



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δισδιάστατη Υπολογιστική Προσομοίωση Αποθήκευσης
Θερμικής Ενέργειας με Υλικό Αλλαγής Φάσης Ενισχυμένο Με
Νανοδομημένα Μετάλλων

Άγγελος Κουσάνας

Επιβλέπουσα : Ειρήνη Κορωνάκη
Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Ημερομηνία παράδοσης
14/7/2017

Λευκή σελίδα



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

SECTION OF THERMAL ENGINEERING

Two dimensional modeling of thermal energy storage in phase
change material with metal nanoparticles augmentation

Aggelos Kousanas

ADVISOR: Irene Koronaki
Assistant Professor N.T.U.A.

Date

14/7/2017

Λευκή σελίδα

Copyright © ΚΟΥΣΪΝΑΣ ΑΓΓΕΛΟΣ 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής, κλείνει και ο πρώτος κύκλος εκπαίδευσης και σπουδών. Οι Σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αποτελεί τον τελευταίο και πλέον ενδιαφέροντα σταθμό της πορείας αυτής.

Διακύβευμα της επόμενης περιόδου της ζωής μου είναι η αξιοποίηση των γνώσεων και εμπειριών που απέκτησα όλα αυτά τα χρόνια, τόσο για την επίτευξη προσωπικών στόχων και επιθυμιών, όσο και για την εξυπηρέτηση, των κοινωνικών αναγκών, που υπάρχουν και που θα προκύψουν.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τη επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα Ειρήνη Κορωνάκη, για το πολύ ενδιαφέρον θέμα που μου εμπιστεύτηκε με την παρούσα διπλωματική. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μιχάλη Νίτσα για τη καθοδήγηση του, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου, για την στήριξη, την κατανόηση στις δύσκολες στιγμές, και την εμπιστοσύνη που μου δείχνουν. Μαζί, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους φίλους μου για την αδιάληπτη παρουσία και συντροφικότητα τους, στα εύκολα και στα δύσκολα.

Λευκή σελίδα

Περίληψη

Με την παρούσα διπλωματική επιχειρήθηκε η υπολογιστική προσομοίωση της αποθήκευσης ενέργειας σε δοχείο με υλικό αλλαγής φάσης. Ακόμα μελετήθηκε η προσθήκη διαφόρων νανοσωματιδίων στο υλικό και η επίδραση αυτής στη θερμική του συμπεριφορά.

Η εργασία περιλαμβάνει ενδελεχή παρουσίαση της τεχνολογίας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης και της προόδου που συντελείται τα τελευταία χρόνια πάνω στο αντικείμενο

Συγκεκριμένα για τη δημιουργία και επίλυση του υπολογιστικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής Fluent 17 και το ICEM CFD 17 της Ansys Inc.

Στην εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά η χρήση του προγράμματος, η διαδικασία σύνθεσης και επίλυσης του μοντέλου αλλά και μια επιλογή των κρίσιμων χαρακτηριστικών του μαθηματικού υπόβαθρου της διαδικασίας αυτής.

Λευκή σελίδα

Abstract

In this thesis, it was attempted a numerical investigation of thermal energy storage, in a phase change material cylinder. Part of this investigation was the addition of nano-materials in the phase change material and their effect on its thermal properties.

This thesis also includes an extended review on thermal energy storage with phase change materials and the recent progress on this field.

For numerical investigation, the CFD programs Ansys Fluent 17 and Ansys ICEM CFD 17 were used.

In this thesis, the procedure followed to create and solve this model, is explained in details as well as critical aspect of its mathematical foundation

Λευκή σελίδα

Table of Contents

Κατάλογος εικόνων και σχημάτων	13
1. Εισαγωγή	16
1.1 Παρουσίαση κεφαλαίων	16
2. Ενεργειακή κατάσταση	18
3. Ανάγκες σε θερμική ενέργεια	21
3.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας	22
3.2 Θερμοχημική αποθήκευση	23
3.3 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας	24
3.3.1 Πλεονεκτήματα	24
3.3.2 Αναγκαία χαρακτηριστικά	24
3.3.4 Κατηγοριοποίηση	25
3.3.5 Μειονεκτήματα	29
4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	31
4.1. Συμβατότητα-Διαβρωτικότητα.....	31
4.2. Αντιμέτωπιση χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας	32
4.2.3 Γεωμετρία και προσανατολισμός	33
4.2.2 Αύξηση επιφάνειας	34
4.2.3 Προσθήκη υλικών	37
4.3 Εφαρμογές PCM	43
4.3.1 Εφαρμογές σε κτήρια.....	43
4.3.2 Εφαρμογή στις ηλεκτρονικές συσκευές.....	46
4.3.3 Αποθήκευση ηλιακής θερμικής ενέργειας.....	48
4.3.4 Νέες τεχνολογίες	50
5 Υπολογιστική προσομοίωση.....	52
5.1 Γενική περιγραφή	52
5.2 Φυσικό πρόβλημα	53
5.3 Μαθηματική μοντελοποίηση	53
5.3 Αριθμητική επίλυση.....	57
5.3.1 Προετοιμασία επίλυσης	58
5.3.2 Επίλυση	78
6 Ανεξαρτητοποίηση πλέγματος και χρονικού βήματος	80
7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	83

7.1 Αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης	94
8 Συμπεράσματα	103
9 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	104
Bibliography	105

Κατάλογος εικόνων και σχημάτων

Εικόνα 1: Κάλυψη ενεργειακών αναγκών [2].....	18
Εικόνα 2: Παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ σε γιγατόνους ανά έτος [3]	19
Εικόνα 3: Παροχή και ζήτηση της ενέργειας στην Ελλάδα για το 2015 [3]	20
Εικόνα 4: Παροχή ηλιακής ενέργειας σε ετήσια και ημερήσια βάση [4]	20
Εικόνα 5: Αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενή διαστρωματωμένης θερμοκρασίας...	23
Εικόνα 6: Συγκριτικός πίνακας αποθήκευσης 1850 kWh για τα διάφορα μέσα [7]	24
Εικόνα 7 : Κατηγορίες των υλικών αλλαγής φάσης [10].....	26
Εικόνα 8: Πίνακας Ιδιοτήτων συνήθων οργανικών PCM [11]	27
Εικόνα 9: Πίνακας Ιδιοτήτων συνήθων μη οργανικών PCM [11]	28
Εικόνα 10: Πίνακας Ιδιοτήτων μεταλλικών PCM [11].....	29
Εικόνα 11: Συμβατότητα ένυδρου άλατος Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O με διάφορα μεταλλικά δοχεία(11).....	32
Εικόνα 12 : Επίδραση του προσανατολισμού στη τήξη υλικών αλλαγής φάσης [17]	34
Εικόνα 13: Τήξη χωρίς περυσία	35
Εικόνα 14: Επίδραση περυσίων στη τήξη	35
Εικόνα 15: Αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε διάταξη με σφαιρίδια PCM [18]	36
Εικόνα 16: Μεταλλικά πλέγματα-αφροί χαλκού με μειούμενο πορώδες [21].....	38
Εικόνα 17: Μεταλλικά πλέγματα-αφροί χαλκού με μειούμενο πορώδες μετά την πλήρωση του με παραφίνη [21]	38
Εικόνα 18: Δείγματα αυξανόμενης σύστασης σε EG πριν και μετά την τήξη του PCM [23]	39
Εικόνα 19: Χρόνοι τήξης [25]	40
Εικόνα 20: Επίδραση της κλίσης ισοσκελούς τραπεζίου στο χρόνο στερεοποίησης, παραφίνης 2% περιεκτικότητας σε νανοσωματίδια [28]	41
Εικόνα 21: Διάγραμμα εφαρμογών PCM σε κτήρια [37]	44
Εικόνα 22: Γυψοσανίδες με υλικό αλλαγής φάσης	45
Εικόνα 23: Πειραματική διάταξη κλιματισμού με υλικό αλλαγής φάσης	46
Εικόνα 24: Υστέρηση θερμοκρασιακής αύξησης της συσκευής [11].....	47
Εικόνα 25: Εξομάλυνση της θερμοκρασίας συσκευής κατά τη διακοπτόμενη λειτουργία [11]	47
Εικόνα 26: Ηλιακός θερμοσίφωνας με PCM [11]	49

Εικόνα 27: Εναλλάκτης κυκλοφορίας	49
Εικόνα 28: Διάταξη αποθήκευσης με PCM σε ανακυκλοφορία.....	50
Εικόνα 29: Θερμοκρασιακή απόκριση του σύνθετου και του συμβατικού υλικού [46]..	51
Εικόνα 30: Γεωμετρία του μοντέλου [48]	58
Εικόνα 31: Δισδιάστατο πλέγμα με τα στοιχεία του [49]	59
Εικόνα 32: Απεικόνιση μεγέθους Skewness [49].....	60
Εικόνα 33: Λόγος διαστάσεων των πλευρών [49]	61
Εικόνα 34: Γενικές ιδιότητες.....	62
Εικόνα 35: Φυσικά Μοντέλα [48]	63
Εικόνα 36: Ιδιότητες σύνθετων υλικών.....	64
Εικόνα 37: Δημιουργία νέων υλικών [48]	64
Εικόνα 38: Ορισμός ιδιοτήτων των περιοχών του υπολογιστικού πλέγματος [48].....	66
Εικόνα 39: Συνοριακή συνθήκη για ζεστό τοίχο [48].....	67
Εικόνα 40: Συνοριακή συνθήκη για εξωτερικό τοίχο [48]	67
Εικόνα 41: Segregated και coupled solvers [50].....	69
Εικόνα 42: Πρώτης τάξης ανάντι σχήμα.....	72
Εικόνα 43: Δεύτερης τάξης ανάντι σχήμα [55]	73
Εικόνα 44: Καταγραφή των υπολοίπων σε κάθε επανάληψη και χρονικό βήμα	76
Εικόνα 45: Διαφορά ποσοστών τήγματος για τα πλέγματα 130.000 και 100.000 κόμβων	80
Εικόνα 46: Διαφορά ποσοστών τήγματος για 130.000 και 48.000 υπολογιστικούς κόμβους.....	81
Εικόνα 47: Διαφορά από το ποσοστό τήγματος για 0.01s.....	82
Εικόνα 48: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες για σύνθετο υλικό PCM-Cu1% και χρονική στιγμή 900 s	84
Εικόνα 49: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες για καθαρό PCM και χρονική στιγμή 900s..	84
Εικόνα 50: Ισοεπιφάνειες του μέτρου της ταχύτητας	86
Εικόνα 51: Διανύσματα ταχύτητας	87
Εικόνα 52: Λεπτομέρεια του διανυσματικού πεδίου	87
Εικόνα 53: Κυκλοφορία κοντά στο ζεστό τοίχωμα	88
Εικόνα 54: Ανάπτυξη τήγματος στα 700s.....	89
Εικόνα 55: Ανάπτυξη τήγματος στα 600s.....	89
Εικόνα 56: Ανάπτυξη τήγματος στα 500s.....	89
Εικόνα 57: Ανάπτυξη τήγματος στα 400s.....	89
Εικόνα 58: Ανάπτυξη τήγματος στα 200s.....	89
Εικόνα 59: Ανάπτυξη τήγματος στα 100s.....	89
Εικόνα 60: Αναπτυξη τήγματος στα 300s.....	89
Εικόνα 61: Ανάπτυξη τήγματος στα 800s.....	89
Εικόνα 62: Ισοθερμοκρασιακές στα 100s	90
Εικόνα 63: Ισοθερμοκρασιακές στα 200s	90
Εικόνα 64: Ισοθερμοκρασιακές στα 300s	90
Εικόνα 65: Ισοθερμοκρασιακές στα 400s	90
Εικόνα 66: Ισοθερμοκρασιακές στα 600s	90

Εικόνα 67: Ισοθερμοκρασιακές στα 500s.....	90
Εικόνα 68: Ισοθερμοκρασιακές στα 700s	90
Εικόνα 69: Ισοθερμοκρασιακές στα 800s.....	90
Εικόνα 70: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 100s	91
Εικόνα 71: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 200s	91
Εικόνα 72: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 300s	91
Εικόνα 73: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 400s	91
Εικόνα 74: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 600s	91
Εικόνα 75: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 500s	91
Εικόνα 76: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 700s	91
Εικόνα 77: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 800s	91
Εικόνα 78: Λειώσιμο PCM σε διάταξη ομόκεντρων κυλίνδρων [56].....	92
Εικόνα 79: Γραμμές ροής , ισοθερμοκρασιακές και μέτωπο του τήγματος αντίστοιχα [57]	93
Εικόνα 80: Εξέλιξη του τήγματος σε σχέση με το χρόνο για τις διάφορες περιεκτικότητες	94
Εικόνα 81: Εξέλιξη της αποθηκευμένης ενέργειας προς το χρόνο για διάφορες περιεκτικότητες.....	95
Εικόνα 82: Αύξηση ποσοστού του τήγματος για κάθε περιεκτικότητα.....	97
Εικόνα 83: Ποσοστιαία αύξηση του τήγματος για κάθε περιεκτικότητα	98
Εικόνα 84: Ποσοστιαία αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας για κάθε συγκέντρωση	99
Εικόνα 85: Διάγραμμα απεικόνισης ποσοστιαίας αύξησης του τήγματος ανάμεσα στις διαφορετικές περιεκτικότητες σε χαλκό (1%) - (3%) για τις διαφορετικές θερμοκρασίες	101

1. Εισαγωγή

1.1 Παρουσίαση κεφαλαίων

Κεφάλαιο 1

Σύντομη παρουσίαση των περιεχομένων κάθε κεφαλαίου

Κεφάλαιο 2

Σύντομη περιγραφή της παγκόσμιας ενεργειακής κατάστασης, της αναγκαιότητας των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας και των τεχνολογιών αποθήκευσης

Κεφάλαιο 3

Παρουσίαση των βασικών τεχνολογιών αποθήκευσης θερμότητας

Κεφάλαιο 4

Βιβλιογραφική επισκόπηση της ερευνητικής δραστηριότητας των τελευταίων χρόνων, πάνω στην ανάπτυξη της τεχνολογίας αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης.

Κεφάλαιο 5

Παρουσίαση της μαθηματικής μοντελοποίησης, της υπολογιστικής προσομοίωσης με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού. Περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής και επίλυσης του μοντέλου.

Κεφάλαιο 6

Παρουσιάζεται η ανεξαρτητοποίηση της επίλυσης και των αποτελεσμάτων κατ' επέκταση, από το υπολογιστικό πλέγμα και το χρονικό βήμα του που επιλέχθηκε.

Κεφάλαιο 7

Γίνεται αναλυτική παρουσίαση και επεξεργασία και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Κεφάλαιο 8

Στο κεφάλαιο αυτό, συμπυκνώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

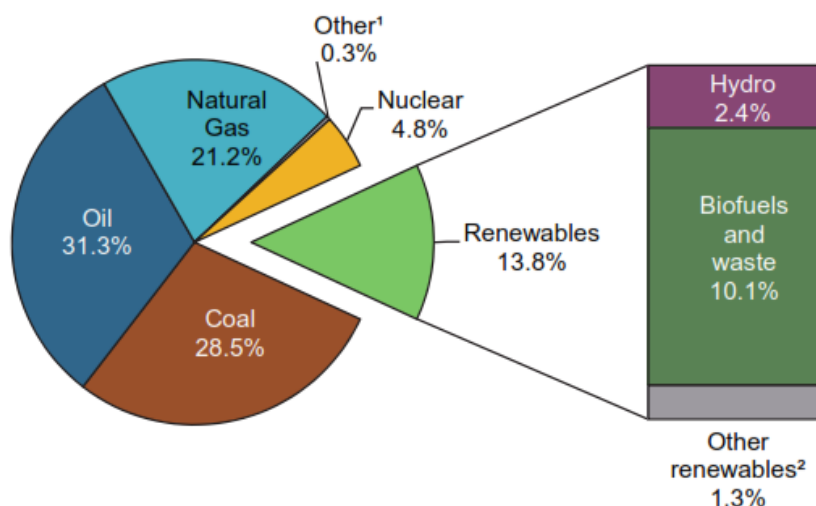
Κεφάλαιο 9

Στο κεφάλαιο, καταγράφονται κάποιες προτάσεις, για περαιτέρω έρευνα με βάση την βιβλιογραφία αλλά και την παρούσα εργασία.

2. Ενεργειακή κατάσταση

Η ολοένα αυξανόμενες παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς και η αναπόφευκτη εξάντληση των πετρελαϊκών κοιτασμάτων, έστρεψαν, κατά τις τελευταίες δεκαετίες το ερευνητικό ενδιαφέρον, στις ανανεώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον, πηγές ενέργειας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως το 40% των νέων ηλεκτροπαραγωγών μονάδων αφορά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ προβλέπεται το ποσοστό αυτό να ξεπεράσει το 60% στο 2020. [1]

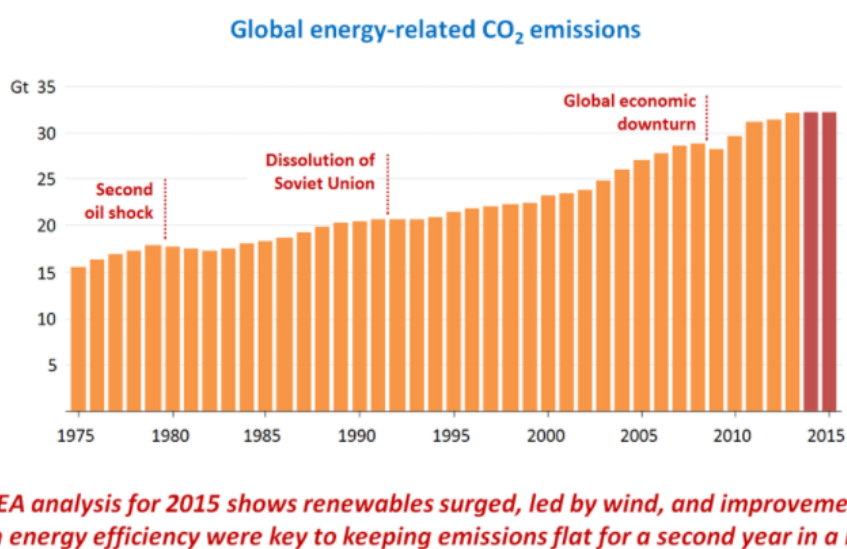
Χωρίς να έχει πάψει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνουμε να προέρχεται από ορυκτά καύσιμα (σε ποσοστό >80 %), οι διάφορες τεχνολογίες δέσμευσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές εξυπηρετούν ένα, **διαρκώς διογκούμενο**, μέρος της παγκόσμιας ζήτησης. Κυρίαρχες είναι οι τεχνολογίες βιοκαυσίμων, και υδροηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η ηλιακή και αιολική ενέργεια, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 1: Κάλυψη ενεργειακών αναγκών [2]

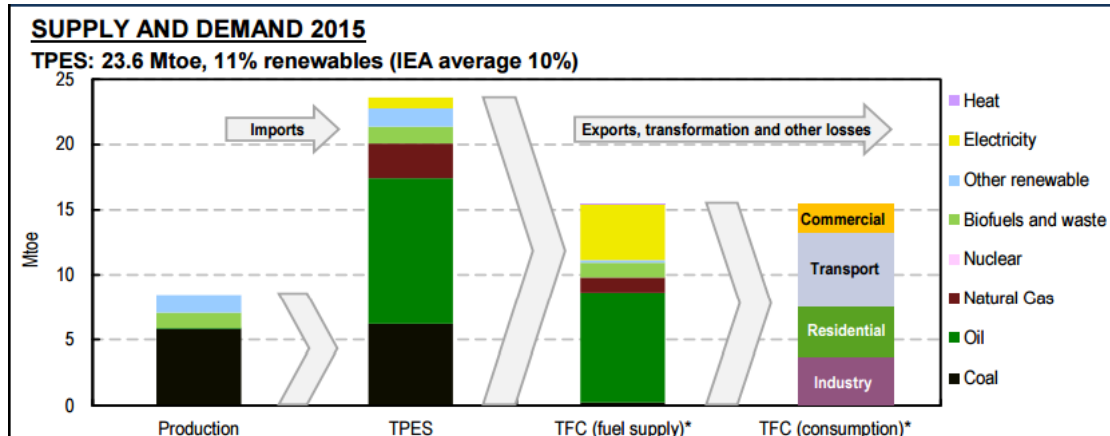
Πέρα από τον κίνδυνο εξάντλησης των ορυκτών-μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιχειρούν να απαντήσουν και σε ένα άλλο μεγάλο

πρόβλημα της εποχής, αυτό της περιβαλλοντικής κρίσης τόσο στο επίπεδο της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της Γης, όσο και σε επίπεδο ρύπανσης της ατμόσφαιρας με επικίνδυνα αέρια που προέρχονται από την καύση των ορυκτών. Τόσο το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) όσο και τα οξείδια του θείου (SO_x) και αζώτου (NO_x) επιδρούν καθοριστικά στην υποβάθμιση της ποιότητας της ζωής του ανθρώπου. Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το βασικό αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου και γίνονται προσπάθειες ελέγχου της εκπομπής του. Σύμφωνα με την International Energy Agency (IEA) η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα είναι μεγαλύτερη κατά 60% από την παραγωγή εκείνη που θα έχει, μέχρι το 2035, αυξήσει τη παγκόσμια μέση θερμοκρασία κατά 2 °C, πράγμα που σημαίνει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας με απρόβλεπτες συνέπειες για το περιβάλλον και το παγκόσμιο κλίμα. Ωστόσο το 2015, είναι η πρώτη χρονιά τα τελευταία 40 χρόνια, που δεν παρατηρήθηκε αύξηση των εκπομπών, με παράλληλη ανάπτυξη της παγκόσμια οικονομίας.



Εικόνα 2: Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ σε γιγατόνους ανά έτος [3]

Η Ελλάδα σύμφωνα με στοιχεία τις IEA, αν και χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε ποσοστό μεγαλύτερο από το μέσο όρο των υπόλοιπων μελών, ωστόσο οι εκπομπές της σε διοξείδιο είναι μεγαλύτερες του μέσου όρου. Επίσης μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών της αναγκών καλύπτεται, είτε με την εισαγωγή πετρελαίου-φυσικού αερίου, είτε ακόμα και με την εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών αφορούν τις κατοικίες. Το ποσοστό αυτό, όπως θα περιγράψει και παρακάτω, αποτελεί πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των θερμικών ηλιακών και των εφαρμογών, υλικών αλλαγής φάσης.

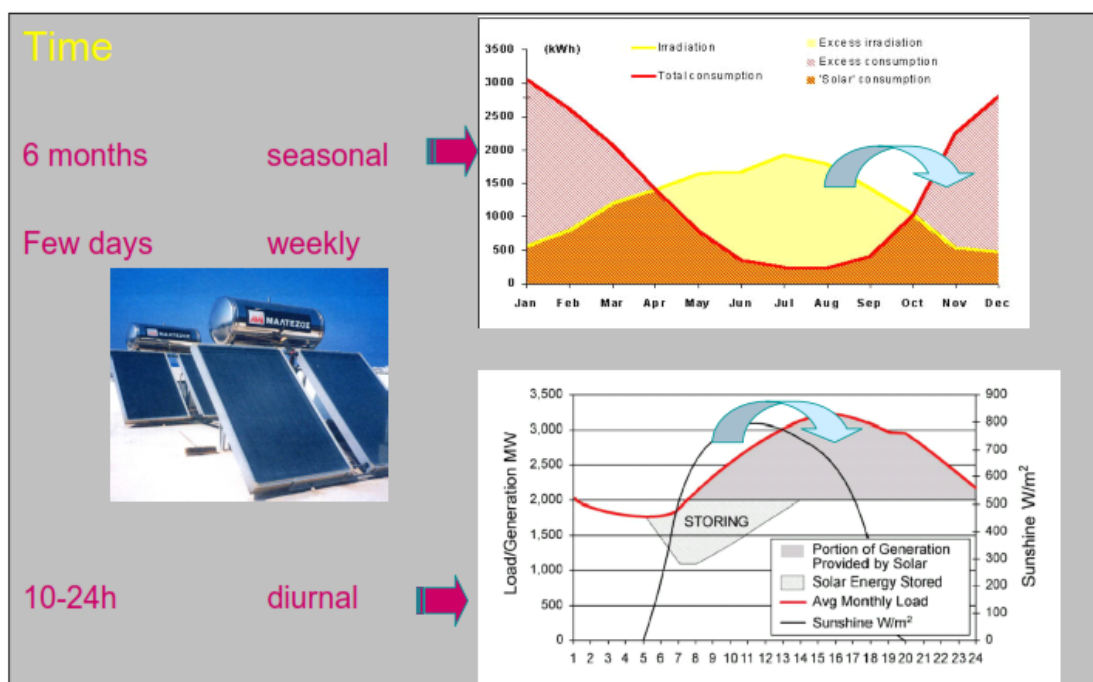


Εικόνα 3: Παροχή και ζήτηση της ενέργειας στην Ελλάδα για το 2015 [3]

Τέλος, τα ορυκτά καύσιμα και ειδικά το πετρέλαιο βρίσκουν, μέσα από τα παράγωγά τους (πλαστικά, ρευστά χημικά κλπ), πληθώρα εφαρμογών στο βαθμό που θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε, πως η καύση τους αποτελεί σπατάλη πολύτιμων πόρων.

Ωστόσο, πέρα από το σχετικά νεαρό της τεχνολογίας δέσμευσης της ενέργειας που προέρχεται από τις ανανεώσιμες πηγές και τις συνακόλουθες δυσκολίες, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα είναι οι μεγάλες διακυμάνσεις στη παροχή ενέργειας, που **δυσκολεύουν την εξυπηρέτηση της ζήτησης.**

Χαρακτηριστικά, πολλές από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι περιοδικές ή έχουν άστατη συμπεριφορά, όπως είναι η νύχτα ή η συννεφιά για την ηλιακή ενέργεια, οι τυχαίες πτώσεις του ανεμολογικού δυναμικού κ.α.



Εικόνα 4: Παροχή ηλιακής ενέργειας σε ετήσια και ημερήσια βάση [4]

3. Ανάγκες σε θερμική ενέργεια

Για τις διάφορες μορφές ενέργειας που χρειαζόμαστε έχουν αναπτυχθεί και αντίστοιχες τεχνολογίες, με κέντρο βάρους την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο, μεγάλο κομμάτι των αναγκών μας σε ενέργεια είναι θερμικής φύσης, όπως οι ανάγκες για θέρμανση κτηρίων-κλιματισμό, ανάγκες σε ζεστό νερό χρήσης, ανάγκες της βιομηχανίας κ.α.

Οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας θα μπορούσαν, ειδικά για χαμηλότερες θερμοκρασίες, να εξυπηρετήσουν μέρος της ζήτησης, με τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για την υπέρβαση του μειονεκτήματος της διαφοράς ανάμεσα στη παραγωγή και τη κατανάλωση αναπτύσσονται, ειδικά τα τελευταία χρόνια, τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που μας επιτρέπουν να ισοσκελίζουμε την παραγωγή, με τη ζήτηση θερμικής ισχύος, κάνοντας έτσι **ρεαλιστική τόσο σε τεχνικούς όσο και σε οικονομικούς όρους**, την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (thermal energy storage- TES), μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για δέσμευση ενέργειας από θερμικά απόβλητα εργοστασίων ή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αυξάνοντας κερδίζοντας έτσι μια κατά τα άλλα χαμένη ισχύ.

Οι TES τεχνολογίες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας ως εξής:

- Αποθήκευση αισθητής θερμικής ενέργειας
- Αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας
- Αποθήκευση λανθάνουσας ενέργειας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι δύο πρώτες και δίνεται έμφαση στη τρίτη που αποτελεί και το πεδίο που αφορά την διπλωματική.

3.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας γίνεται μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας ενός υλικού. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι υγρά ή στερεά (τα αέρια αποκλείονται αφού αυξάνουν τον όγκο-πίεσή τους, κατά τη θέρμανση) και είναι συνήθως νερό, έλαια και διαλύματα αλάτων στην υγρή εκδοχή ή πέτρες και μέταλλα στην στερεή.

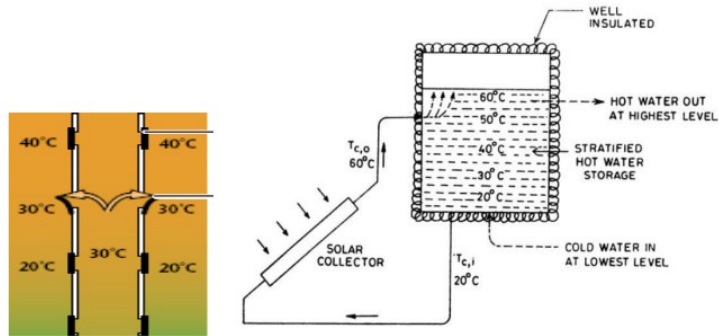
Ανάλογα με την εφαρμογή μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά με καλή αγωγιμότητα όπως τα μέταλλα, για γρήγορη απορρόφηση και απόδοση του θερμικού φορτίου ή πέτρες κ.α. όταν κάτι τέτοιο είναι ανεπιθύμητο.

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας, είναι η πιο διαδεδομένη μορφή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, με πιο συνηθισμένη την αποθήκευση ζεστού νερού, για οικιακή χρήση.

Προτερήματα αυτής της μεθόδου είναι το μικρό κόστος των αποθηκευτικών μέσων (νερό πέτρες κλπ) και ο εύκολος προσδιορισμός της συναλλασσόμενης ενέργειας αφού αυτή ισούται με το γινόμενο της μάζας, της ειδικής θερμοχωρητικότητας και της θερμοκρασιακής διαφοράς του μέσου πριν και μετά την πρόσδοση/αφαίρεση θερμότητας.

Στα μειονεκτήματα είναι η χαμηλή θερμοχωρητικότητα που κυμαίνεται από 10 έως 50 kWh/m³ πράγμα που σημαίνει μεγάλους όγκους για αποθήκευση ικανών ποσοτήτων άρα , μεγάλες επιφάνειες και αυξημένες απώλειες θερμότητας με την πάροδο του χρόνου [5]

Όσο αφορά την αποθήκευση σε υγρά μέσα, σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν, είναι η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του μέσου. Το υγρό μέσο είναι πυκνότερο όσο πιο χαμηλή θερμοκρασία έχει, οπότε και φυσικά προκύπτουν ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας μέσα στη δεξαμενή αποθήκευσης του υγρού. Όσο μικρότερη είναι η ζώνη με τις ενδιάμεσες θερμοκρασίες ανάμεσα στο ζεστό και το κρύο υγρό (νερό συνηθέστερα) τόσο πιο αποδοτική είναι η λειτουργία της διάταξης. Βέβαια μέσα από την αφαίρεση του ζεστού υγρού χρήσης ή του κρύου υγρού κατάλληλου για ψύξη (ανάλογα την εφαρμογή) και τη αναπλήρωση του κρύου ή ζεστού υγρού αντίστοιχα υπάρχει ο κίνδυνος ανάμειξης. Για το λόγο αυτό η προσθαφαίρεση του υγρού γίνεται από κατάλληλα σημεία όπως φαίνεται και στο σχήμα



Εικόνα 5: Αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενή διαστρωματωμένης θερμοκρασίας

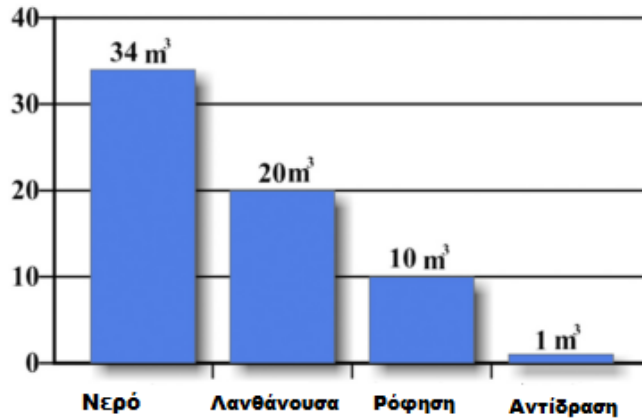
3.2 Θερμοχημική αποθήκευση

Η θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας γίνεται μέσα από μια αντιστρεπτή χημική αντίδραση για την οποία είναι απαραίτητη κάποια συναλλαγή θερμότητας. Συνήθως κατά την φόρτιση της αποθηκευτικής διάταξης χρησιμοποιούμε την ενέργεια που θέλουμε να αποθηκεύσουμε για τη αντίστροφη κάποιας διαδικασίας που όταν συμβαίνει κατά τον ευθύ τρόπο αποδίδει θερμότητα στο περιβάλλον. Υπάρχουν πολλές τέτοιες αντιδράσεις-διαδικασίες που αποδίδουν θερμική ενέργεια σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (50-1300 °C).

Ενδεικτικά τέτοιες αντιδράσεις είναι οι κύκλοι απορρόφησης, προσρόφησης, για τα διάφορα μέσα, ο κύκλος σύνθεσης και αποσύνθεσης θειικού οξέος κ.α.

Ο συγκεκριμένος τρόπος αποθήκευσης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον αφού μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά θερμότητας (έως και 1000 kWh/m³) και σχεδόν χωρίς απώλειες κατά το πέρασμα του χρόνου

Η τεχνολογία αυτή είναι σε ερευνητικό στάδιο ακόμα [6]



Εικόνα 6: Συγκριτικός πίνακας αποθήκευσης 1850 kWh για τα διάφορα μέσα [7]

3.3 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται κατά την αλλαγή φάσης ενός υλικού ή μείγματος, και αφορά την θερμότητα που δεσμεύει ή εκλύει κατά την αλλαγή αυτή. Γενικά η αλλαγή αυτή συμβαίνει σε σταθερή θερμοκρασία ή σε μικρό θερμοκρασιακό εύρος και τα ποσά ενέργειας που συναλλάσσονται ανηγμένα στη μάζα είναι αρκετά μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Επίσης η έρευνα επικεντρώνεται στην αλλαγή φάσης μεταξύ στερεής και υγρής μορφής διότι αν και έχει μικρότερη λανθάνουσα ενέργεια από την αλλαγή αέριας-υγρής φάσης, δεν παρουσιάζει τις τεχνικές δυσκολίες της τελευταίας, που προκύπτουν από την μεγάλη αύξηση του όγκου, στην αέρια μορφή [8]

3.3.1 Πλεονεκτήματα

Στα βασικά πλεονεκτήματα της αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας και των υλικών αλλαγής φάσης (phase change materials- PCM) συγκαταλέγονται η ικανότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μικρό όγκο, η συναλλαγή της ενέργειας σε σταθερή θερμοκρασία και η ποικιλία των θερμοκρασιών αυτών.

