



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
ΔΠΜΣ Υπολογιστική Μηχανική.
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.
Τομέας Θερμότητας.**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΡΟΗΣ
ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΠΡΙΓΚΗΠΙΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
Α.Μ : 05120909

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΦΟΥΝΤΗ ΜΑΡΙΑ

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, στον Τομέα Θερμότητας στο πλαίσιο του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος «Υπολογιστική μηχανική». Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα την εργασία καθηγήτρια κα. Μαρία Φούντη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας και τον μεταδιδακτορικό ερευνητή κ. Δημήτριο Κατσουρίνη για τις πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Δημήτριος Πρίγκηπας

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται η επίδραση των υλικών αλλαγής φάσης στην θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου πειραματικών σταθμών – οικίσκων με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η υπολογιστική μοντελοποίηση των οικίσκων και του περιβάλλοντος χώρου και η επίλυση του θερμορευστομηχανικού προβλήματος που προκύπτει γίνεται στο υπολογιστικό πακέτο ANSYS 13.0. Επιπλέον γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα που έχουν ληφθεί στην Ισπανία από μετρήσεις σε αντίστοιχους σταθμούς.

Στα τέσσερα πρώτα κεφάλαια αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των υλικών της αλλαγής φάσης και εφαρμογές τους κυρίως σε κτίρια. Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό να αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμότητα και να την αποδίδουν σε μετέπειτα χρονική στιγμή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κτιριακές εφαρμογές, καθώς το σημείο αλλαγής φάσης τους βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναπτύσσεται το φυσικό πρόβλημα, διατυπώνονται οι μαθηματικές εξισώσεις επίλυσης του φυσικού προβλήματος και αναλύεται η μέθοδος πεπερασμένων όγκων που θα χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία μοντελοποίησης του φυσικού προβλήματος. Παρουσιάζεται η κατασκευή της γεωμετρίας, η δημιουργία του πλέγματος και ο ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών στο ANSYS για την επίλυση του προβλήματος.

Τέλος στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης. Ουσιαστικά πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη του προβλήματος με παραμέτρους την ταχύτητα ανέμου, την ύπαρξη PCM και το εάν οι πόρτες του οικίσκου είναι κλειστές ή όχι. Όπως προκύπτει από τα υπολογιστικά αποτελέσματα και τη σύγκριση τους με τα πειραματικά το PCM έχει επίδραση στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Μάλιστα αυτή η επίδραση είναι κοντά στο αναμενόμενο με βάση πειραματικά δεδομένα (διαφορά θερμοκρασιών σε περιπτώσεις με και χωρίς PCM γύρω στον 1 K). Επίσης παρατηρούμε επίδραση των ανακυκλοφοριών στην κατανομή θερμοκρασιών στο πεδίο ροής.

Λέξεις κλειδιά: Υλικά αλλαγής φάσης, PCM, πεπερασμένοι όγκοι

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Φαινόμενα Αλλαγής Φάσης.....	14
1.1 Εισαγωγή.....	14
1.2 Κατάσταση της ύλης.....	16
1.2.1 Αλλαγή φάσης (γενικές αρχές).....	16
1.2.2 Θερμική ενέργεια στις αλλαγές φάσης.....	19
1.2.3 Μικροσκοπική δομή των καταστάσεων της ύλης.....	19
1.2.4 Ιδιότητες της ύλης ανάλογα με την κατάστασή της.....	20
1.2.5 Διαφορά μεταξύ αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας.....	21
1.2.6 Ενθαλπία και Θερμοχωρητικότητα.....	21
1.2.7 Θερμότητα ατμοποίησης – Ολική Θερμότητα.....	23
1.2.8 Μέθοδοι Προσομοίωσης Μεταφοράς Θερμότητας με Αλλαγή Φάσης-Βασικές Προϋποθέσεις και Προσεγγίσεις.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ).....	31
2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Κατηγοριοποίηση ΥΑΦ.....	33
2.2.1 Οργανικά ΥΑΦ.....	33
2.2.2 Ανόργανα PCM.....	38
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατηγοριών ΥΑΦ.....	39
2.4 Χαρακτηριστικά ΥΑΦ.....	41
2.4.1 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση 42	
2.4.2 Φαινόμενο supercooling (υπόψυξη).....	43
2.4.3 Διάβρωση.....	44
2.4.4 Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων.....	44
2.5 Ιδιότητες ΥΑΦ.....	45
2.5.1 Θερμοφυσικές και χημικές ιδιότητες.....	45
2.5.2 Οικονομικά χαρακτηριστικά.....	46
2.6 Τοποθέτηση Υ.Α.Φ. σε Κάψουλες και Σύνθετα Υλικά.....	46

2.6.1	Macroencapsulation.....	46
2.6.2	Microencapsulation.....	47
2.7	Συμβατότητα των ΥΑΦ με άλλα υλικά.....	47
2.8	Ενώσεις PCM στην Αγορά.....	48
2.9	Εφαρμογές.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των ΥΑΦ		51
3.1	Μέθοδος DSC (διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης)	52
3.1.1	DSC με σταθερό ρυθμό ψύξης και θέρμανσης (δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας, dynamic DSC).....	52
3.1.2	DSC ισόθερων βημάτων (isothermal steps mode).....	53
3.1.3	Μέθοδος διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA).....	53
3.1.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των DSC και DTA.....	54
3.2	Η μέθοδος T-History	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογές ΥΑΦ.....		55
4.1	Εισαγωγή.....	55
4.2	Υλικά Αλλαγής Φάσης για ψύξη και θέρμανση κτιρίων (παθητικά συστήματα).....	57
4.2.1	Τοίχος trombe με ΥΑΦ.....	60
4.2.2	Παραθυρόφυλλο με ΥΑΦ.....	61
4.2.3	Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας για αερισμό του κτιρίου..	62
4.2.4	Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο ΥΑΦ	63
4.2.5	Μπλόκ τσιμέντου με ενσωματωμένο ΥΑΦ.....	66
4.2.6	Θερμικά αυξημένος σκελετός τοίχου με ΥΑΦ	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Το φυσικό πρόβλημα και η περιγραφή του.....		68
5.1	Εισαγωγή.....	68
5.2	Μεταφορά θερμότητας.....	68
5.2.1	Γενικά	68
5.2.2	Αγωγή	72
5.2.3	Συναγωγή.....	74
5.2.4	Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.....	76

5.3	Μαθηματικές εξισώσεις περιγραφής του φυσικού προβλήματος.....	79
5.4	Μέθοδος των πεπερασμένων όγκων	80
5.4.1	Ολοκλήρωση σε όγκο αναφοράς.....	81
5.4.2	Οριακές συνθήκες μικτού τύπου	83
5.4.3	Χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα	84
5.4.4	Ολοκλήρωση σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο όγκο αναφοράς	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αριθμητική προσομοίωση		89
6.1	Εισαγωγή	89
6.2	Γεωμετρία.....	90
6.3	Κατασκευή πλέγματος.....	95
6.4	Καθορισμός εξισώσεων επίλυσης και αρχικών / συνοριακών συνθηκών του προβλήματος.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Παράμετροι προβλήματος και αποτελέσματα.....		113
7.1	Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων	113
7.2	Επίδραση του ΥΑΦ.....	115
7.3	Παραμετρική μελέτη	117
7.4	Φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την τρισδιάστατη ανάλυση....	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα και προτάσεις.....		139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Βιβλιογραφία		140

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1-1: Στη φωτογραφία φαίνεται ένα μικρό κομμάτι στερεοποιημένο Αργό (σημείο τήξης: $-189.352\text{ }^{\circ}\text{C}$ σημείο βρασμού: $-185.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) που λόγω θερμοκρασίας περιβάλλοντος περνά γρήγορα από τη μία φάση στην άλλη. ,ιακρίνονται καθαρά οι τρεις φάσεις της ουσίας.....	16
Εικόνα 1-2: Μικροσκοπική δομή των καταστάσεων της ύλης [6].....	20
Εικόνα 1-3: Αποθήκευση θερμότητας ως Αισθητή θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	24
Εικόνα 1-4: Διάγραμμα αλλαγής φάσης.....	26
Εικόνα 1-5: Αποθήκευση θερμότητας ως Λανθάνουσα θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	27
Εικόνα 1-6: Ποιοτικό διάγραμμα T-P καθαρής ουσίας.....	28
Εικόνα 2-1: Encapsulation και σύνθετα υλικά και μερικά από τα θετικά τους αποτελέσματα [18].....	47
Εικόνα 2-2: Τεστ συμβατότητας για συνδυασμούς μετάλλων-ανόργανων PCM [18].....	48
Εικόνα 2-3: Τεστ συμβατότητας για συνδυασμούς πλαστικών-ανόργανων ΥΑΦ και πλαστικών-οργανικών ΥΑΦ [18].	48
Εικόνα 2-4: Από αριστερά προς τα δεξιά: Επίπεδη συσκευασία(Kissmann/Γερμανία), σφαίρες ΥΑΦ (PCM) και μπάρες διπλών πιάτων(Dorken/Γερμανία) [18].....	49
Εικόνα 2-5: Macro encapsulation σε σάκους (αριστερά από την Climator/Σουηδία και δεξιά από την Dorken/Γερμανία) [18].....	49
Εικόνα 2-6: Macro encapsulation σε λωρίδες κάψουλας όπως παράγονται από την TEAP/Αυστραλία και από την Dorken/Γερμανία για ανόργανα PCM. [18]	49
Εικόνα 2-7: Macro encapsulation σε αλουμίνια πορτραίτα, με πτερύγια για βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας(Climator/Σουηδία) [18].....	49
Εικόνα 3-1: Διάταξη μετρήσεως με καλορίμετρα σαρώσεως DSC [19].....	52
Εικόνα 4-1:Ενεργητικά και παθητικά συστήματα.....	57
Εικόνα 4-2:Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται σε κτίρια	58
Εικόνα 4-3: Διατάξεις ενσωμάτωσης PCM σε ενδοδαπέδια θέρμανση, εσωτερική τοιχοποιία και ενδοδαπέδια θέρμανση.....	59

Εικόνα 4-4: Τοίχος Trombe [23]	61
Εικόνα 4-5: Παραθυρόφυλλα με pcm [23].....	62
Εικόνα 4-6: Στοιχεία ηλιακού τοίχου με pcm [22].....	63
Εικόνα 5-1: Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε σώμα πάχους L κατά τη x διεύθυνση και απείρων διαστάσεων στις δύο άλλες διευθύνσεις.	73
Εικόνα 5-2: Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών, όπου η μια περικλείει την άλλη. Οι δύο επιφάνειες βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες.	79
Εικόνα 5-3: Διακριτοποίηση σε μια διάσταση	81
Εικόνα 5-4: Διακριτοποίηση οριακού κόμβου σε μια διάσταση.....	83
Εικόνα 5-5: Διακριτοποίηση σε δύο διαστάσεις.....	86
Εικόνα 6-1: Πειραματικός οικίσκος από τσιμέντο και πέτρα.....	89
Εικόνα 6-2: Πειραματικός οικίσκος και όγκος ελέγχου	91
Εικόνα 6-3: Πειραματικός οικίσκος	92
Εικόνα 6-4: Προβολή του πειραματικού οικίσκου στο επίπεδο xy.....	94
Εικόνα 6-5: Προβολή του πειραματικού οικίσκου στο επίπεδο xy.....	94
Εικόνα 6-6: Προβολή του πειραματικού οικίσκου στο επίπεδο xy.....	95
Εικόνα 6-7: Τετράεδρα πεπερασμένων όγκων	96
Εικόνα 6-8: Πρώτο χρησιμοποιούμενο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων	97
Εικόνα 6-9: Στοιχεία πρώτου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων	97
Εικόνα 6-10: Δεύτερο χρησιμοποιούμενο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων..	98
Εικόνα 6-11: Στοιχεία δεύτερου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.....	98
Εικόνα 6-12: Πλέγμα στα τοιχώματα του οικίσκου	99
Εικόνα 6-13: Πυκνωμένο πλέγμα στο μεταλλικό φύλλο της πόρτας.....	100
Εικόνα 6-14: Ορισμός τύπου ανάλυσης και χαρακτηριστικών	101
Εικόνα 6-15: Λήψη αποτελεσμάτων με δημιουργία αρχείων ανά χρονικό βήμα	101
Εικόνα 6-16: Καθορισμός όγκων ελέγχου, περιοχών αποτελούμενων από το ίδιο υλικό και διεπιφανειών για την επίλυση εξισώσεων ροής και μεταφοράς θερμότητας.....	104
Εικόνα 6-17: Συνάρτηση ορισμού του υλικού αλλαγής φάσης.....	107

Εικόνα 6-18: Γραφική παράσταση της μεταβολής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	108
Εικόνα 6-19: Γραφική παράσταση της μεταβολής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία στην περιοχή της αλλαγής φάσης.....	108
Εικόνα 6-20: Το προς επίλυση πρόβλημα με τις συνοριακές συνθήκες του και τα σημεία ελέγχου του	110
Εικόνα 6-21: Σύγκλιση και επαναλήψεις.....	111
Εικόνα 6-22: Εξισώσεις προς επίλυση.....	111
Εικόνα 6-23: Μονάδες των προς επίλυση μεγεθών.....	112
Εικόνα 7-1: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για θερμοκρασία εσωτερικού χώρου χωρίς PCM.....	113
Εικόνα 7-2: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για θερμοκρασία εσωτερικού χώρου με ΥΑΦ (PCM)	114
Εικόνα 7-3:Επίδραση του ΥΑΦ (PCM) στη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου όταν η πόρτα του πειραματικού σταθμού είναι πλήρως κλειστή	115
Εικόνα 7-4: Επίδραση του ΥΑΦ (PCM) στη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου όταν η πόρτα του πειραματικού σταθμού είναι πλήρως ανοικτή	116
Εικόνα 7-5:Παραμετρική μελέτη μεταβολής της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου χωρίς PCM.....	118
Εικόνα 7-6: Παραμετρική μελέτη μεταβολής της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου με PCM	118
Εικόνα 7-7: Πεδίο παράλληλο στη ροή για ταχύτητα 2.5 m/s	119
Εικόνα 7-8: Πεδίο παράλληλο στη ροή για ταχύτητα 5.0 m/s	120
Εικόνα 7-9: Πεδίο κάθετο στη ροή για ταχύτητα 2.5 m/s	121
Εικόνα 7-10: Πεδίο κάθετο στη ροή για ταχύτητα 5.0 m/s	122
Εικόνα 7-11: Πεδίο κάθετο στη ροή για ταχύτητα 5.0 m/s με ανοικτή πόρτα	123
Εικόνα 7-12: Επίπεδο παράλληλο στο δάπεδο για ταχύτητα 2.5 m/s	124
Εικόνα 7-13: Επίπεδο παράλληλο στο δάπεδο για ταχύτητα 5.0 m/s	125
Εικόνα 7-14: Ροή στην επιφάνεια του δαπέδου για ταχύτητα 5 m/s.....	126
Εικόνα 7-15: Ροή στο εσωτερικό του οικίσκου για ανοικτή πόρτα και ταχύτητα 5 m/s.....	127

Εικόνα 7-16: Σύγκριση ανακυκλοφορίας πεδίου ροής με κατανομή θερμοκρασίας για επίπεδο παράλληλο στη ροή και ταχύτητα ροής 5 m/s.....	128
Εικόνα 7-17: Σύγκριση ανακυκλοφορίας πεδίου ροής με κατανομή θερμοκρασίας για επίπεδο παράλληλο στο δάπεδο και ταχύτητα ροής 5 m/s	129
Εικόνα 7-18: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	130
Εικόνα 7-19: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	130
Εικόνα 7-20: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	131
Εικόνα 7-21: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	131
Εικόνα 7-22: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	132
Εικόνα 7-23: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	132
Εικόνα 7-24: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	133
Εικόνα 7-25: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	133
Εικόνα 7-26: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	134
Εικόνα 7-27: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.....	134

Εικόνα 7-28: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.	135
Εικόνα 7-29: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.	135
Εικόνα 7-30: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM...	136
Εικόνα 7-31: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM...	136
Εικόνα 7-32: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM...	137
Εικόνα 7-33: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM...	137

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1: Αλλαγές φάσης	17
Πίνακας 1-2: Λανθάνουσα θερμότητα γνωστών ουσιών	26
Πίνακας 2-1: Οργανικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM.	37
Πίνακας 2-2: Ανόργανες εύτηκτες ενώσεις με πιθανή χρήση ως PCM.	39
Πίνακας 2-3: Εμπορικά PCM διαθέσιμα στη διεθνή αγορά [15]	40
Πίνακας 6-1: Βασικές γεωμετρικές διαστάσεις του πειραματικού οικίσκου ...	93
Πίνακας 6-2: Χαρακτηρισμός περιοχών του προβλήματος και υλικών	104
Πίνακας 6-3: Ορισμός εκφράσεων και συναρτήσεων	106
Πίνακας 6-4: Αρχικές συνθήκες ανά περιοχή.....	109
Πίνακας 7-1: Παράμετροι που εξετάστηκαν και τιμές που τους δώθηκαν	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Φαινόμενα Αλλαγής Φάσης

1.1 Εισαγωγή

Εδώ και πολλά χρόνια, οι μεγάλοι ενεργειακοί φορείς έχουν αναγνωρίσει την ανάγκη προσεκτικής και λογικής χρήσης των ορυκτών πηγών ενέργειας. Η συνεχής και σταθερά αυξανόμενη κατανάλωση αυτών των ενεργειακών πόρων, εκτοξεύοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε ανησυχητικά επίπεδα, έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή σύνθεσης του στρώματος του όζοντος σε τέτοιο βαθμό ώστε αυτό να μην επιτελεί το ρόλο του στην προστασία της επιφάνειας του πλανήτη από τις υπεριώδεις ακτινοβολίες και φυσικά την αποδεδειγμένη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη.

Η Διακυβερνητική επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών, αποτελούμενη από περισσότερα από 300 εξέχοντα μέλη της επιστημονικής κοινότητας, στη συνέλευση του 1992, κατέθεσαν την άποψη πως για να έχουν σταθεροποιηθεί τα επίπεδα εκπομπών CO₂ παγκοσμίως μέχρι το 2005 θα πρέπει να υπάρξει μείωση 60% στην κατανάλωση όλων των ορυκτών καυσίμων.

Αυτό το μέτρο αντιπροσωπεύει μια αναθεώρηση του σημερινού τρόπου χρήσης του καυσίμου, όπου το 50% χρησιμοποιείται για τη λειτουργία και τη θέρμανση κτιρίων και οι αντίστοιχες εκπομπές CO₂ φτάνουν το 60% των συνολικών.

Συγκεκριμένα για την Ευρωπαϊκή ήπειρο το 40% -κατά μέσο όρο- του καταναλισκόμενου καυσίμου αντιστοιχεί στον κτιριακό τομέα και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως η Γαλλία το ποσοστό αυτό ανέρχεται σε 45%, ενώ στη χώρα μας φτάνει περίπου το 25%.

Στην συνεδρίαση του 2003 όμως παρουσιάστηκε η πρόβλεψη για τη μελλοντική ενεργειακή κατανάλωση που θα αυξηθεί δυστυχώς κατά 58% τα έτη 2001-2025.

Για να αντιμετωπιστεί η συνεχώς αυξανόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος, τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής ένωσης μεταξύ άλλων, δεσμεύθηκαν από το πρωτόκολλο του Κιότο σε συνολική και συστηματική μείωση των εκπομπών CO₂, που για τη χώρα μας μεταφράζεται σε μείωση των εθνικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2008-2012, στα επίπεδα του 92% των αντίστοιχων εκπομπών του 1990.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, γίνεται κατανοητή η σημασία που έχει σήμερα η λήψη μέτρων για τη μείωση των απωλειών ενέργειας, θερμικών ή ψυκτικών φορτίων, ανάλογα με την περίπτωση, και η λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση των απωλειών αυτών. Επιπρόσθετα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει

λάβει μέτρα προς την κατεύθυνση της εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια, όπως την πιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, αλλά και νέα ενεργειακά πρότυπα.

Είναι λοιπόν λογικό να ξοδεύονται επί του παρόντος μεγάλα κονδύλια παγκοσμίως για τη μείωση αυτών των επιπέδων και για την ανάπτυξη συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τις προαναφερθείσες χρήσεις.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η έρευνα γύρω από τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχει κάνει εντυπωσιακή πρόοδο. Μέσω μελετών παγκοσμίως (με τις πλέον σημαντικές να λαμβάνουν χώρα στις ΗΠΑ, την Ευρώπη και την Ιαπωνία), έχει αποδειχθεί ότι τα συστήματα αυτά είναι ιδανικά για αποθήκευση ανανεώσιμης (και πολλές φορές δωρεάν) ενέργειας για κλιματισμό κτιρίων.

Εφαρμογές όπως οι ηλιακοί συλλέκτες, και άλλες που εκμεταλλεύονται άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά πάρκα καθώς επίσης και εφαρμογές βιομάζας και γεωθερμικής ενέργειας, θεωρούνται πλέον πρώτης προτεραιότητας ανάπτυξης.

Η ηλιακή ενέργεια για παράδειγμα, έχει σπουδαίες προοπτικές όσον αφορά στη χρήση της στα κτίρια, αφού η ηλιακή ακτινοβολία μετρούμενη σε ενεργειακές μονάδες υπολογίζεται να είναι 30000 φορές περισσότερη από αυτήν που πραγματικά έχει ανάγκη ο Άνθρωπος. Είναι επίσης καθαρή πηγή ενέργειας, χωρίς εκπομπές ρύπων, και φυσικά δωρεάν, άφθονη και ανανεώσιμη.

Παρ' όλ' αυτά υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση της ηλιακής ενέργειας. Είναι απρόβλεπτη πηγή ενέργειας, από την άποψη της ηλιοφάνειας, είναι διακοπτόμενη και πολλές φορές για μεγάλα χρονικά διαστήματα (συννεφιά, χιόνι, βροχή). Εξ' αιτίας αυτών των απολύτως φυσικών λόγων, καθώς επίσης και λόγω του γεγονότος ότι από τις 8760 ώρες του έτους οι μισές περίπου είναι νύχτα για οποιοδήποτε μέρος στον πλανήτη, γίνεται προφανής η ανάγκη δημιουργίας ενός συστήματος ικανού να παράγει τέτοια χρονική καθυστέρηση στο φαινόμενο, ώστε η παροχή ενέργειας να μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση ανά πάσα στιγμή.

Από όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που προτάθηκαν για την αντιμετώπιση του προβλήματος, τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έτυχαν μεγάλης απήχησης λόγω κυρίως της ικανότητάς τους στην αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας σε σχετικά μικρό χώρο.

Το μεγαλύτερο εμπόδιο για κάθε τέτοιο σύστημα είναι η ανάγκη αποθήκευσης της ενέργειας για χρήση σε μετέπειτα στάδιο. Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παρέχουν έναν πρακτικό και φυσικό τρόπο χρονικής

καθυστέρησης και επιτρέπουν, για παράδειγμα, τη χρήση της θερμότητας που αποθηκεύτηκε την ημέρα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, όποτε και αυτή χρειάζεται.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τα οποία συνδυάζουν τη χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης, θεωρούνται ιδιαίτερος σημαντικά για την έρευνα, λόγω της μεγάλης αποθηκευτικής (από ενεργειακή άποψη) ικανότητάς τους. [1], [2], [3], [4]

1.2 Κατάσταση της ύλης

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

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

1.2.1 Αλλαγή φάσης (γενικές αρχές)

Αλλαγή φάσης ονομάζεται η διαδικασία μετάβασης ενός θερμοδυναμικού συστήματος από μία κατάσταση ύλης σε κάποια άλλη. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό του φαινομένου αυτού είναι η παρατήρηση σημαντικών αλλαγών σε μία ή περισσότερες φυσικές ιδιότητες του συστήματος και κυρίως στη θερμοχωρητικότητά του. Κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης η θερμοκρασία και η πίεση παραμένουν σχεδόν σταθερές.



Εικόνα 1-1: Στη φωτογραφία φαίνεται ένα μικρό κομμάτι στερεοποιημένο Αργό (σημείο τήξης: -189.352 °C σημείο βρασμού: -185.9 °C) που λόγω θερμοκρασίας περιβάλλοντος περνά γρήγορα από τη μία φάση στην άλλη. ,ιακρίνονται καθαρά οι τρεις φάσεις της ουσίας.

Συνήθως ο όρος αλλαγή φάσης αναφέρεται σε μεταβάσεις μεταξύ των τριών πρώτων καταστάσεων (στερεής, υγρής και αέριας) εξαιρώντας συνήθως την κατάσταση του πλάσματος.

Οι αλλαγές φάσης περιλαμβάνουν:

- Τις μεταβάσεις μεταξύ της στερεής, υγρής και αέριας φάσης μιας ουσίας, λόγω αλλαγών στις συνθήκες θερμοκρασίας και/ή πίεσης μέχρι το σημείο έναρξης της αλλαγής φάσης.
- Τη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών μοριακών δομών, ιδίως για στερεά, όπως για παράδειγμα τη μετάβαση από μία άμορφη δομή σε μία κρυσταλλική ή τη μετάβαση μεταξύ δύο διαφορετικών κρυσταλλικών δομών.

Η **μετατροπή του στερεού σε υγρό** ονομάζεται τήξη, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται πήξη.

Η **μετατροπή από αέριο σε υγρό** ονομάζεται υγροποίηση ή συμπύκνωση, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται βρασμός ή ατμοποίηση για όλο το υγρό ή εξάτμιση για την επιφάνεια και μόνο του υγρού.

Η **μετατροπή από αέριο σε στερεό** ονομάζεται εναπόθεση, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται εξάχνωση.

Η **μετατροπή από αέριο σε πλάσμα** ονομάζεται ιονισμός, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται ανασυνδιασμός.

Πίνακας 1-1: Αλλαγές φάσης

Από	Σε			
	Στερεό	Υγρό	Αέριο	Πλάσμα
Στερεό	-	Τήξη	Εξάχνωση	-
Υγρό	Στερεοποίηση (Πήξη)	-	Βρασμός/Ατμοποίηση	-
Αέριο	Εναπόθεση	Συμπύκνωση (Υγροποίηση)	-	Ιονισμός
Πλάσμα	-	-	Ανασυνδιασμός	-

Στις παραπάνω μετατροπές δεν ενδιαφερόμαστε, αν αυτές προκλήθηκαν από την ασυμφωνία τρέχουσας και κατάλληλης κατάστασης ή λόγω μερικών

πίεσεων. Όμως, στη **μετατροπή υγρού σε αέριο** διακρίνουμε δύο διαδικασίες: το βρασμό και την εξάτμιση. Ο βρασμός οφείλεται στην ασυμφωνία τρέχουσας και κατάλληλης κατάστασης, ενώ η εξάτμιση γίνεται λόγω της μερικής πίεσης. Για αυτό ο βρασμός εμφανίζεται μόνο σε συγκεκριμένες συνθήκες και συμβαίνει σε όλη την έκταση του υγρού, ενώ η εξάτμιση μπορεί να γίνει σε οποιοσδήποτε συνθήκες και συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια του υγρού.

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

Είναι δυνατόν σε κάποιες περιπτώσεις να εμφανιστεί αλλαγή κατάστασης μη αδιαβατικά με τέτοιο τρόπο ώστε το θερμοδυναμικό σύστημα να διέλθει τα όρια της αλλαγής φάσης, χωρίς να παρατηρείται η αλλαγή αυτή καθ' αυτή, όπως παρατηρείται στα φαινόμενα της υπόψυξης και της υπερθέρμανσης. Η προκύπτουσα κατάσταση δεν είναι ενεργειακά σταθερή και εμφανίζεται όταν οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας ξεπερνούν ένα κρίσιμο σημείο.

Οι αλλαγές φάσης περιλαμβάνουν λανθάνουσα θερμότητα, όταν εξελίσσονται σε ζεύγη τιμών πίεσης – θερμοκρασίας που δεν ξεπερνούν το κρίσιμο σημείο. Κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας αλλαγής το σύστημα είτε απορροφά είτε ελευθερώνει μία σταθερή και συνήθως αξιόλογη ποσότητα ενέργειας. Επειδή η ενέργεια αυτή δεν μπορεί να μεταφερθεί στιγμιαία μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος, αυτές οι μεταβάσεις, βρίσκονται υπό καθεστώς μικτής φάσης, όπου τμήμα του θερμοδυναμικού συστήματος έχει ολοκληρώσει την μετάβαση και το υπόλοιπο όχι. Το εύρος αυτού του τμήματος μετάβασης εξαρτάται από το πόσο κοντά στο κρίσιμο σημείο βρίσκονται τα δεδομένα του προβλήματος.

Για παράδειγμα κατά το βρασμό ενός δοχείου που περιέχει νερό, το νερό δεν γίνεται στιγμιαία ατμός, αλλά εμφανίζεται μια τυρβώδης μίξη νερού και φυσαλίδων ατμού, εκτός και αν βρισκόμαστε σε περιοχή άνω του κρίσιμου σημείου, οπότε και έχουμε υπέρθερμο ατμό. [5]

Η μεταβολή ενθαλπίας τήξης, γνωστή και ως θερμότητα τήξης (λανθάνουσα), είναι το ποσό θερμότητας που πρέπει να απορροφηθεί ή να εκλυθεί, ώστε 1 gr ουσίας να αλλάξει φάση από στερεά σε υγρή ή/και αντίστροφα και ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης, ενώ η θερμοκρασία στην οποία αυτή εμφανίζεται, ονομάζεται σημείο τήξης. Για να υπάρξει μετάβαση από υγρό σε

στερεό, τα μόρια της ουσίας πρέπει να εκτελούν λιγότερες άτακτες κινήσεις και να τείνουν να αποκτήσουν μια αυστηρότερη διάταξη και, επομένως, θα πρέπει να αφαιρεθεί θερμότητα, ώστε να βρεθεί το σύστημα σε μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Αντιθέτως, για να έχουμε την αντίστροφη διαδικασία και τη μετάβαση από την στερεή κρυσταλλική μορφή στην υγρή, χρειάζεται απορρόφηση θερμότητας για τη λύση των διαμοριακών δεσμών. Αναλυτικά τα παραπάνω θέματα θα τα εξετάσουμε στις επόμενες ενότητες.

1.2.2 Θερμική ενέργεια στις αλλαγές φάσης

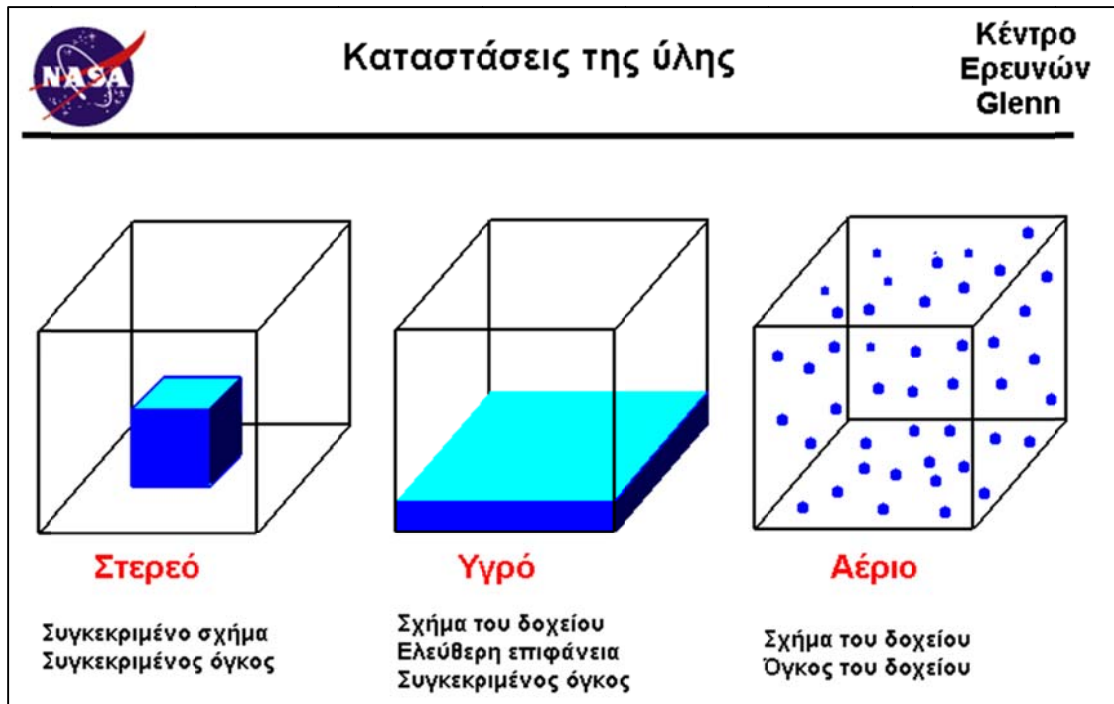
Σημαντικό ρόλο στις αλλαγές φάσεις παίζει η θερμική ενέργεια. Συνήθως οι αλλαγές φάσης γίνονται σε κανονική πίεση (μία ατμόσφαιρα ή 760 mm Hg), οπότε οι μετατροπές οφείλονται στην αλλαγή της θερμοκρασίας, άρα και την πρόσληψη ή αποβολή θερμικής ενέργειας. Γενικά ένα σώμα είναι στερεό σε χαμηλές θερμοκρασίες, και καθώς αυτές αυξάνονται το σώμα μετατρέπεται διαδοχικά σε υγρό και έπειτα σε αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμική ενέργεια του σώματος αυξάνεται. Αντίστροφα, ένα σώμα σε υψηλές θερμοκρασίες είναι αέριο και καθώς αυτή μειώνεται το σώμα μετατρέπεται διαδοχικά σε υγρό και έπειτα σε στερεό. Εδώ η θερμική ενέργεια του σώματος μειώνεται. Παρόλ' αυτά, υπάρχει περίπτωση απευθείας **μετατροπής από στερεό σε αέριο**, η οποία ονομάζεται εξάχνωση, όπως αναφέραμε παραπάνω.

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

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

1.2.3 Μικροσκοπική δομή των καταστάσεων της ύλης

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



Εικόνα 1-2: Μικροσκοπική δομή των καταστάσεων της ύλης [6]

1.2.4 Ιδιότητες της ύλης ανάλογα με την κατάστασή της

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

- **Συμπιεστότητα (ή διασταλτικότητα):** Αυτή η ιδιότητα υποδηλώνει το βαθμό ευκολίας μεταβολής του όγκου ενός υλικού. Τα στερεά και τα υγρά είναι *ασυμπιέστα*, ενώ τα αέρια *συμπιεστά*. Η συμπιεστότητα των αερίων εξαρτάται σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, από την ευκολία μεταβολής της θερμοκρασίας και της πίεσης.
- **Ρευστότητα:** Είναι η ιδιότητα της ύλης να *ρέει*, δηλαδή να μπορεί να μεταφέρεται αλλάζοντας σχήμα. Τα σώματα που έχουν αυτήν την ιδιότητα ονομάζονται *ρευστά*. Τα υγρά και τα αέρια, καθώς και τα κολλοειδή είναι ρευστά.
- **Ιξώδες:** Είναι η εσωτερική τριβή που εμφανίζεται κατά τη ροή των ρευστών. Για παράδειγμα το μέλι έχει πολύ μεγαλύτερο ιξώδες από ότι το νερό. Όταν το ιξώδες γίνεται υπερβολικά μεγάλο, ή τείνει στο άπειρο, τότε το ρευστό τείνει να μη ρέει, άρα να μην αλλάζει σχήμα, δηλαδή τείνει να είναι στερεό.
- **Σταθερότητα:** Όσον αφορά τις καταστάσεις της ύλης μερικές καταστάσεις προκύπτουν όχι μόνο από τις συνθήκες που τελικά επικρατούν στο περιβάλλον, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο αυτές διαμορφώθηκαν. Τότε μπορούν να προκύψουν ορισμένες καταστάσεις της ύλης, οι οποίες είναι

εξαιρετικά **ασταθείς** και οι οποίες πολύ εύκολα υποκύπτουν σε άλλες σταθερές καταστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το υπέρκορο υγρό διάλυμα, το οποίο με μία απλή κρούση στο δοχείο μετατρέπεται σε ετερογενές μίγμα. [6]

1.2.5 Διαφορά μεταξύ αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας

Αισθητή θερμότητα Όταν θερμαίνεται ένα αντικείμενο, η θερμοκρασία του ανεβαίνει καθώς προστίθεται θερμότητα. Η αύξηση της θερμότητας ονομάζεται αισθητή θερμότητα. Ομοίως, όταν η θερμότητα αφαιρείται από ένα αντικείμενο και η θερμοκρασία του μειώνεται, και η θερμότητα που αφαιρείται ονομάζεται αισθητή. Συνεπώς, η θερμότητα που προκαλεί αλλαγές στη θερμοκρασία ενός αντικειμένου ονομάζεται αισθητή θερμότητα.

Λανθάνουσα θερμότητα Όλες οι καθαρές ουσίες στη φύση έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν κατάσταση. Τα στερεά μπορούν να μετατραπούν σε υγρά (ο πάγος σε νερό) και τα υγρά μπορούν να μετατραπούν σε αέρια (το νερό σε ατμό), αλλά τέτοιου είδους αλλαγές απαιτούν την προσθήκη ή αφαίρεση θερμότητας. Η θερμότητα που προκαλεί τις αλλαγές αυτές ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα.

Ωστόσο, η λανθάνουσα θερμότητα δεν επηρεάζει τη θερμοκρασία μιας ουσίας - για παράδειγμα, το νερό παραμένει ως έχει στους 100°C ενώ βράζει. Η θερμότητα που προστίθεται για να συνεχίσει ο βρασμός του νερού είναι λανθάνουσα θερμότητα. Συνεπώς, η θερμότητα που επιφέρει αλλαγή στην κατάσταση αλλά δεν επιφέρει καμία αλλαγή στη θερμοκρασία ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα.

Η κατανόηση της διαφοράς αυτής είναι θεμελιώδης για την κατανόηση του λόγου για τον οποίο ψυκτικό υγρό χρησιμοποιείται στα συστήματα ψύξης. Επεξηγεί, επίσης, το λόγο για τον οποίο οι όροι "συνολική δυναμικότητα" (αισθητή & λανθάνουσα θερμότητα) και "αισθητή δυναμικότητα" χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ψυκτικής ικανότητας μιας μονάδας. Κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής λειτουργίας της ψύξης, σχηματίζονται συμπυκνώματα στο εσωτερικό της μονάδας, εξαιτίας της αφαίρεσης λανθάνουσας θερμότητας από τον αέρα. Η αισθητή δυναμικότητα είναι η δυναμικότητα που απαιτείται για να μειώσει τη θερμοκρασία και λανθάνουσα δυναμικότητα είναι η δυναμικότητα που απαιτείται για την αφαίρεση της υγρασίας από τον αέρα.

1.2.6 Ενθαλπία και Θερμοχωρητικότητα

- Ενθαλπία ενός συστήματος ονομάζεται η ολική ενέργεια του συστήματος όταν αυτό βρίσκεται υπό σταθερή πίεση.

Επομένως, σε ένα Χημικό Σύστημα η μεταβολή της ενθαλπίας κατά τη διάρκεια ενός χημικού μετασχηματισμού αντιπροσωπεύει το ποσό θερμότητας που ανταλλάσσεται με το περιβάλλον, υπό σταθερή πίεση

$$dH = P \cdot dQ \quad (1.1)$$

Οι μονάδες ως γνωστό, είναι:

1. kJ/kg (μονάδες SI)
2. joules/mole (μονάδες SI)
3. calories / gram (παλαιές μετρικές μονάδες, οι οποίες πλέον χρησιμοποιούνται ελάχιστα, εκτός από το Kcal που χρησιμοποιείται συνήθως για θρεπτικά συστατικά τροφών)
4. British thermal units ανά pound ή Btu ανά pound-mole

• Η *Θερμοχωρητικότητα* είναι ένα Φυσικό Μέγεθος της Θερμοδυναμικής.

Συγκεκριμένα με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται ή απορροφάται από κάποιο σώμα όταν η θερμοκρασία του μεταβληθεί κατά ένα βαθμό Κελσίου. Έτσι η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος βρίσκεται αν πολλαπλασιασθεί η μάζα του επί την ειδική θερμότητά του.

Επειδή δε, η ειδική θερμότητα του ύδατος είναι ίση με τη μονάδα, γι' αυτό ακριβώς το λόγο και η θερμοχωρητικότητα και η μάζα του εκφράζονται με τον ίδιο αριθμό.

Αυτό σημαίνει πως η θερμοχωρητικότητα οποιουδήποτε σώματος εκφράζεται με τη μάζα του ύδατος που λαμβάνεται αν πολλαπλασιασθεί η μάζα του σώματος επί την ειδική του θερμότητα. Έτσι ο αριθμός που προκύπτει ονομάζεται *αξία του σώματος σε ύδωρ* ή "*θερμικό ισοδύναμο*" του συγκεκριμένου σώματος ως προς το ύδωρ.

Μαθηματικά, ο λόγος της θερμότητας ΔQ που προσφέρεται σε ένα σώμα δια την ανύψωση της θερμοκρασίας του ΔT ονομάζεται **Θερμοχωρητικότητα**

$$C = \Delta Q / \Delta T \quad (1.2)$$

Η Ειδική Θερμοχωρητικότητα αναφέρεται στη μονάδα της μάζας, ενώ η Γραμμομοριακή Θερμοχωρητικότητα αναφέρεται σε ένα mole του υλικού.

Στη γενική περίπτωση, η θερμοχωρητικότητα ενός υλικού δεν είναι μια σταθερά, αλλά εξαρτάται από τη διαδικασία που ακολουθείται κατά τη θέρμανση του υλικού. Δηλαδή, για την ίδια μεταβολή θερμοκρασίας (ΔT), να συμβαίνουν διαφορετικές διαδικασίες θέρμανσης που μπορεί να απαιτούν διαφορετικά ποσά θερμότητας (ΔQ) [6].

1.2.7 Θερμότητα ατμοποίησης – Ολική Θερμότητα

Ο όρος **θερμότητα ατμοποίησης** χαρακτηρίζει τη θερμότητα που απαιτείται για τη συντέλεση του φαινομένου της ατμοποίησης. Το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την μετατροπή 1 Kg απεσταγμένου νερού θερμοκρασίας 0°C σε ατμό ορισμένης πίεσης p και θερμοκρασίας T_2 (της αντίστοιχης με τη πίεση), ονομάζεται "*ολική θερμότητα ατμοποίησης*".

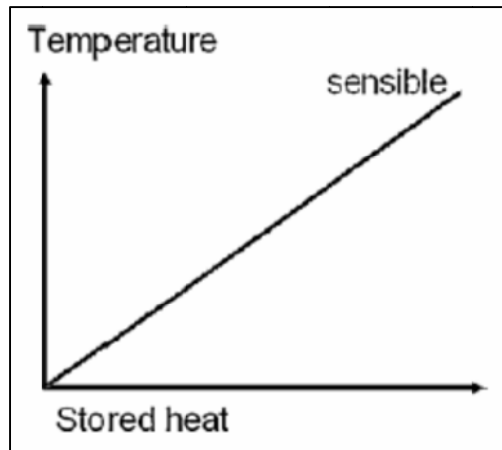
Η Ολική θερμότητα ατμοποίησης αναλύεται στην "*αισθητή θερμότητα*", (αυτή που γίνεται αντιληπτή με θερμομέτρηση, καθώς συνοδεύεται από αλλαγή θερμοκρασίας), και την "*λανθάνουσα θερμότητα*", (αυτή που δεν γίνεται αντιληπτή με θερμομέτρηση, αφού το θερμόμετρο δείχνει την ίδια θερμοκρασία). Η δεύτερη, η *λανθάνουσα θερμότητα*, διακρίνεται επιμέρους στην "*εσωτερική λανθάνουσα*" και την "*εξωτερική λανθάνουσα θερμότητα*".

1.2.7.1 Αισθητή θερμότητα

Αισθητή θερμότητα ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας 1 Kg νερού από 0°C μέχρι τη θερμοκρασία βρασμού, δηλαδή στους 100°C. Ονομάζεται έτσι επειδή γίνεται αντιληπτή από την ανύψωση θερμοκρασίας που παρατηρείται σε προσαρμοσμένο θερμόμετρο.

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

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι υπό τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Στο σχ. 2.1.5.1. που ακολουθεί, φαίνεται ότι καθώς αποθηκεύεται θερμότητα υπό τη μορφή αισθητής θερμότητας, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 1-3: Αποθήκευση θερμότητας ως Αισθητή θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή αισθητής θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο σε στερεά δομικά στοιχεία, όπως τούβλο, πέτρα κλπ καθώς επίσης και σε υγρά, όπως το νερό. Τα αέρια λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητάς τους δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας.

1.2.7.2 Λανθάνουσα θερμότητα

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

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

A) Εσωτερική λανθάνουσα θερμότητα

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

B) Εξωτερική λανθάνουσα θερμότητα

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

Η εξάτμιση είναι μια αλλαγή φάσης με μεγάλη μεταβολή του ενθαλπικού περιεχομένου του υπό εξάτμιση υλικού, ωστόσο η διαδικασία της εξάτμισης είναι αναγκαίο να γίνεται σε καθορισμένες συνθήκες, οι οποίες είναι:

- *Σταθερός όγκος* : η εξάτμιση συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης στον όγκο που εξατμίζεται, κάτι που τεχνικά δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί.

- *Σταθερή πίεση σε κλειστά Θ/Δ συστήματα* : που προκαλεί αύξηση του όγκου, γεγονός που επίσης δεν είναι τεχνολογικά επιτεύξιμο.

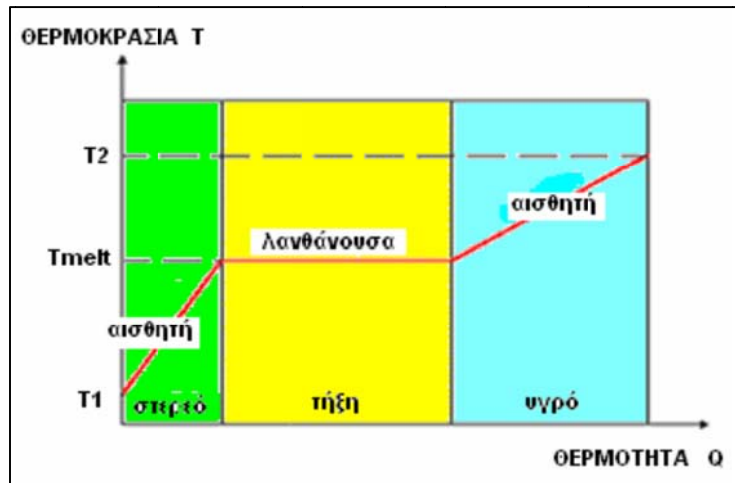
- *Σταθερή πίεση σε ανοιχτά Θ/Δ συστήματα* : καθώς το υλικό φορτίζεται θερμικά προκειμένου να εξατμιστεί, εξατμίζεται και διαφεύγει στο περιβάλλον. Ο μόνος τρόπος για να αποφορτιστεί το υλικό είναι να επανασυλλεγεί από το περιβάλλον. Το μόνο υλικό που είναι δυνατόν να συλλεγεί από το περιβάλλον είναι το νερό.

1.2.7.3 Αλλαγές φάσης μεταξύ στερεού και υγρού (τήξη)

Η τήξη είναι επίσης μια αλλαγή φάσης με μεγάλη μεταβολή του ενθαλπικού περιεχομένου του υπό τήξη υλικού. Η τήξη χαρακτηρίζεται από μικρή αλλαγή του όγκου του υλικού, που συνήθως υπολογίζεται στο 10 % του αρχικού όγκου. Αν το υλικό το οποίο τήκεται τοποθετηθεί σε ένα χώρο, τότε λόγω της τήξης η αλλαγή της πίεσης του υγρού δεν αλλάζει σημαντικά. Έτσι η στερεοποίηση και η τήξη γίνονται υπό σταθερή θερμοκρασία. Οι αλλαγές φάσεων μεταξύ υγρού και στερεού έχουν πολλές τεχνικές εφαρμογές.

Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης παρατηρείται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας κατά τη στερεοποίηση του νερού. Στην περίπτωση κλειστού δοχείου με νερό θερμοκρασίας δωματίου, αν αυτό τοποθετηθεί σε ψυχρό περιβάλλον, παρατηρείται σταθερή μείωση της θερμοκρασίας μέχρι το σημείο πήξης-τήξης. Στη συνέχεια παρατηρείται δημιουργία κρυστάλλων στο νερό, δηλαδή έναρξη της στερεοποίησης. Η θερμοκρασία δεν ελαττώνεται μετά το σημείο πήξης εξ αιτίας της λανθάνουσας θερμότητας πήξης. Αυτή προφανώς ισούται με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης η οποία πρέπει να αφαιρεθεί από το υλικό, ώστε να συνεχισθεί η θερμοκρασιακή πτώση. Μετά το πέρας της στερεοποίησης, η θερμοκρασία θα συνεχίσει την πτώση της, έως ότου ικανοποιηθεί η ισορροπία θερμοκρασιών περιβάλλοντος και του πάγου που δημιουργήθηκε. [5], [7]

Τα παραπάνω παρατηρούνται και στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Εικόνα 1-4: Διάγραμμα αλλαγής φάσης

Ένα υλικό δύναται να αποθηκεύσει θερμότητα με δύο μορφές: της αισθητής, που εκφράζεται με συνακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας του και της λανθάνουσας με την απαραίτητη αλλαγή φάσης (τήξη). [7]

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

$$Q_s = m \left[(T^* - T_1) c_{ps} + \lambda + (T_2 - T^*) c_{pl} \right] \quad (1.3)$$

όπου m είναι η μάζα του υλικού, c_{ps} και c_{pl} είναι οι θερμοχωρητικότητες της στερεής και της υγρής φάσης αντίστοιχα και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα.

Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του νερού είναι 79.72 cal/gr ή 334.5 kJ/kg

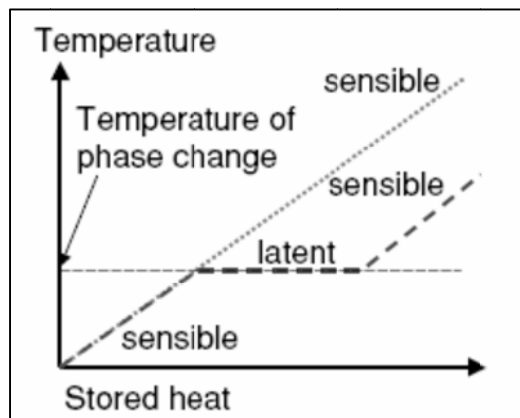
Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, άλλων γνωστών ουσιών:

Πίνακας 1-2: Λανθάνουσα θερμότητα γνωστών ουσιών

Ουσία	Λανθάνουσα Θερμότητα(kJ/kg)
Μεθάνιο:	58.41
Αιθάνιο:	95.10
Προπάνιο:	79.96
Μεθανόλη:	99.16
Αιθανόλη:	108.99
Γλυκερόλη:	200.62
Μυρμηγκικό Οξύ:	276.35
Οξικό Οξύ:	192.09

Ακετόνη:	97.99
Βενζόλιο:	127.40
Μυριστικό Οξύ:	198.70
Παλμιτικό Οξύ:	163.93
Στεατικό Οξύ:	198.91

Στην εικόνα 1-5 που ακολουθεί, φαίνεται η αποθήκευση θερμότητας ως λανθάνουσα θερμότητα για την περίπτωση αλλαγής φάσης μεταξύ στερεού – υγρού.



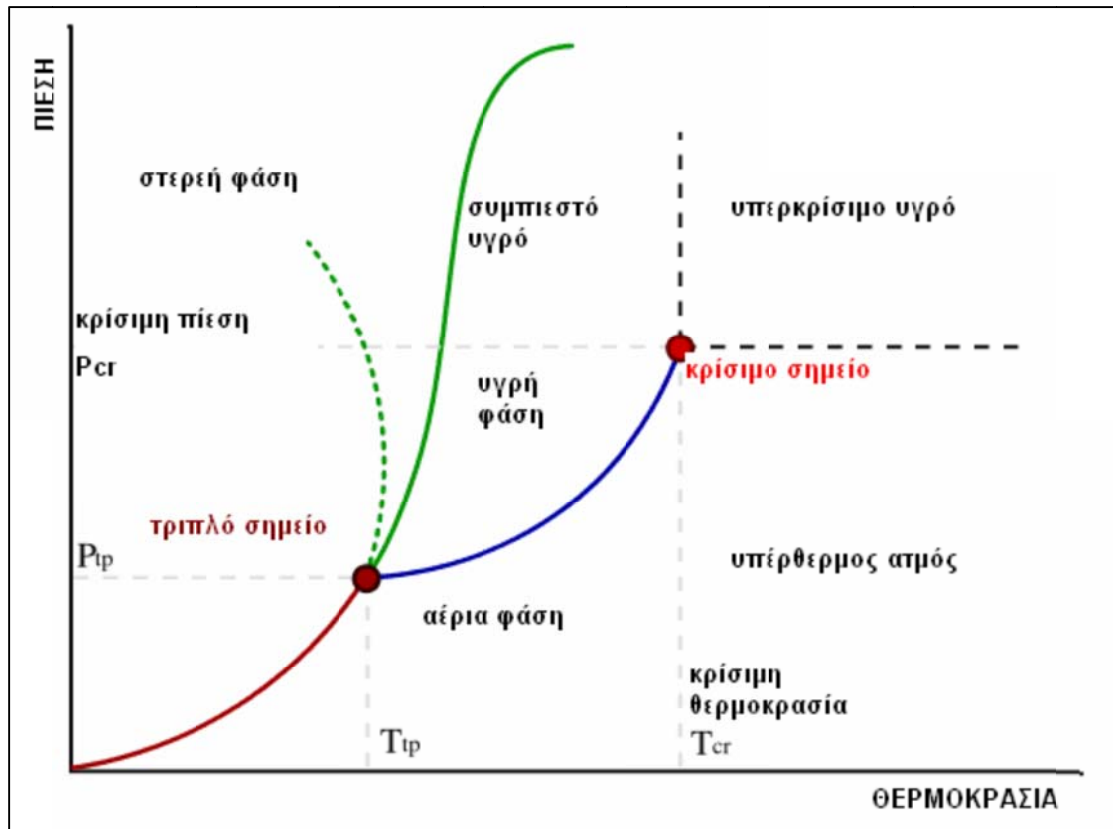
Εικόνα 1-5: Αποθήκευση θερμότητας ως Λανθάνουσα θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

1.2.7.4 Αλλαγές φάσης μεταξύ στερεού και στερεού .

Οι αλλαγές φάσης στερεού – στερεού παρουσιάζουν ομοιότητες σε σχέση με αυτές των στερεών και υγρών, αλλά συνήθως δεν συνοδεύονται από αλλαγές της ενθαλπίας του υλικού.

1.2.7.5 Κρίσιμα σημεία

Σε συστήματα που περιέχουν υγρή και αέρια φάση υπάρχει ένας συνδυασμός η πίεσης και θερμοκρασίας που ονομάζεται κρίσιμο σημείο. Στο σημείο αυτό το υγρό είναι τόσο θερμό και υπό κατάλληλη πίεση, ώστε η διάκριση μεταξύ υγρής και αέριας φάσης είναι σχεδόν αδύνατη. [7]



Εικόνα 1-6: Ποιοτικό διάγραμμα T-P καθαρής ουσίας

1.2.8 Μέθοδοι Προσομοίωσης Μεταφοράς Θερμότητας με Αλλαγή Φάσης-Βασικές Προϋποθέσεις και Προσεγγίσεις

Κάθε μαθηματική περιγραφή ενός φυσικού φαινομένου περιέχει προσεγγίσεις και το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας με αλλαγή φάσης στερεού-υγρού, δεν αποτελεί εξαίρεση.

Οι εξισώσεις που διέπουν, βασίζονται στην ιδέα ενός μοντέλου συνέχειας. Επιπλέον, κάθε φάση υποτίθεται ότι είναι ομοιογενής και ισοτροπική. Η παρουσία της πυκνότητας που αλλάζει μεταξύ των φάσεων έχει μακροπρόθεσμες συνέπειες. Σε εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης, μη επιθυμητές κοιλότητες, οι οποίες δημιουργούνται επειδή η στερεή φάση είναι πιο πυκνή από την υγρή φάση, εμποδίζουν τη μεταφορά θερμότητας.

Οι μεταβολές θερμοκρασίας στο ρευστό είναι απαραίτητα παρούσες κατά τη διάρκεια της μεταφοράς θερμότητας και οι διαφορές πυκνότητας στο υγρό μπορεί να είναι επαρκώς μεγάλες για να παράγουν δυνάμεις πλευστότητας για ασταθείς καταστάσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να παράγουν ελεύθερες κινήσεις μεταφοράς. Η φυσική κυκλοφορία μεταφοράς στο υγρό θα μπορούσε να έχει σημαντική κατεύθυνση στην κίνηση. Καταστάσεις όπου οι διαφορές

πυκνότητας είναι παρούσες μεταξύ των φάσεων ή όπου οι μεταβολές πυκνότητας προκαλούνται στο υγρό, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή.

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν δύο μοντέλα μεταφοράς θερμότητας αλλαγής φάσης στερεού-υγρού:

(1) Η ουσία έχει μια ιδιαίτερη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και μια οξεία ορισμένη διεπαφή ή

(2) Η ουσία υφίσταται αλλαγή φάσης σε ένα εύρος θερμοκρασιών και υπάρχει μια περιοχή δύο φάσεων μεταξύ της στερεής και της υγρής φάσης.

Η επιλογή του μοντέλου που χρησιμοποιείται εξαρτάται από το υλικό αλλαγής φάσης (PCM).

Δύο μέθοδοι είναι διαθέσιμες για την ανάλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας αλλαγής φάσης, βασισμένες στην επιλογή της εξαρτημένης μεταβλητής που χρησιμοποιείται. Στην κλασική μέθοδο, η θερμοκρασία είναι η μοναδική εξαρτημένη μεταβλητή και οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας γράφονται χωριστά για τη στερεή και την υγρή περιοχή. Αυτή η προσέγγιση αναφέρεται ως η βασισμένη στην θερμοκρασία μέθοδος και είναι αυτή που χρησιμοποιείται συχνότερα.

Στη δεύτερη μέθοδο, η ενθαλπία χρησιμοποιείται ως εξαρτημένη μεταβλητή κατά μήκος της θερμοκρασίας. Αυτή η μορφοποίηση ονομάζεται μέθοδος ενθαλπίας. Η ισορροπία των μοντέλων θερμοκρασίας και ενθαλπίας έχει αποδειχθεί.

Αφότου η διεπαφή μεταξύ των δύο περιοχών στο μοντέλο θερμοκρασίας είναι, γενικά, μια άγνωστη καμπύλη, της οποίας η θέση και το σχήμα ποικίλουν με το χρόνο, οποιαδήποτε ορισμένη διαφορά ή ορισμένο στοιχείο ιδιαιτερότητας θέτει ένα πρόβλημα στο χειρισμό της διεπαφής. Παρ' όλ' αυτά, στο μοντέλο ενθαλπίας η διεπαφή εξαλείφεται από μελέτη στους υπολογισμούς και το πρόβλημα φτιάχνεται ισοδύναμο/αντίστοιχο με ένα πρόβλημα αγωγής θερμότητας χωρίς αλλαγή φάσης. [8]

Οι πιο κοινές αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας σε PCM, είναι η μέθοδος ενθαλπίας και η μέθοδος θερμοχωρητικότητας. Στην πραγματικότητα, στις καταστάσεις αλλαγής φάσης, περισσότερες από μία διεπαφές αλλαγής φάσης μπορούν να συμβούν ή οι διεπαφές μπορεί να εξαφανιστούν εντελώς. Επιπλέον, η αλλαγή φάσης συνήθως συμβαίνει σε ένα εύρος μη-ισοθερμικών θερμοκρασιών. Σε τέτοιες περιπτώσεις η εύρεση της διεπαφής στερεού-υγρού μπορεί να είναι δύσκολη ή ακόμα και αδύνατη. Από την άποψη των υπολογισμών είναι χρήσιμο ότι το πρόβλημα αναδιατυπώνεται με τέτοιο τρόπο που η συνθήκη

Stefan είναι σιωπηρά δεμένη σε νέους τύπους εξισώσεων και ότι οι εξισώσεις θερμότητας εφαρμόζονται σε ολόκληρη τη σταθερή περιοχή. Και με τις δύο μεθόδους είναι πιθανό να λάβουμε υπόψη το θερμοκρασιακό εύρος dT , στο οποίο πραγματοποιείται η τήξη ή η στερεοποίηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ)

2.1 Εισαγωγή

Όλα τα υλικά που είναι γνωστά σήμερα, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν, μπορούν να βρίσκονται σε μία από τις τρεις γνωστές καταστάσεις, στερεή, υγρή, αέρια.

Αν χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ταξινόμησης ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό, ο οποίος χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του υλικού, δημιουργούνται δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους. Σε αυτή την κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά αποτελεί η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο.

2. τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

Σε αυτή την κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για τη μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη.

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται, ονομάζονται **Υλικά Αλλαγής Φάσης (Υ.Α.Φ. (P.C.M., δηλ. Phase Change Material))**. Τα Υ.Α.Φ. (P.C.M.) είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η αποθήκευση ή η απελευθέρωση της θερμότητας πραγματοποιείται όταν το υλικό μεταπίπτει από τη στερεή στην υγρή φάση και αντίστροφα.

Αυτός ο ορισμός εμπεριέχει όλα τα γνωστά και χρησιμοποιούμενα σήμερα υλικά. Το καινοτόμο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης ομάδας υλικών όμως, είναι ότι δίνουν τη δυνατότητα στο μηχανικό-σχεδιαστή να εκμεταλλευτεί αυτή την φυσική ιδιότητά τους, ώστε να βελτιώσει τη θερμική συμπεριφορά πληθώρας συστημάτων και κατασκευών.

Στα πλαίσια του θερμοκρασιακού εύρους της ανθρώπινης θερμικής άνεσης (20-30 °C), τα υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι ιδιαίτερος αποδοτικά. Αποθηκεύουν περίπου 5 με 14 φορές περισσότερη ενέργεια κατ' όγκο απ' ότι τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως το νερό, η πέτρα, το τούβλο, και άλλα.

Ως υποψήφια ΥΑΦ (PCM) θεωρούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν φάση μεταξύ στερεής και υγρής κατάστασης, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο και υλικά που μεταβαίνουν από τη μία φάση στην άλλη με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τα υλικά που μεταπίπτουν σε αέρια κατάσταση κατά την αλλαγή φάσης δεν ενδιαφέρουν, λόγω των πρακτικών δυσκολιών που εμφανίζει η μεγάλη αλλαγή της πυκνότητας αλλά και της ίδιας της φύσης των αερίων.

Όσον αφορά τώρα, στα στερεά-υγρά ΥΑΦ (PCM), αυτά αρχικά συμπεριφέρονται όπως τα κλασσικά υλικά αποθήκευσης: η θερμοκρασία τους αυξάνει, όσο αυτά απορροφούν θερμότητα. Αντίθετα με τα κλασσικά (αισθητής θερμότητας) αποθηκευτικά υλικά, όταν τα ΥΑΦ (PCM) φτάσουν στο θερμοκρασιακό επίπεδο αλλαγής φάσης (σημείο τήξης), τότε απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας τους. Αντίστοιχα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία (θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου) του ΥΑΦ (PCM) ελαττωθεί, τότε αυτό στερεοποιείται ελευθερώνοντας το ποσό θερμότητας που είχε απορροφήσει κατά τη φάση της υγροποίησης. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα ΥΑΦ (PCM) απορροφούν και εκλύουν θερμότητα, διατηρώντας μία σχεδόν σταθερή θερμοκρασία.

Το ιδανικό ΥΑΦ (PCM) θα ήταν ένα υλικό που θα παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξης σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εκάστοτε εφαρμογής, να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση supercooling (υπόψυξης), να είναι χημικά σταθερό, άφθονο, φθινό στην παραγωγή, όπως επίσης να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό, ή εύφλεκτο. Τα υλικά που έχουν μελετηθεί τα τελευταία χρόνια είναι τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και εύτηκτα μίγματα οργανικών και μη οργανικών συστατικών.

Το πλέον γνωστό ΥΑΦ (PCM) είναι το νερό, που κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο, μπορεί να αποθηκεύσει πολύ μεγάλα ποσά θερμότητας (περίπου 80 φορές περισσότερη αποθηκευμένη ενέργεια σε σχέση με την υγρή του κατάσταση). Επειδή η χρήση του πάγου ως ΥΑΦ (PCM) παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα, που δημιουργούνται λόγω των ιδιοτήτων του νερού (Σ.Τ. 0 °C, μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία, χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης κλπ) η ιδέα ήταν να αναπτυχθούν υλικά με βάση το νερό, ώστε να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματά του (μεγάλη τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας) αλλά να μην παρουσιάζουν τα υπόλοιπα προβλήματα χρήσης του πάγου ως ΥΑΦ (PCM) και κυρίως την χαμηλή θερμοκρασία τήξης του. Έτσι δημιουργήθηκαν τα πρώτα ΥΑΦ (PCM) που

είναι τα ένυδρα άλατα, μία κατηγορία υλικών που αναπτύσσεται και τελειοποιείται ακόμη και σήμερα.

Τα ένυδρα άλατα είναι σχετικά ασταθείς ενώσεις με μόρια νερού που ανάλογα με την αποβολή ή απορρόφηση θερμότητας από το σύστημα, αποβάλλουν ή προσλαμβάνουν τα μόρια νερού. Ένα από τα πλέον γνωστά ένυδρα άλατα είναι το άλας του Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) με Σ.Τ. 32.4°C και λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης 254kJ/kg .

Κύριο πλεονέκτημα των ΥΑΦ (PCM) έναντι του πάγου είναι η δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας σε ένα μεγάλο εύρος από τους -40°C έως τους 110°C . Το χαρακτηριστικό αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα των PCM, διότι ανάλογα με την εφαρμογή, η επιθυμητή θερμοκρασία αλλαγής φάσης είναι και διαφορετική. Για παράδειγμα, η εφαρμογή στην τοιχοποιία ζητά θερμοκρασίες αλλαγής φάσης από 25°C έως 27°C , ενώ για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού το αντίστοιχο εύρος πρέπει να κυμαίνεται από 2 έως 5°C . [9], [10]

2.2 Κατηγοριοποίηση ΥΑΦ

Τα υλικά που αλλάζουν φάση και ειδικότερα αυτά που από στερεά μεταπίπτουν σε υγρά, ομαδοποιούνται με βάση τη σύστασή τους, σε οργανικά και ανόργανα υλικά.

2.2.1 Οργανικά ΥΑΦ

Τα οργανικά υλικά αντιπροσωπεύονται κυρίως από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά, τα οποία είναι μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως 25. Εξίσου σημαντικές κατηγορίες οργανικών υλικών είναι τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών.

Τα εμπορικά προϊόντα οργανικών υλικών είναι αρκετά φθηνότερα από τα ένυδρα άλατα με μέτριες τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 150kJ/kg) και δυνατότητα παραγωγής για σχεδόν όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Η εμφάνιση supercooling (υπόψυξης) είναι αμελητέα, είναι χημικά αδρανή και σταθερά, χωρίς να εμφανίζουν διαχωρισμό φάσεων ή εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους. Δυστυχώς όμως εμφανίζουν χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, ιδιότητα που περιορίζει τις εφαρμογές τους (περίπου $0,2\text{W/mK}$). Γι' αυτό το λόγο έχουν εξεταστεί πολλές περιπτώσεις εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό.

Επίσης στα οργανικά υλικά επηρεάζεται αρκετά η πυκνότητα του υλικού από τη φάση, ώστε είναι δυνατόν όταν το υλικό στερεοποιηθεί και αυξηθεί η πυκνότητά του, να αποκολληθεί από τα τοιχώματα του δοχείου, γεγονός που θα επηρεάσει αρκετά το φαινόμενο της αγωγής θερμότητας. Επίσης μειονέκτημα είναι η αναφλεξιμότητά τους, παρ' όλο που είναι κοινή άποψη των ερευνητών της περιοχής, ότι η χαμηλή τάση ατμών της παραφίνης, δεν εγκυμονεί κινδύνους ανάφλεξης. [10], [8]

2.2.1.1 Παραφίνες

Παραφίνη είναι το σύνηθες όνομα για μια ομάδα αλκανικών υδρογονανθράκων μεγάλου μοριακού βάρους, με γενικό μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} , με n μεγαλύτερο του 20. Παραφίνη είναι επίσης επιστημονική ονομασία για ένα αλκάνιο γενικότερα, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αναφέρεται γενικά σε ένα γραμμικό (κανονικό) αλκάνιο, ενώ τα ισοαλκάνια ονομάζονται ισοπαραφίνες. Κατατάσσονται στα οργανικά ΥΑΦ (PCM).

Τα αλκάνια είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες. Το πλέον απλό αλκάνιο είναι το μεθάνιο, CH_4 . Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των ατόμων που σχηματίζουν την ανθρακική αλυσίδα. Η ανθρακική αλυσίδα των κορεσμένων υδρογονανθράκων μπορεί να είναι γραμμική (C_nH_{2n+2}), ή με διακλαδώσεις (C_nH_{2n+2} , $n > 3$), ή κυκλικού σχήματος (C_nH_{2n} , $n > 2$). Η κατά IUPAC ονοματολογία των αλκανίων, ονομάζει υπό τον γενικό τίτλο αλκάνια, όλες τις περιπτώσεις που υποπίπτουν στις δύο πρώτες κατηγορίες, ενώ ονομάζει κυκλοαλκάνια αυτές που σχηματίζουν βρόχο. Αντίστοιχα τα αλκύλια, είναι μέρη ανθρακικής αλυσίδας, με έναν ελεύθερο δεσμό και ακολουθούν πιστά την ονοματολογία των αλκανίων (μεθύλιο, αιθύλιο, κλπ). Παρατηρούνται σαν πρόσθετα σε κύριες ανθρακικές αλυσίδες.

Τα αλκάνια δεν είναι ιδιαίτερα αντιδραστικές ουσίες και θεωρούνται βιολογικά υποπροϊόντα και είναι σημαντικά κυρίως λόγω των μη υδρογονανθρακικών ουσιών, οι οποίες μπορούν να προσαρτηθούν στην ανθρακική αλυσίδα. Σε κανονικές συνθήκες από CH_4 έως C_4H_{10} τα αλκάνια είναι αέρια. Από C_5H_{12} έως $C_{17}H_{36}$ είναι υγρά και από $C_{18}H_{38}$ και μετά είναι στερεά.

Το σημείο βρασμού των αλκανίων γενικότερα εξαρτάται από το μοριακό βάρος, και μάλιστα η συνάρτηση των δύο μεγεθών είναι σχεδόν γραμμική. Αντίστοιχα, οι κυκλικοί υδρογονάνθρακες έχουν υψηλότερο σημείο βρασμού από τους υδρογονάνθρακες ευθείας αλυσίδας ίδιου μοριακού βάρους. Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το σημείο τήξης, δηλαδή όσο περισσότερα άτομα άνθρακα στο μόριο του αλκανίου, τόσο υψηλότερο το σημείο τήξης.

Τα αλκάνια με περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα έχουν γενικά χαμηλότερο σημείο τήξης από αυτά με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, και αυτό διότι τα

μόρια με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, είναι καλύτερα χωροθετημένα, πράγμα που συνεπάγεται υψηλότερης απαιτούμενης προσθήκης θερμότητας για να σπάσουν οι δεσμοί και να επιτευχθεί η μετάβαση στην υγρή φάση. Οι περισσότερες παραφίνες αποτελούνται από ευθείες ανθρακικές αλυσίδες με δύο μεθυλικά μόρια κοντά στο τέλος της αλυσίδας. Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους. Υπάρχουν οι n-Παραφίνες, οι οποίες έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα και οι ισο-παραφίνες, των οποίων η ανθρακική αλυσίδα αποτελείται από περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα. Το κατά πόσον μία παραφίνη θα είναι ισο-παραφίνη ή όχι, εξαρτάται από τον αριθμό των αλκανίων που περιέχονται στην ουσία (75% έως 100%).

Το σημείο τήξης των παραφινών εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ατόμων άνθρακα του μορίου. Αλκάνια με ανθρακικό αριθμό από 14-40 έχουν σημεία τήξης από 6 °C έως 80 °C. Αυτές ονομάζονται καθαρές παραφίνες και δεν έχουν σχέση με τα κεριά παραφίνης, όπως ονομάζονται οι παραφίνες με ανθρακικό αριθμό από 8 έως 15, και χαμηλότερα σημεία τήξης από τις καθαρές παραφίνες, από 2 °C έως 45 °C ,δεν είναι διαλυτές στο νερό, αλλά διαλύονται στους αιθέρες, στο βενζόλιο, και σε συγκεκριμένους εστέρες. Δεν αντιδρούν με τα περισσότερα χημικά αντιδραστήρια, αλλά στην υγρή φάση τους είναι ιδιαίτερος εύφλεκτες.

Οι παραφίνες είναι ιδανικά υλικά για χρήση ως PCM. Έχουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος και μπορούν να δημιουργηθούν, μέσω μιγμάτων, υλικά κατάλληλα να καλύψουν οποιοδήποτε εύρος θερμοκρασιών, ανάλογα με την εκάστοτε εγκατάσταση. Είναι οργανικές ουσίες, επομένως είναι φτηνές και άφθονες. Έχουν αρκετά καλή αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με άλλα υλικά, το υλικό στερεοποιείται χωρίς εμφάνιση υπόψυξης και επομένως αποδίδει τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητά του. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που εμφανίζουν οι παραφίνες έναντι άλλων υλικών για εφαρμογές θέρμανσης σε κτίρια, είναι πως υπάρχει πλήθος παραφινών με σημεία τήξης από 20 °C -26 °C, στα πλαίσια δηλαδή που κυμαίνονται οι απαιτήσεις των εν λόγω συστημάτων.

Οι παραφίνες παρουσιάζουν χαμηλή πίεση ατμοποίησης, γεγονός που ερμηνεύει τις ελάχιστες απώλειες υλικού σε ένα μεγάλο βάθος χρόνου χρήσης. Το πλεονέκτημα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό για τις εφαρμογές όπου απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός κυκλικών φορτίσεων του υλικού . Για παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την εφαρμογή στην τοιχοποιία, όπου απαιτούμε περισσότερα από 25 έτη ζωής. Επιπλέον δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο.

Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο ότι οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10K (περίπου- 9K πριν το Σ.Τ. και 1K μετά από αυτό). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπ' όψη μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές.

Η ύπαρξη πληθώρας ουσιών λύνει τα χέρια των μελετητών και δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού και ανάπτυξης αποδοτικότερων και οικονομικότερων συστημάτων. Υπάρχει ακόμα χώρος για μελέτη και βελτίωση αυτών των συστημάτων, λόγω του υπαρκτού κινδύνου ανάφλεξης της υγρής φάσης της παραφίνης, καθώς επίσης και για την ανάπτυξη μεθόδων ακόμη καλύτερης ενσωμάτωσης της παραφίνης στα υλικά για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου διαφυγής PCM, όταν αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση. [10], [8], [11], [12]

2.2.1.2 Λιπαρά Οξέα

Στην Οργανική Χημεία και ειδικότερα στη Βιοχημεία, λιπαρό οξύ ονομάζεται ένα καρβοξυλικό οξύ, συνήθως με μακρά ανθρακική αλυσίδα, είτε κορεσμένη, είτε ακόρεστη. Καρβοξυλικά οξέα σαν το βουτυρικό οξύ (με 4 άτομα άνθρακα) θεωρούνται λιπαρά οξέα, παρά το ότι γενικότερα τα λιπαρά οξέα προέρχονται από φυσικά λίπη και έλαια και θεωρείται ότι έχουν τουλάχιστον 8 άτομα άνθρακα, όπως το καπριλικό οξύ.

Τα περισσότερα από τα φυσικά λιπαρά οξέα, έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα στην ανθρακική αλυσίδα τους. Στη βιομηχανία παράγονται από την υδρόλυση των εστερικών δεσμών ενός λιπαρού ή βιολογικού ελαίου (π.χ. τριγλυκερίδια), με την αφαίρεση της γλυκερόλης.

Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα κορεσμένα και τα ακόρεστα. Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα δεν περιέχουν καθόλου διπλούς δεσμούς ή άλλα λειτουργικά σύνολα κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας.

Ενδεικτικά κορεσμένα λιπαρά οξέα είναι:

- Βουτυρικό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$
- Μυριστικό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
- Παλμιτικό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
- Στεαρικό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$

Τα ακόρεστα λιπαρά οξέα είναι παρόμοιας μορφής με τα κορεσμένα, περιέχοντας όμως αυτή τη φορά αλκύλια κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας με αποτέλεσμα να υπάρχουν διπλοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων του άνθρακα. Ενδεικτικά ακόρεστα λιπαρά οξέα:

- Άλφα-λινολεϊκό οξύ: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

- Λινολεϊκό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
- Ολεϊκό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

Τα λιπαρά οξέα εμφανίζουν σημεία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα παρόμοια με αυτά των παραφινών. Το Βουτυρικό οξύ ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$) για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κτιριακές εφαρμογές και έχει χρησιμοποιηθεί σε πειράματα, όμως το κόστος του είναι τουλάχιστον 2 με 2,5 φορές μεγαλύτερο από την παραφίνη με αντίστοιχες θερμικές ιδιότητες. Αντίστοιχα, υπάρχουν λίγα λιπαρά οξέα τα οποία να είναι κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές, πράγμα που γίνεται εύκολα κατανοητό ότι είναι σημαντικό μειονέκτημα έναντι των παραφινών. Οι δύο επικρατέστεροι υπονήφιοι από αυτά τα υλικά για χρήση σε κτιριακές θερμικές εφαρμογές είναι το Καπρικό Οξύ [σημείο τήξης 31.5°C] και το Καπριλικό Οξύ [σημείο τήξης 16.5°C].

Τα λιπαρά οξέα σε θερμοκρασία δωματίου, υπόκεινται σε μία χημική αντίδραση, γνωστή σαν αυτό-οξειδωση. Το λιπαρό οξύ σπάει σε υδατάνθρακες, κετόνες, αλδεΐδες και μικρότερες ποσότητες αλκοολών και εποξικών. Επίσης συχνά στα τελευταία γίνεται επεξεργασία με συμπυκνωτικούς παράγοντες, όπως το κιτρικό οξύ.

Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτής της ομάδας υλικών είναι η κακοσμία, γεγονός που όπως γίνεται κατανοητό περιορίζει δραματικά τη χρηστικότητα του χώρου στον οποίο αυτά εγκαθίστανται. Παρ' όλ' αυτά, τα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσαν να ξεπεραστούν με κάποιου είδους συσκευασία, δίνοντας έτσι ένα PCM φτηνό, χημικά σταθερό, ιδανικό για κτιριακές εφαρμογές. [10], [8], [14], [13]

Πίνακας 2-1: Οργανικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM.

Compound	Melting point ($^\circ\text{C}$)	Heat of fusion (kJ/kg)
Butyl stearate	19	140
Paraffin $\text{C}_{16}\text{-C}_{18}$	20-22	152
Capric-Lauric acid	21	143
Dimethyl sabacate	21	120
Polyglycol E 600	22	127.2
Paraffin $\text{C}_{13}\text{-C}_{24}$	22-24	189
(34% Mistic acid + 66% Capric acid)	24	147.7
1-Dodecanol	26	200
Paraffin C_{18} (45-55%)	28	244
Vinyl stearate	27-29	122
Capric acid	32	152.7

2.2.2 Ανόργανα PCM

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος ανόργανων υλικών και παρουσιάζουν αρκετά καλές ιδιότητες (τιμή λανθάνουσας θερμότητας περίπου 250 kJ/kg και αγωγιμότητας 0.6 W/mK περίπου), μέτριο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις παραφίνες αλλά υψηλό κόστος πώλησης σε σχέση με τις τιμές πώλησης των παραφινών λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα και χρήση πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους.

Έχουν πραγματοποιηθεί πάρα πολλές μελέτες γύρω από τη χρησιμοποίηση ένυδρων αλάτων ως PCM. Ο κύριος λόγος είναι το σχετικά μεγάλο εύρος σημείων τήξης που διαθέτουν, σχεδόν από 0 °C έως 120 °C, πράγμα που τα κάνει κατάλληλα για πολλές θερμικές εφαρμογές και όχι μόνο για κτίρια. Ο χημικός τύπος είναι $M \cdot nH_2O$, όπου M είναι μία ανόργανη ουσία, ενυδατωμένη με n μόρια νερού, και σχηματίζει μία σύνθετη ουσία ικανή να αποθηκεύσει μεγάλο ποσό θερμότητας υπό μορφή λανθάνουσας. Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων, βασίζεται στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού, το οποίο αποβάλλεται όταν προσδοθεί θερμότητα στο άλας σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό, αποθηκεύεται θερμότητα στο ΥΑΦ (PCM), η οποία ανακτάται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος.

Βασικό μειονέκτημα των ανόργανων ΥΑΦ (PCM) και κυρίως των ένυδρων αλάτων είναι η ιδιαίτερα διαβρωτική συμπεριφορά τους με αποτέλεσμα την ασυμβατότητα του ΥΑΦ (PCM) με τα υλικά συσκευασίας, γεγονός που οδηγεί σε διαβρωτικά φαινόμενα στο δοχείο. Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν και άλλα προβλήματα όπως για παράδειγμα την αφυδάτωση του ένυδρου άλατος, λόγω συνεχούς και μακράς χρήσης, κατά την οποία οι φάσεις του ΥΑΦ (PCM) διαχωρίζονται κυρίως λόγω της πίεσης των ατμών του νερού, φαινόμενο το οποίο αντιμετωπίζεται με τη χρήση αεροστεγών δοχείων αποθήκευσης. Το φαινόμενο της αποσύνθεσης του ΥΑΦ (PCM) ή αλλιώς του διαχωρισμού των φάσεών του, είναι σοβαρό πρόβλημα και συμβαίνει λόγω της ανομοιομορφίας στην τήξη του υλικού, διαδικασία η οποία είναι μη αντιστρεπτή.

Το άλας του Glauber ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), με τυπική κατά βάρος σύσταση 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O είναι ένα από τα πλέον μελετημένα υλικά με θερμοκρασία τήξης 32,4 °C και λανθάνουσα θερμότητα 254 kJ/kg. Αν και είναι ένα από τα φθηνότερα υλικά που κυκλοφορούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων, ο σχηματισμός ιζήματος και το φαινόμενο supercooling (υπόψυξη) περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών. Ερευνητές προτείνουν την προσθήκη επιπλέον ύδατος, για την αποφυγή δημιουργίας ιζήματος, όμως κάτι τέτοιο θα

μειώνει την αποθηκευτική ικανότητα του υλικού. Ωστόσο έχει χρησιμοποιηθεί πληθώρα υλικών για την σταθεροποίηση του ΥΑΦ (PCM), προσπαθώντας παράλληλα να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας.

Συμπερασματικά, τα κυριότερα προβλήματα που εμφανίζει η χρήση των ένυδρων αλάτων δημιουργούνται λόγω της ανεπάρκειας σταθερότητας της χημικής σύνθεσης του υλικού και του φαινομένου διάβρωσης μεταξύ του υλικού και του υλικού συσκευασίας. Προφανώς, βασικό πλεονέκτημα των ένυδρων αλάτων έναντι των παραφινών όσον αφορά στις κτιριακές κυρίως εγκαταστάσεις είναι η μη αναφλεξιμότητά τους. Σημαντικό ρόλο παίζει και η πυκνότητα του ΥΑΦ (PCM) όταν τα υλικά χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις ή εφαρμογές που από τη φύση τους απαιτούν οικονομία χώρου. Σε γενικές γραμμές τα ένυδρα άλατα είναι πυκνότερα υλικά από τα υπόλοιπα ΥΑΦ (PCM) και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικού. [10], [8], [14]

Ενδεικτικές τιμές πυκνότητας των βασικών κατηγοριών PCM:

- Ένυδρα άλατα περίπου 1500 kg/m³
- Λιπαρά οξέα περίπου 900 kg/m³
- Παραφίνες περίπου 800 kg/m³

Πίνακας 2-2: Ανόργανες εύτηκτες ενώσεις με πιθανή χρήση ως PCM.

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
66.6% CaCl ₂ · 6H ₂ O + 33.3% MgCl ₂ · 6H ₂ O	25	127
48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H ₂ O	26.8	188
47% Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O + 53% Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	30	136
60% Na(CH ₃ COO) · 3H ₂ O + 40% CO(NH ₂) ₂	30	200.5

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατηγοριών ΥΑΦ

Συγκεντρωτικά για τις δύο βασικές κατηγορίες ΥΑΦ (PCM) παρατίθενται τα σημαντικότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της κάθε κατηγορίας. Σημειώνεται εδώ ότι κάθε εφαρμογή στην οποία επιδιώκεται η εισαγωγή ΥΑΦ (PCM), έχει ξεχωριστές παραμέτρους και ιδιαιτερότητες, οπότε τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έχουν διαφορετική βαρύτητα από εφαρμογή σε εφαρμογή.

Οργανικά ΥΑΦ

1. Πλεονεκτήματα:

- Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού

- Μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- Χημική και θερμική σταθερότητα
- Χαμηλό κόστος αγοράς σχετικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες ΥΑΦ (PCM)
- Παραγωγή υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

2.Μειονεκτήματα:

- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα ανόργανα
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερος από τα ανόργανα
- Αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (200 °C)
- Πυκνότητα χαμηλότερη από τα ανόργανα

Ανόργανα ΥΑΦ

1.Πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη τιμή λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης (σε σύγκριση με τα οργανικά)
- Μη αναφλέξιμα
- Πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

2.Μειονεκτήματα:

- Διαβρωτικά (απαραίτητη αποθήκευση υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- Εμφάνιση supercooling
- Διαχωρισμός των φάσεων (μεταβλητή τιμή διαλυτότητας με τη θερμοκρασία)
- Δυνατή δημιουργία ιζήματος
- Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία. [15]

Πίνακας 2-3: Εμπορικά PCM διαθέσιμα στη διεθνή αγορά [15]

PCM name	Type of product	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Source
RT 20	Paraffin	22	172	Rubithem GmbH
Climsel C23	Salt hydrate	23	148	Climator
ClimselC24	Salt hydrate	24	216	Climator
RT 26	Paraffin	25	131	Rubithem GmbH
RT 25	Paraffin	26	232	Rubithem GmbH
STL 27	Salt hydrate	27	213	Mitsubishi chemical
S27	Salt hydrate	27	207	Cristopia
RT 30	Paraffin	28	206	Rubithem GmbH
RT 27	Paraffin	28	179	Rubithem GmbH
TH 29	Salt hydrate	29	188	TEAP
Climsel C32	Salt hydrate	32	212	Climator
RT32	Paraffin	31	130	Rubithem GmbH

2.4 Χαρακτηριστικά ΥΑΦ

Ακολουθεί μία σύντομη παράθεση των βασικών χαρακτηριστικών θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά του θερμικού συστήματος του κάθε υλικού.

Η θερμοχωρητικότητα για όλα τα ΥΑΦ (PCM), ανεξαρτήτως αν πρόκειται για οργανικά ή ανόργανα, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Δεν έχει βρεθεί μέχρι σήμερα κάποιος νόμος που να περιγράφει τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας και να καλύπτει ένα μεγάλο εύρος υλικών. Επί του παρόντος χρησιμοποιείται η σύμβαση με την οποία οι δύο φάσεις (στερεή και υγρή) του υλικού αντιμετωπίζονται με δύο αντίστοιχες τιμές για τη θερμοχωρητικότητα, τιμές που θεωρούνται πρακτικά σταθερές για το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιείται το υλικό, αλλά δεν υπάρχει σαφής απάντηση για την τιμή της θερμοχωρητικότητας στη διαφασική περιοχή. Πρακτικά, δίνονται πολυωνυμικές και εκθετικές συναρτήσεις για το κάθε ΥΑΦ (PCM), χωρίς να έχει εξαχθεί σήμερα μια οικουμενική συνάρτηση που θα αντιπροσωπεύει μια μεγάλη ομάδα από αυτά. Το μοντέλο εξέλιξης του C_p που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ΥΑΦ (PCM) στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο. Επιγραμματικά εδώ μπορούμε να αναφέρουμε ότι θεωρήσαμε γραμμική αύξηση ως το μέσο του διαστήματος και στη συνέχεια γραμμική μείωση τέτοια ώστε το συνολικό εμβαδόν του σχηματιζόμενου τριγώνου να είναι ίσο με τη θερμότητα αποθήκευσης του ΥΑΦ (PCM).

Η τιμή της μέγιστης λανθάνουσας θερμότητας που μπορούν να αποθηκεύσουν τα ΥΑΦ (PCM) ανά μονάδα μάζας, είναι δείκτης αποδοτικότητας για κάθε εφαρμογή, καθώς είναι επιθυμητή η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αποθήκευση ανά μονάδα μάζας υλικού. Τον ίδιο ρόλο (ποιοτικά κατά τις εφαρμογές) παίζει και η πυκνότητα του ΥΑΦ (PCM).

Για να υπάρχει αποδοτική μεταφορά θερμότητας πρέπει το υπεύθυνο υλικό να έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα (k). Τα ΥΑΦ (PCM) έχουν εν γένει μικρή τιμή θερμικής αγωγιμότητας, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα των ΥΑΦ (PCM) στις διάφορες εφαρμογές τους. Η τιμή θεωρείται πρακτικά σταθερή σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό φάσμα εφαρμογής. Λόγω της μικρής τιμής του k , ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στα ΥΑΦ (PCM) θεωρείται μη αποδοτικός, καθώς απαιτούνται για γρήγορη και αποτελεσματική χρήση των εφαρμογών των ΥΑΦ (PCM), υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές. Το μειονέκτημα αυτό, ανάλογα πάντα με την εφαρμογή, μπορεί σε κάποιο βαθμό να αντιμετωπιστεί με αντίστοιχα μεγάλες επιφάνειες μετάδοσης θερμότητας.

Υπάρχουν βέβαια κάποιες εφαρμογές όπως η μεταφορά τροφίμων, στις οποίες τα παραπάνω δεν είναι ιδιαίτερος σημαντικά. Όπως γνωρίζουμε η πυκνότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, οπότε κάθε υλικό που αλλάζει φάση, υπόκειται σε αλλαγές σχήματος και όγκου. Σε περίπτωση λοιπόν που υπάρχει ΥΑΦ (PCM) σε κλειστή συσκευασία, πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της ογκομετρικής αλλαγής και της συνεπαγόμενης μεταβολής της πίεσης στο εσωτερικό της συσκευασίας.

Οικολογικά, τα ΥΑΦ (PCM) δεν αποτελούν κάποιο κίνδυνο προς το περιβάλλον και πιο συγκεκριμένα έχουν κατηγοριοποιηθεί σαν ουσίες που δεν αποτελούν απειλή για το νερό και είναι 100% ανακυκλώσιμα. Επομένως δεν είναι ούτε τοξικά, ούτε επικίνδυνα προς την ανθρώπινη υγεία. Επεξεργασμένες τέτοιες παραφίνες ικανοποιούν και τις αυστηρότερες προϋποθέσεις ασφαλείας για επαφή με τρόφιμα και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων, σαν αυτούσια ή συστατικά υλικών συσκευασίας, ως επί το πλείστον. Στη φαρμακευτική και κοσμητική βιομηχανία, χρησιμοποιούνται ως βάση για πολλών ειδών κρέμες. [10], [8]

2.4.1 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των ΥΑΦ (PCM) σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών (χωρίς εκφυλισμό των ιδιοτήτων), ο οποίος μετράται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικές μονάδες χρόνου.

Η έλλειψη σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους:

- Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή υλικών που αποτελούν το ΥΑΦ (PCM).
- Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του ΥΑΦ (PCM) και του υλικού συσκευασίας.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών που ως αντικείμενο έχουν τη διατήρηση των ιδιοτήτων των ΥΑΦ (PCM) κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα, αφορούν στα ένυδρα άλατα. Για τις παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους έχει βρεθεί ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες καθώς επίσης και καμία επίδραση όταν έρχονται σε επαφή με τα περισσότερα υλικά (μεταλλικά αλλά και λοιπά δομικά υλικά). Αντιθέτως, τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερο διαδεδομένα μέταλλα (χαλκός, σίδηρος, κλπ).

2.4.2 Φαινόμενο supercooling (υπόψυξη)

Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αφορά στο σύνολο των ανόργανων ΥΑΦ (PCM) αλλά και σε μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο της υπόψυξης (supercooling or subcooling).

Ένα ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα έπρεπε να στερεοποιείται και να τήκεται στην ίδια θερμοκρασία,. Κάποια υλικά δεν στερεοποιούνται αμέσως, εάν η θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπόψυξη.

Η ύπαρξη supercooling οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης, συνεπώς η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Βασική παρατήρηση ότι όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός ψύξης του δείγματος, τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός supercooling. Θα πρέπει επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η «καθαρότητα» του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

Το φαινόμενο της υπόψυξης και τα προβλήματα τα οποία αυτό συνεπάγεται μπορούν να αντιμετωπιστούν με την προσθήκη στο υλικό τεχνητών παραγόντων πυρηνοποίησης, οι οποίοι είναι ουσίες με κρυσταλλική δομή παρόμοια, αν όχι ίδια με αυτή του υλικού στο οποίο προστίθενται και προστίθεται στο P.C.M. για να εξασφαλίσουν ότι η στερεή φάση θα σχηματισθεί με μηδαμινή ή ακόμα και καθόλου υπόψυξη.

Τα είδη των πυρήνων που μπορούν να προστεθούν είναι τα ακόλουθα :

- «Εγγενής» Πυρήνες (Intrinsic nucleators) : πρόκειται για ίδια συστατικά του ΥΑΦ (P.C.M.) , πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το ΥΑΦ (P.C.M.), διότι αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να τήξουν μαζί με αυτό και κατόπιν να είναι ανενεργά.

- «Συμβατοί» Πυρήνες (Extrinsic nucleators) : πρόκειται για χημικά τα οποία παρουσιάζουν όμοια δομή με αυτή των ΥΑΦ (P.C.M.), αυτό σημαίνει ότι έχουν παρόμοιες θερμοκρασίες τήξης με το ΥΑΦ (P.C.M.) που χρησιμοποιούμε. Επίσης θα πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το ΥΑΦ (P.C.M.), διότι αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να τήξουν μαζί με αυτό και κατόπιν να είναι ανενεργά [10], [16], [8], [17]

2.4.3 Διάβρωση

Πολύ σημαντικός παράγοντας στη λειτουργία ενός ΥΑΦ (PCM) είναι να μην είναι διαβρωτικό, κυρίως απέναντι σε μεταλλικά υλικά. Δυστυχώς τα ανόργανα υλικά στην πλειοψηφία τους είναι διαβρωτικά, οι παραφίνες όμως όχι. Η διαβρωτικότητα ενός ΥΑΦ (PCM) μπορεί σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης, σε βάθος χρόνου (όχι υποχρεωτικά μεγάλο) να καταστρέψει τη συσκευασία του ΥΑΦ (PCM) και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με ΥΑΦ (PCM) ο γραφίτης χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας. Παρ' όλ' αυτά ενισχύει και το φαινόμενο της οξειδωσης, όπου και όταν αυτό εμφανίζεται. [10], [8]

2.4.4 Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων

Η συμπεριφορά κατά την αλλαγή φάσης στα ένυδρα άλατα είναι μακράν πιο περίπλοκη απ' ό τι στα οργανικά ΥΑΦ (PCM), γιατί το υλικό περνά στάδια ενυδάτωσης και αφυδάτωσης, και όχι απλά τις φάσεις της τήξης και της στερεοποίησης.

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

Η μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και συνήθως μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός ανύδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο

λαμβάνει χώρα λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος (ανομοιόμορφη τήξη), δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συχνή εξασθένιση των ιδιοτήτων τους.

Προφανώς, λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο αυτών φάσεων, η στερεή φάση κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποσύνθεση του υλικού (ή διαχωρισμός των φάσεων). [10], [8]

2.5 Ιδιότητες ΥΑΦ

2.5.1 Θερμοφυσικές και χημικές ιδιότητες

- Θερμοκρασία τήξεως στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας.
- Υψηλός λόγος λανθάνουσας θερμότητας προς όγκο, ώστε ο απαιτούμενος όγκος να είναι ο ελάχιστος.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για σημαντική πρόσθετη αποθήκευση αισθητής θερμότητας.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα τόσο της στερεής όσο και της υγρής φάσης για να επικουρείται η φόρτιση/αποφόρτιση της ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης.
- Μικρή διαστολή-συστολή κατά την αλλαγή φάσης και μικρή τάση ατμών στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, ώστε να μειωθεί το πρόβλημα αποθήκευσης.
- Σταθερή συμπεριφορά με κάθε κύκλο τήξης/στερεοποίησης, για σταθερή αποθηκευτική ικανότητα του υλικού.
- Υψηλή αναλογία ξένων στοιχείων - πυρήνων (nucleation rate) ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπόψυξης της υγρής φάσης.
- Υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης των κρυστάλλων, ώστε το σύστημα να μπορεί να καλύπτει την ζήτηση ανακτώντας θερμότητα από το σύστημα αποθήκευσης.
- Ο κύκλος τήξης/στερεοποίησης να είναι πλήρως αναστρέψιμος.
- Να μην υποβαθμίζεται μετά από πολλούς κύκλους τήξης/στερεοποίησης (κόπωση).
- Να μην διαβρώνει τα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή.
- Να μην είναι τοξικό, να μην είναι εύφλεκτο και να μην εκρήγνυται.

