



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Υπολογιστική Διερεύνηση Θερμοϋδραυλικής Συμπεριφοράς
Διάταξης Αποθήκευσης Λανθάνουσας Θερμότητας υπό Μορφή
Συμπαγούς Κλίνης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Ευάγγελου-Ιάσονα Μπασιάκου

Επιβλέποντες:

Ανδρέας Μπουντουβής
Καθηγητής ΕΜΠ

Ηλίας Παπανικολάου
Ερευνητής Α' ΕΚΕΦΕ
«Δημόκριτος»

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Στη Λίλη Β. και το Γιάννη Τ.

"I'm sorry, but I don't want to be an emperor. That's not my business. I don't want to rule or conquer anyone. I should like to help everyone - if possible - Jew, Gentile - black man - white. We all want to help one another. Human beings are like that. We want to live by each other's happiness - not by each other's misery. We don't want to hate and despise one another. In this world there is room for everyone. And the good earth is rich and can provide for everyone. The way of life can be free and beautiful, but we have lost the way. Greed has poisoned men's souls, has barricaded the world with hate, has goose-stepped us into misery and bloodshed. We have developed speed, but we have shut ourselves in. Machinery that gives abundance has left us in want. Our knowledge has made us cynical. Our cleverness, hard and unkind. We think too much and feel too little. More than machinery we need humanity. More than cleverness we need kindness and gentleness. Without these qualities, life will be violent and all will be lost...The aeroplane and the radio have brought us closer together. The very nature of these inventions cries out for the goodness in men - cries out for universal brotherhood - for the unity of us all. Even now my voice is reaching millions throughout the world - millions of despairing men, women, and little children - victims of a system that makes men torture and imprison innocent people. To those who can hear me, I say - do not despair. The misery that is now upon us is but the passing of greed - the bitterness of men who fear the way of human progress. The hate of men will pass, and dictators die, and the power they took from the people will return to the people. And so long as men die, liberty will never perish...Soldiers! don't give yourselves to brutes - men who despise you - enslave you - who regiment your lives - tell you what to do - what to think and what to feel! Who drill you - diet you - treat you like cattle, use you as cannon fodder. Don't give yourselves to these unnatural men - machine men with machine minds and machine hearts! You are not machines! You are not cattle! You are men! You have the love of humanity in your hearts! You don't hate! Only the unloved hate - the unloved and the unnatural! Soldiers! Don't fight for slavery! Fight for liberty! In the 17th Chapter of St Luke it is written: "the Kingdom of God is within man" - not one man nor a group of men, but in all men! In you! You, the people have the power - the power to create machines. The power to create happiness! You, the people, have the power to make this life free and beautiful, to make this life a wonderful adventure. Then - in the name of democracy - let us use that power - let us all unite. Let us fight for a new world - a decent world that will give men a chance to work - that will give youth a future and old age a security. By the promise of these things, brutes have risen to power. But they lie! They do not fulfil that promise. They never will! Dictators free themselves but they enslave the people! Now let us fight to fulfil that promise! Let us fight to free the world - to do away with national barriers - to do away with greed, with hate and intolerance. Let us fight for a world of reason, a world where science and progress will lead to all men's happiness. Soldiers! in the name of democracy, let us all unite!"

Charlie Chaplin, The Great Dictator

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση και υποβολή της Διπλωματικής Εργασίας σηματοδοτεί, όχι μόνο το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Χημικών Μηχανικών, αλλά συνάμα το κλείσιμο ενός άλλου εύρύτερου κύκλου, αυτού της πρώτης μου νεότητας. Στο πλαίσιο αυτό και αγνοώντας σκοπίμως την όποια τυπικότητα επιβάλλει το επικοινωνιακό πλαίσιο μιας Διπλωματικής Εργασίας, αυτό το ευχαριστήριο σημείωμα λαμβάνει πιο προσωπικό χαρακτήρα.

Ειλικρινώς οφείλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ανδρέα Μπουντουβή για την αποδοχή της ακαδημαϊκής συνεργασίας με το ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας, την υποστήριξη σε τυχόν ζητήματα που ανέκυψαν, τη διάθεση συνεργασίας και την εμπιστοσύνη που με περιέβαλλε ευθύς εξ' αρχής.

Ο φορέας υλοποίησης της Διπλωματικής Εργασίας υπήρξε το Εργαστήριο Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Θέλω να απευθύνω ευχαριστίες στον Προϊστάμενο του Εργαστηρίου, Δρα Βασίλειο Μπελεσιώτη που με δέχτηκε στο Εργαστήριο προτείνοντάς μου ένα ιδιαιτέρως ενδιαφέρον θέμα που βρίσκεται στην αιχμή της έρευνας της θερμικής μηχανολογίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ερευνητή Α', Δρα Ηλία Παπανικολάου, ο οποίος, ως ακαδημαϊκός υπεύθυνος από πλευράς του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», κατηύθυνε την πορεία της Διπλωματικής. Οι εξειδικευμένες γνώσεις του σε ζητήματα μεταφοράς θερμότητας και ορμής, σε συνδυασμό με την πραότητα του χαρακτήρα του, κατέστησαν τις συζητήσεις μας όχι μόνο ενδιαφέρουσες, αλλά και απολαυστικές.

Η περάτωση της Εργασίας αυτής δε θα ήταν ποτέ δυνατή χωρίς τη συνδρομή του Υποψήφιου Διδάκτορα και φίλου πλέον, Κώστα Αρβανίτη. Από την πρώτη στιγμή υπήρξε άμεσος και φιλικός, δημιουργώντας ιδανικό κλίμα συνεργασίας. Συνηθισμένος από την απόμακρη και συχνά υπερφίαλη συμπεριφορά Υ/Δ στη Σχολή, μπορώ να παραδεχτώ ότι η καθημερινότητα με τον Κώστα στο εργαστήριο αποτελεί μια από τις πιο ευχάριστες αναμνήσεις της Διπλωματικής. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μεταδιδακτορικό ερευνητή και φίλο, Δρα Στάθη Καλούδη, καθώς πέραν της πολύτιμης βοήθειας που μου παρείχε σε ζητήματα τεχνικής φύσεως, μοιραστήκαμε και ελπίζω να συνεχίσουμε να μοιραζόμαστε την αγάπη μας για το Μπάσκετ στα κατά τόπους γήπεδα της Αθήνας. Επίσης, ευχαριστώ όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» για το άψογο κλίμα συνεργασίας.

Δεν θα μπορούσα φυσικά να παραλείψω τους ανθρώπους που όλα αυτά τα χρόνια με συντρόφευαν εντός Πολυτεχνείου. Τους ευχαριστώ πραγματικά γιατί από το τρίτο έτος και έπειτα μαζί τους, η καθημερινότητά μου απογειώθηκε, είτε στις

εκδρομές, είτε στην ταράτσα, είτε απλά από τα συλλογικά διαβάσματα! Από καρδιάς ευχαριστώ τους φίλους μου από τη γειτονιά και το σχολείο, με τους οποίους από μικρά παιδιά έχουμε γελάσει και πικραθεί αλλά κυρίως έχουμε ζήσει. Ειδικότερα, θέλω να ευχαριστήσω την Αγγελική, τον Ανάγνω, το Γιάννη, την Ειρήνη, τον Κουτσούκο, τη Μαριτίνα, το Μητσάν, τον Μπάμπη, αλλά και τους απόδημους στην εσπερία Αλέξη, Ιάσωνα και Παναγιώτη, επειδή πολύ απλά είχαμε πάντοτε ο ένας τις πλάτες του άλλου.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, Αλεξάνδρα, Γιάννη και Έλσα για την υποστήριξη και την πίστη τους στις δυνατότητές μου, την ανοχή τους στις περιέργιές μου και τα χόμπυ μου, όπως το να σπουδάζω για εξίμιση χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζεται η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας σε υλικά αλλαγής υπό μορφή συμπαγούς κλίνης, μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων. Ο σκόπος της εργασίας συνίσταται στην προσομοίωση της λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, την επιβεβαίωση της υπολογιστικής λύσης με πειραματικά δεδομένα και τη μελέτη της επίδρασης ποικίλων παραμέτρων στην αποθηκευτική ικανότητά του. Αρχικά, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας εμπορικής και βιομηχανικής κλίμακας και τονίζεται η θεμελιώδης σημασία της υπολογιστικής ανάλυσης σε προβλήματα Φαινομένων Μεταφοράς. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση των διεργασιών αποθήκευσης αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Στο σημείο αυτό εκτίθενται οι βασικές θεωρητικές έννοιες, η κατανόηση των οποίων είναι κομβική για την ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων περιγραφής της μεταφοράς ορμής, θερμότητας και των μηχανισμών αλλαγής φάσης σε συμπαγείς κλίνες. Ειδική αναφορά γίνεται στη μέθοδο χωρικών μέσων τιμών, τους νόμους του Darcy και τις επεκτάσεις του, τα μοντέλα θερμότητας με ή χωρίς ισορροπία και τις ενθαλπικές μεθόδους προσέγγισης της αλλαγής φάσης. Η υπολογιστική διαδικασία περατώνεται με τη χρήση εμπορικού λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ANSYS Fluent και COMSOL Multiphysics. Γίνεται περιγραφή του προκαταρκτικού προβλήματος αποθήκευσης αισθητής και του τελικού προβλήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας που μελετήθηκαν. Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Κατακλείδα της εργασίας αποτελούν τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: αποθήκευση θερμότητας, συμπαγής κλίνη, υλικά αλλαγής φάσης, ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, μέθοδος χωρικών μέσων τιμών, νόμος Darcy, μοντέλα θερμότητας σε πορώδη μέσα, ενθαλπικές μέθοδοι αλλαγής φάσης.

ABSTRACT

This Diploma Thesis examines latent heat thermal energy storage using phase change materials in the form of packed bed, via computational simulations. It aims at the simulation of the operation of a latent heat thermal energy storage system, the validation of the computational results against experimental data and the consideration of the effect of various parameters to its storage capability. Firstly, commercial and industrial scale energy storage techniques are being presented, emphasizing on the significance of computational analysis in the study of Transport Phenomena. A thorough bibliographical review follows, covering the area of sensible and latent heat thermal energy storage. At this point, the main theoretical background, which is essential to fully understand the mathematical models of momentum and heat transport, has been developed. Special reference is made to the method of volume averaging, Darcy law and its extensions, equilibrium and non-equilibrium thermal models and the enthalpy methods of phase change. The computational procedure takes place with the use of ANSYS Fluent and COMSOL Multiphysics. The following chapter is devoted to the description of the preliminary problem of sensible thermal energy storage and the main concern of the current thesis, the latent heat thermal energy storage problem. The final part of this work, presents the conclusions and some suggestions for further research.

Key words: thermal energy storage, packed bed, phase change materials, ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, method of volume averaging, Darcy law, porous media thermal models, enthalpy method of phase change

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ABSTRACT	IV
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	V
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	X
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	XII
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	2
1.2.1. Αποθήκευση σε Μηχανικές Διατάξεις	3
1.2.1.1 Σύστημα Αποθήκευσης Δυναμικής Ενέργειας Νερού	3
1.2.1.2 Αποθήκευση Περιστροφικής Κινητικής Ενέργειας σε Σφονδύλους	4
1.2.1.3 Αποθήκευση Πεπιεσμένου Αέρα	4
1.2.2. Αποθήκευση σε Χημικές Διατάξεις	5
1.2.2.1 Ηλεκτροχημικά Συστήματα-Μπαταρίες	5
1.2.2.2 Θερμοχημικά Συστήματα-Χημικές Αντλίες Θερμότητας	5
1.2.2.3 Βιολογικά Συστήματα	5
1.2.2.4 Συστήματα Αποθήκευσης σε Οργανικά Μόρια	6
1.2.2.5 Αποθήκευση Υδρογόνου	6
1.2.3 Αποθήκευση σε Ηλεκτρικές Διατάξεις	7
1.2.4 Αποθήκευση σε Μαγνητικές Διατάξεις	7
1.2.5 Αποθήκευση Θερμότητας	8
1.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	8
1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9

1.5 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
----------------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
-------------------	-----------

2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	11
2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	11
2.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	16
2.2.1 Χαρακτηρισμός Θερμικού Κυκλώματος	16
2.2.2 Υλικά SHTES	17
2.2.2.1 Στερεά Υλικά SHTES	18
2.2.2.2 Υγρά Μέσα SHTES	19
2.2.3 Τεχνολογίες SHTES	20
2.2.3.1 Σύστημα Πολλαπλών Δεξαμενών	20
2.2.3.2 Θερμοκλίνες ή Δεξαμενές Θερμικής Διαστρωμάτωσης	21
2.2.3.3 Συστήματα Λαβυρίνθου	22
2.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	23
2.3.1 Χαρακτηρισμός Θερμικού Κυκλώματος LHTES	23
2.3.2 Επιλογή Αλλαγής Φάσης	25
2.3.3 Υλικά Αλλαγής Φάσης	26
2.3.3.1 Μέτρηση Θερμικών Ιδιοτήτων PCM	28
2.3.4 Ιδιότητες Υλικών Αλλαγής Φάσης	30
2.3.5 Βελτιστοποίηση LHTESS και Μελλοντική Έρευνα	33
2.4 ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΚΛΙΝΕΣ	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	40
-------------------	-----------

3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	40
3.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΪΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ	40
3.1.1 Μέθοδος Άμεσης Μοντελοποίησης	40
3.1.2 Μέθοδος Συνεχούς Μοντελοποίησης	42
3.1.2.1 Νόμος Darcy	42
3.1.2.2 Επέκταση Forchheimer και Brinkman	45
3.1.2.3 Ορισμός του Re και Μετάβαση από τη Ροή Darcy	47
3.1.2.4 Μέθοδος Χωρικών Μέσων Τιμών	49
3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	51
3.2.1 Άμεση Μοντελοποίηση Θερμότητας	52
3.2.2 Συνεχής Μοντελοποίηση Θερμότητας	54
3.2.2.1 Μοντέλα Θερμικής Ισορροπίας	54
3.2.2.2 Μοντέλα χωρίς Θερμική Ισορροπία	55
3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	57
3.3.1 Αναλυτική Προσέγγιση Stefan	58

3.3.2 Αριθμητικές Μέθοδοι	58
3.3.2.1 Αριθμητικές Μέθοδοι Κινούμενου Πλέγματος	59
3.3.2.2 Αριθμητικές Μέθοδοι Σταθερού Πλέγματος	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	62
4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	62
4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	62
4.1.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων	62
4.1.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	65
4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ	68
4.2.1 Πρόβλημα I-SHTES	68
4.1.2 Πρόβλημα II-LHTES	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	81
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	81
5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ I	81
5.1.1 Αρχικές Συνθήκες και Ανεξαρτησία Πλέγματος	81
5.1.2 Επικύρωση από Πειραματικά Δεδομένα	83
5.1.3 Ανεξαρτησία Χρονικού Βήματος	84
5.1.4 Παραμετρική Ανάλυση	85
5.1.4.1 Επίδραση Ειδικής Θερμοχωρητικότητας του Εργαζόμενου Ρευστού	86
5.1.4.2 Επίδραση Ειδικής Θερμοχωρητικότητας του Υλικού Πλήρωσης	88
5.1.4.3 Επίδραση της Θερμικής Αγωγιμότητας του Εργαζόμενου Ρευστού	90
5.1.4.4 Επίδραση της Θερμικής Αγωγιμότητας του Υλικού Πλήρωσης	90
5.1.4.5 Επίδραση του Πορώδους της Κλίνης	94
5.1.4.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ	96
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ II	96
5.2.1 Ανεξαρτησία Πλέγματος	98
5.2.2 Επιβεβαίωση από Πειραματικά Δεδομένα	99
5.2.3 Ανεξαρτησία Χρονικού Βήματος	101
5.2.4 Παραμετρική Ανάλυση	102
5.2.4.1 Επίδραση Ειδικής Θερμοχωρητικότητας του Εργαζόμενου Ρευστού	103
5.2.4.2 Επίδραση Ειδικής Θερμοχωρητικότητας του Υλικού Αλλαγής Φάσης	103
5.2.4.3 Επίδραση της Θερμικής Αγωγιμότητας του Εργαζόμενου Ρευστού	105
5.2.4.4 Επίδραση Θερμικής Αγωγιμότητας του Υλικού Αλλαγής Φάσης	106
5.2.4.4 Επίδραση της Ενθαλπίας Αλλαγής Φάσης	108
5.2.4.5 Επίδραση του Πορώδους της Κλίνης	109
5.2.4.7 Επίδραση της Διαπερατότητας της Κλίνης	111
5.2.4.8 Επίδραση της Οριακής Συνθήκης Ταχύτητας Εισόδου	113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	115
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	115
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	117
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	119
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	124

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

1D, 2D, 3D: μονο-δι-τρισε-διάστατος

CAD: Σχεδίαση με Χρήση Η/Υ (Computer Aided Design)

CFD: Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics)

DTA: Διαφορική Θερμική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis)

ES: Αποθήκευση Ενέργειας (Energy Storage)

ESS: Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems)

GHG: Αέρια θερμοκηπίου (Green House Gases)

HTF: Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας (Heat Transfer Fluid)

LHTES: Αποθήκευση Λανθάνουσας Θερμότητας (Latent Heat Thermal Energy Storage)

LHTESS: Συστήματα Αποθήκευσης Λανθάνουσας Θερμότητας (Latent Heat Thermal Energy Storage Systems)

PCM: Υλικά Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials)

REV: Αντιπροσωπευτικός Στοιχειώδης Όγκος (Representative Elementary Volume)

SHTES: Αποθήκευση Αισθητής Θερμότητας (Sensible Thermal Energy Storage)

SHTESS: Συστήματα Αποθήκευσης Αισθητής Θερμότητας (Sensible Thermal Energy Storage Systems)

TES: Αποθήκευση Θερμότητας (Thermal Energy Storage)

TESS: Συστήματα Αποθήκευσης Θερμότητας (Thermal Energy Storage Systems)

UDF: User Defined Function

ΑΔΕ: Αρχή Διατήρησης Ενέργειας

ΕΠΥ: Εργαστήριο Προσωπικών Υπολογιστών

Εξ: Εξίσωση

Η/Υ: Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

ΚΗΥ: Κέντρο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Ταξινόμηση των διαφόρων τάξεων TES	3
Σχήμα 2: Σύστημα αποθήκευσης δυναμικής ενέργειας νερού	4
Σχήμα 3: Χημική αντλία θερμότητας	6
Σχήμα 4: Αποθηκευτικός κύκλος TES	12
Σχήμα 5: Συστήματα TES δύο δεξαμενών	20
Σχήμα 6: Συστήματα θερμοκλινών	21
Σχήμα 7: Διάγραμμα συνάρτησης $T=f(Q)$	33
Σχήμα 8: Πτερύγια ενίσχυσης θερμικής αγωγιμότητας PCM	34
Σχήμα 9: Διατάξεις συμπαγών κλινών	36
Σχήμα 10: Βιομηχανικό SHTESS υψηλών θερμοκρασιών	38
Σχήμα 11: Απεικόνιση 2D πεδίου ροής σε πορώδες μέσο	41
Σχήμα 12: Άμεση μέθοδος μοντελοποίησης πορώδους	42
Σχήμα 13: Μέθοδος Χωρικών Μέσων Τιμών	50
Σχήμα 14: Γεωμετρική απεικόνιση χωρίου αλλαγής φάσης	57
Σχήμα 15: Μοντέλο Φαινόμενης Θερμοχωρητικότητας	61
Σχήμα 16: Εξαγωγή γενικής διαφορική εξίσωση διατήρησης	63
Σχήμα 17: Όγκοι ελέγχου με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων	64
Σχήμα 18: Γεωμετρία προβλήματος I-SHTESS	69
Σχήμα 19: Πλέγμα 1.125 κελλιών προβλήματος I	70
Σχήμα 20: Πλέγμα 10.000 κελλιών προβλήματος I	70
Σχήμα 21: Πλέγμα 18.750 κελλιών προβλήματος I	71
Σχήμα 22: Γεωμετρία προβλήματος II-LHTESS	74
Σχήμα 23: Πλέγμα 4.000 κελλιών προβλήματος II	75
Σχήμα 24: Πλέγμα 9.000 κελλιών προβλήματος II	76
Σχήμα 25: Πλέγμα 16.000 κελλιών προβλήματος II	76
Σχήμα 26: Πλέγμα 15.611 κελλιών προβλήματος II	77
Σχήμα 27: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας PCM	80
Σχήμα 28: Ισοϋψείς αρχικών συνθηκών θερμοκρασίας προβλήματος I	82
Σχήμα 29: Σύγκριση υπολογιστικών-πειραματικών για $T_{charged}=669K$	83
Σχήμα 30: Ανεξαρτησία πλέγματος προβλήματος I	84
Σχήμα 31: Σύγκριση υπολογιστικών-πειραματικών για $T_i^*=f(z_i)$	85
Σχήμα 32: Ανεξαρτησία χρονικού βήματος προβλήματος I	86
Σχήμα 33: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $C_p(HTF)=1.550J/kg\cdot K$	87
Σχήμα 34: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $C_p(HTF)=3.100J/kg\cdot K$	87
Σχήμα 35: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $C_p(HTF)=775J/kg\cdot K$	88
Σχήμα 36: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $C_{ps}=1.050J/kg\cdot K$	89
Σχήμα 37: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $C_{ps}=2.100J/kg\cdot K$	89
Σχήμα 38: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $C_{ps}=525J/kg\cdot K$	90
Σχήμα 39: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $k(HTF)=0,57W/m\cdot K$	91
Σχήμα 40: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $k(HTF)=1,14 W/m\cdot K$	91

Σχήμα 41: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $k(\text{HTF})=0,285\text{W/m}\cdot\text{K}$	92
Σχήμα 42: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $k_s=2,5\text{W/m}\cdot\text{K}$	92
Σχήμα 43: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $k_s=5\text{W/m}\cdot\text{K}$	93
Σχήμα 44: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $k_s=1,25\text{W/m}\cdot\text{K}$	93
Σχήμα 45: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $\varepsilon=0,22$	94
Σχήμα 46: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $\varepsilon=0,5$	95
Σχήμα 47: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $\varepsilon=0,9$	95
Σχήμα 48: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $\varepsilon=0,1$	96
Σχήμα 49: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $K=2,625\cdot 10^{-8}\text{m}^2$	97
Σχήμα 50: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $K=2,363\cdot 10^{-7}\text{m}^2$	97
Σχήμα 51: Ισοϋψείς θερμοκρασίας για $K=2,625\cdot 10^{-10}\text{m}^2$	98
Σχήμα 52: Διάταξη προβλήματος II και θέση θερμοστοιχείων	99
Σχήμα 53: Ανεξαρτησία πλέγματος προβλήματος II	100
Σχήμα 54: Σύγκριση υπολογιστικών-πειραματικών προβλήματος II	101
Σχήμα 55: Ανεξαρτησία χρονικού βήματος προβλήματος II	102
Σχήμα 56: Ισοϋψείς θερμοκρασίας και επίδραση $C_p(\text{HTF})$	104
Σχήμα 57: Ισοϋψείς θερμοκρασίας και επίδραση $C_p(\text{PCM})$	106
Σχήμα 58: Ισοϋψείς θερμοκρασίας και επίδραση $k(\text{HTF})$	107
Σχήμα 59: Ισοϋψείς θερμοκρασίας και επίδραση $k(\text{PCM})$	108
Σχήμα 60: Ισοϋψείς θερμοκρασίας και επίδραση ενθαλπίας τήξης	109
Σχήμα 61: Ισοϋψείς θερμοκρασίας και επίδραση ε	111
Σχήμα 62: Ισοϋψείς θερμοκρασίας και επίδραση K	112
Σχήμα 63: Ισοϋψείς θερμοκρασίας και επίδραση ν_{in}	114

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κατηγορίες TES	15
Πίνακας 2: Υλικά SHTESS	18
Πίνακας 3: Ιδιότητες Μέσων Αποθήκευσης SHTESS και LHTESS	23
Πίνακας 4: Θερμοφυσικές Ιδιότητες Ορισμένων PCM	29
Πίνακας 5: Εμπειρικές Σχέσεις Άμεσης Μοντελοποίησης Θερμότητας	53
Πίνακας 6: Θερμοφυσικές Ιδιότητες για το Πρόβλημα I-SHTESS	72
Πίνακας 7: Θερμοφυσικές Ιδιότητες για το Πρόβλημα II-LHTESS	78
Πίνακας 8: Υπολογισμός των Re του Προβλήματος II-LHTESS	124

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικό Αλφάβητο

A	εμβαδόν επιφάνειας	m^2
C_p	ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση	J/kg·K
D	διάμετρος δεξαμενής	m
d_p	διάμετρος σωματιδίου κλίνης	m
Gr	αδιάστατος αριθμός Grashof	
h	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή	W/m ² ·K
H	συνάρτηση ενθαλπία (απόλυτη ή ογκομετρική)	J ή J/m ³
k	θερμική αγωγιμότητα	W/m·K
K	διαπερατότητα	m ²
L	χαρακτηριστική διάσταση συστήματος (σε συμπαγείς κλίνες αναφέρεται στην κύρια διάσταση της δεξαμενής αποθήκευσης)	m
m	μάζα	kg
\tilde{n}:	διάνυσμα κάθετο σε επιφάνεια	
Nu	αδιάστατος αριθμός Nusselt	
Nu_H	αδιάστατος αριθμός Nusselt με χαρακτηριστικό μήκος το ύψος δεξαμενής	
Nu_p	αδιάστατος αριθμός Nusselt με χαρακτηριστικό μήκος τη d _p	
Pr	αδιάστατος αριθμός Prandtl	
Q	θερμότητα	J
r, θ, z	κυλινδρικές συντεταγμένες	
\dot{q}	ρυθμός μεταφοράς θερμότητας	W
\dot{q}''	ρυθμός ροής θερμότητας	W/m ²
\dot{q}'''	ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής/κατανάλωσης θερμότητας	W/m ³
Pe	αδιάστατος αριθμός Peclet	
Ra	αδιάστατος αριθμός Rayleigh	
Re	αδιάστατος αριθμός Reynolds	
Re_h	αδιάστατος αριθμός Reynolds με χαρακτηριστικό μήκος τη d _h	
Re_K	αδιάστατος αριθμός Reynolds με χαρακτηριστικό μήκος τη K	
Re_{K(1/2)}	αδιάστατος αριθμός Reynolds με χαρακτηριστικό μήκος τη K ^{1/2}	
Re_{Kε}	αδιάστατος αριθμός Reynolds με χαρακτηριστικό μήκος τροποποιημένο κατά K·ε	
Re_p	αδιάστατος αριθμός Reynolds με χαρακτηριστικό μήκος τη d _p	
T	θερμοκρασία	K
u	διάνυσμα ταχύτητας	m/s
u, v, w	συνιστώσες διανύσματος ταχύτητας στον τρισδιάστο χώρο	m/s
V	όγκος	m ³
x, y, z	καρτεσιανές συντεταγμένες	
<>	μέση τοπική τιμή ιδιότητας με τη μέθοδο Χωρικών Μέσων Τιμών	

Ελληνικό Αλφάβητο

α	θερμική διαχυτότητα	m ² /s
α_m	υγρό κλάσμα	

β	συντελεστής θερμικής διαστολής	1/K
Δh_m	ειδική λανθάνουσα ενθαλπία τήξης	J/kg
ΔH_m	ογκομετρική ενθαλπία αλλαγής φάσης	J/m ³
ϵ	πορώδες	
ϵ_∞	μέσο πορώδες κλίνης	
μ	δυναμικό ιξώδες	Pa·s
ρ	πυκνότητα	kg/m ³

Δείκτες-Εκθέτες

Λατινικό Αλφάβητο

cond	μέγεθος που αναφέρεται στην αγωγή
conv	μέγεθος που αναφέρεται στη συναγωγή
eff	ενεργό μέγεθος
f	τελικό
init	αρχικό
l	υγρή φάση
m	τήξη
p	σωματίδιο κλίνης
phys	physical
rad	μέγεθος που αναφέρεται στην ακτινοβολία
ref	μέγεθος αναφοράς
s	στερεά φάση
sf	διεπιφάνεια στερεού-υγρού
sup	superficial
*	αδιάστατο μέγεθος
charged	πλήρως φορτισμένη δεξαμενή

Ελληνικό Αλφάβητο

β	ρευστή φάση σε συμπαγείς κλίνες
βσ	διεπιφάνεια στερεού-ρευστού σε συμπαγείς κλίνες
σ	στερεά φάση σε συμπαγείς κλίνες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αρχίζει με την εξέταση της Αποθήκευσης Ενέργειας (ES) υπό το πρίσμα των A και B αξιωμάτων της Θερμοδυναμικής, ενώ παράλληλα διατυπώνονται τα πλεονεκτήματα εφαρμογής της ES. Στη συνέχεια γίνεται μια εισαγωγική, βιβλιογραφική επισκόπηση των Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας που έχουν προταθεί και εφαρμόζονται σε εργαστηριακή, πιλοτική ή βιομηχανική κλίμακα με στόχο την ορθολογική εκμετάλλευση της ενέργειας. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην Υπολογιστική Προσομοίωση που υιοθετήθηκε και τέλος αναλύεται ο σκοπός και η διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας.

1.1 Αποθήκευση Ενέργειας

Η διεθνής ενεργειακή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, σε συνδυασμό με τα περιορισμένα αποθέματα και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος που προκαλεί η χρήση τους, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας σε μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας. Όπως είναι γνωστό από την αρχή διατήρησης της ενέργειας (ΑΔΕ) [1], η ενέργεια δε δημιουργείται, ούτε καταστρέφεται, αλλά διατηρείται, καθώς μετατρέπεται από μια μορφή σε μια άλλη. Αυτή είναι η βασική ιδιότητα της ενέργειας που επιχειρεί να εκμεταλλευτεί η αποθήκευση: η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε περιόδους που η ζήτησή της είναι χαμηλή και να απομαστευτεί όταν είναι υψηλή.

Μπορεί σύμφωνα με την ΑΔΕ, η ενέργεια να διατηρείται, αλλά υποβαθμίζεται ποιοτικά, όπως επιβάλλει το Β' Θερμοδυναμικό Αξίωμα [2]. Κατά συνέπεια, οι διατάξεις αποθήκευσης, πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η όποια ενεργειακή απώλεια-υποβάθμιση. Οι Dincer and Rosen [3], επισημαίνουν ότι ο σωστός σχεδιασμός συστημάτων αποθήκευσης, καλείται να προσεγγίσει το πρότυπο του πετρελαίου: αυτό αποθηκεύεται για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε δεξαμενές, διατρέχει όλο τον κύκλο επεξεργασίας-διύλισης-παραϊτέρω αποθήκευσης, χωρίς να υφίσταται κάποια ποιοτική υποβάθμιση το ενεργειακό του περιεχόμενο. Κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, ειδικότερα στις περιπτώσεις αποθήκευσης θερμότητας που εστιάζει τη μελέτη της η παρούσα Διπλωματική.

Η αποθήκευση ενέργειας είναι θεμελιώδους σημασίας σε διεργασίες που [3], (α) δε συμπίπτει χρονικά η προμήθεια και η απαίτηση ενέργειας, (β) η προμήθεια ενέργειας χαρακτηρίζεται από διαλείπουσα προσφορά και (γ) η ζήτησή της είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την ενσωμάτωση τεχνολογιών ESS, είναι ποικίλα [1], [3]:

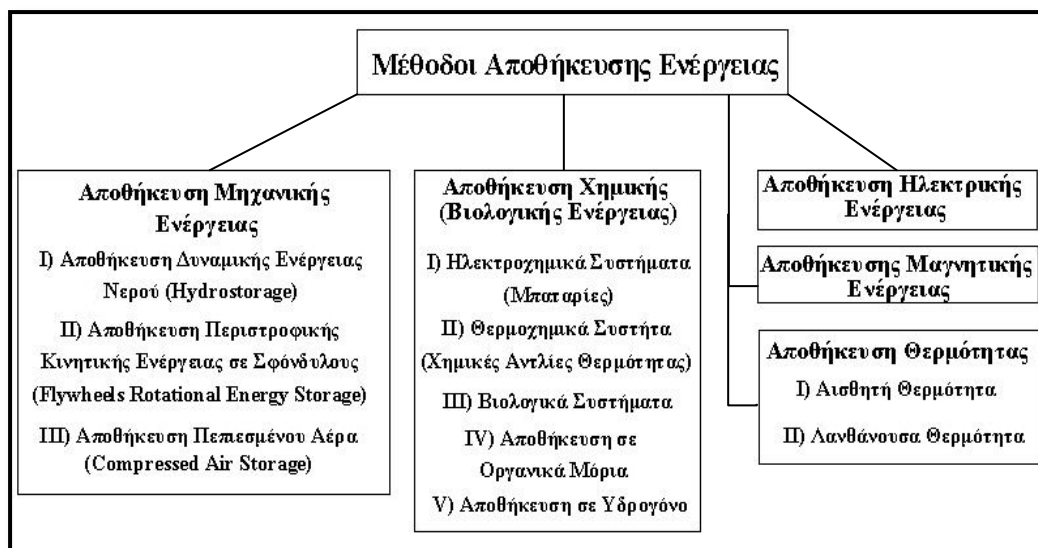
- Ελάττωση κόστους ενέργειας: λόγω των ESS, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να υποκαταστήσουν τα υψηλού κόστους ορυκτά καύσιμα, καθώς η δυνατότητα αποθήκευσης τις καθιστά βιώσιμες λύσεις.

- Ελάττωση ενεργειακής κατανάλωσης: πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους, όπως με την αξιοποίηση της μέχρι πρότινος απορριπτόμενης ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση.
- Αυξημένη ευελιξία στη λειτουργία των μονάδων: με δεδομένη την ασφάλεια που προσφέρει η αποθηκευμένη ενέργεια, μπορεί να γίνει καλύτερος προγραμματισμός των λειτουργικών συνθηκών των μονάδων.
- Ελάττωση μεγέθους μονάδων και αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους: παλαιότερης τεχνολογίας σταθμοί παραγωγής ενέργειας, χωρίς τη δυνατότητα αποθήκευσης, λειτουργούσαν με μεγάλες μονάδες, σχεδιασμένες προς ικανοποίηση φορτίων αιχμής. Ενσωμάτωση ESS, απαιτεί μονάδες μικρότερου μεγέθους, οπότε κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής παράγουν στο μέγιστο και με το πέρας τους, παράγουν και αποθηκεύουν το πλεόνασμα.
- Μείωση πάγιου κόστους και κόστους συντήρησης: απόρροια του παραπάνω πλεονεκτήματος. Η χρήση μικρότερων μονάδων επιφέρει ελάττωση στα δύο κόστη.
- Δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές διαλείπουσας προσφοράς (π.χ. αιολική, ηλιακή): χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης, τέτοιες μορφές ενέργειας θα απείχαν οποιασδήποτε τεχνικής εφαρμογής.
- Κάλυψη ενεργειακής απαίτησης περιόδων αιχμής: παραγωγή ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, αποθήκευσή της όσο διαρκεί η περίοδος αυτή και κατανάλωσή της σε περίοδο αυξημένης ζήτησης.
- Περιορισμός οικολογικού αποτυπώματος διεργασιών: μέσω της ελάττωσης ενεργειακής κατανάλωσης, της υποκατάστασης ορυκτών καυσίμων κτλ.

1.2 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

Για να γίνει εφικτή η αποθήκευση ενέργειας, απαραίτητες είναι οι διατάξεις υλοποίησής της, οι οποίες ονομάζονται Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας. Η έννοια του ESS είναι ευρεία και περιλαμβάνει τόσο το μέσο αποθήκευσης, όσο και το σύνολο του βοηθητικού εξοπλισμού του. Η ταξινόμηση των ESS που προτείνεται κατά κύριο λόγο από τη βιβλιογραφία [1], [3], τις κατηγοριοποιεί με κριτήριο την ιδιότητα (μέσο αποθήκευσης) που εκμεταλλεύεται η διάταξη για να αποθηκεύσει την ενέργεια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1. Έτσι, τα κυριότερα συστήματα που βρίσκουν εφαρμογή στην πράξη αποθηκεύουν [3]: μηχανική¹ (βιολογική), ηλεκτρική, μαγνητική ενέργεια και θερμότητα.

¹ Ενώ, λόγω του πλήθους των εφαρμογών και του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας για την αποθήκευσή του, το υδρογόνο αναφέρεται ως ξεχωριστή κατηγορία, η παρούσα ανάλυση το ταξινομεί στα χημικά ESS.



Σχήμα 1: Οι διάφορες τάξεις συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας όπως κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τους Dincer and Rosen [3].

1.2.1. Αποθήκευση σε Μηχανικές Διατάξεις

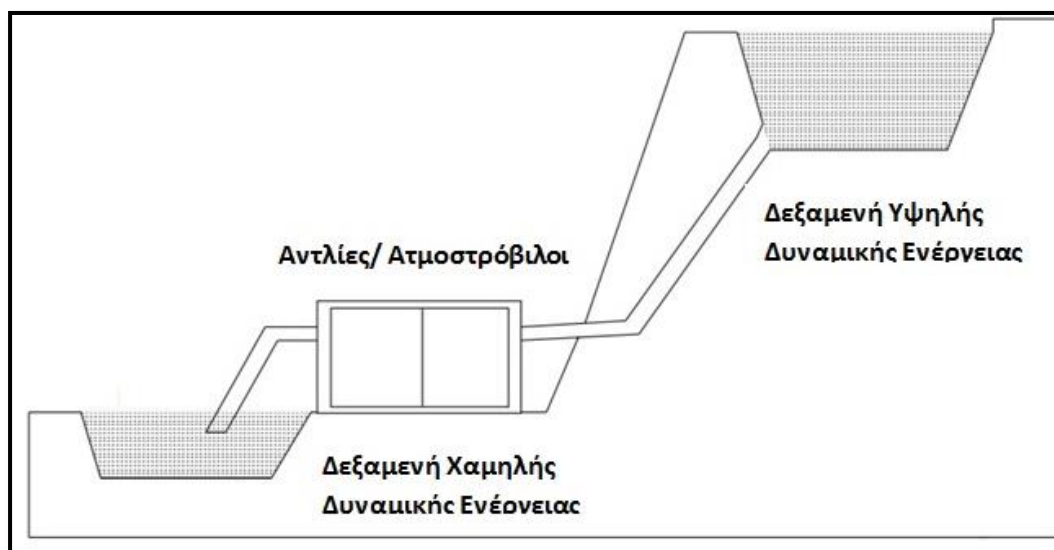
Η μηχανική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως κινητική, περιστροφική, βαρυτική δυναμική, συμπίεσης ή παραμόρφωσης ελαστικού υλικού και ενέργεια συμπίεσης αερίου [3]. Τα κυριότερα συστήματα που έχουν διαμορφωθεί είναι τα ακόλουθα:

1.2.1.1 Σύστημα Αποθήκευσης Δυναμικής Ενέργειας Νερού (potential energy storage²): η βασική ιδέα της μεθόδου, έχει να κάνει με την αποθήκευση της δυναμικής ενέργειας του νερού σε δύο δεξαμενές που βρίσκονται σε διαφορετικά μεταξύ τους ύψη (Σχήμα 2). Έτσι, κατά τη διάρκεια της νύχτας που τόσο η ζήτηση ενέργειας, όσο και η τιμή της είναι χαμηλή, το νερό αντλείται στο αντίστοιχο πηγάδι, αποκτώντας υψηλότερη δυναμική βαρυτική ενέργεια. Τη μέρα, που η ζήτηση είναι υψηλή, η δεξαμενή απελευθερώνει το περιεχόμενό της και μέσω σωληνώσεων, καταλήγει σε υδροστρόβιλους, παράγοντας ηλεκτρισμό.

Σύμφωνα με τους Kalaiselvam and Parameshwaran [1], η απόδοση της συνολικής διεργασίας κυμαίνεται μεταξύ 60-80% και ο χρόνος ζωής της διάταξης από 30-50 χρόνια. Αντίθετα, οι Dincer and Rosen [3], εκτιμούν την απόδοση ως 50% και το χρόνο ζωής ως μεγαλύτερο των 20 ετών. Η αποθηκευτική ικανότητα μιας τέτοιας διάταξης εξαρτάται [1] από την υψομετρική διαφορά των δύο πηγαδιών και τον όγκο του νερού που διακινείται. Ωστόσο, η μέθοδος μειονεκτεί ως προς τα εξής σημεία: τις γεωγραφικές προδιαγραφές που είναι δύσκολο να πληρούνται, το μεγάλο πάγιο κόστος, τη μακρόχρονη διάρκεια κατασκευής της εγκατάστασης και την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Μια σύγχρονη εναλλακτική που άρει ορισμένα

² Τα εν λόγω συστήματα εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία [1], [3], [4] με ποικίλες ονομασίες, όπως: hydrostorage, pumped storage, pumped hydroelectric storage, gravitational energy storage, pumped hydro power storage. Η απόδοσή τους στην ελληνική, γίνεται με ευθύνη του γράφοντος.

από τα προβλήματα, είναι η χρήση μιας υπέργειας και μιας υπόγειας δεξαμενής, με τη βασική ιδέα της διάταξης να παραμένει αναλλοίωτη.



Σχήμα 2: Αναπαράσταση ενός συστήματος αποθήκευσης νερού. Τις ώρες αιχμής, ρέει από σημεία υψηλής γήινης βαρυτικής δυναμικής ενέργειας προς σημεία χαμηλής.

1.2.1.2 Αποθήκευση Περιτροφικής Κινητικής Ενέργειας σε Σφονδύλους (flywheels rotational energy): το σύστημα αποθήκευσης με σφονδύλους [1], περιλαμβάνει ένα κυλινδρικό στοιχείο, τοποθετημένο πάνω σε ένα στάτορα που υποστηρίζεται από αιωρούμενο έδρανο. Ο σφόνδυλος είναι συζευγμένος με μια ηλεκτρική γεννήτρια-μηχανή, συναποτελώντας τη διάταξη αποθήκευσης. Η όλη διάταξη είναι τοποθετημένη σε χαμηλής πίεσης θάλαμο ώστε να ελαχιστοποιηθούν απώλειες ενέργειας περιστροφής λόγω τριβών. Κατά την περίοδο φόρτισης του κυκλώματος, ο σφόνδυλος περιστρέφεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα μέσω της ενεργοποίησης της ηλεκτρικής μηχανής. Κατά την αποφόρτιση, ο σφόνδυλος χρησιμοποιείται παρέχοντας ενέργεια προς τη γεννήτρια.

1.2.1.3 Αποθήκευση Πεπιεσμένου Αέρα (compressed air storage): κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης [3], ο αέρας συμπιέζεται και αποθηκεύεται σε υπόγειες δεξαμενές (πηγάδια, εγκαταλελειμένα ορυχεία) σε πιέσεις 4-8 MPa [1], ενώ κατά τις περιόδους αιχμής, θερμαίνεται, εκτόνωνεται και διέρχεται από αεριοστρόβιλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Περιοριστικοί παράγοντες εφαρμογής της τεχνικής αυτής είναι [1]: οι γεωγραφικές προδιαγραφές, το κόστος εγκατάστασης, η αδυναμία σύζευξης με άλλες εγκαταστάσεις παραγωγής (θερμικές, πυρηνικές, ανανεώσιμες) οι περιβαλλοντικοί παράγοντες λόγω της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τη χρήση καυσίμων κατά τους κύκλους συμπίεσης-εκτόνωσης. Η πρώτη και η τρίτη περίπτωση αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας χρησιμοποιούνται [4] για αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλες εγκαταστάσεις, ενώ η δεύτερη σε μεσαίου μεγέθους.

1.2.2. Αποθήκευση σε Χημικές Διατάξεις

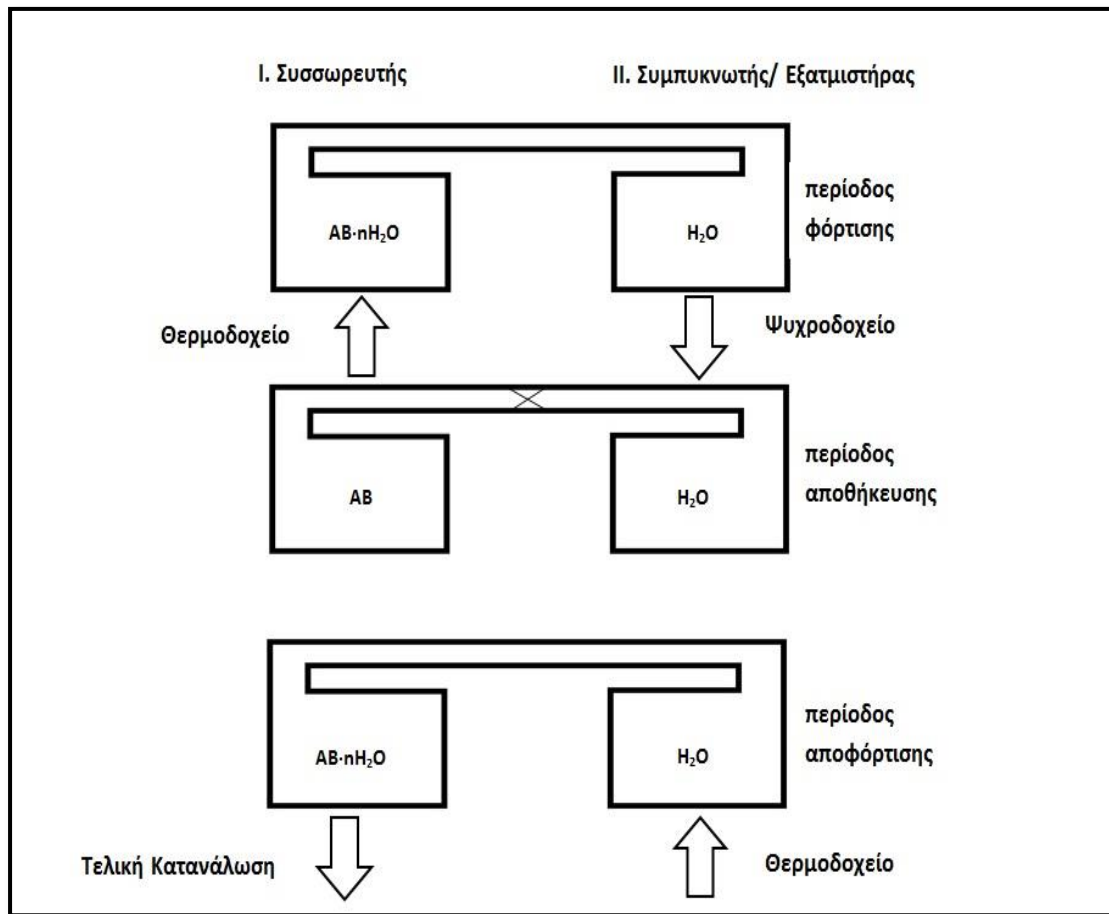
Χημική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε [3] ηλεκτροχημικά, θερμοχημικά και βιολογικά συστήματα, σε συστήματα οργανικών μορίων και ως υδρογόνο. Συνοπτικά, αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

1.2.2.1 Ηλεκτροχημικά Συστήματα-Μπαταρίες: η μπαταρία [1] αποτελείται από δύο ηλεκτροχημικά κελιά, καθένα από τα οποία περιέχει στερεό, υγρό ή κολλοειδή ηλεκτρολύτη και ένα θετικό (άνοδος) ή αρνητικό (κάθοδος) ηλεκτρόδιο. Κατά την αποφόρτιση της μπαταρίας, ηλεκτροχημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στα δύο ηλεκτρόδια, οπότε εξασφαλίζεται η ροή ηλεκτρονίων προς εξωτερικό κύκλωμα. Αντιστρέφοντας την ηλεκτροχημική αντίδραση με παροχή εξωτερικής τάσης στα ηλεκτρόδια, η μπαταρία επαναφορτίζεται. Προς χρήση υπάρχουν διάφορα είδη μπαταριών [3], όπως Pb-οξέος, νικελίου (Ni-Zn, Ni-Fe, Ni-Cd) ιόντων Li, NaS, κάθε μια από τις οποίες προκρίνεται για συγκεκριμένη εφαρμογή, αφού διαφέρουν ως προς τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους (απόδοση, κόστος, κύκλος ζωής, θερμοκρασία λειτουργίας, αποθηκευτική ικανότητα).

1.2.2.2 Θερμοχημικά Συστήματα-Χημικές Αντλίες Θερμότητας: η αρχή λειτουργίας της διάταξης είναι η ακόλουθη [3]: δυο θάλαμοι μεταξύ τους συνδεδεμένοι, με τον πρώτο να λειτουργεί ως συσσωρευτής ενέργειας, περιέχει κάποιο άλας με την ικανότητα να απορροφά ατμούς και ο δεύτερος, ο συμπυκνωτής/εξατμιστήρας, περιέχει το λειτουργούν ρευστό, συνήθως νερό (Σχήμα 3). Το σύστημα φορτίζεται με παροχή θερμότητας προς το θάλαμο I, οπότε γίνεται εκρόφηση των ατμών από το άλας και αυτοί οδηγούνται στο θάλαμο II όπου συμπυκνώνονται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αποδίδεται η λανθάνουσα ενθαλπία συμπύκνωσης. Όταν το σύστημα αποφορτίζεται, θερμότητα προσδίδεται στο θάλαμο II, που τώρα λειτουργεί ως εξατμιστήρας, μέρος του ρευστού εξατμίζεται, αποδίδοντας με τη σειρά του τη λανθάνουσα ενθαλπία εξάτμισης. Ταυτόχρονα, απελευθερώνεται θερμότητα με την απορρόφηση του ατμού από το άλας. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι ο θάλαμος I χρησιμεύει ως χώρος αποθήκευσης θερμότητας, ενώ ο θάλαμος II για την αποθήκευση ψύχους. Οι διατάξεις αυτές υστερούν ως προς [3] τις παράπλευρες αντιδράσεις και τη χαμηλή σταθερότητα των εργαζόμενων υλικών, το χαμηλό βαθμό απόδοσής τους και τη χαμηλή απόδοσή τους σε ενέργεια.

1.2.2.3 Βιολογικά Συστήματα: πρόκειται για αποθήκευση χημικής ενέργειας [3] μέσω βιολογικών διεργασιών σε βιομόρια και κρίνεται κατάλληλη για μακροπρόθεσμη αποθήκευση. Ως μέσα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται οι βιομπαταρίες [1], η λειτουργία των οποίων δε διαφέρει από την αντίστοιχη των κλασικών ηλεκτροχημικών μπαταριών. Συνήθως, η αποθήκευση σε βιολογικές διατάξεις επιτυγχάνεται με την ενζυμική διάσπαση βιομορίων προς παραγωγή γλυκόζης. Αφού ληφθεί γλυκόζη, περαιτέρω διάσπασή της δίνει πρωτόνια και

ηλεκτρόνια, που οδηγούνται στην κάθοδο και την άνοδο της βιομπαταρίας αντίστοιχα. Η ροή πρωτονίων και ηλεκτρονίων τροφοδοτεί το σύστημα με ηλεκτρικό ρεύμα. Έχουν χαμηλή απόδοση και δεν χρησιμοποιούνται εκτεταμένα.



Σχήμα 3 : Διάταξη χημικής αντλίας θερμότητας (θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης). Φαίνονται οι διαφορετικοί θάλαμοι που δημιουργούνται, καθώς και η λειτουργία τους στις διαφορετικές φάσεις της αποθήκευσης.

1.2.2.4 Συστήματα Αποθήκευσης σε Οργανικά Μόρια (organic molecular storage):

αποτελεί μια προσπάθεια αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας εναλλακτική των θερμικών και φωτοβολταϊκών συλλεκτών [3]. Μέσω διεργασιών όπως η φωτοσύνθεση, μπορεί η ηλιακή ακτινοβολία να αποθηκευτεί υπό μορφή χημικής ενέργειας. Η έρευνα εστιάζει το ενδιαφέρον της στην ανακάλυψη κυκλικών διαδικασιών του σχήματος [3]:



1.2.2.5 Αποθήκευση Υδρογόνου: η αποθήκευση υδρογόνου πραγματοποιείται κυρίως σε κυψέλες καυσίμου. Το σύστημα αποτελείται από τρεις επιμέρους διεργασίες/στοιχεία: την ηλεκτρόλυση, την κυψέλη καυσίμου και τη δεξαμενή υδρογόνου. Κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης, καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για

την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Το κελλί καυσίμου χρησιμοποιεί το παραγόμενο υδρογόνο και οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα, αποδίδοντας ηλεκτρισμό μέσω οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων, που καλύπτει τις ανάγκες κατά τις ώρες αιχμής. Ο ρυθμιστής ελέγχει τη διαθεσιμότητα υδρογόνου κατά τις ώρες αιχμής. Βασικό μειονέκτημα της αποθήκευσης υδρογόνου συνιστά το υψηλό κόστος των δεξαμενών [3], ενώ στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται το καθαρό και αποδοτικό καύσιμο [1].

1.2.3 Αποθήκευση σε Ηλεκτρικές Διατάξεις

Ηλεκτρικά στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας είναι οι πυκνωτές και οι νεώτερες τροποποιήσεις τους (supercapacitors, hypercapacitors). Η ενέργεια αποθηκεύεται στους πυκνωτές [5] υπό μορφή αρνητικών και θετικών ηλεκτρικών φορτίων, σε παράλληλες πλάκες που χωρίζονται από διηλεκτρικό υλικό. Η αποθηκευτική ικανότητα ενός πυκνωτή, που ονομάζεται χωρητικότητα, εξαρτάται από την επιφάνεια των πλακών, τη μεταξύ τους απόσταση και διαπερατότητα του διηλεκτρικού. Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται τόσο σε εφαρμογές συνεχούς, όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος. Ωστόσο, η χρήση των πυκνωτών συνεχούς, περιορίζεται πλέον σε βραχυχρόνια αποθήκευση φορτίων και μάλιστα όχι μεγάλης δυναμικότητας. Εξελίξεις του αρχικού προτύπου των πυκνωτών, παρουσιάζουν σημαντικές βελτιώσεις σε χαρακτηριστικά όπως η διαπερατότητα, η επιφάνεια των πλακών και η επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού. Έτσι, στους supercapacitors, χρησιμοποιείται πορώδης ηλεκτρολύτης και ως αποτέλεσμα αυξάνεται η επιφάνεια των πλακών του πυκνωτή και συνεπώς η αποθηκευτική του ικανότητα. Παράλληλα, η ευελιξία που προσφέρει η χρήση του εκάστοτε πορώδους ηλεκτρολύτη, δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού πυκνωτών με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (χωρητικότητα, λειτουργικές συνθήκες, μέγεθος).

1.2.4 Αποθήκευση σε Μαγνητικές Διατάξεις

Η αποθήκευση ενέργειας με τη χρήση μαγνητικού πεδίου, καθίσταται δυνατή με την εφαρμογή τεχνολογίας αποθήκευσης υπεραγωγίσιμης μαγνητικής ενέργειας (superconducting magnetic energy storage technology) [1]. Βασίζεται στη ροή συνεχούς ρεύματος μέσω υπεραγωγίσιμου σπειροειδούς καλωδίου, το οποίο έχει υποστεί κρυογενική κατεργασία σε θερμοκρασία χαμηλότερη της κρίσιμης. Περιλαμβάνει τρία τμήματα: την υπεραγωγίσιμη σπείρα, το σύστημα κρυογενικής ψύξης και τη μονάδα μετασχηματισμού ρεύματος (ανορθωτές/αντιστροφείς). Κατά τη φόρτιση, εφαρμόζεται τάση, φορτία αποθηκεύονται στη σπείρα, τα οποία λόγω υπεραγωγιμότητας, συνεχίζουν να ρέουν και μετά την παύση εφαρμογής της τάσης. Κατά την αποφόρτιση, ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία και η ενέργεια αποδίδεται πίσω στο δίκτυο. Σε χρήση σήμερα βρίσκονται τέτοια συστήματα δυναμικότητας 1kWh [6]. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται η μεγάλη απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 80-90% [3], οι αμελητέες απώλειες ενέργειας (λόγω υπεραγωγιμότητας τα φορτία ρέουν «ανενόχλητα») που αντιστοιχούν στις

ανορθώσεις/αντιστροφές του ρεύματος και η δυνατότητα άμεσης ανάκτησης της αποθηκευμένης ενέργειας. Κύριο μειονέκτημα συνιστά το υψηλό κόστος [1], [3] (λόγω της κρυογενικής ψύξης).

1.2.5 Αποθήκευση Θερμότητας³

Το παρόν αποτελεί το κύριο αντικείμενο μελέτης της Διπλωματικής Εργασίας, οπότε αναλυτική εξέτασή του θα γίνει κυρίως στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν. Πέραν της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, προς την οποία προσανατολίστηκε η προσπάθεια αυτή, η αισθητή θερμότητα, συνιστά την άλλη όψη του ίδιου νομίσματος. Γενικότερα, οι διεργασίες αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, συνοδεύονται πάντοτε από την αποθήκευση και τμήματος αισθητής θερμότητας γύρω από τα θερμοκρασιακά όρια αλλαγής φάσης. Κατά συνέπεια, στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν, αναπόφευκτα, θα γίνεται διαρκής αναφορά στις δύο μορφές αποθήκευσης θερμότητας, η ανάλυση της αποδοτικότητας των οποίων καθίσταται δυνατή με εφαρμογή των νόμων της μεταφοράς θερμότητας και της μηχανικής των ρευστών.

1.3 Υπολογιστική Προσομοίωση

Η μελέτη και ο σχεδιασμός των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας, καθώς και η ανάλυση των σχετικών διεργασιών, απαιτούν μια σύνθεση της γνώσης ροής ρευστών και της μεταφοράς θερμότητας. Η περιγραφή των φαινομένων αυτών γίνεται μέσω συστημάτων μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, η αναλυτική επίλυση των οποίων είναι εφικτή μόνο σε περιπτώσεις απλών ροών σε απλές γεωμετρίες. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε ρεαλιστικά προβλήματα αυξημένης πολυπλοκότητας, τα αναλυτικά μοντέλα είναι αδύνατο να επιλυθούν.

Η πρώτη ιστορικά προσέγγιση για την επίλυση ρεαλιστικών προβλημάτων σχεδιασμού, είναι τα μονοδιάστατα μοντέλα φαινομένων μεταφοράς με τη χρήση εμπειρικών παραμέτρων για τη σύμπτωση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι υπολογιστικές δυνατότητες της εποχής εκείνης ήταν περιορισμένες και έτσι η ενσωμάτωση της πολυπλοκότητας σε εμπειρικούς συντελεστές υπήρξε μονόδρομος. Χρησιμοποιούνται ωστόσο ακόμα και σήμερα [7], [8] παρέχοντας αξιοσημείωτη συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις αξιολόγησης ετήσιας λειτουργίας εγκαταστάσεων.

Η λύση που προκρίνει η επιστημονική κοινότητα είναι εκείνη της αριθμητικής επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τα θερμικά και ροϊκά φαινόμενα που αναπτύσσονται στις διατάξεις αποθήκευσης θερμότητας. Αποτελεί την πλέον σύγχρονη αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, η οποία λίγες δεκαετίες

³ Η έννοια της αποθήκευσης θερμότητας αναφέρεται καταχρηστικά, καθώς ως γνωστόν [2], η θερμότητα αποτελεί ενέργεια διεργασίας που βρίσκεται σε συνεχή ροή και δεν αποθηκεύεται σε ένα μέσο. Ωστόσο, διατηρείται ο όρος που προέρχεται από τη διεθνή βιβλιογραφία και αναφέρεται ως Thermal Energy Storage ή Heat and Cold Storage.

νωρίτερα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί [9]. Επιτυγχάνεται μέσω προσομοιώσεων με τη χρήση εμπορικών ή μη κωδίκων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD). Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται [10], όχι μόνο δίνουν ακριβή και λεπτομερή περιγραφή των αντίστοιχων πεδίων, αλλά επιπλέον οπτικοποιούνται, παρέχοντας διαισθητική κατανόηση των φαινομένων. Ακόμη, επιδέχονται παραμετρική ανάλυση, δίνοντας τη δυνατότητα βελτιστοποίησης μιας διάταξης. Επιπλέον, ελαττώνουν το κόστος σχεδιασμού, καθώς τα CFD πειράματα είναι φθηνότερα των αντίστοιχων σε πραγματικές διατάξεις. Ωστόσο, βασικό τους μειονέκτημα είναι η απαίτηση υψηλής υπολογιστικής ισχύος.

1.4 Σκοπός της Εργασίας

Η εν λόγω εργασία, στοχεύει στην περιγραφή των ροϊκών και θερμικών φαινομένων που παρατηρούνται σε μια από τις πλέον διαδεδομένες τεχνικές αποθήκευσης και συγκεκριμένα την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας σε υλικά αλλαγής φάσης (PCM) υπό μορφή συμπαγούς κλίνης. Η πολυπλοκότητα της διεργασίας γίνεται φανερή, ήδη κατά την προσπάθεια μοντελοποίησής της και πηγάζει από: α) την ύπαρξη πορώδους φάσης και β) την ενσωμάτωση της αλλαγής φάσης. Η προσθήκη των δύο αυτών στοιχείων στο σύστημα των εξισώσεων συνέχειας, ορμής και θερμότητας, αποτελεί δυναμικά εξελισσόμενο κλάδο των φαινομένων μεταφοράς.

Στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας, αρχικά έγινε βιβλιογραφική επισκόπηση των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας και ειδικότερα λανθάνουσας μορφής. Μελετήθηκαν τα διάφορα μοντέλα πορώδους φάσης και ο τρόπος ενσωμάτωσής τους στις εξισώσεις ορμής και θερμότητας. Όσον αφορά στην αλλαγή φάσης, από τα υποψήφια μοντέλα της βιβλιογραφίας επελέγη αυτό της φαινόμενης θερμοχωρητικότητας (apparent heat capacity) καθώς χαρακτηρίζεται από καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, ευστάθεια και χαμηλό χρόνο υπολογιστικής επεξεργασίας. Για την επιβεβαίωση της υπολογιστικής διαδικασίας, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα αποφόρτισης θερμικού κυκλώματος λανθάνουσας από τη βιβλιογραφία [11]. Η απόκλιση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων από τα πειραματικά δεδομένα, τόσο στην παρούσα εργασία, όσο και από πλευράς των συγγραφέων του άρθρου, είναι ενδεικτικά της πολυπλοκότητας και της αδυναμίας πλήρους περιγραφής του φαινομένου.

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση εμπορικού λογισμικού CFD, συγκεκριμένα με το COMSOL Multiphysics 3.4 και το ANSYS Fluent 14.0. Πέραν της λήψης ικανοποιητικής λύσης ως προς τα πειραματικά δεδομένα, έγινε παραμετρική ανάλυση ως προς τα χαρακτηριστικά της κλίνης και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του συστήματος. Επιπλέον, ακολουθώντας τη συνήθη πρακτική που τηρείται κατά την επίλυση προβλημάτων CFD, ελέγχθηκε η ανεξαρτησία πλέγματος και χρονικού βήματος επίλυσης.

1.5 Διάρθρωση της Εργασίας

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, το παρόν, επιχειρείται μια εισαγωγή στην ES και τα κυριότερα ESS, καταγράφεται η σημασία και οι δυνατότητες που προσφέρει η υπολογιστική προσομοίωση στα φαινόμενα μεταφοράς και κατατίθεται ο σκοπός της εργασίας. Το δεύτερο κεφάλαιο εξετάζει διεξοδικά την αποθήκευση θερμότητας και τα TESS από τεχνική και οικονομική άποψη, υπογραμμίζοντας τα ειδικότερα χαρακτηριστικά της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LHTES). Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (μοντέλα ορμής, θερμότητας, αλλαγής φάσης) σε πορώδη μέσα, όπως είναι οι συμπαγείς κλίνες. Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στην υπολογιστική μοντελοποίηση των εξισώσεων ροϊκών φαινομένων και θερμότητας, εστιάζοντας στις μεθόδους των Πεπερασμένων Όγκων και Πεπερασμένων Στοιχείων, με τις οποίες ANSYS Fluent και COMSOL Multiphysics αντίστοιχα, επιλύουν το σύστημα των εξισώσεων διατήρησης. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων, η σύγκρισή τους με τα πειραματικά δεδομένα, η παραμετρική ανάλυση και η ανεξαρτησία πλέγματος και χρονικού βήματος. Η εργασία ολοκληρώνεται με το έκτο κεφάλαιο, όπου γίνεται καταγραφή των συμπερασμάτων που προκύπτουν και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Αποθήκευση Θερμότητας⁴

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δύο μορφές θερμότητας που μπορούν να αποθηκευτούν. Αρχικά, παρατίθενται ορισμένες πληροφορίες που αφορούν γενικά στα TESS, τοποθετώντας τα έτσι στο χάρτη των ESS. Ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, ενώ το κύριο μέρος του κεφαλαίου, αναλώνεται στην εξέταση των LHTESS. Τέλος, γίνεται αναφορά στις διατάξεις συμπαγών κλινών και τις εφαρμογές τους.

