



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**«ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ
ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ
ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS»**

Διπλωματική Εργασία
Γαρυφαλιά Κλουσάκου

Επιβλέπων: Μαρία Φούντη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2012



**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	9
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	12
1.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟ ΑΙΣΘΗΤΗ ΜΟΡΦΗ.	15
1.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΜΟΡΦΗ.....	21
1.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.	24
1.3 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	27
1.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	28
1.3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.	29
1.3.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	35
1.3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ.	37
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1 ^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	43
2.1 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΥΑΦ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	43
2.1.1 PCM ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ	43
2.1.2 PCM ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΔΟΔΑΠΕΔΙΑΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	79
2.1.3 PCM ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΡΟΦΗΣ ΓΙΑ ΨΥΞΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗ.	84
2.1.4 PCM ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΜΟΝΑΔΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ-ΨΥΞΗΣ.....	89
2.1.5 PCM ΔΟΚΟΙ ΟΡΟΦΗΣ.	90
2.1.6 PCM ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΠΑΡΑΘΥΡΑ.....	92
2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ PCM- ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	95
2.2.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ Stefan-ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	95
2.2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ.....	97
2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΑΦ.....	106
2.3.1 TRNSYS.....	106
2.3.2 Energy Plus	107
2.3.3 ESP-r.....	109



2.3.4 BSim	111
2.3.5 RADCOOL	113
2.3.6 FLUENT Software	115
2.3.7 COMSOL.....	116
2.3.8 PCM express	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2 ^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	132
3.1 ΓΝΩΡΙΜΙΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ TRNSYS	132
3.2 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ.....	133
3.2.1 TRNSYS Simulation Studio.	133
3.2.2 TRNBuild-Type56.....	136
3.2.3 TRNEdit-TRNSED	137
3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΜΕ ΥΑΦ -ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ PCM TYPES ΣΤΟ TRNSYS	138
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3 ^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	140
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	141
4.1 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΤΡΑΣ ΩΣ ΜΕΣΟ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ- ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΟΙΚΙΣΚΩΝ.....	141
4.2 ΟΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ALICANTE.	143
4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΟΙΚΙΣΚΩΝ.....	145
4.3.1 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ.	146
4.3.2 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ.....	148
4.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΩΝ ΟΙΚΙΣΚΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	149
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4 ^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	152
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	153
5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΟΙΚΙΣΚΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ TRNSYS 16.	153
5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ TRNSYS 16.	154
5.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ PCM ΜΟΝΤΕΛΩΝ (PCM Types) ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΠΩΣ ΑΥΤΑ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΟ TRNSYS ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ Types.	159
5.3.1 PCM Type 204.....	159



5.3.2. PCM Type 241.....	171
5.3.3 PCM Type 260.....	172
5.3.4 PCM with MATLAB code	182
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5 ^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	191
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	193
6.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ PCM ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΟΥ TRNSYS.....	193
6.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TRNBuild ΤΟΥ SCHEDULE 1- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PCM ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	197
6.1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TRNBuild ΤΟΥ SCHEDULE 2- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PCM ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	200
6.1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TRNBuild ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ 20°C ΩΣ ΣΤΑΘΕΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PCM ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	202
6.1.4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TRNBuild ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ 27°C ΩΣ ΣΤΑΘΕΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PCM ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	205
6.1.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	206
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6 ^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	208



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιτακτική ανάγκη για κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων στον κτιριακό τομέα ώθησε στην ανάπτυξη νέων και οικονομικών τεχνολογιών. Τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας και ειδικότερα τα Υλικά Αλλαγής Φάσης, αποτελούν ίσως την πιο προηγμένη μορφή τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας. Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε δομικά υλικά και κτιριακά συστήματα παρέχει στο κτίριο ικανοποιητικότερα επίπεδα θερμικής άνεσης καθώς διευκολύνει τη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ παράλληλα συνεισφέρει στην εξοικονόμηση ενέργειας χάρη στη μετατόπιση των φορτίων σε περιόδους μη αιχμής. Η επιλογή του κατάλληλου ΥΑΦ, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητές του και το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας, αποτελεί παράγοντα ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η συμπεριφορά των ΥΑΦ που συναντώνται στις κτιριακές εγκαταστάσεις μοντελοποιείται με χρήση λογισμικών προσομοίωσης ή υπολογιστικών μοντέλων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των υπολογιστικών εργαλείων του TRNSYS τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της θερμικής απόκρισης κτιρίων τα δομικά στοιχεία των οποίων περιέχουν ΥΑΦ. Τρία διαφορετικά υπολογιστικά μοντέλα ενσωματώθηκαν στην πλατφόρμα του TRNSYS στα πλαίσια της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς των πρότυπων οικίσκων της Alicante. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS 16 με χρήση των PCM Types 204, 260 και του υπολογιστικού κώδικα MATLAB, ο οποίος αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα, όπως αυτά παραχωρήθηκαν από το Ινστιτούτο της AIDICO, προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία των μοντέλων και η ακρίβεια με την οποία αποδίδουν τη θερμοκρασιακή διακύμανση στο εσωτερικό απλών κατασκευών που περιέχουν PCM στο δομικό τους υλικό. Στα πλαίσια της εργασίας εντοπίστηκαν και σχολιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε υπολογιστικού εργαλείου, ενώ προτάθηκαν και λύσεις οι οποίες θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη λειτουργία τους.



ABSTRACT

The continuous increase of energy requirements in buildings urged scientists and engineers to develop efficient and economical technologies. Thermal energy storage systems using Phase Change Materials have been recognized as one of the advanced energy technologies in enhancing the sustainability of buildings. PCM incorporation in building materials and energy systems provides the potential for a better indoor thermal comfort for occupants due to the reduced indoor temperature fluctuations and lower energy consumption due to the load shifting. It has been demonstrated that for the implementation of a latent heat storage system in a building construction, the choice of the appropriate PCM and the heat transfer mechanism in the material play an important role. The PCM behavior (heat transfer mechanism) in building envelopes and products is modeled using the available simulation models or commercial tools.

The scope of the present Diploma Thesis is to evaluate TRNSYS simulation models which are used to simulate thermal performance of buildings with PCM enhanced construction materials. Three different PCM Types were implemented in TRNSYS 16 for the simulation of the thermal behavior of experimental pilot house stations located in Alicante, Spain. The simulation results from TRNSYS 16 using PCM Types 204, 260 and the simulation MATLAB code were compared with the experimental data, in order to evaluate the accuracy and reliability of the simulation tools regarding the thermal behavior of simple PCM constructions. The advantages and disadvantages of each simulation model were discussed and improvements concerning their function were proposed.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία σχεδιάστηκε, εξελίχθηκε και ολοκληρώθηκε κατά το Ακαδημαϊκό Έτος 2011-2012 σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση των υπολογιστικών εργαλείων του TRNSYS τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της θερμικής απόκρισης κτιρίων τα δομικά στοιχεία των οποίων περιέχουν Υλικά Αλλαγής Φάσης.

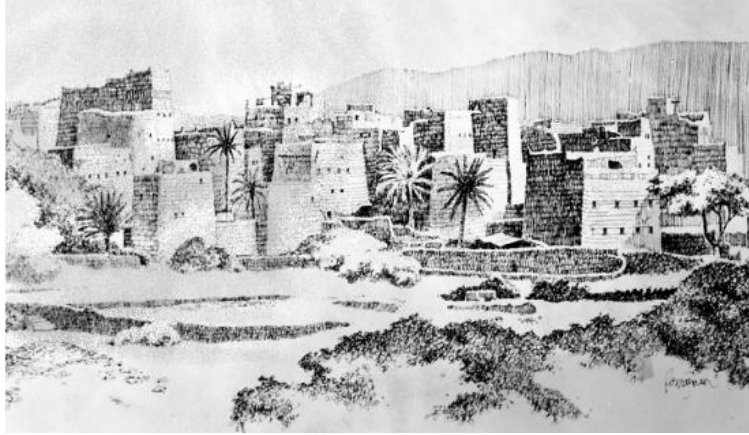
Στο σημείο αυτό θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς στην επιβλέπουσα καθηγήτρια κα Μαρία Φούντη που μου εμπιστεύτηκε το θέμα και ήταν πολύτιμος αρωγός καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής του. Ευχαριστώ ειλικρινά και θερμά την Υποψήφια Διδάκτορα Μαριάννα Σταματιάδου για την αποτελεσματική, συνεχή και αμέριστη βοήθειά της κατά την υλοποίηση του εν λόγω Διπλωματικού πονήματος. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το team του Εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που όλο αυτό το διάστημα μου εξασφάλισε πρακτικά, ψυχολογικά και ηθικά άριστες συνθήκες για τη διεκπεραίωση της εργασίας μου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οικοδόμηση των κτιρίων χαρακτηριζόταν ανέκαθεν από προνοητικότητα όσον αφορά στην αντιμετώπιση των κλιματολογικών συνθηκών. Η ίδια η κατασκευή των οικοδομημάτων παρείχε ικανοποιητικά επίπεδα θερμικής άνεσης διατηρώντας τον εσωτερικό χώρο του κτιρίου δροσερό τους θερινούς μήνες και θερμό την χειμερινή περίοδο. Λόγω των διαφορετικών κλιματολογικών συνθηκών, η αρχιτεκτονική των κτιρίων διαφοροποιείται ανά περιοχή παγκοσμίως. Για παράδειγμα σε κράτη όπου το κλίμα είναι αρκετά θερμό και χαρακτηρίζεται από έντονη υγρασία, τα κτίρια διαθέτουν μεγάλα παράθυρα, παραθυρόφυλλα, στέγαστρα για σκίαση, τοιχοποιία φωτεινού χρώματος και ψηλές οροφές. Τα μεγάλα παράθυρα επιτρέπουν επαρκή αερισμό, τα παραθυρόφυλλα και τα στέγαστρα παρέχουν προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία και τη βροχή και οι ανοιχτόχρωμοι τοίχοι ελαχιστοποιούν το θερμικό κέρδος. Σε περιοχές με ψυχρό κλίμα η κατασκευή των κτιρίων διαφέρει σημαντικά. Τα οικοδομήματα χαρακτηρίζονται από συμπαγή κατασκευή και πολλές φορές επιλέγεται στην τοιχοποιία ξύλο αντί για πέτρα, προκειμένου να ενισχυθεί η θερμική αντίσταση του κτιρίου. Οι οροφές κατασκευάζονται χαμηλά, προκειμένου να διατηρείται ο θερμός αέρας συγκεντρωμένος στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ υπάρχουν ελάχιστα παράθυρα, καθώς η συμβολή τους στο θερμικό κέλυφος είναι αμελητέα.[1]



Σχήμα 1.1.1: Απεικόνιση χωριού της Υεμένης με θερμό και ξηρό κλίμα.- Οικοδομήματα συμπαγούς κατασκευής, με μικρά παράθυρα, ανοιχτόχρωμη τοιχοποιία κι επίπεδες στέγες. Τα σπίτια κατασκευάζονται πλησίον μεταξύ τους για την επίτευξη αμοιβαίας σκίασης. [1]



Σχήμα 1.1.2: Απεικόνιση ανακατασκευασμένης ιστορικής κατοικίας στο Dubai.-Οι δίοδοι αέρα (ανοίγματα στην επένδυση) του κτιρίου επιτρέπουν τον φυσικό αερισμό του. [1]

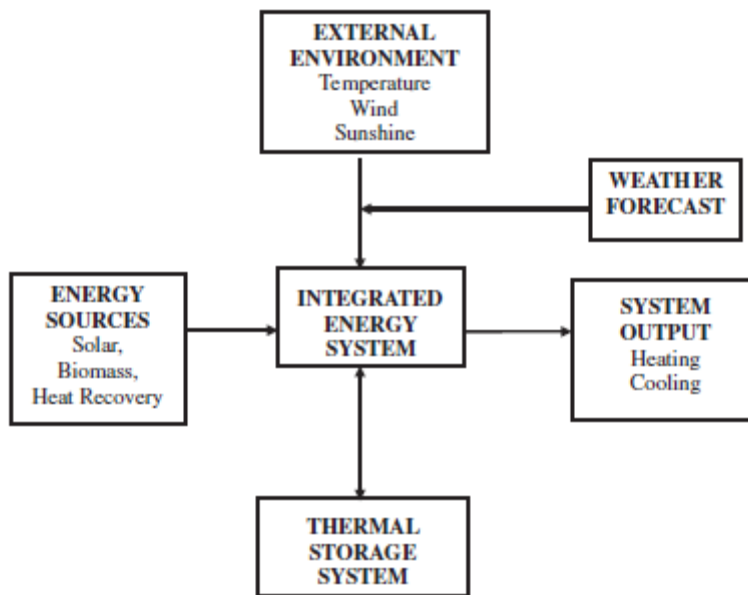
Δυστυχώς τέτοιου είδους πρακτικές πτυχές παραμελήθηκαν εν μέρει στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Ως επί το πλείστον στα νεότερα κτίρια η επίτευξη ικανοποιητικών επιπέδων θερμικής άνεσης είναι αποτέλεσμα της διαδεδομένης χρήσης μηχανικού εξοπλισμού για ψύξη, θέρμανση και αερισμό, πραγματικότητα ιδιαίτερα δαπανηρή τόσο σε οικονομικό όσο και σε ενεργειακό επίπεδο.



Η επιτακτική ανάγκη για αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης, η οποία παρατείνεται, ώθησε την αρχιτεκτονική στην εύρεση νέων διόδων επίτευξης κτιριακής θερμικής άνεσης οι οποίες απαιτούν ελάχιστη ή και μηδενική ενεργειακή δαπάνη. Η πιο διαδεδομένη μορφή εξοικονόμησης ενέργειας είναι η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τις τελευταίες δεκαετίες, εκτός από τη διαρκή αναζήτηση νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προς εκμετάλλευση, επιτεύχθηκαν εναλλακτικές μέθοδοι περιορισμού της ενεργειακής δαπάνης.

Συγκεκριμένα, καθώς η απαίτηση για κλιματισμό των κτιρίων αυξήθηκε αρκετά κατά την τελευταία εικοσαετία, η μεγάλη ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια και τα περιορισμένα αποθέματα ορυκτών καυσίμων έχουν οδηγήσει σε αύξηση του ενδιαφέροντος για νέες αποδοτικές ενεργειακές εφαρμογές. Είναι γεγονός πως η αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρει σημαντικά κατά την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας και η ζήτησή της καθορίζεται από το είδος της δραστηριότητας την οποία καλείται να εξυπηρετήσει (βιομηχανικές, εμπορικές και οικιακές δραστηριότητες). Καθοριστικό ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας επίσης παίζουν οι κλιματολογικές συνθήκες: σε περιοχές με πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες όπου το μεγαλύτερο μέρος της διαφοροποίησης φορτίου οφείλεται στις ανάγκες για ψύξη και θέρμανση του οικιακού χώρου, αντίστοιχα. Η διαφοροποίηση αυτή οδηγεί σε ένα διαφορετικό σύστημα ενεργειακής κατανομής για τις περιόδους μέγιστης κι ελάχιστης ενεργειακής ζήτησης. Καλύτερη διαχείριση της παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σημαντικό οικονομικό κέρδος μπορούν να εξασφαλιστούν εάν ένα μέρος των φορτίων μετατοπιστεί από τις περιόδους μέγιστης ενεργειακής ζήτησης στις περιόδους ελάχιστης ζήτησης, κάτι που υλοποιείται με την αποθήκευση θερμικής ενέργειας για κλιματισμό σε οικιακές κι εμπορικές εγκαταστάσεις. Η προσαρμογή μίας ή περισσοτέρων πηγών ενέργειας σε ένα σύστημα για θέρμανση και ψύξη του εκάστοτε κτιρίου τελικά καθιστά αναγκαία την ενσωμάτωση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, προς επίτευξη θερμικής άνεσης.

Ακολουθεί η σχηματική απεικόνιση διαγράμματος ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού συστήματος, το οποίο βασίζεται σε νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συνοδεύεται από μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.



Σχήμα 1.1.3: Σχηματικό διάγραμμα ολοκληρωμένου ενεργειακού συστήματος [2].

Σχηματικά καταδεικνύεται και η χρήση των τοπικών μετεωρολογικών δεδομένων με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος με προληπτικό έλεγχο.

Μια ελκυστική εναλλακτική επιλογή μεθόδων περιορισμού της ενεργειακής δαπάνης, λοιπόν, αποτελεί η ανάπτυξη συσκευών και συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στα κτίρια, γεγονός εξίσου σημαντικό με την ανάπτυξη πηγών ενέργειας εκ νέου. Τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας παρέχουν την δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ανακούφιση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου, ο οποίος εντείνεται λόγω της ενεργειακής κατανάλωσης. Στην πραγματικότητα, τα συστήματα αυτά ενισχύουν την επίλυση στο πρόβλημα της αναντιστοιχίας που συνήθως παρατηρείται μεταξύ της ζήτησης ενέργειας και του διατιθέμενου ενεργειακού αποθέματος. [2]

1.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

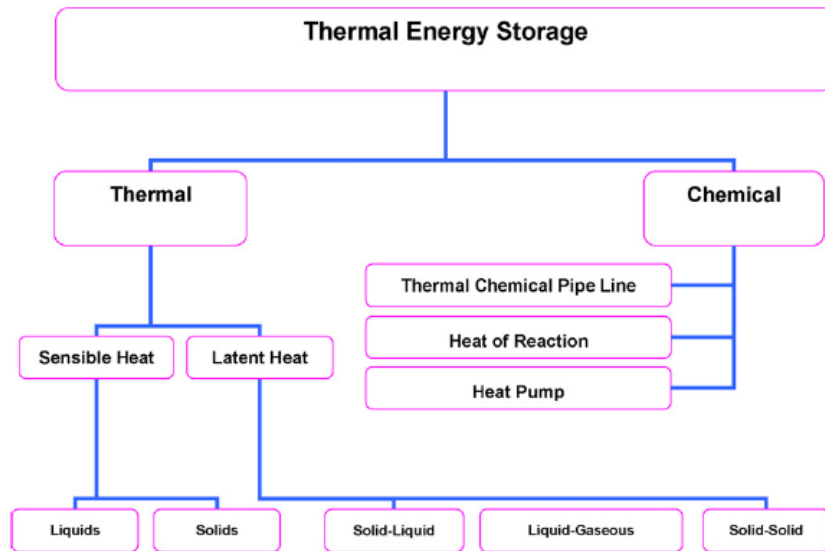
Νεωτερική τεχνολογία η οποία συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της αποδοτικότητας εφαρμογών ενεργειακής κατανάλωσης, χωρίς να επιβαρύνεται το περιβάλλον, αποτελούν τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (**T**hermal



Energy Storage systems). Με τον όρο **TES** δηλώνεται η προσωρινή αποθήκευση θερμικής ενέργειας υπό μορφή θερμών ή ψυχρών μαζών για μελλοντική χρήση. Πρόκειται για τεχνολογία η οποία εφαρμόζεται σε ενεργειακά συστήματα (→ τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν συμβατικές ή ανανεώσιμες μορφές ενέργειας) και καθιστά την λειτουργία τους αποτελεσματικότερη καθώς εξασφαλίζει ισοζύγιο παροχής-ζήτησης ενέργειας. Τα ενισχυμένα TES συστήματα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας και η επιλογή του κατάλληλου συστήματος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από τις κατωτέρω συνιστώσες:

- ☑ Το θερμοκρασιακό εύρος εντός του οποίου συντελείται η αποθήκευση θερμικής ενέργειας.
- ☑ Τη χωρητικότητα της αποθήκευσης. Μία σχετικά μικρή μονάδα αποθήκευσης λειτουργεί με υψηλότερη μέση θερμοκρασία, με αποτέλεσμα την μεταφορά θερμότητας σε περιορισμένο βαθμό, πράγμα που δε συμβαίνει σε μεγαλύτερες μονάδες αποθήκευσης.
- ☑ Τις απώλειες θερμότητας οι οποίες προκύπτουν από την αποθήκευση. Επιδιώκεται η ελαχιστοποίησή τους κυρίως στις μονάδες μακροπρόθεσμης αποθήκευσης, τις οποίες κι επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό.
- ☑ Τον ρυθμό φόρτισης και αποφόρτισης του μέσου αποθήκευσης.
- ☑ Το κόστος της μονάδας αποθήκευσης, το οποίο συμπεριλαμβάνει το αρχικό κόστος του αποθηκευτικού μέσου, το δοχείο συγκράτησης, την μόνωση της μονάδας, καθώς και το κόστος λειτουργίας της.[3],[4]

Τα συστήματα TES ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με την μορφή της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας: 1. συστήματα αποθήκευσης θερμότητας υπό αισθητή μορφή (Sensible Heat Storage systems), 2. συστήματα αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή (Latent Heat Storage systems) και 3. συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας (Thermochemical Storage systems).



Σχήμα 1.2.1: Διαγραμματική απεικόνιση των τεχνικών αποθήκευσης ηλιακής θερμικής ενέργειας.[5]

Οι δύο πρώτες τεχνικές θερμικής αποθήκευσης (SHS και LHS) έχουν ήδη εφαρμοστεί, σε αντίθεση με τα συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας τα οποία δεν αποτελούν εμπορική τεχνική. Βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, για περαιτέρω έρευνα κι ανάπτυξη, πριν αποτελέσουν εμπορεύσιμο είδος.[4]

Οι τρεις βασικοί τύποι TES συστημάτων παρουσιάζονται συνοπτικά και αντιπαραβάλλονται στον Πίνακα 1.2.1. Γίνεται φανερό ότι κάθε σύστημα διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, τα οποία επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως επίσης και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία το καθιστούν κατάλληλο ή ανεπαρκές για συγκεκριμένη εφαρμογή. Σε επόμενες παραγράφους διεξάγεται λεπτομερέστερη περιγραφή κάθε τεχνικής αποθήκευσης και δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

Πίνακας 1.2.1: Σύγκριση των διαφορετικών τεχνικών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) με βάση καθοριστικούς παράγοντες απόδοσης. [4]

Performance Parameter	Type of Thermal Energy Storage		
	Sensible TES	Latent TES	Chemical TES (Sorption and Thermochemical)
Temperature range	Up to: 110 °C (water tanks) 50 °C (aquifers and ground storage) 400 °C (concrete)	20-40 °C (paraffins) 30-80 °C (salt hydrates)	20-200 °C
Storage density	Low (with high temperature interval): 0.2 GJ/m ³ (for typical water tanks)	Moderate (with low temperature interval): 0.3-0.5 GJ/m ³	Normally high: 0.5-3 GJ/m ³
Lifetime	Long	Often limited due to storage material cycling	Depends on reactant degradation and side reactions
Technology status	Available commercially	Available commercially for some temperatures and materials	Generally not available, but undergoing research and pilot project tests
Advantages	Low cost Reliable Simple application with available materials	Medium storage density Small volumes Short distance transport possibility	High storage density Low heat losses (storage at ambient temperatures) Long storage period Long distance transport possibility Highly compact energy storage
Disadvantages	Significant heat loss over time (depending on level of insulation) Large volume needed	Low heat conductivity Corrosivity of materials Significant heat losses (depending on level of insulation)	High capital costs Technically complex

1.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟ ΑΙΣΘΗΤΗ ΜΟΡΦΗ.

Στην περίπτωση των συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, η ενέργεια αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται με την θέρμανση ή ψύξη ενός υγρού ή στερεού συστατικού, το οποίο δεν μεταβάλλει την κατάσταση του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής.



a



b

Σχήμα 1.2.2: Δοκιμαστικές μονάδες αποθήκευσης θερμότητας σε αισθητή μορφή a) στην Almeria 100kW/350kWh και b) στην Stuttgart 100kW/400kWh. [8]



Η λειτουργία των SHS συστημάτων εξυπηρετείται με την χρήση υγρών (→ νερό, έλαια μεταφοράς θερμότητας και ορισμένα τηγμένα ανόργανα άλατα) και στερεών μέσων (→ λίθοι, βότσαλα και πυρίμαχα κεραμικά αυξημένης σκληρότητας). Στην περίπτωση των στερεών μέσων, το υλικό βρίσκεται πάντα σε πορώδη μορφή και η θερμότητα αποθηκεύεται ή εξάγεται με τη ροή ενός αερίου ή υγρού διά μέσω των πόρων ή διακένων του υλικού.

Η επιλογή του μέσου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, προκειμένου να κάνει όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη τη λειτουργία του, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους εξής παράγοντες:

- ☑ Το θερμοκρασιακό επίπεδο της εφαρμογής (→ π.χ. το νερό χρησιμοποιείται για θερμοκρασίες μικρότερες των 100°C, ενώ τα πυρίμαχα τούβλα χρησιμοποιούνται για θερμοκρασίες γύρω στους 1000°C).
- ☑ Την χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας. Η χωρητικότητα της αποθήκευσης ενός SHS συστήματος το οποίο λειτουργεί με στερεό ή υγρό μέσον αποθήκευσης εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_p(T_f - T_i) = V\rho C_p(T_f - T_i) \quad (1)$$

όπου m: η μάζα, ρ: η πυκνότητα, C_p: η ειδική θερμοχωρητικότητα και T_f-T_i: η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της μέγιστης κι ελάχιστης θερμοκρασίας που αποκτά το μέσον της αποθήκευσης. Μέσω της συγκεκριμένης διατύπωσης είναι δυνατός ο υπολογισμός της μάζας και του όγκου του μέσου το οποίο απαιτείται για την αποθήκευση μιας δεδομένης ποσότητας ενέργειας.

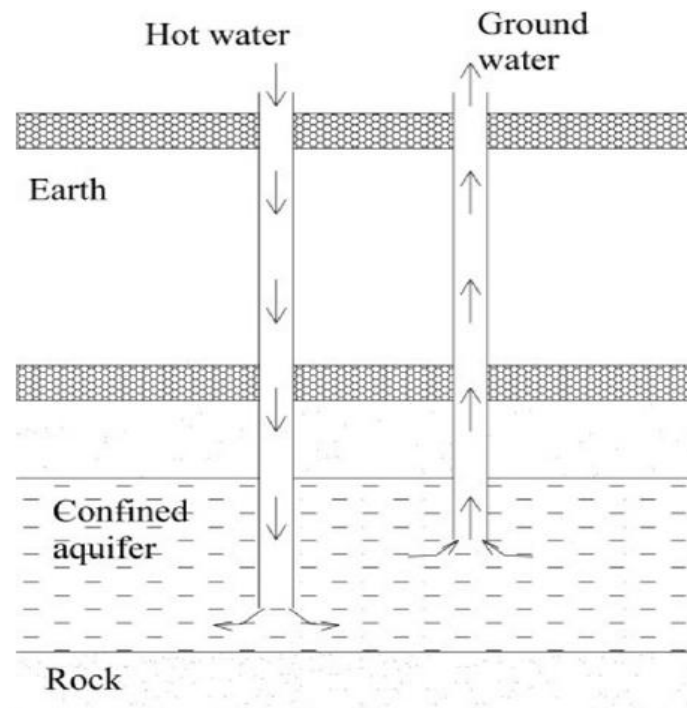
- ☑ Την ικανότητα και τον βαθμό αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Η συγκεκριμένη συνιστώσα εμφανίζεται άμεσα συνυφασμένη με την ενεργειακή πυκνότητα ρC_p του υλικού.
- ☑ Την θερμική αγωγιμότητα του υλικού.
- ☑ Το κόστος του υλικού. [3],[6],[7]



1.2.1.1 Μέσα αποθήκευσης υγρής κατάστασης

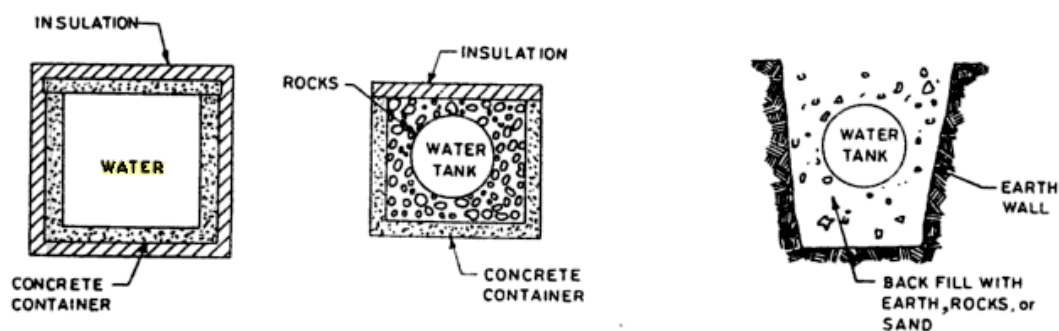
Η υψηλή ειδική του θερμότητα, η αυξημένη διαθεσιμότητα και το χαμηλό του κόστος καθιστούν το νερό ως το πιο διαδεδομένο μέσον αποθήκευσης στα SHS συστήματα. Τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού και χώρου χρησιμοποιούν στην πλειονότητά τους δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού, οι οποίες βρίσκονται στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό του κτιρίου, ή είναι τοποθετημένες υπόγεια και η χωρητικότητά τους ποικίλει από μερικές εκατοντάδες λίτρα έως και χιλιάδες κυβικά μέτρα. Οι δεξαμενές αυτές κατασκευάζονται από υλικά όπως μέταλλο, σκυρόδεμα και fiberglass, ενώ η μόνωση που τις επενδύει συνίσταται σε υαλοβάμβακα, ορυκτοβάμβακα ή πολυουρεθάνη. Το πάχος της χρησιμοποιούμενης μόνωσης κινείται στα όρια 10-20cm κι αποτελεί μια σημαντική δαπάνη εξαιτίας της αυξημένης τιμής του. Αυτό καθιστά τη μόνωση ένα αρκετά δαπανηρό τμήμα της όλης SHS εφαρμογής και πρέπει να μελετηθούν τρόποι μείωσης του κόστους της.

Ένα πιθανό σενάριο μείωσης του κόστους τόσο της μόνωσης όσο και της όλης SHS εφαρμογής αποτελεί η διαμόρφωση ενός υπόγειου συστήματος αποθήκευσης αισθητής θερμότητας το οποίο αποτελείται από υπόγεια φυσική υδροφόρο «δεξαμενή» που διαθέτει ήδη ποσότητα νερού. Η εναλλακτική αυτή SHS εφαρμογή εξετάζεται για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση αισθητής θερμότητας.



Σχήμα 1.2.3: Υπόγειο σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.[3]

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στην άντληση του ζεστού νερού με σκοπό την αποθήκευσή του στην υδροφόρο «δεξαμενή», εκτοπίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το υπάρχον κρύο νερό του εδάφους. Εφόσον η βασική απαίτηση της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι η ύπαρξη μιας σειράς ανοιγμάτων για την έγχυση και απομάκρυνση των υδάτων, αναμένεται ότι μια τέτοια SHS εφαρμογή δεν θα είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.



Σχήμα 1.2.4: Απεικόνιση συστημάτων νερού αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. [9]



Τα SHS συστήματα τα οποία φέρουν ως μέσον το νερό, εκμεταλλεύονται τις ευεργετικές φυσικές του ιδιότητες προκειμένου να βελτιωθεί η λειτουργία και η απόδοσή τους. Ωστόσο, το νερό εμφανίζει και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία εμποδίζουν ενίοτε την εύρυθμη λειτουργία των SHS συστημάτων, όπως: ο εξαιρετικά διαβρωτικός του χαρακτήρας, το ενδεχόμενο άκαιρης τήξης ή στερεοποίησής του, η δυσκολία διαχωρισμού του κ.α. [3]

Συστατικά κατάλληλα για χρήση στα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι και τα έλαια μεταφοράς θερμότητας. Πρόκειται για ουσίες οι οποίες χρησιμοποιούνται σε συστήματα το θερμοκρασιακό επίπεδο των οποίων κινείται στους 100-300°C. Χαρακτηριστικά έλαια τα οποία χρησιμοποιούνται σε SHS εφαρμογές αποτελούν το **DOWTHERM™** της **Dow Chemical Company** [10] και το **Therminol®** της **Solutia** [11]. Προβλήματα συνυφασμένα με την χρήση των ελαίων αυτών στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι η υποβάθμιση της ποιότητάς τους σε συνάρτηση με τον χρόνο, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες ανώτερες του μέγιστου θερμοκρασιακού τους ορίου, καθώς και η πιθανότητα ανάφλεξής τους, ενδεχόμενο που αντιμετωπίζεται μόνο με την χρήση καλύμματος αδρανούς αερίου. Τα μειονεκτήματα αυτά καθιστούν τα έλαια μεταφοράς θερμότητας επισφαλή ως προς την χρήση τους και σε συνδυασμό με το υψηλό τους κόστος κρίνονται κατάλληλα μόνο για μικρά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.[3]

Η τελευταία κατηγορία των υγρών μέσων αποθήκευσης στα SHS συστήματα περιλαμβάνει τα τηγμένα ανόργανα άλατα τα οποία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με θερμοκρασιακό επίπεδο άνω των 300°C. Αντιπροσωπευτικό εμπορικό προϊόν αποτελεί το **Coastal Chemical Hitec®** [12]. Πρόκειται για ένα εύτηκτο μίγμα με κατά βάρος περιεκτικότητα 40% NaNO_2 , 7% NaNO_3 και 53% KNO_2 . Το Hitec® διαθέτει σχετικά χαμηλό σημείο τήξης (145°C) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως και σε θερμοκρασίες οι οποίες αγγίζουν τους 425°C. Σε θερμοκρασία ανώτερη των 425°C παρουσιάζονται προβλήματα όπως η αποσύνθεση και η οξείδωση και το υλικό κρίνεται επισφαλές ως προς την χρήση του. Ένα ακόμα τηγμένο άλας της κατηγορίας αυτής είναι το υδροξείδιο του νατρίου με σημείο τήξης 320°C. Επιλέγεται συνήθως



για SHS εφαρμογές αποθήκευσης υψηλών ενεργειακών επιπέδων, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σε θερμοκρασία 800°C. Ωστόσο χαρακτηρίζεται από υψηλή διαβρωτικότητα, ιδιότητα που καθιστά δύσκολη την συγκράτησή του σε υψηλές θερμοκρασίες.

1.2.1.2 Μέσα αποθήκευσης στερεάς κατάστασης

Τα στερεά μέσα αποθήκευσης θερμότητας καλούνται να χρησιμοποιηθούν προς αποφυγή των περιορισμών, οι οποίοι δημιουργούνται από την παρουσία και λειτουργία των υγρών μέσων αποθήκευσης. Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε λίθους ή βότσαλα τα οποία συγκρατούνται (συσκευάζονται) σε μονωμένα δοχεία. Η συγκεκριμένη τεχνική αποθήκευσης αισθητής θερμότητας χρησιμοποιείται για θερμοκρασιακές συνθήκες οι οποίες αγγίζουν τους 100°C και συνδυάζεται με ηλιακούς εναλλάκτες αέρα. Γενικά στα SHS συστήματα, επιλέγονται ως μέσα αποθήκευσης ενέργειας λίθοι μεγέθους 1-5cm και χρησιμοποιούνται 300-500kg αυτών ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας συλλογής θερμότητας για την θέρμανση χώρων. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι υποστρώσεις πετρωμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση αισθητής θερμότητας και σε θερμοκρασιακές συνθήκες υψηλότερες των 1000°C. Βασικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων εφαρμογών αποτελεί ο απλός σχεδιασμός τους, ο οποίος προβλέπει την άμεση επαφή της δεξαμενής αποθήκευσης με το ρευστό μεταφοράς θερμότητας για αποδοτικότερη συναλλαγή θερμότητας. Τα πετρώματα επιλέγονται ως μέσα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας διότι χαρακτηρίζονται από μία σειρά πλεονεκτημάτων: έχουν μη τοξικό και μη εύφλεκτο χαρακτήρα, λειτουργούν και ως επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας, διευκολύνουν την καλή μεταφορά θερμότητας μεταξύ της υπόστρωσης των πετρωμάτων και του αέρα, καθώς παρέχουν μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής (→ μειώνονται οι απώλειες θερμότητας). Ωστόσο, προκειμένου η χωρητικότητα αποθήκευσης των συγκεκριμένων μέσων να εμφανίζεται ισάξια με αυτή του νερού και των υπόλοιπων υγρών αποθηκευτικών ουσιών, απαιτείται χρήση μεγαλύτερης ποσότητας των στερεών υλικών. Υπό άλλες συνθήκες η μεγάλη αυτή ποσότητα θα επιβάρυνε οικονομικά την εφαρμογή, όμως στην περίπτωση των λίθων αυτό δεν συμβαίνει χάρη στο χαμηλό τους κόστος. [3],[13]

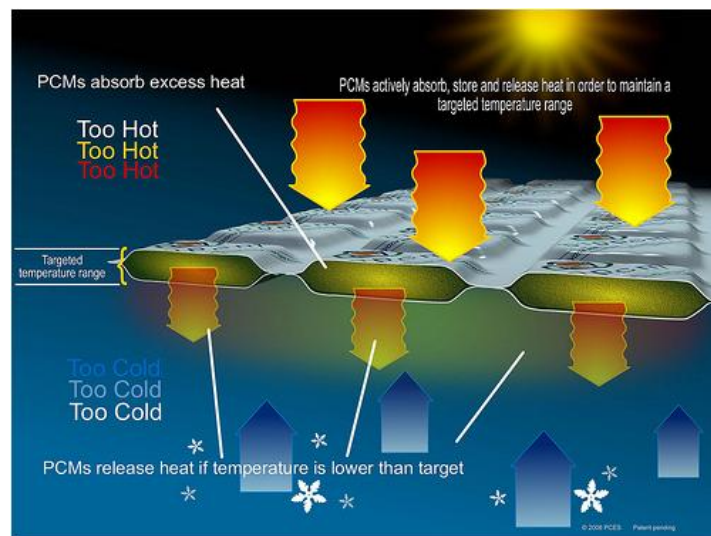


Το οξείδιο του μαγνησίου, το οξείδιο του αλουμινίου και το οξείδιο του πυριτίου εντάσσονται στην κατηγορία των πυρίμαχων υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα τούβλα από οξείδιο μαγνησίου συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται αρκετές δεκαετίες σε πολλές περιοχές ως μέσον θερμικής αποθήκευσης. Πλέον διατίθενται με την μορφή συσκευών με ενσωματωμένους ηλεκτρικούς θερμαντές. Στις εφαρμογές αυτές η θερμότητα αποθηκεύεται κατά την διάρκεια της νύχτας (όποτε και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερη) ενεργοποιώντας τους θερμαντές. Η αποθηκευμένη θερμότητα παρέχεται στον χώρο κατά την διάρκεια της ημέρας επιτρέποντας στον αέρα να διαπεράσει τις συσκευές αυτές. [3],[13]

Είναι γεγονός ότι τα SHS συστήματα χαρακτηρίζονται από απλούστερο σχεδιασμό σε σύγκριση με τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και τα συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας. Αποτελούν όμως κατασκευές μεγαλύτερου όγκου. Το γεγονός αυτό καθιστά επιτακτική την ανάγκη της χρήσης μέσω αποθήκευσης με αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα προκειμένου να χρησιμοποιούνται μικρότερες ποσότητες υλικών και η εφαρμογή να είναι λιγότερο δαπανηρή.

1.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΜΟΡΦΗ.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παρουσιάζουν αυξημένο ενεργειακό ενδιαφέρον τόσο σε εργαστηριακό όσο και σε εμπορικό επίπεδο, εξαιτίας της υψηλής τους ενεργειακής πυκνότητας (ανά μονάδα μάζας και όγκου) και της ικανότητάς τους να αποθηκεύουν θερμική ενέργεια σε σταθερή θερμοκρασία. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην απορρόφηση ή απελευθέρωση θερμότητας κατά την μεταβολή της κατάστασης του υλικού αποθήκευσης (θερμότητας). Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας στα LHS συστήματα συγκροτούν την ευρεία κατηγορία των Υλικών Αλλαγής Φάσης. Πρόκειται για υλικά τα οποία μεταβάλλουν την κατάστασή τους από στερεά σε υγρά ή από υγρά σε αέρια ή από στερεά σε αέρια ή από στερεά σε στερεά (→ οι μεταβολές συμβαίνουν και αντίστροφα), παρέχοντας την δυνατότητα αποθήκευσης και διακίνησης ποσών θερμικής ενέργειας κυρίως για σκοπούς κλιματισμού.



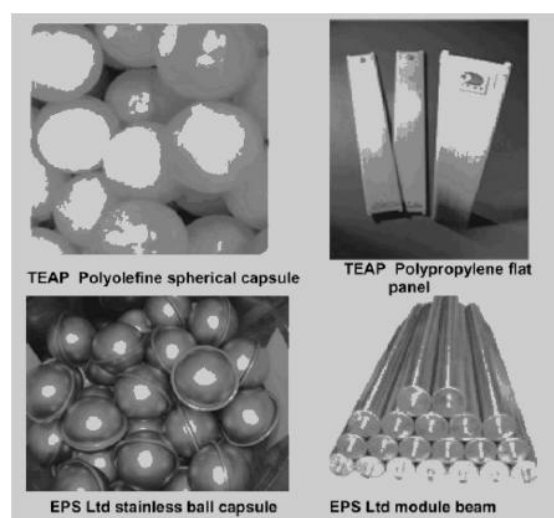
Σχήμα 1.2.5: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας των Υλικών Αλλαγής Φάσης. [14]

Τα ΥΑΦ τα οποία μεταβαίνουν από την στερεά στην αέρια (solid-gas) και από την υγρή στην αέρια (liquid-gas) φάση τους, διαθέτουν αρκετά υψηλή θερμοχωρητικότητα, γεγονός που εξασφαλίζει την αποθήκευση μεγάλης ποσότητας θερμικής ενέργειας προς μεταβολή της φάσης τους. Ωστόσο, οι μεγάλες μεταβολές του όγκου οι οποίες διέπουν την αλλαγή φάσης τους, προκαλούν προβλήματα συγκράτησης των υλικών, γεγονός που καθιστά τα συγκεκριμένα ΥΑΦ ακατάλληλα για χρήση σε συστήματα TES. (→ Οι μεγάλες μεταβολές του όγκου καθιστούν ένα σύστημα περίπλοκο και μη πρακτικό). Η αρχή της μεταβολής από στερεή σε στερεή φάση (solid-solid) διαφοροποιείται της αρχής των μεταβολών που προαναφέρθηκαν, καθώς, εν προκειμένω, η κρυσταλλική δομή του υλικού μετασχηματίζεται από μία μορφή σε μία άλλη. Τα solid-solid ΥΑΦ πλεονεκτούν των solid-liquid υλικών (ΥΑΦ τα οποία μετασχηματίζονται από στερεά σε υγρά) στο ότι η μεταβολή της κρυσταλλικότητάς τους διέπεται από περιορισμένες μεταβολές όγκου και λανθάνουσας θερμότητας. Τα solid-solid Υλικά Αλλαγής Φάσης δεν απαιτούν ιδιαίτερα αυστηρές μεθόδους συγκράτησης, ενώ παράλληλα χαρακτηρίζονται από ευελιξία στο σχεδιασμό [15],[16]. Πολλά υποσχόμενα οργανικά στερεά ΥΑΦ αποτελούν η πενταερυθριτόλη (σημείο τήξης 188°C και Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης 323 kJ/kg), η πενταγλυκερίνη (σημείο τήξης 81°C και Λανθάνουσα

θερμότητα αποθήκευσης 216kJ/kg), το θεικό λίθιο (σημείο τήξης 578°C και Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης 214 kJ/kg) και το διφθοριούχο κάλιο (σημείο τήξης 196°C και Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης 135 kJ/kg). [17]

Είναι γεγονός ότι συγκριτικά με τα liquid-gas, τα solid-liquid ΥΑΦ διαθέτουν μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης. Ωστόσο, οι μετασχηματισμοί από την στερεή στην υγρή φάση διέπονται από μεταβολές του όγκου της τάξης <10%. Η χρήση των ΥΑΦ, τα οποία μεταβάλουν τη φάση τους από στερεά σε υγρή, αποτελεί ένα πολύ ελκυστικό οικονομικά σενάριο για τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Τα ΥΑΦ δε μπορούν να λειτουργήσουν από μόνα τους ως μέσα διακίνησης θερμότητας. Είναι απαραίτητη η χρήση στο σύστημα κατάλληλα διαμορφωμένου εναλλάκτη θερμότητας προκειμένου να μεταβιβαστεί η θερμική ενέργεια από την πηγή στο ΥΑΦ και από το ΥΑΦ στο φορτίο. Ως εκ τούτου, ο σωστός σχεδιασμός του εναλλάκτη αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη βελτίωση της μετάδοσης θερμότητας στα LHS συστήματα. Εκτός από την ορθή κατασκευή των εναλλακτών, η δημιουργία μέσων συγκράτησης των ΥΑΦ αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα για τα LHS συστήματα. Το μέσον συγκράτησης πρέπει να έχει τη δυνατότητα ελέγχου των μεταβολών του όγκου του υλικού και από τη φύση του να είναι συμβατό με το υπό συγκράτηση ΥΑΦ.



Σχήμα 1.2.6: Υλικά Αλλαγής Φάσης του εμπορίου σε σφαίρες, κάψουλες, πάνελς και ράβδους.[18]



Κάθε σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας οφείλει να διαθέτει τα εξής στοιχεία, τα οποία το καθιστούν αρκετά αποδοτικό:

- Κατάλληλο ΥΑΦ με σημείο τήξης εντός του επιθυμητού θερμοκρασιακού εύρους.
- Κατάλληλα σχεδιασμένη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.
- Κατάλληλο μέσο συγκράτησης συμβατό με το ΥΑΦ. [7]

Στη συγκεκριμένη παράγραφο της εργασίας παρατέθηκε μία συνοπτική αναφορά σε ορισμένες πτυχές που αφορούν στα ΥΑΦ, καθώς εκτενέστερη περιγραφή περιλαμβάνεται σε επόμενη παράγραφο.

1.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

Πρόκειται για μία έμμεση τεχνική αποθήκευσης θερμικής ενέργειας κι αποτελεί υποκατηγορία της ευρύτερης τεχνικής της χημικής αποθήκευσης (Chemical Energy Storage) . Η θερμότητα, εν προκειμένω, δεν αποθηκεύεται άμεσα υπό αισθητή ή λανθάνουσα μορφή, αλλά μέσω μιας φυσικοχημικής διεργασίας, όπου ποσό της καταναλώνεται κατά την λειτουργία της φόρτισης κι αποδίδεται κατά την λειτουργία της αποφόρτισης του συστήματος. Όσον αφορά στο πρώτο στάδιο της θερμοχημικής αποθήκευσης, απαιτείται η συνεισφορά ποσού θερμότητας σε μία ενδόθερμη διεργασία προκειμένου να διαχωριστεί η θερμοχημική ουσία σε διάφορα προϊόντα. Στην χημικά αντίστροφη διεργασία, τα προϊόντα της αντίδρασης συνδυάζονται προς σχηματισμό του αρχικού θερμοχημικού προϊόντος. Η εξώθερμη αυτή αντίδραση πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές της ενδόθερμης αντίστροφής της. Ο διαχωρισμός πολλών θερμοχημικών ουσιών έχει δώσει προϊόντα, τα οποία μπορούν να αποθηκευτούν για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς σημαντικές απώλειες θερμότητας, καθιστώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας αποτελεσματική τεχνική.

Τα συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας διαθέτουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε μικρό όγκο υλικού αποθήκευσης, γεγονός το οποίο συνεπάγεται την αποθήκευση μεγάλων ποσών θερμότητας σε περιορισμένη ποσότητα αποθηκευτικών ουσιών. Επιπλέον κατά το στάδιο της ξεχωριστής αποθήκευσης των προϊόντων Α και



Β της αντίδρασης διαχωρισμού (όπως γίνεται φανερό παρακάτω) δεν υφίστανται απώλειες ενέργειας, γεγονός το οποίο καθιστά περιττή την χρήση μόνωσης στο TES σύστημα. Ωστόσο η πολυπλοκότητα, το υψηλό τους κόστος και η δυσκολία πρόβλεψης των αντοχών των συστημάτων μετά από πολλούς κύκλους λειτουργίας σε συνδυασμό με την απαίτηση υψηλών θερμοκρασιών για την λειτουργία τους αποτελούν παράγοντες οι οποίοι εμποδίζουν τη χρήση των συστημάτων αυτών σε επίπεδο πέρα από το εργαστηριακό. [4],[19]

1.2.3.1 Ανάλυση της λειτουργίας των συστημάτων θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας.

Η βασική αρχή των συστημάτων θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας στηρίζεται σε μια αναστρέψιμη χημική αντίδραση: $C + Heat \rightleftharpoons A + B$ (2).

Στην αντίδραση (2) το θερμοχημικό υλικό C (ThermoChemical Material) απορροφά ποσό θερμότητας και διαχωρίζεται σε δύο προϊόντα A και B τα οποία μπορούν να αποθηκευτούν ξεχωριστά. Η χημικά αντίστροφη αντίδραση λαμβάνει χώρα όταν τα δύο συστατικά A και B συνδυάζονται προς σχηματισμό του υλικού C. Η ουσία A στην παραπάνω θερμοχημική αντίδραση αποθήκευσης μπορεί να είναι υδροξείδιο, ένυδρη ουσία, ανθρακικό άλας κλπ., ενώ το συστατικό B μπορεί να είναι νερό, διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, υδρογόνο κλπ (Πίνακας 1.2.2).

Πίνακας 1. 2.2: Προτεινόμενα υλικά με προοπτικές για συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας. [4]

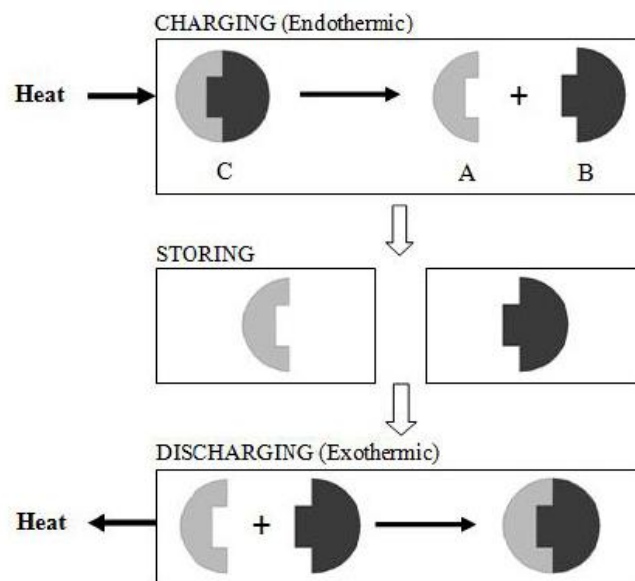
Thermochemical Material (C)	Solid Reactant (A)	Working Fluid (B)	Energy Storage Density of Thermochemical Material (GJ/m ³)	Charging Reaction Temperature (°C)
MgSO ₄ ·7H ₂ O	MgSO ₄	7H ₂ O	2.8	122
FeCO ₃	FeO	CO ₂	2.6	180
Ca(OH) ₂	CaO	H ₂ O	1.9	479
Fe(OH) ₂	FeO	H ₂ O	2.2	150
CaCO ₃	CaO	CO ₂	3.3	837
CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaSO ₄	2H ₂ O	1.4	89

Δεν είναι επιβεβλημένος κάποιος περιορισμός ως προς την φάση με την οποία λαμβάνουν μέρος οι ουσίες στην αντίδραση και ως εκ τούτου τα A και B μπορούν να συμμετέχουν υπό οποιαδήποτε κατάσταση, ενώ το TCM C συνήθως συμμετέχει ως υγρή ή στερεά ουσία. Πολλές είναι οι παράμετροι οι οποίες εξετάζονται προκειμένου

να επιλεγεί το κατάλληλο θερμοχημικό υλικό C, καθώς οι ιδιότητές του καθορίζουν την χρήση του στο εκάστοτε σύστημα TES. Ορισμένες από αυτές είναι: το κόστος του υλικού, η αναστρεψιμότητα και η φθορά του εντός πολλών κύκλων λειτουργίας, η διαθεσιμότητά του, ο τοξικός και διαβρωτικός του χαρακτήρας, η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας, η θερμοκρασία και ο ρυθμός αντίδρασης, η δυνατότητα ένταξής του σε ενεργειακά συστήματα κ.α.[4]

1.2.3.2 Ο κύκλος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Ο κύκλος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (\rightarrow γενικά στα συστήματα TES κι εν προκειμένω στα συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης) εξελίσσεται σε τρεις βασικές διαδικασίες: 1.φόρτιση, 2.αποθήκευση ενέργειας, 3.αποφόρτιση. Οι διεργασίες αυτές στην περίπτωση των συστημάτων θερμοχημικής αποθήκευσης περιγράφονται ως εξής:



Σχήμα 1.4: Διαγραμματική απεικόνιση των διεργασιών οι οποίες περιλαμβάνονται στον κύκλο θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας: φόρτιση, αποθήκευση, αποφόρτιση.[4]

- ☑ **Φόρτιση (charging):** Η διαδικασία φόρτισης ενός συστήματος θερμοχημικής αποθήκευσης αποτελεί μία ενδόθερμη διεργασία. Ποσό θερμικής ενέργειας, η οποία προέρχεται από κάποια πηγή συμβατικής ή ανανεώσιμης μορφής ενέργειας (\rightarrow ορυκτά καύσιμα), χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του θερμοχημικού υλικού C. Η ενέργεια αυτή ισούται με την θερμότητα αντίδρασης ή την ενθαλπία σχηματισμού. Την διαδικασία διαχωρισμού



ακολουθεί ο σχηματισμός δύο προϊόντων A και B, με διαφορετικές ιδιότητες, τα οποία μπορούν πλέον να αποθηκευτούν ξεχωριστά. Η διαδικασία της φόρτισης περιγράφεται από την έκφραση: $C + Heat \rightarrow A + B$ (2α).[4]

☑ Αποθήκευση (storing): Η αποθήκευση των προϊόντων A και B της αντίδρασης διαχωρισμού αποτελεί το δεύτερο στάδιο του κύκλου λειτουργίας του συστήματος TES. Οι ουσίες A και B αποθηκεύονται ξεχωριστά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και η διαδικασία της αποθήκευσης χαρακτηρίζεται από αμελητέες ενεργειακές απώλειες (\rightarrow με εξαίρεση το αρχικό στάδιο ψύξης των ουσιών A και B αμέσως μετά την διαδικασία φόρτισης). Η εμφάνιση οποιωνδήποτε άλλων απωλειών ενεργειακής φύσης οφείλεται στην υποβάθμιση των υλικών.[4]

☑ Αποφόρτιση (discharging): Κατά την διεργασία της αποφόρτισης του συστήματος, οι ουσίες A και B, με ρόλο αντιδρώντων αυτή τη φορά, συνδυάζονται προς σχηματισμό του υλικού C σε μια εξώθερμη αντίδραση. Η θερμότητα η οποία απελευθερώνεται από την αντίδραση αυτή επιτρέπει την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας. Με την λήξη της διαδικασίας της αποφόρτισης, το υλικό C αναγεννάται και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου στον κύκλο λειτουργίας. Η εξώθερμη αντίδραση αποφόρτισης διατυπώνεται ως εξής: $A + B \rightarrow C + Heat$ (2β). [4]

Η υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα και η συμπαγής τους φύση καθιστά τα συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης εφαρμογές με πολλές προοπτικές για την ψύξη και θέρμανση συγκροτημάτων οικιακής κι επαγγελματικής χρήσης. Η συγκεκριμένη τεχνική κρίνεται κατάλληλη για αποθήκευση ενέργειας τόσο για μικρά όσο και για μεγάλα χρονικά διαστήματα, και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εποχιακή θερμική αποθήκευση.

1.3 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.

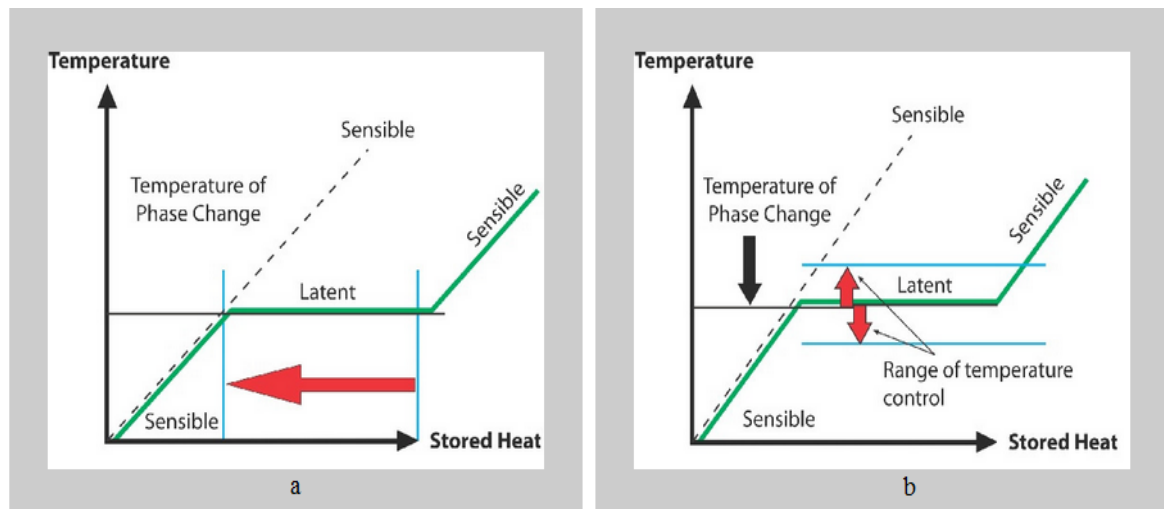
Η χρήση των Υλικών Αλλαγής Φάσης σε συστήματα TES έχει χαρακτηριστεί από πολλούς ερευνητές ευεργετική, καθώς τα συγκεκριμένα υλικά εξασφαλίζουν υψηλή



πυκνότητα ενεργειακής αποθήκευσης και αποθήκευση θερμότητας σε σταθερή θερμοκρασία. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά καθιστούν ένα σύστημα TES οικονομικό και αρκετά αποδοτικό. Η κατηγορία των ΥΑΦ η οποία θα μας απασχολήσει περισσότερο στα πλαίσια της εργασίας είναι αυτή των solid→liquid, εξαιτίας του μεγάλου εύρους εφαρμογών της κυρίως στον κτιριακό τομέα. (Σχετική αναφορά έχει παρατεθεί στην **Παράγραφο 1.2.2**)

1.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.

