



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική εργασία

**«Παραμετρική Ανάλυση Υλικών Αλλαγής Φάσης για
Αποθήκευση Θερμότητας σε Κτίρια και
Κατασκευές»**

Ροβιθάκης Αναστάσιος
A.M.: 2013050023

Τριμελής Επιτροπή

Κολοκοτσά Διονυσία (Επιβλέπουσα καθηγήτρια)
Λαζαρίδης Μιχαήλ
Τσούτσος Θεοχάρης

XANIA 2018

Αφιέρωση
Στους γονείς μου
και στην αδερφή μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Διονυσία Κολοκοτσά για την βοήθεια και την καθοδήγηση της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την υποστήριξη και τις συμβουλές τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κύριο Λαζαρίδη Μιχαήλ και κύριο Θεοχάρη Τσούτσο για το χρόνο που αφιέρωσαν για την μελέτη και την παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----------|
| Περίληψη | i |
| Abstract..... | ii |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή..... | 1 |
| 1.1 Κίνητρο αξιοποίησης των Υλικών Αλλαγής Φάσης..... | 1 |
| 1.2 Δομή διπλωματικής..... | 3 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Γενικές Αρχές των Phase Change Materials..... | 4 |
| 2.1 Εισαγωγή: Τι είναι τα PCM και πως λειτουργούν | 4 |
| 2.2 Ιστορική αναδρομή της χρησιμότητας των PCM | 6 |
| 2.3 Κατηγοριοποίηση των PCM | 8 |
| 2.3.1 Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης..... | 8 |
| 2.3.2.Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης..... | 9 |
| 2.3.3.Εντηκτικά | 10 |
| 2.4 Ιδιότητες των PCM | 11 |
| 2.4.1. Φυσικές ιδιότητες | 11 |
| 2.4.2. Χημικές ιδιότητες | 11 |
| 2.4.3. Τεχνικές ιδιότητες..... | 12 |
| 2.5.Δυσκολίες κατά την χρήση των PCM..... | 13 |
| 2.5.1. Διαχωρισμός φάσεων | 13 |
| 2.5.2.Μικρή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας | 13 |
| 2.5.3. Διάβρωση..... | 14 |
| 2.5.4. Υπόψυξη - Υπέρψυξη (Subcooling – Supercooling) | 14 |
| 2.6 Πρακτικές Εφαρμογές των PCM | 15 |
| 2.6.1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια..... | 15 |
| 2.6.2. Συστήματα κλιματισμού..... | 15 |
| 2.6.3. Ηλιακά συστήματα | 16 |
| 2.6.4 Εφαρμογές σε κτίρια | 16 |

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Θερμική ενέργεια | 20 |
| 3.1 Μεταφορά θερμότητας..... | 20 |
| 3.1.1 Μεταφορά θερμότητας με θερμική αγωγή..... | 20 |
| 3.1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή..... | 20 |
| 3.1.3 Μεταφορά θερμότητας με θερμική ακτινοβολία..... | 21 |
| 3.2 Έννοια θερμοχωρητικότητας | 22 |
| 3.3 Θερμική μάζα κτιρίου | 22 |
| 3.4. Τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας..... | 24 |
| 3.4.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας..... | 24 |
| 3.4.1 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας | 25 |
| 3.5 Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας..... | 26 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχέδιο Μοντελοποίησης και Είδος Μοντέλου | 27 |
| 4.1 Εισαγωγή: Εργαλεία μοντελοποίησης | 27 |
| 4.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας στο Open studio..... | 27 |
| 4.3 Energy plus..... | 31 |
| 4.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στο Energy plus..... | 31 |
| 4.3.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας στο Energy plus | 32 |
| 4.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά των PCM..... | 35 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων από το Energy plus | 36 |
| 5.1 Εισαγωγή: Γενικές πληροφορίες για το κτίριο..... | 36 |
| 5.2 Περιγραφή Μελετούμενων Περιοχών..... | 36 |
| 5.3 Κλιματικά Χαρακτηριστικά | 36 |
| 5.4 Παραδοχές Προσομοίωσης | 38 |
| 5.4.1 Κλιματικά δεδομένα | 38 |
| 5.4.2 Θερμοκρασίες σχεδιασμού | 38 |
| 5.4.3 Εσωτερικά κέρδη | 38 |
| 5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης από το Energy plus | 39 |
| 5.5.1 Θερμό-Υγρό κλίμα (Χανιά)..... | 39 |
| 5.5.2 Ψυχρό-Ξηρό κλίμα (Βαρσοβία) | 43 |
| 5.5.3 Ήπιο-Υγρό κλίμα (Βαλένθια)..... | 46 |

| | |
|--|-----------|
| 5.5.4 Θερμό-Ξηρό κλίμα (Κάιρο)..... | 48 |
| 5.6 Ανακεφαλαίωση | 50 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συζήτηση και Οικονομική Σύγκριση των Αποτελεσμάτων..... | 52 |
| 6.1 Συγκριτική καταγραφή της χρησιμοποιούμενης ενέργειας με και χωρίς PCM..... | 52 |
| 6.2 Υπολογισμός εξοικονόμησης ενέργειας παρουσία PCM..... | 56 |
| 6.3 Υπολογισμός ετήσιου οικονομικού κόστους εξοικονόμησης ενέργειας με μείωση των ακραίων φορτίων | 57 |
| 6.4 Ανακεφαλαίωση | 66 |
| Βιβλιογραφία | 67 |

Παραμετρική Ανάλυση Υλικών Αλλαγής Φάσης για Αποθήκευση Θερμότητας σε Κτίρια και Κατασκευές

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των υλικών αλλαγής φάσης στην θερμοκρασία στο εσωτερικό των κτιρίων και η επίδραση τους στις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη.

Το κτίριο όπου εξετάστηκε είναι ένα τυπικό σπίτι με ενεργοποιημένο το σύστημα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού, το οποίο μοντελοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ENERGY PLUS. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση των διαφόρων υλικών αλλαγής φάσης και της επίδρασής τους στην εξοικονόμηση ενέργειας μειώνοντας τα ακραία φορτία καθώς και για την μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου.

Η παράμετρος που εξετάστηκε ως προς την επίδραση της στην εξοικονόμηση ενέργειας ήταν τα διαφορετικά είδη υλικών αλλαγής φάσης σε 4 διαφορετικές κλιματικές ζώνες, καθώς όπως προκύπτει από της παρούσα διπλωματική εργασία, ορισμένα υλικά αλλαγής φάσης με βάση των ιδιοτήτων τους είναι περισσότερο κατάλληλα από άλλα.

Parametric Analysis of Phase Change Materials for Storage of Heat in Buildings and Structures

Abstract

Subject of the current thesis is the study of the properties of Phase Change Materials (PCM) and its effect on annual energy demands for heating as well as cooling.

The building studied is typical house with heating, ventilation and air condition systems turned on and was modeled using the following program, ENERGY PLUS. This program was used to model the different types of PCM and their effects on energy conservation by reducing the peak loads of the building's energy demands as well as studying the building's thermal profile.

The parameter that was studied on its effect on energy conservation was all the different types of PCMs in 4 different climate zones because certain PCMs are better optimized based on their properties.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο αξιοποίησης των Υλικών Αλλαγής Φάσης

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί πρωτοφανής αύξηση του ενδιαφέροντος, ολοένα και μεγαλύτερου μέρους του πληθυσμού, τόσο για την κλιματική αλλαγή όσο και για την αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων των διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Συγκεκριμένα, λόγω της αλόγιστης χρήσης υδρογονανθράκων ως καύσιμα, ο ανθρώπινος παράγοντας πλέον θεωρείται κύριος υπαίτιος για την κλιματική αλλαγή, εξαιτίας των συνεχώς αυξανόμενων εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα. Στηριζόμενη στην παραπάνω παρατήρηση, ολόκληρη πλέον η επιστημονική κοινότητα επισημαίνει πως η μείωση των εκπομπών του CO₂ είναι επιτακτική και αναγκαία, την ίδια στιγμή που τα αποθέματα των καυσίμων όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο γίνονται όλο και λιγότερο διαθέσιμα.

Το ενδιαφέρον αυξάνεται ακόμα περισσότερο στον τομέα των κτιρίων, καθώς όπως είναι εύκολα αντιληπτό τα κτίρια έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις και ως εκ τούτου η προσπάθεια εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας σε αυτά κρίνεται αναγκαία. Η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη έχει ως αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό των ενεργειακών αναγκών. Ιδίως, με τη διαρκή βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, η κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία των κτιρίων συνεχώς αυξάνει. Η αύξηση είναι τόσο ποσοτική, καθώς καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια σε απόλυτο μέγεθος, όσο και ποιοτική, επειδή χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο ο ηλεκτρισμός για την ψύξη των κτιρίων.

Για να γίνει αντιληπτός ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις και ως εκ τούτου και η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας από αυτά, αξίζει να αναφερθεί ότι η κατανάλωση τελικής ενέργειας στην Ελλάδα ήταν σχεδόν σταθερή την περίοδο 1990-1994. Μεταξύ των ετών 1995-1996 η κατανάλωση τελικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 6,5% περίπου, ενώ από τότε ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης είναι γύρω στο 2,5%. Συνολικά, η κατανάλωση τελικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 50% περίπου, την περίοδο 1990-2006, κυρίως ως συνέπεια της οικονομικής ανάπτυξης. Επίσης, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα αυξήθηκε με μεγαλύτερο ρυθμό από το 1990. Η κύρια αύξηση προέρχεται από τον οικιακό και τον τριτογενή τομέα.

Υπολογίζεται πως στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 41% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας δαπανάται για την κάλυψη των αναγκών των κτιρίων, σε θέρμανση και ψύξη.

Στην Ελλάδα, ο γενικός εκσυγχρονισμός συνοδευόμενος με την αδιαφορία για την εξοικονόμηση ενέργειας, οδήγησαν σε υπέρμετρες καταναλώσεις στον τομέα των κτιρίων και των υπηρεσιών. Το 1995, η χρήση ενέργειας στον οικιακό και τριτογενή τομέα για θέρμανση και ψύξη καθώς και για την παραγωγή θερμού νερού έφτασε τους 4.4 τόνους ισοδυνάμου πετρελαίου. Έχει καταγραφεί ότι η θέρμανση των κτιρίων, παρόλο που η Ελλάδα είναι μια χώρα με ήπιο κλίμα, κατέχει σημαντικό μέρος των συνολικών ενεργειακών καταναλώσεων (69%), ακολουθούμενη από την παραγωγή ζεστού νερού (13%), τις ηλεκτρικές συσκευές, τη ψύξη και το φωτισμό (18%).

Η ανάγκη λοιπόν για εξοικονόμηση ενέργειας στον τομέα αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανής, καθώς καλύπτει περίπου το 36% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ελλάδα. Επιπλέον, τα κτίρια στη χώρα μας ευθύνονται για πάνω από το 45% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), βασικού αερίου του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι τα ποσοστά αυτά είναι εξαιρετικά μεγάλα με συνέπεια να είναι εξίσου μεγάλη και η ανάγκη μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων των κτιρίων.

Σε αυτή τη κατεύθυνση κινείται και ο ενεργειακός σχεδιασμός των κτιρίων, που έχει σκοπό τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, των αντίστοιχων ρύπων αλλά και του φορτίου αιχμής για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό των κτιρίων, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα θερμική και οπτική άνεση μέσα στους χώρους.

Πρέπει ακόμη να τονιστεί, πως το μεγαλύτερο ποσοστό των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης των ελληνικών κτιρίων είναι σαφώς ξεπερασμένα, με αποτέλεσμα να είναι επιτακτική η ανάγκη αντικατάστασης τους. Η χρήση ΑΠΕ θα ήταν μια εξαιρετική λύση για την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, αν συλλογιστεί κανείς το πόσες εναλλακτικές λύσεις προσφέρονται χάρη στο κλίμα της χώρας μας.

Αυτό που κυρίως επιδιώκει ο ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων είναι η διατήρηση του εσωτερικού ισοζυγίου του χώρου σε χαμηλά, αν όχι μηδενικά επίπεδα. Βασικό χαρακτηριστικό για τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ των ηλιακών και εσωτερικών κερδών και θερμικών απωλειών αποτελεί το κτιριακό κέλυφος, καθώς μέσω αυτού πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του κτιρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κελύφους, η θερμοχωρητικότητα των δομικών στοιχείων, το μέγεθος και η χωροθέτηση των ανοιγμάτων παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου.

Επιπλέον τις τρεις τελευταίες δεκαετίες η έρευνα γύρω από τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχει κάνει εντυπωσιακή πρόοδο. Μέσω μελετών παγκοσμίως έχει αποδειχθεί ότι τα συστήματα αυτά είναι ιδανικά για αποθήκευση ανανεώσιμης ενέργειας για κλιματισμό κτιρίων. Η ηλιακή ενέργεια έχει σπουδαίες προοπτικές όσον αφορά στη χρήση της στα κτίρια καθώς πρόκειται για καθαρή πηγή ενέργειας, άφθονη και ανανεώσιμη. Υφίστανται όμως κάποιοι σημαντικοί περιορισμοί στην χρήση της από την άποψη της ηλιοφάνειας η οποία είναι διακοπτόμενη για μεγάλα χρονικά διαστήματα καθώς επίσης και λόγω του γεγονότος ότι οι μισές ώρες του έτους είναι νύχτα.

Όλοι οι ανωτέρω λόγοι καθιστούν προφανή την ανάγκη της δημιουργίας ενός συστήματος ικανού να παράγει τέτοια χρονική καθυστέρηση στο φαινόμενο ώστε η παροχή ενέργειας να μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση ανά πάσα στιγμή. Από όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που έχουν προταθεί και επιστημονικά αξιολογηθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχουν την μεγαλύτερη απήχηση χάρις στην ικανότητα τους να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας σε σχετικά μικρό χώρο.

Έτσι τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια νέα τάση στη δόμηση που επιδιώκει να επιτύχει συνθήκες θερμικής άνεσης με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της χρήσης συμβατικής ενέργειας με την χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) στη δόμηση. Μέσω της λανθάνουσας θερμότητας τα PCM μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερη θερμική ενέργεια σε σύγκριση με άλλα συμβατικά υλικά που στηρίζονται μόνο στην αισθητή θερμότητα με αποτέλεσμα να μπορούν να προσθέσουν πολύ μεγαλύτερη θερμική μάζα ανάλογα με τον όγκο τους ενώ ταυτόχρονα παρέχουν ένα πρακτικό και φυσικό τρόπο χρονικής καθυστέρησης και επιτρέπουν την χρήση της θερμότητας που αποθηκεύτηκε την ημέρα κατά την διάρκεια της νύχτας όποτε και αυτή χρειάζεται.

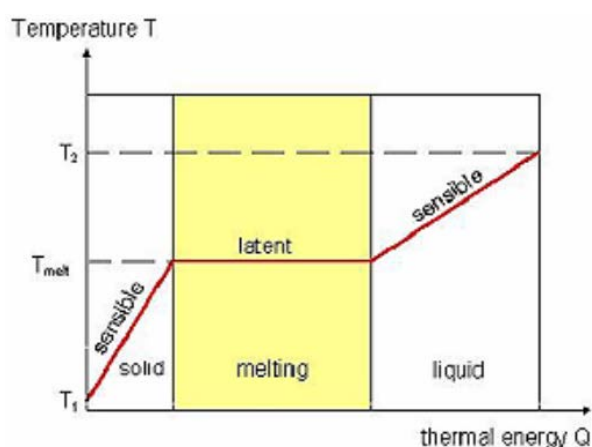
1.2 Δομή διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια. Το πρώτο από αυτά είναι εισαγωγικό και παρουσιάζονται ο στόχος και η δομή της εργασίας. Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να κάνει τον αναγνώστη, να συνειδητοποιήσει από την αρχή, την ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια δομημένα σε αστικές περιοχές. Στο δεύτερο κεφάλαιο εξηγούνται αναλυτικότερα έννοιες που δεν ήταν δυνατόν να αναπτυχθούν στο πρώτο κεφάλαιο όπως η λειτουργία, οι διαφορετικές κατηγορίες αλλά και τρόπους εφαρμογής αυτών των υλικών. Το τρίτο κεφάλαιο βασίζεται σε πληροφορίες από άλλες μελέτες με σκοπό την ανάλυση θεμάτων σχετικά με την μεταφορά θερμότητας, τη θερμική μάζα του κτιρίου καθώς και διάφορους τρόπους αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας και το πώς αυτή επηρεάζει την γενικότερη ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των προγραμμάτων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία των τελικών αρχείων προσομοίωσης για την εργασία. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αρχικά τα κλιματικά δεδομένα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για όλες τις περιοχές που επιλέχθηκαν. Ακολούθως στο έκτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των οικονομικών συμπερασμάτων που βασίζονται στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με σκοπό την ανάδειξη του αποδοτικότερου PCM.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Γενικές Αρχές των Phase Change Materials

2.1 Εισαγωγή: Τι είναι τα PCM και πως λειτουργούν

Τα PCM είναι αποθηκευτικά υλικά λανθάνουσας θερμότητας. Χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα. Η αποθήκευση ή η απελευθέρωση θερμότητας συμβαίνει, όταν ένα υλικό μεταπίπτει από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε στερεό αντίστοιχα. Όταν θερμαίνεται ένα στερεό PCM, η θερμοκρασία του αρχίζει να αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αισθητή θερμότητά του. Όταν η θερμοκρασία προσεγγίσει τη θερμοκρασία τήξης του υλικού, το υλικό αρχίζει να λιώνει, αλλάζει δηλαδή φάση από στερεό σε υγρό. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή μέχρι ο υλικό να λιώσει τελείως και το υλικό αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα. Λανθάνουσα θερμότητα είναι, η θερμότητα που δεν ευθύνεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του σώματος, αλλά για την καταστροφή της κρυσταλλικής δομής της στερεάς ή της υγρής φάσης του υλικού. Η αντίστροφη διαδικασία ισχύει, όταν έχουμε πτώση της θερμοκρασίας και αλλαγή της φάσης του υλικού από υγρό σε στερεό. Το παρακάτω διάγραμμα περιγράφει εποπτικά τη παραπάνω διαδικασία



Διάγραμμα 1: Μεταβολή θερμοκρασίας συναρτήσει της ενέργειας τυπικού PCM

Η αισθητή θερμότητα ΔQ που αποκτήθηκε ή χάθηκε από ένα υλικό αλλάζοντας θερμοκρασία από T_1 σε T_2 είναι:

$$\Delta Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p \cdot dT \quad (2.1.1)$$

όπου m και V η μάζα και όγκος του υλικού αντίστοιχα.

Η αποθηκευτική ικανότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης που θερμαίνεται από θερμοκρασία T_1 σε T_2 , αν υφίσταται αλλαγή φάσης σε θερμοκρασία T_{melt} , είναι το άθροισμα της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του στερεού από T_1 σε T_{melt} , της λανθάνουσας θερμότητας σε θερμοκρασία T_{melt} και της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του υγρού από T_{melt} σε T_2 :

$$Q_s = m[(T_{\text{melt}} - T_1)c_s + \lambda + (T_2 - T_{\text{melt}})c_l] \quad (2.1.2)$$

όπου m είναι η μάζα του υλικού, c_s και c_l είναι οι θερμοχωρητικότητες της στερεής και της υγρής φάσης αντίστοιχα και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα.

Τα υλικά αυτά που προορίζονται για οικιακή χρήση εμφανίζουν θερμοκρασία τήξεως μεταξύ των 15°C και 26°C , μεγάλη απορροφητικότητα θερμότητας ανά κυβικό μέτρο, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, μικρή θερμική μεταβολή του όγκου, ομοιογένεια κατά την τήξη τους και πλήρως αναστρέψιμο κύκλο μεταβολών φυσικής κατάστασης, καθώς και υψηλή αντίσταση στην διάβρωση και την ανάφλεξη. Στα κτίρια, τα υλικά αυτά μπορούν να τοποθετούνται με μικροκάψουλες στην οροφή και στους τοίχους.

2.2 Ιστορική αναδρομή της χρησιμότητας των PCM

Η χρήση των Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) για την αποθήκευση θερμότητας είναι γνωστή και εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια. Η χρήση του πάγου για την διατήρηση τροφίμων είναι σχεδόν αρχαία.

Η βιομηχανία τροφίμων εκτός από πάγο χρησιμοποίησε σε μεταγενέστερη φάση και άλλες μεθόδους για την διατήρηση τροφίμων σε επιθυμητή θερμοκρασία. Για παράδειγμα κατά την μεταφορά ή αποθήκευση τροφίμων χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά δοχεία μεγάλου πλάτους και μικρού πάχους γεμάτα με στερεοποιημένα μίγματα αλάτων τα οποία άλλαζαν φάση κατά την μεταφορά ή αποθήκευση του τροφίμου απορροφώντας θερμότητα και διατηρώντας το εσωτερικό στην επιθυμητή θερμοκρασία.

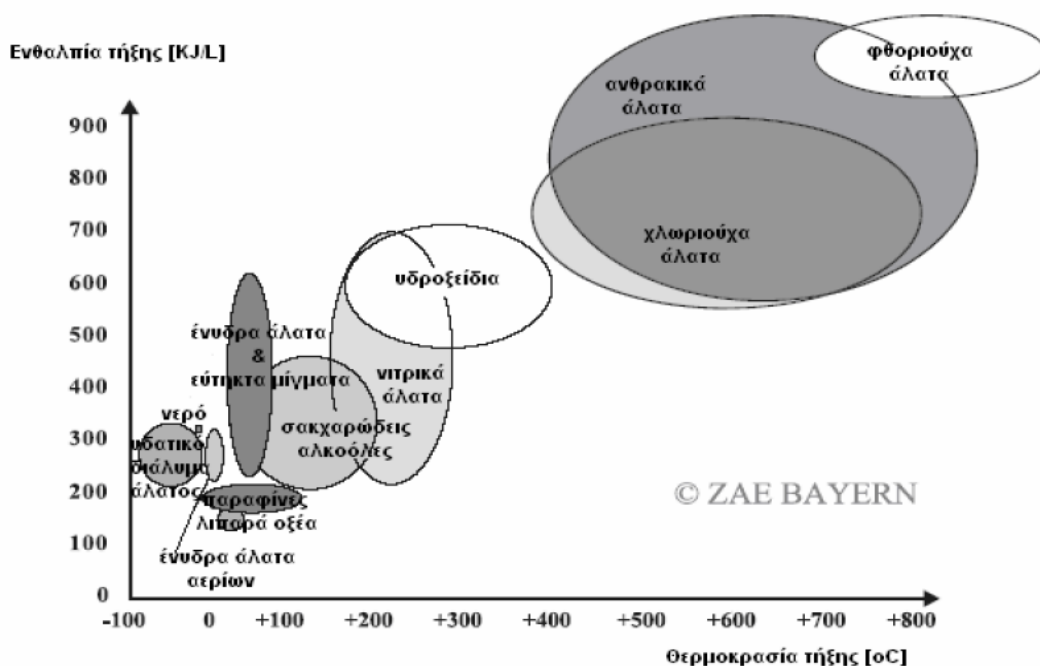
Οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν για να χρησιμοποιηθούν τα PCM στη θέρμανση και ψύξη κτηρίων ξεκινούν το 1920. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 κτίζονται τα πρώτα σπίτια που χρησιμοποιούν PCM. Η Δρ. Maria Telkes από τις Η.Π.Α, ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να εισαγάγει τα PCM στα κτήρια. Το 1946 πρότεινε τη κατασκευή ενός δοκιμαστικού σπιτιού, που ονομάστηκε το σπίτι του Ντόβερ και που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του αρχιτέκτονα Eleanor Raymond σε ένα κτήμα κοντά στη Βοστώνη. Το σπίτι αποτελείτο από έναν όροφο 135 m² με δύο υπνοδωμάτια, κουζίνα, σαλόνι και γκαράζ. 18 ηλιακοί συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 67 m² συνέλλεγαν θερμική ενέργεια. Στη συνέχεια, η θερμότητα αυτή μεταφερόταν μέσω ενός αγωγού με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα σε τρία «δοχεία» αποθήκευσης που βρίσκονταν ανάμεσα στα δωμάτια (σχήμα 1.1). Κάθε τέτοιο «δοχείο» είχε χωρητικότητα 1,9 m³ και περιείχε ως υλικό αλλαγής φάσης το λεγόμενο άλας του Glauber (ένυδρο θειικό άλας, Na₂SO₄·10H₂O) με σημείο τήξης τους 32°C. Με 21 τόνους PCM που περιείχαν συνολικά τα «δοχεία» αποθήκευσης το κτήριο μπορούσε να αποθηκεύει θερμότητα ύψους 11 MJ (4.7 εκατομ. Btu). Τα PCM που διέθετε το κτήριο είχαν την ικανότητα να αποθηκεύουν θερμότητα για 12 ημέρες παρέχοντας αισθητή θερμότητα για θερμοκρασίες μέχρι 32°C (σημείο τήξης). Η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1948 με κόστος 20.000 δολάρια εκ των οποίων τα 3.000 δολάρια είχαν δαπανηθεί για την εγκατάσταση των PCM. Το σπίτι κατοικήθηκε από τον Dr. Anthony Nemethy και την οικογένειά του, ο οποίος τα πρώτα δύο χρόνια έμεινε απόλυτα ικανοποιημένος. Όπως αναφέρει η Telkes, τα πρώτα δύο έτη 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 συνοδευτικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο, όμως, το σύστημα απέτυχε. Βρέθηκε ότι η απόδοση του άλατος του Glauber πέφτει μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους. Παρατηρήθηκε ότι το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na₂SO₄), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Επίσης τα «δοχεία» αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες.

Το 1960 ήταν περίοδος ραγδαίας ανάπτυξης στον τομέα της διαστημικής τεχνολογίας. Αυτήν τη περίοδο η NASA επιχορήγησε επιστημονικά προγράμματα του M.I.T, που μελετούσαν τα PCM. Στόχος των επιστημόνων ήταν με τη χρήση των PCM να πετύχουν θερμικό έλεγχο σε διάφορα συστήματα. Οι έρευνες απέδωσαν και λίγα χρόνια αργότερα τα PCM χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στο διαστημόπλοιο Apollo 15 Lunar Rover Vehicle. Συγκεκριμένα τα PCM χρησιμοποιήθηκαν για να ελεγχθεί η θερμότητα που απελευθεωνόταν από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του Apollo 15. Κατά τη διάρκεια του διαστημικού ταξιδιού τα PCM, που αποτελούνταν από μίγματα παραφίνης, αποθήκευαν τη θερμότητα που απελευθεωνόταν από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και την απέβαλλαν με τη μορφή ακτινοβολίας.

Η δεκαετία του 1970 ήταν ορόσημο για τα PCM και γενικότερα για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας . Συγκεκριμένα το 1973 με τον αραβικό αποκλεισμό πετρελαίου εμφανίζεται η πρώτη πετρελαϊκή κρίση. Αυτό ώθησε τις κυβερνήσεις διάφορων χωρών να αναζητήσουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Έτσι, από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα PCM σε χώρες όπως οι Η.Π.Α, η Αγγλία, η Γερμανία και η Γαλλία.

2.3 Κατηγοριοποίηση των PCM

Τα PCM μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε με βάση τη χημική τους σύσταση, είτε με βάση το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο γίνεται η αλλαγή φάσης τους, είτε ακόμα με κριτήριο τις εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η κατηγοριοποίηση όμως, που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι αυτή ως προς τη σύστασή τους, σε τρεις κατηγορίες: οργανικά, ανόργανα και εύθηκτα υλικά. Κάθε μία από αυτές τις ομάδες υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να διαιρεθεί σε υποκατηγορίες.



2.3.1 Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης

Έτσι, τα οργανικά PCM διακρίνονται σε παραφίνες και μη παραφίνες. Οι μη παραφίνες περιλαμβάνουν ένα μεγάλο πλήθος οργανικών υλικών όπως λιπαρά οξέα, εστέρες, αλκοόλες και γλυκόλες, με τα πρώτα να συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Έχουν τη δυνατότητα να τήκονται και να πήζουν επανειλημμένα χωρίς να υφίστανται διαχωρισμό φάσης και μείωση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης τους. Επίσης, στα πλεονεκτήματά τους μπορεί να προστεθεί η χημική και θερμική σταθερότητά τους, ότι δεν είναι διαβρωτικά, δεν εμφανίζουν έντονα το φαινόμενο της υπέρψυξης (supercooling) και έχουν χαμηλότερο κόστος από τις άλλες δύο κατηγορίες PCM. Ωστόσο, συγκριτικά με τα ανόργανα υλικά μειονεκτούν στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (~ 0,2 W/mk) και έχουν χαμηλότερη πυκνότητα. Επίσης, είναι αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι παραφίνες ανήκουν στην κατηγορία των αλκανίων, τα οποία είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες. Οι καθαρές παραφίνες είναι ιδιαίτεως ακριβές, για το λόγο αυτό στις εφαρμογές επιλέγονται τεχνητές παραφίνες, οι οποίες αποτελούνται από μίγματα κυρίως αλυσίδων n-αλκανίων $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)-\text{CH}_3$, με αποτέλεσμα η τήξη/πήξη τους να

πραγματοποιείται σε ένα εύρος θερμοκρασιών και όχι σε ένα συγκεκριμένο σημείο αλλαγής φάσης. Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους. Έτσι, υπάρχουν οι n-Παραφίνες, οι οποίες έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα και οι ισο-Παραφίνες, των οποίων η ανθρακική αλυσίδα αποτελείται από περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα. Το κατά πόσον μία παραφίνη θα είναι ισο-παραφίνη ή όχι, εξαρτάται από τον αριθμό των αλκανίων που περιέχονται στην ουσία (75% έως 100%). Τόσο το σημείο τήξης, όσο και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνονται με την αύξηση των ατόμων του άνθρακα και το μήκος της αλυσίδας. Η κρυστάλλωση/τήξη της μοριακής αλυσίδας απελευθερώνει ένα μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες που είναι κατάλληλες να χρησιμοποιηθούν ως PCM σε αποθηκευτικά συστήματα είναι κυρίως αυτές που έχουν από 14 έως 40 μόρια άνθρακα. Η μέση λανθάνουσα θερμότητα τήξης των παραφινών που είναι κατάλληλη για κτιριακές εφαρμογές είναι 170MJ/m^3 , δηλαδή σχεδόν η μισή αυτής των ένυδρων αλάτων που αναλύονται στη συνέχεια.