2.1 Συστήματα Αποθήκευσης Θερμότητας (TES)

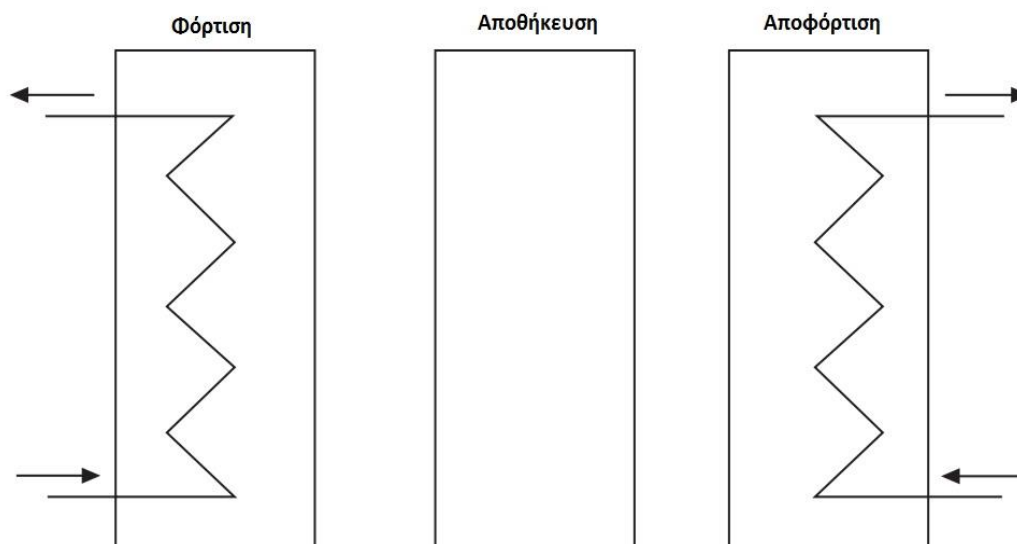
Η TES αποτελεί την αρχαιότερη προσπάθεια αποθήκευσης ενέργειας που επιχειρήθηκε από τον άνθρωπο. Πράγματι, ήδη από τα προϊστορικά χρόνια [3], είναι γνωστή η συγκομιδή μεγάλων κομματιών πάγου το χειμώνα, τα οποία διατηρούνταν όσο διαρκούσαν οι ψυχροί μήνες του έτους και χρησιμοποιούνταν για τη συντήρηση τροφής κατά το καλοκαίρι. Γίνεται φανερό λοιπόν η αρχική ανάγκη που απαιτείται να καλύψει η TES· πρόκειται για τη γεφύρωση του χρονικού χάσματος μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης της ενέργειας.

Η αλματώδης πρόοδος της τεχνολογίας και ο αειφόρος σχεδιασμός που επιβάλλει η νομοθεσία, δίνει τη δυνατότητα στα TESS να διεισδύσουν [1], [3] με τεράστια δυναμική στον οικιακό και βιομηχανικό τομέα και την αγορά ενέργειας. Πλέον, η TES είναι απαραίτητη και σε περιπτώσεις α) μη μόνιμης ή διαλείπουσας παροχής ενέργειας, β) συστημάτων που κυριαρχούν κυκλικές θερμικές διεργασίες (π.χ. ηλιακή ηλεκτροπαραγωγή, γ) υπερ/υπο διαστασιολογημένου εξοπλισμού παροχής-κατανάλωσης ενέργειας, δ) που το κόστος σε ώρες αιχμής δε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο.

Η βασική ιδέα πίσω από τα TESS είναι απλή και συνίσταται [3] στην αποθήκευση θερμότητας ή ψύχους μέσω θέρμανσης, ψύξης, τήξης, πήξης, ατμοποίησης ή συμπύκνωσης κατάλληλου μέσου για όσο χρονικό διάστημα κρίνεται απαραίτητο (φόρτιση θερμικού κυκλώματος). Όταν η θερμότητα ζητηθεί προς κατανάλωση, αντιστρέφεται η διεργασία και αυτή απομαστεύεται (αποφόρτιση θερμικού κυκλώματος). Ο θεμελιώδης στόχος της διεργασίας αποθήκευσης είναι να διατηρήσει τη θερμοδυναμική διαθεσιμότητα της αποθηκευμένης ενέργειας και να επιτρέψει την εξαγωγή της στα εγγύτερα θερμοκρασιακά επίπεδα με αυτά της αποθήκευσης [10]. Λόγω των επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης [12], τα TESS σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν υπό συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου (θερμοκρασία, ενέργεια φόρτισης-αποφόρτισης θερμικού κυκλώματος,

⁴ Οι θερμοχημικές μέθοδοι αποθήκευσης συγκαταλέγονται από πολλούς ερευνητές [1], [12] στις θερμικές μεθόδους αποθήκευσης. Στην παρούσα εργασία, τηρείται το ταξινομικό σύστημα των Dincer, Rosen [3], που τις κατατάσσει στις χημικές μεθόδους, όπως τονίζεται στο πρώτο κεφάλαιο.

συνθήκες περιβάλλοντος). Σημειώνεται ότι για να θεωρείται πλήρης η διεργασία αποθήκευσης, πρέπει να έχουν πραγματοποιηθεί από μια φορά τουλάχιστον αυτά τα τρία στάδια: φόρτιση, αποθήκευση, αποφόρτιση (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Πλήρης αποθηκευτικός κύκλος σε διάταξη TES. Κατά τα στάδια της φόρτισης και της αποφόρτισης, η θερμότητα μεταφέρεται προς και από το μέσο αποθήκευσης μέσω της θερμαντικής σπείρας. Σε αυτή μπορεί είτε να ρέει το εργαζόμενο ρευστό, είτε να υπάρχει ηλεκτρική αντίσταση.

Το ποσό θερμότητας που μπορεί να αποθηκευτεί και να απομαστευτεί, καθώς και η διάρκεια αποθήκευσης [12], εξαρτώνται από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του μέσου αποθήκευσης, το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του HTF και του μέσου αποθήκευσης, τη μηχανική και χημική σταθερότητα του υλικού αποθήκευσης, τη συμβατότητα υλικού αποθήκευσης και λοιπών υλικών (π.χ. υλικού κατασκευής δεξαμενής αποθήκευσης) την πλήρη αντιστρεπτότητα της διεργασίας για ορισμένο αριθμό κύκλων, τη μεγάλη διάρκεια ζωής και τις χαμηλές απώλειες όσο διαρκεί η αποθήκευση. Τονίζεται λοιπόν ότι η ικανότητα αποθήκευσης δεν αποτελεί κάποια εγγενή ιδιότητα του υλικού αποθήκευσης, αλλά ιδιότητα της διεργασίας, εξαρτώμενη από τις λειτουργικές συνθήκες της εκάστοτε εφαρμογής [12].

Είναι προφανές, ότι όλα αυτά τα χαρακτηριστικά είναι δύσκολο να συνδυαστούν μεταξύ υλικών αποθήκευσης, διεργασίας μεταφοράς θερμότητας και κατασκευής, οπότε κατά το σχεδιασμό γίνεται συμβιβασμός ανάμεσα στα σημαντικότερα κριτήρια σχεδιασμού. Αυτά, σύμφωνα με τους Cabeza et al. [12], είναι: το μέγιστο θερμικό φορτίο, η μεταβολή της ενθαλπίας κατά την αποθήκευση και η δυνατότητα ολοκλήρωσης της διάταξης αποθήκευσης με το υπόλοιπο σύστημα (εναλλάκτες θερμότητας, σωληνώσεις, ηλιακούς συλλέκτες κτλ.). Για το λόγο αυτό απαραίτητη είναι μια περαιτέρω διάκριση των TESS.

Για την κατανόηση ενός ολοκληρωμένου TESS, εισάγεται η έννοια του ενεργητικού και παθητικού μέσου αποθήκευσης. Ως ενεργητικό μέσο αποθήκευσης [1], [12], ορίζεται στο σύστημα εκείνο που περιλαμβάνει μηχανικώς υποβοηθούμενα μέρη για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ μέσου και πηγής θερμότητας. Αντίθετα, παθητικά, καλούνται τα συστήματα που η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται χωρίς τη χρήση τέτοιων μηχανικών διατάξεων. Όπως είναι επόμενο, βασικός μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας στα ενεργητικά συστήματα είναι η εξαναγκασμένη συναγωγή, ενώ στα παθητικά η φυσική [12].

Σε περαιτέρω διάκριση των ενεργητικών μέσων, ορίζονται τα άμεσα και τα έμμεσα ενεργητικά συστήματα. Στα άμεσα το εργαζόμενο ρευστό λειτουργεί και ως μέσο αποθήκευσης. Έτσι, το ρευστό αυτό ρέει εντός του θερμικού κυκλώματος και όταν πρέπει να αποθηκευτεί, οδηγείται σε μονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης. Αντίθετα, στα έμμεσα συστήματα, λειτουργούν ρευστό και υλικό αποθήκευσης είναι διαφορετικά μέσα. Το ρευστό κυκλοφορεί στη διάταξη και διέρχεται μέσω της δεξαμενής αποθήκευσης, όπου ανταλλάσσει θερμότητα με στερεό υλικό αποθήκευσης, συνήθως πέτρες, χαλίκια, τσιμέντο [12].

Μεγάλο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται διεθνώς, παράγεται και διακινείται υπό μορφή θερμότητας [3]. Για το λόγο αυτό, τα TESS, απέκτησαν ποικίλες εφαρμογές, ορισμένες από τις οποίες σχολιάζονται παρακάτω:

- Ηλεκτροπαραγωγή μέσω ηλιακών θερμικών συλλεκτών [7]: με τη χρήση διατάξεων δύο δεξαμενών ή θερμοκλίνης, αποθηκεύεται θερμότητα που συγκεντρώνεται από ηλιακούς συλλέκτες και μεταφέρεται από κατάλληλο εργαζόμενο ρευστό (συνήθως νερό ή λάδι). Κατά την απομάστευση, θερμαίνεται ρεύμα ατμού εντός ατμοπαραγωγού και αφού οδηγηθεί σε ατμοστρόβιλο, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια εξοικονομώντας ορυκτά καύσιμα.
- Ηλιακή παραγωγή ζεστού νερού για οικιακή χρήση [13]: με παρόμοιο τρόπο, κατά τις ώρες διαθεσιμότητας ηλιακής ακτινοβολίας, το νερό θερμαίνεται και αποθηκεύεται σε μονωμένη δεξαμενή. Είναι διαθέσιμο για άμεση κατανάλωση όταν ζητηθεί, ακόμα και κατά τις νυχτερινές ώρες. Παρατηρείται εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ηλιακή οικιακή θέρμανση και ψύξη [4]: με τη χρήση κατάλληλου θερμικού κυκλώματος που περιλαμβάνει ως κύριο εξοπλισμό θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες, δεξαμενή αποθήκευσης λειτουργούντος ρευστού και αντλία θερμότητας, μπορεί να εξασφαλιστεί η θέρμανση/ ψύξη ενός χώρου. Η διαδικασία είναι απλή και προσομοιάζει τις παραπάνω, ωστόσο απαιτεί πιο περίπλοκο μηχανολογικό εξοπλισμό. Εξοικονομείται ηλεκτρική ενέργεια και ορυκτά καύσιμα. Ο βαθμός απόδοσης τέτοιων ηλιακών κυκλωμάτων είναι μικρός, οπότε δεν βρίσκουν ακόμα ευρεία εφαρμογή.

- Αποθήκευση ηλεκτρισμού σε ώρες χαμηλής ζήτησης [13]: για την εξοικονόμηση χρηματικών πόρων, μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται υπό μορφή θερμότητας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και καταναλώνεται τις ώρες αιχμής. Πέραν του πλεονεκτήματος της ελάττωσης του λειτουργικού κόστους, βασικό πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι η λειτουργία του συστήματος σε μόνιμες συνθήκες και χαμηλότερα από τη μέγιστη δυναμικότητα.
- Βιοϊλικά και βιοϊατρικές εφαρμογές [14]: αναπτύσσονται επίδεσμοι και ίνες, με μικροενθυλακωμένα PCM. Λόγω της ενσωμάτωσης των υλικών αυτών, μπορεί η θερμοκρασία του δέρματος να παραμείνει σταθερή και ανεπηρέαστη από αυτή του περιβάλλοντος. Χρησιμοποιούνται σε θεραπείες εγκαυμάτων. Επιπλέον, καινοτόμες έρευνες [14], αποκαλύπτουν ότι η παρουσία PCM σε υλικά τεχνητών ιστών, συμβάλλει στην ταχύτερη και ομαλότερη αποδοχή τους από τους φυσικούς ιστούς.

Ο παραπάνω κατάλογος αναλύει ενδεικτικά ορισμένες μόνο από τις εφαρμογές που βρίσκει η αποθήκευση θερμότητας. Για λόγους οικονομίας του κειμένου θα αναφερθούν επιγραμματικά ορισμένες αξιοσημείωτες ακόμη εφαρμογές: ψύξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ψύξη μηχανών εσωτερικής καύσης, προθέρμανση καταλυτικών μετατροπών, ενεργειακή αυτονομία διαστημικών σκαφών, παρασκευή ινών υφασμάτων για διαστημικές αποστολές, ενίσχυση δομικών υλικών για καθυστέρηση της ανάφλεξης [14], επίτευξη ομοιομορφίας θερμοκρασίας κατά τη συσκευασία προϊόντων της βιομηχανίας τροφίμων [15], αύξηση χρόνου λειτουργίας ηλιακών ξηραντήρων [14], [15].

Η πληθώρα των εφαρμογών των TESS, σκιαγραφεί τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση τους [1]:

- Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων
- Ελάττωση των εκπομπών GHG
- Επέκταση των δυνατοτήτων συστημάτων θέρμανσης-ψύξης, ευελιξία λειτουργίας διατάξεων [3]
- Περιορισμός του μεγέθους συστημάτων θέρμανσης-ψύξης
- Αύξηση της απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης
- Μείωση των απορριπτόμενων θερμών-ψυχρών ρευμάτων
- Δυνατότητα ολοκληρωμένου ενεργειακού σχεδιασμού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, γεωθερμική, ηλιακή) την αποθήκευση και επαναδιανομή της προς παραγωγή ενέργειας
- Ελάττωση του βοηθητικού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για την κάλυψη έκτακτων θερμικών και ψυκτικών φορτίων
- Ελάχιστη επιπλέον περιβαλλοντική επιβάρυνση κατά τους κύκλους αποθήκευσης
- Ελάττωση πάγιου, λειτουργικού και κόστους συντήρησης εγκαταστάσεων

ενώ ως μειονεκτήματα καταγράφονται οι περιπτώσεις που [16]:

- το προφίλ ψύξης συνήθως δε χαρακτηρίζεται από έντοντες διακυμάνσεις μεταξύ ζήτησης αιχμής και μέσης ζήτησης.
- δε διαφέρει σημαντικά η χρέωση ημερήσιας και νυχτερινής χρήσης του ηλεκτρισμού
- δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση δεξαμενών αποθήκευσης

Για την αποθήκευση θερμότητας έχουν προταθεί διάφορα ταξινομικά συστήματα, όπως α) χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας αποθήκευσης, β) μηχανισμός αποθήκευσης θερμότητας [6] και γ) διάρκειας αποθήκευσης. Ο συνηθέστερος τρόπος διάκρισης είναι ο δεύτερος, με επιμέρους κατηγορίες του τις α και β (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Συνοπτική παρουσίαση των κατηγοριών αποθήκευσης θερμότητας με κριτήριο το μηχανισμό αποθήκευσης σε μικροσκοπικό επίπεδο, όπως περιγράφεται από τους Kalaiselvam and Parameshwaran [1].

	Αισθητή	Λανθάνουσα
<i>Μέσο Αποθήκευσης</i>	Νερό, πέτρες, χώμα	Οργανικές, ανόργανες ενώσεις
<i>Πλεονεκτήματα</i>	Φιλικά προς το περιβάλλον, φθηνά υλικά αποθήκευσης Απλές διατάξεις Εύκολος έλεγχος Αξιοπιστία	Αποθήκευση θερμότητας υπό σταθερή θερμοκρασία Υψηλότερη αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με την αισθητή
<i>Μειονεκτήματα</i>	Χαμηλή αποθηκευτική ικανότητα Μεγάλος όγκος συστημάτων αποθήκευσης Υψηλό κόστος κατασκευής Μεγάλες απώλειες	Αδυναμία λειτουργίας υπό πολλαπλούς θερμικούς κύκλους Διάβρωση Υψηλό κόστος υλικών αποθήκευσης
<i>Παρούσα Κατάταση</i>	Μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις	Χαρακτηρισμός υλικών, εργαστηριακή πιλοτική έρευνα
<i>Μελλοντική Έρευνα</i>	Ελάττωση των θερμικών απωλείων Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή ηλεκτρικής	Υλικά μεγαλύτερης ενθαλπίας αλλαγής φάσης Βελτίωση των θερμικών κύκλων και της θερμικής απόκρισης του κυκλώματος

Η αποθήκευση θερμότητας, όσον αφορά στο μηχανισμό που ακολουθεί σε μικροσκοπικό επίπεδο, μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικές μορφές. Οι μορφές αυτές επηρεάζουν τις σχεδιαστικές παραμέτρους του TESS, αλλά ταυτόχρονα εξαρτώνται και από διαφορετικά μεγέθη. Στις επόμενες δύο ενότητες, ακολουθεί πλήρης περιγραφή των δύο αυτών μορφών TES.

2.2 Αποθήκευση Αισθητής Θερμότητας (SHTES)

2.2.1 Χαρακτηρισμός Θερμικού Κυκλώματος SHTES

Η SHTES, περιλαμβάνει την αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ενός στερού ή υγρού⁵. Η αποθηκευμένη ενέργεια ισοδυναμεί με τη μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια του μέσου αποθήκευσης, όπως υπαγορεύει η εξίσωση (2.1):

$$Q = \int_{T_{init}}^{T_f} m C_p dT \quad (2.1)$$

Η κύρια σχεδιαστική παράμετρος περιγραφής της αποθηκευτικής ικανότητας διατάξεων SHTES, είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα C_p . Συμφώνα με τη Θερμοδυναμική [2], εκφράζει το ποσό θερμότητας Q που είναι απαραίτητο να ανταλλάξει ένα μέσο με το περιβάλλον του, για να μεταβληθεί η θερμοκρασία ορισμένης μάζας m του μέσου κατά ΔT . Από πλευράς TES, η ιδιότητα αυτή, φανερώνει την ικανότητα ενός μέσου να αποθηκεύσει θερμότητα. Συνεπώς, υλικά με υψηλές τιμές της C_p , είναι καλοί υποψήφιοι για TES.

Ιδιαίτερο τεχνικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η SHTES σε όσο το δυνατό μικρότερο όγκο, διότι έτσι περιστέλλεται το κόστος (πάγιο, λειτουργικό, συντήρησης) της μονάδας αποθήκευσης και ελαττώνονται οι απώλειες αποθηκευμένης θερμότητας. Είναι ανάγκη δηλαδή, να γίνει αναγωγή της αποθηκευτικής ικανότητας του μέσου αποθήκευσης από μονάδες μάζας ($C_p \sim [J/kg \cdot K]$) σε μονάδες όγκου $[J/m^3 \cdot K]$. Για το λόγο αυτό, συνηθέστερη παράμετρος σχεδιασμού των SHTESS είναι το γινόμενο $\rho \cdot C_p$, που εκφράζει την αποθηκευτική ικανότητα στις κατάλληλες διαστάσεις [6].

Η δεύτερη σχεδιαστική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη και χαρακτηρίζει το ρυθμό απομάστευσης της αποθηκευμένης θερμότητας, είναι η θερμική διαχυτότητα του υλικού αποθήκευσης. Αυτή ορίζεται από την εξίσωση (2.2) ως εξής:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2.2)$$

⁵ Οι ατμοί, αν και μπορούν και αυτοί να αποθηκεύσουν με τον ίδιο τρόπο αισθητή θερμότητα, η χρήση τους αποφεύγεται, καθώς δεν κρίνονται κατάλληλοι από τεχνικής άποψης. Συγκεκριμένα, κατά την μετάβαση από την υγρή στην ατμώδη φάση αυξάνεται σημαντικά ο όγκος και η πίεση με συνέπεια την ανάγκη μεγαλύτερων και πιο ανθεκτικών δεξαμενών αποθήκευσης.

Όσο υψηλότερη η τιμή της, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα μεταφοράς της αποθηκευμένης θερμότητας με μεγαλύτερο ρυθμό. Επομένως, πέραν της εκτίμησης της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας, απαραίτητη είναι και αυτή της θερμικής διαχυτότητας α .

Από την ερμηνεία της (2.1), προκύπτει το εξής ερώτημα: είναι πάντοτε ίδια η ποιότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται [3]; Παρατηρώντας την εξ. 2.1, γίνεται φανερό ότι το ίδιο ποσό θερμότητας μπορεί να αποθηκευτεί, αν για παράδειγμα θερμανθεί 1t νερού κατά 0,86K ή αν θερμανθούν 10kg νερού κατά 86K. Προφανώς, η δεύτερη περίπτωση είναι πιο ελκυστική από πλευράς ποιότητας ενέργειας, καθώς οι περισσότερες εφαρμογές απαιτούν μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές. Η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως ανάλυση σύμφωνα με το Β' Θερμοδυναμικό Αξίωμα και δε θα μας απασχολήσει περαιτέρω.

2.2.2 Υλικά SHTES

Η SHTES, μπορεί να πραγματοποιηθεί σε στερεά ή υγρά μέσα. Ωστόσο, η πορεία που θα ακολουθήσει η αποθήκευση διαφέρει κατά περίπτωση [6]. Έτσι, αν επιλεγεί στερεό υλικό, αυτό θα παραμένει αδρανές εντός της δεξαμενής αποθήκευσης έως ότου το λειτουργούν ρευστό διέλθει από τη δεξαμενή και μεταφέρει θερμότητα στο στερεό. Κατά την απομάστευση το ρευστό, θα 'παραλάβει' τη θερμότητα που αποθηκεύτηκε στο στερεό. Αντίθετα, αν το μέσο αποθήκευσης είναι ρευστό, τότε οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης, παραμένει για όσο διάστημα διαρκεί αυτή και απομαστεύεται προς τελική κατανάλωση.

Γενικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν υλικά υποψήφια για χρήση σε SHTES, είναι οι ακόλουθες:

- Υψηλή ειδική και ογκομετρική θερμοχωρητικότητα
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- Μη εκρηκτικότητα, μη αναφλεξιμότητα στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- Θερμική αξιοπιστία και σταθερότητα για πολλαπλούς κύκλους λειτουργίας
- Χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής
- Συμβατότητα, μη τοξικότητα, μη διαβρωτικότητα με τα υλικά κατασκευής δεξαμενών και σωληνώσεων
- Χαμηλό κόστος
- Χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά τη χρήση τους

Ως μέσα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, χρησιμοποιούνται συνήθως υλικά με υψηλή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, όπως νερό, αέρας, λάδια, αλκοόλες, πέτρες, άμμος, χώμα, τούβλα, σίδηρος. Η επιλογή του υλικού αποθήκευσης καθορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή, ενώ η φυσική του κατάσταση επηρεάζει το εύρος των εφαρμογών. Χαρακτηριστικά των συνηθέστερων υλικών SHTES φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 2):

Πίνακας 2: Υλικά που χρησιμοποιούνται σε SHTESS. Το νερό παρουσιάζει εξαιρετική ογκομετρική θερμοχωρητικότητα και για το λόγο αυτό κυριαρχεί σε εφαρμογές SHTES (Sharma et al. [4], Cabeza et al. [12]).

Υλικό Αποθήκευσης	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική Θερμοχωρητικότητα (J/kg·K)	Ογκομετρική Θερμοχωρητικότητα (10 ⁶ J/m ³ ·K)
Άργιλος	1.458	879	1,28
Τούβλο	1.800	837	1,51
Άμμος	2.200	712	1,57
Ξύλο	700	2.390	1,67
Τσιμέντο	2.000	880	1,76
Γυαλί	2.710	837	2,27
Αλουμίνιο	2.710	896	2,43
Σίδερο	7.900	452	3,57
Ατσάλι	7.840	465	3,68
Χαλίκι	2.050	1.840	3,77
Μαγνητίτης	5.177	752	3,89
Νερό	988	4.182	4,17
Caloria HT43	867	2.200	1,91
Λάδι Μηχανής	888	1.880	1,67
Αιθανόλη	790	2.400	1,90
Προπανάλη	800	2.500	2,00
Βουτανόλη	808	3.000	2,42

2.2.2.1 Στερεά Υλικά SHTES

Τα στερεά υλικά αξιοποιούνται [3] κατά κύριο λόγο στη θέρμανση χώρων (κλίνες με πέτρες ή τσιμέντο) και στην υψηλής θερμοκρασίας ηλιακή τεχνολογία (μέταλλα, κράματα). Πλεονεκτούν, καθώς α) δεν διατρέχεται κίνδυνος διαρροής του υλικού αποθήκευσης στις υψηλές θερμοκρασίες, β) έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και σε υψηλές θερμοκρασίες και γ) δεν υπάρχει κίνδυνος τήξης ή εξαέρωσής τους. Μειοντεκτούν, διότι: α) με εξαίρεση τα μέταλλα έχουν χαμηλή ογκομετρική χωρητικότητα, β) σημειώνονται μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας από τα υγρά αποθηκευτικά μέσα στη μακροπρόθεσμη αποθήκευση, γ) έχουν αυξημένο κόστος συντήρησης εξοπλισμού και δ) υπάρχει μεγαλύτερη ευκολία δημιουργίας θερμικής στρωμάτωσης (βλ. Θερμοκλίνες 2.2.3.2).

Ειδικότερα, οι πέτρες, η άμμος και τα τούβλα προτιμώνται λόγω χαμηλού κόστους, αλλά απορρίπτονται λόγω χαμηλής ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας. Η άμμος και τα τούβλα χαρακτηρίζονται επιπλέον από μεγάλη πτώση πίεσης στις δεξαμενές και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα. Μέταλλα, κράματα και οξειδία μετάλλων προτιμώνται λόγω των άριστων θερμικών τους ιδιοτήτων (ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα) αλλά το αυξημένο σε σχέση με το νερό και άλλα στερεά μέσα κόστος τους, λειτουργεί ως ανασταλτικός παράγοντας.

2.2.2.2 Υγρά Μέσα SHTES

Η SHTES σε υγρές ουσίες περιορίζεται από τα σημεία ή περιοχές αλλαγής φάσης τους [6]. Για το λόγο συναντάται η διάκριση ανάμεσα σε υγρά χαμηλών, μέσων και υψηλών θερμοκρασιών. Συχνά, εφαρμόζεται αύξηση της πίεσης στις δεξαμενές αποθήκευσης, ώστε να αρθεί η πιθανότητα ατμοποίησης του υγρού. Όπως είναι προφανές, αυτό αυξάνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος του συστήματος [16]. Συνήθη υγρά αποθήκευσης χαμηλών και μέσων θερμοκρασιών είναι το νερό, λάδια και τήγματα αλάτων, ενώ στις υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται κυρίως τήγματα αλάτων και λάδια. Νεώτερες έρευνες προτείνουν χρήση υγρών μετάλλων και ιοντικών υγρών [12].

Τα τήγματα αλάτων προτιμώνται, επειδή [12]: α) βρίσκονται στην υγρή φάση για μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος, β) έχουν χαμηλή τάση ατμών, γ) χαμηλό ιξώδες, δ) υψηλή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, ε) ορισμένα από αυτά έχουν χαμηλό κόστος. Μειονεκτούν εξαιτίας της διαβρωτικότητάς τους απέναντι σε μεταλλικά υλικά. Από την πλευρά τους, τα λάδια, ενώ πλεονεκτούν ως προς τη σταθερότητά τους σε πολλαπλούς κύκλους σε υψηλές θερμοκρασίες, μειονεκτούν ως προς α) τη χαμηλή τους πυκνότητα, β) την εύκολη ανάφλεξή τους, γ) την υψηλή τάση ατμών τους. Οι δύο αυτές κατηγορίες υλικών, κυριαρχούν στην ηλιακή ηλεκτροπαραγωγή, είτε ως εργαζόμενα ρευστά, είτε ως μέσα αποθήκευσης.

Η τεχνολογία υγρών μετάλλων και ιοντικών υγρών αποτελεί μια νέα πρόταση προσανατολισμένη σε εφαρμογές ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής. Η εισαγωγή υγρών μετάλλων (αλκάλια, βαρέα και μέταλλα χαμηλού σημείου τήξης) φιλοδοξεί να αυξήσει την απόδοση των μονάδων και να ελαττώσει το κόστος παραγωγής, λόγω της ικανότητας αποθήκευσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η χρήση τους [12] περιορίζεται από α) την παρουσία ανεπιθύμητων ενδόθερμων αντιδράσεων με το νερό (αλκάλια), β) χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και ογκομετρική θερμοχωρητικότητα (βαρέα) και γ) από τη διαβρωτικότητα και το κόστος παραγωγής τους (μέταλλα χαμηλού σημείου τήξης). Αντίστοιχα, στα ιοντικά υγρά, ελπιδοφόρες κρίνονται ιδιότητες όπως α) το θερμοκρασιακό εύρος υγρής φάσης, β) η υψηλή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, γ) η χαμηλή τάση ατμών και δ) η υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα. Βρίσκονται σε επίπεδο έρευνας ως προς τη χρήση τους σε SHTESS και δεν έχουν χαρακτηριστεί πλήρως οι ιδιότητές τους.

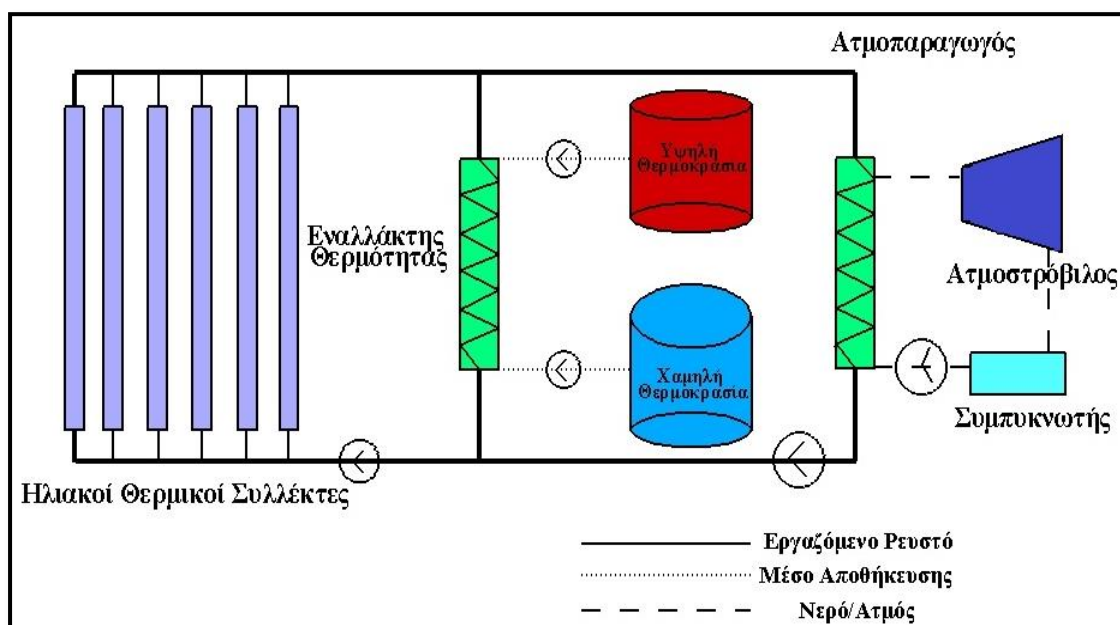
Συνήθως κυριαρχεί το νερό λόγω [6]: α) του χαμηλού του κόστους, β) της υψηλής ογκομετρικής χωρητικότητάς του, γ) του χαμηλού του ιξώδους και δ) της ύπαρξής του σε αφθονία. Ωστόσο, μειονεκτεί λόγω α) της διαβρωτικότητάς του απέναντι σε ορισμένα υλικά, β) του χαμηλού χρόνου ζωής των αποθηκευτικών διατάξεων νερού, γ) του περιορισμού του σε εφαρμογές χαμηλών και μέσων θερμοκρασιών εξαιτίας της τιμής του σημείου ζέσεώς του και δ) της υψηλής τάσης ατμών του. Χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε εφαρμογές οικιακής θέρμανσης και ψύξης.

2.2.3 Τεχνολογίες SHTES

Η αξιοποίηση των SHTESS, οδήγησε στην ανάπτυξη τριών διαφορετικών διατάξεων αποθήκευσης. Συνιστούν ουσιαστικά τις κύριες κατηγορίες που εφαρμόζονται και εμφανίζονται σε διάφορες παραλλαγές και επιμέρους χαρακτηριστικά (π.χ. άμεσης ή έμμεσης λειτουργίας).

2.2.3.1 Σύστημα Πολλαπλών Δεξαμεμών

Η περίπτωση αυτή, προηγείται χρονικά των υπολοίπων και περιλαμβάνει δύο δεξαμεμές αποθήκευσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Μπορεί να αποτελείται από μία δεξαμενή πολλαπλών θαλάμων ή σύστημα δύο και πλέον δεξαμεμών [16]. Κατά τη φόρτιση, το ρευστό οδηγείται από τη δεξαμενή I αρχικά στον εναλλάκτη θερμότητας, οπότε απορροφά ή απάγει θερμότητα. Στη συνέχεια, οδηγείται στη δεξαμενή II και αποθηκεύεται. Για την ανάκτηση του θερμικού του περιεχομένου, το ρευστό απομαστεύεται και χρησιμοποιείται από τον καταναλωτή.

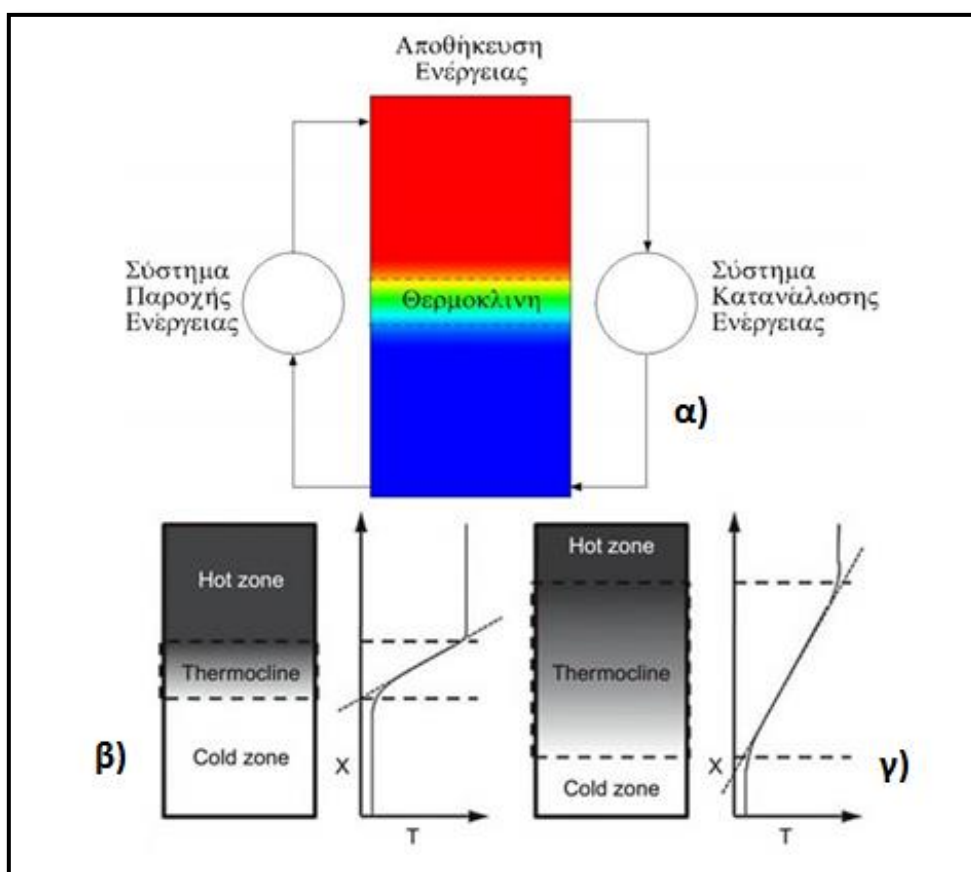


Σχήμα 5: Σύστημα δύο δεξαμεμών προς ηλιακή παραγωγή ηλεκτρισμού. Το εργαζόμενο ρευστό θερμαίνεται από τους θερμικούς συλλέκτες και μέσω εναλλάκτη μεταφέρει τη θερμότητά του στο μέσο αποθήκευσης. Αυτό προσάγεται σε ατμοπαραγωγό και ο παραγόμενος ατμός οδηγείται σε ατμοστρόβιλο προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Αφού ολοκληρωθεί ο πλήρης κύκλος φόρτισης-αποθήκευσης-αποφόρτισης, το ρευστό οδηγείται και πάλι στην αρχική δεξαμενή. Παρατηρείται ότι το ρευστό καταλαμβάνει είτε τη δεξαμενή I, είτε τη δεξαμενή II. Πάντοτε δηλαδή μια από τις δύο δεξαμενές παραμένει άδεια. Η παρατήρηση αυτή, αποτελεί τη βασική ιδέα πίσω από τα συστήματα θερμοκλινών. Οι διατάξεις πολλαπλών δεξαμενών, υστερούν ως προς τη δέσμευση δύο δεξαμενών, αυξάνοντας το κόστος της εγκατάστασης.

2.2.3.2 Θερμοκλίνες ή Δεξαμενές Θερμικής Διαστρωμάτωσης

Πρόκειται για την τεχνολογία που γνωρίζει την ευρύτερη αποδοχή και τις περισσότερες εφαρμογές [3], [16] (Σχήμα 6). Διακρίνονται σε έμμεσης και άμεσης αποθήκευσης σύμφωνα με τα κριτήρια που διατυπώθηκαν στην ενότητα 2.1. Υπενθυμίζεται, ότι στις θερμοκλίνες έμμεσης SHTES, το εργαζόμενο ρευστό μεταφέρει θερμότητα σε στερεά σωματίδια που αποτελούν το αποθηκευτικό μέσο. Στην άμεση SHTES το νερό που κυκλοφορεί στη διάταξη, αποθηκεύει θερμότητα παραμένοντας σε δεξαμενή αποθήκευσης για όσο διάστημα χρειαστεί [17].



Σχήμα 6: (α) Αναπαράσταση δεξαμενής θερμικής διαστρωμάτωσης όπως γίνεται από τον Καλούδη [10]. Με κόκκινο εικονίζεται η περιοχή υψηλής και με μπλε η περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας. Στο ενδιάμεσο της εικόνας με τις έντονες χρωματικές διακυμάνσεις, φαίνεται η θερμοκλίνη. β) θερμοκλίνη μικρού και γ) θερμοκλίνη μεγάλου πάχους (Dincer and Rosen [3]).

Το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς κατέχουν οι θερμοκλίνες άμεσης αποθήκευσης με εργαζόμενο μέσο το νερό [3]. Για το λόγο αυτό, η περιγραφή της λειτουργίας τους θα γίνει χρησιμοποιώντας ως πρότυπο τις δεξαμενές άμεσης αποθήκευσης νερού, χωρίς βλάβη της γενικότητας.

Η λειτουργία των θερμοκλινών βασίζεται στη διαδικασία της διαστρωμάτωσης. Κατά τη φόρτιση, προς αποθήκευση για παράδειγμα θερμότητας (αντ. ψύχους), το ψυχρό (θερμό) ρευστό, εξέρχεται από τον πυθμένα (κορυφή) της δεξαμενής και θερμαίνεται (ψύχεται) μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Επιστρέφει στο πάνω (κάτω) μέρος της δεξαμενής σε υψηλότερη (χαμηλότερη) θερμοκρασία. Στην κορυφή (πυθμένα) της δεξαμενής, εμφανίζεται μια περιοχή ανάμειξης θερμού και ψυχρού ρευστού. Με την είσοδο ολοένα και περισσότερου θερμού ρευστού στη δεξαμενή, η περιοχή αυτή κινείται σταδιακά προς τα κάτω (πάνω). Η περιοχή αυτή, στην οποία παρατηρούνται έντονες βαθμίδες θερμοκρασίας και πυκνότητας και διαχωρίζει το θερμό από το ψυχρό τμήμα, εμποδίζοντας τη μεταξύ τους ανάμειξη, ονομάζεται θερμοκλίνη [10]. Από το σχηματισμό της και έπειτα, κινείται κατακόρυφα προς τα κάτω (πάνω), καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Κατά την εκφόρτιση, η θερμοκλίνη κινείται προς τα πάνω (κάτω). Ανάλογα, σχηματίζεται θερμοκλίνη έμμεσης SHTES.

Ο αρχικός σχηματισμός της θερμοκλίνης είναι πρωταρχικής σημασίας για την απόδοση της δεξαμενής, οπότε απαιτείται προσεκτική επιλογή του διαχύτη προσαγωγής του ρευστού [10]. Επιδιώκεται πάντοτε ο σχηματισμός της λεπτότερης δυνατής θερμοκλίνης, ωστόσο το πάχος της σε δεξαμενές νερού κυμαίνεται μεταξύ 0,3 και 0,6 m [16]. Δεξαμενές οριζόντιου προσανατολισμού, δε συνιστώνται για αποθήκευση μέσω θερμικής διαστρωμάτωσης, λόγω του μεγέθους του υγρού που βρίσκεται εντός της θερμοκλίνης.

Οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε μια θερμοκλίνη, διαφέρουν καθώς εξαρτώνται από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η διάταξη. Στη στατική κατάσταση κυριαρχεί η φυσική συναγωγή, ενώ κατά τη φόρτιση-εκφόρτιση, η μικτή συναγωγή. Ορισμένοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας, όπως η φυσική συναγωγή από τη δεξαμενή προς το περιβάλλον, η αγωγή θερμότητας από τα ψυχρά στα θερμά στρώματα του ρευστού και η ανάμειξη μεταξύ εισερχόμενων/εξερχόμενων ρευμάτων, αποδομούν τη θερμοκλίνη. Ειδικότερα για τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, θα γίνει εκτενής αναφορά παρακάτω (κεφ. 3).

2.2.3.3 Συστήματα Λαβυρίνθου

Προέκυψαν από τον κατασκευαστικό τομέα στην Ιαπωνία και χρησιμοποιούν δίκτυο σωληνώσεων διερχόμενο από το εσωτερικό των θεμελίων των κτιρίων. Τα θεμέλια, εσωτερικά αποτελούνται από μεμονωμένα δοκάρια και κενό χώρο, έχοντας στο εξωτερικό περίβλημα κονιάματος. Οι σχεδιαστές των κτιρίων, αποφάσισαν να τοποθετήσουν σωληνώσεις που θα διατρέχουν τους διαφόρους θαλαμίσκους που δημιουργούνται στο πλέγμα του εσωτερικού των θεμελίων. Έχουν το πλεονέκτημα

του χαμηλού κόστους, καθώς απουσιάζουν οι δεξαμενές αποθήκευσης, εντούτοις μειονεκτούν ως προς τη χαμηλή τους απόδοση και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται σπάνια [18].

2.3 Αποθήκευση Λανθάνουσας Θερμότητας (LHTES)

2.3.1 Χαρακτηρισμός Θερμικού Κυκλώματος LHTES

Η LHTES, βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών να απορροφούν και να απελευθερώνουν θερμότητα όταν υφίστανται κυκλικές αλλαγές φάσης. Η θερμότητα αυτή που εκλύεται ή απορροφάται κατά την αλλαγή φάσης, ονομάζεται λανθάνουσα και τα υλικά αποθήκευσής της, υλικά αλλαγής φάσης. Βασικό της πλεονέκτημα είναι η αποθήκευση τεράστιων, συγκριτικά με την SHTES, ποσοτήτων ενέργειας υπό σταθερή σχεδόν θερμοκρασία. Αποθηκεύουν 5-14 φορές [4], [13] περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τα SHTESS (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Σύγκριση των ιδιοτήτων υλικών αποθήκευσης αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας ως προς το φορτίο αποθήκευσης, τη συνολική μάζα και τον όγκο του υλικού (Kalaiselvam and Parameshwaran [1]).

Ιδιότητα	Υλικό Αποθήκευσης			
	Πέτρες	Νερό	Οργανικά PCM	Ανόργανα PCM
Πυκνότητα (kg/m^3)	2.240	1.000	800	1.600
Ειδική θερμοχωρητικότητα ($kJ/kg \cdot K$)	1,0	4,2	2,0	2,0
Λανθάνουσα ενθαλπία τήξης (kJ/kg)	-	330	190	230
Ογκομετρική λανθάνουσα ενθαλπία τήξης (MJ/m^3)	-	330	152	368
Μάζα υλικού αποθήκευσης για 10^9 J (kg)	67.000	16.000	5.300	4.350
Όγκος υλικού αποθήκευσης για 10^9 J (m^3)	30	16	6,6	2,7
Σχετική μάζα υλικών αποθήκευσης	15	4	1,25	1,0
Σχετικός όγκος υλικών αποθήκευσης	11	6	2,5	1,0

Η έρευνα σε αυτήν την επιστημονική περιοχή, ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και συνεχίζεται με αμείωτο ενδιαφέρον, λόγω της ποικιλίας των εφαρμογών και των λύσεων που παρέχει σε τεχνικά προβλήματα.

Η LHTESS σε PCM, εντοπίζεται ως μεταβολή της ενθαλπίας των δύο φάσεων και υπολογίζεται αλγεβρικά [13], [19] όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.3:

$$Q = m \cdot a_m \cdot \Delta h_m \quad (2.3)$$

Τα μεγέθη a_m και Δh_m , αποτελούν το υγρό κλάσμα και την ειδική λανθάνουσα ενθαλπία τήξης. Τα μεγέθη αυτά αναφέρονται στην αλλαγή φάσης στερεό \leftrightarrow υγρό που αποτελεί την πιο ενδιαφέρουσα από τεχνικής σκοπιάς περίπτωση όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Το υγρό κλάσμα, μέγεθος απαραίτητο για το χαρακτηρισμό της ικανότητας αποθήκευσης των PCM, ορίζεται ως εξής [3]:

$$a_m = \begin{cases} 0, T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, T_s \leq T \leq T_l \\ 1, T > T_l \end{cases} \quad (2.4)$$

Πρόκειται για πολύ σημαντικό μέγεθος κατά τη μοντελοποίηση διεργασιών αλλαγής φάσης με αριθμητικές μεθόδους [19]. Διαισθητικά, μπορεί να ορισθεί ως η ποσότητα του υλικού που βρίσκεται στην υγρή φάση, προς τη συνολική ποσότητα του υλικού αλλαγής φάσης, χωρίς ωστόσο να αποτελεί αυστηρό μαθηματικό ορισμό. Το υγρό κλάσμα, όπως ορίζεται στην (2.4), ενσωματώνεται στις εξισώσεις θερμότητας δίνοντας λύσεις πιο πρόσφορες από πλευράς χρόνου υπολογιστικής επεξεργασίας σε σύγκριση με άλλες, όπως τις μεθόδους κινούμενου πλέγματος [3].

Το τμήμα της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται και ύστερα αποδίδεται υπό λανθάνουσα μορφή, συνοδεύεται στις τεχνικές εφαρμογές και από θερμότητα που αποθηκεύεται ως αισθητή. Αυτό συμβαίνει, επειδή σε μια διάταξη αποθήκευσης τα PCM, δε διατηρούν τη θερμοκρασία τους συνεχώς σταθερή στο σημείο ή την περιοχή αλλαγής φάσης. Κατά συνέπεια, η LHTESS απαιτεί μεταβολή της αρχικής θερμοκρασίας του υλικού στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης μέσω αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, την αλλαγή φάσης και ακολούθως, την αποθήκευση του όποιου πλεονάσματος θερμικής ενέργειας και πάλι ως αισθητή. Αλγεβρικά [14]:

$$Q = \int_{T_{init}}^{T_s} m C_p dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_l}^{T_f} m C_p dT \quad (2.5)$$

Τα LHTESS, πρέπει να περιλαμβάνουν πάντοτε τα τρία ακόλουθα επιμέρους στοιχεία και διατάξεις [3]:

- τα PCM, δηλαδή τα υλικά που υφίστανται την αλλαγή φάσης εντός της επιθυμητής θερμοκρασιακής περιοχής, που αποτελούν το μέσο αποθήκευσης θερμότητας
- υλικό ενθυλάκωσης στο οποίο αποθηκεύονται τα PCM

- διάταξη μεταφοράς θερμότητας από την πηγή θερμότητας στα PCM

Αναφορικά με την ενθυλάκωση, είναι απαραίτητη κατά την αποθήκευσης LHTES, καθώς α) διατηρεί το PCM εντός του κελύφους ενθυλάκωσης, αποτρέποντας τη διαρροή του στον περιβάλλοντα χώρο και β) αυξάνει τη διαθέσιμη επιφάνεια για εναλλαγή θερμότητας και κατά συνέπεια το ρυθμό μεταφοράς της από το εργαζόμενο ρευστό προς το αποθηκευτικό μέσο. Η διάταξη μεταφοράς θερμότητας, μεταδίδει την προς αποθήκευση ενέργεια είτε απευθείας στα PCM (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες) είτε με τη χρήση ενδιάσμεσου λειτουργούντος ρευστού.

2.3.2 Επιλογή Αλλαγής Φάσης

Η συστηματική μελέτη των LHTESS και κατά συνέπεια των PCM, διεξάγεται τα τελευταία 40 χρόνια. Έχουν εξεταστεί διάφορες κατηγορίες υλικών [14], όπως ένυδρα άλατα, παραφίνες, λιπαρά οξέα, ευτηκτικές οργανικές και μη ουσίες και πολυμερή. Καρπός της μελέτης αυτής, υπήρξε η ταξινόμηση των PCM σε διάφορες κατηγορίες με κριτήρια όπως:

- Θερμοκρασιακή περιοχή αλλαγής φάσης: διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής θερμοκρασίας, ανάλογα με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM. Στη βιβλιογραφία, δεν έχουν αποκρυσταλλωθεί τα εύρη της καθεμιάς κατηγορίας. Έτσι, οι [14], ορίζουν ως χαμηλής τα LHTESS με αλλαγή φάσης χαμηλότερη των 15°C, μέσης την περιοχή 15-90°C και ως υψηλής αυτά με θερμοκρασία αλλαγής φάσης μεγαλύτερη των 90°C. Άλλοι [3], θεωρούν χαμηλής τα LHTESS με περιοχή αλλαγής φάσης έως 100 °C, μέσης έως 200 °C και υψηλής μεγαλύτερη των 200 °C. Η χρήση της ορολογίας αυτής απαιτεί λοιπόν προσοχή.

- Είδος αλλαγής φάσης: διακρίνονται σε μεταβάσεις στερεού↔υγρού, υγρού↔ατμού, στερεού↔στερεού και στερεού↔ατμού. Τα περισσότερα LHTESS χρησιμοποιούν PCM που υφίστανται διαρκείς κύκλους αλλαγής φάσης από στερεό↔υγρό, λίγες εφαρμογές βρίσκουν τα LHTESS στερεού↔στερεού, ενώ τα αντίστοιχα υγρού↔ατμού και στερεού↔ατμού είναι περιορισμένα.

- I. Στερεό↔Υγρό: αποτελεί την ευρύτερα διαδεδομένη τεχνολογία LHTES. Προσφέρει μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ή ψύχους (υψηλή τιμή της Δh_m) μικρή μεταβολή του όγκου και της πίεσης κατά την τήξη (συνήθως μικρότερη του 10% για τον όγκο) [20]. Ωστόσο, παρουσιάζει και μειονεκτήματα, τα οποία θα εξεταστούν αναλυτικά στην αναφορά που θα γίνει στα PCM της κατηγορίας αυτής.
- II. Στερεό↔Στερεό: παρουσιάζουν χαμηλότερη μεταβολή ενθαλπίας κατά την αλλαγή φάσης από την πρώτη περίπτωση. Κατέχουν το δεύτερο μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά των PCM, η χρήση τους όμως είναι σπάνια σε σύγκριση με τη μετάβαση στερεό↔υγρό. Πλεονεκτήματά τους είναι η πολύ μικρή μεταβολή στον όγκο και το γεγονός ότι δεν απαιτείται ενθυλάκωση [14].

- III. Υγρό \leftrightarrow Ατμός: η κυκλική μετάβαση από την υγρή στην ατμώδη φάση, προσφέρει συνήθως τη μεγαλύτερη ενθαλπία αλλαγής φάσης. Συνεπώς, ευνοείται από ενεργειακής άποψης η χρήση τέτοιου είδους PCM. Η περιορισμένη χρήση της οφείλεται σε ανασταλτικούς παράγοντες όπως η μεγάλη μεταβολή του όγκου και της πίεσης κατά την εξαέρωση του υγρού. Έτσι, το PCM στην υγρή φάση θα έπρεπε να καταλαμβάνει μικρό όγκο του υλικού ενθυλάκωσης, ώστε η εκτόνωση του ατμού να πραγματοποιείται χωρίς προβλήματα. Η αύξηση ακόμη της πίεσης, θα απαιτούσε μηχανικώς ενισχυμένα περιβλήματα του υλικού ενθυλάκωσης, οδηγώντας σε αυξημένο κόστος, απώλειες θερμότητας και ελάττωση του δυναμικού αποθήκευσης ανά μονάδα συνολικού όγκου [14].
- IV. Στερεό \leftrightarrow Ατμός: παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή ενθαλπίας αλλαγής φάσης, αλλά ταυτόχρονα και τις μεγαλύτερες μεταβολές σε όγκο και πίεση κατά την ατμοποίηση.

2.3.3 Υλικά Αλλαγής Φάσης

Πολλά υλικά εξετάζονται με στόχο την εκμετάλλευσή τους ως PCM κατά τη μετάβαση στερεό \leftrightarrow υγρό. Καθεμιά από τις επιμέρους οικογένειες υλικών, παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που τα καθιστούν κατάλληλα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Σε πρώτο επίπεδο, διακρίνονται σε οργανικά και ανόργανα PCM, τα οποία μπορούν να συνδυαστούν υπό μορφή ευτηκτικού μίγματος. Τα οργανικά PCM, χωρίζονται είτε σε μικρού και μεγάλου μοριακού βάρους [14], είτε σε παραφινικά και μη παραφινικά [4]. Η συζήτηση που ακολουθεί βασίζεται στην κατηγοριοποίηση των [14]:

- Παραφίνες: πρόκειται συνήθως για n-παραφίνες, δηλαδή ευθύγραμμης αλυσίδας κορεσμένους υδρογονάνθρακες, με γενικό μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} . Ευρεία χρήση γνωρίζουν οι παραφίνες με $n > 15$, που βρίσκονται σε στερεά φάση σε θερμοκρασία δωματίου και έχουν εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης 23-67°C [14]. Όσο μεγαλύτερο το μήκος της αλυσίδας τους, τόσο περισσότερο αυξάνει η θερμοκρασία και η ενθαλπία τήξης. Αποτελούν τα PCM με τη μεγαλύτερη διάδοση, αν και μειονεκτούν ως προς το κόστος τους σε σύγκριση με άλλα, όπως π.χ. τα ένυδρα άλατα.

Στα πλεονεκτήματά [4] τους συγκαταλέγονται: α) η απουσία φαινομένων αποκλίνουσας τήξης, β) η χημική σταθερότητα και αδράνεια (αναφέρονται αντιδράσεις τους με O_2 οπότε είναι απαραίτητη η ενθυλάκωσή τους [4]), γ) η σταθερότητα έπειτα από πολλούς κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης (1000-2000 πλήρεις θερμοκινητικούς κύκλους), δ) η υψηλή ενθαλπία τήξης, ε) η απουσία θερμικής υστέρησης, στ) η συμβατότητα με μεταλλικά υλικά ενθυλάκωσης, ζ) η μη τοξικότητα απέναντι στο περιβάλλον [14].

Ως μειονεκτήματα [4], αναφέρονται α) η χαμηλή θερμική τους αγωγιμότητα, β) η μη συμβατότητά τους με πλαστικά υλικά ενθυσάλκωσης, γ) υψηλή μεταβολή όγκου κατά την τήξη, δ) η αναφλεξιμότητά τους και ε) η απουσία συγκεκριμένου σημείου τήξης (καθώς οι εμπορικά διαθέσιμες παραφίνες είναι συνήθως μίγματα).

- Λιπαρά Οξέα: έχουν γενικό μοριακό τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ και χρησιμοποιούνται ως PCM σε εμπορική και βιομηχανική κλίμακα λόγω των κατάλληλων θερμικών και κινητικών τους χαρακτηριστικών. Οι ιδιότητές τους είναι παρόμοιες των παραφινών. Έχουν υψηλότερη ενθαλπία τήξης από τις παραφίνες (45-210kJ/kg) ακριβές σημείο τήξης (-5-71°C) [23], ενώ το κόστος τους είναι 2-3 φορές μεγαλύτερο των παραφινών [5]. Προτείνονται για PCM σε χαμηλής θερμοκρασίας LHTEs.

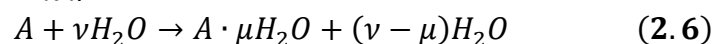
Πλην αυτών, σε εργαστηριακό επίπεδο έχουν δοκιμαστεί και άλλες ενώσεις όπως αλκοόλες (παρασκευή ναοσύνθετων αλκοολών ως εμπορικής χρήσης PCM), εστέρες (κυρίως εστέρες λιπαρών οξέων), καθώς και μίγματα οργανικών ουσιών χαμηλού μοριακού βάρους. Γενικώς, τα μη παραφινικά οργανικά PCM προέρχονται από πολλές διαφορετικές ομόλογες σειρές και είναι επόμενο οι ιδιότητές τους να διαφέρουν. Στα κοινά τους χαρακτηριστικά συγκαταλέγονται [6]: α) η μεγάλη ενθαλπία τήξης, β) η απουσία θερμικής υστέρησης, γ) η μακροπρόθεσμη σταθερότητα (σε κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας) δ) η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, ε) η υψηλή αναφλεξιμότητα και στ) η αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ως προς τα PCM υψηλού μοριακού βάρους, διακρίνονται τα πολυμερή:

- Πολυμερή: η χρήση τους ως PCM, αποτελεί μια από τις πρόσφατες εφαρμογές τους. Οι ιδιότητές τους ποικίλουν τόσο ανάλογα με το είδος της πολυμερικής αλυσίδας, όσο και με το πλήθος των μονομερών που τα οικοδομούν. Συνήθως, χαρακτηρίζονται από υψηλή ενθαλπία τήξης. Επιπλέον, το σημείο τήξης και η τιμή της ενθαλπίας τήξης, αυξάνονται με την αύξηση του μοριακού βάρους της αλυσίδας [6].

Οι κυριότερες κατηγορίες ανόργανων PCM είναι τα ένυδρα αλάτα και τα κράματα μετάλλων.

- Ένυδρα Άλατα: πρόκειται για ενώσεις της μορφής $A \cdot H_2O$, όπου το A είναι κάποιο άλας, ενωμένο στο κρυσταλλικό του πλέγμα με το νερό. Κατά την τήξη, παρατηρείται είτε μερική, είτε πλήρης αφυδάτωση του ένυδρου αλατος, σύμφωνα με τα σχήματα:



Ως PCM, χρησιμοποιούνται ευρύτατα, καθώς εμφανίζουν α) υψηλή ογκομετρική ενθαλπία τήξης, β) κατάλληλες θερμοκρασίες τήξης για μεγάλο

εύρος εφαρμογών (χαμηλής, μέσης και υψηλής LHTES) γ) υψηλή θερμική αγωγιμότητα, δ) χαμηλό κόστος, ε) χαμηλή αναφλεξιμότητα, στ) μη διαβρωτικότητα προς πλαστικά υλικά ενθυσλάκωσης, ζ) χαμηλή μεταβολή όγκου κατά την τήξη [4], [6], [14]. Μειονεκτούν ως προς α) την αποκλίνουσα τήξη (βλ. 2.3.4), β) τη θερμική υστέρηση (βλ. 2.3.4) [5], γ) τη διάβρωση μεταλλικών υλικών ενθυσλάκωσης.

- **Μέταλλα και Ευτηκτικά Μίγματα Μετάλλων:** προτείνονται ενώσεις του Al, Cu, Mg και Zn για χρήση ως PCM, ως λύση στο πρόβλημα της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που κατά κανόνα χαρακτηρίζει τα PCM. Παράλληλα, έχουν υψηλή ογκομετρική ενθαλπία τήξης, χαμηλή τάση ατμών στην υγρή φάση και σταθερότητα έπειτα από πολλούς θερμικούς κύκλους. Εντούτοις, μειονεκτούν ως προς τη μεγάλη αύξηση του βάρους του LHTESS που προκαλούν, τη χαμηλή ειδική ενθαλπία τήξης και τη χαμηλή ειδική θερμοχωρητικότητά τους [13].

Για λόγους πληρότητας, επιγραμματικά αναφέρονται τα PCM που προτείνονται στη βιβλιογραφία κατά την αλλαγή φάσης στερεό \leftrightarrow στερεό. Αυτά μπορεί να είναι πολυαλκοόλες, πολυμερή (πολυουρεθάνες, σταυροδετημένο πολυαιθυλένιο) [14]. Ορισμένα PCM για αλλαγή φάσης στερεό \leftrightarrow στερεό και στερεό \leftrightarrow υγρό, καθώς και οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4).

2.3.3.1 Μέτρηση Θερμικών Ιδιοτήτων PCM

Η αποτίμηση των θερμικών ιδιοτήτων ενός PCM και συνεπώς η καταλληλότητά του για χρήση σε LHTESS, γίνεται με τη χρήση ενδεδειγμένων οργάνων μέτρησης. Η μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας των PCM υπό στενό θερμοκρασιακό εύρος, προκαλεί δυσκολίες στον πειραματικό υπολογισμό των ιδιοτήτων τους. Παρακάτω, δίνονται συνοπτικά οι κυριότερες μέθοδοι πειραματικού προσδιορισμού της ενθαλπίας και θερμοκρασίας τήξης και της θερμικής αγωγιμότητας των PCM.

Η ενθαλπία αλλαγής φάσης μετράται πειραματικά με μεθόδους όπως η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC) και η μέθοδος T-History. Η αρχή λειτουργίας της DSC, στηρίζεται στη μέτρηση της διαφοράς της ροής θερμότητας προς το δείγμα και μια ουσία αναφοράς, συνήθως Al₂O₃, συναρτήσει της θερμοκρασίας όταν οι δύο ουσίες υπόκεινται σε ελεγχόμενο πρόγραμμα σταθερής θέρμανσης ή ψύξης [20]. Με τη μέθοδο αυτή, μετράται με ακρίβεια η ενθαλπία τήξης και υπολογίζεται η θερμοκρασία τήξης και η θερμοχωρητικότητα του δείγματος. Υστερεί ως προς την

Πίνακας 4: Θερμοφυσικές ιδιότητες ορισμένων PCM. Σε ορισμένα από αυτά, δεν υπήρχαν διαθέσιμες οι τιμές για τη θερμική αγωγιμότητα και την πυκνότητα (Kouskou et al. [6], Pielichowska and Pielichowski [14]).

Υλικά	Θερμοκρασία αλλαγής φάσης (°C)	Ενθαλπία αλλαγής φάσης (kJ/kg)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/m·K)	Πυκνότητα (kg/m ³)
Ένυδρα Άλατα				
<i>MgCl₂·6H₂O</i>	117	168,6	0,570 (υγρό: 120 °C) 0,694 (στερεό: 90 °C)	1.450 (υγρό: 120 °C) 1.569 (στερεό: 90 °C)
<i>Mg(NO₃)₂·6H₂O</i>	89	162,8	0,490 (υγρό: 95 °C) 0,611 (στερεό: 37 °C)	1.550 (υγρό: 94 °C) 1.636 (στερεό: 35 °C)
<i>Ba(OH)₂·8H₂O</i>	48	265,7	0,653 (υγρό: 85,7°C) 1,225 (στερεό: 23 °C)	1.937 (υγρό: 84°C) 2.070 (στερεό: 24 °C)
<i>CaCl₂·6H₂O</i>	29	190,8	0,540 (υγρό: 38,7°C) 0,1088 (στερεό 23 °C)	1.562 (υγρό: 32 °C) 1.802 (στερεό 24 °C)
Παραφίνες				
<i>Paraffin 64</i>	64	173,6	0,167 (υγρό: 63,5 °C) 0,346 (στερεό: 33,6°C)	790 (υγρό: 65°C) 916 (στερεό: 24 °C)
Λιπαρά Οξέα				
<i>Παλμιτικό Οξύ</i>	64	185,4	0,162 (υγρό: 68,4 °C) -	850 (υγρό: 65 °C) 989 (στερεό: 24 °C)
<i>Καπρυλικό Οξύ</i>	16	148,5	0,570 (υγρό: 38,5 °C) -	901 (υγρό: 30 °C) 981 (στερεό: 13 °C)
Μέταλλα				
<i>Bi-Cd-In</i> (ευτηκτικό)	61	25	-	-
<i>Bi-Pb-In</i> (ευτηκτικό)	70	29	-	-
Πολυαλκοόλες				
<i>Πενταγλυκερίνη</i>	81	172,58	-	-

επεξεργασία μεγαλύτερων δειγμάτων. Πράγματι, συνήθη δείγματα DSC σε μετρήσεις PCM είναι της τάξης των 100 μL. Σε περιπτώσεις PCM μεγάλης ετερογένειας που απαιτείται μεγαλύτερος όγκος δείγματος, επιλέγεται η μέθοδος T-history. Αποτελεί απλή και οικονομική μέθοδο μέτρησης της αποθηκευμένης θερμότητας στο PCM ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Στηρίζεται στην εξής ιδέα:

ένα δείγμα ψύχεται ή θερμαίνεται και καταγράφεται διαρκώς η θερμοκρασία του, έτσι ώστε οποιαδήποτε μεταβολή υφίστανται οι θερμοφυσικές ιδιότητες του δείγματος που προκαλεί η ροή θερμότητας, να αποτυπώνεται ως μεταβολή της θερμοκρασίας [20].

