

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ ΜΟΡΦΑ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΑΓΟΥ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ**

Τομέας: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ-ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Κορωνάκη Ειρήνη, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα 2022

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Περιεχόμενα

1.	Περίληψη.....	6
2.	Εισαγωγή	8
2.1	Υλικά στα συστήματα αποθήκευσης πάγου (CTES materials).....	10
2.1.1	Υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας	11
2.1.2	Υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας-Υλικά αλλαγής φάσης 13	
2.1.3	Υλικά αποθήκευσης θερμοχημικής θερμότητας.....	20
2.1.4	Συμπεράσματα για την χρήση των υλικών αποθήκευσης θερμότητας.	21
2.2	Αριθμητικές μελέτες των συστημάτων CTES	22
2.3	Πειραματικές μελέτες των συστημάτων CTES	24
3.	Εναλλάκτες θερμότητας	26
3.1	Εισαγωγή	26
3.2	Χαρακτηριστικά σχεδίασης εναλλάκτη θερμότητας.....	28
3.2.1	Διαμόρφωση ροής.....	28
3.2.2	Μέθοδος κατασκευής	30
3.2.3	Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας.....	31
3.3	Τύποι εναλλακτών	32
3.3.1	Εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα (Double Tube Heat Exchangers) 32	
3.3.2	Εναλλάκτες θερμότητας κελύφους και σωλήνων (Shell and Tube Heat Exchangers).....	33
3.3.3	Εναλλάκτες θερμότητας σωλήνα μέσα σε σωλήνα (Tube in Tube Heat Exchangers).....	33
3.3.4	Εναλλάκτες θερμότητας επίπεδων πλακών (Flat Plate Heat Exchangers) 34	
4.	Μελέτη μαθηματικού μοντέλου συστήματος αποθήκευσης πάγου με την χρήση ηλιακών συλλεκτών	36
4.1	Εισαγωγή	36
4.1.1	Υλικό	37
4.1.2	Αριθμητική και πειραματική μελέτη	38
4.2	Μαθηματικό μοντέλο–Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας.....	39
4.2.1	Απώλειες προς το περιβάλλον	41
4.2.2	Εναλλάκτης θερμότητας.....	41
4.2.3	Στερεοποίηση και τήξη του πάγου στην επιφάνεια του εναλλάκτη	43
4.2.4	Λιώσιμο του πάγου που επιπλέει	44
4.2.5	Αριθμητικό μοντέλο	45
5.	Επίλυση μοντέλου σε περιβάλλον MATLAB & EXCEL	46
5.1	Ύπαρξη πάγου στην επιφάνεια του εναλλάκτη	46
5.2	Μη ύπαρξη πάγου στην επιφάνεια του εναλλάκτη.....	47

5.3	Αποτελέσματα κώδικα	48
6.	Σχεδίαση μοντέλου εναλλάκτη στο SOLIDWORKS®	52
6.1	Γενικά	52
6.2	Μοντελοποίηση επιμέρους εξαρτημάτων	53
6.3	Τελικό μοντέλο εναλλάκτη-Συναρμολόγηση επιμέρους εξαρτημάτων	61
7.	Σχεδίαση και προσομοίωση του μοντέλου στο ANSYS® FLUENT	62
7.1	Σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου στο Design Modeler του ANSYS® ..	62
7.2	Ρυθμίσεις στο MESH-Δημιουργία πλέγματος	64
7.3	Ρυθμίσεις στο SETUP	66
7.3.1	Γενικές Ρυθμίσεις	66
7.3.2	Ενεργοποίηση Εξισώσεων Επίλυσης	66
7.3.3	Διαμόρφωση Υλικών	67
7.3.4	Συνθήκες Όγκων Κελιών	70
7.3.5	Οριακές συνθήκες	70
7.3.6	Μέθοδοι Επίλυσης της Προσομοίωσης	72
7.3.7	Παράγοντες Ελέγχου	72
7.3.8	Αρχικοποίηση Προβλήματος και Εκκίνηση της Επίλυσής του	73
8.	Αποτελέσματα του ANSYS® FLUENT.....	75
8.1	Κατανομή Θερμοκρασίας Άλμης	75
8.2	Κατανομή Θερμοκρασίας Πλάκας Εναλλάκτη	79
8.3	Κατανομή Θερμοκρασίας Νερού/Πάγου	82
9.	Σύγκριση Αποτελεσμάτων MATLAB & ANSYS® FLUENT	87
10.	Παράρτημα-Κώδικας MATLAB	93
11.	Βιβλιογραφία	95

1. Περίληψη

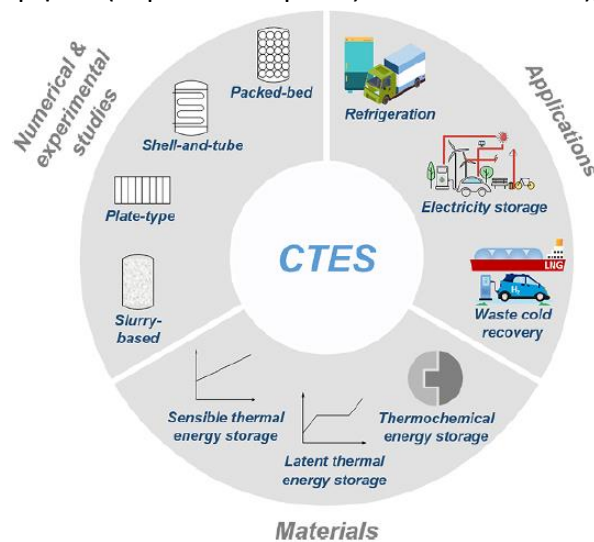
Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να αναλυθεί και να εξεταστεί η συμπεριφορά ενός υλικού αλλαγής φάσης ή PCM (το νερό στην παρούσα εργασία) από θερμική και ενεργειακή άποψη. Το πρώτο βήμα είναι να εξεταστεί η θεωρία πίσω από τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης και ο τεράστιος αριθμός δυνατοτήτων που προσφέρει αυτή η τεχνολογία στον τομέα της ενεργειακής μηχανικής. Αφού αναλυθούν ενδελεχώς όλα τα PCM που είναι διαθέσιμα ή αυτά που εξετάζονται προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην αγορά, τίθεται στο μικροσκόπιο η μελέτη των D. Carbonell, D. Philippen, M.Y. Haller, E. Frank, «Modeling of an ice storage based on a de-icing concept for solar heating applications», που δημοσιεύθηκε το 2015 και εξετάζει ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη συμβολή ηλιακών συλλεκτών. Το σύστημα αποθήκευσης πάγου χρησιμοποιεί εναλλάκτη θερμότητας επίπεδων πλακών από χάλυβα με λειτουργία αποπάγωσης, βυθισμένο σε δεξαμενή αποθήκευσης (τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή αποθήκευσης που είναι γεμάτη με νερό), αντλία θερμότητας και ηλιακούς συλλέκτες για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ζεστού νερού ενός κτιρίου. Η αποπάγωση είναι δυνατή μέσω της ηλιακής θερμότητας από τους ηλιακούς συλλέκτες ή με θερμότητα από το κάτω μέρος της δεξαμενής, το οποίο φορτίζεται αποκλειστικά με ηλιακή ενέργεια αντλούμενη από τα φωτοβολταϊκά. Όταν η αντλία θερμότητας εξάγει θερμότητα από την αποθήκευση πάγου με θερμοκρασίες άλμης (ρευστό εισόδο του εναλλάκτη θερμότητας) κάτω από 0 °C, σχηματίζεται πάγος στην επιφάνεια του βυθισμένου εναλλάκτη θερμότητας. Στην συγκεκριμένη εργασία παρατίθεται εξίσωση διατήρησης ενέργειας μεταξύ των τριών διαδοχικών στρωμάτων του εναλλάκτη: την άλμη, την χαλύβδινη πλάκα και το νερό. Θα αναλυθεί διαδοχικά ο τρόπος επίλυσης της εξίσωσης με τη χρήση τριδιαγώνιου μητρώου για να απεικονισθεί σε διάγραμμα η μεταβολή θερμοκρασίας κάθε στρώματος σε χρονικό διάστημα δεκατεσσάρων ωρών. Μετά, θα γίνει μέσω του υπολογιστικού προγράμματος SOLIDWORKS ο τρισδιάστατος σχεδιασμός και η μοντελοποίηση ενός μοντέλου εναλλάκτη επίπεδων πλακών και των εξαρτημάτων που τον απαρτίζουν. Στη συνέχεια, προκειμένου να εξεταστεί η θερμοκρασία του νερού στην επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας και να αξιολογηθεί η θερμική συμπεριφορά της άλμης, της πλάκας και του νερού-PCM, σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε στο περιβάλλον ANSYS FLUENT ένα τρισδιάστατο μοντέλο είκοσι όγκων ελέγχου, πέντε άλμης, δέκα πλακών και πέντε νερού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου των εξισώσεων (το οποίο δεν λαμβάνει υπόψιν του την γεωμετρία) και του τρισδιάστατου μοντέλου που προσομοιώθηκε, δηλαδή οι προκύπτουσες θερμοκρασίες, συγκρίθηκαν και αναλύθηκαν οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ τους.

Abstract

The purpose of the thesis is to analyze and examine the behavior of a phase change material or PCM (water in the present work) from a thermal and energy point of view. The first step is to consider the theory behind the use of phase change materials and the vast number of possibilities this technology offers in the field of energy engineering. After thoroughly analyzing all the PCMs available or those being considered for use in the market, the study by D. Carbonell, D. Philippen, M.Y. Haller, E. Frank, “Modeling of an ice storage based on a de-icing concept for solar heating applications”, published in 2015, which examines a thermal energy storage system with the contribution of solar panels. The ice storage system uses a steel flat plate heat exchanger with defrost function, submerged in a storage tank (placed inside the storage tank that is filled with water), a heat pump and solar panels to meet the heating and hot water needs of a building. De-icing is possible through solar heat from the solar panels or with heat from the bottom of the tank, which is charged exclusively with solar energy drawn from the photovoltaics. When the heat pump extracts heat from the ice storage with brine (heat exchanger inlet fluid) temperatures below 0 °C, ice forms on the surface of the heat exchanger. In this paper, an energy conservation equation is presented between the three successive layers of the exchanger: the brine, the steel plate and the water. The method of solving the equation will be analyzed successively by using a tridiagonal register to create a diagram of the temperature change of each layer over a period of fourteen hours. Then, the 3D design and modeling of a flat plate heat exchanger model and the components that make it up will be created through the SOLIDWORKS computer program. Then, in order to examine the temperature of water on the surface of the heat exchanger and to evaluate the thermal behavior of brine, plate and water-PCM, one model 3D model of twenty control volumes, five brine, ten plates, five water was designed and simulated in the ANSYS FLUENT environment. The results of the equation model (which does not take geometry into account) and the simulated 3D model, i.e. the resulting temperatures, were compared and the similarities and differences were analyzed.

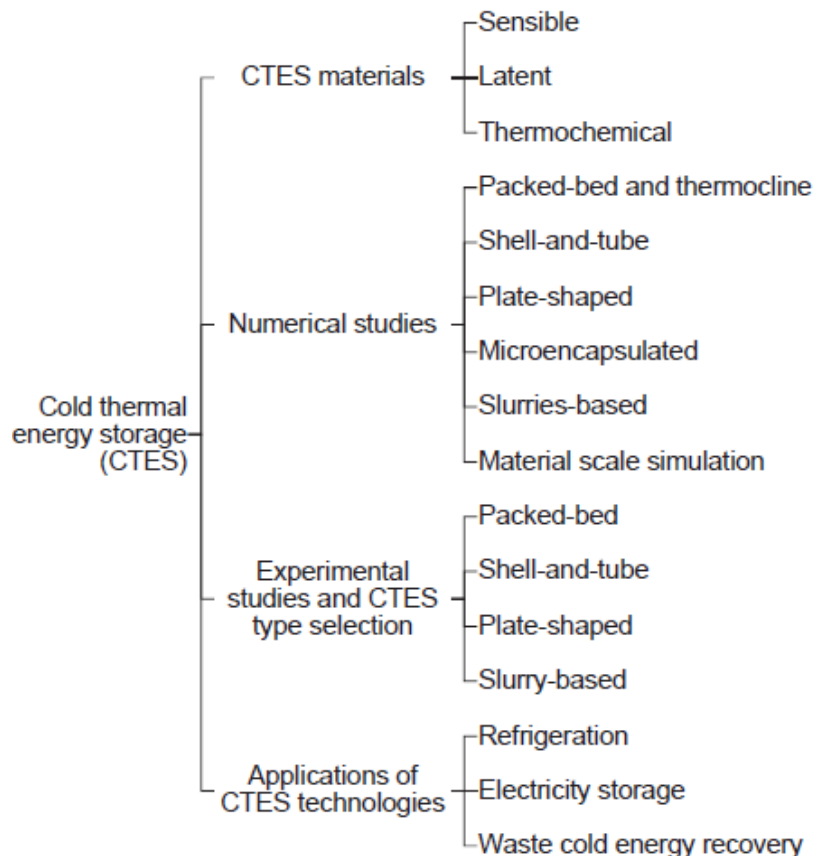
2. Εισαγωγή

Εδώ και αρκετά χρόνια τα αποτελέσματα της περιβαλλοντική καταστροφής έχουν αρχίσει να γίνονται εμφανή. Οι επιστήμονες έχουν επισημάνει πολλές φορές τις τεράστιες επιπτώσεις που θα επέλθουν εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής και της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού. Μέχρι το 2015, η ψύξη, ο κλιματισμός και ο εξοπλισμός αντλιών θερμότητας αντιπροσωπεύει ήδη το 25-30% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και αναμένεται να αυξηθεί 33 φορές έως το 2100. Εν τω μεταξύ, διάφορες πηγές ψυχρής ενέργειας δεν έχουν αξιοποιηθεί πλήρως. Για τους λόγους αυτούς η βιομηχανία ενέργειας καλείται να λάβει δράση, αυξάνοντας την χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και βελτιώνοντας τις υπάρχουσες τεχνολογίες ενέργειας, ή αναπτύσσοντας καινούριες. Αξίζει να ειπωθεί ότι στην Ευρώπη περίπου το 50% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας καλύπτει τις ανάγκες για θέρμανση σε οικίες και εργοστασιακές δομές, ένα ποσοστό που θα αυξηθεί μέσα στα επόμενα χρόνια. Αυτές οι προκλήσεις έχουν στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας σε μία τεχνική που δεν είχε αξιοποιηθεί πλήρως έως τώρα, την αποθήκευση πάγου για παραγωγή θερμικής ενέργειας μέσω της οποίας γίνεται ανάκτηση και εκμετάλλευση της απορριπτόμενης λανθάνουσας θερμότητας (λανθάνουσα θερμότητα ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την μετατροπή 1 Kg νερού θερμοκρασίας βρασμού σε ατμό ίδιας θερμοκρασίας). Με αυτή την μέθοδο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων ψύξης και επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση ανανεώσιμης ενέργειας στην διαδικασία παραγωγής θερμότητας. Έχουν αναπτυχθεί και πρόκειται να αναπτυχθούν επιπλέον αρκετές τεχνολογίες και τρόποι αποθήκευσης πάγου για θερμική ενέργεια για θερμοκρασίες υπό του μηδέν (κυμαίνονται μεταξύ $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), ενώ επίσης είναι υπό



Εικόνα 2.1: Αριθμητικές και πειραματικές μελέτες, εφαρμογές και υλικά

διερεύνηση τα πιθανά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στις δεξαμενές αποθήκευσης. Πιο αναλυτικά, για ευρύτερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι άμεση η ανάγκη για εύρεση οικονομικών και αποδοτικών τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς η ολοένα αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση ενέργειας για θερμότητα και ψύξη, η διαθέσιμη απορριπτόμενη λανθάνουσα θερμότητα και η ανάγκη για στροφή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνέβαλαν στην μελέτη και δημιουργία συστημάτων αποθήκευσης πάγου για παραγωγή θερμότητας (cold thermal energy storage: CTES), υλικών και αυτοματοποιημένη κατανομή του πάγου. Τα λεγόμενα συστήματα CTES έχουν αναπτυχθεί εδώ και δεκαετίες και μέχρι τώρα χρησιμοποιούνταν κυρίως για εφαρμογές που σχετίζονται με την συντήρηση των τροφίμων και των φαρμακευτικών προϊόντων. Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά τα επιμέρους τμήματα που χρειάζονται μελέτη για τον σχεδιασμό συστημάτων αποθήκευσης πάγου. Αυτά είναι: τα χρησιμοποιούμενα υλικά, οι αριθμητικές μελέτες, οι πειραματικές μελέτες και οι εφαρμογές στις οποίες αξιοποιούνται τα συστήματα CTES.



Εικόνα 2.2: Κατηγορίες συστημάτων CTES

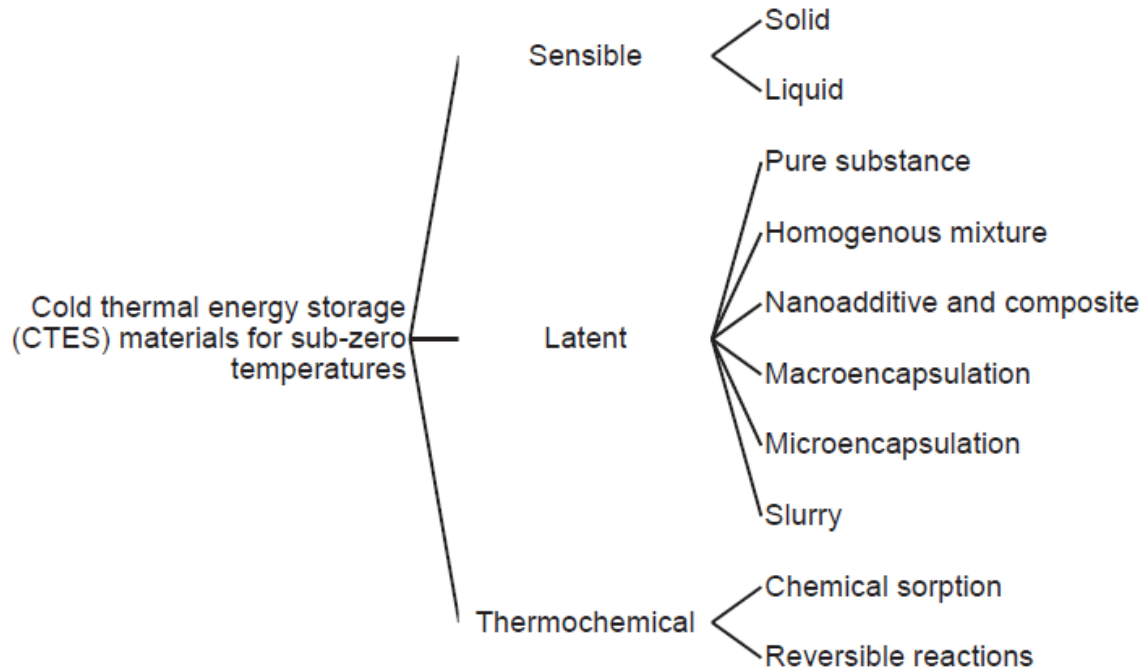
2.1 Υλικά στα συστήματα αποθήκευσης πάγου (CTES materials)

Η επιλογή του υλικού είναι ένα από τα πρωταρχικά βήματα κατασκευής ενός συστήματος CTES. Πιο αναλυτικά, το εκάστοτε υλικό καθορίζει την χωρητικότητα της δεξαμενής και την τελική μορφή του συστήματος. Οι απαιτήσεις που θέλουμε να πληρούν τα υλικά είναι:

- ◆ Ένα κατάλληλο εύρος θερμοκρασίας ανάλογα με την εφαρμογή
- ◆ Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα
- ◆ Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- ◆ Υψηλή πυκνότητα
- ◆ Χαμηλό βαθμό υπόψυξης ή υπέρψυξης
- ◆ Αντοχή στη διάβρωση
- ◆ Χημική σταθερότητα
- ◆ Μη τοξικό, εύφλεκτο ή εκρηξιογόνο
- ◆ Μικρή τάση ατμών
- ◆ Μικρή μεταβολή όγκου
- ◆ Χαμηλό κόστος και διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες
- ◆ Συμβατότητα με άλλα υλικά

Τα υλικά αλλαγής φάσης (CTES) για διαφορετικές εφαρμογές μπορούν να διαχωρισθούν με βάση την: αισθητή θερμότητα, την λανθάνουσα θερμότητα και την θερμοχημική θερμότητα. Κάθε κατηγορία μπορεί να ταξινομηθεί περαιτέρω σε διάφορες υποκατηγορίες ανάλογα με την χρήση που επιδιώκει ο κατασκευαστής και τις παραδοχές που είναι διατεθειμένος να κάνει. Αυτή η ταξινόμηση φαίνεται στο Σχ. 3. Αξίζει να υποθεί ότι το πιο συνηθισμένο υλικό αλλαγής φάσης (Phase Change Material:PCM) είναι το νερό. Κατά την μετατροπή του σε πάγο μπορεί να αποθηκεύσει πολλή θερμότητα, επομένως η

λανθάνουσα θερμότητα του συστήματος είναι αυξημένη, κάτι που αυξάνει την αποδοτικότητα του CTES.



Εικόνα 2.3: Κατηγορίες υλικών στην κατασκευή δεξαμενών

2.1.1 Υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας

Τα υλικά αυτά αποθηκεύουν θερμική ενέργεια (θερμότητα ή ψύξη) με βάση μια αλλαγή θερμοκρασίας. Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ένα υλικό αλλαγής φάσης αισθητής θερμότητας εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα και τη μάζα του υλικού, σύμφωνα με την εξίσωση (2.1):

$$Q_s = \int_{T_{\text{initial}}}^{T_{\text{final}}} (m \cdot c_p) dT \quad (2.1)$$

Όπου: Q_s [kJ] είναι η αισθητή θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται, m [kg] και c_p [kJ/kg·K] είναι η συνολική μάζα και η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και T [K] η θερμοκρασία.

Η χρήση αποθήκευσης αισθητής θερμικής ενέργειας για τα συστήματα CTES είναι απλούστερη και λιγότερο ακριβή από τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμικής ενέργειας. Τα περισσότερα από τα υλικά που είναι κατάλληλα για συστήματα CTES είναι

στερεά. Πετρώματα, πλαστικά, μέταλλα, χαλαζίας, σκυρόδεμα, βότσαλα, μεταξύ άλλων, έχουν μελετηθεί ως υλικά αποθήκευσης με θερμοκρασιακά εύρη από θερμοκρασία δωματίου έως περίπου $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα υλικά που αναφέρονται παραπάνω χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα συσκευασμένων κρεβατιών. Η υψηλή πυκνότητα και η χαμηλή ειδική θερμοχωρητικότητα αυτών των υλικών, καθώς και το μέγεθος και το βάρος του συστήματος είναι οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την μελέτη τέτοιων συστημάτων. Αριθμητικές και πειραματικές μελέτες για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υγρού αέρα (LAES) απέδειξαν ότι η αποθήκευση ψυχρής ενέργειας υψηλής ποιότητας μπορεί να είναι αντιληπτή χρησιμοποιώντας συστήματα συσκευασμένων κρεβατιών με πέτρες ως υλικά πλήρωσης. Τα εμπορικά διαθέσιμα πολυμερή υλικά, όπως το πολυπροπυλένιο (PP) και το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), έχουν επίσης μελετηθεί ως στερεά υλικά CTES. Οι ειδικές τους θερμικές τους χωρητικότητες είναι ανταγωνιστικές για να τα κάνει ελκυστικά υλικά για συστήματα συσκευασμένων κρεβατιών.

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει μια λίστα δοκιμασμένων και πιθανών στερεών υλικών αισθητής θερμικής ενέργειας για θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν. Η εφαρμογή όποιου από αυτά τα υλικά αναφέρεται στη βιβλιογραφία προστίθεται στον πίνακα και αναφέρεται αν αυτό το υλικό είναι κατάλληλο για την εφαρμογή.

Material	Density (kg/m^3)	Specific heat capacity ($\text{J}/\text{g}\cdot\text{K}$)	Thermal conductivity ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	Application(s) mentioned in the literature
Water (Ice)	926–916 ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	1.39–2.05 ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	3.48–2.22 ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	
Granite	2600–2688 (NA)	0.72–0.95 (NA)	1.9–3.5 (NA)	Liquid air energy storage, pumped thermal energy storage
Rocks	1810–7500 (NA)	0.74–2.15 (NA)	0.82–7.2 (NA)	
Concrete	500–2400 (NA)	0.83–1.16 (NA)	0.6–1.3 ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Pumped thermal energy storage
Polypropylene	900–910 (NA)	0.64–1.51 ($-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0.18–0.22 ($-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	
High Density Polyethylene	930–965 (NA)	1.9–2.25 (NA)	0.42–0.51 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	
Quartz	2600–2650 (NA)	0.41–0.70 ($-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0.78–1.30 ($-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Liquid air energy storage
Sodium chloride	2170 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0.6–0.85 ($-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$)	22.73–7.52 ($-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$)	
Aluminum oxide	3400–4000 (NA)	0.10–0.72 ($-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	27.01–15.51 ($-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	

Πίνακας 2.1: Υπάρχοντα και πιθανά στερεά υλικά αισθητής θερμότητας για θερμοκρασίες υπό του μηδενός

Υγρά υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας για εφαρμογή σε συστήματα CTES μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα ως υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και το υλικό μεταφοράς θερμότητας σε ένα CTES σύστημα, κάτι το οποίο διαφέρει από τα στερεά υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των εφαρμογών πρέπει να είναι μεταξύ του σημείου ψύξης και του σημείου βρασμού αυτών των υλικών. Ένα κριτήριο για την επιλογή υγρού υλικού αισθητής θερμότητας που πρότεινε ο Laughlin για

αντλούμενη θερμική ενέργεια (PTES) είναι ότι το υλικό πρέπει να παραμείνει υγρό σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν και να έχει πίεση ατμών κάτω από 1 atm. Υγρά υλικά αισθητής θερμότητας που πληρούν αυτά τα κριτήρια είναι κυρίως οι υδρογονάνθρακες και τα παράγωγά τους. Για παράδειγμα, το εξάνιο προτάθηκε από τον Laughlin για ένα PTES σύστημα. Δεδομένου ότι αυτά τα υλικά μπορεί να είναι τοξικά και εύφλεκτα, τα πιθανά θέματα ασφάλειας αξίζει να ληφθούν υπόψιν. Ο Laughlin ισχυρίστηκε ότι μέθοδοι όπως η αλογόνωση μπορεί να κάνει τους υδρογονάνθρακες ανθεκτικούς στη φλόγα. Ένα διάλυμα αιθυλενογλυκόλης/νερού μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως υλικό αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Είναι άοσμο, έχει θερμοκρασία στερεής φάσης κάτω από 0 °C και χαμηλή πίεση ατμών. Αλκοόλες βραχύτερης αλυσίδας, όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη, η προπανόλη, η προπυλενογλυκόλη και τα υδατικά τους διαλύματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

2.1.2 Υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας-Υλικά αλλαγής φάσης

Τα υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αποθηκεύουν και απελευθερώνουν θερμική ενέργεια κατά τις αλλαγές φάσης του υλικού και είναι ευρέως γνωστά ως υλικά αλλαγής φάσης (phase change materials-PCM). Η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η αλλαγή φάσης ονομάζεται θερμοκρασία αλλαγής φάσης (PCT). Η λανθάνουσα θερμότητα Q_l [kJ] που αποθηκεύεται από ένα PCM βρίσκεται από την εξίσωση (2.2):

$$Q_l = x_l \cdot m \cdot \Delta H_l \quad (2.2)$$

Όπου: x_l είναι το κλάσμα του υλικού αποθήκευσης που άλλαξε η φάση του, ΔH_l [kJ/kg] είναι η ειδική λανθάνουσα θερμότητα του υλικού. Η συνολική ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται θα είναι η συμβολή της αισθητής θερμότητας (πριν και μετά την αλλαγή φάσης) και της λανθάνουσας θερμότητας.

Τα PCM βρίσκονται υπό συνεχή ανάπτυξη εδώ και δεκαετίες. Μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας από τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών είναι επίσης υψηλότερη. Οι διαδικασίες αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας θεωρούν τέσσερις διαφορετικούς τύπους μεταβολών φάσης: στερεό-στερεό, στερεό-υγρό, υγρό-αέριο και στερεό--αέριο. Η αλλαγή φάσης στερεού-υγρού είναι η πιο μελετημένη και χρησιμοποιούμενη μορφή υλικών αλλαγής φάσης. Αυτός ο μετασχηματισμός έχει υψηλότερη λανθάνουσα θερμότητα από στερεό-στερεό. Η θερμική διαστολή του υλικού κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης μπορεί να φτάσει το 10% του αρχικού όγκου υλικού ή λιγότερο. Η μεταβολή στερεού-στερεού μεταξύ των πολυμορφικών φάσεων του υλικού απελευθερώνει χαμηλότερα ποσά λανθάνουσας θερμότητας σε σύγκριση με τη μετάπτωση στερεού-υγρού. Στερεό-αέριο και υγρό-αέριο αποθηκεύουν και απελευθερώνουν την υψηλότερη ποσότητα θερμικής

ενέργειας που συνοδεύεται από σημαντική αλλαγή όγκου κατά την αλλαγή φάσης, η οποία απαιτεί δοχεία αποθήκευσης ή υπαίθρια συστήματα. Στην τελευταία περίπτωση, μόνο ο αέρας, το άζωτο και το διοξείδιο του άνθρακα είναι πρακτικά αφού μπορούν να απελευθερωθούν με ασφάλεια στην ατμόσφαιρα.

Τα υπάρχοντα και πιθανά προϊόντα PCM που αξίζει να αναφερθούν λόγω της υψηλής λανθάνουσας θερμότητάς τους ταξινομούνται σε έξι τύπους:

- ◆ PCM καθαρής ουσίας
- ◆ PCM ομοιογενούς μείγματος
- ◆ νανοπρόσθετα και συνθετικά PCM
- ◆ μακροενθυλακωμένα PCM
- ◆ μικροενθυλακωμένα PCM
- ◆ PCM πολτού

2.1.2.1 PCM καθαρής ουσίας

Τα υλικά αλλαγής φάσης καθαρής ουσίας που είναι κατάλληλα για εφαρμογές οι οποίες απαιτούν θερμοκρασίες υπό του μηδενός, περιλαμβάνουν οργανικές και ανόργανες χημικές ενώσεις και χημικά στοιχεία.

Τα οργανικά PCM αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο και δομές άνθρακα, όπως αλκάνια (παραφίνες), αλκανόνες, εστέρες, λιπαρά οξέα, αλκοόλες, γλυκόλες και πολυμερή. Το αλκάνιο είναι ο πιο ευρέως μελετημένος τύπος οργανικού υλικού αλλαγής φάσης. Το σημείο τήξης του αλκανίου και η λανθάνουσα θερμότητά του αυξάνονται με το μήκος της ανθρακικής αλυσίδας. Τα αλκάνια είναι λιγότερο ακριβά, αξιόπιστα, προβλέψιμα, μη διαβρωτικά και διαθέσιμα υλικά για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας. Για εφαρμογές με θερμοκρασίες υπό το μηδέν, υπάρχοντα και πιθανά οργανικά PCM είναι διαθέσιμα για θερμοκρασίες από (προσεγγιστικά) $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Γενικά, τα περισσότερα οργανικά PCM έχουν χαμηλή ή καθόλου υποψύξη, χαμηλό σημείο τήξης, είναι μη διαβρωτικά και χημικά σταθερά, αλλά η αλλαγή του όγκου τους κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης μπορεί να είναι σημαντική. Τα οργανικά PCM μπορούν επίσης να είναι εύφλεκτα και μερικές φορές οξειδωτικό.

Η ομάδα ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης καθαρής ουσίας αποτελείται κυρίως από άλατα, ένυδρα άλατα και μέταλλα. Για θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν, οι πιο βασικές επιλογές των PCM είναι στοιχεία όπως το άζωτο, το υδρογόνο, το ήλιο, το οξυγόνο, το νέο.

Οι θερμοκρασίες μετάβασής τους είναι κάτω από τους $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$, που είναι κατάλληλη για εφαρμογές εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών. Το στερεό άζωτο έχει δοκιμαστεί σε υπεραγωγίμο σύστημα σφονδύλου για αποθήκευση τόσο της ψυχρής ενέργειας όσο και της μηχανικής κινητικής ενέργειας, δείχνοντας ότι η εφαρμογή είναι θεωρητικά εφικτή. Από την άλλη πλευρά, η αμμωνία, της οποίας η θερμοκρασία τήξης είναι $-78,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, έχει τη μεγαλύτερη θερμότητα σύντηξης μεταξύ όλων των καθαρών ουσιών, με το μειωέκτημα ότι είναι τοξική και διαβρωτική ουσία.

2.1.2.2 PCM ομοιογενούς μείγματος

Ένα ομοιογενές μείγμα PCM είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων ουσιών που δεν συνδυάζονται χημικά, αλλά η σύνθεση τους έχει ενιαία μορφή. Το ποσοστό κάθε συστατικού του μείγματος μπορεί να μεταβληθεί για να αποκτήσει διαφορετικές θερμοκρασίες μετάβασης φάσης.

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ομοιογενές μείγμα PCM είναι ευτηκτικό υλικό. Ένα ευτηκτικό υλικό είναι ένα μείγμα δύο ή περισσότερων ουσιών με μια συγκεκριμένη σύνθεση, της οποίας η θερμοκρασία τήξης είναι η χαμηλότερη από όλες τέτοιων μειγμάτων που σχηματίζονται από τις ίδιες ουσίες. Αυτό το είδος υλικού λιώνει και παγώνει συνεπώς χωρίς διαχωρισμό φάσης και έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα. Ευτηκτικά υλικά μπορεί να είναι ανόργανα ή οργανικά. Τα ανόργανα ευτηκτικά PCM είναι γενικά χαμηλού κόστους, έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμική και υψηλή θερμική αγωγιμότητα, ωστόσο, μπορεί να είναι χημικά ασταθή και διαβρωτικά. Υδατικά μείγματα αλατιού ή ευτηκτικά διαλύματα νερού-αλατιού, είναι ο πιο ευρέως εφαρμοσμένος τύπος PCM για εύρος θερμοκρασιών κάτω από το μηδέν.

Τα οργανικά ομοιογενή PCM μελετώνται επίσης ευρέως. Ο Rasta εργάστηκε σε ένα bio-PCM που βασίζεται σε ένα μείγμα φυτικών ελαίων και νερού. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση στο σημείο πήξης του νερού ενώ ταυτόχρονα σημειώθηκε διατήρηση παρόμοιων θερμικών ιδιοτήτων με αυτών του νερού. Επίσης, έγινε αντιληπτή η μείωση της επίδρασης υποψύξης λόγω της παρουσίας λαδιού. Το υδατικό διάλυμα αλκοόλης είναι μια άλλη επιλογή ως υλικό αποθήκευσης PCM από $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η γλυκόλη και η αιθανόλη μελετήθηκαν σε διάφορες συγκεντρώσεις για να γίνει ο προσδιορισμός του σημείου πήξης και της λανθάνουσας θερμότητας σύντηξης.

2.1.2.3 Νανοπρόσθετα και συνθετικά PCM

Έχει γίνει ανάπτυξη των καινοτόμων νανοπροσθετικών και συνθετικών PCM για εφαρμογές CTES σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν. Αυτός ο τύπος PCM σχηματίζεται με την προσθήκη συμπληρωματικών υλικών, όπως για παράδειγμα προσθήκη νανοσωματιδίων, παχυντών ή ενσωμάτωση του PCM σε μια μήτρα από πορώδες υλικό. Ο συνδυασμός αυτών των υλικών με το υλικό αλλαγής φάσης μπορεί να μειώσει την υποψύξη και τον χρόνο πυρήνωσης, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα και επιτυγχάνεται

αποφυγή διαρροής. Πολλά εμπορικά προϊόντα PCM αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα της συμπερίληψης προσθετικών υλικών. Ωστόσο, είναι συχνό φαινόμενο τα νανοπροσθετα και οι μήτρες να μειώνουν τη λανθάνουσα θερμότητα, να αυξάνουν το κόστος των προϊόντων PCM και να επιδεινώνουν τη σταθερότητα των τελικών προϊόντων. Επομένως, η επίδραση των νανοπροσθετικών υλικών και των μητρών θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά για την διασφάλιση της βελτίωσης στην απόδοση των PCM.

Τα νανოსωματίδια στα υλικά αλλαγής φάσης αυξάνουν τη θερμική αγωγιμότητα, βελτιώνουν την πυρήνωση και μειώνουν το φαινόμενο της υποψύξης. Πολλά νανოსωματίδια έχουν διερευνηθεί για χρήση ως PCM θερμοκρασίας κάτω του μηδενός. Ορισμένα από αυτά τα υλικά είναι τα νανοαιμοπετάλια γραφενίου (GnP), το οξείδιο γραφενίου (GO), το TiO_2 και οι νανოსωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNT). Ορισμένα από αυτά μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρηνικός παράγοντας για να προκαλέσουν θέσεις πυρηνοποίησης και να μειώσουν την υπόψυξη, μερικά μπορούν επίσης να ενισχύσουν τη μεταφορά θερμότητας ή να μειώσουν το PCT. Ως εκ τούτου, όλα τα αναγραφόμενα υλικά πραγματοποιούν σημαντική αύξηση θερμικής αγωγιμότητας και μείωση της υποψύξης. Από την άλλη πλευρά, μπορεί επίσης μειώνουν τη λανθάνουσα θερμότητα, να συσσωματώνονται με την πάροδο του χρόνου και να επηρεάζουν την ομοιομορφία του υλικού. Η επεξεργασία με οξύ ή η προσθήκη παχύρρευστου ενισχυτικού παράγοντα είναι μέθοδοι που σύμφωνα με μελέτες ενισχύουν σημαντικά τη σταθερότητα για ορισμένα PCM, ωστόσο δεν έχουν δοκιμαστεί όλες αυτές οι μελέτες για μακροπρόθεσμη απόδοση των προστιθέμενων νανოსωματιδίων σε PCM. Εκτός από τα υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω για θερμοκρασίες υπό του μηδενός, έχουν χρησιμοποιηθεί περισσότερα υλικά ως PCM για θερμοκρασίες πάνω από το μηδέν, για παράδειγμα, οξείδιο του χαλκού (CuO), οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), ανθρακικό βάριο ($BaCO_3$), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), σκόνη γραφίτη, νανο αργύρου-τιτανίας ($Ag-TiO_2$), θειικό μαγνήσιο ($MgSO_4$), στρόντιο-χλωρίδιο ($SrCl_2$) και εξαφθοριαργλικό νάτριο (Na_3AlF_6). Η προσθήκη πηκτικών υλικών σε PCM βελτιώνει την απόδοσή τους κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων, εμποδίζοντας την καθίζηση του παράγοντα πυρήνων και μειώνοντας των διαχωρισμό φάσεων. Μερικές φορές, χρησιμοποιούνται πηκτικοί παράγοντες μαζί με πυρηνικούς παράγοντες ταυτόχρονα. Ωστόσο, πηκτικοί παράγοντες θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο τις θερμικές ιδιότητες των υλικών αποθήκευσης.

Τα σύνθετα υλικά μήτρας βελτιώνουν τη θερμική αγωγιμότητα των PCM με χαμηλό κόστος. Αυτή η μέθοδος βοηθά επίσης στο διαχωρισμό φάσεων και στην αποτροπή προβλημάτων διαρροής κατά την αλλαγή φάσης. Μεταλλικές μήτρες μπορούν να βελτιώσουν τη θερμική αγωγιμότητα και να κρατήσουν τα υλικά αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια της τήξης, μειώνοντας έτσι τον διαχωρισμό φάσεων. Οι μήτρες με βάση τον άνθρακα είναι επίσης κατάλληλες λόγω του υψηλού πορώδους, της χαμηλής πυκνότητας, της ανώτερης θερμικής αγωγιμότητας και της μεγάλης επιφάνειάς τους. Η συνολική θερμική αγωγιμότητα του σύνθετου PCM μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο αυτή του υλικού της μήτρας, η οποία είναι πολύ υψηλότερη από τη θερμική αγωγιμότητα του PCM χωρίς τη μήτρα. Περισσότερες μήτρες, όπως αφρός αλουμινίου, γραφένιο, νανοςωλήνες άνθρακα, πορώδες νανο-τιτάνιο

διοξείδιο, πορώδης διογκωμένος περλίτης, διατομίτης και μοντμοριλλονίτης αξίζει επίσης να εξερευνηθούν για χρήση ως σύνθετα PCM θερμοκρασίας κάτω του μηδενός.