2.5.2 Οικονομικά χαρακτηριστικά

- Χαμηλή τιμή πώλησης, ώστε να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα προϊόντα τα οποία προσφέρουν αποθήκευση θερμότητας για θέρμανση και ψύξη.
- Μη τοξικά, για περιβαλλοντικούς λόγους και λόγους ασφάλειας .
- Ανακυκλώσιμα, επίσης για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους. [18]

Συνήθως η επιλογή της χρήσης ενός υλικού αλλαγής φάσης γίνεται με κριτήριο την θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία και την δυνατότητα αναστρεψιμότητα του φαινομένου πήξης – τήξης. Όμως στην πλειονότητα των περιπτώσεων ένα υλικό δεν είναι δυνατόν να καλύψει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις, διότι για παράδειγμα όταν η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρή, τότε απαιτείται η τοποθέτηση του υλικού σε κάψουλες (encapsulation), ώστε να διευκολυνθεί η μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας. Επομένως έχουν αναπτυχθεί στρατηγικές και προσεγγίσεις οι οποίες έχουν στόχο να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα.

2.6 Τοποθέτηση Υ.Α.Φ. σε Κάψουλες και Σύνθετα Υλικά

Η τοποθέτηση των ΥΑΦ (P.C.M.) σε κάψουλες και η χρήση σύνθετων υλικών είναι δύο τεχνολογίες πολλά υποσχόμενες για το μέλλον των ΥΑΦ (P.C.M.). Στις περισσότερες των περιπτώσεων η τοποθέτηση του ΥΑΦ (P.C.M.) σε κάψουλες είναι αναγκαία για τεχνικούς λόγους, διότι υπάρχει κίνδυνος να έχουμε διαρροή της υγρής φάσης στον περιβάλλοντα χώρο. Διακρίνουμε δύο είδη ενσωμάτωσης των ΥΑΦ (P.C.M.) σε κάψουλες :

2.6.1 Macroencapsulation

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται τοποθέτηση του ΥΑΦ (P.C.M.) σε κάψουλες με διάμετρο μεγαλύτερη του 1 cm. Εκτός από το ότι αυτή η μέθοδος διατηρεί το υλικό του ΥΑΦ (P.C.M.) σε πεπερασμένο χώρο και εμποδίζει την επαφή του με άλλα συστατικά, η μέθοδος παρουσιάζει και τα ακόλουθα προτερήματα :

- Βελτιώνει τη συμβατότητα του υλικού με το περιβάλλον, καθώς λειτουργεί σαν φράγμα μεταξύ του ΥΑΦ (P.C.M.) και του χώρου που αυτό ευρίσκεται.
- Βελτιώνει τη διακίνηση του ΥΑΦ (P.C.M.) κατά την παραγωγή του.
- Μειώνει ουσιαστικά τις μεταβολές του όγκου, που συνήθως αποτελούν ένα πλεονέκτημα για τις περισσότερες εφαρμογές, ιδίως σε αυτές που οι χωροταξικές προδιαγραφές είναι σε στενά πλαίσια.

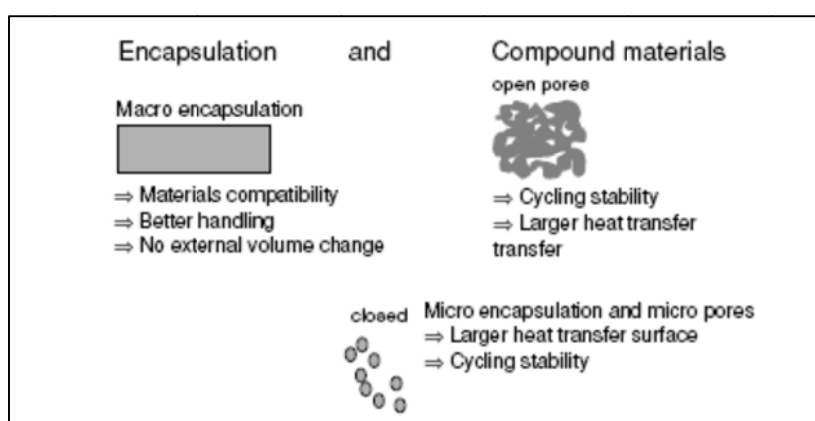
2.6.2 Microencapsulation

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται τοποθέτηση του ΥΑΦ (P.C.M.) σε κάψουλες με διάμετρο μικρότερη του 1 mm. Η μέθοδος έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτή της macroencapsulation, αλλά έχει επιπλέον τα εξής προτερήματα :

- Βελτιώνει τη μετάδοση θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο λόγω του μεγάλου ποσοστού της επιφάνειας συναλλαγής.
- Βελτιώνει ουσιαστικά την σταθερότητα της κυκλικής φόρτισης καθώς ο διαχωρισμός των φάσεων είναι ιδιαίτερα περιορισμένος λόγω των μικροσκοπικών διαστάσεων της κάψουλας που εμπεριέχει το ΥΑΦ (P.C.M.)

Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που αποτελούνται από ένα ΥΑΦ (P.C.M.) και τουλάχιστον ένα άλλο υλικό. Το άλλο υλικό χρησιμοποιείται για να βελτιώσει τουλάχιστον μια από τις ιδιότητες του ΥΑΦ (P.C.M.). Η χρήση σύνθετων ενώσεων έχει επιπλέον τα εξής προτερήματα :

- Βελτιώνει τη σταθερότητα της κυκλικής φόρτισης, αφού οι μικροσκοπικές δομές μειώνουν ουσιαστικά το διαχωρισμό των φάσεων στο τήγμα.
- Βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας, μέσω της προσθήκης των υλικών με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα όπως για παράδειγμα τον γραφίτη. [18]



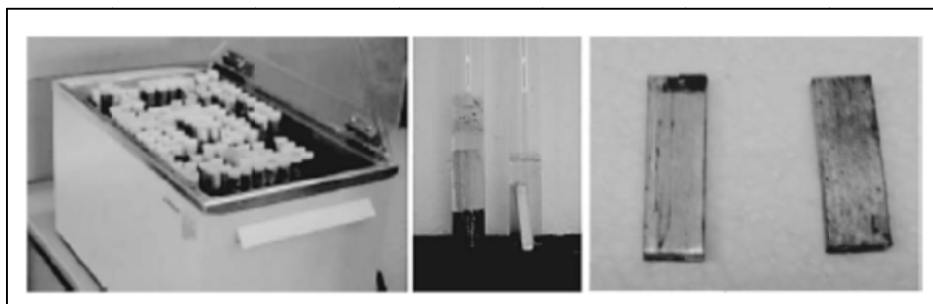
Εικόνα 2-1: Encapsulation και σύνθετα υλικά και μερικά από τα θετικά τους αποτελέσματα [18].

2.7 Συμβατότητα των ΥΑΦ με άλλα υλικά

Η συμβατότητα των ΥΑΦ (P.C.M.) με άλλα υλικά είναι σημαντική τόσο για τη διάρκεια ζωής του δοχείου ή της κάψουλας που φέρει το ΥΑΦ (P.C.M.), όσο και για μία πιθανή διαρροή του τήγματος προς τον περιβάλλοντα χώρο όπου μπορεί να προξενήσει προβλήματα. Τα πιο συνήθη προβλήματα αναφορικά με τη συμβατότητα των υλικών και τα ΥΑΦ (P.C.M.) είναι τα ακόλουθα :

- Διάβρωση των μετάλλων όταν έρθουν σε επαφή με ανόργανα ΥΑΦ (P.C.M.)
- Απώλεια σταθερότητας δομής των πλαστικών όταν έρχονται σε επαφή με οργανικά ΥΑΦ (P.C.M.)

- Μετακίνηση υγρών ή αερίων διαμέσου πλαστικών δοχείων, τα οποία επηρεάζουν τη δομή του περιεχόμενου ανόργανου ή οργανικού ΥΑΦ (P.C.M.) [18].



Εικόνα 2-2: Τεστ συμβατότητας για συνδυασμούς μετάλλων-ανόργανων PCM [18].



Εικόνα 2-3: Τεστ συμβατότητας για συνδυασμούς πλαστικών-ανόργανων ΥΑΦ και πλαστικών-οργανικών ΥΑΦ [18].

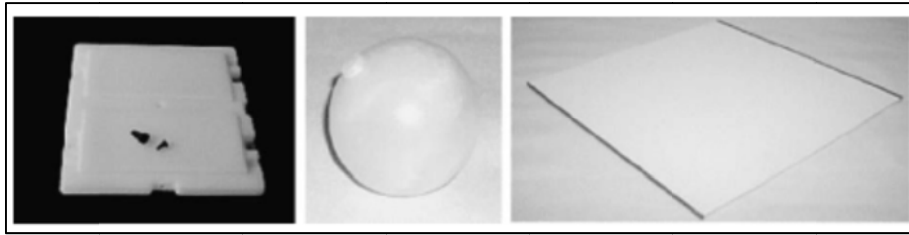
2.8 Ενώσεις PCM στην Αγορά

Προς στιγμήν περισσότερα από 50 ΥΑΦ (PCM) είναι εμπορικά διαθέσιμα από τις παρακάτω εταιρίες:

- RUBITHERM GmbH in Germany (<http://www.rubitherm.de/>).
- Dörken GmbH & Co. KG in Germany (<http://www.doerken.de/bvf/de/produkte/pcm/produkte/cool25.php>).
- Climator AB in Sweden (<http://www.climator.com/>).
- TEAP in Australia (<http://www.teappcm.com/>).
- CRISTOPIA Energy Systems in France (<http://www.cristopia.com/>).
- Mitsubishi Chemical in Japan.

Οι τιμές τους ποικίλουν σε εύρος 0,5-10Euro/kg.

Παρακάτω παραθέτω κάποιες εικόνες με τις συσκευασίες των ΥΑΦ (PCM) που κυκλοφορούν στην αγορά, από τις εταιρίες που προανέφερα.



Εικόνα 2-4: Από αριστερά προς τα δεξιά: Επίπεδη συσκευασία(Kissmann/Γερμανία), σφαίρες ΥΑΦ (PCM) και μπάρες διπλών πιάτων(Dorken/Γερμανία) [18]



Εικόνα 2-5: Macro encapsulation σε σάκους (αριστερά από την Climator/Σουηδία και δεξιά από την Dorken/Γερμανία) [18]



Εικόνα 2-6: Macro encapsulation σε λωρίδες κάψουλας όπως παράγονται από την TEAP/Αυστραλία και από την Dorken/Γερμανία για ανόργανα PCM. [18]



Εικόνα 2-7: Macro encapsulation σε αλουμίνια πορτραίτα, με πτερύγια για βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας(Climator/Σουηδία) [18]

2.9 Εφαρμογές

Τα ΥΑΦ (PCM) χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών και διαφορετικών πεδίων:

Σε συστήματα ηλιακής ενέργειας, για τον κλιματισμό κτιρίων, σε κτίρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, για αποθήκευση ενέργειας, ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας, σε βοηθητικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, σε αντλίες θερμότητας, σε διαστημικές εφαρμογές, συστήματα ψύξης φορητών Η/Υ, σε συστήματα τηλεπικοινωνίας και σε πολλές άλλες εφαρμογές.

Στον κλιματισμό κτιρίων υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι εφαρμογής των ΥΑΦ (PCM):

1. ΥΑΦ (PCM) μέσα στην τοιχοποιία.
2. ΥΑΦ (PCM) σε άλλα δομικά στοιχεία εκτός των τοίχων.
3. ΥΑΦ (PCM) σε δοχεία αποθήκευσης θερμότητας.

Τα πρώτα δύο συστήματα είναι παθητικά, δηλ. η αποθηκευμένη θερμότητα ή το ψύχος εκλύονται αυτόματα όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία ανέβει ή κατέβει πέραν της θερμοκρασίας αλλαγής φάσεως. Το τρίτο είναι ένα ενεργητικό σύστημα όπου η αποθηκευμένη θερμότητα βρίσκεται σε ένα θερμικά μονωμένο δοχείο. Έτσι χρησιμοποιείται μόνο κατά βούληση και όχι αυτόματα.

Οι εφαρμογές αυτές είναι πολύ ενδιαφέρουσες στην περίπτωση ελαφρών κατασκευών κτιρίων, οι οποίες έχουν μικρή μάζα αποθήκευσης θερμότητας με αποτέλεσμα η ημερήσια διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας να είναι μεγάλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των ΥΑΦ

Η πυκνότητα αποθήκευσης και οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης είναι πολύ σημαντικές παράμετροι, καθώς βάση αυτών καθορίζεται η ικανότητα αποθήκευσης, το μέγεθος και το εύρος λειτουργίας του συστήματος λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας. Αν οι τιμές αυτών των παραμέτρων παρουσιάζουν απόκλιση από τις πραγματικές, η αποθηκευτική ικανότητα θα είναι μικρότερη από την αναμενόμενη, με αποτέλεσμα το σύστημα να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές του. Η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που μπορούμε να αποθηκεύσουμε εξαρτάται από την ενθαλπική διακύμανση στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Πρέπει, συνεπώς, να είναι γνωστή και η ενθαλπική συνάρτηση ή η θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης, ώστε να είναι ακριβή τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου. Προκειμένου να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, πρέπει να ληφθεί υπ'όψη το θερμοκρασιακό εύρος, βάση του οποίου λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο υπολογισμός των ιδιοτήτων των ΥΑΦ (PCM) είναι εξαιρετικής σημασίας ζήτημα για την επιλογή του κατάλληλου υλικού ανά εφαρμογή. Οι κυριότερες ιδιότητες του υλικού που πρέπει να εξετάζονται είναι :

1. Σημείο τήξης
2. Σημείο πήξης
3. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
4. Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
5. Η λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης - στερεοποίησης
6. Ο βαθμός του supercooling
7. Ο βαθμός του phase segregation
8. Ο βαθμός διάβρωσης σε διάφορα «κοινά» υλικά

Οι ιδιότητες των ΥΑΦ (PCM) πρέπει να εξετάζονται με δύο κατηγορίες μεθόδων :

1. Μέθοδοι με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε περιορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα κύκλο φόρτισης του υλικού.
2. Μέθοδοι με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε εκτεταμένο χρονικό διάστημα και για πολλούς κύκλους φόρτισης του υλικού.

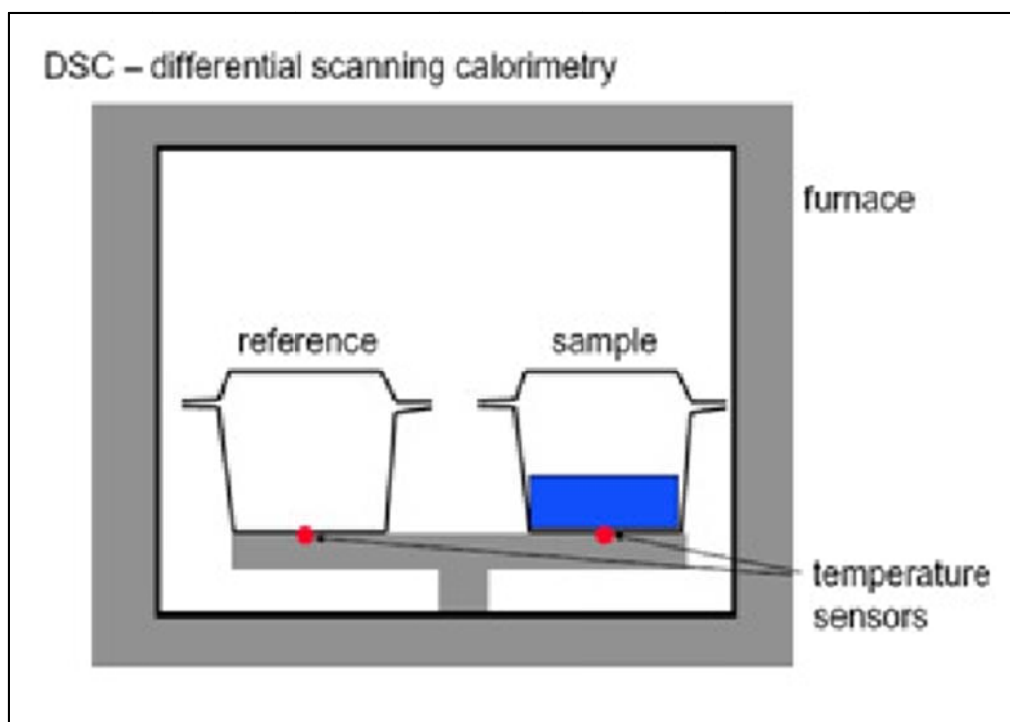
Οι μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των ΥΑΦ είναι οι εξής:

- Με συμβατικές μεθόδους καλοριμέτρων (conventional calorimetry methods)
- Με διαφορική θερμική ανάλυση (differential thermal analysis DTA)
- Με καλορίμετρα διαφορικής σαρώσεως (differential scanning calorimetry DSC)
- Με την μέθοδο T-history

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε κυρίως τη μέθοδο DSC, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα.

3.1 Μέθοδος DSC (διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης)

Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος θερμικής ανάλυσης. Σε ένα θερμοκρασιακό πρόγραμμα μετράται η διαφορά στην θερμική απόκριση του δείγματος και του υλικού αναφοράς. Υπάρχουν δύο μέθοδοι θερμοκρασιακού προγράμματος.



Εικόνα 3-1: Διάταξη μετρήσεως με καλορίμετρα σαρώσεως DSC [19]

3.1.1 DSC με σταθερό ρυθμό ψύξης και θέρμανσης (δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας, dynamic DSC)

Γίνεται εφαρμογή θερμοκρασιακού προγράμματος σταθερού ρυθμού ψύξης ή θέρμανσης για τον υπολογισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p . Για τις συνήθεις εφαρμογές, οι τυπικές τιμές του ρυθμού ψύξεως ή θερμάνσεως κυμαίνονται στο διάστημα 2 έως 10 K/min. Το σήμα που λαμβάνεται, κατά την μέτρηση, είναι ανάλογο προς την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ

μετρούμενου δείγματος και δείγματος αναφοράς. Έτσι, με την βοήθεια ενός δείγματος αναφοράς, του οποίου είναι γνωστή η καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας σε σχέση με την θερμοκρασία, υπολογίζεται η αντίστοιχη $Cp(T)$ για το μετρούμενο δείγμα.

Η εφαρμογή της μεθόδου DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης δεν ενδείκνυται για την μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των ΥΑΦ (PCM), γιατί κατά την αλλαγή φάσης, το δείγμα δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και έχουμε σημαντική κατανομή της θερμοκρασίας, μέσα σε αυτό. Για αυτό τον λόγο οδηγούμαστε σε λανθασμένα αποτελέσματα, των οποίων η απόκλιση εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, από τον ρυθμό θέρμανσης, από το μέγεθος της θερμοχωρητικότητας και από την θερμική αγωγιμότητα. Όμως οι θερμοφυσικές ιδιότητες των μετρούμενων υλικών συνήθως δεν είναι γνωστές με την επιθυμητή ακρίβεια, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να επιτύχουμε μείωση του σφάλματος. [19]

3.1.2 DSC ισόθερων βημάτων (isothermal steps mode)

Στην περίπτωση αυτή το δείγμα θερμαίνεται βηματικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική υστέρηση και έτσι παράγεται το σήμα εξόδου. Όταν θα φτάσει το δείγμα σε θερμική ισορροπία, το σήμα μηδενίζεται και ακολουθεί το επόμενο ισόθερμο βήμα. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του σήματος είναι ανάλογο της απορροφημένης θερμότητας από το δείγμα, στο συγκεκριμένο ισόθερμο βήμα. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα

3.1.3 Μέθοδος διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA)

Η διαφορική θερμική ανάλυση ορίζεται επισήμως ως μια τεχνική καταγραφής των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ μιας ουσίας και ενός υλικού αναφοράς σε συνάρτηση είτε με τον χρόνο είτε με τη θερμοκρασία, ενόσω τα δύο μείγματα υπόκεινται σε πανομοιότυπο θερμοκρασιακό καθεστώς, εντός περιβάλλοντος ελεγχόμενης θέρμανσης ή ψύξης. Με πιο απλά λόγια, η μέθοδος DTA περιλαμβάνει την θέρμανση ή την ψύξη ενός δείγματος και ενός αδρανούς υλικού αναφοράς κάτω από όμοιες συνθήκες, καταγράφοντας ταυτόχρονα τις θερμοκρασιακές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ τους. Οι διαφορές αυτές με την σειρά τους αναπαριστώνται διαγραμματικά ως προς τον χρόνο ή την θερμοκρασία. Η ύπαρξη του αδρανούς δείγματος συμβάλλει στον εντοπισμό των αλλαγών του μελετώμενου δείγματος που οφείλονται στην απορρόφηση ή έκλυση θερμότητας.

Θερμοκρασιακές διαφορές προκύπτουν όχι μόνο μεταξύ του δείγματος-αδρανούς υλικού αναφοράς αλλά και μεταξύ δύο αδρανών δειγμάτων, όταν η απόκρισή τους στην προσφερόμενη θερμότητα είναι διαφορετική. Αυτός είναι

και ο λόγος που καθιστά την DTA ικανή να εφαρμοστεί στη μελέτη θερμικών ιδιοτήτων και αλλαγών φάσης, που χαρακτηρίζονται από ενθαλπικές μεταβολές. Στις περιπτώσεις αυτές, η βασική καμπύλη του διαγράμματος θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ασυνέχειες στις μεταβατικές θερμοκρασίες ενώ η κλίση της σε οποιοδήποτε σημείο θα πρέπει να εξαρτάται από την κατάσταση της μικροδομής του δείγματος στην αντίστοιχη θερμοκρασία.

3.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των DSC και DTA

Το κύριο πλεονέκτημα των παραπάνω μεθόδων είναι η ακρίβεια των μετρούμενων μεγεθών. Τα μειονεκτήματα μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω. Το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρό, γεγονός που είναι αντίθετο με τη γνώση ότι ορισμένες ιδιότητες των ΥΑΦ (PCM) επηρεάζονται από το μέγεθος του δείγματος ή από το αν είναι συσκευασμένο ή όχι. Επιπλέον αν το υλικό είναι μη ομογενές δεν μπορεί να επιλεγθεί εύκολα δείγμα με αξιόπιστο τρόπο. Ακόμα σε μία μέτρηση δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα πολλά δείγματα, αλλά θα πρέπει να επαναληφθεί το πείραμα τόσες φορές όσα είναι και τα δείγματα. Τέλος ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι σχετικά πολύπλοκος και μεγάλου κόστους.

3.2 Η μέθοδος T-History

Οι μέθοδοι που περιγράφηκαν παραπάνω απαιτούν δείγμα υλικού, γεγονός που επιβάλλει την πολύ προσεκτική δειγματοληψία, ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι αντιπροσωπευτικά των ιδιοτήτων του υλικού αλλαγής φάσης. Στην περίπτωση δε που το υλικό έχει προκύψει ως σύνθεση άλλων, είναι τεχνικές πλήρως εξαρτώμενες από το δείγμα που λαμβάνουμε. Η λεγόμενη T-history, είναι μία εναλλακτική μέθοδος, η οποία είναι ιδανική για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των Υ.Α.Φ., τα οποία παρουσιάζουν ετερογένεια. Πρόκειται για μία τεχνική εύκολη, γρήγορη, κατά την οποία το υλικό τοποθετείται σε σφραγισμένο σωλήνα και επαναλαμβάνονται οι κύκλοι τήξης-πήξης, χωρίς να απαιτείται δειγματοληψία. Η αρχική T-history μέθοδος που προτάθηκε παρουσιάζει ατέλειες σε ότι αφορά τις θερμοφυσικές ιδιότητες, εξαιτίας ορισμένων μη έγκυρων φυσικών υποθέσεων που λαμβάνει υπ' όψη. Η έρευνα λοιπόν σήμερα οδηγείται στην κατεύθυνση των βελτιώσεων της Thistory μεθόδου [20].

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού, το συγκριτικά με τις προηγούμενες μεθόδους μεγάλο μέγεθος του δείγματος, η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα καθώς και η οπτική παρατήρηση του φαινομένου. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το σφάλμα των μετρήσεων έχει άμεση σχέση με τη προσεκτική κατασκευή

της διάταξης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται καθώς και τη διεξαγωγή του πειράματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογές ΥΑΦ

4.1 Εισαγωγή

Η χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης για αποθήκευση θερμότητας είναι γνωστή και εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια. Η χρήση του πάγου για τη διατήρηση των τροφίμων ήταν γνωστή από τα αρχαία χρόνια. Η χρήση λοιπόν του πάγου σαν υλικό αλλαγής φάσης αποτελεί ουσιαστικά η πρώτη χρήση τέτοιων συστημάτων. Τα ιγκλού (σπίτια από πάγο) κατασκευάζονταν χρησιμοποιώντας μεγάλα κομμάτια πάγου από την παγωμένη επιφάνεια ποταμών, τα οποία μετά αποθηκεύονταν σε πριονίδι για μετέπειτα χρήση κατά την περίοδο της Άνοιξης.

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

Τα ίδια υλικά χρησιμοποιήθηκαν και στη βιομηχανία φαρμάκων, σε πλαστικά δοχεία, ώστε να διατηρούν τα θερμοκρασιακά επίπεδα χημικών και φαρμάκων, κατά τη μεταφορά ή την αποθήκευσή τους. Το βασικό υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε σε τέτοιες εφαρμογές, ήταν κάποιο μίγμα ανόργανων αλάτων, όπως Θεϊκό Νάτριο, Θεϊκό Μαγνήσιο, Θεϊκό Κάλιο, Θεϊκό Αμμώνιο, Θεϊκό Ασβέστιο και κάποια χλωρίδια του Μαγνησίου.

Από τη στιγμή που η επιστημονική κοινότητα κατάλαβε τις προοπτικές των υλικών αλλαγής φάσης, ξεκίνησε να διεξάγει μελέτες και πειράματα για την εύρεση και ανάπτυξη όλο και καλύτερων, με διάφορα σημεία τήξης και υψηλές θερμότητες υγροποίησης.

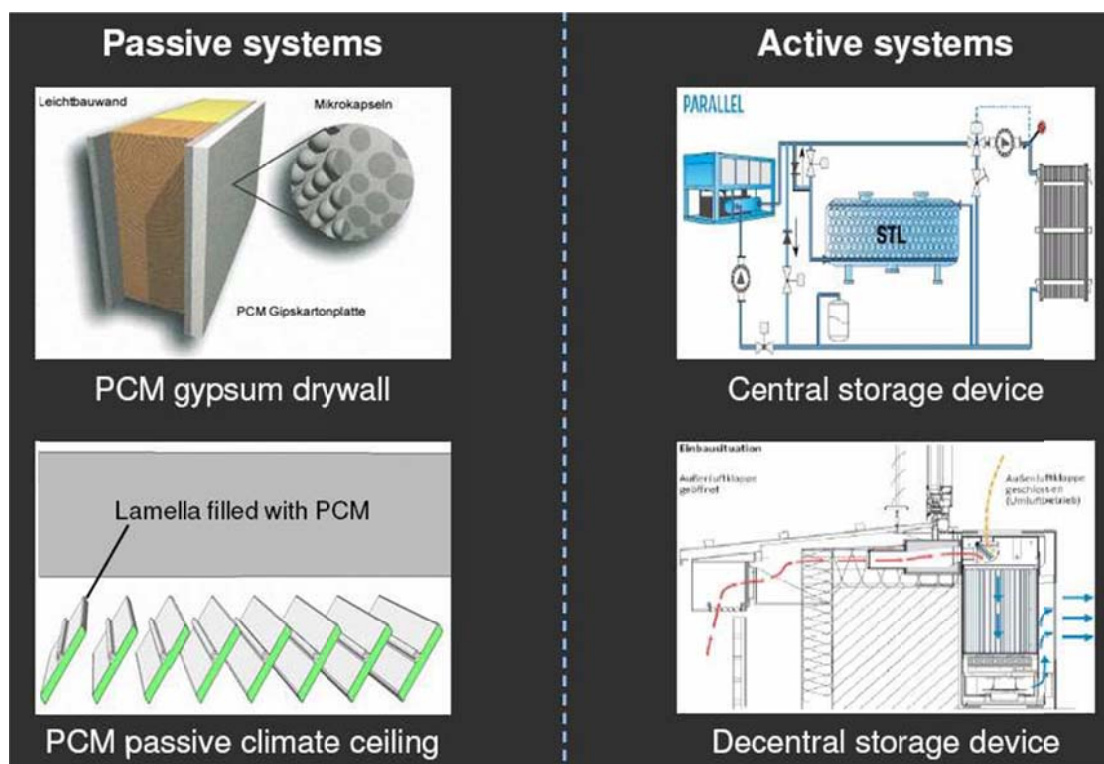
Σε πρώτη φάση το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στους μεμονωμένους χρήστες των συστημάτων αυτών και όχι σε τεχνολογικώς ανεπτυγμένα θερμικά συστήματα. Μερικά δείγματα δουλειάς, ήταν κάποια συστήματα, τα οποία προορίζονταν για εστιατόρες και ξενοδόχους και ήταν σχεδιασμένα να διατηρούν τα ζεστά πιάτα σε ικανοποιητική θερμοκρασία όση ώρα διαρκούσε το σερβίρισμα.

Άλλες εφαρμογές ήταν προϊόντα για τη διατήρηση ζεστών ροφημάτων, αλλά η εφεύρεση του "Θερμός" ήταν πολύ πιο αποτελεσματική, οπότε αυτό το προϊόν δεν έτυχε ιδιαίτερης προτίμησης, και διάφορα προϊόντα σε ρούχα διαβίωσης (ρούχα για ακραίες συνθήκες).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 διατέθηκε στην αγορά ένα φαρμακευτικό προϊόν, μία θερμαντική ζώνη που προοριζόταν για θεραπευτικούς σκοπούς, το οποίο βασιζόταν στη θερμική συμπεριφορά του Βορικού Θείου. Το πρώτο προϊόν το οποίο αναπτύχθηκε για θεραπευτικό σκοπό ήταν μία συσκευασία ψύξης, ονομαζόταν γενικά "cool pack" και αναπτύχθηκε από αθλίαιτρους σε συνεργασία με νοσοκομειακές μονάδες και η κύρια χρήση του ήταν να περιορίζει την εμφάνιση μώλωπα σε περίπτωση τραυματισμού. Το προϊόν αποτελείται από μία σακούλα που λειτουργεί σαν εξωτερική συσκευασία, η οποία είναι εσωτερικά χωρισμένη σε δύο τμήματα. Το ένα και μεγαλύτερο περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο έχει σταθεροποιηθεί σε υπόψυκτη κατάσταση. Το άλλο τμήμα περιέχει έναν παράγοντα πυρηνοποίησης, κάποιου είδους πηκτικό δηλαδή. Μια απότομη κίνηση καταστρέφει το διαχωριστικό εντός της συσκευασίας και επιτρέπει την ανάμιξη των δύο υλικών, με αποτέλεσμα το υλικό αλλαγής φάσης να σταθεροποιείται, απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη θερμότητα.

Κατ' αντιστοιχία αναπτύχθηκαν άλλα πακέτα με υλικά υψηλότερου σημείου τήξης για παραγωγή υψηλότερης θερμοκρασίας για ιατρικές εφαρμογές όπου ζητούμενο είναι να θερμανθεί η πληγείσα περιοχή. Τα λεγόμενα "hot packs" βρήκαν εφαρμογή και σε στρατιωτικά πακέτα εξοπλισμού επιβίωσης, όπως και σε ειδικά ενδύματα για συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας. Η εξέλιξη των προϊόντων ήταν φυσική εξέλιξη λόγω της τεχνολογικής προόδου και διατέθηκαν στην αγορά πολλά ακόμη προϊόντα επιβίωσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά αλλαγής φάσης με μεγάλη ποικιλία σημείων τήξης.

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκαν και από τη NASA στο διαστημικό της πρόγραμμα εξαιτίας της αποθηκευτικής τους ικανότητας και της δυνατότητας μείωσης των θερμικών φορτίων της κατασκευής. Αυτό που ενδιέφερε περισσότερο από όλα τους επιστήμονες στη NASA, ήταν η δυνατότητα διατήρησης σταθερών θερμοκρασιακών συνθηκών. Οι πρώτες εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης ήταν στην αποστολή Apollo 15, όπου χρησιμοποιήθηκαν σε επένδυση χώρου για να απορροφούν την επιπλέον θερμότητα που εκλυόταν από τα ηλεκτρονικά συστήματα, γεγονός που οδήγησε στη μείωση της χρήσης κλιματιστικών συσκευών για αυτό το σκοπό. Επίσης στην ίδια αποστολή χρησιμοποιήθηκαν υλικά αλλαγής φάσης σε κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών που ήταν εγκατεστημένο στην επιφάνεια του διαστημικού αεροσκάφους. [21]



Εικόνα 4-1: Ενεργητικά και παθητικά συστήματα

4.2 Υλικά Αλλαγής Φάσης για ψύξη και θέρμανση κτιρίων (παθητικά συστήματα)

Η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας στην πέτρα είχε παρατηρηθεί από τους αρχαίους χρόνους και αξιοποιηθεί στη κατασκευή των κατοικιών. Η χρήση όμως υλικών που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα παρουσιάζει διάφορα προβλήματα με κυριότερα την υπερβολική ποσότητα του υλικού που απαιτείται και τις ανεπιθύμητες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου.

Τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα κτίρια παραμένουν στη στερεή κατάσταση σε ολόκληρο το εύρος των θερμοκρασιών χρήσης τους. Ομοίως συμπεριφέρονται και τα συμβατικά μονωτικά υλικά τα οποία ως χαρακτηριστικό γνώρισμα έχουν την αντίσταση που παρουσιάζουν στη μεταφορά της θερμότητας μέσα από το σώμα τους. Αντίθετα με αυτή τη προσέγγιση μόνωσης των κτιρίων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν υλικά που θα αποθήκευαν τη θερμότητα που εισέρχεται στο κτίριο από το κέλυφος κατά την περίοδο του καλοκαιριού ώστε να μην αυξηθεί η θερμοκρασία των χώρων ή να αποθηκεύουν τη θερμότητα που προσπίπτει στο κτίριο με μορφή ηλιακής ακτινοβολίας ώστε μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας κατά την περίοδο του χειμώνα.

Property	Rock	Water	Organic PCM	Inorganic PCM
Density, kg/m ³	2240	1000	800	1600
Specific heat, kJ/kg	1.0	4.2	2.0	2.0
Latent heat, kJ/kg	–	–	190	230
Latent heat, kJ/m ³	–	–	152	368
Storage mass for 10 ⁶ J, kg	67,000	16,000	5300	4350
Storage volume for 10 ⁶ J, m ³	30	16	6.6	2.7
Relative storage mass	15	4	1.25	1.0
Relative storage volume	11	6	2.5	1.0

Εικόνα 4-2:Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται σε κτίρια

Παρ' όλο που η πρόοδος στη μελέτη και εφαρμογή των υλικών αυτών ήταν σε προχωρημένα στάδια, είχαν γίνει ελάχιστα βήματα για τη χρήση αυτών των υλικών σε σπίτια και στην ουσιαστική συμβολή τους στη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν μόλις από τη δεκαετία του 1920, ενώ κάποιες πειραματικές κατασκευές σπιτιών για πειράματα μεγάλης κλίμακας παρατηρήθηκαν από το 1940 έως το 1970. Παρ' ότι τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν επιτυχημένα, δεν υπήρξε περαιτέρω εξέλιξη ή μελέτη, αφού δεν υπήρξε σημαντική χρηματοδότηση, λόγω κυρίως έλλειψης πίστης στην επιτυχία του όλου εγχειρήματος.

Η βασική ιδέα των συστημάτων αποθήκευσης ως μέσα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μετατόπιση των μεγίστων ενεργειακών απαιτήσεων της εγκατάστασης σε ώρες εκτός των περιόδων μέγιστης ζήτησης του συστήματος διανομής ενέργειας ή η εξομάλυνση της καμπύλης ενεργειακής απαίτησης της εγκατάστασης ώστε να μην παρουσιάζονται σημεία αιχμής κατά την εικοσιτετράωρη λειτουργία της. Οι έρευνες που έχουν γίνει και γίνονται καθώς και οι εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί αποδεικνύουν ότι δομικά υλικά τα οποία έχουν εμποτιστεί με ΥΑΦ (PCM) ή δομικές κατασκευές που εμπεριέχουν ΥΑΦ (PCM), μπορούν να αποθηκεύσουν 5 – 14 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά.

Η εφαρμογή στις κτιριακές εγκαταστάσεις μπορεί να γίνει είτε με χρήση των ΥΑΦ (PCM) αυτούσια ως στρώμα υλικού μέσα στην τοιχοποιία ή σαν συστατικό σύνθετου υλικού με κύριο συστατικό το γύψο ή το τσιμέντο, όπως για παράδειγμα γυψοσανίδα με πρόσθετο συστατικό το ΥΑΦ ή σοβάς με ΥΑΦ. Η χρήση των ΥΑΦ (PCM) σε συνδυασμό με γυψοσανίδα συνήθως γίνεται σε αναλογία 20-30% PCM κατά βάρος. Ειδικά όταν χρησιμοποιούνται οργανικά PCM η ενσωμάτωση τους σε υλικά με υψηλό δείκτη πυραντίστασης εξασφαλίζει εν μέρη τη μη ανάφλεξη των PCM σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η ενσωμάτωση των PCM σε υλικά όπως ο γύψος ή το τσιμέντο εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό τη συγκράτηση του υλικού ακόμη και μετά την πλήρη υγροποίησή του, καθώς και τη μη πρόσληψη υγρασίας από τον αέρα του

περιβάλλοντος. Σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με την κατηγορία του υλικού (λιπαρά οξέα, ένυδρα άλατα) είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση του ΥΑΦ (PCM) σε προστατευτικό κάλυμμα πριν την ενσωμάτωσή τους σε δομικό υλικό. Για την κατηγορία των παραφινών πειραματικά αποτελέσματα έχουν αναδείξει τη συμβατότητά τους με το γύψο, καθώς και με το τσιμέντο και γι' αυτό το λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί δομικά υλικά εμποτισμένα με παραφίνες.

Παρακάτω εξετάζεται η λειτουργία που επιτελούν τα ΥΑΦ (PCM) κατά την χρήση τους στην τοιχοποιία. Κατά την περίοδο του καλοκαιριού η θερμότητα από το εξωτερικό περιβάλλον εισέρχεται στο κέλυφος του κτιρίου διαπερνώντας τα στρώματα του σοβά και του τούβλου και αντιμετωπίζει τη θερμική αντίσταση της μόνωσης. Στη κοινή κατασκευή τοιχοποιίας όσο ποσό θερμότητας διαπεράσει το στρώμα της μόνωσης θα εισέλθει στο χώρο μέσω των στρωμάτων του τούβλου και του σοβά. Στην περίπτωση της ενισχυμένης τοιχοποιίας με PCM το επιπλέον ποσό θερμότητας αποθηκεύεται στο υλικό και δεν περνά προς τον εσωτερικό χώρο. Κατά την περίοδο του χειμώνα ο αέρας του εσωτερικού χώρου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Σ' αυτή την περίπτωση η θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο διαπερνά τα στρώματα του σοβά και του τούβλου και εγκλωβίζεται στο ΥΑΦ (PCM) μην αφήνοντας να διαφύγει θερμότητα προς το περιβάλλον. Στη συμβατική περίπτωση όσο ποσό θερμότητας διαφεύγει από το στρώμα της μόνωσης καταλήγει στο περιβάλλον.



Εικόνα 4-3: Διατάξεις ενσωμάτωσης PCM σε ενδοδαπέδια θέρμανση, εσωτερική τοιχοποιία και ενδοδαπέδια θέρμανση

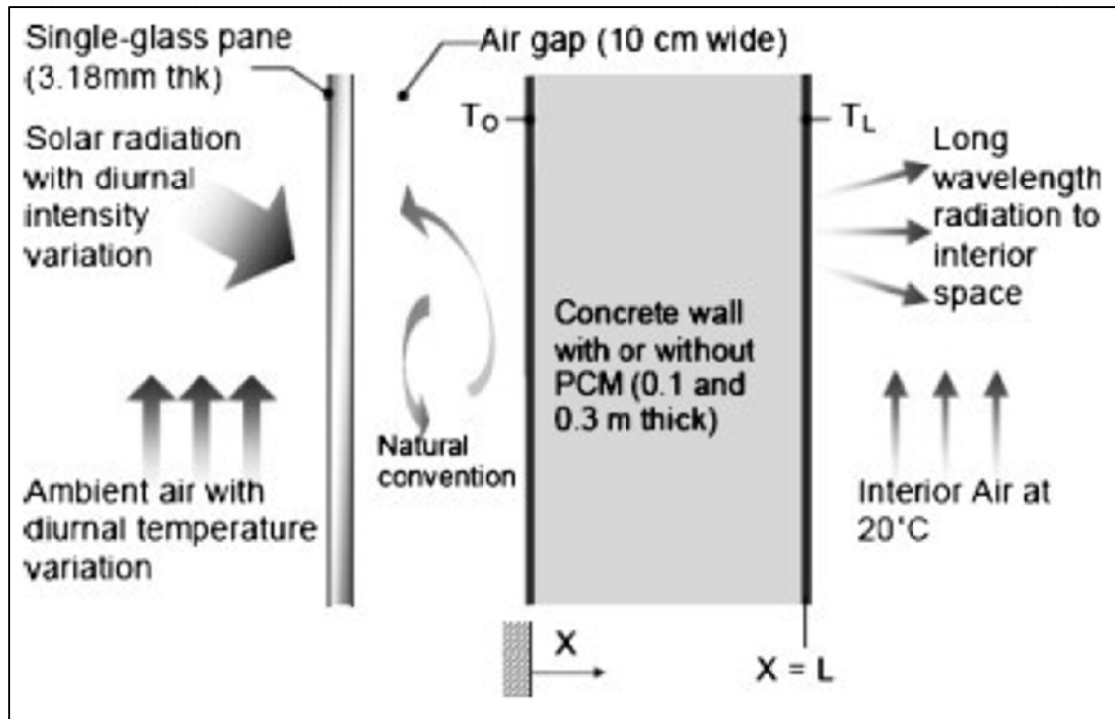
Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι για χρήση ΥΑΦ (PCM) στα κτίρια για θέρμανση-ψύξη:

- 1) Τοποθέτηση των ΥΑΦ στους τοίχους των κτιρίων.
- 2) Τοποθέτηση των ΥΑΦ σε στοιχεία των κτιρίων διαφορετικά από τους τοίχους.
- 3) Τοποθέτηση των ΥΑΦ σε θερμές και ψυχρές μονάδες αποθήκευσης.

Τα πρώτα δυο αναφέρονται σε παθητικά συστήματα, όπου η θέρμανση και η ψύξη που αποθηκεύονται αποδίδονται αυτόματα όταν η εσωτερική ή η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται κάτω από το σημείο τήξης. Το τρίτο είναι ένα ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή ψύξη βρίσκεται μέσα σε κάλυμμα, θερμικά μονωμένο από το κτίριο με μόνωση. Έτσι, η θερμότητα ή η ψύξη χρησιμοποιείται μόνο όταν αυτό απαιτείται και όχι αυτόματα. [22]

4.2.1 Τοίχος trombe με ΥΑΦ

Ο τοίχος trombe αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περίπτωσης με έμμεσο θερμικό κέρδος. Αποτελείται από ένα συνηθισμένο αλλά παχύ τοίχο στην νότια πλευρά του κτιρίου, με ένα γυάλινο ή πλαστικό κάλυμμα τοποθετημένο σε απόσταση περίπου τεσσάρων ιντσών από τον τοίχο. Θερμότητα από τον ήλιο αποθηκεύεται στον χώρο ανάμεσα στον τοίχο και στο κάλυμμα, Επιπλέον το μαύρο χρώμα της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου απορροφά επίσης θερμότητα, η οποία αποθηκεύεται στην μάζα του τοίχου. Θερμότητα αποδίδεται από τον τοίχο trombe στο κτίριο για αρκετές ώρες. Ο παραδοσιακός τοίχος trombe εκμεταλλεύεται την αισθητή θερμότητα, αλλά προκειμένου να αυξήσουμε την δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας, ο τοίχος trombe με PCM θα μπορούσε να είναι μια εξαιρετικά καλή λύση. Έτσι, ένας τοίχος που περιέχει PCM κατασκευάζεται στην νότια πλευρά του κτιρίου, ο οποίος θα θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια της ημέρας, τήκοντας το PCM, και αποδίδοντας την απορροφημένη θερμότητα το βράδυ προς θέρμανση του κτιρίου. Για δεδομένη ποσότητα θερμότητας που θέλουμε να αποθηκεύσουμε, οι μονάδες αλλαγής φάσης απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους με νερό ή από τους παραδοσιακούς τοίχους trombe, και είναι και πολύ ελαφρύτεροι. Συνήθως, ως PCM σε τοίχους trombe χρησιμοποιούνται ένυδρα άλατα και υδρογονάνθρακες. Ένα σχηματικό διάγραμμα τοίχου trombe, με PCM παρουσιάζεται παρακάτω: [23]



Εικόνα 4-4: Τοίχος Trombe [23]

Οι Buddhi και Sharma [16] μέτρησαν το κατά πόσο μεταφέρεται ηλιακή ακτινοβολία μέσω ενός υλικού αλλαγής φάσης για διαφορετικές θερμοκρασίες και πάχη. Ως PCM επιλέχθηκε στεατικό οξύ, και κατέληξε στο ότι στο PCM η ηλιακή ακτινοβολία μεταφέρεται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με το γυαλί για το ίδιο πάχος και μάλιστα πρότεινε μια καινούρια εφαρμογή, την εισαγωγή τους σε τοίχους παράθυρα, ως διαφανές μονωτικό υλικό.