Η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στο PCM παρουσιάζει περαιτέρω δυσκολίες εξαιτίας της αλλαγής φάσης. Υπάρχει δηλαδή ασυνέχεια στη θερμική αγωγιμότητα της υγρής και της στερεάς φάσης των PCM. Η βιβλιογραφία προτείνει δύο μεθόδους μέτρησής της που βασίζονται στο (μονοδιάστατο) Νόμο Αγωγής του Fourier:

$$\frac{dQ}{dt} = -A \cdot k \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.8)$$

α) οι μόνιμες, οπότε το θερμοκρασιακό πεδίο και η ροή θερμότητας δε μεταβάλλονται με το χρόνο και β) οι δυναμικές, οπότε υπάρχει εξάρτηση του πεδίου θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας από το χρόνο. Αμφότερες οι μέθοδοι, επιλύουν την εξ. 2.8 με χρήση κατάλληλων οριακών συνθηκών που προκύπτουν από την εκάστοτε πειραματική διάταξη. Η περιγραφή των διατάξεων αυτών είναι διαθέσιμη στη βιβλιογραφία [20], αλλά ξεφεύγουν από το σκοπό της παρούσας συζήτησης.

2.3.4 Ιδιότητες Υλικών Αλλαγής Φάσης

Ένα υποψήφιο υλικό για να χρησιμοποιηθεί ως PCM, οφείλει να διαθέτει ένα συνδυασμό από κατάλληλες θερμικές, φυσικές, κινητικές, χημικές και τεχνοοικονομικές ιδιότητες [4], [13], [14], [21]. Η κατάταξη που ακολουθεί είναι ενδεικτική, καθώς πολλοί συγγραφείς επιλέγουν διαφορετικά σχήματα ταξινόμησης.

- Θερμικές Ιδιότητες
 - I. Θερμοκρασία τήξης στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας
 - II. Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου, ώστε να ελαττωθεί ο συνολικός όγκος των δεξαμενών αποθήκευσης του PCM για δεδομένο επιθυμητό φορτίο
 - III. Υψηλή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα για επιπλέον αποθήκευση SHTES
 - IV. Υψηλή θερμική αγωγιμότητα και στις δύο φάσεις, για ταχύτερη φόρτιση και αποφόρτιση του κυκλώματος
 - V. Πλήρως αντιστρέψιμοι κύκλοι στερεοποίησης-τήξης, για μακροπρόθεσμη εκμετάλλευση του PCM χωρίς σημαντικές θερμικές απώλειες ανά κύκλο

- Φυσικές Ιδιότητες
 - I. Μικρή μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή φάσης, για να ελαττωθούν τυχόν προβλήματα με το υλικό ενθυλάκωσης
 - II. Χαμηλή τάση ατμών στη θερμοκρασία λειτουργίας, ώστε να μην είναι απαραίτητα περιβλήματα ενθυλάκωσης με αντοχή σε υψηλές τάσεις
 - III. Υψηλή πυκνότητα, για ικανότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας PCM σε μικρότερο όγκο
 - IV. Συγκλίνουσα τήξη, ώστε να διατηρείται η υψηλή ικανότητα αποθήκευσης σε διαδοχικούς κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης
 - V. Ευνοϊκή ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων
- Κινητικές Ιδιότητες
 - I. Απουσία φαινομένων θερμικής υστέρησης⁶, ώστε να πραγματοποιείται η φόρτιση-αποφόρτιση στην ίδια θερμοκρασία και να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες που προκαλεί το φαινόμενο αυτό
 - II. Υψηλός ρυθμός πυρήνωσης κατά τη στερεοποίηση, για την αποφυγή της θερμικής υστέρησης
 - III. Επαρκής ρυθμός ανάπτυξης κρυστάλλων, για την ταχύτερη στερεοποίηση
- Χημικές Ιδιότητες
 - I. Μακροπρόθεσμη χημική σταθερότητα, ώστε να μην επηρεάζεται η αποθηκευτική ικανότητα έπειτα από πολλαπλούς κύκλους
 - II. Συμβατότητα με το υλικό ενθυλάκωσης
 - III. Μη διαβρωτικότητα, μη τοξικότητα, μη αναφλεξιμότητα, μη εκρηκτικότητα προς αποφυγή καταστροφής της διάταξης LHTES
- Τεχνοοικονομικές
 - I. Αφθονία του υλικού προς ελάττωση του κόστους της διεργασίας
 - II. Διαθεσιμότητα προς μεγάλη έκτασης εκμετάλλευση
 - III. Χαμηλό κόστος λειτουργίας της μονάδας
 - IV. Ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Το ιδανικό PCM πρέπει λοιπόν να πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις. Κάτι τέτοιο, όπως και στην περίπτωση των SHTES, δεν είναι εφικτό. Έτσι, η επιλογή ενός υλικού για δεδομένη εφαρμογή, απαιτεί προσεκτική εξέταση των ιδιοτήτων των υποψηφίων PCM και αξιολόγηση των επιμέρους πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Ορισμένες από τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω και εξετάζονται στα υποψήφια PCM, απαιτούν περαιτέρω σχολιασμό για την καλύτερη

⁶ Πρόκειται για το φαινόμενο που στη διεθνή βιβλιογραφία απαντάται ως subcooling [20], supercooling [13] και ως thermal hysteresis. Οι δύο πρώτοι όροι χρησιμοποιούνται κυρίως σε εγχειρίδια θερμοδυναμικής και μεταφοράς θερμότητας, ενώ ο τελευταίος σε άρθρα προσανατολισμένα στις βιολογικές επιστήμες. Επιλέγεται ο όρος θερμική υστέρηση, ως ο πλέον κατάλληλος για την ελληνική, καθώς κρίνεται ότι θα δημιουργήσει τη λιγότερη σύγχυση.

κατανόησή τους. Παρακάτω εξηγούνται οι έννοιες αυτές που προέκυψαν από τη μέχρι τώρα αναφορά στην LHTEs.

- Συγκλίνουσα τήξη⁷ [4], [6], [13]: πρόκειται για φαινόμενο που παρατηρείται κατά τη χρήση ένυδρων αλάτων ως PCM. Η τήξη αυτών των PCM, χαρακτηρίζεται ως συγκλίνουσα, όταν το άνυδρο άλας είναι διαλυτό στο νερό που προκύπτει κατά την τήξη, δίνοντας υγρή φάση της ίδιας σύστασης με την αρχική στερεή. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει διαχωρισμός των δύο φάσεων (άλατος, ύδατος) κατά τη μετάβαση στερεό \leftrightarrow υγρό. Ήμι-συγκλίνουσα, ονομάζεται η τήξη κατά την οποία η σύσταση υγρής και στερεάς φάσης ποικίλει ανάλογα με την απώλεια ύδατος από το μόριο του ένυδρου άλατος. Έτσι, όταν η θερμοκρασία λάβει μια ορισμένη τιμή, που ονομάζεται περιτηκτική (συγκεκριμένη για κάθε ουσία) αρχικά θα δημιουργηθεί διφασικό μίγμα ένυδρου άλατος και διαλύματος νερού άλατος. Με θέρμανση λίγων βαθμών πάνω από την περιτηκτική θερμοκρασία, το διάλυμα θα ομογενοποιηθεί σε μια θερμοκρασία. Αποκλίνουσα τήξη, καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο το άλας δεν είναι εντελώς διαλυτό στο νερό που προκύπτει κατά την τήξη. Το νερό δηλαδή δεν επαρκεί για τη διάλυση του στερεού άλατος, με συνέπεια το διαχωρισμό των φάσεων και την καθίζηση του άλατος. Στην περίπτωση αυτή, ομογενής φάση δε λαμβάνεται, ούτε σε θερμοκρασίες πάνω από την περιτηκτική.

- Θερμική Υστέρηση: είναι το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας κάτω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης χωρίς να επέλθει στερεοποίηση του PCM [20]. Στην περίπτωση αυτή, η δημιουργία των πρώτων κρυστάλλων στερεού, μπορεί να ξεκινήσει ακόμα και 15°C κάτω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Έτσι, κατά τη διεργασία της αποφόρτισης, η θερμότητα είναι δυνατό να συνεχίσει να απομαστεύεται ως αισθητή για το θερμοκρασιακό εύρος που εμφανίζεται η υστέρηση ή ακόμη σε περίπτωση τεχνικής αδυναμίας, να μην απομαστευτεί το λανθάνον τμήμα της. Συνέπεια, είναι η υποβάθμιση της λειτουργίας της διάταξης.

Χαρακτηριστικό του προβλήματος που προκαλείται από τη θερμική υστέρηση φαίνεται στο Σχήμα 7: αν η θερμότητα που αποθηκεύεται στο θερμοκρασιακό εύρος που παρατηρείται υστέρηση, είναι μικρότερη της λανθάνουσας που απελευθερώνεται κατά τη στερεοποίηση, η θερμοκρασία αυξάνεται ταχύτατα στην αντίστοιχη της αλλαγής φάσης και διατηρείται σταθερή μέχρι την ολοκλήρωσή της. Σε αντίθετη περίπτωση, η θερμοκρασία δε θα ανέβει στην αντίστοιχη τιμή της αλλαγής φάσης.

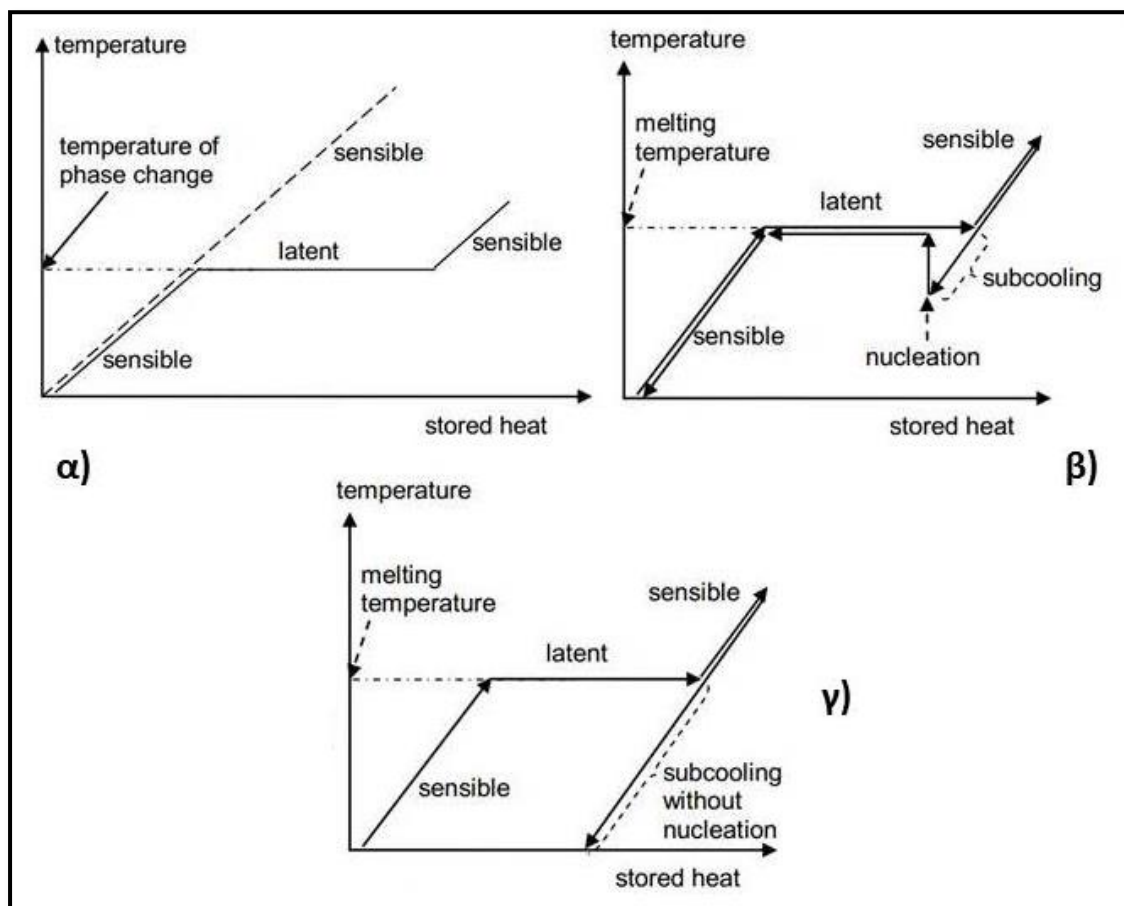
Η αιτία εμφάνισης του φαινομένου, αναζητείται στο μηχανισμό της στερεοποίησης. Αυτή πραγματοποιείται όταν το υγρό έλθει σε επαφή με στερεά φάση, οπότε αρχίζει η ανάπτυξη των κρυστάλλων του στερεού. Σε περίπτωση που αρχικά δεν

⁷ Ο όρος προέρχεται από μετάφραση της έννοιας congruent melting. Σύμφωνα με την ελληνική μετάφραση του Atkins P., de Paula J., 2014, «Φυσικοχημεία», ΠΕΚ, Ηράκλειο, ο όρος congruent melting αποδίδεται ως συγκλίνουσα τήξη, ο semi-congruent melting ως ημισυγκλίνουσα τήξη και ο incongruent melting ως αποκλίνουσα τήξη.

υπάρχει κάποιο στερεό σωματίδιο (πυρήνας) ή υπάρχει αλλά είναι πολύ μικρού μεγέθους, η δημιουργία κρυστάλλων στη διεπιφάνεια υγρού-στερεού, δεν ευνοείται ενεργειακά. Απαιτείται λοιπόν περαιτέρω ψύξη για την αλλαγή φάσης.

2.3.5 Βελτιστοποίηση LHTESS και Μελλοντική Έρευνα

Η πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που παρέχει η LHTESS, απαιτεί την επίλυση ορισμένων τεχνικών προβλημάτων που αφορούν είτε στα PCM, είτε στη διεργασία της μεταφοράς θερμότητας. Η έως αυτό το σημείο ανάλυση, έχει καταδείξει ως κύρια προβλήματα των PCM τη χαμηλή θερμική τους αγωγιμότητα, τη θερμική υστέρηση, την αποκλίνουσα τήξη και το είδος της ενθυλάκωσης.

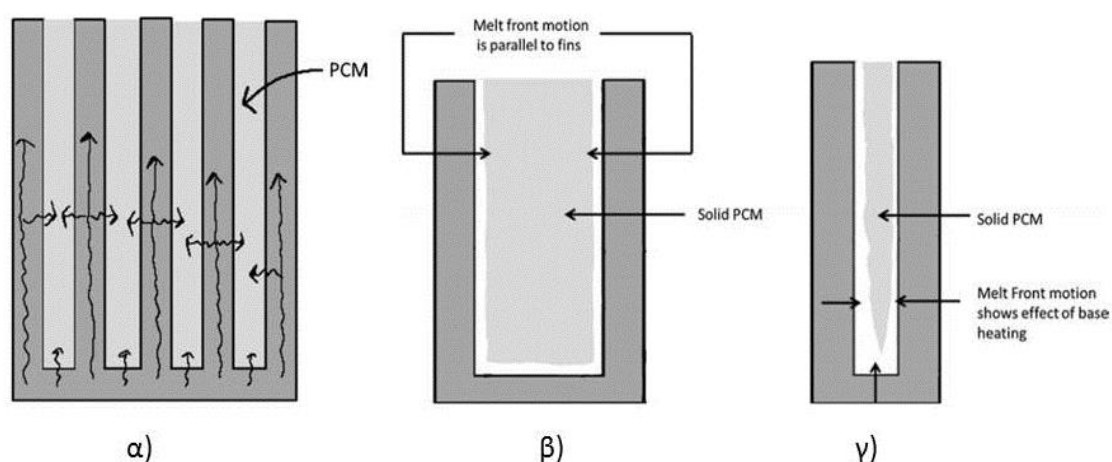


Σχήμα 7: Διάγραμμα της συνάρτησης $T=f(Q)$ για, α) την περίπτωση αλλαγής φάσης χωρίς θερμική υστέρηση, β) την περίπτωση θερμικής υστέρησης μικρού θερμοκρασιακού εύρους και τελικά πυρήνωσης και γ) την περίπτωση θερμικής υστέρησης μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους χωρίς τελικά να παρατηρείται πυρήνωση, όπως περιγράφεται από τους Mehling and Cabeza [20].

Πέραν των μεταλλικής μήτρας PCM, όλες οι υποψήφιες κατηγορίες παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Πρόκειται για σημαντικό πρόβλημα, ειδικά σε εφαρμογές που απαιτείται ταχεία αποθήκευση ή απομάστευση της θερμότητας. Για παράδειγμα, υλικά όπως οι παραφίνες με μια μέση τιμή $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, δυσχεραίνουν τη διάχυση θερμότητας, οπότε δρουν ως στρώμα μόνωσης. Για την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM, προτείνονται τρεις μέθοδοι: α) ενίσχυση με

μεταλλικά πρόσθετα, β) ενίσχυση με σωματίδια C στη μακροκλίμακα και γ) ενίσχυση με σωματίδια C στη νανοκλίμακα [23].

Η πρώτη, αποτελεί την απλούστερη πρόταση. Σύμφωνα με αυτή, μέταλλο υψηλής αγωγιμότητας, σε σχήμα με πτερύγια, τοποθετείται εντός του PCM όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 [23]. Έτσι, η θερμότητα μεταφέρεται γρήγορα μέσω του μεταλλικού πτερυγίου και διεισδύει βαθιά μέσα στο PCM, προκαλώντας την τήξη όλης της μάζας του και όχι μόνο τοπικά (Σχήμα 8α). Λόγω της διάταξης πτερυγίου (μεγάλη επιφάνεια) το PCM χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα και έτσι η αγωγή προς αυτό είναι ταχύτερη [23].



Σχήμα 8: Ποικίλα σχήματα ενίσχυσης της θερμικής αγωγιμότητας των PCM. Διακρίνονται διαδοχικά: α) πτερύγια σε πολλαπλά σημεία προς επίτευξη μεγάλων ρυθμών μεταφοράς θερμότητας, β) εστίαση σε πτερύγια μεγάλης σχετικής απόστασης και γ) εστίαση σε πτερύγια μικρότερης σχετικής απόστασης. Μεταξύ των διατάξεων β και γ είναι εμφανείς οι διαφορές ως προς τη σημασία της θέρμανσης από τη βάση. Ανάκτηση της εικόνας από το Fleisher [23].

Η ενίσχυση με σωματίδια άνθρακα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μακροσκοπικά, είτε στη νανοκλίμακα. Τα ανθρακονήματα ή ο γραφίτης, υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα ($220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) μπορούν διατεταγμένα είτε τυχαία, είτε με συγκεκριμένο τρόπο, να αυξήσουν την αγωγιμότητα του PCM. Στη νανοκλίμακα, τα σωματίδια άνθρακα τοποθετούνται εντός του PCM, σχηματίζοντας ένα νανοσύνθετο υλικό. Η τιμές της αγωγιμότητας του σύνθετου πλέον υλικού, αυξάνονται λόγω του διαφορετικού μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας στη νανοκλίμακα [23].

Η αποφυγή φαινομένων θερμικής υστέρησης, συντελείται με τη μέθοδο της πυρήνωσης [20]. Αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: α) την ομογενή πυρήνωση, δηλαδή πυρήνωση που ξεκινά από στερεά σωματίδια PCM εντός της υγρής του φάσης και β) την ετερογενή πυρήνωση από ειδικά πρόσθετα παρόμοιας κρυσταλλικής δομής, αλλά υψηλότερου σημείου τήξης από το στερεό PCM, που επιτρέπουν την ανάπτυξη κρυστάλλων στερεού PCM στην επιφάνειά τους. Η δεύτερη προσέγγιση αποτελεί το συνηθέστερο τρόπο αντιμετώπισης της θερμικής υστέρησης.

Οι συνέπειες των φαινομένων αποκλίνουσας τήξης είναι αρνητικές ως προς τη λειτουργία της διάταξης αποθήκευσης. Έρευνες προς τον περιορισμό της προτείνουν [20]: α) τη χρήση ανάδευσης για ομογενοποίηση του τήγματος, κάτι που απαιτεί μηχανολογικό εξοπλισμό και ακόμη δε μπορεί να εφαρμοσθεί κατά τη μικρο και νάνο ενθυλάκωση, β) την προσθήκη επιπλέον μορίων νερού στο ένυδρο άλας, ενισχύοντας την ομογενοποίηση μετά την τήξη, αλλά ταυτόχρονα μειώνοντας την αποθηκευτική ικανότητα λόγω της παρουσίας περισσότερου νερού, γ) την προσθήκη γέλης πολυμερούς μήτρας, που συγκρατεί σε μικροσκοπικό επίπεδο τις διαφορετικές φάσεις του PCM, ομογενοποιώντας τις, δ) την προσθήκη ουσιών που θα αυξήσουν το ιξώδες του υγρού PCM, έτσι ώστε να μην μπορούν να διαχωριστούν πλήρως οι επιμέρους φάσεις (ένυδρο άλας, διάλυμα νερού άλατος) που προκύπτουν σε αυτό. Ο περιορισμός της αποκλίνουσας τήξης άπτεται του αντικειμένου της Φυσικοχημείας και της Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών και ξεφεύγει από το πλαίσιο μελέτης της παρούσας Εργασίας.

Η ενθυλάκωση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις διεργασίες αλλαγής φάσης. Επιβάλλεται λόγω της ύπαρξης ρευστής φάσης, ώστε να μην υπάρχει διαρροή του υγρού και συνακόλουθα, ελάττωση της ενέργειας που αποθηκεύεται. Σε επίπεδο μεγέθους του κελύφους ενθυλάκωσης έχουν προταθεί δύο διαφορετικές προσεγγίσεις: α) Μακροενθυλάκωση, στην οποία το PCM φορτώνεται σε πλαστικό ή μεταλλικό κέλυφος όγκου ml-L και β) μικροενθυλάκωση, στην οποία το PCM, αποθηκεύεται σε πολυμερικό κέλυφος διαμέτρου 1-1.000μm. Παρόλο που η μακροενθυλάκωση χρησιμοποιείται ευρύτερα, πλέον είναι δυνατή και η εμπορικής κλίμακας παρασκευή κελύφων μικροενθυλάκωσης, υψηλότερου όμως κόστους [20].

Επιπλέον χαρακτηριστικά του υλικού ενθυλάκωσης που αναβαθμίζουν τη λειτουργία ενός LHTESS, είναι: α) κατάλληλο πάχος του κελύφους, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες διάχυσης και να υπάρχει μηχανική αντοχή στις αυξήσεις της πίεσης λόγω αλλαγής φάσης, β) βελτίωση της απόκρισης του κυκλώματος έπειτα από πολλαπλούς κύκλους, καθώς ο διαχωρισμός φάσεων περιορίζεται σε μικροσκοπικό επίπεδο (μικροενθυλάκωση) γ) σημαντική αύξηση (ιδίως στην περίπτωση της μικροενθυλάκωσης) του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας, λόγω αύξησης της επιφάνειας, δ) ταχύτερη απόκριση του θερμικού κυκλώματος [23]. Η ενθυλάκωση των PCM και η τοποθέτησή του εντός δεξαμενών αποθήκευσης μέσω των οποίων ρέει το εργαζόμενο ρευστό, συνιστά δημιουργία διάταξης συμπαγούς κλίνης. Σε αυτήν έγινε αναφορά και στο χωρίο που εξετάστηκαν τα SHTESS. Λόγω του εύρους των εφαρμογών τους, τέτοιες διατάξεις θα περιγραφούν εκτενέστερα τόσο θεωρητικά, όσο και από πλευράς μαθηματικής μοντελοποίησης παρακάτω.

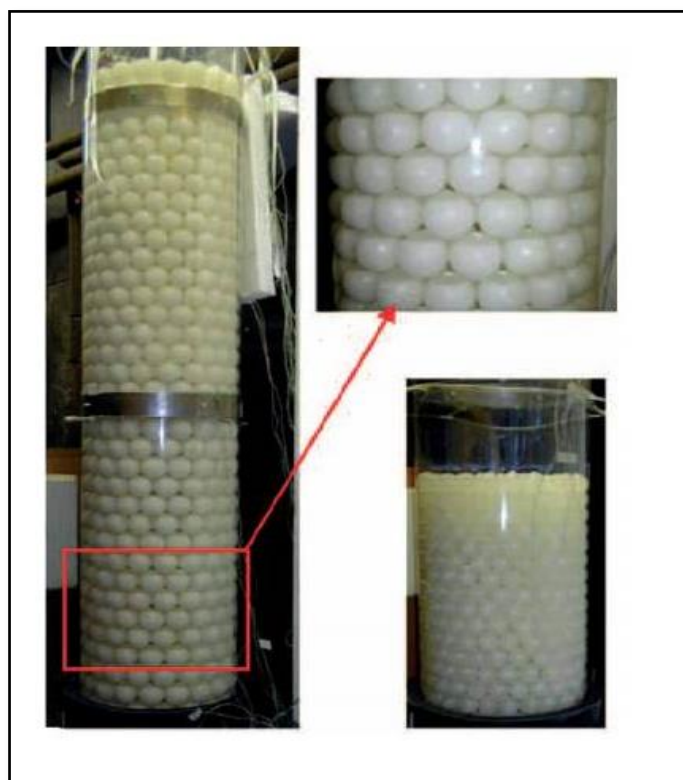
Η μελλοντική έρευνα ως προς τα PCM, προσανατολίζεται γύρω από τους εξής άξονες: α) περαιτέρω μελέτη και ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM, β) νανοενθυλάκωση, δηλαδή ενθυλάκωση σε κάψουλες διαμέτρου 10-500nm, γ)

παραγωγή των Shape Stabilized PCM, δηλαδή PCM των οποίων το σχήμα δε μεταβάλλεται με την αλλαγή φάσης, δ) αύξηση της θερμοχωρητικότητας του PCM, ε) αύξηση της λανθάνουσας ενθαλπίας τήξης και στ) ενίσχυση της ικανότητας αποθήκευσης του θερμικού κυκλώματος έπειτα από πολλαπλούς κύκλους φόρτισης, αποθήκευσης, αποφόρτισης. Πρόοδος στα συγκεκριμένα τεχνικά ζητήματα, θα δώσει νέα δυναμική στα LHTESS.

2.4 Συμπαγείς⁸ Κλίνες

Βάσει όσων αναπτύχθηκαν παραπάνω, αμφότερες οι μορφές TES μπορούν να συνδυαστούν σε διατάξεις συμπαγών κλινών (Σχήμα 9) οπότε με την ενσωμάτωση του κατάλληλου βοηθητικού εξοπλισμού, δημιουργείται η ζητούμενη διάταξη αποθήκευσης. Πράγματι, οι συμπαγείς κλίνες αποτελούν την πλέον διαδεδομένη διάταξη TES με εφαρμογές τόσο σε βιομηχανικό, όσο και σε οικιακό επίπεδο. Η διείσδυσή τους οφείλεται στα πλεονεκτήματα της ενθυλάκωσης (LHTES) και των έμμεσων ενεργητικών συστημάτων αισθητής (SHTES).

Οι συμπαγείς κλίνες προκύπτουν με την τοποθέτηση σωματιδίων σφαιρικής, κυλινδρικής, ορθογωνικής ή και ακανόνιστης γεωμετρίας εντός δεξαμενής. Το λειτουργούν ρευστό, ρέει μέσα από τα κενά που δημιουργούνται ανάμεσα στα



Σχήμα 9: Διατάξεις συμπαγών κλινών ομοιόμορφα κατανεμημένων σφαιρικών σωματιδίων πλήρωσης (Fleischer [23]).

⁸ Στην ελληνική βιβλιογραφία, οι συμπαγείς κλίνες αναφέρονται συχνά και ως σταθερές κλίνες, όπως προκύπτει από το Levespiel O., 2004, «Μηχανική Χημικών Διεργασιών» (μετάφραση), Κωσταράκης, Αθήνα. Στον παρόν χρησιμοποιούνται και οι δύο όροι συμπληρωματικά.

στερεά σωματίδια. Τα συστήματα σταθερών κλινών έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών σε πεδιά όπως η Χημική Μηχανική (καταλυτικοί αντιδραστήρες και μετατροπείς, ξηραντήρες, διεργασίες μεμβρανών), η Γεωλογία (υπόγειες ροές, διαχείριση γεωθερμικής ενέργειας), η Μηχανολογία (ροές σε συμπυκνωτήρες, θερμομόνωση κτιρίων, χύτευση μετάλλων) και η Μηχανική Πετρελαίου (υπόγειες ροές και ανάκτηση ορυκτών καυσίμων) [24]. Η εργασία αυτή, εστιάζει το ενδιαφέρον της σε εφαρμογές TES σε συμπαγείς κλίνες.

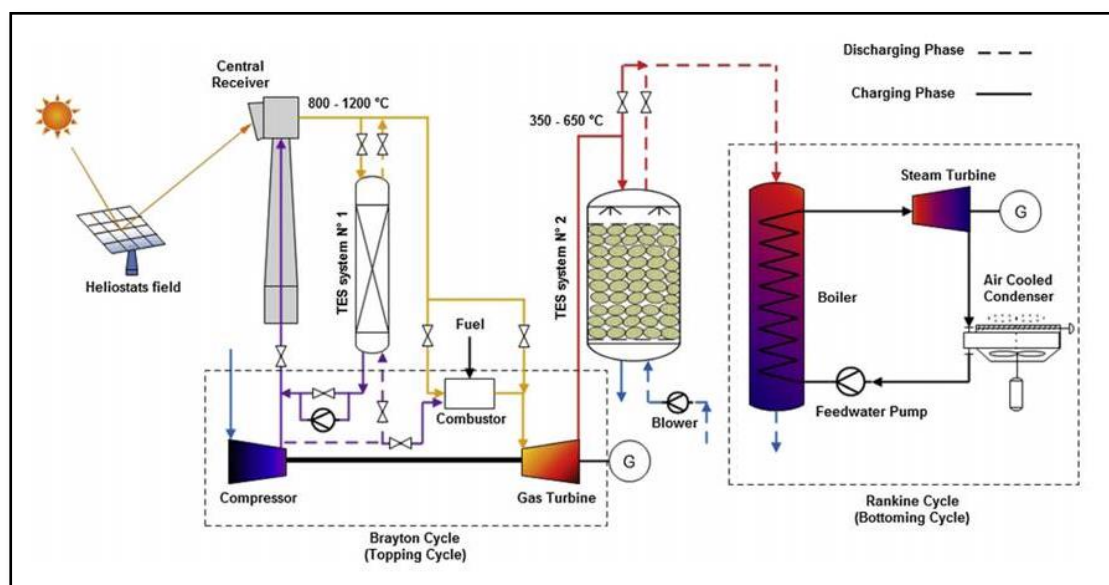
Οι εφαρμογές των συμπαγών κλινών στην αποθήκευση θερμότητας ποικίλουν. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης τους προέρχονται από τον οικιακό, το βιομηχανικό, τον κατασκευαστικό και άλλους τομείς. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή τους:

- Οικιακός τομέας: χρησιμοποιούνται είτε ως SHTESS, είτε ως LHTESS για την παροχή ζεστού νερού, τη θέρμανση ή ψύξη του αέρα σε εφαρμογές κλιματισμού και τους ηλιακούς φούρνους. Έχουν προταθεί διάφορες διατάξεις, η λειτουργία των οποίων εξυπηρετεί εφαρμογές σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες και θερμικό φορτίο. Ένα ολοκληρωμένο οικιακό σύστημα TES, συνδυάζεται συνήθως με ηλιακούς συλλέκτες μέσω των οποίων παρέχεται η προς αποθήκευση ενέργεια. Περιλαμβάνονται σωληνώσεις προσαγωγής και απαγωγής των λειτουργούντων ρευστών, ενώ το υλικό αποθήκευσης επιλέγεται με βασικό κριτήριο το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Η οικιακή χρήση αποτελεί περίπτωση εφαρμογής χαμηλών θερμοκρασιών, όποτε ως στερεά υλικά πλήρωσης χρησιμοποιούνται κυρίως πέτρες και βότσαλα (SHTESS) και παραφίνες (LHTES) [13].

- Βιομηχανικός τομέας: πρόκειται για την αιχμή των συστημάτων TES υπό μορφή σταθερών κλινών. Στις διατάξεις αυτές, αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρισμού, οπότε απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και επιλογή του εργαζόμενου ρευστού και του μέσου αποθήκευσης. Ειδικότερα, σημειώνεται ότι συστήματα LHTESS με PCM δε βρίσκουν ακόμη ευρεία βιομηχανική εφαρμογή για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 200°C και παραμένουν σε ερευνητικό στάδιο. Τη μερίδα του λέοντος κατέχουν τα SHTESS μιας ή δύο δεξαμενών. Σε θερμοκρασίες 120-220°C χρησιμοποιούνται κατά βάση τήγματα αλάτων ως HTF και πέτρες ως μέσο αποθήκευσης. Για θερμοκρασίες άνω των 550°C αναφέρεται η χρήση πυριτικών ενώσεων του μαγνησίου ως μέσο πλήρωσης της κλίνης, ενώ σε θερμοκρασίες έως 700°C, προτείνονται κεραμικά υλικά. Σε θερμοκρασίες μέχρι τους 1.000°C, προσέγγιση που βρίσκεται στην αιχμή της έρευνας, έχουν δοκιμαστεί πέτρες και κεραμικά, υλικά ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις [25]. Σύστημα SHTES για παραγωγή σε υψηλές θερμοκρασίες φαίνονται στο Σχήμα 10.

- Κατασκευαστικός τομέας: περισσότερες εφαρμογές παρουσιάζουν τα υλικά αλλαγής φάσης μικροενθλακωμένης μορφής. Αφορούν κυρίως στην ενίσχυση της θερμικής άνεσης εντός του κτιρίου. Έχει προταθεί εισαγωγή PCM εντός τοιχοποιίας,

εντός υαλοπινάκων και εντός του δαπέδου. Η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης εντός τοιχοποιίας (τοίχοι Trombe) υπήρξε η πρώτη εφαρμογή αυτού του είδους. Εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία κατά τις πρωινές και μεσημβρινές ώρες και αποδίδει τη θερμότητα κατά τις νυχτερινές. Εξέλιξη της ιδέας αυτής υπήρξε η εισαγωγή μικροενθυλακωμένων PCM στους υαλοπίνκες και σε συστήματα υποδαπέδιας θέρμανσης. Στα συστήματα αυτά και τις παραλλαγές τους, τα PCM διατάσσονται υπό μορφή συμπαγών κλινών [4].



Σχήμα 10: Σύστημα αποθήκευσης SHTES υψηλών θερμοκρασιών. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μπορεί να ξεπεράσουν τους 1.000°C , ενώ οι πιέσεις τα 15 bar, οπότε η επιλογή των υλικών καθίσταται θεμελιώδους σημασίας. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται κύκλοι Brayton και Rankine για την ολοκλήρωση του κυκλώματος (Agalit H., et al. [54]).

Βασική αιτία εισαγωγής των σταθερών κλινών ως δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα πολλών στερεών υλικών πλήρωσης [25]. Για τον περιορισμό της επίδρασης της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, απαιτείται αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας. Σε μια κλίνη, τα σωματίδια επιτυγχάνουν αυτήν την απαραίτητη αύξηση, ενισχύοντας με τον τρόπο αυτό τη μεταφορά θερμότητας και βελτιώνοντας τη λειτουργία του κυκλώματος. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [25], προτιμότερη γεωμετρία για το υλικό πλήρωσης είναι η σφαιρική, καθώς για δεδομένο όγκο προσφέρει τη μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [25], σε περιπτώσεις SHTES, η αποθήκευση σε συμπαγείς κλίνες αποδίδει μικρότερη αποθηκευτική ικανότητα από την αντίστοιχη σε δεξαμενές νερού. Παρόλα αυτά, προτιμώνται επειδή δεν παρατηρούνται διαρροές (τα στερεά σωματίδια δεν ρέουν εκτός δεξαμενής) μεγιστοποιούν τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ ρευστού και στερεού και ελαχιστοποιούν τη μεταφορά εντός του στερεού υλικού (λόγω χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας).

Η λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής: θερμό ρευστό διέρχεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης μεταφέροντας θερμότητα (λανθάνουσα ή/και αισθητή) προς το υλικό αποθήκευσης. Στην περίπτωση λανθάνουσας παρατηρείται τήξη, ενώ στην περίπτωση αισθητής, αύξηση θερμοκρασίας. Κατά την αποφόρτιση, ψυχρό ρευστό διέρχεται από τη δεξαμενή και η θερμότητα μεταφέρεται από το υλικό πλήρωσης της κλίνης [25].

Σε εφαρμογές TES, κατά το σχεδιασμό συμπαγών κλινών το ενδιαφέρον εστιάζεται στις ακόλουθες παραμέτρους: α) θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας της διάταξης, β) θερμοκρασία αλλαγής φάσης, γ) λανθάνουσα ενθαλπία αλλαγής φάσης, δ) προς αποθήκευση φορτίο, ε) διαμόρφωση της κλίνης, στ) πτώση πίεσης στην κλίνη, ζ) έργο αντλίας [25]. Συνήθως, ευελιξία εμφανίζεται ως προς τις δύο τελευταίες παραμέτρους.

Ροές αυτού του είδους διαφοροποιούνται σημαντικά στην περιγραφή τους σε σχέση με αντίστοιχες χωρίς την ύπαρξη της κλίνης. Αιτία της διαφοροποίησης αυτής είναι το πορώδες της κλίνης, η ύπαρξη δηλαδή διακένων μεταξύ των σωματιδίων, που επιτρέπουν περιορισμένη ροή του ρευστού. Συνακόλουθα, επηρεάζεται και η μεταφορά θερμότητας εντός της κλίνης. Η διαφοροποίηση των θερμοϋδραυλικών φαινομένων σε σταθερές κλίνες, αποτυπώνεται μέσω τροποποιήσεων του μαθηματικού φορμαλισμού περιγραφής τους.

Η μαθηματική διατύπωση των εξισώσεων περιγραφής ροϊκών και θερμικών φαινομένων γίνεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί. Ποιοτικά και σε σχέση με τις συμπαγείς κλίνες, αναφέρονται τα εξής: α) ως προς τη μεταφορά ορμής, η πτώση πίεσης σε μια κλίνη εξαρτάται από την παροχή του ρευστού και τα φυσικά χαρακτηριστικά της κλίνης (γεωμετρία, υλικά) και β) ως προς τη μεταφορά θερμότητας ότι αποτελεί σύνθεση επιμέρους θερμικών αντιστάσεων. Διακρίνονται οι μηχανισμοί: i) συναγωγή από τα τοιχώματα της δεξαμενής προς το HTF, ii) συναγωγή από το υλικό πλήρωσης προς το HTF, iii) αγωγή από τα τοιχώματα της δεξαμενής προς τα σωματίδια γύρω του, iv) αγωγή μεταξύ των σωματιδίων, v) ακτινοβολία, vi) συναγωγή μέσω της ανάμιξης του ρευστού. Εξαρτάται από τις ιδιότητες στερεού και ρευστού, την παροχή του ρευστού και τα χαρακτηριστικά της κλίνης [25].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Μαθηματική Μοντελοποίηση

Στην ενότητα αυτή αναλύονται τα μαθηματικά μοντέλα περιγραφής ροϊκών, θερμικών, καθώς και φαινομένων αλλαγής φάσης που υπεισέρχονται στη μελέτη της TES υπό μορφή συμπαγούς κλίνης. Αρχικά, εξετάζονται τα μαθηματικά μοντέλα περιγραφής των φαινομένων μεταφοράς ορμής και θερμότητας, ενώ παρουσιάζονται οι παραδοχές και οι αδυναμίες τους από θεωρητικής και υπολογιστικής άποψης. Καταληκτική ενότητα του κεφαλαίου είναι η διατύπωση του προβλήματος μοντελοποίησης της αλλαγής φάσης.

3.1 Μαθηματική Μοντελοποίηση Ροϊκών Φαινομένων

Η ροή ρευστών σε πορώδη μέσα προσεγγίζεται με δύο διαφορετικές μεθόδους: α) τη μέθοδο άμεσης μοντελοποίησης⁹ και β) τη μέθοδο της συνεχούς μοντελοποίησης. Η επιλογή της μιας ή της άλλης μεθόδου εξαρτάται από την κλίμακα του φυσικού συστήματος που μοντελοποιείται. Έτσι, σε περιπτώσεις συστημάτων μικρής κλίμακας (π.χ. δεξαμενές οικιακών συστημάτων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος άμεσης μοντελοποίησης, ενώ σε μεγάλης (π.χ. ροές υπόγειων υδάτων) ενδείκνυται η μέθοδος συνεχούς μοντελοποίησης.

3.1.1 Μέθοδος Άμεσης Μοντελοποίησης

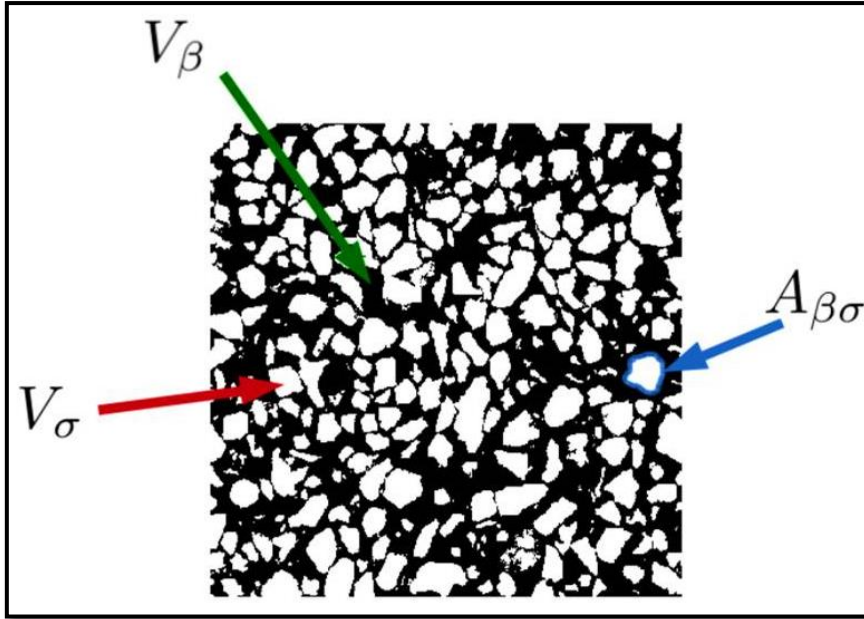
Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, σε κάθε σημείο του εσωτερικού της κλίνης μπορεί να βρίσκεται είτε ρευστό, είτε στερεό σωματίδιο, ποτέ όμως και τα δύο ταυτόχρονα. Τα ροϊκά φαινόμενα στην περίπτωση αυτή μπορούν να περιγραφούν από το σύστημα των εξισώσεων συνέχειας και ορμής, όπως ακριβώς αυτές θα διατυπώνονταν απουσία του στερεού [26]. Αυτές για την περίπτωση ασυμπιέστης, μονοφασικής ροής νευτωνικού ρευστού διαμορφώνονται:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{u} = 0 & (3.1\alpha) \\ \rho \cdot \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} & (3.1\beta) \end{cases}$$

Αναλυτικότερα, σε κάθε σημείο του πεδίου ροής θεωρούμε ότι το ρευστό καταλαμβάνει όγκο V_β και το στερεό όγκο V_σ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 11. Λόγω της ύπαρξης αυτών των δύο διακριτών φάσεων, πάντοτε θα υπάρχει σαφής διαχωρισμός τους από τη μεταξύ τους διεπιφάνεια $A_{\beta\sigma}$.

Τις περισσότερες φορές που χρησιμοποιείται η άμεση μοντελοποίηση [26], [27], οι ταχύτητες του ρευστού είναι πολύ χαμηλές (χαμηλές δυνάμεις αδράνειας ως προς τις δυνάμεις ιξώδους) οπότε η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί έρπουσα (ροή Stokes) και το σύστημα των εξισώσεων 3.1 να απλοποιηθεί ως εξής:

⁹ Προέρχονται από μετάφραση των διεθνών όρων direct modeling representation και continuum modeling respresentation αντίστοιχα.



Σχήμα 11: Απεικόνιση 2D του πεδίου ροής σε πορώδες μέσο. Με μαύρο χρώμα φαίνονται οι περιοχές που καταλαμβάνει το ρευστό, ενώ με άσπρο οι αντίστοιχες του στερεού. Οι δύο φάσεις διαχωρίζονται από τη διεπιφάνεια $A_{\beta\sigma}$ (Soulaine and Quintard [26]).

$$Re = \frac{\text{Δυνάμεις Αδράνειας}}{\text{Δυνάμεις Ιξώδους}} \ll 1 \Leftrightarrow u_{ref} \cdot \rho \cdot L \ll \mu \quad (3.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{u}_\beta = 0 \\ \rho \cdot \frac{D\vec{u}_\beta}{Dt} = \rho_\beta \vec{g} - \nabla p_\beta + \mu \nabla^2 u_\beta \end{array} \right. \xrightarrow{Re \ll 1} \left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \rho_\beta \vec{g} - \nabla p_\beta + \mu \nabla^2 u_\beta = \vec{0} \end{array} \right. \quad (3.3\alpha)$$

$$\begin{array}{ccc} \uparrow & & \uparrow \\ \text{Δυνάμεις Αδράνεις} & & \text{Δυνάμεις Ιξώδους} \end{array}$$

Το σύστημα αυτό προφανώς ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι $V=V_\beta$ (σημεία της κλίνης που καταλαμβάνει το ρευστό) και με οριακή συνθήκη τη συνθήκη μη ολίσθησης:

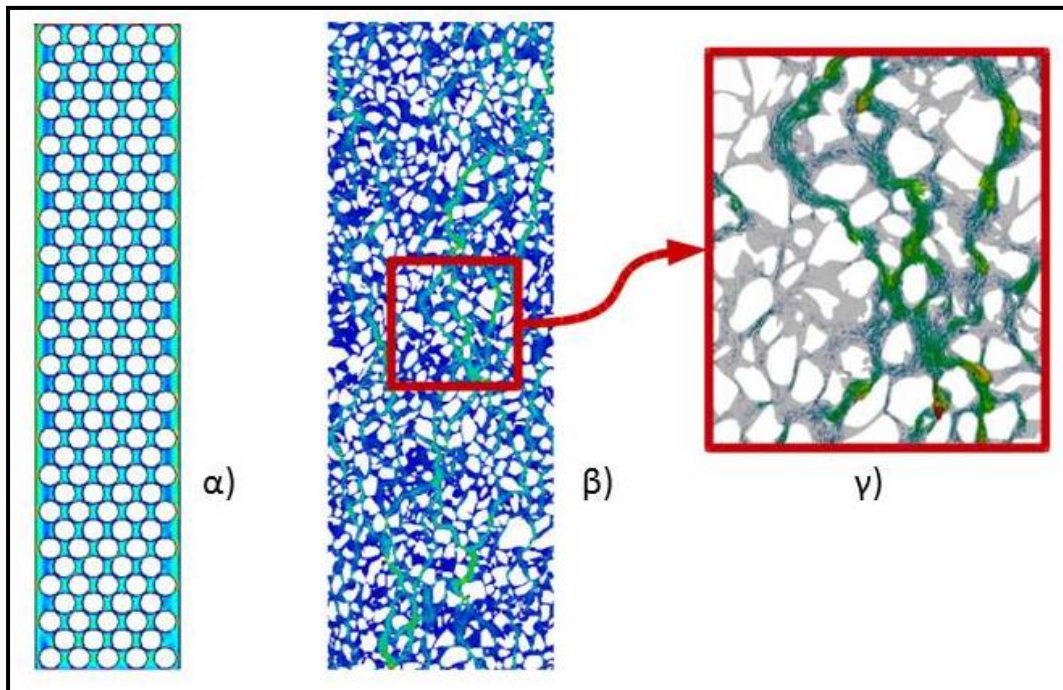
$$\vec{v}_\beta = \vec{0} \text{ για } A = A_{\beta\sigma} \quad (3.4)$$

Όπως φαίνεται και στην εξ. 3.2, η μετατροπή από το σύστημα των Navier-Stokes στις εξισώσεις έρπουσας ροής απαιτεί πολύ χαμηλή τιμή του Re . Σε περιπτώσεις άμεσης μοντελοποίησης, ως χαρακτηριστικό μήκος επιλέγεται η μέση διάμετρος των σωματιδίων¹⁰ της κλίνης [28], όποτε:

¹⁰ Η μέση διάμετρος των σωματιδίων συμπίπτει συνήθως με τη διάμετρο καθενός από αυτά. Σε 3D εργασίες Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, μοντελοποιούνται κλίνες με ομοιόμορφο πακετάρισμα σωματιδίων σταθερής διαμέτρου. Αυτό γίνεται κυρίως για λόγους υπολογιστικού κόστους [28]. Πράγματι, μοντελοποίηση ανομοιόμορφης κλίνης σε τρεις διαστάσεις δε συναντάται στη βιβλιογραφία. Σε 2D προσεγγίσεις, έχουν επιλυθεί κλίνες σε ανομοιόμορφο πακετάρισμα [26].

$$Re_p = \frac{u_{ref} \cdot \rho \cdot d_p}{\mu} \quad (3.5)$$

Η άμεση μέθοδος δε θεωρεί παραδοχές ως προς τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, οπότε θεωρείται η ακριβέστερη για την περιγραφή συμπαγών κλινών. Μειονεκτεί ως προς τον περιορισμό αναπαράστασης πολύπλοκων γεωμετριών και της ακαταλληλότητας διαχείρισης μεγάλων κλινών. Σε υπολογιστική επίλυση προβλημάτων, χρησιμοποιείται σε γεωμετρίες όπως αυτές του Σχήματος 12. Η χρήση της ενδύκνεται όταν για τη χαρακτηριστική διάσταση της κλίνης L και τη χαρακτηριστική διάσταση του υλικού πλήρωσης ισχύει: $L/d_p \approx O(1)$ [24].



Σχήμα 12: 2D υπολογιστική μοντελοποίηση με την άμεση μέθοδο: α) πεδίο ταχύτητας σε ομοιόμορφο πακετάρισμα σφαιρικών σωματιδίων, β) πεδίο ταχύτητας σε ανομοιόμορφο πακετάρισμα σωματιδίων τυχαίας διάταξης και γ) εστίαση στο πεδίο ταχύτητας ορισμένων καναλιών. Στο σχήμα αυτό γίνεται φανερή (ποιοτικά) η έντονη διακύμανση της ταχύτητας σε ένα κανάλι (Xia et al. [19], Soulaire and Quintard [26]).

3.1.2 Μέθοδος Συνεχούς Μοντελοποίησης

3.1.2.1 Νόμος Darcy

Οι απαρχές της μεθόδου συνεχούς μοντελοποίησης τοποθετούνται χρονικά στα μέσα του 19^{ου} αι. όταν ο Γάλλος μηχανικός Henri Darcy πραγματοποιούσε πειράματα ροής σε πορώδη μέσα για το σύστημα υδροδότησης της κωμόπολης Dijon. Καρπός της δουλειάς του, ήταν ο ομώνυμος φαινομενολογικός νόμος, ο οποίος διατυπώθηκε για μόνιμη, μονοδιάστατη ροή σε ομοιόμορφο πορώδες μέσο και αργότερα επεκτάθηκε στις τρεις διαστάσεις [28]:

$$u_{sup} = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \stackrel{3D}{\Rightarrow} \vec{u}_{sup} = -\frac{\bar{K}}{\mu} \cdot \nabla P \quad (3.6)$$

Από τα μεγέθη που εμφανίζονται στην (3.6) ιδιαίτερη προσοχή απαιτεί η ταχύτητα που χρησιμοποιείται: πρόκειται για την ταχύτητα που θα είχε το ρευστό που καταλαμβάνει στην κλίση στοιχειώδη όγκο V_β , αν σε αυτήν δεν υπήρχαν στερεά σωματίδια. Σε μονοδιάστατη ροή, προκύπτει ως ο λόγος της ογκομετρικής παροχής προς το εμβαδό της κάθετης στη ροή επιφάνειας. Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διάφορα ονόματα για το χαρακτηρισμό της (seepage, filtration, superficial, Darcy velocity). Στο παρόν, επιλέγεται ο όρος superficial velocity. Η ταχύτητα αυτή διακρίνεται από την ταχύτητα του ρευστού σε όγκο V_β παρουσία της κλίσης, η οποία καλείται intrinsic ή physical velocity [29]. Αλγεβρικά συνδέονται ως:

$$\vec{u}_{sup} = \varepsilon \cdot \vec{u}_{phys} \quad (3.7)$$

Το δύο χαρακτηριστικά μεγέθη των συμπαγών κλινών, προκύπτουν ως σταθερές αναλογίας των εξισώσεων (3.6) και (3.7): είναι η διαπερατότητα και το πορώδες, τα οποία ορίζονται ακολούθως:

- Πορώδες: ο λόγος του όγκου του ρευστού που διαρρέει την κλίση, V_β προς το συνολικό όγκο της δεξαμενής V_t [26],

$$\varepsilon = \frac{V_\beta}{V_t} = 1 - \frac{V_\sigma}{V_t} \quad (3.8)$$

Ως φυσικό μέγεθος, εκφράζει το κλάσμα του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης που καταλαμβάνει κάθε χρονική στιγμή το διερχόμενο ρευστό, ενώ το $1-\varepsilon$, εκφράζει αντίστοιχα το κλάσμα όγκου της δεξαμενής που καταλαμβάνουν τα στερεά σωματίδια. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει πάντοτε. Προχωρημένες μελέτες γύρω από το πορώδες [24], θεωρούν ότι η ύπαρξη των στερεών σωματιδίων δημιουργεί ένα πολύπλοκο δίκτυο διαδρωμών (αλληλοσυνδεόμενοι πόροι) μιας διαδρομής (αδιέξοδοι πόροι) ή και καθόλου (απομονωμένοι πόροι). Το ρευστό ρέει μόνο μεταξύ των αλληλοσυνδεόμενων πόρων, οπότε και ορίζεται το ενεργό πορώδες ως ο όγκος του ρευστού (αλληλοσυνδεόμενοι πόροι) προς τον όγκο της δεξαμενής.

Το πορώδες δεν αποτελεί σταθερή ιδιότητα της κλίσης, αντίθετα το μέγεθος και η κατανομή του είναι ανομοιόμορφη [24]. Αναλύσεις ρεαλιστικών προβλημάτων σε συμπαγείς κλίνες, θεωρούν το πορώδες ως ιδιότητα μεταβαλλόμενη και εξαρτώμενη τόσο από τα χαρακτηριστικά της κλίσης και του στερεού υλικού, όσο και από τη θέση μέσα στη δεξαμενή¹¹. Μια

¹¹ Σύμφωνα με τον Kaniany [24], το πορώδες εξαρτάται και από την πτώση πίεσης εντός της κλίσης στην περίπτωση παραμορφώσιμων στερεών σωματιδίων.

συνήθης σχέση υπολογισμού που προτείνεται στη βιβλιογραφία [19], είναι¹²:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \cdot \left[1 + \left(\frac{0,87}{\varepsilon_{\infty}} - 1 \right) \exp \left(-5 \cdot \frac{\frac{D}{2} - r}{d_p} \right) \right] \quad (3.9)$$

Η μέτρηση του πορώδους γίνεται πειραματικά με μεθόδους όπως η πορωσιμετρία Hg, πορωσιμετρία αερίου, φωτογράφιση, με αναρρόφηση διαβρεχόμενου υγρού και με ακτίνες γ [24]. Συνήθεις τιμές για φυσικά πορώδη μέσα δεν ξεπερνούν το 0,6, ενώ σε τεχνικές εφαρμογές κυμαίνεται μεταξύ 0,25-0,48 [29].

- Διαπερατότητα: ο μαθηματικός ορισμός της καθίσταται δυσχερής σε σχέση με τον αντίστοιχο του πορώδους και αυτό επειδή πρόκειται για μέγεθος που προκύπτει ως σταθερά αναλογίας από το φαινομενολογικό νόμο του Darcy (εξ. 3.6). Είναι ανεξάρτητη του είδους του ρευστού, αλλά εξαρτάται από τη γεωμετρία του πορώδους μέσου. Εκφράζει την ικανότητα του πορώδους μέσου να επιτρέπει τη διέλευση¹³ του ρευστού μέσα από αυτό [30]. Υψηλές τιμές διαπερατότητας δηλώνουν ευκολία διέλευσης του ρευστού μέσω της κλίνης, ενώ χαμηλές δυσκολία διέλευσης [31]. Σύμφωνα με τους Solaine and Quintard [26], η K περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με την τοπολογία της κλίνης. Είναι συμμετρικό δυαδικό μέγεθος, με τις συνιστώσες του σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων x, y, z:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

όπου $\forall K_{ij}$, ο δείκτης i δηλώνει τη θετική κατεύθυνση και ο j το θετικό επίπεδο στο οποίο είναι κάθετο. Σε αντίθεση με το πορώδες που είναι αδιάστατο μέγεθος, η διαπερατότητα έχει διαστάσεις $\{L^2\}$, με μονάδα μέτρησης στο SI το m^2 .

Ο υπολογισμός της διαπερατότητας δεν είναι σαφής, καθώς αυτή εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κλίνης. Έτσι, αυτό που αναμένεται είναι να δίνεται από διαφορετικές εξισώσεις για διαφορετικά σχήματα του υλικού πλήρωσης της κλίνης. Ένα απλό, ημιεμπειρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη βιβλιογραφία, είναι η εξίσωση των Carman-Kozeny [24]:

¹² Οι συμπαγείς κλίνες προορίζονται ως επί το πλείστον για λειτουργία εντός κυλινδρικών δεξαμενών. Για το λόγο αυτό, οι εξισώσεις υπολογισμού αναφέρονται κυρίως σε κυλινδρικά συστήματα συντεταγμένων.

¹³ Μια πολύ ενδιαφέρουσα αναλογία για την κατανόηση της διαπερατότητας δίνεται από R.G. Holdich [31]. Συγκεκριμένα, θεωρεί τον αντίστροφο της διαπερατότητας υδραυλικό ανάλογο της ωμικής αντίστασης ενός γραμμικού ηλεκτρικού κυλώματος. Έτσι, υψηλή αντίσταση συνεπάγεται χαμηλή διαπερατότητα και το αντίστροφο.

$$K = \frac{\varepsilon^3 \cdot d_p^2}{180 \cdot (1 - \varepsilon)^2} \quad (3.11)$$

Ισχύει για ισότροπα μέσα σφαιρικού ή σχεδόν σφαιρικού υλικού πλήρωσης, με πορώδες και διαμέτρους σωματιδίων συγκεκριμένου εύρους τιμών [24], [31]. Η σταθερά 180 προκύπτει δίνοντας την καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Άλλοι συγγραφείς, όπως οι Raithby and Hollands [24] προκρίνουν τη χρήση της σταθεράς 150 για καλύτερη συμφωνία [32]. Αναφέρεται επίσης, ότι η εξίσωση Rumpf-Gurte δίνει καλύτερα αποτελέσματα για συμπαγείς κλίνες σφαιρικών σωματιδίων, πορώδους 0,35-0,67 [33]:

$$K = \frac{\varepsilon^{5,5} \cdot d_p^2}{5,6} \quad (3.12)$$

Η γενική συναρτησιακή σχέση υπολογισμού της διαπερατότητας, που άρει τους περιορισμούς των ευρών πορώδους και διαμέτρου σωματιδίων είναι:

$$K = G \cdot f(\varepsilon) \quad (3.13)$$

όπου το G ονομάζεται συνάρτηση γεωμετρίας πόρων και η f(ε) συνάρτηση πορώδους [33]. Η γενική μορφή των δύο αυτών συναρτήσεων λαμβάνεται μέσω εκθετικών εξισώσεων και συχνά η εξ. 3.13 αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως power law model [33] και γράφεται:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(\varepsilon) = \varepsilon \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\alpha - \varepsilon} \right)^{2\beta} \\ G = \Gamma^2 \end{array} \right. \quad (3.14\alpha)$$

$$(3.14\beta)$$

όπου Γ: σταθερά που διεθνώς αναφέρεται ως interconnectivity, α: η παράμετρος cement exclusion factor με τιμές 0-1 και β: εκθετική παράμετρος. Τα Γ και β εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση του ρευστού με την κλίνη [33]. Περαιτέρω ανάλυση των σχέσεων υπολογισμού της διαπερατότητας, όπως ήδη μπορεί να φανεί και από την εξ. 3.14, παράγει σχέσεις με πιο αφηρημένα ή και μη μετρήσιμα μεγέθη. Ως κατακλείδα της συζήτησης γύρω από τη διαπερατότητα, προτείνεται η χρήση της εξ. 3.11 ως της συχνότερα εμφανιζόμενης στη σχετική βιβλιογραφία.

3.1.2.2 Επέκταση Forchheimer και Brinkman

Η εξίσωση του Darcy, αποτέλεσε μια πρώτη προσπάθεια περιγραφής της ροής σε πορώδη μέσα. Ουσιαστικά, θεωρεί ότι η πτώση πίεσης προέρχεται από την επίδραση ιξωδών τάσεων μεταξύ ρευστού και στερεού σε μικροσκοπικό επίπεδο. Η ισχύς της κρίνεται ικανοποιητική μόνο σε περιπτώσεις ροών χαμηλής ταχύτητας. Για τη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα σε μεγαλύτερες ταχύτητες, προτάθηκε από το Forchheimer το 1901 η φερώνυμη διόρθωση. Αυτή λαμβάνει υπόψη της την

επίδραση αδρανειακών¹⁴ φαινομένων που δρουν σε μικροσκοπικό επίπεδο [34] και γράφεται:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \cdot \vec{u}_{sup} - \frac{c_E}{\sqrt{K}} \cdot \rho \cdot |\vec{u}_{sup}| \cdot \vec{u}_{sup} \quad (3.15)$$

όπου η παράμετρος c_E αποτελεί την αδιάστατη παράμετρο Ergun που σχετίζεται με την αδρανειακή έλξη λόγω του πορώδους μέσου. Ο λόγος $c_E/(K^{1/2})=\beta$, ονομάζεται παράμετρος Forchheimer, έχει διαστάσεις $\{L^{-1}\}$. Σύμφωνα με άλλους συγγραφείς [32], η επέκταση Forchheimer γράφεται:

$$\begin{cases} \nabla P = -\frac{\mu}{K} \cdot \vec{u}_{sup} - \frac{\chi}{K} \cdot \rho \cdot |\vec{u}_{sup}| \cdot \vec{u}_{sup} & (3.16\alpha) \\ \chi = \frac{1,75 \cdot d_p}{150 \cdot (1 - \varepsilon)} & (3.16\beta) \end{cases}$$

όπου το χ πλέον ονομάζεται παράμετρος Forchheimer, με τις σταθερές 1,75 και 150 να αποτελούν εμπειρικές παραμέτρους για καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Στη βιβλιογραφία περισσότεροι συγγραφείς υιοθετούν την προσέγγιση της εξ. 3.15, κάτι που θα τηρηθεί και στην προκειμένη περίπτωση.

Σε περιπτώσεις μεγαλύτερης διαμέτρου σωματιδίων πλήρωσης, παρατηρούνται μακροσκοπικά διατμητικές τάσεις μεταξύ υγρού και στερεού. Για το λόγο αυτό ο Brinkman σε εργασία του το 1947 πρότεινε την ακόλουθη τροποποίηση που ενσωματώνει την επίδραση πολλών γειτονικών σφαιρών στη ροή [33]:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \cdot \vec{u}_{sup} + \frac{\hat{\mu}^{15}}{\varepsilon} \cdot \nabla \cdot (\nabla \vec{u}_{sup}) \quad (3.17)$$

Το μέγεθος $\hat{\mu}$ ονομάζεται ενεργό ιξώδες. Ο Brinkman θεώρησε την ισότητά του με το δυναμικό ιξώδες, αλλά αυτό δεν ισχύει πάντοτε [29]. Η εξ. 3.17 αναφέρεται ως εξίσωση Darcy-Brinkman, σε αντιδιαστολή με τις εξ. 3.15 και 3.16 που καλούνται εξισώσεις εξ. Darcy-Forchheimer. Η πλήρης περιγραφή ροών σε πορώδη μέσα γίνεται με την εξίσωση Darcy-Forchheimer-Brinkman:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \cdot \vec{u}_{sup} - \frac{c_E}{\sqrt{K}} \cdot \rho \cdot |\vec{u}_{sup}| \cdot \vec{u}_{sup} + \frac{\hat{\mu}}{\varepsilon} \cdot \nabla \cdot (\nabla \vec{u}_{sup}) \quad (3.18)$$

Οι περιοχές ισχύος καθεμιάς από τις εξισώσεις αυτές αποτελεί αντικείμενο έρευνας δυναμικά εξελισσόμενο, με δεδομένο ότι παράγονται ακόμα και σήμερα εργασίες που μελετούν το ζήτημα. Παρόλο το μεγάλο αριθμό κριτηρίων ισχύος των εξισώσεων αυτών, ξεκάθαρες απαντήσεις δεν έχουν ακόμα δοθεί. Αυτό σχετίζεται με το πρόβλημα ορισμού του Re και άλλων αδιάστατων παραμέτρων.