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

2.3.2.Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης

Τα ανόργανα PCM διακρίνονται σε ένυδρα άλατα και μέταλλα (τα μέταλλα έχουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες τήξης για παθητικές εφαρμογές κτιρίων). Γενικά, τα ανόργανα PCM καλύπτουν μία πλατιά θερμοκρασιακή κλίμακα, χαρακτηρίζονται από αρκετά μεγάλη θερμότητα τήξης και καλή θερμική αγωγιμότητα, είναι οικονομικά, μη εύφλεκτα και λόγω της μεγάλης πυκνότητάς τους έχουν σε γενικές γραμμές, σχεδόν διπλάσια ογκομετρική ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ($250\text{-}400\text{kg/d}$) σε σχέση με τα οργανικά PCM ($128\text{-}200\text{ kg/d}$). Τα περισσότερα όμως από αυτά, προκαλούν διαβρώσεις σε αρκετά μέταλλα, υφίστανται έντονα υπέρψυξη και διαχωρισμό φάσης και η ικανότητά τους να αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμότητα μειώνεται μετά από κυκλική καταπόνηση. Ακόμα, έχουν μεγάλο κόστος πώλησης, λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα και της χρήσης πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους.

Τα ένυδρα άλατα είναι τα πιο συνηθισμένα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης. Είναι τα πρώτα PCM που μελετήθηκαν και έχουν αποτελέσει αντικείμενο διεξοδικής έρευνας για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας σε κατοικίες. Η αλλαγή φάσης τους από στερεό σε υγρό είναι ουσιαστικά μία αφυδάτωση της υγρασίας του άλατος, παρόλο που αυτή η διαδικασία μοιάζει θερμοδυναμικά με τήξη. Στο σημείο τήξης οι

κρύσταλλοι των ένυδρων αλάτων διασπώνται σε άνυδρα άλατα και νερό ή σε ένυδρα άλατα με χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας και νερό. Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα ένυδρα άλατα είναι ότι κατά τη διάρκεια της τήξης, το νερό που απελευθερώνεται δεν αρκεί για να διαλύσει όλη τη στερεή φάση. Εξαιτίας της διαφοράς στην πυκνότητα το ένυδρο άλας με το χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας ή το άνυδρο άλας εγκαθίσταται στον πυθμένα του δοχείου σχηματίζοντας ίζημα. Επίσης, τα πιο πολλά ένυδρα άλατα παρουσιάζουν αδυναμία σχηματισμού πυρήνα, γεγονός που οδηγεί σε εμφάνιση του φαινομένου supercooling στο υγρό πριν την κρυσταλλοποίηση. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου (~350MJ/m³), η σχετικά μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, περίπου 0,5W/(mK) (σχεδόν διπλάσια αυτής των παραφινών), η μικρή μεταβολή όγκου κατά την τήξη και το λογικό κόστος τους συγκριτικά με τα κεριά παραφίνης. Επιπρόσθετα, είναι συμβατά με τα πλαστικά, δεν είναι πολύ διαβρωτικά και μόνο ελαφρώς τοξικά.

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

2.3.3.Εύτηκτα

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

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

2.4 Ιδιότητες των PCM

Η κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και η μεγάλη ενθαλπία τήξης είναι οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να καλυφτούν από ένα PCM. Εντούτοις, υπάρχουν απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν για τις περισσότερες, αλλά όχι όλες τις εφαρμογές. Οι βασικότερες από αυτές είναι οι ακόλουθες

2.4.1. Φυσικές ιδιότητες

- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ώστε να εξασφαλισθεί η αποθήκευση και στη συνέχεια η απελευθέρωση της θερμότητας σε μια εφαρμογή, με σταθερό θερμοκρασιακό εύρος.
- Μεγάλο ποσό ενθαλπίας αλλαγής φάσης (ΔH), για να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας σε σχέση με την αποθήκευση που θα γινόταν αν είχαμε αποθήκευση ενέργειας με αισθητή θερμότητα.
- Μεγάλη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή της αποθηκευμένης θέρμανσης ή ψύξης με ικανοποιητικό ποσό θερμοροής.
- Δυνατότητα αναστρεψιμότητας των αλλαγών φάσεων, ώστε το υλικό να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές.
- Μικρό ποσό υπόψυξης (*subcooling*), ώστε να βεβαιωθούμε ότι το υλικό τήκεται και στερεοποιείται στις ίδιες θερμοκρασίες.

2.4.2. Χημικές ιδιότητες

- Ο κύκλος τήξης/στερεοποίησης να είναι πλήρως αναστρέψιμος.
- Να μην υποβαθμίζεται μετά από πολλούς κύκλους τήξης /στερεοποίησης (κόπωση).
- Να μην διαβρώνει τα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή.
- Να μην είναι τοξικό, να μην είναι εύφλεκτο και να μην εκρήγνυται.

2.4.3. Τεχνικές ιδιότητες

- Μικρή τιμή της πίεσης ατμών, για να μειωθούν απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα βρίσκεται το υλικό αλλαγής φάσης.
- Μικρή μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή φάσης, επίσης για να μειωθούν οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα φέρει το εν λόγω υλικό.
- Φυσική και χημική σταθερότητα του υλικού για να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Συμβατότητα με άλλα υλικά, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια διάρκεια ζωής του στο δοχείο, χωρίς να επηρεάζεται η δομή και η σύστασή του από τα υλικά των τοιχωμάτων του δοχείου.

2.5.Δυσκολίες κατά την χρήση των PCM

Συνήθως, κατά την επιλογή ενός υλικού, για να χρησιμοποιηθεί ως Υλικό Αλλαγής Φάσης, δεν πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις για την ενδεχόμενη χρήση του. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες στρατηγικές προκειμένου να επιλυθούν τέτοιου είδους προβλήματα. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται σε αυτού του είδους τα υλικά

2.5.1.Διαχωρισμός φάσεων

Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσης είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στα PCM., ιδιαίτερα μάλιστα σε αυτά που αποτελούνται από παραπάνω από δύο συστατικά. Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσης οφείλεται στην μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων που είναι δύσκολο να διατηρηθεί καθώς μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός άνυδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος, δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συνεχή εξασθένιση των ιδιοτήτων τους.

Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων διαχωρισμού φάσεων χρησιμοποιούνται κολλοειδή προσθετικά (*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. Εναλλακτικά αν δεν χρησιμοποιηθούν προσθετικά, είναι δυνατόν να αναθερμάνουμε το μίγμα και με μοριακή διάχυση να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση

2.5.2.Μικρή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας

Η χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του PCM. είναι μια εγγενής ιδιότητα των μη μεταλλικών υγρών. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι το PCM., αποθηκεύει ένα μεγάλο ποσό θερμότητας σε μικρό όγκο και αυτή η θερμότητα πρέπει να μεταφερθεί μέσω της επιφάνειας αυτού του όγκου στο εξωτερικό περιβάλλον ώστε να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα. Τρόποι βελτίωσης της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού είναι οι ακόλουθοι :

- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιώντας μεταφορά μάζας, με μεταφορά. Ο μηχανισμός της μεταφοράς εμφανίζεται μόνο κατά την υγρή φάση και επομένως ενεργεί μόνο όταν θερμότητα μεταφέρεται στο PCM. Όταν η θερμότητα εξάγεται, οι στερεές μορφές σχηματίζονται στις συναλλασσόμενες με θερμότητα επιφάνειες.
- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη των αντικειμένων με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα στο PCM.

2.5.3. Διάβρωση

Πολύ σημαντικός παράγοντας στη λειτουργία ενός PCM είναι να μην είναι διαβρωτικό, κυρίως απέναντι σε μεταλλικά υλικά. ,δυστυχώς τα ανόργανα υλικά στην πλειονοψηφία τους είναι διαβρωτικά, οι παραφίνες όμως όχι. Η διαβρωτικότητα ενός PCM μπορεί σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης, σε βάθος χρόνου (όχι υποχρεωτικά μεγάλο) 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. Παρ' όλ' αυτά ενισχύει και το φαινόμενο της οξειδωσης, όπου και όταν αυτό εμφανίζεται.

2.5.4. Υπόψυξη - Υπέρψυξη (Subcooling – Supercooling)

Ένα βασικό πρόβλημα που εμφανίζεται κυρίως στα ανόργανα ένυδρα άλατα είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης ή υπόψυξης (*supercooling or subcooling*). Ενα ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα έπρεπε να στερεοποιείται και να τήκεται στην ίδια θερμοκρασία. Κάποια υλικά δεν στερεοποιούνται αμέσως, εάν η θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπόψυξη ή υπέρψυξη. Κατά τη διάρκεια της υπόψυξης το υλικό βρίσκεται σε μια μετασταθή κατάσταση. Το φαινόμενο είναι δυνατόν να περιορισθεί με χρήση ενός πυρήνα, ο οποίος προστίθεται στο PCM για να εξασφαλίσει ότι η στερεή φάση θα σχηματισθεί με μηδαμινή ή ακόμα και καθόλου υπόψυξη.

Για την αντιμετώπιση της υπόψυξης προτείνονται οι παρακάτω λύσεις, που έχουν στόχο να προωθήσουν τη διεργασία της δημιουργίας πυρήνων:

- Με προσθήκη μικρής ποσότητας παραγόντων πυρήνωσης
- Με μηχανικά μέσα όπως η χρήση δοχείου με ανώμαλη επιφάνεια τοιχωμάτων, ή εναλλάκτη θερμότητας με τραχεία επιφάνεια
- Με διατήρηση μέσα στο PCM μιας περιοχής σε χαμηλή θερμοκρασία όταν το υπόλοιπο υλικό τήκεται με θέρμανση.

2.6 Πρακτικές Εφαρμογές των PCM

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε λανθάνουσα μορφή είναι αρκετά εκτεταμένες εφόσον η αποθήκευση θερμότητας είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας, βελτιώνοντας την αξιοποίηση της ήδη υπάρχουσας ενέργειας. Παρακάτω αναλύονται μερικές σημαντικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, εκμεταλλευόμενα τις ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης.

2.6.1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών σε κτίρια, όπου γίνεται χρήση φωτοβολταϊκών, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με αρκετές απώλειες. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μια χαρακτηριστική τιμή θερμοκρασίας είναι οι 25 °C. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στοιχείου ξεπεράσει αυτή την τιμή, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0,5%K⁻¹. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης σε φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την εξέχουσα θερμότητα, διατηρώντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σταθερή θερμοκρασία, εξασφαλίζοντας την αποδοτική λειτουργία του.

2.6.2. Συστήματα κλιματισμού

Τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού λειτουργούν σπάνια στο μέγιστο φορτίο, γεγονός που αναδεικνύει την υπερδιαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών, καθώς έχουν επιλεγεί για να καλύψουν το μέγιστο φορτίο. Με άλλα λόγια, η λειτουργία τους περιορίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας για να καλύψουν τις μέγιστες απαιτήσεις, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας παραμένουν απενεργοποιημένα.

Επιπρόσθετα, οι βιομηχανικές ψυκτικές διατάξεις διαστασιολογούνται για να ικανοποιήσουν τη μέγιστη στιγμιαία ζήτηση ψύξης, η οποία εμφανίζεται σε λίγες μόνο μέρες το χρόνο. Τα βιομηχανικά συστήματα ψύξης, παρέχουν την ψύξη για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, εκ των οποίων αρκετές απαιτούν μεγάλα ψυκτικά φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα.

Ένα σύστημα αποθήκευσης ψύξης, είναι ικανό να μειώσει το μέγιστο φορτίο (το φορτίο για το οποίο διαστασιολογείται η εγκατάσταση) μέχρι και 70%. Αν ληφθεί υπ' όψη και το χαμηλό κόστολόγιο του ηλεκτροπαραγωγού κατά τις νυχτερινές ώρες, γίνεται αντιληπτό το ότι τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα φιλικά προς τους οικονομικούς επενδυτές.

2.6.3. Ηλιακά συστήματα

Αν ληφθεί υπ' όψη η περιοδικότητα που εμφανίζουν οι πηγές ενέργειας στη φύση, τότε πρέπει να γίνει πρόβλεψη για την αποθήκευση της ενέργειας που δεν χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα τις ώρες με έντονη ηλιοφάνεια, κατά τις οποίες η ενέργεια που απορροφάται είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για κατανάλωση. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας και η αντίστοιχη δυνατότητα ανάκτησής της προς ικανοποίηση των θερμικών αναγκών του συστήματος. Η λειτουργία του συστήματος που περιλαμβάνει τα υλικά αλλαγής φάσης, διαφέρει από τις συνήθεις ηλιακές εφαρμογές, μόνο στο δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Στις ηλιακές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται σήμερα περισσότερο τα ένυδρα άλατα. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος, στηρίζεται στη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου (το οποίο μπορεί να είναι υγρή σιλικόνη ή ορυκτέλαιο) από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που παίρνει ο συλλέκτης. Το εργαζόμενο μέσο, αφού θερμανθεί, οδηγείται στο δοχείο θερμικής αποθήκευσης, όπου βρίσκεται και το υλικό αλλαγής φάσης. Η θερμότητα που μεταφέρει το εργαζόμενο μέσο, διαβιβάζεται στο ένυδρο άλας και απελευθερώνει το κρυσταλλικό νερό. Με τη διαδικασία αυτή, σχηματίζεται κορεσμένο υδατικό διάλυμα του άλατος, στερεό υπόλειμμα του αδιάλυτου άλατος και επίπλευση του εργαζόμενου μέσου σε αυτό. Το εργαζόμενο μέσο οδηγείται κατά ένα μέρος στο συλλέκτη και κατά ένα άλλο μέρος στο δοχείο ανάδευσης, όπου αναδεύεται με το υπόλοιπο μέσο και παραλαμβάνει θερμότητα από μια ηλεκτρική αντίσταση, αν κριθεί σκόπιμο.

Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας, το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στον εναλλάκτη, όπου μεταφέρει θερμότητα σε ένα άλλο μέσο (συνήθως νερό), για τη χρήση της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας. Αφού το εργαζόμενο μέσο ψυχθεί στον εναλλάκτη, διαβιβάζεται στο κορεσμένο διάλυμα για να προσλάβει θερμότητα. Καθώς το κορεσμένο διάλυμα ψύχεται, επανακρυσταλλώνεται και αποδίδει την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια.

2.6.4 Εφαρμογές σε κτίρια

2.6.4.1. Δομικά υλικά

Τα δομικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στα κτίρια παραμένουν στη στερεή κατάσταση σε ολόκληρο το εύρος θερμοκρασιών χρήσης τους. Ομοίως συμπεριφέρονται και τα κλασσικά δομικά υλικά τα οποία ως χαρακτηριστικό έχουν την αντίσταση που προβάλλουν στη διαμέσου τους ροή της θερμότητας. Αντίθετα με αυτή την προσέγγιση μόνωσης των κτιρίων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν υλικά που αποθηκεύουν τη θερμότητα που εισέρχεται στο κτίριο από το κέλυφός του κατά την περίοδο του θέρους, ώστε να μην αυξηθεί η θερμοκρασία των χώρων, ή να αποθηκεύουν τη θερμότητα που προσπίπτει στο κτίριο υπό τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας κατά το χειμώνα.

Για χρήση στις κατασκευές τα PCM πρέπει να έχουν σημείο τήξης λίγο μεγαλύτερο της θερμοκρασίας δωματίου, ώστε σε συνήθεις συνθήκες δωματίου να είναι στερεό. Κάθε αλλαγή θερμοκρασίας προκαλεί τήξη του υλικού, οπότε και απορρόφηση

θερμότητας από το περιβάλλον. Πτώση της θερμοκρασίας θα έχει ως αποτέλεσμα απελευθέρωση ενέργειας ξανά προς τον περιβάλλοντα αέρα.

Η βασική ιδέα των συστημάτων αποθήκευσης ως μέσα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μετατόπιση των μέγιστων της ενεργειακής ζήτησης της εγκατάστασης σε ώρες μη αιχμής, ή η εξομάλυνση της καμπύλης ενεργειακής ζήτησης της εγκατάστασης ώστε να μην παρουσιάζονται σημεία αιχμής κατά την 24ωρή λειτουργία της, άρα μικρότερα θερμικά και ψυκτικά φορτία.

Η εφαρμογή των PCM στην τοιχοποιία μπορεί να γίνει είτε με χρήση των PCM αυτούσιων (σαν στρώμα υλικού μέσα στα υλικά του τοίχου), ή σαν συστατικό σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ή το γύψο (γυψοσανίδες ή σοβάς με PCM). Η χρήση των PCM σε γυψοσανίδα συνήθως γίνεται σε αναλογία 20-30% κατά βάρος. Ειδικά για τη χρησιμοποίηση οργανικών PCM η χρήση τους σε συνδυασμό με μη αναφλέξιμα και πυρασφαλή υλικά εξασφαλίζει εν μέρει την μη αναφλεξιμότητα του τελικού προϊόντος. Η ενσωμάτωση των PCM σε τσιμέντο ή γύψο εξασφαλίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τη συγκράτηση του υλικού ακόμη και μετά την πλήρη υγροποίησή του, καθώς και την μη πρόσληψη υγρασίας από τον αέρα του περιβάλλοντος. Σε πολλές περιπτώσεις πριν την ενσωμάτωση του PCM (πχ λιπαρά οξέα, ένυδρα άλατα) σε κάποιο δομικό υλικό είναι απαραίτητη η προσθήκη κάποιου καλύμματος στο PCM. Για την κατηγορία των παραφινών πειραματικές μελέτες απέδειξαν τη συμβατότητά τους με το τσιμέντο ή το γύψο και γι' αυτό το λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί δομικά υλικά εμποτισμένα με παραφίνες.

Το πλέον προσιτό δείγμα χρήσης των PCM ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους είναι στην τοιχοποιία. Κατά τη θερινή περίοδο η θερμότητα από το περιβάλλον εισέρχεται στο κέλυφος του κτιρίου διαπερνώντας τα στρώματα των δομικών υλικών και αντιμετωπίζει τη θερμική αντίσταση της μόνωσης. Σε κοινή κατασκευή τοιχοποιίας όση θερμότητα διαπεράσει το στρώμα της μόνωσης θα εισέλθει στον εσωτερικό χώρο. Στην περίπτωση τοιχοποιίας με PCM αυτή η θερμότητα δεν θα εισέλθει στο χώρο, καθώς θα αποθηκευτεί στο στρώμα του PCM.

Στην χειμερινή περίοδο, ο αέρας του εσωτερικού χώρου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίστοιχα λοιπόν, η στρώση PCM αποθηκεύει όση θερμότητα έχει διαφύγει από τα στρώματα του τούβλου, του σοβά και της μόνωσης.

2.6.4.2. Τοιχοποιία

Παρότι έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες γύρω από πειράματα με χρήση διαφόρων PCM σε διαφορετικούς τύπους τοίχων, δεν έχει έως τώρα κανείς καταλήξει σε μία οικουμενική μέθοδο χρήσης των PCM σε τοίχους, η οποία να παρέχει γενικές κατευθύνσεις χρήσης και εγκατάστασης, καθώς και τεχνικά-θερμικά μεγέθη και γενικές οδηγίες για την τελική επιλογή του είδους, της ποσότητας και του τρόπου εφαρμογής του PCM σε τοίχο, με βάση τις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες.

Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι η θερμοκρασία τήξης του PCM καθορίζει τη βέλτιστη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του τοίχου, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Σύμφωνα με ερευνητικά αποτελέσματα αποδεικνύεται πως ο αποδοτικότερος τρόπος ρύθμισης του τοίχου, επιτυγχάνεται με επιλογή PCM του οποίου η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ κοντά με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία του τοίχου και όχι του περιβάλλοντος.

Εξισώνοντας τη θερμοκρασία τήξης του PCM με τη μέση ημερήσια του τοίχου μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το μεγαλύτερο μέρος της αποθηκευτικής ικανότητας

του PCM, καθώς και να πετύχουμε την εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στον εσωτερικό χώρο. Αφού λοιπόν δύναται να υιοθετηθεί μία μόνο θερμοκρασία αλλαγής φάσης (χρήση ενός μόνο PCM) αποδεικνύεται πως αυτή η θερμοκρασία θα πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη συνολική μέση θερμοκρασία του τοίχου, δηλαδή τη μέση τιμή της ημερήσιας θερμοκρασίας και την μέση τιμή της συνάρτησης της θερμοκρασίας του τοίχου σε σχέση με το πάχος του.

Για παράδειγμα ο αποδοτικός σχεδιασμός ενός νότιου εξωτερικού τοίχου ο οποίος χρησιμοποιείται για απορρόφηση ενέργειας ώστε να δύναται να παρέχει μία καθυστέρηση στο φαινόμενο μεταφοράς της θερμότητας της τάξης των 10 ωρών, απαιτεί παχύ στρώμα τσιμέντου 12-16in (31-41cm). Αυτός ο όγκος περιορίζει την ευελιξία του κατασκευαστή σε θέματα κάτοψης και γενικότερου σχεδιασμού εσωτερικού ή εξωτερικού και δεν συμβαδίζει με την ελαφρού τύπου κατασκευή που υιοθετείται στις κατοικίες τα τελευταία χρόνια. Επίσης, αφού η θερμότητα σε τέτοιες εφαρμογές αποθηκεύεται υπό μορφή αισθητής, βάσει της θερμοχωρητικότητας των υλικών του τοίχου, μπορεί πολύ εύκολα να παρατηρηθεί το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του χώρου, φαινόμενο το οποίο αντιτίθεται στη λεγόμενη ανθρώπινη θερμική άνεση και ως εκ τούτου ελαττώνει δραματικά τη χρηστικότητα του μελετούμενου χώρου.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά που προκύπτουν από τις κλασσικές εγκαταστάσεις των παθητικών ηλιακών συστημάτων. Σε συστήματα λανθάνουσα θερμότητας, χρησιμοποιείται ένα PCM για να απορροφά ή να αποβάλλει αντίστοιχα, σημαντικό ποσό θερμότητας κατά τις μεταβάσεις φάσεων στις οποίες αυτό υποβάλλεται, ενώ η θερμοκρασία του παραμένει πρακτικά σταθερή. Η αποθηκευτική ικανότητα των κλασσικών οργανικών PCM (παραφίνες, λιπαρά οξέα) είναι συνήθως μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ικανότητα των παραδοσιακών δομικών υλικών (τσιμέντο, πέτρα, τούβλο, ξύλο, κλπ), αναφορικά πάντα με την ίδια ποσότητα μάζας. Επομένως η ίδια αποθηκευτική ικανότητα επιτυγχάνεται με πολύ λιγότερη μάζα.

Ακόμα, η πρακτικά σταθερή θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του κτιρίου, ελαττώνει την πιθανότητα εμφάνισης υψηλού θερμικού φορτίου θέρμανσης ή ψύξης, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη χρήση μικρότερων θερμαντικών και κλιματιστικών σωμάτων, που ως γνωστό λειτουργούν με καλύτερο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις μεγαλύτερες μονάδες.

Η εύρεση του κατάλληλου σημείου τήξης είναι μία πρόκληση για κάθε τέτοια εφαρμογή. Προτείνεται γενικά ότι η ημερήσια αποθηκευόμενη ενέργεια από ένα PCM μεγιστοποιείται όταν το σημείο τήξης του είναι κοντά στη μέση ημερήσια θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο χώρο.

Διάφορα PCM, συνήθως κάποια παραφίνη μπορούν να προστεθούν σε γυψοσανίδα ή σοβά ή κάποιο άλλο επενδυτικό υλικό τοιχοποιίας, δημιουργώντας ένα είδος δομικού υλικού που λειτουργεί σαν αποθηκευτικό υλικό. Το PCM στερεοποιείται ελευθερώνοντας θερμότητα όταν είναι διαθέσιμες ψυκτικές πηγές, και υγροποιείται απορροφώντας θερμότητα όταν απαιτείται ψύξη. Τα PCM προσφέρουν σημαντική αλλαγή στη θερμοχωρητικότητα μιας εγκατάστασης και για καθαρές ουσίες ελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα με σχεδόν μηδενική αλλαγή στη θερμοκρασία τους.

Τα PCM επιτρέπουν στην αποθήκευση θερμότητας να γίνει μέρος των κτιρίων, επιτρέποντας σημαντική αποθήκευση θερμότητας χωρίς αλλαγή θερμοκρασίας δωματίου. Ακριβώς επειδή η θερμότητα αποθηκεύεται μέσα στο κτίριο, εκεί όπου

λαμβάνουν χώρα και υπολογίζονται τα φορτία, και όχι εξωτερικά, δεν απαιτείται επιπλέον μεταφορά ενέργειας.

Η αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα της ενισχυμένης γυψοσανίδας, μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία δωματίου κοντά στο ανώτατο όριο ανθρώπινης θερμικής άνεσης, χωρίς μηχανικό σύστημα κλιματισμού. Σε περιοχές όπου λόγω κλίματος, κατά τη διάρκεια της ημέρας έχουμε μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα εξαερισμού κατά τη διάρκεια της νύχτας για να απομακρύνει την αποθηκευμένη θερμότητα από τη γυψοσανίδα.

Οι τοίχοι με μόνωση που περιέχει PCM έχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους και τα αντίστοιχα υλικά μόνωσης στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Επειδή η επιφάνεια που εκτίθεται είναι μεγάλη και το PCM απορροφά θερμότητα σε ένα μικρό μόλις θερμοκρασιακό εύρος, πρέπει το τμήμα που περιέχει το PCM να μην έρχεται σε άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία. Η μόνωση με PCM έχει πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά είδη μόνωσης και προσφέρει εξαιρετική μετάδοση θερμότητας. ,ενέχει ιδιαιτερότητες ως προς την εγκατάστασή του, οπότε και το όποιο επιπλέον κόστος εγκατάστασης είναι πολύ μικρό.

Παρ' όλ' αυτά υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα, όπως η ιδιαιτερότητα σχεδιασμού για κάθε ξεχωριστό κλίμα, ένα σημείο τήξης μπορεί να εξυπηρετεί άριστα ένα κλίμα, αλλά το πιθανότερο είναι ότι δεν εξυπηρετεί καθόλου όλα τα άλλα.

2.6.4.3. Συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με υλικά αλλαγής φάσης

Σήμερα η ενδοδαπέδια θέρμανση παρουσιάζει το μεγάλο πλεονέκτημα της ομοιόμορφης θερμικής άνεσης σε ολόκληρο το χώρο που θερμαίνεται, για ένα φάσμα θερμοκρασιών περίπου 25-28 °C. Το περιβάλλον που διαμορφώνει η ενδοδαπέδια θέρμανση είναι πολύ φιλικό προς τον άνθρωπο, το ίδιο το σύστημα δεν παρουσιάζει προβλήματα ή κινδύνους για τους χρήστες και επίσης δεν παρεμβαίνει στην αισθητική του χώρου, κάτι που καθιστά την εφαρμογή κατάλληλη για οποιουδήποτε είδους εσωτερικό χώρο.

Η λειτουργία της εγκατάστασης, προορίζεται κυρίως για τις ώρες μη αιχμής. Τη θερμότητα αυτή πρώτα θα απορροφήσουν οι κόκκοι του ΥΑΦ που περιβάλλουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η θερμότητα αυτή, αρχικά θα αποθηκευτεί με τη μορφή της αισθητής θερμότητας στο ΥΑΦ, μέχρι να φτάσει το σημείο τήξης του. Μια αντιπροσωπευτική τιμή για το σημείο τήξης των ΥΑΦ για τις εν λόγω εφαρμογές είναι οι 280 °C. Μόλις το ΥΑΦ φτάσει το σημείο τήξης του, τότε αρχίζει να λιώνει, αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Πρακτικά, ένα μικρό ποσοστό από την παραγόμενη στις αντιστάσεις θερμότητα διαφεύγει από το ΥΑΦ και κατευθύνεται προς τη βάση του πατώματος, πριν ακόμα το ΥΑΦ αποκτήσει την ονομαστική λανθάνουσα θερμότητα. Η ροή θερμότητας προς την αντίθετη κατεύθυνση συναντά τη μεγάλη θερμική αντίσταση της θερμομόνωσης και είναι ανεπιθύμητη.