Με τον όρο Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) ή Phase Change Materials (PCM) απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας συντελείται κατά τον μετασχηματισμό του υλικού από στερεό σε υγρό (→ ή και το αντίστροφο). Η διαδικασία αυτή καλείται αλλαγή φάσης και συνιστά μία ενδόθερμη (ή εξώθερμη) διαδικασία, καθώς το ΥΑΦ απορροφά (ή απελευθερώνει) θερμότητα προς μετασχηματισμό του. Αρχικά, τα PCM συμπεριφέρονται ως συμβατικά υλικά αποθήκευσης, η θερμοκρασία των οποίων αυξάνεται καθώς απορροφούν θερμότητα. Όταν η θερμοκρασία τους αγγίζει την τιμή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, παύει να αυξάνει, ενώ η απορρόφηση θερμότητας συνεχίζει. Η απορρόφηση και αποθήκευση της λανθάνουσας πλέον θερμότητας, προκαλεί την αναδιάρθρωση των χημικών δεσμών και κατ' επέκταση την τήξη και τον μετασχηματισμό του στερεού υλικού σε υγρό. Η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σταθερή έως ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία της τήξης.[5],[7]



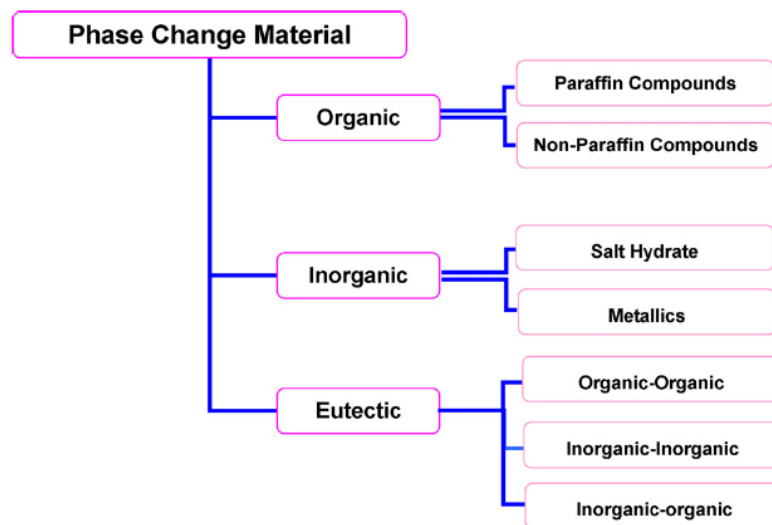
Σχήμα 1.5: α. Συγκριτική διαγραμματική απεικόνιση της αποθήκευσης αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. β. Έλεγχος της θερμοκρασίας κατά την επί αλλαγή φάσης του υλικού αποθήκευση ενέργειας. [20]

Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, τα PCM δύνανται να απορροφούν και να απελευθερώνουν θερμότητα σε σταθερή σχεδόν θερμοκρασία. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό το οποίο επιβεβαιώνει την καταλληλότητα των ΥΑΦ ως μέσα θερμικής αποθήκευσης σε συστήματα TES, είναι η αυξημένη ενεργειακή τους πυκνότητα, καθώς μπορούν να αποθηκεύσουν 5-14 φορές μεγαλύτερο ποσό θερμότητας συγκριτικά με συμβατικά υλικά αποθήκευσης αισθητής ενέργειας, όπως το νερό, τα πετρώματα, οι λιθοδομές κ.α. (→ Το μέγεθος της παραπάνω σύγκρισης γίνεται αισθητό, αν αναλογιστεί κανείς ότι ο όγκος αποθήκευσης του PCM είναι περίπου δύο φορές μικρότερος από αυτόν του νερού).

Το ισχυρότερο πλεονέκτημα των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Μάλιστα, υπάρχει μεγάλη ποικιλία ΥΑΦ με σημείο τήξης εντός του απαιτούμενου για συγκεκριμένη εφαρμογή θερμοκρασιακού εύρους.[5],[7]

1.3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.

Πλήθος ΥΑΦ διατίθενται στο θερμοκρασιακό εύρος που απαιτείται κάθε φορά για συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα οργανικά και ανόργανα υλικά, καθώς και τα εύτηκτα μίγματα αποτελούν τις τρεις βασικές κατηγορίες υλικών, τα οποία έχουν αναγνωριστεί ως Υλικά Αλλαγής Φάσης με γνώμονα το σημείο τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης.



Σχήμα 1.3.2: Κατηγοριοποίηση των Υλικών Αλλαγής Φάσης σε οργανικά, ανόργανα και εύτεκτα υλικά. [5]

1.3.2.1 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.

Στην κατηγορία των οργανικών ΥΑΦ εντάσσονται οι παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά παραφινών (μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως 25), καθώς και οι μη παραφίνες (λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων και μίγματα αυτών).

Τα πλεονεκτήματα των οργανικών ΥΑΦ, τα οποία τα καθιστούν κατάλληλα για χρήση σε LHS συστήματα, είναι τα εξής:

- ✓ Υπάρχει δυνατότητα παραγωγής τους σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος.
- ✓ Διαθέτουν υψηλή τιμή λανθάνουσας θερμότητας.
- ✓ Χαρακτηρίζονται από χημική σταθερότητα και οι ιδιότητές τους συνήθως δεν υποβαθμίζονται.
- ✓ Η εμφάνιση των φαινομένων του **super cooling** και του **διαχωρισμού των φάσεων** συντελείται σε αμελητέα συχνότητα.
- ✓ Παρουσιάζουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση.
- ✓ Συνήθως εμφανίζουν συμβατότητα με τα συμβατικά δομικά υλικά στα οποία ενσωματώνονται, ενώ δεν αποτελούν παράγοντες διάβρωσης και δεν αντιδρούν.
- ✓ Στην πλειοψηφία τους είναι ανακυκλώσιμα. [2],[5]



Ορισμένα από τα μειονεκτήματα των οργανικών υλικών είναι:

- ✘ Χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός το οποίο αποτελεί ισχυρό μειονέκτημα για ένα ΥΑΦ. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, έχει μελετηθεί η χρήση μεταλλικών παραγόντων (μικρών μεταλλικών αντικειμένων, δοχείων, αγωγών και πτερυγίων), για την ενίσχυση του ρεύματος θερμότητας εντός του υλικού.
- ✘ Η ογκομετρική χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης είναι αρκετά χαμηλή.
- ✘ Διαθέτουν εύφλεκτο χαρακτήρα, πρόβλημα το οποίο μετριάζεται με την χρήση ενός κατάλληλα κατασκευασμένου μέσου συγκράτησης.
- ✘ Εξαιτίας του υψηλού κόστους των οργανικών ουσιών, μόνο οι παραφίνες τεχνικού βαθμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οι οποίες είναι ουσιαστικά μίγματα. [2],[5]

Ακολουθούν πίνακες με ορισμένα αντιπροσωπευτικά υλικά από τις κατηγορίες των παραφινών και μη παραφινών:



Πίνακας 1.3.1: Πίνακας με τιμές του σημείου τήξης και της λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης ενδεικτικών υλικών τα οποία εντάσσονται στην κατηγορία των παραφινών. [5]

Melting point and latent heat of fusion: paraffins

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)	Group ^a
14	5.5	228	I
15	10	205	II
16	16.7	237.1	I
17	21.7	213	II
18	28.0	244	I
19	32.0	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44.0	249	II
23	47.5	232	II
24	50.6	255	II
25	49.4	238	II
26	56.3	256	II
27	58.8	236	II
28	61.6	253	II
29	63.4	240	II
30	65.4	251	II
31	68.0	242	II
32	69.5	170	II
33	73.9	268	II
34	75.9	269	II

^a Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising; — insufficient data.

Πίνακας 1.3.2: Πίνακας με τιμές του σημείου τήξης και της λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης ενδεικτικών υλικών τα οποία εντάσσονται στην κατηγορία των λιπαρών οξέων. [5]

Melting point and latent heat of fusion: fatty acids

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
Acetic acid	16.7	184	I
Polyethylene glycol 600	20–25	146	I
Capric acid	36	152	—
Eladic acid	47	218	I
Lauric acid	49	178	II
Pentadecanoic acid	52.5	178	—
Tristearin	56	191	I
Myristic acid	58	199	I
Palmitic acid	55	163	I
Stearic acid	69.4	199	I
Acetamide	81	241	I
Methyl fumarate	102	242	I



1.3.2.2 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.

Κυρίαρχο ρόλο στη συγκεκριμένη κατηγορία κατέχουν τα ένυδρα άλατα, χαρακτηριστικό των οποίων αποτελεί το μέτριο σχετικά κόστος παραγωγής τους, αλλά το υψηλό κόστος πώλησής τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιτακτική ανάγκη συσκευασίας των συγκεκριμένων ουσιών σε προστατευτικό κάλυμμα και η χρήση πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους.

Ορισμένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των ανόργανων ΥΑΦ είναι:

- ✓ Η υψηλή ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης.
- ✓ Η ευρεία διαθεσιμότητά τους.
- ✓ Η υψηλή θερμική τους αγωγιμότητα και λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης.
- ✓ Οι μικρές μεταβολές του όγκου τους κατά την μεταβολή της φάσης τους.
- ✓ Ο μη εύφλεκτος χαρακτήρας τους. [2],[5]

Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα τα οποία ορισμένες φορές καθιστούν την χρήση των ανόργανων υλικών σε LHS συστήματα επισφαλή. Αυτά είναι:

- ✗ Το πρόβλημα του super cooling και του διαχωρισμού των φάσεων κατά τον μετασχηματισμό του υλικού, καθώς και ο σχηματισμός ιζήματος, περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών των συγκεκριμένων υλικών.
- ✗ Παρατηρείται χημική αστάθεια των υλικών αυτών, ενώ εμφανίζεται και κίνδυνος διάβρωσης του υλικού συσκευασίας.
- ✗ Κρίνεται απαραίτητη η χρήση προσθέτων πυρήνωσης. [2],[5]



Πίνακας 1.3.3: Πίνακας με τιμές του σημείου τήξης και της λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης ενδεικτικών υλικών τα οποία εντάσσονται στην κατηγορία των λιπαρών οξέων. [5]

Melting point and latent heat of fusion: salt hydrates

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O	14.0	109	II
FeBr ₃ ·6H ₂ O	21.0	105	II
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.5	148	II
FeBr ₃ ·6H ₂ O	27.0	105	II
CaCl ₂ ·12H ₂ O	29.8	174	I
LiNO ₃ ·2H ₂ O	30.0	296	I
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	189	I
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	32.0	267	II
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32.4	241	II
KFe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	33	173	I
CaBr ₂ ·6H ₂ O	34	138	II
LiBr ₂ ·2H ₂ O	34	124	I
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36.1	134	III
FeCl ₃ ·6H ₂ O	37.0	223	I
Mn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	37.1	115	II
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	40.0	279	II
CoSO ₄ ·7H ₂ O	40.7	170	I
KF·2H ₂ O	42	162	III
MgI ₂ ·8H ₂ O	42	133	III
CaI ₂ ·6H ₂ O	42	162	III
K ₂ HPO ₄ ·7H ₂ O	45.0	145	II
Zn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	45	110	III
Mg(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47.0	142	II
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47.0	153	I
Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	47	155	I
Na ₂ SiO ₃ ·4H ₂ O	48	168	II
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	48	99	II
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48.5	210	II
MgSO ₄ ·7H ₂ O	48.5	202	II
Ca(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	51	104	I
Zn(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	55	68	III
FeCl ₃ ·2H ₂ O	56	90	I
Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	57.0	169	II
MnCl ₂ ·4H ₂ O	58.0	151	II

1.3.2.3 ΕΥΤΗΚΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ.

Ως εύτηκτο μίγμα χαρακτηρίζεται η ένωση ελάχιστης τήξης η οποία αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά, καθένα απ' τα οποία τήκεται και στερεοποιείται ομοιόμορφα, σχηματίζοντας έτσι ένα μίγμα συστατικών κρυστάλλων κατά την κρυσταλλοποίηση.

Τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη κατηγορία ΥΑΦ είναι:



- ✓ Τα εύτηκτα υλικά σχεδόν πάντα τήκονται και στερεοποιούνται χωρίς διαχωρισμό, δεδομένου ότι ενώ στερεοποιούνται σχηματίζουν ένα μίγμα κρυστάλλων και ως εκ τούτου δεν δίνουν την ευκαιρία στα συστατικά να διαχωριστούν.
- ✓ Διέπονται από ικανοποιητική ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας καθώς είναι ελάχιστα χαμηλότερη από την αντίστοιχη των οργανικών υλικών.

Ως ισχυρό μειονέκτημα της συγκεκριμένης κατηγορίας θα μπορούσε να σημειωθεί το γεγονός ότι:

- ✗ Η διαθεσιμότητά τους είναι περιορισμένη, καθώς η χρήση τους αποτελεί νέα τεχνική στον τομέα της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. [2],[5]

1.3.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.

Η επιλογή του κατάλληλου ΥΑΦ για κάποιο σύστημα ή εγκατάσταση αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Το υλικό πρέπει να χαρακτηρίζεται από ορισμένες ιδιότητες θερμοδυναμικής, κινητικής και χημικής φύσεως, να αποτελεί συμφέρουσα οικονομική λύση και να διαθέτει εμπορική επάρκεια. Οι ιδιότητες που συνηγορούν στη χρήση των ΥΑΦ σε συστήματα TES κατά κατηγορία είναι:

Θερμοδυναμικές ιδιότητες (thermodynamic properties)

- ☑ Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού που επιλέγεται για συγκεκριμένη LHS εφαρμογή πρέπει να ανήκει στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.
- ☑ Το ΥΑΦ θα πρέπει να διαθέτει υψηλή λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης, ειδικά σε ογκομετρική βάση, προκειμένου να ελαχιστοποιείται το φυσικό μέγεθος της ενεργειακής μονάδας.
- ☑ Η θερμική αγωγιμότητα του υλικού τόσο στην στερεά όσο και στην υγρή του φάση θα πρέπει να είναι ιδιαίτερος υψηλή προκειμένου να ενισχύονται οι λειτουργίες της φόρτισης και αποφόρτισης του ενεργειακού συστήματος.



- ☑ Οι αμελητέας συχνότητας και μεγέθους μεταβολές του όγκου του υλικού (διαστολή- συστολή) κατά την αλλαγή φάσης και η μικρή τάση ατμών στο εύρος λειτουργίας ελαχιστοποιούν το πρόβλημα της συγκράτησης του ΥΑΦ.
- ☑ Η σταθερή συμπεριφορά κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας (διαδικασία τήξης και στερεοποίησης) του υλικού ενισχύει την διαδικασία της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας .
- ☑ Η υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης εξασφαλίζει τον περιορισμό του μεγέθους του δοχείου συγκράτησης του υλικού. [2],[5]

Κινητικές ιδιότητες (kinetic properties)

- ☑ Αμελητέα συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου του super cooling. Το φαινόμενο του super cooling σε περισσότερους από μερικούς βαθμούς θα διατάρασσε την εύρυθμη απαγωγή της αποθηκευμένης θερμότητας και σε 5-10°C θα μπορούσε να την αναστείλει εντελώς.
- ☑ Ο επαρκής ρυθμός κρυσταλλοποίησης ενισχύει την ανταπόκριση του συστήματος στις απαιτήσεις ανάκτησης θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης. [2],[5]

Χημικές ιδιότητες (chemical properties)

- ☑ Το ΥΑΦ θα πρέπει να εμφανίζει χημική σταθερότητα κατά την διάρκεια των κύκλων λειτουργίας και οι ιδιότητές του να μην υποβαθμίζονται, εξαιτίας της χημικής αποσύνθεσης ή της απώλειας νερού.
- ☑ Ο κύκλος λειτουργίας (τήξη- στερεοποίηση) να είναι πλήρως αναστρέψιμος.
- ☑ Το υλικό δεν πρέπει να εμφανίζει τοξικό, εύφλεκτο και διαβρωτικό χαρακτήρα.
- ☑ Πρέπει να υπάρχει απόλυτη συμβατότητα μεταξύ του ΥΑΦ και του δομικού υλικού στο οποίο ενσωματώνεται. [2],[5]

Οικονομικές ιδιότητες (economic properties)

- ☑ Το ΥΑΦ πρέπει να χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος τόσο παραγωγής όσο και πώλησης.
- ☑ Η διαθεσιμότητά του πρέπει να είναι επαρκής.



Ένα ΥΑΦ πρέπει να είναι ανακυκλώσιμο. [2],[5]

Το σημείο αλλαγής φάσης εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας είναι το κριτήριο το οποίο πληρείται από την πλειονότητα των ΥΑΦ. Πέραν τούτου η πλειοψηφία των υλικών δεν ικανοποιεί όλα τα κριτήρια καταλληλότητας τα οποία θα τα καθιστούσαν ιδανικά ως μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Κατά συνέπεια, πρέπει για συγκεκριμένη εφαρμογή να επιλέγεται το καταλληλότερο δυνατό ΥΑΦ και οι ιδιότητες στις οποίες υστερεί να αναπληρώνονται από ένα ορθώς σχεδιασμένο σύστημα αποθήκευσης. Για παράδειγμα, η παρεμβολή μεταλλικών πτερυγίων θα ενίσχυε την θερμική αγωγιμότητα του ΥΑΦ του ενδιαφέροντός μας ή το φαινόμενο της ανομοιόμορφης τήξης θα μπορούσε να αποφευχθεί με χρήση κατάλληλου πάχους αποθήκευσης.

1.3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ.

Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε κτιριακές εγκαταστάσεις αποτέλεσε και αποτελεί ακόμα αντικείμενο ερευνών. Απαρχή των σχετικών ερευνών αποτέλεσε η μελέτη που διεξήγαγε το 1940 η Dr Maria Telkes [21],[22] με αντικείμενο τη χρήση του δεκαένυδρου θεικού νατρίου ως μέσον αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για την θέρμανση χώρου κατά τις νυχτερινές ώρες και της ημέρες με νέφωση. Η πρώτη πειραματική εφαρμογή για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας στα κτίρια υλοποιήθηκε από την ερευνήτρια το 1970 [23]. Έκτοτε ακολούθησε εκτεταμένη έρευνα σε όλες της πτυχές ενσωμάτωσης των PCM σε κτιριακές εγκαταστάσεις. Η όλη μελέτη οδήγησε στην παραγωγή και χρήση ΥΑΦ κατάλληλων για θέρμανση, ψύξη και αερισμό κτιρίων (HVAC) υπό διάφορες κλιματολογικές συνθήκες, στην ανάπτυξη των αποτελεσματικών μεθόδων της ενθυλάκωσης των ΥΑΦ, στην ανάλυση κι ενίσχυση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών, στην απόδοση μεταφοράς θερμότητας και στην μεγάλης διάρκειας σταθερότητα, στη μαθηματική μοντελοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, στην κατάδειξη της θερμικής συνεισφοράς των ΥΑΦ στην ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων, καθώς και στην εξοικονόμηση μεγάλων ποσών ενέργειας. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών κατέδειξαν ότι η κατάλληλη χρήση των ΥΑΦ στα κτίρια ενισχύει τόσο την εξοικονόμηση ενέργειας, όσο και τη μείωση των εκπομπών CO₂, ενώ βελτιώνει το επίπεδο θερμικής άνεσης καθώς τα υλικά

δύνανται να εξομαλύνουν τις έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό του κτιρίου. Με την ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε κτιριακές εγκαταστάσεις μειώνεται και το μέγεθος του μηχανικού HVAC εξοπλισμού, ενώ αυξάνεται και ο χρόνος ζωής του.[24]

Στις κτιριακές εφαρμογές, τα ΥΑΦ μπορούν να ενσωματωθούν σε δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, τα στοιχεία ξηράς δόμησης, το ξύλο κ.α. προκειμένου να ενισχύσουν τη θερμική συμπεριφορά κτιρίων βαριάς ή ελαφριάς κατασκευής. Δύνανται επίσης να ενσωματωθούν σε κυκλώματα νερού και αέρα στα HVAC συστήματα.



a



b

Σχήμα 1.6: a. Έκχυση τσιμέντου με προσμίξεις PCM στην οροφή του κτιρίου WIL0, στην Ολλανδία. b. Εφαρμογή επιχρίσματος με πρόσμιξη μικροκάψουλων PCMs. [25]

Η χρήση των PCM στα κτίρια μπορεί να εξυπηρετήσει πλήθος λειτουργιών, όπως: την ελεύθερη ψύξη χώρου (free cooling), τη μετατόπιση φορτίων από τις ώρες αυξημένης ενεργειακής ζήτησης στις ώρες μειωμένης ζήτησης, την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, την ανάκτηση της δαπανημένης θερμότητας κ.α.

Ωστόσο, η επιτυχής ενσωμάτωση και αξιοποίηση των ΥΑΦ στις κτιριακές εγκαταστάσεις εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, όπως: το είδος και την ποσότητα των υλικών, την χρησιμοποιούμενη μέθοδο συσκευασίας, την τοποθεσία, τον προσανατολισμό, τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής και τον σχεδιασμό του κτιρίου κ.λπ. Η σωστή επιλογή του κατάλληλου PCM για την εκάστοτε εφαρμογή,



όπως έχει προαναφερθεί, πραγματοποιείται με γνώμονα κάποιες ιδιότητες του υλικού, ενώ καθοριστικό ρόλο παίζει και η κρίση του αρχιτέκτονα στον σχεδιασμό και την επιδίωξη βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου.

Στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2** της εργασίας, το οποίο παρατίθεται στη συνέχεια, ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των PCM κτιριακών εφαρμογών, ενώ παρατίθεται κατάλογος με ΥΑΦ του εμπορίου τα οποία συνεισφέρουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό στη διαμόρφωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου.[24]



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] L.Norbert, Heating, Cooling, and Lighting as Form-Givers in Architecture: Chapter 1, Heating, Cooling, Lighting, Sustainable Design Methods of Architects, 2000
- [2] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 1, January 2008, Pages 39-64
- [3] Ö. Ercan Ataer, Storage of Thermal energy, Energy Storage Systems, Volume 1, Pages 97-116
- [4] Ali H. Abedin, Marc A. Rosen, A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems, The Open Renewable Energy Journal, Volume 4, 2011, Pages 42-46
- [5] Atul 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, Volume 13, 2009, Pages 318–345
- [6] A.I. Fernandez, M. Martínez, M. Segarra, I. Martorell, L.F. Cabeza, Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 94, Issue 10, October 2010, Pages 1723-1729
- [7] S.D. Sharma, K. Sagara, Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review, International Journal of Green Energy, Volume 2, 2005, Pages 1–56
- [8] Storage Technology for Process Heat Applications, <http://www.preheat.org>, access date: 27 Μαρτίου 2012
- [9] H. P. Garg, S. C. Mullick, A. K. Bhargava, Solar thermal energy storage, 1985, Pages 1-642
- [10] Χρήσιμες πληροφορίες για το προϊόν DOWTHERM™ της Dow Chemical Company, <http://www.dow.com>, access date 24 Μαρτίου 2012



- [11] Therminol®: Heat Transfer Fluids by Solutia, <http://www.therminol.com>, access date 24 Μαρτίου 2012
- [12] Χρήσιμες πληροφορίες για το προϊόν Coastal Chemical Hitec®, <http://www.coastalchem.com>, access date 24 Μαρτίου 2012
- [13] John Littler, Randall Thomas, Design With Energy: The Conservation and Use of Energy in Buildings, 1984 , Pages 1-366
- [14] Phase Change Energy Solutions, <http://www.phasechange.com>, access date 27 Μαρτίου 2012
- [15] K.K. Pillai, B.J. Brinkwarth, The storage of low grade thermal energy using phase change materials, Applied Energy, Volume 2,1976, Pages 205–216
- [16] X. Wang, E. Lu, W. Lin, T. Liu, Z. Shi, R. Tang, C.Wang, Heat storage performance of the binary systems neopentyl glycol/pentaerythritol and neopentyl glycol/trihydroxy menthylaminomethane as solid phase change materials, Energy Conservation and Management , Volume 41, 2000, Pages 129-134
- [17] H.P. Garg, S.C. Mullick, A.K. Bhargava, Solar Thermal Energy Storage. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Co, 1985
- [18] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 3, April 2011, Pages 1675-1695
- [19] Chris Bales, Thermal Properties of Materials for Thermo-chemical Storage of Solar Heat, A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme - Task 32, Advanced storage concepts for solar and low energy buildings, 2005
- [20] Phase Change Energy Storage Technology, Heat and Cold storage with Phase Change-An Innovation for Storing Thermal Energy and Temperature Control, <http://www.rgees.com>, access date 28 Μαρτίου 2012
- [21] M. Telkes, Review of solar house heating, Heat Vent, Volume 46, Issue 6,1949, Pages 68–74



[22] M. Telkes, Storing solar heat in chemicals, Heat Vent , Volume 46, Issue 11, 1949, Pages 79-86

[23] M. Telkes, Solar energy storage, ASHRAE J, Volume 16, Issue 9, 1974, Pages 38-44

[24] Na Zhu, Zhenjun Ma, Shengwei Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review, Energy Conversion and Management, Volume 50, Issue 12, December 2009, Pages 3169-3181

[25] N. Παπαμανώλης, Εφαρμογές των Υλικών Αλλαγής Φάσης στα Κτίρια, <http://www.econ3.gr>, access date 29 Μαρτίου 2012



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΥΑΦ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ.

Η τεχνολογία αξιοποίησης των PCMs σε κτιριακές εφαρμογές ακολουθεί δύο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη στοχεύει στον έλεγχο κι εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου και η δεύτερη στην αποθήκευση, διακίνηση κι απελευθέρωση ποσών θερμότητας κατάλληλων για την επίτευξη ικανοποιητικών ορίων θερμικής άνεσης.

2.1.1 PCM ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

Η δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε δομικά υλικά, όπως σκυρόδεμα (τσιμέντο), κονίαμα (γύψος), φυσική πέτρα και ξύλο, καθιστά τα ΥΑΦ συστατικά κατάλληλα για την κατασκευή κι επένδυση της τοιχοποιίας των κτιριακών εγκαταστάσεων. Επιπροσθέτως η ικανότητά τους να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή διευκολύνει την βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων (αύξηση της θερμικής απόδοσής τους).

2.1.1.1 ΥΑΦ ΚΑΤΑΛΛΗΛΑ ΓΙΑ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Η θερμική μάζα (θερμοχωρητικότητα) των τοίχων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο των κτιρίων. Σε ένα κτίριο κατασκευασμένο από υλικά μικρής θερμοχωρητικότητας οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος γίνονται άμεσα αισθητές στο εσωτερικό του. Αντίθετα, σε ένα κτίριο κατασκευασμένο από ΥΑΦ (ελαφριές κατασκευές με μεγάλη θερμοχωρητικότητα), εξασφαλίζεται εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Ο έλεγχος της εσωτερικής θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τους βελτιωμένους μηχανισμούς ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ των ΥΑΦ και του περιβάλλοντος επιτυγχάνουν ικανοποιητικά όρια θερμικής άνεσης. ΥΑΦ με θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας εντός των ορίων θερμικής άνεσης (20°C - 30°C) διακινούνται ήδη στο εμπόριο ως συστατικά της τοιχοποιίας των κτιρίων (**Πίνακας**



2.1.1.1.a), ενώ άλλα βρίσκονται ακόμη εντός εργαστηριακού περιβάλλοντος για περαιτέρω μελέτη της θερμικής τους συμπεριφοράς (**Πίνακας 2.1.1.1.b**)



Πίνακας 2.1.1.1.a ΥΑΦ ΤΟΥ ΕΜΠΟΡΙΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
Micronal® PCM DS 5000	BASF SE	Micro- encapsulated Paraffin mixture (Dispersion)	26	45	-----	BASF Micronal PCM Brochure 2009 [1]	[1]
Micronal® PCM DS 5007	BASF SE	Micro- encapsulated Paraffin mixture (Dispersion)	23	41	-----	BASF Micronal PCM Brochure 2009 [1]	[1]
Micronal® PCM DS 5030	BASF SE	Micro- encapsulated Paraffin mixture (Dispersion)	21	37	-----	BASF Micronal PCM Brochure 2009 [1]	[1]
Micronal® PCM DS 5001	BASF SE	Micro- encapsulated Paraffin mixture (Pulver)	26	110	-----	BASF Micronal PCM Brochure 2009 [1]	[1]



**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS**

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
Micronal® PCM DS 5008	BASF SE	Micro- encapsulated Paraffin mixture (Pulver)	23	100	-----	BASF Micronal PCM Brochure 2009 [1]	[1]
Micronal® PCM DS 5029	BASF SE	Paraffin mixture (Pulver)	21	90	-----	BASF Micronal PCM Brochure 2009[1]	[1]
THERMUSOL® HD28SE	Capzo International BV	salt hydrate	28	110	-----	THERMUSOL® HD28SE MICRO ENCAPSULATED SALT-HYDRATES [2]	[2]
ClimSel™ C21	Climator Sweden AB	salt hydrate	21	144	0,5-0,7	Physical Data for ClimSel C21 [3]	[3]
ClimSel™ C23	Climator Sweden AB	salt hydrate	23	148	-----	-----	
ClimSel™ C24	Climator Sweden AB	salt hydrate	24	126	0,5-0,7	Physical Data for ClimSel C24 [3]	[3]
ClimSel™ C28	Climator Sweden AB	salt hydrate	28	162	0,5-0,7	Physical Data for ClimSel C28 [3]	[3]



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
AC.27	Cristopia Energy Systems	salt hydrate	27	207	-----	Characteristics for 1m ³ STL/ Nodule type [4]	[4], [5]
DELTA®-COOL 24	Dörken GmbH & Co. KG	Macro encapsulated salt hydrate	22 - 28 °C	158	1.12 / 0.56	Technical Data of DELTA®-COOL 24 [6]	[6]
DELTA®-COOL 28	Dörken GmbH & Co. KG	salt hydrate	26 - 30 °C	188	1.12/ 0.56	Technical Data of DELTA®-COOL 28 [6]	[6]
DuPont™ Energain® PCM Thermal Mass Panel	Du Pont de Nemours	Paraffin Wax (The core material of the panel is a mix of a copolymer and a paraffin wax)	21.7	>70	Solid-0.18 Liquid-0.14	Energain Datasheet [7]	[7]
Micronal® PCM SmartBoard	Knauf	Micro- encapsulated special wax mixture of BASF SE	23 or 26	28.7 ---	0.134	Technical Data of PCM Smartboard. E. [8]	[8]
STL27	Mitsubishi Chemical	Salt hydrate	27	213	-----		[5]



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ	
PlusICE® S30	PCM	PCM Products Ltd	Salt hydrate	30	190	0.480	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PlusICE® S27	PCM	PCM Products Ltd	Salt hydrate	27	183	0.540	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PlusICE® S25	PCM	PCM Products Ltd	Salt hydrate	25	180	0.540	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PlusICE® S23	PCM	PCM Products Ltd	Salt hydrate	23	175	0.540	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PlusICE® S21	PCM	PCM Products Ltd	Salt hydrate	22	170	0.540	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PlusICE® A28	PCM	PCM Products Ltd	Organic PCM	28	155	0.210	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ	
PlusICE® A26	PCM	PCM Products Ltd	Organic PCM	26	150	0.210	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PlusICE® A25	PCM	PCM Products Ltd	Organic PCM	25	150	0.180	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PlusICE® A24	PCM	PCM Products Ltd	Organic PCM	24	145	0.180	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PlusICE® A23	PCM	PCM Products Ltd	Organic PCM	23	145	0.180	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]



**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS**

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
PlusICE® PCM A22	PCM Products Ltd	Organic PCM	22	145	0.180	PlusICE ® Phase Change Materials [9]	[9]
PURE TEMP 20	PURE TEMP™ PCMs energy solutions	Patented natural vegetable based PCMs (Green Technology)	20	190	-----	PURE TEMP™ TECHNOLOGY [9]	[9]
PURE TEMP 23	PURE TEMP™ PCMs energy solutions	Patented natural vegetable based PCMs (Green Technology)	23	203	-----	PURE TEMP™ TECHNOLOGY [10]	[10]
PURE TEMP 24	PURE TEMP™ PCMs energy solutions	Patented natural vegetable based PCMs (Green Technology)	24	189	-----	PURE TEMP™ TECHNOLOGY [10]	[10]



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
PURE TEMP 27	PURE TEMP™ PCMs energy solutions	Patented natural vegetable based PCMs (Green Technology)	27	200	-----	PURE TEMP™ TECHNOLOGY [10]	[10]
PURE TEMP 28	PURE TEMP™ PCMs energy solutions	Patented natural vegetable based PCMs (Green Technology)	28	205	-----	PURE TEMP™ TECHNOLOGY [10]	[10]
PURE TEMP 29	PURE TEMP™ PCMs energy solutions	Patented natural vegetable based PCMs (Green Technology)	29	189	-----	PURE TEMP™ TECHNOLOGY [10]	[10]



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
PURE TEMP 30	PURE TEMP™ PCMs energy solutions	Patented natural vegetable based PCMs (Green Technology)	30	163	-----	PURE TEMP™ TECHNOLOGY [10]	[10]
RUBITHERM® CSM Panel with SP 22 A17	Rubitherm GmbH	SP 22 A17 Salt hydrate	22 - 24	150	0.6	Preliminary Data Sheet RUBITHERM® SP 22 A17 [11]	[11]
RUBITHERM® CSM Panel with SP 25 A8	Rubitherm GmbH	SP 25 A8 Salt hydrate	25 - 27	160	0.6	Preliminary Data Sheet RUBITHERM® SP 25 A08 [11]	[11]
RUBITHERM® CSM Panel with SP 26 A9	Rubitherm GmbH	SP 26 A9 Salt hydrate	26 - 28	170	0.6	Preliminary Data Sheet RUBITHERM® SP 26 A09 [11]	[11]



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
RUBITHERM® CSM Panel with SP 29 A15	Rubitherm GmbH	SP 29 A15 Salt hydrate	28 - 30	190	0.6	Preliminary Data Sheet RUBITHERM® SP 29 A15 [11]	[11]
RUBITHERM® CSM Panel with RT 28 HC	Rubitherm GmbH	RT 28 HC Paraffin	28	245	0.2	Preliminary Data Sheet RUBITHERM® RT 28 HC [11]	[11]
RUBITHERM® CSM Panel with RT 21	Rubitherm GmbH	RT 21 Paraffin	21	134	0.2	Data Sheet RUBITHERM® RT 21 [11]	[11]
RUBITHERM® CSM Panel with RT 27	Rubitherm GmbH	RT27 Paraffin	27	179	0.2	Data Sheet RUBITHERM® RT 27 [11]	[11]
RUBITHERM® CSM Panel with RT 31	Rubitherm GmbH	RT 31 Paraffin	29	169	0.2	Data Sheet RUBITHERM® RT 31 [11]	[11]



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS

ΠΡΟΪΟΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	PCM	Θ. ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (°C)	ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (kJ/kg)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/mK)	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
Latest™ 29T	TEAP	Salt hydrate	28-30	188	1	TECHNO- COMMERCIAL STATEMENT OF PCM PRODUCT T-SERIES LATEST™, [12]	[5],[12]
Latest™ 25T	TEAP	Salt hydrate	24-26	188	1	TECHNO- COMMERCIAL STATEMENT OF PCM PRODUCT T-SERIES LATEST™, [12]	[12]
Latest™ 20T	TEAP	Salt hydrate	19-20	188	1	TECHNO- COMMERCIAL STATEMENT OF PCM PRODUCT T-SERIES LATEST™, [12]	[12]



Πίνακας 2.1.1.1.b ΥΑΦ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΩΣ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ)

ΠΡΟΪΟΝ	PCM	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
PCM plasterboard	Fatty acids	Incorporation in a lightweight passive 120 m ² solar house with good insulation and a large area of south facing glazing in Madison, Wisconsin	K. Peippo, P. Kauranen, P.D. Lund	[13],[14]
PCM gypsum wallboard	Fatty acids Paraffin waxes	Incorporation in a room not directly illuminated by the sun	D. Neeper	[13],[15]
PCM gypsum wallboard	Butyl Stearate (BS) commercial grade	Incorporation in a laboratory scale energy storage gypsum wallboard	D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, E. Ghanbari	[16],[13]
PCM gypsum wallboard	Octadecane wax	Incorporation in a passive solar application	R.J. Kedl, T.K. Stovall	[13],[17]
PCM plasterboard	Linear alkyl hydrocarbon (from petroleum)	Incorporation in a plasterboard into the wet stage of its manufacture	I.O. Salyer, A. K. Sircar	[13],[18]
PCM gypsum wallboard	Butyl Stearate (BS) commercial grade	Incorporation in a full scale outdoor test room with PCM gypsum board as inside wall lining.	A.K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman	[13],[19]



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΚΤΙΡΙΩΝ/ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ TRNSYS

ΠΡΟΪΟΝ	PCM	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ
PCM gypsum wallboard	Mixtures of methyl-esters, methyl palmitate and methyl stearate, and mixtures of short- chain acids, capric and lauric acid.	Introduction into gypsum wallboard with possible thermal storage applications for the Florida climate.	M. Shapiro	[13],[20],[21]
PCM gypsum wallboard	Commercial paraffin (K18)	Incorporation of PCM wallboards into simple structures.	J.K. Kissock, J.M Hannig., T.I. Whitney, M.L. Drake	[13],[22]
PCM concrete blocks	BS and Commercial paraffin	Incorporation of PCM into concrete blocks.	T. Lee, D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman	[13],[23]
PCM concrete blocks	BS, dodecanol, paraffin, tetradecanol	Incorporation of PCM into concrete blocks.	D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman	[13],[24]
PCM concrete blocks	Sodium thiosulphate penta hydrate (Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O)	Incorporation of PCM into concrete blocks.	M. Hadjieva, R. Stoykov, T. Filipova	[13],[25]
PCM wood-lightweight concrete	PCM Rubitherm GR40 and GR50	Building interior and outer wall construction.	R. Mehling, A. Krippner, Hauer	[13],[26]



2.1.1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΑΦ ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Η τεχνική εφαρμογή των ΥΑΦ σε δομικά υλικά και στοιχεία ξηράς δόμησης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή της συσκευασίας τους (μέσα συγκράτησης) και του τρόπου ενσωμάτωσής τους. Τέσσερις είναι οι βασικοί τρόποι ενσωμάτωσής τους σε δομικά στοιχεία κι εγκαταστάσεις [27]: 1. άμεση ενσωμάτωση, 2. απορρόφηση, 3. ενθυλάκωση και 4. προσάρτηση του ΥΑΦ.

1. ΑΜΕΣΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΟΥ ΥΑΦ ΣΤΟ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ (direct incorporation).

Η πρώτη μέθοδος της άμεσης ενσωμάτωσης αφορά στην εισαγωγή του ΥΑΦ στην γραμμή παραγωγής του δομικού στοιχείου κατά το στάδιο όπου αναμιγνύονται τα υπόλοιπα συστατικά του μίγματος του παρασκευάσματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το [16] της βιβλιογραφίας, όπου παρασκευάζεται PCM γυψοσανίδα με την μέθοδο της άμεσης ενσωμάτωσης, όπως περιγράφεται παρακάτω. Στα πλαίσια των πειραματικών διεργασιών, μελετήθηκε η θερμική συμπεριφορά PCM γυψοσανίδας εργαστηριακής κλίμακας. Κατά την παραγωγή της γυψοσανίδας, στο στάδιο της ανάμιξης των συμβατικών συστατικών της (συμβατικός γύψος και συστατικά) εισήχθη βουτύλιο στεατικού οξέως (BS) εμπορικού βαθμού το οποίο κι ενσωματώθηκε στη μάζα της γυψοσανίδας. Η άμεση ενσωμάτωση του ΥΑΦ (BS) διευκολύνθηκε κι επισπεύθηκε χάρη στην παρουσία παραγόντων διασποράς στο μίγμα. Η συγκεκριμένη διεργασία είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή PCM γυψοσανίδας με φυσικοχημικές ιδιότητες ανάλογες με αυτές της πρότυπης (ιδανικής) γυψοσανίδας. Χαρακτηριστικό του νέου αυτού παρασκευάσματος αποτελεί η μεγάλη θερμοχωρητικότητα, η οποία εμφανίζεται δεκαπλάσια της θερμοχωρητικότητας της συμβατικής γυψοσανίδας, στοιχείο θετικό για την αποθήκευση και διακίνηση μεγαλύτερου ποσού θερμότητας στην εγκατάσταση [16],[13]. Η μέθοδος της άμεσης ενσωμάτωσης του ΥΑΦ προβάλλει να είναι η οικονομικότερη μέθοδος ένταξής του, ειδικά για τις γυψοσανίδες [28].



2. ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ ΥΑΦ ΑΠΟ ΤΟ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ (immersion).

Η μέθοδος της **απορρόφησης** του ΥΑΦ από το δομικό στοιχείο αποτελεί ίσως την απλούστερη μέθοδο ενσωμάτωσης του υλικού. Κατά την διαδικασία της απορρόφησης, το PCM θερμαίνεται σε ειδική φιάλη και υπό ελεγχόμενη θερμοκρασία και συναντά σε υγρή μορφή το πορώδες δομικό υλικό σε δεξαμενή ελεγχόμενης θέρμανσης όπου και πραγματοποιείται η προσρόφησή του. Εν συνεχεία το εμποτισμένο υλικό απομακρύνεται και αφήνεται να στεγνώσει και να αποβάλει το περιττό ΥΑΦ. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αποτελεί ένα φαινομενικά ξηρό, αλλά πλήρως εμπλουτισμένο δομικό υλικό [29],[30].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη που διεξήγαγε ο Mehling και οι συνεργάτες του [13] με αντικείμενο την ενσωμάτωση ΥΑΦ σε μίγμα ξύλου κι ελαφρού σκυροδέματος, παρασκεύασμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή εσωτερικής κι εξωτερικής τοιχοποιίας κτιρίου. Δύο ΥΑΦ προς απορρόφηση χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη διεργασία: το **GR40** και το **GR50 της RUBITHERM®**. Τα αποτελέσματα της ενσωμάτωσης έδειξαν πως με την απορρόφηση των ΥΑΦ από δομικά υλικά, τα δεύτερα αποκτούν μεγαλύτερη αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα, ενώ δεν επηρεάζονται οι μηχανικές τους ιδιότητες.

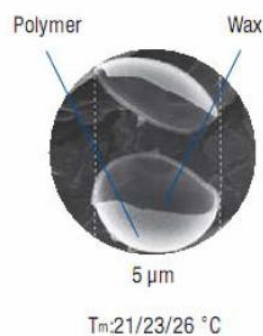
3. ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ ΤΟΥ ΥΑΦ – PCM SLURRIES

Η **μακρο-ενθυλάκωση (macro encapsulation)** και η **μικρο-ενθυλάκωση (micro encapsulation)** αποτελούν τις δύο κύριες συνιστώσες της μεθόδου της **ενθυλάκωσης**. Η πρώτη μέθοδος (**macro encapsulation**) περιλαμβάνει την ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε αγωγούς, σφαίρες, σακουλάκια, πάνελς και δοχεία, μέσα συγκράτησης τα οποία είτε δρουν άμεσα ως εναλλάκτες θερμότητας είτε μπορούν να ενσωματωθούν σε δομικά στοιχεία. Στατιστικά, πειράματα τα οποία διεξήχθησαν με σκοπό την μελέτη της μεθόδου της μακρο-ενθυλάκωση δεν είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στους εξής δύο παράγοντες: 1. το ΥΑΦ διέπεται από χαμηλή αγωγιμότητα, 2. κατά το στάδιο της ανάκτησης της θερμότητας απ' την υγρή φάση, το ΥΑΦ στερεοποιείται περιμετρικά και ως εκ τούτου αναστέλλεται η αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας [13].

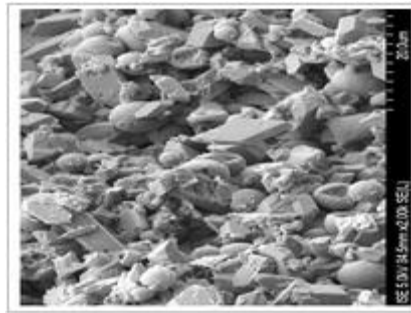


Σχήμα 2.1.7: Εφαρμογή PCMs (Dorkins DELTA®-COOL 24) σε σακουλάκια με αλουμινένιο περίβλημα [31].

Σε αντίθεση με την μακροενθυλάκωση, η μικροενθυλάκωση (**micro encapsulation**) αποτελεί διαδεδομένη και πρακτικά εφαρμόσιμη μέθοδο συγκράτησης του ΥΑΦ, με τέτοιο τρόπο ώστε αυτό να μην επηρεάζει δυσμενώς την λειτουργία του δομικού υλικού στο οποίο περιέχεται. Κατά την μικροενθυλάκωση, μικρά σφαιρικά ή ραβδοειδή PCM σωματίδια περιορίζονται σε λεπτή πολυμερή μεμβράνη (film) κι έπειτα ενσωματώνονται σε διαμορφώσεις, συμβατές με την συγκρατητική αυτή μεμβράνη. Οι μικρές διαστάσεις των σωματιδίων διευκολύνουν πολύ την ροή της θερμότητας και ο συγκεκριμένος τρόπος συγκράτησης επιτρέπει στο ΥΑΦ να ενσωματώνεται με απλό και οικονομικό τρόπο σε συμβατικά υλικά κατασκευής [13].



Σχήμα 2.1.8: Απεικόνιση μικροενθυλακωμένου ΥΑΦ/ Micronal® PCM της BASF [1].



Σχήμα 2.1.9: Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου με μικροκάψουλες με PCMs (σφαιρίδια) αναμεμιγμένα με υλικά επιχρίσματος [31].

Περιγραφικό παράδειγμα [32] εφαρμογής της μεθόδου της μικροενθυλάκωσης αποτελεί η μελέτη και σύγκριση της θερμικής συμπεριφοράς δύο όμοιων θαλαμίσκων στην Puigverd de Lleida (Ισπανία) εκ των οποίων ο ένας κατασκευάστηκε από συμβατικό σκυρόδεμα και ο άλλος από PCM-σκυρόδεμα (σκυρόδεμα εμπλουτισμένο με μικροενθυλακωμένο ΥΑΦ- **Micronal® PCM** της **BASF**) . Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την δυνατή προσαρμογή ενθυλακωμένου ΥΑΦ σε δομικό υλικό και την αποτελεσματική εξοικονόμηση ενέργειας στον θαλαμίσκο από PCM-σκυρόδεμα.

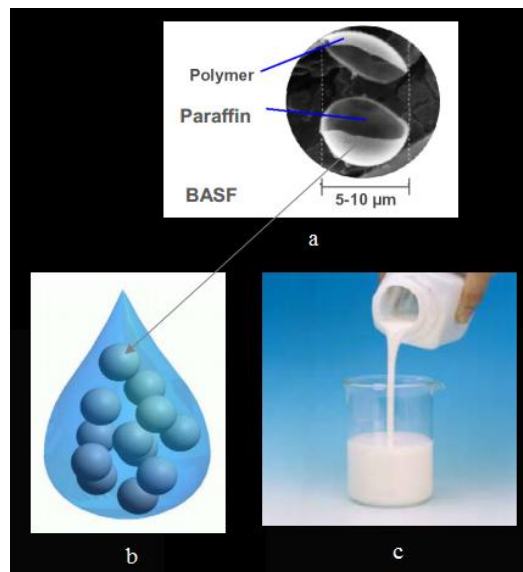
Ίσως μια από τις αποδοτικότερες και πιο αντιπροσωπευτικές μορφές μικροενθυλάκωσης αποτελούν τα **PCM slurries**.

Έως το 1994 περίπου επιχειρούνταν η χρήση και αξιολόγηση PCM συστημάτων κλιματισμού, τα οποία διέθεταν δίκτυα σωληνώσεων κυκλοφορίας ρευστού (ως επί το πλείστον νερό) και ΥΑΦ. Η χρήση διάσπαρτων PCM σωματιδίων στο ρευστό των συγκεκριμένων εγκαταστάσεων ενίσχυε σημαντικά την χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης του συστήματος. Το υδαρές μίγμα νερού και αιωρούμενων σωματιδίων ΥΑΦ αποτέλεσε τα λεγόμενα PCM slurries. Η τεχνική των PCM slurries εφαρμόστηκε αρχικά σε συστήματα ψύξης. Ο Cleary και οι συνεργάτες του [33] μελετώντας την εφαρμογή των PCM slurries διαπίστωσαν ότι ένα υδαρές PCM μίγμα αυτού του είδους με περιεκτικότητα σωματιδίων ΥΑΦ 25% κατ' όγκο διαθέτει θερμοχωρητικότητα διπλάσια ή ακόμα και τετραπλάσια εκείνης του κρύου νερού. Το συμπέρασμα της συγκεκριμένης έρευνας κατέδειξε την καταλληλότητα του PCM slurry ως μέσον διακίνησης θερμότητας σε συστήματα ψύξης τα οποία έως τότε λειτουργούσαν με ρέον μέσον το καθαρό νερό. Αν και η συγκεκριμένη PCM τεχνική πρόβαλε πολλά υποσχόμενη, το γεγονός ότι τα PCM σωματίδια αιωρούνταν ελεύθερα



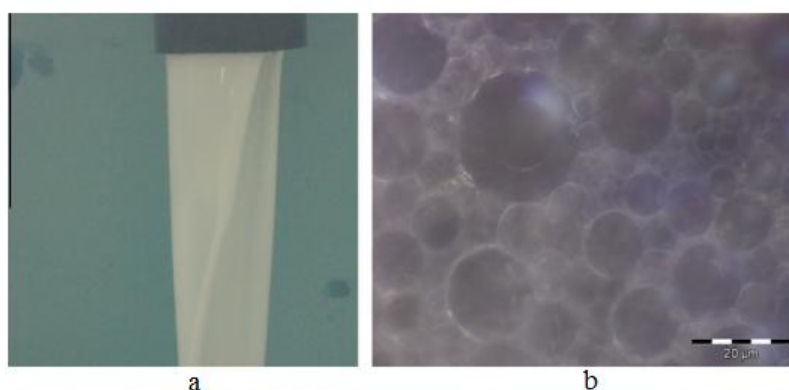
από μέσο συγκράτησης (κάψουλες) στο ρευστό αποτέλεσε ισχυρό μειονέκτημα. Τα PCM σωματίδια κατά την ανομοιόμορφη κίνησή τους εντός του υγρού έρχονταν σε επαφή μεταξύ τους κι εξαιτίας της κολλώδους επιφάνειάς τους συνδέονταν προς σχηματισμό συσσωματωμάτων. Οι συγκεκριμένες μάζες ανέκοπταν τη ροή του ρευστού στις σωληνώσεις εμποδίζοντας την κυκλοφορία του υδαρούς μίγματος εντός του δικτύου. Εκτός αυτού, η χρήση των PCM slurries απαιτούσε εξοπλισμό διαχωρισμού για εκ νέου χρήση των αμιγών σωματιδίων ΥΑΦ από το μίγμα, γεγονός το οποίο καθιστούσε τα συστήματα αυτά αρκετά δαπανηρά. [34]

Λύση στο πρόβλημα του δαπανηρού εξοπλισμού και της δημιουργίας PCM μαζών στις εγκαταστάσεις των PCM slurries έδωσε η μέθοδος της μικροενθυλάκωσης. Οι παραφίνες (όπως το δεκατετράνιο και το δεκαπεντάνιο) ως PCM έχουν τη δυνατότητα να ενθυλακώνονται σε κάψουλες μεγέθους μόλις μερικών μm (→ μέθοδος η οποία δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί για την συσκευασία των ένυδρων αλάτων [35]). Όταν οι μικροκάψουλες αυτές διαχυθούν σε ρευστό (συνήθως νερό), δημιουργείται ένα υδαρές μίγμα με διακριτές PCM κάψουλες το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσον αποθήκευσης και διακίνησης θερμότητας. Το συγκεκριμένο υδαρές μίγμα ΥΑΦ αποτελεί το λεγόμενο **MCPC slurry** (**Mi**Croencapsulated **P**hase **C**hange slurry) κι εξαιτίας της πολύ μικρής διαμέτρου των καψουλών που περιέχει συμπεριφέρεται ως ομογενές μίγμα.



Σχήμα 2.1.10: a. Εικόνα από μικροσκόπιο ενθυλακωμένων σωματιδίων παραφίνης της εταιρείας BASF, b. Σχηματική απεικόνιση των μικροκαψουλών εντός του ρευστού, c. Υδαρές μίγμα MCPC slurry της εταιρείας BASF. [36]

Τα MCPC slurries ως μέσα μεταφοράς θερμότητας εμφανίζουν ενισχυμένη θερμοχωρητικότητα λόγω της παρουσίας των ενθυλακωμένων ΥΑΦ, ενώ δεν απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος εξοπλισμός για την παραγωγή αμιγών PCM σωματιδίων, διότι τα συγκεκριμένα ενθυλακωμένα σωματίδια διαφοροποιούνται από το υπόλοιπο ρευστό. [34] ,[37]



Σχήμα 2.1.11: Απεικόνιση των PCM slurries σε θερμοκρασία δωματίου a. κατά την έξοδό τους από αγωγό, b. σε φωτογραφία από μικροσκόπιο. [38]

Αναφορά σε πιο πρακτική εφαρμογή των PCM slurries παρατίθεται στην **Παράγραφο 2.1.3** όπου και γίνεται πιο κατανοητή η επίδραση των PCM μιγμάτων στα συστήματα ψύξης οροφής.



Εκτός από την δοκιμασμένη με επιτυχία χρήση των PCM slurries σε συστήματα ψύξης, έχει προταθεί η χρήση τους και σε συστήματα θέρμανσης χώρου. Το 2005 οι Heinz και Streicher [39] από το Ινστιτούτο Θερμικής Μηχανικής (Institute of Thermal Engineering) του Graz University of Technology διεξήγαγαν μία σειρά πειραμάτων σε δεξαμενή αποθήκευσης η οποία περιείχε μικροενθλακωμένο PCM slurry. Το PCM υδαρές μίγμα, με θερμοκρασία τήξης 60°C , διατέθηκε από την εταιρεία BASF. Στα πλαίσια της διεξαγωγής των πειραμάτων, εξετάστηκαν slurries με διαφορετικές συγκεντρώσεις ΥΑΦ, ως ρευστά αποθήκευσης θερμότητας, σε δεξαμενή χωρητικότητας 200 lt. Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε την φόρτιση και αποφόρτιση της δεξαμενής με διαφορετικά είδη εναλλακτών θερμότητας και την ανάλυση των συντελεστών τόσο της φυσικής (\rightarrow με χρήση εσωτερικού εναλλάκτη θερμότητας) όσο και της εξαναγκασμένης συναγωγής (\rightarrow με χρήση εξωτερικού εναλλάκτη θερμότητας επίπεδης πλάκας). Ο σκοπός του συγκεκριμένου project ήταν η ανάπτυξη κι εξέταση του σεναρίου εφαρμογής των PCM slurries σε συστήματα θέρμανσης χώρου και η αξιολόγηση της χρηστικότητάς τους σε πρακτικές εφαρμογές. Τα πορίσματα της ανάλυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξαν ότι μέχρι πρότινος δεν υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης ολοκληρωμένου συστήματος θέρμανσης με ρέον μέσον PCM slurry. [39], [40]

4. ΠΡΟΣΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΥΑΦ ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η προσάρτηση PCM επιπέδου στα υπάρχοντα επίπεδα της τοιχοποιίας της κατασκευής αποτελεί τον τελευταίο και πιο διαδεδομένο στον εμπορικό κόσμο τρόπο ένταξης του ΥΑΦ σε κτιριακές εγκαταστάσεις. Η προσαρμογή των ΥΑΦ στα κτιριακά κελύφη υλοποιείται μέσω PCM γυψοσανίδων και PCM σύνθετων πάνελς. Στην περίπτωση αυτή, το PCM αποτελεί ένα ξεχωριστό στρώμα υλικού, το οποίο μπορεί να προστεθεί στην κατασκευή ενός τυπικού κτιρίου προκειμένου να αυξήσει την ικανότητά του για αποθήκευση ενέργειας [41].

Το **Energain® PCM πάνελ** της εταιρείας **Du Pont** ανήκει στην κατηγορία των PCM στοιχείων τα οποία ενσωματώνονται στην κτιριακή τοιχοποιία, ως ανεξάρτητα επίπεδα. Συνίσταται από κερί παραφίνης, το οποίο σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 18°C βρίσκεται στην στερεή του κατάσταση. Όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του χώρου, στον οποίο το πάνελ έχει προσαρμοστεί, αυξηθεί εξαιτίας του ηλιακού

κέρδους ή των εξωτερικών θερμοκρασιών, και φτάσει τους 22 °C, λαμβάνει χώρα ο μετασχηματισμός της φάσης και η παραφίνη τήκεται. Κατά την μεταβολή της φάσης το PCM πάνελ απορροφά την υπάρχουσα θερμότητα την οποία και αποδίδει ξανά στον χώρο, όταν η εσωτερική θερμοκρασία αγγίξει τους 18°C. Η συνεισφορά του συγκεκριμένου προϊόντος στην θερμική συμπεριφορά της κτιριακής εγκατάστασης γίνεται αντιληπτή, αν αναλογιστεί κανείς ότι 10 mm του Dupont™ Energain® PCM κρίνονται επαρκή για την κατά το βέλτιστον απορρόφηση κι απελευθέρωση θερμότητας στον χώρο, την στιγμή που για την διακίνηση ανάλογο ποσού θερμότητας στο ίδιο δομικό περιβάλλον είναι απαραίτητα 8cm συμβατικού σκυροδέματος [7].

