

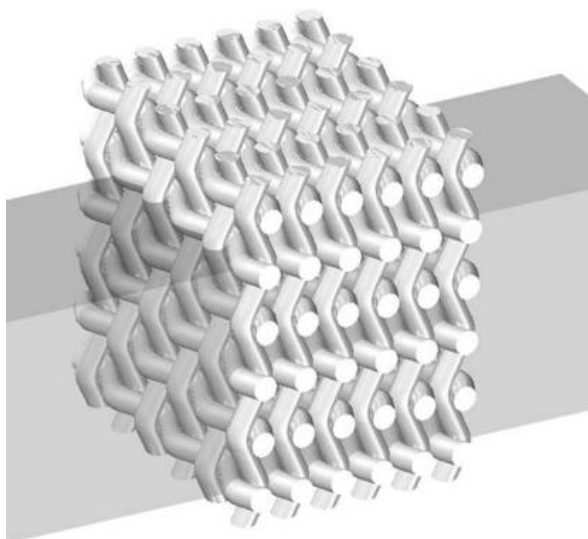
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ΕΝΤΟΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ
ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SOLIDWORKS**

**GAS FLOW STUDY IN A REGENERATOR
IN SOLIDWORKS**



ΕΚΠΟΝΩΝ: ΚΑΜΠΙΩΤΗΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ (02110672)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΡΟΓΔΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΑΘΗΝΑ, 2019

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά τη χρονική περίοδο από τον Οκτώβριο του 2018 έως τον Οκτώβριο του 2019.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου κ. Εμμανουήλ Ρογδάκη, Καθηγητή του Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, για την ανάθεση αυτού του εξαιρετικά ενδιαφέροντος θέματος και για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτωρ κ. Παναγιώτη Μπίτσικα για την ιδιαίτερη συμβολή του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους φίλους και την κοπέλα μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους, την υπομονή τους και την στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	i
Περίληψη	vi
Abstract	vii
Σύμβολα & Δείκτες	viii
Εισαγωγή.....	ix
1. Μηχανή Stirling – Ορισμός, Λειτουργία, Αναγεννητής & Ταξινόμηση	1
1.1 Ορισμός	1
1.2 Λειτουργία Μηχανής Stirling.....	1
1.3 Τύποι Μηχανών Stirling – Σχεδιαστικές διαφοροποιήσεις.....	2
1.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Μηχανών Stirling	3
1.5 Αναγεννητής	4
1.6 Εργαζόμενο Μέσο	6
1.6.1 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Εργαζόμενων Μέσων	7
2. Γεωμετρία	8
3. Περιγραφή του Solidworks	10
4. Αρχικά Τρεξίματα & Δοκιμές	23
4.1 Περίληψη.....	23
4.2 Δοκιμές με Διαφορετικές Γεωμετρίες	23
4.2.1 Επιλογή Πλέγματος & Σημείων για τις Δοκιμές	23
4.2.2 Δοκιμές & Αποτελέσματα	28
5. Μελέτη Πτώσης Πίεσης.....	31
5.1 Σχεδιασμός Εκπόνησης Δοκιμών & Αποτελέσματα	31
5.1.1 Υπολογισμός Πτώσης Πίεσης	31
5.1.2 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Ένα Φύλλο Μεταλλικού Πλέγματος.....	32
5.1.3 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Δύο Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος	35
5.1.4 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Τρία Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος	36
5.1.5 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Τέσσερα Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος.....	38
5.1.6 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Δύο Φύλλα Στριμμένα Μεταλλικού Πλέγματος.....	39
5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμών	41
5.2.1 Διάγραμμα Σύγκρισης Πτώσης Πίεσης Μεταξύ Μεταλλικού Πλέγματος Ενός & Δύο Φύλλων	41

5.2.2 Διαγράμματα Σύγκρισης Πτώσης Πίεσης & Friction Factor Μεταξύ Μεταλλικού Πλέγματος Ενός, Δύο & Τριών Φύλλων	42
5.2.3 Διαγράμματα Σύγκρισης Πτώσης Πίεσης & Friction Factor Μεταξύ Μεταλλικού Πλέγματος Ενός, Δύο, Τριών & Τεσσάρων Φύλλων.....	44
5.2.4 Διαγράμματα Σύγκρισης Πτώσης Πίεσης & Friction Factor Μεταξύ Μεταλλικού Πλέγματος Δύο, Τριών, Τεσσάρων & Δύο Στριμμένων Φύλλων.....	45
6. Μελέτη Μεταφοράς Θερμότητας.....	49
6.1 Προσομοιώσεις & Αποτελέσματα για Διαφορετικές Θερμοκρασίες Πλέγματος.....	49
6.1.1 Διαγράμματα για Ένα Φύλλο Μεταλλικού Πλέγματος Διαφορετικών Θερμοκρασιών.....	49
6.1.2 Διαγράμματα για Δύο Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος Διαφορετικών Θερμοκρασιών.....	52
6.1.3 Διαγράμματα Σύγκρισης Αναγεννητή με Ένα & Δύο Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος Διαφόρων Θερμοκρασιών	55
6.1.4 Διαγράμματα Nusselt – Reynolds.....	60
6.1.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μεταφοράς Θερμότητας Δύο & Δύο Φύλλων Στριμμένων Μεταλλικού Πλέγματος.....	62
7. Σύνοψη & Συμπεράσματα.....	64
Βιβλιογραφία.....	65

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, μελετάται η ροή αερίου (Ηλιο, He) διαμέσω ενός πλέγματος από μεταλλικά φύλλα. Το αέριο ρέει εντός αγωγού κυκλικής διατομής. Η διάταξη προσομοιώνει τον αναγεννητή μίας μηχανής Stirling. Η μελέτη των εργοπααραγωγών και ψυκτικών μηχανών Stirling αποτελεί κύριο αντικείμενο έρευνας του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής.

Η μελέτη χωρίζεται σε δύο τμήματα: Την μελέτη για την πτώση πίεσης που προκαλείται από τη ροή του αερίου εντός του πλέγματος, και την μελέτη σχετικά με την μεταφορά θερμότητας από το πλέγμα στο εργαζόμενο μέσο. Η προσομοίωση γίνεται για διαφορετικό πλήθος φύλλων του πλέγματος, καθώς και για διαφορετικές διατάξεις (παράλληλα και σε στροφή μεταξύ τους). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη ροή του αερίου μέσω του σχεδιασμένου μεταλλικού πλέγματος, οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία του αναγεννητή.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία της γεωμετρίας του αναγεννητή είναι το Solidworks και η θερμο-ρευστομηχανική προσομοίωση των εσωτερικών διεργασιών του έγιναν μέσω της επέκτασης Flow Simulation που περιέχει το Solidworks. Στην εργασία γίνεται αναλυτική παρουσίαση των βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν, από το σχεδιασμό έως την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Συνεπώς, η εργασία αποτελεί έναν οδηγό για αντίστοιχες εργασίες στο μέλλον που θα πραγματοποιηθούν με τη χρήση του προγράμματος Solidworks και του προγράμματος για την προσομοίωση ροής. Επίσης, η εργασία αποτελεί και μία πηγή αξιολόγησης του Solidworks για το αν και σε ποιο βαθμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση ροών.

Η πτώση της πίεσης μελετήθηκε για διαφορετικές ταχύτητες εισόδου, ενώ η θερμοκρασία του αερίου και του πλέγματος δεν ελήφθη υπόψη. Η μεταφορά θερμότητας μελετήθηκε για διαφορετικές θερμοκρασίες του μεταλλικού πλέγματος, με τη θερμοκρασία εισόδου του αερίου σταθερή. Για την μελέτη της μεταφοράς θερμότητας από το μεταλλικό πλέγμα προς το αέριο έγιναν δοκιμές με μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αερίου, αλλά και της θερμοκρασίας του μεταλλικού πλέγματος. Εξήχθησαν συσχετίσεις για το συντελεστή τριβής και τον αριθμό Nusselt, ενώ υπολογίσθηκε και ο βαθμός απόδοσης του αναγεννητή.