4.2.2 Παραθυρόφυλλο με ΥΑΦ

Σε αυτή την εφαρμογή, παραθυρόφυλλο που περιέχει ΥΑΦ (PCM) τοποθετείται έξω από επιφάνειες παραθύρων. Κατά την διάρκεια της ημέρας είναι ανοιχτά προς το περιβάλλον, η εξωτερική του πλευρά εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται θερμότητα και το PCM λιώνει. Την νύχτα, κλείνουμε το παραθυρόφυλλο, ανοίγουμε το παράθυρο και θέρμανση από το PCM εισέρχεται λόγω ακτινοβολίας στον χώρο. Ο Budhi, ερεύνησε την θερμική συμπεριφορά ενός δοκιμαστικού δωματίου διαστάσεων 1 m x 1 100 m x 1m, με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Ως υλικό αποθήκευσης της λανθάνουσας μορφής θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το CG, και βρέθηκε ότι η ικανότητα θερμικής αποθήκευσης του δωματίου αυξήθηκε κατά 4 °C για 4-5 ώρες, όταν χρησιμοποιείται νύχτα, χάρη στην παρουσία του PCM. [23], [24]

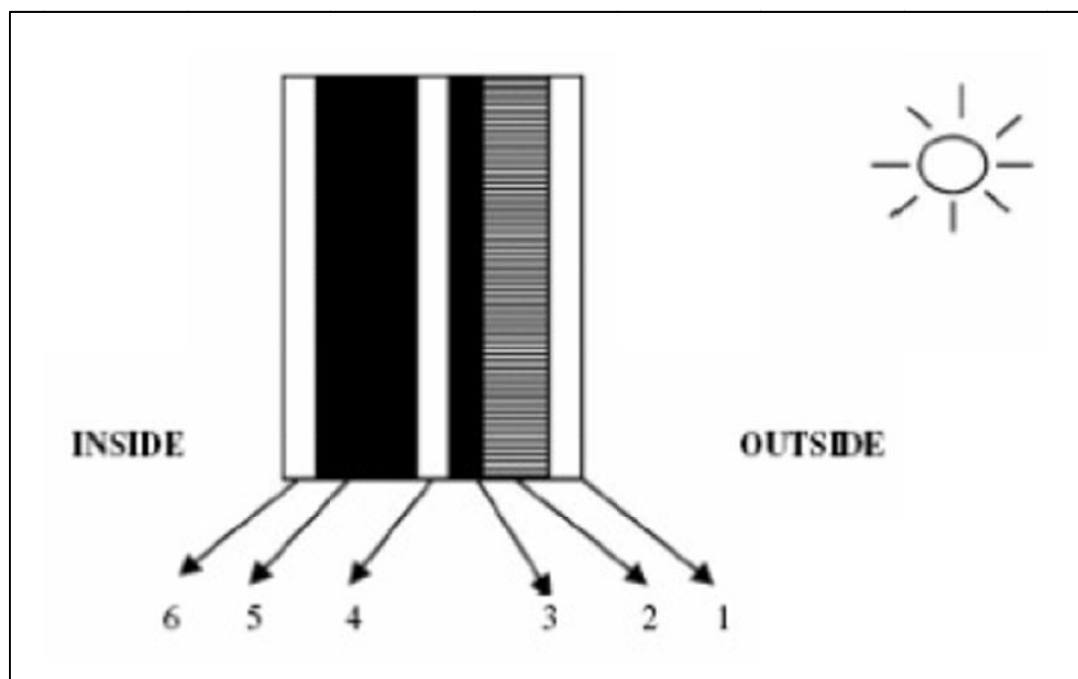


Εικόνα 4-5: Παραθυρόφυλλα με pcm [23]

4.2.3 Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας για αερισμό του κτιρίου

Όπως είναι γνωστό ένας τοίχος ΥΑΦ (PCM) έχει την δυνατότητα να αιχμαλωτίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους και στην οροφή του κτιρίου. Εξ αιτίας της μεγάλης θερμικής τους μάζας μπορούν να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου. Επιπλέον, είναι πολύ αποτελεσματικός στην μετατόπιση του φορτίου σε περιόδους μικρότερης ζήτησης. Οι Arkar και Medved σχεδίασαν και εξέτασαν ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LTHS) για τον αερισμό ενός κτιρίου. Οι σφαιρικές κάψουλες πολυαιθυλένης τοποθετήθηκαν σε ένα κανάλι του συστήματος αερισμού του κτιρίου και λειτούργησαν ως ένα πορώδες μέσο αποθήκευσης και απορρόφησης θερμότητα που απορροφήθηκε χρησιμοποιήθηκε για να προθερμάνει τον αέρα που εισέρχεται στο κτίριο. Ο "ηλιακός τοίχος" είναι μία άλλη εφαρμογή για την θερμική αποθήκευση με PCM. Σε αυτή την περίπτωση η ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο απορροφάται από το PCM και "θάβεται" στον τοίχο. Οι Stritih και Novak κατασκεύασαν έναν πειραματικό τοίχο, ο οποίος περιείχε μαύρο κερί παραφίνης ως PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση και τον αερισμό του κτιρίου και τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τους

ερευνητές , ήταν πολλά υποσχόμενα. Ο τοίχος αποτελείται από έξι κυρίως μέρη. [22]



Εικόνα 4-6: Στοιχεία ηλιακού τοίχου με pcm [22]

Η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος περνάει μέσα από το τζάμι με το διαφανές μονωτικό υλικό(1,2), το οποίο εμποδίζει την συναγωγή και την μεταφορά την θερμότητας με ακτινοβολία. Στη συνέχεια το PCM (3), το οποίο βρίσκεται σε μία διαφανή πλαστική θήκη από πολυκαρβονικό οξύ, απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια , κυρίως ως λανθάνουσα θερμότητα. Ο αέρας για τον αερισμό του κτιρίου θερμαίνεται στο κανάλι (4) και οδηγείται στο δωμάτιο, ενώ η μόνωση και ο γύψος (5) και (6) αντίστοιχα αποτελούν δεδομένα στοιχεία.

Ο "ηλιακός τοίχος" παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα .Καταρχήν, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα με τόσο υψηλή αποδοτικότητα οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατευθείαν από το PCM μέσω του διαφανούς πλαστικού τζαμιού, το οποίο ταυτόχρονα λειτουργεί και ως μονωτικό, εμποδίζοντας τις απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Επιπλέον, οι απώλειες λόγω της αγωγής στο δωμάτιο επίσης μειώνονται στην επιφάνεια του τοίχου.

4.2.4 Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο ΥΑΦ

Η γυψοσανίδα με ΥΑΦ (PCM) ή το πάνελ είναι ένας εξαιρετικά ενδιαφέρον τύπος υλικού, με ενσωματωμένο υλικό αποθήκευσης θερμότητας, για κατασκευή κτιρίου. Κατά την διάρκεια των περασμένων 20 έτων, πολλά είδη

καψουλών μεγάλων διαστάσεων βγήκαν στο εμπόριο τόσο για ενεργητικά όσο και για παθητικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένου του άμεσου κέρδους. Παρόλα αυτά, η επιφάνεια των περισσότερων εμπορικών προϊόντων που είναι αποθηκευμένα σε μορφή κάψουλας, δεν ήταν ικανή να μεταδώσει την θερμότητα στο κτίριο ύστερα από την τήξη του PCM από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Γυψοσανίδες με PCM θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν στις παραδοσιακές γυψοσανίδες κατά την διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτιρίου. Έτσι, θα παρέχουν στο κτίριο την θερμική αποθήκευση, η οποία θα διανέμεται σε όλη του την έκταση, ενισχύοντας το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία για θέρμανση-ψύξη. [22]

Ο Peirpo θεώρησε μία γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM ως μέσο αποθήκευσης σε μία ελαφριά κατασκευή κατοικίας έκτασης 120 m² με καλή μόνωση και μία μεγάλη έκταση της νότιας επιφάνειας κατασκευασμένη από γυαλί. Το κτίριο μπορούσε να εξοικονομήσει μέχρι 3 GJ το χρόνο ή αλλιώς το 15 % του ετήσιου ενεργειακού κόστους. Επιπλέον, κατέληξαν στο ότι η βέλτιστη αποθήκευση ενέργειας προκύπτει όταν το PCM έχει θερμοκρασία τήξης περίπου 1-3 °C πάνω από την μέση θερμοκρασία του δωματίου.

Οι Stetiu και Feustel ερεύνησαν την χρήση διπλής γυψοσανίδας με PCM για την περεταίρω αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας ενός κτιρίου, ώστε οι θερμοκρασίες του δωματίου να διατηρηθούν πιο κοντά στα ανώτερα όρια θερμικής άνεσης, χωρίς τη χρήση μηχανικής ψύξης. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση μίας οικίας με υψηλά εσωτερικά φορτία και δεδομένες καιρικές συνθήκες για την περιοχή Sunnyvale, California έδειξαν σημαντική πτώση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, όταν η θερμότητα αποθηκεύεται στο PCM των γυψοσανίδων. Αν και οι προσομοιώσεις έχουν δείξει τα πιθανά οφέλη από την χρήση των PCM στους τοίχους, οι ερευνητές κατάληξαν στο ότι ψύξη του "φακέλου" του κτιρίου μέσω της κίνησης του αέρα στον χώρο, αποτελεί έναν μη αποδοτικό τρόπο μεταφοράς της θερμότητας. Η κίνηση του αέρα κοντά στους τοίχους, η οποία καθορίζει και την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται, είναι σχετικά μικρή. Κυρίως σε περιόδους όπου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι σχετικά υψηλή και την νύχτα, θα ήταν αποδοτική η εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών των τοίχων για να διευκολύνει την ανταλλαγή θερμότητας. Η μειωμένη ικανότητα απόρριψης του αέρα που χρησιμοποιείται για ψύξη το καλοκαίρι, απαιτεί είτε αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας είτε μείωση του ποσού της θερμότητας που αποθηκεύεται.

Ο Neeper έχει εξετάσει την δυναμική μιας γυψοσανίδας με ενσωματωμένα λιπαρά οξέα και παραφίνη ως PCM που υπόκεινται στην ημερήσια

θερμοκρασιακή διακύμανση του δωματίου, χωρίς όμως να προσπίπτει άμεσα σε αυτά ηλιακή ακτινοβολία. Η παρατήρηση που έγινε από τον συγγραφέα είναι ότι η μέγιστη τιμή της ημερήσιας αποθηκευμένης ενέργειας προκύπτει όταν η τιμή της θερμοκρασίας τήξης του PCM σε κάψουλες πλησιάζει την μέση τιμή της θερμοκρασίας που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης. Μάλιστα, η ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια μειώνεται όταν η αλλαγή φάσης πραγματοποιηθεί σε ένα εύρος θερμοκρασιών.

Οι προσομοιώσεις των "ενεργειακών" κτιρίων βοηθούν στην εκτίμηση των διάφορων εφαρμογών των PCM για λόγους αποθήκευσης θερμότητας στα κτίρια. Έτσι, το Fraunhofer Institute, Germany προσομοίωσε την θερμική συμπεριφορά των στοιχείων κτιρίου, προκειμένου να συγκρίνει την δυναμική απόδοση των διαφόρων ειδών τοίχων, που περιείχαν ποικίλα PCM. Η βάση τους είναι ένα μοντέλο, που εξετάζει την αλλαγή φάσης και είναι εμπειρικά επικυρωμένο από μετρήσεις σε δείγματα τοίχων, διαστάσεων $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$. Ερεύνησαν την επίδραση που έχουν τα PCM ως συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής φάσης, της ποσότητας του PCM και της κατασκευής και χρήσης του κτιρίου. Με την βοήθεια θερμογράφων, φάνηκε ποσοτικά η επίδραση του PCM στα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή σε τέσσερα δείγματα τοίχων με διαφορετική ποσότητα PCM ενσωματωμένη στο καθένα, τα οποία είχαν θερμανθεί σε ένα φούρνο και στη συνέχεια παρακολουθούνταν η ψύξη τους. Η ποικιλία στις τιμές της θερμοκρασίας με τον χρόνο αποδεικνύει την επίδραση των PCM. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του PCM τόσο περισσότερο διαρκεί η αποβολή της θερμότητας που έχουν απορροφήσει. Επομένως, σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα ενός στοιχείου του κτιρίου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω της διαδικασίας αλλαγής φάσης, ώστε η θερμική άνεση που συνδέεται με τις βαριές κατασκευές των κτιρίων να μπορεί να προσεγγισθεί και από κατασκευαστικά υλικά για πιο ελαφριές κατασκευές.

Ο Kissock, έχει παρουσιάσει τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης τους πάνω στην θερμική συμπεριφορά γυψοσανίδων, οι οποίες έχουν απορροφήσει 30% κατά βάρος εμπορική παραφίνη. Στις προσομοιώσεις που έκανε, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του γύρω χώρου και οι εσωτερικές θερμοκρασίες στα κελιά των δοκιμών παρακολουθούνταν συνεχόμενα για 14 ημέρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης στο δοκιμαστικό κελί με PCM ήταν σχεδόν 10 μικρότερη από την αντίστοιχη στο κελί αναφοράς τις θερμές ημέρες.

Όμως, οι γυψοσανίδες με PCM παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Η κατάλληλη μεταβατική θερμοκρασία διαφέρει ανάλογα με το κλίμα της εκάστοτε περιοχής, ενώ το να επιτύχεις την σωστή θερμοκρασία γίνεται διπλά

δύσκολο σε περιοχές που έχουν ανάγκη τόσο από θέρμανση όσο και από κλιματισμό. Άλλα ζητήματα που προκύπτουν είναι η διάβρωση, η αναφλεξιμότητά τους και άλλα παραδοσιακά θέματα που αφορούν στην εφαρμογή τους, όπως η δυνατότητα να βαφτεί ο τοίχος. [22]

4.2.5 Μπλόκ τσιμέντου με ενσωματωμένο ΥΑΦ

Ο Hawes, παρουσίασε την θερμική συμπεριφορά ποικίλων ΥΑΦ (PCM) σε διάφορους τύπους τσιμεντένιων τοίχων. Η παρουσίαση αυτή κάλυψε την επίδραση της αλκαλικότητας του τσιμέντου, της θερμοκρασίας, τον χρόνο εμβαπτισμού και την αποδυνάμωση της δυνατότητας απορρόφησης του PCM κατά την διαδικασία της ενσωμάτωσης. Εξέτασαν τους μηχανισμούς απορρόφησης και ίδρυσαν μία μέθοδο ανάπτυξης και χρήσης των σταθερών απορρόφησης του PCM στο τσιμέντο, για να επιτύχουν την διάχυση της ζητούμενης ποσότητας PCM και επομένως την απαιτούμενη θερμική ικανότητα αποθήκευσης. Οι επιπτώσεις της αλλαγής του τσιμέντου και των βελτιωμένων τεχνικών ενσωμάτωσης έχουν αυξήσει την θερμική αποθήκευση κατά 300% περίπου. Η κύρια τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η εμβάπτιση των PCM σε πορώδη υλικά.

Ο Lee μελέτησε και παρουσίασε τα αποτελέσματα μακροσκελών δοκιμών που συγκρίνουν την συμπεριφορά, σε ότι αφορά στην θερμική αποθήκευση, των συνηθισμένων μπλοκ τσιμέντου με αυτά που έχουν ενσωματωμένους δύο τύπους από PCM, το BS και την εμπορική παραφίνη – P.1. Δύο τύποι μπλοκ μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν, το συνηθισμένο μπλοκ από τσιμέντο Portland, και το ένα μπλοκ, που αποτελείται από το ίδιο τσιμέντο αλλά έχει επιπλέον πυρίτιο. Η ενσωμάτωση επιτεύχθηκε με την εμβάπτιση του θερμού μπλοκ τσιμέντου σε λουτρό λιωμένου PCM ώσπου να απορροφηθεί η απαιτούμενη ποσότητα PCM, περίπου 3.9 - 8.6%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μπλοκ τσιμέντου είναι ικανά να αποθηκεύουν την λανθάνουσα και την αισθητή θερμότητα του ενσωματωμένου PCM καθώς και την αισθητή θερμότητα του τσιμέντου. Έτσι, επιτρέπεται η μετατόπιση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων από τις ώρες αιχμής.

Ο Hadjiena έχει εφαρμόσει την ίδια τεχνική ενσωμάτωσης για το τσιμέντο αλλά με $(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ ως PCM. Χρησιμοποίησε πορώδεις τσιμέντο και κατάφερε να γεμίσει τους περισσότερους πόρους του τσιμέντου σε ποσοστό περίπου 60%. Έτσι κατέληξε στο ότι η μεγάλη περιοχή απορρόφησης του εμπλουτισμένου με πυρίτιο πορώδους τσιμέντου λειτουργεί ως ένα πολύ καλό υποστηρικτικό πλέγμα για το $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, που βελτιώνει την δομική του σταθερότητα κατά την διάρκεια των θερμικών φορτίσεων. Μία τέτοιου είδους μικροενσωμάτωση σε κάψουλες μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά

αποτελεσματική, αφού η ενσωμάτωση του PCM γίνεται με έναν σχετικά οικονομικό τρόπο και περιορίζονται τα προβλήματα που συνδέονται με την χρήση των ένυδρων αλάτων, όπως το φαινόμενο υπόψυξης. [22], [23]

4.2.6 Θερμικά αυξημένος σκελετός τοίχου με ΥΑΦ

Ο Meng Zhang, παρουσίασε την ανάπτυξη ενός θερμικά αυξημένου σκελετού τοίχου, ο οποίος μειώνει τα μέγιστα της ζήτησης κλιματισμού σε κατοικήσιμα κτίρια. Ένας σκελετός τοίχου που περιέχει υψηλή κρυσταλλική παραφίνη ως PCM, μέσω μακροενσωμάτωσης σε κάψουλες είναι αυτός που αναπτύχθηκε, κατασκευάστηκε και αξιολογήθηκε. Αυτός ο πρωτότυπος τοίχος ονομάστηκε phase change frame wall (PCFW), και τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι ο PCFW μειώνει τα μέγιστα φορτία θερμορροής από τον τοίχο κατά 38%. Σε κτιριακές εφαρμογές, αυτό θα μπορούσε να μεταφραστεί σε χαμηλότερα φορτία κλιματισμού που απαιτούνται από τους τοίχους και τα ταβάνια, σε μετατόπιση μέρους του θερμικού φορτίου σε άλλες ώρες της ημέρας και στην σχετικά σταθερή εσωτερική θερμοκρασία του χώρου. Το χειμώνα, θερμότητα από τον εξοπλισμό-πηγή μπορεί να αποθηκεύεται στο PCFW, η οποία αργότερα θα αποδίδεται προς θέρμανση του σπιτιού, μειώνοντας έτσι τις φορτίσεις του εξοπλισμού, και επομένως αυξάνοντας την αποδοτικότητά του και τον χρόνο ζωής του. [22]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Το φυσικό πρόβλημα και η περιγραφή του

5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η επίδραση των υλικών αλλαγής φάσης στην εσωτερική θερμοκρασία πειραματικών σταθμών – οικίσκων με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα που έχουν ληφθεί στην Ισπανία από μετρήσεις σε αντίστοιχους σταθμούς.

Ουσιαστικά πρόκειται να αναλυθεί ένα σύνθετο πρόβλημα μηχανικής ρευστών και μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Τελικός σκοπός είναι ο προσδιορισμός της κατανομής θερμοκρασιών σε όλο το χωρίο επίλυσης, δηλαδή σε κάθε σημείο του εσωτερικού του οικίσκου, στα τοιχώματα και το δάπεδο του οικίσκου, καθώς και στον εξωτερικό χώρο πλησίον του οικίσκου. Για να επιλυθεί το παραπάνω πρόβλημα με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή χρειάζεται να αναπαραστήσουμε το πραγματικό πρόβλημα κάνοντας παραδοχές, οι οποίες όμως δεν αλλοιώνουν σε κρίσιμο βαθμό τη γεωμετρία ή το φυσικό φαινόμενο που μελετάμε. Αυτό το στάδιο ονομάζεται μοντελοποίηση του προβλήματος και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

5.2 Μεταφορά θερμότητας

5.2.1 Γενικά

Σύμφωνα με τη θερμοδυναμική η ενέργεια συναλλάσσεται μεταξύ των συστημάτων υπό μορφή έργου και θερμότητας. Ενώ όμως η θερμοδυναμική δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των ποσών θερμότητας ή έργου που συναλλάσσονται, καθώς και των τελικών καταστάσεων του συστήματος ή του εργαζόμενου μέσου, δεν δίνει πληροφορίες όσον αφορά στους μηχανισμούς, μέσω των οποίων γίνεται η μετάδοση της θερμότητας, ούτε για τους ρυθμούς με τους οποίους πραγματοποιείται η συναλλαγή αυτή της ενέργειας.

Γνωρίζουμε από την καθημερινή πρακτική ότι εάν ένα κομμάτι θερμού μετάλλου τοποθετηθεί μέσα σε κρύο νερό, το κομμάτι του μετάλλου ψύχεται ενώ το νερό θερμαίνεται, έως ότου και τα δύο αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία. Η εξίσωση της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας οφείλεται στην ροή θερμότητας από το θερμό σώμα προς το ψυχρό.

Η θερμότητα ορίζεται ως η μορφή ενέργειας που μεταδίδεται μέσα από το όριο ενός θερμοδυναμικού συστήματος συγκεκριμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο

σύστημα. - ή στο περιβάλλον - που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, λόγω ακριβώς αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο συστημάτων.

Η θερμότητα μεταδίδεται πάντα από σύστημα υψηλότερης προς σύστημα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η μοναδική αιτία αυτής της μεταφοράς ενέργειας είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ίδιο το σύστημα δεν περιέχει θερμότητα. Η θερμότητα μπορεί να οριστεί μόνο στα όρια του συστήματος, κατά τη διαδικασία της μεταφοράς της από ένα σύστημα σε ένα άλλο και για όσο χρόνο διαρκεί η μεταφορά. Στο προηγούμενο παράδειγμα τα δύο συστήματα του μετάλλου και του νερού δεν περιέχουν τα ίδια θερμότητα. Αυτό που περιέχουν είναι φυσικά ενέργεια (για την οποία θα μιλήσουμε στη συνέχεια). Η θερμότητα εμφανίζεται (στα όρια των συστημάτων) μέχρι να επέλθει θερμοκρασιακή ισορροπία στα δύο συστήματα.

Το αντικείμενο της Μετάδοσης Θερμότητας είναι η διερεύνηση των μηχανισμών με τους οποίους η θερμότητα μεταδίδεται μεταξύ των σωμάτων και η ποσοτικοποίηση αυτής της συναλλαγής. Θα μπορούσε να διατυπωθεί ο παρακάτω ορισμός για τη μετάδοση θερμότητας:

Μετάδοση θερμότητας είναι η μεταφορά ενέργειας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς.

Έτσι, όταν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ δύο εργαζόμενων μέσων ή δύο συστημάτων, παρατηρείται μετάδοση θερμότητας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί με τους οποίους πραγματοποιείται αυτή η μεταφορά ενέργειας. Ο πρώτος μηχανισμός αναφέρεται σε ακίνητο μέσο (στερεό, υγρό ή αέριο) και ονομάζεται **αγωγή (conduction)**. Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται σε μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού και ονομάζεται **συναγωγή (convection)**. Ο τρίτος μηχανισμός στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Έτσι μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας, χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου σώματος, με την εφαρμογή του τρίτου μηχανισμού, της **θερμικής ακτινοβολίας (thermal radiation)**.

Κατά την εξέταση των φαινομένων στα οποία υπόκειται μία δεδομένη μάζα, εμφανίζονται αλληλεπιδράσεις με τον υπόλοιπο εξωτερικό κόσμο. Για να λαμβάνονται σωστά υπ' όψιν οι αλληλεπιδράσεις αυτές και για την ορθή εξέταση του εν λόγω αντικειμένου, εισάγεται η έννοια του **συστήματος**. Σύστημα είναι μία διάταξη ή συνδυασμός διατάξεων, που περιέχουν την υπό

μελέτη ποσότητα μάζας. Ουσιαστικά είναι ένα υλικό τμήμα του σύμπαντος, το οποίο μπορεί να εξεταστεί χωριστά από το περιβάλλον του.

Για να περιγραφεί με ακρίβεια το σύστημα, χρησιμοποιείται ο **όγκος ελέγχου** (Control volume), ο οποίος μέσω του ορίου του (της διαχωριστικής επιφάνειας - **επιφάνειας ελέγχου** - Control surface) διαχωρίζει το σύστημα από τον υπόλοιπο κόσμος. Ο όγκος ελέγχου περιλαμβάνει την υπό εξέταση μάζα ή ακόμη και τις περιβάλλουσες τη μάζα διατάξεις. Κάθε τι εκτός του όγκου ελέγχου ανήκει στο εξωτερικό περιβάλλον. Η εξωτερική επιφάνεια που περικλείει και ορίζει τον όγκο ελέγχου, όπως προαναφέρθηκε, ονομάζεται επιφάνεια ελέγχου.

Ο όγκος ελέγχου μπορεί να επιτρέπει ή όχι τη συναλλαγή μάζας, θερμότητας ή έργου μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος. Μπορεί να έχει σταθερό σχήμα ή κινούμενα όρια. Ανάλογα με το βαθμό συναλλαγής του συστήματος με το περιβάλλον του (και με αυξανόμενο βαθμό απομόνωσης) ένα σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως:

Κλειστό σύστημα, στο οποίο δεν είναι δυνατή οποιαδήποτε συναλλαγή μάζας, μέσω των ορίων του, με το περιβάλλον. **Ανοικτό σύστημα**, αντίθετα, είναι αυτό που επιτρέπει τη συναλλαγή μάζας με το περιβάλλον, μέσω των ορίων του.

Μηχανικώς κλειστό σύστημα, στο οποίο δεν γίνεται συναλλαγή έργου με το περιβάλλον του.

Αδιαβατικό σύστημα, στο οποίο δε γίνεται συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον.

Μονωμένο σύστημα, στο οποίο δε γίνεται συναλλαγή μάζας, μηχανικού έργου ή θερμότητας με το περιβάλλον.

Στην περίπτωση ενός κλειστού συστήματος το όριο δεν πρέπει να είναι κατ' ανάγκη σταθερό, αλλά μπορεί να μεταβάλλεται σε όγκο, ώστε να περικλείει συνεχώς τη σταθερή μάζα του συστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι το αέριο που περικλείεται στεγανά εντός ενός κυλίνδρου και του εμβόλου του, το οποίο παλινδρομεί.

Η εξέταση της συμπεριφοράς ενός συστήματος μπορεί να γίνει είτε με μικροσκοπική είτε με μακροσκοπική θεώρηση. Η δεύτερη θεώρηση, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο της κλασικής Θερμοδυναμικής και της κλασικής Ρευστομηχανικής, χρησιμοποιεί ένα μικρό αριθμό μεταβλητών για την περιγραφή της μακροσκοπικής συμπεριφοράς του συστήματος. Με τον όρο μακροσκοπική εννοούμε την κατά μέσο όρο συμπεριφορά ενός μεγάλου αριθμού σωματιδίων, όπως την αντιλαμβανόμαστε με την παρατήρηση ή τις

μετρήσεις μας. Για παράδειγμα η πίεση, την οποία εξασκεί ένα αέριο στις επιφάνειες του δοχείου στο οποίο το έχουμε περιορίσει, είναι το μακροσκοπικό αποτέλεσμα της μεταβολής της ορμής κάθε στοιχειώδους σωματιδίου (ατόμου ή μορίου) που συγκρούεται με τα τοιχώματα του δοχείου. Αντί να θεωρήσουμε κάθε ένα στοιχειώδες σωματίδιο του αερίου ξεχωριστά, εξετάζουμε τη χρονικά μέση επίδραση τους (η οποία μπορεί να μετρηθεί με τα μετρητικά μας όργανα). Η μέση αυτή επίδραση είναι και ανεξάρτητη από υποθέσεις, όσον αφορά τη δομή και τη φύση του προς εξέταση στοιχείου.

Στη μακροσκοπική θεώρηση, η οποία και θα μας απασχολήσει, οι διαστάσεις των εξεταζόμενων συστημάτων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις διαστάσεις των στοιχειωδών σωματιδίων και συνεπώς τα συστήματα απαρτίζονται από πολύ μεγάλο αριθμό στοιχειωδών σωματιδίων. Στην περίπτωση αυτή, το εξεταζόμενο υλικό θεωρείται ότι είναι συνεχές σώμα. Η υπόθεση αυτή χάνει την ισχύ της σε περιπτώσεις όπου η ελεύθερη διαδρομή των μορίων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις διαστάσεις του όγκου ελέγχου, όπως συμβαίνει σε συνθήκες κενού στο εργαστήριο ή στα όρια της ατμόσφαιρας.

Η κατάσταση του σώματος μπορεί να περιγραφεί με συγκεκριμένες μακροσκοπικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η πυκνότητα. Οι μεταβλητές αυτές χαρακτηρίζουν την κατάσταση και έχουν την ίδια πάντα τιμή στην ίδια κατάσταση, ανεξάρτητα με τον τρόπο που επιτεύχθηκε η κατάσταση αυτή. Οι εν λόγω μεταβλητές καλούνται **καταστατικά μεγέθη**. Έτσι, ως καταστατικό μέγεθος μπορεί να οριστεί κάθε μεταβλητή, η οποία εξαρτάται μόνο από την κατάσταση του σώματος και είναι ανεξάρτητη του τρόπου με τον οποίο έχει επιτευχθεί η συγκεκριμένη θερμοδυναμική κατάσταση. Τα καταστατικά μεγέθη περιγράφουν τη συγκεκριμένη κατάσταση, ενώ ο ελάχιστος αριθμός ανεξάρτητων καταστατικών μεγεθών, που απαιτούνται για την πλήρη περιγραφή μιας κατάστασης, εξαρτάται από τη σύνθεση και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Τα καταστατικά μεγέθη διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα **εντατικά** και τα **εκτατικά** μεγέθη. Στα εντατικά μεγέθη η τιμή τους δεν εξαρτάται από το μέγεθος - τη μάζα - του σώματος, σε αντίθεση με τα εκτατικά μεγέθη, των οποίων η τιμή εξαρτάται από το μέγεθος του σώματος. Η πίεση, η θερμοκρασία και η πυκνότητα είναι παραδείγματα εντατικών μεγεθών, ενώ η μάζα και ο όγκος είναι παραδείγματα εκτατικών μεγεθών. Έτσι αν μια ποσότητα αερίου, που περικλείεται σε ένα δοχείο, χωριστεί στη μέση με ένα διάφραγμα, τα εντατικά μεγέθη στα δύο ανεξάρτητα τμήματα δε θα μεταβληθούν, θα μεταβληθούν όμως τα εκτατικά μεγέθη σε κάθε τμήμα (τόσο ο όγκος όσο και η μάζα θα υποδιπλασιαστούν).

Τα εκτατικά μεγέθη διαιρεμένα με τη μάζα του σώματος δίνουν τα **ειδικά** μεγέθη, όπως ο ειδικός όγκος, ο οποίος είναι ο λόγος του όγκου δια της μάζας του σώματος. Τα ειδικά μεγέθη είναι εντατικά μεγέθη. Τα εκτατικά μεγέθη συμβολίζονται συνήθως με κεφαλαία γράμματα ενώ τα ειδικά μεγέθη με πεζά. Ως παράδειγμα, ο όγκος του σώματος συμβολίζεται με το V ενώ ο ειδικός όγκος με το v , και ορίζεται ως:

$$v = \frac{V}{m} \quad (5.1)$$

όπου m η μάζα του υπό εξέταση σώματος.

5.2.2 Αγωγή

Ο πρώτος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας που θα εξεταστεί είναι η αγωγή θερμότητας. Αρχικά θα γίνει γενική αναφορά στο φαινόμενο, ενώ περισσότερες λεπτομέρειες θα παρατεθούν σε επόμενα κεφάλαια. Η αγωγή θερμότητας αναφέρεται σε μακροσκοπικώς ακίνητα σώματα (στερεά ή ρευστά σε ακινησία) και συνδέεται με τη συναλλαγή ενέργειας σε μοριακό επίπεδο. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μετάδοση ενέργειας από στοιχειώδη σωματίδια υψηλότερης προς σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας, δια της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης.

Ας θεωρήσουμε ένα αέριο το οποίο μακροσκοπικά βρίσκεται σε ακινησία. Έστω ότι το αέριο βρίσκεται μεταξύ δύο επιφανειών διαφορετικής θερμοκρασίας. Η υψηλότερη θερμοκρασία σε κάποιο σημείο του αερίου συνδέεται με υψηλότερη ενέργεια των σωματιδίων του αερίου λόγω τυχαίας κίνησης, λόγω εσωτερικής περιστροφής και λόγω ταλάντωσης των ατόμων του κάθε μορίου του αερίου. Τα σωματίδια σε επαφή με τη πιο θερμή επιφάνεια διαθέτουν υψηλότερη ενέργεια, την οποία μεταδίδουν στα γειτονικά τους σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας μέσω των μεταξύ τους συγκρούσεων. Έτσι στην περίπτωση παρουσίας θερμοκρασιακής κλίσης στο εσωτερικό του αερίου υπάρχει μετάδοση ενέργειας από την περιοχή της υψηλότερης θερμοκρασίας προς την περιοχή της χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ακριβώς των συγκρούσεων των μορίων. Η μετάδοση αυτή της ενέργειας μέσω των τυχαίων συγκρούσεων των μορίων καλείται *διάχυση* ενέργειας (diffusion).

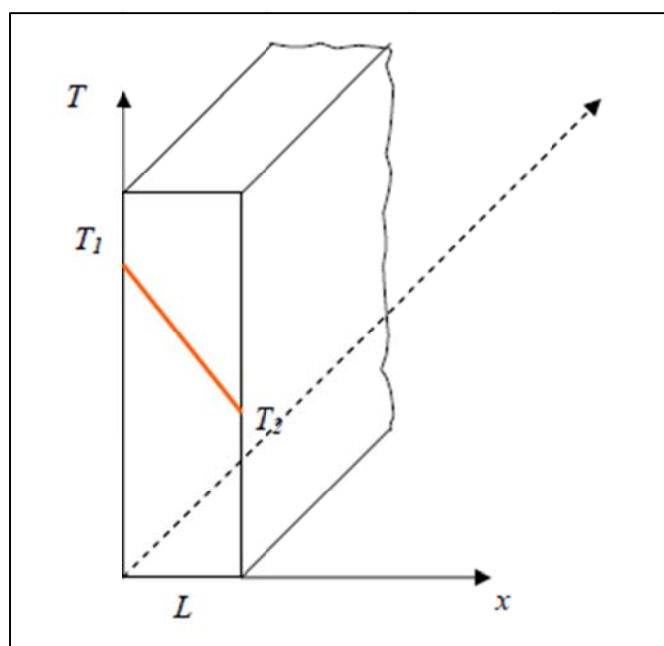
Παρόμοιος μηχανισμός εμφανίζεται και στην περίπτωση των ακίνητων υγρών. Στην περίπτωση όμως των υγρών οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι πολύ πιο ισχυρές (παρουσία ισχυρών διαμοριακών δυνάμεων εκτός των συγκρούσεων), οπότε περιμένουμε λογικά το φαινόμενο της διάχυσης της ενέργειας μέσω της αλληλεπίδρασης των μορίων να είναι πιο έντονο. Στην περίπτωση των στερεών η διάδοση της ενέργειας πραγματοποιείται μέσω δύο μηχανισμών. Στην περίπτωση των μονωτών, η ενέργεια διαδίδεται με μορφή

πλεγματικών κυμάτων εντός της δομής του στερεού. Τα κύματα αυτά επάγονται από την ταλαντωτική κίνηση των ατόμων. Στην περίπτωση των αγωγών, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συμμετέχουν, μέσω της κίνησής τους, στη διάχυση της θερμικής ενέργειας στον όγκο του στερεού, μαζί με τα πλεγματικά κύματα.

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή μακροσκοπικά περιγράφεται (σε μία διάσταση) από τον Νόμο του Fourier. Ας θεωρήσουμε επίπεδο σώμα σταθερού πάχους L με τις άλλες δύο διαστάσεις του να εκτείνονται στο άπειρο (Εικόνα 5-1). Αν επικρατεί στην μία πλευρά του θερμοκρασία T_1 και στην άλλη πλευρά του θερμοκρασία T_2 μικρότερη της T_1 , ενώ η κλίση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του είναι σταθερή (γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας), τότε ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας κατά την x διεύθυνση (κάθετα στο επίπεδο του σώματος) ανά μονάδα επιφάνειας δίδεται:

$$\dot{q}_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (5.2)$$

Το παραπάνω μέγεθος ονομάζεται *πυκνότητα ροής θερμότητας* ή *πυκνότητα θερμοροής (heatflux)*, ενώ η μονάδα μέτρησής του είναι W/m^2 (ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας). Εκφράζει τη θερμική ενέργεια που περνά από μοναδιαία επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, λόγω της θερμοκρασιακή κλίσης σε διεύθυνση κάθετη στην εν λόγω επιφάνεια. Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση οφείλεται στο γεγονός ότι η μετάδοσης θερμότητας πραγματοποιείται από υψηλότερες προς χαμηλότερες θερμοκρασίες, δηλαδή κατά τη φορά των αρνητικών θερμοκρασιακών κλίσεων.



Εικόνα 5-1: Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε σώμα πάχους L κατά τη x διεύθυνση και απείρων διαστάσεων στις δύο άλλες διευθύνσεις.

Ο συντελεστής k στην παραπάνω σχέση ονομάζεται *συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας* (*thermal conductivity*) με μονάδα μέτρησης $W/(mK)$. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από το υλικό στο οποίο εφαρμόζεται η θερμοκρασιακή κλίση (ενώ μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, που θεωρήσαμε σταθερή θερμοκρασιακή κλίση στο εσωτερικό του σώματος (γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας), η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (5.3)$$

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσα από την επιφάνεια (θερμοροή μέσα από την εν λόγω επιφάνεια) προκύπτει πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδόν A της επιφάνειας, δηλαδή:

$$q_x = q_x'' A = -kA \frac{dT}{dx} \quad (5.4)$$

Στην καθημερινή ζωή υπάρχουν πολλά φαινόμενα τα οποία συνδέονται με την μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Η απώλεια θερμότητας από το εσωτερικό του σπιτιού προς το εξωτερικό περιβάλλον το χειμώνα πραγματοποιείται με αγωγή μέσα από τους τοίχους και τα παράθυρα. Η μετάδοση θερμότητας από το μάτι της κουζίνας προς το μαγειρικό σκεύος πραγματοποιείται με αγωγή.

5.2.3 Συναγωγή

Η συναγωγή αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά. Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων (όπως και στην περίπτωση της αγωγής), ενώ ο δεύτερος μηχανισμός συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Κατά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού τα στοιχειώδη σωματίδια, που απαρτίζουν τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και την θερμική ενέργεια που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνηση τους, την εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωση τους. Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω συγκρούσεων (διάχυση) και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας των σωματιδίων μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού.

Η κύρια περιοχή εφαρμογής της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι η μετάδοση από στερεή επιφάνεια προς κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια, ή το αντίθετο. Γνωρίζουμε από τη μηχανική των ρευστών ότι στην περιοχή επαφής του ρευστού με στερεή επιφάνεια αναπτύσσεται το λεγόμενο

οριακό στρώμα ταχύτητας (ή υδραυλικό οριακό στρώμα), ως αποτέλεσμα της δράσης των δυνάμεων συνεκτικότητας στο εσωτερικό του ρευστού. Στο οριακό στρώμα εμφανίζεται ομαλή μετάβαση από την ταχύτητα της ροής μακριά από το τοίχωμα (ταχύτητα ελεύθερης ροής) στην μηδενική ταχύτητα στην επιφάνεια του ακίνητου τοιχώματος. Στην περίπτωση κινούμενης επιφάνειας, η ταχύτητα της ροής πάνω στην επιφάνεια ισούται, ως γνωστόν, με την ταχύτητα της επιφάνειας (συνθήκη μη ολίσθησης). Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται κατάντι της ροής.

Στην περίπτωση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της στερεής επιφάνειας και του ρευστού εμφανίζεται και το λεγόμενο *θερμικό οριακό στρώμα (thermal boundary layer)*, του οποίου το πάχος μπορεί να είναι ίσο, μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτό του υδραυλικού οριακού στρώματος. Εντός του θερμικού οριακού στρώματος εμφανίζεται ομαλή μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας T_s έως τη θερμοκρασία της κύριας ροής T_θ . Στην περίπτωση που η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης, η ροή θερμότητας πραγματοποιείται από την θερμή επιφάνεια στο ψυχρότερο ρευστό.

Επειδή στην περιοχή κοντά στο στερεό τοίχωμα οι ταχύτητες της ροής είναι πολύ μικρές, ο μηχανισμός της διάχυσης είναι αυτός που επικρατεί. Αντίθετα, μακριά από το τοίχωμα, όπου έχουν αυξηθεί οι ταχύτητες της ροής, επικρατεί η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά. Ειδικά πάνω στο τοίχωμα, όπου η σχετική ταχύτητα της ροής είναι μηδενική, υπάρχει αποκλειστικά μετάδοση θερμότητας με διάχυση.

Η ροή που προκαλεί τη συναγωγή θερμότητας μπορεί να οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες ή στην ίδια τη μετάδοσης θερμότητας. Έτσι, στην περίπτωση των σωμάτων κεντρικής θέρμανσης ενός σπιτιού, ο θερμαινόμενος (αρχικά μόνο με αγωγή) ακίνητος αέρας, λόγω μείωσης της πυκνότητας του ανέρχεται, προκαλώντας φυσική κυκλοφορία στο εσωτερικό του δωματίου. Η φυσική αυτή κυκλοφορία δίνει την αναγκαία μεταφορική κίνηση για την εμφάνιση συναγωγής μεταξύ του θερμαντικού σώματος και του αέρα. Ο μηχανισμός της συναγωγής είναι πολύ πιο έντονος από τον αντίστοιχο της αγωγής. Στην παραπάνω περίπτωση έχουμε *συναγωγή με φυσική κυκλοφορία*.

Στην περίπτωση που η ροή του ρευστού συντηρείται από εξωτερικό αίτιο (μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα) τότε έχουμε μετάδοση θερμότητας με συναγωγή με *εξαναγκασμένη κυκλοφορία*. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η θέρμανση του αέρα στο πιστολάκι των μαλλιών, ή η ψύξη μιας θερμής επιφάνειας με τη χρήση ανεμιστήρα. Συνήθως μαζί με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία συνυπάρχει και φυσική κυκλοφορία λόγω των ανωστικών δυνάμεων από τη μεταβολή των

πυκνοτήτων, μόνο που το πρώτο φαινόμενο είναι πιο έντονο στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Συνήθως η συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή αναφέρεται στην εσωτερική θερμική ενέργεια, η οποία συνδέεται με τη θερμική του κίνηση. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η μετάδοση θερμότητας συνοδεύεται από αλλαγή φάσης, δηλαδή περιλαμβάνει και τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης. Ένα παράδειγμα της παραπάνω περίπτωσης είναι η μετάδοση θερμότητας προς το ρευστό από τις φυσαλίδες ατμού που ανέρχονται προς την επιφάνεια, σε δοχείο με νερό που βράζει. Αυτές προκαλούν ισχυρή κίνηση εντός του ρευστού, με αποτέλεσμα να εντείνεται η συναγωγή. Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή όταν υπάρχει και αλλαγή φάσης είναι πολύ πιο έντονη από την απλή περίπτωση της συναγωγής.

Το φαινόμενο της συναγωγής εξαρτάται από την ροή του ρευστού (και τα χαρακτηριστικά της) και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας. Μια γενική σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος του Newton για τη συναγωγή, ο οποίος δίνει την πυκνότητα ροής θερμότητας:

$$q_x'' = h(T_s - T_o) \quad (5.5)$$

Ο συντελεστής h ονομάζεται *συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή* και δίδεται σε $W/(m^2 K)$. Η τιμή του εξαρτάται από το είδος της ροής, τη μορφή της επιφάνειας και τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του ρευστού. Ο προσδιορισμός του συνήθως απαιτεί σοβαρές γνώσεις ρευστομηχανικής, ενώ για τυπικές ροές η τιμή του βρίσκεται από πίνακες και διαγράμματα.

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσα από την επιφάνεια (θερμοροή μέσα από την εν λόγω επιφάνεια) προκύπτει πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδόν A της επιφάνειας, δηλαδή:

$$q_x = q_x'' A = Ah(T_s - T_o) \quad (5.6)$$

5.2.4 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Κάθε σώμα (στερεό, υγρό ή αέριο), το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από $0 K$, εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία (σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - φωτονίων) δημιουργείται με αλλαγές στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων των ατόμων του σώματος. Σε αντίθεση με τους άλλους δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή), η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης, αλλά μπορεί να πραγματοποιείται και εν κενώ (στην πραγματικότητα η

μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται πιο αποδοτικά εν κενώ). Στην παρούσα φάση θα ασχοληθούμε με ακτινοβολία μεταξύ στερεών επιφανειών και δεν θα εξετάσουμε τις περιπτώσεις ακτινοβολίας από και προς υγρά και αέρια σώματα.

Ας θεωρήσουμε τη στερεή εξωτερική επιφάνεια ενός σώματος. Η ακτινοβολία που εξέρχεται από την επιφάνεια παράγεται στο εσωτερικό του σώματος και ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια εξέρχεται από μοναδιαίο εμβαδόν της επιφάνειας καλείται *πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας* E , ενώ η μέγιστη τιμή της E_b δίδεται από τον νόμο Stefan-Boltzman ως:

$$E_b = \sigma \cdot T_s^4 \quad (5.7)$$

όπου T_s η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας (σε K) και σ η σταθερά των Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K}^4)$). Η επιφάνεια που εκλύει τη μέγιστη αυτή ισχύ ακτινοβολίας ονομάζεται *μέλαν σώμα (blackbody)*. Σε μία πραγματική επιφάνεια η ακτινοβολούσα ισχύς είναι προφανώς μικρότερη για την ίδια θερμοκρασία και δίδεται:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (5.8)$$

όπου ε η *ικανότητα εκπομπής (emissivity)* της επιφάνειας, με τιμές μεταξύ 0 και 1. Η τιμή της εξαρτάται από το υλικό και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και δείχνει πόσο προσεγγίζει η συγκεκριμένη επιφάνεια το μέλαν σώμα.

Εκτός από την εκπομπή ακτινοβολίας από μια επιφάνεια, γίνεται και πρόσπτωση ακτινοβολίας, η οποία παράγεται εκτός της επιφάνειας. Αν G η *πυκνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας* (ισχύς ανά μονάδα επιφανείας), τότε ένα τμήμα της μπορεί να απορροφηθεί από το σώμα (αυξάνοντας την εσωτερική του ενέργεια), ένα τμήμα μπορεί να ανακλαστεί, ενώ το υπόλοιπο τμήμα μπορεί να διαπεράσει το σώμα (εάν αυτό είναι ημιδιαφανές).

Το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το σώμα περιγράφεται με την *απορροφητικότητα* α , οπότε ισχύει:

$$G_{\text{απορρ}} = \alpha G \quad (5.9)$$

Προφανώς η απορροφητικότητα παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η απορροφητικότητα της επιφάνειας δεν εξαρτάται μόνο από την επιφάνεια αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Η ίδια επιφάνεια μπορεί να έχει διαφορετική απορροφητικότητα σε ακτινοβολίες διαφορετικού μήκους κύματος. Μόνο η απορροφώμενη ακτινοβολία μεταβάλλει την εσωτερική

ενέργεια του σώματος, ενώ η ανακλώμενη και η ακτινοβολία που διαπερνά το σώμα δεν έχουν προφανώς καμία επίδραση σε αυτή.

Μία ειδική περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία (με σημαντικές όμως εφαρμογές) αφορά στην περίπτωση μιας μικρής επιφάνειας η οποία περικλείεται ολοκληρωτικά από μία αρκετά μεγαλύτερη επιφάνεια, η οποία βρίσκεται σε διαφορετική (σταθερή) θερμοκρασία $T_{εξ}$ (Εικόνα 5-2). Μία τέτοια περίπτωση επιφάνειας είναι τα τοιχώματα ενός φούρνου. Στην περίπτωση αυτή η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην μικρή εσωτερική επιφάνεια θερμοκρασίας T_s μπορεί να προσεγγιστεί από την ακτινοβολία που παράγει ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας $T_{εξ}$, δηλαδή:

$$G = \sigma T_{εξ}^4 \quad (5.10)$$

Στην ειδική περίπτωση κατά την οποία υποθέτουμε ότι η μικρή επιφάνεια είναι μία **γκρίζα επιφάνεια** θα ισχύει:

$$a = \varepsilon \quad (5.11)$$

Η καθαρή ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που εξέρχεται από την μικρή εσωτερική επιφάνεια εμβαδού A θα δίδεται:

$$q_{rad}'' = \frac{q_{rad}}{A} = \varepsilon \cdot E_b - \varepsilon \cdot G = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{εξ}^4) \quad (5.12)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την καθαρή ισχύ που απελευθερώνεται από την επιφάνεια ως αποτέλεσμα της ισχύος που απορροφάται και της ισχύος που εκλύεται, λόγω της υπάρχουσας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής και της περικλείουσας επιφάνειας.