Η λειτουργία του πάνελ καθ' όλο το 24ωρο προσφέρει ικανοποιητικό ποσοστό θερμικής άνεσης χωρίς περαιτέρω δαπάνη μεγάλων ποσών ενέργειας.

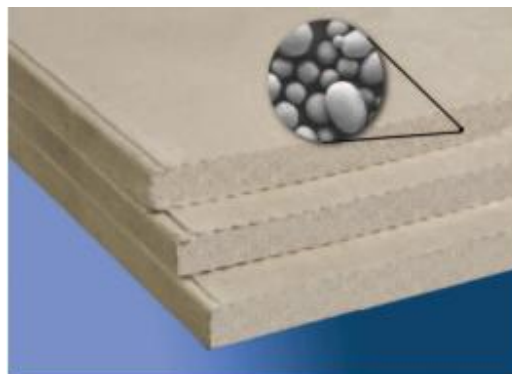


Σχήμα 2.1.12: Απεικόνιση του Dupont™ Energain® PCM πάνελ.[7]



Σχήμα 2.1.13: Φωτογραφία πειραματικού τοίχου επενδεδυμένου με Dupont™ Energain® PCM πάνελς.[42]

Ευρεία εφαρμογή στην σύγχρονη δόμηση βρίσκει και η **Micronal® PCM SmartBoard**. Πρόκειται για ένα εμπορικό προϊόν το οποίο παρήχθη από την εταιρεία **Knauf** και διαθέτει ενσωματωμένο ΥΑΦ το **Micronal® PCM** της εταιρείας **BASF**.



Σχήμα 2.1.14: Απεικόνιση της Knauf Micronal® PCM SmartBoard με ενσωματωμένο ΥΑΦ της εταιρείας BASF [1].

Η συγκεκριμένη κατασκευή, ως υλικό ξηράς δόμησης, προσαρμόζεται στις κτιριακές εγκαταστάσεις. Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης κατασκευής αποτελεί η αυξημένη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας καθώς η θερμοχωρητικότητα τοιχοποιίας διπλά εξοπλισμένης με 15mm Micronal® PCM SmartBoard αντιστοιχεί στην τιμή της θερμοχωρητικότητας τοιχοποιίας



κατασκευασμένης από σκυρόδεμα 14cm ή τοιχοποιίας από πλίνθους (τούβλα) πάχους 36,5 cm. [1],[8].

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση των PCM προϊόντων στις κτιριακές εγκαταστάσεις εξυπηρετεί κατά βάση δύο σκοπούς: 1.αυξάνει την χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης των εγκαταστάσεων της τοιχοποιίας, με αποτέλεσμα να επιτρέπει την απορρόφηση, απελευθέρωση και διακίνηση μεγαλύτερων ποσών θερμότητας. 2.εξυπηρετεί την χρήση ελαφρύτερων και μικρότερου πάχους κατασκευών με ιδιότητες ισοδύναμες ή και βελτιωμένες των αντίστοιχων ιδιοτήτων των συμβατικών υλικών.

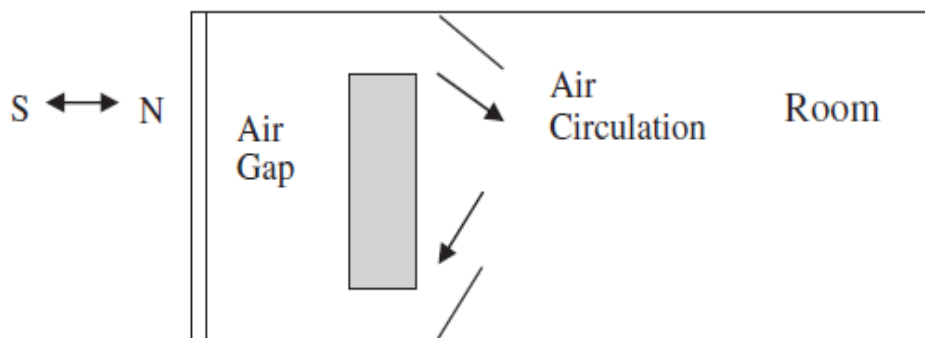
2.1.1.3 ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΥΑΦ ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ.

2.1.1.3.α PCM ηλιακοί τοίχοι.

Ο τοίχος Trombe αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μονάδας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (τοίχος-συλλέκτης) κι εντάσσεται στην κατηγορία των συστημάτων έμμεσου ηλιακού κέρδους. Οικοδομείται συνήθως στη νότια πλευρά του κτιρίου και η συμβατική κατασκευή του περιλαμβάνει συμπαγή τοίχο από σκυρόδεμα μεγάλου πάχους και γυάλινη (ή πλαστική) επιφάνεια μονού ή διπλού επιπέδου τοποθετημένη σε απόσταση περίπου 10cm από τον τοίχο. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι σκουρόχρωμη, προκειμένου να απορροφά την προερχόμενη απ' την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία θερμότητα, η οποία με την σειρά της αποθηκεύεται στην μάζα του τοίχου. Όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου του κτιρίου αποκτήσει τιμή μικρότερη από αυτή της επιφάνειας του τοίχου, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται, θερμαίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο κάθε επιφάνεια του χώρου.

Αν και παραδοσιακά οι τοίχοι Trombe βασίζουν την αρχή λειτουργίας τους στην αποθήκευση θερμότητας υπό αισθητή μορφή, το σενάριο μιας ελαφρύτερης κατασκευής με δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσών λανθάνουσας θερμότητας προβάλλει αρκετά ελκυστικό. Ο PCM τοίχο Trombe αποτελεί κατασκευή πλήρως οπλισμένη με ΥΑΦ, η οποία θερμαίνεται την ημέρα λόγω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό έχει ως επακόλουθο την αποθήκευση θερμότητας στην μάζα του τοίχου και την τήξη του ενσωματωμένου ΥΑΦ. Κατά την

διάρκεια της νύχτας, αντιστρόφως, όποτε και οι θερμοκρασίες πέφτουν, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στον χώρο θερμαίνοντάς τον και το ΥΑΦ επανέρχεται στην στερεή του κατάσταση.

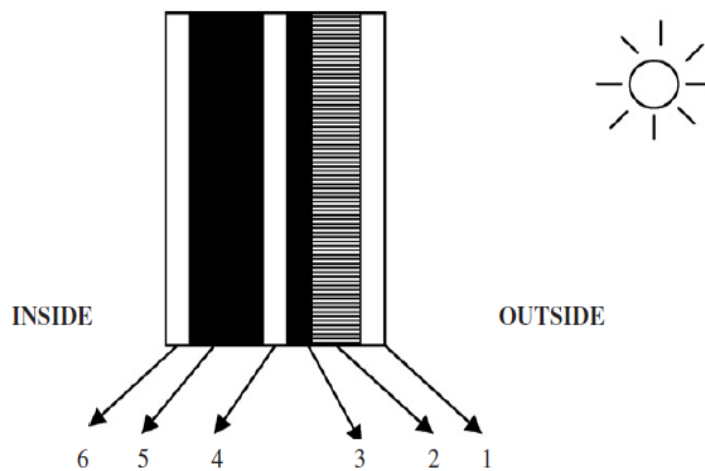


Σχήμα 2.1.15: Σχηματική απεικόνιση του PCM Trombe Wall [43].

Ως ΥΑΦ για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγονται συνήθως ένυδρα άλατα και υδρογονάνθρακες, καθώς οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες τα καθιστούν κατάλληλα για την βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του τοίχου [43]. Τα ΥΑΦ παίζουν τον ρόλο του ρυθμιστή θερμοκρασίας του τοίχου Trombe κι ενισχύουν το σενάριο της αντικατάστασης της συμπαγούς βαριάς κατασκευής του, με μια ελαφρύτερη και μικρότερου πάχους PCM κατασκευή, η οποία θα έχει αντίστοιχη ή και καλύτερη θερμική απόδοση. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν γίνει σημαντικά βήματα, σε ερευνητικό επίπεδο, με σκοπό την διαπίστωση της συνεισφοράς των ΥΑΦ στην θερμική συμπεριφορά του τοίχου. Αποτελέσματα ερευνών με αντικείμενο την ενσωμάτωση ΥΑΦ όπως **δεκαένυδρο θειικό νάτριο (σημείο τήξης 32°C)** [44], [45], [46] και **CG κερί παραφίνης** [47] κατέδειξαν την επίδραση των PCM στην αύξηση της θερμοχωρητικότητας κι ενίσχυση της ολικής αγωγιμότητας του τοίχου Trombe.

Σε ανάλογα αποτελέσματα κατέληξε και η έρευνα των Farouk και Gucerı [48], οι οποίοι εγκατέστησαν τον PCM τοίχο σε οίκημα με σκοπό την θέρμανσή του κατά τις νυχτερινές ώρες. Οι ερευνητές μελέτησαν την συνεισφορά του μίγματος **άλατος glauber** και κεριού **SUNOCO P-116** στον τοίχο κι επεσήμαναν ότι ένας κατάλληλα σχεδιασμένος PCM τοίχος περιορίζει σημαντικά ορισμένα από τα μη επιθυμητά χαρακτηριστικά των συμβατικών συμπαγών τοίχων, αποφέροντας ανάλογα θερμικά αποτελέσματα.

Χαρακτηριστική εφαρμογή, η οποία επιβεβαιώνει το σενάριο για αποδοτικότερη αποθήκευση θερμικής ενέργειας από τον PCM τοίχο Trombe, παρά την μικρού πάχους κατασκευή του, αποτελεί ο ηλιακός PCM τοίχος των Stritih και Novak [49]. Οι ερευνητές σχεδίασαν και μελέτησαν την θερμική συμπεριφορά ενός πειραματικού PCM ηλιακού τοίχου πλήρους εξοπλισμένου με μαύρο κερί παραφίνης (**σημείο τήξης 25-30°C**). Η κατασκευή του τοίχου διαρθρώνεται σε έξι επίπεδα, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



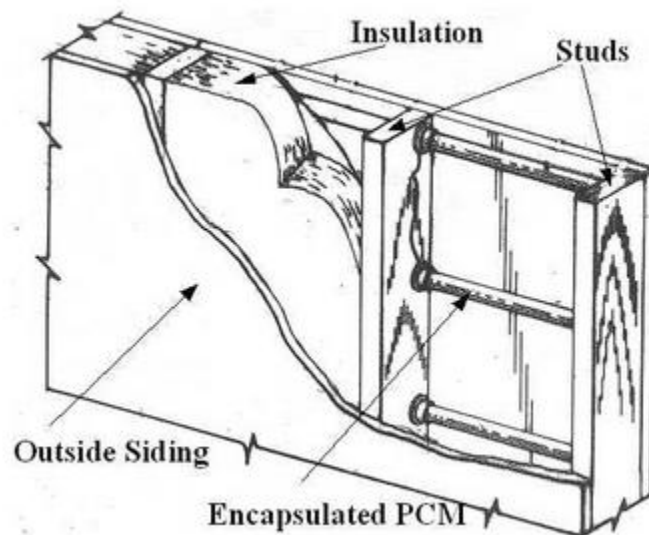
Σχήμα 2.1.16: Στοιχεία του ηλιακού τοίχου [39].

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εγκατάστασης (→ δηλαδή η θέρμανση του εσωτερικού αέρα κατοικίας) επιτεύχθη μέσω μιας σειράς διαδοχικών φυσικών διεργασιών: Η ηλιακή ακτινοβολία (μικρού μήκους κύματος) διαπερνά την γυάλινη εξωτερική επιφάνεια (1) του τοίχου, καθώς και το διαφανές μονωτικό υλικό της (2). Εν συνεχεία συναντά το ΥΑΦ (3), το οποίο συγκρατείται σε διαφανές πλαστικό περίβλημα κατασκευασμένο από πολυκαρβονικό υλικό (θερμοπλαστικό πολυμερές). Το ΥΑΦ απορροφά την θερμότητα της ακτινοβολίας και την αποθηκεύει υπό λανθάνουσα μορφή, μεταβάλλοντας ταυτόχρονα και την στερεή του φάση σε υγρή. Όταν οι επικρατούσες θερμοκρασίες το επιτρέψουν (κατά την διάρκεια της νύχτας), το PCM απελευθερώνει την αποθηκευμένη θερμότητα στο κανάλι (4) της εγκατάστασης, όπου και θερμαίνεται ο αέρας, κι επιστρέφει στην στερεά του κατάσταση. Ο θερμός πλέον αέρας οδηγείται στο εσωτερικό της κατοικίας, θερμαίνοντας κάθε επιφάνειά της. (Η μόνωση (5) και το κονίαμα (6) αποτελούν τα σταθερά υλικά της κατασκευής) [13].

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης απέδειξαν τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης του ηλιακού τοίχου και την συνεισφορά του στην θερμική συμπεριφορά των οικημάτων, κι έδωσαν το έναυσμα για την διεξαγωγή ερευνών με σχετικό αντικείμενο.

2.1.1.3.β PCM σκελετός διαχωριστικού τοίχου (θερμικά ενισχυόμενος).

Η ιδέα ενός θερμικά ενισχυμένου σκελετού διαχωριστικού τοίχου υλοποιήθηκε με πρωτοβουλία του Meng Zang και των συνεργατών του [50]. Σκοπός της συγκεκριμένης κατασκευής ήταν η μείωση της αυξημένης απαίτησης σε κλιματισμό σε οικιακά και μικρής κλίμακας εμπορικά κτίρια.



Σχήμα 2.1.17: Απεικόνιση του Phase Change Frame Wall (PCFW) [51].

Η κατασκευή του σκελετού περιελάμβανε μακρο-ενθυλακωμένη παραφίνη υψηλής κρυσταλλικότητας, η οποία ως ΥΑΦ ενισχύει την ικανότητα θερμικής αποθήκευσης του τοίχου και κατ' επέκταση αυξάνει την θερμική μάζα του κτιρίου. Τα αποτελέσματα της μελέτης κι αξιολόγησης της συγκεκριμένης PCM εφαρμογής έδειξαν ότι ο PCFW δύναται να απορροφά σημαντικά ποσά θερμικής ενέργειας, μειώνοντας την μέγιστη ροή θερμότητας του τοίχου έως και 38%. Στις κτιριακές εφαρμογές η μείωση αυτή θα μπορούσε να μεταφραστεί ως μείωση της αυξημένης απαίτησης σε κλιματισμό από την τοιχοποιία και την οροφή του κτιρίου, με παράλληλη μετατόπιση μέρους του θερμικού φορτίου σε άλλες ώρες της ημέρας, ενώ



η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα παραμένει σταθερή. Η συνεισφορά της λειτουργίας του PCFW γίνεται αισθητή κατά τους χειμερινούς μήνες, όποτε και η θερμότητα η οποία προέρχεται από κάποια εστία θέρμανσης εντός του κτιρίου, αποθηκεύεται στον PCFW και όταν οι επικρατούσες θερμοκρασίες το επιτρέψουν, απελευθερώνεται πίσω στον χώρο θερμαίνοντάς τον. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνεται ο κύκλος λειτουργίας του μηχανικού εξοπλισμού και ως εκ τούτου αυξάνεται η αποδοτικότητα και ο χρόνος ζωής του [13].

2.1.1.3.γ PCM γυψοσανίδα (Συστήματα ξηράς δόμησης).

Η κατασκευή της PCM γυψοσανίδας αποτελεί έναν επιτυχημένο συνδυασμό των μηχανικών ιδιοτήτων της συμβατικής γυψοσανίδας και των φυσικών ιδιοτήτων του ενσωματωμένου ΥΑΦ, του οποίου η συνεισφορά στην θερμική απόδοση του δομικού στοιχείου είναι πολύ μεγάλη. Η PCM γυψοσανίδα προσαρτάται ως επιπλέον επίπεδο τοιχοποιίας είτε κατά την οικοδόμηση νέου κτιρίου είτε κατά την ανακαίνιση παλαιού, αυξάνοντας την θερμική μάζα του οικοδομήματος και βελτιώνοντας την θερμική συμπεριφορά του. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, το ΥΑΦ μπορεί να ενσωματωθεί στην γυψοσανίδα, είτε προστιθέμενο κατά την διαδικασία παραγωγής της (κατά το στάδιο της ανάμιξης των βασικών συστατικών της → άμεση ενσωμάτωση) είτε κατά την βύθιση της ήδη κατασκευασμένης γυψοσανίδας σε τηγμένο ΥΑΦ (προσρόφηση του ΥΑΦ στους πόρους της γυψοσανίδας → απορρόφηση). Τόσο ο τρόπος ενσωμάτωσης του ΥΑΦ στην γυψοσανίδα όσο και η προσαρμογή της γυψοσανίδας στην τοιχοποιία των κτιριακών εγκαταστάσεων αποτελούν βασικό αντικείμενο έρευνας τα τελευταία 25 χρόνια.

Ο Ρεϊπρο και οι συνεργάτες του [14] μελέτησαν τη συνεισφορά PCM γυψοσανίδας στην θερμική απόδοση παθητικού ηλιακού οικήματος 120m² με καλή μόνωση και με μεγάλη επιφάνεια υαλοπινάκων στη νότια πλευρά του, στο Madison του Wisconsin. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι με την ενσωμάτωση της PCM κατασκευής, το συγκεκριμένο κτίριο μπορούσε να μειώσει την ετήσια ενεργειακή του δαπάνη στο 85% (εξοικονόμηση περίπου 3GJ ετησίως). Επιπροσθέτως, διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη ημερήσια αποθήκευση θερμικής ενέργειας επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση ΥΑΦ με θερμοκρασία τήξης περίπου 1-3°C χαμηλότερη από τη μέση θερμοκρασία του δωματίου, ως PCM στα στοιχεία ξηράς δόμησης του οικοδομήματος.



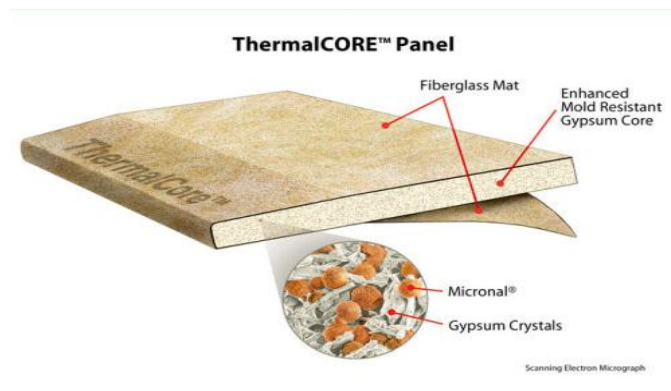
Μια άλλου είδους προσέγγιση έκαναν οι Stetiu και Feustel [51], οι οποίοι εκτίμησαν αριθμητικά την θερμική απόδοση PCM γυψοσανίδας κτιριακής εγκατάστασης με χρήση υπολογιστικού εργαλείου προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως η χρήση του PCM στοιχείου σε συνδυασμό με μηχανισμό νυκτερινού αερισμού παρέχει την δυνατότητα μείωσης των διαστάσεων του συστήματος, ειδικά σε περιοχές όπου η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος πέφτει κάτω απ' τους 18°C κατά τις νυκτερινές ώρες. Στην περίπτωση, μάλιστα, ενός πρότυπου οικοδομήματος στην California, εκτίμησαν ότι η εφαρμογή της γυψοσανίδας μπορούσε να μειώσει το μέγιστο φορτίο ψύξης κατά 28% [13]. Οι ερευνητές επέκτειναν τις μελέτες τους στην ενσωμάτωση γυψοσανίδας διπλού ΥΑΦ σε οίκημα [52] προκειμένου να επιτύχουν περαιτέρω αύξηση της θερμικής μάζας του κτιρίου, ούτως ώστε η θερμοκρασία του δωματίου να διατηρείται πλησιέστερα στα ανώτερα όρια θερμικής άνεσης, χωρίς την χρήση μηχανικού συστήματος ψύξης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα καθιστικό με υψηλά εσωτερικά φορτία και δεδομένα καιρού για το Sunnyvale της California, έδειξαν αισθητή μείωση της θερμοκρασίας του αέρα του δωματίου, όταν ποσά θερμότητας μπορούν να αποθηκευτούν σε γυψοσανίδες με ΥΑΦ. Παρόλο που οι προσομοιώσεις κατέδειξαν τον ευεργετικό, για την θερμική απόδοση του κτιρίου, ρόλο των PCM γυψοσανίδων, επισημάνθηκε από τους ερευνητές ότι η ψύξη του κτιριακού κελύφους μόνο με την μεταφορά αέρα στο εσωτερικό του δωματίου, προβάλλει αναποτελεσματικός τρόπος μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο η εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών της τοιχοποιίας προκειμένου να διευκολυνθεί η συναλλαγή θερμότητας, θα ήταν ευεργετική κυρίως σε περιόδους αυξημένης θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τις νυκτερινές ώρες.

Είναι γεγονός ότι οι ενεργειακές προσομοιώσεις κτιρίων συνεισφέρουν σημαντικά στην εκτίμηση των δυνατών εφαρμογών των PCM συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Την προσέγγιση αυτή ακολούθησε το Ινστιτούτο Fraunhofer της Γερμανίας [53] και προσομοίωσε τη θερμική συμπεριφορά δομικών στοιχείων, προκειμένου να συγκρίνει τη δυναμική επίδοση διαφορετικών τύπων τοιχοποιίας με διαφορετική κατά μάζα ποσότητα ΥΑΦ. Την βάση της προσομοίωσης αποτέλεσε ένα εμπειρικό μοντέλο για την μεταβολή φάσης κι εξετάστηκαν τέσσερα δείγματα τοιχοποιίας με διαφορετική PCM αναλογία, τα οποία θερμάνθηκαν σε κλίβανο και

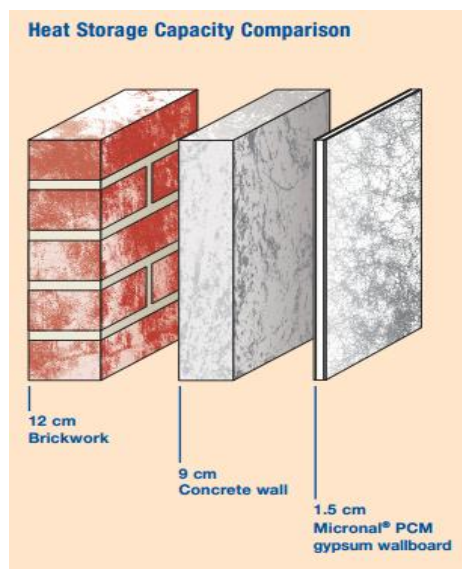
παρακολουθήθηκαν κατά την ψύξη τους. Οι παράμετροι οι οποίοι εκτιμήθηκαν στην προσομοίωση ήταν η επίδραση των ΥΑΦ ως συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, η ποσότητα του ενσωματωμένου PCM καθώς και η κατασκευή και χρήση του κτιρίου. Με την χρήση θερμογράφων απεικονίστηκε ποιοτικά η επίδραση των PCM στην θερμική απόδοση των δομικών στοιχείων (γυψοσανίδες), η οποία υποδηλώνεται από την διαφοροποίηση της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως όσο μεγαλύτερη ποσότητα PCM χρησιμοποιείται στο δομικό στοιχείο, τόσο περισσότερο διαρκεί η διαδικασία της ψύξης. Συνεπώς, σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα του PCM δομικού στοιχείου μπορεί να αυξηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να επιτευχθεί η μέχρι τώρα συνυφασμένη με βαριές κατασκευές θερμική άνεση.

(Για περαιτέρω στοιχεία μελέτης της θερμικής απόδοσης της PCM γυψοσανίδας σε ερευνητικό επίπεδο βλ. Πίνακα 2.1.1.1b.)

Η PCM γυψοσανίδα αποτελεί, εκτός από ευρέως εφαρμοσμένη τεχνική στο εργαστηριακό επίπεδο, και εμπορεύσιμο είδος από εταιρείες δομικών υλικών και κτιριακών συστημάτων όπως η Knauf και η BASF.



Σχήμα 2.1.18: PCM γυψοσανίδα της εταιρείας Knauf- ThermalCORE™ Panel [54].



Σχήμα 2.1.19: Σύγκριση της θερμοχωρητικότητας της (Micronal® PCM gypsum wallboard) της εταιρείας BASF με την θερμοχωρητικότητα συμβατικών δομικών στοιχείων [55].

Είναι γεγονός πως παρά την μικρή κι ελαφριά κατασκευή της, η PCM γυψοσανίδα μπορεί να αντικαταστήσει συμβατικές δομικές κατασκευές μεγαλύτερου πάχους και να παράσχει στο κτίριο ανάλογες ή και βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες. Όπως φαίνεται και απ' το **Σχήμα 2.1.19**, 1.5cm της **Micronal® PCM gypsum wallboard** διαθέτει θερμοχωρητικότητα η οποία ισοδυναμεί με την θερμοχωρητικότητα τοίχου από σκυρόδεμα πάχους 9cm και πλινθοδομής πάχους 12 cm [55].

Παρά την ευεργετική συνεισφορά τους στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας στα κτίρια, οι PCM γυψοσανίδες παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως: 1. Το εύρος αλλαγής φάσης του PCM που έχει επιλεγεί για τις θερμικές ανάγκες κάποιας περιοχής δεν σημαίνει ότι είναι κατάλληλο για κάθε περιοχή. 2. Η επιλογή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του υλικού σε περιοχές όπου απαιτείται τόσο θέρμανση όσο και ψύξη παρουσιάζει διπλή δυσκολία. 3. Συχνά προβλήματα που παρατηρούνται κατά την ενσωμάτωση και λειτουργία της PCM γυψοσανίδας είναι το blooming (πηκτικές προσμίξεις στην επιφάνεια των υλικών), δυσκολία στην ανάπτυξη πυρίμαχης ικανότητας, διάβρωση των μετάλλων, οσμή και θέματα που αφορούν ιδιότητες όπως η ικανότητα της βαφής να προσκολλάται σταθερά στην κατασκευή[13].

2.1.1.3.δ PCM σκυρόδεμα.

Χαρακτηριστικό των εμβαπτισμένων σε ΥΑΦ δομικών στοιχείων, όπως η PCM γυψοσανίδα και το ενισχυμένο με ΥΑΦ μπλοκ σκυροδέματος, αποτελεί η εκτεταμένη πλέον χρήση τους στον τομέα της κτιριακής κατασκευής. Οι συγκεκριμένες PCM εφαρμογές εμφανίζουν βελτιωμένες θερμοφυσικές ιδιότητες συγκριτικά με τις αντίστοιχες συμβατικές μορφές τους και παρέχουν στο οικοδόμημα ενισχυμένη θερμική αδράνεια, πλεονέκτημα του κτιρίου συνυφασμένο με βαριές και μεγάλου πάχους κατασκευές.



Σχήμα 2.1.20: Το πορώδες PCM μπλοκ σκυροδέματος CelBloc Plus® της εταιρείας BASF [1].

Οι περιορισμένων διαστάσεων κατασκευή, η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή καθώς και τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά όπως η πυρίμαχη ιδιότητα και παροχή ηχομόνωσης στο κτίριο, καθιστούν το PCM σκυρόδεμα ένα δομικό στοιχείο αυξημένης θερμικής απόδοσης, η συμπεριφορά του οποίου χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Ο Lee και οι συνεργάτες του [23] διεξήγαγαν δοκιμές μακροκλίμακας προκειμένου να μελετήσουν και να συγκρίνουν την δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μεταξύ συμβατικών μπλοκ και μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένων με ΥΑΦ. Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν και αντιπαραβλήθηκαν πειραματικά δύο τύποι σκυροδέματος: το συμβατικό σκυρόδεμα (regular block) με βασικό συστατικό του το τσιμέντο Portland και το πορώδες σκυρόδεμα (autoclaved block), το οποίο συνίσταται από τσιμέντο Portland καθώς και διοξείδιο του πυριτίου. Τα συγκεκριμένα μπλοκ οπλίστηκαν με δύο διαφορετικά είδη ΥΑΦ: στεατικό βουτύλιο BS κι εμπορική παραφίνη, με την μέθοδο της απορρόφησης (\rightarrow το θερμαινόμενο σκυρόδεμα βυθίστηκε σε δεξαμενή με τεταγμένο ΥΑΦ, όπου και απορροφήθηκε επαρκής



ποσότητα PCM). Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι το PCM σκυρόδεμα αποτελεί ένα επιτυχημένο συνδυασμό των θερμικών ιδιοτήτων του ΥΑΦ και του συμβατικού σκυροδέματος, καθώς η PCM εφαρμογή έχει την δυνατότητα να απορροφά την λανθάνουσα και αισθητά θερμότητα του ενσωματωμένου ΥΑΦ και την αισθητή θερμότητα του σκυροδέματος [13].

Προς ανάλογη ερευνητική κατεύθυνση κινήθηκε και ο Hawes με τους συνεργάτες του [24] οι οποίοι εξέτασαν και παρουσίασαν την θερμική απόδοση διαφορετικών τύπων μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένων με PCM (BS, δωδεκανόλη, δεκατετρανόλη, παραφίνη). Η συγκεκριμένη μελέτη κατέδειξε την επίδραση παραγόντων, όπως η αλκαλικότητα, η θερμοκρασία, ο χρόνος εμποτισμού και η αραίωση του PCM, στην απορρόφηση του ΥΑΦ κατά την διεργασία της εμβάπτισης του μπλοκ. Οι ερευνητές μελέτησαν εκτενώς τον μηχανισμό απορρόφησης και καθιέρωσαν ένα μέσον για την ανάπτυξη και χρήση σταθερών απορρόφησης του PCM στο σκυρόδεμα, προκειμένου να επιτύχουν διάχυση της επιθυμητής ποσότητας PCM και κατά επέκταση την απαιτούμενη χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας. Τα αποτελέσματα της τροποποίησης του συμβατικού σκυροδέματος σε PCM δομικό υλικό, μέσω βελτιωμένων τεχνικών απορρόφησης, έδειξαν σημαντική αύξηση της θερμικής αποθήκευσης του στοιχείου έως και 300% [13].

Μια άλλη πτυχή που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι μέθοδοι συγκράτησης και εγκλεισμού του ΥΑΦ στους πυρήνες του μπλοκ. Οι μέθοδοι αυτοί, οι οποίοι παρουσιάστηκαν από τον Salyer και τους συνεργάτες του [56], είναι: 1. Προσρόφηση του PCM σε πορώδες υλικό, 2. Απορρόφηση του PCM από ρινίσματα πυριτίου, 3. Διείσδυση του ΥΑΦ σε πολυμερείς μεταφορείς. Οι ερευνητές επεσήμαναν ότι όταν το PCM εισάγεται στους πυρήνες του σκυροδέματος με την μορφή τηγμένου μίγματος, ξηράς σκόνης και σε σφαιρίδια πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας, μπορεί να φιλοξενηθεί σε μεγάλες ποσότητες, γεγονός που εξασφαλίζει αυξημένη χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης.

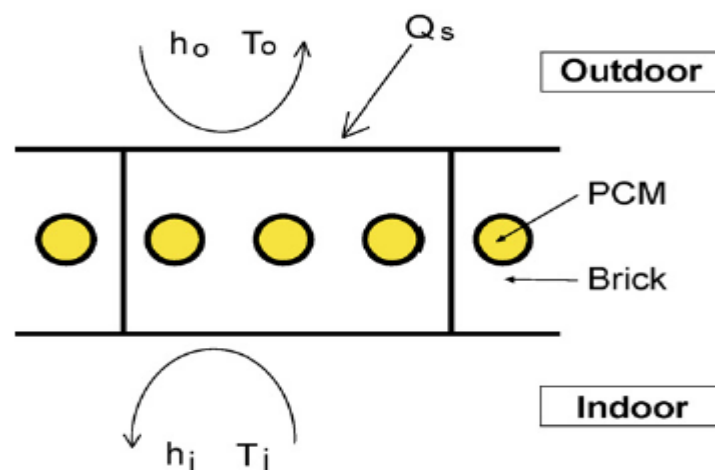
Ανάλογη τεχνική εμποτισμού του ΥΑΦ στους πυρήνες του σκυροδέματος εφάρμοσαν ο Hadjiena και οι συνεργάτες του [25] χρησιμοποιώντας πενταένυδρο θειικό άλας νατρίου ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ως PCM. Εμπότισαν το πορώδες σκυρόδεμα και κατάφεραν να καλύψουν με ΥΑΦ το 60% των πόρων του. Το αποτέλεσμα της πειραματικής

διεργασίας κατέδειξαν ότι η προσρόφηση του PCM στους πόρους του σκυροδέματος παρέχει, εκτός από αύξηση της θερμικής απόδοσης, ενισχυμένη σταθερότητα κατά τους θερμικούς κύκλους λειτουργίας της κατασκευής [13].

2.1.1.3.ε PCM πλινθοδομή.

Πρόκειται για μια PCM τεχνική η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια πειραματικών διεργασιών και παραμένει έως και σήμερα σε εργαστηριακό επίπεδο. Σε αντίθεση με την PCM γυψοσανίδα και το PCM σκυροδέμα, η θερμική απόδοση των PCM πλίνθων έχει απασχολήσει τους ερευνητές σε περιορισμένο βαθμό.

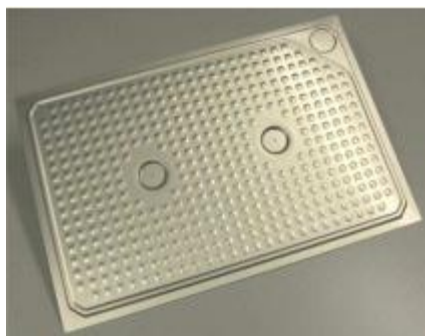
Η πρώτη προσέγγιση για την εν λόγω εφαρμογή πραγματοποιήθηκε από τον Esam M. Alawadhi [57]. Ο ερευνητής ανέλυσε την θερμική απόδοση PCM πλίνθου για κτιριακές εφαρμογές σε θερμό κλίμα. Ο σκοπός της χρήσης του PCM στην δεδομένη εφαρμογή ήταν η απορρόφηση της εισερχόμενης θερμικής ενέργειας, κατά την αλλαγή φάσης του υλικού, πριν την μετάδοσή της στο εσωτερικό του κτιρίου, μειώνοντας έτσι το θερμικό κέρδος. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη ήταν μία κατασκευή η οποία αποτελείτο από πλίνθους (τούβλα) με κυλινδρικές οπές, όπου και φιλοξενήθηκε το ΥΑΦ (\rightarrow στην συγκεκριμένη πειραματική διεργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά είδη ΥΑΦ: ν-δεκαοκτάνιο , ν-εικοσαίνη και P116) .



Σχήμα 2.1.21: Σχηματική αναπαράσταση του PCM τούβλου και τον οριακών συνθηκών [57].

Η αριθμητική προσέγγιση της ροής θερμότητας στην συγκεκριμένη PCM εφαρμογή πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η προσθήκη του PCM στον πλίνθο μείωσε σημαντικά το θερμικό κέρδος του χώρου και η ενδεχόμενη αύξηση της ποσότητας του θα είχε ευεργετική θερμική επίδραση, καθώς αυξάνεται σημαντικά η χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης της κατασκευής. Επιπροσθέτως, διαπιστώθηκε ότι οι PCM κυλινδρικές οπές οι οποίες βρίσκονται κατά μήκος του οριζόντιου κεντρικού άξονα του πλίνθου εμφανίζουν πιο βελτιωμένη θερμική απόδοση [57].

Την έρευνα του Alawadhi ακολούθησε η μελέτη του Castell και των συνεργατών του [58], οι οποίοι εξέτασαν την θερμική συμπεριφορά κατασκευής με PCM πλίνθους. Η πειραματική διάταξη περιελάμβανε διάφορους θαλαμίσκους κατασκευασμένους από συμβατικούς και κυψελώδεις πλίνθους: έναν θάλαμο αναφοράς χωρίς μόνωση με συμβατικούς πλίνθους, έναν θάλαμο με συμβατικούς πλίνθους και μονωτικό υλικό (πολυουρεθάνη), έναν θάλαμο με συμβατικούς πλίνθους, μονωτικό υλικό και παραφίνη RT-27 ως ΥΑΦ, έναν θάλαμο αναφοράς με κυψελώδεις πλίνθους κι έναν θάλαμο με κυψελώδεις πλίνθους και το ένυδρο άλας SP-25 A8 ως ΥΑΦ.



Σχήμα 2.1.22: CSM Panel της εταιρείας **Rubitherm® GmbH**, το οποίο φέρει το προς ενσωμάτωση ΥΑΦ (RT-27 και SP-25 A8) [58].

Οι θαλαμίσκοι κατασκευάστηκαν στην Puigverd de Lleida της Ισπανίας και μετρήθηκε η θερμική τους απόδοση σε συνάρτηση με τον χρόνο. Τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος που διεξήχθη έδειξαν εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων εντός των PCM θαλαμίσκων, καθώς και μείωση των θερμοκρασιακών μεγίστων μέχρι και 1°C. Αν και η συνεισφορά των ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία ήταν εμφανής και στις δύο περιπτώσεις (συμβατικοί και κυψελώδεις πλίνθοι), στις

κατασκευές με κυψελώδεις πλίνθους η επίδραση του PCM ήταν ακόμα μεγαλύτερη, λόγω της μειωμένης θερμικής αντίστασης της συγκεκριμένης πλινθοδομής.



Σχήμα 2.1.23: Πειραματικός θαλαμίσκος πλινθοδομής με RT-27 και πολουρεθάνη [58].

Στο δεύτερο πείραμα που διεξήχθη στα οικοδομήματα χρησιμοποιήθηκε αντλία θερμότητας για τον έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας των θαλάμων. Τα αποτελέσματα τα οποία διεξήχθησαν κατέδειξαν ότι η κατανάλωση ενέργειας στους PCM θαλαμίσκους είχε μειωθεί στο 85% σε σχέση με τους θαλαμίσκους συμβατικών δομικών υλικών. Η μείωση αυτή της ενεργειακής δαπάνης υποδηλώνει την αισθητή θερμική συνεισφορά των PCM στο κτιριακό κέλυφος, η οποία οδηγεί σε ικανοποιητικά όρια θερμικής άνεσης.

Με την διεξαγωγή των συγκεκριμένων πειραμάτων διαπιστώθηκε η καλή θερμική συμπεριφορά, η εξοικονόμηση ενέργειας και η τεχνική βιωσιμότητα της χρήσης μακρο-ενθυλακωμένου ΥΑΦ σε μεσογειακές κατασκευές. Επιπλέον, λόγω της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης, αποφεύχθηκαν περίπου 1–1.5 kg/ m² των ετήσιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Το ποσοστό μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να συμβάλει στην άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής και στον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη, μέσω μιας αποτελεσματικής και αειφόρου ενεργειακής χρήσης.

2.1.2 PCM ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΔΟΔΑΠΕΔΙΑΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

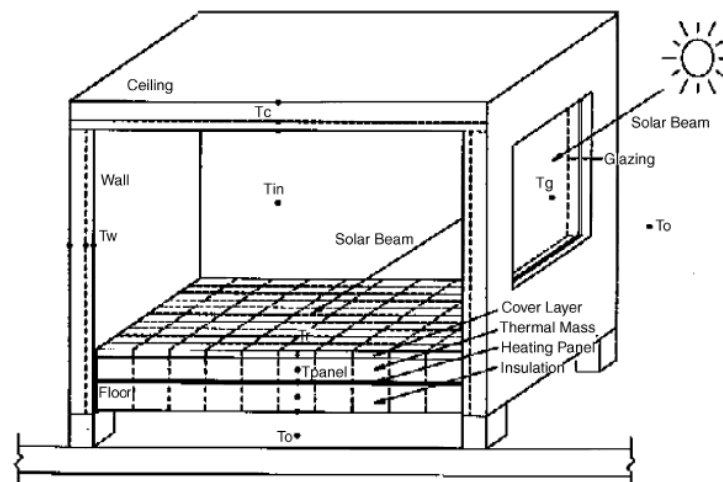
Τα ηλεκτρικά συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης εμφανίζουν ευρεία εφαρμογή στον κτιριακό τομέα, καθώς η θέρμανση του χώρου διά ακτινοβολίας πλεονεκτεί σε σχέση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις θέρμανσης διά συναγωγή. Επιπλέον, χάρη στη στρωματική διάρθρωση και την τοποθέτηση των συστημάτων στο εσωτερικό του κτιριακού κελύφους εξοικονομείται χώρος στο κτίριο (→ σε αντίθεση με τις εξωτερικές μονάδες θέρμανσης).



Σχήμα 2.1.24: Εγκατάσταση ενδοδαπέδιου PCM συστήματος θέρμανσης της εταιρείας PCM products [59].

Βασικό πλεονέκτημα των ενδοδαπέδιων συστημάτων θέρμανσης είναι ότι διευκολύνουν τη μείωση και μετατόπιση των μέγιστων φορτίων στις νυχτερινές ώρες, όποτε και η απαιτήσεις σε θέρμανση είναι μεγαλύτερες ενώ το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλότερο (→ Σε χώρες όπως η Κίνα η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις νυχτερινές ώρες αποτελεί περίπου το 1/3-1/5 του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια της ημέρας) [60].

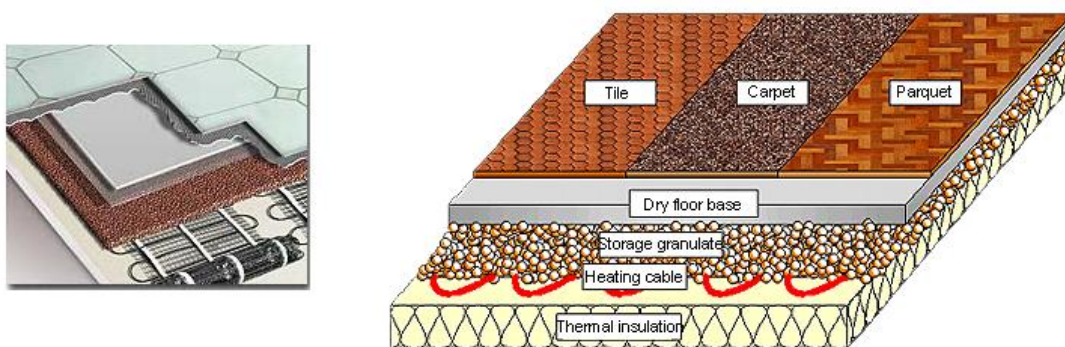
Οι Athienities και Chen [61],[62] μελέτησαν εκτενώς τη λειτουργία και απόδοση ενδοδαπέδιων συστημάτων θέρμανσης με αποθήκευση θερμότητας υπό αισθητή μορφή. Μία από τις μελέτες τους [62] επικεντρώθηκε στην επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και του καλύμματος στην κατανομή της θερμοκρασίας του δαπέδου και στην ενεργειακή κατανάλωση. Προκειμένου να ερευνηθούν οι πτυχές αυτές εξετάστηκε εξωτερικός δοκιμαστικός θάλαμος.



Σχήμα 2.1.25: Σχηματική αναπαράσταση του δοκιμαστικού θαλάμου [62].

Οι διαπιστώσεις του πειράματος και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προσπίπτει τοπικά στην επιφάνεια του δαπέδου, μπορεί να προκαλέσει στην περιοχή αυτή θερμοκρασία κατά 8°C υψηλότερη από αυτή που επικρατεί στην υπό σκιά περιοχή. Οι ερευνητές διαπίστωσαν επίσης ότι αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να αυξηθεί και να προσεγγίσει τους 15°C , αν η ηλιακή ακτινοβολία απορροφηθεί από τάπητες (ή κάλυμμα σκληρού ξύλου \rightarrow hardwood) οι οποίοι καλύπτουν πλήρως ή μερικώς την επιφάνεια του δαπέδου. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και η αποθήκευσή της στη μάζα του δαπέδου για σκοπούς θέρμανσης του κτιρίου μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση έως 30% και περισσότερο [43].

Έχει αποδειχθεί από μελέτες ότι ο συνδυασμός της ενδοδαπέδιας θέρμανσης με την αποθήκευση θερμικής ενέργειας παρέχει τη δυνατότητα αισθητής αύξησης της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου με ταυτόχρονη εξασφάλιση ικανοποιητικής θερμικής άνεσης. Υλικά αυξημένης πυκνότητας, όπως το σκυρόδεμα, χρησιμοποιούνται συχνά ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας για το ηλεκτρικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Ωστόσο, τα υλικά αυτά μπορούν να προκαλέσουν έντονες διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου. Στο σημείο αυτό έγκειται και η διαφορά των ΥΑΦ, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας εντός του περιορισμένου θερμοκρασιακού εύρους το οποίο συνήθως συναντάται στα κτίρια, και ως εκ τούτου να βελτιώνουν το επίπεδο θερμικής άνεσης.



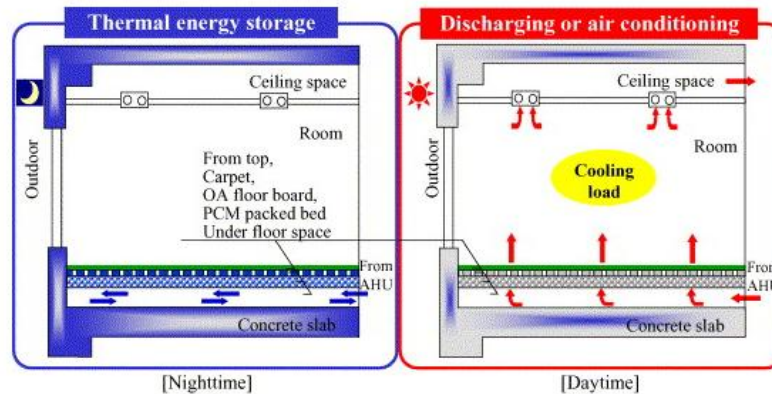
Σχήμα 2.1.26: Ενδοδαπέδια PCM εγκατάσταση για θέρμανση της εταιρείας RUBITHERM®GmbH [11].

Οι Farid και Kong [63] εφάρμοσαν ένα είδος PCM συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ενθυλακωμένο $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ σε δάπεδο από σκυρόδεμα, κατά το στάδιο της κατασκευής του. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν την επίτευξη ικανοποιητικής θερμικής απόδοσης της κατασκευής.

Το προβάδισμα σε θερμική συνεισφορά των ενδοδαπέδιων συστημάτων θέρμανσης και αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε σχέση με τα ενδοδαπέδια συστήματα που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα, διακρίθηκε στην εφαρμογή του Amir και των συνεργατών του [64]. Οι ερευνητές συνέκριναν δύο θερμαινόμενα πάνελ δαπέδου, κάθε ένα από τα οποία αποθήκευε την θερμότητα με διαφορετική μέθοδο και διέθετε διαφορετικό μέσον μεταφοράς θερμότητας: στο πρώτο πάνελ χρησιμοποιήθηκε νερό και σκυρόδεμα ως μέσον και η θερμότητα αποθηκευόταν υπό αισθητή μορφή και στο δεύτερο πάνελ η παραφίνη (ν-δεκαοκτάνιο) ως PCM διευκόλυνε την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης έδειξαν ότι τα συστήματα τα οποία συνδυάζουν την θέρμανση με την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (πάνελ με παραφίνη) πλεονεκτούν των συστημάτων τα οποία αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα. Η μεγάλη θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ (εν προκειμένω της παραφίνης) δεν παρέχει μόνο την δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσών λανθάνουσας θερμότητας, αλλά εξασφαλίζει και ικανοποιητικά επίπεδα θερμικής άνεσης, καθώς δύναται να εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Τα ενδοδαπέδια συστήματα εκτός από την θέρμανση εξυπηρετούν και την ψύξη χώρων. Ο Nagano και οι συνεργάτες του [65] μελέτησαν την ενεργειακή επίδραση PCM ενδοδαπέδιου συστήματος κλιματισμού σε κτιριακή εγκατάσταση. Οι ερευνητές

χρησιμοποίησαν πειραματικά κελιά επιφάνειας δαπέδου 0.5m^2 και PCM ενδοδαπέδιο σύστημα κλιματισμού για την διεξαγωγή του πειράματος.

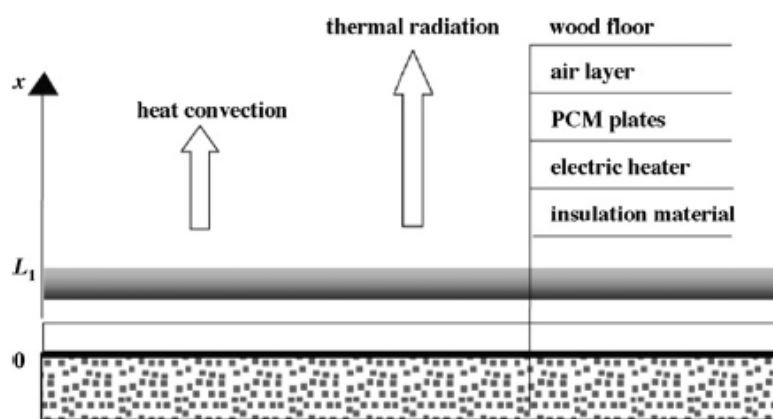


Σχήμα 2.1.27: Σχηματική αναπαράσταση του ενδοδαπέδιου συστήματος κλιματισμού [65].

Το ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα ψύξης ήταν ένα μίγμα σφαιριδίων foamed glass και παραφίνης. Το στρώμα του ΥΑΦ πάχους 3cm εγκαταστάθηκε κάτω από το επίπεδο του δαπέδου με πολλαπλές μικρές οπές. Με την λειτουργία του συστήματος αυτού, μετρήθηκαν η μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου και η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας και τα αποτελέσματα έδειξαν τις δυνατότητες μετατόπισης των ψυκτικών φορτίων με την χρήση συσκευασμένων κόκκων ΥΑΦ σε ενδοδαπέδιο σύστημα κλιματισμού [60].

Παρά το γεγονός ότι τα PCM προσδίδουν πολλά πλεονεκτήματα στα ενδοδαπέδια συστήματα, η διαρροή, η επιπλέον θερμική αντίσταση και το επιπρόσθετο κόστος αποτελούν προβλήματα που προκύπτουν από την ενσωμάτωση των υλικών και χρήζουν αντιμετώπισης. Το πρόβλημα της διαρροής του ΥΑΦ προλαμβάνεται με την χρήση των σταθερού σχήματος PCM πλακών (shape-established PCM). Πρόκειται για ένα σύνθετο στοιχείο αποτελούμενο από PCM σε αναλογία 70-80% και υποστηρικτικό υλικό. Όσο το σημείο λειτουργίας βρίσκεται κάτω απ' την θερμοκρασία τήξης, το PCM στοιχείο διατηρεί το σχήμα του ακόμα και κατά την μετάβαση του ΥΑΦ από την στερεή στην υγρή του φάση. Η ιδιότητα αυτή καθιστά την PCM πλάκα κατάλληλο στοιχείο για το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης, χωρίς να είναι απαραίτητη η ενθυλάκωση του υλικού.

Ο Kunping Lin και οι συνεργάτες του [66] ήταν πρωτοπόροι στην ενσωμάτωση των σταθερών PCM πλακών σε ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Προκειμένου να μελετηθεί η ενδοδαπέδια PCM εφαρμογή κατασκευάστηκε πειραματικός οικίσκος στο Πανεπιστήμιο Tsinghua στην Κίνα. Η τοιχοποιία και η οροφή του οικίσκου διέθεταν πολυστυρένιο ως μόνωση και στη νότια πλευρά της κατασκευής υπήρχε υαλοπίνακας με διπλό τζάμι καλυμμένος με μαύρη κουρτίνα. Στον οικίσκο ενσωματώθηκε PCM ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης διαρθρωμένο σε διαδοχικά επίπεδα.



Σχήμα 2.1.28: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με σταθερές PCM πλάκες [60].

Τα στρώματα της κατασκευής όπως φαίνονται και από το παραπάνω σχήμα είναι: το μονωτικό υλικό (πολυουρεθάνη), οι ηλεκτρικοί θερμαντές (καλοριφέρ), οι PCM πλάκες, το διάκενο αέρα και το ξύλινο δάπεδο. Οι ηλεκτρικοί θερμαντές θερμαίνουν και τήκουν το ΥΑΦ, με χρήση του οικονομικού νυχτερινού ηλεκτρισμού, και το σύστημα αποθηκεύει θερμότητα. Κατά την διάρκεια της ημέρας τα καλοριφέρ απενεργοποιούνται και τα PCM επανέρχονται στην στερεή τους κατάσταση, απελευθερώνοντας στον χώρο την αποθηκευμένη θερμότητα και θερμαίνοντας κάθε επιφάνειά του. Τα αποτελέσματα της εξέτασης της θερμικής συμπεριφοράς του οικίσκου ήταν: 1. Το ενδοδαπέδιο σύστημα αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς να αυξήσει την θερμοκρασιακή διαφορά. 2. Η θερμοκρασία των PCM πλακών διατηρήθηκε στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού για μεγάλο χρονικό διάστημα, μετά την απενεργοποίηση των θερμαντών. Περισσότερο από το μισό ποσόν της ολικής ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας μετατοπίστηκε απ' την περίοδο



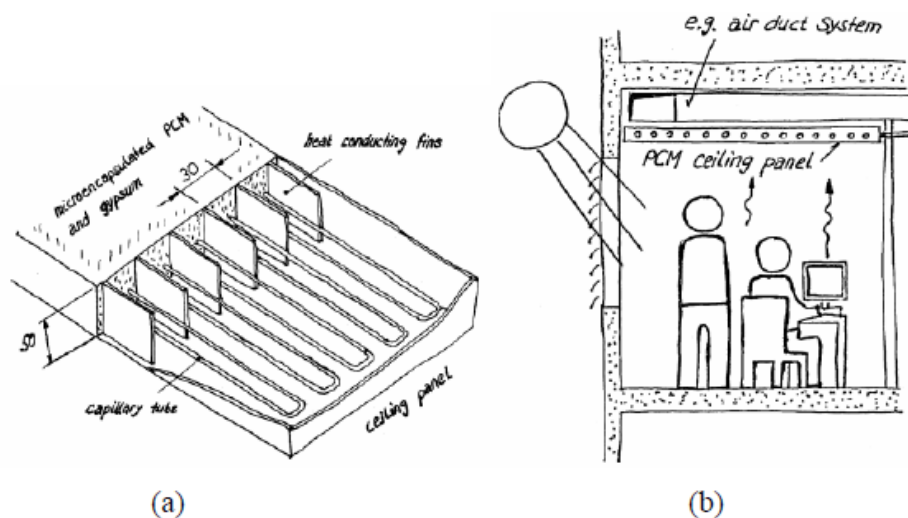
αυξημένης ενεργειακής ζήτησης στην περίοδο χαμηλής ζήτησης, γεγονός που παρέχει σαφώς σημαντικό οικονομικό όφελος λόγω της διαφορετικής τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ ημέρας και νύχτας. 3. Εμφανίσθηκε μικρή θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης, διότι η ενδοδαπέδια θέρμανση παρέχει ομοιόμορφη θέρμανση στον εσωτερικό αέρα. Το σύστημα θέρμανσης παρέχει θερμική άνεση και χαρακτηρίστηκε ενεργειακά αποδοτικό [13],[60],[66].

2.1.3 PCM ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΡΟΦΗΣ ΓΙΑ ΨΥΞΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗ.

Σε ένα κτίριο με προοπτικές βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του, η ενσωμάτωση συστημάτων για θέρμανση και ψύξη δεν περιορίζεται μόνο στις ενδοδαπέδιες εγκαταστάσεις. Η αξιοποίηση της συμβατικής κατασκευής της οροφής σε συνδυασμό με την εγκατάσταση μονάδας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, καθιστά τα PCM συστήματα εφαρμόσιμη τεχνική για θέρμανση και δροσισμό των κτιρίων, ιδιαιτέρως σε εργαστηριακό επίπεδο. Τα ενεργειακά συστήματα οροφής εμφανίζονται κατάλληλα για την ενίσχυση της κτιριακής θερμικής απόδοσης, καθώς μεταδίδουν την θερμότητα στον χώρο με δύο τρόπους: μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών αποτελεί η ικανότητά τους να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση έως και 10% και με κατάλληλο σχεδιασμό δύνανται να παρέχουν θέρμανση και κατά την χειμερινή περίοδο .