Τέλος, ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των κεφαλαίων της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 1 της εργασίας γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στη λειτουργία των κινητήρων Stirling και γίνεται κατανοητή η λειτουργία και η χρησιμότητα του αναγεννητή. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται η παρουσίαση της γεωμετρίας του κυλινδρικού αγωγού και του μεταλλικού πλέγματος, και υπολογίζονται τα γεωμετρικά μεγέθη που είναι απαραίτητα για την μελέτη των επόμενων κεφαλαίων. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η παρουσίαση του ορισμού των συνθηκών της προσομοίωσης (setup). Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι πρώτες δοκιμές και επιλέγονται τα σημεία στα οποία υπολογίζεται η πίεση, καθώς και το χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό πλέγμα. Στο Κεφάλαιο 5 μελετάται η πτώση πίεσης κατά τη ροή του αερίου διαμέσω του μεταλλικού πλέγματος. Αντίστοιχα, στο Κεφάλαιο 6 μελετάται η μεταφορά της θερμότητας από το μεταλλικό πλέγμα προς το εργαζόμενο μέσο. Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με τα βασικά συμπεράσματα, και προτάσεις για μελλοντική ανάπτυξη της παρούσας μελέτης.

Abstract

In the present dissertation the gas flow (He) through a mesh of metal sheets is studied. The gas is flowing through a circular conduit. This geometry represents the regenerator of a Stirling machine. The study of Stirling generators and refrigeration machines is the main subject of research in the Applied Thermodynamics Laboratory.

This study consists of two parts: The study on the pressure drop caused by the flow of gas inside the mesh, and the study on the heat transfer from the mesh to the gas (He). The simulation is done for different number of sheets of the mesh, as well as for different layouts (in parallel and in turns). The results obtained from the flow simulation lead to useful conclusions regarding the operation of the regenerator.

The program used to design the geometry of the regenerator is Solidworks and the thermo-fluid simulation of its internal processes was done through the Flow Simulation extension contained in Solidworks. The dissertation gives a detailed presentation step by step from designing to extracting the results. Therefore, this dissertation is a guide for future projects using Solidworks program and Flow Simulation extension. This work is also a source of Solidworks evaluation of whether and to what extent it can be used to simulate flows.

The pressure drop was studied for different inlet speeds, while the gas and mesh temperatures were not taken into account. Heat transfer was studied for different temperatures of the metal mesh, with the gas inlet temperature constant. In order to study the heat transfer from the metallic to the gas, tests were performed by varying the gas inlet speed and the temperature of the metallic mesh. Correlations for friction factor and Nusselt number were extracted, and regeneration efficiency was calculated.

Finally, a brief description of the chapters of the dissertation follows. In Chapter 1 a brief introduction to the operation of Stirling engines is made and the operation and utility of the regenerator. Chapter 2 presents the geometry of the duct and the grid, and calculates the geometries necessary for the study of the following chapters. Chapter 2 presents the geometry of the duct and the mesh, and calculates the geometries necessary for the study of the following chapters. Chapter 3 presents the definition of simulation conditions (setup). Chapter 4 presents the first runs and selects the points where the pressure is measured and the mesh used. Chapter 5 examines the pressure drop during gas flow through the metal mesh. Accordingly, Chapter 6 deals with the transfer of heat from the metal mesh to gas (He). Finally, the dissertation concludes with the main conclusions, and suggestions for future development of this study.

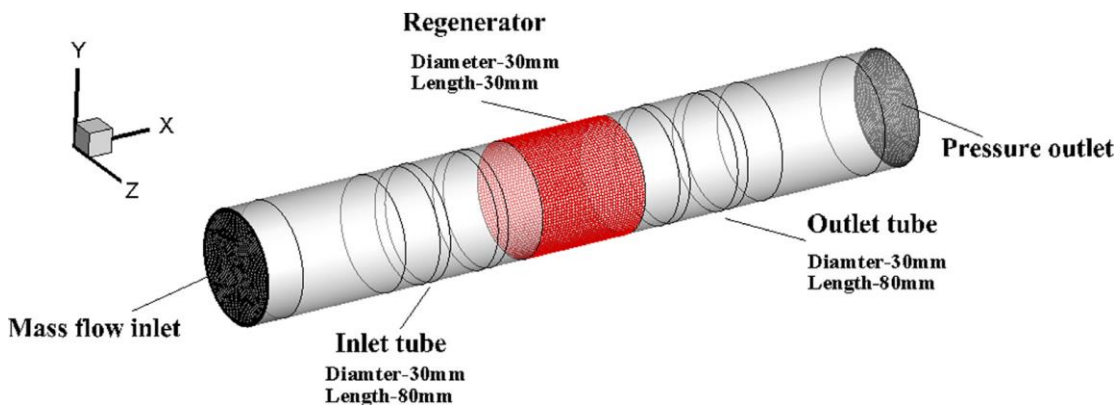
Σύμβολα & Δείκτες

Σύμβολα & Δείκτες	
D	Διάμετρος κυλίνδρου
C_f	Συντελεστής τριβής
dh	Υδραυλική διάμετρος
dp	Πτώση πίεσης
dw	Διάμετρος μετάλλου
f	Συντελεστής τριβής
h	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
k	Θερμική αγωγιμότητα
L	Μήκος κυλίνδρου
m	Παροχή εργαζόμενου μέσου
Nu	Αριθμός Nusselt
p	Πίεση
Q	Μεταφορά θερμότητας
Re	Αριθμός Reynolds
T	Θερμοκρασία
T_{matrix}	Θερμοκρασία πλέγματος
u	Ταχύτητα
V_{fluid}	Όγκος εργαζόμενου μέσου
V_{total}	Συνολικός στοιχειώδεις όγκος
μ	Δυναμικό ιξώδες
ρ	Πυκνότητα ρευστού
ψ	Porosity

Εισαγωγή

Οι κινητήρες Stirling είναι μηχανές εξωτερικής καύσης παραγωγής θετικού έργου, οι οποίες μπορούν να συνδυασθούν με εναλλακτικές πηγές ενέργειας και να λειτουργήσουν ως συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Το πιο σημαντικό στοιχείο μίας μηχανής Stirling είναι ο αναγεννητής. Η δομή της μήτρας ενός αναγεννητή αποτελείται από ένα πορώδες πλέγμα πολλών παράλληλων μεταλλικών στρωμάτων, τα οποία συνήθως είναι πεπλεγμένα μεταξύ τους. Ο αριθμός των μεταλλικών στρωμάτων στον αναγεννητή μίας μηχανής Stirling είναι συνήθως της τάξης των 200-1000 στρωμάτων. Το μεταλλικό πλέγμα του αναγεννητή λειτουργεί ως ένας χώρος αποθήκευσης θερμότητας, καθώς το εργαζόμενο μέσο μεταφέρεται μεταξύ του ψυχρού και του θερμού τμήματος της μηχανής. Από την άλλη, η πίεση του εργαζόμενου αερίου πέφτει καθώς περνά διαμέσω του πλέγματος. Η καλή απόδοση του αναγεννητή είναι κομβική για την απόδοση της μηχανής, και η λειτουργία του αναγεννητή αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας.