Η θερμική ισχύς που ακτινοβολείται συχνά εκφράζεται σε μορφή αντίστοιχη με αυτή που μεταδίδεται με συναγωγή, δηλαδή:

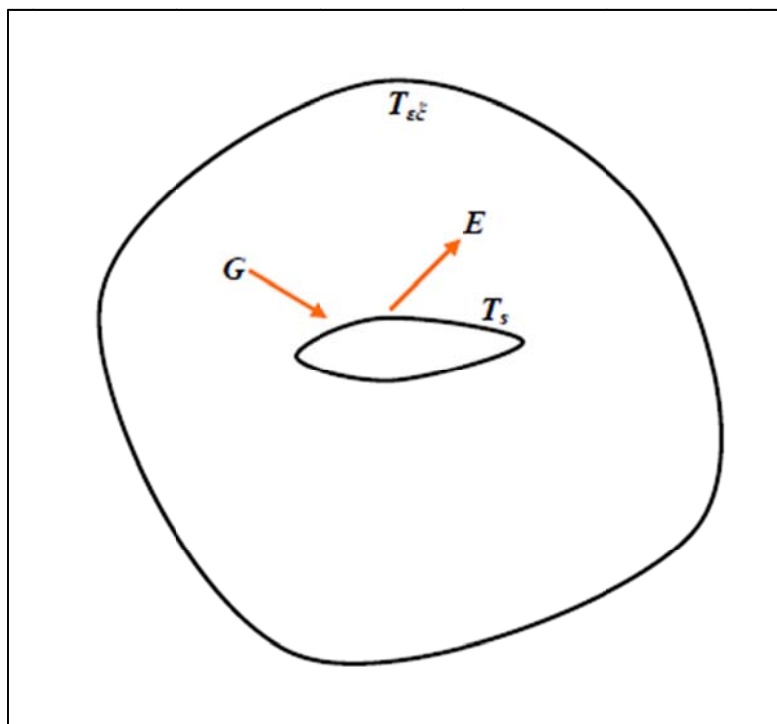
$$q_{rad} = h_{rad} A (T_s - T_{εξ}) \quad (5.13)$$

όπου h_{rad} ο **συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία**, ο οποίος δίδεται:

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s + T_{εξ}) (T_s^2 + T_{εξ}^2) \quad (5.14)$$

Προφανώς, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία μεταβάλλεται ισχυρά με τη θερμοκρασία (ουσιαστικά αυτό που γίνεται με τις παραπάνω σχέσεις είναι μία γραμμικοποίηση της σχέσης που δίνει την μεταδιδόμενη με ακτινοβολία ισχύ, στην περιοχή των θερμοκρασιών της μικρής εσωτερικής επιφάνειας και της περικλείουσας επιφάνειας). Η

παραπάνω μοντελοποίηση είναι χρήσιμη στις περιπτώσεις που έχουμε ταυτόχρονη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή.



Εικόνα 5-2: Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών, όπου η μια περικλείει την άλλη. Οι δύο επιφάνειες βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

5.3 Μαθηματικές εξισώσεις περιγραφής του φυσικού προβλήματος

Οι εξισώσεις που περιγράφουν μαθηματικά το ρευστομηχανικό πρόβλημα, είναι οι εξισώσεις Navier – Stokes για μονοφασικό πεδίο ροής (εξισώσεις ορμής κατά x, κατά y και κατά z) , η εξίσωση της συνέχειας (διατήρηση της μάζας) και η εξίσωση της ενέργειας. Παρακάτω διατυπώνονται αναλυτικά οι εξισώσεις προς επίλυση:

Εξίσωση της συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (5.15)$$

Εξίσωση της ορμής κατά x:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{dp}{dx} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx} \quad (5.16)$$

Εξίσωση της ορμής κατά y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{dp}{dy} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My} \quad (5.17)$$

Εξίσωση της ορμής κατά z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{dp}{dz} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{Mz} \quad (5.18)$$

Εξίσωση της ενέργειας:

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{div} \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad} T) + \Phi + S_i \quad (5.19)$$

όπου \mathbf{u} το διάνυσμα της ταχύτητας, u, v, w οι συνιστώσες της, ρ η πυκνότητα, p η πίεση, T η θερμοκρασία, i η εσωτερική ενέργεια, μ το ιξώδες, k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, S είναι όροι πηγής και Φ η συνάρτηση καταστροφής.

Επιλέγοντας τις ιδιότητες του ρευστού καθορίζεται και η μορφή των καταστατικών εξισώσεων $p = p(\rho, T)$, $i = i(\rho, T)$ οι οποίες διέπουν τη συμπεριφορά του και έτσι επιλύεται ένα σύστημα επτά εξισώσεων με επτά αγνώστους (u, v, w, p, T, i, ρ) όταν δεν λαμβάνεται υπόψιν η τύρβη.

Για την μοντελοποίηση της τύρβης χρησιμοποιείται μοντέλο 2 εξισώσεων, το RNG k-ε. Το RNG k-ε μοντέλο είναι μία παραλλαγή του γνωστού k-ε. Στην γενική περίπτωση, οι εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό την κινητικής ενέργειας της τύρβης k και για την καταστροφή της ε είναι:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div}(a_k \mu_{eff} \text{grad} k) + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div}(a_\varepsilon \mu_{eff} \text{grad} \varepsilon) + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.21)$$

όπου $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$,

$C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $\eta_0 = 4.377$ και $\beta = 0.012$

5.4 Μέθοδος των πεπερασμένων όγκων

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων είναι μία ευρέως διαδεδομένη υπολογιστική μέθοδος επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος εφαρμόζεται εύκολα χωρίζοντας αρχικά το πεδίο ορισμού σε **πεπερασμένους όγκους αναφοράς**, έτσι ώστε κάθε κόμβος του πλέγματος να περιβάλλεται από έναν όγκο αναφοράς. Στη συνέχεια η μερική διαφορική εξίσωση **ολοκληρώνεται στον όγκο αναφοράς**. Τα ολοκληρώματα υπολογίζονται αναλυτικά υποθέτοντας ότι οι τιμές της άγνωστης εξαρτημένης μεταβλητής είναι σταθερές ή ότι μεταβάλλονται γραμμικά σε κάθε όγκο αναφοράς. Οι

αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν ονομάζονται **εξισώσεις πεπερασμένων όγκων** και το σύστημα επιλύεται χρησιμοποιώντας τις άμεσες ή τις επαναληπτικές τεχνικές επίλυσης συστημάτων.

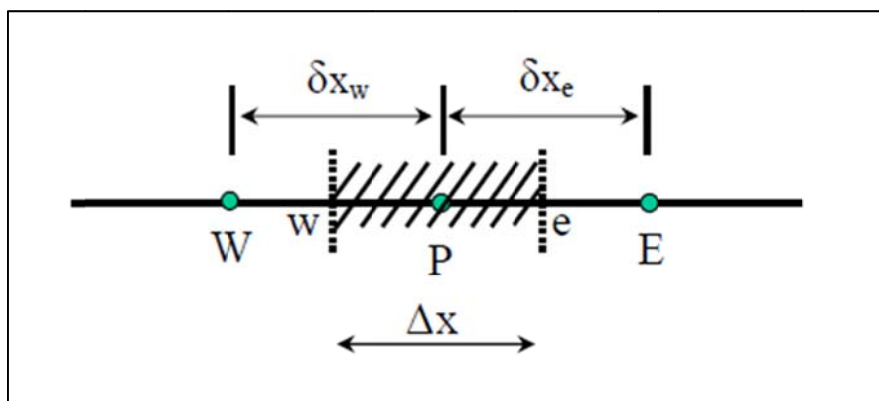
Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων γίνεται εύκολα κατανοητή αφού η μεθοδολογία και γενικότερα ο τρόπος διατύπωσης της μεθόδου συνδέεται άμεσα με τη φυσική του προβλήματος. Είναι λογικό να θεωρούμε ότι **οι εξισώσεις πεπερασμένων όγκων ικανοποιούν τις ίδιες φυσικές αρχές και νόμους, (διατήρηση μάζας, ορμής, ενέργειας), με αυτές που ικανοποιούν οι μερικές διαφορικές εξισώσεις από τις οποίες έχουν προκύψει.** Μία βασική διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και όγκων είναι ότι στις πεπερασμένες διαφορές η λύση βασίζεται μόνο στις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στους κόμβους του πλέγματος ενώ στους πεπερασμένους όγκους η λύση βασίζεται όχι μόνο στις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στους κόμβους αλλά και σε υποθετικές κατανομές ανάμεσα στους κόμβους. Τέλος σημειώνεται ότι οι δύο υπολογιστικές μέθοδοι οδηγούν σε αντίστοιχες εξισώσεις διαφορών εφόσον η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών διατυπωθεί με συστηματικό τρόπο, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια και η συνοχή του αριθμητικού σχήματος.

5.4.1 Ολοκλήρωση σε όγκο αναφοράς

Έστω η μόνιμη μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας με πηγή

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (5.22)$$

όπου $k = k(x)$ ο συντελεστής θερμικής αγωγής, $T(x)$ η κατανομή θερμοκρασίας και S ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Η διατύπωση της μεθόδου ξεκινά ορίζοντας το υπολογιστικό χωρίο επίλυσης του προβλήματος. Το συνεχές πεδίο ορισμού διακριτοποιείται και εστιάζουμε την προσοχή μας σε ένα τυχαίο κόμβο του πλέγματος, έστω στον κόμβο P και στους γειτονικούς κόμβους W και E όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-3.



Εικόνα 5-3: Διακριτοποίηση σε μια διάσταση

Στη συνέχεια ορίζουμε τον όγκο ελέγχου γύρω από τον κόμβο P με τις διακεκομμένες γραμμές και τα σημεία w και e βρίσκονται στο αριστερό και δεξί αντίστοιχα μέτωπο του όγκου ελέγχου. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται ότι τα σημεία w και e ορίζονται στο μέσο των διαστημάτων WP και PE, χωρίς όμως αυτή η επιλογή να είναι υποχρεωτική. Σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι W, P και E είναι αντίστοιχοι των κόμβων $i-1$, i και $i+1$, ενώ οι κόμβοι w και e αντιστοιχούν στους κόμβους $i\pm 1/2$. Θεωρώντας μοναδιαία πάχη στις κατευθύνσεις και $i1i+1/2i\pm yz$, αφού το πρόβλημα είναι μονοδιάστατο ο όγκος του όγκου ελέγχου είναι $\Delta x \times 1 \times 1$. Η εξίσωση (5.22) ολοκληρώνεται στον όγκο ελέγχου και προκύπτει

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx + \int_w^e S dx = 0 \Rightarrow \left(k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad (5.23)$$

Στο σημείο αυτό για να προχωρήσουμε απαιτείται να γίνει μια υπόθεση για την θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από τα σημεία e και w. Οι δύο απλούστερες υποθέσεις είναι να θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία $T(x)$ είναι σταθερή ή ότι **μεταβάλλεται γραμμικά ανάμεσα στα σημεία W, P και E**. Επιλέγοντας τη δεύτερη υπόθεση η εξίσωση (5.23) ανάγεται στην αλγεβρική πλέον εξίσωση

$$\frac{k_e}{\delta x_e} (T_E - T_P) - \frac{k_w}{\delta x_w} (T_P - T_E) + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (5.24)$$

όπου το \bar{S} είναι η μέση τιμή του S στον όγκο ελέγχου. Για υπολογιστικούς λόγους συνηθίζεται η εξίσωση (5.24) να γράφεται στη μορφή

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (5.25)$$

όπου

$$a_E = \frac{k_e}{\delta x_e}, a_W = \frac{k_w}{\delta x_w}, a_P = a_E + a_W, b = \bar{S} \Delta x$$

ή στην πιο βολική μορφή

$$a_P T_P = \sum a_{nb} T_{nb} + b \quad (5.26)$$

όπου ο δείκτης nb σημαίνει κάποιο γειτονικό κόμβο και το άθροισμα ισχύει για όλους τους γειτονικούς κόμβους. **Οι συντελεστές της εξίσωσης (5.26) πρέπει να είναι θετικοί και επίσης**

$$a_P = \sum a_{nb} \quad (5.27)$$

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις που οι κανόνες αυτοί δεν τηρούνται και αυτό έχει συνήθως σαν συνέπεια ασταθή αριθμητικά αποτελέσματα που δεν συμφωνούν με τη φυσική του προβλήματος.

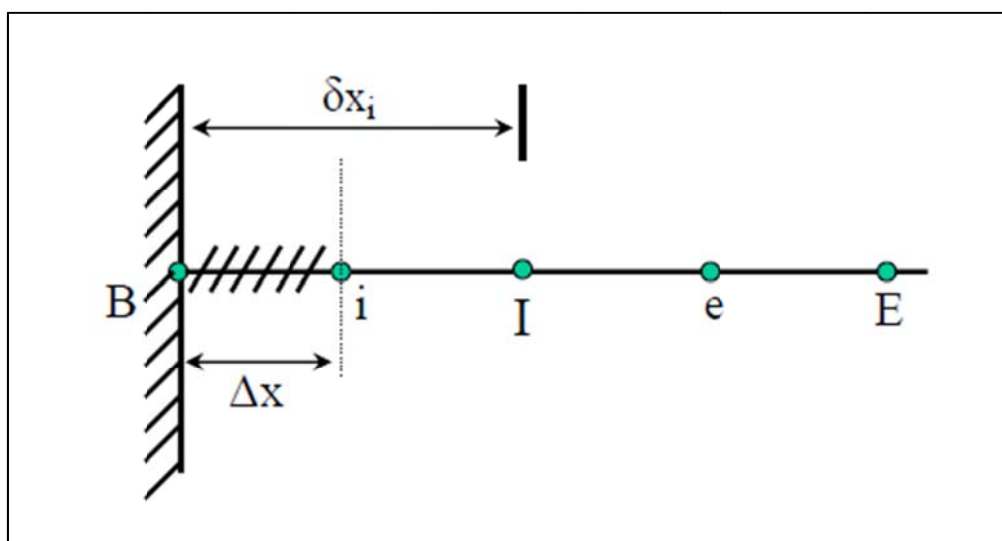
5.4.2 Οριακές συνθήκες μικτού τύπου

Οι οριακές συνθήκες που συνοδεύουν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις, όπως έχουμε συχνά αναφέρει, είναι τύπου Dirichlet ή τύπου Neumann, ή μικτού τύπου. Όταν είναι τύπου Dirichlet, οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στους οριακούς κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος είναι γνωστές. Αντίθετα στις άλλες δύο περιπτώσεις είναι απαραίτητο να διατυπωθούν εξισώσεις πεπερασμένων όγκων για τους συνοριακούς κόμβους που θα λυθούν μαζί με τις υπόλοιπες εξισώσεις των εσωτερικών κόμβων.

Η μεθοδολογία παρουσιάζεται με ένα παράδειγμα όπου εξετάζεται η μόνιμη μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας (5.22) με συνοριακή συνθήκη μικτού τύπου στο όριο $x=0$:

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_B = h(T_\infty - T_B) \quad (5.28)$$

όπου T_∞ και T_B οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος και του συνοριακού σημείου B ($x=0$) αντίστοιχα. Η διακριτοποίηση στον οριακό όγκο αναφοράς, στο σημείο B φαίνεται στην Εικόνα 5-4



Εικόνα 5-4: Διακριτοποίηση οριακού κόμβου σε μια διάσταση

Παρατηρούμε ότι τώρα ο συνοριακός κόμβος B δεν περιβάλλεται από τον αντίστοιχο όγκο ελέγχου. Η εξίσωση (5.22) ολοκληρώνεται στον συνοριακό όγκο ελέγχου και προκύπτει ότι

$$\int_B^i \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx + \int_B^i S dx = 0 \Rightarrow \left(k \frac{dT}{dx} \right)_i - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_B + \int_B^i S dx = 0 \quad (5.29)$$

θεωρούμε ότι η θερμοκρασία $T(x)$ μεταβάλλεται γραμμικά ανάμεσα στα σημεία B και P και επίσης αντικαθιστούμε τον δεύτερο όρο της (5.29) από την οριακή συνθήκη (5.28). Με βάση τα παραπάνω έχουμε ότι

$$\frac{k_i}{\delta x_i}(T_I - T_B) + h(T_\infty - T_B) + \bar{S}\Delta x = 0 \quad (5.30)$$

Η εξίσωση (5.30) γράφεται στη μορφή

$$a_B T_B = a_I T_I + b \quad (5.31)$$

Όπου

$$a_I = \frac{k_i}{\delta x_i} \quad (5.32)$$

$$a_B = a_I + h \quad (5.33)$$

Και

$$b = \bar{S}\Delta x + hT_\infty \quad (5.34)$$

Λύνοντας την εξίσωση (5.30) μαζί με τις εξισώσεις πεπερασμένων όγκων για τους εσωτερικούς κόμβους (5.25) οδηγούμαστε στον υπολογισμό των θερμοκρασιών.

5.4.3 Χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα

Έστω ότι ζητείται η αριθμητική επίλυση της χρονικά μεταβαλλόμενης εξίσωσης θερμότητας

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5.35)$$

όπου η πυκνότητα ρ και η ειδική θερμότητα c δεν μεταβάλλονται ως προς το χρόνο. Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία η εξίσωση (5.35) ολοκληρώνεται στον όγκο αναφοράς. Παράλληλα η χρονική επίλυση του c προβλήματος επιτυγχάνεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση (5.35) στο χρονικό διάστημα ανάμεσα σε t και $t + \Delta t$. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω βρίσκουμε

$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (5.36)$$

όπου η σειρά ολοκλήρωσης εξαρτάται από το χαρακτήρα του κάθε όρου. Θεωρούμε ότι στον όγκο ελέγχου η εξαρτημένη μεταβλητή $T(t,x)$ παραμένει σταθερή στη διάρκεια του χρονικού βήματος, ενώ μεταβάλλεται γραμμικά στο διάστημα Δx . Με βάση τις υποθέσεις αυτές προκύπτει ότι

$$\rho c \Delta x (T_P^{n+1} - T_P^n) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e}{\delta x_e} (T_E - T_P) - \frac{k_w}{\delta x_w} (T_P - T_W) \right] dt \quad (5.37)$$

όπου η χωρική διακριτοποίηση είναι αντίστοιχη αυτής του Κεφαλαίου 5.4.1 και της Εικόνας 5-3. Για να συνεχίσουμε απαιτείται μια νέα υπόθεση για τη χρονική μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής $T(t,x)$ στα σημεία E, P και W στη διάρκεια του χρονικού βήματος Δt . Μερικές από τις υπάρχουσες δυνατότητες παρουσιάζονται στη γενική έκφραση

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [\theta T_P^{n+1} + (1-\theta) T_P^n] \Delta t \quad (5.38)$$

όπου η παράμετρος θ είναι ο συντελεστής σημαντικότητας ή βαρύτητας ανάμεσα στις χρονικές στιγμές t και $t + \Delta t$. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.38) στην εξίσωση (5.37) προκύπτει η εξίσωση πεπερασμένων όγκων

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P^{n+1} - T_P^n) = & \theta \left[\frac{k_e}{\delta x_e} (T_E^{n+1} - T_P^{n+1}) - \frac{k_w}{\delta x_w} (T_P^{n+1} - T_W^{n+1}) \right] \\ & + (1-\theta) \left[\frac{k_e}{\delta x_e} (T_E^n - T_P^n) - \frac{k_w}{\delta x_w} (T_P^n - T_W^n) \right] \end{aligned} \quad (5.39)$$

Το παραπάνω αποτέλεσμα μπορεί να γραφεί στην πιο συνεκτική μορφή

$$\begin{aligned} a_P^* T_P^{n+1} = & a_E [\theta T_E^{n+1} + (1-\theta) T_E^n] + a_W [\theta T_W^{n+1} + (1-\theta) T_W^n] + \\ & + [a_P - (1-\theta)a_E - (1-\theta)a_W] T_P^n \end{aligned} \quad (5.40)$$

όπου

$$a_E = \frac{k_e}{\delta x_e} \quad (5.41)$$

$$a_W = \frac{k_w}{\delta x_w} \quad (5.42)$$

$$a_P = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \quad (5.43)$$

και

$$a_P^* = a_P + \theta a_E + \theta a_W \quad (5.44)$$

Όταν $\theta=0$ και $\theta=1$ το σχήμα είναι ρητό και πεπλεγμένο αντίστοιχα, ενώ όταν $\theta=1/2$ το σχήμα είναι πεπλεγμένο τύπου Crank-Nicolson. Επίσης όλα τα σχήματα που προκύπτουν για $\theta \neq 0$ είναι πεπλεγμένα και απαιτείται η επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων σε κάθε χρονική στιγμή. Αντίθετα, όταν το σχήμα είναι ρητό ($\theta=0$) οι θερμοκρασίες σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζονται

άμεσα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί ώστε να ικανοποιείται ο ορισμός ότι όλοι οι συντελεστές της εξίσωσης (5.40) πρέπει να είναι θετικοί. Στην ειδική περίπτωση που η θερμική αγωγιμότητα παραμένει σταθερή ($k_w=k_e=k$) και $\Delta x=\delta x_e=\delta x_w$, ο περιορισμός των θετικών συντελεστών ικανοποιείται μόνο όταν

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \frac{\rho c}{k} \quad (5.45)$$

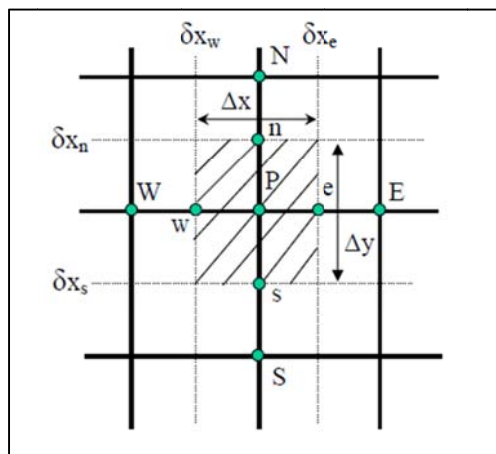
Όταν το κριτήριο (5.45) παραβιάζεται τότε προκύπτουν αφύσικα αποτελέσματα αφού μια υψηλότερη θερμοκρασία T_P τη χρονική στιγμή n θα οδηγήσει σε χαμηλότερη θερμοκρασία T_P την επόμενη χρονική στιγμή $n+1$. Η επίλυση της αντίστοιχης εξίσωσης με ρητό σχήμα περασμένων διαφορών είναι ευσταθής μόνο όταν ικανοποιείται το ίδιο ακριβώς κριτήριο ευστάθειας. Επίσης επεκτείνοντας τη σύγκριση των δύο μεθοδολογιών στις περιπτώσεις του πεπλεγμένου σχήματος και του σχήματος Crank-Nicolson προκύπτουν αντίστοιχα αποτελέσματα ισοδυναμίας, αν και η περίπτωση του σχήματος Crank-Nicolson χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. Με βάση τα παραπάνω σχόλια μπορούμε να παραλληλίσουμε την απαίτηση για θετικούς συντελεστές στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων με το κριτήριο ευστάθειας στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

5.4.4 Ολοκλήρωση σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο όγκο αναφοράς

Έστω ότι ζητείται η αριθμητική επίλυση της μόνιμης εξίσωσης θερμότητας σε δυο διαστάσεις

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (5.46)$$

Τμήμα του υπολογιστικού πλέγματος με έναν όγκο ελέγχου γύρω από το σημείο P φαίνεται στην Εικόνα 5-5.



Εικόνα 5-5: Διακριτοποίηση σε δύο διαστάσεις

Τα γειτονικά σημεία του P είναι τα σημεία W και E στη διεύθυνση x και τα σημεία S και N στη διεύθυνση y. Το πάχος του όγκου ελέγχου στη διεύθυνση z είναι μονάδα. Επομένως, ο όγκος είναι $\Delta x \times \Delta y \times 1$. Τα σημεία w, e, s και n βρίσκονται στα μέτωπα του όγκου ελέγχου. Είναι προφανές, ότι επιχειρώντας μία σύγκριση ανάμεσα στα υπολογιστικά πλέγματα των μεθόδων πεπερασμένων διαφορών και όγκων βλέπουμε ότι τα πλέγματα είναι ισοδύναμα. Συγκεκριμένα τα σημεία P, W, E, S και N είναι αντίστοιχα των σημείων (i, j) , $(i \pm 1, j)$ και $(i, j \pm 1)$, ενώ τα σημεία w, e, s και n είναι αντίστοιχα των σημείων $(i \pm 1/2, j)$ και $(i, j \pm 1/2)$. Η εξίσωση (5.46) ολοκληρώνεται στον όγκο αναφοράς και έχουμε ότι

$$\int_s^e \int_w^n \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy + \int_w^n \int_s^e \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy dx = 0 \quad (5.47)$$

ή

$$\int_s^e \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dy + \int_w^n \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right] dx = 0 \quad (5.48)$$

Στη συνέχεια θεωρώντας ότι οι θερμοροές παραμένουν σταθερές κατά μήκος των τεσσάρων μετώπων του όγκου ελέγχου η εξίσωση (5.48) γράφεται στη μορφή

$$\left[\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y + \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x = 0 \quad (5.49)$$

Τέλος, υποθέτουμε γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας στα μέτωπα e, w, n και s και προκύπτει η εξίσωση πεπερασμένων όγκων

$$\frac{k_e \Delta y}{\delta x_e} (T_E - T_P) - \frac{k_w \Delta y}{\delta x_w} (T_P - T_W) + \frac{k_n \Delta x}{\delta y_n} (T_N - T_P) - \frac{k_s \Delta x}{\delta y_s} (T_P - T_S) = 0 \quad (5.50)$$

Η εξίσωση (5.36) γράφεται στην πιο συνεκτική μορφή

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S \quad (5.51)$$

όπου

$$a_E = \frac{k_e \Delta y}{\delta x_e} \quad (5.52)$$

$$a_W = \frac{k_w \Delta y}{\delta x_w} \quad (5.53)$$

$$a_N = \frac{k_n \Delta x}{\delta y_n} \quad (5.54)$$

$$a_s = \frac{k_s \Delta x}{\delta y_s} \quad (5.55)$$

και

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (5.56)$$

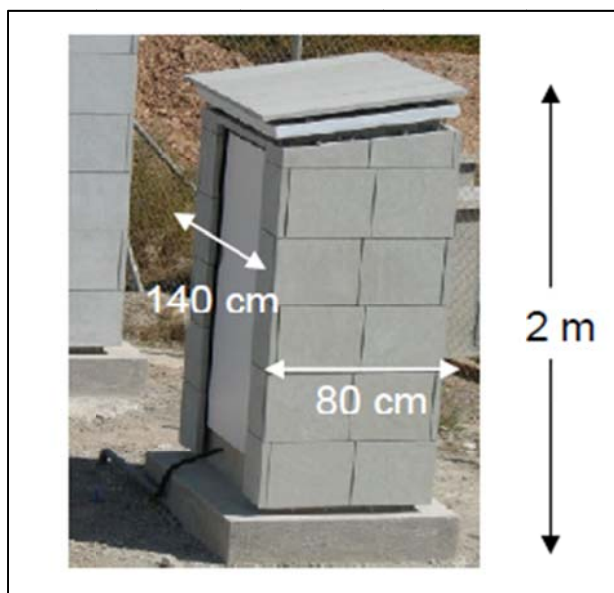
Η παραπάνω ανάλυση επεκτείνεται εύκολα σε τρισδιάστατα προβλήματα με ή χωρίς χρονική μεταβολή και όρο πηγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αριθμητική προσομοίωση

6.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των υλικών αλλαγής φάσης στην θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου πειραματικών σταθμών – οικίσκων με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Επιπλέον θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα που έχουν ληφθεί στην Ισπανία από μετρήσεις σε αντίστοιχους σταθμούς.

Για την πειραματική μελέτη της επίδρασης των υλικών αλλαγής φάσης στην θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν οικίσκοι. Το πείραμα εκτελέστηκε στην Ισπανία, στην πόλη Alicante. Οι πειραματικοί οικίσκοι έχουν κατασκευαστεί από τσιμέντο και ισπανικό μάρμαρο-πέτρα. Σε μερικούς οικίσκους έχει χρησιμοποιηθεί μίγμα πέτρας με υλικό αλλαγής φάσης (PCM), ενώ σε άλλους έχει χρησιμοποιηθεί μόνο πέτρα χωρίς πρόσμιξη από PCM. Η ποσότητα του PCM που έχει αναμιχθεί με την πέτρα στο μίγμα πέτρα-PCM υπολογίζεται στα 0.011g PCM/cm^3 φυσικού λίθου, δηλαδή περίπου στο 0.5% του συνολικού βάρους του φυσικού λίθου. Στην αριστερή πλευρά των πειραματικών σταθμών υπάρχει μια πόρτα αποτελούμενη από στρώματα αλουμινίου, μονωτικού υλικού (polyspan) και PVC. Μεταξύ του φυσικού λίθου και του τσιμέντου υπάρχει στρώμα αέρα πάχους 3.5cm.



Εικόνα 6-1: Πειραματικός οικίσκος από τσιμέντο και πέτρα

Για την εκτέλεση του πειράματος είχαν τοποθετηθεί αισθητήρες τόσο στον εσωτερικό όσο και στον εξωτερικό χώρο των πειραματικών σταθμών, με

σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας εντός του οικίσκου και ταυτόχρονα τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος αντίστοιχα. Οι πειραματικές μετρήσεις λαμβάνονταν ανά 10 λεπτά κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας και για διάστημα μερικών εικοσιτετραώρων. Το πειραματικά δεδομένα, που χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια περίπου δύο εικοσιτετραώρων (σύνολο 143400 δευτερόλεπτα) στις 2, 3 Σεπτεμβρίου 2008 και οι συγκρίσεις με τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης θα γίνονται ανά 600 δευτερόλεπτα.

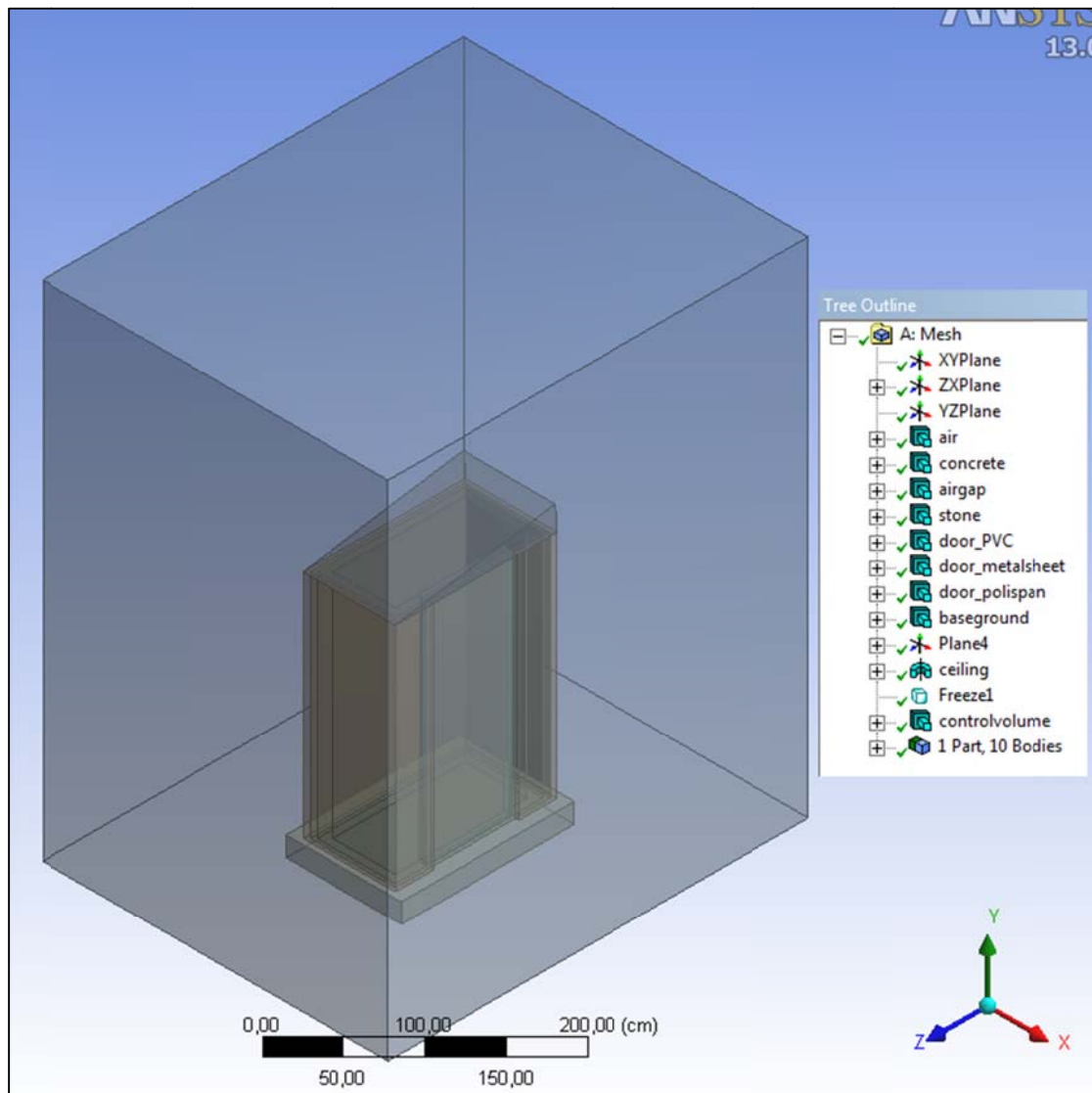
Η μοντελοποίηση και επίλυση του προβλήματος έγινε στο υπολογιστικό πακέτο ANSYS CFX 13.0 . Με το ANSYS είναι δυνατόν να επιλυθούν προβλήματα φαινομένων μεταφοράς (ρεολογίας-μεταφοράς ορμής, μεταφοράς θερμότητας και μεταφοράς μάζας), προβλήματα ηλεκτρομαγνητισμού και οπτικής, προβλήματα στατικής και δυναμικής των κατασκευών και ακουστικής, αλλά και σύνθετα προβλήματα αλληλεπίδρασης ρευστών με κατασκευές, ακόμα και προβλήματα που αφορούν μικρονανοσυστήματα. Στην ουσία το ANSYS επιλύει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν ένα συγκεκριμένο φαινόμενο για τις συγκεκριμένες αρχικές-οριακές συνθήκες που έχουμε θέσει. Για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλύεται ένα πρόβλημα φαινομένων μεταφοράς και συγκεκριμένα μεταφοράς θερμότητας. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση της υπολογιστικής προσομοίωσης.

Το πρώτο στάδιο της μοντελοποίησης είναι η κατασκευή της ζητούμενης γεωμετρίας των πειραματικών σταθμών – οικίσκων. Στη συνέχεια δημιουργείται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στους κόμβους του οποίου θα επιλυθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο και την εξέλιξή του. Μετά επιλέγονται οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα όσο το δυνατόν πληρέστερα και ορίζονται οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Τέλος επιλέγεται μέθοδος επίλυσης του προβλήματος και μετά την επίλυση ακολουθεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή των συμπερασμάτων. [25]

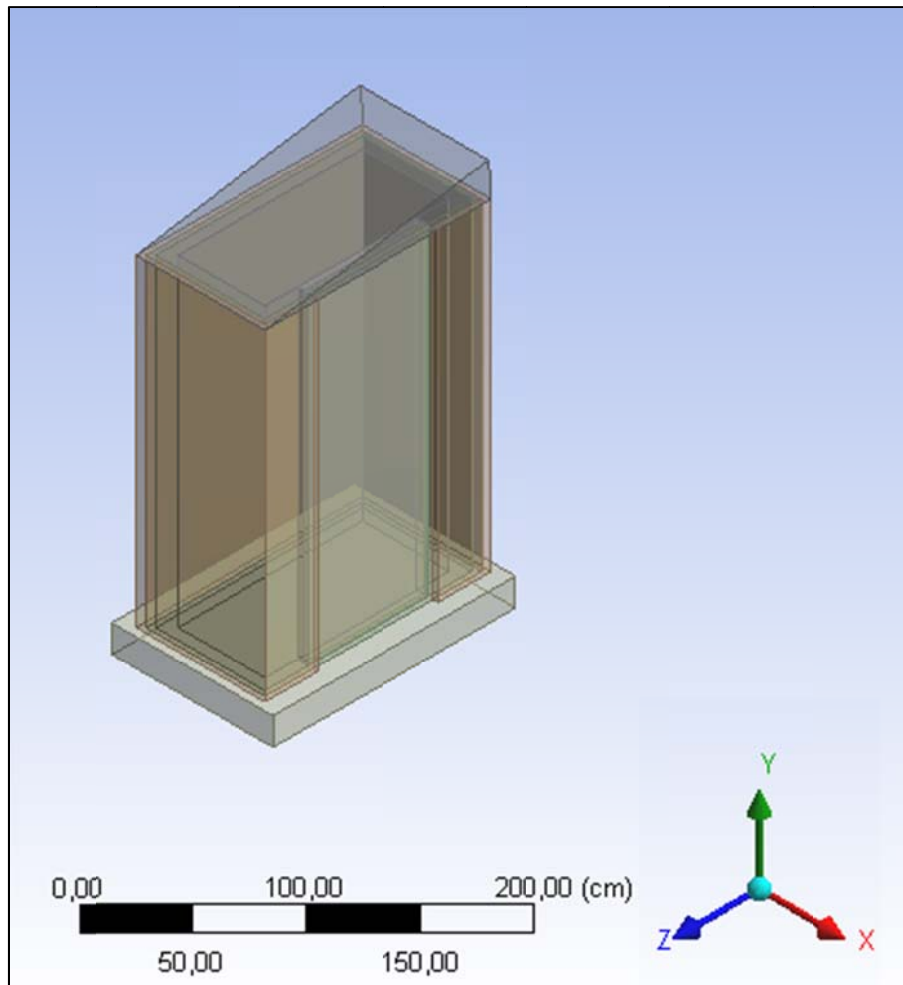
6.2 Γεωμετρία

Το πρώτο βήμα για την επίλυση του προβλήματος είναι η γεωμετρική μοντελοποίηση, η οποία έγινε στο Workbench του ANSYS 13.0. Στα δύο παρακάτω σχήματα διακρίνεται ο πειραματικός οικίσκος εκτός και εντός του

όγκου ελέγχου αντίστοιχα που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του θερμορευστομηχανικού προβλήματος.



Εικόνα 6-2: Πειραματικός οικίσκος και όγκος ελέγχου



Εικόνα 6-3: Πειραματικός οικίσκος

Ο πειραματικός οικίσκος με τον όγκο ελέγχου που τον περιβάλλει αποτελείται από τα ακόλουθα επιμέρους τμήματα (bodies), τα οποία τελικά θα λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύνολο κατά την επίλυση του προβλήματος:

1. Εξωτερικός αέρας

2. Τοίχος

2-1. Πέτρα

2-2. Διάκενο αέρα

2-3. Τσιμέντο

3. Πόρτα

3-1. Επικάλυψη με PVC

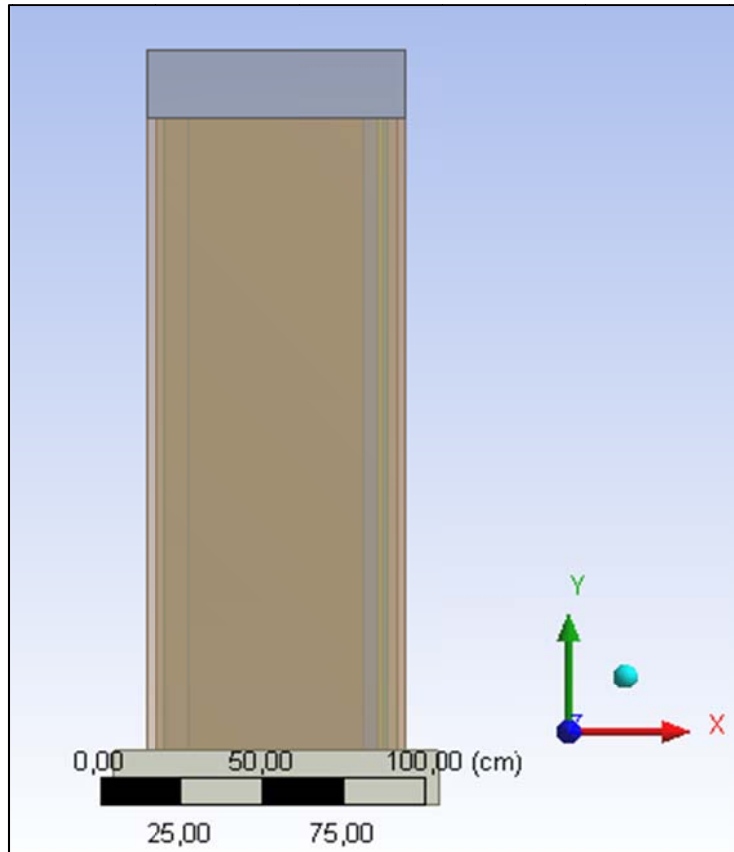
3-2. Μεταλλικό φύλλο (Αλουμίνιο)

3-3. Polyspan (Μόνωση)

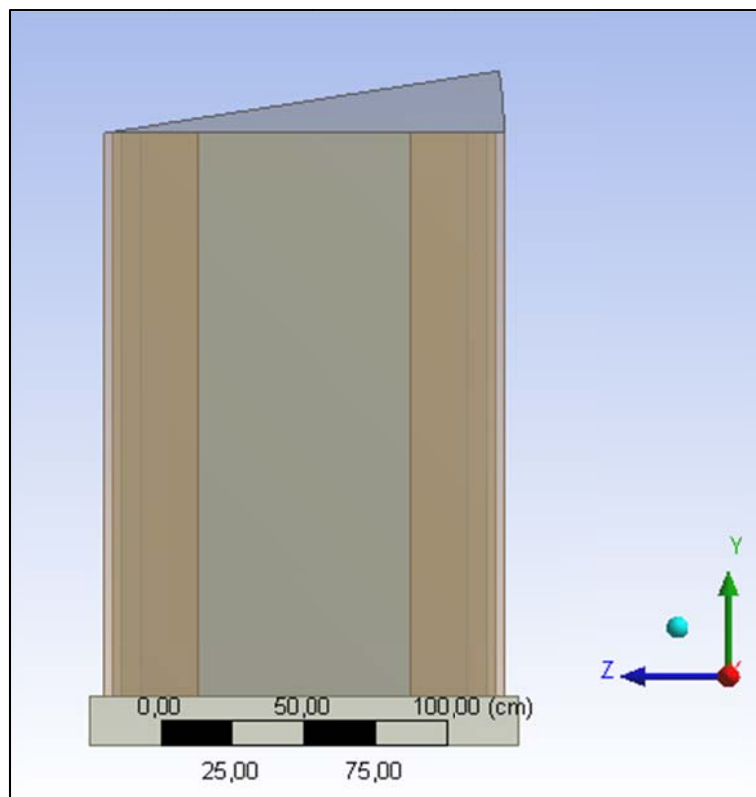
4. Εσωτερικός αέρας

Πίνακας 6-1: Βασικές γεωμετρικές διαστάσεις του πειραματικού οικίσκου

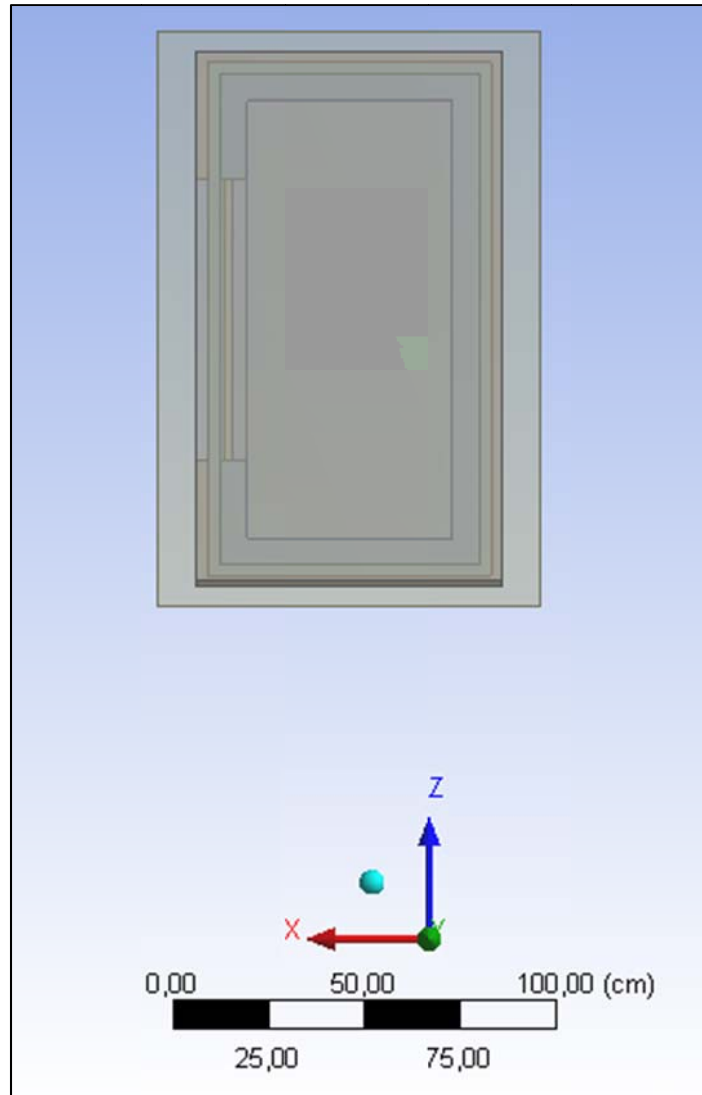
Γενικές διαστάσεις		Τοίχος		Πόρτα	
Πλάτος	134 cm	Πάχος πέτρας	3 cm	Πλάτος	74 cm
Μήκος	76.5 cm	Πάχος Διακένου Αέρα	3.5 cm	Πάχος επικάλυψης με PVC	1 cm
Ύψος (μεγάλης πλευράς)	225 cm	Πάχος τσιμέντου	7 cm	Πάχος μεταλλικού φύλλου	0.2 cm
Ύψος (μικρής πλευράς)	211 cm			Πάχος Polyspan	1 cm
Κλίση οροφής	9°			Ύψος	163 cm



Εικόνα 6-4: Προβολή του πειραματικού οικίσκου στο επίπεδο xy



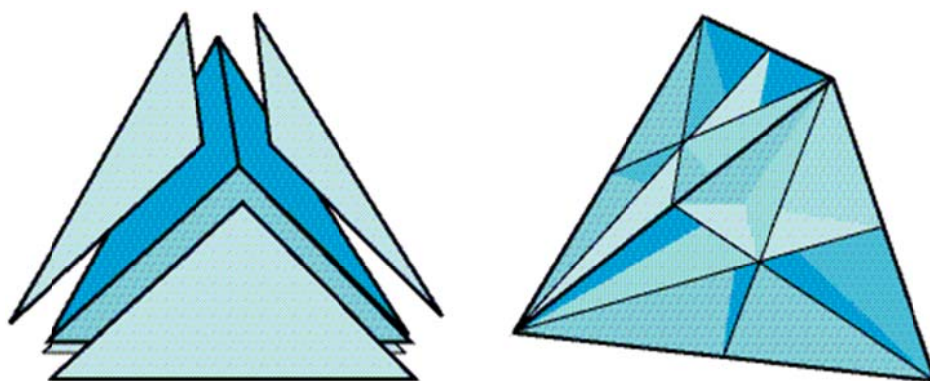
Εικόνα 6-5: Προβολή του πειραματικού οικίσκου στο επίπεδο xy



Εικόνα 6-6: Προβολή του πειραματικού οικίσκου στο επίπεδο xy

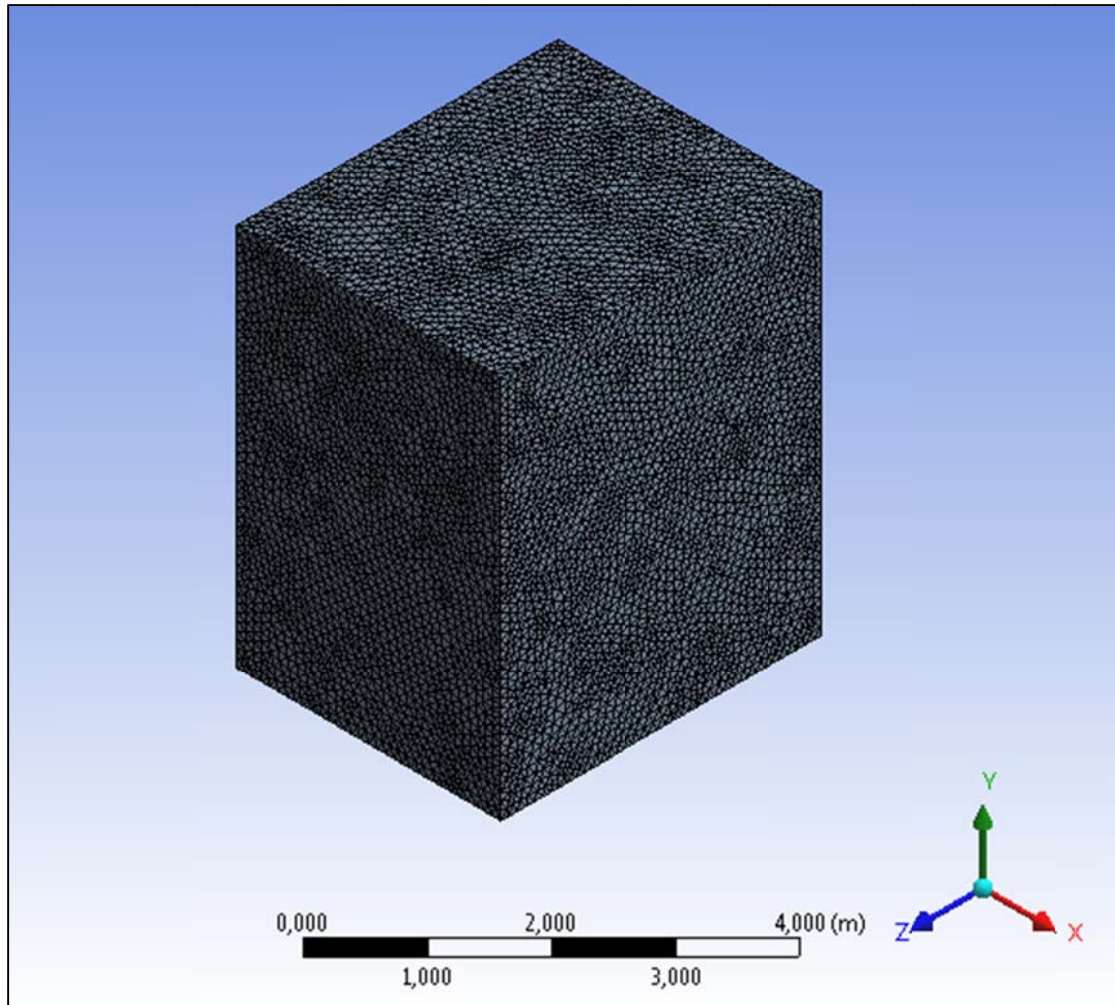
6.3 Κατασκευή πλέγματος

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την διακριτοποίηση του χώρου και την επίλυση των μετασχηματισμένων διαφορικών εξισώσεων του προβλήματος σε αλγεβρικές αποτελείται από τετράεδρα, χωρίς ενδιάμεσους κόμβους.