Η προοπτική εγκατάστασης σε νεόδμητα ή ανακαινισμένα κτίρια συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, το οποίο θα προσέδιδε στο οικοδόμημα θερμοχωρητικότητα ανάλογη του θερμικού κέρδους κατά την διάρκεια του ημερήσιου κύκλου, ώθησε τους Koschenz και Lehmann [67] στην υλοποίηση του νεωτερικού σεναρίου των πάνελ οροφής. Κατά την διάρκεια της ημέρας το ενσωματωμένο στα πάνελ ΥΑΦ τήκεται καθώς εκτίθεται στα θερμικά φορτία, ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας επανέρχεται στην στερεή μορφή του υποβοηθούμενο από δίκτυο αγωγών νερού. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η προσωρινή αποθήκευση ποσότητας θερμότητας στο ΥΑΦ αμβλύνει την θερμοκρασιακή διακύμανση στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ η διαδικασία απελευθέρωσής της στον χώρο δε συμπίπτει χρονικά με τα θερμικά φορτία. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση θα προϋπέθετε λήψη

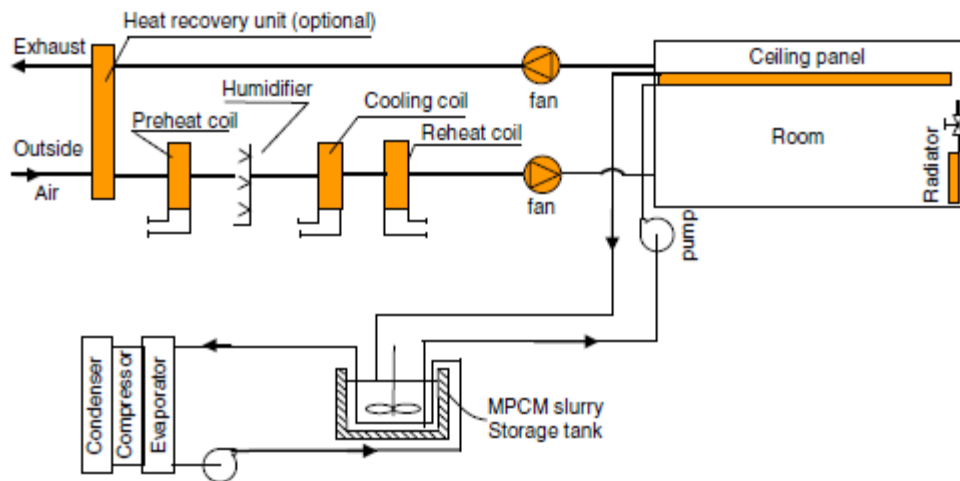
μέτρων πυροπροστασίας για τυχούσα διαρροή της υγρής παραφίνης. Αντί αυτού, επιλέγεται για ενσωμάτωση στο πάνελ μικροενθυλακωμένη παραφίνη φερόμενη σε κατάλληλο υλικό συγκράτησης (γύψος). Μέσω του γύψου η παραφίνη διατηρείται σε σταθερή μορφή, ενώ παράλληλα η ποσότητα του νερού στο υλικό συγκράτησης επιβραδύνει την εξάπλωση της φλόγας σε περίπτωση πυρκαγιάς.



Σχήμα 2.1.29: Στο σχήμα a απεικονίζεται το PCM πάνελ οροφής και στο σχήμα b η ενσωμάτωσή του εντός του κτιριακού κελύφους [67].

Το μίγμα γύψου και μικροενθυλακωμένης παραφίνης εισήχθη στην μεταλλική σχάρα του πάνελ και προσέδωσε στην κατασκευή την απαραίτητη μηχανική σταθερότητα. Ο ενεργός έλεγχος της θερμικής μάζας επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση τριχοειδούς αγωγού νερού στο στοιχείο του γύψου και η ενίσχυση της συναγωγιμότητας, όταν απαιτείται, εξασφαλίζεται με την εισαγωγή μεταλλικών πτερυγίων. Η εφαρμογή του PCM πάνελ δεν περιορίζεται μόνο στην εγκατάσταση της οροφής, καθώς η προσαρμογή της στην τοιχοποιία των κτιρίων ενδείκνυται επίσης [13].

Ο Wang και οι συνεργάτες του [68] πρότειναν ένα διαφορετικό σύστημα οροφής για κτιριακή ψύξη, αποτελούμενο από δίκτυο σωληνώσεων με ρέον μέσο υδαρές μίγμα μικροενθυλακωμένης παραφίνης με καθαρό νερό (PCM slurry).

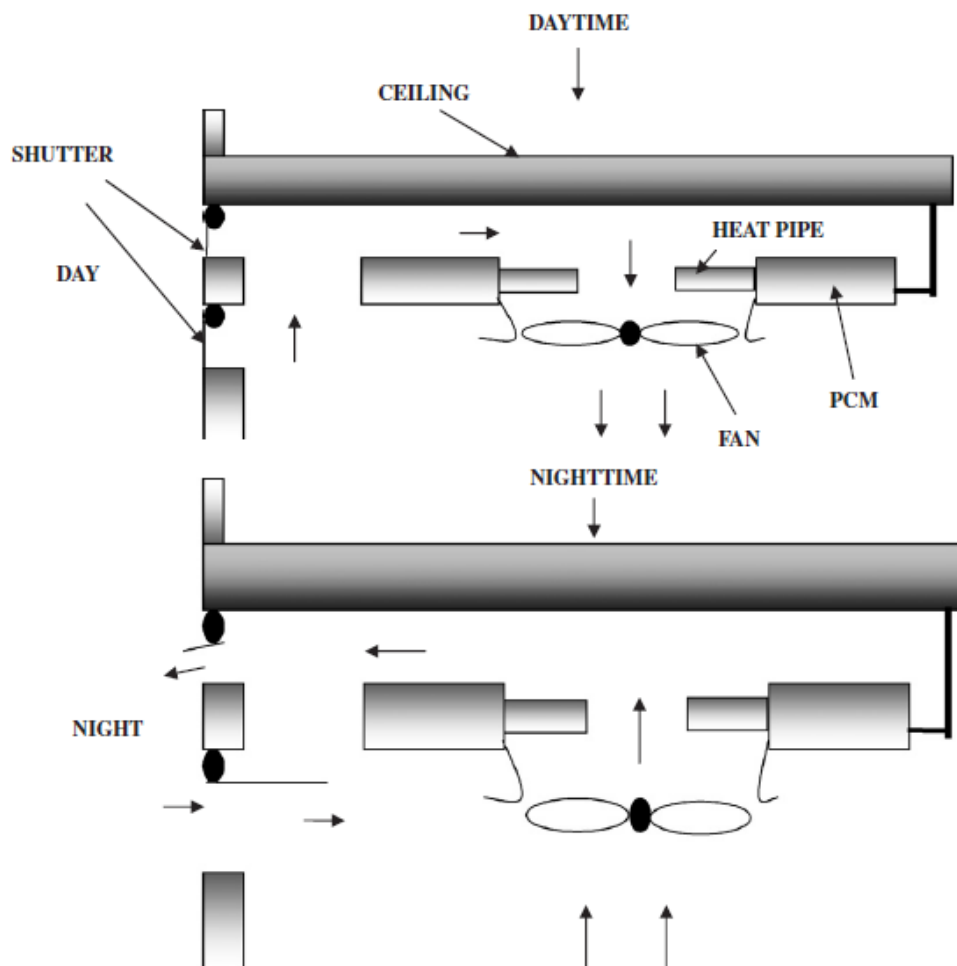


Σχήμα 2.1.30: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ψύξης οροφής με ρέον μέσο υδαρές μίγμα μικροενθυλακωμένου ΥΑΦ (**M**icro-**e**ncapsulated **PCM**) [68].

Στην συγκεκριμένη PCM εφαρμογή το νερό, ως παραδοσιακό εργαζόμενο μέσον στις συμβατικές εγκαταστάσεις κλιματισμού, αντικαθίσταται από το PCM slurry, υδαρές υδατικό μίγμα με μικροενθυλακωμένο δεκαεξάνιο (ΥΑΦ). Κατά την διάρκεια του κύκλου λειτουργίας του συστήματος, το ψυχρό PCM slurry αντλείται από το πάνελ της οροφής και τήκεται υποβοηθούμενο από την συναλλαγή θερμότητας με τον θερμό αέρα του δωματίου. Εν συνεχεία, το στερεοποιημένο πλέον ΥΑΦ επιστρέφει στην δεξαμενή η οποία περιέχει το ψυχρό PCM υδαρές μίγμα με το οποίο και αναμιγνύεται. Οι ερευνητές προχώρησαν και σε προσομοίωση της συμπεριφοράς του PCM συστήματος ψύξης, συγκρίνοντας την απόδοσή του σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις: όταν το ρέον εργαζόμενο μέσον ήταν 1.το PCM slurry, 2.μίγμα νερού-πάγου και 3. το παραδοσιακό ψυχρό νερό, χωρίς αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανέδειξαν το PCM slurry σύστημα ως το αποδοτικότερο, ενώ κρίνεται και οικονομικό, όταν η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Προς την ίδια κατεύθυνση διεξήγαγε τις μελέτες του και ο Griffiths με τους συνεργάτες του [69], οι οποίοι έκαναν δοκιμές σε έναν πειραματικό θαλαμίσκο με σύστημα ψύξης οροφής, όπου το εργαζόμενο μέσο ήταν PCM slurry με 40% περιεκτικότητα σε μικροενθυλακωμένο ΥΑΦ. Τα αποτελέσματα του πειράματος συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα τα οποία διεξήχθησαν από την χρήση απλού ψυχρού νερού ως ρέον μέσον στο σύστημα. Οι ερευνητές με την συγκριτική αυτή μελέτη κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με την υψηλή του θερμοχωρητικότητα το υδαρές PCM μίγμα μπορεί να διανεμηθεί με πολύ

χαμηλότερη ταχύτητα ροής σε σχέση με το νερό, γεγονός το οποίο συνεπάγεται την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του θορύβου του συστήματος, ενώ η θερμική άνεση παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα. [70]

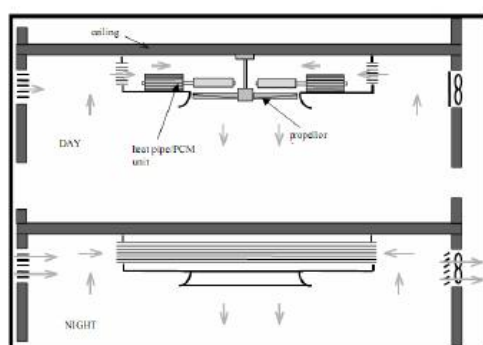
Είναι γεγονός ότι τα πάνελ οροφής τα οποία χρησιμοποιούνται σε συστήματα ψύξης- θέρμανσης είναι μια νεωτερική μορφή κλιματισμού η οποία γίνεται ακόμα πιο αποδοτική όταν στην εγκατάσταση ρέει ΥΑΦ. Ωστόσο PCM παρέμβαση μπορούν να δεχθούν και πιο συμβατικές μορφές συστημάτων, τα οποία λειτουργούν με φυσική υποδομή. Το Πανεπιστήμιο του Nottingham [71] επιχείρησε την αντικατάσταση ενός πλήρους συστήματος κλιματισμού με ένα σύστημα νυχτερινής ψύξης το οποίο δέχεται επίσης παρεμβάσεις.



Σχήμα 2.1.31: Απεικόνιση της λειτουργίας του PCM συστήματος ψύξης το οποίο προτάθηκε από το Πανεπιστήμιο του Nottingham [71].

Το σύστημα προσαρμόζεται στην οροφή του κτιρίου και διαθέτει ανεμιστήρα με τον οποίο κατευθύνει τον αέρα πάνω από τις εκτεθειμένες απολήξεις των αντλιών θέρμανσης. Το άλλο άκρο των αντλιών εισέρχεται σε PCM μονάδα αποθήκευσης. Κατά την διάρκεια της νύχτας, ο ανεμιστήρας αντιστρέφεται και τα παραθυρόφυλλα (ή γρίλιες) παραμένουν ανοιχτά, ώστε να εισέρχεται ο κρύος αέρας του περιβάλλοντος. Ο εισερχόμενος αέρας περνά πάνω από τις αντλίες θερμότητας και αποσπά την αποθηκευμένη θερμότητα από το ΥΑΦ. Ο κύκλος λειτουργίας επαναλαμβάνεται καθημερινά. Οι ερευνητές στην εγκατάστασή τους χρησιμοποίησαν PCM με θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης 22°C και 21°C αντίστοιχα. Πλήρης τήξη του ΥΑΦ συμβαίνει εντός ενός χρονικού διαστήματος 8 ωρών όποτε και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του PCM και του αέρα ανέρχεται στους 2°C κι εντός χρονικού διαστήματος 3 ωρών με θερμοκρασιακή διαφορά 3.5 °C. Με το συγκεκριμένο σύστημα νυχτερινής ψύξης εξασφαλίζονται ποσά μεταφοράς θερμότητας 80 και 200W/ μονάδες επιφάνειας αντίστοιχα.[13]

Ο εμπορικός κόσμος μόλις έχει αρχίσει να εξοικειώνεται με τα PCM συστήματα κλιματισμού οροφής. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί η εγκατάσταση των PCM μονάδων αποθήκευσης θερμότητας με αντλίες θέρμανσης από την εταιρεία PCM Products Ltd, κάτω από την οροφή στο κτίριο διοίκησης του Nottingham [70],[71].



(a)



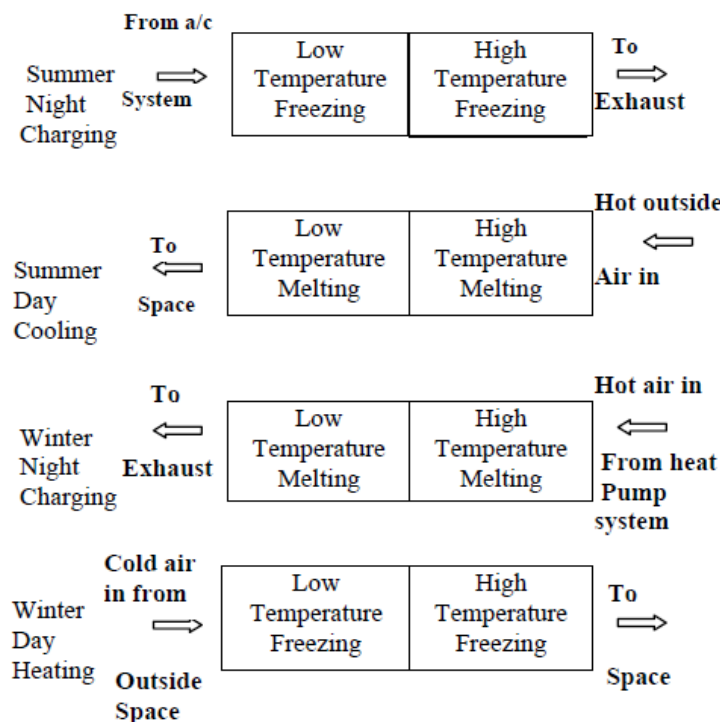
(b)

Σχήμα 2.1.32: Αντλίες θέρμανσης συνδεδεμένες με PCM δεξαμενή αποθήκευσης από την εταιρεία PCM Products Ltd, α. Απεικόνιση των αρχών λειτουργίας του συστήματος κατά την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας και β. Απεικόνιση του πραγματικού προϊόντος ενσωματωμένο στην οροφή του Πανεπιστημίου του Nottingham [70],[72].

2.1.4 PCM ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΜΟΝΑΔΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ-ΨΥΞΗΣ.

Στα μέσα της δεκαετίας του 90' το Sustainable Energy Center του Πανεπιστημίου της Νότιας Αυστραλίας κατασκεύασε την πρώτη PCM συνδυασμένη μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Σκοπός της συγκεκριμένης PCM εφαρμογής ήταν η θέρμανση και ψύξη χώρου κατά την χειμερινή και θερινή περίοδο αντίστοιχα, διεργασίες οι οποίες επιτυγχάνονται με την φόρτιση του συστήματος κατά την διάρκεια της νύχτας και την αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας την ημέρα. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελείται από δύο διαφορετικά ΥΑΦ ενσωματωμένα σε σύστημα αναστρέψιμου κύκλου λειτουργίας.

Η εξαναγκασμένη ροή του αέρα κατευθύνεται διά μέσω του συστήματος και υποβάλλεται σε διαδικασία δύο σταδίων θέρμανσης ή ψύξης. Ο αέρας αρχικά διαπερνά το πρώτο ΥΑΦ κι έπειτα συναντά το δεύτερο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.33.



Σχήμα 2.1.33: Απεικόνιση της διαδικασίας φόρτισης τις νυχτερινές ώρες και της διαδικασίας αξιοποίησης της ενέργειας την ημέρα κατά την θερινή και χειμερινή περίοδο.[73]

Το σημείο τήξης/στερεοποίησης του πρώτου υλικού βρίσκεται κάτω από το κατώτερο όριο θερμικής άνεσης, ενώ το αντίστοιχο σημείο του δεύτερου υλικού βρίσκεται



πάνω από το ανώτερο όριο θερμικής άνεσης. Κατά την χειμερινή περίοδο, η ροή του αέρα ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμική ενέργεια τη νύχτα (→ με την τήξη και των δύο ΥΑΦ) και να απελευθερώνει θερμότητα σε θερμοκρασία ανώτερη των συνθηκών άνεσης κατά την ημέρα (→ με την στερεοποίηση των υλικών). Τη θερινή περίοδο, η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυχρή ενέργεια τη νύχτα και απελευθερώνει τον κρύο αέρα σε θερμοκρασία κατώτερη των συνθηκών άνεσης κατά την ημέρα για δροσισμό.

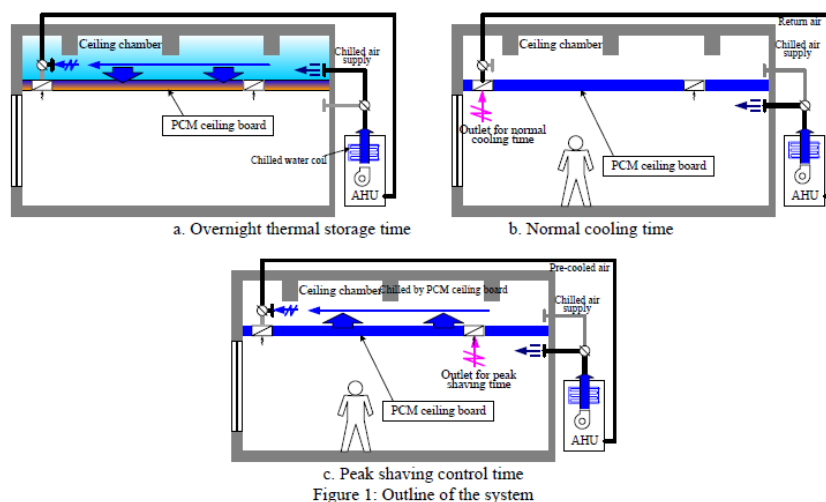
Η εγκατάσταση ενός συνδυασμένου συστήματος θερμικής αποθήκευσης διπλού PCM σε χώρο οικιακής χρήσης, το οποίο θα αντικαθιστούσε την κοινή κλιματιστική μονάδα ενισχύει σημαντικά στην θερμική συμπεριφορά του κτιρίου. Το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης PCM εφαρμογής είναι η μετατόπιση σημαντικού ποσοστού των θερμικών και ψυκτικών φορτίων σε ώρες μειωμένης ενεργειακής ζήτησης, όποτε και η ηλεκτρική ενέργεια κοστίζει λιγότερο. Επιπροσθέτως, η εγκατάσταση μιας συνδυασμένης PCM μονάδας εξασφαλίζει αύξηση της θερμοχωρητικότητας και μείωση του αρχικού κόστους συγκριτικά με μία συμβατική κλιματιστική μονάδα. Το υπολογιστικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός οικήματος στην Adelaide το οποίο διαθέτει την PCM μονάδα, κατέδειξε τα εξής: ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας το οποίο αποτελείται από 100kg ΥΑΦ 29°C και από 80kg ΥΑΦ 18°C έχει τη δυνατότητα να μειώσει την απαιτούμενη χωρητικότητα της μονάδας κλιματισμού, ενώ παράλληλα το ετήσιο κόστος της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται στο 78% χάρη στη μετατόπιση των φορτίων. [73]

2.1.5 PCM ΔΟΚΟΙ ΟΡΟΦΗΣ.

Η συγκεκριμένη παράγραφος τοποθετήθηκε σκόπιμα στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρ' ότι οι δοκοί οροφής εντάσσονται στα δομικά στοιχεία των κτιριακών εγκαταστάσεων. Ο όρος PCM δοκοί οροφής δεν αντιπροσωπεύει πλήρως το σύστημα, καθώς δεν εμποτίζονται άμεσα οι δοκοί της οροφής με ΥΑΦ, αλλά τα PCM ενσωματώνονται σε αγωγούς ή σε δεξαμενές αποθήκευσης οι οποίες συνδέονται με αντλίες θερμότητας και τοποθετούνται κάτω απ' τις δοκούς στο κτίριο.

Σύστημα θέρμανσης, το οποίο διαθέτει PCM δοκούς οροφής, αναπτύχθηκε απ' τους Gutherz και Schiler [74]. Στην εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκαν ανακλαστές φωτός, οι οποίοι κατηύθυναν την ηλιακή ακτινοβολία άμεσα στο ΥΑΦ. Το βασικό πλεονέκτημα της εφαρμογής ήταν ότι διατιθόταν μεγάλη επιφάνεια για αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας, χωρίς να υπάρχει ανάγκη μεγάλου όγκου του μέσου αποθήκευσης, απαίτηση που επικρατεί στα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας υπό αισθητή μορφή. Τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής λειτουργίας της εφαρμογής έδειξαν ότι η χρήση ενός συστήματος αυτού του τύπου παρέχει την δυνατότητα επανάκτησης του 17-36% των θερμικών απωλειών.[13]

Οι Kondo και Iwamoto [75] διεξήγαγαν μελέτη με αντικείμενο τον έλεγχο κι εξομάλυνση των μεγίστων συστήματος κλιματισμού με χρήση PCM δοκών οροφής. PCM δοκοί οροφής από πετροβάμβακα ενισχύθηκαν με την προσθήκη μικροενθλακωμένου ΥΑΦ με θερμοκρασία και θερμότητα αποθήκευσης 25°C και 174.4kJ/kg αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1.34: Απεικόνιση της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος με τις PCM δοκούς οροφής [75].

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι το μέγιστο φορτίο στην μονάδα χειρισμού του αέρα AHU (AirHandling Unit) μπορεί να μειωθεί με την χρήση θερμικής αποθήκευσης από τις PCM δοκούς, κατά την περίοδο ελέγχου των μεγίστων. Παράλληλα, με την PCM εφαρμογή μπορεί να βελτιωθεί και το πεδίο ακτινοβολίας στον χώρο, καθώς με την αποθήκευση ενέργειας σταθεροποιείται η θερμοκρασία της PCM δοκού στο σημείο τήξης. Κατά την διάρκεια της νύχτας, ο προερχόμενος από



την AHU ψυχρός αέρας διέρχεται από τον θάλαμο της οροφής και μεταβιβάζει την ψυκτική του ενέργεια στο ΥΑΦ το οποίο και μετασχηματίζεται. Όταν τα θερμικά φορτία είναι μέγιστα, ο αέρας από τον χώρο επιστρέφει στην AHU μέσω της ίδιας διόδου (θάλαμος της οροφής). Εξαιτίας της διέλευσης από το PCM μέσο, ο θερμός πλέον αέρας αντλεί ξανά ψυκτική ενέργεια από το ΥΑΦ κι επιστρέφει στην AHU ψυχρότερος. Τελικά, η λειτουργία του συστήματος των PCM δοκών εξασφαλίζει μείωση τόσο των μέγιστων θερμικών φορτίων, όσο και της χωρητικότητας αποθήκευσης θερμότητας.[75]

2.1.6 PCM ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΠΑΡΑΘΥΡΑ.

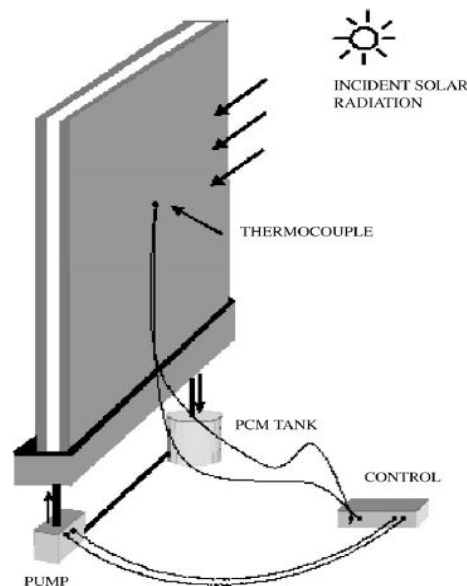
Η μετατροπή των συμβατικών υαλοπινάκων σε ενισχυμένα PCM παράθυρα προσφέρει στο κτίριο μία ακόμα αποδοτική πηγή θερμότητας. Η ενσωμάτωση ΥΑΦ στα στοιχεία σκίασης των παραθύρων (παραθυρόφυλλα) ενδείκνυται ως μέθοδος αύξησης της απόδοσης της συμβατικής κατασκευής του παραθύρου, και κατ' επέκταση θερμικής ενίσχυσης όλου του κτιρίου. Την ημέρα τα PCM παραθυρόφυλλα των παραθύρων παραμένουν ανοιχτά ούτως ώστε η εξωτερική πλευρά τους να εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Με αυτόν τον τρόπο απορροφάται θερμότητα και το PCM τήκεται. Κατά τις νυχτερινές ώρες τα παραθυρόφυλλα κλείνουν και διά μέσου του υαλοπίνακα η θερμότητας που απελευθερώνεται μεταδίδεται στον εσωτερικό χώρο.

Κατ' αυτόν τον τρόπο λειτούργησε και το σύστημα αποθήκευσης με τις εσωτερικές PCM γρίλιες του Mehling [76], ο οποίος επεσήμανε πως η χρήση τέτοιου είδους PCM σκίαση στα παράθυρα έχει την δυνατότητα να μειώσει την θερμοκρασία του δωματίου έως και 2°C.



Σχήμα 2.1.35: Παράθυρα με PCM σκίαση.[60]

Ο Ismail και οι συνεργάτες του [77] έκαναν μια διαφορετική προσέγγιση στην δημιουργία ενεργειακά αποδοτικού παραθύρου, καθώς στην δεδομένη μελέτη το ΥΑΦ εμπεριέχεται στο ίδιο το παράθυρο και όχι σε κάποιο εξωτερικό ή εσωτερικό στοιχείο σκίασης.



Σχήμα 2.1.36: Απεικόνιση ενεργειακά αποδοτικού PCM παραθύρου [13].

Το παράθυρο, όπως φαίνεται και από το Σχ.2.1.36, απαρτίζεται από δύο γυάλινες επιφάνειες, με ενδιάμεση παρεμβολή διακένου και διαθέτει ένα στόμιο εξαερισμού (αεραγωγό) στην πάνω γωνία του. Οι πλευρές και η βάση της κατασκευής είναι



σφραγισμένα, με εξαίρεση δύο οπές στο κάτω μέρος, οι οποίες συνδέονται μέσω πλαστικού αγωγού με μια αντλία θέρμανσης και την δεξαμενή του ΥΑΦ. Η αντλία συνδέεται με την σειρά της με την δεξαμενή που φέρει το ΥΑΦ, το οποίο βρίσκεται σε υγρή φάση. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται από αισθητήρα θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασιακή διαφορά φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή, η αντλία ενεργοποιείται και το υγρό PCM αντλείται από την δεξαμενή για να συμπληρώσει το κενό μεταξύ των γυάλινων επιφανειών. Εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, το PCM αρχίζει να ψύχεται, σχηματίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα στερεό στρώμα το πάχος του οποίου αυξάνει σε συνάρτηση με τον χρόνο και ως εκ τούτου εξασφαλίζει την σταθεροποίηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη διαδικασία συνεχίζει μέχρι το PCM να στερεοποιηθεί εξ' ολοκλήρου. Ένα παράθυρο κατάλληλου σχεδιασμού εξασφαλίζει ότι η εξωτερική θερμοκρασία θα αρχίσει να αυξάνει πριν την εξ' ολοκλήρου στερεοποίηση του εγκλεισμένου PCM. Το προτεινόμενο σενάριο του συστήματος του PCM-filled παραθύρου είναι βιώσιμο και θερμικά αποδοτικό. Επιβεβαιώνεται επίσης απ' τους ερευνητές ότι η συμπλήρωση του διακένου με ΥΑΦ προωθεί το φιλτράρισμα της θερμικής ακτινοβολίας και μειώνει τις θερμικές απώλειες διότι η περισσότερη απ' την ενέργεια που μεταφέρεται, απορροφάται κατά την αλλαγή φάσης του υλικού. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το παράθυρο με διπλό υαλοπίνακα οπλισμένο πλήρως με PCM είναι περισσότερο αποδοτικό θερμικά απ' ότι το ίδιο παράθυρο όταν διαθέτει μόνο αέρα.[13]

Σε ανάλογα πλαίσια κινήθηκε και η μελέτη του Weinlader και των συνεργατών του [78], οι οποίοι ανέλυσαν το σενάριο της χρήσης δύο υαλοπινάκων με τοποθετημένο ένα ΥΑΦ στο μεταξύ τους διάκενο. Η συγκεκριμένη κατασκευή, συγκρινόμενη με συμβατικό διπλό υαλοπίνακα, εξασφαλίζει 30% μείωση των θερμικών απωλειών εντός κτιριακών εγκαταστάσεων. Επιπροσθέτως, η ενσωμάτωση της PCM εφαρμογής σε κτίρια προκαλεί μείωση έως και 50% στα ηλιακά θερμικά κέρδη, γεγονός το οποίο διατηρεί την θερμική άνεση σε ικανοποιητικά επίπεδα.



2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ PCM- ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.

Είναι γεγονός ότι η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε ποικιλία εφαρμογών επιζητά και την απαραίτητη ανάλυση, η οποία θα επιτρέψει στον ερευνητή να βελτιστοποιήσει την απόδοση των PCM συστημάτων. Τα τελευταία 40 χρόνια, ευρύ αντικείμενο ερευνών στην επιστημονική βιβλιογραφία αποτελεί η μοντελοποίηση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας κατά τις διαδικασίες τήξης και στερεοποίησης του εκάστοτε υλικού. Εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης του προβλήματος της μεταβολής φάσης, η αριθμητική ανάλυση αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη των κατάλληλων λύσεων που αφορούν στην θερμική συμπεριφορά των μελετώμενων και χρησιμοποιούμενων συστημάτων.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για την καλύτερη κατανόηση των εξισώσεων και μαθηματικών σχέσεων όπως αυτές περιλαμβάνονται στα **Υποκεφάλαια 2.2** και **2.3** της εργασίας παρατίθεται **Πίνακας Θεμελιωδών Μεγεθών:**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΘΕΜΕΛΙΩΔΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ		
T:	θερμοκρασία	°C
T _m :	θερμοκρασία αλλαγής φάσης	°C
t:	χρόνος	sec
x:	θέση διεπιφάνειας στερεού-υγρού υλικού	m
L:	λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης	kJ/kg
ρ:	πυκνότητα του υλικού	kg/m ³
K:	θερμική αγωγιμότητα του υλικού	W/(m K)
C ή C _p :	ειδική θερμοχωρητικότητα	J/(kg°C)
C _{eff} :	ενεργός θερμοχωρητικότητα	J/(kg°C)
H:	ενθαλπία	J/kg
ε:	το ήμισυ του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης	
k _{eq} :	ισοδύναμη αγωγιμότητα	W/(m K)
s:	δείκτης για συμβολισμό του στερεού υλικού	
l:	δείκτης για συμβολισμό του υγρού υλικού	

2.2.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ Stefan-ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.

Η αλλαγή φάσης κάθε υλικού περιγράφεται μαθηματικά από συγκεκριμένου είδους μερική διαφορική εξίσωση ως πρόβλημα συννοριακών τιμών, όπου το όριο αλλαγής



φάσης κινείται συναρτήσει του χρόνου. Οι πρώτες προσπάθειες κατανόησης του προβλήματος μετασηματισμού έγιναν το 1831 από τους Clapeyron και Lamé, οι οποίοι μελετούσαν την διαμόρφωση του φλοιού της Γης κατά την ψύξη του, κι έπειτα απ' τον Franz Neumann, ο οποίος συμπεριέλαβε στις διαλέξεις του το 1835-1840 την επίλυση στα δεδομένα προβλήματα. [79]

Ωστόσο, το κλασικό πρόβλημα της ροής θερμότητας συμπεριλαμβανομένης και της μεταβολής της κατάστασης ενός υλικού διατυπώθηκε από τον Stefan το 1889 [80] και θεωρείται το μονοδιάστατο πρόβλημα σε ημιάπειρο διάστημα $x \geq 0$, το οποίο αφορά σε υλικό που μπορεί να υπάρξει και σε στερεά και σε υγρή φάση. Σε κλίμακα χρόνου, για τις χρονικές τιμές $t \leq 0$ το υλικό βρίσκεται στην υγρή του φάση σε σταθερή θερμοκρασία $T(x,0) = T_2 > T_m$, όπου T_m η θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Την χρονική στιγμή $t=0$ η θερμοκρασία της διεπιφάνειας υγρού-στερεού $x=0$ μειώνεται στιγμιαία και παραμένει στην τιμή $T(0,t) = T_1 < T_m$. Το γεγονός αυτό προκαλεί την δημιουργία ενός στερεού στρώματος παραπλεύρως της διεπιφάνειας $x=0$ και με το πέρασμα του χρόνου, το στερεό αυτό στρώμα θα επεκτείνεται στην έκταση του υγρού. Με την υπόθεση ότι η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μόνο διά αγωγής, το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί αλγεβρικά ως ζεύγος δύο εξισώσεων Fourier αγωγής θερμότητας:

Μία εξίσωση για την στερεά κατάσταση του υλικού:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) = \rho C_s \frac{\partial T_s}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq X(t) \quad (2.2.1. a)$$

Και μία για την υγρή κατάσταση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) = \rho C_l \frac{\partial T_l}{\partial t}, \quad X(t) \leq x \quad (2.2.1. \beta)$$

Στο όριο της αλλαγής φάσης (διεπιφάνεια στερεού-υγρού) ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

$$T_l = T_s = T_m \quad (2.2.2)$$



$$K_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=X(t)} - K_l \left. \frac{\partial T_l}{\partial x} \right|_{x=H(t)} = \rho_s L \frac{dX(t)}{dt} \quad (2.2.3)$$

Η **Σχέση 2.2.3**, γνωστή και ως **συνθήκη Stefan**, εκφράζει την θερμική ισορροπία κατά μήκος του ορίου αλλαγής φάσης $x=X(t)$.

Ως πρόβλημα Stefan, εν τέλει, χαρακτηρίζεται η αδυναμία ακριβούς εντοπισμού της προαναφερθείσας διεπιφάνειας στερεού- υγρού $x=X(t)$, καθώς το όριο αυτό κινείται διά μέσω του υγρού και σε συνάρτηση με τον χρόνο, γεγονός το οποίο χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. [80]

2.2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ.

Ο προκαθορισμός της συμπεριφοράς των υλικών/συστημάτων αλλαγής φάσης, αποτελεί ένα περίπλοκο πρόβλημα εξαιτίας της εγγενούς μη γραμμικής του φύσης στις κινούμενες διεπιφάνειες («σύνορο» μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης), ποσοστό της μετατόπισης των οποίων ελέγχεται απ' το ποσόν της λανθάνουσα θερμότητας που χάνεται ή απορροφάται απ' το όριο των δύο καταστάσεων. Επιπλέον, το γεγονός ότι οι δύο φάσεις εμφανίζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, θα μπορούσε να δημιουργήσει στο εκάστοτε αριθμητικό μοντέλο μη φυσικές ασυνέχειες, οι οποίες πρέπει να δρομολογούνται, διερευνώντας την βέλτιστη λύση.

Η διεθνής βιβλιογραφία υποδεικνύει δύο αριθμητικές μεθόδους ως πιο δημοφιλείς για την μοντελοποίηση της διαδικασίας αλλαγής φάσης των υλικών γενικά, και την αντιμετώπιση των προβλημάτων κινούμενου ορίου ειδικά. Οι **μέθοδοι της ενθαλπίας** και της **ενεργούς θερμοχωρητικότητας** εφαρμόζονται στο εκάστοτε σύστημα αντιμετωπίζοντας το στερεό και το υγρό σαν ένα ενιαίο μέσον και οι συνθήκες της διεπιφάνειας εκφράζονται από μιας νέας μορφής συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφονται από την ενθαλπία (H) και την ενεργό θερμοχωρητικότητα (C_{eff}). [81]

2.2.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ (ENTHALPY METHOD).

Με την εισαγωγή της **μεθόδου της ενθαλπίας**, το πρόβλημα του ορίου της αλλαγής φάσης **απλοποιείται**, καθώς με την αναγωγή της βασικής συνθήκης Stefan στο μέγεθος της ενθαλπίας H, όπως αναφέρεται στη **Σχέση 2.2.5**, επικρατεί μία ενιαία εξίσωση και για τις δύο φάσεις του υλικού (στερεά- υγρή). Η συγκεκριμένη



αναδιατύπωση εκλαμβάνει το μέγεθος της ενθαλπίας ως πρωτεύουσα μεταβλητή, ενώ η συνάρτηση της θερμοκρασίας $T=T(H)$:

$$T = \begin{cases} \frac{H}{c}, & H \leq CT_m \\ T_m, & CT_m \leq H \leq CT_m + L \\ \frac{H-L}{c}, & H > CT_m + L \end{cases} \quad (2.2.4)$$

επιλύεται συγχρόνως με την εξίσωση της ενθαλπίας. [80],[82]

Η γενική μορφή της αναδιατυπωμένης εξίσωσης δόθηκε από τον Voller [83] και παρουσιάζεται ως εξής:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla[K_k(\nabla T)] \quad (2.2.5)$$

Από την προαναφερθείσα σχέση γίνεται κατανοητό ότι για την διαδικασία αλλαγής φάσης, η διατήρηση της ενέργειας μπορεί να εκφραστεί σε όρους της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας H και της θερμοκρασίας T για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες. Το μέγεθος της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας H αποτελεί το άθροισμα της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας [84]:

$$H(T) = h(T) + \rho f(T)L \quad (2.2.6)$$

Και:

$$h = \int_{T_m}^T \rho C dT \quad (2.2.7)$$

Άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι σε πολλά φυσικά προβλήματα, η αλλαγή φάσης δεν συμβαίνει μόνο σε μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας, όπου η σχέση ενθαλπίας-θερμοκρασίας υποδηλώνεται με την μορφή:

$$H(T) = \begin{cases} CT, & T < T_m \\ CT + L, & T > T_m \end{cases} \quad (2.2.8)$$

Αλλά σε ένα θερμοκρασιακό εύρος όπου η ενθαλπία εκφράζεται αλγεβρικά ως ομαλή συνεχής συνάρτηση της θερμοκρασίας:



$$H(T) = \begin{cases} CT, & T \leq T_m - \varepsilon \\ H(T_m - \varepsilon) + \frac{L(T - T_m + \varepsilon)}{2\varepsilon}, & T_m - \varepsilon < T < T_m + \varepsilon \\ H(T_m + \varepsilon) + C(T - T_m - \varepsilon), & T_m + \varepsilon \leq T \end{cases} \quad (2.2.9)$$

Έχει αποδειχθεί ότι όταν η H ορίζεται από την παραπάνω ομαλή συνάρτηση (χωρίς ταλαντώσεις), οι επικείμενες θερμοκρασίες θα μπορέσουν να προβλεφθούν μόνο όταν τουλάχιστον δύο κομβικές θερμοκρασίες βρίσκονται στην περιοχή αλλαγής φάσης σε όλα τα χρονικά βήματα. Γίνεται λοιπόν σαφές πως η αποδοτικότητα του συστήματος είναι κρίσιμα εξαρτώμενη από το μέγεθος ε για κάθε πρόβλημα. [80]

Η μέθοδος της ενθαλπίας ως αριθμητική μέθοδος μοντελοποίησης του φαινομένου μεταβολής της φάσης υλικού χαρακτηρίζεται τόσο από πλεονεκτήματα, όσο και από μειονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

1. Οι συνθήκες της διεπαφής $x=X(t)$ επιτυγχάνονται αυτόματα.
2. Η ακριβής ανίχνευση του ορίου της διεπιφάνειας δεν αποτελεί ανάγκη.
3. Δεν είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι περιοχές κάθε πλευράς του ορίου ξεχωριστά.
4. Επιπλέον, δημιουργείται και μια υδαρής ζώνη μεταξύ των δύο φάσεων, όπου η μεταβολή φάσης πραγματοποιείται εντός ενός θερμοκρασιακού εύρους και όχι σε ένα σημείο. Η ζώνη αυτή αποτρέπει τις απότομες ασυνέχειες οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν κάποιες αριθμητικές αστάθειες. Κατά συνέπεια, η ποιότητα της υδαρούς αυτής ζώνης είναι κρίσιμης σημασίας για την επίδοση του εκάστοτε μοντέλου.[80]

Μειονεκτήματα της μεθόδου:

1. Η λανθάνουσα θερμότητα, η οποία απορροφάται και απορρίπτεται από το υλικό κατά την αλλαγή φάσης του, δεν αντιπροσωπεύεται πλήρως απ' την μέθοδο.
2. Παρατηρούνται θερμοκρασιακές διακυμάνσεις προσεγγίζοντας τις οριακές συνθήκες.



3. Απαιτείται αρκετή ώρα απ' τον υπολογιστή να προσομοιώσει το φαινόμενο, εξαιτίας των μικρών χωρικών και χρονικών απαιτήσεων για ιδανική ανάλυση.[85]

Η μέθοδος της ενθαλπίας μπορεί να συμμορφωθεί τόσο με προβλήματα που αφορούν στην υδαρή ζώνη που προαναφέρθηκε, όσο και με αυτά που αφορούν στην ισοθερμοκρασιακή αλλαγή φάσης, λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη την παράμετρο του χρόνου. Ο Hunter το 1989 [86] και ο Amdjadi το 1990 [87] επιβεβαίωσαν πως η εν λόγω μέθοδος είναι η πιο κατάλληλη για τυπικές εφαρμογές υπό τον περιορισμό όμως ότι δεν θα υπάρξει κάποια μετατροπή στο αριθμητικό σύστημα της διεπαφής.

2.2.2.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Το πρόβλημα τήξης του ΥΑΦ στο εσωτερικό οριζόντιας κυλινδρικής κάψουλας μπορεί να επιλυθεί, κατά τον A.Felix Regin [88], ως πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή σε έναν δακτύλιο μεταξύ ομόκεντρων κύκλων. Στην περίπτωση αυτή η κίνηση του στερεού στρώματος εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ των δύο φάσεων αμελείται και το άτηκτο υγρό αντικαθίσταται από έναν κύλινδρο ο οποίος έχει τον ίδιο όγκο με το στερεό. Κατά την έναρξη της διαδικασίας τήξης η αγωγή αποτελεί την επικρατούσα μορφή μεταφοράς θερμότητας, ενώ η σημασία της φυσικής συναγωγής αυξάνεται βαθμιαία, καθώς η τηγμένη περιοχή εξαπλώνεται. Η απλή λύση η οποία επιδέχεται το προαναφερθέν πρόβλημα είναι να αντιμετωπιστεί η αγωγή σαν επικρατής τρόπος μεταφοράς θερμότητας και οι έννοιες της φυσικής συναγωγής και της θερμικής αγωγιμότητας του υγρού να συνδεθούν μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\overline{Keq_{liquid}}(t) = \overline{Keq}(t)K_l \quad (2.2.10)$$

Ως καταλληλότερη μέθοδος για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος κρίνεται η μέθοδος της ενθαλπίας. Στην αναγωγή της βασικής εξίσωσης στο μέγεθος της ενθαλπίας, η συνάρτηση της H εισάγεται στο πρόβλημα ως μεταβλητή εξαρτημένη απ' την θερμοκρασία. Για την επίλυση πραγματοποιήθηκαν οι εξής υποθέσεις: 1) Το ΥΑΦ συμπεριφέρεται ιδανικά (αμελούνται φαινόμενα όπως το super cooling και ο εκφυλισμός των ιδιοτήτων), 2) Το ΥΑΦ σε κάθε κατάσταση θεωρείται ομογενές και ιστροπικό, 3) Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM είναι ανεξάρτητες της



θερμοκρασίας, όμως διαφέρουν μεταξύ των δύο φάσεων. Στην φάση συνύπαρξης στερεάς και υγρής κατάστασης λαμβάνεται η μέση τιμή των ιδιοτήτων των δύο φάσεων. 4) Το αποτέλεσμα της φυσικής συναγωγής στο υγρό ΥΑΦ μελετάται με χρήση της έννοιας της ισοδύναμης θερμικής αγωγιμότητας. 5) Η θερμοκρασία της ελεύθερης ροής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας θεωρείται σταθερή. 6) Στην περίπτωση PCM του οποίου η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται σε ένα θερμοκρασιακό εύρος, η σχέση H-T θεωρείται γραμμική, κατά την μεταβολή φάσης. 7) Η συναγωγή μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της κάψουλας και του υγρού μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται με χρήση της εμπειρικής συσχέτισης του μέσου αριθμού Nusselt, για φυσική συναγωγή σε κυλινδρική επιφάνεια.

Η κύρια εξίσωση, τελικά, αναδιατυπωμένη με το μέγεθος της ενθαλπίας παίρνει την

$$\text{μορφή: } \rho \frac{\partial H}{\partial t} = K \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad 0 < r < r_i \quad , t > 0 \quad (2.2.11)$$

2.2.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (EFFECTIVE CAPACITY METHOD)

Στην εξέλιξη του μοντέλου της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας του ΥΑΦ, το οποίο περιγράφεται γενικά από τρεις εξισώσεις (εξίσωση για την στερεά, για την υγρή και για την ενδιάμεση υδαρή κατάσταση), μετασχηματίζεται σε μη γραμμικό πρόβλημα αγωγής θερμότητας ενιαίας φάσης, καθ' όλο το εύρος των υπολογισμών. [89]

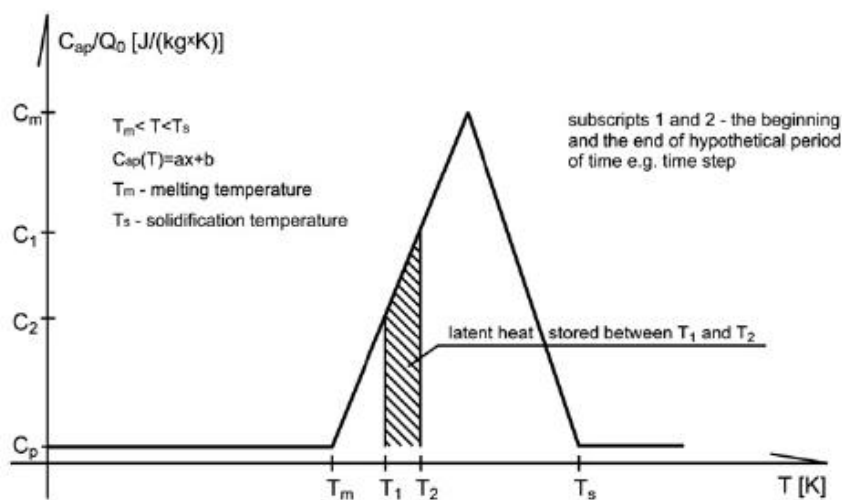
Η ενιαία εξίσωση διατήρησης ενέργειας η οποία διέπει την συγκεκριμένη μέθοδο είναι:

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K\nabla T) \quad (2.2.12)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ως ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{eff} ορίζεται το πηλίκο $C_{eff} = \frac{dH}{dT}$, ποσότητα η οποία δηλώνει την κλίση της καμπύλης στο διάγραμμα θερμοκρασίας ενθαλπίας. [90]

Η ενεργός θερμοχωρητικότητα ως μέγεθος μεταβάλλεται ανάλογα με την ενέργεια η οποία αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται κατά την αλλαγή φάσης και αντιστρόφως ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος της τήξης ή της στερεοποίησης.

Στην μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, το μέγεθος της C_{eff} εκλαμβάνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, στο θερμοκρασιακό εύρος μεταβολής φάσης. Το υλικό βρίσκεται πλήρως αποφορτισμένο σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτήν της τήξης και πρόσθετη ενέργεια αποθηκεύεται ως ειδική θερμότητα. Εντός του θερμοκρασιακού εύρους όπου πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του υλικού περιορίζονται από σχεδόν ισοθερμοκρασιακή διεργασία τήξης ή στερεοποίησης. Θερμοκρασία ίση ή μεγαλύτερη από αυτή της στερεοποίησης είναι δυνατό να υπάρξει μόνο για κατάσταση πλήρως φορτισμένου υλικού. Ουσιαστικά, συνοψίζοντας, το υλικό μπορεί να βρίσκεται εκτός του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, μόνο στην περίπτωση που είναι πλήρως φορτισμένο ή αποφορτισμένο. [91]



Σχήμα 2.2.1: Γραφική απεικόνιση της μεθόδου ενεργούς θερμοχωρητικότητας. [91]

Μελετώντας την εξέλιξη των φάσεων ενός ΥΑΦ (όταν ο μετασχηματισμός φάσης συμβαίνει σε ένα θερμοκρασιακό εύρος), η τιμή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας κινείται, με βάση συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, στα παρακάτω πλαίσια:



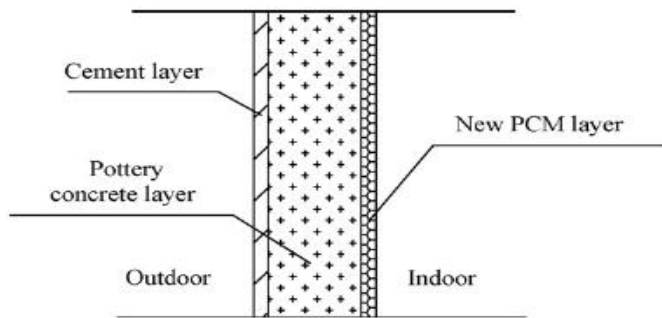
$$C_{eff} = \begin{cases} C_{effs}, & T < T_1 \\ \frac{L}{(T_2 - T_1)} + C_{eff}, & T_1 \leq T \leq T_2 \\ C_{effl}, & T > T_2 \end{cases} \quad (2.2.13)$$

Η παραπάνω διαφοροποίηση των τιμών οφείλεται στο γεγονός ότι το στο μοντέλο 1) η ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα θεωρείται συνάρτηση της θερμοκρασίας και 2) η ειδική θερμοχωρητικότητα θεωρείται σταθερή κατά την υγρή και στερεά κατάσταση.[91]

Πρόκειται για μια ευρέως χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδο για την ανάλυση του φαινομένου του μη ισοθερμικού μετασχηματισμού φάσης ενός υλικού, καθώς εισάγει την έννοια της ενεργούς ή ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας κι αντιμετωπίζει την λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης ως ειδική θερμότητα σε αισθητή μορφή σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος μεταβολής της φάσης. Επιπλέον καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της διεπιφάνειας στερεού-υγρού με την επίτευξη θερμοκρασιακής κατανομής.

2.2.2.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.

Τόσο η συμβατική όσο και η PCM γυψοσανίδα ως μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά για την κατασκευή του κελύφους κτιρίων και έχουν ως χαρακτηριστικά σύσταση υλικών πολλών επιπέδων και περίπλοκα εσωτερικά φαινόμενα μεταφοράς. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η θερμική συμπεριφορά της PCM γυψοσανίδας στο πείραμα του **Chao Chen [92]**, έπρεπε να διατυπωθεί η εξίσωση μεταφοράς θερμότητάς της. Για την επίτευξη του στόχου αυτού η PCM γυψοσανίδα εξετάστηκε ξεχωριστά ως δύο διακριτά τμήματα: την συμβατική γυψοσανίδα και το PCM επίπεδο.



Σχήμα 2.2.2: Σχηματική απεικόνιση της νέας PCM γυψοσανίδας. [92]

- Όσον αφορά στην συμμετρική γυψοσανίδα: αν η κατασκευή της επιφάνειάς της είναι συμμετρική και το πάχος αρκετά μικρότερο του εμβαδού της επιφάνειας, η ασταθής μεταφορά θερμότητας στην γυψοσανίδα θεωρείται μονοδιάστατη διαδικασία κι ερμηνεύεται απ' την σχέση:

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (2.2.14)$$

Και η διατύπωση κατά νόμους Fourier έχει την μορφή:

$$q(x, t) = -K \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad (2.2.15)$$

- Όσον αφορά στο PCM επίπεδο: με την προσαρμογή του μοντέλου της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την μοντελοποίηση του PCM αυτού επιπέδου, λήφθηκαν υπ' όψη τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας του προβλήματος μεταβολής φάσης κι έγιναν οι εξής υποθέσεις: 1) Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μόνο κατά μήκος της κατεύθυνσης του πάχους του τοίχου και θεωρείται ως μία μονοδιάστατη μη γραμμική διαδικασία αγωγής θερμότητας. 2) Το νέο PCM επίπεδο (New PCM Layer) σταθερού σχήματος θεωρείται ότι έχει μια ισοδύναμη κι ενεργό ειδική θερμότητα στο εύρος αλλαγής φάσης, ενώ θα έπρεπε να θεωρηθεί μία σταθερή τιμή για την στερεά κατάσταση και μια για την υγρή. Η πυκνότητα θεωρείται σταθερή και η μεταβολή του όγκου μικρή ή αμελητέα κατά την διαδικασία μεταβολής φάσης. 3) Δεν λαμβάνονται υπόψη η ελεύθερη συναγωγή κατά την τήξη και το φαινόμενο του super cooling κατά τη στερεοποίηση του ΥΑΦ.



Κατ' αυτόν τον τρόπο, η μονοδιάστατη μη γραμμική διαφορική εξίσωση αγωγιμότητας της PCM γυψοσανίδα για αποθήκευση θερμότητας, σε όλο το εύρος των υπολογισμών μπορεί να γραφεί:

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (2.2.14)$$

Στην πραγματικότητα, το μοντέλο ενεργούς θερμοχωρητικότητας δεν αυξάνει άλλες νέες παραμέτρους και μπορεί να μετατρέψει την λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης στην παράμετρο ισοδύναμης ειδικής θερμότητας c , στο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης. Οι παράμετροι όπως η ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα C και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας K θεωρούνται συνάρτηση της κομβικής θερμοκρασίας, η οποία μετατρέπει το πρόβλημα μεταβολής φάσης σε πρόβλημα αγωγιμότητας μεταβλητών θερμικών ιδιοτήτων. Όταν η ειδική θερμότητα κατά την στερεά και υγρή φάση θεωρείται σταθερή, η ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα C και θερμική αγωγιμότητα K έχουν τη μορφή:

$$C = \begin{cases} C_s(T) & T < T_m - \Delta T \\ \frac{\rho H}{2\Delta T} + \frac{C_s + C_l}{2} & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ C_s(T) & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (2.2.16)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_s(T) & T < T_m - \Delta T \\ \lambda_s + \frac{\lambda_l - \lambda_s}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ \lambda_{sl}(T) & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (2.2.17)$$

Ως εκ τούτου, οι Σχέσεις 2.2.14 και 2.2.17 μπορούν να προσαρμοσθούν τόσο στην συμβατική όσο και στην PCM γυψοσανίδα, όπου όσον αφορά την γυψοσανίδα με ενσωματωμένο ΥΑΦ: ρ η πυκνότητα του ΥΑΦ και K και c παράμετροι οι οποίες υπολογίζονται με την μέθοδο ενεργούς θερμοχωρητικότητας, η οποία μειώνει σημαντικά τα υπολογιστικά προβλήματα.



2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΑΦ.

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των ΥΑΦ, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή στον κτιριακό τομέα, έχει απασχολήσει αρκετά ερευνητές και μηχανικούς. Μοντέλα και εμπορικά υπολογιστικά εργαλεία χρησιμοποιούνται κατάλληλα για την μοντελοποίηση των PCM. Στο παρόν κεφάλαιο επιλέχθηκε να περιγραφούν συνοπτικά τα πιο διαδεδομένα υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση του φαινομένου της αλλαγής φάσης.

2.3.1 TRNSYS

2.3.1.1 Γενικά για το TRNSYS.

Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο κι επεκτάσιμο περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο πραγματεύεται την μοντελοποίηση θερμικών συστημάτων καθώς και κτιρίων πολλαπλών ζωνών. Χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς κι ερευνητές κι ανταποκρίνεται σε νέα ενεργειακά σενάρια, από απλά ηλιακά συστήματα ζεστού νερού χρήσης έως σχεδιασμό και προσομοίωση κτιρίων και κτιριακού εξοπλισμού, συμπεριλαμβάνοντας στρατηγικές ελέγχου, είδος χρήσης του εκάστοτε χώρου κι εναλλακτικά ενεργειακά συστήματα (αιολικά, ηλιακά, φωτοβολταϊκά και συστήματα υδρογόνου). Πρόκειται για ένα ευέλικτο ενεργειακό λογισμικό το οποίο απλοποιεί την διαδικασία προσθήκης μαθηματικών μοντέλων, εκμεταλλεύεται κατάλληλα τα διαθέσιμα στοιχεία κι έχει την δυνατότητα να συνδέεται με άλλα προγράμματα προσομοίωσης και μη (Microsoft Excel, MATLAB/SIMULINK κ.λ.π.). [93],[94]

2.3.1.2 Μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού.

Το TRNSYS σαν υπολογιστικό εργαλείο έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει κάθε είδους κτίριο με πολλές θερμικές ζώνες και περίπλοκη γεωμετρία. Η σπονδυλωτή αρχιτεκτονική του λογισμικού του TRNSYS προωθεί την διασύνδεση πολλών στοιχείων (components). Το πρόγραμμα απαριθμεί τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου των στοιχείων (inputs) και τις τιμές εξόδου (outputs), οι οποίες υπολογίζονται απ' τα εν λόγω στοιχεία κι εν συνεχεία μπορούν να λειτουργήσουν ως δεδομένα εισόδου και για άλλα στοιχεία. Η δυνατότητα εισαγωγής και σύνδεσης στοιχείων οδήγησε στο σενάριο της εισαγωγής των λεγόμενων Types



στην πλατφόρμα του TRNSYS, δεδομένου ότι το ίδιο το πρόγραμμα δεν δύναται να προσομοιώσει το φαινόμενο μεταβολής φάσης με τα εργαλεία που διαθέτει. Η παρεμβολή των PCM Types διευκολύνει την ανάλυση της ροής θερμότητας μεταξύ του ΥΑΦ και των δομικών στοιχείων του μελετώμενου κτιρίου κι επιτρέπει την προσομοίωση του φαινομένου αλλαγής φάσης. Μέχρι σήμερα έχει μελετηθεί ένας αριθμός PCM Types τα οποία εξυπηρετούν τον σκοπό αυτό. Εκτενέστερη περιγραφή τόσο των PCM Types, όσο και του προγράμματος του TRNSYS παρουσιάζεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.[93],[94]

2.3.2 Energy Plus

2.3.2.1 Γενικά για το Energy Plus.

