



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

**Μελέτη μικτής συναγωγής σε συστήματα μοντέρνων
ψηκτρών ψύξης ηλεκτρονικών με μεθόδους της
υπολογιστικής ρευστοδυναμικής**

**Μπορομπόκας
Κωνσταντίνος**

Διπλωματική εργασία για την
απόκτηση

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ**

Επιβλέπωντας: ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

Η Επιτροπή εξέτασης

ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΣΟΦΙΑΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΚΑΡΒΕΛΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

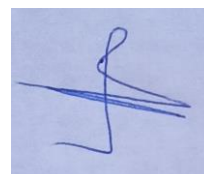
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μπορομπόκας Κωνσταντίνος του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 272017075 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



Περίληψη

Η διπλωματική αυτή διατριβή μελετά τις επιπτώσεις της γεωμετρίας και του υλικού στην μέγιστη θερμοκρασία ενός κοινού επεξεργαστή και η διεξοδική διερεύνηση της μεικτής συναγωγής στα σύγχρονα συστήματα ψύξης ηλεκτρονικών συσκευών με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Έχει χωριστεί σε 10 κεφάλαια που το καθένα πραγματεύεται ένα διαφορετικό ζήτημα. Αρχικά στην εισαγωγή γίνεται μια μικρή αναφορά στους ορισμούς που θα αναλυθούν εκτενώς στο κεφάλαιο 2, αλλά και πως η μικτή συναγωγή αποκτά μεγάλη σημασία στις μέρες μας. Τέλος παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα όρια απόδοσης και τις δυνατότητες βελτίωσης, ενημερώνοντας για την καινοτόμο θερμική διαχείριση στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα. Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής ανάλυση των φυσικών φαινομένων που συμβάλουν στην απαγωγή θερμότητας από ένα θερμό αντικείμενο. Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή αναδρομή στην ιστορία και την ανάπτυξη των μοντέλων Cfd αλλά και στα τρέχοντα ερευνητικά κενά και προκλήσεις που παρουσιάζονται στις μέρες μας. Στο 4^ο αναπτύσσεται εξονυχιστικά το μαθηματικό μοντέλο, στο οποίο βασίστηκε η προσομοίωση αυτής της διπλωματικής, σε αυτό αναφέρονται όλες οι διαφορετικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μία προσομοίωση μεικτής συναγωγής. Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία και οι γεωμετρίες που θα αποτελέσουν το πείραμα στο οποίο βασίζεται η διπλωματική. Στο 6^ο κεφάλαιο θα αναπτυχθούν τα αποτελέσματα και η ανάλυση τους με σύγκριση των μέγιστων θερμοκρασιών που θα προκύψουν από τις γεωμετρίες και τα υλικά. Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται μια απλή τεχνοοικονομική ανάλυση των υλικών και γεωμετριών. Στο 8^ο κεφάλαιο έχουμε τις παρατηρήσεις που προκύπτουν. Στο 9^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για συνέχιση της εργασίας. Τέλος στο 10^ο κεφάλαιο ολοκληρώνεται η διπλωματική με σύγχρονη βιβλιογραφία και πρόσφατα άρθρα που την επικαιροποιούν.

Mixed convection heat transfer in modern electronics cooling heat sinks with methods of computational fluid dynamics

Abstract

This thesis studies the effects of geometry and material on the maximum temperature of a common processor and the thorough investigation of mixed convection in modern electronic device cooling systems using computational fluid dynamics methods. It has been divided into 10 chapters, each dealing with a different issue. Firstly, the introduction gives a brief mention of the definitions which will be discussed in detail in chapter 2, and how mixed convection is becoming very important nowadays. Finally, information on performance limits and improvement possibilities is provided, informing about innovative thermal management in modern electronic systems. Chapter 2 provides an extensive analysis of the physical phenomena that contribute to heat dissipation from a hot object. Chapter 3 reviews the history and development of Cfd models and the current research gaps and challenges that exist nowadays. In the 4th the mathematical model on which the simulation of this thesis was based is thoroughly developed, in it all the different equations used for the physical phenomena that take place in a mixed convection simulation are mentioned. Chapter 5 presents the methodology and the geometries that will constitute the experiment on which the thesis is based. Chapter 6 will develop the results and their analysis by comparing the maximum temperatures obtained from the geometries and materials. In chapter 7 a simple techno-economic analysis of the materials and geometries is presented. In chapter 8 we have the resulting observations. In chapter 9 some suggestions for further work are presented. Finally in chapter 10 the thesis is concluded with modern literature and recent articles updating the thesis.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| 1° Κεφάλαιο Εισαγωγή | 13 |
| 2° Βιβλιογραφική Ανασκόπηση..... | 15 |
| 2.1 Τεχνολογία ηλεκτρονικών και απαιτήσεις τις στις μέρες μας | 15 |
| 2.2 Φυσική Συναγωγή (Natural Convection)..... | 16 |
| 2.3 Εξαναγκασμένη Συναγωγή (Forced Convection)..... | 18 |
| 2.4 Πλεονεκτήματα εξαναγκασμένης συναγωγής έναντι της φυσικής..... | 22 |
| 2.5 Μικτή Συναγωγή(Mixed Convection) | 23 |
| 3. Υπολογιστική Δυναμική Ρευστών (CFD) στην ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών | 27 |
| 3.1 Ιστορία CFD | 28 |
| 3.2 Τρέχοντα ερευνητικά κενά και προκλήσεις..... | 30 |
| 3.2-1 Ανεπαρκής κατανόηση των πολύπλοκων μοτίβων ροής | 31 |
| 3.2-2 Επικύρωση και συγκριτική αξιολόγηση | 31 |
| 3.2-3 Τεχνικές βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας | 32 |
| 3.2-4 Συμβατότητα υλικών και αξιοπιστία..... | 33 |
| 4 Μαθηματικά Μοντέλα-Μέθοδοι Επίλυσης | 35 |
| 4.1 Joule Heating | 35 |
| 4.2 Γενική εξίσωση ροής ρευστών και μεταφοράς θερμότητας..... | 36 |
| 4.3 Γρήγορη εξαναγκασμένη συναγωγή..... | 39 |
| 4.4 Εξίσωση συνέχειας (διατήρηση της μάζας)..... | 40 |
| 4.5 Navier-Stokes Εξίσωση | 40 |
| 4.6 Ιχνη Σωματιδίων | 41 |
| 4.7 Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος του Νεύτωνα..... | 42 |
| 4.8 Ιδιότητες των ρευστών..... | 43 |
| 4.9 Διακριτοποίηση..... | 45 |
| 4.10 Πλέγμα..... | 45 |
| 4.10-1 Σφάλματα λύσεων λόγο πλέγματος..... | 46 |
| 4.11 Μέθοδος επίλυσης | 48 |
| 4.11-1 Διαχωριστικός επιλύτης (Segregated Solver) | 48 |
| 4.11-2 Επιλύτες πινάκων | 50 |
| 5 Μεθοδολογία..... | 53 |
| 5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά-Περιβαλλον Autodesk Inventor 2024 | 53 |
| 5.2 Ανάλυση κατασκευής Γεωμετριών..... | 55 |
| 5.2.1 Κουτί..... | 55 |

| | |
|--|----|
| 5.2.2 Πλακέτα | 56 |
| 5.2.3 Βάσεις Πλακέτας | 57 |
| 5.2.4 Τσιπάκι..... | 58 |
| 5.2.4 Ψύκτρες..... | 59 |
| 5.3 Τελικά σχήματα | 62 |
| 5.4 Πρόγραμμα CFD..... | 66 |
| Παραδοχή..... | 66 |
| 5.5 Μεθοδολογία Εξαγωγής Αποτελεσμάτων | 67 |
| 6 Αποτελέσματα και Ανάλυση τους | 70 |
| 6.1 Σύγκριση Γεωμετριών..... | 70 |
| 6.2 Σύγκριση υλικών ψύκτρας..... | 73 |
| 7. Τεχνοοικονομική Ανάλυση Προβλήματος | 77 |
| 8. Παρατηρήσεις | 79 |
| 9. Προτάσεις για Συνέχιση της Εργασίας | 81 |
| 10. Βιβλιογραφία | 83 |

Πίνακας περιεχομένων γραφημάτων

| | |
|---|----|
| Γράφημα 1 Ανάλυση σύγκλισης πλέγματος..... | 48 |
| Γράφημα 2 Θερμοκρασιακή Κατανομή Υγρού&Στερεού | 67 |
| Γράφημα 3 Μέγιστη Θερμοκρασία των 3 γεωμετριών ψύκτρας..... | 72 |
| Γράφημα 4 Θερμοκρασιακή κατανομή σε σύγκριση με τη απόσταση από τον επεξεργαστή | 72 |
| Γράφημα 5 Μέγιστη θερμοκρασία ορθογωνικών πτερυγίων ψύκτρα με διαφορετικά υλικά | 75 |
| Γράφημα 6 Θερμοκρασιακή κατανομή κατά ύψος της ορθογωνικής ψύκτρας με τα 4 υλικά | 75 |
| Γράφημα 7Κόστος ανά τεμάχιο | 78 |

Πίνακας περιεχομένων εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1 Ψύξη εκτυπωτή November 1,2005 Clemens J.M.Lasance..... | 16 |
| Εικόνα 2 Διαδικασία φυσικής συναγωγής..... | 17 |
| Εικόνα 3 Απεικόνιση διαδικασία φυσικής συναγωγής σε CFD (Ilker Taril,Mehdi Mehrtash)..... | 17 |
| Εικόνα 4 Πειραματικές διατάξεις Yu 2005 | 18 |
| Εικόνα 5 Εξαναγκασμένη συναγωγή από (Hexagon)..... | 19 |
| Εικόνα 6 Ανεμιστήρας EuropeanThermoDynamics..... | 19 |
| Εικόνα 7 Λειτουργία HVAC(Ankur Choudhary)..... | 20 |
| Εικόνα 8 Εφαρμογές εναλλάκτη θερμότητας..... | 20 |
| Εικόνα 9 Notebook Dell με ελάχιστους χωρους για εξαναγκασμένη συναγωγή | 21 |
| Εικόνα 10 Μεταφορά θερμότητας θερμού σώματος από μικτή συναγωγή..... | 23 |
| Εικόνα 11 Data center..... | 24 |
| Εικόνα 12 Δοκιμαστικό εξάρτημα για δοκιμές ψύξης και θερμοκρασίας PCB σε συστήματα αεροναυπηγικής..... | 25 |
| Εικόνα 13 Μικτή συναγωγή σε εσωετικό χώρο..... | 25 |
| Εικόνα 14 Γραμμές ρεύματος που δείχνουν τη ροή του αέρα γύρω από το μονοθέσιο της F1,οι οποίες προκύπτουν με τη χρήση των εξισώσεων N-S)..... | 27 |
| Εικόνα 15 Ιστορία CFD,Arthur Rizzi a, James M. Luckring | 29 |
| Εικόνα 16 Μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας Pankaj PandeAmity Ph.D.(Chemical Eng)..... | 33 |
| Εικόνα 17 Συγκριση διακριτοποίησης και συμβολή της στη γραμικοποίηση των PDEs και στη σύλληψη των ευαίσθητων μεταβλητών κλίσεων..... | 45 |
| Εικόνα 18 Μεταβλητότητα πυκνότητας του πλέγματος σε μονοθέσιο F1 | 46 |
| Εικόνα 19 Περιβάλλον Autodesk Inventor 2024..... | 53 |
| Εικόνα 20 Εντολές 2D Sketch | 54 |
| Εικόνα 21 Εντολές δημιουργίας όγκου σχημάτων | 54 |
| Εικόνα 22 Εντολές μορφοποίησης όγκων | 54 |
| Εικόνα 23 Εντολή δημιουργίας Pattern | 55 |
| Εικόνα 24 Message Box | 55 |
| Εικόνα 25 Εξωτερικό κουτί..... | 56 |
| Εικόνα 26 Pcb πλακέτα..... | 57 |
| Εικόνα 27 Βάση πλακέτας..... | 58 |
| Εικόνα 28 Επεξεργαστής..... | 58 |
| Εικόνα 29 Ψύκτρα Square fins | 60 |
| Εικόνα 30 Ψύκτρα Rentangle fins | 60 |
| Εικόνα 31 Ψύκτρα Circular Fins | 61 |
| Εικόνα 32 Πειραματική διάταξη άρθρου..... | 66 |
| Εικόνα 33 Περιβάλλον Autodesk CFD 2024 | 67 |
| Εικόνα 34 Boundary Conditions..... | 68 |
| Εικόνα 35 Περιβάλλον Solver (Controls)..... | 69 |
| Εικόνα 36 Περιβάλλον Solver (Physics) | 69 |
| Εικόνα 37 Μέγιστη Θερμοκρασία Rentangle fins..... | 70 |
| Εικόνα 38 Μέγιστη Θερμοκρασία Circular fins..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 39 Μέγιστη Θερμοκρασία Square fins | 71 |
| Εικόνα 40 Μέγιστη Θερμοκρασία αλουμινίου | 73 |
| Εικόνα 41 Μέγιστη Θερμοκρασία 6063 | 74 |
| Εικόνα 42 Μέγιστη Θερμοκρασία ασήμι | 74 |
| Εικόνα 43 Traces μορίων αέρα Rentangle fins..... | 79 |
| Εικόνα 44 Traces μορίων αέρα Circural fins..... | 79 |
| Εικόνα 45 Traces μορίων αέρα Square fins..... | 80 |

1^ο Κεφάλαιο Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία πρόοδος των σύγχρονων ηλεκτρονικών οδήγησε σε εκθετική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, με αποτέλεσμα υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και αυξημένες προκλήσεις απαγωγής θερμότητας. Η αποτελεσματική απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της αξιόπιστης και μακροπρόθεσμης απόδοσής τους. Η ψύξη με συναγωγή, η οποία βασίζεται στη μεταφορά θερμότητας μέσω ενός ρευστού μέσου, έχει υιοθετηθεί ευρέως ως αποτελεσματική μέθοδος ψύξης. Παραδοσιακά, δύο κύριοι τρόποι συναγωγής, δηλαδή η φυσική συναγωγή και η εξαναγκασμένη συναγωγή, έχουν χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα για την αντιμετώπιση της θερμικής διαχείρισης σε ηλεκτρονικά συστήματα.

Η φυσική συναγωγή οδηγείται από τις δυνάμεις άνωσης που προκαλούνται από τις διαφορές θερμοκρασίας, όπου το θερμό ρευστό ανεβαίνει ενώ το ψυχρό ρευστό κατεβαίνει, σχηματίζοντας φυσικούς βρόχους κυκλοφορίας. Εφαρμόζεται κυρίως όταν απουσιάζουν εξωτερικοί ανεμιστήρες ή αντλίες, όπως σε παθητικά συστήματα ψύξης ή όταν μόνο η φυσική συναγωγή είναι επαρκής για τη διατήρηση αποδεκτών θερμοκρασιών. Από την άλλη πλευρά, η εξαναγκασμένη συναγωγή χρησιμοποιεί εξωτερικά μέσα, όπως ανεμιστήρες ή αντλίες, για τη δημιουργία εξαναγκασμένης ροής αέρα, ενισχύοντας τη μεταφορά θερμότητας και την ψύξη με συναγωγή. Η εξαναγκασμένη συναγωγή χρησιμοποιείται συνήθως σε ηλεκτρονικές συσκευές με υψηλές πυκνότητες ισχύος ή περιορισμένους χώρους, όπου η φυσική συναγωγή από μόνη της είναι ανεπαρκής.

Ωστόσο, καθώς οι ηλεκτρονικές συσκευές συνεχίζουν να συρρικνώνονται σε μέγεθος και οι πυκνότητες ισχύος αυξάνονται, απαιτείται περισσότερος από ένας τρόπος ψύξης με συναγωγή. Οι περιορισμοί της στήριξης αποκλειστικά στη φυσική συναγωγή ή στην εξαναγκασμένη συναγωγή οδήγησαν στη διερεύνηση της μικτής συναγωγής ως μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων ψύξης στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα. Η μικτή συναγωγή συνδυάζει τα αποτελέσματα

τόσο της φυσικής όσο και της εξαναγκασμένης συναγωγής, εκμεταλλευόμενη τη συνεργατική τους συμπεριφορά για την επίτευξη βελτιωμένων επιδόσεων ψύξης.

Η μεικτή συναγωγή στα συστήματα ψύξης ηλεκτρονικών συσκευών εμφανίζεται όταν η ροή που οδηγείται από την άνωση και προκαλείται από τις κλίσεις θερμοκρασίας αλληλοεπιδρά με την εξωτερικά εξαναγκασμένη ροή. Ο συνδυασμός αυτών των δύο τρόπων συναγωγής έχει ως αποτέλεσμα πολύπλοκα μοτίβα ροής ρευστών και φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Η κατανόηση της υποκείμενης φυσικής της μικτής συναγωγής και του αντίκτυπού της στην απόδοση της ψύξης είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών θερμικής διαχείρισης στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα.

Για να κατανοήσει κανείς την πολύπλοκη δυναμική που εμπλέκεται, πρέπει να αποκτήσει γνώσεις σχετικά με τη μεικτή συναγωγή και να βελτιστοποιήσει την απόδοση ψύξης, οι μέθοδοι υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) έχουν γίνει απαραίτητα εργαλεία. Οι τεχνικές CFD επιτρέπουν την αριθμητική προσομοίωση και ανάλυση της ροής ρευστών, της μεταφοράς θερμότητας και άλλων σχετικών φαινομένων σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Αξιοποιώντας τις προσομοιώσεις CFD, οι ερευνητές και οι μηχανικοί μπορούν να διερευνήσουν και να αξιολογήσουν τη θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρονικών συστημάτων, να μελετήσουν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην απόδοση ψύξης και να προτείνουν καινοτόμες τροποποιήσεις σχεδιασμού.

Στόχος της εργασίας είναι η διεξοδική διερεύνηση της μεικτής συναγωγής στα σύγχρονα συστήματα ψύξης ηλεκτρονικών συσκευών με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Ο κύριος στόχος μας είναι να εξετάσουμε τη μεταφορά θερμότητας, χαρακτηριστικά, τα μοτίβα ροής και την κατανομή της θερμοκρασίας σε ηλεκτρονικά συστήματα υπό συνθήκες μικτής συναγωγής. Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στην παροχή πολύτιμων πληροφοριών σχετικά με τους περιορισμούς των επιδόσεων και τις πιθανές βελτιώσεις της ψύξης με μεικτή συναγωγή μέσω της ακριβούς αποτύπωσης και ανάλυσης της πολύπλοκης δυναμικής των ρευστών.

2^ο Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Τεχνολογία ηλεκτρονικών και απαιτήσεις τις στις μέρες μας

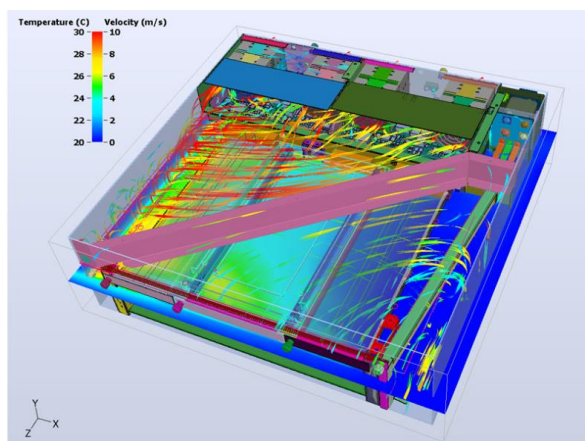
Τα τελευταία χρόνια, υπήρξε πρωτοφανής ανάπτυξη της βιομηχανίας ηλεκτρονικών ειδών, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη εξαιρετικά προηγμένων και εξελιγμένων ηλεκτρονικών συσκευών. Αυτά τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα, που κυμαίνονται από υπολογιστές και smartphones έως ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων και κέντρα δεδομένων, χαρακτηρίζονται από ολοένα αυξανόμενες πυκνότητες ισχύος και συμπαγείς σχεδιασμούς. Η απόδοση και η αξιοπιστία αυτών των ηλεκτρονικών συσκευών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διατήρηση των βέλτιστων θερμοκρασιών λειτουργίας. Η αποτελεσματική ψύξη είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της μακροζωίας και της ορθής λειτουργίας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα σε αυτά τα συστήματα παράγουν σημαντικά ποσά θερμότητας κατά τη λειτουργία λόγω των απωλειών αντίστασης και των δραστηριοτήτων μεταγωγής. Εάν αυτή η θερμότητα δεν διαχέεται αποτελεσματικά, μπορεί να οδηγήσει σε θερμική καταπόνηση, αστοχίες που προκαλούνται από τη θερμοκρασία και μειωμένη απόδοση. Ως εκ τούτου, η σωστή ψύξη των ηλεκτρονικών συσκευών είναι απαραίτητη για την αποφυγή της υπερθέρμανσης και των ζημιών που προκαλούνται από τη θερμότητα.

Μια σημαντική πρόκληση που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα συστήματα ψύξης ηλεκτρονικών είναι οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες ισχύος σε μικρότερους χώρους των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι ηλεκτρονικές συσκευές γίνονται πιο ισχυρές, με αποτέλεσμα την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή θερμότητας. Αυτή η τάση αύξησης της πυκνότητας ισχύος καθιστά ακόμη πιο δύσκολη την αποτελεσματική διαχείριση της απαγωγής θερμότητας.

Επιπλέον, η ελαχιστοποίηση είναι μια άλλη σημαντική τάση στον κλάδο των ηλεκτρονικών. Η ζήτηση για μικρότερες και ελαφρύτερες ηλεκτρονικές συσκευές έχει μειώσει το μέγεθος των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και συστημάτων. Ωστόσο, η μείωση του μεγέθους των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διαθέσιμης επιφάνειας για την απαγωγή θερμότητας, επιβαρύνοντας περισσότερο το πρόβλημα της θερμικής διαχείρισης.

Τόσο οι αυξανόμενες απαιτήσεις ισχύος όσο και οι τάσεις σμίκρυνσης οδηγούν σε μια κατάσταση όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι ψύξης, όπως η φυσική συναγωγή ή οι απλές ψύκτρες, μπορεί να καταστούν ακατάλληλες για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων απαιτήσεων απαγωγής θερμότητας.

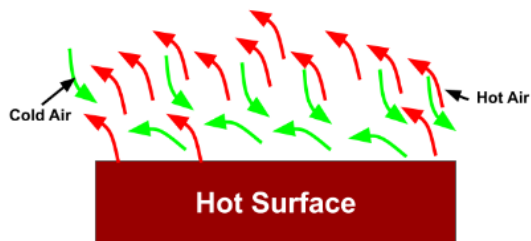


Εικόνα 1 Ψύξη εκτυπωτή November 1, 2005 Clemens J.M.Lasance

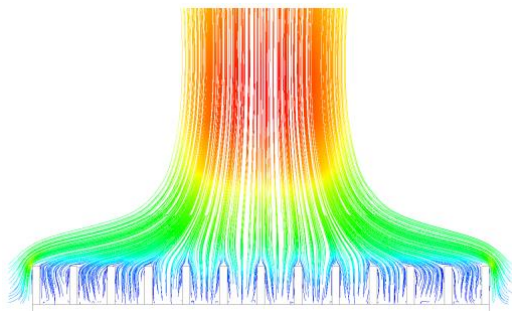
2.2 Φυσική Συναγωγή (Natural Convection)

Υπάρχουν δύο σημαντικές πτυχές της απόδοσης που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή του τύπου ψύξης που απαιτείται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή: η **μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία** του εξαρτήματος (που καθορίζεται από το μέγεθος της απώλειας ισχύος) και οι **θεμελιώδεις συνθήκες του χώρου εγκατάστασης**. Ο πιο οικονομικός τρόπος για την απομάκρυνση της θερμότητας από ένα ερμάριο ή μια θήκη είναι η χρήση ψύξης με φυσική συναγωγή. Ωστόσο, προκειμένου να αποφευχθεί η υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας του εξαρτήματος, πρέπει να μεταφερθούν επαρκείς ποσότητες της συνολικής ενέργειας στον εξωτερικό αέρα, ώστε η μέθοδος αυτή να είναι αποτελεσματική. Αυτή η μεταφορά αέρα πραγματοποιείται κυρίως μέσω των πλευρικών πινάκων των κλειστών ερμάρων ή περιπτώσεων, τα οποία πρέπει να επιτρέπουν την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα τόσο από το εσωτερικό όσο και από το εξωτερικό του περιβλήματος. Η φυσική συναγωγή είναι μια διαδικασία μετάδοσης θερμότητας που βασίζεται μόνο στις δυνάμεις άνωσης στο εσωτερικό ενός ρευστού (όπως ο αέρας) που προκαλούνται από την διαφορά θερμοκρασίας. Όταν συζητάμε για την ψύξη ηλεκτρονικών, αναφέρεται στη διαδικασία ψύξης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων με τη χρήση της φυσικής ροής του αέρα χωρίς την ανάγκη

ανεμιστήρων ή φυσητήρων. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα παράγουν θερμότητα, η οποία κάνει τον αέρα γύρω τους θερμότερο και λιγότερο πυκνό. Ο θερμότερος αέρας ανεβαίνει ως αποτέλεσμα, δημιουργώντας μια ανοδική ροή, ενώ ο ψυχρότερος, πυκνότερος αέρας πέφτει για να τον αντικαταστήσει, δημιουργώντας ένα φυσικό μοτίβο κυκλοφορίας. Η θερμότητα τελικά διαχέεται μεταφερόμενη από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα στον περιβάλλοντα αέρα λόγω της ανοδικής ροής του θερμού αέρα και της καθοδικής ροής του ψυχρότερου αέρα.

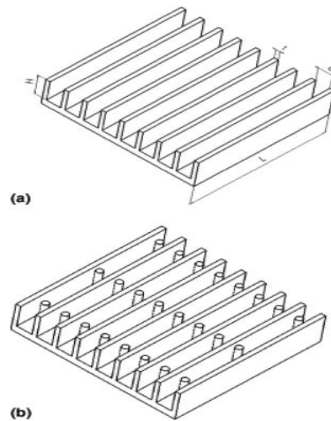


Εικόνα 2 Διαδικασία φυσικής συναγωγής



Εικόνα 3 Απεικόνιση διαδικασίας φυσικής συναγωγής σε CFD (Ilker Taril, Mehdi Mehrtash).

Κάνοντας αναζήτηση σε δημοσιεύσεις ο (Yu et al., 2005) με πειραματικές διατάξεις προσπάθησε και αυτός να συγκρίνει την θερμική απόδοση ψυκτρών με δυο διαφορετικές γεωμετρίες. Τα αποτελέσματα του απέδειξαν ότι οι ψήκτρες με πτερύγια πλακα-ακίδα ήταν 30% αποδοτικότερες από τα πλάκα-πλάκα



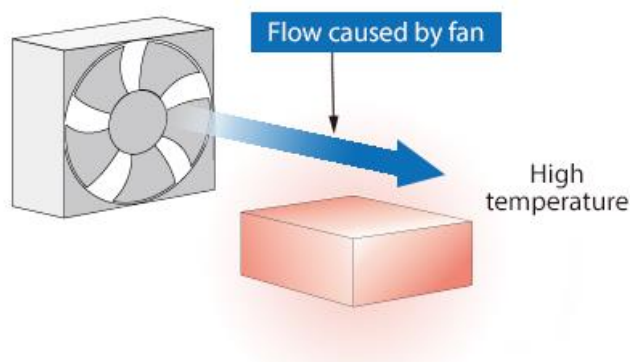
Εικόνα 4 Πειραματικές διατάξεις Yu 2005

Τη σημαντικότητα της έρευνα για την ευκολότερη μετάδοση θερμότητας από τα θερμικά στοιχεία βοήθησε και (Khattak and Ali, 2019) με το να αναφέρει αρχικά ότι το 55% των αποτυχιών στα ηλεκτρονικά μέρη είναι λόγω θερμοκρασίας και στην συνέχεια αναφέρει ότι οι εφαρμογές με πλάκες με ακίδες μπορούν να αποτελέσουν λύση και αυτό το αφού σύγκρινε πολλές γεωμετρίες και υλικά. Μία ακόμα έρευνα από τον (Al-Damook et al., 2015) αναφέρετε ότι οι ψύκτρες με γεωμετρική διάταξη οπών και την αποτελεσματικότερη αποβολή της θερμότητας. Τα πλεονεκτήματα αυτά προκύπτουν όχι μόνο λόγω της αυξημένης επιφάνειας αλλά και λόγω της βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας κοντά στις οπές μέσω του σχηματισμού τοπικών πιδάκων αέρα. Με την πάροδο των ετών έχει δημοσιευθεί σημαντικός όγκος βιβλιογραφίας για την τεχνολογία των ψυκτρών (Lin, Chuang, and Chou, 2005; Bünnagel et al., 2021).

2.3 Εξαναγκασμένη Συναγωγή (Forced Convection)

Η ψύξη με εξαναγκασμένο αέρα είναι ο πιο δημοφιλής τύπος ψύξης και είναι επαρκής για την πλειονότητα των σχεδίων περιβλήματος. Εδώ, χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες ή δίσκοι ανεμιστήρων για την αύξηση της φυσικής συναγωγής- σε ορισμένες περιπτώσεις, η τελευταία χρησιμοποιείται όταν η αντίσταση του αέρα των εσωτερικών εξαρτημάτων γίνεται πολύ υψηλή για τη φυσική συναγωγή από μόνη της. Η εξαναγκασμένη συναγωγή χρησιμοποιείται συχνά στο πλαίσιο της ψύξης ηλεκτρονικών για τη μείωση της θερμότητας που παράγεται από ηλεκτρονικά

εξαρτήματα, όπως μικροεπεξεργαστές, ολοκληρωμένα κυκλώματα ή τρανζίστορ ισχύος.



Εικόνα 5 Εξαναγκασμένη συναγωγή από (Hexagon)

Τώρα όσον αφορά τους μηχανισμούς που την διέπουν είναι αρκετά σημαντικό να αναλυθούν αφού θα διέπουν και το πειραματικό μέρος της εργασίας. Για την επίτευξη της εξαναγκασμένης συναγωγής χρησιμοποιείται ένας αριθμός συναφών διεργασιών που συνεργάζονται αρμονικά για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη σκόπιμη αύξηση της ταχύτητας του ρευστού, τη σκόπιμη απομάκρυνση των οριακών στρωμάτων, την επαγωγή τυρβώδους ροής για την αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και την επακόλουθη αύξηση των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας.

Πιο συγκεκριμένα **η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται** με τη χρήση ανεμιστήρων,



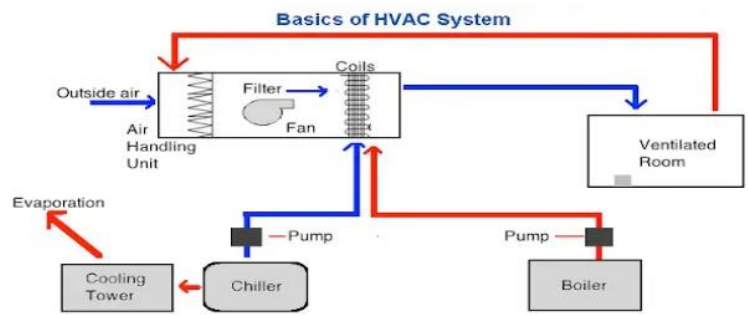
Εικόνα 6 Ανεμιστήρας
EuropeanThermoDynamics

φουσητήρων ή αντλιών. Η βελτιωμένη ανάμιξη και κατανομή της θερμότητας σε όλο το ρευστό λόγω της αυξημένης ταχύτητας του ρευστού καθιστά την ψύξη πιο αποτελεσματική. Επιπρόσθετα το **ρευστό δημιουργεί ένα λεπτό οριακό στρώμα**, το οποίο χαρακτηρίζεται από μειωμένη ταχύτητα του καθώς ρέει πάνω από τη θερμαινόμενη επιφάνεια. Αυτό το στρώμα

ορίου εμποδίζει την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας. Με την επιτυχή απομάκρυνση αυτού του οριακού στρώματος, η εξαναγκασμένη συναγωγή επιτρέπει την ανταλλαγή θερμότερου ρευστού με ψυχρότερο ρευστό και τη διατήρηση υψηλού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Μια επιπλέον συνθήκη είναι η δημιουργία τυρβώδους ροής, η οποία αυξάνει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ο συντελεστής αυτός

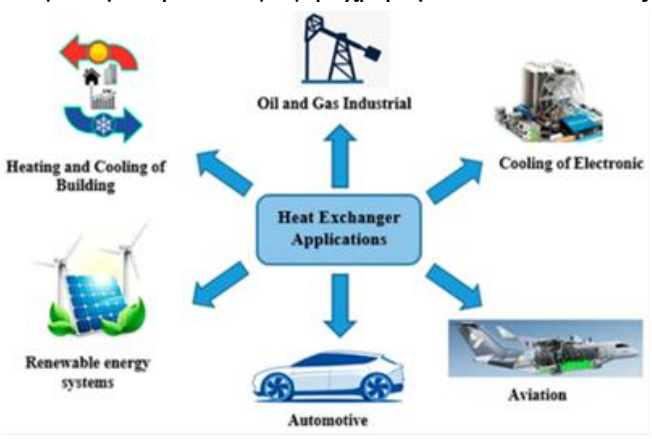
δείχνει την ικανότητα του ρευστού να μεταδίδει θερμότητα και είναι υψηλότερος στις τυρβώδεις ροές από ό,τι στη φυσική συναγωγή, όπου η μετάδοση θερμότητας εξαρτάται από τα ρεύματα που οδηγούνται από την άνωση. Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται **Reynolds**. Σε σύγκριση με τη φυσική συναγωγή, η εξαναγκασμένη συναγωγή παράγει υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας λόγω της αυξημένης ταχύτητας του ρευστού και του μειωμένου οριακού στρώματος. Αυτό την καθιστά πολύ πιο αποτελεσματική για εφαρμογές ψύξης, ιδίως σε ηλεκτρικές συσκευές υψηλής ισχύος. Κάποιες από τις εφαρμογές εξαναγκασμένης συναγωγής είναι:

Συστήματα HVAC: Για την κυκλοφορία του αέρα και τη ρύθμιση της θερμοκρασίας και της υγρασίας ενός κτιρίου, η εξαναγκασμένη συναγωγή είναι βασικό συστατικό των συστημάτων HVAC.



Εικόνα 7 Λειτουργία HVAC(Ankur Choudhary)

Εναλλάκτες θερμότητας: Η εξαναγκασμένη συναγωγή χρησιμοποιείται στους εναλλάκτες θερμότητας, όπως τα ψυγεία και οι συμπυκνωτές στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και στα αυτοκίνητα, για τη μεταφορά θερμότητας από το ένα ρευστό στο άλλο.



Εικόνα 8 Εφαρμογές εναλλάκτη θερμότητας

Η εξαναγκασμένη συναγωγή παίζει καθοριστικό ρόλο σε πολλούς τομείς της μηχανικής, συμβάλλοντας στην ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας και τη ροή ρευστών σε συστήματα που κυμαίνονται από την ηλεκτρονική ψύξη έως τις βιομηχανικές

διεργασίες. Παρά την ευρεία υιοθέτησή της, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί που πρέπει να αναλογιστούν. Αρχικά η σημαντική κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται από τη συμπερίληψη εξωτερικών συσκευών(π.χ ανεμιστήρες ή αντλίες) , είναι ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της εξαναγκασμένης συναγωγής. Η συνεχής χρήση αυτών των εξαρτημάτων που κινούνται αυξάνει τις ενεργειακές ανάγκες που θα μπορούσαν να παρουσιάσουν σημαντικές δυσκολίες, ιδίως σε συστήματα μεγάλης κλίμακας. Θα πρέπει να αναλογισθούν και τα κόστος συντήρησης γιατί η εγκατάσταση, η χρήση και η συντήρηση των συστημάτων εξαναγκασμένης συναγωγής μπορεί να απαιτούν σημαντικές οικονομικές δεσμεύσεις.

Για να προσδιοριστεί κατά πόσον οι λύσεις διαχείρισης θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή είναι οικονομικά βιώσιμες, πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά οι δαπάνες που σχετίζονται με την αγορά και τη συντήρηση ανεμιστήρων, αντλιών και βοηθητικού εξοπλισμού. Ένας ακόμη περιορισμός που μπορεί συμπεριληφθεί είναι τα προβλήματα που σχετίζονται με το χώρο, επειδή η προσθήκη επιπλέον εξαρτημάτων μπορεί να καταστήσει το σύστημα ογκώδες και να καταλαμβάνει περισσότερο χώρο. Η εφαρμογή της εξαναγκασμένης συναγωγής σε ορισμένα μηχανολογικά πλαίσια με στενούς χώρους μπορεί να περιορίζεται από τέτοιους περιορισμούς.



Εικόνα 9 Notebook Dell με ελάχιστους χώρους για εξαναγκασμένη συναγωγή

Οι ανεμιστήρες ή οι αντλίες υψηλής ταχύτητας μπορούν να παράγουν ανεπιθύμητο θόρυβο και δονήσεις στα συστήματα εξαναγκασμένης συναγωγής. Αυτό το στοιχείο απαιτεί προσεκτική μελέτη σε περιοχές ευαίσθητες στον θόρυβο ή σε εφαρμογές όπου οι δονήσεις θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά την ακεραιότητα του συστήματος. Τα συστήματα εξαναγκασμένης συναγωγής μπορεί να παρασύρουν ακούσια σωματίδια ή ακαθαρσίες που μεταφέρονται στον αέρα, εγείροντας ανησυχίες για τη μόλυνση των

ρευστών. Τέτοια προβλήματα καθιστούν αναγκαία τη χρήση αποτελεσματικών τεχνικών φιλτραρίσματος για την προστασία της ακεραιότητας του ρευστού.

Η λήψη συνετών αποφάσεων σε μηχανολογικές εφαρμογές απαιτεί την κατανόηση των περιορισμών της εξαναγκασμένης συναγωγής. Η ανάπτυξη αποτελεσματικότερων και οικονομικότερων μηχανολογικών συστημάτων διευκολύνεται με την προσεκτική επιλογή λύσεων θερμικής διαχείρισης, η οποία καθίσταται δυνατή με την επίγνωση των δυσκολιών που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας, το κόστος, και χωρικούς περιορισμούς. Η αναζήτηση βιώσιμων και βέλτιστων μηχανολογικών λύσεων μπορεί να ωφεληθεί από την περαιτέρω μελέτη σε αυτόν τον τομέα, η οποία μπορεί επίσης να αναπτύξει την τεχνολογία μεταφοράς θερμότητας κάτι στο οποίο θα βασιστεί και η συγκεκριμένη διπλωματική.

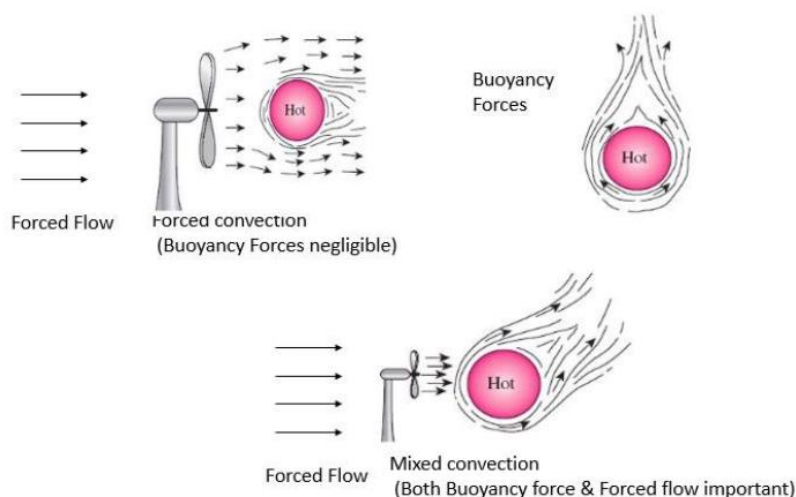
2.4 Πλεονεκτήματα εξαναγκασμένης συναγωγής έναντι της φυσικής

Μπορεί να υπάρχουν κάποια όρια όσο αφορά την εφαρμογή της αλλά είναι αδιαμφισβήτητα πιο αποδοτικότερη από την φυσική συναγωγή. Αρχικά σε σύγκριση με τη φυσική συναγωγή, η εξαναγκασμένη συναγωγή αυξάνει σημαντικά τα ποσοστά μεταφοράς θερμότητας. Ως αποτέλεσμα της εξαναγκασμένης ροής του ρευστού πάνω από τη θερμαινόμενη επιφάνεια, υπάρχει καλύτερη ανάμιξη και σημαντικότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, γεγονός που προκαλεί ταχύτερη διάχυση της θερμότητας. Επιπρόσθετα οι περιβαλλοντικές μεταβλητές, όπως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της πίεσης του αέρα, επηρεάζουν σημαντικά τη φυσική συναγωγή. Αντίθετα, οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν λιγότερο την εξαναγκασμένη συναγωγή, επειδή εξαρτάται από εξωτερικούς μηχανισμούς για να κρατήσει το ρευστό σε κίνηση. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή, η ροή μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια ώστε να παρακάμπτει εμπόδια και να εισέρχεται σε μικρούς χώρους, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική μετάδοση θερμότητας σε περίπλοκες γεωμετρίες. Επιπλέον σε κλειστούς χώρους όπου η φυσική συναγωγή μπορεί να περιορίζεται από την περιορισμένη ταχύτητα του ρευστού, η εξαναγκασμένη συναγωγή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για σκοπούς ψύξης. Σε σύγκριση με τις περιοχές στάσιμου ρευστού στη φυσική συναγωγή, η ενεργή κίνηση του ρευστού στην εξαναγκασμένη συναγωγή ελαχιστοποιεί τη συχνότητα επιφανειακής ρύπανσης, με

αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση του συστήματος και μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης. Τέλος σε σύγκριση με την φυσική συναγωγή χρειαζόμαστε πολύ μικρότερο χώρο αφού όλη η διαδικασία μπορεί να γίνει με την ίδια απόδοση σε μικρότερο μέγεθος .

2.5 Μικτή Συναγωγή(Mixed Convection)

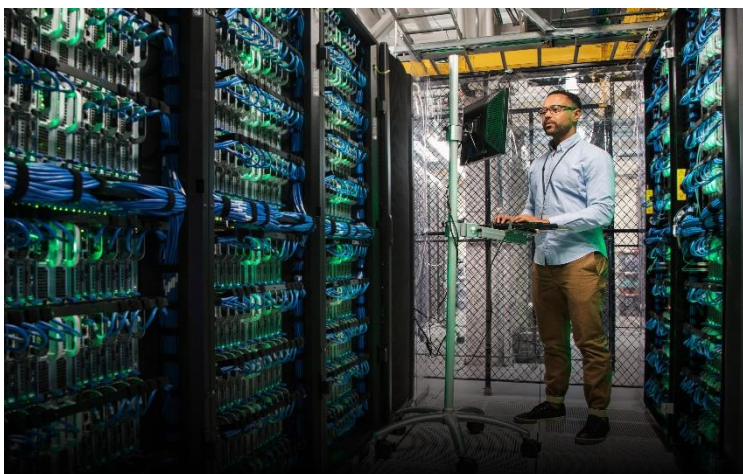
Μια ροή καθορίζεται ταυτόχρονα από ένα εξωτερικό σύστημα ώθησης (δηλ. μια εξωτερική πηγή ενέργειας για το σύστημα σώματος με ρεύμα ρευστού) και μια εσωτερική ογκομετρική (μαζική) δύναμη, (δηλ. τη μη ομοιόμορφη κατανομή πυκνότητας ενός ρευστού μέσου σε ένα πεδίο βαρύτητας). Αυτό είναι γνωστό ως μεικτή (συνδυασμένη) συναγωγή, ένας συνδυασμός εξαναγκασμένης και ελεύθερης συναγωγής.



Εικόνα 10 Μεταφορά θερμότητας θερμού σώματος από μικτή συναγωγή

Επειδή μπορεί να γίνει αρκετά δυσνόητο παρακάτω θα δοθούν κάποια παραδείγματα στα οποία αντικρίζεται η μικτή συναγωγή. Ένα συχνό παράδειγμα σε που παρατηρείται σχεδόν παντού και θα παρουσιαστεί και στην συγκεκριμένη διπλωματική είναι ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα παράγουν θερμότητα και τα συστήματα ψύξης συχνά χρησιμοποιούν εξαναγκασμένη ψύξη με αέρα ή υγρό και φυσική συναγωγή για την αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα οι πολυάριθμοι διακομιστές που στεγάζονται σε κέντρα δεδομένων παράγουν πολλή θερμότητα. Η φυσική και η εξαναγκασμένη

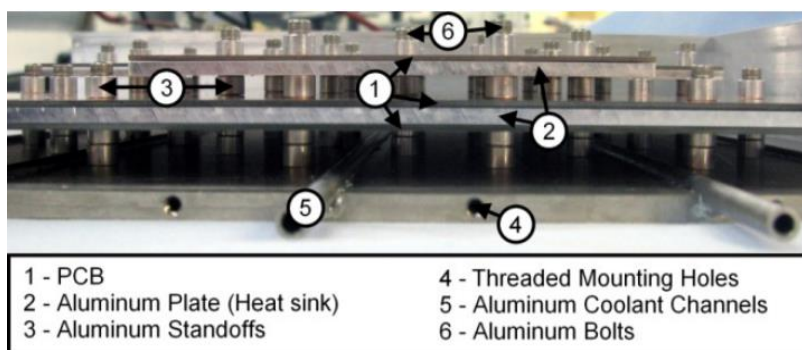
συναγωγή χρησιμοποιούνται συχνά για την ψύξη των τοποθετημένων σε ράφια διακομιστών. Στα ράφια διακομιστών, η μικτή συναγωγή βοηθά στην αποτελεσματική ψύξη των ηλεκτρικών εξαρτημάτων.



Εικόνα 11 Data center

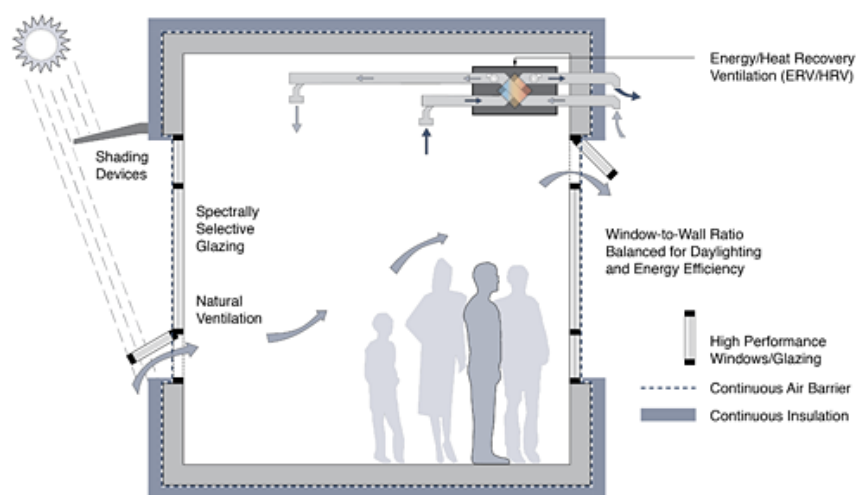
Τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα, βιομηχανικά μηχανήματα και ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, αντιμετωπίζουν συχνά δύσκολες συνθήκες θερμότητας. Στα περισσότερα σύγχρονα αυτοκίνητα, υπάρχουν πολυάριθμοι υπολογιστές - έως και 100, μερικές φορές - ή ενσωματωμένα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση διαφόρων λειτουργιών. Ορισμένα από αυτά τα συστήματα εκτελούν θεμελιώδεις βοηθητικές εργασίες, ενώ άλλα προσφέρουν ψυχαγωγία ή λειτουργίες που απευθύνονται στον χρήστη. Ο έλεγχος ταχύτητας, οι αισθητήρες αντιγράφων ασφαλείας, ο έλεγχος της ανάρτησης, τα συστήματα πλοήγησης και τα συστήματα αερόσακων είναι μερικές ενσωματωμένες τεχνολογίες που συναντώνται στα καταναλωτικά οχήματα. Η ψύξη με μικτή συναγωγή χρησιμοποιείται και σε τηλεπικοινωνιακές υποδομές, όπως σταθμούς βάσης και εξοπλισμό δικτύωσης, για τη διατήρηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε άλλον ένα τομέα που είναι πολύ σημαντική η λειτουργία της είναι ηλεκτρονικά αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής. Ένα από τα κύρια πράγματα που επηρεάζουν την αποδοτικότητα και τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού αεροναυπηγικής είναι η θερμική διαχείριση. Τα συστήματα αεροναυπηγικής, όπως και άλλα ηλεκτρονικά συστήματα, μπορούν να λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που

μειώνει τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων και καταπονεί τις πλακέτες. Αυτά τα νέα ηλεκτρονικά συστήματα πρέπει να κατασκευάζονται για να αντέχουν εξαιρετικά υψηλές θερμικές και μηχανικές απαιτήσεις, καθώς όλο και περισσότερα μηχανικά συστήματα αντικαθίστανται από ισοδύναμα ηλεκτρονικά. Αυτό περιλαμβάνει τη μετατόπιση μεταξύ μεγάλων διακυμάνσεων θερμοκρασίας και την αντοχή σε παρατεταμένους ελιγμούς που προκαλούν μηχανικούς κραδασμούς και δονήσεις.



Εικόνα 12 Δοκιμαστικό εξάρτημα για δοκιμές ψύξης και θερμοκρασίας PCB σε συστήματα αεροναυπηγικής

Επίσης άλλο ένα συχνό παράδειγμα που χρησιμοποιείται η μικτή συναγωγή είναι στα κτίρια που όταν χρησιμοποιούνται συστήματα κλιματισμού ή θέρμανσης, αλλά υπάρχουν επίσης διαφορές θερμοκρασίας λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας ή άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων.

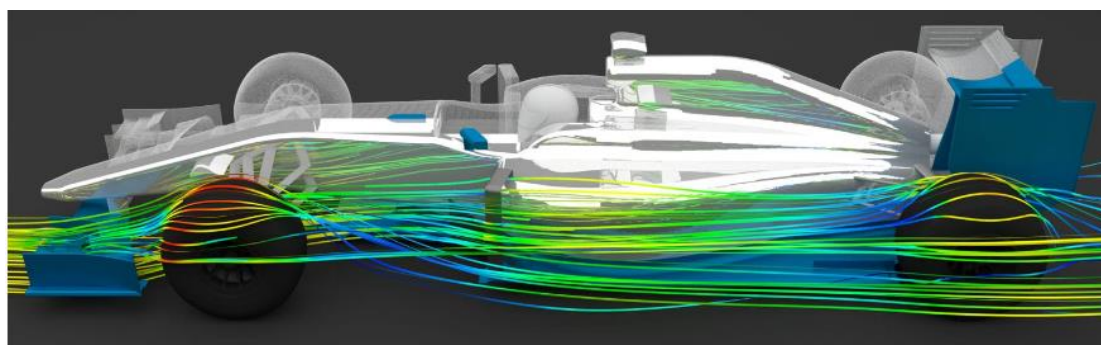


Εικόνα 13 Μικτή συναγωγή σε εσωτερικό χώρο

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μικτής συναγωγής είναι η ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας. Η θερμότητα μπορεί να μετακινηθεί πιο αποτελεσματικά με την ανάμειξη φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής παρά με την εξάρτηση απλώς από έναν τύπο συναγωγής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη διαχείριση της θερμοκρασίας και σε πιο αποδοτικές λειτουργίες ψύξης ή θέρμανσης. Επιπρόσθετα οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάσουν τη μικτή συναγωγή για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Με τη χρήση φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής, είναι εφικτή η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση της εξάρτησης από μηχανικό εξοπλισμό (ανεμιστήρες, αντλίες), ιδίως στα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC). Η μικτή συναγωγή προσφέρει περισσότερες επιλογές για τη ρύθμιση της μετάδοσης θερμότητας και των ροών ρευστών, έτσι μεταβληθεί η αναλογία φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής για να επιτύχουν την καλύτερη απόδοση ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις ενός συστήματος. Η ανθεκτικότητα του συστήματος στις αλλαγές των συνθηκών λειτουργίας μπορεί να βελτιωθεί με τη μικτή συναγωγή. Η φυσική συναγωγή μπορεί ακόμα να μεταφέρει θερμότητα όταν οι εξωγενείς δυνάμεις που οδηγούν την εξαναγκασμένη συναγωγή είναι ασταθείς ή αναποτελεσματικές. Ακόμα χρησιμοποιείται για εξοικονόμηση χρημάτων με την εξάλειψη της ανάγκης για ισχυρούς ανεμιστήρες ή αντλίες. Με την πάροδο του χρόνου, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του εξοπλισμού και των λειτουργικών δαπανών. Το οποίο επίσης συνεπάγεται σε βελτιωμένη ασφάλεια αφού αντί για μηχανικά συστήματα, τα οποία μπορεί να είναι επιρρεπή σε δυσλειτουργία ή αποτυχία, μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια σε διάφορες βιομηχανικές λειτουργίες. Τέλος ελαχιστοποιώντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και το συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα ενός συστήματος, η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας της μικτής συναγωγής μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα πλεονεκτήματα της μικτής συναγωγής εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή, το σχεδιασμό του συστήματος και τη βελτιστοποίηση της ισορροπίας μεταξύ φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής. Οι λεπτομερείς αναλύσεις και προσομοιώσεις θα καθορίσουν τη βέλτιστη προσέγγιση για μια δεδομένη κατάσταση, ώστε να αξιοποιήσουν αποτελεσματικά τα οφέλη της μικτής συναγωγής. έρευνα μικτής συναγωγής.

3.Υπολογιστική Δυναμική Ρευστών (CFD) στην ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών

Όσον αφορά όλα τα παραπάνω μπορούν να πάρουν εφαρμογή σε διάφορα προσομοιώσεις οι οποίες χρησιμοποιώντας υπολογιστική ισχύ για την επίλυση των εξισώσεων, η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) είναι η διαδικασία μαθηματικής πρόβλεψης της πραγματικής ροής των ρευστών. Η αεροδυναμική είναι ένα κρίσιμο στοιχείο της συνολικής απόδοσης ενός σχεδίου, όταν ένας μηχανικός έχει αναλάβει τη δημιουργία ενός νέου προϊόντος, όπως ένα νικηφόρο αγωνιστικό όχημα για την επερχόμενη αγωνιστική περίοδο. Ωστόσο, η αεροδυναμική απόδοση είναι δύσκολο να μετρηθεί στο στάδιο της ιδέας.



Εικόνα 14 Γραμμές ρεύματος που δείχνουν τη ροή του αέρα γύρω από το μονοθέσιο της F1, οι οποίες προκύπτουν με τη χρήση των εξισώσεων N-S)

Παραδοσιακά, η δοκιμή φυσικών πρωτοτύπων ενός προϊόντος είναι η μόνη επιλογή για έναν μηχανικό να βελτιώσει το σχεδιασμό του. Ο τομέας της CFD έχει εξελιχθεί σε μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την πρόβλεψη της φυσικής του πραγματικού κόσμου λόγω της αυξανόμενης υπολογιστικής ικανότητας. Με βάση καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας, η ροή ρευστού και οι φυσικές ιδιότητες με τις οποίες σχετίζεται, όπως η ταχύτητα, η πίεση, το ιξώδες, η πυκνότητα και η θερμοκρασία, υπολογίζονται σε μια μελέτη λογισμικού CFD. Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται ταυτόχρονα για να ληφθεί μια ακριβής, φυσική λύση.

Κάθε εργαλείο CFD, είτε είναι ανοικτού κώδικα, είτε εμπορικό, είτε και τα δύο, χρησιμοποιεί μια αριθμητική μέθοδο και ένα μαθηματικό μοντέλο για την πρόβλεψη της απαιτούμενης φυσικής ροής. Οι εξισώσεις Navier-Stokes (N-S) αποτελούν τη βάση

για την πλειονότητα των εργαλείων CFD. Οι εξισώσεις Navier-Stokes περιέχουν μεγάλο αριθμό σταθερών στοιχείων, αλλά μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν πρόσθετοι όροι ανάλογα με τη φυσική. Για παράδειγμα, νέοι όροι θα προστεθούν στις εξισώσεις που διέπουν, εάν πρέπει να ληφθούν υπόψη η μετάδοση θερμότητας, η αλλαγή φάσης ή οι χημικές διεργασίες.

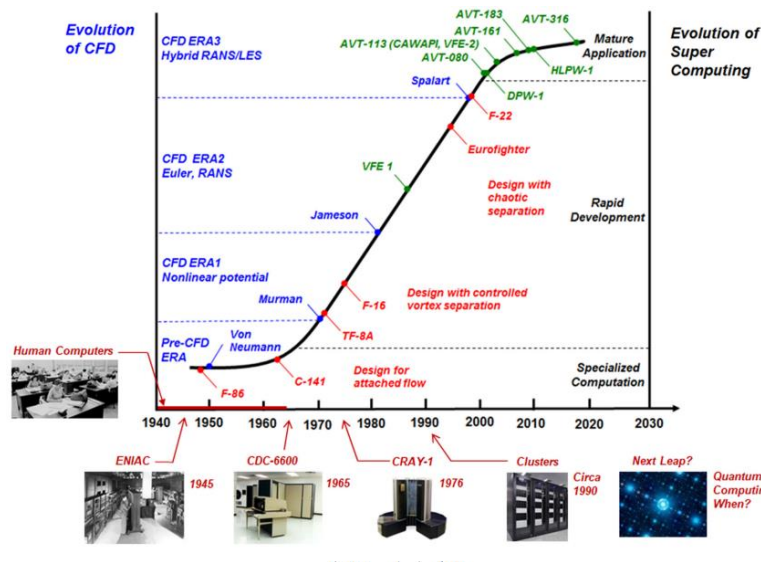
3.1 Ιστορία CFD

Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν έστω και φιλοσοφικά ήταν στην Αρχαία Ελλάδα από τον Ηράκλειτο, ωστόσο, ο Αρχιμήδης εγκαινίασε τους τομείς της στατικής μηχανικής, της υδροστατικής και καθόρισε τον τρόπο μέτρησης των πυκνοτήτων και των όγκων των αντικειμένων. Σημαντική δουλειά στην προσπάθεια να περιγραφεί μαθηματικά η κίνηση των ρευστών έγινε κατά τον 19ο αιώνα από τον Daniel Bernoulli (1700-1782), που κατέληξε στη διάσημη εξίσωση του Bernoulli. Ο Leonhard Euler (1707-1783) πρότεινε τις εξισώσεις Euler, οι οποίες περιγράφουν τη διατήρηση της ορμής για ένα αδιαφανές ρευστό και τη διατήρηση της μάζας.

Στην ίδια χρονική περίοδο ασχολήθηκαν με τον τομέα της ροής των ρευστών ο Γάλλος Claude Louis Marie Henry Navier (1785-1836) και ο Ιρλανδός George Gabriel Stokes (1819-1903), οι οποίοι εισήγαγαν την ιξώδη μεταφορά στις εξισώσεις Euler, γεγονός που οδήγησε στη διάσημη πλέον εξίσωση Navier-Stokes. Αυτές οι μορφές των διαφορικών μαθηματικών εξισώσεων που πρότειναν πριν από σχεδόν 200 χρόνια αποτελούν τη βάση της σύγχρονης βιομηχανίας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) και περιλαμβάνουν εκφράσεις για τη διατήρηση της μάζας, της ορμής, της πίεσης, των ειδών και της τύρβης. Πράγματι, οι εξισώσεις αυτές είναι τόσο στενά συνδεδεμένες και δύσκολο να επιλυθούν, ώστε μόνο με την έλευση των σύγχρονων ψηφιακών υπολογιστών στις δεκαετίες του 1960 και 1970 μπόρεσαν να επιλυθούν για πραγματικά προβλήματα ροής σε λογικά χρονικά διαστήματα.

Στις αρχές του 1980 οι πρώτοι εμπορικοί κώδικες CFD κυκλοφόρησαν στην αγορά οι οποίοι βασίζονται σε σύνολα πολύ σύνθετων μη γραμμικών μαθηματικών εκφράσεων που καθορίζουν τις θεμελιώδεις εξισώσεις της ροής ρευστών, της μεταφοράς θερμότητας και υλικών. Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται επαναληπτικά με τη χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων που είναι ενσωματωμένοι στο λογισμικό CFD. Το καθαρό

αποτέλεσμα αυτού του λογισμικού είναι να επιτρέπει στο χρήστη να μοντελοποιεί υπολογιστικά οποιοδήποτε πεδίο ροής, εφόσον είναι γνωστή η γεωμετρία του αντικειμένου, η φυσική η χημεία και οι αρχικές συνθήκες ροής. Τα αποτελέσματα από το λογισμικό μπορούν να προβληθούν γραφικά σε έγχρωμα διαγράμματα διανυσμάτων ταχύτητας, περιγράμματα πίεσης, γραμμές σταθερών ιδιοτήτων του πεδίου ροής και διαγράμματα X-Y.



Εικόνα 15 Ιστορία CFD, Arthur Rizzi a, James M. Luckring

Τα γεγονότα στον 20ο αιώνα μπορούμε να τεθούν σε μια πιο καλή χρονική σειρά πιο αναλυτικά αφού σε αυτή την χρονική περίοδο έγιναν οι σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα.

1910: Προόδους στις αριθμητικές τεχνικές και τα μαθηματικά μοντέλα.

1910-1940: Συνδυασμός μοντέλων και τεχνικών για την εξαγωγή αριθμητικών απαντήσεων με βάση υπολογισμούς με το χέρι.

Από το 1940 έως το 1950, οι πρώτοι υπολογιστές, όπως ο ENIAC, πέρασαν σε υπολογισμούς με βάση τον υπολογιστή. Ο Kawaguti έλυσε τη ροή γύρω από έναν κύλινδρο το 1953 χρησιμοποιώντας μια μηχανική επιτραπέζια αριθμομηχανή.

1950-1960: Εθνικό εργαστήριο Los Alamos, Αρχική έρευνα για τη χρήση υπολογιστών για την προσομοίωση ροής ρευστών με βάση τις εξισώσεις Navier-Stokes. Μέθοδος εκτίμησης της στροβιλότητας με χρήση συνάρτησης ροής. Η πρώτη παγκοσμίως εφαρμογή δισδιάστατης, μεταβατικής, ασυμπίεστης ροής

1960-1970: Το 1967, οι Hess και Smith δημοσίευσαν το πρώτο τους επιστημονικό έργο για την υπολογιστική ανάλυση τρισδιάστατων (3D) σωμάτων, με τίτλο "Υπολογισμός της δυναμικής ροής γύρω από αυθαίρετα σώματα". Δημιουργία επιχειρηματικών κωδικών. Συμβολή σε διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται ακόμη ευρέως, όπως το μοντέλο k-turbulence, το Arbitrary Lagrangian-Eulerian και ο αλγόριθμος SIMPLE.

1970-1980: Οι κώδικες που δημιουργήθηκαν από την Boeing, τη NASA και άλλους οργανισμούς δημοσιοποιήθηκαν και άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως υποβρύχια, πλοία επιφανείας, αυτοκίνητα, ελικόπτερα και αεροπλάνα.

Οι Jameson βελτίωσαν την ακρίβεια των λύσεων των διατονικών ροών τους στην τρισδιάστατη περίπτωση μεταξύ **1980 και 1990**. Τόσο η ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και οι επιχειρήσεις έχουν αρχίσει να εφαρμόζουν εμπορικούς κώδικες.

Από το **1990**, υπήρξαν σημαντικές εξελίξεις στην πληροφορική, με αποτέλεσμα σχεδόν κάθε βιομηχανία να χρησιμοποιεί πλέον CFD.

3.2 Τρέχοντα ερευνητικά κενά και προκλήσεις

Όπως παρατηρείται η τεχνολογία των προγραμμάτων CFD έχει προχωρήσει αρκετά αλλά παρόλα αυτά ακόμα η έρευνα στην ψύξη με μικτή συναγωγή, ιδίως στο πλαίσιο των ηλεκτρονικών, αντιμετωπίζει αρκετά κενά γνώσης και προκλήσεις που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Η μικτή συναγωγή αναφέρεται στην ταυτόχρονη επίδραση της φυσικής (λόγω άνωσης) και της εξαναγκασμένης (εξωτερικά προκαλούμενης) συναγωγής σε μια ροή ρευστού. Το φαινόμενο αυτό είναι ζωτικής σημασίας στη θερμική διαχείριση των ηλεκτρονικών συσκευών, όπου η αποτελεσματική ψύξη είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή της υπερθέρμανσης και τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης. Παρακάτω θα αναφερθούν τα ερευνητικά κενά και οι πιθανές βελτιώσεις έρευνας που μπορούν να γίνουν.

3.2-1 Ανεπαρκής κατανόηση των πολύπλοκων μοτίβων ροής

Είναι δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια η κατανομή της θερμοκρασίας λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της επαγόμενης και της φυσικής συναγωγής, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε περίπλοκα και δυναμικά μοτίβα ροής. Είναι δύσκολο και απαιτεί πιο προηγμένες υπολογιστικές τεχνικές για την ανάπτυξη ακριβών μοντέλων και προσομοιώσεων που αντικατοπτρίζουν τη μεταβατική και τυρβώδη συμπεριφορά αυτών των μικτών ροών.

Για να καλυφθεί αυτό το κενό, απαιτούνται περισσότερες μελέτες για την κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών αυτών των μοτίβων ροής. Είναι ζωτικής σημασίας να εξεταστεί πώς οι αλλαγές στη γεωμετρία, οι θερμικές κλίσεις και οι εξωτερικοί παράγοντες επηρεάζουν τη συμπεριφορά της ροής. Για την καλύτερη κατανόηση της πολυπλοκότητας αυτών των προτύπων ροής με μικτή συναγωγή, αυτό θα μπορούσε να συνεπάγεται τη χρήση τεχνικών προσομοίωσης υψηλής πιστότητας, όπως η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD), σε συνδυασμό με πειραματική επικύρωση. Επιπλέον, η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο τα μοτίβα ροής επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση και την απόδοση της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία ακριβέστερων συστημάτων ψύξης. Τα μυστήρια αυτών των πολύπλοκων χαρακτηριστικών ροής μπορούν να λυθούν από τους ερευνητές, ανοίγοντας την πόρτα σε πιο αποτελεσματικές τεχνικές θερμικής διαχείρισης για την ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών.

3.2-2 Επικύρωση και συγκριτική αξιολόγηση

Το ερευνητικό κενό σε αυτό το πλαίσιο η ανάγκη για εκτεταμένα πειραματικά δεδομένα καθιστά δύσκολη την επικύρωση και τη συγκριτική αξιολόγηση μοντέλων και προσομοιώσεων μικτής συναγωγής στο πλαίσιο της ψύξης ηλεκτρονικών συσκευών.

Μία λύση ζωτικής σημασίας να δημιουργηθούν ακριβή σημεία αναφοράς και πειραματικές διατάξεις που αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές ρυθμίσεις ψύξης ηλεκτρονικών ειδών για την αξιολόγηση της ακρίβειας και της προγνωστικής ισχύος των αριθμητικών μοντέλων. Ωστόσο, είναι δύσκολο και απαιτητικό σε πόρους να συγκεντρωθούν πειραματικά δεδομένα που καλύπτουν διάφορες συνθήκες

λειτουργίας, καθεστώτα ροής και γεωμετρίες. Χωρίς ενδεδεγμένη επικύρωση, είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν προσομοιώσεις που δεν αντικατοπτρίζουν πιστά την πολύπλοκη φυσική της μικτής συναγωγής.

Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, πρέπει να καταβληθεί συγκεντρωτική προσπάθεια για την παραγωγή πειραματικών δεδομένων υψηλής ποιότητας που είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για ρυθμίσεις ψύξης με μικτή συναγωγή. Προκειμένου να δημιουργηθούν πειράματα που απεικονίζουν με ακρίβεια τα πολύπλοκα μοτίβα ροής και τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, οι ερευνητές πρέπει να συνεργαστούν. Η ακρίβεια και η εφαρμοσιμότητα των μοντέλων προσομοίωσης μπορούν στη συνέχεια να βελτιωθούν με την επικύρωση και την τελειοποίησή τους χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών. Επιπλέον, θα πρέπει να γίνουν εργασίες για την ανάπτυξη τυποποιημένων συνόλων δεδομένων επικύρωσης που θα μπορούν να χρησιμοποιούν ακαδημαϊκοί από πολλούς τομείς για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση των μοντέλων τους. Οι ερευνητές μπορούν να αναπτύξουν ακριβέστερα εργαλεία πρόβλεψης για την ψύξη με μικτή συναγωγή στα ηλεκτρονικά και να διασφαλίσουν ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν με τις πραγματικές παρατηρήσεις δίνοντας προτεραιότητα στην πειραματική επικύρωση και τη συγκριτική αξιολόγηση. Έτσι, θα ακολουθήσουν πιο σίγουρες και καλά ενημερωμένες επιλογές σχεδιασμού για λύσεις θερμικής διαχείρισης ηλεκτρονικών.

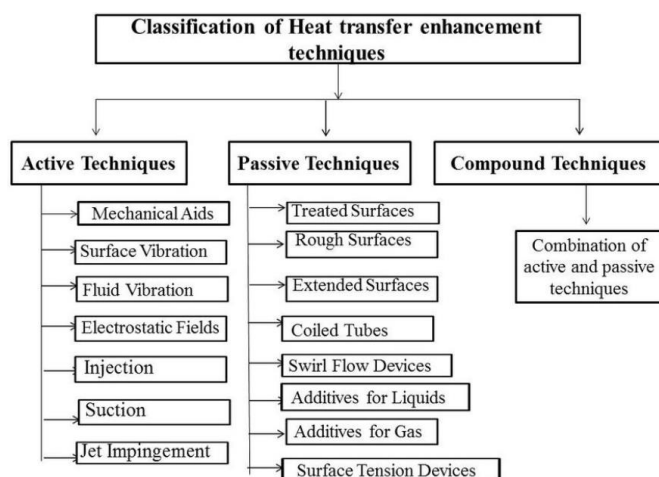
3.2-3 Τεχνικές βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας

Στον συγκεκριμένο τομέα πρέπει να βελτιωθεί η βαθιά κατανόηση της αποτελεσματικότητας των προσεγγίσεων ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας στην ψύξη με μικτή συναγωγή.

Οι προκλήσεις στην βελτιστοποίηση των συστημάτων ψύξης, που περιλαμβάνουν τόσο παθητικές όσο και ενεργητικές προσεγγίσεις, όπως περύγια, ψύκτρες και μικροκανάλια, αποτελεί πρόκληση. Οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτίωσης μπορεί μόνο μερικές φορές να λειτουργούν καλά σε ένα δυναμικό περιβάλλον λόγω της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης αυτών των δύο μορφών μετάδοσης θερμότητας.

Απαιτείται σημαντική ερευνητική προσπάθεια για την αντιμετώπιση αυτής της δυσκολίας. Οι ερευνητές θα πρέπει να διεξάγουν εις βάθος αναλύσεις για το πώς

λειτουργούν οι διάφορες στρατηγικές ψύξης σε συνθήκες μικτής συναγωγής. Αυτό περιλαμβάνει την εξέταση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικοί ρυθμοί ροής, οι κλίσεις θερμοκρασίας και οι γεωμετρικές διατάξεις επηρεάζουν τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας. Η ανάγκη για καινοτομία θα πρέπει επίσης να προκαλέσει τη διερεύνηση νέων και υβριδικών μεθόδων ψύξης που δημιουργήθηκαν ειδικά για συνθήκες μικτής συναγωγής. Ορισμένες προσεγγίσεις υπόσχονται αυξημένη αποτελεσματικότητα στην ψύξη των ηλεκτρονικών, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης νέων υλικών, της βελτίωσης των γεωμετριών των επιφανειών και της εφαρμογής ενεργών στρατηγικών ελέγχου.



Εικόνα 16 Μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας Pankaj Pande Amity Ph.D.(Chemical Eng)

3.2-4 Συμβατότητα υλικών και αξιοπιστία

Όσον αφορά την συμβατότητα και την αξιοπιστία των υλικών ένα ερευνητικό κενό που υπάρχει είναι ότι η πολύπλοκη αλληλεπίδραση της δυναμικής της θερμότητας και της ροής στη μεικτή συναγωγή ανοίγει μια προηγουμένως ανεξερεύνητη περιοχή συμβατότητας, ακεραιότητας και αξιοπιστίας των υλικών στα ηλεκτρονικά συστήματα ψύξης. Οι ποικίλες και κυμαινόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και ροής που προκαλεί η μικτή συναγωγή μπορούν να καταπονήσουν σημαντικά τα εξαρτήματα ψύξης. Αυτές οι καταπονήσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε φθορά του υλικού, διάβρωση και αλλαγή των μηχανικών χαρακτηριστικών. Για τη δημιουργία ισχυρών και αξιόπιστων λύσεων ψύξης είναι απαραίτητη η διεξοδική κατανόηση αυτών των επιπτώσεων. Για την επιτυχή πλοήγηση σε αυτή τη νέα

περιοχή, απαιτείται περισσότερη έρευνα για να εκτιμηθεί ο τρόπος με τον οποίο τα διάφορα υλικά ψύξης αντιδρούν στα ιδιαίτερα προβλήματα που παρουσιάζουν οι καταστάσεις μικτής συναγωγής. Οι ερευνητές θα πρέπει να εξετάσουν πώς επηρεάζεται η ακεραιότητα των υλικών από τις παροδικές κλίσεις θερμοκρασίας, τις δονήσεις που προκαλούνται από τη ροή και την πιθανότητα αλληλεπιδράσεων. Ο σχεδιασμός συστημάτων ψύξης με βελτιωμένη μακροζωία και αξιοπιστία απαιτεί επίσης τη διερεύνηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων της μικτής συναγωγής σε διάφορα είδη υλικών, επιστρώσεων και επιφανειακών επεξεργασιών.

Εν κατακλείδι, υπάρχουν αρκετά άλυτα ερωτήματα και δυσκολίες όσον αφορά την ψύξη με μικτή συναγωγή στα ηλεκτρονικά. Η κάλυψη αυτών των κενών θα βοηθήσει στη δημιουργία ακριβών μοντέλων, αποτελεσματικών μεθόδων ψύξης και βέλτιστων λύσεων θερμικής διαχείρισης για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα των συστημάτων ψύξης ηλεκτρονικών που λειτουργούν υπό συνθήκες μικτής συναγωγής πρέπει να βελτιωθούν, γεγονός που απαιτεί πρόσθετη έρευνα.

4 Μαθηματικά Μοντέλα-Μέθοδοί Επίλυσης

Για τη μελέτη του υπό εξέταση προβλήματος έγινε χρήση του προγράμματος Inventor Professional 2024 και το Autodesk CFD 2024 από την σουίτα της Autodesk.

Επιλέχθηκαν αυτά τα δύο συγκεκριμένα προγράμματα λόγω της δωρεάν παροχή τους από το πανεπιστήμιο αλλά και την καλή επικοινωνία και ευκολότερη μεταφορά των μοντέλων.

Στην ενότητα που ακολουθεί παρατίθενται οι εξισώσεις που διέπουν το σύστημα. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη μη γραμμικότητας σε αυτές τις εξισώσεις. Οι όροι μεταφοράς χρησιμεύουν ως παράδειγμα του πρώτου τύπου μη γραμμικότητας. Για παράδειγμα, μια φράση όπως αυτή μπορεί να βρεθεί στην εξίσωση της ταχύτητας u :

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x}$$

Κατά συνέπεια, εξαρτάται από το γινόμενο του u και την παράγωγό του. Τα χαρακτηριστικά ή οι συνιστώσες των όρων εξαρτώνται από την εξαρτημένη μεταβλητή, η οποία είναι το δεύτερο είδος μη γραμμικότητας που παρατηρείται στις κυβερνητικές εξισώσεις.

Για παράδειγμα, η θερμοκρασία είναι ένας παράγοντας στην εξάρτηση της εξίσωσης της ενέργειας από την πυκνότητα. Επιπλέον, οι ταχύτητες επηρεάζουν σημαντικά το ιξώδες των στροβίλων για τις τυρβώδεις ροές που χρησιμοποιούνται για τους όρους διάχυσης στις εξισώσεις ταχύτητας. Η αριθμητική λύση επηρεάζεται μακράν περισσότερο από αυτές τις δύο μορφές μη γραμμικότητας. Ως εκ τούτου, οι εξισώσεις πρέπει να επιλύονται επαναληπτικά.

4.1 Joule Heating

Για την περίπτωση που πρέπει να ληφθεί υπόψη η ωμική θέρμανση ή η θέρμανση Joule, ισχύει η ακόλουθη ενεργειακή εξίσωση για ασυμπίεστη ροή:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p w \frac{\partial T}{\partial z} + \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right) + r i^2 + q_v$$

C_p ειδική θερμότητα σταθερής πίεσης (J/kg-K)

i πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (amps/m²)

k θερμική αγωγιμότητα (W/m-K)

q_v ογκομετρική πηγή θερμότητας (W/m³)

r ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Ohm-m)

T θερμοκρασία (K)

t χρόνος (s)

u συνιστώσα ταχύτητας στην κατεύθυνση x (m/s)

v συνιστώσα ταχύτητας στην κατεύθυνση y (m/s)

w συνιστώσα ταχύτητας στη διεύθυνση z (m/s)

ρ πυκνότητα (kg/m³)

Οι οριακές συνθήκες για την εξίσωση ενέργειας περιλαμβάνουν τη συνήθη καθορισμένη θερμοκρασία, τον συντελεστή μεμβράνης, τη ροή θερμότητας ή την ακτινοβολία προς μια εξωτερική πηγή. Οι οριακές συνθήκες για την εξίσωση του ηλεκτρικού δυναμικού περιλαμβάνουν μια καθορισμένη τάση ή ένα καθορισμένο ηλεκτρικό ρεύμα.

4.2 Γενική εξίσωση ροής ρευστών και μεταφοράς θερμότητας

Οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή των ρευστών και τη μεταφορά θερμότητας είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes ή εξισώσεις ορμής και ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής ή εξίσωση ενέργειας. Οι διέπουσες $pdes$ μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

X-Momentum Equation:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = & \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\ & + S_\omega + S_{DR} \end{aligned}$$

Y-Momentum Equation:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = & \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ & + S_\omega + S_{DR} \end{aligned}$$

Z-Momentum Equation:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = & \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] \\ & + S_\omega + S_{DR} \end{aligned}$$

Οι δύο πηγαίοι όροι στις εξισώσεις ορμής αφορούν τις περιστρεφόμενες συντεταγμένες και τις κατανεμημένες αντιστάσεις αντίστοιχα. Ο όρος της κατανεμημένης αντίστασης μπορεί να γραφεί γενικά ως εξής:

$$S_{DR} = - \left(K_i + \frac{f}{D_H} \right) \frac{\rho V_i^2}{2} - C_\mu V_i$$

όπου το i αναφέρεται στη διεύθυνση των παγκόσμιων συντεταγμένων (εξίσωση ορμής u , v , w). Ο όρος K -συντελεστής μπορεί να λειτουργεί σε μία μόνο εξίσωση

ορμής κάθε φορά, επειδή κάθε κατεύθυνση έχει τον δικό της μοναδικό συντελεστή K . Οι άλλοι δύο τύποι αντίστασης λειτουργούν εξίσου σε κάθε εξίσωση ορμής.

Ο άλλος όρος της πηγής είναι για την περιστρεφόμενη ροή. Αυτός ο όρος μπορεί να γραφεί γενικά ως εξής:

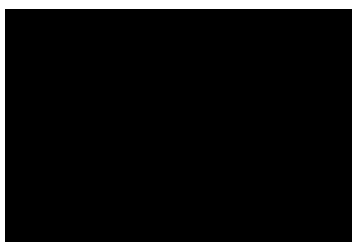
$$S_{\omega} = -2\rho\omega_i \times V_i - \rho\omega_i \times \omega_i \times r_i$$

όπου i αναφέρεται στην παγκόσμια διεύθυνση συντεταγμένων, ω είναι η ταχύτητα περιστροφής και r είναι η απόσταση από τον άξονα περιστροφής

Οι βασικές εξισώσεις παρατίθενται στην επόμενη ενότητα. Σε αυτές τις εξισώσεις εμφανίζονται δύο τύποι μη γραμμικότητας. Το πρώτο είδος μη γραμμικότητας παρουσιάζεται από τους όρους συμβολής. Για παράδειγμα, στην εξίσωση της ταχύτητας u , εμφανίζεται ένας όρος:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x}$$

Κατά συνέπεια, το u εξαρτάται από το γινόμενο του u και την παράγωγό του. Τα χαρακτηριστικά ή οι συνιστώσες των όρων εξαρτώνται από την εξαρτημένη μεταβλητή, η οποία είναι το δεύτερο είδος μη γραμμικότητας που μπορεί να παρατηρηθεί στις κυβερνητικές εξισώσεις. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία είναι ένας παράγοντας στην εξάρτηση της εξίσωσης της ενέργειας από την πυκνότητα. Επιπλέον, οι ταχύτητες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο ιξώδες των στροβίλων για τις τυρβώδεις ροές, το οποίο χρησιμοποιείται για τους όρους διάχυσης στις εξισώσεις ταχύτητας. Η αριθμητική λύση επηρεάζεται μακράν περισσότερο από αυτές τις δύο μορφές μη γραμμικότητας. Ως εκ τούτου, οι εξισώσεις πρέπει να επιλύονται επαναληπτικά.



Βίντεο.(Αυτό το κινούμενο σχέδιο ροής Ball Valve από την μία από τις διάφορες δυνατότητες προσομοίωσης)

4.3 Γρήγορη εξαναγκασμένη συναγωγή

Για πρόχειρες εκτιμήσεις της εξαναγκασμένης συναγωγής, το Autodesk® CFD θα χρησιμοποιήσει την εξίσωση δυναμικού ταχύτητας για να δημιουργήσει ένα γρήγορο βασικό πεδίο ροής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους όρους συναγωγής στην εξίσωση ενέργειας (θερμικής). Η εξίσωση δυναμικού ταχύτητας αντικαθιστά τις εξισώσεις Navier-Stokes. Η εξίσωση αυτή μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\nabla^2 \phi = 0$$

όπου ϕ είναι το δυναμικό ταχύτητας που ορίζεται ως:

$$\vec{V} = \nabla \phi$$

όπου \vec{V} είναι το διάνυσμα ταχύτητας. Η πίεση λαμβάνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Bernoulli:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} |\vec{V}|^2 = \text{const}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού.

Μετά τον υπολογισμό του δυναμικού ταχύτητας με την παραπάνω εξίσωση, οι ταχύτητες υπολογίζονται με τη χρήση

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

και η πίεση υπολογίζεται με τη χρήση

$$Nu = C Re^a Pr^b$$

Με αυτές τις ταχύτητες, η εξίσωση της ενέργειας (πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής που περιγραφικέ προηγουμένως) επιλύεται για τις θερμοκρασίες.

4.4 Εξίσωση συνέχειας (διατήρηση της μάζας)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Όπου:

$$\rho$$

η πυκνότητα ρευστού

$$\mathbf{u}$$

είναι το διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού.

4.5 Navier-Stokes Εξίσωση

Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τη διατήρηση της ορμής και αποτελούν τη βάση της δυναμικής των ρευστών. Μπορούν να γραφούν σε διανυσματική μορφή για κάθε συνιστώσα ως εξής:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v})}_I + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})}_{II} = \underbrace{-\nabla p}_{III} + \underbrace{\nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}})}_{IV} + \underbrace{\rho \vec{g}}_V$$

όπου p είναι η στατική πίεση, $\overline{\overline{\tau}}$ είναι ο τανυστής ιξωδών τάσεων και $\rho \vec{g}$ είναι η βαρυτική δύναμη ανά μονάδα όγκου. Εδώ, οι λατινικοί αριθμοί υποδηλώνουν:

I: Τοπική μεταβολή με το χρόνο

II: Συναγωγή ορμής

III: Επιφανειακή δύναμη

IV: Όρος διάχυσης

V: Δύναμη μάζας

4.6 Ίχνη Σωματιδίων

Για τα σωματίδια χωρίς μάζα, η εξίσωση είναι:

$$\frac{dx_p}{dt} = v$$

όπου x_p είναι το διάνυσμα θέσης του σωματιδίου και v είναι η τοπική ταχύτητα του σωματιδίου.

Για τα σωματίδια χωρίς μάζα, αυτή η τοπική ταχύτητα σωματιδίου είναι ίδια με την τοπική ταχύτητα του ρευστού. Για σωματίδια με μάζα, απαιτείται μια δεύτερη εξίσωση για τον προσδιορισμό της τοπικής ταχύτητας σωματιδίου. Χρησιμοποιείται ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_D + F_b$$

όπου m_p είναι η μάζα του σωματιδίου, v_p είναι η ταχύτητα του σωματιδίου, F_b είναι η δύναμη άνωσης και F_D είναι η δύναμη αντίστασης που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_f A_p (v_f - v_p) |v_f - v_p| C_D$$

ρ_f είναι η πυκνότητα του ρευστού

A_p είναι το εμβαδόν του σωματιδίου με βάση την εισαγωγή της ακτίνας του σωματιδίου από τον χρήστη

v_f είναι το διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού

v_p είναι το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου

C_D είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας, που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας:

$$C_D = \frac{24}{Re}(a + bRe^c)$$

Σε αυτή την εξίσωση, τα a,b και c είναι εισροές του χρήστη και Re είναι το ρευστό Reynolds που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας:

$$Re = \frac{\rho_f |v_f - v_p| 2R_p}{\mu_f}$$

Εκτός από τους παραπάνω ορισμούς, η εξίσωση αυτή χρησιμοποιεί επίσης Rp ως ακτίνα σωματιδίου και είναι το ιξώδες του ρευστού. Τέλος, η δύναμη άνωσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας:

$$F_b = m_p g$$

όπου g είναι το διάνυσμα βαρύτητας που εισάγεται από τον χρήστη.

4.7 Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος του Νεύτωνα

Η διατήρηση της ενέργειας είναι ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής που ορίζει ότι το άθροισμα του έργου και της θερμότητας που προστίθενται στο σύστημα θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας στο σύστημα

$$dE_t = dQ + dW$$

όπου dQ είναι η θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα, dW είναι το έργο που επιτελείται στο σύστημα και dEt είναι η αύξηση της συνολικής ενέργειας του συστήματος.

Ένας από τους συνήθεις τύπους μιας ενεργειακής εξίσωσης είναι:

$$\rho \left[\overbrace{\frac{\partial h}{\partial t}}^I + \overbrace{\nabla \cdot (h\vec{v})}^{II} \right] = -\overbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}^{III} + \overbrace{\nabla \cdot (k\nabla T)}^{IV} + \overbrace{\phi}^V$$

I: Τοπική μεταβολή με το χρόνο

II: Συναλλακτικός όρος

III: Έργο πίεσης

IV: Ροή θερμότητας

V: Ορος πηγής

4.8 Ιδιότητες των ρευστών

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι παράμετροι ρευστού που απαιτούνται για τις αναλύσεις ροής ρευστού και μεταφοράς θερμότητας. Οι μονάδες για τα cm και τις ίντσες εμφανίζονται ως σύνολο. Η πραγματοποίηση των απαραίτητων μετατροπών επιτρέπει τη χρήση άλλων μονάδων.

| Μεταβλητές | Ονοματολογία | Μονάδα Μέτρησης |
|------------|--|--|
| C_p | ειδική θερμότητα σταθερής πίεσης | Joule/gram-K |
| g_c | συντελεστής μετατροπής | 1.0 gram-cm/sec ² -dyne |
| k | θερμική αγωγιμότητα | Watt/cm-K |
| γ | συμπιεστικότητα (λόγος των ειδικών θερμών για τα αέρια και του μέτρου όγκου για τα υγρά) | dynes/cm ² (for bulk modulus) |
| μ | απόλυτο ιξώδες | gram/cm-sec |
| ρ | πυκνότητα | gram/cm ³ |
| ϵ | ικανότητα εκπομπής (επιφανειακή ιδιότητα μόνο) | |
| r | τραχύτητα τοιχώματος (επιφανειακή ιδιότητα μόνο) | cm |
| D | ικανότητα διάχυσης | cm ² /s |

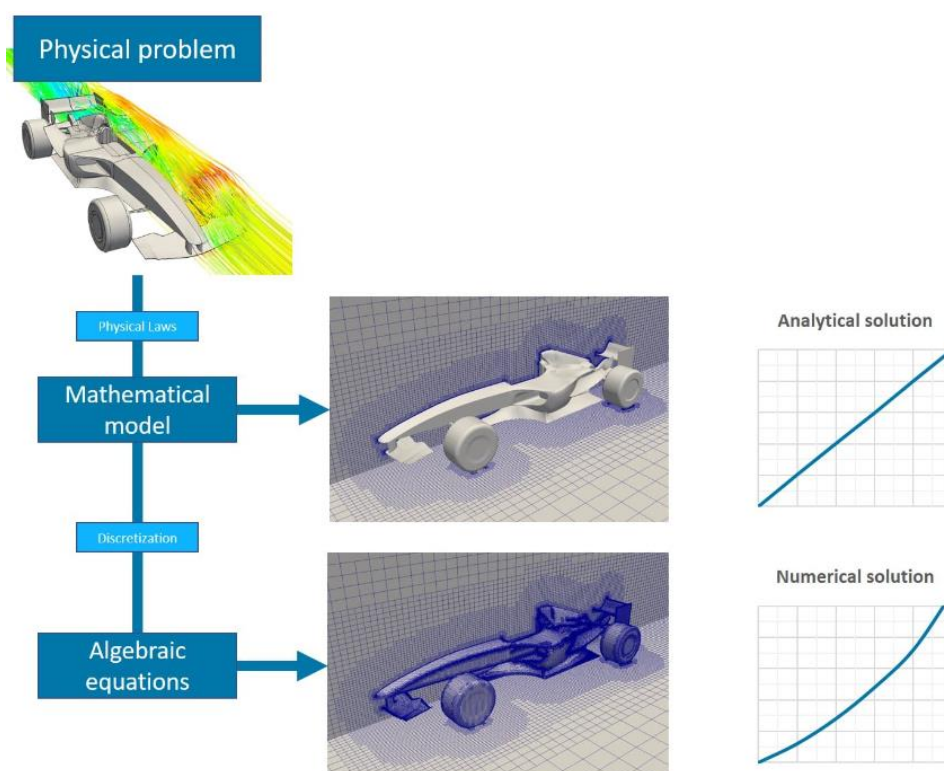
| Τύπος εναλλάκτη θερμότητας | Εξίσωση | Οριακές συνθήκες στην έξοδο του εναλλάκτη θερμότητας |
|--|--|--|
| Heat Exchanger (q'', T_∞) | $Q = q'' (T_{in} - T_\infty) = mcp (T_{out} - T_{in})$ | $q'' = T_{out} - (T_{in} - T_\infty) + T_{in}$ |
| Heat Input/Extraction Rate (Q) | $Q = mcp (T_{out} - T_{in})$ | $T_{out} = T_{in} + Q/mcp$ |
| Temperature Change (∇) | $\nabla = T_{out} - T_{in}$ | $T_{out} = T_{in} + \nabla$ |
| Air Conditioner (T_{set}) | $T_{out} = T_{set}$ | $T_{out} = T_{set}$ |

Χωρίς ένα πολύπλοκο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, η συσκευή υλικού εναλλάκτη θερμότητας προσομοιώνει έναν πραγματικό εναλλάκτη θερμότητας.

Οι οριακές συνθήκες στις δύο κοινές επιφάνειες διεπαφής του πεδίου του ρευστού αντικαθιστούν αποτελεσματικά το στοιχείο του εναλλάκτη θερμότητας. Υπάρχουν πλέον τέσσερις διαφορετικοί τύποι εναλλάκτη θερμότητας στους οποίους ισχύει στην είσοδο $p = 0$. Για κάθε τύπο εναλλάκτη θερμότητας, παρουσιάζονται οι διατυπώσεις της κυβερνητικής εξίσωσης και των οριακών συνθηκών του εναλλάκτη θερμότητας.

4.9 Διακριτοποίηση

Μια τεχνική που βασίζεται στη διακριτοποίηση, γνωστή ως αριθμητική λύση, χρησιμοποιείται για την παροχή προσεγγιστικών λύσεων σε δύσκολα προβλήματα που δεν μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά. Το παρακάτω σχήμα δείχνει πώς οι τεχνικές επίλυσης χωρίς διακριτοποίηση παράγουν μόνο μια αναλυτική απάντηση που είναι ακριβής αλλά απλή. Επιπλέον, η ποιότητα της διακριτοποίησης έχει σημαντικό αντίκτυπο στο πόσο ακριβής είναι η αριθμητική λύση. Είναι δυνατόν να καθοριστούν ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές διακριτοποίησης, όπως πεπερασμένες διαφορές, πεπερασμένοι όγκοι, πεπερασμένα στοιχεία, φασματικές (στοιχειομετρικές) μέθοδοι και συνοριακά στοιχεία.



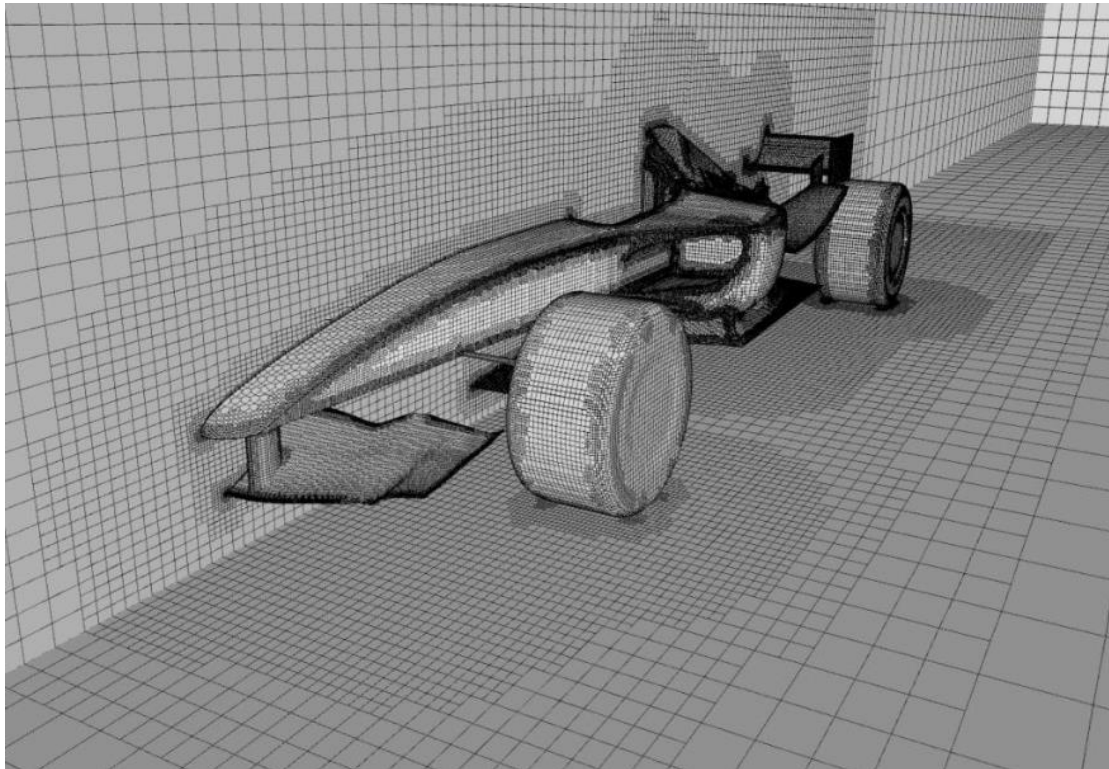
Εικόνα 17 Συγκριση διακριτοποίησης και συμβολή της στη γραμμικοποίηση των PDEs και στη σύλληψη των ευαίσθητων μεταβλητών κλίσεων

4.10 Πλέγμα

Πριν την μεθοδολογία ένα ακόμα σημαντικό κενό που πρέπει να καλυφθεί είναι η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος και γιατί χρησιμοποιείται. Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, το πλέγμα είναι ένα από τα βασικά στοιχεία της διαδικασίας προσομοίωσης. Είναι ένα σύστημα που αποτελείται από κελιά και κόμβους. Για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, μπορεί να έχει σχεδόν οποιοδήποτε μέγεθος

ή σχήμα. Κάθε κελί του πλέγματος αντιπροσωπεύει μια ξεχωριστή λύση της εξίσωσης, η οποία όταν προστεθεί μαζί με το υπόλοιπο δίκτυο δίνει μια λύση για ολόκληρο το πλέγμα.

Λόγω της πολυπλοκότητας του αντικειμένου, ενδέχεται να μην είναι δυνατή η πλήρης επίλυσή του χωρίς να διασπαστεί σε μικρότερα στοιχεία. Μπορεί να είναι πολύ δύσκολο για τους επιλύτες να βρουν μια λύση όταν υπάρχουν τρύπες, ή γωνίες. Η προτιμώμενη προσέγγιση, ωστόσο, είναι η χρήση μικρών κελιών επειδή είναι αρκετά απλή η επίλυσή τους.



Εικόνα 18 Μεταβλητότητα πυκνότητας του πλέγματος σε μονοθέσιο F1

4.10-1 Σφάλματα λύσεων λόγο πλέγματος

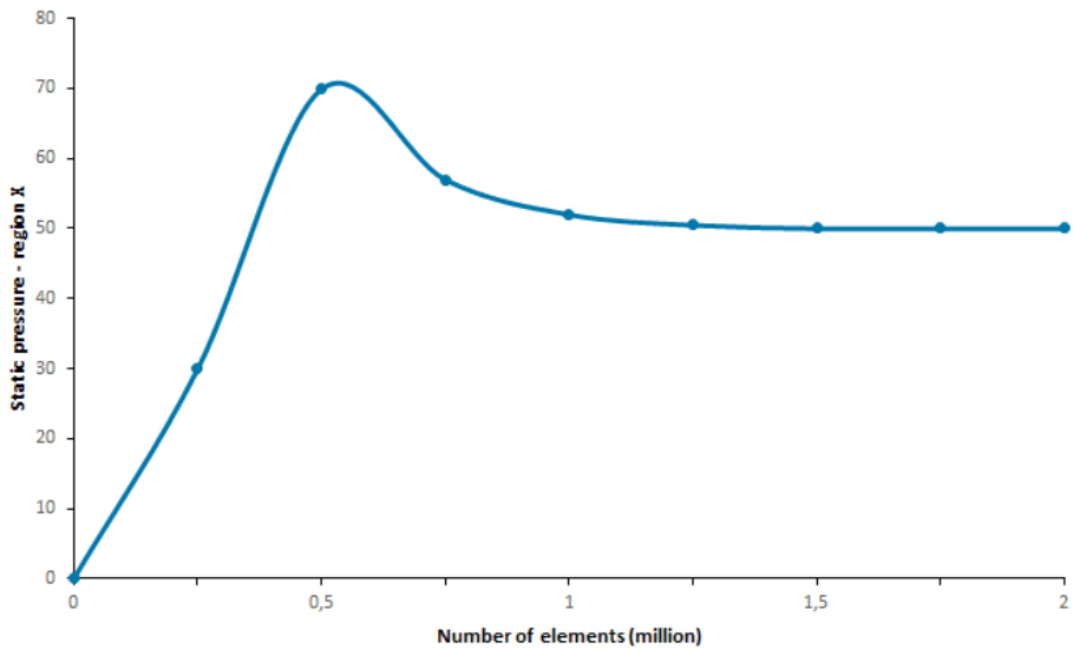
Τα σφάλματα πλέγματος είναι ένα συχνό πρόβλημα που μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες λύσεις ή σε πλήρη αποτυχία της προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν στο πλέγμα υπάρχουν πάρα πολλά ογκώδη, χονδροειδή κελιά, τα οποία εμποδίζουν τη φυσική της ροής να αναπαρασταθεί σωστά. Εξαιτίας αυτού, η διεξαγωγή μιας μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος είναι απαραίτητη για να

διασφαλιστεί ότι το πλέγμα δεν επηρεάζει άμεσα τη λύση. Παρακάτω παρουσιάζεται μια απεικόνιση της μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος:

- Βασικό είναι να δημιουργηθεί ένα πρώτο πλέγμα που οπτικά φαίνεται να έχει αρκετά κελιά και ένα αρκετά πυκνό πλέγμα, ενώ αποτυπώνει με ακρίβεια τη γεωμετρία.
- Στις περιοχές ενδιαφέροντος, να αναγεννηθεί το πλέγμα με περισσότερα σημεία και πυκνότερο πλέγμα. Επαναλάβετε την ανάλυση CFD και συγκρίνετε τα αποτελέσματα, όπως απαιτείται. Για παράδειγμα, η σύγκριση των μειώσεων της πίεσης σε κρίσιμες θέσεις θα ήταν ένας εξαιρετικός τρόπος για να μετρηθεί η ευαισθησία του πλέγματος κατά την εξέταση της εσωτερικής ροής μέσω ενός καναλιού.

Τέλος να βελτιωθεί έως ότου τα αποτελέσματα και τα σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά (όπως η πτώση πίεσης, η μέγιστη ταχύτητα κ.λπ.) συμπίπτουν επαρκώς με το προηγούμενο πλέγμα και τη μελέτη CFD.

Τα παραπάνω βήματα επιτρέπουν την ελαχιστοποίηση των λαθών που σχετίζονται με τη δομή του πλέγματος και την επίτευξη του ιδανικού αριθμού στοιχείων για τη διευκόλυνση των υπολογισμών.



Γράφημα 1 Ανάλυση σύγκλισης πλέγματος

4.11 Μέθοδος επίλυσης

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε προηγουμένως, κάθε ένα από τα προαναφερθέντα ρυθμιστικά $pdes$ διακριτοποιείται. Για να βρεθούν οι τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να επιλυθεί το προκύπτουν σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων. Στην παρούσα ενότητα εξηγείται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το Autodesk® CFD για την επίλυση αυτών των εξισώσεων.

4.11-1 Διαχωριστικός επιλύτης (Segregated Solver)

Η πίεση που λείπει είναι το πρώτο πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί για την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων. Εάν οι συνιστώσες της ταχύτητας υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ορμής, η πίεση πρέπει να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση συνέχειας. Ωστόσο, η εξίσωση συνέχειας δεν αναφέρει ποτέ απευθείας την πίεση. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να παρακάμψετε τις αριθμητικές προκλήσεις της σιωπηρής σύζευξης πίεσης. Οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής πρέπει συχνά να υπολογίζονται ταυτόχρονα σε κάθε κόμβο του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε πολλές από αυτές τις τεχνικές επίλυσης. Αυτή η τεχνική είναι επαρκής για δευτερεύοντα ζητήματα. Ωστόσο, για τα περισσότερα ζητήματα

του πραγματικού κόσμου, η τεχνική αυτή επηρεάζει σημαντικά αρνητικά τους πόρους του υπολογιστή και μπορεί να είναι ακόμη και μη πρακτική. πρέπει να ανακαλυφθεί μια ρητή εξίσωση στην πίεση για να διευκολυνθεί αυτός ο περιορισμός. Από την εξίσωση συνέχειας προκύπτει η εξίσωση πίεσης που επιλύει το Autodesk® CFD. Για να μειωθεί η τάξη ολοκλήρωσης, λαμβάνεται το σταθμισμένο ολοκλήρωμα της εξίσωσης συνέχειας:

$$\int N \left(\frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} \right) d\Omega$$

$$= \oint N \rho U d\Gamma + \oint N \rho V d\Gamma + \oint N \rho W d\Gamma - \int \left(\frac{\partial N}{\partial x} \rho U + \frac{\partial N}{\partial y} \rho V + \frac{\partial N}{\partial z} \rho W \right) d\Omega$$

Τα τρία πρώτα ολοκληρώματα στη δεξιά πλευρά αυτής της εξίσωσης αντιπροσωπεύουν τη ροή μάζας στα όρια των στοιχείων. Αυτά τα ολοκληρώματα θα ακυρωθούν στις εσωτερικές επιφάνειες του στοιχείου και θα είναι μηδενικά για όλα τα όρια στα οποία δεν υπάρχει ροή μάζας (συμμετρία, τοίχοι). Έτσι, αυτοί οι όροι αντιπροσωπεύουν τη φυσική οριακή συνθήκη για την εξίσωση πίεσης.

Στην συνέχεια είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί μια σχέση μεταξύ ταχύτητας και πίεσης, προκειμένου να απαιτηθεί η συμπερίληψη της πίεσης σε αυτή την εξίσωση. Οι εξισώσεις ορμής επιτρέπει την εξαγωγή αυτής της σχέσης. Η σχέση ταχύτητας-πίεσης μπορεί να εκφραστεί ως εξής χρησιμοποιώντας μια ημι-διακριτοποιημένη παραλλαγή των εξισώσεων ορμής:

$$U = U_h - K_U \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$V = V_h - K_V \frac{\partial P}{\partial y}$$

$$W = W_h - K_W \frac{\partial P}{\partial z}$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, οι όροι U_h , V_h , W_h περιέχουν όλους τους εκτός διαγωνίου όρους των εξισώσεων ορμής. Εάν αυτές οι τρεις εξισώσεις αντικατασταθούν τώρα στην προηγούμενη εξίσωση συνέχειας, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση πίεσης:

$$\int \left(\frac{\partial N}{\partial x} \rho K_U \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \rho K_V \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial N}{\partial z} \rho K_W \frac{\partial P}{\partial z} \right) d\Omega$$

$$= - \oint N \rho U d\Gamma - \oint N \rho V d\Gamma - \oint N \rho W d\Gamma + \int \rho \left(U_h \frac{\partial N}{\partial x} + V_h \frac{\partial N}{\partial y} + W_h \frac{\partial N}{\partial z} \right) d\Omega$$

Η διακριτοποιημένη εξίσωση Poisson που χρησιμοποιείται σε αυτή την εξίσωση θα οδηγήσει σε έναν συμμετρικό πίνακα συντελεστών.

Οι διέπουσες εξισώσεις πρέπει να επιλυθούν επαναληπτικά επειδή είναι μη γραμμικές. Η μέθοδος είναι είτε η μέθοδος Picard είτε η διαδοχική αντικατάσταση. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την αντικατάσταση των εξισώσεων διακυβέρνησης με εκτιμήσεις των μεταβλητών λύσης (U, V, W, P, T και K). Οι εξισώσεις επιλύονται για να παρέχουν νέες τιμές, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως εκτιμήσεις για το επόμενο πέρασμα. Όταν πληρούνται κάθε μία από αυτές τις συνθήκες, το Autodesk® CFD είτε σταματά είτε εκτελεί έναν καθορισμένο αριθμό αυτών των συνολικών επαναλήψεων είτε ελέγχει το κριτήριο σύγκλισης. το όριο που πρέπει να περάσει η υπολειμματική τιμή της συγκεκριμένης μεταβλητής είναι γνωστό ως κριτήριο σύγκλισης.

4.11-2 Επιλύτες πινάκων

4.11-2.1 Gauss-Seidel

Σε κάθε κόμβο της διαδικασίας διακριτοποίησης δημιουργούνται αλγεβρικές εξισώσεις. Αυτές οι εξισώσεις συνδυάζονται για να δημιουργήσουν τον πίνακα A_{ij} , ο οποίος έχει τόσες στήλες όσοι είναι οι μη μηδενικοί συντελεστές για τις τιμές των κόμβων και τόσες γραμμές όσοι είναι οι κόμβοι πεπερασμένων στοιχείων. Η κλασική μέθοδος για την επίλυση της εξίσωσης του πίνακα είναι η απαλοιφή του Gauss. Αυτός είναι ένας μάλλον ακριβός τρόπος για να ληφθεί μια λύση, επειδή η διαδικασία απαλοιφής απαιτεί τουλάχιστον έναν πίνακα με ζώνες για το γέμισμα που παράγεται κατά την αποσύνθεση. Ο A_{ij} που αποθηκεύεται από το Autodesk® CFD είναι πολύ μικρότερος από έναν ζωνικό πίνακα. Επίσης, η διαδικασία απαλοιφής είναι αρκετά απαιτητική σε υπολογισμούς. Δεδομένου ότι επιλύουμε αυτές τις εξισώσεις επανειλημμένα, αυτή η δαπανηρή διαδικασία εξάλειψης θα ήταν απαγορευτικά αργή και επίπονη. Η χρήση επαναληπτικών επιλυτών πινάκων, οι οποίοι κάνουν

προσεγγίσεις για να μειώσουν τον αριθμό των υπολογισμών και να εξαλείψουν πλήρως τη διαδικασία συμπλήρωσης, είναι μια εναλλακτική λύση στη χρήση διαδικασιών εξάλειψης. Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται μόνο μη μηδενικές καταχωρήσεις πινάκων, μειώνοντας σημαντικά τον απαιτούμενο αποθηκευτικό χώρο του υπολογιστή (2-3 τάξεις μεγέθους σε τρισδιάστατες εφαρμογές). Ειδικότερα, η υπόθεση είναι ότι οι προηγούμενες τιμές του μπορούν να εκτιμηθούν από τις παρούσες τιμές. Η μέθοδος απαλοιφής Gauss θα παράγει τελικά την ίδια απάντηση μετά από πολλά περάσματα ή επαναλήψεις μέσω του επιλυτή, μείον τυχόν λάθη στρογγυλοποίησης. Μπορεί όμως να θέλουμε να χρειαστεί τις επαναλήψεις πριν φτάσουμε σε αυτό το σημείο, για άλλη μια φορά λόγω της μη γραμμικής δομής των εξισώσεων. Παρακάτω θα προσδιορισθεί ο απλούστερος επαναληπτικός επιλυτής πινάκων Gauss-Seidel και προσδιορίζεται ως :

$$\phi_i = \frac{F_i - \sum_{j \neq i} A_{ij} \phi_j}{A_{ii}}$$

Οι τιμές σε αυτή την εξίσωση είναι οι πιο πρόσφατες διαθέσιμες τιμές. Πρακτικά, αυτό που κάνει είναι να μεταφέρει όλους τους εκτός διαγωνίου όρους στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης. Επειδή ο αριθμός των επαναλήψεων Gauss-Seidel που απαιτούνται για την επίτευξη μιας αξιοπρεπούς λύσης είναι αρκετά μεγάλος, η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται συχνά.

4.11-2.2 TDMA

Ένας άλλος επαναληπτικός επιλύτης πινάκων που δίνει σημαντικά καλύτερη λύση από τον Gauss-Seidel, ιδίως για προβλήματα μεταφοράς, είναι ο αλγόριθμος τριδιαγώνιου πίνακα (TDMA). Σε αυτή τη μέθοδο, κατασκευάζεται μια εξίσωση τριδιαγώνιου πίνακα όπου οι στείλες που συνορεύουν στη διαγώνιο διατηρούνται και οι υπόλοιποι όροι μεταφέρονται στη δεξιά πλευρά των εξισώσεων, όπου εφαρμόζονται οι προηγούμενες τιμές του. Ένα παράδειγμα της εξίσωσης πίνακα TDMA:

$$A_{i-1,j}\phi_{i-1} + A_{i,j}\phi_{i-1} + A_{i+1,j}\phi_{i+1} = \sum_{j \neq i-1, j \neq i, j \neq i+1} A_{i,j}\phi_j + F_i$$

Τα μονοδιάστατα επίπεδα κόμβων της μεθόδου TDMA μπορούν να επιλυθούν ταυτόχρονα. Οι πληροφορίες μεταφέρονται από το επίπεδο εισόδου σε κάθε επόμενο επίπεδο στις εξισώσεις μεταφοράς. Κατά συνέπεια, η προσομοίωση αυτής της φυσικής διαδικασίας ροής πληροφοριών με την επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς με τη χρήση του αλγορίθμου TDMA.

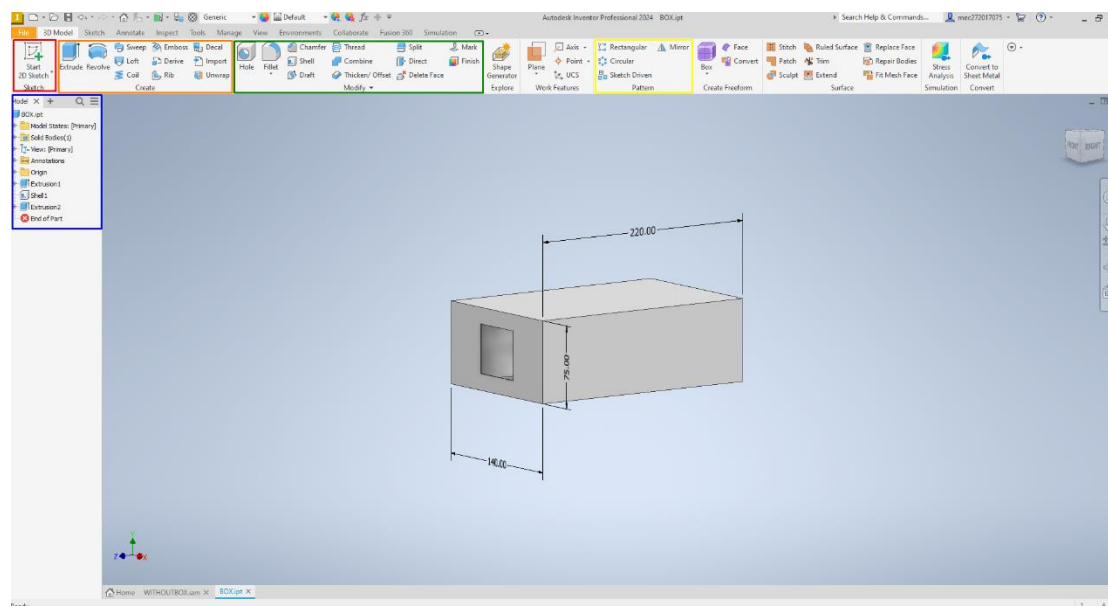
5 Μεθοδολογία

5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά-Περιβάλλον Autodesk Inventor 2024

Για τη μελέτη του υπό εξέταση προβλήματος έγινε χρήση του προγράμματος Inventor Professional 2022 και το CFD 2023 από την σουίτα της Autodesk. Επιλέχθηκαν αυτά τα δύο συγκεκριμένα προγράμματα λόγω της δωρεάν παροχή τους από το πανεπιστήμιο αλλά και την καλή επικοινωνία και ευκολότερη μεταφορά των μοντέλων. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχεδιάστηκε ένα εξωτερικό κουτί με δύο τετράγωνες διατομές για την είσοδο και την έξοδο του αέρα. Εσωτερικά του κουτιού θα υπάρχει μία πλακέτα υλικού PCB, η οποία θα στερεώνεται σε τέσσερα ποδαράκια PVC υλικού. Πάνω στην πλακέτα θα τοποθετηθεί επεξεργαστής πυριτίου. Τέλος θα τοποθετηθεί ψήκτρα από πάνω για απαγωγή θερμότητας. Η πλακέτα PCB είναι ορθογωνική κάτι το οποίο μπορεί να έχει μια απλή δομή αφού το υποεξέταση θέμα είναι η απαγωγή θερμότητας από την ψήκτρα. Όλες οι γεωμετρίες κατασκευάστηκαν εξ ολοκλήρου στο πρόγραμμα Autodesk Inventor.

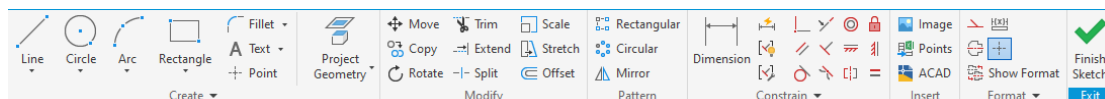
Πιο αναλυτικά στην μελέτη περίπτωσης μας αρχικά χρησιμοποιήθηκε όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το πρόγραμμα AUTODESK INVENTOR 2024 για την κατασκευή των εξαρτημάτων που θα αποτελέσουν το πείραμα.

Αρχικά να αναλύσουμε λίγο το περιβάλλον του AUTODESK CFD το οποίο είναι αρκετά απλοποιημένο και ευκολόχρηστο. Πιο αναλυτικά:



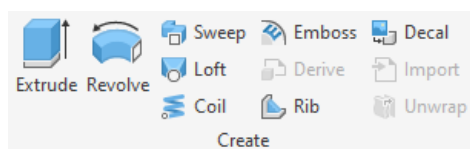
Εικόνα 19 Περιβάλλον Autodesk Inventor 2024

Στο **κόκκινο τετράγωνο** διακρίνεται η εντολή Start 2D Sketch στο οποίο διαλέγεις επίπεδο και κάνεις τον αρχικό δισδιάστατο σχηματισμό της γεωμετρίας. Παρακάτω διακρίνεται και το μενού των εντολών που υπάρχουν στον δισδιάστατο σχεδιασμό των σχημάτων.



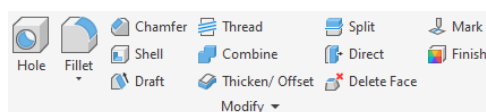
Εικόνα 20 Εντολές 2D Sketch

Στην συνέχεια το **πορτοκαλί** σχεδιάγραμμα διακρίνονται οι εντολές στις οποίες θα δώσουμε όγκο και φυσική υπόσταση στα σχέδια που έγιναν στο 2D Sketch.



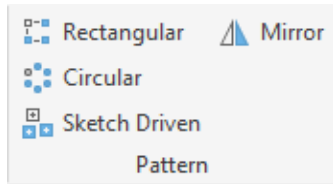
Εικόνα 21 Εντολές δημιουργίας όγκου σχημάτων

Στο **πράσινο κουτί** οι εντολές οι οποίες μπορούν να μεταβάλλουν τα τρισδιάστατα σχέδια όπως και έγινε για παράδειγμα μια τρύπα με την εντολή Shell για να γίνει ο κενός χώρος μέσα στο κουτί και να δώσουμε ένα συγκεκριμένο πάχος.



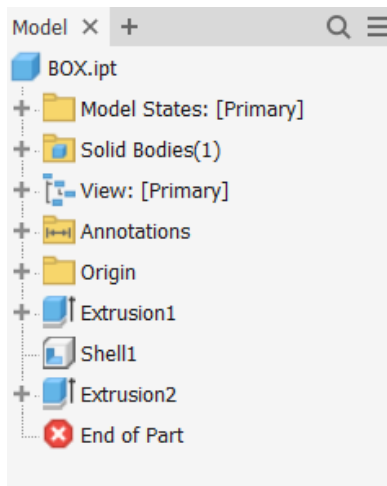
Εικόνα 22 Εντολές μορφοποίησης όγκων

Στο **κίτρινο περίγραμμα** υπάρχουν οι εντολές Patterns τα οποία θα διευκολύνουν στις δημιουργία και στην καλύτερη και γρηγορότερη κατασκευή των ψυκτρών, το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω.



Εικόνα 23 Εντολή δημιουργίας Pattern

Τέλος το **μπλε περίγραμμα** είναι το Message Box στο οποίο αναφέρεται αναλυτικά η κάθε ενέργεια που έχει γίνει και με την σειρά της αλλά και στην πιο εύκολη πρόσβαση κάποιων εντολών(π.χ Copy,Delete).



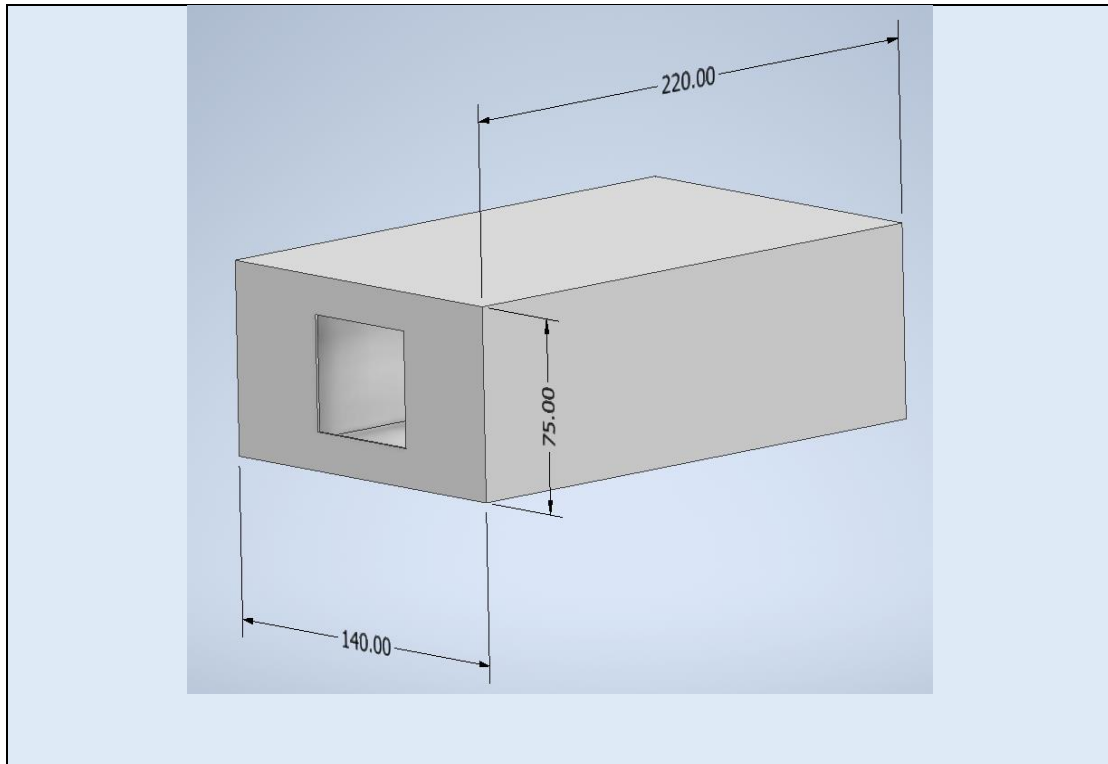
Εικόνα 24 Message Box

5.2 Ανάλυση κατασκευής Γεωμετριών

5.2.1Κουτί

Πιο αναλυτικά:

| ΚΟΥΤΙ | |
|--------------|--------------------------------|
| ΥΛΙΚΟ | ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ |
| CONDUCTIVITY | 2.04 W/cm-K |
| DENSITY | 2.707g/cm ³ |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ | 140*75*220(mm) με πάχος 1 (mm) |

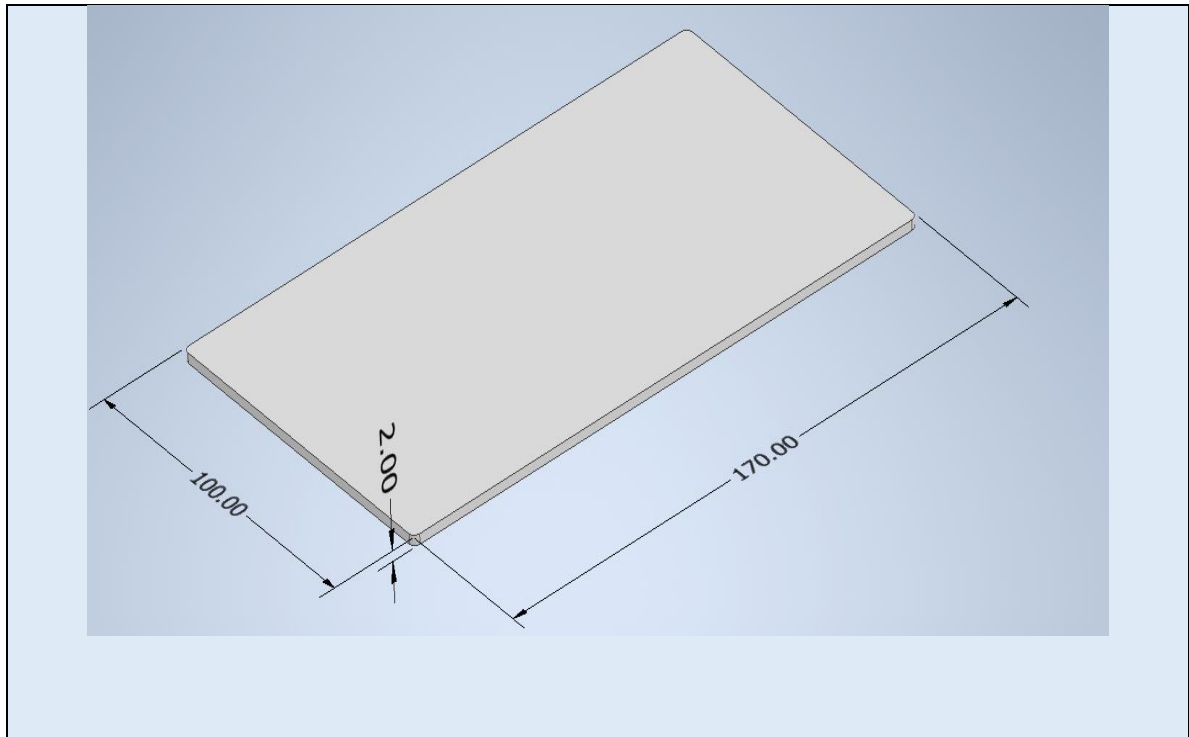


Για τον σχεδιασμό του κουτιού κατασκευάστηκε αρχικά ένα τετράγωνο με διαστάσεις 220*140 και στην συνέχεια με την εντολή Extrusion δημιουργείται το ύψος του κουτιού στα 75mm. Για τις δυο εσοχές για την εισαγωγή του αέρα και την εξαγωγή από το κουτί από της μικρές πλευρές του με διαστάσεις 45*50mm. Τέλος για να δημιουργήσουμε πάχος 1mm θα το κάνουμε με την ενέργεια Shell.

5.2.2 Πλακέτα

Όσον αφορά την πλακέτα θα κάνουμε ένα τετράγωνο με διαστάσεις 170*100mm και πάχος 2mm με την ενέργεια Extrusion. Τέλος για την ομάλυνση των γωνιών έγινε με την διεργασία Fillet με ακτίνα 3mm.

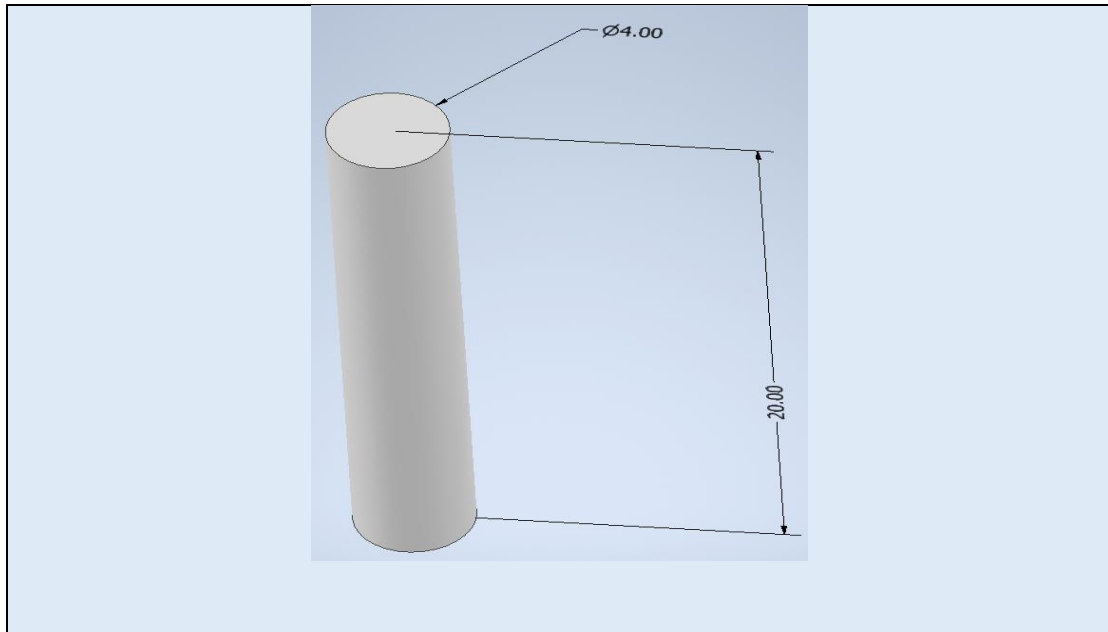
| ΠΛΑΚΕΤΑ | |
|--------------|-----------------------|
| ΥΛΙΚΟ | PVC |
| CONDUCTIVITY | 0.0026 W/cm-K |
| DENSITY | 0,43g/cm ³ |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ | 170*100*2(mm) |



5.2.3 Βάσεις Πλακέτας

Για τα 4 ποδαράκια που τοποθετήθηκαν στις 4 στρογγυλεμένες άκρες της πλακέτας τα οποία κατασκευάστηκαν με έναν κύκλο διαμέτρου 4mm και έγινε Extrusion με πάχος 20mm και διάμετρο 4mm όπως φαίνεται στο σχήμα.

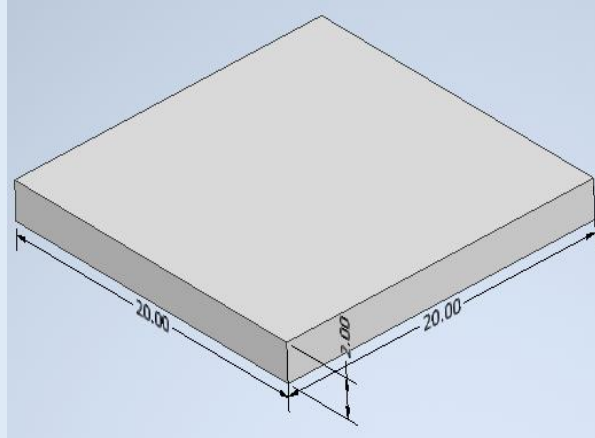
| ΒΑΣΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ | |
|---------------|----------------------|
| ΥΛΙΚΟ | PVC |
| CONDUCTIVITY | 0.0025 W/cm-K |
| DENSITY | 1.4g/cm ³ |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ | Ø4*20mm |



5.2.4 Τσιπάκι

Πάνω στην πλακέτα θα τοποθετηθούν κατά μήκος 1 τσιπάκι σε απόσταση 40 mm από την αρχή της πλακέτας . Τα συγκεκριμένα έχουν τετραγωνικό σχήμα 20*20mm το οποίο έγινε σε Sketch και πάχος 2mm (Extrusion)

| ΤΣΙΠΑΚΙ | |
|--------------|-----------------------------|
| ΥΛΙΚΟ | ΠΥΡΙΤΙΟ |
| CONDUCTIVITY | 1 W/cm-K |
| DENSITY | 2.33 g/cm ³ |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ | 50*50*5(mm) με πάχος 1 (mm) |
| ΙΣΧΥΣ | 75W |



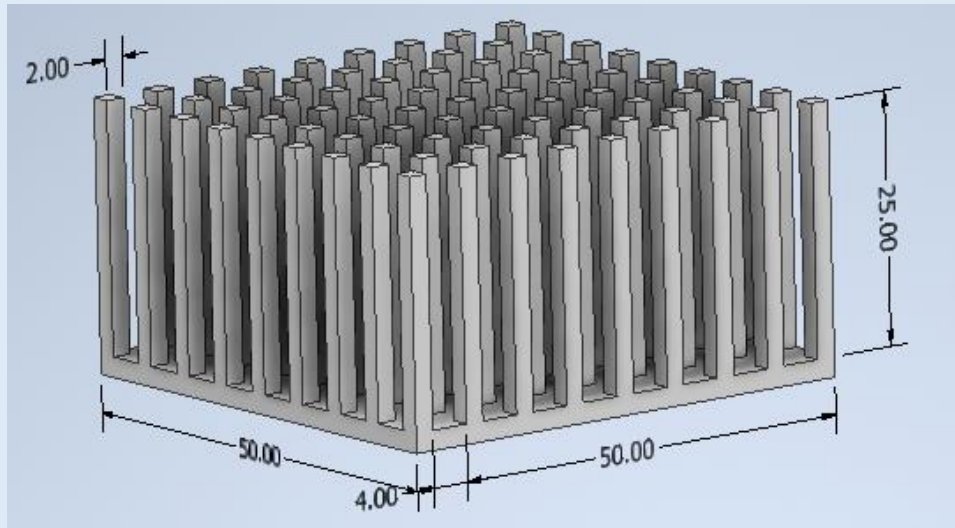
5.2.4 Ψύκτρες

Όσον αφορά τις ψύκτρες έγινε ο σχεδιασμός 3 γεωμετριών οι οποίες θα τοποθετηθούν πάνω από το τσιπάκι απεικονίζονται παρακάτω.

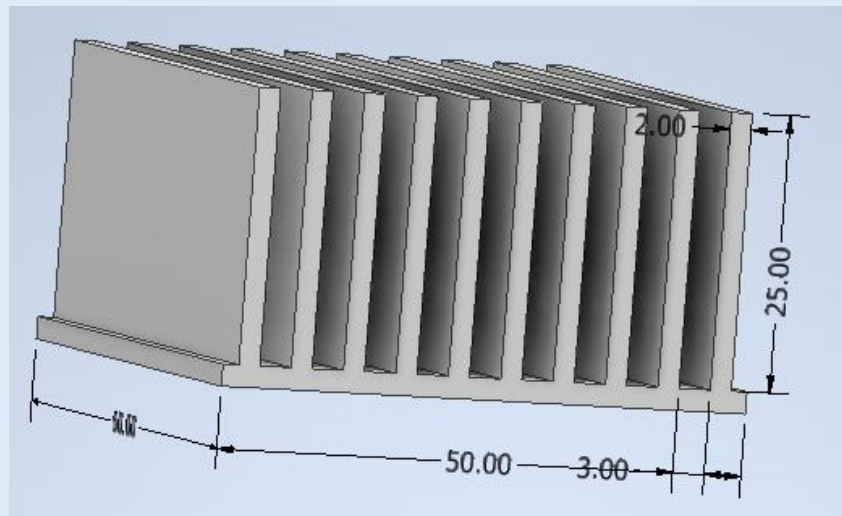
Στο παραπάνω σχήμα έχουμε μια ψύκτρα τετραγωνικής γεωμετρίας 50*50(mm) και με πάχος 4mm. Το ύψος των τετραγωνικών πυργίσκων είναι στα 25mm και το κενό ανάμεσα τους είναι 4mm και στις δύο πλευρές. Η συγκεκριμένη γεωμετρία φτιάχτηκε με Rectangular Pattern.

Όλες οι ψήκτρες εξετάστηκαν στο υλικό **χαλκός** και η αποδοτικότερη, δηλαδή η μικρότερη θερμοκρασία που θα παρουσιαστεί σε μία από τις γεωμετρίες εξετάστηκε και σε αλλά 3 υλικά. Τα οποία είναι το κράμα μετάλλων αλουμινίου (**6063**) το οποίο περιέχει 97.5%Al, 0.45%Mg, 0.20%Si), καθαρό Al και καθαρό ασήμι Ag.

| ΥΛΙΚΟ | ΧΑΛΚΟΣ | 6063 | ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | ΑΣΗΜΙ |
|--------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| CONDUCTIVITY | 398 W/m•K | 209 W/m-K | 237 W/cm-K | 429 W/cm-K |
| DENSITY | 8.9 g/cm ³ | 2.70 g/cm ³ | 2.71 g/cm ³ | 10.49 g/cm ³ |

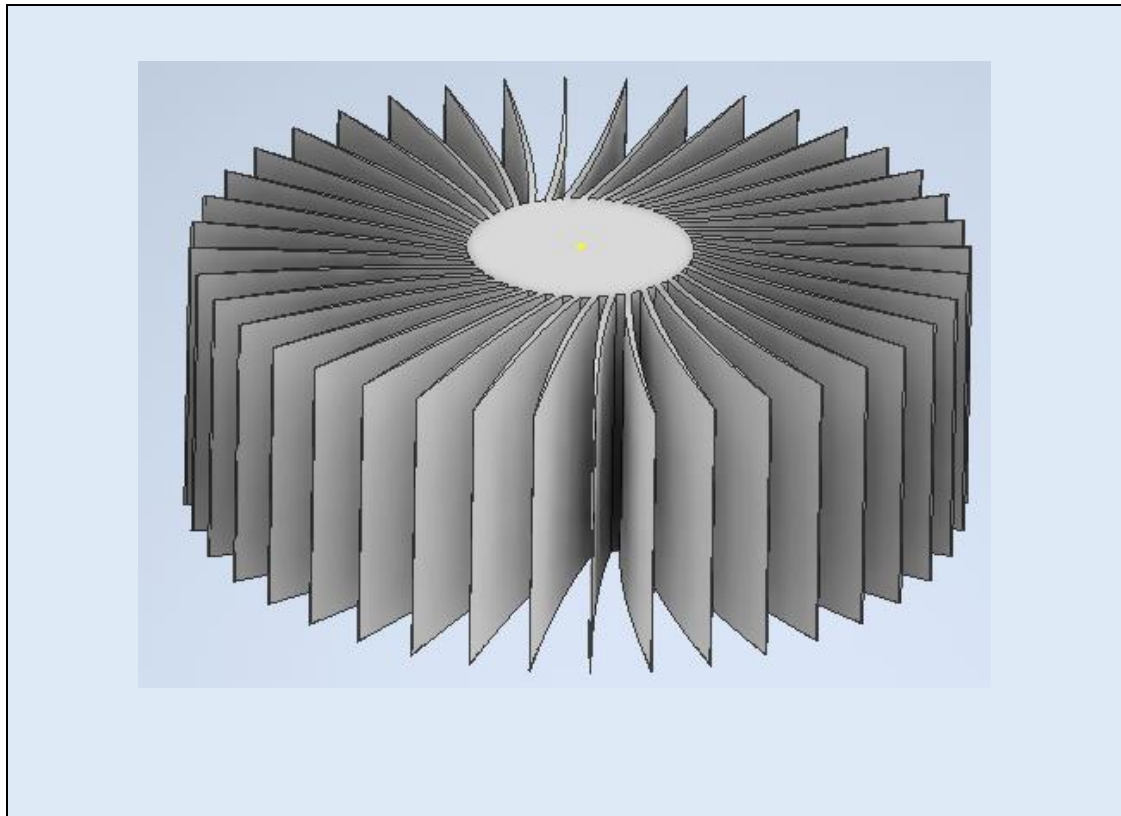


Επόμενη γεωμετρία τετραγωνικής γεωμετρίας 50*50(mm) και με πάχος 4mm η οποία αποτελείται από 10 ορθογωνικά πτερύγια, τα οποία έχουν ύψος 25mm πάχος 2mm και κενό ανάμεσα τους στα 3mm.



Εικόνα 30 Ψύκτρα Rectangle fins

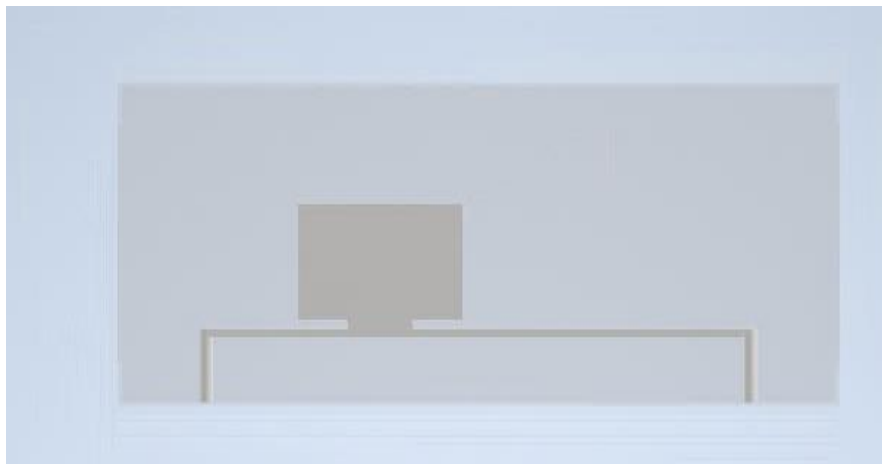
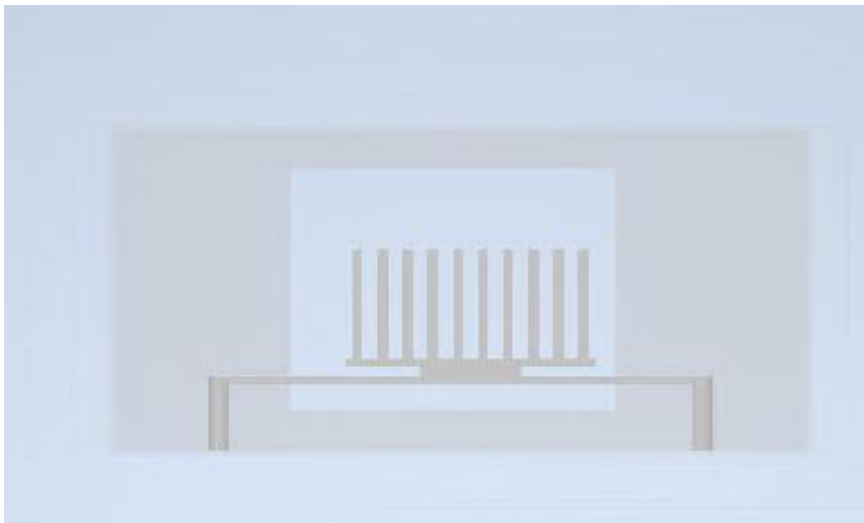
Η τελευταία γεωμετρία είναι κυκλικής μορφής και τα πτερύγια έχουν ακτίνα 25mm. Το ύψος των πτερυγίων είναι επίσης στα 25mm. Ο σχεδιασμός της έγινε με 2 Extrusion, ένα για το μήκος πτερυγίων και ένα για το ύψος του. Τέλος για την δημιουργία των 40 πτερυγίων χρησιμοποιήθηκε το Circular Pattern.

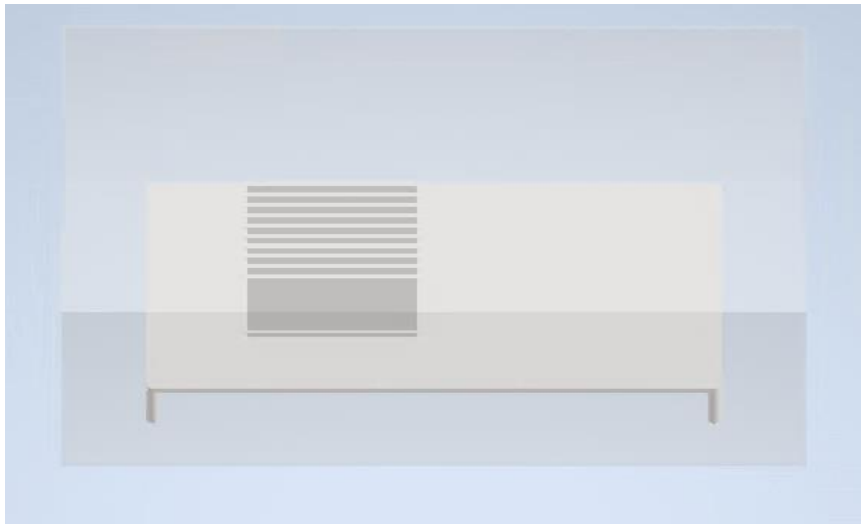


5.3 Τελικά σχήματα

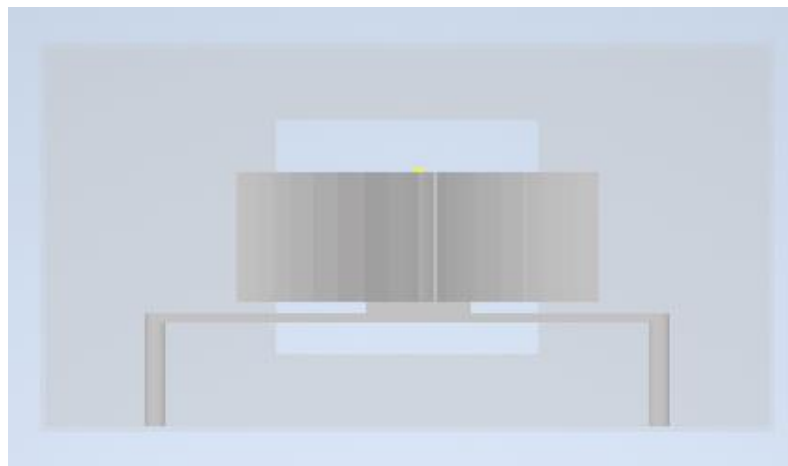
Στην συνέχεια τα παραπάνω τοποθετούνται όλα μαζί καταλληλά με Constrains χωρίς κενά έτσι ώστε να περάσουν στην επόμενη διαδικασία του πειράματος στο πρόγραμμα CFD Autodesk.

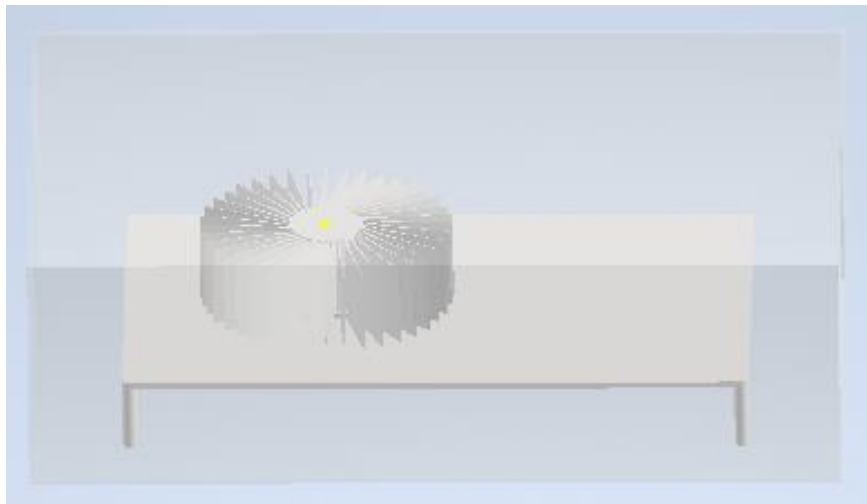
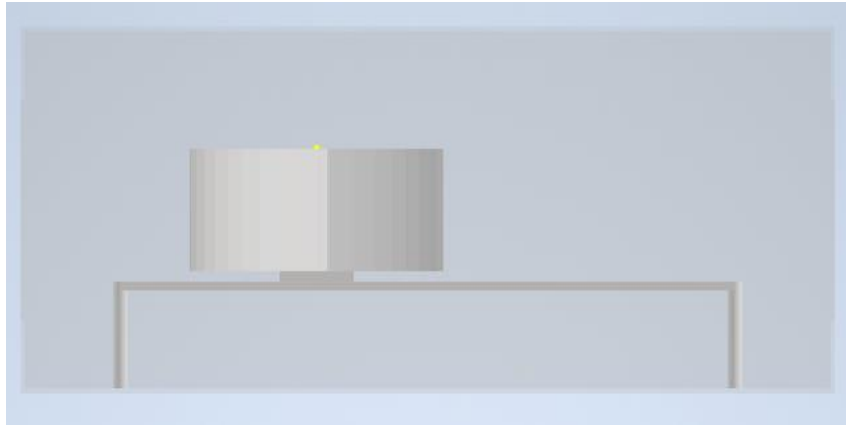
1.



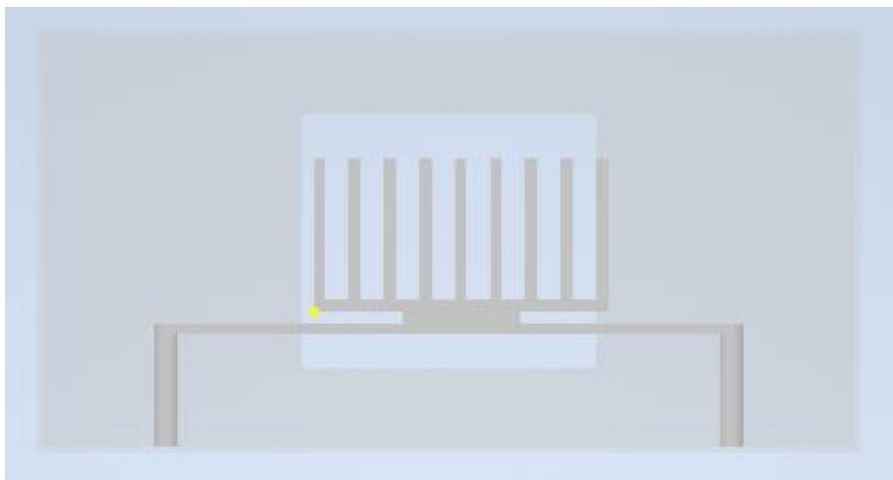


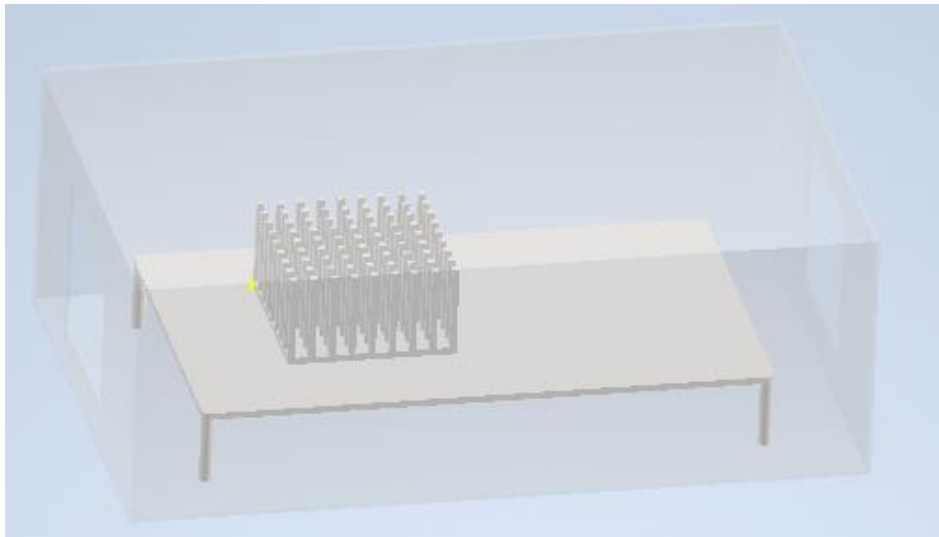
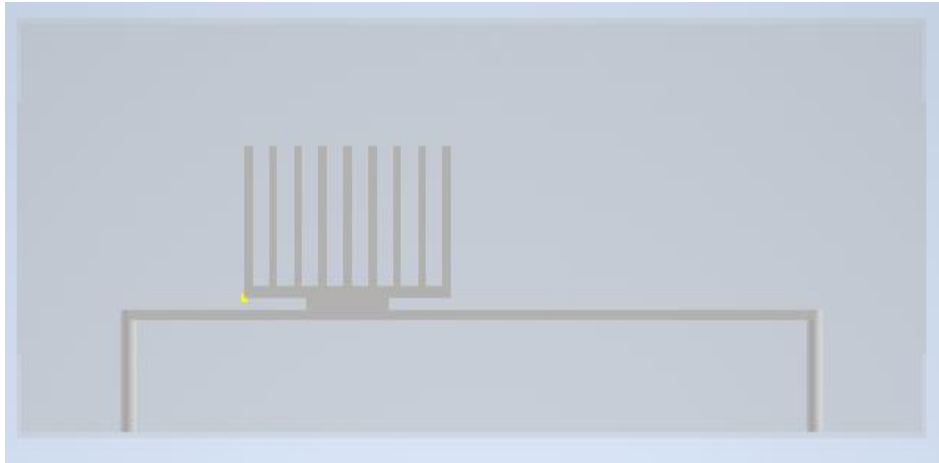
2.





3.

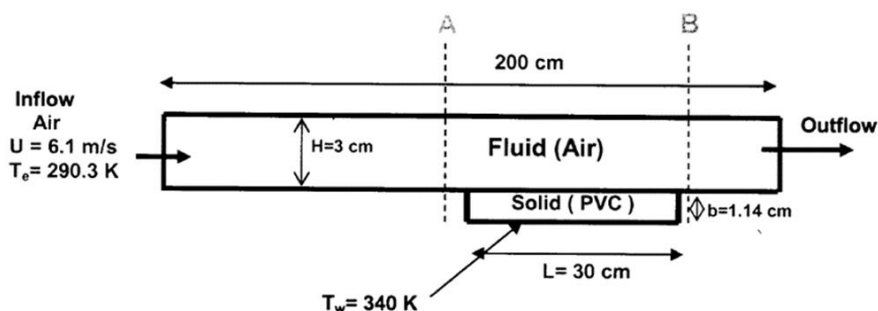




5.4 Πρόγραμμα CFD

Παραδοχή

Για την σωστή και έγκυρη εξαγωγή αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα CFD συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με ένα άρθρο το οποίο και αυτό χρησιμοποίησε πρόγραμμα CFD για την παραγωγή αποτελεσμάτων με τίτλο NUMERICAL INVESTIGATION OF CONJUGATE HEAT TRANSFER PROBLEMS του P. Manna και Debasis Chakraborty. Στο συγκεκριμένο άρθρο χρησιμοποιώντας το εμπορικό λογισμικό CFD CFX TASCFlow, έγινε ανάλυση συζυγούς μεταφοράς θερμότητας (CHT) για στρωτή ροή μέσω επίπεδων πλακών και τυρβώδη ροή μεταξύ παράλληλων πλακών. Η υπολογισμένη κατανομή της θερμοκρασίας της ροής διαμέσου της επίπεδης πλάκας είναι αρκετά ακριβής και συμφωνεί με άλλα αριθμητικά και αναλυτικά αποτελέσματα παρόμοιων πειραμάτων. Οπότε η γεωμετρία που θα αξιολογήσουμε και εμείς είναι η παρακάτω.

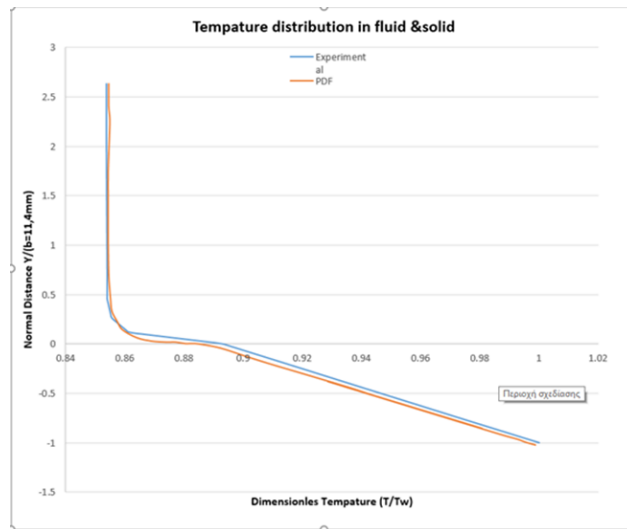


Εικόνα 32 Πειραματική διάταξη άρθρου

Τα δεδομένα εισόδου είναι:

- Ταχύτητα αέρα: 6.8 m/s
- Θερμοκρασία αέρα: 290.3 K
- Θερμοκρασία επιφάνειας: PVC 340K

Με αυτά τα δεδομένα συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της έρευνας με τα αποτελέσματα που βγάλαμε εμείς. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της θερμοκρασιακής κατανομής στον αέρα και στο στερεό.

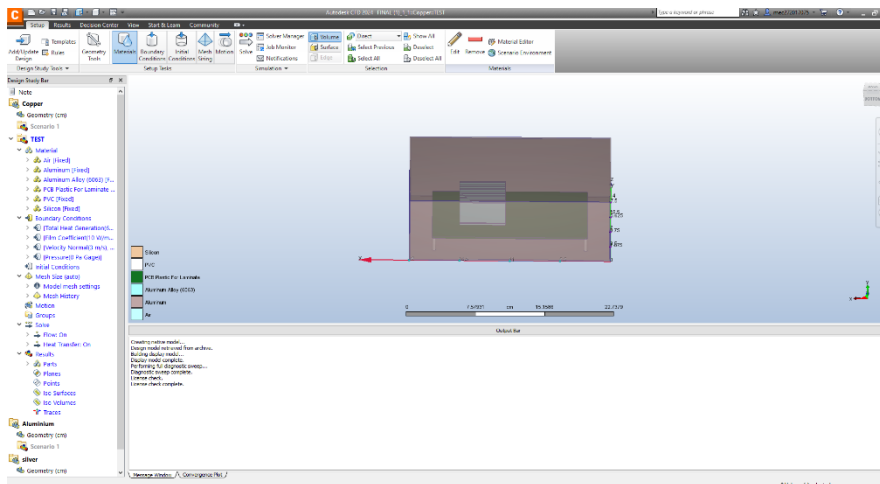


Γράφημα 2 Θερμοκρασιακή Κατανομή Υγρού & Στερεού

Στις μετρήσεις του πειράματος των δύο ερευνητών και με την μπλε καμπύλη οι μετρήσεις που εξάχθηκαν από το πρόγραμμα CFD Autodesk. Όπως παρατηρείται οι μετρήσεις που εξάχθηκαν από τα δύο μοντέλα είναι σχεδόν πανομοιότυπα. Από αυτή την διαδικασία συμπεραίνεται ότι από το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορούν να εξαχθούν σωστά και έγκυρα αποτελέσματα.

5.5 Μεθοδολογία Εξαγωγής Αποτελεσμάτων

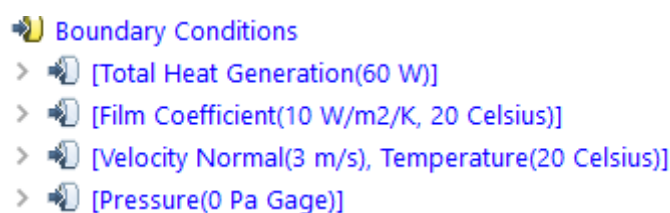
Όσον αφορά το περιβάλλον το οποίο θα παραχθούν τα αποτελέσματα είναι το παρακάτω:



Εικόνα 33 Περιβάλλον Autodesk CFD 2024

Αριστερά παρατηρείται η Design Study Bar στην οποία παίρνουν θέση όλες οι εντολές που έχουν γίνει και έχουν επιλεγθεί στο σχήμα και είναι μια συντόμευση

ώστε να γίνονται ταχύτερα οι ενέργειες αυτές. Στο πάνω μέρος παίρνει θέση η μπάρα των εντολών που γίνονται όλες οι ενέργειες. Με την εντολή Geometry tools θέσαμε τον όγκο του αέρα μέσα στο κουτί και τις συνταραγμένες που θα διεξαχθεί το πείραμα. Στην συνέχεια με την εντολή Materials θα επιλεχθούν όλα τα υλικά που θα αποτελέσουν το πείραμα τα οποία έχουν αναφερθεί προτέρων. Στην συνέχεια τα Boundary Conditions είναι όλες οι παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν για να εξαχθούν τα αποτελέσματα. Τέλος στο κάτω μέρος φαίνεται το Message Box και το Convergence Plot, στα οποία φαίνονται τυχόν λάθη, γραφική, αριθμητική απεικόνιση και των αποτελεσμάτων. Τα Boundary Conditions που επιλέχθηκαν είναι αρχικά το Film Coefficient δηλαδή ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεάς επιφάνειας και ενός ρευστού ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας. Η τιμή που τέθηκε είναι $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ η οποία είναι και η τιμή ελεύθερης συναγωγής του αέρα. Επόμενη κατάσταση είναι η είσοδος του αέρα που επιλέχθηκε στα 3m/s και θερμοκρασίας 20 βαθμών Κελσίου. Η πίεση εξόδου του κουτιού τέθηκε στα 0 Pa και η ισχύς για το τσιπάκι στα 60 Watt .



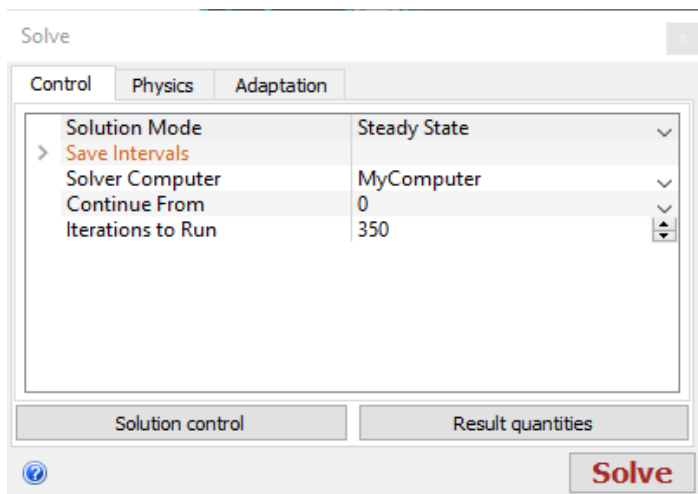
Εικόνα 34 Boundary Conditions

Αφού τεθούν τα Boundary Conditions στην συνέχεια με την εντολή Mesh Sizing κάνει αυτόματα την διαδικασία της κατασκευής του πλέγματος και σύμφωνα με την Autodesk έχει αρκετά προτερήματα τα οποία είναι:

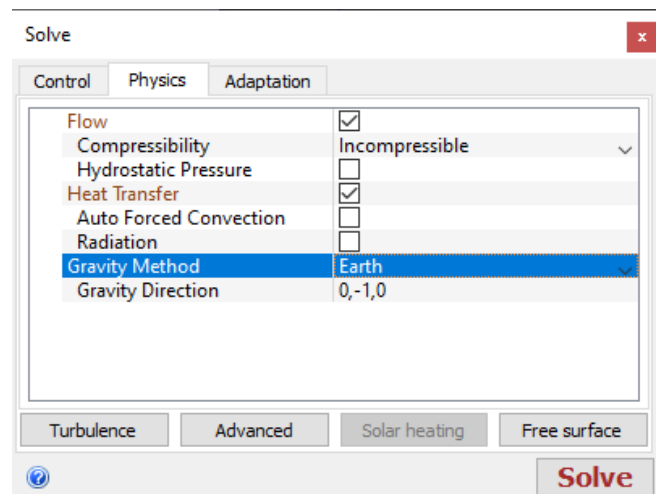
- Λιγότερος χρόνος δαπανάται για την ανάθεση μεγεθών πλέγματος λόγω της σημαντικά απλοποιημένης ρύθμισης του μοντέλου ανάλυσης.
- Αποτελεσματικότερες κατανομές πλέγματος: το πλέγμα είναι χοντρό όπου είναι κατάλληλο και λεπτό όπου είναι απαραίτητο.
- Λόγω της βελτιωμένης ποιότητας πλέγματος και των μεταβάσεων πλέγματος, η ακρίβεια της λύσης έχει αυξηθεί.

- Βελτιωμένη ευρωστία λύσεων: παράγονται καλά διατεθειμένα μαθηματικά μοντέλα με αποτελεσματικές μεταβάσεις πλέγματος.

. Ο αριθμός των αντικειμένων στις 3 κατασκευές θα είναι από 1.200.000-2.500.000 στοιχεία ανάλογα την πολυπλοκότητα των κατασκευών. Στην συνέχεια με την εντολή Solve αρχικά στην καρτέλα Control επιλέγεται πως θα γίνει η μέθοδος επίλυσης στην συγκεκριμένη περίπτωση Steady State δηλαδή η λύση θα πάει κατευθείαν στην σταθερή κατάσταση να λύσει ώστε να εξοικονομείστε χρόνος και πόροι. και στην συνέχεια ο χρόνος επίλυσης με την εντολή Iterations to Run ο οποίος έγινε σε 350 επαναλήψεις ώστε να σταθεροποιηθούν τελείως οι λύσεις. Αμέσως μετά στην καρτέλα Physics επιλέγουμε τα φυσικά φαινόμενα που θέλουμε να εμφανιστούν τα οποία θα είναι το Flow και το Heat Transfer αλλά και την κατεύθυνση της βαρύτητας με το Gravity Direction. Τέλος στην καρτέλα Adaptation ενεργοποιείται το Enable Adaptation σε 2 κύκλους το οποίο θα μας δημιουργήσει το τελικό και αποτελεσματικότερο πλέγμα που αναφέρθηκε και παραπάνω.



Εικόνα 35 Περιβάλλον Solver (Controls)

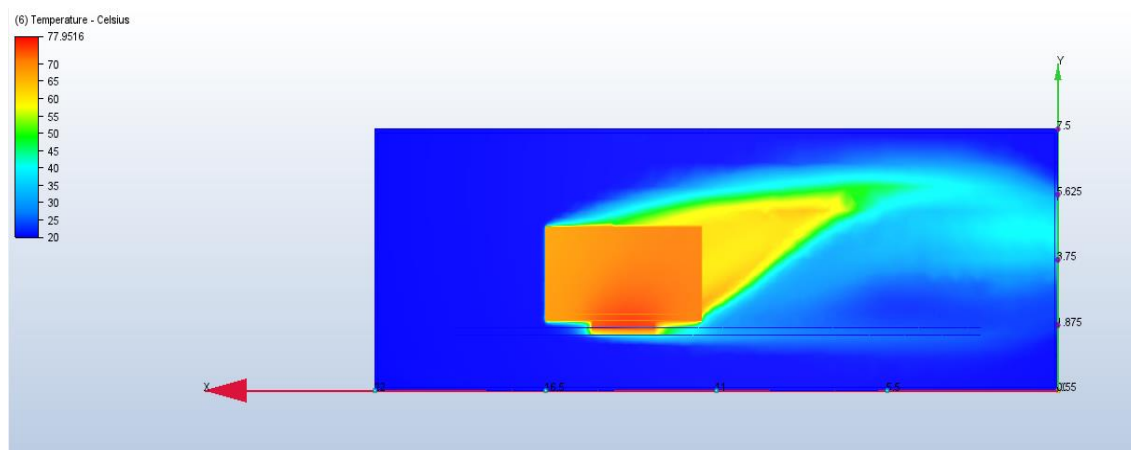


Εικόνα 36 Περιβάλλον Solver (Physics)

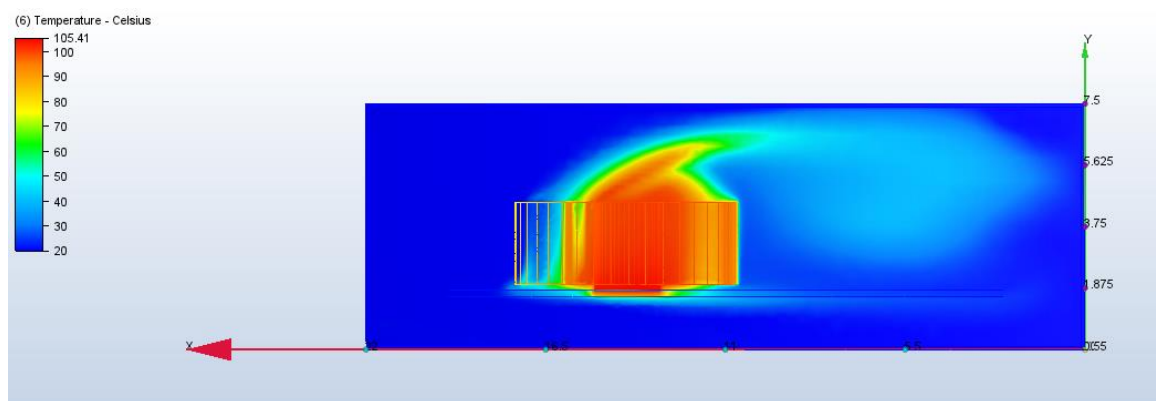
6 Αποτελέσματα και Ανάλυση τους

6.1 Σύγκριση Γεωμετριών

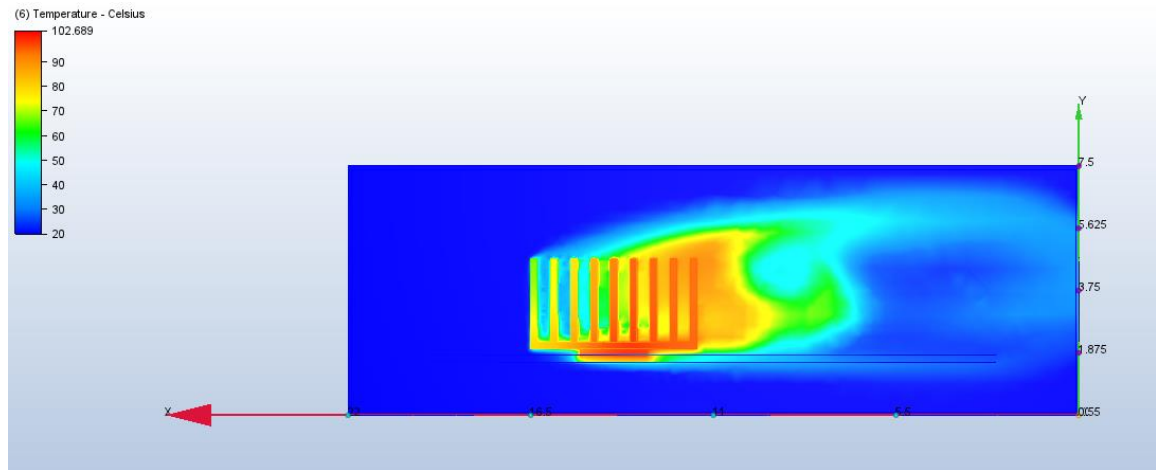
Η εξαγωγή αποτελεσμάτων έγινε από την καρτέλα Results κατά την οποία μπορούμε να δούμε όλη την διαδικασία της εξαγωγής των τελικών μας αποτελεσμάτων. Πρώτα θα συγκριθούν οι μέγιστες θερμοκρασίες που παρατηρήθηκαν στις γεωμετρίες.



Εικόνα 37 Μέγιστη Θερμοκρασία Rentangle fins

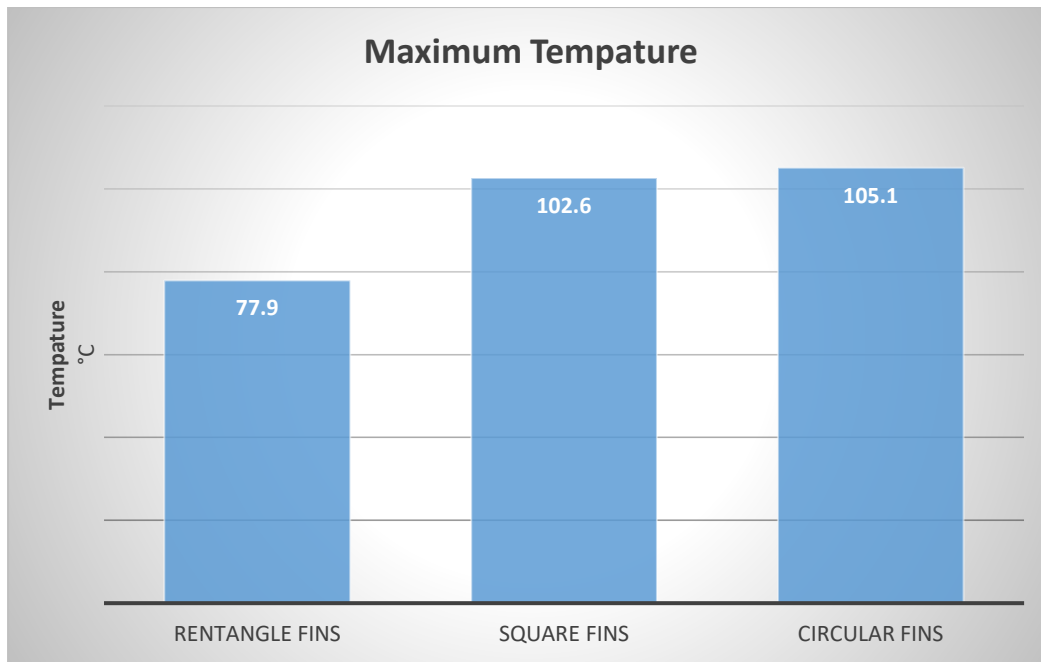


Εικόνα 38 Μέγιστη Θερμοκρασία Circular fins



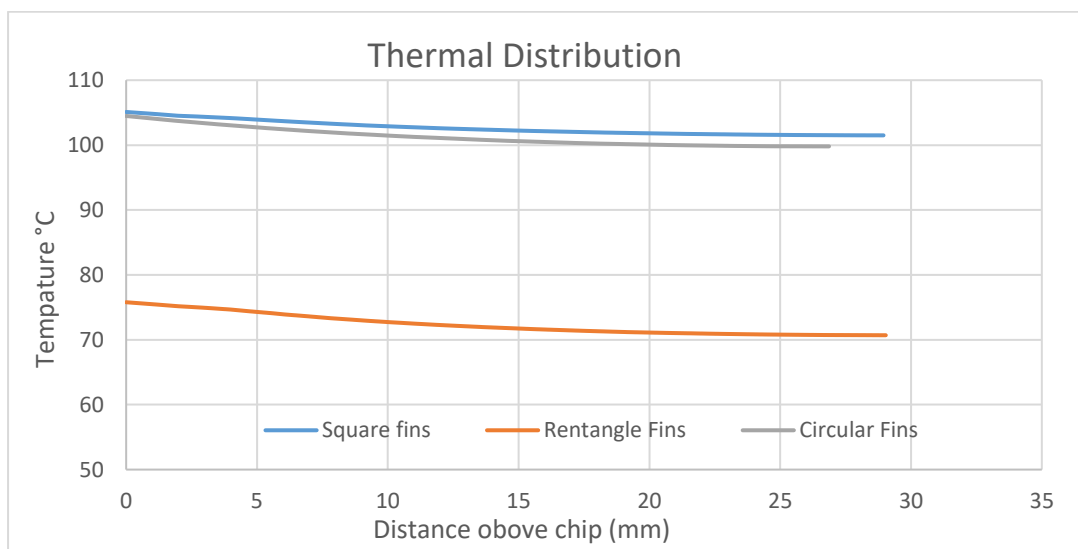
Εικόνα 39 Μέγιστη Θερμοκρασία Square fins

Αρχικά όλες οι ψήκτρες ορίσθηκαν να αποτελούνται από χαλκό το οποίο μας για την πρώτη γεωμετρία στους **77.9** βαθμούς Κελσίου. Η γεωμετρία με τους κατακόρυφους πυργίσκους ανέπτυξε θερμοκρασία **102.6** βαθμών Κελσίου και τέλος η κυκλική γεωμετρία **105.1** βαθμούς Κελσίου. Από τα αποτελέσματα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η ψήκτρα με τα ορθογωνικά πτερύγια ψύξης είναι 26% περισσότερο αποδοτικά από την κυκλική ψήκτρα και 24% από την ψήκτρα με τους κατακόρυφους πυργίσκους.



Γράφημα 3 Μέγιστη Θερμοκρασία των 3 γεωμετριών ψύκτρας

Παρακάτω θα παρουσιαστεί και η θερμοκρασιακή κατανομή στις τρεις γεωμετρίες. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν βγήκαν με την μέθοδο XY plot του Autodesk CFD 2024. Με την διαδικασία αυτή μπορούμε να πάρουμε μια πληθώρα τιμών θερμοκρασιών κατά μήκος ενός αντικειμένου. Στις συγκεκριμένες γεωμετρίες πήραμε στο από το κέντρο του επεξεργαστή μέχρι το μέγιστο ύψος της σημείο της ψύκτρας.



Γράφημα 4 Θερμοκρασιακή κατανομή σε σύγκριση με τη απόσταση από τον επεξεργαστή

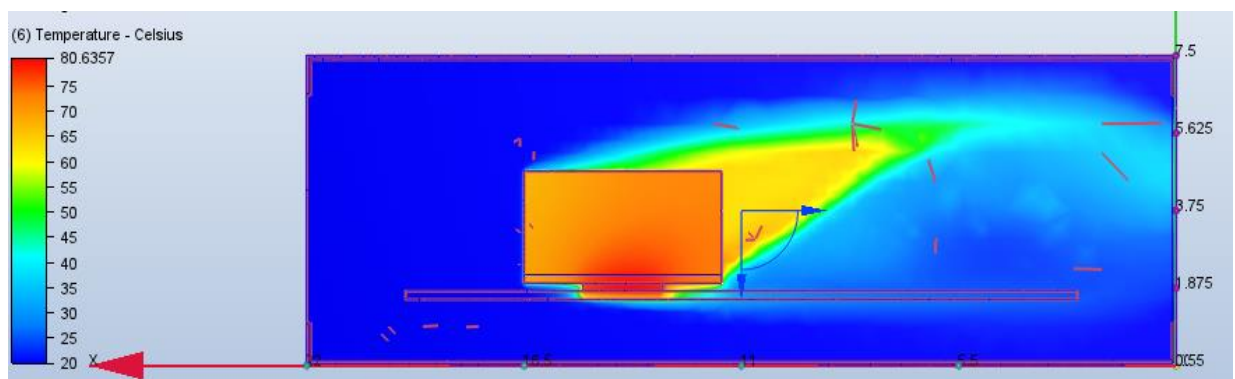
Όπως παρατηρείται στην βάση του chip σημειώνεται και η μέγιστη θερμοκρασία και στις τρεις γεωμετρίες και όσο οδηγείται προς το πάνω άκρο της ψύκτρας η θερμοκρασία πέφτει. Επίσης παρατηρείται ότι όσο πιο αποδοτική ήταν η ψύκτρα στην αποδέσμευση του θερμικού φορτίο από τον επεξεργαστή τόσο μεγαλύτερη ήταν η διαφορά θερμοκρασίας από τον επεξεργαστή στην κορυφή της. Το οποίο αναδεικνύεται και πάλι η ορθογωνική γεωμετρία πιο αποδοτική με διαφορά θερμοκρασίας να ανέρχεται στους 5 βαθμούς Κελσίου.

6.2 Σύγκριση υλικών ψύκτρας

Οπότε τώρα αφού βρέθηκε η κατάλληλη γεωμετρία της ψύκτρας που θα τοποθετηθεί πάνω από τον επεξεργαστή από τα 3 συγκεκριμένα σχήματα, στην συνέχεια θα επιλεγθεί το καλύτερο υλικό από αυτά που επιλέχθηκαν να κατασκευαστεί.

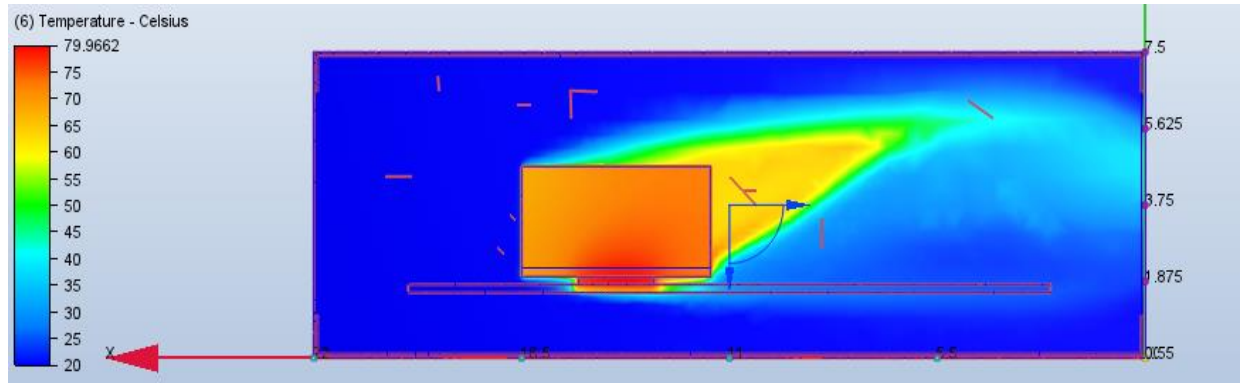
Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από τα 3 υπόλοιπα υλικά είναι

Αλουμίνιο (Al):



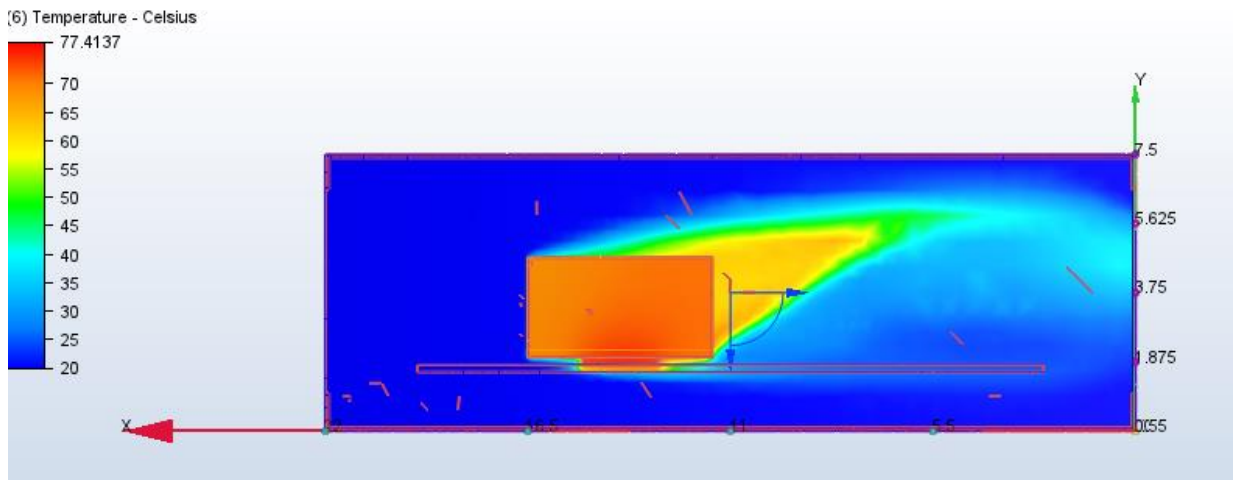
Εικόνα 40 Μέγιστη Θερμοκρασία αλουμινίου

Κράμα Αλουμινίου (6063):



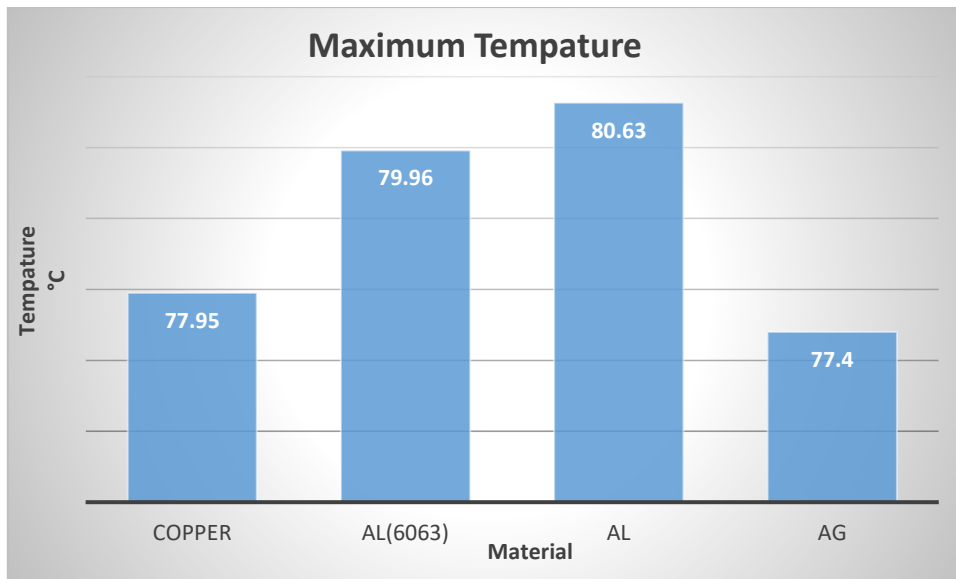
Εικόνα 41 Μέγιστη Θερμοκρασία 6063

Ασήμι (Ag):



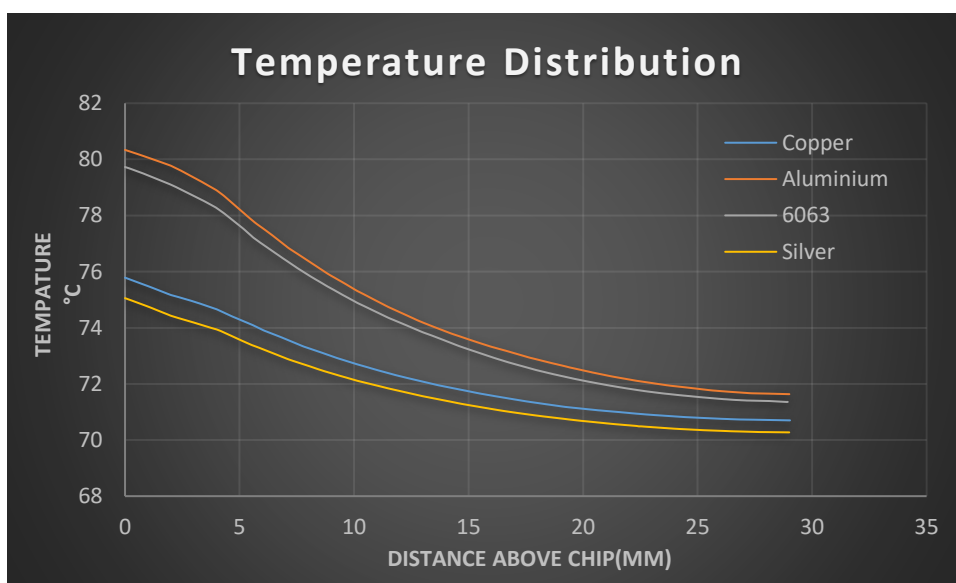
Εικόνα 42 Μέγιστη Θερμοκρασία ασήμι

Παρακάτω θα αναδειχθεί και σε ραβδόγραμμα τα αποτελέσματα από την την συλλογή αποτελεσμάτων



Γράφημα 5 Μέγιστη θερμοκρασία ορθογωνικών πτερυγίων ψύκτρα με διαφορετικά υλικά

Όπως παρατηρείται και από τα οπτικά αποτελέσματα αλλά και από το ραβδόγραμμα για την συγκεκριμένη γεωμετρία που αναλύεται στην διπλωματική καλύτερο υλικό ασήμι(Ag) με μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε να ανέρχεται μόνο στους **77.4** βαθμούς Κελσίου. Το ασήμι όπως αποδείχθηκε είναι **4.13%** πιο αποδοτικό από το αλουμίνιο(Al) , **3.2%** από το κράμα αλουμινίου (6063) και μόνο **0.7%** από το χαλκό (Cu).



Γράφημα 6 Θερμοκρασιακή κατανομή κατά ύψος της ορθογωνικής ψύκτρας με τα 4 υλικά

Παραπάνω παρατηρείται η θερμοκρασιακή κατανομή στην ψύκτρα από την βάση του επεξεργαστή μέχρι το πάνω άκρο της. Αρχικά παρατηρείται μια ομοιότητα στις καμπύλες του κράματος αλουμινίου (6063) και το καθαρό αλουμίνιο. Επίσης παρόλο που αναπτύσσεται σε αυτά τα δυο υλικά μεγαλύτερες θερμοκρασίες διακρίνεται ότι έχουμε μια μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας κατά μήκος της ψήκτρας της τάξης των 10 βαθμών. Ο χαλκός έχει μια πτώση των 6 βαθμούς κατά μήκος της και 5 το ασημί. Τέλος παρατηρείται μια ελάχιστη αλλαγή κλίσης στα 2mm όπου μεταπηδούμε από τον επεξεργαστή στην ψύκτρα.

7. Τεχνοοικονομική Ανάλυση Προβλήματος

Κάτι άλλο που μπορεί να αναλυθεί σε αυτή την διπλωματική είναι το κόστος των γεωμετριών των ψυκτρών που αναλύονται. Αυτό μπορούμε να το κάνουμε αρκετά εύκολα αφού το πρόγραμμα Autodesk Inventor 2024 μπορεί να μας πει αναλυτικά τις ιδιότητες των γεωμετριών. Παραπάνω στην ανάλυση των υλικών έχουμε το εξής πίνακάκι που θα μας βοηθήσει στον υπολογισμό του βάρους της κατασκευής και τον προσδιορισμό του κόστους της αντίστοιχα της κάθε γεωμετρίας αλλά και με κάθε υλικό που θα επιλεγεί.

| ΥΛΙΚΟ | ΧΑΛΚΟΣ | 6063 | ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | ΑΣΗΜΙ |
|---------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| DENSITY | 8.9 g/cm ³ | 2.70 g/cm ³ | 2.71 g /cm ³ | 10.49 g/cm ³ |

Αρχικά θα συγκριθούν οι τιμές που θα προκύψουν στην γεωμετρία με τα ορθογωνικά πτερύγια ψύξης. Η συγκεκριμένη γεωμετρία σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες που μας αναφέρει το πρόγραμμα καταλαμβάνει όγκο της τάξης 25cm³. Με αυτά τα δεδομένα οι μάζες βάση την πυκνότητα είναι:

| Βάρος Γεωμετρίας Ορθογωνικών Γεωμετριών | | | | |
|---|----------|----------|-----------|----------|
| ΥΛΙΚΟ | ΧΑΛΚΟΣ | 6063 | ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | ΑΣΗΜΙ |
| ΒΑΡΟΣ | 0,224 kg | 0.068 kg | 0.068 kg | 0.262 kg |

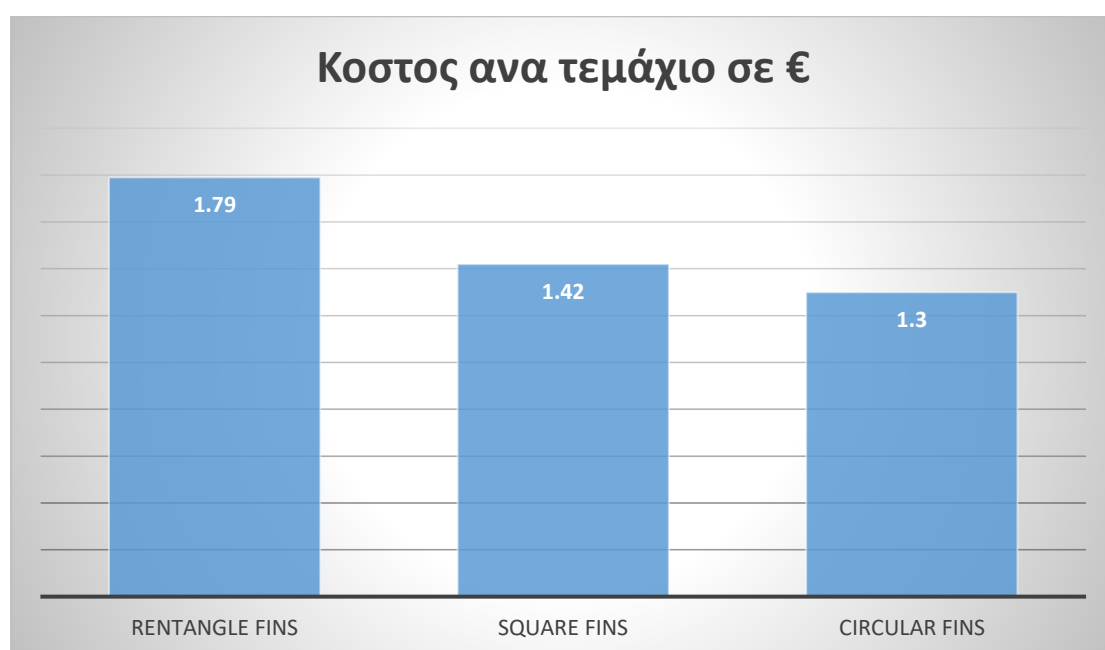
Σύμφωνα με τις αγορές το τελευταίο χρόνο έχουμε μια μέση τιμή 8€/κιλό χαλκού το οποίο συνεπάγεται σε 1.79 € ανά τεμάχιο. Για το 6063 μέταλλο η τιμή του πέφτει στα 2.7€/κιλό και ως συνέπεια στα 0.19€ ανά τεμάχιο. Το καθαρό αλουμίνιο έχει ετήσια μέση τιμή στα 2.4€/κιλό και έχουμε τιμή ανά τεμάχιο στα 0.16€ ανά τεμάχιο. Τέλος το ασήμι ανέρχεται στα 670€/κιλό το οποίο συνεπάγεται σε τιμή των 175,5€ ανά τεμάχιο. Το οποίο είναι πολύ ξεκάθαρο ότι η επιλογή για ασήμι είναι η πιο ακριβή επιλογή και με πιο οικονομική το μέταλλο 6063.

Όσον αφορά τις 3 γεωμετρίες που συγκριθήκανε και στις θερμοκρασίες θα αναλυθεί παρακάτω και το κόστος ανά τεμάχιο με την ίδια κατασκευή μετάλλου τον χαλκό.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η ψύκτρα με τα ορθογωνικά πτερύγια ανέρχεται

1.79 € ανά τεμάχιο, η ψύκτρα με τα τετράγωνους στύλους ψύξης έχει μάζα 0.184 kg σύμφωνα τα χαρακτηριστικά που δίνονται από το Autodesk Inventor 2024, το οποίο συνεπάγεται στα 1.42€ ανά τεμάχιο. Τέλος η γεωμετρία με τα κυκλικά πτερύγια έχει βάρος 0.162kg οποίο σημαίνει 1.3€ ανά τεμάχιο.

| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ | Rectangle fins | Square fins | Circular fins |
|-----------|----------------|-------------|---------------|
| ΒΑΡΟΣ | 0,224 kg | 0.184 kg | 0.162kg |



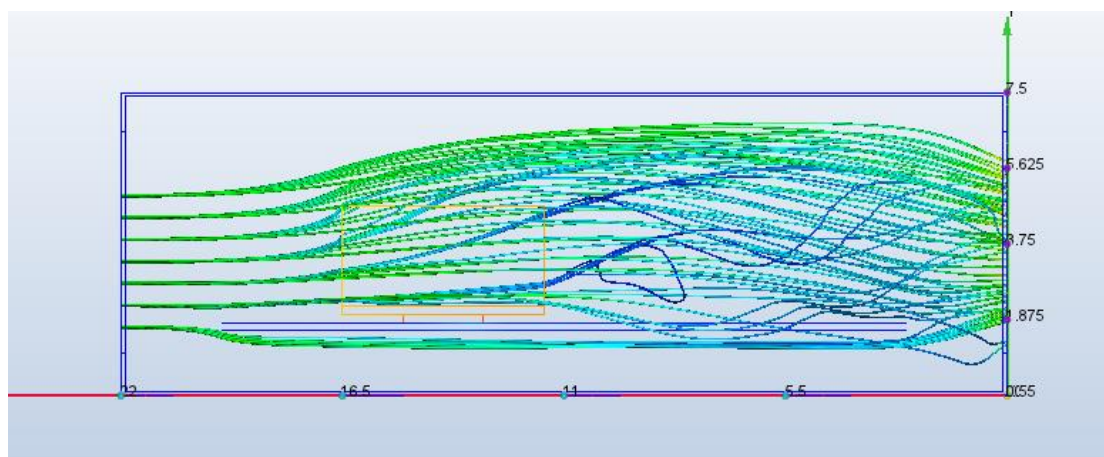
Γράφημα 7 Κόστος ανά τεμάχιο

Όπως παρατηρείται και από το σχήμα έχουμε σαν ακριβότερη την ψύκτρα με τα ορθογωνικά το οποίο σημαντικός παράγοντας του βάρους θα παίζει το πάχος του πτερυγίου που ανέρχεται στα 2mm. Στην συνέχεια στα 1.42€ η ψύκτρα με τα ορθογωνικά πτερύγια και η φτηνότερη κατασκευή με τα κυκλικά πτερύγια στα 1.32€.

8. Παρατηρήσεις

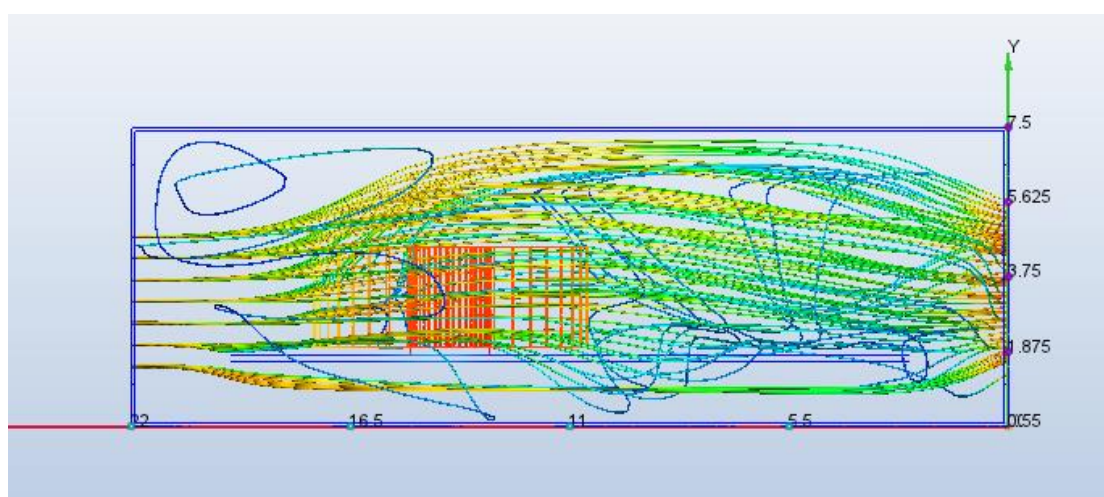
Αξιοσημείωτο είναι να τονίσουμε ότι η αεροδυναμική των γεωμετριών παίζουν τον κύριο λόγο στην αποδέσμευση της θερμότητας από τα θερμά σημεία. Παρακάτω θα εξετασθούν με Traces των μορίων αέρα που εισέρχονται από την εισαγωγή. Οπότε για να οπτικοποιηθούν τα αποτελέσματα θα δημιουργηθούν ένα plane παράλληλα στην ροή και ένα κάθετο σε αυτή και θα ενεργοποιηθεί η επιλογή Traces πάνω σε αυτό.

Rectangle Fins:



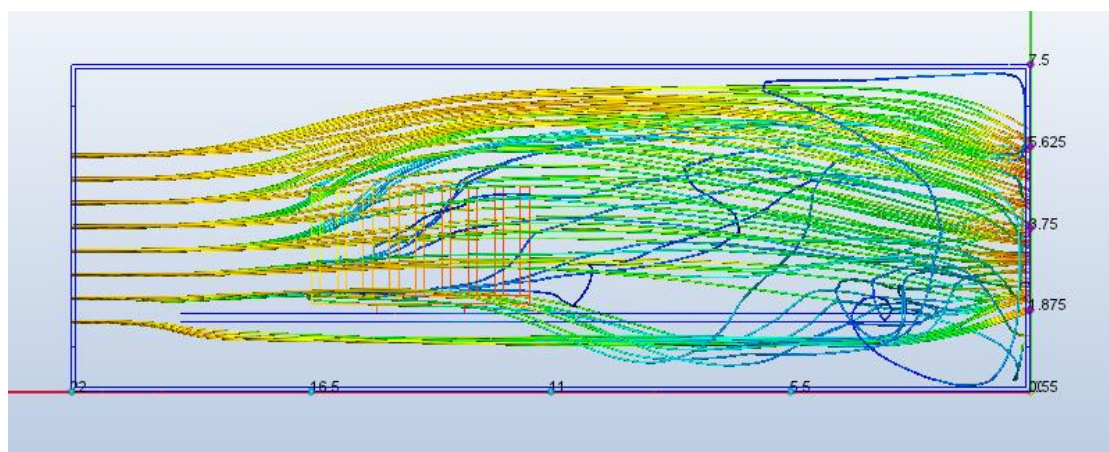
Εικόνα 43 Traces μορίων αέρα Rectangle fins

Circular Fins:



Εικόνα 44 Traces μορίων αέρα Circular fins

Square Fins:



Εικόνα 45 Traces μορίων αέρα Square fins

Όπως και παρατηρείται ο αεροδυναμικός χαρακτήρας της ψύκτρας επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί. Άμα συγκρίνουμε τα τρία οπτικά αποτελέσματα που παράχθηκαν με την επιλογή Traces παρατηρείται ότι, στα **Rectangle Fins** έχουμε τις λιγότερες δίνες αέρα μέσα στο κουτί αρά και καλύτερη εξαγωγή του και πιο αποτελεσματική. Στην συνέχεια **Circular Fins** έχουμε τις περισσότερες περιδινήσεις του αέρα μέσα στο κουτί που σημαίνει πολύ πιο φτωχή ανανέωση του άρα και αυξημένες θερμοκρασίες. Τέλος το **Square Fins** είναι σε μια ενδιάμεση κατάσταση των δύο άλλων γεωμετριών το οποίο φαίνεται και στο σχήμα ότι δεν παρουσιάζονται πολλές περιδινήσεις μέσα στο κουτί.

9. Προτάσεις για Συνέχιση της Εργασίας

Βέβαια, ας επικεντρωθούμε σε μερικές βασικές ερευνητικές κατευθύνσεις που σχετίζονται με τη θερμική διαχείριση της ψύκτρας και τη μοντελοποίηση της Υπολογιστικής Δυναμικής Ρευστών (CFD) και ας τις αναλύσουμε σε μεγαλύτερο βάθος

- Προηγμένα υλικά ψύξης:

Η διερεύνηση της χρήσης προηγμένων υλικών, όπως σύνθετα υλικά άνθρακα ή υλικά αλλαγής φάσης, στο σχεδιασμό ψύκτρων. Μπορεί τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά αυτά επηρεάζουν την απαγωγή θερμότητας και τη μείωση της θερμοκρασίας, και να πραγματοποιηθούν μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας και ειδικής

θερμοχωρητικότητας σε διαφορετικές θερμοκρασίες για την καλύτερη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τους. Η έρευνα αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ψύκτρες με ανώτερα χαρακτηριστικά απόδοσης και μπορεί να βρει εφαρμογές σε ηλεκτρονικές συσκευές υψηλής ισχύος, συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην αεροδιαστημική, όπου η διαχείριση της θερμότητας είναι κρίσιμη.

- Ενσωμάτωση μηχανικής μάθησης:

Ο συνδυασμός προσομοιώσεων CFD με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για τη βελτιστοποίηση των σχεδίων ψύκτρων πιο αποτελεσματικά. Μπορούν να αναπτυχθούν μοντέλα πρόβλεψης που λαμβάνουν υπόψη διάφορες παραμέτρους σχεδιασμού, όπως η γεωμετρία πτερυγίων, ο ρυθμός ροής αέρα και οι ιδιότητες υλικών, για να προτείνουν βέλτιστες διαμορφώσεις. Η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στη μοντελοποίηση CFD εξορθολογίζει τη διαδικασία σχεδιασμού, μειώνει τους υπολογιστικούς πόρους και μπορεί να οδηγήσει σε νέες διαμορφώσεις ψύκτρων που μπορεί να είναι δύσκολο να ανακαλυφθούν μέσω των παραδοσιακών μεθόδων βελτιστοποίησης.

- Τεχνικές κατασκευής απορροφητήρων θερμότητας:

Διερεύνηση προηγμένων τεχνικών κατασκευής για την παραγωγή ψύκτρων, όπως η προσθετική κατασκευή (τρισεδιάστατη εκτύπωση). Να αναλυθεί τον τρόπο με τον οποίο οι διάφορες διαδικασίες κατασκευής επηρεάζουν τη θερμική απόδοση, τη

δομική ακεραιότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των ψύκτρων. Οι προηγμένες μέθοδοι κατασκευής μπορούν να οδηγήσουν σε εξατομικευμένα σχέδια ψύκτρων με περίπλοκες γεωμετρίες που μεγιστοποιούν την απαγωγή θερμότητας. Η έρευνα αυτή συμβάλλει τόσο στη σχεδιαστική καινοτομία όσο και στην αποδοτικότητα του κόστους.

- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:

Αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών και των διαδικασιών κατασκευής των ψύκτρων. Να εξεταστούν παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας κατά την κατασκευή, η δυνατότητα ανακύκλωσης των υλικών και η διάθεση στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Συγκρίνετε τα παραδοσιακά υλικά με τις αναδυόμενες φιλικές προς το περιβάλλον επιλογές. Καθώς η βιωσιμότητα αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, η κατανόηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ψύκτρων είναι ζωτικής σημασίας. Η έρευνα αυτή βοηθά στη λήψη τεκμηριωμένων επιλογών που ευθυγραμμίζονται με τους περιβαλλοντικούς στόχους.

Αυτές οι ερευνητικές κατευθύνσεις προσφέρουν μια μοναδική προοπτική για το σχεδιασμό ψύκτρων και τη θερμική διαχείριση. Η ανάλυση αυτών των τομέων παρέχει πληροφορίες τόσο για τις πρακτικές εφαρμογές όσο και για τις ευρύτερες επιπτώσεις, όπως η περιβαλλοντική βιωσιμότητα και η ενεργειακή απόδοση. Η συνέχεια της εργασίας ερευνητές μπορούν να επιλέξουν να εμβαθύνουν σε αυτούς τους τομείς με βάση τα συγκεκριμένα ενδιαφέροντά τους και τη συνάφεια με τις τρέχουσες ανάγκες της βιομηχανίας.

10. Βιβλιογραφία

- [1] “AMWEL Enterprises - Computational Fluid Dynamics (CFD)” 2021
- [2] Ahmed, H.E. *et al.* (2018) “Optimization of thermal design of heat sinks: A review,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118, pp. 129–153.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.099>.
- [3] *Air cooled heat sink geometries subjected to forced flow: A critical review | Request PDF* (2019). Available at:
https://www.researchgate.net/publication/332463990_Air_cooled_heat_sink_geometries_subjected_to_forced_flow_A_critical_review.
- [4] *AMWEL Enterprises - Computational Fluid Dynamics (CFD)* (no date).
Available at: <https://www.amwel.com/history.html>.
- [5] Bünnagel, C. *et al.* (2021) “Forced air cooled heat sink with uniformly distributed temperature of power electronic modules,” *Applied Thermal Engineering*, 199, p. 117560. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117560>.
- [6] BYJU’S Exam Prep (2023) *Forced Convection: Definition, Formula, Example [GATE Notes]*. Available at: <https://byjusexamprep.com/forced-convection-i>.
- [7] Choudhary, A. (2001) *Basics of HVAC System and Its Components*. Available at: <https://www.pharmaguideline.com/2017/05/basics-of-hvac-system.html>.
- [8] *Computational Fluid Dynamics (CFD) - Ultimate Guide | SimScale* (2023).
Available at: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>.

- [9] *Copper (Cu) - Chemical properties, Health and Environmental effects* (2023). Available at: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/cu.htm>.
- [10] DNP Group (2021) *What are Heat Sinks? | Column | Solutions/Products/Services | DNP Dai Nippon Printing*. Available at: https://www.global.dnp.biz/column/detail/10162228_4117.html.
- [11] DNP Group (2023) *DNP Group*. Available at: <https://www.global.dnp/index.html>.
- [12] *Effective cooling for electronic systems* (no date). Available at: <https://www.electronicpecifier.com/products/cabinets-and-enclosures/effective-cooling-for-electronic-systems>.
- [13] *Effective cooling for electronic systems* (no date). Available at: <https://www.electronicpecifier.com/products/cabinets-and-enclosures/effective-cooling-for-electronic-systems>.
- [14] Gao, T. *et al.* (2015) *Raised Floor Hybrid Cooled Data Center: Effect on Rack Inlet Air Temperatures When In Row Cooling Units are Installed Between the Racks*. Available at: <https://doi.org/10.1115/ipack2015-48071>.
- [15] Gao, Z.-K. *et al.* (2015) “Multivariate weighted complex network analysis for characterizing nonlinear dynamic behavior in two-phase flow,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60, pp. 157–164. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.09.008>.
- [16] *Help | Chapter 10: Assigning the Mesh | Autodesk* (2023). Available at: <https://help.autodesk.com/view/SCDSE/2024/ENU/?guid=GUID-EFEC3DCE-7B24-42A0-8AA4-C3B2A9D332B1>.

- [17] *Help | Solution Mode | Autodesk* (2023). Available at:
<https://help.autodesk.com/view/SCDSE/2024/ENU/?guid=GUID-86FB2C3B-457A-4A75-B575-FD3D64314778>.
- [18] <https://www.cespr.fsu.edu/people/myh/CFD-Conference/Session-1/Tony-Jameson-Presentation.pdf>
- [19] *Kupferpreis aktuell, Preisentwicklung (EUR & US DOLLAR)* (2022).
Available at: <https://www.geiger-edelmetalle.de/en/Charts/Current-copper-price/>.
- [20] Lasance, C.J.M. (2019) *Advances In High-Performance Cooling For Electronics | Electronics Cooling*. Available at: <https://www.electronics-cooling.com/2005/11/advances-in-high-performance-cooling-for-electronics/>.
- [21] Lutkevich, B. (2020) “embedded system,” *IoT Agenda* [Preprint].
Available at: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/embedded-system>.
- [22] *Metals, Metallic Elements and Alloys - Thermal Conductivities* (no date). Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html.
- [23] Peterson, Z. (2023) “Thermal Management: Designing Aircraft Avionics Cooling Systems,” *Altium* [Preprint]. Available at:
<https://resources.altium.com/p/thermal-management-for-avionics>.
- [24] Polijakov, A.F. (2008) “MIXED (COMBINED) CONVECTION,” in *Begellhouse eBooks*. Available at:
https://doi.org/10.1615/atoz.m.mixed_combined_convection.

- [25] Rizzi, A. and Luckring, J.M. (2021) "Historical development and use of CFD for separated flow simulations relevant to military aircraft," *Aerospace Science and Technology*, 117, p. 106940. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106940>.
- [26] Rouse, A.P. by M. (2014) *What is Telecommunications Equipment? - Definition from Techopedia*. Available at: <https://www.techopedia.com/definition/30400/telecommunications-equipment>.
- [27] Sandeep (2023) "Heat vs Temperature - Difference and Comparison - Differ Between," *Differ Btw*, 11 June. Available at: <https://differbtw.com/difference-between-heat-and-temperature/>.
- [28] Sobhani, M. and Behzadmehr, A. (2018) "Investigation of thermo-fluid behavior of mixed convection heat transfer of different dimples-protrusions wall patterns to heat transfer enhancement," *Heat and Mass Transfer*, 54(11), pp. 3219–3229. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2356-9>.
- [29] Su, Y.-C. and Chung, J.N. (2000) "Linear stability analysis of mixed-convection flow in a vertical pipe," *Journal of Fluid Mechanics*, 422, pp. 141–166. Available at: <https://doi.org/10.1017/s0022112000001762>.
- [30] Team, G. (2021) "6063 Aluminum: Get to Know its Properties and Uses - Gabrian," *Gabrian*, 27 May. Available at: <https://www.gabrian.com/6063-aluminum-properties/>.
- [31] *The Density Of Silver | BullionByPost* (2023). Available at: <https://www.bullionbypost.eu/index/silver/density-of-silver/>.

- [32] Therapy in Anxiety Disorders,” *AIMS Neuroscience*, 2(3), pp. 123–138.
Available at: <https://doi.org/10.3934/neuroscience.2015.3.123>.
- [33] Thermtest (2021) *Top 10 Thermally Conductive Materials*. Available
at: <https://thermtest.com/thermal-resources/top-10-resources/top-10-thermally-conductive-materials>.
- [34] Thermtest (2021) *Top 10 Thermally Conductive Materials*. Available
at: <https://thermtest.com/thermal-resources/top-10-resources/top-10-thermally-conductive-materials>.
- [35] *Thesis: Numerical Investigation for Entropy Generation of Conjugate Natural Convection and Heat Transfer Inside a Prismatic Enclosure with Different Thick Wall Materials* (2018). Available at:
https://www.researchgate.net/publication/349670316_Thesis_Numerical_Investigation_for_Entropy_Generation_of_Conjugate_Natural_Convection_and_Heat_Transfer_Inside_a_Prismatic_Enclosure_with_Different_Thick_Wall_Materials.
- [36] Thomas, A. (2022) “How AI and automation make data centers greener and more sustainable,” *www.ey.com* [Preprint]. Available at:
https://www.ey.com/en_in/technology/how-ai-and-automation-make-data-centers-greener-and-more-sustainable.
- [37] TRADING ECONOMICS (no date) *Aluminum - 2023 Data - 1989-2022 Historical - 2024 Forecast - Price - Quote - Chart*. Available at:
<https://tradingeconomics.com/commodity/aluminum>.

- [38] *What is Computational Fluid Dynamics (CFD)? | SimScale | SimScale* (2023). Available at: <https://elpatiohotel-com.ngontinh24.com/article/what-is-computational-fluid-dynamics-cfd-simscale-simscale>.
- [39] *Wholesale Aluminium 6063 Price Per Kg Products at Factory Prices from Manufacturers in China, India, Korea, etc. | Global Sources* (2020). Available at: <https://www.globalsources.com/manufacturers/aluminium-6063-price-per-kg.html>.
- [40] Xu, H. *et al.* (2022) “Multiple hysteresis effects and their destabilization mechanism in the enclosed mixed convection enclosure with three representative aspect ratios,” *Numerical Heat Transfer Part A-applications*, 83(12), pp. 1377–1407. Available at: <https://doi.org/10.1080/10407782.2022.2104585>.
- [41] Yan, P. *et al.* (1999) “Modeling and control of workstation level information flow in FMS using modified petri nets,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(6), pp. 557–568. Available at: <https://doi.org/10.1023/a:1008912805440>.
- [42] Yu, X. *et al.* (2005) “Development of a plate-pin fin heat sink and its performance comparisons with a plate fin heat sink,” *Applied Thermal Engineering*, 25(2–3), pp. 173–182. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.06.016>.
- [43] *Επίσημη τοποθεσία της Dell | Dell Ελλάδα* (2023). Available at: <https://www.dell.com/el-gr/lp>.