3.3.2 Αναγκαία χαρακτηριστικά

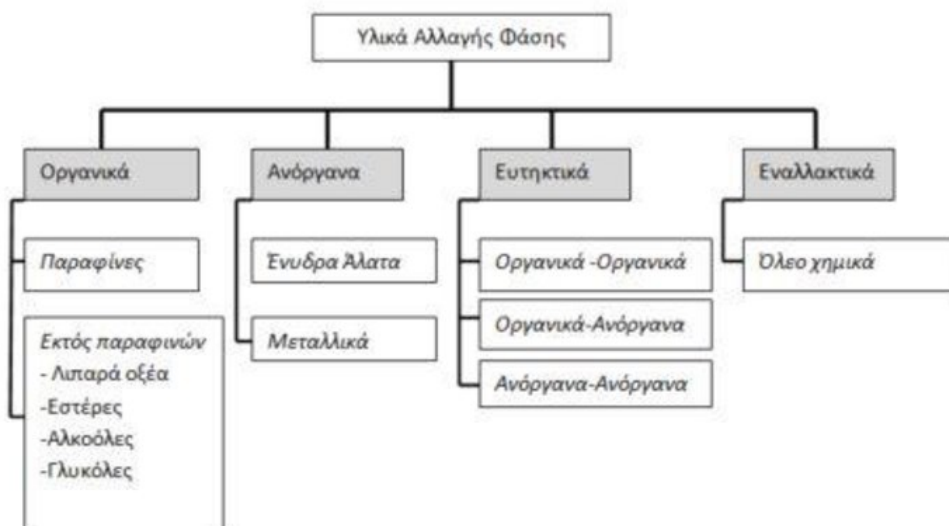
Πέρα όμως από την κατάλληλη θερμοκρασία για την εκάστοτε εφαρμογή, κατά την επιλογή του PCM, πρέπει να πληρούνται και κάποιες άλλες προϋποθέσεις, με διαφορετική κάθε φορά βαρύτητα. Συμπεριλαμβάνοντας τα ανωτέρω, μπορούμε να συνοψίσουμε τα χαρακτηριστικά που χρειάζεται να συγκεντρώνει ένα PCM ως εξής:

- Θερμοκρασία τήξης, κατάλληλη για την εφαρμογή
- Υψηλή πυκνότητα, αφού μειώνεται ο απαιτούμενος όγκος
- Μεγάλη λανθάνουσα ενέργεια αλλαγής φάσης, αφού αυτή αποτελεί τον «αποθηκευτικό» μας χώρο
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα, για γρήγορη παραλαβή και απόδοση ενέργειας - ανταπόκριση στις ανάγκες για θερμικά φορτία
- Χαμηλό κόστος και διαθεσιμότητα
- Ανθεκτικότητα σε ένα εύρος θερμοκρασιών για την αποφυγή αλλοιώσεων κατά τη λειτουργία
- Μεγάλη διάρκεια ζωής, που θα επιτρέπει πολλούς κύκλους τήξης-πήξης χωρίς αλλοιώσεις του υλικού
- Χημική σταθερότητα, για τους ίδιους λόγους
- Ελάχιστη μεταβολή του όγκου μεταξύ υγρής-στερεής φάσης, για διευκόλυνση αποθήκευσης, ελαχιστοποίηση νεκρού όγκου
- Απουσία τοξικότητας, για περιβάλλον και ανθρώπους
- Απουσία διαβρωτικής ικανότητας, για διευκόλυνση αποθήκευσης κλπ. [9]

3.3.4 Κατηγοριοποίηση

Τα διάφορα PCM ικανοποιούν, στον ένα ή στον άλλο βαθμό, κάποια από τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

Οι δύο μεγάλες ομάδες στις οποίες χωρίζονται τα PCM είναι στα οργανικά και ανόργανα υλικά. Τα οργανικά PCM χωρίζονται επίσης σε δύο μεγάλες υποομάδες, τις παραφίνες και τα άλλα ενώ τα ανόργανα χωρίζονται βασικά, σε μεταλλικά υλικά και ένυδρα άλατα-τήγματα αλάτων. Τέλος υπάρχουν ευτηκτικά μίγματα των προηγούμενων υλικών σε ποικίλους συνδυασμούς [10]



Εικόνα 7 : Κατηγορίες των υλικών αλλαγής φάσης [10]

3.3.4.1 Οργανικά PCM

Τα οργανικά PCM είναι γενικά, χημικά σταθερά και παραμένουν αναλλοίωτα σε ένα ικανοποιητικό εύρος θερμοκρασιών. Είναι επίσης μη διαβρωτικά, κατάλληλα για πληθώρα αποθηκευτικών δεξαμενών. Τα υλικά αυτά διακρίνονται σε παραφίνες ή μη-παραφίνες.

3.3.4.1.1 Παραφίνες

Οι παραφίνες είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες και αποτελούνται από μακριές αλυσίδες αλκανίων $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{n-2}-\text{CH}_3$. Όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι αλυσίδες τόσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης της παραφίνης [10].

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματά τους είναι το εύρος θερμοκρασιών που καλύπτουν 6-135 °C, η χημική σταθερότητα και η μεγάλη διάρκεια ζωής, η ικανοποιητική ικανότητα αποθήκευσης (~ 200 kJ/kg), η μικρή μεταβολή στον όγκο κατά τις μεταβολές, το μικρό κόστος. Το τελευταίο βέβαια αφορά βιομηχανικές παραφίνες, αφού η καθαρές παραφίνες είναι αρκετά ακριβές. Από την έλλειψη καθαρότητας της χημικής ουσίας προκύπτει και ένα θερμοκρασιακό εύρος, αντί για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία κατά την αλλαγή φάσης, γεγονός γενικά ανεπιθύμητο. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (~0,3 W/m K) και αποτελεί σημείο ενδιαφέροντος της έρευνας.

2.3.4.1.2 Λιπαρά οξέα

Τα λιπαρά οξέα έχουν εξίσου μεγάλες λανθάνουσες ενέργειες τήξης αλλά οι θερμοκρασίες στις οποίες αλλάζουν φάση, είναι περιορισμένες σε σχέση με τις παραφίνες (7.8-64 C) και σε χαμηλότερο θερμοκρασιακό εύρος. Είναι λοιπόν συχνότερη η χρήση τους στη συντήρηση τροφίμων και στον κλιματισμό . Είναι επίσης ακριβότερα από τις παραφίνες του εμπορίου, είναι ελαφρά διαβρωτικά, περισσότερο εύφλεκτα και δυσάρεστα στην οσμή. Επίσης, έχουν εξίσου χαμηλή θερμική αγωγιμότητα με τις παραφίνες. [9]

Όνομα	Είδος	T _m (°C)	Θερμότητα (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	C _p (kJ/kg)	k (W/m K)
Octadecane	Paraffin	29	244	814 (sol)	2150 (sol)	0.358 (sol)
				724 (liq)	2180 (liq)	0.152 (liq)
Heneicosane	Paraffin	41	294.9	773 (liq)	2386 (liq)	0.145 (liq)
Tricosane	Paraffin	48.4	302.5	777.6 (liq)	2181 (liq)	0.124 (liq)
Tetracosane	Paraffin	51.5	207.7	773.6 (liq)	2924 (liq)	0.137 (liq)
IGI 1230A	Blended paraffin	54.2	278.2	880 (sol)	2800 (liq)	0.25 (sol)
				770 (liq)		0.135 (liq)
Oleic acid	Fatty acid	13	75.5	871 (liq)	1744 (liq)	0.103 (liq)
Capric acid	Fatty acid	32	153	1004 (sol)	1950 (sol)	0.153 (liq)
				878 (liq)	1720 (liq)	
Lauric acid	Fatty acid	44	178	1007 (sol)	1760 (sol)	0.147 (liq)
				965 (liq)	2270 (liq)	
Palmitic acid	Fatty acid	64	185	989 (sol)	2200 (sol)	0.162 (liq)
				850 (liq)	2480 (liq)	
Stearic acid	Fatty acid	69	202	965 (sol)	2830 (sol)	0.172 (liq)
				848 (liq)	2380 (liq)	

Εικόνα 8: Πίνακας Ιδιοτήτων συνήθων οργανικών PCM [11]

3.3.4.2 Μη οργανικά PCM

3.3.4.2.1 Ένυδρα άλατα

Τα ένυδρα άλατα είναι ενώσεις ανόργανων αλάτων με νερό. Η αλλαγή φάσης υγρού-στερεού αποτελεί στην ουσία μια ενυδάτωση ή αφυδάτωση αντίστοιχα του ένυδρου άλατος που προσομοιάζει θερμοδυναμικά μια τυπική τήξη. Κατά το λιώσιμο γίνεται μια ολική ή μερική αφυδάτωση του ένυδρου προς παραγωγή, είτε άνυδρου άλατος, είτε ένυδρου με λιγότερα μόρια νερού. Τα ένυδρα άλατα αποτελούν τα πλέον μελετημένα PCM και στα προτερήματά τους συγκαταλέγονται, η μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα τήξης, η υψηλή, συγκριτικά με τις παραφίνες, θερμική αγωγιμότητα, η μικρή μεταβολή του όγκου τους και το χαμηλό κόστος.

Επίσης είναι σε μικρό βαθμό τοξικά και διαβρωτικά. Τα πλέον σημαντικά όμως στη λειτουργία τους είναι η υπόψυξη που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και

ο διαχωρισμός φάσεων, το γεγονός δηλαδή ότι λόγω του υπερκορεσμένου τήγματος το αλάτι ως βαρύτερο κατακάθεται, πράγμα που αλλάζει την σύσταση του ένυδρου. Και τα δύο αυτά προβλήματα επηρεάζουν την αποθήκευση ενέργειας στο PCM και αποτελούν σοβαρά μειονεκτήματα [12]

3.3.4.2.2 Τήγματα αλάτων

Τα τήγματα αλάτων παρουσιάζουν αντίστοιχες θερμοδυναμικές ιδιότητες με τα ένυδρα. Έχουν γενικά υψηλότερες θερμοκρασίες τήξης και χρησιμοποιούνται σε ηλιακές εγκαταστάσεις τόσο σαν PCM όσο και σαν HTF. Όπως και τα ένυδρα αντιμετωπίζουν προβλήματα υπόψυξης.

Μέτρα που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα αυτό θα παρουσιαστούν στη συνέχεια [11]

Χημική φόρμουλα	Όνομα	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική αγωγιμότητα (W/m K)
MgCl ₂ · 6H ₂ O	Magnesium chloride hexahydrate	117	168.6	1450 (liq) 1569 (solid)	0.579 (liq) 0.694 (solid)
CaCl ₂ · 6H ₂ O	Calcium chloride hexahydrate	29	170–192	1562 (liq) 1802 (solid)	0.561 (liq) 1.008 (solid)
NaSO ₄ · 10H ₂ O	Glauber's salts	32	251	1485 (solid)	0.544
NaNO ₃	Sodium nitrate	307	172	2260 (solid)	0.5
KNO ₃	Potassium nitrate	333	266	2110 (solid)	0.5
MgCl ₂	Magnesium chloride	714	452	2140 (solid)	NA
NaCl	Table salt (sodium chloride)	802	492	2160 (solid)	5.0

Εικόνα 9: Πίνακας Ιδιοτήτων συνήθων μη οργανικών PCM [11]

3.3.4.2.3 Μέταλλα

Τα μέταλλα και τα κράματα μετάλλων παρουσιάζουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, χημική σταθερότητα και αντοχή σε πολλούς κύκλους τήξης πήξης. Αν και η λανθάνουσα ενέργεια τήξης τους ανά κιλό, δεν είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με άλλα PCM ωστόσο λόγω της μεγάλης πυκνότητάς τους, έχουν μεγάλη ογκομετρική λανθάνουσα ενέργεια

τήξης. Η αποθήκευση στα περισσότερα μέταλλα, αφορά ενέργειες πολύ υψηλών θερμοκρασιών οπότε υπάρχει μια φυσική ροή προς το περιβάλλον. [13]

Όνομα	T_m (°C)	Θερμότητα (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg)	k (W/m K)
Cesium	28.65	16.4	1796	0.236	17.4
Gallium	29.8	80.1	5907	0.237	29.4
Indium	156.8	28.59	7030	0.23	36.4
Tin	232	60.5	730	0.221	15.08
Bismuth	271.4	53.3	979	0.122	8.1
Zinc	419	112	7140	0.39 (sol) 0.48 (liq)	116
Al59-35Mg-6Zn	443	310	2380	1.63 (sol) 1.46 (liq)	NA
Al54-22Cu-18Mg-6Zn	520	305	3140	1.51 (sol) 1.13 (liq)	NA
Al65-30Cu-5Si	571	422	2730	1.3 (sol) 1.2 (liq)	NA
Al88-Si12	576	560	2700	1.038 (sol) 1.741 (liq)	160

Εικόνα 10: Πίνακας Ιδιοτήτων μεταλλικών PCM [11]

3.3.4.3 Ευτηκτικά

Ευτηκτικά είναι τα μείγματα διαφόρων οργανικών PCM με οργανικά PCM, με ανόργανα, είτε και ο συνδυασμός ανόργανων PCM μεταξύ τους. Τα επιμέρους PCM αλλάζουν φάση ταυτόχρονα και σχηματίζουν ενιαίους κρυστάλλους κατά τη στερεοποίηση, χωρίς ποτέ να γίνεται διαχωρισμός των δύο υλικών. Με τα ευτηκτικά υλικά μπορούμε μέσα από συνδυασμούς να πετύχουμε συγκεκριμένες θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, ενδιάμεσες των επιμέρους στοιχείων [9]

3.3.5 Μειονεκτήματα

Από τα παραπάνω φαίνεται πως τα συνήθη PCM, μοιράζονται κοινά προβλήματα με σημαντικότερο τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Προβληματισμός και έρευνα υπάρχει και για επιμέρους θέματα που παρουσιάζει η χρήση των διάφορων PCM όπως η

υπόψυξη, ο διαχωρισμός άλατος-νερού, η διαβρωτική δράση κάποιων υλικών καθώς και η εξασφάλιση της μακροζωίας του PCM.

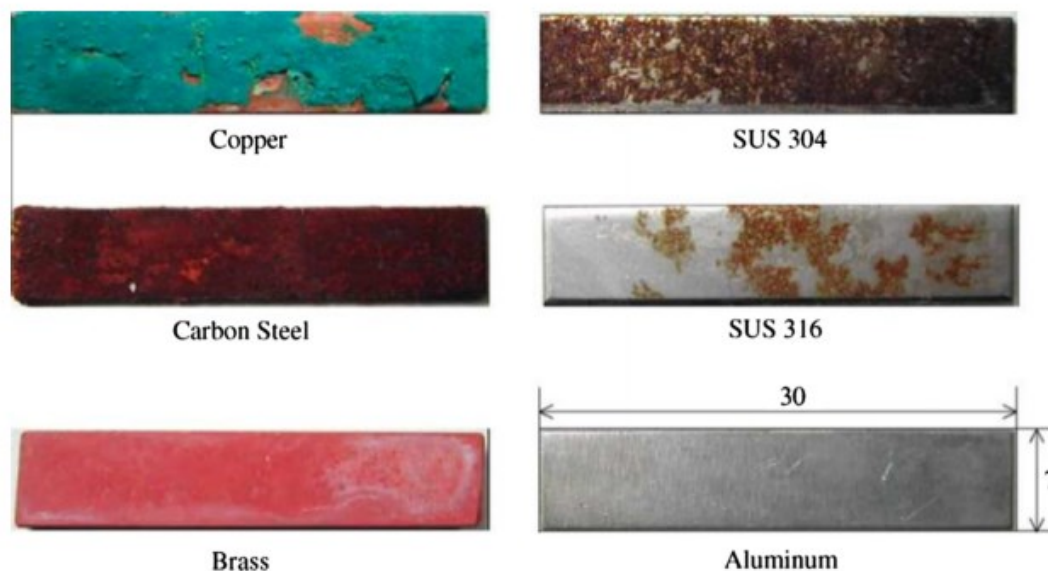
Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφέρονται τις απαντήσεις που έχουν δοθεί στα παραπάνω ζητήματα και γίνεται λεπτομερής αναφορά στους τρόπους αντιμετώπισης της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των PCM και την περίπτωση της παραφίνης.

4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Είναι εμφανές από τα προηγούμενα, ότι η υπόψυξη και η υποβάθμιση της ποιότητας του PCM λόγω διαχωρισμού αφορούν τα ένυδρα άλατα. Στη βιβλιογραφία προτείνεται, αυτά τα δύο προβλήματα να αντιμετωπίζονται μαζί [14]. Η ανασκόπηση του Khan [14] αναφέρει πληθώρα συνεκτικών παραγόντων (thickeners) η προσθήκη των οποίων αποτρέπει την κατακάθιση του άλατος κατά την υγρή φάση, αλλά και ουσιών που βοηθούν τη δημιουργία κρυστάλλων (nucleating agents) διευκολύνοντας έτσι τη στερεοποίηση του τήγματος και αποτρέποντας την υπόψυξη. Αναφέρονται επίσης η μηχανική ανάδευση και ο εγκλεισμός σε μικρά δοχεία με σφαιρίδια κλπ για την αποφυγή του διαχωρισμού των φάσεων. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται και για τη αύξηση της συνολικής επιφάνειας σαν αντιστάθμισμα της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας όπως αναφέρεται και στη συνέχεια. Για περισσότερες λεπτομέρειες [14], [10]. Ακόμα η προσθήκη νανοσωματιδίων μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία κρυστάλλων, μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία υπόψυξης με παράλληλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας [15]

4.1. Συμβατότητα-Διαβρωτικότητα

Στη παραπάνω έκθεση αναφέρεται και η διαβρωτική επίδραση που έχουν τα ένυδρα άλατα και τα λιπαρά οξέα στα μεταλλικά δοχεία αποθήκευσης αλλά και οι παραφίνες στα διάφορα πλαστικά δοχεία σε βάθος χρόνου υποδεικνύοντας την αναγκαιότητα κατάλληλου συνδυασμού PCM-δοχείου [14]



Εικόνα 11: Συμβατότητα ένυδρου άλατος $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ με διάφορα μεταλλικά δοχεία(11)

4.2. Αντιμετώπιση χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας

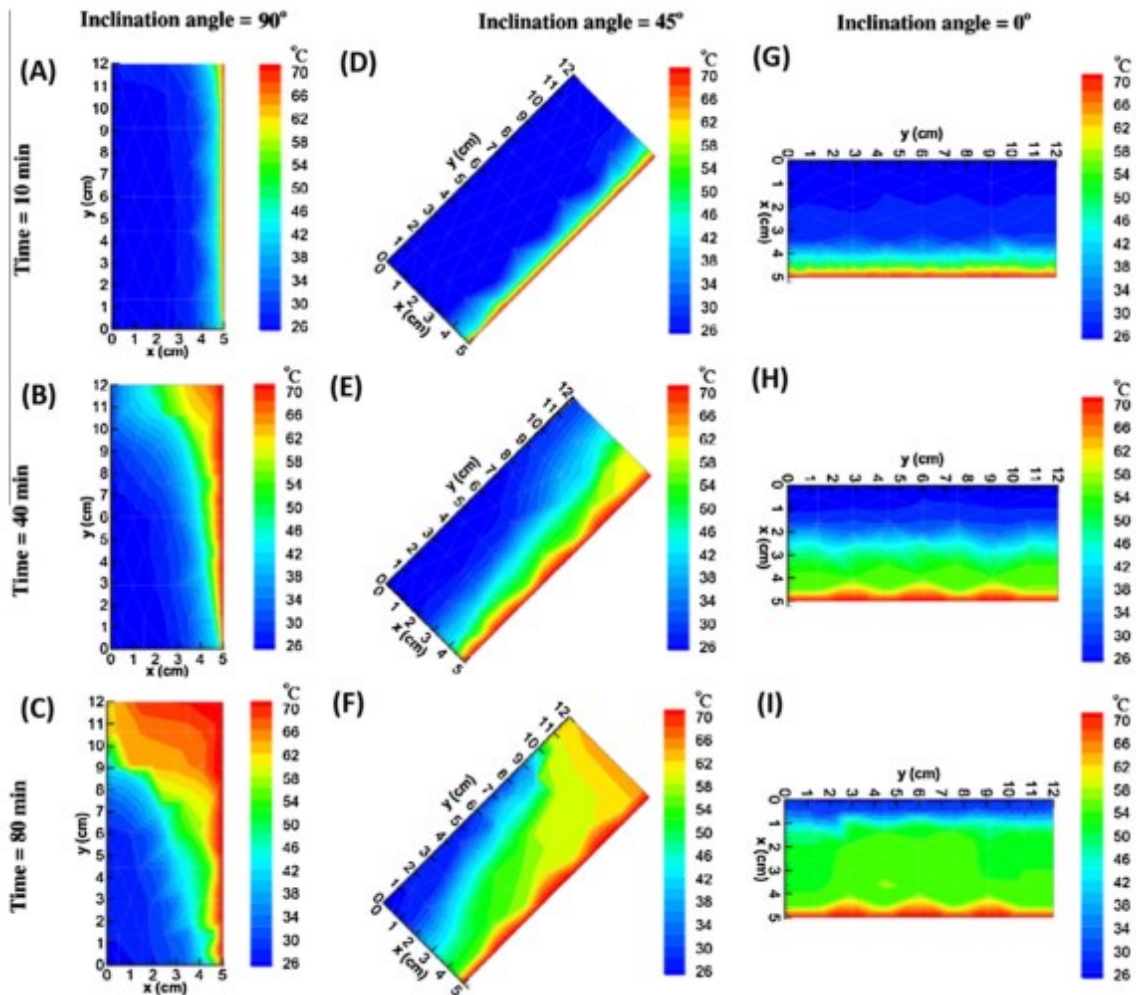
Με εξαίρεση τα μεταλλικά PCM, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα συνιστά, σημαντική τροχοπέδη στην περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμικής ενέργειας καθώς εμποδίζεται η γρήγορη ανταπόκριση των συστημάτων τόσο κατά την αποθήκευση όσο και κατά την απόδοση της ενέργειας αυτής, για την κάλυψη κάποιας ανάγκης.

Έχουν εξερευνηθεί, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, διάφορες εναλλακτικές στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ανάμεσα στις οποίες είναι διάφορες γεωμετρίες δοχείων και εναλλακτών, για την αύξηση της επιφάνειας μεταξύ του HTF και του PCM και καλύτερη αξιοποίηση της φυσικής συναγωγής του τήγματος. Ακόμα σημαντικό κομμάτι της έρευνας στρέφεται στην αξιοποίηση νανοϋλικών για την ενίσχυση της καθαυτού θερμικής αγωγιμότητας των διαφόρων PCM.

Τέλος αξίζει να τονιστεί το γεγονός ότι η δυσκολία στη συγκρότηση πειραματικών διατάξεων για τη μελέτη της συμπεριφοράς των διάφορων PCM, σε συνδυασμό με το αυξημένο κόστος, την απουσία επακριβούς γνώσης των θερμοδυναμικών μεταβολών που συμβαίνουν κατά την αλλαγή φάσης αυτών των υλικών, αλλά και τη ραγδαία άνοδο της υπολογιστικής ικανότητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία χρόνια, έχουν οδηγήσει στην διευρυμένη χρήση τεχνικών της υπολογιστικής μηχανικής για τη μοντελοποίηση και μελέτη των PCM. Η χρήση ελεύθερων ή εμπορικών υπολογιστικών πακέτων (Fluent, Comsol, Openfoam) συμβάλει επίσης σε αυτή την κατεύθυνση

4.2.3 Γεωμετρία και προσανατολισμός

Κατά το λειώσιμο, η μεταφορά της θερμότητας από το HTF γίνεται αρχικά με αγωγή μέσω του διαχωριστικού τοιχώματος και στη συνέχεια με αγωγή στο στερεό PCM. Το PCM αυξάνει την θερμοκρασία του μέχρι το σημείο τήξης του και στη συνέχεια με σχεδόν σταθερή θερμοκρασία παραλαμβάνει την λανθάνουσα ενέργεια τήξης που χρειάζεται για να λιώσει. Στη συνέχεια το τήγμα υπερθερμαίνεται και αναπτύσσεται φυσική κυκλοφορία λόγω της διαφοράς πυκνότητας μέσα στο ρευστό και κατ' επέκταση φυσική συναγωγή. Αυτή ακριβώς η συναγωγή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο λιώσιμο του PCM. Μάλιστα σε υπολογιστικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί χωρίς να συμπεριλάβουν την επίδραση της συναγωγής, ο χρόνος λειωσίματος είναι σχεδόν διπλάσιος από τα πειραματικά δεδομένα (όπου η συναγωγή υπάρχει φυσικά) [16]. Η ενίσχυση λοιπόν αυτής της κυκλοφορίας μέσα από συγκεκριμένη γεωμετρία ή προσανατολισμό της διάταξης, μπορεί να δράσει ευεργετικά στην ταχύτητα παραλαβής του θερμικού φορτίου από το PCM. Αντίστοιχα ισχύουν και για την στερεοποίηση. Στην ανασκόπηση του ο Khan [14] εξετάζει αρκετές τέτοιες διατάξεις. Χαρακτηριστική είναι η επίδραση της απλής τοποθέτησης σε διαφορετικές κλίσεις ενός ορθογωνίου PCM, στο χρόνο λειωσίματος του (βλ Εικόνα 12) [17]. Παρουσιάζονται ακόμα μελέτες σχετικές με τη καλύτερη μεταφορά ενέργειας παραμετρικά ως προς το σχήμα του δοχείου ή και τον συνολικό αριθμό των σωλήνων με HTF που διαπερνούν το δοχείο. Μάλιστα αναφέρεται μείωση 29% στον χρόνο λειωσίματος του PCM όταν αυξάνεται ο αριθμός των σωλήνων από 1 σε 4 παράλο που η συνολική παροχή μένει σταθερή.



Εικόνα 12 : Επίδραση του προσανατολισμού στη τήξη υλικών αλλαγής φάσης [17]

4.2.2 Αύξηση επιφάνειας

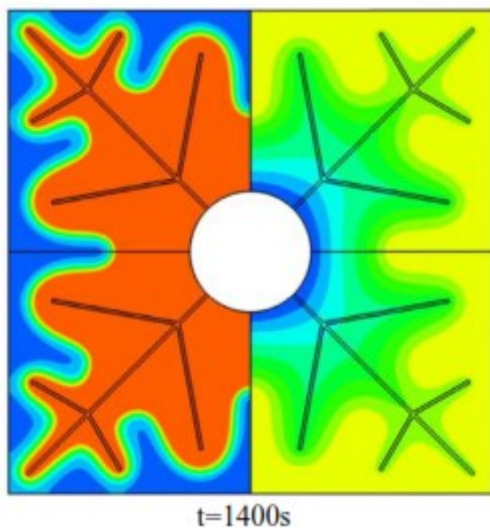
Για την αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές κυρίως, αν θεωρήσουμε την αύξηση του αριθμού των σωλήνων, γεωμετρική προσέγγιση.

Οι τεχνικές αυτές είναι η προσθήκη πτερυγίων και αποθήκευση του PCM σε σφαιρίδια

Από την επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας που έκανε ο Khan [14] προκύπτει πως η προσθήκη πτερυγίων υψηλής θερμικής αγωγιμότητας μέσα στο PCM γενικά βελτιώνει την μετάδοση της θερμότητας ιδιαίτερα κατά την διάρκεια της τήξης. Ωστόσο το πάχος, το μήκος και ο αριθμός των πτερυγίων έχουν κατά περίπτωση βέλτιστες διαστάσεις που εξαρτώνται από τον ισολογισμό ανάμεσα στην αύξηση του ρυθμού μεταφοράς ενέργειας

και την ταυτόχρονη μείωση της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας, αφού πλέον ο όγκος που θα μπορούσε να καταλαμβάνει το PCM δεσμεύεται από τα πτερυγία.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το μέγεθος του τήγματος και οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες για συγκεκριμένους χρόνους φόρτισης πριν και μετά την προσθήκη πρωτοποριακής διάταξης πτερυγίων. Η διαφορά είναι εμφανής



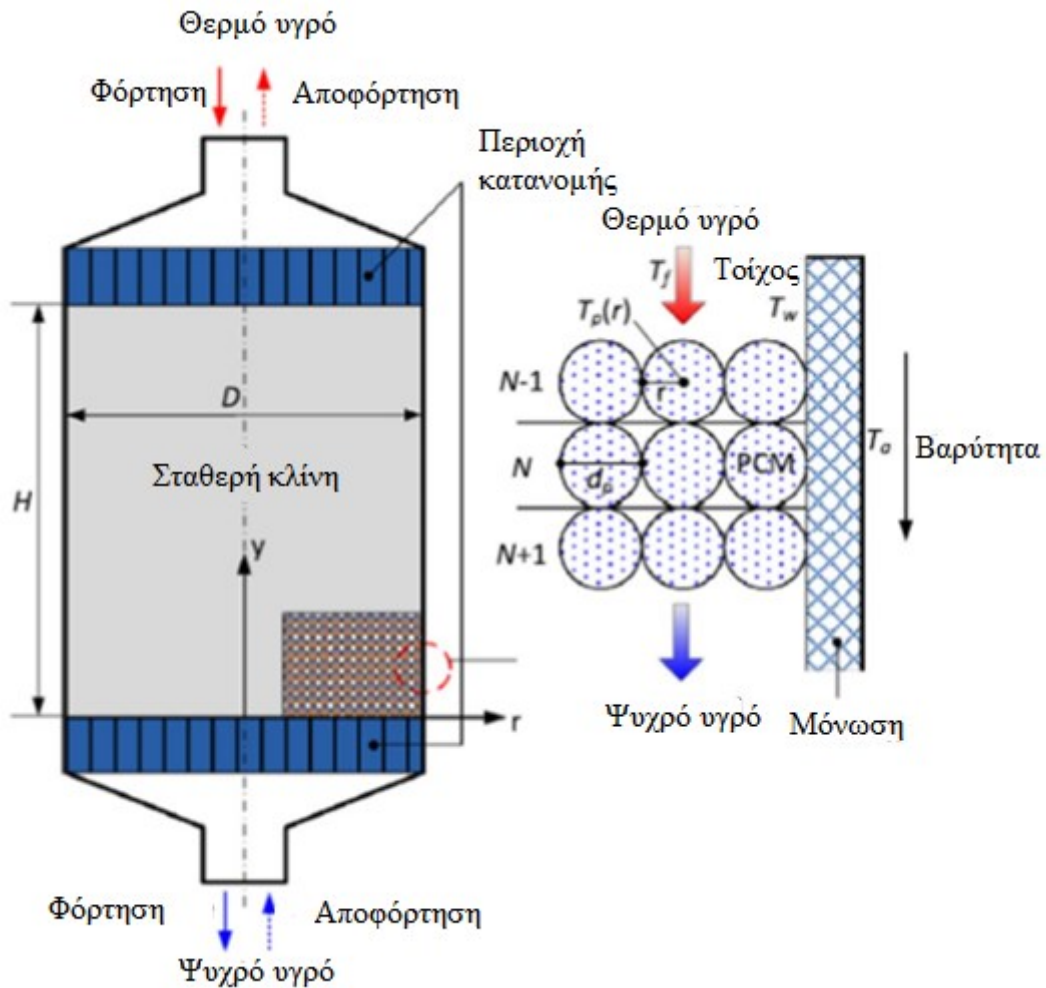
Εικόνα 14: Επίδραση πτερυγίων στη τήξη



Εικόνα 13: Τήξη χωρίς πτερυγία

Ο εγκλεισμός του PCM σε σφαιρίδια γίνεται και για τη διασφάλιση της μακροζωίας του PCM ειδικά όταν παρατηρείται σε αυτό διαχωρισμός των συστατικών του, διαβρωτική δράση, τοξικότητα κ.α. Τέτοια υλικά, μεταξύ άλλων μπορεί να είναι τα ένυδρα άλατα, τα λιπαρά οξέα.

Σχετικά με της βελτίωση της μεταφοράς ενέργειας, η ενθυλάκωση του PCM αυξάνει τη συνολική συναλασσόμενη επιφάνεια, δημιουργώντας ένα πορώδες στρώμα μέσα από το οποίο περνά το HTF. Σύμφωνα με τους Garcia και Albenz [18] το μέγεθος των σφαιριδίων αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για τη ευεργετική δράση αυτής της μεθόδου. Όσο μικρότερη η διάμετρος τόσο καλύτερη η μεταφορά



Εικόνα 15: Αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε διάταξη με σφαιρίδια PCM [18]

Προς αυτή την κατεύθυνση είναι και η μικροενθυλάκωση (microencapsulation) του PCM. Αυτή αφορά τη δημιουργία σφαιριδίων με διάμετρο 1-1000 μm και συμβαίνει με μηχανικά και χημικά μέσα ανάλογα το μέγεθος και τις ιδιότητες που θέλουμε να πετύχουμε. Αντίθετα με την μακροενθυλάκωση (macroencapsulation) αποθήκευσης στο μικρο- επίπεδο η αποθήκευση των κυψέλων γίνεται μέσα σε κάποιο ρευστό.

Σημαντική παράμετρο αποτελούν και τα επιμέρους χαρακτηριστικά της κυψέλης και της διαδικασίας ενθυλάκωσης. Το πάχος, το υλικό, η γεωμετρία της κυψέλης επηρεάζουν αποφασιστικά την επίδραση της τεχνικής. Χοντρότερη κυψέλη σημαίνει χειρότερη μεταφορά θερμότητας αλλά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, ενώ καλύτερα, περισσότερο αγώγιμα υλικά αυξάνουν το κόστος. [10]. [14]

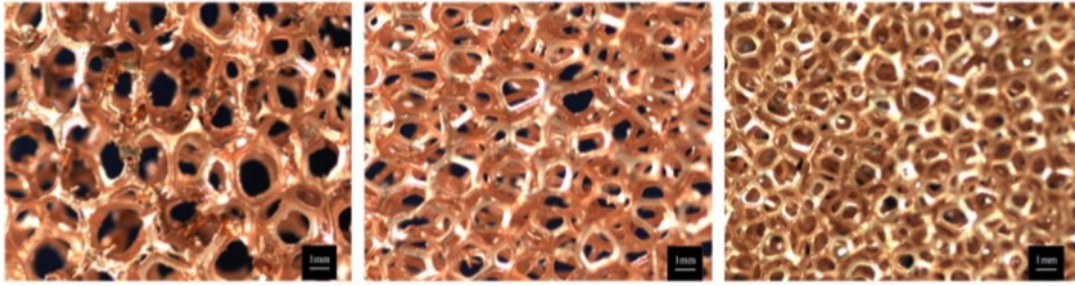
4.2.3 Προσθήκη υλικών

Ο τελευταίος τρόπος που θα εξετάσουμε είναι η προσθήκη νέων υλικών στο ίδιο το PCM, για τη δημιουργία ενός νέου σύνθετου υλικού με θερμική αγωγιμότητα υψηλότερη της αρχικής.

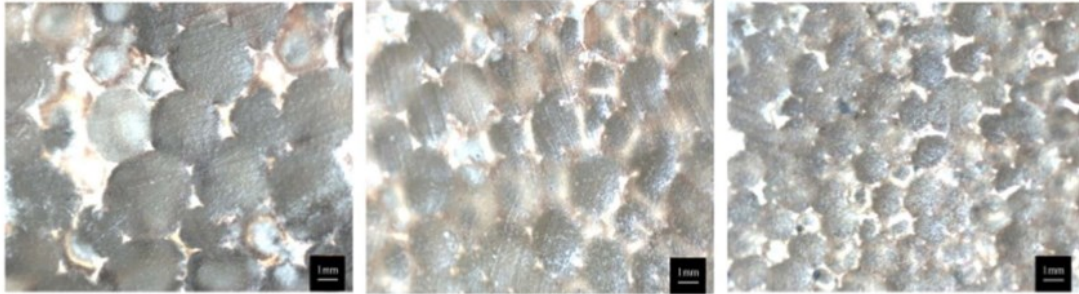
Οι δύο βασικοί τρόποι για να το πετύχουμε αυτό είναι η προσθήκη νανο-σωματιδίων διαφόρων υλικών και γεωμετριών στο PCM ή η ενσωμάτωση του PCM σε ένα εξαιρετικά πορώδες μεταλλικό πλέγμα (μεταλλικό αφρό). Από τις δύο αυτές τεχνικές προκύπτουν νέα υλικά με βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα που φυσικά έρχεται με παραχωρήσεις σε άλλους τομείς όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία που παρουσιάζεται παρακάτω.