Ο σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η μελέτη και η κατανόηση της ροής του αερίου διαμέσω ενός αναγεννητή. Σχεδιάστηκε αγωγός εντός του οποίου διέρχεται το εργαζόμενο μέσο, το οποίο είναι Ήλιο (He). Στο μέσο του αγωγού σχεδιάστηκε ένα μεταλλικό πλέγμα. Μία γενική απεικόνιση της διάταξης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.1: Μοντέλο για σταθερή ροή μέσω αναγεννητή. [1]

Στη συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκε η πτώση πίεσης, αρχικά, και η μεταφορά θερμότητας, στη συνέχεια, μέσα στον αναγεννητή. Η μελέτη της πτώσης πίεσης διαμέσω του μεταλλικού πλέγματος πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Solidworks με τη γεωμετρία του πλέγματος να αποτελείται με ένα, δυο, τρία και τέσσερα μεταλλικά φύλλα στη σειρά καθώς και δυο φύλλα στριμμένα μεταξύ τους για ένα πιο εμπειριστωμένο αποτέλεσμα μελέτης. Μελετάται επίσης και η επίδραση (ή μη) της γωνίας στροφής των φύλλων του πλέγματος στην πτώση πίεσης. Για την μελέτη της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ένα φύλλο, δύο φύλλα σε παράλληλη διάταξη και δύο φύλλα στριμμένα μεταξύ τους. Η πτώση πίεσης και η μεταφορά θερμότητας διαφοροποιούνται ανάλογα με τον αριθμό και τη διάταξη των φύλλων του πλέγματος. Δυστυχώς, η πολύ μεγάλη απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς και ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος δεν επιτρέπει τη μελέτη μεγάλου αριθμού στρωμάτων του πλέγματος. Αυτό, δείχνει πως πιθανότατα ο προσομοιωτής ροής του Solidworks χρειάζεται περισσότερο χρόνο και ισχύ σε σχέση με άλλα προγράμματα που έχουν χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο (πχ ANSYS Fluent). Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη ροή του αερίου μέσω λίγων φύλλων μεταλλικού πλέγματος, οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία του αναγεννητή.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται περιγραφή του Solidworks. Εξηγείται αναλυτικά η διαδικασία για την προσομοίωση προβλημάτων ροής αερίου, τα οποία είναι μια πολύ συχνή εφαρμογή. Η συγκεκριμένη εργασία λειτουργεί ως ένας οδηγός για μελλοντικές εργασίες που θα χρησιμοποιήσουν το πρόγραμμα, και είναι η πρώτη χρονικά στο εργαστήριο.

Στο τμήμα της μελέτης της πτώσης πίεσης, προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με το πόσο αυξάνεται η πτώση πίεσης με την προσθήκη ενός ακόμα φύλλου μεταλλικού πλέγματος. Μελετάται η επίδραση της σχετικής στροφής των πλεγμάτων (κατά 5,25 και 45 μοίρες). Εξάγονται οι συσχετίσεις των συντελεστών τριβής.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της μεταφοράς θερμότητας μελετάται η επίδραση της ταχύτητας εισόδου του αερίου στην μεταφερόμενη θερμότητα από το πλέγμα και στην αύξηση της θερμοκρασίας του αερίου. Προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με το αν η αλλαγή της διάταξης του πλέγματος (στροφή) βελτιώνει ή όχι, και σε τι βαθμό, την μεταφορά θερμότητας. Τα αποτελέσματα μετατρέπονται σε συσχετίσεις για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt. Τέλος υπολογίζεται η επίδραση του αριθμού των φύλλων στην απόδοση του αναγεννητή.

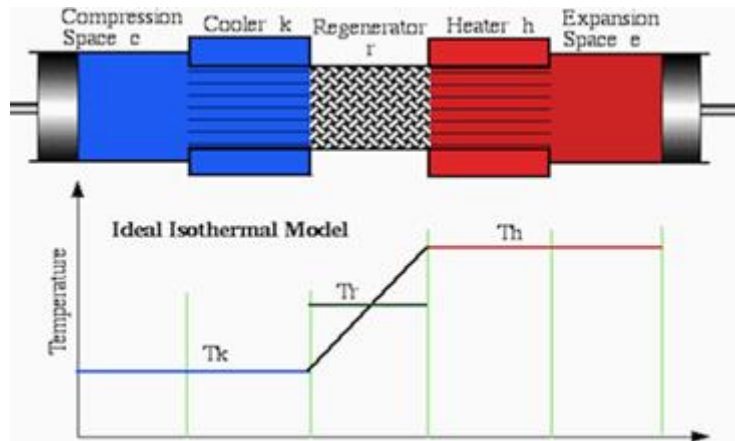
1. Μηχανή Stirling – Ορισμός, Λειτουργία, Αναγεννητής & Ταξινόμηση

1.1 Ορισμός

Οι μηχανές Stirling έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της παγκόσμιας βιομηχανίας τα τελευταία χρόνια καθώς παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μηχανές όπως υψηλή θερμική αποδοτικότητα, χαμηλή απαίτηση συντήρησης, ευελιξία ενεργειακών πηγών κατανάλωσης και ασφαλή λειτουργία. Ειδικότερα, η ικανότητά τους να χρησιμοποιούν ένα ευρύ φάσμα πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, η θερμότητα από τα βιομηχανικά απόβλητα, και ενέργεια από τη καύση βιομάζας τις έχουν καταστήσει μία από τις πιο ελπιδοφόρες απαντήσεις στην επιδείνωση των προβλημάτων της εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων και της παγκόσμιας υπερθέρμανσης. Επίσης η μηχανή Stirling βελτιώνει τη θερμική απόδοση του κινητήρα λειτουργώντας ως μονάδα θερμικής αποθήκευσης θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα όταν ρέει καυτό αέριο μέσω αυτής κατά τη διαδικασία της εκτόνωσης, ο αναγεννητής απορροφά μέρος της θερμότητας από το θερμό αέριο και στη συνέχεια απελευθερώνει τη θερμότητα πίσω στο κρύο αέριο καθώς ρέει μέσω του αναγεννητή στη διαδικασία συμπίεσης. Συνεπώς, απαιτείται λιγότερη πρόσδοση θερμότητας από την εξωτερική πηγή στο καυτό άκρο του κινητήρα, βελτιώνοντας έτσι τη θερμική απόδοση του κινητήρα. Η μηχανή Stirling αποτελείται από τον χώρο συμπίεσης (compression space), τον ψύκτη (cooler), τον αναγεννητή (regenerator), τον θερμαντήρα (heater) και, τέλος, τον χώρο εκτόνωσης (expansion space). Στο ισοθερμοκρασιακό μοντέλο οι εναλλάκτες θερμότητας και ο αναγεννητής είναι ιδανικοί. Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία του αερίου εντός των εναλλακτών είναι σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων. Η κατανομή της θερμοκρασίας στους χώρους της μηχανής αποτυπώνεται στο σχήμα 2.1. Το εργαζόμενο μέσο που βρίσκεται εσωτερικά σε κάθε ένα από τα εξαρτήματα της μηχανής έχει στιγμιαία μάζα m , απόλυτη θερμοκρασία T , όγκο V και πίεση p .

1.2 Λειτουργία Μηχανής Stirling

Η ισοθερμοκρασιακή ανάλυση είναι η πιο απλή μέθοδος μελέτης μίας μηχανής Stirling με τη χρήση ενός αναλυτικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι κοντά σε αυτά μίας πραγματικής μηχανής. Η μέθοδος αυτή αποτελεί όμως έναν γρήγορο τρόπο εκτίμησης κάποιων βασικών παραμέτρων λειτουργίας της μηχανής (πίεση, παροχές μάζας), καθώς και της επίδρασης που προκαλούν συγκεκριμένες παράμετροι (πχ ταχύτητα περιστροφής, νεκροί όγκοι) στην ισχύ και την απόδοση της μηχανής. Στην ισοθερμοκρασιακή ανάλυση της μηχανής Stirling το αέριο στο χώρο εκτόνωσης και στον θερμαντήρα (heater) βρίσκεται σε μια σταθερή υψηλή θερμοκρασία T_h ενώ στο χώρο συμπίεσης καθώς και στον ψύκτη βρίσκεται σε μια σταθερή χαμηλή θερμοκρασία T_c . Σκοπός της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι να προσδιοριστεί το παραγόμενο από τη μηχανή έργο και το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας. Το ολικό παραγόμενο έργο (W) είναι το αλγεβρικό άθροισμα των έργων στους χώρους της συμπίεσης και εκτόνωσης και αντίστοιχα το ποσό της μεταφερόμενης ενέργειας υπολογίζεται από την εξίσωση ενέργειας του εργαζόμενου μέσου. Καθώς πολλές πηγές απωλειών παραλείπονται, το παραγόμενο έργο και η απόδοση της μηχανής είναι κατά πολύ υψηλότερες από ό,τι μιας πραγματικής μηχανής. Το ισοθερμοκρασιακό μοντέλο αντιπροσωπεύεται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα.