2.1.2.4 Μακροενθυλακωμένα PCM

Η μέθοδος της μακροενθυλάκωσης αναφέρεται στον περιορισμό των PCM σε περιεχόμενα μεγέθους από αρκετά χιλιοστόλιτρα έως αρκετά λίτρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα ως θερμοκλίνη CTES σε ενεργητικό ή παθητικό σύστημα ψύξης ή ως το πληρωτικό σύστημα CTES συσκευασμένου κρεβατιού. Η μακροενθυλάκωση είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική ενθυλάκωσης PCM. Ενσωματώνει μεγάλη ποσότητα PCM με χαμηλό κόστος, προστατεύει το PCM από μόλυνση και αλλαγή όγκου από το εξωτερικό περιβάλλον, ενισχύει τη μεταφορά θερμότητας παρέχοντας μεγαλύτερη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και μειώνοντας τη θερμική αντίσταση λόγω περιορισμένου πάχους. Διάφορες ερευνητικές ομάδες και εταιρείες έχουν αναπτύξει μεθόδους μακροενθυλάκωσης για θερμοκρασία κάτω από το μηδέν. Ένας περιέκτης μακροενθυλάκωσης περιλαμβάνει πάντα ένα μαξιλάρι αέρα για αντιστάθμιση της αλλαγής όγκου του υλικού, ειδικά για άκαμπτες κάψουλες, η οποία ενισχύει επίσης τη μηχανική σταθερότητα του συστήματος αποθήκευσης. Τα σχήματα συγκράτησης μπορεί να είναι σφαιρικά, ορθογώνια, κυκλικά, κυλινδρικά, θήκες, επίπεδες πλάκες και άλλα ειδικά κατασκευασμένα σχήματα για εφαρμογές ποικίλων χρήσεων. Τα υλικά για την μακροενθυλάκωση μπορεί να είναι και τα δύο μεταλλικό ή πλαστικό. Δεδομένου ότι ο περιορισμός είναι σε άμεση επαφή με τα υλικά αλλαγής φάσης και μερικές φορές και με τα HTF, τα υλικά συγκράτησης θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά για να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα διάβρωσης. Ο Or'ο δοκίμασε το αποτέλεσμα διάβρωσης τεσσάρων μετάλλων (χαλκός, αλουμίνιο, ανοξείδωτος χάλυβας, ανθρακούχος χάλυβας) και τεσσάρων πολυμερών (πολυπροπυλένιο (PP), πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και πολυστυρόλιο (PS)) έναντι τριών

εμπορικών υλικών αλλαγής φάσης και έξι PCM που αναπτύχθηκαν στο University of Lleida (PCT μεταξύ -22 °C και 16 °C). Ορισμένα υλικά χρησιμοποίησαν οξυαιθυλομεθυλοκυτταρίνη (CMC), AlF_3 , NaCl και NH_4Cl ως πρόσθετα. Μετά από μία, τέσσερις και δώδεκα εβδομάδες δοκιμών, ο ανοξείδωτος χάλυβας 316 έδειξε χαμηλό ρυθμό διάβρωσης και ήταν το μόνο μεταλλικό υλικό που προτάθηκε για μακροχρόνια χρήση. Ο χαλκός και ο ανθρακοχάλυβας παρουσίασαν υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης καθώς και παρουσία ιζημάτων και μεταβολών του pH. Επομένως, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό συγκράτησης. Το αλουμίνιο έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές μακροενθυλάκωσης. Ωστόσο, σε αυτή τη μελέτη, εμφανίστηκαν λακκούβες και φυσαλίδες στις επιφάνειες των δειγμάτων αλουμινίου, υποδεικνύοντας ότι μπορεί να δημιουργηθούν τρύπες εάν ο περιορισμός είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο για αυτά τα PCM. Από την άλλη πλευρά, και τα τέσσερα πολυμερή – PP, PS, PET και HDPE – αποδείχθηκαν κατάλληλα υλικά για περιορισμό της μακροενθυλάκωσης. Άλλα πλεονεκτήματα των πολυμερών περιλαμβάνουν χαμηλό κόστος, χαμηλή πυκνότητα και εύκολη διαμόρφωση.

2.1.2.5 Μικροενθυλακωμένα PCM

Η μέθοδος της μικροενθυλάκωσης αναφέρεται στον περιορισμό των PCM κάψουλες σε μικροκλίμακα (μερικά χιλιοστά ή λιγότερο) που συγκρατούν το υλικό στο εσωτερικό και αποφεύγεται έτσι η αλλαγή της σύστασης του υλικού λόγω επαφής με το περιβάλλον. Τα κελύφη της κάψουλας είναι συνήθως κατασκευασμένα από πολυμερή όπως πολυαμίδια, πολυουρεθάνες, πολυουρίες και πολυεστέρες. Η μικροενθυλάκωση δημιουργεί μια μεγάλη επιφάνεια, βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας και τη μηχανική σταθερότητα, μειώνει τη συσσωμάτωση, ελαχιστοποιεί το διαχωρισμό φάσεων και βελτιώνει τη σταθερότητα του κύκλου.

Ωστόσο, υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία σχετικά με τη μακροπρόθεσμη θερμική απόδοση των μικροενθυλακωμένων PCM. Αυτή η μέθοδος χρειάζεται βελτιώσεις για να αποφευχθεί η καταστροφή των καψουλών κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων. Οι τεχνικές μικροενθυλάκωσης έχουν επίσης αποδειχθεί ότι αυξάνουν το φαινόμενο υποψύξης στα PCM, το οποίο αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για την εφαρμογή του ως υλικά CTES. Οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος περιλαμβάνουν προσθήκη παραγόντων πυρήνωσης καθώς και αλλαγή της σύνθεσης και δομής του κελύφους.

Όσον αφορά τις διαδικασίες κατασκευής μικροενθυλάκωσης, τόσο οι φυσικές όσο και χημικές μέθοδοι εξακολουθούν να είναι πολύ περίπλοκες, κάτι που θα έπρεπε να βελτιωθεί για να μειωθεί το κόστος παραγωγής. Εάν χρησιμοποιείται η φυσική μέθοδος, μπορεί να υπάρξει σημαντική μείωση στην ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας του εκάστοτε υλικού αλλαγής φάσης.

Advantages	Disadvantages	Suitable CTES type(s)
<i>Macroencapsulation</i>		
Lower cost Large surface area and limited thickness to enhance heat transfer Avoidance of contamination of PCM and change of properties Various shapes available with flexible or rigid materials Rigid macroencapsulation enhances the mechanical stability of the storage system	There could be corrosion between the PCM and the container	Packed-bed and thermocline
<i>Microencapsulation</i>		
Large surface area to enhance heat transfer Improve cycling stability Avoid the agglomeration of PCM particles Avoid contamination of PCM and change of properties	Higher cost Increase the subcooling Possible destruction of the capsules	Shell-and-tube Slurry-based

Πίνακας 2.2: Ποιοτική σύγκριση μακροενθυλάκωσης και μικροενθυλάκωσης των PCM με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους

2.1.2.6 PCM πολτού

Ο πολτός είναι ένας μοναδικός τύπος υλικού αλλαγής φάσης, το οποίο είναι ένα σταθερό εναιώρημα σωματιδίων PCM σε ρευστό φορέα. Η ενέργεια που αποθηκεύεται είναι ο συνδυασμός της λανθάνουσας θερμότητας του PCM και της αισθητής θερμότητας του ρευστού φορέα. Ο πολτός λειτουργεί σαν υγρό ανά πάσα στιγμή, επομένως μπορεί να αντληθεί, να αποθηκεύεται σε δεξαμενές, να απορρίπτεται απευθείας και να περνά μέσα από εναλλάκτες θερμότητας για να λειτουργήσει ως υλικό αποθήκευσης και HTF ταυτόχρονα. Μεταξύ των διαφόρων τύπων πολτών αλλαγής φάσης (phase change slurries-PCS) ο πολτός πάγου, ο πολτός ξηρού πάγου και το μικροενθυλακωμένο PCS μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές με θερμοκρασία υπό του μηδενός και στη βιομηχανία τροφίμων. Σχηματίζεται από νερό σε υγρή μορφή ως το φέρον υγρό και σωματίδια πάγου ως διασπαρμένη φάση. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πήξης, η διασπαρμένη φάση εξαφανίζεται και πρέπει να επανεισαχθεί από μια γεννήτρια πολτού πάγου. Τα κατασταλτικά σημείου πήξης μπορούν να μειώσουν το σημείο πήξης του πολτού πάγου από $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ και χαμηλότερα. Θεωρητικά, οποιοδήποτε οργανικό ή ανόργανο υλικό που μπορεί να σχηματίσει ένα υδατικό διάλυμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατασταλτικό κατάψυξης για τη δημιουργία ενός πολτού πάγου. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα κατασταλτικά του σημείου πήξης είναι το χλωριούχο νάτριο, η αιθανόλη, η αιθυλενογλυκόλη και η προπυλενογλυκόλη, ενώ η μεθανόλη, η γλυκερόλη, η αμμωνία, το ανθρακικό κάλιο, το χλωριούχο ασβέστιο, το χλωριούχο μαγνήσιο, το οξικό κάλιο και το κάλιο μελετήθηκαν επίσης. Ωστόσο, η ενεργειακή πυκνότητα του πολτού πάγου σχετίζεται περισσότερο με το κλάσμα πάγου παρά με τον τύπο των κατασταλτικών του σημείου πήξης. Παρόμοια με τον πολτό πάγου, ο πολτός ξηρού πάγου περιέχει υγρό διοξείδιο του άνθρακα και σωματίδια ξηρού πάγου. Το θεωρητικό εύρος θερμοκρασίας είναι μεταξύ $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$, το οποίο είναι κατάλληλο για ψύξη σε χαμηλή θερμοκρασία. Ένας μικροενθυλακωμένος πολτός είναι ένα σταθερό εναιώρημα στερεού-υγρού που αποτελείται από ένα φέρον υγρό και μικροενθυλακωμένα PCM. Περιέχει το PCM σε μικρά σταγονίδια με μικροενθυλάκωση από πολυμερή. Η μικροενθυλάκωση βοηθά στην αποφυγή της διασποράς PCM στο φέρον υγρό, στην αποφυγή της συσσωμάτωσης σωματιδίων PCM, στην προστασία του PCM από το περιβάλλον και στη βελτίωση της μηχανικής σταθερότητας. Ωστόσο, έχουν συνήθως υψηλό κόστος, σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και οι επιδόσεις τους τείνουν να επιδεινώνονται μετά από μακροχρόνια λειτουργία. Γενικά, τα συστήματα πολτού με πρόσθετα μπορούν να προσφέρουν υποσχόμενες ευκαιρίες για εφαρμογές CTES, ειδικά για ψύξη και κλιματισμό.

2.1.3 Υλικά αποθήκευσης θερμοχημικής θερμότητας

Τα θερμοχημικά υλικά (thermochemical materials - TCM) αποθηκεύουν και απελευθερώνουν θερμική ενέργεια μέσω χημικών αντιδράσεων. Η ενέργεια που αποθηκεύεται μέσω της αντίδρασης μεταξύ στερεού-αερίου περιγράφεται από την εξίσωση:



όπου τα S' και S είναι στερεά και το G είναι αέριο.

Η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας αυτών των υλικών μπορεί να είναι μεταξύ 5 και 15 φορές μεγαλύτερη από τα υλικά αισθητής θερμότητας, αλλά η πολυπλοκότητα του συστήματος είναι η υψηλότερη μεταξύ όλων των τεχνολογιών αποθήκευσης θερμότητας. Η αποθήκευση χημικής απορρόφησης είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος θερμοχημικής αποθήκευσης για CTES. Υπάρχουν δύο είδη απορρόφησης αποθήκευσης: απορρόφηση (σε υγρά υλικά) και προσρόφηση (σε στερεά υλικά). Τόσο η απορρόφηση όσο και η προσρόφηση περιλαμβάνουν δύο είδη υλικών, ένα απορροφητικό και ένα ψυκτικό μέσο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεταφορά ψυχρής ενέργειας μέσω της διαδικασίας απορρόφησης ή προσρόφησης. Έχουν διερευνηθεί αρκετά ζεύγη απορροφητικού και ψυκτικού μέσου για αποθήκευση απορρόφησης σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν και το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ζεύγος εργασίας είναι νερό και αμμωνία ($\text{H}_2\text{O} / \text{NH}_3$) καθώς η αμμωνία μπορεί να εξατμιστεί κάτω από τους 0°C . Τα μειονεκτήματα του ζεύγους $\text{H}_2\text{O} / \text{NH}_3$ είναι ότι η αμμωνία είναι τοξική και το σύστημα απαιτεί υψηλές πιέσεις λειτουργίας. Άλλα ζεύγη που μπορούν να αξιοποιηθούν είναι αυτά που παρατίθενται στον πίνακα.

Working Pairs	Evaporator temperature ($^\circ\text{C}$)	Energy stored (kJ/kg)
$\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$	-20	122.4
$\text{LiNO}_3/\text{NH}_3$	-20	129.6
$\text{CaCl}_2/\text{NH}_3$	-20	295.2
$\text{SrCl}_2/\text{NH}_3$	-20	432.0
$\text{MgCl}_2/\text{NH}_3$	-20	360.0*
$\text{FeCl}_2/\text{NH}_3$	-20	316.8*
$\text{NiCl}_2/\text{NH}_3$	-20	313.2*
$\text{MnCl}_2/\text{NH}_3$	-20	324.0*

Πίνακας 2.3: Δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας για ζεύγη απορροφητικού και ψυκτικού μέσου

Μεταξύ αυτών το $\text{SrCl}_2 / \text{NH}_3$ προσφέρει την υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης. Για τη διαδικασία προσρόφησης, το ζεύγος $\text{CaCl}_2 / \text{NH}_3$ έχει υψηλή ικανότητα προσρόφησης, αλλά παρουσιάζει προβλήματα όπως διαστολή, διάβρωση και φθορά. Βελτιώσεις στα συστήματα απορρόφησης μπορούν να γίνουν με ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας των αντιδραστήρων, με την αναζήτηση περισσότερων ζευγών υλικών και την χρήση συνθετικών υλικών.

2.1.4 Συμπεράσματα για την χρήση των υλικών αποθήκευσης θερμότητας

Η επιλογή κατάλληλου υλικού αποθήκευσης θερμότητας είναι το πιο σημαντικό βήμα στο σχεδιασμό CTES. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ψυχρής αποθήκευσης είναι κυρίως υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας και υλικά αλλαγής φάσης. Ωστόσο, πολλά από τα υλικά που παρατίθενται παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης, ασφάλειας και διαχωρισμού φάσης (στην περίπτωση των PCM) που πρέπει να ξεπεραστούν πριν θεωρηθούν ως κατάλληλα υποψήφια υλικά για εφαρμογές CTES. Για παράδειγμα, μπορούν να προστεθούν επιβραδυντικά πυρκαγιάς για την καταστολή της ευφλεκτότητας των οργανικών υλικών που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε χαμηλή θερμοκρασία.

Τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι χαμηλού κόστους, αξιόπιστα και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εμπορικές εφαρμογές. Η μελλοντική έρευνα για τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας στερεής μορφής, μπορεί να δώσει προσοχή στη χρήση τοπικά διαθέσιμων υλικών και ανακυκλωμένων υλικών. Από την άλλη πλευρά, τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας υγρής μορφής πρέπει να ξεπεράσουν τη διάβρωση και τα προβλήματα ασφάλειας πριν χρησιμοποιηθούν για CTES.

Η ποσότητα των PCM που ερευνήθηκε είναι σημαντική σε σύγκριση με τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Μεταξύ των καταλόγων των PCM, τα χημικά στοιχεία, οι ενώσεις και τα ομοιογενή μείγματα αποτελούν την πλειοψηφία. Υπάρχουν επίσης νέα υλικά υπό ανάπτυξη, όπως PCM αποθηκευμένα σε μικροκάψουλες και PCM με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες που βασίζονται σε πρόσθετα υλικά. Ένα σημαντικό μέρος των PCM έχει ήδη εφαρμοστεί κυρίως στον τομέα της ψύξης, ωστόσο τα υπόλοιπα δοκιμάζονται ήδη πειραματικά και αριθμητικά σε διάφορα συστήματα αποθήκευσης ψύξης. Υπάρχει μια επιλογή, εμπορικών και μη, PCM με καλές και μέτριες θερμοφυσικές ιδιότητες, που είναι αξιοποιήσιμες σε εύρος θερμοκρασίας $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Λόγω της έλλειψης επιλογών μεταξύ των σημερινών PCM που διατίθενται για κρυογονικές εφαρμογές, μια σαφής μελλοντική ερευνητική κατεύθυνση σε υλικά ψυχρής αποθήκευσης που χρησιμοποιούν PCM θα πρέπει να κινηθεί προς τα κρυογονικά εύρη θερμοκρασίας για την εξερεύνηση νέων υλικών με υψηλή θερμική ικανότητα αποθήκευσης. Επιπλέον, θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην ενεργειακή πυκνότητα και το κόστος κατά την ανάπτυξη PCM για εφαρμογές κρυογονικής αποθήκευσης ψύξης για την αντικατάσταση άφθονων πετρωμάτων ευαίσθητων υλικών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για εφαρμογές κρυογονικής αποθήκευσης ψύξης. Θα πρέπει επίσης να διερευνηθούν περισσότερες μέθοδοι για την επίλυση των επιπτώσεων της υποψύξης και του διαχωρισμού φάσης, συμπεριλαμβανομένης της βαθύτερης κατανόησης των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, των χαρακτηριστικών μεταφοράς και της σταθερότητας της μικροενθυλάκωσης και των πρόσθετων νανοσωματιδίων. Είναι επίσης σημαντική η αναζήτηση περισσότερων προσθετικών υλικών που επιτρέπουν την εύκολη προσαρμογή των θερμοκρασιών τήξης και την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης απόδοσης των νανοπροσθετικών και των συνθετικών υλικών. Για την αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας, ο κύκλος προσρόφησης είναι ο μόνος τύπος που έχει μελετηθεί ευρέως. Η

αμμωνία/νερό είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ζεύγος υλικών. Λόγω της τοξικότητας και υψηλής πίεσης στα συστήματα που βασίζονται στην αμμωνία, θα πρέπει να διερευνηθούν άλλα εναλλακτικά ζεύγη απορροφητών και ψυκτικών μέσων.

2.2 Αριθμητικές μελέτες των συστημάτων CTES

Η χρήση εργαλείων αριθμητικής μοντελοποίησης πριν από την κατασκευή του πρωτοτύπου συστήματος, είναι ουσιαστικό μέρος του σχεδιασμού του συστήματος TES. Συνήθως, εκτιμώνται αρχικές παράμετροι, όπως η χωρητικότητα αποθήκευσης και οι συνθήκες λειτουργίας (κυρίως θερμοκρασίες και πιέσεις) της αποθήκευσης. Στη συνέχεια επιλέγονται τα υλικά αποθήκευσης και οι τύποι αποθήκευσης. Το φαινόμενο υποψύξης θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση που χρησιμοποιείται PCM ως υλικό αποθήκευσης. Τέλος, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών όπως η ελαστικότητα, η πλαστικότητα και η μετάβαση σε υαλώδη κατάσταση σε θερμοκρασίες κάτω του μηδενός χρειάζονται επίσης ιδιαίτερη προσοχή στα αριθμητικά μοντέλα για την καλύτερη κατανόηση του πλήρους συστήματος CTES.

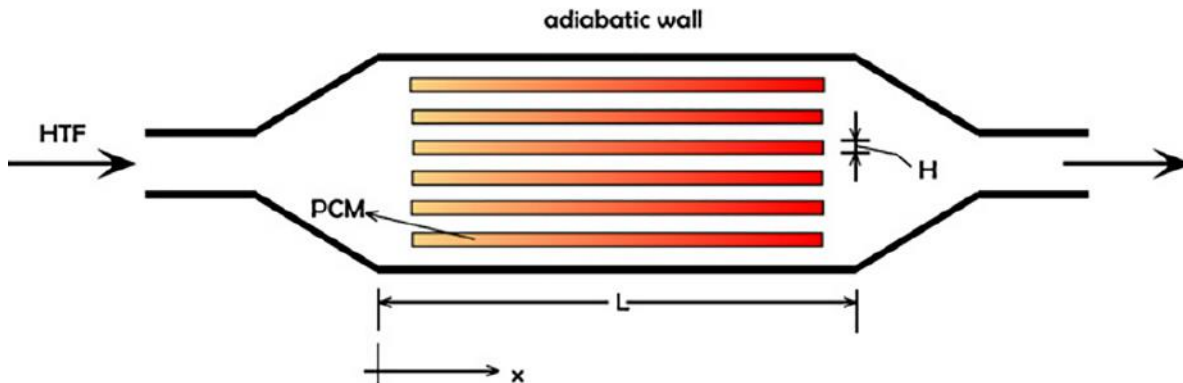
Όσον αφορά την υπάρχουσα βιβλιογραφία, όλες σχεδόν οι αριθμητικές μελέτες περιορίζονται σε απλές ορθογώνιες, κυλινδρικές ή σφαιρικές μορφές δοχείων αποθήκευσης ψύξης, ενώ οι υπολογιστικοί τομείς ήταν κυρίως 1-D, 2-D και 2-D αξονικοί συμμετρικοί, πράγμα που σημαίνει ότι οι γεωμετρίες των συσκευών αποθήκευσης απλοποιήθηκαν σκόπιμα για να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος και η πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Τα μαθηματικά μοντέλα CTES που θα αναφερθούν βασίζονται σε πρόσφατες έρευνες που έχουν δημοσιευθεί. Αυτά διαχωρίζονται με βάση τον σχεδιασμό της δεξαμενής αποθήκευσης, την υπολογιστική μέθοδο και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν, το εύρος της θερμοκρασίας και το υλικό της δεξαμενής. Οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται αυτές οι υπολογιστικοί μέθοδοι είναι:

- ◆ Συσκευασμένο κρεβάτι και θερμοκλίνη CTES
- ◆ Κέλυφος και σωλήνας CTES
- ◆ CTES σε σχήμα πλάκας
- ◆ Μικροενθυλακωμένο PCM
- ◆ CTES με βάση πολτούς
- ◆ Προσομοίωση κλίμακας υλικού

Στην παρούσα εργασία κρίνεται σκόπιμο να μην αναλυθούν όλες οι μέθοδοι, παρά μόνο η μέθοδος CTES σε σχήμα επίπεδης πλάκας, καθώς αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στην έρευνα υπό μελέτη (θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο).

CTES σε σχήμα πλάκας



Εικόνα 2.4: Αριθμητικές μελέτες CTES σε σχήμα πλάκας

Αυτός ο τύπος συστήματος CTES χρησιμοποιεί υλικά αποθήκευσης σε σχήμα επίπεδης πλάκας. Τα υλικά αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και τα HTF χωρίζονται από μεγάλες πλάκες ευθυγραμμισμένες παράλληλα στη μονάδα αποθήκευσης. Οι επίπεδες πλάκες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και τοποθετούνται σε δεξαμενή, συνήθως ορθογώνιας διατομής. Το HTF κυκλοφορεί μέσω του ελεύθερου χώρου μεταξύ των πλακών, επιτρέποντας την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των υλικών αποθήκευσης και του HTF. Οι διαστάσεις των πλακών (πάχος, ύψος και μήκος) και η απόσταση μεταξύ των πλακών καθορίζουν τις τελικές διαστάσεις της δεξαμενής αποθήκευσης, οι οποίες θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις εφαρμογής και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού. Ο Liu μελέτησε αριθμητικά και πειραματικά πλάκες PCM με διαστάσεις $0.26 \text{ m} \times 1.70 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$, ομαδοποιημένες μαζί με το ομοιόμορφο διάκενο $0,6 \text{ cm}$ μέσα στην δεξαμενή. Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε ήταν 1-D, όπου μόνο το μισό πάχος της πλάκας PCM και της διόδου HTF (το διάκενο μεταξύ των πλακών) μελετήθηκαν αριθμητικά κατά μήκος της κατεύθυνσης ροής αφού οι πλάκες ήταν δεσμευμένες παράλληλα μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, η μεταφορά θερμότητας στην πλάκα PCM κατά μήκος της αξονικής κατεύθυνσης, καθώς και η μεταβολή της θερμοκρασίας του HTF στην κανονική κατεύθυνση προς τη ροή αγνοήθηκαν. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη το ενεργειακό ισοζύγιο για το HTF κατά μήκος της κατεύθυνσης ροής μεταξύ των πλακών PCM και λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ HTF και PCM μέσω των τοιχωμάτων της πλάκας, μελετήθηκε αριθμητικά η διάρκεια φόρτισης ή εκφόρτισης της εφαρμογής και η ακρίβεια του μοντέλου επικυρώθηκε μέσω πειραματικών μελετών.

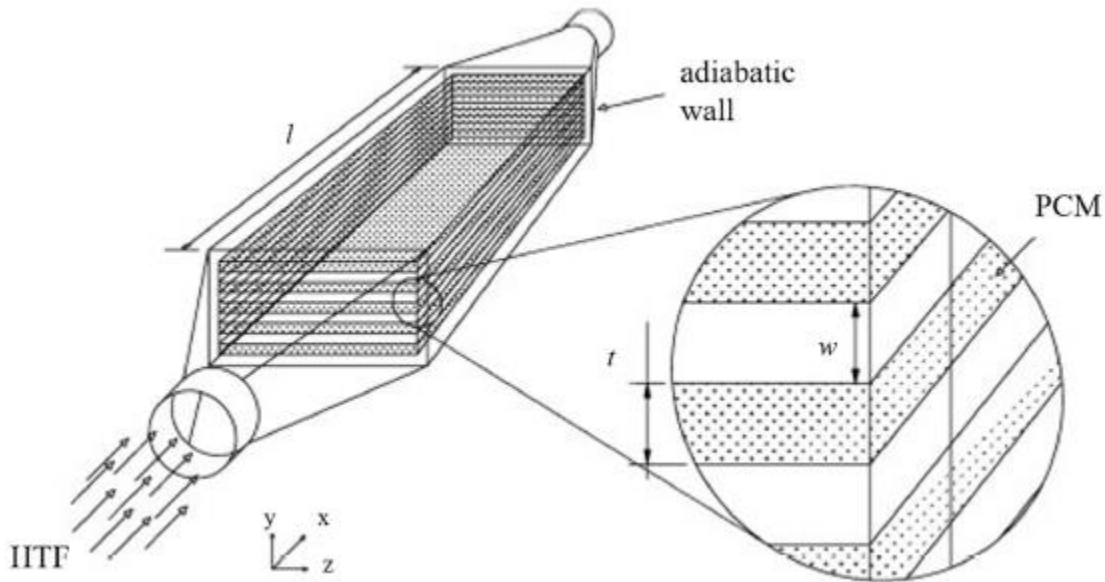
2.3 Πειραματικές μελέτες των συστημάτων CTES

Σύμφωνα με το που αποθηκεύονται τα υλικά CTES και πως μεταφέρεται η θερμότητα, τα συστήματα θερμικής ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πολλούς τύπους. Αν και τα περισσότερα από αυτά τα σχέδια έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές θερμοκρασίας κάτω του μηδενός, τα υπάρχοντα συστήματα CTES περιέχουν κυρίως τέσσερις τύπους: διάταξης συσκευασμένου κρεβατιού, διάταξης κελύφους και σωλήνα, διάταξης επίπεδης πλάκας, διάταξης με βάση τον πολτό.

Τα σχέδια αυτών των τύπων είναι ως επί το πλείστον παρόμοια με τα συστήματα TES που χρησιμοποιούνται σε υψηλότερα εύρη θερμοκρασίας, αλλά έχουν ληφθεί υπόψιν απαιτήσεις για εφαρμογές υπό το μηδέν, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου υγρασίας, της αλλαγής όγκου του υλικού αποθήκευσης θερμότητας και των δομών συγκράτησης, καθώς και επιλογή των υλικών.

Στην παρούσα εργασία κρίνεται σκόπιμο να μην αναλυθούν όλες οι πειραματικές μέθοδοι, παρά μόνο η αυτή για σχήμα επίπεδης πλάκας, καθώς αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στην έρευνα υπό μελέτη (θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο).

CTES σε σχήμα πλάκας



Εικόνα 2.4: Πειραματικές μελέτες CTES σε σχήμα πλάκας

Το σύστημα σε σχήμα πλάκας είναι παρόμοιο με τον πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας. Σε σύγκριση με το CTES διάταξης κελύφους και σωλήνα, το σύστημα CTES διάταξης πλάκας μπορεί να λειτουργήσει τόσο με υγρά όσο και με αέρια HTF, με μεγαλύτερη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας που εμφανίζει μικρή απώλεια πίεσης. Δεδομένου ότι η μονάδα TES

συναρμολογείται από έναν ορισμένο αριθμό ορθογώνιων πλακών, μπορεί να επιτευχθεί ευέλικτη λειτουργία με διαφορετικά PCM και θερμικά φορτία ρυθμίζοντας την απόσταση μεταξύ των πλακών και τοποθετώντας πολλές μονάδες CTES σε σχήμα πλάκας σε σειρά ή παράλληλα. Η δυνατότητα μαζικής παραγωγής των πλακών μπορεί να μειώσει το κόστος. Ωστόσο, πρέπει να δοθεί προσοχή στην αλλαγή όγκου των υλικών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ο Liu σχεδίασε ένα σύστημα CTES σε σχήμα πλάκας που περιέχει πολλές επίπεδες πλάκες παράλληλα τοποθετημένες σε στρώματα. Το HTF (αέρας) διέρχεται από τα κενά μεταξύ των πλακών για να φορτίσει ή να αποφορτίσει τα PCMs μέσα στις πλάκες. Για να γίνει διαχείριση της αλλαγής όγκου των υλικών κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, η μονάδα είναι κατασκευασμένη ώστε να είναι άκαμπτη και να μην παραμορφώνεται.

Ο Seltnes ανέπτυξε ένα σύστημα CTES διάταξης επίπεδης πλάκας-μαξιλαριού, που μπορεί να αντέξει υψηλότερη πίεση λειτουργίας του HTF σε συστήματα ψύξης διοξειδίου του άνθρακα. Το PCM γεμίζεται απευθείας στη μονάδα CTES. Στοιίβες από ανοξειδωτες πλάκες βυθίζονται στο PCM. Κάθε πλάκα περιέχει δύο λεπτά μεταλλικά φύλλα που συγκολλούνται και φουσκώνουν με σημείο για να δημιουργήσουν τα κανάλια ροής για το HTF με υψηλή πίεση λειτουργίας. Το μοτίβο κάθε πλάκας και η απόσταση μεταξύ των πλακών μπορούν να αλλάξουν για να γίνει η σχεδίαση ευέλικτη για διαφορετικά υλικών αλλαγής φάσης. Μια αντίστοιχη εγκατάσταση δοκιμών έχει κατασκευαστεί για τη δοκιμή των PCM με PCT που κυμαίνονται από -45 °C έως 0 °C.

3. Εναλλάκτες Θερμότητας

Στο παρόν κεφάλαιο αφού παρουσιαστούν συνοπτικά οι βασικοί νόμοι της θερμοδυναμική που διέπουν την λειτουργία των εναλλακτών θερμότητας, θα παρατεθούν τα είδη εναλλακτών που υπάρχουν και θα αναλυθεί διεξοδικά ο τύπος εναλλάκτη επίπεδων πλακών. Θα αναλυθεί ο τρόπος κατασκευής και λειτουργίας τους, καθώς και οι λόγοι για τους οποίους προτιμάται ο συγκεκριμένος τύπος εναλλάκτη.

3.1 Εισαγωγή

ΓΕΝΙΚΑ

Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές σχεδιασμένες να μεταφέρουν θερμότητα μεταξύ δύο ή περισσότερων ρευστών, δηλαδή μεταξύ υγρών, ατμών ή αερίων διαφορετικών θερμοκρασιών. Ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου εναλλάκτη θερμότητας, η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας μπορεί να είναι αέριο σε αέριο, υγρό σε αέριο ή υγρό σε υγρό και να πραγματοποιείται μέσω ενός στερεού διαχωριστή, ο οποίος εμποδίζει την ανάμειξη των ρευστών. Άλλα χαρακτηριστικά σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένων των δομικών υλικών και εξαρτημάτων, των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας και των διαμορφώσεων ροής του εργαζόμενου και του ψυκτικού μέσου συμβάλουν στην ταξινόμηση και την κατηγοριοποίηση των τύπων των διαθέσιμων εναλλακτών θερμότητας. Οι εναλλάκτες θερμότητας έχουν ποικίλες εφαρμογές, οι δύο βασικές είναι εφαρμογές ψύξης και εφαρμογές θέρμανσης κτιρίων. Τα δύο υγρά μπορεί να διαχωρίζονται μεταξύ τους είτε από ένα συμπαγές τοίχωμα (για να αποφευχθεί η ανάμειξή τους) ή μπορεί να έρχονται σε άμεση επαφή. Χρησιμοποιούνται ευρέως στη θέρμανση χώρων, την ψύξη, τον κλιματισμό, τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, τα χημικά εργοστάσια, τα πετροχημικά εργοστάσια, τα διυλιστήρια πετρελαίου, την επεξεργασία φυσικού αερίου και την επεξεργασία λυμάτων.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΟΥΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ανεξάρτητα από τον τύπο και τον σχεδιασμό, όλοι οι εναλλάκτες θερμότητας λειτουργούν σύμφωνα με τις ίδιες θεμελιώδεις αρχές, δηλαδή τον μηδενικό, τον πρώτο και τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής που περιγράφουν και ερμηνεύουν τη μεταφορά ή την ανταλλαγή θερμότητας από το ένα ρευστό στο άλλο.

Ο μηδενικός νόμος της θερμοδυναμικής λέει ότι τα θερμοδυναμικά συστήματα που βρίσκονται σε θερμική ισορροπία έχουν την ίδια θερμοκρασία. Επιπλέον, εάν δύο συστήματα βρίσκονται το καθένα σε θερμική ισορροπία με ένα τρίτο σύστημα, τότε τα δύο προηγούμενα συστήματα πρέπει να βρίσκονται σε ισορροπία μεταξύ τους. Έτσι, και τα τρία συστήματα έχουν την ίδια θερμοκρασία. Αυτός ο νόμος εκφράζει τη θερμική ισορροπία ως

μεταβατική ιδιότητα αλλά ορίζει επίσης την έννοια της θερμοκρασίας και την καθιερώνει ως μετρήσιμη ιδιότητα των θερμοδυναμικών συστημάτων.

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής βασίζεται στον μηδενικό νόμο, ορίζοντας την εσωτερική ενέργεια (U) ως μια άλλη ιδιότητα των θερμοδυναμικών συστημάτων και υποδεικνύοντας την επίδραση της θερμότητας και του έργου στην εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος και την ενέργεια του περιβάλλοντος. Επιπλέον, ο πρώτος νόμος δηλώνει ότι η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί από το μηδέν ή να καταστραφεί, μόνο να μεταφερθεί σε άλλο θερμοδυναμικό σύστημα ή να μετατραπεί σε άλλη μορφή.

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής ορίζει την εντροπία (S) ως πρόσθετη ιδιότητα των θερμοδυναμικών συστημάτων και περιγράφει τη φυσική και αμετάβλητη τάση οποιουδήποτε κλειστού θερμοδυναμικού συστήματος να αυξάνει την εντροπία με την πάροδο του χρόνου. Χρησιμοποιείται επίσης για να εξηγήσει την τάση δύο απομονωμένων συστημάτων να κινούνται προς τη θερμοδυναμική ισορροπία. Όπως ορίζεται από τον δεύτερο νόμο, η εντροπία μπορεί μόνο να αυξηθεί και ποτέ να μειωθεί. Συνεπώς, κάθε σύστημα, καθώς αυξάνεται η εντροπία του, κινείται πάντα προς την υψηλότερη τιμή που μπορεί να επιτευχθεί για το εν λόγω σύστημα. Σε αυτή την τιμή, το σύστημα φτάνει σε μια κατάσταση ισορροπίας όπου η εντροπία δεν μπορεί πλέον να αυξηθεί (όπως είναι στο μέγιστο) ούτε να μειωθεί όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επομένως, οι μόνες δυνατές αλλαγές συστήματος είναι αυτές στις οποίες η εντροπία δεν υφίσταται αλλαγή (δηλαδή, ο λόγος της θερμότητας που προστίθεται ή αφαιρείται στο σύστημα προς την απόλυτη θερμοκρασία παραμένει σταθερός).

Συνολικά, αυτές οι αρχές υπαγορεύουν τους μηχανισμούς και τις λειτουργίες που διέπουν έναν εναλλάκτη θερμότητας. Αναλυτικότερα, ο μηδενικός νόμος καθιερώνει τη θερμοκρασία ως μετρήσιμη ιδιότητα των θερμοδυναμικών συστημάτων, ο πρώτος νόμος περιγράφει την αντίστροφη σχέση μεταξύ της εσωτερικής ενέργειας ενός συστήματος (και των μετατρεπόμενων μορφών του) και του περιβάλλοντός του και ο δεύτερος νόμος εκφράζει την τάση δύο αλληλεπιδρώντων συστημάτων να κινούνται προς τη θερμική ισορροπία. Έτσι, οι εναλλάκτες θερμότητας λειτουργούν επιτρέποντας σε ένα ρευστό υψηλότερης θερμοκρασίας, το εργαζόμενο μέσο, να αλληλεπιδράσει με ένα ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας, το ψυκτικό μέσο, το οποίο επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας από το πρώτο στο δεύτερο ρευστό για να κινηθεί προς την ισορροπία. Αυτή η μεταφορά θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα μείωση της θερμοκρασίας για το εργαζόμενο μέσο και αύξηση της θερμοκρασίας για το ψυκτικό μέσο. Ανάλογα με το αν η εφαρμογή στοχεύει στη θέρμανση ή την ψύξη ενός ρευστού, αυτή η διαδικασία (και οι συσκευές που το χρησιμοποιούν) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποθηκευτεί θερμότητα σε ένα σύστημα ή να απορροφηθεί θερμότητα από αυτό.

3.2 Χαρακτηριστικά σχεδίασης εναλλάκτη θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όλοι οι εναλλάκτες θερμότητας λειτουργούν με τις ίδιες βασικές αρχές. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές μπορούν να ταξινομηθούν και να κατηγοριοποιηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους με βάση τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά με τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν οι εναλλάκτες θερμότητας είναι:

- ◆ Διαμόρφωση ροής
- ◆ Μέθοδος κατασκευής
- ◆ Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας

3.2.1 Διαμόρφωση ροής

Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες των εναλλακτών θερμότητας ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής των ρευστών τους.

Στους εναλλάκτες θερμότητας παράλληλης ροής, τα δύο ρευστά εισέρχονται στον εναλλάκτη στο ίδιο άκρο και ταξιδεύουν παράλληλα το ένα με το άλλο μέχρι την έξοδο του εναλλάκτη. Αν και αυτή η διαμόρφωση συνήθως οδηγεί σε χαμηλότερες αποδόσεις από μια διάταξη αντίθετης ροής, επιτρέπει επίσης τη μεγαλύτερη θερμική ομοιομορφία στα τοιχώματα του εναλλάκτη θερμότητας.

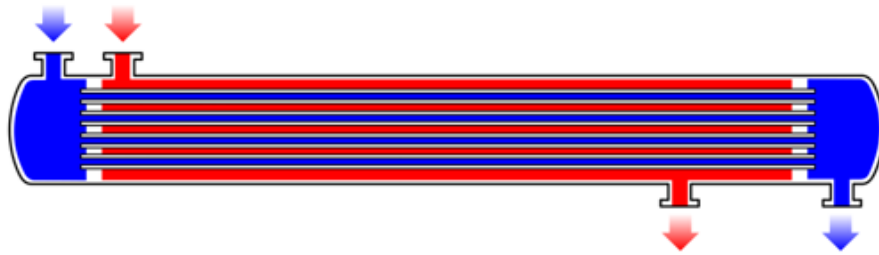
Στους εναλλάκτες θερμότητας αντίθετης ροής τα υγρά εισέρχονται στον εναλλάκτη από αντίθετα άκρα και είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε τα ρευστά να κινούνται αντιπαράλληλα (δηλαδή παράλληλα αλλά σε αντίθετες κατευθύνσεις) μεταξύ τους εντός του εναλλάκτη θερμότητας. Ο σχεδιασμός αντίθετου ρεύματος είναι ο πιο αποτελεσματικός, καθώς μπορεί να μεταφέρει την περισσότερη θερμότητα από το εργαζόμενο μέσο ανά μονάδα μάζας λόγω του ότι η μέση διαφορά θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε σημείο του εναλλάκτη είναι μεγαλύτερη.

Σε έναν εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας ροής, τα ρευστά κινούνται κάθετα το ένα στο άλλο. Η απόδοση ενός εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιεί αυτή τη διαμόρφωση ροής εμπίπτει μεταξύ της απόδοσης ενός εναλλάκτη αντίθετου ρεύματος και ενός εναλλάκτη θερμότητας παράλληλης ροής.

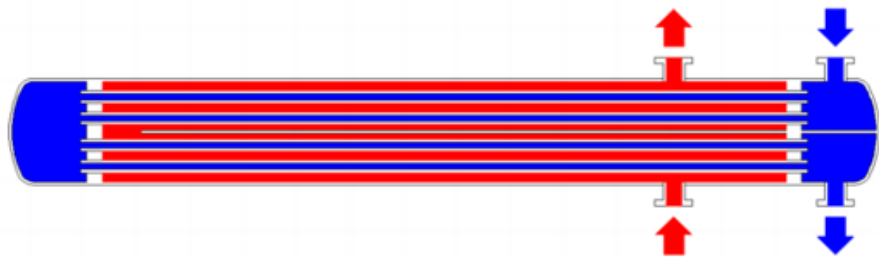
Οι εναλλάκτες θερμότητας υβριδικής ροής παρουσιάζουν συνδυασμό των χαρακτηριστικών των προαναφερθέντων διαμορφώσεων ροής. Τα συγκεκριμένα μοντέλα εναλλακτών θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιούν πολλαπλές διελεύσεις και κατευθύνσεις ροής μέσα σε έναν μόνο εναλλάκτη θερμότητας. Αυτοί οι τύποι εναλλάκτη χρησιμοποιούνται συνήθως για την αντιμετώπιση των περιορισμών μιας εφαρμογής, όπως ο χώρος, το κόστος προϋπολογισμού ή οι απαιτήσεις θερμοκρασίας και πίεσης.

Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απόδοση, οι εναλλάκτες θερμότητας έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μεγιστοποιούν την επιφάνεια του τοιχώματος μεταξύ των δύο ρευστών, ενώ ελαχιστοποιούν την αντίσταση στη ροή του ρευστού μέσω του εναλλάκτη. Η

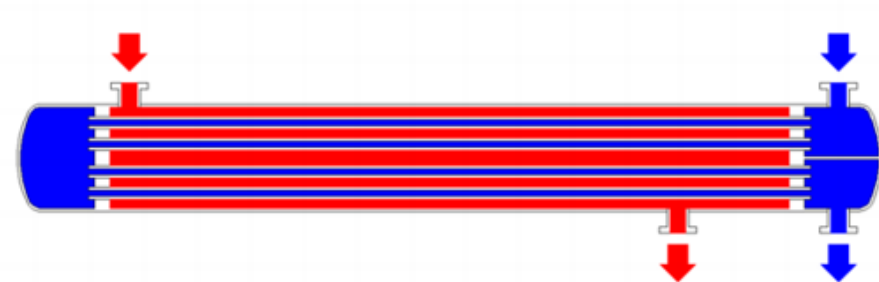
απόδοση του εναλλάκτη μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την προσθήκη πτερυγίων ή αυλακώσεων σε μία ή και στις δύο κατευθύνσεις.



Εικόνα 3.1: Εναλλάκτης ομορροής



Εικόνα 3.2: Εναλλάκτης αντιρροής



Εικόνα 3.3: Εναλλάκτης κάθετης ροής

3.2.2 Μέθοδος κατασκευής

- ◆ Εναλλάκτες θερμότητας ανάκτησης και εναλλάκτες θερμότητας αναγέννησης
- ◆ Άμεσης και έμμεσης επαφής των ρευστών
- ◆ Στατική έναντι δυναμικής
- ◆ Τύποι εξαρτημάτων και υλικών που χρησιμοποιούνται

3.2.2.1 Εναλλάκτες θερμότητας ανάκτησης και εναλλάκτες θερμότητας αναγέννησης

Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορούν να ταξινομηθούν σε εναλλάκτες θερμότητας ανάκτησης και σε εναλλάκτες θερμότητας αναγέννησης. Η διαφορά μεταξύ των συστημάτων εναλλάκτη θερμότητας ανάκτησης και αναγέννησης είναι ότι στους εναλλάκτες θερμότητας ανάκτησης (ή αλλιώς ανακτητές), τα ρευστά ρέουν ταυτόχρονα μέσω του δικού τους καναλιού το καθένα εντός του εναλλάκτη θερμότητας. Από την άλλη πλευρά, οι αναγεννητικοί εναλλάκτες θερμότητας (ή αλλιώς χωρητικοί εναλλάκτες θερμότητας ή αναγεννητές), επιτρέπουν την εναλλάξ ροή του θερμότερου και του ψυχρότερου ρευστού μέσω του ίδιου καναλιού. Τόσο οι ανακτητές όσο και οι αναγεννητές μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω σε διαφορετικές κατηγορίες εναλλάκτη, όπως άμεσοι ή έμμεσοι και στατικοί ή δυναμικοί, αντίστοιχα. Από τους δύο τύπους που αναφέρονται, οι εναλλάκτες θερμότητας ανάκτησης χρησιμοποιούνται συχνότερα σε όλη τη βιομηχανία.

3.2.2.2 Άμεσης και έμμεσης επαφής των ρευστών

Οι εναλλάκτες θερμότητας ανάκτησης χρησιμοποιούν διεργασίες μεταφοράς είτε άμεσης επαφής είτε έμμεσης επαφής για την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευστών. Στους εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής, τα ρευστά δεν διαχωρίζονται και η θερμότητα μεταφέρεται από το ένα ρευστό στο άλλο μέσω άμεσης επαφής. Αντίθετα, στους εναλλάκτες θερμότητας έμμεσης επαφής τα ρευστά δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και αυτό επιτυγχάνεται με θερμικά αγώγιμα εξαρτήματα, όπως σωλήνες ή πλάκες, καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας. Τα εξαρτήματα λαμβάνουν πρώτα θερμότητα από το θερμότερο ρευστό καθώς ρέει μέσω του εναλλάκτη θερμότητας και στη συνέχεια μεταφέρουν τη θερμότητα στο ψυχρότερο ρευστό καθώς ρέει.

3.2.2.3 Στατικοί και δυναμικοί εναλλάκτες θερμότητας

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι εναλλακτών θερμότητας αναγέννησης, οι στατικοί εναλλάκτες θερμότητας και δυναμικοί εναλλάκτες θερμότητας. Στους στατικούς αναγεννητές (γνωστοί και ως αναγεννητές σταθερής κλίνης), το υλικό και τα εξαρτήματα του εναλλάκτη θερμότητας παραμένουν ακίνητα καθώς τα ρευστά ρέουν μέσω της συσκευής, ενώ στους δυναμικούς αναγεννητές το υλικό και τα εξαρτήματα κινούνται σε όλη τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας.

3.2.2.4 Εξαρτήματα και υλικά εναλλάκτη θερμότητας

Υπάρχουν διάφοροι τύποι εξαρτημάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εναλλάκτες θερμότητας, καθώς και ένα ευρύ φάσμα υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους. Τα εξαρτήματα και τα υλικά που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από τον τύπο του εναλλάκτη θερμότητας και την προβλεπόμενη εφαρμογή του. Μερικά από τα πιο κοινά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν κελύφη, σωλήνες, σπειροειδείς σωλήνες (πηνία), πλάκες, πτερύγια και αδιαβατικούς τροχούς. Ενώ τα μέταλλα είναι κατάλληλα υλικά και χρησιμοποιούνται τακτικά για την κατασκευή ενός εναλλάκτη θερμότητας λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητάς τους, άλλα υλικά, όπως γραφίτης, κεραμικά, συνθετικά υλικά ή πλαστικά, μπορεί να προσφέρουν περισσότερα πλεονεκτήματα ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής μεταφοράς θερμότητας.

3.2.3 Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας

Υπάρχουν δύο τύποι μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται από εναλλάκτες θερμότητας, μονοφασική ή διφασική μεταφορά θερμότητας. Στους μονοφασικούς εναλλάκτες θερμότητας τα υγρά δεν υφίστανται καμία αλλαγή φάσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας, πράγμα που σημαίνει ότι τόσο τα θερμότερα όσο και τα ψυχρότερα ρευστά παραμένουν στην ίδια κατάσταση ύλης στην οποία εισήλθαν στον εναλλάκτη θερμότητας. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας από νερό σε νερό, το θερμότερο νερό χάνει θερμότητα η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στο ψυχρότερο νερό και δεν μετατρέπεται σε ατμό ή πάγο.

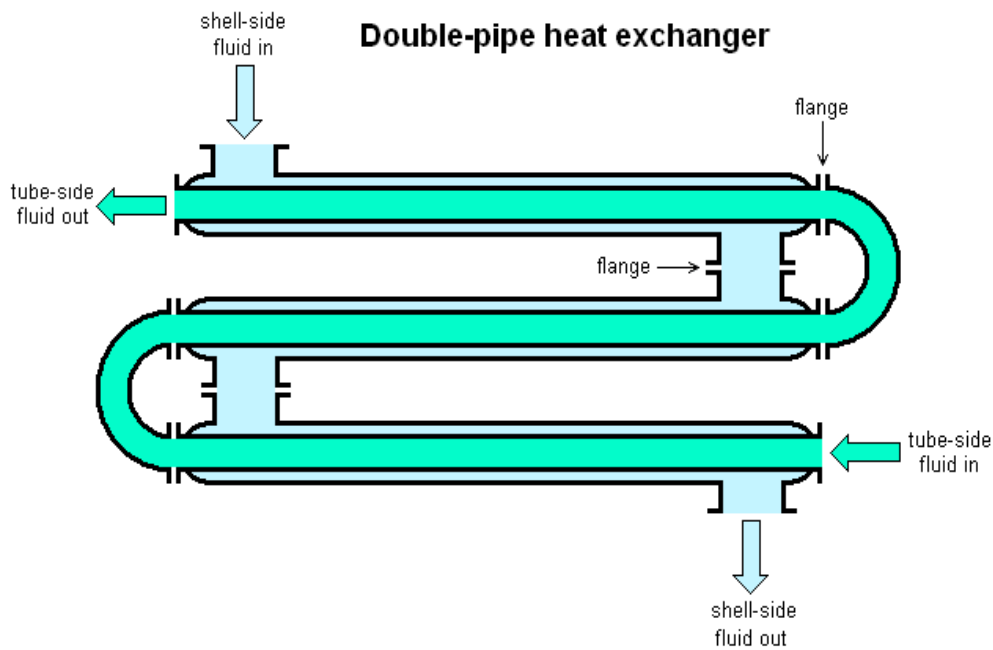
Στους εναλλάκτες θερμότητας δύο φάσεων τα ρευστά υφίστανται μια αλλαγή φάσης κατά τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας. Η αλλαγή φάσης μπορεί να συμβεί σε ένα ή και στα δύο ρευστά που εμπλέκονται με αποτέλεσμα την αλλαγή από υγρό σε αέριο ή αέριο σε υγρό. Συνήθως, οι συσκευές που χρησιμοποιούν μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας δύο φάσεων απαιτούν πιο σύνθετες σχεδιαστικές εκτιμήσεις από αυτές που χρησιμοποιούν μονοφασικό μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας. Μερικοί από τους διαθέσιμους τύπους διφασικών εναλλάκτη θερμότητας περιλαμβάνουν λέβητες, συμπυκνωτές και εξατμιστές.

3.3 Τύποι εναλλακτών

Παρόλο που όλοι οι εναλλάκτες θερμότητας εκτελούν την ίδια λειτουργία, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι ανάλογα με την χρήση την οποία θέλουμε να επιτελούν. Υπάρχουν 4 βασικοί τύποι εναλλακτών θερμότητας.

3.3.1 Εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα (Double Tube Heat Exchangers)

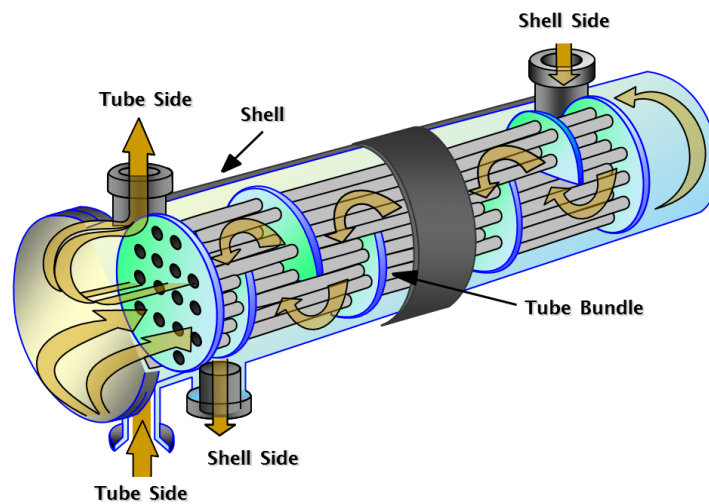
Οι εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα χρησιμοποιούν τη διάταξη σωλήνα μέσα σε δομή σωλήνα. Η γεωμετρία αυτού του εναλλάκτη είναι της μορφής δύο σωλήνων όπου ο ένας είναι τοποθετημένος μέσα στον άλλο. Ο τρόπος λειτουργίας της διάταξης αυτής είναι να ρέει το πρώτο ρευστό μέσω του εσωτερικού σωλήνα ενώ το δεύτερο ρευστό ρέει γύρω από το πρώτο ρευστό στον εξωτερικό σωλήνα. Αυτός ο τύπος εναλλάκτη θερμότητας είναι γνωστός καθώς είναι ο πιο βασικός και προσιτός σε σχέση με τους υπόλοιπους. Το μέγεθός του το καθιστά ιδανικό για στενούς και μικρούς χώρους, επιτρέποντας επιπλέον ευελιξία στη διάταξη κατά την διαδικασία κατασκευής.



Εικόνα 3.4: Εναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνα

3.3.2 Εναλλάκτες θερμότητας κελύφους και σωλήνων (Shell and Tube Heat Exchangers)

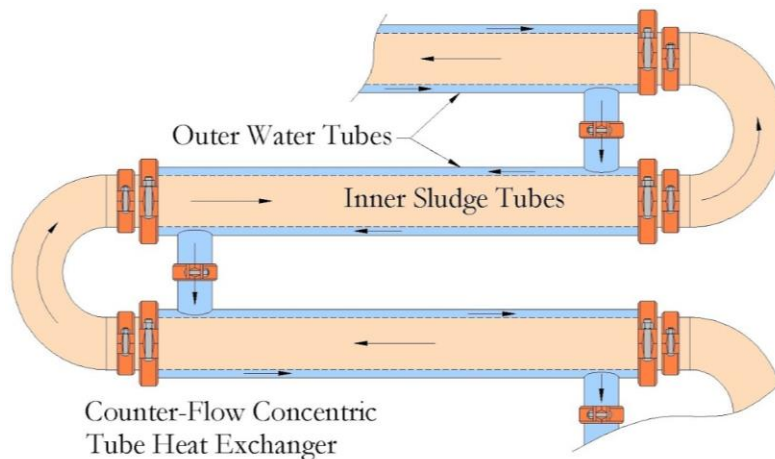
Από όλους τους τύπους εναλλάκτη θερμότητας, οι εναλλάκτες θερμότητας κελύφους και σωλήνων είναι οι πιο ευέλικτοι. Ένας εναλλάκτης θερμότητας κελύφους και σωλήνα έχει σχεδιαστεί με έναν αριθμό σωλήνων τοποθετημένων μέσα σε ένα κυλινδρικό κέλυφος. Ο σχεδιασμός αυτού του τύπου εναλλάκτη θερμότητας επιτρέπει ένα ευρύ φάσμα πιέσεων και θερμοκρασιών. Αν και είναι μικρότερος σε μέγεθος σε σύγκριση με ορισμένους από τους άλλους τύπους εναλλακτών, ένας εναλλάκτης θερμότητας κελύφους και σωλήνα έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να σπάσει αποσυναρμολογηθεί εύκολα, καθιστώντας έτσι τον καθαρισμό και την επισκευή του ευκολότερες διαδικασίες.



Εικόνα 3.5: Εναλλάκτης θερμότητας κελύφους και σωλήνων

3.3.3 Εναλλάκτες θερμότητας σωλήνα μέσα σε σωλήνα (Tube in Tube Heat Exchangers)

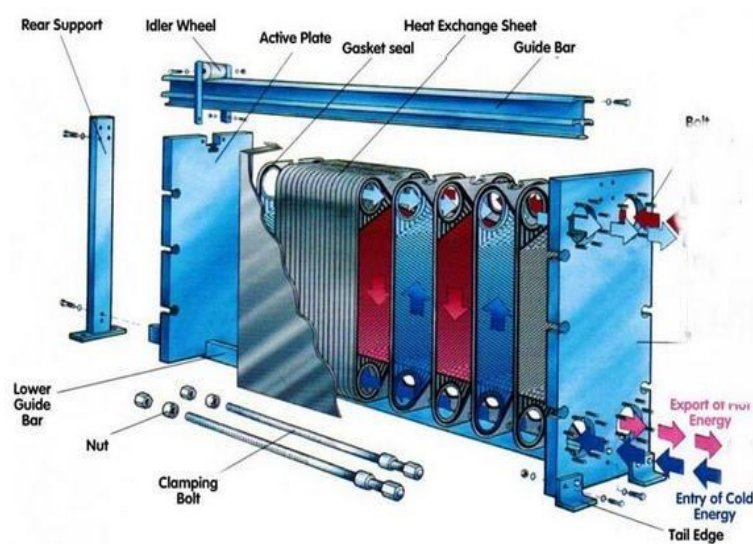
Παρόμοια με τους άλλους τύπους εναλλάκτη θερμότητας, ένας εναλλάκτης θερμότητας σωλήνα μέσα σε σωλήνα αποτελείται από δύο σωλήνες, έναν για κάθε ρευστό. Η διαφοροποίηση αυτής της διάταξης είναι ότι οι σωλήνες τυλίγονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα εξωτερικό και εσωτερικό σχέδιο. Η εφαρμογή για σχεδιασμό σωλήνα σε σωλήνα μπορεί να γίνει αρκετά δημιουργική και έχει πολλές προοπτικές. Δεδομένου ότι οι σωλήνες τυλίγονται μεταξύ τους, τα περισσότερα σχέδια για αυτόν τον τύπο εναλλάκτη είναι συμπαγή. Οι εφαρμογές για έναν εναλλάκτη θερμότητας σωλήνα σε σωλήνα χρησιμοποιούν υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις. Συνεπώς ένας εναλλάκτης θερμότητας σωλήνα σε σωλήνα τείνει να έχει μεγαλύτερη απόδοση.



Εικόνα 3.6: Εναλλάκτης θερμότητας σωλήνα μέσα σε σωλήνα

3.3.4 Εναλλάκτες θερμότητας επίπεδων πλακών (Flat Plate Heat Exchangers)

Ενώ όλοι οι τύποι εναλλάκτη θερμότητας που συζητήθηκαν μέχρι τώρα έχουν παρόμοιο σχεδιασμό, ο πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας είναι η εξαίρεση. Οι μεταλλικές επίπεδες πλάκες που απαρτίζουν την διάταξη χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών, του ψυκτικού μέσου και του εργαζόμενου μέσου. Η πλάκα είναι ένα μεταλλικό κέλυφος, με χώρους μέσα σε κάθε πλάκα που λειτουργούν ως διάδρομοι για τη διέλευση υγρών. Με έναν πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας, υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής των πλακών με τα δύο υγρά, επομένως επιτυγχάνονται καλύτεροι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με όλους τους άλλους τύπους. Αν και οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας μπορεί να είναι πιο ακριβοί, η απόδοση που επιτυγχάνεται από το σχεδιασμό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα.

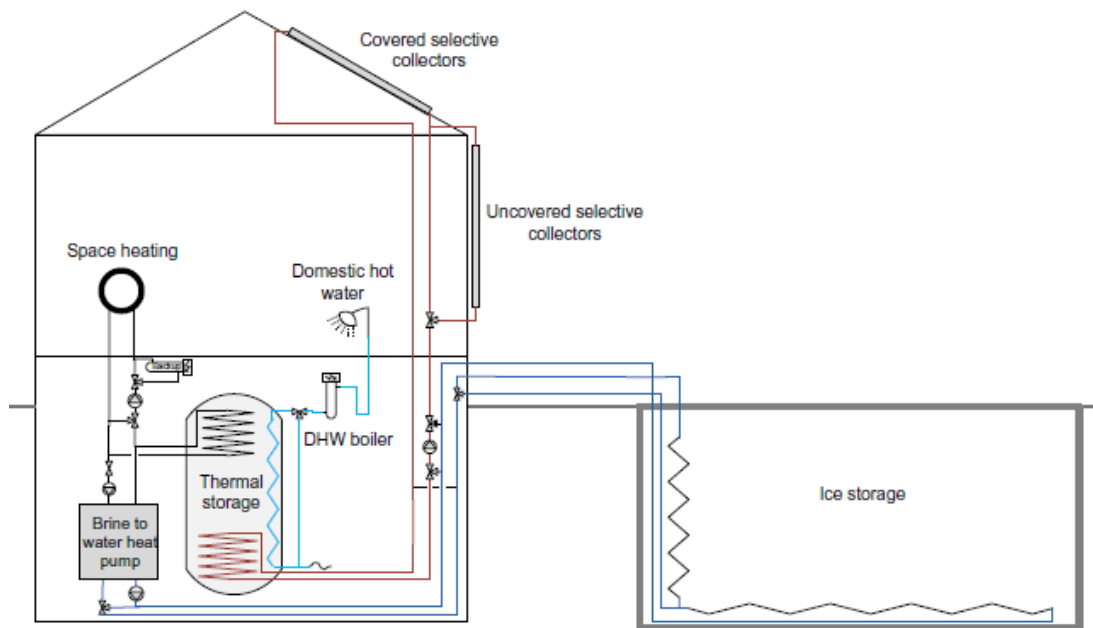


Εικόνα 3.7: Εναλλάκτης θερμότητας επίπεδων πλακών

Κοιτάζοντας τα κύρια μέρη του εναλλάκτη θερμότητας επίπεδων πλακών, έχουμε τις ακραίες πλάκες στο μπροστινό και το πίσω κάλυμμα, οι οποίες είναι συνήθως κατασκευασμένες από μαλακό χάλυβα. Είναι πολύ δυνατές, έτσι ώστε να μπορούν να συγκρατήσουν μαζί όλα τα εξαρτήματα που απαρτίζουν τον εναλλάκτη. Ένα άλλο τεμάχιο του παραπάνω εναλλάκτη είναι τα παξιμάδια, τα οποία στερεώνονται και σφίγγουν πάνω στις βίδες σύσφιξης. Τα μπουλόνια σύσφιξης τοποθετούνται σε αυλακώσεις στο πλάι της μονάδας και διατρέχουν τον εναλλάκτη θερμότητας σε όλο το μήκος του. Τα μπουλόνια σφίγγουν πάνω σε αυτές τις ράβδους και συμπιέζουν όλες τις πλάκες και τις φλάντζες μεταξύ τους σχηματίζοντας μια στεγανή κατασκευή. Μεταξύ των ακραίων πλακών είναι τοποθετημένα οι τσιμούχες και οι πλάκες μεταφοράς θερμότητας. Οι πλάκες προκειμένου να συντηρηθούν μπορούν να συρθούν εκτός της κατασκευής μόλις αφαιρεθεί η ακραία πλάκα. Ανάμεσα στις πλάκες έχουμε τσιμούχες οι οποίες είναι κατασκευασμένες από καουτσούκ. Οι τσιμούχες εφάπτονται πάνω στην επιφάνεια των πλακών και ο σκοπός τους είναι να εξασφαλίσουν σφικτή συναρμογή και να αποτρέψουν διαρροές των ρευστών που κινούνται εντός του εναλλάκτη. Οι τσιμούχες επίσης επιτρέπουν ή παρεμποδίζουν τη ροή του εκάστοτε υγρού μέσα στα κενά μεταξύ δύο εναλλάξ πλακών. Οι φλάντζες μπορούν να περιστραφούν για να μπλοκάρουν είτε τις οπές της δεξιάς είτε της αριστερής πλευράς, δηλαδή τα κανάλια κυκλοφορίας των δύο ρευστών του εναλλάκτη. Αυτή η διάταξη έχει ως αποτέλεσμα τα δύο ρευστά να ρέουν εναλλάξ σε κάθε κενό μεταξύ των πλακών. Οι οπές ευθυγραμμίζονται για να σχηματίσουν ένα κανάλι σαν σωλήνα μέσα από το οποίο ρέουν τα υγρά. Τα δύο υγρά δεν συναντώνται και δεν αναμειγνύονται ποτέ καθώς τα χωρίζει πάντα το τοίχωμα της μεταλλικής πλάκας. Η θερμότητα απλά μεταφέρεται μέσω αυτού. Επομένως η θερμοκρασία του θερμότερου ρευστού θα μειωθεί και του ψυχρότερου ρευστού θα αυξηθεί.

4. Μελέτη μαθηματικού μοντέλου συστήματος αποθήκευσης πάγου με την χρήση ηλιακών συλλεκτών

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει βιβλιογραφική ανασκόπηση της εργασίας των D. Carbonell, D. Philippen, M.Y. Haller, E. Frank που διεξήχθη το 2015 και έχει τίτλο: <<Modeling of an ice storage based on a de-icing concept for solar heating applications>>. Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας θα αποτελέσει η μελέτη των βασικών ερευνητικών αποτελεσμάτων του υπό εξέταση αντικειμένου καθώς και η περαιτέρω εμβάθυνση και διερεύνηση του συστήματος αποθήκευσης πάγου που αυτό παρουσιάζει και μελετάει. Παρακάτω παρατίθεται η εικόνα της διάταξης του συστήματος αποθήκευσης πάγου με ηλιακούς συλλέκτες και αντλία θερμότητας.



Εικόνα 4.1: Διάταξη του συστήματος αποθήκευσης πάγου με ηλιακούς συλλέκτες και αντλία θερμότητας

4.1 Εισαγωγή

Μελετάται μία διάταξη αποθήκευσης πάγου που χρησιμοποιεί εναλλάκτες θερμότητας, αντλία θερμότητας και ηλιακούς συλλέκτες για να καλύψει τις ανάγκες ενός κτιρίου σε θέρμανση και ζεστό νερό. Τα συστήματα τα οποία συνδυάζουν αποθήκευση πάγου και χρήση φωτοβολταϊκών ονομάζονται αλλιώς solar-ice systems και έχουν αρχίσει να γίνονται πλέον πιο δημοφιλή. Στα solar-ice systems η δεξαμενή αποθήκευσης πάγου/νερού αποτελεί την πηγή θερμότητας για την αντλία θερμότητας και τροφοδοτείται από το πλέγμα των ηλιακών πάνελ, τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης και κατευθείαν ως πηγή θερμότητας για την αντλία.

Τα συστήματα αποθήκευσης πάγου για παραγωγή θερμότητας προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα:

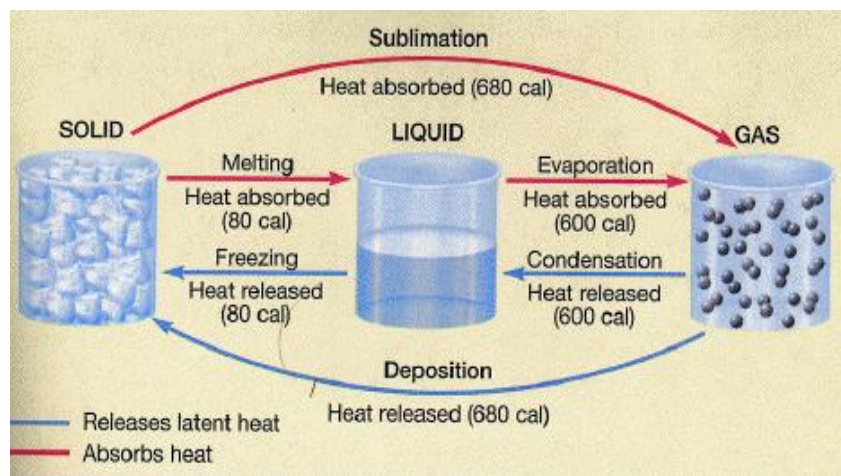
- ◆ Η εγκατάσταση της δεξαμενής μπορεί να γίνει στο υπόγειο του εκάστοτε κτιρίου για να είναι εύκολα προσβάσιμη
- ◆ Λύση για την περίπτωση που δεν υπάρχει πολύς διαθέσιμος χώρος
- ◆ Έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα αποθήκευσης, σε αντίθεση με τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας
- ◆ Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αποθήκες για την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά

Όσον αφορά την διαδικασία σχηματισμού του πάγου, στην συγκεκριμένη διάταξη αξιοποιείται η μέθοδος σχηματισμού πάγου πάνω στον εναλλάκτη (ice on heat exchanger ή ice-on-hx). Αυτή η μέθοδος είναι η πιο διαδεδομένη για τα συστήματα solar-ice.

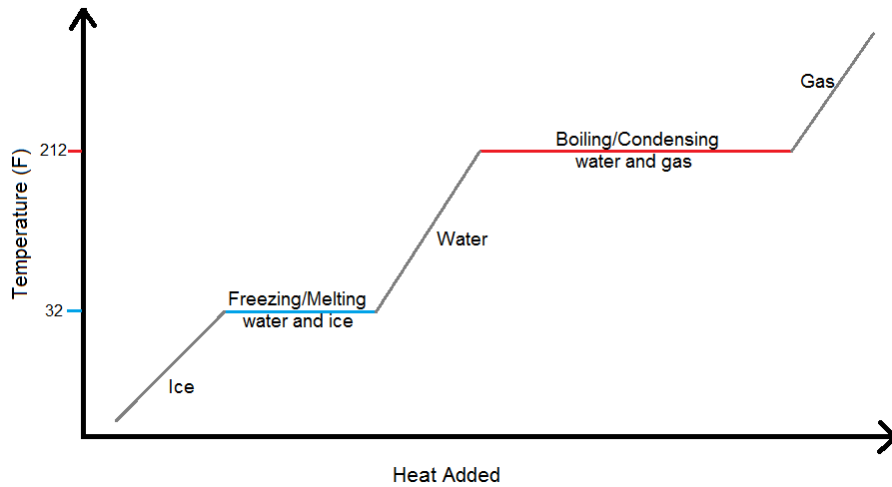
Σύμφωνα με την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου και παρατηρώντας την εικόνα 2, είναι αντιληπτό ότι το σύστημα CTES το οποίο θα μελετηθεί τελικά διαμορφώνεται σύμφωνα με τα εξής χαρακτηριστικά:

4.1.1 Υλικό

Όπως ειπώθηκε και στην παράγραφο 2.1 το πιο συνηθισμένο υλικό αλλαγής φάσης (Phase Change Material: PCA) είναι το νερό, το οποίο ανήκει στην κατηγορία υλικών αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Αυτό είναι και το στοιχείο το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε για απομάστευση της λανθάνουσας θερμότητας που εκλύει κατά την μετατροπή του από πάγο σε νερό (δηλαδή κατά την διεργασία της τήξης: από στερεή μορφή σε υγρή μορφή) και αντίστροφα. Αυτή η χημική διεργασία είναι αντιστρεπτή.



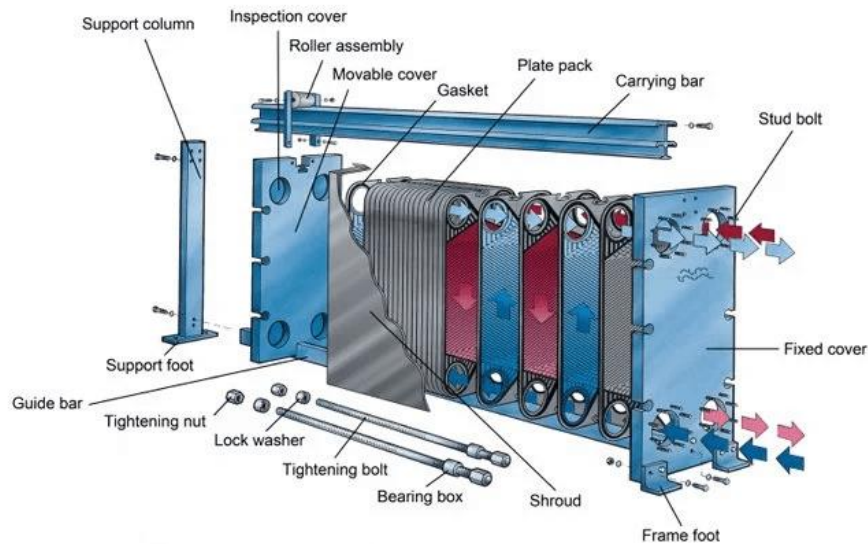
Εικόνα 4.2: Αλλαγή φάσης νερού-πάγου



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα θερμότητας-θερμοκρασίας αλλαγής φάσης νερού

4.1.2 Αριθμητική και πειραματική μελέτη

Το σύστημα αποθήκευσης πάγου της μελέτης βασίζεται σε εναλλάκτες επίπεδης πλάκας. Επομένως στην τρέχουσα μελέτη οι εναλλάκτες υπάγονται στην κατηγορία plate-shaped της αριθμητικής-πειραματικής μεθόδου που παρουσιάστηκε στις παραγράφους 2.2 και 2.3. Πιο συγκεκριμένα οι εναλλάκτες της διάταξης αποτελούνται από ασάλι, είναι σε μορφή επίπεδης πλάκας και βυθίζονται μέσα στην δεξαμενή, ενώ διαθέτουν δυνατότητα απόψυξης (immersed steel flat plate heat exchangers with de-icing concept). Η λειτουργία της απόψυξης επιτελείται με την συμβολή των ηλιακών συλλεκτών.



Εικόνα 4.4: Εναλλάκτης θερμότητας επίπεδων πλακών

Όταν η αντλία λαμβάνει θερμότητα από την δεξαμενή πάγου με θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (άλμης) υπό του μηδενός (το αλατούχο νερό-άλμη αποκτά στερεή μορφή σε θερμοκρασία $-21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$), σχηματίζεται πάγος στην επιφάνεια των εναλλακτών θερμότητας που είναι τοποθετημένοι μέσα στην δεξαμενή. Τα στρώματα πάγου αρχίζουν να λιώνουν όταν η αντλία θερμότητας σταματήσει να λειτουργεί πριν μειωθεί πολύ η θερμοκρασία της άλμης και φτάσει στο σημείο ψύξης της. Αυτή η μετατροπή του πάγου σε νερό εκκλύει λανθάνουσα θερμότητα.

4.2 Μαθηματικό μοντέλο–Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Στην εργασία υπό μελέτη, περιγράφεται αναλυτικά το μαθηματικό μοντέλο συστήματος αποθήκευσης πάγου με εναλλάκτες θερμότητας που μπορούν να αποπαγωθούν. Το μοντέλο επικυρώνεται με πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα, με δεξαμενή αποθήκευσης πάγου όγκου 1 m^3 υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Το μοντέλο έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εργασίες προσομοίωσης όπου ολόκληρο το ηλιακό σύστημα πάγου έχει αξιολογηθεί με ετήσιες προσομοιώσεις.

Το μαθηματικό μοντέλο για το σύστημα αποθήκευσης πάγου βασίζεται στην λύση του νόμου διατήρησης της ενέργειας που εφαρμόζεται μεταξύ των «στρωμάτων» του εναλλάκτη: αλατούχο νερό/άλμη, ατσάλινη πλάκα, νερό:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla h = -\nabla \cdot \vec{q} \quad (4.1)$$

Όπου: h είναι η ειδική ενθαλπία, q είναι η ειδική θερμότητα σε $[\text{W}/\text{m}^3]$ t είναι ο χρόνος, \vec{v} είναι η ταχύτητα και ρ η πυκνότητα.

Παραβλέποντας τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, ο όρος $\nabla \cdot \vec{q}$ μπορεί να διαιρεθεί στην αγωγή θερμότητα μεταξύ των όγκων ελέγχου ρευστού $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$, τη θερμότητα που ανταλλάσσεται από το περιβάλλον μέσω των επιφανειών των τοίχων \dot{q}_{ext} , και της θερμότητας που παρέχεται από τους εναλλάκτες θερμότητας \dot{q}_{hx} . Επομένως η προηγούμενη εξίσωση γράφεται στη μορφή:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla h = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{q}_{ext} + \dot{q}_{hx} \quad (4.2)$$

Το μοντέλο αγνοεί τη μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή μεταξύ των όγκων ελέγχου επειδή δεν υπάρχει άμεση φόρτιση ή εκφόρτιση που θα οδηγούσε σε καθαρή ροή μάζας από τον έναν όγκο ελέγχου στον άλλον. Επομένως η δράση των δυνάμεων του σώματος είναι ο μόνος μηχανισμός ικανός να δημιουργήσει ρευστή κίνηση.

Με αυτές τις απλοποιήσεις και υποθέτοντας ένα μονοδιάστατη συμπεριφορά κατά το ύψος της δεξαμενής y , η παραπάνω εξίσωση γράφεται απλοποιημένα:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q}_{ext} + \dot{q}_{hx} \quad (4.3)$$

Με την θεώρηση ότι η στερεή φάση του υλικού (πάγος) παραμένει στην ίδια θερμοκρασία, η ενθαλπία ενός υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει της θερμοκρασίας προκύπτει:

$$h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT + f_i h_f \quad (4.4)$$

Όπου: h_f είναι η ειδική ενθαλπία σύντηξης του νερού σε [J/kg], T_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς και f_i το υγρό κλάσμα με τύπο: $f_i = 1 - M_{ice}/M$

Ο συνδυασμός των παραπάνω εξισώσεων δίνει την ακόλουθη μορφή της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{h_f}{V} \frac{\partial M_{ice}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q}_{ext} + \dot{q}_{hx} \quad (4.5)$$

$$\frac{h_f}{V} \frac{\partial M_{ice}}{\partial t} = \dot{q}_{ice,hx} - \dot{q}_{ice}^m = \dot{q}_{ice} \quad (4.6)$$

Όπου: V είναι ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης, \dot{q}_{ice} είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης που ορίζεται ως η διαφορά των όρων $\dot{q}_{ice,hx}$ (είναι η θερμότητα σχηματισμού πάγου πάνω στην επιφάνεια του εναλλάκτη) και \dot{q}_{ice}^m (είναι η θερμότητα του πάγου που έχει αναδυθεί στην επιφάνεια της δεξαμενής και αρχίζει να λιώνει). Η τελική μορφή της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας λαμβάνει τη μορφή:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q}_{ext} + \dot{q}_{hx} + \dot{q}_{ice,hx} - \dot{q}_{ice}^m \quad (4.7)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης εκφράζει την συσσωρευμένη αισθητή θερμότητα του υλικού. Ο δεύτερος όρος εκφράζει την θερμότητα αγωγιμότητας μεταξύ των όγκων ελέγχου. Το λ είναι η θερμική αγωγιμότητα του νερού και λαμβάνει την τιμή 10^{-5} . Οι υπόλοιποι όροι θα αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω.

4.2.1 Απώλειες προς το περιβάλλον

Ο τρίτος όρος της εξίσωσης (3.7) εκφράζει τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, δηλαδή το εργαστήριο θερμοκρασίας $T_{ext,j}=22^{\circ}\text{C}$ όπου γίνεται η διεξαγωγή της προσομοίωσης, μέσω της εξωτερικής επιφάνειας της δεξαμενής αποθήκευσης A_{ext} . Υπολογίζεται με την θεώρηση σταθερών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας U_{ext} για κάθε όγκο ελέγχου j . Στη συγκεκριμένη μελέτη γίνεται η παραδοχή ότι έχουμε τρεις όγκους ελέγχου: το στρώμα άλμης, την πλάκα του εναλλάκτη και το στρώμα νερού/πάγου.

$$\dot{Q}_{ext,j} = U_{ext,j}A_{ext,j}(T_j - T_{ext,j}) \quad (4.8)$$

4.2.2 Εναλλάκτης θερμότητας

Προκειμένου να προσομοιωθεί ο εναλλάκτης θερμότητας, θεωρείται ένας σταθερός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος της διαδρομής του ρευστού. Με αυτή την υπόθεση μπορεί να ληφθεί μια αναλυτική λύση της θερμοκρασίας του ρευστού του εναλλάκτη θερμότητας:

$$T_{f,o} = T_{sk} + (T_{f,i} - T_{sk})e^{\frac{-UA_{hx}}{m \cdot c_p}} \quad (4.9)$$

Όπου: A_{hx} είναι η υπό εξέταση περιοχή του εναλλάκτη θερμότητας, $m=150 \text{ kg/hr}$ είναι ο ρυθμός ροής μάζας της άλμης και του νερού, T_f είναι η θερμοκρασία του ρευστού (άλμη) του εναλλάκτη θερμότητας και οι δείκτες o , i και sk αναφέρονται στην έξοδο, είσοδο και καταβύθιση αντίστοιχα. Όταν σχηματίζεται πάγος, το T_{sk} ορίζεται ως η θερμοκρασία σχηματισμού πάγου $T_{fr}=0$. Όταν δεν υπάρχει πάγος, το T_{sk} ισούται με τη θερμοκρασία T_j . Ο παγκόσμιος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της άλμης και του νερού της δεξαμενής αποθήκευσης ορίζεται ως:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (4.10)$$

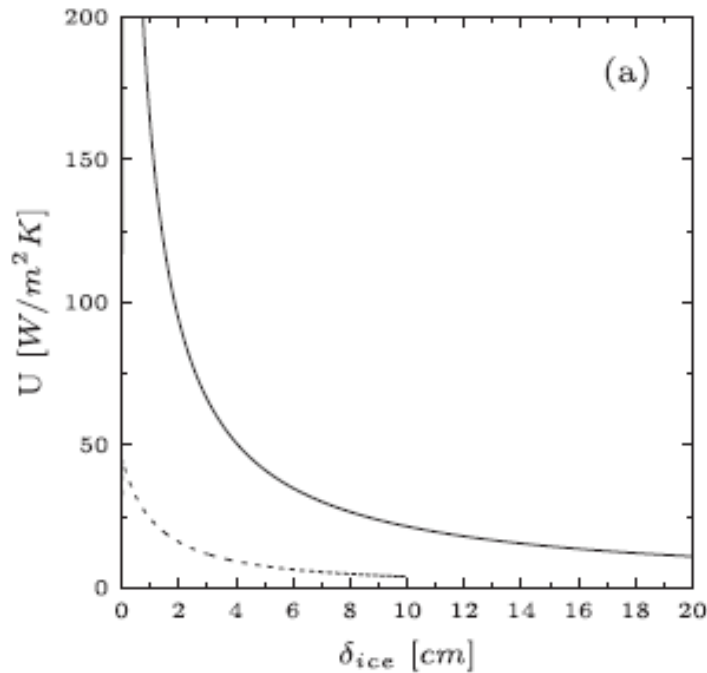
Όπου: α_i και α_o είναι ο εσωτερικός και εξωτερικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $\delta_p=0.9 \text{ mm}$ είναι το πάχος της πλάκας του εναλλάκτη και $\lambda_p=15.3 \text{ W/m K}$ είναι η θερμική αγωγιμότητα της πλάκας του εναλλάκτη.

Στην περίπτωση όπου δεν εμφανίζεται πάγος πάνω στην επιφάνεια του εναλλάκτη, για την εύρεση των τιμών του U εφαρμόζεται η εξίσωση (3.10). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας φυσικής συναγωγής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον αριθμό Nusselt, με τύπο:

$$Nu=C \cdot (Ra)^n \quad (4.11)$$

Όπου: Ra είναι ο αριθμός Rayleigh και C και n είναι εμπειρικοί συντελεστές που μπορούν να προσαρμοστούν για συγκεκριμένες συνθήκες. Κοινές τιμές των C και n για κατακόρυφη πλάκα είναι $C=0.59$ και $n=1/4$ για στρωτή ροή και $C=0.1$ και $n=1/3$ για τυρβώδη ροή. Στην συγκεκριμένη μελέτη ο συντελεστής C ορίζεται 0.55 για τον εναλλάκτη θερμότητας και ο συντελεστής n ορίζεται 0.28.

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι ο συντελεστής U έχει υπολογιστεί στην εργασία υπό μελέτη για την **περίπτωση όπου έχουμε πάγο** και οι τιμές του παρατίθενται σε διάγραμμα συναρτήσεως του πάχους του πάγου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του εναλλάκτη. Αυτές οι τιμές θα αξιοποιηθούν εν τέλει. Το διάγραμμα είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 4.5: Συντελεστής U συναρτήσεως του πάχους δ_{ice} του στρώματος πάγου

Μόλις γίνει γνωστή η θερμοκρασία εξόδου από τον εναλλάκτη θερμότητας, μπορεί να υπολογιστεί η θερμότητα που μεταφέρεται προς τη δεξαμενή αποθήκευσης:

$$\dot{Q}_{hx} = -\dot{m}c_p(T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (4.12)$$

4.2.3 Στερεοποίηση και τήξη του πάγου στην επιφάνεια του εναλλάκτη

Για χρονικό βήμα $\Delta t=60 \text{ sec}$, η θερμότητα στερεοποίησης $\dot{q}_{ice,hx}$ πάνω στον εναλλάκτη υπολογίζεται:

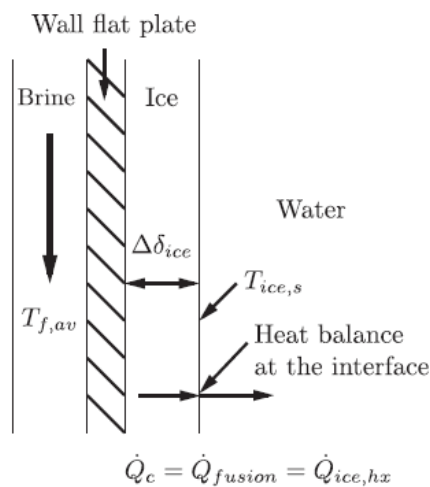
$$\dot{Q}_{ice,hx} = \frac{h_f \rho_{ice} \Delta \delta_{ice} A_{hx}}{\Delta t} \quad (4.13)$$

Όπου: $h_f=5 \text{ }^\circ\text{C}$ και $\Delta \delta_{ice}$ η απόσταση όπου διανύει η στερεή φάση για χρονικό βήμα Δt .

Το μαθηματικό μοντέλο για τη στερεοποίηση βασίζεται στην προσέγγιση σταθερής κατάστασης που παρουσιάζεται σε μελέτη των Baehr και Stephan (2010). Αυτή η υπόθεση συνεπάγεται ότι η θερμοχωρητικότητα στο στερεό στρώμα του πάγου αγνοείται. Περαιτέρω θεωρείται ότι η διεπαφή μεταξύ του πάγου και του νερού της δεξαμενής αποθήκευσης βρίσκεται σε θερμοκρασία ψύξης. Επομένως, όταν σχηματίζεται πάγος, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια του πάγου προς το νερό της δεξαμενής δεν χρειάζεται. Όταν το στρώμα του πάγου μεγαλώνει στην εξωτερική επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας, η θερμότητα αγωγής Q_c στη διεπαφή μεταξύ του πάγου και του νερού της δεξαμενής ισούται με τη θερμότητα στερεοποίησης $Q_{ice,hx}$:

$$\Delta \delta_{ice} = \frac{\dot{Q}_c \Delta t}{h_f \rho_{ice} A_p} \quad (4.14)$$

Η θερμότητα αγωγής στη διεπιφάνεια υπολογίζεται ως τη μεταφορά θερμότητας που παρέχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας με αρνητικό πρόσημο ($Q_c=-Q_{hx}$).



Εικόνα 4.5: Οι τρεις όγκοι ελέγχου (άλμη-πλάκα-νερό/πάγος) και το ισοζύγιο θερμότητας μεταξύ τους

Εάν προστεθεί θερμότητα όταν ο εναλλάκτης θερμότητας έχει πάγο στην επιφάνειά του, ένα στρώμα πάγου λιώνει στην επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τον εναλλάκτη και το $\Delta\delta_{ice}$ είναι αρνητικό. Όταν το πάχος $\Delta\delta_{ice}$ του πάγου που έλιωσε είναι πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή, το υπόλοιπο στρώμα πάγου θεωρείται ότι αποσπάται από την επιφάνεια του εναλλάκτη και επιπλέει μέχρι την επιφάνεια του νερού της δεξαμενής. Η τήξη στον εναλλάκτη θερμότητας είναι εφικτή μόνο με θερμότητα από τον ίδιο τον εναλλάκτη. Επομένως, το λιώσιμο του πάγου λόγω του φαινομένου της αγωγής θερμότητας στην επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας που έρχεται σε επαφή με το νερό της δεξαμενής δεν λαμβάνεται υπόψη. Αυτή η υπόθεση είναι δικαιολογημένη γιατί δεν αναμένεται να υπάρχουν πλάκες πάγου στην επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας για μεγάλα χρονικά διαστήματα λόγω του φαινομένου της αποπάγωσης (de-icing).

4.2.4 Λιώσιμο του πάγου που επιπλέει

Όταν τα στρώματα πάγου αποκολληθούν από τον εναλλάκτη θερμότητας, επιπλέουν μέχρι την επιφάνεια του νερού στο πάνω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης όπου μπορούν να λιώσουν. Ο υπολογισμός του λιωμένου πλωτού πάγου για κάθε όγκο ελέγχου j (τρεις όγκοι ελέγχου: άλμη, πλάκα εναλλάκτη, νερό/πάγος) απλοποιείται υποθέτοντας έναν συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας:

$$\dot{Q}_{ice,j}^m = \alpha_j^m A_{ex,j} (T_j - T_{fr}) \quad (4.15)$$

Όπου: T_{fr} είναι η θερμοκρασία πήξης και α_j^m είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των πλακών πάγου και του νερού.

Αυτός ο συντελεστής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.11) με συντελεστές $C=0.15$ και $n=1/3$. Η θερμοκρασία κατάψυξης του πάγου T_{fr} ισούται με $0\text{ }^\circ\text{C}$. Η επιφάνεια ανταλλαγής A_{ex} μεταξύ πάγου και νερού είναι κατά προσέγγιση:

$$A_{ex,j} = \frac{2M_{ice,j}}{\rho_{ice}\Delta\delta_{av}} \quad (4.16)$$

Όπου: Το μέσο πάχος των πλακών πάγου είναι $\Delta\delta_{av}=1\text{ cm}$.

4.2.5 Αριθμητικό μοντέλου

Η μερική διαφορική εξίσωση για την επίλυση του μοντέλου αποθήκευσης πάγου διακριτοποιείται μονοδιάστατα κατά μήκος της αξονικής συντεταγμένης y με ισοκατανεμημένους όγκους ελέγχου. Για την επίλυση του μαθηματικού χρησιμοποιούνται παράγωγοι χρόνου πρώτης τάξης και ένα σχήμα κεντρικής διαφοράς δεύτερης τάξης για τον όρο διάχυσης

$$\rho c_p \frac{T_j - T_j^0}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\Delta y^2} (T_{j+1} + T_{j-1} - 2T_j) + \frac{U_{ext,j} A_{ext,j}}{V} (T_j - T_{ext,j}) + \dot{q}_{ice,j} + \dot{q}_{hx,j} \quad (4.17)$$

Όπου: T^0 αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία του προηγούμενου χρονικού βήματος για κάθε επανάληψη

5. Επίλυση μοντέλου σε περιβάλλον MATLAB & EXCEL

Αυτή η αλγεβρική εξίσωση μπορεί να γραφεί σε μορφή τριδιαγώνιου μητρώου(tridiagonal matrix algorithm-TDMA)για την επίλυσή της.

$$A_j T_j = A_{j-1} T_{j-1} + A_{j+1} T_{j+1} + B \quad (5.1)$$

Οι όροι q_{hx} και q_{ice} περιλαμβάνονται στον όρο B. Παρακάτω θα ληφθούν δύο περιπτώσεις, μία για την ύπαρξη πάγου στην επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας και μία για την μη ύπαρξη. Η εξίσωση (3.17) λαμβάνει τελικά την μορφή:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{T_j - T_j^0}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\Delta y^2} \cdot (T_j + T_{j-1} - 2 \cdot T_j) + \frac{U_{extj} \cdot A_{extj}}{V} \cdot (T_j - T_{extj}) - \frac{m \cdot C_p}{V} \cdot (T_{fo} - T_{fi}) + \frac{h_f \cdot \rho_{ice} \cdot \Delta \delta_{ice} \cdot A_{hx} - a^m \cdot A_{exj}}{V \cdot \Delta t} \cdot (T_j - T_{fr}) \quad (5.2)$$

Για την επίλυση και των δύο τριδιαγώνιων μητρώων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB. Συνθήκη στον κώδικα για την ύπαρξη ή μη πάγου είναι αν η θερμοκρασία της πλάκας είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη του 0. Ο κώδικας παρατίθεται στο παράρτημα.

5.1 Ύπαρξη πάγου στην επιφάνεια του εναλλάκτη

Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο (3.2.2), όταν σχηματίζεται πάγος, το T_{sk} ορίζεται ως η θερμοκρασία σχηματισμού πάγου $T_{fr}=0$. Η εξίσωση (4.2) μετατρέπεται στην μορφή τριδιαγώνιου μητρώου, δηλαδή στην μορφή της εξίσωσης (4.1), προκειμένου να λυθεί. Οι όροι με δείκτη j-1 αντιστοιχούν στην άλμη, με j στην πλάκα του εναλλάκτη και με j+1 στο νερό/πάγο.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\rho_{j-1} \cdot C_{p,j-1}}{\Delta t} + \frac{2 \cdot \lambda}{\Delta y^2} - \frac{U_{extj-1} \cdot A_{extj-1}}{V} + a^m_{j-1} \cdot A_{exj-1} & & -\frac{\lambda}{\Delta y^2} \\ & -\frac{\lambda}{\Delta y^2} & \\ & & \frac{\rho_j \cdot C_{p,j}}{\Delta t} + \frac{2 \cdot \lambda}{\Delta y^2} - \frac{U_{extj} \cdot A_{extj}}{V} + a^m_j \cdot A_{exj} \\ & & & -\frac{\lambda}{\Delta y^2} \end{bmatrix}$$

(η τελευταία στήλη του πίνακα για μεγαλύτερη ευκρίνεια παρατίθεται παρακάτω)

$$\left[\begin{array}{c} 0 \\ -\frac{\lambda}{\Delta y^2} \\ \frac{\rho_{j+1} \cdot C_{p,j+1}}{\Delta t} + \frac{2 \cdot \lambda}{\Delta y^2} - \frac{U_{ext,j+1} \cdot A_{ext,j+1}}{V} + a_{j+1}^m \cdot A_{ex,j+1} \end{array} \right]$$

(5.3)

$$T = \begin{bmatrix} T_{j-1} \\ T_j \\ T_{j+1} \end{bmatrix} \quad B = \left[\begin{array}{c} \frac{\rho_{j-1} \cdot C_{p,j-1} \cdot T_{j-1}^0}{\Delta t} - \frac{U_{ext,j-1} \cdot A_{ext,j-1} \cdot T_{ext,j-1}}{V} - \frac{m_{j-1} \cdot C_{p,j-1} \cdot T_{fi}}{V} \cdot \left(e^{-\frac{U \cdot A_{hx}}{m_{j-1} \cdot C_{p,j-1}}} \right) \\ \frac{\rho_j \cdot C_{p,j} \cdot (T_j)^0}{\Delta t} - \frac{U_{ext,j} \cdot A_{ext,j} \cdot T_{ext,j}}{V} \\ \frac{\rho_{j+1} \cdot C_{p,j+1} \cdot T_{j+1}^0}{\Delta t} - \frac{U_{ext,j+1} \cdot A_{ext,j+1} \cdot T_{ext,j+1}}{V} + \frac{m_{j+1} \cdot C_{p,j+1} \cdot T_{fi}}{V \cdot \Delta t} \cdot \left(e^{-\frac{U \cdot A_{hx}}{m_{j+1} \cdot C_{p,j+1}}} \right) \end{array} \right]$$

(5.4)

(5.5)

5.2 Μη ύπαρξη πάγου στην επιφάνεια του εναλλάκτη

Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο (3.2.2), όταν δεν υπάρχει πάγος, το T_{sk} ισούται με τη θερμοκρασία T_j . Η εξίσωση (4.2) μετατρέπεται στην μορφή τριδιαγώνιου μητρώου, δηλαδή στην μορφή της εξίσωσης (4.1), προκειμένου να λυθεί. Οι όροι με δείκτη $j-1$ αντιστοιχούν στην άλμη, με j στην πλάκα του εναλλάκτη και με $j+1$ στο νερό/πάγο.

$$A = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\rho_{j-1} \cdot C_{p,j-1}}{\Delta t} + \frac{2 \cdot \lambda}{\Delta y^2} - \frac{U_{ext,j-1} \cdot A_{ext,j-1}}{V} + \frac{m_{j-1} \cdot C_{p,j-1}}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{U \cdot A_{hx}}{m_{j-1} \cdot C_{p,j-1}}} \right) & & -\frac{\lambda}{\Delta y^2} \\ & -\frac{\lambda}{\Delta y^2} & \frac{\rho_j \cdot C_{p,j}}{\Delta t} + \frac{2 \cdot \lambda}{\Delta y^2} - \frac{U_{ext,j} \cdot A_{ext,j}}{V} + \frac{m_j \cdot C_{p,j}}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{U \cdot A_{hx}}{m_j \cdot C_{p,j}}} \right) \\ & 0 & -\frac{\lambda}{\Delta y^2} \end{array} \right]$$

(η τελευταία στήλη του πίνακα για μεγαλύτερη ευκρίνεια παρατίθεται παρακάτω)

$$\begin{aligned}
 & 0 \\
 & -\frac{\lambda}{\Delta y^2} \\
 & \left. \frac{\rho^{j+1} \cdot C_p^{j+1}}{\lambda t} + \frac{2 \cdot \lambda}{\Delta y^2} - \frac{U \cdot \text{ext}^{j+1} \cdot \lambda \cdot \text{ext}^{j+1}}{V} + \frac{m^{j+1} \cdot C_p^{j+1}}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{U \cdot \lambda_{hx}}{m^{j+1} \cdot C_p^{j+1}}} \right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

Τα μητρώα T και B παραμένουν ίδια με την περίπτωση που υπάρχει πάγος.

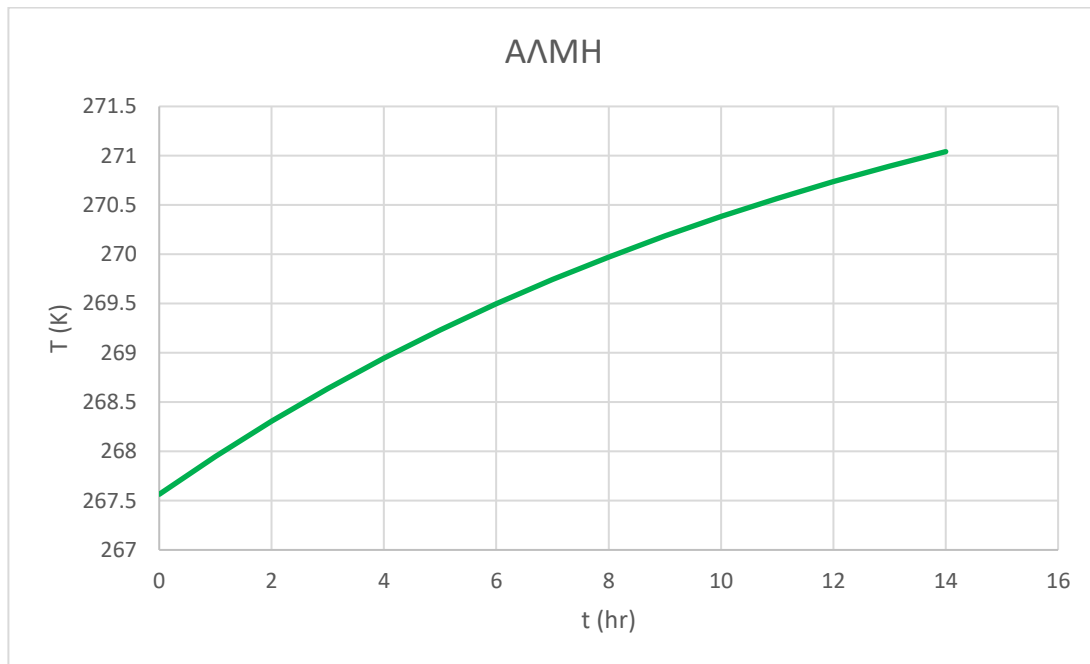
5.3 Αποτελέσματα κώδικα

Ο κώδικας παρατίθεται στο παράρτημα. Οι τιμές της θερμοκρασίας για κάθε όγκο ελέγχου (άλμη-πλάκα-νερό/πάγος) υπολογίζονται για χρονικό διάστημα 13.5 ωρών (όπως και στην εργασία υπό μελέτη), προσεγγιστικά 14 ωρών και χρονικό βήμα μίας ώρας. Η θερμοκρασία υπολογίζεται στο περιβάλλον MATLAB μέσω του κώδικα σε βαθμούς Κελσίου. Τα αποτελέσματα εισάγονται μετά στο περιβάλλον EXCEL και προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα σε θερμοκρασιακή κλίμακα βαθμών Κέλβιν:

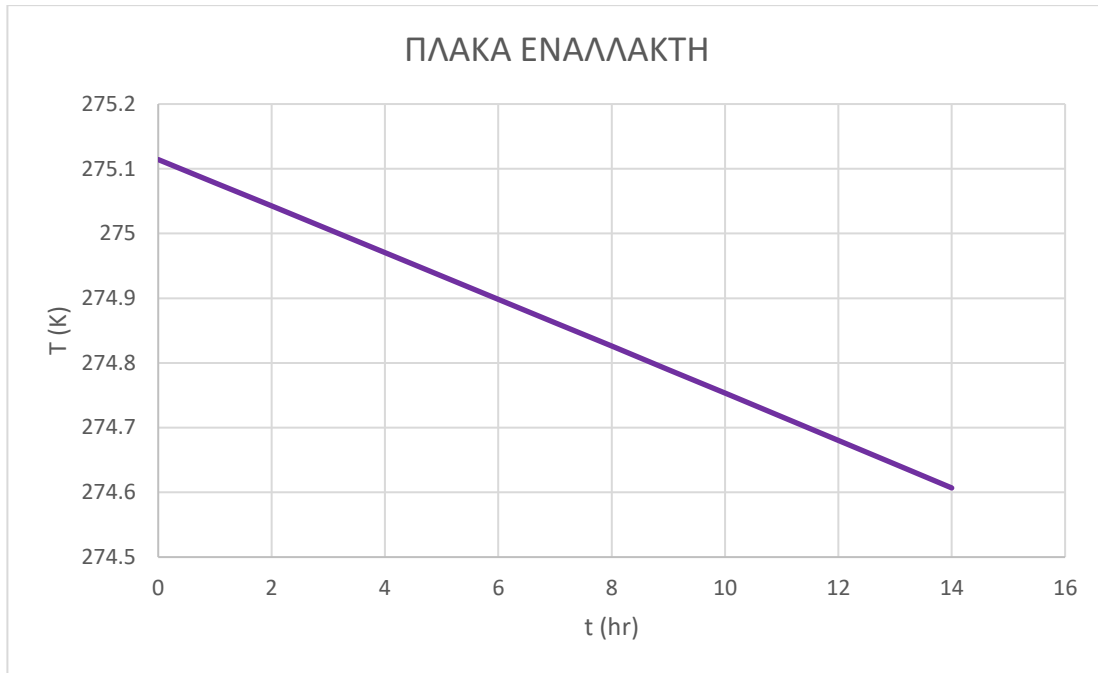
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (K)			
ΩΡΑ	ΑΛΜΗ	ΠΛΑΚΑ	ΝΕΡΟ/ΠΑΓΟΣ
0	267.564	275.114	274.213
1	267.948	275.078	273.714
2	268.305	275.043	273.450
3	268.637	275.007	273.309
4	268.945	274.971	273.234
5	269.231	274.935	273.194

6	269.497	274.898	273.173
7	269.743	274.862	273.162
8	269.972	274.826	273.156
9	270.185	274.790	273.153
10	270.383	274.753	273.151
11	270.566	274.717	273.150
12	270.736	274.680	273.150
13	270.895	274.644	273.149
14	271.042	274.607	273.149

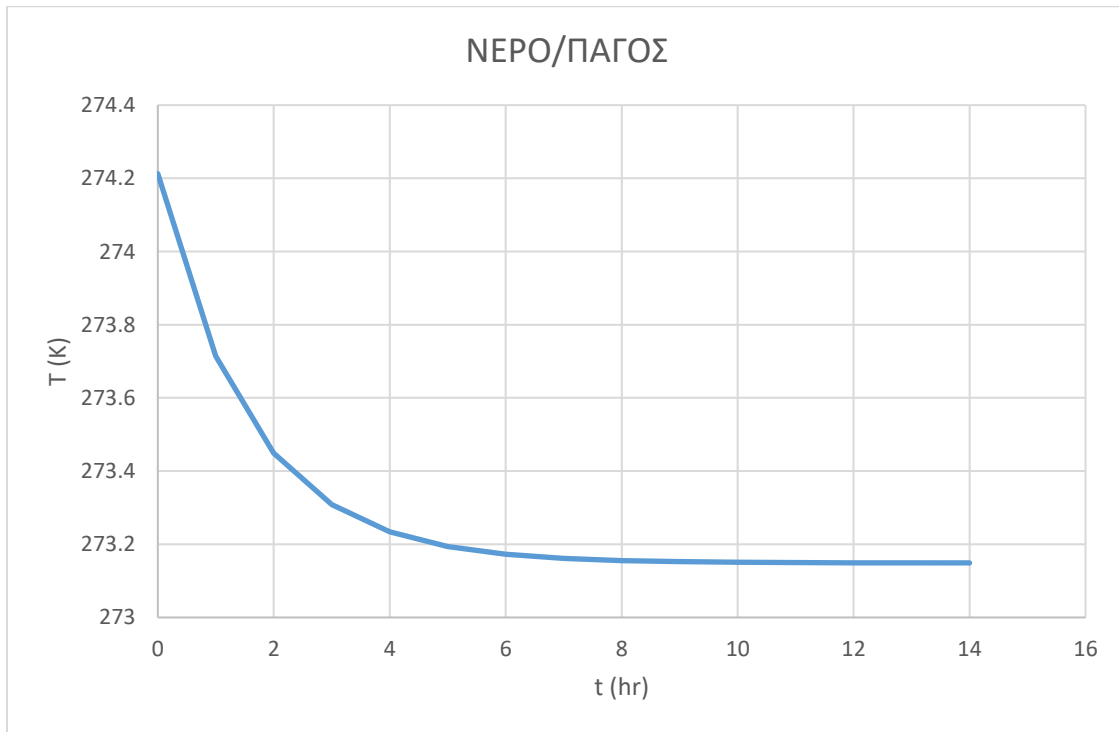
Πίνακας 5.1: Μεταβολές θερμοκρασιών όγκων ελέγχου για χρονικό διάστημα 14 ωρών



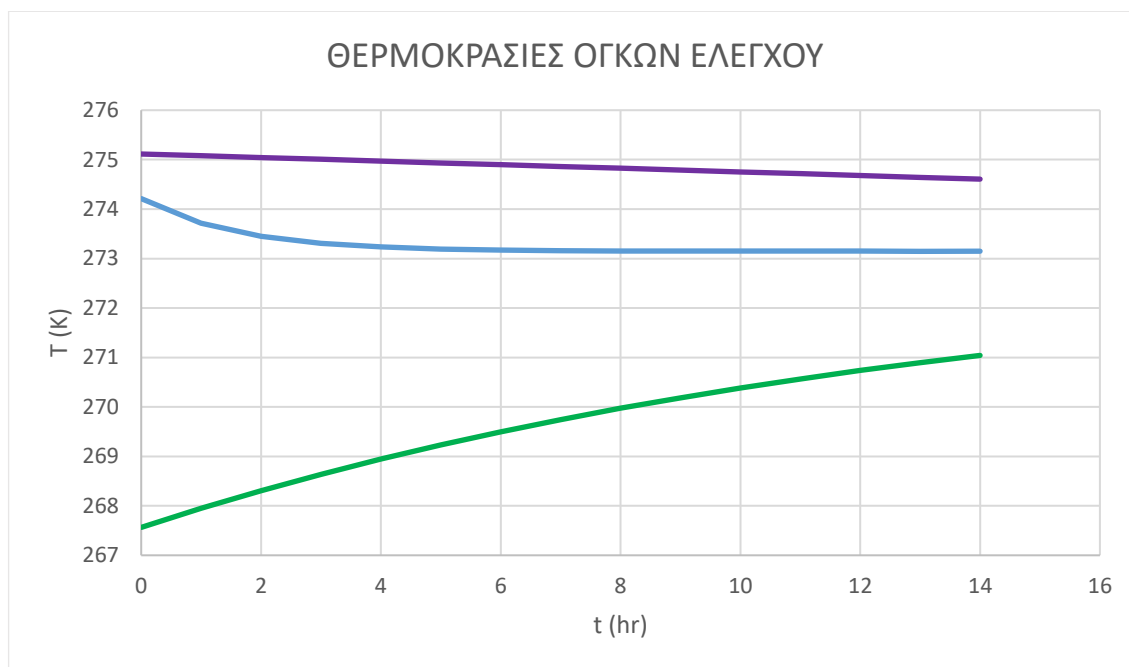
Εικόνα 5.1: Διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας της άλμης



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας της πλάκας του εναλλάκτη



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού/πάγου



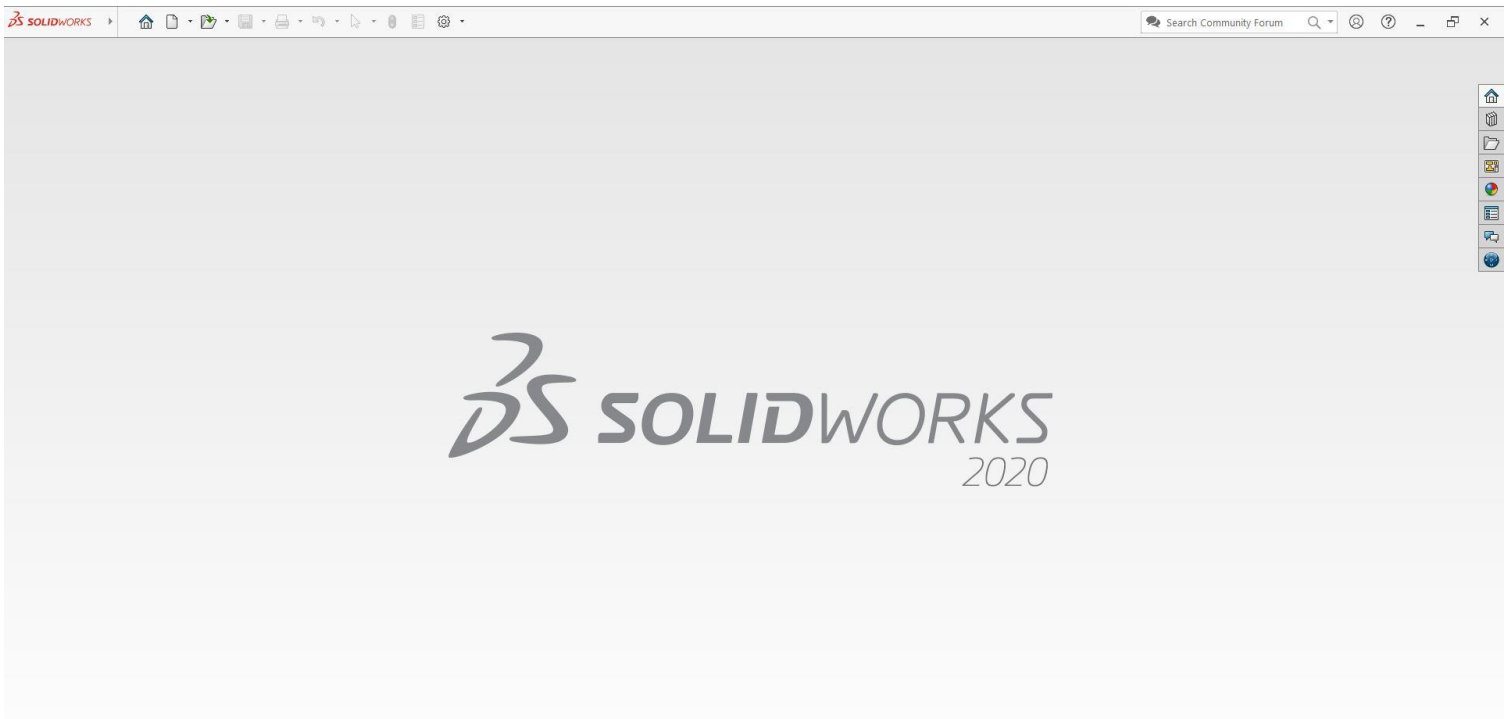
Εικόνα 5.4: Διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας των τριών όγκων ελέγχου

6. Σχεδίαση μοντέλου εναλλάκτη στο SOLIDWORKS®

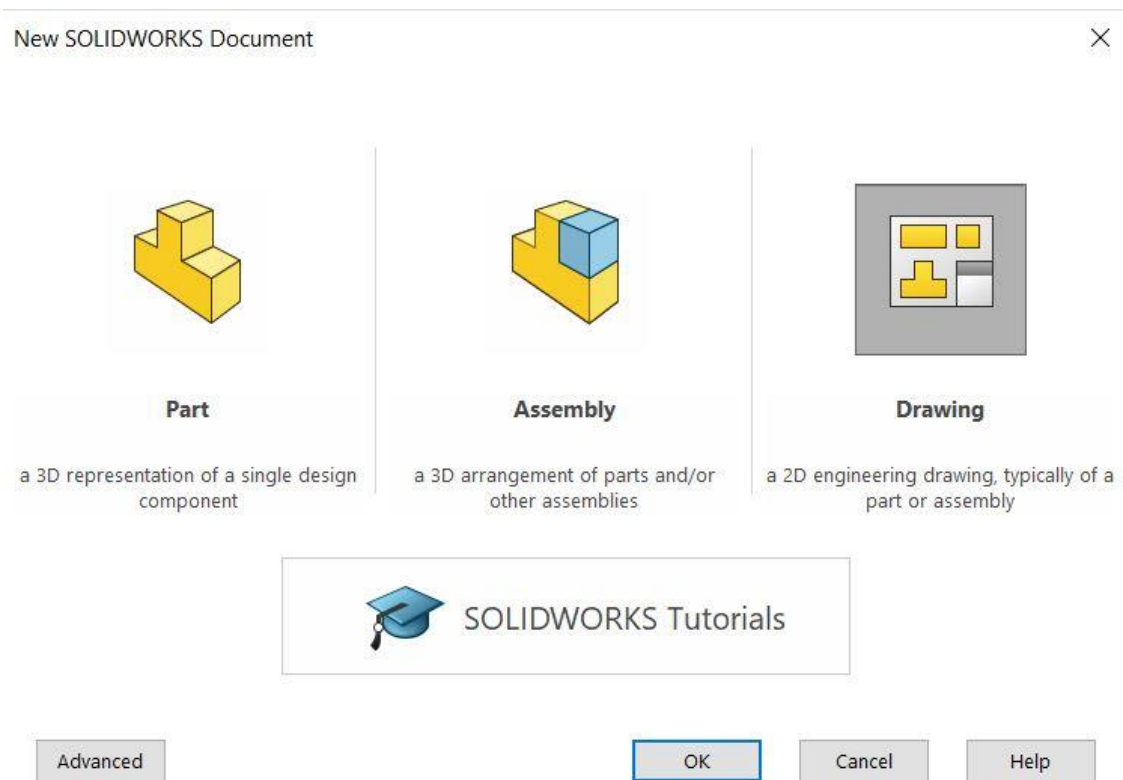
Το SOLIDWORKS® είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα σχεδιασμού και μοντελοποίησης μηχανολογικών εξαρτημάτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αξιοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του τρισδιάστατου μοντέλου εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται στην δημοσίευση υπό μελέτη (Κεφάλαιο 4, για το σχεδιασμό έγιναν απαραίτητες αυθαίρετες θεωρήσεις οι οποίες δεν παρουσιαζόντουσαν στην δημοσίευση και προέκυψαν από συνηθισμένα μοντέλα εναλλάκτη παρόμοιας λειτουργίας και μορφής). Αρχικά θα παρουσιασθούν οι βασικές λειτουργίες του SOLIDWORKS® που χρειάστηκαν για την ολοκλήρωση του μοντέλου. Στη συνέχεια θα παρατεθούν τα μηχανολογικά εξαρτήματα που απαρτίζουν το μοντέλο του εναλλάκτη (η λειτουργία του καθενός έχει ορισθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 3). Τέλος θα αναλυθεί η τελική γεωμετρία του μοντέλου εναλλάκτη.

6.1 Γενικά

Η αρχική επιφάνεια εργασίας φαίνεται στην εικόνα (6.1). Από το αρχικό παράθυρο του SOLIDWORKS® επιλέγουμε την επιθυμητή ενέργεια όπως φαίνεται στην εικόνα (6.2): τον σχεδιασμό ενός νέου αρχείου/εξαρτήματος, την συναρμολόγηση ενός συστήματος που αποτελείται από τα απαραίτητα εξαρτήματα ή την δημιουργία ενός δισδιάστατου κατασκευαστικού σχεδίου.



Εικόνα 6.1: Η αρχική επιφάνεια εργασίας του SOLIDWORKS®



Εικόνα 6.2: Επιλογή επιθυμητής ενέργειας στο SOLIDWORKS®

Στην παρούσα εργασία πρώτα αξιοποιήθηκε ο σχεδιασμός εξαρτήματος για τον σχεδιασμό των μηχανολογικών μερών που απαρτίζουν τον εναλλάκτη, μετά η λειτουργία συναρμολόγησης για να ορισθούν οι συνδέσεις μεταξύ των μεμονωμένων εξαρτημάτων και να ολοκληρωθεί το μοντέλο του εναλλάκτη και τέλος η δημιουργία δισδιάστατου σχεδίου για να παρουσιασθούν με ευκρίνεια οι διαστάσεις του κάθε εξαρτήματος.

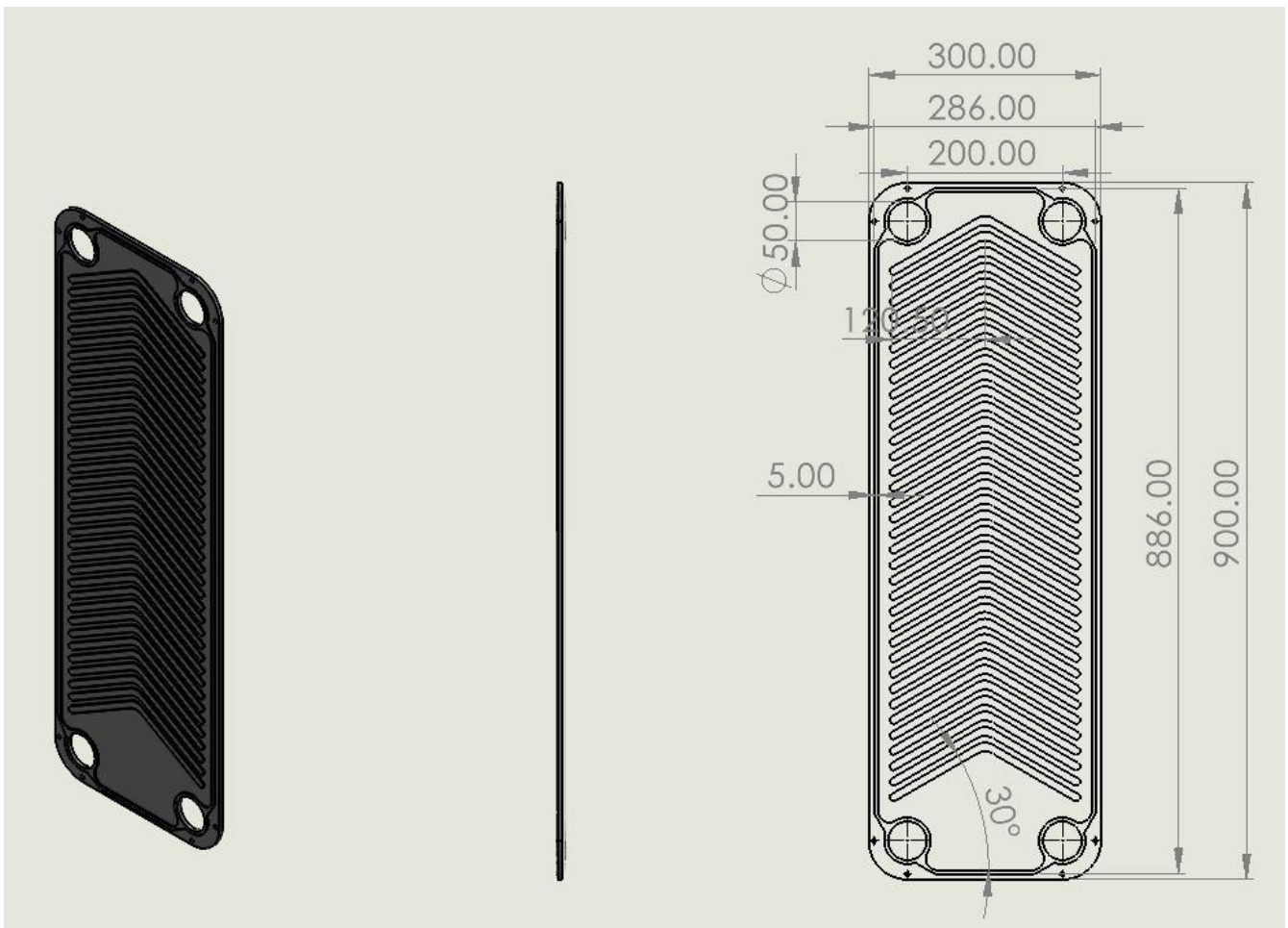
6.2 Μοντελοποίηση επιμέρους εξαρτημάτων

Τα εξαρτήματα του απαρτίζουν τον υπό εξέταση εναλλάκτη σχεδιάστηκαν και μοντελοποιήθηκαν στο SOLIDWORKS®. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η γεωμετρία των προαναφερθέντων εξαρτημάτων και οι διαστάσεις τους (σε χιλιοστά mm). Τα μηχανολογικά μέρη είναι τα ακόλουθα:

- ◆ Εσωτερική πλάκα εναλλάκτη
- ◆ Εσωτερική προτελευταία πλάκα εναλλάκτη

- ◆ Εσωτερική τελευταία πλάκα εναλλάκτη
- ◆ Εξωτερική πλάκα εισόδου των δύο ρευστών (νερό και άλμη)
- ◆ Εξωτερική πλάκα
- ◆ Βίδες ένωσης εξωτερικών πλακών εναλλάκτη
- ◆ Τσιμούχα εισόδου νερού
- ◆ Τσιμούχα εισόδου άλμης

Εσωτερική πλάκα εναλλάκτη

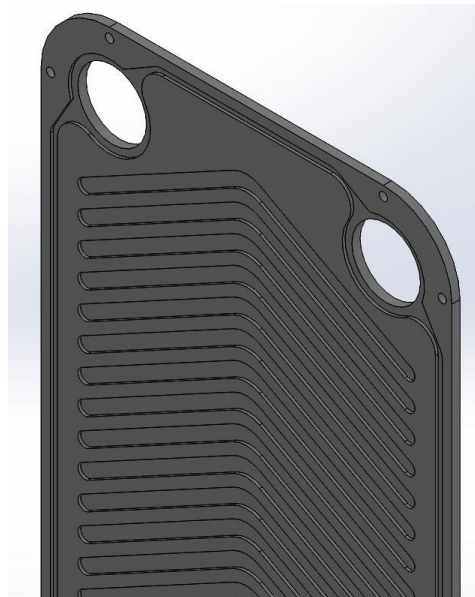


Εικόνα 6.3: Εσωτερική πλάκα εναλλάκτη, διαστάσεις

Όπως φαίνεται ευκρινέστερα και στις εικόνες (6.4) και (6.5), οι πλάκες του εναλλάκτη στην μπροστινή τους πλευρά έχουν τις πτυχώσεις τύπου ν να προεξέχουν (η λειτουργία τους εξηγείται στο κεφάλαιο 3) και στην πίσω πλευρά τους τις έχουν σαν εσοχή. Ακόμα, είναι εμφανές ότι στις αντίστοιχες πλευρές είναι σχηματισμένη η γεωμετρία της τσιμούχας που χρησιμοποιείται, με την μορφή προεξοχής και εσοχής.



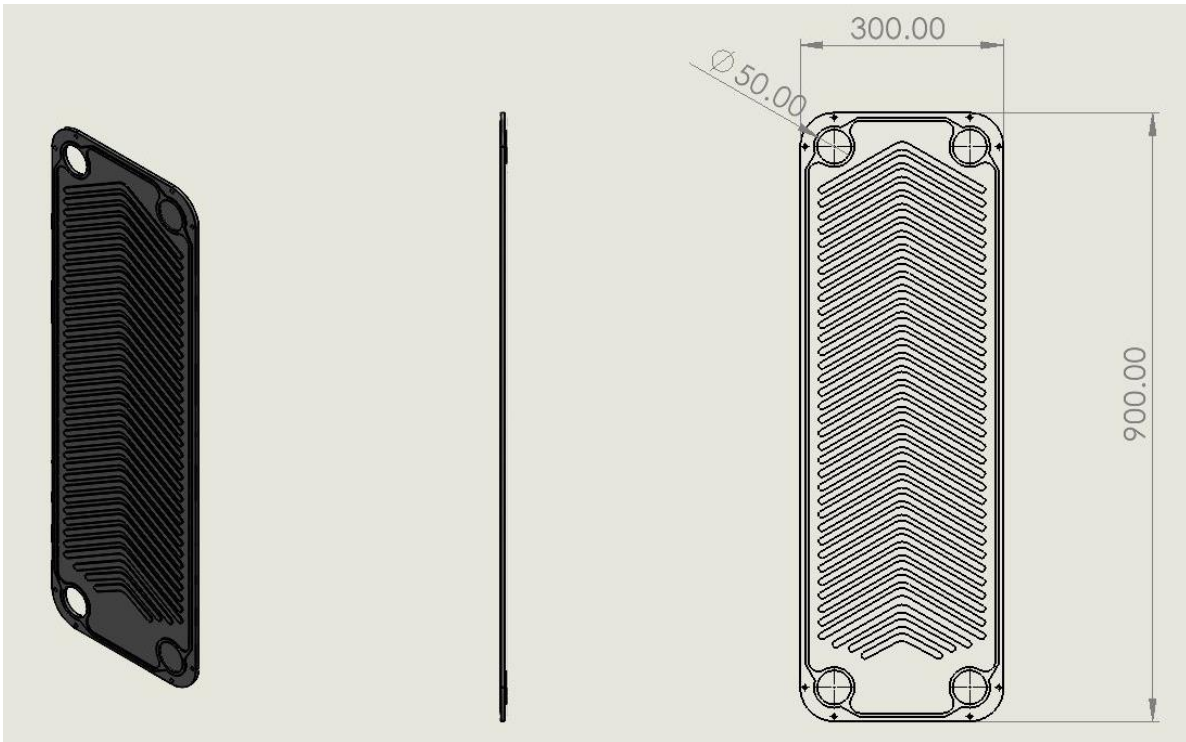
Εικόνα 6.4: Προεξοχές στην επιφάνεια της πλάκας



Εικόνα 6.5: Εσοχές στην επιφάνεια της πλάκας

Εσωτερική προτελευταία πλάκα εναλλάκτη

Στην συγκεκριμένη πλάκα είναι ανοιχτές μόνο η είσοδος και η έξοδος του νερού (και όχι της άλμης). Αυτό συμβαίνει επειδή ο τελευταίος όγκος ρευστού της διάταξης είναι το νερό και είναι επιθυμητή η διέλευση μόνο αυτού.



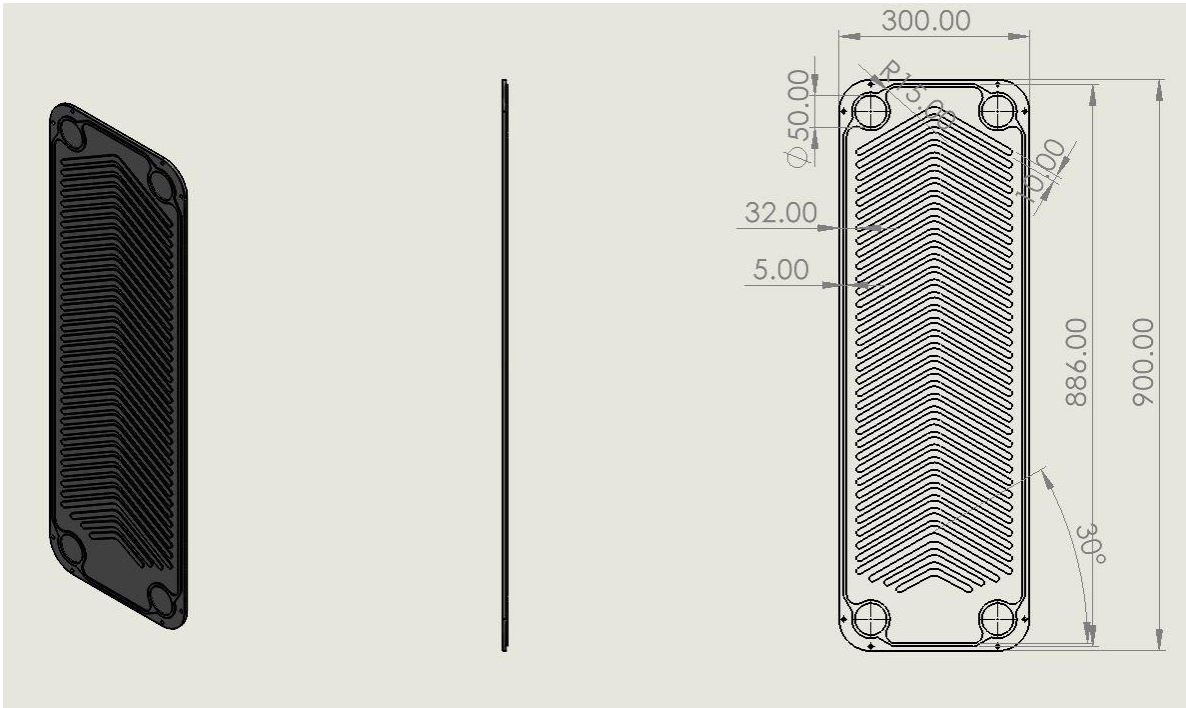
Εικόνα 6.6: Εσωτερική προτελευταία πλάκα εναλλάκτη, διαστάσεις



Εικόνα 6.7: Κενό στο άνω μέρος της πλάκας (είσοδος νερού)

Εσωτερική τελευταία πλάκα εναλλάκτη

Αυτή η πλάκα τοποθετείται αμέσως μετά από αυτή που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Σε αυτήν την πλάκα είναι κλειστές όλες οι είσοδοι και οι έξοδοι των ρευστών, καθώς οι επιθυμητοί όγκοι ελέγχου οι οποίοι εμφανίζονται εναλλάξ μέσα στον εναλλάκτη έχουν επιτευχθεί.

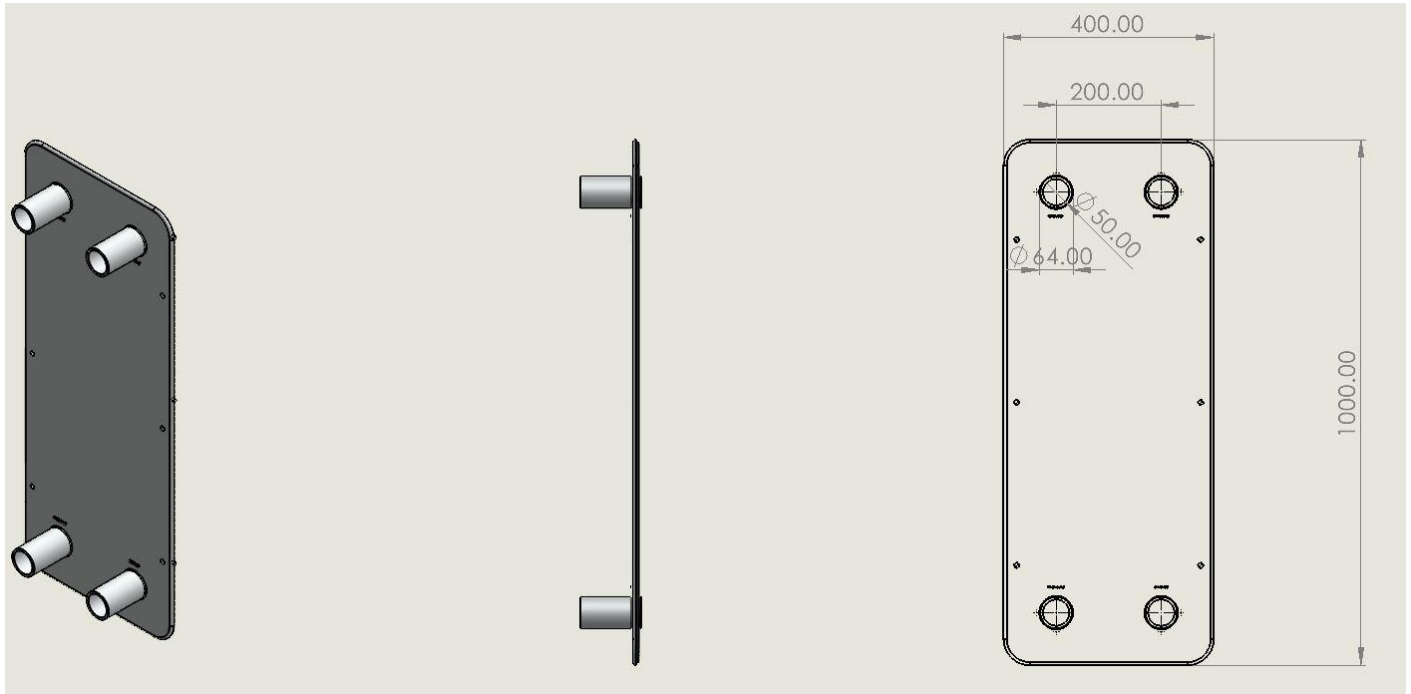


Εικόνα 6.8: Εσωτερική τελευταία πλάκα εναλλάκτη, διαστάσεις



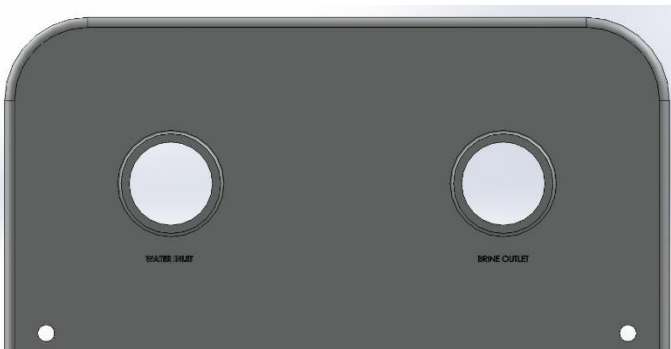
Εικόνα 6.9: Έλλειψη κενών στο άνω μέρος της πλάκας

Εξωτερική πλάκα εισόδου των δύο ρευστών (νερό και άλμη)

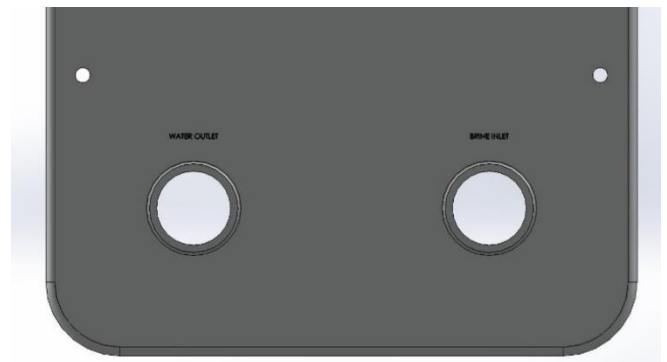


Εικόνα 6.10: Εξωτερική πλάκα εισόδου εναλλάκτη, διαστάσεις

Στις φωτογραφίες (6.7) και (6.8) απεικονίζονται οι δίοδοι των δύο ρευστών και οι έξοδοί τους από τον εναλλάκτη επίπεδων πλακών.

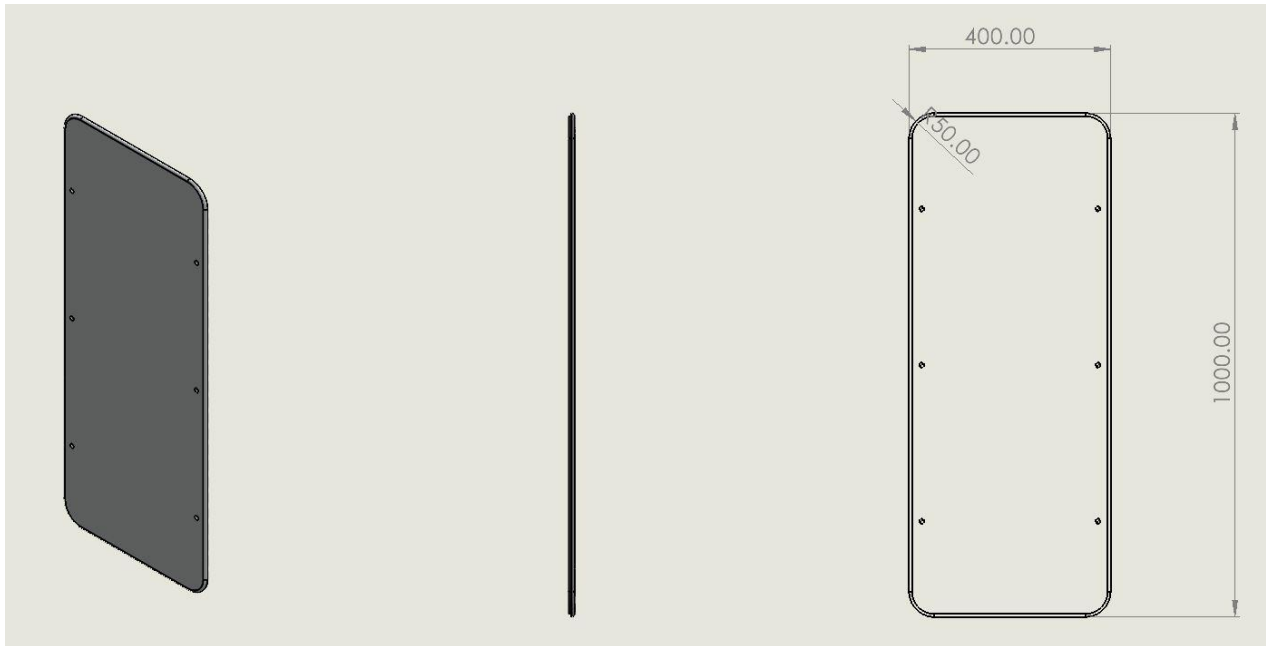


Εικόνα 6.11: Είσοδος νερού & έξοδος άλμης



Εικόνα 6.12: Είσοδος άλμης & έξοδος νερού

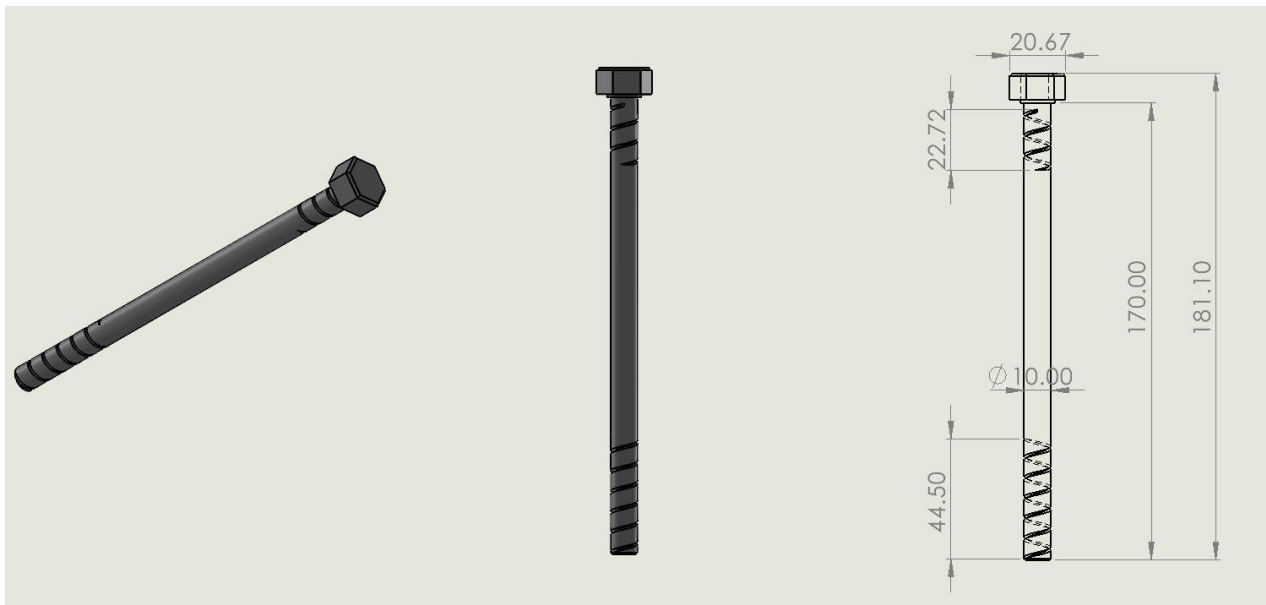
Εξωτερική πλάκα



Εικόνα 6.9: Εξωτερική πλάκα εναλλάκτη, διαστάσεις

Βίδες ένωσης εξωτερικών πλακών εναλλάκτη

Οι δύο εξωτερικές πλάκες του εναλλάκτη οι οποίες ενώνουν την διάταξη και αποτρέπουν την διαρροή των ρευστών συνδέονται μεταξύ τους μέσω βιδών.



Εικόνα 6.10: Βίδες ένωσης εξωτερικών πλακών εναλλάκτη, διαστάσεις

Τσιμούχα εισόδου νερού

Η τσιμούχα εισόδου του νερού επιτρέπει την διέλευση στο κενό μεταξύ δύο πλακών μόνο του νερού, τόσο εισόδου όσο και εξόδου. Αντίστοιχα για την τσιμούχα της άλμης.



Εικόνα 6.11: Τσιμούχα εισόδου νερού, διαστάσεις

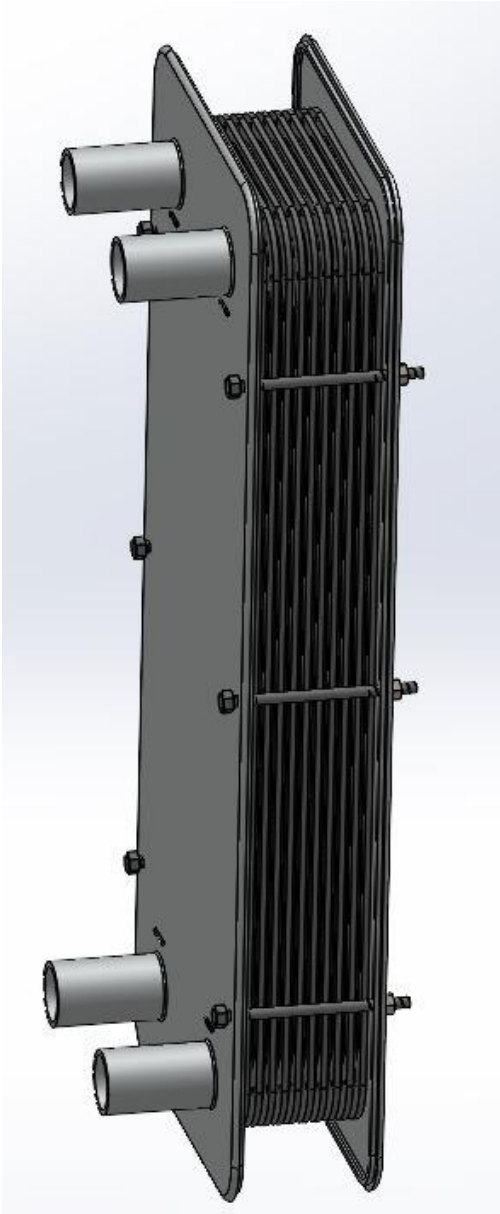
Τσιμούχα εισόδου άλμης



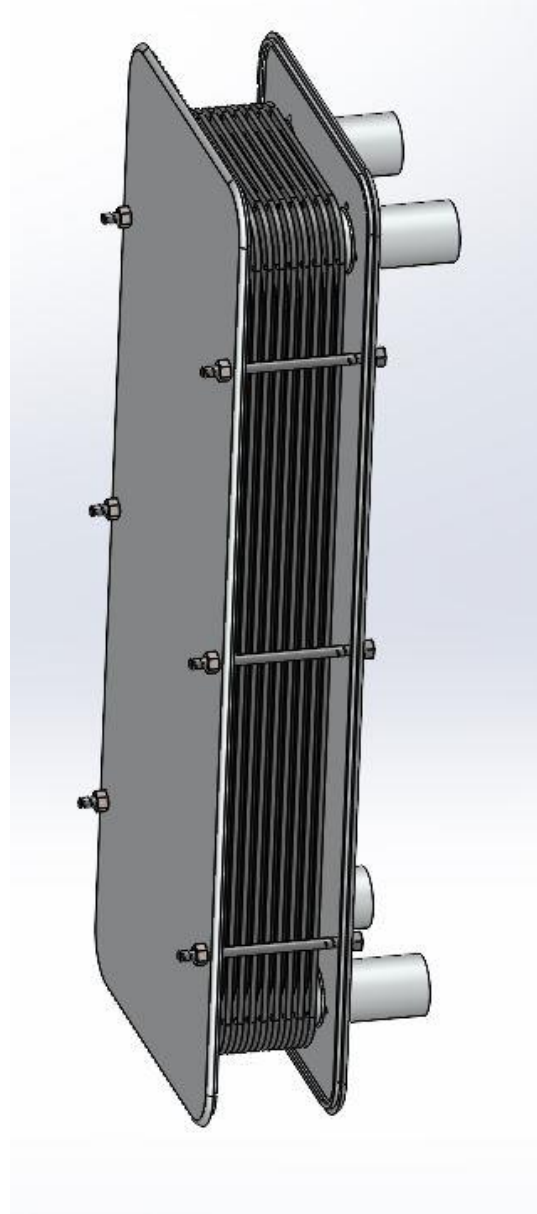
Εικόνα 6.12: Τσιμούχα εισόδου άλμης, διαστάσεις

6.3 Τελικό μοντέλο εναλλάκτη-Συναρμολόγηση επιμέρους εξαρτημάτων

Όλα τα εξαρτήματα που παρουσιάσθηκαν αναλυτικά προηγουμένως, μέσω της λειτουργίας του SOLIDWORKS® Assembly συναρμολογήθηκαν μεταξύ τους έτσι ώστε να σχηματιστεί το τελικό μοντέλο του εναλλάκτη θερμότητας επίπεδων πλακών. Ο αριθμός πλακών που επιλέχθηκε είναι 10 πλάκες. Η τελική διάταξη είναι η ακόλουθη.



Εικόνα 6.13: Μοντέλο εναλλάκτη



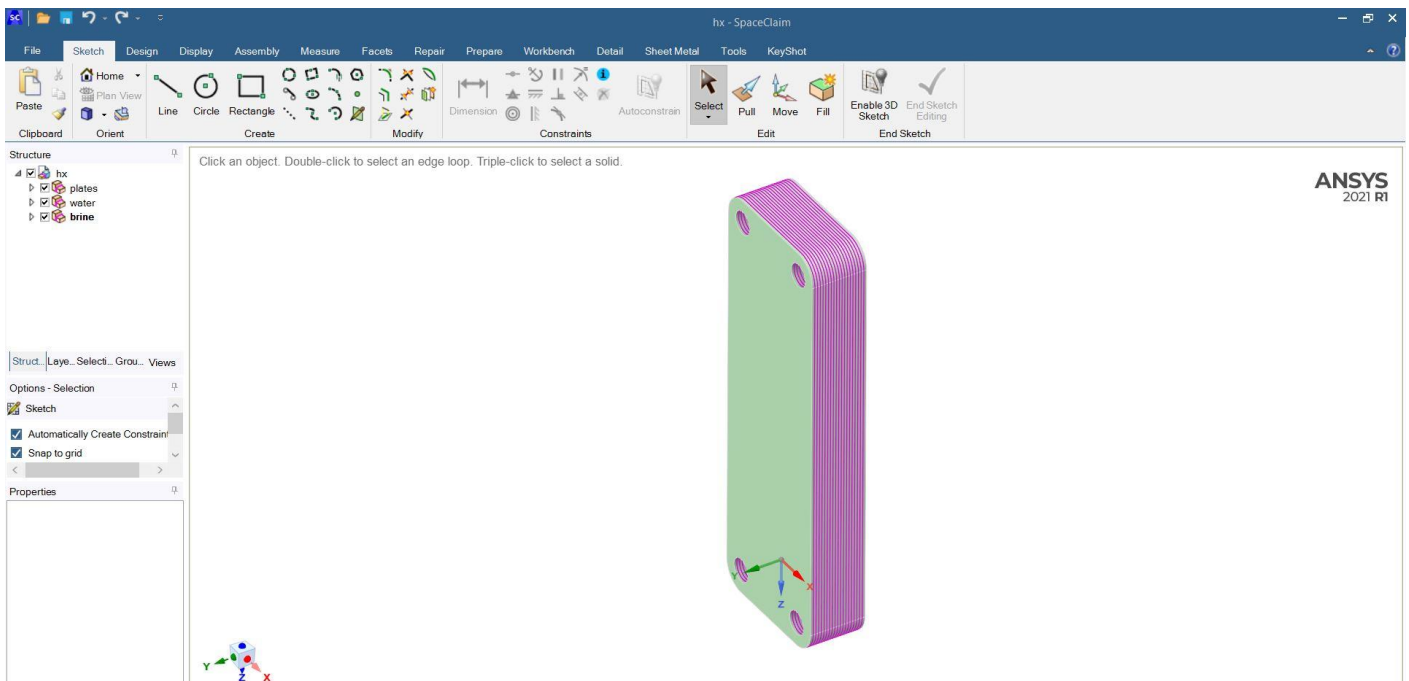
Εικόνα 6.14: Μοντέλο εναλλάκτη

7. Σχεδίαση και προσομοίωση του μοντέλου στο ANSYS® FLUENT

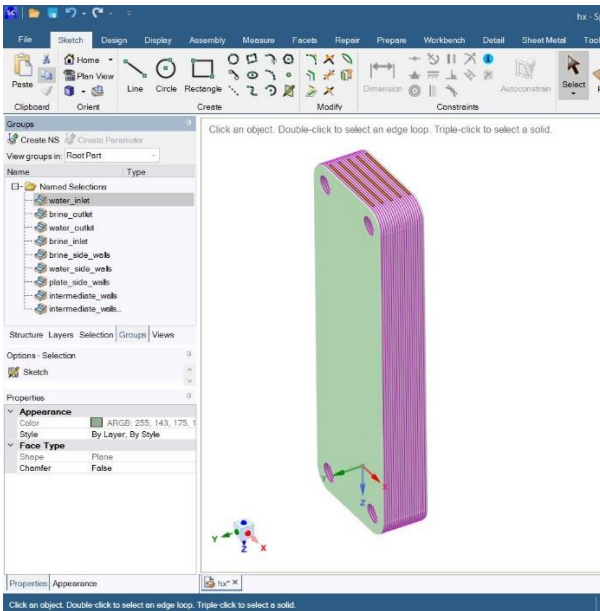
Σε αυτό το στάδιο της μελέτης, σχεδιάστηκε ένα απλοποιημένο τρισδιάστατο μοντέλο του εναλλάκτη, που αποτελείται από τους είκοσι όγκους ελέγχου, πέντε νερού, πέντε άλμης, δέκα πλακών. Μετά τον σχεδιασμό του μοντέλου έγινε η πλεγματοποίησή του, ενώ στη συνέχεια ορίστηκαν οι συνριακές και οι αρχικές συνθήκες σε αυτό. Τέλος, έγινε η προσομοίωση για το χρονικό διάστημα των 14 ωρών και προέκυψαν οι θερμοκρασίες.

7.1 Σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου στο Design Modeler του ANSYS®

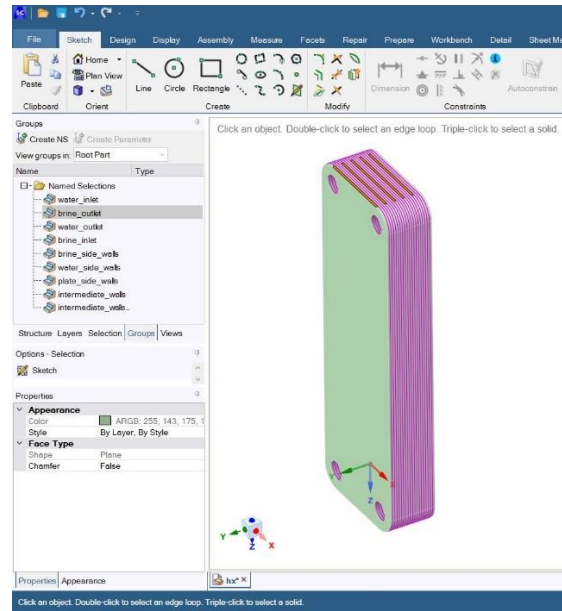
Η σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου των 20 όγκων ελέγχου έγινε με το πρόγραμμα Design Modeler του ANSYS® WORKBENCH. Για λόγους μείωσης του υπολογιστικού χρόνου και απλοποίησης των πράξεων κατά την προσομοίωση στο ANSYS® FLUENT, δεν έγινε σχεδιασμός ολόκληρου του μοντέλου του εναλλάκτη (παραλείφθηκαν τεμάχια όπως οι τσιμούχες, οι προεξοχές και οι εσοχές στην επιφάνεια των πλακών κλπ) αλλά μόνο των όγκων ελέγχου, δηλαδή της άλμης, των πλακών και του νερού. Όπως αναγράφεται και στην υπό εξέταση μελέτη και παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 6, τα στρώματα άλμης, πλάκας, νερού έχουν διαστάσεις: μήκος 0.9 m, ύψος 0.3 m και πάχος 0.006 m. Αφού έγινε κατηγοριοποίηση των όγκων ελέγχου (plates, water, brine), πραγματοποιήθηκε όπως φαίνεται στις εικόνες (6.4-6.10) ορισμός των επιφανειών και των λειτουργιών τους, δηλαδή το πως ορίστηκαν οι είσοδοι και οι έξοδοι του νερού και της άλμης (inlet, outlet), οι πλαϊνές πλευρές τους (side walls) και οι ενδιάμεσες επιφάνειες μεταξύ του νερού, της άλμης και των πλακών (intermediate walls).



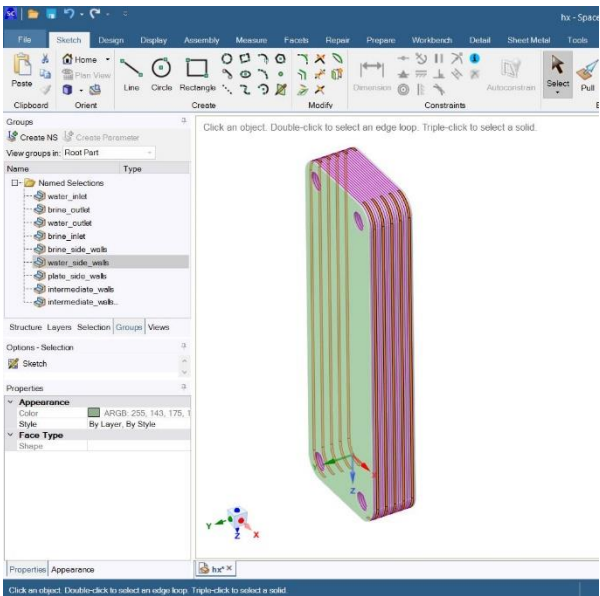
Εικόνα 7.1: Design Modeler στο ANSYS® FLUENT



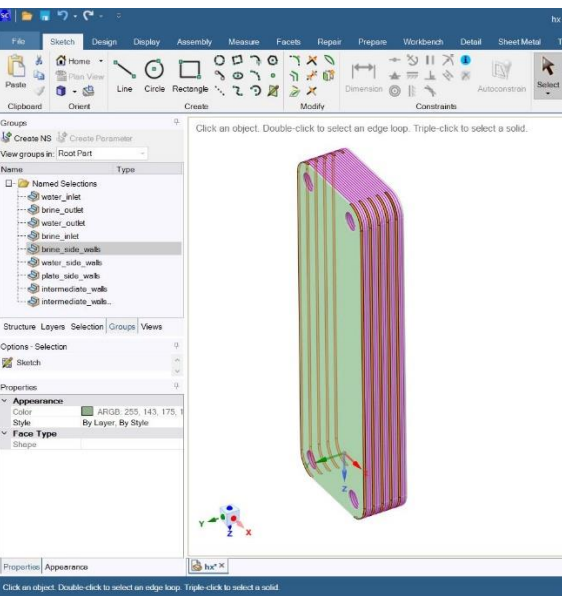
Εικόνα 7.2: Επιφάνειες εισόδου νερού



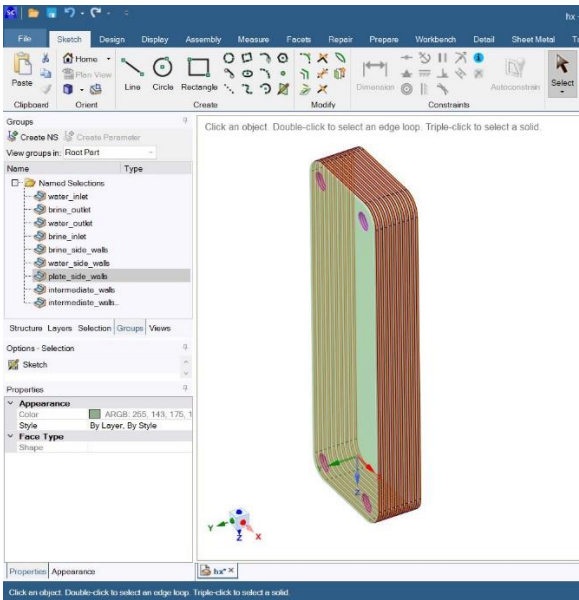
Εικόνα 7.3: Επιφάνειες εισόδου άλμης



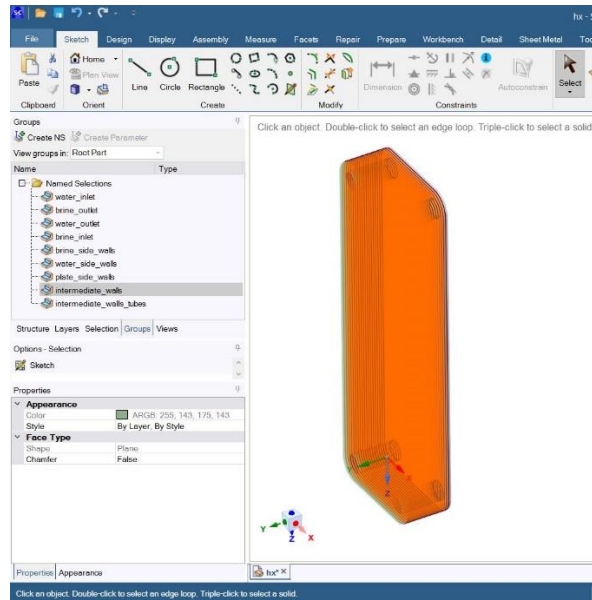
Εικόνα 7.4: Πλαϊνές επιφάνειες νερού



Εικόνα 7.5: Πλαϊνές επιφάνειες άλμης



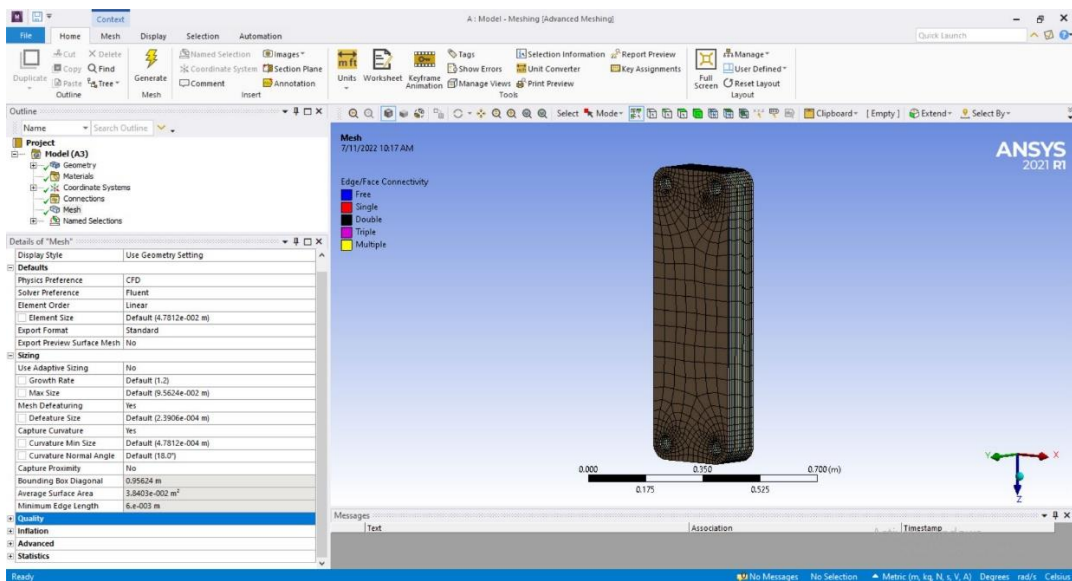
Εικόνα 7.6: Πλαϊνές επιφάνειες πλακών



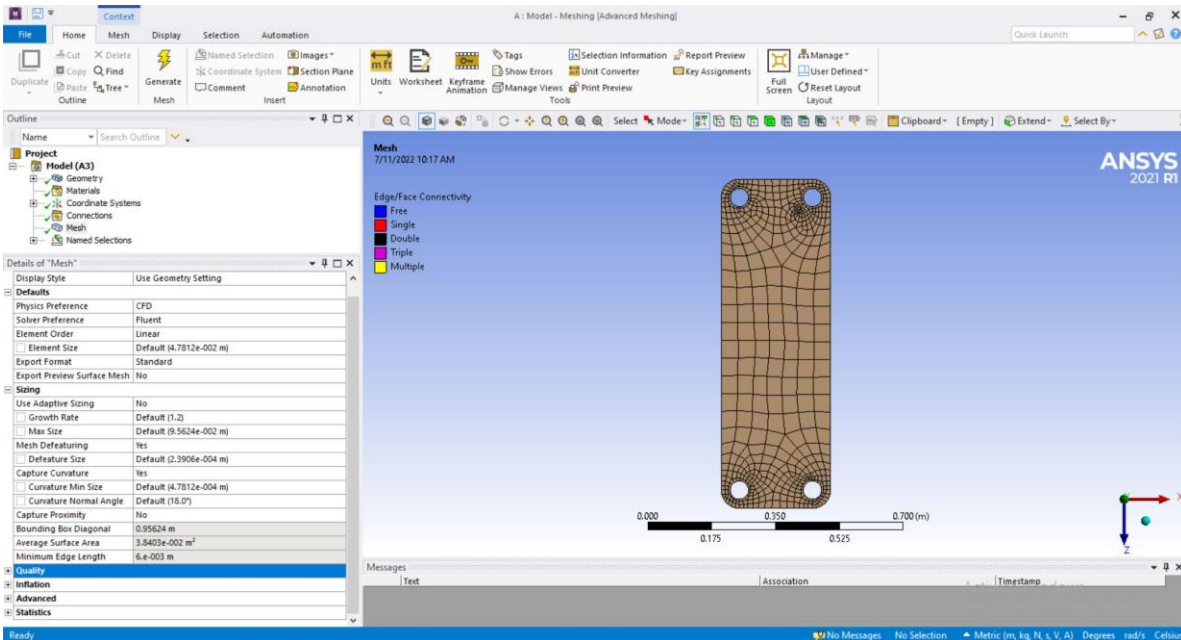
Εικόνα 7.7: Διεπιφάνειες μεταξύ των όγκων ελέγχου

7.2 Ρυθμίσεις στο MESH-Δημιουργία πλέγματος

Η δημιουργία και ο καθορισμός των παραμέτρων για το πλέγμα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σημεία της μελέτης. Με τον όρο πλέγμα εννοείται η δημιουργία υπολογιστικών τμημάτων (κελιών/πεπερασμένων στοιχείων), στα οποία υποδιαιρείται το τρισδιάστατο αντικείμενο ώστε να μπορούν να υπολογιστούν οι μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων του. Το πλέγμα δημιουργήθηκε μέσω της εφαρμογής ANSYS® MESH. Η εικόνες (7.8) και (7.9) δείχνουν τις ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για την δημιουργία του μοντέλου.



Εικόνα 7.8: Το πλέγμα των 20 όγκων ελέγχου του τρισδιάστατου μοντέλου, πλαινή όψη



Εικόνα 7.9: Το πλέγμα των 20 όγκων ελέγχου του τρισδιάστατου μοντέλου, μπροστινή όψη

Αρχικά καθορίστηκε το προφίλ και το πρόγραμμα επίλυσης, με βάση τα οποία δημιουργούνται τα προεπιλεγμένα χαρακτηριστικά τα οποία έχουν καθοριστεί από το πρόγραμμα ως τα καλύτερα για την δημιουργία του πλέγματος. Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις που έχει το Ansys® Mesh ανάλογα το είδος του φυσικού προβλήματος και του προγράμματος επίλυσης. Επιλέχθηκε ως φυσικό μοντέλο το CFD (Computational Fluid Mechanics) και ως πρόγραμμα επίλυσης το Fluent.

Η τοποθέτηση των κόμβων επιλέχθηκε ως γραμμική (linear element order). Με τον τρόπο αυτό οι κόμβοι τοποθετούνται στις άκρες της ακμής του κάθε στοιχείου. Το μέγεθος των στοιχείων επιλέχθηκε ίσο με 0.047812 m. Ο λόγος που επιλέχθηκε τόσο μικρό μέγεθος στοιχείου, είναι να προσομοιωθεί σωστά η τήξη του υλικού και να υπολογίζονται πιο σωστά το ποσοστό της υγρής φάσης στον εναλλάκτη, καθώς και να υπολογίζονται τα ζητούμενα μεγέθη με την επιθυμητή ακρίβεια. Τέλος όσον αφορά το πλέγμα, στην εικόνα που παρατίθεται παρακάτω και υπολογίστηκε μέσω του ANSYS, φαίνεται η ποιότητα των πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν.

```
Mesh Quality:
Minimum Orthogonal Quality = 5.19440e-01 cell 305 on zone 51 (ID: 434 on partition: 0) at location ( 1.91534e-02, 5.09703e-02, -2.04378e-01)
(To improve Orthogonal quality, use "Inverse Orthogonal Quality" in Fluent Meshing,
where Inverse Orthogonal Quality = 1 - Orthogonal Quality)
Maximum Aspect Ratio = 1.37861e+01 cell 109 on zone 49 (ID: 5840 on partition: 0) at location ( 1.51032e-01, 1.49981e-02, -2.34234e-01)
```

Εικόνα 7.10: Ποιότητα πεπερασμένων στοιχείων

7.3 Ρυθμίσεις στο SETUP

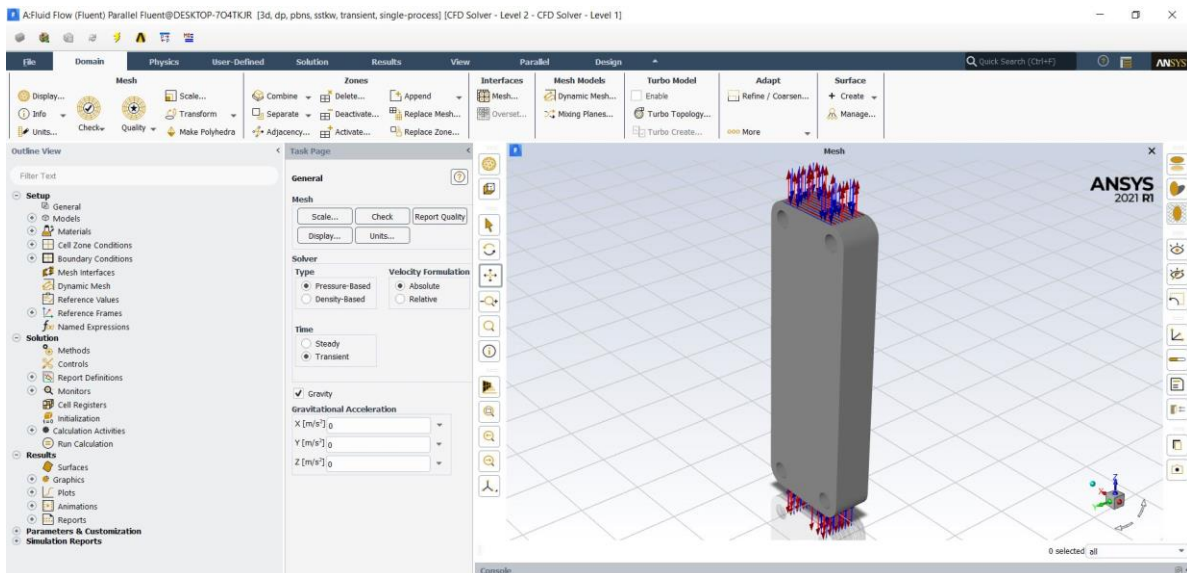
Στο SETUP γίνεται αρχικοποίηση και ορισμός όλων των συνθηκών πριν την προσομοίωση του απλουστευμένου μοντέλου του εναλλάκτη.

7.3.1 Γενικές Ρυθμίσεις

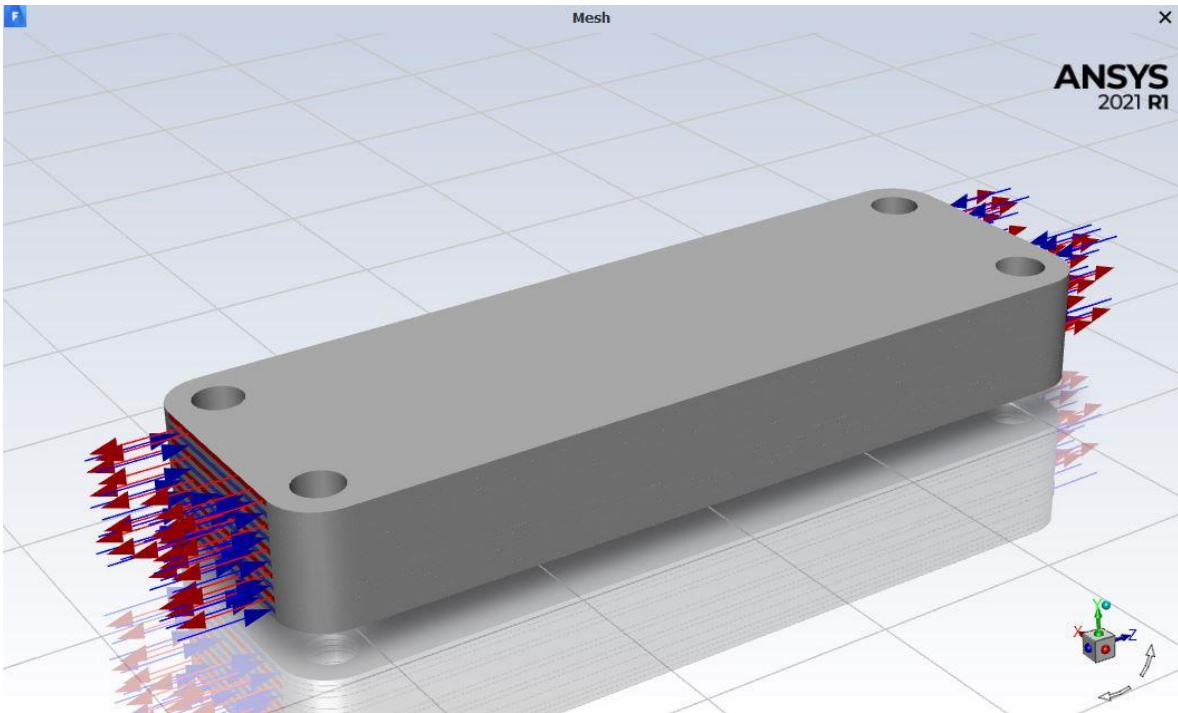
Μέσω των γενικών ρυθμίσεων επιλέγεται η μορφή που θα ακολουθήσει η προσομοίωση, δηλαδή αν η επίλυση θα γίνει σε κατάσταση μόνιμης συνθήκης (Steady) ή σε χρονικά μεταβαλλόμενη συνθήκη (Transient). Για την παρούσα μελέτη το μοντέλο του χρονικά μεταβαλλόμενου προβλήματος επιλέχθηκε, αφού η συμπεριφορά του εναλλάκτη στην διάρκεια του χρόνου είναι άμεσου ενδιαφέροντος. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι θεωρείται η ύπαρξη βαρύτητας για την επίλυση του μοντέλου.

7.3.2 Ενεργοποίηση Εξισώσεων Επίλυσης

Αρχικά ενεργοποιούνται τα επιθυμητά μοντέλα επίλυσης για την παρούσα εφαρμογή, το μοντέλο της ενέργειας (Energy) και το μοντέλο τήξης/πήξης (Solidification/Melting). Μέσω του μοντέλου Ενέργειας ενεργοποιείται η δυνατότητα επίλυσης της εξίσωσης της ενέργειας για το μοντέλο. Η εξίσωση της ενέργειας που χρησιμοποιείται έχει την μορφή της εξίσωσης (5.2) και αναλύθηκε διεξοδικά στο κεφάλαιο 5. Το μοντέλο τήξης και πήξης χρησιμοποιείται με σκοπό την επίλυση προβλημάτων αλλαγής φάσης που συμβαίνει είτε σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ή σε ένα θερμοκρασιακό εύρος. Το μοντέλο αφορά την αλλαγή φάσης από στερεά σε υγρή φάση και το αντίστροφο (νερό-πάγος). Επίσης όπως αναλύθηκε στα κεφάλαια 4 και 5, στην μελέτη υπό εξέταση και συνεπώς στην εξίσωση (5.2) έχει συμπεριληφθεί το μοντέλο τήξης/πήξης.



Εικόνα 7.11: Γενικές ρυθμίσεις στο SETUP



Εικόνα 7.12: Τρισδιάστατο μοντέλο του εναλλάκτη

7.3.3 Διαμόρφωση Υλικών

Καθώς τα επιθυμητά υλικά για την μελέτη δεν υπάρχουν όλα στην βάση δεδομένων του προγράμματος, καθίσταται απαραίτητη η δημιουργία των υλικών, για τον ορθό θερμοδυναμικό υπολογισμό. Οι ιδιότητες οι οποίες πρέπει να εισαχθούν ώστε να περιγραφεί πλήρως ένα υλικό εντός του προγράμματος είναι:

- Πυκνότητα (kg/m^3)
- Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)
- Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)
- Θερμική Αγωγιμότητα ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
- Ιξώδες ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)
- Λανθάνουσα Ενθαλπία αλλαγής φάσης (J/kg)
- Θερμοκρασία Στερεάς φάσης (K)
- Θερμοκρασία Υγρής φάσης (K)

Τα υλικά αλλαγής φάσης πρέπει να ορισθούν ως υλικά υγρής φάσης ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή αλλαγή της φάσης.

7.3.3.1 Άλμη

Η άλμη αποτελεί το ψυκτικό μέσο του υπό μελέτη εναλλάκτη θερμότητας. Καθώς δεν υπήρχε στη βάση δεδομένων οι ιδιότητές οι οποίες αναγράφονται στην εικόνα (5.2) προστέθηκαν έπειτα από έρευνα των ιδιοτήτων αυτού του υλικού.

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Name' field is 'brine', 'Material Type' is 'fluid', and 'Chemical Formula' is 'ch2nao'. The 'Fluent Fluid Materials' dropdown is set to 'brine (ch2nao)'. The 'Mixture' dropdown is 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. Below these are buttons for 'Fluent Database...', 'GRANTA MDS Database...', and 'User-Defined Database...'. The 'Properties' section lists the following values:

Property	Value
Density [kg/m ³]	constant, 1230
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant, 432
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant, 0.6
Viscosity [kg/(m s)]	constant, 0.001003
Pure Solvent Melting Heat [J/kg]	constant, 0
Solidus Temperature [K]	constant, 0
Liquidus Temperature [K]	constant, 0

At the bottom are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

Εικόνα 7.13: Ιδιότητες άλμης

7.3.3.2 Ατσάλι

Το ατσάλι αποτελεί το μοναδικό στερεό υλικό του μοντέλου και είναι το υλικό της πλάκας του εναλλάκτη. Οι ιδιότητες του καθορίστηκαν από την βάση δεδομένων του FLUENT®.

Create/Edit Materials

Name: steel

Material Type: solid

Chemical Formula:

Fluent Solid Materials: steel

Mixture: none

Order Materials by: Name Chemical Formula

Fluent Database...
GRANTA MDS Database...
User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m³]: constant (8030) Edit...

Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant (502.48) Edit...

Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant (16.27) Edit...

Change/Create Delete Close Help

Εικόνα 7.14: Ιδιότητες ατσάλιού

7.3.3.3 Νερό

Το νερό όπως έχει παρουσιασθεί αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια αποτελεί το υλικό αλλαγής φάσης του μοντέλου.

Create/Edit Materials

Name: water-liquid

Material Type: fluid

Chemical Formula: h2o<l>

Fluent Fluid Materials: water-liquid (h2o<l>)

Mixture: none

Order Materials by: Name Chemical Formula

Fluent Database...
GRANTA MDS Database...
User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m³]: constant (998.2) Edit...

Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant (4182) Edit...

Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant (0.6) Edit...

Viscosity [kg/(m s)]: constant (0.001003) Edit...

Pure Solvent Melting Heat [J/kg]: constant Edit...

Change/Create Delete Close Help

Εικόνα 7.15.: Ιδιότητες νερού

7.3.4 Συνθήκες Όγκων Κελιών

Στο τμήμα αυτό καθορίζονται οι φυσικές συνθήκες για κάθε όγκο του μοντέλου υπολογισμού. Δηλαδή καθορίζεται αν είναι στερεό ή υγρό και από ποιο υλικό. Η πλάκα του εναλλάκτη καθορίστηκε ως το μόνο στερεό υλικό και καθορίστηκε ως ατσάλινο. Το ψυκτικό μέσο, δηλαδή η άλμη, ορίστηκε ως υγρό υλικό. Τέλος, το υλικό αλλαγής φάσης, δηλαδή το νερό, ορίστηκε ως υγρό υλικό.



Εικόνα 7.16.: Συνθήκες όγκων κελιών

7.3.5 Οριακές συνθήκες

7.3.5.1 Είσοδοι

Ως εισοδοι ορίστηκαν οι παράπλευρες επιφάνειες του μοντέλου, οι 5 αντιστοιχούν στην είσοδο του νερού και οι άλλες πέντε από την αντίθετη πλευρά του μοντέλου στην είσοδο της άλμης, όπως φαίνεται και στην εικόνα (7.17). Για να χαρακτηριστεί μια επιφάνεια ως είσοδος υπάρχουν 2 πιθανές επιλογές. Η είσοδος ορίζεται είτε ως παροχή μάζα είτε ως ταχύτητα του μέσου. Για το παρόν μοντέλο επιλέχθηκε η είσοδος παροχής μάζας. Η παροχή μάζας και του νερού και της άλμης είναι 150 kg/hr ή αλλιώς 0.0416 kg/s. Επίσης ορίστηκαν οι θερμικές οριακές συνθήκες για την είσοδο του νερού και της άλμης, με θερμοκρασία

εισόδου του πρώτου ίση με 26.85°C , δηλαδή 300K και θερμοκρασία εισόδου του δεύτερου ίση με -6°C , δηλαδή 267.15K .

7.3.5.2 Έξοδοι

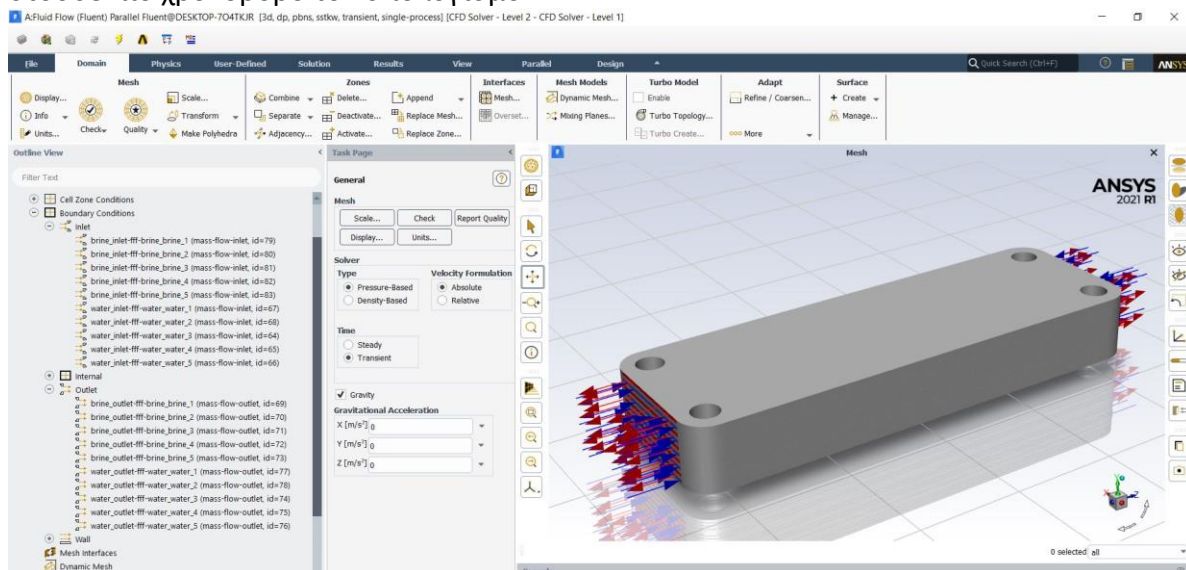
Για τον καθορισμό της οριακής συνθήκης εξόδου υπάρχουν τρεις επιλογές, η ταχύτητα με βάση την πίεση, η έξοδος παροχής μάζας και η απορροή (outflow). Ως οριακή συνθήκη επιλέχθηκε η έξοδος παροχής μάζας. Η τιμή της και για την έξοδο του νερού και για την έξοδο της άλμης από τον εναλλάκτη θερμότητας είναι ίδια με αυτήν της εισόδου, δηλαδή 150 kg/hr ή αλλιώς 0.0416 kg/s

7.3.5.3 Τοίχοι

Ως τοίχος ορίζεται κάθε άλλη εξωτερική επιφάνεια. Η οριακή συνθήκη αυτή χρησιμοποιείται για να ορίσει τις περιοχές όπου υπάρχει ρευστό ή στερεό. Οι κύριες συνθήκες που καθορίζονται για την οριακή συνθήκη του τοίχου είναι:

- Συνθήκες κίνησης τοίχου
- Συνθήκες διάτμησης
- Σκληρότητα του τοίχου
- Θερμικές οριακές συνθήκες

Για την παρούσα εφαρμογή ρυθμίστηκαν οι συνθήκες κίνησης τοίχου και οι θερμικές οριακές συνθήκες. Η συνθήκη κίνησης του τοίχου που επιλέχθηκε είναι ο σταθερός ακίνητος τοίχος. Στις θερμικές συνθήκες επιλέχθηκε το υλικό του τοίχου ανάλογα με τον υπολογιστικό όγκο στον οποίο αναφερόταν. Οι εξωτερικοί ορίστηκαν ως αδιαβατικοί, δηλαδή η ροή θερμότητας από τους τοίχους αυτούς προς το μοντέλο ισούται με 0 . Έτσι προσομοιώνεται η ύπαρξη μόνωσης γύρω από τον εναλλάκτη, χωρίς τον σχεδιασμό της που θα καθιστούσε πιο χρονοβόρο τον υπολογισμό.



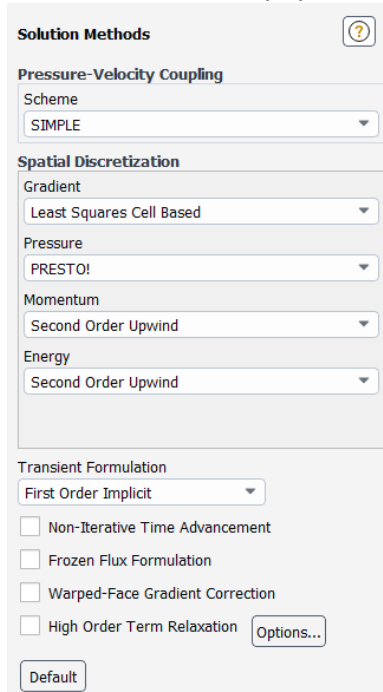
Εικόνα 7.17.: Ορισμός εισόδων, εξόδων και πλευρών του μοντέλου

7.3.6 Μέθοδοι Επίλυσης της Προσομοίωσης

Στο στάδιο αυτό καθορίζονται οι αλγόριθμοι μέσω των οποίων θα πραγματοποιηθεί η επίλυση του μοντέλου των τρισδιάστατων όγκων ελέγχου. Αρχικά, ρυθμίζεται το μοντέλο μέσω του οποίου γίνεται η σύζευξη ανάμεσα στην πίεση και την ταχύτητα. Επιλέγεται το μοντέλο σύζευξης SIMPLE. Για την πίεση επιλέγεται το μοντέλο PRESTO!.

Ο αλγόριθμος SIMPLE χρησιμοποιεί μια σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα και τις προκύπτουσες διορθώσεις της πίεσης ώστε να διασφαλιστεί η διατήρηση της μάζας και να δημιουργηθεί το κατάλληλο πεδίο πίεσης. Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου βασίζεται στην θεώρηση ενός πεδίου πίεσης, p^* και σε αυτήν την υπόθεση η διάχυση κατά επιφάνεια, J_f^* δεν ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας. Επομένως, δημιουργείται ένας διορθωτικός παράγοντας για την διάχυση κατά επιφάνεια, J_f' , ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση της συνέχειας. Το μοντέλο SIMPLE υπολογίζει τον διορθωτικό παράγοντα της διάχυσης με βάση την διόρθωση πίεσης του υπολογιστικού κελιού.

Ως μέθοδος καθορισμού της πίεσης στην επιφάνεια των στοιχείων επιλέχθηκε η μέθοδος PRESTO!, η οποία χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν στροβιλώδης ροή (Swirling flow) ή ροές με απότομες κλίσεις πίεσης. Δύο παραδείγματα ροών με απότομες κλίσεις πίεσης είναι οι ροές που περιλαμβάνουν πορώδεις περιοχές, όπως στις περιοχές συνύπαρξης των δύο φάσεων στο συγκεκριμένο μοντέλο του εναλλάκτη, ή κάποιο μοντέλο ανεμιστήρα.



Εικόνα 7.18.: Solution Methods

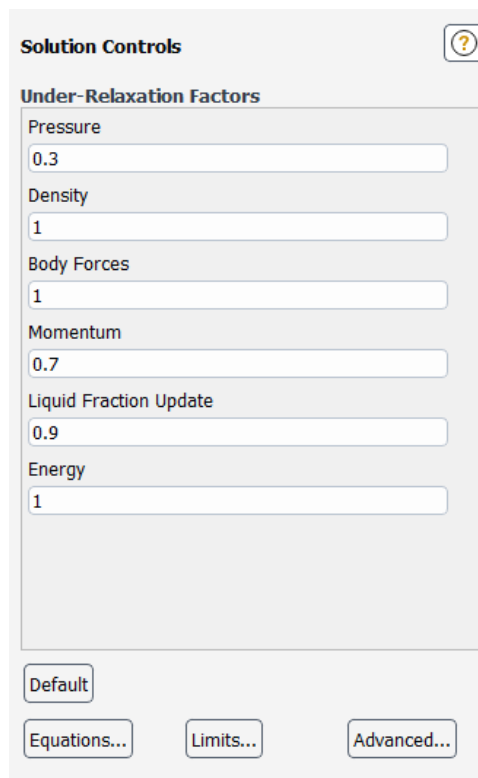
7.3.7 Παράγοντες Ελέγχου

Ως παράγοντες θεωρούνται τα σφάλματα σύγκλισης για τις ταχύτητες, την εξίσωση της συνέχειας και της ενέργειας, καθώς και οι συντελεστές χαλάρωσης (Relaxation Factors).

7.3.7.1 Συντελεστές Χαλάρωσης

Οι συντελεστές χαλάρωσης αποτελούν μια μέθοδο αύξησης της ευστάθειας ενός μοντέλου υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Μέσω των συντελεστών αυτών καθορίζεται το ποσοστό κατά το οποίο η λύση της εξίσωσης του νέου χρονικού βήματος επηρεάζεται από την λύση της προηγούμενης χρονικής στιγμής και από την υπολογισμένη τιμή. Έστω το μέγεθος z το οποίο υπολογίζεται από το πρόγραμμα, α ο συντελεστής χαλάρωσης και Δz η τιμή της μεταβολής του μεγέθους για ένα χρονικό βήμα. Η νέα τιμή του μεγέθους z υπολογίζεται ως: $z_i = z_{i-1} + \alpha \Delta z$

Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής χαλάρωσης τόσο περισσότερο κοντά είναι το παλιό με το καινούργιο χρονικό βήμα. Συνήθως, οι συντελεστές χαλάρωσης είναι ορισμένοι από το πρόγραμμα και η μεταβολή τους έχει ως στόχο να σταματήσει απότομες μεταβολές στα σφάλματα κατά την επίλυση. Οι συντελεστές χαλάρωσης διατηρήθηκαν ίδιοι με τις προεπιλεγμένες τους τιμές.

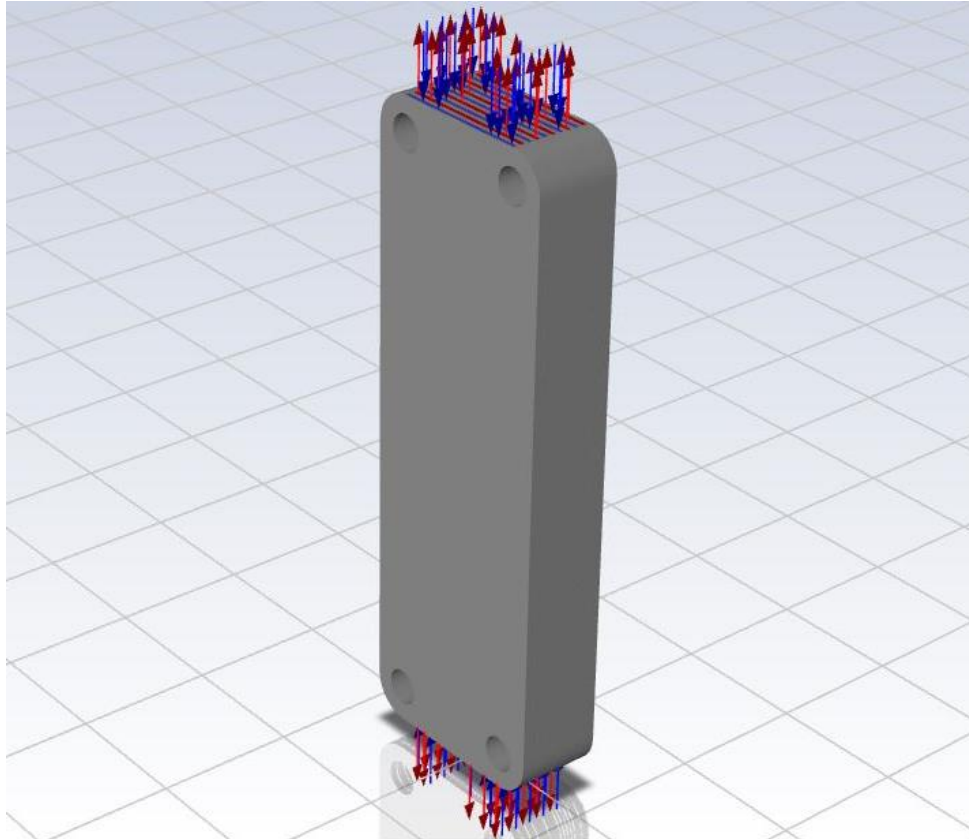


Εικόνα 7.19.: Solution Controls

7.3.8 Αρχικοποίηση Προβλήματος και Εκκίνηση της Επίλυσής του

Για την εκκίνηση του προγράμματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός τιμών όλων των μεγεθών για την χρονική στιγμή $t=0$. Ο καθορισμός των αρχικών τιμών, έγινε με την μέθοδο

της υβριδικής εκκίνησης (Hybrid Initialization). Ακόμα, επιλέχθηκε η επίλυση με σταθερό χρονικό βήμα και ίσο με 60s. Η συνολική διάρκεια ροής είναι 14 ώρες, που αντιστοιχούν σε 840 χρονικά βήματα. Ο αριθμός επαναλήψεων ανά χρονικό βήμα τέθηκε ίσος με 1, ώστε κάθε επανάληψη να ισούται με ένα χρονικό βήμα $\Delta t=60s$.

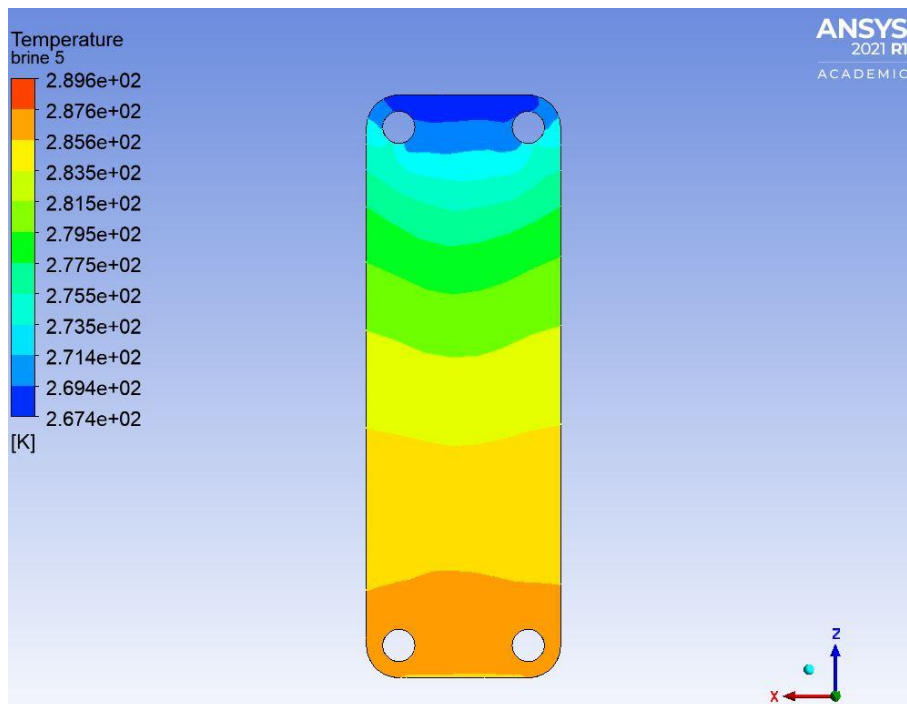


Εικόνα 7.20.: 3D μοντέλο στο ANSYS® FLUENT

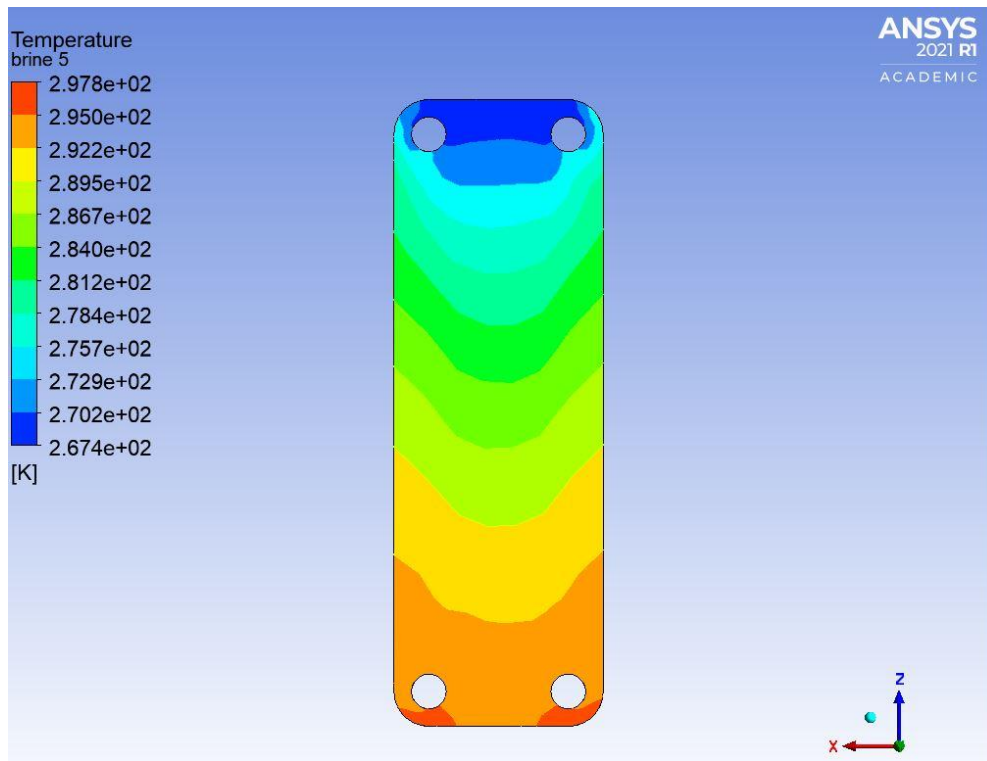
8. Αποτελέσματα του ANSYS® FLUENT

Σκοπός της προσομοίωσης στο ANSYS® FLUENT ήταν να προκύψει χωρικά η κατανομή των θερμοκρασιών για κάθε όγκο ελέγχου, στο χρονικό διάστημα των 14 ωρών. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες της κατανομής για την άλμη, την πλάκα και το νερό για τις χρονικές στιγμές $t=60 \text{ sec}$, $t=7\text{hr}$, $t=14\text{hr}$. Στα επόμενα υποκεφάλαια κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν δύο όγκοι ελέγχου για κάθε υλικό (άλμη, νερό, πλάκα), μία στην εξωτερική πλευρά του συνολικού μοντέλου και μία όσο πιο εσωτερικά στην αλληλουχία των όγκων γίνεται προκειμένου να μελετηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των όγκων ελέγχου. Όπως θα γίνει εμφανές από τις παρακάτω φωτογραφίες, οι θερμοκρασίες εισόδου της άλμης και του νερού παραμένουν σταθερές καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ακόμα, όπως ήταν αναμενόμενο η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου, δηλαδή της άλμης, στο τρισδιάστατο χωρίο που καταλαμβάνει συνεχώς αυξάνεται από την είσοδο προς την έξοδο. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης, δηλαδή του νερού, στο τρισδιάστατο χωρίο που καταλαμβάνει συνεχώς μειώνεται από την είσοδο προς την έξοδο. Τέλος, η θερμοκρασία της πλάκας του εναλλάκτη κατά το μέσο επίπεδό της έχει προσεγγιστικά την μέση τιμή των θερμοκρασιών των μέσων επιπέδων της άλμης και του νερού. Στο άνω άκρο της η πλάκα τείνει να έχει μειωμένη θερμοκρασία, δηλαδή εύρος που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία εισόδου της άλμης και στο κάτω άκρο της τείνει να έχει αυξημένη θερμοκρασία, εύρος που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία εισόδου του νερού.

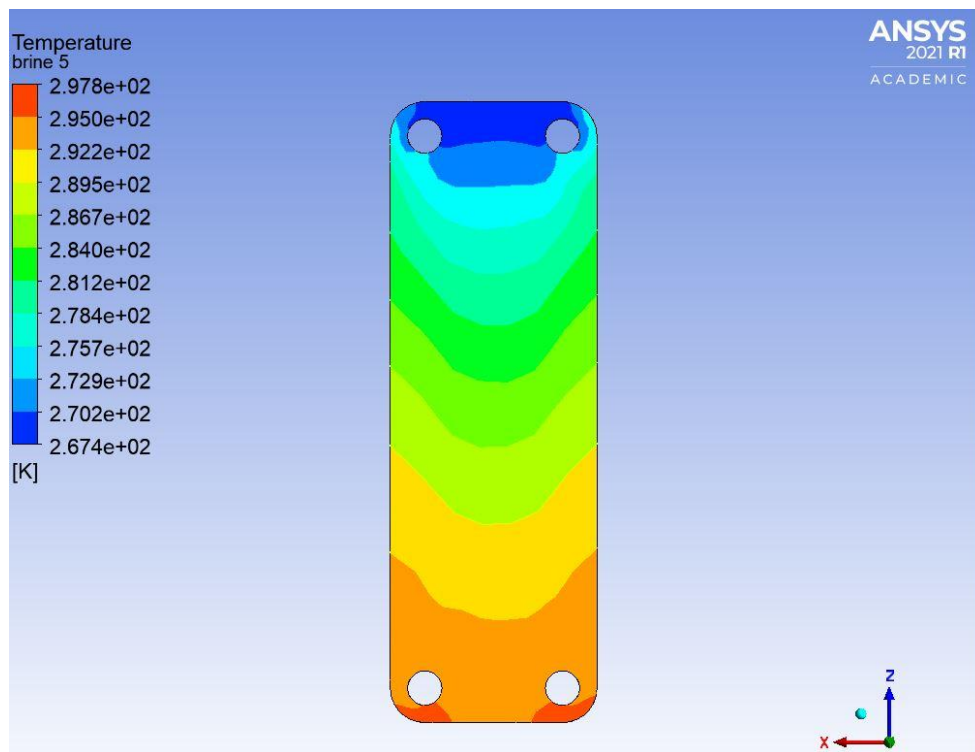
8.1 Κατανομή Θερμοκρασίας Άλμης



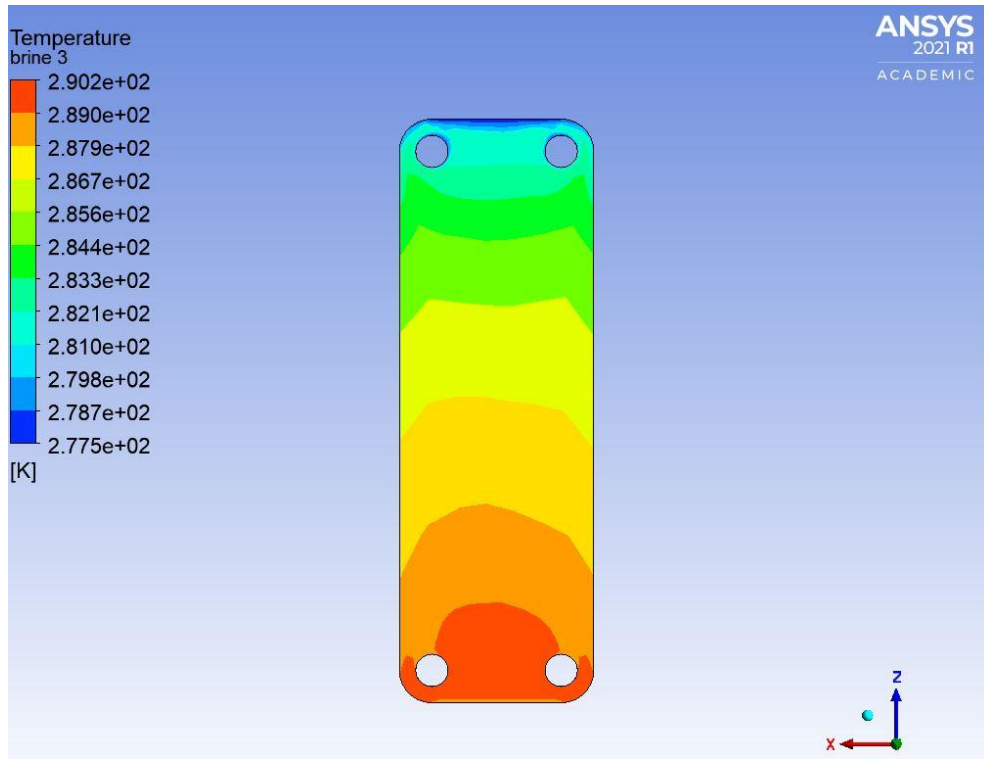
Εικόνα 8.1.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικού όγκου άλμης για $t=60 \text{ sec}$



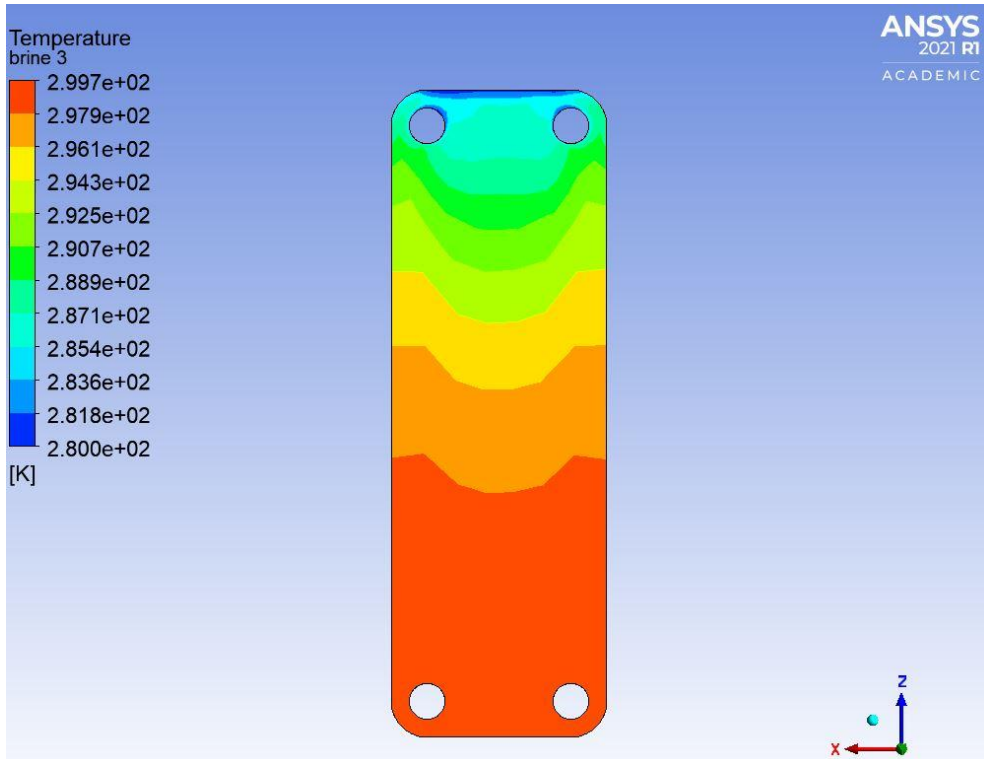
Εικόνα 8.2.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικού όγκου άλμης για $t=25200 \text{ sec}$ ή $t=7 \text{ hr}$



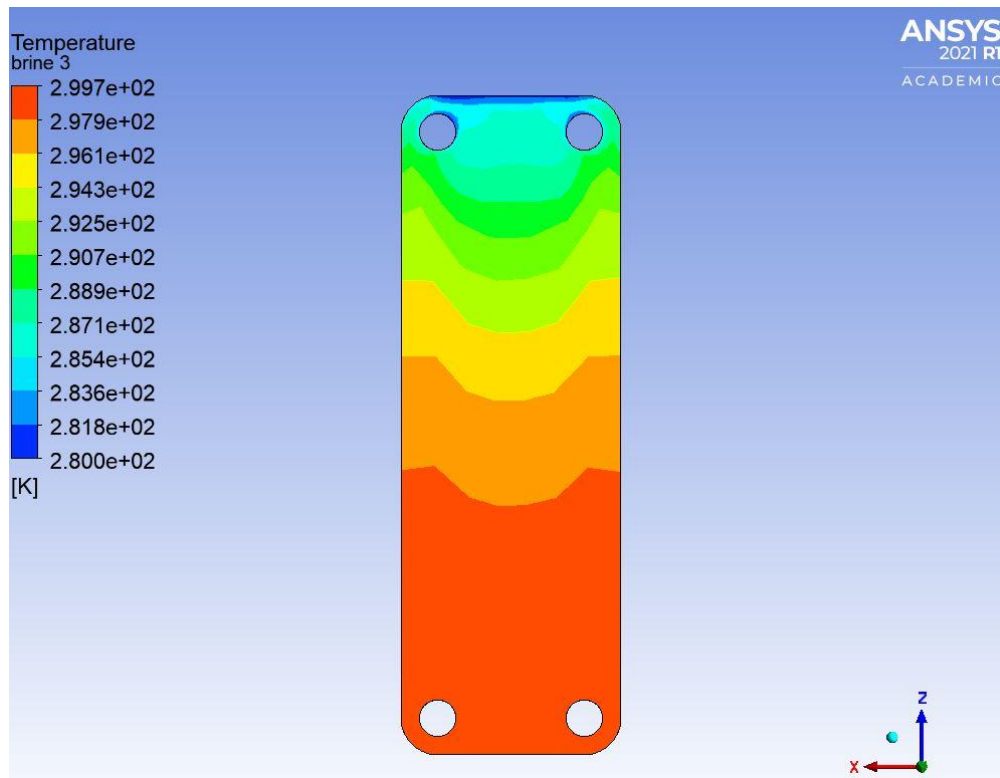
Εικόνα 8.3.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικού όγκου άλμης για $t=50400 \text{ sec}$ ή $t=14 \text{ hr}$



Εικόνα 8.4.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικού όγκου άλμης για $t=60 \text{ sec}$



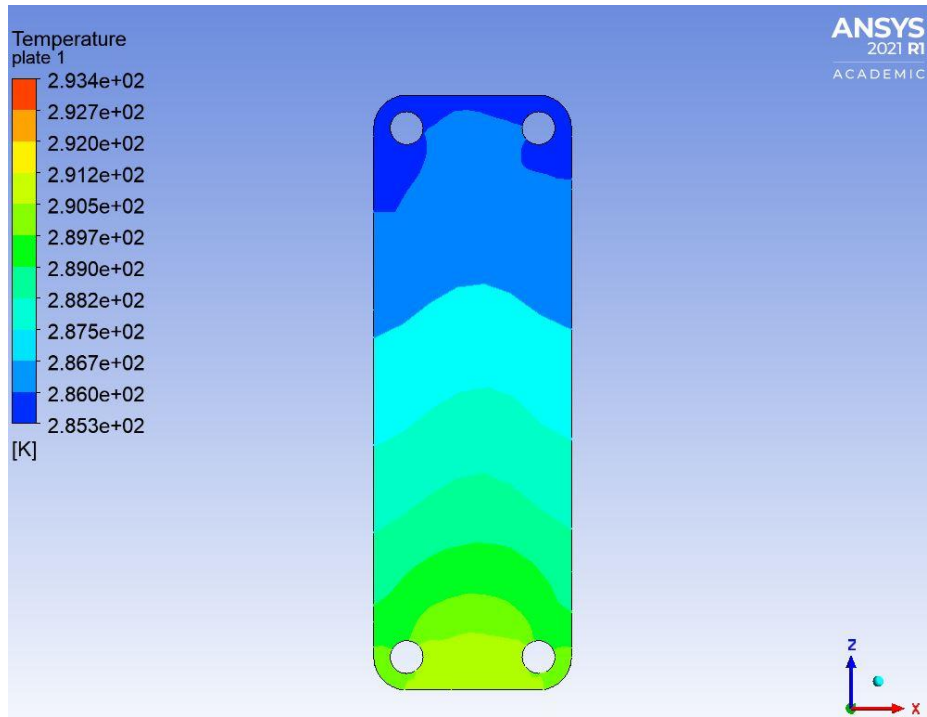
Εικόνα 8.5.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικού όγκου άλμης για $t=25200 \text{ sec}$ ή $t=7 \text{ hr}$



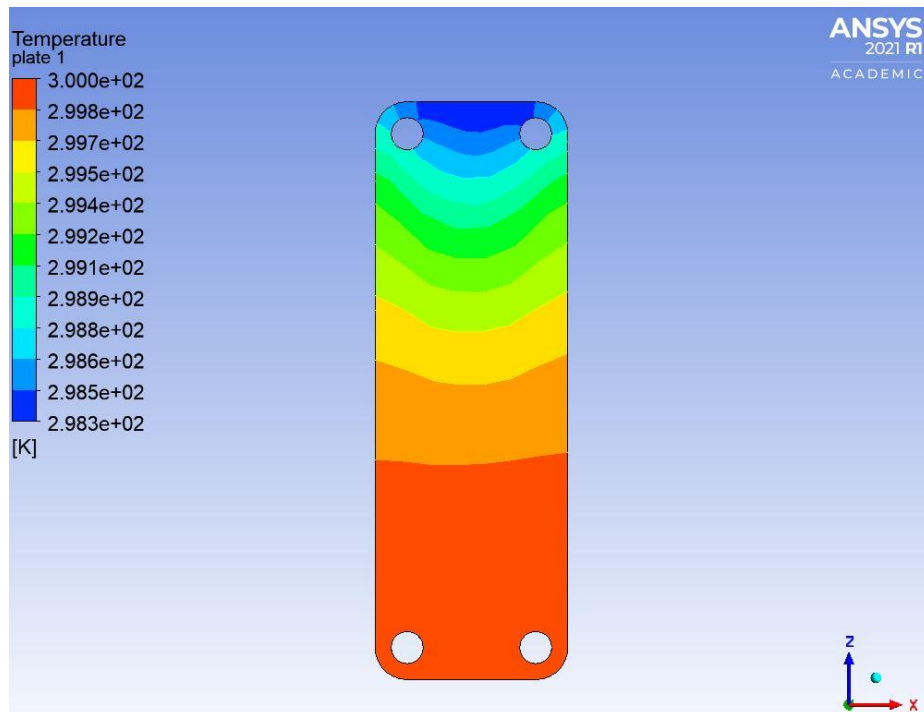
Εικόνα 8.6.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικού όγκου άλμης για $t=50400 \text{ sec}$ ή $t=14 \text{ hr}$

Είναι εμφανές με σύγκριση των εικόνων (8.1-8.3) μεταξύ τους, αντίστοιχα και των (8.4-8.5), ότι οι δύο όγκοι εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά. Αναλυτικότερα, και οι δύο όγκοι άλμης στα 60 sec εμφανίζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες στην επιφάνειά τους ειδικά από την μέση και άνω, ενώ τα εύρη θερμοκρασιών στον εξωτερικό όγκο από 267.4 K-289.6K ανεβαίνουν στο 267.4K-297.8K και στον εσωτερικό όγκο από 277.5K-290.2K στο 280.0K-299.7K. Αυτό αιτιολογείται στον ότι στην αρχή της προσομοίωσης δεν έχει προλάβει να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού και της άλμης, επομένως οι θερμοκρασίες είναι μειωμένες σε σχέση με τις χρονικές στιγμές $t=7\text{hr}$, $t=14\text{hr}$, ενώ σε αυτές τις χρονικές στιγμές οι θερμοκρασίες έχουν αυξηθεί ειδικά στο κάτω άκρο των όγκων άλμης (η είσοδος του νερού είναι στο κάτω άκρο του συνολικού μοντέλου του εναλλάκτη ενώ η είσοδος της άλμης στο άνω). Ακόμα είναι εμφανές ότι οι θερμοκρασίες και στις τρεις χρονικές στιγμές είναι υψηλότερες στον εσωτερικό όγκο άλμης από ότι στον εσωτερικό. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να δικαιολογηθεί στο ότι ο εσωτερικός όγκος είναι θεωρητικά μονωμένος από όλους τους υπόλοιπους όγκους άλμης, νερού και πλακών που το περιβάλλουν ενώ ο εξωτερικός όγκος εμφανίζει μεγαλύτερες ενεργειακές απώλειες προς το περιβάλλον, συνεπώς αυξημένες θερμοκρασίες σε σχέση με τον εξωτερικό. Τελική αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι και στους δύο όγκους άλμης, έχει επέλθει θερμική ισορροπία στις χρονικές στιγμές $t=7\text{hr}$ και $t=14\text{hr}$ και η κατανομή θερμοκρασίας είναι ίδια, ενώ στην αρχική χρονική στιγμή όπως αναφέρθηκε και πριν η θερμοκρασίες είναι μειωμένες.

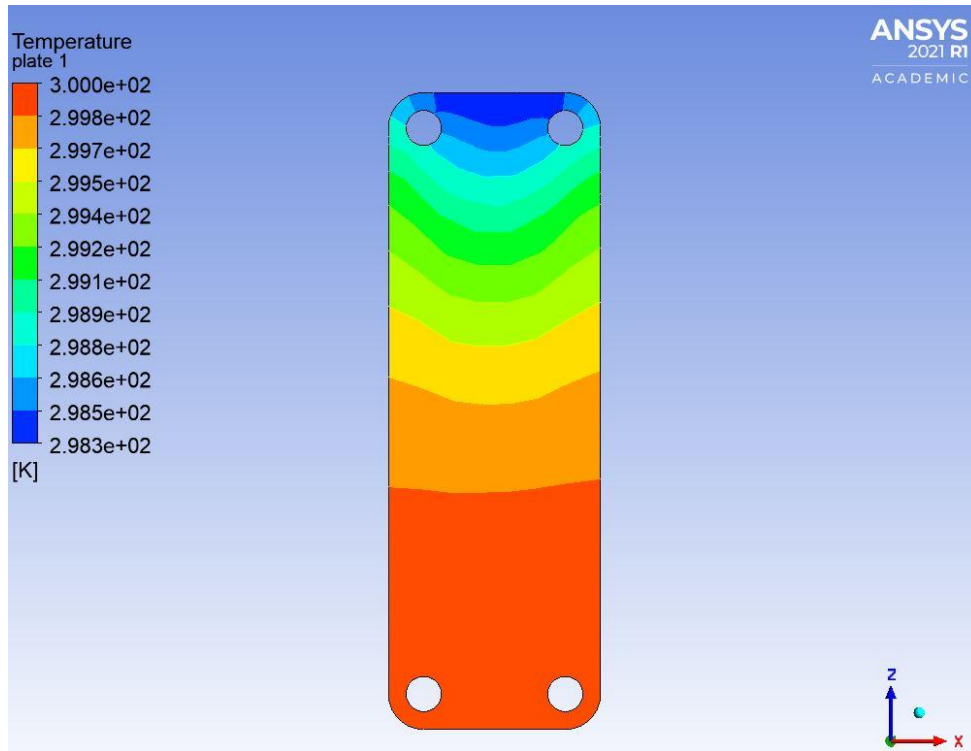
8.2 Κατανομή Θερμοκρασίας Πλάκας Εναλλάκτη



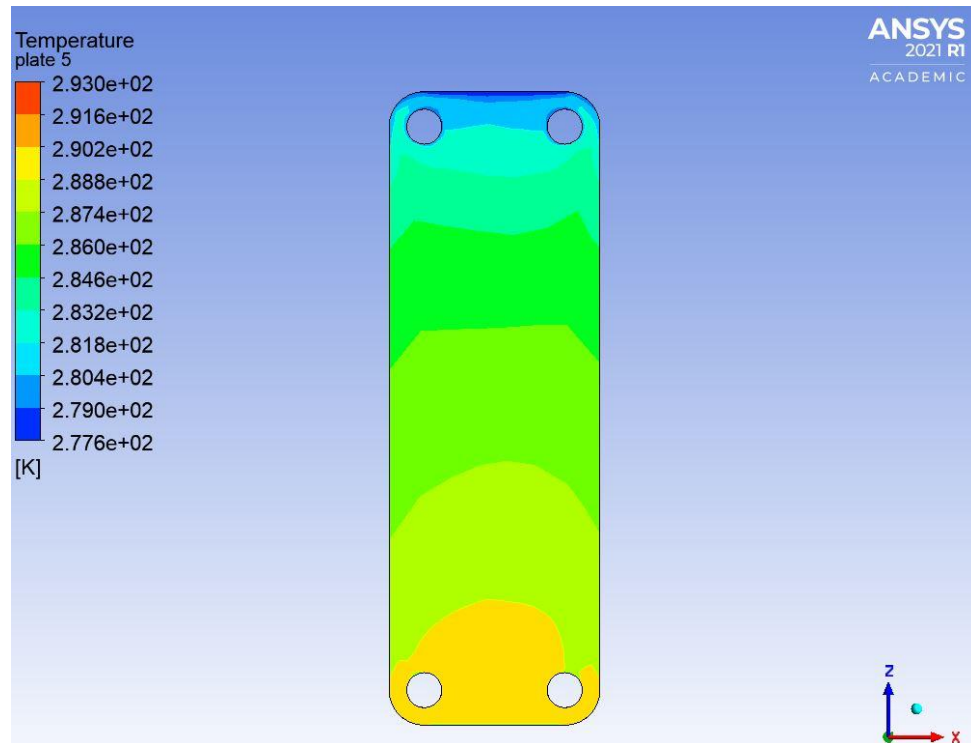
Εικόνα 8.7.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικής πλάκας για $t=60 \text{ sec}$



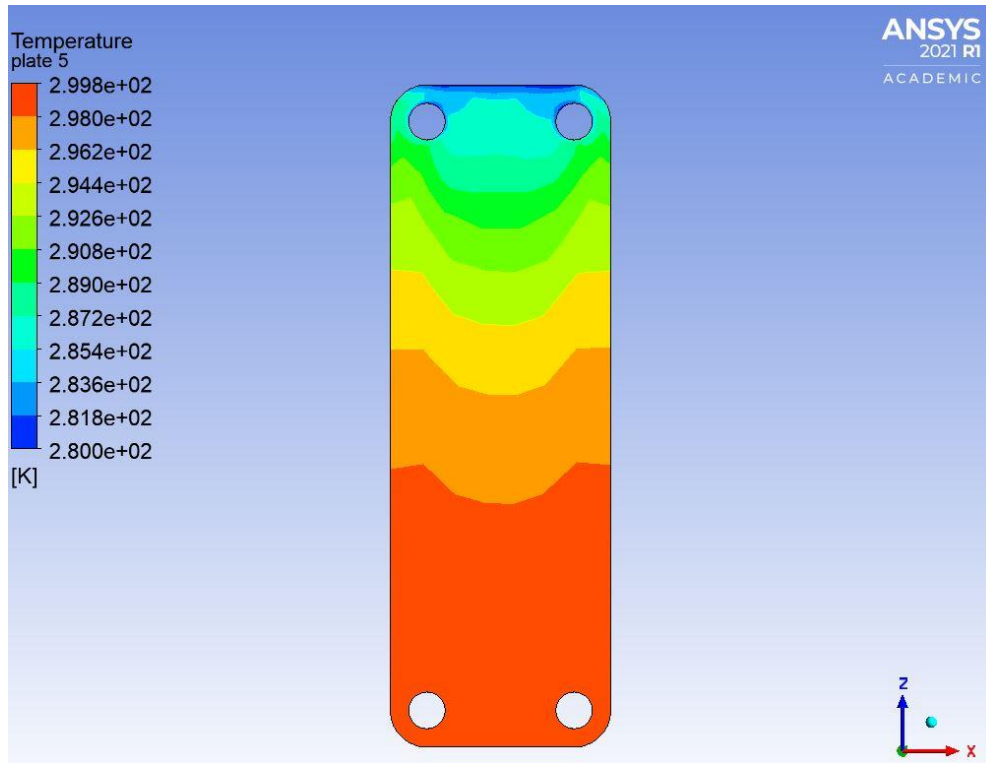
Εικόνα 8.8.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικής πλάκας για $t=25200 \text{ sec}$ ή $t=7 \text{ hr}$



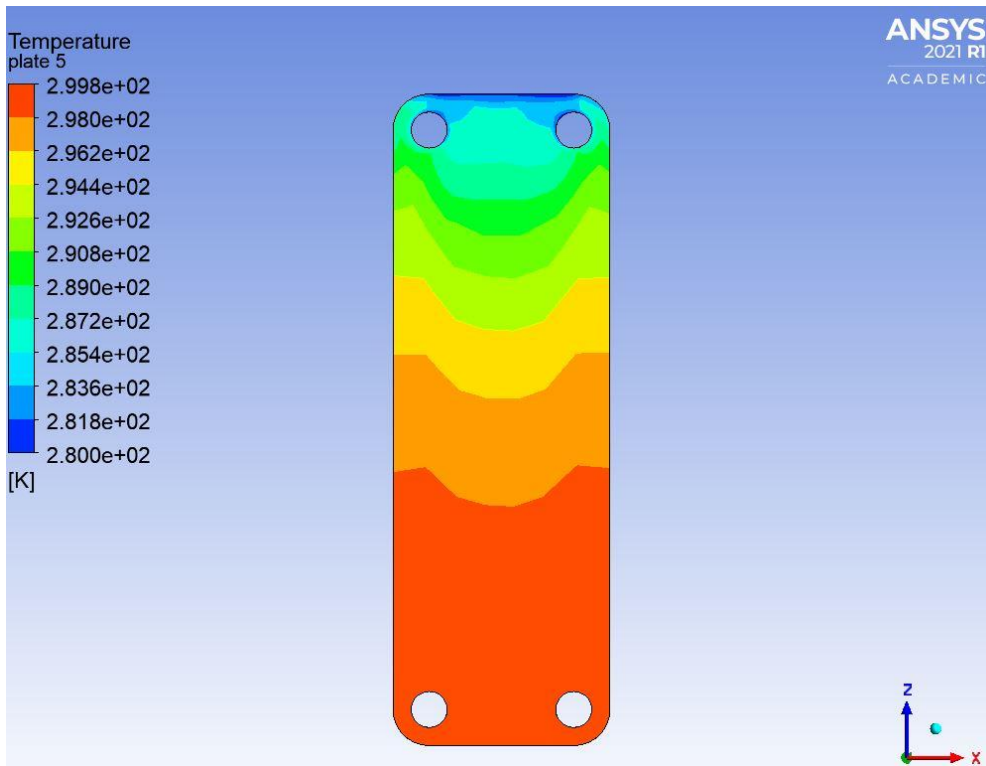
Εικόνα 8.9.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικής πλάκας για $t=50400 \text{ sec}$ ή $t=14 \text{ hr}$



Εικόνα 8.10.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικής πλάκας για $t=60 \text{ sec}$



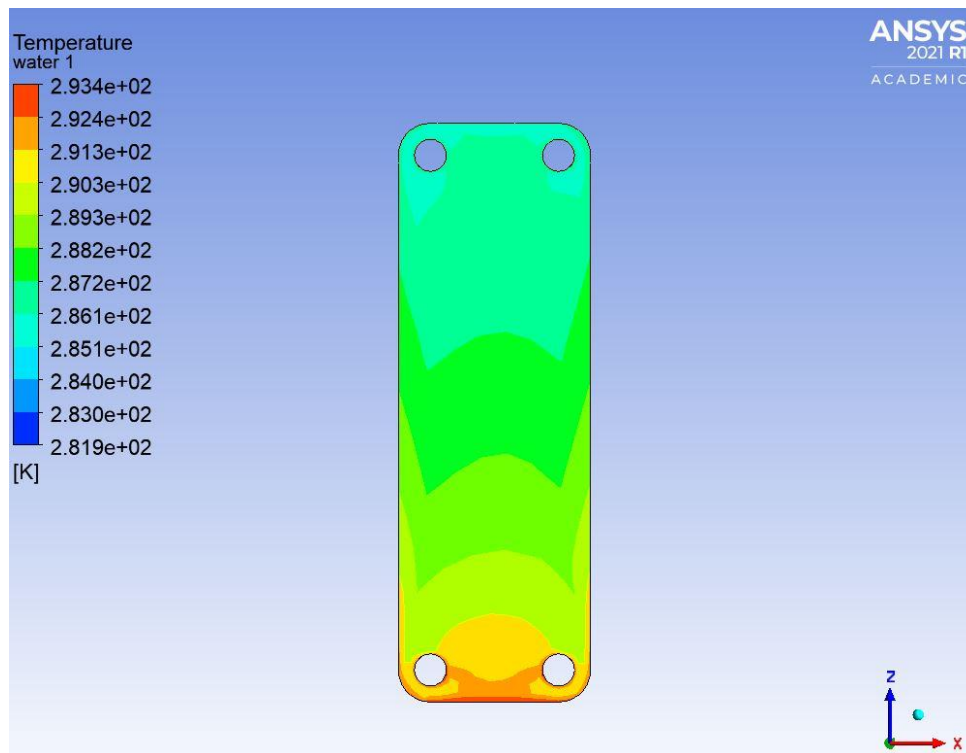
Εικόνα 8.11.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικής πλάκας για $t=25200$ sec ή $t=7$ hr



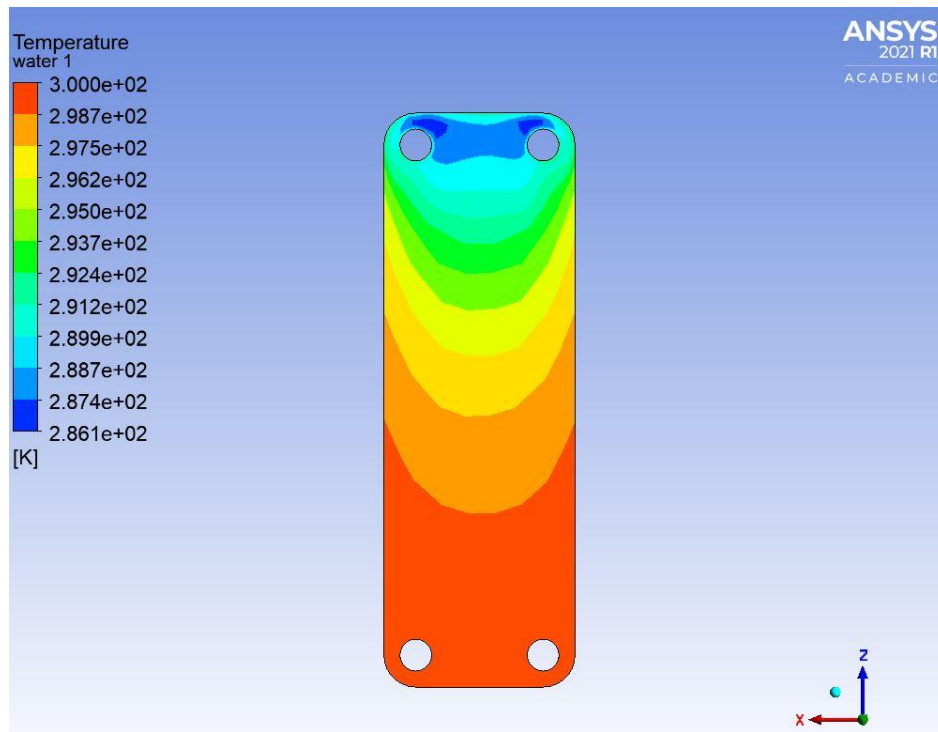
Εικόνα 8.12.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικής πλάκας για $t=50400$ sec ή $t=14$ hr

Οι δύο πλάκες στα 60 sec εμφανίζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες σχεδόν σε όλη την επιφάνειά τους, ενώ τα εύρη θερμοκρασιών στην εξωτερική πλάκα από 285.3K-293.4K ανεβαίνουν στο 298.3K-300.0K και στην εξωτερική πλάκα από 277.6K-293.0K στο 280.0K-299.8K. Στην πρώτη περίπτωση η αύξηση και η αλλαγή κατανομής είναι πιο έντονες, αυτό αιτιολογείται στο ότι η εξωτερική πλάκα έρχεται σε επαφή μόνο με τον όγκο του νερού που είναι το ρευστό υψηλότερης θερμοκρασίας και όχι με κάποιον όγκο άλμης. Η εσωτερική πλάκα εμφανίζει μικρή αύξηση ενώ είναι εμφανές ότι η κατανομή (υψηλών και χαμηλών θερμοκρασιών) είναι σχετικά ομοιόμορφη, μια παρατήρηση που έχει λογική καθώς η εσωτερική πλάκα από την μία πλευρά της έρχεται σε επαφή με όγκο άλμης και από την άλλη με όγκο νερού. Ακόμα είναι εμφανές ότι οι θερμοκρασίες στις δύο τελευταίες χρονικές στιγμές είναι υψηλότερες στον εξωτερικό όγκο άλμης από ότι στον εσωτερικό. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να δικαιολογηθεί σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν προηγουμένως, ο εσωτερικός όγκος έρχεται σε επαφή με δύο ρευστά, ένα υψηλής και ένα χαμηλής θερμοκρασίας τα οποία εξισορροπούν την αλλαγή θερμοκρασίας ενώ η εξωτερική πλάκα έρχεται σε επαφή μόνο με το ρευστό υψηλής θερμοκρασίας. Τελική αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι και στους δύο όγκους άλμης, έχει επέλθει θερμική ισορροπία στις χρονικές στιγμές $t=7hr$ και $t=14hr$ και η κατανομή θερμοκρασίας είναι ίδια, ενώ στην αρχική χρονική στιγμή όπως αναφέρθηκε και πριν η θερμοκρασίες είναι μειωμένες.

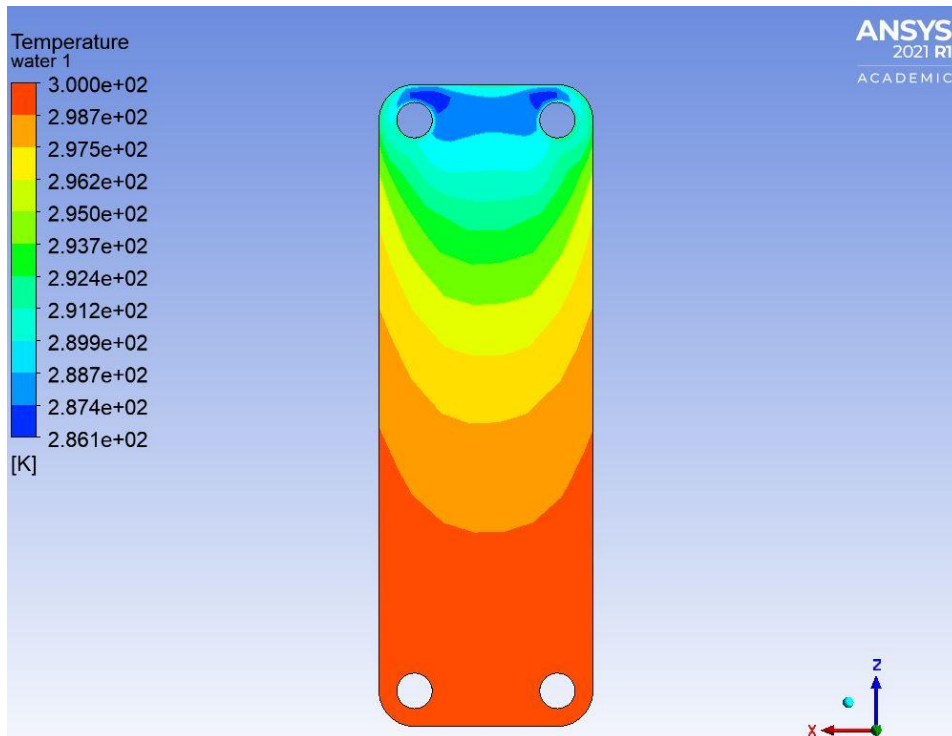
8.3 Κατανομή Θερμοκρασίας Νερού/Πάγου



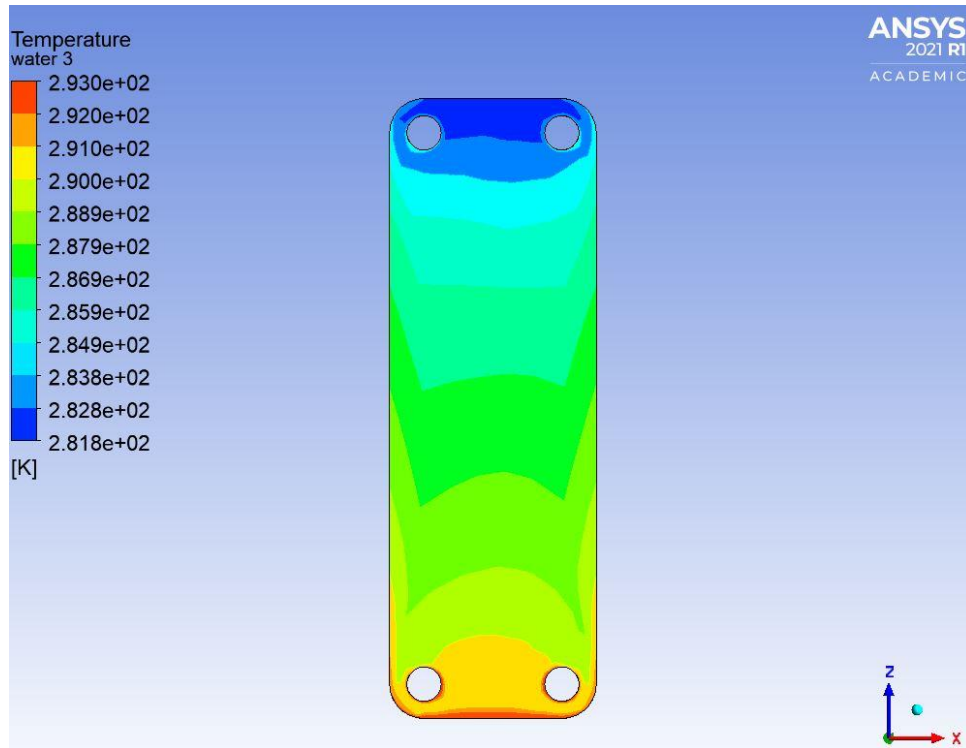
Εικόνα 8.13.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικού όγκου νερού για $t=60 sec$



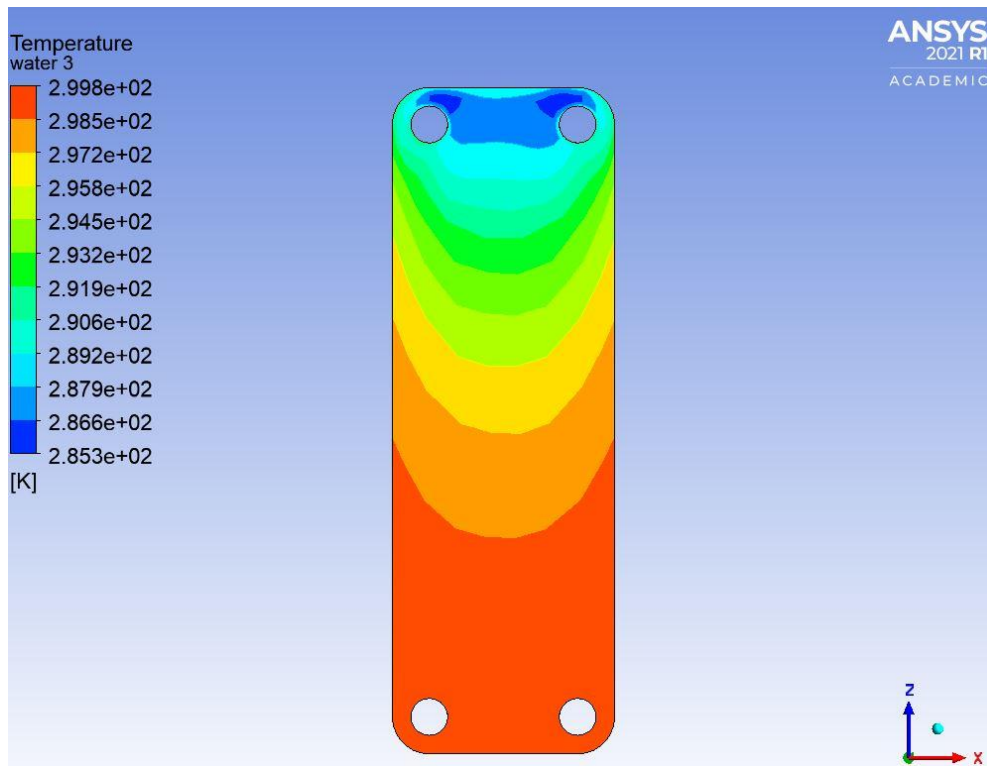
Εικόνα 8.14.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικού όγκου νερού για $t=25200 \text{ sec}$ ή $t=7 \text{ hr}$



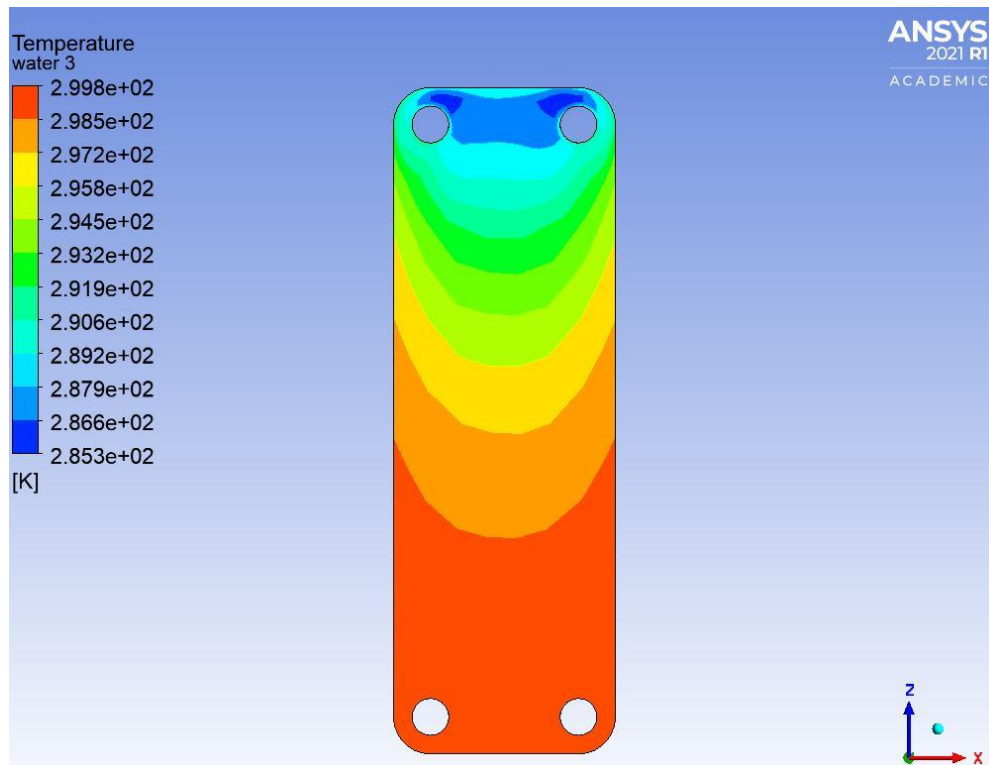
Εικόνα 8.15.: Κατανομή θερμοκρασίας εξωτερικού όγκου νερού για $t=50400 \text{ sec}$ ή $t=14 \text{ hr}$



Εικόνα 8.16.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικού όγκου νερού για $t=60 \text{ sec}$

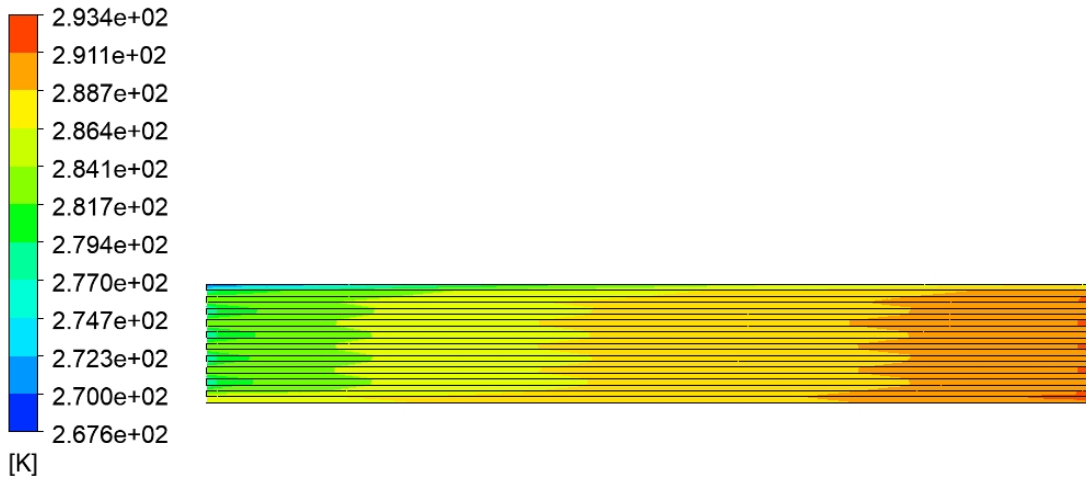


Εικόνα 8.17.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικού όγκου νερού για $t=25200 \text{ sec}$ ή $t=7 \text{ hr}$

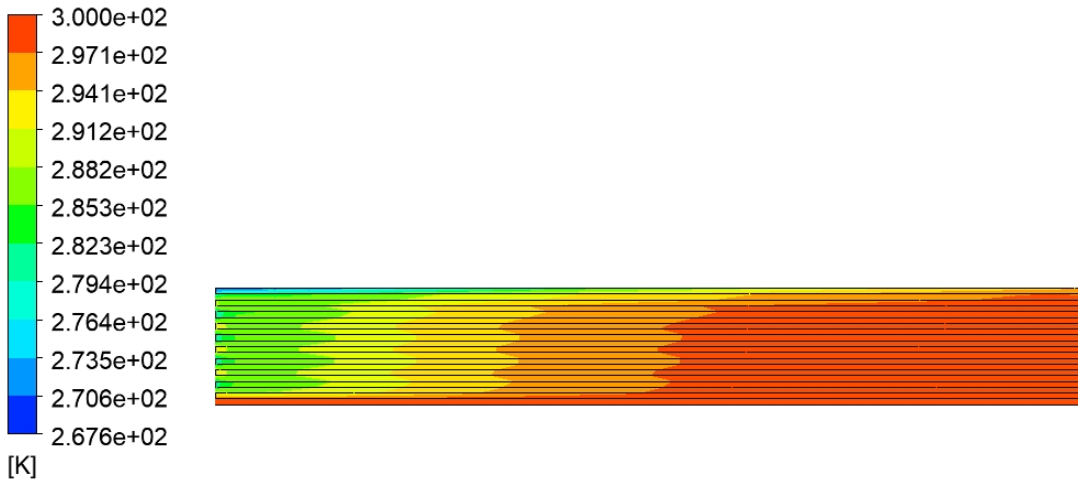


Εικόνα 8.18.: Κατανομή θερμοκρασίας εσωτερικού όγκου νερού για $t=50400 \text{ sec}$ ή $t=14 \text{ hr}$

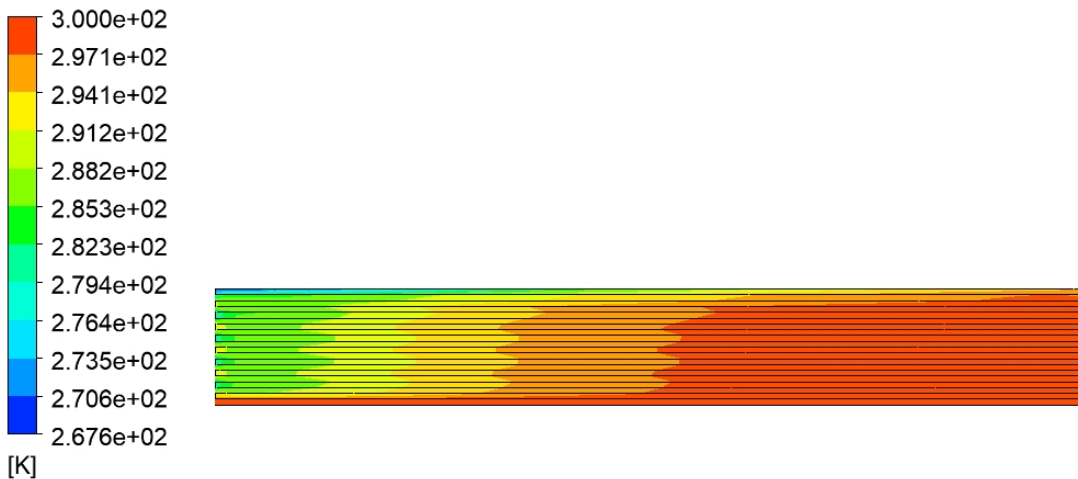
Είναι εμφανές από τις εικόνες (8.13-8.15) ότι τα εύρη θερμοκρασιών στον εξωτερικό όγκο νερού από 287.2K-293.4K μειώνονται στο 286.1K-300.0K. Αυτό αιτιολογείται στο ότι ο εξωτερικός όγκος εμφανίζει μεγαλύτερες ενεργειακές απώλειες προς το περιβάλλον ενώ ακόμα γίνεται μεταφορά θερμότητας από αυτόν προς την εξωτερική πλάκα του εναλλάκτη που έρχεται σε επαφή μόνο με το νερό και το εξωτερικό περιβάλλον. Τα εύρη θερμοκρασιών του εσωτερικού όγκου νερού από 281.8K-293.0K αυξάνονται ελάχιστα στο 285.3K-299.8K, ενώ ακόμα αλλάζει η κατανομή θερμοκρασίας. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί στο ότι ο εσωτερικός όγκος είναι θεωρητικά μονωμένος από όλους τους υπόλοιπους όγκους άλμης, νερού και πλακών που το περιβάλλουν ενώ ο εξωτερικός όγκος εμφανίζει μεγαλύτερες ενεργειακές απώλειες προς το περιβάλλον, συνεπώς αυξημένες θερμοκρασίες σε σχέση με τον εξωτερικό. Τελική αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι και στους δύο όγκους νερού, έχει επέλθει θερμική ισορροπία στις χρονικές στιγμές $t=7\text{hr}$ και $t=14\text{hr}$ και η κατανομή θερμοκρασίας είναι ίδια, ενώ στην αρχική χρονική στιγμή όπως αναφέρθηκε και πριν η θερμοκρασίες είναι μειωμένες.



Εικόνα 8.19.: Κατανομή θερμοκρασίας εγκάρσιας τομής όλων των όγκων ελέγχου για $t=60 \text{ sec}$

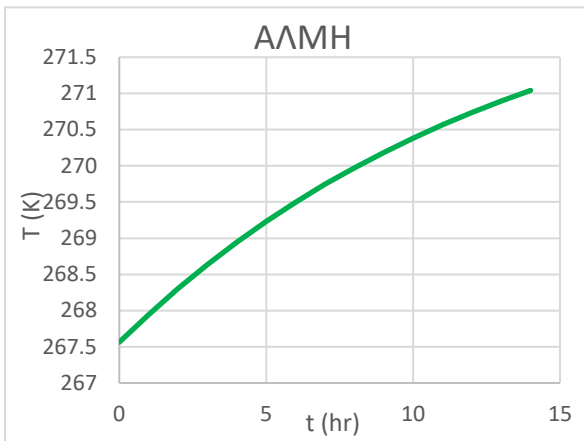


Εικόνα 8.20.: Κατανομή θερμοκρασίας εγκάρσιας τομής όλων των όγκων ελέγχου για $t=25200 \text{ sec}$ ή $t=7 \text{ hr}$

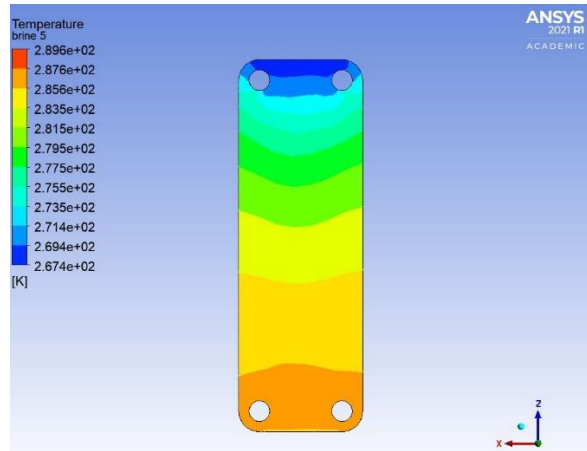


Εικόνα 8.21.: Κατανομή θερμοκρασίας εγκάρσιας τομής όλων των όγκων ελέγχου για $t=50400 \text{ sec}$ ή $t=14 \text{ hr}$

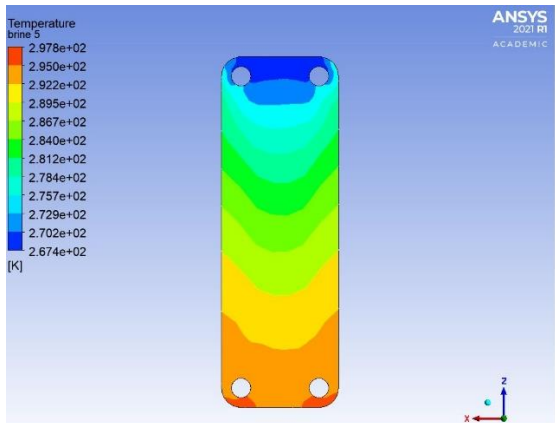
9. Σύγκριση Αποτελεσμάτων MATLAB & ANSYS® FLUENT



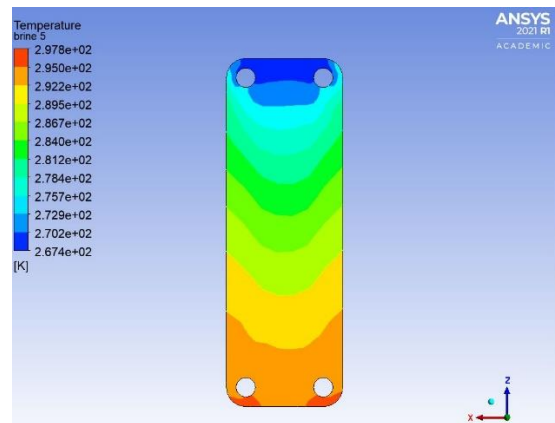
Εικόνα 9.1: Μεταβολής της θερμοκρασίας της άλμης



Εικόνα 9.2.: Θερμοκρασία εξωτερικού όγκου άλμης, t=60 sec



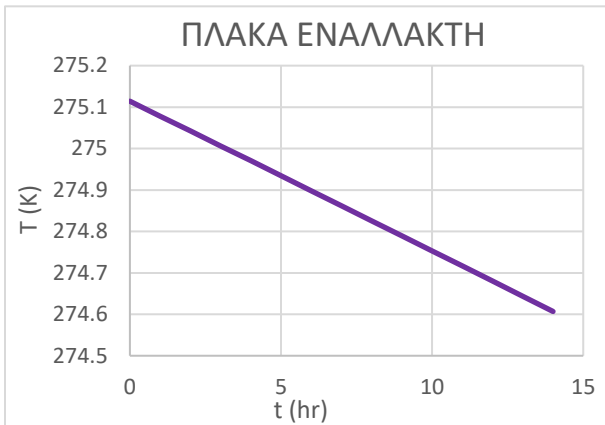
Εικόνα 9.3.: Θερμοκρασία εξωτερικού όγκου άλμης, t=7 hr



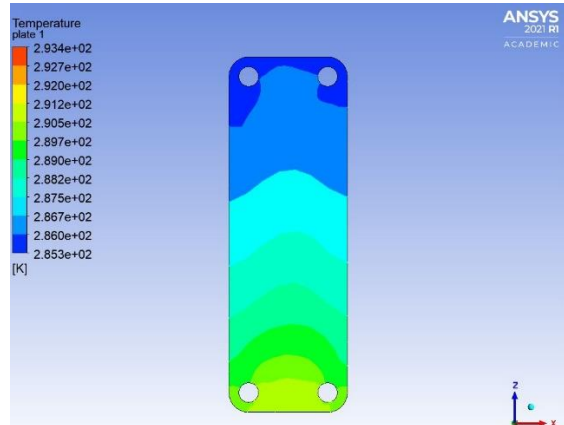
Εικόνα 9.4.: Θερμοκρασία εξωτερικού όγκου άλμης, t=14hr

Από το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας της άλμης που προέκυψε από την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, το θερμοκρασιακό εύρος για τις 14 ώρες είναι 267.5K-271 K. Είναι εμφανές ότι για την τρισδιάστατη προσομοίωση (για τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές) το εύρος είναι 267.4 K-297.8 K. Μια αρχική παρατήρηση είναι ότι τα δύο εύρη είναι αρκετά κοντά το ένα στο άλλο, ειδικά το κάτω όριο και αυτό επιβεβαιώνει την ορθότητα του θεωρητικού μοντέλου, δηλαδή αυτού των εξισώσεων. Ωστόσο, μεταξύ της θεωρητικής προσέγγισης και της τρισδιάστατης προσομοίωσης υπάρχει η διαφοροποίηση ότι καθόλη την διάρκεια των 14 ωρών στην πρώτη περίπτωση η θερμοκρασία συνεχώς αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό, ενώ στην δεύτερη αυξάνεται σε μικρό βαθμό και ομοιόμορφα σε όλο το εύρος του μοντέλου με τη θερμοκρασία να παραμένει σταθερή από μια χρονική στιγμή και μετά, όταν έχει επέλθει δηλαδή θερμική ισορροπία.

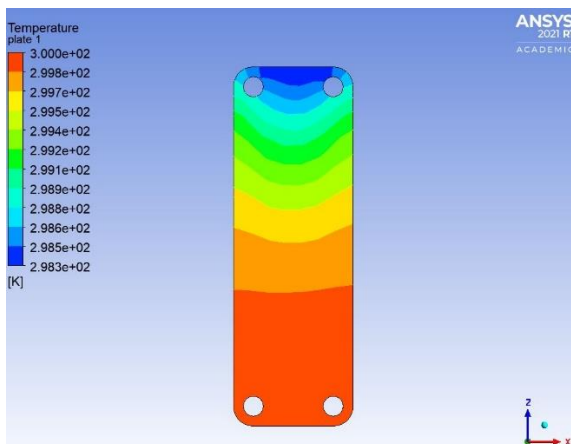
Οι διαφορές στις τιμές μπορούν να ερμηνευθούν στο γεγονός ότι οι προκύπτουσες θερμοκρασίες από τις εξισώσεις είναι θεωρητικές και δεν λαμβάνουν υπόψιν με την αναγκαία ακρίβεια την πολύπλοκη γεωμετρία και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τρισδιάστατων όγκων ελέγχου, αλλά εξετάσουν σαν «σημείο» τον όγκο ελέγχου.



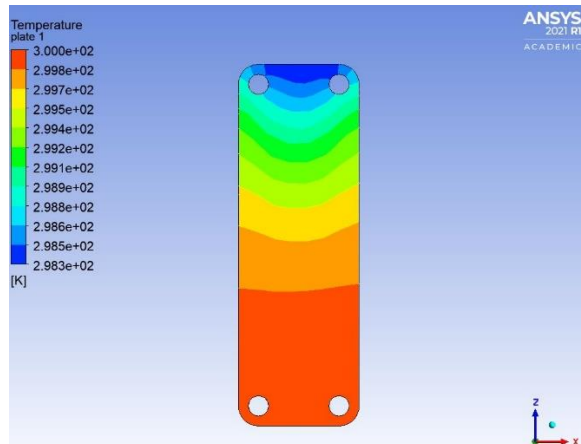
Εικόνα 9.5: Μεταβολής της θερμοκρασίας της πλάκας



Εικόνα 9.6.: Θερμοκρασία εξωτερικής πλάκας, t=60 sec



Εικόνα 9.7.: Θερμοκρασία εξωτερικής πλάκας, t=7 hr

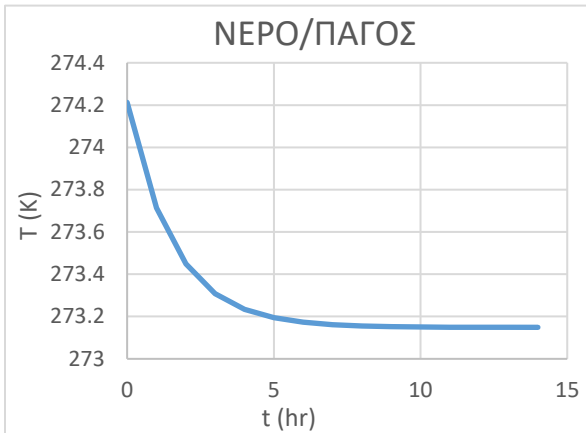


Εικόνα 9.8.: Θερμοκρασία εξωτερικής πλάκας, t=14 hr

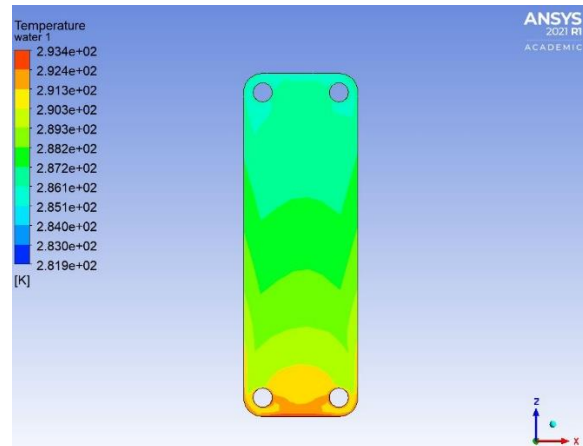
Από το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας της πλάκας που προέκυψε από την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, το θερμοκρασιακό εύρος για τις 14 ώρες είναι 274.6K-275.1 K. Είναι εμφανές ότι για την τρισδιάστατη προσομοίωση (για τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές) το εύρος είναι 285.3 K-300.0 K. Μια αρχική παρατήρηση είναι ότι τα δύο εύρη παρουσιάζουν διαφοροποίηση το ένα από το άλλο, ενώ ακόμα το ανώτερο και το κατώτερο άκρο του καθενός απέχουν προσεγγιστικά και τα δύο 10K.

Μεταξύ της θεωρητικής προσέγγισης και της τρισδιάστατης προσομοίωσης υπάρχει η διαφοροποίηση ότι καθόλη την διάρκεια των 14 ωρών στην πρώτη περίπτωση η θερμοκρασία συνεχώς μειώνεται, ενώ στην δεύτερη αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό, με ομοιομορφία όμως σε όλο το εύρος του μοντέλου. Ακόμα η θερμοκρασία παραμένει σταθερή από μια χρονική στιγμή και μετά, όταν έχει επέλθει δηλαδή θερμική ισορροπία.

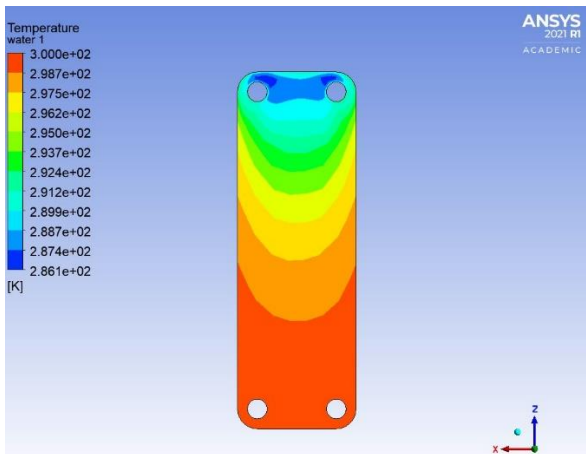
Οι διαφορές στις τιμές μπορούν να ερμηνευθούν στο γεγονός ότι οι προκύπτουσες θερμοκρασίες από τις εξισώσεις είναι θεωρητικές και δεν λαμβάνουν υπόψιν με την αναγκαία ακρίβεια την πολύπλοκη γεωμετρία και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τρισδιάστατων όγκων ελέγχου, αλλά εξετάσουν σαν «σημείο» τον όγκο ελέγχου.



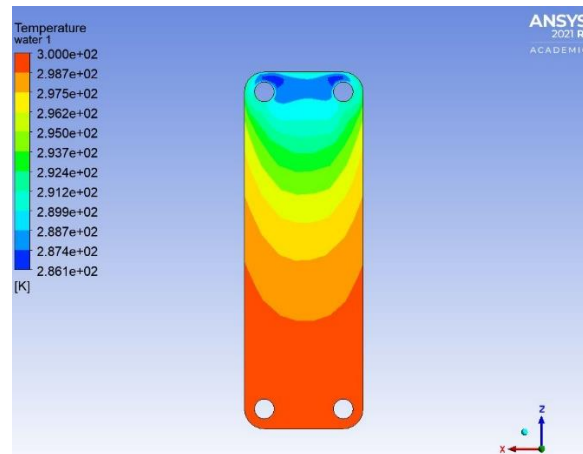
Εικόνα 9.9: Μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού



Εικόνα 9.10.: Θερμοκρασία εξωτερικού όγκου νερού, t=60 sec



Εικόνα 9.11.: Θερμοκρασία εξωτερικού όγκου νερού, t=7 hr

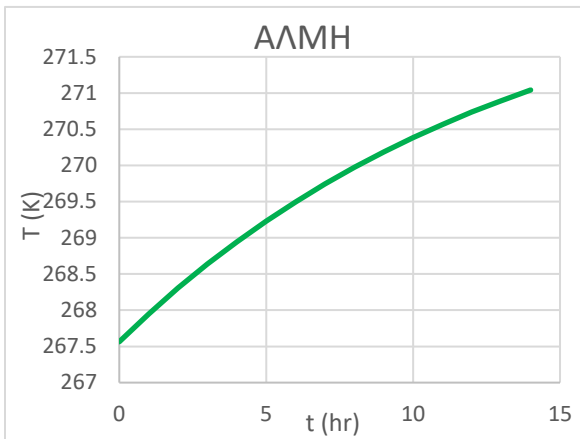


Εικόνα 9.12.: Θερμοκρασία εξωτερικού όγκου νερού, t=14 hr

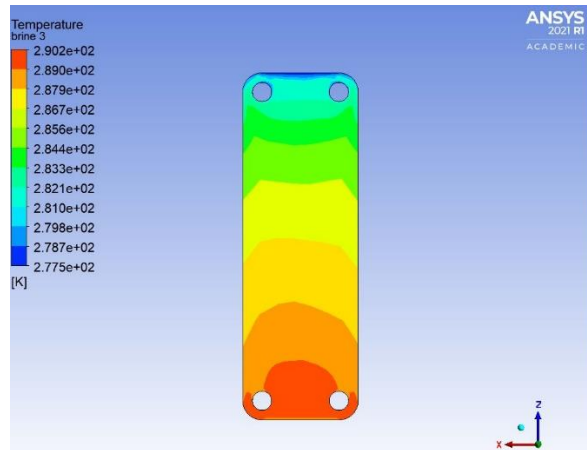
Από το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού που προέκυψε από την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, το θερμοκρασιακό εύρος για τις 14 ώρες είναι 273.15K-274.2K. Είναι εμφανές ότι για την τρισδιάστατη προσομοίωση (για τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές) το εύρος είναι 286.1K-300.0 K. Μια αρχική παρατήρηση είναι ότι τα δύο εύρη απέχουν αρκετά το ένα από το άλλο, με το θερμοκρασιακό εύρος του τρισδιάστατου μοντέλου να είναι μεγαλύτερο από αυτό του μοντέλου των εξισώσεων.

Επίσης, με σύγκριση της θεωρητικής προσέγγισης και της τρισδιάστατης προσομοίωσης γίνεται εμφανές ότι καθόλη την διάρκεια των 14 ωρών στην πρώτη περίπτωση η θερμοκρασία μειώνεται και μετά παραμένει σταθερή, ενώ στην δεύτερη μειώνεται σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας και όχι σε όλα, παραμένει όμως επίσης σταθερή μετά από κάποια χρονική στιγμή.

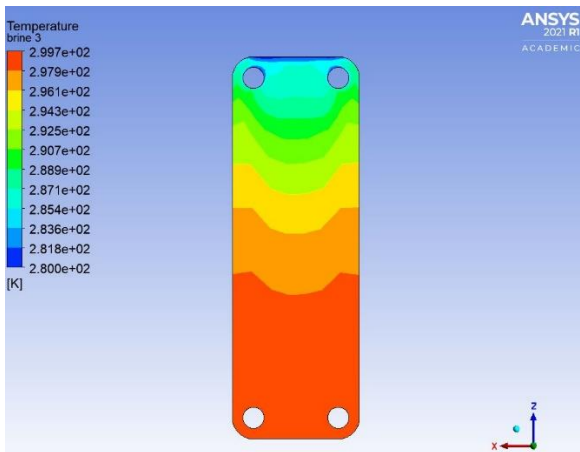
Οι διαφορές στις τιμές μπορούν να ερμηνευθούν στο γεγονός ότι οι προκύπτουσες θερμοκρασίες από τις εξισώσεις είναι θεωρητικές και δεν λαμβάνουν υπόψιν με την αναγκαία ακρίβεια την πολύπλοκη γεωμετρία και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τρισδιάστατων όγκων ελέγχου, αλλά εξετάσουν σαν «σημείο» τον όγκο ελέγχου.



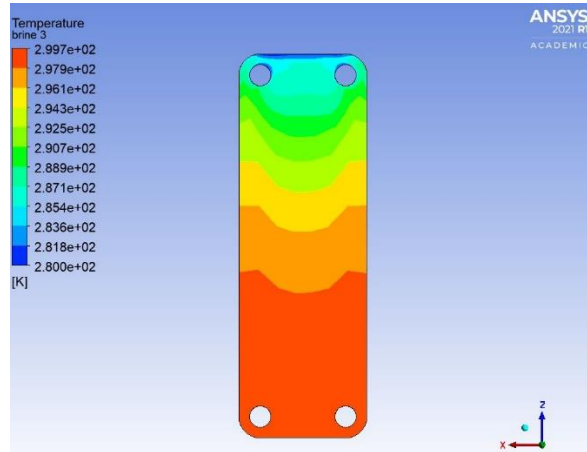
Εικόνα 9.13: Μεταβολής της θερμοκρασίας της άλμης



Εικόνα 9.14.: Θερμοκρασία εσωτερικού όγκου άλμης, t=60 sec



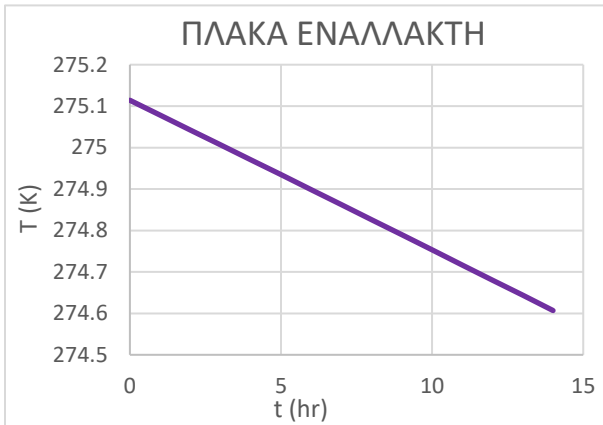
Εικόνα 9.15.: Θερμοκρασία εσωτερικού όγκου άλμης, t=7hr



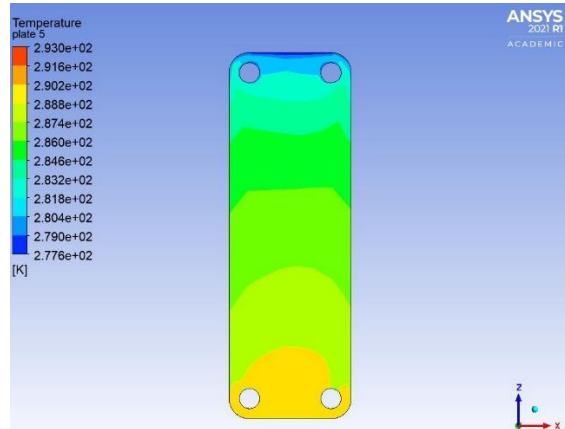
Εικόνα 9.16.:Θερμοκρασία εσωτερικού όγκου άλμης,t=14hr

Από το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας της άλμης που προέκυψε από την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, το θερμοκρασιακό εύρος για τις 14 ώρες είναι 267.5K-271 K. Είναι εμφανές ότι για την τρισδιάστατη προσομοίωση (για τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές) το εύρος είναι 277.5 K-299.7 K. Μια αρχική παρατήρηση είναι ότι τα δύο εύρη απέχουν το ένα από το άλλο. Μεταξύ της θεωρητικής προσέγγισης και της τρισδιάστατης προσομοίωσης υπάρχει η διαφοροποίηση ότι καθόλη την διάρκεια των 14 ωρών στην πρώτη περίπτωση η θερμοκρασία συνεχώς αυξάνεται , ενώ στην δεύτερη αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό και ομοιόμορφα σε όλο το εύρος του μοντέλου με τη θερμοκρασία να παραμένει σταθερή από μια χρονική στιγμή και μετά, όταν έχει επέλθει δηλαδή θερμική ισορροπία.

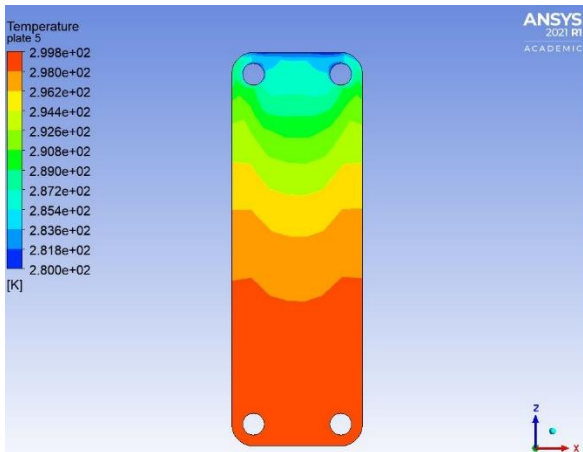
Οι διαφορές στις τιμές μπορούν να ερμηνευθούν στο γεγονός ότι οι προκύπτουσες θερμοκρασίες από τις εξισώσεις είναι θεωρητικές και δεν λαμβάνουν υπόψιν με την αναγκαία ακρίβεια την πολύπλοκη γεωμετρία και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τρισδιάστατων όγκων ελέγχου, αλλά εξετάσουν σαν «σημείο» τον όγκο ελέγχου.



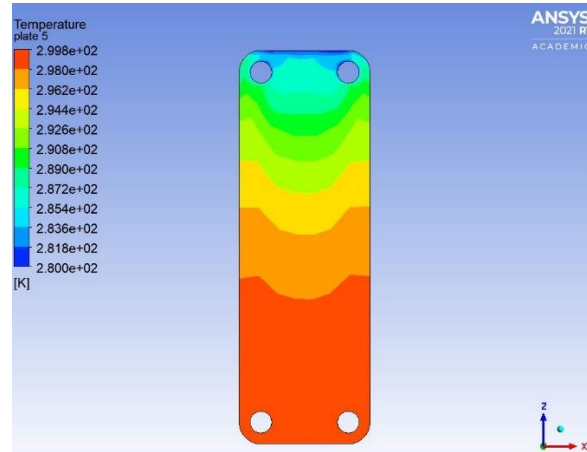
Εικόνα 9.17: Μεταβολής της θερμοκρασίας της πλάκας



Εικόνα 9.18.: Θερμοκρασία εσωτερικής πλάκας, $t=60 \text{ sec}$



Εικόνα 9.19.: Θερμοκρασία εσωτερικής πλάκας, $t=7 \text{ hr}$

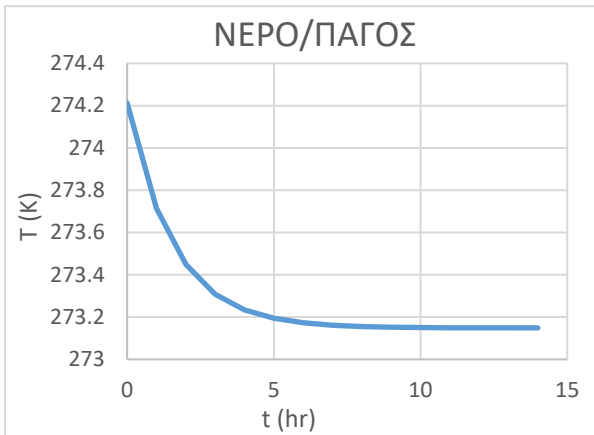


Εικόνα 9.20.: Θερμοκρασία εσωτερικής πλάκας, $t=14 \text{ hr}$

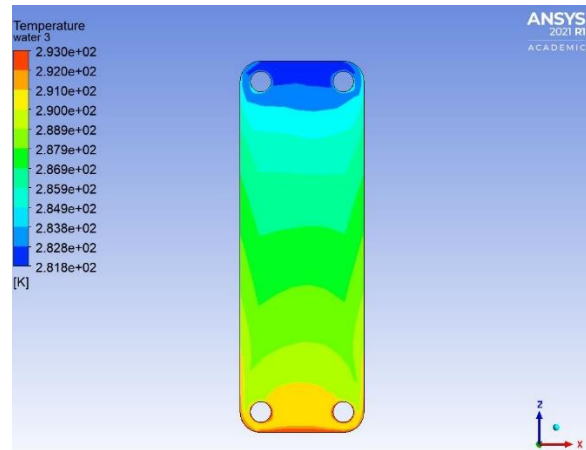
Από το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας της πλάκας που προέκυψε από την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, το θερμοκρασιακό εύρος για τις 14 ώρες είναι 274.6K-275.1 K. Είναι εμφανές ότι για την τρισδιάστατη προσομοίωση (για τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές) το εύρος είναι 277.6 K-299.8 K. Μια αρχική παρατήρηση είναι ότι η κατώτερη τιμή της θερμοκρασίας είναι σχεδόν ίδια και στις δύο περιπτώσεις, σε αντίθεση με το άνω άκρο που είναι αρκετά μεγαλύτερο στο τρισδιάστατο μοντέλο.

Μεταξύ των δύο περιπτώσεων υπάρχει η διαφοροποίηση ότι καθόλη την διάρκεια των 14 ωρών στην πρώτη περίπτωση η θερμοκρασία συνεχώς μειώνεται, ενώ στην δεύτερη αυξάνεται με μικρό ρυθμό, με ομοιομορφία όμως μεταξύ υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας σε όλο το εύρος του μοντέλου. Ακόμα η θερμοκρασία παραμένει σταθερή από μια χρονική στιγμή και μετά, όταν έχει επέλθει δηλαδή θερμική ισορροπία.

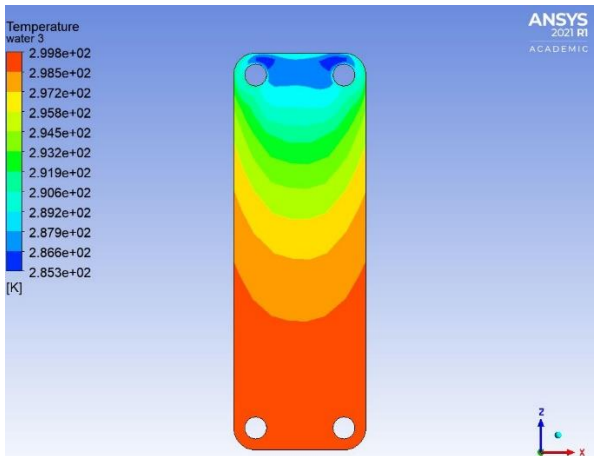
Οι διαφορές στις τιμές μπορούν να ερμηνευθούν στο γεγονός ότι οι προκύπτουσες θερμοκρασίες από τις εξισώσεις είναι θεωρητικές και δεν λαμβάνουν υπόψιν με την αναγκαία ακρίβεια την πολύπλοκη γεωμετρία και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τρισδιάστατων όγκων ελέγχου, αλλά εξετάσουν σαν «σημείο» τον όγκο ελέγχου.



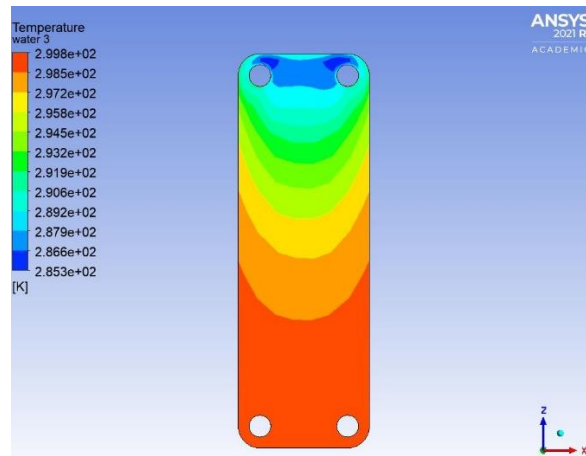
Εικόνα 9.21.: Μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού



Εικόνα 9.22.: Θερμοκρασία εσωτερικού όγκου νερού, t=60 sec



Εικόνα 9.23.: Θερμοκρασία εσωτερικού όγκου νερού, t=7 hr



Εικόνα 9.24.: Θερμοκρασία εσωτερικού όγκου νερού, t=14 hr

Από το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού που προέκυψε από την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, το θερμοκρασιακό εύρος για τις 14 ώρες είναι 273.15K-274.2K. Είναι εμφανές ότι για την τρισδιάστατη προσομοίωση (για τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές) το εύρος είναι 281.8K-299.8 K. Μια αρχική παρατήρηση είναι ότι η κατώτερη τιμή της θερμοκρασίας είναι αρκετά κοντά και στις δύο περιπτώσεις, σε αντίθεση με το άνω άκρο που είναι αρκετά μεγαλύτερο στο τρισδιάστατο μοντέλο.

Επίσης, με σύγκριση της θεωρητικής προσέγγισης και της τρισδιάστατης προσομοίωσης γίνεται εμφανές ότι καθόλη την διάρκεια των 14 ωρών στην πρώτη περίπτωση η θερμοκρασία μειώνεται και μετά παραμένει σταθερή, ενώ στην δεύτερη μειώνεται σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας και όχι σε όλα, παραμένει όμως επίσης σταθερή μετά από κάποια χρονική στιγμή.

Οι διαφορές στις τιμές μπορούν να ερμηνευθούν στο γεγονός ότι οι προκύπτουσες θερμοκρασίες από τις εξισώσεις είναι θεωρητικές και δεν λαμβάνουν υπόψιν με την αναγκαία ακρίβεια την πολύπλοκη γεωμετρία και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τρισδιάστατων όγκων ελέγχου, αλλά εξετάσουν σαν «σημείο» τον όγκο ελέγχου.

10. Παράρτημα-Κώδικας MATLAB

```

clear all; clc;

pw=1000;
pi=997;
pp=7500;

Cpw=4182;
Cpi=2093;
Cpp=420;

Uextw=1000;
Uexti=1.1*(10^-3);
Uextp=20;

amw=8.999;
ami=33.858;
amp=677.160;

lw=10^-5;
Dt=1;
Dy=0.05;
Aext=6;

V=1;
Mice=18.015;
hf=5;
Tfr=0;
Ddav=0.01;
Aex=2*Mice/(pice*Ddav);
Ahx=0.06*0.3;
Text=22;
m=150;
Tfi=-6;

aai=[(pw*Cpw/Dt)+(2*l/((Dy^2)))-(Uextw*Aext/V)+(amw*Aex) -l/((Dy)^2) 0];
bbi=[-l/((Dy)^2) (pp*Cpp/Dt)+(2*l/((Dy^2)))-(Uextp*Aext/V)+(amp*Aex) -l/((Dy)^2)];
ccci=[0 -l/((Dy)^2) (pi*Cpi/Dt)+(2*l/((Dy^2)))-(Uexti*Aext/V)+(ami*Aex)];
Ai=[aai;bbi;ccci];

```

```

aani=[(pw*Cpw/Dt)+(2*I/((Dy^2)))-(Uextw*Aext/V)+(amw*Aex)+(m*Cpw*(1-(exp(-
U*Ahx/m*Cpw)))/V) -I/((Dy)^2) 0];
bbni=[-I/((Dy)^2) (pp*Cpp/Dt)+(2*I/((Dy^2)))-(Uextp*Aext/V)+(amp*Aex)+(m*Cpp*(1-
(exp(-U*Ahx/m*Cpp)))/V) -I/((Dy)^2)];
ccni=[0 -I/((Dy)^2) (pi*Cpi/Dt)+(2*I/((Dy^2)))-(Uexti*Aext/V)+(ami*Aex)+(m*Cpi*(1-(exp(-
U*Ahx/m*Cpi)))/V)];
Ani=[aani;bbni;ccni];

```

```
T(1:3,1)=[5;5;5];
```

```

for t=1:24*1
    if T(2,t)>0
        U=1/((1/)+(0.0009/15.3)+(0));
        B(1,t)=[(pw*Cpw*T(1,t)/Dt)-(Uextw*Aext*Text/V)-(m*Cpw*Tfi*((exp(-
U*Ahx/(m*Cpw)))-1)/V)];
        B(2,t)=[pp*Cpp*T(2,t)/Dt-(Uextp*Aext*Text/V)];
        B(3,t)=[pi*Cpi*T(3,t)/Dt-(Uexti*Aext*Text/V)+(m*Cpi*Tfi*((exp(-U*Ahx/(m*Cpi)))-
1)/(V*Dt))];
        neesthermokrasies = linsolve(B,Ai);
    else
        U=1/((1/ami)+(0.0009/15.3)+(0));
        B(1,t)=[(pw*Cpw*T(1,t)/Dt)-(Uextw*Aext*Text/V)-(m*Cpw*Tfi*((exp(-
U*Ahx/(m*Cpw)))-1)/V)];
        B(2,t)=[pp*Cpp*T(2,t)/Dt-(Uextp*Aext*Text/V)];
        B(3,t)=[pi*Cpi*T(3,t)/Dt-(Uexti*Aext*Text/V)+(m*Cpi*Tfi*((exp(-U*Ahx/(m*Cpi)))-
1)/(V*Dt))];
        neesthermokrasies = linsolve(B,Ani);
    end
end

```

```
disp(neesthermokrasies)
```


11. Βιβλιογραφία

- [1] D. Carbonell, D. Philippen, M.Y. Haller, E. Frank, «Modeling of an ice storage based on a de-icing concept for solar heating applications», 2015
- [2] Mohammad Hoseini Rahdar, Abolghasem Emamzadeh, Abtin Ataei, «A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings», 2016
- [3] Håkon Selvnes, Yosr Allouche, Armin Hafner, «Experimental characterisation of a cold thermal energy storage unit with a pillow-plate heat exchanger design», 2021
- [4] Lizhong Yang, Uver Villalobos, Bakytzhan Akhmetov, Antoni Gil, Jun Onn Khor, Anabel Palacios, Yongliang Li, Yulong Ding, Luisa F. Cabeza, Wooi Leong Tan, Alessandro Romagnoli, «A comprehensive review on sub-zero temperature cold thermal energy storage materials, technologies, and applications: State of the art and recent developments», 2021
- [5] P. McKenna, W.J.N. Turner, D.P. Finn, «Thermal energy storage using phase change material: Analysis of partial tank charging and discharging on system performance in a building cooling application», 2021
- [6] Tariq Mehmood, Najam ul Hassan Shah, Muzaffar Ali, Pascal Henry Biwole, Nadeem Ahmed Sheikh, «Simplified mathematical model and experimental analysis of latent thermal energy storage for concentrated solar power plants», 2021
- [7] Various, «EVAPCO Ice Storage Application and Design Guide»
- [8] Various, «Ansys 19.2 User's Guide», Ansys
- [15] Various, «Ansys Theory Guide», Ansys
- [16] A. S. Fleischer, «Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials», 2015
- [17] Paul Evans, <https://theengineeringmindset.com/how-plate-heat-exchangers-work/>, 2019

[18]Romina Ronquillo, <https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/understanding-heat-exchangers/>

[19] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger