



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διερεύνηση ροής και μεταφοράς θερμότητας σε υλικά αλλαγής φάσης
με μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής**

ΧΥΣΕΣΑΝΙ ΝΤΟΝΑΛΝΤΟ
ΑΜ: 51204280

Επιβλέποντες Καθηγητές: Δρ. Σαρρής Ιωάννης, Δρ. Γκούντας Απόστολος
ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2021



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

**Heat and fluid flow study of phase-change materials with
computational fluid dynamics**

HYSESANI DONALDO
Registration Number: 51204280

Supervisors: Dr Ioannis Sarris, Dr Gkountas Apostolos
ATHENS, October 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/Α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΠΡΟΕΣΤΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ	ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	
3	ΓΚΟΥΝΤΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ	ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΑΣ ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΧΥΣΕΣΑΣΝΙ ΝΤΟΝΑΛΝΤΟ, με αριθμό μητρώου 51204280 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Copyright © ΧΥΣΕΣΑΝΙ ΝΤΟΝΑΛΑΝΤΟ 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Ως συγγραφέας θα ήθελα να ευχαριστώ όλους όσους βοήθησαν στην πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και γενικότερα.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω των καθηγητή μου, κο Ιωάννη Σαρρή, για την εμπιστοσύνη του αρχικά αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα, αλλά και της βοήθειας που παρείχε σε όλους εμάς τους φοιτητές όταν ζητούσαμε την βοήθεια του ήταν πάντα πρόθυμος οποιαδήποτε στιγμή για να μας ακούσει και να βοηθήσει.

Εξίσου θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς τον καθηγητή μου και επίσης επιβλέποντα , κο Γκούντα Απόστολο για την καθοδήγηση καθόλου την διάρκεια της διπλωματικής και την πολύτιμη υποστήριξη που μου παρείχε και την άμεση ανταπόκριση του. Η συνεργασία μαζί του με βοήθησε σε αρκετά στάδια της διπλωματικής και η ενθάρρυνση του στην πραγματοποίηση της εργασίας μέσω της ρευστοδυναμικής ήταν καταλυτική.

Στη συνέχεια θα ήθελα να αναφέρω ονομαστικά τους φίλους μου και συμφοιτητές που βοήθησαν στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας αλλά και γενικότερα στην σχολή για τις μοναδικές στιγμές που περάσαμε, την Καλλιόπη Λιάκη για τον ορθογραφικό έλεγχο της συγκεκριμένης εργασίας, τον Κατσάπη Ιωάννη για την βοήθεια του στο σχεδιασμό και τέλος τους Κέντρο Δημήτριο και Μπαλί Δημήτριο για τις αμέτρητες ώρες που περάσαμε μαζί μελετώντας και κάνοντας παρέα.

Τέλος να μου συγχωρεθεί ο συναισθηματισμός, θα ήθελα να πω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, στην αδερφή μου Σοέλα και την μητέρα με το πατερά μου για όλη την υπομονή που έχουν κάνει, την υποστήριξη και κατανόηση σε όλα αυτά τα χρονιά σπουδών και γενικότερα της ζωής μου. Η υποστήριξη τους ήταν καθοριστική σε όλες τις φάσεις της ζωής μου και δεν γίνονταν να μην τους συμπεριλάβω.

Περίληψη

Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι σύστημα λανθάνουσας θερμότητας και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας και για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας σε εφαρμογές τους. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται η υπολογιστική προσομοίωση ενός δοχείου με υλικό αλλαγής φάσης κυλινδρικής διατομής.

Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύσσεται το θεωρητικό πλαίσιο σχετικά με την ανάγκη αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μέσω της λανθάνουσας θερμότητας, ο τρόπος που τα υλικά αλλαγής φάσης συνεισφέρουν σε αυτή την κατεύθυνση, την διαδικασία αλλαγής φάσης ενός υλικού, τον τρόπο λειτουργίας και τις ιδιότητες τους, την αναλυτική κατηγοριοποίηση των υλικών, και τέλος τις εφαρμογές που μπορούν να αξιοποιηθούν αυτά τα υλικά, όπως και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής και της μεταφοράς θερμότητας σε ένα πλαίσιο γεμάτο με υλικό αλλαγής φάσης, μέσα από το οποίο περνάνε σωλήνες κυλινδρικής διατομής που διαρρέονται από θερμό ρευστό. Για να προσομοιωθεί αυτή η διεργασία, χρησιμοποιείται εμπορικό λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η εργασία περιγράφει αναλυτικά τη διαδικασία πλεγματοποίησης, εισαγωγής των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών και αρχικών συνθηκών καθώς και των φυσικών – αριθμητικών παραμέτρων επίλυσης. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες σε ένα χρονικό διάστημα 200s. Τα αποτελέσματα αφορούν το πως τήκεται το υλικό αλλαγής φάσης καθώς και την ανάλυση του πεδίου ροής του, όπου και γίνεται σχολιασμός των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

Λέξεις - κλειδιά :

Αποθήκευση θερμικής ενέργειας (TES), Υλικά Αλλαγής φάσης (ΥΑΦ),
Μεταφορά θερμότητας, Υπολογιστική ρευστοδυναμική CFD

Abstract

Phase change materials are a latent heat system and are used to store thermal energy to achieve energy savings in their application. In the present thesis is attempted a numerical investigation of a container with phase change material of cylindrical section.

The thesis expands the theoretical background of the essential need for thermal energy storage through latent heat, the way phase change materials contribute in this direction, the process of phase change of a material, their way of operation and their properties, the detail classification of the materials and finally the applications that can be utilized by these materials. Additionally, the construction characteristics of these materials are investigated.

Next, is presented the mathematical model for simulating flow and heat transfer in a frame filled with phase change material, through which cylindrical tubes, leaked with hot liquid, pass. Commercial computational dynamic fluid software is used for the simulation of this process. The thesis describes in detail the grid process, Input of the appropriate boundary conditions and initial conditions as well as the physical – numerical solution parameters. Finally, are presented the results for two different temperatures in a period of 200 seconds. The results refer to way the phase change materials melt as well as to the analysis of their flow field, where the respective results are commended.

Keywords:

Thermal energy storage (TES) , Phase Change Materials(PCM)
Heat transfer, Computational Fluid Dynamics (CFD)

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	15
1.2	ΚΙΝΗΤΡΟ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	16
1.3	ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΙΑΣ

2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
2.2	ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ.....	18
2.3	ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	19
2.4	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ)	20
2.4.1	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ	20
2.4.2	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΥΝΑΓΩΓΗ	21
2.4.3	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	22
2.5	ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	23
2.5.1	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ SHS.....	24
2.5.2	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	26
2.5.3	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΥΛΙΚΑ ΑΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.	29
3.2	ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ.....	30
3.2.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	32
3.3	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΑΦ(PCM).....	34
3.4	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΑΦ (PCM)	35
3.4.1	ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ – ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ	35
3.4.2	ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ.....	35
3.4.3	ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ	35
3.4.4	ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ.....	36
3.4.5	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ	36
3.5	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΑΦ – PCM	36
3.5.1	ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΑΦ – PCM.....	38
3.5.1.1	ΠΑΡΑΦΙΝΕΣ.....	38

3.5.1.2 ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ	40
3.5.1.3 ΑΛΚΟΟΛΕΣ ΣΑΚΧΑΡΩΝ	41
3.5.2 ΑΝΑΓΟΝΤΑ ΥΑΦ – PCM	41
3.5.2.1 ΈΝΥΔΡΑ ΑΛΑΤΑ	42
3.5.2.2 ΜΕΤΑΛΛΑ	43
3.5.3 ΕΥΤΗΚΤΑ.....	44
3.5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΘΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΥΑΦ- PCM.....	45
3.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΑΦ-PCM.....	46
3.6.1 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (DSC).....	47
3.6.2 ΜΕΘΟΔΟΣ T-HISTORY	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ -ΥΑΦ-PCM

4.1 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΥΑΦ – PCM.....	51
4.1.1 ΜΑΚΡΟΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ – ΜΑΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ.....	52
4.1.2 ΜΙΚΡΟΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ – ΜΙΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ	53
4.1.3 ΥΑΦ – PCM ΣΕ ΚΛΙΝΕΣ.....	54
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΑΦ – PCM ΣΕ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	55
4.2.1 ΥΑΦ – PCM ΣΤΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ	55
4.2.2 ΥΑΦ – PCM ΣΕ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΑΕΡΑ	56
4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΥΑΦ – PCM ΟΡΓΑΝΙΚΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥΣ RANKIE ORC (ORGANIC RANKIE CYCLE)	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ60

5.1 ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ.....	60
5.2 ΕΞΙΣΩΣΗ ΟΡΜΗΣ.....	60
5.3 ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ -CFD

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	62
6.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ CFD ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	62
6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	64
6.3.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ.....	65
6.4 ΠΡΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ / PRE – PROCESSING.....	65
6.4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	66

6.4.2 ΠΛΕΓΜΑ.....	66
6.4.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	68
6.4.3.1 SOLVER PROPERTIES.....	69
6.4.3.2 ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	70
6.4.3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ / MATERIAL PROPERTIES	71
6.4.3.4 CELL ZONE.....	72
6.4.3.5 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ / BOUNDARY CONDITIONS.....	73
6.4.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΛΥΣΗ.....	76
6.4.4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	76
6.4.4.2 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	79
6.4.4.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	79
6.5 ΕΠΙΛΥΣΗ	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

8.1 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	94
------------------------------	----

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 : Σύγκριση τυπικών παραμέτρων τριών τεχνολογιών TES.....	24
Πίνακας 2.2 : Διαθέσιμα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας που χρησιμοποιούνται για συστήματα TES.....	25
Πίνακας 3.1 : Θερμοφυσικές ιδιότητες των n – Παραφινών και εμπορικών παραφινών ΥΑΦ – PCM.....	39
Πίνακας 3.2 : : Θερμοφυσικές ιδιότητες από λιπαρά οξέα με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα.....	40
Πίνακας 3.3 : Θερμοφυσικές ιδιότητες από Αλκοόλες σακχαρών με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα.....	41
Πίνακας 3.4 : Θερμοφυσικές ιδιότητες από Ένυδρα άλατα με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα.....	43
Πίνακας 3.5 :: Θερμοφυσικές ιδιότητες από Μέταλλα με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα.].....	44
Πίνακας 3.6 : Θερμοφυσικές ιδιότητες Εύτηκτα υλικά με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα..	45
Πίνακας 3.7 : Σύγκριση οργανικά – ανόργανα – εύτηκτα ΥΑΦ - PCM	46
Πίνακας 4.1 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Micro-Marco Encapsulation	54
Πίνακας 6.1 : Φυσικές ιδιότητες Gallium	71

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 3.1 : ΥΑΦ – PCM , κερι παραφίνης στην αρχική του κατάσταση.	39
Εικόνα 3.2 : ΥΑΦ – PCM , Στεαρικό οξύ στην αρχική του κατάσταση.	40

Εικόνα 4.1 : TEAP σφαιρική κάψουλα πολυολεφίνης.	52
Εικόνα 4.2 : Μεταλλικοί σωλήνες.	52
Εικόνα 4.3 : Ανοξειδωτα σφαιρίδια κάψουλας.	52
Εικόνα 4.4 : CSM πάνελ που αποτελείται από PCM.	52
Εικόνα 4.5 : Μικροκάψουλες PCM σε γύψο (σε μικροσκόπιο). Το PCM Μικροκάψουλας με μέση διάμετρο 8 μm διασκορπίζεται ομοιογενές μεταξύ των κρυστάλλων γύψου.	53
Εικόνα 4.6 : Δομή μικροκαψουλών. (α) απεικόνιση σχήματος δομής , (β) απεικόνιση σε μικροσκόπιο το κέλυφος κάψουλας και βασικού υλικού	53
Εικόνα 6.1 : Παράθυρο εκκίνησης εμπορικού λογισμικού (WORKBENCH).	65
Εικόνα 6.2 : Ορισμός Double Precision.....	68
Εικόνα 6.3 : Αρχική ορισμών εντολών στο FLUENT	69
Εικόνα 6.4 : Ορίσμος ρυθμίσεων για ιδιότητες επίλυσης	70
Εικόνα 6.5 : Ορισμός φυσικών μοντέλων	71
Εικόνα 6.6 : Ορισμός υλικού και φυσικών ιδιοτήτων του.	72
Εικόνα 6.7 : Πρόσθεση υλικού αντιστήχησης.	73
Εικόνα 6.8 : Συνοριακές συνθήκες στα τοιχώματα πηγών θερμότητας στους 40°C.....	74
Εικόνα 6.9 : Συνοριακές συνθήκες στα τοιχώματα πηγών θερμότητας στους 45°C	75
Εικόνα 6.10 : Συνοριακή συνθήκη εξωτερικού τοιχώματος	76
Εικόνα 6.11 : Ορισμός μεθόδων.....	78
Εικόνα 6.12 : Προεπιλογές από FLUENT	78
Εικόνα 6.13 : Ορισμός αρχικών συνθήκων	79
Εικόνα 6.14 : Ορισμός Monitors Residuals	80
Εικόνα 6.15 : Ορισμός χρονικού βήματος και επανάληψης.....	81

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1 : Παγκόσμια κάλυψη ενεργειακών αναγκών [2].	15
Σχήμα 2.1 : Η θερμότητα μεταφέρεται προς την κατεύθυνση ελάττωσης της θερμότητας [6].	19
Σχήμα 2.2 : Τα τρία φαινόμενα της μετάδοσης θερμότητας (Αγωγή , Συναγωγή , Ακτινοβολία) σε οικιακή συσκευή η οποία θερμαίνεται. [35].	20
Σχήμα 2.3 : (α) Φυσική συναγωγή προκαλείται από τη διαφορά στην πυκνότητα ζεστού και κρύου ρευστού, (β) Εξαναγκασμένη συναγωγή , η κίνηση του ρευστού εξαναγκάζεται μέσω ενός ανεμιστήρα. [36].	22
Σχήμα 2.4 : Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.	24
Σχήμα 2.5 : Απλοποιημένο σχήμα συστήματος TES βασισμένο σε χημικές αντίδρασης. [10].	28
Σχήμα 3.1 : Θερμική σταθεροποίηση ιγλού. [37].	29
Σχήμα 3.2 : Μετατροπή κατάστασης της ύλης με αύξηση της θερμότητάς. [38].	31
Σχήμα 3.3 : Μετατροπή νερού σε όλες της μορφές του στις τρεις φάσεις. [39].	32
Σχήμα 3.4 : Ποιοτικό διάγραμμα πίεσης (P) – θερμοκρασίας (T) μιας καθαρής ουσίας. [19].	33
Σχήμα 3.5 : Ατομική δέσμη αλλαγής Φάσης από τήξη<-> πήξη. [12].	34
Σχήμα 3.6 Απεικόνιση λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας σε διάγραμμα αποθηκευμένης ενέργειας Q- θερμοκρασίας T (40).	34
Σχήμα 3.7 : Ταξινόμηση ΥΑΦ – PCM με γνώμονα την σύσταση τους.	37
Σχήμα 3.8 : Ενθαλπία τήξης – θερμοκρασία τήξης διάφορων υλικών PCM. [13].	38
Σχήμα 3.9 : Κρυσταλλικό πλέγμα χλωριούχου ασβεστίου. [17].	42
Σχήμα 3.10 : Συνδυασμοί από του οποίους μπορούν να προκύψουν εύτηκτα υλικά.	44

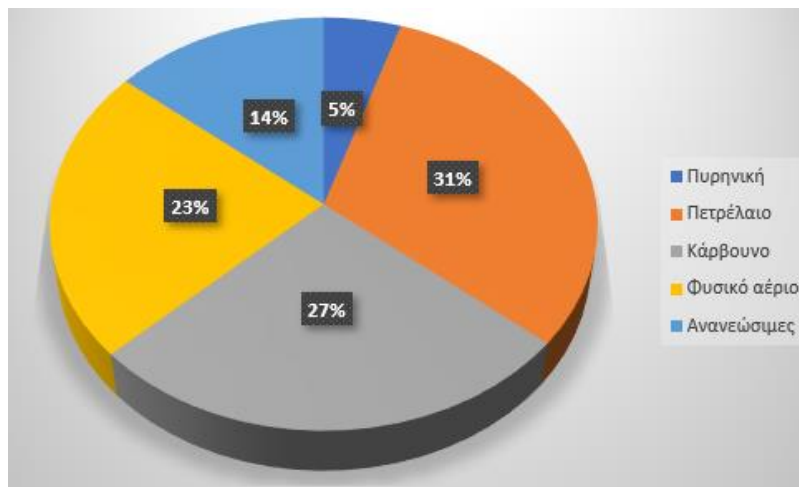
Σχήμα 3.11 : Σχηματική απεικόνιση της διάταξης DSC. [18].....	47
Σχήμα 3.12 : Σχηματική διάταξη πειραματικής εγκατάστασης T-history. [18].	49
Σχήμα 3.13 : (α) Καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου για ΥΑΦ – PCM και αέρα περιβάλλοντος, (β) Καμπύλη θερμοκρασία – χρόνου για αποσταγμένο νερό και αέρα περιβάλλοντος [19].	50
Σχήμα 4.1 : Διάταξη κλίνης [23].....	55
Σχήμα 4.2 : Ηλιακός συλλέκτης με μονάδα αποθήκευσης θερμότητας που περιέχει PCM για την παροχή ζεστή νερού [25].	56
Σχήμα 4.3 : Σχηματική απεικόνιση της solar air heater [26].....	57
Σχήμα 4.4 : Διάταξη της αλλαγής φάσης με βάση την αποθήκευση PCM. [28]	59
Σχήμα 6.1 : Βήματα Pre – Procesing	63
Σχήμα 6.2 : Κυλινδρικό δοχείο αοιθήκευσης θερμότητας με τα επιμέρους στοιχεία του.....	64
Σχήμα 6.3 : Ολόκληρη σχηματική απεικόνιση δοχείου αποθήκευσης θερμότητας	64
Σχήμα 6.4 : Σχεδιασμός γεωμετρικών διαστάσεων.	66
Σχήμα 6.5 : Γεωμετρία μοντέλου που θα υποστεί μοντελοποίηση	66
Σχήμα 6.6 : Είδη υπολογιστικών πλεγμάτων. [30]	67
Σχήμα 6.7 : Υπολογιστικό πλέγμα μονέλου.	67
Σχήμα 6.8 : Οριακές συνθήκες των κυλινδρικών πηγών θέρμανσης. [32]	73
Σχήμα 6.9 : Συνολικά στάδια αλγορίθμου SIMPLE. [33].....	77
Σχήμα 7.1 : Διάγραμμα υπολογισμού αριθμών επαναλήψεων.....	82
Σχήμα 7.2 : Αποτέλεσμα Προσομοίωσης για τήξη σε 200s στους 40°C	83
Σχήμα 7.3 : Αποτέλεσμα Προσομοίωσης για τήξη σε 200s στους 45°C	83
Σχήμα 7.4 : Ολόκληρη απεικόνιση τήξης κυλινδρικής εποφάνειας στους 40°C σε 200s	83
Σχήμα 7.5 : Ολόκληρη απεικόνιση τήξης κυλινδρικής εποφάνειας στους 45°C σε 200s	84
Σχήμα 7.6 : Ανάπτυξη θερμοκρασίας στους 40°C στα 200s	85
Σχήμα 7.7 : Ανάπτυξη θερμοκρασίας στους 45°C στα 200s	85
Σχήμα 7.8 : Ανάπτυξη ταχύτητας στους 40°C στα 200s.....	86
Σχήμα 7.9 : Ανάπτυξη ταχύτητας στους 45°C στα 200s.....	86
Σχήμα 7.10 : Διανυσματικές ταχύτητες γύρω από πηγή θερμότητας στους 45°C στα 200s	87
Σχήμα 7.11 : Κατεύθυνση διανυσματικών ταχυτήτων στο κύλινδρο στους 45°C στα 200s.	88
Σχήμα 7.12 : Ανάπτυξη πεδίου θερμοκρασίας ανά χρονικό διάστημα α) για 40°C β) για 45°C.	89
Σχήμα 7.13 : Ανάπτυξη πεδίου ταχυτήτων ανά χρονικό διάστημα α) για 40°C β) για 45°C	90
Σχήμα 7.14 : Ανάπτυξη πεδίου τήξης ανά χρονικό διάστημα α) για 40°C β) για 45°C.....	91
Σχήμα 7.15 : Εξέλιξη του τήγματος σε σχέση με το χρόνο	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ενεργειακή και περιβαλλοντική κατάσταση

Τα τελευταία χρόνια οι αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις σε συνδυασμό με τη διαρκή εξάντληση των ορυκτών πόρων έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα προβλέποντας ότι θα υπάρξει μια αύξηση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας 48% [1]. Ειδικότερα, πλέον υπάρχουν και περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οδηγούν σε έντονη κλιματική αλλαγή, η οποία πλέον είναι αισθητή σε όλο τον πλανήτη. Η επιστημονική κοινότητα έχει τονίσει επανειλημμένως την επιτακτική ανάγκη για νέους ενεργειακούς πόρους, οδηγώντας την παγκόσμια κοινότητα σε μία στροφή προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Πλέον μαζί με την τεχνολογική εξέλιξη μπορούμε να αξιοποιήσουμε τους ενεργειακούς πόρους της φύσης όπως είναι η αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, γεωθερμική ενέργεια.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια κάλυψη ενεργειακών αναγκών [2].

Όπως παρατηρείται και από το σχήμα 1.1 στη συντριπτική πλειοψηφία (81%) η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών αποτελείται από ορυκτά καύσιμα. Όμως παρατηρείται και η αυξημένη συνεισφορά από τις ανανεώσιμες οι οποίες σταδιακά στο πέρασμα των χρόνων συμβάλουν όλο και περισσότερο σε σχέση με παλιότερα χρόνια.

Η αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας σήμερα εκτός από την κλιματική αλλαγή έχει συντελέσει και στην περιβαλλοντική μόλυνση με τα σημαντικότερα προβλήματα να είναι κυρίως η αυξανόμενη ατμοσφαιρική μόλυνση εξαιτίας της αύξησης των ρύπων και του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με μελέτες η χρήση των ΑΠΕ έχει οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών CO₂ όπου αποτελούν το βασικό αέριο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλά και σε κάποια μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης γενικότερα [4]. Άλλα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης των ΑΠΕ είναι πως τα κόστη από την χρήση τους κυμαίνονται σε προσιτά επίπεδα και δεν επηρεάζονται από τις μεταβαλλόμενες τιμές των ορυκτών καυσίμων όπως για παράδειγμα την πετρελαϊκή κρίση του '70. Έτσι αυτή η τεχνολογία εκτός από προστασία στο περιβάλλον συμβάλει και στην εγχώρια ενεργειακή κατανομή ενέργειας για κατανάλωση που ταυτόχρονα συντελεί και στην μείωση εισαγόμενου και ακριβού πετρελαίου έχοντας έτσι θετικό πρόσημο στο ενεργειακό ισοζύγιο της εκάστοτε χώρας.

1.2 Κίνητρο αξιοποίησης Υλικών Αλλαγής Φάσης

Όπως είναι γνωστό εκτός από τα θετικά που περιβάλλουν τις ΑΠΕ υπάρχουν και μειονεκτήματα με το μεγαλύτερο κυρίως να είναι η ασυνεχής διαθεσιμότητα της ενέργειας. Επηρεαζόμενες από τυχαίες τοπικές καιρικές διακυμάνσεις μερικές τεχνολογίες όπως η ηλιακή και η αιολική είναι απρόβλεπτες, και δεν θα μπορούν να αξιοποιηθούν σε χρονικές στιγμές που η ζήτηση τους είναι αναγκαία. Για την επέκταση της χρήσης τους θα πρέπει να προβλεφθεί μια τεχνολογία, η οποία θα αποθηκεύει την περίσσεια ενέργεια που παράγεται σε περιπτώσεις που υπάρχει υψηλή διαθεσιμότητα ή χαμηλή ζήτηση.

Επομένως είναι κατανοητό ότι η θερμική και ηλεκτρική ενέργεια δεν θα είναι σταθερή ως προς την ζήτηση τους. Συνεπώς η πιο αξιόπιστη λύση στα προαναφερθέντα προβλήματα είναι αυτή της αποθήκευσης της ενέργειας η οποία παίζει σημαντικό ρολό στην επιτυχή κάλυψη ενεργειακής ζήτησης. Στην σημερινή εποχή έχει γίνει επιτακτική ανάγκη η χρήση τους για την κάλυψη- μείωση φορτίων σε ώρες αιχμής πχ για συμβατικά ηλεκτρικά συστήματα.

Οι βασικές μορφές ενέργειας τις οποίες μπορούμε να αποθηκεύσουμε είναι:

- Ηλεκτρική ενέργεια
- Μηχανική ενέργεια
- Θερμική ενέργεια

Για αυτό τον λόγο τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Ένα τέτοιο σύστημα είναι αυτό της χρήσης των **Υλικών Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) (PCM-Phase Change Materials)** για την αποθήκευση θερμότητας, γνωστά και ως **Θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργεια TES(Thermal Energy Storage)** [3].

Γενικά, η έννοια των υλικών αλλαγής φάσης υπάρχει αρκετά χρόνια στην ανθρωπότητα, καθώς χρησιμοποιούταν ακόμα από την αρχαιότητα σαν ένα απλό φαινόμενο όπως αυτό της δημιουργίας πάγου για την αποθήκευση τροφών, ώστε να διατηρείται η τροφή σε μια σταθερή θερμοκρασία και να αξιοποιείται όταν υπάρχει ζήτηση. Έτσι ο πάγος αποτέλεσε το πρώτο υλικό αλλαγής φάσης μέσω του φαινομένου

της τήξης, οδηγώντας στην ανάπτυξη της χρήσης των υλικών αλλαγής φάσης που χρησιμοποιούνται πλέον για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

1.3 Δομή διπλωματικής

Η δομή της παρούσας διπλωματικής αποτελείται από 5 βασικά κεφάλαια. Το πρώτο είναι το εισαγωγικό κεφάλαιο και στόχος του είναι να μυήσει τον αναγνώστη για το λόγο που χρησιμοποιούνται εναλλακτικές μορφές ενέργειας και το ρολό της ανάπτυξης των ΥΑΦ και γίνει μια Ανάλυση για τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και μερικά βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίες τους.

Το 2^ο κεφάλαιο γίνεται εξήγηση του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με όλα τα θερμοδυναμικά φαινόμενα που συμβαίνουν και τους τρόπους όπου μπορεί να αποθηκεύει τη θερμότητα.

Το 3^ο κεφάλαιο εστιάζει στην αναλυτική λειτουργία των ΥΑΦ και τα χαρακτηριστικά τους με τις ιδιότητες του. Γίνεται ανάλυση στο πως αλλάζει η φάση από τήξη- πήξη σε εξάτμιση- συμπύκνωση. Στο ποιος είναι η βασικές ιδιότητες και της κατηγορίες τους και μια λεπτομερή ανάλυση γενικά της τεχνολογίας αυτής.

Το 4^ο κεφάλαιο αποσκοπεί να δείξει στον αναγνώστη πως πλέον αφού έχει αναλυθεί η τεχνολογία των ΥΑΦ βρίσκει εφαρμογές πρακτικά. Θα αναλυθούν τα συστήματα που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Οπού θα γίνει μια λεπτομερή περιγραφής του κάθε συστήματος πως δουλεύουν μαζί με τα ΥΑΦ.

Το 5^ο κεφάλαιο πρόκειται για το κεφάλαιο της μαθηματικής μοντελοποίησης που εφαρμόζονται η μαθηματικές σχέσης της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Το 6^ο κεφάλαιο είναι το κεφάλαιο οπού γίνεται και μοντελοποίηση. Στην αρχή θα γίνει ένας σχεδιασμός του μοντέλου που θα προσομοιώσουμε όλες της βασικές διαστάσεις του. Υστέρα θα αναφερθούν η βασικές παράμετροι που θα χρειαστούν ώστε να ξεκινήσει η έναρξη της μοντελοποίησης με τις μεθόδους της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και θα γίνει ανάλυση κάθε βήματος μέχρι να βγει το τελικό αποτέλεσμα της μοντελοποίησης.

Στο 7^ο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα αποξέσματα της προσομοίωσης.

Στο 8^ο κεφάλαιο τέλος αναπτύσσονται τα συμπεράσματα και η μελλοντική εργασία που μπορεί να γίνει στο συγκεκριμένο θέμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας TES είναι μια τεχνολογία κατά την οποία αποθηκεύεται θερμική ενέργεια από θέρμανση ή ψύξη ενός μέσου αποθήκευσης, έτσι ώστε η ενέργεια η οποία έχει αποθηκευτεί να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο για θέρμανση και ψύξη αλλά και για μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Η μέθοδος αυτή της αποθήκευσης αποτελείται από 3 βασικά βήματα τα οποία είναι η φόρτιση , αποθήκευση και εκφόρτωση

Υπάρχουν 3 είδη συστημάτων **TES** :

- Αποθήκευση αισθητής θερμότητας(Sensible heat storage)
- Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας(Latent heat storage)
- Θερμοχημική αποθήκευση(Thermo-chemical storage)

Τα συστήματα TES χρησιμοποιούνται κυρίως σε κτήρια και βιομηχανικές διαδικασίες. Μερικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι :

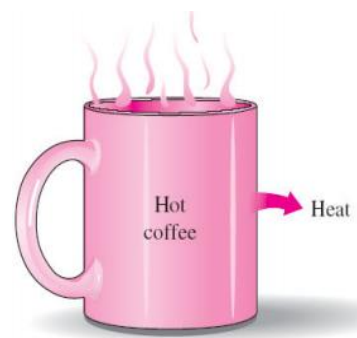
- Αποθήκευση με μέσο το νερό
- Κρυογενικό σύστημα(Cryogenic Energy Storage)
- Σύστημα με τετμημένα άλατα (Molten salts)
- Υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials-PCM) [4][6].

2.2 Θερμότητα

Η θερμότητα ορίζεται ως η μορφή της ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί από ένα το ένα σύστημα στο άλλο ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας [5]. Η Θερμότητα ρέει από το θερμότερο σώμα στο ψυχρότερο.

Μια έννοια η οποία πολύς κόσμος άθελα του συγχέει είναι η διαφορά μεταξύ της θερμότητας και της θερμοκρασίας. Η θερμότητα όπως αναφέρθηκε πιο πάνω είναι μια μορφή ενέργειας ενώ η θερμοκρασία είναι το μετρό της ποσότητας της συγκεκριμένης ενέργειας που υπάρχει σε ένα σώμα.

Όπως πολλές μορφές ενέργειας μπορούν να μετατραπούν σε έργο(W) έτσι και η θερμότητα αντίστοιχα. Το μεταφερόμενο ποσό θερμότητας συμβολίζεται με Q. Οπότε η ροή θερμότητας θα έχει μονάδες Joule/sec, Watt



Σχήμα 2.1 : Η θερμότητα μεταφέρεται προς την κατεύθυνση ελάττωσης της θερμότητας [6].

2.3 Θερμοχωρητικότητα

Η θερμοχωρητικότητα (Heat capacity) είναι μια ιδιότητα από την θερμοδυναμική , η οποία δείχνει την ικανότητα ενός σώματος να απορρόφα ή να αποβάλει το ποσό της θερμότητας κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας κατά 1°C. Πρακτικά φανερώνει το πόσο γρήγορα μπορεί κάποιο σώμα να θερμανθεί ή να ψυχθεί.

Ως θερμοχωρητικότητα ορίζεται η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την αύξηση της μοναδιαίας μάζας μιας ουσίας μέσω ενός καθορισμένου διαστήματος θερμοκρασίας , ονομάζεται θερμοχωρητικότητα ή η ειδική θερμότητα της ουσίας αυτής. Ουσιαστικά η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος βρίσκεται με τον πολλαπλασιασμό της μάζας με την ειδική του θερμότητα. Ειδική θερμοχωρητικότητα (Specific heat capacity) αναφέρεται στη μονάδα της μάζας, ενώ η Γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα (Molar heat capacity) πρόκειται για την θερμοχωρητικότητα που αναφέρεται στο ένα Mole του υλικού.

Η μαθηματική έκφραση της θερμοχωρητικότητας είναι ο λόγος θερμότητας ΔQ που προσφέρει σε ένα σώμα δια της ανύψωσης της θερμοκρασίας ΔT

$$\Delta T: C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{dQ}{dT} \quad (2.1)$$

Η θερμοχωρητικότητα μπορεί να μετρηθεί υπό συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας ή πίεσης ή σταθερού όγκου.

- Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο.

$$c_v = \left(\frac{\delta q}{dT} \right)_v \quad (2.2)$$

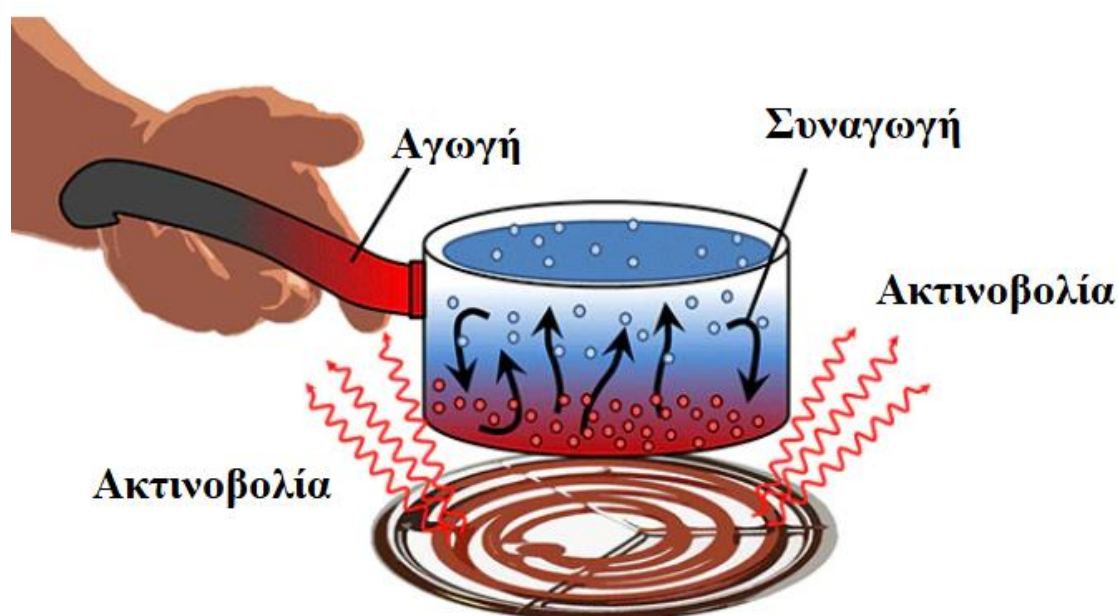
- Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση.

$$C_p = \left(\frac{\delta q}{dT} \right)_p \quad (2.3)$$

2.4 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας (Μετάδοση Θερμότητας)

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω στο παράρτημα 2.2 ως θερμότητα καλείται η μορφή της ενέργειας η οποία μπορεί να μεταφερθεί από το ένα σύστημα σε ένα άλλο ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής τους διαφορά. Η επιστήμη η οποία συσχετίζεται με τον συγκεκριμένο ρυθμό της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας καλείται Μετάδοση θερμότητας. Όπως είναι γνωστό από το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο χωρίς εξωτερική βοήθεια η θερμότητα πάντα θα ρέει από το πιο ζεστό σώμα (υψηλότερη θερμοκρασία) προς το πιο κρύο (χαμηλότερη θερμοκρασία) και η μεταφορά αυτή σταματά όταν τα δυο σώματα θα έχουν φτάσει σε κοινή-ιδιά θερμοκρασία.

