

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ  
ΥΛΙΚΟΥ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ENERGY PLUS**

**ΔΗΜΗΤΡΑ ΤΖΑΝΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

Copyright © ΔΗΜΗΤΡΑ ΤΖΑΝΗ 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσεως, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν επιτρέπεται να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Ευχαριστίες...

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ.Χρήστο Τζιβανίδη για την ευκαιρία ανάθεσης της μελέτης του παρόντος θέματος, καθώς και για τις συμβουλές και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μεταδιδακτορικό ερευνητή Ευάγγελο Μπέλλο για την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου προσέφερε στη διεκπεραίωση της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη και συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και ιδιαίτερα τους γονείς μου, στους οποίους οφείλω ό,τι έχω καταφέρει μέχρι σήμερα.



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς ενός απλοποιημένου κτιρίου, το οποίο περιέχει στο κελύφος του υλικό αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα, διερευνάται η επίδραση των υλικών αλλαγής φάσης στη διακύμανση της ωριαίας θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου, καθώς και στη διακύμανση της ενέργειας που καταναλώνεται από το σύστημα θέρμανσης-ψύξης. Χρησιμοποιήθηκαν και μελετήθηκαν υλικά αλλαγής φάσης, με διαφορετικά σημεία τήξης τοποθετημένα σε διαφορετικά σημεία του κελύφους του κτιρίου (τοίχους και οροφή), κατά τη θερινή και κατά τη χειμερινή περίοδο. Ο σχεδιασμός του απλοποιημένου κτιρίου έγινε με χρήση του λογισμικού Sketch Up Make με το Plug-in του Open Studio και για τη προσομοίωση του χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Energy Plus.

Στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφεται η επικρατούσα ενεργειακή κατάσταση στη σύγχρονη εποχή σε παγκόσμια και ελληνική κλίμακα με έμφαση στο κτιριακό τομέα. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια του βιοκλιματικού σχεδιασμού και της θερμικής άνεσης και εξηγούνται οι τρόποι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας από ενεργητικά και παθητικά συστήματα θέρμανσης. Έπειτα το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει θεωρητικά στοιχεία γύρω από το φαινόμενο της αλλαγής φάσης και επεξηγήσεις γύρω από την έννοια της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση για τα υλικά αλλαγής φάσης, τις ιδιότητες που πρέπει να έχουν και τις κατηγορίες στις οποίες ανήκουν, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρόποι ενσωμάτωσης των υλικών αλλαγής φάσης στα δομικά υλικά. Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τα προβλήματα που εμφανίζουν τα υλικά αλλαγής φάσης κατά τη χρήση τους και οι τρόποι αντιμετώπισης τους και στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες κτιριακές εφαρμογές, στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί υλικά αλλαγής φάσης.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του σχεδιασμού του κτιρίου στο Sketch Up και των σταδίων συμπλήρωσης των παραμέτρων του Energy Plus, που δημιουργούν το προφίλ του προς μελέτη κτιρίου. Στο ένατο κεφάλαιο έγινε εξαγωγή και μελέτη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μέγιστη πτώση θερμοκρασίας  $1,632^{\circ}\text{C}$  τη θερινή περίοδο με χρήση υλικού αλλαγής φάσης με σημείο τήξης  $27^{\circ}\text{C}$  και μέγιστη αύξηση τη χειμερινή  $2,498^{\circ}\text{C}$  με υλικό αλλαγής φάσης με  $18^{\circ}\text{C}$ . Ακόμη φάνηκε ότι καλύτερη επίδραση είχαν τα υλικά αλλαγής φάσης όταν τοποθετήθηκαν σε οροφή και σε τοίχους, με το υλικό αλλαγής φάσης των  $29^{\circ}\text{C}$  τοποθετημένο κατ' αυτό τον τρόπο να επιτυγχάνει μέγιστη εξοικονόμηση της ενέργειας, που καταναλώνεται από το σύστημα θέρμανσης-ψύξης, με ποσοστό  $13,32\%$ . Στο δέκατο και τελευταίο κεφάλαιο, επισημαίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη, καθώς και οι πιθανοί τομείς μελλοντικής έρευνας.



## Abstract

This diploma thesis investigates the thermal performance of a simplified building, which contains phase change material in the building shell. In particular, the effect of phase change materials on the fluctuation of the hourly temperature inside the building, as well as the variance of the energy consumed by the heating-cooling system are studied. Phase change materials with different melting points were used and studied at different points of the building shell (walls and roof) during the summer and winter season. The design of the simplified building was created using the Sketch Up Make software with the Open Studio Plug-in, and the Energy Plus software was used to simulate it.

The first chapter describes the prevailing energy situation in modern times on a global and Greek scale, with an emphasis on the building sector. The second chapter analyzes the concept of bioclimatic design and thermal comfort and explains the ways of using solar energy by active and passive heating systems. Then the third chapter contains theoretical facts about the phenomenon of phase change and explanations about the concept of thermal energy storage. In the fourth chapter we are informed about the phase change materials, the properties they need to have and the categories they belong to, and in the fifth chapter the ways of incorporating the phase change materials into the building materials are analyzed. The sixth chapter presents the problems of the phase change materials during their use and the ways of their treatment and the seventh chapter presents the main building applications in which phase change materials have been used.

In the eighth chapter there is a detailed description of the building design in Sketch Up and of the stages of completing the Energy Plus parameters that create the building's profile. In the ninth chapter, we extracted and studied the results of the simulation. Specifically, a peak temperature drop of 1,632 °C was observed during the summer period using phase change material with a melting point of 27°C and a maximum increase of 2,498 °C was detected during the winter period using a phase change material of 18°C. Also it was shown that phase change materials were more efficient when placed on ceiling and walls, with the phase change material of 29°C positioned in this way, achieving maximum savings of the energy, consumed by the heating-cooling system, with a percentage of 13,32%. In the tenth and final chapter, the conclusions drawn from the study, as well as the possible areas of future research, are highlighted.





# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	v
Abstract .....	vii
<b>1 Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1 Υφιστάμενη Ενεργειακή Κατάσταση .....	1
1.2 Ενέργεια και Κτίρια .....	3
1.3 Ενέργεια και Κτίρια στην Ελλάδα.....	8
<b>2 Κτίρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης .....</b>	<b>11</b>
2.1 Βιοκλιματικός σχεδιασμός .....	11
2.2 Θερμική άνεση .....	12
2.3 Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.....	14
2.3.1 Ηλιακή ενέργεια .....	14
2.3.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα .....	14
2.3.3 Παθητικά ηλιακά συστήματα .....	16
2.3.3.1 Συστήματα άμεσου ηλιακού κέρδους.....	17
2.3.3.2 Συστήματα έμμεσου ηλιακού κέρδους .....	18
2.3.3.3 Συστήματα απομονωμένου ηλιακού κέρδους .....	21
<b>3 Φαινόμενο αλλαγής φάσης .....</b>	<b>23</b>
3.1 Γενικά .....	23
3.2 Κατάσταση της ύλης.....	23
3.3 Αλλαγή φάσης.....	24
3.4 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	25
3.4.1 Αισθητή θερμότητα .....	25
3.4.2 Λανθάνουσα θερμότητα.....	25
<b>4 Υλικά αλλαγής φάσης (PCM).....</b>	<b>27</b>
4.1 Γενικά .....	27
4.2 Ιδιότητες των PCM .....	29
4.2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες .....	29
4.2.2 Κινητικές ιδιότητες.....	29
4.2.3 Χημικές ιδιότητες.....	29
4.2.4 Οικονομικές ιδιότητες.....	30
4.3 Κατηγοριοποίηση των PCM .....	30

4.3.1	Οργανικά PCM.....	30
4.3.1.1	Παραφίνες .....	31
4.3.1.2	Μη Παραφίνες. ....	31
4.3.2	Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης.....	32
4.3.2.1	Ένυδρα Άλατα .....	32
4.3.2.2	Μέταλλα.....	33
4.3.3	Ευτηκτικά.....	33
<b>5</b>	<b>Ενσωμάτωση των PCM σε δομικά υλικά .....</b>	<b>35</b>
5.1	Γενικά.....	35
5.2	Άμεση ενσωμάτωση.....	35
5.3	Εμβάπτιση.....	37
5.4	Ενθυλάκωση .....	37
5.4.1	Μικροενθυλάκωση .....	38
5.4.2	Μακροενθυλάκωση.....	39
<b>6</b>	<b>Προβλήματα κατά την χρήση των PCM και τρόποι αντιμετώπισης. 41</b>	
6.1	Διαχωρισμός των φάσεων.....	41
6.2	Το φαινόμενο της υπόψυξης /υπέρψυξης .....	42
6.3	Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα .....	43
6.4	Διάβρωση.....	44
6.5	Συμβατότητα με άλλα υλικά.....	44
<b>7</b>	<b>PCM σε κτιριακές εφαρμογές για θέρμανση και ψύξη.....</b>	<b>45</b>
7.1	Γενικά.....	45
7.2	Τρόποι χρήσης PCM στα κτίρια .....	45
7.3	Τοίχοι παθητικής αποθήκευσης.....	46
7.3.1	Τοίχος Trombe με PCM .....	46
7.3.2	Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας .....	47
7.4	Τοίχοι με δομικά υλικά με ενσωματωμένα PCM .....	48
7.4.1	Γυψοσανίδα με PCM (wallboard).....	48
7.4.2	Μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένα με PCM .....	49
7.5	Ενεργειακά Αποδοτικά Παράθυρα.....	50
7.6	Εφαρμογές PCM σε δάπεδα και οροφές. ....	52
7.6.1	Δάπεδα .....	52
7.6.2	Ενδοδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης (με PCM) .....	53

7.6.3	Οροφές .....	55
7.7	Στέγες και σοφίτες .....	58
7.7.1	Ενεργητικό σύστημα στέγης με PCM.....	59
7.8	Διπλό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με PCM.....	60
<b>8</b>	<b>Προσομοίωση του κτιρίου.....</b>	<b>63</b>
8.1	Λογισμικό Energy Plus .....	63
8.1.1	Γενικά.....	63
8.1.2	Υπολογιστικές μέθοδοι του Energy Plus .....	65
8.2	Λογισμικό Sketch Up.....	66
8.3	Σχεδιασμός του κτιρίου με χρήση του λογισμικού Sketch Up.....	67
8.4	Επεξεργασία δεδομένων στο Open Studio .....	74
8.5	Επεξεργασία δεδομένων στο Energy Plus .....	76
8.5.1	Εισαγωγή στο περιβάλλον προσομοίωσης.....	76
8.5.2	Κατηγορία Simulation Parameters .....	79
8.5.3	Κατηγορία Location and Climate.....	83
8.5.4	Κατηγορία Schedules .....	86
8.5.5	Κατηγορία Surface Construction Elements .....	92
8.5.6	Κατηγορία Thermal Zones and Surfaces .....	101
8.5.7	Κατηγορία Internal Gains.....	104
8.5.8	Κατηγορία Natural Ventilation and Duct Leakage .....	108
8.5.9	Χαρακτηριστικά συστήματος ψύξης- θέρμανσης (HVAC) ..	112
8.5.10	Κατηγορία Output Reporting .....	120
<b>9</b>	<b>Εκτέλεση προσομοιώσεων .....</b>	<b>123</b>
9.1	Εξεταζόμενες περιπτώσεις.....	123
9.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	123
<b>10</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>143</b>
10.1	Συμπεράσματα της μελέτης .....	143
10.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	145
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>147</b>

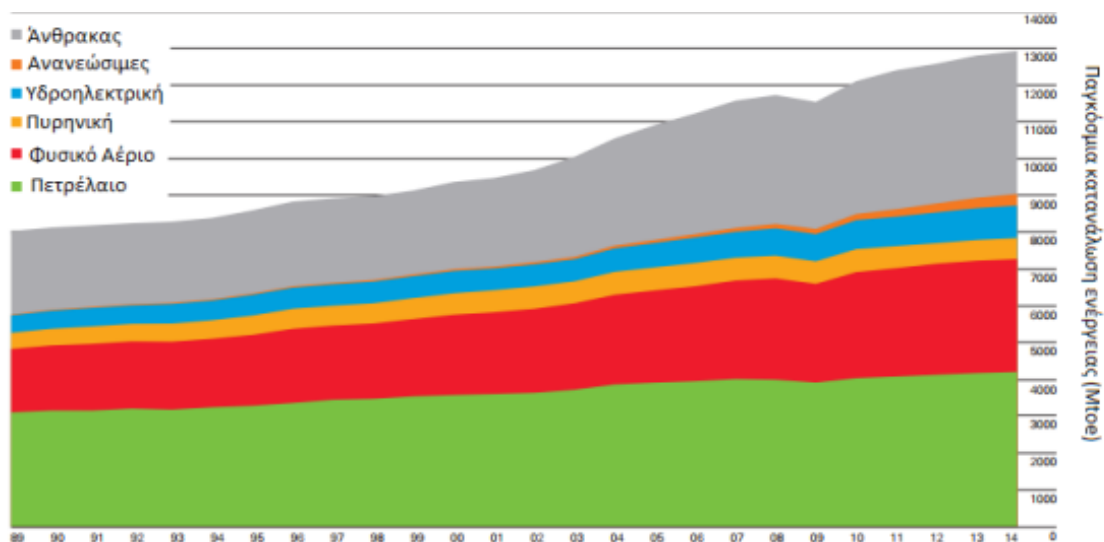


# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Υφιστάμενη Ενεργειακή Κατάσταση

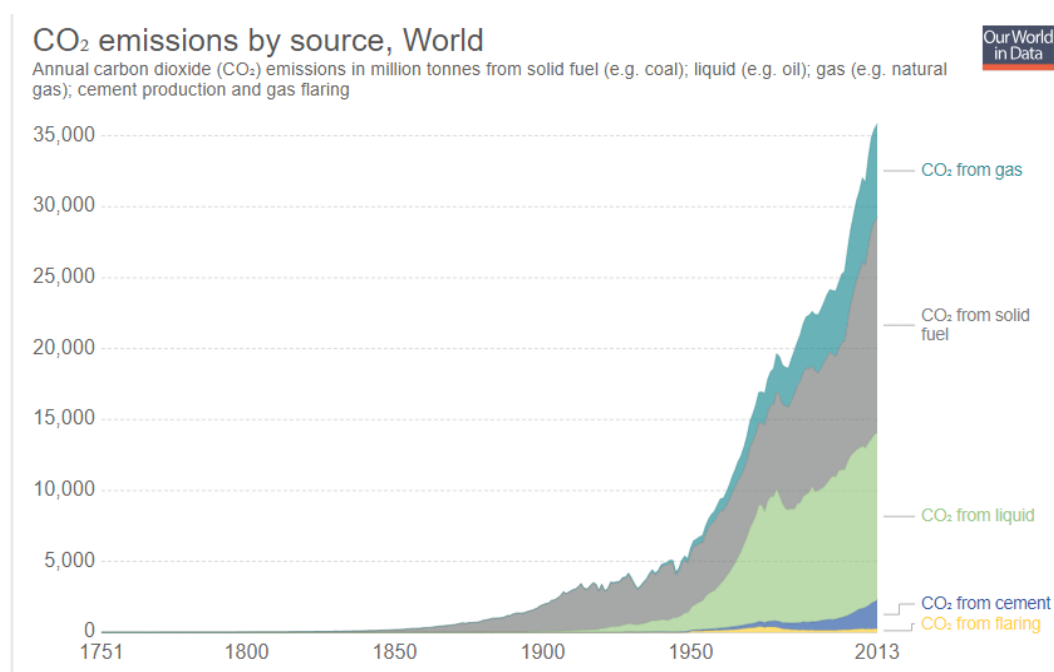
Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας καλύπτεται από την αξιοποίηση των ενεργειακών πηγών που υπάρχουν στη φύση ως πρωτογενή ενέργεια. Η πρωτογενής ενέργεια βρίσκεται με τη μορφή ορυκτών καυσίμων όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο γαιάνθρακας ή ανανεώσιμων πηγών όπως ο άνεμος και ο ήλιος ή τέλος ραδιενεργών πηγών, όπως το ουράνιο.

Σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, ενώ οι ανανεώσιμες και οι πυρηνικές πηγές παρέχουν το υπόλοιπο. Η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται παράλληλα με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και της οικονομίας. Η αύξηση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ήταν 2.2% το 2017, μεγαλύτερη από 1.2% που ήταν το 2016 και η ταχύτερη από το 2013. Ο άνθρακας και το φυσικό αέριο αντιπροσωπεύουν τη μεγαλύτερη αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, ακολουθούμενη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τελικά το πετρέλαιο [1]. Αναμένεται ότι η ζήτηση θα συνεχίσει να αυξάνεται, ενώ η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας θα αυξηθεί κατά περίπου ένα τρίτο μέχρι το 2040 [2].



Σχήμα 1.1.1 Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από το έτος 1992 έως το 2014 σε Mtoe [1]

Τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια για να σχηματιστούν με αποτέλεσμα να εξαντλούνται με πολύ ταχύτερο ρυθμό από τον ρυθμό με τον οποίο σχηματίζονται. Έτσι πέρα από τον κίνδυνο της πλήρους εξάλειψής τους η συνεχόμενη αυτή μείωση του αποθέματος τους καθιστά τα ορυκτά καύσιμα όλο και πιο περιζήτητα και συνεπώς όλο και πιο ακριβά δημιουργώντας αστάθεια στην παγκόσμια οικονομία [3]. Επιπλέον η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων συνεπάγεται και την αύξηση των εκπομπών ρύπων (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα, γεγονός που συμβάλλει στην επιδείνωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα με σοβαρές επιπτώσεις για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον (Φαινόμενο του θερμοκηπίου). Οι εκπομπές ρύπων από την κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκαν κατά 1.6%, μετά από μικρή ή καθόλου αύξηση για τα τρία χρόνια από το 2014 έως το 2016 ενώ εκτιμάται ότι με βάση τις τρέχουσες πολιτικές, θα είναι κατά 40% υψηλότερες το 2040 σε σχέση με το 2010 [2]



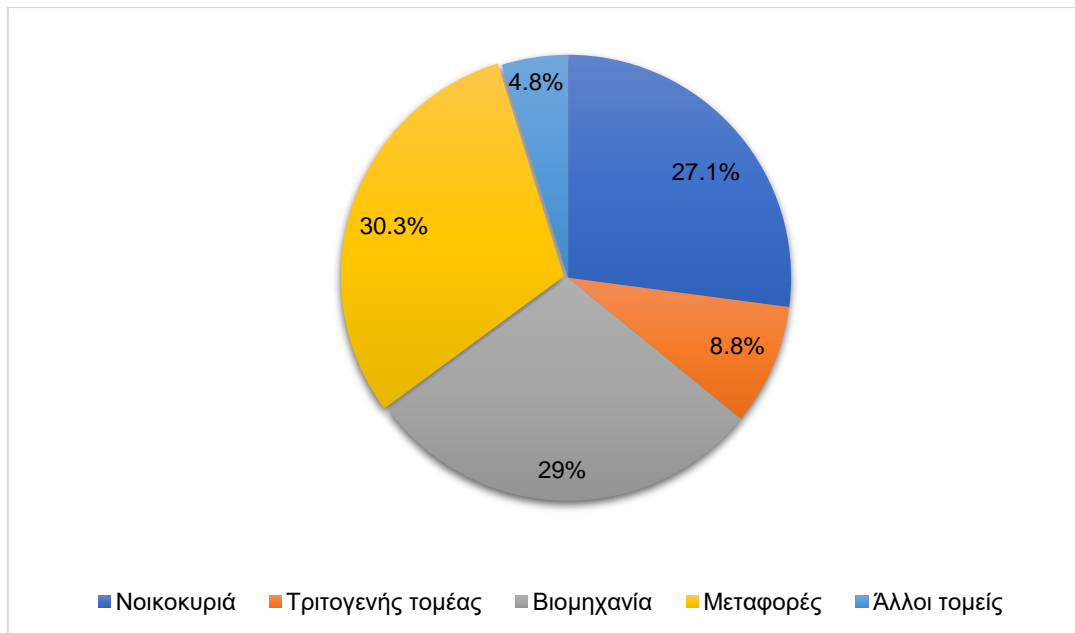
**Σχήμα 1.1.2 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα(CO<sub>2</sub>) από το έτος 1751 έως το 2013 σε billion tones[3]**

Η αναζήτηση λύσεων προκειμένου να μειωθούν και τελικά να εξαλειφθούν τα δυσμενή αποτελέσματα της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων είναι πλέον επιτακτική. Η αύξηση του ποσοστού παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές καθώς και η βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων κατανάλωσης ενέργειας είναι οι πρωταρχικοί στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν, για την αντιμετώπιση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της κλιματικής αλλαγής καθώς και για την εξασφάλιση ενεργειακής βιωσιμότητας.

## 1.2 Ενέργεια και Κτίρια

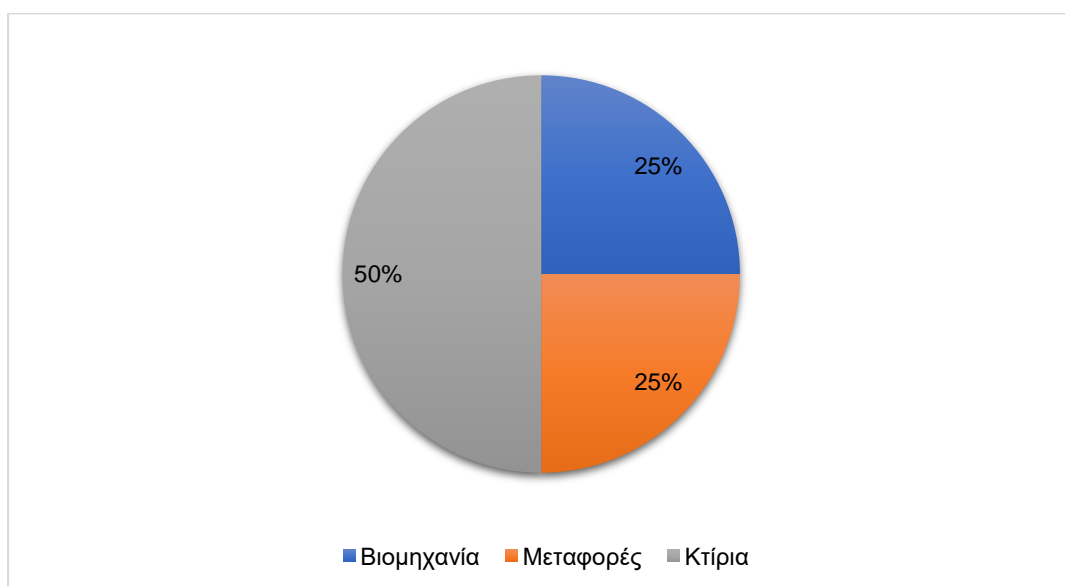
Στα κτίρια, η ενέργεια χρησιμοποιείται για διάφορους σκοπούς όπως η θέρμανση, ο φωτισμός, ο εξαερισμός, ο κλιματισμός καθώς και για διάφορες συσκευές και μηχανήματα. Η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα είναι οι δύο μορφές τελικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα κτίρια. Η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται για θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό, φωτισμό και για διάφορες συσκευές, ενώ χρησιμοποιείται θερμότητα για θέρμανση (θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για ψύξη εάν χρησιμοποιούνται ψυκτικές απορρόφησης).

Ο τομέας των κτιρίων κυριαρχεί στην τελική κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο. Στις χώρες που συμμετέχουν στον OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development) υπολογίζεται ότι τα κτίρια αποτελούν σχεδόν το 40% της τελικής χρήσης ενέργειας.Ο OECD είναι ένας οργανισμός στον οποίο συμμετέχουν διάφορες χώρες του πλανήτη, μία από αυτές είναι και η Ελλάδα από το 1961, με σκοπό οι κυβερνήσεις τους να κατανοούν και να αντιμετωπίζουν κοινά περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά προβλήματα .Η κατανομή της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, στις χώρες του OECD,σε διάφορους τομείς παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2.1. Είναι φανερό ότι η χρήση ενέργειας στα νοικοκυριά και στον τριτογενή τομέα(εμπορικά καταστήματα, υπηρεσίες) είναι περίπου 36% της συνολικής. Το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας σε αυτούς τους δύο τομείς συμβαίνει σε κτίρια. Εκτός από τις κατοικίες και τα εμπορικά καταστήματα κάποια ποσότητα της ενέργειας που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία είναι επίσης για κτιριακές εγκαταστάσεις και ως εκ τούτου η ενέργεια τελικής χρήσης που δαπανάται για τα κτίρια αποτελεί περίπου το 40% της συνολικής ενέργειας τελικής χρήσης. [4]



**Σχήμα 1.2.1 Κατανομή της χρήσης της τελικής ενέργειας σε διάφορους τομείς σε χώρες του OECD [4]**

Από την άλλη πλευρά, η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων από κτίρια για την παροχή ενέργειας στην τελική της μορφή απαιτεί το ήμισυ της συνολικής κατανάλωσης, γεγονός που καθιστά τον τομέα των κτιρίων τον μεγαλύτερο καταναλωτή ορυκτών καυσίμων στις χώρες του OECD. Η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων στη βιομηχανία και στις μεταφορές ακολουθεί την κατανάλωση του κτιριακού τομέα. Το ποσοστό κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ανά τομέα, στις χώρες του OECD, φαίνονται στο Σχήμα 1.2.2 [5]



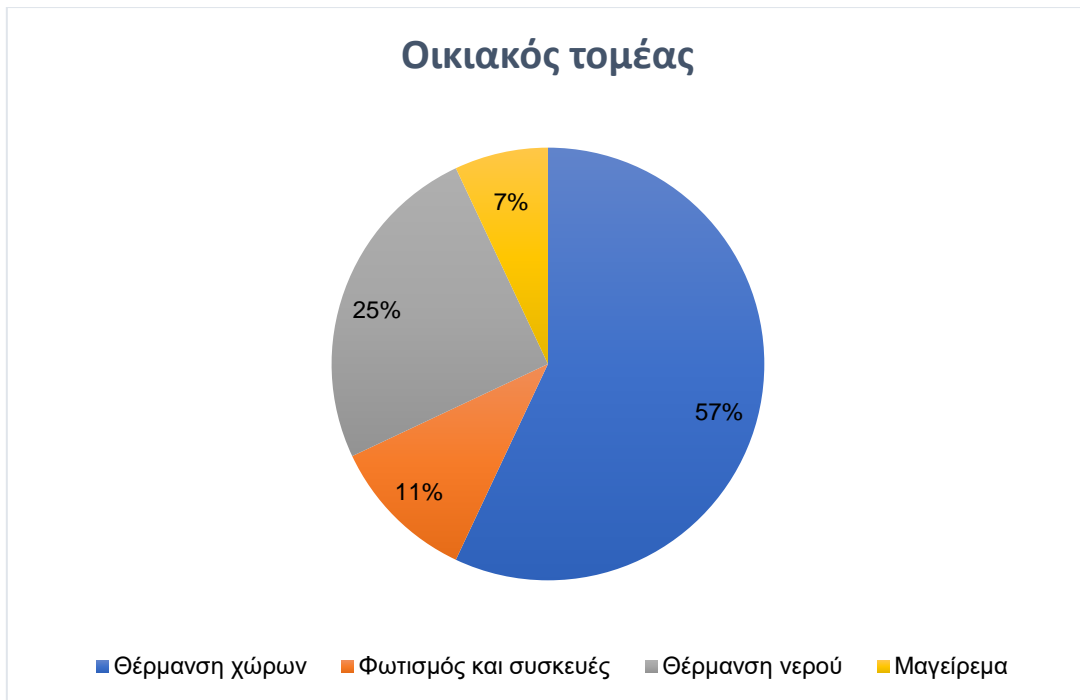
**Σχήμα 1.2.2 Ποσοστά κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ανα τομείς σε χώρες του OECD [5]**



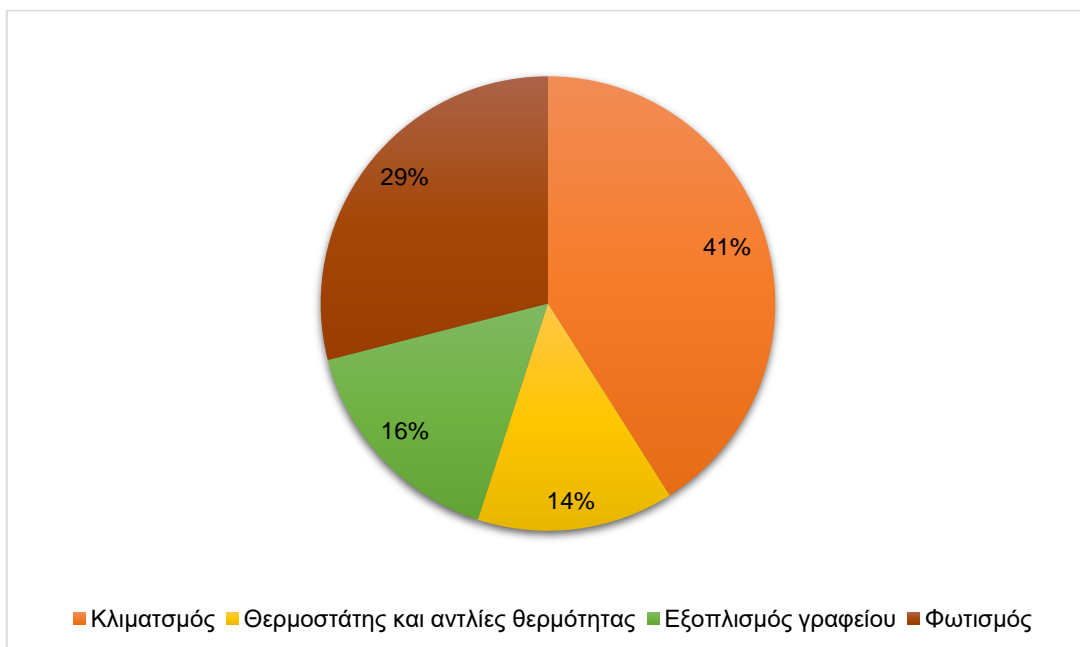
Η κατανομή της χρήσης της ενεργειακής κατανάλωσης διακρίνεται από μεγάλη ποικιλία ανάλογα με το κλίμα της περιοχής στην οποία είναι κτισμένο το κτίριο, τον τύπο του κτιρίου (οικιστική ή εμπορική χρήση) και το σχεδιασμό του. Για παράδειγμα, εάν ένα κτίριο βρίσκεται σε κρύο κλίμα, η ενέργεια για θέρμανση αναμένεται να αποτελέσει το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του. Αντίθετα, εάν το κτίριο βρίσκεται σε ένα ζεστό κλίμα η ενέργεια για κλιματισμό πιθανότατα θα αποτελέσει το μεγαλύτερο τμήμα. Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας για τον φωτισμό και τις συσκευές αναμένεται να έχει υψηλότερες τιμές στα εμπορικά κτίρια από τα κτίρια κατοικιών. Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν πως κατανέμεται η χρήση της τελικής ενέργειας σε διαφορετικά κτίρια ,σε διαφορετικές χώρες με διαφορετικό κλίμα. Στα σχήματα 1.2.3 και 1.2.4 φαίνεται η κατανομή της ενέργειας στα κτίρια στην Ευρώπη στον τριτογενή τομέα αλλά και στις κατοικίες. Ενώ στα σχήματα 1.2.5 και 1.2.6 παρουσιάζεται η κατανομή τελικής ενέργειας σε ένα υπηρεσιακό κτίριο στο Hong Kong και σε ένα οικιακό κτίριο στο Βερολίνο.[6]



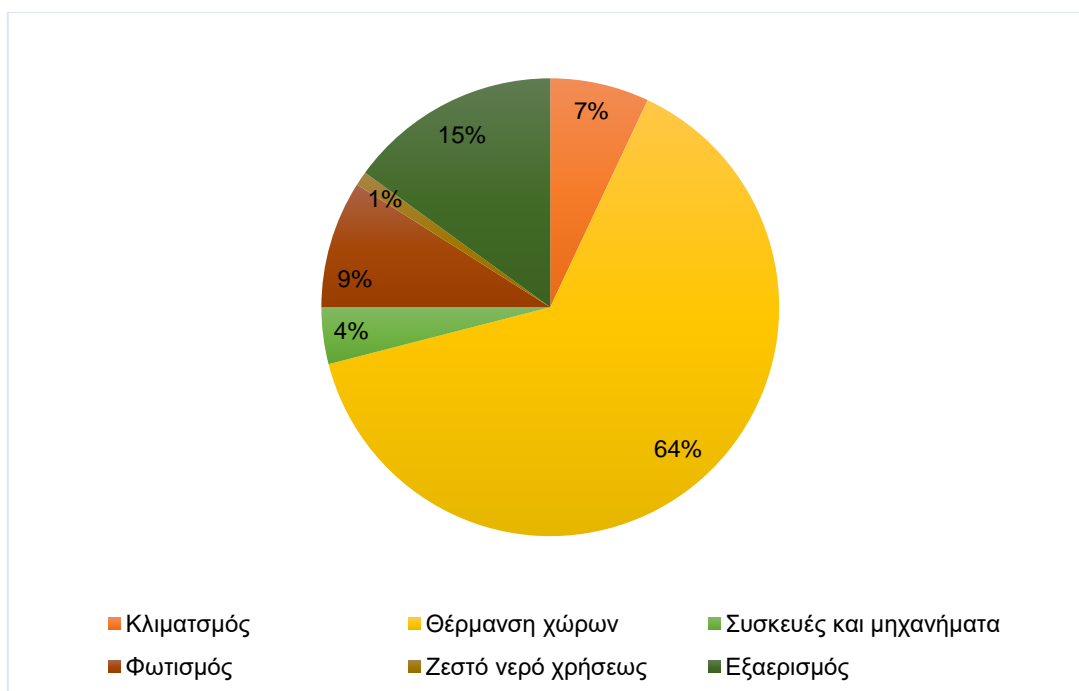
**Σχήμα 1.2.3 Κατανομή της χρήσης τελικής ενέργειας σε κτίρια στον τριτογενή τομέα στην Ευρώπη,2007 [7]**



**Σχήμα 1.2.4 Κατανομή της χρήσης τελικής ενέργειας σε κτίρια στον οικιστικό τομέα στην Ευρώπη, 2007 [6]**



**Σχήμα 1.2.5 Κατανομή της χρήσης τελικής ενέργειας σε κτίρια γραφείων στο Hong Kong, 2007 [6]**

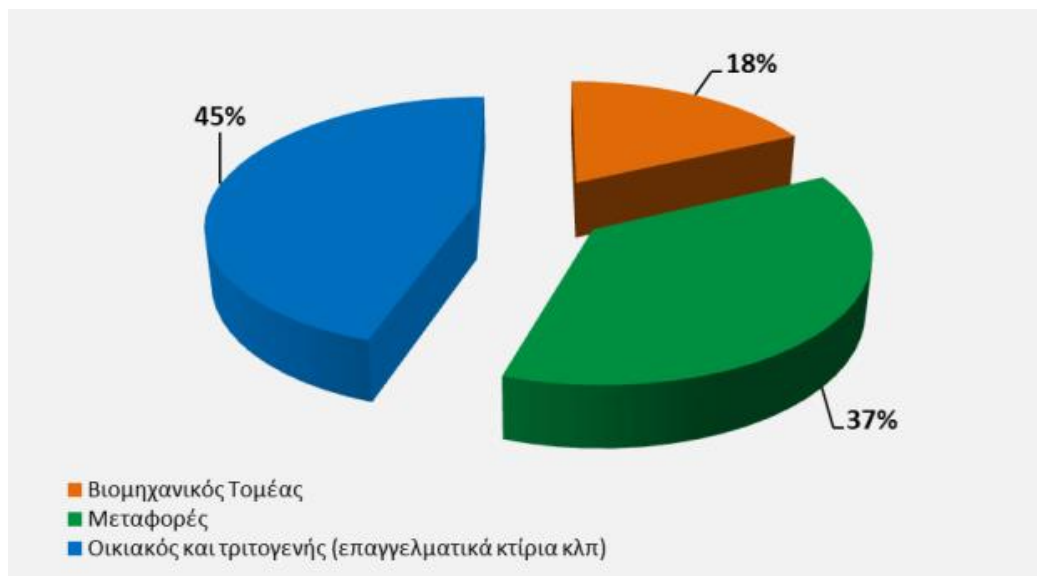


**Σχήμα 1.2.6 Κατανομή της χρήσης τελικής ενέργειας σε κτίριο με δεκατρείς ορόφους στο Βερολίνο, 2007 [6]**

Διερευνώντας τα παραπάνω αριθμητικά στοιχεία, φαίνεται ότι η ενέργεια που δαπανάται στα κτίρια για θέρμανση, κλιματισμό και εξαερισμό αποτελεί το μεγαλύτερο μερίδιο της κατανάλωσης τελικής ενέργειας. Συνεπώς, οποιαδήποτε βελτίωση στα συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης καθώς και στις κτιριακές υποδομές, για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της ενέργειας, θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στη μείωση της ενέργειας που δαπανάται τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε Παγκόσμιο επίπεδο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα κτίρια κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων παγκοσμίως, η εφαρμογή συστημάτων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και η φιλική προς το περιβάλλον κατασκευή κτιρίων δεν θα περιορίσει μόνο τη συνολική κατανάλωση ενέργειας από τα κτίρια αλλά θα οδηγήσει και σε μείωση των εκπομπών ρύπων λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων.

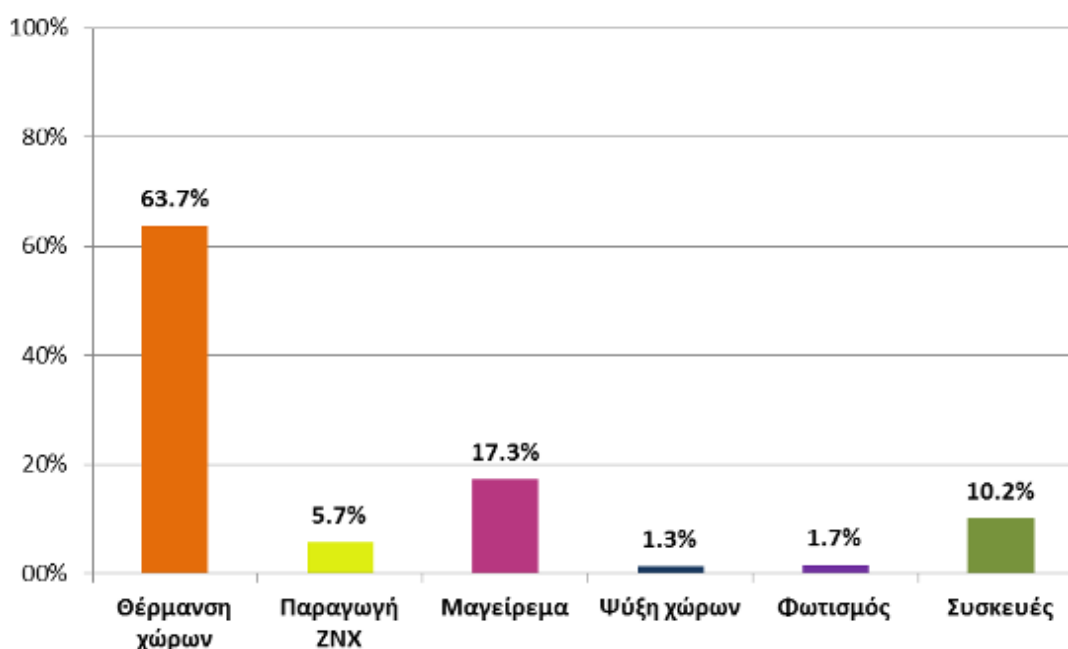
### 1.3 Ενέργεια και Κτίρια στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, ο γενικός εκσυγχρονισμός συνοδευόμενος με την αδιαφορία για την εξοικονόμηση ενέργειας, οδήγησαν σε υπέρμετρες καταναλώσεις στον τομέα των κτιρίων και των υπηρεσιών με αποτέλεσμα ο κτιριακός τομέας να κυριαρχεί στην κατανάλωση τελικής ενέργειας και στη χώρα μας ,με ποσοστό 45%. [8]



Σχήμα 1.3.1 Κατανομή της κατανάλωσης τελικής ενέργειας ανά τομέα στην Ελλάδα, έτος 2012[8]

Έχει καταγραφεί ότι η θέρμανση των κτιρίων, παρόλο που είναι μια χώρα με ήπιο κλίμα, κατέχει το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών ενεργειακών καταναλώσεων (63.7%) του τομέα των κατοικιών και του τριτογενούς. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μεγάλο πλήθος συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού που χρησιμοποιούνται για τη δεδομένη έκταση της χώρας μας, στο ότι τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα έχουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση καθώς και στην ελλιπή ή ανύπαρκτη προστασία των κτιρίων κατά τη διάρκεια του χειμώνα και του καλοκαιριού.[9]



**Σχήμα 1.3.2 Ποσοστιαία κατανομή της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για τελική χρήση στον οικιακό τομέα, στην Ελλάδα, έτος 2012 [10]**

Το μεγαλύτερο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη των χώρων, καθώς και για τις υπόλοιπες ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου, καλύπτεται από συμβατικές πηγές με αποτέλεσμα τα κτίρια να οφείλονται στη χώρα μας για περισσότερο από το 45% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.[10]

Σε αντίθεση με το σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπου εμφανίζεται μια μικρή μείωση, στην Ελλάδα η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια παρουσιάζει αυξητική τάση. Για την επίλυση αυτού του ενεργειακού προβλήματος η Ελλάδα πρέπει σταδιακά να προσαρμοστεί στο νέο πολιτικό και νομοθετικό πλαίσιο, που έχει διαμορφωθεί σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο, με βάση το οποίο προτείνεται η εξοικονόμηση ενέργειας και η χρήση ήπιων τεχνολογιών και μορφών ενέργειας προκειμένου να μειωθούν συνολικά οι επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η ανάγκη λοιπόν σχεδίασης των κτιρίων με τέτοιο τρόπο ώστε, να μειώνονται όσο είναι δυνατό οι ενεργειακές καταναλώσεις του αλλά και να αξιοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας, είναι πλέον επιτακτική.[9]



## 2 Κτίρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης

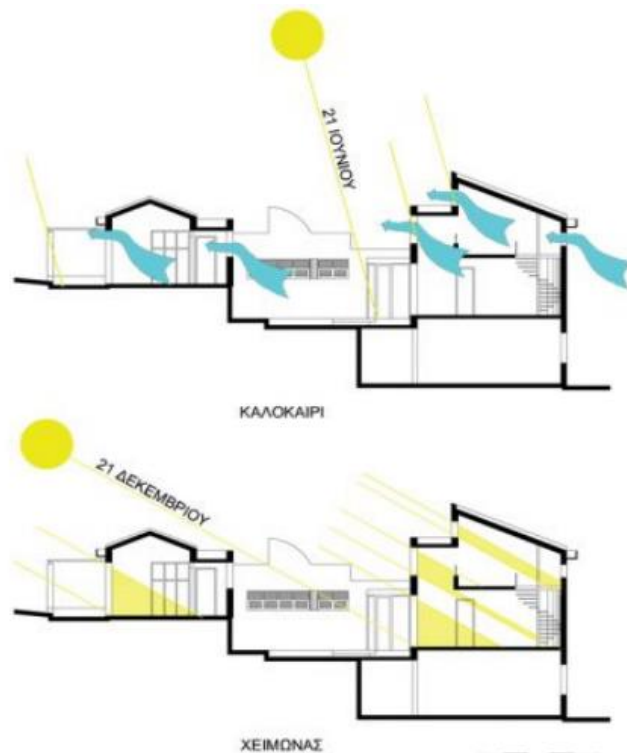
### 2.1 Βιοκλιματικός σχεδιασμός

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια προϋποθέτει τον κατάλληλο σχεδιασμό του κτιρίου, τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων και συστημάτων και τη σωστή συνεργασία αυτών. Δηλαδή απαιτείται άριστη ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του, καθώς και ύπαρξη των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν.

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός λαμβάνει υπόψη μια σύνθεση δεδομένων που αφορούν τις κλιματικές συνθήκες μιας περιοχής, την τοποθεσία, την θερμική και οπτική άνεση των ενοίκων, για το σχεδιασμό και την κατασκευή κτιρίων και χώρων αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια, αλλά και τα φυσικά φαινόμενα του κλίματος. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός που έχει ως βασικά στοιχεία τα ηλιακά παθητικά συστήματα, συμβάλλει στον περιορισμό της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων και στην ανάδειξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακής ενέργειας). Στοχεύει, δηλαδή, στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην προσαρμογή των κτιρίων στο περιβάλλον τους. [11]

Οι βασικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού συνοψίζονται στα εξής:

- Κατάλληλη τοποθέτηση του κτιρίου στο χώρο με σκοπό την εκμετάλλευση των καιρικών συνθηκών.
- Λειτουργία του κτιρίου ως φυσικό ηλιακό συλλέκτη τον χειμώνα, για θέρμανση των χώρων.
- Λειτουργία του κτιρίου ως αποθήκη φυσικής ψύξης το καλοκαίρι για επίτευξη φυσικού δροσισμού και αερισμού.
- Λειτουργία του κτιρίου ως αποθήκη θερμότητας έτσι ώστε με τα κατάλληλα υλικά κατασκευής να μπορεί να αποδώσει την συσσωρευμένη θερμότητα και σε περίοδο κρύου ή έλλειψης ηλίου.
- Λειτουργία του κτιρίου ως παγίδα θερμότητας με επαρκή μόνωση του κτιρίου με σκοπό την αποφυγή θερμικών απωλειών τον χειμώνα και τη θωράκιση από την ανεπιθύμητη θερμότητα το καλοκαίρι.
- Αξιοποίηση του ήλιου για φυσικό φωτισμό.



**Σχήμα 2.1.1 Σχέδιο βιοκλιματικά κατασκευασμένου κτιρίου.[12]**

Συνεπώς, για να κατασκευαστεί και να λειτουργεί ένα κτίριο βιοκλιματικά, πρέπει να κατανοήσουμε πλήρως τις τοπικές κλιματικές συνθήκες και να σταθμίσουμε τα κλιματικά οφέλη και τους περιορισμούς. Το κτίριο θα πρέπει να είναι ικανό να συλλέγει και να αποθηκεύει θερμότητα όταν υπάρχει ανάγκη για θέρμανση, να λειτουργεί ως φυσικός συλλέκτης δροσισμού και ως αποθήκη ψύξης, όταν χρειάζεται ψυκτικά φορτία και να δρα ως φυσικός διακινητής αέρα, προκειμένου να προσφέρει στους χρήστες άνετο θερμικό εσωτερικό κλίμα

Βασικά κριτήρια για την εφαρμογή του βιοκλιματικού σχεδιασμού πρέπει να είναι η απλότητα χρήσης των εφαρμογών και η αποφυγή περίπλοκων συστημάτων και τεχνικών, ώστε να είναι περιορισμένη η συμβολή του χρήστη στη λειτουργία τους, καθώς και η χρήση ευρέως εφαρμοσμένων συστημάτων.[11]

## 2.2 Θερμική άνεση

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός, εκτός από την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε μια οικία, αποσκοπεί και στην δημιουργία ιδανικών συνθηκών διαβίωσης. Η θερμική άνεση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να ορίσει μια πνευματική κατάσταση, η οποία εκφράζει την ικανοποίηση από το θερμικό περιβάλλον. Δηλαδή πρόκειται περισσότερο για μια πνευματική κατάσταση,



κι επομένως για ένα ψυχολογικό φαινόμενο παρά για μια φυσική οργανική κατάσταση. Επομένως, μπορεί να επηρεάζεται από την προσωπική διάθεση του καθενός, την κουλτούρα της κάθε προσωπικότητας καθώς και από άλλους προσωπικούς, οργανικούς και κοινωνικούς παράγοντες.

Πέραν όμως από αυτούς τους ψυχολογικούς παράγοντες, η θερμική άνεση επηρεάζεται και από παράγοντες που σχετίζονται με το περιβάλλον και με τον ίδιο τον άνθρωπο.

- Οι παράγοντες που σχετίζονται με το περιβάλλον είναι:
- η θερμοκρασία του αέρα και ο έλεγχος αυτής τόσο κατά τη διάρκεια του χειμώνα όσο και κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού,
- η σχετική υγρασία,
- η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία των επιφανειών που περιβάλλουν το χώρο και
- η κίνηση/ταχύτητα του αέρα.

Οι παράγοντες που σχετίζονται με τον άνθρωπο είναι:

- ο μεταβολισμός του,
- το φύλο και η ηλικία του,
- το ντύσιμο
- η δραστηριότητα του ατόμου στον εκάστοτε χώρο ,
- η κατάσταση της υγείας του

Συνεπώς, μαζί με το αυξημένο ενδιαφέρον που έχει παρουσιαστεί για την ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την θερμική άνεση του ανθρώπου, έχει εμφανιστεί και η ανάγκη να αναπτυχθούν τα κατάλληλα μέσα και συστήματα τα οποία θα μπορούν να εξασφαλίσουν τις αποδεκτές συνθήκες τόσο σε χώρους κατοικίας, όσο και σε χώρους εργασίας, μεταφοράς κλπ. Οι εσωτερικοί χώροι θα πρέπει να πληρούν τις απαιτούμενες συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας, αερισμού αλλά και τα κατάλληλα επίπεδα φωτισμού, χρωμάτων, θορύβων, καθώς και ποιότητας αέρα. Η καλή ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος στα κτήρια προσφέρει πλήρη άνεση που αναλύεται σε θερμική άνεση, οπτική άνεση, ακουστική άνεση και καλή ποιότητα αέρα και γίνεται αισθητή μέσω του δέρματος, των ματιών, των αυτιών και της μύτης, ενώ οι επιπτώσεις του ακατάλληλου εσωτερικού περιβάλλοντος (είτε αυτές εμφανίζονται με κακή ποιότητα αέρα, είτε με ξηρή ατμόσφαιρα, είτε με θερμοκρασίες έξω από τα όρια της θερμικής άνεσης), μπορούν να δημιουργήσουν πολλά προβλήματα στους χρήστες των κτιρίων. Στόχος λοιπόν είναι η επίτευξη των επιθυμητών επιπέδων για όλες αυτές τις παραμέτρους, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ορθολογικότερης κατανάλωσης ενέργειας αλλά και κατάλληλων συνθηκών διαβίωσης για τον χρήστη. [11]

## **2.3 Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας**

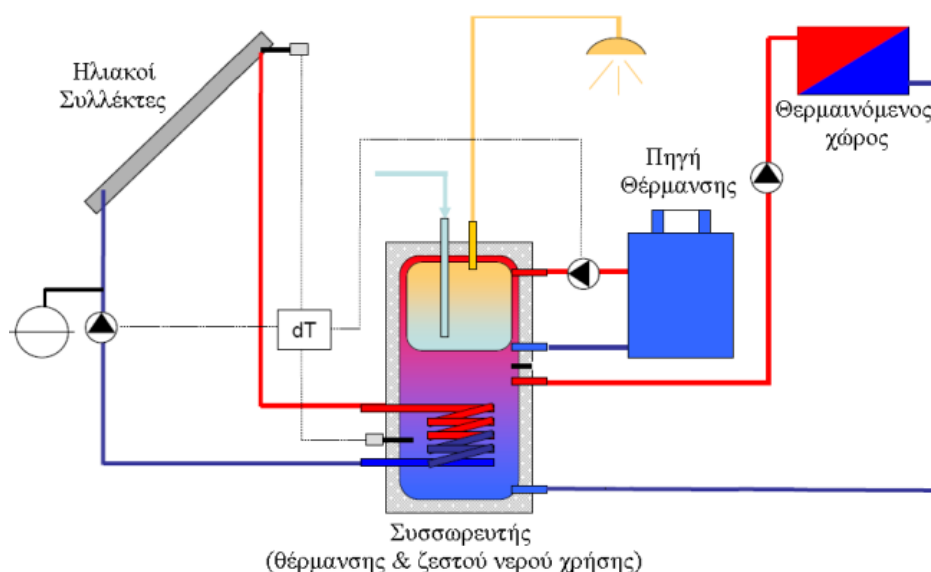
### **2.3.1 Ηλιακή ενέργεια**

Όπως φάνηκε από τα παραπάνω η ηλιακή ενέργεια έχει κυρίαρχο ρόλο στην εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας και στην εξασφάλιση θερμικής άνεσης στα κτίρια. Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία μορφή ενέργειας υψίστης σημασίας καθώς όχι μόνο είναι ανανεώσιμη και δεν απελευθερώνει αέρια του θερμοκηπίου αλλά αποτελεί και την πρωταρχική μορφή ενέργειας όλης της γης αφού όλες οι υπόλοιπες μορφές, όπως η αιολική ενέργεια και η βιομάζα είναι παραγόμενες από αυτήν. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα στη χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι η περιοδικότητά της, χαρακτηριστικό στοιχείο όλων σχεδόν των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δηλαδή τις ώρες της ημέρας και ανάλογα με την εποχή του έτους η ηλιοφάνεια είναι διακοπτόμενη και επιπλέον περίπου οι μισές ώρες του έτους είναι νύχτα. Αυτό σημαίνει αυτόματα ότι πολύ συχνά η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας μπορεί να μην συμπίπτει με τη ζήτηση. Καθώς επίσης υπάρχει περίπτωση να παράγεται περισσότερη ηλιακή ενέργεια από αυτήν που απαιτείται, οπότε μία μορφή αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας που θα δημιουργεί μία χρονική καθυστέρηση στην απόδοσή της θα ήταν ωφέλιμη τόσο ενεργειακά όσο και οικονομικά.[13]

Τα τεχνολογικά συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, για τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα ενεργητικά και τα παθητικά.

### **2.3.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα**

Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας είναι αυτά που απαιτούν τη χρησιμοποίηση μηχανικών μέσων, απλών μέχρι υψηλής τεχνολογίας (αντλίες θερμότητας, εναλλάκτες θερμότητας). Προϋποθέτουν σύνθετους μηχανισμούς συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης της θερμότητας που έχει προέλθει από την ηλιακή ακτινοβολία που δεσμεύτηκε. Για παράδειγμα τα συστήματα που συλλέγουν ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας χρησιμοποιώντας ως ρευστό μεταφοράς κάποιο υγρό ή αέρα, είναι ενεργητικά συστήματα.



**Σχήμα 2.3.1** Τυπικό ηλιακό ενεργητικό σύστημα [14]

Τα ενεργητικά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου:

- Ανοιχτού κυκλώματος: Άμεση θέρμανση του νερού χρήσης ( το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό που θα χρησιμοποιηθεί).
- Κλειστού κυκλώματος: Έμμεση θέρμανση του νερού χρήσης ( το θερμαινόμενο μέσο κυκλοφορεί σε ιδιαίτερο κύκλωμα το οποίο θερμαίνει το νερό που θα χρησιμοποιηθεί, χωρίς να γίνεται ανάμειξή τους, μέσω εναλλάκτη θερμότητας).

Το πιο διαδεδομένο ενεργητικό σύστημα είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας. Ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για ψύξη χώρων, με τις κατάλληλες τεχνολογίες (ψυκτικές μηχανές τύπου απορρόφησης). Πέρα από την οικιακή χρήση, ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε απαιτείται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασιακής στάθμης (όπως στη θέρμανση/ψύξη χώρου, στα συστήματα αφαλάτωσης νερού και στη θέρμανση νερού πισίνας).[15]

### 2.3.3 Παθητικά ηλιακά συστήματα

Τα παθητικά συστήματα είναι εκείνα που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία για θέρμανση ή ψύξη και δεν κάνουν χρήση μηχανικών μέσων για τη μεταφορά της θερμότητας στον χώρο.

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας προϋποθέτει ένα σωστά ενεργειακά σχεδιασμένο κτίριο, σύμφωνα με τις αρχές βιοκλιματικού σχεδιασμού που ήδη αναφέρθηκαν. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα επιτρέπουν σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους για τη θέρμανση των κτιρίων και βελτιώνουν τη θερμική άνεση των ενοίκων τους.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης, είναι ειδικά σχεδιασμένα παράθυρα, τοίχοι, πατώματα, τα οποία συλλέγουν, αποθηκεύουν και διανέμουν την ηλιακή θερμότητα τον χειμώνα και προστατεύουν το κτιριακό κέλυφος από τα ηλιακά κέρδη το καλοκαίρι. Ακόμη είναι απλά, απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και δεν χρειάζονται μηχανικά μέρη. Βασικοί παράγοντες στην κατασκευή πετυχημένων παθητικών συστημάτων είναι η αξιοποίηση του τοπικού κλίματος, η γνώση της κατεύθυνσης και κλίσης του ηλίου στις εκάστοτε συντεταγμένες και η χρήση κατάλληλων δομικών υλικών για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας καθώς και την αποθήκευση και μετάδοση της με τη μορφή θερμότητας.