4.2.3.1 Μεταλλικοί αφροί –μεταλλικά πλέγματα

Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούμε ένα μεταλλικό πλέγμα ή αφρό, τους πόρους του οποίου γεμίζουμε με το PCM. Η διαδικασία γίνεται υπό κενό για την καλύτερη πλήρωση του PCM [11]. Συνήθως το PCM είναι παραφίνη δεν αποκλείονται όμως και τα λιπαρά οξέα ή τα ένυδρα άλατα. Το πλέγμα μπορεί να έχει διάφορες μορφές ωστόσο είναι βασικό να είναι κατάλληλα πορώδες ώστε να μη διαφεύγει το λιωμένο PCM από τις τρύπες, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες, συγκρατείται από την επιφανειακή τάση. Η επίδραση που θα έχει το μεταλλικό πλέγμα στη μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από το υλικό που είναι φτιαγμένο, από το μέγεθος των θυλάκων και από το πορώδες του. Επίσης λόγω της ενθυλάκωσης του PCM μέσα στο πλέγμα, η φυσική συναγωγή εκμηδενίζεται, με εξαίρεση πλέγματα με πολύ μεγάλους πόρους. Συνήθη υλικά κατασκευής των μεταλλικών πλεγμάτων είναι ο χαλκός, το αλουμίνιο και ο γραφίτης. Η μεταφορά γίνεται με αγωγή αρχικά στο θερμοαγώγιμο πλέγμα και από εκεί, στο PCM. Ο Χiao [19] αναφέρει στην εργασία του πολλαπλασιασμό, της θερμικής αγωγιμότητας του εμποτισμένου με παραφίνη χάλκινου πλέγματος που εξετάζει 8000% σε σχέση με τη θερμική αγωγιμότητα της καθαρής παραφίνης. Και εδώ αντισταθμιστικά στα προτερήματα που παρουσιάζει η χρήση διάφορων μεταλλικών πλεγμάτων στέκονται η μείωση της συνολικής δυνατότητας αποθήκευσης ενέργειας, το αυξημένο βάρος και το κόστος. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο γραφίτης αφού συνδυάζει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και μικρό βάρος. Ο γραφίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές μορφές. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι εμποτισμένος με παραφίνη διογκωμένος γραφίτης παρουσίασε αύξηση θερμικής αγωγιμότητας από 0,22 σε 0,82 W/mK με ελάχιστη πτώση συνολικής λανθάνουσας ενέργειας (αποθηκευτικής ικανότητας από 194 kJ/kg σε 174 kJ/kg [20]. Χρησιμοποιείτε όμως και ως νανοϋλικό στη μορφή γραφενίου, single wall carbon nanotube (SW-CNT), multi wall carbon nanotube (MW-CNT), grafite nano plate (GNP).



Εικόνα 16: Μεταλλικά πλέγματα-αφροί χαλκού με μειούμενο πορώδες [21]



Εικόνα 17: Μεταλλικά πλέγματα-αφροί χαλκού με μειούμενο πορώδες μετά την πλήρωση του με παραφίνη [21]

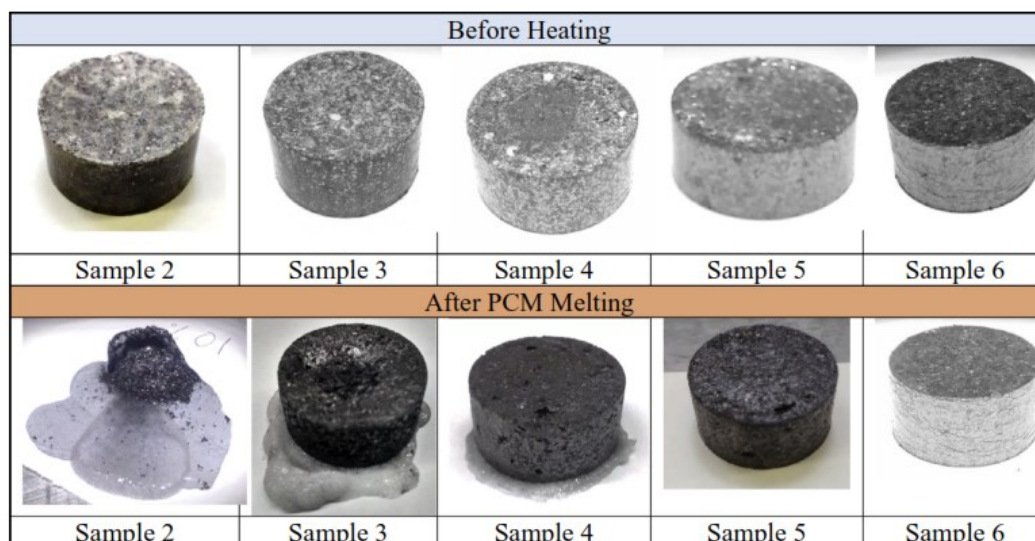
4.2.3.2 Νανοϋλικά

Τέλος η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM επιδιώκεται με τη προσθήκη διαφόρων νανοϋλικών όπως μετάλλων, οξειδία μετάλλων, μακρομόρια άνθρακα. Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση και σχολιασμός της έρευνας των τελευταίων ετών:

Ο Harish [22] σε μια σειρά πειραμάτων προσδιόρισε την θερμική αγωγιμότητα διαφόρων μειγμάτων PCM και νανοϋλικού. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησε lauric acid με $k=0.215 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ για στερεό και $k=0,139 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ για υγρό το οποίο με προσθήκη 1% κατ' όγκο (Single wall carbon nanotube) SWCNT, (multi wall carbon nano tube) MWCNT και (graphite nanoplate) GNP αύξησε αντίστοιχα την θερμική του αγωγιμότητα κατά 27%, 171%, 273% για την στερεή κατάσταση και 4%, 19,8%, 39% για την υγρή κατάσταση. Σύμφωνα με την έρευνα για τη διαφορετική επίδραση κάθε νανοϋλικού ευθύνεται κυρίως η θερμική αντίσταση της διεπιφάνειας με το PCM.

Ο Languri [23] χρησιμοποίησε δημιούργησε δέγματα σύνθετων PCM (βαζελίνη) διαφορετικών συστάσεων σε EG (expanded graphite) από 0%, 10%-90% και παρατήρησε στο δείγμα με σύσταση 80% EG συνολική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 700% με μείωση της αποθηκευτικής ικανότητας κατά 30% μόλις. Ακόμα παρατήρησε ότι οι

υψηλότερες συγκεντρώσεις σε EG (<50%) παρέχουν και μηχανική υποστήριξη στο PCM αποτρέποντας τη διαρροή του τήγματος κατά την υγρή φάση.



Εικόνα 18: Δείγματα αυξανόμενης σύστασης σε EG πριν και μετά την τήξη του PCM [23]

Ο Motahar [24] σε μια σειρά πειραμάτων εξέτασε τη συμπεριφορά PCM διαφορετικής σύστασης σε TiO_2 σε κάποια θερμικά ρεύματα ($2,500-10,000 W/m^2$). Από τα πειράματα προκύπτει ότι, αν και η θερμική αγωγιμότητα του μείγματος αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νανοσωματίδια, ο συνολικός χρόνος λειωσίματος του υλικού δεν μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αν και στην αρχή η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή από ένα σημείο ανάπτυξης του τήγματος και μετά κυρίαρχο ρόλο παίζει η συναγωγή, η οποία καταστέλλεται με την προσθήκη νανοσωματιδίων.

Χρησιμοποιώντας TiO_2 σε δύο μορφές TiNT (Titanium Nanotube) και TiNP (Titanium Nanoplates) ο Shao [15] εξερεύνησε τη στερεοποίηση του νερού και τη χρήση του σαν PCM για αποθήκευσης «ψυκτικής» ενέργειας. Τα αποτελέσματά του ήταν ότι τα νανοσωματίδια μειώνουν το χρόνο στερεοποίησης αφού αυτός εξαρτάτε κυρίως από τη θερμική αγωγιμότητα. Παράλληλα περιορίζουν την υπόψυξη, λειτουργώντας σαν πυρήνες έναρξης της κρυσταλλοποίησης των μορίων του νερού. Τέλος τα διάφορα μείγματα με τα δύο νανοϋλικά παρουσίασαν καλύτερη ικανότητα ανάμειξης με το νερό και μικρότερη πτώση στη ικανότητα αποθήκευσης, σε σχέση με τα μείγματα με ένα νανοϋλικό.

Συνδυάζοντας στην ερευνά του τόσο νανοσωματίδια Al_2O_3 και Cu όσο και πτερύγια για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας ο Mahdi [25] σε παραφίνη RT82 καταλήγει πως η αύξηση του ποσοστού των νανοσωματιδίων μειώνει το χρόνο λειωσίματος του υλικού αλλά ο συνδυασμός τους με πτερύγια παράγει καλύτερα αποτελέσματα. Σημειώνει

μάλιστα πως αν ο συνολικός όγκος που δεσμεύουν τα νανοϋλικά καταλαμβάνονται από πτερύγια κατάλληλου μήκους, προκύπτουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Η έρευνα του βασιζόταν σε υπολογιστική προσέγγιση μίας διάταξης τριπλού σωλήνα με παροχή θερμότητας εξωτερικά και εσωτερικά. Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της μελέτης. ϕ_f : μέρος που καταλαμβάνουν τα πτερύγια, ϕ_n : μέρος που καταλαμβάνουν τα νανοσωματίδια, $\phi_t = \phi_f + \phi_n$

Case #	ϕ_f	ϕ_n	ϕ_t	T (min)	% Time saving
1	0.00	0.00	0.00	162	0
2	0.02	0.00	0.02	91	43.8
3	0.01	0.01	0.02	101	37.7
4	0.00	0.02	0.02	134	17.3
5	0.01	0.01	0.02	91	43.8
6	0.02	0.00	0.02	66	59.2

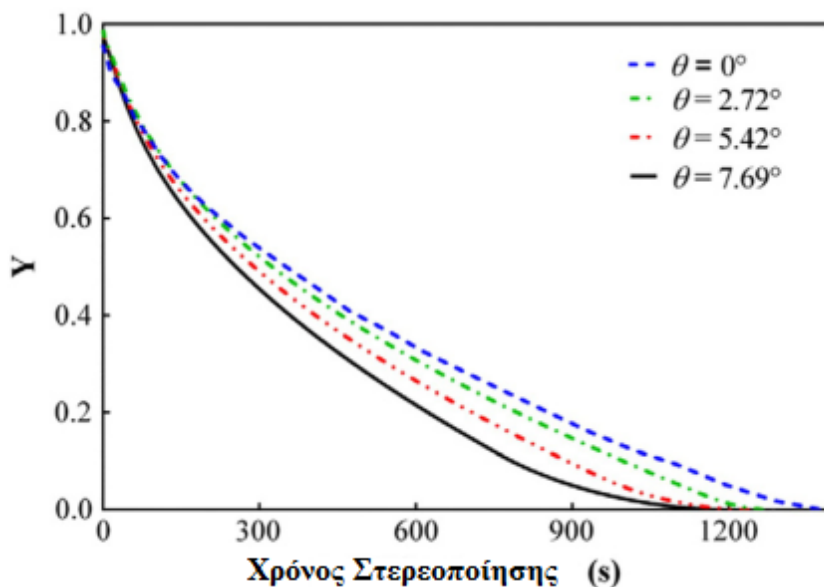
Εικόνα 19: Χρόνοι τήξης [25]

Ενισχυτικά στις παραπάνω διαπιστώσεις είναι και τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης του Lohrasbi [26]. Μάλιστα, εξετάζει μια βέλτιστη διάταξη στα πτερύγια η οποία επιτρέπει την γρηγορότερη στερεοποίηση του νερού, που χρησιμοποιεί σαν PCM, σε σχέση τόσο με άλλες διατάξεις όσο και σε σχέση με την προσθήκη νανοσωματιδίων Cu σε ίδιο, κατ' όγκο, ποσοστό. Επισημαίνει πως οποιαδήποτε προσθήκη πτερυγίων βελτιώνει κατά πολύ περισσότερο την θερμική συμπεριφορά του συστήματος σε σχέση με το νανοϋλικό.

Στη συγκεκριμένη εργασία δεν προσδιορίζεται ο όγκος που δεσμεύουν τα πτερύγια

Ο Dongliang [27] εξέτασε στο πείραμά του την επίδραση διαφορετικών νανοσωματιδίων CNT και Cu σε διάφορες περιεκτικότητες και σε δύο μεγέθη 20 και 50 nm για το χαλκό. Από τα αποτελέσματά του προκύπτει αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του ένυδρου άλατος tetrahydrofuran clathrate hydrate, που εξετάζει κατά 73,6% για 10% vol για CNT και 50% για Cu(25 nm). Ακόμα αναφέρει 2% μικρότερη θερμική αγωγιμότητα του μείγματος άλατος με νανοσωματίδια χαλκού μεγαλύτερης διαμέτρου.

Σε μια πολυπαραμετρική υπολογιστική έρευνα ο Sharma [28] μελέτησε τόσο την επίδραση που έχει το ποσοστό του νανοϋλικού στο συνολικό χρόνο στερεοποίησης του νερού ως PCM αλλά και της επίδρασης του σχήματος του δοχείου. Συγκεκριμένα εξέτασε ισοσκελή τραπέζια διαφορετικών κλίσεων και παρατήρησε πως για κλίση 7,69 έχουμε για 11,5% μείωση του χρόνου στερεοποίησης σε σχέση με μία τετράγωνη επιφάνεια ίσου εμβαδού.



Εικόνα 20: Επίδραση της κλίσης ισοσκελούς τραπεζίου στο χρόνο στερεοποίησης, παραφίνης 2% περιεκτικότητας σε νανοσωματίδια [28]

Στην υπολογιστική, του έρευνα, ο Arici [29] εξερεύνησε την επίδραση του νανοϋλικού Al_2O_3 σε ποσοστά 1%,2%,3% κατ' όγκο αλλά και του προσανατολισμού της διάταξης, στη θερμική αγωγιμότητα και την επιτάχυνση της τήξης γενικά. Διαπίστωσε πως παρά την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση του ποσοστού του νανουλικού η ταχύτητα της τήξης ήταν μεγαλύτερη για ποσοστό 1%. Το γεγονός αυτό εξηγείται από την ταυτόχρονη αύξηση της κινηματικής συνεκτικότητας με την αύξηση της συγκέντρωσης σε νανοσωματίδια και τη περιστολή της συναγωγής ως συνακόλουθο. Στην ίδια λογική όταν ο θερμός τοίχος βρίσκεται στο κάτω μέρος του δοχείου έχουμε αύξηση της κυκλοφορίας, της συναγωγής και της ταχύτητας τήξης τελικά.

Ο Wang [30] εξερεύνησε την επίδραση διάφορων ποσοστών νανοσωματιδίων TiO_2 στη θερμική αγωγιμότητα παραφίνης αλλά και στην λανθάνουσα ενέργεια τήξης. Στα αποτελέσματά του φάνηκε μια αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας για ποσοστά <1%, σε σχέση με την καθαρή παραφίνη, συγκεκριμένα +20J/g για ποσοστό 0,7% ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά η αποθηκευτική ικανότητα ήταν μικρότερη από το καθαρό PCM. Η αύξηση αυτή αφορά αλληλεπιδράσεις σε μοριακό επίπεδο μεταξύ νανοσωματιδίων και υλικού.

Ο Harikrishnan [31] μελέτησε πειραματικά την συμπεριφορά του stearic acid με διάφορα ποσοστά νανο TiO_2 από 0,05 -0,3 % κατά βάρος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος παρατηρείται μείωση του απαιτούμενου χρόνου τόσο για τη τήξη όσο και για τη στερεοποίηση του PCM που είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται το ποσοστό του νανουλικού. Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι σε

Ο Embrahimi [32] στην υπολογιστική του έρευνα για τη συμπεριφορά παραφίνης με διάφορα ποσοστά νανο Al_2O_3 από 1-5% wt% κατέληξε στο συμπέρασμα πως η μεγαλύτερη μείωση του χρόνου τήξης επιτυγχάνεται για ποσοστό 2%. Μάλιστα στα πλαίσια της έρευνάς του εξερευνάει διάφορες διατάξεις των θερμικών πηγών και όταν σε κάποιες από αυτές όπως φαίνεται () ο ρυθμός τήξης είναι μικρότερος για ποσοστό σε νανουλικά 5% wt% σε σχέση με το καθαρό PCM! Οι διαφορές εντοπίζονται λόγω της επίδρασης των νανουλικών στην κινηματική συνεκτικότητα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Ο Harish [22] διερευνά πειραματικά την επίδραση νανοπλακιδίων γραφενίου και άλλων νανουλικών στη θερμική συμπεριφορά του lauric acid. Στα συμπεράσματά του συγκαταλέγονται η αύξηση κατά 230% στους 293 K της θερμικής αγωγιμότητας για ποσοστό 1% vol% νανουλικού και μεταβολή της λανθάνουσας ενέργειας τήξης από 181 σε 183 kJ/kg.

Συνηγορώντας στα ανωτέρω με την εργασία του ο Harish [33] αναφέρει αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας της στερεής φάσης κατά 30,8% και της υγρής κατά 10% για προσθήκη 2% SWCNT σε lauric acid με μία μικρή μείωση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης για 0,5 % ποσοστό από 158 σε 153 kJ/kg ενώ μετά παρατηρεί αύξηση έως και 165 kJ/kg για 1,5% SWCNT.

Ο Dhaidan [34] στη μελέτη του, διερεύνησε, τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά, την επίδραση που είχε η προσθήκη CuO nanoparticle στις θερμικές ιδιότητες της n-octadecane. Τα πειραματικά και υπολογιστικά του αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία και υποδεικνύουν τη μείωση του χρόνου λειωσίματος της παραφίνης όσο αυξανόταν το νανουλικό από 0-5%. Παραδέχεται τελικά ότι υπάρχουν όρια στη προσθήκη νανουλικού αφού αυξάνεται η κινηματική συνεκτικότητα και τελικά αντιστρέφονται τα θετικά οφέλη της αυξημένης θερμικής συναγωγής χωρίς ωστόσο να αναφέρει ποια είναι αυτά.

Ο Zeng [35] μελετά πειραματικά την προσθήκη MWCNT σε 1-dodeconal για να προσδιορίσει της θερμικές ιδιότητες του σύνθετου PCM. Από τα τρία σύνθετα υλικά περιεκτικότητας 0%,1%, 2% υποδεικνύει πως παρά την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας που προσφέρει το νανουλικό τελικά το καθαρό PCM αν και αρχικά υπολείπεται στο ρυθμό τήξης τελικά λιώνει γρηγορότερα. Αυτό αποδίδεται στη περιστολή της συναγωγής που προκαλείται με τη μεγάλη αύξηση της κινηματικής

συνεκτικότητας στα σύνθετα PCM. Ακόμα καταγράφει πτώση της λανθάνουσας ενέργειας τήξης από 231.4 ± 2.7 kJ/kg, σε 220.8 ± 3.3 kJ/kg, και 212.4 ± 1.4 kJ/kg για καθαρό PCM και σύνθετα 1% και 2% αντίστοιχα.

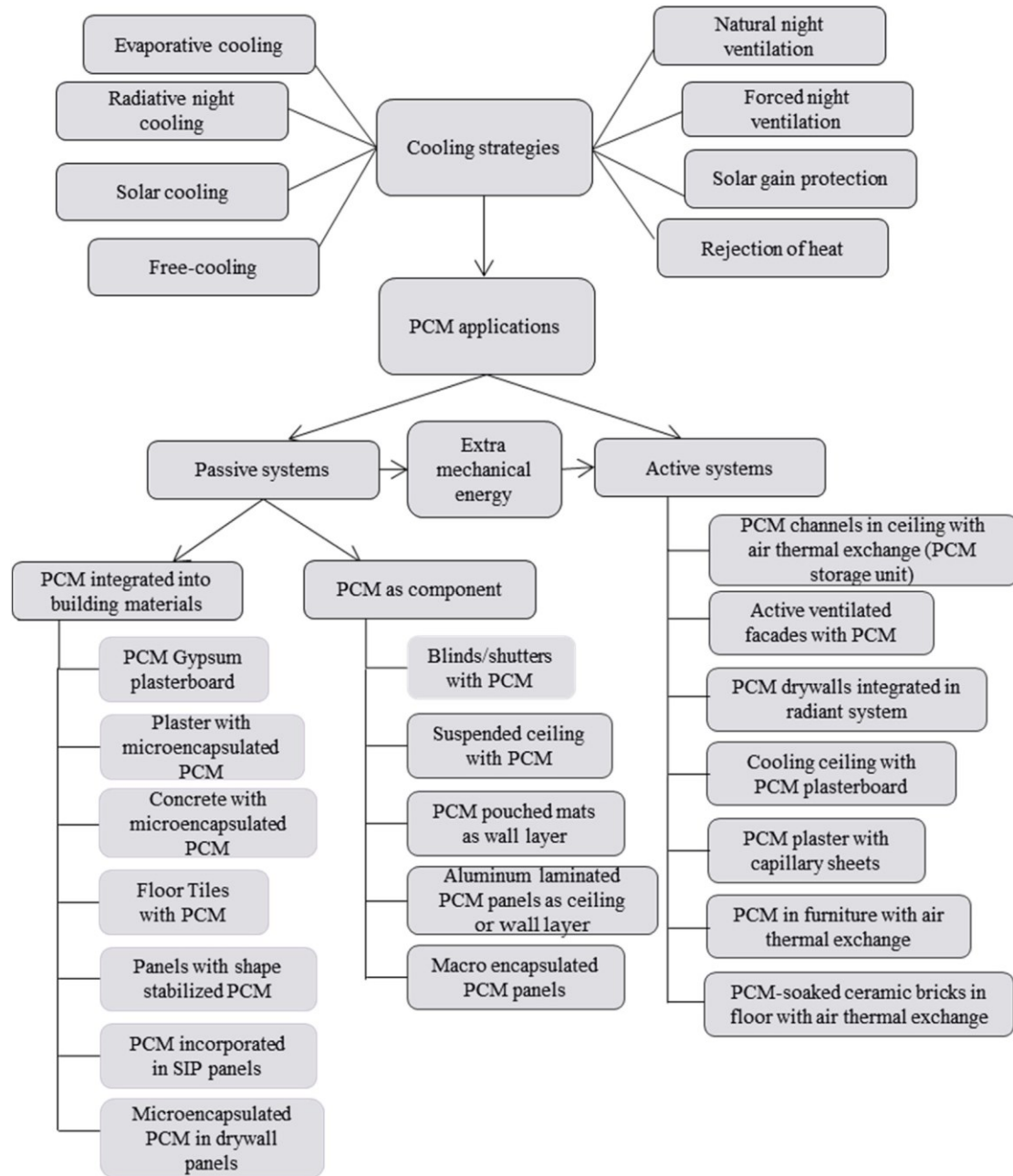
Σε σχέση με τα ανωτέρω παρουσιάζονται διαφορετικές εκτιμήσεις-αποτελέσματα τόσο από πειραματικές όσο και από υπολογιστικές μελέτες. Οι διαφοροποιήσεις είναι σημαντικές και αφορούν κατά βάση τη θερμική αγωγιμότητα του σύνθετου υλικού, την επίδραση των νανοϋλικών στο χρόνο λειωσίματος και στερεοποίησης, στη λανθάνουσα ενέργεια τήξης του σύνθετου υλικού. Τα αποτελέσματα μπορεί να αναφέρουν αύξηση, μείωση ή ελάχιστη διαφοροποίηση στη λανθάνουσα ενέργεια τήξης και οι διάφοροι συγγραφείς εξηγούν ποικιλοτρόπως τα συμπεράσματά τους. Ακόμα η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας συνδέεται με το ποσοστό νανοσωματιδίων γραμμικά ή και όχι [36]. Ακόμα η επίδραση των νανοϋλικών στη τήξη κυρίαρχα αμφισβητείται αφού περιορίζουν την συναγωγή που από ένα σημείο και μετά αποτελεί τον κυρίαρχο τρόπο μεταφοράς της θερμότητας μέσα στο σύνθετο υλικό όπως φαίνεται και στα ανωτέρω. Είναι φανερό η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης τόσο σε πειραματικό επίπεδο όσο και η ανάπτυξη πιο αξιόπιστων υπολογιστικών προσομοιώσεων

4.3 Εφαρμογές PCM

4.3.1 Εφαρμογές σε κτήρια

Η εφαρμογή των PCM στα υλικά κτηρίων αποσκοπεί στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του κτηρίου μέσα από τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας, μέρα και νύχτα. Το PCM απορροφά κατά τη διάρκεια της μέρας μεγάλα ποσά θερμότητας σε σταθερή θερμοκρασία κατάλληλη για άνετη διαβίωση $20-30$ °C αλλάζοντας τη φάση του και αποδίδει αυτά τα ποσά το βράδυ όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέφτει. Ειδικά σε ερημώδεις περιοχές όπου το θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ μέρας και νύχτας είναι μεγάλο η χρήση των PCM μπορεί να μειώσει κατά πολύ τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου για ψύξη ή θέρμανση.

Σημαντική παράμετρο αποτελεί η θερμοκρασία αλλαγής φάσης, η οποία πρέπει να επιλέγεται με βάση το κλίμα της περιοχής του κτηρίου. Ο Souayfane [37] στην ανασκόπηση που έκανε σημειώνει πως για το χειμώνα στην περιοχή της Μεσογείου η το εύρος θερμοκρασιών προτείνεται στους 18-22 °C ενώ για το καλοκαίρι στους 25-30 °C. Εάν παραληφθεί αυτή η παράμετρος το PCM δεν θα αξιοποιήσει όλο το εύρος της αποθηκευτικής του ικανότητας. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πληθώρα των εφαρμογών των PCM στη ρύθμιση της θερμοκρασίας των κτηρίων



Εικόνα 21: Διάγραμμα εφαρμογών PCM σε κτήρια [37]

Ηλιακοί Τοίχοι

Τα υλικά αλλαγής φάσης βρίσκουν εφαρμογή στους τοίχους Trombe με ευεργετικά αποτελέσματα για τη λειτουργία τους. Το υλικό αλλαγής φάσης αντικαθιστά το συμβατικό δομικό υλικό και αποθηκεύει περισσότερη θερμότητα σε μικρότερο χώρο.

Ο Bourdeau στο πείραμά του συνέκρινε δυο τοίχους Trombe με χλωρίδιο του ασβεστίου έξι νερών (σημείου τήξης 29 οC) ως PCM. Τα αποτελέσματα του έδειξαν ότι ο τοίχος με το PCM, πάχους 8.1 cm, είχε καλύτερες θερμικές επιδόσεις σε σχέση με έναν πλίνθινο τοίχο, πάχους 40 cm.

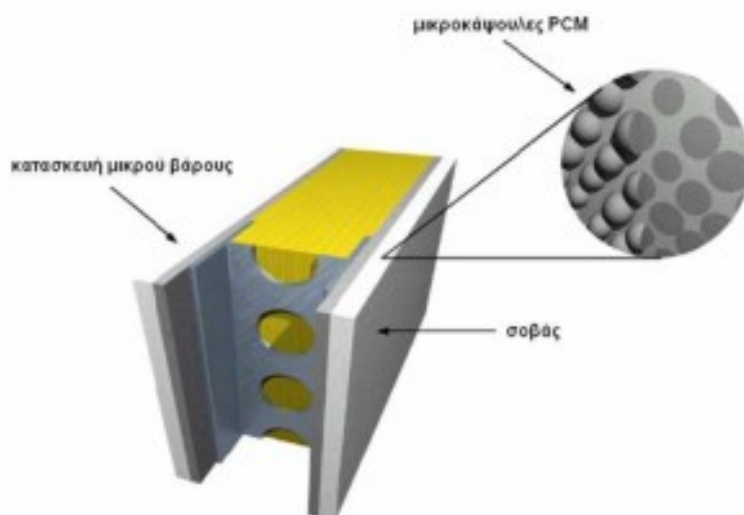
Στην εργασία του ο Francesco Fiorito [38] μετά από μετρήσεις σε πέντε διαφορετικές πόλεις κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους υποστηρίζει πως σε κάθε περίπτωση η προσθήκη PCM εξομαλύνει την λειτουργία της διάταξης

Τοίχοι με PCM

Η ενσωμάτωση PCM μέσα στα δομικά υλικά όπως τσιμέντο ή γυψοσανίδες προσφέρει δυνατότητες καλύτερης ρύθμισης της θερμοκρασίας του κτηρίου αλλά και εξοικονόμησης ενέργειας

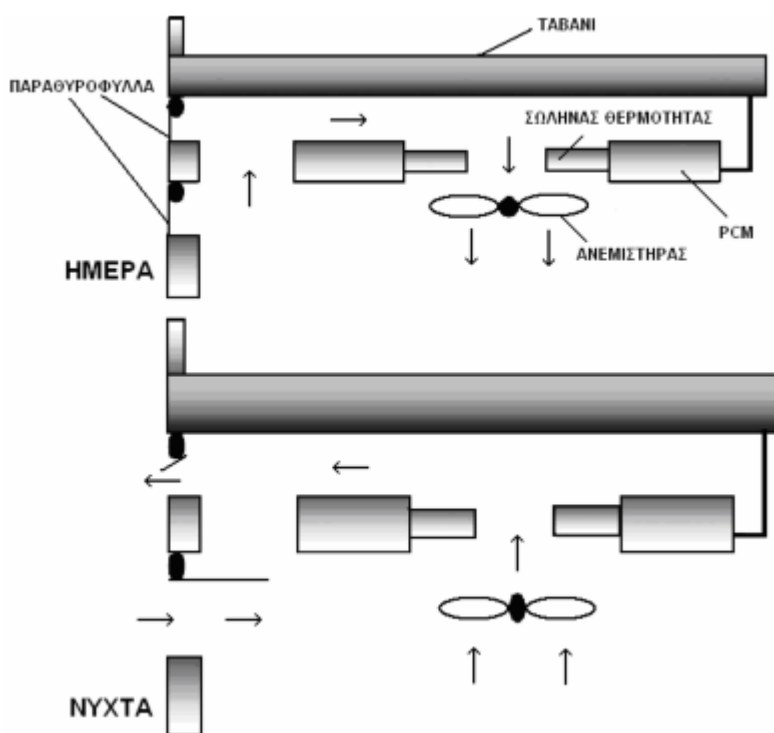
Στην εργασία του ο Ρεϊρρο [39] ερευνά για διάφορες θερμοκρασίες τήξης και διάφορα ποσοστά της επίδραση προσθήκης υλικών αλλαγής φάσης σε τσιμέντο και παρατηρεί εξοικονόμηση ενέργειας έως και 20%

Ο Athienities [40] στην πειραματική και αριθμητική του μελέτη υπολογίζει μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας 4 °C κατά τη διάρκεια τη μέρας με τη χρήση γυψοσανίδων εμποτισμένων κατά 25% κατά βάρος με κατάλληλη παραφίνη, σε σχέση με απλές γυψοσανίδες



Εικόνα 22: Γυψοσανίδες με υλικό αλλαγής φάσης

Ο Turhpenney κ.α. [41] μελέτησαν μία παθητική κλιματιστική διάταξη για κτήρια κατά την οποία γίνεται αποθήκευση «ψυκτικής» ισχύος τη νύχτα που χρησιμοποιείται για το δροσισμό του χώρου την ημέρα. Με τη βοήθεια μονοδιάστατου αριθμητικού μοντέλου οι ερευνητές διαστασιολόγησαν τη πειραματική διάταξη που περιγράφεται και στο παρακάτω σχήμα.

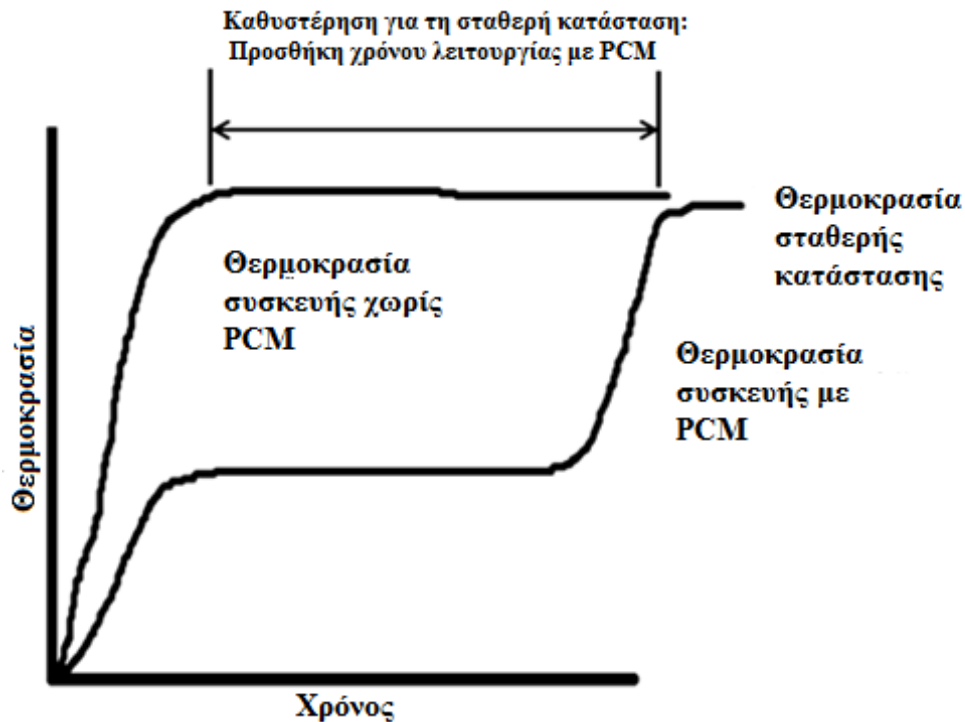


Εικόνα 23: Πειραματική διάταξη κλιματισμού με υλικό αλλαγής φάσης

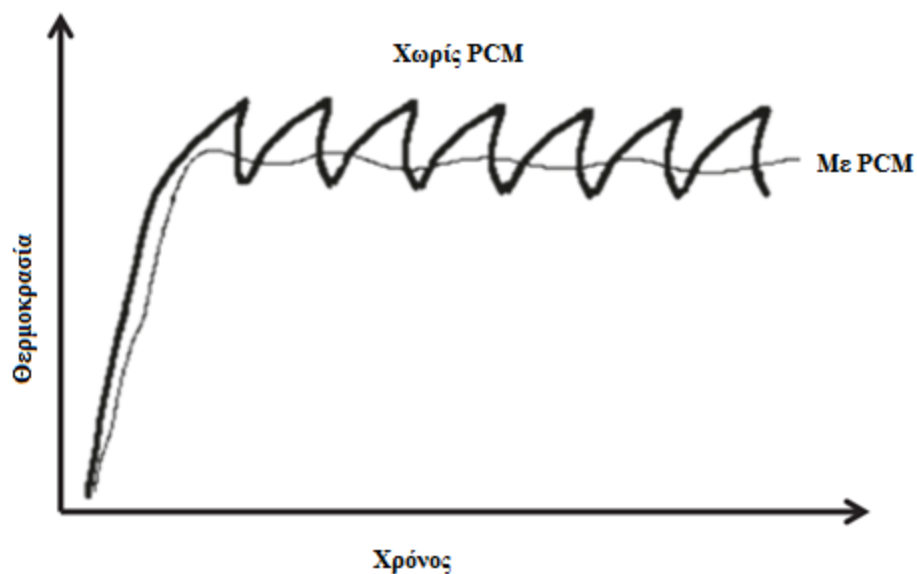
4.3.2 Εφαρμογή στις ηλεκτρονικές συσκευές

Οι ηλεκτρονικές συσκευές παράγουν σημαντικά ποσά θερμότητας κατά τη λειτουργία τους. Απουσία διαχείρισης αυτών των ποσών μπορεί να σημαίνει καταστροφή της συσκευής ή και τραυματισμό του χρήστη. Για το λόγο αυτό όλες οι συσκευές διαθέτουν συστήματα ψύξης, ανάλογα με τη συγκεκριμένη χρήση τους με συνηθέστερους τους αεροψύκτες ή υδροψύκτες ανάλογα το μέγεθος του φορτίου. Η χρήση αυτών των διατάξεων ωστόσο είναι αδύνατη για μικρές-φορητές συσκευές. Μία από τις λύσεις που έχει προταθεί είναι η παραλαβή αυτών των φορτίων από PCM. Η καταλληλότητα των PCM αφορά την υψηλή τους ογκομετρική αποθηκευτική ικανότητα, τη χημική τους σταθερότητα και τη σταθερή θερμοκρασία παραλαβής του φορτίου, που προστατεύει το χρήστη και τη συσκευή. Ακόμα, η τυπική χρήση των φορητών

ηλεκτρονικών συσκευών είναι μικρά χρονικά διαστήματα δραστηριότητας (15-30min). Έτσι η χρήση των PCM όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα, είτε καθυστερεί την άνοδο της θερμοκρασίας της συσκευής, ενδεχομένως και την αποτρέπει αν το διάστημα είναι αρκετά μικρό, είτε εξομαλύνει της θερμοκρασιακές διακυμάνσεις από τη διακοπτόμενη χρήση της συσκευής. Τέλος η μεγάλες περιόδους αδράνειας της συσκευής δίνουν το χρόνο για την απόδοση του φορτίου στο περιβάλλον [11]



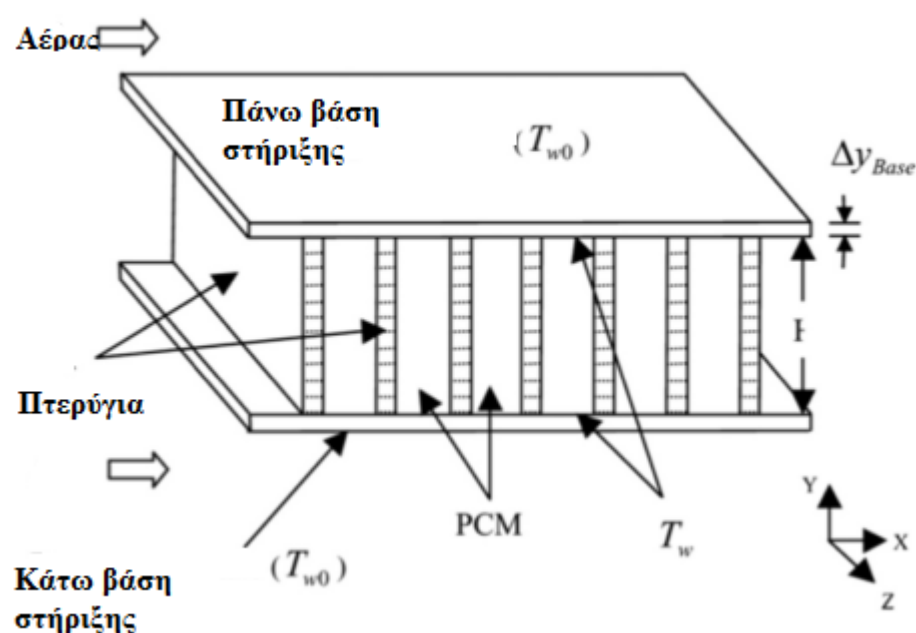
Εικόνα 24: Υστέρηση Θερμοκρασιακής αύξησης της συσκευής [11]



Εικόνα 25: Εξομάλυνση της θερμοκρασίας συσκευής κατά τη διακοπτόμενη λειτουργία [11]

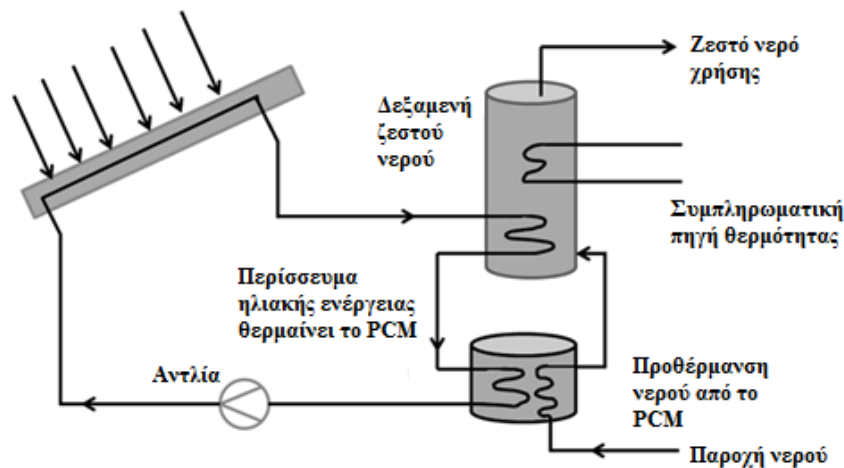
Στην εργασία του ο Arshad [42] εξετάζει την επίδραση που έχει η προσθήκη παραφίνης σε ψύκτρα ηλεκτρονικής διάταξης. Σε όλες τις περιπτώσεις η παραφίνη διατηρεί πιο σταθερή τη θερμοκρασία της ψύκτρας βελτιώνοντας έτσι τη λειτουργία της. Μάλιστα αναφέρει πως η προσθήκη μπορεί να καθυστερήσει τη θέρμανση της ψύκτρας στη κρίσιμη θερμοκρασία ακόμα και 4,3 μεγαλύτερο διάστημα σε σχέση με τη κανονική ψύκτρα.