Η μεταφορά της θερμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους : **Μεταφορά με αγωγή** , **Μεταφορά με συναγωγή** και τέλος η μεταφορά με **ακτινοβολία**.



Σχήμα 2.2 : Τα τρία φαινόμενα της μετάδοσης θερμότητας (Αγωγή , Συναγωγή , Ακτινοβολία) σε οικιακή συσκευή η οποία θερμαίνεται. [35].

2.4.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Η **αγωγή (Conduction)** πρόκειται για μια διαδικασία **διάχυσης (diffusion)** κατά την οποία θερμική ενέργεια μεταφέρεται από θερμότερες περιοχές σε ψυχρότερες αλλά χωρίς να υπάρχει μακροσκοπική μετακίνηση της μάζας του υλικού από την μια θέση στην άλλη. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι μικροσκοπικά υπάρχουν μετακινήσεις και αλληλεπιδράσεις (το υλικό δεν μετακινείται). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει διότι γίνεται μεταφορά ενέργειας από τα σωματίδια μιας ουσίας με την περισσότερη ενέργεια προς τα γειτονικά με την μικρότερη εξαιτίας των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή είναι ένας μηχανισμός ο οποίος μπορεί να μεταφερθεί σε στερεά σώματα σε σταθερά – μη κινούμενα υγρά και σε αέρια.

Σύμφωνα με το **νόμο του Fourier** η μεταφορά θερμότητας με αγωγή εκφράζει την θερμική ροή η οποία ρέει από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω της επαφής η οποία οφείλεται στην διαφορά της θερμοκρασίας των σωμάτων αυτών.

Για μονοδιάστατη θερμική αγωγή

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

Όπου q είναι η ροή θερμότητας ενώ η σταθερά k [W/m K] είναι ο συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας (**Thermal Conductivity**) του υλικού, και dT/dx είναι η κλίση της θερμοκρασίας

Η ολοκληρωμένη μορφή του νόμου του Fourier για το ρυθμό αγωγής θερμότητας ανά μονάδα χρόνου \dot{Q} είναι η εξής

$$\dot{Q}_{αγωγ} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

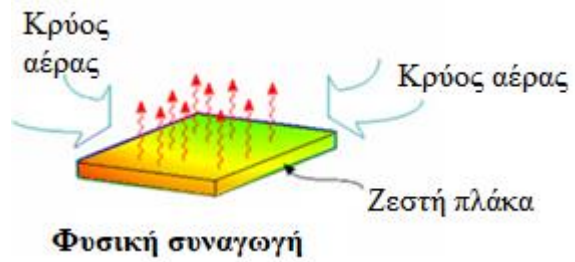
dx είναι ανάλογο της επιφάνειας A που είναι κάθετη στη διεύθυνση της μεταφοράς της θερμότητας, της θερμοκρασιακής βαθμίδας dT/dx , που επικρατεί στις δυο πλευρές του στρώματος.

2.4.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

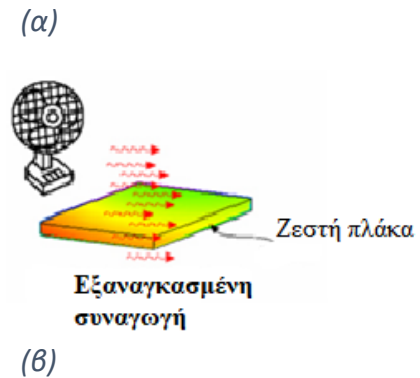
Συναγωγή(Convection) είναι ένας τρόπος μεταφοράς θερμότητας από την μαζική κίνηση ενός ρευστού (υγρό – αέριο). Η συναγωγή συμβαίνει στην επιφάνεια ενός αντικείμενου όπου το περιβάλλον ρευστό του αντικείμενου θερμαίνεται και μετακινείται θερμότητα μακριά από την πηγή θερμότητας. Δηλαδή πρόκειται για την μεταφορά ενέργειας μιας στέρεας (συνήθως) επιφάνειας και της γειτονικής αέριας η υγρής ή φάσης. Η κίνηση του ρευστού όσο πιο γρήγορα γίνεται τότε τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Επίσης θα πρέπει για να επιτευχθεί η μεταφορά αυτή φυσικά να υπάρχει και διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας με το γειτονικό ρευστό. Αλλά κατά την περίπτωση που το ρευστό είναι μη κινούμενο όπως αναφέρθηκε από πάνω τότε θα γίνεται με αγωγή η μεταφορά της θερμότητας από την επιφάνεια του στερεού προς περιβάλλον ρευστό. Το κινούμενο ρευστό επιτυγχάνει να ενισχύσει την μεταφορά της θερμότητας αλλά περιπλέκει τον υπολογισμό του ρυθμού της μεταφοράς της θερμότητας.

Στην συναγωγή υπάρχουν δυο όροι οι οποίοι είναι η **Φυσική συναγωγή(Natural convection)** και η **Εξαναγκασμένη συναγωγή(Forced convection)**

- Η συναγωγή με τον όρο φυσική ή ελεύθερη χρησιμοποιείται εάν αυτή η κίνηση ανάμιξη προκαλείται από διακυμάνσεις πυκνότητας που είναι αποτέλεσμα που προκύπτει από την διαφορά θερμοκρασίας στο εν λόγω υγρό.



- Αντίθετα, με τον όρο εξαναγκασμένη συναγωγή χρησιμοποιείται εάν η κίνηση και η ανάμιξη προκαλούνται από εξωτερική δύναμη- παράγοντα όπως είναι μια αντλία, ένας ανεμιστήρας ή ακόμα μέχρι και από τον άνεμο.



Σχήμα 2.3: (α) Φυσική συναγωγή προκαλείται από τη διαφορά στην πυκνότητα ζεστού και κρύου ρευστού, (β) Εξαναγκασμένη συναγωγή, η κίνηση του ρευστού εξαναγκάζεται μέσω ενός ανεμιστήρα. [36].

Η εξίσωση για τον ρυθμό μεταφοράς με συναγωγή $\dot{Q}_{\text{συναγ}}$ είναι ο **νόμος της (ψύξης) Νεύτωνα** όπου:

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_f) \quad (2.6)$$

Όπου h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (**Heat transfer coefficient**) ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), A είναι ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια εμβαδού και τέλος η διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας T_s με την θερμοκρασία της κυρίας μάζας του ρευστού T_f .

Ο συντελεστής θερμότητας με συναγωγή h δεν αποτελεί ιδιότητα του ρευστού αλλά πρόκειται για μια παράμετρο η οποία η τιμή της προσδιορίζεται πειραματικά και εξαρτάται από τις μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν την συναγωγή [6].

2.4.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Σαν **ακτινοβολία (radiation)** ορίζεται όπως και στις 2 προηγούμενες περιπτώσεις η μεταφορά θερμότητας από ένα θερμότερο σώμα σε ένα ψυχρότερο. Με την ιδιαιτερότητα σε αυτή την περίπτωση να είναι πως δεν υπάρχει η ανάγκη ύπαρξης ύλης και η δυνατότητα μεταφοράς της στο κενό όπου και ενισχύεται. Ένα τρανό παράδειγμα είναι η θέρμανση του πλανήτη μας από τον ήλιο όπου με αυτόν τον τρόπο φτάνει η ηλιακή ενέργεια. Σαν μηχανισμό λειτουργίας του φαινομένου της ακτινοβολίας ορίζεται η μεταφορά της θερμότητας μέσω **ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων**. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι αίτιο από την θερμότητα όπου

δημιουργούνται χάρη στις μεταβολές της ενεργειακής κατάστασης των ηλεκτρονίων των ατόμων όπου ύστερα θα γίνει εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Όλα τα σώματα (στερεά, υγρά, αέρια) τα οποία η θερμοκρασία τους ξεπερνά αυτή του απόλυτου μηδέν(-273.15C°) έχουν την ικανότητα να εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Στην περίπτωση της θερμικής ακτινοβολίας, μια επιφάνεια η οποία απορροφάει όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία και αυτή δεν αντανακλά καμία ορίζεται σαν **Μέλαν σώμα(Black body)**. Ο **νόμος του Stefan-Boltzmann** για τη θερμική ακτινοβολία ενός μέλαν σώματος αναφέρει ότι ο ρυθμός της ενέργειας της ακτινοβολίας από την επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας είναι ανάλογη με την τέταρτη ισχύ της θερμοκρασίας του σώματος δηλαδή:

$$q = \sigma AT^4 \quad (2.7)$$

Όπου με σ συμβολίζεται η σταθερά Stefan-Boltzmann($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$). Εάν θεωρήσουμε μέλαν σώμα με επιφανειακή θερμοκρασία T_1 που αντανακλά με άλλο μέλαν σώμα με θερμοκρασία επιφάνειας T_2 η οποία την περιβάλλει εντελώς, το δεύτερο μέλαν σώμα απορρόφα εντελώς την προσπίπτουσα ακτινοβολία και έτσι εκπέμπεται ακτινοβολία ενέργειας η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας T_2^4 . Η ακριβής μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία δίδεται παρακάτω

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

Ωστόσο η θερμική ισχύς η οποία εκπέμπεται από όλες τις πραγματικές επιφάνειες στην πραγματικότητα είναι μικρότερες από αυτές του μέλαν σώματος.

$$q = \varepsilon \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.9)$$

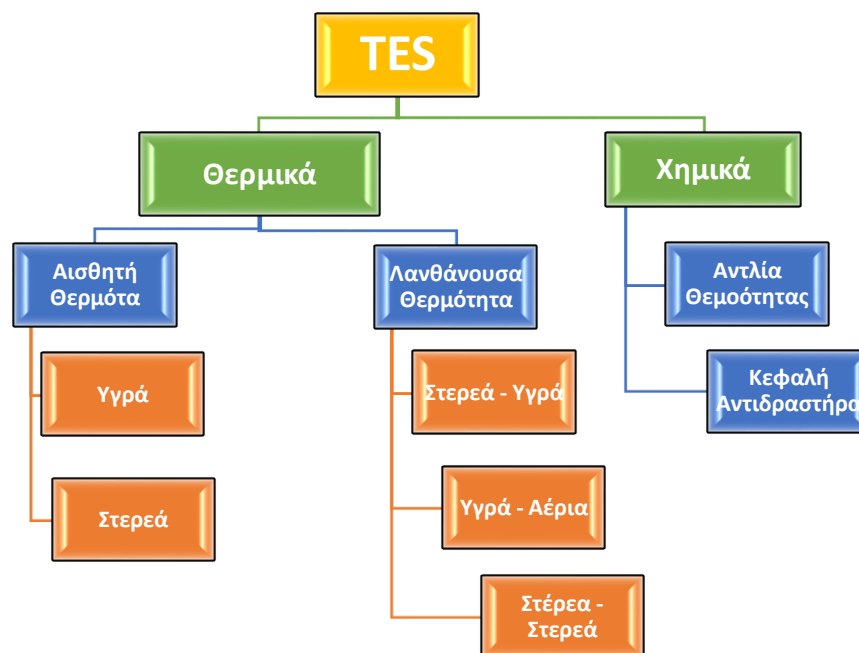
Με ε συμβολίζεται η ικανότητα εκπομπής(**emissivity**) για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ .

2.5 Τρόποι αποθήκευσης θερμικής θερμότητας

Όπως έχει προαναφερθεί παραπάνω οι τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας – θερμότητας κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες στις οποίες κάθε μια από αυτές βασίζεται σε διαφορετικές αρχές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Μια εξ αυτών είναι η **αποθήκευση αισθητής θερμότητας SHS(Sensible Heat Storage)** όπου η μέθοδος βασίζεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του στερεού ή του υγρού να αποθηκεύσει θερμότητα και να την απελευθερώσει με την μείωση της θερμοκρασίας όταν είναι απαραίτητο. Δεύτερη τεχνολογία αποθήκευσης πρόκειται για την μορφή **αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας LHS (Latent Heat Storage)**. Η αποθήκευση σε αυτήν την μορφή γίνεται με την αλλαγή κατάστασης της ύλης – φάσης του μέσου αποθήκευσης όπου κατά την αντίστροφη μεταβολή της φάσης από την αποθήκευση τότε απελευθερώνουν την θερμότητα – ενέργεια. Τέλος πρόκειται για την **αποθήκευση Θερμοχημικής ενέργειας TCM (Thermo-chemical storage)** που πραγματοποιείται από μια αντιστρεπτή χημική αντίδραση όπου είναι αναγκαία να υπάρχει κάποια συναλλαγή θερμότητας για την επίτευξη της.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση τυπικών παραμέτρων τριών τεχνολογιών TES [8].

TES Τεχνολογία	Χωρητικότητα (kWh/m ³)	Κόστος (/kWh)	Περίοδος αποθήκευσης
Αισθητή	10-50	0.1-10	ημέρες/μήνες
Λανθάνουσα	50-150	10-50	ώρες/μήνες
Θερμοχημική	120-150	8-100	μήνες/εποχή



Σχήμα 2.4 : Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

2.5.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας SHS

Η βασική θεωρία της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας SHS είναι ότι ενέργεια αποθηκεύεται σε υλικά τα οποία είναι στερεά ή υγρά και στα οποία αλλάζει η θερμοκρασία αλλά όχι τη φάση και καμία χημική αντίδραση δεν παίρνει μέρος σε αυτά παρά μόνο η εναλλαγή της θερμοκρασίας. Το ποσό της θερμότητας το οποίο μπορεί να αποθηκεύσει ένα σύστημα SHS εξαρτάται από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των αρχικών και των τελικών συνθηκών, της μάζας, της αποθήκευσης μεσαίου μεγέθους και την θερμοχωρητικότητα του. Όπου η μαθηματικής έκφραση είναι :

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2.10)$$

Όπου, m : συμβολίζεται η μάζα των υλικών αποθήκευσης

c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα των υλικών αποθήκευσης

ΔT : η θερμοκρασιακή διαφορά από της αρχικές στις τελικές συνθήκες

Υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για SHS είναι υγρά όπως το νερό, έλαια και μερικοί τύποι από διαλύματα αλάτων. Περαιτέρω τύποι υλικών που περιλαμβάνουν στερεά όπως είναι το σκυρόδεμα, βότσαλα, γρανίτη, πέτρες, και γενικά μέταλλα. Στο Παρακάτω πίνακα είναι διαθέσιμη μια λίστα με τα πιο συνηθισμένα στερεά και υγρά υλικά αποθήκευσης θερμότητας με τις αντίστοιχες ιδιότητες τους για εφαρμογή.

Πίνακας 2.2 : Διαθέσιμα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας που χρησιμοποιούνται για συστήματα TES. [8].

Υλικά	Τύπος	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική αγωγιμότητα (W/m*K)	Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg*K)	Κόστος (€/m ³)
Πέτρες	στερεό	1500-2800	0.85-3.5	1	64-742
Σκυρόδεμα	στερεό	2000	1.35	1	76
Άμμος & Χαλίκια	στερεό	1700-2200	2	0.910-1.180	6.0-8.0
Κεραμικό πλακάκι	στερεό	2000	1	0.8	1600-3500
Γύψος (επικάλυψη)	στερεό	1000	0.4	1	78
Κεραμικό Τούβλο	στερεό	1800	0.73	0.92	36-64
Ξύλο	στερεό	450	0.12	1.6	404
Νερό	Υγρό	990	0.63	4.19	1.6
Λάδι	Υγρό	888	0.14	1.88	6560
Νιτρώδη άλατα	Υγρό	1825	0.57	1.5	220
Ανθρακικά άλατα	Υγρό	2100	2	1.8	6050
Υγρό νάτριο	Υγρό	850	71	1.3	2000

Στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας παρατηρείτε όπως δείχνει και ο παραπάνω πίνακας να είναι το χαμηλό κόστος των αποθηκευτικών μέσων. Όπου αυτός ο παράγοντας κάνει την χρήση των SHS ιδιαίτερα διαδομένη στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας με την πιο γνωστή και οικεία σε όλους να είναι η αποθήκευση νερού για οικιακή χρήση με κοστολόγηση όπως αναφέρεται στο πίνακα να είναι κοντά στο 1€/m³. Στο Νερό εκτός από το χαμηλό κόστος παρατηρείτε και υψηλή θερμοχωρητικότητα της τάξης περίπου 4.19kJ/kg*K που δείχνει την δυνατότητα υψηλής αποθηκευτικής θερμότητας κάτι που την κάνει να είναι τόσο εδραιωμένη. Γενικά για την επιλογή υλικού για την χρήση της αποθήκευσης υπάρχουν μερικά κριτήρια όπως είναι θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα, αντοχή, κόστος κλπ.

Στα μειονεκτήματα των SHS είναι ότι η χαμηλή χωρητικότητα όπως φαίνεται στο πίνακα (2.1) κυμαίνεται στην τάξη 10-50 (kWh/m³) όπου γίνεται αντιληπτό ότι θα υπάρχουν απώλειες θερμότητας με την πάροδο του χρόνου εξαιτίας του μεγάλου όγκου για αποθήκευση ικανής ποσότητας. Σε συνδυασμό με την χαμηλή ενεργειακή τους πυκνότητα τα καθιστά ικανά για εφαρμογή σε μικρή κλίμακα όπως πχ οικιακή χρήση και βιομηχανίες.

2.5.2 Αποθήκευση Λανθάνουσας Θερμότητας

Η λανθάνουσα θερμότητα πρόκειται για την ενέργεια η οποία απορροφάται ή απελευθερώνεται από μια ουσία όταν αυτή αλλάζει την κατάσταση της ύλης της δηλαδή την φάση στην οποία βρίσκεται. Η αλλαγή της φάσης κατηγοριοποιείται σε 3ς φάσεις στερεή, αέρια, υγρή πιο συνηθισμένες μεταβολές είναι οι εξής

- Στερεά → Υγρή
- Υγρή → αέρια

Η αλλαγή φάσης από στερεά σε υγρή, είναι η πιο συνηθισμένη τεχνολογία LHS αλλαγής φάσης σε TES συστήματα και αυτό εξαιτίας του μικρού όγκου κατά την αλλαγή και κατά συνέπεια και με μικρότερη πίεση σε σχέση με την υγρή και στερεή σε αέρια όπου μπορεί να έχει μεγαλύτερη λανθάνουσα ενεργεία αλλά οι αλλαγές όταν γίνεται η αέρια φάση έχει κατά συνέπεια να καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο. Ενώ υπάρχει και άλλο ένα είδος το στερεό-στερεό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας υλικό η οποία λειτουργία βασίζεται στην αποθήκευση θερμότητας στην μετατροπή του υλικού από μια κρυσταλλική μορφή σε μια άλλη. Αυτή η μετάβαση της λανθάνουσας θερμότητας είναι μια τάξης μεγέθους μικρότερη από την στερεά -υγρή.

Η ενεργειακή πυκνότητα αυξάνεται δραστικά όταν τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται. Έχοντας μια αλλαγή φάσης εντός του εύρους θερμοκρασίας αποθήκευσης ($\Delta T = T_2 - T_1$), Η αποθηκευμένη ενέργεια σε υλικό αλλαγής φάσης μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$Q_{lat} = \int_{T_1}^{T_{pcm}} (mC_{p,s} dT) + mH_{lat} + \int_{T_{pcm}}^{T_2} (mC_{p,l} dT) \quad (2.11)$$

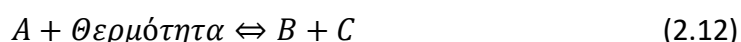
Όπου, Q_{lat} πρόκειται για την ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται. $C_{p,s}$ και $C_{p,l}$ πρόκειται για την ειδική θερμότητα του υλικού σε υγρή και αέρια φάση m είναι η μάζα θερμότητας μέσω της αποθήκευσης. H_{lat} είναι η θερμότητα τήξης κατά την αλλαγή φάσης της θερμοκρασίας T_{pcm} .

Η θερμότητα της τήξης ή η θερμότητα της εξάτμισης είναι πολύ μεγαλύτερες από την αντίστοιχη της ειδικής θερμότητας. Αυτό συμβαίνει διότι τα υλικά λανθάνουσας θερμότητας έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης ογκομετρικής ενέργειας από τα αντίστοιχα υλικά αισθητής θερμότητας που και αυτό είναι και το βασικό τους πλεονέκτημα η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μικρό όγκο. Άλλο ένα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι η απορρόφηση και απελευθέρωση της αποθηκευμένης ενέργειας λαμβάνει θέση σε σταθερή θερμοκρασία το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να

κάνει ευκολότερη την εύρεση του υλικού που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί στις διάφορες εφαρμογές έχοντας μια ποικιλία των θερμοκρασιών αυτών.

2.5.3 Αποθήκευση Θερμοχημικής ενέργειας

Αντιθέτως από την αποθήκευση με λανθάνουσα και αισθητή θερμότητα η **αποθήκευση Θερμοχημικής ενέργειας TCM** πρόκειται για ένα πιο περίπλοκο σύστημα από τα άλλα δύο όπου η λειτουργία του βασίζεται **στην χημική αντιστρεπτή αντίδραση**. Στην τεχνολογία αυτή η θερμότητα αποθηκεύεται κατά την διάρκεια της **ενδοθερμικής** αντίδρασης αφού έχει απορροφηθεί και απελευθερώνεται στην διάρκεια της **εξώθερμης**. Όπου η απελευθερωμένη θερμότητα από την εξώθερμη αντίδραση είναι αυτή που την κάνει ικανή να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές.

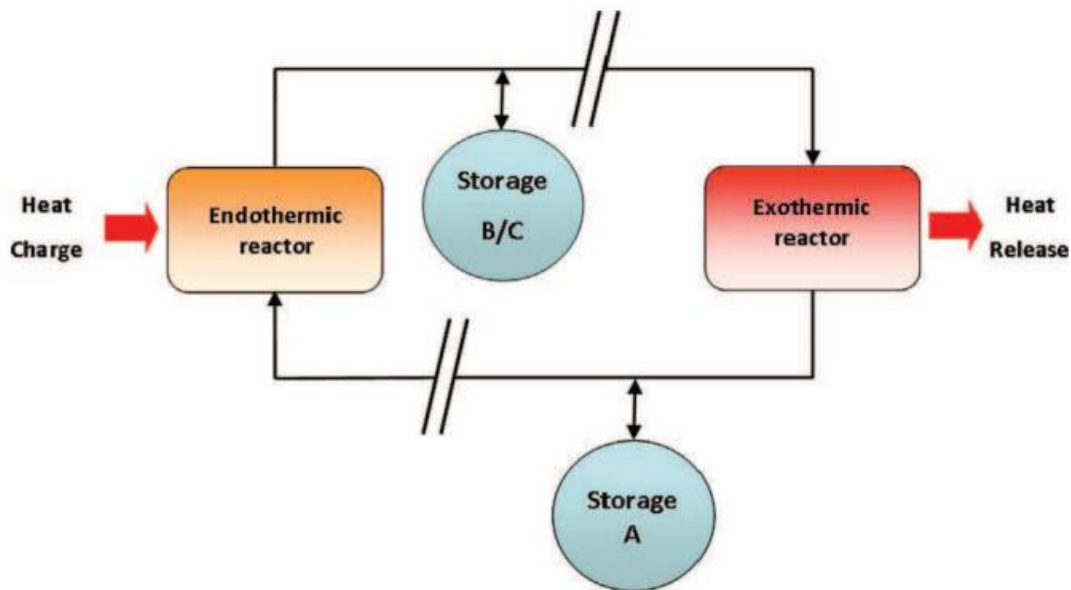


Κατά την διαδικασία της φόρτισης, θερμότητα απορροφάται για την χημική διάσπαση αντίδρασης του υλικού (A) δημιουργώντας δυο νέα προϊόντα τα (B) και (C). Αυτή η αντίδραση είναι ενδοθερμική και η αποθηκευμένη Θερμοχημική θερμότητα συνδέεται με την ενθαλπία αντίδρασης. Στην συνέχεια τα 2 νέα προϊόντα θα πρέπει να αποθηκευτούν σε δυο ξεχωριστά δοχεία όπου θα μπορούν να είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όταν είναι αναγκαία η θερμότητα τότε τα ενδοθερμικά προϊόντα (B) και (C) αναμιγνύονται μαζί ώστε αντιδρώντας να σχηματίσουν το αρχικό υλικό (A) ώστε να απελευθερωθεί η αποθηκευμένη θερμότητα. Αυτή η αντίδραση πρόκειται για εξώθερμη αντίδραση.

Η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια σε ένα θερμοχημικό υλικό μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$Q_{χημ} = n_A \Delta H_r \quad (2.13)$$

Όπου το n_A πρόκειται για των αριθμό Mol του (A) και ΔH_r είναι η αντίδραση της ενδοθερμικής ενθαλπίας [kWh mol^{-1}]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται απλοποιημένα όλοι η θεωρία που περιεγράφηκε παραπάνω. [8]



Σχήμα 2.5 : Απλοποιημένο σχήμα συστήματος TES βασισμένο σε χημικές αντιδράσεις. [10].

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποθήκευσης παρουσιάζει ενδιαφέρον διότι όπως φαίνεται από τον πίνακα (2.1) έχει την ικανότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσών θερμότητας τα οποία επίσης μπορεί και να τα αποθηκεύσει για μια μακράν περίοδο χωρίς το πρόβλημα απώλειας. Όπως για παράδειγμα κρατώντας την θερμότητα το καλοκαίρι ώστε να αξιοποιηθεί των χειμών. Ένα άλλο θετικό σχετικά με τις άλλες 2 τεχνολογίες είναι ότι δεν περιορίζεται στην απόσταση της μετάδοσης της θερμότητας σχετικά με τις άλλες 2 όπου η απόσταση τους είναι μικρή.

Στα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας όπως αναφέρθηκε παραπάνω και αναλυθήκαν στην συνέχεια είναι η πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου τρόπου αποθήκευσης θερμότητας. Η τεχνολογία αυτή έχει και μερικούς πολύ σημαντικούς περιορισμούς με κύριους να είναι αυτή της ανάπτυξης των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, επίσης σημαντικό παράγοντα παίζει και η διαμόρφωση του αντιδραστήρα όπου θα γίνουν οι αντιδράσεις. Ένας από τους σημαντικούς παράγοντες βέβαια είναι αυτός του κόστους που υστερεί σημαντικά με τις άλλες 2 τεχνολογίες οι οποίες είναι αρκετά πιο φθηνές και προσιτές για χρήση.

Η τεχνολογία αποθήκευσης Θερμοχημικής θερμότητας TES βρίσκεται ακόμα σε πολύ αρχικά στάδια ανάπτυξης. Για αυτό και η ερευνά και η εφαρμογή της βασίζονται σε ερευνητικό – εργαστηριακό στάδιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή και ιστορική αναδρομή.

Σαν **υλικά αλλαγής φάσης(Phase Change Materials)** όπως προαναφέρθηκε στο παράρτημα (2.5.2) πρόκειται για τα υλικά στα οποία γίνεται μεταβολή στην κατάσταση της ύλης τους. Πρόκειται για ένα σύστημα λανθάνουσας θερμότητας που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των βασικών αναγκών. Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης χρησιμοποιούταν από παλιά σε πολύ απλές καθημερινές εφαρμογές. Μια από αυτές όπως είχε αναφερθεί στο 1^ο κεφάλαιο ήταν η χρήση του πάγου για την διατήρηση των τροφών σε χαμηλές θερμοκρασίες, το οποίο είναι ένα διαχρονικό φαινόμενο που χρησιμοποιείτε μέχρι και σήμερα. Από παλιά ο πάγος είναι ένα πολύ βασικό ΥΑΦ κυρίως για χώρες που έχουν υψηλές θερμοκρασίες για την αποθήκευση όπως ειπώθηκε παραπάνω για το φαΐ αλλά και για νερού και για την δροσιά σε κάποιους χώρους. Από την αρχαία Ελλάδα και την Ρωμαϊκή αυτοκρατορία έχουν παρατηρηθεί τέτοιου είδους πρακτικές.

Στις πιο βόρειες περιοχές του κόσμου της Αρκτικής ζώνης οι άνθρωποι που ζουν εκεί χρησιμοποιούσαν για χρόνια τα πολύ γνωστά σε όλους ιγκλού. Τα ιγκλού χρησιμοποιούνταν από τους ανθρώπους που κατοικούσαν σε αυτές τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ως κτίσμα στο οποίο επέφερε θερμική σταθεροποίηση. Αυτός ο ευφυής τρόπος ήταν πολύ αποτελεσματικός ώστε να κρατάει τους ανθρώπους αυτούς εκεί ζεστούς. Τα ιγκλού κρατούσαν μια εσωτερική θερμοκρασία της τάξης των 9°C με 15°C, Παραμένοντας σταθερή ακόμα και σε βαρύ αρκτικούς χειμώνες με θερμοκρασίες που αγγίζαν τους -45°C. Κάνοντας έτσι την κατασκευή των ιγκλού την πρώτη εφαρμογή Υλικών αλλαγής φάσης λανθάνουσας θερμότητας για δόμηση οικίας



Σχήμα 3.1: Θερμική σταθεροποίηση ιγκλού. [37].

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, η λανθάνουσα θερμότητα του πάγου και μιας μεγάλης συλλογής υλικών με την ικανότητα της αποθήκευσης της θερμότητας μέσω της αλλαγής φάσης κατάφεραν με επιτυχία να εγκαταστήσουν σε κατοικίες.

Οι πρώτες καταγεγραμμένες χρήσεις των PCM ήταν από την Δρ. Maria Telkes το 1948. Η ερευνήτρια Maria Telkes ήταν από τις πρώτες που προσπάθησε να φέρει αυτή την νέα καινοτομία ώστε να εισάγει τα PCM στα κτήρια. Το 1946 η Δρ. Maria Telkes πρότεινε την κατασκευή ενός δοκιμαστικού σπιτιού. Η κατασκευή του συγκεκριμένου χώρου θα γινόταν στην Μασαχουσέτη των ΗΠΑ και πιο συγκεκριμένα κοντά στην πόλη της Βοστώνης το συγκεκριμένο κτίσμα ονομάστηκε το σπίτι του Ντοβερ (Dover's

House) όπου έγινε με την συνεργασία του αρχιτέκτονα Eleanor Raymond. Το συγκεκριμένο σπίτι αποτελούταν από ένα όροφο και επρόκειτο για ένα κτίσμα 5 δωμάτων συνολικά 135-m² (2 υπνοδωμάτια , σαλόνι , κουζίνα και γκαράζ).

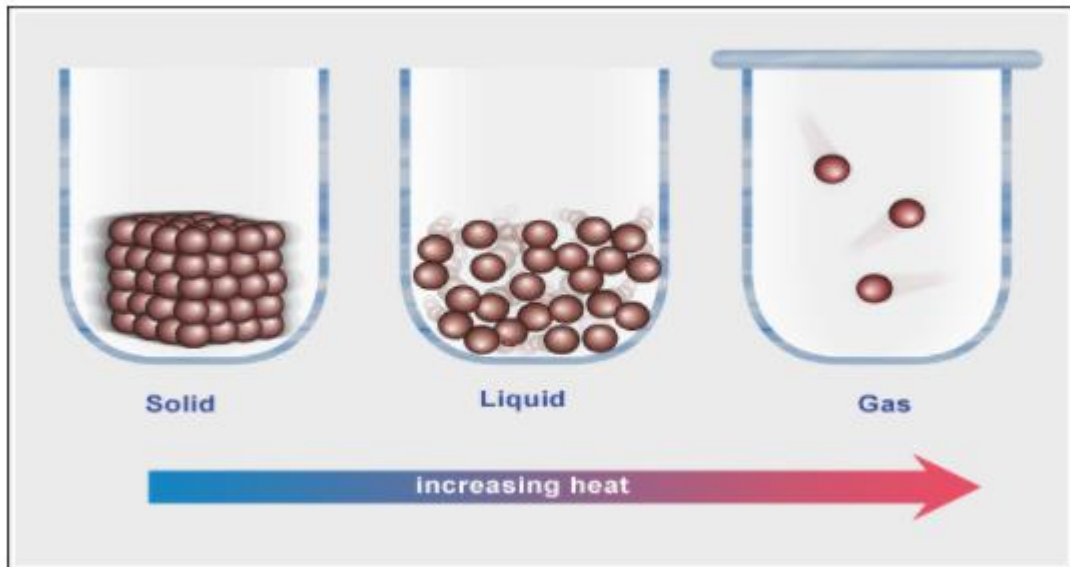
Στα τεχνικά χαρακτηριστικά του σπιτιού υπήρχαν 18 συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 67 m² από όπου και γινόταν η συλλογή της θερμικής ενέργειας. Στην συνέχεια η μεταφορά της θερμικής ενέργειας επιτυγχανόταν μέσω ενός συστήματος αγωγού-ανεμιστήρα από όπου και καταλήγει σε 3 δοχεία αποθήκευσης PCM όπου κάθε δοχείο είχε μια χωρητικότητα 1,9 m³. Το κάθε δοχείο από αυτά περιείχε το άλας του Glauber (ένυδρο θειικό άλας με τύπο Na₂SO₄·10H₂O) όπου και αποτέλεσε το υλικό αλλαγής φάσης για την συγκεκριμένη εφαρμογή με σημείο τήξης τους 32°C. Το συγκεκριμένο άλας είχε μια μάζα συνολικά των 21 τόνων όπου ήταν διαμοιρασμένη σε κάθε δοχείο. Η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας των συγκεκριμένων PCM ήταν 11MJ, όπου ήταν μια ικανοποιητική ποσότητα ώστε να παρέχει στο κτήριο θερμότητα για 12 μέρες.