Η λειτουργία του συστήματος συνεχίζει φορτίζοντας τους κόκκους με τα ΥΑΦ μέχρι να αποθηκευτεί η μέγιστη λανθάνουσα θερμότητα στο σύστημα. Από εκείνη τη στιγμή και μετά, όλη η θερμότητα που παράγεται στις ηλεκτρικές αντιστάσεις κατευθύνεται στο χώρο, αφού έχει πρώτα αποθηκευτεί στη βάση του δαπέδου της κατασκευής. Η διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω εμφανίζει ως χρονική καθυστέρηση το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που μπαίνει σε λειτουργία η εγκατάσταση θέρμανσης, μέχρι τη στιγμή που θα φορτιστεί πλήρως το ΥΑΦ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Θερμική ενέργεια

3.1 Μεταφορά θερμότητας

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

3.1.1 Μεταφορά θερμότητας με θερμική αγωγή

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

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.1.1.1)$$

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

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

3.1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση (συναγωγή) εμφανίζεται μεταξύ της επιφάνειας ενός σώματος και του γειτονικού ρευστού (υγρό ή αέριο) που βρίσκεται σε κίνηση, όταν οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν. Στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού, τόσο πιο μεγάλη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή διακρίνεται σε εξαναγκασμένη και σε ελεύθερη ή φυσική. Η εξαναγκασμένη συναγωγή εμφανίζεται όταν η κίνηση του ρευστού επιβάλλεται από εξωτερικά αίτια, δηλαδή από ανεμιστήρα, αντλία ή στροβιλοσυμπιεστή, ενώ ελεύθερη συναγωγή έχουμε όταν η κίνηση του ρευστού είναι αποτέλεσμα ανωστικών δυνάμεων που δημιουργούνται από την μεταβολή πυκνότητας λόγω θερμοκρασιακών διαφορών στο ρευστό. Ένα παράδειγμα

ελεύθερης συναγωγής είναι ένα θερμαντικό σώμα (καλοριφέρ) όταν λειτουργεί. Ο θερμαινόμενος αέρας είναι ελαφρύτερος και καταλαμβάνει τα ανώτερα στρώματα, ενώ ο ψυχρότερος αέρας παρασύρεται προς το θερμαντικό σώμα για να ακολουθήσει και αυτός στη συνέχεια την πορεία του θερμού. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας παροχής θερμότητας $q[W/m^2]$ που είναι ανάλογη της υπάρχουσας θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ επιφάνειας T_s και ρευστού T_l , χρησιμοποιείται η σχέση Newton:

$$q = h(T_s - T_l) \quad (3.1.2.1)$$

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

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

3.1.3 Μεταφορά θερμότητας με θερμική ακτινοβολία

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

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (3.1.3.1)$$

όπου $\sigma = 5,67 Wm^{-2}/K^4$ η σταθερά ακτινοβολίας Stefan- Boltzmann του μέλανος σώματος και ε ο συντελεστής εκπομπής του πραγματικού σώματος με τιμές από 0 έως και 1 για το μέλαν σώμα.

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

3.2 Έννοια θερμοχωρητικότητας

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

3.3 Θερμική μάζα κτιρίου

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

Η θερμική μάζα είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό ενός κτιρίου, και εκφράζει την ικανότητα των δομικών του υλικών να αποθηκεύουν θερμότητα και να την εκπέμπουν με χρονική καθυστέρηση. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η μεγάλη θερμική μάζα συμβάλλει στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, μειώνοντας την απαίτηση για κλιματισμό κατά τη θερινή περίοδο και την κατανάλωση καυσίμου θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο. Η απουσία της απαραίτητης θερμικής μάζας, έχει σαν αποτέλεσμα την εξισορρόπηση των εσωτερικών και εξωτερικών

θερμοκρασιών σε μικρό χρονικό διάστημα, επηρεάζοντας άμεσα το εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου και κατά συνέπεια οδηγεί στη συνεχή λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης και κατ' επέκταση στην αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και εκπομπών άνθρακα. Όσο μεγαλύτερη είναι δηλαδή η θερμική μάζα της κατασκευής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να επηρεαστούν οι εσωτερικές συνθήκες από τις εξωτερικές. Αν για παράδειγμα ένα κτίριο έχει μεγάλη θερμική μάζα, κατά τη διάρκεια του χειμώνα θα έχει συνεχώς μεγάλη ποσότητα θερμότητας αποθηκευμένη, οπότε το σύστημα θέρμανσης θα αναγκάζεται να λειτουργεί για μικρή χρονική διάρκεια και σε αραιά διαστήματα. Στο κλίμα της Ελλάδας, η ύπαρξη θερμικής μάζας είναι μία από τις βασικότερες προϋποθέσεις που δίνουν δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας έως και 70% το χειμώνα και έως και 100% το καλοκαίρι.

Η θερμική μάζα ενός κτιρίου εξαρτάται κυρίως από την ειδική θερμοχωρητικότητα, την πυκνότητα και τη θερμική αγωγιμότητα των δομικών του υλικών. Συγκεκριμένα, αν το περίβλημα ενός κτιρίου δομείται από υλικά μικρής θερμοχωρητικότητας, οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος θα γίνονται άμεσα αισθητές στο εσωτερικό του. Αντίθετα, σε ένα κτίριο με δομικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας, ένα μέρος της θερμότητας κατά τη διάρκεια των υψηλών θερμοκρασιών της ημέρας αποθηκεύεται στα στοιχεία του κελύφους και αυξάνει τη θερμοκρασία τους. Κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη θερμοκρασία να μειώνεται, η θερμότητα που είχε αποθηκευτεί στα υλικά αποδίδεται πλέον στο περιβάλλον. Έτσι, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου μεταβάλλεται πιο ομαλά σε σχέση με την αντίστοιχη στο περιβάλλον. Επομένως, μεγάλη θερμοχωρητικότητα ενός υλικού, που είναι και ανάλογη με τον όγκο και την πυκνότητά του, συνεπάγεται μεγάλη θερμική μάζα στο κέλυφος του κτιρίου.

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

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

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

3.4. Τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

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

3.4.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

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

Κατά την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία ενός στερεού ή υγρού υλικού. Καθοριστικός παράγοντας στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας υπό μορφή αισθητής θερμότητας, είναι η θερμοχωρητικότητα του υλικού και η μεταβολή της θερμοκρασίας που υφίσταται αυτό κατά τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης, δηλαδή κατά τη διαδικασία απορρόφησης και απόδοσης της θερμότητας.

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

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

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

3.4.1 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

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

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

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

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

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

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

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

3.5 Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Από τις μεθόδους αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που αναλύθηκαν παραπάνω πιο ελκυστική και πρακτική θεωρείται η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, για την εφαρμογή της οποίας χρησιμοποιούνται υλικά που ονομάζονται Υλικά Αλλαγής Φάσης ή PCM.

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

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:Σχέδιο Μοντελοποίησης και Είδος Μοντέλου

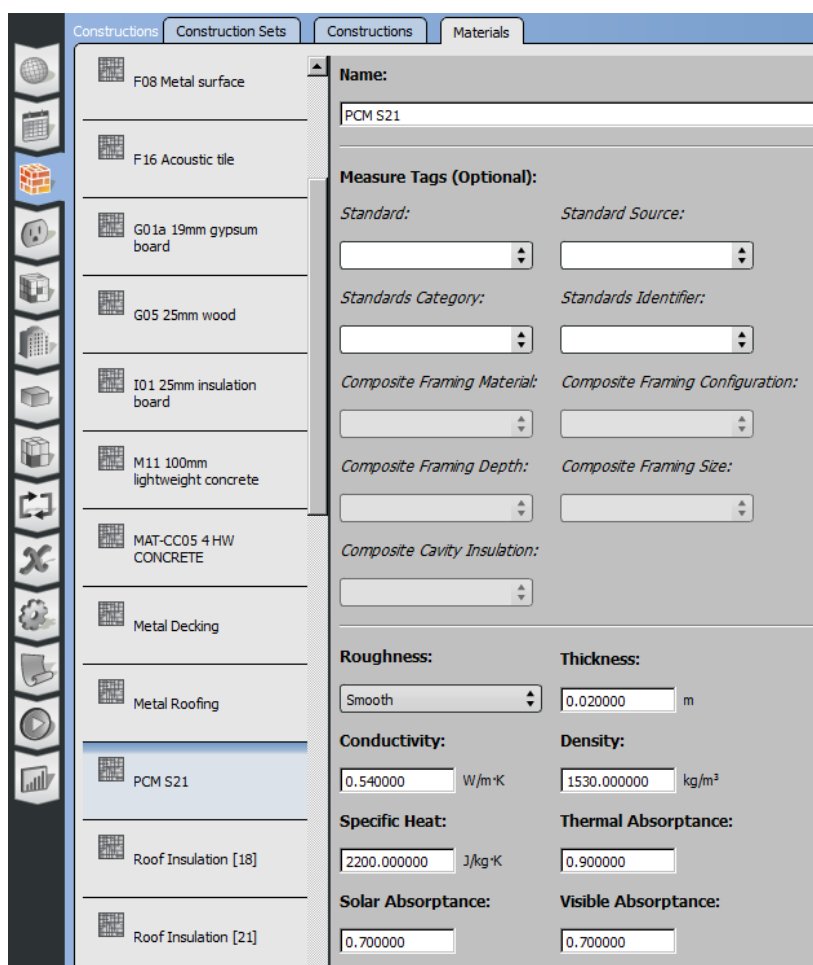
4.1 Εισαγωγή: Εργαλεία μοντελοποίησης

Κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής επιλέχθηκε ένα κτίριο εξοπλισμένο με σύστημα θέρμανσης και εξαερισμού, με σκοπό να εξεταστεί η καταλληλότητα των υλικών αλλαγής φάσης σε τέσσερα διαφορετικά κλίματα, σε τέσσερις διαφορετικές πόλεις Ευρωπαϊκών χωρών.

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε με την κατασκευή των υλικών στο Open Studio και με την εισαγωγή τους στην γεωμετρία του κτιρίου, ενώ η ενεργειακή προσομοίωση όλων των διαφορετικών καιρικών δεδομένων έγινε με τη χρήση του λογισμικού Energy plus.

4.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας στο Open studio

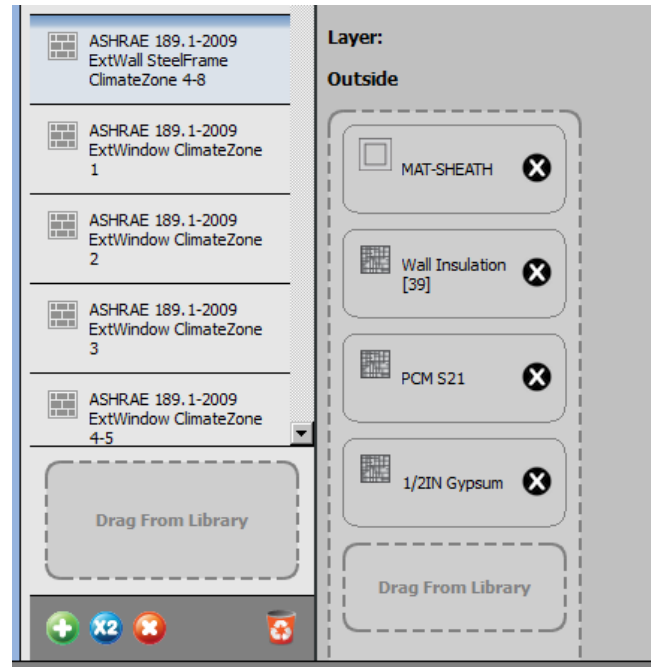
Πριν την προσομοίωση του κτιρίου έγινε κατασκευή του στρώματος PCM στο ήδη υπάρχον αρχείο του κτιρίου στο Open studio με τυπικά χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.1 και τα οποία άλλαζαν για κάθε PCM.



Εικόνα 4.2.1:Κατασκευή ενός τυπικού στρώματος PCM

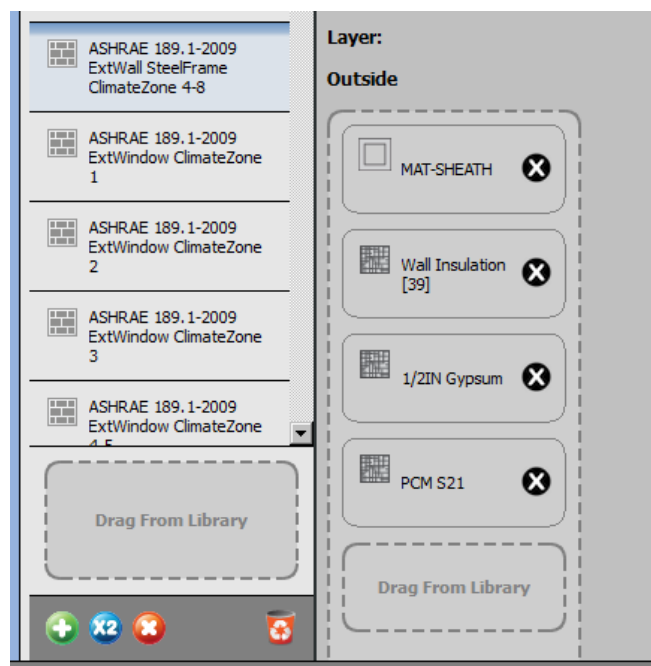
Για την εύρεση της πιο κατάλληλης θέσης του στρώματος PCM στην κατασκευή του κτιρίου καταστρώθηκαν τα εξής σενάρια:

Σενάριο 1^ο: Εισαγωγή του στρώματος PCM ενδιάμεσα των υλικών που απαρτίζουν τον τοίχο όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.2



Εικόνα 4.2.2: PCM σε ενδιάμεση θέση

Σενάριο 2^ο: Εισαγωγή του στρώματος PCM ως το πιο εσωτερικό υλικό από αυτά που απαρτίζουν τον τοίχο όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.3



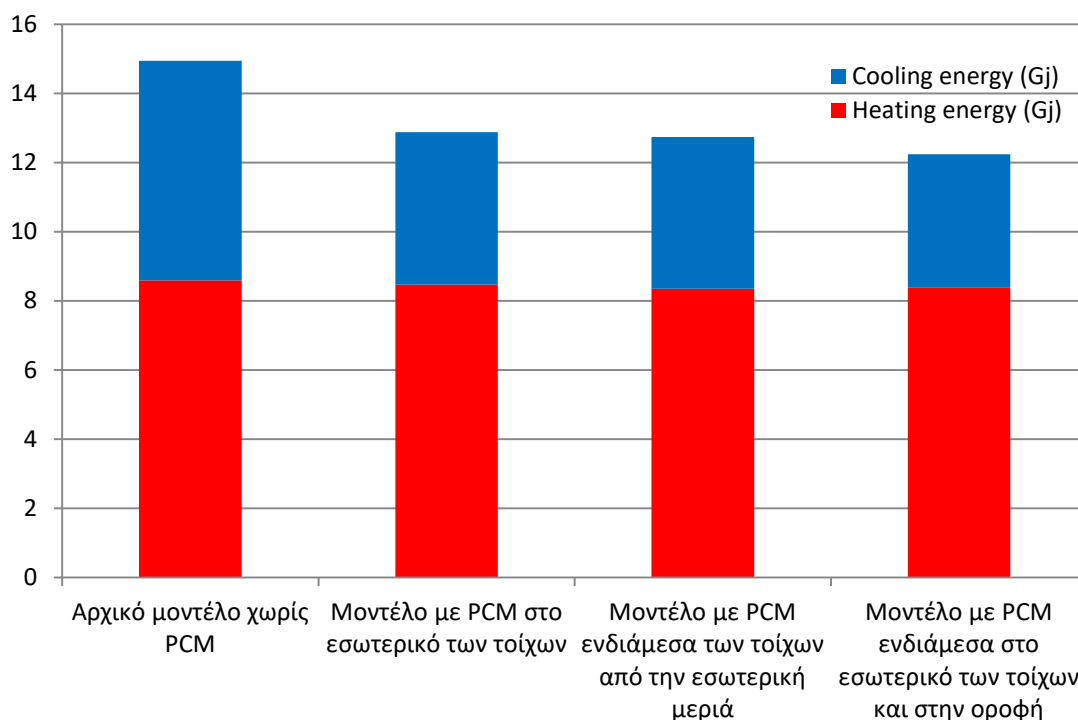
Εικόνα 4.2.3: PCM σε εσωτερική θέση

Πιο αποδοτικό σενάριο όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης και ψύξης αποδείχτηκε το Σενάριο 1^ο πάνω στο οποίο εξετάστηκε το ενδεχόμενο περεταίρω βελτίωσης με την τοποθέτηση αυτού του στρώματος PCM και στην οροφή του κτιρίου το οποίο επιβεβαιώνεται με τα αποτελέσματα παρακάτω:

Επίσης η εγκατάσταση των υλικών αλλαγής φάσης στην κατασκευή του κτιρίου επιλέγεται να είναι ως ένα αυτόνομο στρώμα πάχους 3-5 cm και όχι σαν συστατικό μείγματος τσιμέντου ή κάποιου άλλου υλικού με σκοπό την εύκολη αντικατάστασή τους καθώς τα υλικά αυτά έχουν χρόνο ζωής περίπου 25 χρόνια

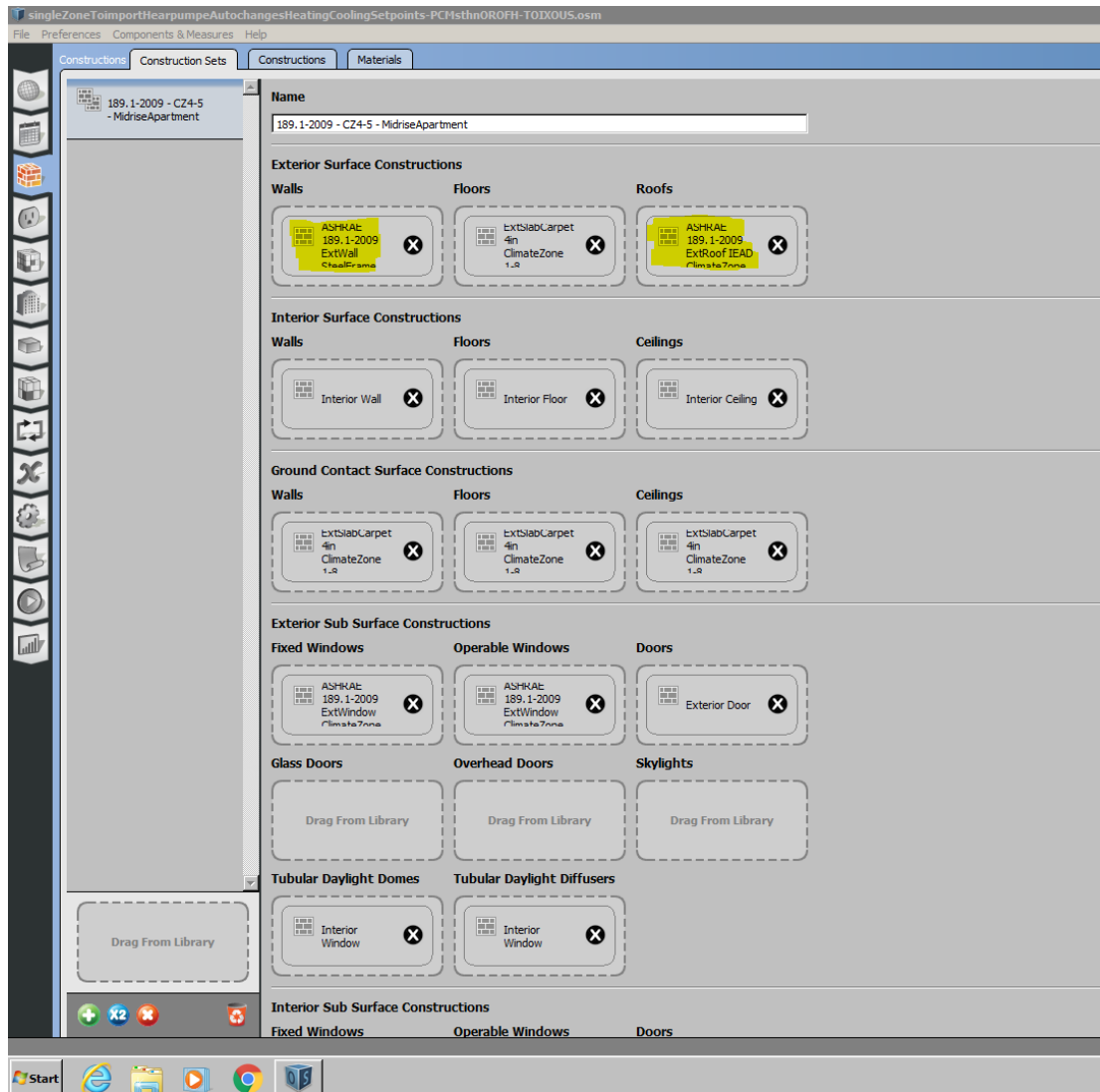
| Κατηγορία | Heating energy (Gj) | Cooling energy (Gj) |
|--|---------------------|---------------------|
| Αρχικό μοντέλο χωρίς PCM | 8,59 | 6,35 |
| Μοντέλο με PCM στο εσωτερικό των τοίχων | 8,47 | 4,41 |
| Μοντέλο με PCM ενδιάμεσα των τοίχων από την εσωτερική μεριά | 8,35 | 4,39 |
| Μοντέλο με PCM ενδιάμεσα στο εσωτερικό των τοίχων και στην οροφή | 8,38 | 3,86 |

Πίνακας 4.2.1: Σύγκριση αποδοτικότερης θέσης του στρώματος PCM



Διάγραμμα 4.2.1: Γραφική αναπαράσταση της κατανάλωσης ενέργειας για ένα χρόνο ανάλογα με την θέση του στρώματος PCM.

Έχοντας επιβεβαιώσει την κατάλληλη θέση του στρώματος PCM στην κατασκευή του τοίχου και της οροφής αλλά και της τοποθέτησης του στο Exterior Surface Constructions του κτιρίου (καθώς όταν τοποθετήθηκε στο Interior Surface Constructions δεν είχε καμία επίδραση στην εξοικονόμηση ενέργειας) όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.4 ολοκληρώθηκε η τροποποίηση του ήδη υπάρχον αρχείου στο Open studio



Εικόνα 4.2.2: Τα υπογραμμισμένα είναι τα constructions που περιέχουν PCM

4.3 Energy plus

Η μελέτη και αξιολόγηση των κτιρίων ως προς την ενεργειακή τους συμπεριφορά είναι μία διεργασία ιδιαίτερα δύσκολη, αν αναλογιστεί κανείς το πόσο πολύπλοκα δυναμική είναι λόγω των πολλών παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται. Η προσπάθεια μελέτης ενός τόσο δυναμικού συστήματος με απλούς στατικούς υπολογισμούς δεν έχει να προσφέρει κανένα αξιόπιστο αποτέλεσμα ούτε όσον αφορά την ενεργειακή αλλά ούτε και την περιβαλλοντική συμπεριφορά του κτιρίου.

Στον αντίποδα, η χρήση της ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων προσφέρεται για την μελέτη τέτοιων συστημάτων, καθώς είναι σε θέση να αντιληφθεί την επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως το κλίμα, τον τρόπο κατασκευής, το ενεργειακό κόστος και τους διάφορους περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Υπάρχει πλέον πληθώρα τέτοιων λογισμικών που λόγω των πολλών δυνατοτήτων τους ,πέραν ενός απλού υπολογισμού φορτίων, είναι απαραίτητα στην ενεργειακή μελέτη ενός κτιρίου.

Το πρόγραμμα που επιλέχθηκε για την προσομοίωση στη συγκεκριμένη εργασία είναι το Energy Plus. Έχει τις ρίζες του στα προγράμματα BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) και DOE-2. Τα δύο παραπάνω προγράμματα αναπτύχθηκαν κατά τις δεκαετίες '70 και '80. Η γέννηση τους είναι αποτέλεσμα της ενεργειακής κρίσης στις αρχές της δεκαετίας του '70 και της καθολικής αναγνώρισης ότι η ενεργειακή κατανάλωση στις κατοικίες αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα, σύμφωνα πάντα με στατιστική υπηρεσία των Η.Π.Α.

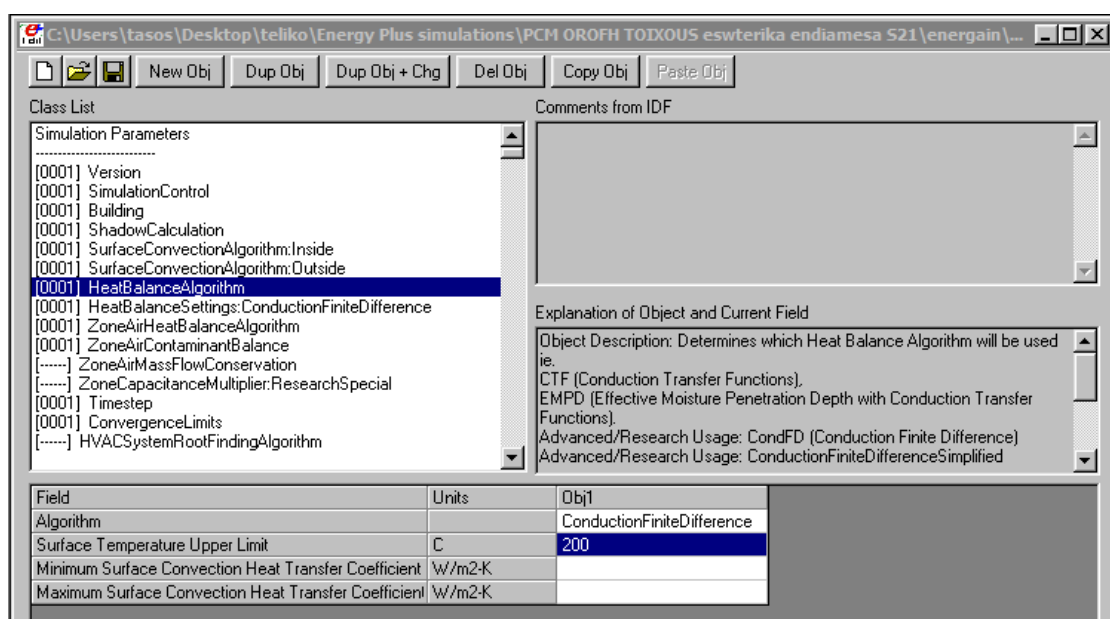
4.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στο Energy plus

Όσον αφορά το Energy Plus, είναι ένα πρόγραμμα ενεργειακής ανάλυσης και προσομοίωσης του θερμικού φορτίου, βασιζόμενο πάντα στα στοιχεία που ο εκάστοτε χρήστης βάζει στο λογισμικό. Τα στοιχεία που εισάγονται αφορούν τόσο το κτιριακό κέλυφος, όσο και τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις του κτιρίου. Το πρόγραμμα υπολογίζει τα απαραίτητα θερμικά και ψυκτικά φορτία που είναι αναγκαία για τη διατήρηση του θερμοστάτη σε δεδομένη θερμοκρασία, τις συνθήκες κατά τις οποίες δουλεύει ένα δευτερεύων σύστημα Θέρμανσης-Ψύξης-Κλιματισμού, την ενεργειακή κατανάλωση του βασικού εξοπλισμού που υφίσταται το κτίριο καθώς επίσης και οποιαδήποτε άλλα στοιχεία που θα πιστοποιήσουν ότι η προσομοίωση ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες του κτιρίου.

Είναι ευνόητο ότι κανένα πρόγραμμα δεν μπορεί να προσομοιώσει οποιαδήποτε κατάσταση. Ωστόσο το Energy Plus είναι δυνατόν να λάβει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών όσον αφορά το κτιριακό κέλυφος και τον μηχανολογικό εξοπλισμό, είτε άμεσα από τον χρήστη είτε έμμεσα από άλλα προγράμματα όπως είναι το Google Sketch Up. Στη συνέχεια μετά από όλα αυτά είναι σε θέση να υπολογίσει τα θερμικά φορτία και την ενεργειακή κατανάλωση είτε για μία δεδομένη μέρα είτε για μία συγκεκριμένη περίοδο που προφανώς ορίζεται από το χρήστη. Συμπερασματικά λοιπόν το Energy Plus είναι ένα σπουδαίο εργαλείο με μεγάλη χρησιμότητα στον τομέα του ενεργειακού σχεδιασμού κτιρίων.