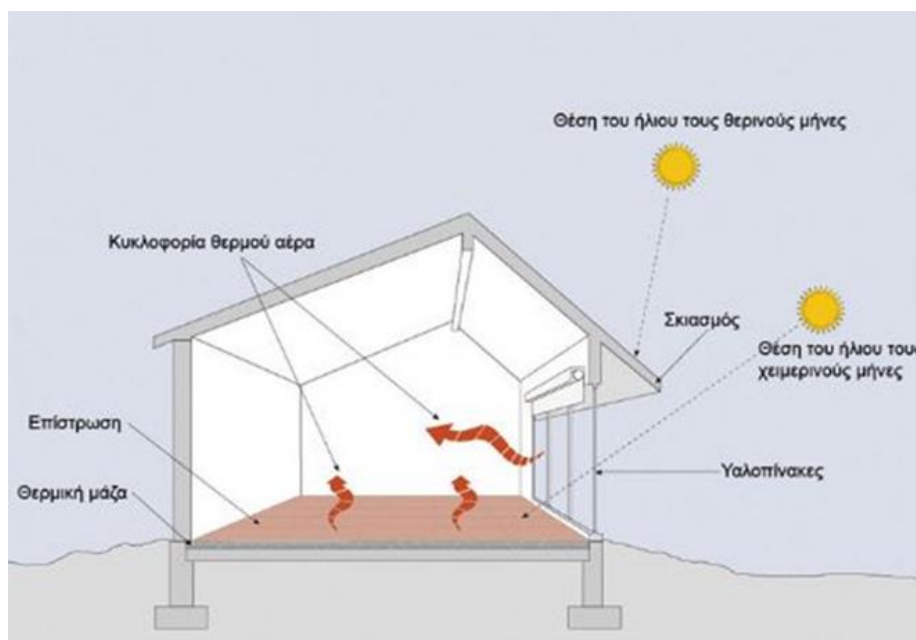
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα παθητικά συστήματα, διακρίνονται σε υλικά συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας και σε υλικά αποθήκευσης της θερμότητας. Το πιο σύνηθες υλικό συλλογής είναι το γυαλί, το οποίο είναι διαφανές και άκαμπτο, παρουσιάζει αντοχή στις καιρικές μεταβολές και στις χημικές αντιδράσεις, αλλά είναι αρκετά βαρύ και έχει μικρή αντοχή σε μηχανική κρούση. Όσον αφορά τα υλικά αποθήκευσης της θερμότητας, αυτά μπορεί να ποικίλλουν από το νερό και τα παραδοσιακά δομικά υλικά (όπως σκυρόδεμα, πέτρα, τούβλο) μέχρι τα προηγμένης τεχνολογίας υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials), τα οποία θα αποτελέσουν το βασικό αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία και θα αναλυθούν εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο. Αυτά τα υλικά έχουν πολύ μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα και άρα μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας από ότι ένα συμβατικό οικοδομικό υλικό, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα στο να αποδίδουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας το χειμώνα και να προστατεύουν από την υπερθέρμανση το καλοκαίρι. Τα PCM είναι αναδυόμενη τεχνολογία και διατίθενται όλο και περισσότερο στην αγορά, ως αποτελεσματικότερη λύση για κτίρια με κακή θερμική άνεση.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι συνήθως απλές κατασκευές ενσωματωμένες στο κέλυφος του κτιρίου και λειτουργούν δίχως να καταναλώνουν ενέργεια τελικής χρήσης. Συμβάλουν με αυτό τον τρόπο στην μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας είτε σε συνέργεια με τα συνηθισμένα συστήματα θέρμανσης/ψύξης μετριάζοντας τα φορτία τους είτε αντικαθιστώντας τα σταδιακά πλήρως.

Τα παθητικά συστήματα χωρίζονται σε αυτά του άμεσου κέρδους, του έμμεσου κέρδους και του απομονωμένου κέρδους.[16],[17]

### 2.3.3.1 Συστήματα άμεσου ηλιακού κέρδους

Τα συστήματα άμεσου κέρδους είναι το πιο απλό και συνηθέστερο παθητικό ηλιακό σύστημα και βασίζεται στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για τη θέρμανση των κτιρίων μέσω της αξιοποίησης νότιων παραθύρων. Στην περίπτωση αυτή το κτίριο λειτουργεί σαν συλλέκτης, αποθήκη και διανομέας της θερμότητας. Τα παράθυρα συμμετέχουν ούτως ή άλλως στο θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου ανεξάρτητα αν ο σχεδιασμός είναι συμβατικός ή ενεργειακός. Στο παθητικό σύστημα του άμεσου κέρδους η διαφορά από ένα συμβατικό σύστημα, εντοπίζεται στη θερμική απόδοση των παραθύρων, των υλικών του και το μέγεθος των δομικών του στοιχείων.



Σχήμα 2.3.2 Τυπικό ηλιακό παθητικό σύστημα, άμεσου ηλιακού κέρδους[18]

Η αποτελεσματικότητα αυτού του συστήματος εξαρτάται καταρχήν από το μέγεθος των νότιων παραθύρων, αφού πρέπει να εξασφαλίζονται μεγάλες γυάλινες επιφάνειες, αλλά και από τον προσανατολισμό. Σχεδόν όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα απαιτούν περίπου νότιο προσανατολισμό, ώστε να υπάρχει ηλιακή πρόσπτωση στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας το χειμώνα. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η επιλογή του είδους και της κλίσης των υαλοπινάκων. Το κατακόρυφο υαλοστάσιο είναι προτιμότερο γιατί δέχεται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα ενώ το θέρος τα κέρδη από ένα κατακόρυφο υαλοστάσιο είναι μικρότερα από αυτά που εξασφαλίζονται αν το υαλοστάσιο ήταν υπό άλλες γωνίες επειδή ο ήλιος είναι ψηλά στον ουρανό και η ηλιακή δέσμη έχει κατά συνέπεια υψηλή γωνία πρόσπτωσης.

Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο έχουν τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία εκτός των υαλοπινάκων, δηλαδή τοίχοι, δάπεδο, οροφή. Καταρχήν, όλοι οι εσωτερικοί χώροι πρέπει να έχουν ένα λειτουργικό σχεδιασμό με κύρια οργάνωση προς νότο. Πρέπει να εξασφαλίζεται μεγάλη θερμική μάζα στο εσωτερικό του κτιρίου, που αυτό σημαίνει ότι για τα δομικά στοιχεία πρέπει να χρησιμοποιούνται βαριά υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι διότι εξασφαλίζεται η εξομάλυνση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατοικίας ακόμα και όταν οι εξωτερικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι έντονες και ο δεύτερος λόγος είναι ότι επιτυγχάνεται η απαραίτητη χρονική καθυστέρηση στην απόδοση της αποθηκευμένης θερμότητας μέσα στην κατοικία, ώστε να επιτρέπεται η θέρμανση και μετά τη δύση του ηλίου.[19],[20]

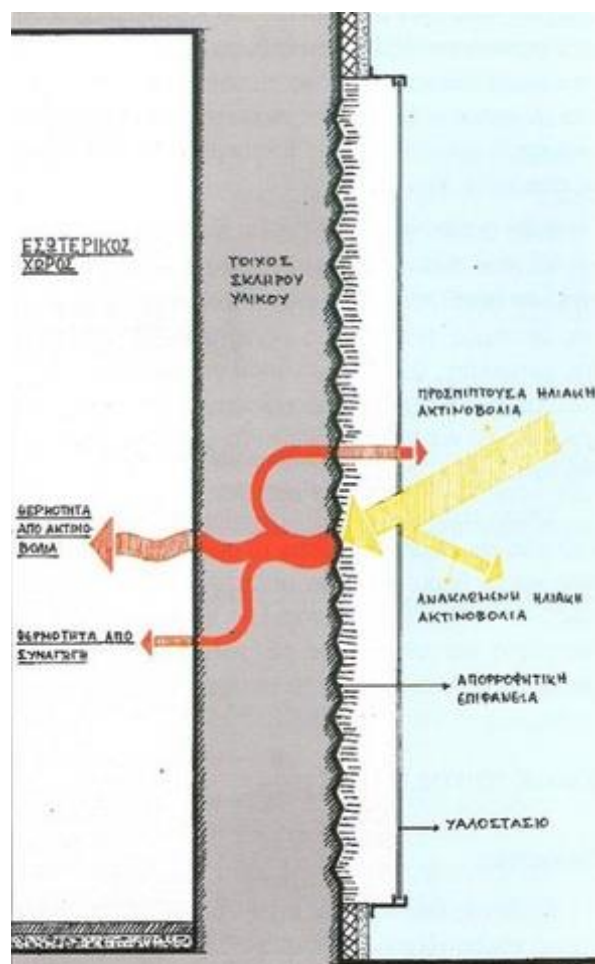
### 2.3.3.2 Συστήματα έμμεσου ηλιακού κέρδους

Τα συστήματα έμμεσου κέρδους είναι συστήματα που αξιοποιούν έμμεσα τα ηλιακά οφέλη για τη θέρμανση του κτιρίου. Αυτά τα συστήματα απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στη θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης. Η κύρια διαφορά με τα συστήματα άμεσου ηλιακού κέρδους είναι ότι οι ακτίνες του ήλιου δεν διασχίζουν το χώρο αφού η θερμική μάζα είναι ουσιαστικά μια εξωτερική επιφάνεια στον νότο. Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι οι ηλιακοί τοίχοι μάζας και ο τοίχος θερμικής αποθήκευσης Trombe-Michel.[19],[20]

## Ηλιακός τοίχος μάζας

Στο σύστημα αυτό, υπάρχει ένα γυάλινο άνοιγμα προσανατολισμένο στο νότο, μπροστά από τον τοίχο. Μεταξύ του γυαλιού και του τοίχου υπάρχει ένα διάκενο στο οποίο γίνεται η θέρμανση του αέρα και σταδιακά αρχίζει και η θέρμανση της εξωτερικής πλευράς του τοίχου. Βασικό χαρακτηριστικό του τοίχου που πρέπει να μελετάται είναι η θερμοχωρητικότητα του η οποία ουσιαστικά εξασφαλίζει την αποθήκευση μεγάλης ποσότητας θερμότητας έτσι ώστε μέσω της χρονικής υστέρησης να αποδίδεται η αποθηκευμένη θερμότητα αργά το βράδυ, όταν υπάρχει και μεγαλύτερη ανάγκη.

Είναι σημαντικό να ξεχωρίσουμε τον τοίχο νερού ο οποίος έχει μελετηθεί εκτενέστερα λόγω της πολύ υψηλής θερμοχωρητικότητας του νερού. Ένα σύνολο κοντέινερ με νερό βρίσκεται στην νότια πλευρά του σπιτιού σαν τοίχος. Αντίθετα με τους συμβατικούς τοίχους από μπετόν ή σκυρόδεμα, οι τοίχοι νερού απαιτούν μικρότερη επιφάνεια. [21]



Σχήμα 2.3.3 Σχηματική αναπαράσταση τοίχου μάζας [22]

## ***Τοίχος Trombe-Michel***

Το σύστημα αποτελείται από έναν νότια προσανατολισμένο τοίχο μεγάλου πάχους (συνήθως 30-40 cm), υψηλής θερμοχωρητικότητας, βαμμένο σε σκούρο χρώμα στην εξωτερική του πλευρά. Σε απόσταση 3-5cm υπάρχει υαλοστάσιο και στο ενδιάμεσο τοίχου και γυάλινης επιφάνειας, διάκενο αέρα. Στο πάνω και κομμάτι του τοίχου υπάρχουν θυρίδες (συνήθως 10 cm) οι οποίες βοηθούν στην ομαλή διακίνηση του αέρα.

Ο τοίχος Trombe βασίζεται κυρίως σε 2 φαινόμενα :

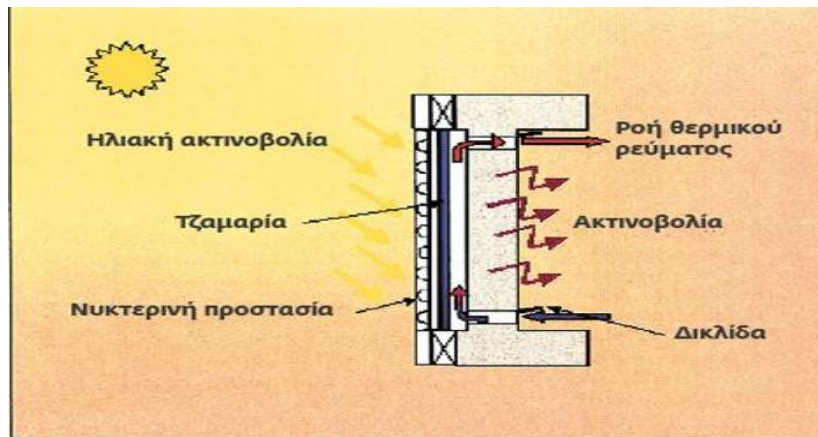
- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Η θερμότητα του ηλίου, με τη μορφή υπεριώδους ακτινοβολίας μικρού κύματος και υψηλής ενέργειας, περνάει την γυάλινη επιφάνεια και εγκλωβίζεται στο διάκενο. Αυτό συμβαίνει διότι η προηγούμενη ακτινοβολία έχει απορροφηθεί στην σκουρόχρωμη επιφάνεια και επανεκπέμπεται με τη μορφή μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία. Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται με αργό ρυθμό από τον τοίχο στην εσωτερική επιφάνεια . Ο χώρος πίσω από τον τοίχο θερμαίνεται με μία χρονική υστέρηση της τάξης των 8-10 ωρών.

- Το φαινόμενο του θερμοσιφωνισμού:

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η προσπίπτουσα ακτινοβολία περνάει από το τζάμι του υαλοστασίου και θερμαίνει τον αέρα που βρίσκεται στο διάκενο. Οι θυρίδες ανοίγουν και ο θερμός αέρας, λόγω υψηλότερης πυκνότητας, ανεβαίνει προς τα πάνω και περνάει στον εσωτερικό χώρο ενώ αντίστοιχα ο κρύος αέρας του δωματίου, αναπληρώνει το κενό που δημιουργείται. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι θυρίδες παραμένουν κλειστές για να μην έχουμε απώλειες θερμότητας και η θερμότητα μεταδίδεται μέσω ακτινοβολίας από τον τοίχο στον χώρο. Τους θερινούς μήνες η λειτουργία του Τοίχου αλλάζει. Ένα τμήμα του εξωτερικού υαλοστασίου, στο πάνω μέρος, πρέπει να ανοίγει για να απομακρύνεται ο ζεστός αέρας του διακένου. Επιπλέον για την αποφυγή υπερθέρμανσης του χώρου η επάνω θυρίδα του τοίχου παραμένει κλειστή.[23]

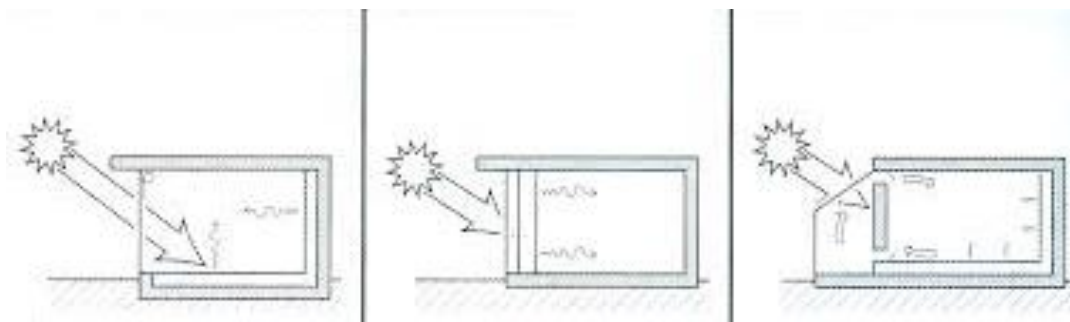




Σχήμα 2.3.4 Σχηματική αναπαράσταση τοίχου Trombe [24]

### 2.3.3.3 Συστήματα απομονωμένου ηλιακού κέρδους

Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους η επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ενέργειας δεν βρίσκεται σε επαφή με τον χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Ένα απομονωμένο σύστημα έχει αναπόσπαστα κομμάτια ξεχωριστά από τον χώρο της κατοικίας. Ένας γυάλινος ηλιακός συλλέκτης, αποθηκεύει θερμότητα και μέσω ειδικού δικτύου διασύνδεσης την μεταφέρει στην κατοικία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των απομονωμένων συστημάτων είναι οι ηλιακοί χώροι, τα θερμοκήπια και τα ηλιακά αίθρια. Για την αποφυγή απωλειών, είναι βασικό η πρόβλεψη ρυθμίσεων στο κέλυφος του θερμοκηπίου-ηλιακού χώρου όπως νυκτερινή προστασία το χειμώνα και ηλιοπροστασία σε συνδυασμό με αερισμό το καλοκαίρι.[20]



Σχήμα 2.3.5 Σχήμα άμεσου(αριστερά), έμμεσου(μέση) και απομονωμένου(δεξιά) συστήματος κέρδους [25]



## **3 Φαινόμενο αλλαγής φάσης**

### **3.1 Γενικά**

Η μείωση κατανάλωσης ενέργειας και η εξασφάλιση θερμικής άνεσης των κτιρίων με τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης ως δομικά συστατικά είναι η βασική μελέτη της παρούσας διπλωματικής. Προτού γίνει η επισκόπηση των συγκεκριμένων υλικών αποθήκευσης θερμότητας, είναι απαραίτητη η κατανόηση βασικών θερμοδυναμικών διεργασιών, όπως το φαινόμενο αλλαγής φάσης των υλικών και εννοιών, όπως η αισθητή και η λανθάνουσα θερμότητα.

### **3.2 Κατάσταση της ύλης**

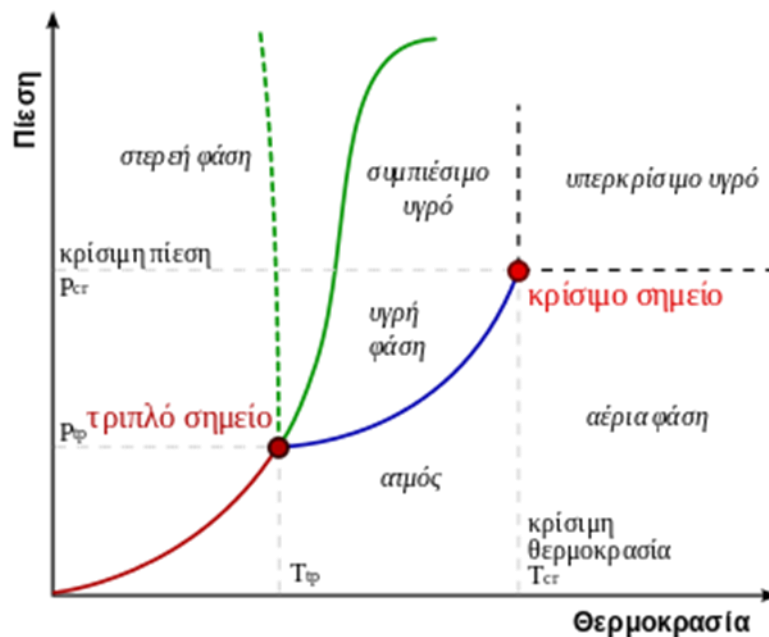
Η κατάσταση της ύλης ενός σώματος περιγράφει το πόσο εύκολα μεταβάλλεται το σχήμα και το μέγεθός του. Υπάρχουν τρεις βασικές καταστάσεις της ύλης, η στερεά, η υγρή και η αέρια. Η κατάσταση στην οποία θα βρεθεί ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντός του.

Η σύγχρονη περιγραφή της κατάστασης της ύλης γίνεται με σύγκριση των διαφορών σχέσης της κατάστασης των μορίων. Στερεά θεωρούνται τα υλικά στα οποία τα μόρια κρατούνται σε σταθερές θέσεις μεταξύ τους στο χώρο. Υγρά θεωρούνται τα υλικά στα οποία τα μόρια είναι κοντά μεταξύ τους αλλά όχι σε σταθερές θέσεις. Αέρια είναι τα υλικά στα οποία τα μόρια βρίσκονται σε σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και η θέση τους δεν επηρεάζεται από τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης των μορίων. Σαν τέταρτη κατάσταση της ύλης αναφέρεται το πλάσμα, ιδιαίτερα ιονισμένο αέριο σε υψηλή θερμοκρασία. Η ιονισμένη κατάσταση δημιουργεί ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις που δίνουν ιδιαίτερες ιδιότητες στο πλάσμα που το ξεχωρίζουν από τα αέρια.[26]

### 3.3 Αλλαγή φάσης

Αν ένα σώμα βρίσκεται σε διαφορετική κατάσταση από αυτήν που αντιστοιχεί στις συνθήκες του περιβάλλοντος, τότε τη μεταβάλλει για να βρεθεί στην κατάλληλη. Η μετατροπή του στερεού σε υγρό ονομάζεται τήξη, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται πήξη. Η μετατροπή από αέριο σε υγρό ονομάζεται υγροποίηση ή συμπύκνωση και η μετατροπή από στερεό σε αέριο ονομάζεται εξάχνωση. Σε αυτές τις μετατροπές δεν έχει διαφορά αν προήλθαν από ασυμφωνία τρέχουσας και κατάλληλης κατάστασης ή λόγω μερικών πιέσεων. Αλλά στη μετατροπή υγρού σε αέριο διακρίνονται δύο περιπτώσεις: ο βρασμός και η εξάτμιση. Ο βρασμός οφείλεται στην τάση του υλικού να επιστρέψει στην κατάλληλη κατάσταση, ενώ η εξάτμιση οφείλεται στην μερική πίεση. Για το λόγο αυτό και ο βρασμός εμφανίζεται μόνο σε συγκεκριμένες συνθήκες και συμβαίνει σε όλη την έκταση του υγρού, ενώ η εξάτμιση μπορεί να γίνει σε οποιοσδήποτε συνθήκες και συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια του υγρού.

Γενικά οι αλλαγές φάσης που δεν οφείλονται στις μερικές πιέσεις, γίνονται σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης για την κάθε καθαρή ουσία. Συνεπώς αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες του κάθε υλικού και μάλιστα αποτελούν τις συνθήκες ισορροπίας δύο διαφορετικών καταστάσεων του.[26]



Σχήμα 3.3.1 Διάγραμμα αλλαγής φάσης νερού [27]

## **3.4 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας**

### **3.4.1 Αισθητή θερμότητα**

Η θερμότητα που προκαλεί την αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου όταν προστίθεται ή αφαιρείται από αυτό ονομάζεται αισθητή θερμότητα.[28]

#### ***Αποθήκευση αισθητής θερμότητας***

Ο πιο γνωστός τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι η αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Η θερμότητα μεταφέρεται στο μέσο που χρησιμοποιείται για αποθήκευση και ανεβάζει τη θερμοκρασία του. Ο λόγος της αποθηκευόμενης ενέργειας προς τη θερμοκρασιακή μεταβολή καλείται θερμοχωρητικότητα του μέσου, η οποία είναι επιθυμητό να είναι αυξημένη. Ως μέσα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται υγρά υλικά (όπως το νερό, τα παράγωγα πετρελαίου ή κάποια τηγμένα άλατα) ή στερεά υλικά (όπως οι πέτρες ή τα μέταλλα). Τα αέρια δεν έχουν πρακτική χρήση λόγω ακριβώς της μικρής θερμοχωρητικότητάς τους.

Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα. Αυτά είναι η περιορισμένη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου του μέσου αποθήκευσης και η μη ισοθερμική συμπεριφορά κατά την αποθήκευση και την απόδοση θερμότητας, δηλαδή κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση του συστήματος.[29]

### **3.4.2 Λανθάνουσα θερμότητα**

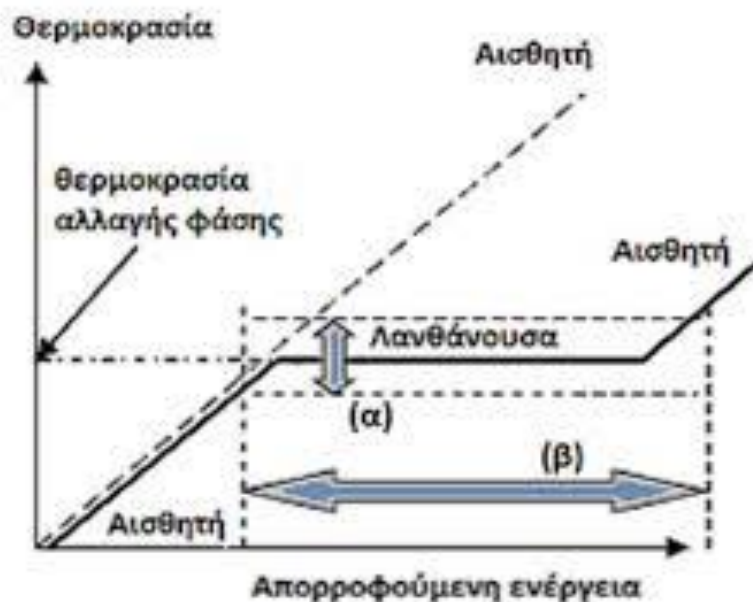
Όπως αναφέρθηκε όλες οι καθαρές ουσίες στη φύση έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν κατάσταση αλλά τέτοιου είδους αλλαγές απαιτούν την προσθήκη ή την αφαίρεση θερμότητας. Η θερμότητα που προκαλεί αυτές τις αλλαγές ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα. Η λανθάνουσα θερμότητα, ωστόσο, δεν επηρεάζει τη θερμοκρασία μιας ουσίας καθώς καταναλώνεται ή αποδίδεται κατά την διάλυση ή τη δημιουργία των μοριακών δεσμών του υλικού, οι οποίοι έχουν άμεση σχέση με τη δομή ενός σώματος σε μικροσκοπικό επίπεδο.[28]

## Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Η αποθήκευση με λανθάνουσα θερμότητα βασίζεται στην απορρόφηση και στην απελευθέρωση θερμότητας όταν ένα υλικό που δρα ως μέσο αποθήκευσης, όπως τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM), αλλάζει φάση από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο ή αντίστροφα. Μεταξύ αυτών των μετατροπών, τα δύο είδη που είναι πιο συχνά εκμεταλλεύσιμα είναι αυτά της μετατροπής στερεού σε υγρό και στερεό σε υγρό. Οι μετατροπές στερεού σε αέριο και υγρού σε αέριο δεν επιλέγονται για πρακτικές χρήσεις, εξαιτίας των μεγάλων όγκων που απαιτούνται για τα αντίστοιχα συστήματα.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του είδους αποθήκευσης είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας και ανά μονάδα όγκου. Επίσης, μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί με τη λανθάνουσα θερμότητα να αποθηκεύεται ενέργεια σε σταθερή θερμοκρασία, η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του υλικού.

Σε αυτήν την περίπτωση η αποθηκευόμενη θερμική ενέργεια εξαρτάται από την ποσότητα του αποθηκευτικού μέσου, την ενδοθερμική θερμότητα της αντίδρασης και το βαθμό της μετατροπής του υλικού[29]



Σχήμα 3.4.1 Απεικόνιση αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας[29]

## 4 Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)

### 4.1 Γενικά

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

Τα PCM στερεού-υγρού ενεργούν αρχικά όπως τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης, η θερμοκρασία τους αυξάνεται καθώς απορροφούν ηλιακή θερμότητα. Σε αντίθεση με τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όταν τα PCM φτάσουν την θερμοκρασία στην οποία αλλάζουν φάση, απορροφούν μεγάλα ποσά θερμότητας χωρίς να γίνονται θερμότερα. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος στο χώρο γύρω από το PCM πέφτει, τότε αυτό στερεοποιείται απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητά του. Τα PCM απορροφούν και εκπέμπουν θερμότητα διατηρώντας παράλληλα μια σχετικά σταθερή θερμοκρασία.



Σχήμα 4.1.1 Παράδειγμα λειτουργίας PCM [33]

Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές δυσκολίες που μπορεί να προκύψουν κατά τη χρήση ορισμένων στερεών-υγρών PCM όπως η υπόψυξη, ο διαχωρισμός των φάσεων και η διάβρωση οι οποίες θα διερευνηθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Το μεγάλο εύρος των θερμοκρασιών μετάβασης φάσης που είναι διαθέσιμο καθιστά τα PCM κατάλληλα για ποικίλες εφαρμογές. Παραδείγματος χάριν τα PCM που βρίσκονται μεταξύ 15 °C και 40 °C μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτεταμένα για τη θέρμανση ή τη ψύξη κτιρίων, καθώς και για πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών.

Προκειμένου να γίνει επιλογή του πιο πρακτικού PCM για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης είναι συχνά ο πιο σημαντικός παράγοντας. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού θα πρέπει γενικά να είναι τόσο υψηλή όσο να καθίσταται δυνατή η αποθήκευση της μέγιστης ποσότητας ενέργειας ανά μονάδα μάζας. Μια ειδικά υψηλή θερμοχωρητικότητα επιτρέπει στο PCM να λειτουργήσει επιπροσθέτως ως υλικό αποθήκευσης αισθητής θερμότητας εκτός από υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας κατά τη λειτουργία σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Μια υψηλή θερμική αγωγιμότητα επιτρέπει στη θερμική ενέργεια να μεταφερθεί πιο αποτελεσματικά μέσα στο υλικό ενώ μια χαμηλή θερμική αγωγιμότητα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες κλίσεις θερμοκρασίας για φόρτιση και αποφόρτιση. Η τελική εφαρμογή και το περιβάλλον στο οποίο το PCM θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του καταλληλότερου PCM. Τα PCM με διαβρωτικές ιδιότητες δεν είναι κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές ή όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ένα σύστημα που περιέχει μεταλλικά τμήματα. Επίσης, η μεταβολή του όγκου κατά τη διάρκεια της μετάβασης μπορεί να επηρεάσει το σχεδιασμό των συστημάτων ανταλλαγής θερμότητας. Μερικά PCM είναι επίσης τοξικά και εύφλεκτα κάτι που αποτελεί επίσης μια σημαντική παρατήρηση. Ωστόσο, ο πιο ανασταλτικός παράγοντας μέχρι στιγμής είναι το κόστος, το οποίο ποικίλλει σημαντικά σε όλο το φάσμα των διαθέσιμων PCM.[30],[31]



## 4.2 Ιδιότητες των PCM

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

### 4.2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες

- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου έτσι ώστε ο απαιτούμενος όγκος του δοχείου, που αποθηκεύει μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας, να είναι ελάχιστος.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για την παροχή πρόσθετης, σημαντικής αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα για στερεές και υγρές φάσεις προκειμένου να επιτευχθεί φόρτιση/ αποφόρτιση της ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης.
- Μικρές μεταβολές του όγκου κατά την αλλαγή φάσης και μικρά τάση ατμών στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας προκειμένου να περιορισθεί το πρόβλημα αποθήκευσης.
- Σταθερή συμπεριφορά του PCM για δεδομένη αποθηκευτική ικανότητα με κάθε κύκλο τήξης/στερεοποίησης
- Θερμοκρασία τήξης στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας.

### 4.2.2 Κινητικές ιδιότητες

- Υψηλή εμπύρινη αναλογία προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπόψυξης της υγρής φάσης.
- Υψηλό ποσοστό ανάπτυξης κρυστάλλων, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ανάκτησης θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης.

### 4.2.3 Χημικές ιδιότητες

- Χημική σταθερότητα.
- Πλήρης αναστρέψιμος κύκλος τήξης/στερεοποίησης.
- Καμία υποβάθμιση μετά από πολλούς κύκλους τήξης/στερεοποίησης.
- Καμία διαβρωτικότητα στα κατασκευαστικά υλικά.
- Αποφυγή χρήσης τοξικών, εύφλεκτων και εκρηκτικών υλικών για ασφάλεια.
- Χρήση κυρίως ανακυκλώσιμων υλικών για περιβαλλοντολογικούς λόγους

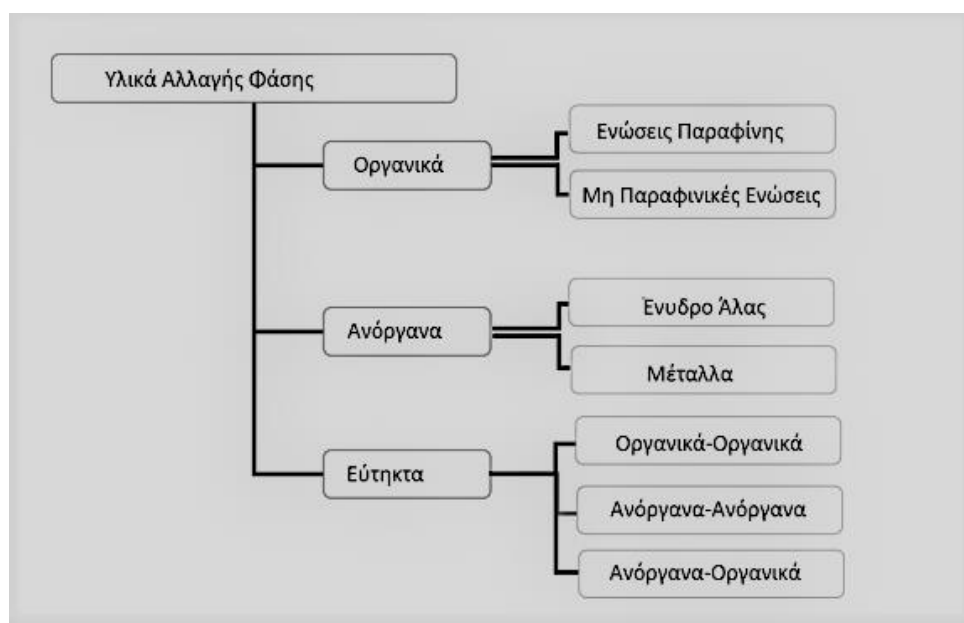
#### 4.2.4 Οικονομικές ιδιότητες

- Χαμηλή τιμή πώλησης, για λόγους ανταγωνιστικότητας σε σχέση με άλλα υλικά που προσφέρουν δυνατότητες αποθήκευσης θερμότητας για ψύξη και θέρμανση.
- Διαθέσιμα σε μεγάλο εύρος κλίμακας.[32]

### 4.3 Κατηγοριοποίηση των PCM

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

Μια κατηγοριοποίηση των PCM φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.3.1 Ταξινόμηση των PCM [31]

#### 4.3.1 Οργανικά PCM

Τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε παραφίνες και μη παραφίνες, αυτά είναι συμπαγή μέσα τήξης, τήκονται και ψύχονται χωρίς διαχωρισμό φάσης και εμφανίζουν συνεχή υποβάθμιση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Επίσης το χαρακτηριστικό της αυτοδημιουργίας πυρήνων σημαίνει ότι αναπτύσσουν κρυστάλλους με ελάχιστη ή καθόλου υπέρψυξη και συνήθως είναι μη διαβρωτικά.

#### 4.3.1.1 Παραφίνες

Τα κεριά παραφίνης αποτελούνται κυρίως από ένα μείγμα αλκαλίων  $CH_3 - (CH_2)_n - CH_3$ . Η κρυστάλλωση της  $(CH_2)_n - CH_3$  – αλυσίδας απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας. Τόσο η τήξη όσο και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνεται με το μήκος της αλυσίδας. Λόγω της σημασίας του κόστους, μόνο οι ειδικά τεχνικά επεξεργασμένες παραφίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Πλεονεκτήματα της παραφίνης είναι η ασφάλεια, αξιοπιστία, είναι ένα προβλέψιμο - φθινό υλικό και μη διαβρωτικό. Επίσης είναι χημικώς αδρανής και σταθερή κάτω των  $500^\circ C$ , δείχνει ελάχιστες μεταβολές όγκου κατά την τήξη και αρκετά χαμηλή πίεση ατμών σε υγρή μορφή. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά μας δείχνουν ότι οι παραφίνες έχουν πολύ μεγάλο κύκλο τήξης / ψύξης. Βέβαια εκτός από αυτές τις ευνοϊκές ιδιότητες η παραφίνη παρουσιάζει και κάποιες αρνητικές όπως : χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, δεν είναι συμβατή με πλαστικά δοχεία και είναι εν μέρει εύφλεκτη. Όλες αυτές οι ανεπιθύμητες ενέργειες μπορούν να απαλειφθούν τροποποιώντας το κεριά και το σύστημα αποθήκευσης.

#### 4.3.1.2 Μη Παραφίνες.

Τα υλικά μη παραφίνης είναι τα πιο πολυπληθή, όσο αναφορά την αγορά των PCM, και παρουσιάζουν πολύ ποικίλες ιδιότητες. Καθένα από αυτά τα υλικά έχει τις δικές του ιδιότητες, σε αντίθεση με τα υλικά παραφίνης τα οποία έχουν πολύ παρόμοιες ιδιότητες. Αυτή είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υποψήφιων PCM αποθήκευσης. Αυτά τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε περαιτέρω υποομάδες ως λιπαρά οξέα και μη οργανικές παραφίνες. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των οργανικών υλικών είναι τα ακόλουθα: υψηλή θερμότητα τήξης, εύφλεκτα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλά σημεία ανάφλεξης, ήπια διαβρωτικά, μεταβαλλόμενο επίπεδο τοξικότητας και αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλές τιμές θερμοκρασίας τήξης, συγκρίσιμες με αυτές τις παραφίνης. Παρουσιάζουν επίσης αναπαραγωγίσιμη τήξη και πήξη χωρίς προβλήματα υπέρψυξης. Ο γενικός τύπος που περιγράφει το λιπαρό οξύ δίνεται από το  $CH_3(CH_2)_nCOOH$ . Ωστόσο το μείζον μειονέκτημά τους είναι το κόστος τους, το οποίο είναι δύο με δυόμισι φορές μεγαλύτερο από αυτό των επεξεργασμένων παραφινών.

### 4.3.2 Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης

Τα ανόργανα υλικά ταξινομούνται σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά. Αυτά τα PCM δεν παρουσιάζουν πρόβλημα υπέρψυξης και οι θερμότητες τήξης δεν υποβαθμίζονται.

#### 4.3.2.1 Ένυδρα Άλατα

Τα ένυδρα άλατα μπορούν να θεωρηθούν ως σύμπλοκα ανόργανων αλάτων και νερού σχηματίζοντας ένα τυπικό κρυσταλλικό στερεό. Ένα ένυδρο άλας συνήθως τήκεται σε ένα ένυδρο άλας με λιγότερα μόρια νερού.

Στο σημείο τήξης οι ενυδατωμένοι κρύσταλλοι διαλύονται σε άνυδρο άλας και νερό ή σε ένα ένυδρο άλας με λιγότερα μόρια νερού και νερό. Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα ένυδρα άλατα είναι η δημιουργία ενός μη συμπαγούς μείγματος, το οποίο προκαλείται από το γεγονός ότι το απελευθερωμένο νερό της κρυστάλλωσης δεν επαρκεί για να διαλύσει όλη την παρούσα στερεά φάση.

Τα περισσότερα ένυδρα άλατα έχουν επίσης φτωχές ιδιότητες πυρήνωσης, με αποτέλεσμα την υπέρψυξη του υγρού πριν την κρυστάλλωσή του. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να προσθέσουμε ένα παράγοντα πυρήνωσης, ο οποίος παρέχει τον αριθμό πυρήνων με τον οποίο ξεκίνησε ο σχηματισμός κρυστάλλων. Μια άλλη λύση είναι να διατηρήσουμε μερικούς κρυστάλλους σε μια κρύα περιοχή για να χρησιμεύσουν ως πυρήνες.

Τα ένυδρα άλατα είναι η πιο σημαντική ομάδα των PCM, τα οποία έχουν μελετηθεί εκτενώς για τη χρήση τους σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι: υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου, σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια από τη θερμική αγωγιμότητα της παραφίνης), εμφανίζουν μικρές αλλαγές όγκου κατά την τήξη, δεν παρουσιάζουν διάβρωση, είναι συμβατές με πλαστικά δοχεία και τέλος δεν είναι τοξικές. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα των ένυδρων αλάτων είναι ότι πολλά από αυτά είναι φθηνά για ενεργειακή αποθήκευση. Τρεις τύποι συμπεριφοράς των λιωμένων ένυδρων αλάτων μπορούν να ταυτοποιηθούν, ως : συμπαγούς, μη συμπαγούς και ημισυμπαγούς τήξης.

- Η συμπαγής τήξη συμβαίνει όταν το άνυδρο άλας είναι πλήρως διαλυμένο στο νερό της ενυδάτωσης κατά τη θερμοκρασία τήξης.
- Η μη συμπαγής τήξη συμβαίνει όταν το άλας δεν είναι εξ ολοκλήρου διαλυμένο στο νερό της ενυδάτωσης στο σημείο τήξης.
- Η ημισυμπαγής τήξη των υγρών και στερεών φάσεων στην ισορροπία, κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης είναι διαφορετική στην τήξη λόγω της μετατροπής του ένυδρου σε ένα ένυδρο υλικό με λιγότερα μόρια νερού μέσω της απώλειας νερού.

Τα κύρια προβλήματα χρήσης ένυδρων αλάτων ως PCM είναι :

- Τα περισσότερα ένυδρα άλατα τα οποία κρίνονται κατάλληλα για θερμική αποθήκευση, λιώνουν ακανόνιστα.
- Κοινό πρόβλημα όλων των ένυδρων αλάτων είναι αυτό της υπέρψυξης το οποίο θα αναλυθεί και περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο.

#### 4.3.2.2 Μέταλλα

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα μέταλλα χαμηλής τήξης και τα ευτηκτικά μέταλλα. Αυτά δεν έχουν γίνει αποδεκτά για την χρήση τους ως PCMs λόγω του μεγάλου βάρους τους. Ωστόσο, όταν ο όγκος είναι πρόβλημα, είναι πιθανά υποψήφια λόγω της υψηλής θερμοκρασίας τήξης ανά μονάδα όγκου. Μια μεγάλη διαφορά μεταξύ τους και άλλων PCMs είναι η θερμική τους αγωγιμότητα. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των υλικών είναι τα εξής: χαμηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα βάρους, υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου, χαμηλή ειδική θερμότητα και σχετικά χαμηλή πίεση ατμών.

#### 4.3.3 Ευτηκτικά

Τα ευτηκτικά υλικά αλλαγής φάσης είναι μείγματα ανόργανων και οργανικών PCM. Έτσι, μπορούν να χωριστούν σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με τα υλικά από τα οποία συντίθενται: οργανικά-οργανικά, ανόργανα-ανόργανα και οργανικά-ανόργανα ευτηκτικά υλικά. Κάθε ένα από τα συστατικά ενός ευτηκτικού μείγματος, λιώνει και παγώνει με τον ίδιο τρόπο σχηματίζοντας έτσι ένα μείγμα συστατικών κρυστάλλων κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης. Το ευτηκτικό μείγμα λιώνει και στερεοποιείται χωρίς κάποιο διαχωρισμό, καθώς αυτό ψύχεται σε ένα περιορισμένο μείγμα κρυστάλλων, αφήνοντας ελάχιστες ευκαιρίες για τον διαχωρισμό των συστατικών. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ομάδας των ευτηκτικών μειγμάτων είναι η δυνατότητά τους να τήκονται – στερεοποιούνται, ταυτόχρονα χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό φάσεων. Επίσης, έχουν τα πλεονεκτήματα και των οργανικών και των ανόργανων PCM. Από την άλλη πλευρά, το κόστος παραγωγής μπορεί να είναι διπλάσιο ή ακόμα και τριπλάσιο απ' αυτό των οργανικών και ανόργανων PCM, κάτι που αποτελεί βασικό μειονέκτημα. Γενικά, τα οργανικά ευτηκτικά μείγματα έχουν μικρότερη θερμοκρασία τήξης και μεγαλύτερη θερμότητα τήξης απ' ότι τα ανόργανα ευτηκτικά μείγματα, καθιστώντας τα πρώτα πιο κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές.[31]



## **5 Ενσωμάτωση των PCM σε δομικά υλικά**

### **5.1 Γενικά**

Τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κτίρια είτε σε ενεργητικά είτε σε παθητικά συστήματα. Και στις δύο περιπτώσεις τα PCM ενσωματώνονται στο κέλυφος του κτιρίου.

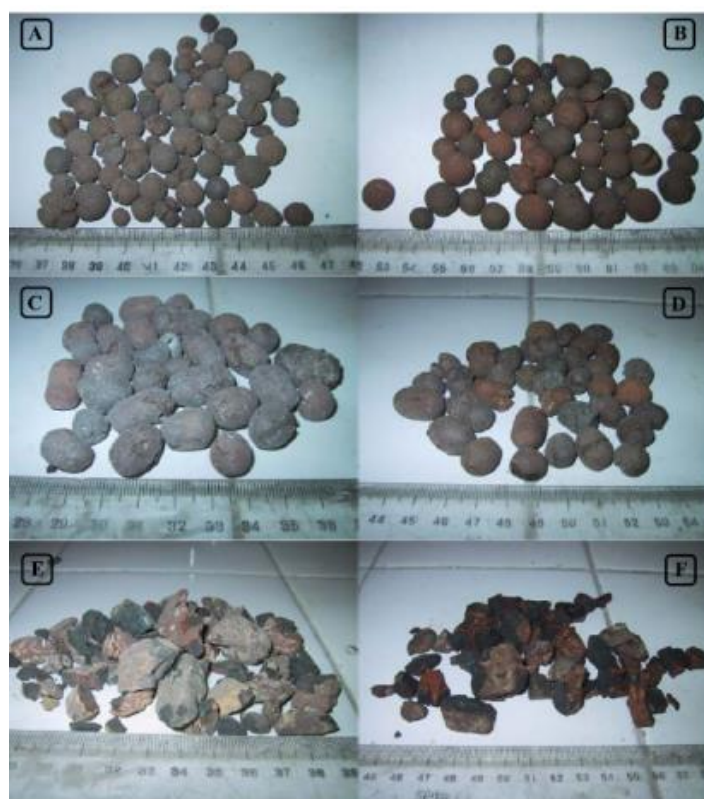
Στα παθητικά συστήματα συγκεντρώνεται ηλιακή ενέργεια στο κέλυφος του κτιρίου, όπου βρίσκονται τα PCM, τα οποία λόγω των ιδιοτήτων τους που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια μεταδίδουν τη θερμότητα ή την απορροφούν ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του κτιρίου. Τα PCM μπορούν να συνεργαστούν, λειτουργώντας με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, και με ενεργητικά συστήματα και λόγω της ύπαρξής τους μειώνονται οι ανάγκες για θέρμανση και κλιματισμό και κατά συνέπεια τα φορτία των συστημάτων.

Η μέθοδος με την οποία ενσωματώνονται τα PCM στα δομικά συστατικά του κτιρίου έχει σημαντικό αντίκτυπο στην μετέπειτα απόδοση τους. Για το λόγο αυτό έχουν μελετηθεί διάφορες μέθοδοι με τις επικρατέστερες να είναι η άμεση ενσωμάτωση, η εμβάπτιση και η ενθυλάκωση. Ο τρίτος είναι αυτός ο οποίος χρησιμοποιείται σήμερα και ορίζεται ως : η συγκράτηση του PCM μέσα σε μια κάψουλα διαφόρων υλικών, μορφών και μεγεθών πριν την ενσωμάτωση, έτσι ώστε να μπορεί να εισαχθεί το μείγμα με ένα εύχρηστο και αποτελεσματικό τρόπο.[35]

### **5.2 Άμεση ενσωμάτωση**

Στην άμεση ενσωμάτωση, τα PCM με τη μορφή υγρού ή σκόνης αναμιγνύονται με τα κατασκευαστικά υλικά κατά τη διάρκεια του σταδίου παραγωγής. Αυτό καθιστά τη διαδικασία πιο οικονομική. Πολλές έρευνες και πειράματα διεξήχθησαν προκειμένου να επιτευχθεί η ανάμειξη των PCM με δομικά υλικά με τη μέθοδο αυτή. Τελικά γυψοσανίδες και σκυρόδεμα, αναμειγμένα με PCM, μπορούν να κατασκευαστούν με αυτόν τον τρόπο και να είναι αρκετά αποδοτικά.

Μια αρχική διερεύνηση (D.Feldman,1991) αφορούσε τις φυσικό-μηχανικές ιδιότητες εργαστηριακά κατασκευασμένων γυψοσανίδων με 21-22% PCM ,τύπου στεατικού βουτυλίου, με άμεσο τρόπο ενσωμάτωσης. Διαπιστώθηκε ότι οι συγκεκριμένες γυψοσανίδες έχουν 10 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας από απλές σανίδες γύψου με αμελητέα αλλαγή στις κύριες ιδιότητές τους. Η παραγωγή σκυροδέματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας επιτεύχθει (D. Zhang,2004) χρησιμοποιώντας πορώδη συσσωματώματα τα οποία απορροφούν PCM τύπου στεατικού βουτυλίου. Αυτά τα υλικά αναμειγνύονται με τσιμέντο και άλλες πρώτες ύλες για την παραγωγή σκυροδέματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Έχουν διαπιστώσει ότι το σκυρόδεμα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε κτίρια για διατήρηση ενέργειας. Μετέπειτα μελετήθηκε η παραγωγή δειγμάτων σκυροδέματος (D. Bentz και R. Turpin ,2007) χρησιμοποιώντας τσιμέντο ως υλικό μήτρας για PCM. Παρήγαγαν δείγματα από σκυρόδεμα με δύο μεθόδους. Πρώτα αναμειγνύοντας το τσιμέντο και τα PCM που έχουν απορροφήσει αδρανή υλικά ελαφρού βάρους και δεύτερον με ανάμιξη τσιμέντου και PCM μόνο .Το αποτέλεσμα ήταν και πάλι να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας του σκυροδέματος.



**Σχήμα 5.2.1 Τα συσσωματώματα που παράγονται από τον D. Zhang (Τα αδρανή συσσωματώματα στα αριστερά είναι απλά και στα δεξιά είναι εκείνα που απορρόφησαν PCM)[39]**



Το ενισχυμένο με PCM σκυρόδεμα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές θερμοχωρητικότητας από τις εμπλουτισμένες με PCM γυψοσανίδες όμως οι γυψοσανίδες προτιμώνται για ελαφριές κατασκευές.

Το μειονέκτημα της άμεσης ενσωμάτωσης είναι ότι τα PCM μπορεί να αλληλοεπιδράσουν άμεσα με τα υπόλοιπα υλικά του κτιρίου και να προκαλέσουν υποβάθμιση των κύριων ιδιοτήτων αυτών των υλικών. Επιπλέον, τα PCM μπορεί να διαρρεύσουν ή να ξεχειλίσουν από τα υλικά με τα οποία αναμειγνύονται και να μολύνουν το εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου.[35], [37], [38]

### **5.3 Εμβάπτιση**

Με τη μέθοδο της εμβάπτισης κατασκευάζονται έτοιμα δομικά υλικά όπως τούβλα, τσιμεντόλιθοι και γυψοσανίδες βυθίζοντάς τα σε λιωμένο PCM. Η πορώδης δομή αυτών των προϊόντων επιτρέπει την απορρόφηση των τηγμένων PCM μέσω τριχοειδών επιδράσεων. Στη συνέχεια τα υλικά απομακρύνονται από το υγρό PCM και αφού κρυώσουν το PCM έχει μείνει στους πόρους τους. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί στα τελικά προϊόντα και αυτό καθιστά τη διαδικασία δυνατή οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Ωστόσο σε αρχικές μελέτες και εφαρμογές της μεθόδου υπήρχε και πάλι διαρροή PCM, όμως οι Hawes και Feldman εξέτασαν τους μηχανισμούς απορρόφησης των PCM και χρησιμοποιώντας σταθεροποιητές απορρόφησης του PCM πέτυχαν τη διάχυση της επιθυμητής ποσότητας.[37],[39]

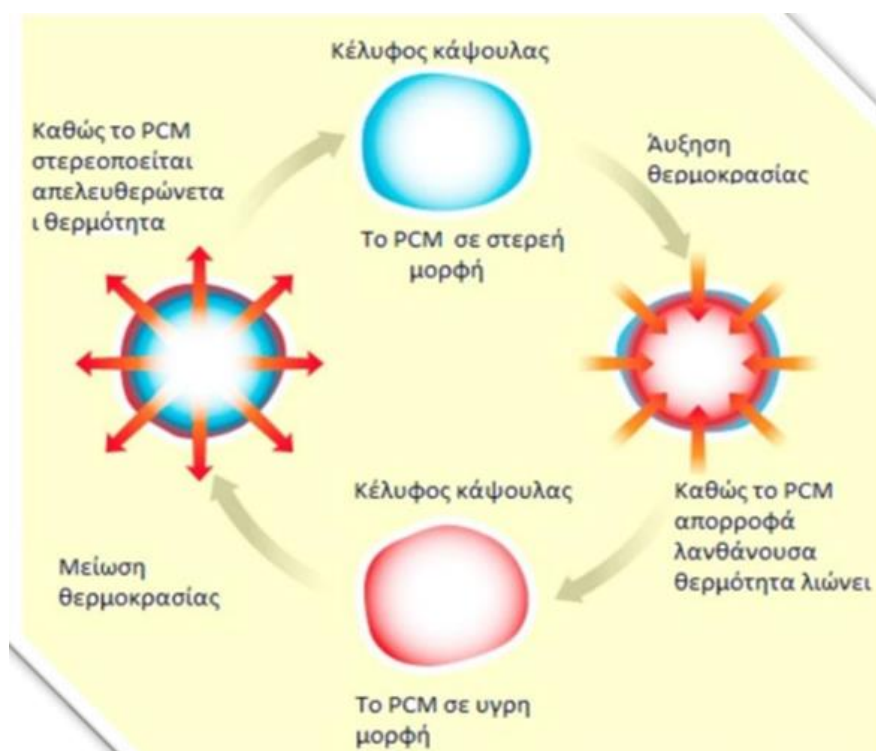
### **5.4 Ενθυλάκωση**

Για να ξεπεραστούν οι δυσμενείς επιπτώσεις, όπως η διαρροή του PCM και η αλλοίωση των ιδιοτήτων των άλλων υλικών, που προκύπτουν από τις διαδικασίες άμεσης ενσωμάτωσης και εμβάπτισης, μια άλλη μέθοδος ενσωμάτωσης που καλείται ενθυλάκωση αναπτύσσεται. Με αυτή τη μέθοδο, τα PCM ενσωματώνονται με οικοδομικά υλικά μετά την ενθυλάκωσή τους σε δοχεία. Με αυτή τη μέθοδο, τα PCM δεν έχουν άμεση επαφή με δομικά υλικά και επομένως δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Αυτό εμποδίζει την υποβάθμιση των δομικών υλικών που προκαλούνται από τα PCM. Υπάρχουν δύο τρόποι μεθόδους ενθυλάκωσης, η μικροενθυλάκωση και η μακροενθυλάκωση.

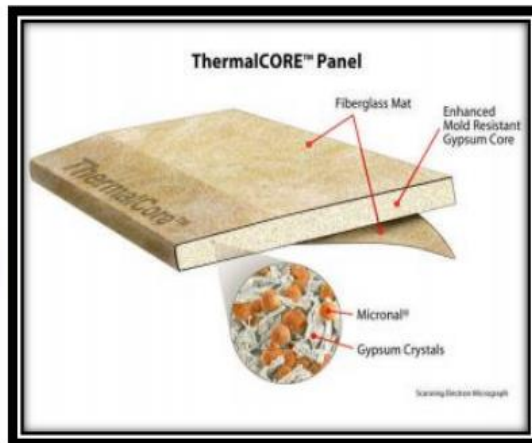
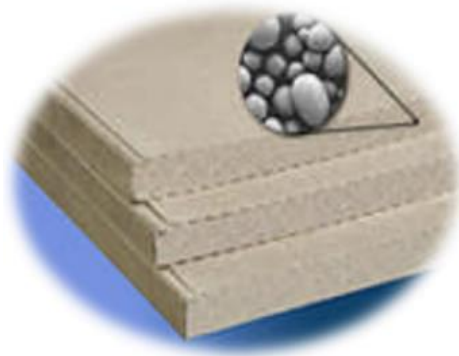
### 5.4.1 Μικροενθυλάκωση

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

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα των μικροενσωματωμένων PCM, όπως η αύξηση της περιοχής όπου μεταφέρεται θερμότητα, άρα καλύτερη μετάδοση θερμότητας, η συγκράτηση της υγρής φάσης του PCM, ώστε να μην υπάρχει κάποιου είδους διαρροή προς το εξωτερικό περιβάλλον και ο έλεγχος των αλλαγών στον όγκο του υλικού αποθήκευσης καθώς συμβαίνει η αλλαγή φάσης. Ωστόσο ένα μειονέκτημα της χρήσης μικροκαψουλών είναι ότι ενδέχεται να μειώσουν την μηχανική αντοχή της κατασκευής. Επιπλέον, η πιθανή χρήση των μικροενσωματωμένων PCM σε διάφορες εφαρμογές θερμικού ελέγχου είναι περιορισμένη, λόγω του κόστους. Παρόλα αυτά, ο θερμικός έλεγχος στις διαστημικές εφαρμογές είναι πιο σημαντικός από το κόστος και γι' αυτό η ανάπτυξη αυτών των PCM αποτελεί ορόσημο για τη διαστημική τεχνολογία.



Σχήμα 5.4.1 Σχηματική απεικόνιση κύκλου λειτουργίας PCM ενσωματωμένου σε σφαιρική κάψουλα.[42]



Σχήμα 5.4.2 Παραδείγματα μικροενθυλάκωσης PCM σε γυψοσανίδα.[43]

## 5.4.2 Μακροενθυλάκωση

Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της μακροενθυλάκωσης, η οποία πραγματοποιείται με την έγκλειση του PCM σε κάποια μορφή συσκευασίας όπως, σωλήνες, σφαιρίδια ή πλαίσια. Αυτά τα δοχεία μπορούν να χρησιμεύσουν στην άμεση μεταφορά θερμότητας ή να ενσωματωθούν σε κτιριακές εφαρμογές (δομικά υλικά). Η μεμβράνη βέβαια θα πρέπει να είναι συμβατή τόσο με το PCM όσο και με το πλέγμα ενσωμάτωσής της. Τα πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής, λόγω της κάψουλας, είναι μέταλλα, όπως κασσίτερος και χάλυβας και πλαστικά, όπως το πολυπροπυλένιο και η πολυολεφίνη.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μακροενθυλάκωσης είναι η δυνατότητα ενθυλάκωσης υλικού αλλαγής φάσης τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή μπορεί να συμβάλλει στην αποφυγή του φαινομένου διαχωρισμού φάσεων, στην αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας και στην ενίσχυση της δομής του PCM.

Μέσω της μακροενθυλάκωσης, μελετητές ανέπτυξαν και δοκίμασαν ένα πλαίσιο τοίχου που ενσωματώθηκε με υψηλή κρυσταλλική παραφίνη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο τοίχος μείωσε τις απώλειες θερμότητας κατά 38%. Ωστόσο, η μακροενθυλάκωση έχει το μειονέκτημα ότι οι μεμβράνες χρειάζονται προστασία για να μην φθαρούν και απαιτείται πολύ περισσότερη εργασία για την ενσωμάτωσή τους στη δομή του κτιρίου, συνεπώς είναι πιο δαπανηρή. Ένα άλλο πρόβλημα της, είναι η μείωση ρυθμού μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης.[38],[40]



**Σχήμα 5.4.3** Παράδειγμα μακροενθυλάκωσης σε τούβλα [43]

## 6 Προβλήματα κατά την χρήση των PCM και τρόποι αντιμετώπισης

### 6.1 Διαχωρισμός των φάσεων

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

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

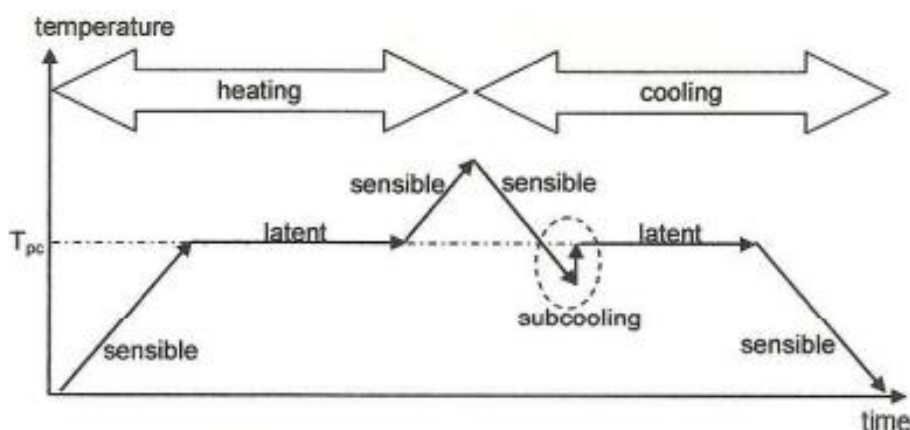
Η μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και συνήθως μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός ανύδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος στην ανομοιόμορφη τήξη, δημιουργώντας έτσι μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συχνή εξασθένιση των ιδιοτήτων τους.