Η συγκεκριμένη κατασκευή κοστολογήθηκε στα 20.000 δολάρια εκ των οποίων 3000 αφορούσαν για την τεχνολογία των PCM. Στα πρώτα 2 έτη λειτουργίας και διαμονής της κατοικίας από των Δρ. Anthony Nemethy ήταν ιδιαίτερα ικανοποιημένος έχοντας μια θερμική άνεση περίπου στους 21° C. Η μελέτη για 2 χρονιά όδευε με μεγάλη επιτυχία αλλά στο 3^ο χρόνο η απόδοση του συστήματος μειώθηκε αισθητά. Διαπιστώθηκε ότι το PCM διαχωριστικέ άνυδρο άλας (Na₂SO₄) με αποτέλεσμα χαθεί η αποθηκευτή ιδιότητα που προϋπήρχε. Άλλη μια σημαντική παρατήρηση ήταν η διάβρωση των δοχείων με αποτέλεσμα να υπάρχει ακόμα μεγαλύτερες απώλειες. [10]

Από την μελέτη της Δρ. Telkas υπήρξε ερευνητικό ενδιαφέρον και με το χρόνο δημιουργήθηκαν νέες τεχνολογίες με την δεκαετία του 70 και 80 να υπήρξαν ορόσημο για τα υλικά αλλαγής φάσης και γενικότερα για της τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μερικές από αυτές είναι την δεκαετία του 70 η χρήση της παραφίνης σαν κύριο υλικό αλλαγής φάσης και την δεκαετία του 80 η κατασκευή υλικού φάσης με ενθυλακωμένη παραφίνη (κερι) για την μόνωση των κτηρίων. Εκτός από κτηριακές εγκαταστάσεις έγιναν πολλές μελέτες και χρήσεις και σε άλλων ειδών συστήματα χρήση PCM με ένα καινοτόμο να είναι υστέρα από αρκετές έρευνες της NASA να χρησιμοποιήσουν PCM στο Apollo 15 Lunar Rover Vehicle για τον έλεγχο της θερμότητας που απελευθερωνόταν από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και γενικότερα τα ηλεκτρονικά συστήματα του Apollo 15.

3.2 Αλλαγή φάσης

Σαν ορισμός **αλλαγής φάσης** είναι η διαδικασία της μετάβασης ενός θερμοδυναμικού συστήματος από την μια φάση του συστήματος σε μια άλλη. Οι τρεις θεμελιώδεις φάσης της ύλης είναι : Στερεά , υγρά , αέρια. Εξαιρείται συνήθως η φάση του πλάσματος. Κάθε ουσία βρίσκεται σε μια από τις τρεις συγκεκριμένες φάσεις. Η



Σχήμα 3.2 : Μετατροπή κατάστασης της ύλης με αύξηση της θερμότητάς [21].

Θερμοκρασία και η πίεση στην οποία θα αλλάξει εξαρτάται σε πολύ σημαντικό βαθμό από τις διαμοριακές δυνάμεις οι οποίες δρουν στα άτομα και στα μόρια της ουσίας.

Στο παραπάνω σχήμα από τα άτομα που φαίνονται για την κάθε φάση συμπεραίνεται ότι :

Στην **στερεά κατάσταση** : Τα μόρια τα οποία δημιουργούν την στερεά κατάσταση είναι κατανεμημένα σε τακτικά, κατανεμημένα μοτίβα τα οποία είναι σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους το κάθε μόριο και είναι σχεδόν ακίνητα. Μπορεί να υπάρχει μια ελάχιστη δόνηση σε μια περιορισμένη περιοχή. Εάν δεν υπάρχει κάποια αύξηση της θερμοκρασίας ή της πίεσης ο όγκος και η μάζα θα παραμείνει έως έχει.

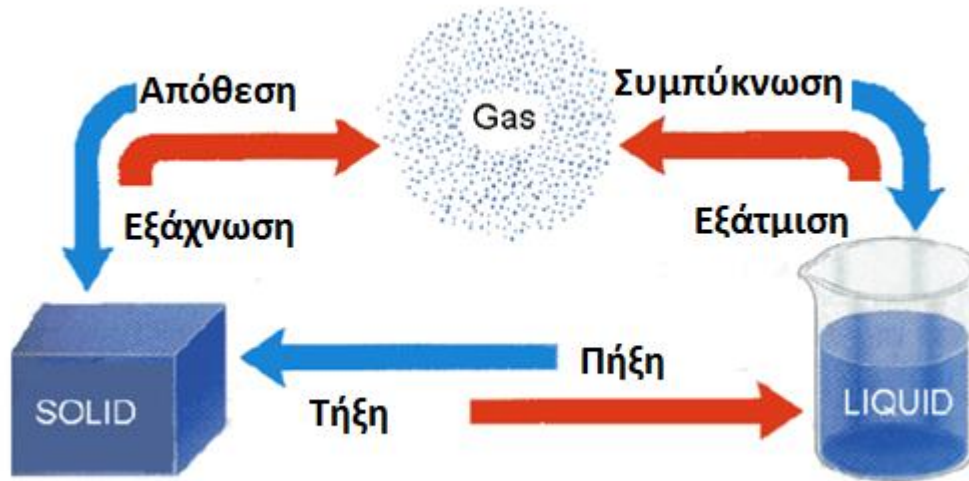
Στην **υγρή κατάσταση**: Τα μόρια της υγρής κατάστασης όπως παρατηρείται και στην εικόνα έχουν μια μεγαλύτερη απόσταση από ότι αυτά της στερεής. Τα μόρια σε αυτήν την κατάσταση έχουν μια πιο ελεύθερη κίνηση και μια ελκτική δύναμη μικρότερη από ότι της στερεής που είναι μεγαλύτερη αλλά αρκετή ώστε να μην αιωρούνται. Και όπως παρατηρείται και από την εικόνα η υγρή κατάσταση παίρνει το σχήμα του αντικειμένου στην οποία είναι τοποθετημένη.

Στην **αέρια κατάσταση** : Τα μόρια της αέριας κατάστασης έχουν μια άτακτη κίνηση προς όλες τις κατευθύνσεις με υψηλές ταχύτητες. Όπως είναι αντιληπτό και από την εικόνα είναι τόσο μακριά μεταξύ τους τα μόρια όπου ουσιαστικά οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ τους είναι ασήμαντες.

Υπάρχουν έξι τρόποι με τους οποίους μια ουσία μπορεί να αλλάξει μεταξύ των τριών φάσεων της στερεής, υγρής και αέριας. Αυτές είναι οι εξής:

- **Τήξη(Melting)**: Η μετάβαση από τη στερεή φάση στην υγρή φάση.
- **Πήξη(Freezing)**: Η μετάβαση από την υγρή φάση στη στερεή φάση.
- **Εξάτμιση(Evaporation)** : Η μετάβαση από την υγρή φάση στην αέρια φάση.

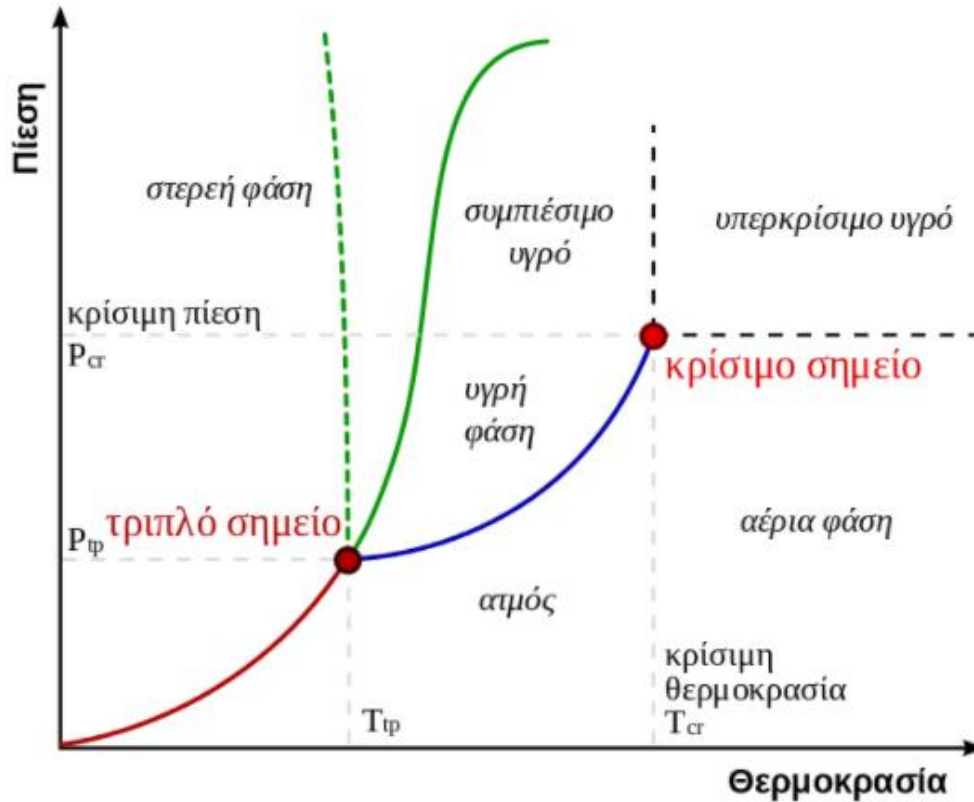
- **Συμπύκνωση(Condensing)** : Η μετάβαση από την αέρια φάση στην υγρή φάση.
- **Εξάχνωση(Sublimation)**: Η μετάβαση από τη στερεή φάση στην αέρια φάση.
- **Απόθεση(Deposition)** : Η μετάβαση από την αέρια φάση στη στερεή φάση.



Σχήμα 3.3 : Μετατροπή νερού σε όλες της μορφές του στις τρεις φάσεις. [39].

3.2.1 Χαρακτηριστικά σημεία αλλαγής φάσης.

Το **διάγραμμα φάσης** πρόκειται για ένα γράφημα που αναπαριστάνει τις φυσικές καταστάσεις μια ουσίας υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Τα πιο απλά διαγράμματα είναι αυτά στις οποίες αποτελούνται από καθαρές ουσίες. Σε ένα τυπικό διάγραμμα φάσης απεικονίζεται στον κάθετο άξονα y η πίεση και στον οριζόντιο x άξονα αντίστοιχα η θερμοκρασία. Καθώς στο διάγραμμα διασχίζοντας τις γραμμές ή τις καμπύλες φάσης, είναι αντιληπτό ότι έτσι επιφέρεται και η αλλαγή φάσης. Επιπρόσθετα, δυο καταστάσεις της ουσίας μπορούν να συνυπάρχουν σε ισορροπία στις γραμμές ή τις καμπύλες.



Σχήμα 3.4 : Ποιοτικό διάγραμμα πίεσης (P) – θερμοκρασίας (T) μιας καθαρής ουσίας. [19].

Στο παρακάτω διάγραμμα είναι ένα παράδειγμα ενός διαγράμματος φάσης μιας καθαρής ουσίας.

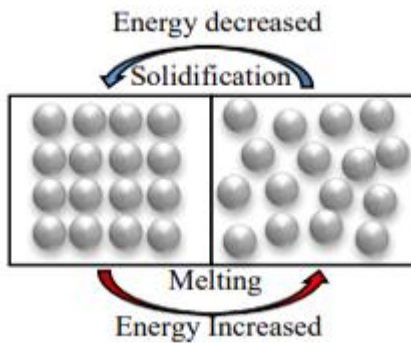
Στο από πάνω διάγραμμα φάσης οι συνεχείς γραμμές εκφράζουν τα όρια της φάσης. Η κόκκινη γραμμή δείχνει τις συνθήκες όπου ένα στερεό μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε αέριο (και αντιστρόφως), η μπλε γραμμή σηματοδοτεί το σημείο βρασμού(ή την μετάβαση από υγρό σε αέριο), η συνεχόμενη πράσινη γραμμή σηματοδοτεί το σημείο της πήξης (ή την μετάβαση από υγρό σε στερεό), οι διακεκομμένες πράσινες γραμμές προορίζονται για την αντικατάσταση της πράσινης γραμμής στην περίπτωση αυτής του διαγράμματος φάσης- νερό. Απεικονίζει την ανώμαλη συμπεριφορά του νερού.

Μερικά σημεία στο διάγραμμά τα οποία δεν έχουν αναλυθεί παραπάνω είναι:

- **Τριπλό σημείο :** Πρόκειται για το σημείο κατά το οποίο συνυπάρχουν οι τρεις κατάστασης της ύλης (στερεά , υγρή , αέρια).
- **Κρίσιμο σημείο :** Πρόκειται για το σημείο στο οποίο δεν διακρίνεται μεταξύ της υγρής και της αέριας κατάστασης. Επίσης πρόκειται και για το σημείο όπου το όριο υγρού-ατμού όπως φαίνεται τελειώνει σε μια κρίσιμη θερμοκρασία T_c και σε μια κρίσιμη πίεση P_c σε ένα τελικό σημείο όπου είναι όπως παρατηρείται με ονομασία κρίσιμο σημείο.

3.3 Αρχή λειτουργίας ΥΑΦ(PCM)

Τα **Υλικά Αλλαγής φάσης ΥΑΦ – Phase Change Materials PCM** όπως έχει αναφερθεί στις παραπάνω παραγράφους πρόκειται για τα υλικά αποθήκευσης ενέργειας που είναι στην μορφή της λανθάνουσας θερμότητας όπου υφίσταται μια μετάβαση στην φάση μεταξύ υγρής και στερεής όπου πραγματοποιείτε ισοθερμικά κατά την **τήξη(Melting)** ή την **στερεοποίηση(Solidification)**. Καθώς το ΥΑΦ απορροφά

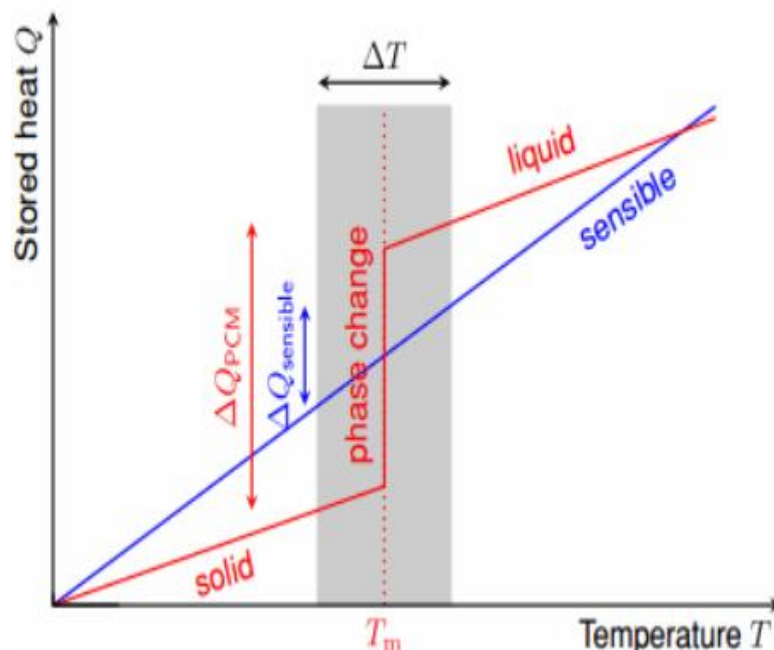


Σχήμα3.5 : Ατομική δέσμη αλλαγής Φάσης από τήξη<-> πήξη. [12].

ενέργεια από το περιβάλλον , το υλικό υφίσταται αλλαγή στην φάση του από στερεό σε υγρό καθώς διατηρώντας σχεδόν σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία της μετάβασης της φάσης του ΥΑΦ. Όταν το ΥΑΦ απορροφά την μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας, οι ατομικοί δεσμοί αρχίζουν να χαλαρώνουν, σηματοδοτώντας την ολοκλήρωση της μετατροπής από στερεό σε υγρό αφού έχει φτάσει στο σημείο τήξης. Αυτή η ποσότητα ενέργειας που απορροφάται κατά την μετάβαση της φάσης είναι γνωστή ως λανθάνουσα θερμότητα.

Η **σταθεροποίηση** , γνωστή σαν **πήξη** ή **αποκρυστάλλωση** είναι η αντιστροφική διαδικασία από ότι προηγούμενη όπου γίνεται η απελευθέρωση της θερμικής ενέργειας, τα μόρια ξανά ενώνονται και το υλικό μεταβαίνει από υγρό σε στερεό σε περίπου σταθερή θερμοκρασία.

Στο σχήμα [3.5] πιο πάνω και στο παρακάτω διάγραμμα [3.6] φαίνεται η θερμική αποθήκευση ενέργειας



Σχήμα 3.6 :Απεικόνιση λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας σε διάγραμμα αποθηκευμένης ενέργειας Q-θερμοκρασίας T (40).

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω η αλλαγή φάσης στην μετατροπή στερεής – υγρής το pcm αποθηκεύει θερμική ενέργεια στην μορφή αισθητής θερμότητας μέσω μιας ενδοθερμικής διαδικασίας όπου γίνεται η διάλυση των χημικών δεσμών των PCM, και εκτονώνει όταν ψυχθεί στο να ξανά αποκτήσει την στερεή κατάσταση του με την επανένωση των χημικών δεσμών.

3.4 Χαρακτηρίστηκα - Ιδιότητες ΥΑΦ (PCM)

Γενικά ένα ΥΑΦ για τη χρήση του σαν σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας TES θα πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις. Για την επιλογή ενός ΥΑΦ εκτός από το κατάλληλο θερμοκρασιακό εύρος που πρέπει να έχει το κάθε υλικό για την εκάστοτε εφαρμογή(πχ ποτέ θα πρέπει να αρχίζει η αλλαγή φάσης, σε τι θερμοκρασίες κλπ.). Το υλικό θα πρέπει να πληροί και τις παρακάτω παραμέτρους ώστε να θεωρηθεί και να επιλεγθεί σαν PCM.

3.4.1 Θερμοδυναμικά – φυσικά χαρακτηρίστηκα

- Θα πρέπει τα ΥΑΦ να διαθέτουν τη θερμοκρασία τήξης στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασίας για την εκάστοτε εφαρμογή όπως αναφέρθηκε και προηγούμενος.
- Θα πρέπει να διαθέτει Μεγάλη τιμή Λανθάνουσας θερμότητας αλλαγής φάσης όπου είναι ουσιαστικά και ο αποθηκευτικός χώρος.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για επιπρόσθετη αποθήκευση LHS TES.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα , για την απαίτηση μικρότερων θερμοκρασιακών διαφόρων για την φόρτιση και αποφόρτιση της αποθήκευσης.
- Υψηλή πυκνότητα, έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση όγκου από το επιλεγμένο υλικό.
- Ελάχιστη μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή της φάσης ώστε να γίνει μείωση του νεκρού όγκου και να δοθεί διευκόλυνση κατά την αντίστοιχη αποθήκευση.
- Μικρή πίεση ατμών, σε θερμοκρασίες λειτουργείας ώστε να γίνει μείωση των περιορισμένων προβλημάτων

3.4.2 Κινητικές ιδιότητες – χαρακτηρίστηκα

Είναι δυο βασικά στις κινητικές ιδιότητες για τα ΥΑΦ και αυτές είναι:

- Υψηλός ρυθμός πυρήνωσης , ώστε να γίνει αποφυγή της υπερψύξης (super-cooling) της υγρής φάσεις.
- Μεγάλος ρυθμός ανάπτυξης κρυστάλλων , ώστε να γίνει επίτευξη βέλτιστης ανάκτησης από το σύστημα αποθήκευσης.

3.4.3 Χημικά χαρακτηρίστηκα

Ένα PCM είναι πολύ βασικό να διαθέτει τις παρακάτω χημικές ιδιότητες :

- Ένας πλήρης αναστρέψιμος κύκλος τήξης-σταθεροποίησης

- Χημική σταθερότητα
- Χωρίς υποβάθμιση ύστερα από μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης-στερεοποίησης
- Να μην υπάρχει διάβρωση
- Μη τοξικό , εύφλεκτο και εκρηκτικό υλικό

3.4.4 Τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες γενικά για την τοποθέτηση και εφαρμογή διαφόρων τύπων τεχνολογιών είναι αυτός του οικονομικού ώστε μια τεχνολογία να είναι ανταγωνιστική εκτός από αποδοτική και στην περίπτωση των PCM επίσης αυτά που θα πρέπει να διαθέτει είναι τα εξής:

- Χαμηλό κόστος , ώστε να είναι όσο το δυνατόν ποιο ανταγωνιστικό με τις υπόλοιπες τεχνολογίες TES
- Τέλος εμπορική διαθεσιμότητα όπου μαζί με το χαμηλό κόστος είναι από τα ποιο σημαντικά οικονομικά κριτήρια.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι αυτός για τα τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε σύστημα όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι:

- Απλότητα εφαρμογής
- Δυνατότητα εφαρμογής
- Αποτελεσματικότητα
- Συμβατότητα
- Βιωσιμότητα
- Αξιοπιστία

3.4.5 Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά

Τα τελευταία χρονιά ένας σημαντικός παράγοντας έχει προστεθεί για τα εκάστοτε συστήματα και αυτός είναι της Περιβαλλοντικής προστασίας. Γενικά έχουν θεσπισθεί μερικοί κανόνες όπου πρέπει κάθε σύστημα – εφαρμογή να εφαρμόζει και αυτοί είναι οι εξής :

- Χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- Να μην ρυπαίνει μέσα στην διάρκεια ζωής του συστήματος
- Να υπάρχει η δυνατότητα ανακύκλωσης

3.5 Ταξινόμηση ΥΑΦ – PCM

Τα υλικά αλλαγής φάσης όπως εξηγήθηκε παραπάνω στην ιστορική τους αναδρομή λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του ήταν πολύ ικανοποιητικό για τις εφαρμογές και χρησιμοποιήθηκε και χρησιμοποιείται για πάρα πολλά χρονιά. Με την πάροδο των χρόνων όπως αναφέρθηκε η τεχνολογία αυτή κέντρισε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για περαιτέρω μελέτες και αναπτύχθηκαν διάφορες Μεθοδολογίες για χρήση τους σε εφαρμογές για ψύξη αλλά και για θέρμανση.

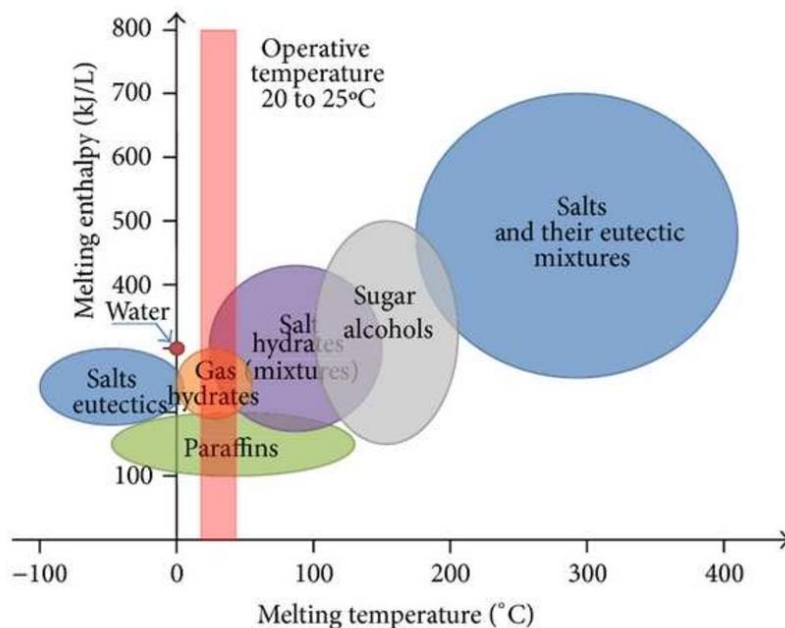
Η κατηγοριοποίηση τους γίνονται με γνώμονα τα ΥΑΦ τα οποία υφίστανται αλλαγή φάσης μεταξύ υγρού και στερεού και ταξινομούνται σε τρεις κυρίες κατηγορίες ανάλογα με τη σύστασή τους

- **Οργανικά**
- **Ανόργανα**
- **Εύτηκτα**

Αυτές οι κατηγορίες στην συνέχεια έχουν υποκατηγορίες η κάθε μια με βάση τα χημικά χαρακτηριστικά τα οποία σχηματίζουν το αντίστοιχο PCM όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (). Ένα άλλο πολύ σημαντικό κριτήριο είναι ο προσδιορισμός του εύρους εργασίας κάθε PCM να πληροί την ζήτηση καθώς και να λαμβάνεται υπόψη παράλληλα η θερμική χωρητικότητα ταυτόχρονα. Στο παρακάτω διάγραμμα () απεικονίζεται η διακύμανση της ενθαλπίας τήξης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας της τήξης για μερικά ορισμένα κοινά PCM.



Σχήμα 3.7 : Ταξινόμηση ΥΑΦ – PCM με γνώμονα την σύστασή τους.



Σχήμα 3.8 : Ενθαλπία τήξης – θερμοκρασία τήξης διάφορων υλικών PCM. [13].

3.5.1 Οργανικά ΥΑΦ – PCM

Η συγκεκριμένη κατηγορία **οργανικών υλικών** έχει δυο κύριες υπό κατηγορίες οι οποίες είναι **παραφίνες** και **μη παραφινούχα**. Αυτό που χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη κατηγορία είναι η χημική σταθερότητα και η λειτουργία τους σε ένα θερμοκρασιακό εύρος κάλυψης 0°C με 200°C ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρείτε μια αστάθεια εξαιτίας των ομοιοπολικών δεσμών. Η μη διαβρωτικότητα τους τα κάνει ικανά για μια μεγάλη χρήση σε αποθηκευτικές δεξαμενές.

3.5.1.1 Παραφίνες

Η **παραφίνη(Paraffin)** πρόκειται για το πιο διαδεδομένο και κοινό σύστημα PCM. Συνήθως είναι ένα μείγμα ευθείας – αλυσίδας n-ακλακνίων με γενικό τύπο **CH₃ – (CH₂)_n – CH**. Από θερμική άποψη, οι παραφίνες είναι γνωστό ότι έχουν υψηλή ικανότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας TES.

Γενικότερα , τα PCM με βάση την παραφίνη είναι γνωστά σαν κηρώδεις στερεές επιφάνειες σε θερμοκρασίες δωματίου. Εμπορικός οι παραφίνες περιέχουν μίγμα ισομέρων και έτσι έχουν ένα εύρος από θερμοκρασίες τήξης.

Οι παραφίνες έχουν συνήθως υψηλή λανθάνουσα θερμική ικανότητα της τάξης περίπου 200kJ kg⁻¹ και 250 kJ kg⁻¹. Σε περίπτωση αύξησης του μήκους της αλυσίδας τότε το εύρος τήξης των κεριών αυξάνεται. Οι κηρώδεις παραφίνες θεωρούνται ασφαλής και αξιόπιστα όσο από την οικονομική πλευρά τους είναι προσιτά και έχουν το πλεονέκτημα ότι τα περισσότερα κεριά τεχνικής ποιότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν PCM σε λανθάνουσας θερμότητας συστήματα. Από χημικής άποψης είναι σταθερά . Εμφανίζουν μέτριες μεταβολές όγκου περίπου με 10%-20% κατά την διάρκεια της τήξης και έχουν χαμηλή πίεση ατμών.

Τα PCM τα οποία τα οποία βασίζονται στις παραφίνες έχουν κατά κανόνα έχουν υψηλή σταθερότητα για μεγάλους κύκλους τήξης κρυστάλλωσής. Στο παρακάτω πίνακα απεικονίζονται

Πίνακας 3.1 : Θερμοφυσικές ιδιότητες των n – Παραφινών και εμπορικών παραφινών ΥΑΦ – PCM. [14].

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
n-Tetradecane(C14)	6	228-230	763	0,14
n-Pentadecane(C15)	10	205	770	0,2
n-Hexadecane(C16)	18	237	770	0,2
n-Heptadecane(C17)	22	213	760	0,145
n-Octadecane(C18)	28	245	865	0,148
n-Nonadecane(C19)	32	222	830	0,22
n-Eicosane(C20)	37	246		
n-Triacontate(C30)	66	251		
Paraffin C16-C18	20-22	152		
Paraffin C13-C24	22-24	189	900	0,21
RT 35 HC	35	240	240	0,2
RT70HC	69-71	260	880	
Paraffin natural Wax 811	82-86	85		0,72(Solid)
Paraffin natural Wax 106	101-108	80		0,65(Solid)

Στους 20°C βαθμούς Ακριβώς πάνω από το σημείο τήξης (υγρή φάση)

Εικόνα 3.1 : ΥΑΦ – PCM , κερι παραφίνης στην αρχική του κατάσταση. [15].



Εκτός από τις ευνοϊκές ιδιότητες , στις παραφίνες γίνεται η εμφάνιση και μερικών ανεπιθύμητων ιδιοτήτων όπως είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα , χαμηλές θερμοκρασίες τήξης και μέτρια – υψηλή αναφλεξιμότητα. Μερικά από τα συγκεκριμένα μειονεκτήματα ειδικά αυτό της θερμικής αγωγιμότητας και της

ευφλεκτότητας μπορούν να εξαλειφθούν ως ένα σημείο χρησιμοποιώντας την χρήση προσθέτων ή χρήση σύνθετων παραφίνης.

3.5.1.2 Λιπαρά οξέα

Μια δεύτερη υποκατηγορία στα οργανικά υλικά είναι αυτή για τα **μη παραφινούχα** όπου σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα **Λιπαρά οξέα(Fatty Acid)**. Τα Λιπαρά οξέα είναι μια σημαντική κατηγορία στα ΥΑΦ έχοντας σαν γενικό χημικό τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$. Οι επιθυμητές ιδιότητες που έχουν είναι η χημική σταθερότητα κατά του κύκλους φόρτισης αποφόρτισης, συντονιζόμενη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και απώλεια φαινομένου υπέρψυξης (supercooling). Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο διαθέτουν είναι οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους οι οποίες είναι οι ανανεώσιμες πηγών (φυτικές, ζωικές).

Αντιθέτως μερικά μειονεκτήματα τα οποία διαθέτουν τα Λιπαρά οξέα είναι ότι έχουν υψηλότερο κόστος από παραφίνες εμπορίου με μια τιμή 2-2.5 φορές μεγαλύτερη και είναι ελαφρώς διαβρωτικά. Τέλος άλλο ένα αρνητικό τους είναι η αντίδραση την οποία κάνουν τα λιπαρά οξέα με τα μέταλλα εξαιτίας του οξέος που διαθέτουν που τα κάνει μη καταλληλά για χρήση μετάλλων αλλά παρουσιάζουν και μια δυσσομία που δεν τα καθιστά ικανά για μερικές εφαρμογές. Στο παρακάτω πίνακα δίνονται κάποια παραδείγματα από λιπαρά οξέα με τις παραμέτρους τους.

Πίνακας 3.2 : : Θερμοφυσικές ιδιότητες από λιπαρά οξέα με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα. [14].

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
Formic acid	8,3	147	1220	-
n-Octanoic acid	16	149	910	0,148
Lauric acid	43,6	184,4	867	
Palmitic acid	61,3	198	989	0,162
stearic acid	66,8	259	965	0,172

Στους 20°C βαθμούς Ακριβώς πάνω από το σημείο τήξης (υγρή φάση)



Εικόνα 3.2 : ΥΑΦ – PCM , Στεαρικό οξύ στην αρχική του κατάσταση. [15].

3.5.1.3 Αλκοόλες σακχάρων

Πρόκειται για άλλη μια κατηγορία οργανικών υλικών στην δεύτερη υποκατηγορία **μη παραφινούχα** με την ονομασία **σάκχαρο- αλκοόλες** με γενικό χημικό τύπο $\text{HOCH}_2[\text{CH}(\text{OH})_n\text{CH}_2\text{OH}]$ και ανάλογα με το προσανατολισμό OH ομάδων διαμορφώνονται και διάφορες μορφές. Τα συγκεκριμένα οργανικά PCM αποτελούν μια νέα σχετικά κατηγορία υλικών και δεν υπάρχουν πολλές διαθέσιμες πληροφορίες σε σύγκριση με τις προηγούμενες κατηγορίες υλικών. Έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα σε ένα εύρος θερμοκρασίας μέχρι 200°C τήξης. Ωστόσο, εμφανίζουν μερική Υπόψυξη σε σύγκριση με αλλά οργανικά PCM. Στον παρακάτω πίνακα είναι κάποια παραδείγματα.

Πίνακας 3.3 : Θερμοφυσικές ιδιότητες από Αλκοόλες σακχάρων με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα. [14].

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
Glycerin	18	199	1250	0,285
Xylitol	95	236	1520	0,4
Erythritol	119	338	1361	0,38

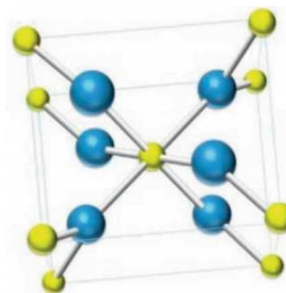
Στους 20°C βαθμούς Ακριβώς πάνω από το σημείο τήξης (υγρή φάση)

3.5.2 Ανάγοντα ΥΑΦ – PCM

Η συγκεκριμένη κατηγορία **ανόργανων υλικών** ταξινομείται σε δυο υποκατηγορίες τα **ένυδρα άλατα** και στις **μεταλλικές ενώσεις**. Αυτό που χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη κατηγορία είναι η μεγάλη χωρητικότητα για αποθήκευση θερμικής ενέργειας TES σχεδόν διπλάσια από ότι αυτή των οργανικών. Σε σχέση με τα οργανικά έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα και ενεργειακή απόδοση.

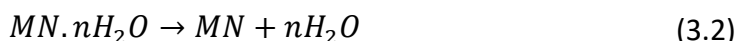
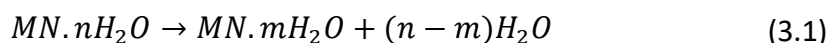
3.5.2.1 Ένυδρα άλατα

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.1 τα **ένυδρα άλατα** είναι από τις πιο παλιές κατηγορίες PCM γενικά και αποτελεί την πιο σημαντική κατηγορία στα ανόργανα υλικά. Τα ένυδρα άλατα συνήθως περιγράφονται σαν ένα μείγμα από ανόργανα άλατα και νερό $AB \times nH_2O$. Τα ένυδρα άλατα δείχνουν μια τρισδιάστατη δομή που είναι αρκετά ανοιχτή ώστε να απορρόφα και να ρυθμίζει μόρια νερού εσωτερικά στο κρυσταλλικό πλέγμα. Στο σχήμα [3.9] απεικονίζεται το κρυσταλλικό πλέγμα χλωριούχου ασβεστίου το οποίο προσελκύει ευκολά μόρια H_2O και σχηματίζει εξαενυδρο χλωριούχο ασβέστιο[15]. Η δόμηση της κρυσταλλικής δομής στα ένυδρα άλατα βασίζεται στις συνδέσεις από τα μόρια του νερού με τα αντίστοιχα ιόντα του άλατος



Σχήμα 3.9 : Κρυσταλλικό πλέγμα χλωριούχου ασβεστίου. [17].

Η αλλαγής φάσης στο άλας ενυδατώνει στην πραγματικότητα την απώλεια άφθονου ή όλου του νερού τους, το οποίο είναι περίπου ισοδύναμο με την θερμοκρασία τήξης σε αλλά υλικά.