Ο Gharebaghi [43] στην εργασία του μελέτησε επίσης ψύκτρα ηλεκτρονικής συσκευής με PCM. Η γεωμετρία που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα μοντελοποιήθηκε και διερευνήθηκε παραμετρικά η διάταξη των πτερυγίων. Από τα αποτελέσματα προέκυψε διπλάσια απαγωγή θερμότητας για πτερύγια κάθετα στη ροή του αέρα σε σχέση με τα παράλληλα



4.3.3 Αποθήκευση ηλιακής θερμικής ενέργειας

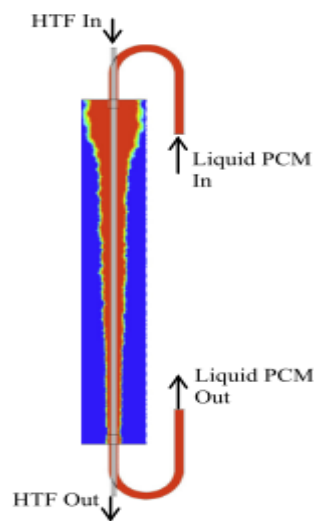
Σημαντική είναι η εφαρμογή των PCM στις τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας. Όσο αφορά τα θερμικά ηλιακά συστήματα τα διάφορα PCM χρησιμοποιούνται για να αποθηκεύσουν το πλεονάζον θερμικό φορτίο και να το αξιοποιήσουν όταν υπάρχει έλλειψη, τη νύχτα ή συννεφιασμένες μέρες. Η τα πλεονεκτήματά τους όπως αναφέρθηκαν και προηγουμένως τα καθιστούν συμφέρουσες επιλογές για πολλές διατάξεις, βιομηχανικές και οικιακές. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς των ηλιακών θερμοσιφώνων μέσω την διάταξης που φαίνεται στο σχήμα



Εικόνα 26: Ηλιακός θερμοσίφωνας με PCM [11]

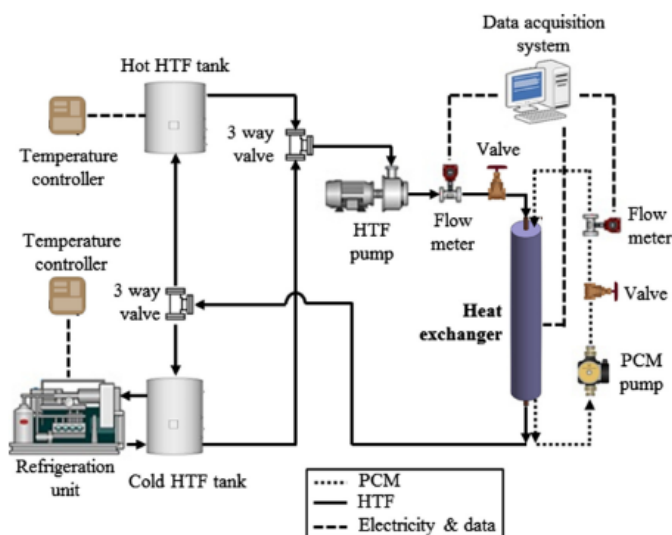
Ακόμα με κατάλληλα PCM όπως τήγματα αλάτων, μπορεί να γίνει αποθήκευση θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας, είτε από θερμικά απόβλητα της βιομηχανίας είτε από θερμικά ηλιακά ισχύος και άλλες πηγές και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας σε κύκλους νερού ατμού ή και ORC(organic Rankine cycle).

Σε ότι αφορά διατάξεις για αποθήκευση οι N.H.S. Tay κ.α [44] μελέτησαν υπολογιστικά, με τη χρήση του λογισμικού Ansys, την επίδραση που έχει στο χρόνο τήξης η ανακυκλοφορία του τήγματος κατά την αποθήκευση ενέργειας . Στην περίπτωση που η παροχή του εργαζόμενου ρευστού ήταν χαμηλή απαιτούνταν ανακυκλοφορία πενταπλάσιας παροχής για την αποτελεσματική μείωση του χρόνου τήξης. Αντιθέτως σε υψηλές τιμές της παροχής του ρευστού απαιτούνταν περίπου ίδια παροχή ανακυκλοφορίας PCM για να επιτευχθεί μείωση του χρόνου τήξης του υλικού αλλαγής φάσης. Επιπλέον κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση της αντιρροής η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιούνταν με καλύτερο ρυθμό σε σχέση με την περίπτωση της ομορροής.



Εικόνα 27: Εναλλάκτης κυκλοφορίας

Τα παραπάνω αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και αριθμητικά από τους Garsia κ.α. [45] με την παρακάτω πειραματική διάταξη. Παρατήρησαν ωστόσο μικρότερη μετάφορα ενέργειας από το θερμό υγρό στο PCM. Αιτία ήταν η απορρόφηση ενέργειας και από το περιβάλλον κατά την ανακυκλοφορία του τήγματος, πρόβλημα που επιλύθηκε με την προσθήκη κατάλληλης μόνωσης. Τέλος παρατηρήθηκε καλύτερη μεταφορά όταν το θερμό υγρό και το τήγμα βρίσκονται σε αντιροή.

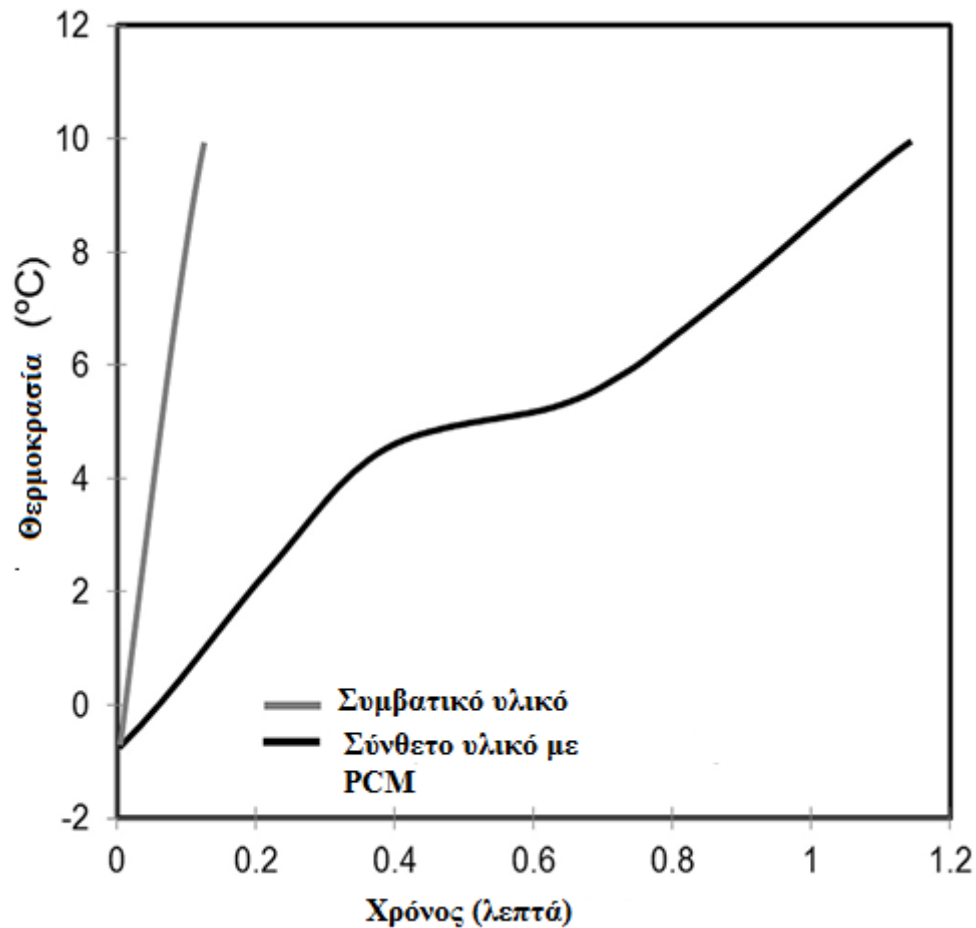


Εικόνα 28: Διάταξη αποθήκευσης με PCM σε ανακυκλοφορία

4.3.4 Νέες τεχνολογίες

Τέλος, τα PCM χρησιμοποιούνται σε πληθώρα νέων εφαρμογών όπου απαιτείται ρύθμιση θερμοκρασίας. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες ενδεικτικά.

Ο Sandoval [46] χρησιμοποίησε μείγμα παραφίνης (RT 5) με χαμηλό σημείο τήξης (5°C) για να βελτιώσει τη θερμική συμπεριφορά συσκευασίας τροφίμων. Συγκεκριμένα, δημιούργησε ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από πολυστερίνη (PS) και το PCM. Η PS δημιούργησε ένα πλέγμα από μικρο-ίνες στο οποίο δεσμευτικέ το PCM με υψηλό ποσοστό πλήρωσης. Στη συνέχεια επένδυση πάχους 78 μm συνδέθηκε, με θερμική κατεργασία, με τη συσκευασία πολυστερίνης δημιουργώντας μια συσκευασία που επέτρεπε καλύτερη ρύθμιση της θερμοκρασίας του προϊόντος. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα το σύνθετο υλικό αποτρέπει τη ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας του προϊόντος απορροφώντας τα θερμικά φορτία του περιβάλλοντος.



Εικόνα 29: Θερμοκρασιακή απόκριση του σύνθετου και του συμβατικού υλικού [46]

Ακόμα έρευνα για σύνθετα υλικά που θα αξιοποιούν τα PCM για ρύθμιση της θερμοκρασίας γίνονται και για τα ρούχα. Όπως αναφέρεται στη σχετική ανασκόπηση [11] η χρήση των PCM γίνεται είτε με εγκλωβισμό μικρο- κυψελών στην πλέξη του ρούχου είτε με δημιουργία σύνθετων υλικών από PCM και πολυμερή. Η ρύθμιση προκύπτει όπως περιγράψαμε και παραπάνω. Προβλήματα αυτών των τεχνικών είναι η αντοχή και η μακροβιότητά τους αφού στην πρώτη περίπτωση υπάρχει απομάκρυνση των κυψελίδων κατά την πλύση του ρούχου, ενώ στη δεύτερη υπάρχει υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού σε σχέση με το απλό ύφασμα, με κίνδυνο σχισμάτων κλπ.

5 Υπολογιστική προσομοίωση

5.1 Γενική περιγραφή

Κάθε διαδικασία μοντελοποίησης ενός πραγματικού προβλήματος, απαρτίζεται από τα παρακάτω βήματα. Η σωστή υλοποίηση καθενός από αυτά, αλλά και η εποπτεία και γνώση των εκάστοτε παραδοχών και των συνεπειών τους καθορίζει την επιτυχία της μοντελοποίησης και την αξιοπιστία των συμπερασμάτων που θα προκύψουν από αυτή. Τα βήματα αυτά είναι:

- Η κατανόηση του ίδιου του φυσικού προβλήματος και των κρίσιμων χαρακτηριστικών του. Είναι πολύ διαφορετική η σημασία της ταχύτητας κατά τη μοντελοποίηση μιας αεροτομής και κατά τη κάμψη μίας δοκού.
- Η απλοποίηση του φυσικού προβλήματος στο βαθμό που να μπορεί να περιγράψει από ένα πλήθος εξισώσεων. Εδώ γίνεται η μετάβαση από το συγκεκριμένο επίπεδο της πραγματικότητας σε ένα πιο αφηρημένο επίπεδο.
Σε ένα ακραίο παράδειγμα κατά την μελέτη της φυσικής συναγωγής στην τήξη, συνυπολογίζεται ανάμεσα σε άλλα και η βαρυτική έλξη της γης στο τήγμα και το εξαναγκάζει σε κάποια κίνηση. Φυσικά, στο τήγμα ασκείτε και η βαρυτική έλξη από όλα τα περιβάλλοντα αντικείμενα με μάζα, κάτι τέτοιο όμως δεν αφορά τους υπολογισμούς μας αφού, αυτή η καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας θα δυσκόλευε σε τεράστιο βαθμό την επίλυση του μοντέλου μας χωρίς να προσφέρει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα.
- Η επιλογή των κατάλληλων μαθηματικών εξισώσεων που θα περιγράψουν το παραπάνω απλοποιημένο μοντέλο μας.
- Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων με τις απαραίτητες μεθόδους αριθμητικές ή αναλυτικές. Τα ιδιαίτερα βήματα που αφορούν τις αριθμητικές μεθόδους και την παρούσα εργασία θα περιγράψουν παρακάτω.
- Ο συνυπολογισμός του κόστους σε χρόνο, χρήμα και πόρους στην επιλογή της μεθόδου επίλυσης, καθότι τις περισσότερες φορές αποτελούν ρυθμιστικό παράγοντα.
- Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με κατάλληλο τρόπο, που να διευκολύνει, τόσο την αξιολόγηση του μοντέλου όσο και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Στη συνέχεια περιγράφονται αυτά ακριβώς τα βήματα για τη δημιουργία και επίλυση του μοντέλου.

5.2 Φυσικό πρόβλημα

Το φυσικό πρόβλημα που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η τήξη ενός κυλίνδρου από συγκεκριμένο PCM. Η παροχή θερμότητας γίνεται από ομόκεντρο, μικρής διαμέτρου σωλήνα που τον διατρέχει ζεστό νερό 80 °C. Ο κύλινδρος είναι παράλληλος με το έδαφος, θερμικά μονωμένος από το περιβάλλον του, ομογενής και στατικός. Ο κύλινδρος διατηρείται σε οριζόντια θέση για την ενίσχυση της φυσικής συναγωγής στο τήγμα μέσω καλύτερης αξιοποίησης του διελκυστίνδας άνωσης και βαρυτικής δύναμης που ασκείται στο υπέρθερμο τήγμα, όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως (βλ σελ 33)

Η εργασία, ερευνά επίσης την επίδραση, των νανοϋλικών και συγκεκριμένα των νανοσωματιδίων αλουμίνας (Al_2O_3) και χαλκού (Cu) σε ποσοστά 1% και 3% κατ' όγκο έκαστο, στη θερμική συμπεριφορά του PCM.

5.3 Μαθηματική μοντελοποίηση

Το φυσικό πρόβλημα μελετήθηκε στην δισδιάστατη μορφή του σαν δύο ομόκεντροι δίσκοι, ένας με υλικό και ένας χωρίς. Για τους υπολογισμούς τέθηκε επίσης σταθερή θερμοκρασία 80 °C στο εσωτερικό τοίχωμα, καθώς όπως είναι γνωστό για στρωτές ροές, όπως υποθέσαμε και τη ροή μέσα στο σωλήνα με το θερμικό υγρό, η θερμοκρασία μεταβάλλεται μόνο κατά μήκος της ροής.

Η αρχική θερμοκρασία του PCM ορίστηκε στους 26 ° C. Ακόμα θεωρήθηκε πως το σύνθετο υλικό PCM-νανοσωματιδίων είναι ένα νέο υλικό με ενιαίες ιδιότητες και όχι ένα μείγμα δύο υλικών

Τέλος το τήγμα θεωρήθηκε ασυμπίεστο και η ροή του λόγω φυσικής συναγωγής θεωρήθηκε στρωτή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο που θέλουμε να υπολογίσουμε είναι οι εξής σε διαφορική μορφή

A_{mush} : σταθερά «mushy» ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)	t: Χρόνος (s)
C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	T: θερμοκρασία (K)
f: ποσοστό τηγματος	u,v: ταχύτητες (m s^{-1})
g: βαρύτητα (m s^{-2})	x,y: καρτεσιανές συντεταγμένες (m)
H: ολική ενθαλπία (J kg^{-1})	μ : κινηματική συνεκτικότητα (Pa s)
ΔH : ενθαλπία αλλαγής φάσης (J kg^{-1})	ρ : πυκνότητα (Kg m^{-3})
h: αισθητή θερμότητα (J kg^{-1})	ϕ : κατ όγκο περιεκτικότητα
k: θερμική αγωγιμότητα ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	όρισμα n_p : νανοσωματίδια
L: λανθάνουσα θερμότητα (J kg^{-1})	όρισμα ρ_{cm} : υλικό αλλαγής φάσης
P: πίεση (Pa)	όρισμα ρ_{pcm} : σύνθετο υλικό

Εξίσωση

συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Είναι η εξίσωση διατήρησης της μάζας. Η πυκνότητα προσαρμόζεται, όπως θα δούμε παρακάτω, σε σχέση με την περιεκτικότητα του PCM σε νανοσωματίδια

Εξισώσεις ορμής:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + (\rho \beta) g (T - T_m) + S_y \quad (3)$$

Αντίστοιχα και εδώ η πυκνότητα (ρ) αλλά και η κινηματική συνεκτικότητα (μ) εξαρτώνται και από την περιεκτικότητα σε νανοσωματίδια

Οι όροι S_x και S_y είναι όροι πηγής και βοηθούν στη προσέγγιση της ορμής μέσα στη ζώνη τήξης, όπου $\varepsilon = 0,001$ για αποφυγή διαίρεσης με το μηδέν

$$S_x = \frac{(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} A_{mush} u \quad (4)$$

Εξίσωση 1

$$S_y = \frac{(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} A_{mush} v \quad (5)$$

Εξίσωση ενέργειας:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u H)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v H)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_x \quad (6)$$

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα η θερμική αγωγιμότητα (k) εξαρτάται επίσης από το ϕ . Το ποσοστό του τήγματος δίνεται για κάθε δεδομένη θερμοκρασία T από το παρακάτω σχήμα

$$f = 0 \text{ if } T < T_{solidus} \quad (7)$$

$$f = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \text{ if } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \quad (8)$$

$$f = 1 \text{ if } T > T_{liquidus} \quad (9)$$

όπου $T_{solidus}$ $T_{liquidus}$ η θερμοκρασία πήξης και τήξης αντίστοιχα.

Στη υπό εξέταση περίπτωση, αυτές οι δύο θερμοκρασίες ταυτίζονται.

Η συνολική ενθαλπία του υλικού (H) δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις στις οποίες φαίνεται το κομμάτι που οφείλεται στην πρόσδοση αισθητής θερμότητας (h) και λανθάνουσας (ΔH)

$$H = h + \Delta H \quad (10)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (11)$$

$$\Delta H = fL \quad (12)$$

Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις

$$\rho_{npcm} = \varphi_{np} \rho_{np} + (1 - \varphi_{pcm}) \rho_{pcm} \quad (13)$$

$$(\rho C_p)_{npcm} = \varphi_{np} (\rho C_p)_{np} + (1 - \varphi_{np}) (\rho C_p)_{pcm} \quad (14)$$

$$(\rho L)_{n\text{epcm}} = (1 - \varphi_{np})(\rho L)_{pcm} \quad (15)$$

Ο τύπος της κινηματικής συνεκτικότητας είναι από την εργασία του Vajiha [47]

Εξίσωση 2

$$\mu_{n\text{epcm}} = 0.983\mu_{pcm} \exp(12.959\varphi_{np}) \quad (16)$$

Για την θερμική αγωγιμότητα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του Maxwell

$$k_{n\text{epcm}} = \frac{k_{np} + 2k_{pcm} - 2(k_{pcm} - k_{np})\varphi_{np}}{k_{np} + 2k_{pcm} + 2(k_{pcm} - k_{np})\varphi_{np}} k_{pcm} \quad (17)$$

Τέλος δίνονται οι ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν

	A53(PCM)	Al2O3	Cu
$\rho(\text{kg m}^{-3})$	910	3600	8933
$Cp(\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1})$	2,2	0,765	0,385
$k(\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1})$	0,22	36	400
$\mu(\text{Pa s})$	0,03499		
$L(\text{kJ kg}^{-1})$	130		

5.3 Αριθμητική επίλυση

Για την μοντελοποίηση και επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό Ansys Fluent 17.0 αλλά και το Ansys ICEM CFD 17.0. Το Fluent, όπως φαίνεται και από τη σχετική βιβλιογραφία είναι, συχνά χρησιμοποιούμενο [29] [25] λογισμικό και αυτό γιατί έχει διαθέσιμη επιλογή τη διαδικασία τήξης-πύξης, καθιστώντας τη μοντελοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης σημαντικά ευκολότερη. Στη συνέχεια θα αναφερθούν αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν.

Εισαγωγικά, η χρήση τόσο του Fluent, όσο και των περισσότερων αντίστοιχων πακέτων (COMSOL, CFX) χωρίζεται σε δύο βασικές διαδικασίες, την προετοιμασία της επίλυσης (Pre-process) και τη διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων (Post-Process).

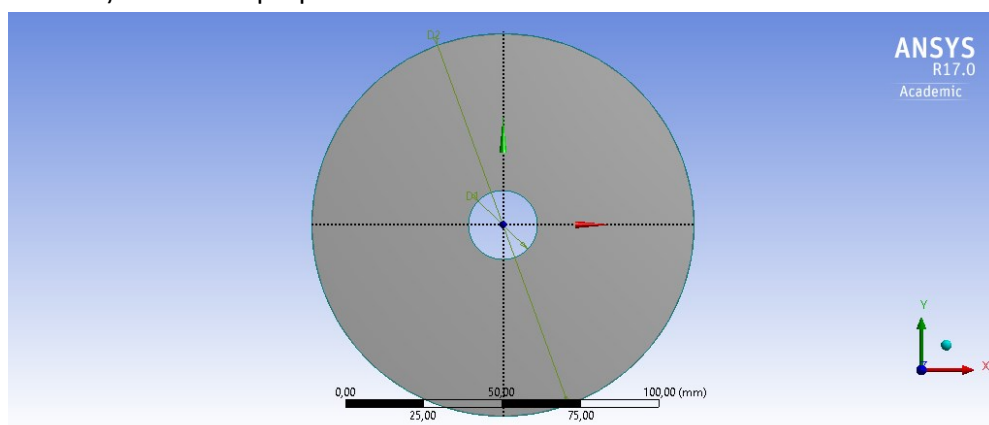
5.3.1 Προετοιμασία επίλυσης

Η προετοιμασία της επίλυσης (Pre-Processing) παρέχει στο πρόγραμμα επίλυσης (solver) τα δεδομένα που συνιστούν το προς επίλυση «πρόβλημα». Τα δεδομένα αυτά είναι:

- Η γεωμετρία
- Το πλέγμα
- Οι φυσικές ιδιότητες
- Οι μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης

5.3.1.1 Η γεωμετρία

Στο στάδιο αυτό σχεδιάστηκε η γεωμετρία του μοντέλου μας. Η σχεδίαση έγινε στο Design Modeler του Ansys Workbench, υπάρχει όμως η δυνατότητα η σχεδίαση να γίνει σε κάποιο άλλο CAD (computer-aided design) λογισμικό όπως το Autocad ή το Solidworks, για πιο απαιτητικές γεωμετρίες. Παρακάτω φαίνεται η γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, και που αποτελείται από ομόκεντρους κύκλους διαμέτρου 22mm και 122mm αντίστοιχα.

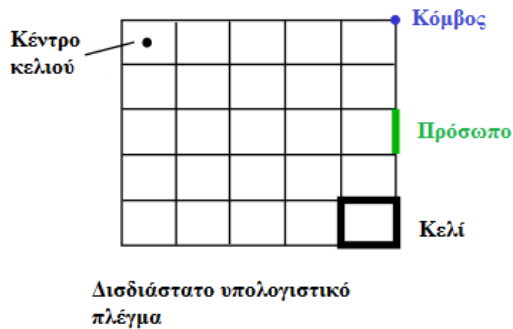


Εικόνα 30: Γεωμετρία του μοντέλου [48]

5.3.1.2 Πλέγμα

Όπως είναι γενικά απαραίτητο για τις μεθόδους της υπολογιστικής ρευστομηχανικής, στην υπό εξέταση επιφάνεια ή χώρο, ορίζονται υπολογιστικοί κόμβοι (nodes), με διάφορες μεθόδους, δημιουργώντας ένα πεπερασμένο αριθμό υπολογιστικών κελιών

(cells), για το καθένα από τα οποία γίνεται μια σειρά υπολογισμών.



Εικόνα 31: Δισδιάστατο πλέγμα με τα στοιχεία του [49]

Η δημιουργία κατάλληλου πλέγματος είναι εξαιρετικά σημαντική για τη σωστή προσομοίωση της συμπεριφοράς των μοντέλων και των διάφορων φαινομένων που εξετάζονται κάθε φορά.

Γενικά, πυκνότερο πλέγμα σημαίνει καλύτερη προσέγγιση, με αυξημένο κόστος σε υπολογιστικούς πόρους (χρόνο CPU, μνήμη). Έτσι, η συνήθης πρακτική είναι η δημιουργία πλεγμάτων πυκνότερα κοντά κρίσιμες περιοχές (απότομες γεωμετρίες, οπές, οριακά στρώματα, πλούμια) και πιο αραιά σε περιοχές που προβλέπουμε να έχουν λιγότερο ενδιαφέρον.

Στην περίπτωση που εξετάζεται, η φυσική συναγωγή που αναπτύσσεται από τη διαφορά θερμοκρασίας στο τήγμα της παραφίνης, καθιστά σημαντική την επίδραση του πλέγματος στα αποτελέσματα.

Για τη δημιουργία του πλέγματος προτιμήθηκε το εξειδικευμένο πρόγραμμα ICM CFD έναντι του προγράμματος Meshing του Workbench, καθώς το πρώτο παρείχε καλύτερες δυνατότητες ελέγχου του πλέγματος αλλά και τη δυνατότητα δημιουργίας δομημένου πλέγματος στη συγκεκριμένη γεωμετρία, πράγμα που το δεύτερο δεν προσέφερε.

Το πλέγμα που επιλέχθηκε όπως φαίνεται και στο σχήμα είναι εξαιρετικά πυκνό με 112010 υπολογιστικά κελιά και πύκνωση κοντά στη θερμή επιφάνεια για τον καλύτερο υπολογισμό του οριακού στρώματος.

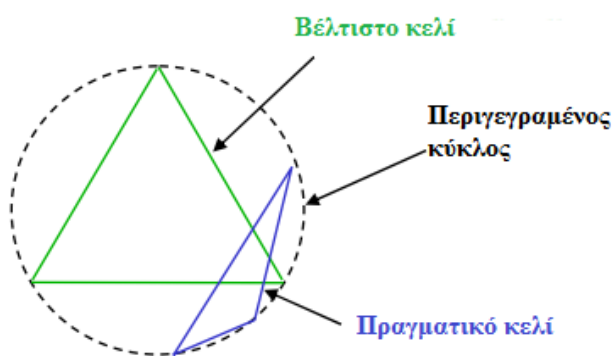
Το πλέγμα επιλέχθηκε να έχει τρίγωνα κελιά και να είναι δομημένο με τη μέθοδο patch dependant. Στη μέθοδο αυτή το πλέγμα δημιουργείται λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των κόμβων που έχει οριστεί στις ακμές-καμπύλες και την μέγιστη και ελάχιστη απόσταση που έχει οριστεί ανάμεσα στους κόμβους. [50]

Η πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος αν και είναι η πλέον σημαντική παράμετρος για την καλή προσομοίωση του φαινομένου, δεν είναι ωστόσο η μοναδική.

Skewness: Είναι ένα μέγεθος που ορίζεται με διάφορους τρόπους και περιγράφει το κατά πόσο τα υπολογιστικά κελιά έχουν το βέλτιστο μέγεθος. Στην περίπτωση των τριγώνων υπολογιστικών κελιών το μέγεθος αυτό είναι

$$\text{Skewness} = \frac{(\text{βέλτιστο μέγεθος} - \text{πραγματικό μέγεθος})}{\text{βέλτιστο μέγεθος}}$$

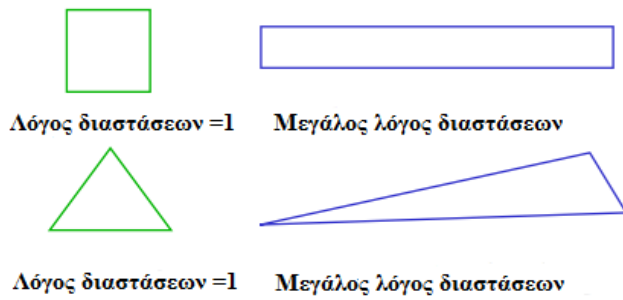
Όσο μικρότερο το μέγεθος τόσο το καλύτερο με τιμές μικρότερες του 0,5 να θεωρούνται καλές και μικρότερες του 0,25 εξαιρετικές. Στο πλέγμα που δημιουργήθηκε η τιμή ήταν 0,32



Εικόνα 32: Απεικόνιση μεγέθους Skewness [49]

Aspect ratio: Λόγος διαστάσεων είναι το μέγεθος που περιγράφει το κατά πόσο μία πλευρά (face) κελιού (cell) είναι μεγαλύτερη από την άλλη. Και εδώ η ομοιομορφία των

πλευρών αποτελεί παράγοντα ποιότητας του πλέγματος



Εικόνα 33: Λόγος διαστάσεων των πλευρών [49]

5.3.1.3 Προσδιορισμός γενικών συνθηκών

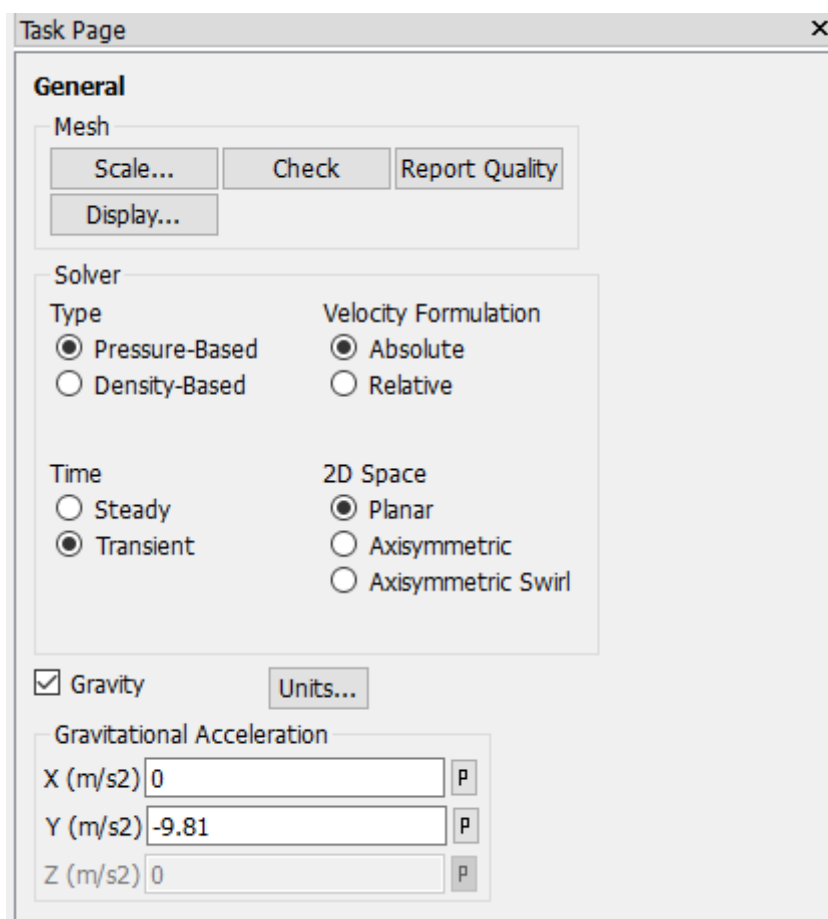
Το τελικό σκέλος της προετοιμασίας της επίλυσης του υπό εξέταση μοντέλου είναι ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων του μοντέλου αλλά και των αριθμητικών μεθόδων που θέλουμε να ακολουθηθούν.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν, με τη σειρά που έγινα οι απαραίτητες ρυθμίσεις. Για τη διευκόλυνση της αντιστοίχισης, θα διατηρηθεί η αγγλική ορολογία, όπου κρίνεται σκόπιμο.

Αρχικά προσδιορίζεται ο τύπος της διαδικασίας επίλυσης. Από τις διαθέσιμες επιλογές η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη είναι η Pressure-based Solver ενώ η Density-based Solver χρησιμοποιείται κυρίως για προβλήματα με δυσκολίες στον προσδιορισμό της πίεσης όπως, οι υπερηχητικές ροές [50]. Στο πρόβλημα μας χρησιμοποιήθηκε ο Pressure based solver αφού είναι και ο μόνος στον οποίο διατίθεται το μοντέλο τήξης-πήξης.