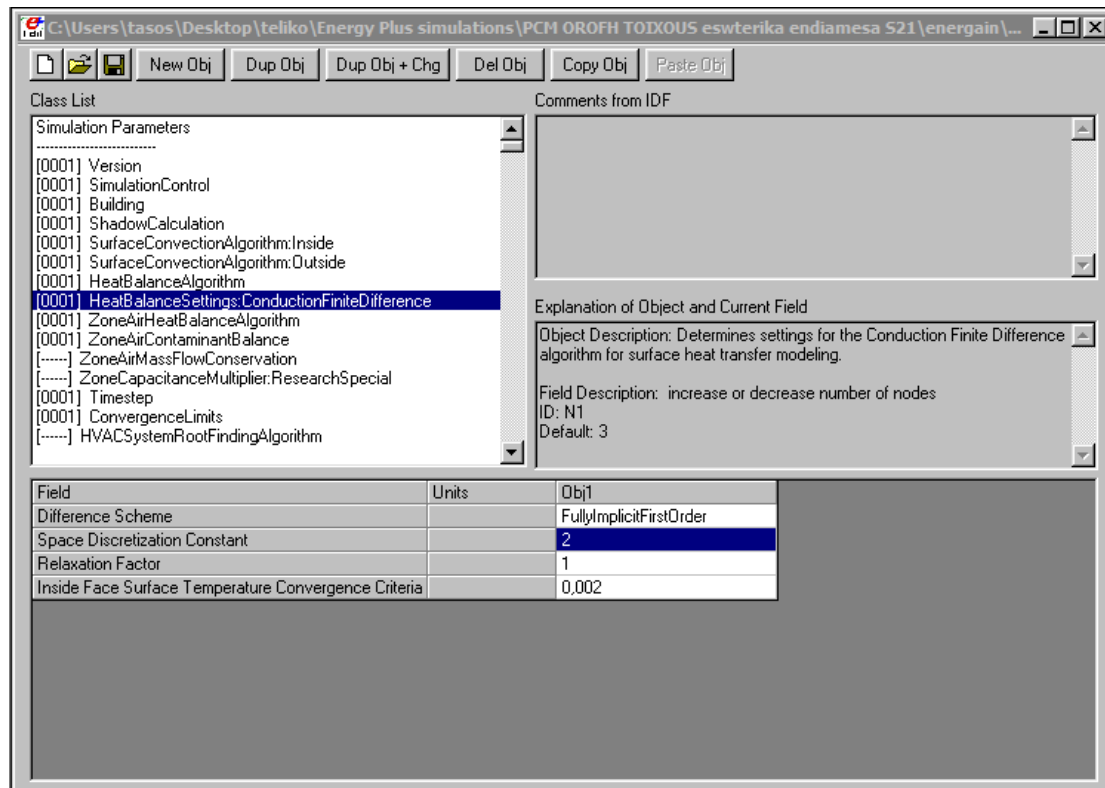
4.3.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας στο Energy plus

Το EnergyPlus είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης ενέργειας που χρησιμοποιεί το μοντέλο ζυγοστάθμισης θερμοκρασίας ζώνης (heat balance algorithm) για την πρόβλεψη θερμικών φορτίων και συνθηκών αέρα ζώνης. Οι διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγών αποτελούν σημαντικό στοιχείο αυτού του μοντέλου που συνδέει όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών. Το EnergyPlus αναπτύχθηκε αρχικά χρησιμοποιώντας CTF για να υπολογίσει τις διεργασίες μεταφοράς σε όλους τους τοίχους, τα παράθυρα και τα δάπεδα. Τα CTF είναι πολύ ισχυρά καθώς συνδέουν τις τρέχουσες τιμές της ροής θερμότητας επιφάνειας και θερμοκρασίας με τις τιμές της προηγούμενης επιφανειακής ροής θερμότητας και θερμοκρασίας. Έτσι, με τα CTF δεν υπάρχει λόγος να υπολογίζονται θερμοκρασίες εντός της επιφάνειας, γεγονός που μειώνει τις υπολογιστικές απαιτήσεις για την προσομοίωση. Τα κύρια μειονεκτήματα των CTF είναι ότι παίρνουν σταθερές θερμικές ιδιότητες και δεν παρέχουν πληροφορίες για εσωτερικές διεργασίες σε τοίχο. Επομένως, οι προγραμματιστές του EnergyPlus πρόσθεσαν ένα υποθετικό μοντέλο CondFD στο EnergyPlus, το οποίο και επιλέγεται για την προσομοίωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.2.1



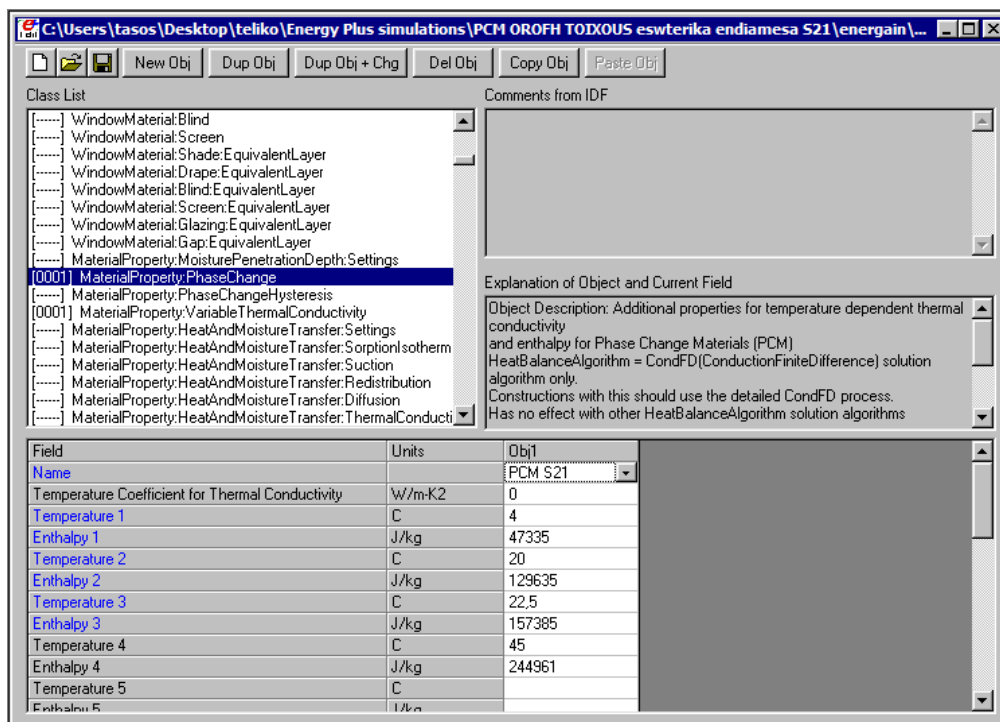
Εικόνα 4.3.2.1: Ο αλγόριθμος heat transfer στο PCM στο Energy plus

Στο μοντέλο CondFD, η διακριτοποίηση του τοίχου/οροφής εξαρτάται από τη θερμική διάχυση του επιλεγμένου υλικού και του χρονικού βήματος και από τη σταθερά διακριτοποίησης χώρου για αυτόν τον λόγο επιλέγονται οι τιμές που φαίνονται στην Εικόνα 4.3.2.2



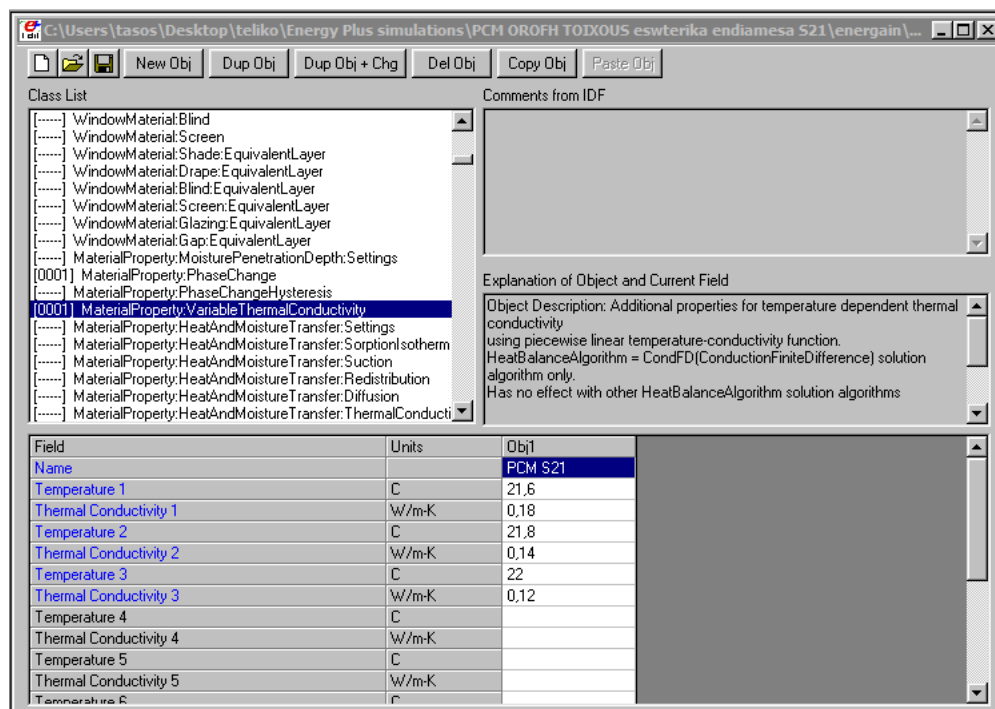
Εικόνα 4.3.2.2: Ρυθμίσεις του αλγορίθμου CondFD στο Energy plus

Για τον αλγόριθμο για το PCM, η μέθοδος CondFD συνδυάζεται με μια συνάρτηση θερμοκρασίας ενθαλπίας στην οποία εισάγονται δεδομένα κοντά στην δεδομένη τιμή ενθαλπίας στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης του κάθε υλικού για να υπολογίζει τις αλλαγές της κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης. Όπως φαίνονται στην Εικόνα 4.3.2.3



Εικόνα 4.3.2.3: Εισαγωγή δεδομένων θερμοκρασίας-ενθαλπίας για κλαθε PCM στο Energy plus

Παρόμοια διαδικασία εφαρμόζεται και στην εισαγωγή δεδομένων για θερμική αγωγιμότητα του κάθε υλικού PCM χωρίς να υπάρχει σημαντικό σφάλμα στα αποτελέσματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.2.4τα οποία θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 4.3.2.4: Εισαγωγή δεδομένων θερμοκρασίας-αγωγιμότητας για κλαθε PCM στο Energy plus

4.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά των PCM

Για την εκτέλεση της εργασίας έπρεπε να δοκιμαστούν πολλά διαφορετικά είδη PCM το καθένα με τις δικές του ξεχωριστές ιδιότητες με σκοπό την εύρεση του πιο κατάλληλου για χρήση σε διαφορετικούς τύπους κλιμάτων στον κόσμο.

Δοκιμάστηκαν παραφίνες και μη παραφίνες καθώς και άλατα όπως φαίνονται στους παρακάτω πίνακες τα οποία είχαν θερμοκρασίες αλλαγής φάσης από 15 °C έως 25 °C δηλαδή κοντά στην άνετη και βιώσιμη θερμοκρασία των 20 °C στο εσωτερικό του σπιτιού, ενώ απώτερος σκοπός ήταν να εξομαλυνθούν οι διακυμάνσεις την θερμοκρασίας στο εσωτερικό του σπιτιού και να μειωθούν τα μέγιστα φορτία κατανάλωσης ενέργειας το χειμώνα και το καλοκαίρι. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

| PCM Υλικά | Είδος | Θερμοκρασία Αλλαγής Φάσης (°C) | Ενθαλπία Αλλαγής Φάσης (J/kg) |
|-----------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| S15 | Ανόργανο (Άλας) | 15 | 160000 |
| S19 | Ανόργανο (Άλας) | 19 | 160000 |
| Dupond Energain | Οργανικό (Παραφίνη) | 22 | 250000 |
| S25 | Ανόργανο (Άλας) | 25 | 180000 |
| A15 | Οργανικό (Μη Παραφίνη) | 15 | 130000 |
| A25H | Οργανικό (Μη Παραφίνη) | 25 | 226000 |

Πίνακας 4.4.1: Ιδιότητες των διαφορετικών υλικών PCM

| PCM Υλικά | Ειδική Θερμότητα (J/kgK) | Θερμική Αγωγιμότητα Αλλαγής Φάσης (W/mK) | Πυκνότητα (kg/m ³) |
|-----------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|
| S15 | 1900 | 0,43 | 1510 |
| S19 | 1900 | 0,43 | 1520 |
| Dupond Energain | 2200 | 0,18 | 1540 |
| S25 | 2200 | 0,54 | 1530 |
| A15 | 2260 | 0,18 | 790 |
| A25H | 2150 | 0,18 | 810 |

Πίνακας 4.4.2: Ιδιότητες των διαφορετικών υλικών PCM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων από το Energy plus

5.1 Εισαγωγή: Γενικές πληροφορίες για το κτίριο

Κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής επιλέχθηκαν ένα τυπικό κτίριο κατοικίας, με σκοπό να εξεταστεί σε τέσσερα διαφορετικά κλίματα, σε τέσσερις διαφορετικές πόλεις (Χανιά, Βαρσοβία, Βαλένθια και Κάιρο). Το κτίριο αυτό ενός ορόφου αποτελείται από μια θερμική ζώνη και είναι εξοπλισμένο με σύστημα θέρμανσης εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) με σκοπό να μελετηθεί η κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης και ψύξης με την παρουσία και χωρίς όλων των διαφορετικών υλικών αλλαγής φάσης (PCM) υπό σταθερές συνθήκες καθώς και η καταγραφή της εσωτερικής θερμοκρασίας του σπιτιού με και χωρίς την χρήση PCM. Για την καταγραφή της εσωτερικής θερμοκρασίας γινόταν απενεργοποίηση του συστήματος HVAC ώστε να μην επηρεάσει τα αποτελέσματα.

5.2 Περιγραφή Μελετούμενων Περιοχών

Τέσσερις διαφορετικές κλιματικές περιοχές επιλέχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του κτιρίου επιλέχθηκαν 4 διαφορετικά κλίματα, τεσσάρων διαφορετικών πόλεων, ένα θερμό-υγρό (Χανιά-Ελλάδα), ένα θερμό-ξηρό (Κάιρο-Αίγυπτος), ένα ήπιο-υγρό (Βαλένθια- Ισπανία) και ψυχρό-ξηρό κλίμα (Βαρσοβία-Πολωνία). Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κλιματικές παράμετροι αυτών των τεσσάρων Ευρωπαϊκών πόλεων.

5.3 Κλιματικά Χαρακτηριστικά

Η Ελλάδα είναι μια από τις πιο ηλιόλουστες χώρες της Ευρώπης. Βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Ευρώπης και έχει γενικά θερμό κλίμα. Το χαρακτηριστικό του κλίματος είναι οι ήπιοι και υγροί χειμώνες και τα ζεστά και ξηρά καλοκαίρια. Τα Χανιά, τα οποία εξετάζονται στην παρούσα εργασία, είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη στην Κρήτη και η πρωτεύουσα του νομού Χανίων. Λόγω της θάλασσας, τα Χανιά επηρεάζονται άμεσα από αυτήν. Έχει αποδειχθεί ότι οι περιοχές κατά μήκος και τα κτίρια κοντά στις ακτές, επηρεάζονται ακόμα περισσότερο από την αύρα της θάλασσας. Τα δεδομένα από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό δείχνουν ότι οι μέσες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι 8 - 15 °C. Οι χειμώνες είναι σχετικά ήπιοι, με λίγο κρύο τις πρωινές ώρες. Ο άνεμος είναι επίσης ένα συνηθισμένο φαινόμενο για την πόλη της Θεσσαλονίκης. Τα καλοκαίρια είναι ζεστά και υγρά. Οι μέσες θερμοκρασίες είναι 28 έως 32 °C, ωστόσο οι θερμοκρασίες συχνά κυμαίνονται πάνω από 35 °C.

Από την *Βαρσοβία* διέρχεται ο ποταμός Βιστούλας. Στις περισσότερες περιοχές της Πολωνίας κυριαρχούν υγροί δυτικοί άνεμοι ενώ οι βροχοπτώσεις συμβαίνουν κυρίως το καλοκαίρι. Συγκεκριμένα, ο Ιούνιος και ο Αύγουστος είναι οι πιο υγροί μήνες, ενώ η πιο ξηρή περίοδος είναι κατά τον Οκτώβριο και το Φεβρουάριο. Η Βαρσοβία διαθέτει ηπειρωτικό κλίμα. Οι χειμώνες διαρκούν από τον Δεκέμβριο μέχρι τον Μάρτιο. Η Βαρσοβία βιώνει κρύους χειμώνες, αλλά οι έντονες βροχοπτώσεις είναι σπάνιες στη διάρκεια του χειμώνα. Ο ψυχρότερος μήνας είναι ο Ιανουάριος με μέση θερμοκρασία $-2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η χιονοκάλυψη παρατηρείται αρκετές εβδομάδες, κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Τα καλοκαίρια ήπια, με μέση μέγιστη θερμοκρασία στους $23,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, το θερμότερο μήνα Ιούλιο. Τα καλοκαίρια διαρκούν από το Μάιο μέχρι το Σεπτέμβριο.

Η *Βαλένθια* βρίσκεται στο ανατολικό κομμάτι της Ισπανίας. Το κλίμα της είναι εύκρατο με μέτριες βροχοπτώσεις όλο το χρόνο.. Σύμφωνα με την εθνική μετεωρολογική υπηρεσία της Ισπανίας, οι χειμώνες είναι και κρύοι με θερμοκρασίες από $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα καλοκαίρια στη Βαλένθια είναι ζεστά. Η μέση θερμοκρασία είναι περίπου $29\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Το *Κάιρο* βρίσκεται στη βόρεια Αφρική Νότια της Μεσογείου. Το κλίμα του χαρακτηρίζεται ως ένα καυτό υποτροπικά ημίξηρο κλίμα,. Έχει μακρά, ζεστά και ξηρά καλοκαίρια με υψηλές θερμοκρασίες. Οι μέσες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού είναι $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι χειμώνες είναι σχετικά υγροί και ήπιοι, με μέση θερμοκρασία $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Επιπλέον, το φθινόπωρο και η άνοιξη είναι σύντομες εποχές, με μέσες θερμοκρασίες $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι βροχοπτώσεις είναι χαμηλές, και μόνο κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου και του Ιανουαρίου.

5.4 Παραδοχές Προσομοίωσης

5.4.1 Κλιματικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση δίνονται από ιστοσελίδα του προγράμματος προσομοίωσης Energy Plus. Τα κλιματικά δεδομένα είναι διαθέσιμα πολλές περιοχές σε μια μορφή αρχείου (epw) που μπορεί να διαβαστεί από το Energy Plus. Τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των κτιρίων στο Energy Plus καλύπτουν μια τυπική χρονιά για τους υπολογισμούς της ενεργειακής κατανάλωσης.

5.4.2 Θερμοκρασίες σχεδιασμού

Το κύριο ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας ήταν οι θερμοκρασίες λειτουργίας των PCM για αυτό στο λογισμικό προσομοίωσης έπρεπε να εισαχθούν οι θερμοκρασίες σχεδιασμού των κτιρίων. Συγκεκριμένα, οι θερμοκρασίες σχεδιασμού ήταν στους 26 °C για τη περίοδο ψύξης και στους 20 °C για τη περίοδο θέρμανσης. Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασιών, ώστε να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στις συνθήκες θερμικής άνεσης του ανθρώπου. Το λογισμικό λοιπόν υπολογίζει την ενέργεια που απαιτείται από το σύστημα HVAC ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία, εντός των κτιρίων σταθερή στις τιμές που επιλέχθηκαν.

5.4.3 Εσωτερικά κέρδη

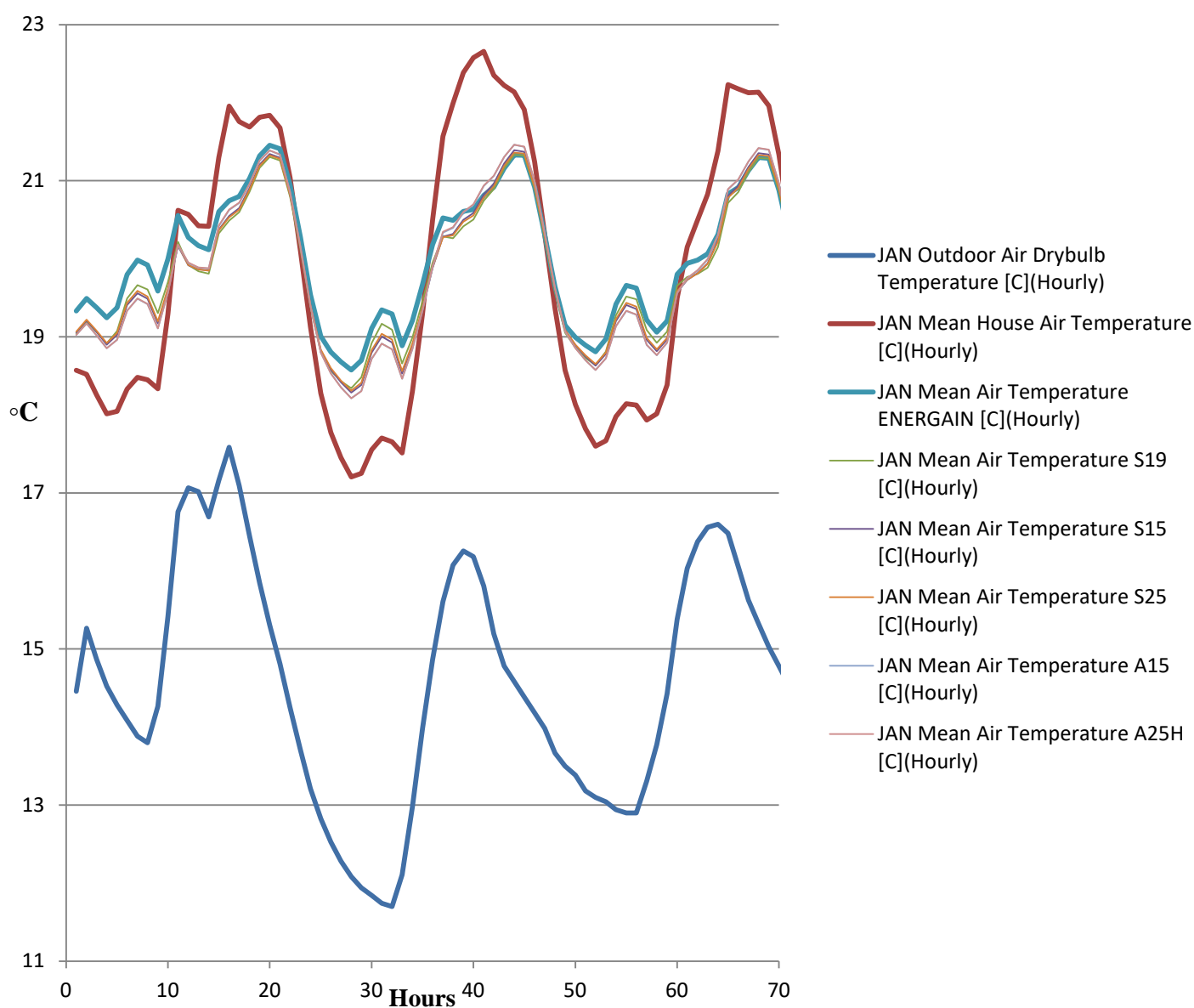
Τα εσωτερικά φορτία προκύπτουν από τους ανθρώπους, το φωτισμό και τον εξοπλισμό και εξαρτώνται από τον αριθμό των ανθρώπων, το είδος της δραστηριότητας τους και το χρόνος λειτουργίας όλων των συσκευών. Κατά τη φάση του σχεδιασμού όλα τα εσωτερικά φορτία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Όσο περισσότερο αυξάνονται τα εσωτερικά φορτία, τόσο υψηλότερες είναι οι ανάγκες ψύξης και εξαερισμού και λιγότερες οι ανάγκες θέρμανσης. Ωστόσο για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης δεν λαμβάνονται υπόψη όλες αυτές οι μεταβλητές ώστε τα αποτελέσματα καταγραφής της εσωτερικής θερμοκρασίας και ενέργειας να είναι αντιπροσωπευτικά των υλικών αυτών.

5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης από το Energy plus

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και κατόπιν ερμηνεύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη προσομοίωση του κτιρίου στο Energy Plus. Αρχικά εξετάζονται όλα τα PCM προϊόντα που επιλέχθηκαν για τις δοκιμές στα διαφορετικά κλίματα ως προς τις εσωτερικές θερμοκρασίες και στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας για κάθε πόλη.

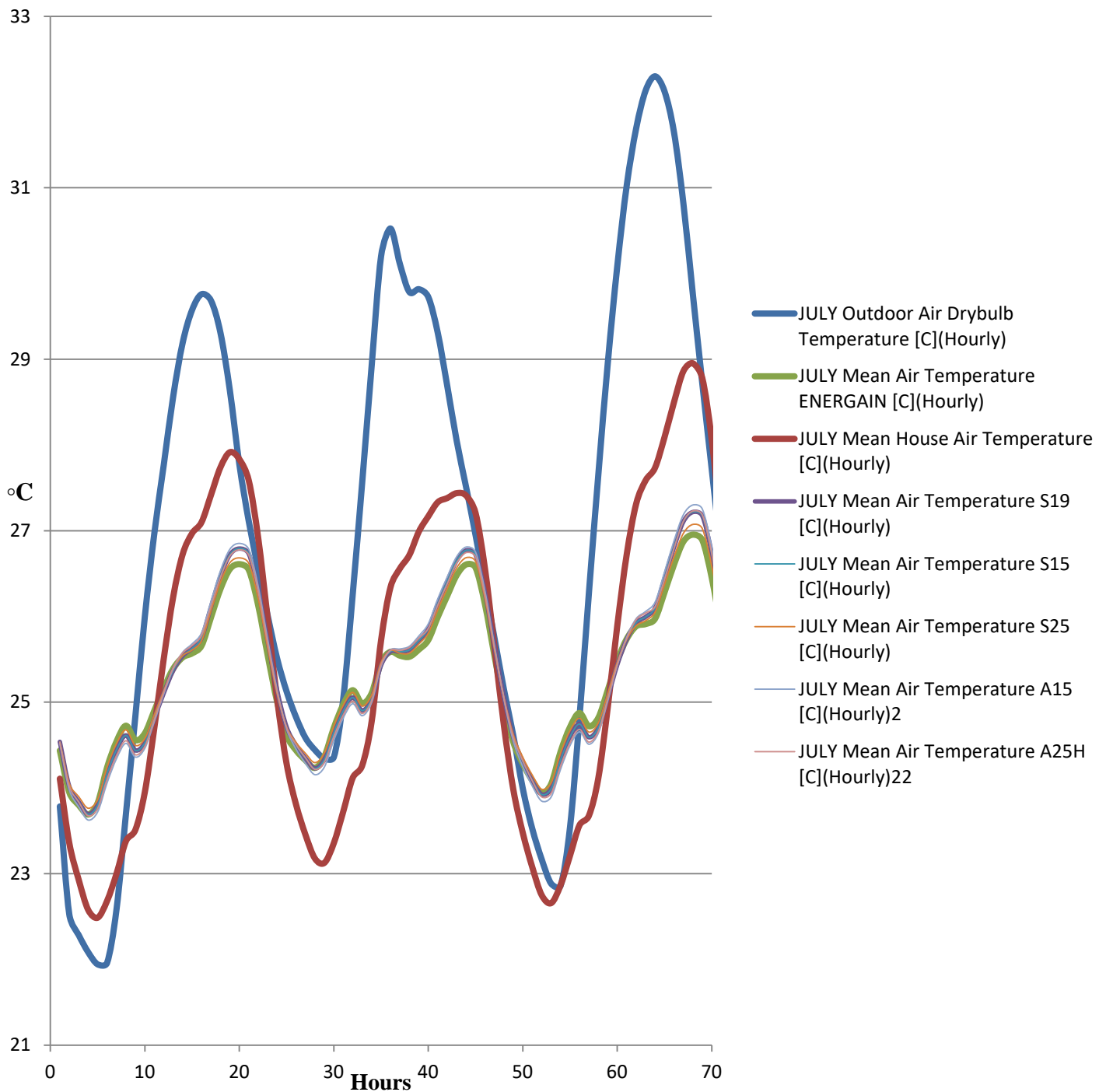
5.5.1 Θερμό-Υγρό κλίμα (Χανιά)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εσωτερικής θερμοκρασίας καθώς και κατανάλωση ενέργειας μοντέλου σπιτιού με και χωρίς HVAC στο Energy plus με μοντελοποίηση PCM για την περιοχή των Χανίων



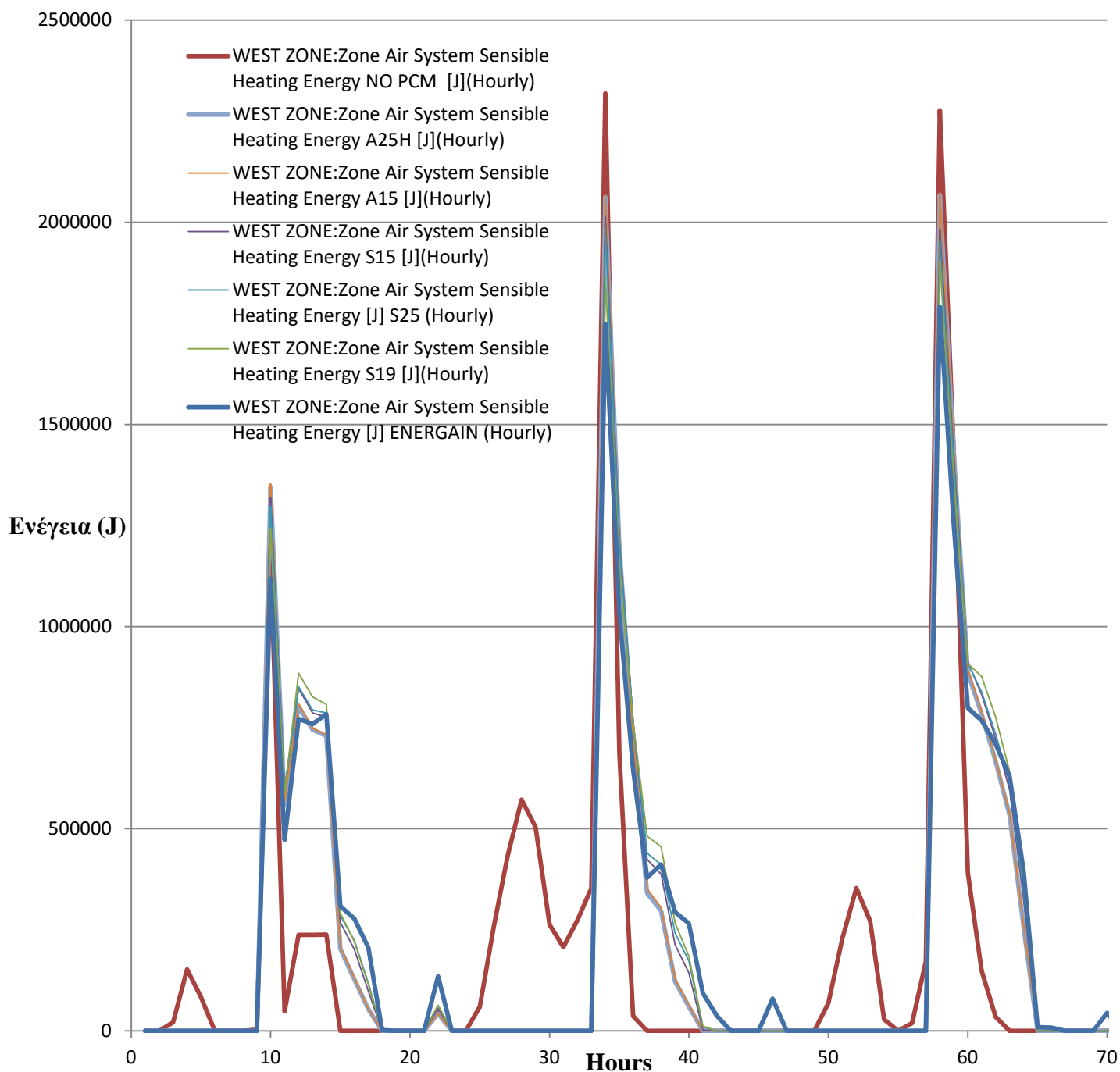
Διάγραμμα 5.5.1.2: Σύγκριση θερμοκρασιών με και χωρίς PCM για τις πρώτες 3 μέρες του Ιανουαρίου για τα Χανιά χωρίς HVAC

Αποτελέσματα σύγκρισης εσωτερικής με εξωτερικής θερμοκρασίας για 3 μέρες του Ιουλίου.