Εικόνα 6-7: Τετράεδρα πεπερασμένων όγκων

Δημιουργήθηκαν αρκετά πλέγματα έως το τελικό χρησιμοποιούμενο πλέγμα. Στόχος ήταν η επίτευξη ανεξαρτησίας της λύσεως από το πλέγμα. Πράγματι ένα αραιό πλέγμα μπορεί να επηρεάσει την τελική ποιότητα της λύσης, καθώς δεν θα είναι δυνατή η ανίχνευση απότομων μεταβολών του υπολογιζόμενου μεγέθους εντός του χωρίου. Από τη άλλη πλευρά δεν είναι συμφέρον να πυκνώνουμε το πλέγμα συνεχώς, διότι χρησιμοποιούμε επιπλέον πόρους του υπολογιστή (π.χ. μνήμη) χωρίς να χρειάζεται, αυξάνεται υπερβολικά ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος και δεν κερδίζουμε σε ακρίβεια λύσης ουσιαστικά. Επίσης υπάρχει πιθανότητα να μην επαρκούν οι δυνατότητες ενός υπολογιστικού συστήματος για ένα τόσο πυκνό πλέγμα. Παρακάτω παρατίθενται τα δύο τελευταία πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν.

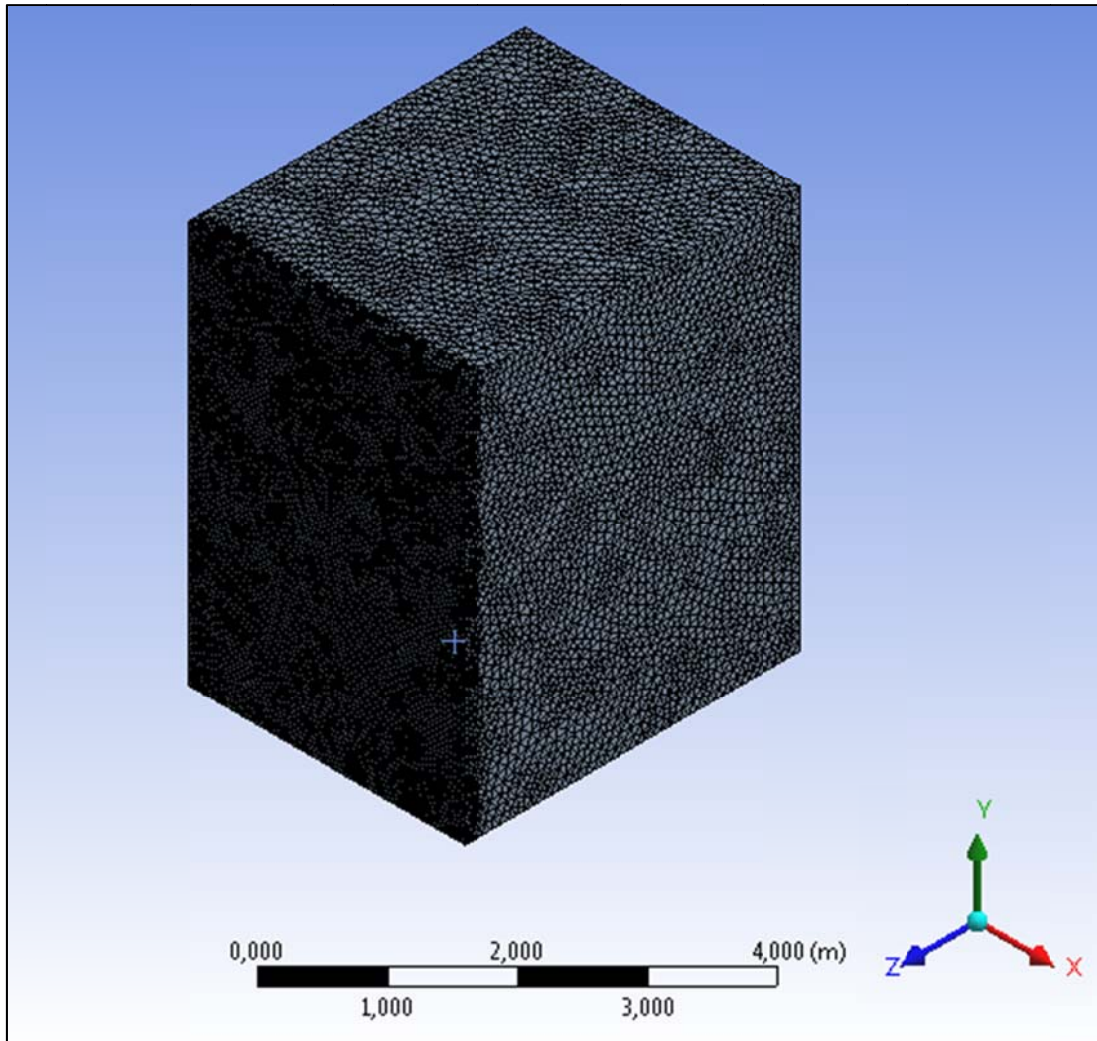


Εικόνα 6-8: Πρώτο χρησιμοποιούμενο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	102395
<input type="checkbox"/> Elements	577551
Mesh Metric	None

Details of "Patch Conforming Method" - Method	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	10 Bodies
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Midside Nodes	Dropped

Εικόνα 6-9: Στοιχεία πρώτου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 6-10: Δεύτερο χρησιμοποιούμενο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

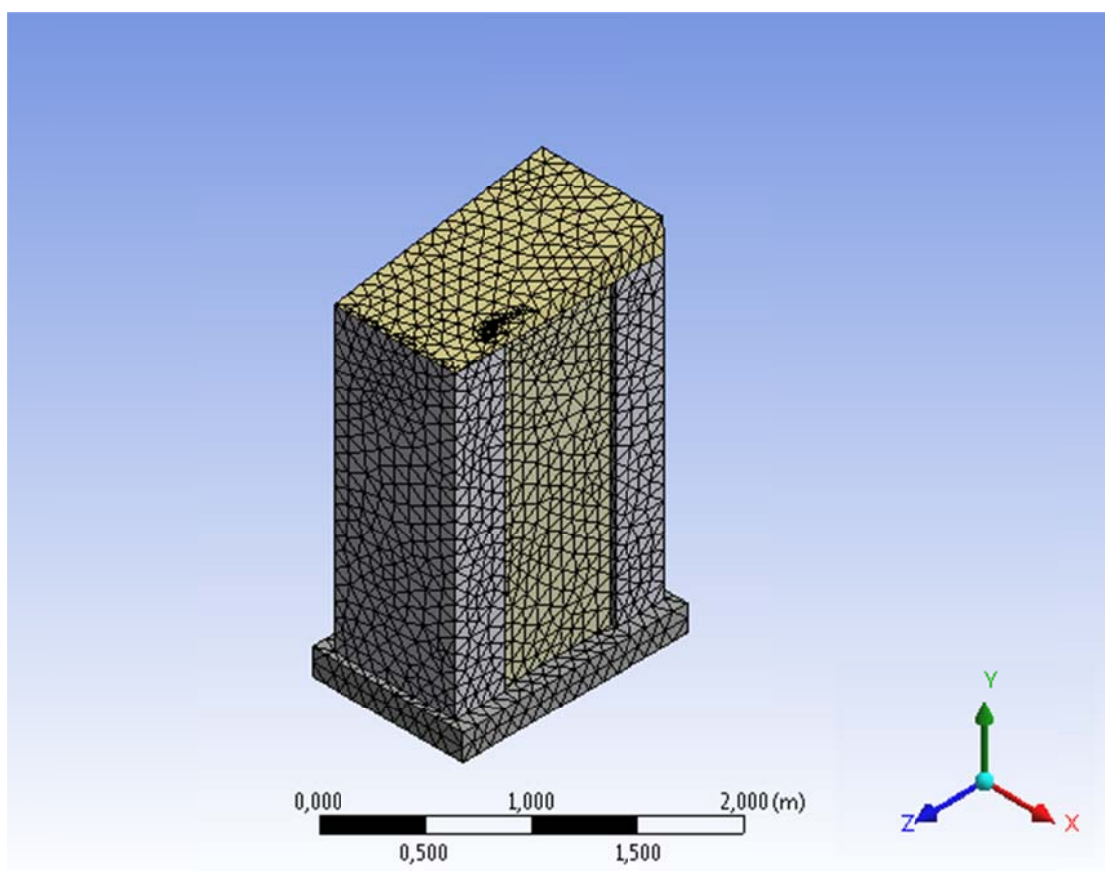
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	126862
<input type="checkbox"/> Elements	704820
Mesh Metric	None

Details of "Patch Conforming Method" - Method	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	10 Bodies
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Midside Nodes	Dropped

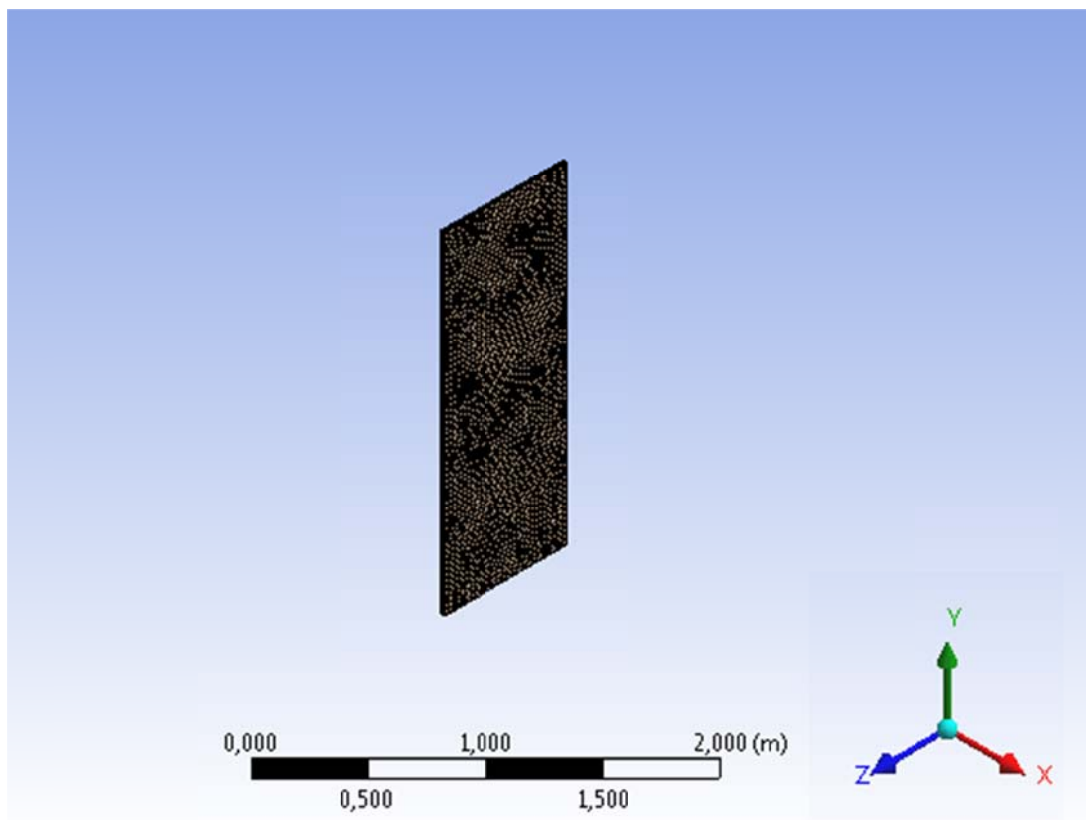
Εικόνα 6-11: Στοιχεία δεύτερου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Επίσης χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος ελέγχου του πλέγματος των τετραέδρων (Patch Conforming Algorithm for Tetrahedrons Method Control). Αυτή η μέθοδος στηρίζεται στην κατά Delaunay διακριτοποίηση του χώρου και δημιουργεί τις προϋποθέσεις για ομαλή μετάβαση από την μια διεπιφάνεια που αποτελεί σύνορο μεταξύ περιοχών στην άλλη περιοχή, χωρίς εισχώρηση τετραέδρων από τη μια περιοχή στην άλλη, χρησιμοποιώντας επιπλέον κόμβο. Επίσης συμβάλλει στη δημιουργία στρωμάτων ομαλού πυκνώματος ή αραιώσης κόμβων σε πλήρη αναλογία με τον συντελεστή πυκνώσης-αραιώσης.

Το πλέγμα δεν κατασκευάστηκε ομοιόμορφο σε όλες τις επιμέρους ορισμένες με βάση τη γεωμετρία περιοχές του προβλήματος. Ενώ στον όγκο ελέγχου που αφορά το εξωτερικό του οικίσκου περιβάλλοντα αέρα χρησιμοποιήθηκε η ορισμένη από το ANSYS κατανομή πεπερασμένων όγκων, κοντά στα τοιχώματα και το δάπεδο έγινε πυκνώση, όπως και στο μεταλλικό φύλλο της πόρτας πάχους 1 mm κατά επίπεδο 2 (factor 2), δηλαδή κάθε τετράεδρο σπάζει σε άλλα 2. Το ελάχιστο μήκος υπολογιστικού κελιού στις περιοχές πυκνώσης είναι $4.3 \cdot 10^{-4}$ m. Επίσης επιλέχθηκε η όποια αλλαγή στην πυκνώση των τετραέδρων να γίνεται ομοιόμορφα και όχι απότομα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στα τοιχώματα του οικίσκου και το πυκνωμένο πλέγμα στο μεταλλικό φύλλο της πόρτας.



Εικόνα 6-12: Πλέγμα στα τοιχώματα του οικίσκου

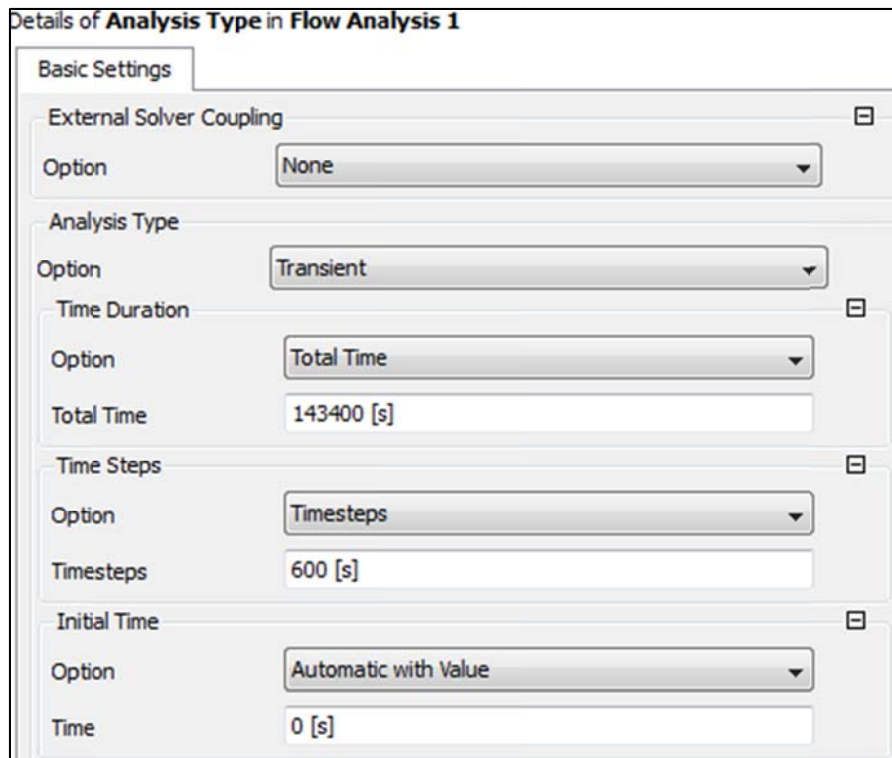


Εικόνα 6-13: Πυκνωμένο πλέγμα στο μεταλλικό φύλλο της πόρτας

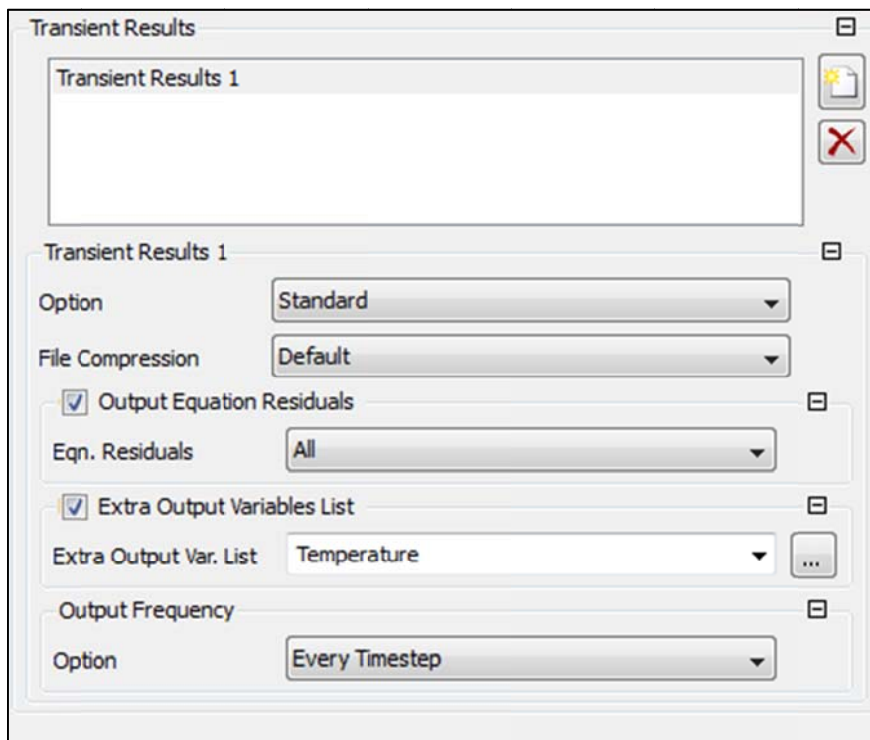
6.4 Καθορισμός εξισώσεων επίλυσης και αρχικών / συνοριακών συνθηκών του προβλήματος

Μετά την κατασκευή του πλέγματος και της γεωμετρίας στο περιβάλλον Workbench του ANSYS 13.0, γίνεται εισαγωγή τους στο ANSYS CFX. Εκεί θα καθοριστούν οι εξισώσεις επίλυσης του προβλήματος, οι φυσικές ιδιότητες των υλικών και οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες για κάθε περιοχή του προβλήματος και πως αυτές συνδέονται μεταξύ τους.

Το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι χρονικά μεταβαλλόμενο (μεταφορά θερμότητας ως μεταβατικό φαινόμενο), διότι μελετάται η κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των πειραματικών οικίσκων κατά τη διάρκεια 2 ημερών. Οπότε ορίζεται το πρόβλημα ως transient (μεταβατικό). Ο συνολικός χρόνος μελέτης του φαινομένου και καταγραφής της θερμοκρασίας είναι 143400 δευτερόλεπτα. Τέλος ορίζεται η λήψη αποτελεσμάτων κάθε 600 δευτερόλεπτα (χρονικό βήμα) για τη θερμοκρασία με τη μορφή αρχείου (.tmp), αφού κάθε 600 δευτερόλεπτα έχει γίνει και η λήψη των πειραματικών μετρήσεων με τις οποίες θα συγκριθούν τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Ως αρχή της μελέτης του φαινομένου θεωρείται η χρονική στιγμή μηδέν.



Εικόνα 6-14: Ορισμός τύπου ανάλυσης και χαρακτηριστικών



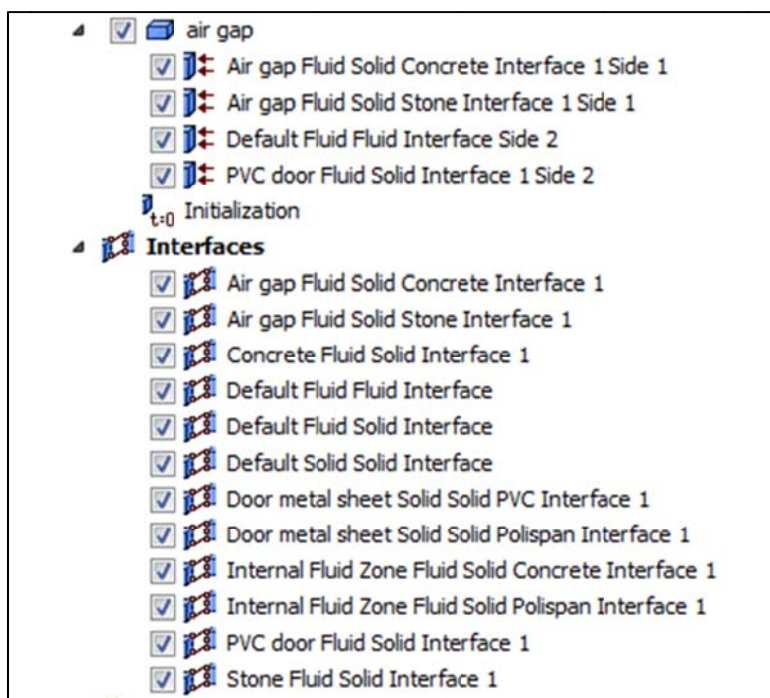
Εικόνα 6-15: Λήψη αποτελεσμάτων με δημιουργία αρχείων ανά χρονικό βήμα

Οι διακριτές μεταξύ τους περιοχές, οι οποίες κατά κανόνα αποτελούνται από διαφορετικό υλικό, είναι:

1. Αέρας περιλαμβανόμενος στον όγκο ελέγχου (Fluid zone)
2. Αέρας εσωτερικού χώρου (Internal Fluid zone)
3. Πέτρα (Stone)
4. Τσιμέντο (Concrete)
5. Διάκενο αέρα (Air gap)
6. Επικάλυψη πόρτας με PVC (PVC door)
7. Μεταλλικό φύλλο πόρτας (Metal sheet door)
8. Μόνωση με Polyspan (Polyspan door)

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι 8 περιοχές με τον τρόπο που ορίστηκαν στο ANSYS καθώς και οι διεπιφάνειες που αποτελούν κοινά σύνορα μεταξύ των περιοχών αυτών.

- Simulation
 - Flow Analysis 1
 - Analysis Type
 - Concrete
 - Air gap Fluid Solid Concrete Interface 1 Side 2
 - Concrete Fluid Solid Interface 1 Side 1
 - Default Fluid Solid Interface in Concrete Side 1
 - Default Solid Solid Interface Side 1
 - Internal Fluid Zone Fluid Solid Concrete Interface 1 Side 2
 - Initialization
 - Fluid zone
 - Boundary 1
 - Boundary 2
 - Concrete Fluid Solid Interface 1 Side 2
 - Default Fluid Fluid Interface Side 1
 - Default Fluid Solid Interface Side 2
 - Stone Fluid Solid Interface 1 Side 2
 - dapedo
 - Initialization
 - Internal fluid zone
 - Internal Fluid Zone Fluid Solid Concrete Interface 1 Side 1
 - Internal Fluid Zone Fluid Solid Polispan Interface 1 Side 1
 - Initialization
 - Metal sheet door
 - Default Solid Solid Interface in Metal sheet door Side 1
 - Door metal sheet Solid Solid PVC Interface 1 Side 1
 - Door metal sheet Solid Solid Polispan Interface 1 Side 1
 - Initialization
 - PVC door
 - Default Solid Solid Interface Side 2
 - Door metal sheet Solid Solid PVC Interface 1 Side 2
 - PVC door Fluid Solid Interface 1 Side 1
 - Initialization
 - Polispan door
 - Default Solid Solid Interface in Polispan door Side 2
 - Door metal sheet Solid Solid Polispan Interface 1 Side 2
 - Internal Fluid Zone Fluid Solid Polispan Interface 1 Side 2
 - Initialization
 - Stone
 - Air gap Fluid Solid Stone Interface 1 Side 2
 - Default Fluid Solid Interface in Stone Side 1
 - Default Solid Solid Interface in Stone Side 2
 - Stone Fluid Solid Interface 1 Side 1
 - Initialization



Εικόνα 6-16: Καθορισμός όγκων ελέγχου, περιοχών αποτελούμενων από το ίδιο υλικό και διεπιφανειών για την επίλυση εξισώσεων ροής και μεταφοράς θερμότητας

Πίνακας 6-2: Χαρακτηρισμός περιοχών του προβλήματος και υλικών

Περιοχές Ρευστών				
Υποπεριοχή	Υλικό	Ιδιότητες υλικού		
		Πυκνότητα (Kg/m ³)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/(Kg*K))	Θερμική Αγωγιμότητα (W/(m*K))
Εξωτερικά του οικίσκου αέρας (Fluid zone)	Αέρας 20°C	1.19	1004.4	0.026
Αέρας εσωτερικού χώρου (Internal Fluid zone)				
Διάκενο αέρα (Air gap)				

Περιοχές Στερεών				
Υποπεριοχή	Υλικό	Ιδιότητες υλικού		
		Πυκνότητα (Kg/m ³)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/(Kg*K))	Θερμική Αγωγιμότητα (W/(m*K))
Πέτρα (Stone)	Πέτρα	2250	974.1	1.87
	PCM	800	974.1(για περιοχή εκτός αλλαγής φάσης)	0.2
Τσιμέντο (Concrete)	Τσιμέντο	2400	800	2.1
Επικάλυψη PVC (PVC door)	PVC	1500	1000	0.231
Μεταλλικό φύλλο πόρτας (Metal sheet door)	Αλουμίνιο	2702	903	237
Μόνωση με Polyspan (Polyspan door)	Polyspan	10	1400	0.039

Ορίζονται στο προς επίλυση μοντέλο εκφράσεις και συναρτήσεις βοηθητικές για την επίλυση του προβλήματος. Όλες οι εκφράσεις (Expressions), με εξαίρεση την CPstone PCM, προσδιορίζουν τη μέση θερμοκρασία μιας περιοχής (volumeAve(T)@περιοχή) και χρησιμεύουν ως αρχικές ή συνοριακές συνθήκες. Αντίθετα, οι ορισμένες από το χρήστη συναρτήσεις (User functions) αφορούν γραμμικές παρεμβολές μεταξύ τιμών που δίνονται σε αρχεία και αφορούν είτε δεδομένα θερμοκρασίας είτε δεδομένα ακτινοβολίας. Τα δεδομένα για την ακτινοβολία ελήφθησαν από τη βιβλιοθήκη του software TRNSYS για τη Valencia τις ίδιες μέρες που εκτελέστηκαν τα πειράματα, δηλαδή στις 2 και 3 Σεπτεμβρίου.

Πίνακας 6-3: Ορισμός εκφράσεων και συναρτήσεων

Έκφραση	Περιεχόμενο έκφρασης
Expressions	
Air gap	volumeAve(T)@B175
CPstone PCM	$974.1[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \cdot \text{step}(T/1[\text{C}]) + 0.005 \cdot (39600[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}] \cdot (T-25.5[\text{C}]) \cdot \text{step}((T-25.5[\text{C}])/1[\text{C}]) - 2 \cdot 39600[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}] \cdot (T-26.5[\text{C}]) \cdot \text{step}((T-26.5[\text{C}])/1[\text{C}]) + 39600[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}] \cdot (T-27.5[\text{C}]) \cdot \text{step}((T-27.5[\text{C}])/1[\text{C}]))$
Concrete (οροφή)	volumeAve(T)@B152
Concrete2 (τοιχος)	volumeAve(T)@B165
Door metalsheet	volumeAve(T)@door metalsheet
Fluid zone	volumeAve(T)@B264
Internal fluid	volumeAve(T)@B152
PVC	volumeAve(T)@B126
Polyspan	volumeAve(T)@B134
Stone	volumeAve(T)@B116
User functions	
Horizontal Radiation	Γραμμική παρεμβολή σε πίνακα τιμών ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο σε συνάρτηση με το χρόνο
Horizontal and Vertikal Radiation	Γραμμική παρεμβολή σε πίνακα τιμών ακτινοβολίας σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο σε συνάρτηση με το χρόνο
Vertikal Radiation	Γραμμική παρεμβολή σε πίνακα τιμών

	ακτινοβολίας σε κατακόρυφο επίπεδο σε συνάρτηση με το χρόνο
Thermokrasia eisodou	Γραμμική παρεμβολή σε πίνακα τιμών θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε συνάρτηση με το χρόνο
Thermokrasia dapedou	Γραμμική παρεμβολή σε πίνακα τιμών θερμοκρασίας δαπέδου σε συνάρτηση με το χρόνο

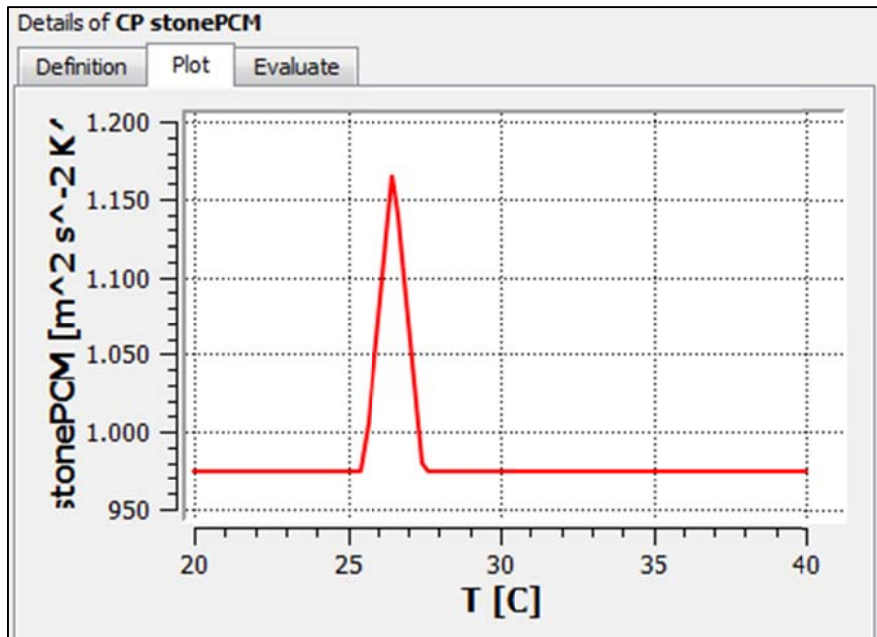
Ο προσδιορισμός της ειδικής θερμοχωρητικότητας του μίγματος πέτρας και PCM κατά την αλλαγή φάσης γίνεται με τη σύνθετη βηματική συνάρτηση:

$$C_p = 974.1 \cdot u(T) + 0.005 \cdot [39600 \cdot (T - 25.5) \cdot u(T - 25.5) - 2 \cdot 39600 \cdot (T - 26.5) \cdot u(T - 26.5) + 39600 \cdot (T - 27.5) \cdot u(T - 27.5)] \quad (6.1)$$

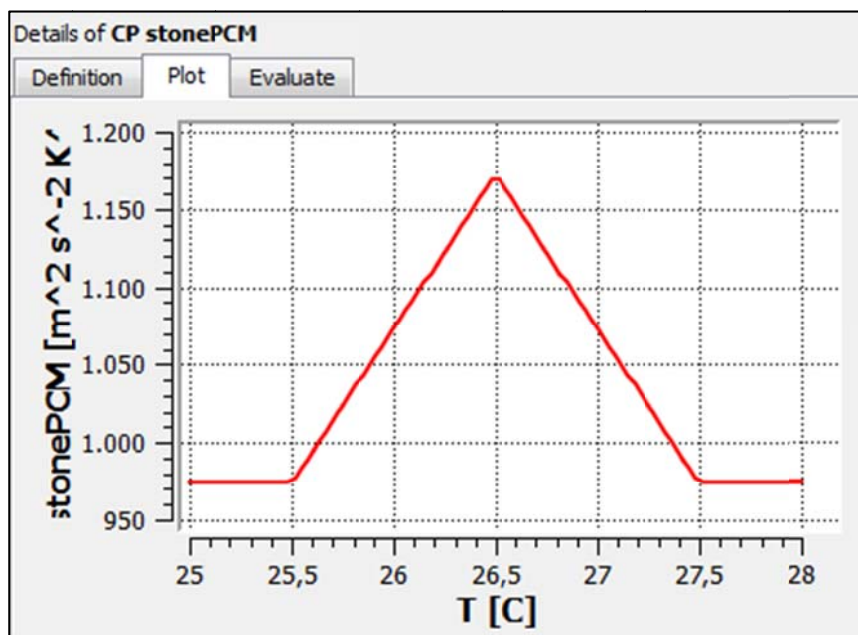
Για την εξαγωγή της παραπάνω εξίσωσης υπολογισμού του C_p ακολουθήθηκε η μέθοδος “Effective Heat Capacity Method” (“Μέθοδος φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας”). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο το C_p θεωρείται ότι μεταβάλλεται γραμμικά, αλλά πολύ απότομα (μεγάλη κλίση ευθείας) εντός της περιοχής αλλαγής φάσης. Η συνολική λανθάνουσα θερμότητα κατά τη διάρκεια του φαινομένου της αλλαγής φάσης ισούται με το εμβαδόν του τριγώνου που δημιουργείται από τις δύο γραμμικές συναρτήσεις αύξησης και μείωσης της ειδικής θερμοχωρητικότητας. Επειδή η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης είναι γνωστό μέγεθος, όπως επίσης και το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο, μπορώ να προσδιορίσω πλήρως τη συνάρτηση του C_p με τη θερμοκρασία. Πρέπει να τονίσουμε ότι αυτό το εύρος θερμοκρασιών είναι ουσιαστικά ελάχιστο, διότι η αλλαγή φάσης γίνεται σχεδόν ισοθερμοκρασιακά.

$$974.1 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \cdot \text{step}(T/1[C]) + 0.005 \cdot (39600 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-2}] \cdot (T - 25.5 [C]) \cdot \text{step}((T - 25.5 [C])/1[C]) - 2 \cdot 39600 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-2}] \cdot (T - 26.5 [C]) \cdot \text{step}((T - 26.5 [C])/1[C]) + 39600 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-2}] \cdot (T - 27.5 [C]) \cdot \text{step}((T - 27.5 [C])/1[C]))$$

Εικόνα 6-17: Συνάρτηση ορισμού του υλικού αλλαγής φάσης



Εικόνα 6-18: Γραφική παράσταση της μεταβολής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

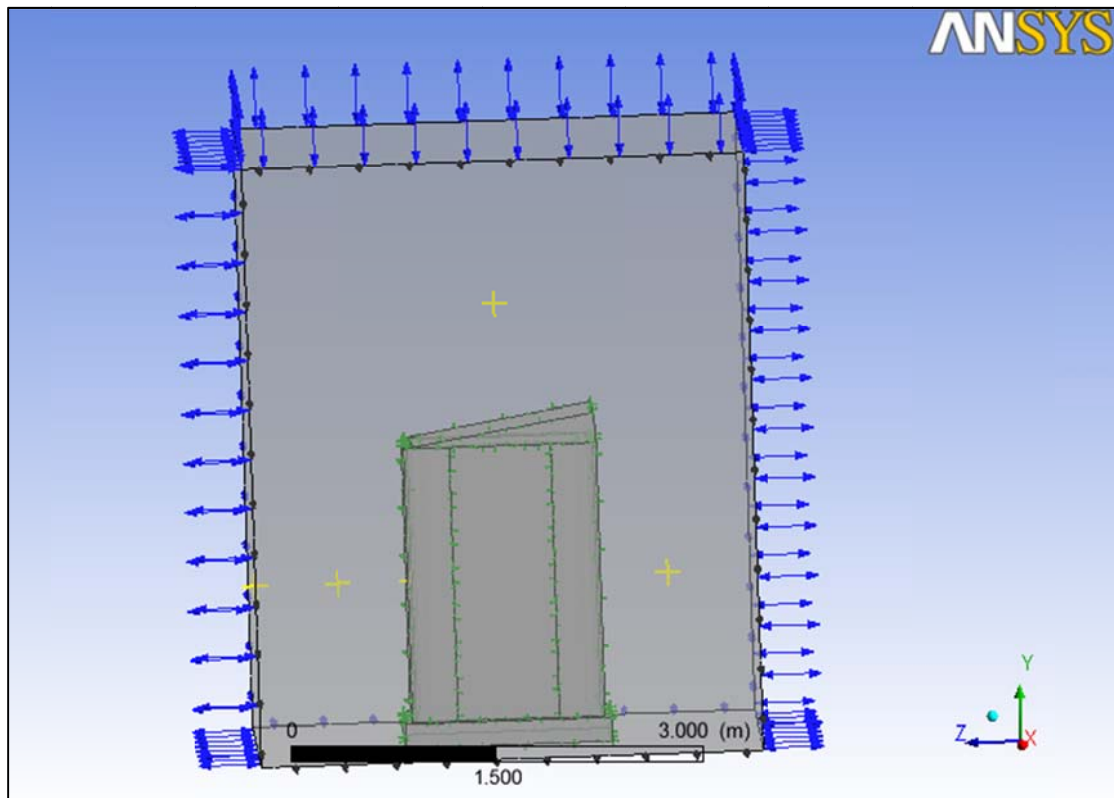


Εικόνα 6-19: Γραφική παράσταση της μεταβολής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία στην περιοχή της αλλαγής φάσης

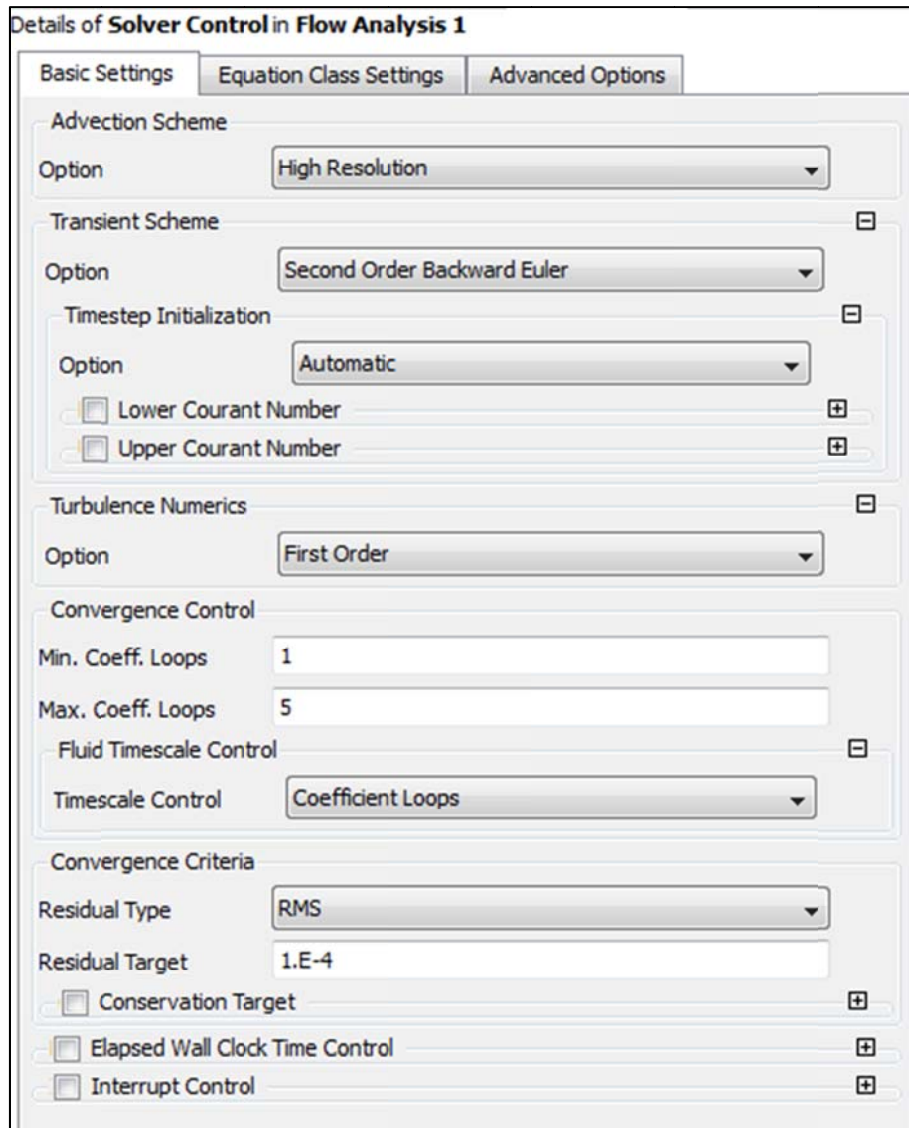
Πίνακας 6-4: Αρχικές συνθήκες ανά περιοχή

Περιοχή	Αρχικές συνθήκες	
	Ταχύτητα	Θερμοκρασία
Εξωτερικά του οικίσκου αέρας (Fluid zone)	2.5 m/s ή 5 m/s	Thermokrasia eisodou (t) (Αρχείο θερμοκρασιών περιβάλλοντος)
Αέρας εσωτερικού χώρου (Internal Fluid zone)	1m/s για κλειστή πόρτα 2.5 ή 5 m/s για ανοιχτή πόρτα	28.21 °C
Διάκενο αέρα (Air gap)	0.5 m/s	Fluid zone
Πέτρα (Stone)	-----	Fluid zone
Τσιμέντο (Concrete)	-----	28.21 °C
Επικάλυψη PVC (PVC door)	-----	Air gap
Μεταλλικό φύλλο πόρτας (Metal sheet door)	-----	PVC
Μόνωση με Polyspan (Polyspan door)	-----	Door metalsheet

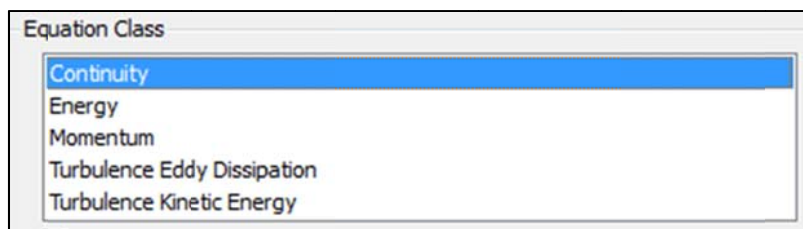
Ορίζονται επίσης σημεία ελέγχου ώστε να παρακολουθούμε κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος τη συμπεριφορά συγκεκριμένων μεγεθών, όπως η θερμοκρασία, σε περιοχές του όγκου ελέγχου που μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα, όπως είναι ο χώρος εσωτερικά του οικίσκου. Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων βρίσκεται κοντά στο δάπεδο στο κέντρο του οικίσκου.



Εικόνα 6-20: Το προς επίλυση πρόβλημα με τις συνοριακές συνθήκες του και τα σημεία ελέγχου του. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά με τη μέθοδο Euler δεύτερης τάξης. Όπως έχει ήδη αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο αυτές οι εξισώσεις είναι διακριτοποιημένες με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ως προς το χώρο και το χρόνο, οπότε ουσιαστικά έχουν μετατραπεί σε αλγεβρικές εξισώσεις. Όπως αναφέρεται και στην εικόνα 6.22 οι εξισώσεις που επιλέχθηκαν για την περιγραφή και επίλυση του προβλήματος είναι οι εξισώσεις συνέχειας, ενέργειας, ορμής και οι 2 εξισώσεις του μοντέλου τύρβης. Ορίζονται 5 επαναλήψεις ανά χρονικό βήμα ώστε να επιτευχθεί η σύγκλιση. Το δε κριτήριο για τη σύγκλιση είναι η μέση τετραγωνική διαφορά τιμής των υπολογιζόμενων μεγεθών (RMS υπολογιζόμενων μεγεθών) μεταξύ δύο επαναλήψεων να μην ξεπερνά το 10^{-4} . Τέλος στην εικόνα 6.23 αναφέρονται οι μονάδες των προς επίλυση μεγεθών με τις οποίες θα εμφανίζονται στα αποτελέσματα που θα δίνει το ANSYS..



Εικόνα 6-21: Σύγκλιση και επαναλήψεις



Εικόνα 6-22: Εξισώσεις προς επίλυση

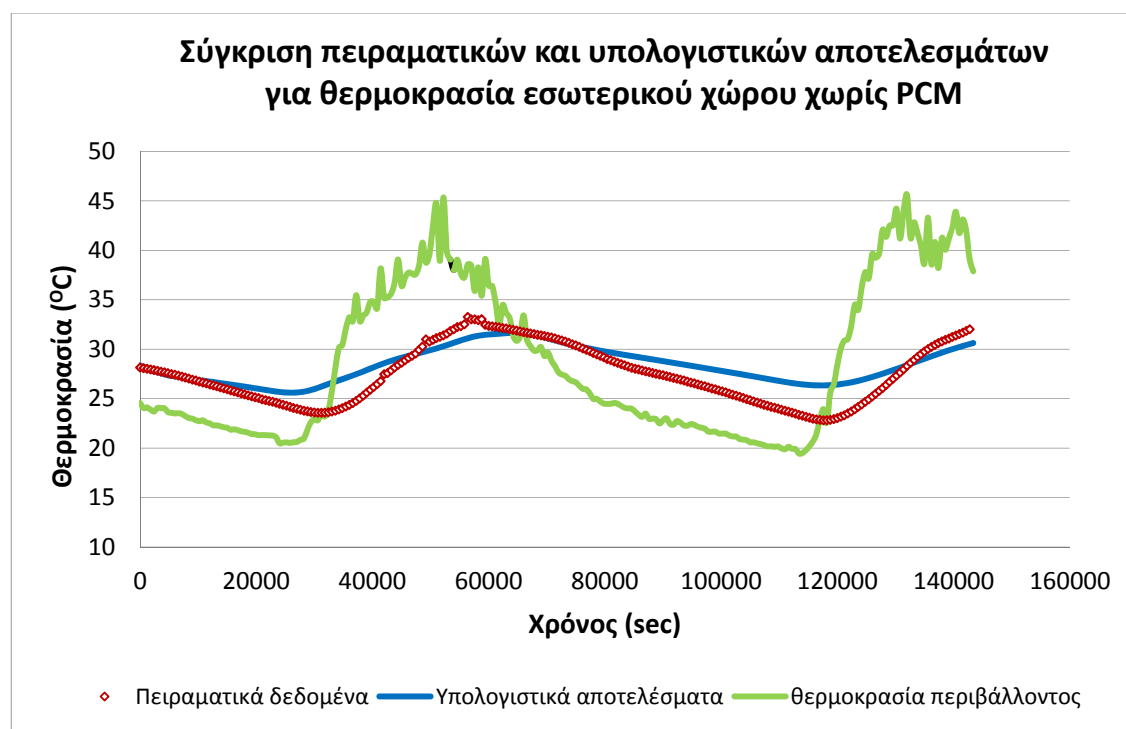
Mass Units	[kg]	...
Length Units	[m]	...
Time Units	[s]	
Temperature Units	[K]	
<input checked="" type="checkbox"/> Angle Units		☐
Angle Units	[rad]	
<input checked="" type="checkbox"/> Solid Angle Units		☐
Solid Angle Units	[sr]	

Εικόνα 6-23: Μονάδες των προς επίλυση μεγεθών

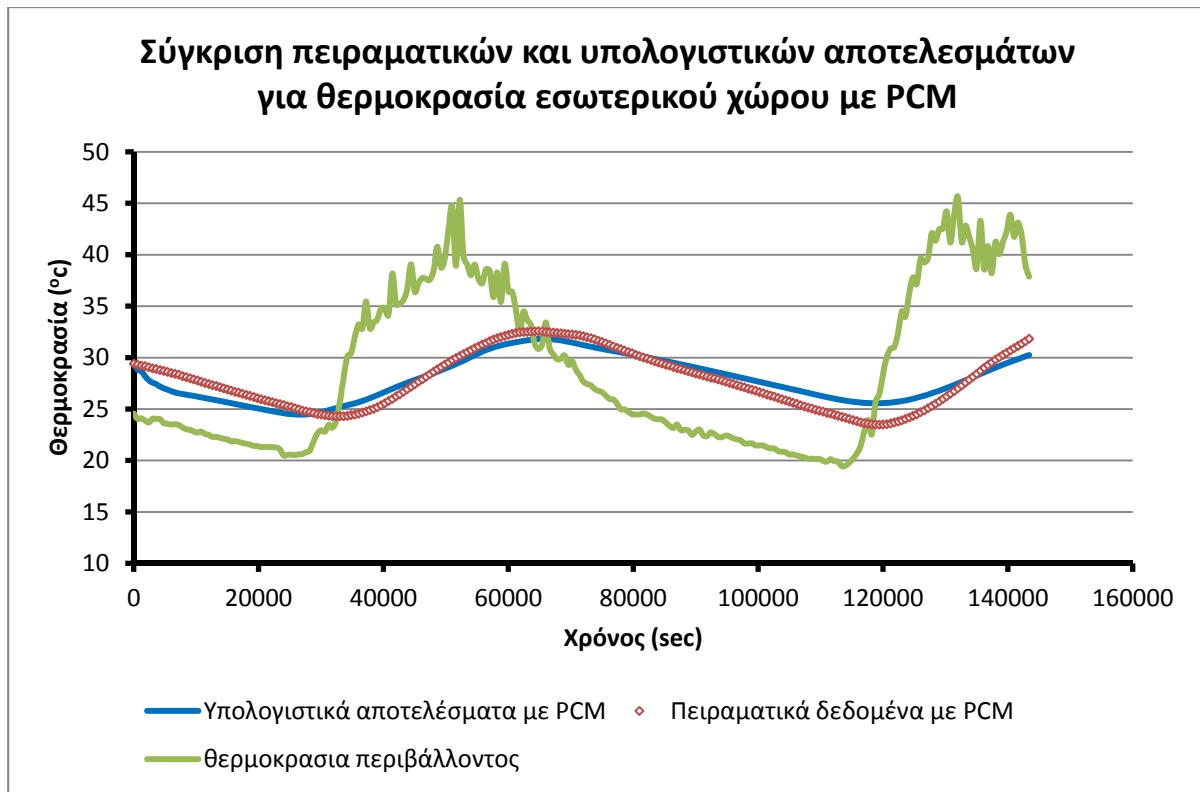
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Παράμετροι προβλήματος και αποτελέσματα

7.1 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων με σκοπό την επαλήθευση του υπολογιστικού μοντέλου με βάση τα πειραματικά δεδομένα. Ουσιαστικά αυτή η σύγκριση μας δείχνει το πόσο κοντά στην πραγματικότητα (πειραματικά δεδομένα) βρίσκεται η υπολογιστική προσομοίωση με τις παραδοχές που έχουμε κάνει σε αυτήν. Η σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων γίνεται τόσο για την περίπτωση που η πρόσοψη του κτιρίου (πέτρα) δεν περιέχει PCM, όσο και για την περίπτωση χρήσης PCM.