Οι ρυθμίσεις για την ταχύτητα αλλά και τη συμμετρία παρέμειναν επίσης στις προεπιλογές, absolute velocity και planar symmetry αφού προσφέρουν καλύτερη εποπτεία.

Τέλος ορίστηκε η επιλογή σχετικά με το χρόνο ορίστηκε μεταβατική (transient) και ορίστηκε βαρύτητα κατά τον άξονα y

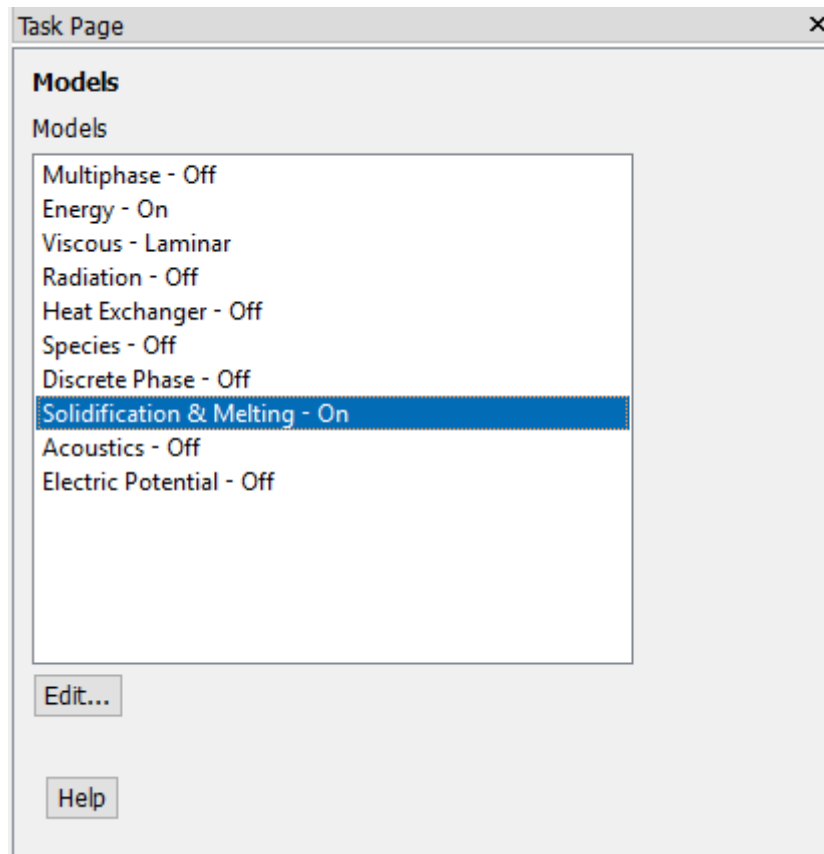


Εικόνα 34: Γενικές ιδιότητες

5.3.1.4 Φυσικά μοντέλα

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι εξισώσεις που χρειάζεται να λυθούν, για να περιγραφεί το μοντέλο που εξετάζεται. Οι εξισώσεις έχουν παρουσιαστεί στο σκέλος της μαθηματικής μοντελοποίησης. Τέλος σημειώνεται πως η σταθερά A_{mush} ορίστηκε ίση με 10^5 . Η τιμή της συγκεκριμένης σταθεράς είναι ακόμα υπό διερεύνηση με συνήθη τιμές ανάμεσα σε 10^5 - 10^6 όπως αναφέρει και ο [25]. Στην έρευνα του ωστόσο ο Shmueli [51] συγκρίνοντας την πιστότητα μοντέλων με διαφορετική τιμή στη σταθερά καταλήγει πως μεγαλύτερη ακρίβεια έχει η προσομοίωση της τήξης με $A_{mush}=10^8$. Στην παρούσα

εργασία, επιλέχθηκε η προεπιλεγμένη τιμή λόγω απουσίας πειραματικών δεδομένων.



Εικόνα 35: Φυσικά Μοντέλα [48]

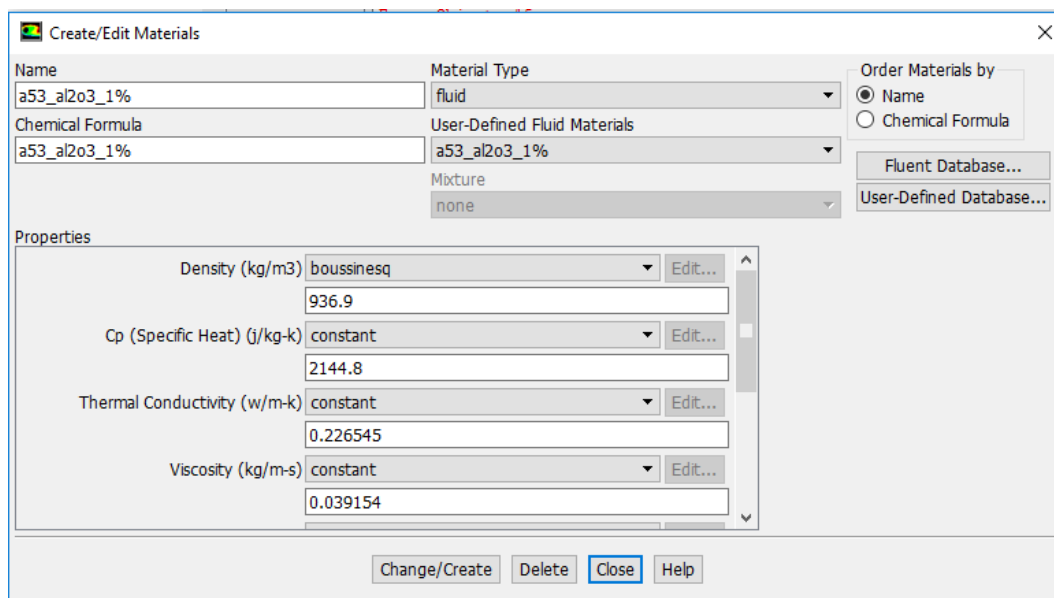
5.3.1.5 Ορισμός ιδιοτήτων υλικών

Το Fluent διαθέτει πολλά υλικά με τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες αλλά παρέχει και τη δυνατότητα δημιουργίας και νέας καταχώρησης υλικών.

Στην εργασία δημιουργήθηκαν νέα υλικά με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών A53-Al₂O₃ A53-Cu υπολογίστηκαν στο Excel και δημιουργήθηκαν ξεχωριστές καταχωρίσεις για κάθε περίπτωση.

Al ₂ O ₃	nPCM			A53	Cu	nPCM	
3600	936,9	φ	ρ	910	8933	990,23	φ
0,765	2,144861	0,01	CP	2,2	0,385	2,036266	0,01
36	0,226545		k	0,22	400	0,226656	
	0,039154		μ	0,03499		0,039154	
	125,0048		L	130		118,2725	
Al ₂ O ₃	nPCM			A53	Cu	nPCM	
3600	990,7	φ	ρ	910	8933	1150,69	φ
0,765	2,043565	0,03	CP	2,2	0,385	1,777295	0,03
36	0,240031		k	0,22	400	0,240378	
	0,050739		μ	0,03499		0,050739	
	115,8282		L	130		99,72364	

Εικόνα 36: Ιδιότητες σύνθετων υλικών



Εικόνα 37: Δημιουργία νέων υλικών [48]

Όπως φαίνεται και στην εικόνα για τον υπολογισμό της πυκνότητας έχει χρησιμοποιηθεί η **προσέγγιση Boussinesq.**

Η προσέγγιση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ασυμπίεστες ροές των οποίων τα υπόλοιπα μεγέθη είναι σταθερά ή μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασία

Η συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρεί σταθερή τη πυκνότητα του υλικού και χρησιμοποιεί μια σταθερά θερμικής διόγκωσης β ($1/K$)=0.001 . Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της φυσικής συναγωγής αρκεί η διαφορά θερμοκρασίας να είναι αρκούντως μικρή, δηλαδή:

$$\beta(T - T_o) \ll 1 \quad (18)$$

Ο τύπος της προσέγγισης είναι :

$$(\rho - \rho_o)g \approx -\rho_o \beta(T - T_o)g \quad (19)$$

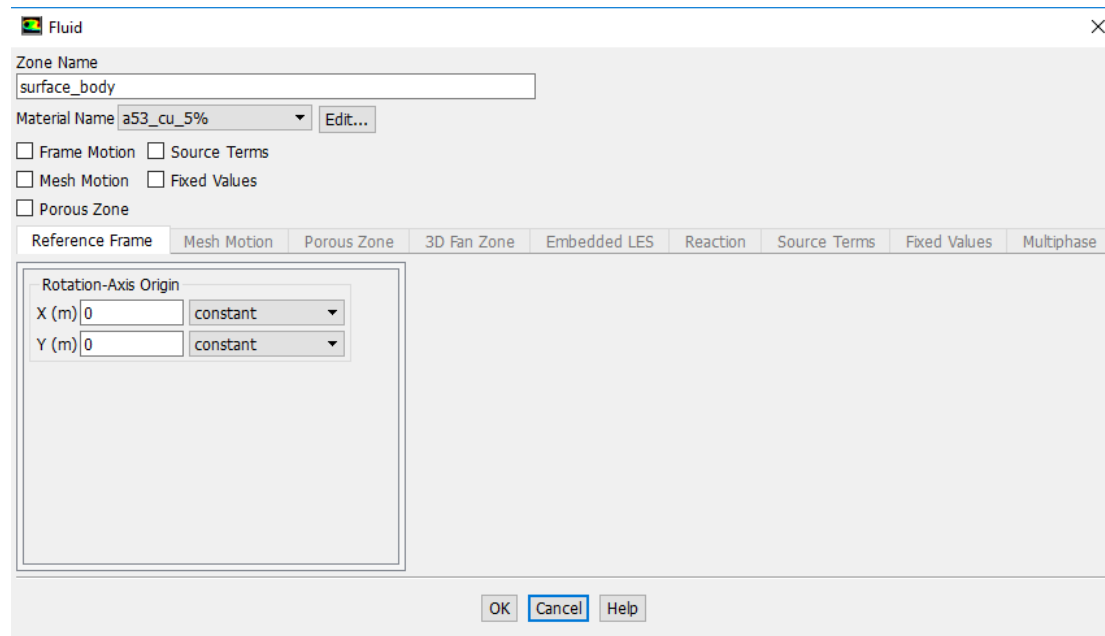
Η πυκνότητα λειτουργίας (ρ_o) είναι ξεχωριστή για κάθε υλικό και η θερμοκρασία λειτουργίας (T_o) ορίζεται στους 53 ° C .

Σε περιπτώσεις που η θερμοκρασιακή διαφορά είναι μεγάλη ή το ρευστό είναι συμπιεστό απαιτείται άλλη συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών όπως για παράδειγμα κάποια συνάρτηση συσχέτισης της θερμοκρασίας με την πυκνότητα, που να προκύπτει από πειραματικά δεδομένα [52]

5.3.1.6 Ορισμός ιδιοτήτων του Cell Zone

Στο στάδιο αυτό αντιστοιχίζονται στις διάφορες υποπεριοχές του πλέγματος του μοντέλου μας τα υλικά, αλλά και διάφορες άλλες ιδιότητες που μπορεί να έχουν.

Στην περίπτωση μας έχουμε μία περιοχή που ονομάζεται surface_body και κάθε φορά αλλάζουμε το υλικό, ανάλογα με το ποσοστό των νανοσωματιδίων που θέλουμε να μελετήσουμε. Επίσης εδώ είναι που προσδιορίζουμε και τη θερμοκρασία λειτουργίας της



Εικόνα 38: Ορισμός ιδιοτήτων των περιοχών του υπολογιστικού πλέγματος [48]

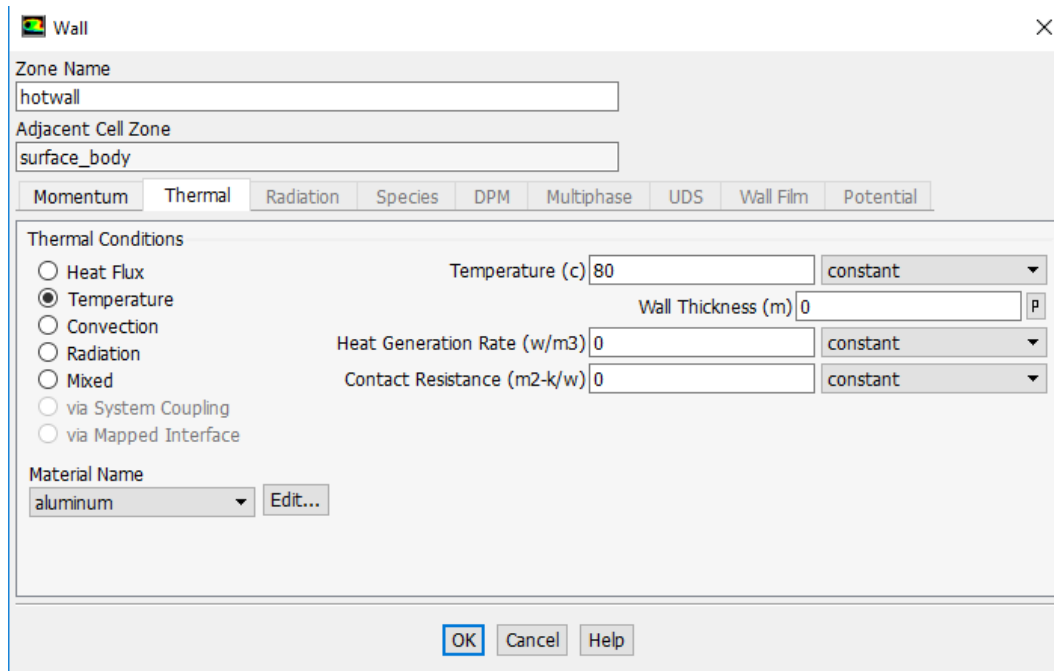
5.3.1.7 Οριακές συνθήκες

Εδώ δίνουμε τις οριακές συνθήκες, τα δεδομένα ουσιαστικά με τα οποία, το μοντέλο που έχουμε φτιάξει θα κληθεί να υπολογίσει τα διάφορα φυσικά μεγέθη που χρειαζόμαστε.

Το Fluent παρέχει πολλές διαφορετικές επιλογές και μπορεί να περιγράψει μεγάλο πλήθος φυσικών φαινομένων. Χαρακτηριστικά μόνο αναφέρονται ότι, στο καθορισμό των οριακών συνθηκών μπορούν να μοντελοποιηθούν με απλό και γρήγορο τρόπο, παροχές εισόδου, εξόδου, ανά μάζα ή με δοσμένη ταχύτητα και θερμοκρασία. Μπορούν να μοντελοποιηθούν θερμομονωμένα τοιχώματα ή θερμικές ροές ή συγκεκριμένες θερμοκρασίες, ακόμα και ακτινοβολία

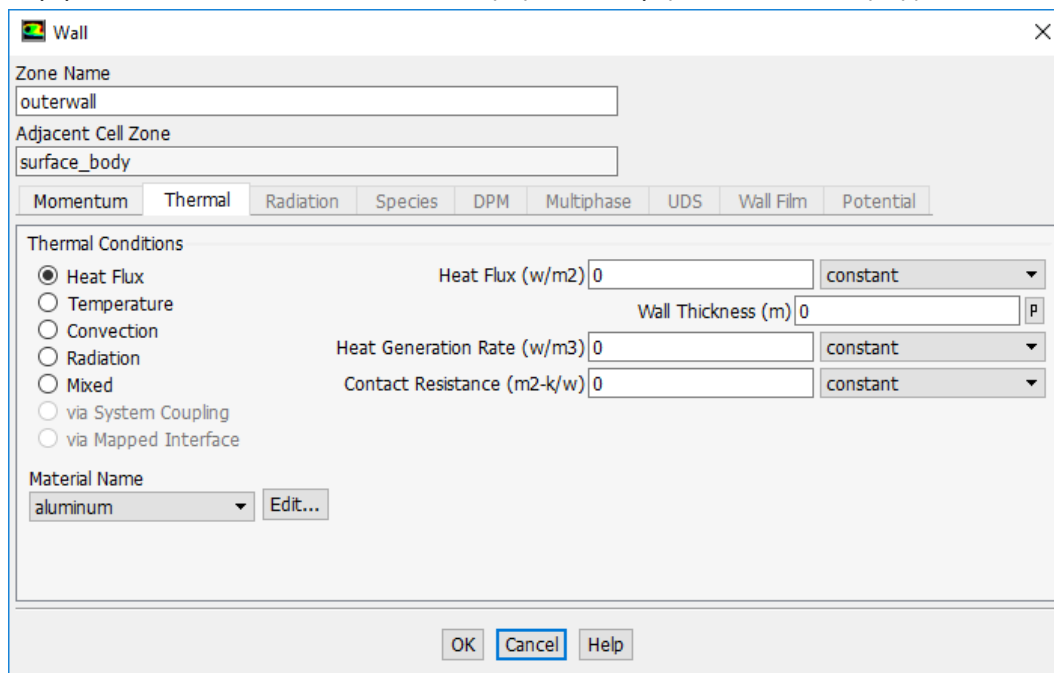
Στο πρόβλημα που εξετάστηκε υπήρχαν μόνο δύο τοιχώματα, και καμία συναλλαγή μάζας με το περιβάλλον. Οι συνοριακές συνθήκες που διαμορφώθηκαν είναι:

Hot_wall: το εσωτερικό τοίχωμα ορίστηκε όπως αναφέρθηκε και παραπάνω με σταθερή θερμοκρασία 80 °C και συνθήκη μη ολίσθησης για την ταχύτητα



Εικόνα 39: Συνοριακή συνθήκη για ζεστό τοίχο [48]

Outer_wall: Το εξωτερικό τοίχωμα ορίστηκε μηδενική ροή θερμότητας προς το περιβάλλον και συνθήκη μη ολίσθησης επίσης



Εικόνα 40: Συνοριακή συνθήκη για εξωτερικό τοίχο [48]

5.3.1.8 Ορισμός αριθμητικών μεθόδων

Ο Pressure-based Solver που επιλέχθηκε παρέχει πληθώρα αριθμητικών μεθόδων προς επίλυση των εξισώσεων αλλά και μεθόδους σύζευξης (coupling) των εξισώσεων ορμής και συνέχειας, μεταξύ τους.

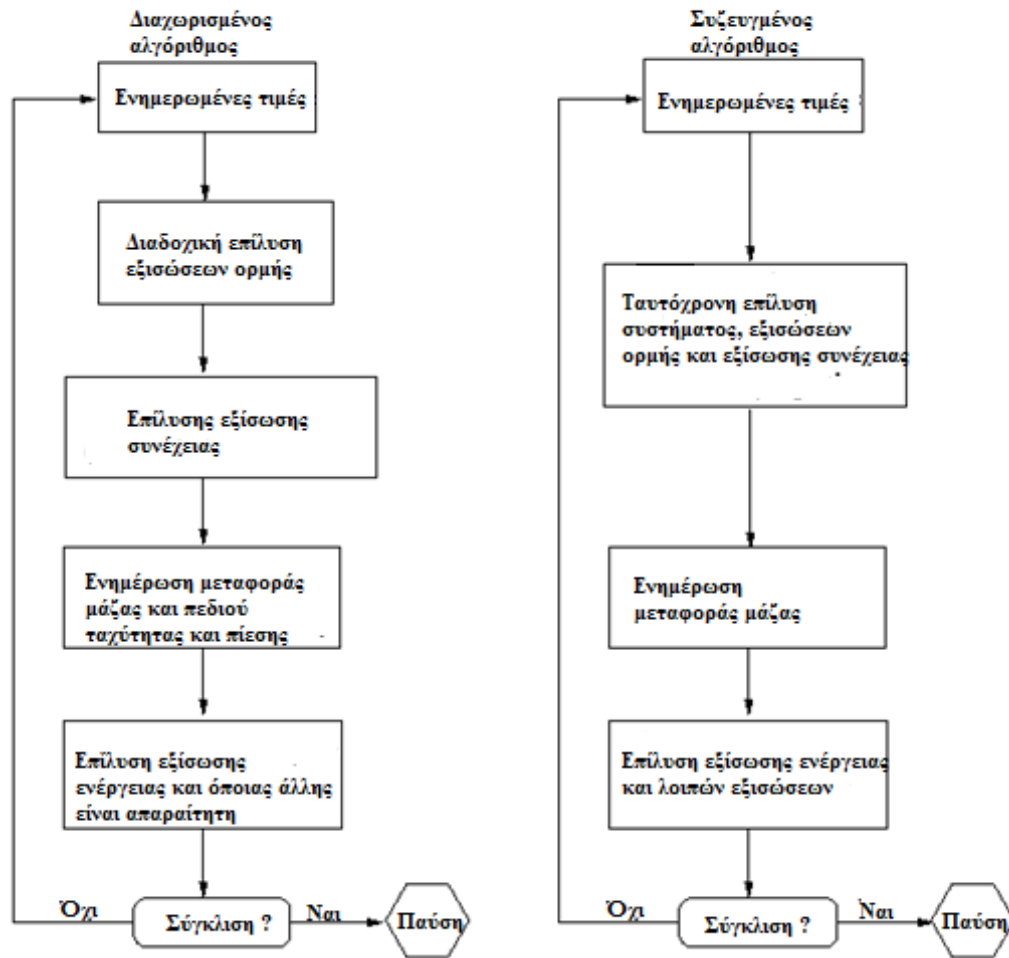
Pressure-Velocity-Coupling

Η μέθοδος σύζευξης μεταξύ ορμής και συνέχειας παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στην ευστάθεια της διαδικασίας επίλυσης όσο και στο συνολικό απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο. Ειδικά στο πρόβλημα που εξετάστηκε, παρατηρήθηκε δυσκολία στην επίτευξη της απαιτούμενης σύγκλησης της εξίσωσης της συνέχειας (continuity), γεγονός που εκφράστηκε είτε με πολλές επαναλήψεις ανά χρονικό βήμα είτε ακόμα και με απόκλιση ανάμεσα σε κάποιες επαναλήψεις. Τη δυσκολία μοντελοποίησης φυσικής συναγωγής σε κλειστή επιφάνεια επιβεβαιώνει και ο οδηγός χρήστη της Ansys για το Fluent [50].

Γενικά οι μέθοδοι σύζευξης χωρίζονται σε segregated-διαχωρισμένους και coupled-συζευγμένους

Όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα ο πρώτος τύπος επίλυσης λύνει διαδοχικά τις εξισώσεις ενώ ο δεύτερος ταυτόχρονα. Η διαδοχική επίλυση των εξισώσεων έτσι όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα ξεκινάει με κάποιες αρχικές τιμές, ή τα προϊόντα επίλυσης του προηγούμενου κύκλου και λύνει κάθε μία από τις εξισώσεις με τη σειρά τροφοδοτώντας με τα αποτελέσματα της λύσης την επόμενη εξίσωση. Στο τέλος ελέγχεται για σύγκληση κάθε εξίσωση. Στην ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων όλες οι εξισώσεις λύνονται παράλληλα. Η πρώτη μέθοδος απαιτεί λιγότερη μνήμη αφού κάθε φορά αποθηκεύεται μια εξίσωση ενώ στο δεύτερο χρειαζόμαστε καταχωρίσεις για όλες τις εξισώσεις που χαρακτηρίζουν

το πρόβλημα. Η Ταυτόχρονη επίλυση όμως τείνει να είναι γρηγορότερη.



Εικόνα 41: Segregated και coupled solvers [50]

Από τις μεθόδους που παρέχονται από το Fluent, segregated είναι οι οι SIMPLE, SIMPEC, PISO ενώ υπάρχει μια COUPLED.

Για το πρόβλημα που μοντελοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική η βιβλιογραφία προτείνει τις μεθόδους SIMPLE και PISO με συχνότερη τη χρήση του αλγόριθμου SIMPLE. [53], [52], [54]. Εδώ χρησιμοποιήθηκε ο PISO καθώς παρατηρήθηκε μέσα από δοκιμές, γρηγορότερη σύγκλιση για το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε.

Η διαδικασία επίλυσης που ακολουθεί ο Pressure-based Solver είναι η ολοκλήρωση σε ένα μικρό όγκο ελέγχου του εκάστοτε συστήματος εξισώσεων σε γραμμικοποιημένη διακριτοποιημένη μορφή.

Για τη διακριτοποίηση των εξισώσεων ενέργειας και ορμής ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία μέσω αντίστοιχων επιλογών

Η τυπική εξίσωση διατήρησης ενός βαθμωτού μεγέθους ϕ σε ένα όγκο ελέγχου V είναι η παρακάτω:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (20)$$

Για δισδιάστατο πρόβλημα οι όγκοι V εκφυλίζονται σε επιφάνειες και οι επιφάνειες A εκφυλίζονται σε ακμές (βλέπε Εικόνα 31: Δισδιάστατο πλέγμα με τα στοιχεία του Εικόνα 31). Το διάνυσμα της ταχύτητας γίνεται $\vec{v} = u\vec{i} + v\vec{j}$ και το διαφορικό γίνεται $\nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{j}$. Τέλος το Γ_ϕ είναι ο εκάστοτε συντελεστής διάχυσης. Τα υπόλοιπα έχουν οριστεί προηγουμένως.

Η ειδική μορφή της εξίσωσης αυτής, η εξίσωση διατήρησης ενέργειας, ορμής και μάζας στη υπό εξέταση περίπτωση, εφαρμόζεται σε κάθε υπολογιστικό κελί ως εξής:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \vec{A}_f + S_\phi V \quad (21)$$

όπου N_{faces} ο αριθμός των επιφανειών ή ακμών που περικλείουν το υπολογιστικό κελί και $\rho_f \vec{v}_f \vec{A}_f$ είναι η ροή μάζας μέσα από το επιφάνεια. Για τη γραμμικοποίηση της παραπάνω σχέσης το άγνωστο μέγεθος ϕ υπολογίζεται κατά τα γνωστά με βάση τους συντελεστές και τις τιμές του ϕ στους γειτονικούς κόμβους και με διαδικασία επαναλήψεων.

$$\alpha_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (22)$$

όπου το όρισμα p αναφέρεται στο προς υπολογισμό σημείο και το όρισμα nb αναφέρεται στα γειτονικά κελιά και τις τιμές του φ εκεί. Ο όρος b αντιστοιχεί στους σταθερούς όρους.

Η τιμή του εκάστοτε φ για το οποίο λύνουμε στην πραγματικότητα επιδέχεται άλλη μία προσαρμογή μέσω ενός συντελεστή χαλάρωσης U, πριν αποδοθεί εκ νέου για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων.

$$\varphi_p^{new} = \varphi_p^{old} + U(\varphi_p^{new,predicted} - \varphi_p^{old}) \quad (23)$$

Ο συντελεστής αυτός παίρνει συνήθως τιμές μικρότερες από τη μονάδα ($U < 1$) καθώς διευκολύνει την ευστάθεια της επίλυσης με επιβράδυνση βέβαια της επίλυσης. Τιμή ίση με τη μονάδα ($U = 1$) σημαίνει την τοποθέτηση της τιμής που προβλέπει η επίλυση του προβλήματος για τη συγκεκριμένη επανάληψη. Τέλος τιμές μεγαλύτερης της μονάδας ($U > 1$) μπορούν να επιταχύνουν την διαδικασία της επίλυσης, σπάνια όμως προτείνονται αφού βάλλεται η ευστάθεια της επίλυσης. Οι τιμές για τα διάφορα μεγέθη είναι που στο πρόβλημα που εξετάστηκε είναι οι προεπιλογές του Fluent:

Πίεση:0.3

Πυκνότητα:1

Δυνάμεις:1

Ορμή:0.7

Ποσοστό-τήγματος:0.9

Ενέργεια:1

Gradient: Εδώ επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο θα διακριτοποιείται το ανάδελτα και θα αποδίδεται η τιμή στα κέντρα των υπολογιστικών κελιών. Επιλέχθηκε η μέθοδος παρεμβολής ελαχίστων τετραγώνων με βάση τα γειτονικά κελιά που αποτελεί την προεπιλογή του Fluent, καθώς αποτελεί την ακριβέστερη και υπολογιστικά οικονομικότερη επιλογή [50]

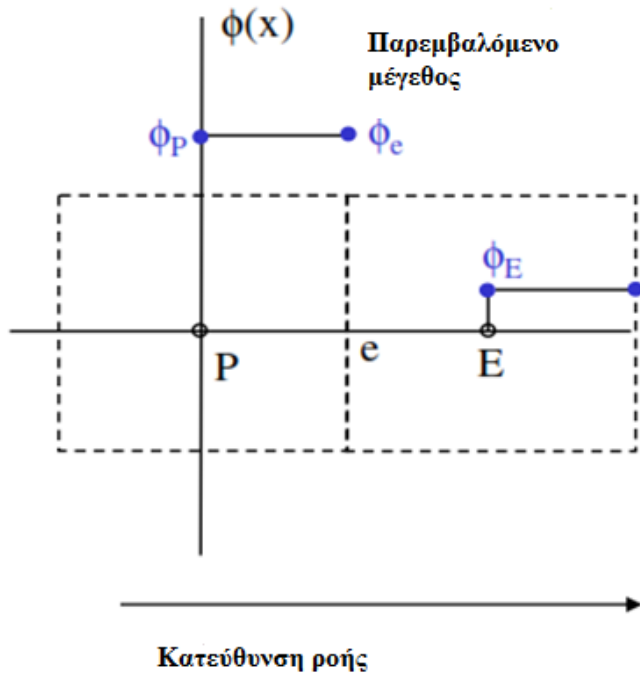
Pressure: Χρησιμοποιείται το σχήμα PRESTO!

Momentum: Εδώ χρησιμοποιείται το Δευτεροτάξιο ανάντι σχήμα

Energy: Επίσης χρησιμοποιείται το Δευτεροτάξιο ανάντι σχήμα

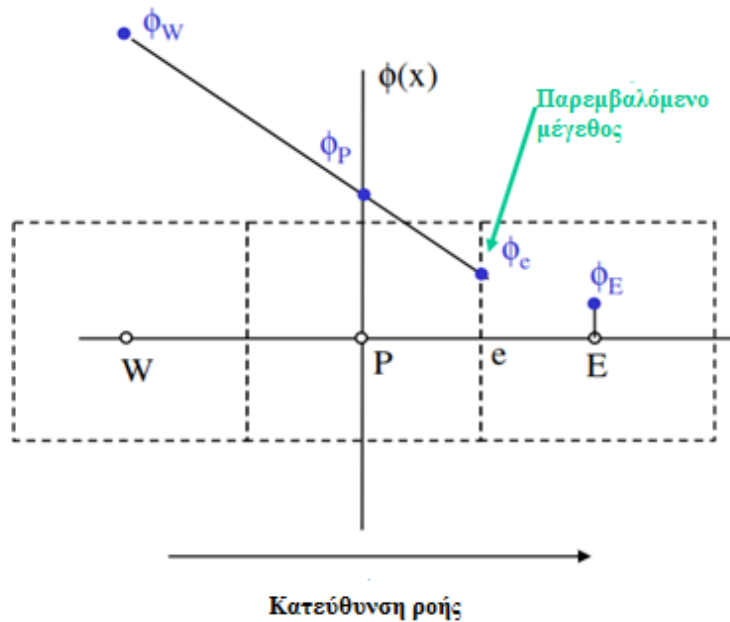
Το Fluent αποθηκεύει τις μεταβλητές του πεδίου που εξετάζουμε στο «κέντρο» κάθε υπολογιστικού κελιού. Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων που χρησιμοποιεί το Fluent για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων (finite volume method- FVM) απαιτεί τον προσδιορισμό των τιμών διάφορων μεγεθών στις διεπιφάνειες (faces) μεταξύ των υπολογιστικών κελιών.

Στην απλούστερη περίπτωση που χρησιμοποιείται, το First order upwind, η τιμή του υπολογιστικού κελιού που ακολουθεί τη διεπιφάνεια κατά τη κατεύθυνση της ταχύτητας αποδίδεται αυτούσια στο αντίστοιχο face.



Εικόνα 42: Πρώτης τάξης ανάντι σχήμα

Ειδικά στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία το συγκεκριμένο σχήμα αργούσε να συγκλίνει και προτιμήθηκε το δευτεροτάξιο καθώς προσφέρει σταθερότητα και μικρή, σχετικά, απόκλιση από το ένα χρονικό βήμα στο άλλο, αφού εμπλέκει τιμές από περισσότερα κελιά για τον υπολογισμό του μεγέθους που θέλουμε να αποδώσουμε στη διεπιφάνεια.



Εικόνα 43: Δεύτερης τάξης ανάντι σχήμα [55]

Αναφέρεται χαρακτηριστικά πως τα residuals, στα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια, ήταν μεγαλύτερα κατά μια τάξη.

Τέλος το PRESTO!, είναι ένα αντίστοιχο σχήμα παρεμβολής που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πίεσης στις διεπιφάνειες. Το PRESTO! αντί να τοποθετεί στις διεπιφάνειες (faces) πίεση που είναι αποθηκευμένη στο κέντρο του υπολογιστικού κελιού, υπολογίζει την πίεση χρησιμοποιώντας τμηματικά (staggered) πλέγματα, όπου πίεση και ταχύτητα δεν είναι τοποθετημένες μαζί στην μνήμη. Το σχήμα PRESTO! χρησιμοποιεί περισσότερη υπολογιστική μνήμη σε σχέση με άλλες μεθόδους παρεμβολής αλλά είναι το μοναδικό σχήμα που δίνει σωστά αποτελέσματα στην υπό εξέταση περίπτωση.

Transient formulation: Εδώ προσδιορίζεται ο τρόπος διακριτοποίησης της εκάστοτε εξίσωσης ως προς το χρόνο. Συγκεκριμένα, για τον Pressure-Based Solver χρησιμοποιούνται μόνο πεπλεγμένα (implicit) σχήματα, πρωτοβάθμια ή δευτεροβάθμια.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το δευτεροβάθμιο σχήμα

$$\frac{3\varphi^{n+1} - 4\varphi^n + \varphi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\varphi) \quad (24)$$

όπου n είναι η παρούσα χρονική στιγμή. Στην πεπλεγμένη του μορφή, δηλαδή λυμένο για τη μελλοντική χρονική στιγμή γίνεται:

$$\varphi^{n+1} = \frac{1}{3}(2\Delta t \cdot F(\varphi^{n+1}) + 4\varphi^n - \varphi^{n-1}) \quad (25)$$

Παρόλο που με τη δευτεροβάθμια προσέγγιση αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος για κάθε χρονικό βήμα, το σύνολο του χρόνου που απαιτείται μειώνεται αφού γίνεται καλύτερη προσέγγιση των μεγεθών στο επόμενο βήμα.

5.3.1.9 Σύγκλιση και μέθοδος των υπολοίπων

Σημαντική παράμετρος για τον έλεγχο της πορείας της υπολογιστικής επίλυσης του μοντέλου είναι τα κριτήρια σύγκλισης (convergence). Το Fluent σε κάθε επανάληψη (iteration) αποδίδει μια προσεγγιστική τιμή, για κάθε μέγεθος που υπολογίζει σε κάθε υπολογιστικό κελί. Κάθε νέα επανάληψη τοποθετεί νέες τιμές στα κελιά αυτά, με βάση τα διπλανά κελιά, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω. Η διαφορά της παλιάς από τη νέα τιμή είναι το μέγεθος-υπόλοιπο (residual) με το οποίο προσδιορίζουμε την ακρίβεια της λύσης μας. Η επίλυση του προβλήματος τελειώνει όταν η νέα τιμή διαφέρει από την προηγούμενη λιγότερο από το από το μέγεθος που έχουμε προσδιορίσει σαν κριτήριο σύγκλισης. Για κάθε μέγεθος που υπολογίζεται τίθενται ξεχωριστά τέτοια μεγέθη, τα οποία είναι αυθαίρετα και αφορούν την ακρίβεια που θέλουμε να πετύχουμε, το χρόνο που διαθέτουμε και τους υπολογιστικούς μας πόρους.

Στην παρούσα εργασία κρατήθηκαν τα δοσμένα μεγέθη:
Συνέχεια: 10^{-3}

U-συνιστώσα-ταχύτητας: 10^{-3}

V-συνιστώσα-ταχύτητας: 10^{-3}

Ενέργεια: 10^{-6}

Το Fluent δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των υπολοίπων (residuals) με διάφορους

τρόπους. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε τα υπόλοιπα να είναι ο αριθμητικός μέσος των υπολοίπων όλων των κελιών και όχι απλά το άθροισμά τους, (scaled residuals).