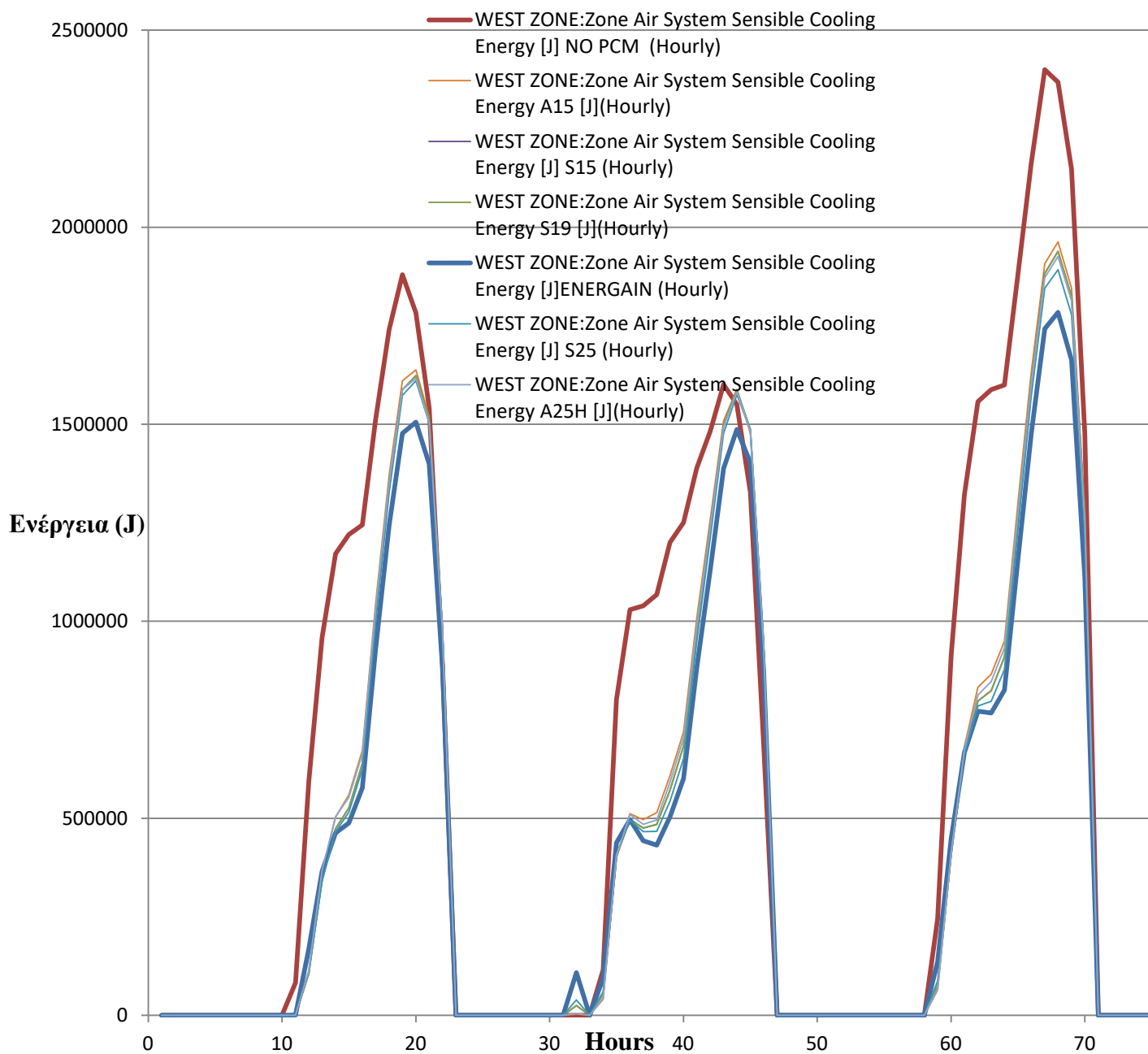


Διάγραμμα 5.5.1.3: Σύγκριση θερμοκρασιών με και χωρίς PCM για τις πρώτες 3 μέρες του Ιουλίου για τα Χανιά χωρίς HVAC

Αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας με και χωρίς PCM



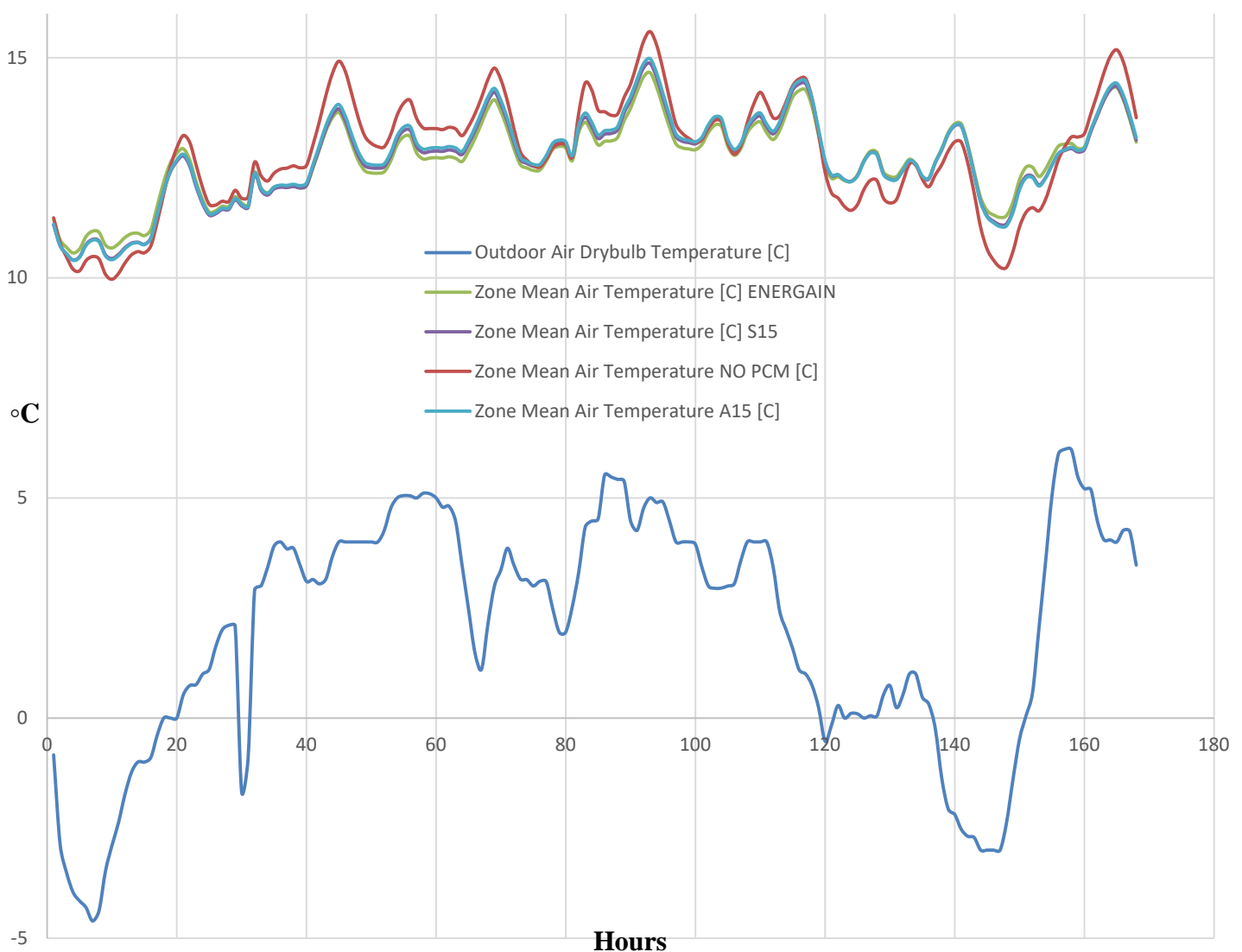
Διάγραμμα 5.5.1.4: Σύγκριση ενέργειας θέρμανσης με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιανουαρίου για τα Χανιά με HVAC



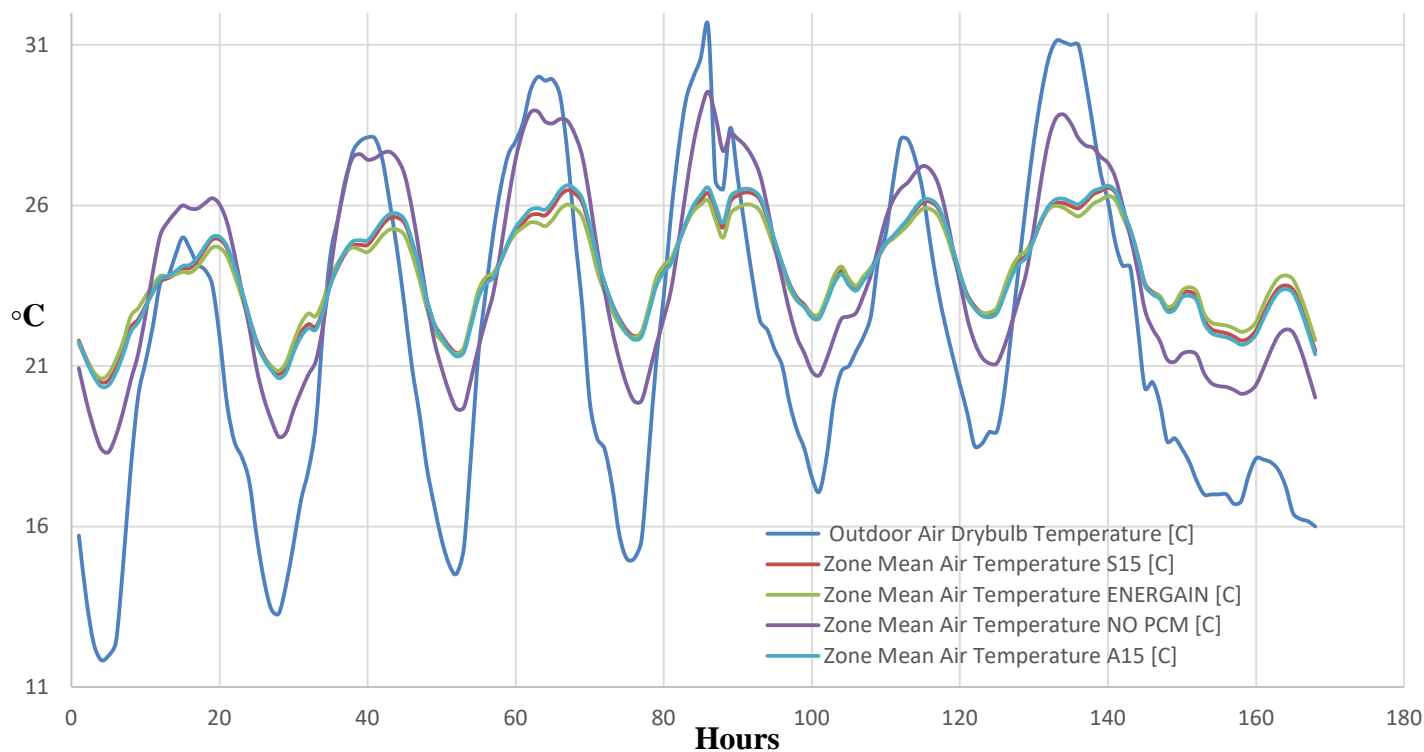
Διάγραμμα 5.5.1.5: Σύγκριση ενέργειας ψύξης με και χωρίς PCM για τις πρώτες 3 μέρες του Ιουλίου για τα Χανιά με HVAC

Από τα προηγούμενα διαγράμματα σύγκρισης όλων των διαφορετικών PCM στην εσωτερική θερμοκρασία και στην κατανάλωση ενέργειας προέκυψε ότι το PCM Dupond Energain εμφανίζει την μεγαλύτερη εξομάλυνση στην εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου (περίπου 1-2 °C) ενώ ταυτόχρονα μειώνει τα ακραία φορτία (peak loads) στην κατανάλωση ενέργειας. Στην συνέχεια ακολουθούν διαγράμματα θερμοκρασίας και κατανάλωσης ενέργειας για τα υπόλοιπα κλίματα

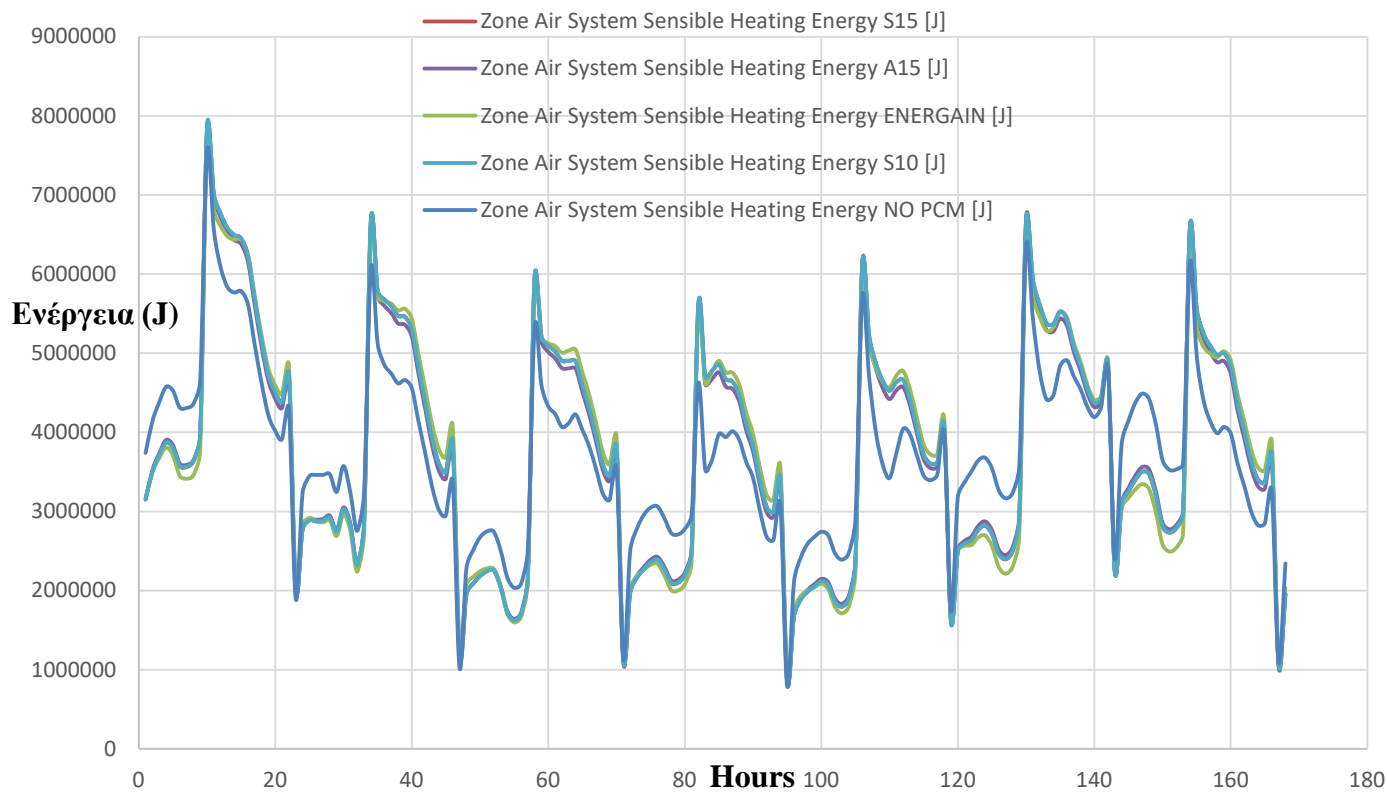
5.5.2 Ψυχρό-Ξηρό κλίμα (Βαρσοβία)



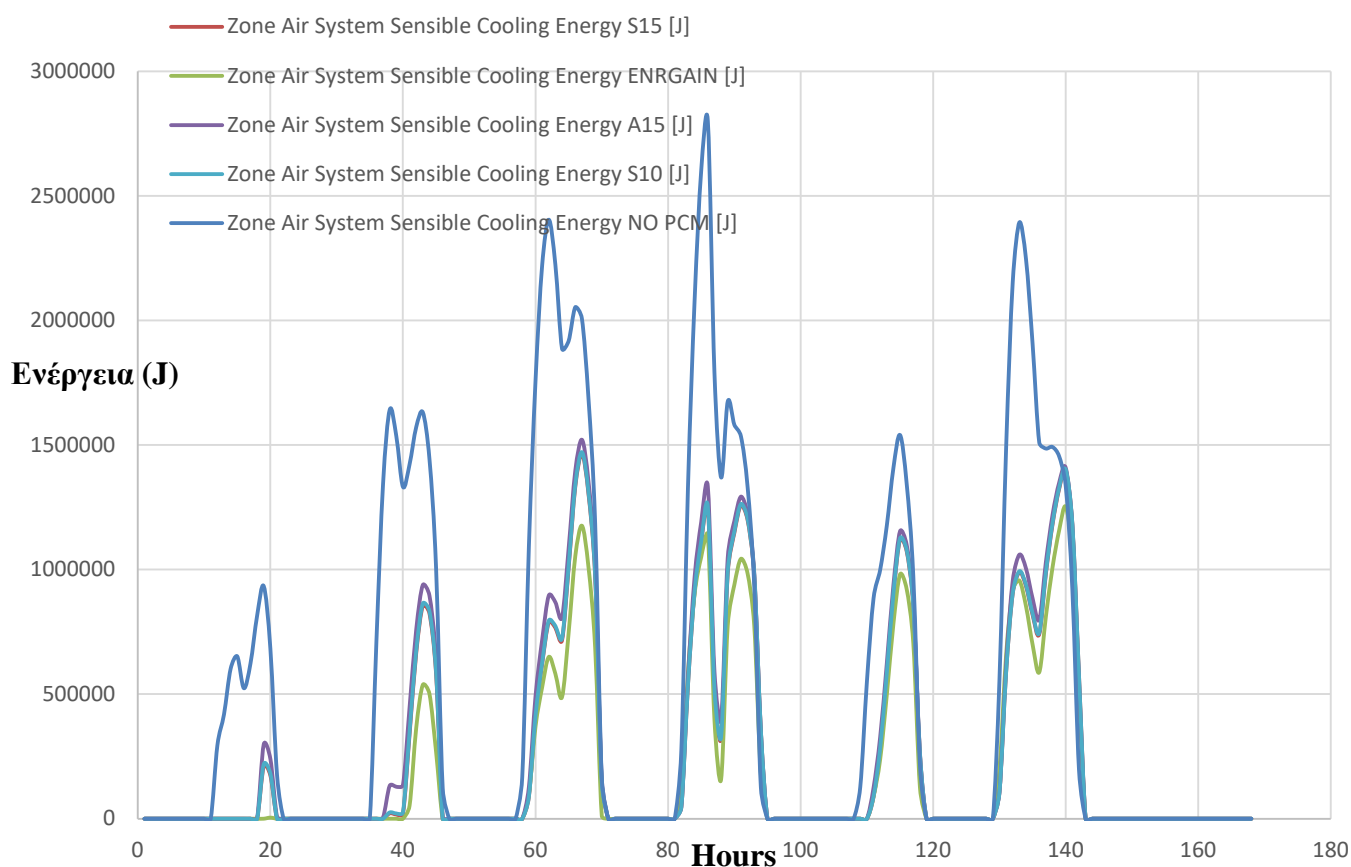
Διάγραμμα 5.5.2.1: Σύγκριση θερμοκρασιών με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιανουαρίου για την Βαρσοβία χωρίς HVAC



Διάγραμμα 5.5.2.2: Σύγκριση θερμοκρασιών με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιουλίου για την Βαρσοβία χωρίς HVAC



Διάγραμμα 5.5.2.3: Σύγκριση ενέργειας θέρμανσης με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιανουαρίου για την Βαρσοβία με HVAC

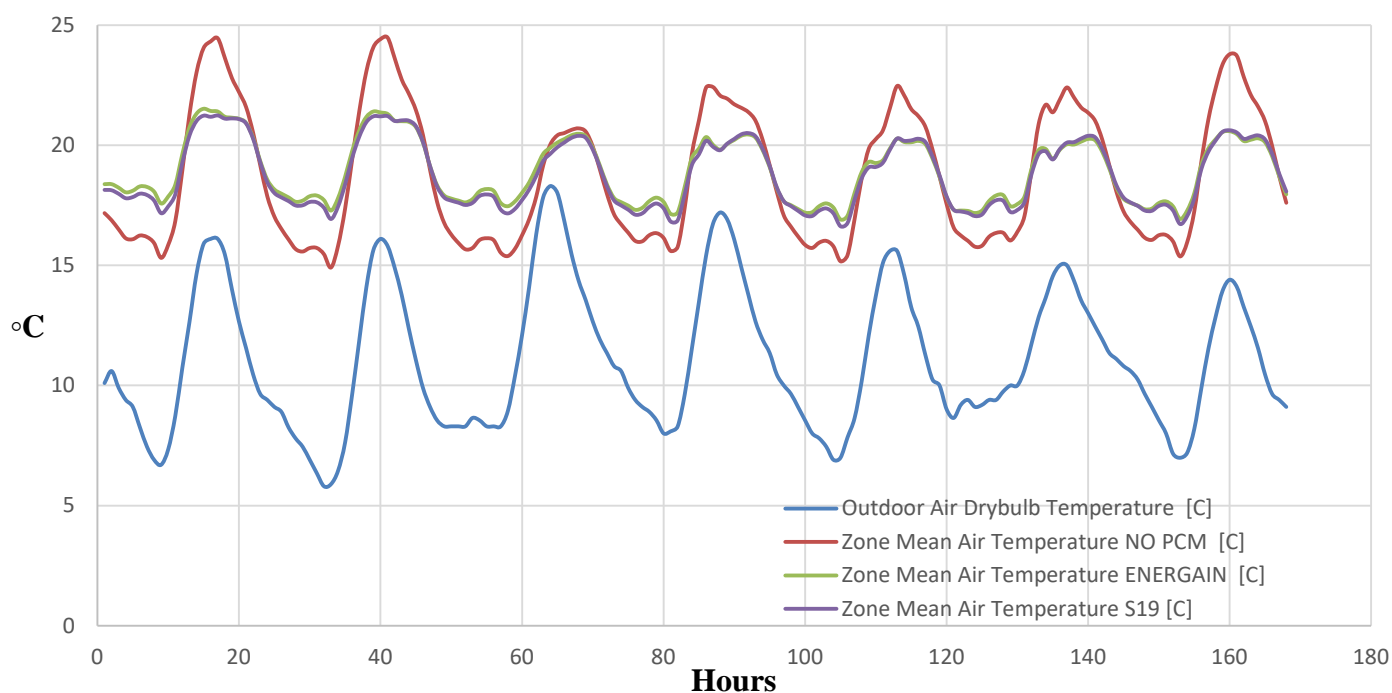


Διάγραμμα 5.5.2.4: Σύγκριση ενέργειας ψύξης με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιουλίου για την Βαρσοβία με HVAC

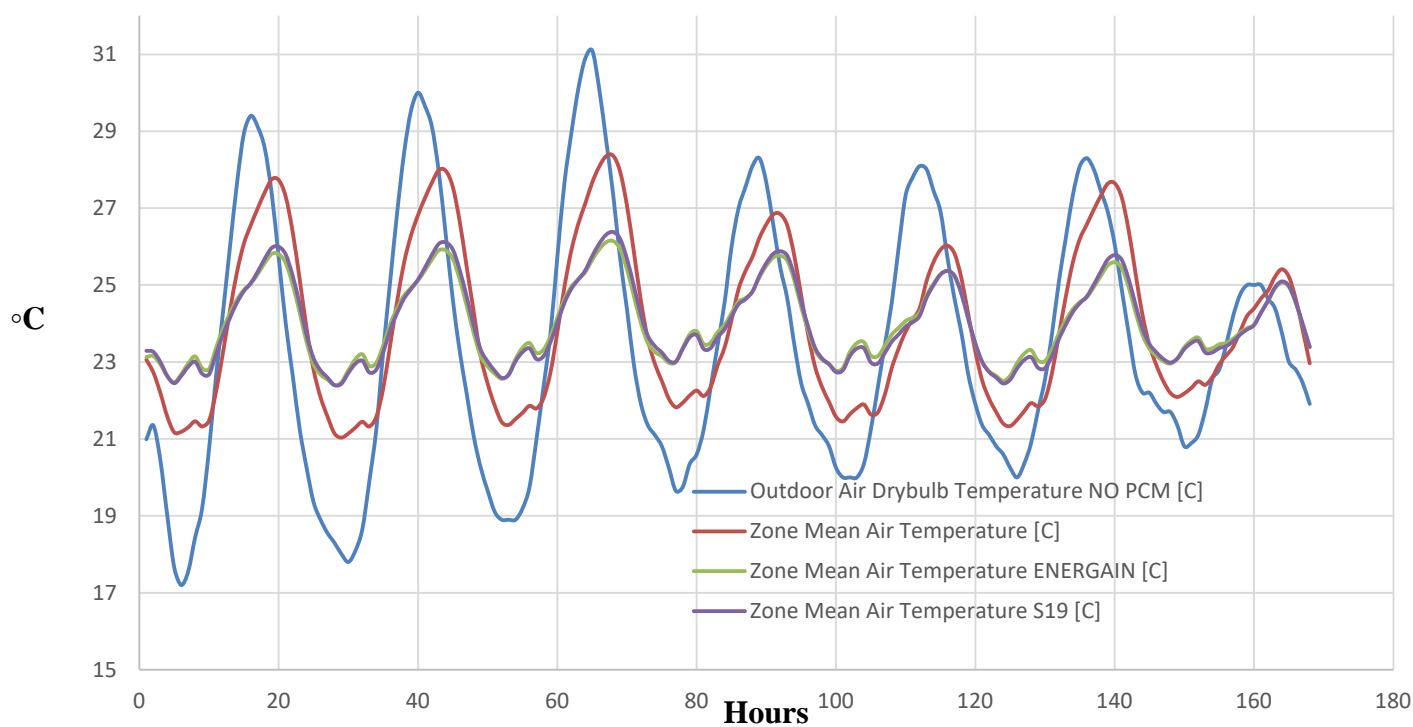
Οι καμπύλες θερμοκρασίας και ενέργειας για όλα τα διαφορετικά PCM εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά και για την Βαρσοβία με το Dupond Energain να εμφανίζει και πάλι τα πιο ιδανικά χαρακτηριστικά. Για αυτόν τον λόγο στα επόμενα διαγράμματα των κλιματικών περιοχών για την καλύτερη απεικόνιση των δεδομένων δίνεται κυρίως έμφαση στην γραφική απεικόνιση Dupond Energain καθώς οι γραφικές παραστάσεις για τα υπόλοιπα PCM είναι πρακτικά ίδιες.

Βέβαια στο κλίμα της Βαρσοβίας παρατηρείτε ότι κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου η γραμμές των διαφορετικών PCM σχεδόν συμπίπτουν με την γραμμή εσωτερικής θερμοκρασίας χωρίς PCM. Αυτό υποδεικνύει ότι σε ψυχρά κλίματα που δεν υπάρχουν σημαντικά ποσά θερμότητας για να απορροφηθούν τα υλικά αυτά δεν είναι αποδοτικά. Ίδια συμπεριφορά εμφανίζεται και στα διαγράμματα κατανάλωσης ενέργειας.