Εικόνα 7-1: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για θερμοκρασία εσωτερικού χώρου χωρίς PCM



Εικόνα 7-2: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για θερμοκρασία εσωτερικού χώρου με ΥΑΦ (PCM)

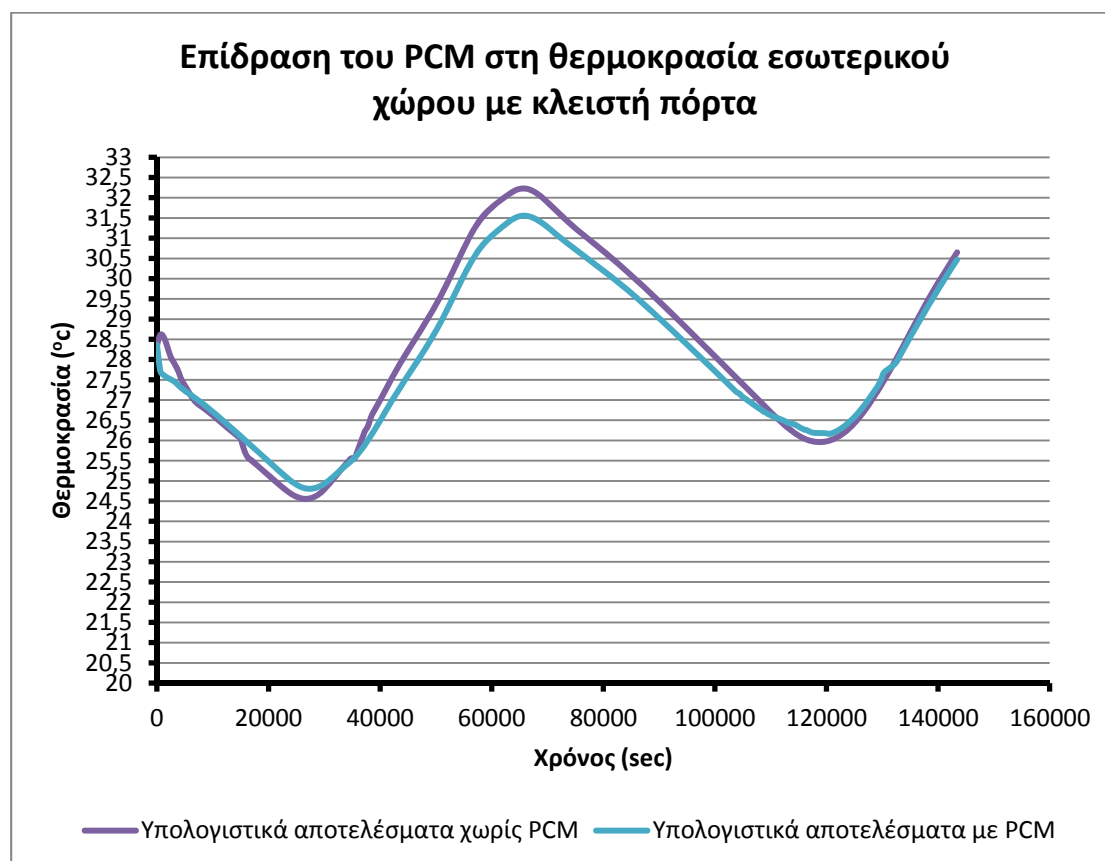
Οι διαφορές που παρουσιάζονται στα προηγούμενα δύο σχήματα μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων τόσο όταν η πέτρα δεν περιέχει PCM όσο και όταν περιέχει οφείλονται σε παραδοχές που αναγκαστικά κάνουμε για να ορίσουμε οριακές συνθήκες στο πρόβλημά μας. Για παράδειγμα ορίσαμε σταθερή ταχύτητα ανέμου για όλο το χρονικό διάστημα των 48 ωρών που μελετάμε, ενώ οι καιρικές συνθήκες αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης τα δεδομένα για την ακτινοβολία ελήφθησαν από τη βιβλιοθήκη του software TRNSYS για τη Valencia τις ίδιες μέρες που εκτελέστηκαν τα πειράματα, δηλαδή στις 2 και 3 Σεπτεμβρίου, χωρίς να σημαίνει απαραίτητα ότι περιέγραφαν τις συνθήκες εκείνες ακριβώς τις ημέρες, καθώς αυτά τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν ουσιαστικά μια στατιστική εκτίμηση για το τι αναμένεται ως ποσό ακτινοβολίας εκείνες τις ημέρες του έτους. Ακόμα η θερμοκρασία του δαπέδου μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος χώρου και μπορεί να μην έχει μοντελοποιηθεί επαρκώς.

Τέλος οι διαφορές μπορεί να οφείλονται και στο γεγονός ότι δεν γνωρίζουμε τις ακριβείς συνθήκες που επικρατούσαν σε όλη τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος, ώστε να τις μοντελοποιήσουμε επαρκώς. Για παράδειγμα ούτε το μοντέλο της ανοιχτής, ούτε το μοντέλο της κλειστής πόρτας μπορεί να περιγράψει επαρκώς το πρόβλημα, διότι αέρας μπαίνει και από χαραμάδες και

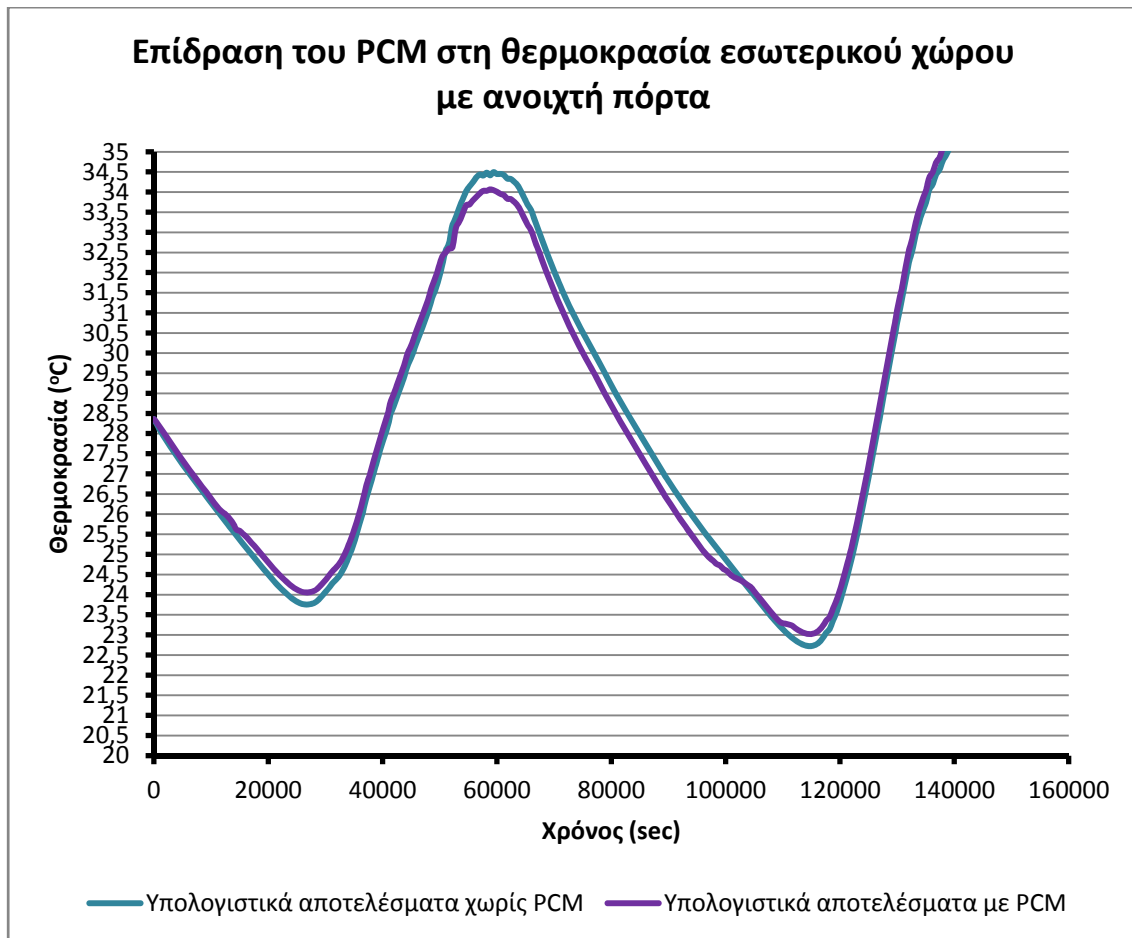
κατασκευαστικές ατέλειες στον οικίσκο και επηρεάζει μέσω της συναγωγής τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του οικίσκου.

7.2 Επίδραση του ΥΑΦ

Στις επόμενες εικόνες μελετάται η επίδραση του PCM στη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου με κλειστή ή ανοιχτή πόρτα. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ υπολογιστικών μόνο αποτελεσμάτων, καθώς τα πειραματικά αποτελέσματα που υπήρχαν διαθέσιμα για τις περιπτώσεις με και χωρίς PCM δεν αφορούσαν την ίδια αρχική θερμοκρασία και επομένως δεν θα μπορούσαν να είναι συγκρίσιμα. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα για τα οποία έγινε η σύγκριση αφορούν ταχύτητα αέρα 5 m/s καθώς, όπως θα αναφερθεί και αργότερα, ήταν η παραμετρική εκτέλεση που προσέγγιζε όσο το δυνατόν καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα. Το ποσοστό περιεκτικότητας σε PCM ανέρχεται περίπου στο 0.5% του συνολικού βάρους του φυσικού λίθου που βρίσκεται στην πρόσοψη του κτιρίου.



Εικόνα 7-3: Επίδραση του ΥΑΦ (PCM) στη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου όταν η πόρτα του πειραματικού σταθμού είναι πλήρως κλειστή



Εικόνα 7-4: Επίδραση του ΥΑΦ (PCM) στη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου όταν η πόρτα του πειραματικού σταθμού είναι πλήρως ανοικτή

Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι το ΥΑΦ (PCM) έχει επίδραση στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Μάλιστα αυτή η επίδραση είναι κοντά στο αναμενόμενο με βάση πειραματικά δεδομένα. Το μέγιστο της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου με ΥΑΦ (PCM) είναι $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερο από το μέγιστο χωρίς ΥΑΦ (PCM), ενώ το ελάχιστο είναι γύρω στους $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ υψηλότερο από το ελάχιστο χωρίς ΥΑΦ (PCM). Τα πειραματικά δεδομένα δίνουν αντίστοιχες διαφορές ίσες με $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Αυτή η διαφορά οφείλεται σε παραδοχές που αναγκαστικά κάνουμε για να ορίσουμε οριακές συνθήκες στο πρόβλημά μας και έχουν αναλυθεί παραπάνω. Το τελευταίο παίζει ιδιαίτερο ρόλο αφού μιλάμε για διαφορές της τάξης του $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ που πρέπει να εντοπιστούν.

Τέλος έγινε και μία δοκιμή κατά την οποία αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε PCM της πέτρας στην πρόσοψη του οικίσκου στο 0.8% του συνολικού βάρους της πέτρας. Τα αποτελέσματα δεν υπήρξαν ιδιαίτερος διαφορετικά, οπότε ίσως θα έπρεπε να αυξηθεί ακόμα περαιτέρω αυτή η ποσότητα.

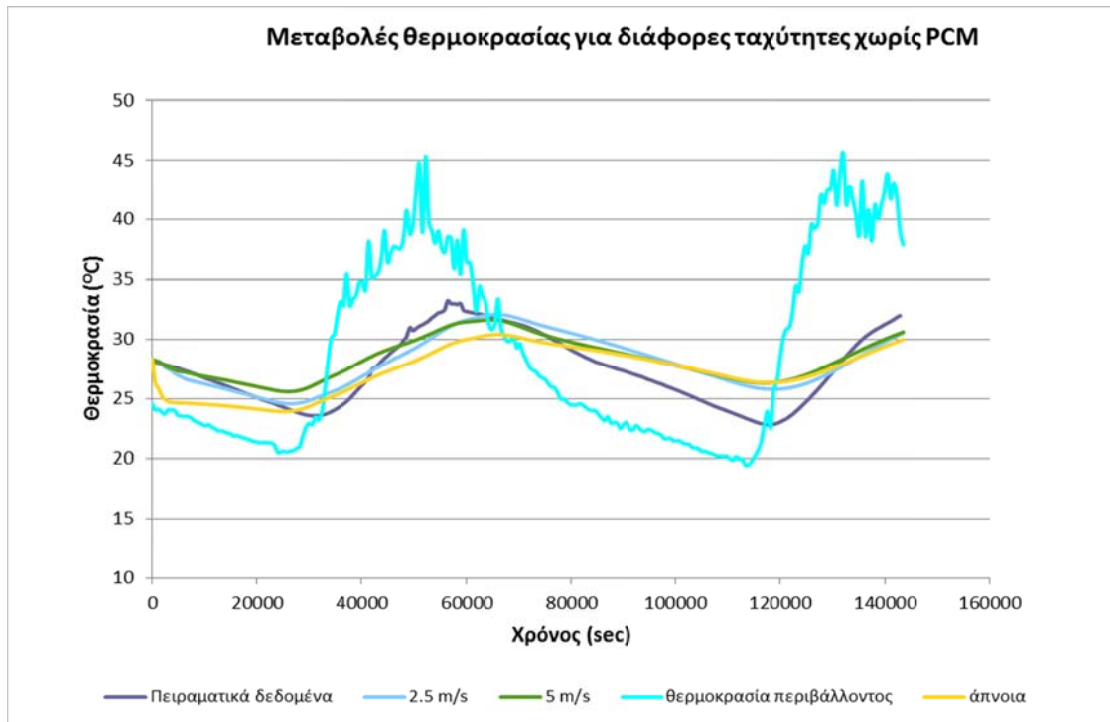
7.3 Παραμετρική μελέτη

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι παράμετροι που εξετάστηκαν στις διάφορες εκτελέσεις του υπολογιστικού μοντέλου και στη συνέχεια αναλύεται η επίδρασή τους.

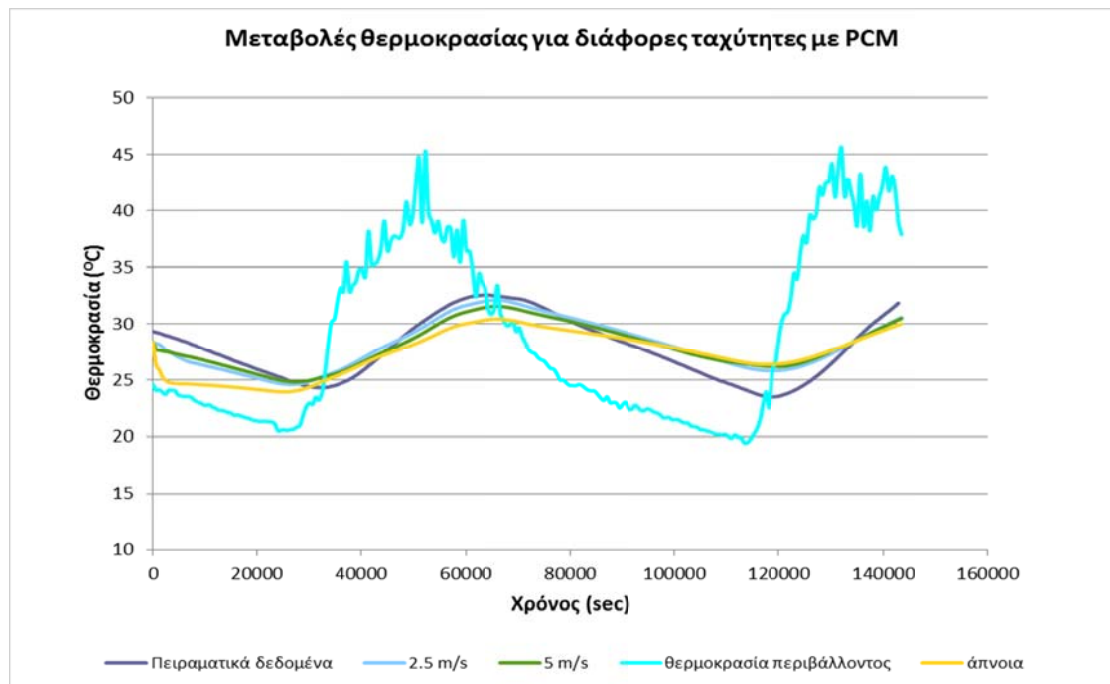
Πίνακας 7-1: Παράμετροι που εξετάστηκαν και τιμές που τους δώθηκαν

Παράμετροι	Τιμές
Ταχύτητα	0 m/s 2.5m/s κατά x 2.5m/s κατά -x 5.0m/s κατά x 5.0m/s κατά -x
Ύπαρξη PCM	ΝΑΙ ΟΧΙ
Πόρτα	ΑΝΟΙΚΤΗ ΚΛΕΙΣΤΗ

Ήδη οι εκτελέσεις που αφορούν στους παράγοντες ανοιχτή/κλειστή πόρτα και ύπαρξη ή όχι PCM έχουν αναλυθεί εκτενώς στην προηγούμενη ενότητα. Εδώ θα ασχοληθούμε κυρίως με την επίδραση της ταχύτητας.



Εικόνα 7-5: Παραμετρική μελέτη μεταβολής της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου χωρίς PCM



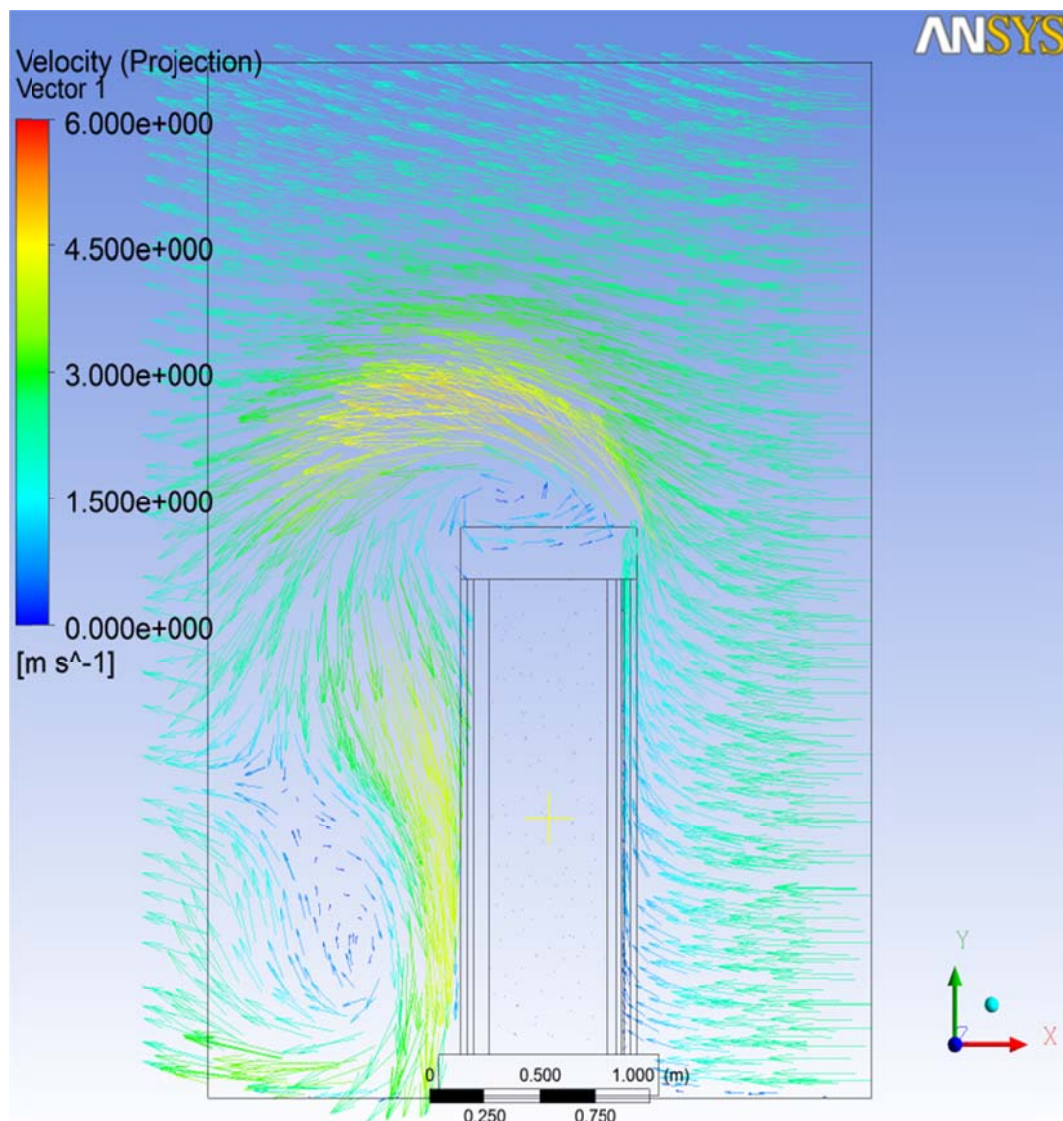
Εικόνα 7-6: Παραμετρική μελέτη μεταβολής της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου με PCM

Παρατηρούμε ότι δεν προκύπτουν ιδιαίτερα σημαντικές διαφορές ως προς την κατανομή της θερμοκρασίας για τις διάφορες ταχύτητες, κυρίως σε ότι αφορά τη διεύθυνσή τους, αλλά και ως προς το μέτρο τους. Τονίζουμε όμως ότι τα παραπάνω διαγράμματα αφορούν την περίπτωση κλειστής πόρτας. Στην

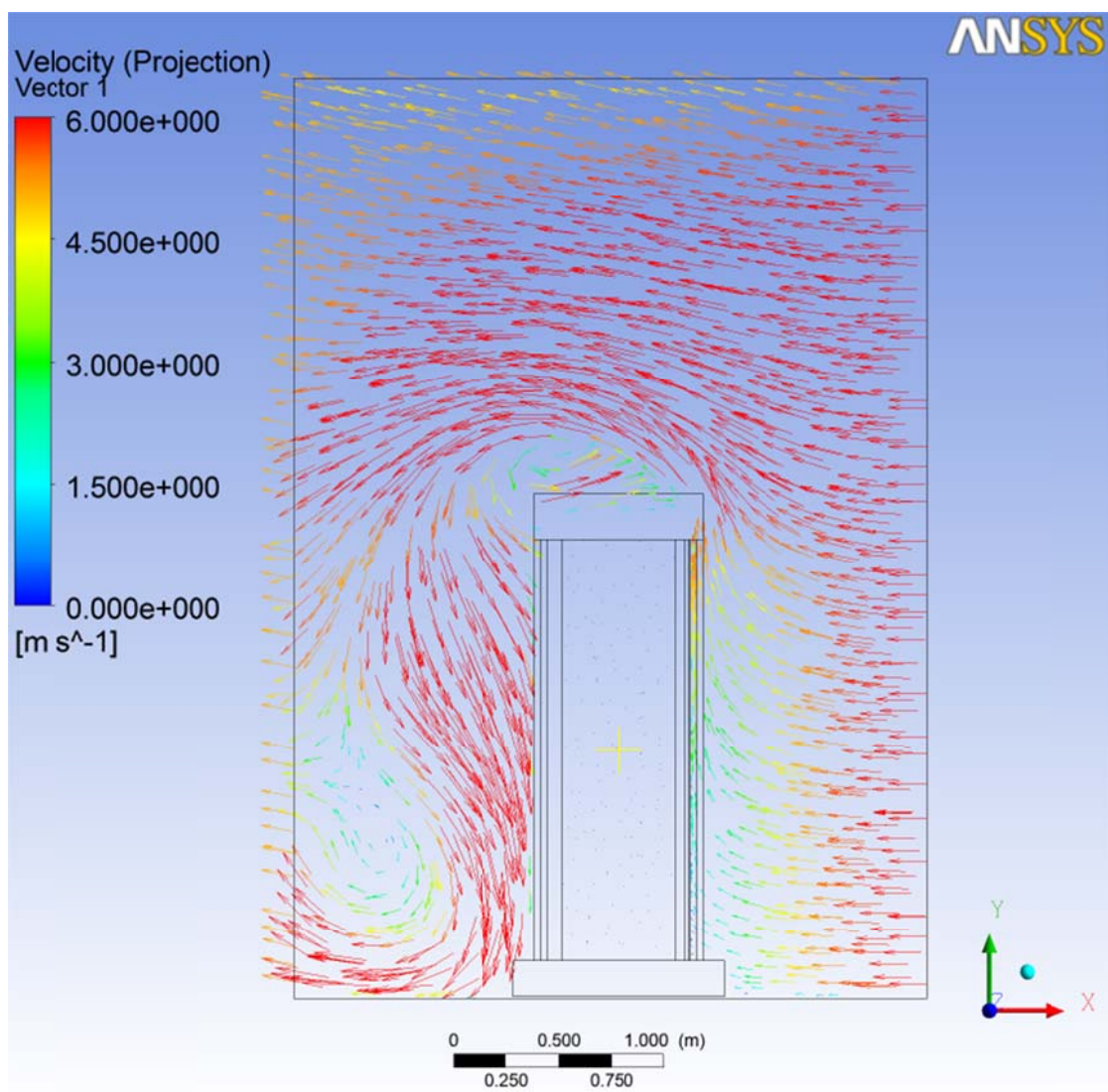
περίπτωση της πρακτικά μηδενικής ταχύτητας (άπνοια) παρατηρούνται μικρότερες θερμοκρασίες καθώς το φαινόμενο της συναγωγής δεν είναι τόσο έντονο και δεν συμβάλλει ιδιαίτερα στη μετάδοση θερμότητας. Αυτή που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα είναι η τιμή για την ταχύτητα 5 m/s. Για αυτήν την περίπτωση εξετάζεται και η κατάσταση εντελώς ανοιχτής πόρτας. Ωστόσο κατά την διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων η πόρτα ήταν μάλλον κλειστή παρά ανοιχτή.

7.4 Φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την τρισδιάστατη ανάλυση

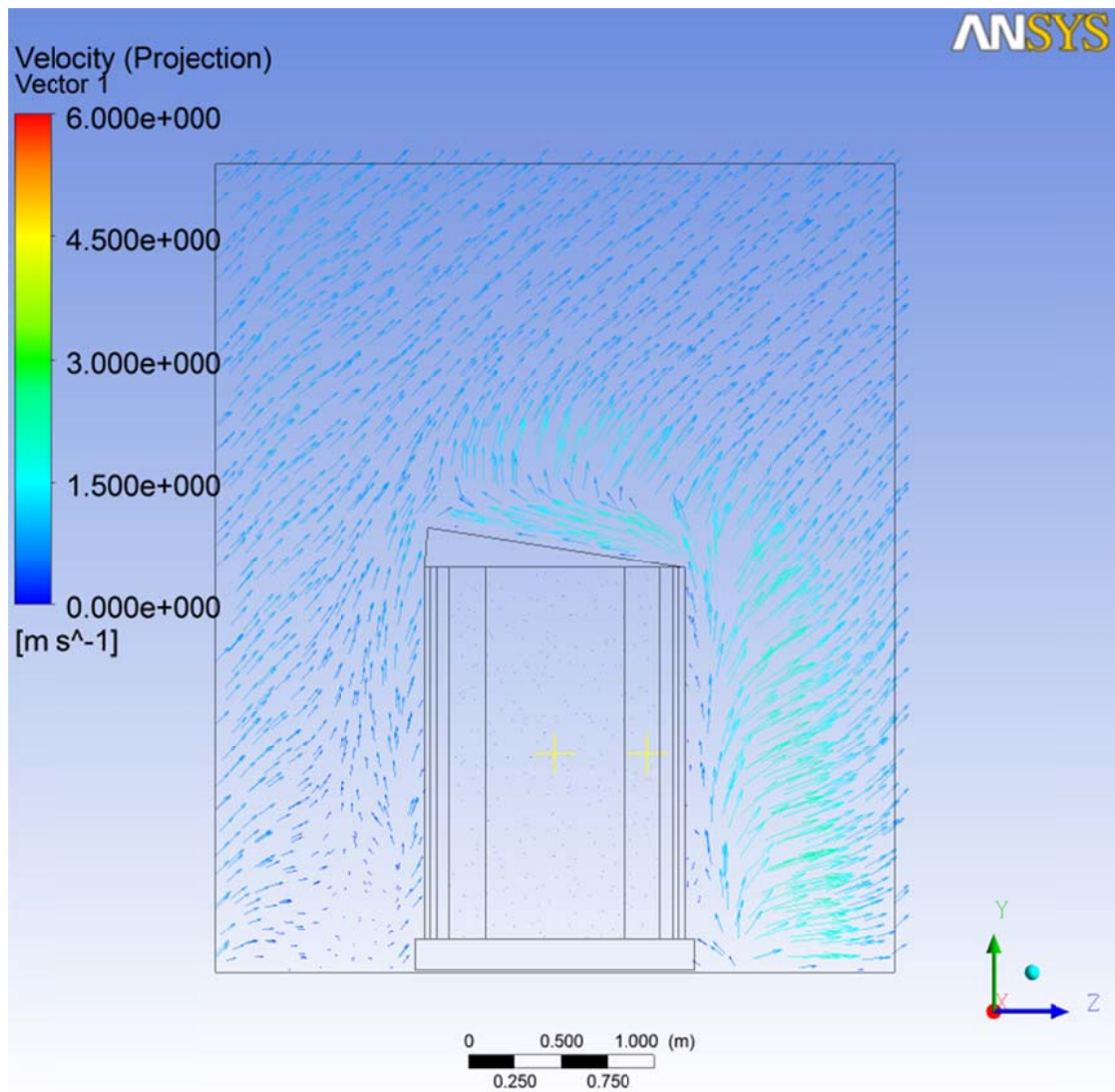
Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες που έχουν ληφθεί από το ANSYS . Στην αρχή παρατηρούμε μόνο το πεδίο ροής σε διάφορα επίπεδα τομής (παράλληλα στη ροή – επίπεδο xy, κάθετα στη ροή – επίπεδο yz, παράλληλα στο δάπεδο – επίπεδο xz, κοντά στο δάπεδο και στον εσωτερικό χώρο του οικίσκου, όταν είναι ανοιχτή η πόρτα) με σκοπό να ανακαλύψουμε ιδιαιτερότητες του πεδίου ροής και πιθανά σημεία μεταβολής του θερμοκρασιακού πεδίου.



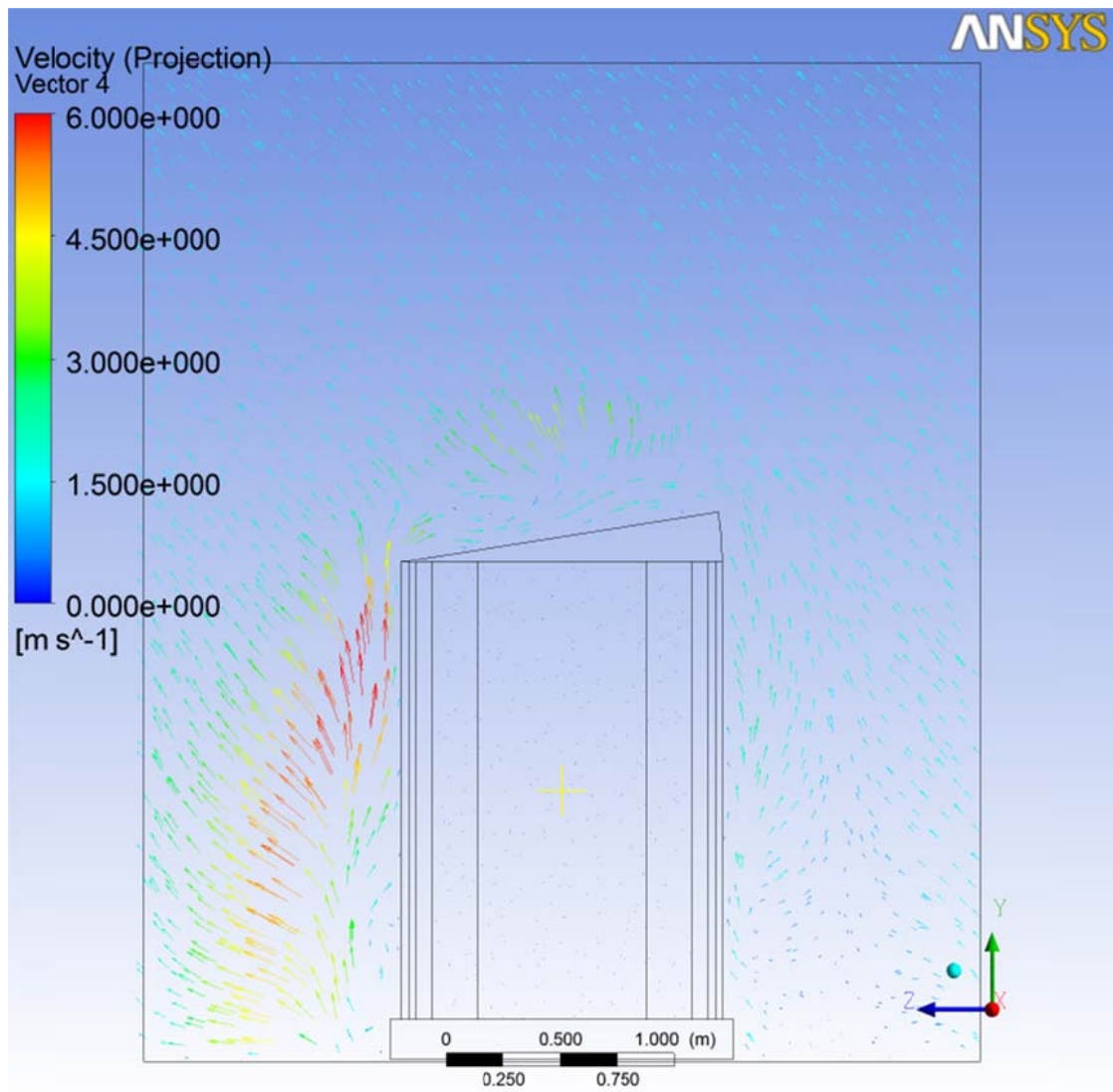
Εικόνα 7-7: Πεδίο παράλληλο στη ροή για ταχύτητα 2.5 m/s



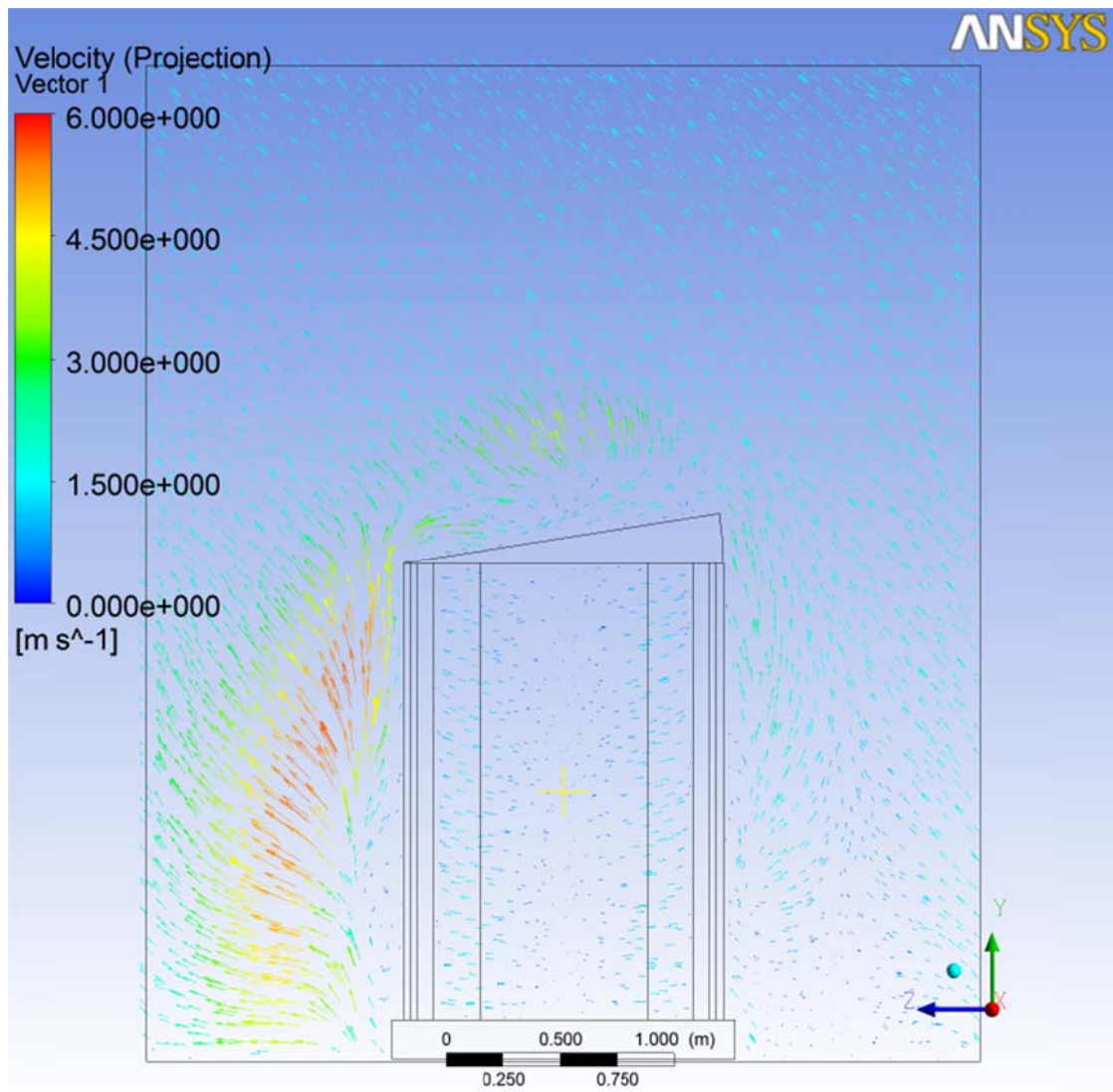
Εικόνα 7-8: Πεδίο παράλληλο στη ροή για ταχύτητα 5.0 m/s



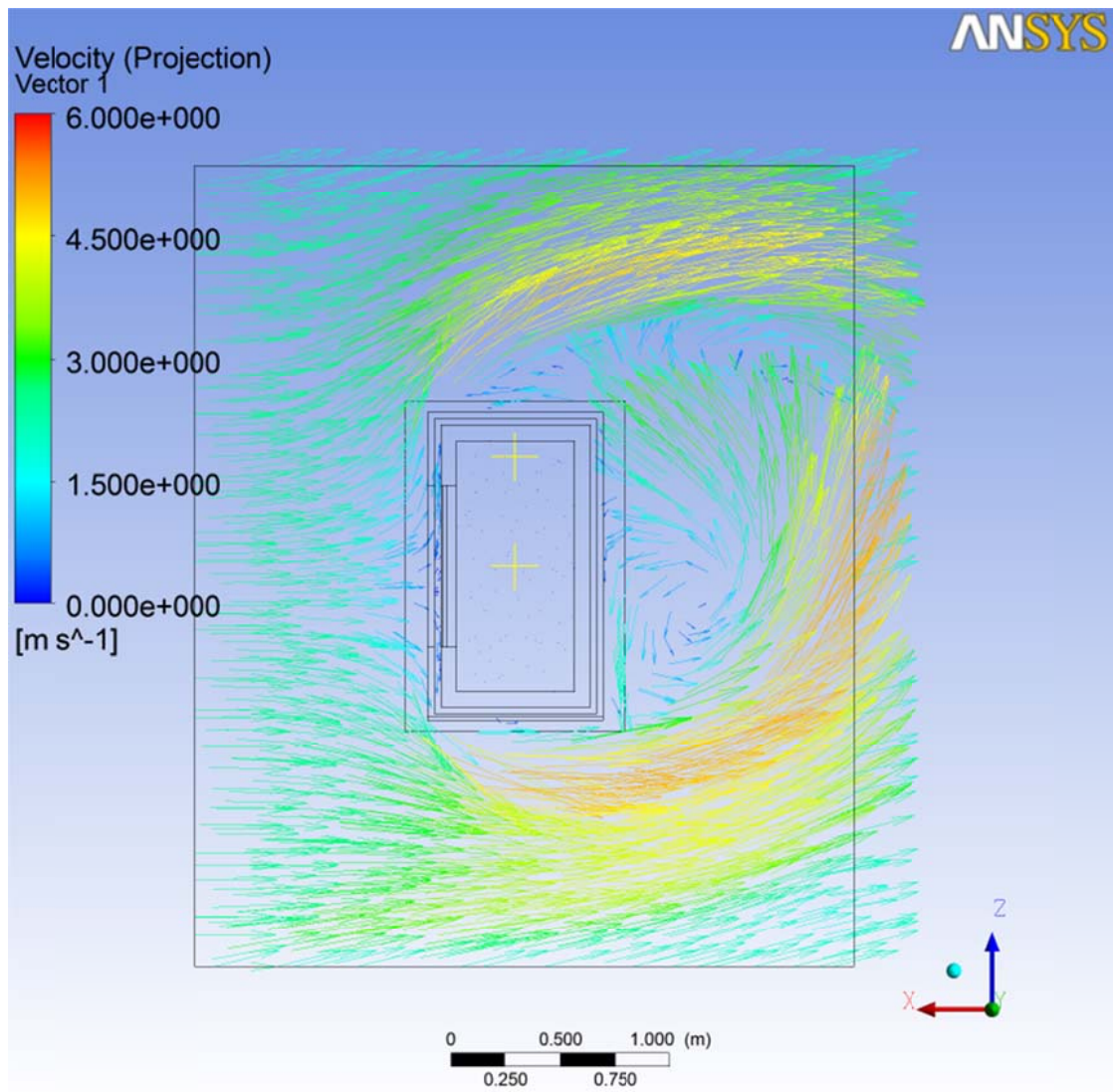
Εικόνα 7-9: Πεδίο κάθετο στη ροή για ταχύτητα 2.5 m/s



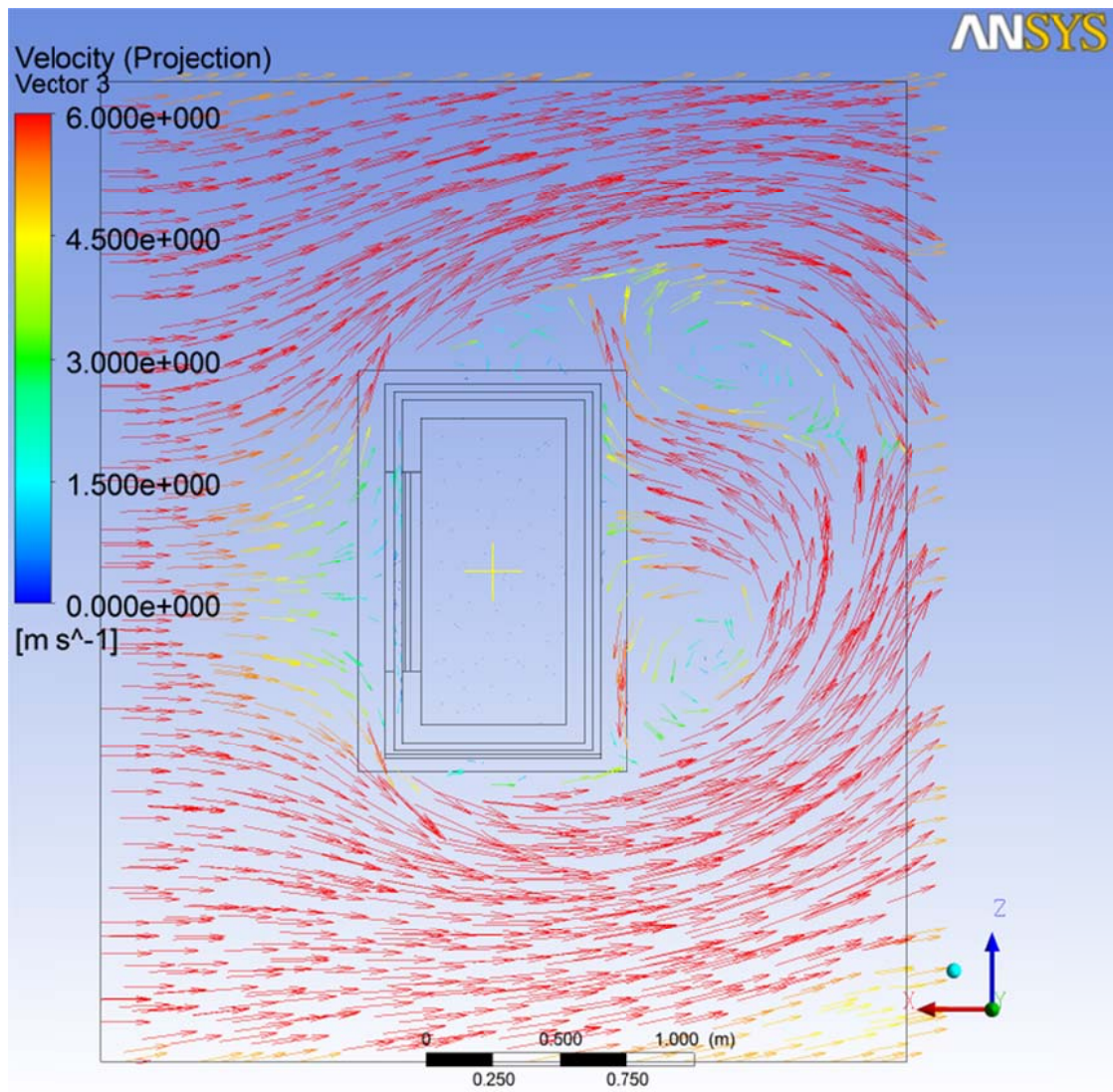
Εικόνα 7-10: Πεδίο κάθετο στη ροή για ταχύτητα 5.0 m/s