¹⁴ Τα αδρανειακά φαινόμενα σε μεγαλύτερες ταχύτητες ροής, γίνονται έντονα, όπως φαίνεται και από την αύξηση του Re (βλ. εξ.3.2).

¹⁵ Στην αρχική μορφή της επέκτασής του, ο Brinkman, θεώρησε την ισότητα ενεργού και δυναμικού ιξώδους. Σε μεταγενέστερη εργασία του, πρότεινε τη σχέση: $\hat{\mu} = \mu \cdot [1 + 2,5(1 - \varepsilon)]$ [24].

3.1.2.3 Ορισμός του Re και Μετάβαση από τη Ροή Darcy

Ένα πρόβλημα που ανακύπτει κατά την εφαρμογή της προσέγγισης συνεχούς μέσου, είναι αυτό του κατάλληλου ορισμού του Re. Όπως σημειώθηκε παραπάνω (ενότητα 3.1.1) με την εξ. 3.2, κατά την άμεση μοντελοποίηση η μόνη τροποποίηση εμφανίζεται στην επιλογή του χαρακτηριστικού μήκους. Με την προσέγγιση του συνεχούς μέσου, η εξ. 3.2 δίνει μόνο έναν από τους Re που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Οι τροποποιήσεις δεν έγκεινται μόνο στην αλλαγή του χαρακτηριστικού μήκους, αλλά προχωρούν στην εισαγωγή παραμέτρων της κλίνης, όπως το πορώδες και η διαπερατότητα.

Η σημασία του Re, λόγω των χαμηλών ταχυτήτων που συνήθως επικρατούν στις ροές σε πορώδη μέσα δεν γίνεται άμεσα αντιληπτή. Θα μπορούσε να ισχυριστεί κάποιος ότι για ροές στο φάσμα της έρπουσας, που δεν εμφανίζουν αστάθεια μετάβασης στην τύρβη, ο ακριβής ορισμός του Re είναι περιττός. Ο ισχυρισμός αυτός είναι πέρα για πέρα εσφαλμένος, καθώς στις ροές σε πορώδη μέσα, ο Re δεν αποτελεί μόνο κριτήριο μετάβασης στην τυρβώδη περιοχή, αλλά και κριτήριο για την κατάλληλη τροποποίηση της εξίσωσης Darcy. Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι διάφοροι ορισμοί του Re που προτείνονται στη βιβλιογραφία¹⁶:

- Re_p : πρόκειται για τον ορισμό που δίνεται από την εξ. 3.5
- Re_h : ως χαρακτηριστικό μήκος επιλέγεται η υδραυλική διάμετρος του συστήματος, ενώ ως ταχύτητα η u_{phys} [35]:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_h = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot d_p \\ Re_h = \frac{d_h \cdot u_{phys} \cdot \rho}{\mu} = \frac{u_{sup} \cdot d_p \cdot \rho}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu} \end{array} \right. \quad (3.19\alpha)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d_h = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot d_p \\ Re_h = \frac{d_h \cdot u_{phys} \cdot \rho}{\mu} = \frac{u_{sup} \cdot d_p \cdot \rho}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu} \end{array} \right. \quad (3.19\beta)$$

- $Re_{K(1/2)}$: αφού η διαπερατότητα K έχει διαστάσεις $\{L^2\}$, ως χαρακτηριστικό μήκος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η $K^{1/2}$ και ως ταχύτητα η u_{sup} [29]:

$$Re_{K(1/2)} = \frac{K^{1/2} \cdot u_{sup} \cdot \rho}{\mu} \quad (3.20)$$

- Re_K : ως χαρακτηριστικό μήκος θεωρείται το γινόμενο $K \cdot \beta$ [33]:

$$Re_K = \frac{K \cdot \beta \cdot u_{sup} \cdot \rho}{\mu} \quad (3.21)$$

- $Re_{K\varepsilon}$: ως χαρακτηριστικό μήκος θεωρείται η τετραγωνική ρίζα της διαπερατότητας, ενώ στη σχέση υπολογισμού υπεισέρχεται και το πορώδες της κλίνης [33]:

$$Re_{K\varepsilon} = \frac{u_{sup} \cdot \rho}{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{K}{\varepsilon}} \quad (3.22)$$

¹⁶ Όπως φαίνεται από τις διάφορες παραλλαγές του Re, αυτό που αλλάζει είναι το χαρακτηριστικό μήκος. Η ταχύτητα υπολογισμού του είναι κατά βάση η u_{sup} . Γενικά θεωρείται πιο αντιπροσωπευτική ταχύτητα, καθώς σε ανομοιόμορφα κατανομημένες κλίνες, η u_{phys} μεταβάλλεται σημαντικά.

Με βάση τις εξ. 3.5 και 3.19-3.22, διατυπώνονται τα κριτήρια ισχύος της εξίσωσης του Darcy για τα πορώδη μέσα. Ως προς το ζήτημα αυτό, παρατηρούνται ασάφειες στη βιβλιογραφία, οπότε εφιστάται προσοχή αναφορικά με τη χρήση των κριτηρίων στη βάση του κατάλληλου Re . Ορισμένα από αυτά είναι:

- Re_p : μετάβαση στο καθεστώς Forchheimer για $40 \leq Re_p \leq 80$, ενώ άλλες μελέτες θεωρούν ως κρίσιμη τιμή την $Re_p=100$, κάτω από την οποία ο N. Darcy δίνει ορθά αποτελέσματα. Χαρακτηρισμός της ροής βασισμένος στον Re_p χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμη η διάμετρος των σωματιδίων [34].
- Re_K : μετάβαση στο καθεστώς Forchheimer (πειραματική μελέτη) για $0,1 \leq Re_K \leq 0,2$, ενώ υπολογιστικά πειράματα προτείνουν $0,01 \leq Re_K \leq 0,1$ [34]. Χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της ροής σε υπολογιστικά πειράματα.
- $Re_{K(1/2)}$: προτείνεται ως κρίσιμη τιμή μετάβασης η $Re_{K(1/2)} = 100$ [29]
- Re_{Ke} : ροή Darcy για $0,06 \leq Re_{Ke} \leq 0,12$, στρωτή ροή Forchheimer: $0,34 \leq Re_{Ke} \leq 2,3$ και τυρβώδης ροή: $Re_{Ke} \geq 3,4$ [33]
- Re_h : μετάβαση στο καθεστώς Forchheimer για $0,1 \leq Re_h \leq 0,2$ [34]

Πέραν του Re , ένα δεύτερο κριτήριο για το είδος της ροής, προτείνεται από τους Zeng and Grigg (2005) στη βάση του αδιάστατου αριθμού Forchheimer (Fo). Ο Fo υπερτερεί έναντι του Re ακριβώς επειδή δεν υπεισέρχεται στον υπολογισμό του το χαρακτηριστικό μήκος. Ορίζεται ως:

$$Fo = \frac{\text{δυνάμεις αλληλεπίδρασης στερεού - υγρού}}{\text{δυνάμεις ιξώδους}} = \frac{K \cdot \beta \cdot \rho \cdot u}{\mu} \quad (3.23)$$

ενώ η επίδραση των δυνάμεων μεταξύ υγρού και στερεού εκφράζεται θεωρώντας το λόγο της επέκτασης Forchheimer προς την αντίστοιχη βαθμίδα πίεσης, δηλαδή:

$$E = \frac{\beta \cdot \rho \cdot |\vec{u}|^2}{|\nabla P|} \Leftrightarrow E = \frac{Fo}{1 + Fo} \quad (3.24)$$

Με χρήση της εξ. 3.24, μπορεί να υπολογιστεί ο κρίσιμος αριθμός Forchheimer, Fo_c . Επιλέγεται ένα επιτρεπτό ποσοστό απόκλισης από τη ροή Darcy, E_c , οπότε βρίσκεται το όριο μετάβασης στην περιοχή Forchheimer, ως εξής [34]:

$$E_c = \dots \Leftrightarrow \dots Fo_c \text{ και } \begin{cases} Fo > Fo_c, \text{ροή Forchheimer} \\ Fo < Fo_c, \text{ροή Darcy} \end{cases} \quad (3.25\alpha)$$

$$(3.25\beta)$$

Για την ενσωμάτωση της επίδρασης Brinkman, η βιβλιογραφία δεν είναι τόσο πλούσια, ενώ οι αναφορές στην περιοχή ισχύος της είναι μάλλον αποσπασματικές. Οι Nield and Bejan [29], παραθέτουν έναν κατάλογο με κριτήρια ενσωμάτωσης της επέκτασης Brinkman που έχουν κατά καιρούς προταθεί από ερευνητές:

- Σε περιπτώσεις που ισχύει $\varepsilon > 0,95$ εφαρμόζεται
- Σε περιπτώσεις που ισχύει $L \gg \sqrt{\frac{\hat{\mu} \cdot K}{\mu}}$ είναι αμελητέα
- Σε περιπτώσεις που ισχύει $\varepsilon < 0,8$ δεν εφαρμόζεται

- Σε περιπτώσεις που το μέγεθος των σωματιδίων είναι της τάξεως n^3 , όπου $n \ll 1$, είναι η απόσταση μεταξύ γειτονικών σωματιδίων, εφαρμόζεται
- Σε περιπτώσεις που μελετάται το οριακό στρώμα κοντά στο τοίχωμα της δεξαμενής και η επίδραση του πορώδους σε αυτό

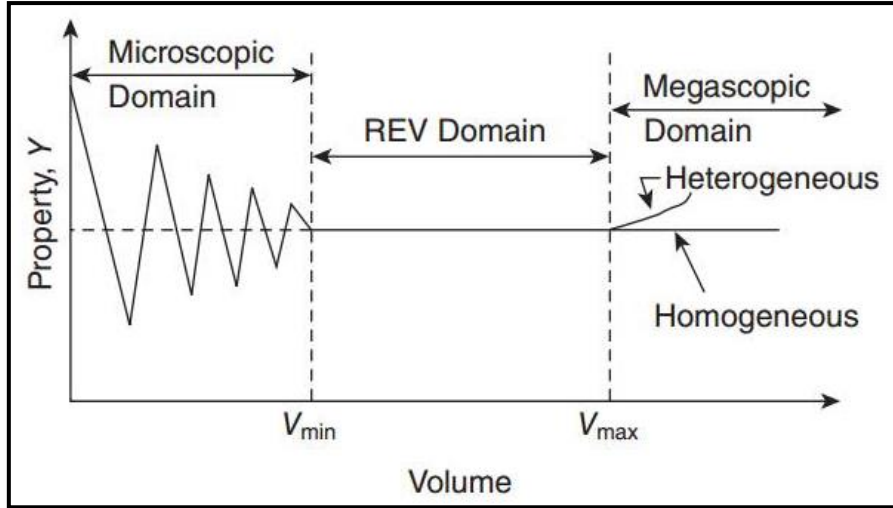
Σημειώνεται ότι η χρήση των όρων Brinkman και Forchheimer με ταυτόχρονη παράλειψη του όρου Darcy πρέπει να αποφεύγεται. Η ισχύς της εξίσωσης αυτής δεν είναι ξεκάθαρη, καθώς η απαίτηση της Brinkman για υψηλά πορώδη δεν είναι σίγουρο ότι συμβαδίζει με την επέκταση Forchheimer.

3.1.2.4 Μέθοδος Χωρικών Μέσων Τιμών (Method of Volume Averaging)

Η χρήση των μοντέλων συνεχούς μέσου που αναπτύχθηκαν ως το σημείο αυτό, δε δίνει παρά μια έκφραση της βαθμίδας πίεσης ως συνάρτηση της ταχύτητας, των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών της κλίνης. Η πλήρης περιγραφή των ροϊκών φαινομένων που δίνεται από το σύστημα των εξισώσεων Navier-Stokes (άμεση μοντελοποίηση) είναι αδύνατη σε ρεαλιστικά προβλήματα. Αναφαίνεται λοιπόν η ανάγκη περιγραφής της ροής σε μια μορφή οιονεί Navier-Stokes που θα ενσωματώνει ταυτόχρονα τα χαρακτηριστικά της κλίνης. Στο σημείο αυτό, προτού κατατεθεί η μέθοδος Χωρικών Μέσων Τιμών που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό, θα συζητηθούν τα χαρακτηριστικά μήκη που εμφανίζονται σε πορώδεις κλίνες.

Τα χαρακτηριστικά μήκη που ορίζονται κατά τη μελέτη συμπαγών κλινών, είναι τα ακόλουθα τέσσερα: α) το μέγεθος των στερεών σωματιδίων d_p , β) το μέγεθος του συστήματος L , γ) το μέγεθος του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου (REV) l και δ) η τετραγωνική ρίζα της διαπερατότητας $K^{1/2}$ [24]. Ο REV, για τον οποίο δεν είχε γίνει λόγος, μπορεί να περιγραφεί ως ο ελάχιστος διαφορικός όγκος που οδηγεί σε στατιστικά αποδεκτές μέσες τοπικές τιμές ιδιοτήτων όπως το πορώδες και η ταχύτητα. Έτσι, η τιμή της ταχύτητας για παράδειγμα, προκύπτει ως μέση τιμή των ταχυτήτων της περιοχής (REV), που περιβάλλει το σημείο ενδιαφέροντος. Αυτό μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητό από το Σχήμα 13: σε όγκους $V < V_{REV}$, η κατανομή της ιδιότητας Y είναι τυχαία. Σε όγκους $V > V_{REV}$ η κατανομή της δεν επηρεάζεται από την προσθήκη περισσότερων σωματιδίων (αύξηση REV). Προφανώς για να ισχύει το παραπάνω απαιτείται $l \gg d_p$ και $l \ll L$. Ένας αυστηρός ορισμός¹⁷ του REV, δίνεται από τον Civan [33], ως ο χαρακτηριστικός όγκος εντός του οποίου μικροσκοπικές ιδιότητες και εξισώσεις διατήρησης που ισχύουν σε μικροσκοπική κλίμακα, αφού επεξεργαστούν στατιστικά, δίνουν ακριβή περιγραφή μακροσκοπικών ιδιοτήτων και εξισώσεων.

¹⁷ Για το REV, έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί από ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με το ζήτημα. Ο Civan [33] παραθέτει τους πιο πλήρεις από αυτούς. Επιπλέον, τονίζει ότι ο REV μπορεί να διαφέρει από ιδιότητα σε ιδιότητα σε πολυφασικά συστήματα συμπαγών κλινών.



Σχήμα 13: Σε όγκους μικρότερους από τον αντιπροσωπευτικό η κατανομή μιας ιδιότητας είναι τυχαία, καθώς επηρεάζεται από την προσθήκη ή αφαίρεση περισσότερων σωματιδίων. Σε τιμές $V \geq V_{REV}$, ο αριθμός των σωματιδίων είναι επαρκής ώστε να οριστεί μια σταθερή τιμή της υπό μελέτη ιδιότητας (Civan [33]).

Η μέθοδος Χωρικών Μέσων Τιμών, αποτελεί μια αρκετά επίπονη αλγεβρική διαδικασία αυστηρού μαθηματικού φορμαλισμού. Για το λόγο αυτό θα εκτεθούν στην παρούσα εργασία ορισμένα βασικά σημεία της. Αρχικά, η μέση τοπική τιμή $\langle \psi \rangle$ μιας ειδικής ιδιότητας ψ σε ένα συγκεκριμένο όγκο V ορίζεται ως [24], [27]:

$$\langle \psi \rangle = \frac{1}{V} \cdot \iiint \psi \cdot dV \quad (3.26)$$

οπότε η μέση τοπική τιμή μιας ιδιότητας του ρευστού σε σταθερή κλίση, γράφεται:

$$\langle \psi \rangle = \frac{1}{V} \cdot \iiint \psi \cdot dV_{\beta} = \frac{\varepsilon}{V_{\beta}} \cdot \iiint \psi \cdot dV_{\beta} \quad (3.27)$$

όπου V_{β} είναι το τμήμα όγκου του V που καταλαμβάνει το ρευστό. Ακόμη, χρησιμοποιούνται τα τρία παρακάτω θεωρήματα:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \iiint \psi \cdot dV = \iiint \frac{\partial \psi}{\partial t} \cdot dV + \iint \psi \cdot \vec{u} \cdot \vec{n} \cdot dA \end{array} \right. \quad (3.28a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \iiint \nabla \psi \cdot dV = \iint \psi \cdot \vec{n} \cdot dA \end{array} \right. \quad (3.28\beta)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle \nabla \psi \rangle = \nabla \langle \psi \rangle + \frac{1}{V} \cdot \iint \vec{n}_{\beta\sigma} \cdot \psi \cdot dA_{\beta\sigma} \end{array} \right. \quad (3.28\gamma)$$

Η εξ. 3.28α είναι το θεώρημα μεταφοράς, γνωστό από τη Μηχανική των Ρευστών, η 3.28β είναι το θεώρημα της απόκλισης, ενώ η 3.28γ ονομάζεται θεώρημα χωρικής μέσης τιμής (Spatial Averaging Theorem-SAT). Επειδή το θεώρημα αυτό διατυπώνεται ειδικά για την περίπτωση ροής σε πορώδες μέσο, χρησιμοποιείται το εμβαδό της διεπιφάνειας στερεής και υγρής φάσης [27]. Από την εξ. 3.1α, εξάγεται η εξίσωση συνέχειας με τη μέθοδο Χωρικών Μέσων Τιμών:

$$\langle \nabla \cdot \vec{u}_\beta \rangle = \frac{1}{V} \iiint \nabla \cdot \vec{u}_\beta \cdot dV = 0 \stackrel{SAT}{\implies} \langle \nabla \cdot \vec{u}_\beta \rangle = \nabla \cdot \langle \vec{u}_\beta \rangle + \frac{1}{V} \cdot \iint \tilde{n}_{\beta\sigma} \cdot \vec{u}_\beta \cdot dA_{\beta\sigma} = 0 \quad (3.29)$$

Όμως, από την οριακή συνθήκη της εξ. 3.4, προκύπτει ότι:

$$\frac{1}{V} \cdot \iint \tilde{n}_{\beta\sigma} \cdot \vec{u}_\beta \cdot dA_{\beta\sigma} = 0 \quad (3.30)$$

Οπότε η τελική μορφή της εξίσωσης συνέχειας, δίνεται από την εξ. 3.31:

$$\langle \nabla \cdot \vec{u}_\beta \rangle = 0 \quad (3.31)$$

Για την εύρεση της αντίστοιχης εξίσωσης ορμής, ο μαθηματικός χειρισμός δεν είναι τόσο εύκολος. Με τη μέθοδο Χωρικών Μέσων Τιμών, για καθέναν από τους όρους της εξίσωσης Darcy-Forchheimer-Brinkman, απαιτείται μια σειρά από επίπονους υπολογισμούς που δεν καταλήγουν στην επιθυμητή μορφή της εξίσωσης ορμής [27]. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της μεθόδου Χωρικών Μέσων Τιμών και επιπλέον εμπειρικών συντελεστών, οδηγούν στις ακόλουθες μορφές [36]:

$$-\nabla \langle p_\beta \rangle + \rho_\beta \cdot \vec{g} = \frac{\mu}{\varepsilon \cdot K} \langle \vec{u}_\beta \rangle \Leftrightarrow \dots$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\rho_\beta}{\varepsilon} \cdot \frac{D\vec{u}_D}{Dt} = -\nabla \langle p_\beta \rangle + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \cdot \vec{u}_{sup} - \frac{\mu}{K} \cdot \vec{u}_{sup} - \\ \frac{c_E}{\sqrt{K}} \cdot \rho \cdot |\vec{u}_{sup}| \cdot \vec{u}_{sup} + \rho_\beta \cdot \vec{g} \end{cases} \quad (3.32\alpha)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\rho_\beta}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}_D}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \vec{u}_D \cdot \nabla \vec{u}_D \right) = -\nabla \langle p_\beta \rangle + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \cdot \vec{u}_{sup} - \frac{\mu}{K} \cdot \vec{u}_{sup} \\ - \frac{c_E}{\sqrt{K}} \cdot \rho \cdot |\vec{u}_{sup}| \cdot \vec{u}_{sup} + \rho_\beta \cdot \vec{g} \end{cases} \quad (3.32\beta)$$

Οι εμπειρικοί συντελεστές που υπεισέρχονται στην εξ. 3.32, είναι αυτοί που συνοδεύουν το μεταβατικό και τον αδρανειακό όρο. Έτσι, στην εξ. 3.32α, η εμπειρική παράμετρος είναι κοινή, κάτι που δε συμβαίνει στην εξ. 3.32β. Το σύστημα λοιπόν των 3.31 και 3.32 (είτε α, είτε β) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή συμπαγούς κλίνης. Τέτοιες είναι οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται και από τα εμπορικά πακέτα λογισμικού COMSOL Multiphysics και ANSYS Fluent.

3.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση Μεταφοράς Θερμότητας

Οι δύο βασικές προσεγγίσεις με κριτήριο την τοπολογία του πορώδους μέσου που χρησιμοποιούνται κατά τη μοντελοποίηση της μεταφοράς ορμής, εφαρμόζονται και στην περίπτωση της θερμότητας. Έτσι, σε περιπτώσεις κλινών με λόγο χαρακτηριστικών διαστάσεων ($d_p/L \approx O(1)$), εφαρμόζεται η μέθοδος της άμεσης μοντελοποίησης και για τις εξισώσεις θερμότητας. Σε αντίθετη περίπτωση, εφαρμόζονται εξισώσεις θερμότητας για πορώδεις κλίνες με τη χρήση κατάλληλων σταθμισμένων συντελεστών.

3.2.1 Άμεση Μοντελοποίηση Θερμότητας

Για την περίπτωση αυτή, διακρίνονται οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας που παρατηρούνται σε σταθερές κλίνες, όπως διατυπώθηκαν στην ενότητα 2.4. Αυτοί είναι οι τρεις γνωστοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας, αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Οι εξισώσεις περιγραφής τους διαφέρουν μόνο ως προς ορισμένους συντελεστές χαρακτηριστικούς της συντελούμενης μεταφοράς (δηλ. διαφορετικό συντελεστή h στην περίπτωση συναγωγής από το τοίχωμα προς το ρευστό και διαφορετικό στην περίπτωση ρευστού και σωματιδίου της κλίνης). Η γενική τους μορφή είναι:

$$\begin{cases} \dot{q}_{cond} = -A \cdot k \cdot \nabla T \\ \dot{q}_{conv} = A \cdot h \cdot (T - T_{\infty}) \\ \dot{q}_{rad} = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_s^4) \end{cases} \quad (3.33)$$

Η μεταφορά θερμότητας στις συμπαγείς κλίνες είναι μια διαδικασία που εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως: α) το μέγεθος των στερεών σωματιδίων, β) την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, γ) το σχήμα των σωματιδίων, δ) τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων, ε) το ρέον ρευστό. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ορισμένοι εμπειρικοί συντελεστές που περιγράφουν τη μεταφορά θερμότητας στις σταθερές κλίνες [32]. Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες, όπως: α) ο αριθμός Re , β) ο αριθμός Pr , γ) το πορώδες ε , δ) ο λόγος της διαμέτρου κλίνης προς τη χαρακτηριστική διάσταση των σωματιδίων, ε) ο λόγος του ύψους της κλίνης προς τη χαρακτηριστική διάσταση των σωματιδίων, στ) οι τοπικές συνθήκες ροής, ζ) η επίδραση παράλληλων φαινομένων (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία), η) η τραχύτητα των στερεών επιφανειών. Εξαιτίας του πλήθους των παραγόντων που επηρεάζουν τους εμπειρικούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, αυτοί ισχύουν μόνο υπό πολύ συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Συνεπώς, αυθαίρετη γενίκευση σχέσεων εκτός της περιοχής εφαρμογής τους, οδηγεί σε λανθασμένη περιγραφή του μηχανισμού μεταφοράς [35].

Στις πρακτικές εφαρμογές γίνεται χρήση αυτών των συντελεστών για την επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας. Τέτοιοι συντελεστές διαμορφώνονται για τα διάφορα είδη αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας, συνήθως με την παραδοχή της μονοσωματιδιακής κλίνης. Έπειτα, επαναδιαμορφώνονται ώστε να ληφθεί υπόψη η παρουσία περισσότερων στερεών πλήρωσης της κλίνης [35]. Μια δεύτερη παραδοχή αναφορικά με τον υπολογισμό των κατάλληλων συντελεστών, σχετίζεται με τις δυσκολίες που προκαλούν σωματίδια πλήρωσης ακανόνιστης γεωμετρίας. Σύμφωνα με τον Ackenbach [35] ορθές σχέσεις υπολογισμού παράγονται εφαρμόζοντας τις εξισώσεις που ισχύουν για γεωμετρία πλάκας, τροποποιώντας κατάλληλα το χαρακτηριστικό μήκος.

Οι περισσότερες διαθέσιμες εργασίες στη βιβλιογραφία, αφορούν στον υπολογισμό τροποποιημένων εκφράσεων των συντελεστών k και h . Αναφορικά με τη k σε

συμπαγείς κλίνες, αυτή δεν αποτελεί πλέον ιδιότητα του υλικού, αλλά εξαρτάται από το πεδίο ροής και τη γεωμετρία των σωματιδίων. Για το λόγο αυτό ονομάζεται ενεργός θερμική αγωγιμότητα και υπολογίζεται ως συνάρτηση του Re : $k_{eff}=f(Re)$. Αντίστοιχα, στις περιπτώσεις συναγωγής, ο συντελεστής h υπολογίζεται μέσω του αριθμού Nu , η έκφραση του οποίου διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της συναγωγής (φυσική, εξαναγκασμένη). Έτσι, στις περιπτώσεις φυσικής συναγωγής, δίνεται συνήθως συναρτήσεως του Ra , ενώ σε περιπτώσεις εξαναγκασμένης στη μορφή: $Nu=C \cdot Re^m \cdot Pr^n$, όπου C , m και n σταθερές εξαρτώμενες από τη γεωμετρία της πορώδους κλίνης και τις συνθήκες ροής [35].

Ορισμένες από τις σχέσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5). Πλήρης ανάλυση των σχέσεων άμεσης μοντελοποίησης θερμότητας, για ποικιλία γεωμετριών και για μεγάλο εύρος αδιάστατων αριθμών δίνεται από τους Nield and Bejan [29].

Πίνακας 5: Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού συντελεστών μεταφοράς θερμότητας όπως συγκεντρώνονται από τους Nield and Bejan [29], Rohsenow [32] και Achenbach [35]. Η αντιμετώπιση της μεταφοράς θερμότητας με εφαρμογή της άμεσης μοντελοποίησης γίνεται μέσω εμπειρικών σχέσεων αυτής της μορφής. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν σχέσεις με μεγάλο εύρος εφαρμογών για όλους τους μηχανισμούς μεταφοράς.

Συναγωγή μεταξύ ρευστού και στερεού σωματιδίου (μονοσωματιδιακή κλίση)	
Εξίσωση	$Nu_p = 2 + 0,6 \cdot Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$
Εύρος Εφαρμογής	$Re_p > 50$
Συναγωγή μεταξύ ρευστού και στερεού σωματιδίου (πολυσωματιδιακή κλίση)	
Εξίσωση	$Nu_p = 2 + 1,8 \cdot Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$
Εύρος Εφαρμογής	$Re_p > 50$
Συναγωγή μεταξύ τοιχώματος δεξαμενής και εξωτερικού ρευστού	
Εξίσωση	$Nu = \left(1 - \frac{1}{D/d}\right) \cdot Re^{0,61} \cdot Pr^{1/3}$
Εύρος Εφαρμογής	$Re > 100$
Ενεργός θερμική αγωγιμότητα κλίνης (λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της συναγωγής)	
Εξίσωση	$\frac{K_{conv}}{K} = \frac{K_e}{K} + 0,75 \cdot Re_p \cdot Pr$
Εύρος Εφαρμογής	$Re_p \leq 5400$
Ερμηνεία Συμβόλων	K : θερμική αγωγιμότητα ρευστού K_e : θερμική αγωγιμότητα κλίνης που πληρούται με ακίνητο ρευστό
Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία (σωματίδια προς το ρευστό της κλίνης)	
Εξίσωση	$\dot{q}_{rad}'' = \frac{\sigma}{\left(\frac{2}{\varepsilon} - 1\right)} \cdot (T^4 - T_s^4)$
Παραδοχή	τα σωματίδια συμπεριφέρονται ως φαιές επιφάνειες
Ερμηνεία Συμβόλων	ε : συντελεστής εκπομπής κατά τη μεταφορά θερμότητας από τα σωματίδια προς το ρευστό της κλίνης

3.2.2 Συνεχής Μοντελοποίηση Θερμότητας

Η προσέγγιση αυτή υιοθετεί την ίδια λογική με την αντίστοιχη κατά τη μελέτη της ροής. Στη διεθνή βιβλιογραφία δε συναντάται ως «Άμεση Μοντελοποίηση Θερμότητας» και η επιλογή της ονομασίας έγινε υστερόβουλα, ώστε να γίνει αντιληπτή η σύνδεση με την αντίστοιχη προσέγγιση της μεταφοράς ορμής. Αντίθετα, τα μοντέλα αυτά χωρίζονται σε δύο ευρείες κατηγορίες, α) τα μοντέλα θερμικής ισορροπίας και β) τα μοντέλα χωρίς θερμική ισορροπία [24]. Κριτήριο επιλογής αμφότερων των μεθόδων αντί της μοντελοποίησης συνεχούς, είναι ο λόγος $L/d_p \gg 1$. Όταν αυτό πληρείται, επιλέγεται η εν λόγω μέθοδος.

3.2.2.1 Μοντέλα Θερμικής Ισορροπίας

Η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης της μεταφοράς θερμότητας προϋποθέτει ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος της χαρακτηριστικής διάστασης d_p είναι αμελητέα σε σύγκριση με την αντίστοιχη κατά μήκος της L , τόσο για το στερεό, όσο και για το ρευστό¹⁸. Εκφράζεται από τις ανισότητες:

$$\Delta T_{K^{1/2}} < \Delta T_{d_p} < \Delta T_l \ll \Delta T_L \quad (3.34)$$

Στην περίπτωση αυτή μπορεί να υποθεθεί ισότητα των θερμοκρασιών ρευστής και στερεάς φάσης εντός περιοχής μήκους d_p , ήτοι: $T_s = T_\beta = T$ [24]. Σε πρακτικά προβλήματα, η παραδοχή αυτή είναι ρεαλιστική σε χαμηλές ταχύτητες και σε περιπτώσεις χωρίς έντονα μεταβατικά φαινόμενα. Απουσία ακτινοβολίας, έργου πίεσης και με μηδενική τη συνάρτηση απωλειών ενέργειας, διαμορφώνεται η εξίσωση για το μοντέλο θερμικής ισορροπίας. Αυτή συχνά αναφέρεται και ως μονοφασική εξίσωση θερμότητας σε πορώδη μέσα [37]. Γράφεται ως εξής:

$$\begin{cases} (1 - \varepsilon) \cdot (\rho C_p)_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varepsilon) \cdot \nabla(k_s \nabla T_s) + (1 - \varepsilon) \cdot q_s''' \\ \varepsilon \cdot (\rho C_p)_\beta \cdot \frac{\partial T_\beta}{\partial t} + (\rho C_p)_\beta \cdot \vec{u}_\beta \cdot \nabla T_\beta = \varepsilon \cdot \nabla(k_\beta \nabla T_\beta) + \varepsilon \cdot q_\beta''' \end{cases} \xrightarrow{+, T_s = T_\beta = T}$$

$$(\rho C_p)_{eff} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_\beta \cdot \vec{u}_\beta \cdot \nabla T_\beta = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + q_{eff}''' \quad (3.35\alpha)$$

$$(\rho C_p)_{eff} = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho C_p)_s + \varepsilon \cdot (\rho C_p)_\beta \quad (3.35\beta)$$

$$k_{eff} = (1 - \varepsilon) \cdot k_s + \varepsilon \cdot k_\beta \quad (3.35\gamma)$$

$$q_{eff}''' = (1 - \varepsilon) \cdot q_s''' + \varepsilon \cdot q_\beta''' \quad (3.35\delta)$$

Όπως προτείνουν οι Ismail and Stuginsky (1998), το μοντέλο αυτό δίνει αποδεκτά αποτελέσματα σε περιπτώσεις κλινών μεγάλη θερμικής αγωγιμότητας και

¹⁸ Προς αποφυγή συγχύσεων, η d_p αποτελεί πέρα από μέση διάμετρο των στερεών σωματιδίων και χαρακτηριστική διάσταση, οπότε νοείται ως μέγεθος και για τη ρευστή φάση.

¹⁹ Υποτίθεται ισότροπο μέσο.

θερμοχωρητικότητας του στερεού σε σύγκριση με το εργαζόμενο ρευστό. Το σημαντικό συμπέρασμα από την εξ. 3.35α είναι η περιγραφή του συστήματος από μια εξίσωση θερμότητας.

3.2.2.2 Μοντέλα χωρίς Θερμική Ισορροπία

Σε μεγαλύτερες ταχύτητες ρευστού, έντονα μεταβατικές καταστάσεις ή φαινόμενα που κυριαρχεί ο όρος πηγής, η παραδοχή της θερμικής ισορροπίας μεταξύ στερεάς και ρευστής φάσης στερείται ορθότητας. Συνεπώς, σε κάθε σημείο της κλίνης οι διαφορετικές φάσεις έχουν διαφορετική θερμοκρασία. Έτσι, οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μεταφορά είναι δύο, μια για κάθε διαφορετική φάση. Η σύνδεση των δύο εξισώσεων γίνεται σε ρεαλιστικά προβλήματα με εμπειρικό τρόπο, χρησιμοποιώντας ως παράμετρο ένα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή h_{sf} . Αυτός ονομάζεται διεπιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή [24]. Οι εξισώσεις αυτού του είδους προκύπτουν και πάλι με εφαρμογή της μεθόδου Χωρικών Μέσων Τιμών.

Τα μοντέλα που βασίζονται στην παράμετρο h_{sf} και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση ρεαλιστικών προβλημάτων σε σταθερές κλίνες σφαιρικών στερεών σωματιδίων, είναι τα ακόλουθα τρία:

- Μοντέλο Schumann: πρόκειται για το πρώτο τέτοιου είδους μοντέλο που διατυπώθηκε. Είναι το απλούστερο, λιγότερο ακριβές, αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι προκύπτει με αναλυτικό τρόπο. Είναι μονοδιάστατο και οι παραδοχές του συνοψίζονται ως εξής: α) μηδενική αγωγή στη ρευστή και τη στερεά φάση, β) θερμοκρασιακή ομοιομορφία κάθε σφαιριδίου λόγω υψηλής θερμικής διαχυτότητας γ) ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το ρευστό στο στερεό είναι ανάλογος της μέσης διαφοράς στη θερμοκρασία τους, δ) μηδενική μεταβολή όγκου στερεού και ρευστού λόγω μεταβολή της θερμοκρασίας, ε) θερμοφυσικές ιδιότητες ανεξάρτητες της θερμοκρασίας [38]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \langle T_{\beta} \rangle}{\partial t} + \langle u_{\beta} \rangle \cdot \frac{\partial \langle T_{\beta} \rangle}{\partial x} = \frac{h_{sf} \cdot A_{\beta\sigma}}{\varepsilon \cdot V \cdot (\rho C_p)_{\beta}} \cdot (\langle T_{\sigma} \rangle - \langle T_{\beta} \rangle) \\ \frac{\partial \langle T_{\sigma} \rangle}{\partial t} = \frac{-h_{sf} \cdot A_{\beta\sigma}}{(1 - \varepsilon) \cdot V \cdot (\rho C_p)_{\sigma}} \cdot (\langle T_{\sigma} \rangle - \langle T_{\beta} \rangle) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3.36\alpha) \\ (3.36\beta) \end{array}$$

- Συνεχές Μοντέλο: υποτίθεται ότι η στερεά φάση συμπεριφέρεται ως συνεχές μέσο και όχι ως ένα σύνολο διακριτών στερεών σωματιδίων. Η μεταφορά θερμότητας στην κλίνη πραγματοποιείται με αγωγή στην ακτινική και αξονική διεύθυνση. Οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής [37]:

$$\frac{\partial \langle T_\beta \rangle}{\partial t} + \langle u_\beta \rangle \cdot \frac{\partial \langle T_\beta \rangle}{\partial x} = \frac{h_{sf} \cdot A_{\beta\sigma}}{\varepsilon \cdot V \cdot (\rho C_p)_\beta} \cdot (\langle T_\sigma \rangle - \langle T_\beta \rangle) + \frac{k_{\beta x}}{\varepsilon \cdot (\rho C_p)_\beta} \cdot \frac{\partial^2 \langle T_\beta \rangle}{\partial x^2} + \frac{k_{\beta r}}{\varepsilon \cdot (\rho C_p)_\beta} \cdot \left[\frac{\partial^2 \langle T_\beta \rangle}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \langle T_\beta \rangle}{\partial r} \right] + \frac{h_{sf} \cdot A_{\beta\sigma}}{\varepsilon \cdot V \cdot (\rho C_p)_\beta} \cdot (\langle T_\sigma \rangle - \langle T_\beta \rangle) \quad (3.37\alpha)$$

$$\frac{\partial \langle T_\sigma \rangle}{\partial t} = \frac{-h_{sf} \cdot A_{\beta\sigma}}{(1-\varepsilon) \cdot V \cdot (\rho C_p)_\sigma} \cdot (\langle T_\sigma \rangle - \langle T_\beta \rangle) + \frac{k_{\sigma x}}{(1-\varepsilon) \cdot (\rho C_p)_\sigma} \cdot \frac{\partial^2 \langle T_\sigma \rangle}{\partial x^2} + \frac{k_{\sigma r}}{(1-\varepsilon) \cdot (\rho C_p)_\sigma} \cdot \left[\frac{\partial^2 \langle T_\sigma \rangle}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \langle T_\sigma \rangle}{\partial r} \right] \quad (3.37\beta)$$

- Μοντέλο Εσωτερικής Θερμοκρασιακής Βαθμίδας: πρόκειται για την πιο σύγχρονη και ακριβή προσέγγιση, η οποία έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς μελέτης της αλλαγής φάσης σε σφαιρικά σωματίδια. Οι παραδοχές της θεώρησης αυτής είναι οι παρακάτω: α) μηδενική εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των σωματιδίων της κλίνης και β) στο εσωτερικό των σωματιδίων η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή κατά την ακτινική διεύθυνση. Εφαρμόζεται μόνο σε προβλήματα μεταβατικής κατάστασης. Περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις [19], [37]:

$$\frac{\partial \langle T_\beta \rangle}{\partial t} + \langle u_\beta \rangle \cdot \frac{\partial \langle T_\beta \rangle}{\partial x} = \frac{k_{\beta x}}{\varepsilon \cdot (\rho C_p)_\beta} \cdot \frac{\partial^2 \langle T_\beta \rangle}{\partial x^2} + \frac{h_{sf} \cdot A_{\beta\sigma}}{\varepsilon \cdot V \cdot (\rho C_p)_\beta} \cdot (\langle T_{\beta\sigma} \rangle - \langle T_\beta \rangle) \quad (3.38\alpha)$$

$$\frac{\partial \langle T_\sigma \rangle}{\partial t} = \frac{k_{\sigma r}}{(\rho C_p)_\sigma} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \langle T_\sigma \rangle}{\partial r} \right) \quad (3.38\beta)$$

$$-k_{\sigma r} \cdot \frac{\partial \langle T_\sigma \rangle}{\partial r} = h_{sf} \cdot (\langle T_{\beta\sigma} \rangle - \langle T_\beta \rangle) \text{ για } r = r_0 \quad (3.38\gamma)$$

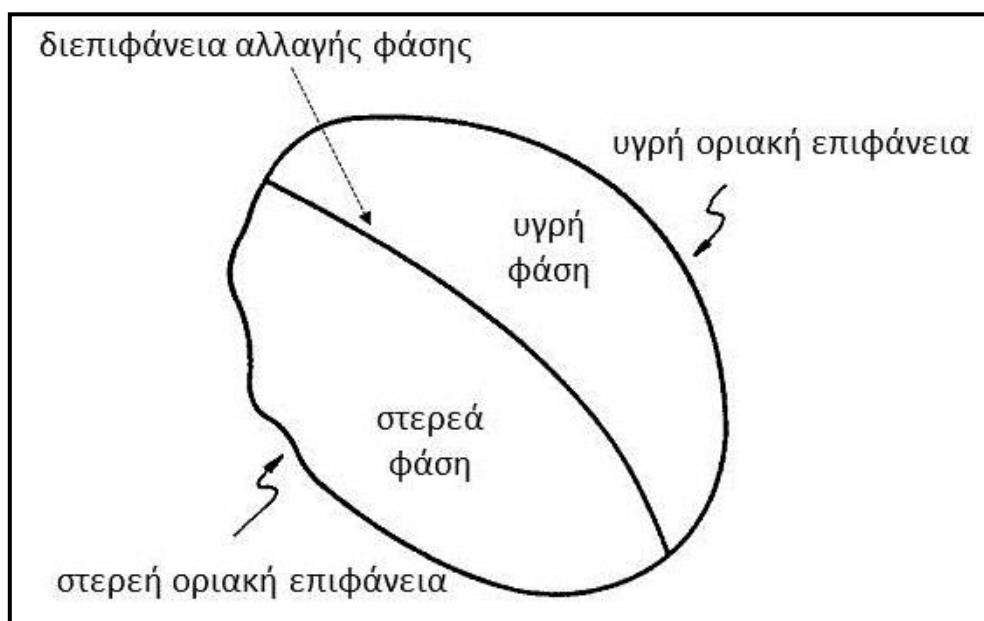
όπου η εξ. 3.38γ αποτελεί απαραίτητη οριακή συνθήκη του προβλήματος (r_0 η ακτίνα του σωματιδίου). Ακόμη, η θερμοκρασία $T_{\beta\sigma}$ είναι η θερμοκρασία του στερεού στην επιφάνεια ελέγχου $A_{\beta\sigma}$.

Κλείνοντας την ενότητα αυτή, τονίζεται ότι σε πολλές υπολογιστικές μελέτες [7] γίνεται χρήση μονοδιάστατων μοντέλων. Αυτά προέρχονται από τα αντίστοιχα δι- και τρισδιάστατα, με την παραδοχή της αξονικής, αποκλειστικά, μεταφοράς θερμότητας. Δίνουν αποδεκτά αποτελέσματα σε περιπτώσεις αξιολόγησης της ετήσιας λειτουργίας TESS [10].

3.3 Μαθηματική Μοντελοποίηση Αλλαγής Φάσης

Η επίλυση προβλημάτων σχετικών με τη μετάβαση στερεό↔υγρό αποτελεί μια από τις δυναμικότερα εξελισσόμενες περιοχές των φαινομένων μεταφοράς. Χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλόκοτητα εξαιτίας α) της κινούμενης διεπιφάνειας αλλαγής φάσης (μη γραμμικό πρόβλημα) β) των διαφορετικών ιδιοτήτων των δύο φάσεων και γ) της ανεπαρκούς γνώσης των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού και ειδικότερα της επίδρασης της φυσικής συναγωγής [25] (Σχήμα 14). Εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην επιστημονική βιβλιογραφία στα τέλη του 19^{ου} αι. με τις εργασίες του J. Stefan, ο οποίος μελέτησε το πρόβλημα της στερεοποίησης με μοναδικό μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας την αγωγή (Πρόβλημα Stefan). Αργότερα, άρχισε να ενσωματώνεται και η επίδραση της συναγωγής.

Η μαθηματική αντιμετώπιση της αλλαγής φάσης μπορεί να γίνει είτε αναλυτικά, είτε αριθμητικά. Οι αναλυτικές μέθοδοι έχουν περιορισμένη εφαρμογή και για το λόγο αυτό θα παρατεθεί μόνο το πρόβλημα του Stefan, μέσω του οποίου ορίστηκε η κίνουμένη διεπιφάνεια αλλαγής φάσης. Οι αριθμητικές μέθοδοι γνωρίζουν ευρεία αποδοχή από τη διεθνή κοινότητα με σημαντικότερες²⁰ από αυτές: α) τις μεθόδους κινούμενου πλέγματος, β) τις μεθόδους σταθερού πλέγματος [39].



Σχήμα 14: Γεωμετρική απεικόνιση του φυσικού χωρίου κατά την αλλαγή φάσης στερεό↔υγρό.

²⁰ Αναφορικά με το ζήτημα της κατηγοριοποίησης των υπολογιστικών μεθόδων, για το συγκεκριμένο πρόβλημα δεν υπάρχει συμφωνία ως προς τις επιμέρους υποκατηγορίες. Ορισμένοι ερευνητές [25] προτείνουν διαφορετικό ταξινομικό σχήμα, διακρίνοντας τις μεθόδους: α) σταθερού πλέγματος, β) μεταβλητού πλέγματος, γ) αναπροσαρμογής πλέγματος, δ) ενθαλπικές. Οι περισσότερες από τις εργασίες που μελετήθηκαν [21], [39] υιοθετούν το σχήμα που παρατέθηκε στο κύριο σώμα του κειμένου.

3.3.1 Αναλυτική Προσέγγιση Stefan

Η μαθηματική διατύπωση των προβλημάτων Stefan βασίζεται στην επίλυση του μεταβατικού ισοζυγίου ενέργειας και την εισαγωγή της έννοιας της θέσης της διεπιφάνειας στερεού-υγρού $s(t)$. Η τομή που πραγματοποίησε ο Stefan, υπήρξε η ανάπτυξη της ομώνυμης συνθήκης Stefan που αποτελεί το ισοζύγιο ενέργειας για την περιοχή της διεπιφάνειας αλλαγής φάσης.

Η εξ. 3.39α είναι το ισοζύγιο ενέργειας για τη στερεά φάση, η εξ. 3.39β για την υγρή. Η εξ. 3.39γ είναι η μαθηματική έκφραση της συνθήκης Stefan, όπου με n συμβολίζεται η διεύθυνση που είναι κάθετη στη διεπιφάνεια με κατεύθυνση προς την πλευρά του στερεού. Οι εξ. 3.39δ, ε, στ αποτελούν τις αρχικές συνθήκες, ενώ η εξ. 3.39ζ είναι η απαραίτητη οριακή συνθήκη για το πρόβλημα. Στα γεωμετρικά όρια του πεδίου μπορούν να εφαρμοστούν οριακές συνθήκες πρώτου, δεύτερου και τρίτου είδους, ανάλογα με τις επιταγές του προβλήματος.

$$\left\{ \begin{array}{l} (\rho C_p)_\sigma \cdot \frac{\partial T_\sigma}{\partial t} = \nabla \cdot (k_\sigma \nabla T_\sigma) \end{array} \right. \quad (3.39\alpha)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (\rho C_p)_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla \cdot (k_l \nabla T_l) \end{array} \right. \quad (3.39\beta)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot \Delta h_m \cdot \frac{ds(t)}{dt} = k_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial n} - k_\sigma \cdot \frac{\partial T_\sigma}{\partial n} \end{array} \right. \quad (3.39\gamma)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_\sigma(\vec{x}, 0) = T_{\sigma i}(\vec{x}) \end{array} \right. \quad (3.39\delta)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_l(\vec{x}, 0) = T_{li}(\vec{x}) \end{array} \right. \quad (3.39\epsilon)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s(0) = s_i \end{array} \right. \quad (3.39\sigma\tau)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_\sigma = T_l = T_{interface} \end{array} \right. \quad (3.39\zeta)$$

Η μέθοδος αντιμετώπισης που πρότεινε ο Stefan, επίδεχεται αναλυτικής επίλυσης μόνο σε περιπτώσεις μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας με απλές οριακές συνθήκες. Εντούτοις, η σημασία της ανάλυσής του αναφορικά με τις διεργασίες τήξης-πήξης, έγκειται στην εισαγωγή του όρου της κινούμενης διεπιφάνειας. Πλέον τα προβλήματα αλλαγής φάσης αντιμετωπίζονται υπολογιστικά παρακάμπτοντας την ανάλυση Stefan, ωστόσο η έννοια της κινούμενης διεπιφάνειας έχει υιοθετηθεί για το χαρακτηρισμό των αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται.

3.3.2 Αριθμητικές Μέθοδοι

Πρόκειται για την πιο ελπιδοφόρο προσέγγιση, καθώς πέραν των αναλυτικών μεθόδων (βλ. ενότητα 3.3.1) και οι πειραματικές παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες (π.χ. λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, εντοπισμός μετώπου αλλαγής φάσης). Το πρωταρχικό ζήτημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι αριθμητικές

μέθοδοι είναι η διαρκής κίνηση της διεπιφάνειας. Μια κίνηση που δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων και αποτελεί κομμάτι της λύσης. Σύμφωνα με την ταξινόμηση που υιοθετήθηκε παραπάνω, διακρίνονται δύο γενικές κατηγορίες μεθόδων:

3.3.2.1 Αριθμητικές Μέθοδοι Κινούμενου Πλέγματος

Στην περίπτωση αυτή, η αλλαγή φάσης λαμβάνεται υπόψη μέσω της άμεσης παρακολούθησης της κίνησης της διεπιφάνειας. Τα γεωμετρικά χωρία των δύο διακριτών φάσεων διέπονται από διαφορετικές εξισώσεις διατήρησης, μία εξίσωση θερμότητας για τη στερεά και μια για την υγρή φάση. Η συνθήκη που ισχύει για το μέτωπο της αλλαγής φάσης, είναι η γνωστή μας συνθήκη Stefan. Η θέση της διεπιφάνειας $s(t)$ στο χώρο προσδιορίζεται με αναπροσαρμογή του πλέγματος διακριτοποίησης κατά την πορεία επίλυσης. Απαιτείται τοπική πύκνωση του πλέγματος στη διεπιφάνεια για καλύτερη απεικόνιση της αλλαγής φάσης. Πράγματι, η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από υψηλές βαθμίδες μεγεθών και ασυνέχεια ως προς τις θερμοφυσικές ιδιότητες. Η τοπική πύκνωση πραγματοποιείται με δύο τρόπους [40]: α) με τη μέθοδο h , που χρησιμοποιείται στους εμπορικούς κώδικες, η επίλυση ξεκινά με ομοιόμορφο πλέγμα και αναπροσαρμόζεται σε κάθε χρονικό βήμα και β) με τη μέθοδο r , οπότε το αρχικό πλέγμα διατηρεί τον αριθμό των κελιών του σταθερό, αλλά κινείται ακολουθώντας την περιοχή υψηλών βαθμίδων που συμπίπτει με τη διεπιφάνεια αλλαγής φάσης. Μειονεκτεί ως προς την εφαρμογή της σε απλές γεωμετρίες και προβλήματα λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους [13].

3.3.2.2 Αριθμητικές Μέθοδοι Σταθερού Πλέγματος

Κατά την εφαρμογή μεθόδων σταθερού πλέγματος, η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης αγνοείται και η επίδρασή της στη διεργασία λαμβάνεται υπόψη με ενσωμάτωση της λανθάνουσας θερμότητας στη συνάρτηση ενθαλπία ή σε μια ενεργό τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας. Η μέθοδος αυτή (κατά πολλούς ερευνητές τα μοντέλα θερμοχωρητικότητας ανήνουν στον ενθαλπικό φορμαλισμό) προκρίνεται λόγω της μεγάλης ακρίβειας των αποτελεσμάτων που παρέχει σε πρακτικά πρόβλημα και του χαμηλότερου υπολογιστικού της κόστους. Η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης δεν περιγράφεται από διαφορετική εξίσωση σε σχέση με τις περιοχές αμιγούς στερεάς ή υγρής φάσης και δεν ορίζονται οριακές συνθήκες για αυτήν [13]. Κρίνεται κατάλληλη για εφαρμογή και σε περιπτώσεις μιγμάτων που κατά την αλλαγή φάσης εμφανίζεται πολτώδης ζώνη (mushy zone) [21].

Σε προβλήματα αλλαγής φάσης, ορίζεται η ενθαλπία ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και λύνεται το ισοζύγιο ενέργειας. Οι πρώτες προσεγγίσεις, εξέταζαν το ζήτημα θεωρώντας τη μεταφορά με συναγωγή ως αμελητέα. Νεώτερες μελέτες ενσωμάτωσαν την επίδραση της συναγωγής στο φαινόμενο μέσω ενός ενεργού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Παρακάτω σκιαγραφείται αλγεβρικά η μέθοδος [40]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k_{cond} \cdot (\nabla T)) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k_{eff} \cdot (\nabla T)) \quad (3.41)$$

όπου η εξ. 3.40 θεωρεί ως μοναδικό μηχανισμό μεταφοράς την αγωγή, ενώ η εξ. 3.41 προσθέτει και τη συναγωγή. Στις εξ. 3.40 και 3.41, η ενθαλπία εμφανίζεται ως ογκομετρική ποσότητα, η οποία ορίζεται ως:

$$H(T) = H_{sensible}(T) + H_{latent}(T) = \int_{T_{init}}^{T_m} \rho_s \cdot C_{ps} \cdot dT + a_m \cdot \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_f} \rho_l \cdot C_{pl} \cdot dT \quad (3.42)$$

Στις περιπτώσεις ενσωμάτωσης της συναγωγής χρησιμοποιούνται εμπειρικές εκφράσεις του k_{eff} , οι οποίες έχουν τη γενική μορφή της εξ. 3.43 (φυσική συναγωγή) [19], [21]:

$$\frac{k_{eff}}{k_l} = C \cdot Ra^m = C \cdot (Pr \cdot Gr)^m \quad (3.43)$$

όπου ο εκθέτης m λαμβάνει συνήθως ρητές θετικές τιμές και k_l είναι η θερμική αγωγιμότητα της υγρής φάσης. Η εξ. 3.41 διαμορφώνεται τελικά ως εξής:

$$\frac{\partial H_{sensible}(T)}{\partial t} = \nabla[k_l \cdot C \cdot (Pr \cdot Gr)^m \cdot (\nabla T)] - \Delta H_m \cdot \frac{\partial a_m}{\partial t} \quad (3.44)$$

Ως κατακλείδα της περιγραφής της ενθαλπικής μεθόδου αναφέρεται ότι η ισοδυναμία της με την κλασική προσέγγιση της διεπιφάνειας (στερεό-διεπιφάνεια-υγρό) έχει αποδειχτεί από την εργασία των Shamsundar and Sparrow [41].

Η δεύτερη προσέγγιση σταθερού πλέγματος, που σύμφωνα με πολλούς ερευνητές ανήκει στον ενθαπλικό φορμαλισμό, θεωρεί την ενσωμάτωση ενεργού τιμής στη θερμοχωρητικότητα (apparent heat capacity methods) για το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης. Λαμβάνεται κατ' αυτόν τον τρόπο μια τροποποιημένη εξίσωση μεταφοράς θερμότητας [42]. Τα πρώτα βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση θεώρησαν την ακόλουθη έκφραση για την ειδική θερμοχωρητικότητα [43]:

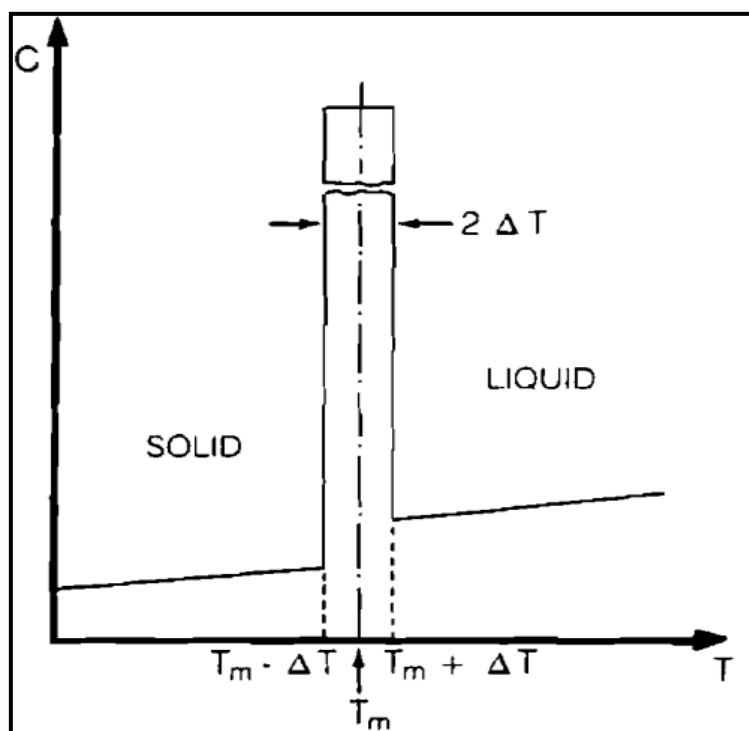
$$C_p = \begin{cases} C_{ps} \text{ για } T < T_m & (3.45\alpha) \\ \Delta H_m \cdot \delta \cdot (T - T_m) \text{ για } T = T_m & (3.45\beta) \\ C_{pl} \text{ για } T > T_m & (3.45\gamma) \end{cases}$$

όπου το δ στην εξ. 3.45 είναι η συνάρτηση Dirac και ΔH_m : η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα. Για την διεξαγωγή των υπολογιστικών πειραμάτων, η εξ. 3.45 τροποποιείται με αντικατάσταση της συνάρτησης Dirac από μια συνάρτηση που έχει πεπερασμένη τιμή σε ένα πολύ μικρό εύρος θερμοκρασιών ΔT . Έτσι, η τελική έκφραση της θερμοχωρητικότητας διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην εξ. 3.46 και

το Σχήμα 15. Το θερμοκρασιακό εύρος ΔT πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να μπορεί να προσομοιωθεί η αλλαγή φάσης καθαρών ουσιών (σημείο αλλαγής φάσης). Σε σχέση με τις μη καθαρές ουσίες που εμφανίζουν περιοχή αλλαγής φάσης, επιλέγεται συνήθως το ΔT ώστε να είναι συμμετρικό ως προς τα άκρα του διαστήματος αλλαγής φάσης [43].

$$C_p = \begin{cases} C_{ps} \text{ για } T < T_m & (3.46\alpha) \\ \frac{\Delta H_m}{2 \cdot \Delta T} + \frac{C_{ps} + C_{pl}}{2} \text{ για } T = T_m & (3.46\beta) \\ C_{pl} \text{ για } T > T_m & (3.46\gamma) \end{cases}$$

Η εξ. 3.46 εκφράζει μια απλή μορφή του μοντέλου φαινόμενης θερμοχωρητικότητας. Πλέον, έχουν προταθεί αρκετές τροποποιήσεις του, οι οποίες έχουν αυστηρότερο αλγεβρικό φορμαλισμό. Ακόμη, στην προσέγγιση φαινόμενης θερμοχωρητικότητας ενσωματώνονται και τροποποιημένες εκφράσεις της θερμικής αγωγιμότητας και της πυκνότητας [42]. Με τον τρόπο αυτό, η αλλαγή φάσης αποτυπώνεται ως ασυνέχεια όχι μόνο μιας, αλλά τριών θερμοφυσικών ιδιοτήτων. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αλλαγή φάσης επιλέγεται να μοντελοποιηθεί μέσω της εξ. 3.46, λόγω της απλής μορφής εισαγωγής της σε εμπορικούς κώδικες Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και της επιβεβαίωσης των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρέχει.



Σχήμα 15: Μοντέλο φαινόμενης θερμοχωρητικότητας (apparent heat capacity): σε διάστημα ΔT γύρω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, η τιμή της θερμοχωρητικότητας λαμβάνει αυξημένη τιμή (Hsiao [43]).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Υπολογιστική Διαδικασία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι υπολογιστικές τεχνικές επίλυσης προβλημάτων αποθήκευσης θερμότητας σε συμπαγείς κλίνες και διατυπώνονται τα προβλήματα που μελετήθηκαν κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας. Αρχικά, μελετώνται οι υπολογιστικές τεχνικές που εφαρμόζονται από τα λογισμικά Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ANSYS Fluent και COMSOL Multiphysics. Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική περιγραφή των κατασκευαστικών στοιχείων των διατάξεων και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών που προσομοιώνονται. Κατακλείδα του κεφαλαίου είναι η αναφορά σε ορισμένες δυσκολίες που προέκυψαν κατά την αλλαγή φάσης.

4.1 Υπολογιστικές Μέθοδοι Επίλυσης

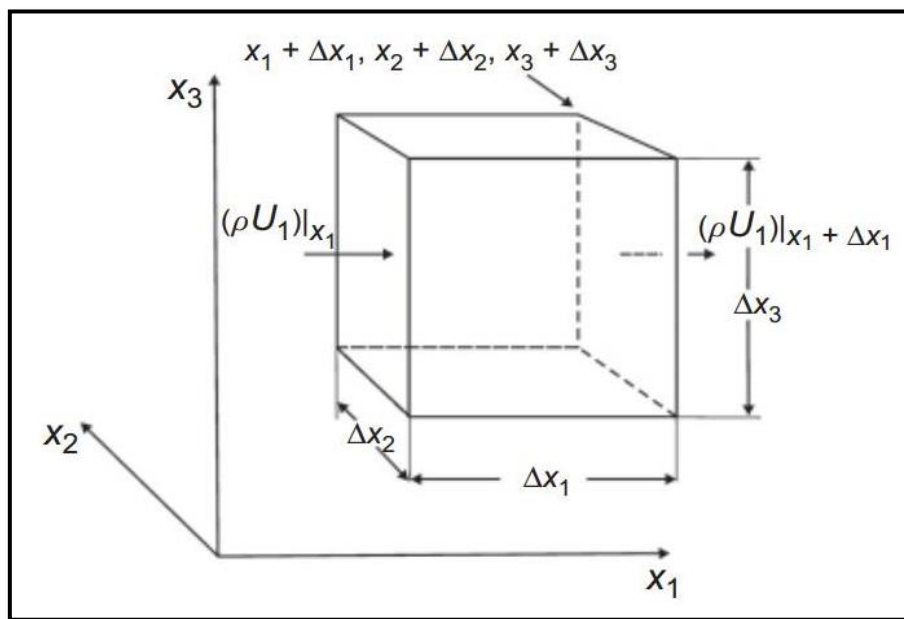
Προβλήματα όπως αυτά που σκιαγραφούνται στις ενότητες του τρίτου κεφαλαίου, δεν μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά και άπτονται του αντικειμένου της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς ορμής και θερμότητας των προβλημάτων αυτών, αποτελούν συστήματα συζευγμένων μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η επίλυσή τους καθίσταται δυνατή με την επιστράτευση των εμπορικών λογισμικών COMSOL Multiphysics 3.4 και ANSYS Fluent 14.0 αντίστοιχα, τα οποία υπολογίζουν αριθμητικές (προσεγγιστικές) λύσεις. Τα δύο αυτά είδη λογισμικού δεν προχωρούν στη λύση των εξισώσεων συνέχειας, ορμής και θερμότητας με τον ίδιο τρόπο. Πράγματι, το μεν ANSYS Fluent 14.0 χρησιμοποιεί τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων, το δε COMSOL Multiphysics 3.4 τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Αμφότερες χαρακτηρίζονται από επιμέρους πλεονεκτήματα αλλά και αδυναμίες. Τα δύο εδάφια που ακολουθούν επιχειρούν μια περιεκτική μελέτη των δύο αυτών μεθόδων.

4.1.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων

Σύμφωνα με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων, το υπολογιστικό χωρίο διαιρείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό μη επικαλυπτόμενων κελιών (διακριτοποίηση υπολογιστικού χωρίου) στα οποία επιβάλλεται η διατήρηση μιας ειδικής ιδιότητας ϕ . Καθένα από αυτά τα υπολογιστικά κελιά που σχηματίζονται αποτελεί έναν όγκο ελέγχου. Η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου συνεπάγεται τη διακριτοποίηση των αντίστοιχων εξισώσεων μεταφοράς, οπότε οι συνεχείς ιδιότητες που περιγράφουν τα διάφορα πεδία (π.χ. ταχύτητας, θερμοκρασίας) λαμβάνουν τιμές σε διακριτά σημεία. Έτσι, το σύστημα των μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων μετατρέπεται σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο λύνεται αριθμητικά παρέχοντας τις τιμές των πεδίων σε διακριτά σημεία [44].