Αυτού του είδους τα PCM έχουν το προτέρημα ότι έχουν μικρότερη αλλαγή όγκου περίπου 10%, συγκριτικά με τα οργανικά έχουν μεγαλύτερη αγωγιμότητα και πυκνότητα. Παρόλο τα πλεονεκτήματα που έχουν τα ένυδρα άλατα μερικές αρνητικές ιδιότητες που περιορίζουν την εφαρμογή τους. Το πιο σημαντικό πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζουν είναι η χημική τους αστάθεια, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω τα ένυδρα άλατα αποτελούνται από νερό και άλατα δημιουργώντας έτσι την τάση του διαχωρισμού σε διαφορετικές φάσης. Η φάση διαχωρισμού ουσιαστικά δημιουργείται όταν το απελευθερωμένο νερό από την διαδικασία της αφυδάτωσης δεν είναι επαρκές ώστε να διαλυθεί ολόκληρη η στερεή φάση με αποτέλεσμα επίσης την μείωση της ενέργεια σε κάθε επαναφόρτιση του κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προσθέτουν επιπλέον υλικό όπως το παχυντικό μέσο ένυδρου άλατος. Ένα δεύτερο σημαντικό μειονέκτημα στα ένυδρα άλατα είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης που δεν κρυσταλλώνεται στο καθορισμένο σημείο τήξης. Το συγκεκριμένο φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί με την προώθηση της πυρήνωσης

Πίνακας 3.4 : Θερμοφυσικές ιδιότητες από Ένυδρα άλατα με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα. [14].

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
LiClO ₃ ·3H ₂ O	8	253	1720	
K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O	14	109		
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25,8	126	1600	
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29,8	191	1802	1,08
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	32-34	246-267		
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32,4	248-254	1490	0,544
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	34-35	280	1522	0,514
FeCl ₃ ·6H ₂ O	36-37	200-226	1820	
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48-49	200-220	1600	1,46
CH ₃ COONa·3H ₂ O	58	226-265	1450	1,97

Στους 20°C βαθμούς Ακριβώς πάνω από το σημείο τήξης (υγρή φάση)

Σε ότι έχει να κάνει για την σχέση της συμβατότητας με άλλα υλικά επειδή είναι ανόργανα θα υπάρχει και διάβρωση για τα μέταλλα αλλά εάν βρίσκονται σε μικρές ποσότητες δεν υπάρχει τόσο μεγάλος κίνδυνος.

3.5.2.2 Μέταλλα

Τα **Μέταλλα** και **κράματα μετάλλων** πρόκειται για άλλη μια υποκατηγορία των ανόργανων υλικών. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης υποκατηγορίας είναι ότι διαθέτουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα , χημική σταθερότητα και μηχανικές ιδιότητες.

Πρόκειται για μια κατηγορία που δεν είναι τόσο εμπορική όσο οι προηγούμενες και εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω της χαμηλής λανθάνουσας θερμότητας και εξαιτίας του βάρους. Υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες όμως είναι σημαντικές και κατάλληλες όπως όταν ζητείτε συμπαγής εφαρμογή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για χαμηλές θερμοκρασίες αλλά και για υψηλές θερμοκρασίες απλά στην κάθε περίπτωση το μέταλλο και το κράμα μετάλλου που θα χρησιμοποιηθεί την κάθε περίπτωση θα είναι διαφορετικό ανάλογα τις ιδιότητές του.

Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται μερικά παραδείγματα με τις ιδιότητες τους

Πίνακας 3.5 :: Θερμοφυσικές ιδιότητες από Μέταλλα με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα. [14].

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική Αγωγιμότητα(W/mK)
Mg-Zn(72:28)	342	155	2850	67
Al-Mg-Zn(60:34:6)	450	329	2380	
Al-Cu(82:18)	550	318	3170	

3.5.3 Εύτηκτα

Η συγκεκριμένη κατηγορία των **ευτήκτων υλικών** είναι μια κατηγορία όπου χρησιμοποιείτε για την δημιουργία νέων PCM με βελτιωμένες ιδιότητες, Τα εύτηκτα είναι στην ουσία μια ελάχιστη σύνθεση τήξης κατά ελάχιστων 2 ή περισσότερων συστατικών τα οποία λιώνουν κατά την διάρκεια της κρυστάλλωσης και στην συνέχεια γίνεται ψύξη στο καθένα ώστε να γίνει η δημιουργία ενός επιθυμητού κρυσταλλικού μείγματος. Τα ανόργανα, οργανικά και οι οργανικοί συνδυασμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σύστημα. Η συνδυασμοί που προκύπτουν είναι **οργανικά - οργανικά** , **οργανικά - ανόργανα** , **ανόργανα - ανόργανα**.



Σχήμα 3.10 : Συνδυασμοί από του οποίους μπορούν να προκύψουν εύτηκτα υλικά.

Τα εύτηκτα λόγω των ενώσεων έχουν πολύ καλές ιδιότητες , επίσης η αλλαγή φάσης τους γίνεται την ίδια χρονική στιγμή έτσι γίνεται η δημιουργία κρυστάλλων στην στερεοποίηση τους χωρίς να αντιμετωπίζεται πρόβλημα διαχωρισμού φάσης όπως παρατηρήθηκε σε άλλες περιπτώσεις. Τα εύτηκτα συνήθως έχουν μεγαλύτερο θερμικό κύκλο από ότι τα ένυδρα άλατα. Ανάλογα λοιπόν από τους συνδυασμούς που μπορούμε να πέτυχουμε μέσω των στοιχείων διάφορες θερμοκρασίες αλλαγής φάσης για την χρήση της επιθυμητής εφαρμογής. Ένα σημαντικό μειονέκτημα τους είναι το κόστος τους που είναι αρκετά πιο πάνω από των διαθεσίμων εμπορικών PCM. Δίνονται μερικά παραδείγματα στο παρόντα πίνακα.

Πίνακας 3.6 : Θερμοφυσικές ιδιότητες Εύτηκτα υλικά με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα. [14].

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
CaCl ₂ .6H ₂ O+ MgCl ₂ .6H ₂ O	25	127	1590	
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O+ MgCl ₂ .6H ₂ O	59	144	1630	0,51
Trimethylolethane+ Urea	29,8	218		
CH ₃ COONa.3H ₂ O+ Urea (60:40)	31	226		

Στους 20°C βαθμούς Ακριβώς πάνω από το σημείο τήξης (υγρή φάση)

3.5.4 Σύγκριση κάθε κατηγορίας ΥΑΦ- PCM

Όπως παρατηρήθηκε και στις πιο πάνω παραγράφους κάθε είδος από τις κατηγορίες των PCM (Οργανικά , Ανόργανα , Εύτηκτα) είχε κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούν συνοπτικά και συγκριτικά τα κάθε προτερήματα και μη τις κάθε κατηγορίας στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 3.7 : Σύγκριση οργανικά – ανόργανα – εύτηκτα ΥΑΦ - PCM

Κατηγορία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οργανικά PCM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Διάθεση σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος. 2. Υψηλή λανθάνουσα θερμοκρασία τήξης. 3. Μηδαμινή έως και καθόλου εμφάνιση φαινομένου Supercooling 4. Μη διαχωρισμός φάσεων 5. Χημικός και θερμικός σταθερά 6. Δυνατότητα ανακύκλωσης 7. Μη διαβρωτικότητα και καλή συμβατότητα με διαφορά είδη κατασκευαστικών υλικών 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Στην στερεή κατάσταση έχει την πιο χαμηλή θερμική αγωγιμότητα 2. Χαμηλότερη πυκνότητα υλικού 3. Λιγότερο συμβατό με πλαστικά δοχεία. 4. Εύφλεκτα με αποτέλεσμα αυτανάφλεξης σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες.
Ανόργανα PCM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μεγάλη ογκομετρική χωρητικότητα λανθάνουσας θερμότητας 2. Χαμηλή ατμών στην κατάσταση της τήξης 3. Υψηλή θερμική αγωγιμότητα 4. Δεν είναι εύφλεκτα οπότε δεν υπάρχουν προβλήματα αυτανάφλεξης 5. Χαμηλότερο κόστος και 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εμφάνιση φαινομένου supercooling 2. Χαμηλός βαθμός πυρήνωσης 3. Πρόβλημα διαχωρισμού φάσης κατά την διάρκεια της αφυδάτωσης 4. Μη συμβατότητα με διαφορά δομικά υλικά 5. Διαβρωτικό 6. Ελαφρώς τοξικό στο περιβάλλον

	υψηλότερη εμπορική διαθεσιμότητα	
Εύτηκτα PCM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ευδιάκριτο το σημείο της τήξης 2. Δεν γίνεται εμφάνιση του φαινομένου διαχωρισμού φάσης 3. Υψηλότερη ογκομετρική μεταβολή 4. Υπαρχή η δυνατότητα η ιδιότητες να προσαρμοστούν στις αντίστοιχες συγκεκριμένες απαιτήσεις 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Περιορισμένα δεδομένα σε θερμοφυσικές ιδιότητες σε πολλούς συνδυασμούς 2. Το πολύ μεγάλο εμπορικό κόστος

3.6 Μέθοδος μέτρησης ιδιοτήτων ΥΑΦ-PCM

Σε κάθε μελέτη και διαδικασία σχεδιασμού εφαρμογής των PCM είναι σημαντικό να γίνει ο υπολογισμός των ιδιοτήτων του υλικού του οποίου θα γίνει χρήση. Οι ιδιότητες κατά τις οποίες πρέπει να γίνει εκτίμηση το υλικό είναι η εξής :

- Σημείο τήξης-πήξης(στερεοποίησης)
- Θερμική αγωγιμότητα
- Ειδική θερμοχωρητικότητα κατά σταθερή πίεση (Cp)
- Λανθάνουσα θερμότητα (τήξη – πήξη)
- Ο βαθμός από διαφορά προβλήματα όπως (Supercooling, διαχωρισμό φάσεων, διάβρωση)
- Στέρεες και υγρές πυκνότητες (γίνονται σημαντικές κατά την εκτέλεση των αντίστοιχων υπολογισμών)

Γενικά για να υπάρξει μια αληθή και αντιπροσωπευτική εικόνα από τις μετρήσεις θα πρέπει ο υπολογισμός των ιδιοτήτων να γίνεται σε έναν κύκλο φόρτισης αλλά και σε περισσότερους με την πάροδο του χρόνου ώστε να υπάρξει και ένα μακροπρόθεσμο πλαίσιο για την εξέταση των ιδιοτήτων των υλικών. Μερικές από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους μέτρησης για σημείο τήξης λανθάνουσας θερμότητας αλλά και της θερμοχωρητικότητας τους είναι :

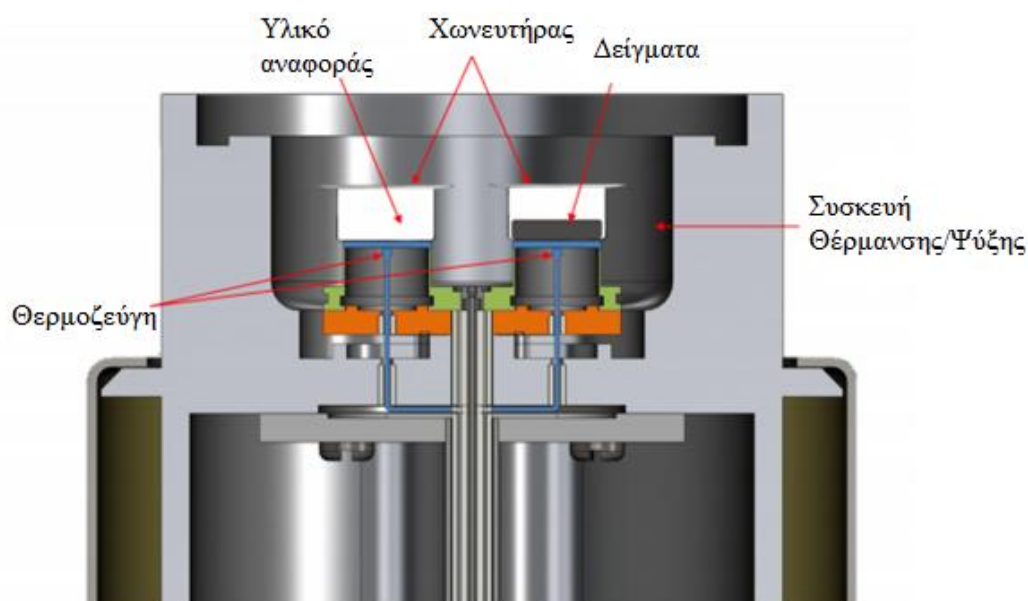
- Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)
- Μέθοδος T-History
- Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)
- Διαφορικό Θερμιδόμετρο

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει παρουσίαση από παραδοσιακές και πιο εφαρμοζόμενες διαδικασίες μέτρησης και κάποιες πιο οικονομικές συγκριτικά μεθόδων μέτρησης για την απόκτηση θερμικών ιδιοτήτων. Από την επιστημονική κοινότητα έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές μέτρησης για την ανάγκη του να αναγνωρίζονται τα κυρία θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των υλικών τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπως κτηριακές που περιλαμβάνουν

αποθήκευση θερμικής ενέργειας από λανθάνουσας θερμότητας να αναφέρονται παρακάτω.

3.6.1 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)

Η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης DSC (Differential Scanning Calorimetry) πρόκειται για μια από τις πιο διαδομένες – συνηθισμένες τεχνικές μέτρησης και προσδιορισμού του χρόνου , θερμοκρασίας και θερμότητας απορρόφησης – απελευθέρωσης κατά την μετάβαση τη φάσης σε ανόργανες ενώσεις ,οργανικές , πολυμερή και γενικότατα στα ΥΑΦ. Η συγκεκριμένη τεχνική επιτρέπει στους επιστήμονες να μετρήσουν την θερμοκρασία μετάβασης , ενθαλπία και ειδική θερμοχωρητικότητα των PCM. Στην συγκεκριμένη πειραματική τεχνική, η διαφορά μεταξύ της συνεισφοράς της ενέργειας σε μια ουσία και σε ένα υλικό αναφοράς μετριέται ενώ και τα δυο υπόκεινται σε θερμοκρασίες προγράμματος με έναν ελεγχόμενο ρυθμό. Πρακτικά στις συγκεκριμένες μετρήσεις χρησιμοποιούνται μικρά δείγματα από PCM που μελετήθηκαν και στην συνέχεια το προαναφερθέν υλικό αναφοράς υφίσταται θέρμανση/ψύξη με ελεγχόμενο ρυθμό ώστε η θερμοκρασία να διατηρείται σταθερή και η θερμοκρασία του δείγματος να αυξάνει/μειώνεται γραμμικά , ενώ παρακολουθείτε η θερμοκρασία ροής μεταξύ τους όπως παρατηρείται στο παρακάτω σχήμα. Κατά το οποίο περιγράφονται οι κυρίες συσκευές με τα παραγόμενα σήματα και τις χαρακτηριστικές καμπύλες τους.



Σχήμα 3.11 : Σχηματική απεικόνιση της διάταξης DSC. [18].

Ο προσδιορισμός της θερμοχωρητικότητας με DSC μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους: Απευθείας, γίνοντας χρήση ενός διαμορφωμένου DSC (MDSC) και η μέθοδος ASTM E1269. Το προηγούμενο απαιτεί βασική σάρωση, μέτρηση σε ένα πρότυπο δείγμα και μέτρηση του υλικού δείγματος το οποίο θα αξιολογηθεί. Καθώς έχει γίνει λήψη των πραγματοποιημένων μετρήσεων τότε η ειδική θερμότητα μπορεί να βρεθεί από:

$$c_p(s) = c_p(st) \frac{D_s W_s}{D_{st} W_{st}} \quad (3.3)$$

Όπου στην από πάνω εξίσωσή με $C_p(st)$ συμβολίζεται η ειδική θερμοχωρητικότητα σταθερά του προτύπου δείγματος, D_s πρόκειται για την διαφορά αναμεσα της ροής θερμότητας του δείγματος και του κενού χωνευτηριού που βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία ενώ αντίστοιχα το D_{st} πρόκειται για την διαφορά θερμότητας για το πρότυπο και τέλος W_s και W_{st} αντίστοιχα πρόκειται για τις μάζες του πρότυπου και του δείγματος. Οι θερμοδομετρίες μπορούν να πραγματοποιηθούν σε δυναμική λειτουργία ή σε κατάσταση step-mode δίχως την παρατήρηση σημαντικής διαφοράς των δυο αυτών τροπών.

Από την άλλη στην χρήση ενυδατωμένων αλάτων συνίσταται η χρήση αργής δυναμικής λειτουργίας. ASTM D4419-20 σταθερά για κεριά πετρελαίου με ταχύτητες 10-20 K/min, ωστόσο για τα ανόργανα και οργανικά ΥΑΦ συνίσταται αυτή της αργής δυναμικής μεθόδου με σταθερά ταχύτητα στα 5K/min.[17]

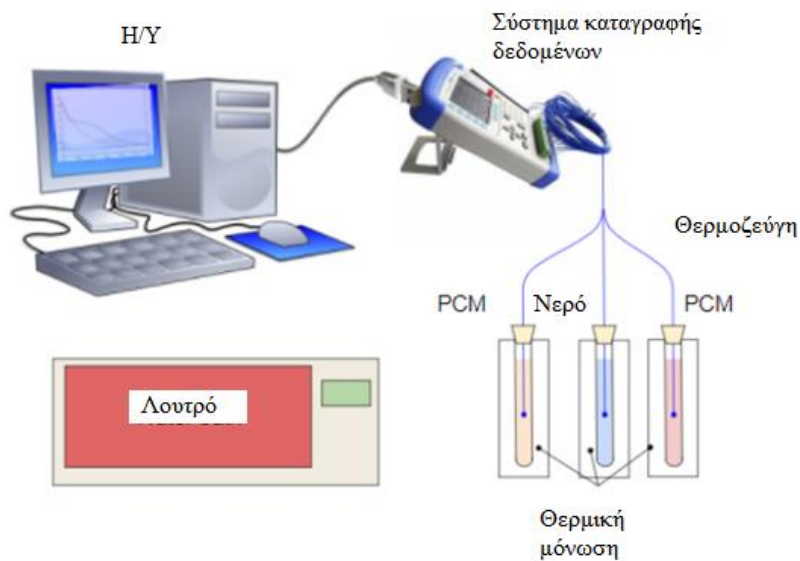
3.6.2 Μέθοδος T-history

Αρχικά η μέθοδος T-history είναι μια μέθοδος η οποία καθιερώθηκε κατά το 1999 από τον Yinping. Πρόκειται για μέθοδο κατά την οποία βασίζεται στην διερεύνηση της ικανότητας θερμότητας (Lumped Heat Capacity Method). Από αυτή την μέθοδο μπορεί να γίνει καθορισμός των:

- Σημείο τήξης
- Supercooling
- Θερμική αγωγιμότητα
- Ειδική θερμότητα

Η T-history μέθοδος πρακτικά αποτελείται από τουλάχιστον δυο δοχεία τα οποία θερμαίνονται, κάθε δοχείο αντιστοιχεί σε ένα αναφοράς(συνήθως νερό) και σε ένα δείγμα υλικού που είναι γεμάτο με PCM για την μέτρηση των ιδιοτήτων του. Η θέρμανση πραγματοποιείται ταυτόχρονα σε ένα λουτρό μεγαλύτερης θερμοκρασίας από ότι το σημείο τήξης από το δείγμα του υλικού. Η καταγραφή της εσωτερικής θερμοκρασίας καταγράφεται από θερμοζεύγη τα οποία είναι τοποθετημένα στο κέντρο του δείγματος και είναι συνδεδεμένα με ένα σύστημα απόκτησης- καταγραφής δεδομένων. Για να θεωρηθεί έγκυρη η μέθοδος της χωρητικότητας θα πρέπει ($Bi < 0,1$) και θα πρέπει αντίστοιχα και η σχέση μεταξύ του μήκους και της διαμέτρου του δοχείου να είναι αρκετά μεγάλη.

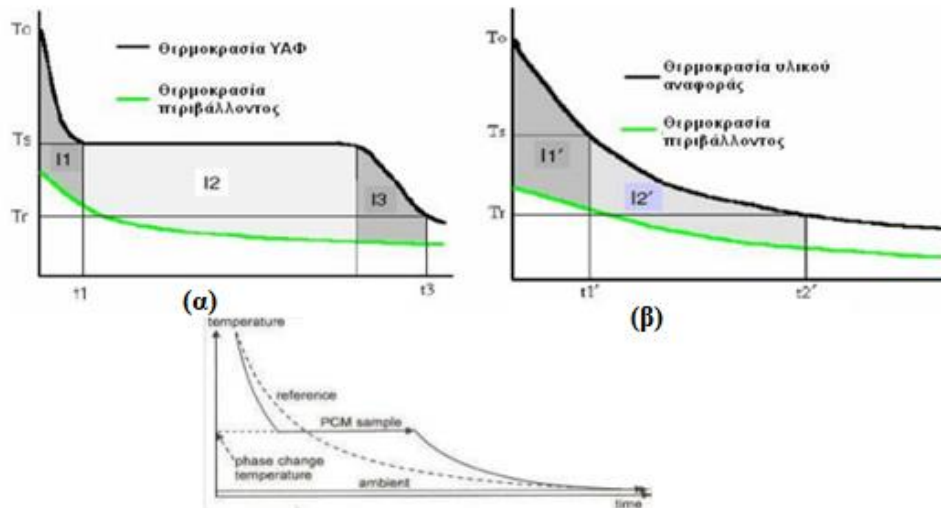
Το πειραματικό σχήμα το οποίο εξηγήθηκε είναι όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.12 : Σχηματική διάταξη πειραματικής εγκατάστασης T-history. [18].

Στην διάταξη της παραπάνω εικόνας παρατηρείται ότι υπάρχουν δυο δοκιμαστικοί σωλήνες που χρησιμοποιούνται για επαναληψιμότητα και το νερό στο κέντρο είναι το δοχείο αναφοράς. Όταν πραγματοποιηθεί σταθεροποίηση της εσωτερικής θερμοκρασίας τότε το δείγμα και ο δοκιμαστικός σωλήνας αφαιρούνται και αφήνονται να κρυώσουν σε ένα δοχείο με διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) σε ένα περιβάλλον κατά το οποίο η θερμοκρασία είναι ελεγχόμενη.

Στη διαδικασία του πειράματος προκύπτουν δυο καμπύλες οι οποίες εμφανίζουν τις μεταβολές της θερμοκρασίας λαμβάνοντας υπόψη τα δοχεία αναφοράς και PCM. Για τις θερμικές ιδιότητες της θερμότητας τήξης αλλά και της θερμοχωρητικότητας μπορούν να βρεθούν μελετώντας τα πειραματικά δεδομένα και τις καμπύλες των παρακάτω σχημάτων.



Σχήμα 3.13 : (α) Καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου για ΥΑΦ – PCM και αέρα περιβάλλοντος, (β) Καμπύλη θερμοκρασία – χρόνου για αποσταγμένο νερό και αέρα περιβάλλοντος [19].

Από τις συγκεκριμένες καμπύλες είναι εφικτό μέσω μιας μαθηματικής περιγραφής της μετάδοσης θερμότητας γνώση του υλικού αναφοράς να προσδιοριστεί η θερμοχωρητικότητα του PCM.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η σχετική απλότητα του πειράματος και κατά συνέπεια το χαμηλό κόστος που το περιβάλλει, δεδομένου ότι πρόκειται για μια μη εμπορική συσκευή είναι δυνατόν να διαμορφωθεί ανάλογη διάταξη σύμφωνα με το συγκεκριμένο εύρος της εφαρμογής η οποία θέλει να αξιολογηθεί. Στα μειονεκτήματα συγκρατήθηκε ότι η δοκιμή ενός αντιπροσωπευτικού μεγέθους μειώνει την δυσκολία της κρυστάλλωσης η οποία συσχετίζεται με μικρά δείγματα όπως και στην περίπτωση DSC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ -ΥΑΦ-PCM:

4.1 Συσκευασία ΥΑΦ – PCM

Η χρήση των PCM απαιτεί για την επιτυχή και ομαλή λειτουργία του κάποιο είδος προστατευτικής συσκευασίας (κέλυφος) , εκτός αν χρησιμοποιείτε άμεσα όπως πχ το σκυρόδεμα. Αλλά στις περισσότερες των περιπτώσεων όπως αναφέρθηκε χρειάζεται κάποια προστασία η οποία θα επιτρέπει την ενσωμάτωση του PCM χωρίς να επηρεάζεται από το περιβάλλον αλλά και ταυτοχρόνως να προστατεύει το περιβάλλον χωρίς να υπάρχει κάποια επαφή μεταξύ τους από φαινόμενα όπως η διαβρωτικότητα του PCM. Με την επίτευξη της συσκευασίας του υλικού ουσιαστικά επιτυγχάνεται η διευκόλυνση κατά την μετάδοση της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας.

Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες συσκευασίας πρόκειται αυτή της **ενθυλάκωσης (encapsulation)** . Η ενθυλάκωση είναι επίσης χρήσιμη στον έλεγχο των αλλαγών του όγκου που προκύπτουν στο PCM. Γενικά η συσκευασία με ενθυλάκωση έχει πολλές θετικές συνιστώσες στην τοποθέτηση τους όπως.

- Η μείωση της αλληλεπίδρασης με το εξωτερικό περιβάλλον όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω για την προστασία του PCM αλλά και αντίστοιχα του περιβάλλοντος.
- Η αύξηση της περιοχής της μετάδοσης θερμότητας
- Μηχανική σταθερότητα σε διάφορες κατηγορίες κατασκευών.
- Θερμική σταθερότητα
- Ευελιξία χρυσής
- Συγκράτηση υγρής φάσης κατά την μετατροπή της φάσης.

Ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της ενθυλάκωσης δηλαδή του κελύφους που θα χρησιμοποιηθεί είναι το υλικό το οποίο θα το περιβάλλει να είναι συμβατό με το αντιστοιχώ PCM. Επιπροσθέτως θα πρέπει να επιλεχθεί και το κατάλληλο πάχος του κελύφους ώστε να επιτευχθεί η κάλυψη της απαραίτητης στεγανότητας διάχυσης (diffusion tightness) .Αναλόγως με το μέγεθος της ενθυλάκωσης υπάρχουν δυο κυρίες κατηγορίες που απαρτίζονται είναι αυτές τις **μακροενθυλάκωση – μακροκάψουλες (Macroencapsulation)** και **μικροενθυλάκωση – μικροκάψουλες (Microencapsulation)** . Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα γίνει μια πιο λεπτομερής ανάλυση για τις δυο κατηγορίες της ενθυλακώσεις.

Σημαντική αναφορά είναι ότι η ενθυλάκωση δεν είναι η μοναδική κατηγορία συσκευασίας, υπάρχουν και άλλες στο εμπόριο και μερικά παραδείγματα από αυτές είναι η αποθήκευση όγκου σε δεξαμενές συναλλαγής θερμότητάς , Κλίνες , Εμβάπτιση PCM σε πορώδες υλικό.

4.1.1 Μακροενθυλάκωση – Μακροκάψουλες

Μακροενθυλάκωση – Μακροκάψουλες (Macroencapsulation) πρόκειται για μια μέθοδο συσκευασίας (συγκράτησης του PCM) όπως θήκες , σφαίρες , σωλήνες , πάνελ ή και άλλα δοχεία γενικώς. Τα συγκεκριμένα δοχεία έχουν συνήθως μια διάμετρο μεγαλύτερη από 1 cm και έχουν χωρητικότητα από μερικά ml μέχρι και σε ορισμένες περιπτώσεις σε lt. Υπάρχει η ευχέρεια επίσης να τοποθετούνται σε οικοδομικά προϊόντα για κτηριακές εγκαταστάσεις όπου και παρέχουν έλεγχο του όγκου και προστασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Το κυριότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η δυνατότητα εφαρμογής της σε υγρά όσο και σε αέρια ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας και έτσι είναι ευκολότερος ο χειρισμός τους όσο και η μεταφορά τους. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία αντιμετωπίζει ένα σημαντικό πρόβλημα στην μεταφορά θερμότητας εξαιτίας της μεγάλης αναλογίας της επιφάνειας ως προς των όγκο όπου έτσι δημιουργείτε και το πρόβλημα της μη σωστής ανταπόκρισης σε μερικές περιπτώσεις αλλά και προβλήματα διαρροής.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις πιο γνωστές εμπορικές κατασκευασμένες Μακροκάψουλες:



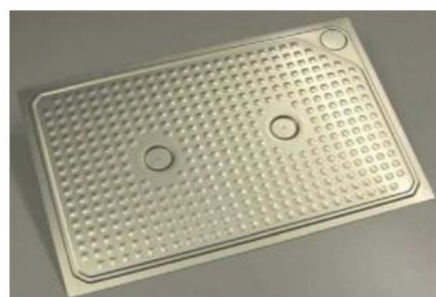
Εικόνα 4.1 : TEAP σφαιρική κάψουλα πολυολεφίνης. [20]



Εικόνα 4.2 : Μεταλλικοί σωλήνες. [20]



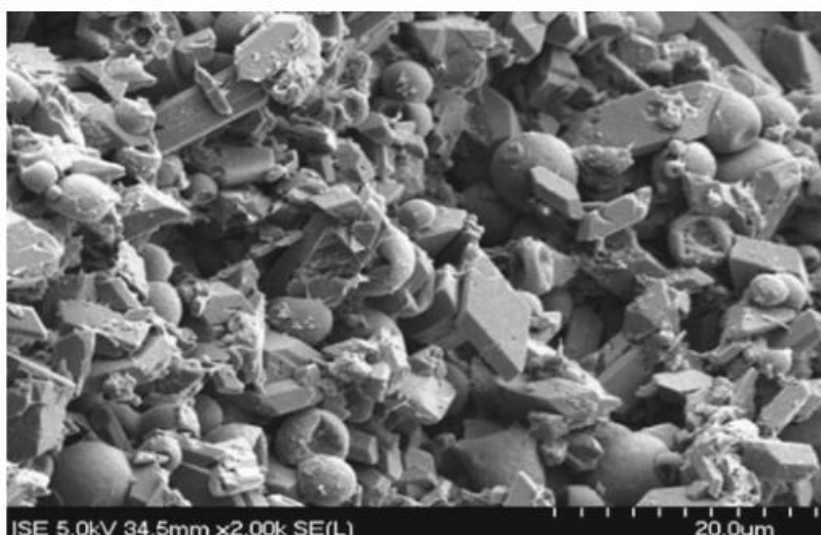
Εικόνα 4.3 : Ανοξείδωτα σφαιρίδια κάψουλας. [20]



Εικόνα 4.4 : CSM πάνελ που αποτελείται από PCM. [21]

4.1.2 Μικροενθυλάκωση – Μικροκάψουλες

Μια δεύτερη σημαντική κατηγορία ενθυλάκωσης είναι η **μικροενθυλάκωση – μικροκάψουλες (Microencapsulation)**. Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία μικροσκοπικά σωματίδια επικαλύπτονται από ένα κέλυφος για να σχηματιστούν έτσι μικρές κάψουλες (μικρότερη από 1mm) με πολλές χρήσιμες ιδιότητες. Τα σωματίδια μπορούν να έχουν διάφορες μορφές όπως στερεή , υγρή , αέρια , ενώ το κέλυφος που τα επικαλύπτει μπορεί να είναι από πολυμερές ή κάποιο ανόργανο υλικό. Ο κύριος σκοπός της τοποθέτησης του κελύφους είναι να αντιμετωπίζει ζητήματα διαρροής αλλά και ζητήματα όπως ογκομετρικές αλλαγές κατά την διάρκεια των κύκλων τήξης – σταθεροποίησης του PCM , αντιδραστικότητα με το περιβάλλον και τέλος αντοχή και συμβατότητα με δόκιμα υλικά. Επίσης ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ενίσχυση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 4.5 : Μικροκάψουλες PCM σε γύψο (σε μικροσκόπιο). Το PCM Μικροκάψουλας με μέση διάμετρο 8 μm διασκορπίζεται ομοιογενές μεταξύ των κρυστάλλων γύψου. [21].



Εικόνα 4.6 : Δομή μικροκαψουλών. (α) απεικόνιση σχήματος δομής , (β) απεικόνιση σε μικροσκόπιο το κέλυφος κάψουλας και βασικού υλικού [41].

Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και των δυο κατηγοριών ενθυλάκωσης micro-macro encapsulation :

Πίνακας 4.1 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα *Micro-Macro Encapsulation*. [22].

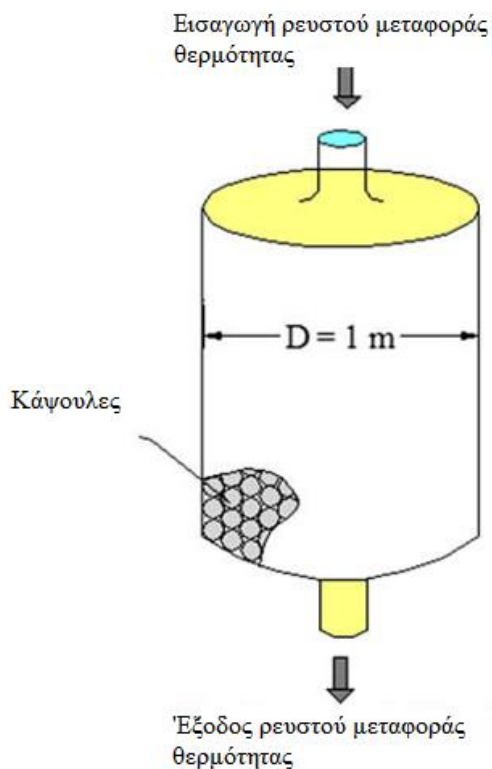
Κατηγορία	Μικροενθυλάκωση	Μακροενθυλάκωση
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Κάλος έλεγχος όγκου αλλαγής κατά την αλλαγή φάσης PCM. • Εύκολη ενσωμάτωση σε συμβατικά δόκιμα υλικά. • Σημαντική βελτίωση θερμικής αξιοπιστίας. • Βελτίωση της αγωγίμης μεταφοράς θερμότητας • Αποτροπή διαρροής PCM • Βελτιωμένη χημική σταθερότητα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Βελτιωμένο υλικό συμβατό με τα περιβάλλοντα.. • Οι επιδράσεις εξωτερικής αλλαγής όγκου μετριάζονται. • Βελτίωση χειρισμού PCM κατά την παραγωγή. •
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του υλικού. • Οδηγεί σε φαινόμενο Super-cooling. • Η συναγωγή διακόπτεται επηρεάζοντας τα φαινόμενα στερεοποίησης • Υψηλά κόστη. 	

4.1.3 ΥΑΦ – PCM σε κλίνες

Οι κλίνες πρόκειται για συστήματα τα οποία αποτελούνται στο εσωτερικό τους από Μακροκάψουλες , κάποια αλλά στοιχεία που αποτελείται η κλίνη είναι

- Δοχείο,
- Ρευστό (για την μεταφορά της θερμότητας).