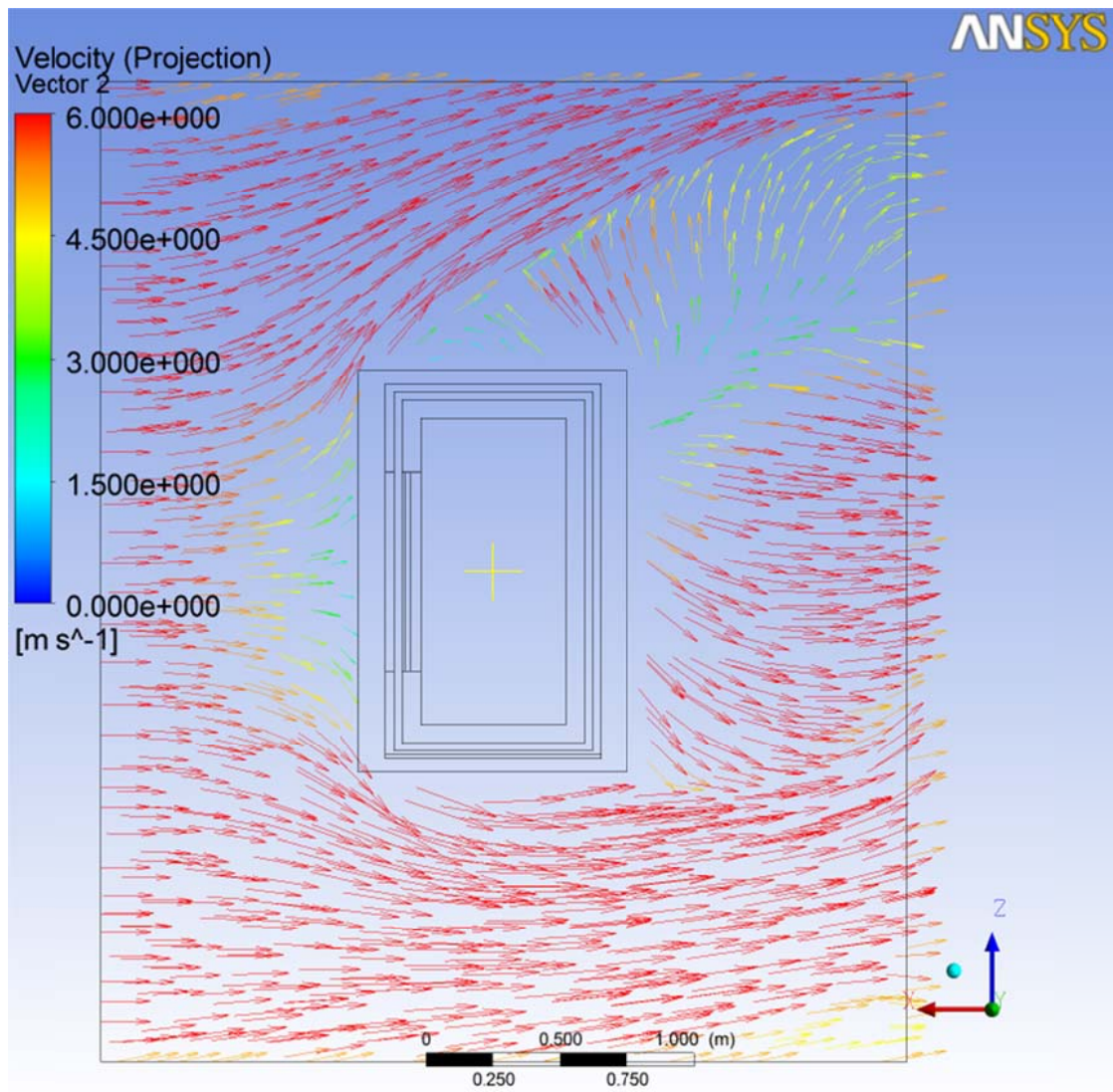
Εικόνα 7-11: Πεδίο κάθετο στη ροή για ταχύτητα 5.0 m/s με ανοιχτή πόρτα



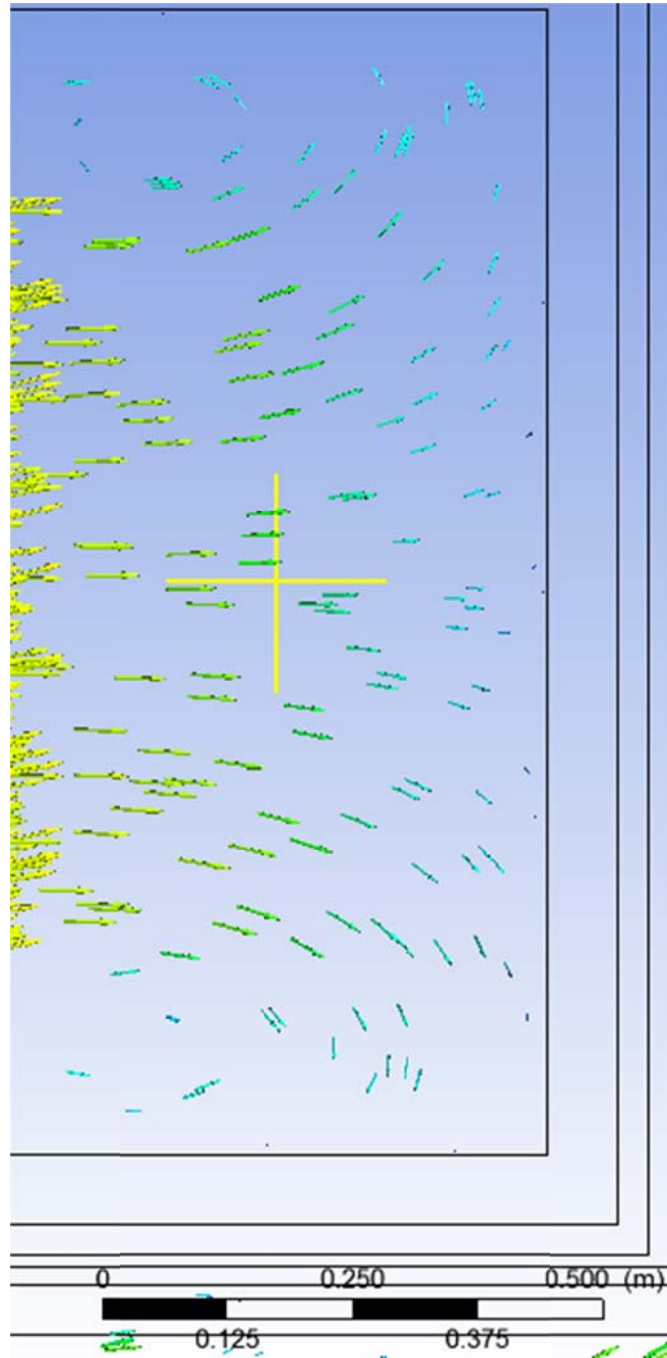
Εικόνα 7-12: Επίπεδο παράλληλο στο δάπεδο για ταχύτητα 2.5 m/s



Εικόνα 7-13: Επίπεδο παράλληλο στο δάπεδο για ταχύτητα 5.0 m/s

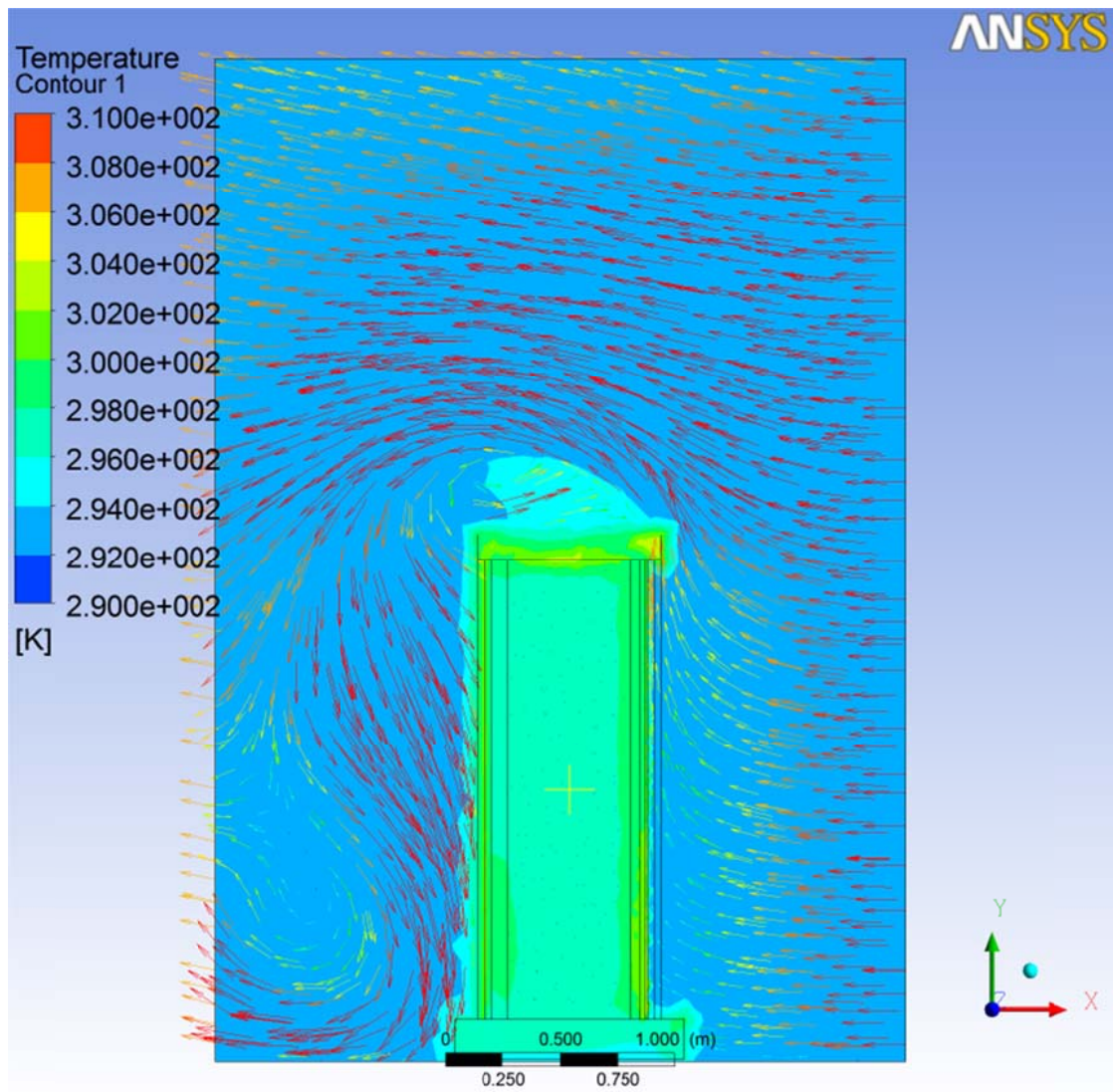


Εικόνα 7-14: Ροή στην επιφάνεια του δαπέδου για ταχύτητα 5 m/s

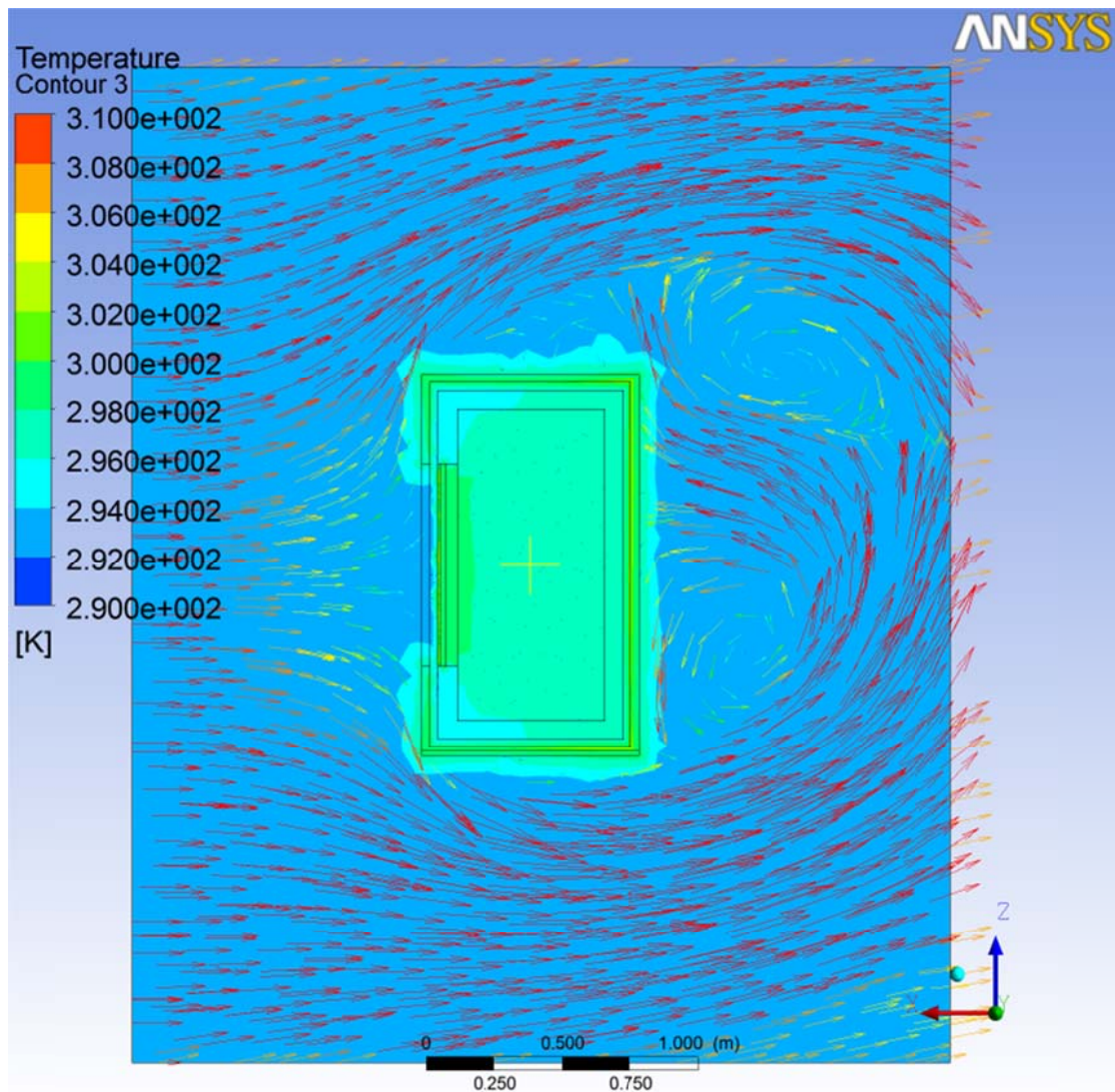


Εικόνα 7-15: Ροή στο εσωτερικό του οικίσκου για ανοιχτή πόρτα και ταχύτητα 5 m/s

Στη συνέχεια βλέπουμε ότι στις περιοχές που εμφανίζονται ανακυκλοφορίες υπάρχει και διαφορετικό πεδίο θερμοκρασιών, άλλες φορές λιγότερο και άλλες φορές περισσότερο σε σχέση με τον υπόλοιπο χώρο. Αυτό είναι ένδειξη της επίδρασης στη θερμοκρασιακή κατανομή του φαινομένου της συναγωγής.

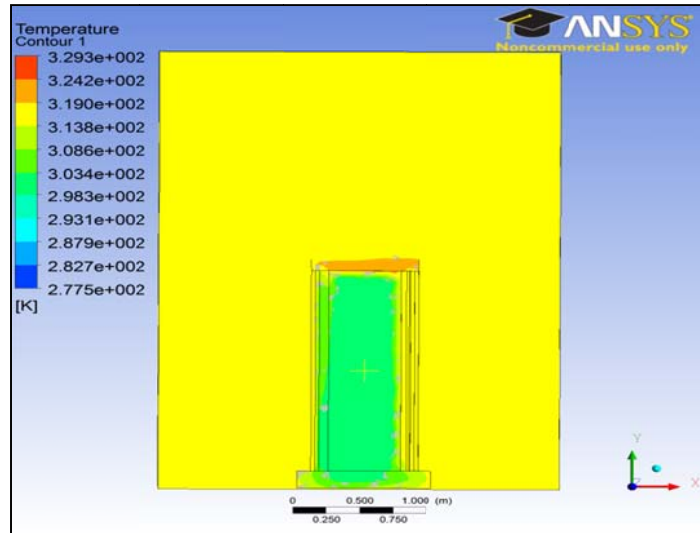


Εικόνα 7-16: Σύγκριση ανακυκλοφορίας πεδίου ροής με κατανομή θερμοκρασίας για επίπεδο παράλληλο στη ροή και ταχύτητα ροής 5 m/s

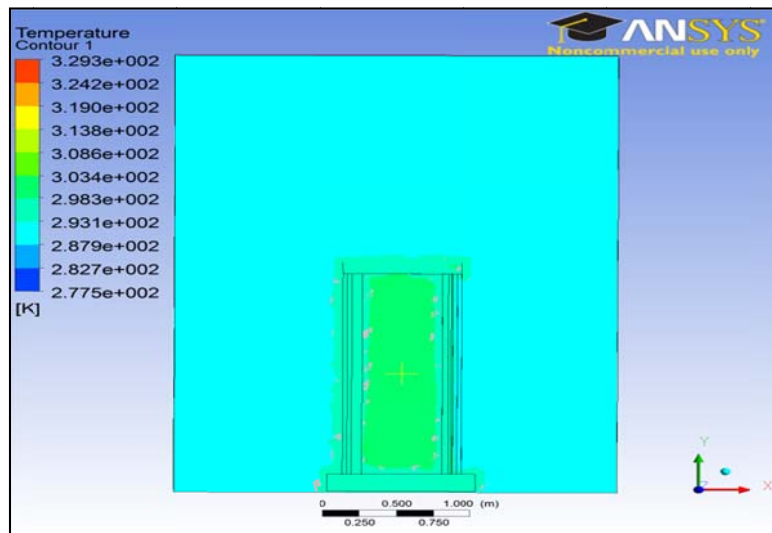


Εικόνα 7-17: Σύγκριση ανακυκλοφορίας πεδίου ροής με κατανομή θερμοκρασίας για επίπεδο παράλληλο στο δάπεδο και ταχύτητα ροής 5 m/s

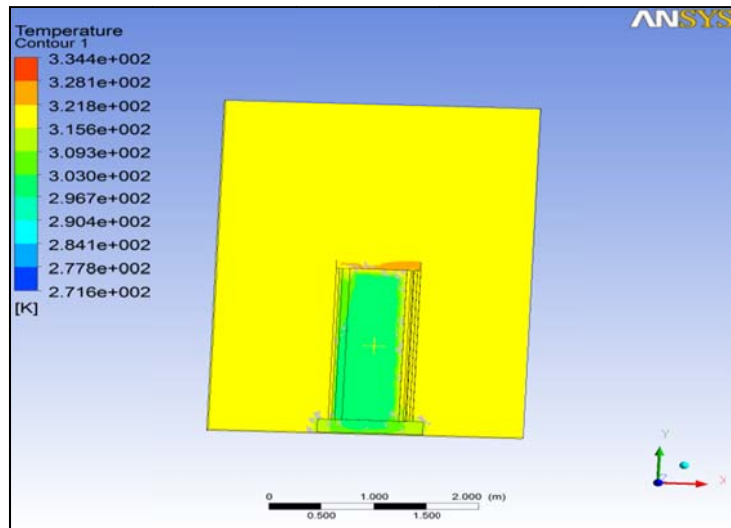
Τέλος στις επόμενες εικόνες παρατίθεται ένα ιστορικό μεταβολής της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια δύο περίπου εικοσιτετραώρων, συγκρίνοντας ανά ζεύγος περιπτώσεις μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας για ταχύτητες 2.5 m/s και 5 m/s αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν εμφανίζεται ταυτόχρονα με τη μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου. Υπάρχει μια καθυστέρηση που οφείλεται στο γεγονός ότι τα τοιχώματα παρουσιάζουν θερμική αντίσταση κατά τη μετάδοση θερμότητας και με αυτόν τον τρόπο αποδίδεται θερμότητα σε επόμενες χρονικές στιγμές στο εσωτερικό του οικίσκου.



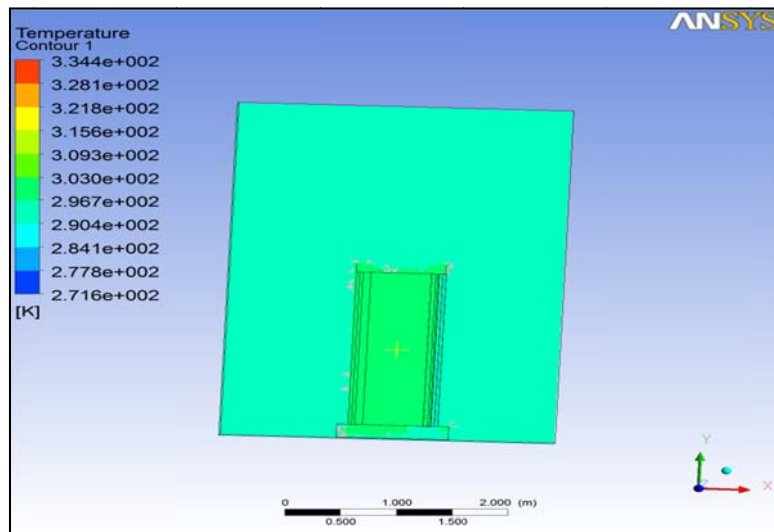
Εικόνα 7-18: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



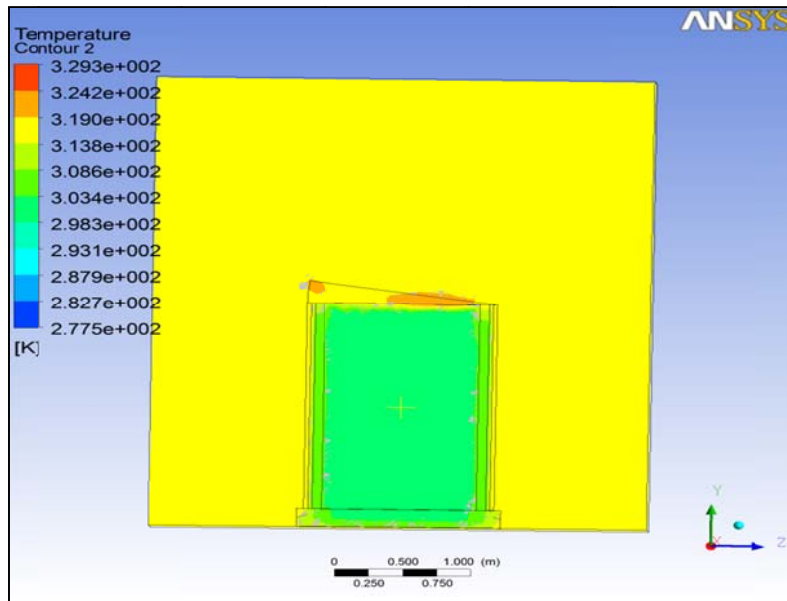
Εικόνα 7-19: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



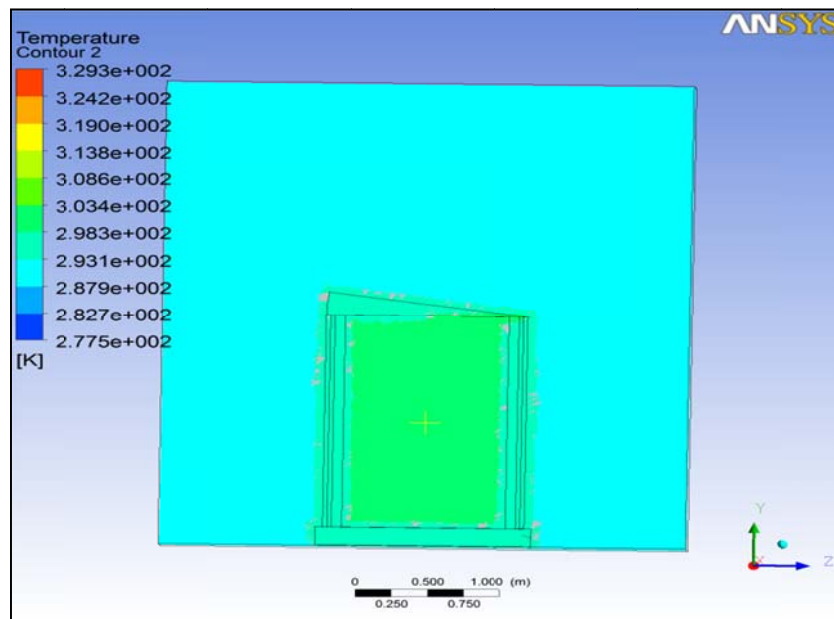
Εικόνα 7-20: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



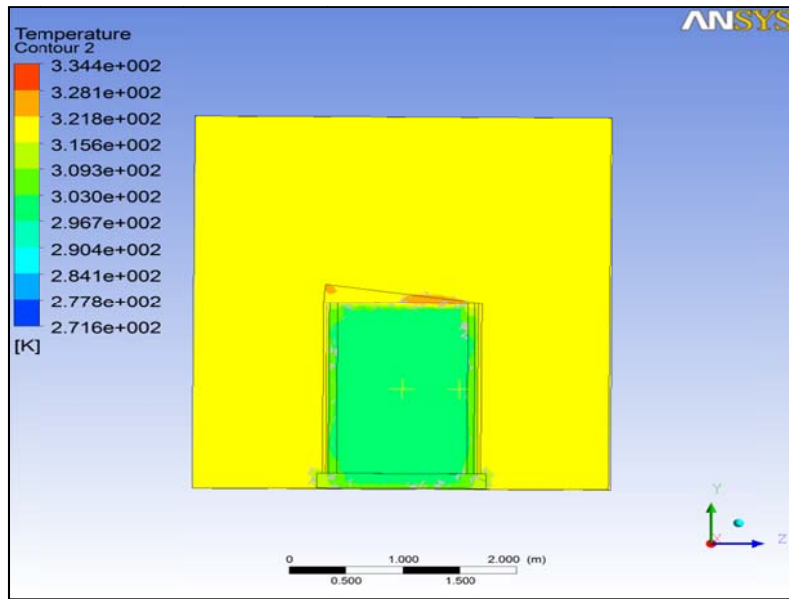
Εικόνα 7-21: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



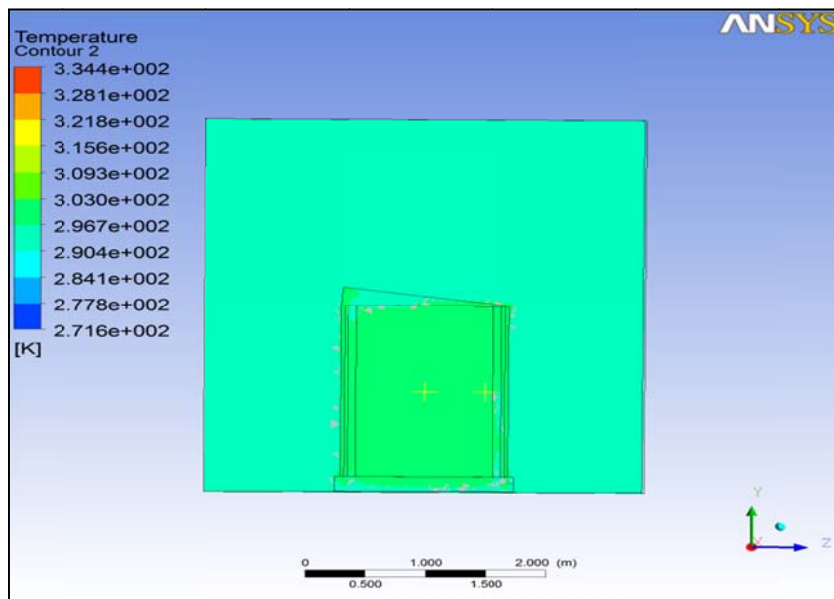
Εικόνα 7-22: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



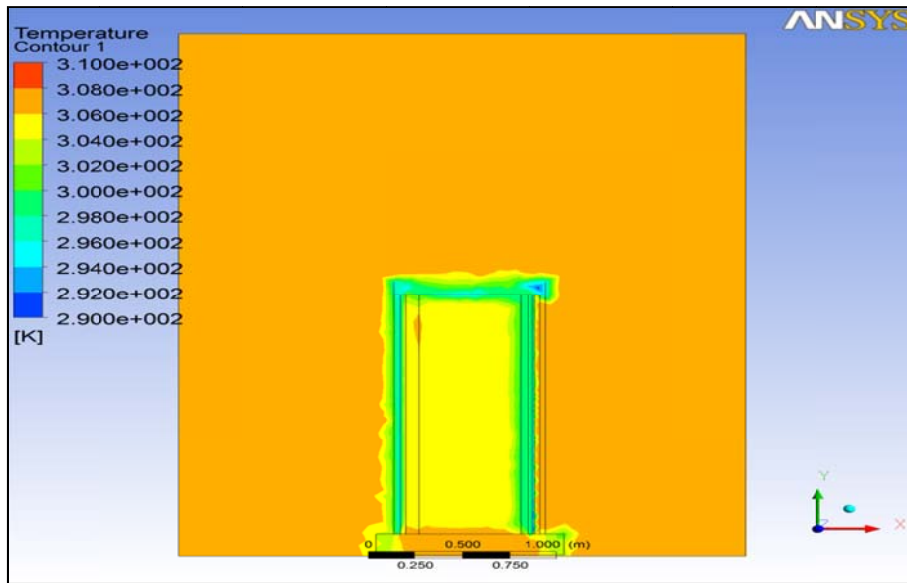
Εικόνα 7-23: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



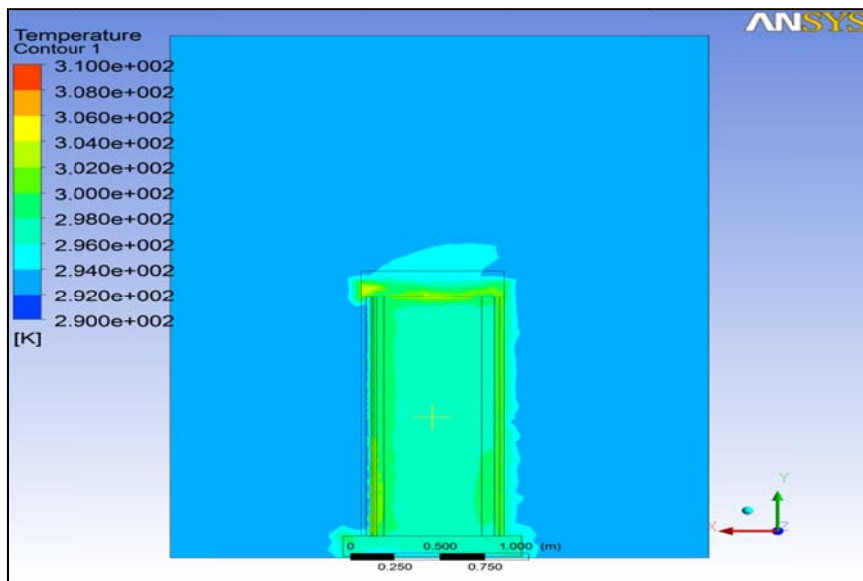
Εικόνα 7-24: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



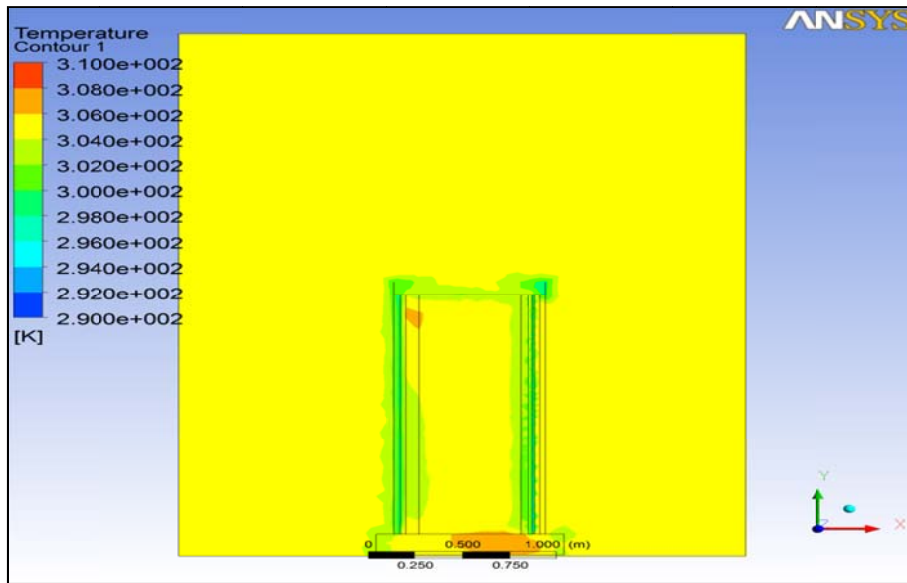
Εικόνα 7-25: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



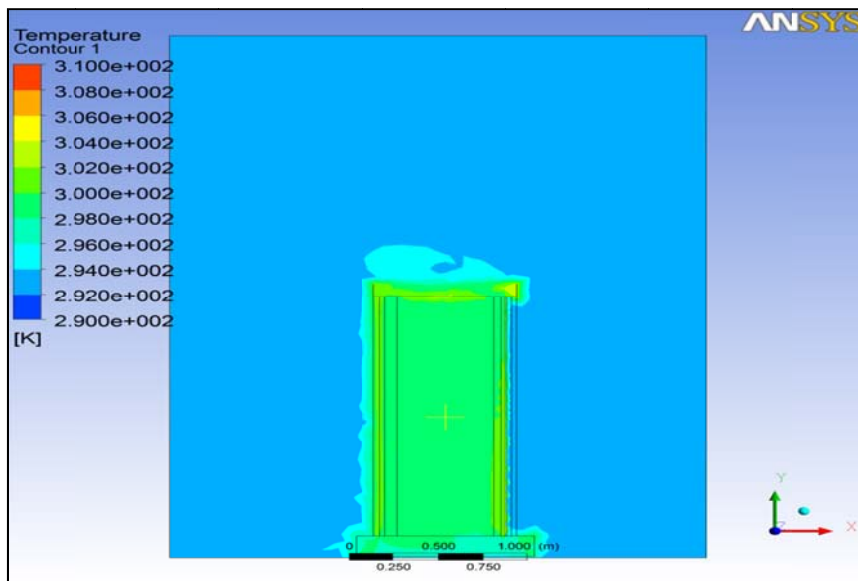
Εικόνα 7-26: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



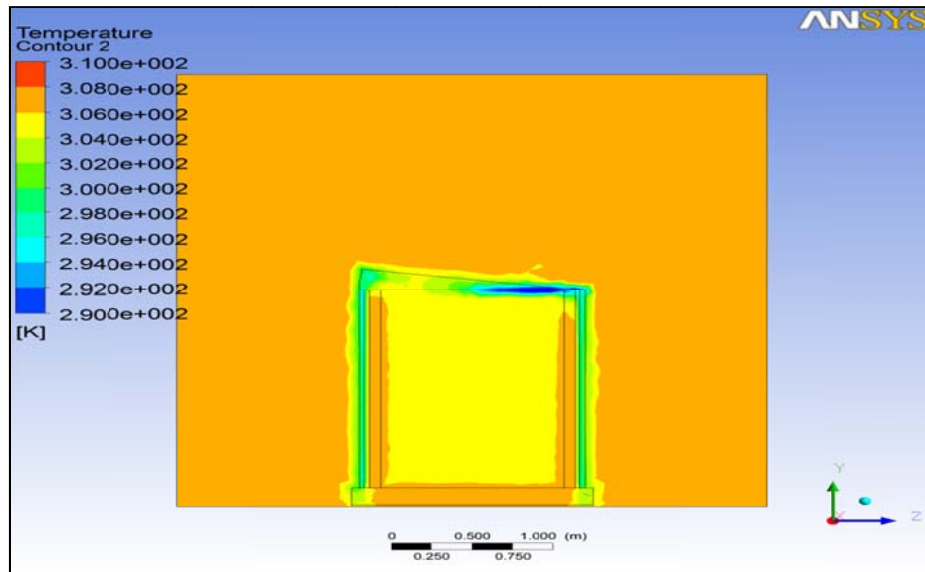
Εικόνα 7-27: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



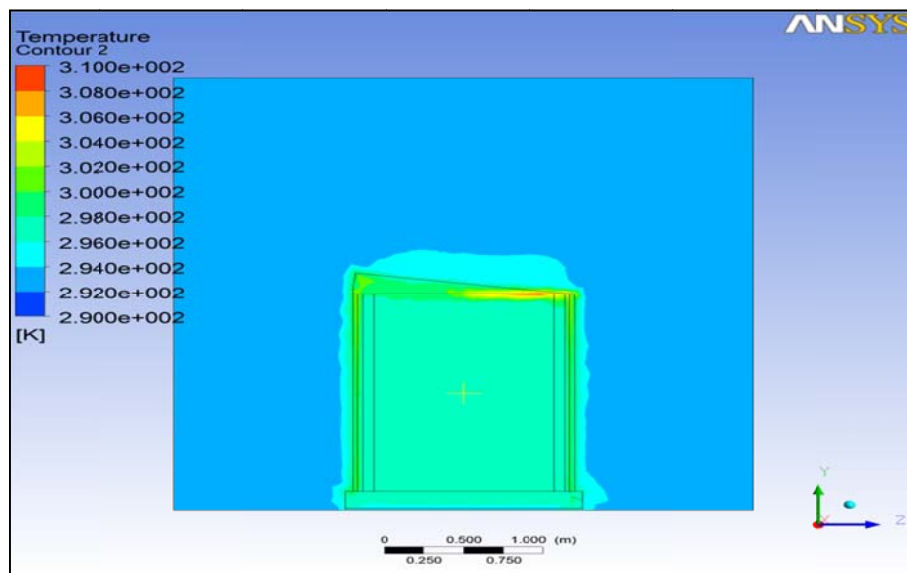
Εικόνα 7-28: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



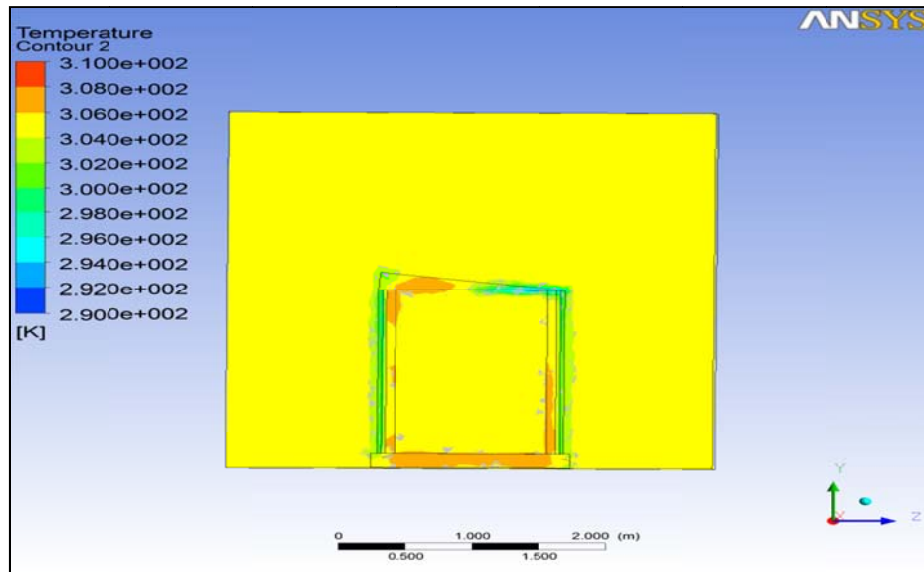
Εικόνα 7-29: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο παράλληλο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



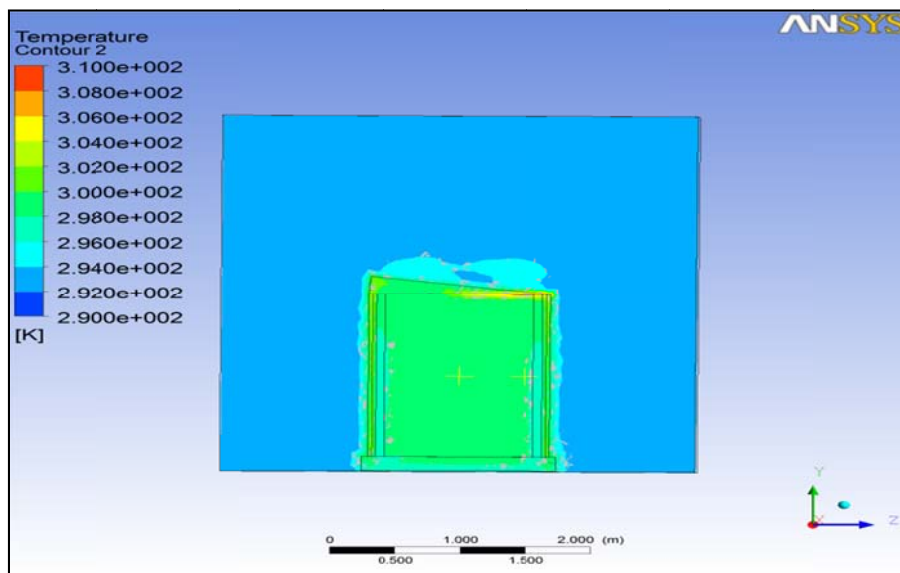
Εικόνα 7-30: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



Εικόνα 7-31: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 5.0 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



Εικόνα 7-32: Κατανομή θερμοκρασίας για μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.



Εικόνα 7-33: Κατανομή θερμοκρασίας για ελάχιστη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, ταχύτητα 2.5 m/s, επίπεδο κάθετο στη ροή και χωρίς χρήση PCM.

Το πρόβλημα θα ήταν δυνατό να επιλυθεί με μονοδιάστατη προσέγγιση, δισδιάστατη προσέγγιση ή ως τρισδιάστατο πρόβλημα. Η τρισδιάστατη επίλυση βρίσκεται σαφώς πιο κοντά στην πραγματικότητα. Μια μονοδιάστατη επίλυση όμως του προβλήματος, η οποία λειτουργεί με παραδοχές που δεν αλλοιώνουν το πραγματικό πρόβλημα μπορεί να είναι πολύ καλύτερη από μια τρισδιάστατη επίλυση, διότι εξοικονομούνται πόροι και χρόνος. Ο λόγος που προτιμήθηκε η τρισδιάστατη επίλυση σε σχέση με τη μονοδιάστατη ήταν για να μελετήσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια πως η ροή του ρευστού και οι ανακυκλοφορίες που εμφανίζονται στο πεδίο ροής επηρεάζουν τη συναγωγή

θερμότητας. Επίσης μπορούμε να επιτύχουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την πρόβλεψη κατανομής θερμοκρασίας εξαιτίας της ύπαρξης ΥΑΦ (PCM) καθώς οι διαφορές που προβλέπονται είναι της τάξης του 1K και η παραμικρή παραδοχή (π.χ. μονοδιάστατη προσέγγιση) μπορεί να μας οδηγήσει σε μεγάλες αποκλίσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα και προτάσεις

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας προκύπτουν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συνέκλιναν μέχρι κάποιο βαθμό με τα πειραματικά, γεγονός που σημαίνει ότι το θεωρητικό μοντέλο που κατασκευάστηκε και επιλύθηκε βρίσκεται κοντά στην πραγματικότητα.

Ακόμα επιβεβαιώθηκε ποσοτικά η επίδραση του PCM στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Μάλιστα αυτή η επίδραση είναι κοντά στο αναμενόμενο με βάση πειραματικά δεδομένα. Το μέγιστο της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου με PCM είναι $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερο από το μέγιστο χωρίς PCM, ενώ το ελάχιστο είναι γύρω στους $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ υψηλότερο από το ελάχιστο χωρίς PCM. Τα πειραματικά δεδομένα δίνουν αντίστοιχες διαφορές ίσες με $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα.

Με τη βοήθεια της παραμετρικής μελέτης ως προς τις ταχύτητες αναδεικνύεται ο ρόλος της συναγωγής στη συνολική μετάδοση θερμότητας και κατανομή θερμοκρασίας, αφού η αλλαγή της ταχύτητας προκαλεί έστω και μικρές διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου.

Τέλος αποδείχθηκε ορθή επιλογή η τρισδιάστατη επίλυση του προβλήματος σε σχέση με τη μονοδιάστατη και η μελέτη του συνολικού πεδίου ροής, διότι εμφανίζονται ανακυκλοφορίες οι οποίες επιδρούν στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, αλλάζοντας κατά τύπους το θερμοκρασιακό πεδίο.

Ωστόσο υπάρχουν ακόμα αρκετά ζητήματα προς διερεύνηση. Ένα από αυτά είναι η επίδραση της θερμοκρασίας του δαπέδου στη συνολική θερμοκρασιακή κατανομή. Επίσης η διερεύνηση σε μεγαλύτερο βαθμό της επίδρασης της αύξησης σε περιεκτικότητα της πρόσοψης του κτιρίου σε PCM, θα μπορούσε να έχει ενδιαφέρον με σκοπό την εύρεση μιας βέλτιστης περιεκτικότητας σε PCM για κτιριακές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Βιβλιογραφία

- [1] J. R. Goulding, "Energy Conscious Design," in *Commission of the European Communities*, 1992.
- [2] «Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ),» Available: http://www.cres.gr/kape/index_gr.htm.
- [3] S. Weider, *An Introduction To Solar Energy For Scientists and Engineers*, New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [4] <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>.
- [5] F. D. Incropera and D. P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, New York: John Wiley and Sons Publishing Co, 1990.
- [6] «Wikipedia,» http://el.wikipedia.org/wiki/Κατάσταση_της_ύλης.
- [7] «Wikipedia,» http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_fusion.
- [8] G. A. Lane, *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, vol. I: Background and Scientific Principles, Florida: CRC Press, Inc, 1983.
- [9] <http://www.fskab.com/annex10/workshops/html> .
- [10] A. A. Ghoneim and S. A. Klein, "Phase Change Materials Analysis, Solar Energy," vol. 47, no. 3, 1991.
- [11] «Wikipedia,» <http://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin>.
- [12] «Wikipedia,» <http://en.wikipedia.org/wiki/Alkane>.
- [13] «Wikipedia,» http://en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid.
- [14] «Wikipedia,» http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_sulfate.
- [15] «Wikipedia,» http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_Change_Material.
- [16] J. Tomlinson, "New materials for Thermal Storage," *Oak Ridge National*

Laboratory, no. 4, 1989.

- [17] X. X. Zhang, Y. F. Fan, X. M. Tao and K. L. Yick, "Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes," *Journal of colloid and interface Science*, no. 281, 2005.
- [18] H. Mehling and L. Cabeza, *Phase Change Materials*, vol. 23, 2003.
- [19] E. Gunther, S. Hieber and H. Mehling, "Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM-objects as a function of temperature," *Bavarian Center for Applied Energy Research (ZAE Bayern)*, Ecstock, 2006.
- [20] M. A. Rady, E. Arquis and Cendric Le Bot, "Characterization of granular phase changing composites for thermal energy storage using the T-history method".
- [21] Hans Dieter Baehr και Karl Stephan, *Heat and Mass Transfer*, Springer.
- [22] A. Pasupathya, R. Velraja and R. V. Seenirajb, "Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments".
- [23] Vineet Veer Tyagi και D. Buddhi, «PCM thermal storage in buildings: A state of art,» 13 August 2005.
- [24] International Energy Agency, *A Report of IEA SHC - Task 26 Solar Combisystems*, December 2002.
- [25] M. D. Romero-Sánchez, G. Guillem-López, A. M. López-Buendía, M. Stamatiadou, I. Mandilaras, D. Katsourinis και M. Founti, «Accepted for publication in *Applied Thermal Engineering Journal*, Accepted manuscript (unedited version) available online: 19-MAY-2012».
- [26] Γ. ΤΣΑΜΑΣΦΥΡΟΣ και Ε. ΘΕΟΤΟΚΟΓΛΟΥ, *Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων Ι*, Αθήνα: Συμμετρία.
- [27] Μ. ΠΑΠΑΔΡΑΚΑΚΗΣ, *Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2001.
- [28] Α. ΜΠΟΥΝΤΟΥΒΗΣ, *Υπολογιστική Ανάλυση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, ΕΜΠ, 1992.