Λαμβάνοντας υπόψη τη μορφή που έχει πάρει η διακριτοποιημένη και γραμμικοποιημένη εξίσωση για ένα τυχαίο σημείο P

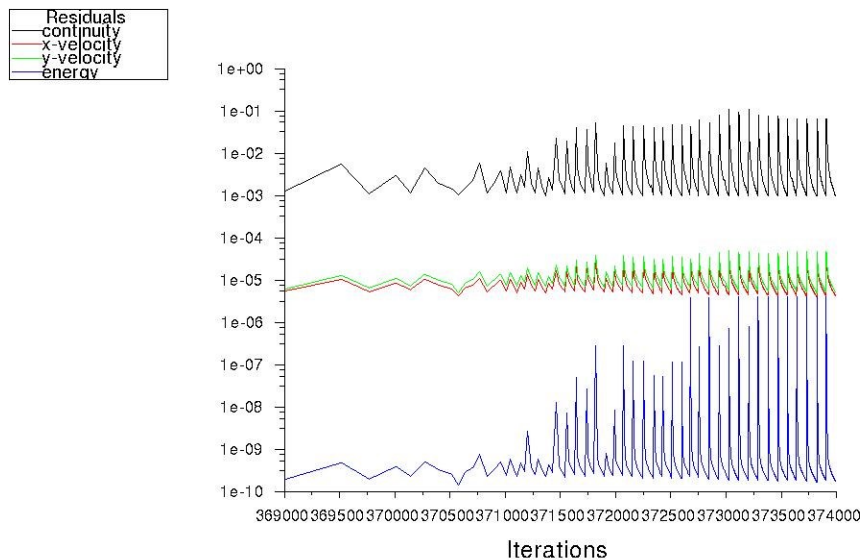
$$a_p \varphi = \sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + b \quad (26)$$

ο τύπος που εκφράζει τα υπόλοιπα (residuals- R^ϕ) είναι :

$$R^\phi = \frac{\sum_{cells P} |\sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + b - a_p \varphi_p|}{\sum_{cells P} |a_p \varphi_p|} \quad (27)$$

Αυτό μας επιτρέπει μια εκτίμηση για την σύγκληση σε κάθε χρονικό βήμα. Γενικά επειδή εξετάστηκε ένα φαινόμενο που εξελίσσεται στο χρόνο και δεν εισέρχεται σε μια χρονική κατάσταση παρά πολύ αργότερα και είναι μάλιστα αυτή, η μεταβατική κατάσταση που θέλουμε να μελετήσουμε, η σύγκληση γίνεται όλο και δυσκολότερη όσο περνά ο χρόνος. Αυτό προκύπτει ακριβώς από το γεγονός ότι το μέτωπο του τήγματος αυξάνεται και άρα όλο και περισσότερα υπολογιστικά κελιά επηρεάζονται από την τήξη, τη συναγωγή κλπ. Ακόμα επειδή μας αφορά και η πραγματική απόκριση στο χρόνο του φαινομένου πρέπει

κάθε χρονικό βήμα να συγκλίνει προτού προχωρήσει η επίλυση στο επόμενο

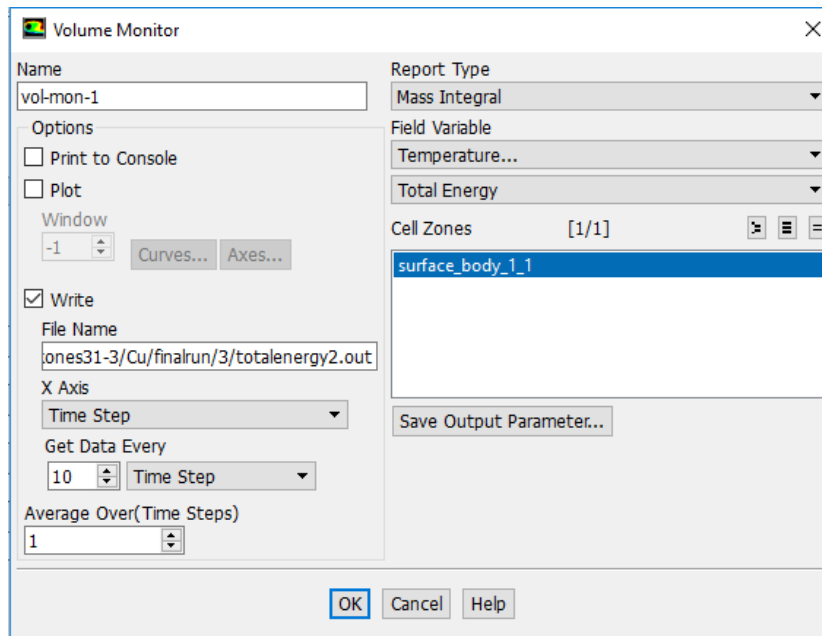


Εικόνα 44: Καταγραφή των υπολοίπων σε κάθε επανάληψη και χρονικό βήμα

5.3.1.10 Καταγραφή μεγεθών

Για την καλύτερη εποπτεία της εξέλιξης του φαινομένου αλλά και για τη εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων το Fluent δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας αρχείων καταγραφής δεδομένων, κινούμενων γραφικών τόσο των υπό υπολογισμών δεδομένων, όσο και μεγεθών που αναφέρονται σε συγκεκριμένους κόμβους, σε επιφάνειες ή υποπεριοχές του υπολογιστικού πλέγματος, αλλά και συνολικών μεγεθών «ολοκληρωμάτων των υπό εξέταση μεγεθών»

Αξιοποιώντας αυτή τη δυνατότητα, δημιουργήθηκαν αρχεία καταγραφής του ποσοστού του τήγματος σε όλο το μοντέλο, ως συνάρτηση του χρόνου με καταγραφή κάθε δέκα (10) χρονικά βήματα και καταγραφή της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας ως συνάρτηση του χρόνου, με αντίστοιχη καταγραφή.



Ο τύπος που περιγράφει την συνολική ενέργεια του μοντέλου είναι

$$\int H \rho dV = \sum_{i=1}^n H_i \rho_i V_i \quad (28)$$

Το Fluent κάνει τους υπολογισμούς που αφορούν δισδιάστατα μοντέλα υποθέτοντας βάθος 1m.

Αντίστοιχα ο τύπος που υπολογίζει το ποσοστό του τήγματος στο μοντέλο είναι

$$\frac{1}{V} \int f dV = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n f_i V_i \quad (29)$$

5.3.1.11 Αρχικοποίηση

Το τελευταίο στάδιο πριν την επίλυση του μοντέλου μας είναι ο ορισμός των αρχικών συνθηκών, του σημείου εκείνου δηλαδή από το οποίο θα ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία.

Στο πρόβλημα που εξετάστηκε οι αρχικές συνθήκες ορίστηκαν αντιπροσωπευτικές των πραγματικών κατά την εκκίνηση της τήξης, δηλαδή με μηδενική πίεση, μηδενική ταχύτητα και θερμοκρασία στους 26 ° C.

Task Page

Solution Initialization

Initialization Methods

Hybrid Initialization

Standard Initialization

Compute from

Reference Frame

Relative to Cell Zone

Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)

0

X Velocity (m/s)

0

Y Velocity (m/s)

0

Temperature (c)

26.85001

Initialize Reset Patch...

5.3.2 Επίλυση

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος ορίστηκε σταθερό χρονικό βήμα 0,1s Για την ολοκλήρωση κάθε χρονικού βήματος και τη επίτευξη σύγκλησης, χρειάζονται **διαρκώς αυξανόμενες επαναλήψεις** (iterations). Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς προχωράει η τήξη του PCM όλο και περισσότερα υπολογιστικά κελιά επηρεάζονται από τη φυσική συναγωγή, αποκτούν ταχύτητα και ιδιότητες ρευστού γενικά αυξάνοντας τόσο τα υπόλοιπα (*residuals*) και κατά συνέπεια τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων. Έτσι ο υπολογιστικός χρόνος που αντιστοιχεί σε κάθε πραγματικό δευτερόλεπτο αυξάνεται επίσης και η επίλυση του μοντέλου επιβραδύνεται. Αναφέρεται χαρακτηριστικά πως οι αρχικά οι απαιτούμενες επαναλήψεις είναι 20-30 ανά χρονικό βήμα ενώ μετά από 900 δευτερόλεπτα και 9000 βήματα οι απαιτούμενες επαναλήψεις ξεπερνούν τις 100 ανά επανάληψη. Ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται κάθε μία από τις περιπτώσεις για να φτάσουν 30 λεπτά λειτουργίας είναι πάνω από 5 μέρες. Ακόμα, στην περίπτωση του καθαρού PCM όπου η κινηματική συνεκτικότητα είναι

χαμηλότερη και αναπτύσσονται κατ' επέκταση μεγαλύτερες ταχύτητες, η σύγκληση της εξίσωσης συνέχειας (continuity) είναι ακόμα δυσκολότερη και οι συνολικές επαναλήψεις ανά χρονικό βήμα αυξάνονται περαιτέρω.

5.3.2.1 Υπολογιστικά συστήματα υψηλών απαιτήσεων και παράλληλη επεξεργασία

Για τον επίλυση των μοντέλων που περιεγράφηκαν παραπάνω είναι προφανές πως οι απαραίτητοι υπολογιστικοί πόροι ξεπερνούν κατά πολύ τις δυνατότητες ενός συμβατικού ηλεκτρονικού υπολογιστή οικιακής χρήσης.

Τόσο η ανάγκη μεγάλης μνήμης για την αποθήκευση των δεδομένων, χιλιάδων υπολογιστικών κελιών όσο και οι εκατομμύρια πράξεις που είναι απαραίτητες για κάθε μία από τις επαναλήψεις καθιστούν απαραίτητη τη χρήση μεγάλων υπολογιστικών μονάδων

Οι μονάδες αυτές έχουν σα βασικό χαρακτηριστικό, τη παράλληλη λειτουργία πολλών επεξεργαστικών υπομονάδων όχι απαραίτητα μεγάλης επεξεργαστικής ισχύς.

Το Fluent δίνει με απλό τρόπο, τη δυνατότητα χρησιμοποίησης τέτοιων υπερ-υπολογιστών μέσα από την επιλογή για παράλληλη επεξεργασία (parallel processing). Κατά τη παράλληλη επεξεργασία του μοντέλου, το πλέγμα (mesh) επιμερίζεται σε κάθε ένα επεξεργαστή, ο οποίος επιλύει τις εξισώσεις για τα συγκεκριμένα υπολογιστικά κελιά και στη συνέχεια τα δεδομένα «κυκλοφορούν» ανάμεσα στις υποδιαιρέσεις του πλέγματος, ενώνοντας ξανά το πλέγμα στην αρχική του μορφή και αποδίδοντας τα σωστά μεγέθη.

Στην διπλωματική, έγινε χρήση του HPC του πολυτεχνείου, που αριθμεί 24 εξαπύρηνους επεξεργαστές και 96 Gbyte μνήμη. Από αυτούς έγινε λόγω περιορισμένου αριθμού αδειών χρήση των 16 επεξεργαστών οι οποίοι λειτουργούσαν στα 0,8 GHz.

Ο τρόπος κατανομής του πλέγματος αλλά και επικοινωνίας μεταξύ των επεξεργαστών παρέμεινε στις προεπιλογές του Fluent.

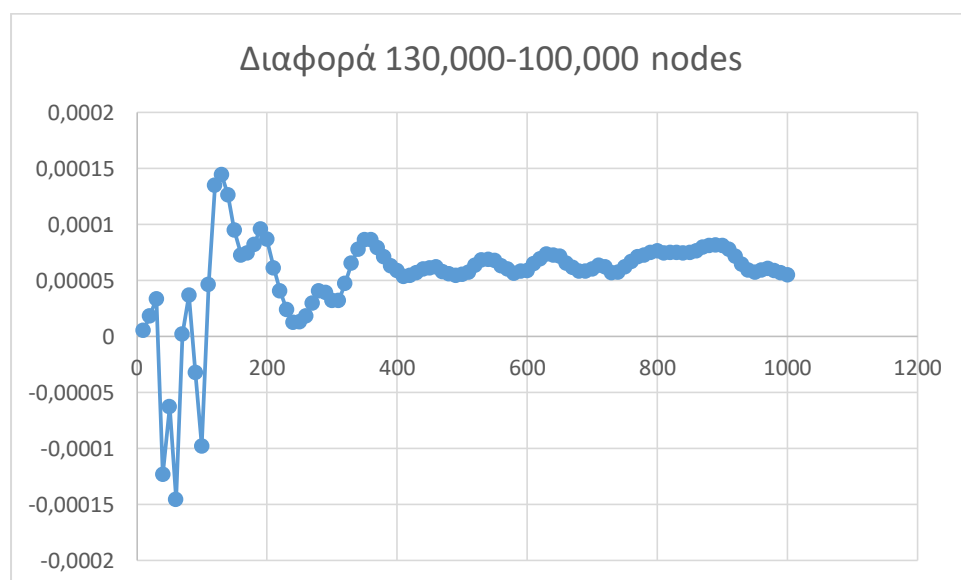
6 Ανεξαρτητοποίηση πλέγματος και χρονικού βήματος

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, η αποτελεσματική προσομοίωση μοντέλων σε λογισμικά CFD εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλέγμα διακριτοποίησης του χώρου (mesh) και από το χρονικό βήμα. Πέρα από τη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων με κριτήριο τη σύγκληση των υπολογισμών, είναι επίσης βασικό, η πυκνότητα του πλέγματος και το μέγεθος του χρονικού βήματος να μην επηρεάζουν, μέσα σε κάποια όρια, τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου.

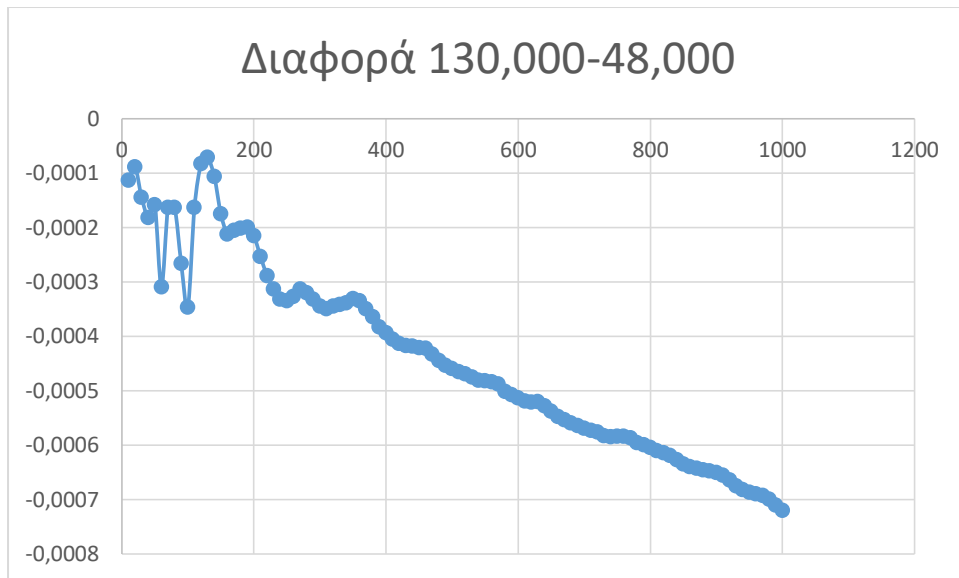
Για το λόγο αυτό πριν την τελική επίλυση του μοντέλου μέσα από δοκιμές, με όλο και πυκνότερα πλέγματα, προσδιορίζεται ο αριθμός κόμβων, η περεταίρω αύξησή του οποίου, δεν μεταβάλλει «σημαντικά» τα αποτελέσματα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η το ποσοστό του τήγματος σαν συνάρτηση του χρόνου για τα διαφορετικά πλέγματα, αλλά και η εξέλιξη ως προς το χρόνο, της διαφοράς των ποσοστών από το ποσοστό της του τήγματος της μεγαλύτερης πυκνότητας.

Τα πλέγματα που εξετάστηκαν είναι πυκνότητας 70.000 υπολογιστικών κόμβων (nodes) 100.000 nodes και 130.000 nodes. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται για τα 1000 πρώτα χρονικά βήματα (100 δευτερόλεπτα) οι διαφορές των ποσοστών.



Εικόνα 45: Διαφορά ποσοστών τήγματος για τα πλέγματα 130.000 και 100.000 κόμβων

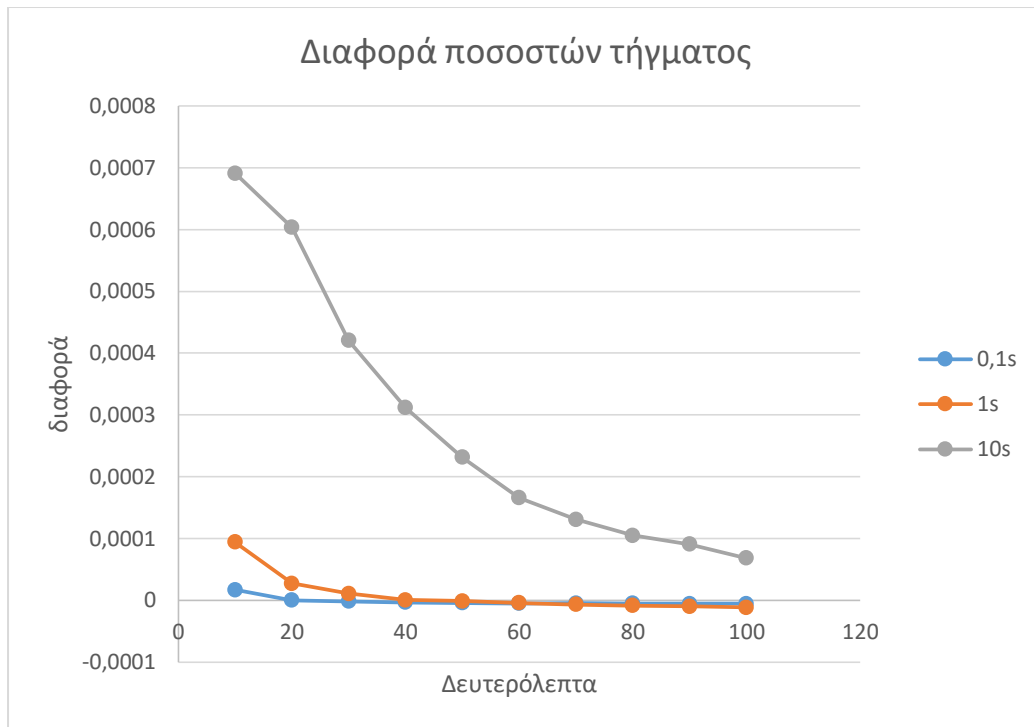


Εικόνα 46: Διαφορά ποσοστών τήγματος για 130.000 και 48.000 υπολογιστικούς κόμβους

Παρατηρούμε ότι για τα δύο πλέγματα αυτό με τους λιγότερους κόμβους εμφανίζει μία σημαντική διαφορά σε σχέση με το πυκνό πλέγμα η οποία μάλιστα, αυξάνεται όσο περνά ο χρόνος.

Από την άλλη το πλέγμα με τις 100.000 κόμβους παρουσιάζει, μικρότερη διαφορά σε σχέση με το πυκνό πλέγμα η οποία μάλιστα παραμένει σχετικά σταθερή με την εξέλιξη του χρόνου Σύμφωνα με τα παραπάνω επιλέχθηκε το πλέγμα των 100.000 κόμβων, ως ακριβές και υπολογιστικά οικονομικότερο.

Αντίστοιχα ακολουθεί, πίνακας που παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού του τήγματος ως προς το χρόνο για κάποια διαφορετικά χρονικά βήματα και η διαφορά τους από το μικρότερο χρονικό βήμα που ελέγχθηκε και ήταν 0,01s.



Εικόνα 47: Διαφορά από το ποσοστό τήγματος για 0.01s

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η απόκλιση ελαχιστοποιείται για χρονικό βήμα 0.1s το οποίο και επιλέχθηκε τελικά

Στην επιλογή του πλέγματος και του χρονικού βήματος συνυπολογίζεται, το κόστος σε υπολογιστικούς πόρους.

7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο κομμάτι αυτό και αφού έχει διαπιστωθεί η ακρίβεια του υπολογιστικού μοντέλου, η ανεξαρτησία του από το πλέγμα και το χρονικό βήμα και έχουν προσδιοριστεί μέσα από την προαναφερθείσα διαδικασία όλα τα απαραίτητα δεδομένα αλλά και οι κατάλληλες αριθμητικές μέθοδοι, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης των διαφορετικών μοντέλων.

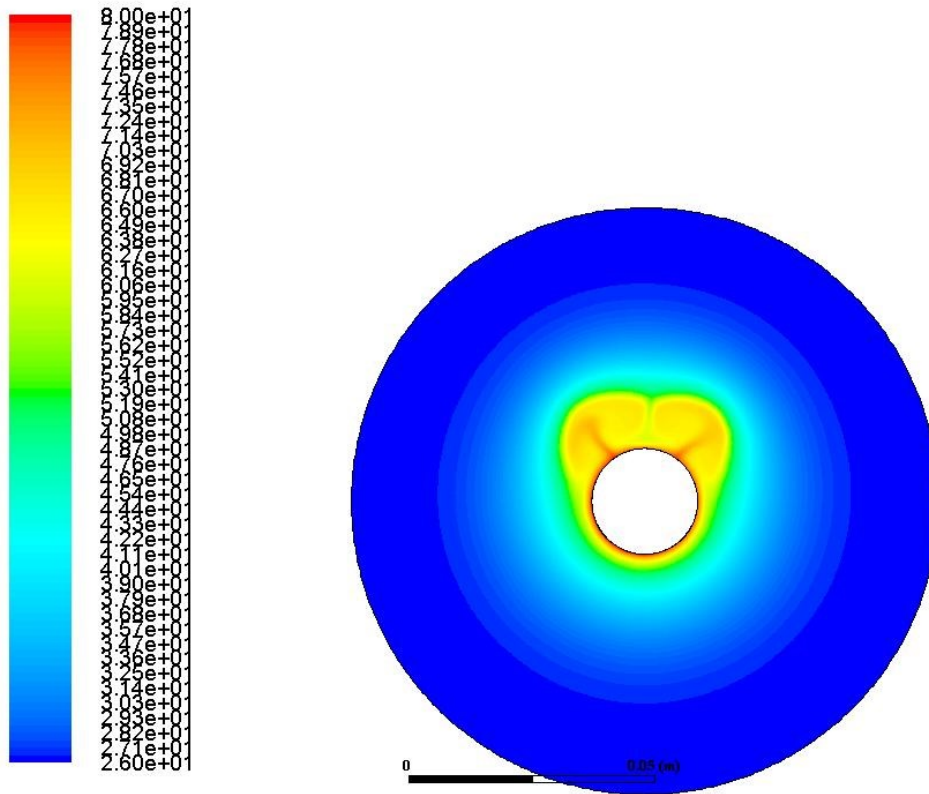
Όλα τα μοντέλα μοιράζονται τις ίδιες ρυθμίσεις με μοναδική διαφορά τις ιδιότητες του υλικού.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα διάφορα σύνθετα υλικά από PCM και νανοϋλικό αντιμετωπίστηκαν σαν νέα υλικά και όχι σαν μείγματα. Οι συστάσεις που εξετάστηκαν είναι:

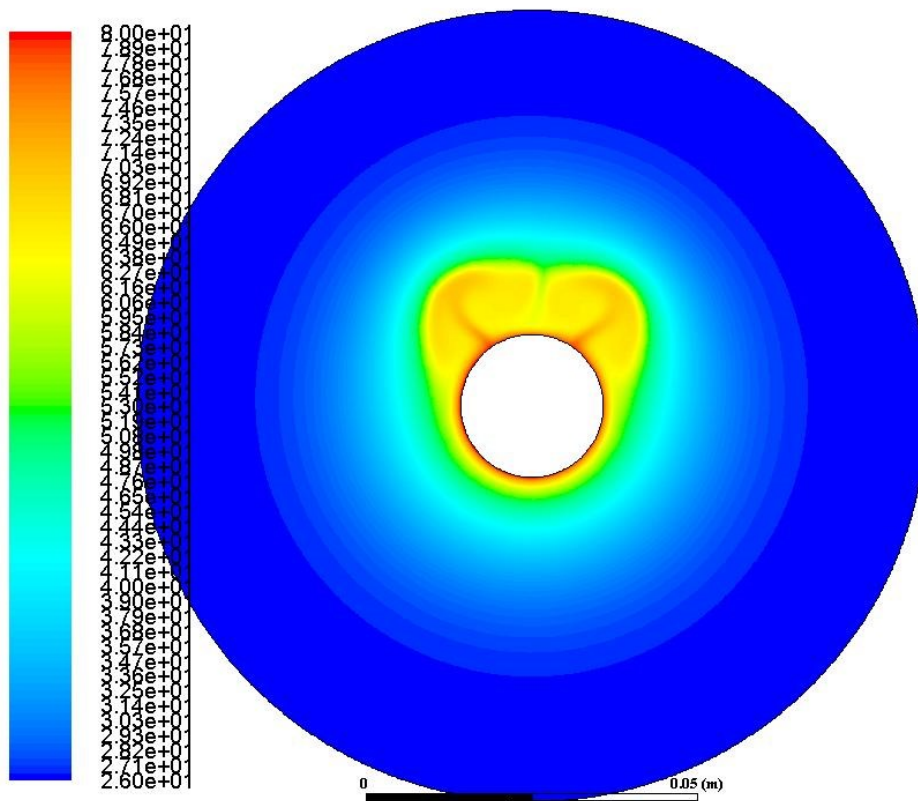
- Καθαρό PCM
- Περιεκτικότητα 1% σε αλουμίνα (Al_2O_3)
- Περιεκτικότητα 3% σε αλουμίνα (Al_2O_3)
- Περιεκτικότητα 1% σε χαλκό (Cu)
- Περιεκτικότητα 3% σε χαλκό (Cu)

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε σχέση με την επίδραση των νανοϋλικών στο PCM περιγράφεται μέσα από κατάλληλα σχήματα, κάποια φαινόμενα που συναντώνται κατά τη διάρκεια της τήξης και είναι κοινά στις διάφορες περιπτώσεις και κάποιες αντιστοιχήσεις με παρόμοιες εργασίες

Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, είναι δύσκολο κανείς να εξάγει ασφαλή συμπεράσματα βασιζόμενος μόνο σε επιφάνειες και εικόνες εν γένει, καθώς οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα μοντέλα είναι της τάξης του 1-5% και δεν είναι ευδιάκριτες.



Εικόνα 48: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες για σύνθετο υλικό PCM-Cu1% και χρονική στιγμή 900 s

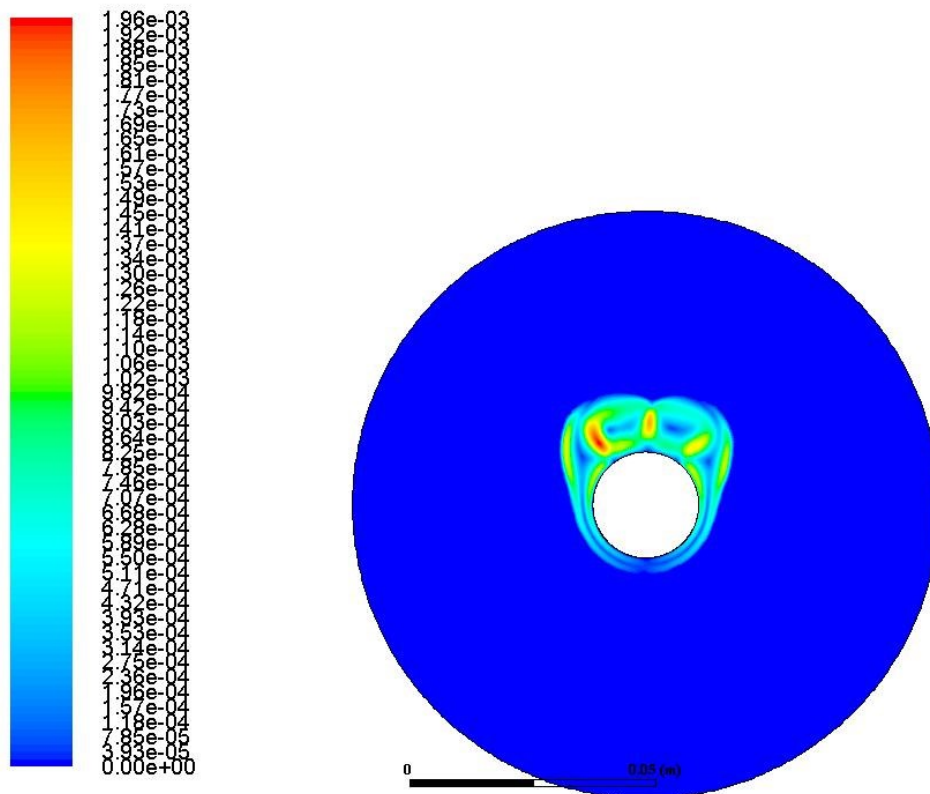


Εικόνα 49: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες για καθαρό PCM και χρονική στιγμή 900s

Μαζί με τις παραπάνω εικόνες ακολουθούν και κάποιες ακόμα που σκοπό έχουν να περιγράψουν το φαινόμενο και όχι να σχολιάσουν την επίδραση των νανουλικών.

Αρχικά, όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες, η μεταφορά θερμότητας συμβαίνει με **αγωγή και συναγωγή**. Από τις ισοθερμοκασιακές προκύπτει πως και στο στερεό κομμάτι του PCM αυξάνεται η θερμοκρασία (γαλάζιο κομμάτι) ενώ παράλληλα το ρευστό κομμάτι έχει θερμανθεί πέρα από το σημείο τήξης του και αναπτύσσεται τελικά η συναγωγή.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το μέτρο του διανύσματος ταχύτητας για την περίπτωση του σύνθετου υλικού PCM-Cu1% στα 900 s

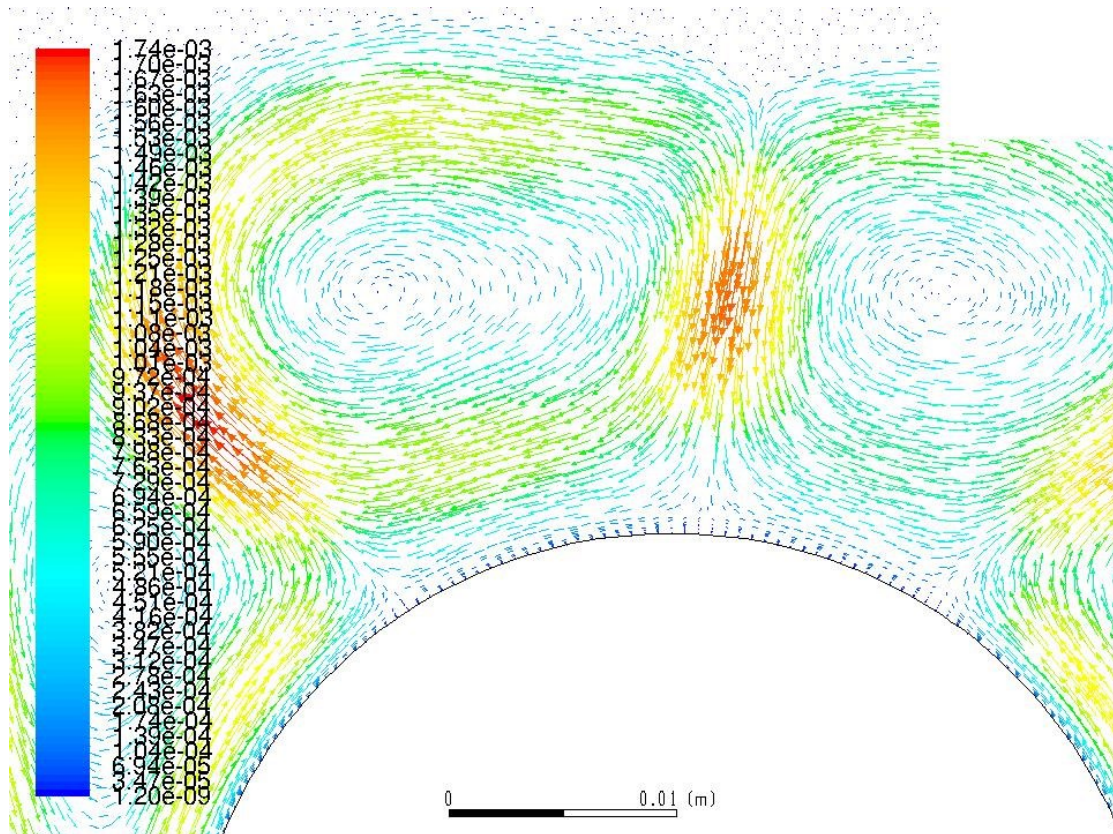


Εικόνα 50: Ισοεπιφάνειες του μέτρου της ταχύτητας

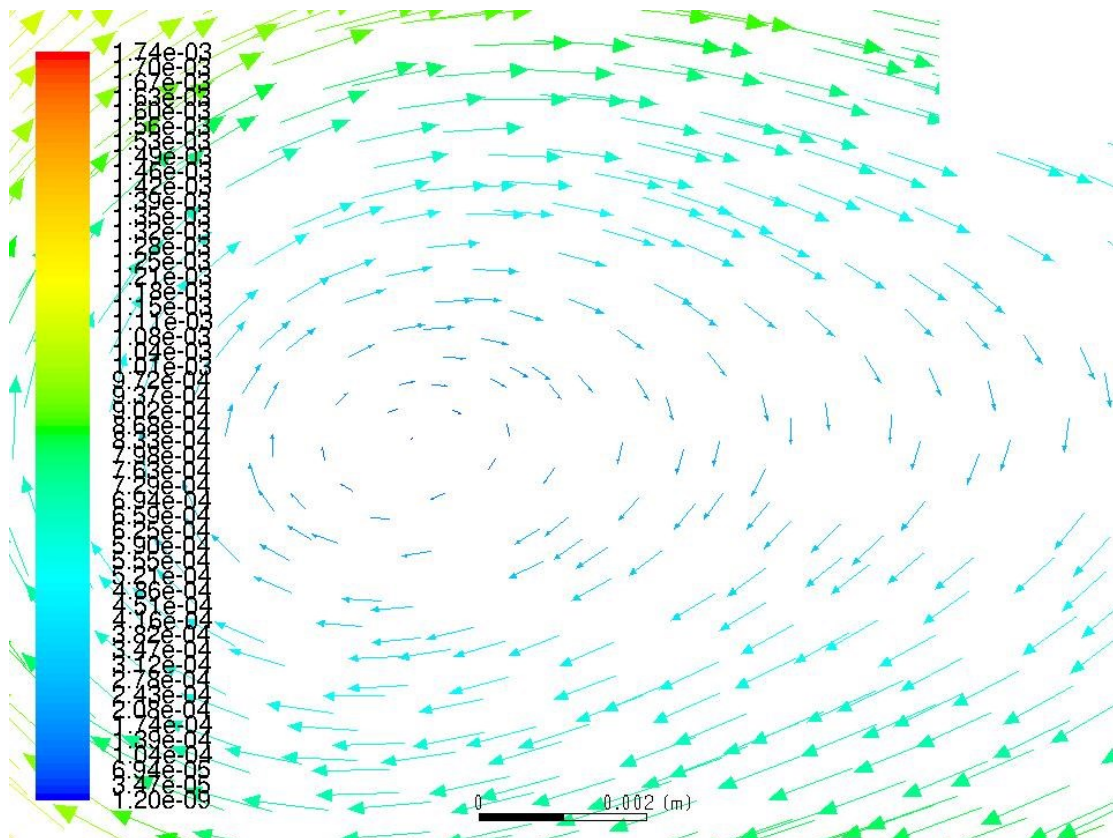
Από την εικόνα, μπορεί εύκολα κανείς να διακρίνει πως η ταχύτητες που αναπτύσσονται λόγω της φυσικής συναγωγής στο τήγμα είναι αρκετά μικρές και πως υπάρχει, δεδομένης της κλίμακας, σημαντική διαφοροποίηση του μέτρου της ταχύτητας ανάλογα την περιοχή.