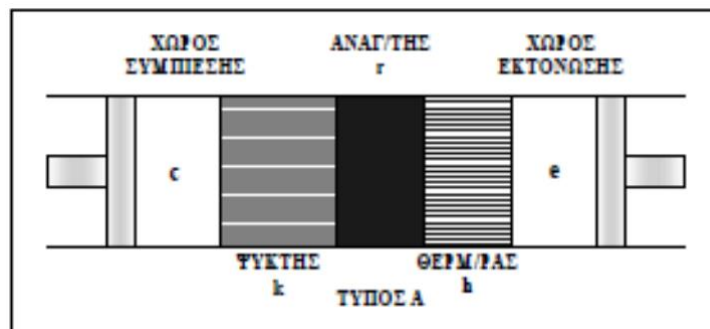


Σχήμα 1.2: Ιδανικό Ισοθερμοκρασιακό Μοντέλο. [2]

1.3 Τύποι Μηχανών Stirling – Σχεδιαστικές Διαφοροποιήσεις

ΤΥΠΟΣ ΑΛΦΑ

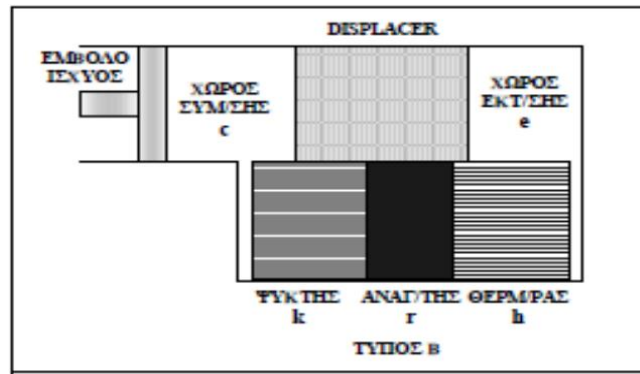
Όλες οι μηχανές Stirling τύπου άλφα αποτελούνται από ένα, ή και περισσότερα ζευγάρια εμβόλων. Τα έμβολα συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να παλινδρομούν με συγκεκριμένη διαφορά φάσης. Κάθε έμβολο κινείται μέσα στον αντίστοιχο κύλινδρο μεταφέροντας παράλληλα και το εργαζόμενο αέριο στον ψύκτη, τον αναγεννητή και το θερμαντήρα.



Σχήμα 1.3: Μηχανή Stirling τύπου Α. [3]

ΤΥΠΟΣ ΒΗΤΑ

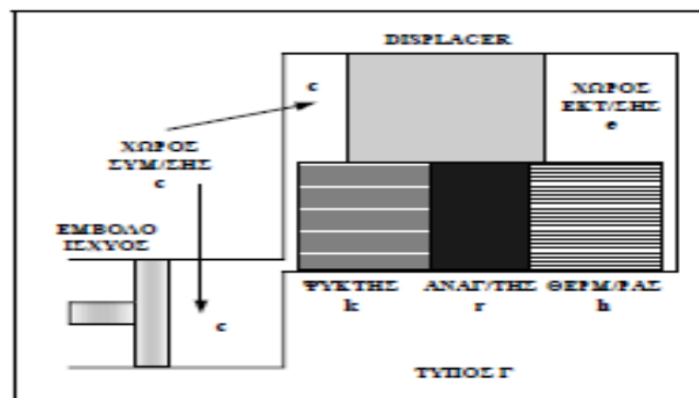
Στο συγκεκριμένο τύπο μηχανής Stirling, τα κινούμενα μέρη είναι τοποθετημένα στον ίδιο κύλινδρο. Με τη σχεδίαση αυτή αποφεύγονται κυρίως προβλήματα διαρροής του εργαζόμενου μέσου. Αντί για δύο έμβολα, συμπίεσης και εκτόνωσης, που έχουμε στην μηχανή τύπου άλφα, οι μηχανές τύπου Βήτα διαθέτουν ένα έμβολο ισχύος και έναν εκτοπιστή. Ο εκτοπιστής με την κίνησή του ρυθμίζει την μεταφορά του αερίου μεταξύ των δύο άκρων. Το έμβολο ισχύος είναι υπεύθυνο για την παραγωγή ή την κατανάλωση μηχανικού έργου. Όταν το αέριο βρίσκεται στο θερμό άκρο διαστέλλεται και ωθεί το έμβολο ισχύος, παράγοντας έργο. Αντίστοιχα όταν το εργαζόμενο αέριο μεταφέρεται στο ψυχρό άκρο συστέλλεται και το έμβολο ισχύος ωθείται προς τα μέσα, καταναλώνοντας έργο.



Σχήμα 1.4: Μηχανή Stirling τύπου Β. [4]

ΤΥΠΟΣ ΓΑΜΜΑ

Στον τελευταίο σχεδιαστικό τύπο μηχανής (μηχανές τύπου γάμα), το έμβολο ισχύος και ο εκτοπιστής είναι τοποθετημένα σε διαφορετικό κύλινδρο αλλά είναι συνδεδεμένα στον ίδιο σφόνδυλο. Κατά τη λειτουργία της μηχανής, το εργαζόμενο αέριο κινείται ελεύθερα μεταξύ των κυλίνδρων και περνά μέσα από τους εναλλάκτες. Ως μειονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου μηχανής Stirling θεωρείται ο μικρότερος λόγος συμπίεσης. Από την άλλη, ο απλούστερος κατασκευαστικός σχεδιασμός των μηχανών τύπου γάμμα είναι ιδανικός για πολυκύλινδρες μηχανές.



Σχήμα 1.5: Μηχανή Stirling τύπου Γ. [5]

1.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Μηχανών Stirling

Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μηχανών Stirling.

Πλεονεκτήματα:

- Δίνουν τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών ειδών καυσίμου με τη χρήση κατάλληλου καυστήρα ως εξωτερική πηγή θερμότητας. Παραδείγματα καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι: πετρέλαιο, βενζίνη, μεθανόλη, αιθανόλη, βουτάνιο, υγραέριο και βιοαέριο. Επίσης, οι μηχανές Stirling μπορούν να χρησιμοποιήσουν ως πηγή θερμότητας κάποια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή ενέργεια και η βιομάζα, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν λαμβάνοντας ενέργεια από πυρηνικό καύσιμο.

- Οι μηχανές Stirling ρυπαίνουν ηχητικά λιγότερο καθώς δεν έχουν βαλβίδες εισαγωγής, εξαγωγής και η περιοδική έκρηξη απουσιάζει. Επίσης η χημική ρύπανση είναι αμελητέα συμβάλλοντας ουσιαστικά στη προστασία του περιβάλλοντος.
- Λειτουργούν αρκετές χιλιάδες ώρες συνεχώς χωρίς να χρειάζονται συντήρηση. Οι απαιτήσεις των μηχανών Stirling σε μόνωση και λίπανση είναι μικρές λόγω της μη άμεσης επαφής των προϊόντων καύσης με τα κινούμενα εξαρτήματα της μηχανής.
- Ο βαθμός απόδοσης των μηχανών Stirling παραμένει σταθερός για μεγάλες μεταβολές φορτίου.