Πρόκειται για ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κι ενεργειακής ανάλυσης κτιρίων, και κατ' επέκταση εγκαταστάσεων θέρμανσης, κλιματισμού, φωτισμού, αερισμού και άλλων συστημάτων ροής ενέργειας. Στηρίζει τις αρχές του στα πιο δημοφιλή χαρακτηριστικά και δυνατότητες των λογισμικών BLAST και DOE-2 και παρέχει πολλές δυνατότητες και καινοτόμα χαρακτηριστικά προσομοίωσης όπως: χρήση χρονικών βημάτων προσομοίωσης μικρότερων της ώρας, προσομοίωση αρθρωτών συστημάτων κι πολυζωνικών εγκαταστάσεων με επίλυση του θερμικού ισοζυγίου, επέκταση της διαδικασίας προσομοίωσης στην πολυζωνική ροή του αέρα, στην χρήση νερού, στο φυσικό αερισμό και στα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς και μοντελοποίηση συστημάτων για την επίτευξη θερμικής άνεσης. Χάρη στον επεκτάσιμο χαρακτήρα και την αρθρωτή δομή του, το λογισμικό του Energy Plus δίνει την δυνατότητα στον χρήστη (μηχανικό, ερευνητή κ.λ.π.) να ενσωματώνει αλγόριθμους από άλλα προγράμματα και υπολογιστικά εργαλεία (BLAST, DOE-2, WINDOWS 5, κ.λ.π.) κατά την ροή του.[95]

Τα μοντέλα του Energy Plus ακολουθούν πιστά τις θεμελιώδεις αρχές του θερμικού ισοζυγίου σε όλες σχεδόν τις πτυχές του προγράμματος. Γενικά, η προσομοίωση συμβατικών επιφανειών κτιριακών εγκαταστάσεων βασίζεται σε έναν μετασχηματισμό της συνάρτησης μεταφοράς θερμότητας, διατυπωμένο ως σύνολο απλών γραμμικών εξισώσεων με σταθερούς συντελεστές (Conduction Transfer Functions). Η συγκεκριμένη διατύπωση της μεταφοράς θερμότητας διά αγωγή συνοδεύεται απ' τους συνήθεις περιορισμούς επίλυσης βασιζόμενης σε



μετασχηματισμό, δηλαδή: σταθερές ιδιότητες και καθορισμένες τιμές κάποιων παραμέτρων, συνιστώσες οι οποίες πλαισιώνουν τον επιλυτικό αλγόριθμο του προγράμματος.

2.3.2.2 Μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού.

Η προσομοίωση θερμικών ιδιοτήτων εξαρτώμενων από το μέγεθος της θερμοκρασίας, πιο προηγμένων κατασκευών (ΥΑΦ), καθιστά επιτακτική την ανάγκη ο προαναφερθείς τρόπος υπολογισμού να ενισχυθεί από πιο θεμελιώδεις μορφές. Κατά συνέπεια αναπτύχθηκε ένας επιλυτικός αλγόριθμος πεπερασμένων διαφορών (Conduction Finite Difference Solution Algorithm), ο οποίος ενσωματώνεται στο Energy Plus. Ο αλγόριθμος αυτός δεν αντικαθιστά τον συμβατικό CTF αλγόριθμο για την προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας, αλλά τον συμπληρώνει σε περιπτώσεις όπου ο χρήστης καλείται να προσομοιώσει ΥΑΦ ή καταστάσεις μεταβλητής θερμικής αγωγιμότητας. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα σύστημα πεπερασμένων διαφορών συνδυασμένο με μια συνάρτηση ενθαλπίας-θερμοκρασίας, προκειμένου να συμπεριληφθεί με σαφή τρόπο η ενέργεια αλλαγής φάσης.

Η συμβατική διατύπωση της μονοδιάστατης εξίσωσης αγωγής θερμότητας μέσω τοίχου, παρουσιάζεται ως εξής:

$$\rho \frac{\partial(c_p T)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.3.1)$$

Και η έμμεση διατύπωση η οποία αφορά σε έναν εσωτερικό μελετώμενο κόμβο της κατασκευής:

$$\frac{\rho C_p \Delta x (T_{i,new} - T_{i,old})}{\Delta t} = \frac{K(T_{i-1,new} - T_{i,new})}{\Delta x} + \frac{K(T_{i+1,new} - T_{i,new})}{\Delta x} \quad (2.3.2)$$

Οι δείκτες της σχέσης αναφέρονται στον κόμβο και το χρονικό βήμα της μοντελοποίησης. Η εξίσωση αυτή ακολούθως συμπληρώνεται από μία συνάρτηση ενθαλπίας-θερμοκρασίας:

$$h_i = f_{H,T}(T_i) \quad (2.3.3)$$

Όπου η $f_{H,T}$ συνάρτηση ενθαλπίας-θερμοκρασίας αποτελεί το δεδομένο εισόδου του χρήστη. Οι σχέσεις (2.3.2) και (2.3.3) χρησιμοποιούνται για το σύνολο των κόμβων της εγκατάστασης (κόμβοι εξωτερικής επιφάνειας, κόμβοι εσωτερικής επιφάνειας,



εσωτερικοί κόμβοι και κόμβοι επιφάνειας υλικού), λόγω της παρόμοιας διατύπωσής τους. Ο κόμβος της επιφάνειας υλικού είναι εκείνος που διευκολύνει την χρήση ΥΑΦ. Δεδομένου ότι πρόκειται για έμμεση επίλυση, ένα σύστημα επανάληψης Gauss-Seidell χρησιμοποιείται προκειμένου να ανανεώνεται η θερμοκρασία στον εκάστοτε κόμβο της κατασκευής. Το γεγονός αυτό επιφέρει σε κάθε επανάληψη ανανέωση και της ενθαλπίας, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της μεταβλητής C_p με την χρήση της εξίσωσης:

$$C_p = \frac{(h_{i,new} - h_{i,old})}{T_{i,new} - T_{i,old}} \quad (2.3.4) \quad , \text{στην περίπτωση προσομοίωσης ΥΑΦ.}$$

Το δεδομένο σύστημα επανάληψης εξασφαλίζει την χρήση της σωστής τιμής ενθαλπίας και κατ' επέκταση της αντίστοιχης C_p σε κάθε χρονικό βήμα. Εάν, βέβαια, πρόκειται για συμβατικό υλικό, σταθερή τιμή της C_p παρέχεται απ' τον χρήστη για την εξέλιξη της προσομοίωσης.[96]

2.3.3 ESP-r

2.3.3.1 Γενικά για το ESP-r.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα ενεργειακής προσομοίωσης παρέχει δυνατότητες μοντελοποίησης της ροής της ενέργειας και των ρευστών εντός κτιριακών εγκαταστάσεων και συστημάτων. Η προσέγγιση της κτιριακής εγκατάστασης πραγματοποιείται με την διάκριση των θερμικών ζωνών. Μία ή περισσότερες ζώνες στο εσωτερικό του εκάστοτε κτιρίου καθορίζονται και οριοθετούνται με κριτήριο την γεωμετρία, την κατασκευή και την χρηστικότητα του χώρου. Οι ζώνες αυτές συμπλέκονται με σκοπό την διαμόρφωση του κτιρίου κι εν τέλει τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του μελετώμενου πολυζωνικού κτιρίου παρέχονται από τα στοιχεία ανάλυσης αποτελεσμάτων του ESP-r.

Αναλόγως το είδος της μελέτης η οποία ενδιαφέρει τον χρήστη, εντάσσονται στο ESP-r πρόσθετα στοιχεία μοντελοποίησης προκειμένου να βελτιωθεί η επίλυση ή να διευκολυνθεί η προσομοίωση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του κτιρίου, για παράδειγμα: η προσθήκη στοιχείων για την διείσδυση και ανανέωση αέρα διευκολύνει την ολοκληρωμένη προσομοίωση της ροής του αέρα, η προσθήκη δικτύου εγκαταστάσεων για την μοντελοποίηση του συστήματος κλιματισμού, η προσθήκη στοιχείου ανανεώσιμης μορφής ενέργειας για την μοντελοποίηση



φωτοβολταϊκών συστημάτων. [97],[98]. Το ESP-r βασίζει τη λειτουργία του σε προσέγγιση πεπερασμένων όγκων, στην οποία ένα πρόβλημα μετασχηματίζεται σε σύνολο εξισώσεων διατήρησης. Οι εξισώσεις αυτές ολοκληρώνονται σε διαδοχικά χρονικά βήματα με γνώμονα τις κλιματολογικές συνθήκες, το είδος της χρήσης και την επιρροή των συστημάτων ελέγχου.

2.3.3.2 Μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού.

Η προσέγγιση όγκου ελέγχου του ESP-r υιοθετήθηκε με σκοπό την περιγραφή των φυσικών στοιχείων του PCM μοντέλου με την χρήση των ζωνών του ESP-r και των στοιχείων των δικτύων. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει, επιπλέον, και την υιοθέτηση μεταβλητών θερμοφυσικών ιδιοτήτων.

Οι ζώνες της κτιριακής εγκατάστασης συνδέονται μεταξύ τους προς διαμόρφωση του κτιρίου και το ολοκληρωμένο αριθμητικό μοντέλο μαζί με τις οριακές συνθήκες και τον επιβεβλημένο έλεγχο, μεταβιβάζεται για κεντρική επίλυση.

Η διατύπωση του όγκου ελέγχου προκύπτει απ' την ολοκλήρωση της μερικής διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας με μεταβλητές θερμοφυσικές ιδιότητες:

$$\rho(T)C_{eff}(T) \frac{T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla[K(T)\nabla T(\vec{r}, t)] + g(\vec{r}, t) \quad (2.3.5a)$$

όπου C_{eff} η ενεργός θερμοχωρητικότητα.

σε έναν μικρό πολυεδρικό όγκο ελέγχου V , εφαρμόζοντας το θεώρημα μέσης τιμής και το θεώρημα της απόκλισης, με ομογενές υλικό και ομοιόμορφο σύνορο σε κάθε επιφάνεια. Με αυτόν τον τρόπο, η προαναφερθείσα εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$\rho(\bar{T})C_{eff}(\bar{T})V(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = -K_s(T) \frac{\partial T}{\partial n_s} + V(\bar{T})\bar{g} \quad (2.3.5\beta)$$

όπου \bar{T} η μέση θερμοκρασία του όγκου V , g ο βαθμός παραγωγής θερμότητας στον όγκο ελέγχου και το n_s .

Σύμφωνα με τα όρια του όγκου ελέγχου και την μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, η επίδραση της μεταβολής φάσης προστίθεται στην εξίσωση ενεργειακής ισορροπίας μέσω υποκατάστασης των ιδιοτήτων του υλικού. Στο ESP-r ,



ένας τρόπος μοντελοποίησης των PCMs είναι με χρήση του σεναρίου των «ειδικών υλικών». Τα «ειδικά υλικά» εισήχθησαν στο ESP-r ως μέσον μοντελοποίησης στοιχείων ενεργητικού κτιρίου κι έχουν την δυνατότητα να αλλάζουν τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες ως απόκριση κάποιων εξωτερικών διεγέρσεων. Οι συναρτήσεις των «ειδικών υλικών» του ESP-r μπορούν να εφαρμοστούν σε έναν συγκεκριμένο κόμβο μέσα σε μια πολυστρωματική κατασκευή. Κάθε κόμβος ο οποίος ορίζεται σαν «ειδικό υλικό» υποβάλλεται σε μια χρονική διαφοροποίηση στις θερμοφυσικές του ιδιότητες. [99]

2.3.4 BSim

2.3.4.1 Γενικά για το BSim.

Το λεπτομερές αυτό πρόγραμμα προσομοίωσης κτιριακών κατασκευών παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού κι ανάλυσης των εσωτερικών συνθηκών και της ενεργειακής απαίτησης και κατανάλωσης του κτιρίου. Οι διάφοροι υπολογισμοί κατά την ροή του διεξάγονται με βάση τις ωριαίες τιμές των συνημμένων μετεωρολογικών δεδομένων.

Εστιάζοντας στο περιβάλλον του BSim, ένα κτίριο συνίσταται από διακριτές και διαχωρισμένες μεταξύ τους θερμικές ζώνες, από διαφορετικά είδη κατασκευής. Το θερμικό ισοζύγιο σε κάθε μία από τις ζώνες καθορίζεται απ' την μεταφορά θερμότητας, μέσω των δομικών στοιχείων, μεταξύ των παρακείμενων κατασκευών. Η μεταφορά θερμότητας μέσω των στοιχείων κατασκευής απλοποιείται σε μονοδιάστατο πρόβλημα και η υπολογιστική μηχανή βασίζεται στην μέθοδο των όγκων ελέγχου. Στο πρόγραμμα του BSim, κάθε θερμική ζώνη παρουσιάζεται ως ένα μοναδικό κομβικό σημείο και κάθε δομικό στοιχείο εμφανίζεται να αποτελείται από ένα ή περισσότερα ομοιογενή στρώματα.

Σε αριθμητικά μοντέλα τα οποία έχουν εισαχθεί στο BSim, η δυναμική συμπεριφορά του κτιρίου περιγράφεται από μια διακριτή μορφή. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι μια συνεχής διαδικασία περιγράφεται από τις μεταβολές μεταξύ των χρονικών βημάτων της μοντελοποίησης. Ωστόσο, κατά την διάρκεια ενός χρονικού βήματος, το μοντέλο βρίσκεται σε μια μόνιμη σχεδόν κατάσταση, γεγονός το οποίο δηλώνει ότι οι θερμοκρασίες διατηρούνται σταθερές. Τα μοντέλα αυτά απαιτούν χρήση επαρκούς



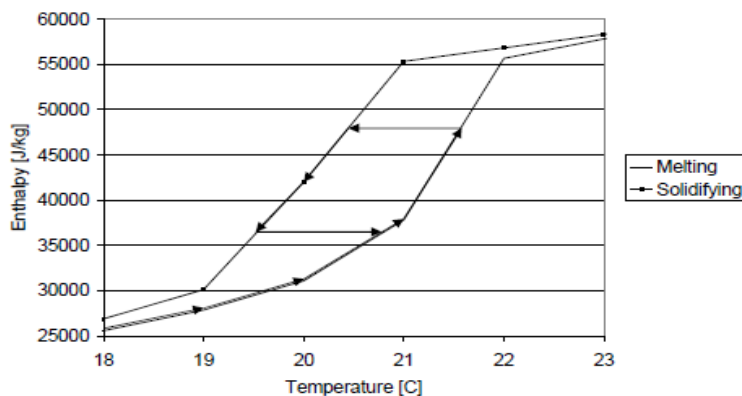
αριθμού χρονικών βημάτων προκειμένου να επιτυγχάνεται ικανοποιητική διεξαγωγή αποτελεσμάτων [100].

2.3.4.2 Μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού.

Μέθοδος που έχει ήδη εφαρμοσθεί για την διεξαγωγή υπολογισμών, που αφορούν στην μοντελοποίηση των ΥΑΦ στο BSim, περιγράφεται επαρκώς μέσω του παραδείγματος προσομοίωσης της γυψοσανίδας Micronal SmartBoard, η οποία περιέχει ενθυλακωμένο ΥΑΦ (παραφίνη). Το συγκεκριμένο παράδειγμα επιβεβαιώνει την καθοριστική επίδραση του μεγέθους της υστέρησης στην αλλαγή φάσης του υλικού (εκδηλώνεται σαν φαινόμενο στην αλλαγή φάσης του υλικού όταν η θερμοκρασίες τήξης και πήξης δεν συμφωνούν).

Η SmartBoard, σαν δομικό υλικό, διαθέτει καθορισμένες ιδιότητες (πυκνότητα, θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα) και το 30% της μάζας της καταλαμβάνεται απ' το ΥΑΦ. Για να μοντελοποιηθεί η υστέρηση της αλλαγής φάσης του στοιχείου με αρθρωτό τρόπο, πρέπει να είναι γνωστή η κατάσταση του PCM στο προηγούμενο χρονικό βήμα προκειμένου να προσδιορισθεί η κατάστασή του στο παρόν χρονικό βήμα. Ο προσδιορισμός αυτός επιτυγχάνεται με χρήση μιας απλοποιημένης μεθόδου: για ένα ΥΑΦ η ειδική θερμοχωρητικότητα για όγκο ελέγχου i στο χρονικό βήμα j προσδιορίζεται με βάση την θερμοκρασία του όγκου ελέγχου στο χρονικό βήμα $j-1$, δηλαδή την τελευταία γνωστή θερμοκρασία του συγκεκριμένου όγκου ελέγχου. Χαρακτηριστικό της παραπάνω μεθόδου είναι τα μικρά χρονικά βήματα, διότι κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ανακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Πριν την έναρξη της πραγματικής προσομοίωσης, η θερμοκρασία διατηρείται στους 20°C σε όλο το μοντέλο και για κάθε ΥΑΦ ορίζεται αυτή η αρχική κατάσταση να βρίσκεται στην καμπύλη τήξης. Συνεπώς, η κατάσταση θα ακολουθεί πάντα είτε την καμπύλη τήξης (θέρμανση) είτε την καμπύλη στερεοποίησης (ψύξη) ή θα βρίσκεται κάπου μεταξύ των δύο καμπυλών. Μεταξύ των δύο καμπυλών, η κατάσταση θα κινείται οριζόντια μέχρι να καταλήξει σε μία απ' τις δύο καμπύλες, και αντίστοιχα, καταστάσεις, όπως γίνεται φανερό απ' το διάγραμμα που έπεται.



Σχήμα 2.3.1: Απεικόνιση της εξέλιξης της κατάστασης του ΥΑΦ-Βρόχος τήξης στερεοποίησης [100].

Μεταξύ των δύο καμπυλών η ειδική θερμοχωρητικότητα C_p προσδιορίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των αντίστοιχων σημείων των καμπυλών τήξης και στερεοποίησης.[100],[101]

2.3.5 RADCOOL

2.3.5.1 Γενικά για το RADCOOL.

Το εργαλείο προσομοίωσης RADCOOL έχει σχεδιασθεί ειδικά για την μοντελοποίηση της δυναμικής απόδοσης κτιρίων εξοπλισμένων με συστήματα ψύξης, στα οποία ποσοστό μεγαλύτερο του 50% της διακινούμενης θερμότητας μεταφέρεται μέσω θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ των επιφανειών του συστήματος. Πρόκειται για ένα αρθρωτό πρόγραμμα προσομοίωσης, το οποίο βασίζει την λειτουργία του εξ' ολοκλήρου στους υπολογισμούς ενεργειακού ισοζυγίου. Τα αποτελέσματά του παρέχουν στον χρήστη πληροφορίες σχετικές με τα θερμικά φορτία, το ποσοστό εξαγωγής θερμότητας, την θερμοκρασία του αέρα και την θερμοκρασιακή κατανομή στις επιφάνειες οι οποίες απαρτίζουν το εκάστοτε κτίριο. Το RADCOOL μπορεί επίσης να αξιολογήσει την διαστασιολόγηση και διαμόρφωση συστημάτων, και ως εκ τούτου, μπορεί να ενισχύσει τον σχεδιασμό HVAC συστημάτων. Η χρήση του επεκτείνεται και στην αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου σε μεταβολές φορτίων, καθώς και στη μελέτη της εσωτερικής θερμικής άνεσης και της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων.

Το πρόγραμμα αποτελείται από μια βιβλιοθήκη εξοπλισμένη με δομικά στοιχεία (building components) και μια μέθοδο προκειμένου να συνδυάζει και να εντάσσει τα στοιχεία αυτά σε αριθμητικά μοντέλα κτιρίων. Επομένως, στο RADCOOL κάθε



κτίριο που μοντελοποιείται αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σύνολο συνδεδεμένων στοιχείων. Θετικό είναι το γεγονός ότι το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει μεγάλη ποικιλία κτιριακών κατασκευών και πλήθος θερμικών φορτίων, με την προϋπόθεση ότι ο χρήστης εισάγει όλα τα δεδομένα τα οποία είναι απαραίτητα για την μοντελοποίηση (π.χ. θερμικές ιδιότητες δομικών υλικών). Τον μόνο περιοριστικό παράγοντα για τους υπολογισμούς προσομοίωσης αποτελεί το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, το οποίο πρέπει να είναι της τάξης του λεπτού.

Για την περίπτωση πιο σύνθετων και νεωτερικών κτιριακών κατασκευών, ο επεκτάσιμος χαρακτήρας του RADCOOL του δίνει την δυνατότητα ένταξης υπομονάδων και συναρτήσεων για την μοντελοποίηση των νέων στοιχείων. [102]

2.3.5.2 Μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού.

Η λειτουργία του μοντέλου RADCOOL για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς κτιρίων, και στην περίπτωση μεταφοράς θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή (ΥΑΦ), δεν ικανοποιείται μόνο από μια συνεχή συνάρτηση για το μέγεθος της ενθαλπίας, αλλά απαιτεί την διατύπωση μιας συνάρτησης η οποία περιγράφει την ενθαλπία σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας για όλο το θερμοκρασιακό εύρος που παρατηρείται στο κτίριο. Ο Feustel [103] περιγράφει τις απλοποιήσεις οι οποίες επιτρέπουν την περιγραφή της ενθαλπίας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας μέσω υπερβολικών συναρτήσεων, αντίστοιχα:

$$h(T) = C_{p,const}T + \frac{h_2 - h_1}{2} \cdot \left\{ 1 + \tanh \left[\frac{2\beta}{\tau} (T - T_m) \right] \right\} \quad (2.3.6)$$

$$C_p(T) = C_{p,const}T + \frac{h_2 - h_1}{2} \cdot \frac{\frac{2\beta}{\tau}}{\cosh^2 \left[\frac{2\beta}{\tau} (T - T_m) \right]} \quad (2.3.7)$$

Η συνάρτηση η οποία περιγράφει την ειδική θερμοχωρητικότητα και βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα ενσωματώνεται σε κάποιες απ' της υπομονάδες της τοιχοποιίας οι οποίες εντάσσονται στο RADCOOL.

Η διαδικασία που περιγράφηκε εφαρμόστηκε απ' τους Stetiu και Feustel για την μοντελοποίηση κτιρίου στο [104] της βιβλιογραφίας, οι τοίχοι του οποίου είναι εμποτισμένοι με ΥΑΦ (παραφίνη). Το μοντέλο του RADCOOL, το οποίο βασίζεται



σε προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών, χρησιμοποιήθηκε για κτίριο μονοζωνικό με τοιχοποιία πολλών επιπέδων. Τα αποτελέσματα του πειράματος κατέδειξαν την συμβολή των ΥΑΦ στην θερμική συμπεριφορά του εν λόγω κτιρίου.

2.3.6 FLUENT Software

2.3.6.1 Γενικά για το FLUENT.

Το υπολογιστικό εργαλείο Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics techniques) FLUENT παρέχει στον χρήστη αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μεταβολής φάσης. Περιορίζει την χρησιμότητά του κυρίως στην ανάλυση της ροής ασυμπίεστων και ήπιας ροής συμπιεστών ρευστών. Το λογισμικό FLUENT, με την χρήση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων ως μέθοδο επίλυσης, παρέχει φυσικά μοντέλα μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ανάλυση φαινομένων σχετικών με: τυρβώδεις ροές, μεταφορά θερμότητας, χημική ανάμιξη, καύση, πολυφασικές ροές κλπ. [105]

Η χρήση του προγράμματος αυτού προϋποθέτει και την χρήση ενός συμβατού σχεδιαστικού πακέτου, όπως το Gambit, με το οποίο κατασκευάζεται το γεωμετρικό μοντέλο του εκάστοτε προβλήματος καθώς και το υπολογιστικό πλέγμα, δεδομένα τα οποία εισάγονται με την σειρά τους στο FLUENT όπου και πραγματοποιούνται οι διάφοροι υπολογισμοί. Στις μέχρι τώρα εφαρμογές του, το πρόγραμμα επιλύει φαινόμενα δύο ή τριών διαστάσεων (2D και 3D) και ρόλος του είναι ο έλεγχος του πλέγματος το οποίο παρέχεται απ' το σχεδιαστικό πακέτο κι έπειτα η επίλυση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας και αλλαγής φάσης [106].

2.3.6.2 Μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού.

Η επίλυση των προβλημάτων Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, σε εγκαταστάσεις οι οποίες περιλαμβάνουν και ΥΑΦ, επιτυγχάνεται με τα εξής βήματα:

Ο όγκος του ΥΑΦ της μελετώμενης εγκατάστασης διαχωρίζεται σε μικρότερους όγκους ελέγχου οι οποίοι αποτελούν το λεγόμενο πλέγμα. Είναι σαφές ότι το πλέγμα του ΥΑΦ πρέπει να είναι ευκρινώς διαχωρισμένο απ' το πλέγμα της μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας στην οποία βρίσκεται προσαρμοσμένο. Ο διαχωρισμός αυτός πραγματοποιείται από το σχεδιαστικό πακέτο με κάποια μέθοδο αφαίρεσης (π.χ. λογικές πράξης της άλγεβρας Boole όπως συμβαίνει και στην



ανάλυση του ΥΑΦ η οποία συναντάται στο [106] της βιβλιογραφίας) του όγκου του ΥΑΦ απ' τον όγκο της μονάδας αποθήκευσης. Με αυτόν τον τρόπο παρέχονται οι δύο διακριτοί όγκοι του ΥΑΦ και της μονάδας αποθήκευσης, οι οποίοι εξυπηρετούν την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος.

Ακολουθεί η εισαγωγή τόσο του γεωμετρικού μοντέλου όσο και του υπολογιστικού πλέγματος απ' το σχεδιαστικό λογισμικό στο υπολογιστικό εργαλείο, προκειμένου να προσεγγιστεί αριθμητικά η λειτουργία της εγκατάστασης. Οι υπολογισμοί αυτοί προϋποθέτουν οριακές συνθήκες καθώς και τις ιδιότητες τόσο του ΥΑΦ όσο και των άλλων υλικών της εγκατάστασης, οι οποίες συνήθως είναι: το ιξώδες, η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κλπ.

Επόμενο βήμα αποτελεί η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, η οποία βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ροής κι ενέργειας τόσο στην υγρή όσο και στην στερεά φάση του ΥΑΦ. Με την λήξη των υπολογισμών, το FLUENT παρέχει στον χρήστη το ζητούμενο αποτέλεσμα της υπολογιστικής διαδικασίας.[106],[107]

2.3.7 COMSOL

2.3.7.1 Γενικά για το COMSOL.

Το διαδραστικό περιβάλλον του COMSOL χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση κι επίλυση προβλημάτων επιστημονικής και μηχανικής φύσης. Δίνει στον χρήστη την δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων με βασική προϋπόθεση τον καθορισμό των απαραίτητων φυσικών ποσοτήτων οι οποίες χαρακτηρίζουν την μελετώμενη εφαρμογή, όπως: οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών, τα φορτία, οι ροές κλπ., χωρίς να απαιτείται όμως ο καθορισμός των εξισώσεων επίλυσης απ' τον ίδιο. Το λογισμικό COMSOL Multiphysics βασίζει τις υπολογιστικές τεχνικές του στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (**F**inite **E**lement **M**ethod) και δύναται να προσομοιώνει τα συστήματα γραμμικών και μη γραμμικών μη μόνιμων μερικών διαφορικών εξισώσεων (**P**artial **D**ifferential **E**quations), οι οποίες αποτυπώνουν την φύση του εκάστοτε προβλήματος. [108],[109] Η προσομοίωση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας, με το κατάλληλα επιλεγμένο χρονικό βήμα προσομοίωσης από το COMSOL, εξελίσσεται σε μια σειρά διαδοχικών βημάτων ως εξής: Τον καθορισμό του γεωμετρικού μοντέλου της μελετώμενης εφαρμογής ακολουθεί η



κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος. Η διαμόρφωση του πλέγματος, η οποία εξαρτάται απ' τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες, διευκολύνει την αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος απ' το υπολογιστικό εργαλείο. Οι εξισώσεις ροής θερμότητας (π.χ. μεταφοράς θερμότητας διά αγωγής και συναγωγής) συγκροτούνται στο COMSOL Multiphysics κι εν τέλει το λογισμικό επιλύει αυτά τα συστήματα των PDEs εφαρμόζοντας τις κατάλληλες αρχικές κι οριακές συνθήκες. [109]

2.3.7.2 Μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού

Στο COMSOL το φαινόμενο της μεταβολής φάσης προσομοιώνεται ανεξάρτητα από το υπόλοιπο σύστημα, εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης του προβλήματος. Για την προσομοίωση των ΥΑΦ, δημιουργείται μοντέλο στο COMSOL το οποίο καταδεικνύει την εξέλιξη των βασικών θερμικών ιδιοτήτων των υλικών (ειδική θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα, λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης, θερμική αγωγιμότητα κλπ.) κατά την διάρκεια της μεταβολής φάσης. Οι συγκεκριμένες ιδιότητες μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας και διαφέρουν αρκετά μεταξύ των δύο καταστάσεων του μελετώμενου υλικού (υγρή- στερεά φάση) [110].

Η μοντελοποίηση ΥΑΦ στο COMSOL ξεκινά με την εκτίμηση της μεταβολής φάσης απ' την στερεά στην υγρή κατάσταση και το αντίστροφο, με την χρήση της βασικής εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας διά αγωγής: $\rho \frac{\partial (c_p T)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ (2.3.1). Είναι γεγονός ότι παλαιές μελέτες οι οποίες διεξάγονταν για την μοντελοποίηση συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή, παρέλειπαν το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας μέσω φυσικής συναγωγής κατά την αλλαγή φάσης του μελετώμενου υλικού. Σε αντίθεση με τις μελέτες αυτές όπως αναφέρεται και στο [111] της βιβλιογραφίας, διεξήχθη στο COMSOL προσομοίωση της τήξης του ΥΑΦ λαμβάνοντας υπόψη την μεταφορά θερμότητας τόσο μέσω αγωγής όσο και μέσω φυσικής συναγωγής, τεχνική η οποία εξασφαλίζει πληρότητα και σχετική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για την εξέλιξη της εν λόγω μοντελοποίησης της αλλαγής φάσης πραγματοποιήθηκε προσέγγιση διαφόρων παραμέτρων του υλικού ως εξής: 1) Για τον προσδιορισμό της λανθάνουσας θερμότητας η οποία απορροφήθηκε κατά την τήξη, χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p . 2) Το δυναμικό ιξώδες εισήχθη ως δεδομένο με την μορφή τμηματικά συνεχούς συνάρτησης. 3) Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι σταθερές τιμές της



πυκνότητας και της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Ακολουθεί η κατασκευή ενός υπολογιστικού πλέγματος το οποίο αποτελεί και το αντικείμενο της προσομοίωσης. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της μοντελοποίησης, η εξέλιξη της τήξης του ΥΑΦ περιγράφεται από τα ποιοτικά αποτελέσματα του COMSOL [111].

2.3.8 PCM express

2.3.8.1 Γενικά για το PCM express

Το PCM express αποτελεί ένα πρόγραμμα σχεδιασμού και προσομοίωσης κτιρίων, τα οποία περιλαμβάνουν ΥΑΦ. Το πρόγραμμα παρέχει στον χρήστη μια απλή μέθοδο καθορισμού των PCM συστημάτων. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την χρήση ΥΑΦ στην τοιχοποιία και τις μεταβολές στις συνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ενισχύεται με την μορφή ενεργών δομικών στοιχείων (πανέλων θέρμανσης, περιοχές ψύξης) και τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας ψύξης. Ανάλογα με την επικρατούσα κατάσταση, η χρήση των PCM καθορίζεται από το αυξημένο επίπεδο της παρεχόμενης θερμικής άνεσης (ιδιωτικές οικείες με απαιτήσεις άνετης ζωής) ή από οικονομικούς παράγοντες. Και οι δύο προαναφερθέντες τύποι στρατηγικής υποστηρίζονται απ' το πρόγραμμα, με την χρήση μενού, προκαθορισμένων προφίλ χρήσης και προσαρμοσμένης παρουσίασης των αποτελεσμάτων. [112]

2.3.8.2 Μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού

Στο μελετώμενο κτίριο, θεωρείται ότι το ΥΑΦ χρησιμοποιείται στις κατασκευές του δαπέδου, της οροφής και της τοιχοποιίας. Προκειμένου να περιγραφεί η επίδραση του ΥΑΦ, η μεταβολή της φάσης πρέπει να προσδιορισθεί με ακρίβεια. Ως εκ τούτου, οι κατασκευές οι οποίες δεν διαθέτουν ΥΑΦ ορίζονται με σταθερή θερμοχωρητικότητα C_p , ενώ οι PCM κατασκευές ορίζονται από την σχέση εξάρτησης θερμοκρασίας-ενθαλπίας.

Στην υπό μοντελοποίηση κατασκευή, όλα τα στρώματα/επίπεδα προσομοιώνονται ως κόμβος στο μαθηματικό μοντέλο των κόμβων που χρησιμοποιείται και κάθε δωμάτιο του κτιρίου αντιπροσωπεύεται από έναν κόμβο για τον εσωτερικό αέρα. Η ροή θερμότητας μεταξύ των κόμβων είναι αποτέλεσμα της θερμικής αγωγής και αντιπροσωπεύεται από ένα σύνδεσμο, ο οποίος ενώνει δύο επίπεδα. Το εξωτερικό



επίπεδο με την σειρά του συνδέεται με το περιβάλλον μέσω συνδέσμου ο οποίος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας και την ακτινοβολία. Η ακτινοβολία του περιβάλλοντος κατανέμεται μέσω των παραθύρων στους κόμβους αέρα των δωματίων και στο εσωτερικό επίπεδο των κατασκευών. Ο κόμβος του αέρα με την σειρά του συνδέεται με τα συστήματα ψύξης, θέρμανσης και αερισμού του κτιρίου. Επιπλέον, κάθε επίπεδο συστήματος μπορεί να οριστεί σαν ενεργό, και τα ενεργά επίπεδα ενισχύονται από νερό για σκοπούς θέρμανσης και ψύξης. Για όλα αυτά τα συστήματα εφαρμόζονται κατάλληλες στρατηγικές ελέγχου.

Ο υπολογισμός του μοντέλου τελικά πραγματοποιείται σε εξάλεπτα διαστήματα για όλη την διάρκεια του έτους. [112]



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Πληροφορίες για τα Micronal® PCM προϊόντα της BASF, <http://www.dispersions-pigments.basf.com>, access date 8 Μαρτίου 2012
- [2] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της Capzo International BV, <http://www.capzo.nl>, access date 12 Μαρτίου 2012
- [3] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της RUBITHERM®, <http://www.climator.com>, access date 10 Μαρτίου 2012
- [4] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της Cristopia Energy Systems, <http://www.cristopia.com>, access date 10 Μαρτίου 2012
- [5] W. Streicher, L. Cabeza, A. Heinz, Inventory of phase change materials (PCM). IEA solar heating and cooling programme e task 32, Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings, 2005, Pages 1-33
- [6] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της Dörken GmbH & Co. KG, <http://www.doerken.de>, access date 12 Μαρτίου 2012
- [7] Πληροφορίες για το Dupont™ Energain® PCM πάνελ/ Energain Datasheet, <http://energain.co.uk>, access date 8 Μαρτίου 2012
- [8] Τεχνικό φυλλάδιο του προϊόντος Micronal® PCM SmartBoard, <http://www.lowex.info>, access date 9 Μαρτίου 2012
- [9] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της PCM Products Ltd, <http://www.pcmproducts.net>, access date 11 Μαρτίου 2012
- [10] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της PURETEMP™, <http://www.puretemp.com>, access date 11 Μαρτίου 2012
- [11] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της RUBITHERM®, <http://www.rubitherm.de>, access date 10 Μαρτίου 2012
- [12] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της TEAP, <http://teappcm.com>, access date 10 Μαρτίου 2012



- [13] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 12, Issue 1, January 2008, Pages 39-64
- [14] K. Peippo, P. Kauranen, P.D. Lund, A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating, *Energy and Buildings*, Volume 17, Issue 4, 1991, Pages 259-270
- [15] D.A. Neeper, Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, *Solar Energy*, Volume 68, Issue 5, 2000, Pages 393-403
- [16] 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*, Volume 22, Issue 2-3, 1991, Pages 231-242
- [17] Kedl RJ, Stovall TK., Activities in support of the wax-impregnated wallboard concept: US Department of energy: thermal energy storage researches activity review, 1989
- [18] Ival O. Salyer, Anil K. Sircar, Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other applications, *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Volume 25, Issue 4, 1990, Pages 236-243
- [19] A.K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage, *Building and Environment*, Volume 32, Issue 5, September 1997, Pages 405-410
- [20] Shapiro M, Development of the enthalpy storage materials, Mixture of methyl stearate and methyl palmitate, Sub-contract report to Florida Solar Energy Center, 1989
- [21] Shapiro M, Development of the enthalpy storage materials, mixture of capric acid and lauric acid with fire Retardants, Subcontract report to Florida Solar Energy Center, 1989



- [22] Kissock 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, 1998, Pages 45–52
- [23] T. Lee, D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 62, Issue 3, 15 May 2000, Pages 217-237
- [24] D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Latent heat storage in concrete, Solar Energy Materials, Volume 19, Issues 3–5, November 1989, Pages 335-348
- [25] M. Hadjieva, R. Stoykov, Tz. Filipova, Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage, Renewable Energy, Volume 19, Issues 1–2, January–February 2000, Pages 111-115
- [26] Mehling R, Krippner A, Hauer, Research project on PCM in wood–light weight-concrete, Proceedings of the second workshop of IEA ECES IA Annex 17, Ljubljana, Slovenia, 2002
- [27] D.W. Hawes, D. Feldman, Absorption of phase change materials in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 27, Issue 2, July 1992, Pages 91-101
- [28] D.W. Hawes, D. Feldman, D. Banu, Latent heat storage in building materials, Energy and Buildings, Volume 20, Issue 1, 1993, Pages 77-86
- [29] H. Kaasinen, The absorption of phase change substances into commonly used building materials, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 27, Issue 2, July 1992, Pages 173-179
- [30] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, Energy and Buildings, Volume 42, Issue 9, September 2010, Pages 1361-1368
- [31] Πληροφορίες για ΥΑΦ, <http://www.econ3.gr>, access date 8 Μαρτίου 2012
- [32] C. Castellón; M. Medrano, J. Roca, M. Nogués, A. Castell, L.F. Cabeza ,Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Building Applications, Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings X



- [33] C. Clearly, S. Day, R. Lindsay, C. Murry, R. Gupta, B. Larkin, H. Thompson, M. Wiggin, J. S. O' C. Young, Hydraulic Characteristics of Ice Slurry and Chilled Water Flows, IEA District Heating: Advanced Energy Transmission Fluid-Final Report of Research, Netherlands ,1990
- [34] Yasushi Yamagishi, Hiromi Takeuchi, Alexander T. Pyatenko, Naoyuki Kayukawa, Characteristics of microencapsulated PCM slurry as a heat-transfer fluid, AIChE Journal, Volume 45, Issue 4, April 1999, Pages 696–707
- [35] E. Jahns, Mikroverkapselte PCM: Herstellung, Eigenschaften, Anwendungen, ZAE-Symposium 2004, Wärme- und Kältespeicherung mit Phasenwechselmaterialien (PCM), München, 4 - 5 März 04
- [36] Application of Phase Change Materials and PCM-Slurries for Thermal Energy Storage, <http://intraweb.stockton.edu>, access date 2 Απριλίου 2012
- [37] A. Heinz, W. Streicher, Application of Phase Change Materials and PCM – Slurries for Thermal Energy Storage, Thermal Engineering, Volume 29, Issue14-15, 2009, Pages 3149-3159
- [38] W. Lu, S.A. Tassou, Experimental study of the thermal characteristics of phase change slurries for active cooling, Applied Energy, Volume 91, Issue 1, March 2012, Pages 366–374
- [39] Harald Mehling, Luisa F. Cabeza, Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction Into Basics and Applications, October 2008, Pages 308
- [40] P.W. Egolf, O.Sari, J. Brulhart, F. Gendre, D. Ata-Caesar, V.Vuarnoz, Physical Behaviour of Phase Change Material Slurries, Deliverable D6, Workpackage 3, EU project ENK6-CT-2001-00507 (PAMELA), 2004
- [41] Sunliang Cao, Arild Gustavsen, Sivert Uvslokk, Bjorn Petter Jelle, Jacques Gilbert, Jussi Maunuksela, The Effect of Wall-Integrated Phase Change Material Panels on the Indoor Air and Wall Temperature – Hot box Experiments, zero emission buildings - proceedings of Renewable Energy Conference 2010, Pages 15-26



- [42] Sunliang Cao, Arild Gustavsen, Sivert Uvsløkk, Bjorn Petter Jelle, Jacques Gilbert⁵, Jussi Maunuksela, The Effect of Wall-Integrated Phase Change Material Panels on the Indoor Air and Wall Temperature – Hot box Experiments, Renewable Energy Research Conference 2010, Pages 15-26
- [43] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 11, Issue 6, August 2007, Pages 1146-1166
- [44] Swet CJ. Phase change storage in passive solar architecture, Proceedings of the fifth national passive solar conference, Amherst, MA, 1980, Pages 282-286
- [45] Ghoneim AA, Klein SA, Duffie JA. Analysis of collector—storage building walls using phase change materials, Sol Energy, Volume 47, 1991, Pages 237–242.
- [46] Chandra S, Kumar R, Kaushik S, Kaul S. Thermal performance of a non-A/C building with PCCM thermal storage wall, Energy Convers Manage, Volume 25, 1985, Pages 15–20.
- [47] Knowler T. Proportioning composites for efficient-TSWs, Sol Energy, Volume 31, 1983, Pages 319–326.
- [48] Farouk B, Guceri SI, Tromb–Michal wall using a phase change material, Proceedings of the second Miami international conference on alternative energy, Miami, 1979
- [49] Stritih U, Novak P., Solar heat storage wall for building ventilation, World renewable energy congress (WREC), 1996, Pages 268–271
- [50] Meng Zhang, Mario A. Medina, Jennifer B. King, 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, Volume 29, Issue 9, July 2005, Pages 795–809
- [51] Stetiu C, Feustel HE, Phase change wallboard and mechanical night ventilation in commercial buildings, Lawrence Berkeley National laboratory, 1998.



[52] Feustel HE, Stetiu C, Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application ,Lawrence Berkeley National laboratory, Report LBL-38320, 1997.

[53] Fraunhofer ISE. Available at www.ise.fhg.de/english, access date 12 Μαρτίου 2012

[54] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της Knauf, <http://www.ecohookups.com>, access date 12 Μαρτίου 2012

[55] Πληροφορίες για τα ΥΑΦ της BASF, <http://www.energyefficiency.basf.com> , access date 12 Μαρτίου 2012

[56] Salyer IO, Sircar AK, Kumar A, Advanced phase change materials technology: valuation in lightweight solite hollow-core building blocks, Proceedings of the 30th intersociety energy conversion engineering conference, Orlando, USA, 1995, Pages 217–224.

[57] Esam M. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material, Energy and Buildings, Volume 40, Issue 3, 2008, Pages 351-357

[58] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, Energy and Buildings, Volume 42, Issue 4, April 2010, Pages 534-540

[59] Χρήσιμες πληροφορίες για τα PCM προϊόντα της εταιρείας PCM products, <http://www.pcmproducts.net>, access date 15 Μαρτίου 2012.

[60] Atul 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, Volume 13, Issue 2, February 2009, Pages 318-345

[61] A. K. Athienitis, Y. Chen, Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage, ASHRAE Transactions, Volume 99,1993, Pages 1049-1057



- [62] A.K. Athienitis, Y. Chen, The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems, *Solar Energy*, Volume 69, Issue 3, 2000, Pages 229-237
- [63] Farid M, Kong WJ, Underfloor heating with latent heat storage, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2001, Pages 601–609
- [64] M. Amir, M. Lacroix, N. Galanis, Thermal analysis of electric heating floor panels with daily heat storage, *Revue Generale de Thermique*, Volume 38, 1999, Pages 121-131.
- [65] K. Nagano, S. Takeda, T. Mochida, K. Shimakura, T. Nakamura, Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage—Heat response in small scale experiments, *Energy and Buildings*, Volume 38, Issue 5, May 2006, Pages 436-446
- [66] Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang, Penghua Qin, Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates, *Building and Environment*, Volume 39, Issue 12, December 2004, Pages 1427-1434
- [67] Markus Koschenz, Beat Lehmann, Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings, *Energy and Buildings*, Volume 36, Issue 6, June 2004, Pages 567-578
- [68] Xichun Wang, Jianlei Niu, Performance of cooled-ceiling operating with MPCM slurry, *Energy Conversion and Management*, Volume 50, Issue 3, March 2009, Pages 583-591
- [69] P.W. Griffiths, P.C. Eames, Performance of chilled ceiling panels using phase change material slurries as the heat transport medium, *Applied Thermal Engineering*, Volume 27, Issue 10, July 2007, Pages 1756-1760
- [70] Cao Sunliang, State of the Art Thermal Energy Storage Solution for High Performance Buildings, Master's Thesis University of Jyväskylä, Department of Physics, Master's Degree Programme in Renewable Energy, 3 June 2010



- [71] University of Nottingham,
<http://www.nottingham.ac.uk/sbe/research/ventcool/objectives.htm>, access date 15
Μαρτίου 2012
- [72] PCM Products Ltd, China Shipping FlatICE System, PCM Products Ltd,
http://www.pcmproducts.net/files/china_shipping_flatice_system_1_.pdf ,access date
15 Μαρτίου 2012
- [73] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material-based building
architecture for thermal management in residential and commercial establishments,
Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 1, 2008, Pages 39-64
- [76] Harald Mehling, strategic project “Innovative PCM-Technology”— results and
future perspectives, 8th expert meeting and work shop, Kizkalesi, Turkey, April 18–
20, 2004
- [74] Guthertz JM, Schiler ME, A passive solar heating system for the perimeter zone
of office buildings, Energy Sources, Volume 13, 1991, Pages 39–54
- [75] Kodo T, Ibamoto T, Research on using the PCM for ceiling board. IEA ECESIA,
third workshop, 1–2 October, Tokyo, Japan, 2002 (Annex 17).
- [77] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, Thermally effective windows with moving phase
change material curtains, Applied Thermal Engineering, Volume 21, Issue 18,
December 2001, Pages 1909-1923
- [78] Helmut Weinsläder, Andreas Beck, Jochen Fricke, PCM-facade-panel for
daylighting and room heating, Solar Energy, Volume 78, Issue 2, February 2005,
Pages 177-186
- [79] L. P.Kholpanov, S. E Zakiev, V. A Fedotov, Neumann–Lame–Clapeyron–Stefan
Problem and Its Solution Using Fractional Differential-Integral Calculus, Theoretical
Foundations of Chemical Engineering, Volume 37, Issue 2, 2002, Pages 113-121
- [80] V. Voller, M. Cross, Accurate solutions of moving boundary problems using the
enthalpy method, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 24, Issue
3, March 1981, Pages 545-556



- [81] Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 43, Issue 3, March 2004, Pages 277-287
- [82] Huang, H. C., & Usmani, A. S. (1994). *Finite element Analysis for Heat transfer*. Great Britain: Springer-Verlag.
- [83] V. Voller, An implicit enthalpy solution for phase change problems: with application to a binary alloy solidification, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 11, Issue 2, April 1987, Pages 110-116
- [84] Yvan Dutil, Daniel R. Rousse, Nizar Ben Salah, Stéphane Lassue, Laurent Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 1, January 2011, Pages 112-130
- [85] O.A. Obitayo, *Simulation and Analysis of Phase Change Materials for Building Temperature Control*, Department of Mechanical Engineering
- [86] Hunter L.W., Kuttler J.R. ,The enthalpy method for heat conduction problems with moving boundaries. *Journal of Heat Transfer*, Volume 111:2, May 1989, Pages: 239-242
- [87] M. Amdjadi, B. Fabre, C. Meynadier, Résolution unidimensionnelle d'un problème de Stefan par une méthode à pas de temps variable. Application à une bille de chliarolithe, 1990, Pages 129–134
- [88] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations, *Renewable Energy*, Volume 31, Issue 13, October 2006, Pages 2025-2041
- [89] Chao Chen, Haifeng Guo, Yuning Liu, Hailin Yue, Chendong Wang, A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 5, 2008, Pages 882-890



- [90] Haitian Yang, Yiqian He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 37, January 2010, Pages 385-392
- [91] Dariusz Heim, Isothermal storage of solar energy in building construction, *Renewable Energy*, Volume 35, Issue 4, April 2010, Pages 788-796
- [92] Chao Chen, Haifeng Guo, Yuning Liu, Hailin Yue, Chendong Wang, A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 5, 2008, Pages 882-890
- [93] Matthew J. Duffy, Marion Hiller, David E. Bradley, Werner Keilholz , Jeff W. Thornto, TRNSYS–And Functionality for Building Simulation 2009 CONFERENCE, *Building Simulation*, 2009, Pages 1950-1954
- [94] Χαρακτηριστικά του λογισμικού TRNSYS, <http://apps1.eere.energy.gov>, access date 25 Δεκεμβρίου 2011
- [95] Χαρακτηριστικά του λογισμικού Energy Plus, <http://apps1.eere.energy.gov>, access date 25 Δεκεμβρίου 2011
- [96] Chun-long Zhuang, An-zhong Deng, Yong Chen, Sheng-bo Li, Hong-yu Zhang, , Guo-zhi Fan, Validation of Veracity on Simulating the Indoor Temperature in PCM Light Weight Building byEnergyPlus, *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 6328, 2010, Pages 486-496
- [97] Samuel A., Imbabi M. S., Peacock A., Strachan P. A., An engineering approach to modelling of dynamic insulation using ESP-r, *Comparative and General Pharmacology*, 2003, Pages 1-6
- [98] The ESP-r system for Building Energy Simulation: User Guide Version 10 Series, University of Strathclyde, October 2003
- [99] Dariusz Heim, Joe A Clarke, Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r, *Energy and Buildings*, Volume 36, Issue 8, August 2004, Pages 795-805



- [100] Jorgen Rose, Andreas Lahme, Niels Uhre Christensen, Per Heiselberg, Magne Hansen, Karl Grau, Numerical method for calculating latent heat storage in two constructions containing phase change materials, *Building Simulation*, 2009, Pages 400-407
- [101] Michal Pomianowski, Per Heiselberg, Rasmus Lund Jensen, Initial development of a combined PCM and TABS solution for heat storage and cooling, *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics*, Volume 1, 2011, Pages 483-490
- [102] RADCOOL: A Tool for Modeling Buildings Equipped with Radiant Cooling Systems, <http://epb.lbl.gov>, access date 25 Δεκεμβρίου 2011
- [103] H.E. Feustel, Simplified numerical description of latent storage characteristics for phase change wallboard, 1995 May 01
- [104] H. E. Feustel , C.Stetiu, Thermal Performance of Phase Change Wallboard for Residential Cooling Application, April 1997
- [105] Χαρακτηριστικά του λογισμικού Fluent, <http://www.chemicalonline.com>, access date Δεκέμβρης 2011
- [106] A. Nayak, M.Gowtham, R.Vinod, G.Ramkumar, Analysis of PCM Material in Thermal Energy Storage System, *International Journal of Environmental Science and Development*, Volume 2, Issue 6, 2011, Pages 437-441
- [107] Chaxiu Guo, Wujun Zhang, Numerical simulation and parametric study on new type of high temperature latent heat thermal energy storage system, *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 5, May 2008, Pages 919-927
- [108] Manual of COMSOL Multiphysics
- [109] Wilson Ogoh, Dominic Glourx, Effects of the heat transfer fluid velocity on the storage characteristics of a cylindrical latent heat energy storage system: a numerical study, *Heat and Mass Transfer*, 10 September 2011, Pages 1-11
- [110] Building a phase change model, <http://www.comsol.com>, access date Δεκέμβρης 2011



[111] Robynne E. Murray, Dominic Groulx, Modeling convection during melting of a phase change material, COMSOL Conference in Boston,2011

[112] Gatzka B. Valentin G. Dr. Valentin., PCM express- Planning and simulation programme for the use of phase change materials (PCM) in buildings: Demonstrating its use in residential and office buildings in Ireland

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 ΓΝΩΡΙΜΙΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ TRNSYS

Το TRNSYS είναι ένα ευέλικτο εργαλείο ενεργειακής προσομοίωσης το οποίο αναπτύχθηκε από τα μέλη του Εργαστηρίου Ηλιακής Ενέργειας του Πανεπιστημίου του Wisconsin. Το όνομά του αποτελεί ακρωνύμιο της αρχικής ονομασίας **TR**ansient **S**ystems **S**imulation Program και προφέρεται “Tran-sis”.



Σχήμα 3.37.1: Απεικόνιση του λογοτύπου του λογισμικού ενεργειακής προσομοίωσης TRNSYS.[1]

Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο κι επεκτάσιμο περιβάλλον το οποίο σχεδιάστηκε για τη μοντελοποίηση δυναμικών συστημάτων (συστήματα τα οποία μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου → **transient systems**). Το λογισμικό χρησιμοποιείται ευρέως από ερευνητές και μηχανικούς ως εργαλείο αξιολόγησης πληθώρας ενεργειακών συστημάτων όπως: ηλιακά θερμικά και φωτοβολταϊκά συστήματα, συστήματα HVAC, συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συστήματα συμπαραγωγής, συστήματα κυψελών καυσίμου, συστήματα υδρογόνου, αιολικά συστήματα κ.α. Επιπλέον δύναται να προσομοιώνει τη θερμική συμπεριφορά κτιρίων πολύπλοκης γεωμετρίας και πολλών θερμικών ζωνών μέσω του Type 56, όπως αναφέρεται και στη συνέχεια. [1],[2],[3]

Βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου λογισμικού αποτελεί το γεγονός ότι δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να επέμβει και να τροποποιήσει με τρόπο κατάλληλο τον

κώδικα των υπολογιστικών μοντέλων (Types) που περιλαμβάνονται στο TRNSYS με σκοπό την εξυπηρέτηση των δικών του αναγκών.

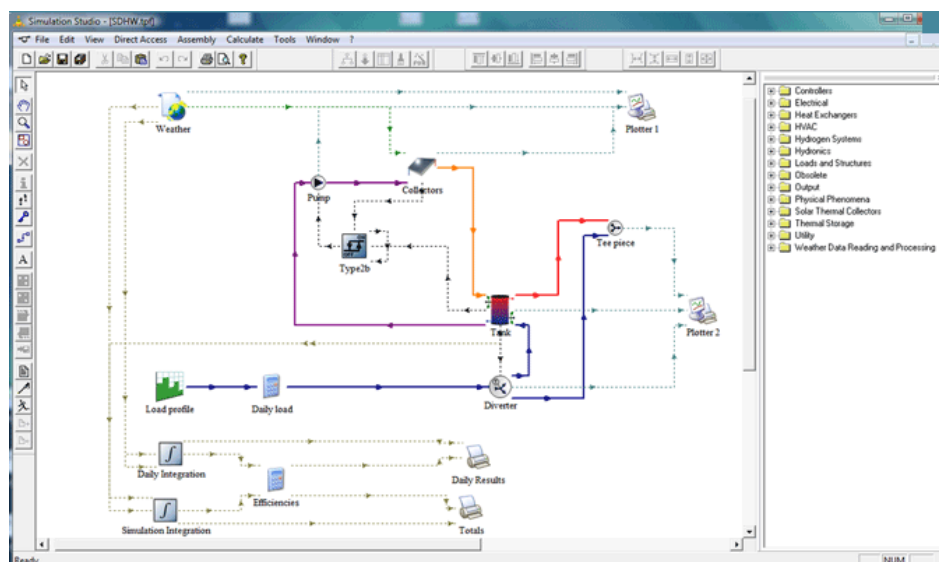
Το TRNSYS ως υπολογιστικό εργαλείο απλοποιεί την διαδικασία εισαγωγής νέων αριθμητικών μοντέλων χάρη στην αρχιτεκτονική του, εκμεταλλεύεται κατάλληλα τα διαθέσιμα στοιχεία για τη δημιουργία του έργου προσομοίωσης κι έχει την δυνατότητα να συνδέεται με άλλα προγράμματα (Microsoft Excel, MATLAB/SIMULINK, COMIS κ.λπ.) για επεξεργασία πριν, μετά ή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.[1],[2],[3]

3.2 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Το TRNSYS περιλαμβάνει τρία βασικά τμήματα: το **TRNSYS Simulation Studio**, το **TRNBuild-Type56** και το **TRNEdit-TRNSED**.

3.2.1 TRNSYS Simulation Studio.

Το TRNSYS Simulation Studio αποτελεί το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού στο οποίο οικοδομείται και διεξάγεται η διαδικασία της προσομοίωσης. Στο Simulation Studio ο χρήστης δημιουργεί σταδιακά το έργο της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.38.2: Απεικόνιση του περιβάλλοντος του Simulation Studio του λογισμικού TRNSYS 17.[1]

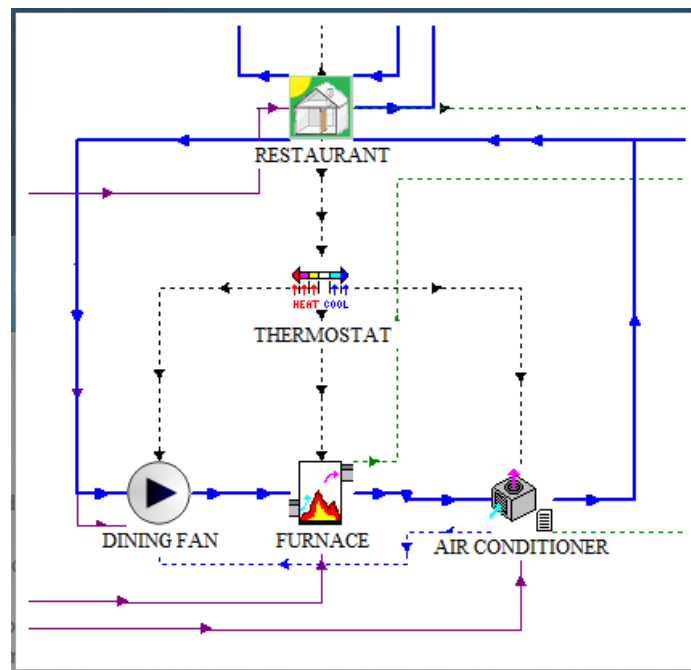
Ως έργο προσομοίωσης (simulation project) ορίζεται το σύνολο των στοιχείων (components) του TRNSYS τα οποία συνδέονται μεταξύ τους προς σχηματισμό ενός



ολοκληρωμένου ενεργειακού συστήματος (→ π.χ. μιας μονάδας αιολικής ενέργειας, ενός κτιρίου εξοπλισμένου με διάφορα συστήματα κλιματισμού, ενός συστήματος ζεστού νερού οικιακής χρήσης κ.λπ.).

Τα εν λόγω στοιχεία βρίσκονται κατηγοριοποιημένα στη βιβλιοθήκη του TRNSYS απ' όπου ο χρήστης μπορεί να τα επιλέξει και με την απλοϊκή μέθοδο “drag and drop” να τα τοποθετήσει στο παράθυρο εργασίας.

Κάθε component αποτελεί ένα αριθμητικό μοντέλο υπολογισμού **μεταβλητών εξόδου (outputs)** και μοντελοποιεί ένα μόνο τμήμα του μελετούμενου ενεργειακού συστήματος (→ π.χ. μοντέλο ηλιακού συλλέκτη, αντλίας, πολυζωνικού κτιρίου, κ.α.). Ο υπολογισμός των μεταβλητών εξόδου εξαρτάται κυρίως από τα **δεδομένα εισόδου (inputs)** και τις **παραμέτρους (parameters)** οι οποίες ορίζονται στο στοιχείο από το χρήστη. Τα outputs ενός στοιχείου αποστέλλονται ως **δεδομένα εισόδου** σε κάποιο γειτονικό στοιχείο. Η αποστολή των outputs από ένα component σε ένα άλλο πραγματοποιείται μέσω της μεταξύ τους σύνδεσης. Η σύνδεση μεταξύ δύο στοιχείων του προγράμματος συμβολίζει τη ροή πληροφορίας και πραγματοποιείται από το χρήστη με συγκεκριμένη φορά και όχι με τυχαίο τρόπο. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία ενός ρευστού αποτελεί το στοιχείο εξόδου *-output-* ενός ηλιακού συλλέκτη *-1^ο component-* ενώ εν συνεχεία εισάγεται ως στοιχείο εισόδου *-input-* σε ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης *-2^ο component-* όταν μεταξύ συλλέκτη και συστήματος θέρμανσης μεσολαβεί μία σύνδεση. [1],[4],[5]



Σχήμα 3.2.39: Σχηματική απεικόνιση ορισμένων components του TRNSYS και των μεταξύ τους συνδέσεων, όπως αυτά συναντώνται στην προσομοίωση των ενεργειακών συστημάτων ενός εστιατορίου, στο TRNSYS Simulation Studio.[1]

Με την κατάλληλη σύνδεση των components μεταξύ τους προς δημιουργία του έργου προσομοίωσης συντίθεται ο αλγόριθμος της προσομοίωσης (→ **ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** τα components είναι υπορουτίνες γραμμένες σε γλώσσα FORTRAN, C, C++ ή PASCAL οι οποίες όταν συνδεθούν μεταξύ τους σχηματίζουν έναν αλγόριθμο.)

Ο πυρήνας της προσομοίωσης (**simulation kernel**) «διαβάζει» το αρχείο ορισμού του έργου (deck file), το αναλύει κι εν συνεχεία εκτελεί μια δυναμική προσομοίωση, με σταθερό βήμα, προς υπολογισμό των δεδομένων εξόδου τα οποία ζητήθηκαν από τον χρήστη. Ο πυρήνας χρησιμοποιεί έναν από τους ενσωματωμένους σε αυτόν επιλύτες προκειμένου να υπολογίσει τα απαιτούμενα outputs, καλώντας κάθε component το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο έργο σε μια επαναληπτική διαδικασία έως ότου να επιτευχθεί σύγκλιση σε κάθε βήμα. Η μέθοδος των διαδοχικών αντικαταστάσεων αποτελεί τον πιο συνήθη τρόπο επίλυσης.[4]

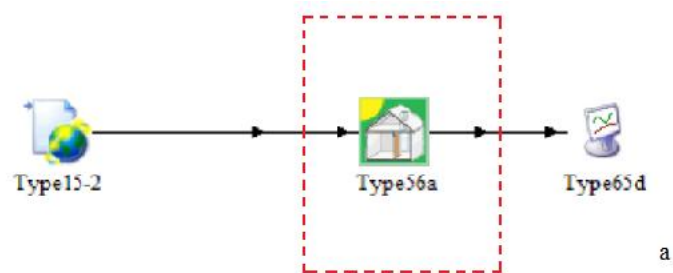
Εάν στο σύστημα έχει προστεθεί τουλάχιστον ένα **μοντέλο ταυτόχρονης δημιουργίας διαγραμμάτων (Online Plotter)**, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών της προσομοίωσης εμφανίζεται στην οθόνη ένα διάγραμμα, το οποίο δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να παρακολουθεί την πορεία των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση που έχει προστεθεί **μοντέλο εκτυπωτή**, τα outputs εκτυπώνονται σε ένα



αρχείο εξόδου το οποίο μπορεί να ανοιχθεί μέσω της επιλογής “Calculate/ Open/ External Files” του Simulation Studio.[3]

3.2.2 TRNBuild-Type56.

Το Type 56 του TRNSYS (μοντέλο **Πολυζωνικού Κτιρίου** → βλ. **Λεξικό Όρων**) χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της θερμικής συμπεριφοράς κτιρίων διηρημένων σε διαφορετικές θερμικές ζώνες, ο αριθμός των οποίων δεν ξεπερνά τις 25. Το μοντέλο «διαβάζει» την περιγραφή του κτιρίου μέσω μίας σειράς αρχείων. Τα συγκεκριμένα αρχεία δημιουργούνται με βάση τα δεδομένα τα οποία εισάγει ο χρήστης στο TRNBuild. Το TRNBuild αποτελεί ένα πρόγραμμα στο οποίο ο χρήστης μπορεί να μεταβεί μέσω της επιλογής “Edit Building” του Type 56 και να ορίσει όλες τις λεπτομέρειες οι οποίες απαιτούνται για τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου (→ π.χ. θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών, οπτικές ιδιότητες υαλοπινάκων, θερμικό κέρδος, φωτισμός, διείσδυση αέρα κ.λπ.), καθώς και τα στοιχεία εκείνα τα οποία αφορούν στη δομή του (→ π.χ. υλικά και πάχη επιπέδων τοιχοποιίας).[1],[4]



a



b

Σχήμα 3.2.40: α. Απεικόνιση του μοντέλου Type 56 του Πολυζωνικού Κτιρίου. β. Απεικόνιση του περιβάλλοντος του TRNBuild.[2]

Η τοιχοποιία, η οροφή και το δάπεδο του μελετούμενου πολυζωνικού κτιρίου προσομοιώνονται από το μοντέλο με χρήση των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας κατά ASHRAE, ενώ η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών θερμικών ζωνών υπολογίζεται επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις με χρήση μεθοδολογίας αντιστροφής πινάκων. [1],[7]

3.2.3 TRNEdit-TRNSED

Το TRNEdit αποτελεί ένα εργαλείο για την αυτόματη επεξεργασία των αρχείων εισόδου του TRNSYS, την υλοποίηση παραμετρικών εκτελέσεων και τη δημιουργία αυτόνομων TRNSYS εφαρμογών.[2]



3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΜΕ ΥΑΦ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ PCM TYPES ΣΤΟ TRNSYS

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, στο περιβάλλον του TRNSYS το πολυζωνικό κτίριο περιγράφεται από το Type 56. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει τις λεπτομέρειες οι οποίες απαιτούνται για τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου, καθώς και τα στοιχεία τα οποία αφορούν στην κατασκευή του, μεταξύ των οποίων και τα δομικά του υλικά. Ο χρήστης επιλέγει τα υλικά μέσω του προγράμματος TRNBuild και τα εισάγει ως δεδομένα στο μοντέλο. Κάθε δομικό υλικό χαρακτηρίζεται από τρεις ιδιότητες: **τη θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμοχωρητικότητα και την πυκνότητά του.** Οι τιμές των ιδιοτήτων αυτών είναι σταθερές και είτε δίδονται από το πρόγραμμα (→ αν το υλικό έχει επιλεγεί από βιβλιοθήκη του TRNSYS) είτε ορίζονται από τον ίδιο το χρήστη (→ αν πρόκειται για κάποιο υλικό το οποίο δεν περιλαμβάνεται στη βιβλιοθήκη αλλά εισάγεται από το χρήστη). Είναι προφανές ότι για την προσομοίωση π.χ. της τοιχοποιίας ενός κτιρίου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει πλήθος δομικών υλικών με ποικιλία ιδιοτήτων. Ωστόσο ΥΑΦ δε μπορούν να εισαχθούν απευθείας στο TRNBuild, γεγονός το οποίο οφείλεται στη μεταβολή της θερμοχωρητικότητάς τους συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Επιπλέον στη βιβλιοθήκη του TRNSYS δεν υπάρχει κάποιο “wall component” το οποίο να μοντελοποιεί τοίχο οπλισμένο με ΥΑΦ. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν τα PCM Types. Πρόκειται για υπορουτίνες γραμμένες ως επί το πλείστον σε γλώσσα FORTRAN ή MATLAB, οι οποίες ενσωματώνονται στην πλατφόρμα του TRNSYS προκειμένου να προσομοιώσουν τη θερμική συμπεριφορά τοίχων οπλισμένων με ΥΑΦ. Τα PCM Types επιλύουν αριθμητικά την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Ορισμένα από τα PCM Types είναι: το Type 204, το Type 240, το Type 241, το Type 260, το Type 313 κ.α.

Τα PCM Types αντιμετωπίζουν το φαινόμενο της αλλαγής φάσης του ΥΑΦ με χρήση της μεθόδου ενθαλπίας ή τη μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας. Οι παράμετροι οι οποίες συνήθως ορίζονται από το χρήστη στα μοντέλα αυτά είναι: η θερμική αγωγιμότητα και η πυκνότητα του PCM, η θερμοκρασία τήξης και



κρυσταλλοποίησής του, η επιφάνεια και το πάχος του τοίχου στον οποίο περιέχεται το υλικό κ.α. Στο παράθυρο εργασίας το εκάστοτε PCM Type συνδέεται με το Type 56 του πολυζωνικού κτιρίου, ούτως ώστε το ΥΑΦ να ενσωματωθεί στην τοιχοποιία του κτιρίου. Αναλυτικότερη περιγραφή των PCM Types παρατίθεται στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Transient System Simulation Tool, <http://www.trnsys.com/>, access date 7 Μαΐου 2012
- [2] The University of Wisconsin-Madison, <http://sel.me.wisc.edu>, access date 8 Μαΐου 2012
- [3] TRNSYS 17, Getting Started, Volume 1, <http://www.transsolar.com>, access date 8 Μαΐου 2012
- [4] Manuel Ibáñez, Ana Lázaro, Belén Zalba, Luisa F. Cabeza, An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS, Applied Thermal Engineering, Volume 25, Issues 11–12, August 2005, Pages 1796-1807
- [5] P. Riederer, W. Keilholz, V. Ducreux, Coupling of TRNSYS with SIMULINK – A Method to automatically Export and Use TRNSYS models within SIMULINK and vice-versa, Building Simulation, Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009, Pages 1628-1633
- [6] Matthew J. Duffy, Marion Hiller, David E. Bradley, Werner Keilholz, Jeff W. Thornton, TRNSYS – Features and Functionality for Building Simulation 2009 Conference, Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009, Pages 1950-1954
- [7] TRNSYS 16, Multizone Building modeling, Volume 6, <http://web.mit.edu>, access date 1 Ιουνίου 2012



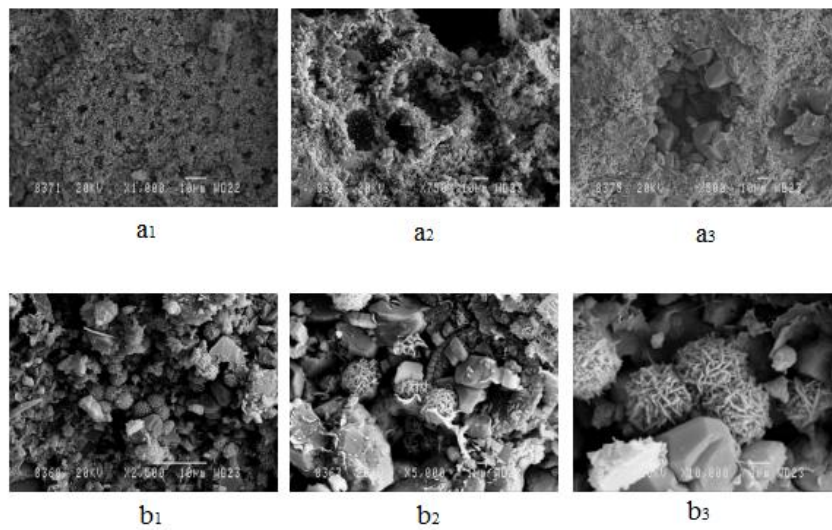
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΤΡΑΣ ΩΣ ΜΕΣΟ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΟΙΚΙΣΚΩΝ.

Η συμπεριφορά των ΥΑΦ, ως μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, αποτελεί αντικείμενο εκτενούς μελέτης από τα μέσα της δεκαετίας του 1940. Ωστόσο τα PCM αξιοποιήθηκαν στον τομέα των κτιριακών εγκαταστάσεων τα τελευταία 40 έτη, όποτε και το κόστος τους έγινε πιο συμφέρον. Όπως έχει αναλυθεί εκτενώς και στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**, η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε δομικά υλικά, όπως π.χ. στο σκυρόδεμα ή στο γύψο, συνεισφέρει στη βελτίωση των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών, ενώ παράλληλα αποτελεί μία συμφέρουσα οικονομικά λύση για τον περιορισμό των ενεργειακών δαπανών των κτιρίων.[1]

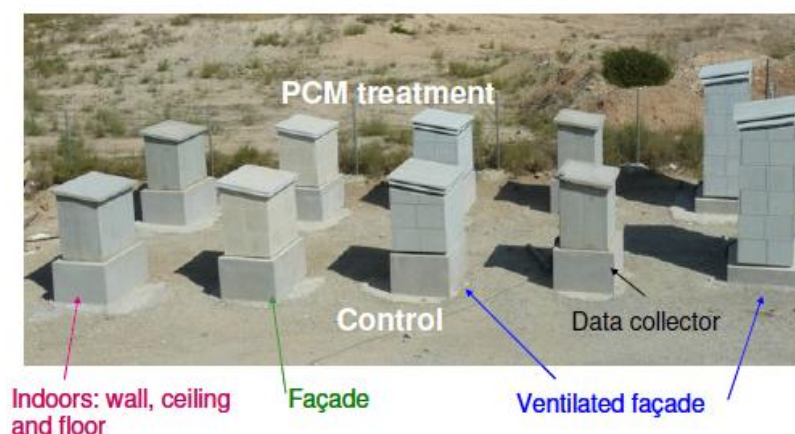
Στον τομέα των κατασκευών, εκτός από το γύψο ή το σκυρόδεμα, χρησιμοποιείται και η Φυσική Πέτρα ως συστατικό της τοιχοποιίας και του δαπέδου των κτιρίων. Δεδομένης της αφθονίας της στη φύση και της ευρείας χρήσης της η αξιοποίησή της για σκοπούς αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποτέλεσε ένα ενδεχόμενο αρκετά ελκυστικό. Το σενάριο αυτό ώθησε τους ερευνητές να επιχειρήσουν βελτίωση των θερμικών της ιδιοτήτων προσθέτοντας ποσότητα ΥΑΦ στους πόρους της. Η ενσωμάτωση του PCM στην πέτρα απέβλεπε στη δημιουργία ενός δομικού υλικού με μεγάλη θερμοχωρητικότητα και αντοχή στις έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, που ως συστατικό κτιριακού κελύφους θα εξασφάλιζε μείωση των ενεργειακών δαπανών του κτιρίου κι επίτευξη ικανοποιητικών ορίων θερμικής άνεσης.[1],[2],[3]

Ως ο καταλληλότερος τρόπος ενσωμάτωσης ποσότητας PCM στη φυσική πέτρα κρίθηκε η μέθοδος της απορρόφησης (immersion). Οι ερευνητές βύθισαν το πορώδες υλικό σε τήγμα PCM με αποτέλεσμα το υγρό να εισχωρήσει στους πόρους της πέτρας. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι ένα φαινομενικά ξηρό αλλά πλήρως εμπλουτισμένο δομικό υλικό με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες σε σύγκριση με τη συμβατική φυσική πέτρα.[2]



Σχήμα 4.41.1: Μικρογραφία από την πειραματική τεχνική SEM (→ βλ. Λεξικό Όρων) ποσότητας Bateig Azul (Φυσική Πέτρα) a₁,a₂,a₃, χωρίς ΥΑΦ και b₁,b₂,b₃, με ΥΑΦ. [3]

Η επίδραση της ενσωμάτωσης του ΥΑΦ στη θερμική συμπεριφορά της πέτρας εξετάστηκε στα πλαίσια μίας σειράς πειραμάτων τα οποία διεξήχθησαν σε πρότυπους οικίσκους ειδικά κατασκευασμένους για τον σκοπό αυτό στην Alicante της Ισπανίας. Την κατασκευή των πρότυπων οικίσκων και τη μελέτη της θερμικής τους συμπεριφοράς ανέλαβε το Ινστιτούτο της **AIDICO (Technological Institute of Construction)**.



Σχήμα 4.1.42: Φωτογραφία των πρότυπων οικίσκων της Alicante: Η πρώτη σειρά περιλαμβάνει τους Οικίσκους Ελέγχου (Control) οι οποίοι κατασκευάζονται από Φυσική Πέτρα χωρίς ΥΑΦ, ενώ η δεύτερη σειρά περιλαμβάνει τους PCM Οικίσκους οι οποίοι κατασκευάζονται από Φυσική Πέτρα εμποτισμένη με ΥΑΦ.[2]



Το Ινστιτούτο διαμόρφωσε έναν «πρότυπο οικισμό» αποτελούμενο από σπιτάκια, παρατεταγμένα σε δύο συστοιχίες. Η μία συστοιχία περιλαμβάνει οικίσκους που διαθέτουν επικάλυψη συμβατικής φυσικής πέτρας (Bateig Azul) στην εξωτερική τους επιφάνεια, ενώ η άλλη περιλαμβάνει οικίσκους που διαθέτουν κέλυφος επενδεδυμένο με στρώμα φυσικής πέτρας εμποτισμένης με ΥΑΦ.

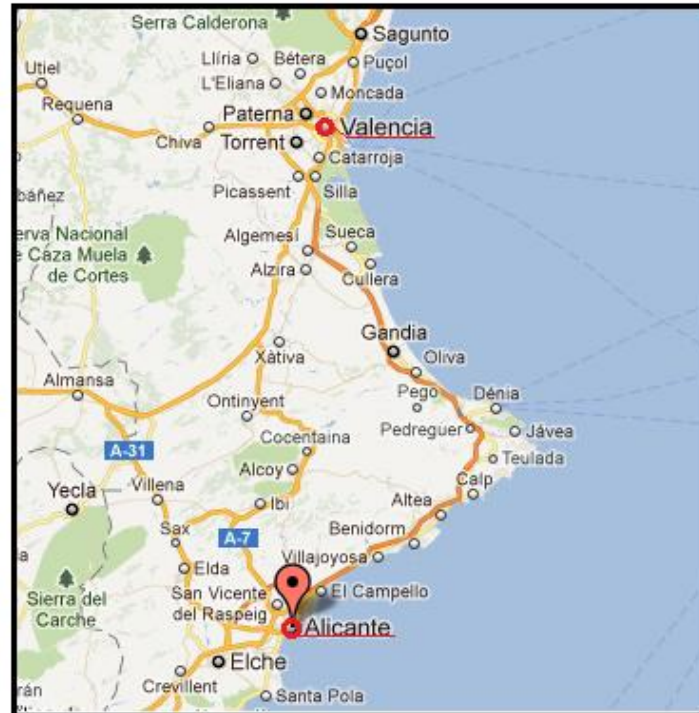
Τα σπιτάκια έχουν τοποθετηθεί σε εξωτερικό περιβάλλον προκειμένου να εκτίθενται στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του εικοσιτετραώρου. Ειδικοί αισθητήρες μετρούν τη μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας όλων των οικίσκων κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έχουν αποδείξει ότι η προσθήκη του ΥΑΦ στη φυσική πέτρα εξασφαλίζει ομαλότερη θερμοκρασιακή διακύμανση στο εσωτερικό των οικίσκων, γεγονός το οποίο δεν ισχύει για τα σπιτάκια τα οποία διαθέτουν επένδυση συμβατικής πέτρας στο κέλυφός τους. [1],[2],[3]

4.2 ΟΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ALICANTE.

Οι οικίσκοι της Alicante αποτελούν μια πειραματική εφαρμογή πλήρως κατάλληλη για την πιστοποίηση της συνεισφοράς του ΥΑΦ στη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς της Φυσικής Πέτρας. Τα σπιτάκια κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν σε εξωτερικό χώρο, προκειμένου να εκτίθενται άμεσα στις μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Η θερμική συμπεριφορά των οικίσκων επηρεάζεται καθ' ολοκληρία από τις κλιματολογικές συνθήκες της Alicante.

Η Alicante, πόλη της Ισπανίας, βρίσκεται νότια της Valencia. Η γεωγραφική της θέση παρέχει στην πόλη συνθήκες ξηρού μεσογειακού κλίματος με ήπιους χειμώνες και θερμά καλοκαίρια. Οι ψυχρότερες συνθήκες στην Alicante επικρατούν το μήνα Ιανουάριο με θερμοκρασίες από 10-18°C την ημέρα και 2-12°C τη νύχτα, ενώ ο Αύγουστος ως ο θερμότερος μήνας χαρακτηρίζεται από μέση θερμοκρασία 30°C. Κατά τους φθινοπωρινούς μήνες παρατηρούνται σπάνια φαινόμενα υετού (→ η μηνιαία βροχόπτωση ανέρχεται στις 3 ημέρες), ενώ η ημερήσια ηλιοφάνεια κυμαίνεται στις 7-8h. Συγκεκριμένα το μήνα Σεπτέμβριο η μέγιστη θερμοκρασία που

έχει παρατηρηθεί στην Alicante κυμαίνεται από 28 ως 31°C, ενώ η ελάχιστη από 17 ως 22°C. [4],[5],[6]

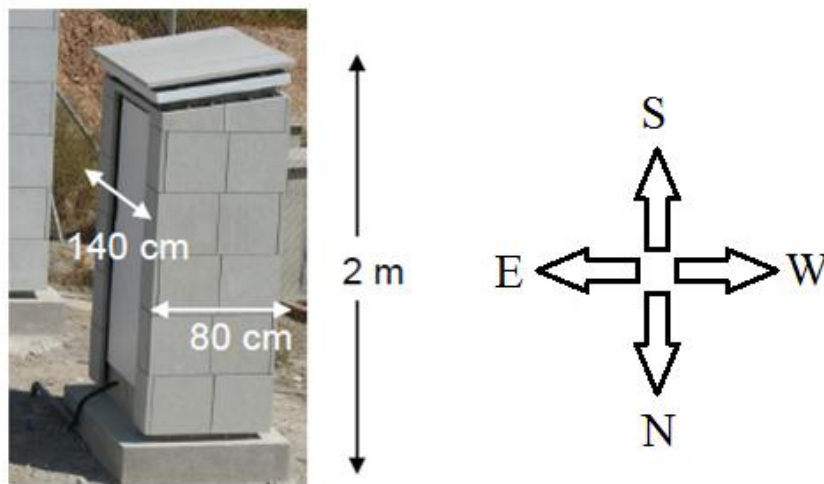


Σχήμα 4.2.1: Απεικόνιση σε χάρτη της γεωγραφικής θέσης της Alicante σε σχέση με τη Valencia, μία από τις μεγαλύτερες πόλεις της Ισπανίας. [7]

Το Ινστιτούτο της AIDICO διεξήγαγε μια σειρά πολύμηνων μετρήσεων της εσωτερικής θερμοκρασίας όλων των οικίσκων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς των οικίσκων μέσω υπολογιστικών μοντέλων στο TRNSYS (**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**). Για τη διαδικασία των προσομοιώσεων απαιτήθηκε η εισαγωγή αρχείων καιρού στο λογισμικό. Τα συγκεκριμένα αρχεία περιέχουν τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος των πρώτων ημερών του Σεπτεμβρίου. Οι πρώτες ημέρες του Σεπτεμβρίου επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά διότι η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς των οικίσκων σε διάστημα ολόκληρου έτους θα ήταν μία χρονοβόρος διαδικασία. Επομένως η αναφορά στις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην Alicante το μήνα Σεπτέμβριο επελέγη σκόπιμα. [4],[5],[6]

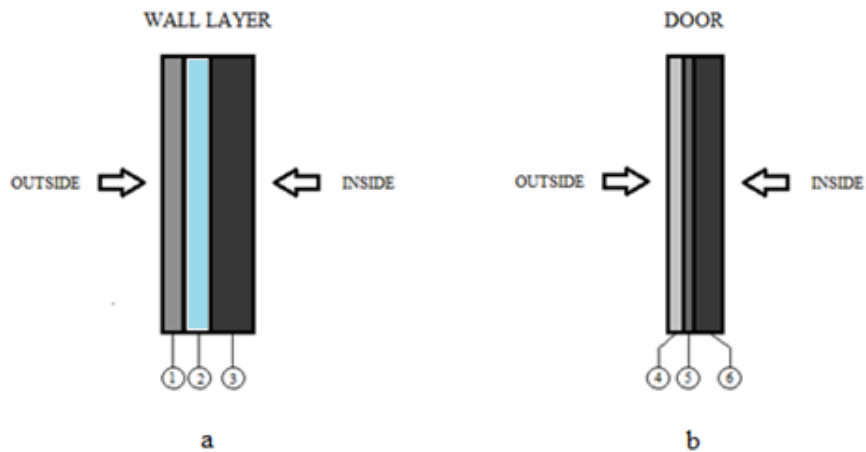
4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΟΙΚΙΣΚΩΝ.

Οι πρότυποι οικίσκοι είναι κατασκευασμένοι από σκυρόδεμα. Για πειραματικούς σκοπούς η εξωτερική επιφάνεια του κελύφους τους έχει επενδυθεί με φυσική πέτρα (→Bateig Azul). Σε ορισμένους οικίσκους έχει ενσωματωθεί πέτρα στη φυσική της κατάσταση, ενώ σε άλλους φυσική πέτρα εμποτισμένη με ΥΑΦ. Χαρακτηριστικό της τοιχοποιίας όλων των οικίσκων αποτελεί το κενό αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ του εσωτερικού κι εξωτερικού επιπέδου (→ επίπεδο σκυροδέματος-επίπεδο φυσικής πέτρας), το οποίο λειτουργεί ως μέσον μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 4.3.1: Απεικόνιση πρότυπου PCM οικίσκου στην Alicante. Η φωτογραφία συνοδεύεται από τις διαστάσεις και τον προσανατολισμό της κατασκευής.[1]

Ανάλογα δομημένη είναι και η επικλινή στέγη των οικίσκων με τη διαφορά ότι μεταξύ του σκυροδέματος και του Bateig Azul εκτός από αέρας παρεμβάλλεται και μονωτικό υλικό. Οι εν λόγω κατασκευές διαθέτουν πόρτα στον ανατολικό τους τοίχο ενώ το δάπεδό τους αποτελείται από απλό στρώμα σκυροδέματος. [1],[2],[3]



Σχήμα 4.3.2: Σχηματική απεικόνιση των επιπέδων τα οποία απαρτίζουν α. την τοιχοποιία και β. τη διαμόρφωση της πόρτας των πιλοτικών οικίσκων.

4.3.1 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ.

Η τοιχοποιία των οικίσκων είναι διαρθρωμένη σε στρώματα, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο (**Σχήμα 4.5.a**).

Ο τοίχος στο εσωτερικό του οικίσκου δομείται με **σκυρόδεμα (concrete) πάχους 7cm**. Για την κατασκευή των πρότυπων οικίσκων επιλέχθηκε σκυρόδεμα με τις ιδιότητες που φαίνονται στον **Πίνακα 4.1**.

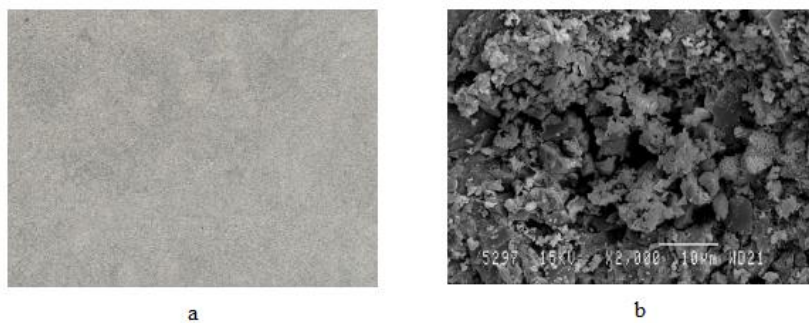
Πίνακας 4.3.1: Οι ιδιότητες του σκυροδέματος ως στοιχείο της τοιχοποιίας των οικίσκων. [3]

	Thermal conductivity (kJ/h·m·K)	Density (kg/m ³)	Thermal capacity (kJ/kg·K)	Thickness (cm)
Concrete (wall)	7.56	2400	0.8	7

Το σκυρόδεμα είναι το πλέον διαδεδομένο στη χρήση δομικό υλικό. Στους οικίσκους δε συναντάται μόνο ως συστατικό της τοιχοποιίας, αλλά και ως μοναδικό δομικό στοιχείο του δαπέδου (→ **πάχος 10 cm**), ενώ αποτελεί και το κατώτατο στρώμα της διαμόρφωσης της επικλινούς στέγης (→ **πάχος 7cm**).

Εξετάζοντας τη δομή της τοιχοποιίας των οικίσκων με κατεύθυνση από το εσωτερικό τους προς το εξωτερικό περιβάλλον, το στρώμα σκυροδέματος ακολουθείται από διάκενο **πάχους 3.5cm**. Ο αέρας μεταξύ του εσωτερικού κι εξωτερικού στρώματος της τοιχοποιίας λειτουργεί ως μέσον μεταφοράς θερμότητας.

Στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους των οικίσκων συναντάται ένα στρώμα φυσικής πέτρας (Bateig Azul), **πάχους 3cm**. Το πορώδες αυτό υλικό που επενδύει την κατασκευή εξορύσσεται στη Novelda της Alicante. Εμφανίζει μια απαλή γκρίζα απόχρωση και συνίσταται σε ασβεστίτη και χαλαζία.[1],[2],[8]



Σχήμα 4.3.3: Στο σχήμα a. παρουσιάζεται εικόνα του Bateig Azul του εμπορίου και στο b. μικρογραφία από την πειραματική τεχνική SEM του υλικού.[1],[3]

Σε ορισμένα σπιτάκια το Bateig Azul ενσωματώθηκε στη φυσική του κατάσταση (**Κατασκευές Ελέγχου-Control Pilot Houses**), ενώ σε κάποια άλλα είχε εμποτιστεί με ποσότητα ΥΑΦ (**PCM Κατασκευές-PCM Treated Houses**). Το ΥΑΦ που προσροφήθηκε από τους πόρους της πέτρας είναι το Micronal DS[®] 5000x της εταιρείας BASF. Η θερμοκρασία τήξης του υλικού αυτού είναι 26°C, το ιξώδες του κυμαίνεται από 30 έως 100 mPa·s, ενώ η στερεά περιεκτικότητά του ανέρχεται σε 43%.[1],[2]

Στον **Πίνακα 4.2** φαίνονται δύο βασικές θερμικές ιδιότητες του Bateig Azul και του Bateig Azul εμποτισμένου με ΥΑΦ.

Πίνακας 4.3.2: Οι θερμικές ιδιότητες του Bateig Azul ενισχυμένου και μη με ΥΑΦ.[3]

	Thermal conductivity (W/m·K)	Volumetric thermal capacity (kJ/m ³ ·K)
Bateig Azul	1.87	2191.7
Bateig Azul + PCM	1.99	2308.7

Παρατηρώντας τις τιμές του πίνακα διακρίνεται μία αύξηση της τάξης του 6.7% της θερμικής αγωγιμότητας και του 5.3% της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας του Bateig Azul με την ενσωμάτωση του ΥΑΦ. Τα ποσοστά αυτά της αύξησης μπορούν να ερμηνευτούν ως εξής:



- ☑ **Αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού:** Όπως έχει προαναφερθεί, το Bateig Azul είναι ένα πορώδες υλικό. Ο μεγάλος αριθμός πόρων συνεπάγεται μειωμένη θερμική αγωγιμότητα, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ύπαρξη αρκετής ποσότητας αέρα. (→ ο αέρας χαρακτηρίζεται από μικρή θερμική αγωγιμότητα). Με την εμβάπτιση της πέτρας στο υγρό PCM μίγμα, οι πόροι της πληρούνται με ΥΑΦ, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητάς της.[2]
- ☑ **Αύξηση της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας του υλικού:** Η αύξηση της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας ερμηνεύεται ως η ανάγκη του Bateig Azul για απορρόφηση μεγαλύτερου ποσού θερμικής ενέργειας προκειμένου να τροποποιήσει την θερμοκρασία του. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι το ΥΑΦ της πέτρας απορροφά ένα αξιόλογο ποσό της εισερχόμενης θερμότητας προκειμένου να μετασχηματιστεί και κατ' επέκταση το ποσό αυτό το στερείται το ίδιο το Bateig Azul.[2]

Η ενσωμάτωση ποσότητας PCM στη φυσική πέτρα αποβλέπει στην τροποποίηση των θερμικών της ιδιοτήτων. Το μέγεθος της τροποποίησης αυτής εξαρτάται από το είδος και την ποσότητα του ΥΑΦ που επιλέγεται κάθε φορά. [1],[2]

Στην κατασκευή των οικίσκων το στρώμα του Bateig Azul εκτός από την τοιχοποιία συναντάται και ως ανώτατο επίπεδο της επικλινούς οροφής. Στην προκειμένη περίπτωση όμως η πέτρα ενσωματώνεται στη φυσική της κατάσταση και όχι εμποτισμένη με ΥΑΦ.

4.3.2 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ.

Η πόρτα, που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά, κατασκευάζεται από θερμοπλαστικό πολυμερές, στρώμα αλουμινίου και μονωτικό υλικό (Σχήμα 4.5.b).

Το **θερμοπλαστικό πολυμερές (PVC coating) πάχους 1cm** επενδύει την πόρτα εξωτερικά και προσδίδει στην κατασκευή σταθερότητα. Το δεύτερο επίπεδο της είναι ένα **λεπτό στρώμα αλουμινίου (metal sheet) πάχους 20mm**. Το αλουμίνιο που παρεμβάλλεται μεταξύ του πολυμερούς και του μονωτικού υλικού χρησιμοποιείται ως μέσο συναλλαγής θερμότητας μεταξύ του περιβάλλοντος και των οικίσκων. Το τελευταίο επίπεδο της πόρτας κατασκευάζεται από **μονωτικό υλικό (Polyspan**



insulation) πάχους 4cm. Πρόκειται για ένα αφρώδες υλικό με αυξημένη θερμική αντίσταση και δυνατότητα αναστολής της ροής του αέρα. Υλικό ανάλογων ιδιοτήτων έχει χρησιμοποιηθεί και για τη μόνωση της επικλινούς οροφής των οικίσκων.

Οι σημαντικότερες ιδιότητές των στοιχείων της πόρτας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.3.4.**

Πίνακας 4.3.4: Οι ιδιότητες των στοιχείων της πόρτας των οικίσκων.[3]

	Thermal conductivity (kJ/h·m·K)	Density (kg/m ³)	Thermal capacity (kJ/kg·K)	Thickness (cm)
PVC coating (door)	0.83	1500	1	1
Metal sheet (door)	720	2700	0.86	0.2
Polyspan insulation (door)	0.14	10	1.40	4

4.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΩΝ ΟΙΚΙΣΚΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

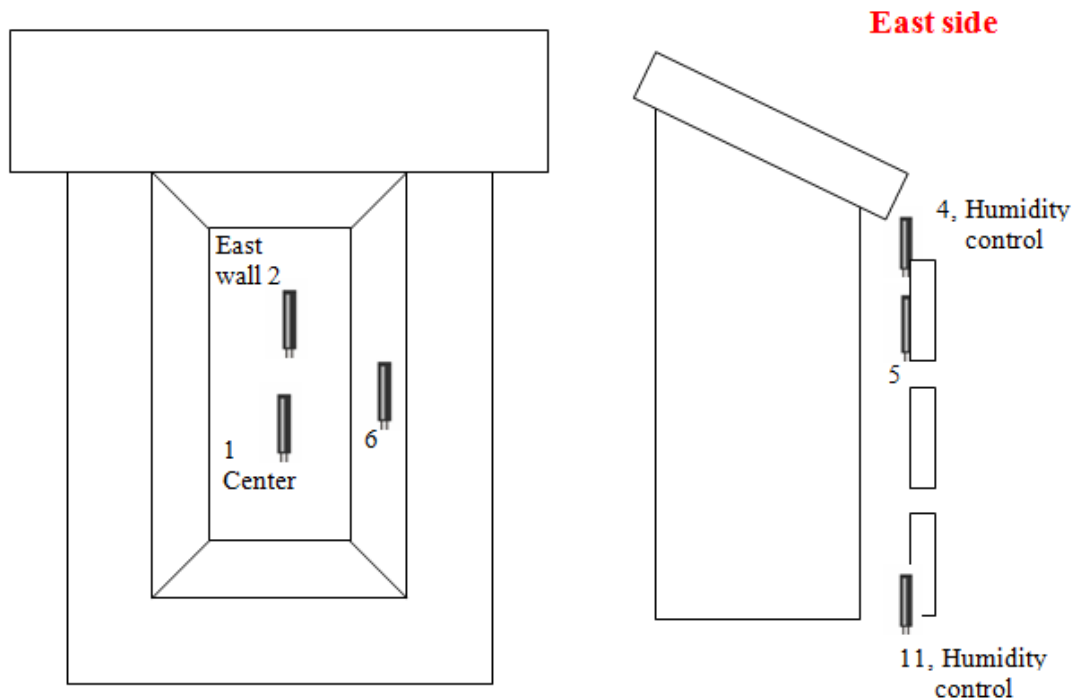
Η επίδραση της χρήσης του ΥΑΦ στη θερμική συμπεριφορά της φυσικής πέτρας εξετάστηκε στα πλαίσια μίας σειράς πειραμάτων που διεξήχθησαν σε πρότυπους οικίσκους ειδικά κατασκευασμένους από το Ινστιτούτο της AIDICO.

Το Ινστιτούτο τοποθέτησε στα σπιτάκια αισθητήρες προκειμένου να παρακολουθήσει τη διακύμανση της θερμοκρασίας τόσο στο εσωτερικό τους όσο και στο περιβάλλον. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο στρώμα αέρος της τοιχοποιίας, στη μέσα πλευρά του νότιου και δυτικού τοίχου και στην οροφή των οικίσκων, τόσο στις κατασκευές Ελέγχου όσο και στις PCM κατασκευές, στις ίδιες θέσεις. Είναι προφανές ότι η αντιστοιχία των θέσεων τοποθέτησης των αισθητήρων στις κατασκευές ελέγχου και στις PCM κατασκευές επιδιώχθηκε σκόπιμα προκειμένου τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι πλήρως συγκρίσιμα.[2],[3]

Οι αισθητήρες μετρούσαν τη θερμοκρασία στο εσωτερικό κι εξωτερικό των οικίσκων επί εικοσιτετραώρου βάσεως.

SENSORS POSITION

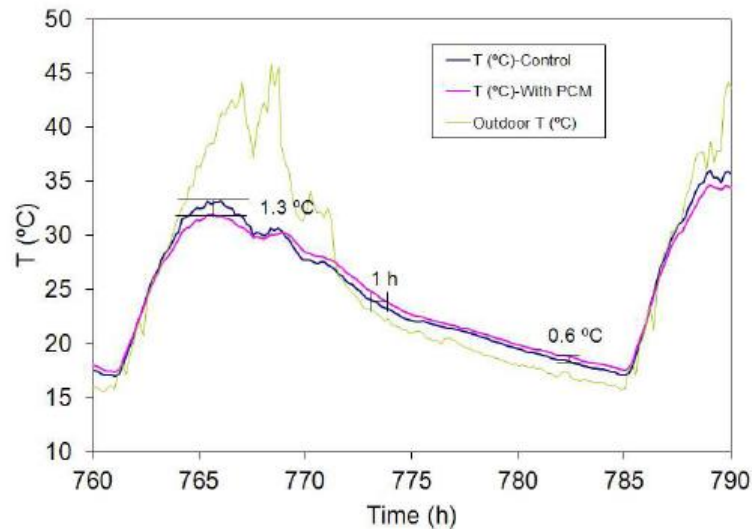
VENTILATED FAÇADE



Σχήμα 4.4.1: Σχηματική απεικόνιση των αισθητήρων θερμότητας και των θέσεων που αυτοί κατέχουν σε έναν από τους πιλοτικούς οικίσκους.[9]

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η θερμοκρασιακή διακύμανση είναι ομαλότερη στο εσωτερικό των οικίσκων, που περιλαμβάνουν στην τοιχοποιία τους φυσική πέτρα εμποτισμένη με ΥΑΦ, από αυτή των οικίσκων με τη συμβατική πέτρα.

Διάγραμμα 4.4.1: Αποτύπωση σε διάγραμμα της θερμοκρασιακής διακύμανσης στο εσωτερικό των Οικίσκων Ελέγχου και των PCM οικίσκων.[1]



Η πειραματική διαδικασία που διεξήχθη στα πιλοτικά σπιτάκια κατέδειξε τη συνεισφορά των ΥΑΦ στη θερμική συμπεριφορά της πέτρας και κατ' επέκταση ολόκληρης της κατασκευής. Το γεγονός αυτό αποτελεί κίνητρο για τη χρήση στον τομέα των κατασκευών ενός νέου δομικού υλικού με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες. Η αξιοποίηση του νέου αυτού υλικού στον κτιριακό τομέα θα εξασφαλίσει μείωση των ενεργειακών δαπανών καθώς και ικανοποιητικά όρια θερμικής άνεσης.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] M.D. Romero-Sánchez, M. Founti, C. Guillem-López, A.M. López-Buendía, Thermal energy storage in natural stone treated with PCMs, Proceedings of the 11th International Conference on thermal energy Storage, 2009, Stockholm – Sweden
- [2] M.D. Romero-Sánchez, C. Guillem-López, A.M. López-Buendía, M. Stamatiadou, I. Mandilaras, D. Katsourinis, M. Founti, Treatment of natural stones with phase change materials: Experiments and computational approaches, Applied Thermal Engineering, Available online 19 May 2012, ISSN 1359-4311, 10.1016/j.applthermaleng.2012.05.017.
- [3] D. Katsourinis, M. Founti, M.D. Romero-Sánchez, A.M López-Buendía, On The Computational Modelling of Thermal Energy Storage in Natural Stone Treated With PCMs, 9th International Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air – Conditioning, 2010 September 29 – October 1, Sofia, Bulgaria, Paper 12.
- [4] César Coll, Enric Valor, Joan M. Galve, Maria Mira, Mar Bisquert, Vicente García-Santos, Eduardo Caselles, Vicente Caselles, Long-term accuracy assessment of land surface temperatures derived from the Advanced Along-Track Scanning Radiometer, Remote Sensing of Environment, Volume 116, 15 January 2012, Pages 211-225
- [5] Πληροφορίες για τις κλιματολογικές συνθήκες της Alicante, <http://el.allmetsat.com>, access date 19 Απριλίου 2012
- [6] Weather forecast, <http://www.wunderground.com>, access date 19 Απριλίου 2012
- [7] Προσδιορισμός της γεωγραφικής θέσης της Alicante σε χάρτη της Ισπανίας, <http://maps.google.com/> , access date 19 Απριλίου 2012
- [8] Πληροφορίες για το Bateig Azul από την εταιρεία Bateig, <http://www.bateig.com> , access date 19 Απριλίου 2012
- [9] Sensors position in pilot houses, AIDICO



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΟΙΚΙΣΚΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ TRNSYS 16.

Όπως έχει αναφερθεί και στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**, το Ινστιτούτο της AIDICO κατασκεύασε έναν «πρότυπο οικισμό» αποτελούμενο από **Οικίσκους Ελέγχου** (Control Pilot Houses→ σπιτάκια που διαθέτουν επικάλυψη συμβατικής φυσικής πέτρας στην εξωτερική τους επιφάνεια) και **PCM Οικίσκους** (PCM Treated Houses→ σπιτάκια που διαθέτουν κέλυφος επενδεδυμένο με στρώμα φυσικής πέτρας εμποτισμένης με ΥΑΦ) στα πλαίσια της μελέτης της επίδρασης των ΥΑΦ στη θερμική συμπεριφορά της φυσικής πέτρας. Το Ινστιτούτο τοποθέτησε στα σπιτάκια αισθητήρες προκειμένου να παρακολουθεί τη διακύμανση της θερμοκρασίας τόσο στο εσωτερικό τους όσο και στο περιβάλλον επί εικοσιτετραώρου βάσεως. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η θερμοκρασιακή διακύμανση είναι ομαλότερη στο εσωτερικό των PCM Οικίσκων από αυτή στο εσωτερικό των Οικίσκων Ελέγχου.[6]

Στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας, μοντελοποιήθηκε η θερμική συμπεριφορά ενός Οικίσκου Ελέγχου κι ενός PCM οικίσκου όμοιας γεωμετρίας με χρήση του υπολογιστικού πακέτου TRNSYS. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου κατέστη απαραίτητη η εισαγωγή των PCM Types στην πλατφόρμα του TRNSYS, όπως αναλύεται και στην **Παράγραφο 5.3**.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς των οικίσκων που αφορούν στη 2^η και 3^η ημέρα του Σεπτεμβρίου συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα όπως αυτά διατέθηκαν από το Ινστιτούτο της AIDICO.



5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ TRNSYS 16.

ο ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ TRNBuild.

Για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του Οικίσκου Ελέγχου με χρήση του λογισμικού TRNSYS ήταν απαραίτητος ο καθορισμός των παραμέτρων που αφορούν στις θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών του οικίσκου, στη διείσδυση του αέρα, στα υλικά και τα πάχη των στρωμάτων της τοιχοποιίας κ.λπ. Οι παράμετροι αυτές ορίστηκαν στο περιβάλλον του TRNBuild λαμβάνοντας υπόψη τη δομή και τον προσανατολισμό του οικίσκου, τις συνθήκες του περιβάλλοντος κ.α. Από την πληθώρα των παραμέτρων του TRNBuild παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.2.1** η διείσδυση του αέρα, η θερμοκρασία του εδάφους, ο συντελεστής ηλιακής απορροφητικότητας των επιφανειών και ο συντελεστής συναγωγής. Η ειδική αναφορά στις συγκεκριμένες παραμέτρους παρατέθηκε σκόπιμα, καθώς τα συγκεκριμένα μεγέθη επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του Οικίσκου Ελέγχου.



Πίνακας 5.2.1: Συγκεντρωτικά ορισμένα από τα στοιχεία που εισήχθησαν στο TRNBuild για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

Στοιχεία του TRNBuild	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Infiltration	0.1	1/h	Οι πρότυποι οικίσκοι της Alicante είναι απλές κατασκευές. Η μοναδική διόδος μέσω της οποίας ο αέρας περιβάλλοντος μπορεί να εισχωρήσει στο εσωτερικό τους είναι η πόρτα στην ανατολική τους πλευρά η οποία ανοίγει σπανίως. Επομένως στην επιλογή “Infiltration” του TRNBuild ορίστηκε ενδεικτικά μία πολύ μικρή τιμή, καθώς η διείσδυση του αέρα είναι περιορισμένη.[7]
Boundary temperature of the ground	00:00h-8:00h→ 15 8:00h-12:00h→ 19 12:00h-15:00h→ 21 15:00h-21:00h→ 20 21:00h-24:00h→ 18	°C	Προκειμένου να οριστεί η “Boundary temperature” του δαπέδου των οικίσκων διαμορφώθηκε στο TRNBuild ένα “Schedule” θερμοκρασιών. Στο “Schedule” αποτυπώθηκε η διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους εντός εικοσιτετραώρου λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως αυτή μετρήθηκε από το Ινστιτούτο της AIDICO για τη 2 ^η και 3 ^η ημέρα του Σεπτεμβρίου.



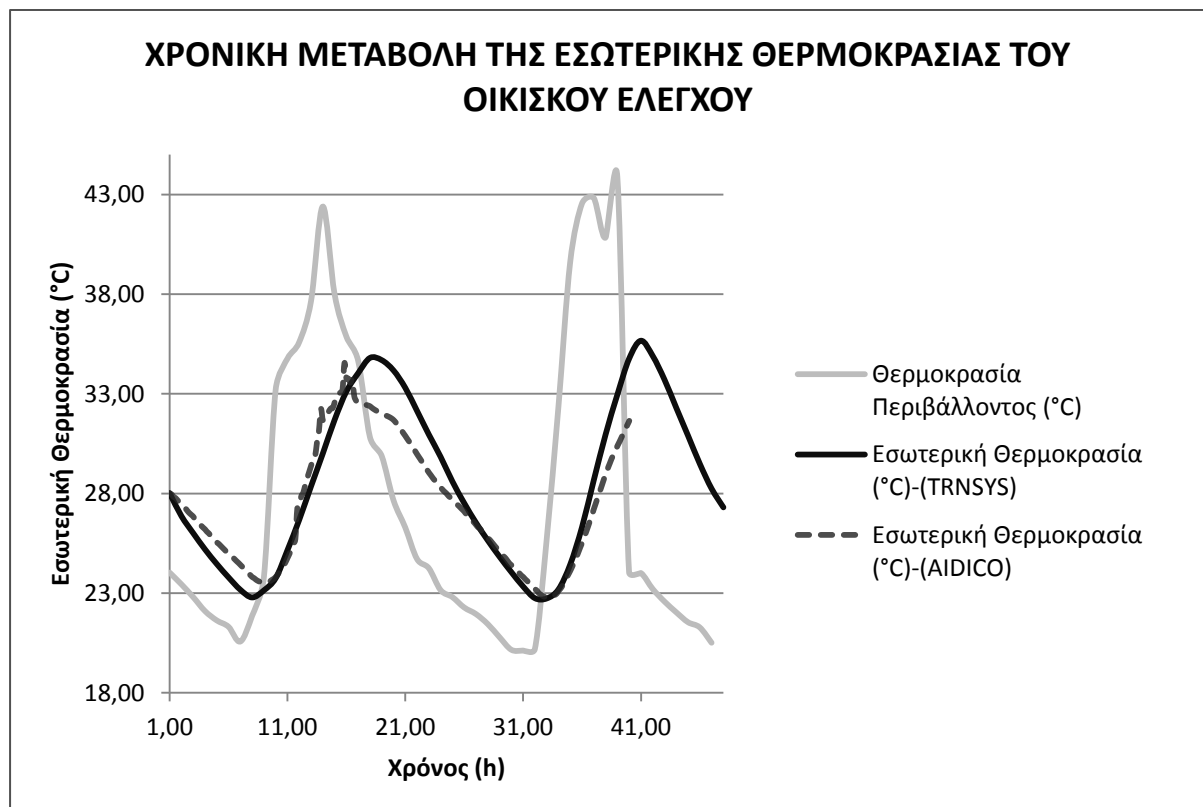
Στοιχεία του TRNBuild	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Convective heat transfer coefficient	βλ. Σχόλιο	$\text{kJ/hm}^2\text{K}$	Ο συντελεστής συναγωγιμότητας έχει οριστεί $11 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$ στη “front” επιφάνεια του concrete (→ μεταφορά θερμότητας διά συναγωγής μεταξύ του αέρα στο εσωτερικό των οικίσκων και της εσωτερικής επιφάνειας του στρώματος σκυροδέματος) και $78 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$ στη “back” επιφάνεια του Bateig Azul (→ μεταφορά θερμότητας διά συναγωγής μεταξύ του αέρα περιβάλλοντος και της εξωτερικής επιφάνειας του στρώματος φυσικής πέτρας).[8]
Solar absorptance	βλ. Σχόλιο	-	Οι εξωτερικές επιφάνειες του οικίσκου είναι στην πλειοψηφία τους σκουρόχρωμες (→ το γκρίζο στρώμα του Bateig Azul στην τοιχοποιία και την οροφή και η μαύρη επένδυση πολυβινυλοχλωριδίου στην πόρτα). Επιπλέον η κατασκευή του οικίσκου δεν επιτρέπει την είσοδο του ηλιακού φωτός στο εσωτερικό του (→ δεν υπάρχουν υαλοπίνακες και η πόρτα παραμένει συνήθως κλειστή), ενώ απουσιάζει και οποιοδήποτε σύστημα τεχνητού φωτισμού. Επομένως η τιμή του συντελεστή της solar absorptance (a_s) θεωρήθηκε 0.6-0.8 στις εξωτερικές επιφάνειες της κατασκευής, ενώ στις επιφάνειες στο εσωτερικό του οικίσκου η τιμή του a_s ορίστηκε 0.8. [9]

ο ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Η ομαλή διεξαγωγή της διαδικασίας της προσομοίωσης προϋποθέτει, εκτός από την εισαγωγή στο TRNBuild των παραμέτρων που αφορούν στη θερμική συμπεριφορά και στη δομή του Οικίσκου Ελέγχου, και τον καθορισμό του χρονικού βήματος της προσομοίωσης και των αρχικών συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας (initial values). Ως χρονικό βήμα ορίστηκαν τα 10min, ενώ ως αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας οι τιμές 28.02°C και 50% αντίστοιχα.

Στο **Διάγραμμα 5.2.1** αποτυπώνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του Οικίσκου Ελέγχου κατά τη 2^η και 3^η ημέρα του Σεπτεμβρίου. Η μία καμπύλη θερμοκρασιακής διακύμανσης δείχνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήγαγε το Ινστιτούτο της AIDICO για τις συγκεκριμένες ημέρες, ενώ η άλλη τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS 16.

Διάγραμμα 5.2.1



Παρατηρώντας το **Διάγραμμα 5.2.1** διαπιστώνεται ότι η διακύμανση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ακολουθεί σε ικανοποιητικό βαθμό τη διακύμανση των πειραματικών δεδομένων για το χρονικό διάστημα από τη 1:00 στις



2/9 έως τις 16:00 στις 3/9 (όποτε και διακόπτεται η διακύμανση των πειραματικών δεδομένων). Η εισαγωγή στο TRNBuild της τιμής 28.02°C ως αρχική τιμή της θερμοκρασίας διευκόλυνε την ταύτιση της τάσης των δύο καμπυλών και τα αποτελέσματα είναι πλήρως συγκρίσιμα. Η τιμή 28.02°C δεν εισήχθη τυχαία στις “initial values” του TRNBuild. Οι 28.02°C αποτελούν την τιμή της θερμοκρασίας η οποία μετρήθηκε από το Ινστιτούτο της AIDICO στο εσωτερικό του Οικίσκου Ελέγχου στη 1:00 στις 2/9.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της θερμοκρασιακής μεταβολής διαπιστώνεται ότι πολύ καλή προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης από την καμπύλη της προσομοίωσης έχει επιτευχθεί στις 2/9 από τις 8:30 έως τις 16:00 και στις 3/9 από τις 2:30 έως τις 13:00. Ωστόσο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν μία υποεκτίμηση των ελαχίστων τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας του πρώτου εικοσιτετραώρου, ενώ υπερεκτιμημένες εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές κατά τη διάρκεια και των δύο ημερών. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται κυρίως στις παραδοχές που έγιναν σχετικά με τις ιδιότητες των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (→ η εκτίμηση των συντελεστών a_s και h) και τα πάχη των στρωμάτων της τοιχοποιίας (→ τα ακριβή πάχη των στρωμάτων της τοιχοποιίας δεν ήταν γνωστά), στη διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους κατά τη διάρκεια του 24ώρου (→ έγινε μία πρώτη εκτίμηση λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) και στη διείδυση του αέρα.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη προσέγγιση της καμπύλης των πειραματικών δεδομένων της AIDICO από την καμπύλη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπως αυτή προκύπτει από το λογισμικό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή στο TRNSYS των όσο το δυνατόν κατάλληλων παραμέτρων που αφορούν στη θερμική συμπεριφορά και στη δομή του Οικίσκου Ελέγχου.

5.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ PCM ΜΟΝΤΕΛΩΝ (PCM Types) ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΠΩΣ ΑΥΤΑ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΟ TRNSYS ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ Types.

5.3.1 PCM Type 204



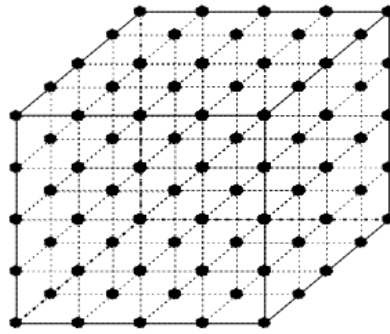
Type204-PCM

5.3.1.a ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ Type.

Το Type 204 αποτελεί το προϊόν έρευνας της επιστημονικής ομάδας του Πανεπιστημίου Τεχνολογίας του Helsinki. Πρόκειται για μία υπορουτίνα γραμμένη σε γλώσσα FORTRAN η οποία ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα του TRNSYS στα πλαίσια της αξιολόγησης της επίδρασης των PCM τοίχων, οροφών και δαπέδων στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου και όχι της προσομοίωσης της πραγματικής διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας εντός των υλικών τα οποία περιέχουν PCM. Στο Type 204 οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας επιλύονται σε **τρεις διαστάσεις (3-D)** για τις διάφορες φάσεις του PCM, ενώ το φαινόμενο της αλλαγής φάσης προσομοιώνεται με την μέθοδο της **ενεργούς θερμοχωρητικότητας**. Το συγκεκριμένο πιστοποιημένο μοντέλο έχει υποστεί ορισμένες τροποποιήσεις από τον M.Ahmad και τους συνεργάτες του. [1],[2],[3],[4]

5.3.1.b Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ Type.

Για την προσομοίωση του ΥΑΦ, το Type 204 χρησιμοποιεί ένα τρισδιάστατο δίκτυο 729 κόμβων (\rightarrow 9 κόμβοι σε κάθε μία από τις τρεις κατευθύνσεις x,y,z) κι επιλύει τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας για τις διάφορες φάσεις του PCM (\rightarrow στερεά, στερεά-υγρή, υγρή κατάσταση).



Σχήμα 5.3.1: Απεικόνιση του τρισδιάστατου πλέγματος το οποίο αντιπροσωπεύει το PCM στοιχείο τοίχου.[3]

Η διάρθρωση του μοντέλου σε δίκτυο κόμβων δίνει τη δυνατότητα ύπαρξης διαφορετικού υλικού σε κάθε κόμβο γεγονός το οποίο καταδεικνύει τη δυνατότητα προσομοίωσης σύνθετων κατασκευών, οι οποίες δεν περιέχουν μόνο ΥΑΦ αλλά και άλλα υλικά όπως το σκυρόδεμα (→ concrete with microencapsulated paraffin) ή ο γύψος (→ plaster with microencapsulated paraffin). Επιπλέον η κατ' όγκο αναλογία του PCM στον κάθε κόμβο μπορεί να οριστεί εύκολα. [1],[2],[3],[4]

Στις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας λαμβάνεται υπόψη η μετάδοση θερμότητας διά αγωγής (conduction), συναγωγής (convection) και ακτινοβολίας (radiation) μεταξύ των κόμβων του πλέγματος, ενώ η επίλυσή τους πραγματοποιείται με **τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών** (έμμεση μέθοδος Crank-Nicholson) με την οποία υπολογίζεται και η θερμοκρασία σε κάθε κόμβο.

Η ενσωμάτωση του Type 204 στο λογισμικό TRNSYS πραγματοποιείται μέσω ενός “Boundary wall” (τοίχου οριακών συνθηκών). Το μοντέλο δέχεται ως δεδομένα εισόδου τη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου και την ροή θερμότητας προς τον τοίχο (ηλιακά κέρδη κι εσωτερικά κέρδη) κι επιστρέφει στο μοντέλο του πολυζωνικού κτιρίου (**Type 56**) την θερμοκρασία στην επιφάνεια του τοίχου μετά τη διεξαγωγή των απαραίτητων υπολογισμών. [1],[2],[3],[4]

Το Type 204 δίνει τη δυνατότητα καθορισμού από τον χρήστη των παραμέτρων οι οποίες χαρακτηρίζουν το εκάστοτε PCM όπως η θερμοκρασία τήξης, η θερμοκρασία κρυσταλλοποίησης, η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα αλλά και η αναλογία του υλικού PCM στην περίπτωση σύνθετων υλικών. [1],[2],[3],[4]



5.3.1.c ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ Type 204 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.

Το Type 204 ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα του TRNSYS με σκοπό την αξιολόγηση της επίδρασης της PCM τοιχοποιίας στη θερμική συμπεριφορά των πρότυπων οικίσκων της Alicante (βλ. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4). Το υπολογιστικό μοντέλο τοποθετήθηκε στο παράθυρο εργασίας και συνδέθηκε με το Type 56 του πολυζωνικού κτιρίου.

ο ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ TRNBuild ΚΑΙ ΤΟΥ Type 204

Η ενσωμάτωση του Type 204 στο TRNSYS πραγματοποιήθηκε μέσω ενός “Boundary wall” (τοιχίου οριακών συνθηκών). Ο “Boundary wall” αντιπροσωπεύει το επίπεδο του PCM στην τοιχοποιία του πρότυπου οικίσκου. Η εισαγωγή του “Boundary wall” στην επιφάνεια του TRNBuild καθιστά απαραίτητο τον καθορισμό τόσο της θερμοκρασίας (Boundary temperature) όσο και της επιφάνειας (area) του PCM επιπέδου.

Στο περιβάλλον του TRNBuild εκτός από τα στοιχεία που αφορούν στο PCM layer, ορίστηκαν και οι λεπτομέρειες που σχετίζονται με τη θερμοκρασία εδάφους, τις θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών της κατασκευής, τη διείσδυση αέρα, τα υλικά και τα πάχη των στρωμάτων της τοιχοποιίας κ.λπ. Στην προκειμένη περίπτωση για την επίτευξη της βέλτιστης δυνατής προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου ορίστηκαν στις επιλογές “infiltration”, “solar absorptance” και “convective heat transfer coefficient” του TRNBuild οι ίδιες τιμές που έχουν οριστεί και στην περίπτωση της προσομοίωσης της συμπεριφοράς του Οικίσκου Ελέγχου (βλ. Πίνακα 5.2.1). Οι υπόλοιπες παράμετροι του TRNBuild, η τιμή των οποίων επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου, σχολιάζονται στον Πίνακα 5.3.1.1.

Στη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου εξίσου σημαντικό ρόλο με τις παραμέτρους του TRNBuild παίζουν και οι παράμετροι του Type 204. Οι παράμετροι αυτές που ορίστηκαν στο Type 204 προκειμένου να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια το ΥΑΦ αφορούν ως επί το πλείστον στις ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην εν λόγω εφαρμογή (→ Micronal DS[®] 5000x της



εταιρείας BASF). Ορισμένες από τις παραμέτρους του Type σχολιάζονται στον **Πίνακα 5.3.1.2.**



Πίνακας 5.3.1.1: Συγκεντρωτικά ορισμένα από τα στοιχεία που εισήχθησαν στο TRNBuild για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

Στοιχεία του TRNBuild	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Boundary temperature of the ground	20	°C	Η τιμή της “Boundary temperature” του δαπέδου του μελετούμενου οικίσκου ορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως αυτή μετρήθηκε από το Ινστιτούτο της AIDICO για τις 2 και 3/9. Οι 20 °C αποτελούν μία μέση τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους τις συγκεκριμένες ημέρες.
Boundary temperature of the PCM	βλ. Σχόλιο	°C	Ως “Boundary temperature” ορίστηκε η θερμοκρασία του PCM τοίχου η οποία υπολογίζεται από το Type 204 και αποστέλλεται ως input στο μοντέλο του πολυζωνικού κτιρίου.
Area of the PCM layer	0.758	m ²	Το στρώμα της φυσικής πέτρας (πάχους 0.03m) καλύπτει συνολική επιφάνεια περίπου 7.59 m ² στην κατασκευή. Η ποσότητα ΥΑΦ που χρειάζεται για τον επαρκή εμποτισμό της πέτρας αντιστοιχεί σε 0.011g ΥΑΦ ανά cm ³ Bateig Azul. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πυκνότητα του ΥΑΦ είναι 800kg/m ³ , υπολογίζεται ότι το στρώμα του PCM στην τοιχοποιία των οικίσκων έχει επιφάνεια 0.758 m ² και πάχος 0.004125m.[6]



Πίνακας 5.3.1.2: Οι παράμετροι του Type 204.[2]

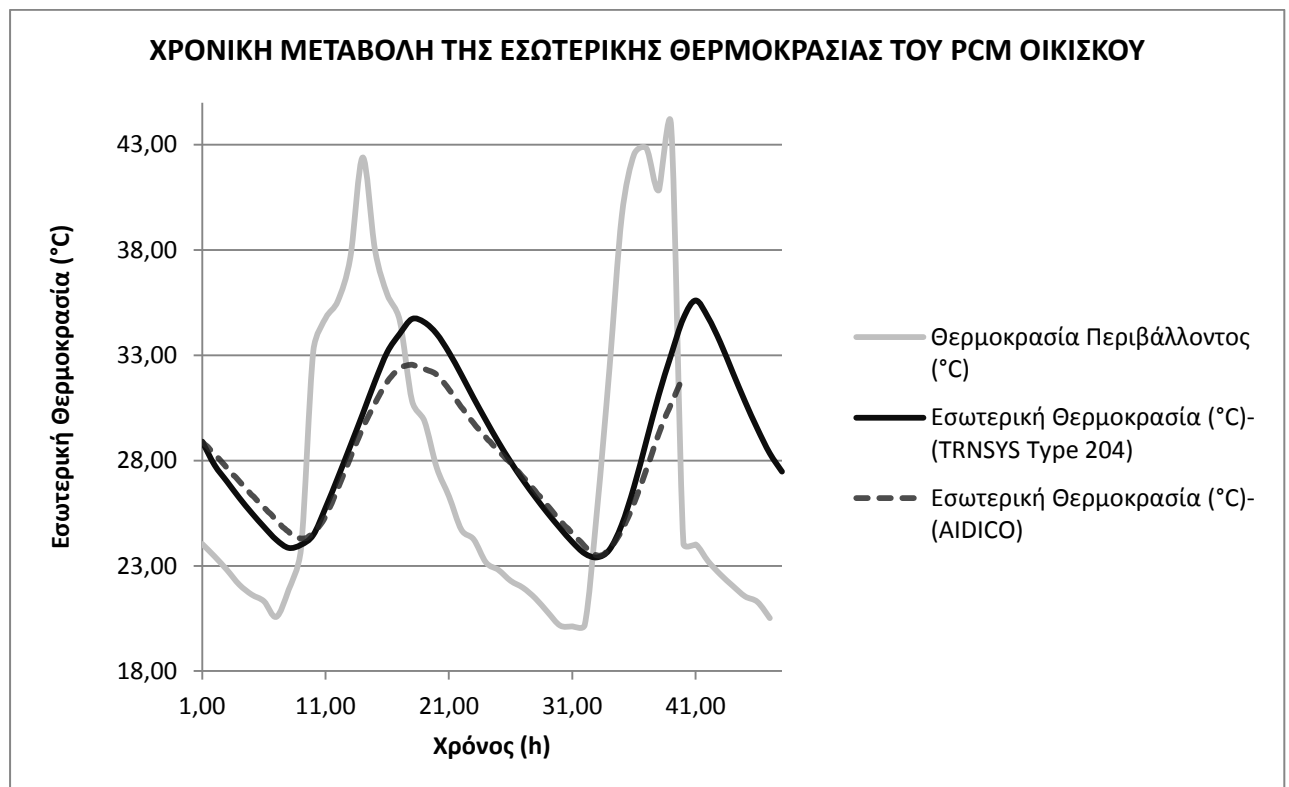
Παράμετροι του Type 204	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Melting temperature of PCM	26	°C	Οι ιδιότητες του ΥΑΦ Micronal DS [®] 5000x παρέχονται από το “Product Portfolio” της εταιρίας BASF. [5]
Crystallization temperature of PCM	20	°C	Η τιμή της θερμοκρασία κρυσταλλοποίησης του ΥΑΦ είναι πάντοτε χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης του. Για το λόγο αυτό ορίστηκε στο Type η τιμή 20 °C.[2]
Latent Heat of PCM	110	kJ/kg	Η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης του Micronal DS [®] 5000x εντοπίστηκε στο [11] της βιβλιογραφίας.
Density of PCM	800	no units	Η πυκνότητα του PCM επιπέδου θεωρήθηκε ίση με 800kg/m ³ . [6]
C _p of PCM	5300	no units	Το μοντέλο δε λαμβάνει υπόψη στους υπολογισμούς του τη μεταβολή της C _p του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας. Ωστόσο στις παραμέτρους του απαιτείται η δήλωση μίας σταθερής τιμής της θερμοχωρητικότητας του υλικού. Η σταθερή τιμή της C _p (J/kg·K) που ορίστηκε στο μοντέλο είναι ο μέσος όρος των τιμών της C _p του υλικού που μετρήθηκαν από το Ινστιτούτο της AIDICO συναρτήσει της θερμοκρασίας.[2],[6]

ο ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Στην περίπτωση της μοντελοποίησης του PCM Οικίσκου με χρήση του Type 204 ορίστηκαν στο TRNSYS οι τιμές 28.9°C και 50% ως αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας αντίστοιχα, ενώ ως βήμα της προσομοίωσης επιλέχθηκαν τα 10min.

Στο **Διάγραμμα 5.3.1.1** αποτυπώνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μελετούμενου PCM οικίσκου κατά τη 2^η και 3^η ημέρα του Σεπτεμβρίου. Η μία καμπύλη απεικονίζει τη διακύμανση των πειραματικών τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας όπως αυτές μετρήθηκαν από το Ινστιτούτο της AIDICO ενώ η άλλη απεικονίζει τη διακύμανση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS 16 με χρήση του Type 204.

Διάγραμμα 5.3.1.1



Παρατηρώντας το **Διάγραμμα 5.3.1.1** είναι προφανές ότι η τάση της καμπύλης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ακολουθεί σε ικανοποιητικό βαθμό την τάση της πειραματικής καμπύλης. Το γεγονός αυτό καθιστά τις δύο καμπύλες πλήρως συγκρίσιμες.



Σύμφωνα με το διάγραμμα της θερμοκρασιακής μεταβολής, στις 2/9 από τις 9:00 έως περίπου και τις 15:30, η διακύμανση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης δείχνει να ταυτίζεται με τη διακύμανση των πειραματικών δεδομένων. Ανάλογη ταύτιση των αποτελεσμάτων παρατηρείται και στις 3/9 από τη 1:00 έως και τις 13:00.

Εμφανής είναι η απόκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα κατά το πρώτο δωρο της 2^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου, ενώ παρατηρείται και υποεκτίμηση της τάξης του 0.5°C της ελάχιστης εσωτερικής θερμοκρασίας που εμφανίζεται στις 8:05 της ίδιας ημέρας. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται ως επί το πλείστον στις παραδοχές που έγιναν σχετικά με τις ιδιότητες των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (π.χ. η εκτίμηση των συντελεστών a_s και h , το πάχος των στρωμάτων της τοιχοποιίας κ.λπ.) και στη θερμοκρασία του εδάφους (“boundary temperature”). Το γεγονός ότι η θερμοκρασία του εδάφους θεωρήθηκε σταθερή στους 20°C επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM οικίσκου. Η ενδεχόμενη αύξηση ωστόσο της τιμής της “boundary temperature” ή η διαμόρφωση ενός κατάλληλου “Schedule” θερμοκρασιών στο TRNBuild, να μεν θα διευκόλυνε την προσέγγιση της minimum τιμής της θερμοκρασίας του πρώτου 24ώρου, όμως θα προκαλούσε και την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε όλο της το εύρος της προσομοίωσης (→ μετατόπιση της καμπύλης προσομοίωσης προς τα πάνω), πράγμα το οποίο δεν είναι επιθυμητό όλες τις ώρες της ημέρας.

Στο **Διάγραμμα 5.3.1.1** η υποεκτίμηση της ελάχιστης τιμής της εσωτερικής θερμοκρασίας στις 2/9 δεν αποτελεί τη μοναδική απόκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα. Παρατηρείται και υπερεκτίμηση των μεγίστων τιμών της θερμοκρασίας από τις 15:30 στις 2/9 έως περίπου και τη 1:00 στις 3/9. Προβλέποντας την πορεία των πειραματικών τιμών και μετά τις 16:00 στις 3/9 από την υπάρχουσα διακύμανση θα μπορούσε να σημειωθεί ότι υπερεκτίμηση των μεγίστων τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας διακρίνεται και στο χρονικό διάστημα από τις 13:00 έως τις 21:00 στις 3/9. Η απόκλιση των μεγίστων τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας της καμπύλης προσομοίωσης από τις αντίστοιχες τιμές της πειραματικής καμπύλης ανέρχεται στους 2.5°C . Η μεγάλη αυτή διαφορά που παρατηρείται και στα δύο εικοσιτετράωρα, οφείλεται σε πολλούς παράγοντες.



Ορισμένοι από τους παράγοντες αυτούς είναι οι παραδοχές που έγιναν σχετικά με τις ιδιότητες των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και η σταθερή θερμοκρασία του εδάφους. Η βασική αιτία όμως της υπερεκτίμησης των μεγίστων τιμών της θερμοκρασίας είναι η αδυναμία του Type 204 να λάβει υπόψη στους υπολογισμούς του τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Όπως αναφέρεται και στον **Πίνακα 5.3.1.2**, στις παραμέτρους του Type 204 ορίστηκε μία σταθερή τιμή της C_p του ΥΑΦ ($\rightarrow 5300 \text{ J/kgK}$). Το γεγονός αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το ΥΑΦ σε όλο του το εύρος δύναται να απορροφά και να αποθηκεύει συγκεκριμένο ποσό θερμότητας, κάτι το οποίο προφανώς δεν ισχύει αν αναλογιστεί κανείς ότι η τιμή της C_p μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της θερμοκρασιακής μεταβολής διαπιστώνεται ότι οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM οικίσκου εμφανίζονται στις 18:00 το πρώτο εικοσιτετράωρο και στις 17:00 το δεύτερο εικοσιτετράωρο. Τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές η θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει υπολογιστεί στους 28.89°C και στους 24°C αντίστοιχα. Τις δεδομένες χρονικές στιγμές με τις δεδομένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος η τιμή της C_p του ΥΑΦ ανέρχεται στα 5605.2 J/kgK και 6876.2 J/kgK σύμφωνα με τις μετρήσεις της AIDICO. Οι τιμές αυτές της C_p είναι αισθητά μεγαλύτερες από την τιμή που ορίστηκε εξ' αρχής στο περιβάλλον του TRNSYS. Στην περίπτωση που το Type 204 λάμβανε υπόψη τη μεταβολή της C_p συναρτήσει της θερμοκρασίας, στις 18:00 του πρώτου εικοσιτετράωρου και στις 17:00 του δεύτερου, το ΥΑΦ θα αναμενόταν να απορροφήσει μεγαλύτερο ποσόν θερμότητας από τον χώρο (\rightarrow φυσική συνέπεια της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητας). Το γεγονός αυτό θα συνεπαγόταν μείωση των μεγίστων της καμπύλης προσομοίωσης και κατ' επέκταση ικανοποιητικότερη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων.

ο ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στο στρώμα της φυσικής πέτρας που επενδύει το κέλυφος του μελετούμενου οικίσκου έχει ενσωματωθεί ποσότητα PCM (Micronal DS[®] 5000x), η οποία αύξησε το βάρος του Bateig Azul κατά 0.5%. Το ποσοστό αυτό αύξησης του βάρους του



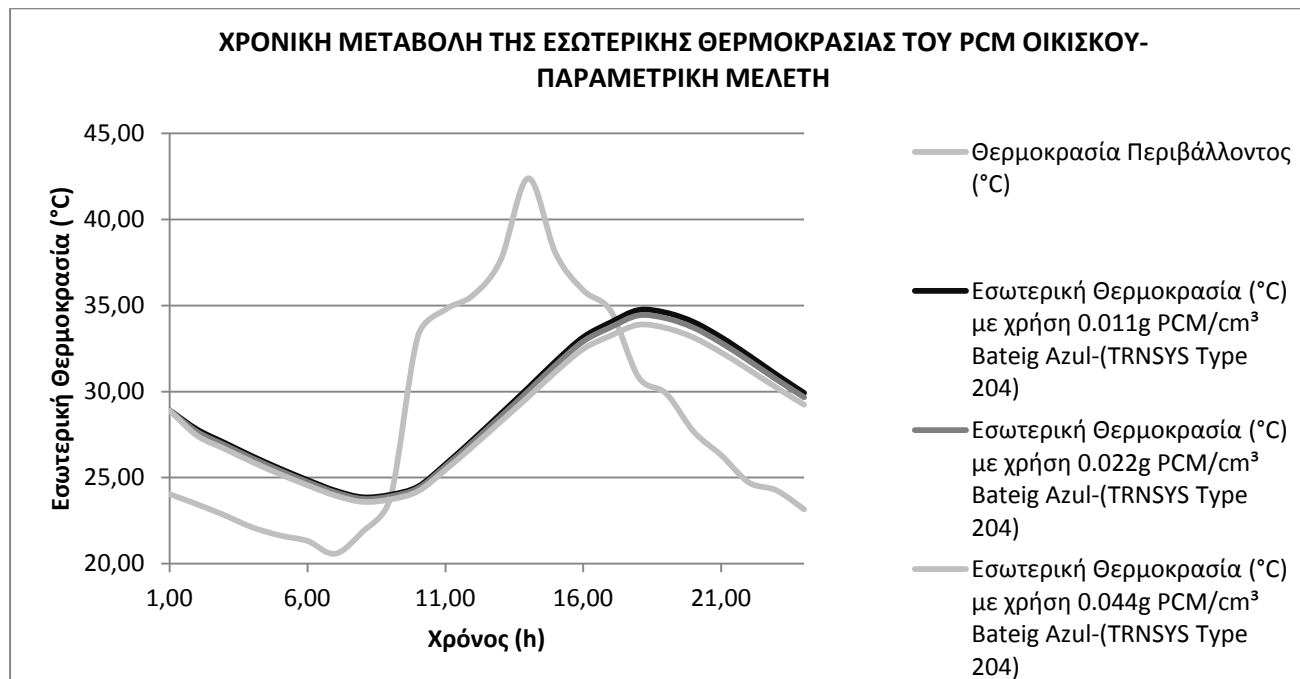
Bateig Azul επετεύχθη με προσθήκη 0.011g ΥΑΦ ανά cm^3 της φυσικής πέτρας. Όπως έχει διαπιστωθεί από σχετική μελέτη της Romero Sanchez και των συνεργατών της[6], η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας ΥΑΦ στους πόρους του Bateig Azul θα επηρέαζε αρνητικά την αισθητική άποψη της φυσικής πέτρας, ενώ δεν έχει διευκρινιστεί ακόμα κατά πόσο η επιπλέον ποσότητα ΥΑΦ θα έπληττε τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης εξετάστηκε η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου όταν η ποσότητα του ΥΑΦ αυξάνεται. Στην πρώτη περίπτωση μοντελοποιήθηκε η θερμική συμπεριφορά του PCM οικίσκου όταν ανά 1 cm^3 της φυσικής πέτρας του κελύφους του ενσωματώνονται 0.022g ΥΑΦ Bateig Azul (\rightarrow αύξηση του βάρους της φυσικής πέτρας κατά 1%) και στη δεύτερη περίπτωση μοντελοποιήθηκε η θερμική συμπεριφορά του PCM οικίσκου όταν ανά 1 cm^3 της φυσικής πέτρας του κελύφους του ενσωματώνονται 0.044g ΥΑΦ Bateig Azul (\rightarrow αύξηση του βάρους της φυσικής πέτρας κατά 2%). Η επιλογή διπλασιασμού και τετραπλασιασμού της ποσότητας του ΥΑΦ δεν ήταν τυχαία, αλλά βασίστηκε στην παραμετρική μελέτη που παρατίθεται στο [6] της βιβλιογραφίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι δεν έχει διασαφηνιστεί προς το παρόν ο αντίκτυπος της επιπλέον ποσότητας ΥΑΦ στις μηχανικές ιδιότητες του Bateig Azul.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το Type 204 αντιλαμβάνεται την αύξηση της ποσότητας του ΥΑΦ ως αύξηση της επιφάνειας του PCM Layer. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αντιπαραβάλλονται στο **Διάγραμμα 5.3.1.2**.



Διάγραμμα 5.3.1.2



Παρατηρώντας τις καμπύλες των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, όπως αυτές προέκυψαν από το TRNSYS για το πρώτο 24ωρο (στις 2/9) διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της ποσότητας του ΥΑΦ στην κατασκευή η μέγιστη τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας του οικίσκου μειώνεται. Η εξέλιξη αυτή είναι αναμενόμενη, αν αναλογιστεί κανείς ότι μεγαλύτερη ποσότητα ΥΑΦ σημαίνει μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας. Εφόσον υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης μεγαλύτερου ποσού θερμότητας τότε είναι προφανές ότι η μέγιστη θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό του PCM οικίσκου μειώνεται (→ μείωση των μεγίστων της καμπύλης). Από φυσικής σκοπιάς, με την αύξηση της ποσότητας του ΥΑΦ εκτός από τη μείωση των μεγίστων τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας θα αναμενόταν και αύξηση των ελαχίστων τιμών, γεγονός το οποίο δεν παρατηρείται στις καμπύλες της προσομοίωσης. Επιπλέον η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας PCM στην τοιχοποιία του οικίσκου σημαίνει παράταση του χρόνου φόρτισης και αποφόρτισης του ΥΑΦ γεγονός το οποίο συνεπάγεται εμφάνιση των μεγίστων κι ελαχίστων τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας με μία χρονική καθυστέρηση. Ωστόσο ούτε αυτό το αποτέλεσμα αποτυπώνεται στο διάγραμμα, καθώς το μοντέλο δεν αντιλαμβάνεται το χρόνο φόρτισης και αποφόρτισης του ΥΑΦ. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην



αδυναμία του Type 204 να λάβει υπόψη στους υπολογισμούς του τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας.

ο ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση του Type 204 δεν αποτελούν τη βέλτιστη δυνατή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια του 48ώρου, αν αναλογιστεί κανείς τη μεγάλη απόκλιση που εμφανίζουν οι μέγιστες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Το Type 204 ήταν από τα πρώτα υπολογιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν για την αξιολόγηση της επίδρασης των PCM στη θερμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας. Το βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου, εκτός από το υψηλό υπολογιστικό του κόστος, είναι ότι στους υπολογισμούς του δε λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας, ενώ απαιτεί τον ορισμό μίας σταθερής τιμής της C_p στις παραμέτρους του. Κατ' επέκταση το υπολογιστικό μοντέλο θεωρεί ότι το ΥΑΦ καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης και αποφόρτισης του δύναται να αποθηκεύει σταθερό ποσό θερμικής ενέργειας και κατ' επέκταση η συνεισφορά του στη θερμική συμπεριφορά του εκάστοτε κτιρίου δεν είναι η αναμενόμενη. Το μειονέκτημα αυτό του Type 204 δικαιολογεί το γεγονός ότι στα πλαίσια της μοντελοποίησης τα μεγέθη τα οποία επηρέαζαν σε μεγαλύτερο βαθμό τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας ήταν η θερμοκρασία του εδάφους (“boundary temperature”) και η επιφάνεια που καλύπτει το PCM επίπεδο (“Area of the PCM Layer”) και όχι η σταθερή τιμή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ.

Ευεργετικό για τη λειτουργία του συγκεκριμένου μοντέλου θα ήταν να μπορεί να δέχεται τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του εκάστοτε ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας μέσω κάποιου “External file” ή να μπορεί να αντιλαμβάνεται εν μέρει τη διακύμανση της C_p μέσω επιπλέον παραμέτρων θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασίας όπως συμβαίνει στο Type 260 (βλ. **Παράγραφο 5.3.3**).

Ο Ahmad και οι συνεργάτες [1] του προσπάθησαν να βελτιώσουν τη λειτουργία του Type 204 τροποποιώντας το μοντέλο με τέτοιο τρόπο ώστε η αλλαγή της φάσης του εκάστοτε ΥΑΦ να λαμβάνεται υπόψη μέσω της μεταβολής της ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας $C_{pe}(T)$. Η συνάρτηση η οποία περιγράφει τη μεταβολή αυτή μπορεί είτε να προσδιορισθεί πειραματικά είτε να προσεγγιστεί από μία συνάρτηση τετραγωνικού παλμού με μικρή περιοχή supercooling.[1]

5.3.2. PCM Type 241



Type241

5.3.2.a ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ TYPE.

Το Type 241 αποτελεί ένα ακόμα αριθμητικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει τη μεταφορά θερμότητας μέσω των ΥΑΦ και λειτουργεί μέσω σύζευξης με το μοντέλο του πολυζωνικού κτιρίου. Το μοντέλο αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Θερμικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου του Gratz σε γλώσσα FORTRAN κι ενσωματώθηκε στο περιβάλλον του TRNSYS με σκοπό την προσομοίωση της ενεργειακής απόκρισης κτιρίων τα οποία περιλαμβάνουν ποσότητα PCM στην τοιχοποιία τους. Χαρακτηριστικό του αποτελεί η δυνατότητά του να προσομοιώνει το φαινόμενο της μεταβολής της φάσης του υλικού με **τη μέθοδο της ενθαλπίας**. Το Type 241 προς το παρόν δεν έχει επαληθευθεί με πειραματικά δεδομένα, ενώ από τη στιγμή της δημιουργίας του έως και σήμερα έχει υποστεί τροποποιήσεις και βελτιώσεις.[13],[14]

5.3.2.b ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ TYPE.

Το Type 241 αποτελεί μία ιδιαίτερη προσέγγιση του τρόπου ενσωμάτωσης των PCM επιπέδων τοιχοποιίας στο περιβάλλον του προγράμματος ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων TRNSYS.

Η ορθή λειτουργία του Type προϋποθέτει το διαχωρισμό της δομής του τοίχου στο σημείο όπου το επίπεδο του ΥΑΦ πρέπει να εισαχθεί. Στη θέση του PCM επιπέδου εισάγεται μία νέα θερμική ζώνη, μία ζώνη άμεσης επαφής (direct contact zone), η οποία και ακολουθείται από το υπόλοιπο της δομής του τοίχου. Χαρακτηριστικά της

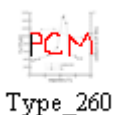


νέας θερμικής ζώνης αποτελούν ο πολύ μικρός όγκος αέρα (air volume) και η αμελητέα αντίσταση μεταφοράς θερμότητας (heat transfer resistance). Η μία πλευρά της ζώνης άμεσης επαφής γειτνιάζει με το τμήμα του τοίχου το οποίο αποτελεί έναν “External Wall” (Εξωτερικό τοίχο) κατά το TRNSYS, ενώ η άλλη με το υπόλοιπο τμήμα του τοίχου, το οποίο συνιστά έναν “Boundary Wall” (τοίχο οριακών συνθηκών) όπου η “boundary temperature” (οριακή θερμοκρασία) $T_{s,2}$ ορίζεται ως δεδομένο εισόδου στο Type 56.

Η κύρια θερμική ζώνη της κατασκευής (actual air zone) συνορεύει με ένα μη συμπαγές (mass less) επίπεδο τύπου “Boundary Wall” με αμελητέα αντίσταση μεταφοράς θερμότητας όπου η boundary temperature $T_{s,1}$ ορίζεται επίσης ως δεδομένο εισόδου στο Type 56. Ο υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμότητας η οποία αποθηκεύεται εντός του ΥΑΦ πραγματοποιείται από το Type 241 με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Το μοντέλο παραλαμβάνει τις θερμοροές $q_{s,1}$ και $q_{s,2}$, οι οποίες εισέρχονται και στις δύο πλευρές του PCM επιπέδου ως δεδομένα εισόδου (και αντίστοιχα ως δεδομένα εξόδου από το Type 56) κι εν συνεχεία αποδίδει τις τιμές των θερμοκρασιών των αντίστοιχων επιφανειών $T_{s,1}$ και $T_{s,2}$ οι οποίες αποτελούν δεδομένα εισόδου στο Type 56 (και αντίστοιχα δεδομένα εξόδου από το Type 241).[12],[13],[14]

Ολοκληρώνοντας τη δομή και λειτουργία του Type 241 πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω ασυμβατότητας των εκδόσεων της FORTRAN και του TRNSYS δεν κατέστη δυνατή η διεξαγωγή της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου με χρήση του συγκεκριμένου υπολογιστικού εργαλείου.

5.3.3 PCM Type 260



5.3.3.a ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ TYPE.

Το Type 260 αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Lyon κι ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα του TRNSYS με σκοπό τη μοντελοποίηση της θερμικής συμπεριφοράς



τοιχών οι οποίοι φέρουν ποσότητα PCM. Το μοντέλο δύναται να επιλύσει αριθμητικά το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας μέσω των δομικών υλικών τα οποία περιέχουν ΥΑΦ με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών. Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου μοντέλου αποτελεί η δυνατότητά του να αντιμετωπίζει το φαινόμενο αλλαγής φάσης του ΥΑΦ με τη μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας.[15]

5.3.3.b ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ TYPE.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας δεν κατέστη δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της λειτουργίας του Type 260. Κατά τη μελέτη της δημοσίευσης που αφορά στο συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο [15] και του αντίστοιχου παραδείγματος εφαρμογής του Type στο TRNSYS “MiniBoite_PCM_MONTEE_HEX” προέκυψαν ορισμένες απορίες οι οποίες λόγω ελλειπόν στοιχείων δεν κατέστη δυνατόν να αποσαφηνιστούν.

Ωστόσο μελετώντας ενδελεχώς την εφαρμογή του Type 260 στο παράδειγμα του TRNSYS “MiniBoite_PCM_MONTEE_HEX” [15] κι επιχειρώντας με διάφορους δυνατούς τρόπους την ενσωμάτωση του PCM επιπέδου στο περιβάλλον του TRNBuild, διαπιστώθηκε ότι ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου είναι ο εξής: στο περιβάλλον του TRNBuild εισάγεται ένα PCM Layer το οποίο αντιπροσωπεύει το στρώμα του ΥΑΦ σε κάθε τοίχο του εκάστοτε κτιρίου (→ ο αριθμός των PCM Layers που εισάγεται στο TRNBuild είναι ίδιος με τον αριθμό των τοίχων του κτιρίου που διαθέτουν ενσωματωμένη ποσότητα ΥΑΦ και ίδιος με τον αριθμό των Type 260 που εισάγονται στο παράθυρο εργασίας του TRNSYS). Το PCM Layer ορίζεται ως “Boundary wall” στο περιβάλλον του TRNBuild. Στην επιλογή “Boundary temperature” του PCM Layer εισάγεται η τιμή της θερμοκρασίας της επιφάνειας του PCM επιπέδου (→TPCM) όπως αυτή υπολογίζεται από το αντίστοιχο Type 260. Το Type 56 με τη σειρά του στέλνει ως δεδομένο εισόδου στο Type 260 την τιμή της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του μοντελοποιούμενου κτιρίου (TS1). Τα υπόλοιπα στρώματα της τοιχοποιίας τα οποία προηγούνται ή έπονται του PCM επιπέδου ορίζονται στο Type 260.



Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι πριν εξακριβωθεί ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου δοκιμάστηκε κι ένα ακόμα σενάριο λειτουργίας του Type όπου όλα τα επίπεδα ΥΑΦ της τοιχοποιίας αντιπροσωπεύονται από έναν PCM Boundary Wall ο οποίος έχει συγκεκριμένο πάχος και η επιφάνειά του ισούται με το άθροισμα των επιφανειών όλων των PCM επιπέδων. Κατ' επέκταση στο παράθυρο εργασίας του TRNSYS εισήχθη ένα Type 260 και όχι τέσσερα. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης όμως όταν εφαρμόστηκε το δεύτερο σενάριο ήταν ιδιαίτερα απογοητευτικά, καθώς η τάση της καμπύλης προσομοίωσης ακολουθούσε με τα δυσκολίας την τάση της πειραματικής καμπύλης. Για το λόγο αυτό το συγκεκριμένο σενάριο απορρίφθηκε.

5.3.3.c ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ Type 260 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.

ο ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ TRNBuild ΚΑΙ ΤΟΥ Type 260

Η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου της Alicante στο TRNSYS με χρήση του Type 260 προϋποθέτει τον καθορισμό μίας σειράς παραμέτρων τόσο στην επιφάνεια του TRNBuild όσο και στο ίδιο το υπολογιστικό μοντέλο.

Οι σημαντικότερες παράμετροι που ορίστηκαν στο περιβάλλον του TRNBuild σχολιάζονται στον **Πίνακα 5.3.3.1** (→ εκτός από τις επιλογές “infiltration” και “convective heat transfer coefficient” όπου εισήχθησαν οι τιμές που είχαν οριστεί στην περίπτωση της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του Οικίσκου Ελέγχου και του PCM Οικίσκου με χρήση του Type 204), ενώ οι παράμετροι του Type 260 παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.3.3.2**.



Πίνακας 5.3.3.1: Συγκεντρωτικά ορισμένα από τα στοιχεία που εισήχθησαν στο TRNBuild για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

Στοιχεία του TRNBuild	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Solar absorptance	βλ. Σχόλιο	-	Οι εξωτερικές επιφάνειες του οικίσκου είναι στην πλειοψηφία τους σκουρόχρωμες (→ το γκρίζο στρώμα του Bateig Azul στην τοιχοποιία και την οροφή και η μαύρη επένδυση πολυβινυλοχλωριδίου στην πόρτα). Επιπλέον η κατασκευή του οικίσκου δεν επιτρέπει την είσοδο του ηλιακού φωτός στο εσωτερικό του (→ δεν υπάρχουν υαλοπίνακες και η πόρτα παραμένει συνήθως κλειστή), ενώ απουσιάζει και οποιοδήποτε σύστημα τεχνητού φωτισμού. Επομένως με μία ορθή εκτίμηση η τιμή του συντελεστή της solar absorptance (a_s) θεωρήθηκε 0.6-0.8 στις εξωτερικές επιφάνειες της κατασκευής, ενώ στις επιφάνειες στο εσωτερικό του οικίσκου η τιμή του a_s ορίστηκε 1. [9]
Boundary temperature of the ground	27	°C	Η τιμή της “Boundary temperature” του δαπέδου του μελετούμενου οικίσκου στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίστηκε με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων. Η τιμή 27 °C δεν αντιπροσωπεύει μία ρεαλιστική μέση τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους, ωστόσο επιλέχθηκε με σκοπό την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων προσομοίωσης.
Area of the PCM layer	βλ. Σχόλιο	m ²	Η επιφάνεια του PCM επιπέδου ισούται κάθε φορά με την επιφάνεια του αντίστοιχου τοίχου της κατασκευής.
Boundary temperature of the PCM	βλ. Σχόλιο	°C	Ως “Boundary temperature” ορίστηκε η θερμοκρασία TPCM της επιφάνειας του PCM τοίχου η οποία υπολογίζεται από το Type 260 και αποστέλλεται ως input στο μοντέλο του πολυζωνικού κτιρίου.



Πίνακας 5.3.3.2: Οι παράμετροι του Type 260.[15]

Παράμετροι του Type 260	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
The global conductance→ U equivalent	0.3	W/mK	Η συγκεκριμένη παράμετρος αναφέρεται στη συνολική αγωγιμότητα των στρωμάτων της τοιχοποιίας τα οποία βρίσκονται μεταξύ της θερμικής ζώνης και του PCM επιπέδου.[15] Στην περίπτωση του πρότυπου οικίσκου η τιμή της U αναφέρεται στην ολική αγωγιμότητα του «συμπαγούς» στρώματος του αέρα και του στρώματος σκυροδέματος.
The convective heat transfer coefficient of the external surface	21.7	W/m ² K	Πρόκειται για την τιμή του συντελεστή συναγωγιμότητας μεταξύ της επιφάνειας του Bateig Azul και του εξωτερικού περιβάλλοντος.
Thickness of PCM	0.004125	m	Αναφέρεται στο πάχος του PCM επιπέδου.
The heat capacity curve of the PCM	T ₀ =22→ C ₀ =5722.44 T ₁ =24→ C ₁ =6876.2 T ₂ =26.5→C ₂ =20053 T ₃ =27→ C ₃ =5839.4 T ₄ =32→ C ₄ =3800	(°C)→ (J/kgK)	Ορίζοντας στο Type 260 πέντε τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και τις αντίστοιχες τιμές της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ γίνεται μία πρώτη εκτίμηση της μεταβολής της C _p συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι τιμές της θερμοκρασίας που επιλέχθηκαν βρίσκονται εντός του εύρους 20-32 °C.



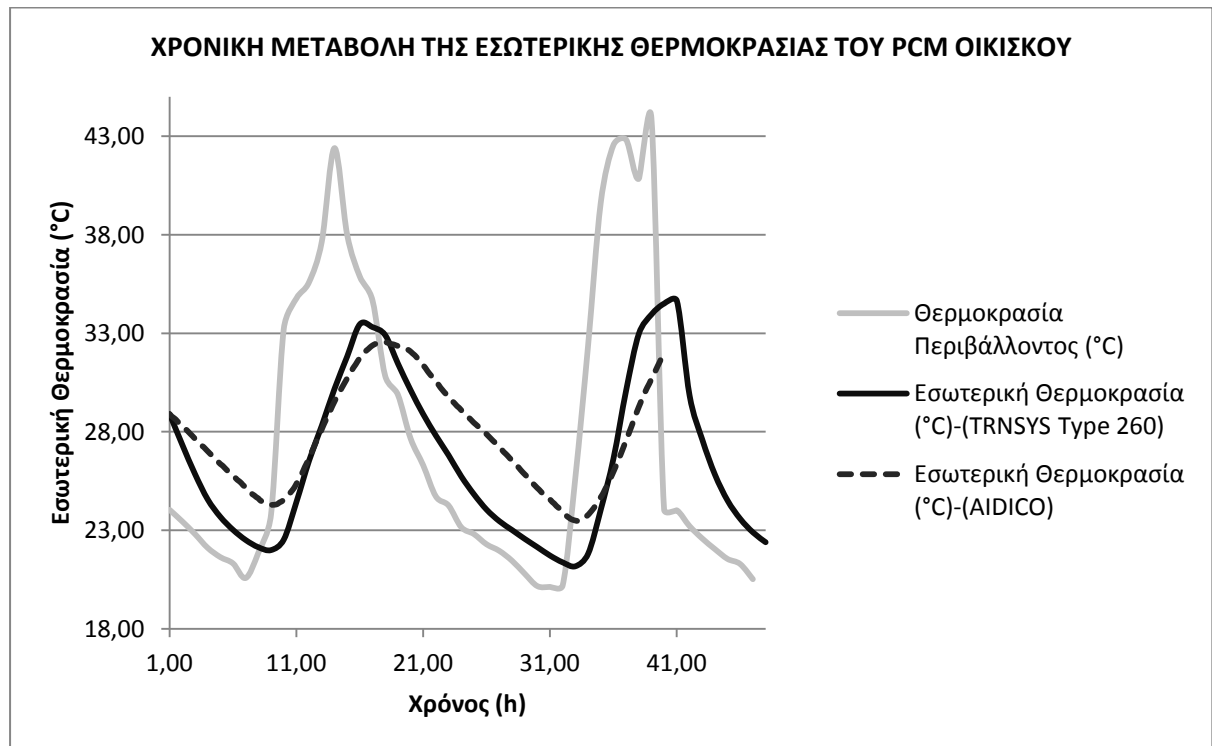
Παράμετροι του Type 260	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
External wall layers	1	-	Στη συγκεκριμένη επιλογή του Type 260 δηλώθηκε ότι υπάρχει ένα μόνο στρώμα τοιχοποιίας που παρεμβάλλεται μεταξύ του PCM επιπέδου και του περιβάλλοντος.
Properties of the external wall layers	βλ. Σχόλιο	-	Στο Type 260 ορίζονται παράμετροι οι οποίες αφορούν στο εξωτερικό επίπεδο της τοιχοποιίας (→ εν προκειμένω στο στρώμα του Bateig Azul) όπως το πάχος, η πυκνότητα και η θερμοχωρητικότητα του υλικού κ.α.

ο ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Στην περίπτωση της μοντελοποίησης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου με χρήση του Type 260 ορίστηκαν στο TRNBuild οι τιμές 28.9°C και 50% ως “initial values”, ενώ ως βήμα της προσομοίωσης ορίστηκαν τα 10min.

Στο **Διάγραμμα 5.3.3.1** αποτυπώνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μελετούμενου PCM οικίσκου κατά τις 2 και 3/9. Η μία καμπύλη απεικονίζει τη διακύμανση των πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου ενώ η άλλη καμπύλη δείχνει τη διακύμανση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS 16 με χρήση του Type 260.

Διάγραμμα 5.3.3.1



Στο **Διάγραμμα 5.3.3.1** φαίνεται ότι η τάση της καμπύλης προσομοίωσης ακολουθεί την τάση της πειραματικής καμπύλης. Ωστόσο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εμφανίζουν σημαντική απόκλιση από τα αντίστοιχα πειραματικά σε όλο το εύρος της θερμοκρασιακής διακύμανσης.



Μελετώντας το διάγραμμα της θερμοκρασιακής μεταβολής παρατηρείται υποεκτίμηση των ελαχίστων τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας της τάξης των 3.5°C , ενώ εμφανής είναι και η υπερεκτίμηση της τάξης του 1 με 2°C των μεγίστων τιμών της θερμοκρασίας.

Είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του Type 260 δεν ήταν ικανοποιητικά. Ένας παράγοντας ο οποίος σίγουρα επηρεάζει τη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου είναι η μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας. Στο Type 260 εισήχθησαν πέντε τιμές θερμοκρασίας με κεντρική την τιμή εκείνη στην οποία γνωρίζουμε ότι εμφανίζεται η μεγαλύτερη τιμή C_p του ΥΑΦ. Κατ' αντιστοιχία με τις τιμές της θερμοκρασίας εισήχθησαν και πέντε τιμές θερμοχωρητικότητας. Η επιλογή των τιμών αυτών δεν ήταν τυχαία, καθώς επιδιώχθηκε να εισαχθεί στο Type ένα θερμοκρασιακό εύρος το οποίο να αντιπροσωπεύει το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης. Για το λόγο αυτό εισήχθησαν τιμές της θερμοκρασίας από 22 έως και 32°C . Ωστόσο με τη συγκεκριμένη μέθοδο που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της κατανομής της θερμοχωρητικότητας δεν είναι εφικτό να ληφθεί υπόψη από το μοντέλο η διακύμανση των τιμών της C_p στο διάστημα μεταξύ π.χ. των τιμών της θερμοκρασίας T_0-T_1 ή T_1-T_2 κ.ο.κ. γεγονός το οποίο επηρεάζει αρνητικά την διαμόρφωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Παρατηρώντας το **Διάγραμμα 5.3.3.1** διαπιστώνεται ότι ένας τρόπος για να αυξηθούν οι ελάχιστες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι η διαμόρφωση ενός “Schedule” θερμοκρασιών όπου η ελάχιστη θερμοκρασία εδάφους θα ξεπερνά τους 27°C γεγονός το οποίο δεν αντιπροσωπεύει ρεαλιστικά στοιχεία.

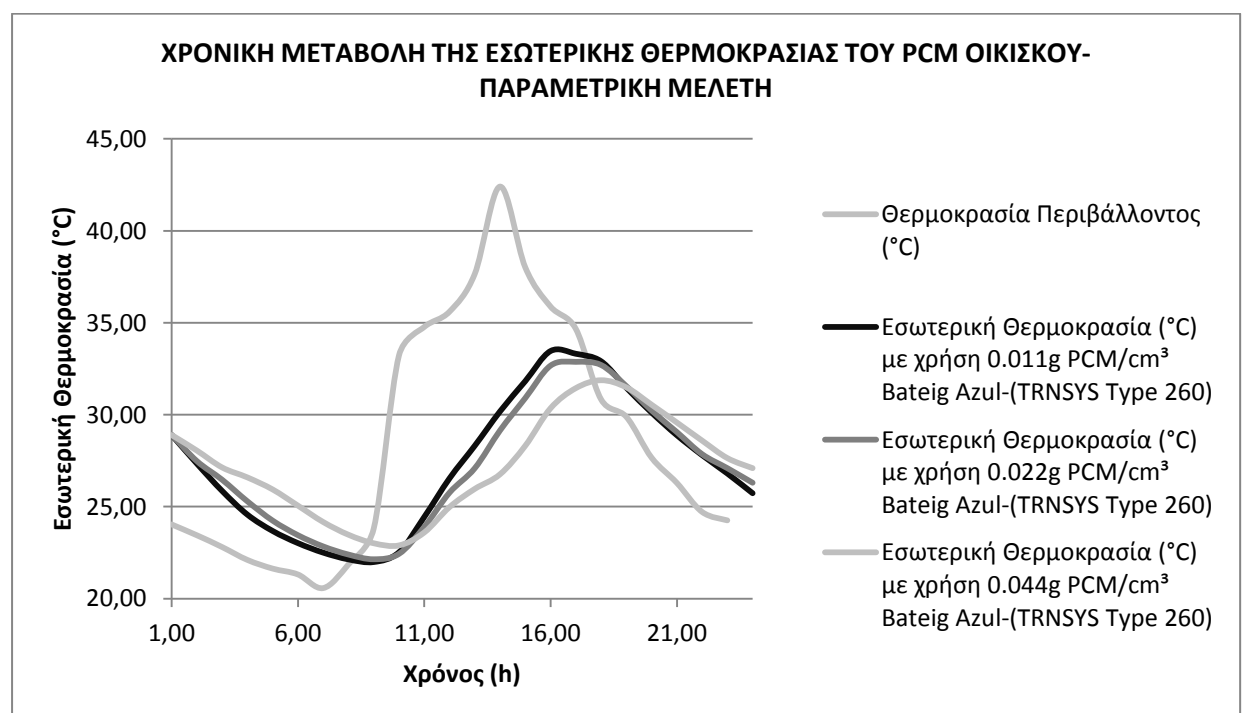
ο ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης εξετάστηκε η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου όταν η ποσότητα του ΥΑΦ που ενσωματώνεται στο Bateig Azul διπλασιάζεται και τετραπλασιάζεται. Η επιλογή διπλασιασμού και τετραπλασιασμού της ποσότητας του ΥΑΦ δεν ήταν τυχαία, αλλά βασίστηκε στην παραμετρική μελέτη που παρατίθεται στο [6] της βιβλιογραφίας. Στο σημείο αυτό

πρέπει να διευκρινιστεί ότι δεν έχει διασαφηνιστεί προς το παρόν ο αντίκτυπος της επιπλέον ποσότητας ΥΑΦ στις μηχανικές ιδιότητες του Bateig Azul.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το Type 260 αντιλαμβάνεται την αύξηση της ποσότητας του ΥΑΦ ως αύξηση του πάχους του PCM Layer. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αντιπαραβάλλονται στο **Διάγραμμα 5.3.3.2**.

Διάγραμμα 5.3.3.2



Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 5.3.3.2**, τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη είναι αρκετά ικανοποιητικά. Όπως ήταν αναμενόμενο, με την αύξηση της ποσότητας του ΥΑΦ τα μέγιστα της καμπύλης μειώθηκαν (→ αύξηση της ποσότητας του ΥΑΦ σημαίνει μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας και κατά συνέπεια μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατασκευής όταν το ΥΑΦ φορτίζεται) και τα ελάχιστα αυξήθηκαν (→ η αύξηση της χωρητικότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας συνεπάγεται και απελευθέρωση μεγαλύτερου ποσού θερμότητας στο χώρο κατά την αποφόρτιση του PCM και κατ' επέκταση αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατασκευής).



Επιπροσθέτως, στο διάγραμμα της θερμοκρασιακής μεταβολής με την αύξηση της ποσότητας του PCM παρατηρείται η εμφάνιση των ελάχιστων και μέγιστων τιμών της θερμοκρασίας με μία μικρή χρονική καθυστέρηση. Η παράταση του χρόνου εμφάνισης των μέγιστων κι ελάχιστων τιμών της θερμοκρασίας είναι ευεργετική για την κατασκευή, καθώς με αυτόν τον τρόπο τα μέγιστα φορτία της εγκατάστασης μετατοπίζονται σε χρονικές περιόδους μη αυξημένης ζήτησης.

ο ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση του Type 260 δεν αποτέλεσαν ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων, αν αναλογιστεί κανείς τη μεγάλη απόκλιση που εμφανίζουν τόσο οι μέγιστες όσο και οι ελάχιστες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια του 48ώρου.

Ισχυρό πλεονέκτημα του Type 260 αποτελεί το μικρό υπολογιστικό του κόστος, ενώ η βασική του αδυναμία είναι ο τρόπος με τον οποίο αντιλαμβάνεται τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας. Αν και είναι σημαντικό πλεονέκτημα για ένα υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο αξιολογεί την συμπεριφορά των ΥΑΦ, να συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς του τη διακύμανση της C_p , στην περίπτωση του μοντέλου 260 η διακύμανση της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ περιορίζεται σε πέντε μόνο τιμές. Όσο εύστοχη κι αν είναι η επιλογή των τιμών της θερμοκρασίας και των αντίστοιχων C_p , οι διακυμάνσεις της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας ενδέχεται να είναι πολύ έντονες εντός ενός θερμοκρασιακού εύρους, γεγονός το οποίο δεν είναι δυνατόν να γίνει αντιληπτό από το Type. Η δυνατότητα εισαγωγής περισσότερων τιμών θερμοκρασίας και θερμοχωρητικότητας στις παραμέτρους του Type 260 σίγουρα θα ήταν μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση η οποία θα εξασφάλιζε ομαλότερη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατασκευής.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι στη μοντελοποίηση με χρήση του Type 260 οι ιδιότητες των στρωμάτων της τοιχοποιίας τα οποία μεσολαβούν μεταξύ του PCM επιπέδου και της θερμικής ζώνης όπως: ο συντελεστής συναγωγιμότητας, ο

συντελεστής ηλιακής απορροφητικότητας, το πάχος τους κ.α. δεν ορίζονται ούτε στο TRNBuild ούτε στις παραμέτρους του Type. Το μοναδικό μέγεθος το οποίο υποδηλώνει την παρουσία τους είναι η ολική θερμική αγωγιμότητα που ορίζεται στις παραμέτρους του Type 260. Η δυνατότητα καθορισμού περισσότερων ιδιοτήτων των συγκεκριμένων υλικών θα ενέτασσε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πιο κοντά στην πραγματικότητα.

5.3.4 PCM with MATLAB code



Type155

5.3.4.a ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ.

Ο κώδικας της MATLAB αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με σκοπό να παράσχει αριθμητική λύση στο πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας μέσω δομικών υλικών οπλισμένων με ΥΑΦ. Στην προκειμένη περίπτωση η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών, η οποία παρέχεται από τον ίδιο τον κώδικα. Το Type 155, το οποίο λειτουργεί ως σύνδεση μεταξύ του TRNSYS και της MATLAB επιτρέπει στο αρχείο της MATLAB (m-file), που φέρει τον εν λόγω κώδικα, να ενσωματωθεί στην πλατφόρμα του TRNSYS. Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρέχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης της μεταβολής της θερμοχωρητικότητας C_p των δομικών υλικών που περιέχουν PCM η οποία σχετίζεται με τα φαινόμενα αλλαγής φάσης και αποθήκευσης ενέργειας. Με τη μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας λαμβάνονται υπόψη οι ρεαλιστικές τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM που εμπεριέχεται στο μελετούμενο δομικό στοιχείο συναρτήσει της θερμοκρασίας.[6]

5.3.4.b ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ.

Η αρχή λειτουργίας του κώδικα της MATLAB και η εισαγωγή του στο περιβάλλον του TRNSYS βασίζεται σε αυτή του Type 241. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι και στο συγκεκριμένο μοντέλο προϋποτίθεται ο διαχωρισμός της δομής του τοίχου στο



σημείο όπου το επίπεδο του ΥΑΦ πρέπει να εισαχθεί, και η εισαγωγή στη θέση του PCM επιπέδου μίας ζώνη άμεσης επαφής, η οποία ακολουθείται από το υπόλοιπο της δομής του τοίχου. Η ζώνη άμεσης επαφής οριοθετείται από έναν “External Wall” από τη μία της πλευρά και από έναν “Boundary Wall” από την άλλη, όπου η “boundary temperature” T_1 ορίζεται ως δεδομένο εισόδου στο Type 56.

Η κύρια θερμική ζώνη της κατασκευής συνορεύει με έναν μη συμπαγή “Boundary Wall”, όπου η boundary temperature T_2 ορίζεται επίσης ως δεδομένο εισόδου στο Type 56. Ο υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμότητας η οποία αποθηκεύεται εντός του επιπέδου του ΥΑΦ πραγματοποιείται από τον κώδικα της MATLAB ο οποίος εισήχθη στο λογισμικό. Το Type 155 παραλαμβάνει τις θερμοροές Q_1 και Q_2 από τις επιφάνειες οι οποίες συνορεύουν με το PCM επίπεδο ως δεδομένα εξόδου από το Type 56 κι εν συνεχεία ο κώδικας αποδίδει τις τιμές των θερμοκρασιών των αντίστοιχων επιφανειών T_1 και T_2 οι οποίες αποτελούν δεδομένα εισόδου στο Type 56.