Επίσης είναι σημαντικό να τονιστεί η ύπαρξη συμμετρίας ως προς τον κάθετο αξόνα y .

Τέλος μέσα στη περιοχή όπου υπάρχει κυκλοφορία υπάρχουν και ορισμένες περιοχές, με σχεδόν μηδενική ταχύτητα παρόλο εμπύπτουν στο τήγμα. Αυτό εξηγείται από το επόμενο σχήμα που απεικονίζει τα διανύσματα τις ταχύτητας για κάθε ένα υπολογιστικό κελί (cell)



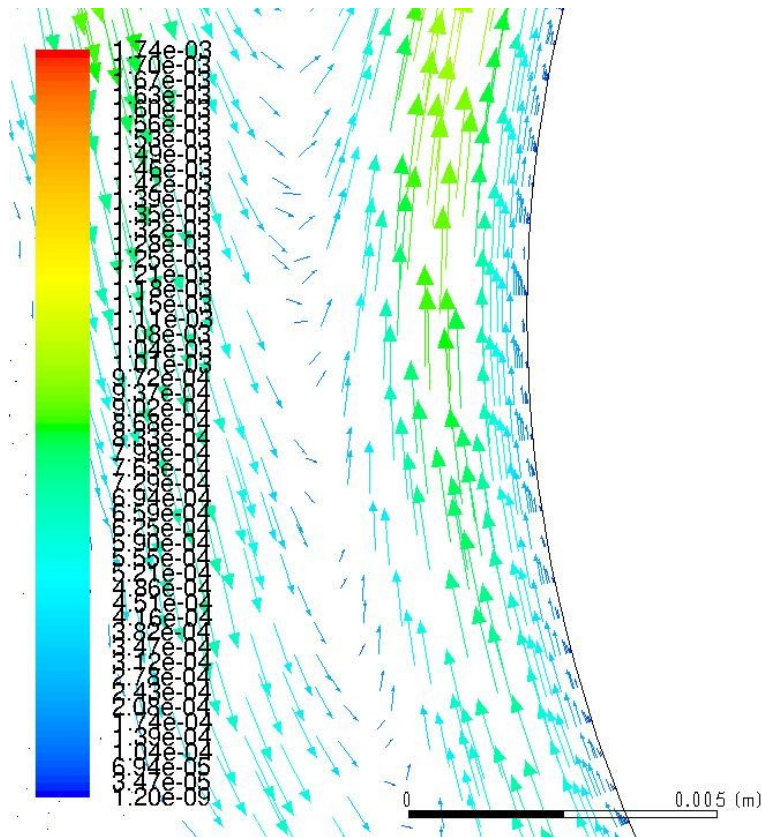
Εικόνα 51: Διανύσματα ταχύτητας



Εικόνα 52: Λεπτομέρεια του διανυσματικού πεδίου

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η «δίνη» που σχηματίζεται λόγω της φυσικής κυκλοφορίας του τήγματος, πράγμα που δικαιολογεί και το μηδενισμό της ταχύτητας στο κέντρο.

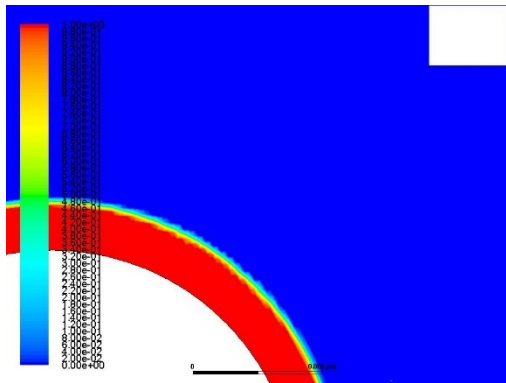
Λόγω της κυκλοφορίας αυτής, όπου το ζεστό και ελαφρύ μέρος του τήγματος ανεβαίνει μέχρι να συναντήσει το στερεό όριο ή να χάσει το θερμικό του φορτίο και να κρυώσει, δημιουργούνται πολλές τέτοιες δίνες και ισάριθμες περιοχές μηδενικής ταχύτητας. Είναι επίσης εμφανές στην παρακάτω εικόνα, πως τα ανοδικά ρεύματα είναι πιο κοντά στο ζεστό τοίχωμα, στο κέντρο του κυλίνδρου.



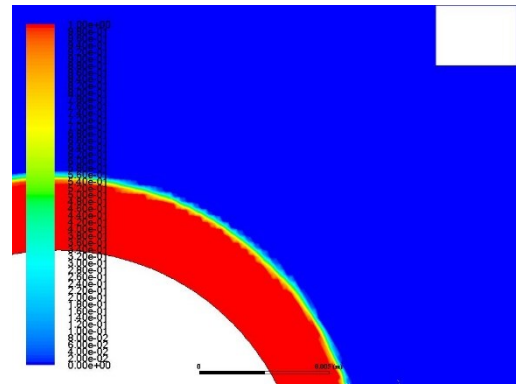
Εικόνα 53: Κυκλοφορία κοντά στο ζεστό τοίχωμα

Τέλος όπως φαίνεται και στην Εικόνα 51 οι μεγαλύτερες ταχύτητες εντοπίζονται εκεί που συμβάλουν οι επιμέρους δίνες.

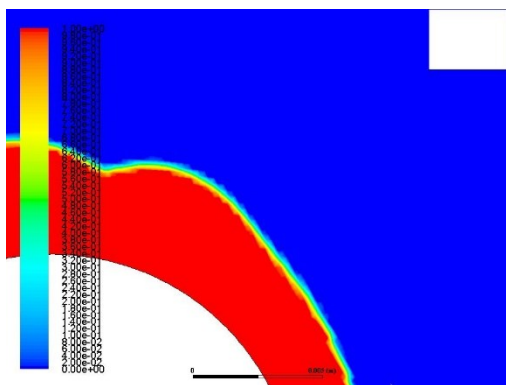
Ακολουθούν εικόνες από την ανάπτυξη του πεδίου



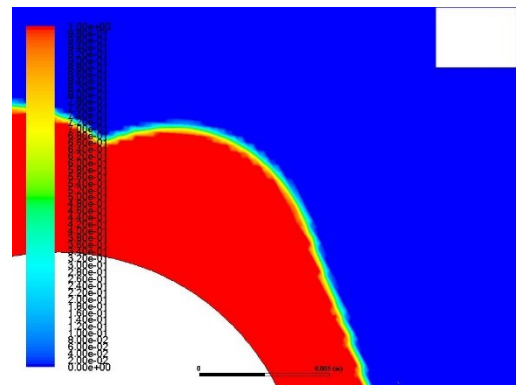
Εικόνα 59: Ανάπτυξη τήγματος στα 100s



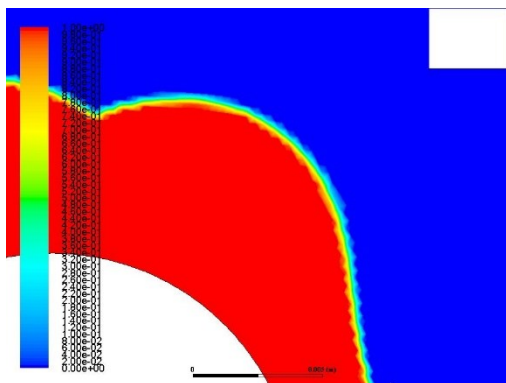
Εικόνα 58: Ανάπτυξη τήγματος στα 200s



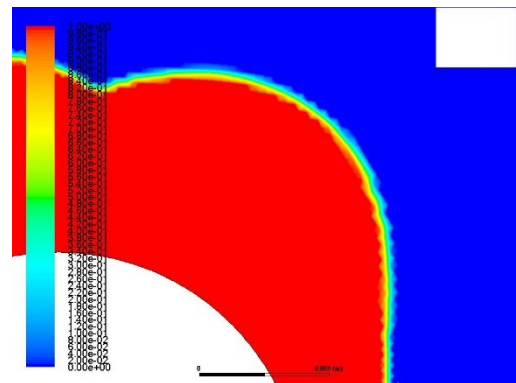
Εικόνα 60: Αναπτυξη τήγματος στα 300s



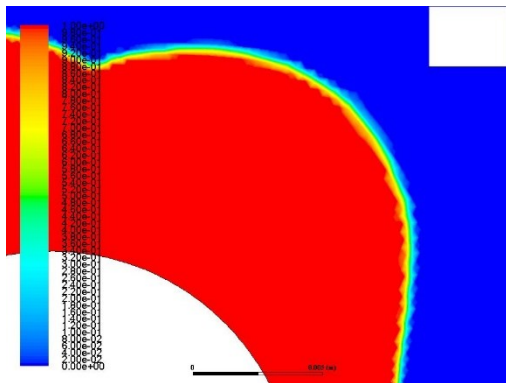
Εικόνα 57: Ανάπτυξη τήγματος στα 400s



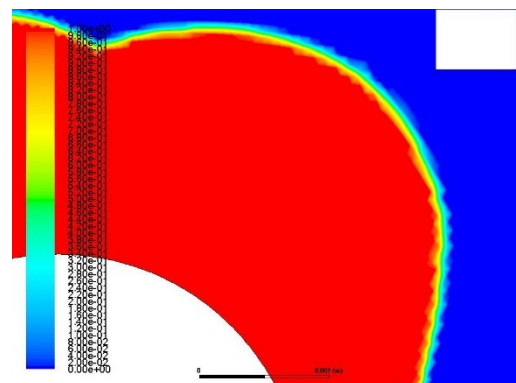
Εικόνα 56: Ανάπτυξη τήγματος στα 500s



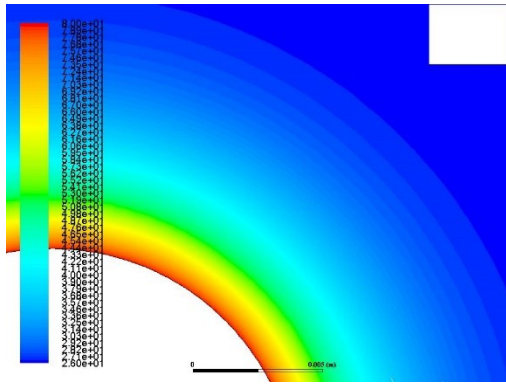
Εικόνα 55: Ανάπτυξη τήγματος στα 600s



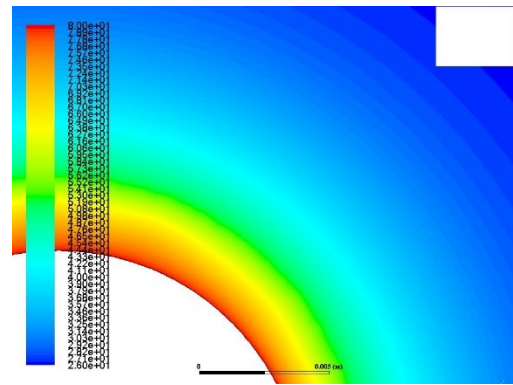
Εικόνα 54: Ανάπτυξη τήγματος στα 700s



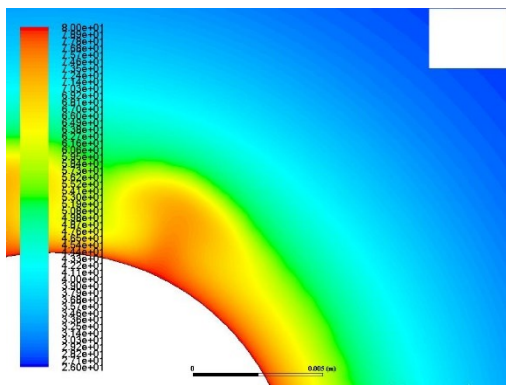
Εικόνα 61: Ανάπτυξη τήγματος στα 800s



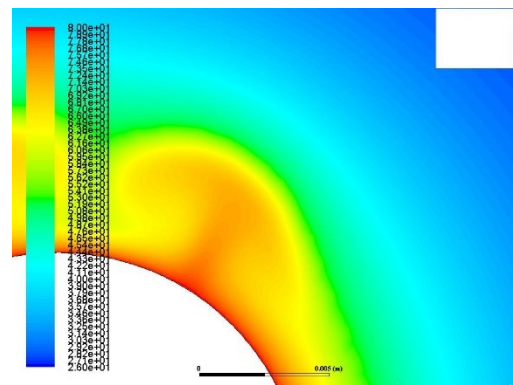
Εικόνα 62: Ισοθερμοκρασιακές στα 100s



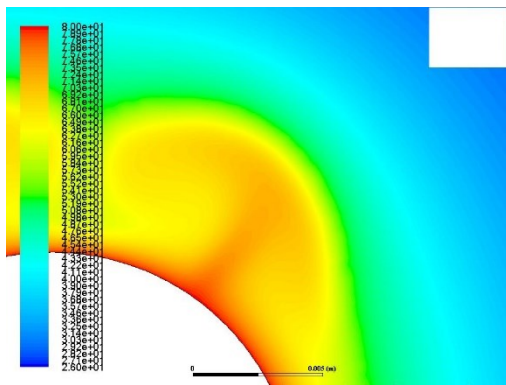
Εικόνα 63: Ισοθερμοκρασιακές στα 200s



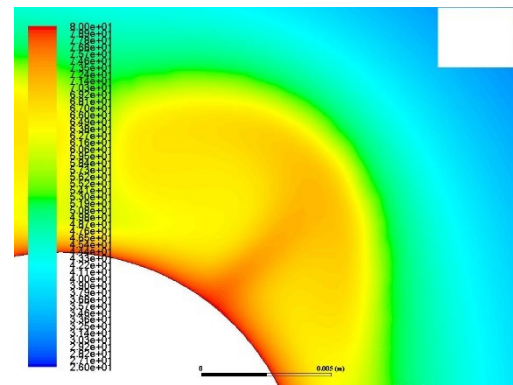
Εικόνα 64: Ισοθερμοκρασιακές στα 300s



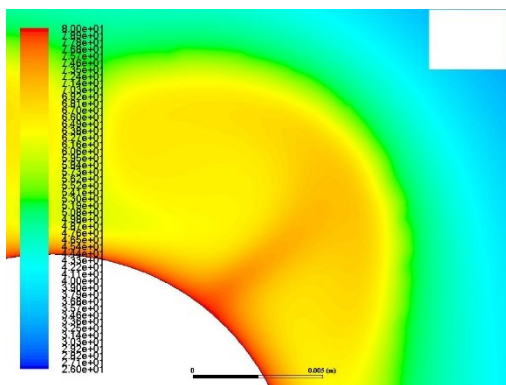
Εικόνα 65: Ισοθερμοκρασιακές στα 400s



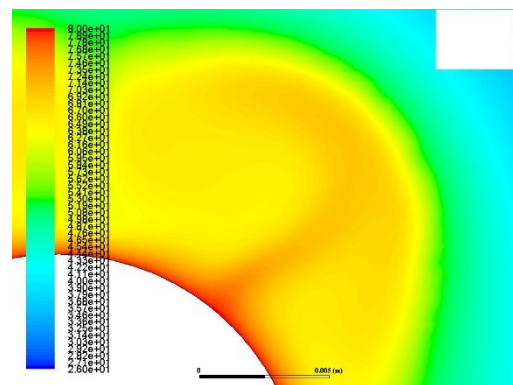
Εικόνα 67: Ισοθερμοκρασιακές στα 500s



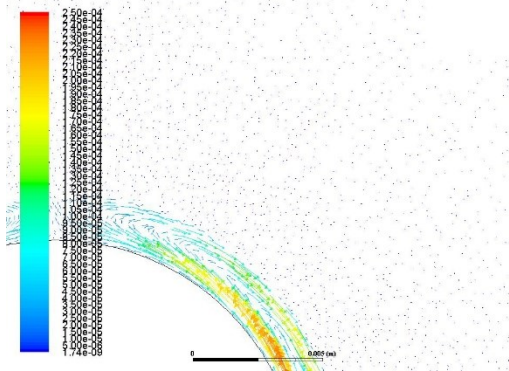
Εικόνα 66: Ισοθερμοκρασιακές στα 600s



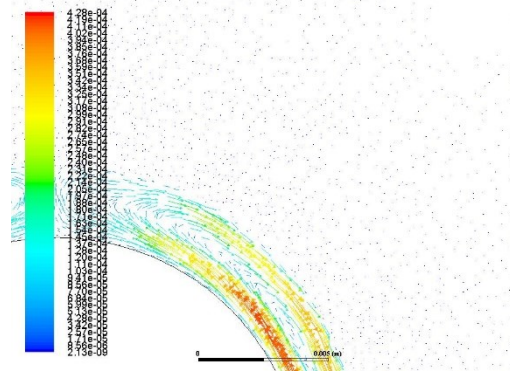
Εικόνα 68: Ισοθερμοκρασιακές στα 700s



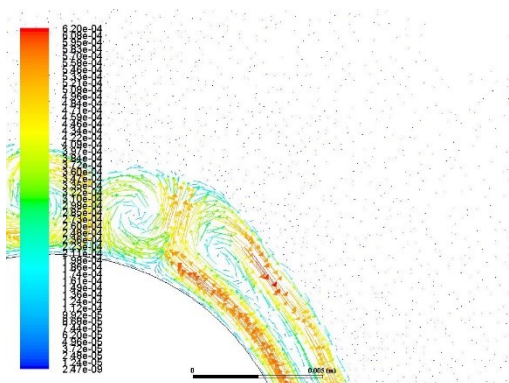
Εικόνα 69: Ισοθερμοκρασιακές στα 800s



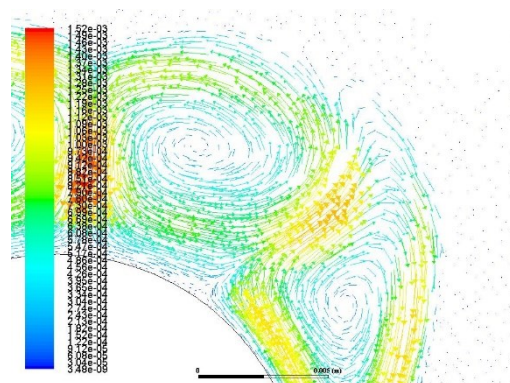
Εικόνα 70: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 100s



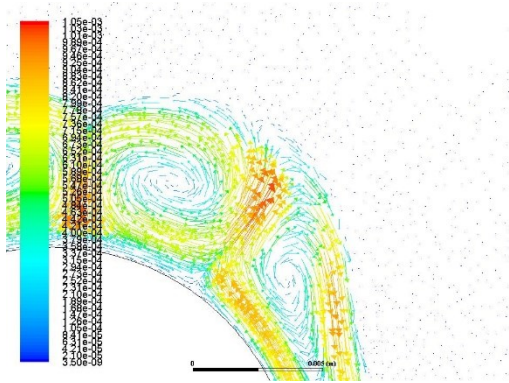
Εικόνα 71: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 200s



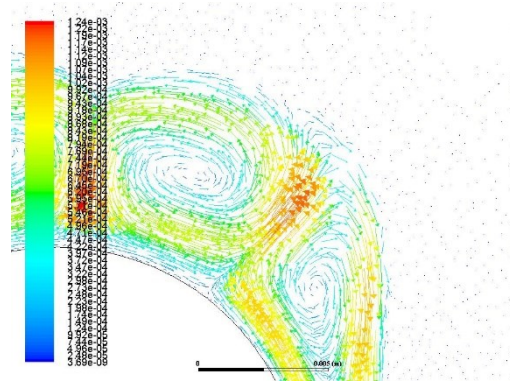
Εικόνα 72: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 300s



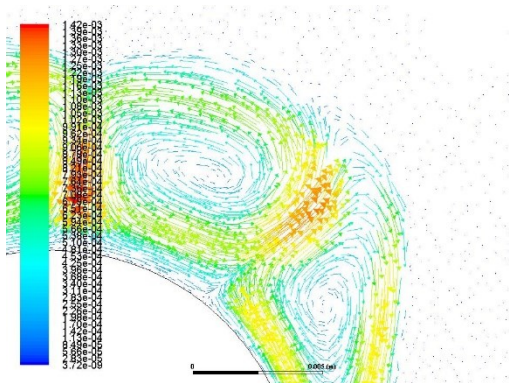
Εικόνα 73: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 400s



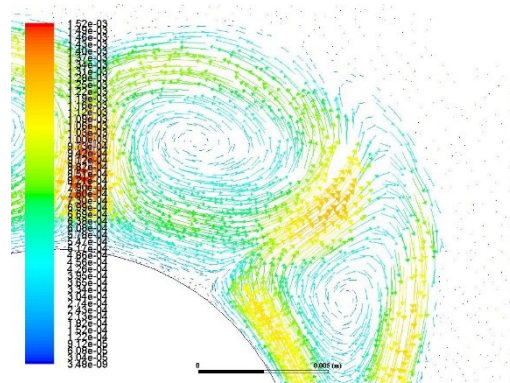
Εικόνα 75: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 500s



Εικόνα 74: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 600s



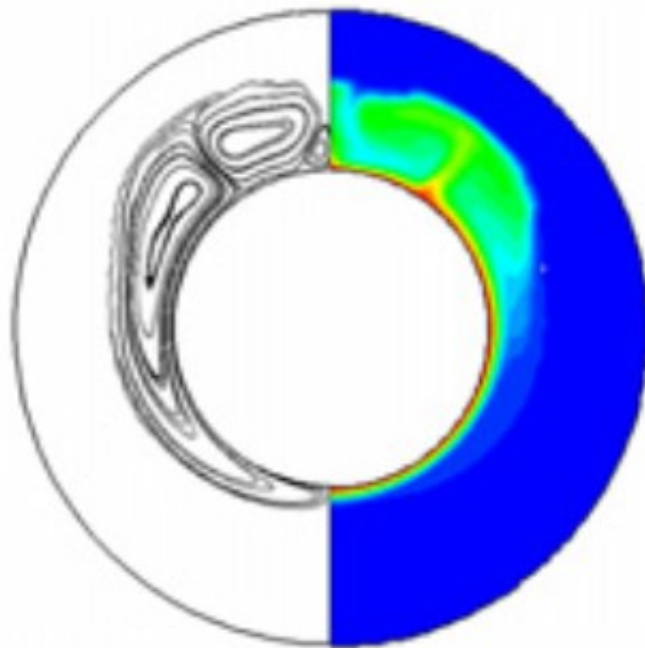
Εικόνα 76: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 700s



Εικόνα 77: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στα 800s

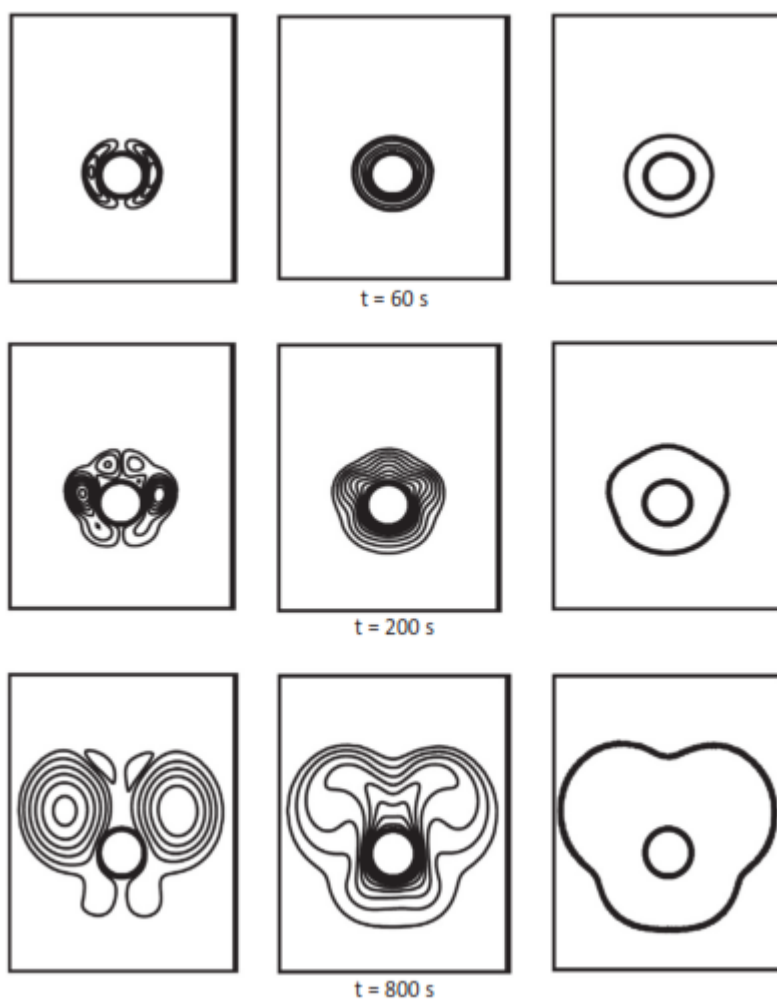
Το διανυσματικό πεδίο και αντίστοιχα το σχήμα του τήγματος είναι χαρακτηριστικό για φαινόμενα τήξης και φυσικής συναγωγής σε κλειστούς χώρους . Ακολουθούν στη συνέχεια εικόνες από παρόμοιες υπολογιστικές μελέτες.

Στην εργασία του ο Farhadi [56] εξέτασε ανάμεσα στα άλλα και την τήξη δισδιάστατου μοντέλου με εσωτερικό κυκλικό τοίχωμα σταθερής θερμοκρασίας. Η ομοιότητα είναι εμφανής ανάμεσα στην εικόνα που παρατίθεται και στις εικόνες που προέρχονται από τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου.



Εικόνα 78: Λειώσιμο PCM σε διάταξη ομόκεντρων κυλίνδρων [56]

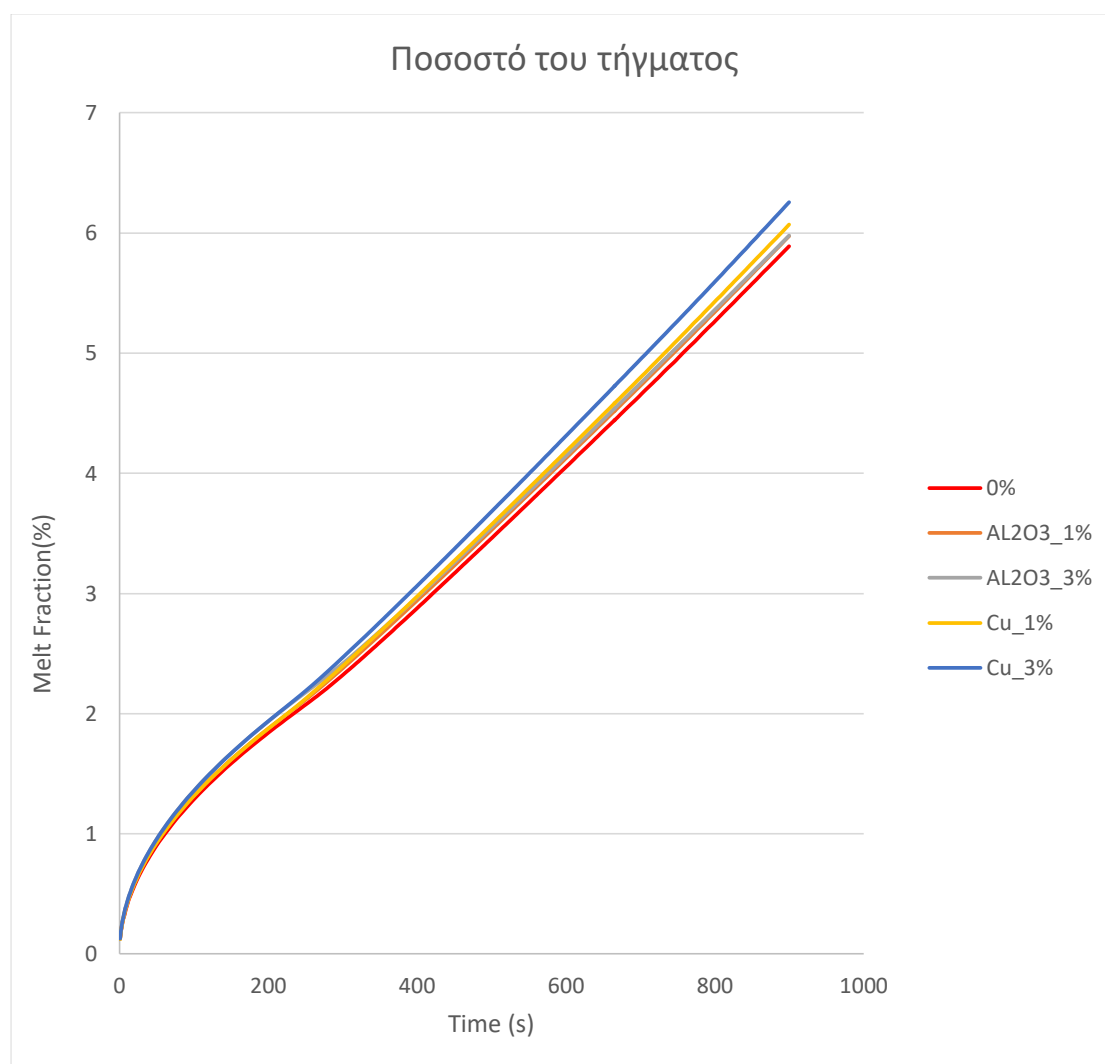
Στην εργασία του ο Mahdaoui [57] στην εργασία του μοντελοποιεί την τήξη PCM γύρω από κυκλική επιφάνεια σταθερής θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα του, έχουν εμφανή ομοιότητα με αυτά που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση που έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής. Το γεγονός της χρονικής σύμπτωσης είναι τυχαίο αφού η ταχύτητα τήξης αφορά την θερμική αγωγιμότητα του υλικού και την συνεκτικότητά του, την θερμοκρασία στο θερμό κυκλικό τοίχωμα και τη θερμοκρασία τήξης. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επιδρούν καθοριστικά στην ταχύτητα ανάπτυξης του φαινομένου αλλά στο κατά πόσο το τήγμα θα προχωρήσει προς τα πάνω ή θα αναπτυχθεί και κάτω από τη θερμή επιφάνεια όπως στο παρακάτω σχήμα.



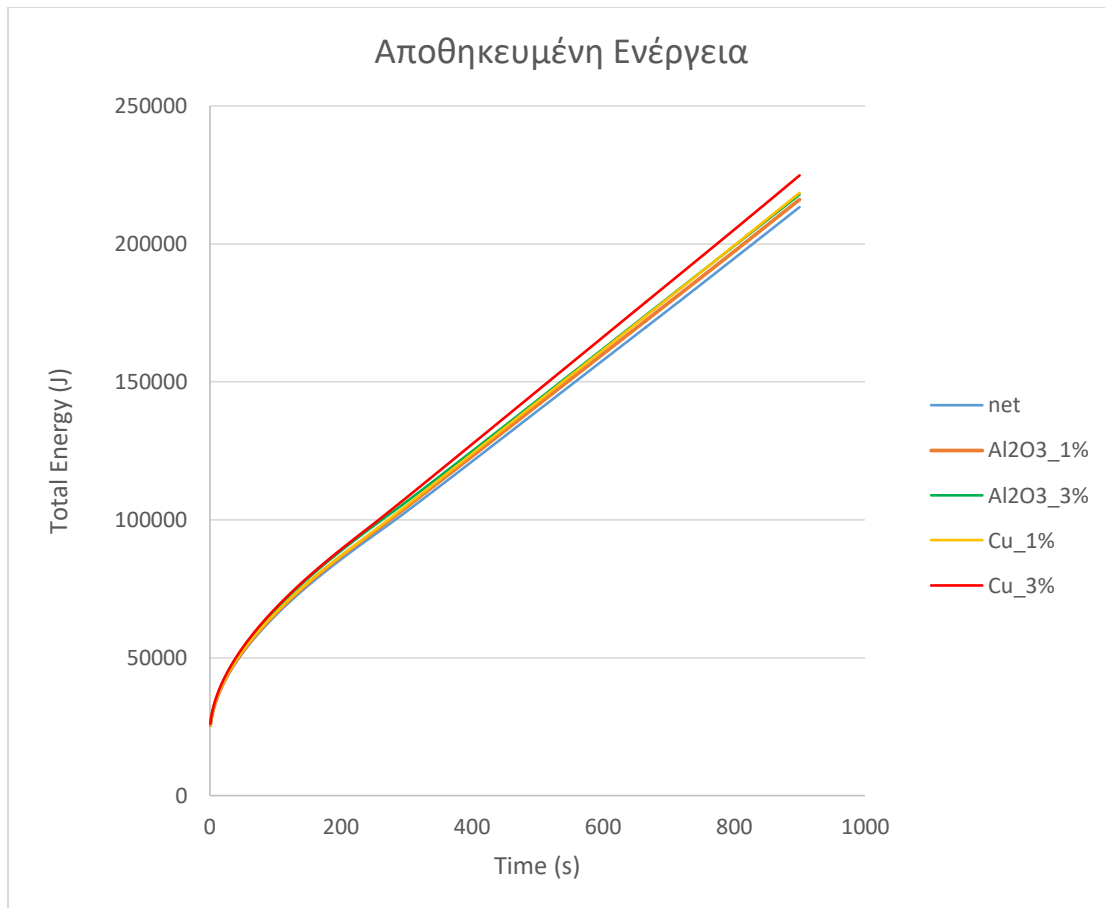
Εικόνα 79: Γραμμές ροής , ισοθερμοκρασιακές και μέτωπο του τήγματος αντίστοιχα [57]

7.1 Αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης

Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνεται η εξέλιξη του ποσοστού του τήγματος και της συνολικής ενέργειας του σώματος ως προς το χρόνο, για κάθε μια από τις διαφορετικές συστάσεις σε νανοϋλικά.



Εικόνα 80: Εξέλιξη του τήγματος σε σχέση με το χρόνο για τις διάφορες περιεκτικότητες



Εικόνα 81: Εξέλιξη της αποθηκευμένης ενέργειας προς το χρόνο για διάφορες περιεκτικότητες

Αρχικά, είναι εμφανές πως η προσθήκη νανοϋλικών, σε κάθε περίπτωση επιτρέπει την αποθήκευση περισσότερης ενέργειας στο υλικό, για ίδιο χρονικό διάστημα φόρτισης.

Ωστόσο οι μικρές διαφοροποιήσεις καθιστούν δύσκολη την εξαγωγή συμπερασμάτων. Σε αυτό έρχεται να βοηθήσει η δημιουργία διαγραμμάτων ποσοστιαίας βελτίωσης για κάθε μία από τις συστάσεις σε σχέση με το καθαρό PCM.

Ακολουθούν διαγράμματα, σχολιασμός και ποσοτικά δεδομένα, όπου είναι απαραίτητα.