Πρόκειται για μια τεχνολογία η οποία εξασφαλίζει την μεταφορά θερμότητας για την τήξη αλλά και την ψύξη του μέσου αποθήκευσης που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί ένα αρκετά οικονομικό και ταυτοχρόνως αποδοτικό σύστημα για την μεταφορά της θερμότητας.



Σχήμα 4.1 : Διάταξη κλίνης [23].

Η λειτουργία της κλίνης όπως δείχνει και στο σχήμα βασίζεται σε ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας το οποίο εισέρχεται από πάνω και υστέρτα το ρευστό μεταφέρει θερμότητα μέσα στην κλίνη από όπου ρέει διάμεσου των κενών της. Στην συνέχεια το PCM που είναι τοποθετημένο εσωτερικά στις κάψουλες λιώνει από την θερμότητα που έχει απορροφήσει από το ρευστό το οποίο ρέει στην κλίνη. Η συγκεκριμένη διαδικασία αφορούσε την φόρτιση, όσο για την αποφόρτιση αυτό που συμβαίνει είναι ότι κυκλοφορεί ψυχρό ρευστό για την αποφόρτιση του συστήματος και όταν υπάρχει ανάγκη ξανά για το σύστημα υπάρχει ένας εναλλάκτης θερμότητας για αύξηση της θερμοκρασίας και κάπως έτσι γίνονται ανάλογα την ζήτηση της φόρτισης – αποφόρτισης του συστήματος.

4.2 Εφαρμογές ΥΑΦ – PCM σε ηλιακά συστήματα

Για οικιακή χρήση, η ηλιακή ενέργεια είναι ευρέως η πιο δημοφιλής πηγή ανανεώσιμης ενέργειας για ηλεκτρική παραγωγή και θέρμανση. Όσο αφορά για την ηλιακή θερμική ενέργεια είναι ένα πεδίο το οποίο χρησιμοποιείτε αρκετά πλέον στο οικιακό τομέα. Για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας ανά πασα στιγμή μέσω της τεχνολογίας της αποθήκευσης ενέργειας αναπτύχθηκε η τεχνολογία των PCM σε ηλιακά συστήματα.

4.2.1 ΥΑΦ – PCM στα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού

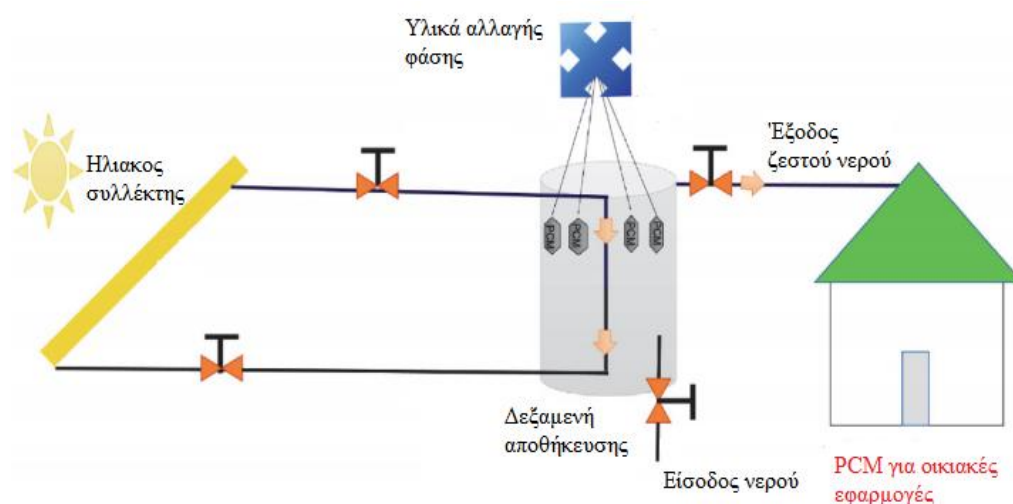
Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάτε από τους ηλιακούς συλλέκτες κατά την διάρκεια της ημέρας, όπου η συγκεκριμένη ηλιακή ενέργεια που εισπράττουν να αξιοποιηθεί υστέρτα σε διαφορές εφαρμογές. Ένας από τους τομείς που έχει αξιοποιηθεί πλήρως πρόκειται για τα συστήματα αποθήκευσης θέρμανσης νερού για την έξοδο ζεστού νερού για να γίνει χρήση του σε κατοικίες, επαγγελματικούς χώρους αλλά και σε διαφορές βιομηχανίες. Για την έξοδο της θερμοκρασίας ζεστού νερού εξαρτάται στους διάφορους τύπους συλλεκτών. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον των καταναλωτών διότι έχει τα εξής εμπορικά χαρακτηριστικά:

- Σχετικά οικονομικό και εμπορικά προσιτό
- Εύκολη συντήρηση
- Απλή κατασκευή

Για την διασφάλιση του ζεστού νερού καθόλη την διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιούνται τα PCM ως το μέσο της θερμικής αποθήκευσης. Ένα τυπικό σύστημα ηλιακού θερμοσίφωνα αποτελείται συνήθως από δυο μονάδες οι οποίες λειτουργούν ταυτόχρονα. Πρόκειται για τα εξής δυο συστήματα:

- Θερμοσίφωνα
- Μια μονάδα αποθήκευσης θερμότητας που περιέχει PCM

Για την λειτουργία τους αυτό που συμβαίνει είναι κατά την ημέρα η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στους ηλιακούς συλλέκτες του θερμοσίφωνα ο οποίος λειτουργεί καθόλη την διάρκεια της ημέρας για την θέρμανση του νερού ενώ ταυτόχρονα , τα PCM απορροφούν θερμική ενέργεια όπου και την αποθηκεύουν μέσα στο υλικό. Εφόσον περάσει η μέρα και δεν υπάρχουν πλέον οι ηλιακές ακτινοβολίες τότε κατά την διάρκεια της νύχτας η θερμική ενέργεια αντικαθίσταται από τα PCM όπου απελευθερώνουν την θερμική ενέργεια που είχαν συλλέξει κατά την διάρκεια της ημέρας για την θέρμανση του νερού ώστε να καλυφτούν οι εκάστοτε ενεργειακές ανάγκες. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια διάταξη με τα δύο προαναφερθέντα συστήματα.



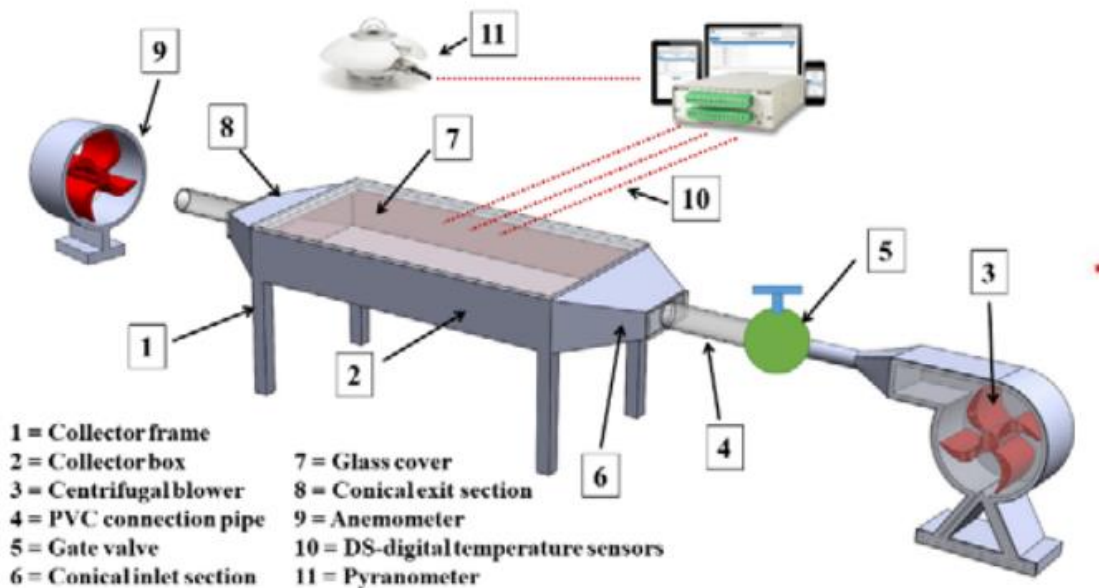
Σχήμα 4.2 : Ηλιακός συλλέκτης με μονάδα αποθήκευσης θερμότητας που περιέχει PCM για την παροχή ζεστή νερού [25].

4.2.2 ΥΑΦ – PCM σε ηλιακά σύστημα θέρμανσης αέρα

Για εφαρμογές ηλιακού θερμοσίφωνα αέρα SAH (Solar Air Heater) οι οποίες χρησιμοποιούν PCM σαν το σύστημα θερμικής αποθήκευσης , σφαιρική ενθυλάκωση του PCM σχηματίζοντας ένα συσκευασμένο σύστημα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποδείχτηκε ότι έχουν τα εξής πλεονέκτημα

- Υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης
- Απλότητα διαμόρφωσης
- Μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο

Για τα SAH ο Α.Ε Kabel κ.α [27] πραγματοποίησε μια πειραματική διερεύνηση από επίπεδη και κυματοειδή πλάκας ηλιακού θερμοσίφωνα αέρα τα οποία ήταν ενσωματωμένα με PCM ως συστήματα αποθήκευσης θερμότητας υλικού όπως δείχνει και το σχήμα 23



Σχήμα 4.3 : Σχηματική απεικόνιση της solar air heater [26]

Στην συγκεκριμένη πειραματική διερεύνηση ο ηλιακός θερμοσίφωνας αέρα είχε σαν PCM κεριά παραφίνης που σχεδιάστηκε και δοκιμάστηκε με τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες της πόλης Τάντα που βρίσκεται στην Αίγυπτο. Στα αποτελέσματα του πειράματος έγινε επιβεβαίωση ότι κατά την χρήση του PCM στην έξοδο της κυματοειδούς πλάκας του ηλιακού θερμοσίφωνα η θερμοκρασία ήταν υψηλότερη από την αντίστοιχη του περιβάλλοντος κατά 1,5 – 7,2 °C κατά 3,5 ωρών μετά το ηλιοβασίλεμα σε σύγκριση με 1 – 5,5 °C κατά 2,5 ωρών μετά την δύση του ηλίου για επίπεδη πλακά ηλιακού θερμοσίφωνα με ρυθμό ροής μάζας που ήταν 0,062kg/s. Η απόδοση χρησιμοποιώντας κυματοειδής πλακά PCM ήταν υψηλότερη κατά 12% από την αντίστοιχη χωρίς την χρήση PCM ενώ από τις αντίστοιχες τιμές όταν η επίπεδη πλακά χρησιμοποιήθηκε με PCM και 21,3% παραπάνω σε σχέση με τις αντίστοιχες επίπεδες πλάκες.

4.3 Εφαρμογές σε ΥΑΦ – PCM Οργανικούς Κύκλους Rankie ORC (Organic Rankie Cycle)

Ο οργανικός κύκλος rankie ORC πρόκειται για μια πολύ αποτελεσματική τεχνολογία για την μετατροπή χαμηλής – μεσαίας θερμότητας ενέργειας σε ισχύ. Η αρχή

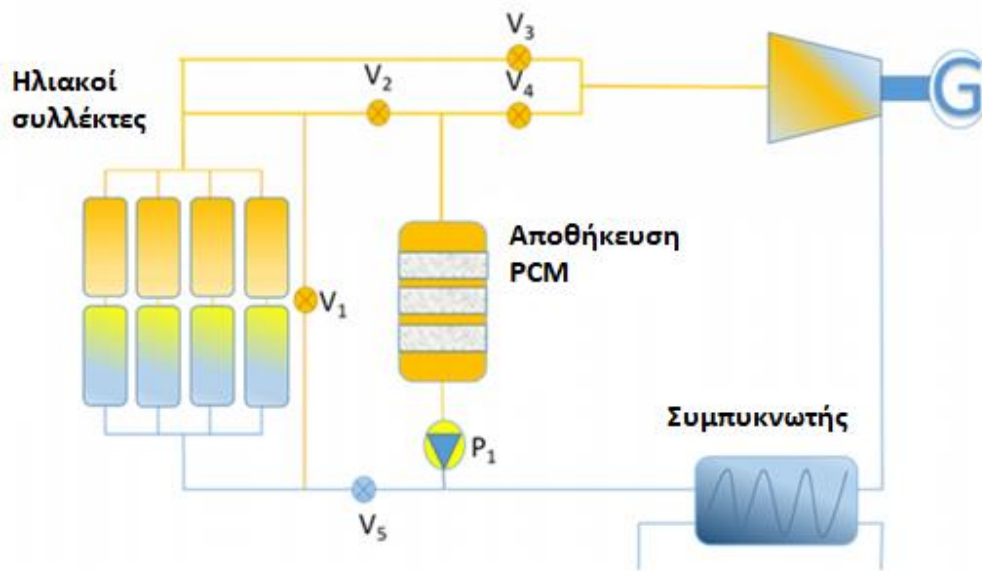
λειτουργίας του κύκλου ατμού αλλά και οργανικών κύκλων Rankie αντίστοιχα φαίνεται να είναι παρόμοιοι. Ωστόσο είναι αντιληπτό μόνο και από την ονομασία ότι ένας οργανικός κύκλος rankie χρησιμοποιεί οργανικό υγρό σε αντίθεση με το νερό που χρησιμοποιείτε για τον ατμό και αυτό τυχαίνει να έχει μεγαλύτερη μάζα και χαμηλότερο σημείο βρασμού αντίστοιχα για την μεταφορά της θερμότητας σε όλο τον κύκλο.

Γενικά για την τροφοδοσία ενέργειας ενός κύκλου Rankie μερικές πιθανές πηγές ενέργειας είναι βιομάζας , γεωθερμική ενέργεια . Μια σχετικά νέα ενέργεια που χρησιμοποιείτε για την τροφοδοσία είναι αυτή της ηλιακής θερμικής ενέργειας όπου πρόκειται για μια ταχέως αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας για τους κύκλους Rankie. Τα τελευταία χρονιά έχει αποκτήσει ένα πολύ μεγάλο ενδιαφέρον αντίστοιχα και σύζευξη ηλιακών συστημάτων ORC με τα υλικά αλλαγής φάσης.

Σε μια ερευνά ο Jahan Zeb Alvi κ.α [28] έγινε μια ανάλυση σε ένα σύστημα DVG (Direct Vapor Generation) ηλιακό σύστημα το οποίο ήταν σε σύζευξη με ένα σύστημα PCM. Το σύστημα αποτελούταν από:

- Μια διάταξη συλλέκτη
- Μια δεξαμενή αποθήκευσης με βάση PCM
- Μια τουρμπίνα
- Έναν υδρόψυκτο συμπυκνωτή
- Τέλος μια αντλία οργανικού υγρού

Χρησιμοποιήθηκαν τα ωριαία δεδομένα καιρού από το Καρατσι του Πακιστάν για εβδομάδες, μήνες και ετήσια βάση για την πραγματοποίηση της δυναμικής προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που είχαν τα PCM ήταν στην βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος κατά την διάρκεια των τρόπων φόρτισης αλλά και εκφόρτωσης. Για ετήσια απόδοση του οργανικού κύκλου Rankie με τα PCM ήταν 12,16% , 9,38% και 26,8 kW αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρείται και η αντίστοιχη διάταξη



Σχήμα 4.4 : Διάταξη της αλλαγής φάσης με βάση την αποθήκευση PCM. [28]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Μαθηματική μοντελοποίηση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση στις μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ροή των ρευστών και την κίνηση τους και αναλύονται βάση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Με βάση τις συγκεκριμένες διαφορικές εξισώσεις υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης μοντελοποίηση σε διαφορά προγράμματα , όπου βάση αυτών των προγραμμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί ερευνά σε διαφορά πεδία των ρευστών.

Για την τήξη στα υλικά αλλαγής φάσης οι εξισώσεις ενέργειας και Navier – Stokes χρησιμοποιούνται για την επίλυση σε μεταβατικά υδροδυναμικά και θερμικά πεδία. Οπότε οι εξισώσεις μπορούν να γραφτούν με τους παρακάτω τρόπους.

5.1 Εξίσωση συνέχειας

Η συγκεκριμένη εξίσωση ισχύει για όλα τα ρευστά (ιδανικά & πραγματικά) , πρόκειται για την εξίσωση διατήρησης της μάζας και η μαθηματική της μορφή είναι η εξής :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} \quad (5.1)$$

Όπου \vec{u} είναι το διάνυσμα ταχύτητας (Velocity vector) και ρ πρόκειται για την πυκνότητα του ρευστού (Density of the fluid).

5.2 Εξίσωση ορμής

Η ακόλουθη εξίσωση πρόκειται για μια αναπαράσταση της εξίσωσης ορμής (Momentum equation) στην διανυσματική της μορφή.

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\vec{\nabla} \rho + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \beta (T - T_m) \vec{g} \quad (5.2)$$

Όπου p πρόκειται για την στατική πίεση , T πρόκειται για την θερμοκρασία , T_m πρόκειται αντίστοιχα για την μέση θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης , β πρόκειται για τον συντελεστή της ογκομετρικής θερμικής διαστολής , g είναι αντίστοιχα το διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας και τέλος η ιξώδες τάση έντασης (Viscous stress tensor) ενός νευτώνειου ρευστού δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (5.3)$$

Όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες.

5.3 Εξίσωση ενέργειας

Η την ενθαλπία του υλικού υπολογίζεται ως το άθροισμα της αισθητής ενθαλπίας, h , και της λανθάνουσας θερμότητας, ΔH :

$$H = h + \Delta H \quad (5.4)$$

Όπου

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dt \quad (5.5)$$

Όπου h_{ref} είναι η ενθαλπία αναφοράς, T_{ref} αντίστοιχα είναι η θερμοκρασία αναφοράς και σε c_p πρόκειται για την ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση.

Το υγρό κλάσμα (Liquid fraction), α , μπορεί να οριστεί ως:

$$a = 0 \text{ εάν: } T > T_s, \alpha = 1 \text{ εάν: } T < T_j \text{ και } \alpha = \frac{T - T_s}{T_j - T_s} \quad (5.6)$$

εάν: $T_s < T < T_j$

Η περιεκτικότητα σε λανθάνουσα θερμότητα μπορεί να γραφτεί με τους όρους της λανθάνουσας θερμότητας του υλικού, L_F

$$\Delta H = a L_F \quad (5.7)$$

Όσο για την περιεκτικότητα της λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0 (για στερεό) και αντίστοιχα L_F (για υγρό).

Για το πρόβλημα της τήξης, η εξίσωση ενέργειας γράφεται ως εξής :

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (5.8)$$

Όπου λ πρόκειται για την θερμική αγωγή του ρευστού, και H είναι η ενθαλπία (εξίσωση 9).

Η τεχνική ενθαλπία – πορώδους αντιμετωπίζει την Mushy region (κατά κύριο λόγο στερεοποιημένη περιοχή) σαν ένα πορώδες μέσο. Σε πλήρες στερεοποιημένες περιοχές το πορώδες είναι ίσο με το μηδέν, το οποίο εξαφανίζει τις ταχύτητες στην συγκεκριμένη περιοχή. Ο όρος πηγής S είναι ένας όρος ο οποίος βοηθάει στην προσέγγιση της ορμής εσωτερικά της ζώνης τήξης με την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$s = \frac{(1 - a)^2}{(a^3 + \epsilon)} A_{mush} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (5.9)$$

Όπου α είναι το υγρό κλάσμα όγκου, ϵ είναι ένας μικρός αριθμός για την αποφυγή – αποτροπή της διαίρεσης με το 0 και A_{mush} είναι η σταθερή ζώνη και τέλος \vec{u}_p πρόκειται η ταχύτητα του στερεού εξαιτίας της έλξης στερεοποιημένου υλικού από το τομέα (γνωστή και σαν ταχύτητα έλξης)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

Προσομοίωση Υπολογιστής Ρευστοδυναμικής -CFD

6.1 Εισαγωγή

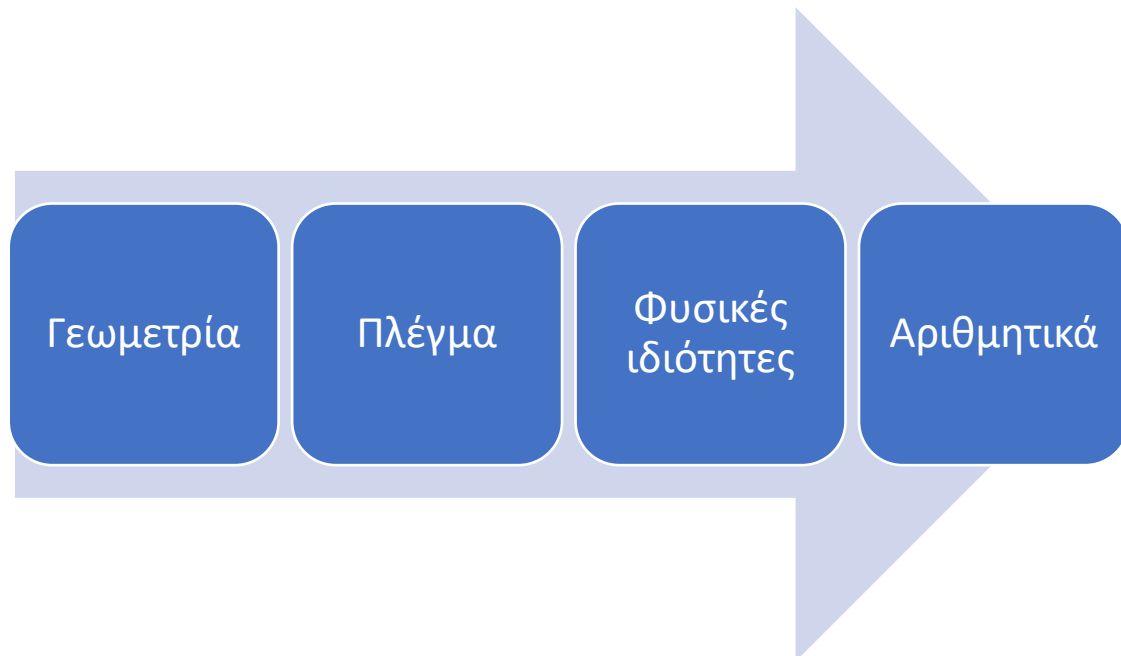
Η υπολογιστική ρευστοδυναμική CFD (Computation Fluid Dynamics) πρόκειται για μια μαθηματική μοντελοποίηση ενός φυσικού φαινομένου στην οποία περιλαμβάνεται η ροή ρευστού και η αριθμητική επίλυση χρησιμοποιώντας την υπολογιστική ικανότητα. Τα λογισμικά CFD προσφέρουν την δυνατότητα στην προσομοίωση σε διαφορά φαινόμενα όπως , Ροή αέριων και υγρών , μεταφορά θερμότητας και μάζας , κινούμενα σώματα , χημικά και φυσικά φαινόμενα είναι μερικά παραδείγματα όπου εφαρμόζονται μέσω της μοντελοποίηση υπολογιστή. Το λογισμικό CFD χρησιμοποιείται ευρέως για ερευνά διότι το λογισμικό έχει την δυνατότητα δημιουργίας ενός εικονικού προτύπου που βάσει την ανάλυσης του μπορεί να ερευνηθεί αν μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικό περιβάλλον , από το λογισμικό θα παρέχονται δεδομένα και εικόνες όπου θα δίνουν την απόδοση του προτύπου. Στους υπολογιστές πραγματοποιούνται μεγάλος αριθμός υπολογισμών που είναι απαραίτητοι για την προσομοίωση. Ουσιαστικά το CFD επιλύει έναν μεγάλο αριθμό εξισώσεων ενός ροϊκού πεδίου στον όγκο ελέγχου όπου του έχουν εφαρμοστεί στα σύνορα του αντίστοιχα και οι κατάλληλες οριακές και αρχικές συνθήκες για την επίτευξη της μοντελοποίησης.

6.2 Μέθοδος επίλυσης CFD με πεπερασμένα στοιχεία

Για την επίτευξη επίλυσης κώδικα CFD η μέθοδος η οποία θεωρείται η πιο αξιόπιστη είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEA (Finite Element Method) όπου έχουν την ευχέρεια να χρησιμοποιούνται τόσο σε απλά όσο και σε σύνθετα προβλήματα.

Ένα λογισμικό το οποίο λειτουργεί με το κώδικα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι το ANSYS. Το ANSYS έχει ένα μεγάλο φάσμα δυνατοτήτων που καλύπτει όπως σε κατασκευαστικό (structure) κομμάτι , Ηλεκτρομαγνητικά (Electromagnetic) κτλπ. Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του είναι αυτό της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής το οποίο προσφέρεται από ANSYS FLUENT που παρέχει ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων σε μοντελοποίηση CFD. Στην χρήση του το λογισμικού ANSYS όπως αναφέρθηκε παραπάνω βασίζεται στην μέθοδο FEA δηλαδή στο υπό ανάλυση μοντέλο – σχέδιο το οποίο μπορεί να είναι διδιάστατο 2D ή τρισδιάστατο 3D διαιρείτε σε στοιχεία τα οποία έχουν έναν συγκεκριμένο αριθμό κόμβων. Στα συγκεκριμένα στοιχεία γίνεται και επίλυση της κάθε εξισώσεις.

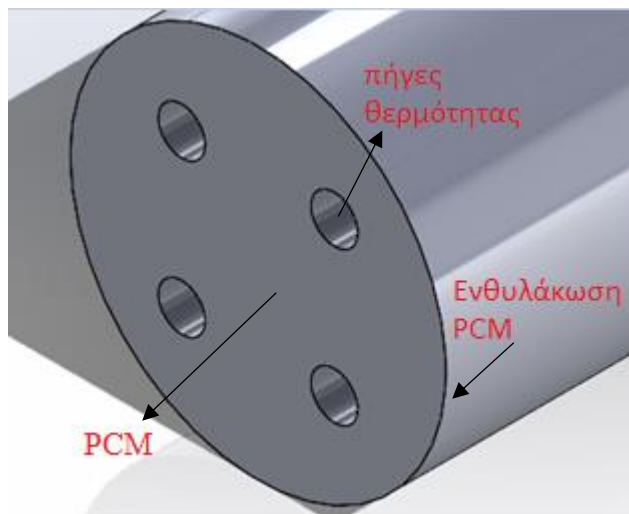
Στην επίλυση προβλημάτων CFD Μέσω ANSYS όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χρησιμοποιείτε το ANSYS FLUENT. Αρχικό στάδιο για την επίλυση του προβλήματος αποτελεί η προεργασία – προετοιμασία (pre – processing) δηλαδή τα δεδομένα τα οποία θα χρειαστεί ο επιλυτής (solver) ώστε να μπορέσει να φτάσει στην επίλυση του προβλήματος. Η διαδικασία με την σειρά για το Pre processing είναι η παρακάτω.



Σχήμα 6.1 : Βήματα Pre – Procesing

Κατά το pre – processing το αρχικό βήμα είναι όπως φαίνεται και στο σχήμα ο ορισμός της γεωμετρίας του προβλήματος που θα αναλυθεί. Υστέρα το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος όπου μπορεί να είναι ομοιόμορφο ή ανομοιορφο. Αφού έχει πραγματοποιηθεί και η δημιουργία του πλέγματος τότε ορίζονται η φυσικές ιδιότητες ώστε να γίνει η φυσική μοντελοποίηση του CFD όπου σαν φυσικές ιδιότητες ορίζονται οι οριακές και αρχικές συνθήκες , εδώ περιλαμβάνεται των προσδιορισμό της συμπεριφοράς του ρευστού στο πρόβλημα. Τέλος επιλέγεται η κατάλληλη αριθμητική μέθοδος για την επίλυση των εξισώσεων.

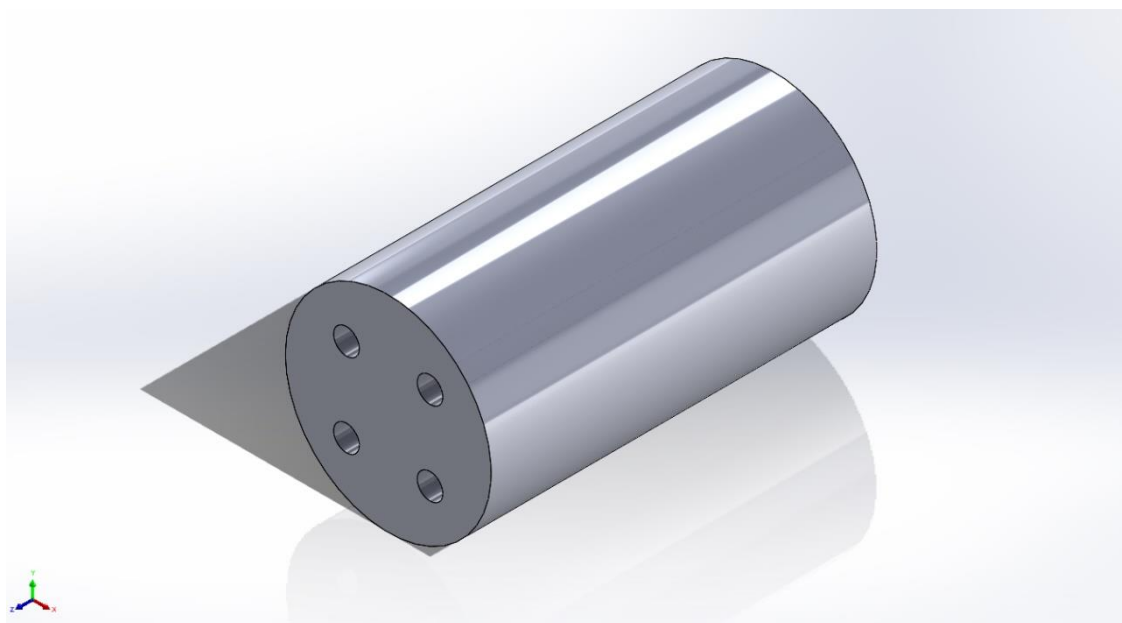
6.3 Περιγραφή προβλήματος



Σχήμα 6.2 : Κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης θερμότητας με τα επιμέρους στοιχεία του.

με το στερεό μεταλλικό PCM όπου είναι το γάλλιο. Ο κύλινδρος είναι θερμικά μονωμένος από το περιβάλλον και επιβάλλεται μη ολίσθηση στο στερεό επιφανειακό τοίχωμα, δηλαδή η ταχύτητα του PCM στο τοίχωμα είναι 0. Ο κύλινδρος όπως παρατηρείται και στο παρακάτω σχήμα βρίσκεται σε οριζόντια διάταξη ώστε να επιτευχθεί καλύτερη φυσική συναγωγή μέσω της άνωσης και της βαρυτικής δύναμης.

Στο συγκεκριμένο φυσικό πρόβλημα στο οποίο πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση για την τήξη σε έναν κύλινδρο με μεταλλικό στερεό υλικό από PCM ο οποίος απαρτίζονταν από τέσσερις πηγές θερμότητας κυλινδρικής διατομής. Η παροχή θερμότητας γίνεται από τις συγκεκριμένες τέσσερις πηγές θερμότητας με την κυλινδρική διατομή όπου θα διαχέονται αρχικά από θερμοκρασία 40° C και σε άλλη μοντελοποίηση από 45° C ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά της τήξης



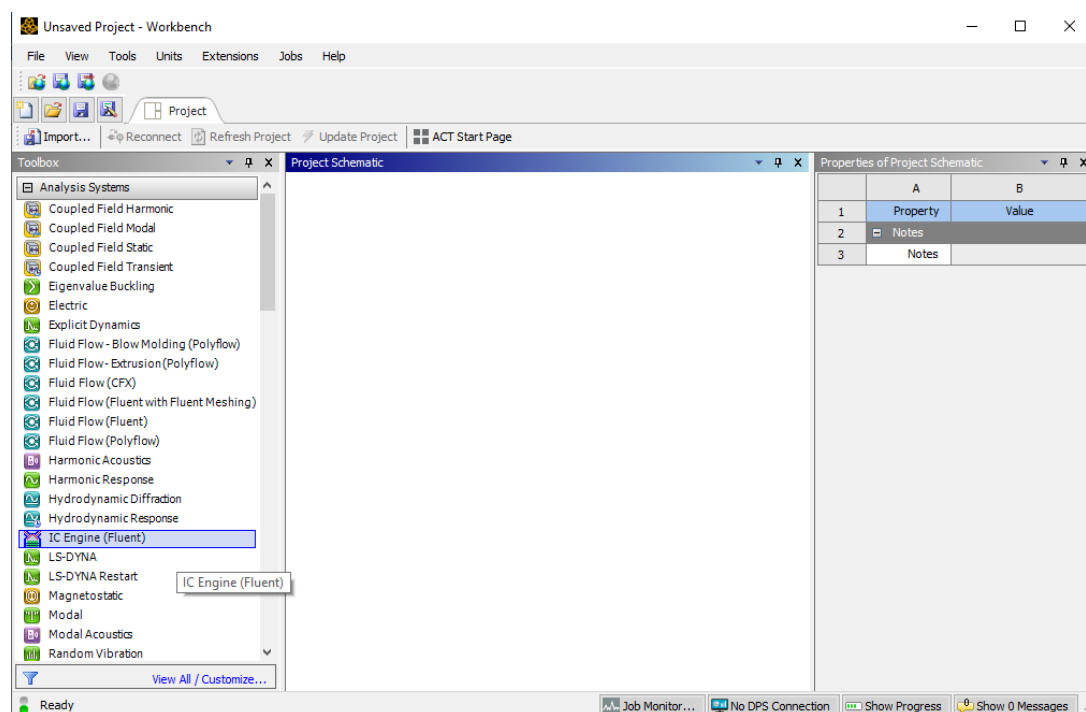
Σχήμα 6.3 : Ολόκληρη σχηματική απεικόνιση δοχείου αποθήκευσης θερμότητας

6.3.1 Αριθμητική επίλυση

Στην μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό ANSYS όπως και εξηγήθηκε στην ενότητα 6.2 ότι παρέχει με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και μέσω του ANSYS FLUENT την δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων CFD. Το συγκεκριμένο λογισμικό μέσω του FLUENT παρέχει την δυνατότητα της επιλογής της τήξης – σταθεροποίησης για την επίτευξη της μοντελοποίηση που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε στο PCM. Για την συγκεκριμένη διαδικασία όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 6.2 αρχικά θα πρέπει να γίνει η προ επεξεργασία (pre processing) και υστέρτα να πραγματοποιηθεί το Post processing ουσιαστικά η επίλυση του προβλήματος με τα δεδομένα που έχουμε εισχωρήσει όπως θα αναλυθούν παρακάτω στο κεφάλαιο.

6.4 Προ επεξεργασία / Pre – processing

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω και βάση του σχήματος 25 σε αυτό το σημείο πραγματοποιείτε η προ επεξεργασία για την επίλυση του προβλήματος. Το λογισμικό ANSYS ώστε να αρχίσει η επεξεργασία των δεδομένων θα πρέπει αρχικά να ανοιχτεί το << παράθυρο >> WORKBENCH όπου διαθέτει το λογισμικό ANSYS Fluent για την εκκίνηση της επίλυσης του CFD προβλήματος. Όπως φαίνεται στην εικόνα στο αριστερό μέρος βρίσκεται το Toolbox όπου βρίσκονται τα προγράμματα της μοντελοποίηση γενικά στο ANSYS και από κάτω το πράσινο σήμα (φωτάκι) READY δείχνει ότι είναι έτοιμο το πρόγραμμα για την έναρξη της μοντελοποίησης.

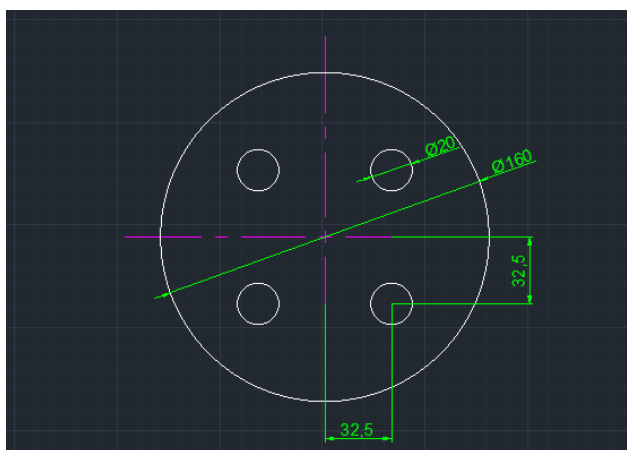


Εικόνα 6.1 : Παράθυρο εκκίνησης εμπορικού λογισμικού (WORKBENCH).

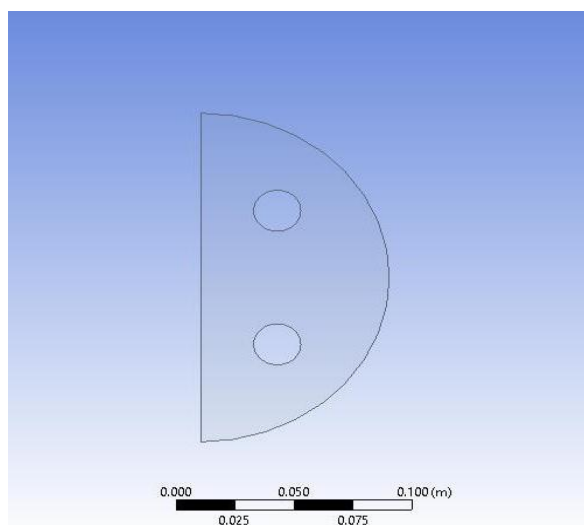
6.4.1 Γεωμετρία

Το αρχικό βήμα της προ επεξεργασίας (pre – processing) αφού έχει ανοιχτεί το παράθυρο του WORKBENCH του ANSYS είναι να σχεδιαστεί το μοντέλο το οποίο θέλουμε να ερευνήσουμε – μελετήσουμε ώστε να πραγματοποιηθεί σε αυτό η αντίστοιχη μοντελοποίηση. Ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει μέσω του ANSYS ή να γίνει εισαγωγή από αρχείο CAD πχ AutoCAD , Solidworks , Inventor.

Η σχεδίαση του μοντέλου για αυτήν την εργασία έγινε σε ένα αρχείο CAD σε δισδιάστατη μορφή 2D με γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στην εικόνα (), έναν ομόκεντρο κύκλο με διάμετρο 160 mm και τους 4 κύκλους που απεικονίζουν τις πηγές θερμότητας με διάμετρο 20mm ο καθένας.



Σχήμα 6.4 : Σχεδιασμός γεωμετρικών διαστάσεων.



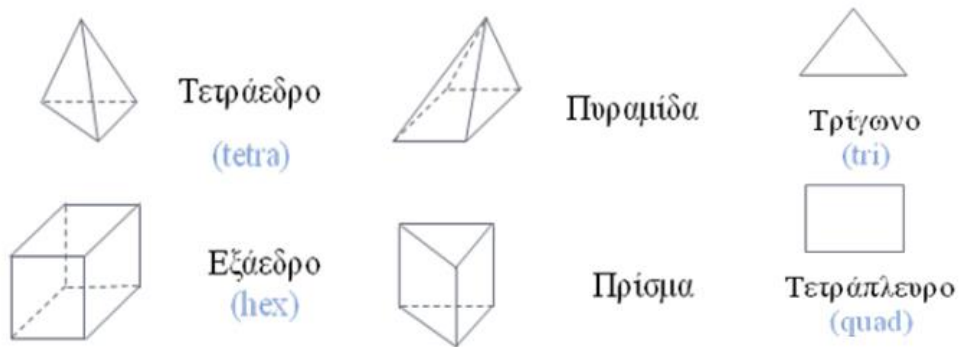
Σχήμα 6.5 : Γεωμετρία μοντέλου που θα υποστεί μοντελοποίηση

Όπως φαίνεται στο σχήμα χάριν στην συμμετρία του σχήματος και των φαινομένων αντίστοιχα οι προσομοιώσεις θα πραγματοποιηθούν στο μισό του σχήματος οπότε με κατάλληλη διαμόρφωση η εισροή “Import” στο GEOMETRY του λογισμικού έγινε όπως απεικονίζεται στην εικόνα ().

6.4.2 Πλέγμα

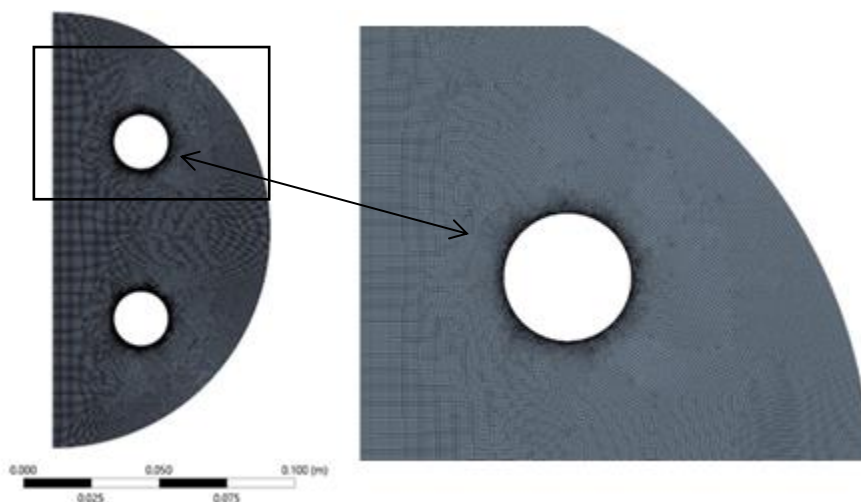
Αφού πραγματοποιηθεί η σχεδίαση του μοντέλου το επόμενο βήμα της προ επεξεργασίας (pre – processing) είναι η δημιουργία του πλέγματος. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 6.2 ορίζονται τα στοιχεία και υπολογιστικοί κόμβοι του προς μοντελοποίηση αντικείμενου. Ουσιαστικά δημιουργούνται μικρά κελιά (Cells) στα οποία γίνεται η επίλυση των εξισώσεων που μας ενδιαφέρει.

Γενικά για την μοντελοποίηση η ποιότητα του πλέγματος αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Όμως πιο πυκνό πλέγμα σημαίνει και μεγαλύτερο κόστος διότι είναι συστήματα αρκετά “ βαριά “ για έναν απλό οικιακό Η/Υ. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρακτικά αυτό που γίνεται στα προς μοντελοποίηση σχέδια είναι να δημιουργούνται πιο αραιά πλέγματα τα οποία δεν έχουν ερευνητικό ενδιαφέρον και υπολογιστικό και αντιθέτως στα πιο κρίσιμα σημεία να γίνονται πυκνά πλέγματα στα σημεία της γεωμετρίας που μας ενδιαφέρουν ώστε να υπάρχει καλύτερη προσέγγιση των κρίσιμων αυτών σημείων.



Σχήμα 6.6 : Είδη υπολογιστικών πλεγμάτων. [30]

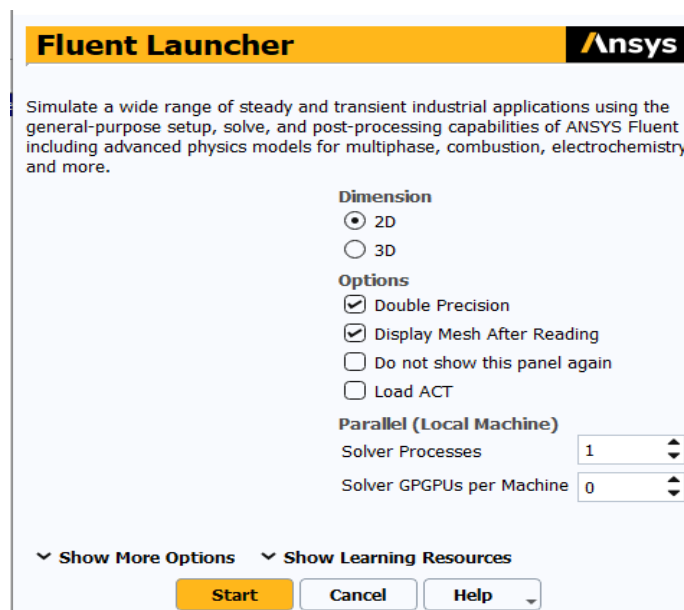
Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε το Meshing από το WORKBENCH για την δημιουργία του πλέγματος. Πριν την δημιουργία του πλέγματος οριστήκαν – δημιουργήθηκαν οι είσοδοι – εξόδιο , σύνορα , επιφάνειες που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω στο κεφάλαιο στις οριακές συνθήκες. Το πλέγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην γεωμετρία του μοντέλου είναι το μη δομημένο πλέγμα για την ανεξαρτησία του πλέγματος. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω έτσι και εδώ δημιουργήθηκαν πιο πυκνά πλέγματα στα σημεία που μας ενδιέφεραν όπως είναι οι πηγές θερμότητας και η εξομάλυνση στα τοιχώματα. Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν περίπου στα 50000. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το υπολογιστικό πλέγμα το οποίο έγινε για την προσομοίωση.



Σχήμα 6.7 : Υπολογιστικό πλέγμα μοντέλου.

6.4.3 Φυσικές ιδιότητες

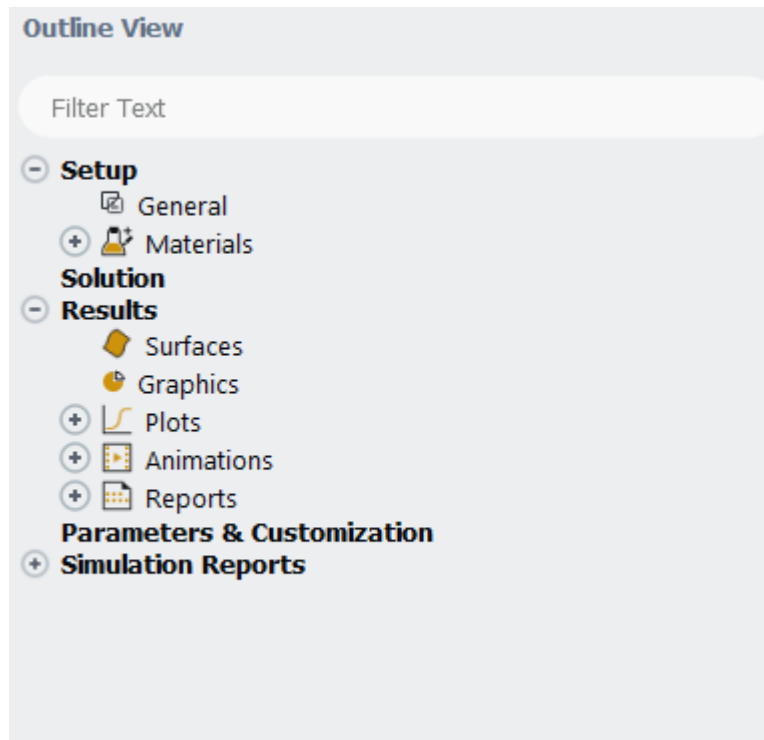
Σε αυτό το σημείο της εργασίας και αφού έχει τελειώσει και η διαδικασία της πλεγματοποίησης τότε θα γίνει η επιλογή στο FLUENT αφού έχουν στεφθεί με επιτυχία τα προηγούμενα βήματα τότε το επόμενο βήμα να γίνει το setup που θα διαβάσει ουσιαστικά τα προηγούμενα βήματα και θα οριστούν σε πρώτο χρόνο οι φυσικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά και υστέρτα σε δεύτερο χρόνο θα ακολουθήσει η επίλυση. Όταν πατηθεί το Setup τότε εμφανίζεται αρχικά το παράθυρο του ANSYS LAUNCHER όπως φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 6.2 : Ορισμός Double Precision

Το Fluent Launcher πρόκειται για ένα παράθυρο το οποίο πρέπει να ορίσεις μερικά χαρακτηριστικά αρχικά ώστε να χρησιμοποιηθούν στο παράθυρο του FLUENT που θα χρησιμοποιηθούν μετά και αυτά είναι όπως φαίνεται παραπάνω αρχικά η επιλογή ότι πρόκειται για δισδιάστατο αντικείμενο που θα υπέστη μοντελοποίηση. Υστέρτα στις επιλογές (Options) έχει επιλεγεί αρχικά η επιλογή του double precision (διπλής ακρίβειας) όπου σε αυτήν την επίλυση κάθε αριθμός θα αντιπροσωπεύεται στα 64 bits από ότι 32 αν ήταν μονή. Τα υπόλοιπα τα μένουν όπως ήταν πριν.

Τέλος πατώντας Start κλείνει αυτό το παράθυρο και ανοίγει ένα νέο παράθυρο όπου είναι του FLUENT το setup. Αφού ανοίξει αυτό το νέο παράθυρο και αφού διαπιστώσει ότι το αρχείο mesh έχει γίνει import κανονικά από το workbench τότε μπορεί να αρχίσει η επιλογή των φυσικών στοιχείων και χαρακτηριστικών του μοντέλου από το setup (ρυθμίσεις) Παρακάτω στα υποκεφάλαια αναλύονται ένα -ένα τα βήματα που επιλέχτηκαν.



Εικόνα 6.3 : Αρχική ορισμών εντολών στο FLUENT

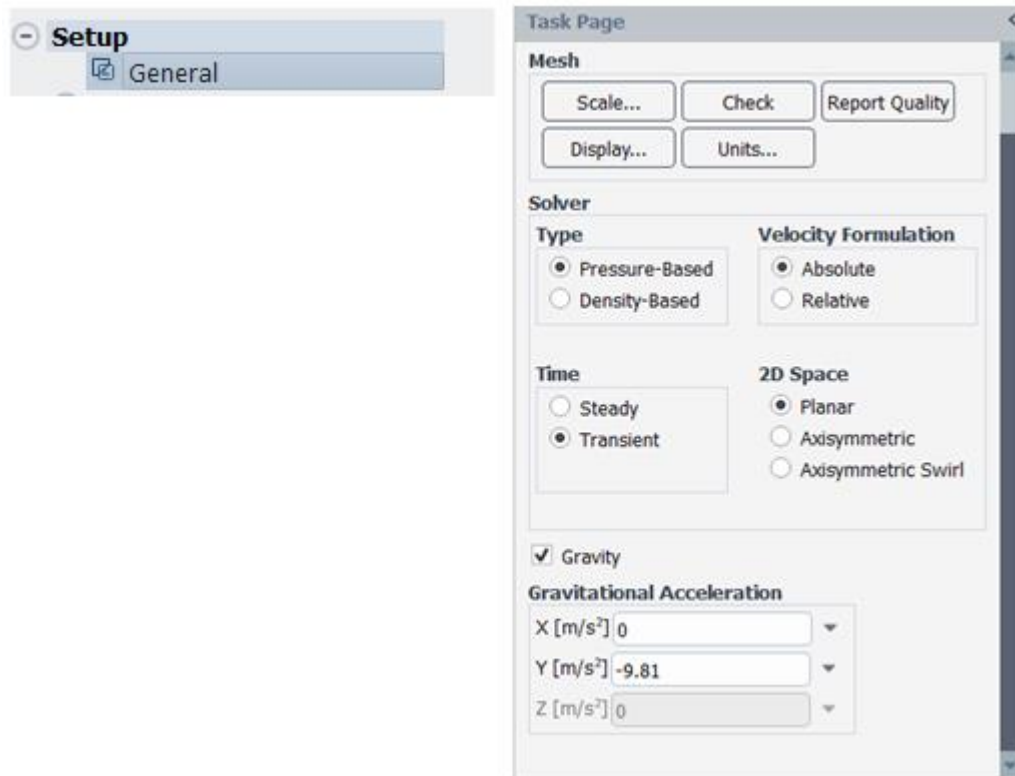
6.4.3.1 Solver properties

Αρχικά αφού έχει ανοίξει το παράθυρο του FLUENT set-up και βεβαιωθούμε ότι έχει γίνει απεικόνιση του mesh κανονικά μέσω του Display όπου θα εμφανίσει όλες τις επιφάνειες που έχουν ονομαστεί από το Meshing που είχε γίνει σε προγενέστερο χρόνο όπως είχε αναφερθεί και στην ενότητα 6.4.2.

Στο ANSYS FLUENT όπως παρατηρείται και στην εικόνα 12 υπάρχουν δυο τρόποι διαδικασίας επίλυσης – Solver διαθέσιμοι είναι ο Pressure – Based και ο Density - Based , και οι δυο solvers μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα ευρύ φάσμα ρευστών. Αναλόγως όμως τις περιπτώσεις ο ένας solver μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα από τον άλλον ώστε να επιλύσουν το πρόβλημα γρηγορότερα ή να λύσει μερικά χαρακτηριστικά ρευστών καλύτερα ο ένας από τον άλλον. Στην συγκεκριμένη εργασία έχει επιλεγεί ο Pressure – Based Solver ο οποίος και διαθέτει και τα μοντέλα της τήξης – σταθεροποίησης .

Για τον ορισμό time (Χρόνου) ορίστηκε Transient (μεταβατική). Από κάτω επιλέγοντας την επιλογή Gravity (βαρύτητα) προσδιορίζουμε την βαρύτητα στους άξονες.

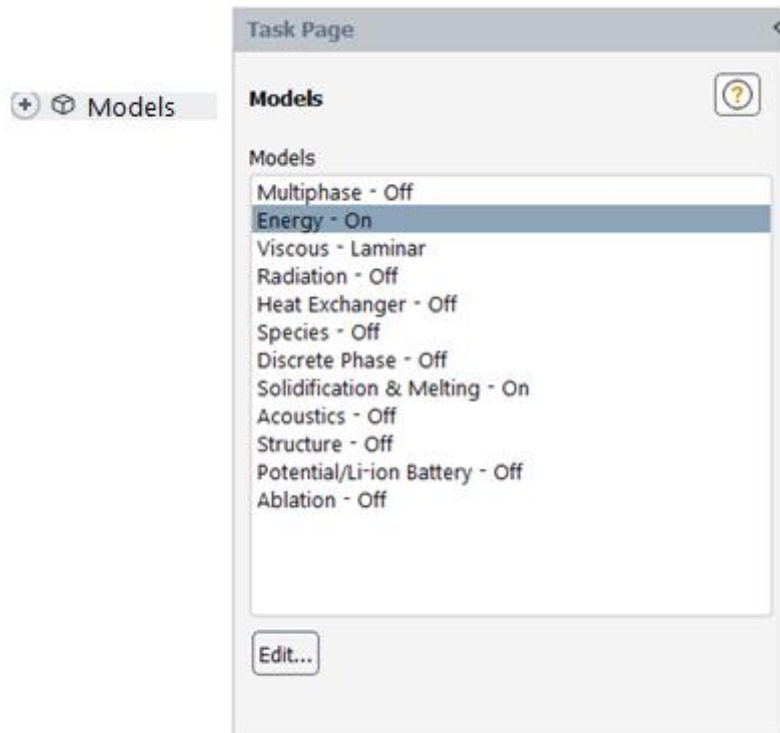
Τέλος για τον ορισμό της ταχύτητας και της συμμετρίας παρέμειναν έως έχουν σε Absolute και Planar αντίστοιχα.



Εικόνα 6.4 : Ορίσμος ρυθμίσεων για ιδιότητες επίλυσης

6.4.3.2 Φυσικά μοντέλα

Σε αυτό το βήμα γίνεται ο προσδιορισμός στα φυσικά μοντέλα αλλά και στις εξισώσεις που επιλέχθηκαν ώστε να λυθεί το πρόβλημα μας. Για την έναρξη της επιλογή θα πρέπει να πατηθεί στο setup το εικονίδιο που γραφεί Model πατώντας θα εμφανιστεί στο Task Page το παράθυρο του Model. Αρχικά επιλέχθηκαν οι εξισώσεις που χρειαστήκαν , οι συγκεκριμένες εξισώσεις έχουν περιγράψει αναλυτικά στο κεφάλαιο 5 της μαθηματικής μοντελοποίησης. Επόμενο βήμα είναι να επιλεγεί το φυσικό μοντέλο Solidification & Melting δηλαδή της σταθεροποίησης και τήξης πατώντας σε αυτό θα επιλεγεί στις παραμέτρους (Parameter) η σταθερά της Mushy Zone οπού ορίστηκε 10^5 .



Εικόνα 6.5 : Ορισμός φυσικών μοντέλων

6.4.3.3 Ιδιότητες Υλικών / Material Properties

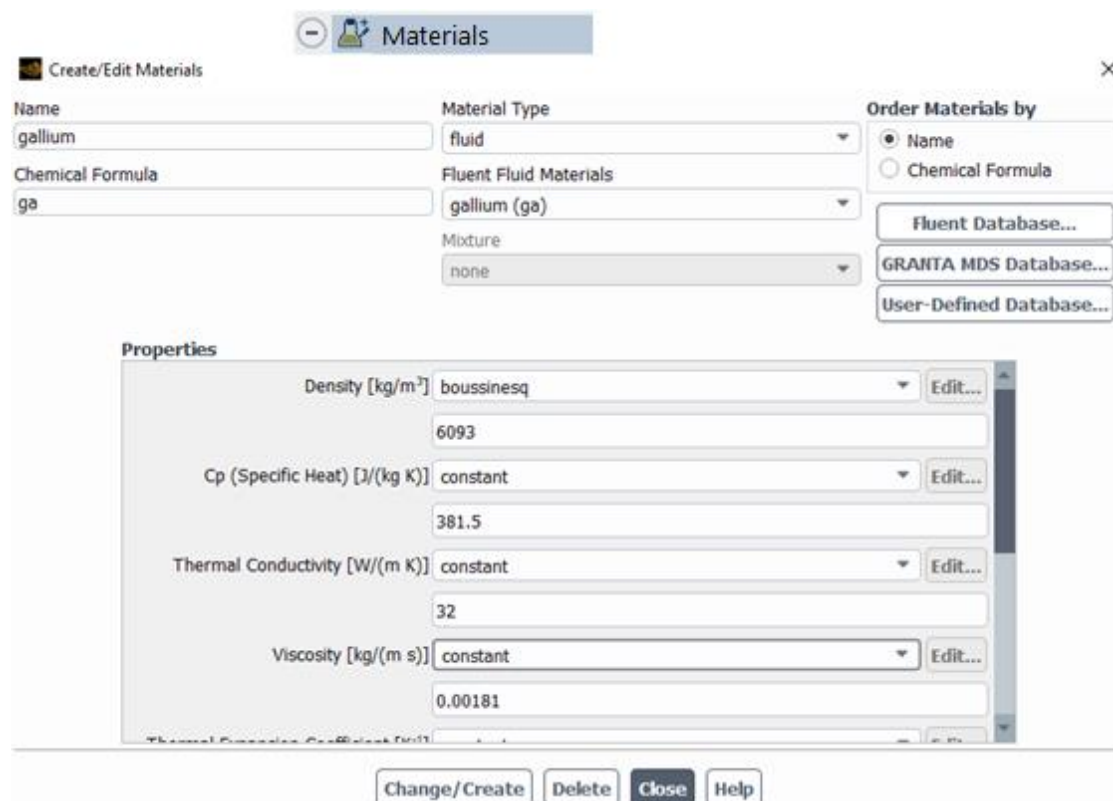
Το υλικό το οποίο αποτελείται το PCM όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην ενότητα 6.3 είναι του Γάλλιου (Gallium), παρακάτω στο πίνακα() αναφέρονται οι φυσικές ιδιότητες για καθαρό γάλλιο που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία.

Πίνακας6.1 : Φυσικές ιδιότητες Gallium

Φυσικές ιδιότητες καθαρού γάλλιου	
Πυκνότητα(υγρό)	6093 kg m ⁻³
Πυκνότητα αναφοράς	6095 kg m ⁻³
Θερμοκρασία αναφοράς	29.78°C
Συντελεστής Θερμικής διαστολής του υγρού	1.2 x 10 ⁻⁴ K ⁻¹
Θερμική αγωγιμότητα	32 W K ⁻¹ m ⁻¹
Θερμοκρασία τήξης	29.78°C
Λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης	80,160 J kg ⁻¹
Ειδική θερμοχωρητικότητα	381.5 J kg ⁻¹
Δυναμικό ιξώδες	1.81 x 10 ⁻³ kg m ⁻¹ s ⁻¹
Αριθμός Prandtl	2.16 x 10 ⁻²

Για την επιλογή του παραπάνω υλικού στο λογισμικό και την πρόσθεση των φυσικών ιδιοτήτων του θα επιλεγεί από το setup και εδώ πατώντας το εικονίδιο Materials (Υλικά) στο Task page θα εμφανιστεί το αντίστοιχο παράθυρο όπου επιλέγοντας Fluid

θα ανοίξει εκ νέου ένα άλλο παράθυρο όπου θα γίνει και η τοποθέτηση των φυσικών ιδιοτήτων του PCM αντίστοιχα όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



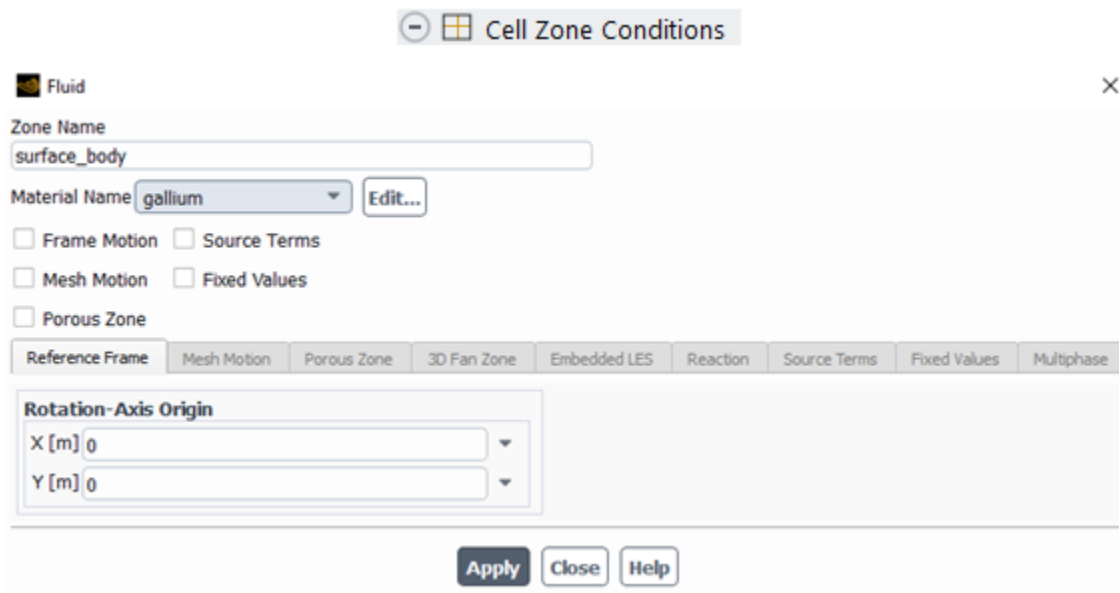
Εικόνα 6.6 : Ορισμός υλικού και φυσικών ιδιοτήτων του.

Όπως παρατηρείται και στην εικόνα έχει επιλεχθεί το γάλλιο και έχουν προστεθεί οι φυσικές ιδιότητες του υλικού. Στην εικόνα παρατηρείται επίσης ότι έχει επιλεχθεί για τον υπολογισμό της πυκνότητας (Density) η boussinesq. Η συγκεκριμένη προσέγγιση boussinesq χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της μεταβολής της πυκνότητας λόγω της διαφοράς της θερμότητας. Αυτή η προσέγγιση θεωρεί ότι η πυκνότητα του υλικού είναι σταθερή.

6.4.3.4 Cell Zone

Σε αυτό το σημείο θα γίνει ο ορισμός των ιδιοτήτων του Cell Zone δηλαδή πρόκειται να γίνει η αντιστοίχιση με της διάφορες υποπεριοχές του υπολογιστικού πλέγματος με το υλικό το οποίο ορίστηκε και όποιες ιδιότητες συνεπάγονται.

Πατώντας το Cell Zone Condition εμφανίζεται το στο Task το αντίστοιχο παράθυρο επιλέγουμε την περιοχή Surface Body και πατώντας αυτό ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο προσθέτουμε το υλικό το οποίο θέλουμε να γίνει αντιστοίχιση.

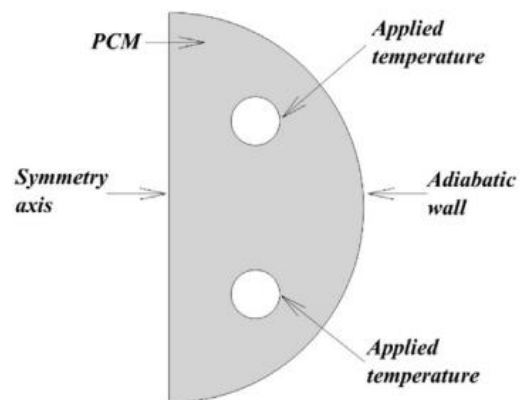


Εικόνα 6.7 : Πρόσθεση υλικού αντιστίχησης.

Υστέρα πατώντας Operating Conditions (Συνθήκες λειτουργίες) στο Task page όπου ανοίχτηκε και το παράθυρο του Surface Body Από εκεί επιλέγεται και η θερμοκρασία λειτουργίας της προσέγγισης Boussinesq στους 35° C.

6.4.3.5 Οριακές Συνθήκες / Boundary Conditions

Στο στάδιο αυτό της εργασίας διαλέγονται μια προς μια οι συνθήκες οι οποίες έχουν ονομαστεί προηγουμένως από τα αρχικά στάδια του Pre – processing στο Meshing και ορίζονται οι οριακές συνθήκες ώστε να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των διάφορων φυσικών μεγεθών που είναι αναγκαία. Οι οριακές συνθήκες δηλαδή τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την άσκηση πάρθηκαν από την μελέτη του T. Bouhal κ.α [32].



Σχήμα 6.8 : Οριακές συνθήκες των κυλινδρικών πηγών θέρμανσης. [32]

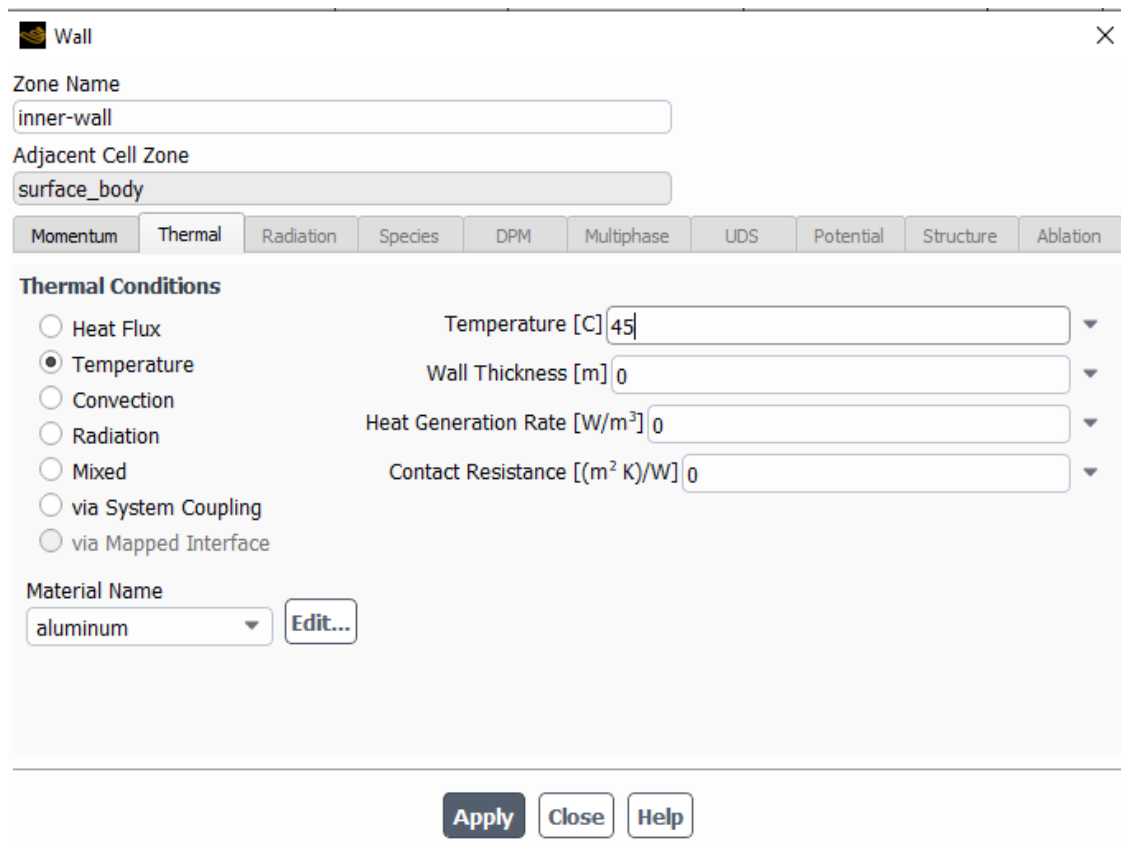
Όπως είχε αναφερθεί στην ενότητα 6.3 υπάρχουν τα τοιχώματα από τις πηγές θερμότητας και το τοίχωμα το εξωτερικό το οποίο δεν έχει καμία συναλλαγή με το περιβάλλον. Για την επιλογή των τοιχωμάτων για τις οριακές συνθήκες έγινε πατώντας πάνω στο εικονίδιο του Boundary conditions και ανοίγοντάς το αντίστοιχο παράθυρο στο Task Page από εκεί τότε τα βήματα που ακολουθούν έχουν ως εξής :

Πρώτο βήμα είναι η επιλογή του Inner Wall (Εσωτερικό Τοίχωμα) δηλαδή για τα τοιχώματα από τις πηγές θερμότητας όπου θα πρέπει για κάθε μοντελοποίηση να οριστούν οι σταθερές θερμοκρασίες τους δηλαδή 40° C και 45° C αντίστοιχα και την

συνθήκη της μη ολίσθησης της ταχύτητας. Οπότε πατώντας Το Inner Wall Εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο με πρώτη επιλογή το momentum όπου επιλέγουμε την επιλογή No slippery για την μη ολίσθηση και πατώντας δίπλα στο Thermal ορίζουμε την θερμοκρασία στους βαθμούς που αναφέρθηκαν για την κάθε μοντελοποίηση όπως φαίνεται στην εικόνα :

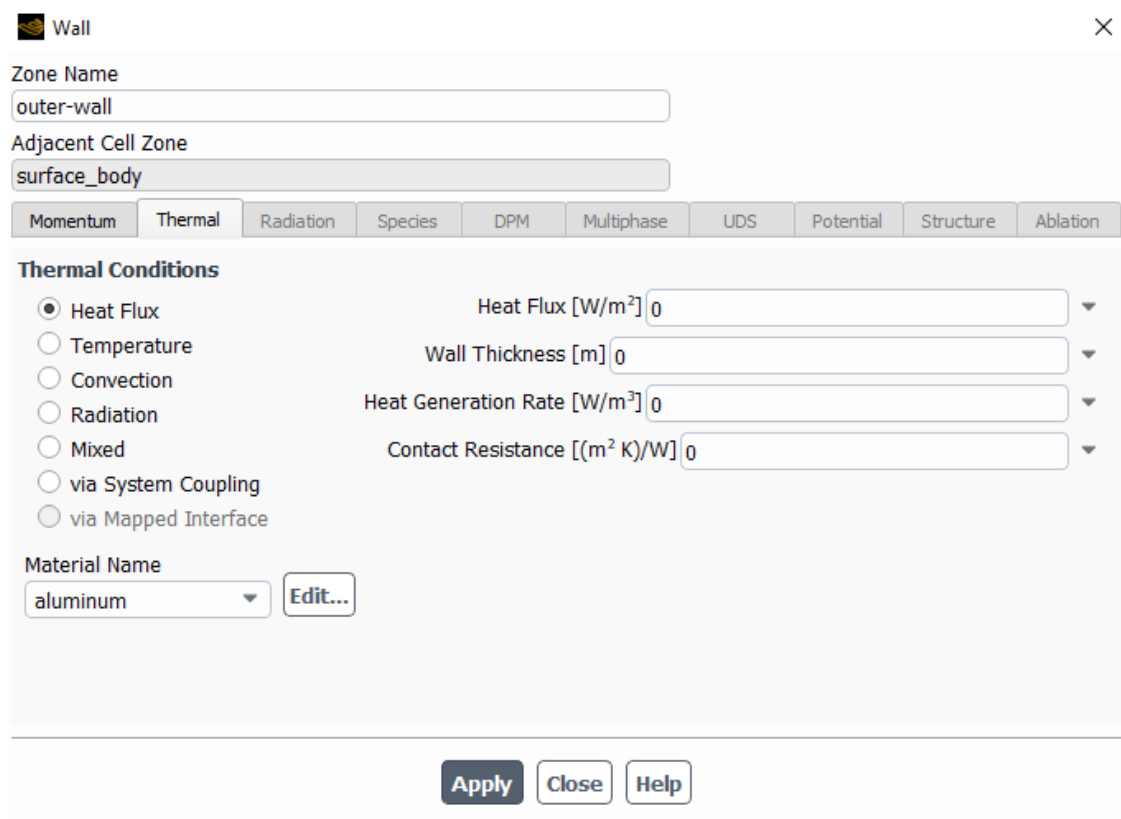
The image shows a software dialog box for setting boundary conditions. At the top, the 'Zone Name' is 'inner-wall' and the 'Adjacent Cell Zone' is 'surface_body'. Below this are several tabs: Momentum, Thermal, Radiation, Species, DPM, Multiphase, UDS, Potential, Structure, and Ablation. The 'Thermal' tab is selected. Under 'Thermal Conditions', several radio buttons are listed: Heat Flux, Temperature (which is selected), Convection, Radiation, Mixed, via System Coupling, and via Mapped Interface. To the right of these are four input fields: Temperature [C] with the value 40, Wall Thickness [m] with the value 0, Heat Generation Rate [W/m³] with the value 0, and Contact Resistance [(m² K)/W] with the value 0. Below the radio buttons, the 'Material Name' is set to 'aluminum' in a dropdown menu, with an 'Edit...' button next to it. At the bottom of the dialog are three buttons: 'Apply', 'Close', and 'Help'.

Εικόνα 6.8 : Συνοριακές συνθήκες στα τοιχώματα πηγών θερμότητας στους 40°C



Εικόνα 6.9 : Συνοριακές συνθήκες στα τοιχώματα πηγών θερμότητας στους 45°C

Στο δεύτερο βήμα του ορισμού των οριακών συνθηκών θα πραγματοποιηθεί για το εξωτερικό τοίχωμα όπου εδώ ο ορισμός θα πραγματοποιηθεί αφού κλείσει το προηγούμενο παράθυρο στο Task Page Θα επιλεχθεί το Outer-Wall που είναι για το εξωτερικό παράθυρο και θα ανοίξει παρόμοιο παράθυρο όπως το προηγούμενο για το εξωτερικό τοίχωμα και θα επιλεχθούν στο Momentum τα ίδια όπως πριν δηλαδή χωρίς ολίσθηση. Πατώντας Thermal από διπλά αυτήν την φορά αντί για Θερμοκρασία θα επιλεχτεί η ροή θερμότητας (Heat Flux) όπου θα είναι 0° C η ροή θερμότητας προς το περιβάλλον διότι δεν υπάρχει συναλλαγή όπως προαναφέρθηκε.



Εικόνα 6.10 : Συνοριακή συνθήκη εξωτερικού τοιχώματος

6.4.4 Αριθμητική Λύση

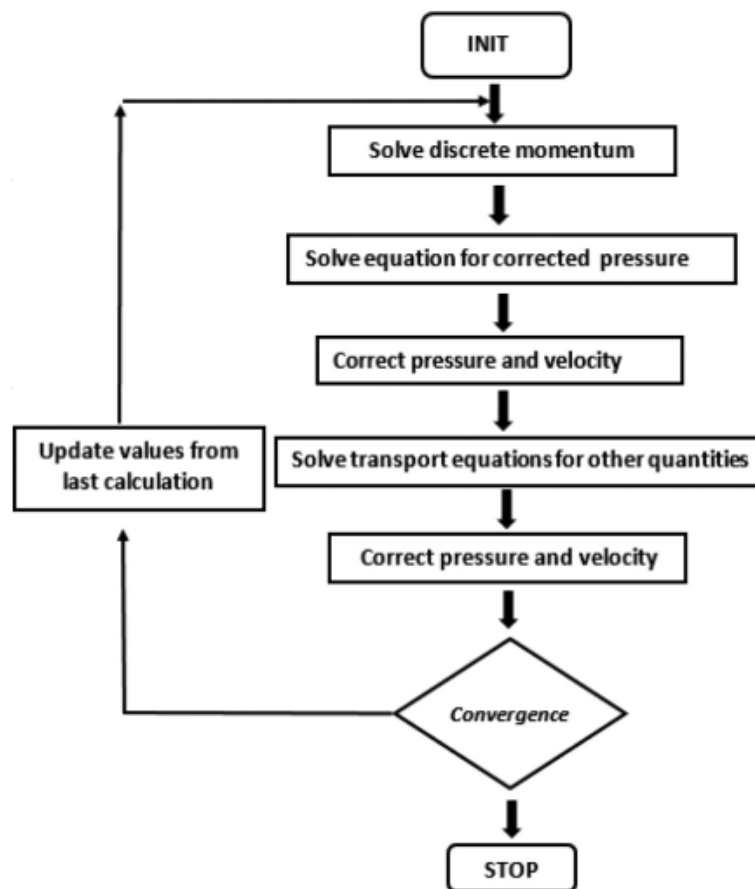
Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουν τα βήματα που ακολουθήθηκαν για το τελευταίο στάδιο του Pre – processing που είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική επίλυση του μοντέλου στην συγκεκριμένη εργασία.

6.4.4.1 Αριθμητική Μέθοδος

Για την επιλογή των αριθμητικών μεθόδων από το Ansys θα παραμείνουμε στο FLUENT αλλά στην αριστερή στήλη στις ρυθμίσεις – Setup πιο κάτω είναι το Solution – Λύση με τα επιμέρους μέρη του και από εκεί βάση του Methods-Μέθοδοι γίνεται η επιλογή για της μεθόδους που θα χρησιμοποιηθούν στις λύσεις. Πατώντας εκεί στο Task page Εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο που πρώτα πρέπει να γίνει η επιλογή αρχικά του αλγορίθμου που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

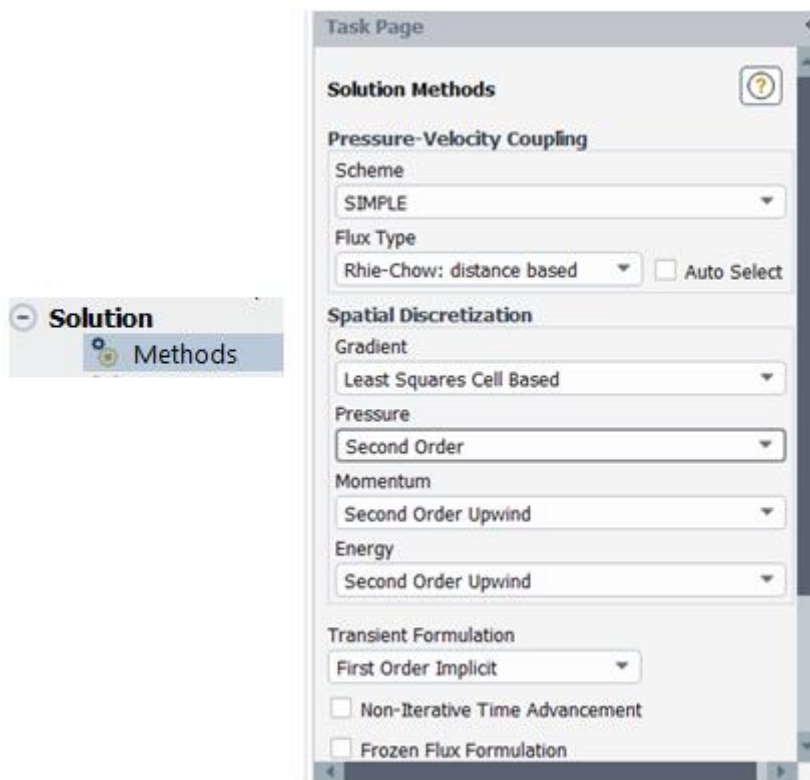
Έχοντας επιλέξει από την ενότητα 6.4.3.1 σαν Solver το Pressure-Based , το ANSYS δίνει την δυνατότητα επιλογής δυο αλγορίθμων solver για την επίλυση και αυτοί είναι οι segregated (διαχωρισμένους) και coupled (συζευγμένους). Οι διαφορές στους συγκεκριμένους αλγορίθμους είναι ο τρόπος ο οποίος επιλύουν τις εξισώσεις. Η segregated κάνει τις επιλύσεις διαδοχικά , παίρνοντας τις εξισώσεις της πίεσης και της ταχύτητας ως κυρίες μεταβλητές. Αντιθέτως ο coupled solver επιλύει συνολικά τις εξισώσεις της συνέχειας , ορμής και species exchange.

Στο FLUENT οι επιλογές για τους αλγορίθμους στο Solver ήταν , για segregated οι SIMPLE . SIMPLEC και PISO ενώ για coupled υπάρχει μόνο ένας με επίσης ονομασία Coupled. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε για Solver Pressure-Velocity coupling αλγόριθμος τύπου segregated και πιο συγκεκριμένα η SIMPLE όπως φαίνεται με τα παρακάτω βήματα (). Οι ροές μάζας μειώνονται μέσω των όψεων από τα κελιά και αξιολογούνται μέσω μιας αρχικής τιμής ταχύτητας σε δυο ή τρεις διαστάσεις . Από τα πεδία πίεσης και ταχύτητας , μια εξίσωση μεταφοράς ορμής λαμβάνει επίλυση. Στην συνέχεια αυτή η επίλυση λαμβάνει μια διορθωμένη πίεση χρησιμοποιώντας μια σειρά από σχέσεις που έχουν προκύψει από την εξίσωση συνέχειας.[33]



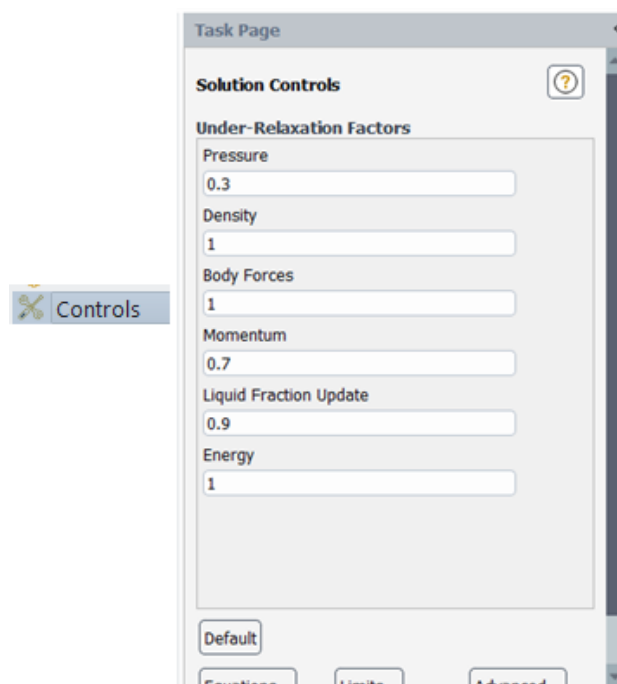
Σχήμα 6.9 : Συνολικά στάδια αλγορίθμου SIMPLE. [33].

Αφού επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Solver όπως φαίνεται και στην εικόνα (), από κάτω παρατηρείται στο Task page ότι επιλέχθηκαν και Spatial Discretization (χωρική διακριτοποίησης).



Εικόνα 6.11 : Ορισμός μεθόδων

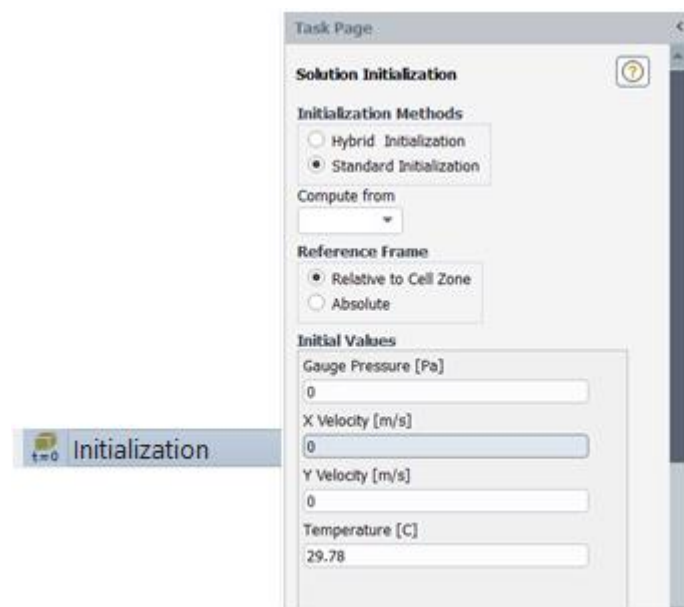
Επιλέγοντας το Controls τις προεπιλογές του FLUENT παρέχει τις τιμές για τα διαφορά μεγέθη του προβλήματος όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 6.12 : Προεπιλογές από FLUENT

6.4.4.2 Αρχικοποίηση

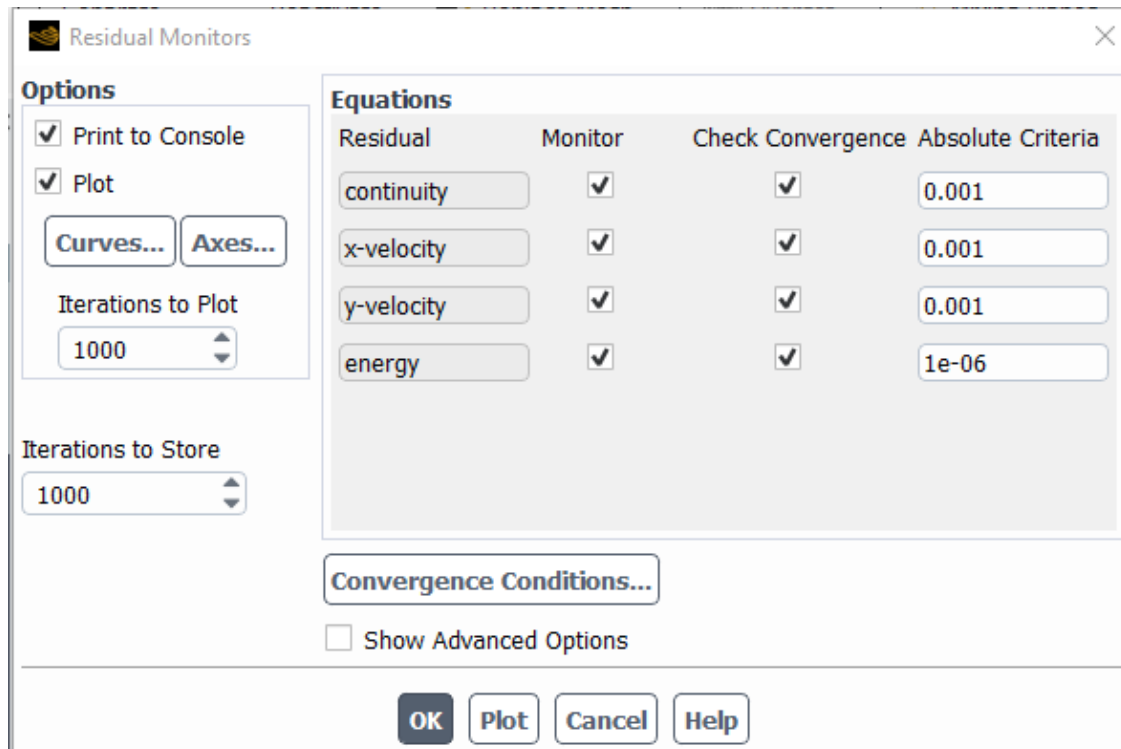
Ένα από τα τελευταία βήματα του Pre – processing είναι όπως ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες να οριστούν και αντίστοιχα οι αρχικές συνθήκες. Όπως είχε αναφερθεί στο πίνακα () η θερμοκρασία αναφοράς ήταν στους 27° C όπου και στις αρχικές συνθήκες αντιπροσωπευτικά η πίεση και οι ταχύτητες θα είναι μηδενικές. Όπως φαίνεται και στην εικόνα.



Εικόνα 6.13 : Ορισμός αρχικών συνθηκών

6.4.4.3 Κριτήρια Σύγκλισης

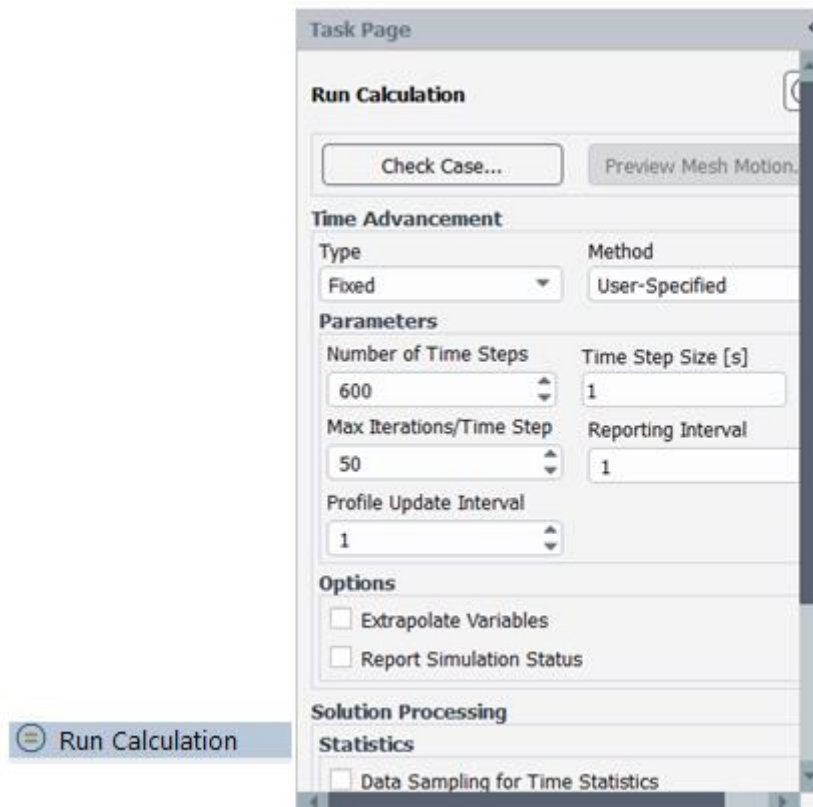
Μια σημαντική παράμετρος του FLUENT που πρέπει να οριστεί πριν το τελικό βήμα των υπολογισμών είναι τα Convergence Criteria (Κριτήρια σύγκλισης) δηλαδή το υπολογιστικό υπόλοιπο(Residual) που υπάρχει από κάθε εξίσωση που έχει επιλυθεί σε κάθε βήμα. Το residual πρόκειται για το μετρώ το οποίο μας δείχνει κατά ποσό η τρέχουσα λύση μπορεί να ικανοποιήσει την αντίστοιχη διακριτή μορφή της κάθε διαφορικής εξίσωσης στο υπολογιστικό κελί. Σε κάθε επανάληψη επίλυσης των υπολογιστικών κελίων θα επαναλαμβάνεται μέχρι το υπόλοιπο σε όλες τις εξισώσεις να είναι μικρότερο από 1e-06. Γενικά ο προσδιορισμός για τα κριτήρια υπολοίπου έγινε βάση [32] όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα που επιλέχθηκε βάση Monitors_Residuals.



Εικόνα 6.14 : Ορισμός Monitors Residuals

6.5 Επίλυση

Πλέον είναι το τελευταίο στάδιο πριν την έναρξη των υπολογισμών που θα οριστεί η Time Advancement (Χρονική πρόοδος). Δηλαδή να οριστούν τα βήματα χρόνου που θα χρησιμοποιηθούν για τις επαναλήψεις (iterations) και τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων μαζί με το χρονικό βήμα που θα πραγματοποιούνται. Όλες αυτές οι παράμετροι που ειπωθήκαν έχουν οριστεί όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

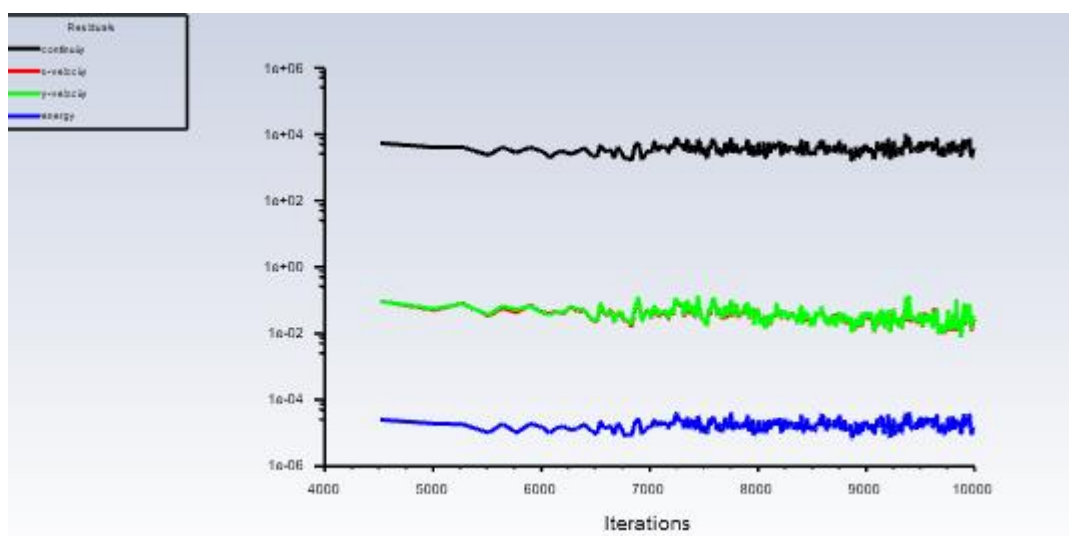


Εικόνα 6.15 : Ορισμός χρονικού βήματος και επανάληψης

Αφού έγινε και ο ορισμός των χρονικών βημάτων πλέον είναι όλες οι παράμετροι έτοιμες και πλέον είναι σε θέση το σύστημα πατώντας Calculate (Υπολογισμός) να υπολογιστούν όλα τα υπολογιστικά κελιά και να αρχίσει η έναρξη της επίλυσης του προβλήματος μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

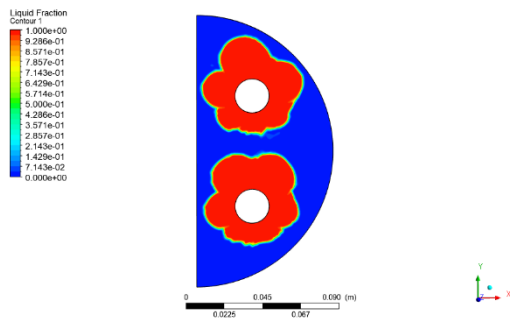
Η παρουσίαση των παρακάτω αποτελεσμάτων είναι αποτέλεσμα όλων των βημάτων , δηλαδή δεδομένων , αριθμητικών μεθόδων , κλπ. από το κεφάλαιο 6 που αναφέρθηκαν αναλυτικά. Για τα συγκεκριμένα αποτελέσματα επίσης στο κεφάλαιο 6.5 αναφέρθηκαν τα χρονικά βήματα που ακολουθήσε ο solver , τα αποτελέσματα παρακάτω πραγματοποιήθηκαν σε 10000 βήματα και στις δυο μορφές μοντελοποίησης για την θερμοκρασία όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



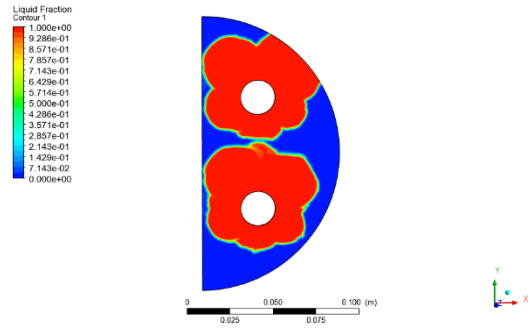
Σχήμα 7.1 : Διάγραμμα υπολογισμού αριθμών επαναλήψεων

Πραγματοποιήθηκαν 2 μορφές μοντελοποίησης με τα ίδια φυσικά χαρακτηριστικά και ρυθμίσεις εκτός από την θερμοκρασία που στην μια περίπτωση ήταν 40°C και στην άλλη 45°C. Παρακάτω μέσω σχημάτων θα γίνει ανάλυση των φαινόμενων που διέπουν το μοντέλο με την τήξη PCM.

Αρχικά τα αποτελέσματα τα οποία λάβαμε ήταν βάση της συμμετρίας στο μισό του κυλίνδρου που είχαμε εισχωρήσει στο σύστημα και τα αποτελέσματα σε προσομοίωση 10000 βημάτων για 200s ήταν τα παρακάτω.

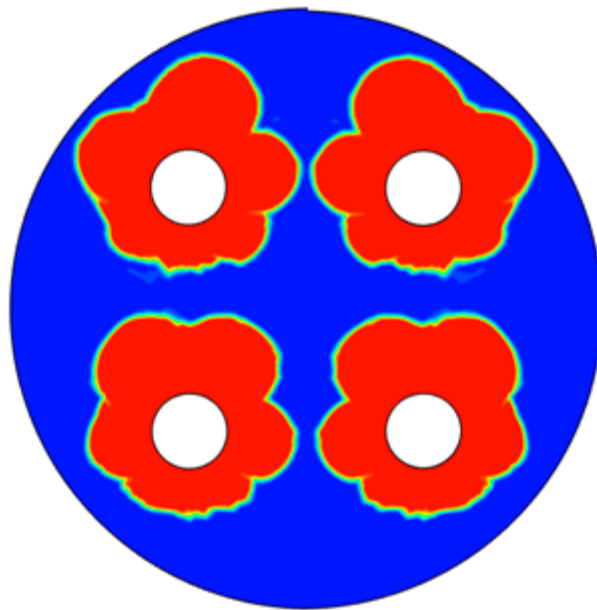


Σχήμα 7.2 : Αποτέλεσμα Προσομοίωσης για τήξη σε 200s στους 40°C

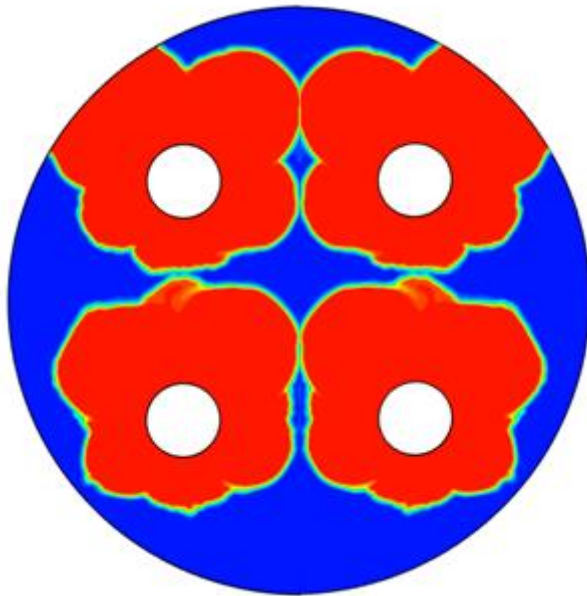


Σχήμα 7.3 : Αποτέλεσμα Προσομοίωσης για τήξη σε 200s στους 45°C

Χάριν στην συμμετρία των φαινομένων και στην γεωμετρία μέσω επεξεργασίας των σχημάτων θα είναι εφικτό να απεικονιστεί όλο το σχήμα του κυλίνδρου με τα φαινόμενα του , η απεικόνιση των σχημάτων θα γίνει ολοκληρωμένη παρακάτω.



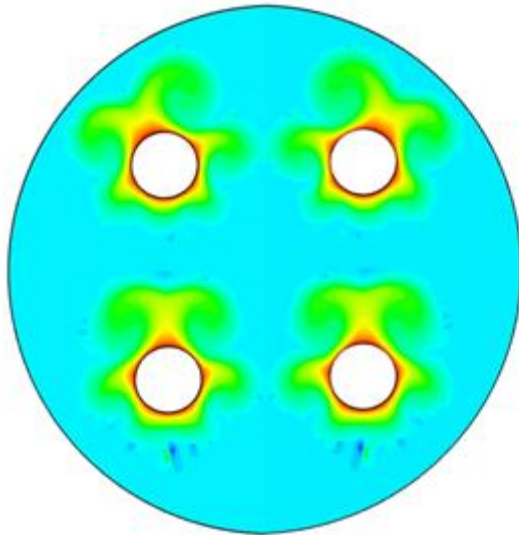
Σχήμα 7.4 : Ολόκληρη απεικόνιση τήξης κυλινδρικής επιφάνειας στους 40°C σε 200s



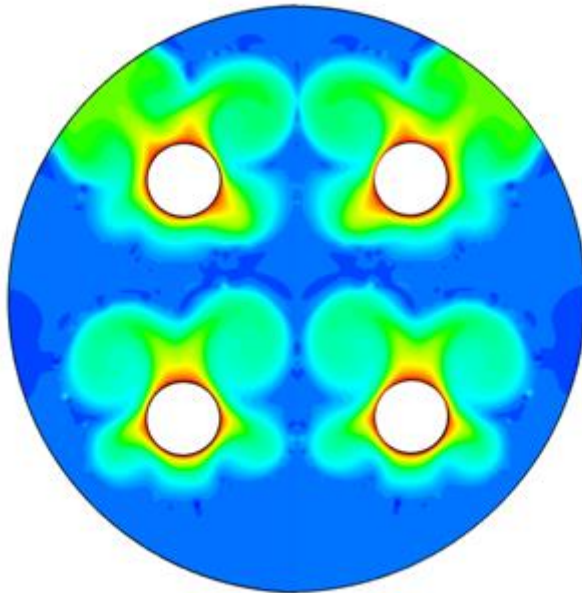
Σχήμα 7.5 : Ολόκληρη απεικόνιση τήξης κυλινδρικής εποφάνειας στους 45°C σε 200s

Στις παραπάνω εικόνες εμφανίζεται το τήγμα σε 200s που έχει υποστεί το PCM του κυλίνδρου και η αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό όπου με μπλε απεικονίζεται το στερεό αρχικό κομμάτι και με κόκκινο το ρευστοποιημένο υλικό πλέον. Παρατηρείται στα 200s στους 45°C να έχει πάει προς τα εξωτερικά τοιχώματα και ένα έχει ρευστοποιήσει ένα σημαντικό μέρος του στερεού υλικού. Αντιθέτως στους 40°C παρατηρείται να έχει παραμείνει παραπάνω στερεό υλικό από ότι το άλλο σχήμα και να πλησιάζει αλλά να μην φτάνει το εξωτερικό τοίχωμα. Παρατηρείται και στις δυο περιπτώσεις το κέντρο του κυλίνδρου να μην έχει ρευστοποιηθεί και να έχει την τάση να ρευστοποιείται με κατεύθυνση προς τα εξωτερικά τοιχώματα.

Παρακάτω θα ακολουθήσουν και άλλα σχήματα ώστε να περιγράψουν συνολικά το φαινόμενο της τήξης του PCM.

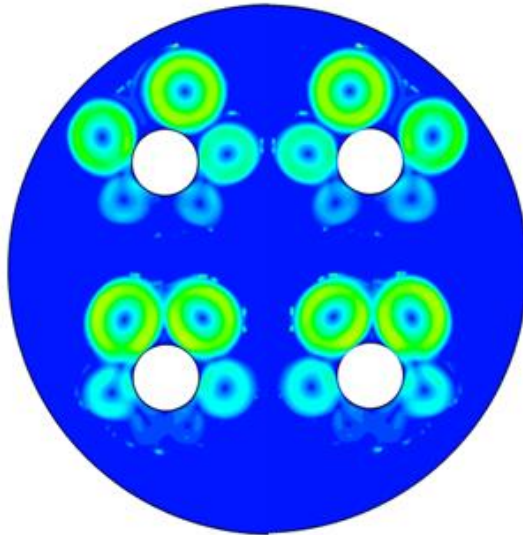


Σχήμα 7.6 : Ανάπτυξη θερμοκρασίας στους 40°C στα 200s

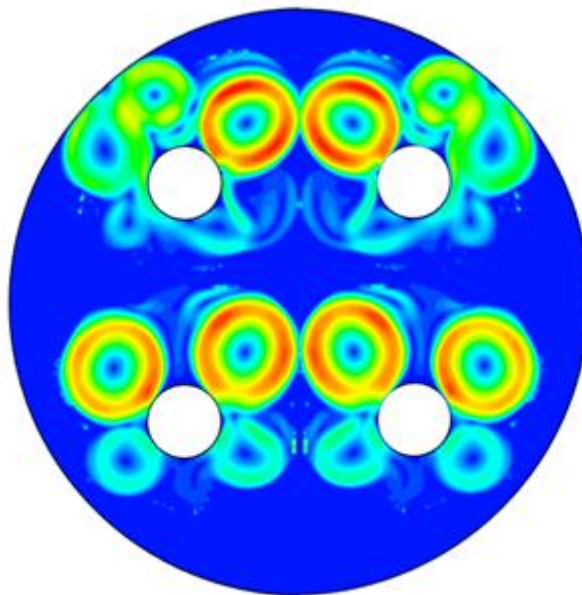


Σχήμα 7.7 : Ανάπτυξη θερμοκρασίας στους 45°C στα 200s

Στα σχήματα παραπάνω για την ανάπτυξη της θερμοκρασίας στα 200s γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω εικόνα ότι η συναλλαγή-μεταφορά θερμότητάς πραγματοποιείται μέσω των φαινομένων της αγωγής και της συναγωγής. Το κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν γύρω από τις πηγές θερμότητες που σημαίνει και η αγωγή της θερμότητάς. Υστέρα το κίτρινο – πράσινο χρώμα γύρω από τις πηγές θερμότητες είναι οι περιοχές που έχει ρευστοποιηθεί το υλικό και έχει υποστεί την τήξη από την θερμότητα. Με σκούρο μπλε είναι οι περιοχές που έχουν θερμανθεί και είναι έτοιμες ως προς την τήξη τους.

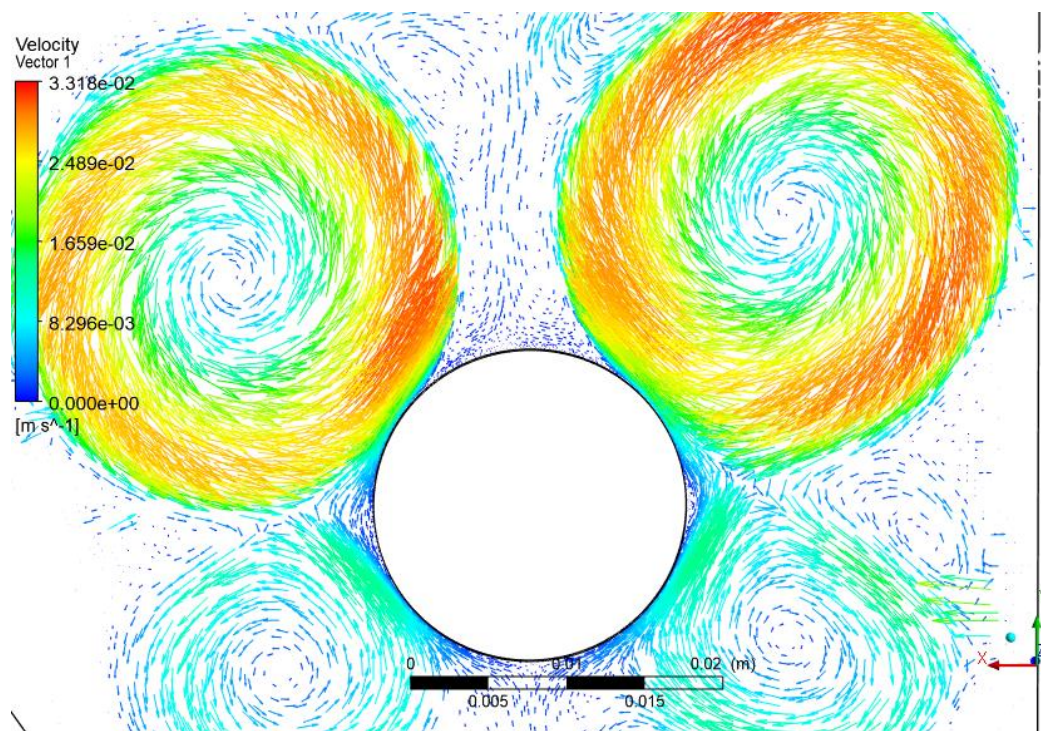


Σχήμα 7.8 : Ανάπτυξη ταχύτητας στους 40°C στα 200s.

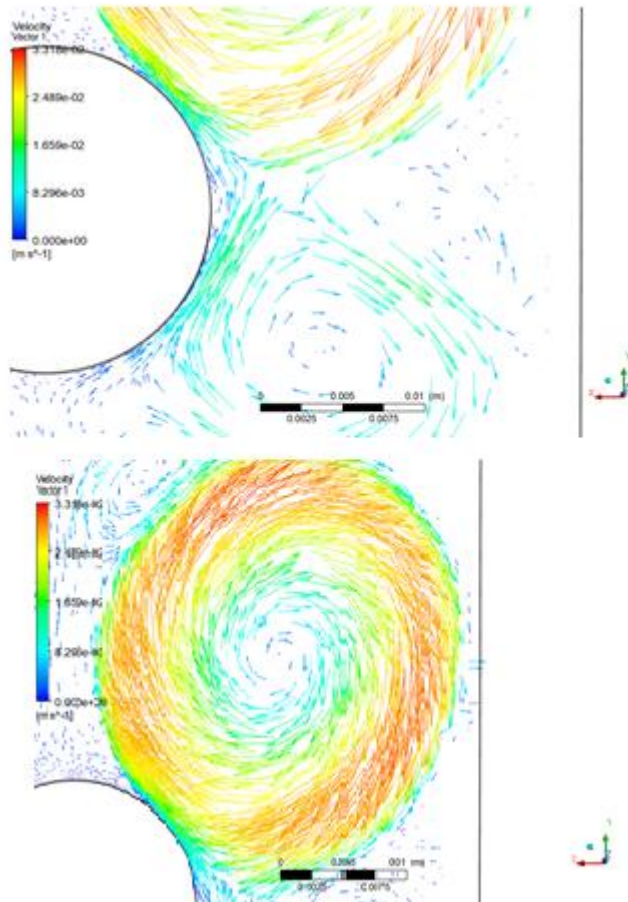


Σχήμα 7.9 : Ανάπτυξη ταχύτητας στους 45°C στα 200s.

Στα παραπάνω σχήματα απεικονίζονται οι ταχύτητες οι οποίες είναι αποτέλεσμα από την συναγωγή που έχουν υποστεί στην ανάπτυξη της τήξης του PCM. Παρατηρείται το φαινόμενο των ταχυτήτων στους 45°C να είναι εντονότερο από ότι στους 40°C. Παρατηρείται από κοινού όμως σε μερικά σημεία η ταχύτητα είναι μηδενική . Για τον πιο λεπτομερή σχολιασμό των ταχυτήτων γύρω από τις πηγές θερμότητάς στις παρακάτω εικόνες έχουν χρησιμοποιηθεί διανυσματικές ταχύτητες σαν αναφορά από την μοντελοποίηση στους 45 βαθμούς που είναι και πιο έντονο το φαινόμενο ώστε να γίνει και ο πιο λεπτομερείς περιγραφή τους.



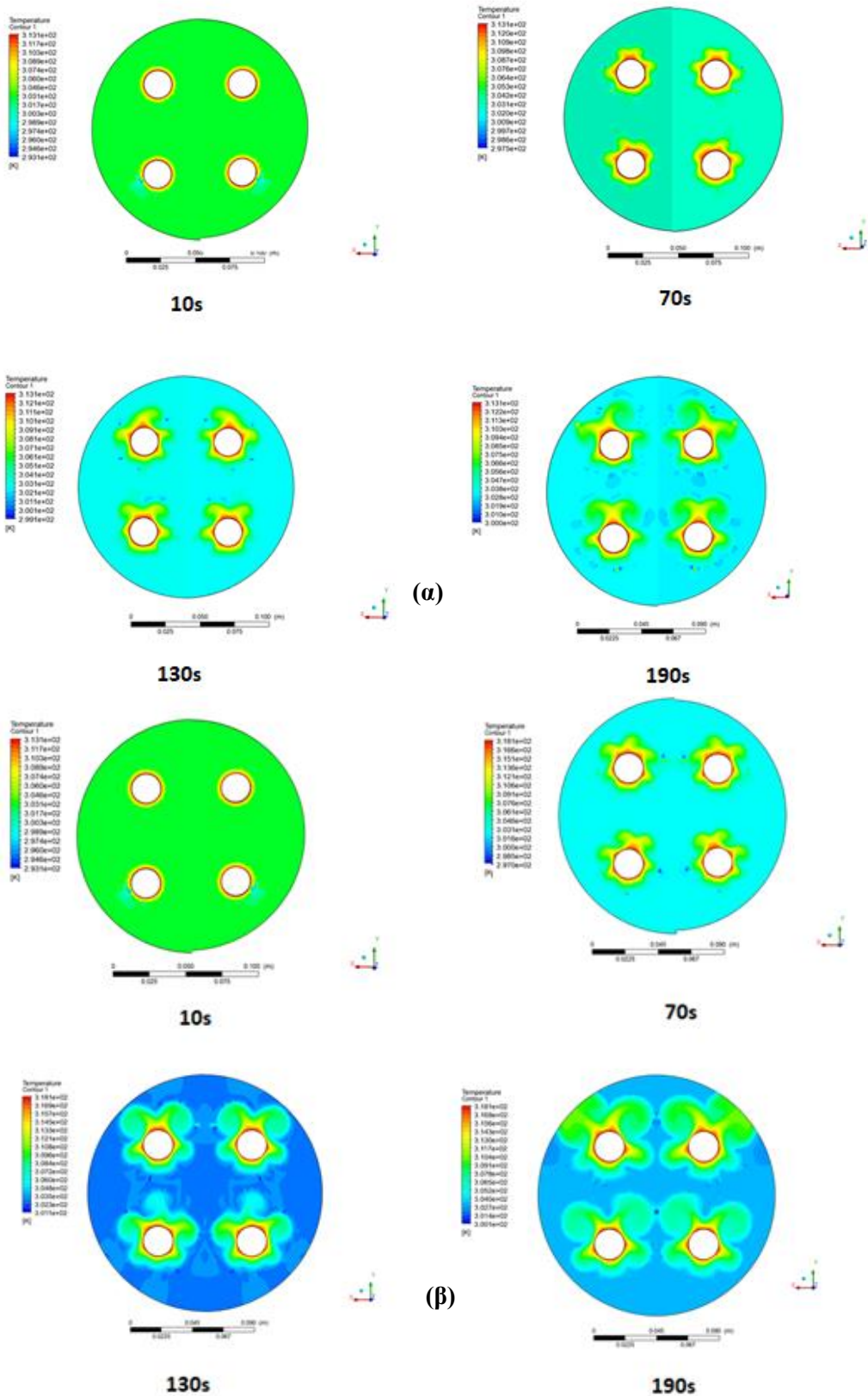
Σχήμα 7.10 : Διανυσματικές ταχύτητες γύρω από πηγή θερμότητας στους 45°C στα 200s



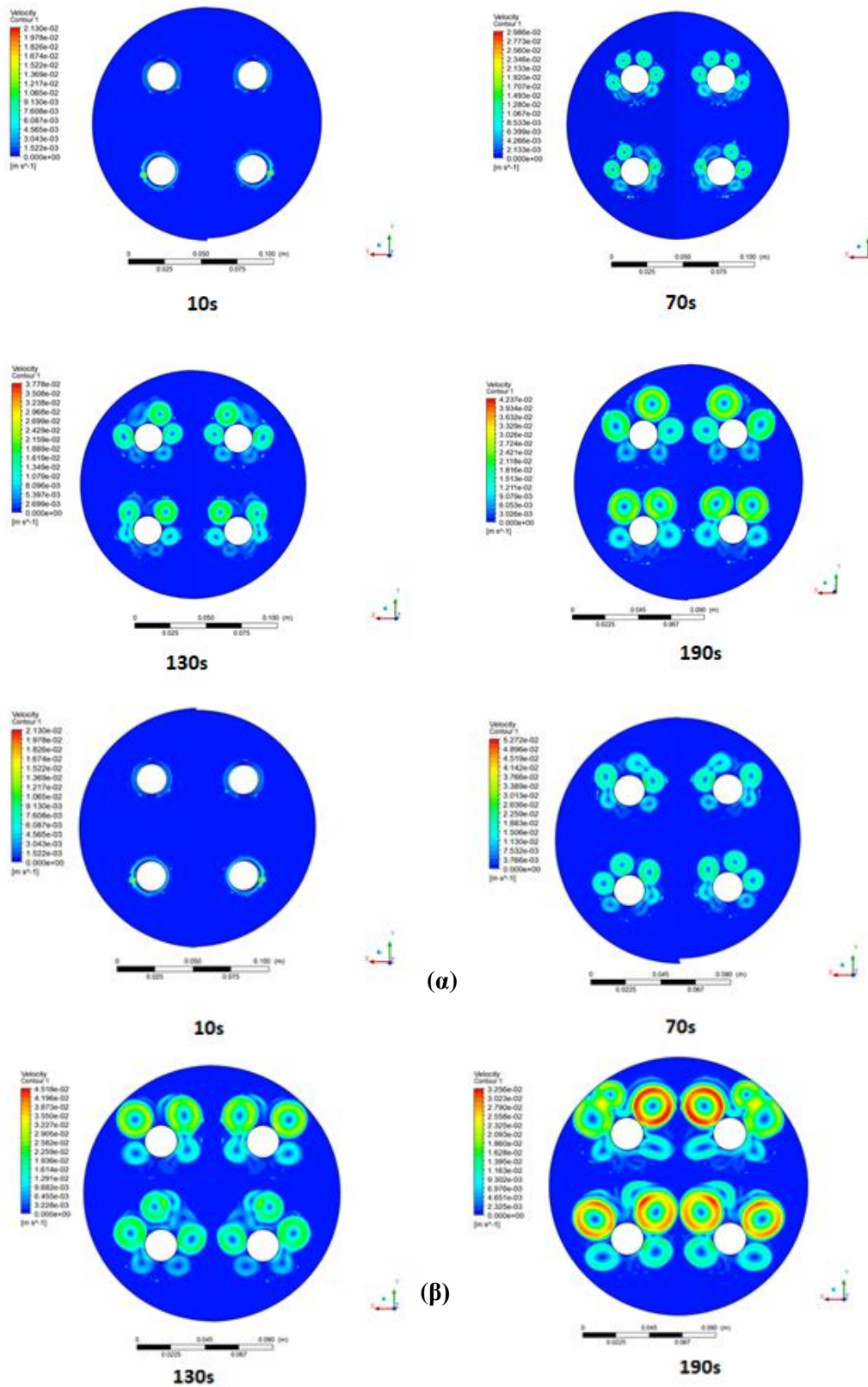
Στα σχήματα με τις διανυσματικές ταχύτητες παρατηρείται καλύτερα η κυκλοφορία των ταχυτήτων που και δημιουργούν και τις διάφορες δίνες γύρω από τις παροχές θερμότητας. Η ανάπτυξη των συγκεκριμένων δινών είναι αποτέλεσμα της συναγωγής στην μετάδοση της θερμότητάς για την φυσική κυκλοφορία της τήξης του υλικού που έχει και σαν αποτέλεσμα την μηδενική ταχύτητα σε ορισμένα σημεία. Με απλά λογία οι δίνες και οι μηδενικές ταχύτητες στο κέντρο τους είναι αποτέλεσμα της ρευστοποιημένης περιοχής του υλικού όπου το θερμό και ελαφρύ μέρος της πάει και συναντάει το αντίστοιχο στερεό μέρος του υλικού. [34]

Σχήμα 7.11 : Κατεύθυνση διανυσματικών ταχυτήτων στο κύλινδρο στους 45°C στα 200s.

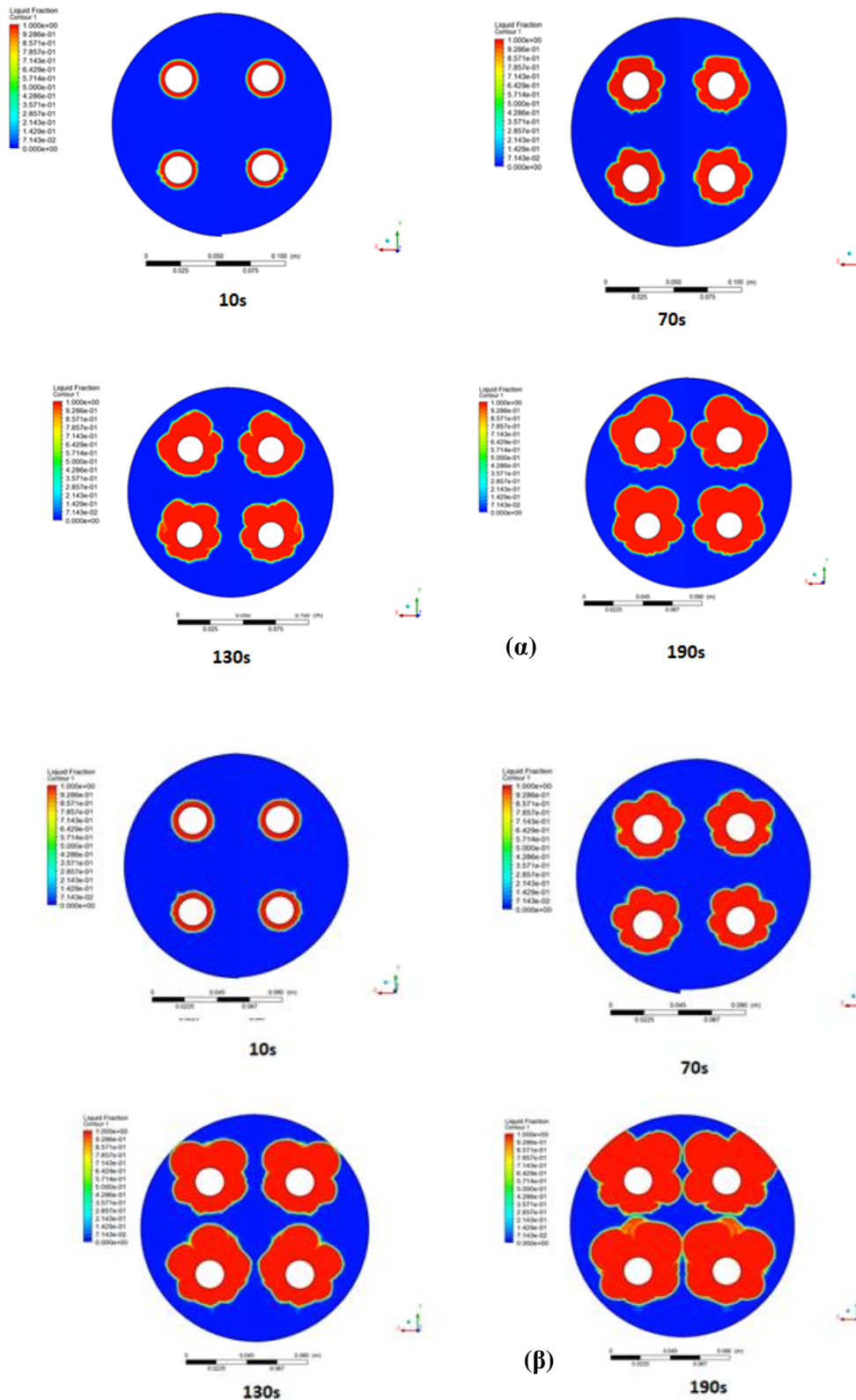
Στα παρακάτω σχήματα θα παρουσιαστούν τα χρονικά βήματα για τα παραπάνω αποτελέσματα που εμφανίστηκαν στα 200s ώστε να εμφανίσει την χρονική διαδικασία του πεδίου από την αρχή μέχρι το σημείο το οποίο έφτασε στα 200s.



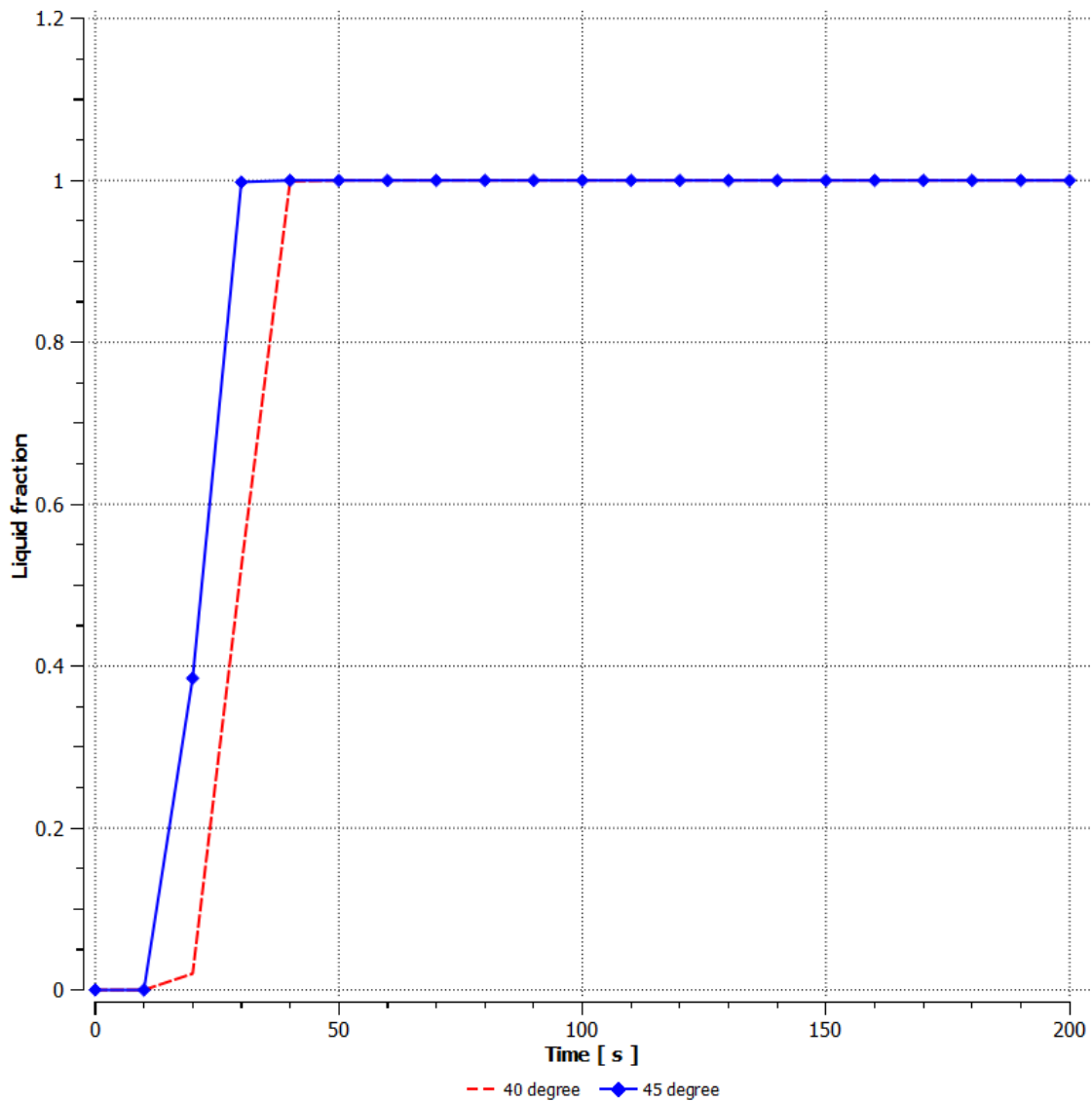
Σχήμα 7.12 : Ανάπτυξη πεδίου θερμοκρασίας ανά χρονικό διάστημα α) για 40°C β) για 45°C.



Σχήμα 7.13 : Ανάπτυξη πεδίου ταχυτήτων ανά χρονικό διάστημα α) για 40°C β) για 45°C



Σχήμα 7.14 : Ανάπτυξη πεδίου τήξης ανά χρονικό διάστημα α) για 40°C β) για 45°C..



Σχήμα 7.15 : Εξέλιξη του τήγματος σε σχέση με το χρόνο.

Στα παραπάνω χρονικά αποτελέσματα ξεκάθαρο ότι η διαδικασία της τήξης και των φαινομένων της ταχύτητας και της θερμοκρασίας μαζί είναι πιο έντονα στην περίπτωση των 45°C. Παρατηρείται ότι στα 130s τα φαινόμενα και το τήγμα είναι το αντίστοιχο στους 40 βαθμούς στα 190s.

Στο διάγραμμα επίσης φαίνεται η διαδικασία της τήξης να αρχίζει 10s για 45 βαθμούς ενώ λίγο αργότερα για τους 40.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στο πλαίσιο παρουσίασης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η τήξη κατά μήκος μιας κυλινδρικής επιφάνειας γεμάτη με υλικό αλλαγής φάσης (γάλλιο) , όπου αποτελούταν από τέσσερεις πηγές θερμότητας συμμετρικά. Η πραγματοποίηση της τήξης έγινε χρησιμοποιώντας δισδιάστατη προσομοίωση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) μέσω ενός εμπορικού λογισμικού.

Αρχικά έγινε μια ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου για τα υλικά αλλαγής φάσης και την χρήση τους στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας . Υστέρα πραγματοποιείτε η ανάλυση του προβλήματος και η δημιουργία της δισδιάστατης γεωμετρίας του μοντέλου , γίνεται εισχώρηση του στο εμπορικό λογισμικό και αρχίζει η διαδικασία της προεργασίας του υπό μελέτη μοντέλου. Τέλος ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπου τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι.

- Η ανάπτυξη της θερμοκρασίας , του τήγματος , και της ταχύτητας περιγραμμάτων για το υπό μελέτη κύλινδρο με τις κυλινδρικές πηγές θερμότητας για δυο εφαρμοζόμενες θερμοκρασίες 40°C και 45°C ερευνήθηκαν ώστε να υποδείξουν την επίδραση που έχουν στο χρόνο τήξης για την συγκεκριμένη γεωμετρία.
- Η ανάπτυξη των διανυσματικών ταχυτήτων και την δημιουργία των δινών με μηδενικές ταχύτητες στο κέντρο τους.
- Το χρονικό στάδιο ανάπτυξης της τήξης κατά την διαδικασία της ρευστοποίησης του PCM. Στους 45 βαθμούς να αγγίζει γρηγορότερα τα εξωτερικά τοιχώματα από ότι στους 40 στο ίδιο χρονικό διάστημα.
- Διαπίστωση μεταφοράς θερμότητας μέσω θερμικής αγωγής και φυσικής συναγωγής.

8.1 Μελλοντική Εργασία

Για την ανάπτυξη περαιτέρω ερευνάς της συγκεκριμένης διπλωματικής :

- Τρισδιάστατη επίλυση του προβλήματος
- Διερεύνηση με αλλαγή σχήματος στις πηγές θερμότητας από κυλινδρικές να είχαν κάποια πτερύγια (fins) ώστε να μελετηθεί και να συγκριθεί η ανάπτυξη του τήγματος με της αντίστοιχες κυλινδρικές.
- Μαζί με την διερεύνηση με τα πτερύγια μπορεί να γίνει και η ενσωμάτωση αλλού μεταλλικού υλικού αλλαγής φάσης με κράματα ή και ενσωμάτωση νανοσωματιδίων.
- Πειραματική διερεύνηση

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Έντυπη βιβλιογραφία

- [1] Ioan Sarbu, Calin Sebarchievici, “A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage”, Sustainability Review, 2018
- [2] World Bioenergy Association, “GLOBAL BIOENERGY STATICS 2020 “ .
- [3] IEA-ESTAP and IRENA, “Thermal Energy Storage, Technology Brief E17” 2017
- [4] S. Kalaiselvam and R. Parameshwaran , “ THERMAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABILITY “ , Academic Press
- [5] Διπλωματική Εργασία: “ Φόρτιση υλικών αλλαγής φάσης(PCMs) με ηλιακούς συλλέκτες για εφαρμογές θέρμανσης κτιρίων στην Αθηνά, με η χωρίς απομάστευση νερού χρήσης” της ΔΗΜΗΤΡΑ – ΤΖΕΜΑ ΣΤΕΦΗ , ΕΜΠ, Ιούλιος 2016
- [6] Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar , “ Μεταφορά μάζας και θερμότητας”, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 5^η έκδοση
- [7] Ibrahim Dinçer, Marc A. Rosen, “ THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS and APPLICATIONS” , WILEY-2ND Edition
- [8] Kai Wang, Zhen Qin, Wei tong, Chenzhen ji, “Thermal Energy Storage For Solar Energy Utilization: Fundamentals and Applications”, September 2020
- [9] PhD Thesis: “Thermal energy storage in buildings through phase change materials (PCM) incorporation for heating and cooling purposes” by Lidia Navaro Farré, University of Lleida, Spain, July 2016
- [10] Pedro Pardo, Alexandre Deydier, Zoé Anxionnaz-Minvielle, Sylvie Rougé, Michel Cabassud, “A review on high temperature thermochemical heat energy storage.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2014
- [11] Jan Košny, “ PCM-Enhanced Building Components”, Springer.
- [12] PhD thesis : “ADVANCEMENT IN THERMAL ENERGY STORAGE USING PHASE CHANGE MATERIALS” by Rami Mohammad Reda Saeed , Missouri university of science and technology, 2018
- [13] A. Váz Sá , R. M. S. F. Almeida , H. Sousa , J. M. P. Q. Delgado, “Numerical Analysis of the Energy Improvement of Plastering Mortars with Phase Change Materials”, April 2014
- [14] Amir Reza Vakhshouri , “ Paraffin as Phase Change Material”, December 2019
- [15] Yathin Krishna, Navid Aslfattahi, R. Saidur, M. Faizal and K.C. Ng, “Fatty acid/metal ion composite as thermal energy storage materials”, 2020
- [16] Manish K. Rathod, “Thermal Stability of Phase Change Material”, August 2018

- [17] I Samylingam, K Kadirgama , Navid Aslfattahi, L samylingam , D Ramasamy , W S W Harun , M Samykano and R Saidur , “ Review on thermal energy storage and eutectic nitrate salt meltin point” doi:10.1088/1757-899X/1078/1/012034
- [18] Arnold Martinez, Mauricio Carmona, Cristobal Cortez and Inmaculada Arauzo, “ Characterization of Thermophysical Properties of Phase Change Materials Using Unconventional Experiment Technologies”, September 2020
- [19) Διπλωματική Εργασία, “Υπολογιστική Προσομοίωση Δοχείου Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας με Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ)”, του Αποστολόπουλος Βασίλη, ΕΜΠ, Ιούνιος 2012.
- [20] Graduation thesis : “ Macroencapsulation of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage “ by Swetha Pendyala , University of south Florida 2012
- [21] João M. P. Q. Delgado , Joana C. Martinho , Ana Vaz Sá , Ana S. Guimarães , Vitor Abrantes : “ Thermal Energy Storage with Phase Change Materials A Literature Review of Applications for Buildings Materials “ , Springer
- [22] S.S Chandel , Tanya Agarwal , “ Review of current state of research on energy storage, toxicity , health hazards and commercialization of phase change materials “ , Renewable and Sustainable Energy Reviews , Elsevier 2016
- [23] A. Felix Regin , S.C. Solanki , J.S Saini , “ An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules : Numerical investigator “ , Renewable Energy , Elsevier 2008
- [24] M. Mofijur , Teuku Meurah Indra Mahlia , Arridina Susan Silitonga , Hwai Chyuan , Mahyar Silakhori , Muhammad Heikal Hasan , Nandy Putra and S.M. Ashrafur Rahman , “ Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview “ , Energies 2020
- [25] Banavath Srinivasaraonaik , Shishir Sinha and Lok Pratap Singh , “ Phase Change Materials for Renewable Energy Storage Applications “ , 2021
- [26] Khaireldin Faraj , Mahmoud Khaled , Jalal Faraj , Farouk Hachem andCathy Castelain , “ A Review on Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Buildings: Heating and Hybrid Applications “ , 2020
- [27] A.E Kabeel , A. Khalil ,SM Shalaby , M.E Zayed , “ Experimental investigation of thermal performance of flat and v-corrugated plate solar air heaters with and without PCM thermal energy storage “, Elsevier 2016
- [28] Jahan Zeb Alvi , Yongqiang Feng , Qian Wang 1 , Muhammad Imran , Lehar Asip Khan and Gang Pei , “ Effect of Phase Change Material Storage on the Dynamic Performance of a Direct Vapor Generation Solar Organic Rankie Cycle System “ , Energies 2020
- [29] R.S Amano and B. Sunden , “ Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer) , WIT_{press}

[30] Πτυχιακή Εργασία , “ Υπολογιστική προσομοίωση στρωτής ροής ρευστού σε απότομη εκτόνωση αγωγού “ , των Θεοδώρου Ιωάννη και Ρήγα Αθανάσιου , ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΤ , 2017

[31] Laurentiu Nastac , Koullis Pericleous , Adrian S. Sabau , Lifeng Zhang and Brian G. Thomas , “ CFD Modeling and Simulation in Materials Processing “ , Springer 2018

[32] T. Bouhal , Saïf ed-Dîn Fertahi , T. Kousksou , A. Jamil , “ CFD thermal energy storage enhancement of PCM filling a cylindrical cavity equipped with submerged heating sources “ , Elsevier 2018

[33] Alejandro Alonzo – García , Claudia del Carmen Gutiérrez-Torres and José Alfredo Jiménez-Bernal “ Computational Fluid Dynamics in Turbulent Flow Applications “ , Research Gate 2016

[34] Διπλωματική Εργασία , “ Δισδιάστατη Υπολογιστική Προσομοίωση Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας με Υλικό Αλλαγής Φασής Ενισχυμένο Με Νανοσωματίδια Μετάλλων “ , ΕΜΠ , 2017

Ηλεκτρονική ισότοποι:

[35] <https://www.machinedesign.com/learning-resources/whats-the-difference-between/document/21834474/whats-the-difference-between-conduction-convection-and-radiation>

[36] https://www.solidworks.com/sw/docs/thermal_2010_ENG_FINAL.pdf

[37] <https://www.motherearthnews.com/diy/buildings/snow-brick-mortar-arctice-circle-ze0z2002znad>

[38] <https://www.abc.net.au/science/articles/2010/03/16/2840402.htm>

[39] https://msnucleus.org/membership/ngss/sixth_ngss/06water%20from%20air.html

[40] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115002038>

[41] <https://www.koehlerinnovative.com/kis-en/microencapsulation/microencapsulation.php>

[42] <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>

[43] www.Ansys.com

[44] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node361.htm>