Η καμπύλη μεταβολής της θερμοχωρητικότητας του εκάστοτε ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας ($\rightarrow C_p(T)$) εισάγεται στον κώδικα της MATLAB με τη μορφή πίνακα.[6]

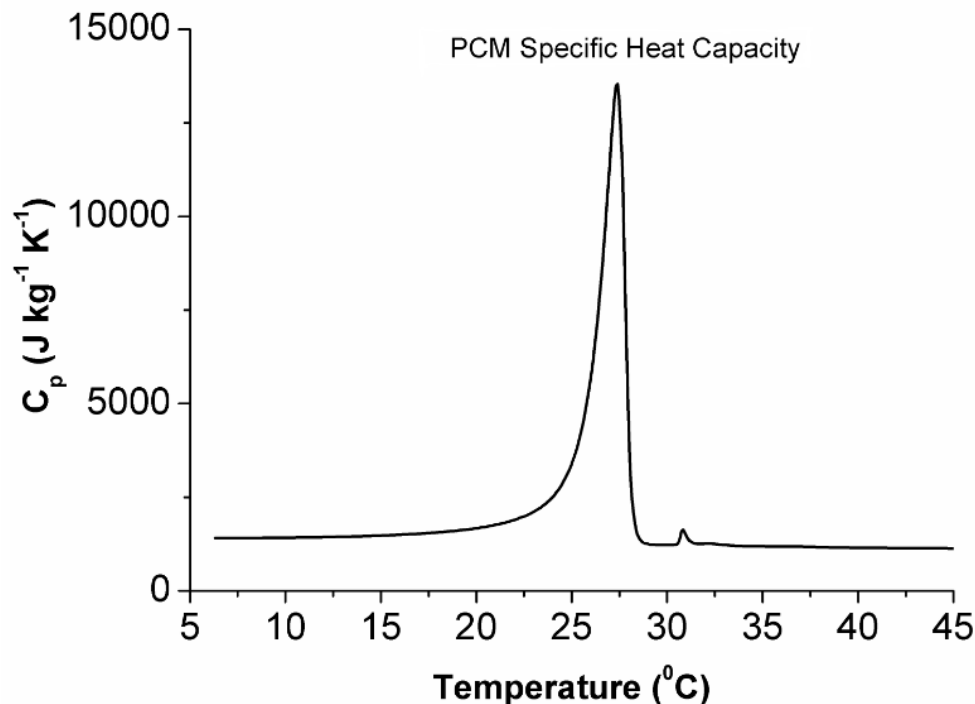
5.3.4.c ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΗΣ MATLAB- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.

- ο ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ TRNBuild ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΤΗΣ MATLAB

Η ομαλή διεξαγωγή της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου PCM οικίσκου με χρήση του κώδικα της MATLAB προϋποθέτει την εισαγωγή ορισμένων παραμέτρων τόσο στο περιβάλλον του TRNBuild όσο και στον κώδικα. Οι σημαντικότερες για την προσομοίωση παράμετροι παρουσιάζονται στους **Πίνακες 5.3.4.1** και **5.3.4.2**, ενώ έχουν παραληφθεί τα μεγέθη: διείσδυση του αέρα, συντελεστής ηλιακής απορροφητικότητας και συντελεστής συναγωγιμότητας, καθώς

οι τιμές τους θεωρήθηκαν ίδιες με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση με το Type 260.

Πριν την παράθεση των πινάκων των παραμέτρων αξίζει να σημειωθεί ότι το Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου διεξήγαγε μία σειρά μετρήσεων προκειμένου να προσδιοριστεί η μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του Micronal DS[®] 5000x συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης η διακύμανση της θερμοχωρητικότητας του PCM αποτυπώθηκε στο **Διάγραμμα 5.3.4.1** που ακολουθεί.



Διάγραμμα 5.3.4.1: Απεικόνιση της διακύμανσης της ειδικής θερμοχωρητικότητας του Micronal DS[®] 5000x της εταιρείας BASF συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η καμπύλη της θερμοχωρητικότητας αποτελεί προϊόν πειραματικής μελέτης η οποία διεξήχθη από το Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.[6]

Η καμπύλη μεταβολής της C_p του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας εισήχθη στον κώδικα της MATLAB με τη μορφή πίνακα.

Ακολουθεί παράθεση των **Πινάκων 5.3.4.1** και **5.3.4.2**.



Πίνακας 5.3.4.1: Συγκεντρωτικά ορισμένα από τα στοιχεία που εισήχθησαν στο TRNBuild για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

Στοιχεία του TRNBuild	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Boundary temperature of the ground	20	°C	Η τιμή της “Boundary temperature” του δαπέδου του μελετούμενου οικίσκου ορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως αυτή μετρήθηκε από το Ινστιτούτο της AIDICO για τις 2 και 3/9. Οι 20 °C αποτελούν μία μέση τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους τις συγκεκριμένες ημέρες.
Boundary Temperature T1	βλ. Σχόλιο	°C	Η τιμή T1 της θερμοκρασίας του “Boundary Wall” που ορίζεται στην “Direct Zone” υπολογίζεται από τον κώδικα της MATLAB και εισάγεται ως δεδομένο εισόδου στο Type 56.
Boundary Temperature T2	βλ. Σχόλιο	°C	Η τιμή T2 της θερμοκρασίας του “Boundary Wall” που ορίζεται στη “Thermal Zone” του TRNBuild υπολογίζεται από τον κώδικα της MATLAB και εισάγεται ως δεδομένο εισόδου στο Type 56.



Πίνακας 5.3.4.2: Οι παράμετροι του κώδικα της MATLAB.

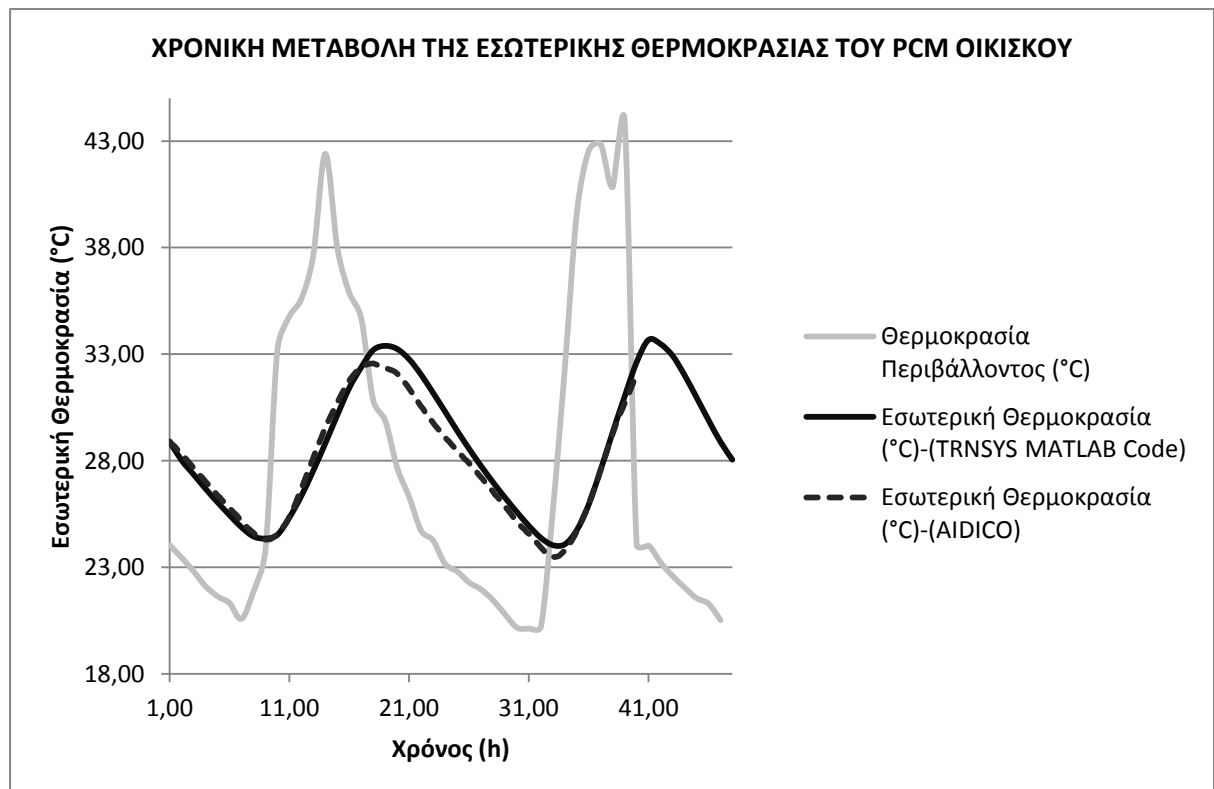
Παράμετροι του κώδικα της MATLAB	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Thickness of PCM	0.004125	m	Αναφέρεται στο πάχος του PCM επιπέδου.
Area of the PCM layer	βλ. Σχόλιο	m ²	Η επιφάνεια του PCM επιπέδου ισούται με την επιφάνεια του αντίστοιχου τοίχου της κατασκευής.

ο ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Στην περίπτωση της μοντελοποίησης του PCM Οικίσκου με χρήση του κώδικα MATLAB ορίστηκαν στο TRNSYS οι τιμές 28.9°C και 50% ως αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας αντίστοιχα, ενώ ως βήμα της προσομοίωσης επιλέχθηκαν τα 10min.

Στο **Διάγραμμα 5.3.4.2** αποτυπώνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μελετούμενου PCM οικίσκου κατά τη 2^η και 3^η ημέρα του Σεπτεμβρίου. Η μία καμπύλη απεικονίζει τη διακύμανση των πειραματικών τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας όπως αυτές μετρήθηκαν από το Ινστιτούτο της AIDICO ενώ η άλλη απεικονίζει τη διακύμανση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS 16 με χρήση του κώδικα MATLAB.

Διάγραμμα 5.3.4.2



Από το **Διάγραμμα 5.3.4.2** διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου, όπως αυτά προέκυψαν από το



TRNSYS με χρήση του κώδικα MATLAB, είναι πολύ ικανοποιητικά. Η τάση της καμπύλης προσομοίωσης ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια την τάση της πειραματικής καμπύλης, ενώ οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα δεν είναι μεγάλες.

Είναι προφανές ότι το TRNSYS με χρήση του κώδικα MATLAB έχει αποδώσει ακριβώς τη θερμοκρασιακή διακύμανση στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου κατά το χρονικό διάστημα από τη 1:00 έως τις 18:00 περίπου στις 2/9 και από τις 10:00 έως τις 16:00 στις 3/9. Παρατηρείται ωστόσο μία υπερεκτίμηση των μέγιστων τιμών της θερμοκρασίας της τάξης του 1°C τόσο στις 2 όσο και στις 3/9, ενώ εμφανής είναι και η υπερεκτίμηση της τάξης του 0.5°C της ελάχιστης θερμοκρασίας του δεύτερου 24ώρου. Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα που παρατηρούνται οφείλονται κυρίως στις παραδοχές που έγιναν σχετικά με τη μοντελοποίηση του PCM (\rightarrow οι ιδιότητες του ΥΑΦ, το επιπλέον επίπεδο τοιχοποιίας που προσαρτήθηκε στο επίπεδο του Bateig Azul κ.α.), στις παραδοχές που έγιναν σχετικά με τις ιδιότητες των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (\rightarrow η εκτίμηση των συντελεστών a_s και h , το πάχος των στρωμάτων της τοιχοποιίας κ.λπ.) και στην υπόθεση ότι η θερμοκρασία του εδάφους διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του 48ώρου.

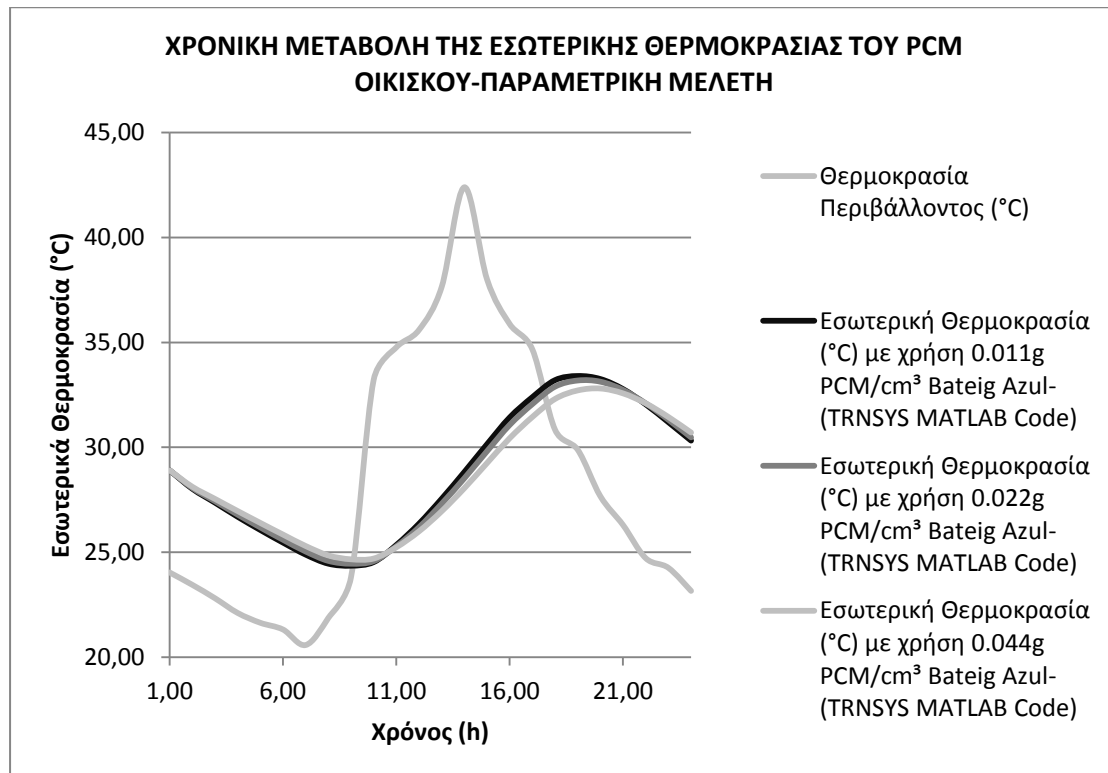
Η υπόθεση ότι η θερμοκρασία του εδάφους παραμένει σταθερή στους 20°C έγινε στα πλαίσια της μοντελοποίησης. Είναι σαφές ότι σε φυσικό επίπεδο η θερμοκρασία αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Το γεγονός αυτό καθιστά ορθότερη την εισαγωγή στο TRNBuild ενός “Schedule” θερμοκρασιών, όπου θα αποτυπωνόταν η διακύμανση της θερμοκρασίας εδάφους εντός ενός 24ώρου. Ακολουθώντας αυτή τη λογική πραγματοποιήθηκαν απόπειρες για τη δημιουργία ενός κατάλληλου “Schedule” θερμοκρασιών, στο οποίο η ελάχιστη θερμοκρασία αγγίζει τους 16°C ενώ η μέγιστη δεν ξεπερνά τους 26°C . Με την εισαγωγή ενός τέτοιου “Schedule” στην επιφάνεια του TRNBuild, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν ήταν ικανοποιητικά. Παρ' όλο που με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε μία καλύτερη προσέγγιση των ελαχίστων τιμών του δεύτερου 24ώρου, η υπερεκτίμηση των μέγιστων τιμών ήταν αναπόφευκτη. Κατά συνέπεια καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης διατηρήθηκε σταθερή η τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους.

ο ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης εξετάστηκε η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου όταν ενσωματώνεται μεγαλύτερη ποσότητα ΥΑΦ στους πόρους της φυσικής πέτρας. Για την ακρίβεια εξετάστηκαν οι περιπτώσεις διπλασιασμού και τετραπλασιασμού της ποσότητας του Micronal DS[®] 5000x. Η παραμετρική μελέτη που διεξάγεται στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας βασίστηκε στην παραμετρική μελέτη που παρατίθεται στο [6] της βιβλιογραφίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι δεν έχει διασαφηνιστεί προς το παρόν ο αντίκτυπος της επιπλέον ποσότητας ΥΑΦ στις μηχανικές ιδιότητες του Bateig Azul.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο κώδικας MATLAB αντιλαμβάνεται την αύξηση της ποσότητας του ΥΑΦ ως αύξηση του πάχους του PCM Layer. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αντιπαραβάλλονται στο **Διάγραμμα 5.3.4.3**.

Διάγραμμα 5.3.4.3



Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη ήταν αναμενόμενα. Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 5.3.4.3** η αύξηση της



ποσότητας του ΥΑΦ επέφερε ομαλότερη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του οικίσκου. Επιπλέον αυξήθηκε η τιμή της ελάχιστης και μειώθηκε η τιμή της μέγιστης εσωτερικής θερμοκρασίας. Εστιάζοντας στην περίπτωση της ενσωμάτωσης 0.044g PCM/cm³ Bateig Azul η ελάχιστη τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας αυξήθηκε κατά 0.5°C, ενώ η μέγιστη τιμή της μειώθηκε κατά 1°C.

Αναμενόμενο είναι επίσης το γεγονός ότι με την αύξηση της ποσότητας του ΥΑΦ η μέγιστη κι ελάχιστη θερμοκρασία εμφανίζονται στο εσωτερικό του οικίσκου με μία χρονική καθυστέρηση. Στην περίπτωση του τετραπλασιασμού της ποσότητας του ΥΑΦ η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας εμφανίζεται περίπου 1 ώρα αργότερα απ' ότι στην περίπτωση της αρχικής ποσότητας. Η παράταση του χρόνου εμφάνισης των μέγιστων κι ελάχιστων τιμών της θερμοκρασίας είναι ευεργετική για το κτίριο, καθώς με αυτόν τον τρόπο τα μέγιστα φορτία της εγκατάστασης μετατοπίζονται σε χρονικές περιόδους μη αυξημένης ζήτησης.

ο ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση του κώδικα της MATLAB προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό επίπεδο τις πειραματικές τιμές, ενώ και τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης ήταν τα αναμενόμενα. Το γεγονός αυτό οφείλεται ως επί το πλείστον στην ικανότητα του κώδικα να λαμβάνει υπόψη τις ρεαλιστικές τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ που εμπεριέχεται στο δομικό στοιχείο συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να παρατηρηθεί ότι ικανοποιητικά αποτελέσματα προσομοίωσης προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση του υπολογιστικού κώδικα MATLAB όταν στο TRNBuild εισήχθη σταθερή τιμή για τη θερμοκρασία του εδάφους. Το γεγονός αυτό δεν καθιστά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ρεαλιστικά. Ένα ακόμα μειονέκτημα του κώδικα MATLAB είναι το μεγάλο υπολογιστικό του κόστος.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Maha Ahmad, Andre Bontemps, Hebert Sallee, Daniel Quenard, Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material, *Energy and Buildings*, November 2005, Pages 1-9
- [2] M. Ebrahim Poulad, Alan S. Fung, David Naylor, Effects of Convective Heat Transfer Coefficient on the Ability of PCM to Reduce Building Energy Demand, *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, 14-16 November, Pages 270-277
- [3] Juha Jokisalo, Piia Lamberg, Kai Sirén, Suitability of Building Construction Materials in Short-Term Energy Storage - Office Room Simulations, *Thermal Simulation of Phase Change Materials in Concrete Products*, Helsinki University of Technology, HVAC-laboratory, Report B64, 1999
- [4] Ing. I.R. Otte, MSc thesis: Integration of long and short term thermal Storage, A research into short term thermal storage solutions for peak demands in office buildings with ATES systems, *Sustainable Energy Technology - Eindhoven University of Technology*, August 2010
- [5] The micronal PCM product portfolio, <http://www.micronal.de>, access date 1 Ιουνίου 2012
- [6] M.D. Romero-Sánchez, C. Guillem-López, A.M. López-Buendía, M. Stamatiadou, I. Mandilaras, D. Katsourinis, M. Founti, Treatment of natural stones with phase change materials: Experiments and computational approaches, *Applied Thermal Engineering*, Available online 19 May 2012, ISSN 1359-4311, 10.1016/j.applthermaleng.2012.05.017.
- [7] Chadi Younes, Caesar Abi Shdid and Girma Bitsuamlak, Air infiltration through building envelopes: A review, *Journal of Building Physics*, 2012, Pages 267-302



- [8] Hazim B. Awbi, Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection, *Energy and Buildings*, Volume 28, Issue 2, October 1998, Pages 219-227
- [9] V.C. Sharma, A. Sharma, Solar properties of some building elements, *Energy*, Volume 14, Issue 12, December 1989, Pages 805-810
- [10] M.D. Romero-Sánchez, C. Guillem-López, A.M. López-Buendía, M. Stamatiadou, I. Mandilaras, D. Katsourinis, M. Founti, Treatment of natural stones with phase change materials: Experiments and computational approaches, *Applied Thermal Engineering*, Available online 19 May 2012, ISSN 1359-4311, 10.1016/j.applthermaleng.2012.05.017.
- [11] Luis Braganca, Sergio Russo Ermolli and Heli Koukkari; “Phase Changing Materials in Building Elements”. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2(1), March 2011.
- [12] <http://www.scribd.com/doc/40617514/11>, access date 2 Μαΐου 2012
- [13] H. Schranzhofer, P. Puschnig, A. Heinz, and W. Streicher, Validation of a TRNSYS Simulation Model for PCM Energy Storages and PCM Wall Construction Elements, 2007
- [14] A. Castell, M. Medrano, C. Castellón, Luisa F. Cabeza, Analysis of the Simulation Models for the Use of PCM in Buildings
- [15] Frédéric Kuznik, Joseph Virgone, Kevyn Johannes, Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM, *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 7, July 2010, Pages 1004-1009



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ PCM ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΟΥ TRNSYS.

Στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5** της Διπλωματικής Εργασίας περιγράφηκε λεπτομερώς η δομή και λειτουργία των υπολογιστικών μοντέλων του TRNSYS, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επίδρασης των PCM στη θερμική συμπεριφορά των δομικών υλικών. Η λειτουργία των Types 204 και 260 καθώς και του υπολογιστικού κώδικα MATLAB αξιολογήθηκε αντιπαραβάλλοντας τις πειραματικές τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας του PCM Οικίσκου της Alicante, όπως αυτές μετρήθηκαν από το Ινστιτούτο της AIDICO, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση των υπολογιστικών μοντέλων.[1]

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των υπολογιστικών μοντέλων μεταξύ τους. Η σύγκριση επιτυγχάνεται αντιπαραβάλλοντας τις καμπύλες προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου όπως αυτές προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση κάθε φορά διαφορετικού υπολογιστικού μοντέλου. Προκειμένου τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων να είναι πλήρως συγκρίσιμα, επιδιώχθηκε η εισαγωγή των ίδιων παραμέτρων τόσο στα μοντέλα όσο και στο περιβάλλον του TRNBuild σε κάθε προσομοίωση. Οι παράμετροι του TRNBuild και των μοντέλων οι οποίες διατήρησαν την ίδια τιμή σε όλες τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή των συγκεκριμένων τιμών των παραμέτρων έγινε με βάση τη βιβλιογραφία λαμβάνοντας υπόψη την κατασκευή του PCM Οικίσκου, τις θερμικές ιδιότητες των δομικών υλικών και το χρώμα των στρωμάτων της τοιχοποιίας.



Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικά ορισμένα από τα στοιχεία που εισήχθησαν στο TRNBuild για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

Στοιχεία του TRNBuild	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Infiltration	0.1	1/h	Οι πρότυποι οικίσκοι της Alicante είναι απλές κατασκευές. Η μοναδική δίοδος μέσω της οποίας ο αέρας περιβάλλοντος μπορεί να εισχωρήσει στο εσωτερικό τους είναι η πόρτα στην ανατολική τους πλευρά η οποία ανοίγει σπανίως. Επομένως στην επιλογή “Infiltration” του TRNBuild ορίστηκε ενδεικτικά μία πολύ μικρή τιμή, καθώς η διείσδυση του αέρα είναι περιορισμένη.[7]
Solar absorptance	βλ. Σχόλιο	-	Οι εξωτερικές επιφάνειες του οικίσκου είναι στην πλειοψηφία τους σκουρόχρωμες (→ το γκρίζο στρώμα του Bateig Azul στην τοιχοποιία και την οροφή και η μαύρη επένδυση πολυβινυλοχλωριδίου στην πόρτα). Επιπλέον η κατασκευή του οικίσκου δεν επιτρέπει την είσοδο του ηλιακού φωτός στο εσωτερικό του (→ δεν υπάρχουν υαλοπίνακες και η πόρτα παραμένει συνήθως κλειστή), ενώ απουσιάζει και οποιοδήποτε σύστημα τεχνητού φωτισμού. Επομένως με μία ορθή εκτίμηση η τιμή του συντελεστή της solar absorptance (a_s) θεωρήθηκε 0.6-0.8 στις εξωτερικές επιφάνειες της κατασκευής, ενώ στις επιφάνειες στο εσωτερικό του οικίσκου η τιμή του a_s ορίστηκε 1. [9]
Convective heat transfer coefficient	βλ. Σχόλιο	$\text{kJ/hm}^2\text{K}$	Ο συντελεστής συναγωγιμότητας έχει οριστεί $11 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$ στη “front” επιφάνεια του concrete (→ μεταφορά θερμότητας διά συναγωγής μεταξύ του αέρα στο εσωτερικό των οικίσκων και της εσωτερικής επιφάνειας του στρώματος σκυροδέματος) και $78 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$ στη “back” επιφάνεια του Bateig Azul (→ μεταφορά θερμότητας διά συναγωγής μεταξύ του αέρα περιβάλλοντος και της εξωτερικής επιφάνειας του στρώματος φυσικής πέτρας).[8]



Πίνακας 6.2: Οι παράμετροι των υπολογιστικών εργαλείων.

Παράμετροι του υπολογιστικού μοντέλου	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	Σχόλιο
Density of PCM	800	kg/m ³	Η πυκνότητα του PCM επιπέδου θεωρήθηκε ίση με 800 kg/m ³ . [6]
Conductivity of PCM	0.2	W/mK	Η θερμική αγωγιμότητα του PCM θεωρήθηκε ίση με 0.2 W/mK [6]
Thickness of PCM	0.004125	m	Αναφέρεται στο πάχος του PCM επιπέδου.



Στον **Πίνακα 6.1** δεν έχει οριστεί κάποια τιμή για την θερμοκρασία του εδάφους (“Boundary Temperature”). Σύμφωνα με τα όσο ειπώθηκαν στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**, η εισαγωγή στο TRNBuild μίας σταθερής τιμής για τη θερμοκρασία του εδάφους θα οδηγούσε την προσομοίωση σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα, καθώς από φυσικής σκοπιάς και λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασιακή διακύμανση του αέρα η θερμοκρασία του εδάφους δεν διατηρείται σταθερή καθ’ όλο το 24ωρο. Στην περίπτωση της προσομοίωσης μέσω του TRNSYS, ιδανικό σενάριο αποτελεί η εισαγωγή ενός “Schedule” θερμοκρασιών στην επιλογή “Boundary Temperature” του TRNBuild. Στο “Schedule” είναι δυνατή η αποτύπωση της διακύμανσης της θερμοκρασίας του εδάφους εντός 24ώρου και κατ’ επέκταση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πιο ρεαλιστικά.

Στα πλαίσια της συγκριτικής αξιολόγησης των PCM υπολογιστικών εργαλείων του TRNSYS διεξήχθησαν συνολικά 12 προσομοιώσεις της θερμικής συμπεριφοράς του PCM οικίσκου της Alicante. Κάθε υπολογιστικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε 4 φορές. Στις 2 από τις 4 προσομοιώσεις που διεξήχθησαν με χρήση του κάθε μοντέλου εισήχθη στο περιβάλλον του TRNBuild ένα “Schedule” για τον καθορισμό της θερμοκρασιακής διακύμανσης του εδάφους. Λόγω έλλειψης επαρκών στοιχείων σχετικά με τη θερμοκρασία του εδάφους της Alicante τη 2^η και 3^η ημέρα του Σεπτεμβρίου τα “Schedules” που εισήχθησαν στο TRNBuild στα πλαίσια της προσομοίωσης διαμορφώθηκαν με γνώμονα τη θερμοκρασιακή διακύμανση του αέρα. Λαμβάνοντας υπόψη τις μέγιστες κι ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος που παρατηρούνται στην Alicante τις πρώτες ημέρες του Σεπτεμβρίου, εκτιμήθηκε ότι η θερμοκρασία του εδάφους κυμαίνεται από 16 °C έως 23°C κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Τα εν λόγω “Schedules” θερμοκρασιών παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.3**.

Στις υπόλοιπες 2 προσομοιώσεις, που διεξήχθησαν με χρήση του κάθε μοντέλου, στην επιλογή “Boundary Temperature” του TRNBuild ορίστηκε σταθερή τιμή θερμοκρασίας. Οι δύο αυτές τιμές, οι οποίες παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.3**, εισήχθησαν στην επιφάνεια του TRNBuild προκειμένου να μελετηθεί η διακύμανση



των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπως αυτή προκύπτει από το TRNSYS θεωρώντας τη θερμοκρασία του εδάφους σταθερή.

Πίνακας 6.3: Τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους.

Boundary Temperature of the Ground	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
SCHEDULE 1	00:00h - 8:00h→ 16 8:00h - 12:00h→ 20 12:00h - 15:00h→ 23 15:00h - 21:00h→ 19 21:00h - 24:00h→ 18	°C
SCHEDULE 2	00:00h - 5:00h→ 16 5:00h - 9:00h→ 19 9:00h - 12:00h→ 22 12:00h - 16:00h→ 23 16:00h - 19:00h→ 22 19:00h - 21:00h→ 19 21:00h - 24:00h→ 16	°C
Constant Value 1	20	°C
Constant Value 2	27	°C

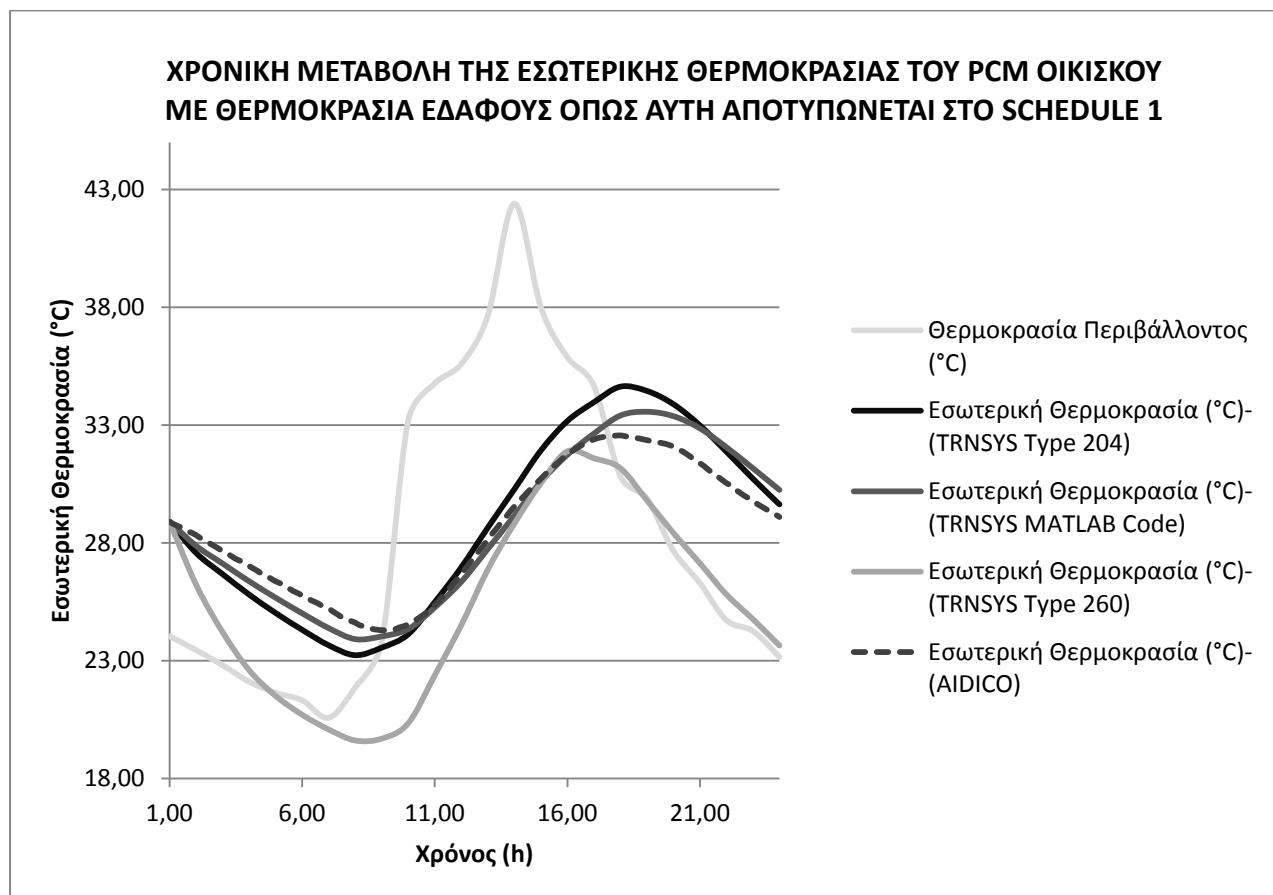
Ακολουθεί συγκριτική αξιολόγηση των PCM υπολογιστικών εργαλείων του TRNSYS.

6.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TRNBuild ΤΟΥ SCHEDULE 1- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PCM ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.

Στο **Διάγραμμα 6.1.1** αποτυπώνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου στις 2/9. Η μία καμπύλη θερμοκρασιακής διακύμανσης δείχνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήγαγε το Ινστιτούτο της AIDICO για τη συγκεκριμένη ημέρα, ενώ οι υπόλοιπες τρεις καμπύλες τα αποτελέσματα της

προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS 16 με χρήση των υπολογιστικών μοντέλων.

Διάγραμμα 6.1.1



Μελετώντας το **Διάγραμμα 6.1.1** διαπιστώνεται οι τάσεις και των τριών καμπυλών προσομοίωσης ακολουθούν την τάση της πειραματικής καμπύλης. Η ομοιόμορφη σχεδόν κατανομή της θερμοκρασίας του εδάφους γύρω από μία μέγιστη τιμή προκαλεί και την καλύτερη κατανομή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση του Type 204 και του κώδικα MATLAB αποτελούν καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων απ' ό,τι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του Type 260.

Σύμφωνα με το διάγραμμα της θερμοκρασιακής μεταβολής τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του Type 204 και του υπολογιστικού κώδικα δείχνουν μία υπερεκτίμηση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας η οποία εμφανίζεται στις 17:30.



Η απόκλιση που εμφανίζει η μέγιστη τιμή της καμπύλης προσομοίωσης όπως αυτή προκύπτει με χρήση του Type 204 από την αντίστοιχη πειραματική τιμή είναι της τάξης των 2°C, ενώ η απόκλιση της μέγιστης τιμής της καμπύλης προσομοίωσης όπως αυτή προκύπτει με χρήση του κώδικα MATLAB από την πειραματική τιμή είναι της τάξης του 1°C. Επιπλέον παρατηρείται και υποεκτίμηση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του Type 204. Η απόκλιση αυτή είναι της τάξης του 0.5°C. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν με χρήση του Type 204 και του κώδικα MATLAB εμφανίζουν απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα και κατά το πρώτο δωρο.

Όσον αφορά στην καμπύλη της προσομοίωσης όπως αυτή προέκυψε από το TRNSYS με χρήση του Type 260, είναι προφανές από το διάγραμμα ακολουθεί την τάση της πειραματικής καμπύλης. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του συγκεκριμένου υπολογιστικού μοντέλου δεν αποτελούν ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων. Το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα αν αναλογιστεί κανείς ότι παρατηρείται υποεκτίμηση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας της τάξης των 4.5°C, ενώ παρατηρείται και μία μικρή υποεκτίμηση της μέγιστης τιμής.

Με την εισαγωγή στο TRNBuild του “Schedule” θερμοκρασιών τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις είναι ρεαλιστικά. Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα στην περίπτωση του Type 204 οφείλονται κυρίως στην αδυναμία του Type να λάβει υπόψη στους υπολογισμούς του τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ, ενώ στην περίπτωση του κώδικα της MATLAB οι αποκλίσεις οφείλονται κυρίως στις παραδοχές που έγιναν σχετικά με τη μοντελοποίηση του ΥΑΦ και στις παραδοχές που έγιναν σχετικά με τις ιδιότητες των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Στην περίπτωση του Type 260 βασική αιτία της απόκλισης που εμφανίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα είναι η κατανομή της C_p του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας η οποία περιορίζεται σε πέντε μόνο τιμές.

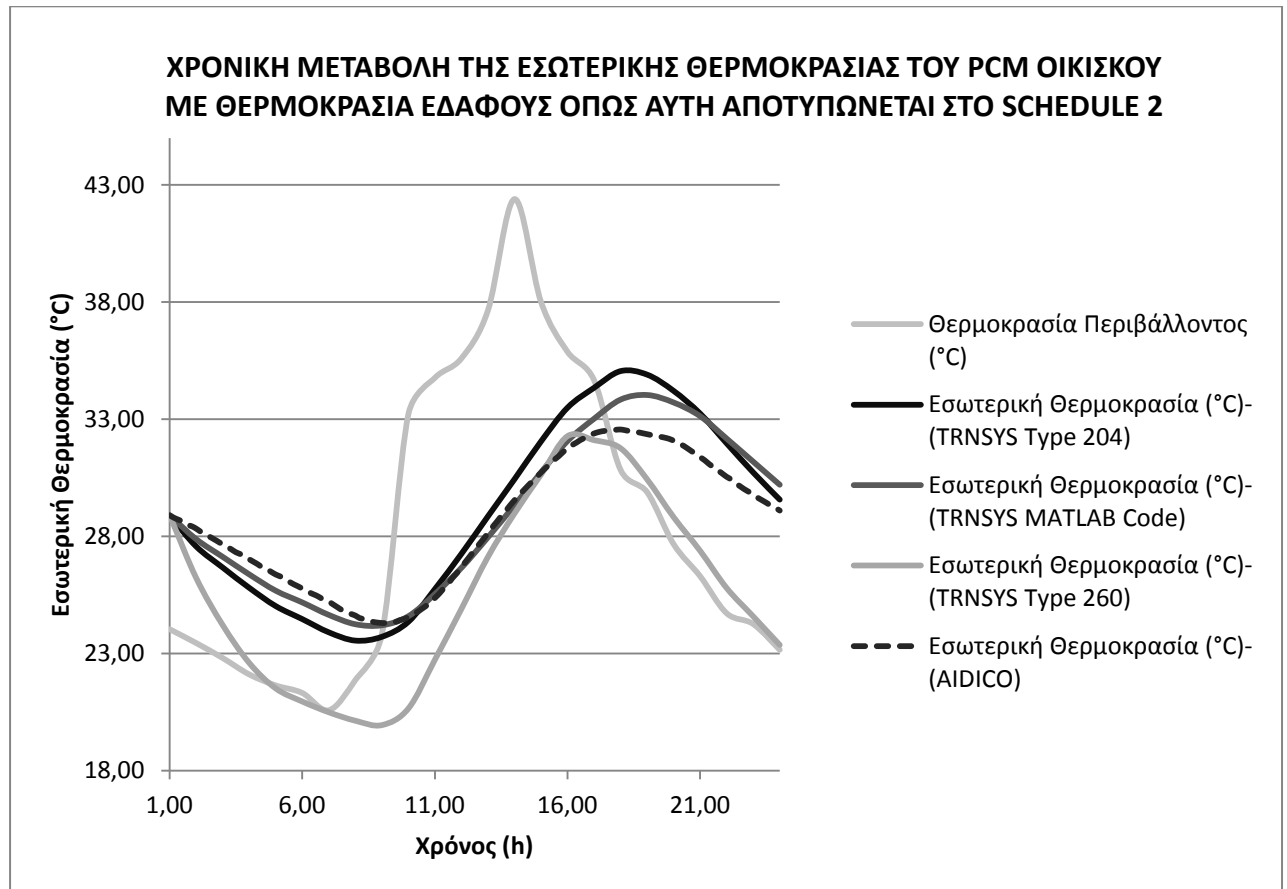


Και τα τρία υπολογιστικά εργαλεία που αξιολογήθηκαν επιλύουν την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Στην περίπτωση του Type 204 στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας λαμβάνεται υπόψη η μετάδοση θερμότητας διά αγωγής (conduction), συναγωγής (convection) και ακτινοβολίας (radiation), ενώ στην περίπτωση του Type 260 και του κώδικα της MATLAB στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας λαμβάνεται υπόψη μόνο η μετάδοση θερμότητας διά αγωγής και συναγωγής. Η ικανότητα του Type 204 να συνυπολογίζει την θερμότητα που μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας υπό άλλες συνθήκες θα δικαιολογούσε το γεγονός ότι το μέγιστο της καμπύλης του βρίσκεται υψηλότερα από τα μέγιστα των άλλων δύο καμπυλών προσομοίωσης. Ωστόσο η απλή κατασκευή του PCM Οικίσκου (→ η απουσία υαλοπινάκων) δεν επιτρέπει σε μεγάλο βαθμό τη μετάδοση θερμότητας διά ακτινοβολίας. Με αυτόν τρόπο μεταδίδεται ελάχιστη ποσότητα θερμότητας μόνο μεταξύ των σκουρόχρωμων επιφανειών στο εσωτερικό του οικίσκου. Το ελάχιστο αυτό ποσό θερμότητας δεν επηρεάζει αισθητά τη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατασκευής.

6.1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TRNBuild ΤΟΥ SCHEDULE 2- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PCM ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με “Boundary Temperature of the ground” το “Schedule 1”, επιχειρήθηκε η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του πιλοτικού οικίσκου με την εισαγωγή ενός “Schedule” θερμοκρασιών με διαφορετική κατανομή τιμών γύρω από μία μέγιστη τιμή θερμοκρασίας για μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου με την εισαγωγή του “Schedule 2” απεικονίζονται στο **Διάγραμμα 6.1.2** από τρεις καμπύλες όπως αυτές προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση διαφορετικού υπολογιστικού εργαλείου κάθε φορά.

Διάγραμμα 6.1.2



Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS φαίνεται να ακολουθούν τη διακύμανση των πειραματικών δεδομένων σε ικανοποιητικό βαθμό. Παρατηρώντας το διάγραμμα της θερμοκρασιακής μεταβολής διακρίνεται υποεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των Types 204 και 260, ενώ υπερεκτιμημένη εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν με χρήση του Type 204 και του κώδικα MATLAB. Στην περίπτωση του Type 204 η ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας της καμπύλης προσομοίωσης είναι μικρότερη της ελάχιστης πειραματικής τιμής της θερμοκρασίας κατά 1°C ενώ στην περίπτωση του Type 260 η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά αγγίζει σχεδόν τους 5°C. Η ελάχιστη τιμή της καμπύλης προσομοίωσης όπως αυτή προέκυψε από το TRNSYS με χρήση του κώδικα της MATLAB ταυτίζεται σχεδόν με την ελάχιστη τιμή της

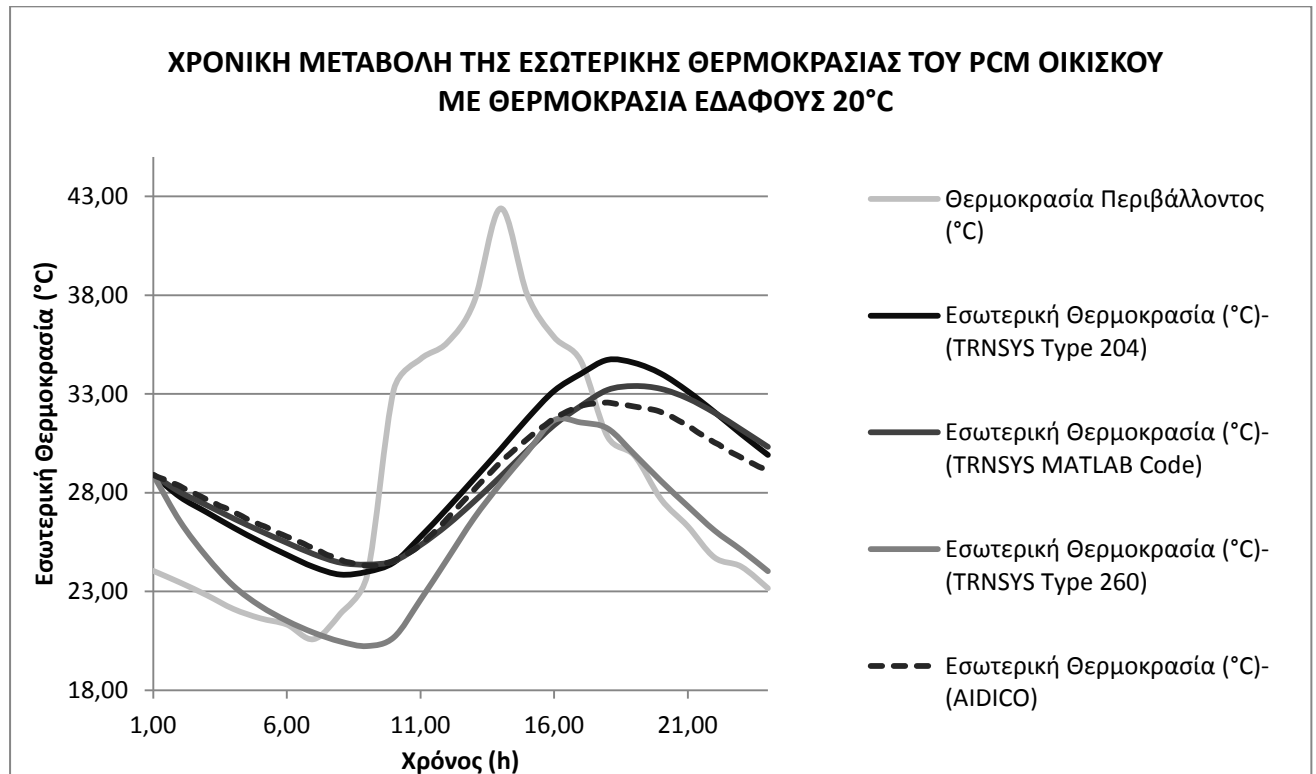


καμπύλης των πειραματικών δεδομένων. Η ίδια ταύτιση όμως δεν παρατηρείται και μεταξύ των μέγιστων τιμών των δύο καμπυλών. Αντιθέτως, η μέγιστη τιμή της καμπύλης προσομοίωσης η οποία προέκυψε με χρήση του κώδικα MATLAB είναι μεγαλύτερη κατά 1.5°C από τη μέγιστη τιμή της πειραματικής καμπύλης. Σημαντική απόκλιση της τάξης των 3°C εμφανίζει και η μέγιστη θερμοκρασία που εμφανίζεται στο εσωτερικό του οικίσκου όπως αυτή υπολογίστηκε από το TRNSYS με χρήση του Type 204 από τη μέγιστη πειραματική τιμή της θερμοκρασίας. Οι αποκλίσεις αυτές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά αποτελέσματα οφείλονται στο σύνολό τους στους παράγοντες που αναφέρθηκαν και στην **Παράγραφο 6.1.1.**

6.1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TRNBuild ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ 20°C ΩΣ ΣΤΑΘΕΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PCM ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.

Στο **Διάγραμμα 6.1.3** απεικονίζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου στις 2/9 από τέσσερις καμπύλες: μία καμπύλη πειραματικών τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας όπως αυτή προέκυψε από μετρήσεις του Ινστιτούτου της AIDICO για τη συγκεκριμένη ημέρα και τρεις καμπύλες προσομοίωσης όπως αυτές προέκυψαν από το TRNSYS 16 με χρήση των υπολογιστικών μοντέλων.

Διάγραμμα 6.1.3



Όπως αναφέρεται στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**, προκειμένου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προκύπτουν από το TRNSYS να είναι ικανοποιητικά, σε ορισμένες περιπτώσεις εισήχθη στο TRNBuild σταθερή τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός αυτό, στα πλαίσια της συγκριτικής αξιολόγησης των PCM Types εισήχθη στο TRNBuild η σταθερή τιμή 20°C για την θερμοκρασία του εδάφους. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση των υπολογιστικών εργαλείων αποτυπώνονται στο **Διάγραμμα 6.1.3**.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με σταθερή θερμοκρασία εδάφους 20°C δεν είναι ρεαλιστικά.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS φαίνεται να ακολουθούν τη διακύμανση των πειραματικών δεδομένων. Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 6.1.3** τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του Type 204 και του υπολογιστικού κώδικα MATLAB δείχνουν μία υπερεκτίμηση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας. Η απόκλιση που εμφανίζει η μέγιστη τιμή της καμπύλης



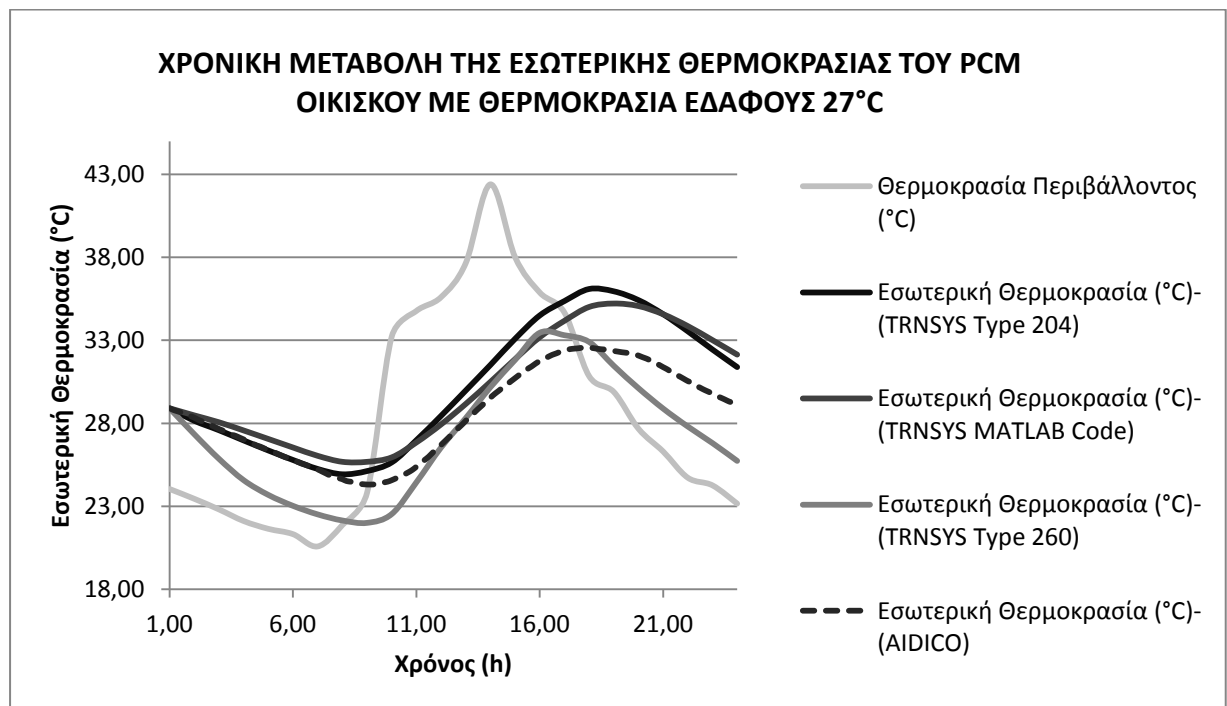
προσομοίωσης όπως αυτή προκύπτει με χρήση του Type 204 από την αντίστοιχη πειραματική τιμή είναι της τάξης των 3.2°C , ενώ η απόκλιση της μέγιστης τιμής της καμπύλης προσομοίωσης όπως αυτή προκύπτει με χρήση του κώδικα MATLAB από την πειραματική τιμή είναι της τάξης του 0.5°C . Επιπλέον παρατηρείται και υποεκτίμηση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του PCM Οικίσκου από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του Type 204. Η απόκλιση αυτή είναι της τάξης του 1°C . Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5** η διαδικασία της προσομοίωσης με το Type 204 και τον κώδικα MATLAB πραγματοποιήθηκε με σταθερή θερμοκρασία εδάφους στους 20°C και τα αποτελέσματα προσέγγιζαν σε ικανοποιητικά επίπεδα τα πειραματικά. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις που παρατηρούνται στο **Διάγραμμα 6.1.3** ιδίως στην περίπτωση του Type 204 οφείλονται κυρίως στις παραδοχές που έγιναν σχετικά με τη μοντελοποίηση του ΥΑΦ και στις παραδοχές που έγιναν σχετικά με τις ιδιότητες των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά κυρίως στην αδυναμία του Type να λάβει υπόψη στους υπολογισμούς του τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ.

Όσον αφορά στην καμπύλη της προσομοίωσης όπως αυτή προέκυψε από το TRNSYS με χρήση του Type 260, είναι προφανές από το διάγραμμα ακολουθεί την τάση της πειραματικής καμπύλης. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του συγκεκριμένου υπολογιστικού μοντέλου δεν αποτελούν ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων. Το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα αν αναλογιστεί κανείς ότι παρατηρείται υποεκτίμηση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας της τάξης των 4.5°C , ενώ παρατηρείται και μία μικρή υποεκτίμηση της μέγιστης τιμής. Οι αποκλίσεις αυτές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση του Type 260 οφείλονται ως επί το πλείστον στην κατανομή της C_p του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας η οποία περιορίζεται σε πέντε μόνο τιμές και στην θερμοκρασία του εδάφους η οποία διατηρήθηκε σταθερή στους 20°C .

6.1.4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ TRNBuild ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ 27°C ΩΣ ΣΤΑΘΕΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PCM ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με σταθερή θερμοκρασία εδάφους 20°C, επιχειρήθηκε η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του πιλοτικού οικίσκου με την εισαγωγή μίας υψηλότερης θερμοκρασίας εδάφους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του PCM Οικίσκου με την εισαγωγή σταθερής τιμής θερμοκρασίας εδάφους στους 27°C απεικονίζονται στο **Διάγραμμα 6.1.4** από τρεις καμπύλες όπως αυτές προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση διαφορετικού υπολογιστικού εργαλείου κάθε φορά.

Διάγραμμα 6.1.4



Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS φαίνεται να ακολουθούν τη διακύμανση των πειραματικών δεδομένων σε ικανοποιητικό βαθμό. Παρατηρώντας το διάγραμμα της θερμοκρασιακής μεταβολής διακρίνεται υπερεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του Type 204 και του κώδικα MATLAB, ενώ υπερεκτιμημένη εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν με χρήση των Types 204 και 260 και του



κώδικα MATLAB. Στην περίπτωση του Type 204 η ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης πειραματικής τιμής της θερμοκρασίας κατά 1°C ενώ και στην περίπτωση του κώδικα της MATLAB η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά αγγίζει σχεδόν τον 1°C . Η ελάχιστη τιμή της καμπύλης προσομοίωσης όπως αυτή προέκυψε από το TRNSYS με χρήση του Type 260 εμφανίζεται κατά 2.5°C χαμηλότερη από την ελάχιστη τιμή της καμπύλης των πειραματικών δεδομένων, ενώ η υψηλότερη τιμή της καμπύλης προσομοίωσης κατά 2.5°C χαμηλότερα από την αντίστοιχη πειραματική. Όσον αφορά στο Type 260, στο **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5** τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση του μοντέλου και με σταθερή θερμοκρασία εδάφους στους 27°C αποτέλεσαν μία σχετικά ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων. Το γεγονός αυτό δεν παρατηρείται σε αυτή την περίπτωση, καθώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές των παραμέτρων του **ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6**. Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά αποτελέσματα οφείλονται στο σύνολό τους στους παράγοντες που αναφέρθηκαν και στην **Παράγραφο 6.1.3**.

6.1.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Κάθε PCM υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας προσεγγίζει τη μεταφορά θερμότητας μέσω των ΥΑΦ με διαφορετικό τρόπο και χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Το Type 204 ήταν από τα πρώτα υπολογιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν για την αξιολόγηση της επίδρασης των PCM στη θερμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας. Το βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι στους υπολογισμούς του δε λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας, ενώ απαιτεί τον ορισμό μίας σταθερής τιμής της C_p στις παραμέτρους του. Παράλληλα μοντελοποιεί το ΥΑΦ ως ένα επίπεδο το οποίο προσαρτάται εσωτερικά στην τοιχοποιία του μελετούμενου κτιρίου, ενώ το υπολογιστικό του κόστος είναι μεγάλο.

Το Type 260 υπερτερεί του Type 204 από την άποψη ότι συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς του τη διακύμανση της C_p του ΥΑΦ συναρτήσει της θερμοκρασίας, ωστόσο η διακύμανση της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ περιορίζεται σε πέντε



μόνο τιμές, γεγονός το οποίο δεν παρέχει στα αποτελέσματα μεγάλη ακρίβεια. Το Type 260 αντιλαμβάνεται το ΥΑΦ ως ένα επίπεδο το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ των στρωμάτων της τοιχοποιίας, ενώ το υπολογιστικό του κόστος είναι ιδιαίτερα μικρό.

Ο κώδικας της MATLAB, ο οποίος στηρίζει την αρχή λειτουργίας του στην αρχή λειτουργίας του Type 241 (βλ. **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**), λαμβάνει υπόψη τις ρεαλιστικές τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ, καθώς η καμπύλη μεταβολής της C_p συναρτήσει της θερμοκρασίας εισάγεται στον κώδικα με τη μορφή πίνακα. Το συγκεκριμένο υπολογιστικό εργαλείο αντιλαμβάνεται το ΥΑΦ ως ένα επίπεδο το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ των στρωμάτων της τοιχοποιίας, ενώ το υπολογιστικό του κόστος είναι ιδιαίτερα υψηλό (→ το πρόβλημα αυτό ενδεχομένως αντιμετωπίζεται με χρήση H/Y με μεγαλύτερη μνήμη RAM και καλύτερο επεξεργαστή).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπως αυτά προέκυψαν από το TRNSYS με χρήση των PCM μοντέλων, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό τόσο από τις παραμέτρους που ορίζονται στο TRNBuild σχετικά με τις θερμικές ιδιότητες και τις διαστάσεις των δομικών υλικών όσο και από την τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[1] M.D. Romero-Sánchez, C. Guillem-López, A.M. López-Buendía, M. Stamatiadou, I. Mandilaras, D. Katsourinis, M. Founti, Treatment of natural stones with phase change materials: Experiments and computational approaches, Applied Thermal Engineering, Available online 19 May 2012, ISSN 1359-4311, 10.1016/j.applthermaleng.2012.05.017.