Μειονεκτήματα:

- Μία μηχανή Stirling έχει υψηλό κόστος κατασκευής. Αυτό οφείλεται στα ακριβά τμήματα της μηχανής όπως είναι ο θερμαντήρας στον οποίο χρησιμοποιούνται υλικά τα οποία πρέπει αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Τέτοια υλικά είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας ή άλλα κράματα υψηλών θερμοκρασιών. Ένας άλλος παράγοντας που αυξάνει το κόστος κατασκευής των συγκεκριμένων μηχανών είναι το σύστημα ψύξης, το οποίο απαιτείται να έχει μεγάλη θερμοχωρητικότητα.
- Οι μηχανές Stirling έχουν προβλήματα στεγανοποίησης. Η χρήση ελαφρών αερίων ως εργαζόμενο μέσο σε υψηλές ταχύτητες και πιέσεις επιβαρύνει τα προβλήματα διαρροής. Επίσης τα στεγανωτικά που χρησιμοποιούνται για τυχόν διαρροές του λιπαντικού στο κύλινδρο είναι αναγκαίο να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, να μην χρειάζονται λίπανση και να μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα από μη ειδικευμένο προσωπικό.
- Η συντήρηση και η λειτουργία των μηχανών Stirling απαιτούν εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό, το οποίο δεν είναι εύκολα διαθέσιμο.

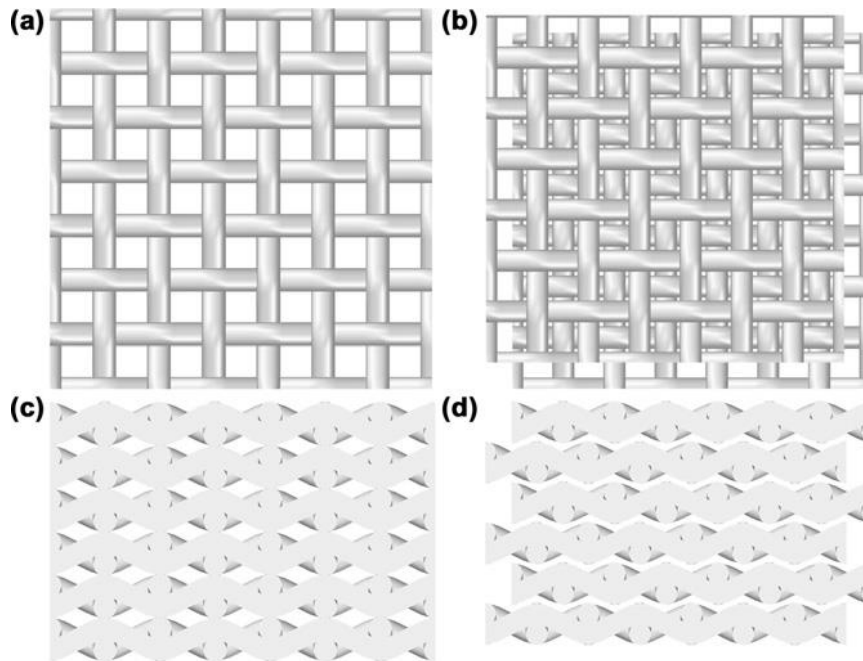
1.5 Αναγεννητής

Ο αναγεννητής στη μηχανή Stirling μπορεί να θεωρηθεί ως το πλέον σημαντικό μέρος της καθώς θεωρείται από πολλές έρευνες ως βασικό στοιχείο για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της επόμενης γενιάς των κινητήρων Stirling. Οι αναγεννητές συνήθως κατασκευάζονται από συσσωρευμένο υφαντό σύρμα ή τυχαίες ίνες μετάλλου. Ένας αναγεννητής είναι βασικά ένα κενό γεμάτο με πορώδες μέσο από μεταλλική τσόχα ή μήτρες. Ο συνδυασμός των παραπάνω επιφανειών δημιουργεί μια περιοχή με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα η οποία προωθεί τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του εργαζομένου μέσου (αερίου) και του πορώδους μέσου. Το ίδιο το μεταλλικό υλικό προσφέρει τεράστια θερμική ικανότητα να απορροφά και να απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα θερμικής ενέργειας. Αρκετές μελέτες προτείνουν κάποιες ιδιότητες που πρέπει να έχει ο αναγεννητής ώστε να επιτρέπουν τη βέλτιστη απόδοση του κινητήρα Stirling. Οι κυριότερες ιδιότητες που πρέπει να έχει ένας αναγεννητής ώστε να λειτουργήσει αποδοτικά σε μία μηχανή Stirling είναι οι παρακάτω.

- Υψηλή θερμική ικανότητα για ελαχιστοποίηση της θερμοκρασιακής μεταβολής.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα για ελαχιστοποίηση των θερμοκρασιακής μεταβολής.
- Μεγάλη επιφάνεια για να ελαχιστοποιούνται οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του αναγεννητή και του εργαζόμενου μέσου.

- Μικρό νεκρό όγκο με πυκνή μήτρα για μεγιστοποίηση της διακύμανσης της πίεσης.
- Αρκετά πορώδες πλέγμα με όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση στη ροή.

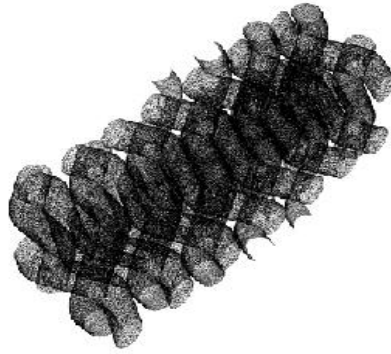
Για την απόκτηση μίας καλύτερης ιδέας σχετικά με το σχήμα και τη διάταξη ενός αναγεννητή, στο Σχήμα 1.6, 1.7 και 1.8 παρουσιάζονται τμήματα αναγεννητών και σε τρισδιάστατη αλλά και στην μπροστινή τους όψη.



Σχήμα 1.6: Δισδιάστατες (2-D) κατακόρυφες διατομές ροής. (a) Ευθυγραμμισμένα. (b) στοιβαγμένα Ευθυγραμμισμένα. (c) Πεπλεγμένα. (d) Άλλες πεπλεγμένες γεωμετρίες. [6]



Σχήμα 1.7: Μοντελοποιημένη γεωμετρία της μήτρας συρμάτινου πλέγματος.[7]



Σχήμα 1.8: Τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση επιφανειακού πεπλεγμένου πλέγματος. [8]

1.6 Εργαζόμενο Μέσο

Οι μηχανές Stirling μπορούν να χρησιμοποιήσουν διάφορα αέρια ως εργαζόμενο μέσο. Συνήθως, η επιλογή του εργαζόμενου μέσου γίνεται μεταξύ του υδρογόνου, του ηλίου και του αζώτου (αέρας). Παρακάτω, θα αναλυθούν συνοπτικά οι απαιτήσεις για το εργαζόμενο μέσο και τα συγκριτικά πλεονεκτήματα του κάθε αερίου. Κάθε μηχανή σχεδιάζεται με δεδομένο το εργαζόμενο μέσο που θα χρησιμοποιηθεί. Θεωρητικά, με αλλαγή του εργαζόμενου μέσου και διατήρηση των θερμοκρασιών στο θερμό και το ψυχρό τμήμα, η απόδοση της μηχανής θα μείνει ίδια. Όμως, στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαίος ο επανασχεδιασμός των εναλλακτών θερμότητας.

Οι επιθυμητές ιδιότητες που πρέπει να έχει το ιδανικό εργαζόμενο ρευστό σε μια μηχανή Stirling έτσι ώστε να επιτευχθεί υψηλός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και παράλληλα χαμηλές απώλειες είναι:

- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα.
- Μικρό ιξώδες.
- Μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα.
- Υψηλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας.
- Μικρή πυκνότητα.

Για την καλύτερη επιλογή εργαζόμενου μέσου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παράγοντας ικανότητας (C_F) ο οποίος είναι ίσος με το πηλίκο της θερμικής αγωγιμότητας προς το γινόμενο της ειδικής θερμοχωρητικότητας επί την πυκνότητα. Η επιδίωξη όμως για μία υψηλή τιμή του παράγοντα ικανότητας, μπορεί να έρθει σε αντίθεση με τις ζητούμενες τιμές μερικών από τις επιθυμητές ιδιότητες του αερίου. Παράλληλα αναζητούμε κάθε φορά εκείνο το εργαζόμενο μέσο που διαθέτει το βέλτιστο συνδυασμό των προαναφερθέντων ιδιοτήτων ώστε να εξασφαλίζει υψηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και ταυτόχρονα χαμηλές απώλειες λόγω αεροδυναμικών αντιστάσεων και θερμικών αδρανειών.

1.6.1 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Εργαζόμενων Μέσων

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης υδρογόνου σε μια μηχανή Stirling είναι τα ακόλουθα:

Πλεονεκτήματα:

- Μεγάλη θερμική αγωγιμότητα.
- Μικρό ιξώδες.
- Μικρή θερμοχωρητικότητα σε σταθερό όγκο.

Μειονεκτήματα:

- Διαπερνά τα μέταλλα δημιουργώντας πρόβλημα στεγανοποίησης.
- Είναι εύφλεκτο.
- Μετατρέπει ορισμένα μέταλλα σε εύθραυστα όταν έρχεται σε επαφή με αυτά.

Η χρήση του αζώτου ως εργαζόμενο μέσο μειώνει το κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης καθώς βρίσκεται σε αφθονία. Από την άλλη, η μικρή πυκνότητα απόδοσης ισχύος οδηγεί σε αύξηση του όγκου και του κόστους λειτουργίας των μηχανών. Μηχανές Stirling που λειτουργούν με άζωτο περιορίζονται στο 20% - 25% της ισχύος αυτών που λειτουργούν με υδρογόνο ή ήλιο.

Στις περισσότερες μηχανές Stirling χρησιμοποιείται το ήλιο, καθώς είναι αδρανές αέριο και απομακρύνει το κίνδυνο έκρηξης. Από την άλλη, είναι ακριβό και η απόδοση του είναι μικρότερη από αυτή του υδρογόνου. Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από τη χρήση του ηλίου είναι τα ακόλουθα:

Πλεονεκτήματα:

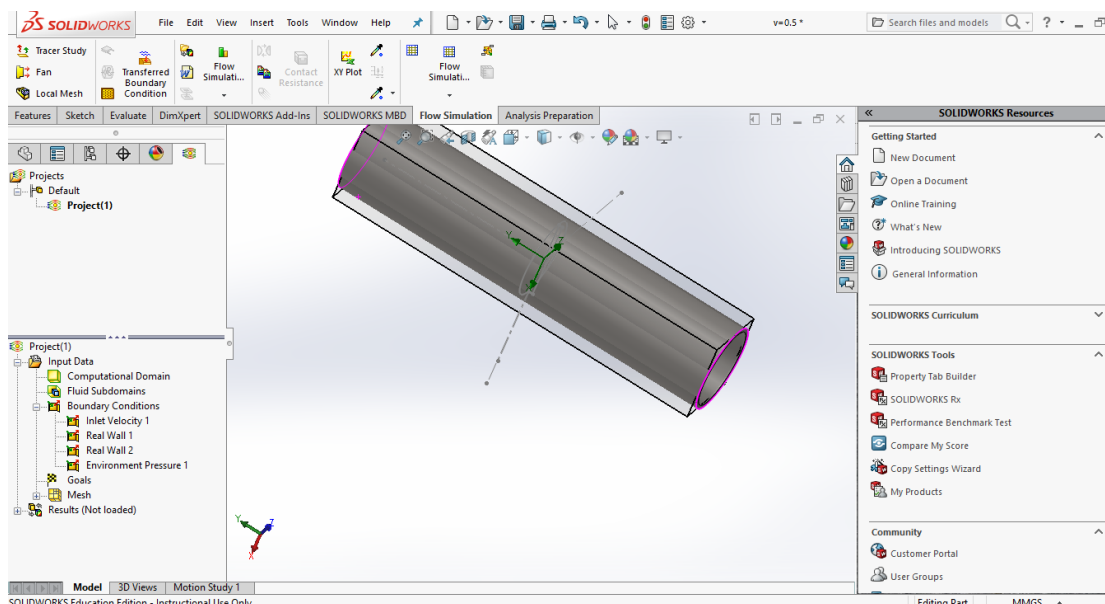
- Είναι αδρανές και μπορεί να περιέχεται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα σε μεταλλικό δοχείο.
- Μεγάλη θερμική αγωγιμότητα.
- Πολύ μικρή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο.

Μειονεκτήματα:

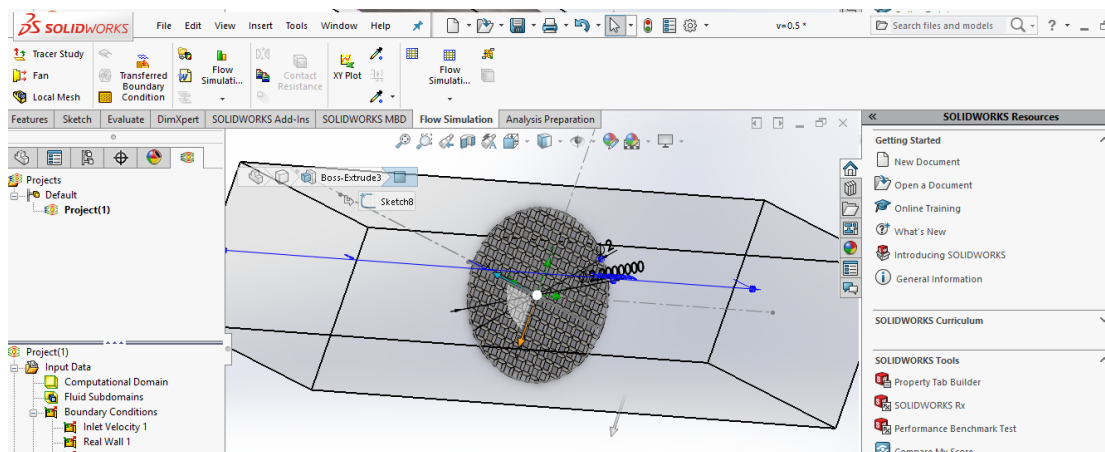
- Μεγάλο ιξώδες

2. Γεωμετρία

Στο παρών κεφάλαιο θα μελετηθεί η γεωμετρία του αναγεννητή. Ο αναγεννητής είναι σχεδιασμένος για να τοποθετηθεί σε κύλινδρο ακτίνας 2×10^{-3} m και η διάμετρος του σύρματος του είναι 4×10^{-5} m. Στόχος της παρούσας μελέτης είναι να βρεθεί ο λόγος εργαζόμενου μέσου (αερίου), μετάλλου στον αναγεννητή που μελετάται.



Εικόνα 2.1: Γεωμετρία κυλίνδρου.



Εικόνα 2.2: Μεταλλικό πλέγμα εσωτερικά της κυλινδρικής γεωμετρίας.

Σαν στοιχειώδεις όγκος αναγεννητή θεωρείτε εκείνος που προκύπτει από το εμβαδό του κυλίνδρου και μήκος σύρματος αναγεννητή. Ύστερα από υπολογισμούς ο συνολικός στοιχειώδεις όγκος είναι $V_{total} = 1.26 \times 10^{-10} \text{ m}^3$.

Εξίσωση συνολικού όγκου:

$$V_{total} = \frac{L \cdot \pi \cdot D^2}{4}$$

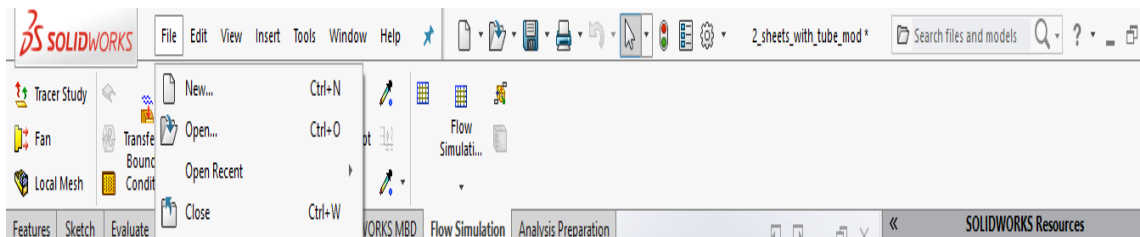
Στόχος είναι να υπολογιστεί ο όγκος που καλύπτει το μεταλλικό πλέγμα μέσα στον στοιχειώδες όγκο. Το πλέγμα αποτελείται από ένα κεντρικό σύρμα και άλλα οκτώ οριζοντίως και καθέτως αυτού. Η απόσταση μεταξύ των δύο κέντρων των δύο μετάλλων είναι 12.66×10^{-5} m και η απόσταση μεταξύ των άκρων των μετάλλων είναι 8.66×10^{-5} m. Με τη χρήση της εξίσωσης του κύκλου $x^2 + y^2 = r^2$ και γνωρίζοντας τις συντεταγμένες του κέντρου κάθε κύκλου υπολογίζεται το μήκος του κάθε σύρματος. Έχοντας την επιφάνεια και το μήκος του κάθε μετάλλου μπορεί να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος του μετάλλου χωρίς τα σημεία στα οποία ενώνονται. Παράλληλα βρίσκονται τα σημεία στα οποία ενώνονται δηλαδή οι επικαλύψεις σύμφωνα με το σχήμα. Ακόμα αφαιρείτε από τον ιδανικό όγκο, ο όγκος των επικαλύψεων και υπολογίζεται ο συνολικός όγκος του μετάλλου. Τέλος υπολογίζεται το porosity που είναι το πηλίκο του όγκου του εργαζόμενου μέσου (αερίου) προς τον συνολικό όγκο και στη συνέχεια υπολογίζεται η υδραυλική διάμετρος (d_h).

Εξίσωση Porosity :
$$\psi = \frac{V_{fluid}}{V_{total}}$$

Εξίσωση υδραυλικής διαμέτρου :
$$d_h = \frac{d_w \cdot \psi}{1 - \psi}$$

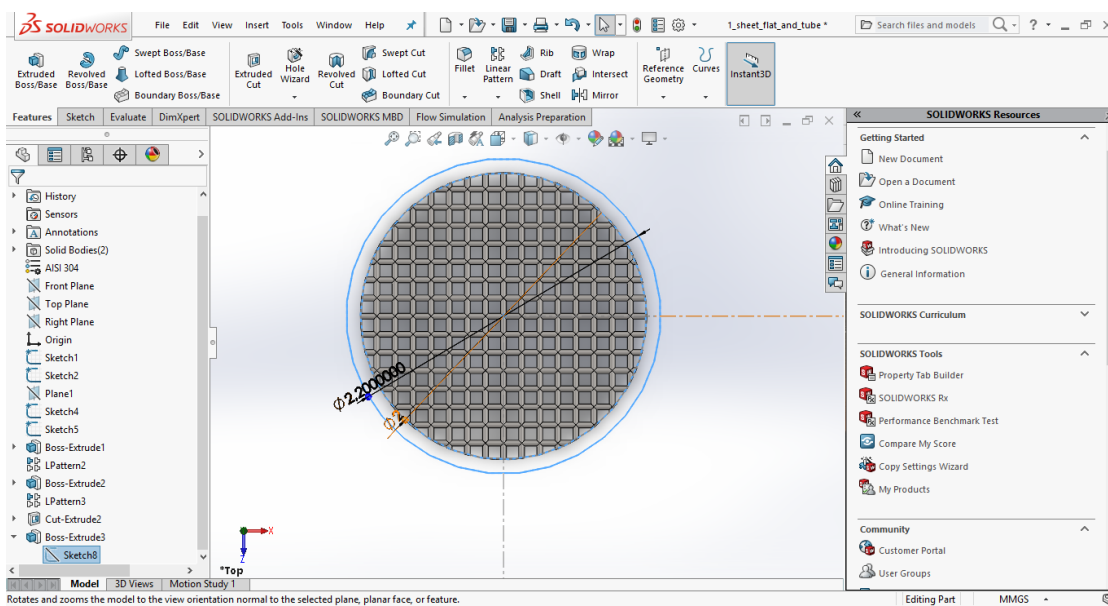
3. Περιγραφή του Solidworks

Αρχικά σε περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε υπάρχουσα γεωμετρία και μεταλλικό πλέγμα, τα οποία είναι αποθηκευμένα, επιλέγουμε την εντολή άνοιγμα (Open). Για τη δημιουργία καινούριας γεωμετρίας γύρω από το μεταλλικό πλέγμα (Matrix) επιλέγουμε την εντολή New. Οι παραπάνω εντολές βρίσκονται στη γραμμή εντολών στο πάνω μέρος της επιφάνειας εργασίας του προγράμματος.



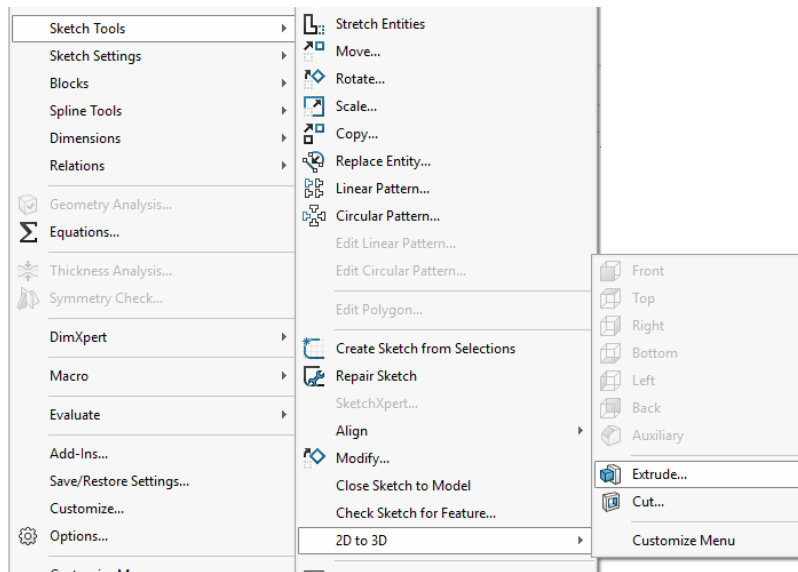
Εικόνα 3.1: Γραμμή εντολών.

Για την κατασκευή καινούριας γεωμετρίας επιλέγεται η εντολή New όπως προαναφέρθηκε και παράλληλα εισάγεται το μεταλλικό πλέγμα (Matrix) έτσι ώστε να αρχίσει ο σχεδιασμός του σωλήνα περιμετρικά αυτού. Αρχικά, σχεδιάζουμε τη διατομή με διάμετρο σωλήνα 2mm και πάχος 0.1mm.