Κατά τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου, στη γενικότερη περίπτωση του 3D χώρου, μπορούμε, χωρίς άρση της γενικότητας, να υποθέσουμε ότι δημιουργούνται κυβικοί όγκοι ελέγχου μικρών αλλά πεπερασμένων διαστάσεων (Σχήμα 16). Αποδεικνύεται ότι σε κάθε επιμέρους όγκο ελέγχου, ισχύει η διατήρηση οποιασδήποτε ειδικής ιδιότητας ϕ , καταλήγοντας σε μια εξίσωση μεταφοράς της μορφής:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot \phi) = \nabla \cdot [\Gamma \cdot (\nabla \phi)] + S \quad (4.1)$$

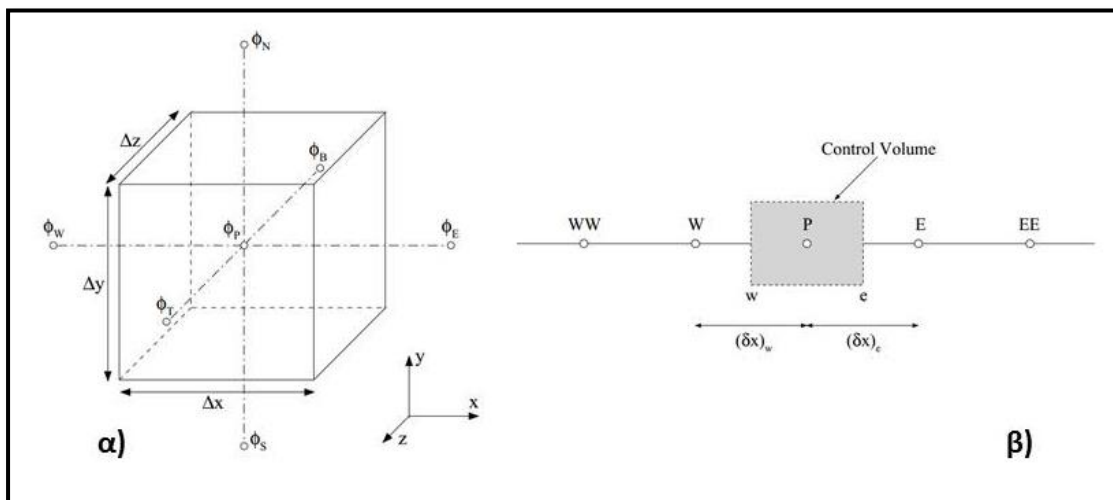


Σχήμα 16: Εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας σε ένα κυβικό όγκο στοιχείου ρευστού. Το ισοζύγιο μάζας εφαρμόζεται και στις τρεις διαστάσεις, παράγοντας εξίσωση στη μορφή της εξ. 4.1. Προφανώς για την περίπτωση της μάζας, επιλέγεται $\phi=1$ (Andersson et al. [46]).

όπου ο πρώτος όρος του αριστερού μέλους εκφράζει τη χρονική μεταβολή της ιδιότητας ϕ , ο δεύτερος τη συναγωγή, ενώ στο δεξί μέλος, ο πρώτος αναφέρεται στην αγωγή και ο δεύτερος στον όρο συσσώρευσης ή κατανάλωσης (όρος πηγής). Ο συντελεστής Γ που πλαισιώνει τον όρο της αγωγής, καθώς και ο όρος πηγής, εξαρτώνται από το φυσικό μέγεθος που εκφράζει η ειδική ιδιότητα ϕ . Η εξ. 4.1 είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως γενική διαφορική εξίσωση διατήρησης [44].

Στη μορφή της εξ. 4.1, βρίσκεται και το σύστημα των προς επίλυση μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Για την επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων, η εξ. 4.1 ολοκληρώνεται αναλυτικά στον όγκο ελέγχου, υποθέτοντας σταθερή (stepwise profile) ή τμηματικά γραμμική (piecewise linear profile) μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής μεταξύ των κέντρων των κελιών [44]. Έτσι, προκύπτει για κάθε μία διαφορική εξίσωση μια αντίστοιχη αλγεβρική, η οποία μπορεί να επιλυθεί ως προς την τιμή της μεταβλητής ϕ στο σημείο του χώρου που

μας ενδιαφέρει. Στη γενική περίπτωση ενός τρισδιάστατου κελιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17α, διακρίνεται το σημείο ενδιαφέροντος P, καθώς και τα κεντρικά σημεία γειτονικών όγκων ελέγχου (E, W, N, S, T, B). Η τιμή της μεταβλητής ϕ στο σημείο P, έστω ϕ_p , θα εκφραστεί ως συνάρτηση των τιμών της ίδιας μεταβλητής στα κέντρα των γειτονικών όγκων ελέγχου. Αντίστοιχα, οι τιμές των ταχυτήτων στην επιφάνεια των όγκων ελέγχου, που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό ροών μέσω αυτής, υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή. Το πλέγμα αυτού του είδους, στο οποίο οι μεταβλητές αποθηκεύονται στα κέντρα των όγκων ελέγχου και οι ταχύτητες στην επιφάνεια ελέγχου υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή, ονομάζεται ομόθετο (co-located) [45].



Σχήμα 17: Όγκοι ελέγχου με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων: α) Κυβικός όγκος ελέγχου σε καρτεσιανό ομόθετο πλέγμα. Φαίνεται χαρακτηριστικά η θέση του σημείο ενδιαφέροντος P και τα αντίστοιχα γειτονικά του W (West), E (East), N (North), S (South), B (Bottom), T (Top). β) Απεικόνιση μονοδιάστατου διακριτοποιημένου χωρίου. Γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος P, διακρίνονται τα όρια του όγκου ελέγχου (μέτωπα-faces) w και e (Καλούδης [10]).

Η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου από N αριθμό κελιών παράγει ένα σύστημα NxN αλγεβρικών εξισώσεων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μεταβλητή στο κέντρο του κελιού ενδιαφέροντος, συσχετίζεται με τις αντίστοιχες μεταβλητές των γειτονικών κελιών. Η πορεία εύρεσης της διακριτοποιημένης εξίσωσης έχει ως εξής:

- Ολοκλήρωση της εξ. 4.1 γύρω από τον όγκο ελέγχου:

$$(4.8) \Rightarrow \frac{\int (\rho\phi)_p - (\rho\phi)_p^o \cdot \Delta V}{\Delta t} + \left(\rho\mu\phi - \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e A_e - \left(\rho\mu\phi - \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_w A_w + \left(\rho\mu\phi - \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_n A_n - \left(\rho\mu\phi - \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_s A_s + \left(\rho\mu\phi - \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_t A_t - \left(\rho\mu\phi - \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_b A_b = S\Delta V \quad (4.2)$$

όπου $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$, $A_w = A_e = \Delta y \cdot \Delta z$, $A_n = A_s = \Delta x \cdot \Delta z$ και $A_t = A_b = \Delta x \cdot \Delta y$.

- Γραμμικοποίηση της εξ. 4.2: η ολοκλήρωση της εξ. 4.1 παράγει εξισώσεις σε μη-γραμμική μορφή. Η γραμμικοποίησή τους είναι απαραίτητη, ώστε το τελικό σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων να είναι γραμμικό, στοιχείο που διευκολύνει την επίλυσή του. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί ποικίλα σχήματα διακριτοποίησης των όρων διάχυσης, συναγωγής, πηγής και το μεταβατικό όρο. Ενδεικτικά αναφέρονται τα σχήματα ανάντη παραγωγής (upwind) και κεντρικών διαφορών για τον όρο συναγωγής, οι κεντρικές διαφορές και το σχήμα power law για τη διάχυση, πρώτης και δεύτερης τάξης για το μεταβατικό όρο [10]. Για εκτενέστερη ανάλυση των σχημάτων διακριτοποίησης, οι αναγνώστες παραπέμπονται σε εγχειρίδια όπως τα Versteeg and Malalasekera [45], Andersson et al. [46].
- Επίλυση τελικού συστήματος: με την ολοκλήρωση της διακριτοποίησης των εξισώσεων, προκύπτουν οι εξισώσεις του συστήματος στη μορφή:

$$A_P^\phi \phi_P = \sum_{nb} A_{nb}^\phi \phi_{nb} + S \quad (4.3)$$

όπου nb: W, E, N, S, T, B, τα κέντρα των γειτονικών κελιών και A_P^ϕ και A_{nb}^ϕ οι γραμμικοποιημένες εκφράσεις των συντελεστών ϕ_P και ϕ_{nb} . Η διαδικασία επίλυσης, αφού ληφθούν κατάλληλες αρχικές, οριακές συνθήκες και κριτήριο τερματισμού, χρησιμοποιεί τις τιμές ϕ_{nb} ώστε να προσδιορίσει μια προσεγγιστική τιμή της λύσης.

4.1.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Πρόκειται για την αριθμητική μέθοδο επίλυσης που χρησιμοποιείται από το λογισμικό COMSOL Multiphysics [47]. Όπως και η μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων που αναπτύχθηκε παραπάνω, έτσι και η μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, βασίζεται στη διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου σε υποχωρία πεπερασμένου πλήθους μέσω κατάλληλου πλέγματος. Τα υποχωρία αυτά ονομάζονται στοιχεία. Μεταξύ γειτονικών στοιχείων καθώς και στο εσωτερικό τους ορίζονται οι κόμβοι του πλέγματος [48]. Σκοπός της μεθόδου είναι η επίλυση ενός προβλήματος οριακών τιμών όπως το παρακάτω:

$$Lu = f \text{ στο } D \quad (4.4)$$

$$Bu = g \text{ στο } \partial D \quad (4.5)$$

όπου u είναι οι λύσεις των παραπάνω εξισώσεων, D η περιοχή ή υποπεριοχή του υπολογιστικού χωρίου που μελετάται για την οποία ισχύει $D \in \mathbb{R}^n$ (στο φυσικό χώρο των τριών διαστάσεων $n=3$) L είναι διαφορικός τελεστής που δρα στη συνάρτηση u , B ο συνοριακός τελεστής ορισμένος στο σύνορο ∂D . Η εξ. 4.4 αποτελεί τη διαφορική εξίσωση του προβλήματος, ενώ η εξ. 4.5 την αντίστοιχη συνοριακή συνθήκη. Η λύση u είναι συνάρτηση του διανύσματος θέσης \vec{x} , που ορίζεται ως εξής [48]:

$$\vec{x} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \hat{e}_i \quad (4.6)$$

όπου τα \hat{e}_i είναι τα μοναδιαία διάνυσματα στους άξονες συντεταγμένων και η n η διάσταση του Ευκλείδειου χώρου. Η αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος συνοριακών τιμών που περιγράφεται από τις εξισώσεις 4.4 και 4.5, προσεγγίζει την πραγματική λύση $u(\vec{x})$ με μια πεπερασμένη σειρά συναρτήσεων που δίνεται από τη σχέση [48]:

$$u(\vec{x}) = \sum_{j=1}^N u_j \cdot \varphi^j(\vec{x}) \quad (4.7)$$

όπου οι συναρτήσεις της μορφής φ^j καλούνται συναρτήσεις βάσης και είναι συνήθως πολυώνυμα πρώτου ή δεύτερου βαθμού του διανύσματος θέσης [48]. Οι συντελεστές των συναρτήσεων βάσης u_j της εξ. 4.7, ονομάζονται κομβικοί άγνωστοι και αποτελούν τις τιμές της προσεγγιστικής λύσης στους κόμβους του χωρίου. Η εύρεση λοιπόν της προσεγγιστικής λύσης ανάγεται στην εύρεση των τιμών των κομβικών αγνώστων.

Μια προσεγγιστική λύση της εξ. 4.4 προφανώς δεν την ικανοποιεί επακριβώς, επομένως εμφανίζεται υπόλοιπο ίσο με: $Lu - f$. Η λύση του προβλήματος συνοριακών τιμών που περιγράφεται από τις εξ. 4.4 και 4.5, μπορεί να γίνει με τη μέθοδο Σταθμισμένων Υπολοίπων Galerkin, σύμφωνα με την οποία πρέπει να μηδενιστούν τα σταθμισμένα υπόλοιπα που δίνονται από τη σχέση [48]:

$$R_i = \int_D (Lu - f) \cdot \varphi^i(\vec{x}) dS \quad (4.8)$$

όπου οι συναρτήσεις βάσεις είναι οι ίδιες που χρησιμοποιήθηκαν στην εξ. 4.7 για την κατασκευή της προσεγγιστικής λύσης του προβλήματος των εξ. 4.4 και 4.5. Το πλήθος των σταθμισμένων υπολοίπων R_i συμπίπτει με το πλήθος των συναρτήσεων βάσης και των κόμβων του πλέγματος. Από την εξ. 4.7, η εξ. 4.8 γράφεται [48]:

$$\text{εξ. 4.15} \xrightarrow{(4.14)} R_i = \int_D \varphi^i \cdot (L \cdot (\sum_{j=1}^N u_j \cdot \varphi^j)) dS - \int_D f \cdot \varphi^i \cdot dS \quad (4.9)$$

Στην παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή η συνάρτηση f και οι συναρτήσεις βάσης φ^j , οπότε το μεταβλητό τμήμα στην έκφραση υπολογισμού του σταθμισμένου υπολοίπου είναι οι κομβικοί άγνωστοι u_j . Στην ειδική περίπτωση γραμμικού τελεστή L , η εξ. 4.9 μπορεί να απολοποιηθεί στη μορφή [48]:

$$R_i = \sum_{j=1}^N u_j \int_D \varphi^i \cdot L \cdot \varphi^j dS - \int_D f \cdot \varphi^i \cdot dS \quad (4.10)$$

Ενσωματώνοντας στην εξ. 4.9 το μηδενισμό του σταθμισμένου υπολοίπου και εκφράζοντάς το ως συνάρτηση των κομβικών αγνώστων u_j , η εξ. 4.9 γράφεται [48]:

$$R_i(u_1, u_2, \dots, u_n) = \sum_{j=1}^N (u_j \cdot a_{ij} - b_{ij}) = 0 \quad (4.11)$$

Τα υπόλοιπα Galerkin (εξ. 4.8-11) είναι αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία με τους κόμβους του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Με απλά λόγια, το υπόλοιπο R_i αντιστοιχεί στον κόμβο i , επειδή η συνάρτηση βάσης που γεννά το υπόλοιπο αυτό, αντιστοιχεί στον κόμβο i [48]. Αφού κατασκευαστεί μια έκφραση του σταθμισμένου υπολοίπου στη μορφή της εξ. 4.11, ακολουθούν μια σειρά από άλλα βήματα προς την κατεύθυνση της λύσης, τα οποία συνοπτικά φαίνονται παρακάτω:

- Ολική-τοπική θεώρηση των παραμέτρων της διακριτοποίησης: η αρίθμηση των στοιχείων και των κόμβων ενός πλέγματος γίνονται κατά τρόπο τυχαίο. Οι κόμβοι αριθμούνται ολικά, λαμβάνοντας τιμές $i=1,2,\dots,N$ και ανεξάρτητα από την αρίθμηση των στοιχείων. Καθώς όμως η ολική αρίθμηση είναι τυχαία, γεννάται το εξής ερώτημα: πως μπορεί να διαχωριστεί ο κόμβος ενός στοιχείου A από τον κόμβο ενός στοιχείου B ; Η απάντηση δίνεται από την τοπική αρίθμηση των κόμβων που δηλώνει το στοιχείο στο οποίο ανήκει ο συγκεκριμένος κόμβος. Κατασκευάζεται έτσι ένας πίνακας, που ονομάζεται πίνακας NOP (NOP array) και συμβολίζεται με $NOP(k,n)$, όπου το k αντιστοιχεί στην αρίθμηση του στοιχείου και το n στην αρίθμηση του κόμβου [48]. Το είδος αυτό της αρίθμησης εφαρμόζεται και στις συναρτήσεις βάσης.
- Κατασκευή συναρτήσεων βάσης: για λόγους απλότητας, οι συναρτήσεις βάσης που χρησιμοποιούνται είναι πολυώνυμα πρώτου και δεύτερου βαθμού ως προς τις χωρικές τους συντεταγμένες. Λόγω της αυθαίρετης επιλογής του πλέγματος, οι συναρτήσεις βάσης (μπορούν να ορίζονται τοπικά σε κάθε στοιχείο) αλλάζουν έκφραση από στοιχείο σε στοιχείο. Για να αποκτήσουν ενιαία έκφραση οι συναρτήσεις βάσης, ορίζονται ως προς στοιχεία αναφοράς. Σε κάθε κόμβο το στοιχείο αναφοράς αντιστοιχεί σε μια συνάρτηση βάσης που είναι μονάδα σε αυτόν τον κόμβο και μηδενική σε κάθε άλλο κόμβο του στοιχείου. Με τη βοήθεια της συνάρτησης αναφοράς, η συνάρτηση βάσης μπορεί να εκφραστεί μέσω μετασχηματισμού ως προς οποιοδήποτε άλλο στοιχείο του πλέγματος. Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται ισοπαραμετρική απεικόνιση [48].
- Υπολογισμός των ολοκληρωμάτων στα σταθμισμένα υπόλοιπα Galerkin: από τις εξισώσεις υπολογισμού των υπολοίπων Galerkin, φαίνεται ότι περιλαμβάνουν τον υπολογισμό ολοκληρωμάτων. Τα ολοκληρώματα αυτά υπολογίζονται στο χωρίο D και στο σύνορο ∂D με εφαρμογή της ισοπαραμετρικής απεικόνισης και αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων.

Για εκτενέστερη αναφορά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [48].

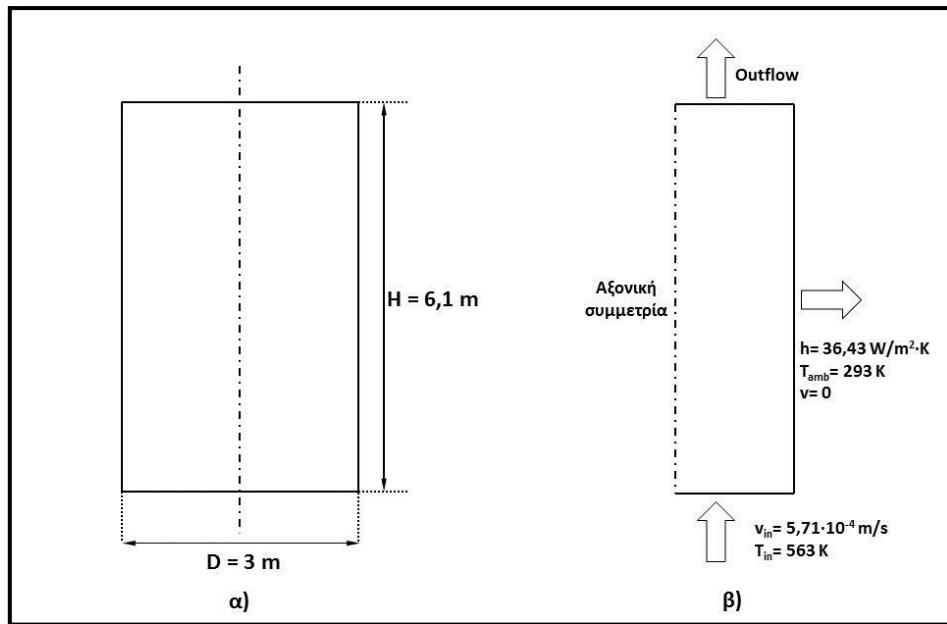
4.2 Ορισμός προς Επίλυση Προβλημάτων

Κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας, διενεργήθηκαν υπολογιστικά πειράματα σε TESS. Απώτερος στόχος, ήταν η προσομοίωση της λειτουργίας δεξαμενής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε PCM και επιβεβαίωση με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [11]. Τηρώντας τη διεθνή πρακτική που εφαρμόζεται σε προβλήματα αυτού του είδους και λαμβάνοντας υπόψη το χαρακτήρα μιας προπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, κρίθηκε ως αναγκαίο πρώτο βήμα η προσομοίωση μιας διάταξης αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, λόγω των απλούστερων χαρακτηριστικών της. Εφεξής, γίνεται αναφορά στο πρόβλημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας ως Πρόβλημα I και στο αντίστοιχο της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ως Πρόβλημα II. Τα προβλήματα αυτά διαθέτουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά (αξονική συμμετρία, συμπαγή κλίση αποθήκευσης) ταυτόχρονα όμως διαφέρουν σημαντικά ως προς το χειρισμό τους λόγω της παρουσίας ή μη της αλλαγής φάσης.

4.2.1 Πρόβλημα I-SHTESS

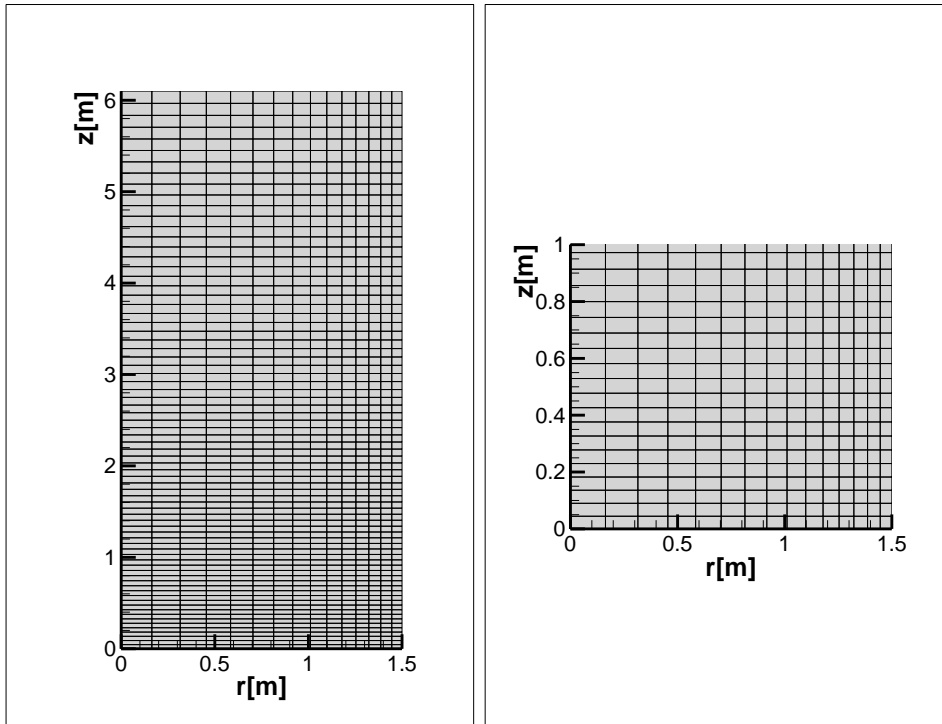
Προσομοιώνεται η λειτουργία SHTESS υπό μορφή δεξαμενής θερμικής διαστρωμάτωσης βιομηχανικής κλίμακας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [7]. Το σύστημα αυτό και τα πειραματικά αποτελέσματα που το συνοδεύουν, δημοσιεύτηκαν το 2002 και έκτοτε αποτελούν κλασική εργασία για την επιβεβαίωση της ορθής επίλυσης υπολογιστικών κωδίκων. Η περίπτωση που εξετάζεται, επιχειρούσε μια ολοκληρωμένη τεχνική μελέτη για την αντικατάσταση συστήματος δύο δεξαμενών από μια θερμοκλίση που επιτυγχάνει την αποθήκευση του ίδιου θερμικού φορτίου. Η μελέτη αυτή συμπεριελάμβανε και οικονομικά στοιχεία για το προτεινόμενο σύστημα μιας δεξαμενής.

Η προσομοίωση της λειτουργίας της αποθηκευτικής διάταξης πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ANSYS Fluent 14.0, αδειοδότηση για το οποίο παρέχεται από το ΚΗΥ του ΕΜΠ. Για την επίλυση, αρχικά καταστρώθηκε η γεωμετρία του προβλήματος σε περιβάλλον ANSYS Design Modeler. Πρόκειται για λογισμικό CAD που ανήκει στην παλέτα της ANSYS και προσφέρει εύκολο σχεδιασμό απλών γεωμετριών, όπως αυτή του προβλήματος. Η δεξαμενή είναι κυλινδρικού σχήματος και για την απεικόνισή της σε γεωμετρικό χωρίο 2D, λόγω της αξονικής συμμετρίας, θα σχεδιαστεί ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Οι διαστάσεις της δεξαμενής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 18, είναι $H=6,1\text{m}$ και $R=1,5\text{m}$. Έτσι το ορθογωνικό χωρίο, θα έχει οριζόντια διάσταση ίση $L=R=1,5\text{m}$ και ύψος $H=6,1\text{m}$. Με την αποθήκευση της γεωμετρίας, έπεται η εισαγωγή του πλέγματος διακριτοποίησης.

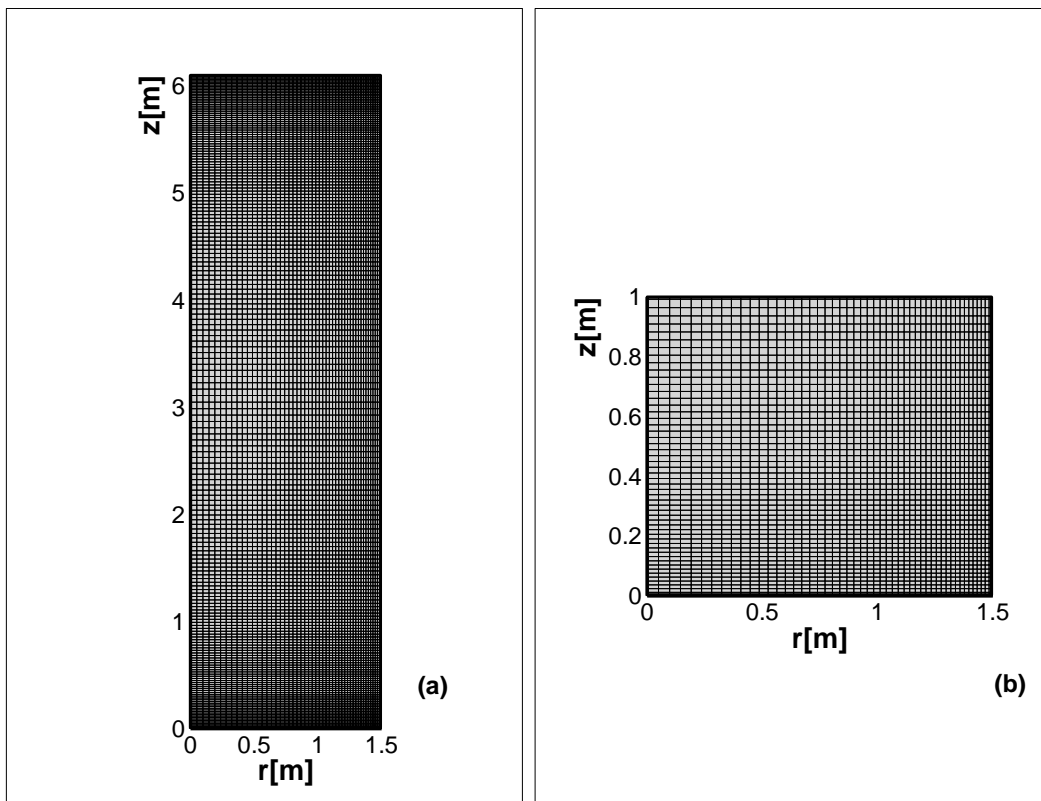


Σχήμα 18: Μοντελοποίηση της διάταξης συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I [7]: α) η γεωμετρία που δημιουργείται στο ANSYS Design Modeler και β) οι οριακές συνθήκες του προς επίλυση προβλήματος.

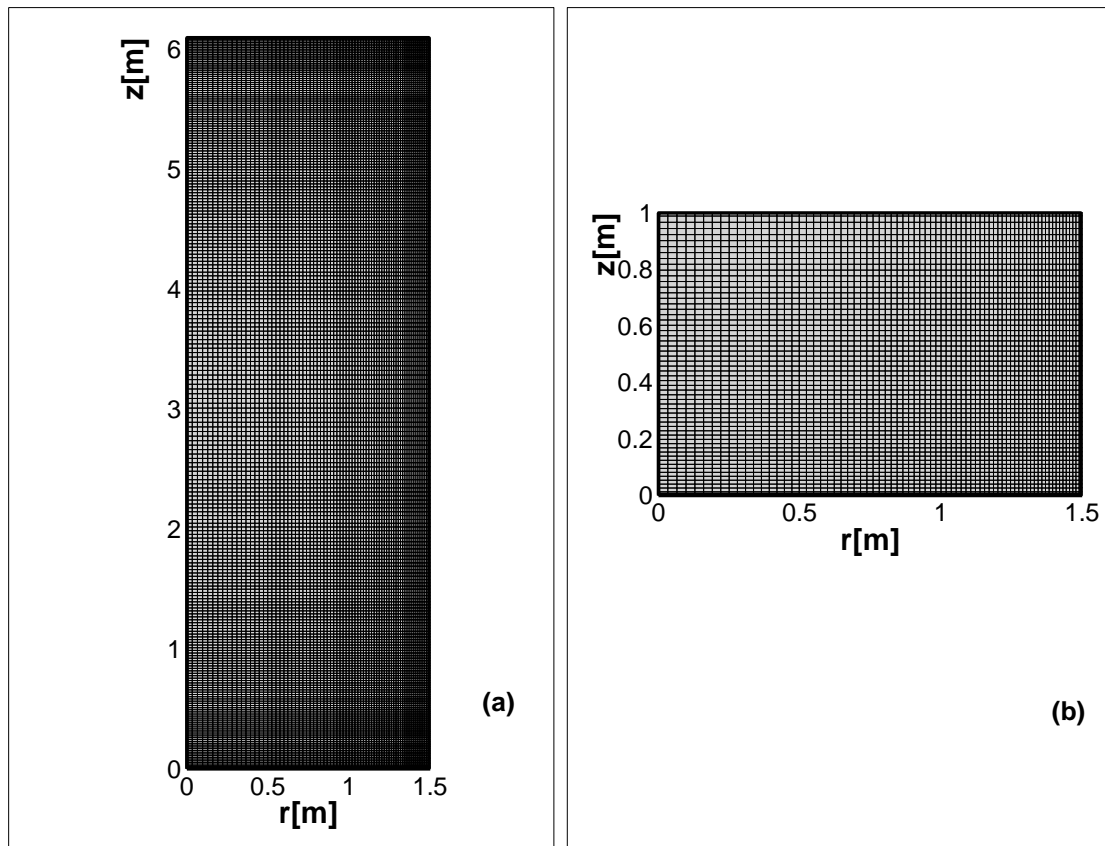
Η διακριτοποίηση ενός υπολογιστικού χωρίου σε προβλήματα φαινομένων μεταφοράς, πραγματοποιείται από το ANSYS Mesh. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει στο χρήστη πληθώρα δυνατοτήτων ως προς τη δημιουργία κατάλληλου πλέγματος. Έτσι μπορεί να προτιμηθεί δομημένο ή μη δομημένο πλέγμα, επιλεκτική πύκνωση σε σημεία που εμφανίζονται υψηλές βαθμίδες μεγεθών, προεπιλογή συγκεκριμένου αριθμού υπολογιστικών κελιών κτλ. Υπολογιστικά, το πρόβλημα που μελετάται έχει προσεγγισθεί με μονοδιάστατα, διφασικά μοντέλα θερμότητας [8], [49], [50], χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η σύζευξη των εξισώσεων ορμής και θερμότητας. Ως εκ τούτου δεν υπήρχε κάποια αναφορά ως προς τον αριθμό των κελιών του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε. Επιλέγησαν για τις ανάγκες της προσομοίωσης πλέγματα 1.125 (15x75), 10.000 (50x200) και 18.750 (75x250) υπολογιστικών κελιών δομημένου ορθογωνικού πλέγματος. Επιπλέον πύκνωση του πλέγματος τέθηκε στις περιοχές της εισόδου και του τοιχώματος, καθώς σε αυτές τις περιοχές είναι πιθανή η εμφάνιση υψηλότερων βαθμίδων ταχύτητας [8]. Τα πλέγματα που λαμβάνονται από το ANSYS Mesh φαίνονται στα Σχήματα 19, 20, 21.



Σχήμα 19: Μοντελοποίηση της διάταξης συμπαγούς κλίνης του προβλήματος I-SHTES [7]. Δομημένο, ορθογωνικό πλέγμα 1.125 (15x75) κελιών· επιλέγεται πύκνωσή του στις περιοχές εισόδου, εξόδου και τοιχώματος. Απεικόνιση: α) σε όλη την έκταση της δεξαμενής, β) στην περιοχή της εισόδου (εστίαση στην περιοχή επιλεκτικής πύκνωσης).



Σχήμα 20: Μοντελοποίηση της διάταξης συμπαγούς κλίνης του προβλήματος I-SHTES [7]. Δομημένο, ορθογωνικό πλέγμα 10.000 (50x200) κελιών· επιλέγεται πύκνωσή του στις περιοχές εισόδου, εξόδου και τοιχώματος. Απεικόνιση: α) σε όλη την έκταση της δεξαμενής, β) στην περιοχή της εισόδου (εστίαση στην περιοχή επιλεκτικής πύκνωσης).



Σχήμα 21: Όπως και στα Σχ. 19 και 20, αλλά με δομημένο, ορθογωνικό πλέγμα 18.750 (75x250) κελιών. Απεικόνιση: α) σε όλη την έκταση της δεξαμενής, β) στην περιοχή της εισόδου (εστίαση στην περιοχή επιλεκτικής πύκνωσης).

Με το πέρας της διακριτοποίησης, ακολούθησε ο ορισμός του προβλήματος και η επίλυσή του. Επιλέγεται το πρόγραμμα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ANSYS Fluent 14.0, στο περιβάλλον του οποίου γίνεται εισαγωγή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων στερεών και ρευστών, τα μοντέλα ορμής και θερμότητας, οι οριακές και αρχικές συνθήκες του προβλήματος, τα σχήματα διακριτοποίησης και το χρονικό βήμα επίλυσης. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι επιλογές βάσει των οποίων διεξάγονται οι υπολογισμοί.

Ως προς το εργαζόμενο ρευστό, αυτό αποτελείται από ευτηκτικό μίγμα $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$, 50% w/w αναλογίας ως προς κάθε συστατικό του. Το στερεό υλικό πλήρωσης της δεξαμενής είναι χαλαζιτικά πετρώματα και πυριτικές άμμοι. Η δεξαμενή αποθήκευσης είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα, οι ιδιότητες του οποίου παρέχονται από τις βιβλιοθήκες του ANSYS Fluent. Οι θερμοφυσικές, γεωμετρικές ιδιότητες των υλικών και οι ακραίες θερμοκρασίες του θερμικού κυκλώματος, φαίνονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 6). Ιδιαίτερης προσοχής χρήζει η περίπτωση της πυκνότητας του ρευστού. Λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας που αυτό υφίσταται, μεταβάλλεται η πυκνότητά του, επομένως είναι πολύ πιθανή η εμφάνιση φυσικής συναγωγής. Η μεταβολή της πυκνότητας δεν απασχόλησε τους συγγραφείς της βιβλιογραφίας. Στο παρόν, γίνεται η παραδοχή

της προσέγγισης Boussinesq για τη μεταβολή της πυκνότητας, η οποία γράφεται [51]:

Πίνακας 6: Θερμοφυσικές ιδιότητες ρευστών, στερεού υλικού πλήρωσης και υλικού κατασκευής της δεξαμενής αποθήκευσης. Για το στερεό υλικό πλήρωσης δίνεται επίσης η μέση διάμετρος των σωματιδίων (Van Lew et al. [49]).

Ιδιότητα	NaNO ₃ -KNO ₃	Υλικό Πλήρωσης	Ανοξειδωτός Χάλυβας
Πυκνότητα [kg/m ³]	1.733	2.640	8.030
Θερμική αγωγιμότητα [W/m·K]	0,570	2,5000	16,2700
Δυναμικό ιξώδες [Pa·s]	0,0021	-	-
Διάμετρος σωματιδίων [m]	-	0,0150	-
Ειδική Θερμοχωρητικότητα [J/kg·K]	1.550	1.050	502,4800
Θερμοκρασία πλήρους φόρτισης [K]		669	
Θερμοκρασία πλήρους αποφόρτισης [K]		563	

$$\rho = \rho_{ref} - \beta \cdot \rho_{ref} \cdot (T - T_{ref}) \quad (4.12)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho_{ref}} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (4.13)$$

όπου στις εξ. 4.12 και 4.13, ως τιμή αναφοράς δόθηκε η τιμή της θερμοκρασίας στην είσοδο της θερμοκλίνης.

Το μοντέλο θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε συμπίπτει με το μονοφασικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.2.2.1. Αντίθετα, για τη μοντελοποίηση της ορμής, λόγω της ενσωμάτωσης της προσέγγισης Boussinesq, εμφανίζεται μια μικρή διαφοροποίηση στον όρο της σωματικής δύναμης. Το μοντέλο που επιλέγεται είναι το Darcy-Forchheimer (βλ. εξ. 3.32β ενότητα 3.1.2.4) οπότε η τελική εξίσωση ορμής που λύνεται από το Fluent είναι:

$$\frac{\rho_{\beta}}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}_D}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \vec{u}_D \cdot \nabla \vec{u}_D \right) = -\nabla p_{\beta} - \frac{\mu}{K} \cdot \vec{u}_{sup} - \frac{c_E}{\sqrt{K}} \cdot \rho \cdot |\vec{u}_{sup}| \cdot \vec{u}_{sup} - \rho_{\beta} \cdot \vec{g} \cdot \beta \cdot (T - T_{ref}) \quad (4.14)$$

Στη συνέχεια γίνεται ο ορισμός της πορώδους ζώνης και ρητή δήλωση στο Fluent για την επίλυση μοντέλου θερμότητας σε ισορροπία. Το πορώδες τίθεται ίσο με

$\varepsilon=0,22$, η διαπερατότητα $K=2,6250 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ και η παράμετρος Forchheimer (βλ. ενότητα 3.1.2.2) $\chi=2,2436 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Ειδικότερα, για τη διαπερατότητα η παραπάνω τιμή ορίζεται τόσο κατά τη διεύθυνση x όσο και κατά τη διεύθυνση y .

Το βήμα που έπεται είναι η δήλωση των οριακών συνθηκών του προβλήματος. Για συντομία αυτές φαίνονται στο Σχήμα 18β. Τονίζεται ότι ο αριθμός Nu , προσεγγίστηκε από τη σχέση [8]:

$$Nu = 0,664 \cdot Re_p^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.15)$$

όπου σύμφωνα με τους Nield and Bejan [29], ως χαρακτηριστικό μήκος του Nu σε περιπτώσεις κατακόρυφων κυλινδρικών δεξαμενών λαμβάνεται το ύψος της δεξαμενής. Επιπλέον, η οριακή συνθήκη outflow που χρησιμοποιείται από το ANSYS Fluent, είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις που δεν είναι γνωστές οι συνθήκες στην έξοδο. Το Fluent μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα πραγματοποιώντας προεκβολή από τα δεδομένα του εσωτερικού [52]. Ακόμη, ως συμπλήρωση της οριακής συνθήκης της αξονικής συμμετρίας όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 18 η μαθηματική πρόταση που πρέπει να πληρείται είναι: $\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$ για $r=0$, όπου φ η ιδιότητα υπό εξέταση (π.χ. θερμοκρασία, ταχύτητα).

Τα σχήματα διακριτοποίησης που επιλέγησαν ήταν ο αλγόριθμος SIMPLE για τη σύζευξη πεδίου πιέσεων και ταχύτητας, για την ενέργεια και την ορμή δεύτερης τάξης ανάντη και για τις βαθμίδες μεγεθών η επιλογή least squares cell based. Ιδιαίτερη μέριμνα λαμβάνεται για την καταλληλότητα των αρχικών συνθηκών, παράμετρος που θα σχολιαστεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο (βλ. Αποτελέσματα). Τέλος, αναφέρεται ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας στη θερμοκλίνη γίνεται με θερμοστοιχεία τοποθετημένα ανά 15cm στον κατακόρυφο άξονα της δεξαμενής [7].

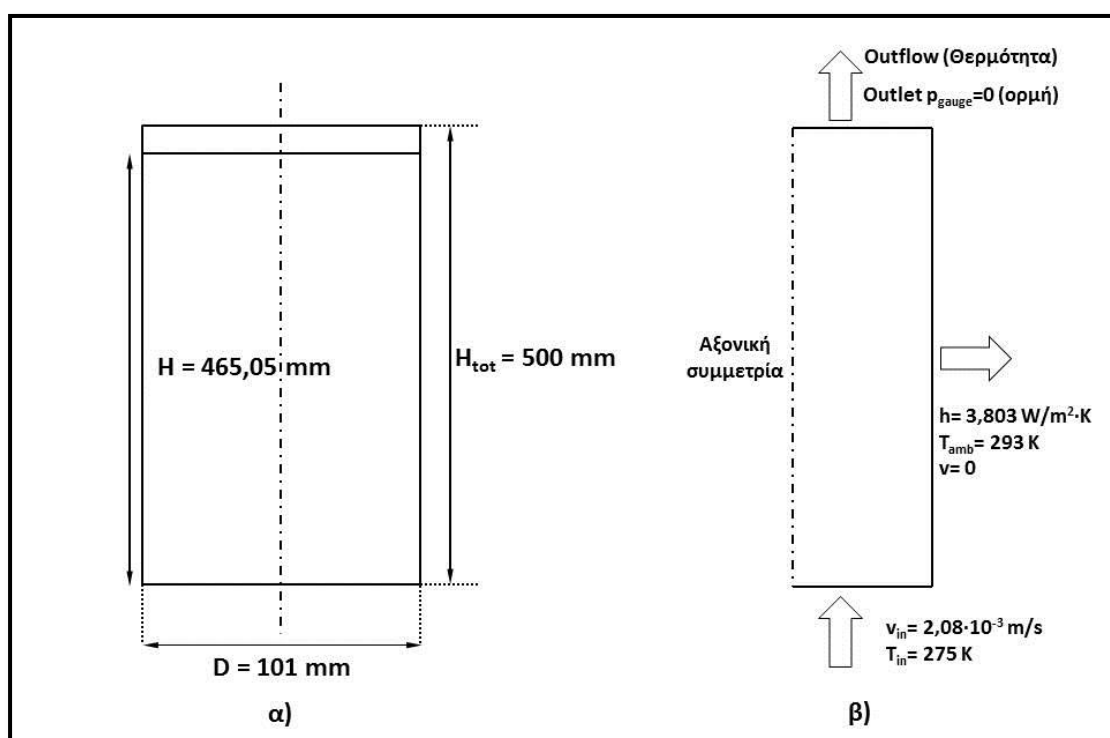
4.1.2 Πρόβλημα II-LHTES

Προσομοιώνεται η λειτουργία δεξαμενής αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας υπό μορφή σταθερής κλίνης. Τα κατασκευαστικά και πειραματικά δεδομένα, καθώς και οι θερμοφυσικές ιδιότητες υλικού και ρευστού που συμμετέχουν λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία [11]. Η πρωτοτυπία της εργασίας αυτής, έγκειται στην προσομοίωση αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με απλά μοντέλα ορμής και κυρίως θερμότητας. Τα σωματίδια στην προκειμένη περίπτωση είναι διεσπαρμένα στην κλίνη κατά εντελώς τυχαίο τρόπο. Ειδικότερα, ως προς την εξίσωση ορμής, χρησιμοποιείται η επέκταση Darcy-Brinkman (βλ. ενότητες 3.1.2.2) ενώ ως προς την εξίσωση θερμότητας το μονοφασικό μοντέλο θερμικής ισορροπίας (βλ. ενότητα 3.2.2.1). Τέτοιου είδους προσέγγιση (μοντέλο θερμικής ισορροπίας) δε συνηθίζεται στη βιβλιογραφία. Αντίθετα, προβλήματα που περιλαμβάνουν αλλαγής φάσης αντιμετωπίζονται συνήθως με δύο διαφορετικούς τρόπους: α) άμεση μοντελοποίηση ορμής και θερμότητας στη βάση ενός ή μικρού αριθμού στερεών σωματιδίων, β) συνεχής μοντελοποίηση ορμής και θερμότητας. Η κλίνη αποτελείται

από μικρό και συγκεκριμένο αριθμό σωματιδίων πλήρωσης, διατεταγμένα με συγκεκριμένο και επαναλαμβανόμενο τρόπο. Η θερμότητα προσεγγίζεται από κάποιο διφασικό μοντέλο (χωρίς θερμική ισορροπία) και η αλλαγή φάσης με την ενθαλπική μέθοδο και χρήση του υγρού κλάσματος. Στο υπό μελέτη άρθρο παρατηρήθηκαν ορισμένες παραλείψεις από τους συντάκτες αναφορικά με την ενσωμάτωση της αλλαγής φάσης, οι οποίες θα συζητηθούν παρακάτω.

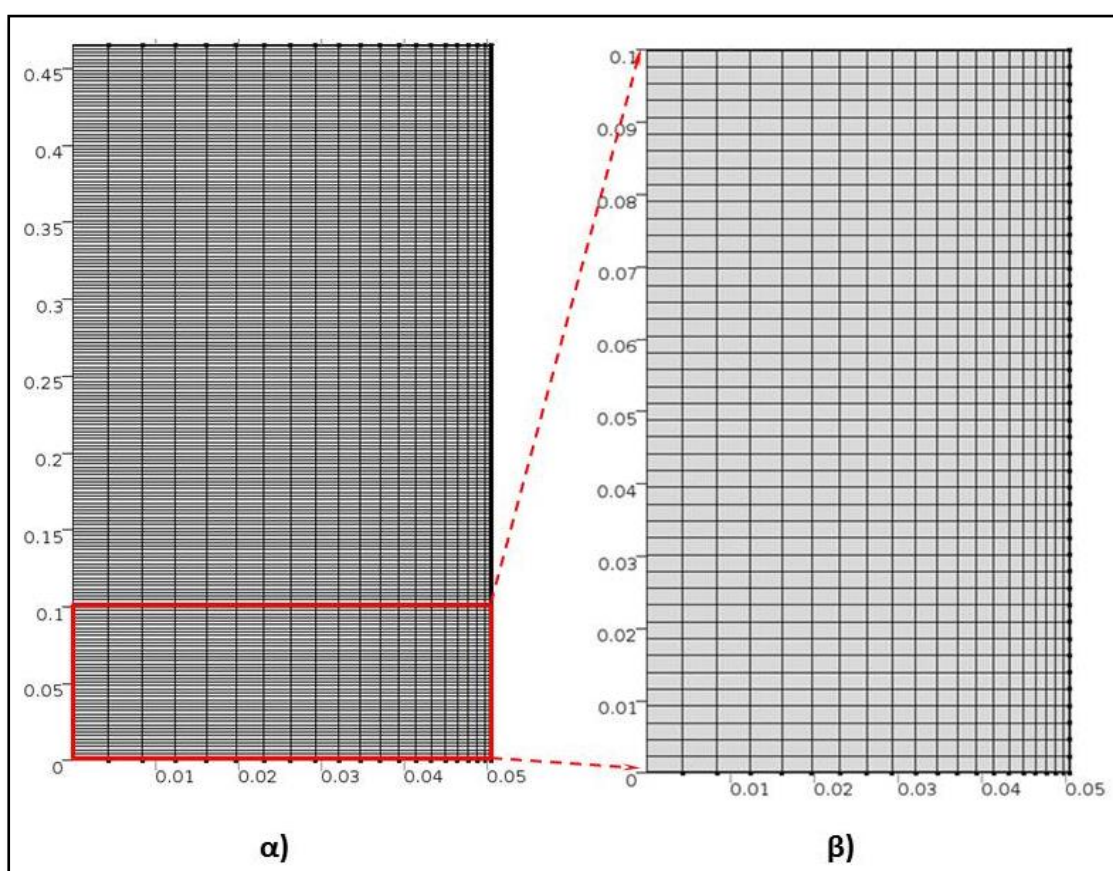
Η προσομοίωση της λειτουργίας της μονάδας πραγματοποιείται σε περιβάλλον COMSOL Multiphysics 3.4, αδειοδότηση για οποίο παρέχεται από το ΕΠΥ της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Η λειτουργία του COMSOL Multiphysics διαφέρει από την αντίστοιχη του ANSYS. Έτσι, ο σχεδιασμός της γεωμετρίας, η εισαγωγή του πλέγματος διακριτοποίησης, η επίλυση και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, γίνεται από το ίδιο πρόγραμμα. Η αλληλουχία των εργασιών με το COMSOL γίνεται με τον τρόπο που εκτέθηκε παραπάνω.

Αρχικά καταστρώνεται η γεωμετρία με χρήση του αντίστοιχου κόμβου στην top to bottom ιεραρχική ακολουθία του προγράμματος. Χρησιμοποιείται και εδώ αξονική συμμετρία. Η δεξαμενή στην περίπτωση αυτή είναι εργαστηριακή, οπότε οι διαστάσεις είναι $H=465,05\text{mm}$ και $R=50,5\text{mm}$. Σχεδιάζεται δε ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο λόγω της 2D αξονικής συμμετρίας. Η γεωμετρία του σχήματος φαίνεται στο Σχήμα 22.

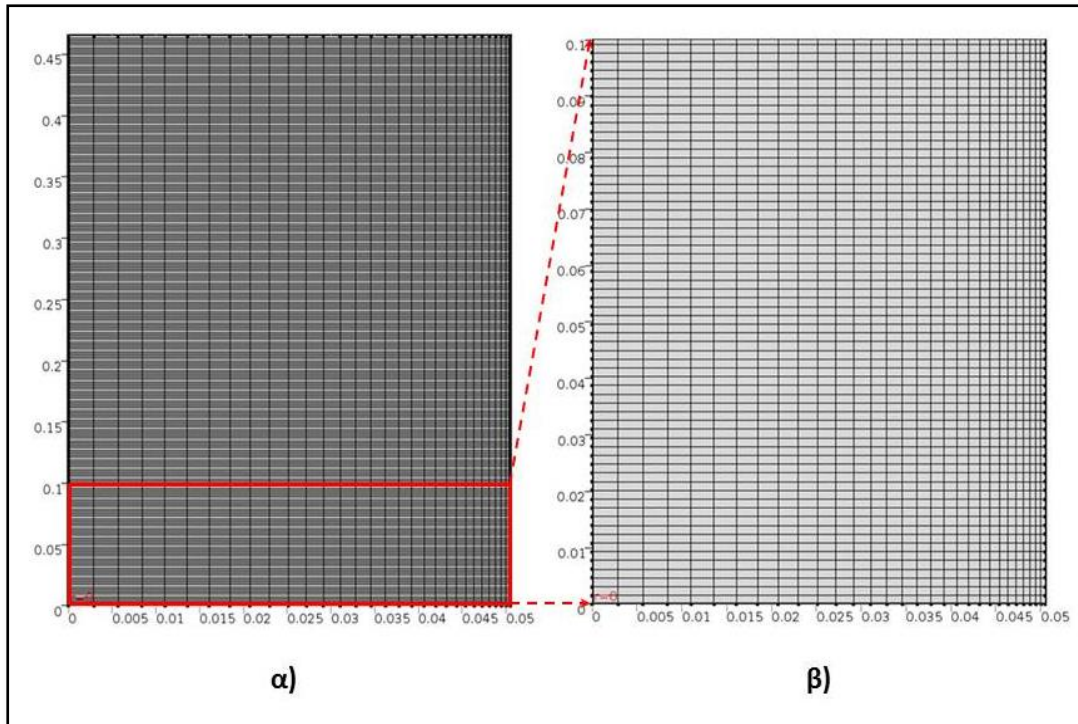


Σχήμα 22: Μοντελοποίηση της διάταξης LHTES του προβλήματος II [11]: α) Απεικόνιση της γεωμετρίας του συστήματος που περιλαμβάνει τα PCM. Από το συνολικό όγκο της δεξαμενής χρησιμοποιούνται για αποθήκευση μόνο 3,73L ή ύψος $H=465,05\text{mm}$. Β) Γεωμετρία και οριακές συνθήκες όπως εισάγονται στο COMSOL Multiphysics 3.4.

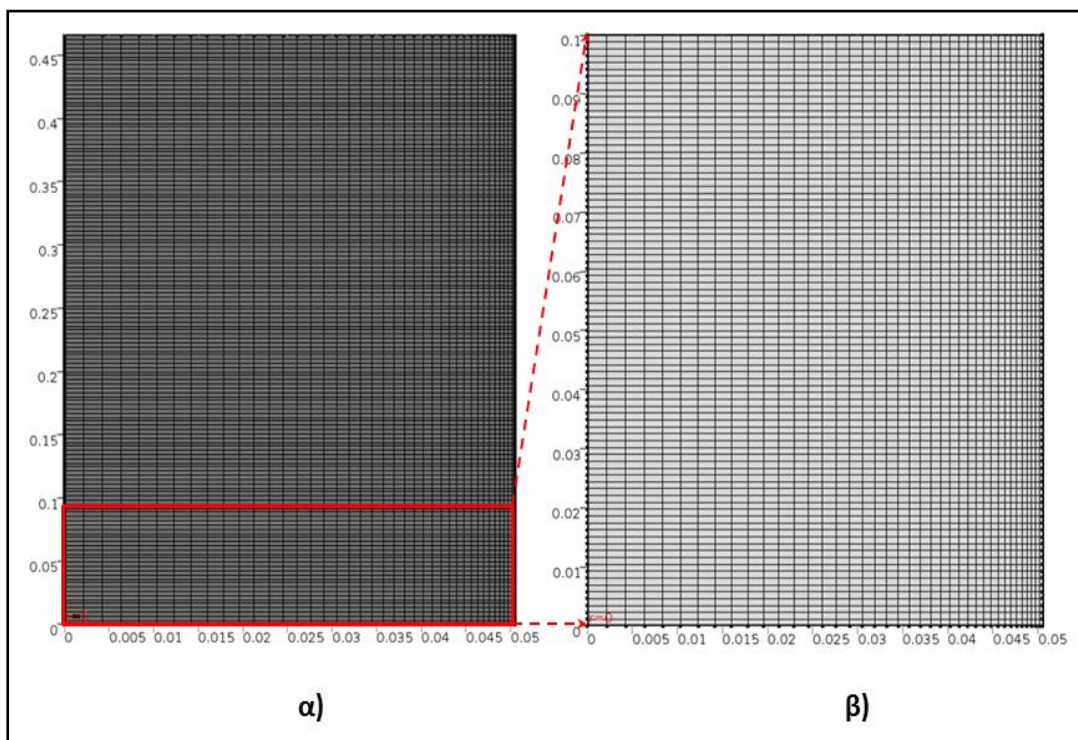
Η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου γίνεται με επιλογή του αντίστοιχου κόμβου. Το COMSOL Multiphysics 3.4 παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα κατασκευής πλέγματος με δύο τρόπους: α) επιλογή user-controlled mesh, σύμφωνα με την οποία ο χρήστης μπορεί να τροφοδοτήσει το πλέγμα της αρεσκείας του και β) επιλογή physics controlled mesh, σύμφωνα με την οποία το λογισμικό από το είδος του προβλήματος που λύνει, εν προκειμένω μοντέλο Brinkman και μεταφορά θερμότητας σε πορώδες μέσο, εισάγει ένα μη δομημένο πλέγμα που παρέχει ορθή λύση [47]. Για την επίλυση, δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά πλέγματα 4.000, 9.000, 16.000 υπολογιστικών κελιών δομημένου, ορθογωνικού πλέγματος (επιλογή user-controlled mesh) και ένα 15.611 κελιών μη δομημένου πλέγματος (επιλογή physics-controlled mesh). Αυτά φαίνονται στα Σχήματα 23, 24, 25, 26.



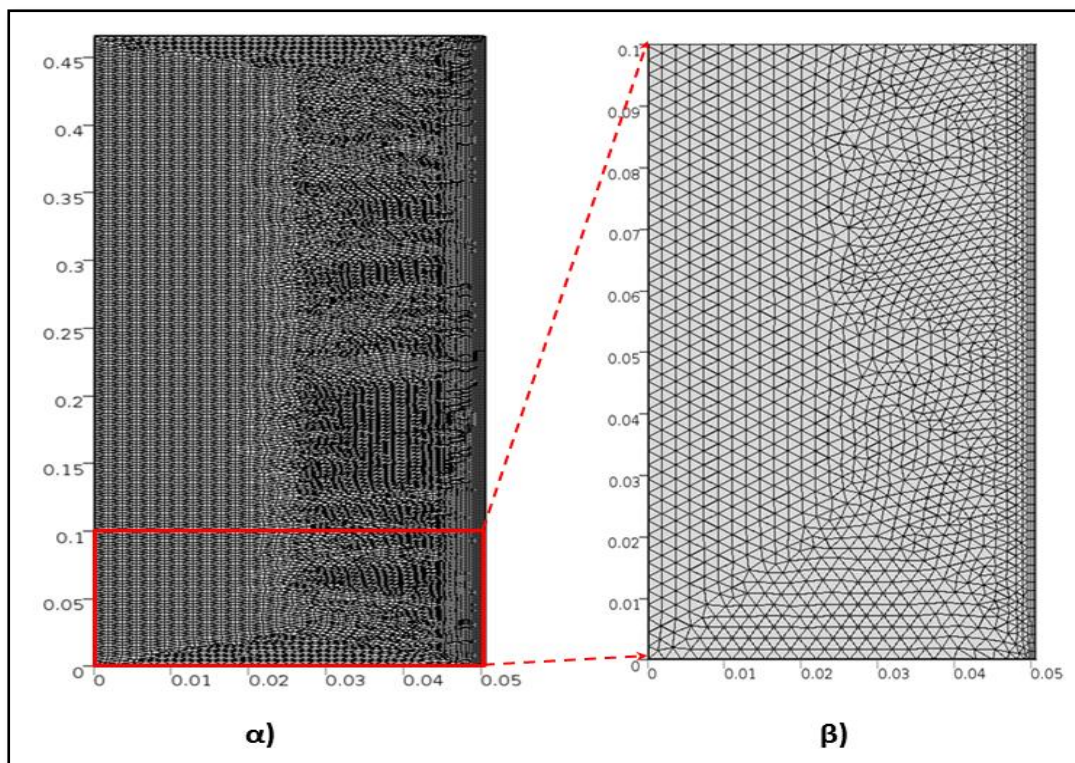
Σχήμα 23: Μοντελοποίηση της διάταξης συμπαγούς κλίνης του προβλήματος II-LHTES [11]. Δομημένο, ορθογωνικό πλέγμα 4.000 (20x200) υπολογιστικών κελιών που εισαγεται μέσω της επιλογής user defined mesh. Απεικόνιση: α) σε όλη την έκταση της δεξαμενής, β) με εστίαση στα πρώτα 10cm κατά την αξονική διεύθυνση. Η μονάδα και των δύο αξόνων είναι το m.



Σχήμα 24: Όπως και στο Σχ.23, αλλά για δομημένο, ορθογωνικό πλέγμα 9.000 (30x300) υπολογιστικών κελιών. Απεικόνιση: α) σε όλη την έκταση της δεξαμενής, β) με εστίαση στα πρώτα 10cm κατά την αξονική διεύθυνση. Η μονάδα και των δύο αξόνων είναι το m.



Σχήμα 25: Όπως και στο Σχ.24, αλλά για δομημένο, ορθογωνικό πλέγμα 16.000 (40x400) υπολογιστικών κελιών. Απεικόνιση: α) σε όλη την έκταση της δεξαμενής, β) με εστίαση στα πρώτα 10cm κατά την αξονική διεύθυνση. Η μονάδα και των δύο αξόνων είναι το m.



Σχήμα 26: Μη δομημένο πλέγμα 15.611 κελιών για την επίλυση του προβλήματος II που εισάγεται μέσω της επιλογής physics controlled mesh που διαθέτει το COMSOL Multiphysics 3.4: α) σε όλη την έκταση της δεξαμενής, β) εστίαση στα πρώτα 10cm κατά την αξονική διεύθυνση. Η μονάδα και των δύο αξόνων είναι το m.

Για την εισαγωγή όλων των παραμέτρων της επίλυσης, χρησιμοποιείται η επιλογή Component. Επιλέγεται ως ρέον ρευστό το νερό με ιδιότητες από τη βιβλιοθήκη του COMSOL και ως στερεό δημιουργείται το υλικό PCM²¹. Οι ιδιότητες των υλικών και διάφορες παράμετροι επίλυσης φαίνονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 7).

Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες της κλίνης, η διαπερατότητα, δεν έχει σαφή τιμή από τα δεδομένα του άρθρου. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι αυτή υπολογίζεται πειραματικά, ωστόσο δε δίνεται το αποτέλεσμα αυτών των υπολογισμών. Η διαπερατότητα αποτελεί πρωταρχικής σημασίας παράμετρο σε προβλήματα συμπαγών κλινών. Έτσι ο υπολογισμός της στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται να γίνει με την εμπειρική σχέση Carman-Kozeny (βλ. ενότητα 3.1.2.1), οπότε προκύπτει $K=4,32 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ και το μέσο θεωρείται ισότροπο.

²¹ Στο άρθρο της βιβλιογραφίας [11], δε γίνεται αναφορά στο υλικό που χρησιμοποιείται ως PCM. Λέγεται μόνο ότι πρόκειται για οργανικό υλικό με κάποιο πρόσθετο που μαζί συνιστούν σφαίρες σφογγώδους μορφής. Από τη θερμική αγωγιμότητα και το γεγονός ότι το υλικό είναι PCM πιθανολογείται ότι είναι κάποιο λιπαρό οξύ.

Πίνακας 7: Παράμετροι επίλυσης που εισάγονται στο μοντέλο. Οι τιμές ορισμένων ιδιοτήτων δίνονται ρητά στο άρθρο, ενώ άλλες υπολογίζονται με εμπειρικές σχέσεις

Ιδιότητα/Παράμετρος	Νερό	PCM
<i>Πυκνότητα [kg/m³]</i>	999,800	837
<i>Θερμική αγωγιμότητα [W/m·K]</i>	0,579	2
<i>Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kg·K]</i>	4.206,200	4.000 (στερεά φάση) 3.000 (υγρή φάση)
<i>Δυναμικό ιξώδες [Pa·s]</i>	2,042·10 ⁻³	-
<i>Διάμετρος σωματιδίων [m]</i>	-	3,6·10 ⁻³
<i>Διαπερατότητα κλίνης [m²]</i>		4,32·10 ⁻⁸
<i>Πορώδες κλίνης</i>		0,22
<i>Λανθάνουσα (ειδική) ενθαλπία τήξης [kJ/kg]</i>	-	100
<i>Συντελεστής θερμικής διαστολής [1/K]</i>	7,900·10 ⁻⁵	-
<i>Περιοχή αλλαγής φάσης [°C]</i>	-	3-7
<i>ΔT [°C]</i>	-	2
<i>Θερμοκρασία αναφοράς [°C]</i>		20

Οι οριακές συνθήκες απεικονίζονται στο Σχήμα 22β. Από αυτές δεν αναφέρονται ρητά στο άρθρο η ταχύτητα εισόδου, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η συνθήκη εξόδου για την εξίσωση θερμότητας, με συνέπεια να γίνουν οι εξής παραδοχές: α) η ταχύτητα εισόδου υπολογίζεται ως το πηλίκο της υδραυλικής παροχής προς το εμβαδό της επιφάνειας της διατομής εισόδου, οπότε $u_{in}=2,08 \cdot 10^{-3}$ m/s, β) η θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρήθηκε $T_{ref}=293K=20^{\circ}C$ και γ) η συνθήκη εξόδου για τη θερμοκρασία δίνεται ως outflow. Για τη συνθήκη αυτή, σύμφωνα με το [47] ισχύουν οι ίδιες προϋποθέσεις εφαρμογής με την περίπτωση του ANSYS Fluent. Ως προς την οριακή συνθήκη της εξίσωσης θερμότητας στο τοίχωμα της δεξαμενής, επελέγη η συνθήκη της ψύξης με συναγωγή (convective cooling). Πρόκειται για οριακή συνθήκη, μέσω της οποίας ο χρήστης εισάγει μόνο τη χαρακτηριστική διάσταση, το είδος της συναγωγής (στην περίπτωσή μας εξωτερική φυσική συναγωγή) και τη θερμοκρασία αναφοράς. Το COMSOL υπολογίζει μέσω μιας εξίσωσης που περιλαμβάνει τον Ra, το συντελεστή συναγωγής h και εφαρμόζει οριακή συνθήκη Robin [47]. Το αποτέλεσμα που δίνει η οριακή συνθήκη του COMSOL επιβεβαιώθηκε, επιλέγοντας διαφορετική οριακή συνθήκη, κατά την οποία εισάγεται από το χρήστη ο συντελεστής συναγωγής.

Για τον υπολογισμό του μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εξισώσεις της βιβλιογραφίας, οι οποίες είναι:

$$Nu_H = 0,59 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0,25} \quad (4.16)$$

$$Nu_H = \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{7 \cdot Ra_H \cdot Pr}{5 \cdot (21 \cdot Pr + 20)} \right]^{\frac{1}{4}} + \frac{4 \cdot (315 \cdot Pr + 272) \cdot H}{35 \cdot (63 \cdot Pr + 64) \cdot D} \quad (4.17)$$

όπου οι δύο εξισώσεις υπολογίζουν αριθμούς Nusselt 77,152 και 77,129, ενώ έχουν ληφθεί από τις αναφορές [11] και [29] αντίστοιχα.

Οι αρχικές συνθήκες εκ πρώτης όψεως, φαίνονται καλώς ορισμένες. Για το πεδίο ταχύτητας, θεωρείται μηδενική η αρχική της τιμή, ενώ για το πεδίο θερμοκρασίας ίση με 11°C. Όπως θα φανεί στα κεφάλαιο 5, οι αρχικές συνθήκες και σε αυτήν την περίπτωση υπήρξαν προβληματικές.

Ως προς τη μοντελοποίηση των εξισώσεων θερμότητας ισχύει ότι και στην περίπτωση του Προβλήματος Ι. Για την εξίσωση ορμής ισχύει η επέκταση Darcy-Brinkman, δηλαδή η ακόλουθη εξίσωση:

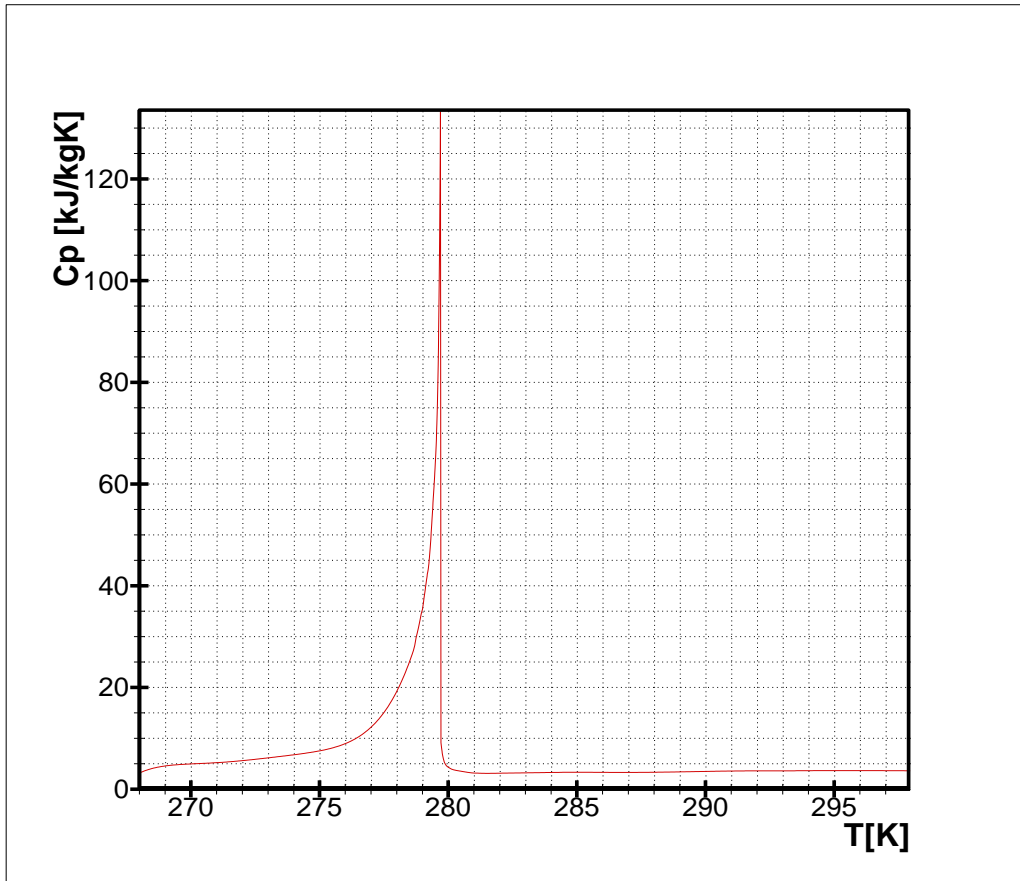
$$\begin{aligned} \frac{\rho_\beta}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}_D}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \vec{u}_D \cdot \nabla \vec{u}_D \right) \\ = -\nabla \langle p_\beta \rangle + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \cdot \vec{u}_{sup} - \frac{\mu}{K} \cdot \vec{u}_{sup} - \rho_\beta \cdot \vec{g} \cdot \beta \cdot (T - T_{ref}) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Όπως φαίνεται έχει ενσωματωθεί και εδώ η προσέγγιση Boussinesq [46] με θερμοκρασία αναφοράς αυτή του Πίνακα 7.

Η ενσωμάτωση του μοντέλου αλλαγής φάσης, όπως ήταν αναμενόμενο, υπήρξε το δυσκολότερο κομμάτι στην προσομοίωση. Πέραν της εγγενούς δυσκολίας που παρουσιάζει το φαινόμενο, επιπλέον, έπρεπε να αντιμετωπιστεί η παντελής απουσία οποιασδήποτε αναφοράς σε μοντέλο αλλαγής φάσης από πλευράς των συγγραφέων²². Σύμφωνα με τους συντάκτες του άρθρου, η αλλαγή φάσης ενσωματώνεται μέσω της μεταβολής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM, όπως φαίνεται στο Σχήμα 27, χωρίς όμως να επισημαίνεται το μοντέλο.

Από πλευράς μας, επελέγη το μοντέλο Φαινόμενης Θερμοχωρητικότητας. Χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση ο χρονοεξαρτώμενος επιλύτης (time dependent solver). Τέλος, αναφέρεται ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας στην κλίση γίνεται με θερμοστοιχεία τύπου T [11] σε τυχαία σημεία του άξονα της δεξαμενής. Οι ακριβείς τους θέσεις, θα φανούν στα σχήματα του επόμενου κεφαλαίου.

²² Η τιμή της διαπερατότητας και της ταχύτητας εισόδου, καθώς και το μοντέλο αλλαγής φάσης υπήρξαν το αντικείμενο επικοινωνίας με την ομάδα που συνέταξε το άρθρο στο Πανεπιστήμιο της Lleida στην Ισπανία. Ωστόσο, δεν κατέστη δυνατό να δοθούν απολύτως ικανοποιητικές απαντήσεις στα ζητήματα αυτά, λόγω και της αποχώρησης μελών της ομάδας από το εν λόγω Πανεπιστήμιο.



Σχήμα 27: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Στην περιοχή αλλαγής φάσης, δηλ. στο διάστημα 275-280K παρατηρείται ομαλή και έπειτα έντονη αύξηση στην τιμή της θερμοχωρητικότητας, κάτι που φανερώνει την αλλαγή φάσης σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την υπολογιστική επίλυση των προβλημάτων I και II. Αρχικά, εκτίθενται και συζητούνται τα αποτελέσματα του προβλήματος I και στη συνέχεια αυτά του προβλήματος II. Σε καθένα από τα προβλήματα, παρατίθεται η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων από πειραματικά δεδομένα, η μελέτη της επίδρασης του πλέγματος, του χρονικού βήματος και η παραμετρική ανάλυση. Η διαδικασία επίλυσης πλαισιώνεται από θερμοκρασιακές ισοϋψείς (contours) των δεξαμενών που φανερώνουν τη χρονική εξέλιξη των διαφόρων πεδίων.

5.1 Αποτελέσματα Προβλήματος I

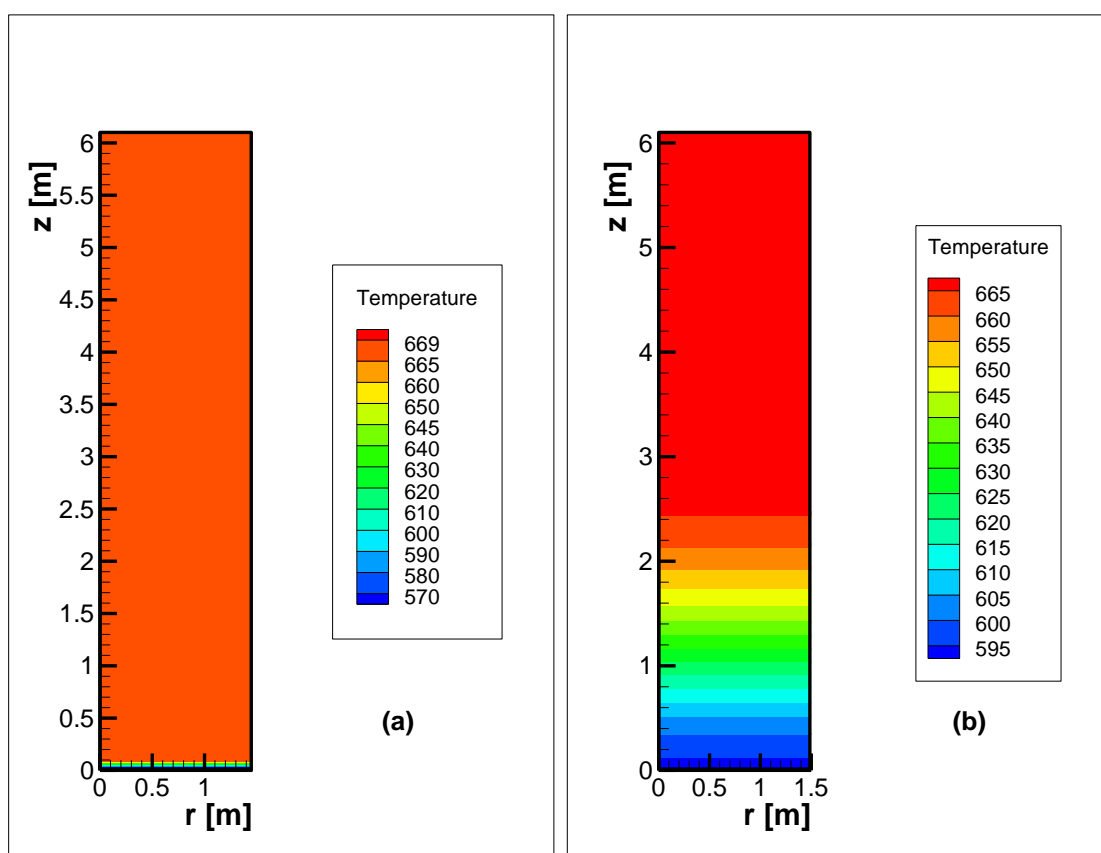
Η επίλυση του προβλήματος αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, αποτελεί το απαραίτητο προκαταρκτικό στάδιο για την ανάλυση θερμικού κυκλώματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Πραγματοποιείται σε Η/Υ με επεξεργαστή Intel(R) Xeon(R) CPU E5620 στα 2.40GHz, 64bit, 8 πυρήνων και μνήμης RAM 6GB.

5.1.1 Αρχικές Συνθήκες και Ανεξαρτησία Πλέγματος

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στις αρχικές συνθήκες. Πράγματι, αυτές δεν αναφέρονται με σαφήνεια ούτε στο πρωτότυπο [7], ούτε στα άρθρα που το επιβεβαιώνουν [8], [49], [50]. Η μόνη σχετική διευκρίνιση υπογραμμίζει ότι η αρχική κατάσταση προκύπτει έπειτα από πλήρη φόρτιση της διάταξης. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να υποστηριχτεί από τα αποτελέσματα που προκύπτουν για αρχική θερμοκρασιακή συνθήκη $T_{\text{charged}}=669\text{K}$ (πλήρης φόρτιση διάταξης). Προς άρση του αδιεξόδου, από την καμπύλη των πειραματικών αποτελεσμάτων για $t^*=0$, υπολογίζεται η συνάρτηση $T_{\text{init}}^*=g(z^*)$ που δίνει τις αρχικές συνθήκες και εισάγεται στο Fluent. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω μιας User Defined Function (UDF, βλ. Παράρτημα Α), η οποία βοηθά το χρήστη να επικοινωνήσει με το ANSYS Fluent και να τροποποιήσει τη διαδικασία επίλυσης κατά βούληση [52]. Η αρχική συνθήκη πλήρους φόρτισης, $T_{\text{charged}}=669\text{K}$, καθώς και η νέα αρχική συνθήκη φαίνονται στο Σχήμα 28. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με αρχικές συνθήκες $T_{\text{charged}}=669\text{K}$ και $T_{\text{init}}^*=g(z^*)$ όπως θα φανεί παρακάτω δικαιώνουν την επιλογή της τελευταίας. Για αρχική συνθήκη $T_{\text{charged}}=669\text{K}$ αυτά φαίνονται στο Σχήμα 29.

Το μοντέλο προσομοίωσης και η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιούνται εξ ολοκλήρου στο ANSYS Fluent και έπεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα γραφικής επεξεργασίας Tecplot 360 2015 R1. Στόχος της είναι η παραγωγή μιας πλήρους μελέτης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Κατά συνέπεια, της επικύρωσης των υπολογιστικών αποτελεσμάτων από πειραματικά, θα προηγηθεί ανάλυση της επίδρασης του πλέγματος στη μορφή της λύσης. Πρόκειται

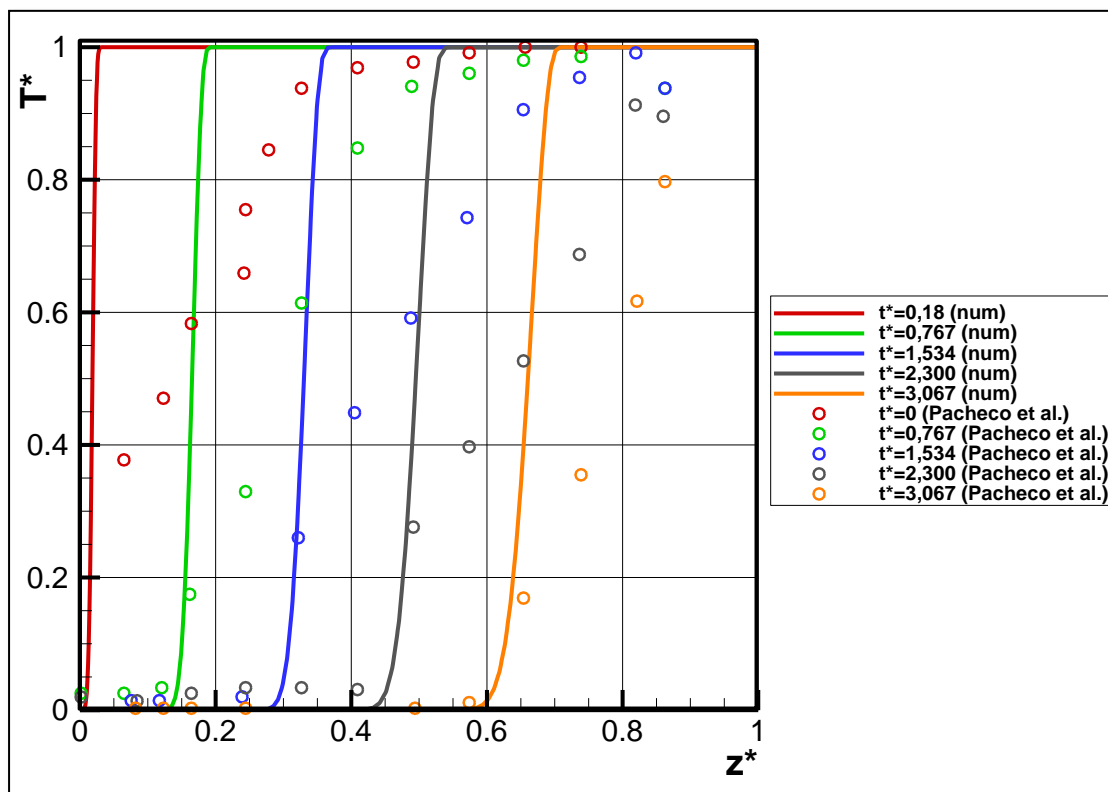
για συνήθη πρακτική σε προβλήματα που το υπολογιστικό χωρίο διακριτοποιείται. Στην προκειμένη περίπτωση, θα σχεδιαστούν τα διαγράμματα αδιάστατης θερμοκρασίας-αδιάστατου ύψους για ορισμένες τιμές του αδιάστατου χρόνου. Εισάγονται στο ίδιο διάγραμμα οι καμπύλες από τα τρία πλέγματα και παρατηρούνται οι αποκλίσεις τους. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 30, οι τιμές των συναρτήσεων $T_{init}^*=f(z_{init}^*)$ ταυτίζονται απολύτως. Μάλιστα, ο συνδυασμός της εγγύτητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων με το χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος (μνήμη και χρόνος) από το πλέγμα των 10.000 κελιών, οδηγούν στην υιοθέτησή του για το πρόβλημα Ι. Η διαδικασία καθίσταται απαραίτητη σε κάθε μελέτη στην περιοχή των υπολογιστικών φαινομένων μεταφοράς, διότι βασική επιδίωξη του μελετητή είναι η εύρεση αποδεκτής λύσης, ελαχιστοποιώντας το κόστος.



Σχήμα 28: Ισοϋψείς θερμοκρασίας (temperature contours) κατά τη μοντελοποίηση της διάταξης του προβλήματος Ι [7] τη χρονική στιγμή $t=0$, δηλαδή όταν ισχύει η αρχική συνθήκη. Στο (a), φαίνεται η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας πλήρους φόρτισης του κυκλώματος, $T_{charged}=669K$, ενώ στο (b) η κατανομή που προσεγγίστηκε από τα πειραματικά δεδομένα για $t^*=0$ και εισήχθη στο ANSYS Fluent μέσω μιας UDF.

Η ανεξαρτησία πλέγματος ως έννοια προέρχεται από την ακόλουθη ιδέα [9]: με τη διακριτοποίηση του χωρίου, η ακριβής λύση προσεγγίζεται από τις αντίστοιχες τιμές στα σημεία του πλέγματος. Από ένα σημείο και μετά η παραπάνω ακρίβεια της υπολογιστικής λύσης είναι τόσο χαμηλή, οπότε το κόστος ευκαιρίας της απόκτησής της είναι αρκετά υψηλό. Κατά συνέπεια, δε συμφέρει να χρησιμοποιηθεί

μεγαλύτερο πλέγμα για ελάχιστη βελτίωση της ακρίβειας. Στην περίπτωση μας, κάτι τέτοιο εφαρμόζεται για το πλέγμα των 18.750 κελιών. Συν τοις άλλοις, λόγω της συμφωνίας που παρατηρείται στο Σχήμα 30, συμπεραίνεται ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ακόμη μικρότερο πλέγμα διακριτοποίησης.

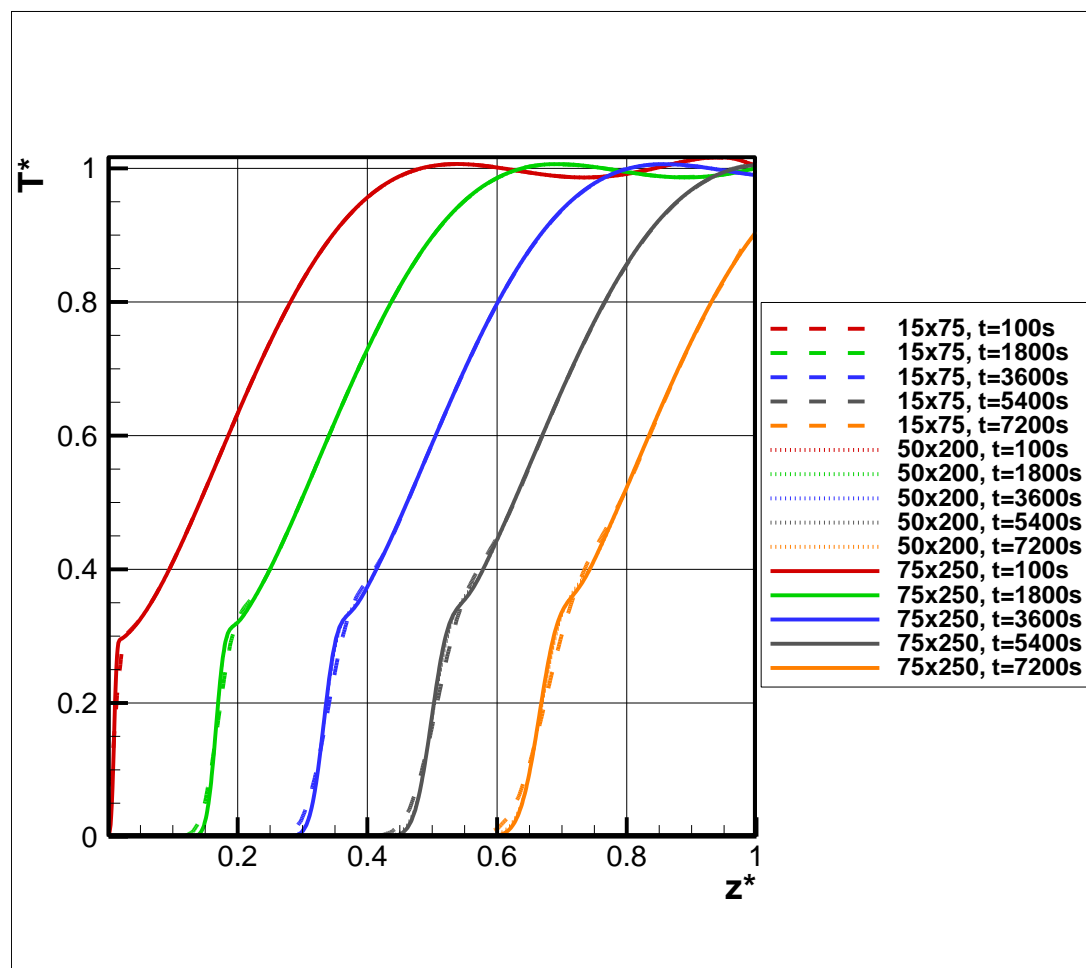


Σχήμα 29: Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα υπολογιστικά αποτελέσματα για το πρόβλημα I [7]. Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της αδιάστατης θερμοκρασίας ως συνάρτηση του αδιάστατου ύψους στον άξονα σε συγκεκριμένες τιμές του αδιάστατου χρόνου. Οι αποκλίσεις οφείλονται στη χρήση της αρχικής συνθήκης πλήρους φόρτισης της δεξαμενής αποθήκευσης, $T_{\text{charged}}=669\text{K}$.

5.1.2 Επικύρωση από Πειραματικά Δεδομένα (Validation)

Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης της επίδρασης του μεγέθους του πλέγματος, ακολουθεί η επικύρωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων από τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας [7]. Το βήμα αυτό ονομάζεται επικύρωση (validation) και είναι μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες κατά την υπολογιστική επίλυση προβλημάτων. Έτσι, ο εκάστοτε κώδικας επίλυσης λύνει ένα πρόβλημα της βιβλιογραφίας που συνοδεύεται από πειραματικά δεδομένα και διερευνάται η σύγκλισή τους. Στη συνέχεια, μπορεί να εφαρμοστεί σε άλλα προβλήματα της ίδιας επιστημονικής περιοχής. Για την περίπτωση μας, έπειτα από την εφαρμογή της κατάλληλης αρχικής συνθήκης και για πλέγμα 10.000 κελιών, επιτυγχάνεται επιβεβαίωση. Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 31, η εγγύτητα των αποτελεσμάτων του ANSYS Fluent με τα πειραματικά είναι ικανοποιητική.

Σε καλώς δομημένες εργασίες από πλευράς πειράματος, τα διαγράμματα που απεικονίζουν την εξάρτηση των μετρούμενων μεταβλητών, συνοδεύονται από γραμμές σφάλματος (error bars). Αυτές προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά του οργάνου και της διαδικασίας μέτρησης. Η συμπερίληψή τους κατά την επιβεβαίωση ενισχύει την αξιοπιστία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.



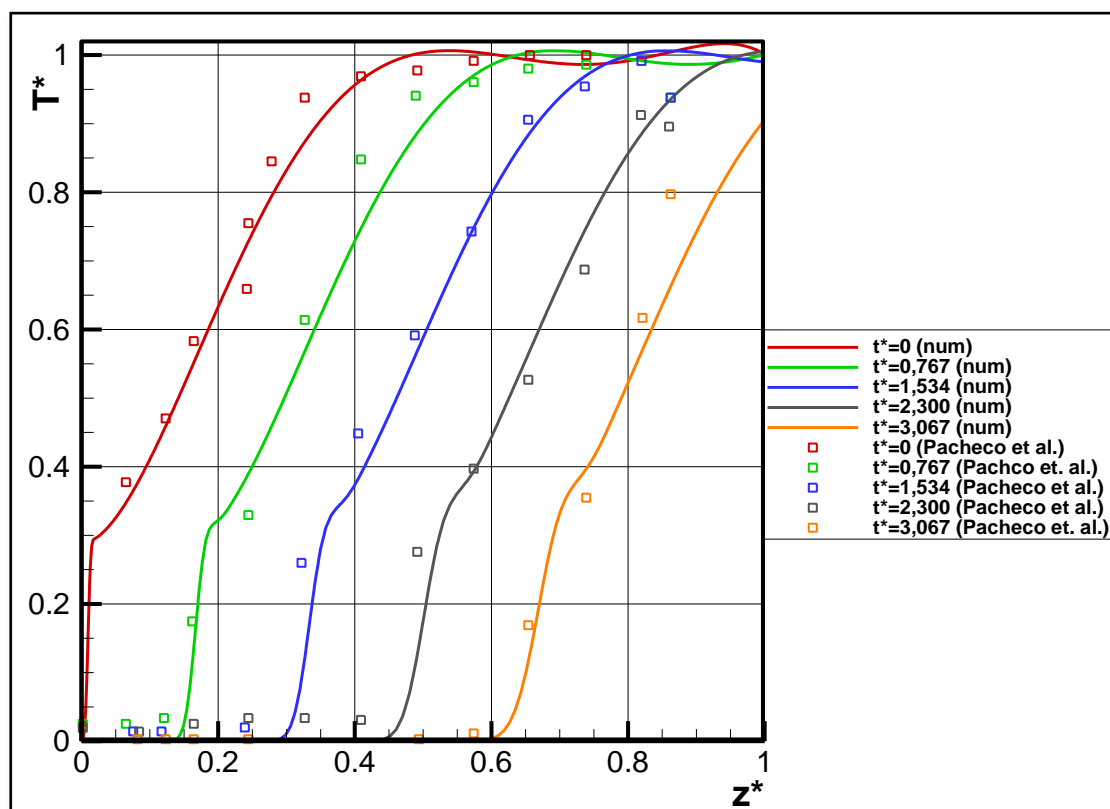
Σχήμα 30: Επιβεβαίωση της ανεξαρτησίας πλέγματος με τη χρήση της ρεαλιστικής αρχικής θερμοκρασιακής κατανομής του Σχ. 28β για το πρόβλημα I: για τα τρία είδη πλεγμάτων, 1.125, 10.000 και 18.750 υπολογιστικών κελιών παρατηρείται πλήρης συμφωνία μεταξύ των υπολογιζόμενων τιμών σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Μια αξιόπιστη υπολογιστική λύση δε συμπίπτει με τα πειραματικά σημεία συνεχώς, ωστόσο θα πρέπει να βρίσκεται εντός του ορίου ανοχής που υπαγορεύουν οι γραμμές σφάλματος. Στην προκειμένη περίπτωση, κάτι τέτοιο δε δίνεται από τους συντάκτες της πειραματικής εργασίας, κατά συνέπεια δεν είναι δυνατή η περαιτέρω αξιολόγηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Η σύμπτωσή τους με τα πειραματικά γίνεται μόνο μέσω του Σχήματος 31.

5.1.3 Ανεξαρτησία Χρονικού Βήματος

Επόμενο βήμα αναφορικά με τις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας της λύσης, είναι η ανάλυση ανεξαρτησίας χρονικού βήματος. Στα μεταβατικά προβλήματα, λόγω της εξάρτησης της λύσης από το χρόνο, για τη λήψη της, ο χρήστης

ενημερώνει το λογισμικό για τα χρονικά διαστήματα που θέλει να ανανεώνεται η λύση. Αυτό εκφράζεται μέσω του χρονικού βήματος επίλυσης (time step). Προφανώς η επιλογή αυτού του χρονικού βήματος επηρεάζει την ακρίβεια της λύσης και πρέπει να γίνονται συμβιβασμοί ως προς το μέγεθός του. Επίσης, πολύ μικρή τιμή του μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια της λύσης και συνεπώς η επιλογή του πρέπει να γίνεται με προσοχή (λ.χ. χρήση κριτηρίου CFL) [46]. Στην περίπτωση που εξετάζεται, χρησιμοποιήθηκαν ως χρονικά βήματα 2s, 1s, 0,5s, 0,1s για το πλέγμα των 10.000 κελιών. Η επίδρασή τους στη μορφή της λύσης φαίνεται στο Σχήμα 32. Λόγω της καλής συμφωνίας που επιτυγχάνεται, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και μικρότερο χρονικό βήμα.

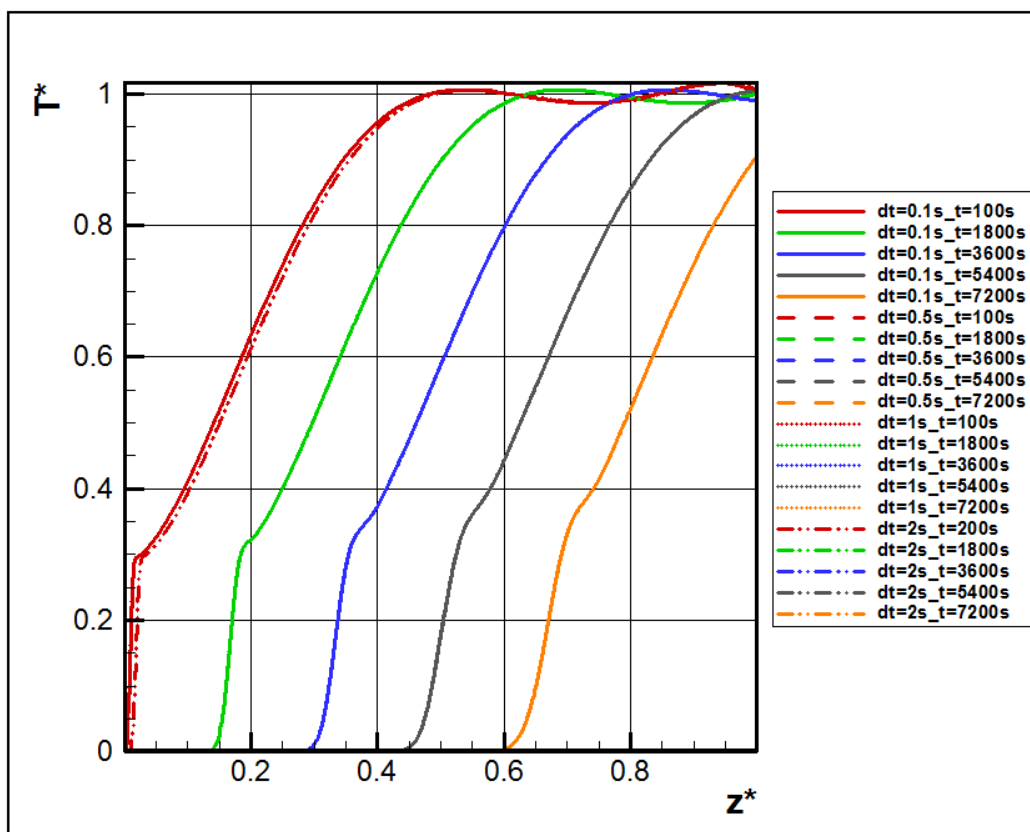


Σχήμα 31: Επιβεβαίωση της υπολογιστικής λύσης για το πρόβλημα I με χρήση της αρχικής θερμοκρασιακής κατανομής του Σχ. 28β: στο πλέγμα των 10.000 κελιών, φαίνεται το διάγραμμα αδιάστατης θερμοκρασίας ως συνάρτηση του αδιάστατου ύψους στον άξονα της δεξαμενής για διάφορες τιμές του αδιάστατου χρόνου.

5.1.4 Παραμετρική Ανάλυση

Στις ενότητες 5.1.1-5.1.3 αξιολογήθηκε η υπολογιστική λύση μέσω της συμπεριφοράς της σε μεταβλητά πλέγματα, χρονικά βήματα καθώς και η επικύρωσή της από πειραματικά δεδομένα. Θεωρώντας αποδεκτή αυτή τη λύση, θα ακολουθήσει η ανάλυση της συμπεριφοράς του κυκλώματος σε μεταβολές θερμοφυσικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών της κλίνης. Οι παράμετροι μελετήθηκαν σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία [8], [11], [20], [53] που προτείνει έλεγχο τους για ανάλυση ως προς το A' και το B' θερμοδυναμικό αξίωμα. Στην

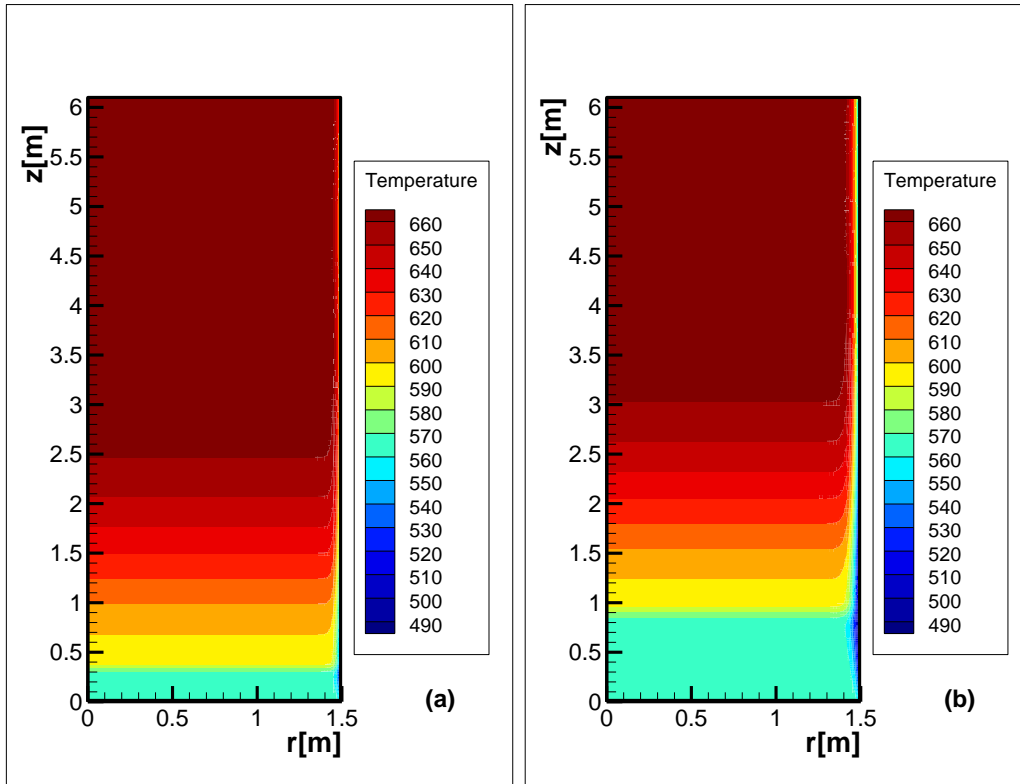
παρούσα μελέτη, όπως σημειώθηκε και στην εισαγωγή, δε γίνεται έλεγχος ως προς το Β' αξίωμα, καθώς προσομοιώθηκε η αποφόρτιση του κυκλώματος και μόνο. Για τον έλεγχο της επίδρασης των παραμέτρων στη μορφή της λύσης, δίνονται τα στιγμιότυπα θερμοκρασιακών πεδίων σε ορισμένες χρονικές στιγμές για διάφορες τιμές των ιδιοτήτων.



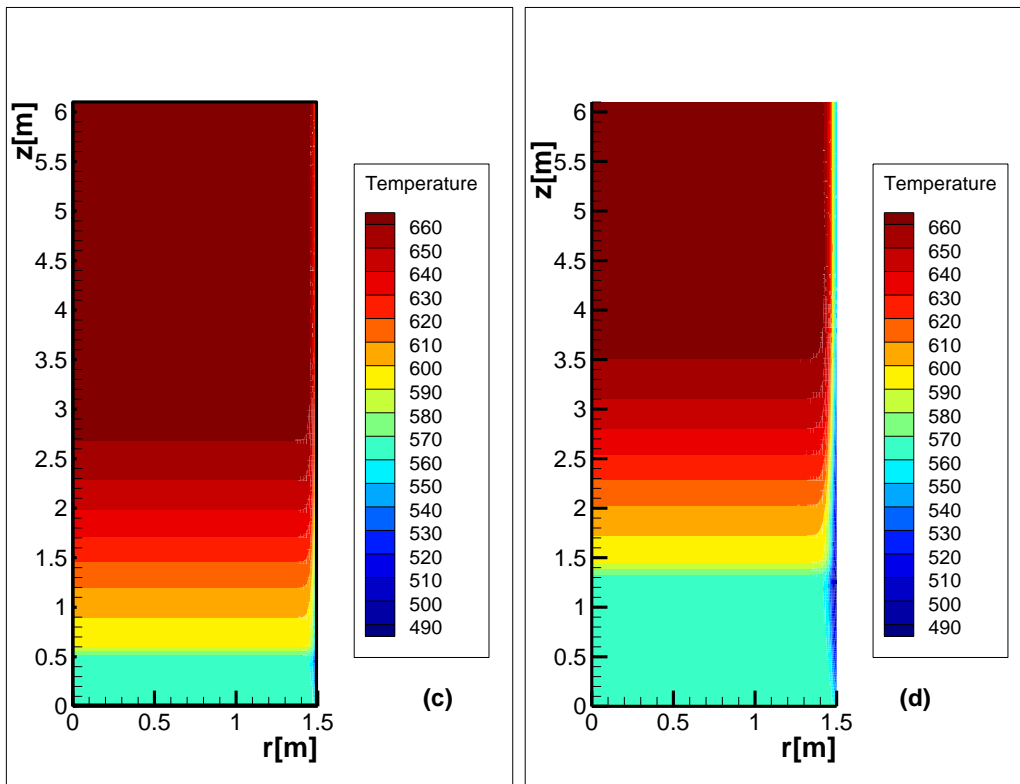
Σχήμα 32: Ανεξαρτησία χρονικού βήματος για τα χρονικά βήματα $dt = 0,1, 0,5, 1$ και $2s$ στο πρόβλημα I: στο σχήμα φαίνεται η μεταβολή της αδιάστατης θερμοκρασίας ως συνάρτηση του αδιάστατου ύψους στον άξονα της δεξαμενής σε διάφορες χρονικές στιγμές.

5.1.4.1 Επίδραση Ειδικής Θερμοχωρητικότητας του Εργαζόμενου Ρευστού

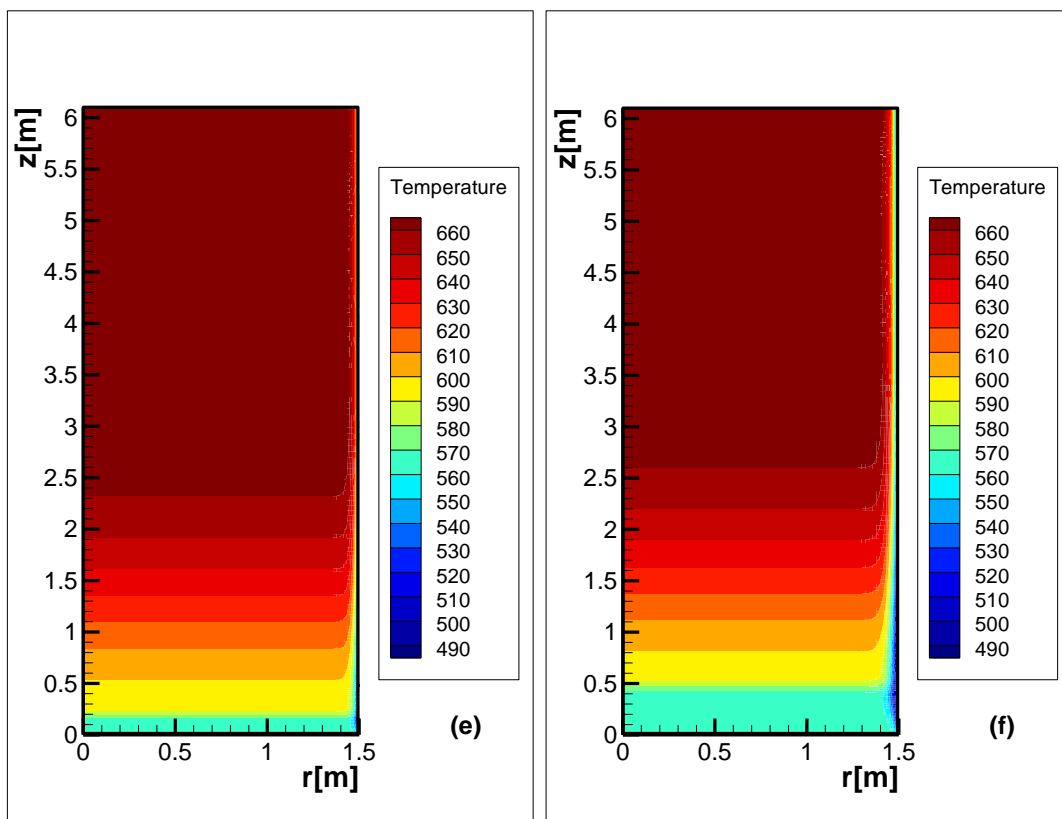
Η μεταβολή της $C_p(\text{HTF})$ αναμένεται να επιδρά στη συμπεριφορά της κλίνης. Πράγματι, η ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου ρευστού, εκφράζει το ποσό ενέργειας που απαιτείται να αποδοθεί στη μονάδα μάζας του HTF, για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του. Εφόσον το HTF ανταλλάσει θερμότητα με την κλίνη, σε περιπτώσεις υψηλής $C_p(\text{HTF})$ αναμένεται η θερμοκρασία του να μεταβάλλεται βραδύτερα, δηλαδή να απαιτείται να διέλθει από μεγαλύτερο τμήμα της δεξαμενής για δεδομένη μεταβολή στη θερμοκρασία. Σε περίπτωση μικρότερης $C_p(\text{HTF})$, αναμένονται τα αντίθετα αποτελέσματα, ήτοι, να αυξάνεται ή να ελαττώνεται η θερμοκρασία ταχύτερα. Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώνεται από τα στιγμιότυπα της θερμοκρασίας με το χρόνο που λαμβάνονται για τιμές $C_p(\text{HTF})=3.100\text{J/kg}\cdot\text{K}$, $C_p(\text{HTF})=1.550\text{J/kg}\cdot\text{K}$ και $C_p(\text{HTF})=775\text{J/kg}\cdot\text{K}$, δηλαδή για τιμές διπλάσιες και υποδιπλάσιες της ισχύουσας στη διάταξη αποθήκευσης που μελετάται. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 33-35.



Σχήμα 33: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I με την αρχική τιμή ειδικής θερμοχωρητικότητας του εργαζόμενου ρευστού: a) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και b) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.



Σχήμα 34: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I, έπειτα από διπλασιασμό της τιμής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του εργαζόμενου ρευστού: c) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και d) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.

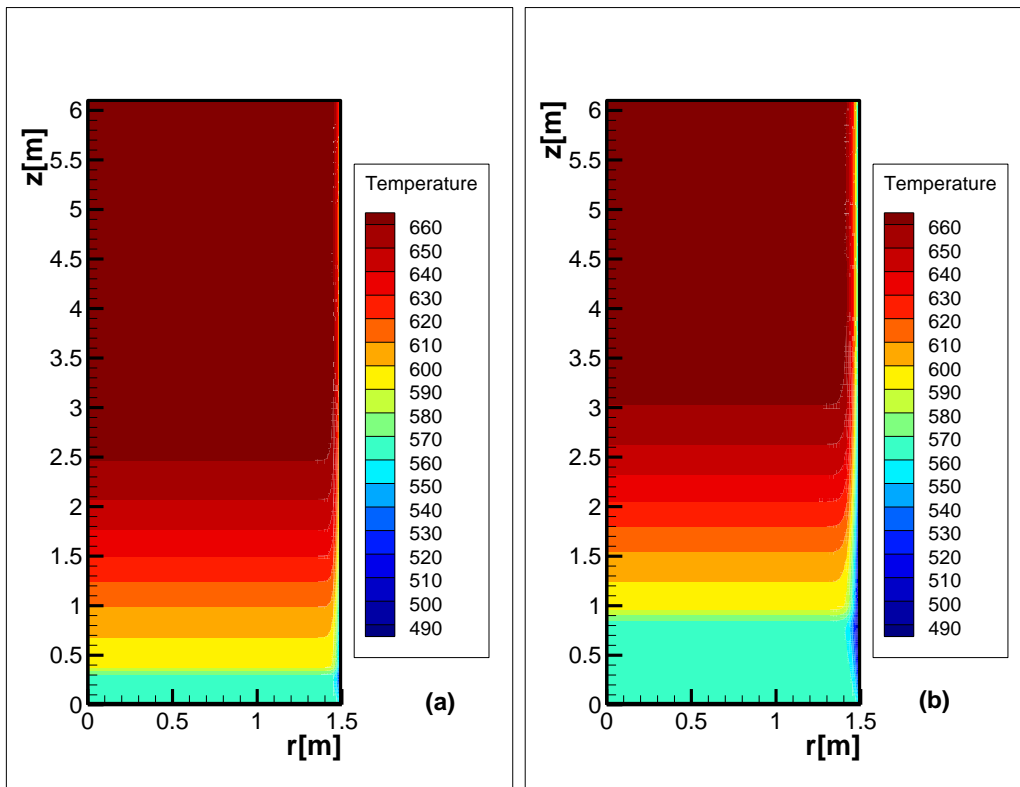


Σχήμα 35: Όπως και στα Σχ. 33 και 34, αλλά έπειτα από υποδιπλασιασμό της τιμής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του εργαζόμενου ρευστού: e) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και f) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.

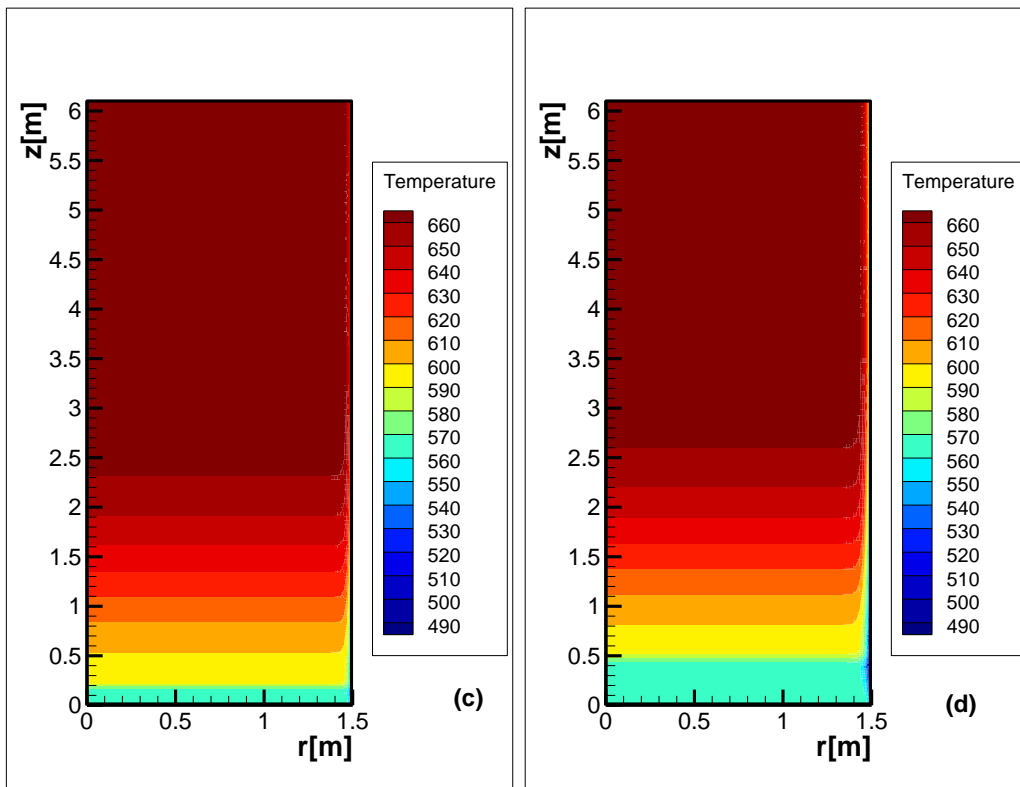
Για την περίπτωση της αποφόρτισης της δεξαμενής που αναλύεται, το ψυχρό ρευστό που εισέρχεται στη δεξαμενή και έχει υψηλότερη $C_p(HTF)$, θα ανέρχεται ψυχρό σε μεγαλύτερο ύψος δεξαμενής (Σχήμα 34). Αντίθετα, ρευστό χαμηλότερης $C_p(HTF)$, θα μεταβάλλει τη θερμοκρασία του και άρα θα θερμαίνεται σε χαμηλότερα ύψη της δεξαμενής (Σχήμα 35).

5.1.4.2 Επίδραση Ειδικής Θερμοχωρητικότητας του Υλικού Πλήρωσης

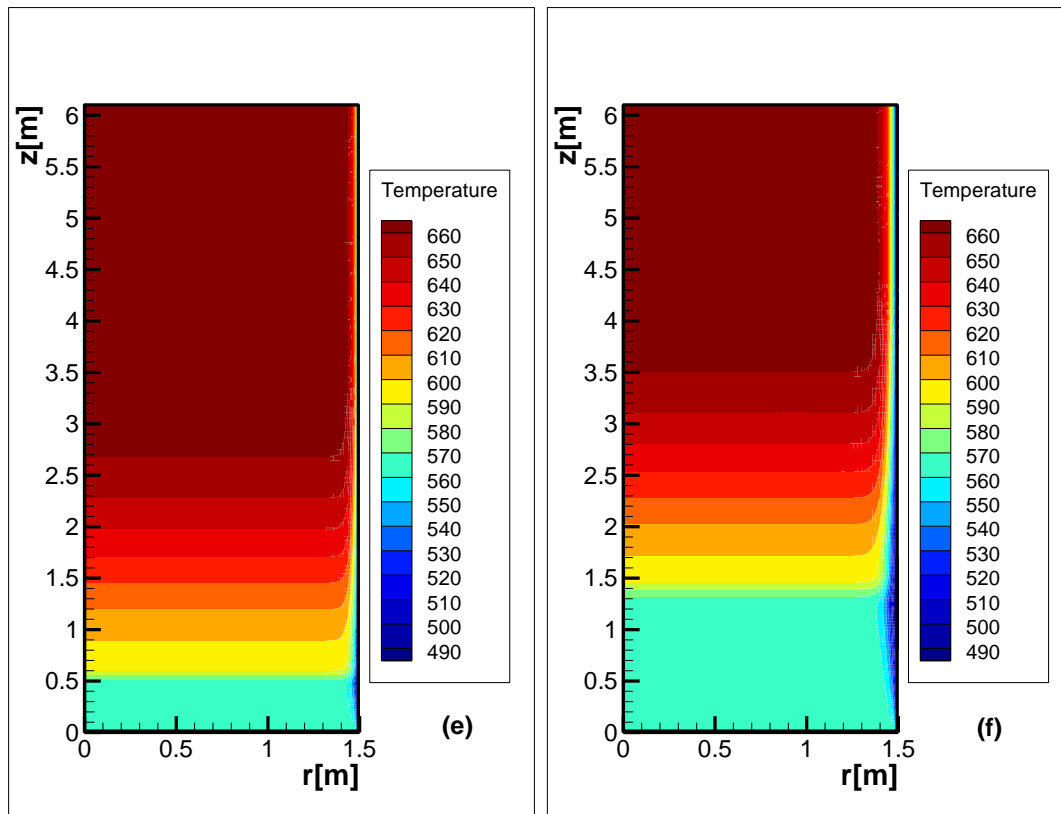
Η ειδική θερμοχωρητικότητα των σωματιδίων της κλίνης επιφέρει τα αντίθετα αποτελέσματα στη συμπεριφορά της διάταξης SHTES. Ο λόγος για τον οποίο ισχύει κάτι τέτοιο είναι ο εξής: καθώς αυξάνεται η C_{ps} απαιτείται όλο και περισσότερο ρευστό να διέλθει από την κλίνη για να μεταβάλλει τη θερμοκρασία της. Συνεπώς, η αύξηση της C_{ps} οδηγεί σε στιγμιότυπα θερμοκρασιακής κατανομής της δεξαμενής όπου η αποφόρτιση φαίνεται να καθυστερεί χρονικά. Αντίστοιχα, ελαττωμένη τιμή της C_{ps} , επιφέρει ταχύτερη διάδοση του μετώπου της θερμοκρασίας καθ' ύψος της δεξαμενής, εφόσον η θερμοκρασία του υλικού πλήρωσης μεταβάλλεται με την απορρόφηση/έκλυση μικρότερου ποσού θερμότητας. Η επιβεβαίωση του παραπάνω σκεπτικού φαίνεται στα Σχήματα 36-38. Σε αυτά πέραν της αρχικής τιμής



Σχήμα 36: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I με την αρχική τιμή ειδικής θερμοχωρητικότητας των σωματιδίων πλήρωσης της κλίνης: a) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και b) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.



Σχήμα 37: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I, έπειτα από διπλασιασμό της τιμής της ειδικής θερμοχωρητικότητας των σωματιδίων πλήρωσης της κλίνης: c) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και d) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.



Σχήμα 38: Όπως και στα Σχ. 36 και 37, αλλά έπειτα από υποδιπλασιασμό της τιμής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του εργαζόμενου ρευστού: e) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και f) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.

της $C_{ps}=1.050 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, φαίνονται τα αποτελέσματα για $C_{ps}=2.100\text{J/kg}\cdot\text{K}$ (διπλασιασμός) και $C_{ps}=525\text{J/kg}\cdot\text{K}$ (υποδιπλασιασμός).

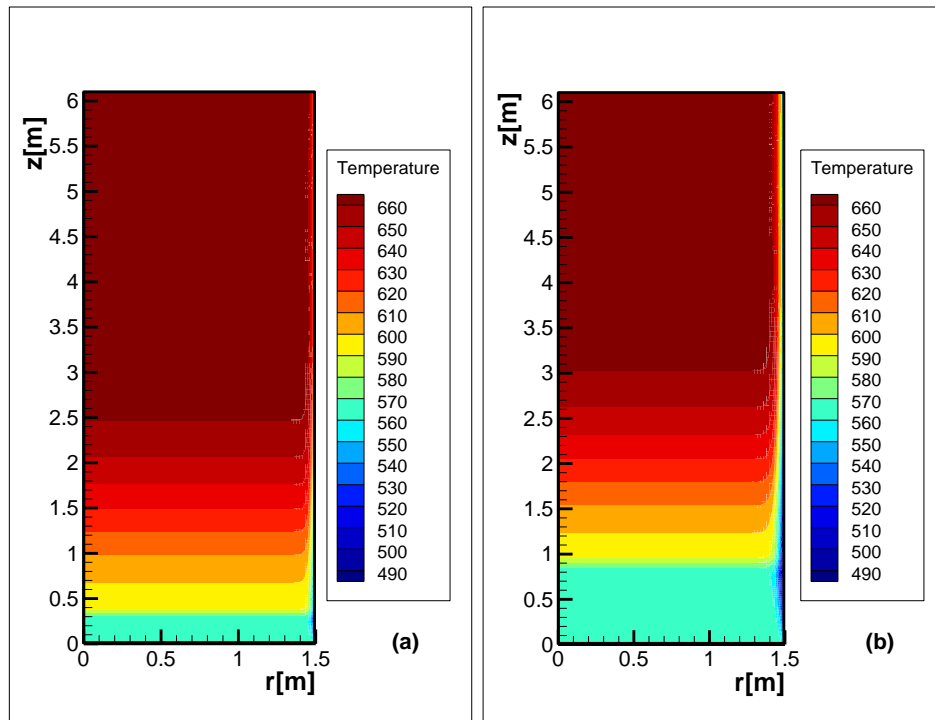
5.1.4.3 Επίδραση της Θερμικής Αγωγιμότητας του Εργαζόμενο Ρευστού

Η θερμική αγωγιμότητα ως ιδιότητα εκφράζει την ικανότητα διάδοσης θερμότητας μέσω αγωγής εντός ενός συγκεκριμένου μέσου. Ενώ η υψηλή θερμική αγωγιμότητα είναι επιθυμητή, καθώς ενισχύεται η εναλλαγή θερμότητας, εντούτοις δεν αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως βασικό κριτήριο σχεδιασμού διατάξεων SHTES. Για την περίπτωση του υπό εξέταση κυκλώματος, η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του HTF διπλασιάστηκε και υποδιπλασιάστηκε σε σχέση με την αρχική. Έτσι, οι τιμές για τις οποίες προσομοιώθηκε η λειτουργία του SHTESS είναι: $k_{HTF}=0,285\text{W/m}\cdot\text{K}$, $k_{HTF}=0,57\text{W/m}\cdot\text{K}$ και $k_{HTF}=1,14\text{W/m}\cdot\text{K}$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα που έπονται (Σχήμα 39, Σχήμα 40, Σχήμα 41).

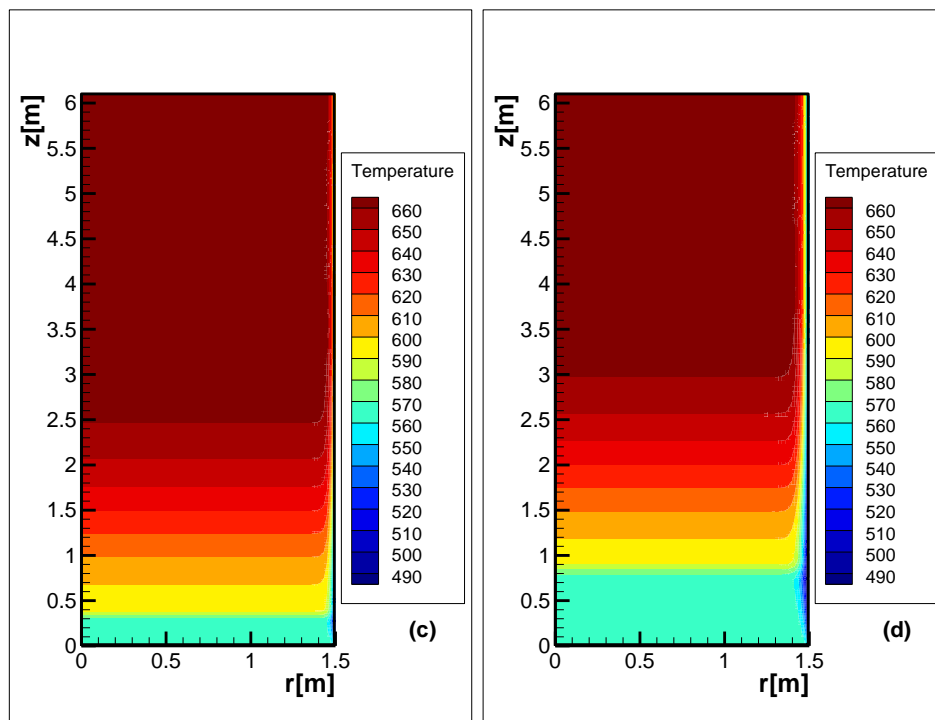
5.1.4.4 Επίδραση της Θερμικής Αγωγιμότητας του Υλικού Πλήρωσης

Με δεδομένα όσα ειπώθηκαν στο κεφάλαιο 2 (βλ. ενότητα 2.2.1) σχετικά με τη θερμική διαχυτότητα ως κρίσιμη παράμετρο σχεδιασμού της απομάστευσης, η πληρέστερη μελέτη της επίδρασής της, μπορεί να πραγματοποιηθεί με μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους την αγωγή θερμότητας εντός των στερεών υλικών πλήρωσης. Ομοίως με την 5.1.4.3, η θερμική αγωγιμότητα του στερεού υλικού

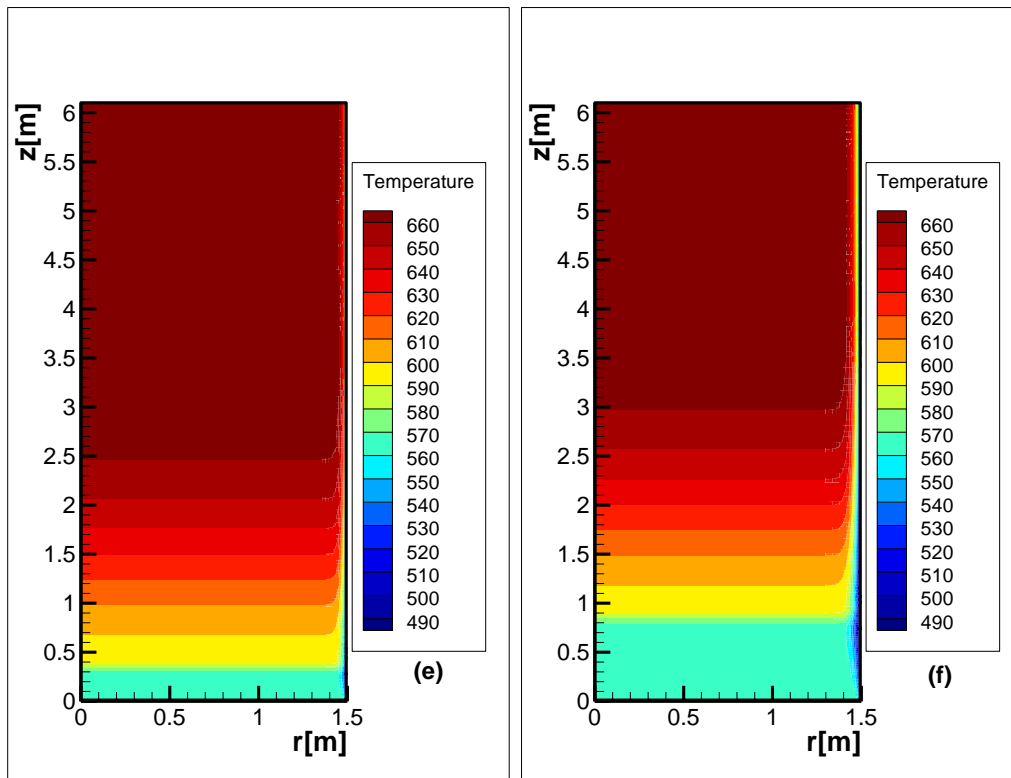
πλήρωσης δε φαίνεται επιδρά στη λειτουργία του συστήματος. Διατρέχονται οι τιμές $k_s=1,25\text{W/m}\cdot\text{K}$, $k_s=2,5\text{W/m}\cdot\text{K}$ και $k_s=5\text{W/m}\cdot\text{K}$ και τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήματα 42-44).



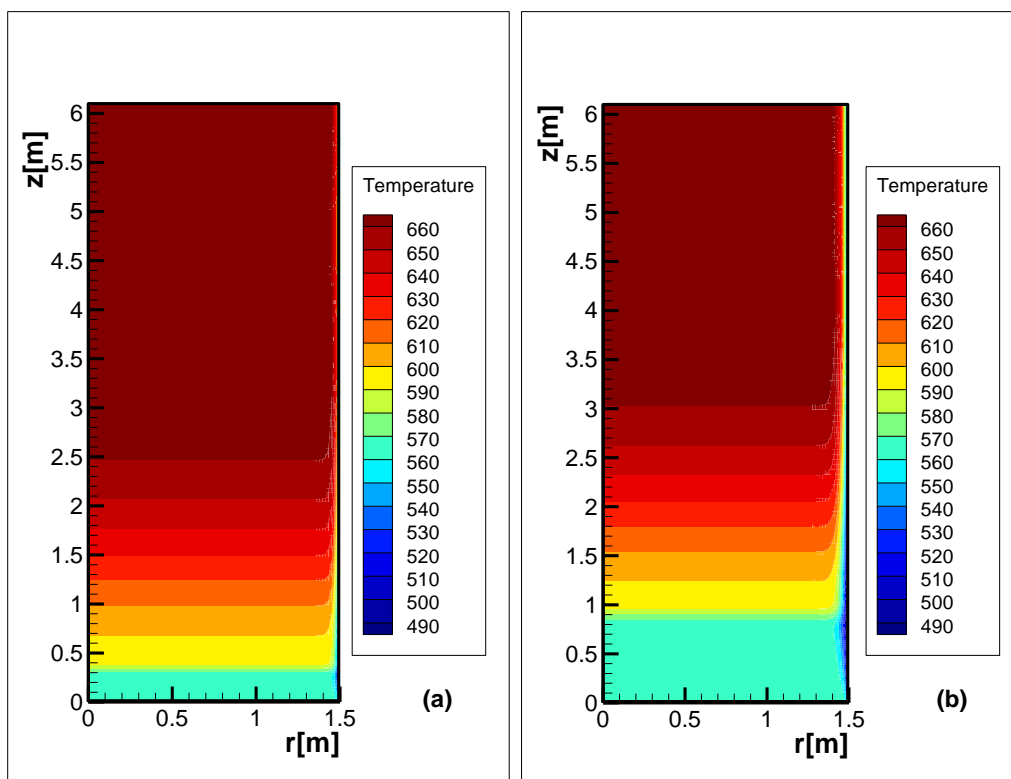
Σχήμα 39: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I με την αρχική τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του εργαζόμενου ρευστού: a) για τη χρονική στιγμή $t=600\text{s}$ και b) για τη χρονική στιγμή $t=1.500\text{s}$.



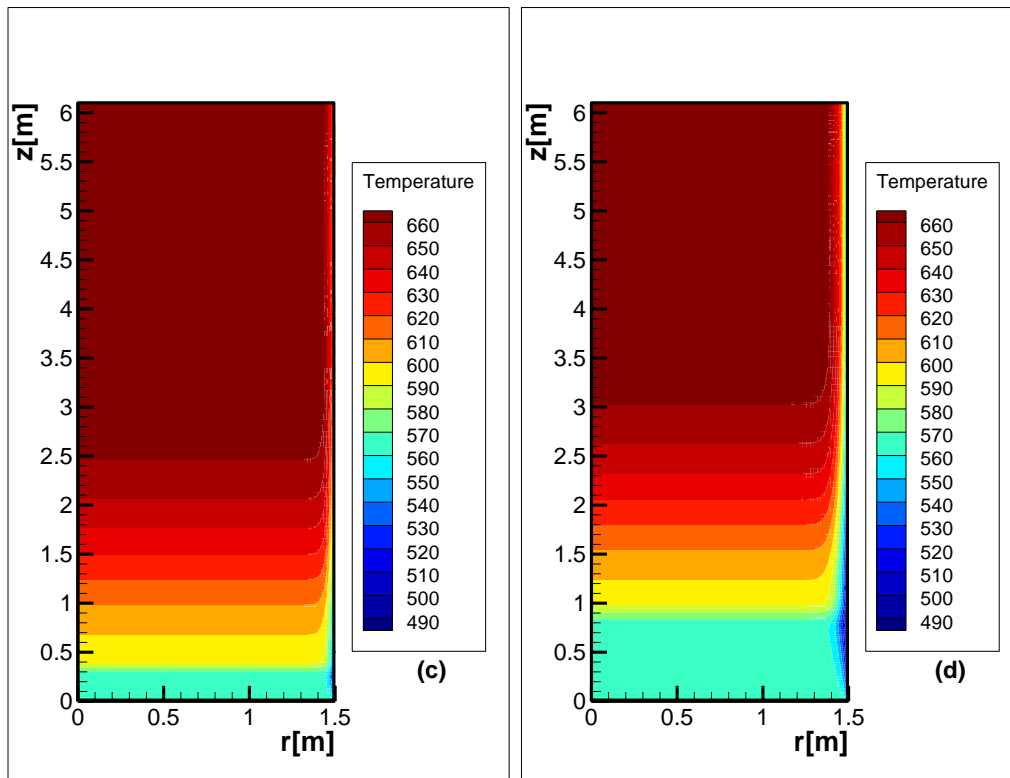
Σχήμα 40: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I, έπειτα από διπλασιασμό της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας του εργαζόμενου ρευστού: c) για τη χρονική στιγμή $t=600\text{s}$ και d) για τη χρονική στιγμή $t=1.500\text{s}$.



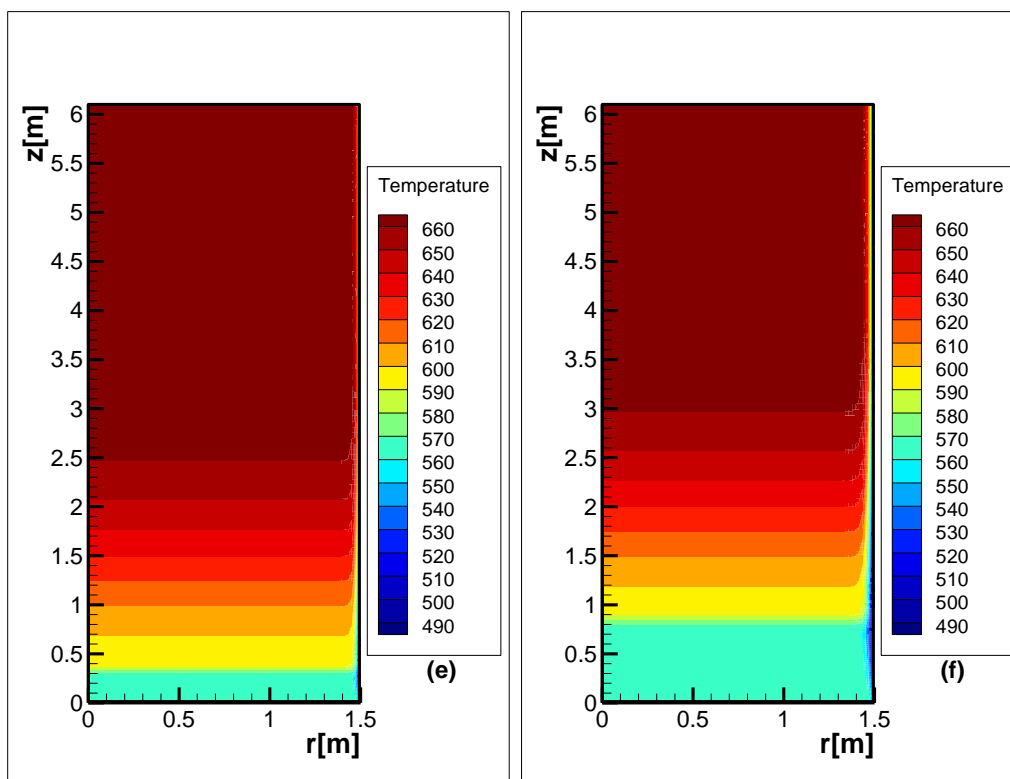
Σχήμα 41: Όπως και στα Σχ. 39 και 40, αλλά έπειτα από υποδιπλασιασμό της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας του εργαζόμενου ρευστού: ε) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και f) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.



Σχήμα 42: Ισοϋψεις θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I με την αρχική τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του στερεού υλικού πλήρωσης: α) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και β) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.



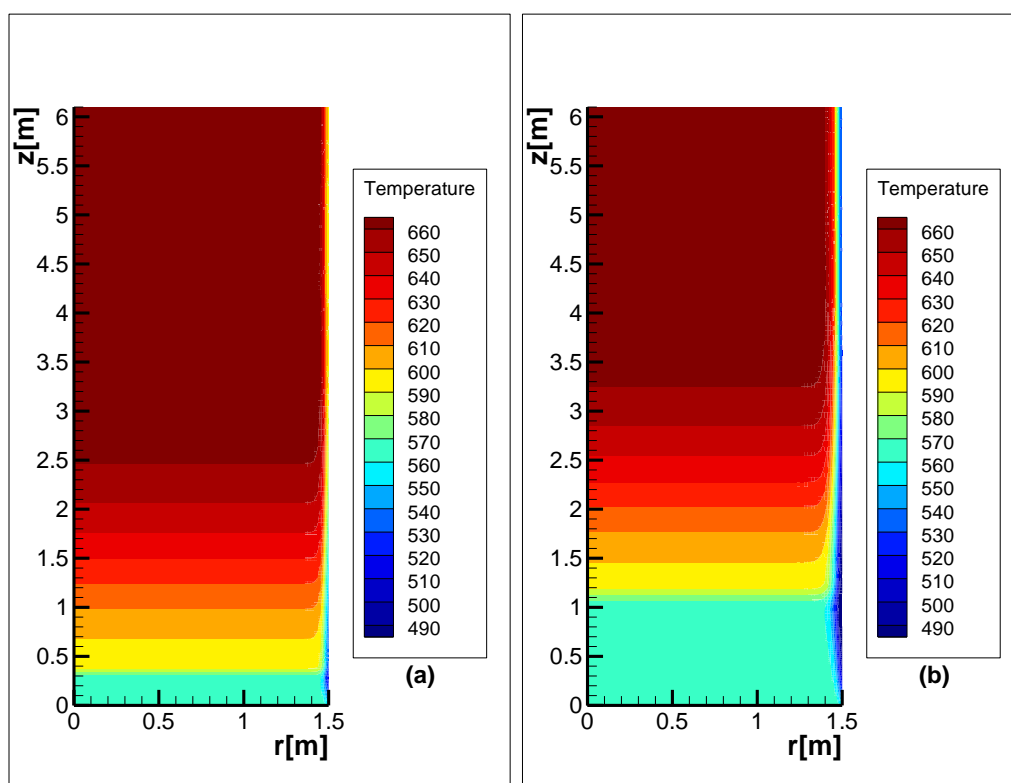
Σχήμα 43: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I, έπειτα από διπλασιασμό της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας του στερεού υλικού πλήρωσης: c) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και d) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.



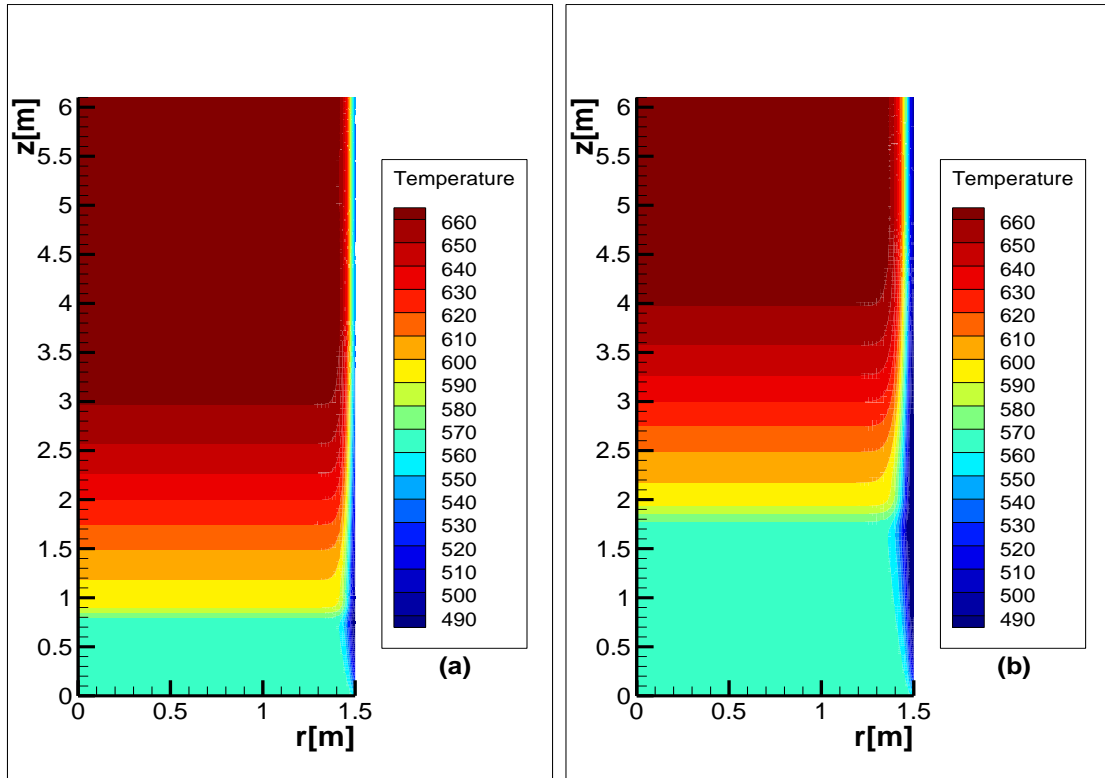
Σχήμα 44: Όπως και στα Σχ. 42 και 43, αλλά έπειτα από υποδιπλασιασμό της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας του στερεού υλικού πλήρωσης: e) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και f) για τη χρονική στιγμή $t=1.500s$.

5.1.4.5 Επίδραση του Πορώδους της Κλίνης

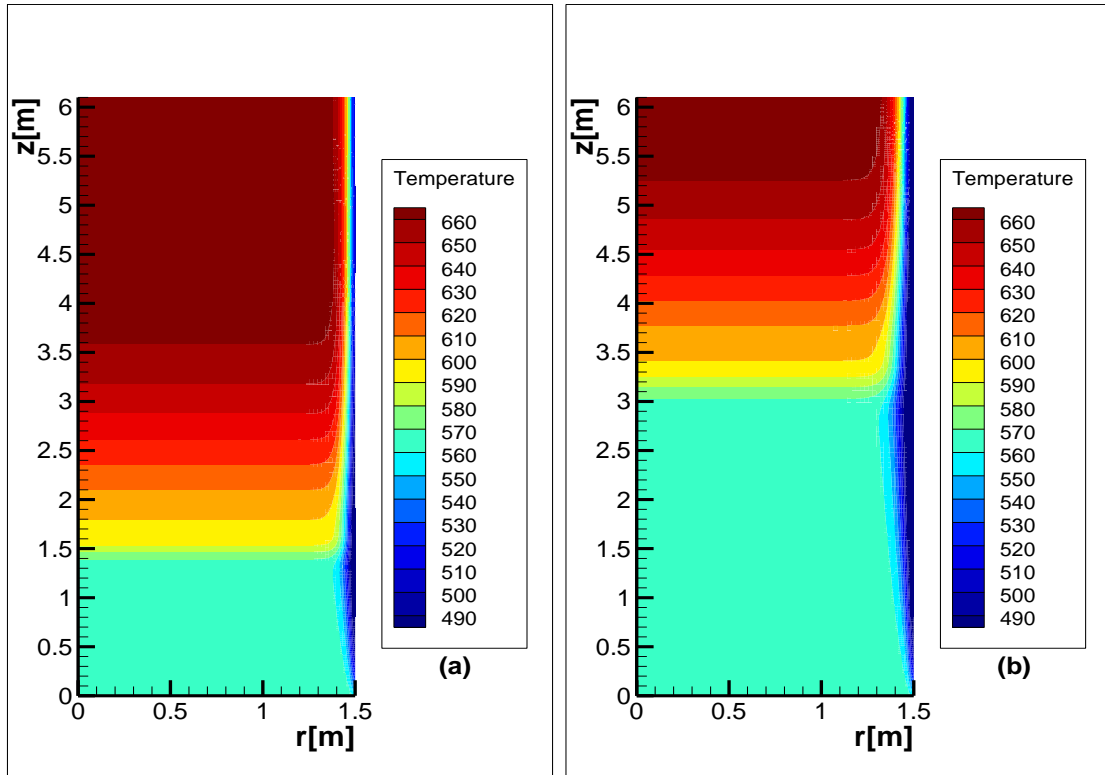
Το πορώδες αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα μιας συμπαγούς κλίνης και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [11] επηρεάζει την ικανότητα αποθήκευσής της. Στην περίπτωση που εξετάζεται, το πορώδες έχει τιμή $\epsilon=0,22$, τιμή που περιορίζει αρκετά τη ροή του ρευστού μέσα στην κλίνη. Αύξηση της τιμής του πορώδους, αναμένεται να διευκολύνει τη ροή του ρευστού και επομένως να επιταχύνει τη διάδοση του θερμοκρασιακού μετώπου. Στην αντίθετη περίπτωση του χαμηλού πορώδους, λόγω του περιορισμού της ροής του ρευστού, δυσχεραίνεται και η μεταφορά θερμότητας. Για την περίπτωση της διάταξης SHTES δοκιμάστηκαν διαδοχικές προσομοιώσεις σε τιμές πορώδους $\epsilon=0,1$, $\epsilon=0,22$, $\epsilon=0,5$ και $\epsilon=0,9$. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται, φαίνονται στα Σχήματα 45-48. Από αυτά γίνεται φανερή η μεγάλη επίδραση του πορώδους στην ταχύτητα επίτευξης της μόνιμης κατάστασης. Οι νέες τιμές που δόθηκαν στο πορώδες είναι περίπου διπλάσιες, τετραπλάσιες και υποδιπλάσιες αντίστοιχα της αρχικής. Η μεγάλη επίδραση του πορώδους έγκειται στην ευκολία μεταβολής του: λόγω της κυβικής εξάρτησης της τιμής του μέσου πορώδους μιας κλίνης ομοιόμορφα κατανεμημένων σωματιδίων από την ακτίνα των τελευταίων, συναπάγεται πολύ μεγάλη μεταβολή του πορώδους για αμελητέα μεταβολή του μεγέθους των σωματιδίων.



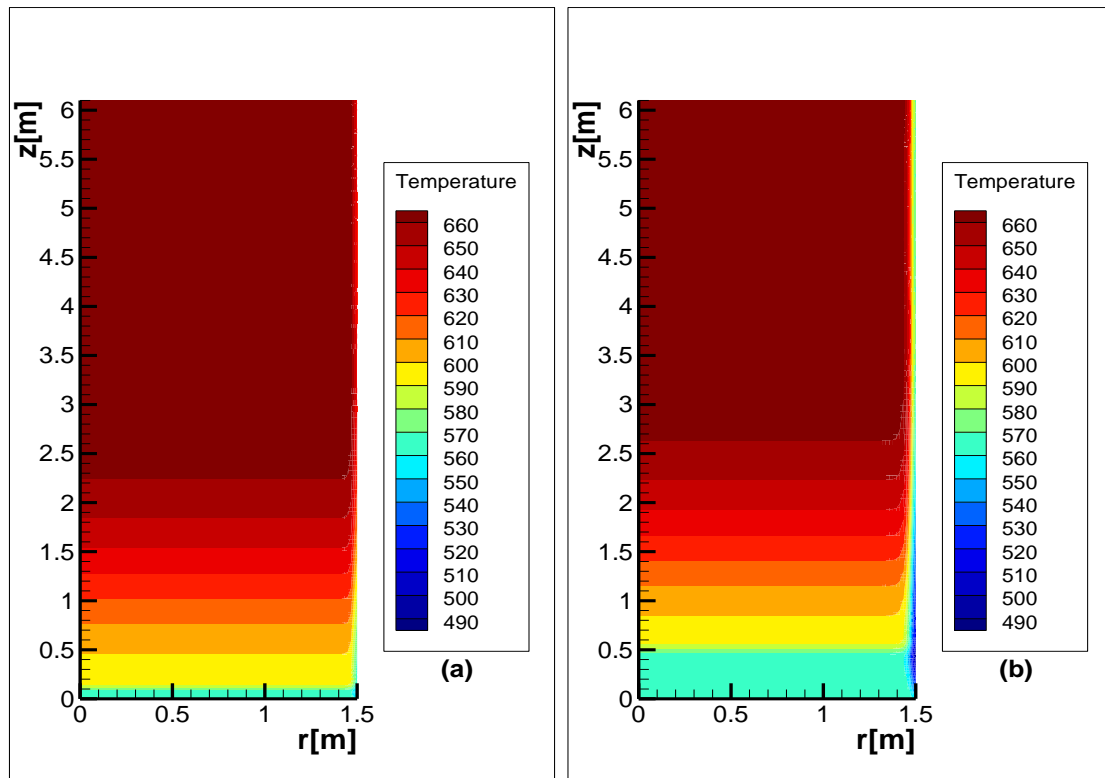
Σχήμα 45: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I με την αρχική τιμή του πορώδους της κλίνης: a) για τη χρονική στιγμή $t=600$ s και b) για τη χρονική στιγμή $t=2000$ s.



Σχήμα 46: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I με την τιμή του πορώδους της κλίνης ορισμένη ως $\epsilon=0,5$: a) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και b) για τη χρονική στιγμή $t=2.000s$.



Σχήμα 47: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I με την τιμή του πορώδους της κλίνης ορισμένη ως $\epsilon=0,9$: a) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και b) για τη χρονική στιγμή $t=2.000s$.



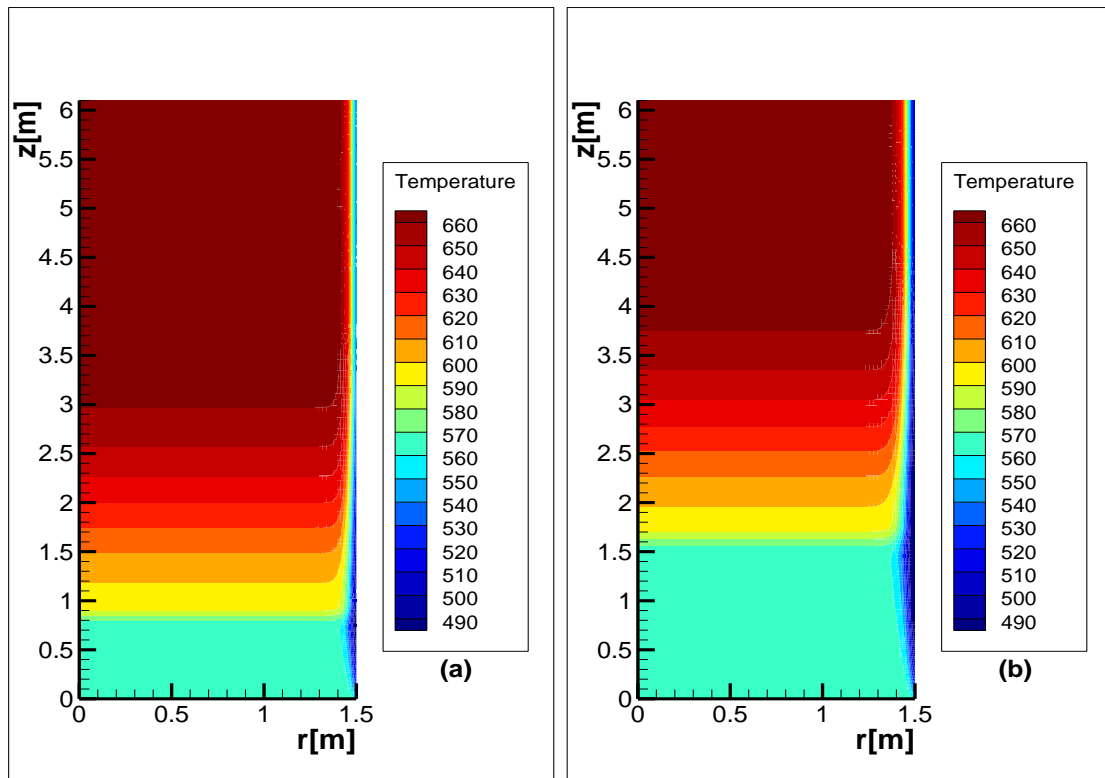
Σχήμα 48: Όπως και στα Σχ. 45-47, αλλά με την τιμή του πορώδους της κλίνης ορισμένη ως $\epsilon=0,1$: a) για τη χρονική στιγμή $t=600s$ και b) για τη χρονική στιγμή $t=2.000s$.

5.1.4.6 Επίδραση της Διαπερατότητας της Κλίνης

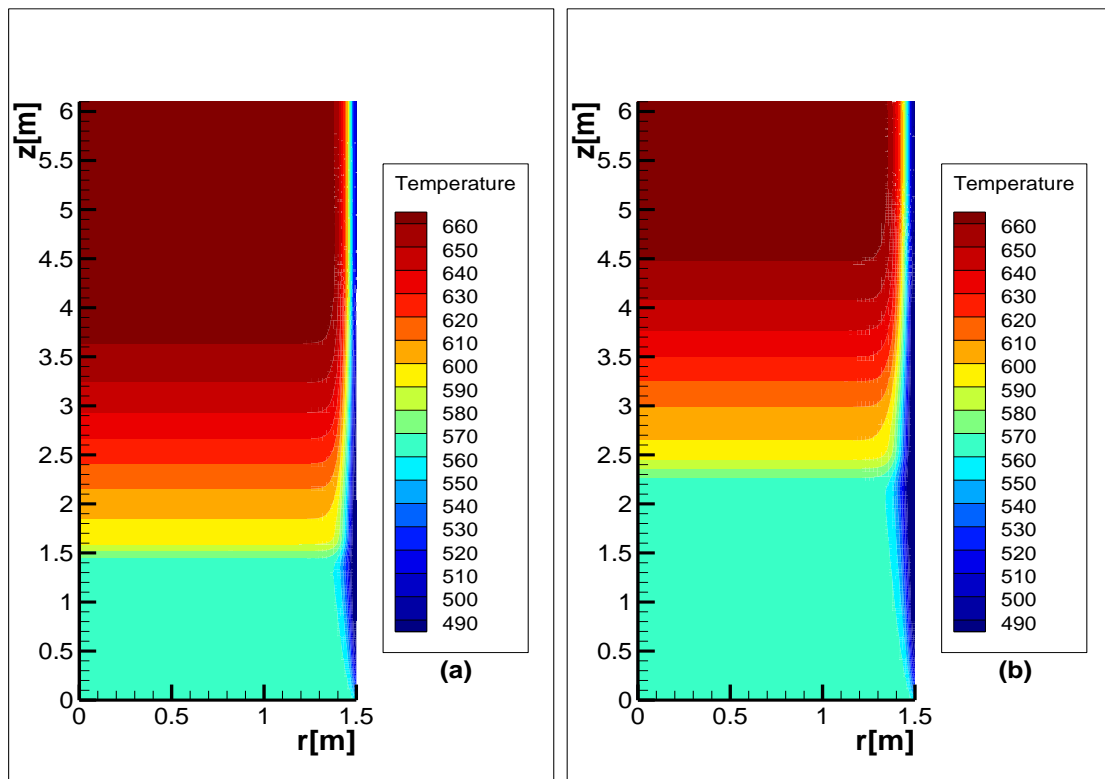
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η διαπερατότητα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά μιας σταθερής κλίνης. Η επίδρασή της έχει παρόμοιες καταβολές με εκείνες του πορώδους: θεωρώντας την ισχύ της εξίσωσης Carman-Kozeny, η τιμή της διαπερατότητας εξαρτάται από το τετράγωνο της τιμής της διαμέτρου των σωματιδίων πλήρωσης. Για την οπτικοποίηση αυτής της επίδρασης, μεταβλήθηκε η διάμετρος των σωματιδίων από $0,015m$ σε $0,045m$ (τριπλασιασμός) και $0,0015m$ (υποδεκαπλασιασμός). Με τον τρόπο αυτό, η διαπερατότητα έλαβε τις τιμές: $2,625 \cdot 10^{-8} m^2$, $2,363 \cdot 10^{-7} m^2$ και $2,625 \cdot 10^{-10} m^2$ αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της μεταβολής της φαίνονται στα Σχήματα 49-51.

5.2 Αποτελέσματα Προβλήματος II

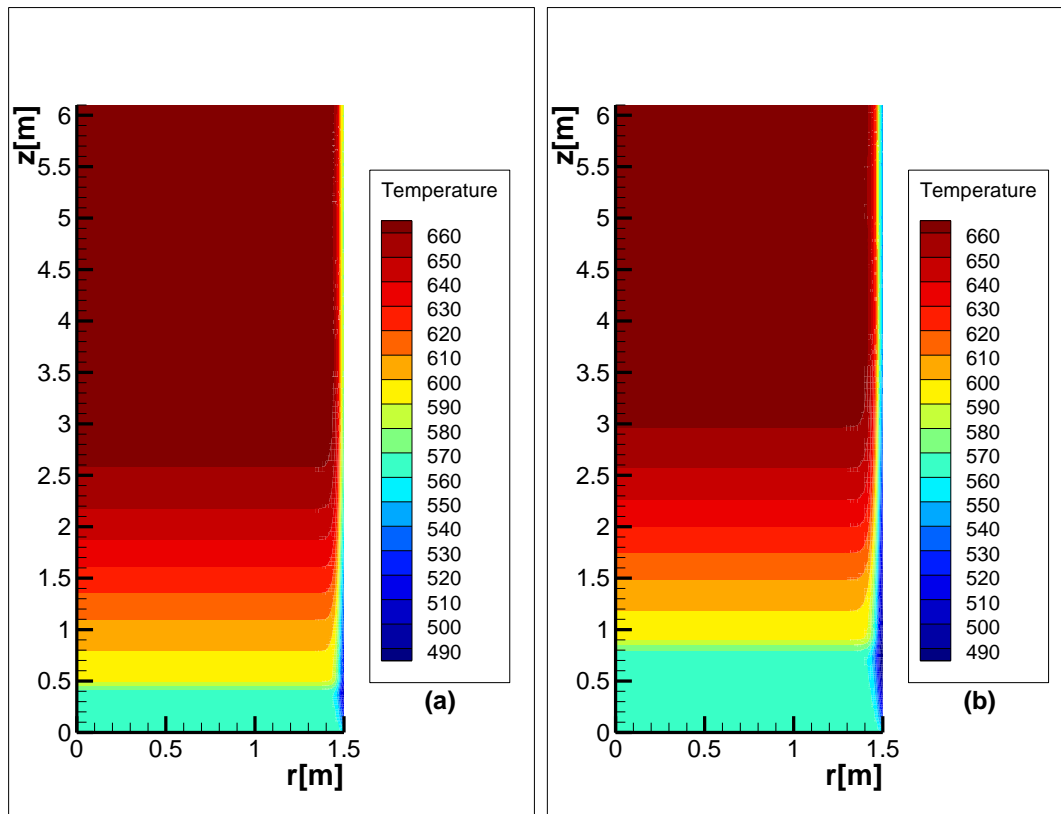
Η διαδικασία που υιοθετήθηκε κατά την επίλυση του Προβλήματος I, εφαρμόζεται και στην περίπτωση της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Κατά σειρά εμφάνισής τους, θα συζητηθούν η ανεξαρτησία του πλέγματος, η προσπάθεια επιβεβαίωσης από πειραματικά δεδομένα και η ανεξαρτησία χρονικού βήματος. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και πάλι σε H/Y με επεξεργαστή Intel(R) Xeon(R) CPU E5620 στα $2.40GHz$, $64bit$, 8 πυρήνων και μνήμης RAM $6GB$. Αναφέρεται επίσης ότι τα θερμοστοιχεία τύπου T, για τα οποία έγινε λόγος στο



Σχήμα 49: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I για την αρχική τιμή της διαπερατότητας της κλίνης: α) τη χρονική στιγμή $t=1.500s$ και β) για τη χρονική στιγμή $t=2.500s$.



Σχήμα 50: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης SHTES του προβλήματος I για τιμή της διαπερατότητας της κλίνης $K=2,363 \cdot 10^{-7} m^2$: α) τη χρονική στιγμή $t=1.500s$ και β) για τη χρονική στιγμή $t=2.500s$.



Σχήμα 51: Όπως και στα Σχ. 49 και 50, αλλά για τιμή της διαπερατότητας της κλίνης $K=2,625 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$: e) για τη χρονική στιγμή $t=1.500\text{s}$ και f) για τη χρονική στιγμή $t=2.500\text{s}$.

προηγούμενο κεφάλαιο, είναι τοποθετημένα στον άξονα της δεξαμενής και σε ύψη 32,19, 96,58, 178,85, 250,38 και 422,08mm (T0, T2, T4, T6, T10²³, Σχήμα 52).

5.2.1 Ανεξαρτησία Πλέγματος

Στο Πρόβλημα II οι αρχικές συνθήκες ήταν σαφώς ορισμένες²⁴. Για τον έλεγχο της επίδρασης του πλέγματος, το πρόβλημα λύνεται στα τέσσερα διαδοχικά πλέγματα που αναφέρθηκαν (βλ. ενότητα 4.2) δηλαδή 4.000, 9.000 και 16.000 κελλιά δομημένου πλέγματος, καθώς και 15.611 κελλιά μη δομημένου πλέγματος. Η προσομοίωση τρέχει και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων θερμοκρασίας-χρόνου. Η επίτευξη της ανεξαρτησίας του πλέγματος φαίνεται στο Σχήμα 53. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακρίβεια και σε μη δομημένα πλέγματα [47]. Η λύση του μη δομημένου πλέγματος, απέχει από τις αντίστοιχες του δομημένου κυρίως για τα θερμοστοιχεία T2 (πράσινο) και T10 (πορτοκαλί). Τα υπόλοιπα τρία θερμοστοιχεία και ειδικότερα το T0 χαρακτηρίζονται από πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των τεσσάρων πλεγμάτων. Είναι ακόμη εμφανές από το Σχήμα 53 ότι τα δομημένα πλέγματα επιτυγχάνουν

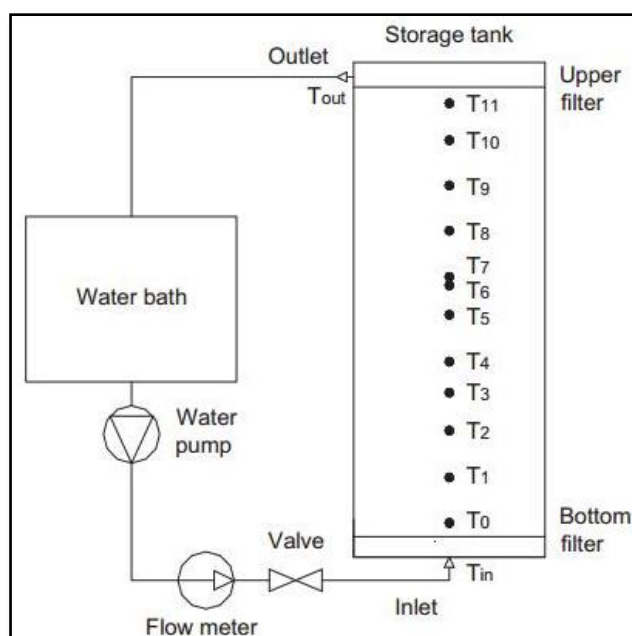
²³ Οι συντεταγμένες της αξονικής συνιστώσας της θέσης των θερμοστοιχείων, έγινε γνωστή έπειτα από επικοινωνία με την ομάδα από το Πανεπιστήμιο της Lleida. Ο συμβολισμός που υιοθετείται, T0, T2, T4, T6, T10, είναι αυτός με τον οποίο αναφέρονται στο άρθρο.

²⁴ Παρόλη τη σαφήνεια στον ορισμό τους, όπως διατυπώνεται στο κεφάλαιο 6, υπάρχει αμφιβολία για την ορθότητα της ομοιομορφίας της αρχικής συνθήκης θερμοκρασίας.

πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους. Λόγω αυτής ακριβώς της συμφωνίας, αλλά και της οικονομίας που προσφέρει στους υπολογισμούς, θα χρησιμοποιηθεί στο εξής το πλέγμα των 4.000 κελλιών.

5.2.2 Επιβεβαίωση από Πειραματικά Δεδομένα

Πρόκειται για την πλέον απαιτητική διαδικασία της εργασίας. Όπως εκτέθηκε στο κεφάλαιο 3 (βλ. ενότητα 3.3) η ενσωμάτωση της αλλαγής φάσης περιπλέκει αρκετά τη μοντελοποίηση ενός θερμικού κυκλώματος. Η χρήση ενός φαινομενικά απλού μοντέλου κατά την προσομοίωση, όπως αυτό της φαινόμενης θερμοχωρητικότητας, δεν απλοποίησε ιδιαίτερα τα πράγματα. Η πρώτη δυσκολία προέρχεται από τις ασάφειες του άρθρου σχετικά με τη διαπερατότητα και τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Σε επόμενη ενότητα (βλ. 5.2.4) θα αποδειχτεί η σημασία σωστού ορισμού της διαπερατότητας.

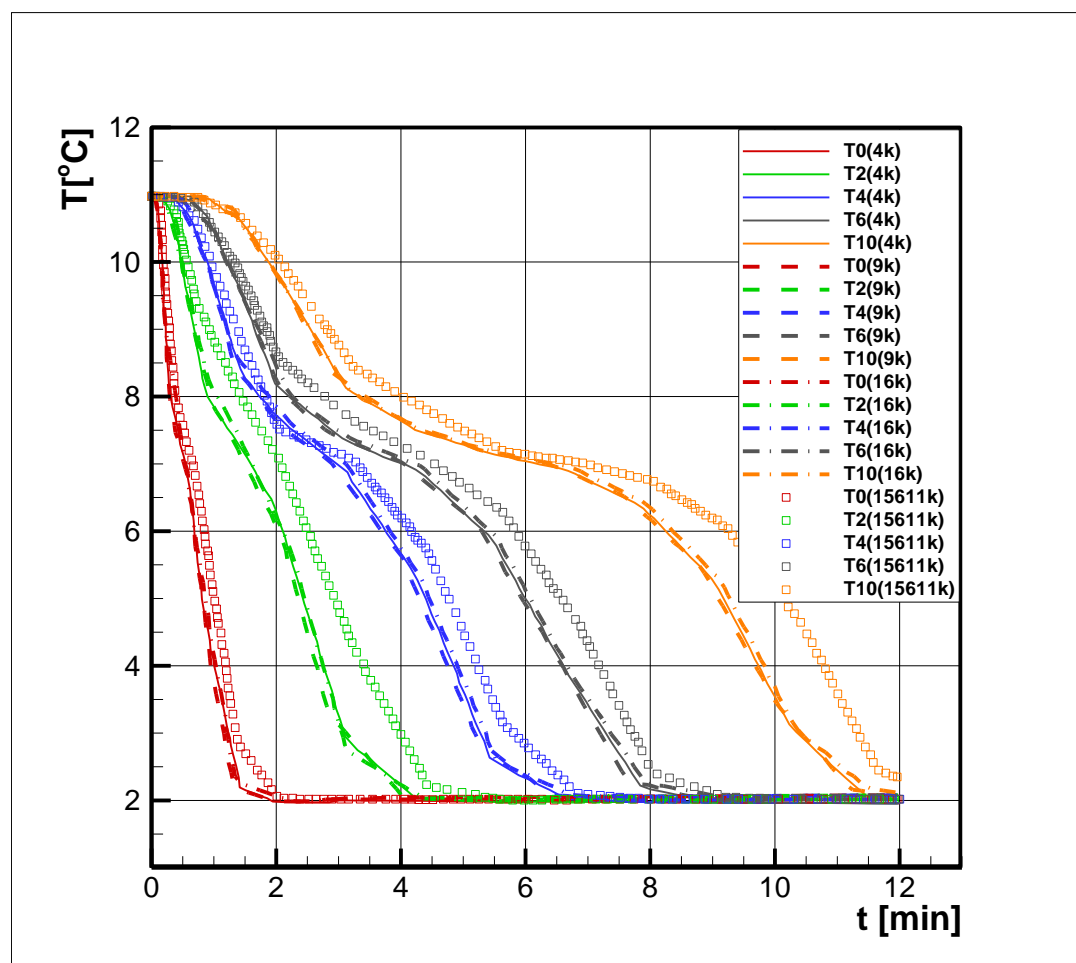


Σχήμα 52: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης συμπαγούς κλίνης του προβλήματος II. Διακρίνονται οι σχετικές θέσεις των θερμοστοιχείων στον άξονα της δεξαμενής (Oro et al. [11]).

Η δεύτερη δυσκολία προέρχεται από την απουσία αναφοράς στο μοντέλο επίλυσης της αλλαγής φάσης. Πράγματι, το μοντέλο αλλαγής φάσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες του PCM στο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης και συνεπώς η γνώση του είναι απαραίτητη. Με δεδομένη ακόμη την απουσία αναφοράς σε κινούμενα πλέγματα και τη μορφή της εξίσωσης θερμότητας²⁵ [11], συμπεραίνεται ότι έχει χρησιμοποιηθεί κάποιο οιονεί μοντέλο Φαινόμενης Θερμοχωρητικότητας. Γενικότερα, η δυσκολία αντιμετώπισης της αλλαγής φάσης γίνεται καλύτερα αντιληπτή παρακάτω, οπότε θα παρασταθούν γραφικά και οι

²⁵ Εφόσον έχει υποτεθεί μοντέλο θερμικής ισορροπίας για την εξίσωση θερμότητας, δεν μπορεί να εφαρμοστεί ενθαλπική μέθοδος, καθώς εκείνη απαιτεί διαφορετικές εξισώσεις περιγραφής στερεάς και ρευστής φάσης της συμπαγούς κλίνης.

υπολογιστικές λύσεις του εν λόγω άρθρου. Από πλευράς μας, υιοθετείται το μοντέλο φαινόμενης θερμοχωρητικότητας στη μορφή που διατυπώθηκε στο κεφάλαιο 3.

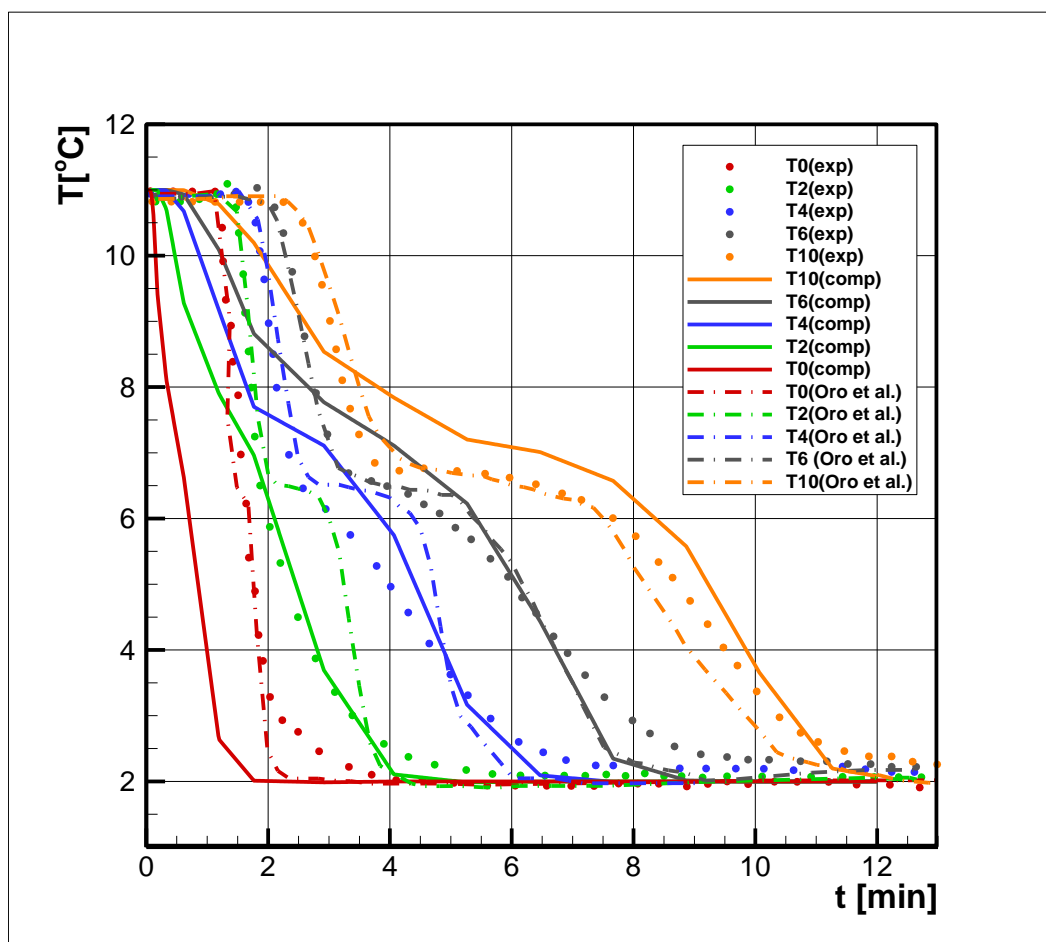


Σχήμα 53: Ανεξαρτησία πλέγματος για το Πρόβλημα II. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα αποτελέσματα του θερμοστοιχείου T0, με πράσινο του T2, με μπλε του T4, με γκρι του T6 και με πορτοκαλί του T10. Παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των δομημένων πλεγμάτων. Το μη δομημένο πλέγμα φαίνεται να αποκλίνει σχετικά για τα θερμοστοιχεία T2 και T10.

Η εφαρμογή του μοντέλου γίνεται με τον ορισμό της τιμής ή της συνάρτησης $C_p=f(T)$ για τα θερμοκρασιακά εύρη αμιγούς στερεάς ή υγρής φάσης και για την περιοχή αλλαγής φάσης από τη σχέση της εξ. 3.46β. Η προσέγγιση των C_{ps} και C_{pl} μέσω του Σχήματος 27, ενώ πραγματοποιήθηκε μέσω Matlab R2011a, Tecplot 360 2015 R1 και MS Excel 2010, δεν μπορούσε να ολοκληρωθεί. Πράγματι, με τον τρόπο αυτό παράγονται πολυώνυμα μεγάλου βαθμού που αυξάνουν απαγορευτικά το υπολογιστικό κόστος. Έτσι, για τις περιοχές στερεού και υγρού χρησιμοποιούνται οι σταθερές τιμές που δίνονται [11]. Τα αποτελέσματα που παράγει η εφαρμογή του σκεπτικού αυτού, φαίνονται στο Σχήμα 54:

Πρώτη βασική παρατήρηση που προκύπτει είναι ότι το μοντέλο δεν ακολουθεί επακριβώς τα πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι υπολογιστικές λύσεις έχουν μικρότερη αδράνεια ως προς την επιβαλλόμενη μεταβολή (είσοδος

κρύου νερού-αποφόρτιση). Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία ελαττώνεται ταχύτερα απ' ότι στο πείραμα. Εν πολλοίς σε αυτό οφείλεται η άμεση πτώση της θερμοκρασίας και η φαινομενική μετατόπιση της περιοχής αλλαγής φάσης από τους 3-7°C στους 6-9°C. Εντούτοις, ακολουθούν πιστά τη χαρακτηριστική μορφή των πειραματικών καμπυλών σε κάθε μια από τις καμπύλες. Αυτό γίνεται φανερό για παράδειγμα στο θερμοστοιχείο T2, οπότε με το πέρας των πρώτων 2min, ακολουθούνται πιστά τα πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον, η μόνιμη κατάσταση προσεγγίζεται σε κάθε θερμομότρο την ίδια χρονική στιγμή. Η εμφάνιση της αδράνειας αυτής, εγείρει ερωτήματα σχετικά με την ομοιομορφία των αρχικών συνθηκών του πεδίου θερμοκρασίας.

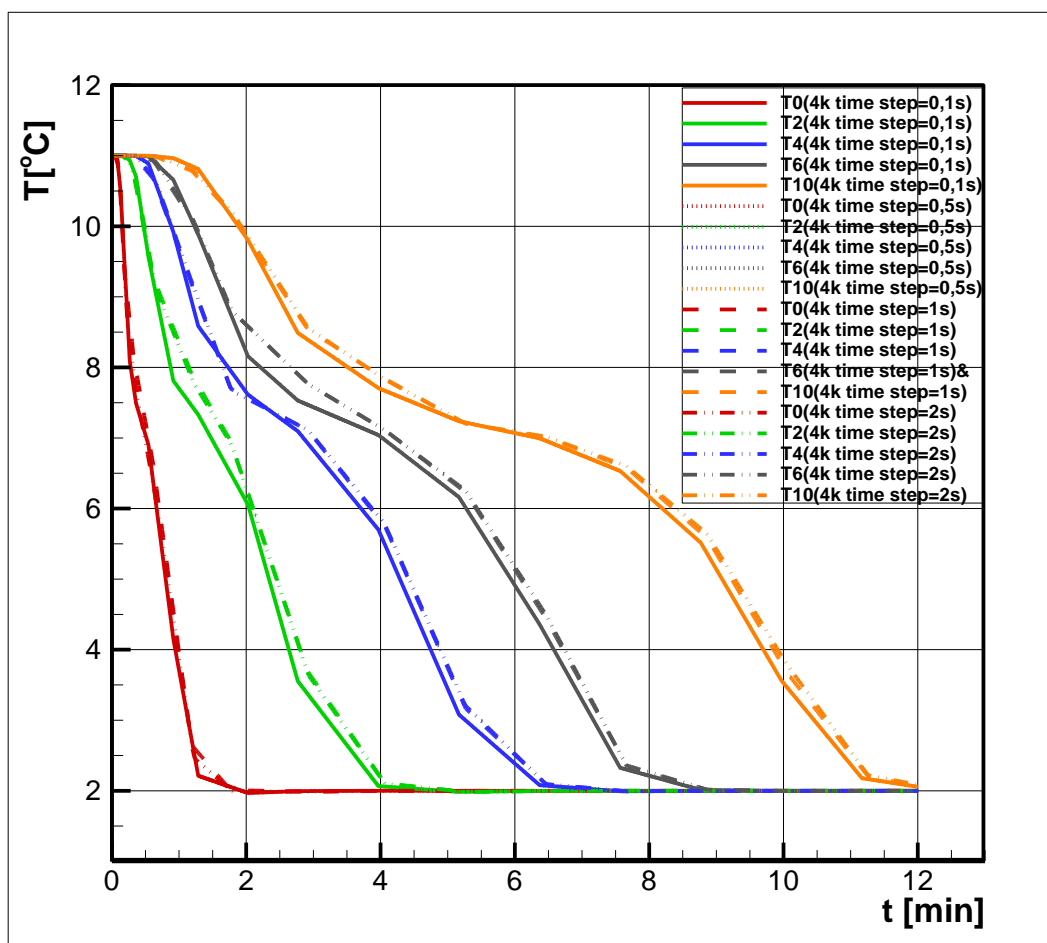


Σχήμα 54: Υπολογιστικά αποτελέσματα σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα σε διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου. Φαίνονται τόσο τα αποτελέσματα που παράγονται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, όσο και τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας [11]. Με κόκκινο δίνεται το θερμοστοιχείο T0, με πράσινο το T2, με μπλε το T4, με γκρι το T6 και με πορτοκαλί το T10.

5.2.3 Ανεξαρτησία Χρονικού Βήματος

Κατά τρόπο παρόμοιο με το Πρόβλημα I, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για ορισμένες τιμές του χρονικού βήματος για το πλέγμα των 4.000 δομημένων κελιών. Αυτές ήταν 2, 1, 0,5 και 0,1s. Η συμφωνία των αποτελεσμάτων κρίνεται αρκετά ικανοποιητική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 55, καθώς παρατηρείται πολύ

μικρή απόκλιση μεταξύ των καμπυλών που αντιστοιχούν σε διαφορετικά χρονικά βήματα.



Σχήμα 55: Επίδραση χρονικού βήματος στο Πρόβλημα II όπως φαίνεται σε διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου: οι υπολογιζόμενες τιμές που προκύπτουν από τα διάφορα θερμοστοιχεία εμφανίζουν ικανοποιητική μεταξύ τους συμφωνία.

Συγκεκριμένα, κάθε θερμοστοιχείο καταγράφει ενδείξεις που ταυτίζουν επακριβώς τη συμπεριφορά των λύσεων για time step 1 και 2s και 0,1 και 0,5s. Πράγματι, είναι τέτοια η ταύτιση των καμπυλών για τα δύο αυτά ζευγάρια που είναι δύσκολο να γίνει αντιληπτή η όποια διαφορά τους, χωρίς επιπλέον εστίαση στο Σχήμα 55. Η μικρή, αλλά πεπερασμένη απόκλιση ανάμεσα στις λύσεις διαφορετικών χρονικών βημάτων, αποτελεί την επίδραση του χρονικού βήματος στη μορφή της λύσης. Στη συνέχεια, επιλέγεται για τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν το χρονικό βήμα 1s, επειδή χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει (λόγω του μοναδιαίου βήματός του) περαιτέρω τους υπολογισμούς.

5.2.4 Παραμετρική Ανάλυση

Διατάξεις αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, εξαρτώνται από ποικίλα χαρακτηριστικά μεγέθη. Τέτοια είναι οι θερμοφυσικές ιδιότητες του HTF και του στερεού πλήρωσης, κατασκευαστικές παράμετροι (ύψος και ακτίνα δεξαμενής,

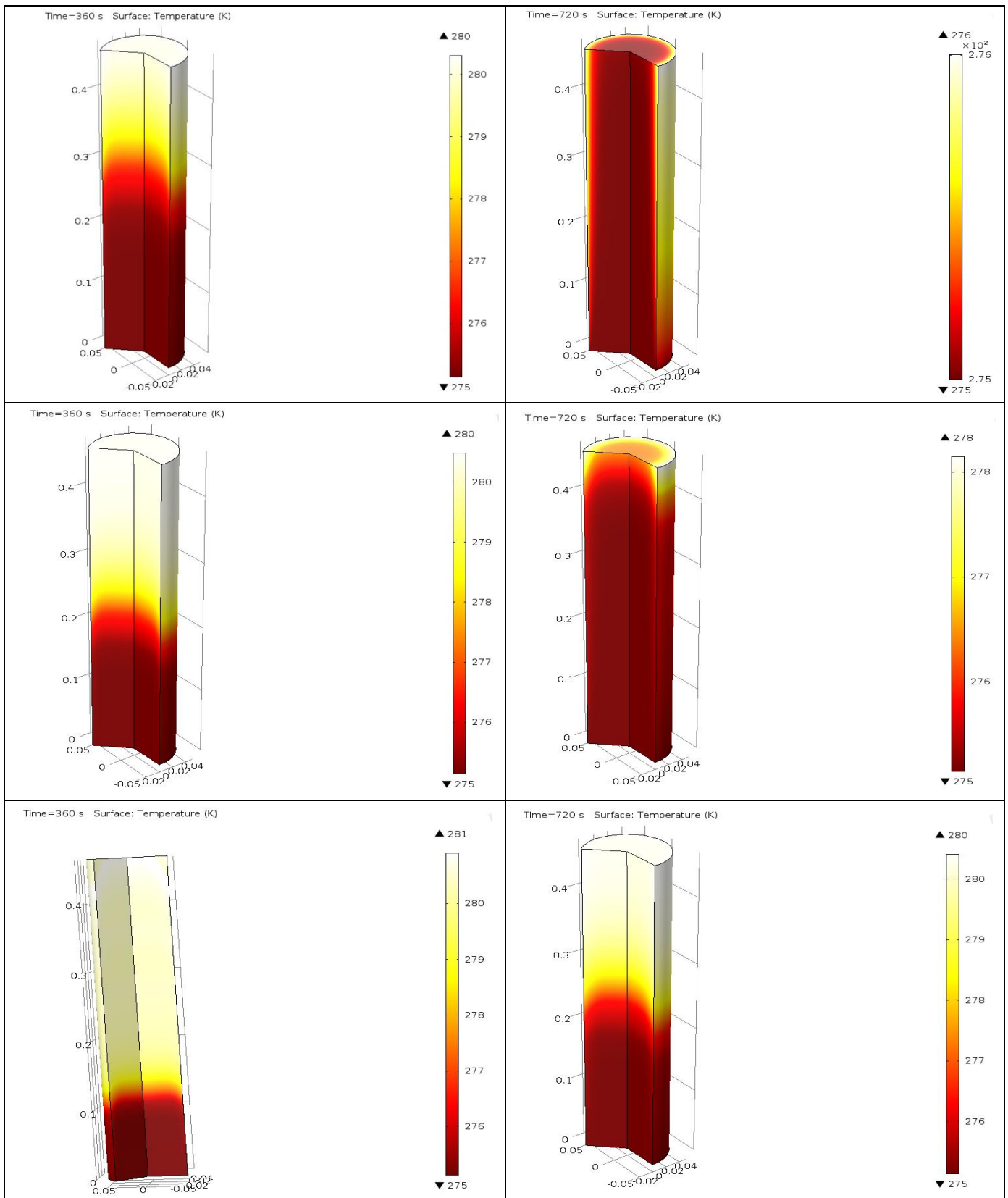
λόγος ακτίνας δεξαμενής/ακτίνα σωματιδίων) και παράμετροι της κλίνης (πορώδες και διαπερατότητα). Η διαφοροποίηση σε σχέση με την αντίστοιχη ανάλυση σε διάταξη αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, έγκειται στη μεγάλη επίδραση των ιδιοτήτων της αλλαγής φάσης. Για το μοντέλο φαινόμενης θερμοχωρητικότητας που χρησιμοποιείται, τέτοιες ιδιότητες είναι η ειδική θερμοχωρητικότητά του και η λανθάνουσα ενθαλπία τήξης του PCM. Στις ενότητες που ακολουθούν, η επίδραση αυτή υπογραμμίζεται είτε μέσω διαγραμμάτων ισοϋψών της θερμοκρασίας, είτε μέσω διαγραμμάτων θερμοκρασίας-χρόνου. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προκύπτουν στο δομημένο πλέγμα των 4.000 κελιών για τιμή χρονικού βήματος $t=1s$.

5.2.4.1 Επίδραση Ειδικής Θερμοχωρητικότητας του Εργαζόμενου Ρευστού

Για τη διάταξη που προσομοιώθηκε επιλέγεται η μεταβολή της $C_p(HTF)$ από την αρχική τιμή των $4.206,2J/kg \cdot K$ σε αυτή των $6.309,3J/kg \cdot K$ (1,5 φορές μεγαλύτερη) και των $2.103,1 J/kg \cdot K$ (ελαττωμένη κατά το ήμισυ). Τα στιγμιότυπα που λαμβάνονται φαίνονται στο Σχήμα 56 για χρόνους ροής $t=360s$ και $t=720s$. Γίνεται φανερό από το σχήμα αυτό, ότι όσο ελαττώνεται η θερμοχωρητικότητα του HTF, το μέτωπο της θερμοκρασίας κινείται βραδύτερα καθ' ύψος της δεξαμενής. Για την ερμηνεία της συμπεριφοράς αυτής σκεφτόμαστε ότι όσο το $C_p(HTF)$ αυξάνεται τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται ώστε να μεταβληθεί η θερμοκρασία του. Κατά συνέπεια, καθώς το $C_p(HTF)$ αυξάνεται, το νερό θα ανέρχεται στη δεξαμενή ψυχρότερο, αφού το ποσό θερμότητας που θα έχει ανταλλάξει με τα PCM δε θα επαρκεί για να του μεταβάλλει τη θερμοκρασία. Συμπερασματικά, τονίζεται ότι μικρή μεταβολή της $C_p(HTF)$, επιφέρει σημαντική μεταβολή στην κατανομή του θερμοκρασιακού προφίλ. Η θερμοχωρητικότητα του HTF (νερό) είναι καλώς ορισμένη στην περίπτωση που μελετάται, οπότε απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα, δεν προέρχεται από αβεβαιότητα στην τιμή υπολογισμού της. Ακόμη, με ασφάλεια μπορεί να θεωρηθεί σταθερή στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.

5.2.4.2 Επίδραση Ειδικής Θερμοχωρητικότητας του Υλικού Αλλαγής Φάσης

Επιβάλλεται διπλασιασμός και υποδιπλασιασμός της συνολικής τιμής της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM. Η $C_p(PCM)$, μέσω του μοντέλου Φαινόμενης Θερμοχωρητικότητας, ορίζεται σε ασυνεχή τμήματα. Για το διπλασιασμό και αντίστοιχα τον υποδιπλασιασμό της, εισάγεται κατάλληλος συντελεστής (2 και 0,5 αντίστοιχα) στην έκφραση υπολογισμού κάθε μονοφασικού τμήματος. Έτσι, οι τιμές που προκύπτουν για το διπλασιασμό είναι: α) για την περιοχή στερεάς φάσης, $C_{ps}(PCM)=8.000J/kg \cdot K$, β) για την υγρή φάση, $C_{pl}(PCM)=6.000J/kg \cdot K$ και γ) για την περιοχή αλλαγής φάσης, $C_{psl}(PCM)=32.000J/kg \cdot K$. Αντίστοιχα, στην περίπτωση του υποδιπλασιασμού εισάγονται οι τιμές: α) $C_{ps}(PCM)=2.000J/kg \cdot K$, β) $C_{pl}(PCM)=1.500 J/kg \cdot K$ και γ) $C_{psl}(PCM)=26.750J/kg \cdot K$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα στιγμιότυπα του Σχήματος 57. Παρατηρείται αντίθετη συμπεριφορά από αυτήν της μεταβολής του $C_p(HTF)$.

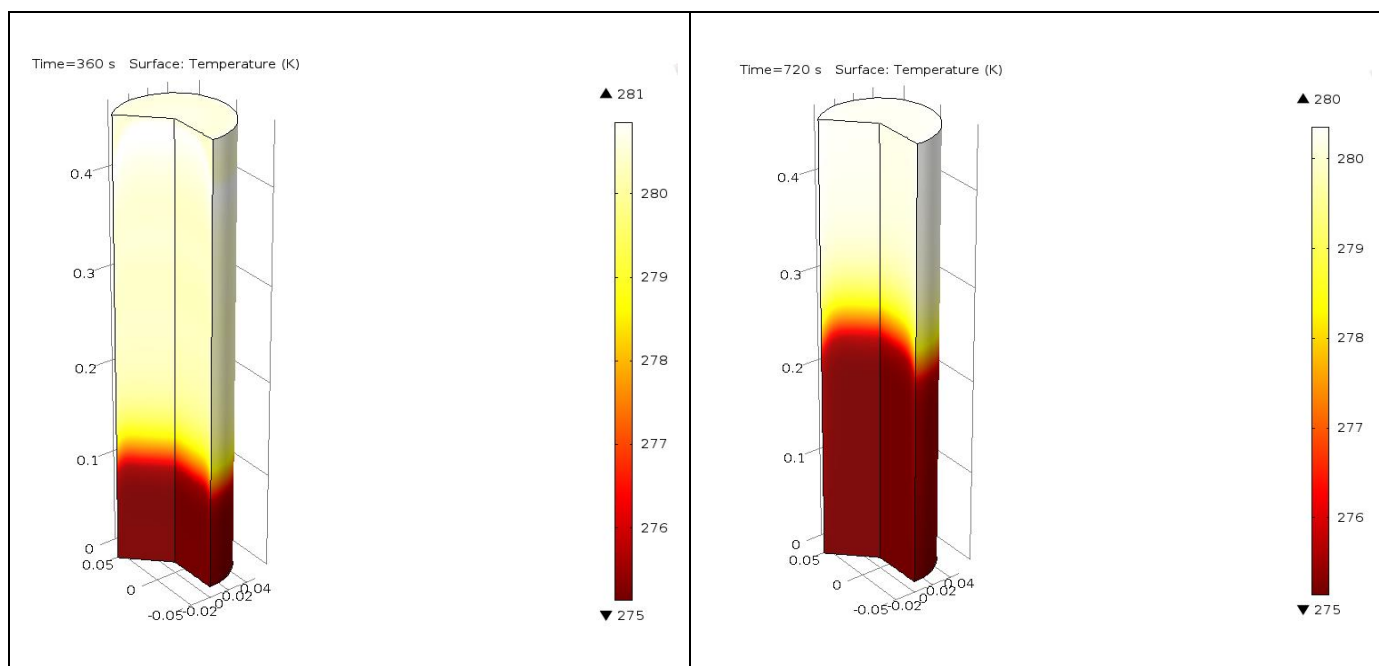


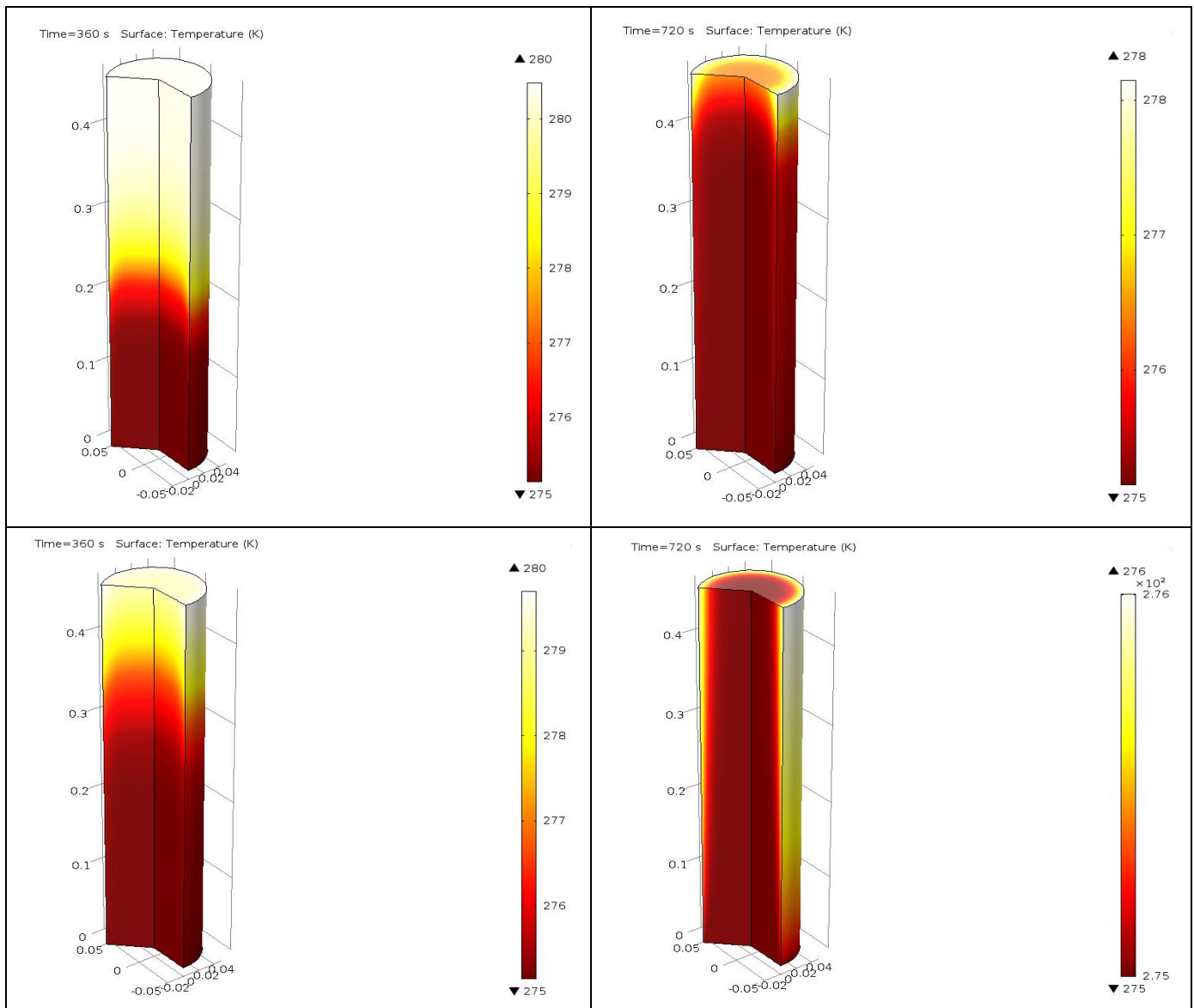
Σχήμα 56: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης LHTES του προβλήματος II με μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του εργαζόμενου ρευστού. Στην αριστερή στήλη και από πάνω προς τα κάτω, εμφανίζονται στιγμιότυπα κατά τη χρονική στιγμή $t=360s$ για $C_p(HTF)=6.309,3J/kg\cdot K$, $C_p(HTF)=4.206,2J/kg\cdot K$ και $C_p(HTF)=2.103,1 J/kg\cdot K$, ενώ στη δεξιά, τα ίδια μεγέθη τη χρονική στιγμή $t=720s$.

Η αύξηση δηλαδή της $C_p(\text{PCM})$, προκαλεί καθυστέρηση στη διάδοση του μετώπου της θερμοκρασίας. Πράγματι, αυξάνοντας τη $C_p(\text{PCM})$, η αποφόρτιση του κυκλώματος γίνεται δυσκολότερη, καθώς περισσότερο ψυχρό ρευστό θα πρέπει να ανταλλάξει θερμότητα με το PCM για να μεταβάλλει τη θερμοκρασία του. Ειδικότερα, στην περιοχή αλλαγής φάσης, οπότε και εμφανίζεται η έντονη αύξηση της τιμής της $C_p(\text{PCM})$, η θερμοκρασία θα μεταβάλλεται ελάχιστα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, καθυστερεί η επιθυμητή μεταβολή της θερμοκρασίας στη διάταξη. Ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζεται η ειδική θερμοχωρητικότητα στο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης είναι συνεπώς θεμελιώδους σημασίας. Επιβεβαιώνεται η υπόθεση που διατυπώθηκε στην ενότητα 5.2.2 ότι το μοντέλο προσομοίωσης της $C_p(\text{PCM})$ επιδρά στην ακρίβεια της επιβεβαίωσης των πειραματικών δεδομένων.

5.2.4.3 Επίδραση της Θερμικής Αγωγιμότητας του Εργαζόμενου Ρευστού

Η θερμική αγωγιμότητα του εργαζόμενου ρευστού μεταβάλλεται από την τιμή $0,579\text{W/m}\cdot\text{K}$, που αντιστοιχεί σε νερό των θερμοκρασιών του προβλήματος στις ακόλουθες: $0,3, 1,2, 1,8$ και $4\text{ W/m}\cdot\text{K}$. Πρόκειται για ιδιότητα που δεν επηρεάζει, σύμφωνα με όσα εκτέθηκαν στο κεφάλαιο 2 τη συμπεριφορά της διάταξης αποθήκευσης. Η διαπίστωση αυτή της βιβλιογραφίας επιβεβαιώνεται στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 58 οι αποκλίσεις στη θερμοκρασιακή κατανομή των θερμοστοιχείων T_0, T_2, T_4, T_6 και T_{10} είναι ελάχιστες. Εμφανίζεται χαρακτηριστική συμφωνία, εξαιτίας της οποίας συμπεραίνεται ότι δεν αποτελεί η θερμική αγωγιμότητα καθοριστική παράμετρο του θερμικού κυκλώματος.

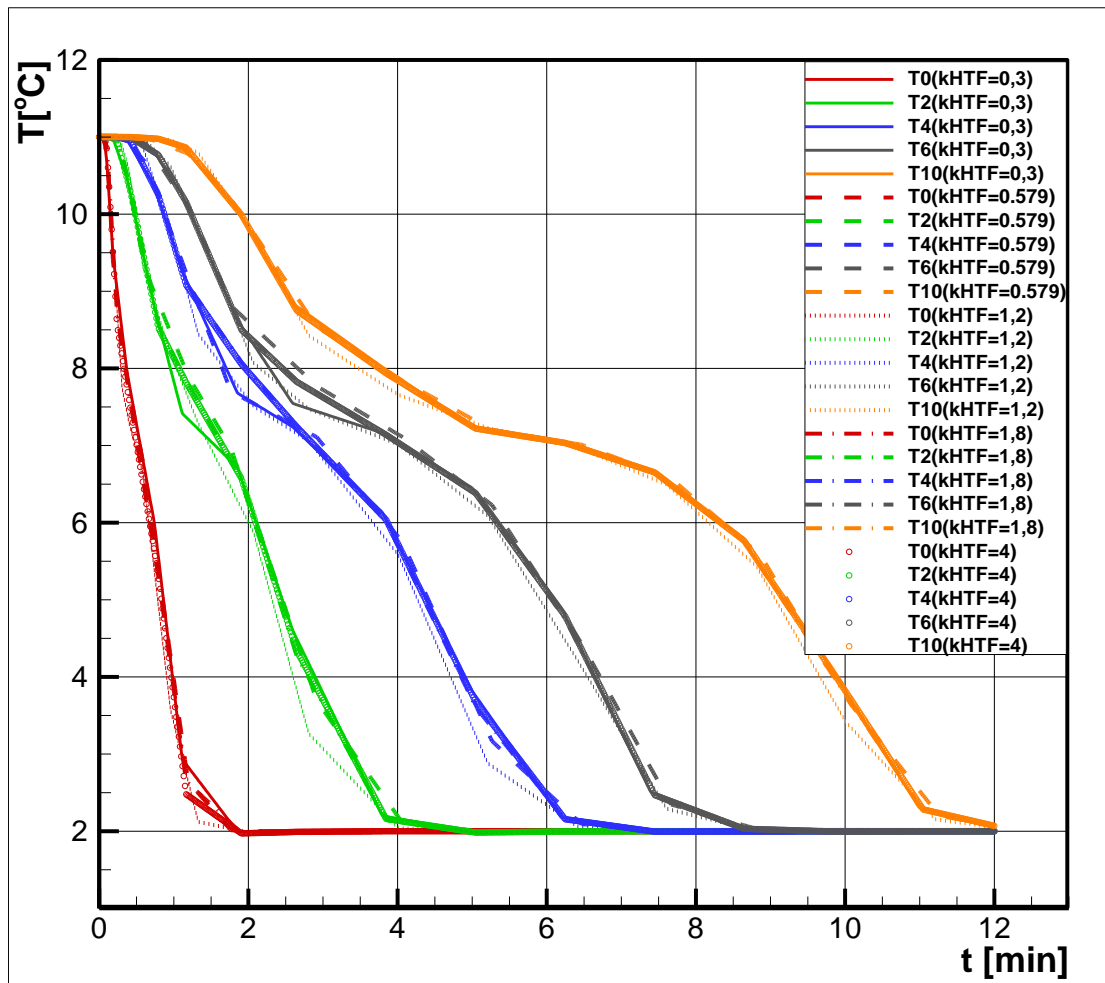




Σχήμα 57: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης LHTES του προβλήματος II με μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υλικού αλλαγής φάσης. Στην αριστερή στήλη και από πάνω προς τα κάτω, εμφανίζονται τα στιγμιότυπα θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή $t=360s$ για $C_p(PCM)$ διπλάσιο, αμετάβλητο και υποδιπλάσιο. Στη δεξιά φαίνονται τα ίδια μεγέθη τη χρονική στιγμή $t=720s$.

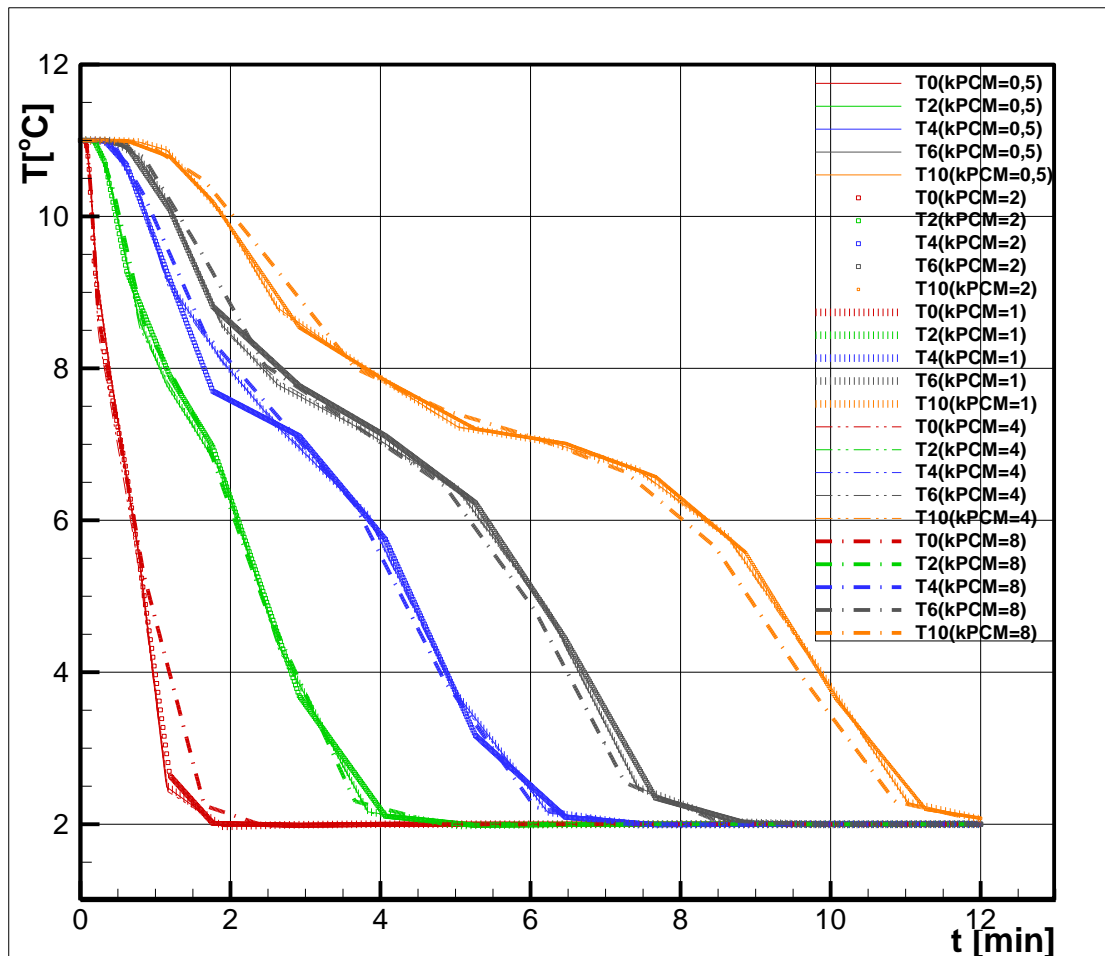
5.2.4.4 Επίδραση Θερμικής Αγωγιμότητας του Υλικού Αλλαγής Φάσης

Σε παρόμοια συμπεράσματα οδηγούμαστε και στην περίπτωση μελέτης της επίδρασης της θερμικής αγωγιμότητας του PCM. Δοκιμάστηκαν ως τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, πέραν αυτής των PCM του πειράματος, 2 W/m·K, οι ακόλουθες: 0,5, 1, 4 και 8 W/m·K. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [3], η θερμική αγωγιμότητα (ακριβέστερα η θερμική διαχυτότητα) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο κατά την απομάστευση αισθητής θερμότητας. Σε διεργασίες που περιλαμβάνουν υλικά αλλαγής φάσης, απαιτείται υψηλή τιμή για ταχύτερη διάδοση της θερμότητας εντός του PCM. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της αποθήκευσης σε διάταξη λανθάνουσας θερμότητας, παρουσιάζονται στο Σχήμα 59.



Σχήμα 58: Επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας του λειτουργούντος ρευστού στη συμπαγή κλίση του προβλήματος II, όπως φαίνεται σε διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου: οι υπολογιζόμενες τιμές που προκύπτουν από τα διάφορα θερμοστοιχεία (T_0 , T_2 , T_4 , T_6 , T_{10}) εμφανίζουν ικανοποιητική μεταξύ τους συμφωνία.

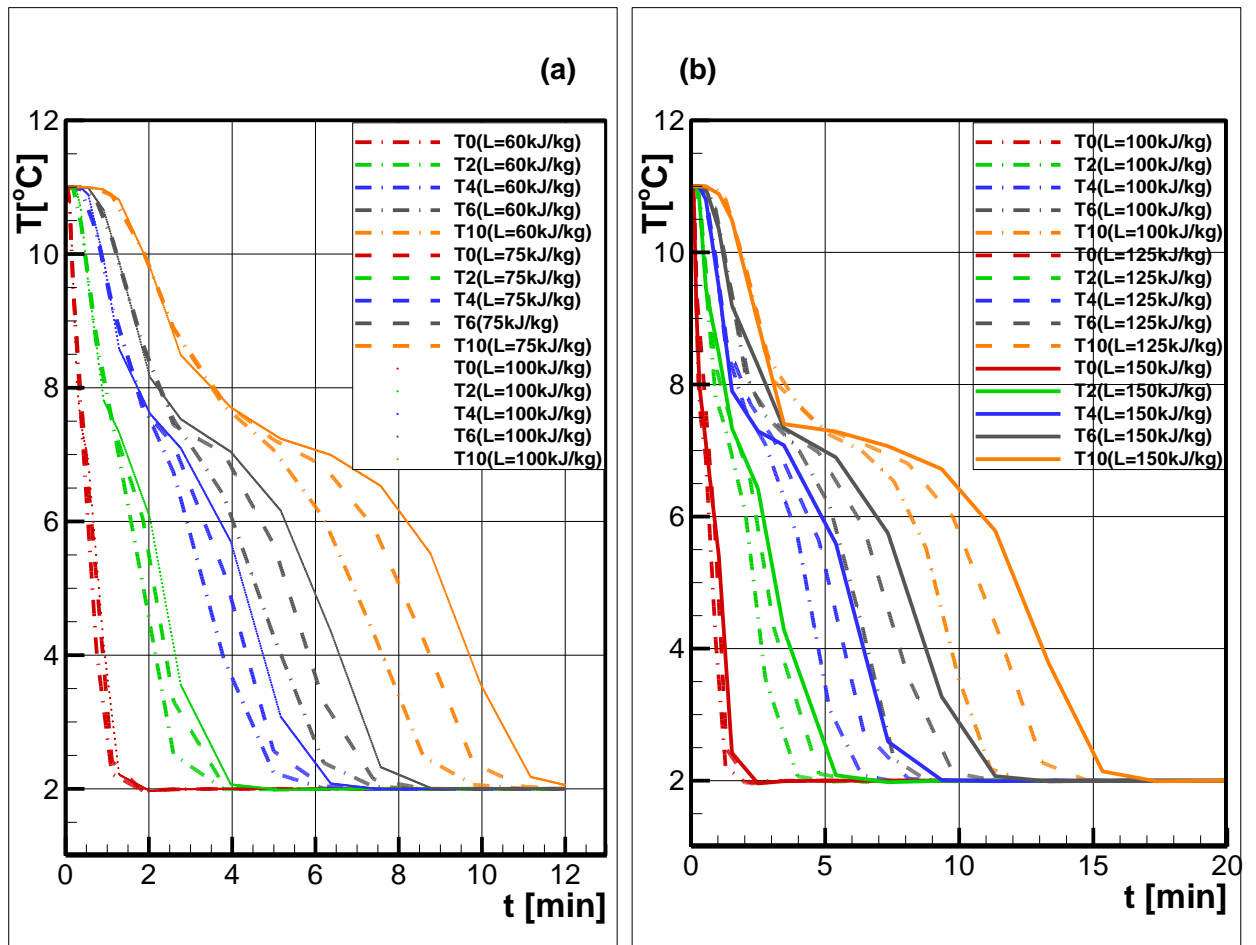
Στις περιπτώσεις αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (περιλαμβάνοντας τη συνακόλουθη αποθήκευση αισθητής) αυτό ερμηνεύεται με βάση της χρήση του μοντέλου θερμότητας με ισορροπία. Πράγματι, στην περίπτωση αυτή η αγωγή θερμότητας λαμβάνεται υπόψη ως σταθμισμένος μέσος των αγωγιμοτήτων PCM και HTF. Σε περίπτωση χρήσης μοντέλου που λαμβάνει υπόψη την αγωγή εντός του στερεού (π.χ. μοντέλο εσωτερικής θερμοκρασιακής βαθμίδας) τα συμπεράσματα μπορεί να είναι διαφορετικά. Ειδικότερα, το μοντέλο Φαινόμενης Θερμοχωρητικότητας που χρησιμοποιείται, δεν ενσωματώνει τη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας κατά την αλλαγή φάσης, οπότε η επίδρασή της στο συνολικό φαινόμενο περιορίζεται ακόμη περισσότερο. Σαφέστερη απάντηση μπορούν να δώσουν μοντέλα που ασχολούνται με την επίλυση της αλλαγής φάσης εντός του κελύφους ενθυλάκωσης.



Σχήμα 59: Επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού αλλαγής φάσης στη συμπαγή κλίση του προβλήματος II, όπως φαίνεται σε διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου: οι υπολογιζόμενες τιμές που προκύπτουν από τα διάφορα θερμοστοιχεία (T0, T2, T4, T6, T10) εμφανίζουν ικανοποιητική μεταξύ τους συμφωνία.

5.2.4.4 Επίδραση της Ενθαλπίας Αλλαγής Φάσης

Πρόκειται για ιδιότητα που εμφανίζεται μόνο στα κυκλώματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η ιδιότητα αυτή ενσωματώνεται στους υπολογισμούς μέσω του μοντέλου Φαινόμενης Θερμοχωρητικότητας και η συμβολή της είναι καθοριστική στη μοντελοποίηση της αλλαγής φάσης. Πράγματι, συνήθως η τιμή της διαιρεμένη με το θερμοκρασιακό βήμα ΔT (βλ. εξ. 3.46β) είναι μεγαλύτερη περίπου μία τάξη μεγέθους από τις αντίστοιχες τιμές θερμοχωρητικότητας στερεής ή υγρής φάσης. Στην υπό μελέτη διάταξη, η ενθαλπία τήξης έχει δοθεί από τον κατασκευαστή με τιμή 100kJ/kg. Προσομοιώνεται η λειτουργία του κυκλώματος στις ακόλουθες τιμές: 60, 75, 125, 150kJ/kg. Για αρτιότερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, αυτά δίνονται στα διαγράμματα α και β του Σχήματος 60.



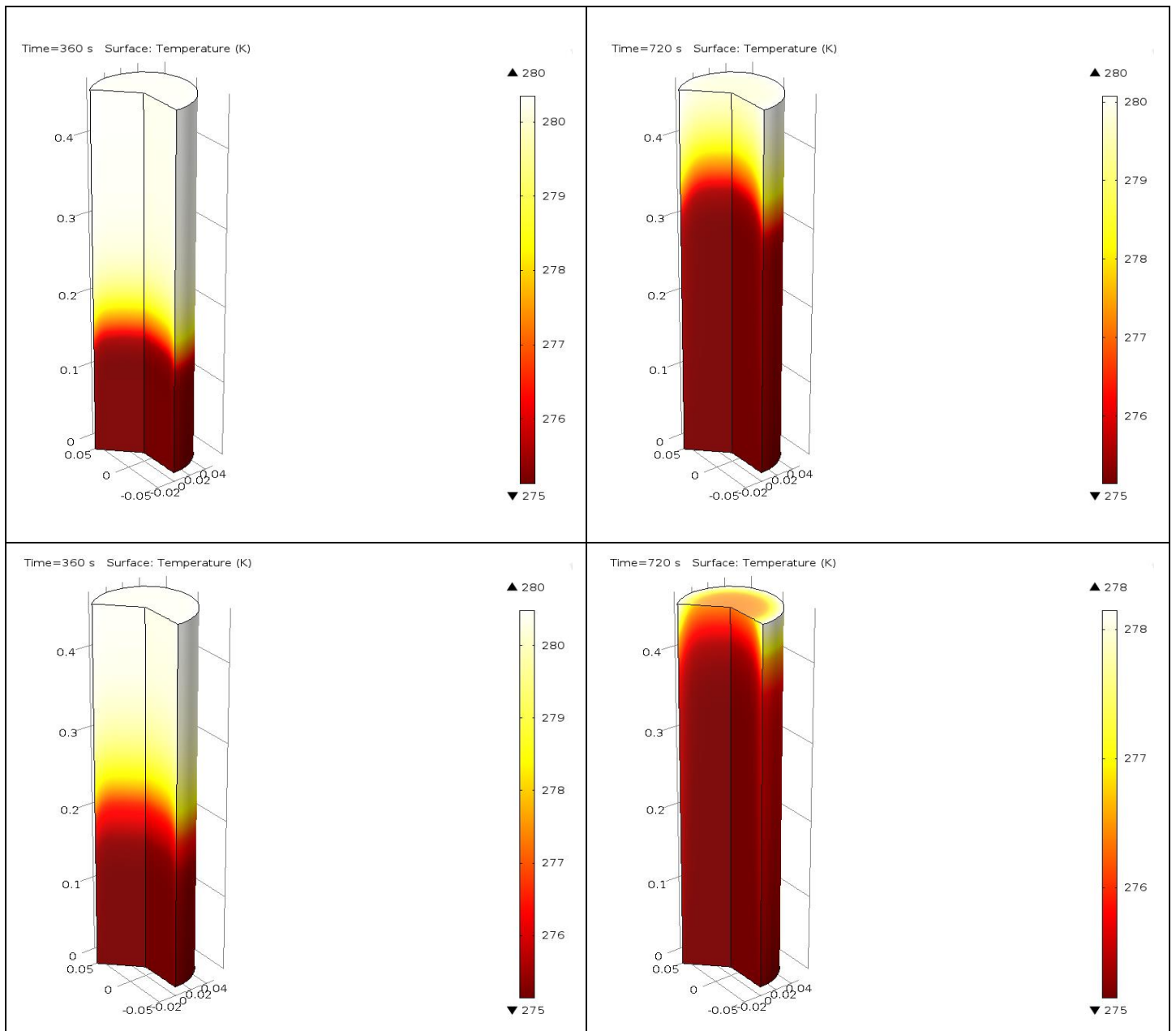
Σχήμα 60: Επίδραση της ενθαλπίας τήξης του υλικού αλλαγής φάσης στη συμπαγή κλίνη του προβλήματος II, όπως φαίνεται σε διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου: οι υπολογιζόμενες τιμές που προκύπτουν από τα διάφορα θερμοστοιχεία ($T_0, T_2, T_4, T_6, T_{10}$) παρουσιάζονται στο διάγραμμα α) για χαμηλές τιμές της και β) για υψηλές τιμές της.

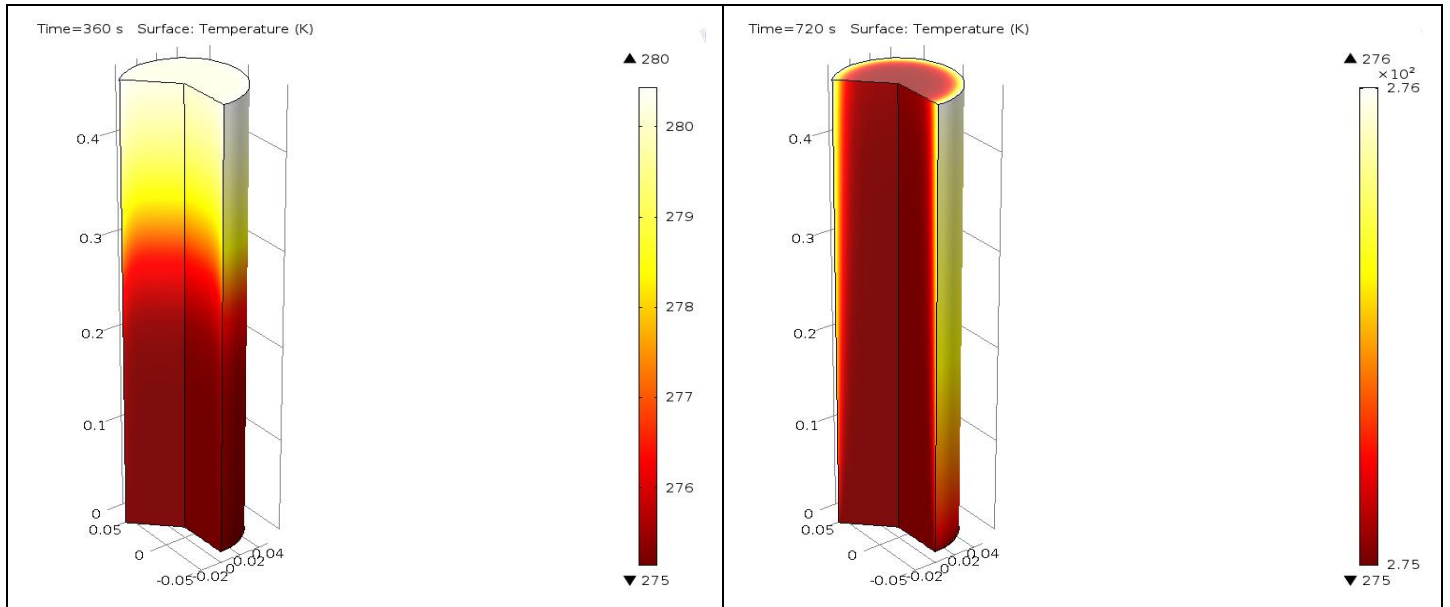
Παρατηρείται ότι τόσο στο τμήμα (α), όσο και στο τμήμα (β) του ως άνω σχήματος, η αύξηση της λανθάνουσας ενθαλπίας αλλαγής φάσης, προκαλεί βραδύτερη απόκριση του κυκλώματος σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Η ερμηνεία της παρατήρησης είναι απλή: PCM μεγαλύτερης ενθαλπίας τήξης απαιτούν υψηλότερο ποσό θερμότητας για την αλλαγή φάσης τους. Έτσι, η θερμοκρασία τους θα παραμείνει σταθερή ή σχεδόν σταθερή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (βλ. Σχήμα 7). Η σύγκλιση των διαφόρων καμπυλών στα θερμοστοιχεία που τοποθετούνται σε χαμηλότερο ύψος και ειδικότερα στο T_0 , προέρχεται από αυτό ακριβώς το χαμηλό ύψος. Σε χαμηλά ύψη της δεξαμενής, η θερμοκρασία του νερού είναι σχεδόν σταθερή στους 2°C με αποτέλεσμα η απαιτούμενη θερμότητα να εναλλάσσεται ταχύτατα σε όλες τις περιπτώσεις.

5.2.4.5 Επίδραση του Πορώδους της Κλίνης

Το πορώδες αποτελεί ιδιότητα που επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά δεξαμενών αποθήκευσης υπό μορφή συμπαγούς κλίνης. Αναμένεται κλίνες υψηλού

πορώδους να εμφανίζουν ταχύτερη διάδοση του μετώπου της θερμοκρασίας, σε αντίθεση με κλίνες χαμηλού πορώδους που εμφανίζουν καθυστέρηση στη διάδοση αυτή. Η εν λόγω συμπεριφορά γίνεται κατανοητή εξ' ορισμού του πορώδους: σε υψηλές τιμές του, το ρευστό διέρχεται με μεγαλύτερη ευκολία μέσω των καναλιών που σχηματίζονται, με αποτέλεσμα να υπάρχει εντονότερη εναλλαγή θερμότητας. Σε χαμηλές τιμές κάτι τέτοιο δε συμβάνει, καθώς τα κανάλια είναι πιο περιορισμένα. Στην προκειμένη περίπτωση, το πορώδες λαμβάνει τις τιμές: 0,25, 0,5 και 0,75. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 61.



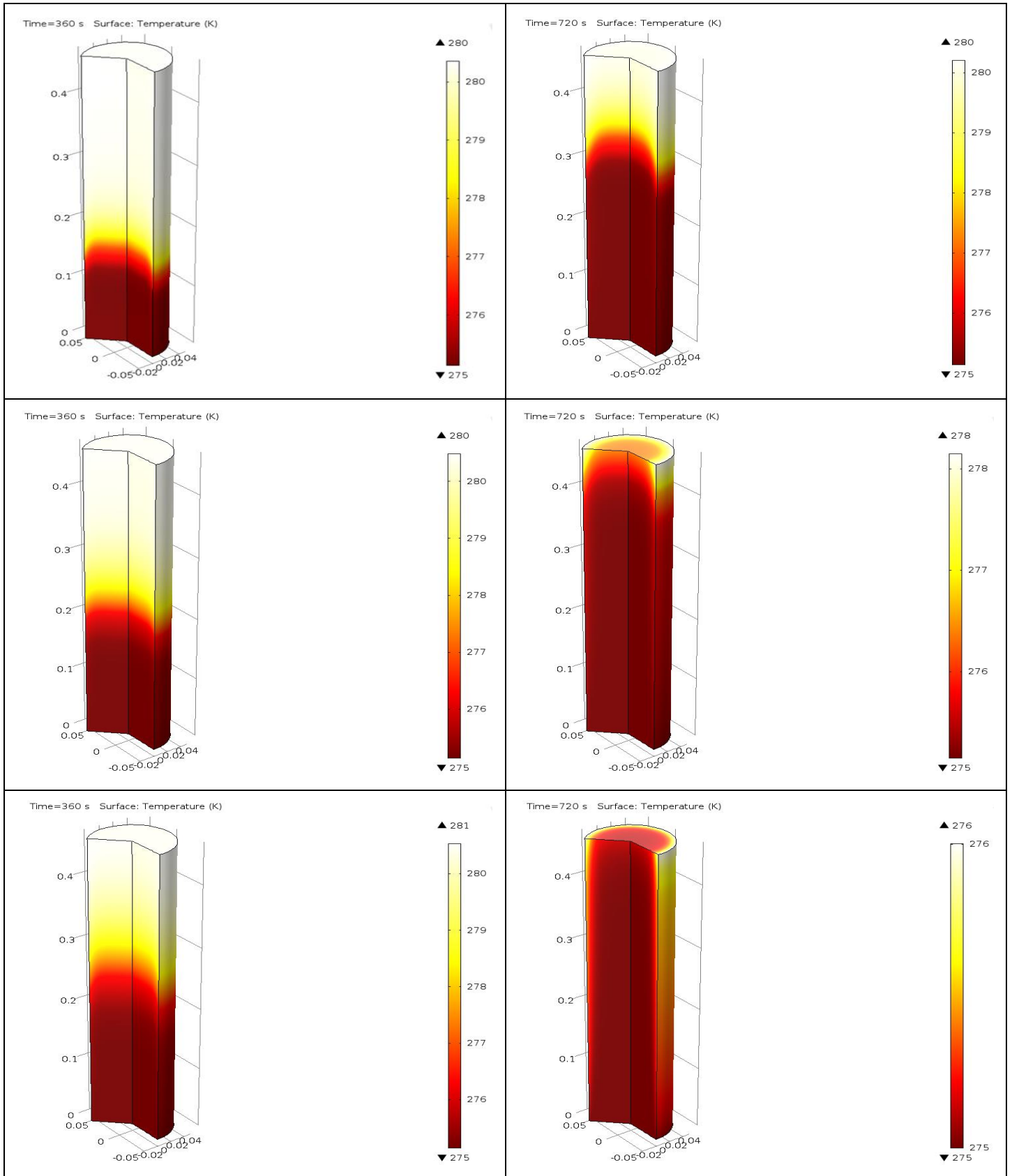


Σχήμα 61: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης LHTES του προβλήματος II με μεταβολή του πορώδους της κλίνης. Στην αριστερή στήλη και από πάνω προς τα κάτω, εμφανίζονται τα στιγμιότυπα της θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή $t=360s$ για $\epsilon=0,25$, $\epsilon=0,5$ και $\epsilon=0,75$. Στη δεξιά φαίνονται τα ίδια μεγέθη τη χρονική στιγμή $t=720s$.

Το Σχήμα 61 επιβεβαιώνει τα όσα προβλέπονται από τον ορισμό του πορώδους. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε χρόνο $t=720s$ και για $\epsilon=0,25$, το θερμοκρασιακό μέτωπο βρίσκεται στα $3/4$ του συνολικού ύψους της δεξαμενής. Το ύψος αυτό προσεγγίζεται σε κλίση πορώδους $\epsilon=0,75$ στο μισό σχεδόν χρονικό διάστημα, όπως φανερώνει το στιγμιότυπο για $t=360s$. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία που προβλέπει πολύ έντονη επίδραση στη συμπεριφορά θερμικών κυκλωμάτων συμπαγούς κλίνης.

5.2.4.7 Επίδραση της Διαπερατότητας της Κλίνης

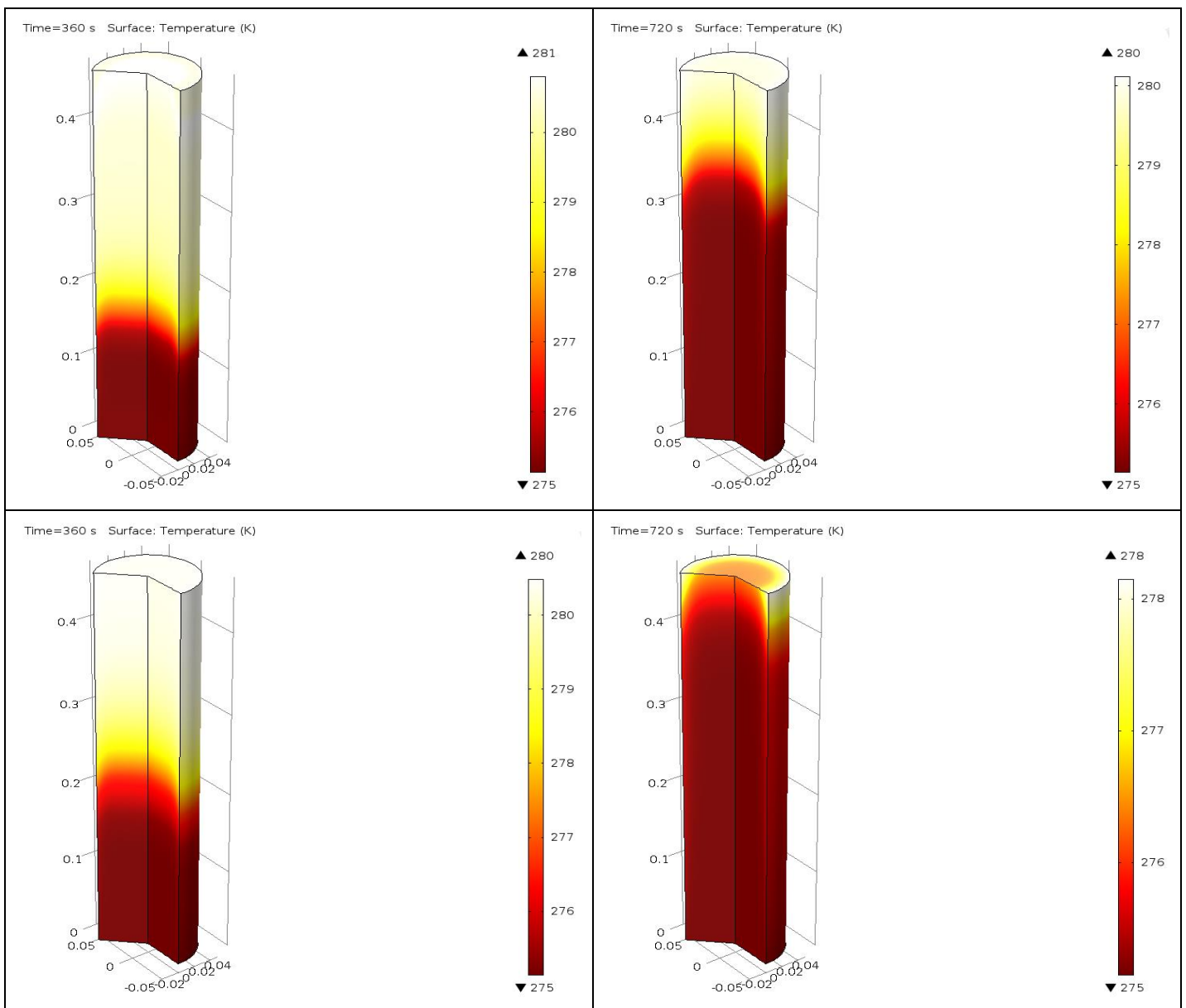
Ομοίως με τη διάταξη αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, αναμένεται η μεταβολή της διαπερατότητας να επηρεάζει σημαντικά τη θερμική συμπεριφορά της κλίνης. Επιβλήθηκαν στην περίπτωση αυτή, πέραν της αρχικής, τιμές δεκαπλάσιες και υποδεκαπλάσιες αυτής, δηλαδή $K=4,32 \cdot 10^{-7} m$ και $K=4,32 \cdot 10^{-9} m^2$. Θεωρώντας τον αντίστροφο της διαπερατότητας ως αντίσταση στη ροή του ρευστού μέσω της συμπαγούς κλίνης, αναμένεται ταχύτερη διάδοση του θερμοκρασιακού μετώπου για υψηλές τιμές διαπερατότητας. Τα αποτελέσματα φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 62.

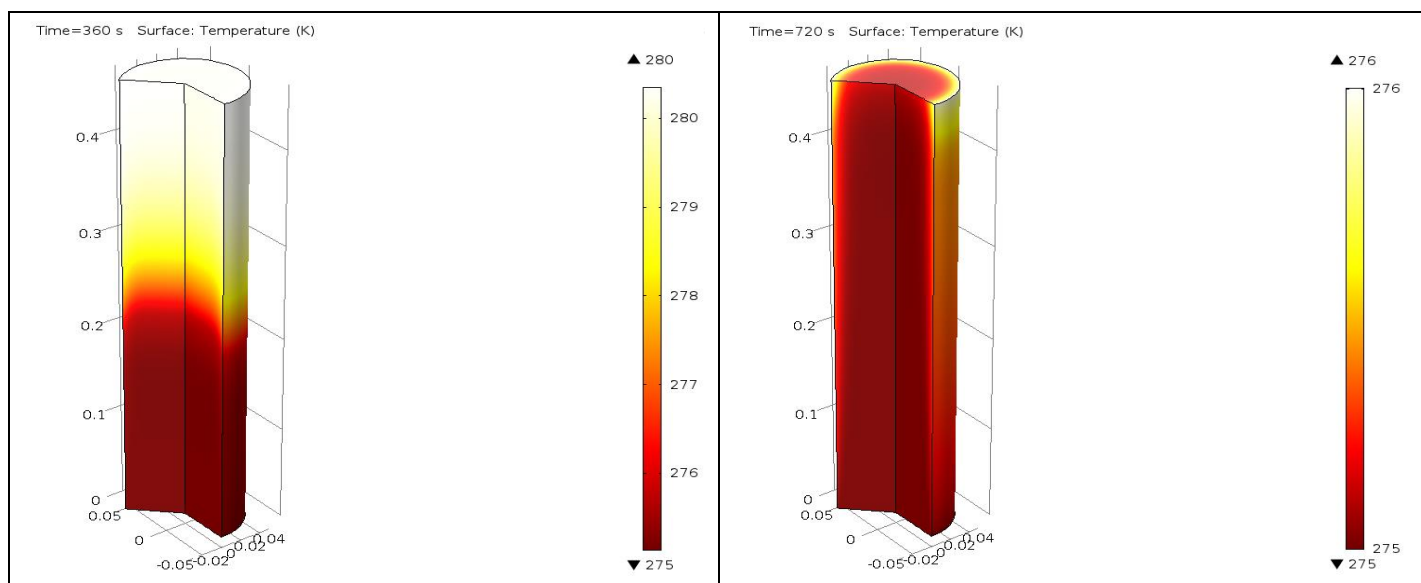


Σχήμα 62: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης LHTEs του προβλήματος II με μεταβολή της διαπερατότητας της κλίνης. Στην αριστερή στήλη και από πάνω προς τα κάτω, εμφανίζονται τα στιγμιότυπα της θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή $t=360\text{s}$ για $K=4,32 \cdot 10^{-9}\text{m}^2$, $K=4,32 \cdot 10^{-8}\text{m}^2$ και $K=4,32 \cdot 10^{-7}\text{m}^2$. Στη δεξιά φαίνονται τα ίδια μεγέθη τη χρονική στιγμή $t=720\text{s}$.

5.2.4.8 Επίδραση της Οριακής Συνθήκης Ταχύτητας Εισόδου

Παρόλο που δεν αποτελεί ούτε θερμοφυσική ιδιότητα, ούτε παράμετρο της κλίνης, κρίνεται επικοδομητική η ανάλυση της επίδρασής της. Το ενδιαφέρον για την οριακή συνθήκη ταχύτητας εισόδου γίνεται εντονότερο από τα αποτελέσματα της επιβεβαίωσης (βλ. ενότητα 5.2.2) που υποδηλώνουν ταχύτερη απόκριση της διάταξης σε σύγκριση με το πειραματικά μετρούμενο. Θεωρώντας τις θερμοφυσικές ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά της κλίνης και τις λοιπές οριακές συνθήκες αμετάβλητες, αναμένεται υψηλές ταχύτητες να καταλήγουν συντομότερα στη μόνιμη κατάσταση του θερμοκρασιακού πεδίου. Αντίστοιχα, χαμηλές ταχύτητες προσεγγίζουν τη μόνιμη κατάσταση σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Στο Σχήμα 63 φαίνεται η επιβεβαίωση του παραπάνω ισχυρισμού.





Σχήμα 63: Ισοϋψείς θερμοκρασίας στη διάταξη συμπαγούς κλίνης LHTEs του προβλήματος II με μεταβολή της οριακής συνθήκης ταχύτητας εισόδου του ρευστού. Στην αριστερή στήλη και από πάνω προς τα κάτω, εμφανίζονται τα στιγμιότυπα της θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή $t=360s$ για $u=0,0016m/s$, $u=0,00208m/s$ και $u=0,0024m/s$. Στη δεξιά φαίνονται τα ίδια μεγέθη τη χρονική στιγμή $t=720s$.

Αξιοσημείωτη δεν είναι μόνο η παρατήρηση της μεγάλης επίδρασης της οριακής συνθήκης ταχύτητας εισόδου, αλλά και η ένταση της επίδρασης αυτής. Θεωρώντας τη χρησιμοποιούμενη τιμή $v_{in}=0,00208m/s$, η σχετική μεταβολή θα είναι κατά περίπτωση: α) $0,00208m/s \rightarrow 0,0024m/s$, που ισοδυναμεί με αύξηση της τάξεως του 15%, ενώ β) κατά τη μετάβαση $0,00208m/s \rightarrow 0,0016m/s$, που ισοδυναμεί με ελάττωση με 23%. Οι μεταβολές των υπόλοιπων μεγεθών που εκτέθηκαν κατά την παραμετρική ανάλυση ήταν της τάξης του 50-100%. Γίνεται αντιληπτή η μεγάλη εξάρτηση της συμπεριφοράς της κλίνης από την ταχύτητα προσαγωγής του εργαζόμενου ρευστού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Συμπεράσματα-Μελλοντικές Προεκτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 5. Κατακλείδα της ενότητας αυτής, αλλά και της Διπλωματικής Εργασίας, αποτελούν οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η θερμοϋδραυλική διερεύνηση διάταξης αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε υλικά αλλαγής φάσης, υπό μορφή συμπαγούς κλίνης στη βάση του Α' θερμοδυναμικού αξιώματος. Βασικός στόχος υπήρξε η εξοικείωση με τη μεθοδολογία εργασίας κατά την επίλυση προβλημάτων ροϊκών και θερμικών φαινομένων σε θερμικά κυκλώματα. Στην προσπάθεια αυτή, επιλύθηκε αρχικά πρόβλημα αποθήκευσης, σε παρόμοιας γεωμετρίας διατάξεις, αισθητής θερμότητας, τα αποτελέσματα του οποίου διασταυρώθηκαν και επιβεβαιώθηκαν με πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας (Πρόβλημα I ή SHTESS). Το βήμα αυτό, αποτέλεσε απαραίτητο προκαταρκτικό στάδιο πριν την ενσωμάτωση στη συνέχεια της αλλαγής φάσης και την επίλυση προβλήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (Πρόβλημα II ή LHTESS).

Η προσομοίωση των θερμικών διατάξεων σε πορώδεις κλίνες παρουσιάζει δυσκολίες καταρχήν ως προς τον τρόπο ενσωμάτωσης της πορώδους φάσης. Η πολυπλοκότητα αυξάνεται σημαντικά κατά την εισαγωγή μοντέλων περιγραφής της αλλαγής φάσης. Από τα πρώτα στάδια της μοντελοποίησης των διατάξεων αυτών, γίνεται φανερό η σημασία σωστού ορισμού των αρχικών συνθηκών. Σε κλίνες αποθήκευσης θερμότητας τόσο εργαστηριακής, όσο και βιομηχανικής κλίμακας, η επίτευξη ομοιόμορφων αρχικών συνθηκών, δεν είναι πάντοτε επιτυχής. Η εξάρτηση μάλιστα της λύσης από τη μορφή τους είναι έντονη, όπως φαίνεται από την προσομοίωση της δεξαμενής SHTES. Στην περίπτωση αυτή, επιτεύχθηκε προσέγγιση και εισαγωγή τους στον κώδικα επίλυσης του ANSYS Fluent μέσω UDF και επιβεβαίωση της λύσης από πειραματικά δεδομένα. Αντίθετα, τέτοιου είδους προσέγγιση δεν κατέστη δυνατή στην περίπτωση του LHTESS. Η επίδραση των αρχικών συνθηκών αποδεικνύεται από τη δυσκολία επίτευξης ικανοποιητικής συμφωνίας μεταξύ πειραματικών δεδομένων και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για το συγκεκριμένο LHTESS που επιλέχθηκε, ειδικά για τα πρώτα χρονικά βήματα επίλυσης.

Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής που υιοθετήθηκε, διερευνήθηκε η επίδραση του πλέγματος διακριτοποίησης και του χρονικού βήματος επίλυσης στη μορφή της λύσης. Τόσο τα αποτελέσματα του προβλήματος

I, όσο και αυτά του προβλήματος II, ελέγχθηκαν ως προς την ανεξαρτησία του πλέγματος και συνεπώς επιβεβαιώθηκε η ορθότητα της λύσης. Στο πρόβλημα II, το υπολογιστικό χωρίο διακριτοποιήθηκε από δύο είδη πλέγματος, το δομημένο και το μη δομημένο. Παρατηρήθηκε μικρή απόκλιση της μορφής της λύσης από δομημένο σε μη δομημένο πλέγμα, γεγονός αναμενόμενο σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Χρησιμοποιήθηκε η λύση του δομημένου πλέγματος στους κατοπινούς υπολογισμούς, καθώς είναι γνωστό ότι για το ίδιο μέγεθος πλέγματος, το δομημένο προσεγγίζει τη λύση με μεγαλύτερη ακρίβεια [45]. Όσον αφορά στο χρονικό βήμα επίλυσης, επιτεύχθηκε και ως προς αυτό ανεξαρτησία για τις δύο διατάξεις που μελετήθηκαν.

Η ερμηνεία της συμπεριφοράς των δύο θερμικών κυκλωμάτων γίνεται μέσω παραμετρικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν παρόμοια απόκριση των δύο διατάξεων αποθήκευσης σε μεταβολές των θερμικών τους ιδιοτήτων. Ειδικότερα, μελετήθηκε η επίδραση των ακόλουθων θερμικών ιδιοτήτων στις δύο διατάξεις: θερμική αγωγιμότητα του HTF, θερμική αγωγιμότητα των σωματιδίων πλήρωσης (στερεά ή PCM) και λανθάνουσα ενθαλπία αλλαγής φάσης. Πλην της τελευταίας, όλες οι άλλες θερμικές ιδιότητες συνυπάρχουν στα δύο κυκλώματα.

Η αύξηση της θερμοχωρητικότητας του HTF, προκαλεί βραδύτερη προσέγγιση της μόνιμης κατάστασης του θερμοκρασιακού πεδίου της διάταξης. Αντίθετα αποτελέσματα επιφέρει η αύξηση της C_{ps} (διάταξη αισθητής) ή της C_p (PCM) (διάταξη λανθάνουσας) καθότι αύξησή τους προκαλεί ταχύτερη ανάπτυξη του θερμοκρασιακού μετώπου. Αναφορικά με τις τιμές των θερμικών αγωγιμοτήτων k (HTF) και k (PCM) ή k_s , δεν παρατηρήθηκε μεταβολή των στιγμιοτύπων της θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής. Στη διάταξη αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας υπεισέρχεται αναπόφευκτα η επίδραση της λανθάνουσας ενθαλπίας τήξης. PCM με υψηλότερη τιμή της οδηγούν σε βραδύτερη απόκρισή του κυκλώματος και συνεπώς διάδοση του θερμοκρασιακού μετώπου.

Ός προς τα χαρακτηριστικά της κλίνης, το πορώδες και τη διαπερατότητα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας συμπαγούς κλίνης. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται, επιβεβαιώνουν τη σημαντική επιρροή του στη θερμική συμπεριφορά της κλίνης.

Πέραν τούτων, η μορφή της λύσης που λαμβάνεται για τη διάταξη LHTEs, φαίνεται να προσεγγίζει τις τιμές των πειραματικών δεδομένων για $t > 2 \text{ min}$ για τα θερμοστοιχεία T2 και T4 (κάτω μισό της κλίνης), ενώ για τα θερμοστοιχεία T6 και T10 (επάνω μισό) αυτό παρατηρείται για $t > 4 \text{ min}$.

Τέλος, στο πρόβλημα II, κατά τα προκαταρκτικά στάδια επιλογής του μοντέλου αλλαγής φάσης, η χρήση περίπλοκων συναρτήσεων υπολογισμού της προσέγγισης των επιμέρους τμημάτων της καμπύλης μεταβολής του C_p (PCM) με τη θερμοκρασία (Σχήμα 27), βρέθηκε ότι αυξάνει κατακόρυφα το υπολογιστικό κόστος σε μνήμη και

χρόνο. Πράγματι, η εύρεση προσεγγίσεων από το curve fitting tool του Matlab R2011a, του Tecplot 360 2015 R1 και του MS Excel, παρήγαγε για τα μεν τμήματα στερεής και υγρής φάσης, πολυωνυμικές συναρτήσεις $4^{ου}$ - $6^{ου}$ βαθμού για το δε τμήμα της αλλαγής φάσης περίπλοκες καμπύλες κατανομής Gauss, πλέον των έξι όρων. Όπως γίνεται αντιληπτό το κόστος τέτοιων προσομοιώσεων από προσωπικό υπολογιστή είναι απαγορευτικό. Έτσι, διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο φαινόμενης θερμοχωρητικότητας αποτελεί την απλούστερη πρόταση μοντελοποίησης της αλλαγής φάσης που δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.

6.2 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία στόχευε στην κατανόηση και περιγραφή διάταξης LHTEs και την εξοικείωση με τις μεθοδολογίες μελέτης σε εργασίες Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Προφανώς, στο πλαίσιο εκπόνησής της, κάλυψε ένα πολύ μικρό κομμάτι αυτού του ευρύτατου πεδίου έρευνας.

Μελλοντικές προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση, σε πρώτη φάση, μπορούν να αξιοποιήσουν τη δυνατότητα μοντελοποίησης χωρίς θερμική ισορροπία (κεφ. 3.2.2.2). Τα μοντέλα αυτά είναι διαθέσιμα από το λογισμικό ANSYS Fluent 14.0 που χρησιμοποιήθηκε και παρέχεται από το ΚΗΥ ΕΜΠ και στο COMSOL Multiphysics από την έκδοση 5.1 και έπειτα. Υπολογιστικά αυτά εισάγονται από το χρήστη και το λογισμικό δημιουργεί δύο αλληλοεπικαλυπτόμενες ζώνες, μια για το HTF και μια για το στερεό υλικό που διαφέρουν μόνο ως προς τις συνθήκες εισόδου και εξόδου. Τα μοντέλα αυτά προβλέπουν με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια τη θερμική αλληλεπίδραση HTF και υλικού πλήρωσης. Η ακρίβεια αυτή μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη επιβεβαίωση του παρόντος μοντέλου με χρήση της φαινόμενης θερμοχωρητικότητας για την περιγραφή της αλλαγής φάσης.

Επιπλέον, μπορεί να εξεταστεί η χρήση μιας πιο ολοκληρωμένης μαθηματικής διαχείρισης της πορώδους ζώνης. Όπως προκύπτει από την ανάλυση του κεφαλαίου 3, το μοντέλο Brinkman, δεν είναι το καταλληλότερο για την ανάλυση κυκλώματος πορώδους $\varepsilon=0,5$. Κατά συνέπεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επέκταση Darcy-Forchheimer ως καταλληλότερη προς χρήση. Βέβαια, ακόμη και η χρήση του απλού μοντέλου Darcy δεν κρίνεται απαγορευτική, λόγω των χαμηλών αριθμών Reynolds που καταγράφηκαν (βλ. Παράρτημα Β).

Υιοθετώντας τη χρήση του μοντέλου φαινόμενης θερμοχωρητικότητας σε μεταγενέστερες προσομοιώσεις, μπορεί να γίνει μια απλή τροποποίησή του. Σε περιπτώσεις μεταβλητών ιδιοτήτων, προτείνεται συχνά στη βιβλιογραφία η χρήση παραγόντων εξομάλυνσης στα σημεία ασυνέχειας των ιδιοτήτων. Αναφέρεται δε, η επίδραση τέτοιων παραγόντων στη λύση που εξάγεται [41].

Περαιτέρω ανάλυση της ακρίβειας περιγραφής τέτοιων διατάξεων, μπορεί να διενεργηθεί με στατιστικό έλεγχο της απόκλισης από τα πειραματικά δεδομένα. Γνωρίζοντας ότι το μόνο μετρήσιμο μέγεθος που υπήρξε ήταν η θερμοκρασία μέσω

θερμοστοιχείων τύπου T, μπορεί από καταλόγους να βρεθεί η ακρίβειά τους. Με κατάλληλη επεξεργασία, υπολογίζεται η αβεβαιότητα και τοποθετούνται οι γραμμές σφάλματος στα διαγράμματα. Έτσι, η απόκλιση πειραματικών δεδομένων και υπολογιστικών αποτελεσμάτων μελετάται σε πιο αυστηρή βάση.

Τέλος, τα αποτελέσματα των προβλημάτων I και II, μπορούν να υποστούν παραμετρική ανάλυση όχι μόνο ως προς τις θερμικές και τις ιδιότητες της κλίνης, αλλά και ως προς κατασκευαστικά στοιχεία (υλικό κατασκευής δεξαμενής, γεωμετρία, διαστάσεις) παροχή και θερμοκρασία προσαγωγής HTF. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να δοθεί πλήρης εικόνα της συμπεριφοράς του κυκλώματος ως προς την ΑΔΕ και να αναπτυχθούν κατάλληλα κριτήρια βελτιστοποίησης του σχεδιασμού διατάξεων αποθήκευσης θερμότητας αυτού του τύπου.

Βιβλιογραφία

- [1] Kalaiselvam S., Parameshwaran R., 2014, *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications*, Elsevier, Oxford, UK.
- [2] Παπαϊωάννου Α., 2007, *Θερμοδυναμική Τόμος Ι*, Κοράλι, Αθήνα.
- [3] Dincer I., Rosen M.A., 2011, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, 2nd Ed., Wiley, West Sussex, UK.
- [4] Sharma S. D., Sagara K., 2005 *Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review*, International Journal of Green Energy, 2:1, pp. 1-56.
- [5] Ribeiro P. F., Crow M. L., Johnson B.K., Liu Y., 2001, *Energy Storage Systems for Advanced Power Applications*, Proceedings of the IEEE, 89:12, pp. 1744-1756.
- [6] Kouskou T., Bruel P., Jamil A., El Rhafiki A., Zeraouli T., 2014, *Energy Storage: Applications and Challenges*, Solar Energy & Materials, 120, pp. 59-80.
- [7] Pacheco J. E., Showalter S.K., 2002 *Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants*, Journal of Solar Energy Engineering, 124, pp. 153-159.
- [8] Bruch A., Fourmigue J. F. Couturier R. 2014 *Experimental and Numerical Investigation of a Pilot-Scale Thermal Oil Packed Bed Thermal Energy Storage System for CSP Power Plant*, Solar Energy, 105, pp. 116-125.
- [9] Μπεργελές Γ., 2012, *Υπολογιστική Ρευστομηχανική*, 2^η Εκδ., Συμεών, Αθήνα.
- [10] Καλούδης Ε., 2014, *Προσομοίωση Τυρβωδών Ροών Φυσικής και Μικτής Συναγωγής σε Ηλιακά και Ενεργειακά Συστήματα*, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [11] Oro E., Chiu J., Martin V., Cabeza L. F., 2013, *Comparative Study of Different Numerical Models of Packed Bed Thermal Energy Storage*, Applied Thermal Engineering, 50, pp.384-392.
- [12] Cabeza L. F., 2015, *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, 1st ed., Oxford, UK.
- [13] Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D., 2009, *Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, pp.318-345.
- [14] Pielichowska K., Pielichowski K., 2014, *Phase Change Materials for Thermal Energy Storage*, Progress in Materials Science, 65, pp. 67-123.

- [15] Shalaby S. M., Bek M.A., El-Sebaei A. A., 2014, *Solar Dryers with PCM as Energy Storage Medium*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, pp. 110-116.
- [16] Owen M.S., 2012, *ASHRAE 2012 Handbook* ASHRAE, Atlanta, GA, USA.
- [17] Dos Santos Bernardes M. A., 2011, *Transient Heat Transfer and Energy Transport in Packed Bed TES- Developments in Heat Transfer*, INTECH, Rijeka, Croatia.
- [18] Mackie E. I., Reeves G., 1988, *Stratified Chilled Water Storage Design Guide*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- [19] Xia L., Zhang P., Wang R. Z., 2010, *Numerical Heat Transfer Analysis of the Packed Bed Latent Heat Storage System Based on an effective packed bed model*, Energy, 35, pp. 2022-2032.
- [20] Mehling H., Cabeza L. F., 2008, *Heat and Cold Storage with PCM*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [21] Zalba B., Ma Marin J., Cabeza L. F., Mehling H., 2003, *Review on TES with Phase Change Materials, Heat Transfer Analysis and Applications*, Applied Thermal Engineering, 23, pp. 251-283.
- [22] Kenisarin M., Mahkamov K., 2007, *Solar Energy Storage Using Phase Change Materials*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, pp. 1913-1965.
- [23] Fleisher A. S., 2015, *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials: Fundamentals and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [24] Kaviany M., 1999, *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, 2nd Ed., Springer New York City, NY, USA.
- [25] Felix Regin A., Solanki S. C., Saini J. S., 2008, *Heat Transfer Characteristics of Thermal Energy Storage System Using PCM Capsules: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, pp. 2438-2458.
- [26] Soulaïne C., Horgue P., Franc J., Quintard M., 2014, *Gas-Liquid Flow Modeling in Columns Equipped with Structured Packing*, AIChE Journal, Wiley, 60 (10), pp. 3665-3674.
- [27] Whitaker S., 1999, *The Method of Volume Averaging*, Rotterdam, Springer Netherlands.
- [28] Baker M. J., Tabor G. R., 2010, *Computational Analysis of Transitional Air Flow through Packed Columns of Spheres Using the Finite Volume Technique*, Computers and Chemical Engineering, vol. 34, pp. 878-885.

- [29] Nield D. A., Bejan A., 2013, *Convection in Porous Media*, 4th Ed., Springer-New York, New York City, NY, USA.
- [30] Jambhekar V. A., 2011, *Forchheimer Porous-media Flow Models-Numerical Investigation and Comparison with Experimental Data*, Master Thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- [31] Holdich R. G. , 2002, *Fundamentals of Particle Technology*, Midland Information Technology and Publishing, Shepshed, UK.
- [32] Rohsenow W. M., Hartnett J. P., Cho Y. I., 1998, *Handbook of Heat Transfer*, 3rd edition, Mc Graw-Hill, New York City, NY,USA.
- [33] Civan F., 2011, *Porous Media Transport Phenomena*, Wiley, Hoboken, NJ, USA.
- [34] Zeng Z., Grigg R., 2006, *A Criterion for non Darcy Flow in Porous Media*, *Transport in porous media*, 63, pp.57-69.
- [35] Achenbach E., 1995, *Review: Heat and Flow Characteristics of Packed Beds*, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10:1, pp.17-27.
- [36] Vafai K., 2005, *Handbook of Porous Media*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [37] Ismail K. A. R., Stuginsky R., 1998, *A Parametric Study on Possible Fixed Bed Models for Pcm and Sensible Heat Storage*, *Applied Thermal Engineering*, 19 (1999), pp.757-788
- [38] Schumann T. E. W., 1929, *Heat Transfer: a Liquid Flowing through a Porous Prism*, *Journal of the Franklin Institute*, 208, pp. 405-416.
- [39] Αραμπατζής Γ., 2000, *Προσομοίωση Μηχανισμών Μεταφοράς κατά τη Στερεοποίηση Υλικών*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [40] Dutil Y., Rousse D. R., Ben Salah N., Lassue S., Zalewski L., 2011, *A Review on Phase Change Materials: Mathematical Modeling and Simulations*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 112-130.
- [41] Shamsundar N., Sparrow E. M., 1975, *Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change Via the Enthalpy Model*, *Journal of Heat Transfer*, 75, pp. 333-340.
- [42] Idelsohn S. R., Storti M. A., Crivelli L. A., 1994, *Numerical Methods in Phase Change Problems*, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1, pp. 49-74.
- [43] Hsiao J. S. 1985, *An Efficient Algorithm for Finite Difference Analyses of Heat Transfer with Melting and Solidification*, *Numerical Heat Transfer*, 8, pp. 653-666.

- [44] Patankar S., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York City, NY, USA.
- [45] Versteeg H. K., Malalasekera W., 2007, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*, 2nd edition, Pearson Educational Limited, Harlow, UK.
- [46] Andersson B, Andersson R., Hakansson L., Mortensen M., Sudiyo R., Van Wachem B., 2012, *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [47] *COMSOL Multiphysics 5.0 Reference Manual*, 2014
- [48] Μπουντουβής Α., 1992, *Υπολογιστική Ανάλυση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [49] Van Lew J. T., Chan C. L., Karaki W., Stephens J., 2011, *Analysis of Heat Storage and Delivery of a Thermocline Tank Having Solid Filler Material*, Journal of Solar Energy Engineering, 133, pp.1-10.
- [50] Nithyanandam K., Ritchumani R., Marthur A., 2014, *Analysis of a Latent Thermocline Storage System with Encapsulated PCM for CPS*, Applied Energy, 113, pp. 1446-1460.
- [51] Gebhart B., Jaluria Y., Mahajan R. L., Sammakia B., 1988, *Buoyancy Induced Flows and Transport*, Hemisphere Publishing Corporation, New York City, NY, USA.
- [52] *ANSYS Fluent 14.5 User's Guide*, 2012, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA.
- [53] Torab H., Beasley D.E., 1987, *Optimization of Packed Bed Thermal Energy Storage Unit*, Journal of Solar Energy Engineering, 109, pp. 170-175.
- [54] Agalit H., Zari N., Maalmi M., Maaroufi M., 2015, "Numerical Investigations of High Temperature Packed Bed TES Systems Used in Hybrid Solar Tower Power Plants", Solar Energy, 122, pp. 603-616.

Παράρτημα Α

Στο σημείο αυτό, δίνεται η User Defined Function (UDF) που εισάγεται στο ANSYS Fluent για την προσέγγιση των ρεαλιστικών αρχικών συνθηκών θερμοκρασίας της δεξαμενής του προβλήματος I:

```
DEFINE_INIT(temperature_distribution, domain)
//DEFINE_PROFILE(temperature_distribution, thread, i)
{
    cell_t c;
    Thread *t;
    double x[ND_ND];
    double temperat;
    double y;
    thread_loop_c (t,domain)
    {
        begin_c_loop_all (c,t)
        {
            C_CENTROID(x,c,t);
            y = x[1];
            temperat=(-0.2061*y*y*y*y*y) + (3.4142*y*y*y*y*y)(19.465*y*y*y)+
(39.361*y*y) + (6.8623*y)+593.65;
            C_T(c,t) = temperat;
        }
        end_c_loop_all (c,t)
    }
}
```

Παράρτημα Β

Στο χωρίο αυτό, παρατίθενται οι υπολογισμοί των διαφόρων αριθμών Re για την περίπτωση του προβλήματος II:

Πίνακας 8: Τιμές των διαφόρων αδιάστατων αριθμών Re, όπως ορίζονται για διατάξεις συμπαγών κλινών και για τα δεδομένα του προβλήματος II-LHTESS.

d_p	0,0036	m	$Re_p = \frac{\rho \cdot d_p \cdot u}{\mu}$	
u_{sup}	0,00208	m/s	superficial velocity	physical velocity
u_{phy}	0,00416	m/s	3.666798452	7.333596905
K	$4,32 \cdot 10^{-8}$	m^2	$Re_{K\varepsilon} = \frac{\rho \cdot u \cdot (\frac{K}{\varepsilon})^{0,5}}{\mu \cdot \varepsilon}$	
ν	$2,042 \cdot 10^{-6}$	m^2/s	superficial velocity	physical velocity
ρ	999,8	kg/m^3	0.59878568	1.19757136
ε	0.5		$Re_{K^{1/2}} = \frac{u \cdot K^{1/2}}{\nu}$	
μ	0,0020417	Pa·s	superficial velocity	physical velocity
			0.211713948	0.423427896
			$Re_h = \frac{u_{sup} \cdot d_p \cdot \rho}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu}$	
			superficial velocity	
			7.333986288	

Πλην του Re_h που ορίζεται με χαρακτηριστικό μήκος την υδραυλική διάμετρο και χρησιμοποιείται ρητά κατά τον υπολογισμό του η u_{sup} , στις υπόλοιπες περιπτώσεις και για λόγους πληρότητας, υπολογίζεται ο Re και με βάση την εγγενή ταχύτητα.