Το διάγραμμα ποσοστιαίας βελτίωσης της συμπεριφοράς του σύνθετου υλικού σε ότι αφορά την τήξη, δημιουργήθηκε με βάση τον κάτω τύπο και παίρνοντας υπόψη, πως το καταγεγραμμένο μέγεθος, είναι η κατ' όγκο σύσταση του μοντέλου σε τήγμα κάθε ένα δευτερόλεπτο δηλαδή

$$f = \frac{\text{Volume of melted PCM}}{\text{Total volume}} \quad (30)$$

Σημειώνεται πως, οι Εξισώσεις 6,7,8 είναι ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζει το πρόγραμμα, για κάθε ένα υπολογιστικό κελί, το ποσοστό του τήγματος που περιέχει, ενώ

η ποσότητα που περιγράφεται σε αυτό το εδάφιο, αφορά το σύνολο του δοκιμίου και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 30. Έτσι με σταθερό όγκο σε κάθε εξεταζόμενη σύσταση, η ποσοστιαία αύξηση του τήγματος, για κάθε σύσταση, σε σχέση με το καθαρό PCM δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

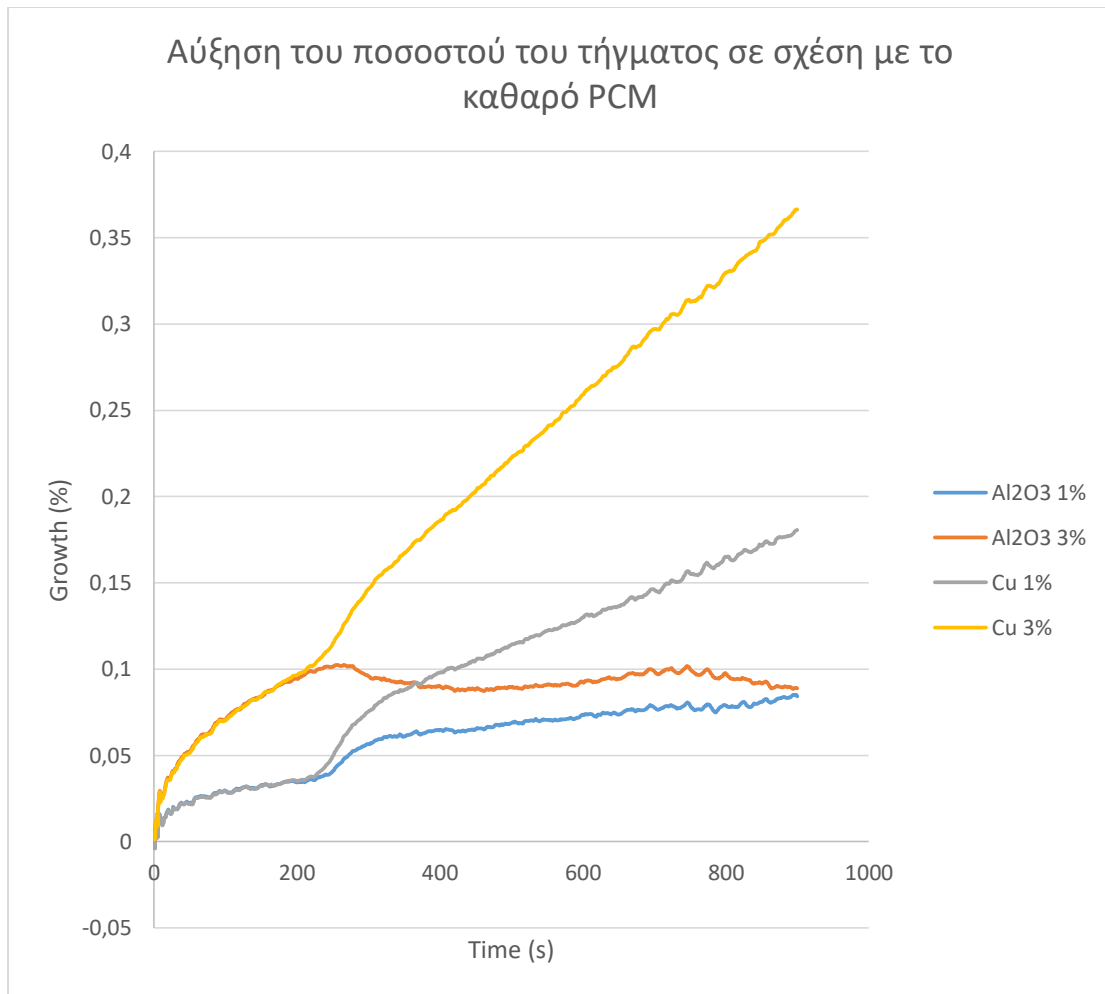
$$R^{\varphi} = \frac{\sum_{cells P} |\sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + b - a_P \varphi_P|}{\sum_{cells P} |a_P \varphi_P|} \Delta f(\%) = \frac{f_{npPCM} - f_{PCM}}{f_{PCM}} \cdot 100 \quad (31)$$

Τέλος, η αύξηση του ποσοστού του τήγματος σε σχέση με το καθαρό PCM για κάποια χρονική στιγμή, προκύπτει με απλή αφαίρεση αφού τα f αποτελούν ποσοστά.

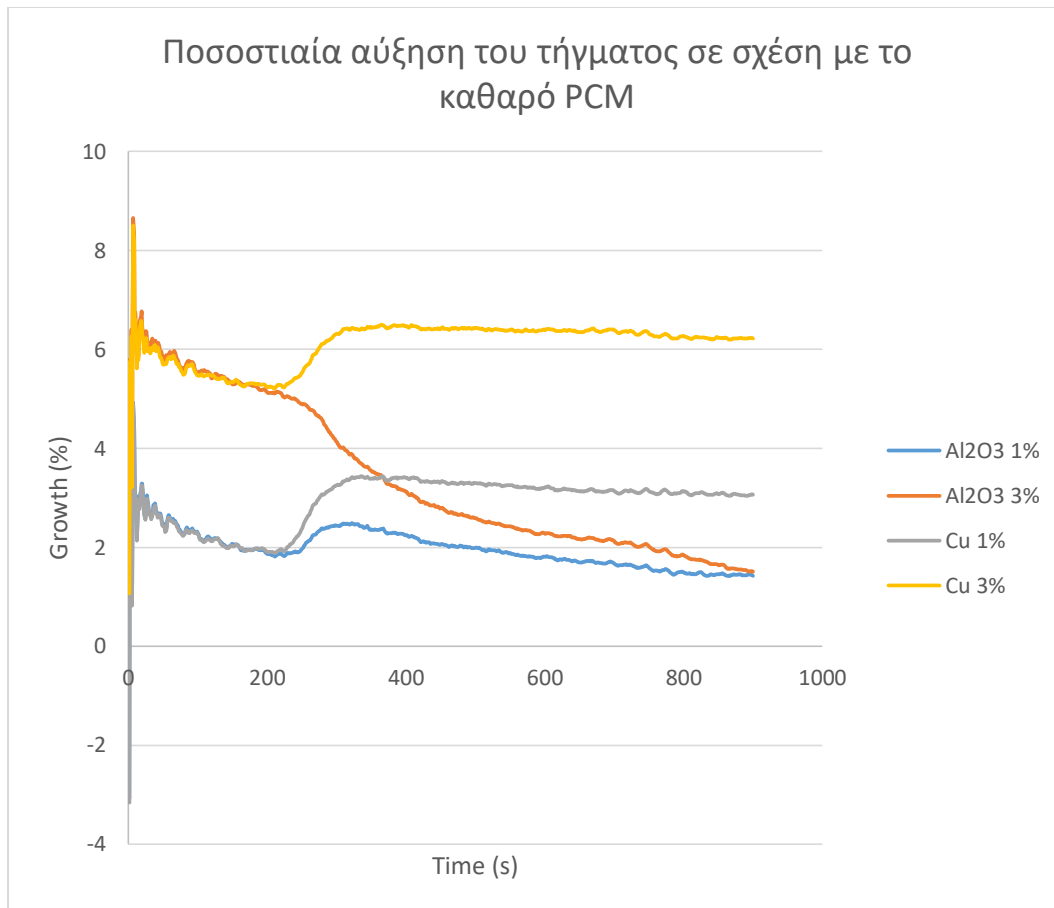
Ο υπολογισμός της ποσοστιαίας αύξησης της αποθηκευμένης ενέργειας γίνεται ως εξής:

$$\Delta H(\%) = \frac{H_{npPCM} - H_{PCM}}{H_{PCM}} \cdot 100 \quad (32)$$

Αρχικά κατά τα πρώτα 400 δευτερόλεπτα η «κατάταξη» των σύνθετων υλικών είναι διαφορετική σε σχέση με τα επόμενα 500 όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα



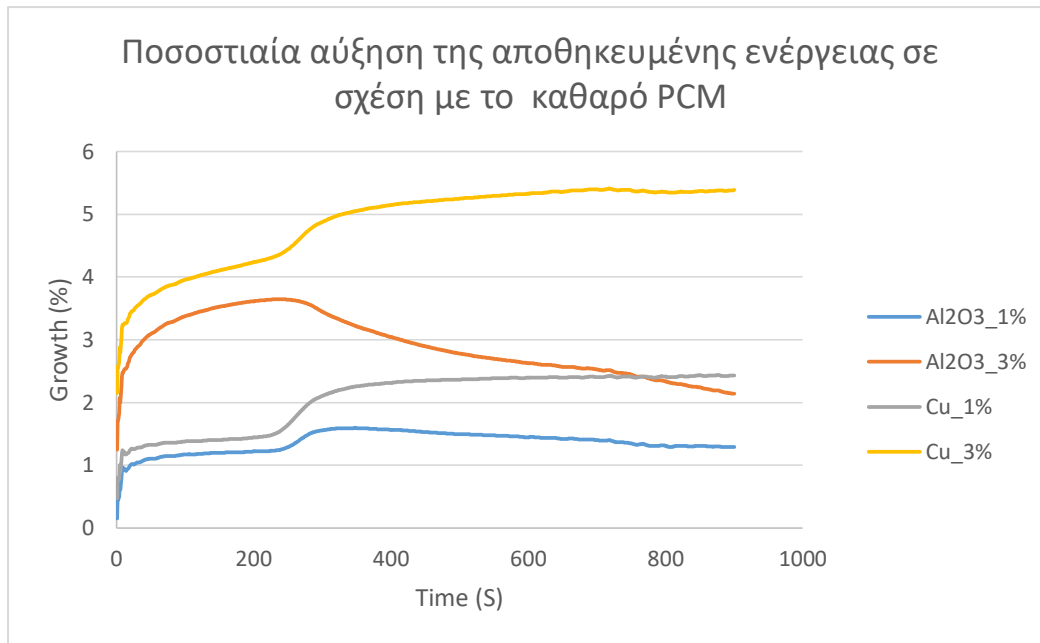
Εικόνα 82: Αύξηση ποσοστού του τήγματος για κάθε περιεκτικότητα



Εικόνα 83: Ποσοστιαία αύξηση του τήγματος για κάθε περιεκτικότητα

Η ποσοστιαία αύξηση έχει αυτή την αστάθεια στην αρχή, διότι στον παρονομαστή εμφανίζεται η μικρή ποσότητα του τήγματος, του καθαρού PCM. Όσο αυξάνεται η ποσότητα αυτή επέρχεται σταθεροποίηση του ποσοστού ή ομαλή μεταβολή.

Αντίστοιχα για την ενέργεια:



Εικόνα 84: Ποσοστιαία αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας για κάθε συγκέντρωση

Η αναντιστοιχία, ποσοστιαίας αύξησης του τήγματος και ποσοστιαία αύξησης αποθηκευμένης ενέργειας, όπως προκύπτει από τη σύγκριση των παραπάνω διαγραμμάτων, είναι αποτέλεσμα της μείωσης της λανθάνουσας θερμότητας τήξης του PCM, με την προσθήκη νανοϋλικών. Στην Εικόνα 36: Ιδιότητες σύνθετων υλικών παρουσιάζονται, οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης όπως υπολογίστηκαν μετά την προσθήκη του νανοϋλικού σύμφωνα με την Εξίσωση 15. Την αναντιστοιχία αυτή ενισχύει και το γεγονός πως κομμάτι ενέργειας που απορροφάτε από το θερμό τοίχωμα στο PCM αποθηκεύτε ως αισθητή θερμότητα. Η αισθητή θερμότητα και η αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασία αφορούν την θέρμανση του στερεού μέχρι την έναρξη της τήξης, αλλά και την υπερθέρμανση του τήγματος και την εκκίνηση της φυσικής συναγωγής. Η αισθητή θερμότητα υπολογίζεται από την Εξίσωση 11 και είναι συνάρτηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας, η οποία επίσης επηρεάζεται από την προσθήκη νανοϋλικών σύμφωνα με την Εξίσωση 14

Κατά την εκκίνηση της τήξης, όπου κυριαρχεί η μετάδοση θερμότητας με αγωγή, τα σύνθετα υλικά με την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, δηλαδή τα PCM-Cu(3%) και PCM- Al₂O₃(3%), προηγούνται τόσο στην αποθήκευση ενέργειας, όσο και στην τήξη του υλικού. Κοντά στα 300 δευτερόλεπτα λειτουργίας και αφού έχει δημιουργηθεί μια ικανή ποσότητα τήγματος, η κυκλοφορία εντείνεται και η φυσική συναγωγή αρχίζει να αποτελεί το βασικό τρόπο μετάδοσης θερμότητας, η κατάταξη των διάφορων συγκεντρώσεων αλλάζει.

Στις εικόνες που προηγήθηκαν φαίνεται καθαρά, η δημιουργία των χαρακτηριστικών λοβών, η σταδιακή μετατροπή του διανυσματικού πεδίου και η δημιουργία των δινών. Η δημιουργία και σταθεροποίηση των δινών αυτών είναι αυτή που χαρακτηρίζει την κυριαρχία της συναγωγής έναντι της αγωγής, αφού όπως φαίνεται και στις αντίστοιχες

εικόνες (Εικόνα 70, Εικόνα 71), κυκλοφορία έχουμε και στα αρχικά στάδια της τήξης μέχρι τα 300 δευτερόλεπτα. Η μικρή αυτή κυκλοφορία περιμετρικά του θερμού τοιχώματος επιτρέπει την συσσώρευση του τήγματος στην πάνω μεριά, που δίνει τελικά τον απαραίτητο χώρο για την περαιτέρω εξέλιξη του φαινομένου.

Σημειώνεται εδώ, πως η ύπαρξη αρκετά μεγάλων κοιλοτήτων, είναι απαραίτητα προϋπόθεση για την ανάπτυξη φυσικής συναγωγής. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η συναγωγή εκμηδενίζεται σε μικρούς χώρους, όπως μεταλλικά πλέγματα [19].

Από τα παραπάνω γραφήματα προκύπτει πως τα νανο-σωματίδια του χαλκού έχουν την πλέον ευεργετική επίδραση στη θερμική συμπεριφορά του PCM, ενώ το PCM- Al₂O₃(3%) από τη κυριάρχηση της φυσικής συναγωγής και κάποια λεπτά μετά υπολείπεται σε ανάπτυξη του τήγματος ακόμα και σε σχέση με το PCM- Al₂O₃(1%). Το γεγονός ότι το PCM- Al₂O₃(3%) αποδίδει λιγότερο καλά σε σχέση με τα άλλα σύνθετα υλικά και ειδικά σε σχέση με τα PCM-Cu(3%) και PCM-Cu(1%), μπορεί να οφείλεται σε διάφορα αίτια.

Όσο αφορά το PCM-Cu(3%) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 36, έχει την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, την χαμηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα και την χαμηλότερη λανθάνουσα ενέργεια τήξης. Το PCM-Cu(3%) χρειάζεται τη λιγότερη θερμότητα για να αυξήσει τη θερμοκρασία του και να αλλάξει τη φάση του γεγονός που σε συνδυασμό με την καλύτερη θερμική αγωγιμότητα ευνοεί την ταχύτερη ανάπτυξη του τήγματος και την ενίσχυση της κυκλοφορίας του. Έτσι, περισσότερη θερμότητα μεταφέρεται στο τήγμα από το θερμό τοίχο μέσω φυσικής συναγωγής με αποτέλεσμα η τήξη και η αποθήκευση ενέργειας να επιταχύνεται, σε σχέση με τα υπόλοιπα σύνθετα υλικά.

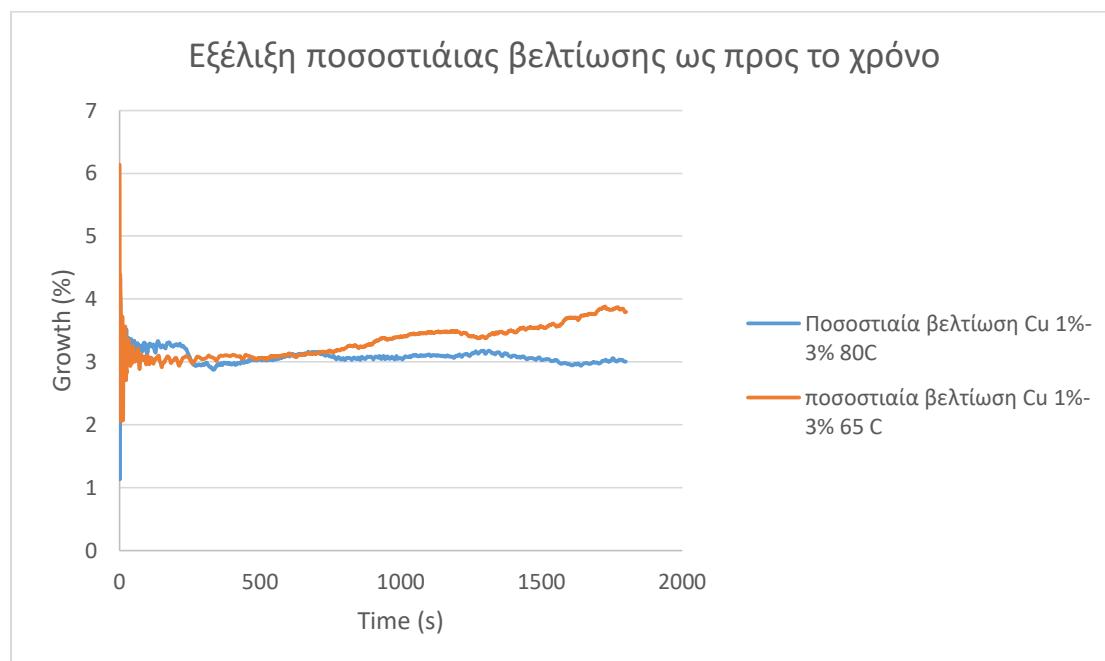
Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ταχύτητα της τήξης και της αποθήκευσης ενέργειας είναι η κινηματική συνεκτικότητα του σύνθετου υλικού η οποία προσδιορίζεται από την Εξίσωση 2 και αυξάνεται με την προσθήκη νανοσωματιδίων. Η αύξηση της κινηματικής συνεκτικότητας δυσχεραίνει την ανάπτυξη της κυκλοφορίας του τήγματος, περιστελλοντας έτσι την φυσική συναγωγή και κατά συνέπεια, τη μεταφορά θερμότητας από το θερμό τοίχωμα στο σύνθετο PCM.

Έτσι στο χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας PCM-Cu(1%) μεταφέρεται γρηγορότερα θερμότητα σε σχέση με το PCM- Al₂O₃(3%), πράγμα που οφείλεται στην χαμηλή του κινηματική συνεκτικότητα ειδικά μετά τα 300 δευτερόλεπτα όπου η κυκλοφορία του υπέρθερμου τήγματος έχει αναπτυχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό.

Η σημασία της κινηματικής συνεκτικότητας έχει τονιστεί και στη βιβλιογραφία, φαίνεται όμως επίσης και από τη σταδιακή επικράτηση του PCM- Al₂O₃(1%), έναντι του PCM- Al₂O₃(3%).

Σαν κομμάτι της διερεύνησης με σκοπό την ανάδειξη της σημασίας της φυσικής συναγωγής και της κινηματικής συνεκτικότητας για την μετάδοση της θερμότητας στο

φαινόμενο που μοντελοποιήθηκε, εξετάστηκε και η τήξη των PCM-Cu(3%) και PCM-Cu(1%) σε θερμοκρασία 65 °C. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το παρακάτω γράφημα απεικόνισης της εξέλιξης στο χρόνο της ποσοστιαίας αύξησης του τήγματος του PCM-Cu(3%) σε σχέση με το PCM-Cu(1%) για κάθε μια θερμοκρασία.



Εικόνα 85: Διάγραμμα απεικόνισης ποσοστιαίας αύξησης του τήγματος ανάμεσα στις διαφορετικές περιεκτικότητες σε χαλκό (1%) - (3%) για τις διαφορετικές θερμοκρασίες

Για τη δημιουργία του παραπάνω διαγράμματος χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση

$$\Delta f(\%) = \frac{f_{PCM_Cu(3\%)} - f_{PCM_Cu(1\%)}}{f_{PCM_Cu(1\%)}} \cdot 100$$

με τα ποσοστά του τήγματος, για τις δύο θερμοκρασίες. Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα ποσοστιαίας βελτίωσης εμφανίζονται αρχικά μεγάλες διαφορές ανάμεσα στις τιμές. Αυτό δικαιολογείται επίσης από το πολύ μικρό ποσοστό του τήγματος του PCM-Cu(1%), στην αρχή της τήξης, που βρίσκεται στον παρονομαστή. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, σε μικρό χρονικό διάστημα υπάρχει σταθεροποίηση, πράγμα που οφείλετε στην αύξηση του ποσοστού του τήγματος του PCM-Cu(1%).

Από το διάγραμμα φαίνεται πως, η διαφορά του ποσοστού του τήγματος ανάμεσα στα PCM-Cu(1%) και PCM-Cu(3%) για την περίπτωση θερμού τοίχου θερμοκρασίας 80 °C υποχωρεί σημαντικά από τα 400 δευτερόλεπτα και μετά. Αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη φυσικής συναγωγής, διότι η μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα του PCM-Cu(3%) και η συνακόλουθη καλύτερη μεταφορά θερμότητας στο στερεό υλικό, ανταγωνίζεται από την μικρότερη κινηματική συνεκτικότητα του PCM-Cu(1%) που επιτρέπει ευκολότερη ανάπτυξη της κυκλοφορίας του τήγματος. Έτσι η διαφορά ανάμεσα στα δύο ποσοστά τήγματος, μετριάζεται.

Αυτή η διαπίστωση ενισχύεται από την εξέλιξη της ποσοστιαία αύξησης του τήγματος ως προς το χρόνο ανάμεσα στα PCM-Cu(3%)-PCM-Cu(1%) για τη σχετικά χαμηλότερη θερμοκρασία των 65 °C.

Λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασιακής διαφοράς από τη θερμοκρασία λειτουργίας για την προσέγγιση Boussinesq (βλ Εξίσωση 19) υπάρχει μικρότερη διόγκωση του τήγματος κοντά στο θερμό τοίχωμα και κατ' επέκταση, επάγεται μικρότερη κυκλοφορία.

Έτσι η μικρότερη κινηματική συνεκτικότητα του PCM-Cu(1%) ως παράγοντας διευκόλυνσης της ανάπτυξης φυσικής συναγωγής, χάνει το συγκριτικό της πλεονέκτημα και η διαφορά ανάμεσα στα PCM-Cu(3%)-PCM-Cu(1%) είναι μεγαλύτερη.

8 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά από όλα τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

Σε ότι αφορά την επίδραση των νανοσωματιδίων χαλκού και αλουμίνας στην τήξη του υλικού αλλαγής φάσης προκύπτει πως περισσότερο ευεργετική ήταν η επίδραση των νανοσωματιδίων χαλκού σε συγκέντρωση 3%. Συγκεκριμένα:

Το σύνθετο υλικό με 3% κατ' όγκο νανοσωματίδια χαλκού στο PCM, στο 900 δευτερόλεπτο είχε ποσοστό του όγκου του που είχε λιώσει, κατά 0,36% μεγαλύτερο σε σχέση με το καθαρό PCM. Η διαφορά αυτή ισοδυναμεί με αύξηση κατά 6,22% στην τηγμένη ποσότητα στο PCM-Cu(3%) σε σχέση με το καθαρό PCM.

Αντίστοιχα, στα 900 δευτερόλεπτα για το PCM-Cu(1%) έχουμε 0,18% μεγαλύτερο ποσοστό τήγματος και 3,06% αύξηση της τηγμένης ποσότητας σε σχέση με το καθαρό PCM.

Για το PCM- Al₂O₃(3%) έχουμε στα 900 δευτερόλεπτα 0,088% μεγαλύτερο ποσοστό τήγματος και 1,50% αύξηση της τηγμένης ποσότητας.

Για το PCM- Al₂O₃(1%) έχουμε στα 900 δευτερόλεπτα 0,08% μεγαλύτερο ποσοστό τήγματος και 1,42% αύξηση της τηγμένης ποσότητας.

Τέλος στα 900 δευτερόλεπτα φόρτισης στο καθαρό PCM έλιωσε το 5,88% του όγκου του

Σε ότι αφορά την αποθήκευση ενέργειας τα αποτελέσματα είναι σε σύμπνοια με τα αντίστοιχα για το ποσοστό τήγματος

Το PCM-Cu(3%) αποθηκεύει στα 900 δευτερόλεπτα 5,38% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το καθαρό PCM

Το PCM-Cu(1%) αποθηκεύει στα 900 δευτερόλεπτα 2,42% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το καθαρό PCM

Το PCM- Al₂O₃ (1%) αποθηκεύει στα 900 δευτερόλεπτα 2,14% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το καθαρό PCM

Το PCM- Al₂O₃ (3%) αποθηκεύει στα 900 δευτερόλεπτα 1,28% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το καθαρό PCM

Το καθαρό PCM για 900 δευτερόλεπτα φόρτισης αποθηκεύει 187,802 kJ.

Αναφορικά με τη θερμοκρασία θερμού τοιχώματος, προκύπτει από τα παραπάνω, πως για θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης του PCM η προσθήκη υψηλότερου ποσοστού νανοϋλικού, επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα από ότι για θερμοκρασίες αρκετά μεγαλύτερες του σημείου τήξης.

9 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από την παραπάνω εργασία αλλά και τη βιβλιογραφία προέκυψαν κρίσιμα ερωτήματα για την επίδραση των νανο-υλικών στη θερμική συμπεριφορά των υλικών αλλαγής φάσης. Είναι σημαντικό να γίνει πειραματική έρευνα για την ανάπτυξη της θεωρίας πάνω στη τήξη και στην επίδραση των νανοσωματιδίων σε αυτή, αλλά και ανάπτυξη καλύτερων υπολογιστικών μοντέλων. Έτσι περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να γίνει ανάπτυξη τρισδιάστατων μοντέλων και στην εξακρίβωση τους με πειραματικές διατάξεις. Τέλος είναι κρίσιμο να ενταχθεί και η συναλλαγή θερμότητας με το υγρό μεταφοράς θερμότητας (Heat transfer fluid) στη μοντελοποίηση στην προσπάθεια καλύτερης περιγραφής και μελέτης του φαινομένου.

Bibliography

- [1] IEA, "Market analysis and forecasts to 2020," *Medium term market report*, 2015.
- [2] IEA, "DEVELOPMENT OF RENEWABLES AND WASTE," 2016.
- [3] IEA, "Source: IEA energy balances 2017".*Greece*.
- [4] J. Hadorn, "Storage solutions for solar thermal energy," *Freiburg Solar Academy*, 2004 .
- [5] L. Dominique and T. F. Handan, "A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications".
- [6] C. Prieto, "Review of technology: Thermochemical energy storage for power plants".
- [7] R. W. L. W. N. Yu, "Sorption thermal storage for solar energy," *Progress in Energy and Combustion Science* 39 , pp. 489-514, (2013) .
- [8] K. S. S.D. Sharma, *Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review. International*.
- [9] L. L. X. H. G. F. Guruprasad Alva, "Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 , p. 693–706, (2017).
- [10] Y. Allouche, "PCM ENERGY STORAGE MODELING:CASE STUDY FOR A SOLAR-EJECTOR COOLING CYCLE," pp. 90-130, 2016 .
- [11] A. S. Fleischer, *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications*, 2015.
- [12] A. Sharma, "Review on thermal energy storage with phase change," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 , p. 318–345, (2009) .
- [13] S. A. Mohamed, "A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .

- [14] ,. Z. K. A. G. Zakir Khan, "A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility," *Energy Conversion and Management* , pp. 132-158, 2016.
- [15] S.-P. M. C. T. Y. Y. L.-S. J. Z.-D. C. Xue-Feng Shao, "Solidification behavior of hybrid TiO₂ nanofluids containing nanotubes and nanoplatelets for cold thermal energy storage," *Applied Thermal Engineering* 117 , p. 427–436, (2017).
- [16] R. L. ,. A.-M. H. Piia Lamberg, "Numerical and experimental investigation of melting and freezing," *International Journal of Thermal Sciences*, pp. 277-287, 2004.
- [17] B. Kamkari, "Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, p. 186–200, 2014, .
- [18] L. F. C. Alvaro de Gracia, "Numerical simulation of a PCM packed bed system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [19] E. t. c. o. o. c. m. foams, "Xiao X, Zhang P, Li M," (2014).
- [20] A. Sari, "Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material," *Applied Thermal Engineering* , p. 1271–1277, 2007.
- [21] G. A. Y. J. G. F. Xiang Huang, "Morphological characterization and applications of phase change materials in thermal energy storage: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , vol. 72, 2017.
- [22] D. O. Y. T. K. Sivasankaran Harish, "Thermal conductivity enhancement of lauric acid phase change nanocomposite with graphene nanoplatelets," *Applied Thermal Engineering* 80 , pp. 205-211, (2015) .
- [23] E. M. L. J. E. Hamidreza Ghasemi Bahraseman, "Fast charging of thermal energy storage systems enabled by phase," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 109, p. 1052–1058, (2017) .
- [24] A. A. A. R. K. Sadegh Motahar, "Experimental investigation on heat transfer characteristics during melting of a phase change material with dispersed TiO₂ nanoparticles in a rectangular enclosure," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 109, p. 134–146, 2017.
- [25] E. C. N. Jasim M. Mahdi, "Melting enhancement in triplex-tube latent thermal energy storage system using nanoparticles-fins combination," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 109 , p. 417–427, 2017.

- [26] M. S. D. D. G. Sina Lohrasbi, "Multi-objective RSM optimization of fin assisted latent heat thermal energy storage system based on solidification process of phase change Material in presence of copper nanoparticles," *Applied Thermal Engineering* 118 , p. 430–447, (2017) .
- [27] P. H. L. D. Li Dongliang, "Thermal conductivity enhancement of clathrate hydrate with nanoparticles," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 104 , p. 566–573, (2017) .
- [28] P. J. H. T. R.K. Sharma, "Numerical study for enhancement of solidification of phase changematerials using trapezoidal cavity," *Powder Technology* 268 , p. 38–47, (2014) .
- [29] E. T. K. H. K. Müslüm Arıcı, "Melting of nanoparticle-enhanced paraffin wax in a rectangular enclosure with partially active walls," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 104, p. 7–17, 2017.
- [30] H. X. Z. G. L. G. Y. L. Jifen Wang, "Improved thermal properties of paraffin wax by the addition of TiO nanoparticles," *Applied Thermal Engineering* 73 1541-1547, pp. 1541-1547, 2014.
- [31] S. M. ., K. S. Harikrishnan, "Preparation and thermal energy storage behaviour of stearic acid TiO₂ nanofluids as a phase change material for solar heatinh systems," *Thermochimica Acta*, pp. 137-145, 2013.
- [32] A. D. Aziz Ebrahimi, "Simulation of melting of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in a square cavity with two heat source–sink pairs," *Alexandria Engineering Journal* 54,, p. 1003–1017, (2015) .
- [33] D. Y. T. M. K. Sivasankaran Harish, "Thermal conductivity enhancement of lauric acid phase change nanocomposite in solid and liquid state with single-walled carbon nanohorn inclusions," *Thermochimica Acta* 600 , p. 1–6, (2015) .
- [34] J. K. T. A. A.-H. S. M. A.-M. Nabeel S. Dhaidan, "Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 66 , p. 672–683, (2013) .
- [35] L.-W. F. Y.-Q. X. Z.-T. Y. K.-F. C. Yi Zeng, "An experimental investigation of melting of nanoparticle-enhanced phase change materials (NePCMs) in a bottom-heated vertical cylindrical cavity," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 66 , p. 111–117, (2013) .

- [36] C. B. Ich-Long Ngo, "A generalized correlation for predicting the thermal conductivity of composite materials," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 83 , p. 408–415, (2015) .
- [37] F. F. P.-H. B. Farah Souayfane, "Phase change materials for cooling application in buildings: A review," *Energy and Buildings* 129(, p. 396–431, 2016).
- [38] F. Fiorito, "Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hot climates. Exploring the use of phase-change materials for performances improvement.," *Energy Procedia* 30 , p. 1110 – 1119 , (2012) .
- [39] P. K. P. L. K. Peippo, " "Multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating", " *Energy and Buildings* 17, pp. :259-270., 1991.
- [40] C. L. D. H. D. B. D. F. AK. Athienities, " "Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage"32(5);, " , *Building and Environment* , pp. 405-410. , 1997;.
- [41] D. E. D. R. JR Turnpenny, " "Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings", Part I: Testing and theoretical modelling,," *Appl. Therm. Engineering* , p. 1019–37, 2000;.
- [42] H. M. A. M. A. S. M. Adeel Arshad, "Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: Effect of pin thickness and PCM volume fraction," *Applied Thermal Engineering* 112 , p. 143–155, (2017) .
- [43] S. I. Gharebaghi M, " Enhancement of heat transfer in latent heat storage modules with internal fins,," *Numer Heat Transf Part A Appl* ;53:7, p. 49–65., 2007.
- [44] M. B. M. L. F. N.H.S. Tay, "Investigation of the effect of dynamic melting in a tube in tank PCM system using a CFD model,," *Applied Energy*, pp. 738-747, 2015.
- [45] N. T. M. B. L. C. F. B. J. Gasia, "Experimental investigation of the effect of dynamic melting in a cylindrical shell and tube heat exchanger using water as PCM," *Applied Energy* ;185;, pp. 136-145, 2017.
- [46] M. J. F. L.-R. M. L. Wilson Chalco-Sandoval, "Use of phase change materials to develop electrospun coatings of interest in food packaging applications," *Journal of Food Engineering* 192 , pp. 122-128, (2017) .
- [47] R. S. Vajjha, "Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al₂O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator," *International Journal of Heat and Fluid Flow* 31 (2010).
- [48] Ansys, "Fluent v17".

- [49] A. Bakker, "Lecture 7 - Meshing," [Online].
- [50] I. ANSYS, ANSYS FLUENT 12.0 User's guide, 2009.
- [51] G. Z. H. Shmueli, "Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments," vol. 4082–4091, (2010).
- [52] G. Z. H. Shmueli, "Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments," *International Journal of Heat and Mass Transfer* , vol. 53 , no. 4082–4091, 2010) .
- [53] A. D. Aziz Ebrahimi, "Simulation of melting of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in a square cavity with two heat source–sink pairs".
- [54] G. Z. V. Shatikian, "Numerical investigation of a PCM-based heat sink with internal fins," *International Journal of Heat and Mass Transfer* , vol. 48 , no. 3689–3706 , (2005) .
- [55] A. Bakker, "Lecture 5 - Solution Methods," [Online].
- [56] M. F. AhmadAli Rabienataj Darzi, "Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus," *Applied Mathematical Modelling* (, vol. 36, no. 4080–4086, 2012).
- [57] M. Mahdaoui, "A numerical analysis of solid–liquid phase change heat transfer around a horizontal cylinder," *Applied Mathematical Modelling* , vol. 38 , no. 1101–1110, (2014) .
- [58] J. M. B.Zalba, "Reviw on the thermal energy storage with phace change: materials heat transfer analysis and applications," *Applied thermal Engineering* , pp. 251-283, 2003.

Table of Contents

Κατάλογος εικόνων και σχημάτων	13
1. Εισαγωγή	16
1.1 Παρουσίαση κεφαλαίων	16
2. Ενεργειακή κατάσταση	18
3. Ανάγκες σε θερμική ενέργεια	21
3.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας	22
3.2 Θερμοχημική αποθήκευση	23
3.3 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας	24
3.3.1 Πλεονεκτήματα	24
3.3.2 Αναγκαία χαρακτηριστικά	24
3.3.4 Κατηγοριοποίηση	25
3.3.5 Μειονεκτήματα	29
4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	31
4.1. Συμβατότητα-Διαβρωτικότητα.....	31
4.2. Αντιμέτωπιση χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας	32
4.2.3 Γεωμετρία και προσανατολισμός	33
4.2.2 Αύξηση επιφάνειας	34
4.2.3 Προσθήκη υλικών	37
4.3 Εφαρμογές PCM	43
4.3.1 Εφαρμογές σε κτήρια.....	43
4.3.2 Εφαρμογή στις ηλεκτρονικές συσκευές.....	46
4.3.3 Αποθήκευση ηλιακής θερμικής ενέργειας.....	48
4.3.4 Νέες τεχνολογίες	50
5 Υπολογιστική προσομοίωση.....	52
5.1 Γενική περιγραφή	52
5.2 Φυσικό πρόβλημα	53
5.3 Μαθηματική μοντελοποίηση	53
5.3 Αριθμητική επίλυση.....	57
5.3.1 Προετοιμασία επίλυσης	58
5.3.2 Επίλυση	78
6 Ανεξαρτητοποίηση πλέγματος και χρονικού βήματος	80
7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	83

7.1 Αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης	94
8 Συμπεράσματα	103
9 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	104
Bibliography	105