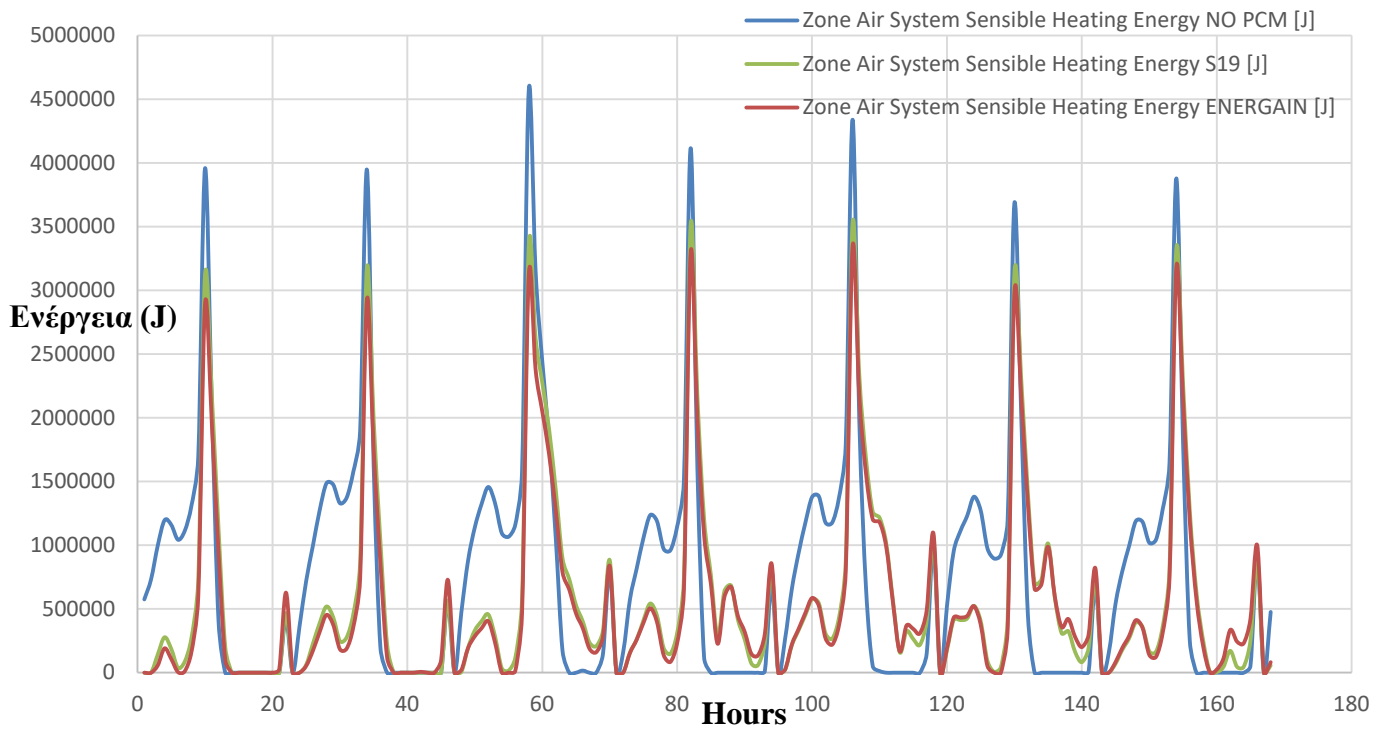
5.5.3 Ήπιο-Υγρό κλίμα (Βαλένθια)



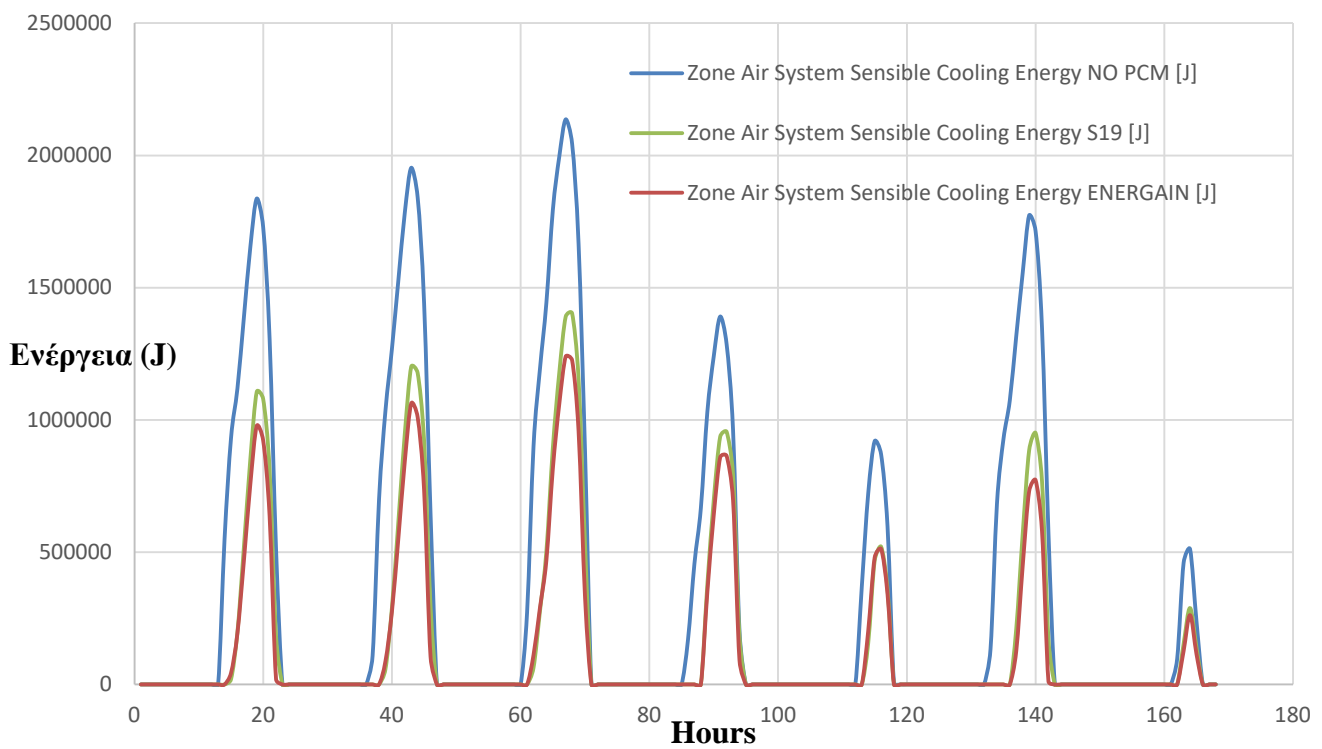
Διάγραμμα 5.5.3.1: Σύγκριση θερμοκρασιών με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιανουαρίου για την Βαλένθια χωρίς HVAC



Διάγραμμα 5.5.3.2: Σύγκριση θερμοκρασιών με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιουλίου για την Βαλένθια χωρίς HVAC

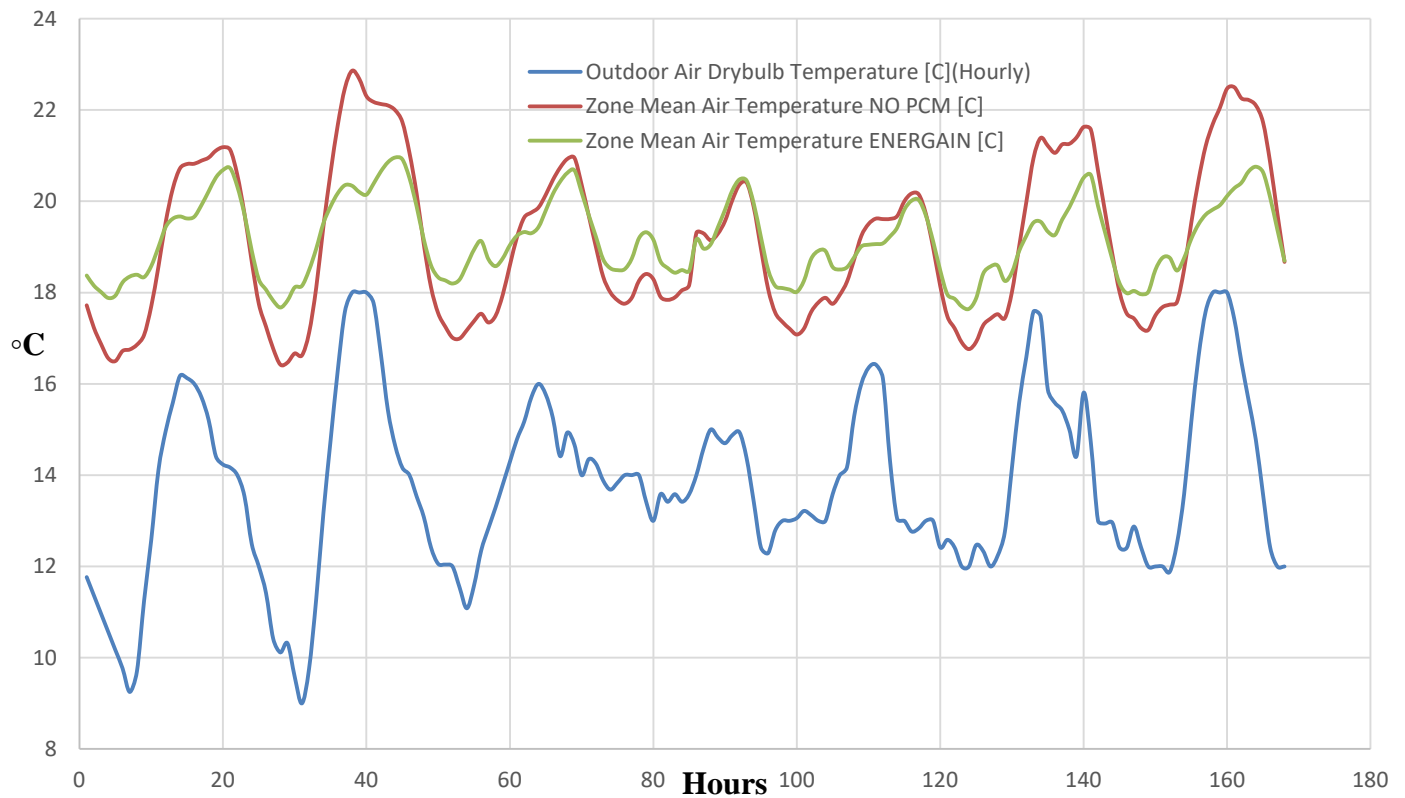


Διάγραμμα 5.5.3.3: Σύγκριση ενέργειας θέρμανσης με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιανουαρίου για την Βαλένθια με HVAC

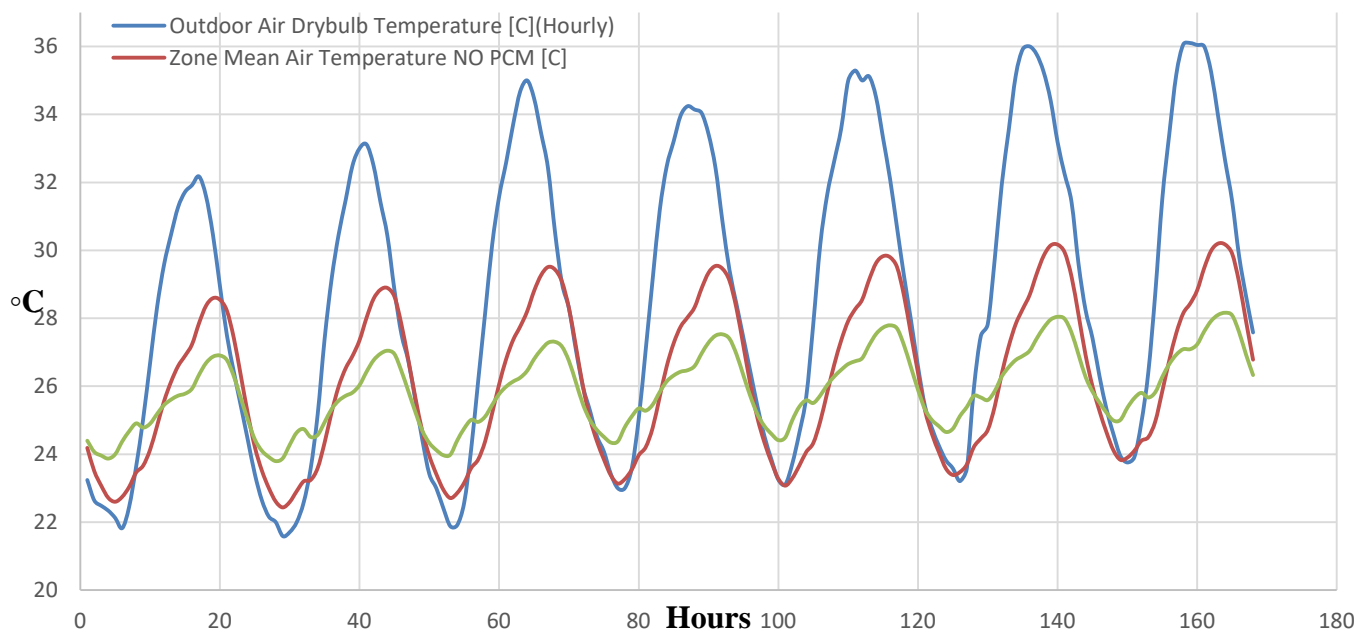


Διάγραμμα 5.5.3.4: Σύγκριση ενέργειας ψύξης με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιουλίου για την Βαλένθια με HVAC

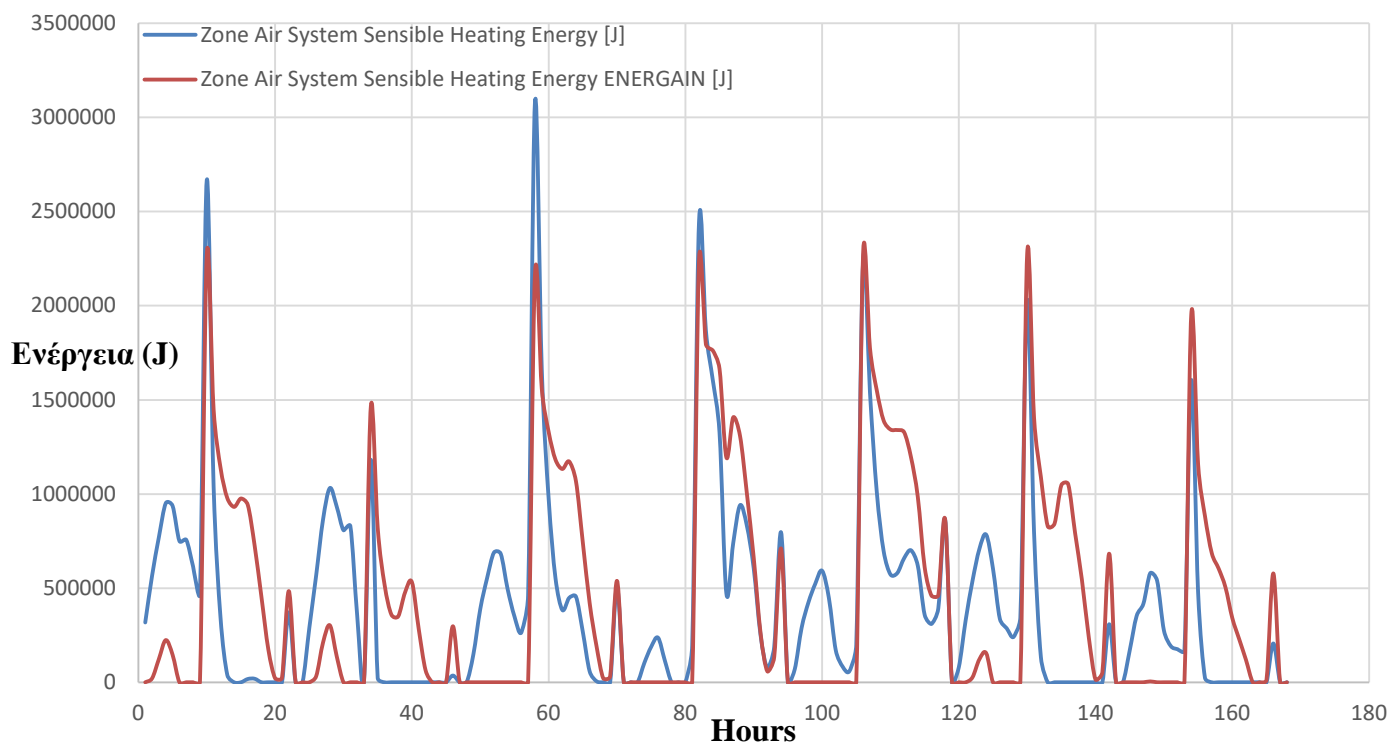
5.5.4 Θερμό-Ξηρό κλίμα (Κάιρο)



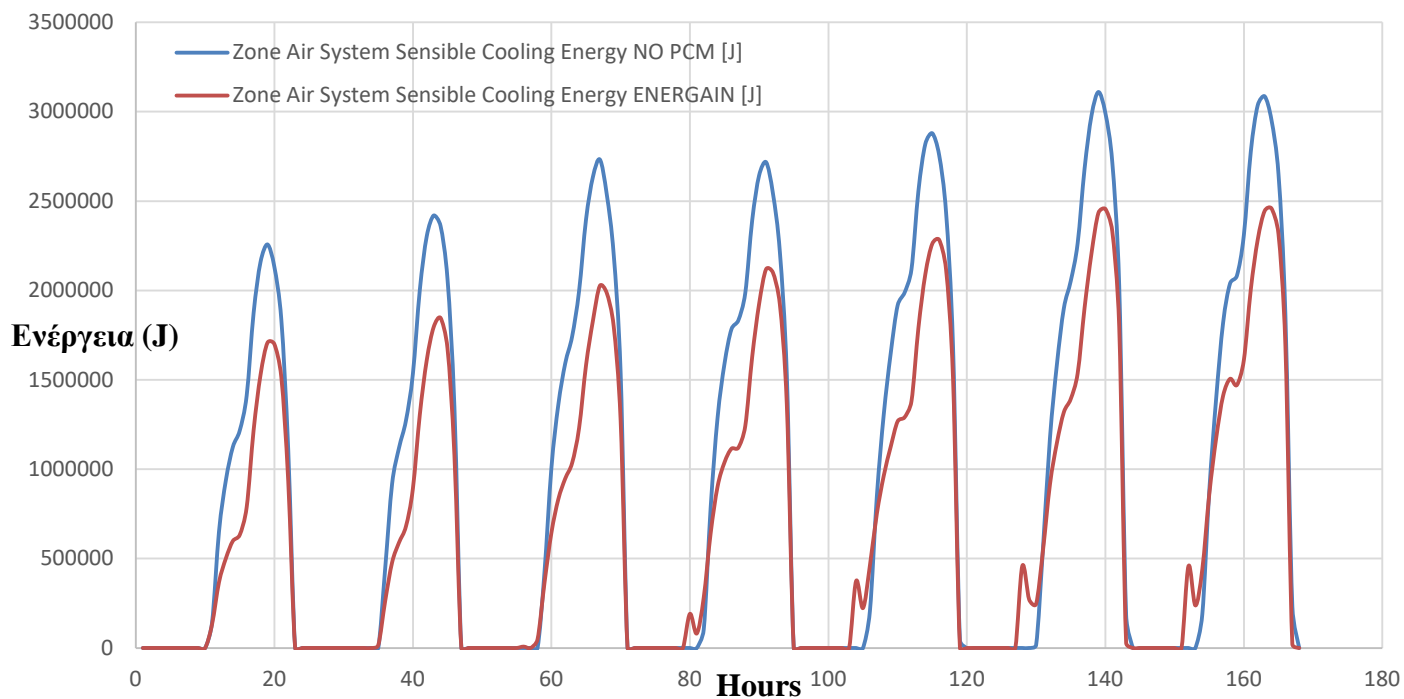
Διάγραμμα 5.5.4.1: Σύγκριση θερμοκρασιών με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιανουαρίου για το Κάιρο χωρίς HVAC



Διάγραμμα 5.5.4.2: Σύγκριση θερμοκρασιών με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιουλίου για το Κάιρο χωρίς HVAC



Διάγραμμα 5.5.4.3: Σύγκριση ενέργειας θέρμανσης με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιανουαρίου για το Κάιρο με HVAC



Διάγραμμα 5.5.4.4: Σύγκριση ενέργειας ψύξης με και χωρίς PCM για τις πρώτες 7 μέρες του Ιουλίου για το Κάιρο με HVAC

5.6 Ανακεφαλαίωση

Από το Διάγραμμα 5.5.1.2 και Διάγραμμα 5.5.1.3 για τα Χανιά παρατηρείται ότι η χρήση στρώματος PCM εξομαλύνει τις ακραίες τιμές θερμοκρασίας στο εσωτερικό του σπιτιού με ιδιαίτερα αυξημένη απόδοση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Επίσης είναι σημαντική η μείωση των ακραίων φορτίων (peak loads) ιδιαίτερα για την ενέργεια θέρμανσης όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 5.5.1.4 και Διάγραμμα 5.5.1.5 γεγονός πολύ σημαντικό καθώς αυτά τα ακραία φορτία είναι που χρεώνονται ιδιαίτερα αυξημένα όπως θα παρουσιαστεί και στο επόμενο κεφάλαιο.

Στην Βαρσοβία η μέση θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος τον χειμώνα είναι 1 βαθμός κελσίου ενώ στο εσωτερικό του σπιτιού χωρίς HVAC στους 13. Το καλοκαίρι ωστόσο μέσα στο σπίτι είναι 23. Τα PCM είναι γενικά κατασκευασμένα στο να αποθηκεύουν την περίσσεια θερμότητα με αποτέλεσμα κανένα να μην δουλεύει σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών του χειμώνα καθώς όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 10 η προσθήκη PCM αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Δοκιμάστηκαν PCM με θερμοκρασία αλλαγής φάσης από 22 έως 10 βαθμούς κελσίου. Ωστόσο το καλοκαίρι έχουμε εξοικονόμηση ενέργειας 30% με το ENERGAİN καθώς αυτό έχει θερμοκρασία αλλαγής φάσης 22 βαθμούς που είναι και η μέση θερμοκρασία του σπιτιού.

Στην Βαλένθια η μέση θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος τον χειμώνα είναι 13 βαθμούς κελσίου ενώ στο εσωτερικό του σπιτιού χωρίς HVAC στους 20. Το καλοκαίρι ωστόσο μέσα στο σπίτι είναι 24. Τον χειμώνα καθώς και το καλοκαίρι το ENERGAİN και πάλι παρουσιάζει την λιγότερη κατανάλωση ενέργειας καθώς η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του είναι η πιο κοντινή στις θερμοκρασίες του εσωτερικού του σπιτιού. Γενικά τα PCM συμφέρει να εγκατασταθούν σε μεσογειακά, θερμά και γενικά ξερά κλίματα

Στο Κάιρο η μέση θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος τον χειμώνα είναι 14 βαθμούς κελσίου ενώ στο εσωτερικό του σπιτιού χωρίς HVAC στους 19. Το καλοκαίρι ωστόσο μέσα στο σπίτι είναι 26. Η απόδοση των υλικών PCM στο Κάιρο είναι η καλύτερη καθώς αυτό είναι το πιο ξηρό και θερμό κλίμα από τα 4 που εξετάστηκαν.

Σχετικά με την εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι κατά την διάρκεια του καλοκαιριού το Κάιρο η Βαλένθια και τα Χανιά εμφανίζουν την μεγαλύτερη μείωση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου 2 °C χάρις την βοήθεια του στρώματος PCM. Ακολουθεί η Βαρσοβία με μείωση θερμοκρασίας 1 °C. Ωστόσο τον χειμώνα τα PCM εμφανίζουν εξομάλυνση θερμοκρασίας περίπου 1 °C στο Κάιρο στη Βαλένθια και στα Χανιά ενώ στην Βαρσοβία δεν έχουν κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζουν και τα αντίστοιχα διαγράμματα για την ενέργεια με την μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας να εμφανίζεται στα πιο θερμά κλίματα και κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα PCM είναι κατασκευασμένα για να απορροφούν την αυξημένη θερμότητα του χώρου με το να την αποθηκεύουν και όταν η θερμοκρασία αρχίσει να μειώνεται αυτήν την αποθηκευμένη ενέργεια την αποδίδουν στον περιβάλλον χώρο με αποτέλεσμα να αυξάνουν την θερμοκρασία του. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι σε κρύα κλίματα όπως η Βαρσοβία στα οποία δεν υπάρχει σημαντική θερμική ενέργεια για να απορροφηθεί τα PCM δεν θα έχουν ουσιαστικό αποτέλεσμα. Οπότε τα PCM συμφέρει να εγκατασταθούν σε μεσογειακά, θερμά και γενικά ξερά κλίματα για να έχουν την καλύτερη δυνατή απόδοση.

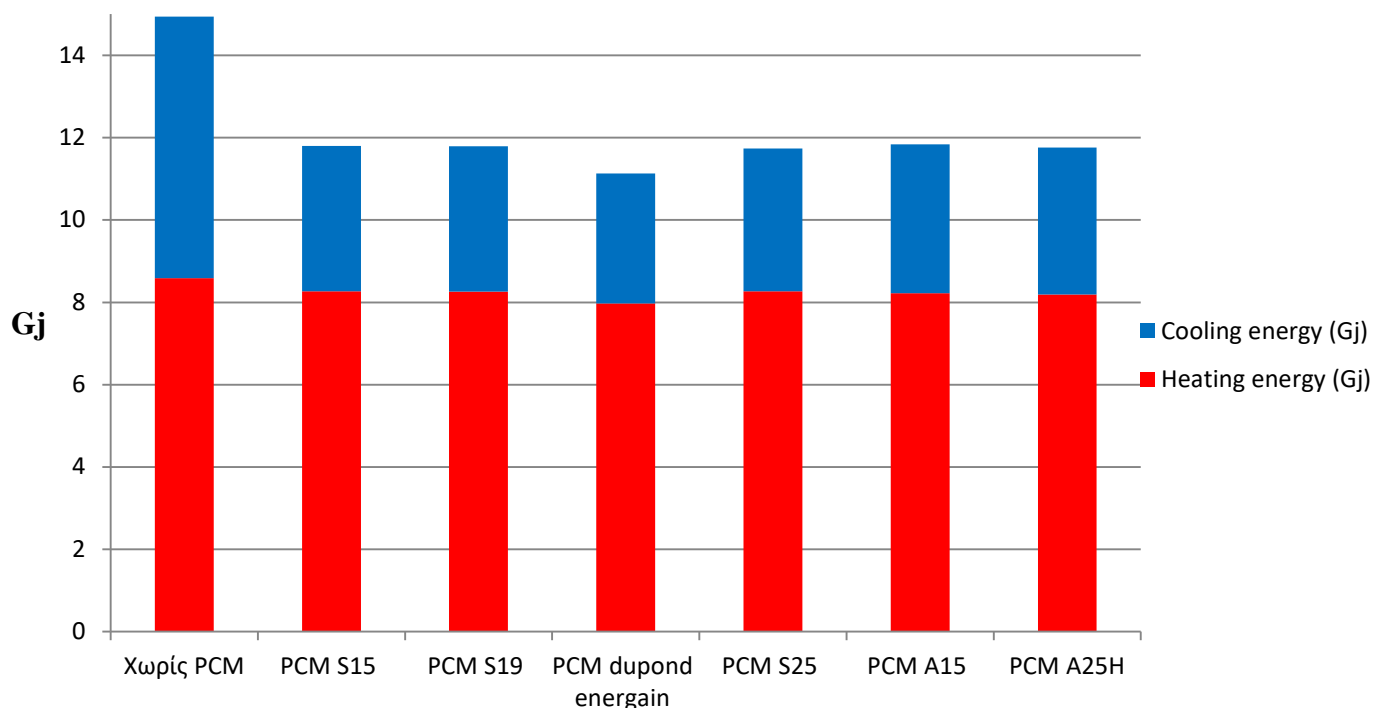
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συζήτηση και Οικονομική Σύγκριση των Αποτελεσμάτων

6.1 Συγκριτική καταγραφή της χρησιμοποιούμενης ενέργειας με και χωρίς PCM

Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες καθώς και τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης και ψύξης του μοντέλου κτιρίου με HVAC στο Energy plus με μοντελοποίηση όλων των διαφορετικών PCM για κάθε κλίμα.

| Αποτελέσματα διαφορετικών PCM ενδιάμεσα στο εσωτερικό των τοίχων και στην οροφή για ένα χρόνο. | | Heating energy (Gj) | Cooling energy (Gj) |
|--|----------|---------------------|---------------------|
| Αρχικό μοντέλο χωρίς PCM | | 8,59 | 6,35 |
| PCM S15 (με 15 C phase change temperature) | Άλας | 8,27 | 3,53 |
| PCM S19 (με 19 C phase change temperature) | Άλας | 8,26 | 3,53 |
| PCM dupond energain (με 22 C phase change temperature) | Παραφίνη | 7,97 | 3,16 |
| PCM S25 (με 25 C phase change temperature) | Άλας | 8,27 | 3,47 |
| PCM A15 (με 15 C phase change temperature) | Οργανικό | 8,22 | 3,62 |
| PCM A25H (με 25 C phase change temperature) | Οργανικό | 8,19 | 3,57 |

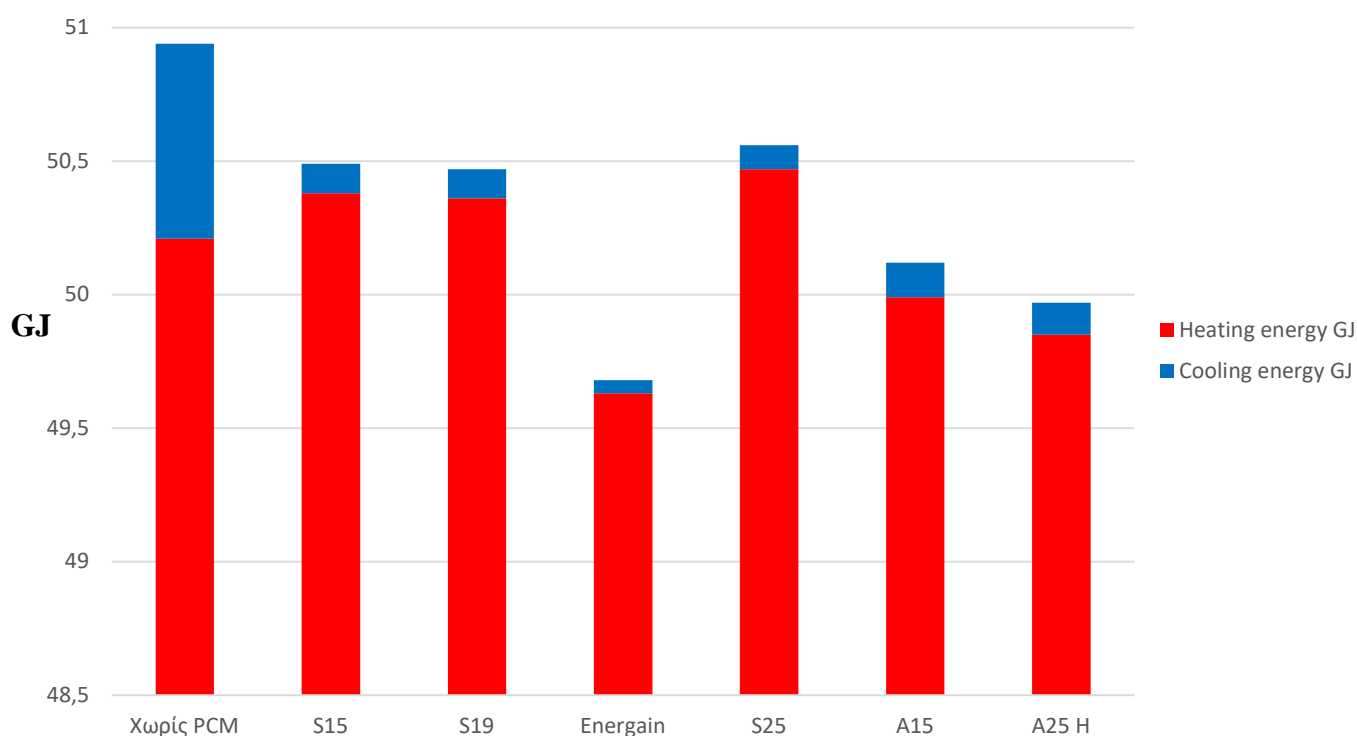
Πίνακας 6.1.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων κατανάλωσης ενέργειας για την ανάδειξη του βέλτιστου PCM για το κλίμα Χανίων



Διάγραμμα 6.1.1: Συγκριτική καταγραφή ενέργειας θέρμανσης και ψύξης για όλο τον χρόνο για κάθε PCM στο κλίμα Χανίων.

| Αποτελέσματα διαφορετικών PCM ενδιάμεσα στο εσωτερικό των τοίχων και στην οροφή για ένα χρόνο. | | Heating energy GJ | Cooling energy GJ |
|--|----------|-------------------|-------------------|
| Χωρίς PCM | | 50,21 | 0,73 |
| PCM S15 (με 15 C phase change temperature) | Άλας | 50,38 | 0,11 |
| PCM S19 (με 19 C phase change temperature) | Άλας | 50,36 | 0,11 |
| PCM dupond energain (με 22 C phase change temperature) | Παραφίνη | 49,63 | 0,05 |
| PCM S25 (με 25 C phase change temperature) | Άλας | 50,47 | 0,09 |
| PCM A15 (με 15 C phase change temperature) | Οργανικό | 49,99 | 0,13 |
| PCM A25H (με 25 C phase change temperature) | Οργανικό | 49,85 | 0,12 |

Πίνακας 6.1.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων κατανάλωσης ενέργειας για την ανάδειξη του βέλτιστου PCM για το κλίμα Βαρσοβίας

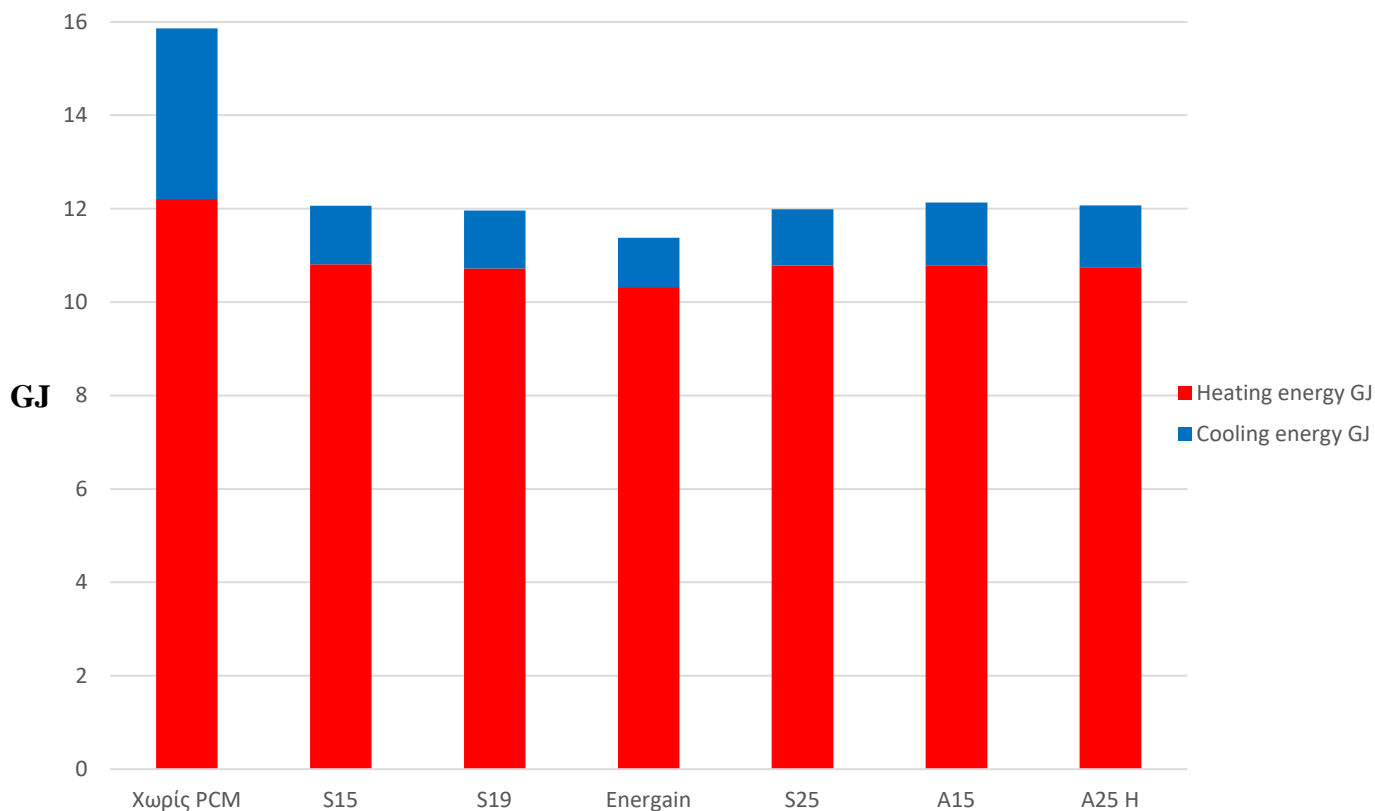


Διάγραμμα 6.1.2: Συγκριτική καταγραφή ενέργειας θέρμανσης και ψύξης για όλο τον χρόνο για κάθε PCM στο κλίμα Βαρσοβίας.

Η Βαρσοβία είναι το μοναδικό από τα 4 κλίματα που εξετάστηκαν στο οποίο μετά την προσθήκη ορισμένων PCM η κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης είναι μεγαλύτερη από την αρχική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα μέρος της ενέργειας θέρμανσης που καταναλώνεται απορροφάται από τα PCM με αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερη κατανάλωση ενέργειας για την θέρμανση του κτιρίου.

| Αποτελέσματα διαφορετικών PCM ενδιάμεσα στο εσωτερικό των τοίχων και στην οροφή για ένα χρόνο. | | Heating energy GJ | Cooling energy GJ |
|--|----------|-------------------|-------------------|
| Χωρίς PCM | | 12,21 | 3,65 |
| PCM S15 (με 15 C phase change temperature) | Άλας | 10,81 | 1,25 |
| PCM S19 (με 19 C phase change temperature) | Άλας | 10,72 | 1,24 |
| PCM dupond energain (με 22 C phase change temperature) | Παραφίνη | 10,32 | 1,06 |
| PCM S25 (με 25 C phase change temperature) | Άλας | 10,78 | 1,21 |
| PCM A15 (με 15 C phase change temperature) | Οργανικό | 10,79 | 1,34 |
| PCM A25H (με 25 C phase change temperature) | Οργανικό | 10,75 | 1,32 |

Πίνακας 6.1.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων κατανάλωσης ενέργειας για την ανάδειξη του βέλτιστου PCM για το κλίμα Βαλένθιας

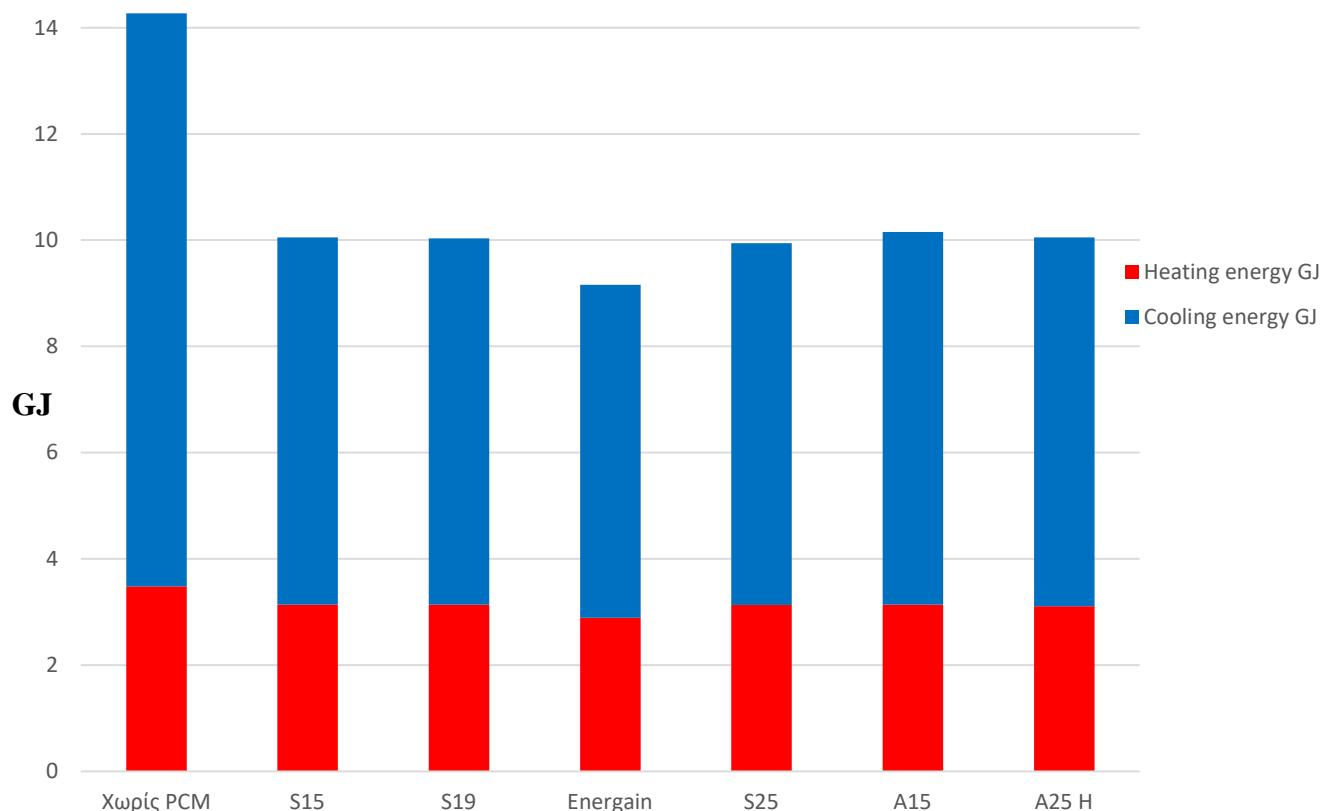


Διάγραμμα 6.1.3: Συγκριτική καταγραφή ενέργειας θέρμανσης και ψύξης για όλο τον χρόνο για κάθε PCM στο κλίμα Βαλένθιας.

Η Βαλένθια καθώς και τα Χανιά εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά κατανάλωσης ενέργειας καθώς χαρακτηρίζονται ως εύκρατα κλίματα.

| Αποτελέσματα διαφορετικών PCM ενδιάμεσα στο εσωτερικό των τοίχων και στην οροφή για ένα χρόνο. | | Heating energy GJ | Cooling energy GJ |
|--|----------|-------------------|-------------------|
| Χωρίς PCM | | 3,48 | 10,79 |
| PCM S15 (με 15 C phase change temperature) | Άλας | 3,14 | 6,91 |
| PCM S19 (με 19 C phase change temperature) | Άλας | 3,14 | 6,89 |
| PCM dupond energain (με 22 C phase change temperature) | Παραφίνη | 2,89 | 6,27 |
| PCM S25 (με 25 C phase change temperature) | Άλας | 3,13 | 6,81 |
| PCM A15 (με 15 C phase change temperature) | Οργανικό | 3,14 | 7,01 |
| PCM A25H (με 25 C phase change temperature) | Οργανικό | 3,11 | 6,94 |

Πίνακας 6.1.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων κατανάλωσης ενέργειας για την ανάδειξη του βέλτιστου PCM για το κλίμα Κάιρο



Διάγραμμα 6.1.4: Συγκριτική καταγραφή ενέργειας θέρμανσης και ψύξης για όλο τον χρόνο για κάθε PCM στο κλίμα Κάιρο.

Το Κάιρο είναι το μοναδικό από τα 4 κλίματα που εξετάστηκαν στο οποίο η κατανάλωση ενέργειας ψύξης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια θέρμανσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το Κάιρο είναι το πιο ξηρό και θερμό κλίμα από τα 4 που εξετάστηκαν με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ιδιαίτερη απαίτηση για κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης.

6.2 Υπολογισμός εξοικονόμησης ενέργειας παρουσία PCM

Από το Πίνακα 6.1.1 για τα Χανιά προκύπτουν τα εξής γενικά αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας: 7% μείωση στην ενέργεια θέρμανσης και 48% μείωση στην ενέργεια ψύξης.

Από το Πίνακα 6.1.2 για την Βαρσοβία προκύπτουν τα εξής γενικά αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας: 1% μείωση στην ενέργεια θέρμανσης και 93% μείωση στην ενέργεια ψύξης.

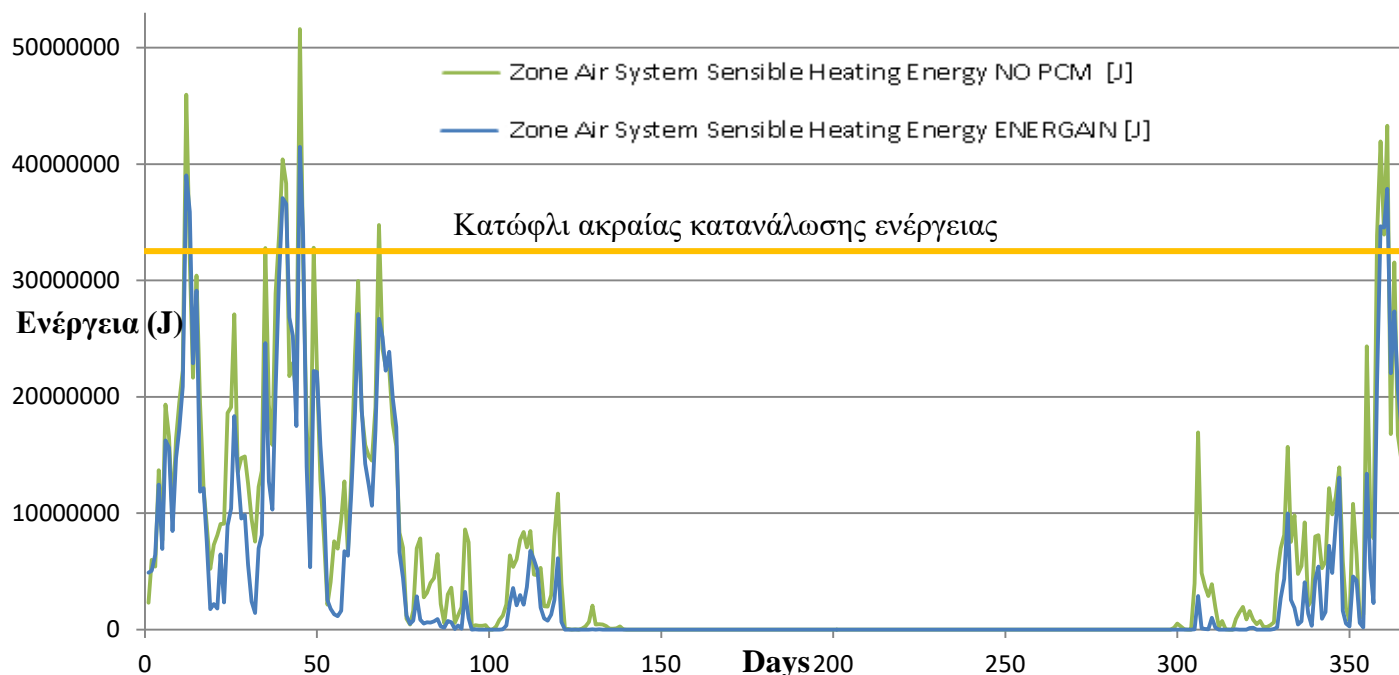
Από το Πίνακα 6.1.3 για την Βαλένθια προκύπτουν τα εξής γενικά αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας: 16% μείωση στην ενέργεια θέρμανσης και 71% μείωση στην ενέργεια ψύξης.

Από το Πίνακα 6.1.4 για το Κάιρο προκύπτουν τα εξής γενικά αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας: 17% μείωση στην ενέργεια θέρμανσης και 42% μείωση στην ενέργεια ψύξης.

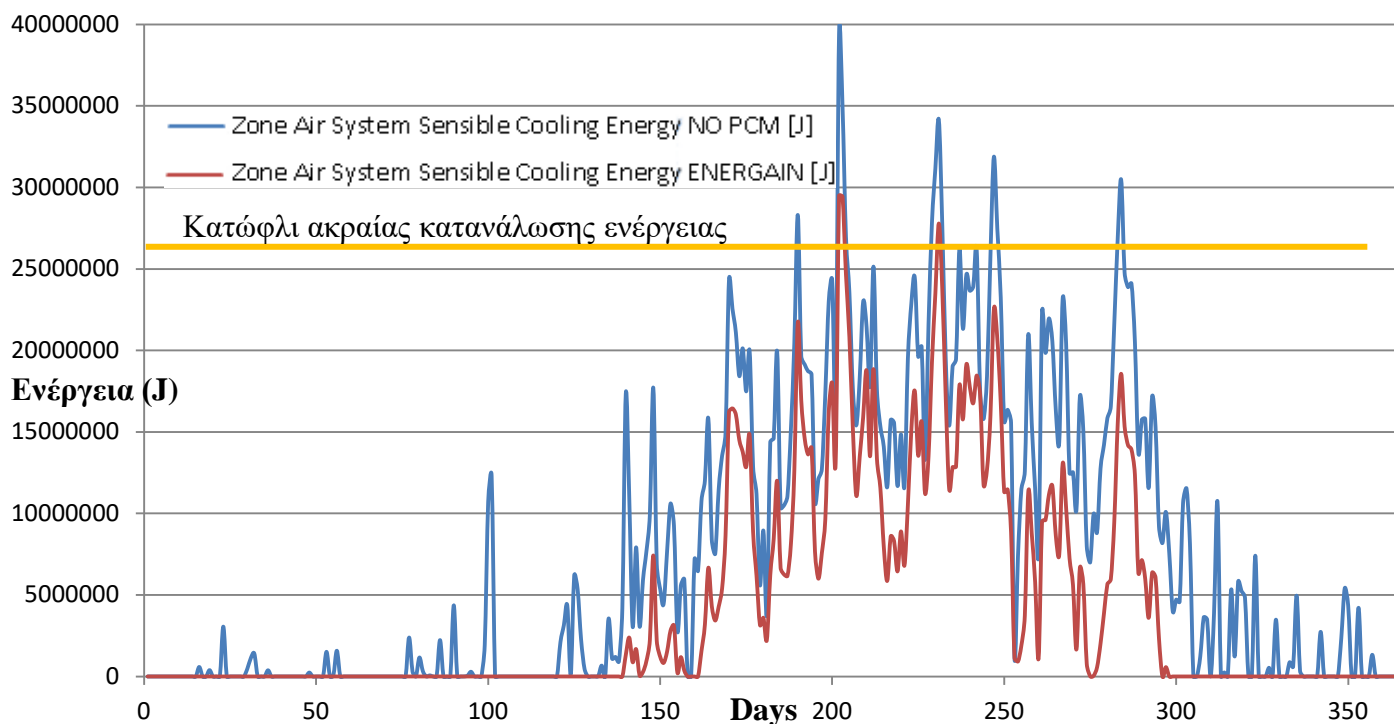
Από τα παραπάνω δεδομένα επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι τα PCM εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση λειτουργίας κατά την διάρκεια των θερμών μηνών του έτους. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης και ψύξης με σκοπό τον υπολογισμό ετήσιου οικονομικού κόστους εξοικονόμησης ενέργειας με μείωση των ακραίων φορτίων.

6.3 Υπολογισμός ετήσιου οικονομικού κόστους εξοικονόμησης ενέργειας με μείωση των ακραίων φορτίων

Από του πίνακες 6.1.1 έως 6.1.4 αναδείχθηκε το PCM Dupond Energain ως το πιο αποδοτικό σε κάθε κλιματικό σενάριο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης και ψύξης μόνο με αυτό το PCM με σκοπό να γίνει υπολογισμός ετήσιου οικονομικού κόστους εξοικονόμησης ενέργειας.



Διάγραμμα 6.3.1: Κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης για ένα χρόνο στα Χανιά



Διάγραμμα 6.3.2: Κατανάλωση ενέργειας ψύξης για ένα χρόνο στα Χανιά

Οι χρεώσεις στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

A) Χρεώσεις βασικής λειτουργίας συσκευών. Αυτού του είδους χρέωση είναι η πιο κοινή καθώς προκύπτει από την φυσιολογική λειτουργία των συσκευών καθημερινά. Τέτοιου είδους λειτουργίας των συσκευών χρεώνεται με μια τυπική τιμή των 0,1€/kWh.

B) Χρεώσεις ακραίων φορτίων στην λειτουργία συσκευών. Αυτού του είδους χρέωση προκύπτει όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση για ενέργεια σε σύντομο χρονικό διάστημα. Παράδειγμα τέτοιας χρέωσης είναι οι ακραίες ψυχρές ή θερμές μέρες του χρόνου στις οποίες τα συστήματα κλιματισμού πρέπει να ‘δουλέψουν’ πολύ περισσότερο από μια τυπική μέρα του χρόνου για να διατηρήσουν το κτίριο στις σταθερές θερμοκρασίες που έχουν οριστεί. Τέτοιου είδους ακραίο φορτίο καταγράφεται σαν μια απότομη κορυφή στο διάγραμμα ενέργειας – χρόνου και χρεώνεται με μια τυπική τιμή των 10€ /kWh. Ενώ ξεχωρίζουν από την A) κατηγορία στα διαγράμματα 6.3.1 έως 6.3.8 καθώς ξεπερνάνε μια τιμή κατώφλι για ακραία κατανάλωση ενέργειας που ορίζεται για κάθε περιοχή ξεχωριστά

Για τον υπολογισμό του ετήσιου οικονομικού κόστους κατανάλωσης ενέργειας από την συνολική ενέργεια για θέρμανση και ψύξη χωρίς PCM και με PCM ξεχωριστά από τους πίνακες 6.1.1 έως 6.1.4 αφαιρείται το άθροισμα των ακραίων φορτίων από τα διαγράμματα 6.3.1 έως 6.3.8. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν η ενέργεια βασικής λειτουργίας η οποία πολλαπλασιάζεται με 0,1€ /kWh για τον υπολογισμό της τιμής βασικής χρέωσης και η ενέργεια ακραίων φορτίων η οποία πολλαπλασιάζεται με 10 €/kWh για τον υπολογισμό της τιμής ακραίων φορτίων. Το άθροισμα των δύο αυτών ποσών συγκρίνεται με ή και χωρίς την χρήση στρώματος PCM για να βρεθεί η οικονομική απόδοση των PCM υλικών. Τα οικονομικά αποτελέσματα απεικονίζονται στους παρακάτω πίνακες 6.3.1 έως 6.3.8 για κάθε διαφορετικό κλίμα.

| | |
|--|--------------------|
| Χρήση ετήσιας ενέργειας ψύξης | 6,35 GJ ή 1764 kWh |
| Χρήση ετήσιας ενέργειας θέρμανσης | 8,59 GJ ή 2386 kWh |

Πίνακας 6.3.1: Ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας χωρίς PCM όπως προέκυψαν από το Energy plus.

| | | Rate | Τιμή |
|--|--|---------------|-----------------|
| Ζήτηση Peak ενέργειας ψύξης | $(0,028 + 0,039 + 0,034 + 0,031 + 0,031)GJ = 44 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 440 € |
| Ζήτηση Peak ενέργειας θέρμανσης | $(0,046 + 0,033 + 0,052 + 0,033 + 0,035)GJ = 55 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 550 € |
| Βασική ενέργεια ψύξης | $(1764 - 44) = 1720 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 172 € |
| Βασική ενέργεια θέρμανσης | $(2386 - 55) = 2331 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 233 € |
| | | Σύνολο | ~ 1395 € |

Πίνακας 6.3.2: Κατανάλωση ετήσιας ενέργειας και ακραία φορτία χωρίς PCM στα Χανιά

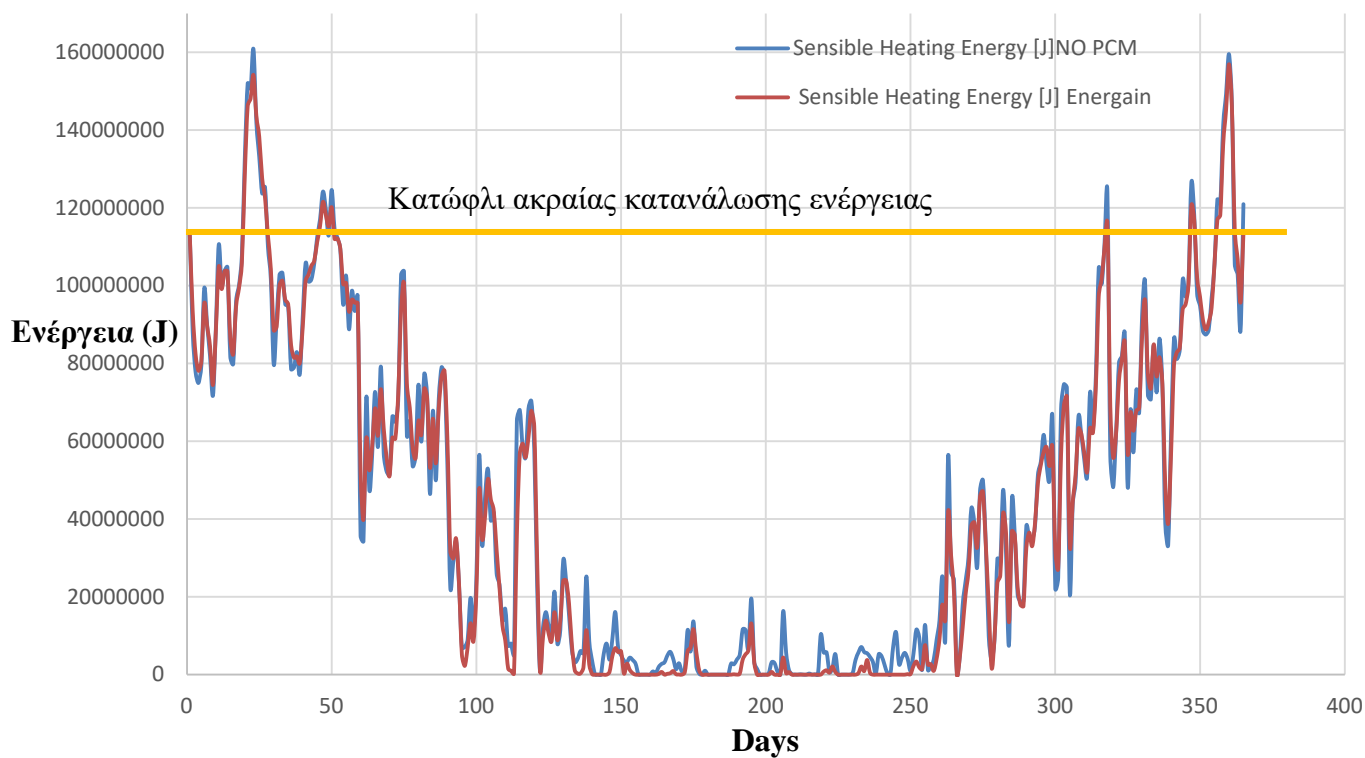
| | |
|----------------------------------|--------------------|
| Χρήση ενέργειας ψύξης | 3,16 GJ ή 877 kWh |
| Χρήση ενέργειας θέρμανσης | 7,97 GJ ή 2213 kWh |

Πίνακας 6.3.3: Ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας με PCM όπως προέκυψαν από το Energy plus.

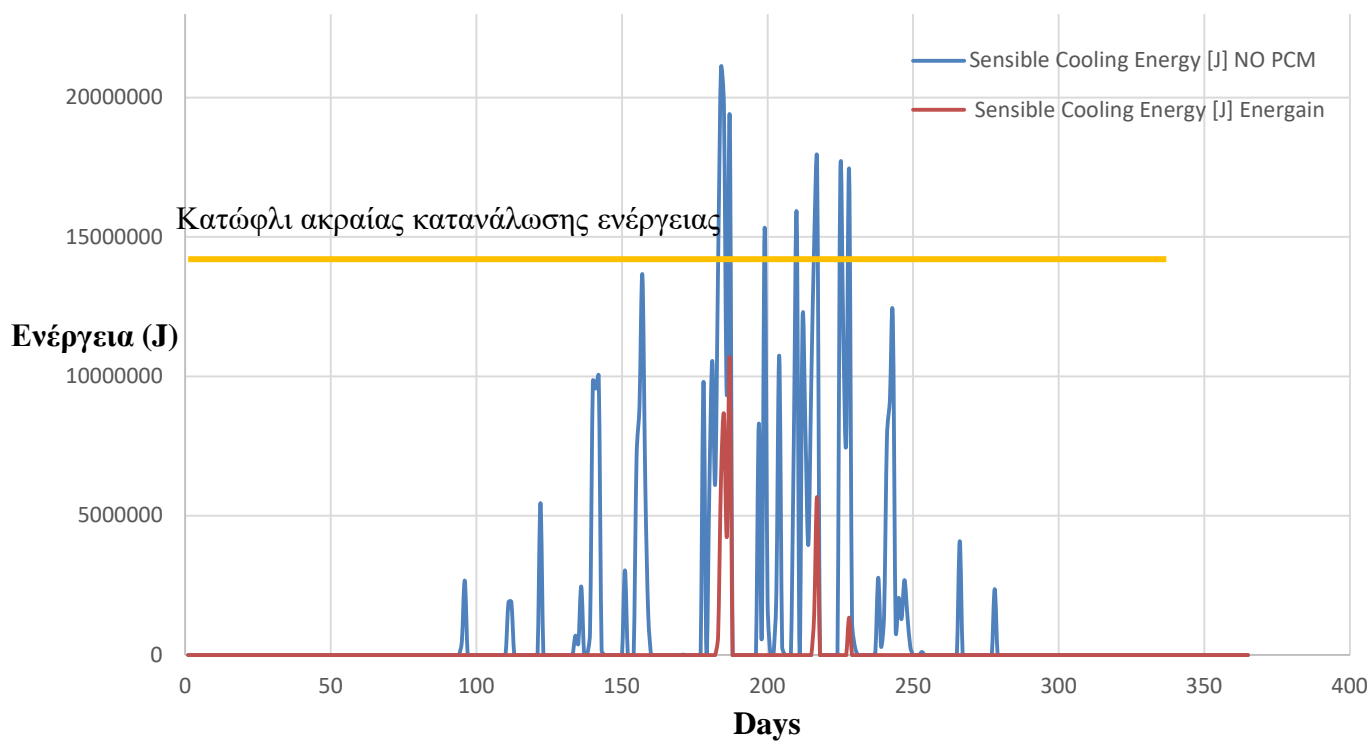
| | | Rate | Τιμή |
|--|--|---------------|-----------------|
| Ζήτηση Peak ενέργειας ψύξης | $(0,021 + 0,029 + 0,028 + 0,023 + 0,019)GJ = 33 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 330 € |
| Ζήτηση Peak ενέργειας θέρμανσης | $(0,039 + 0,025 + 0,041 + 0,022 + 0,026)GJ = 42 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 420 € |
| Βασική ενέργεια ψύξης | $(877 - 33) = 844 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 84 € |
| Βασική ενέργεια θέρμανσης | $(2213 - 42) = 2171 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 217 € |
| | | Σύνολο | ~ 1051 € |

Πίνακας 6.3.4: Κατανάλωση ετήσιας ενέργειας και ακραία φορτία με το πιο ιδανικό PCM (Dupond Energain) στα Χανιά

- Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας ψύξης από την εξομάλυνση των ακραίων φορτίων ίση με 25%
- Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης από την εξομάλυνση των ακραίων φορτίων ίση με 24%
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας ψύξης ίση με 51%
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας θέρμανσης ίση με 7%
- Απόδοση χρηματικής επένδυσης ίση με 25%



Διάγραμμα 6.3.3: Κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης για ένα χρόνο στη Βαρσοβία



Διάγραμμα 6.3.4: Κατανάλωση ενέργειας ψύξης για ένα χρόνο στη Βαρσοβία

| | |
|--|----------------------|
| Χρήση ετήσιας ενέργειας ψύξης | 0,73 GJ ή 203 kWh |
| Χρήση ετήσιας ενέργειας θέρμανσης | 50,21 GJ ή 13947 kWh |

Πίνακας 6.3.5: Ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας χωρίς PCM όπως προέκυψαν από το Energy plus.

| | | Rate | Τιμή |
|--|---|---------------|-----------------|
| Ζήτηση Peak ενέργειας ψύξης | $(0,021 + 0,019 + 0,015 + 0,016 + 0,018 + 0,017) \text{GJ}$ = 25 kWh | ~ 10 € | ~ 250 € |
| Ζήτηση Peak ενέργειας θέρμανσης | $(0,16 + 0,12 + 0,13 + 0,16) \text{GJ} = 158 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 1580 € |
| Βασική ενέργεια ψύξης | $(203 - 25) = 178 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 18 € |
| Βασική ενέργεια θέρμανσης | $(13947 - 158) = 13789 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 1379 € |
| | | Σύνολο | ~ 3227 € |

Πίνακας 6.3.6: Κατανάλωση ετήσιας ενέργειας και ακραία φορτία χωρίς PCM στη Βαρσοβία

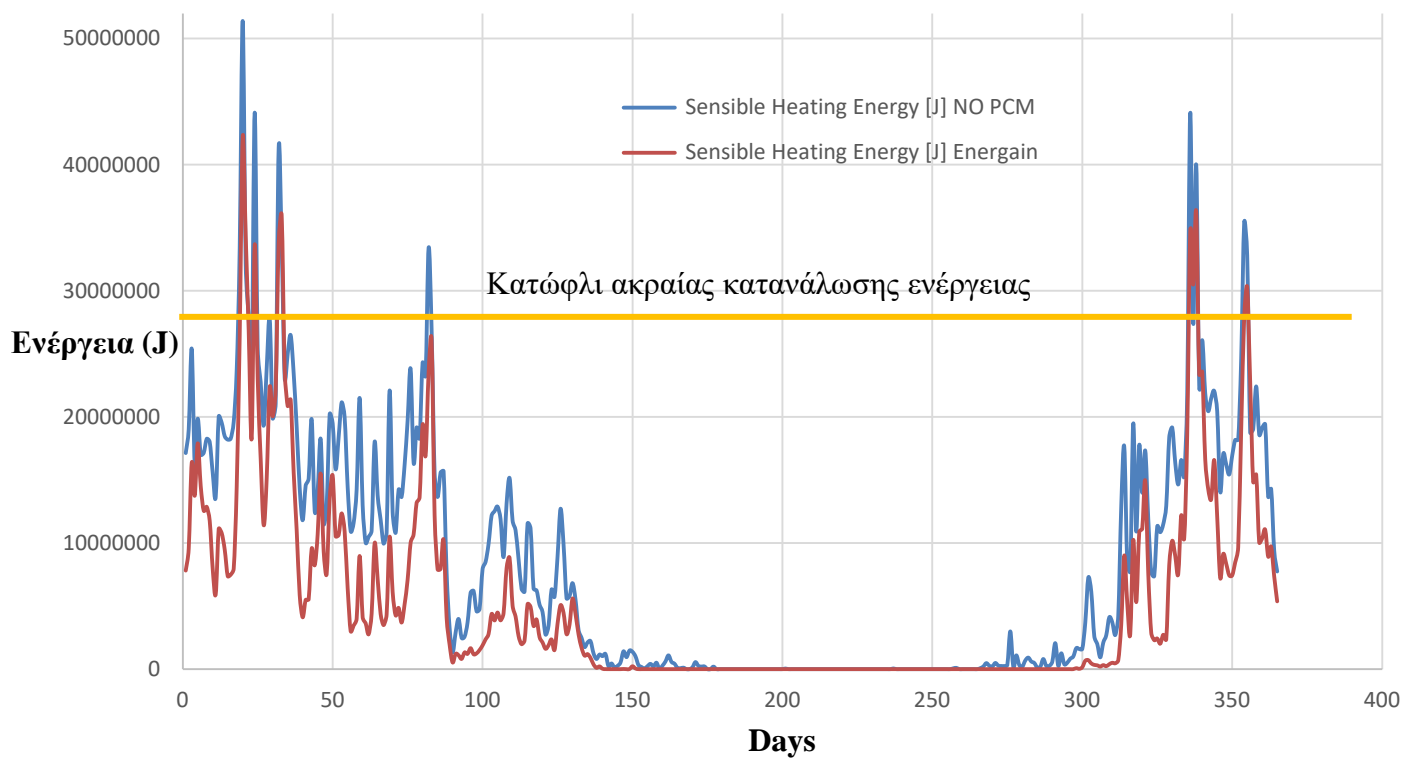
| | |
|----------------------------------|----------------------|
| Χρήση ενέργειας ψύξης | 0,05 GJ ή 14 kWh |
| Χρήση ενέργειας θέρμανσης | 49,63 GJ ή 13786 kWh |

Πίνακας 6.3.7: Ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας με PCM όπως προέκυψαν από το Energy plus.

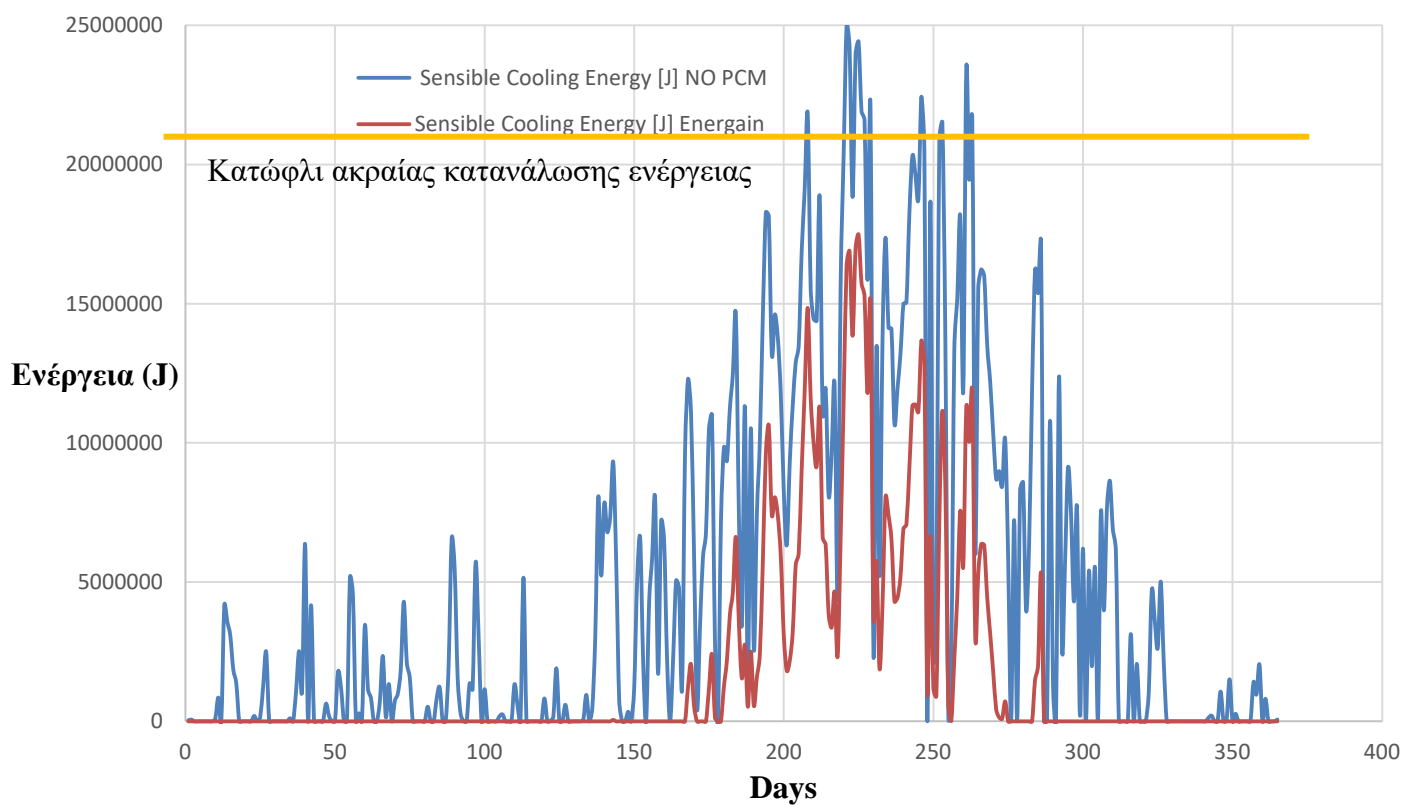
| | | Rate | Τιμή |
|--|---|---------------|-----------------|
| Ζήτηση Peak ενέργειας ψύξης | $(0,012 + 0,006) \text{GJ} = 5 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 50 € |
| Ζήτηση Peak ενέργειας θέρμανσης | $(0,15 + 0,11 + 0,12 + 0,15) \text{GJ} = 147 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 1470 € |
| Βασική ενέργεια ψύξης | $(14 - 5) = 9 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 0,9 € |
| Βασική ενέργεια θέρμανσης | $(13786 - 42) = 13744 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 1374 € |
| | | Σύνολο | ~ 2895 € |

Πίνακας 6.3.8: Κατανάλωση ετήσιας ενέργειας και ακραία φορτία με το πιο ιδανικό PCM (Dupond Energain) στη Βαρσοβία

- Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας ψύξης από την εξομάλυνση των ακραίων φορτίων ίση με 80%
- Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης από την εξομάλυνση των ακραίων φορτίων ίση με 7%
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας ψύξης ίση με 95%
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας θέρμανσης ίση με 0,3%
- Απόδοση χρηματικής επένδυσης ίση με 10%



Διάγραμμα 6.3.5: Κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης για ένα χρόνο στη Βαλένθια



Διάγραμμα 6.3.6: Κατανάλωση ενέργειας ψύξης για ένα χρόνο στη Βαλένθια

| | |
|--|---------------------|
| Χρήση ετήσιας ενέργειας ψύξης | 3,65 GJ ή 1013 kWh |
| Χρήση ετήσιας ενέργειας θέρμανσης | 12,21 GJ ή 3392 kWh |

Πίνακας 6.3.9: Ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας χωρίς PCM όπως προέκυψαν από το Energy plus.

| | | Rate | Τιμή |
|--|--|---------------|-----------------|
| Ζήτηση Peak ενέργειας ψύξης | $(0,025 + 0,024 + 0,022)GJ = 20 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 200 € |
| Ζήτηση Peak ενέργειας θέρμανσης | $(0,051 + 0,044 + 0,041 + 0,033 + 0,044+0,035)GJ = 69 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 690 € |
| Βασική ενέργεια ψύξης | $(1013 - 20) = 993 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 99 € |
| Βασική ενέργεια θέρμανσης | $(3392 - 69) = 3323 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 332 € |
| | | Σύνολο | ~ 1321 € |

Πίνακας 6.3.10: Κατανάλωση ετήσιας ενέργειας και ακραία φορτία χωρίς PCM στη Βαλένθια

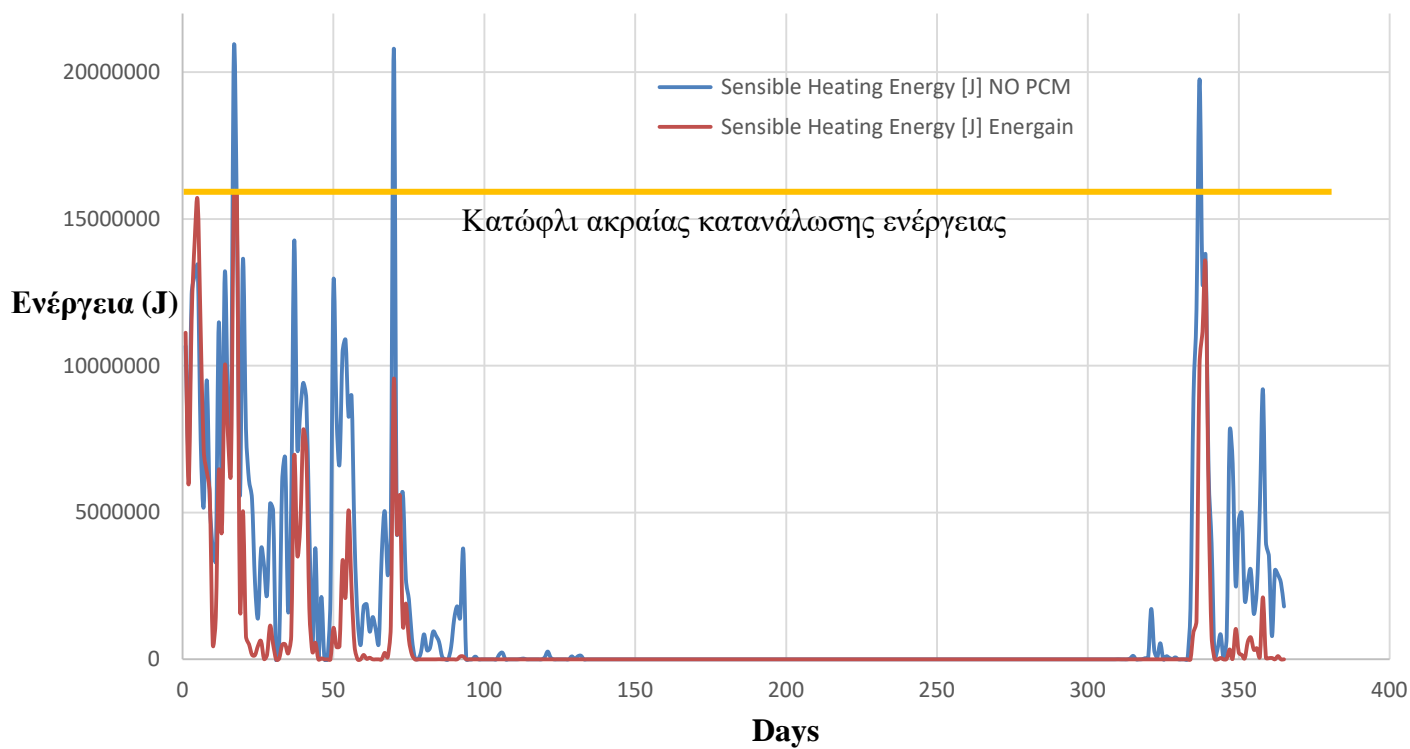
| | |
|----------------------------------|---------------------|
| Χρήση ενέργειας ψύξης | 1,06 GJ ή 294 kWh |
| Χρήση ενέργειας θέρμανσης | 10,32 GJ ή 2867 kWh |

Πίνακας 6.3.11: Ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας με PCM όπως προέκυψαν από το Energy plus.

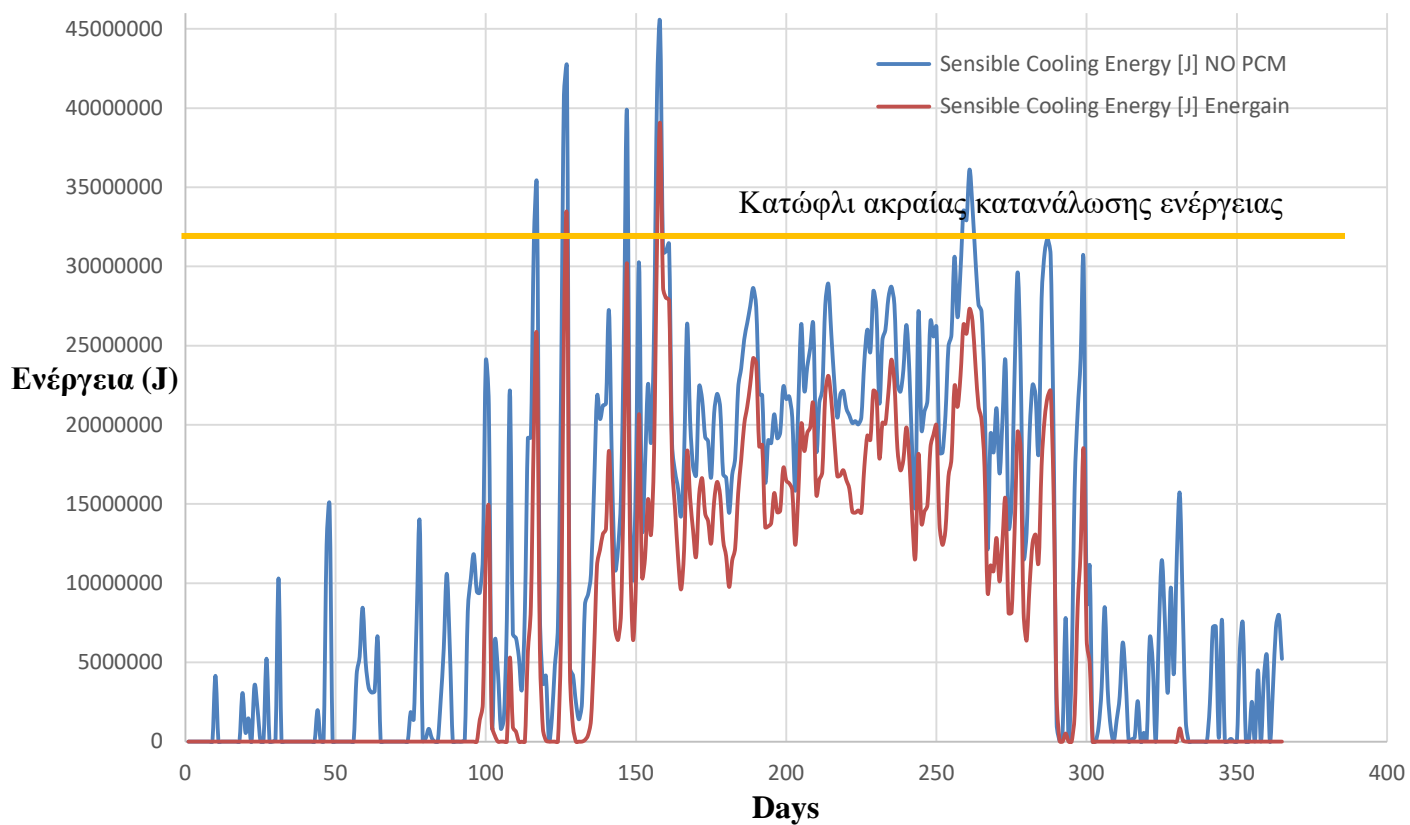
| | | Rate | Τιμή |
|--|--|---------------|----------------|
| Ζήτηση Peak ενέργειας ψύξης | $(0,017 + 0,016 + 0,015)GJ = 13 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 130 € |
| Ζήτηση Peak ενέργειας θέρμανσης | $(0,042 + 0,034 + 0,036 + 0,026 + 0,035+0,029)GJ = 56 \text{ kWh}$ | ~ 10 € | ~ 560 € |
| Βασική ενέργεια ψύξης | $(294 - 13) = 281 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 28 € |
| Βασική ενέργεια θέρμανσης | $(2867 - 56) = 2811 \text{ kWh}$ | ~ 0,1 € | ~ 281 € |
| | | Σύνολο | ~ 999 € |

Πίνακας 6.3.12: Κατανάλωση ετήσιας ενέργειας και ακραία φορτία με το πιο ιδανικό PCM (Dupond Energain) στη Βαλένθια

- Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας ψύξης από την εξομάλυνση των ακραίων φορτίων ίση με 35%
- Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης από την εξομάλυνση των ακραίων φορτίων ίση με 19%
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας ψύξης ίση με 71%
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας θέρμανσης ίση με 15%
- Απόδοση χρηματικής επένδυσης ίση με 24%



Διάγραμμα 6.3.7: Κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης για ένα χρόνο στο Κάιρο



Διάγραμμα 6.3.8: Κατανάλωση ενέργειας ψύξης για ένα χρόνο στο Κάιρο

| | |
|--|---------------------|
| Χρήση ετήσιας ενέργειας ψύξης | 10,79 GJ ή 2997 kWh |
| Χρήση ετήσιας ενέργειας θέρμανσης | 3,48 GJ ή 967 kWh |

Πίνακας 6.3.13: Ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας χωρίς PCM όπως προέκυψαν από το Energy plus.

| | | Rate | Τιμή |
|--|--|---------------|-----------------|
| Ζήτηση Peak ενέργειας ψύξης | $(0,035 + 0,042 + 0,039 + 0,045)GJ = 45 kWh$ | ~ 10 € | ~ 450 € |
| Ζήτηση Peak ενέργειας θέρμανσης | $(0,021 + 0,021 + 0,019)GJ = 17 kWh$ | ~ 10 € | ~ 170 € |
| Βασική ενέργεια ψύξης | $(2997 - 45) = 2952 kWh$ | ~ 0,1 € | 295 € |
| Βασική ενέργεια θέρμανσης | $(967 - 17) = 950 kWh$ | ~ 0,1 € | 95 € |
| | | Σύνολο | ~ 1010 € |

Πίνακας 6.3.14: Κατανάλωση ετήσιας ενέργειας και ακραία φορτία χωρίς PCM στο Κάιρο

| | |
|----------------------------------|--------------------|
| Χρήση ενέργειας ψύξης | 6,27 GJ ή 1741 kWh |
| Χρήση ενέργειας θέρμανσης | 2,89 GJ ή 803 kWh |

Πίνακας 6.3.15: Ετήσια δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας με PCM όπως προέκυψαν από το Energy plus.

| | | Rate | Τιμή |
|--|--|---------------|----------------|
| Ζήτηση Peak ενέργειας ψύξης | $(0,025 + 0,033 + 0,029 + 0,039)GJ = 35 kWh$ | ~ 10 € | ~ 350 € |
| Ζήτηση Peak ενέργειας θέρμανσης | $(0,016 + 0,0095 + 0,013)GJ = 11 kWh$ | ~ 10 € | ~ 110 € |
| Βασική ενέργεια ψύξης | $(1741 - 35) = 1706 kWh$ | ~ 0,1 € | 171 € |
| Βασική ενέργεια θέρμανσης | $(803 - 11) = 792 kWh$ | ~ 0,1 € | 79 € |
| | | Σύνολο | ~ 710 € |

Πίνακας 6.3.16: Κατανάλωση ετήσιας ενέργειας και ακραία φορτία με το πιο ιδανικό PCM (Dupond Energain) στο Κάιρο

- Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας ψύξης από την εξομάλυνση των ακραίων φορτίων ίση με 22%
- Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης από την εξομάλυνση των ακραίων φορτίων ίση με 35%
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας ψύξης ίση με 42%
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας θέρμανσης ίση με 16%
- Απόδοση χρηματικής επένδυσης ίση με 29%

6.4 Ανακεφαλαίωση

Από τους Πίνακες 6.3.1 έως 6.3.16 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Όσον αφορά το οικονομικό παράγοντα της επένδυσης μεγαλύτερη απόδοση εμφανίζει το Κάιρο ίση με 30% ακολουθούν τα Χανιά με 25% η Βαλένθια με 24% και τέλος η Βαρσοβία με 10%. Επιβεβαιώνεται για άλλη μια φορά το γεγονός ότι τα υλικά PCM λειτουργούν καλύτερα σε ξηρά και θερμά κλίματα.

Ιδιαίτερα αξιοσημείωτα είναι ακόλουθα αποτελέσματα του Πίνακα 6.3.8 για την Βαρσοβία:

- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας ψύξης ίση με 95%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην Βαρσοβία οι θερμές μέρες είναι πολύ λίγες σε όλο το έτος και έτσι με την εγκατάσταση στρώματος PCM ελαχιστοποιείται η ήδη μικρή κατανάλωση ενέργειας ψύξης.
- Συνολική εξοικονόμηση βασικής ενέργειας θέρμανσης ίση με 0,3%. Το εξαιρετικά μικρό αυτό ποσοστό επιβεβαιώνει την θεωρία ότι σε κλίματα τα οποία δεν έχουν αρκετή θερμότητα για να απορροφηθεί από το PCM δεν υπάρχει ιδιαίτερη σημασία στην εγκατάσταση τέτοιων υλικών στα κτίρια.

Βιβλιογραφία

A. Pasupathy ,R. Velraj,_, R.V. Seeniraj,Phase change materialbased building architecture for thermal management in resindential and commercial establishments.

S. M.Hasnain,Review on sustainable thermal energy storage technologies,part 1:heat storage materials and techniques, July1997

Ορφανού Ελένη, " Χρήση υλικών αλλαγής φάσης για ηλιακή ενδοδαπέδια θέρμανση χώρου στην περιοχή της Αθήνας", Οκτώβριος 2010

Atul Sharma, V. V. Tyagib, C.R. Chen , D.Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications" ,Renewable & Sustainable Energy Reviews 13 318- 345, (2009)

Halime O Paksoy, "Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Fundamentals,Case Studies and Design", NATO SCIENCE SERIES II: Mathematics, Physics and Chemistry, Volume 234,2007

Μάρκος Παπαδόπουλος-Βεντλινγκ, "Μέτρηση θερμικών ιδιοτήτων αλλαγής φάσης",ΕΜΠ

<http://www.ktiratiatriki.gr/el/news/130-toixoi-apo-protoporiaka-ylika-pcm.html>

Integration of thermal energy storage in buildings, Christina V. Konstantinidou, Spring 2010, 1-4

Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems, Givoni B., Energy and Buildings,volume 17, 1991, 177–99

Impact of thermal insulation location on buildings in hot dry climates Eben Saleh, Solar and wind technology, volume 7, No4, 1990, 393-406

Potential to improve the thermal comfort in buildings using latent heat storage materials under climatic conditions of Germany. Mehling H., Manara J., Körner W. 2002

Latent heat storage in building materials Hawes D.W., Feldmann D., Banu D., Energy and buildings, volume 20, 1993, 77-86

Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, A. Pasupathy, R. Velraj, Energy and buildings, volume 40, 2008, 193-203

Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: An experimental study V.V. Tyagi, D. Buddhi, Richa Kothari, S.K. Tyagi, Energy and buildings, volume 51, 2012, 248-254

Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, A. Pasupathy, R. Velraj, Energy and buildings, volume 40, 2008, 193-203

Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: An experimental study V.V. Tyagi, D. Buddhi, Richa Kothari, S.K. Tyagi, Energy and buildings, volume 51, 2012, 248-254

Α. Μ. Παπαδόπουλος, Θερμική άνεση στα κτίρια, νέα πρότυπα και βελτίωση θερμικής άνεσης στα κτίρια, 2006.

Α. Γ. Κορωναίος και Γ. Ι. Πουλάκος, Τεχνικά υλικά, τόμος 2, 2005.

Ξ. Κακάτσιος, Αρχές μεταφοράς θερμότητας και μάζας, 2006.

F. P. Incropera και D. P. DeWitt, Introduction to heat transfer, New York: John Wiley and Sons Publishing Co., 1990.

H. O. Paksoy, Thermal energy storage for sustainable energy consumption-Fundamentals, case studies and design, Springer, 2007.

R. Baetens, B. P. Jelle και G. Arild, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review.

P. Arce, C. Castellón, A. Castell και L. F. Cabeza, Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings.

W. Zhao, Characterization of Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, 2013.

H. Mehling και L. F. Cabeza, «Phase change materials and their basic properties».

D. Zhou, C. Y. Zhao και Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications.