

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗ ΛΕΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Διπλωματική εργασία:

ΜΠΑΛΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επβλέπων καθηγητής:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΓΨΑΚΗΣ

Χανιά, 2025

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία εστιάζει στη σύγκριση της θερμικής απόδοσης και της πτώσης πίεσης μεταξύ ενός εναλλάκτη θερμότητας με αυλακώσεις και ενός λείου εναλλάκτη, χρησιμοποιώντας ως βασικές παραμέτρους τον αριθμό **Nusselt** και την **πτώση πίεσης**. Οι αυλακώσεις θεωρείται ότι ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας, αυξάνοντας την ανάμειξη του ρευστού και προκαλώντας τυρβώδεις ροές, οι οποίες βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα της θερμικής συναγωγής. Ωστόσο, αυτή η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας συνοδεύεται συνήθως από μεγαλύτερη πτώση πίεσης, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Η μελέτη πραγματοποιείται με τη χρήση **υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD)** μέσω του λογισμικού **Ansys**, το οποίο επιτρέπει την προσομοίωση των ροών ρευστών και της μεταφοράς θερμότητας σε σύνθετες γεωμετρίες. Στην ανάλυση αυτή, εξετάζεται πώς η γεωμετρία των αυλακώσεων επηρεάζει την κατανομή της θερμοκρασίας, την ταχύτητα ροής και την πίεση στο εσωτερικό των εναλλακτών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, ενώ οι εναλλάκτες με αυλακώσεις προσφέρουν καλύτερη θερμική απόδοση, αυτό επιτυγχάνεται με το κόστος της υψηλότερης πτώσης πίεσης, γεγονός που μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση για την κίνηση του ρευστού.

Τελικός στόχος της εργασίας είναι να προσδιοριστεί ποιος τύπος εναλλάκτη είναι πιο αποδοτικός σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, ώστε να ενσωματωθούν βελτιστοποιημένα συστήματα μεταφοράς θερμότητας σε βιομηχανικές και ενεργειακές εφαρμογές, λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία μεταξύ αποδοτικότητας και ενεργειακού κόστους.

Abstract

The thesis focuses on comparing the thermal performance and pressure drop between a grooved heat exchanger and a smooth one, using the **Nusselt number** and **pressure drop** as key parameters. Grooves are believed to enhance heat transfer by increasing fluid mixing and creating turbulent flows, which improve the efficiency of thermal convection. However, this enhancement in heat transfer is typically accompanied by a higher pressure drop, which can impact the overall energy efficiency of the system.

The study is conducted using **computational fluid dynamics (CFD)** via the **Ansys** software, allowing for the simulation of fluid flows and heat transfer in complex geometries. The analysis examines how the grooved geometry affects the distribution of temperature, flow velocity, and pressure within the heat exchangers. The results indicate that while grooved heat exchangers provide better thermal performance, this comes at the cost of increased pressure drop, which may require more energy to maintain fluid flow.

The ultimate goal of the thesis is to determine which type of heat exchanger is more efficient under different operating conditions, providing insights for the optimization of heat transfer systems in industrial and energy applications. The balance between thermal efficiency and energy consumption is a critical factor in determining the best design for various practical uses.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα πρωτίστως, να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή, κύριο Ιψάκη Δημήτριο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε τόσο για την ανάθεση όσο και για την επίτευξη της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα επίσης, να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου που είχα την τιμή να φοιτήσω υπό την στέγη ενός τόσο αναγνωρισμένου ιδρύματος όπως το Πολυτεχνείο Κρήτης. Τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που μου έδωσε την δυνατότητα του να ζήσω και να φοιτήσω στην Κρήτη. Ένα μέρος που με αγκάλιασε, με ωρίμασε και μου χάρισε εμπειρίες και φίλους ζωής.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	3
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	9
1.2 ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	11
1.2.1 Διάταξη ροής.....	12
1.2.3 Μηχανισμοί εναλλαγής θερμότητας.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	16
2.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ.....	16
2.2 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	20
2.3 ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	22
3.1 ΡΟΗ ΣΕ ΛΕΙΟ ΑΓΩΓΟ.....	22
3.1.1 Γεωμετρία.....	23
3.1.2 Διακριτοποίηση χωρίου(Mesh generation)	23
3.1.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες, Επιλογή φυσικού μοντέλου και solver	25
3.2 ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ	30
3.2.1 Γεωμετρία.....	30
3.2.2 Διακριτοποίηση χωρίου(Mesh Generation)	31
3.2.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες, Επιλογή φυσικού μοντέλου και solver	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	33
4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	33
4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΛΕΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ	34
4.2.1 Λείος αγωγός ($Re = 700$)	34
4.2.2 Αγωγός με αυλακώσεις ($Re=700$)	36
4.2.3 Αγωγός με αυλακώσεις ($Re=1150$)	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	41
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	43
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄: ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ.....	45
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48

Πίνακας εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΠΑΡΟΔΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ [1]	9
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON[5]	10
ΕΙΚΟΝΑ 3:ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΥΚΛΩΝ ΨΥΞΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [5].....	11
ΕΙΚΟΝΑ 4:ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΕ ΟΜΟΡΡΟΠΗ ΡΟΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ[7].	12
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΕ ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ ΡΟΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [7].	12
ΕΙΚΟΝΑ 6:ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHELL AND TUBE)[21].....	13
ΕΙΚΟΝΑ 7:ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΠΛΑΚΑ (PLATE)[21].....	14
ΕΙΚΟΝΑ 8:ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ[22].....	14
ΕΙΚΟΝΑ 9:ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΔΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [7].	15
ΕΙΚΟΝΑ 10: Η ΑΡΧΙΚΗ ΣΕΛΙΔΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSYS.	22
ΕΙΚΟΝΑ 11: Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΛΕΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.	23
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΠΛΕΓΜΑ ΓΙΑ ΛΕΙΟ ΑΓΩΓΟ.....	24
ΕΙΚΟΝΑ 13 : Η ΚΑΡΤΕΛΑ ΤΟΥ SETUP.	26
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΑΠΟ ΤΙΣ ΚΑΡΤΕΛΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ ΛΕΙΟ ΑΓΩΓΟ.	25
ΕΙΚΟΝΑ 15: Η ΚΑΡΤΕΛΑ ΜΕ ΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ.....	27
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΥ ΠΟΥ ΘΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΟΥΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.	27
ΕΙΚΟΝΑ 17: Η ΚΑΡΤΕΛΑ ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.	28
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.	28
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΓΕΝΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ(ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ,ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ Κ.Α.) ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.	29
ΕΙΚΟΝΑ 20: Η ΥΠΟΚΑΡΤΕΛΑ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΘΑ ΛΥΘΟΥΝ ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ.	29
ΕΙΚΟΝΑ 21: Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΠΛΕΓΜΑ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ.	31
ΕΙΚΟΝΑ 23: ΤΑ ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΞΕΧΩΡΙΣΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ.	33
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΛΕΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.	34
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΤΟ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.	34
ΕΙΚΟΝΑ 26: ΠΡΟΦΙΛ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΛΕΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.....	35
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΛΕΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.	35
ΕΙΚΟΝΑ 28: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re = 700).....	36
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΠΡΟΦΙΛ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re = 700).	36
ΕΙΚΟΝΑ 30 : ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re = 700).....	37
ΕΙΚΟΝΑ 31: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re=1150).	38
ΕΙΚΟΝΑ 32: ΠΡΟΦΙΛ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re=1150).	38
ΕΙΚΟΝΑ 33: ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re=1150).	39
ΕΙΚΟΝΑ 34: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re=1400).	39
ΕΙΚΟΝΑ 35: ΠΡΟΦΙΛ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re=1400).....	40
ΕΙΚΟΝΑ 36: ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ (Re=1400).	40
ΕΙΚΟΝΑ 37: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΕΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ.	41
ΕΙΚΟΝΑ 38: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΝU ΓΙΑ ΛΕΙΟ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ.	41
ΕΙΚΟΝΑ 39: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ.	42

Ονοματολογία

LNG: liquefied natural gas

s-CO₂: supercritical carbon dioxide

Q: θερμότητα (W)

m: Ρυθμός μάζας(kg/s)

h: ενθαλπία(J/kg)

k: θερμική αγωγιμότητα W/(m· K)

T: Θερμοκρασία(K)

h_c: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (W/(m²· K))

Re:αριθμός Reynolds

ρ:πυκνότητα(kg/m³)

*μ:ιξώδες(Pa*s)*

Nu: αριθμός Nusselt

PE: βαθμός αποτελεσματικότητας

D: διάμετρος(m)

ΔP: πτώση πίεσης(Pa)

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η σύγχρονη κοινωνία αντιμετωπίζει μια κρίσιμη πρόκληση στον τομέα της ενέργειας, με την αυξανόμενη ανάγκη για εναλλακτικές πηγές που να είναι φιλικές προς το περιβάλλον και βιώσιμες. Η επάνδρωση της γης με πηγές ενέργειας όπως η **ηλιακή**, η **αιολική** και η **υδροηλεκτρική** έχει καταστεί πιο επίκαιρη από ποτέ, αποτελώντας τον πυρήνα της σύγχρονης ενεργειακής πολιτικής. Επίσης, η κλιματική αλλαγή και η επιτακτική ανάγκη για την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα ανοίγουν νέους ορίζοντες και δημιουργούν νέες επαγγελματικές δυνατότητες. Σε όλες τις εργαστηριακές μονάδες ένα από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα είναι οι εναλλάκτες θερμότητας. Η όσο το δυνατό μεγαλύτερη απόδοση επιφέρει όχι μόνο μεγαλύτερα αποτελέσματα αλλά επίσης μείωση του κόστους παραγωγής και λειτουργίας. Η μελέτη τους έχει ξεκινήσει πολλά χρόνια πριν αλλά συνεχίζεται μέχρι και σήμερα[1]. Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την ενσωμάτωση βιώσιμων πρακτικών στον τομέα της ενέργειας.

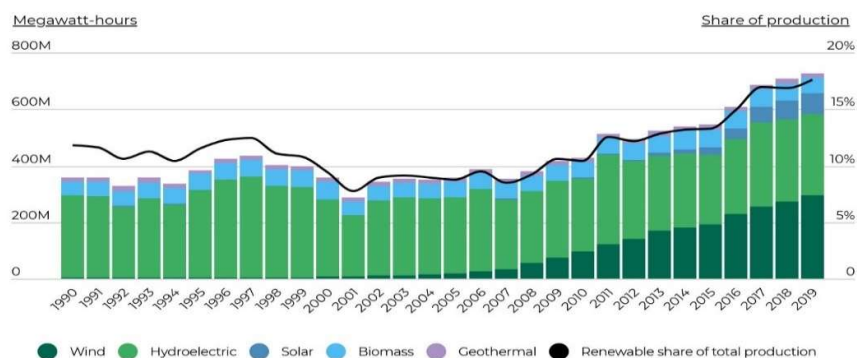
Τα τελευταία χρόνια, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη. Η **ηλιακή ενέργεια**, για παράδειγμα, αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μορφές καθαρής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν εγκατασταθεί σε πολλές χώρες, όπως και στην Ελλάδα, όπου η ηλιοφάνεια είναι άφθονη. Η χρήση τους δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και βιομηχανίες, αλλά συμβάλλει και στη θέρμανση νερού, μειώνοντας την ανάγκη για ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, η πρόοδος στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, καθιστά τη χρήση της ηλιακής ενέργειας πιο αξιόπιστη και αποδοτική. Από την άλλη, η **αιολική ενέργεια** έχει επίσης γνωρίσει εκτεταμένη εφαρμογή, κυρίως μέσω των αιολικών πάρκων. Στην Ελλάδα, η γεωγραφική θέση και οι κλιματικές συνθήκες επιτρέπουν τη δημιουργία αιολικών εγκαταστάσεων σε πολλά νησιά και ορεινές περιοχές. Τα αιολικά πάρκα παρέχουν σημαντικά ποσά ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Παρόλο που η αρχική επένδυση μπορεί να είναι υψηλή, το μακροπρόθεσμο όφελος από τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα είναι τεράστιο, ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια της χώρας.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια άλλη βασική εναλλακτική πηγή ενέργειας, που εκμεταλλεύεται την κίνηση του νερού για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Στην Ελλάδα, υπάρχουν αρκετά υδροηλεκτρικά φράγματα που συνεισφέρουν σημαντικά στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Τα φράγματα αυτά όχι μόνο παράγουν καθαρή ενέργεια, αλλά επίσης βοηθούν στη διαχείριση των υδάτινων πόρων και την πρόληψη πλημμυρών. Ωστόσο, απαιτείται προσοχή στη

διαχείριση των υδροηλεκτρικών πόρων, ώστε να μην επηρεάζεται η βιοποικιλότητα και τα οικοσυστήματα των ποταμών και λιμνών.

Όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 1 ,οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λαμβάνουν όλο και μεγαλύτερο κομμάτι της παγκόσμιας παραγωγής. Απορριπτόμενα αέρια του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εγκαταστάσεις ώστε να μειωθεί η έκθεση τους στο περιβάλλον[2]. Σε όλες τις εφαρμογές ορυκτών πόρων, οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για την μετατροπή του εργαζόμενου μέσου από κρύο σε ζεστό και το αντίστροφο. Αντίστοιχα, το ίδιο μπορεί να γίνει και με την εφαρμογή των εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η ανταλλαγή θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με την χρήση ενός δεύτερου εργαζόμενου μέσου που όπως προαναφέρθηκε μπορεί να είναι κάποιο βλαβερό αέριο.

Electric power generation from renewable sources has increased by over 70% since 2010



Source: U.S. Energy Information Administration's Net Generation by State dataset

Εικόνα 1: Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με τη πάροδο του χρόνου [1]

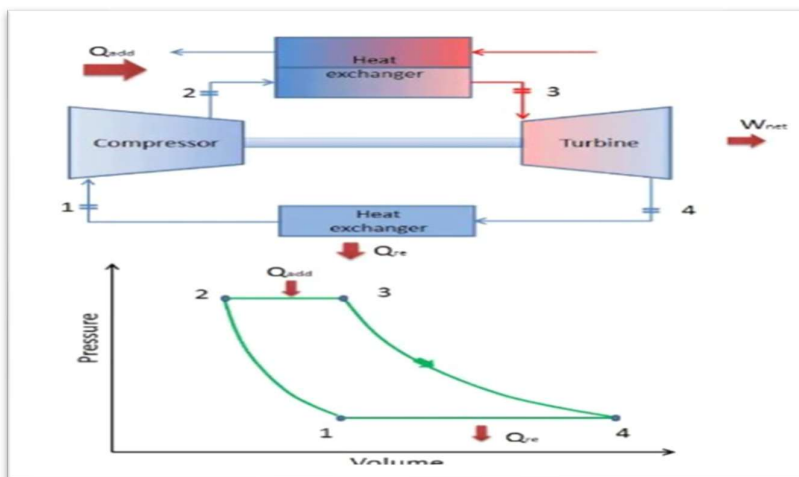
1.1 Εναλλάκτης θερμότητας

Ο εναλλάκτης θερμότητας χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές, όπως συστήματα θέρμανσης, ψύξης, και κλιματισμού, καθώς και σε βιομηχανικές διαδικασίες όπου είναι απαραίτητη η μεταφορά θερμότητας μεταξύ διαφορετικών μέσων με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο.

Επίσης, χρησιμοποιούνται σε χημικές και πετρελαϊκές βιομηχανίες για την ανταλλαγή θερμότητας κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς και σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, όπου μεταφέρουν θερμότητα από τους καυστήρες στους ατμοστροβίλους[4]. Στη βιομηχανία τροφίμων, χρησιμοποιούνται για την παστερίωση και την ψύξη των προϊόντων. Τα κύρια οφέλη από τη χρήση των εναλλακτών θερμότητας περιλαμβάνουν την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και τη μείωση του λειτουργικού κόστους.

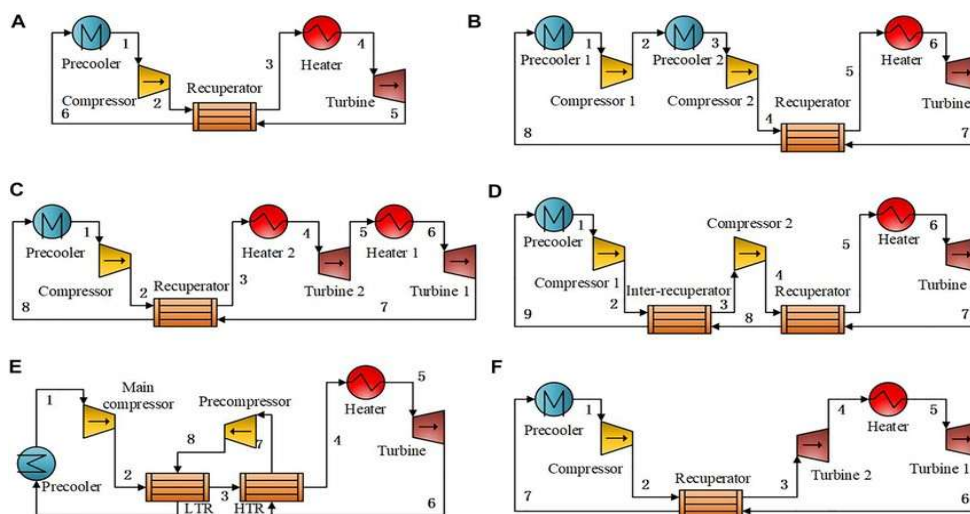
Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου τύπου εναλλάκτη θερμότητας και η σωστή συντήρηση του είναι κρίσιμα ζητήματα για την αποφυγή προβλημάτων, όπως η διάβρωση και η απόφραξη.

Οι εναλλάκτες θερμότητας χωρίζονται σε διαφορετικούς τύπους ανάλογα τη γεωμετρία τους ή την ροή του ρευστού. Στη δεύτερη υποενότητα θα αναλύσουμε αυτές τις κατηγορίες καθώς και τις διαφορετικές παραμέτρους που καθορίζουν την απόδοσή τους. Παρακάτω θα παραθέσουμε μερικούς θερμοδυναμικούς κύκλους που βασίζονται στον κύκλο Brayton ώστε να αντιληφθούμε την μεγάλη εφαρμοσιμότητά τους. Ο ιδανικός κύκλος Brayton αποτελείται από μία ισηντροπική μεταβολή, μία ισοβαρή και άλλη μία σειρά αυτών των μεταβολών [5]. Αυτός ο τύπος κύκλου χρησιμοποιείται ευρέως στα αεροσκάφη για τα συστήματα κλιματισμού χρησιμοποιώντας αέρα από τους συμπιεστές του κινητήρα. Χρησιμοποιείται επίσης ευρέως στη βιομηχανία υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG).



Εικόνα 2: Θερμοδυναμικός κύκλος Brayton[5]

Παρόλ'αυτά σε πραγματικές εγκαταστάσεις οι κύκλοι μπορεί να συμπεριλαμβάνουν κάποια προθέρμανση (*precooling*), ενδιάμεση θέρμανση (*intercooling*), προ-συμπίεση (*pre-compression*) και άλλα[5]. Η διάταξη ανάκτησης μπορεί αποτελεσματικά να χρησιμοποιήσει τη θερμότητα από τα καυσαέρια για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης. Η μεσόψυξη μπορεί να μειώσει την ισχύ εισόδου του συμπιεστή. Επιπλέον, η επαναθέρμανση συμβάλλει στην αύξηση της αποσυμπίεσης των τουρμπινών.



Εικόνα 3: Διατάξεις κύκλων ψύξης που χρησιμοποιούν εναλλάκτες θερμότητας [5].

Οι διατάξεις αυτές και ιδιαίτερα η χρήση εναλλακτών είναι πολύ σημαντική λόγω της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της ζεστής και κρύας πλευράς. Πιο συγκεκριμένα, στους υπερκρίσιμους κύκλους, που είναι κύκλοι που λειτουργούν πάνω από το κρίσιμο σημείο, η χρήση τους είναι απαραίτητη. Για παράδειγμα, ένα από τα χαρακτηριστικά του κύκλου Brayton s-CO₂ είναι ότι η ειδική θερμοκρασία του ρευστού στην κρύα πλευρά είναι δύο έως τρεις φορές υψηλότερη από εκείνη της ζεστής πλευράς. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον σχεδιασμό της διάταξης του κύκλου s-CO₂ και εξηγεί επίσης γιατί η διάταξη της επανασυμπίεσης μπορεί να έχει υψηλή αποδοτικότητα.

1.2 Τύποι εναλλακτών θερμότητας

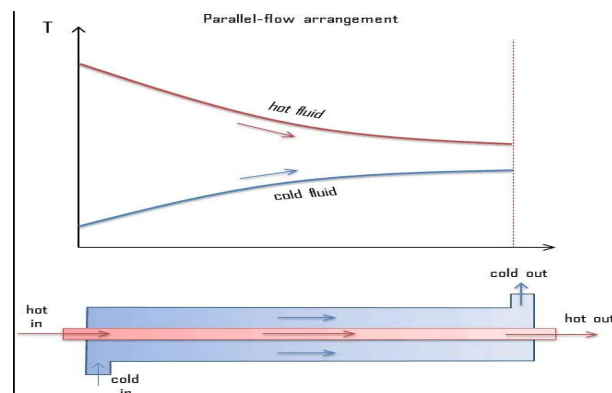
Όπως περιγράφεται παραπάνω, όλοι οι εναλλάκτες θερμότητας λειτουργούν με βάση τις ίδιες βασικές αρχές. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές μπορούν να ταξινομηθούν και να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους, βάσει των χαρακτηριστικών σχεδιασμού τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά με τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν οι εναλλάκτες θερμότητας περιλαμβάνουν[7]:

- Διάταξη ροής.
- Γεωμετρία.
- Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας.

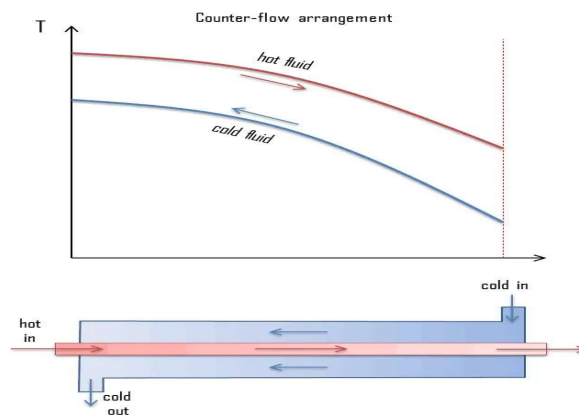
1.2.1 Διάταξη ροής

Ένας παράγοντας μεταξύ των εναλλακτών θερμότητας είναι ο τρόπος κατανομής των ροών θερμότητας στα εσωτερικά των σωλήνων. Όταν αυτές οι ροές κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, ο εναλλάκτης αποκαλείται παράλληλος, ενώ αν κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις, ονομάζεται αντίρροπος. Στους παράλληλους εναλλάκτες θερμότητας υπάρχει σημαντική διαφορά θερμοκρασιών, επιτρέποντας τη χρήση τους σε διατάξεις με ευέλικτες απαιτήσεις θερμοκρασίας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.

Ένας εναλλάκτης αντίρροπης ροής μεταφέρει περισσότερη θερμότητα σε σχέση με έναν εναλλάκτη παράλληλης ροής. Τα προφίλ θερμοκρασιών των δύο εναλλακτών αποκαλύπτουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα στον σχεδιασμό με παράλληλη ροή. Η σημαντική διαφορά θερμοκρασιών στις άκρες οδηγεί σε μεγάλες θερμικές εντάσεις. Η θερμοκρασία του κρύου ρευστού που εξέρχεται από τον εναλλάκτη δεν υπερβαίνει ποτέ τη χαμηλότερη θερμοκρασία του ζεστού ρευστού. Για αυτό το λόγο, ο σχεδιασμός ενός εναλλάκτη θερμότητας παράλληλης ροής είναι προτιμότερος όταν απαιτείται να φέρουμε δύο ρευστά σε σχεδόν ίδιες θερμοκρασίες.



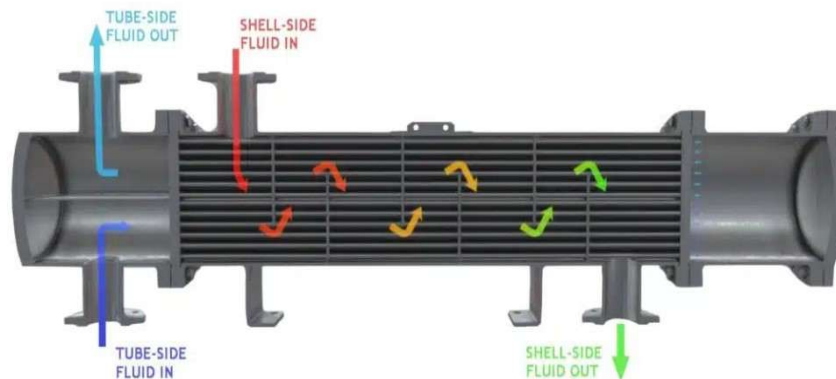
Εικόνα 4: Προφίλ θερμοκρασιών σε ομόρροπη ροή εναλλάκτη θερμότητας [7].



Εικόνα 5: Προφίλ θερμοκρασιών σε αντίρροπη ροή εναλλάκτη θερμότητας [7].

1.2.2 Γεωμετρία

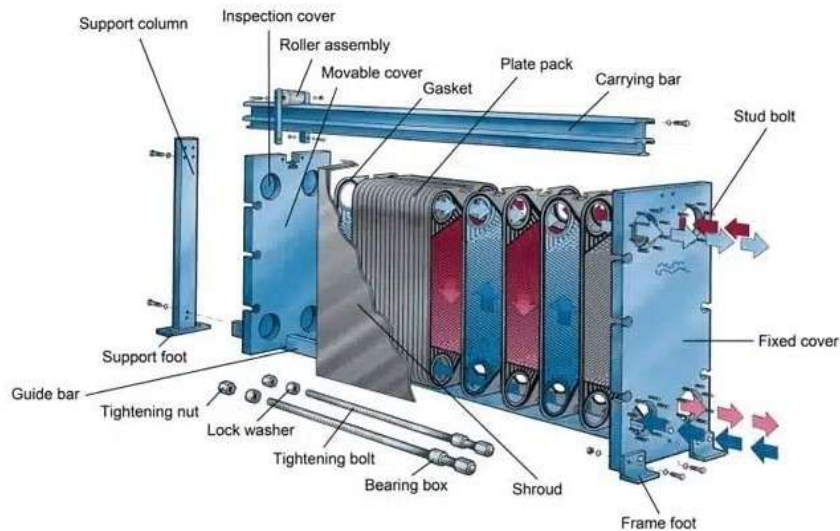
Τα είδη των εναλλακτών θερμότητας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη γεωμετρία τους και το παρακάτω διάγραμμα είναι το πιο σύνηθες σε όλα τα βιβλία μηχανολογίας για εναλλάκτες. Τα δύο πιο σημαντικά είναι ο εναλλάκτης με κέλυφος και σωλήνες (shell and tube heat exchanger) και ο εναλλάκτης πλακών (plate heat exchanger).



Εικόνα 6: Εναλλάκτης θερμότητας με κέλυφος(shell and tube)[21].

Ο εναλλάκτης κάθετου σωλήνα (HX) αντιπροσωπεύει τον πιο διαδεδομένο τύπο με εφαρμογές σε διαφορετικούς κλάδους ιδίως σε βιομηχανικές διεργασίες σε κλίμακα από κιλοβάτ έως μεγαβάτ. Το μεγάλο βάρος και οι μεγάλες διαστάσεις τους, τους καθιστούν ακατάλληλους για μεταφορά. Το πλέον σημαντικό τους χαρακτηριστικό είναι ο συνδυασμός ποιότητας, αποδοτικότητας και κόστους, κάτι που τους καθιστά καλύτερους σε σχέση με όλους τους εναλλάκτες. Ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής στο κέλυφος, ο εναλλάκτης θερμότητας αυτός ονομάζεται ένας μονοπεριστροφικός, διπλός περιστροφικός κ.λπ. .Επιπλέον, η προσθήκη ενός τοιχώματος μετατρέπει τον θερμοσίφωνα αντίρροπης ροής σε έναν θερμοσίφωνα διασταύρωσης, με αποτέλεσμα την ενισχυμένη αποδοτικότητα.

Οι εναλλάκτες πλάκας αποτελούνται από πολλά ραβδωτά, λεπτά φύλλα που συγκρατούνται μαζί. Ζεύγη φύλλων δημιουργούν κανάλια μέσα στα οποία πραγματοποιείται η ροή του υγρού, και αυτά τα ζεύγη φύλλων συνδέονται και στοιβάζονται με τη χρήση συγκόλλησης, βιδώματος ή ηλεκτροσυγκόλλησης έτσι ώστε να δημιουργείται ένα ακόμα πέρασμα μεταξύ των ζευγαριών για τη ροή ενός άλλου υγρού.

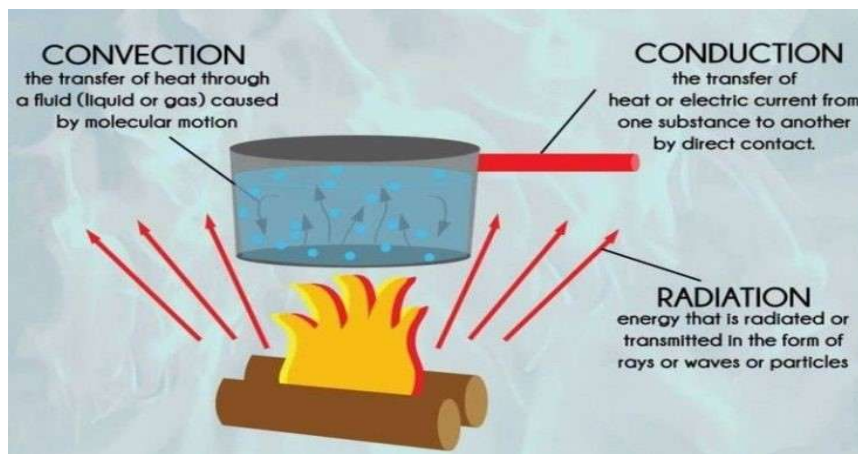


Εικόνα 7:Εναλλάκτης θερμότητας με πλάκα (plate)[21]

1.2.3 Μηχανισμοί εναλλαγής θερμότητας

Οι βασικοί μηχανισμοί για μεταφορά θερμότητας είναι οι ακόλουθοι:

- Αγωγή
- Συναγωγή
- Ακτινοβολία.

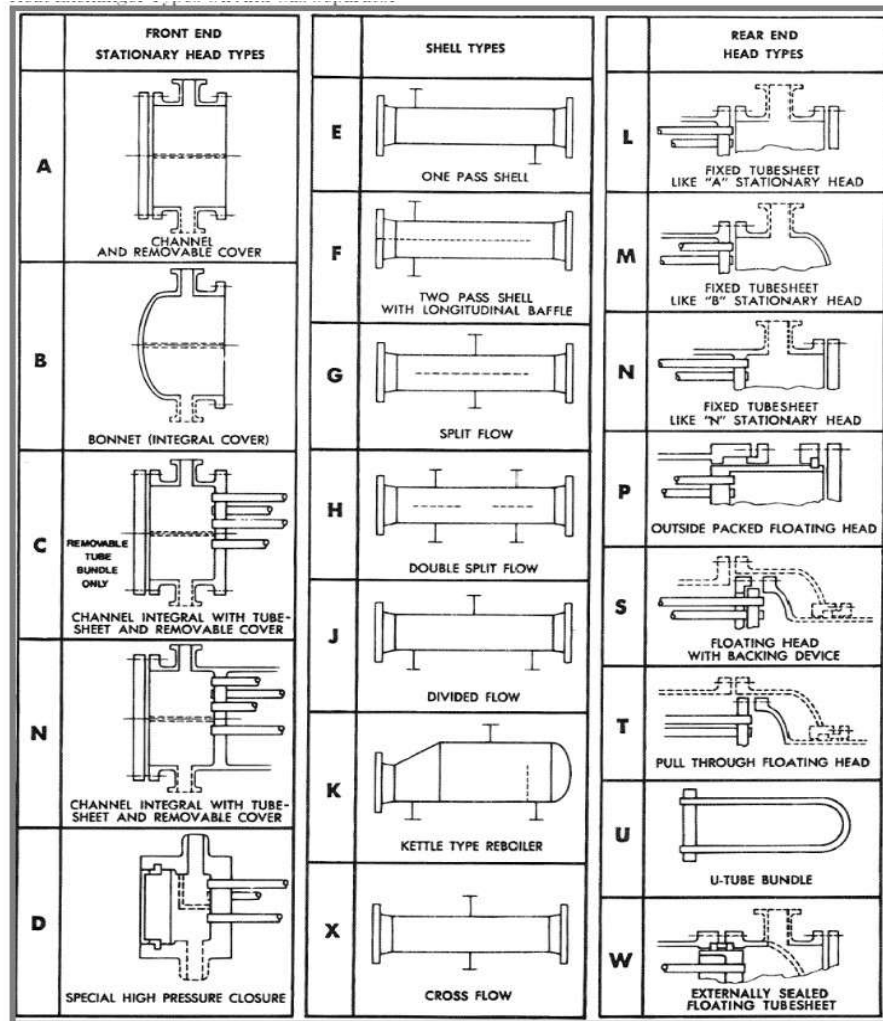


Εικόνα 8:Διαφορετικά είδη μεταφοράς θερμότητας[22].

Βασιζόμενοι στο πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, η αρχή διατήρησης της ενέργειας λέει ότι η ενέργεια ούτε καταστρέφεται ούτε δημιουργείται εκ του μηδενός, αλλά μετατρέπεται από τη μια μορφή σε μια άλλη [7]. Η βασική εξίσωση στη μεταφορά θερμότητας είναι:

$$Q = m \cdot \Delta h \quad (1.1)$$

Ένα σώμα μεταφέρει θερμότητα στο χώρο ή σε ένα άλλο μέσω της αλλαγής της ενθαλπίας όταν δεν έχουν ίδιες θερμοκρασίες (Equilibrium). Όταν τα σώματα βρίσκονται σε επαφή τότε η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή. Καθώς τα σώματα έρχονται κοντά τα μόρια τους έρχονται σε επαφή και μεταφέρουν ενέργεια έτσι ώστε να φτάσουν σε ισορροπία. Μία άλλη μορφή μεταφοράς θερμότητας είναι όταν ένα σώμα θερμαίνεται ή ψυχραίνεται εκλύει ακτινοβολία μέχρι να φτάσει σε ισορροπία με το χώρο ή το σώμα που βρίσκεται. Η διαφορά με τη μεταφορά με αγωγή είναι ότι τα σώματα δεν χρειάζεται να είναι σε επαφή και η μεταφορά θερμότητας ευθύνεται στην αλληλεπίδραση των φωτονίων[9]. Η τελευταία μορφή είναι με συναγωγή και στην ουσία είναι η επαφή δύο σωμάτων που το ένα κινείται σε σχέση με το άλλο. Αυτό το είδος μεταφοράς θερμότητας οφείλεται στη μετάδοση ενέργειας μέσω κινητικής ενέργειας. Ένα παράδειγμα είναι η κίνηση ενός ρευστού πάνω από μία στερεά πλάκα (το νερό μέσα σε καλοριφέρ).



Εικόνα 9: Διαφορετικά είδη εναλλακτών θερμότητας [7].

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι φυσικές και μαθηματικές αρχές που διέπουν την παρούσα έρευνα. Εξισώσεις, αδιάστατοι αριθμοί και φυσικές αρχές παρουσιάζονται σε αυτό το κομμάτι της ανάλυσης αλλά είναι στην ευχέρεια του αναγνώστη να αναζητήσει παραπάνω πληροφορίες στο βιβλίο του Mills [10]. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη ανάλυση αυτή, δεν λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας.

2.1 Μετάδοση θερμότητας και αδιάστατοι αριθμοί

Η αγωγή είναι ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μέσω της άμεσης επαφής των μορίων σε ένα στερεό σώμα ή σε ένα ακίνητο ρευστό. Τα θερμά μόρια μεταφέρουν την ενέργειά τους στα ψυχρότερα μόρια μέσω συγκρούσεων, μέχρι η θερμοκρασία να εξισωθεί. Το πιο κοινό παράδειγμα είναι η μεταφορά θερμότητας μέσω ενός στερεού σώματος, όπως ένα μεταλλικό ραβδί που θερμαίνεται στη μία άκρη του.

Ο θεμελιώδης νόμος της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή αποκαλείται Fourier's law. Η ροή θερμότητας από τη ζεστή περιοχή στη ψυχρή εκφράζεται με τη παρακάτω σχέση:

$$q = -k \cdot \frac{\Delta T}{dx} \quad (2.1)$$

όπου “q” είναι η ροή θερμότητας με μονάδες μέτρησης W/m² και “k” είναι η θερμική αγωγιμότητα με μονάδες μέτρησης W/(m·K). Η θερμική αγωγιμότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική στις λειτουργίες με εναλλαγή θερμότητας και εξαρτάται από το υλικό της εγκατάστασης. Για παράδειγμα το αλουμίνιο έχει τιμή κοντά 237 W/(m·K) ενώ ο αέρας 0.027 W/(m·K). Η επιλογή του υλικού όπως φαίνεται είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη λειτουργία που επιθυμούμε. Για παράδειγμα το καλοριφέρ ενός σπιτιού έχει αλουμίνιο ή σίδηρο για να ενισχύσει τη μεταφορά θερμότητας. Από την άλλη, ανάμεσα στα παράθυρα τις περισσότερες φορές υπάρχει αέρας που λειτουργεί ως μονωτής.

Η συναγωγή αφορά τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενός στερεού και ενός κινούμενου ρευστού (όπως αέρας ή νερό). Η συναγωγή μπορεί να είναι:

- **Φυσική:** Το ρευστό κινείται λόγω διαφορών στη θερμοκρασία, που προκαλούν διαφορές στην πυκνότητα. Π.χ., ζεστός αέρας που ανεβαίνει και ψυχρός αέρας που κατεβαίνει.
- **Εξαναγκασμένη:** Το ρευστό κινείται λόγω εξωτερικών δυνάμεων, όπως ανεμιστήρας ή αντλία

Για τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής χρησιμοποιούμε τον λεγόμενο Newton's law of cooling:

$$q = h_c \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

όπου “ h_c ” είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε $W/(m^2 \cdot K)$. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι παρόμοιος με τη θερμική αγωγιμότητα αλλά εξαρτάται από το κινούμενο μέσο αλλά και από τη ταχύτητα του κινούμενου μέσου. Αν η ροή είναι τυρβώδης τότε αυτός ο συντελεστής είναι διαφορετικός σε σχέση με το συντελεστή σε στρωτή ροή. Μία σημαντική σημείωση είναι ότι η συναγωγή μπορεί να είναι όχι μόνο εξαναγκασμένη αλλά και φυσική λόγω διαφορετικής πυκνότητας (τα ζεστά αέρια κινούνται προς τα πάνω ενώ τα κρύα προς τα κάτω).

Πρωτού αναλυθεί σε μεγαλύτερο βάθος το πρόβλημα, κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στους αδιάστατους αριθμούς. Οι αριθμοί αυτοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί στη ρευστομηχανική και τη μετάδοση θερμότητας καθώς μπορεί να περιγραφεί ένα φυσικό φαινόμενο με αυτούς τους αριθμούς χωρίς να δοθούν μονάδες μέτρησης στο πρόβλημα. Οι δύο αδιάστατοι αριθμοί που λαμβάνουν χώρα σε αυτή την ανάλυση είναι οι ακόλουθοι:

Αριθμός Reynolds:

Εφόσον οι αριθμοί αυτοί δεν έχουν μονάδες μέτρησης τις περισσότερες φορές εκφράζουν ένα πηλίκο μεταξύ δυο διαφορετικών φαινομένων σε ένα πρόβλημα[11]. Ο αριθμός Reynolds εκφράζει τη σχέση μεταξύ των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ιξώδεις δυνάμεις σε μια ροή. Η εφαρμογή αυτού του αριθμού προσδιορίζει αν μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδη. Συγκεκριμένα στις εφαρμογές με φαινόμενα μεταφοράς, ο τύπος της ροής είναι σημαντικός καθώς δείχνει αν η θερμότητα οφείλεται στη ταχύτητα της ροής ή σε κάποιο άλλο φαινόμενο.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} \quad (2.3)$$

Όπου “ ρ ” είναι η πυκνότητα του ρευστού, “ u ” είναι η ταχύτητα της ροής, “ L ” είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος (π.χ. διάμετρος σωλήνα) και “ μ ” είναι το ιξώδες του ρευστού.

Ο αριθμός Reynolds συμβάλλει στη κατανόηση της συμπεριφοράς της ροής. Συγκεκριμένα:

- Για μικρούς αριθμούς Reynolds η ροή είναι στρωτή. Αυτό σημαίνει ότι τα ρευστά κινούνται σε παράλληλες στρώσεις χωρίς ανάμιξη μεταξύ τους.

- Για μεγάλους αριθμούς Reynolds η ροή είναι τυρβώδης. Σε αυτήν την περίπτωση, η κίνηση του ρευστού είναι ακανόνιστη και χαρακτηρίζεται από στροβιλισμούς και ανάμιξη.

Η κατανόηση του αριθμού Reynolds είναι ζωτικής σημασίας στις εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας και μάζας, καθώς ο τύπος της ροής επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των συστημάτων. Για παράδειγμα, σε μια τυρβώδη ροή, η μεταφορά θερμότητας μπορεί να είναι πιο αποδοτική λόγω της αυξημένης ανάμιξης του ρευστού, ενώ σε μια στρωτή ροή, η μεταφορά θερμότητας μπορεί να είναι πιο περιορισμένη.

Συνοψίζοντας, ο αριθμός Reynolds είναι ένα κρίσιμο εργαλείο για την ανάλυση και το σχεδιασμό συστημάτων ροής ρευστών, καθώς παρέχει πληροφορίες για τη φύση της ροής και τις δυνάμεις που την επηρεάζουν.

Αριθμός Nusselt:

Ο αριθμός Nusselt είναι το πηλίκο μεταξύ των δυο ειδών μεταφοράς θερμότητας που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Με αυτό το τρόπο καθορίζεται ποιος από τους δύο μηχανισμούς είναι κυρίαρχος, αν δηλαδή η μεταφορά θερμότητας προέρχεται κυρίως από το υλικό ή από το ρευστό.

$$Nu = \frac{h_c \cdot H}{k} \quad (2.4)$$

Όπου “ h ” είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, “ H ” είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος (π.χ. διάμετρος σωλήνα) και “ k ” είναι η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού.

Με άλλα λόγια, βοηθά στη κατανόηση του πως η θερμότητα μεταφέρεται από τα τοιχώματα ενός σωλήνα ή μιας επιφάνειας προς το ρευστό που ρέει πάνω από αυτή. Συγκεκριμένα:

- Ένας υψηλός αριθμός Nusselt ($Nu > 1$) υποδηλώνει ότι η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής είναι πιο αποτελεσματική από τη μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής. Αυτό σημαίνει ότι η ροή ρευστού συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση της θερμότητας από την επιφάνεια.
- Ένας αριθμός Nusselt ίσος με 1 ($Nu = 1$) υποδηλώνει ότι η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής είναι η κυρίαρχη.

Η κατανόηση του αριθμού Nusselt είναι σημαντική για το σχεδιασμό και την ανάλυση θερμικών συστημάτων. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές όπως οι εναλλάκτες θερμότητας, ένας υψηλός αριθμός Nusselt σημαίνει ότι το σύστημα είναι αποδοτικό στην απομάκρυνση της θερμότητας από τις επιφάνειες, κάτι που είναι επιθυμητό για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος.

Ο αριθμός Nusselt μπορεί επίσης να εξαρτάται από άλλους άνευ διαστάσεων αριθμούς, όπως ο αριθμός Reynolds και ο αριθμός Prandtl (Pr), που σχετίζονται με τη φύση της ροής και τις θερμικές ιδιότητες του ρευστού, αντίστοιχα. Οι εμπειρικές σχέσεις και τα διαγράμματα που συνδέουν αυτούς τους αριθμούς χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε διάφορες εφαρμογές.

Συνοψίζοντας, ο αριθμός Nusselt είναι ένα κρίσιμο εργαλείο στη μεταφορά θερμότητας, καθώς παρέχει πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής σε σχέση με την αγωγή, επιτρέποντας έτσι την καλύτερη κατανόηση και βελτιστοποίηση των θερμικών συστημάτων.

Δείκτης αποτελεσματικότητας:

Στους εναλλάκτες θερμότητας ο πρωταρχικός στόχος είναι η όσο το δυνατό καλύτερη μετάδοση θερμότητας. Παρόλα αυτά αν αυτό επιτυγχάνεται με μεγάλη πτώση πίεσης τότε το ρευστό χρειάζεται ώθηση από κάποιά αντλία αυξάνοντας το κόστος παραγωγής και χρήσης.

$$PE = \frac{\frac{Nu_c}{Nu_s}}{(f_c)^{1/3}} \quad (2.5)$$

όπου “Nu_c” είναι ο Nusselt number της μη λείας επιφάνειας και “Nu_s” είναι ο Nusselt number της λείας επιφάνειας. Επιπλέον, “f_c” και “f_s” είναι ο συντελεστής τριβής της μη λείας επιφάνειας και λείας επιφάνειας αντίστοιχα. Ο συντελεστής τριβής παρατίθεται παρακάτω.

$$f = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot L}{\rho \cdot D \cdot u_{av}^2} \quad \text{Friction factor formula} \quad (2.6)$$

“L” είναι το μήκος του σωλήνα (300mm), “ρ” (1.025 kg/m³) είναι η πυκνότητα του αέρα, “ΔP” είναι η πτώση πίεσης κατά μήκος του σωλήνα, “D” είναι η διάμετρος του σωλήνα και “u_{av}” είναι η μέση ταχύτητα ροής. [12]

Ο δείκτης αποτελεσματικότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικός στις εταιρείες κατασκευής εναλλακτών ώστε να δημιουργήσουν κάποιες κατευθυντήριες γραμμές που τους δείχνουν το ποια είναι τα πιο αποτελεσματικά διαστήματα ροής που πετυχαίνουν τις μεγαλύτερες αποδόσεις.

2.2 Σύγχρονες Εφαρμογές & Υπολογιστικά Μοντέλα

Χρήση του CFD για τη Βελτιστοποίηση Συστημάτων Μεταφοράς Θερμότητας.

Το **CFD** (Computational Fluid Dynamics) είναι ένα ισχυρό εργαλείο που επιτρέπει την προσομοίωση της ροής των ρευστών και της θερμικής συμπεριφοράς σε πολύπλοκα συστήματα. Μέσω της αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes που περιγράφουν την κίνηση των ρευστών (Παράρτημα Α') και των εξισώσεων θερμικής αγωγής και συναγωγής, το CFD μπορεί να δώσει ακριβείς προβλέψεις για τη ροή θερμότητας, ακόμα και σε περιβάλλοντα όπου οι αναλυτικές λύσεις είναι δύσκολο να επιτευχθούν.

Ορισμένες από τις χρήσεις της υπολογιστικής ρευστομηχανικής «CFD» είναι οι εξής :

1. Σχεδιασμός Θερμικών Εναλλακτών για Βιομηχανικές Διεργασίες.

Οι θερμικοί εναλλάκτες χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές διεργασίες για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών χωρίς να έρχονται σε άμεση επαφή. Το CFD βοηθά στον **σχεδιασμό** και τη **βελτιστοποίηση** αυτών των συστημάτων, επιτρέποντας στους μηχανικούς να αναλύουν:

- **Την κατανομή της θερμοκρασίας** σε όλο το μήκος του εναλλάκτη,
- **Την αύξηση της αποδοτικότητας** μέσω της ανάλυσης του τρόπου με τον οποίο η γεωμετρία των σωληνώσεων και των πλακών επηρεάζει τη ροή και την ανταλλαγή θερμότητας,
- **Την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών** και τη βελτιστοποίηση της χρήσης υλικών για να επιτευχθεί η βέλτιστη μετάδοση θερμότητας.
- **Ανάλυση της ροής αέρα:** Βοηθά στον καθορισμό των βέλτιστων διαδρομών για τον αέρα ή το ψυκτικό, ώστε να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας από τα εξαρτήματα στο περιβάλλον.
- **Αξιολόγηση των υλικών και των γεωμετριών:** Το CFD μπορεί να αξιολογήσει ποια υλικά και γεωμετρίες προσφέρουν τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και αποτελεσματικότητα στην απαγωγή θερμότητας.
- **Βελτιστοποίηση της διάταξης των εξαρτημάτων:** Η θερμική συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται από τη διάταξη των εξαρτημάτων και την τοποθέτηση ψυκτρών ή ανεμιστήρων. Το CFD προσομοιώνει διαφορετικές διατάξεις για να βρεθεί η βέλτιστη.

2. Εφαρμογές σε Κλιματιστικά και Συστήματα Θέρμανσης.

Το CFD χρησιμοποιείται και για τον σχεδιασμό αποδοτικών συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) σε κτήρια. Τα σύγχρονα συστήματα HVAC πρέπει να επιτυγχάνουν την καλύτερη δυνατή κατανομή θερμότητας ή ψύξης, ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας. Συγκεκριμένα:

- **Μελέτη θερμικών ροών σε κτήρια:** Το CFD μπορεί να προσομοιώσει τον τρόπο με τον οποίο η θερμότητα μετακινείται μέσα σε ένα κτήριο, βοηθώντας τους μηχανικούς να βρουν την ιδανική θέση για τα συστήματα εξαερισμού, θέρμανσης και ψύξης.
- **Σχεδιασμός θερμαντικών σωμάτων και κλιματιστικών:** μέσω του CFD μπορούν να βελτιστοποιηθούν οι σχάρες εξόδου αέρα των συστημάτων κλιματισμού, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας σε όλο τον χώρο.

Το CFD μπορεί να δώσει πολύ ακριβή αποτελέσματα και να προσδιορίσει σημεία όπου υπάρχουν ενεργειακές απώλειες ή ανεπαρκής ψύξη, επιτρέποντας την εφαρμογή διορθωτικών μέτρων προτού κατασκευαστεί ένα σύστημα. Επίσης, μειώνονται οι ανάγκες για φυσικές δοκιμές και πειράματα, αφού πολλές παράμετροι μπορούν να αναλυθούν μέσω προσομοιώσεων, εξοικονομώντας χρόνο και κόστος. Επιπλέον, μπορεί να προσομοιώσει πολύπλοκες γεωμετρίες που θα ήταν δύσκολο να αναλυθούν με συμβατικές μεθόδους.

2.3 Ερωτήματα και σκοπός

Τα ερευνητικά ερωτήματα της διπλωματικής εργασίας επικεντρώνονται στη **σύγκριση της θερμικής απόδοσης** και των **υδραυλικών χαρακτηριστικών** δύο τύπων εναλλακτών θερμότητας: ενός με αυλακώσεις και ενός λείου. Στόχος είναι να εξεταστεί το πώς η παρουσία αυλακώσεων επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας, την πτώση πίεσης, καθώς και τον βαθμό αποτελεσματικότητας. Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται σε δύο βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την αποδοτικότητα των εναλλακτών θερμότητας: ο αριθμός Nusselt, ο οποίος εκφράζει την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής, και η πτώση πίεσης, η οποία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στον σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων.

Ένα βασικό ερώτημα είναι το πώς οι αυλακώσεις επηρεάζουν τη ροή του ρευστού και κατ' επέκταση την αποδοτικότητα του εναλλάκτη θερμότητας. Οι αυλακώσεις θεωρείται ότι αυξάνουν την ανατάραξη του ρευστού, κάτι που θα μπορούσε να ενισχύσει τη μεταφορά θερμότητας, με ενδεχόμενο όμως τη μεγαλύτερη πτώση πίεσης. Ένα δεύτερο ερευνητικό ερώτημα είναι το αν ο

βαθμός αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη θερμότητας με αυλακώσεις υπερτερεί έναντι του λείου εναλλάκτη, λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία μεταξύ θερμικής απόδοσης και της ενέργειας που απαιτείται για την υπερνίκηση της πτώσης πίεσης.

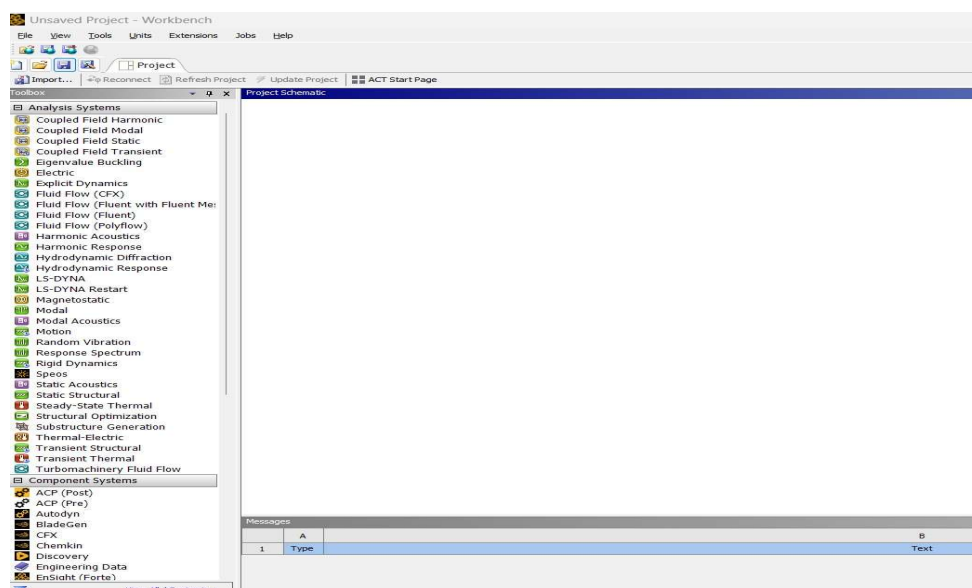
Η εργασία εξετάζει μέσω CFD αυτά τα ερωτήματα, προσδιορίζοντας αν οι αυλακώσεις προσφέρουν πραγματικά πλεονεκτήματα σε συστήματα όπου απαιτείται υψηλή θερμική απόδοση χωρίς σημαντικές υδραυλικές απώλειες.

Κεφάλαιο 3:Ανάλυση μοντελοποίησης

Για τη δημιουργία ενός μοντέλου που περιγράφει προβλήματα ροής ή θερμότητας το λογισμικό Ansys είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα και πιο αξιόπιστα εργαλεία. Για αυτό το λόγο, θα χρησιμοποιηθεί η ακαδημαϊκή έκδοσή αυτού του προγράμματος ώστε να είναι και πιο εύκολο για τον αναγνώστη να κατανοήσει όλη τη μοντελοποίηση [13]. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξηγηθούν όλα τα βήματα ώστε να μπορεί κανείς να μοντελοποιήσει και να αναλύσει τέτοιου είδους προβλήματα.

3.1 Ροή σε λείο αγωγό

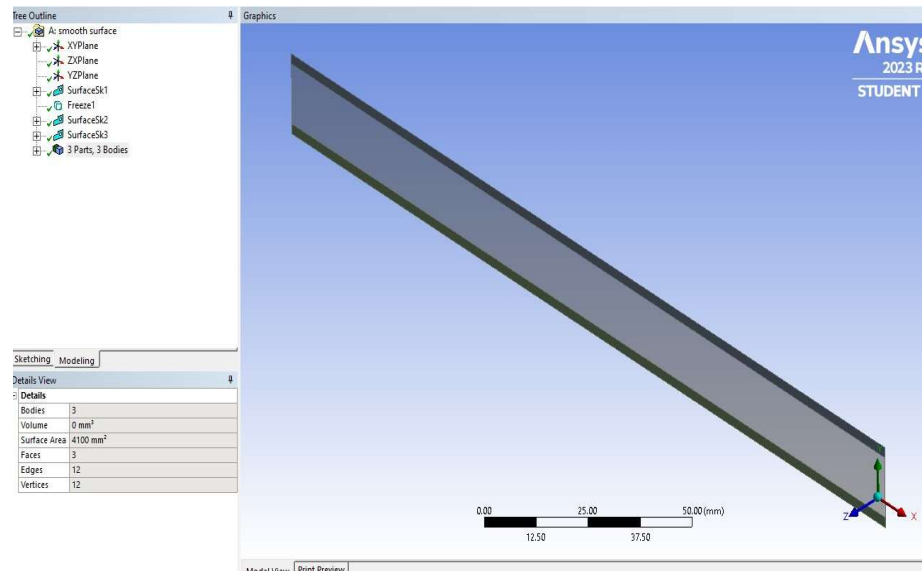
Ανοίγοντας το λογισμικό στη σελίδα "workbench" φαίνονται όλες οι επιλογές των διαφορετικών φυσικών φαινομένων αλλά και των μοντέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση (Εικόνα 10). Το μοντέλο που θα επιλεγεί λέγεται "Fluid Fluent" διότι μπορεί να εξηγήσει τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας λόγω ροής ρευστού αλλά και τις αλλαγές πίεσης και ταχύτητας που είναι ιδιαίτερα σημαντικές στο συγκεκριμένο πρόβλημα.



Εικόνα 10: Η αρχική σελίδα του λογισμικού Ansys.

3.1.1 Γεωμετρία

Αφού επιλεγθεί το φυσικό μοντέλο “Fluid Fluent”, σχεδιάζεται στη καρτέλα "Geometry" η γεωμετρία που αναπαριστά το σωλήνα του εναλλάκτη θερμότητας. Χρησιμοποιώντας τις γεωμετρικές ιδιότητες του προβλήματος ορίζεται η διάμετρος και το μήκος του σωλήνα. Στη συνέχεια, αποθηκεύεται η γεωμετρία.



Εικόνα 11: Η γεωμετρία του σωλήνα λείας επιφάνειας.

Ένας σωλήνας στο δυσδιάστατο χώρο μπορεί να σχεδιαστεί ως ένα ορθογώνιο όπως φαίνεται στο σχήμα. Τα δύο διαφορετικού χρώματος μικρότερα ορθογώνια αναπαριστούν τα τοιχώματα. Το επόμενο βήμα είναι η διακριτοποίηση της γεωμετρίας που σχεδιάστηκε προηγουμένως και πραγματοποιείται στην καρτέλα «Mesh».

3.1.2 Διακριτοποίηση χωρίου(Mesh generation)

Στην υπολογιστική ανάλυση (Computational Analysis), όπως σε προσομοιώσεις υγρών (CFD - Computational Fluid Dynamics) ο χώρος που μελετάται χωρίζεται σε μικρότερους υπολογιστικούς όγκους ή στοιχεία. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως διακριτοποίηση χωρίου (meshing).

Παρόλο που υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες οδηγίες ώστε το μοντέλο να μπορεί να τρέξει και να βγάλει αξιόπιστα αποτελέσματα, το πιο σημαντικό είναι η δημιουργία ομοιόμορφων υπολογιστικών όγκων ώστε να κατασκευαστεί ένα ομοιόμορφο πλέγμα [14]. Ο λόγος για κάτι τέτοιο είναι η διατήρηση ενέργειας και μάζας, καθώς στην υπολογιστική ανάλυση είναι ιδιαίτερα σημαντικό οι κόμβοι όπου λύνονται αυτές οι εξισώσεις να είναι γεωμετρικά δομημένοι ώστε

να μην υπάρχει κάποια διαρροή ενέργειας που είναι πολύ σύνθηδες (Taylor expansion).

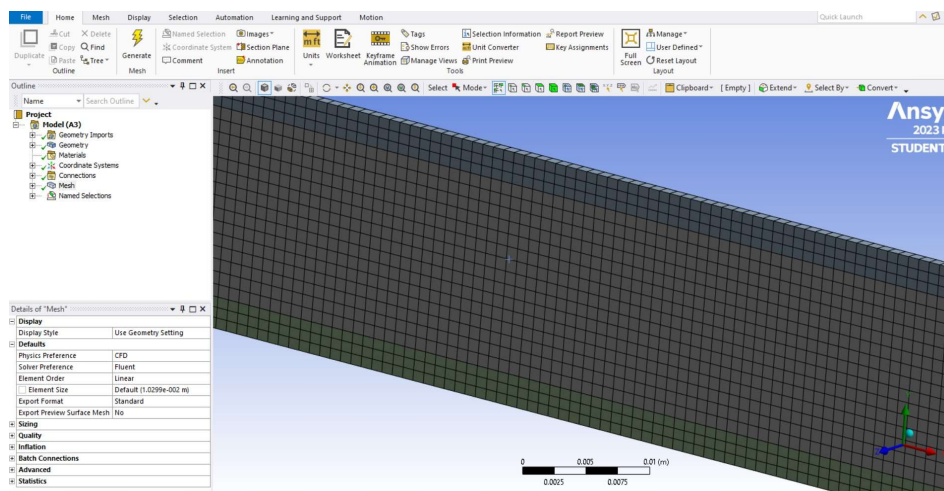
Η δημιουργία ομοιόμορφων υπολογιστικών όγκων σημαίνει ότι τα στοιχεία ή οι όγκοι στο πλέγμα έχουν όσο το δυνατόν ίσες διαστάσεις και σχήματα. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια και τη σταθερότητα της υπολογιστικής ανάλυσης.

Σε πολλές φυσικές προσομοιώσεις, οι νόμοι της διατήρησης της ενέργειας και της μάζας είναι κρίσιμοι. Αν οι υπολογιστικοί όγκοι δεν είναι ομοιόμορφοι, μπορεί να προκύψουν αριθμητικά σφάλματα που παραβιάζουν αυτές τις αρχές. Αυτό οδηγεί σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα και μειωμένη αξιοπιστία των προσομοιώσεων.

Ομοιόμορφα πλέγματα βοηθούν στη διατήρηση της αριθμητικής σταθερότητας των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Η αστάθεια μπορεί να προκαλέσει μεγάλες διακυμάνσεις στα αποτελέσματα και να απαιτήσει περαιτέρω προσαρμογές ή εξομάλυνση.

Η ομοιομορφία των υπολογιστικών όγκων επιτρέπει την καλύτερη εφαρμογή μεθόδων όπως η ανάπτυξη Taylor (Taylor expansion), η οποία χρησιμοποιείται για την αριθμητική προσέγγιση των παραγώγων. Όταν τα στοιχεία είναι ομοιόμορφα, οι αναπτυγμένες συναρτήσεις προσεγγίζουν καλύτερα τις πραγματικές συναρτήσεις, μειώνοντας τα αριθμητικά σφάλματα[15]. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με έντονες διακυμάνσεις, όπως τα όρια και τα σημεία υψηλού στρες.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 12 το πλέγμα είναι τετραγωνισμένο και στο κομμάτι της ροής (γκρι χρώμα) και στο κομμάτι του τοιχώματος(μπλε και πράσινο). Αυτό είναι ένα μοντέλο που ονομάζεται "body sizing" και δημιουργεί ένα αυτοματοποιημένο πλέγμα το οποίο είναι όσο γίνεται τετραγωνικό ανάλογα με τη γεωμετρία . Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ποιότητα του πλέγματος είναι ικανοποιητική όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 12: Πλέγμα για λείο αγωγό.

Το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να κρίνει τη ποιότητα ενός πλέγματος [16], χρησιμοποιώντας τα λεγόμενα “mesh metrics”. Τα τρία βασικά mesh metrics είναι :

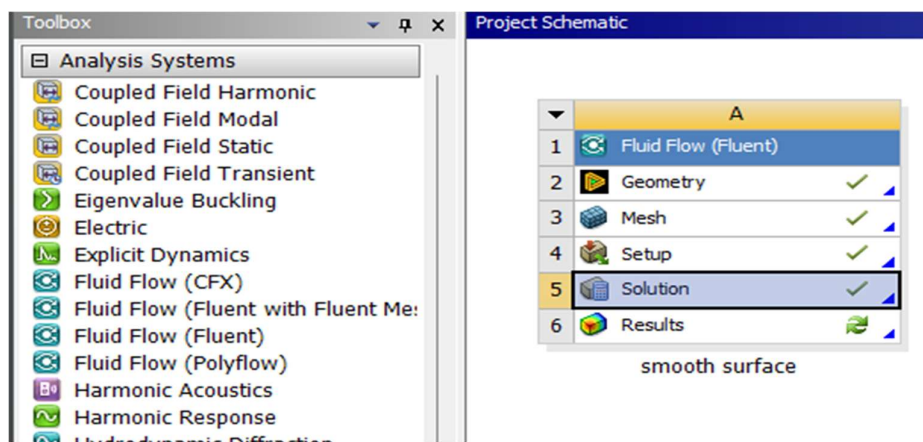
- Average quality. Η τιμή πρέπει να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο 1.
- Average skewness. Η τιμή πρέπει να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο 0.
- Average aspect ratio. Η τιμή πρέπει να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο 1.

Στη περίπτωση αυτή ,τα τρία βασικά mesh metrics έχουν τις εξής τιμές:

Average quality = **0.995**, Average skewness=**0.00012**, Average aspect ratio=**1.05**.

3.1.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες, Επιλογή φυσικού μοντέλου και solver

Έχοντας δημιουργήσει το “mesh” μέσω της επιλογής “generate”, γίνεται έξοδος και επιλέγεται η καρτέλα “Setup” (Εικόνα 13). Σε αυτή τη καρτέλα, ορίζονται όλα τα δεδομένα. Δηλαδή οι αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος ώστε να μπορεί να λυθεί από το λογισμικό.

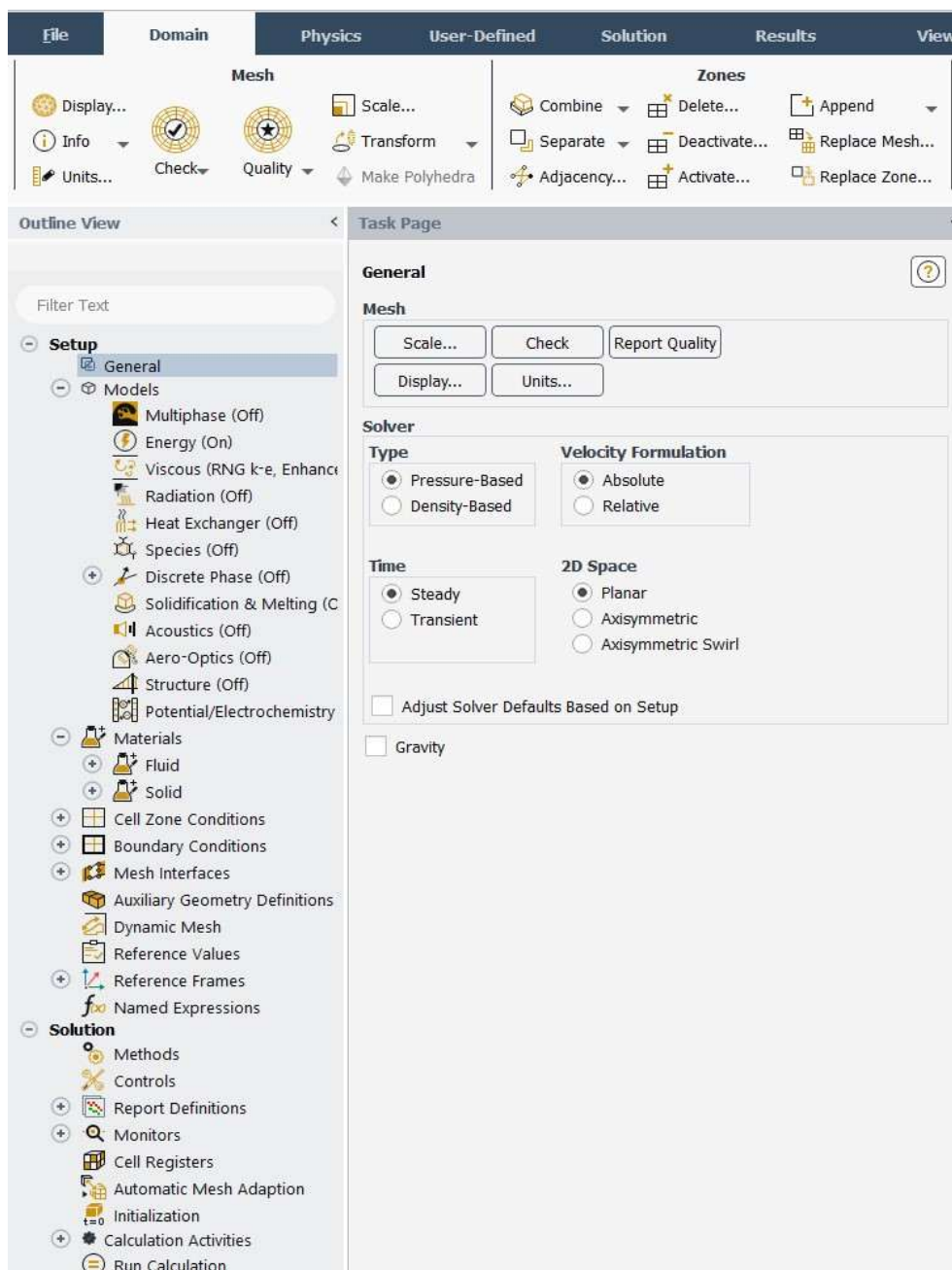


Εικόνα 13: Στιγμιότυπο από τις καρτέλες για τη προσομοίωση σε λείο αγωγό.

Οι επιλογές σε αυτή τη καρτέλα είναι πολλές και για αυτό το λόγο θα εξηγηθούν οι βασικές ώστε να γίνει μία προσομοίωση.

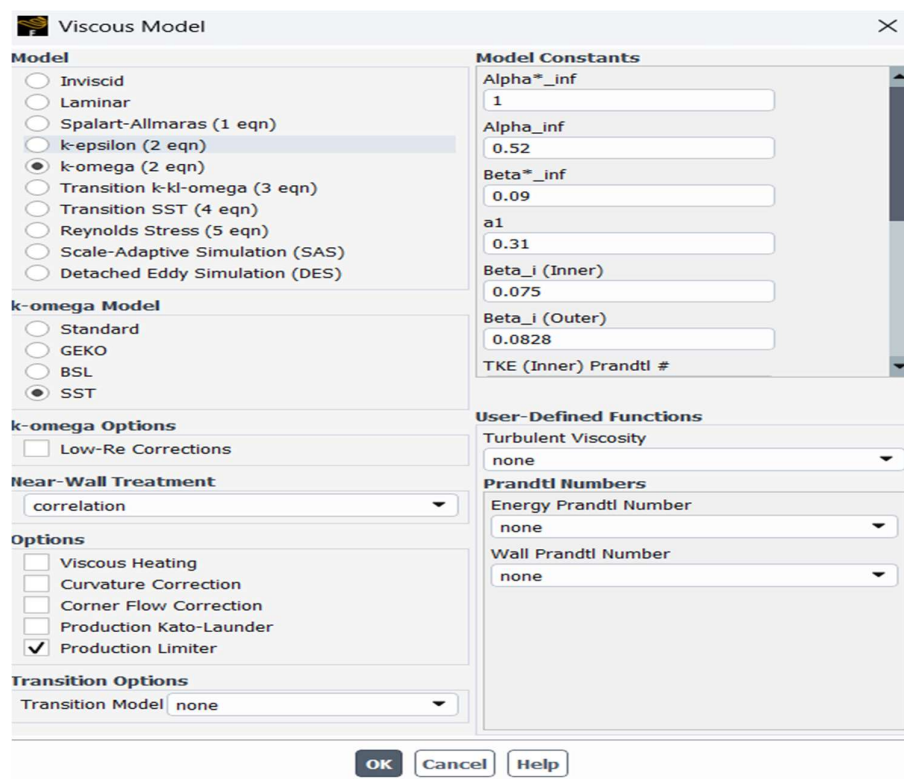
Αρχικά, πρέπει να ενεργοποιηθούν τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, ανάλογα με την εφαρμογή που αναλύεται σε κάθε περίπτωση. Σε φαινόμενα μεταφοράς, ενεργοποιείται η εξίσωση της ενέργειας για να κατανεμηθεί η διάχυση της θερμοκρασίας σε όλο τον υπολογιστικό χώρο (Εικόνα 14).

Το επόμενο βήμα είναι η κατάλληλη επιλογή του μοντέλου τύρβης που θα χρησιμοποιήσει το Ansys για την προσομοίωση. Για ροές σε κλειστά τοιχώματα είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται το μοντέλο k- ω παρά το k- ϵ που ταιριάζει σε ανοικτές ροές όπως γύρω από τα πτερύγια ενός αεροπλάνου[17].



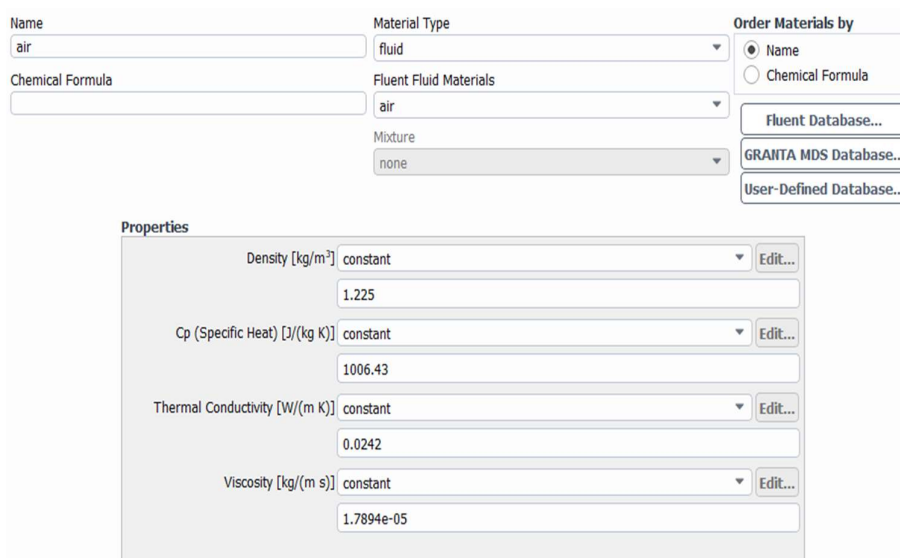
Εικόνα 14 : Η καρτέλα του Setup.

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί είναι μία διαφοροποιημένη έκδοση του k-ε καθώς συμπεριφέρεται διαφορετικά στο ρευστό που βρίσκεται κοντά σε τοίχωμα. Η τιμή του ιξώδες(μ) είναι συνάρτηση της απόστασης από το τοίχωμα. Με αυτό το τρόπο, μακριά από το τοίχωμα χρησιμοποιείται το μοντέλο για ελεύθερη ροή “k-ε” και κοντά στο τοίχωμα το ιξώδες προσαρμόζεται , μέσω του μοντέλου “k-ω”, για να μην υπάρχει μεγάλη αποκοπή της ροής[18]. Το συγκεκριμένο μοντέλο ονομάζεται “k-ω SST” και αποτελεί συνδυασμό μεταξύ του k-ε και του k-ω που αναφέρθηκαν. Στην εικόνα 15 φαίνεται η υποκαρτέλα “Viscous Model” από τη καρτέλα “Setup” και η επιλογή του μοντέλου που περιγράφηκε.



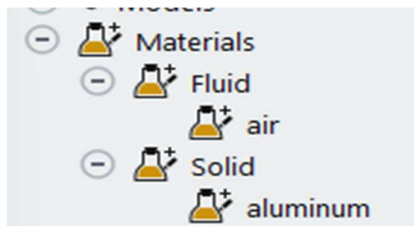
Εικόνα 15: Η καρτέλα με τα διαφορετικά μοντέλα τύρβης.

Αφού επιλεγθεί το μοντέλο τύρβης και τεθούν κάποιες τιμές που βρίσκονται στη βιβλιογραφία για τις απαραίτητες παραμέτρους, επιλέγεται το υλικό του ρευστού και του στερεού. Για το ρευστό ορίστηκε ο αέρας και για το στερεό, το αλουμίνιο. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 16 και 17, το κάθε υλικό έχει κάποιες παραμέτρους που πρέπει να οριστούν[19]. Αυτές είναι η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα, το ιζώδες και ότι χρειάζεται ανάλογα με τα φυσικά φαινόμενα που διέπουν το πρόβλημα.



Εικόνα 16: Ιδιότητες ρευστού και στερεού που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο.

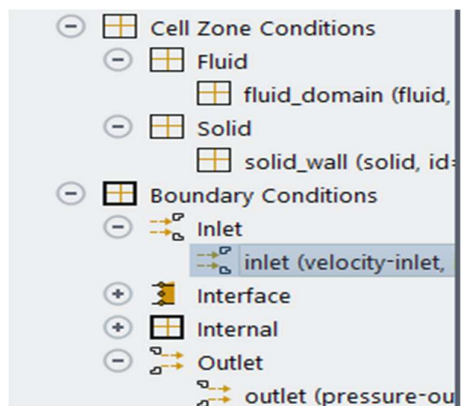
Ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό είναι ότι το λογισμικό έχει πολλά υλικά ενσωματωμένα οπότε, διαλέγοντας το υλικό που επιθυμεί ο χρήστης, το Ansys τοποθετεί αυτόματα όλες τις παραμέτρους. Εάν ένα υλικό δεν είναι διαθέσιμο τότε υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός υλικού με χαρακτηριστικά που δίνει ο χρήστης.



Εικόνα 17: Η καρτέλα οριοθέτησης των υλικών.

Οι **cell zone conditions** και οι **boundary conditions** είναι απαραίτητες σε κάθε προσομοίωση ώστε να οριοθετηθεί το πρόβλημα και να γίνει η μαθηματική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Για παράδειγμα οι διαφορικές δεύτερης τάξης χρειάζονται δύο αρχικές συνθήκες για να λυθούν. Οι οριακές συνθήκες μπορεί να περιλαμβάνουν θερμοκρασίες, πιέσεις, ταχύτητες ροής, και άλλες παραμέτρους που καθορίζουν τις συνθήκες στα όρια της γεωμετρίας. Χωρίς αυτές τις συνθήκες, οι λύσεις των διαφορικών εξισώσεων θα ήταν ακαθόριστες και δεν θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύσουν την πραγματική φυσική συμπεριφορά του συστήματος.

Συνοπτικά, οι οριακές συνθήκες είναι θεμελιώδεις για τη σωστή οριοθέτηση και τη μαθηματική επίλυση ενός προβλήματος προσομοίωσης, ενώ οι αναφορικές τιμές παρέχουν τις βασικές σταθερές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων. Σε αυτή τη περίπτωση ,ως αρχική συνθήκη, είναι η ταχύτητα εισόδου και ως οριακή συνθήκη, η πίεση εξόδου που ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση (Εικόνα 18). Με αυτό το τρόπο υπάρχει συνοχή στο πρόβλημα , χωρίς να αποκλίνει πολύ από την ισορροπία του φυσικού προβλήματος.



Εικόνα 18: Στιγμιότυπο από τις αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για την μοντελοποίηση είναι οι “Reference Values” γιατί η θερμοκρασία περιβάλλοντος τίθεται σε αυτή τη καρτέλα (Εικόνα 19). Επίσης, βασικές παράμετροι όπως το ιξώδες και η ατμοσφαιρική πίεση συμπεριλαμβάνονται σε αυτές τις τιμές, στις οποίες βασίζονται όλοι οι υπολογισμοί.

Εικόνα 19: Γενικές Τιμές(θερμοκρασία ,πυκνότητα κ.α.) του προβλήματος.

Το επόμενο σημαντικό βήμα μέσα στην καρτέλα “Setup”, είναι στη ενότητα “Solution” η υποκαρτέλα “ Methods” (Εικόνα 20).

Εικόνα 20: Η υποκαρτέλα των μεθόδων με τις οποίες θα λυθούν οι διαφορικές εξισώσεις.

Οι ρυθμίσεις σε αυτή την υποκαρτέλα είναι πολύπλοκες και κάθε διαφορετική επιλογή μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα. Η εταιρεία προτείνει ότι σε προβλήματα με ροή σε αγωγό είναι προτιμότερο να αφήνει ο χρήστης τις προκαθορισμένες επιλογές. Σε περίπτωση που η προσομοίωση δεν συγκλίνει, τότε αντί για “second order” μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επιλογή “first order” γνωρίζοντας ότι η λύση του προβλήματος θα αρχίσει να αποκλίνει από τη πραγματικότητα.

Πολύ σημαντική υποκαρτέλα είναι και η “Initializaton” όπου ορίζονται οι αρχικές τιμές που θα ξεκινήσει η προσομοίωση. Πολλές φορές οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές ώστε να μειωθεί ο χρόνος της προσομοίωσης αλλά επίσης το λογισμικό να συγκλίνει πιο εύκολα. Καλό είναι εκτός από τις απαραίτητες τιμές όπως η ταχύτητα εισόδου που μπορεί να αλλάζει ανάλογα το πρόβλημα, να χρησιμοποιούνται τιμές από βιβλιογραφία ή από τιμές που προτείνει το λογισμικό για το εκάστοτε απλούστερο πρόβλημα.

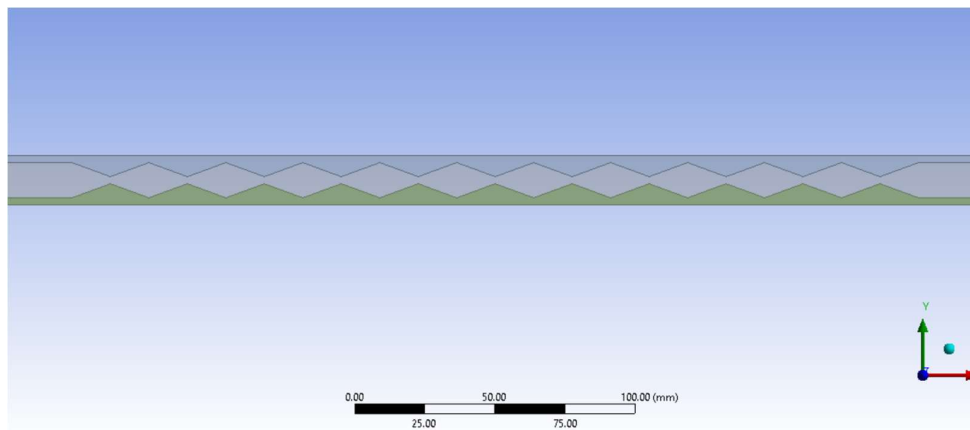
Τέλος, για να ξεκινήσει η προσομοίωση πρέπει να τεθούν τα όρια σύγκλισης και ο αριθμός των επαναλήψεων. Επειδή οι διαφορικές εξισώσεις έχουν προσδιοριστεί με το ανάπτυγμα Taylor, η λύση δεν θα είναι ακριβώς ίδια με την αναλυτική λύση οπότε θα χρειαστεί ένα αριθμητικό όριο που δείχνει ποια είναι η αποδεκτή διαφορά μεταξύ του αποτελέσματος και της ακριβούς λύσης. Σε προβλήματα ενέργειας όπως η μετάδοση θερμότητας το όριο σύγκλισης που προτείνεται είναι 10^{-6} .

3.2 Ροή σε αγωγό με αυλακώσεις

Ο βασικός στόχος αυτής της μελέτης είναι να αναλύσουμε τη διαφορά στη μετάδοση θερμότητας και απόδοσης σε μία ροή με λεία επιφάνεια και σε μία με αυλακώσεις. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η γεωμετρία του προβλήματος και θα αναφερθούν επιγραμματικά η κάθε επιλογή για τη προσομοίωση. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα.

3.2.1 Γεωμετρία

Η κύρια διαφορά μεταξύ της προηγούμενης γεωμετρίας και αυτής που παρουσιάζεται παρακάτω είναι ότι στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα υπάρχουν τριγωνικές διατομές. Με την προσθήκη αυτών των διατομών, η εσωτερική επιφάνεια του αγωγού, γίνεται τραχιά. Δημιουργούνται δηλαδή αυλακώσεις στο εσωτερικό του αγωγού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 21.

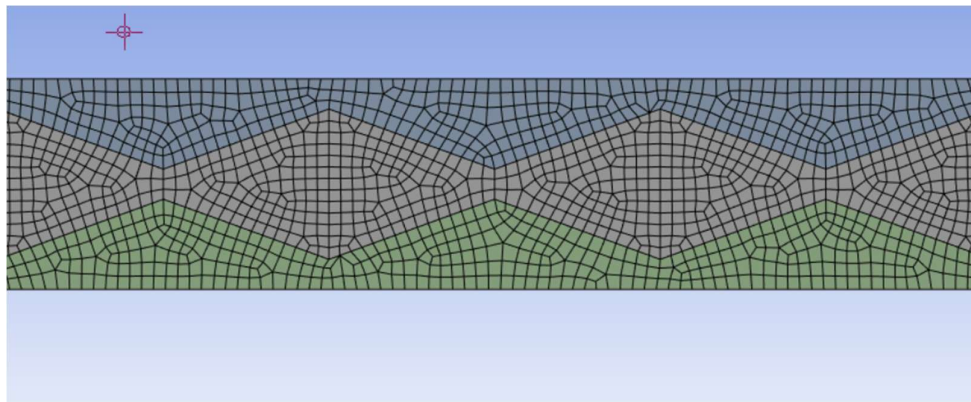


Εικόνα 21: Η γεωμετρία του σωλήνα με αυλακώσεις.

Η διάμετρος του σωλήνα είναι 12.5 mm και το μήκος είναι 300 mm . Στη γεωμετρία με τις αυλακώσεις δημιουργούνται 22 τριγωνικές διατομές οι οποίες έχουν ενσωματωθεί εσωτερικά του σωλήνα.

3.2.2 Διακριτοποίηση χωρίου(Mesh Generation)

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1.2 , δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό χωρίο που να είναι μέσα στα αποδεκτά όρια. Στη γεωμετρία με τις αυλακώσεις , επιλέχθηκαν για την διακριτοποίηση του χώρου, τριγωνικά και τετράπλευρα στοιχεία (triangular and quadrilateral elements) ώστε το πλέγμα να είναι όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφο. Το μέγεθος του κάθε στοιχείου είναι 1mm.



Εικόνα 22: Πλέγμα αγωγού με αυλακώσεις.

Στην Εικόνα 22 ,φαίνεται ότι το πλέγμα δεν είναι το ίδιο ομοιόμορφο με την απλή περίπτωση διότι υπάρχουν στοιχεία διαφορετικής γεωμετρίας. Επίσης το λογισμικό δίνει μεγαλύτερη έμφαση σε σημεία όπου υπάρχουν γωνίες καθώς σε αυτό το σημείο είναι πιο δύσκολο να βρεθεί κάποια αριθμητική λύση των διαφορικών εξισώσεων.

3.2.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες, Επιλογή φυσικού μοντέλου και solver

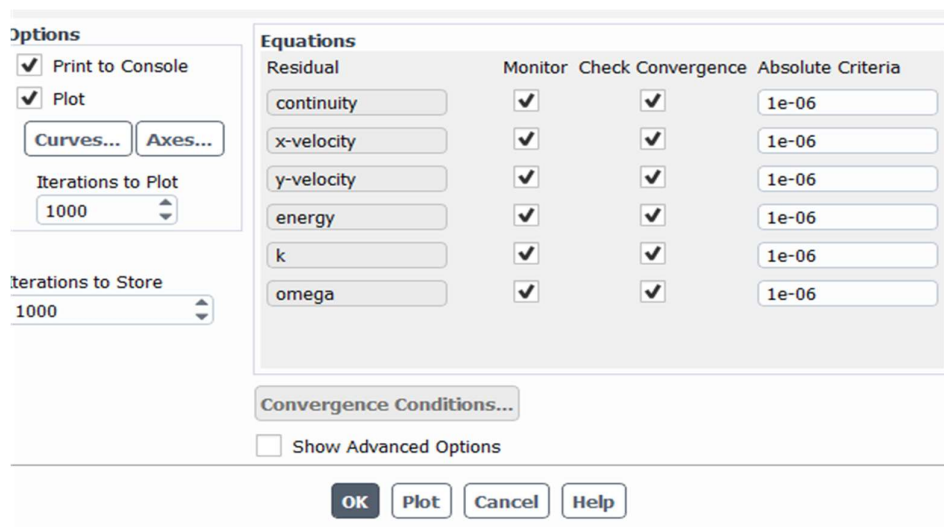
Παρόμοια με το προηγούμενο κεφάλαιο, τα φυσικά μοντέλα και οι αρχικές συνθήκες είναι ίδια. Κάτι το οποίο δεν αναφέρθηκε είναι οι δύο παράμετροι που πρέπει να οριοθετηθούν όταν χρησιμοποιείται κάποιο μοντέλο τύρβης. Αυτές είναι οι τυρβώδης κινητική ενέργεια(κ) και ο ρυθμός απόσβεσης(ω). Σε μια τυρβώδη ροή, το ρευστό κινείται χαοτικά με διακυμάνσεις στην ταχύτητα και την πίεση σε διάφορα σημεία της ροής. Η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι ουσιαστικά η μέση κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας που οφείλεται στις διακυμάνσεις της ταχύτητας σε μια τυρβώδη ροή. Ο ρυθμός απόσβεσης (ή ρυθμός διασποράς) της τυρβώδους κινητικής ενέργειας αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία η τυρβώδης κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω του ιξώδους του ρευστού. Ο ρυθμός απόσβεσης είναι μια κρίσιμη παράμετρος για την κατανόηση της δυναμικής της τυρβώδους ροής, καθώς η ενέργεια που δημιουργείται από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας τελικά καταλήγει να διασπαστεί σε θερμική ενέργεια.

Τα δεδομένα για τις αρχικές και τις οριακές τιμές, αντλήθηκαν από τη παρακάτω δημοσίευση[20]. Με αυτή τη διαδικασία, είναι εφικτή η αξιολόγηση της εγκυρότητας του προβλήματος καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με ένα αντίστοιχο πειραματικό παράδειγμα. Στο παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι συνθήκες που θέτονται και στις δύο περιπτώσεις.

Θερμοκρασία εισόδου(K)	300.3
Ταχύτητα εισόδου(m/s)	Μεταβαλλόμενη μεταβλητή (0.885,1.14,1.45,1.7765)
Πίεση εξόδου (bar)	1
Ροή θερμότητας στους τοίχους (W/m ²)	580
Ταχύτητα στο τοίχο(m/s)	0

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο έχει ένα αρχικό μήκος που δεν υπολογίζεται στο προαναφερόμενο μήκος (300 χιλιοστά) για αυτό η αρχική θερμοκρασία διαφέρει σε κάθε προσομοίωση ώστε στην είσοδο του σωλήνα να είναι η επιθυμητή θερμοκρασία (300.3 K). Αυτό έγινε καθώς η σύγκλιση των αποτελεσμάτων είναι πολύ καλύτερη με αυτό το τρόπο σύμφωνα με την Ansys.

Τέλος, στην υποκαρτέλα “Monitors” μέσω της επιλογής “Residual”, τέθηκε ως ανώτατο όριο σύγκλισης το 10^{-6} , σε όλες τις τιμές που πρέπει να συγκλίνουν, όπως φαίνεται στη Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Τα όρια σύγκλισης για κάθε ξεχωριστή παράμετρο.

Ως αριθμό επαναλήψεων σε περίπτωση μη σύγκλισης ορίστηκε το 3000.

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν τα αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις και θα συγκριθούν έτσι ώστε να αναλύσουμε την επιρροή της τραχιάς επιφάνειας. Επίσης θα παρουσιαστούν διαφορετικά γραφήματα για τη ταχύτητα και τη θερμοκρασία μέσα στον αγωγό καθώς αυξάνεται ή μειώνεται ο αριθμός Reynolds (αλλάζει η αρχική ταχύτητα) και θα αναλυθούν οι δυο βασικοί αδιάστατοι αριθμοί που κοιτάνε οι εταιρείες κατασκευής εναλλακτών θερμότητας όπως αναφέρθηκαν και στο κεφάλαιο 2.

4.1 Διάγραμμα ροής αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν ως εξής:

- Θα παρουσιαστούν τα προφίλ ταχύτητας, πίεσης και θερμοκρασίας για τον λείο αγωγό. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα γραφήματα θα παραθέτονται με την αναφερόμενη σειρά και κάθε γράφημα θα έχει τη δική του αιτιολόγηση. Η περίπτωση του λείου αγωγού αποτελεί τη κύρια αναφορά, για $Re=700$ και $q=580W/m^2$.
- Στη δεύτερη περίπτωση θα παρουσιαστούν τα προφίλ ταχύτητας, πίεσης και θερμοκρασίας για τον αγωγό με αυλακώσεις. Η περίπτωση αυτή συγκρίνεται με τον λείο αγωγό καθώς είναι στις ίδιες συνθήκες.
- Στη τρίτη και τέταρτη περίπτωση θα αναλυθούν τα προφίλ ταχύτητας, πίεσης και θερμοκρασίας για δύο διαφορετικές τιμές Re .

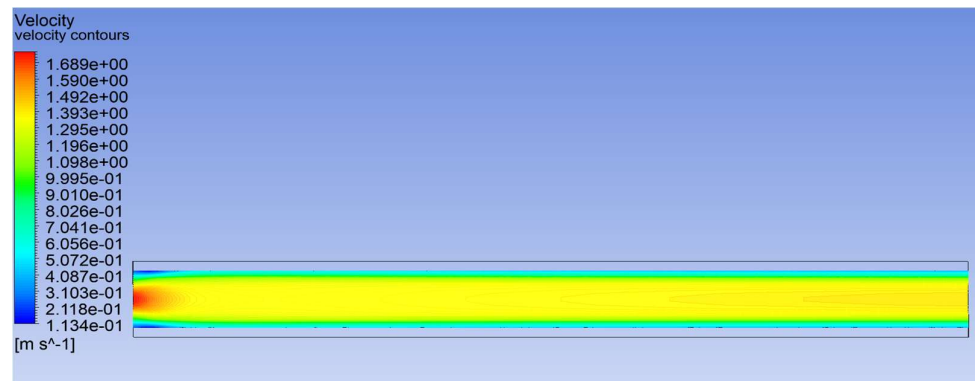
- Στο τέλος θα παρουσιαστούν γραφικά η σύγκριση για τη θερμοκρασία εξόδου και τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ λείου αγωγού και αγωγού με αυλακώσεις. Το τελευταίο γράφημα θα παρουσιάζει το βαθμό αποτελεσματικότητας ενός εναλλάκτη θερμότητας με βάσει τη πτώση πίεσης και τη μετάδοση θερμότητας.

4.2 Σύγκριση μεταξύ λείας επιφάνειας και επιφάνειας με αυλακώσεις

4.2.1 Λείος αγωγός (Re = 700)

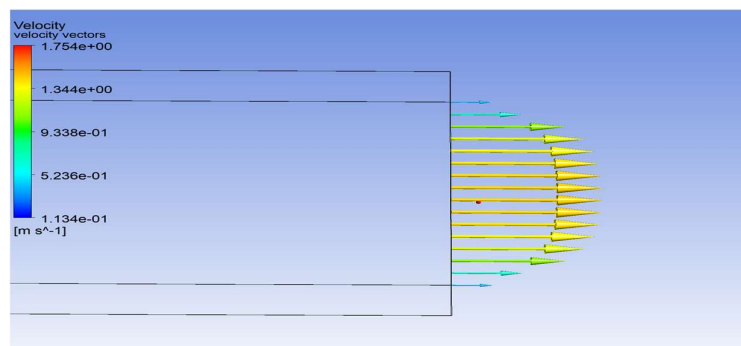
Για $Re = 700$ και ρυθμό θερμότητας 580W/m^2 , τα προφίλ ταχυτήτων, πίεσης και θερμοκρασίας για το λείο αγωγό παρουσιάζονται στην παρακάτω ενότητα.

Προφίλ ταχύτητας



Εικόνα 24: Το προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος του λείου αγωγού.

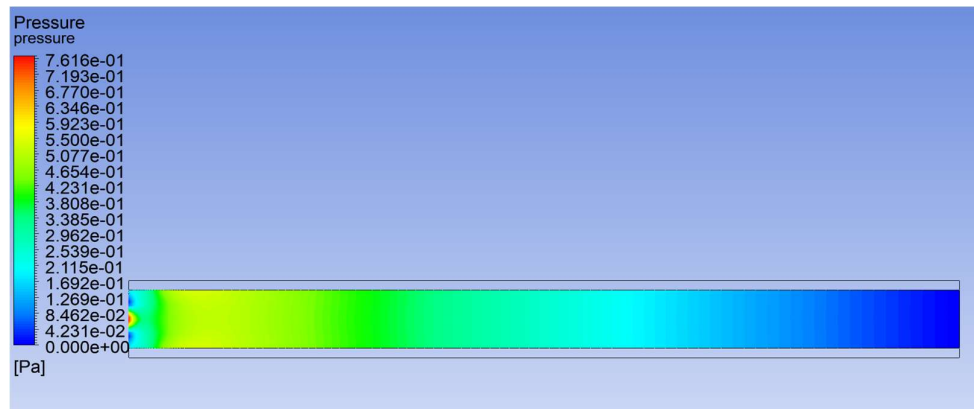
Όπως φαίνεται, το ρευστό όσο προχωράμε κατά μήκος του αγωγού, διανέμεται σε όλο το ύψος του αγωγού από τοίχωμα σε τοίχωμα. Στην εικόνα 25 παρουσιάζεται η κατανομή της ως διάνυσμα στην διάμετρο του αγωγού. Επίσης η κατανομή αυτή, δείχνει ότι η μοντελοποίηση εκ πρώτης όψεως, είναι σωστή καθώς το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο.



Εικόνα 25: Το ανεπτυγμένο προφίλ ταχύτητας στο τέλος του αγωγού.

Το παραπάνω προφίλ είναι από τα πιο βασικά προφίλ στη μελέτη μηχανικής ρευστών και ονομάζεται Hagen-Poiseuille. Σε μία ροή μέσα σε κύλινδρο με χαμηλή ταχύτητα, το αναμενόμενο προφίλ της ταχύτητας είναι το παραπάνω. Με αυτό το τρόπο μπορεί και να αξιολογηθεί εκ πρώτης όψεως, ότι η προσομοίωση τρέχει σωστά. Η ταχύτητα έχει αναπτυχθεί πλήρως και στο κέντρο του σωλήνα είναι μέγιστη, ενώ στα άκρα μικρότερη λόγω της αντίστασης που ασκεί το τοίχωμα στα μόρια του αέρα.

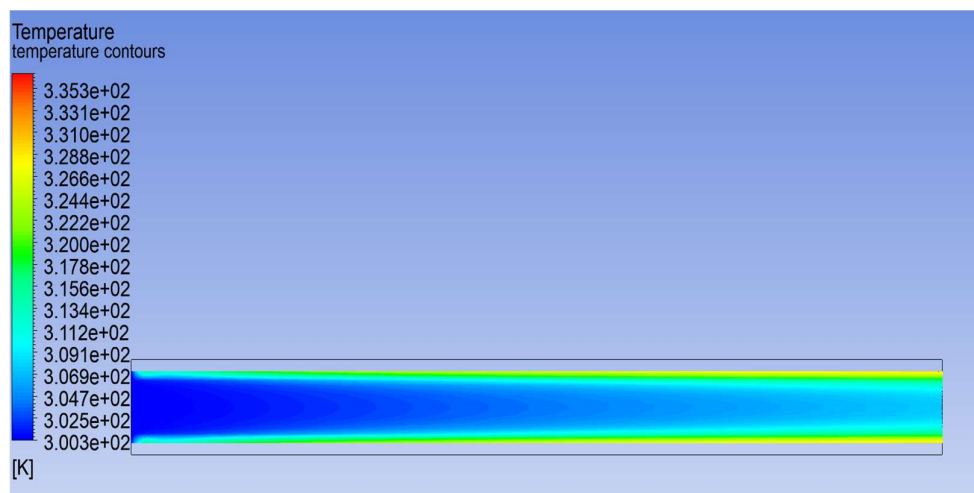
Προφίλ πίεσης



Εικόνα 26: Προφίλ πίεσης κατά μήκος του λείου αγωγού.

Όπως φαίνεται στο προφίλ της πίεσης, κατά μήκος του αγωγού η πίεση μειώνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω των διατμητικών τάσεων που δημιουργούνται μεταξύ των θερμαινόμενων τοιχωμάτων και του ρευστού. Η πίεση στην έξοδο του σωλήνα είναι ίση με την ατμοσφαιρική όπως και ορίσαμε (η κλίμακα στα αριστερά του γραφήματος είναι η διαφορά μεταξύ της πίεσης εσωτερικά του αγωγού σε σχέση με την ατμοσφαιρική). Ο ρυθμός πτώσης πίεσης εξαρτάται και από τη ταχύτητα του ρευστού αλλά και από τις γεωμετρικές ιδιότητες του σωλήνα. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μόνο το προφίλ πίεσης για τους αγωγούς με αυλακώσεις.

Προφίλ θερμοκρασίας

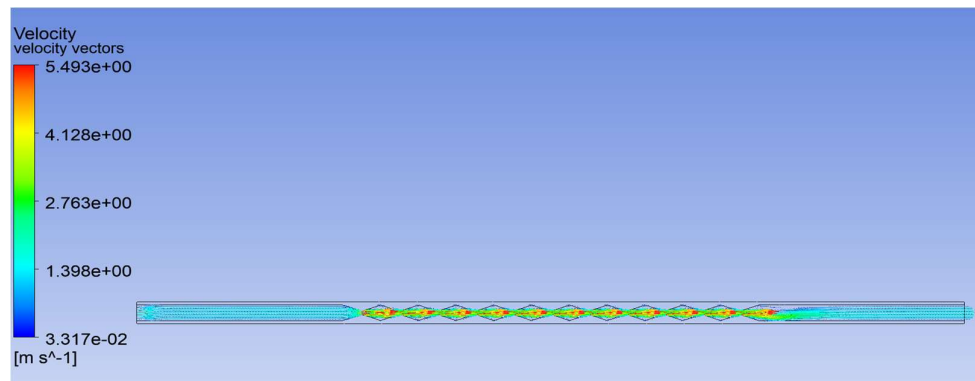


Εικόνα 27: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος λείου αγωγού.

Η θερμοκρασία του ρευστού κατά μήκος του αγωγού αυξάνεται καθώς ο ρυθμός θερμότητας παραμένει σταθερός. Το ρευστό ζεσταίνεται λόγω της ανάμειξης μεταξύ κρύων και ζεστών ροών αλλά και λόγω της ταχύτητας. Είναι λογικό όταν ένα ρευστό εισέρχεται με μία θερμοκρασία και δέχεται από μία σταθερή πηγή μεταφορά θερμότητας, να ανεβαίνει η θερμοκρασία του με την πάροδο του χρόνου. Επίσης η μετάδοση θερμότητας γίνεται στο εξωτερικό τοίχωμα για αυτό σε εκείνο το σημείο είναι η υψηλότερη θερμοκρασία. Λόγω της μετάδοσης θερμότητας, η θερμοκρασία καθ' ύψος του αγωγού ξεκινάει με τη μεγαλύτερη φτάνοντας στο κέντρο που είναι η πιο χαμηλή θερμοκρασία.

4.2.2 Αγωγός με αυλακώσεις ($Re=700$)

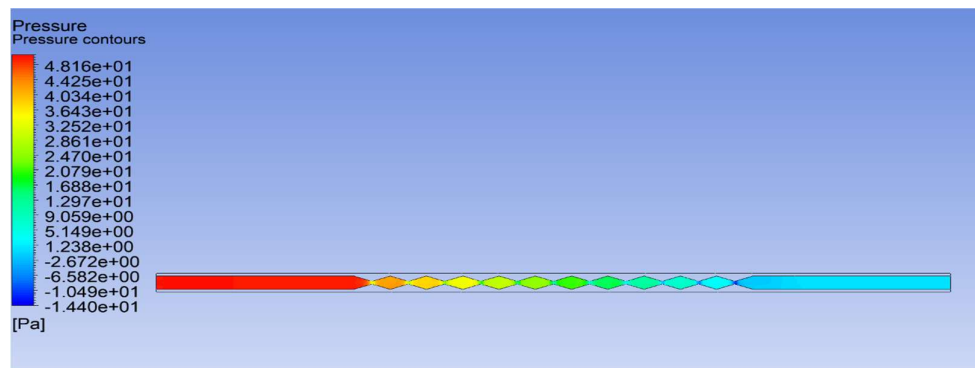
Προφίλ ταχύτητας



Εικόνα 28: Προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος αγωγού με αυλακώσεις ($Re = 700$).

Είναι φανερό ότι λόγω της τριγωνικής διατομής το ρευστό αυξάνει τη ταχύτητα του όσο μικραίνει το πέρασμα. Η αυξημένη ταχύτητα σε συνδυασμό με τις αυλακώσεις επιταχύνει τη μετάβαση του ρευστού από στρωτή σε τυρβώδη, κάτι το οποίο αυξάνει τη μετάδοση θερμότητας. Συνεπώς η τυρβώδης ροή και η επιταχυνόμενη ταχύτητα είναι δύο χαρακτηριστικά που συντελούν στη αύξηση της μετάδοσης θερμότητας όπως παρατηρούμε όχι μόνο στη θεωρία αλλά και στη προσομοίωση.

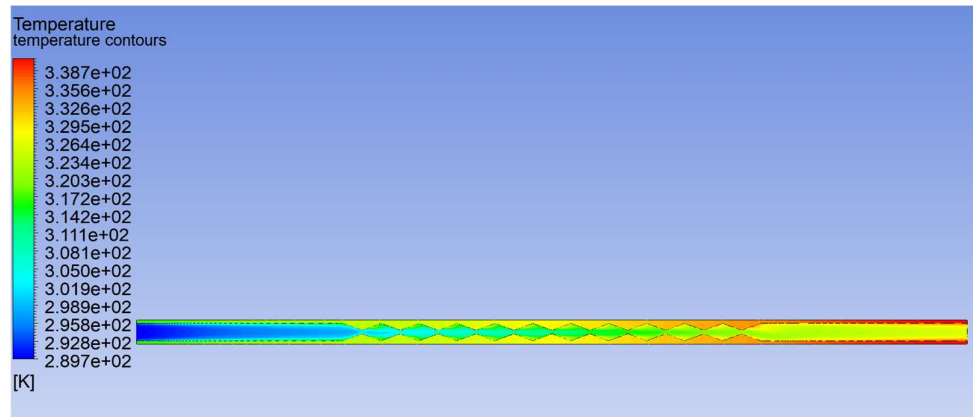
Προφίλ πίεσης



Εικόνα 29: Προφίλ πίεσης στον αγωγό με αυλακώσεις ($Re = 700$).

Στην είσοδο του σωλήνα, η πίεση είναι υψηλή. Καθώς το ρευστό αρχίζει να ρέει κατά μήκος του σωλήνα, οι αυλακώσεις προκαλούν τοπικές αναταράξεις και αυξάνουν την τριβή. Καθώς το ρευστό προχωρά, η πίεση μειώνεται λόγω της συνεχιζόμενης τριβής και των τοπικών απωλειών που προκαλούν οι αυλακώσεις. Στην έξοδο του σωλήνα, η πίεση είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με την είσοδο. Οι αυλακώσεις έχουν προκαλέσει μια συνολική αύξηση της τριβής και μια μεγαλύτερη πτώση πίεσης σε σχέση με έναν λείο σωλήνα. Ένας ακόμη λόγος είναι ότι το ρευστό συμπιέζεται καθώς μειώνεται η διατομή και υπάρχει μεγάλη πτώση σε αυτά τα σημεία. Αυτό το φαινόμενο αποκαλείται Venturi effect και βασίζεται στο θεώρημα Bernoulli, όπου ένα ρευστό όταν μειώνεται η ταχύτητά του, η πίεση του αυξάνεται και ανάποδα. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξηγούνται τα αποτελέσματα βασιζόμενα σε γενικές θεωρίες και αρχές της ρευστομηχανικής ώστε να εξακριβωθεί το μοντέλο αλλά και να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση.

Προφίλ θερμοκρασίας



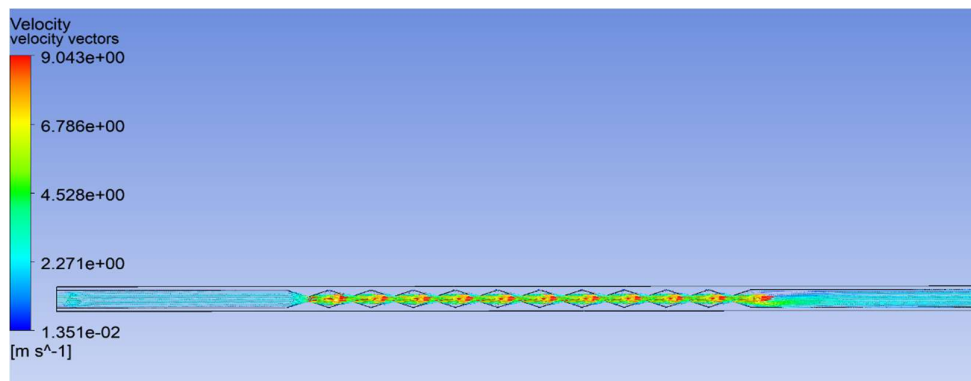
Εικόνα 30 : Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος αγωγού με αυλακώσεις ($Re = 700$).

Συγκρίνοντας το προφίλ θερμοκρασιών στο λείο αγωγό με αυτή τη περίπτωση, παρατηρείται μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία, κάτι που σημαίνει ότι το ρευστό έχει μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας στο λείο αγωγό είναι 336 K, ενώ στον αγωγό με αυλακώσεις είναι 339 K. Επιπλέον, η κατανομή της θερμοκρασίας στη δεύτερη περίπτωση είναι πιο ομοιόμορφη και κατά μέσο όρο υψηλότερη σε όλο το ύψος τους αγωγού, καθώς στρόβιλοι λόγω της τυρβώδους ροής αναμειγνύουν ψυχρά με ζεστά ρεύματα και έτσι η θερμοκρασία αυξάνεται. Ένας ακόμη λόγος, είναι ότι μέσω της τυρβώδους μεγάλώνει η επιφάνεια επαφής μεταξύ των θερμαινόμενων τοιχωμάτων και του ρευστού.

Στη συνέχεια παραθέτονται τα αποτελέσματα για $Re=1150$. Η τιμή της πηγής θερμότητας παραμένει ίδια.

4.2.3 Αγωγός με αυλακώσεις ($Re=1150$)

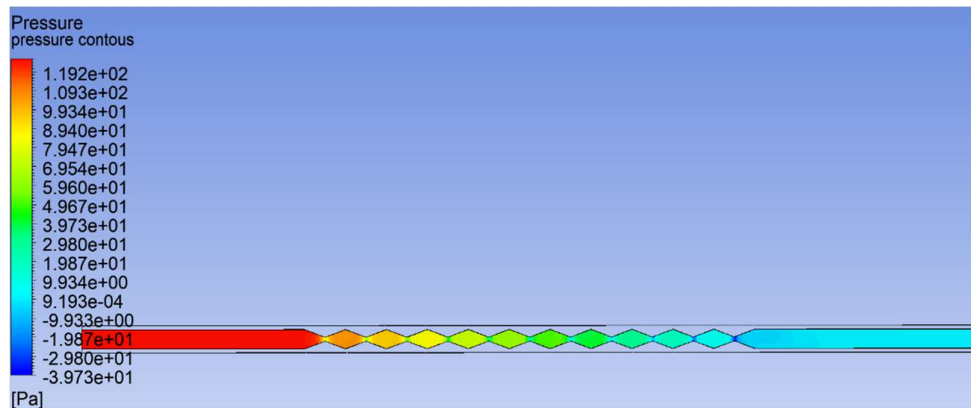
Προφίλ ταχύτητας



Εικόνα 31: Προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος αγωγού με αυλακώσεις ($Re=1150$).

Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ρευστού (καθώς αλλάζουμε το Re), τόσο πιο γρήγορα η ροή γίνεται τυρβώδης. Συγκρίνοντας τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας με τις προηγούμενες περιπτώσεις, παρατηρείται ότι σε αυτή τη περίπτωση η ταχύτητα φτάνει σε σχεδόν διπλάσιες τιμές.

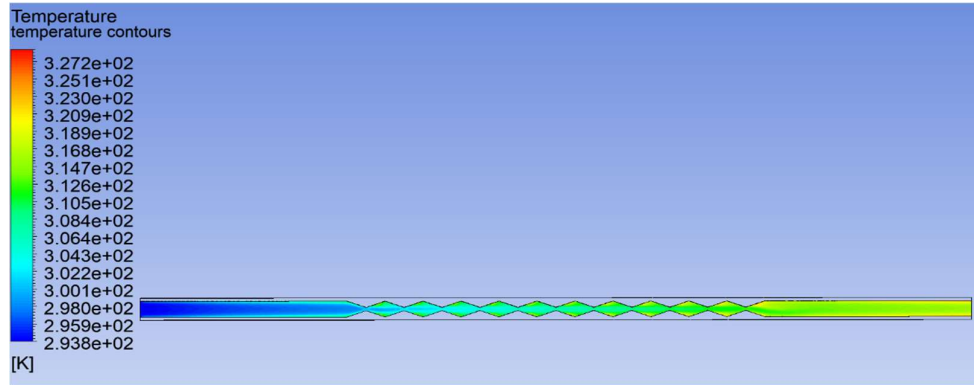
Προφίλ πίεσης



Εικόνα 32: Προφίλ πίεσης στον αγωγό με αυλακώσεις ($Re=1150$).

Το προφίλ πίεσης είναι αρκετά παρόμοιο με τη προηγούμενη περίπτωση για τον αγωγό με αυλακώσεις. Το εύρος και οι τιμές είναι διαφορετικές λόγω της διαφοράς ταχύτητας που εξηγήθηκε προηγουμένως. Συγκεκριμένα, σε αυτή τη περίπτωση η διαφορά της πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι πολύ μεγαλύτερη, γεγονός που είναι λογικό καθώς με την αύξηση της ταχύτητας αυξάνονται οι διατμητικές τάσεις και η τριβή δημιουργώντας μεγαλύτερη πτώση πίεσης.

Προφίλ θερμοκρασίας



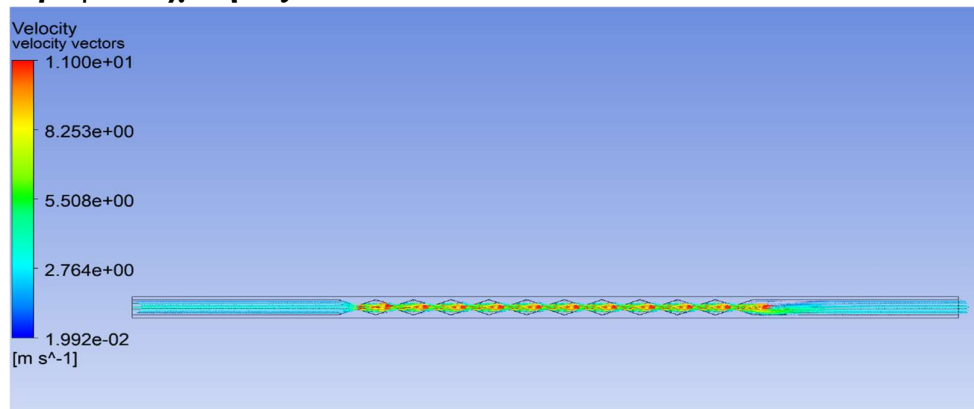
Εικόνα 33: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος αγωγού με αυλακώσεις (Re=1150).

Η μέγιστη θερμοκρασία σε αυτή τη περίπτωση είναι μικρότερη από ότι στη προηγούμενη. Παρόλο που αυτό δημιουργεί την εντύπωση ότι κάτι δεν πάει σωστά, το αποτέλεσμα ελέγχοντας παρόμοιες μελέτες είναι αντίστοιχο. Αυτό συμβαίνει καθώς το ρευστό δεν έχει τον απαιτούμενο χρόνο μέσα στο σωλήνα ώστε να ζεσταθεί και ενώ η ροή του είναι πιο τυρβώδης και η μεταφορά θερμότητας είναι καλύτερη, το ρευστό δεν καταφέρνει να φτάσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό, μπορεί να βελτιωθεί με μεγαλύτερου μήκους σωλήνες ή με διπλή περιστροφή ώστε το ρευστό να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Η διαπίστωση αυτή δείχνει το πόσο χρήσιμο μπορεί να είναι ένα αξιόπιστο μοντέλο για τη κατασκευή του κατάλληλου εξοπλισμού, ανάλογα την εφαρμογή. Εάν ο στόχος είναι να αποκτήσει το ρευστό συγκεκριμένη θερμοκρασία και να διαστασιολογηθεί ο εναλλάκτης θερμότητας, τότε ένα μοντέλο σαν αυτό δίνει κατευθυντήριες γραμμές τόσο στη σχεδίαση αλλά και στη λειτουργία του. Στη συνέχεια παραθέτονται τα αποτελέσματα για Re=1400. Η τιμή της πηγής θερμότητας παραμένει ίδια.

4.2.4 Αγωγός με αυλακώσεις (Re=1400)

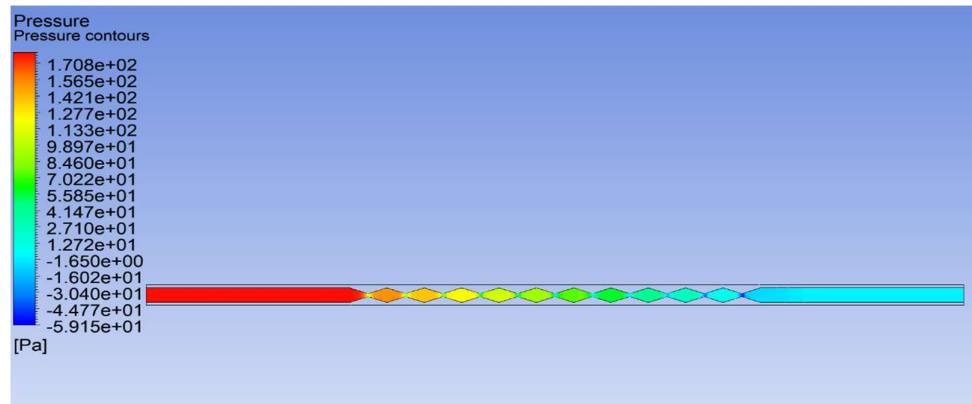
Προφίλ ταχύτητας



Εικόνα 34: Προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος αγωγού με αυλακώσεις (Re=1400).

Η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται ακόμα παραπάνω και το προφίλ παραμένει παρόμοιο με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτή τη περίπτωση η ροή είναι ήδη τυρβώδης από την είσοδο του ρευστού όμως δεν επηρεάζει το προφίλ της ταχύτητας.

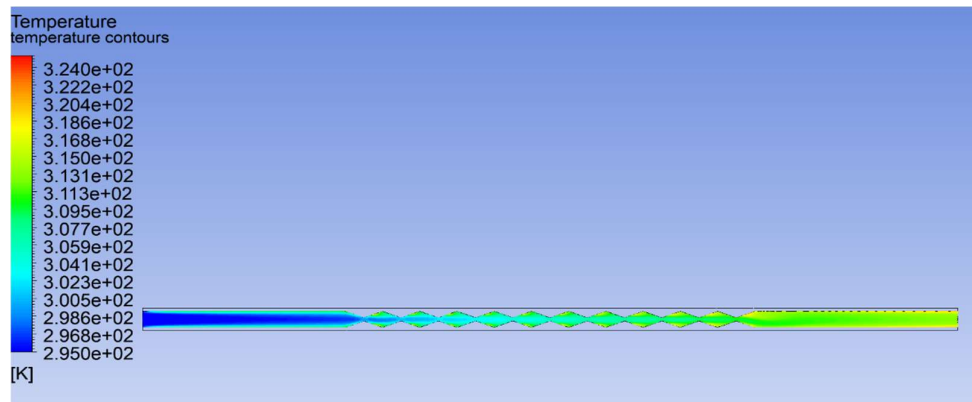
Προφίλ πίεσης



Εικόνα 35: Προφίλ πίεσης στον αγωγό με αυλακώσεις (Re=1400).

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, το προφίλ πίεσης είναι παρόμοιο. Για τον συγκεκριμένο αριθμό Re, η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι ακόμα μεγαλύτερη και μάλιστα σε ορισμένα σημεία, όπου η διατομή μειώνεται, η πτώση πίεσης είναι κοντά στα 60 Pa πιο χαμηλή από την ατμοσφαιρική.

Προφίλ θερμοκρασίας

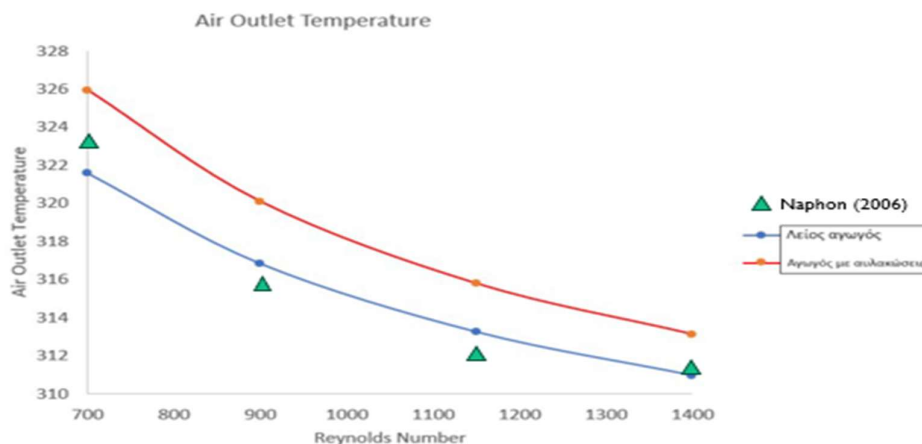


Εικόνα 36: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος αγωγού με αυλακώσεις (Re=1400).

Στη περίπτωση της θερμοκρασίας με αριθμό Re=1150, παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη θερμοκρασία του ρευστού μειώνεται λόγω του μειωμένου χρόνου παραμονής του ρευστού στο σωλήνα. Το ίδιο συμβαίνει και σε αυτή τη περίπτωση επιβεβαιώνοντας έτσι το προηγούμενο επιχείρημα. Κάτι που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στα γραφήματα η μικρότερη τιμή που αναγράφεται δεν είναι ίδια γιατί η κλίμακα στη κάθε περίπτωση είναι διαφορετική, ωστόσο η θερμοκρασία εισόδου ελέγχτηκε και είναι ίδια.

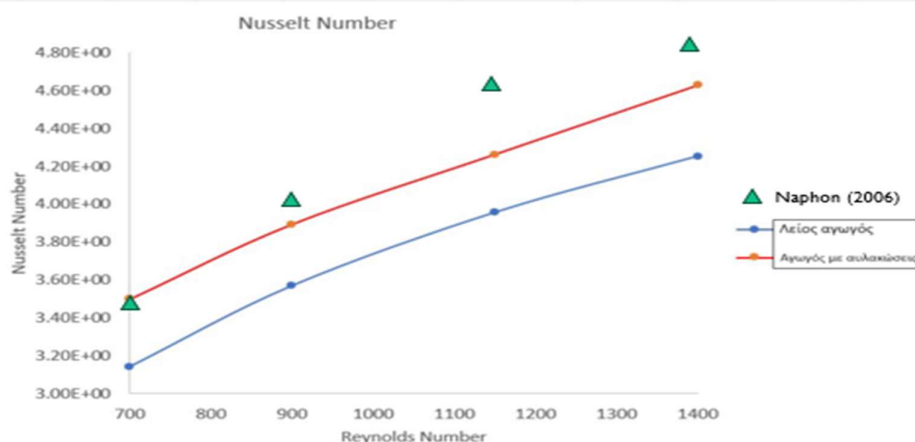
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Προτού αναλυθούν τα συμπεράσματα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές που παραθέτονται από κάτω είναι η μέση τιμή κατά μήκος του αγωγού. Για αυτό υπάρχει και μια διαφορά με τα πειράματα.



Εικόνα 37: Σύγκριση θερμοκρασίας εξόδου αέρα μεταξύ λείου και αγωγού με αυλακώσεις.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του λείου και του αγωγού με αυλακώσεις, παρατηρείται σαφής βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας λόγω της προσθήκης των κυματώσεων. Η θερμοκρασία εξόδου και ο αριθμός Nusselt είναι υψηλότερα για τον αγωγό με αυλακώσεις για όλες τις τιμές του αριθμού Reynolds, όπως φαίνεται στην Εικόνα 37 και στην Εικόνα 38. Επιπλέον, με την αύξηση του αριθμού Reynolds, η θερμοκρασία εξόδου και για τις δύο γεωμετρίες μειώνεται, καθώς ο αέρας που κινείται ταχύτερα έχει μικρότερο χρονικό διάστημα να θερμανθεί από τα τοιχώματα όπως προαναφέρθηκε. Ωστόσο, ο αριθμός Nusselt αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Αυτό συμβαίνει επειδή ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι υψηλότερος σε μεγαλύτερες ταχύτητες λόγω μεγαλύτερης αναταραχής (Τυρβώδης ροή).



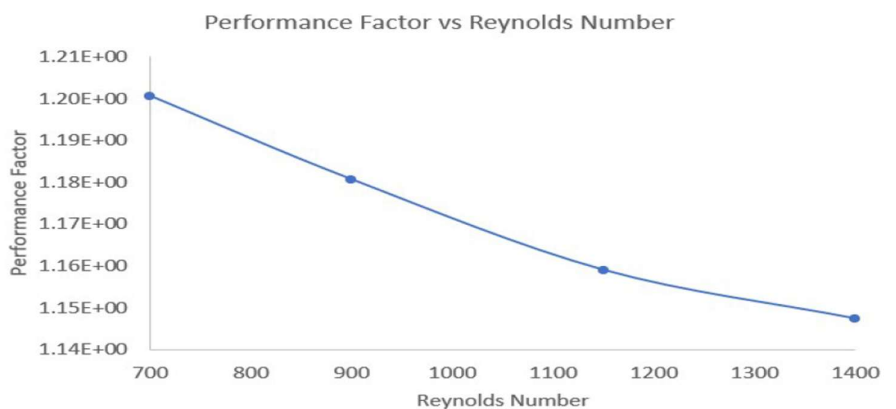
Εικόνα 38: Σύγκριση μετάδοσης θερμότητας μέσω του Nu για λείο και αγωγό με αυλακώσεις.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η προσθήκη αυλακώσεων δημιουργεί δευτερεύουσα ροή, η οποία συμβάλλει στην ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας μέσω αυξημένης ανάμιξης του ρευστού κοντά στα τοιχώματα. Αυτή η δευτερεύουσα ροή μπορεί να βελτιώσει την ομοιομορφία της θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα, μειώνοντας έτσι τις θερμοκρασιακές διαφορές που μπορούν να προκαλέσουν θερμική καταπόνηση στα υλικά.

Το μειονέκτημα της προσθήκης των αυλακώσεων είναι η αύξηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος του σωλήνα, η οποία φτάνει τα 150 Pa για τον μεγαλύτερο αριθμό Reynolds. Αυτή η πτώση πίεσης μπορεί να προκαλέσει αύξηση στην απαίτηση ενέργειας για την άντληση του ρευστού μέσω του σωλήνα, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Παρόλα αυτά, η βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας μπορεί να αντισταθμίσει αυτό το μειονέκτημα, ιδίως σε εφαρμογές όπου η αποδοτικότητα της μεταφοράς θερμότητας είναι κρίσιμη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα της παρακάτω δημοσίευσης[20] είναι αρκετά κοντά στην προσομοίωση αυτή. Το γεγονός αυτό δείχνει την ρεαλιστικότητα του μοντέλου σε τέτοιου είδους μελέτες.

Σαν τελικό συμπέρασμα, εξετάζεται ο δείκτης αποτελεσματικότητας που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.



Εικόνα 39: Ανάλυση αποτελεσματικότητας με βάση τη πτώση πίεσης και τη μεταφορά θερμότητας στον αγωγό με αυλακώσεις.

Για όλους τους 4 αριθμούς Reynolds, ο συντελεστής απόδοσης είναι μεγαλύτερος από 1, γεγονός που δικαιολογεί τη χρήση κυματοειδών επιφανειών. Επιπλέον, ο συντελεστής απόδοσης μειώνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Αυτό συμβαίνει επειδή παρόλο που αυξάνεται ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, η υψηλότερη ταχύτητα ροής και η τριβή, αυξάνουν την πτώση πίεσης. Επομένως, η χρήση κυματοειδών επιφανειών είναι μεγιστοποιημένη σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds. Παρ'όλα αυτά, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν η σχέση κόστους-απόδοσης, καθώς και οι απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής για την τελική επιλογή μεταξύ των δύο σχεδιασμών.

Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Στην συνέχεια προτείνονται επτά βασικές εναλλακτικές που εντάσσουν παράγοντες της πραγματικότητας, όπως τη σχέση κόστους-οφέλους μιας εγκατάστασης εναλλακτών θερμότητας ή τις διακυμάνσεις στη ροή, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μελέτης που προηγήθηκε. Συγκεκριμένα:

1. **Μελέτη Δυναμικών Φαινομένων (Transient Analysis):** Η επέκταση της ανάλυσης για να συμπεριληφθούν και δυναμικά φαινόμενα, όπου οι θερμοκρασίες και οι ταχύτητες ροής αλλάζουν με τον χρόνο είναι μία από τις πιο ενδιαφέρουσες προτάσεις. Αυτό μπορεί να παρέχει καλύτερη κατανόηση της μεταφοράς θερμότητας σε μη σταθερές συνθήκες λειτουργίας, όπως σε περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευστών μεταβάλλονται. Η δυναμική ανάλυση μπορεί επίσης να αποκαλύψει πώς αντιδρούν τα συστήματα σε ξαφνικές αλλαγές στη ροή ή τη θερμοκρασία, κάτι που είναι κρίσιμο για την ασφάλεια και την αποδοτικότητα των εναλλακτών θερμότητας.
2. **Επικύρωση Πειραμάτων:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ANSYS με πειραματικά δεδομένα για να επικυρωθούν τα μοντέλα και οι προσομοιώσεις. Η πειραματική επαλήθευση μπορεί να προσφέρει επιπλέον ακρίβεια στα συμπεράσματα, καθώς και να εντοπίσει τυχόν ασυμφωνίες ή παραδοχές στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, η πειραματική εργασία μπορεί να παράσχει δεδομένα για την επίδραση μη μετρήσιμων παραγόντων και να βελτιώσει την κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς των συστημάτων.
3. **Παράμετροι Ροής και Θερμότητας:** Η εξέταση της αποτελεσματικότητας υπό την επίδραση διαφορετικών παραμέτρων, όπως οι διακυμάνσεις στη ροή (π.χ. μεταβατική ροή), διαφορετικές θερμικές ιδιότητες των υλικών, και ποικιλία στις γεωμετρικές διαμορφώσεις των κυματοειδών σωλήνων. Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων αυτών μπορεί να αποκαλύψει κρίσιμες πληροφορίες για τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων και να ενισχύσει την κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας και ροής σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.
4. **Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού:** Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των κυματοειδών επιφανειών μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη. Μειώνοντας το ύψος της κυμάτωσης, μπορεί να επιτευχθεί μια καλύτερη ισορροπία μεταξύ της ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας και της ελαχιστοποίησης της πτώσης πίεσης, κάτι που είναι κρίσιμο για την απόδοση των θερμικών συστημάτων. Επιπλέον, η βελτίωση στην

απόδοση μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας και σε βελτιωμένη λειτουργία του συστήματος προσφέροντας μια πιο αποδοτική και οικονομική λύση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπου η διατήρηση της ενεργειακής απόδοσης είναι σημαντική. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι ή οι αλγόριθμοι σμήνους σωματιδίων, για την αναζήτηση των βέλτιστων γεωμετρικών παραμέτρων που μεγιστοποιούν την απόδοση ενώ μειώνουν τις απώλειες ενέργειας.

5. **Διερεύνηση Υλικών:** Χρήση νέων υλικών με υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα ή υλικά με ειδικές ιδιότητες, όπως υδρόφοβες επιφάνειες, για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας και την ελαχιστοποίηση της αντίστασης στη ροή. Η έρευνα νέων υλικών μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτικούς και ανθεκτικούς εναλλάκτες θερμότητας, με καλύτερη αντοχή στη διάβρωση και τη φθορά, επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής των συστημάτων.
6. **Επίδραση Σύνθετων Ρευστών:** Επίδραση της ροής σύνθετων ρευστών, όπως μη-Νευτωνικών ρευστών, και την αλληλεπίδρασή τους με τις κυματοειδείς επιφάνειες. Αυτό μπορεί να ανοίξει νέες προοπτικές για εφαρμογές σε βιομηχανίες όπως η χημική και φαρμακευτική βιομηχανία. Η μελέτη της συμπεριφοράς των μη-Νευτωνικών ρευστών μπορεί να αποκαλύψει νέες δυνατότητες βελτίωσης της απόδοσης των συστημάτων σε ειδικές εφαρμογές.
7. **Ανάλυση Κόστους-Οφέλους:** Ανάλυση κόστους-οφέλους για να αξιολογηθεί η οικονομική βιωσιμότητα της χρήσης κυματοειδών σωλήνων σε σχέση με τους λείους σωλήνες, λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές απαιτήσεις και το κόστος κατασκευής. Η ανάλυση αυτή μπορεί να βοηθήσει στην απόφαση επιλογής του κατάλληλου σχεδιασμού για βιομηχανικές εφαρμογές, εξισορροπώντας την αρχική επένδυση με την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μακροχρόνια απόδοση.

Παράρτημα Α': Διαφορικές εξισώσεις

Το λογισμικό ANSYS στο πλαίσιο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD), λύνει αυτόματα ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την μεταφορά θερμότητας και την ροή των ρευστών. Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν:

1. Εξίσωση συνέχειας (Διατήρηση μάζας)
2. Εξισώσεις Navier-Stokes (Διατήρηση Ορμής):
3. Εξίσωση ενέργειας
4. Εξισώσεις μοντέλων τύρβης

Συγκεκριμένα:

Εξίσωση συνέχειας (Διατήρηση μάζας) :

Η εξίσωση συνέχειας περιγράφει την διατήρηση της μάζας σε ένα σύστημα ρευστών ή στερεών στο οποίο υπάρχει μεταφορά θερμότητας. Σε συνδυασμό με τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής (Navier-Stokes) και ενέργειας, περιγράφεται πλήρως ένα φαινόμενο μετάδοσης θερμότητας.

Γενική μορφή της εξίσωσης:

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

Όπου: ρ : Η πυκνότητα του ρευστού σε (kg/m^3) , $\frac{\partial \rho}{\partial t}$: Η χρονική μεταβολή της πυκνότητας , \vec{u} : Το διανυσματικό πεδίο της ταχύτητας σε (m/s) και $\nabla \cdot (\rho \vec{u})$: Ο ρυθμός αλλαγής της μάζας λόγω κίνησης.

Η εξίσωση συνέχειας (διατήρηση της μάζας) σε ένα φαινόμενο μετάδοσης θερμότητας , εξασφαλίζει ότι η εισερχόμενη και η εξερχόμενη μάζα από έναν όγκο ελέγχου συνδέεται με τις ενεργειακές ισορροπίες. Αποτελεί επίσης θεμελιώδη βάση για την διατύπωση της εξίσωσης ενέργειας.

Εξισώσεις Navier-Stokes (Διατήρηση Ορμής):

Για ασυμπίεστη ροή (incompressible flow) με σταθερή πυκνότητα και ιξώδες στη μορφή συναγωγής:

$$\frac{Du}{Dt} = \nu \nabla^2 u - \nabla \frac{p}{\rho} + \frac{1}{\rho} f$$

Όπου: ρ : Πυκνότητα (kg/m^3), p : Πίεση (Pa), ν : Δυναμικό ιξώδες ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) προς πυκνότητα, u : Διάνυσμα ταχύτητας (m/s), f : Δυνάμεις σώματος (π.χ. βαρύτητα)

Ανάλογα το πρόβλημα, διαφορετικές υποθέσεις μπορούν να γίνουν ώστε να απλοποιηθεί παραπάνω η εξίσωση. Στην περίπτωση ροής γύρω από έναν σωλήνα, οι εξισώσεις Navier-Stokes παρέχουν την κατανομή της ταχύτητας (u) στο πεδίο ροής. Αυτή η κατανομή επηρεάζει τον τρόπο που μεταφέρεται η θερμότητα (μέσω συναγωγής) από ή προς τον σωλήνα, συνδυαζόμενη με την εξίσωση ενέργειας.

Εξίσωση Διατήρησης Ενέργειας:

Για σταθερή κατάσταση (steady-state heat transfer):

$$k \cdot \nabla^2 T - T \cdot \nabla T + Q = 0$$

Όπου: T : Θερμοκρασία (K), Q : είναι η δημιουργία θερμότητας (μέσω συναγωγής στη περίπτωση μας), k : Θερμική αγωγιμότητα ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

Η εξίσωση διατήρησης ενέργειας περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας σε ένα ρευστό. Συνδυάζει τη μεταφορά θερμότητας λόγω:

- αγωγής ($k \cdot \nabla^2 T$), και
- συναγωγής ($-T \cdot \nabla T$)

με τη θερμική ενέργεια που μεταφέρεται λόγω της κίνησης του ρευστού. Αυτή η εξίσωση είναι απαραίτητη για την ανάλυση φαινομένων όπως η ψύξη ή η θέρμανση ενός ρευστού γύρω από έναν σωλήνα.

Εξισώσεις μοντέλων τύρβης (σε περίπτωση που υπάρχει τυρβώδης ροή στο σύστημα):

Η τυρβώδης ροή περιγράφεται από τις εξισώσεις RANS που συνδυάζονται με τα κατάλληλα μοντέλα τύρβης ανάλογα την κάθε περίπτωση. Οι εξισώσεις RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) αφορούν τις εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής που περιγράφηκαν παραπάνω.

Τα μοντέλα τύρβης για ροή σε αγωγούς αφορούν τα μοντέλα:

- k-ε
- k-ω
- SST (k-ω)

Αναλυτικά: **Το μοντέλο k-ε** χρησιμοποιείται ευρέως για προβλήματα ελεύθερων ροών, αλλά η ακρίβεια του είναι περιορισμένη σε ροές κοντά σε τοιχώματα, όπως για παράδειγμα μέσα σε αγωγούς. Σε αυτό το μοντέλο η τυρβώδης ροή

περιγράφεται από την τυρβώδης κινητική ενέργεια “ k ” και τον ρυθμό διάχυσης της κινητικής ενέργειας “ ε ”.

Συγκεκριμένα οι εξισώσεις για:

- $k : \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = P_k - \rho \varepsilon + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right]$
Όπου P_k η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας.
- $\varepsilon : \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{u}) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right]$
- $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, το ιξώδες της τύρβης.

Το μοντέλο k-ω : σε αντίθεση με το μοντέλο k-ε , έχει ρυθμό ειδικής διασποράς τύρβης “ω” και αναλύει με μεγαλύτερη ακρίβεια ένα πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας κοντά σε τοιχώματα και σε περιοχές οριακών στρωμάτων, όπως μέσα σε έναν αγωγό. Συγκεκριμένα :

- $k : \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = P_k - \beta \rho k \omega + \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right)$
- $\omega : \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \vec{u}) = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \nabla \omega \right)$
Όπου “α” και “β” είναι εμπειρικά καθορισμένες σταθερές που σχετίζονται με την εξασθένηση της διασποράς “ω” και την συμπεριφορά της τύρβης.
- $\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$, το ιξώδες της τύρβης.

Τέλος, έχουμε **το μοντέλο SST (Shear Stress Transport)** , που αποτελεί έναν συνδυασμό των δύο προηγούμενων μοντέλων που αναφέρθηκαν. Συγκεκριμένα: Για την ροή κοντά σε τοιχώματα το μοντέλο SST χρησιμοποιεί το «k-ω» ενώ για ροές μακριά από τοιχώματα χρησιμοποιεί τον μοντέλο «k-ε». Επίσης χρησιμοποιείται για προβλήματα με πιο σύνθετα χαρακτηριστικά όπως δυναμικές μεταβολές ή σύνθετες γεωμετρίες.

Παράρτημα Β': Θερμική ακτινοβολία

Η θερμική ακτινοβολία (thermal radiation) είναι η μεταφορά θερμότητας μέσω της εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (συνήθως στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος). Σε αντίθεση με την αγωγή και τη συναγωγή, η ακτινοβολία δεν απαιτεί μέσο (π.χ., αέρα ή στερεό) για να συμβεί, και μπορεί να πραγματοποιηθεί στο κενό.

Νόμος του Stefan-Boltzmann:

$$Q = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_\infty^4)$$

Όπου: “ε” είναι ο συντελεστής εκπομπής του σώματος, “σ” η σταθερά του Stefan-Boltzmann, “A” η επιφάνεια του σώματος, “ T_s και T_∞ ” οι θερμοκρασίες του σώματος και του περιβάλλοντος αντίστοιχα. Παράδειγμα: Η θερμότητα που ακτινοβολεί ο ήλιος προς τη γη, η ζέστη που νιώθουμε κοντά σε μια φωτιά ή η θερμότητα που νιώθουμε κοντά στη φωτιά.

Βιβλιογραφία

- [1] “States with the Largest Renewable,” 2010. Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: [rl: https://www.seattlepi.com/news/article/States-With-the-Largest-Increase-in-Renewable-15933983.php](https://www.seattlepi.com/news/article/States-With-the-Largest-Increase-in-Renewable-15933983.php).
- [2] T. C. Coburn and B. C. Farhar, “Public Reaction to Renewable Energy Sources and Systems,” in *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 2004, pp. 207–222. doi: 10.1016/B0-12-176480-X/00462-9.
- [3] A. T. Al-Sammarraie and K. Vafai, “Heat transfer augmentation through convergence angles in a pipe,” *Numeri Heat Transf A Appl*, vol. 72, no. 3, pp. 197–214, Aug. 2017, doi: 10.1080/10407782.2017.1372670.
- [4] “12 DIFFERENT TYPES OF HEAT EXCHANGERS & THEIR APPLICATION .” Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: [url: https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/heat-exchangers/parallel-flowand-counter-flow-heat-exchanger/](https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/heat-exchangers/parallel-flowand-counter-flow-heat-exchanger/)
- [5] Gas turbine 101, “What is Brayton Cycle – Gas Turbine Engine – Definition,” thermal engineering. Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/what-is-brayton-cycle-gas-turbine-engine-definition/>
- [6] E. Wang, N. Peng, and M. Zhang, “System Design and Application of Supercritical and Transcritical CO2 Power Cycles: A Review,” *Front Energy Res*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.723875.
- [7] Inc. John Wiley & Sons, *Fundamentals Of Heat And Mass Transfer*, 7th ed. 2011.
- [8] B. Zohuri, “Heat Exchangers,” in *Physics of Cryogenics*, Elsevier, 2018, pp. 299–330. doi: 10.1016/B978-0-12-814519-7.00012-4.
- [9] “Heat Transfer.” Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer
- [10] A. F. Mills, *Heat and Mass Transfer*. Routledge, 2018. doi: 10.4324/9780203752173.
- [11] P. J. LaNasa and E. L. Upp, “Basic Flow Measurement Laws,” in *Fluid Flow Measurement*, Elsevier, 2014, pp. 19–29. doi: 10.1016/B978-0-12-409524-3.00002-2.
- [12] H. Zhai *et al.*, “The influence of corrugated pipes parameters on heat transfer characteristics,” *Thermal Science*, vol. 28, no. 1 Part A, pp. 257–267, 2024, doi: 10.2298/TSCI230709231Z.

- [13] Y. Nakasone, S. Yoshimoto, and T. A. Stolarski, “Overview of ANSYS Structure and Visual Capabilities,” in *Engineering Analysis with ANSYS Software*, Elsevier, 2006, pp. 37–50. doi: 10.1016/B978-075066875-0/50032-6.
- [14] ANSYS, “Geometry & Mesh — Lesson 3.” Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/turbulent-pipe-flow-rans/lessons/geometry-mesh-lesson-3-4/>
- [15] <https://www.ansys.com/products/meshing>, “Meshing in ANSYS.”
- [16] simscale, “Mesh Quality.” Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/mesh-quality/>
- [17] Fluid Mechanics 101, “[CFD] The k-omega Turbulence Model.”
- [18] F. R. Menter, “Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions,” *AIAA Journal*, vol. 30, no. 6, pp. 1657–1659, Jun. 2012, doi: 10.2514/3.11115.
- [19] ANSYS, “Physics Setup — Lesson 4.” Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/turbulent-pipe-flow-rans/lessons/physics-setup-lesson-4-3/>
- [20] P. Naphon, “Laminar convective heat transfer and pressure drop in the corrugated channels,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 34, no. 1, pp. 62–71, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.09.003.
- [21] Wikipedia, “Heat exchanger.”
- [22] R. J. Brogan, “HEAT EXCHANGERS,” in *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*, Begellhouse. doi: 10.1615/AtoZ.h.heat_exchangers.