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

Ένας τρόπος, λοιπόν, για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων διαχωρισμού των φάσεων μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση κολλοειδών προσθετικών (gelling additives), τα οποία δημιουργούν μια δομή γύρω από τις φάσεις των συστατικών του υλικού και δεν επιτρέπουν τη διέλευση φάσεων με διαφορετικές πυκνότητες διαμέσου της δομής τους. Ένας δεύτερος τρόπος για να μειωθεί το πρόβλημα του διαχωρισμού φάσης είναι με τη χρήση διαδικασιών διάχυσης για ομογενοποίηση. Η διάχυση όμως είναι αποτελεσματική μόνο σε μικρές κλίμακες και επιπλέον αυτή η προσέγγιση μπορεί να λειτουργήσει μόνο εάν το PCM χωρίζεται σε μικρές αποστάσεις.[44],[45]

## 6.2 Το φαινόμενο της υπόψυξης /υπέρψυξης

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



Σχήμα 6.2.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια τήξης και στερεοποίησης ενός PCM με υπόψυξη [45]

Το υλικό βρίσκεται σε μια μετασταθή κατάσταση κατά τη διάρκεια της υπόψυξης. Είτε ένα υλικό παρουσιάζει υπόψυξη είτε όχι, κατά τη διάρκεια της

παροχής θερμότητας στο PCM δεν υπάρχει διαφορά. Ενώ, κατά την εξαγωγή θερμότητας από το PCM αν εμφανίζεται το φαινόμενο της υπόψυξης η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία πολύ πιο κάτω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης για να ξεκινήσει η κρυστάλλωση και να απελευθερωθεί η λανθάνουσα θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο υλικό. Εφόσον το υλικό δε διαμορφώσει κρυσταλλική δομή ή καλύτερα δε σχηματίσει καθόλου πυρήνες κρυστάλλων, η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται καθόλου και το υλικό αποθηκεύει μόνο αισθητή θερμότητα. Το φαινόμενο της υπόψυξης/ υπέρψυξης αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα σε τεχνικές εφαρμογές των PCM.

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

- Ομογενής πυρήνωση, δηλαδή πυρήνωση αποκλειστικά και μόνο από το ίδιο το PCM. Η ομογενής πυρήνωση ξεκινάει από το ίδιο το PCM σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες ή περιλαμβάνει τη δυνατότητα προσθήκης σωματίδια του στερεού PCM στο ίδιο υποψυχόμενο PCM. Η τελευταία περίπτωση ονομάζεται και δευτερογενής πυρήνωση.
- Ετερογενής πυρήνωση, δηλαδή πυρήνωση όχι από το ίδιο το PCM. Η προέλευση της ετερογενούς πυρήνωσης μπορεί να είναι από ειδικά πρόσθετα που σκόπιμα προστίθεται στο PCM ή ακόμη και από ακαθαρσίες ή ρωγμές στα τοίχωμα δοχείων άλλων στερεών PCM. [46],[47]

### 6.3 Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα

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

Συνεπώς διάφορες τεχνικές για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας είναι απαραίτητες για κάθε εφαρμογή αποθήκευσης λανθάνουσα θερμότητας. Στην υγρή φάση, η χρήση συναγωγής μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η ανάμειξη ή ο συνδυασμός των υλικών αλλαγής φάσης με υλικά με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Τέτοια μπορεί να είναι τα μεταλλικά πληρωτικά υλικά, τα μεταλλικά πλέγματα, οι κατασκευές με μεταλλικές μήτρες και τα πτερύγια.[48]

## 6.4 Διάβρωση

Για τη σωστή λειτουργία ενός PCM απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί, αυτό να μην είναι διαβρωτικό, κυρίως απέναντι σε μεταλλικά υλικά. Παρόλα αυτά τα περισσότερα ανόργανα υλικά είναι διαβρωτικά σε αντίθεση με τις παραφίνες. Η διαβρωτικότητα ενός PCM, σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης είναι πιθανόν κάποια στιγμή και όχι ιδιαίτερα μακροπρόθεσμα να καταστρέψει τη συσκευασία του PCM και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με PCM ο γραφίτης χρησιμοποιείται για την βελτίωση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας ταυτόχρονα όμως ενισχύει και το φαινόμενο της οξειδωσης όταν αυτό εμφανίζεται. [48]

## 6.5 Συμβατότητα με άλλα υλικά

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

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

Η επίλυση αυτού του προβλήματος καθιστά απαραίτητο τον έλεγχο συμβατότητας ο οποίος προέρχεται από πειράματα που διεξάγονται σε συνθήκες τυπικές της εκάστοτε εφαρμογής. Η τελική επιλογή των χρησιμοποιούμενων υλικών καθορίζεται από τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών. Η συνεχής μελέτη των υλικών αλλαγής φάσης και η τεχνολογική εξέλιξη έχουν οδηγήσει σε περιορισμό αυτών των προβλημάτων. Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω επιλέγονται τα καταλληλότερα PCM για την εκάστοτε εφαρμογή και τροποποιούνται ώστε να διευρυνθεί ο κύκλος ζωής τους και η απόδοσή τους να είναι η καλύτερη δυνατή. [48]



## 7 PCM σε κτιριακές εφαρμογές για θέρμανση και ψύξη

### 7.1 Γενικά

Οι συνεχείς βελτιώσεις στις τεχνολογίες του κελύφους των κτιρίων υποδηλώνουν ότι, στο σύντομο μέλλον όλο και περισσότερα κτίρια θα κατασκευάζονται με χαμηλά φορτία θέρμανσης και ψύξης. Η χρήση καινοτόμων δομικών υλικών που περιέχουν ενεργά θερμικά συστατικά (δηλαδή PCM), θα είναι ένα σημαντικό βήμα, για την εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης και ψύξης. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης PCM είναι ότι προσφέρει βελτίωση στις θερμικές δυνατότητες αποθήκευσης με ελάχιστες αλλαγές στον σχεδιασμό των κτιρίων. Ωστόσο, η επιλογή των θέσεων των PCM, το εύρος θερμοκρασίας μετάβασης και η ποσότητα που θα χρησιμοποιηθεί, είναι απαραίτητα για την αποτελεσματική λειτουργία τους. [49]

### 7.2 Τρόποι χρήσης PCM στα κτίρια

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

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

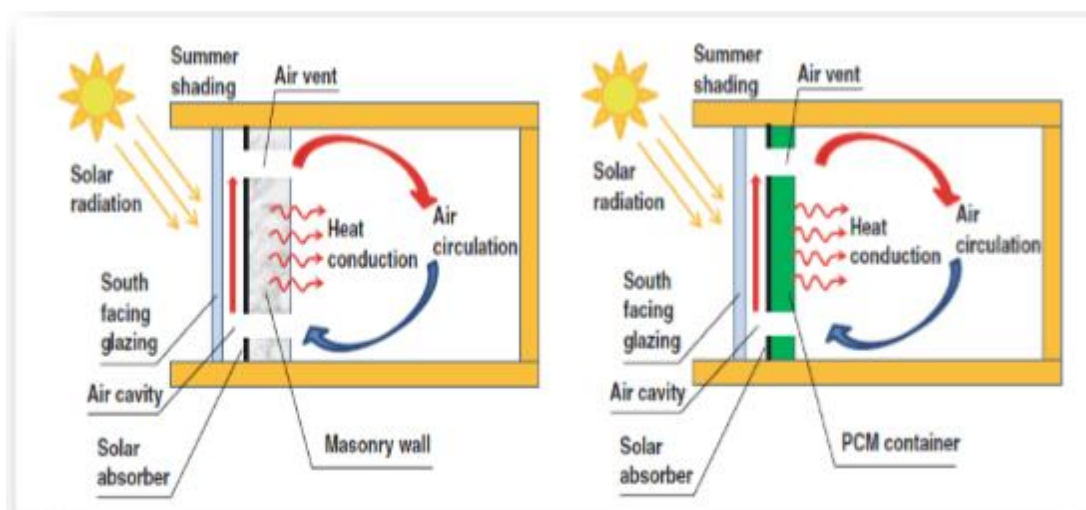
Τα δύο πρώτα είναι παθητικά συστήματα, όπου η αποθηκευμένη ζέστη ή το κρύο αυτόματα απελευθερώνεται όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το σημείο τήξης. Το τρίτο είναι ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη ζέστη ή κρύο είναι σε δοχείο θερμικά διαχωρισμένο από το κτίριο με μόνωση. Ως εκ τούτου, η ζέστη ή το κρύο χρησιμοποιείται μόνο κατόπιν ζήτησης και όχι αυτόματα. Ανάλογα με το πού και το πώς το PCM είναι ενσωματωμένο, υπάρχουν πολλά PCM με διαφορετικά σημεία τήξεως που εφαρμόζονται. Διάφορες πιθανές εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας που μελετήθηκαν για τη θέρμανση και τη ψύξη χώρων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

## 7.3 Τοίχοι παθητικής αποθήκευσης

### 7.3.1 Τοίχος Trombe με PCM

Η λειτουργία του τοίχου Trombe όπως και η κατασκευή του αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο και όπως αναφέρθηκε ο τοίχος του συστήματος πρέπει να είναι κατασκευασμένος από υλικά υψηλής θερμοχωρητικότητας, ώστε να αποθηκεύεται όσο το δυνατόν περισσότερη θερμότητα.

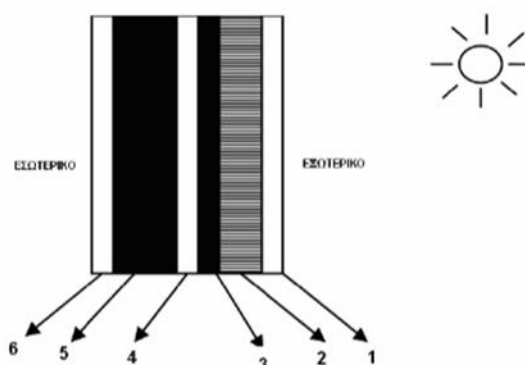
Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί αρκετές τροποποιήσεις από τον βασικό σχεδιασμό ενός τοίχου κλασσικού και σύνθετου τοίχου Trombe. Αρχικά οι τοίχοι Trombe κατασκευάστηκαν είτε με τοιχοποιία είτε με νερό για να παρέχουν τις κατάλληλες ποσότητες αποθήκευσης θερμότητας. Αυτό όμως απαιτεί μεγάλες εκτάσεις χώρου για να κατασκευαστούν οι τοίχοι. Για τον λόγο αυτό, η μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα μάζας που παρέχεται από το PCM θεωρείται ως η ιδανική ιδιότητα που μπορεί να ενσωματωθεί στα υπάρχοντα συστήματα και να βελτιστοποιήσει τον χώρο για άλλες πρακτικές χρήσεις. Επίσης οι τοίχοι PCM είναι πολύ λεπτότεροι και ελαφρύτεροι σε σχέση με το παραδοσιακό σκυρόδεμα και τα υλικά τοιχοποιίας. Αυτοί οι παράγοντες προσφέρουν άνεση και ελκυστικές μειώσεις δαπανών, που συνδέονται τόσο με την κατασκευή νέων κτιρίων όσο και με την αναβάθμισή τους. [49]



**Σχήμα 7.3.1** Λειτουργία ενός κλασσικού τοίχου Trombe (αριστερά) και ενός ειδικά διαμορφωμένου (με PCM) τοίχου Trombe (δεξιά).[49]

### 7.3.2 Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας

Ο ηλιακός τοίχος είναι μία άλλη εφαρμογή για την θερμική αποθήκευση με PCM. Οι ηλιακοί τοίχοι αποτελούνται από έξι κύρια τμήματα, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Ξεκινώντας από την έξω πλευρά του, ο ηλιακός τοίχος φέρει γυάλινη επιφάνεια (1) ακολουθούμενη από διαφανές μονωτικό υλικό (2). Τα δυο αυτά υλικά επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος να τα διαπεράσει, αποτρέποντας ταυτόχρονα τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Επόμενο στη σειρά συστατικό είναι το PCM (3). Τοποθετημένο σε διαφανές πλαστικό (πολυεστέρας) δοχείο, απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια ως επί τω πλείστων με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Ακολουθεί ένα διάκενο (4) από το οποίο διέρχεται και θερμαίνεται ο αέρας για τον αερισμό και οδηγείται στον χώρο. Στο τέλος, έχοντας φτάσει στην εσωτερική πλευρά του τοίχου, βρίσκονται δυο ακόμη βασικά δομικά συστατικά του, η μόνωση (5) και ο σοβάς (6). Συχνά χρησιμοποιούμενα PCM στους τοίχους αυτούς είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες. Πολλές φορές γίνεται χρήση ειδικών μεταλλικών πρόσθετων για την αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας και απόδοσης.[50]



Σχήμα 7.3.2 Δομή ηλιακού θερμικού τοίχου.[50]

Ένας τοίχος με ενσωματωμένο PCM έχει τη δυνατότητα να αιχμαλωτίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους και την οροφή ενός κτιρίου. Οι τοίχοι αυτοί με τα ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης επειδή έχουν μεγάλη θερμική μάζα, μπορούν να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου που εφαρμόζονται. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί όσον αφορά τη μετατόπιση του φορτίου από τις ώρες αιχμής σε περιόδους μικρότερης ζήτησης.[50]

## 7.4 Τοίχοι με δομικά υλικά με ενσωματωμένα PCM

### 7.4.1 Γυψοσανίδα με PCM (wallboard)

Οι γυψοσανίδες είναι φθηνές και ευρέως χρησιμοποιούμενες σε μια ποικιλία εφαρμογών, κάτι που τις κάνει κατάλληλες για την ενσωμάτωση PCM σε κάψουλες. Παρολ'αυτά, οι αρχές της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε κατάλληλο υλικό κτιρίων. Οι ερευνητές Kedl(1990), Stovall(1995), Salyer και Sircar(1996) χρησιμοποίησαν διαποτισμένο τοίχο με κερί παραφίνης για παθητική εφαρμογή.[51],[52] Οι γυψοσανίδες αυτές θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές γυψοσανίδες κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό, θα παρέχουν στο κτίριο την αποθήκευση θερμότητας, η οποία θα διανέμεται σε όλη του την έκταση, ενισχύοντας το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία για θέρμανση-ψύξη.[ Ο Shapiro και οι συνεργάτες του, ανακάλυψαν μεθόδους για διαποτισμό γύψινου τοίχου και άλλων αρχιτεκτονικών υλικών με PCM. Ο Shapiro έδειξε πολλαπλά PCM να είναι κατάλληλα για εισαγωγή σε γύψινο τοίχο, με πιθανές εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης για το κλίμα της Φλώριντας. Τα υλικά αυτά ήταν μείγματα μεθυλο-εστέρων και μείγματα μικρής αλυσίδας λιπαρών οξέων. Παρά το γεγονός ότι τα υλικά αυτά είχαν σχετικά υψηλή λανθάνουσα θερμότητα, το θερμοκρασιακό εύρος που απαιτείτο για την επίτευξη της θερμικής αποθήκευσης δεν ενέπιπτε επαρκώς εντός του εύρους της άνεσης για τα κτίρια σε ζεστά κλίματα. [53]

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, πολλαπλές μορφές από μεγάλες ποσότητες PCM ενσωματωμένων σε κάψουλες, ελέγχθηκαν για εφαρμογές σε ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Ο Neeper (2000) εξέτασε το θερμικό δυναμικό μιας γυψοσανίδας, που είναι εμποτισμένη με λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης ως PCM και που υπόκεινται στην ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου αλλά δεν φωτίζεται άμεσα από τον ήλιο. Οι θερμοκρασίες τήξης αυτών των PCM προσαρμόζονται με χρήση μίγματος συστατικών. Έχει εξετάσει τρεις παραμέτρους της γυψοσανίδας PCM, που μπορεί να επηρεάζουν την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί και να απελευθερωθεί παθητικά στη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου: (i) τη θερμοκρασία τήξης του PCM (ii) το εύρος της θερμοκρασίας κατά το οποίο η τήξη εμφανίζεται και (iii) τη λανθάνουσα χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας της γυψοσανίδας. Η μέγιστη ημερήσια αποθήκευση ενέργειας εμφανίζεται όταν η θερμοκρασία τήξης του PCM ισούται με την μέση θερμοκρασία της γυψοσανίδας, έχοντας παράλληλα ένα στενό εύρος μετάβασης. [54]

Οι Stovall και Tomlinson(1995) εξέτασαν τη μετατόπιση των φορτίων θέρμανσης και ψύξης σε ώρες χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά έβγαλαν γενικά συμπεράσματα σχετικά με τις βέλτιστες ιδιότητες των PCM. Για γυψοσανίδες που θερμαίνονται με απορρόφηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ο Drake έκρινε ότι η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης είναι ανάλογη προς την απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια. [51]

Οι Stetiu και Feustel (2001) παρουσίασαν ένα πρόγραμμα θερμικής προσομοίωσης κτιρίων βασισμένο σε μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών για την αριθμητική αξιολόγηση της απόδοσης αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας των επεξεργασμένων γυψοσανίδων με PCM. Η θερμική μάζα χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση της αιχμής ζήτησης ενέργειας και του μεγέθους της ψύξης ή της θέρμανσης.[55]

#### **7.4.2 Μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένα με PCM**

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

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

Ο Hawes παρουσίασε τη θερμική συμπεριφορά των PCM (BS, δωδεκανόλη (DD), παραφίνη (PAR), δεκατετρανόλη (TD)) σε διάφορους τύπους μπλοκ τσιμέντου. Η παρουσίαση είχε καλύψει τις επιδράσεις της αλκαλικότητας του σκυροδέματος, της θερμοκρασίας, του χρόνου εμποτισμού και της αραίωσης του PCM κατά την απορρόφησή του στη διάρκεια της διαδικασίας εμποτισμού. [56]

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

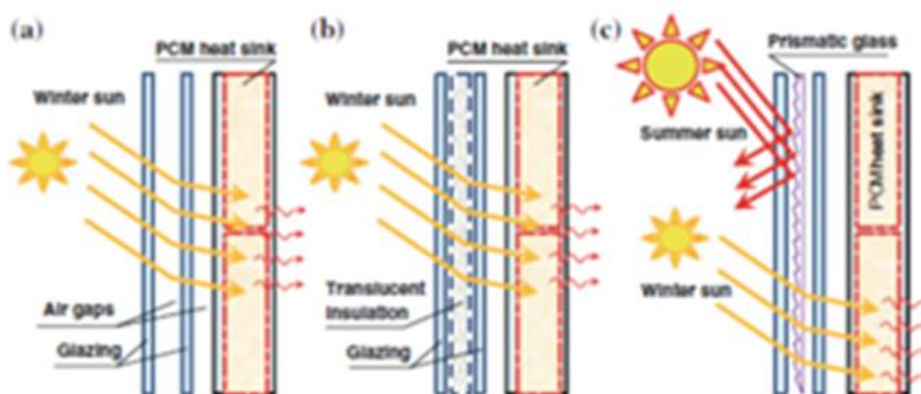
## 7.5 Ενεργειακά Αποδοτικά Παράθυρα

Άλλη μια εφαρμογή του PCM αφορά τα αδιαφανή στοιχεία των κτιρίων. Το PCM επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα προϊόντα περίφραξης, καθώς αποτελούν σημαντικό μέρος του κτιρίου. Στις συμβατικές εφαρμογές, η θερμική απόδοση της εξαέρωσης βελτιώνεται με τη χρήση απορροφητικών αερίων που γεμίζουν το διάκενο μεταξύ του φύλλων γυαλιού ή με την εφαρμογή θερμικά μονωμένων τζαμιών. Όταν μόνο η διαφάνεια είναι σημαντική, μπορούν να ενσωματωθούν νέα υλικά σε γυάλινους υαλοπίνακες, όπως αερόπηγμα πυριτίας ή ημιπερατό PCM. Και οι δύο αυτές εφαρμογές απαιτούν σοβαρή εξέταση των οπτικών ιδιοτήτων και της λειτουργίας του παραθύρου.

Ο στόχος της χρήσης PCM στο παράθυρο, σε υαλοπίνακες ή παραθυρόφυλλα, είναι να χρησιμοποιήσουν την υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τους για να μειώσουν τα παραγόμενα θερμικά φορτία από τα παράθυρα, απορροφώντας τη θερμότητα πριν φτάσει στον εσωτερικό χώρο. Ο κύκλος αλλαγής φάσης μπορεί να σταθεροποιήσει τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και να μειώσει τα θερμαινόμενα και ψυχόμενα φορτία. Τα παράθυρα με PCM θα μπορούσαμε να πούμε ότι λειτουργούν όπως οι οπτικά διαφανείς ή ημιδιαφανείς τοίχοι Trombe. Αυτοί συνήθως αποτελούνται από μονωτικό ή πολυστρωματικό τζάμι, από συμβατικό γυαλί, με ενσωματωμένο ένα στρώμα από ένα διαφανές ή ημιδιαφανές προϊόν PCM. Σε δυναμικά παράθυρα, το PCM αλλάζει τη φάση από στερεή σε υγρή όταν θερμαίνεται, απορροφώντας έτσι τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στην ενδοθερμική διαδικασία. Συνήθως την ίδια στιγμή αλλάζει και η διαφάνεια του PCM. Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μειώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, το λιωμένο PCM στερεοποιείται, ενώ εκπέμπει την προηγούμενα απορροφούμενη θερμότητα στην εξωθερμική διαδικασία.

Η κατάλληλη περιοχή θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τις επιθυμητές θερμοκρασίες, όπως και η δυνατότητα της απορρόφησης και απελευθέρωσης μεγάλων ποσοστών θερμικής ενέργειας, είναι απαιτούμενα για τη σωστή λειτουργία των ενσωματωμένων παραθύρων με PCM. Επίσης είναι απαραίτητο τόσο η μεταβατική ικανότητα αλλαγής φάσης, όσο και τα οπτικά χαρακτηριστικά να μην υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου, πράγμα που αποτελεί κρίσιμη επιλογή για την επιλογή του PCM.

Οι ημιδιαφανείς τοίχοι Trombe κατασκευάζονται κατά τρόπο ώστε να μεταδίδουν το φως και να φωτίζουν το εσωτερικό του κτιρίου. Στα συμβατικά συστήματα ηλιακής εξαέρωσης, η διακύμανση της θερμοκρασίας μέσα στο σύστημα, έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια θερμότητας από το εσωτερικό του κτιρίου στο εξωτερικό κατά τη χειμερινή περίοδο. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι απώλειες θερμότητας μέσω των υαλοπινάκων μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας μια διαφανή μόνωση (κενό) ή ημιδιαφανή πληρωτικά υλικά τοποθετημένα μεταξύ των τζαμιών του παραθύρου. Η διαφανής ή ημιδιαφανής θερμομόνωση μεταδίδει την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία τότε απορροφάται από ένα στρώμα PCM, το οποίο είναι συνήθως, εν μέρει διαφανές όταν λιώνει. Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η θερμική απόδοση, τα διαφανή/αδιαφανή τοιχώματα αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν επιλεγμένο γυαλί. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το εξωτερικό πρισματικό γυαλί για να αντανakλά την ηλιακή ακτινοβολία.



**Σχήμα 7.5.1** Διάφορες επιλογές διαμόρφωσης ημι-διάφανων ηλιακών περσίδων PCM: Θερμαινόμενο τοίχωμα που περιέχει PCM (αριστερά), διαφανές τοίχωμα Trombe με θέρμανση PCM (μεσαίο), σύστημα ηλιακής εξαέρωσης με ψύκτρα PCM και επιλεκτικό πρισματικό τζάμι (δεξιά).[58]

Η ιδέα των ηλιακών παραθύρων που χρησιμοποιούν PCM-ενισχυμένα προϊόντα παραθύρων, είναι μια βελτιωμένη εναλλακτική λύση. Ωστόσο, όσο αναφορά την συγκεκριμένη τεχνική, δεν έχει υπάρξει επιτυχημένη εφαρμογή, επιπλέον πολλοί ημιδιαφανείς ηλιακοί τοίχοι παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα. Το ένα είναι η μειωμένη οπτική επιφάνεια, η άλλη είναι η περιορισμένη θερμική χωρητικότητα αποθήκευσης. Αυτά τα συστήματα πρέπει να έχουν επαρκή θερμική μάζα με σημαντικό αποτέλεσμα να έχουν σημαντική αύξηση πάχους από το ενσωματωμένο PCM. Εδώ είναι που τα προσαρτήματα των παραθύρων με PCM (περσίδες, παντζούρια ή κουρτίνες) προσφέρουν μια

μοναδική λύση : ένα λεπτό, κινητό στρώμα PCM το οποίο μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί όπως απαιτείται, χωρίς να επηρεάζονται οι οπτικές ιδιότητες των παραθύρων. Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί κινητές ψύκτρες PCM πρέπει να εγκατασταθεί στη νότια πλευρά των παραθύρων. Όταν χρησιμοποιείται ένα τέτοιου είδους σύστημα, κατά τη διάρκεια της ημέρας το προσάρτημα του παραθύρου θερμαίνεται από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, λιώνοντας το PCM.

Τη νύχτα αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται για να θερμάνει τον εσωτερικό χώρο. Τα παντζούρια και οι περσίδες των παραθύρων είναι συνήθως κατασκευασμένα από πλαστικό ή αφρό αλουμινίου. Τα ίδια υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM, έτσι ώστε να γεμίσουν τις υπάρχουσες κοιλότητες και να αντικατασταθεί ο αφρός ως υλικό πλήρωσης.[58]

## **7.6 Εφαρμογές PCM σε δάπεδα και οροφές.**

### **7.6.1 Δάπεδα**

Τα συμβατικά παθητικά ηλιακά συστήματα βασίζονται εδώ και δεκαετίες στην αισθητή αποθήκευση θερμότητας των εσωτερικών τοίχων και δαπέδων, για εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο, πρόσφατες έρευνες διερεύνησαν τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για πρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας σε παθητικές ηλιακές εφαρμογές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση του PCM σε υλικά δαπέδου που χρησιμοποιούνται σε παθητικά ηλιακά σπίτια. Για το σκοπό αυτό οι σανίδες δαπέδου, τα πλακάκια ή τα πάνελ μπορούν να ενισχυθούν με PCM. Η αποθήκευση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και η απελευθέρωσή της κατά τη διάρκεια της νύχτας μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου για θερμική άνεση.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, το PCM αναμένεται να είναι αποτελεσματικό κατά τη διάρκεια της αρχής και του τέλους της εποχής του χειμώνα, καθώς και κατά τη διάρκεια των εαρινών και φθινοπωρινών εποχών. Σε αυτές τις εποχές, τα ηλιακά κέρδη και οι μεγάλες, σχετικά, θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορεί να είναι επαρκείς για να λιώσει το PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αντίστοιχα, τη νύχτα η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορεί να είναι ικανοποιητικά χαμηλή για να αποφορτίσει την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο PCM.[36]

Ένα παράδειγμα παθητικού ηλιακού χώρου σχεδιασμένο με εξαρτήματα δαπέδου ενισχυμένα με PCM, είναι το σύστημα δαπέδου που ερευνήθηκε από την Σταματιάδου (2009) για το κλίμα της Αθήνας, στην Ελλάδα. Απέδειξε ότι η

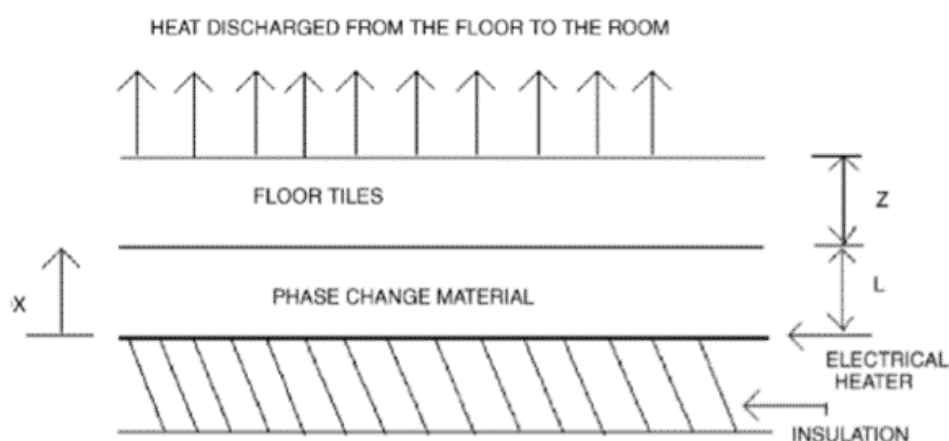


προσθήκη παραφινικού PCM (ειδικής θερμικής ικανότητας 110 kJ/kg) σε συμβατικά πλακάκια που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές δαπέδων, έχει θετική επίδραση στη θέρμανση σε περιπτώσεις άμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Τα PCMπλακάκια δαπέδου για ηλιακό χώρο συγκρίθηκαν με ένα τυπικό μαρμάρινο επίπεδο πλακάκι. Το παθητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης απέδωσε μέγιστη ηλιακή εξοικονόμηση περίπου 4%, η οποία μπορεί να μεταφραστεί άμεσα σε μείωση απαίτησης θέρμανσης του κτιρίου.[59]

## 7.6.2 Ενδοδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης (με PCM)

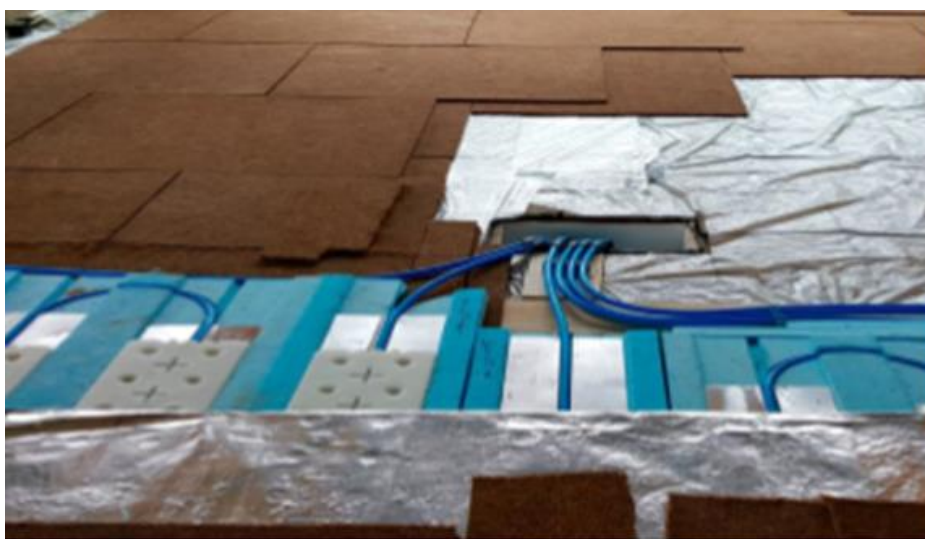
Τα PCM σε συνδυασμό με ένα ενεργητικό σύστημα είναι μία ακόμα εφικτή εφαρμογή σε δάπεδα. Το ενεργητικό σύστημα δαπέδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως για την εκτός αιχμής αποθήκευση θερμικής ενέργειας στα κτίρια. Έτσι, τα φορτία αιχμής μπορούν να μειωθούν και να μετατοπιστούν κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερο.

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



Σχήμα 7.6.1 Απεικόνιση συστήματος ενεργητικής θέρμανσης δαπέδου με υλικά αλλαγής φάσης[60]

Η αποθηκευμένη ενέργεια, με την οποία, έχει φορτιστεί το PCM διαχέεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανάλογα με την απαιτούμενη θερμότητα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που μπορεί να προσφέρει ένα PCM πάνελ είναι ότι η απαιτούμενη θερμότητα χρειάζεται λιγότερο χώρο για να αποθηκευτεί από ότι θα χρειαζόταν αν η πλάκα δεν περιείχε PCM. Ένα πάνελ 13 εκατοστών από PCM μπορεί να συσσωρεύσει όση θερμότητα συσσωρεύουν τα 30 εκατοστά σκυροδέματος. Εγκαθίσταται δηλαδή ένα πολύ λεπτό δάπεδο. Έτσι προκύπτει ένα δάπεδο αποδοτικότερο αλλά και ελαφρύτερης κατασκευής.



**Σχήμα 7.6.2 Ενδοδαπέδιο ηλεκτρικό πάτωμα με PCM[60]**

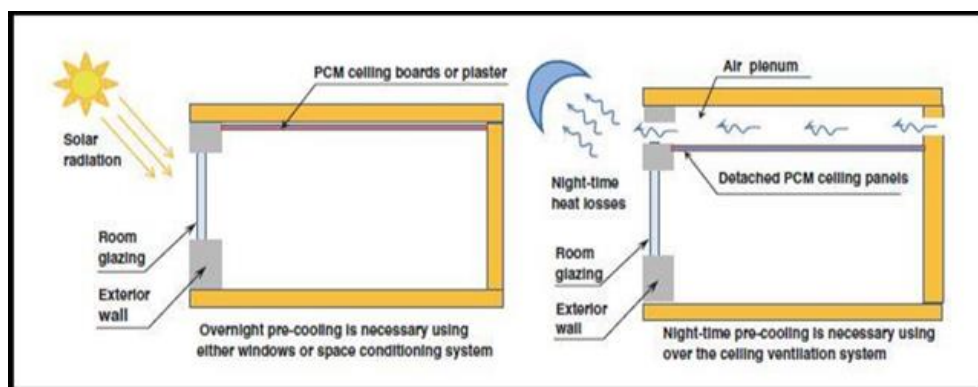
Με τα ενδοδαπέδια PCM, γίνεται δυνατή η κατασκευή σπιτιών με μόνο ηλεκτρικό περιεχόμενο, δηλαδή χωρίς την εξάρτηση από φυσικό αέριο ή πετρέλαιο. Αυτό κάνει δυνατή τη χρήση, μικρών ατομικών ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας από αέρα ή νερό, πολύ ελκυστική. Με αυτό τον τρόπο το σπίτι γίνεται εντελώς αυτόνομο. Αυτό συμβαίνει επειδή η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί, λαμβάνοντας ηλεκτρική ενέργεια από ηλιακά πάνελ. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από βιώσιμη πηγή, όπως ηλιακοί συλλέκτες, τότε η αντλία θερμότητας είναι 100% ουδέτερη για το κλίμα. Επομένως το σύστημα προσφέρει τη δυνατότητα ανεξαρτησίας από τα ορυκτά καύσιμα.

Είτε πρόκειται για κατασκευή είτε για εργασίες ανακαίνισης ισχύουν τα εξής: εάν χρησιμοποιηθούν δάπεδα PCM, θα γίνει άμεση εξοικονόμηση ενέργειας. Στην περίπτωση νέων κατοικιών, η χρήση μικρών ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας είναι πιο κατάλληλη, καθώς μια σύνδεση αερίου μπορεί να αποφευχθεί εύκολα. Κατά την ανακαίνιση σπιτιών, στα οποία έχει ήδη πραγματοποιηθεί εγκατάσταση αερίου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μικρότερο λέβητα ή μικρή αντλία θερμότητας.

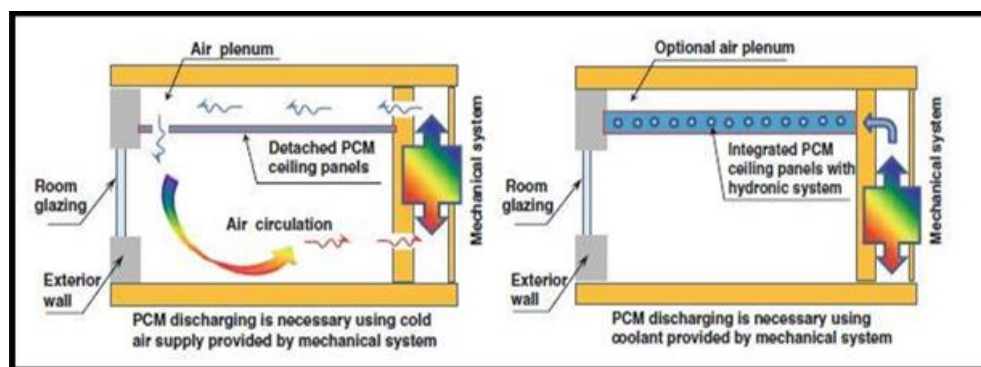
Όσο αναφορά την ψύξη, το ενδοδαπέδιο πάτωμα με PCM έχει ψυκτική επίδραση σε οποιαδήποτε εποχή. Ένα μερικώς φορτισμένο δάπεδο PCM θα απορροφήσει και στη συνέχεια θα αποθηκεύσει αισθητή θερμότητα που προκαλείται για παράδειγμα από την ηλιακή θερμότητα. Κατά συνέπεια η θερμοκρασία του χώρου δεν θα αυξηθεί παρά το αντιληπτό θερμικό φορτίο του ήλιου. Το καλοκαίρι αυτό οδηγεί σε ψύξη, ενώ το χειμώνα αυτό το φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μερική φόρτιση του δαπέδου με ηλιακή ενέργεια. Η υπερθέρμανση των περιοχών εμποδίζεται σε όλες τις εποχές. Όλα αυτά εξαρτώνται από μια στρατηγική ελέγχου για την οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι ελεγκτές, οι οποίοι συνήθως περιλαμβάνονται σε συσκευές που παράγουν θερμότητα.[60]

### 7.6.3 Οροφές

Από την σχεδιαστική όψη, οι εφαρμογές ψύξης PCM σε οροφές είναι είτε παθητικές (οροφές που περιέχουν υλικά εμποτισμένα με PCM ή στρώση τοιχώματος με PCM ) είτε ενεργητικές, οι οποίες συνήθως αποτελούν μέρος πιο περίπλοκων δυναμικών συστημάτων κλιματισμού, που χρησιμοποιούν κατά τη διάρκεια της νύχτας, μια διαδικασία πρόψυξης αέρα και διαθέτουν υδραυλικά συστήματα, εναλλάκτες θερμότητας ,μικροσωληνώσεις και κανάλια αέρα.



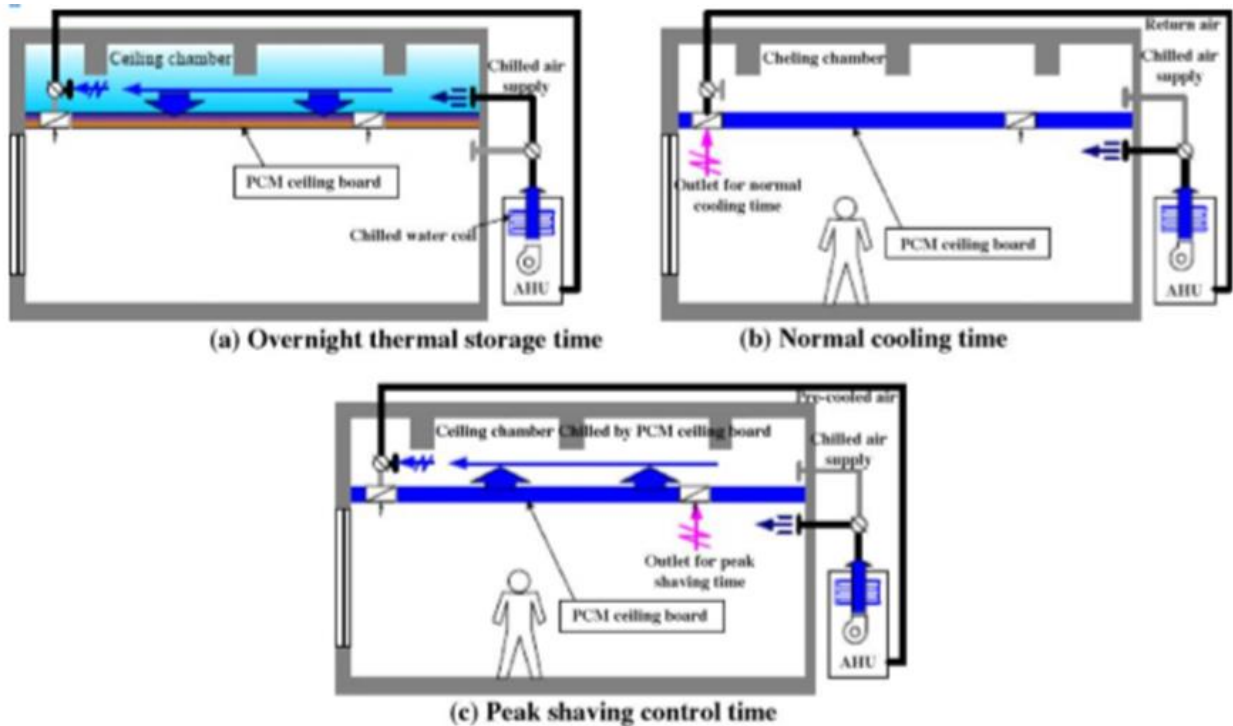
Σχήμα 7.6.3 Παθητικό σύστημα οροφών με PCM [61]



Σχήμα 7.6.4 Ενεργητικό σύστημα οροφών με PCM [61]

Ένα σύστημα θέρμανσης χώρων που ενσωματώνει PCM το οποίο τοποθετείται στην οροφή αναπτύχθηκε από τους Gutherz και Schiler. Ηλιακοί ανακλαστήρες χρησιμοποιήθηκαν για να κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια που εισέρχεται μέσα από τα παράθυρα πάνω στα PCM. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού ήταν ότι έδωσε μια μεγάλη περιοχή για την αποθήκευση θερμότητας χωρίς την ανάγκη μεγάλου όγκου που θα απαιτούσαν τα μέσα αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει 17-36% της θερμότητας που χάνεται κατά τη διάρκεια των αρχικών κερδών.[61]

Οι ερευνητές Kodo και Ibamoto εξέτασαν την επίδραση χρήσης σανίδων οροφής με PCM σε ένα σύστημα κλιματισμού οροφής σε ένα κτίριο γραφείων. Η συμβατική σανίδα οροφής πετροβάμβακα ενισχύθηκε με την προσθήκη PCM σε μικροκάψουλες , με σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα , 24,5°C και 174,4 kJ/kg, αντίστοιχα. Το σχήμα 7.6.5 παρουσιάζει μια περίληψη του συστήματος. Κατά τη διάρκεια μιας νυχτερινής θερμικής αποθήκευσης, ο δροσερός αέρας από τη μονάδα διανομής αέρα (AHU- Air Handling Unit) ρέει στο χώρο του θαλάμου οροφής και κρυώνει την σανίδα οροφής PCM, αποθηκεύοντας έτσι θερμική ενέργεια για ψύξη (a). Κατά τον κανονικό χρόνο ψύξης, ο δροσερός αέρας από την AHU ρέει απευθείας στο δωμάτιο (b). Κατά τη διάρκεια της ώρας εξομάλυνσης της αιχμής, όταν το θερμικό φορτίο παρουσιάζει μέγιστο, ο αέρας από το δωμάτιο επιστρέφει στην AHU μέσω του χώρου του θαλάμου οροφής. Ως αποτέλεσμα της διαδρομής μέσω της σανίδας οροφής PCM, η οποία προσφέρει ψύξη, ο ζεστός αέρας επιστρέφοντας από το δωμάτιο προψύχεται στο δρόμο της επιστροφής προς την AHU (c).



**Σχήμα 7.6.5** Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος κλιματισμού με σανίδα οροφής PCM, όπως προτάθηκε από τους Kodo και Ibatoto [62]

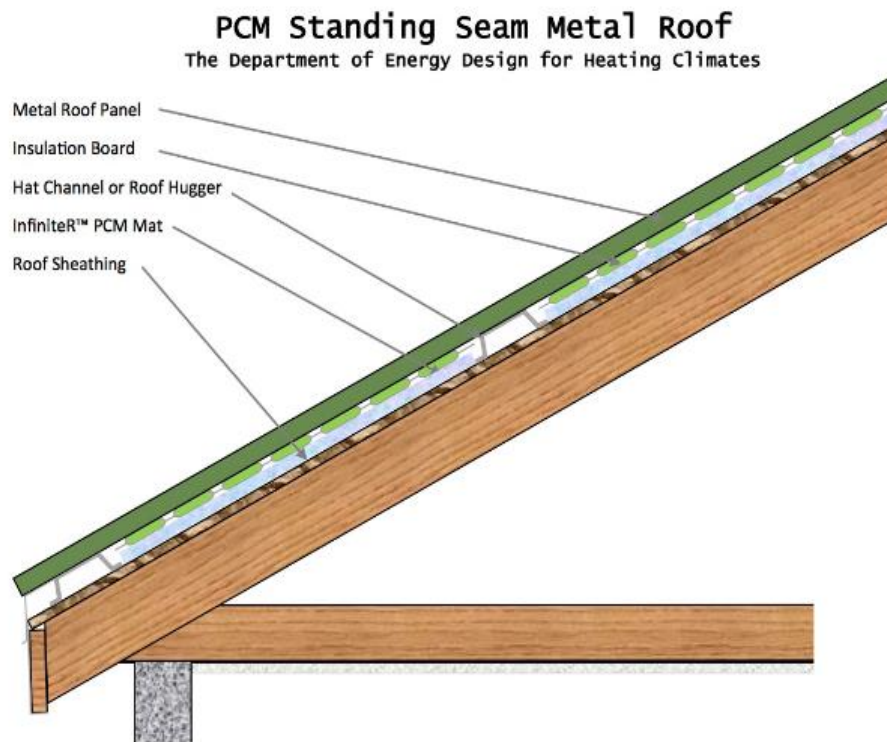
Το μέγιστο θερμικό φορτίο και η χωρητικότητα της πηγής θερμότητας μπορεί κατά συνέπεια να μειωθεί. Η μειωμένη χρήση της μέγιστης φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια της περιόδου εξομάλυνσης της αιχμής και η χρήση του φθηνότερου συντελεστή κατά τη διάρκεια της νύχτας έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα από αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου ήταν μόνο περίπου 2°C, σε σύγκριση με την αύξηση των 6°C στη θερμοκρασία του δωματίου, αν δεν χρησιμοποιούταν PCM. Παράλληλα αποδείχτηκε πως το μέγιστο θερμικό φορτίο χρησιμοποιώντας την σανίδα οροφής PCM μειώθηκε κατά 9,4% σε σύγκριση με τη συμβατική σανίδα οροφής από πετροβάμβακα. Το συνολικό λειτουργικό κόστος βρέθηκε ότι ήταν 96,6% χαμηλότερο από αυτό της σανίδας οροφής με πετροβάμβακα, λόγω της χρήσης μειωμένης νυχτερινής φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας. [62]

## 7.7 Στέγες και σοφίτες

Σήμερα οι συμβατικές στέγες και οι σοφίτες είναι θερμικά σχεδιασμένες με βάση τα κριτήρια σταθερότητας θερμικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται από τη πλειονότητα των πρότυπων κατασκευής, ως μέτρηση της θερμικής απόδοσης. Ταυτόχρονα τα περισσότερα από τα στοιχεία του κελύφους του κτιρίου επηρεάζονται από περιβαλλοντικές δυναμικές συνθήκες. Τα φορτία των κτιρίων είναι συχνά πολύπλοκοι συνδυασμοί από αγωγίμους και ακτινοβολούμενους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας. Αρχές που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό των στεγών είναι η σταθερότητα και η δυναμική τους λειτουργία, αυτά τα δύο είναι σε μεγάλο βαθμό αντιφατικά. Ως αποτέλεσμα η δυναμική λειτουργία σε συνδυασμό με βραχύτερους θερμικούς σχεδιασμούς αποδίδει σχετικά χαμηλή θερμική αποτελεσματικότητα. Με τον κατάλληλο θερμικό σχεδιασμό, ο οποίος συνδυάζει την αποθήκευση θερμότητας και τον έλεγχο ακτινοβολίας, τα δυναμικά φορτία μπορούν να μειωθούν ή ακόμη να εξαλειφθούν πλήρως, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Οι καλά σχεδιασμένες στέγες, όχι μόνο βελτιώνουν τη θερμική αντίσταση, αλλά και ελαχιστοποιούν τις θερμικές δυναμικές διεγέρσεις. Μερικά εξελιγμένα συστήματα θέρμανσης μπορούν επίσης να εξαντλήσουν ή να απορροφήσουν ένα μέρος των φορτίων του δυναμικού περιβάλλοντος ( ανάλογα με τη κλιματική περίοδο).[63]

Το 2006 οι Kissock και Limas , διερεύνησαν τη παραφίνη ως PCM που μπορεί να προστεθεί στις εμπορικές στέγες από χάλυβα, για τη μείωση των ημερήσιων, θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Το PCM που μελετήθηκε ήταν το οκταδεκάνιο παραφίνης, με μέση θερμοκρασία τήξης 25,6 οC. Η μεταλλική οροφή που αναλύθηκε είχε δύο στρώματα πάχους 1 ίντσας πολυϊσοκυανουρικού αφρού. Το κάτω στρώμα του αφρού ενισχύθηκε με το παραφινικό PCM. Ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα διατηρήθηκε σταθερή και σε σύγκριση με μία συμβατική οροφή η εξοικονόμηση του φορτίου ψύξης ήταν κοντά στο 14%.

Όλο και περισσότερες εταιρίες στην Ευρώπη αλλά και παγκοσμίως κατασκευάζουν πλέον συσκευασμένα υλικά αλλαγής σε στρώματα τα οποία είναι εύκολο να τοποθετηθούν κατά την κατασκευή της οροφής.[63]



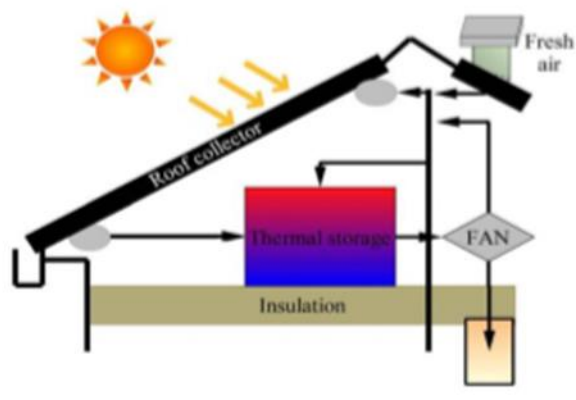
*Σχήμα 7.7.1 Οροφή με στρώμα PCM, της εταιρίας Insolcorp [64]*

### 7.7.1 Ενεργητικό σύστημα στέγης με PCM

Ένα ενσωματωμένο στην οροφή ηλιακό σύστημα θέρμανσης και αποθήκευσης αέρα χρησιμοποιεί τα ήδη υπάρχοντα μεταλλικά φύλλα, ως ηλιακούς συλλέκτες για τη θέρμανση του αέρα. Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης PCM χρησιμοποιείται για την αποθήκευση θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφέρεται η θερμότητα τη νύχτα ή όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Λειτουργεί με τρεις τρόπους :

- Σε περιόδους ηλιοφάνειας και όταν απαιτείται θέρμανση, ο αέρας περνάει μέσω του συλλέκτη και στη συνέχεια στο υπόλοιπο εσωτερικό του σπιτιού.
- Όταν η θέρμανση δεν είναι απαραίτητη, ο αέρας αντλείται στην εγκατάσταση της θερμικής αποθήκευσης, λιώνει το PCM, και φορτίζεται για μελλοντική χρήση.
- Όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι διαθέσιμη, ο αέρας του δωματίου διέρχεται μέσω της εγκατάστασης που είναι αποθηκευμένος, θερμαίνεται και στην συνέχεια σπρώχνεται στο σπίτι.





**Σχήμα 7.7.2 Απεικόνιση ενεργητικού συστήματος στέγης με PCM [65]**

Όταν η εγκατάσταση αποθήκευσης δεν έχει την απαιτούμενη θερμοκρασία χρησιμοποιείται ένας βοηθητικός θερμαντήρας αερίου και ζεσταίνεται το σπίτι. Κατά την εγκατάσταση του συστήματος της ηλιακής θέρμανσης εισάγονται επαρκείς ποσότητες καθαρού αέρα παρέχοντας θερμότητα στο σπίτι όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Μία διαμόρφωση οροφής που περιέχει μεταλλικά φύλλα με φωτοβολταϊκά και υλικά PCM μελετήθηκε στο Tennessee. Ήταν μια νέα τεχνολογία ηλιακής οροφής, η οποία χρησιμοποιεί μεταλλικά πάνελ με ενσωματωμένο φωτοβολταϊκό πυρίτιο, αεριζόμενη κοιλότητα αέρα, πυκνή μόνωση υαλοβάμβακα και παρατεταγμένα PCM με βάση το βιολογικό περιβάλλον. Η θερμική απόδοση της πειραματικής οροφής συγκρίθηκε με μία συμβατική. Τα δεδομένα των δοκιμών απέδειξαν ότι κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, χωρίς τη συμβολή της αλλαγής φάσης, τα φορτία θέρμανσης που παράγονται από τη στέγη μειώθηκαν κατά 30%. Αντίστροφα κατά την εποχή του χειμώνα τα ψυκτικά φορτία ήταν κατά 55% χαμηλότερα.[65]

## **7.8 Διπλό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με PCM**

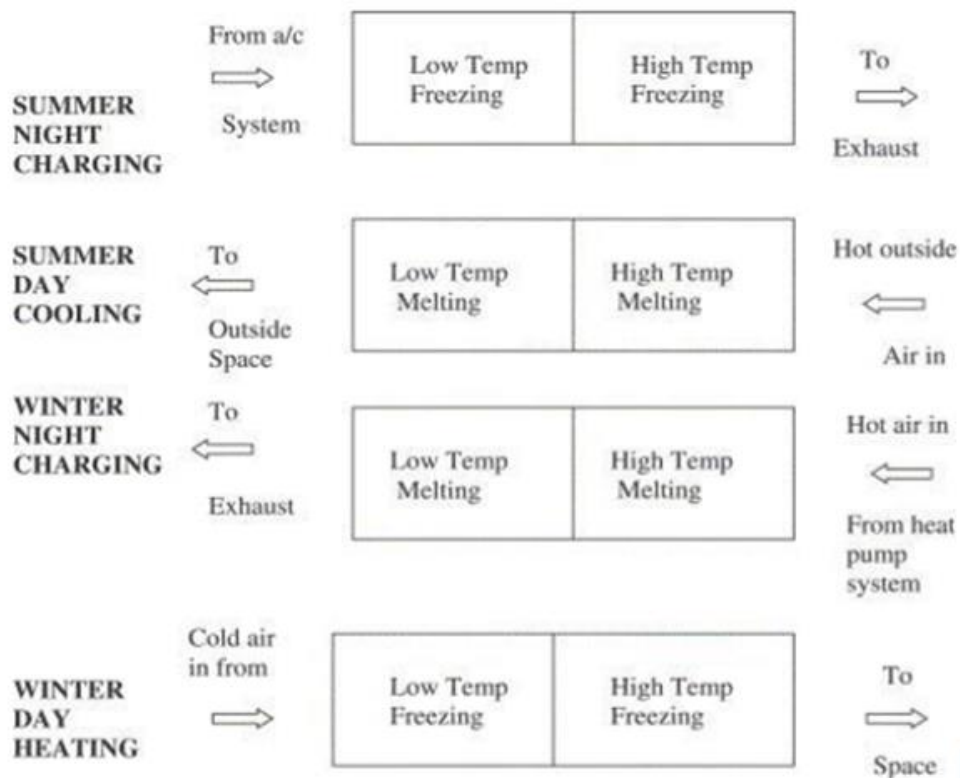
Το Κέντρο Βιώσιμης Ενέργειας (Sustainable Energy Centre, SEC) του Πανεπιστημίου Νότιας Αυστραλίας (University of South Australia) είναι ένα από τα λίγα πανεπιστήμια που εργάζονται πάνω σε σύστημα PCM χρησιμοποιώντας εξαναγκασμένη μεταφορά αέρα για μεταφορά θερμότητας προς και από το PCM. Η μελέτη τους είναι κυρίως για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης χώρων, αν και μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα συστήματα τα



οποία βασίζονται στον αέρα. Το SEC άρχισε να δουλεύει με PCM στα μέσα της δεκαετίας του 1990 με την ανάπτυξη μιας μονάδας αποθήκευσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση και ψύξη ταυτόχρονα. Αυτό ήταν δυνατό χρησιμοποιώντας δύο PCM με διαφορετικά σημεία τήξης και πήξης σε σειρά. Επιλέγοντας PCM με κατάλληλη θερμοκρασία τήξης-πήξης, μπορούν και τα δύο PCM να χρησιμοποιηθούν μαζί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε δύο επίπεδα θερμοκρασιών. Ο αέρας χρησιμοποιείται απευθείας ως μέσο μεταφοράς θερμότητας σε αυτές τις μονάδες. Χρησιμοποιώντας αέρα σε αντίθεση με το νερό έχει μια σειρά πρακτικών πλεονεκτημάτων στο σύστημα θέρμανσης και ψύξης, όπως μειωμένο βάρος και κόστος. Αυτή η πρώτη πρακτική αρχή αυτής της εφαρμογής προτάθηκε για χρήση σε συνδυασμό με κλιματισμό αντίστροφου κύκλου και PCM των 29 °C και 18 °C τήξης.

Το SEC έχει αναπτύξει ένα μαθηματικό μοντέλο για σύστημα αέρα χρησιμοποιώντας την αποθήκευση θερμότητας των PCM. Το μοντέλο, δεδομένης της τήξης όσο και της πήξης του PCM, προβλέπει με ακρίβεια τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και τη θερμοκρασία εξόδου του αέρα. Αυτό το μοντέλο έχει εκτεταμένα επικυρωθεί με ευρύ φάσμα πειραματικών αποτελεσμάτων.

Το παρακάτω σχήμα περιγράφει τη φόρτιση της νύχτας και τη διαδικασία χρήσης την ημέρα κατά τη διάρκεια των περιόδων θέρμανσης και ψύξης για συστήματα αποθήκευσης, που αποτελείται από δύο διαφορετικά PCM ενσωματωμένα σε αντίστροφο ψυκτικό σύστημα αντλιών θερμότητας, που χρησιμοποιείται εκτός του σημείου αιχμής της ενέργειας. Καθώς ο αέρας ωθείται μέσω του συστήματος, υφίσταται δύο στάδια θέρμανσης ή ψύξης. Πρώτα περνάει από το ένα PCM και στη συνέχεια στο δεύτερο. Το σημείο τήξης - πήξης του πρώτου υλικού είναι κάτω από το επιθυμητό, ενώ το δεύτερο υλικό έχει σημείο τήξης - πήξης πάνω από τη επιθυμητή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, η ροή του αέρα ρυθμίζεται έτσι ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα και από τα δύο υλικά τη νύχτα και να απελευθερώνει θερμότητα σε θερμοκρασία πάνω από την επιθυμητή την ημέρα. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα τροφοδοτεί αέρα κάτω από την επιθυμητή θερμοκρασία, μετά τη φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας.



**Σχήμα 7.8.1 Φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας και χρήση την ημέρα, σε περιόδους θέρμανσης και ψύξης [66]**

Το ποσό της μείωσης της απαιτούμενης χωρητικότητας για τον κλιματισμό του αέρα και τις ποσότητες των φορτίων θέρμανσης και ψύξης που μεταφέρθηκαν σε ώρες εκτός αιχμής έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το μοντέλο που αναφέραμε παραπάνω, όπως και το ετήσιο ενεργειακό κόστος. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης το οποίο περιέχει δύο διαφορετικά υλικά αλλαγής φάσης μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη χωρητικότητα και το αρχικό κόστος του κλιματιστικού για οικιακή χρήση.

Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σύστημα στην Αδελαΐδα έδειξαν ότι ένα σύστημα αποθήκευσης αποτελούμενο από 100 kg PCM 29 °C και 80 kg PCM 18 °C, μείωσε το ποσοστό ενέργειας που απαιτείται για θέρμανση και ψύξη κατά 50%. Ενώ, το ετήσιο κόστος του ηλεκτρισμού μειώθηκε κατά 32% λόγω της μετατόπισης του φορτίου την ώρα.[66]

## 8 Προσομοίωση του κτιρίου

### 8.1 Λογισμικό Energy Plus

#### 8.1.1 Γενικά

Για να εξεταστεί η επίδραση των PCM στο εσωτερικό του κτιρίου, αν αυτά χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά στο κέλυφος του, υλοποιήθηκε η προσομοίωση του με χρήση του λογισμικού Energy Plus.

Πρόκειται για ένα πρόγραμμα προσομοίωσης θερμικού φορτίου και ενεργειακής ανάλυσης, υλοποιημένο σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran, το οποίο εκδόθηκε από το τμήμα ενέργειας της Αμερικάνικης κυβέρνησης. Το Energy Plus βασίζεται σε 2 προγενέστερα προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων, το BLAST (Building Loads and System Thermodynamic) και DOE-2 (Department of Energy-2) τα οποία ομοίως είχαν σχεδιαστεί από την κυβέρνηση των ΗΠΑ. Λόγω του ότι τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί σημαντικά οι υπολογιστικές μέθοδοι τα προγράμματα αυτά θεωρήθηκε σκόπιμο να βελτιωθούν, με αποτέλεσμα την σχεδίαση του Energy Plus το 1996. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιούν μηχανικοί, αρχιτέκτονες και ερευνητές για να μοντελοποιήσουν την ενέργεια και τη χρήση νερού ενός κτιρίου με σκοπό τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του, ώστε να είναι ενεργειακά ωφέλιμο.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει την αναλυτική περιγραφή και τον γεωμετρικό σχεδιασμό του κτιρίου καθώς και τα δομικά χαρακτηριστικά του κτιρίου και των συστημάτων ψύξης, θέρμανσης και κλιματισμού (HVAC Systems-Heating Ventilation and Air-condition Systems). Με βάση την περιγραφή της κατασκευής και των μηχανικών συστημάτων του κτιρίου, το πρόγραμμα υπολογίζει μια πληθώρα μεταβλητών όπως τα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης και ψύξης για την θερμική ισορροπία του κτιρίου, οι θερμοκρασίες των θερμικών ζωνών και των επιφανειών, η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου κλπ.

Για την υλοποίηση της κτιριακής προσομοίωσης το Energy Plus παρέχει, μεταξύ άλλων, τα υποπρογράμματα: *IDF Editor* και *EP-Launch* τα οποία αντίστοιχα εξυπηρετούν στη δημιουργία/επεξεργασία αρχείων εισόδου και την εκτέλεση προσομοιώσεων.

Στο Energy Plus, το μοντέλο προσομοιώνεται πιο ρεαλιστικά επειδή τα αποτελέσματα των υποπρογραμμάτων συνδέονται με αναδράσεις, καταλήγοντας σε μια λειτουργία ταυτόχρονης λύσης. Το σύνολο του προγράμματος, μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια σειρά από λειτουργικά στοιχεία που ενώνονται με βρόχους ρευστών. Η διαδικασία επίλυσης είναι μια επαναληπτική δομή διαδοχικών αντικαταστάσεων τύπου Gauss-Seidell. Όλα τα στοιχεία ενσωματώνονται και ελέγχονται από τον διαχειριστή της προσομοίωσης. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά –δυνατότητες του προγράμματος είναι:

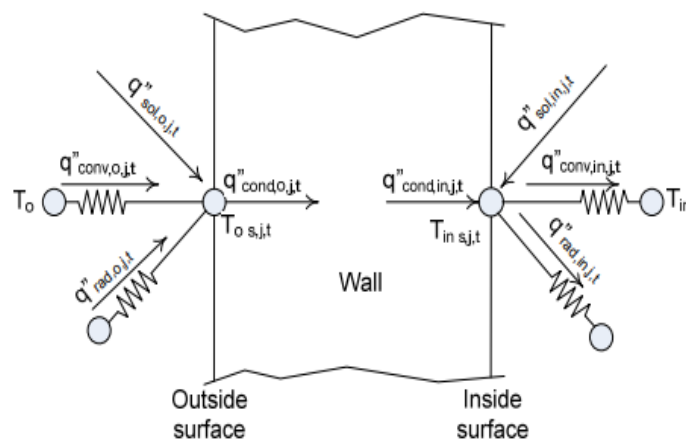
- Ολοκληρωμένη και ταυτόχρονη επίλυση της συμπεριφοράς του κτιρίου και των πρωτευόντων και δευτερευόντων συστημάτων, όταν αυτά είναι άμεσα συνδεδεμένα μεταξύ τους.
- Χρονικά βήματα μικρότερα της μίας ώρας για την αλληλεπίδραση μεταξύ θερμικών ζωνών και περιβάλλοντος, καθώς και μεταβλητά χρονικά βήματα για την αλληλεπίδραση των συστημάτων θέρμανσης, κλιματισμού και αερισμού (HVAC Systems)
- ASCII αρχεία κειμένου, για τα κλιματολογικά και τα δεδομένα εισόδου, που περιλαμβάνουν ωριαίες, ή και συντομότερες καταγραφές καθώς και αποτελέσματα με τύπο και μορφή που καθορίζονται από τον χρήστη.
- Τεχνική επίλυση βασισμένη στη θερμική ισορροπία των φορτίων του κτιρίου, που επιτρέπει τον ταυτόχρονο υπολογισμό των επιδράσεων της ακτινοβολίας και της συναγωγής, τόσο για την εσωτερική όσο και για την εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου
- Συναρτήσεις θερμικής αγωγιμότητας για τον υπολογισμό αυτής στα διάφορα μέρη του κτιρίου, όπως τοίχοι, οροφές, δάπεδα κλπ.
- Βελτιωμένη προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω εδάφους, βασισμένη σε τρισδιάστατα μοντέλα εδάφους και απλοποιημένες μεθόδους ανάλυσης
- Συνδυασμένο μοντέλο διάδοσης θερμότητας και μάζας για τον υπολογισμό της απορρόφησης και της αποβολής υγρασίας από κάθε στρώμα των επιφανειών του κτιρίου. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω συναρτήσεων θερμικής αγωγιμότητας ή με το μοντέλο EMPD (Effective Moisture Penetration Depth Model).
- Μοντέλα θερμικής άνεσης που λαμβάνουν υπόψη τους τη δραστηριότητα των ενοίκων, την υγρασία κλπ.
- Ανισοτροπικό μοντέλο ουρανού για τον καλύτερο υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες.
- Σύνθετοι υπολογισμοί ανοιγμάτων που περιλαμβάνουν ελεγχόμενες περσίδες παραθύρων, ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες κ.ά.

- Έλεγχοι της ημερήσιας ηλιακής φωτεινότητας, συμπεριλαμβανομένων και των υπολογισμών του εσωτερικού φωτισμού, της προσομοίωσης και του ελέγχου και του τεχνητού φωτισμού.
- Υπολογισμοί της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για τις ποσότητες των εκπεμπόμενων ρύπων CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO και μικροσωματιδίων, οι οποίοι παράγονται κατά τις μετατροπές της ενέργειας ώστε να μπορεί να καταναλωθεί από το κτίριο και τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού που αυτό διαθέτει. [67]

### 8.1.2 Υπολογιστικές μέθοδοι του Energy Plus

Το Energy Plus ακολουθεί τη μέθοδο θερμικής ισορροπίας (Heat Balance method) της ASHRAE για να τους υπολογισμούς των θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Αυτή βασίζεται στην εξισορρόπηση όλων των ενεργειακών ροών σε μία θερμική ζώνη και περιλαμβάνει την επίλυση ενός συνόλου εξισώσεων, οι οποίες είναι οι εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου για την εξωτερική και την εσωτερική επιφάνεια για κάθε στοιχείο του κτιρίου (τοίχο, οροφή, δάπεδο κλπ.) καθώς και για τον αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου.

Η θερμότητα που μεταφέρεται με αγωγή μέσω των δομικών στοιχείων του κτιρίου, συνδέεται με το σύνολο των ενεργειακών εξισώσεων συνδυάζοντας έτσι τις εξωτερικές και εσωτερικές ενεργειακές ζυγιστάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μοντελοποιώντας τη θερμότητα με συναρτήσεις θερμικής μεταφοράς (CTF-conduction transfer functions) οι οποίες τελικά συσχετίζουν τις θερμικές ροές με τις τρέχουσες και τις προηγούμενες τιμές θερμοκρασιών των επιφανειών.



Σχήμα 8.1.1 Γραφική απεικόνιση θερμικής ισορροπίας στο εξωτερικό και το εσωτερικό επιφάνειας.[68]

Το πλεονέκτημα της μεθόδου CTF είναι ότι μετατρέπει τις πολύπλοκες εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας σε απλές γραμμικές εξισώσεις με σταθερούς συντελεστές, οι οποίες επιλύονται εύκολα για εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες επιφανειών. Οι συντελεστές που εμπλέκονται σε αυτές τις γραμμικές εξισώσεις υπολογίζονται μόνο μία φορά για κάθε κατασκευή. Αυτή η απλούστευση κάνει τη μέθοδο ικανή να προσομοιώνει εύκολα τα κτίρια που περιλαμβάνουν υλικά, τα οποία έχουν σταθερές ιδιότητες. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν είναι δυνατή η προσομοίωση ενός κτιρίου με προχωρημένα υλικά όπως PCM, τα οποία έχουν μεταβλητή χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας ανάλογα με τη θερμοκρασία. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο ένας νέος αλγόριθμος πεπερασμένων διαφορών συμπεριλήφθηκε στις πιο πρόσφατες εκδόσεις του Energy Plus. Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την μέθοδο της ενθαλπίας (Enthalpy method) που καθιστά δυνατό τον υπολογισμό της ενθαλπίας των PCM καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η λύση του προβλήματος που αφορά την αλλαγή φάσης είναι δύσκολη καθώς δύο φάσεις (στερεή και υγρή) υπάρχουν ταυτόχρονα. Κατά την διεπαφή απελευθερώνεται ή απορροφάται η λανθάνουσα θερμότητα όμως η θέση της είναι άγνωστη. Η εξίσωση της ενέργειας πρέπει να γραφτεί ξεχωριστά για τις δύο φάσεις και σε κάθε φάση πρέπει να συζευχθεί η αντίστοιχη θερμοκρασία. Αυτό απαιτεί την εύρεση της θέσης της διεπαφής φάσης η οποία είναι δύσκολη αν το πρόβλημα πρέπει να λυθεί με αλγόριθμους πεπερασμένων διαφορών. Η μέθοδος ενθαλπίας είναι μια προσέγγιση που ξεπερνά αυτές τις δυσκολίες χρησιμοποιώντας την ενθαλπική μορφή της ενεργειακής εξίσωσης η οποία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και για τις δύο φάσεις. Επομένως, δεν είναι ανάγκη να υπάρχουν ξεχωριστές εξισώσεις για στερεές και υγρές φάσεις και έτσι καθίστανται εφαρμόσιμες οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών.[68]

## 8.2 Λογισμικό Sketch Up

Το πρώτο βήμα της προσομοίωσης είναι η εισαγωγή στο αρχείο δεδομένων εισόδου όλων των δεδομένων εκείνων, τα οποία αφορούν την γεωμετρία του κελύφους του κτιρίου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σχεδίασης του κελύφους στο λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης Sketch Up.

Το Sketch Up είναι ένα πρόγραμμα τρισδιάστατης μοντελοποίησης κτιρίων, καθώς επίσης εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Το πρόγραμμα απευθύνεται σε σχεδιαστές εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, αρχιτέκτονες, μηχανολόγους και πολιτικούς μηχανικούς, με εφαρμογή ακόμα και στον

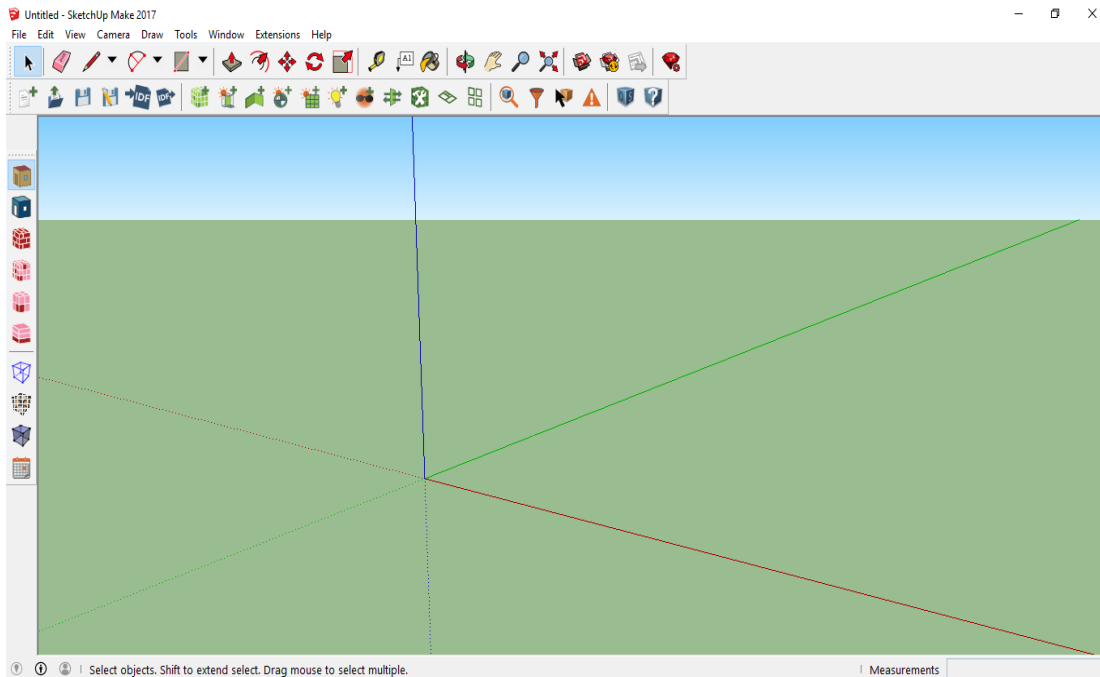
κινηματογράφο και τα ηλεκτρονικά παιχνίδια. Διαθέτει μία ευρεία ποικιλία εργαλείων, με τα οποία είναι δυνατόν να σχεδιαστεί το υπό μελέτη μοντέλο με μία σχετική ακρίβεια έως και πολύ λεπτομερώς, ανάλογα με τις γνώσεις του χρήστη. Το Open Studio plug-in αποτελεί μία επέκταση για το πρόγραμμα Sketch Up, η οποία καθιστά δυνατή την ενεργειακή μοντελοποίηση μέσω των εργαλείων του λογισμικού Open Studio. Ολοκληρώνοντας τη σχεδίαση, ο χρήστης μπορεί να εξαγάγει το μοντέλο του σε αρχείο μορφής .idf, ώστε να εισάγει κωδικοποιημένα τα σχεδιαστικά και ενεργειακά δεδομένα από το Sketch Up και το Open Studio στο EnergyPlus για την περαιτέρω επεξεργασία του.

### 8.3 Σχεδιασμός του κτιρίου με χρήση του λογισμικού Sketch Up

Το Sketch Up είναι ελεύθερα διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <https://www.sketchup.com/download/all>. Το Open Studio, επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελεύθερα, αρκεί να δημιουργήσει κάποιος λογαριασμό στο [energyplus.net](https://www.energyplus.net) και εν συνεχεία να το κατεβάσει από την ηλεκτρονική διεύθυνση: <https://www.openstudio.net/downloads>. Στην συνέχεια, ανοίγοντας το Sketch Up, στην καρτέλα Extensions, μπορεί να εισαχθεί το Open Studio Plug-in στο λογισμικό. Για την παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το Sketch Up Make 2017 και το Open Studio plug-in v.2.6.0.

Το κτίριο στο οποίο θα μελετήσουμε τις επιδράσεις των υλικών αλλαγής φάσης, πρόκειται για ένα απλοποιημένο μοντέλο κατοικίας. Συγκεκριμένα πρόκειται για ένα δωμάτιο  $64 \text{ m}^2$  και με ύψος  $3 \text{ m}$ , το οποίο διαθέτει 3 παράθυρα σε νότο, βορρά και δύση διαστάσεων  $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$  και μία πόρτα στην ανατολή  $1.5 \times 2 \text{ m}^2$ . Η περιοχή προσομοίωσης είναι η Αθήνα με γεωγραφικό μήκος και πλάτος  $23^\circ 73'$  και  $37^\circ 9'$  αντίστοιχα και υψόμετρο  $15 \text{ m}$ . [69]

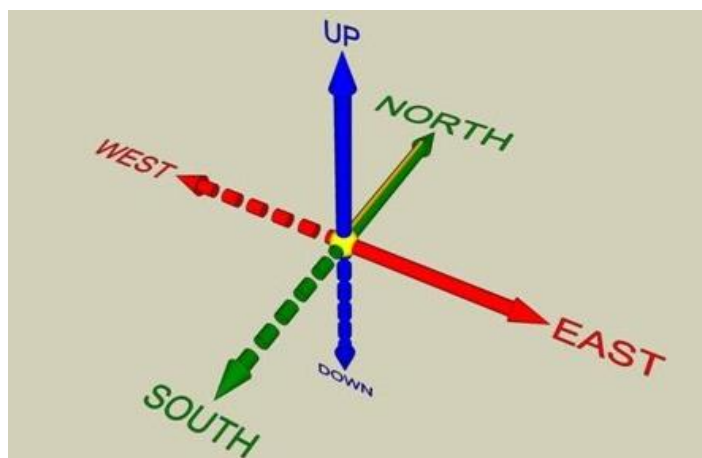
Ανοίγοντας το λογισμικό Sketch Up εμφανίζεται το περιβάλλον σχεδίασης:



**Σχήμα 8.3.1 Περιβάλλον σχεδίασης Sketch Up Make 2017**

Υπάρχουν τρεις μπάρες με εργαλεία επεξεργασίας. Η μπάρα που βρίσκεται στην πάνω γραμμή στο πάνω μέρος της οθόνης έχει τα σχεδιαστικά εργαλεία του Sketch Up, ενώ τα εργαλεία που βρίσκονται στην κάτω γραμμή και στην αριστερή πλευρά της οθόνης είναι εργαλεία της επέκτασης του Open Studio με τα οποία προστίθενται ορισμένες ενεργειακές ιδιότητες στο σχέδιο.

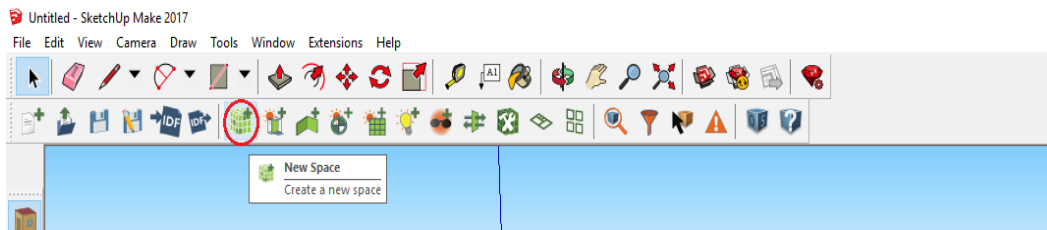
Ακόμη οι άξονες με τα διαφορετικά χρώματα (μπλε, κόκκινο, πράσινο) αφορούν τον προσανατολισμό καθώς κατέχει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του κτιρίου και όπως φαίνεται και στο σχήμα ο πράσινος άξονας δείχνει τον βορρά, ο κόκκινος την ανατολή και ο μπλε την κατακόρυφο.



**Σχήμα 8.3.2 Προσανατολισμός στο Sketch Up**

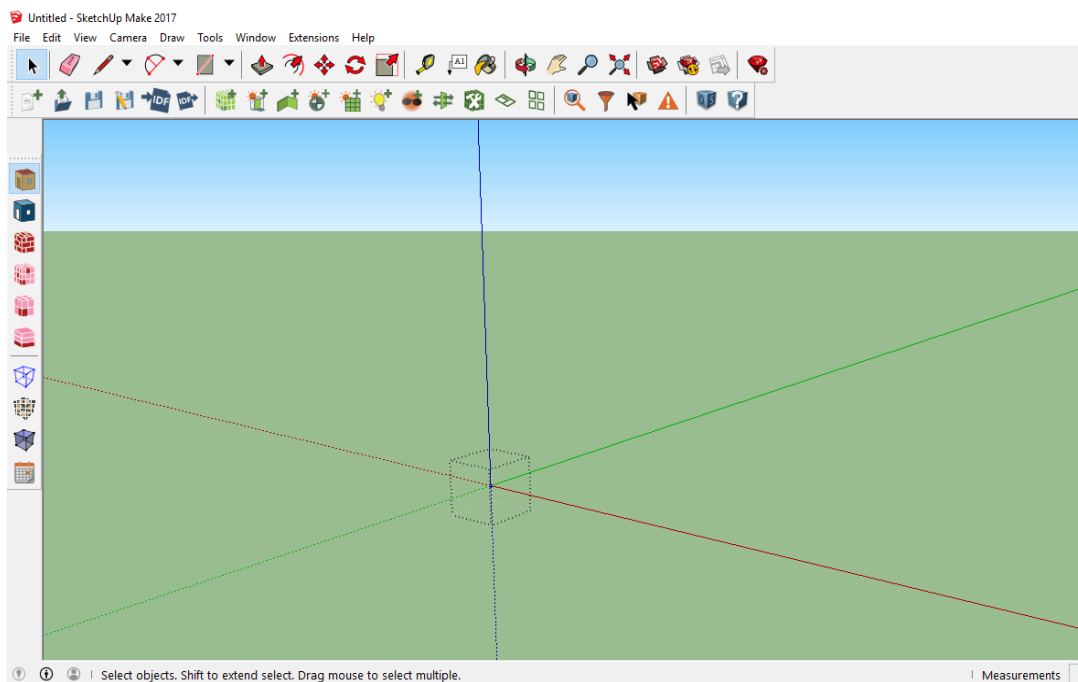


Στη συνέχεια δημιουργούμε μια θερμική ζώνη μέσα στην οποία θα σχεδιάσουμε το κτίριο μας. Η εντολή αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς για να μπορεί μετέπειτα το λογισμικό Energy Plus να αναγνωρίζει και να επεξεργάζεται επιφάνειες αυτές θα πρέπει να βρίσκονται μέσα σε κάποια θερμική ζώνη. Η εισαγωγή της θερμικής ζώνης γίνεται με το εργαλείο *New Space* από τη γραμμή εργαλείων του Open Studio Plug in.



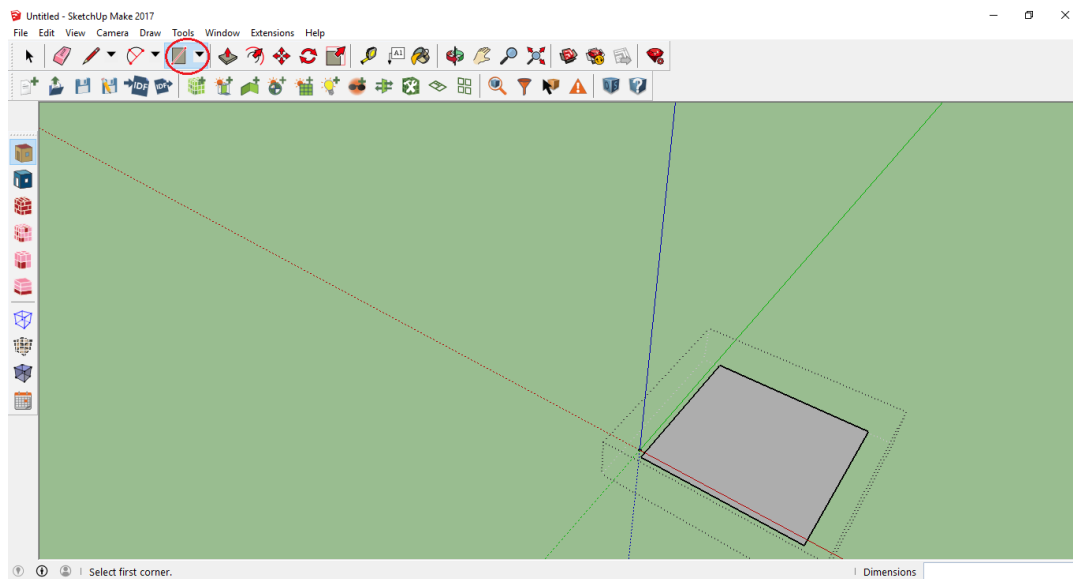
**Σχήμα 8.3.3** Εργαλείο δημιουργίας νέας θερμικής ζώνης/*New space tool*

Αφού επιλέξουμε την εντολή εμφανίζεται στο περιβάλλον ένας κύβος, οι ακμές του οποίου αποτελούν τα όρια της θερμικής ζώνης.




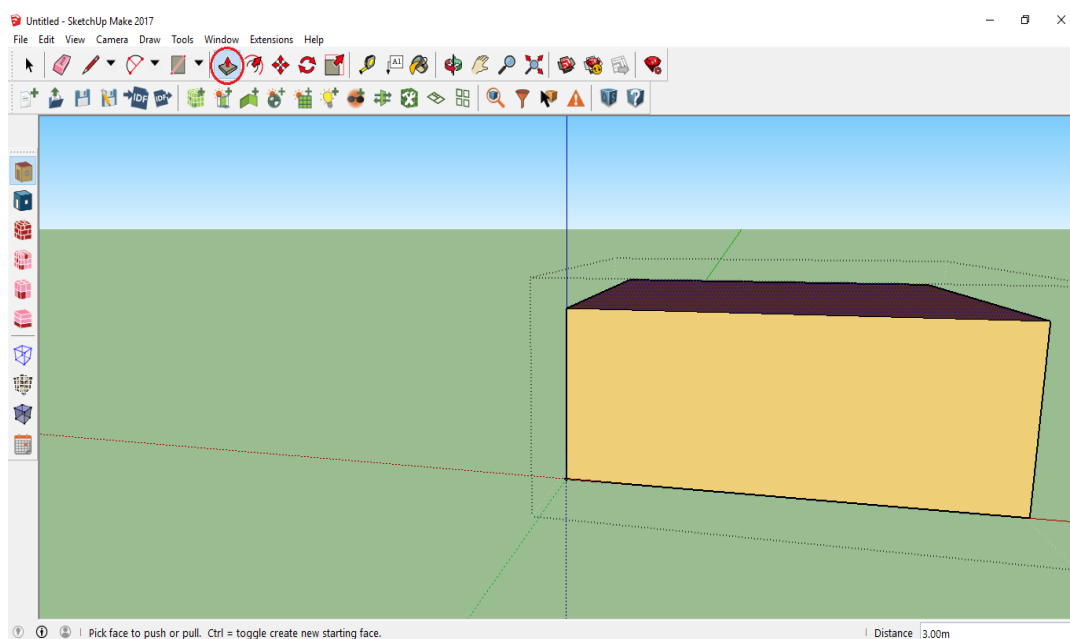
**Σχήμα 8.3.4** Θερμική ζώνη προς επεξεργασία

Η θερμική ζώνη έχει ενεργοποιηθεί και πλέον μπορούμε να αρχίσουμε την σχεδίαση. Με το εργαλείο *Shapes tool > Rectangle* σχεδιάζουμε ένα ορθογώνιο  $8 \times 8 \text{ m}^2$  το οποίο θα είναι το πάτωμα.



**Σχήμα 8.3.5 Δημιουργία επιφάνειας δαπέδου/Shapes tool**


Για να δώσουμε ύψος στο πάτωμα μας και να σχηματιστεί το κέλυφος του δωματίου χρησιμοποιούμε το εργαλείο *Push/Pull tool* .

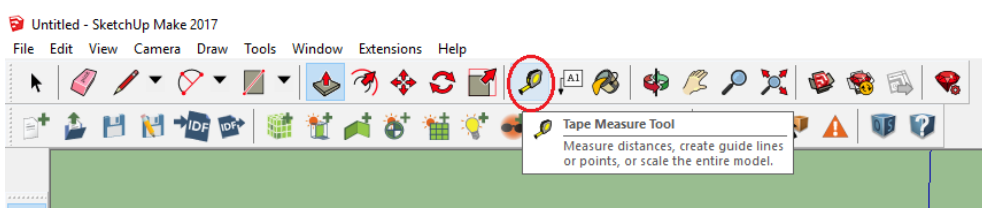


**Σχήμα 8.3.6 Δημιουργία τρισδιάστατης επιφάνειας/Push tool**

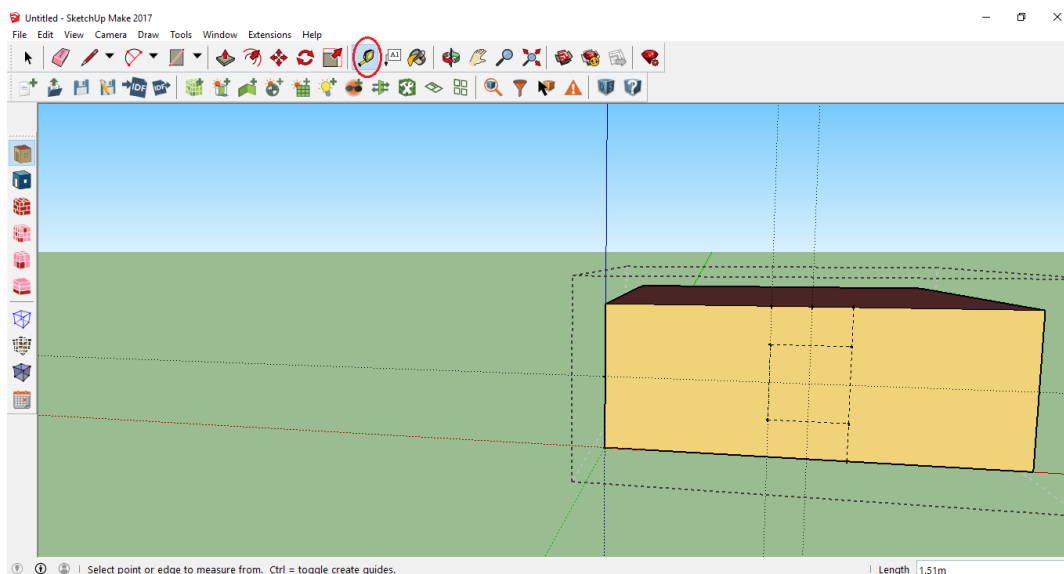
Μόλις ολοκληρώσουμε την ανύψωση του δαπέδου παρατηρούμε πώς οι τοίχοι και η οροφή έχουν διαφορετικό χρώμα. Αυτό συμβαίνει λόγω του Open Studio καθώς μέσω της θερμικής ζώνης μπορεί να διακρίνει τις επιφάνειες σε τοίχους, οροφές, πόρτες και παράθυρα διευκολύνοντας την σχεδίαση μας και προειδοποιώντας μας αν τυχόν προκύψει κάποιο λάθος στη σχεδίαση.

Με το εργαλείο *shapes>rectangle* θα σχεδιάσουμε τρία παράθυρα διαστάσεων 1,2m x 1,2m στη νότια, βόρεια και δυτική πλευρά του κτιρίου καθώς και μία πόρτα στην ανατολική πλευρά διαστάσεων 1,2m x 2m.

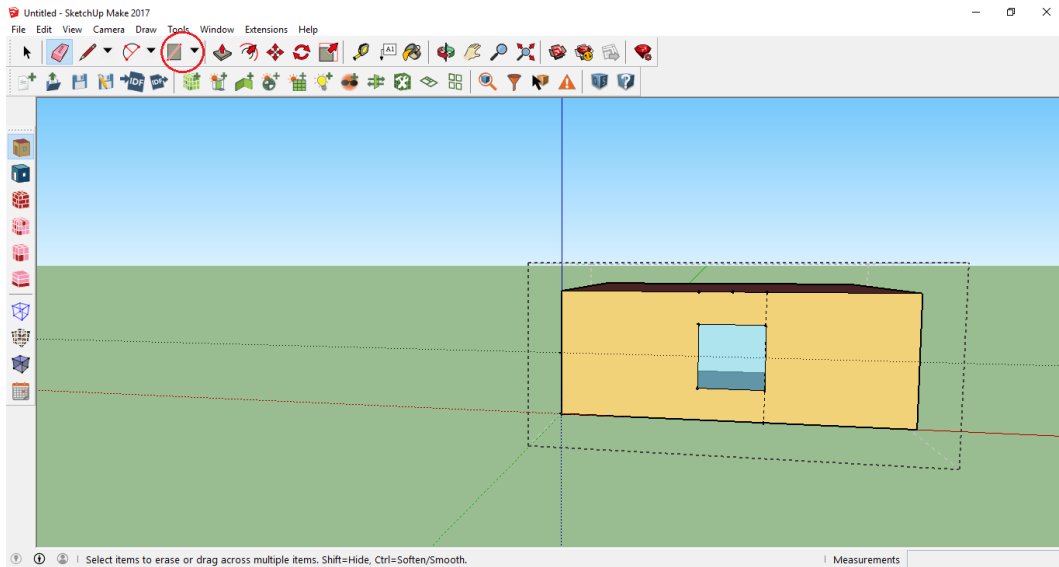
Με την βοήθεια του εργαλείου *Tape measure tool*  , το οποίο χρησιμοποιείται για να μετρήσει αποστάσεις, να σχεδιάσει γραμμές καθοδήγησης και να αποδώσει κλίμακα στο μοντέλο βρίσκουμε το κέντρο του τοίχου και από εκεί σχεδιάζουμε το παράθυρο. Ομοίως πράττουμε και για την πόρτα.



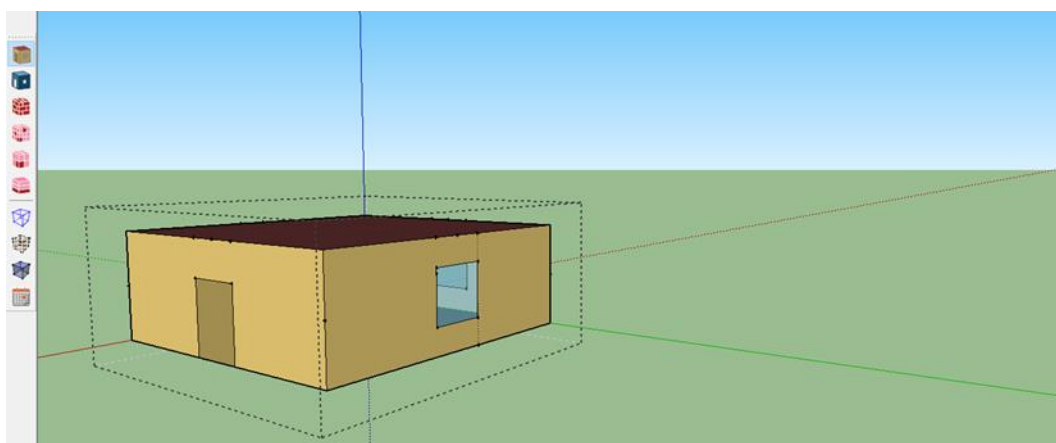
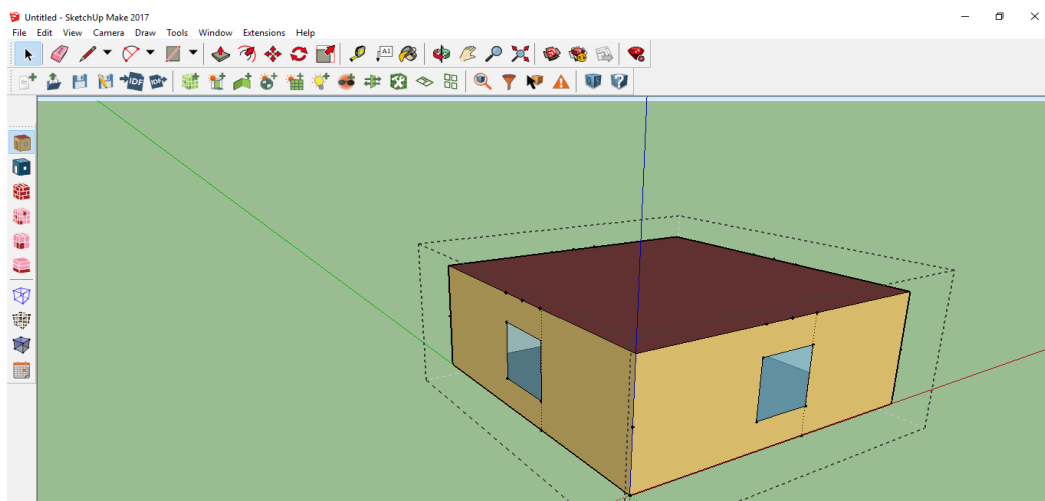
**Σχήμα 8.3.7** Εργαλείο δημιουργίας γραμμών καθοδήγησης



**Σχήμα 8.3.8** Χρήση εργαλείου *Measure tape tool* για το σχεδιασμό του παραθύρου

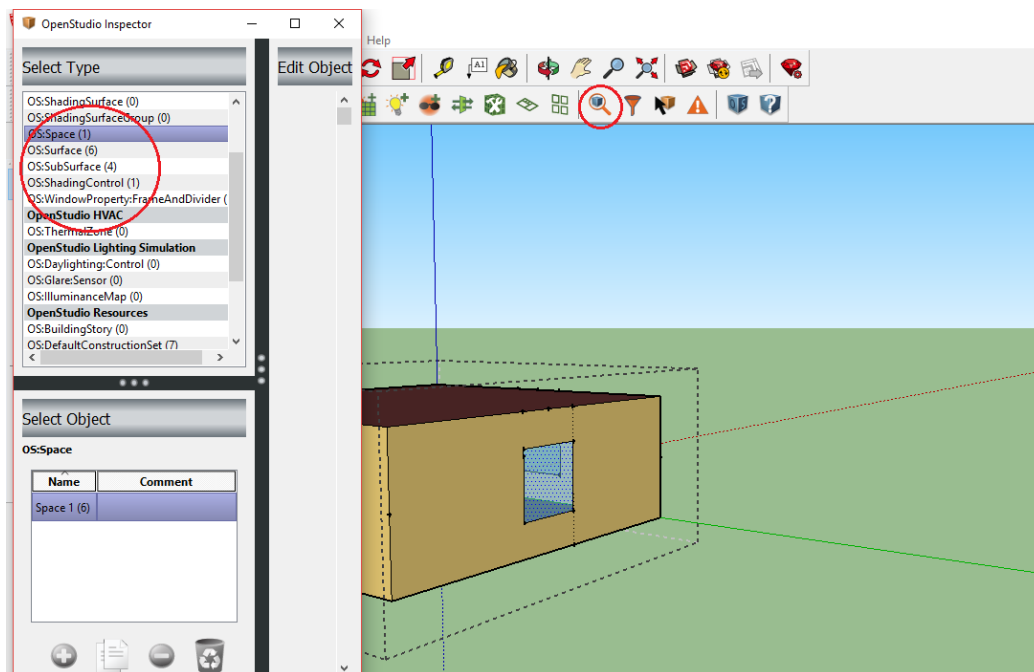


**Σχήμα 8.3.9 Χρήση εργαλείου Shapes tool>Rectangle για τον τελικό σχεδιασμό του παραθύρου**



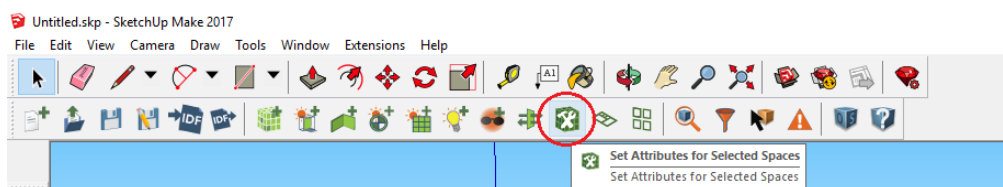
**Σχήμα 8.3.10 Τελική μορφή του κτιρίου**

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες η τελική μορφή του κτιρίου είναι έτοιμη .Προτού συνεχίσουμε χρησιμοποιώντας το *Inspector tool* βεβαιωνόμαστε πως το πρόγραμμα έχει λάβει υπόψιν του όλες τις υπο-επιφάνειες (subsurfaces )που σχεδιάσαμε και με τις κατάλληλες ιδιότητες. Πρόκειται για ένα παράθυρο το οποίο ενημερώνει τον χρήστη για όλες τις πληροφορίες των επιφανειών, όπως συντεταγμένες, είδος επιφάνειας, έκταση κλπ. Επίσης, μέσω του συγκεκριμένου εργαλείου, μπορούμε να ορίσουμε κάποια στοιχεία των επιφανειών, όπως για παράδειγμα το αν ένα παράθυρο θα είναι γυάλινο ή εάν θα ανοίγει ή θα είναι μόνο κλειστό.

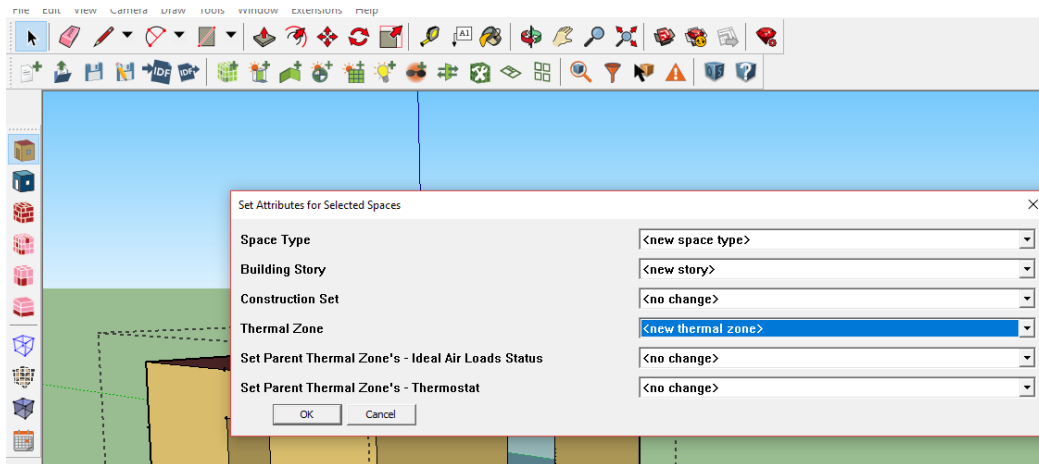


Σχήμα 8.3.11 Χρήση του εργαλείου *Inspector tool*


Έπειτα προσδίδουμε στο κτίριο τα χαρακτηριστικά της θερμικής ζώνης και του χώρου, μέσω του εργαλείου *Set Attributes for Selected Spaces*.

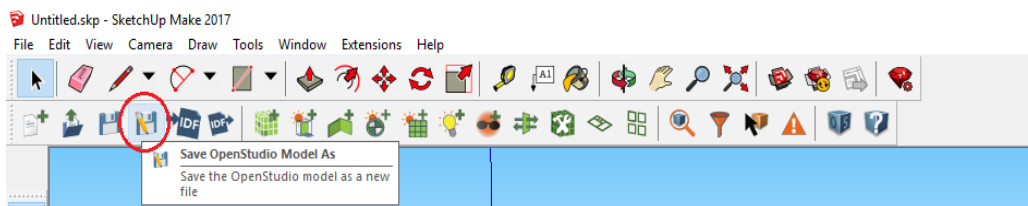


Σχήμα 8.3.12 Χρήση εργαλείου *Set attributes for selected spaces*.



**Σχήμα 8.3.13 Χαρακτηριστικά θερμικής ζώνης**

Μέσω της εντολής *save open studio model as*  , αποθηκεύουμε το αρχείο σε μορφή .osm με το όνομα που επιθυμούμε. Είναι βασικό να αποθηκευτεί το αρχείο σε αυτή την μορφή καθώς με αυτό τον τρόπο έχουν αποθηκευτεί οι γεωμετρίες και οι θερμικές ζώνες που έχουν προσδοθεί στο μοντέλο μέσω του Open Studio. Το Sketch-up δεν αναγνωρίζει αυτές τις γεωμετρίες όταν αποθηκευτεί σε αρχείο .skp

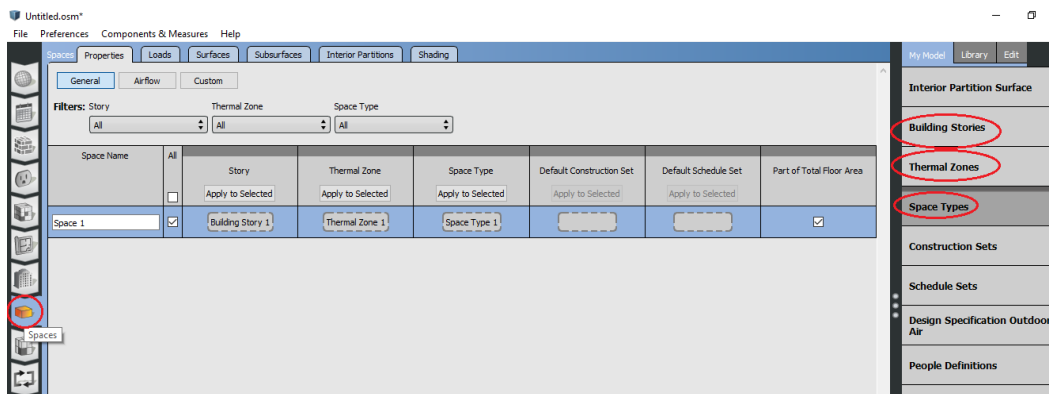


**Σχήμα 8.3.14 Χρήση της εντολής *save open studio model as*.**

## 8.4 Επεξεργασία δεδομένων στο Open Studio

Ο σχεδιασμός του κτιρίου έχει ολοκληρωθεί όμως το αρχείο δεν είναι έτοιμο ακόμα για να επεξεργασθεί από το λογισμικό Energy Plus. Μένει η αντιστοίχιση χώρων-θερμικών ζωνών και η αποθήκευση του αρχείου ως .idf καθώς μόνο τέτοια αρχεία δέχεται ως δεδομένα εισόδου το Energy Plus.

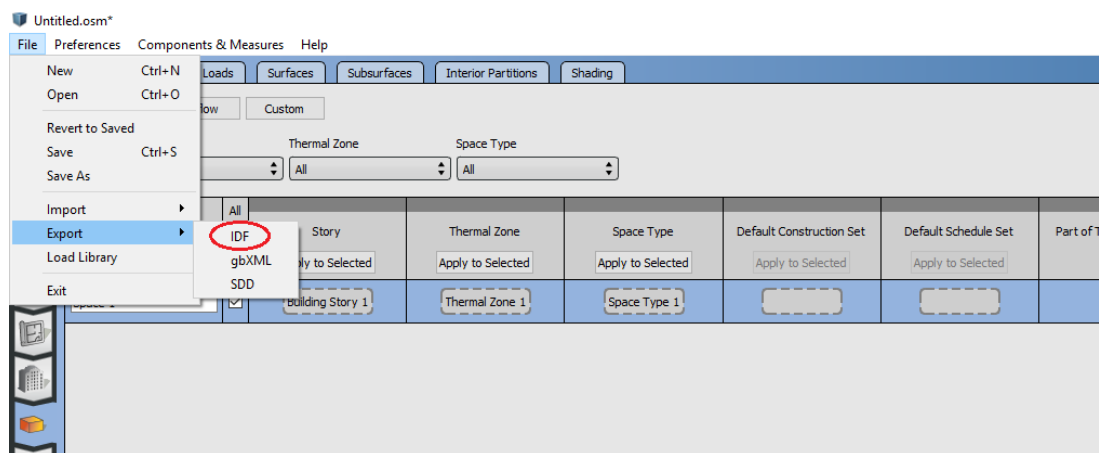
Ανοίγουμε το αρχείο που αποθηκεύσαμε ως .osm και εμφανίζεται το περιβάλλον του λογισμικού Open Studio. Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή της καρτέλας *Spaces*.



**Σχήμα 8.4.1** Επεξεργασία καρτέλας Spaces στο Open Studio

Στην καρτέλα αντιστοιχούμε από τις επιλογές *Building Stories*, *Thermal Zones*, *Space Types* τα χαρακτηριστικά της θερμικής ζώνης που καθορίσαμε προηγουμένως στις στήλες Story, Thermal Zone και Space Type.

Τέλος μέσω της εντολής *file>export>idf* θα εξαγάμουμε το αρχείο το οποίο θα είναι το προς επεξεργασία για το Energy Plus.



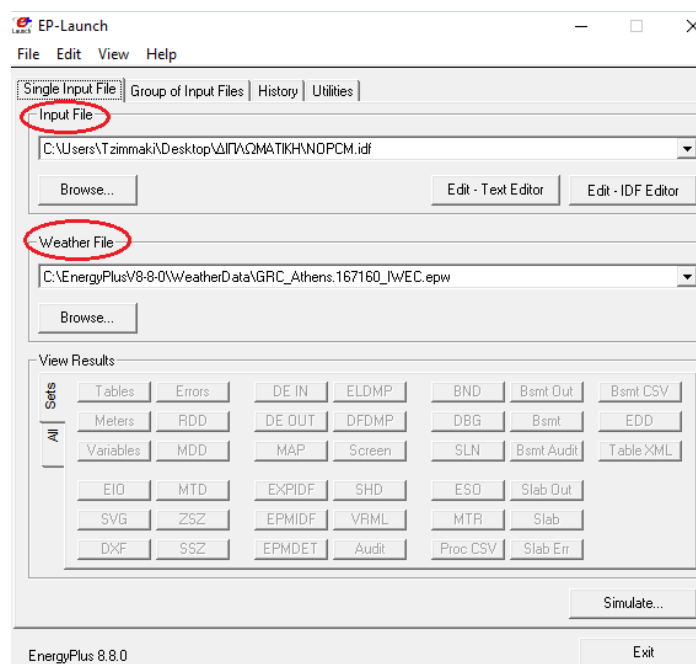
**Σχήμα 8.4.2** Εξαγωγή του αρχείου σε μορφή .idf

Το αρχείο προς επεξεργασία από το Energy Plus, είναι πλέον έτοιμο.

## 8.5 Επεξεργασία δεδομένων στο Energy Plus

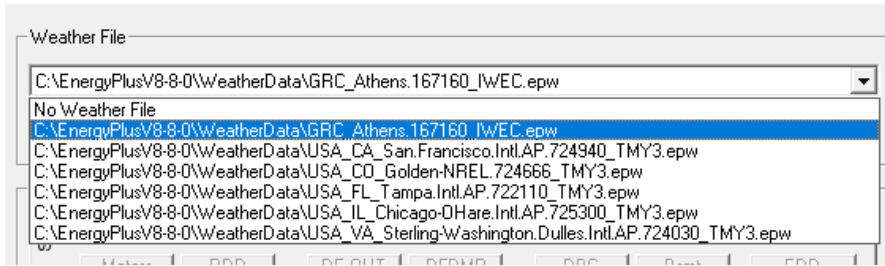
### 8.5.1 Εισαγωγή στο περιβάλλον προσομοίωσης

Μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου στο Sketch Up και την εξαγωγή του αρχείου, που περιέχει τα σχεδιαστικά και ενεργειακά δεδομένα, σε μορφή .idf ακολουθεί η διαδικασία προσομοίωσης του κτιρίου μέσω των υποπρογραμμάτων EP-Launch και IDF Editor, του λογισμικού Energy Plus. Για να επεξεργαστούμε με το IDF Editor περαιτέρω τα ενεργειακά και δομικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, πρέπει πρώτα να εισαχθούν στο EP-Launch, το αρχείο .idf αλλά και το αρχείο καιρικών δεδομένων της περιοχής στην οποία επιλέξαμε να γίνει η προσομοίωση. Τα κλιματικά δεδομένα πάρθηκαν από τη σελίδα του Energy Plus, όπου υπάρχουν αποθηκευμένα αρχεία καιρικών δεδομένων για πληθώρα πόλεων και χωρών. Για την Ελλάδα υπάρχουν τρεις σταθμοί συλλογής δεδομένων, στην Αθήνα, στην Θεσσαλονίκη και στην Ανδραβίδα. Στην εν λόγω προσομοίωση χρησιμοποιούνται δεδομένα της Αθήνας.



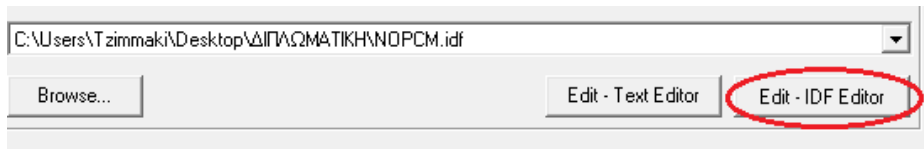
Σχήμα 8.5.1 Περιβάλλον EP-Launch



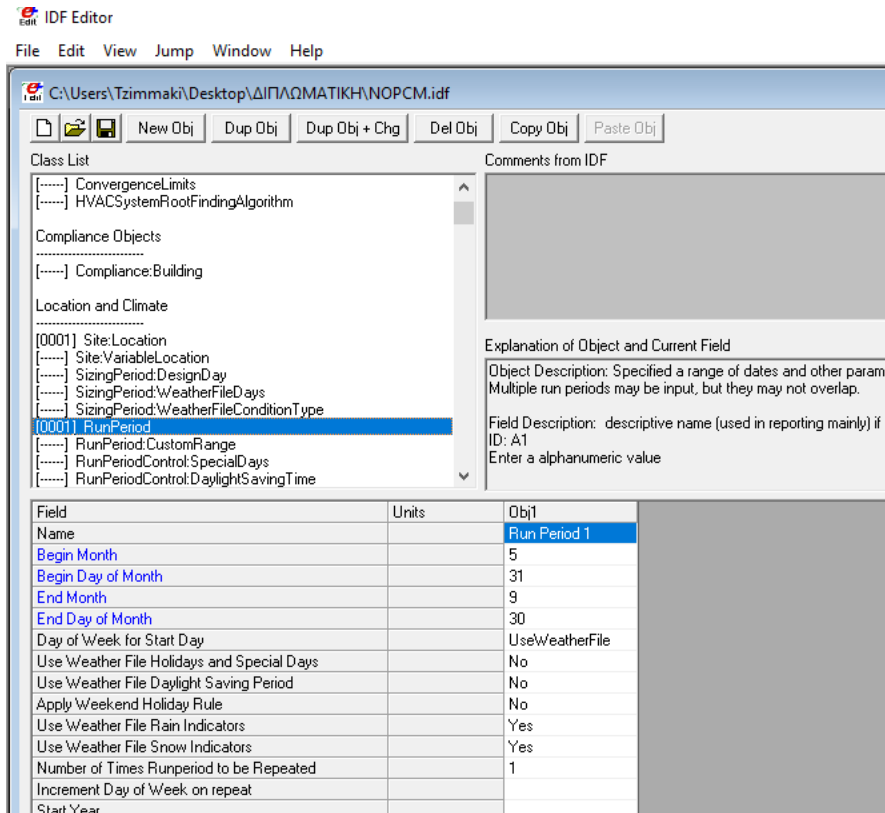


Σχήμα 8.5.2 Εισαγωγή αρχείου καιρού

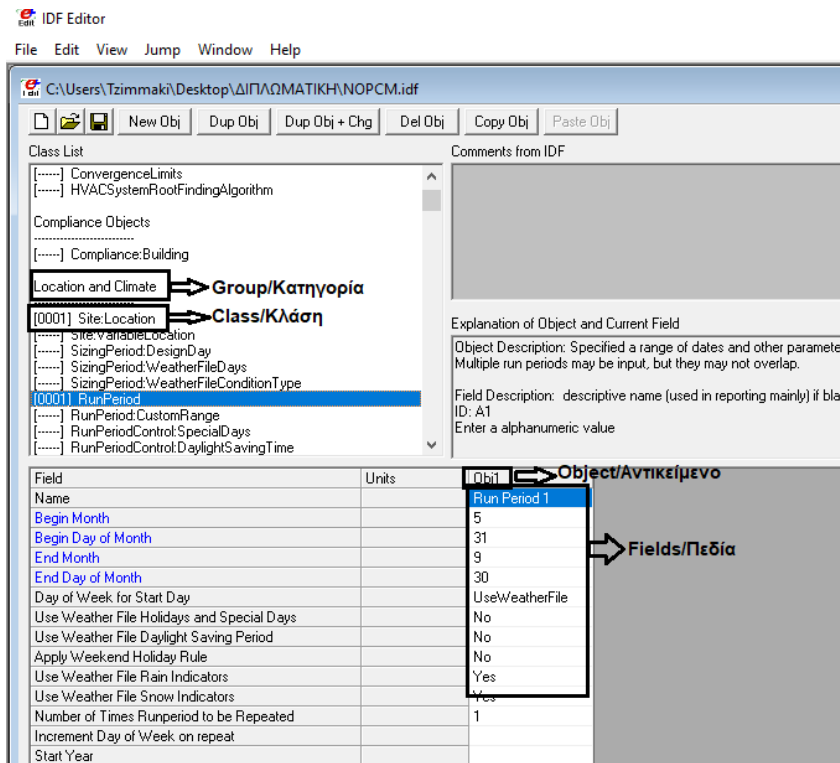
Για να επεξεργαστούμε το αρχείο δεδομένων εισόδου επιλέγουμε *Edit-IDF Editor* και εμφανίζεται το περιβάλλον του IDF Editor όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 8.5.3 Αρχείο προς επεξεργασία



Σχήμα 8.5.4 Περιβάλλον IDF Editor



Σχήμα 8.5.5 Οργάνωση του IDF Editor

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα τα στοιχεία που μπορεί να επεξεργαστεί ο χρήστης ανήκουν σε κλάσεις (Classes) ,οι οποίες ομαδοποιούνται σε ευρύτερες Κατηγορίες (Groups). Κάθε κλάση αποτελείται από αντικείμενα (Objects), τα οποία περιέχουν πεδία (Fields) στα οποία επεμβαίνει ο χρήστης ώστε να κάνει τις διαμορφώσεις που επιθυμεί. Αριστερά από κάθε κλάση αναγράφεται ο αριθμός των αντικειμένων που εμπεριέχει. Για παράδειγμα αν αριστερά αναγράφεται [----] σημαίνει ότι η συγκεκριμένη κλάση είναι κενή, ενώ αν αναγράφεται [0001] σημαίνει ότι η κλάση αυτή έχει ένα αντικείμενο.

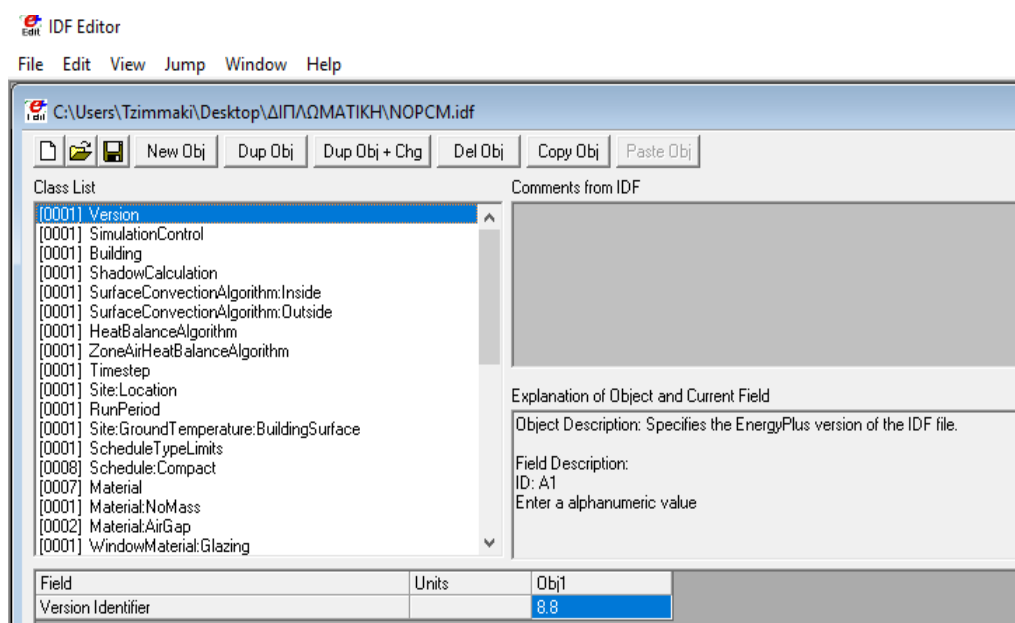
Για να περιγραφεί η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων αναγράφονται οι κατηγορίες, οι κλάσεις, τα αντικείμενα και τα πεδία στα οποία γίνονται τροποποιήσεις, καθώς και οι τιμές που συμπληρώνονται, με τη σειρά που εμφανίζονται στον επεξεργαστή IDF Editor.

Έγιναν προσομοιώσεις του κτιρίου κάνοντας χρήση υλικών αλλαγής φάσης με διαφορετικά σημεία τήξης, για να συγκρίνουμε τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου με το εκάστοτε υλικό. Επίσης έγιναν δοκιμές υλικών αλλαγής φάσης στο κτίριο αφού τοποθετήθηκε σ' αυτό ένα σύστημα θέρμανσης και ψύξης (HVAC- Heating Ventilation and Air-Conditioning) για να παρατηρήσουμε αν υπάρχουν αλλαγές στα φορτία. Οι παράμετροι του συστήματος HVAC που εισήχθησαν στο πρόγραμμα θα εξηγηθούν στο τέλος του κεφαλαίου, αφού παρουσιαστούν πρώτα οι τροποποιήσεις που έγιναν και αφορούν όλες τις προσομοιώσεις

## 8.5.2 Κατηγορία Simulation Parameters

Σ' αυτήν την κατηγορία εισάγονται γενικά δεδομένα που σχετίζονται με τον τρόπο που θέλει ο χρήστης να προσεγγίσει την προσομοίωση του κτιρίου που μελετάει.

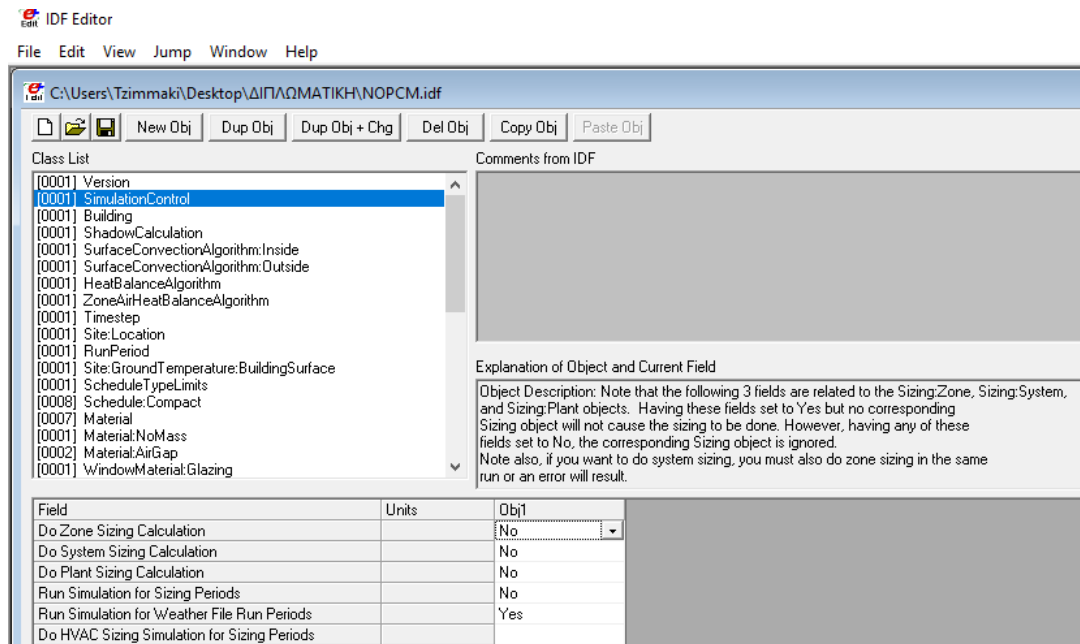
Στην υποκατηγορία **Version** αναφέρεται η έκδοση του Energy Plus η οποία χρησιμοποιήθηκε στην υπό μελέτη προσομοίωση: *Version Identifier: 8.8*.



Σχήμα 8.5.6 Έκδοση του λογισμικού Energy Plus

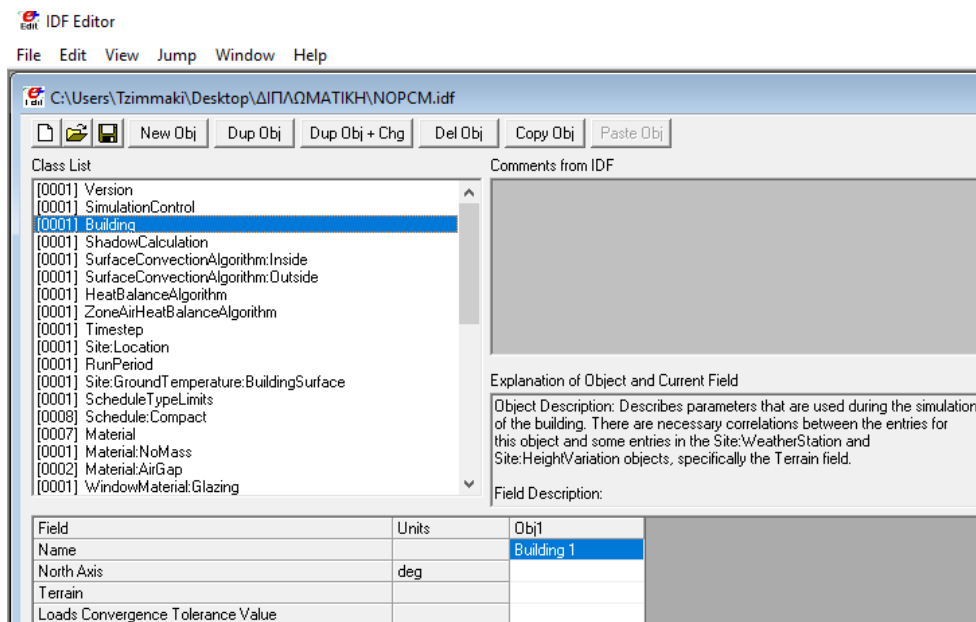
Στην υποκατηγορία **Simulation Control** καθορίζεται τι είδους υπολογισμοί θα εκτελεστούν στην συγκεκριμένη προσομοίωση:

- *Do Zone Sizing Calculation: No.* Το συγκεκριμένο πεδίο υπολογίζει θερμικά και ψυκτικά φορτία με βάση ένα ιδανικό θεωρητικό μοντέλο.
- *Do System Sizing Calculation: No.* Υπολογίζονται τα συνολικά θερμικά και ψυκτικά φορτία με βάση ένα απλοποιημένο μοντέλο.
- *Do Plant Sizing Calculation: No.* Δεν επιθυμούμε τον υπολογισμό της δυναμικότητας των συστημάτων θέρμανσης ψύξης αφού δεν θα υπάρχουν στο μοντέλο μας.
- *Run Simulation for Sizing Periods: No.* Δεν ενδιαφέρουν την προσομοίωση μας οι πρότυπες μέρες.
- *Run Simulation for Weather File Run Periods: Yes.* Πραγματοποίηση της προσομοίωσης για περιόδους του έτους που θα δηλωθούν μετέπειτα, σύμφωνα με το αρχείο καιρού που έχουμε εισάγει.



Σχήμα 8.5.7 Παράμετροι προσομοίωσης/Simulation Parameters

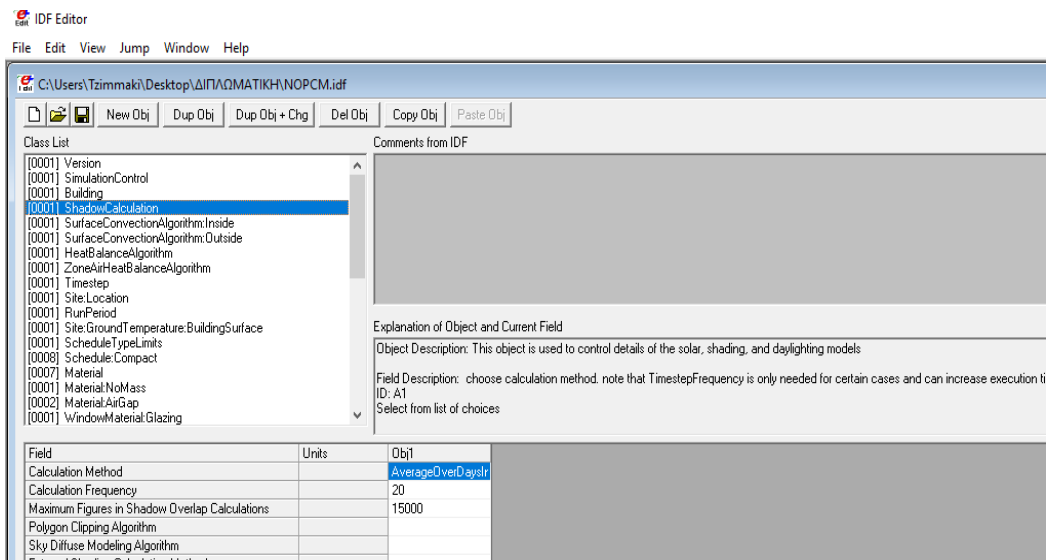
Στην υποκατηγορία **Building** δηλώθηκε το όνομα του κτιρίου, το οποίο ήταν ήδη ορισμένο σαν *Building 1*, από την εξαγωγή του αρχείου από το Open Studio. Τα υπόλοιπα πεδία αφορούν το προσανατολισμό του κτιρίου και αφήνονται κενά, καθώς ο προσανατολισμός του κτιρίου έχει καθοριστεί από το Sketch Up.



Σχήμα 8.5.8 Ορισμός του κτιρίου όπως ονομάστηκε στο Open Studio

Στην υποκατηγορία **Shadow Calculation** επιλέγονται διάφορες λεπτομέρειες που σχετίζονται με τη σκίαση και την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται το κτίριο.

- *Calculation Method*: επιλέγεται ο αλγόριθμος υπολογισμού σκίασης που προτείνεται από το πρόγραμμα *AverageOverDaysInFrequency*. Πρόκειται για τον ταχύτερο αλγόριθμο και πιο αξιόπιστο αφού λαμβάνει υπόψιν του και το χρόνο υπολογισμών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- *Calculation Frequency*: 20. Με αυτό το πεδίο επιλέγεται οι υπολογισμοί σκίασης να γίνονται περιοδικά και κάθε περίοδος να αποτελείται από αριθμό 20 ημερών.
- *Maximum Figures in Shadow Overlap Calculations*: 15000. Σε αυτό το πεδίο καθορίζεται ο αριθμός του δείγματος που θα ληφθεί στους υπολογισμούς. Ένας μεγάλος αριθμός ίσως οδηγήσει σε καθυστέρηση του υπολογισμού ενώ ένα μικρό δείγμα ίσως οδηγήσει σε μη ακριβή αποτελέσματα, οπότε διαλέξαμε ένα προτεινόμενο μέσο αριθμό από το πρόγραμμα.



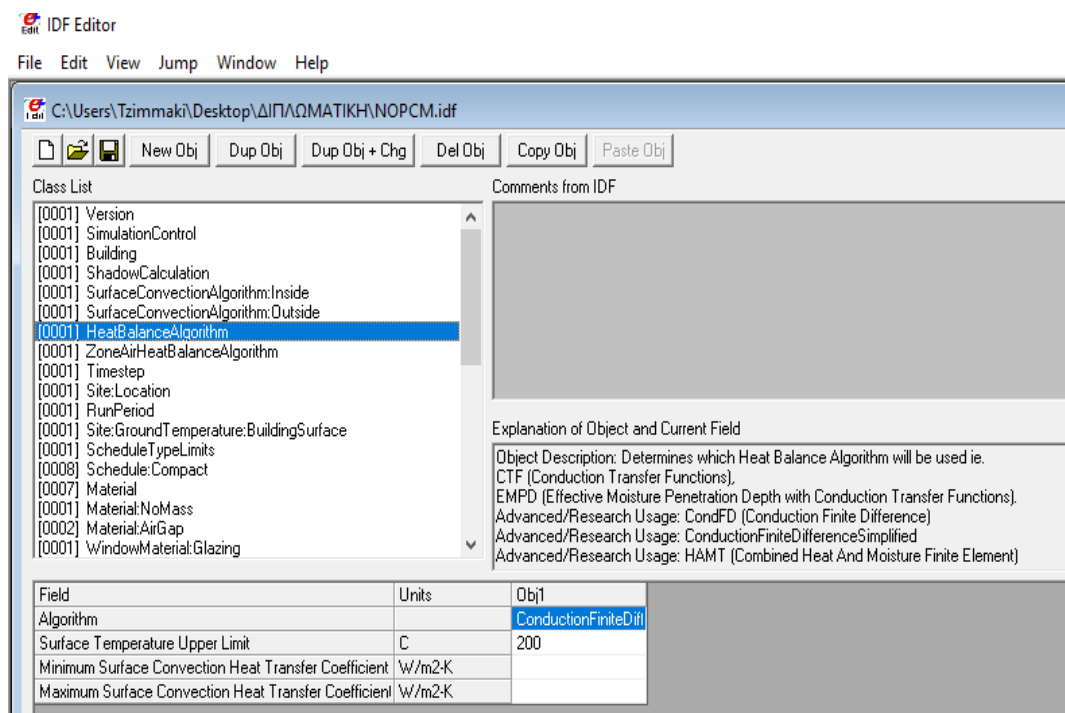
**Σχήμα 8.5.9 Υπολογισμός Σκίασης**

Στην υποκατηγορία **SurfaceConvectionAlgorithm:Inside** γίνεται η επιλογή για τον αλγόριθμο επίλυσης της ροής θερμότητας στο εσωτερικό των επιφανειών που είναι ο αλγόριθμος *TARP*. Το μοντέλο *TARP* συσχετίζει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με τη διαφορά θερμοκρασίας για διάφορους προσανατολισμούς. Αυτό το μοντέλο βασίζεται σε πειράματα επίπεδης πλάκας.

Στην υποκατηγορία **SurfaceConvectionAlgorithm:Outside** αντίστοιχα με την προηγούμενη κατηγορία επιλέγεται αλγόριθμος επίλυσης ροής θερμότητας αλλά για τις εξωτερικές επιφάνειες:DOE-2. Ο αλγόριθμος DOE-2 προέρχεται από μετρήσεις πεδίου και χρησιμοποιεί μια συσχέτιση από τις μετρήσεις των ερευνητών Klems και Yazdaniian για τραχιές επιφάνειες.

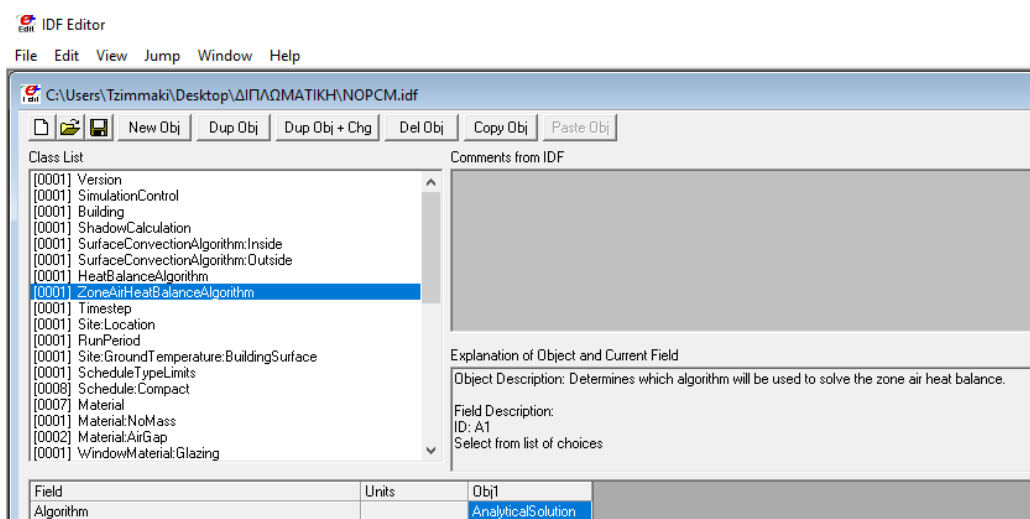
Στην υποκατηγορία **HeatBalanceAlgorithm** επιλέγεται ο αλγόριθμος υπολογισμού της θερμότητας και της υγρασίας στις επιφάνειες του κτιρίου.

- *Algorithm:* Επιλέγεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος στον οποίο έχουμε αναφερθεί και παραπάνω **Conduction Finite Difference** και η επιλογή του είναι απαραίτητη αν το κτίριο μας περιλαμβάνει υλικά αλλαγής φάσης, καθώς διαφορετικά οι ιδιότητες τους δεν αναγνωρίζονται από το πρόγραμμα.
- *Surface Temperature Upper Limit:* 200. Αυτό το πεδίο χρησιμοποιείται αν το πρόγραμμα αποτυγχάνει και μας υποδεικνύει σαν λάθος την θερμοκρασία σε κάποια επιφάνεια. Βάζουμε το υψηλό όριο θερμοκρασίας που μας προτείνει το πρόγραμμα.



**Σχήμα 8.5.10** Αλγόριθμος υπολογισμού θερμότητας και υγρασίας στην επιφάνεια του κτιρίου

Στην υποκατηγορία **ZoneAirHeatBalanceAlgorithm** επιλέγεται ο αλγόριθμος υπολογισμού της θερμότητας και της υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου. Επιλέγεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος: **AnalyticalSolution**. Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την μέθοδο της ενσωμάτωσης για να επιλύσει τις εξισώσεις ενέργειας και ισορροπίας της υγρασίας, στο εσωτερικό του κτιρίου.



Σχήμα 8.5.11 Αλγόριθμος υπολογισμού θερμότητας και υγρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου

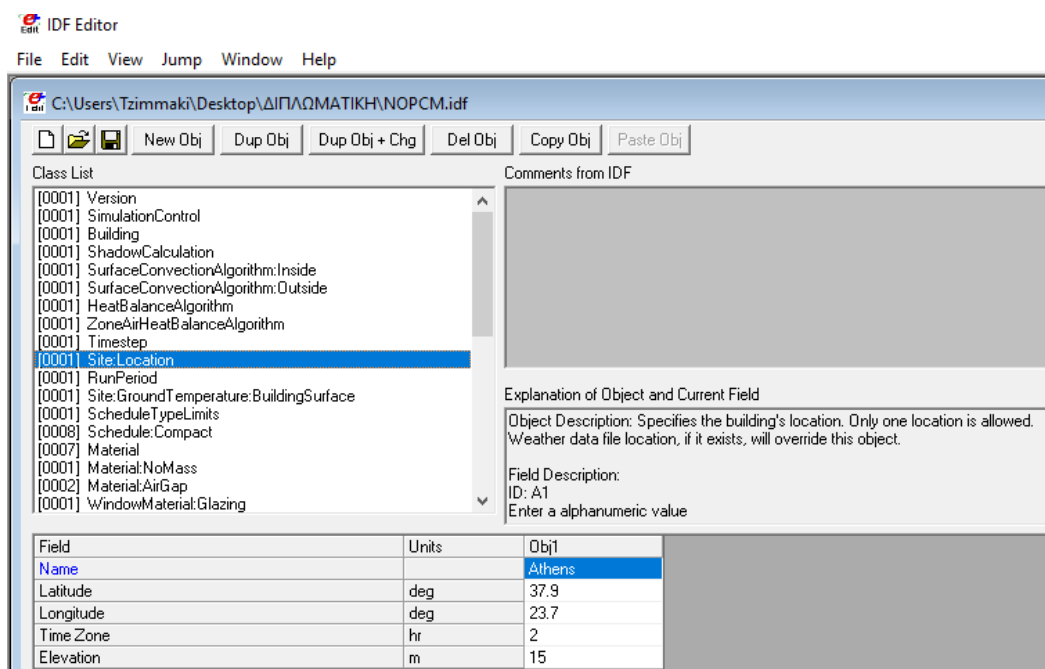
Στην υποκατηγορία **Timestep** εισήχθη το χρονικό βήμα βάσει του οποίου θα γίνουν οι υπολογισμοί μεταφοράς της θερμότητας και των φορτίων. Επιλέγουμε *Number of timesteps per hour* :60 που σημαίνει ότι θα έχουμε χρονικό βήμα 1 minute.

### 8.5.3 Κατηγορία Location and Climate

Αυτή η ομάδα αντικειμένων περιγράφει τις συνθήκες περιβάλλοντος για την προσομοίωση.

Στην υποκατηγορία **Site:Location** δίνονται οι συντεταγμένες του κτιρίου, δηλαδή της περιοχής της Αθήνας. Ορίζονται τα εξής:

- Γεωγραφικό πλάτος: 37,9 deg
- Γεωγραφικό μήκος: 23,7 deg
- Ζώνη ώρας: +02:00 hr
- Υψόμετρο: 15m



Σχήμα 8.5.12 Γεωγραφικά δεδομένα/ Site Location

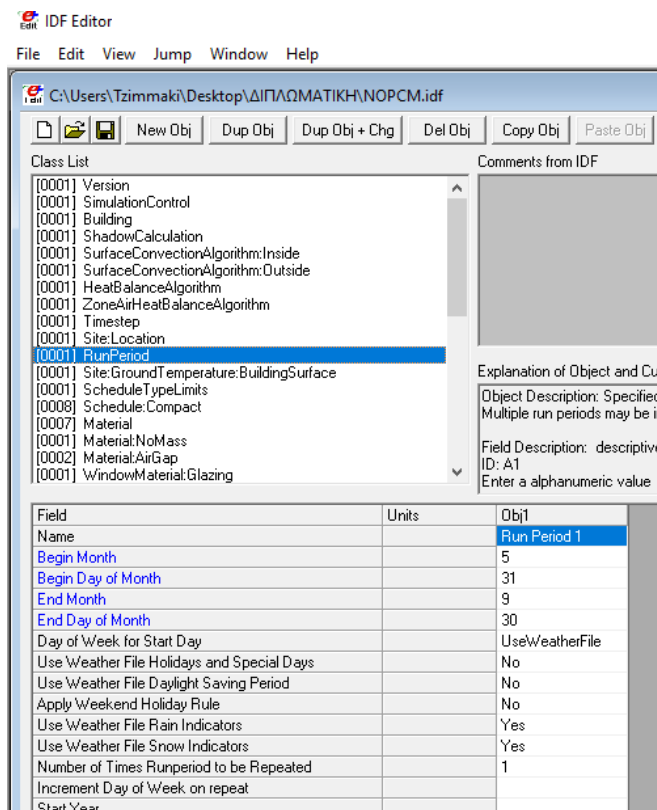
Η υποκατηγορία **RunPeriod** είναι μία πολύ σημαντική κλάση καθώς ορίζεται η χρονική περίοδος διάρκειας προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα ορίζονται η ημέρα και ο μήνας, εκκίνησης και πέρατος, της προσομοίωσης και εν συνεχεία προσδιορίζεται αν θα χρησιμοποιηθεί το αρχείο καιρού, Weather File. Οι περισσότερες προσομοιώσεις έγιναν για την διάρκεια ενός έτους, επειδή όμως εξετάζουμε την επίδραση υλικών αλλαγής φάσης με διαφορετικά σημεία τήξης στο κτίριο πολλές προσομοιώσεις έγιναν για μικρότερες περιόδους για εξοικονόμηση χρόνου. Για παράδειγμα αν ένα PCM έχει σημείο τήξης 18°C, παρουσιάζει ενδιαφέρον κυρίως η χειμερινή περίοδος, καθώς τότε επηρεάζεται το PCM.

- *Name:* Run Period 1. Σ' αυτό το πεδίο ονομάζεται η περίοδος προσομοίωσης όπως αυτή θα εμφανίζεται στα αποτελέσματα.
- *Begin Month:* 1. Εδώ ορίζεται ο μήνας που ξεκινάει η προσομοίωση.
- *Begin Day of Month:* 1. Ορίζεται η μέρα που ξεκινάει η προσομοίωση.
- *End Month:* 12. Δηλώνεται ο μήνας πέρατος της προσομοίωσης.
- *End Day of Month:* 31. Δηλώνεται η ημέρα πέρατος της προσομοίωσης.

Τα στοιχεία που εισαγάγαμε αφορούν περίοδο προσομοίωσης διάρκειας ενός έτους. Τα υπόλοιπα πεδία συμπληρώνονται όπως φαίνεται παρακάτω:



- *Day of week for Start Day:* UseWeatherFile. Επιλέγεται η μέρα έναρξης της προσομοίωσης (Δευτέρα, Τρίτη, κτλ.) να εισαχθεί βάσει του αρχείου δεδομένων καιρού.
- *Use Weather File Holidays and Special Days:* No. Το αρχείο δεδομένων καιρού μπορεί να περιέχει ημερομηνίες με ημέρες διακοπών ή άλλες ειδικές μέρες όπως αργίες και εθνικές εορτές. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση επιλέχθηκε να μη γίνει διάκριση απλών και ειδικών ημερών.
- *Use Weather File Daylight Saving Period:* No. Ορισμένα αρχεία καιρού μπορεί να περιέχουν δείκτες ημερών περιόδου θερινής ώρας. Επιλέγεται να μην χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη πληροφορία.
- *Use Weather File Rain Indicator:* Yes. Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ο ανιχνευτής βροχής του αρχείου καιρού, καθώς τα αποτελέσματα θα είναι πιο ακριβή και ρεαλιστικά
- *Use Weather File Snow Indicator:* Yes. Όπως και πριν επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ο ανιχνευτής χιονιού του αρχείου καιρού, για να ανταποκρίνονται τα αποτελέσματα στην πραγματικότητα.
- *Number of Times Run Period to be repeated:* 1. Αυτό το αριθμητικό πεδίο αντιπροσωπεύει τον αριθμό των φορών (συνήθως ετών) που πρέπει να γίνει η προσομοίωση, σε μια προσομοίωση πολλαπλών επιπέδων. Επιλέχθηκε η προτεινόμενη από το πρόγραμμα τιμή.



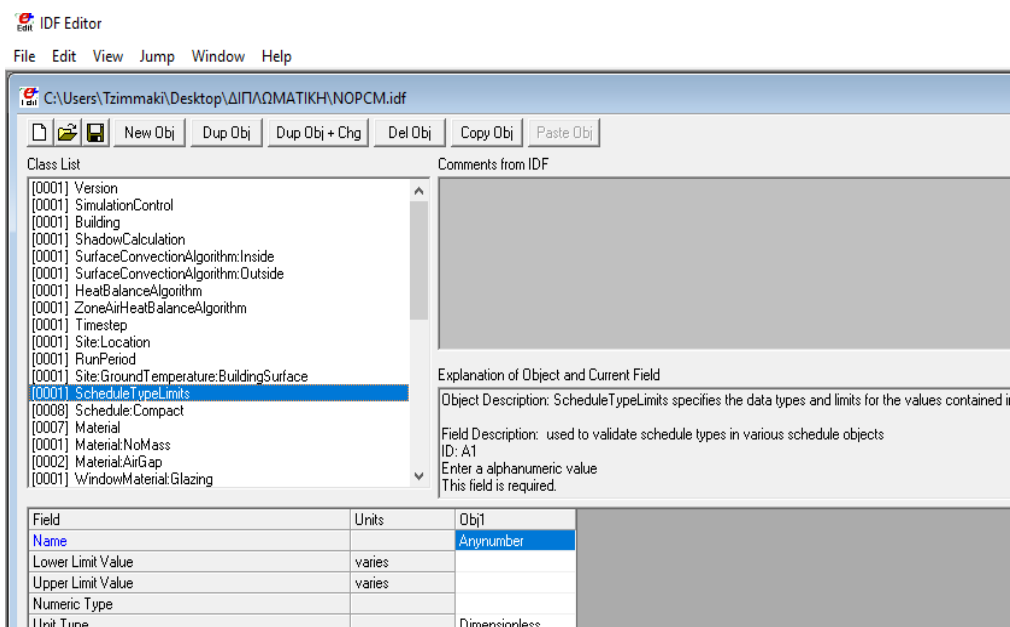
**Σχήμα 8.5.13 Περίοδος προσομοίωσης/ Run Period**

## 8.5.4 Κατηγορία Schedules

Αυτή η κατηγορία επιτρέπει στο χρήστη να ρυθμίζει τον προγραμματισμό (ο οποίος γίνεται με τη βοήθεια χρονοδιαγραμμάτων) πολλών παραμέτρων, όπως η πυκνότητα ανθρώπινης ύπαρξης, η ανθρώπινη δραστηριότητα, ο φωτισμός και η λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών. Χρησιμοποιήθηκαν οι υποκατηγορίες **Schedule TypeLimits** και **Schedule:Compact**.

Στην υποκατηγορία **Schedule TypeLimits** καθορίζεται το είδος των δεδομένων που θα χρησιμοποιήσουμε στα χρονοδιαγράμματα, τα όρια των τιμών που μπορεί να λάβουν και τις μονάδες μέτρησης τους εάν έχουν. Συμπληρώνουμε λοιπόν τα επιθυμητά πεδία όπως φαίνεται παρακάτω.

- **Name:** Anynumber. Ονομάζουμε τον τύπο των δεδομένων ώστε να το επικαλεστούμε μετέπειτα στο χρονοδιάγραμμα.
- **Unit Type:** Dimensionless. Αυτό το πεδίο χρησιμοποιείται για να υποδείξει το είδος των μονάδων των δεδομένων που θα χρησιμοποιήσουμε στο χρονοδιάγραμμα. Ανάλογα με τα δεδομένα που διαθέτουμε θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τις επιλογές: Dimensionless, Temperature, DeltaTemperature, PrecipitationRate, Angle, Convection Coefficient, Velocity, Capacity, Power, Availability, Percent, Control, Mode. Επιλέχθηκε το Dimensionless αφού κάποια από τα δεδομένα είναι αδιάστατα ενώ σε άλλα θα δοθούν μονάδες σε μετέπειτα κατηγορίες.



Σχήμα 8.5.14 Τύποι χρονοδιαγραμμάτων/ Schedule Type Limit

Τονίζεται ότι δεν επιλέχθηκε συγκεκριμένος αριθμητικός τύπος δεδομένων (Numeric Type) όπως διακριτός (Discrete) ή συνεχής (Continuous), ούτε όρια τιμών (Upper Limit, Lower Limit), αφού δε κρίθηκαν αναγκαία.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
00001 ScheduleTypeLimits									
00008 ScheduleTypeCompact									
00007 Material									
00001 Material.NoMass									
00002 Material.AirGap									
00001 WindowMaterial.Glazing									
Object Description: Irregular object. Does not follow the usual definition for fields. Fields A3... are: Through: Date For: Applicable days (ref: Schedule.Week.Compact) Interpolate: Yes/No (ref: Schedule.Day.Interval) -- optional, if not used will be "No" Until: <Time> (ref: Schedule.Day.Interval) <numeric value>									
Name	Schedule Type Limits Name	Activity Level Year	Clothing Insulation Y	Work Efficiency Year	Air Velocity Year Sched	Occupancy Year Sched	Lights Year Schedule	Equipment Year Schedule	Ventilation Year Sched
Field 1	varies	Through:12/31	Through: 4/30	Through:12/31	Through: 12/31	Through:12/31	Through: 4/30	Through:12/31	Through:4/30
Field 2	varies	For:Weekdays	For: Alldays	For:Alldays	For:Alldays	For:Weekdays	For:Alldays	For:Weekdays	For:Alldays
Field 3	varies	Until: 07:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until:08:00	Until: 07:00	Until:07:00	Until:07:00
Field 4	varies	72	0.61	0.3	0.12	1	0.2	0.1	0
Field 5	varies	Until: 08:00	Through: 9/30			Until:17:00	Until: 17:00	Until: 08:00	Until:07:10
Field 6	varies	125	For:Alldays			0	0.1	0.3	1
Field 7	varies	Until: 17:00	Until:24:00			Until:24:00	Until: 24:00	Until:17:00	Until:18:00
Field 8	varies	70	0.36			1	0.9	0.1	0
Field 9	varies	Until: 20:00	Through:12/31			For:AllOtherDays	Through:9/30	Until:24:00	Until:18:20
Field 10	varies	125	For:Alldays			Until:24:00	For:Alldays	0.5	1
Field 11	varies	Until: 24:00	Until:24:00			Until: 07:00	For:AllOtherDays	Until:24:00	Until:24:00
Field 12	varies	99	0.61			0.1	Until:09:00	0	
Field 13	varies	For:AllOtherDays					Until: 19:00	0.3	Through:5/30
Field 14	varies	Until: 09:00					0	Until:14:00	For:Alldays
Field 15	varies	72					Until: 21:00	0.5	Until: 07:00
Field 16	varies	Until: 12:00					0.3	Until:18:00	0
Field 17	varies	99					Until: 24:00	0.2	Until: 09:00
Field 18	varies	Until: 15:00					0.5	Until:24:00	1
Field 19	varies	125					Through:12/31	0.3	Until: 16:00
Field 20	varies	Until: 17:00					For:Alldays		1
Field 21	varies	99					Until: 07:00		Until: 17:00
Field 22	varies	Until: 20:00					0.1		1
Field 23	varies	125					Until: 08:00		Until: 20:00
Field 24	varies	Until: 24:00					0.3		1
Field 25	varies	72					Until: 17:00		Until: 24:00
Field 26	varies						0.1		0
Field 27	varies						Until: 24:00		Through: /9/30
Field 28	varies						0.8		For:Alldays
Field 29	varies								Until: 09:00
Field 30	varies								1
Field 31	varies								Until:18:00
Field 32	varies								0
Field 33	varies								Until:22:00
Field 34	varies								1
Field 35	varies								Until:24:00
Field 36	varies								0
Field 37	varies								Through:12/31
Field 38	varies								For:Alldays
Field 39	varies								Until:07:00
Field 40	varies								0
Field 41	varies								Until:18:00
Field 42	varies								0
Field 43	varies								Until:21:00
Field 44	varies								1
Field 45	varies								Until:24:00
Field 46	varies								0
Field 47	varies								

Σχήμα 8.5.15 Χρονοδιαγράμματα / Schedules

Στην υποκατηγορία **Schedule:Compact** φτιάχνουμε τα χρονοδιαγράμματα που χρειαζόμαστε. Για να είναι πλήρες ένα χρονοδιάγραμμα πρέπει να το ονομάσουμε, να καθορίσουμε τον τύπο του και να ορίσουμε τις τιμές του για τη διάρκεια μίας μέρας και ενός χρόνου.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα διαγράμματα που δημιουργήσαμε για να είναι δυνατή η ρεαλιστική προσομοίωση του κτιρίου. Για την καλύτερη κατανόηση τους αναλύονται στη συνέχεια τα αντικείμενα και τα πεδία όπως συμπληρώθηκαν.

- *Name*: Αποτελεί το όνομα του χρονοδιαγράμματος. Συνήθως περιγράφει τη λειτουργία διαφόρων στοιχείων που θέλουμε να προγραμματίσουμε όπως την ανθρώπινη παρουσία στο κτίριο (Occupancy Year Schedule) ή το φωτισμό του κτιρίου (Light Year Schedule).
- *Schedule Type Limits Type*: Σ 'αυτό το πεδίο επικαλούμαστε το είδος των δεδομένων όπως το καθορίσαμε στην προηγούμενη κλάση (Schedule Type Limits).

Αφού συμπληρώσουμε αυτά τα πεδία ξεκινάμε το χρονικό προγραμματισμό ακολουθώντας τον οδηγό του Energy Plus:

- Ξεκινάμε τον προγραμματισμό με την εντολή *Through* και δηλώνουμε τη λήξη μίας περιόδου, για την οποία θέλουμε να ισχύει μία ορισμένη τιμή για το συγκεκριμένο πρόγραμμα, με τη μορφή ( μήνας / ημερομηνία ).
- Έπειτα χρησιμοποιείται η εντολή *For* και καθορίζεται σε ποιες μέρες θα ισχύει η παραπάνω τιμή (Alldays, Weekends, Weekdays).
- Η επόμενη εντολή που είναι αναγκαία είναι η *Until* και αναγράφεται η ώρα μέχρι την οποία θα ισχύει η επιθυμητή τιμή σε μορφή εικοσιτετράωρου.
- Τελευταία εντολή είναι η *Value*. Ουσιαστικά συμπληρώνουμε την τιμή του χρονοδιαγράμματος για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται τα χρονικά προγράμματα που δημιουργήθηκαν για τη παρούσα προσομοίωση.

Το πρόγραμμα **Occupancy Year Schedule**, δηλώνει τον αριθμό των ατόμων που βρίσκονται μέσα στο κτίριο. Επιλέγουμε τις καθημερινές (Weekdays) να βρίσκεται ένα άτομο μέσα στο κτίριο και βάζουμε στο πεδίο την τιμή 1, εκτός από ορισμένες ώρες 09:00-17:00 όπου θεωρούμε το κτίριο άδειο και βάζουμε την τιμή 0. Για τις υπόλοιπες μέρες (Σαββατοκύριακο) το σπίτι θεωρείται κατοικημένο όλη μέρα και βάζουμε την τιμή 1 για όλο το 24ωρο.

Το πρόγραμμα **Activity Year Schedule** καθορίζει το θερμικό κέρδος (λόγω αγωγής, ακτινοβολίας και το λανθάνον φορτίο) ανά άτομο στη ζώνη υπό συνθήκες σχεδιασμού. Οι τιμές του προγράμματος μπορεί να είναι οποιοσδήποτε θετικός αριθμός και οι μονάδες για αυτήν την παράμετρο είναι Watts ανά άτομο. Λαμβάνοντας υπόψιν τον παρακάτω πίνακα με θερμικά κέρδη από τα έγγραφα του Energy Plus, επιλέχθηκαν οι τιμές των πεδίων, ως εξής:

- 72 W/άτομο όταν κοιμούνται, δηλαδή 24:00-07:00
- 99 W/άτομο όταν τα άτομα έχουν ήπια δραστηριότητα, 07:00-08:00 και 21:00-24:00
- 126 W/άτομο όταν τα άτομα έχουν πιο έντονη δραστηριότητα, τις ώρες που απομένουν.

Activity	Activity Level w/ Person EnergyPlus Schedule Value	Activity W/m <sup>2</sup>	Level met*
<i>Resting</i>			
Sleeping	72	40	0.7
Reclining	81	45	0.8
<i>Seated, quiet</i>			
Seated, quiet	108	60	1
Standing, relaxed	126	70	1.2
<i>Walking (on level surface)</i>			
3.2 km/h (0.9 m/s)	207	115	2
4.3 km/h (1.2 m/s)	270	150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s)	396	220	3.8
<i>Office Activities</i>			
Reading, seated	99	55	1
Writing	108	60	1
Typing	117	65	1.1
Filing, seated	126	70	1.2
Filing, standing	144	80	1.4
Walking about	180	100	1.7
Lifting/packing	216	120	2.1
<i>Miscellaneous Occupational Activities</i>			
Cooking	171 to 207	95 to 115	1.6 to 2.0
Housecleaning	207 to 360	115 to 200	2.0 to 3.4
Seated, heavy limb movement	234	130	2.2
Machine work	189	105	1.8
sawing (table saw)	207 to 252	115 to 140	2.0 to 2.4
light (electrical industry)	423	235	4
Handling 50 kg bags	423	235	4
Pick and shovel work	423 to 504	235 to 280	4.0 to 4.8
<i>Miscellaneous Leisure Activities</i>			
Dancing, social	252 to 459	140 to 255	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	315 to 423	175 to 235	3.0 to 4.0
Tennis, singles	378 to 486	210 to 270	3.6 to 4.0
Basketball, competitive	522 to 792	290 to 440	5.0 to 7.6
Wrestling, competitive	738 to 909	410 to 505	7.0 to 8.7

\*Note that one met = 58.1 W/m<sup>2</sup>

**Σχήμα 8.5.16 Μεταβολικοί ρυθμοί διαφόρων δραστηριοτήτων [70]**

Το πρόγραμμα **Clothing Insulation Year Schedule** αφορά την ποσότητα και το είδος του ρουχισμού που φορά το άτομο. Αυτή η παράμετρος πρέπει να είναι θετικός πραγματικός αριθμός και έχει μονάδες Clo. Συμβουλευμένοι το εγχειρίδιο της ASHRAE και συγκεκριμένα τον πίνακα που φαίνεται παρακάτω επιλέγονται:

- Τη χειμερινή περίοδο, μακρύ παντελόνι με μακρυμάνικη μπλούζα άρα 0.61 clo.
- Την καλοκαιρινή περίοδο, σορτσάκι και κοντομάνικη μπλούζα άρα 0.36 clo.

Clothing Description	Garments Included <sup>b</sup>	$I_{cl}$ (clo)
<b>Trousers</b>	1) Trousers, short-sleeve shirt	0.57
	2) Trousers, long-sleeve shirt	0.61
	3) #2 plus suit jacket	0.96
	4) #2 plus suit jacket, vest, T-shirt	1.14
	5) #2 plus long-sleeve sweater, T-shirt	1.01
	6) #5 plus suit jacket, long underwear bottoms	1.30
<b>Skirts/Dresses</b>	7) Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	0.54
	8) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	0.67
	9) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	1.10
	10) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, suit jacket	1.04
	11) Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	1.10
<b>Shorts</b>	12) Walking shorts, short-sleeve shirt	0.36
<b>Overalls/Coveralls</b>	13) Long-sleeve coveralls, T-shirt	0.72
	14) Overalls, long-sleeve shirt, T-shirt	0.89
	15) Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	1.37
<b>Athletic</b>	16) Sweat pants, long-sleeve sweatshirt	0.74
<b>Sleepwear</b>	17) Long-sleeve pajama tops, long pajama trousers, short 3/4 length robe (slippers, no socks)	0.96

a Data are from Chapter 8 in the 2001 ASHRAE Handbook—Fundamentals

b All clothing ensembles, except where otherwise indicated in parentheses, include shoes, socks, and briefs or panties. All skirt/dress clothing ensembles include pantyhose and no additional socks.

**Σχήμα 8.5.17** Τυπικές τιμές μόνωσης διάφορων ειδών ρουχισμού ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 [71]

Το πρόγραμμα **Work Efficiency Year Schedule** αφορά την απόδοση διαχείρισης ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα για υπολογισμούς θερμικής άνεσης. Η τιμή του κυμαίνεται ανάμεσα στο 0 και το 1, όπου 0 σημαίνει ότι όλη η ενέργεια που παράγεται στο σώμα μετατρέπεται σε θερμότητα, ενώ το 1 αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου όλη η ενέργεια του σώματος μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Επιλέγουμε την τιμή 0.3, καθώς τα άτομα στο κτίριο έχουμε θέσει να έχουν μέτρια δραστηριότητα.

Το πρόγραμμα **Air Velocity Year Schedule** προσεγγίζει το μέγεθος της κίνησης του αέρα στο χώρο ως συνάρτηση του χρόνου καθ' όλη την περίοδο προσομοίωσης. Το χρονοδιάγραμμα απαιτεί οι αριθμοί στο πρόγραμμα να είναι θετικοί πραγματικοί αριθμοί που έχουν μονάδες m/s. Η τιμή ορίστηκε 0.12.

Το πρόγραμμα **Lights Year Schedule** αφορά το ποσοστό του φορτίου λόγω τεχνητού φωτισμού που έχει το κτίριο. Τα πεδία δέχονται θετικούς αριθμούς μεταξύ 0 και 1. Επιλέγονται λοιπόν οι εξής τιμές:

- Τη χειμερινή περίοδο (1/10-30/4) ,τις πρωινές-μεσημεριανές ώρες 07:00-17:00 τοποθετείται τιμή 0.3, τις απογευματινές-βραδινές ώρες 17:00-24:00 τοποθετείται 0.8, ενώ τις ώρες που υποθετικά κοιμούνται τα άτομα βάζουμε τιμή 0.2.
- Την καλοκαιρινή περίοδο (1/5-30/9) ,τις πρωινές-μεσημεριανές ώρες 07:00-20:00 τοποθετείται τιμή 0.1, τις απογευματινές-βραδινές ώρες 20:00-24:00 τοποθετείται 0.8, ενώ τις ώρες που υποθετικά κοιμούνται τα άτομα βάζουμε τιμή 0.2.

Το πρόγραμμα **Equipment Year Schedule** αφορά το ποσοστό του φορτίου λόγω ηλεκτρικού εξοπλισμού που έχει το κτίριο (υπολογιστές, τηλεοράσεις, συσκευές μαγειρικής κ.ά.).Επιλέγονται οι τιμές 0.3 για 07:00-09:00, 0.1 για 24:00-07:00 και 09:00-17:00, 0.5 για 17:00-24:00.

Το πρόγραμμα **Ventilation Year Schedule**, ελέγχει το άνοιγμα και το κλείσιμο των παραθύρων-πορτών για φυσικό αερισμό του σπιτιού. Τα πεδία σε αυτό το χρονοδιάγραμμα παίρνουν τιμή 0 ή 1 , ανάλογα αν είναι κλειστά ή ανοιχτά τα ανοίγματα, αντίστοιχα. Το χρονοδιάγραμμα διαμορφώθηκε ως εξής:

- Από 31/12 έως 30/4 βάζουμε την τιμή 1 για τις ώρες 07:00-07:10 και 18:00-18:20, τις υπόλοιπες ώρες τα ανοίγματα παραμένουν κλειστά.
- Από 1/5 έως 30/9 βάζουμε την τιμή 1 για τις ώρες 24:00-09:00 και 18:00-21:00.
- Από 1/10 έως 31/12 βάζουμε την τιμή 1 για τις ώρες 18:00-19:00.

### 8.5.5 Κατηγορία Surface Construction Elements

Αυτή η ομάδα αντικειμένων περιγράφει τις φυσικές ιδιότητες και τη διαμόρφωση του περιβλήματος του κτιρίου και των εσωτερικών στοιχείων. Αυτά είναι οι τοίχοι, οι στέγες, τα δάπεδα, τα παράθυρα και οι πόρτες για το κτίριο.

Στην υποκατηγορία **Materials** δηλώνουμε τα δομικά υλικά που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε. Είναι απαραίτητο να δηλώσουμε τις θερμικές ιδιότητες τους για να ληφθεί υπόψη κατά τη προσομοίωση η θερμική τους μάζα και να υπολογιστεί η μεταφερόμενη θερμότητα δι' αγωγής. Έτσι συμπληρώθηκαν τα εξής πεδία:

- *Thickness* : Το πάχος του υλικού, d (m)
- *Density*: Η πυκνότητα του, ρ ( kg/m<sup>3</sup>)
- *Conductivity* : Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του, λ ( W/mK )
- *Specific Heat*: Η ειδική θερμοχωρητικότητα του, Cp (J/kgK )
- *Roughness*: Η τραχύτητα του

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις προσομοιώσεις του κτιρίου, το πάχος τους και οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [72]:

Materials	Roughness	Thickness (m)	Conductivity (W/mK)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kgK)
Wood-Oak (Ξύλο-Βελανιδιά)	MediumSmooth	0.15	0.210	800	1600
Ασβεστογυψοκονίαμα (Plaster)	MediumSmooth	0.02	0.7	1400	1000
Διογκωμένη πολυστερίνη (Expanded Polysterene)	MediumRough	0.015	0.035	25	1500
Σκυρόδεμα (Concrete)	Rough	0.2	1.35	2000	1000
Οπλισμένο σκυρόδεμα (Armed concrete)	VeryRough	0.2	2.5	2400	1000
Κεραμικά πλακίδια (Ceramic Tiles)	Rough	0.005	1.8	2000	840
Γυψοκονίαμα (Gypsum mortar)	MediumSmooth	0.02	0.8	1600	900
Μάρμαρο (Marble)	MediumSmooth	0.02	3.5	2800	1000



Αρχικά η προσομοίωση έγινε με το κέλυφος του κτιρίου να περιέχει μόνο τα παραπάνω δομικά στοιχεία. Ύστερα στις επόμενες προσομοιώσεις προσθέσαμε στην κατηγορία αυτή και τα χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης, ώστε να γίνουν οι επιθυμητές συγκρίσεις αποτελεσμάτων για τη θερμική άνεση του κτιρίου.

Για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκαν υλικά αλλαγής φάσεις με διαφορετικά σημεία τήξης, ίδιας όμως σύνθεσης, οπότε οι ιδιότητες τους δε διαφέρουν σε αυτή την κατηγορία.

Τα υλικά αλλαγής φάσης που επιλέχθηκαν έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα, ανήκουν στην κατηγορία των οργανικών PCM και ονομάζονται BioPCM. Η σύνθεσή τους είναι πρωτοποριακή καθώς φτιάχνονται από φυτικά προϊόντα και είναι βιοδιασπώμενα. Αναμένεται να είναι μέχρι και 40% αποδοτικότερα από τα συμβατικά οικοδομικά υλικά ενώ υπολογίζεται ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι 6 φορές χαμηλότερες, αν αντί για τσιμέντο χρησιμοποιηθεί BioPCM, για την ισοδύναμη παραγόμενη θερμική μάζα. Ακόμη πολλά οργανικά PCM προέρχονται από υλικά με βάση την παραφίνη, η οποία τα καθιστά εξαιρετικά εύφλεκτα και επομένως εμποδίζει τη χρήση τους σε κτίρια. Με αυτή τη νέα σύνθεση οργανικού PCM διευκολύνεται η χρήση τους στα κτίρια δεδομένου ότι είναι λιγότερο εύφλεκτο από τα παραδοσιακά PCM. Τέλος το BioPCM μπορεί να κατασκευαστεί με σημείο τήξης να κυμαίνεται μεταξύ -22,7 ° C και 78,33 ° C και έχει προσδοκώμενο κύκλο ζωής περίπου 87 χρόνια, όπως υπολογίστηκε από εργαστηριακές εφαρμογές.

Το BioPCM ενθυλακώνεται σε διακριτά τεμάχια τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με κενά αέρα. Τα τεμάχια αυτά διατάσσονται και συσκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν ένα στρώμα BioPCM, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 8.5.18*. Τα στρώματα PCM μπορούν έτσι να τοποθετηθούν εύκολα στο κέλυφος του κτιρίου (τοίχους, οροφές, πατώματα) όπως οποιαδήποτε άλλη στρώση δομικού υλικού.[73]



Σχήμα 8.5.18 Στρώμα BioPCM [73]

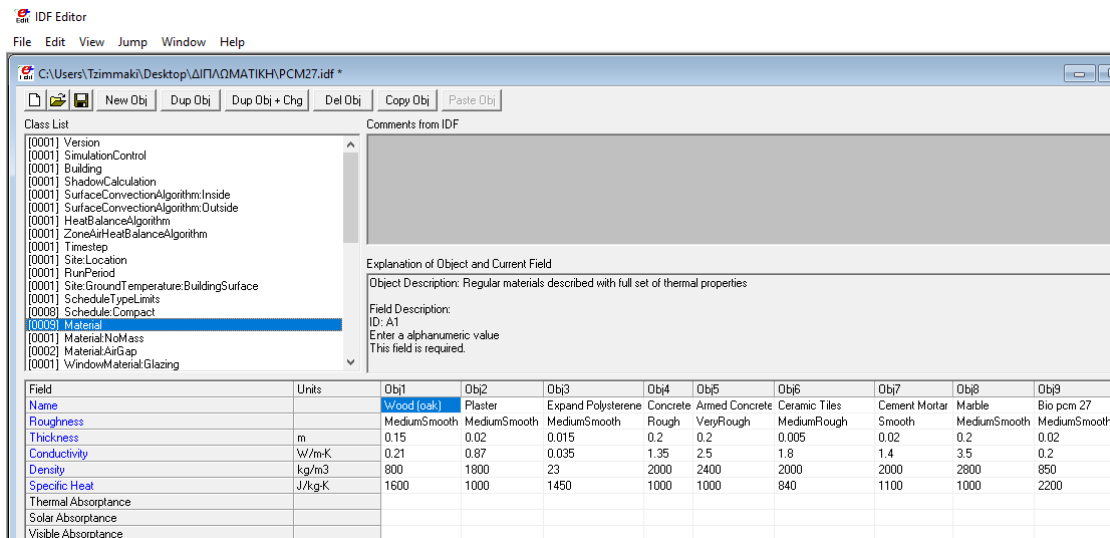


Σχήμα 8.5.19 Εφαρμογή BioPCM σε τοίχο (αριστερά) και οροφή (δεξιά) [73]

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των BioPCM, είναι οι εξής [73]:

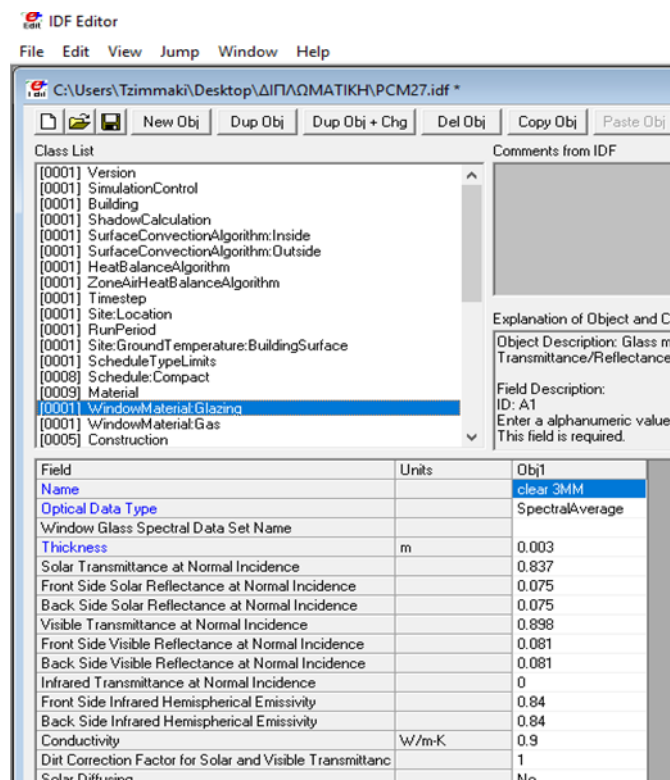
Material	Roughness	Thickness (m)	Conductivity (W/mK)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kgK)
BioPCM	MediumSmooth	0.02	0.2	1970	1100

Εισάγοντας και αυτά τα δεδομένα στην υποκατηγορία Materials, ολοκληρώνεται ο ορισμός των δομικών στοιχείων του κτιρίου.



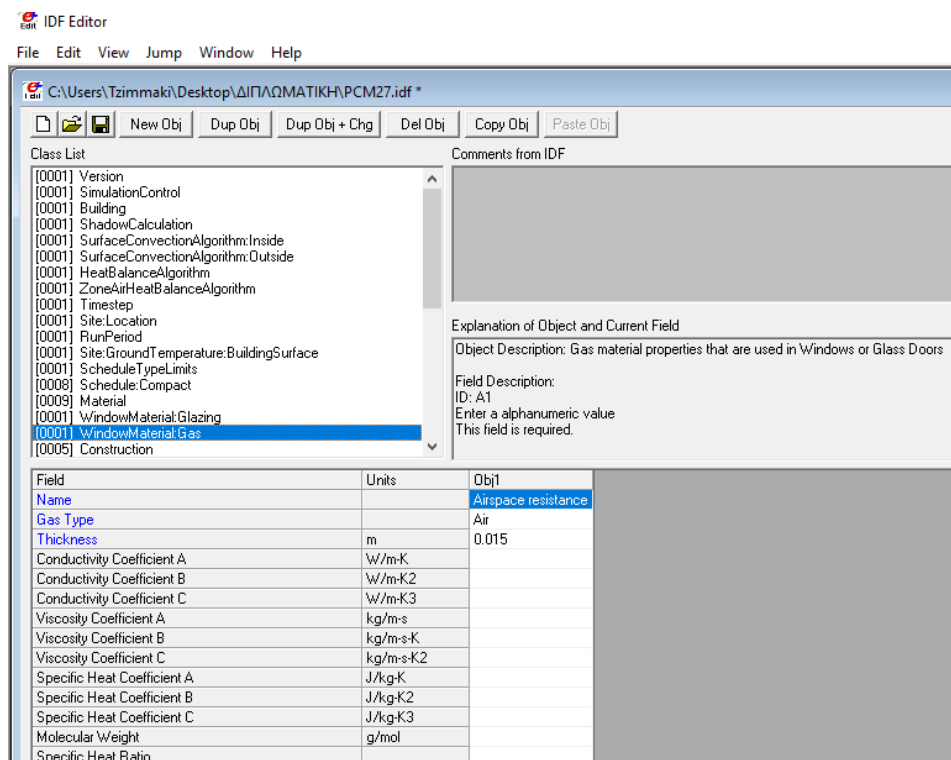
Σχήμα 8.5.20 Δομικά Υλικά/ Materials

Στην υποκατηγορία **WindowMaterial:Glazing** προστίθενται τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα παράθυρα. Επιλέχθηκε καθαρό γυαλί πάχους 3 mm, από τα διαφανή δομικά υλικά που περιέχονται στη βιβλιοθήκη του EnergyPlus (File> OpenDataSet> WindowGlassMaterials). Τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στα πεδία είναι προκαθορισμένα από το πρόγραμμα και δεν τροποποιήθηκαν.



Σχήμα 8.5.21 Διαφανή δομικά υλικά

Στην υποκατηγορία **WindowMaterial:Gas** καθορίζονται οι ιδιότητες του αερίου μεταξύ των υαλοπινάκων ενός παραθύρου πολλαπλών τζαμιών. Επιλέχθηκε για αέριο αέρας από έτοιμα αντικείμενα στη βιβλιοθήκη του προγράμματος ( File>OpenDataSet>WindowGasMaterials). Τα πεδία είναι και πάλι συμπληρωμένα αυτόματα.



Σχήμα 8.5.22 Είδος αερίου στο διάκενο υαλοστασίου

Η υποκατηγορία **MaterialProperty:PhaseChange** είναι ίσως η βασικότερη για την προσομοίωση κτιρίου με υλικά αλλαγής φάσης. Εδώ εισάγονται οι ιδιότητες των υλικών, η ενθαλπία στην προκειμένη περίπτωση, που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Τα ζεύγη τιμών ενθαλπίας-θερμοκρασίας καθιστούν εφικτή την επίλυση του αλγορίθμου Conduction Finite Difference και κατά συνέπεια την θερμική ανάλυση του κτιρίου, ακόμα και αν αυτό περιέχει υλικά αλλαγής φάσης.

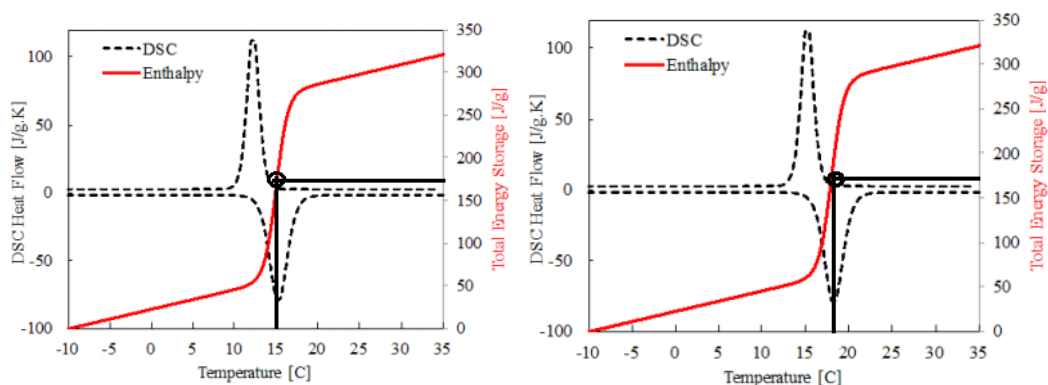
*Name:* Εισάγεται το όνομα του υλικού αλλαγής φάσης που δηλώθηκε στην υποκατηγορία Materials.

*Fields:* Αναγράφονται τα σετ θερμοκρασίας - ενθαλπίας τα οποία προσδιορίζουν μία συνάρτηση θερμοκρασίας-ενθαλπίας για το υλικό. Μπορούν να καθοριστούν δεκαέξι τέτοια ζεύγη. Τα ζεύγη πρέπει να καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή θερμοκρασιών που θα επηρεάσει το υλικό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

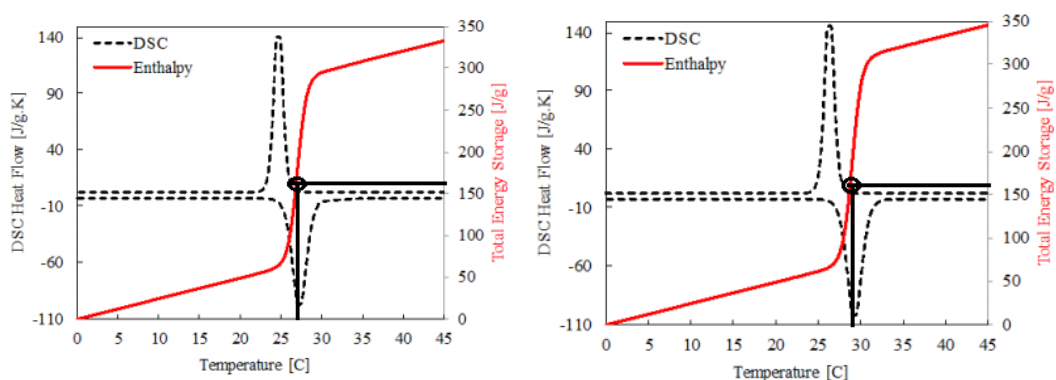
Επειδή χρησιμοποιήσαμε BioPCM με 4 διαφορετικά σημεία τήξης, έπρεπε να εισαχθούν δεδομένα σε 4 διαφορετικά αρχεία από 4 διαφορετικά διαγράμματα ενθαλπών – θερμοκρασιών. Τα διαγράμματα θερμοκρασίας ενθαλπίας λήφθηκαν από την εταιρία που κατασκευάζει τα συγκεκριμένα PCM. Επιλέχθηκαν:

- Για δοκιμές κατά τη χειμερινή περίοδο δύο BioPCM με σημεία τήξης 15°C και 18°C, τα οποία θα αναφέρονται στη συνέχεια BioPCM 15 και BioPCM 18 αντίστοιχα.
- Για δοκιμές κατά την καλοκαιρινή περίοδο δύο BioPCM με σημεία τήξης 27°C και 29°C, τα οποία επίσης θα αναφέρονται BioPCM 27 και BioPCM 29 αντίστοιχα. [74]

Τα διαγράμματα θερμοκρασιών-ενθαλπών φαίνονται στα επόμενα σχήματα:



**Σχήμα 8.5.23 Διαγράμματα Θερμοκρασίας  $T$  (°C) – Ενθαλπίας  $H$  (J/g) των BioPCM 15 (αριστερά) και BioPCM 18 (δεξιά) [74]**

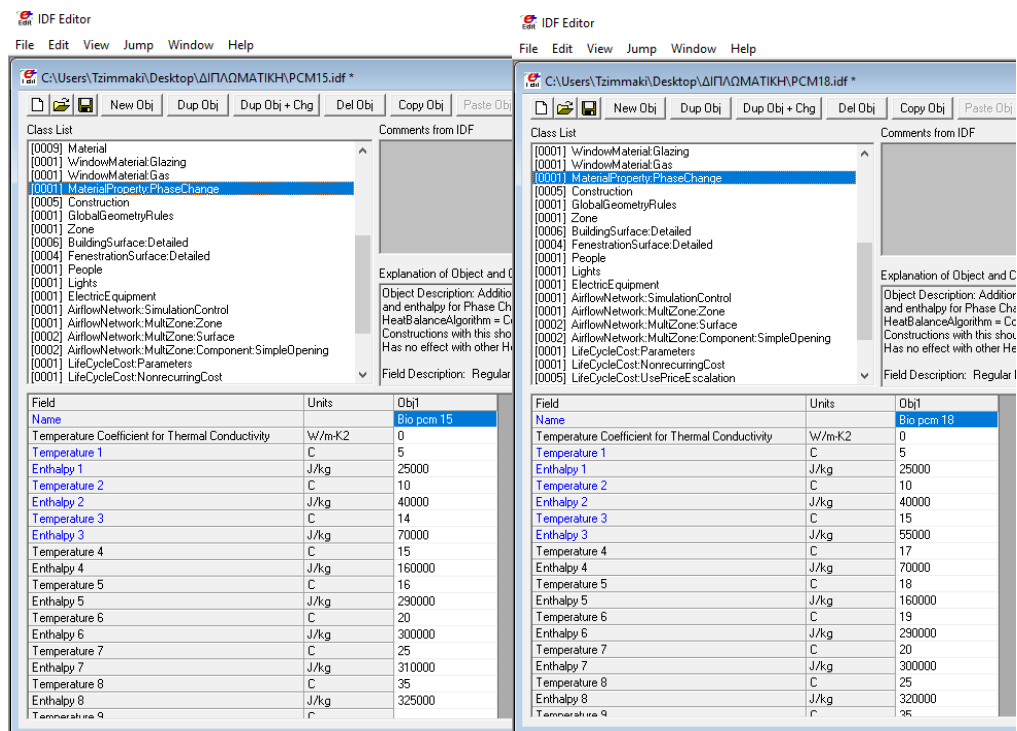


**Σχήμα 8.5.24 Διαγράμματα Θερμοκρασίας  $T$  (°C) – Ενθαλπίας  $H$  (J/g) των BioPCM 27 (αριστερά) και BioPCM 29 (δεξιά) [74]**

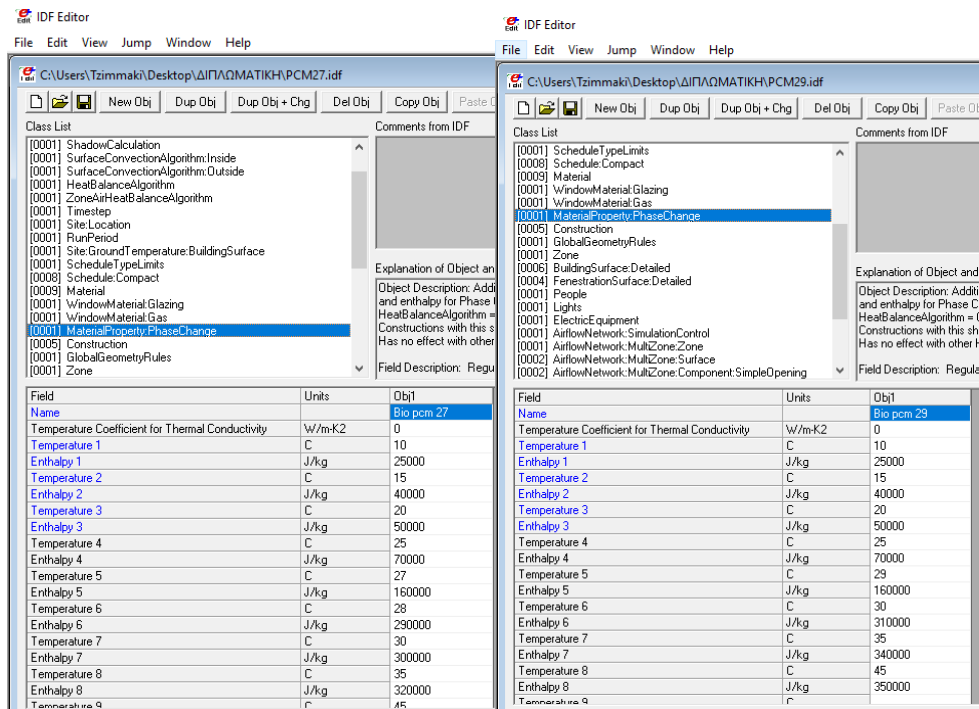
Από τα παραπάνω διαγράμματα λήφθηκαν οι εξής τιμές :

BioPCM 15		BioPCM 18		BioPCM 27		BioPCM 29	
T (°C)	H (j/Kg)	T (°C)	H (j/Kg)	T (°C)	H (j/Kg)	T (°C)	H (j/Kg)
-10	0	-10	0	0	0	0	0
-5	10000	5	25000	10	25000	5	10000
5	25000	10	40000	15	40000	10	25000
10	40000	15	55000	20	50000	15	40000
14	70000	17	70000	25	70000	20	50000
15	160000	18	160000	27	160000	25	70000
16	290000	19	290000	28	290000	28	160000
20	300000	20	300000	30	300000	30	310000
25	310000	25	320000	35	320000	35	340000
35	325000	35	350000	45	350000	45	350000

Οπότε η υποκατηγορία **MaterialProperty:PhaseChange** συμπληρώθηκε όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 8.5.25 Εισαγωγή σημείων Θερμοκρασίας T (°C) – Ενθαλπίας H (J/kg), για τα BioPCM 15 (αριστερά) και BioPCM 18 (δεξιά)



**Σχήμα 8.5.26** Εισαγωγή σημείων Θερμοκρασίας  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) – Ενθαλπίας  $H$  ( $\text{J/kg}$ ), για τα BioPCM 27 (αριστερά) και BioPCM 29 (δεξιά)

Στην υποκατηγορία **Construction** χρησιμοποιώντας τα υλικά που περιγράφονται στα πεδία **Material** και **Window Material Glazing** σχεδιάζεται η δομή που θα έχει η κάθε ξεχωριστή επιφάνεια του κτιρίου (τοίχοι, παράθυρα, οροφή, πόρτες, δάπεδο). Οι στρώσεις συμπληρώνονται κάθε φορά ξεκινώντας από την εξωτερική προς την εσωτερική επιφάνεια, έχοντας πάντα ως σημείο αναφοράς τη θερμική ζώνη την οποία περιβάλλουν. Οι κύριες κατασκευαστικές λεπτομέρειες παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί με τις στρώσεις των υλικών να αναγράφονται από το εξωτερικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, όπως δηλαδή δηλώνονται και στο πρόγραμμα.

	Στρώση 1	Στρώση 2	Στρώση 3	Στρώση 4	Στρώση 5	Στρώση 6
<b>Πόρτα</b>	Ξύλο 150 mm					
<b>Παράθυρο</b>	Καθαρό τζάμι 3 mm	Διάκενο αέρα 3 mm	Καθαρό τζάμι 3 mm			
<b>Τοίχοι (χωρίς PCM)</b>	Ασβεστογυψοκονίαμα 20 mm	Σκυρόδεμα 200 mm	Διογκωμένη πολυστερίνη 15 mm	Γυψοκονίαμα 20 mm		
<b>Τοίχοι (με PCM)</b>	Ασβεστογυψοκονίαμα 20 mm	Σκυρόδεμα 200 mm	Διογκωμένη πολυστερίνη 15 mm	ΒιοPCM 20 mm	Γυψοκονίαμα 20 mm	
<b>Οροφή (χωρίς PCM)</b>	Κεραμικά πλακίδια 5 mm	Ασβεστογυψοκονίαμα 20 mm	Σκυρόδεμα 200 mm	Διογκωμένη πολυστερίνη 15 mm	Γυψοκονίαμα 20 mm	
<b>Οροφή (με PCM)</b>	Κεραμικά πλακίδια 5 mm	Ασβεστογυψοκονίαμα 20 mm	Σκυρόδεμα 200 mm	Διογκωμένη πολυστερίνη 15 mm	ΒιοPCM 20 mm	Γυψοκονίαμα 20 mm
<b>Δάπεδο</b>	Ασβεστογυψοκονίαμα 20 mm	Οπλισμένο Σκυρόδεμα 200 mm	Διογκωμένη πολυστερίνη 15 mm	Μάρμαρο 20 mm		

Οπότε τα πεδία του αρχείου συμπληρώνονται όπως φαίνεται παρακάτω:

The screenshot shows a software interface for defining construction layers. On the left, a list of materials is visible, including 'Construction', 'Construction:CfactorUndergroundWall', 'Construction:FfactorGroundFloor', 'Construction:InternalSource', 'WindowThermalModel.Params', 'Construction:ComplexFenestrationState', 'Construction:WindowEquivalentLayer', and 'Construction:WindowDataFile'. Below this list, 'Thermal Zones and Surfaces' and '[0001] GlobalGeometryRules' are also visible.

On the right, there is a section titled 'Explanation of Object and Current Field' with the following text: 'Object Description: Start with outside layer and work your way to the inside layer. Up to 10 layers total, 8 for windows. Enter the material name for each layer.' Below this, the 'Field Description' is shown as 'ID: A5' and 'Select from list of objects'.

At the bottom, a table displays the field data for each layer:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Door	Floor	Roof	Double Panel Wind	Walls
Outside Layer		Wood (oak)	Plaster	Ceramic Tiles	clear 3MM	Plaster
Layer 2			Armed Concrete	Plaster	Airspace resistance	Concrete
Layer 3			Expand Polysterene	Concrete	clear 3MM	Expand Polysterene
Layer 4			Marble	Expand Polysterene		Bio pcm 27
Layer 5				Gypsum Mortar		Gypsum Mortar
Layer 6						

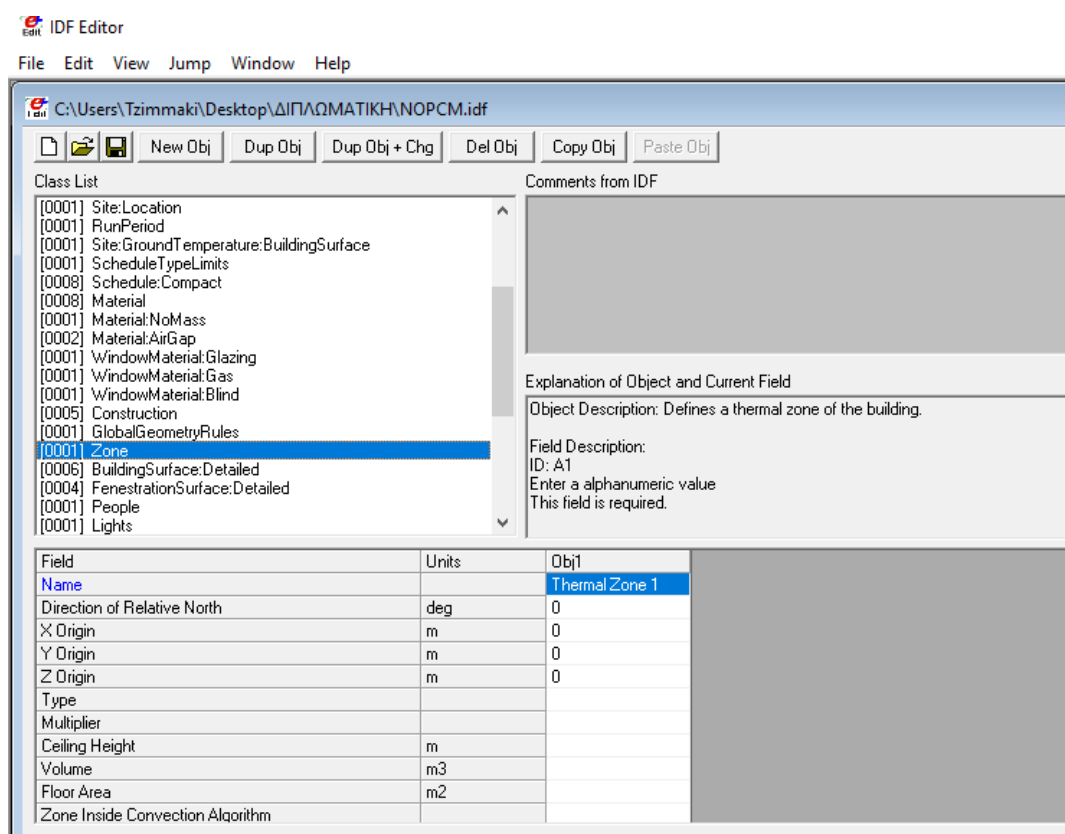
**Σχήμα 8.5.27** Εισαγωγή δεδομένων στην κατηγορία Κατασκευών, στο αρχείο προσομοίωσης του κελύφους του κτιρίου με ΒιοPCM 27



## 8.5.6 Κατηγορία Thermal Zones and Surfaces

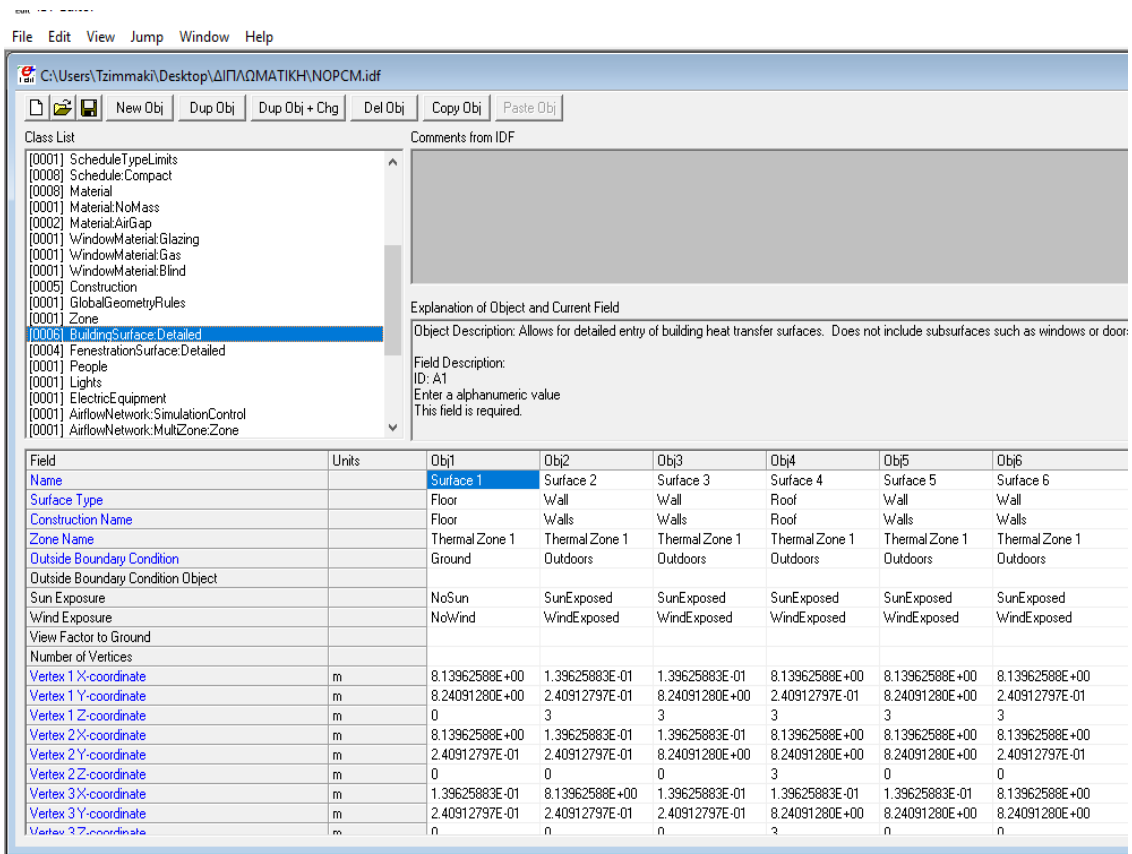
Χωρίς θερμικές ζώνες και επιφάνειες, το κτίριο δεν μπορεί να προσομοιωθεί. Αυτή η ομάδα αντικειμένων (Zone, BuildingSurface) περιγράφει τα χαρακτηριστικά της θερμικής ζώνης καθώς και τις λεπτομέρειες κάθε επιφάνειας που πρόκειται να μοντελοποιηθεί.

Στην υποκατηγορία **Zone** δηλώνονται τα ονόματα των θερμικών ζωνών με κάποια χαρακτηριστικά τους, όπως οι συντεταγμένες του κέντρου της θερμικής ζώνης, όπως εισάγεται από το Sketch-up. Το κτίριό μας έχει μία μόνο θερμική ζώνη η οποία ονομάστηκε *Thermal Zone 1* και τα πεδία συμπληρώθηκαν όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



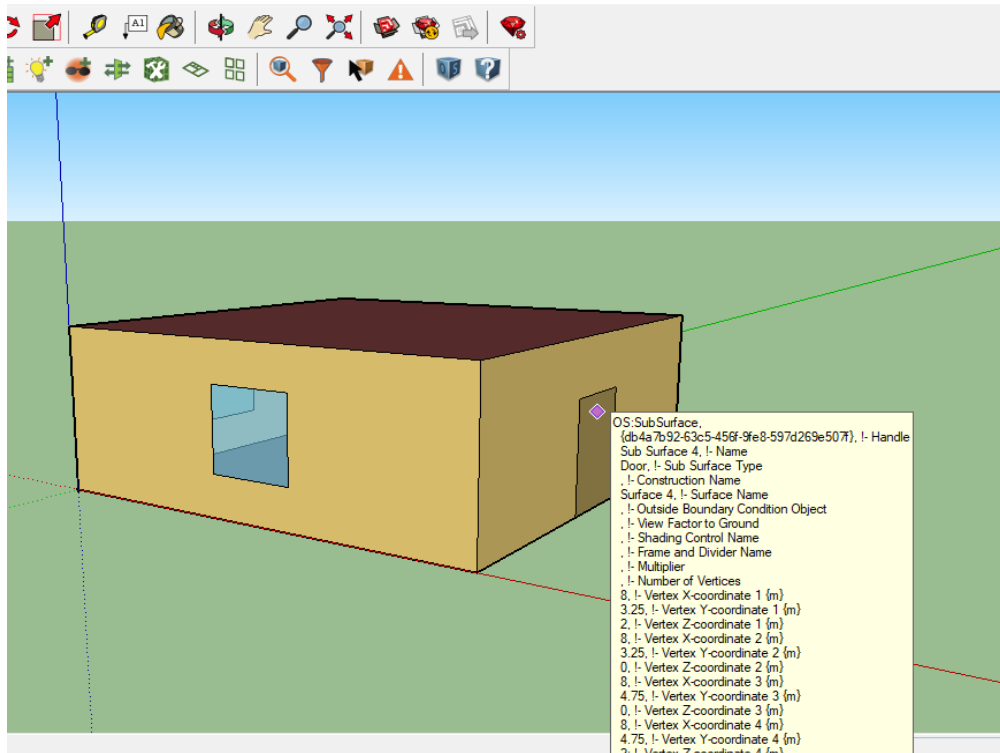
Σχήμα 8.5.28 Συντεταγμένες κέντρου θερμικής ζώνης

Στα πεδία της κατηγορίας **BuildingSurface:Detailed** καταγράφονται τα ονόματα των επιφανειών που έχουν σχεδιαστεί στο SketchUp, δεν περιλαμβάνονται υποεπιφάνειες (πόρτες, παράθυρα). Αναφέρονται ιδιότητες όπως το είδος της επιφάνειας (τοίχος, πάτωμα, ταβάνι), η έκθεση των επιφανειών σε ήλιο-άνεμο, οι συντεταγμένες της κάθε επιφάνειας. Τα πεδία είναι αυτόματα συμπληρωμένα από το Sketch-Up και ελέγχουμε αν αναγράφονται σωστά τα δεδομένα. Για τον έλεγχο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το εργαλείο *InfoTool* του Sketch Up - Openstudio

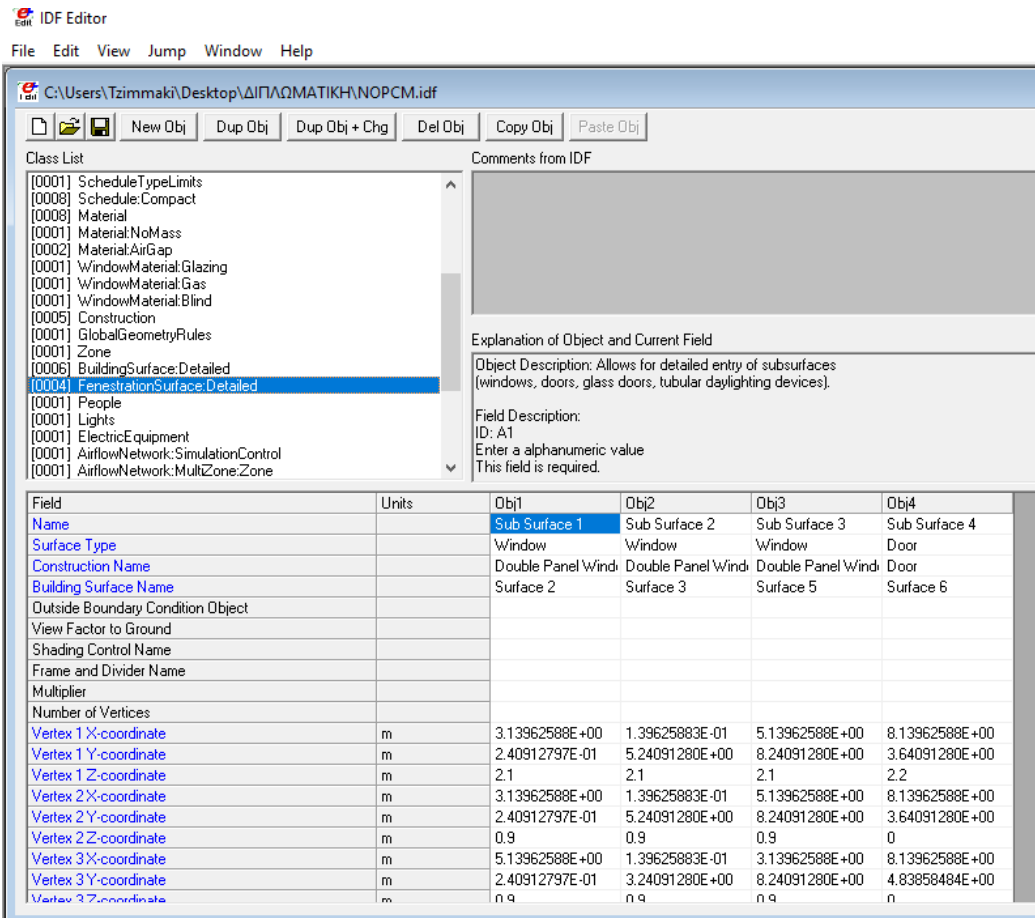


Σχήμα 8.5.29 Χαρακτηριστικά κάθε επιφάνειας

Στο πεδίο **FenestrationSurface:Detailed** δηλώνονται τα χαρακτηριστικά των υπό-επιφανειών (πόρτες, παράθυρα) καθώς και σε ποια επιφάνεια βρίσκονται πάνω. Όπως και πριν τα δεδομένα έχουν εισαχθεί αυτόματα από το Sketch-Up και γίνεται έλεγχος με χρήση του εργαλείου *InfoTool*.



Σχήμα 8.5.30 Χρήση του εργαλείου Info Tool



Σχήμα 8.5.31 Χαρακτηριστικά υπο-επιφανειών

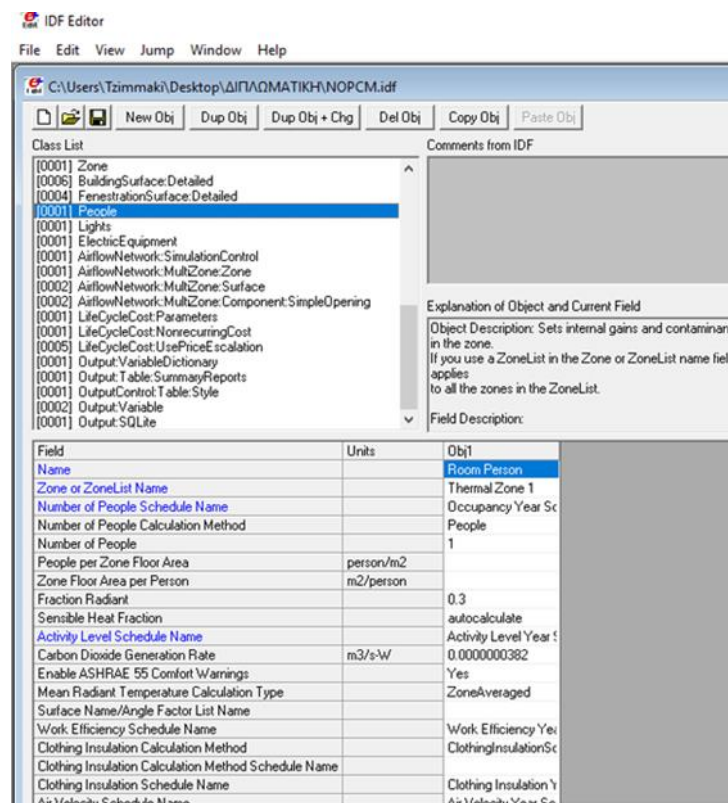
## 8.5.7 Κατηγορία Internal Gains

Οι επιδράσεις στην ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου δεν οφείλονται μόνο στις περιβάλλουσες συνθήκες και στην κατασκευή του κτιρίου. Εδώ λοιπόν εισάγονται τα θερμικά κέρδη που μπορεί να προέρχονται από ανθρώπους, φώτα και οικιακές συσκευές.

Η υποκατηγορία **People** χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την επίδραση του κατοίκου στις συνθήκες του χώρου καθώς και να προσομοιώσει την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα στη θερμική ζώνη. Τα πεδία συμπληρώνονται ως εξής :

- *Name*: Ορίζεται το όνομα κάθε αντικείμενου το οποίο πρέπει να είναι μοναδικό για κάθε αντικείμενο. Ονομάστηκε : Room People.
- *Zone or Zonelist Name*: Επιλέγεται η θερμική ζώνη ή οι θερμικές ζώνες στις οποίες ισχύει η συγκεκριμένη μοντελοποίηση φορτίου ανθρώπων.
- *Number of People Year Schedule*: Αυτό το πεδίο είναι το όνομα του χρονοδιαγράμματος (της κατηγορίας Schedules) που τροποποιεί την παράμετρο του αριθμού των ατόμων που βρίσκονται μέσα στο κτίριο. Επιλέγεται: Occurancy Year Schedule.
- *Fraction Radiant*: Το πεδίο αυτό είναι ένας δεκαδικός αριθμός μεταξύ 0.0 και 1.0 και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τον τύπο θερμότητας που εκπέμπεται από άτομα σε μια ζώνη. Ο αριθμός που καθορίζεται σε αυτό το πεδίο θα πολλαπλασιαστεί με την ολική λογική ενέργεια που εκπέμπεται από τους ανθρώπους για να δώσει την ποσότητα του μεγάλου μήκους κύματος κέρδους ακτινοβολίας από τα ανθρώπινα όντα σε μια ζώνη. Διαλέγουμε : 0.3.
- *Sensible Heat Fraction*: Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτό το πεδίο για να καθορίσει ένα σταθερό λογικό κλάσμα για το κέρδος θερμότητας που οφείλεται σε αυτό το αντικείμενο. Κανονικά το πρόγραμμα υπολογίζει τον αισθητό και λανθάνον φορτίο ξεχωριστά. Αυτό το πεδίο δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγξει αυτό το διαχωρισμό. Επιλέγουμε : autocalculate , ώστε το πρόγραμμα να υπολογίσει αυτόματα αυτόν τον διαχωρισμό.
- *Activity Level Schedule Name* : Το πεδίο αυτό είναι το όνομα του χρονοδιαγράμματος που καθορίζει την ποσότητα κέρδους θερμότητας ανά άτομο στη ζώνη υπό συνθήκες σχεδιασμού. Το χρονοδιάγραμμα έχει δημιουργηθεί και αναλυθεί στην κατηγορία Schedules οπότε δηλώνουμε στο πεδίο : Activity Level Year Schedul
- *Carbon Dioxide Generation Rate* : Αυτό το αριθμητικό πεδίο εισαγωγής καθορίζει το ρυθμό παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα ανά άτομο με μονάδες  $\text{m}^3 / \text{sW}$ . Η προτεινόμενη τιμή από το πρόγραμμα είναι  $0.0000000382 \text{ m}^3 / \text{sW}$  και είναι αυτή η οποία επιλέγεται.

- *ASHRAE 55 Comfort Warnings*: Με αυτό το πεδίο καθορίζεται αν το πρόγραμμα θα παράσχει προειδοποιήσεις όταν οι συνθήκες χώρου βρίσκονται εκτός του εύρους άνεσης ASHRAE 55. Ορίζεται *Yes/Ναι* στο πεδίο καθώς επιθυμούμε να λαμβάνουμε ειδοποιήσεις.
- *Work Efficiency Schedule Name*: Προσδιορίζει το χρονοδιάγραμμα το οποίο καθορίζει την ποσότητα θερμικού κέρδους ανά άτομο στη ζώνη υπό τις συνθήκες σχεδιασμού και έχει δημιουργηθεί στην κατηγορία Schedules. Επιλέγεται: *Work Efficiency Year Schedule*.
- *Clothing Insulation Calculation Method*: Περιγράφει την μέθοδο υπολογισμού της τιμής μόνωσης των ενδυμάτων των ατόμων στην ζώνη. Διαλέγουμε: *ClothingInsulationSchedule*.
- *Clothing Insulation Schedule Name*: Εισάγουμε το όνομα του χρονοδιαγράμματος που καθορίζει την ποσότητα ενδυμάτων που φοριούνται από ένα άτομο κατά τη διάρκεια διαφόρων περιόδων που λαμβάνει χώρα η προσομοίωση. Έχει δημιουργηθεί: *Clothing Insulation Schedule*.
- *Air Velocity Schedule Name*: Καθορίζει το χρονοδιάγραμμα το οποίο προσεγγίζει το μέγεθος της κίνησης του αέρα στο χώρο ως συνάρτηση του χρόνου καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης. Επιλέγεται: *Air Velocity Schedule Name*.
- *Thermal Comfort Model Type*: Καθορίζει ποιο μοντέλο θερμικής άνεσης εφαρμόζεται. Επιλέγεται: *AdaptiveASH55*



Σχήμα 8.5.32 Εισαγωγή δεδομένων στην κατηγορία People

Στην υποκατηγορία **Lights** εισάγονται πληροφορίες για τον υπολογισμό των εσωτερικών θερμικών κερδών που αφορούν τον τεχνητό φωτισμό της θερμικής ζώνης του κτιρίου, όπως η ισχύς και τα χρονοδιαγράμματα λειτουργίας του τεχνητού φωτισμού που δημιουργήθηκαν στην κατηγορία Schedules. Συμπληρώνονται τα πεδία όπως φαίνεται παρακάτω:

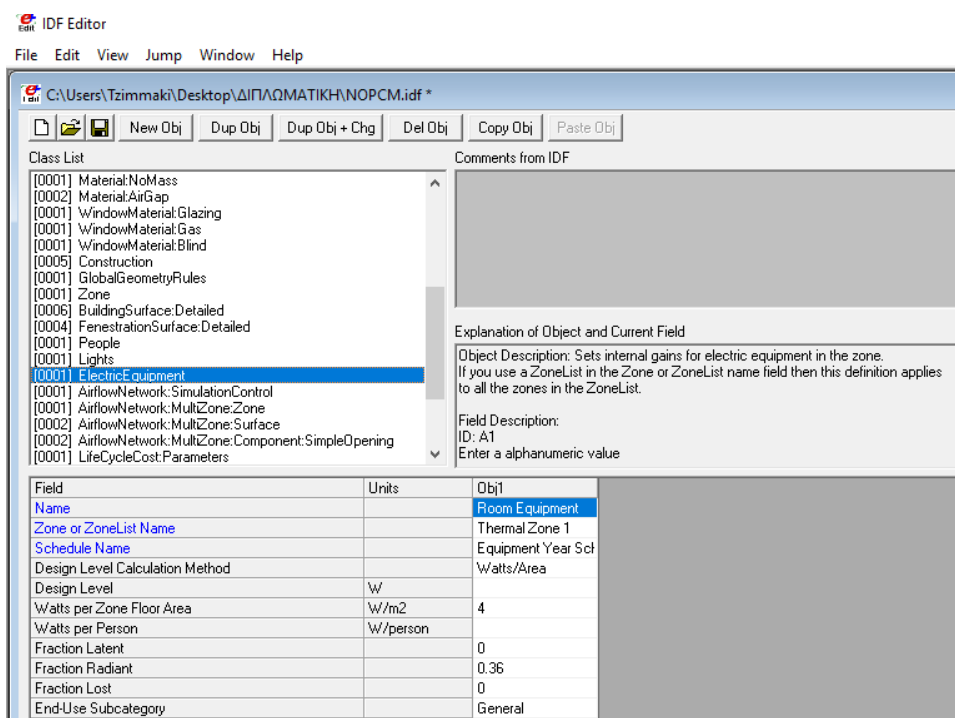
- **Name:** Προσδιορίζει το όνομα του αντικειμένου. Επιλέγεται: Room Lights.
- **Zone or ZoneList Name:** Καθορίζει σε ποια θερμική ζώνη ή σύνολο θερμικών ζωνών εφαρμόζεται ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικού φωτισμού μιας ζώνης. Επιλέγεται: Thermal zone 1.
- **Schedule Name:** Εισάγεται το χρονοδιάγραμμα ελέγχου του τεχνητού φωτισμού. Επιλέγεται: Lights Year Schedule.
- **Design Level Calculation Method:** Ορίζει με ποιον τρόπο θα εισαχθεί η ηλεκτρική ισχύς όλων των εγκατεστημένων φωτιστικών στον χώρο. Προτιμάται να χρησιμοποιηθεί υπολογιστική μέθοδος για εγκατεστημένη ισχύ φωτισμού/τετραγωνικό μέτρο. Οπότε στο πεδίο αναγράφεται: Watts/Area
- **Watts per Zone Floor Area:** Προσδιορίζει την ισχύ των εγκατεστημένων φωτιστικών που υπάρχει ανά τετραγωνικό μέτρο. Η τιμή ελήφθη λαμβάνοντας τις προτάσεις της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-1/2017 για εγκατεστημένη ισχύ τεχνητού φωτισμού / τετραγωνικό μέτρο για κατοικία. Επιλέγεται: 6.4 W/m<sup>2</sup> [72]

Field	Units	Obj1
Name		Room Lights
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 1
Schedule Name		Lights Year Schedu
Design Level Calculation Method		Watts/Area
Lighting Level	W	
Watts per Zone Floor Area	W/m2	6.4
Watts per Person	W/person	
Return Air Fraction		0
Fraction Radiant		0.48
Fraction Visible		0.18
Fraction Replaceable		1
End-Use Subcategory		General
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature		No
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co		
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co	1/K	

Σχήμα 8.5.33 Εισαγωγή δεδομένων στην κατηγορία Lights

Στην υποκατηγορία **Electric Equipment** ορίζονται οι παράμετροι υπολογισμού των εσωτερικών θερμικών κερδών της θερμικής ζώνης από τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικού εξοπλισμού των χώρων, όπως η ισχύς και τα χρονοδιαγράμματα λειτουργίας των ηλεκτρικών συσκευών που προγραμματίστηκαν παραπάνω. Συμπληρώνονται τα παρακάτω:

- **Name:** Προσδιορίζει το όνομα του αντικειμένου. Επιλέγεται: Room Electric Equipment.
- **Zone or Zone List Name:** Καθορίζει τη θερμική ζώνη στην οποία είναι εγκατεστημένες οι ηλεκτρικές συσκευές. Επιλέγεται: Thermal Zone 1.
- **Schedule Name:** Εισάγεται το χρονοδιάγραμμα το οποίο καθορίζει το ποσοστό του συνολικού ηλεκτρικού εξοπλισμού που είναι σε λειτουργία κατά την διάρκεια της κάθε ημέρας. Επιλέγεται: Equipment Year Schedule.
- **Design Level Calculation Method:** Ορίζει με ποιον τρόπο θα εισαχθεί η ηλεκτρική ισχύς όλων των εγκατεστημένων φωτιστικών στον χώρο. Επιλέγουμε τη μέθοδο για εγκατεστημένη ισχύ ηλεκτρικών συσκευών/ τετραγωνικό μέτρο. Συμπληρώνεται: Watts/Area.
- **Watts per Zone Floor Area:** Προσδιορίζει την ισχύ των εγκατεστημένων ηλεκτρικών συσκευών που υπάρχει ανά τετραγωνικό μέτρο. Η τιμή ελήφθη λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για κατοικία και τις προτάσεις της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-1/2017. Επιλέγεται: 4 W/m<sup>2</sup> [72]



**Σχήμα 8.5.34** Εισαγωγή δεδομένων στην κατηγορία **Electric Equipment**

## 8.5.8 Κατηγορία Natural Ventilation and Duct Leakage

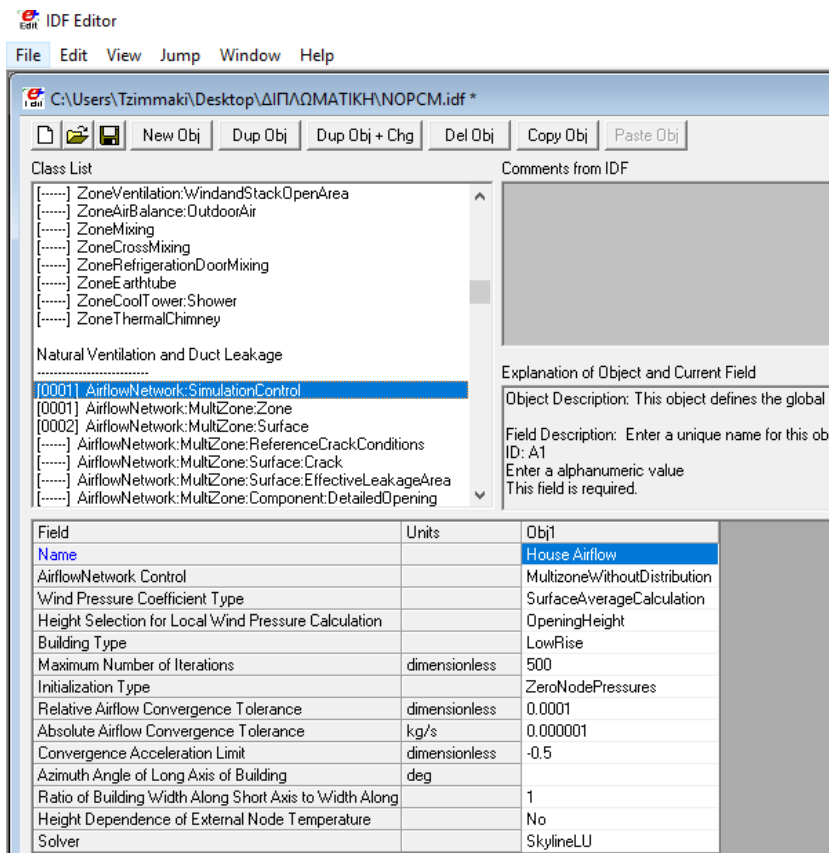
Η συγκεκριμένη κατηγορία δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης της ροής του αέρα σε ένα χώρο είτε μέσω φυσικού αερισμού είτε μέσω των συστημάτων. Στην περίπτωση μας, μας ενδιαφέρει ο φυσικός αερισμός από το άνοιγμα των παραθύρων-πορτών.

Στην υποκατηγορία **AirflowNetwork:SimulationControl** επιλέγονται οι παράμετροι προσομοίωσης του δικτύου αερισμού. Τα πεδία που συμπληρώθηκαν είναι τα εξής.

- *Name: House Airflow.* Το πεδίο αυτό προσδιορίζει το όνομα του αντικειμένου που καθορίζουν την προσομοίωση της ροής του αέρα.
- *AirflowNetworkControl:* Ορίζει τον τρόπο ελέγχου της προσομοίωσης της ροής του αέρα. Επιλέγεται `MultizoneWithoutDistribution` καθώς το μοντέλο μας δεν περιέχει σύστημα διανομής αέρα.
- *Wind Pressure Coefficient type:* Καθορίζει αν οι συντελεστές πίεσης ανέμου εισάγονται από τον χρήστη ή υπολογίζονται (ισχύει μόνο για ορθογώνια κτίρια). Επιλέγεται `SurfaceAverageCalculation` πρόκειται για την προτεινόμενη επιλογή του προγράμματος για τον υπολογισμό των συντελεστών ανέμου.
- *Height Selection for Local Wind Pressure Calculation:* Καθορίζει αν η τοπική πίεση ανέμου υπολογίζεται με βάση τα εξωτερικά ύψη των εξωτερικών κόμβων ή τα ύψη των ανοιγμάτων επιφανείας. Επιλέγεται: `OpeningHeight`, όπως προτείνεται από το πρόγραμμα.
- *Building Type:* Η συμπλήρωσή του είναι απαραίτητη μόνο στην περίπτωση που έχει επιλεγεί για το πεδίο `Wind Pressure Coefficient`. Διαλέγουμε την επιλογή `LowRise` για κτίρια των οποίων το ύψος είναι μικρότερο από το τριπλάσιο του μισού του πλάτους και το τριπλάσιο του μισού του μήκους.
- *Maximum Number of Iterations:* Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του συστήματος φυσικού αερισμού του κτιρίου. Επιλέγουμε 500, την προτεινόμενη τιμή του συστήματος.
- *Initialization Type:* Ορίζει ποια μέθοδο χρησιμοποιείται για την εκκίνηση της επίλυσης του συστήματος. Αφήνουμε και πάλι την προτεινόμενη τιμή του προγράμματος που είναι η `ZeroNodePressures`.
- *Relative Airflow Convergence Tolerance:* Η λύση θεωρείται ότι έχει συγκλίνει όταν η τιμή  $\frac{|\sum m_i|}{\sum |m_i|}$  μικρότερη από την τιμή που έχει εισαχθεί στο πεδίο. Το κλάσμα δηλώνει την αναλογία της απολύτης τιμής του αθροίσματος όλων των ροών του δικτύου προς το άθροισμα των



απόλυτων τιμών όλων των ροών του δικτύου. Επιλέγεται και πάλι η προεπιλεγμένη τιμή 0.0001.



Σχήμα 8.5.35 Παράμετροι προσομοίωσης δικτύου αερισμού

Η υποκατηγορία **AirflowNetwork:Multizone:Zone** χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του φυσικού αερισμού διαμέσω εσωτερικών και εξωτερικών ανοιγμάτων (παράθυρα, πόρτες) σε μια θερμική ζώνη. Είναι μια πολύ βασική κατηγορία για το δίκτυο αερισμού του κτιρίου. Δηλώνονται τα παρακάτω.

- *Zone Name:* Δηλώνεται το όνομα της θερμικής ζώνης που εφαρμόζεται το συγκεκριμένο σύστημα αερισμού. Αναγράφεται : Thermal zone 1.
- *Ventilation Control Mode:* Καθορίζει τον τύπο ελέγχου του φυσικού αερισμού της εκάστοτε ζώνης. Θέλουμε ένα σταθερό χρονολογικό πρόγραμμα , ανεξάρτητο από τις εσωτερικές ή τις εξωτερικές συνθήκες, οπότε επιλέγουμε: Constant.
- *Minimum Venting Opening Factor:* Συμπληρώνουμε 1, που δηλώνει ότι ολόκληρη η επιφάνεια παραμένει ανοιχτή κατά τη διάρκεια του αερισμού.
- *Venting Availability Schedule Name:* Εισάγουμε το χρονοδιάγραμμα που δημιουργήθηκε στην κατηγορία Schedules , το οποίο ρυθμίζει το

άνοιγμα/κλείσιμο των ανοιγμάτων του κτιρίου. Γράφουμε λοιπόν Ventilation Year Schedule.

Στην κατηγορία **AirflowNetwork:Multizone:Component:SimpleOpening** ορίστηκαν τα είδη των ανοιγμάτων, μέσω των οποίων θα πραγματοποιηθεί ο φυσικός αερισμός του χώρου.

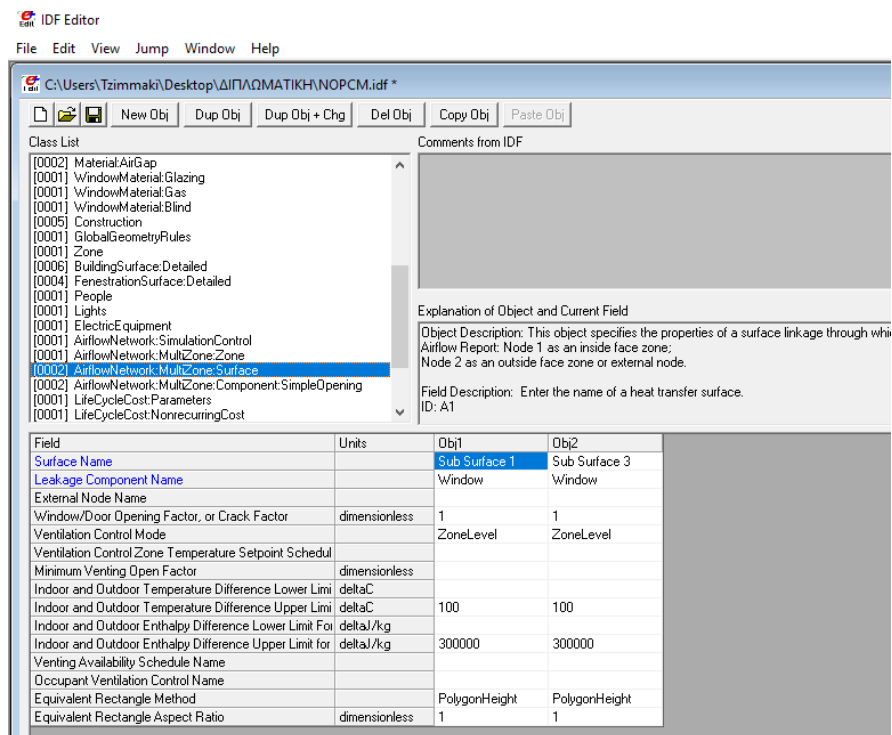
- *Name*: Προσδιορίζει το όνομα της συνιστώσας που έχει τις συγκεκριμένες ιδιότητες. Επιλέξαμε την πόρτα και το παράθυρο.
- *Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed*: Η τιμή του συντελεστή ροής μάζας αέρα όταν το άνοιγμα είναι κλειστό. Αφήνουμε την προεπιλεγμένη τιμή 0.001.
- *Air Mass Flow Exponent When Opening is Closed*: Συντελεστής που αφορά την τιμή της ροής του αέρα μέσω των ρωγμών. Η έγκυρη περιοχή τιμών είναι 0.5 έως 1.0, με την προεπιλεγμένη τιμή που επιλέγεται να είναι 0.65.
- *Minimum Density Difference for Two-Way Flow*: Χρησιμοποιείται για την εισαγωγή της ελάχιστης διαφοράς πυκνότητας πάνω από την οποία μπορεί να προκύψει ροή δύο δρόμων. Ορίζεται 0.0001 όπως προτείνει το πρόγραμμα.
- *Discharge Coefficient*: Χρησιμοποιείται για την εισαγωγή του συντελεστή απόρριψης. Η τιμή πρέπει να είναι μεγαλύτερη του μηδενός και επιλέγουμε 1.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Door	Window
Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed	kg/s-m	0.001	0.001
Air Mass Flow Exponent When Opening is Closed	dimensionless	0.65	0.65
Minimum Density Difference for Two-Way Flow	kg/m3	0.0001	0.0001
Discharge Coefficient	dimensionless	1	1

Σχήμα 8.5.36 Καθορισμός ειδών ανοιγμάτων

Τέλος στην κατηγορία **AirflowNetwork:Multizone:Surface** εισάγονται οι υπό-επιφάνειες (subsurfaces) που αντιστοιχούν στα ανοίγματα του κτιρίου, μέσω των οποίων θα γίνει ο αερισμός. Το πρόγραμμα απαιτεί για κάθε θερμική ζώνη, τουλάχιστον 2 επιφάνειες για γίνει η προσομοίωση του συστήματος φυσικού αερισμού.

- *Surface Name*: Προσδιορίζει το όνομα της επιφάνειας ή υποεπιφάνειας μέσω της οποίας ρέει ο αέρας. Επιλέξαμε οι υποεπιφάνειες που θα ανοίγουν κατά το χρονοδιάγραμμα να είναι το παράθυρο στο βορρά (subsurface 1) και το παράθυρο στη δύση (subsurface 3).
- *Leakage Comproment Name*: Καθορίζει την συνιστώσα που λαμβάνεται υπόψη και δηλώνει τις ιδιότητες διαρροής της επιφανείας, στην περίπτωση μας πρόκειται για 2 παράθυρα.
- *Window/Door Opening Factor, or Crack Factor*: Στην εξεταζόμενη περίπτωση που η σύνδεση γίνεται μέσω παραθύρου ή πόρτας δηλώνει τον συντελεστή ανοίγματος παραθύρου ή πόρτας. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Επιλέγουμε τα ανοίγματα να είναι εντελώς ανοιχτά οπότε βάζουμε την τιμή 1.



**Σχήμα 8.5.37 Αντιστοίχιση Υπο-Επιφανειών Αερισμού και Ιδιότητες**

Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά έγιναν οι συγκρίσεις στις θερμοκρασίες της ζώνης μέσα στο κτίριο όταν αυτό περιέχει PCM και χωρίς PCM. Έπειτα δημιουργήθηκαν κι άλλα αρχεία στα οποία προστέθηκαν επιπλέον παράμετροι

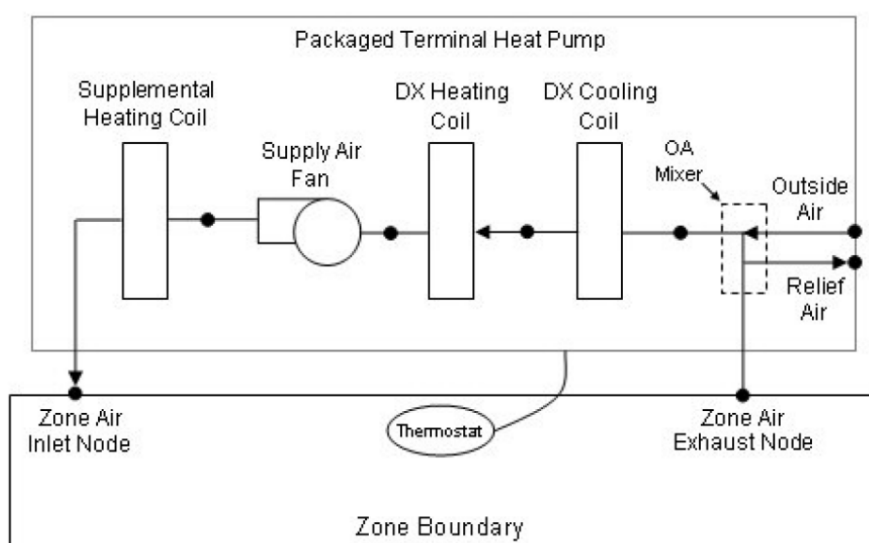
που αφορούν το σύστημα θέρμανσης και ψύξης (HVAC), το οποίο αναλύεται παρακάτω.

### 8.5.9 Χαρακτηριστικά συστήματος ψύξης- θέρμανσης (HVAC)

Για τη θέρμανση και τη ψύξη του κτιρίου μας επιλέχθηκε ένα σύστημα με αντλία θερμότητας (Packaged Terminal Heat Pump –PTHP). Οι αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό είναι συνήθως συσκευές ψύξης με συμπύεση ατμού, που περιλαμβάνουν μια βαλβίδα αναστροφής και 2 βελτιστοποιημένους εναλλάκτες θερμότητας (έναν εξαμιστή και έναν συμπυκνωτή). Η βαλβίδα αναστροφής αλλάζει την κατεύθυνση του ψυκτικού μέσου στον κύκλο και συνεπώς η αντλία θερμότητας μπορεί να παρέχει είτε θέρμανση είτε ψύξη, ανάλογα με την εκάστοτε απαίτηση φορτίου, στο κτίριο.

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση διαθέτει αντλία θερμότητας αέρος/αέρος (air-to-air), πρόκειται δηλαδή για αντλία με 2 εναλλάκτες θερμότητας αέρα-ψυκτικού μέσου, οι οποίοι προσλαμβάνουν θερμότητα από αέρα (τον ψύχουν) και αποβάλλουν θερμότητα σε αέρα (τον θερμαίνουν). Το σύστημα PTHP είναι σύνθετο και αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα, σύμφωνα με τα έγγραφα του Energy Plus :

- Εξωτερικό αναδευτή αέρα (outdoor air mixer),
- Ψυκτικό στοιχείο άμεσης εκτόνωσης (cooling coil DX),
- Θερμαντικό στοιχείο άμεσης εκτόνωσης (heating coil DX),
- Ανεμιστήρα αέρα τροφοδοσίας (draw through fan) και
- Συμπληρωματικό θερμαντικό στοιχείο (supplemental heater)

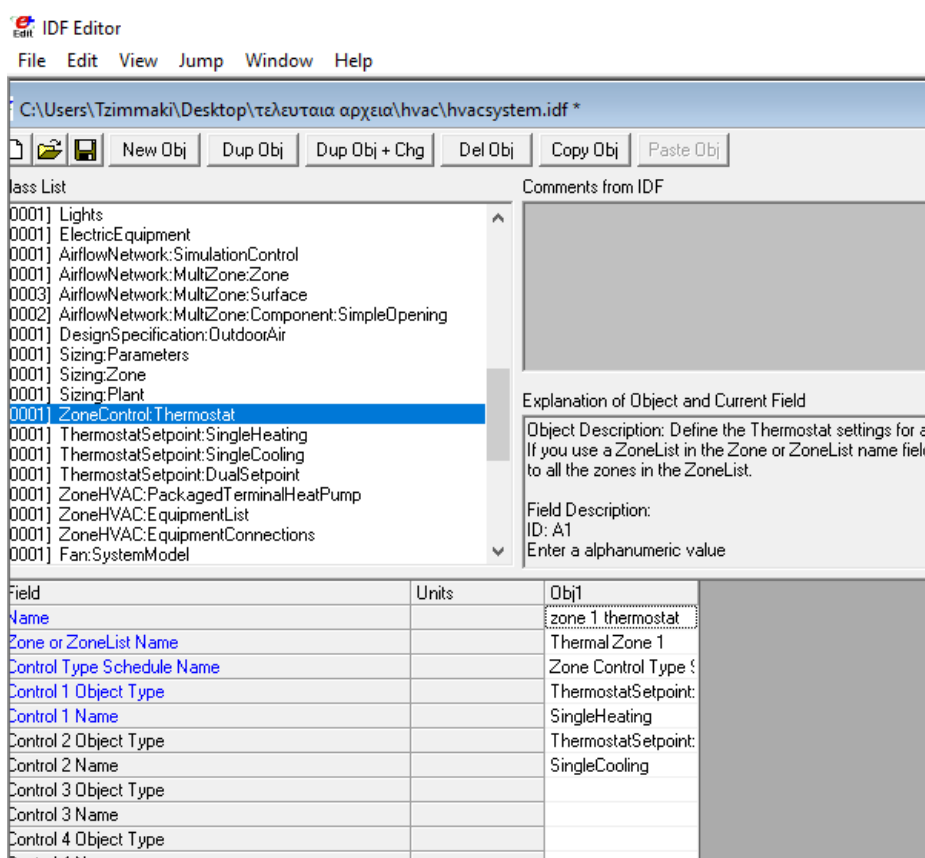


Σχήμα 8.5.38 Χρησιμοποιούμενο σύστημα θέρμανσης/ψύξης

## Θερμοστάτης/Thermostat

Ο θερμοστάτης είναι μια συσκευή ελέγχου η οποία χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του χώρου. Για τον έλεγχο του συστήματος θέρμανσης/ψύξης είναι απαραίτητη η σύνδεση του με θερμοστάτη.

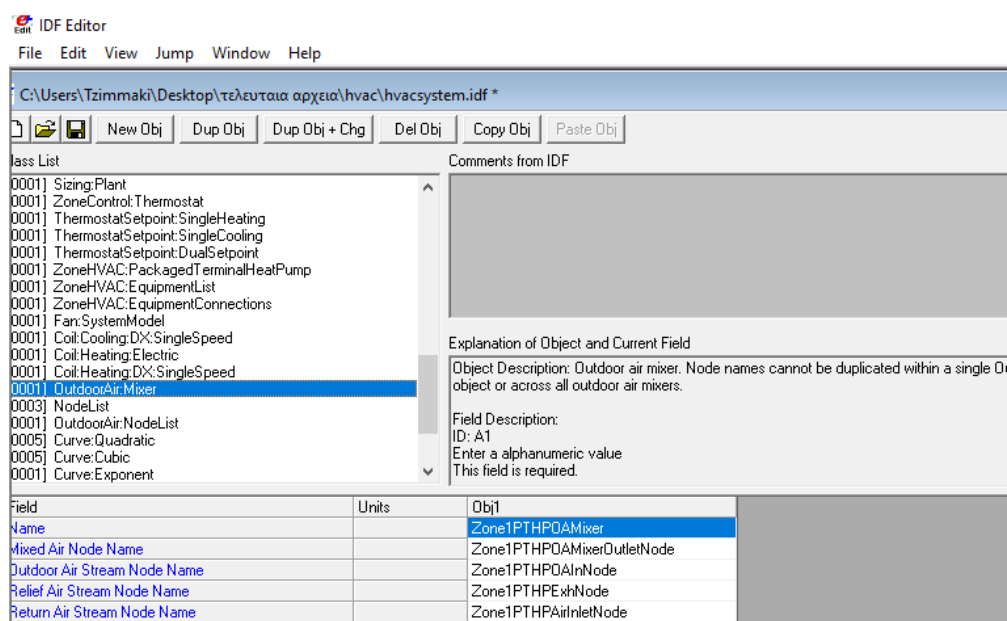
Στις κατηγορίες ZoneControl:Thermostat, Thermostat Setpoint ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του θερμοστάτη και τα όρια της θερμοκρασίας που αν ξεπεραστούν ξεκινάει η λειτουργία του συστήματος θέρμανσης/ψύξης. Για την εφαρμογή των ορίων δημιουργήθηκε χρονοδιάγραμμα όπως θα φανεί παρακάτω. Το heating set point (θερμοκρασία κάτω από την οποία λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης) ορίστηκε στους 21°C και το cooling set point (θερμοκρασία πάνω από την οποία λειτουργεί το σύστημα ψύξης) ορίστηκε στους 27 °C.



Σχήμα 8.5.39 Εισαγωγή δεδομένων για τον θερμοστάτη

## Εξωτερικός αναδευτήρας αέρα/ Outdoor air mixer

Ο εξωτερικός αναδευτήρας αέρα είναι το πιο κοινό εξάρτημα που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα εξωτερικού αέρα. Αποτελείται από 2 ρεύματα αέρα εισόδου: τον αέρα επιστροφής του συστήματος και τον εξωτερικό αέρα. Ενώ διαθέτει και 2 ρεύματα αέρος εξόδου: τον αέρα αποτόνωσης του συστήματος και τον ανάμικτο αέρα. Πρόκειται για ένα παθητικό στοιχείο το οποίο παίρνει τις ροές μάζας και τις συνθήκες εισόδου συν τη ροή μάζας αέρα αποτόνωσης και υπολογίζει την ταχύτητα ροής και τις συνθήκες του μικτού αέρα (καθώς και τις συνθήκες αέρα αποτόνωσης). Η ροή μάζας εισόδου και αποτόνωσης πρέπει να ρυθμιστεί εκτός του εξαρτήματος και αυτό γίνεται συνήθως με κάποιο εξωτερικό ελεγκτή αέρα. Η είσοδος για αυτό το αντικείμενο είναι πολύ απλή: ένα μοναδικό όνομα για το εξάρτημα και τα ονόματα των 2 κόμβων εισόδου και των 2 κόμβων εξόδου.



Σχήμα 8.5.40 Εισαγωγή δεδομένων για τον αναδευτή εξωτερικού αέρα

## Ψυκτικό στοιχείο άμεσης εκτόνωσης/ DX Cooling Coil

Ένα στοιχείο άμεσης εκτόνωσης (DX) χρησιμοποιεί έναν κύκλο εκτόνωσης / συμπίεσης ατμού ψυκτικού μέσου (RVEC) για την άμεση θέρμανση/ ψύξη του αέρα τροφοδοσίας σε έναν κατεχόμενο χώρο.

Το ψυκτικό στοιχείο ψύχει τον αέρα τροφοδοσίας. Οι δύο τύποι ψυκτικού στοιχείου DX που είναι διαθέσιμοι στο EnergyPlus είναι μονής και διπλής

ταχύτητας. Για το σύστημα θέρμανσης που έχουμε επιλέξει συμβατό είναι το εξάρτημα μονής ταχύτητας.

Τα δεδομένα εισόδου για το ψυκτικό στοιχείο είναι: χρονοδιάγραμμα διαθεσιμότητας που θα δημιουργηθεί στην κατηγορία Schedules, όνομα του κόμβου εισόδου αέρα, όνομα του κόμβου εξόδου αέρα, λεπτομερειακές καμπύλες απόδοσης, ονομαστική συνολική ικανότητα ψύξης, ονομαστική αναλογία αισθητής θερμότητας, ονομαστική τιμή συντελεστή συμπεριφοράς COP και ονομαστική παροχή αέρα. Οι τελευταίες 4 εισοδοί καθορίζουν την απόδοση του πηνίου στο σημείο λειτουργίας. Ακόμη πρέπει να εισαχθούν 5 καμπύλες για την προσομοίωση του εξαρτήματος.

- Η καμπύλη τροποποίησης της συνολικής ικανότητας ψύξης ως συνάρτηση θερμοκρασίας.
- Η καμπύλη τροποποίησης της συνολικής ικανότητας ψύξης ως συνάρτηση της ροής.
- Η καμπύλη τροποποίησης της αναλογίας εισόδου ενέργειας (EIR) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.
- Η καμπύλη τροποποίησης της αναλογίας εισόδου ενέργειας (EIR) ως συνάρτηση της ροής.
- Η καμπύλη του μερικού κλάσματος συσχέτισης φορτίου.

The screenshot shows the IDF Editor interface. The 'Class List' on the left includes various HVAC components, with 'Coil:Cooling:DX:SingleSpeed' selected. The 'Field List' on the right displays the following data:

Field	Units	Obj1
Name		Zone1PTHDPDXCoolCoil
Availability Schedule Name		CoolingCoilAvailSched
Gross Rated Total Cooling Capacity	W	7200
Gross Rated Sensible Heat Ratio		0.75
Gross Rated Cooling COP	W/W	3
Rated Air Flow Rate	m3/s	0.4
Rated Evaporator Fan Power Per Volume Flow Rate	W/(m3/s)	
Air Inlet Node Name		Zone1PTHPFanOutletNode
Air Outlet Node Name		Zone1PTHDPDXCoolCoilOutletNode
Total Cooling Capacity Function of Temperature Curve I		HPACCoolCapFT
Total Cooling Capacity Function of Flow Fraction Curve I		HPACCoolCapFFF
Energy Input Ratio Function of Temperature Curve Name		HPACEIRFT
Energy Input Ratio Function of Flow Fraction Curve Name		HPACEIRFFF
Part Load Fraction Correlation Curve Name		HPACPLFFPLR
Minimum Outdoor Dry-Bulb Temperature for Compressor	C	
Nominal Time for Condensate Removal to Begin	s	
Ratio of Initial Moisture Evaporation Rate and Steady State Evaporation Rate	dimensionless	

Σχήμα 8.5.41 Εισαγωγή δεδομένων για το ψυκτικό στοιχείο άμεσης εκτόνωσης

## Θερμαντικό στοιχείο άμεσης εκτόνωσης/ DX Heating Coil

Παρόμοια με το ψυκτικό στοιχείο, το στοιχείο θέρμανσης DX θερμαίνει τον αέρα τροφοδοσίας και έχει δύο παραλλαγές: μονής και διπλής ταχύτητας. Η αντλία θερμότητας που επιλέξαμε χρησιμοποιεί στοιχείο μονής ταχύτητας. Τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου είναι: χρονοδιάγραμμα διαθεσιμότητας, όνομα κόμβου εισαγωγής αέρα, όνομα κόμβου εξαγωγής αέρα, ονομαστική συνολική θερμική ισχύ, ονομαστική τιμή συντελεστή συμπεριφοράς COP και ονομαστική ροή όγκου αέρα. Ακόμη πρέπει να εισαχθούν 5 καμπύλες για την μοντελοποίηση του εξαρτήματος.

- Η καμπύλη τροποποίησης της συνολικής ικανότητας θέρμανσης ως συνάρτηση θερμοκρασίας.
- Η καμπύλη τροποποίησης της συνολικής ικανότητας θέρμανσης ως συνάρτηση της ροής.
- Η καμπύλη τροποποίησης της αναλογίας εισόδου ενέργειας (EIR) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.
- Η καμπύλη τροποποίησης της αναλογίας εισόδου ενέργειας (EIR) ως συνάρτηση της ροής.
- Η καμπύλη του μερικού κλάσματος συσχέτισης φορτίου.

Field	Units	Obj1
Name		Zone1PTHDPDXHea
Availability Schedule Name		HeatingCoilAvailSc
Gross Rated Heating Capacity	W	6600
Gross Rated Heating COP	W/W	2.75
Rated Air Flow Rate	m <sup>3</sup> /s	0.398
Rated Supply Fan Power Per Volume Flow Rate	W/(m <sup>3</sup> /s)	
Air Inlet Node Name		Zone1PTHDPDXCoo
Air Outlet Node Name		Zone1PTHDPDXHea
Heating Capacity Function of Temperature Curve Name		HPACHeatCapFT
Heating Capacity Function of Flow Fraction Curve Name		HPACHeatCapFFF
Energy Input Ratio Function of Temperature Curve Name		HPACHeatEIRFT
Energy Input Ratio Function of Flow Fraction Curve Name		HPACHeatEIRFFF
Part Load Fraction Correlation Curve Name		HPACCOOLPLFFPL
Defrost Energy Input Ratio Function of Temperature Curve Name		
Minimum Outdoor Dry-Bulb Temperature for Compressor	C	2
Outdoor Dry-Bulb Temperature to Turn On Compressor	C	
Maximum Outdoor Dry-Bulb Temperature for Defrost Op	C	5

Σχήμα 8.5.42 Εισαγωγή δεδομένων για το θερμαντικό στοιχείο άμεσης εκτόνωσης



Οι καμπύλες που χρειάστηκαν για την μοντελοποίηση των στοιχείων Cooling Coil DX και Heating coil DX διαμορφώθηκαν ανάλογα με την μορφή τους σύμφωνα με τα έγγραφα του Energy Plus στα πεδία Curve: Biquadratic, Curve: Exponent, Curve: Quadratic, Curve: Cubic.

## Ανεμιστήρας αέρα τροφοδοσίας/ Draw through fan

Ο ανεμιστήρας τροφοδοτεί την αντλία θερμότητας με αέρα, προκειμένου να ψυχθεί ή να θερμανθεί από τα Coils. Το σύστημα χρησιμοποιεί έναν ανεμιστήρα σταθερού όγκου και συνεχής λειτουργίας όπως καθορίζεται από χρονοδιαγράμματα. Απαραίτητα για τη μοντελοποίηση του ανεμιστήρα είναι τα χρονοδιαγράμματα λειτουργίας του, τα σημεία εξόδου και εισόδου του αέρα, ο μέγιστος όγκος ροής αέρα, ο λόγος πίεσης, ο βαθμός απόδοσης και η καμπύλη λειτουργίας του. Τα δεδομένα αυτά εισαχθήκαν όπως φαίνεται παρακάτω λαμβάνοντας τις κατάλληλες τιμές από τα έγγραφα του Energy Plus.

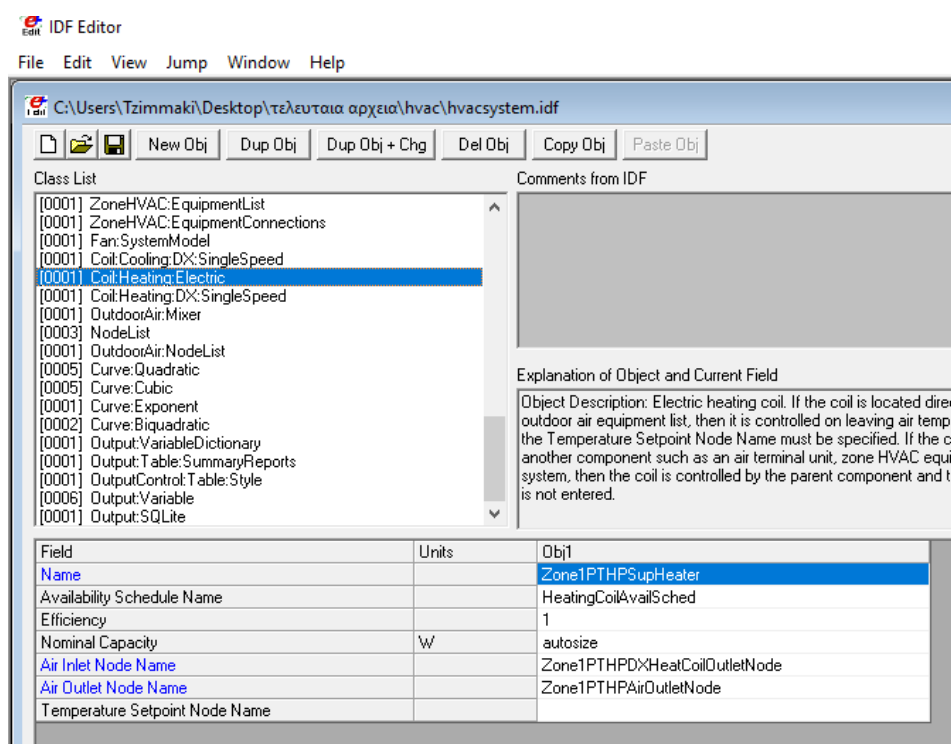
The screenshot shows the IDF Editor interface. The class list on the left has 'Fan: SystemModel' selected. The right pane shows the 'Explanation of Object and Current Field' and a table of fields for the selected object.

Field	Units	Obj1
Name		Zone1PTHPFan
Availability Schedule Name		FanAndCoilAvailSched
Air Inlet Node Name		Zone1PTHPDAMixerOutletNode
Air Outlet Node Name		Zone1PTHPFanOutletNode
Design Maximum Air Flow Rate	m <sup>3</sup> /s	0.4
Speed Control Method		Continuous
Electric Power Minimum Flow Rate Fraction		0
Design Pressure Rise	Pa	75
Motor Efficiency		0.9
Motor In Air Stream Fraction		1
Design Electric Power Consumption	W	autosize
Design Power Sizing Method		TotalEfficiencyAndPressure
Electric Power Per Unit Flow Rate	W/(m <sup>3</sup> /s)	
Electric Power Per Unit Flow Rate Per Unit Pressure	W/(m <sup>3</sup> /s)Pa	
Fan Total Efficiency		0.5
Electric Power Function of Flow Fraction Curve Name		CombinedPowerAndFanEff
Night Ventilation Mode Pressure Rise	Pa	

Σχήμα 8.5.43 Εισαγωγή δεδομένων για τον ανεμιστήρα τροφοδοσίας

## Συμπληρωματικό θερμαντικό στοιχείο (ηλεκτρικό) / Supplemental heater (electric)

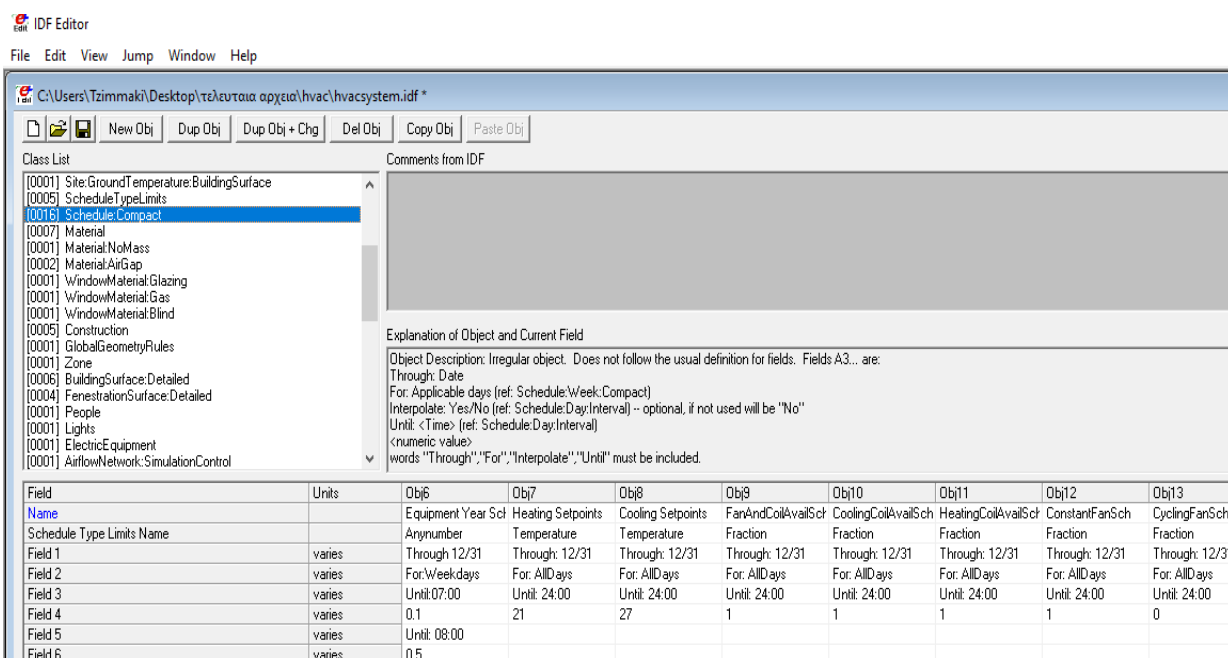
Το συμπληρωματικό θερμαντικό στοιχείο χρησιμοποιείται επιπρόσθετα από την αντλία θερμότητας, όταν υπάρχει απαίτηση φορτίου θέρμανσης. Λειτουργεί όταν η ικανότητα του πρώτου θερμαντικού στοιχείου είναι ανεπαρκής για να καλύψει τη θέρμανση. Τα απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής είναι: χρονοδιάγραμμα διαθεσιμότητας, αποδοτικότητα, ονομαστική θερμαντική ικανότητα, όνομα κόμβου εισαγωγής αέρα και όνομα κόμβου εξαγωγής αέρα.



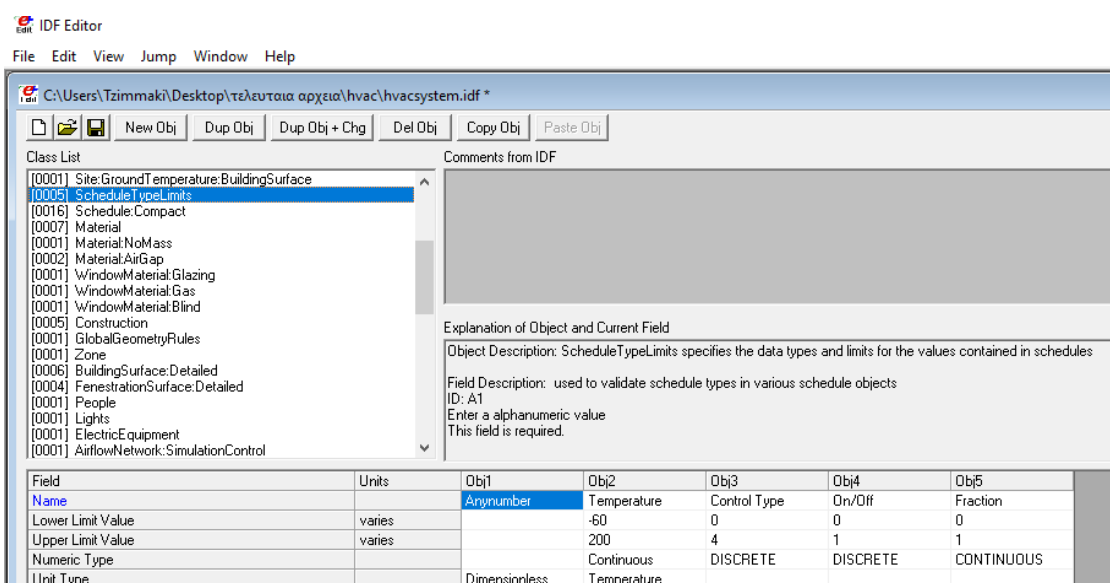
Σχήμα 8.5.44 Εισαγωγή δεδομένων για το συμπληρωματικό θερμαντικό στοιχείο

## Χρονοδιαγράμματα λειτουργίας του συστήματος/ Schedules HVAC

Για τη λειτουργία του συστήματος ήταν απαραίτητα τα χρονοδιαγράμματα του θερμοστάτη, του ανεμιστήρα και των ψυκτικών-θερμαντικών στοιχείων τα οποία ορίστηκαν στην κατηγορία Schedules: Compact όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Καθορίστηκαν επίσης νέοι τύποι χρονοδιαγραμμάτων, τύπου θερμοκρασίας για τη λειτουργία του θερμοστάτη και τύπου ελέγχου για τον ανεμιστήρα και τα στοιχεία, στην καρτέλα Schedule Type Limits.



Σχήμα 8.5.45 Εισαγωγή χρονοδιαγραμμάτων για το σύστημα ψύξης/θέρμανσης



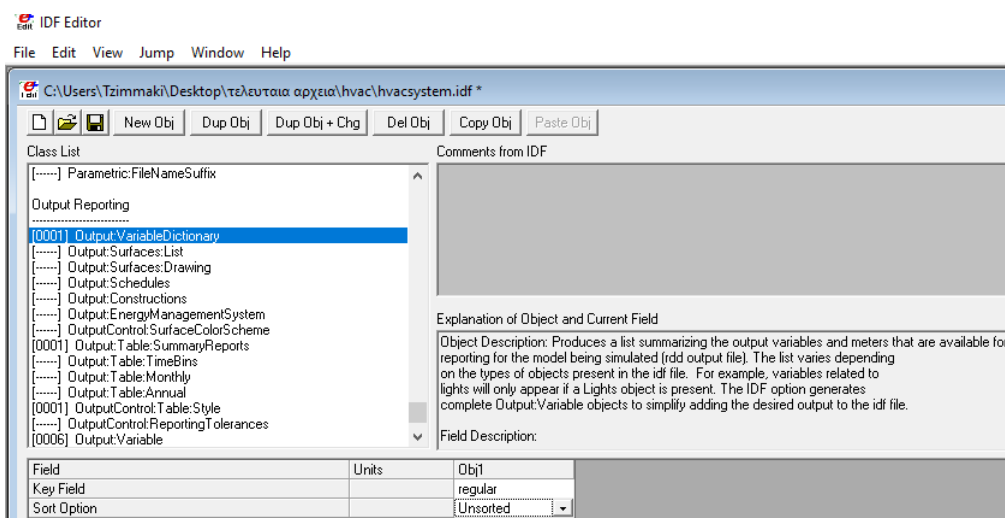
Σχήμα 8.5.46 Καθορισμός τύπων χρονοδιαγραμμάτων

## 8.5.10 Κατηγορία Output Reporting

Το Energy Plus παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού πληθώρας παραμέτρων, η επιλογή των οποίων γίνεται ανάλογα με το είδος και το σκοπό της εκάστοτε μελέτης. Αφού ολοκληρωθεί η εισαγωγή των δεδομένων ακολουθεί ο ορισμός των μεταβλητών που θα ζητηθούν ως αποτελέσματα.

Στην υποκατηγορία **Output Variable Dictionary** επιλέγουμε ουσιαστικά τον κατάλογο από τον οποίο θα επιλέξουμε τις μεταβλητές εξόδου μέσω του πεδίου *Key Field* και αφήνουμε την προεπιλεγμένη επιλογή που είναι: *regular*.

Ακόμα επιλέγουμε αν οι μεταβλητές εξόδου θέλουμε να εμφανίζονται ταξινομημένες ή όχι μέσω του πεδίου *Sort Option*. Για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε *unsorted*, δηλαδή μη ταξινομημένες μεταβλητές καθώς προτιμήθηκε να εμφανίζονται με τη σειρά που αναγράφονται στα έγγραφα του Energy Plus.

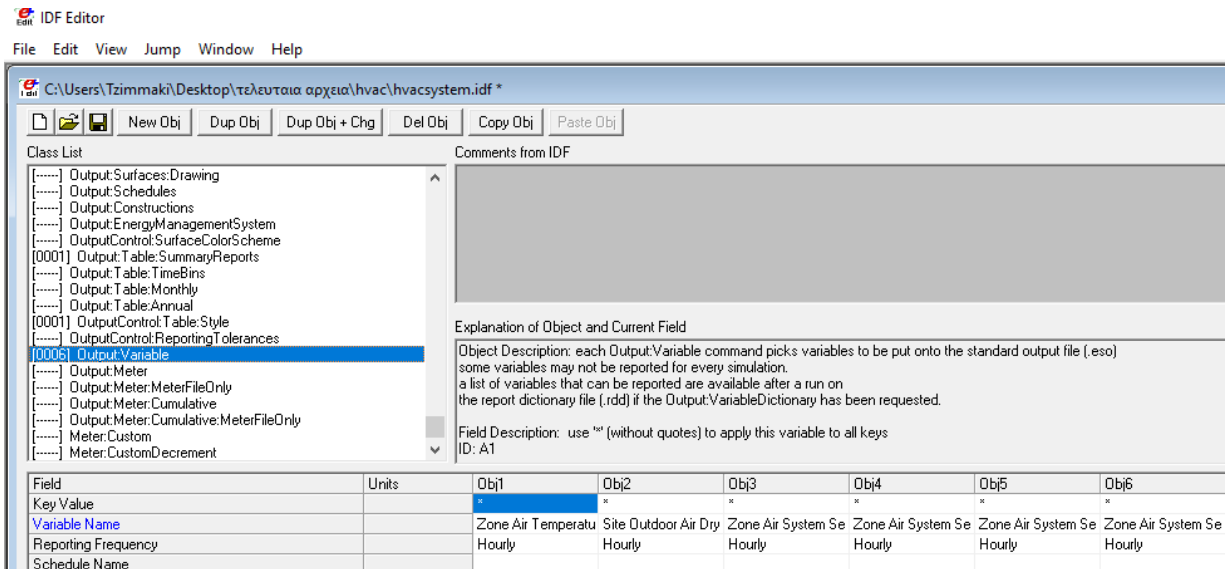


Σχήμα 8.5.47 Ενεργοποίηση καταλόγου μεταβλητών εξόδου του Energy Plus

Τέλος στην υποκατηγορία **Output:Variable** δηλώνουμε τα ονόματα των μεταβλητών που επιθυμούμε να μας υπολογίσει το πρόγραμμα καθώς και την επιθυμητή συχνότητα υποβολής αποτελεσμάτων. Για μεταβλητές εξόδου επιλέξαμε:

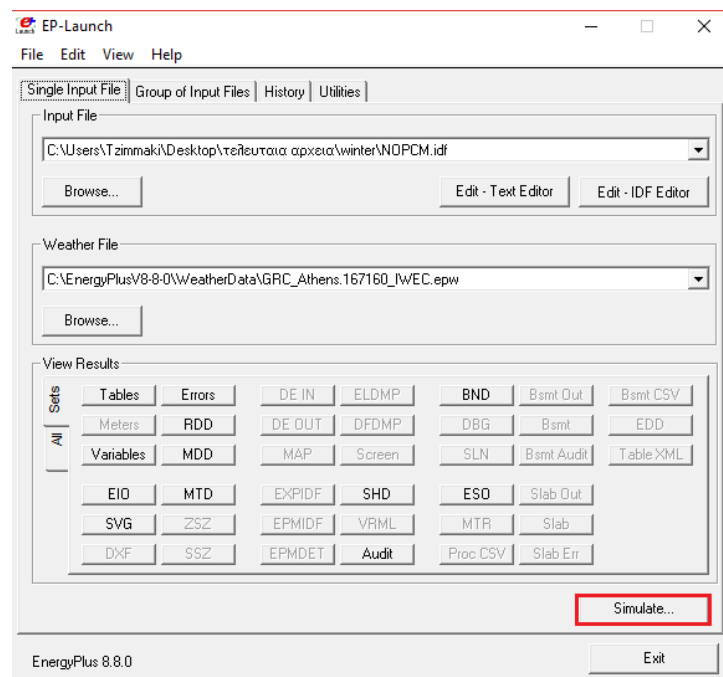
- Για το κτίριο χωρίς HVAC, θερμοκρασία περιβάλλοντος (Site Outdoor Air Drybulb Temperature) και θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου ( Zone Air Temperature )

- Για το κτίριο με σύστημα HVAC, θερμοκρασία περιβάλλοντος (Site Outdoor Air Drybulb Temperature) και θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου ( Zone Air Temperature ) και καταναλισκόμενη ενέργεια για θέρμανση και ψύξη (Zone Air System Sensible Cooling/Heating Energy)



Σχήμα 8.5.48 Επιλογή μεταβλητών εξόδου

Αφού συμπληρώθηκαν και οι επιθυμητές μεταβλητές εξόδου τα αρχεία μας είναι έτοιμα και μπορούν να εκτελεστούν, χρησιμοποιώντας την επιλογή *Simulate* στο περιβάλλον του Energy Plus. Τα αρχεία που προκύπτουν έχουν την μορφή .csv, και επεξεργάζονται περαιτέρω σε φύλλα εργασίας Excel.



Σχήμα 8.5.49 Εκτέλεση προσομοίωσης



## 9 Εκτέλεση προσομοιώσεων

### 9.1 Εξεταζόμενες περιπτώσεις

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, οι προσομοιώσεις στην παρούσα εργασία γίνονται με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων υλικών αλλαγής φάσης στη θερμική άνεση του κτιρίου. Οι προσομοιώσεις διακρίνονται σε δύο κύρια μέρη. Κατά το πρώτο μέρος εξετάστηκε κτίριο το οποίο δεν περιέχει σύστημα θέρμανσης-ψύξης, ενώ κατά το δεύτερο μέρος διερευνήθηκε το ίδιο κτίριο αλλά με τη προσθήκη συστήματος. Αυτό που τροποποιείται και μελετάται σε κάθε μέρος, είναι το χρησιμοποιούμενο υλικό αλλαγής φάσης. Στις πρώτες προσομοιώσεις μελετάται η επίδραση των PCM 27 και PCM 29, στη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου του κτιρίου, κατά τους θερινούς μήνες, καθώς και η επίδραση των PCM 15 και PCM 18, κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Κατά τις περιόδους αυτές τα υλικά εκτελούν συνεχείς κύκλους τήξης-στερεοποίησης, αξιοποιώντας στο μέγιστο το θερμικό δυναμικό αποθήκευσης που διαθέτουν. Τα PCM κατά τις προσομοιώσεις τοποθετούνται και στους 4 τοίχους του κτιρίου ενώ σε εκάστοτε περιπτώσεις, όπου θα αναφέρονται τοποθετούνται και στην οροφή. Στο δεύτερο μέρος των προσομοιώσεων, το κατώτερο και το ανώτερο όριο θερμοκρασίας του θερμοστάτη ,του χρησιμοποιούμενου συστήματος, ρυθμίζονται σε 21°C και 27°C αντίστοιχα. Όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα πέφτει κάτω από 21°C και ανεβαίνει πάνω 27°C, το σύστημα ενεργοποιείται προκειμένου να διατηρεί τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα σε εύρος θερμοκρασιών 21°C - 27°C. Σε αυτή λοιπόν τη περίπτωση μελετάται η επίδραση των PCM 18, PCM 29 και PCM 24 στην ενέργεια που καταναλώνεται για να καλυφθούν τα φορτία θέρμανσης και ψύξης. Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν ,τόσο σε μορφή πινάκων, όσο και διαγραμμάτων.

### 9.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

#### *Κτίριο χωρίς σύστημα θέρμανσης-ψύξης*

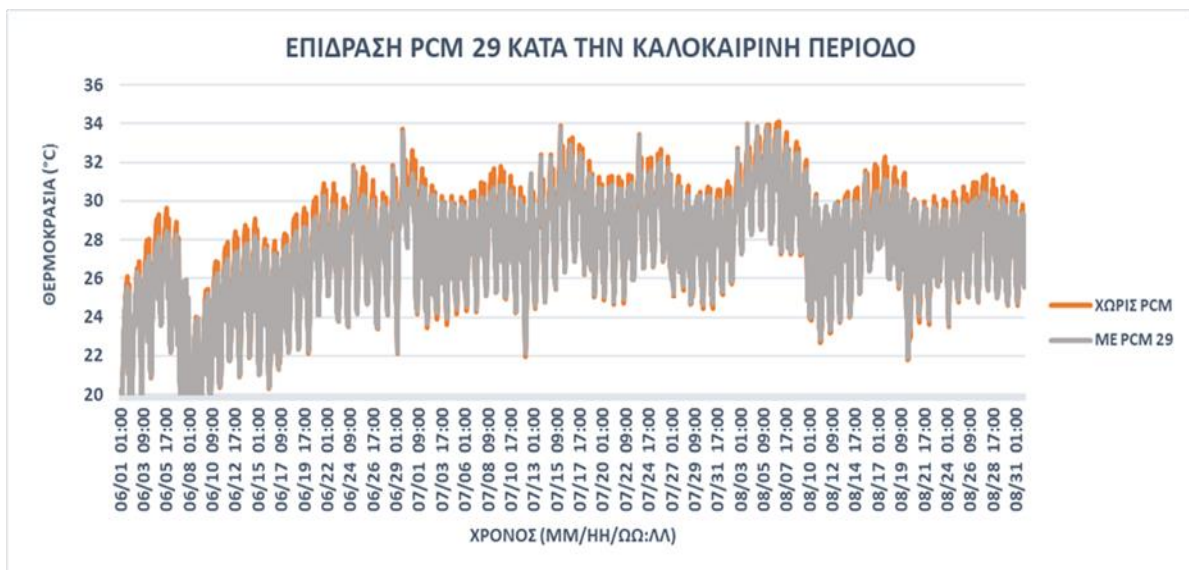
Η πρώτη διερεύνηση έγινε για τα PCM 27 και PCM 29, κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Στη συγκεκριμένες προσομοιώσεις επιλέχθηκαν να εξεταστούν οι

μήνες Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος, ως προς την επίδραση των παραπάνω PCM στην ωριαία θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του κτιρίου.

Αρχικά έγιναν προσομοιώσεις με χρονική περίοδο και τους τρεις μήνες και αφορούσε τη σύγκριση των ωριαίων θερμοκρασιών του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου, όταν αυτό δεν περιέχει PCM στο κέλυφός του και όταν περιέχει PCM 29 ή PCM 27.



**Διάγραμμα 1: Ωριαίες θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα του κτιρίου για τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο, για κτίριο χωρίς PCM και κτίριο με PCM 27**



**Διάγραμμα 2: Ωριαίες θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα του κτιρίου για τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο, για κτίριο χωρίς PCM και κτίριο με PCM 29**



Όπως φαίνεται και τα δύο PCM μειώνουν τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του κτιρίου κατά τους θερινούς μήνες, αφού στις περιπτώσεις με τα PCM εμφανίζονται μειωμένα τα μέγιστα του γραφήματος. Ακόμη διακρίνεται μια πολύ μικρή αύξηση θερμοκρασιών και από τα δύο PCM σε χαμηλές εσωτερικές θερμοκρασίες, σε σχέση με το κτίριο που δεν έχει PCM. Αυτό εξηγείται από τη διαδικασία τήξης-στερεοποίησής των PCM. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το PCM συλλέγει θερμική ενέργεια με παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας του. Μόλις η θερμοκρασία του PCM φτάσει τη θερμοκρασία του σημείου τήξης του, τήκεται δεσμεύοντας μεγάλο ποσό θερμότητας χωρίς περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του, μειώνοντας τη θερμοκρασία του χώρου. Έπειτα όταν η περιβάλλουσα θερμοκρασία του PCM ελαττωθεί, αυτό στερεοποιείται απελευθερώνοντας το πόσο θερμότητας που είχε απορροφήσει κατά τη φάση της υγροποίησης και αυξάνοντας την εσωτερική θερμοκρασία. Ο κύκλος αυτός εξηγεί την πολύ μικρή αύξηση στις τιμές των εσωτερικών θερμοκρασιών, κατά τις χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος που επικρατούν αργά το βράδυ ή νωρίς το πρωί.

Φαίνεται το PCM 27 να επιδρά πιο αποτελεσματικά τον μήνα Ιούνιο από το PCM 29, καθώς φαίνονται εντονότερες οι διαφορές στις θερμοκρασίες σε σχέση με το απλό κτίριο. Αντίθετα κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, το PCM 29 παρουσιάζει μεγαλύτερη μείωση από το PCM 27. Αυτό είναι λογικό αφού τον Ιούνιο έχουμε συνηθώς χαμηλότερες θερμοκρασίες, οπότε το PCM με τη χαμηλότερη θερμοκρασία είναι πιο κατάλληλο ενώ το αντίθετο ισχύει για τους άλλους δύο μήνες.

Για να ελέγξουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το διάγραμμα υπολογίστηκαν η μέση και η μέγιστη μείωση θερμοκρασίας, για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο. Για την εύρεση αυτών των τιμών επεξεργαστήκαμε και πάλι τις ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου, για το απλό κτίριο και τα κτίρια με PCM 27 και 29.

	ΜΕΣΗ ΜΕΙΩΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (°C)		ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (°C)	
	PCM 29	PCM 27	PCM 29	PCM 27
<b>ΜΑΙΟΣ</b>	0.374	0.392	0.957	1.223
<b>ΙΟΥΝΙΟΣ</b>	0.348	0.388	1.591	1.632
<b>ΙΟΥΛΙΟΣ</b>	0.216	0.196	1.130	0.710
<b>ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ</b>	0.212	0.187	1.377	0.778

*Πίνακας 1: Μέση και μέγιστη μηνιαία μείωση θερμοκρασίας στο κτίριο με PCM 29 και PCM 27*

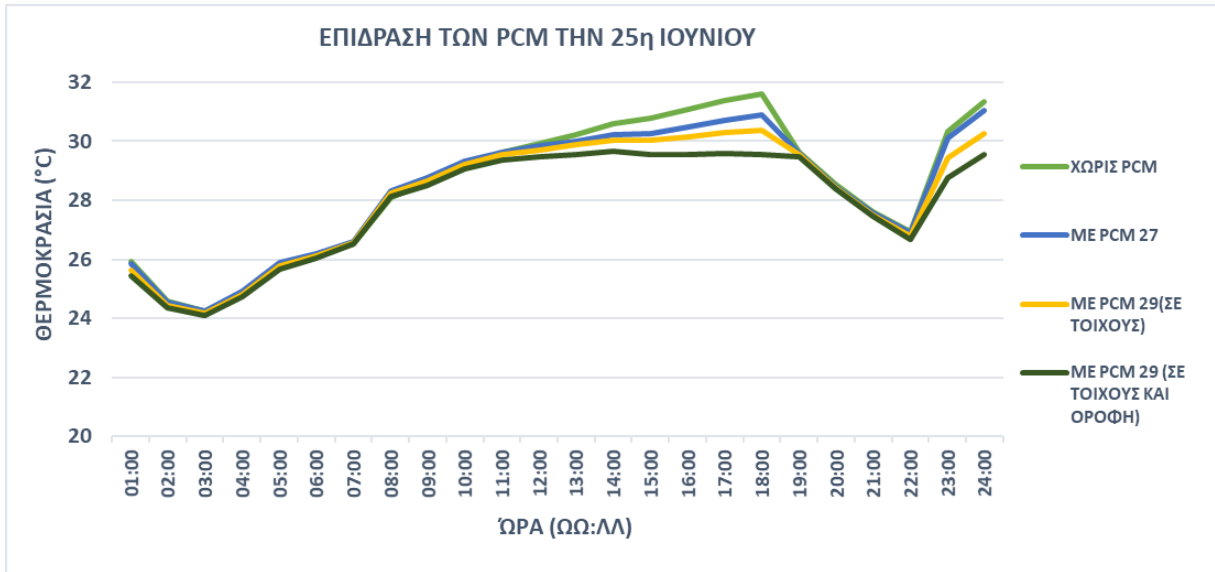
Από τις τιμές του πίνακα συμπεραίνουμε ότι, η εφαρμογή PCM 27 οδηγεί σε μεγαλύτερη μέση αλλά και μέγιστη μείωση θερμοκρασίας τους μήνες Μάιο και Ιούνιο. Το PCM 27 οδηγεί στη μέγιστη μείωση θερμοκρασίας (1,632°C) τον μήνα Ιούνιο. Το PCM 29 όμως εμφανίζει καλύτερες μέσες και μέγιστες μειώσεις τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, ενώ ακόμα και τον Ιούνιο εμφανίζει συγκρίσιμη μέγιστη μείωση( 1,591°C) με το PCM 27. Σε μία χώρα όπως η Ελλάδα που συνήθως υποφέρει από υπερβολική ζέστη κατά τους θερινούς μήνες θα ήταν προτιμότερη η επιλογή του PCM 29, για να μετριαστούν οι υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες.

Τα επόμενα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων ημερών κάθε μήνα. Επιλέχθηκε να επεξεργαστούν οι ωριαίες θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα της 25<sup>ης</sup> Ιουνίου, 9<sup>ης</sup> Ιουλίου και της 2<sup>ης</sup> Αυγούστου. Αρχικά παρατίθεται πίνακας με τις τιμές των θερμοκρασιών περιβάλλοντος, την εκάστοτε μέρα, και τις τιμές των θερμοκρασιών του εσωτερικού αέρα, όταν το κτίριο δεν έχει PCM. Έπειτα παρουσιάζεται σε διαγράμματα η διακύμανση της θερμοκρασίας για κάθε μία από τις παραπάνω μέρες, για τις περιπτώσεις που το κτίριο δεν περιέχει PCM, περιέχει PCM 27, περιέχει PCM 29, περιέχει PCM 29 όχι μόνο σε τοίχους αλλά και στην οροφή.

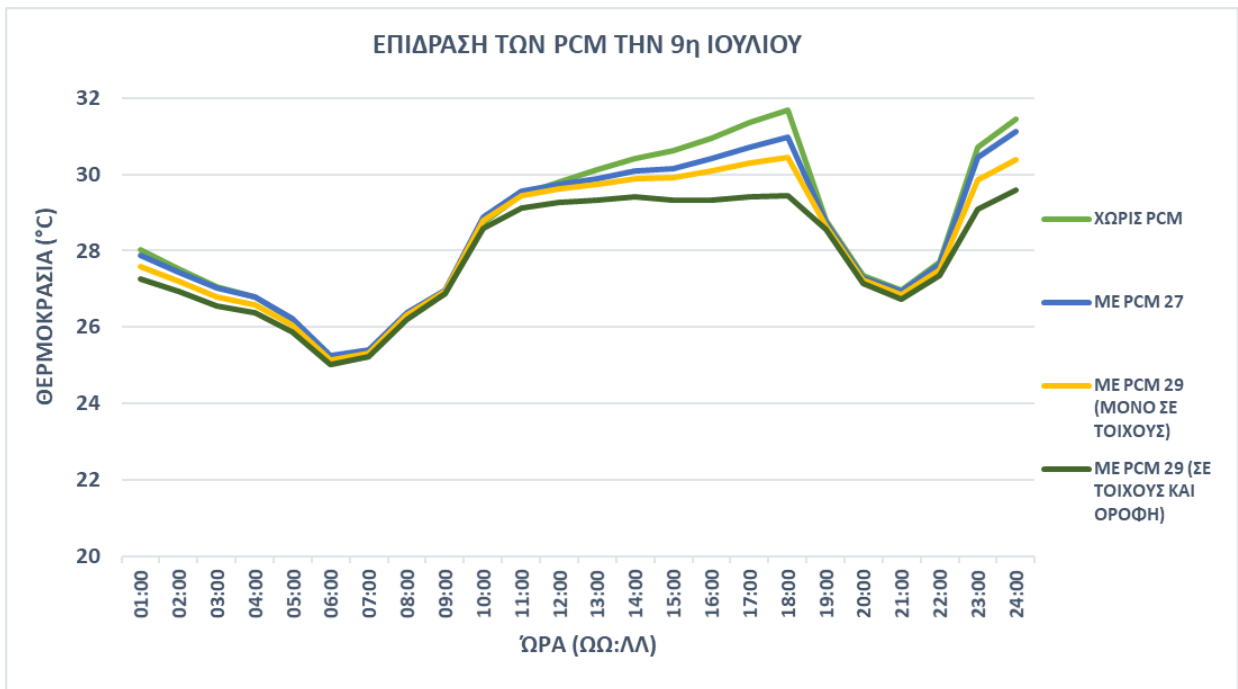
ΩΡΑ	25 <sup>η</sup> Ιουνίου		9 <sup>η</sup> Ιουλίου		2 <sup>η</sup> Αυγούστου	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΧΩΡΙΣ PCM(°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΧΩΡΙΣ PCM(°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΧΩΡΙΣ PCM(°C)
01:00	24.50	25.94	26.00	28.03	26.17	28.08
02:00	23.79	24.57	25.69	27.54	23.85	26.73
03:00	23.40	24.24	25.20	27.07	23.65	26.40
04:00	23.80	24.84	25.00	26.80	23.70	26.29
05:00	24.20	25.77	24.09	26.19	23.75	26.20
06:00	25.06	26.09	23.61	25.21	24.36	26.45
07:00	26.31	26.54	24.00	25.32	25.51	26.64
08:00	27.56	28.10	24.81	26.27	26.66	27.21
09:00	28.76	28.60	26.31	26.88	28.06	28.28
10:00	29.91	29.22	27.00	28.72	29.71	29.51
11:00	31.06	29.63	27.71	29.48	31.36	29.96
12:00	31.80	29.93	28.20	29.81	32.66	30.32
13:00	32.20	30.24	28.51	30.11	33.51	30.66
14:00	32.60	30.58	29.10	30.42	34.36	31.04
15:00	32.55	30.77	29.10	30.61	34.75	31.47
16:00	32.00	31.07	29.00	30.96	34.70	31.88
17:00	31.45	31.38	29.71	31.34	34.65	32.22
18:00	30.64	31.62	29.69	31.67	33.99	32.62
19:00	29.49	29.62	28.49	28.80	32.79	32.78
20:00	28.34	28.53	26.98	27.35	31.59	31.71
21:00	27.34	27.62	26.51	26.98	30.59	30.83
22:00	26.39	26.94	27.00	27.70	29.79	30.16
23:00	25.44	30.34	26.19	30.70	28.99	32.05
24:00	24.80	31.35	25.71	31.46	28.45	32.56

**Πίνακας 2: Ωριαίες τιμές θερμοκρασιών περιβάλλοντος και κτιρίου χωρίς PCM για τις εξεταζόμενες μέρες**

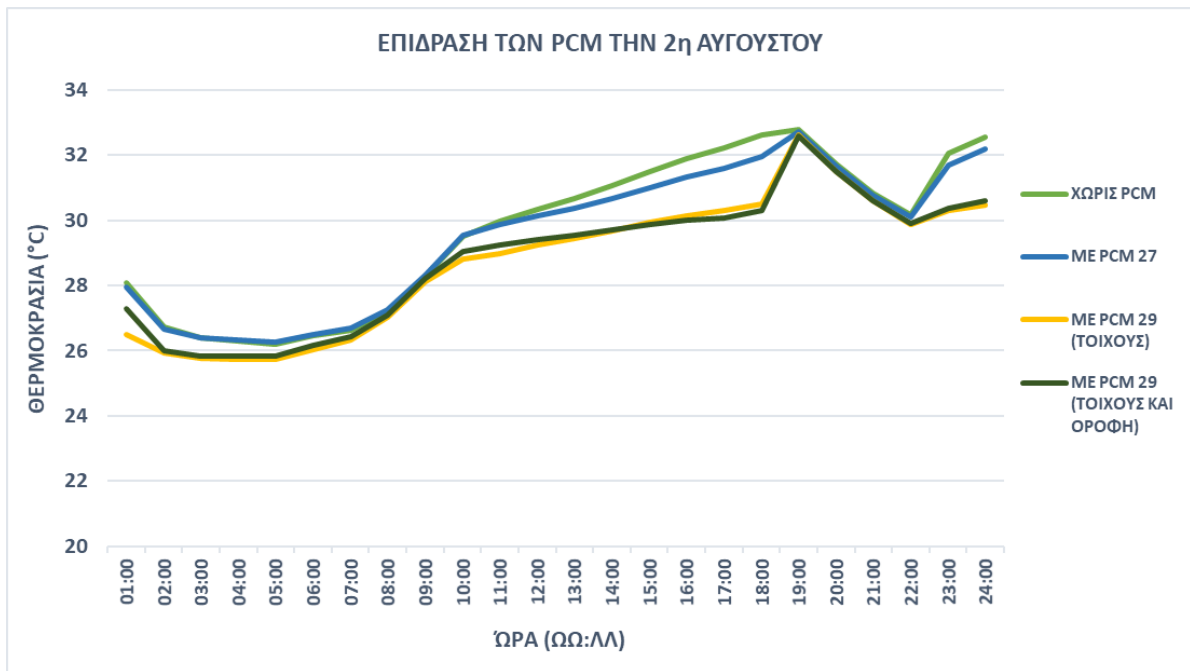
Από τον πίνακα φαίνεται, ότι τις περισσότερες ώρες της ημέρας η θερμοκρασία στο εσωτερικό του απλού κτιρίου είναι λίγο χαμηλότερη από την αντίστοιχη περιβάλλοντος. Υπάρχουν λίγες ώρες που η θερμοκρασία στο εσωτερικό ξεπερνά στοιχειωδώς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όταν έχει περάσει αρκετό χρονικό διάστημα με κλειστά παράθυρα.



**Διάγραμμα 3:** Διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου κατά την 25<sup>η</sup> Ιουνίου για κτίριο χωρίς PCM, με PCM 27, με PCM 29, με PCM 29 και σε οροφή



**Διάγραμμα 4:** Διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου κατά την 9<sup>η</sup> Ιουλίου για κτίριο χωρίς PCM, με PCM 27, με PCM 29, με PCM 29 και σε οροφή



**Διάγραμμα 5: Διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου κατά την 2<sup>η</sup> Αυγούστου για κτίριο χωρίς PCM, με PCM 27, με PCM 29, με PCM 29 και σε οροφή**

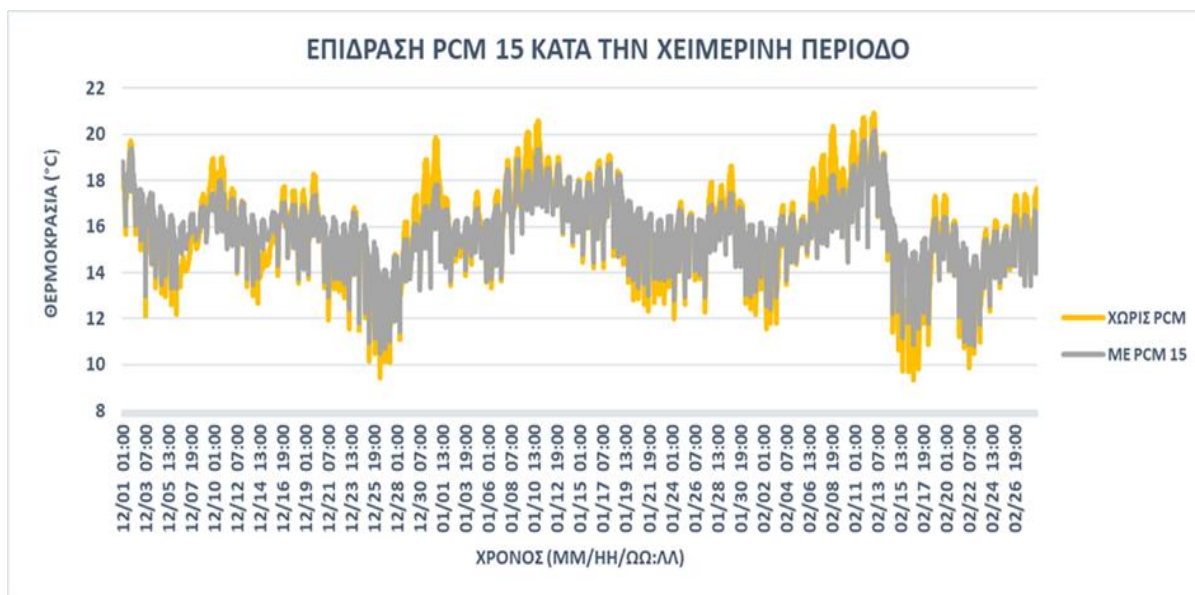
Οι απότομες πτώσεις θερμοκρασίας που παρατηρούνται και στα τρία διαγράμματα, οφείλονται στο άνοιγμα των παραθύρων του κτιρίου για φυσικό αερισμό του κτιρίου. Τις ώρες που τα παράθυρα έχουν μείνει ήδη αρκετές ώρες ανοιχτά, φαίνεται τα PCM να μην έχουν επίδραση στην θερμοκρασία. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν τα παράθυρα είναι για ώρα ανοιχτά, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου σταθεροποιείται σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες, από τις τιμές των σημείων τήξης των υλικών αλλαγής φάσης. Έτσι το PCM μένει στερεό για αρκετές ώρες χωρίς να μπορεί να λιώσει και να ολοκληρώσει τον κύκλο τήξης-στερεοποίησης, για να απορροφήσει και να αποδώσει θερμότητα. Τις ώρες που τα παράθυρα είναι κλειστά, δηλαδή όλες τις ώρες που δεν βρίσκεται κανείς στο κτίριο και ορισμένες ενώ βρίσκονται, παρατηρούμε αισθητή μείωση της θερμοκρασίας μέσα στο κτίριο.

Κατά την 25<sup>η</sup> Ιουνίου φαίνεται το PCM 29 να έχει λίγο μεγαλύτερη μείωση στη θερμοκρασία από το PCM 27, ενώ αποτελεσματικότερο με διαφορά φαίνεται να είναι το PCM 29 όταν τοποθετείται και στην οροφή. Με το PCM 29 τοποθετημένο και στην οροφή η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου δεν ξεπερνά καμία ώρα της ημέρας τους 30°C. Όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου χωρίς PCM φτάνει τη μέγιστη τιμή 31,61°C στις 18:00, το PCM 27 μειώνει στους 30,85°, το PCM 29 μειώνει στους 30,41°C ,ενώ το PCM 29 όταν τοποθετείται και στην οροφή μειώνει στους 29,55 °C.

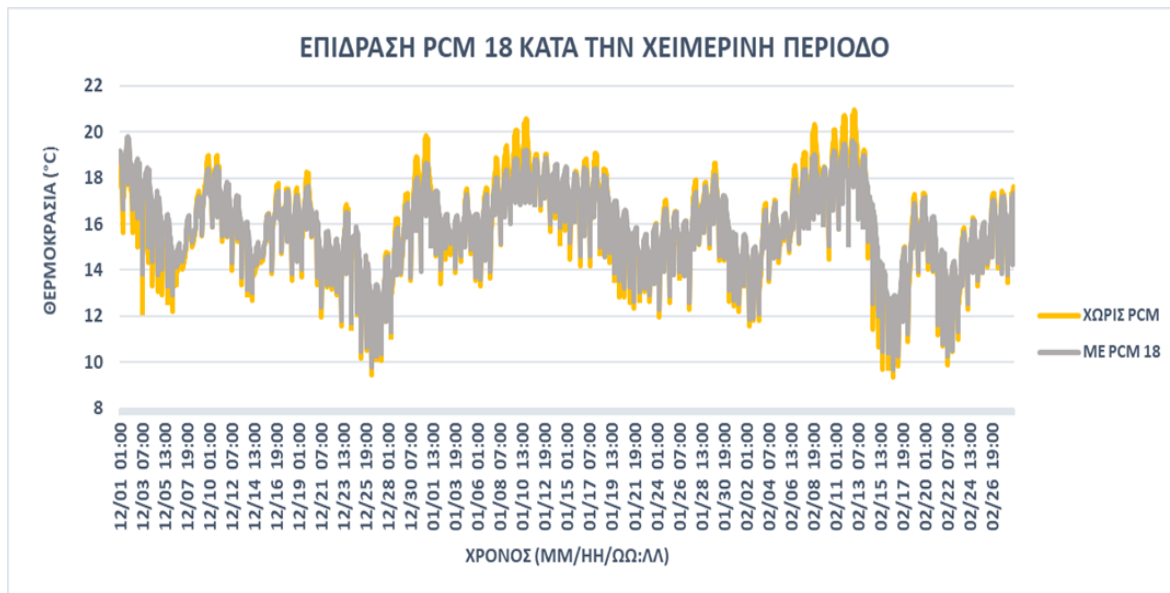
Κατά την 9<sup>η</sup> Ιουλίου η διακύμανση των θερμοκρασιών στο κτίριο είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση. Στο εσωτερικό του κτιρίου χωρίς PCM η θερμοκρασία φτάνει τη μέγιστη τιμή 31,81°C στις 18:00, το PCM 27 μειώνει στους 30,98°, το PCM 29 μειώνει στους 30,43°C ,ενώ το PCM 29 όταν τοποθετείται και στην οροφή μειώνει στους 29,53 °C.

Κατά την 2<sup>η</sup> Αυγούστου φαίνεται το PCM 27 να έχει πολύ μικρή επίδραση στην εσωτερική θερμοκρασία, ενώ αντίθετα το PCM 29 παρουσιάζει το ίδιο αποτελεσματική συμπεριφορά, είτε τοποθετηθεί μόνο σε τοίχους, είτε τοποθετηθεί σε τοίχους και οροφή. Στο εσωτερικό του κτιρίου χωρίς PCM η θερμοκρασία φτάνει τη μέγιστη τιμή 32,61°C στις 18:00, το PCM 27 μειώνει μόλις στους 31,94° C, ενώ το PCM 29 μειώνει στους 30,29 °C ,είτε είναι τοποθετημένο μόνο σε τοίχους ,είτε είναι τοποθετημένο σε τοίχους και οροφή.

Ακολούθησαν οι προσομοιώσεις για τα PCM 15 και PCM 18, κατά την χειμερινή περίοδο. Οι χειμερινοί μήνες που επιλέχθηκαν προς μελέτη, είναι ο Δεκέμβριος, ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος. Η πρώτη προσομοίωση έγινε όπως και πριν και για τους τρεις μήνες και αφορούσε τη σύγκριση των ωριαίων θερμοκρασιών του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου, όταν αυτό δεν περιέχει PCM στο κέλυφός του και όταν περιέχει PCM 15 ή PCM 18.



**Διάγραμμα 6: Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα του κτιρίου για τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, για κτίριο χωρίς PCM και κτίριο με PCM 15**



**Διάγραμμα 7 : Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα του κτιρίου για τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, για κτίριο χωρίς PCM και κτίριο με PCM 18**

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα PCM αυξάνουν τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στο εσωτερικό του κτιρίου (διαδικασία στερεοποίησης) αλλά μειώνουν παράλληλα τις υψηλές θερμοκρασίες (διαδικασία υγροποίησης). Το PCM 15 φαίνεται να αυξάνει παραπάνω τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες από το PCM 18, μειώνει όμως και πάρα πολύ τις υψηλές θερμοκρασίες. Το PCM 18 επιδρά αποτελεσματικά και χωρίς να μειώνει τόσο τις υψηλές θερμοκρασίες ενώ τείνει να εξισορροπήσει τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου περί τους 18°C, που είναι μια ικανοποιητική θερμοκρασία για εσωτερικό χώρο χωρίς σύστημα θέρμανσης το χειμώνα.

Για να ελέγξουμε πιο έμπρακτα την θερμική συμπεριφορά των PCM υπολογίστηκαν η μέση και η μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας, για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Για την εύρεση αυτών των τιμών επεξεργαστήκαμε και πάλι τις ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου, για το απλό κτίριο και τα κτίρια με PCM 18 και 15.

	ΜΕΣΗ ΑΥΞΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (°C)		ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΥΞΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (°C)	
	PCM 18	PCM 15	PCM 18	PCM 15
<b>ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ</b>	0.650	0.540	2.498	1.736
<b>ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ</b>	0.956	0.906	2.267	1.633
<b>ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ</b>	0.154	0.135	1.017	1.459
<b>ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ</b>	0.099	0.153	1.893	2.463

*Πίνακας 3: Μέση και μέγιστη μηνιαία αύξηση θερμοκρασίας στο κτίριο με PCM 15 και PCM 18*

Από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε ότι η μέση αύξηση της θερμοκρασίας έχει πολύ κοντινές τιμές για τα δύο PCM. Τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο οι μέσες τιμές θερμοκρασίας είναι λίγο μεγαλύτερες για το PCM 18 σε σχέση με το PCM 15. Το PCM 15 όμως παρουσιάζει εμφανώς καλύτερη μέση τιμή τον Φεβρουάριο, μάλλον λόγω των χαμηλότερων τιμών θερμοκρασίας που εμφανίζονται εκείνο το μήνα. Τέλος το Νοέμβριο και το Δεκέμβριο το PCM 18 εμφανίζει μεγαλύτερες μέγιστες τιμές, ενώ τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο εμφανίζει μεγαλύτερες μέγιστες το PCM 15.

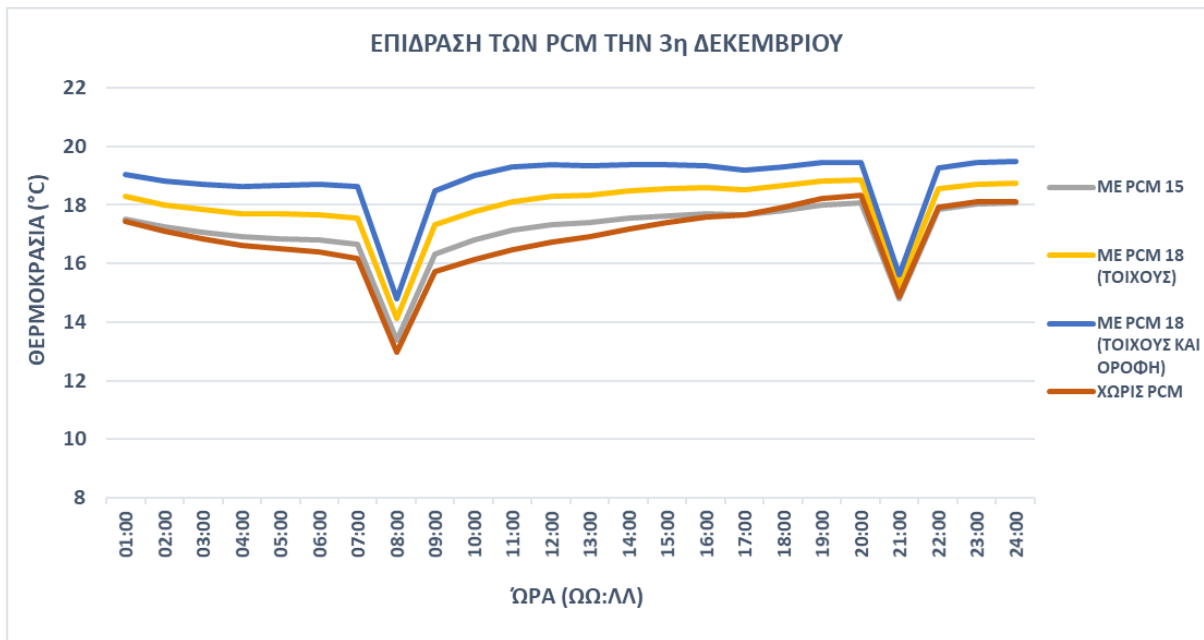
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν διαγράμματα προκειμένου να μελετηθεί η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου, μία συγκεκριμένη μέρα κάθε μήνα. Οι περιπτώσεις που συγκρίθηκαν ήταν το απλό κτίριο χωρίς PCM, το κτίριο με PCM 15 καθώς και κτίριο με PCM 18, στην περίπτωση που περιέχει μόνο στους τοίχους PCM και στην περίπτωση που περιέχει και στην οροφή. Για την υλοποίηση χρειάστηκαν και πάλι οι τιμές των ωριαίων θερμοκρασιών εσωτερικού αέρα που προέκυψαν από κάθε προσομοίωση. Επιλέχθηκε να επεξεργαστούν οι ωριαίες θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα της 3<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου, 14<sup>ης</sup> Ιανουαρίου και της 15<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου. Οι τιμές των θερμοκρασιών περιβάλλοντος, την εκάστοτε μέρα, και οι τιμές των θερμοκρασιών του εσωτερικού αέρα, όταν το κτίριο δεν έχει PCM δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Ύστερα ακολουθούν τα διαγράμματα διακυμάνσεων της εσωτερικής θερμοκρασίας.



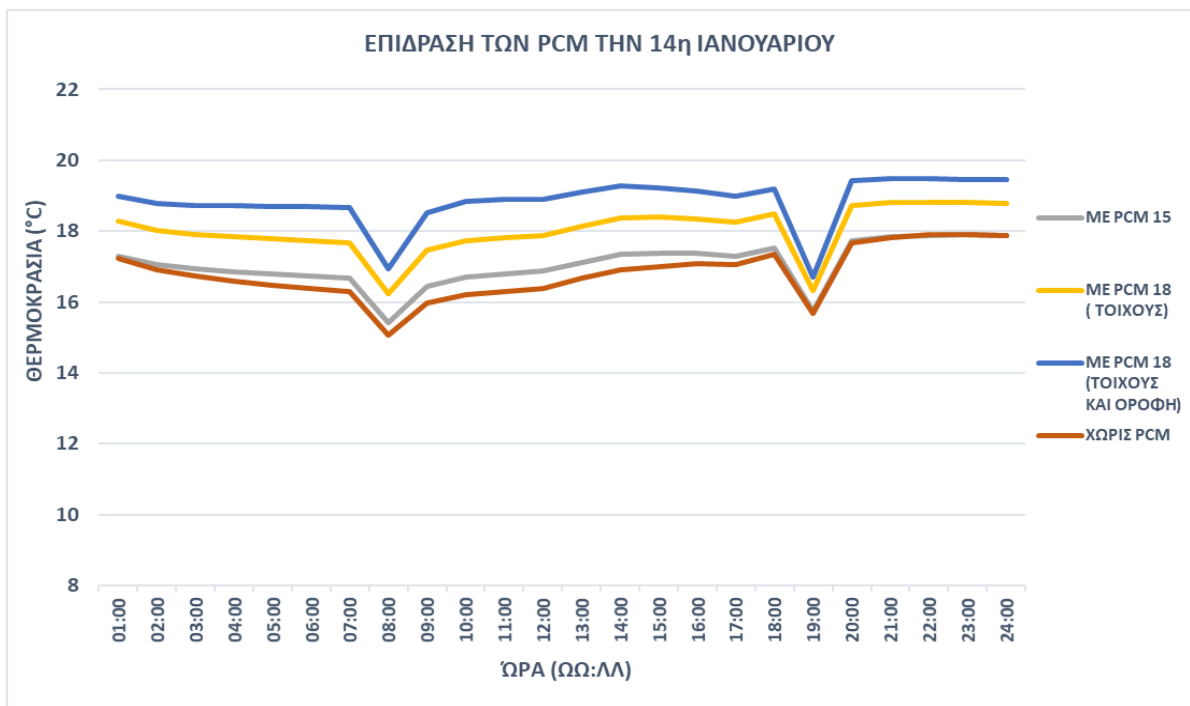
ΩΡΑ	3η Δεκεμβρίου		14η Ιανουαρίου		15η Φεβρουαρίου	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΧΩΡΙΣ PCM(°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΧΩΡΙΣ PCM(°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΧΩΡΙΣ PCM(°C)
01:00	8.00	17.45	10.61	17.22	6.00	11.30
02:00	8.81	17.09	11.15	16.90	6.51	11.13
03:00	8.28	16.84	11.25	16.73	6.49	11.04
04:00	7.00	16.62	11.70	16.60	6.00	11.02
05:00	7.92	16.50	12.15	16.48	6.00	10.96
06:00	7.89	16.39	12.35	16.38	6.00	10.95
07:00	7.00	16.19	12.30	16.28	5.49	10.93
08:00	7.81	12.99	12.25	15.08	5.00	9.14
09:00	7.79	15.72	11.84	15.97	4.49	10.53
10:00	9.03	16.14	11.20	16.21	4.00	10.54
11:00	12.22	16.48	10.54	16.29	5.12	10.64
12:00	13.20	16.73	10.76	16.39	6.10	10.80
13:00	13.00	16.91	11.81	16.66	6.00	10.86
14:00	13.81	17.18	12.86	16.92	6.61	10.88
15:00	13.79	17.39	13.50	17.01	6.59	10.91
16:00	12.49	17.60	13.70	17.07	6.00	10.96
17:00	12.31	17.67	13.90	17.06	6.31	11.00
18:00	11.79	17.94	13.75	17.36	6.30	11.45
19:00	11.00	18.21	13.30	15.69	6.10	8.94
20:00	11.10	18.34	12.85	17.66	6.30	11.40
21:00	10.59	14.85	12.24	17.83	6.20	11.47
22:00	10.00	17.94	11.60	17.89	6.00	11.58
23:00	10.10	18.09	10.94	17.91	6.31	11.60
24:00	9.08	18.10	10.24	17.89	6.30	11.58

*Πίνακας 4: Ωριαίες τιμές θερμοκρασιών περιβάλλοντος και κτιρίου χωρίς PCM για τις εξεταζόμενες μέρες*

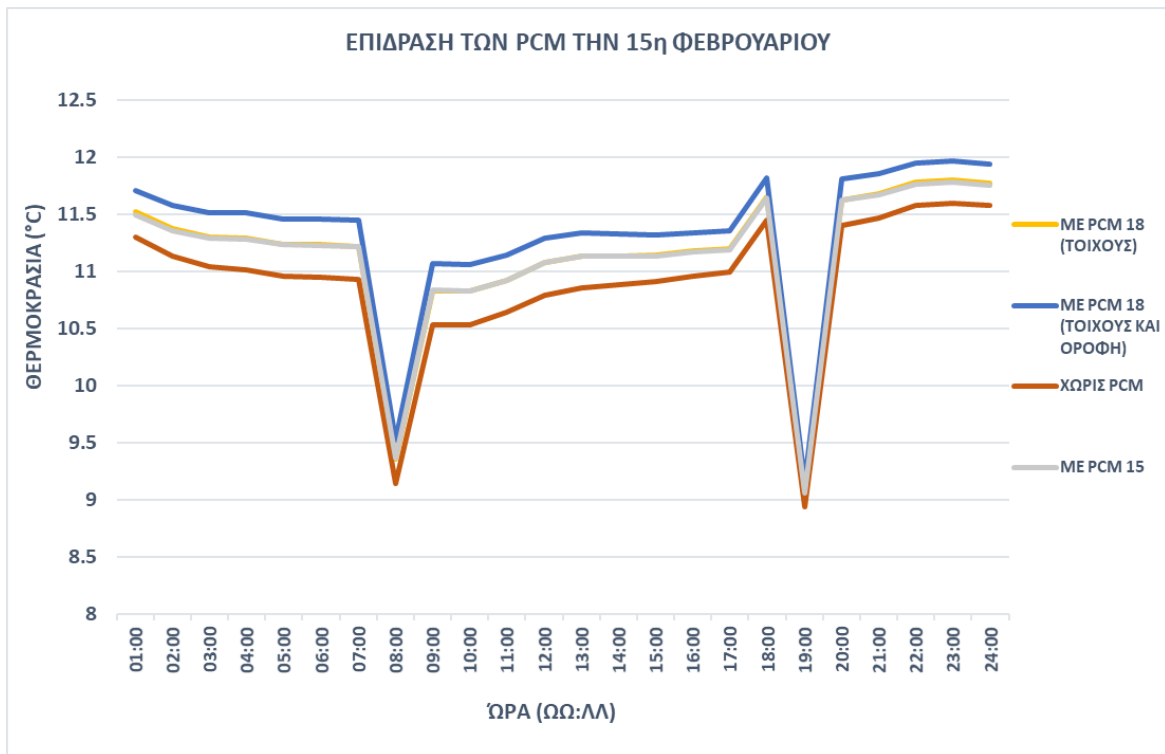
Από τον πίνακα φαίνεται ότι οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του κτιρίου είναι αρκετά μεγαλύτερες από εκείνες του περιβάλλοντος, για όλες τις ώρες και για τις τρεις εξεταζόμενες μέρες.



**Διάγραμμα 8:** Διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου κατά την 3<sup>η</sup> Δεκεμβρίου για κτίριο χωρίς PCM, με PCM 15, με PCM 18, με PCM 18 και σε οροφή



**Διάγραμμα 9:** Διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου κατά την 14<sup>η</sup> Ιανουαρίου για κτίριο χωρίς PCM, με PCM 15, με PCM 18, με PCM 18 και σε οροφή



**Διάγραμμα 10: Διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου κατά την 15<sup>η</sup> Φεβρουαρίου για κτίριο χωρίς PCM, με PCM 15, με PCM 18, με PCM 18 και σε οροφή**

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν απότομες πτώσεις της θερμοκρασίας, οι οποίες όμως δικαιολογούνται από το άνοιγμα των παραθύρων για φυσικό αερισμό του κτιρίου. Σε αντίθεση με τους καλοκαιρινούς μήνες τα παράθυρα παραμένουν για λίγο χρόνο ανοιχτά και δεν επηρεάζουν την επίδραση των PCM.

Κατά την 3<sup>η</sup> Δεκεμβρίου φαίνεται το PCM 18 να παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση στη θερμοκρασία από το PCM 15, ενώ και πάλι αποτελεσματικότερο με διαφορά φαίνεται να είναι το PCM 18 όταν τοποθετείται και στην οροφή. Όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου χωρίς PCM φτάνει τη πολύ μικρή τιμή 16,18°C στις 07:00, με το PCM 15 την ίδια ώρα η θερμοκρασία φτάνει στους 16,64° πετυχαίνοντας ελάχιστη αύξηση της θερμοκρασίας, το PCM 18 αυξάνει στους 17,54°C ,ενώ το PCM 18 όταν τοποθετείται και στην οροφή προκαλεί τη μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας με τιμή 18,66°C.

Κατά την 14<sup>η</sup> Ιανουαρίου η διακύμανση των θερμοκρασιών στο κτίριο είναι ίδια με την περίπτωση του Δεκεμβρίου. Όταν το εσωτερικό του κτιρίου χωρίς PCM η θερμοκρασία φτάνει τη πολύ μικρή τιμή 16,24°C στις 07:00, το PCM 15 αυξάνει στους 16,63°, το PCM 18 αυξάνει στους 17,57°C ,ενώ το PCM 18 όταν τοποθετείται και στην οροφή αυξάνει στους 18,67°C.

Κατά την 15<sup>η</sup> Φεβρουαρίου φαίνεται το PCM 15 να εμφανίζει την ακριβώς ίδια συμπεριφορά με το PCM 18. Η βελτιωμένη συμπεριφορά του PCM 15 τη 15<sup>η</sup> Φεβρουαρίου οφείλεται στις χαμηλές θερμοκρασίες, αφού όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4 καμία θερμοκρασία περιβάλλοντος εκείνη τη μέρα δε ξεπερνά τους 7°C . Βέλτιστη επίδραση στην εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει το PCM 18, αν τοποθετηθεί σε τοίχους και οροφή. Όταν το εσωτερικό του κτιρίου χωρίς PCM η θερμοκρασία φτάνει τη πολύ μικρή τιμή 10,84°C στις 07:00, το PCM 15 και το PCM 18 αυξάνουν στους 11,21°C ,ενώ το PCM 18 όταν τοποθετείται και στην οροφή αυξάνει στους 11,47°C.

### ***Κτίριο με σύστημα θέρμανσης-ψύξης***

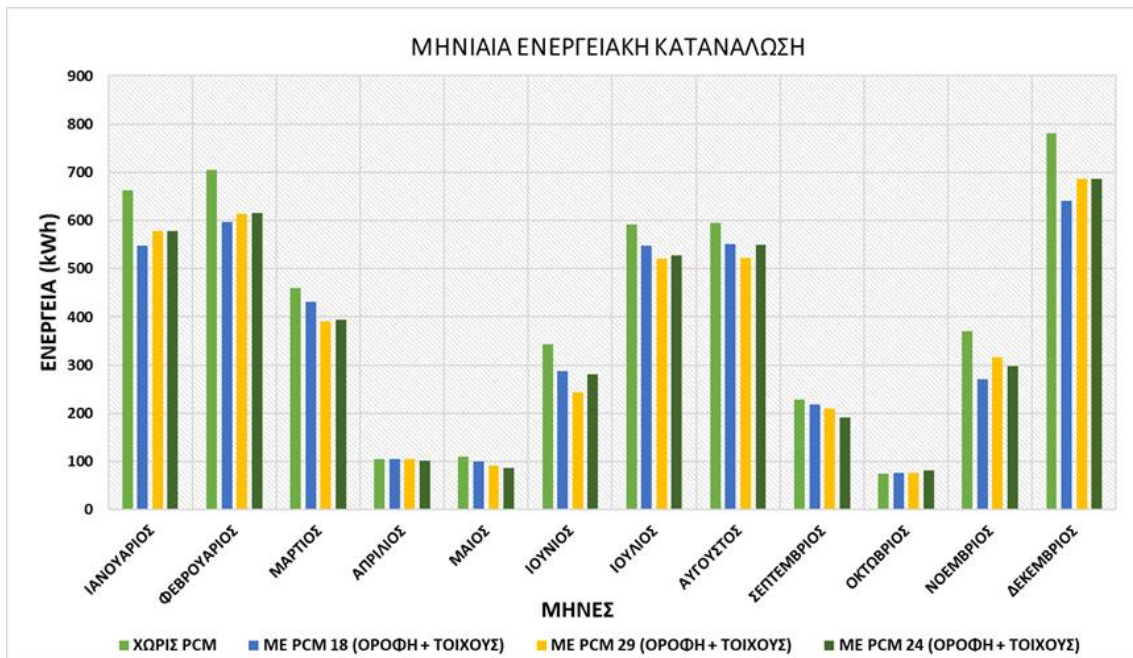
Κατά τις προσομοιώσεις που έγιναν για αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε ότι το σύστημα λειτουργεί όλο το χρόνο. Οι κατασκευές που συγκρίθηκαν και μελετήθηκαν αφορούν το απλό κτίριο χωρίς PCM, κτίριο με PCM 18, PCM 29 και PCM 24 τοποθετημένα μόνο σε τοίχους και τοποθετημένα σε τοίχους και οροφή. Το PCM 24 επιλέχθηκε καθώς είναι ένα υλικό αλλαγής φάσης που έχει σημείο τήξης με μέση θερμοκρασία.

Κατά την πρώτη προσομοίωση υπολογίστηκε η ενέργεια η οποία καταναλώνεται, για να καλύψει τα φορτία θέρμανσης και ψύξης για κάθε μήνα, για όλες τις παραπάνω κατασκευές. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε μήνα, για όλες τις κατασκευές και η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται για τη διάρκεια ενός έτους.

ΜΗΝΕΣ	ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)						
	ΧΩΡΙΣ PCM	ΜΕ PCM 18 (ΟΡΟΦΗ + ΤΟΙΧΟΥΣ)	ΜΕ PCM 29 (ΟΡΟΦΗ + ΤΟΙΧΟΥΣ)	ΜΕ PCM 24 (ΟΡΟΦΗ + ΤΟΙΧΟΥΣ)	ΜΕ PCM 18	ΜΕ PCM 29	ΜΕ PCM 24
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	662.068	547.837	577.626	577.942	631.554	620.248	620.567
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	704.291	596.141	613.684	614.523	641.216	655.715	656.348
ΜΑΡΤΙΟΣ	460.371	431.264	390.472	393.471	436.347	421.902	423.610
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	104.278	104.189	104.489	102.360	104.309	104.870	103.581
ΜΑΙΟΣ	110.048	100.078	91.447	85.990	106.346	98.733	92.341
ΙΟΥΝΙΟΣ	342.729	286.859	243.163	280.264	324.225	286.238	311.296
ΙΟΥΛΙΟΣ	591.887	547.082	521.148	526.679	564.225	564.826	563.871
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	595.694	551.201	522.870	550.107	565.821	561.554	564.947
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	227.523	218.001	209.891	191.043	212.437	212.135	206.533
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	75.162	75.447	77.065	81.763	74.825	75.829	77.819
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	369.713	270.387	316.391	297.305	308.884	341.957	342.548
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	780.827	640.714	686.873	686.831	710.902	733.940	733.920
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>5024.567</b>	<b>4369.201</b>	<b>4355.118</b>	<b>4388.280</b>	<b>4681.091</b>	<b>4677.946</b>	<b>4697.380</b>

*Πίνακας 5: Η ενέργεια που δαπανάται λόγω του συστήματος μηνιαία αλλά και κατά τη διάρκεια ενός έτους, για όλες τις εξεταζόμενες κατασκευές*

Φαίνεται ότι όταν τα PCM τοποθετούνται και στην οροφή και όχι μόνο στους τοίχους του κτιρίου, η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερη. Για να γίνει πιο αντιληπτή η επιρροή που έχει κάθε κατασκευή στα φορτία, κατασκευάστηκε το παρακάτω ραβδόγραμμα. Για τη δημιουργία του ραβδογράμματος λήφθηκαν υπόψη τα φορτία κάθε μήνα μόνο για τις περιπτώσεις που το κτίριο είχε PCM στους τοίχους και στην οροφή.



**Διάγραμμα 11 Μηνιαία ενεργειακή κατανάλωση για το απλό κτίριο και κτίριο με PCM 29, PCM 18, PCM 24 σε τοίχους και οροφή**

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, όποιο PCM και να χρησιμοποιήσουμε οδηγεί σε μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην ιδιότητα του PCM να αποθηκεύει θερμική μάζα και να ελευθερώνει ή να απορροφά ενέργεια, προς και από το κτίριο. Το PCM δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί όλο του το δυναμικό αποθήκευσης σε χαμηλότερη ή υψηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία τήξης του, μπορεί και πάλι όμως να έχει θετικές επιδράσεις στη θερμική άνεση του κτιρίου. Ορισμένοι μήνες όπως ο Απρίλιος και ο Οκτώβριος δεν επηρεάζονται καθόλου από την ύπαρξη των PCM. Τα φορτία όμως είναι έτσι και αλλιώς χαμηλά αυτούς τους μήνες, μάλλον γιατί οι θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών βρίσκονται μεταξύ του εύρους του θερμοστάτη (21°C-27°C) και δεν ενεργοποιείται το σύστημα, οπότε η ανάγκη μείωσή τους δεν είναι επιτακτική. Κατά τους χειμερινούς μήνες που τα φορτία θέρμανσης είναι απαιτητικά (600-800 kWh) φαίνεται και τα τρία PCM να μειώνουν τα φορτία με τα PCM 24 και PCM 29 να προκαλούν περίπου ίδια μείωση, και το PCM 18 να μειώνει περισσότερο από τα προηγούμενα. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες τα φορτία μειώνονται σε σχέση με του απλού σπιτιού (300-600 kWh), με το PCM 29 να προκαλεί την μεγαλύτερη μείωση. Τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα το PCM 24 με μικρή όμως διαφορά από τα άλλα δύο.

Έπειτα αθροίστηκαν ξεχωριστά τα φορτία θέρμανσης και τα φορτία ψύξης για τη διάρκεια ενός έτους, για όλες τις κατασκευές. Ακόμη βρέθηκε το ποσοστό μείωσης της συνολικής ενέργειας που συνεπάγεται κάθε κατασκευή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

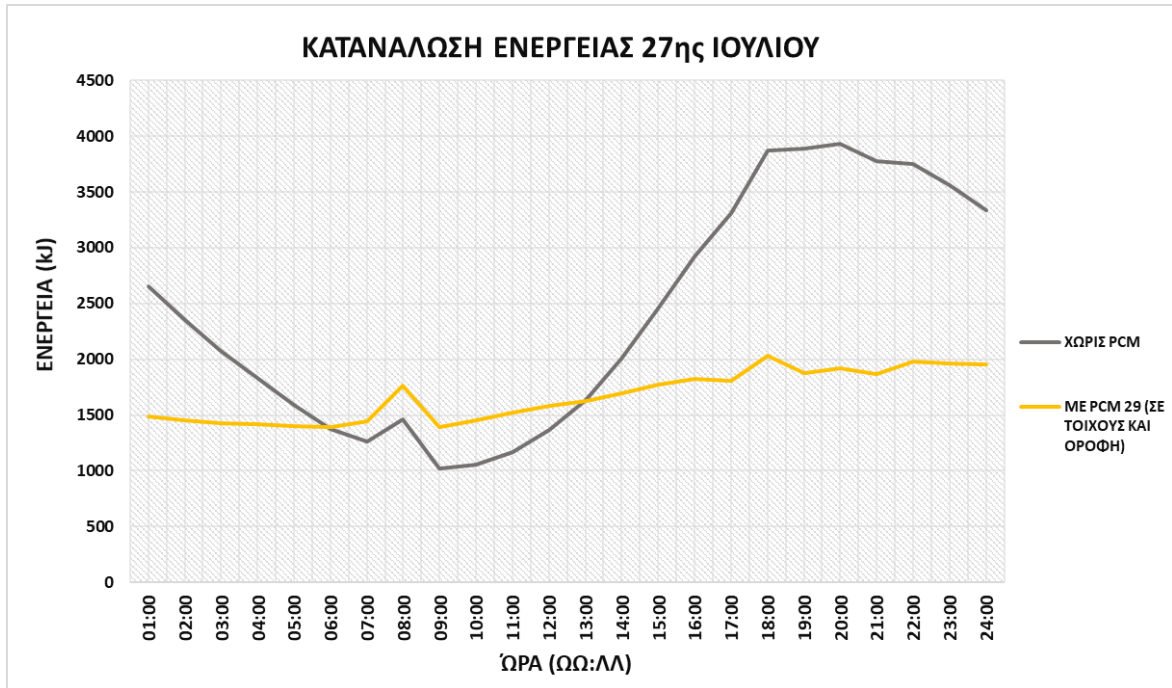
	ΧΩΡΙΣ PCM	PCM 18 (ΣΕ ΤΟΙΧΟΥΣ ΚΑΙ ΟΡΟΦΗ)	PCM 18 (ΜΟΝΟ ΣΕ ΤΟΙΧΟΥΣ)	PCM 29 (ΣΕ ΤΟΙΧΟΥΣ ΚΑΙ ΟΡΟΦΗ)	PCM 29 (ΜΟΝΟ ΣΕ ΤΟΙΧΟΥΣ)	PCM 24 (ΣΕ ΤΟΙΧΟΥΣ ΚΑΙ ΟΡΟΦΗ)	PCM 24 (ΜΟΝΟ ΣΕ ΤΟΙΧΟΥΣ)
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ (kWh)</b>	2953.90	2531.42	2721.58	2560.58	2749.59	2563.34	2750.64
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΨΥΞΗ (kWh)</b>	2070.66	1837.77	1959.50	1794.53	1928.35	1824.93	1946.73
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)</b>	5024.61	4369.20	4681.09	4355.12	4677.94	4388.28	4697.38
<b>ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (%)</b>	-	13.04	6.83	13.32	6.89	12.66	6.50

**Πίνακας 6: Καταναλισκόμενη ενέργεια για ψύξη και θέρμανση κατά τη διάρκεια ενός έτους και ποσοστιαία εξοικονόμηση ενέργειας, για όλες τις περιπτώσεις**

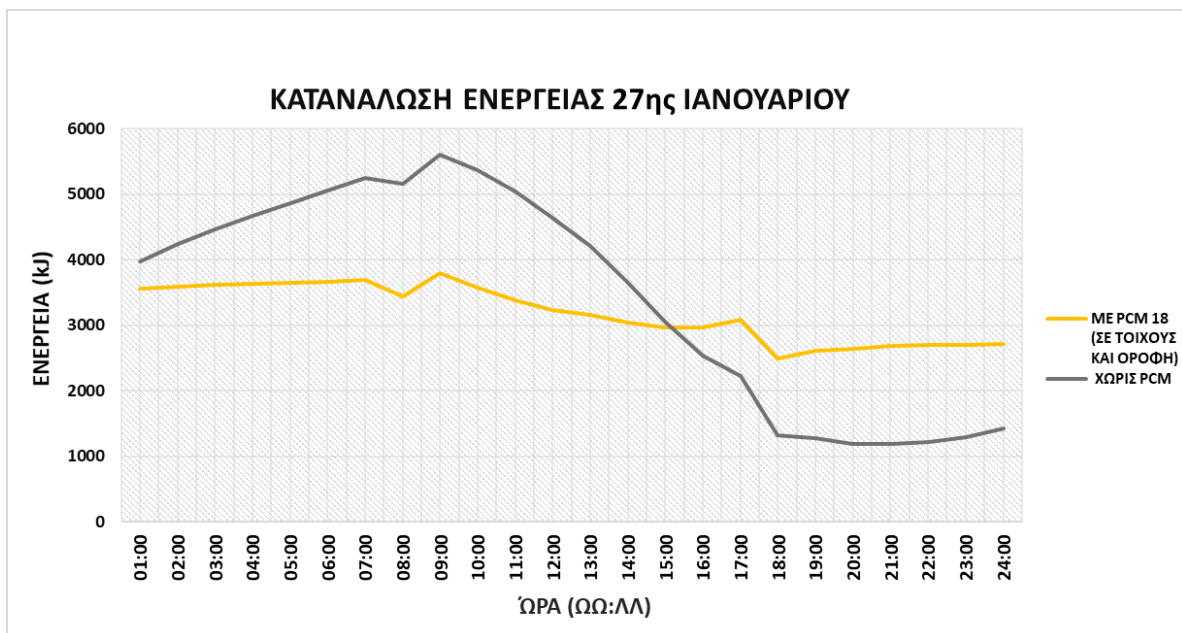
Τη μέγιστη μείωση ενέργειας ψύξης επιτυγχάνει το PCM 29 (σε τοίχους και οροφή), μειώνοντας από 2070,66 kWh σε 1794,53 kWh, ενώ τη μέγιστη μείωση ενέργειας θέρμανσης επιτυγχάνει το PCM 18 (σε τοίχους και οροφή), από 2953,66 kWh σε 2531,42 kWh.

Τη βέλτιστη εξοικονόμηση συνολικής ενέργειας επιτυγχάνει το PCM 29 (σε τοίχους και οροφή), με πολύ μικρή διαφορά από το PCM 18 (σε τοίχους και οροφή). Οι κατασκευές που δεν περιέχουν PCM στην οροφή, εμφανίζουν σχεδόν τη μισή μείωση του φορτίου.

Τέλος έγιναν προσωμοιώσεις για το PCM 29 (σε τοίχους και οροφή) και το PCM 18 (σε τοίχους και οροφή) για συγκεκριμένη μέρα του Ιουλίου και του Ιανουαρίου αντίστοιχα, για να παρατηρηθεί η διακύμανση της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια μίας μέρας. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την περίπτωση του απλού κτιρίου. Επιλέχθηκαν οι μέρες 27<sup>η</sup> Ιουλίου και 27<sup>η</sup> Ιανουαρίου. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τα διαγράμματα ήταν οι ωριαίες τιμές της καταναλισκόμενης ενέργειας ,κατά τη διάρκεια της εκάστοτε μέρας.



**Διάγραμμα 12:** Διακύμανση του φορτίου κατά την 27<sup>η</sup> Ιουλίου, για απλό κτίριο και για κτίριο με PCM 29 (σε τοίχους και οροφή)



**Διάγραμμα 13** Διακύμανση του φορτίου κατά την 27<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για απλό κτίριο και για κτίριο με PCM 18 (σε τοίχους και οροφή)



Κατά την 27<sup>η</sup> Ιουλίου είναι εμφανής η μείωση του φορτίου από το PCM 29. Φαίνεται το PCM να σταθεροποιεί την τιμή του φορτίου, γύρω στα 1500 kJ. Μεταξύ των ωρών 06:00-12:00, οι τιμές κατανάλωσης ενέργειας της κατασκευής με το PCM είναι λίγο μεγαλύτερες από του απλού κτιρίου. Το πιο πιθανό είναι τότε να υφίσταται τη διαδικασία στερεοποίησής του, με αποτέλεσμα να αποδίδει θερμότητα και οι ανάγκες για ψύξη άρα και η κατανάλωση να αυξάνονται. Ωστόσο η αύξηση του φορτίου στο διάγραμμα μοιάζει ασήμαντη σε σχέση με την μείωση του.

Κατά την 27<sup>η</sup> Ιανουαρίου παρουσιάζεται μείωση της κατανάλωσης αλλά και αύξηση (14:00-24:00) η οποία δε μοιάζει τόσο ασήμαντη όσο στο προηγούμενο διάγραμμα. Η αύξηση του φορτίου, όπως και προηγουμένως, εξηγείται από τη διαδικασία τήξης του PCM, κατά την οποία απορροφά μεγάλο ποσό θερμότητας με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ανάγκη φορτίου θέρμανσης. Μπορεί το συνολικό κέρδος ενέργειας τη συγκεκριμένη μέρα να είναι μικρό, έχει επιτευχθεί όμως μείωση του μέγιστου φορτίου. Και κατά τη διάρκεια αυτής της μέρας το PCM τείνει να σταθεροποιήσει το φορτίο, γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή( 3000 kJ).



## 10 Συμπεράσματα

### 10.1 Συμπεράσματα της μελέτης

Στα πλαίσια της εργασίας, έγινε σχεδιασμός και προσομοίωση ενός απλοποιημένου κτιρίου με τη χρήση των λογισμικών Sketch Up και Energy Plus αντίστοιχα. Εξετάστηκαν διαφορετικές κατασκευές του κτιρίου, σε καθεμία από τις οποίες του κελύφους του κτιρίου περιείχε υλικό αλλαγής φάσης με διαφορετικό σημείο τήξης ή τοποθετημένο σε διαφορετικά δομικά στοιχεία του κελύφους (τοίχοι, οροφή). Αρχικά έγινε μελέτη του απλοποιημένου κτιρίου χωρίς σύστημα θέρμανσης, κατά την οποία συγκρίθηκαν για κάθε κατασκευή οι ωριαίες θερμοκρασίες που προκύπτουν στο εσωτερικό του κτιρίου. Ενώ έπειτα έγινε μελέτη του απλοποιημένου κτιρίου με σύστημα θέρμανσης-ψύξης, κατά την οποία εξετάστηκε η ενέργεια που καταναλώνει το σύστημα προκειμένου να καλύψει τα ψυκτικά και θερμικά φορτία. Για κάθε κατασκευή προέκυψαν διαφορετικά συμπεράσματα.

*Για το κτίριο χωρίς σύστημα θέρμανσης ψύξης, προέκυψαν τα εξής:*

Τα PCM 27 και PCM 29 βελτιώνουν τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου που δοκιμάστηκαν. Το PCM 27 παρουσιάζει βέλτιστη μέση και μέγιστη μείωση θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα τους μήνες Μάιο και Ιούνιο, ενώ το PCM 29 παρουσιάζει αποτελεσματικότερη συμπεριφορά τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, που οι θερμοκρασίες τις περισσότερες ώρες τις ημέρας ξεπερνούν τους 30°C. Έπειτα δοκιμάστηκε η τοποθέτηση PCM 29 και στην οροφή του κτιρίου, η οποία αποδείχτηκε άκρως αποτελεσματική με τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου να μειώνεται αρκετά, και καμία ώρα των ημερών που εξετάστηκαν να μην ξεπερνά τους 30°C.

Κατά τη χειμερινή περίοδο εξετάστηκαν τα PCM 15 και PCM 18. Αποδείχθηκε ότι και τα δύο PCM είχαν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου. Το PCM 18 φάνηκε να έχει καλύτερη επίδραση κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο, ενώ το PCM 15 εμφάνισε καλύτερη απόδοση το μήνα Φεβρουάριο, λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Για το PCM 18 δοκιμάστηκε η τοποθέτησή του και στην οροφή του κτιρίου. Με αυτή τη κατασκευή το κτίριο παρουσίασε τη βέλτιστη θερμική συμπεριφορά, αφού η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου παρουσίαζε αύξηση μέχρι και 2,5°C.

*Για το κτίριο με σύστημα θέρμανσης-ψύξης, προέκυψε:*

Για τις προσομοιώσεις του κτιρίου με το σύστημα δοκιμάστηκαν τα PCM 18, PCM 29 , PCM 24 τοποθετημένα σε τοίχους και τοποθετημένα σε οροφή και οροφή. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φάνηκε, ότι όλες οι κατασκευές είχαν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας του συστήματος. Όταν τα PCM ήταν τοποθετημένα στην οροφή και στους τοίχους είχαν αποτελεσματικότερη επίδραση στη μείωση των φορτίων, από όταν ήταν τοποθετημένα μόνο στους τοίχους. Η περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας επιτεύχθει με το PCM 29 με ποσοστό 13,32%, ακολουθεί το PCM 18 με ελάχιστη διαφορά με 13,04% και τελικά το PCM 24 με 12,66%.

Η τοποθέτηση υλικού αλλαγής φάσης στο κέλυφος του κτιρίου οδήγησε σε βελτιωμένη θερμική άνεση του κτιρίου κατά τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο, ενώ μείωσε τη κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ψύξης-θέρμανσης. Η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας συνεπάγεται άμεσα και μείωση των εκπομπών ρύπων CO<sub>2</sub>. Χαρακτηριστικά στη παρούσα διπλωματική επετεύχθη, με χρήση του PCM 29, μείωση κατά 669,49 kWh, για την διάρκεια ενός έτους. Για την ενέργεια που καταναλώνεται από ένα τέτοιο σύστημα, 669,49 kWh ισοδυναμούν με 629,32 kg εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub> [75]. Συνεπώς φαίνεται η γενικευμένη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης στις κτιριακές εφαρμογές, να είναι μια αποτελεσματική λύση για τη μείωση των εκπομπών ρύπων που οφείλονται στον κτιριακό τομέα.

Η σημερινή ενεργειακή κατάσταση, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση, οι κλιματικές αλλαγές, η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και η όλο και πιο απαιτητική περιβαλλοντική νομοθεσία εξασφαλίζουν στα υλικά αλλαγής φάσης μια εγγυημένη θέση στην παγκόσμια τεχνολογική, επιστημονική και οικονομική έρευνα και στις κτιριακές εφαρμογές.

## 10.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Πέραν της συγκεκριμένης μελέτης, υπάρχουν ποικίλα πεδία που μπορούν να εξεταστούν στο μέλλον όσον αφορά τα υλικά αλλαγής φάσης σε κτιριακές εφαρμογές:

- Η μελέτη κτιρίου με χρήση υλικών αλλαγής φάσης με διαφορετικά σημεία τήξης, ανάλογα με το δομικό στοιχείο στο οποίο τοποθετούνται στο κέλυφος. Για παράδειγμα στην οροφή τοποθέτηση ενός υλικού με σημείο τήξης μεγαλύτερης θερμοκρασίας από εκείνο που τοποθετείται στους τοίχους.
- Η διερεύνηση ενός παθητικού ηλιακού συστήματος (τοίχος Trombe-Michel) με προσθήκη υλικού αλλαγής φάσης.
- Η εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης όχι σε ένα απλοποιημένο κτίριο, αλλά σε ένα πολύπλοκο κατοικήσιμο κτίριο
- Η προσομοίωση του υλικού αλλαγής φάσης όχι σαν ενιαία μονοκόμματη στρώση, αλλά σαν πρόσθετο με μικροκάψουλες στο τσιμέντο ή σαν επίστρωση όπου βρίσκεται μακροενθυλακωμένο με κενά αέρος ανάμεσα στις κάψουλες.



## Βιβλιογραφία

- [1] BP, "BP Statistical Review of World Energy June 2015," London, 2015.
- [2] BP, "BP Energy Outlook 2040," London, 2018.
- [3] "No Title." [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- [4] IEA, "ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS IN BUILDING CODES ,ENERGY EFFICIENCY POLICIES FOR NEW BUILDINGS," Paris, 2008.
- [5] S. Roaf, D. Crichton, and F. Nicol, Adapting Buildings and Cities for Climate Change: A 21st Century Survival Guide. Oxford: Architectural Press, 2005.
- [6] L. D. D. Harvey, A Handbook on Low-Energy Buildings and District-Energy Systems. London: Earthscan, 2006.
- [7] European Environment Agency, "Total Final Energy Consumption by Sectors in the EU," 2012. [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/final-energy-consumption-by-sector-5>.
- [8] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). [Online]. Available: <http://www.cres.gr/energyhubforall/Energieiaki%20apodosi%20ktirion.html>
- [9] Κλειώ Ν. Αξαρηλή, ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ, 2007.
- [10] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). [Online]. Available: <http://www.cres.gr/energyhubforall/2.2.1.html>
- [11] Ανδρεαδάκη Ελένη, Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Περιβάλλον και Βιωσιμότητα
- [12] "No Title." [Online]. Available: <https://ker85.webnode.gr/%CF%85%CF%80%CE%B7%CF%81%CE%B5%CF%83%CE%AF%CE%B5%CF%82/energy/>
- [13] "No Title." [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/>
- [14] "No Title." [Online]. Available: <http://www.technotec.gr/76095410.el.aspx>
- [15] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). [Online]. Available: [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_active\\_solar.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_active_solar.htm)
- [16] "No Title." [Online]. Available: <https://www.energy.gov/energysaver/energy-efficient-home-design/passive-solar-home-design>

- [17] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). [Online]. Available: [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_bioclimatic\\_passive.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_bioclimatic_passive.htm)
- [18] “No Title.” [Online]. Available: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSf7dJpIIH-qK8sLoXi4oK1sulirm1vj2HQZoT5T6o0XXeAYTyJ>
- [19] ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ Μαθήματος «Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων», Χ.Τζιβανίδης.
- [20] “No Title.” [Online]. Available: <http://passivesolar.sustainablesources.com/>
- [21] “No Title.” [Online]. Available: [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/pathitika\\_iliaka\\_systimata\\_emmeso\\_kedros\\_iliakoi\\_toixoi.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kedros_iliakoi_toixoi.htm)
- [22] “No Title.” [Online]. Available: [http://building-lab.blogspot.com/2014/03/blog-post\\_15.html](http://building-lab.blogspot.com/2014/03/blog-post_15.html)
- [23] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.ktirio.gr/%CE%B5%CF%86%CE%B1%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CE%B5%CF%82/%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7/%CF%84%CE%BF%CE%AF%CF%87%CE%B7%CF%82-trombe>
- [24] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.wwf.gr/>
- [25] “No Title.” [Online]. Available: [http://users.sch.gr/kpara/ape2009\\_10/sun\\_energy2.html](http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/sun_energy2.html)
- [26] Wikipedia. [Online]. Available: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B1%CF%84%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7\\_%CF%84%CE%B7%CF%82\\_%CF%8D%CE%BB%CE%B7%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B1%CF%84%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7_%CF%84%CE%B7%CF%82_%CF%8D%CE%BB%CE%B7%CF%82)
- [27] Wikipedia. [Online]. Available: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%81%CE%AF%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%BF\\_%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%BF\\_\(%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE\)](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%81%CE%AF%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%BF_%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%BF_(%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE))
- [28] Daikin. [Online]. Available: [https://www.daikin.gr/el\\_gr/faq/what-is-the-difference-between-sensible-and-latent-heat-.html](https://www.daikin.gr/el_gr/faq/what-is-the-difference-between-sensible-and-latent-heat-.html)
- [29] Μαχαίρα Ελένη, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ PCM, Αθήνα 2010
- [30] Sharma A et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and application, Renew Sustain Energy Rev, 2008.



- [31] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules:A review; 2007.
- [32] Belen Zalba, Jose Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: materials heat transfer analysis and applications,2002.
- [33] "No Title." [Online]. Available: [http://www.econ3.gr/readmore.php?article\\_id=51771295788153](http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153)
- [34] "No Title." [Online]. Available: <https://apothesis.lib.teicrete.gr/bitstream/handle/11713/8472/GialitakisIoannis2017.pdf?sequence=1>
- [35] Zhang Yinping, Zhou Guobing, Lin Kunping, Zhang Qunli, Di Hongfa, "Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook", Building and Environment 2007; 42: 2197-2209.
- [36] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009; 13: 318–345.
- [37] D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, E. Ghanbari, "Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard", Solar energy materials 1991;22(2-3):231-42.
- [38] P. Schossig, H. M. Henning, S. Gschwander, T. Haussmann, "Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials", Solar Energy Materials and Solar Cells 2005; 89: 297-306.
- [39] M. Zhang, A.M. Mario, B.K. Jennifer, "Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings", International Journal of Energy Research 2005; 29: 795-809.
- [40] M.N.A Hawlader, M.S Uddin, M.M Khin, "Microencapsulated PCM thermal energy storage system", Applied Energy 2003; 74: 195–202.
- [41] "No Title." [Online]. Available: <https://thermttest.com/applications/phase-change-materials-thermal-conductivity/thermal-conductivity-applications-pcm-change-diagram>
- [42] "No Title." [Online]. Available: <https://www.greenbuildingadvisor.com/article/storing-heat-in-walls-with-phase-change-materials>
- [43] "No Title." [Online]. Available: Alvaro de Gracia, Luisa F. Cabeza, Energy and Buildings: phase change materials and thermal energy storage for buildings, Volume 103, 15 September 2015, Pages 414-419.

- [44] Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj, —A review on phase change energy storage: materials and applications|| , Energy Conversion and Management 45 (2004) 1597-1615 Σελίδα 374
- [45] Francis Agyenim, Neil Hewitt, Philip Eames, Mervyn Smyth, —A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)|| , Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 615-628.
- [46] Ρίζος Νικόλαος, Διπλωματική εργασία : Προσδιορισμός θέσης διεπιφάνειας στερεοούυγρου, σε Υλικό Αλλαγής Φάσης με το εμπορικό πακέτο Fluent,Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009
- [47] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state – of –the – art review, Energy and Buildings, 42 (2010) 1361 – 1368
- [48] Harald Mehling, Luisa F. Cabeza: Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications, Springer, New York, 2008
- [49] Vineet Veer Tyagi and D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, Volume 11, Issue 6, 1146-1166.
- [50] Stritih U, Novak P, Thermal storage of solar energy in the wall for building ventillation.Second workshop IEA, Advanced thermal energy storage techniques feasibility studies and demonstration projects , Ljubjana, Slovenia, April 2002).
- [51] Stovall TK, Tomlinson JJ. What Are The Potential Benefits of Including Latent Storage in Common Wallboard?. Journal of Solar Energy Engineering 1995; 117, p. 318-325.
- [52] Salyer I, Sircar A. Development of PCM wallboard for heating and cooling of residential buildings. Thermal Energy Storage Research Activities Review, US Department of Energy, New Orleans; 1989.
- [53] Shapiro MM, Feldman D, Hawes DD, Banu D. PCM thermal storage in wallboard, Proc. 12th Passive Solar Conference, Portland, OR, ISES, p. 48-58; 1987.
- [54] Neeper DA, Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, Solar Energy, 2000.
- [55] Feustel HE, Stetiu C., Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application, Lawrence Berkeley National laboratory, 1997.
- [56] Lee T, Hawes DW, Banu D, Feldman D (2000) Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. Solar Energy Mater Solar Cells 62:217–237.
- [57] Hadjieva, M., Stoykov, R. and Filipova, T., 2000/1/2. Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. Renewable Energy, 19(1-2), 111-115.

- [58] JM Gutherz, ME Schiler, "A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings", *Energy Sources* 1991; 13: 39–54.
- [59] I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, M. Founti, Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls, Volume 61, March 2013, Pages 93-103.
- [60] Na Zhu, Zhenum Ma, Shengwei Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials.
- [61] JM Gutherz, ME Schiler, "A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings", *Energy Sources* 1991; 13: 39–54.
- [62] T. Kodo, T. Ibamoto, "Research on using the PCM for ceiling board", IEA ECESIA, Annex 17, 3rd workshop, Tokyo, Japan. October 1–2, 2002.
- [63] Kissok JK, Hannig JM, Whitney TI, Drake ML, Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings, Proceedings of 1998 international solar energy conference, New York ,USA , 1998.
- [64] "No Title." [Online]. Available: <https://www.insolcorp.com/author/pcm24m/>
- [65] Markus Koschenz, Beat Lehmann., Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy Build* 2004;36:567–78.
- [66] Vakilatogjar S., Saman M., Domestic heating and cooling with thermal storage.Eight international conference on thermal energy storage , Stuttgart, Germany, 2000
- [67] Energy Plus. [Online]. Available: <https://energyplus.net/>
- [68] Energy Plus. [Online]. Available: [https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs\\_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf)
- [69] Sketch Up. [Online]. Available: <https://www.sketchup.com/programs/sketchup-story>
- [70] Energy Plus. [Online]. Available: [https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs/pdfs\\_v8.3.0/InputOutputReference.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs/pdfs_v8.3.0/InputOutputReference.pdf)
- [71] ASHRAE. [Online]. Available: [http://www.aicarr.org/Documents/Editoria\\_Libri/ASHRAE\\_PDF/STD55-2004.pdf](http://www.aicarr.org/Documents/Editoria_Libri/ASHRAE_PDF/STD55-2004.pdf)

- [72] T.E.E: [Online]. Available:  
[http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC\\_WORK/GR\\_ENERGEIAS/kenak/files/TOTEE\\_20701-1\\_2017\\_TEE\\_1st\\_Edition.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak/files/TOTEE_20701-1_2017_TEE_1st_Edition.pdf)
- [73] PhaseChage: [Online]. Available: <https://phasechange.com/>
- [74] PhaseChage: [Online]. Available: <https://phasechange.com/technology/data-sheets/>
- [75] "No Title." [Online]. Available: <https://carbonpositivelife.com/co2-per-kwh-of-electricity/>