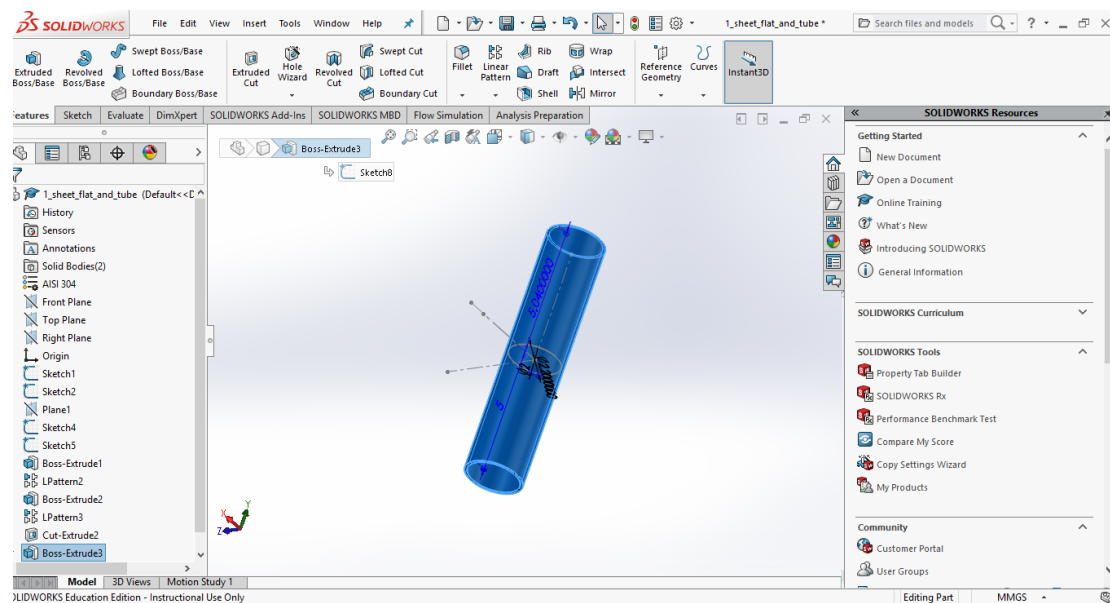
Εικόνα 3.2: Μεταλλικό πλέγμα.

Στη συνέχεια επιλέγουμε την εντολή Extrude και δημιουργούμε το σώμα, με μήκος 5mm εκατέρωθεν του μεταλλικού πλέγματος.



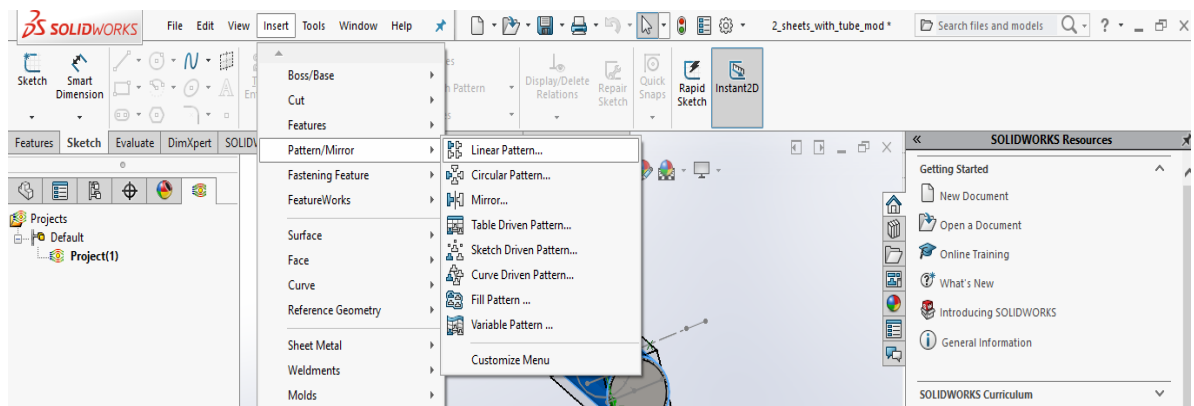
Εικόνα 3.3: Εντολή Extrude.

Έτσι έχει σχεδιασθεί ένα επίπεδο μεταλλικού πλέγματος με ένα σωλήνα συνολικού μήκους 10mm. Από το επάνω μέρος της αριστερής στήλης, επιλέγουμε το υλικό του πλέγματος και του σωλήνα. Από τη στιγμή που και τα δύο σώματα βρίσκονται στο ίδιο σχέδιο, θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό. Εάν πρέπει το πλέγμα και ο σωλήνας να αποτελούνται από διαφορετικό υλικό, θα πρέπει να δημιουργηθούν δύο διαφορετικά αρχεία με τα διαφορετικά σώματα (Parts) και να συνενωθούν σε ένα σώμα με την εντολή Assembly.



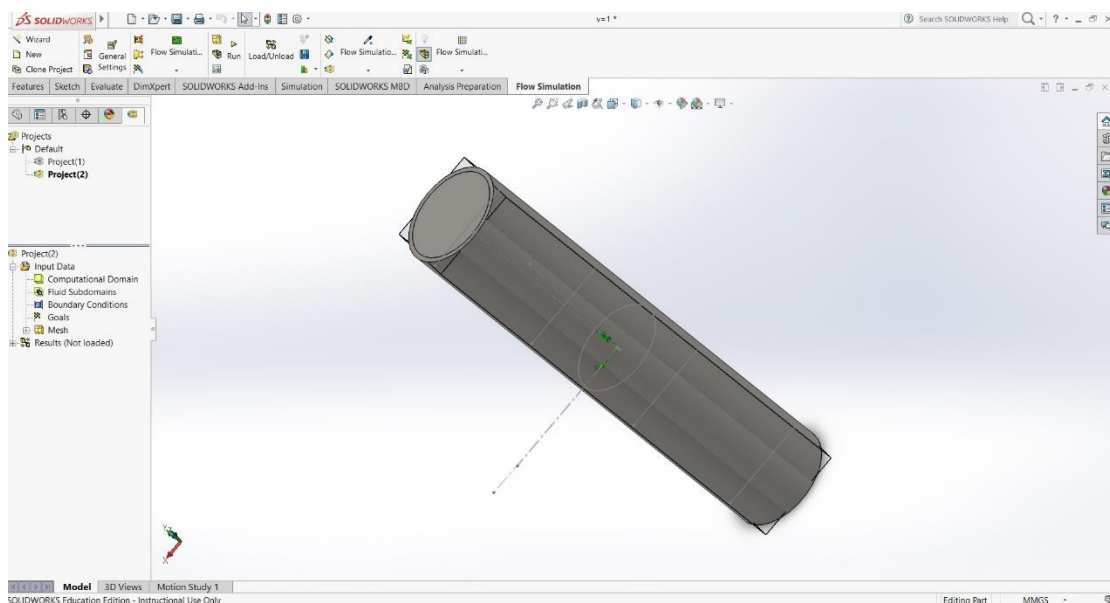
Εικόνα 3.4: Δημιουργία γεωμετρίας.

Σε περίπτωση που το πλέγμα αποτελείται από πολλά επίπεδα, το αρχικό πλέγμα πολλαπλασιάζεται με την εντολή Linear Pattern. Η εντολή αυτή επιλέγεται από την επιλογή Insert στο επάνω μέρος της οθόνης. Με την επιλογή αυτή, το επιλεγμένο σώμα (το εισαχθέν πλέγμα στη συγκεκριμένη εργασία), αναπαράγεται κατά το πλήθος των φορών που επιλέγουμε. Επίσης, πρέπει να ορισθεί και η απόσταση μεταξύ δύο διαφορετικών πλεγμάτων. Για να μπορεί να δημιουργηθεί ένα ενιαίο πλέγμα, η απόσταση ορίζεται ίδια με τη διάμετρο του σύρματος του πλέγματος.



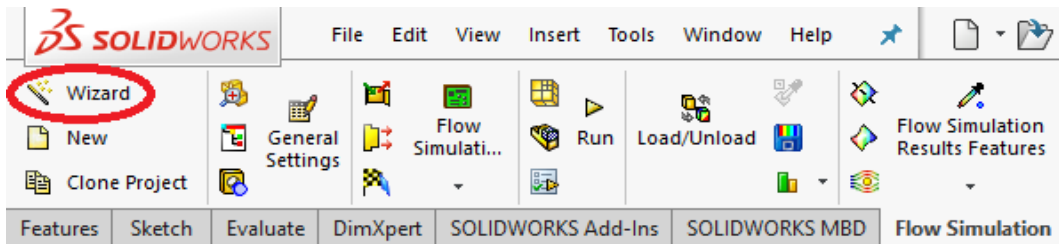
Εικόνα 3.5: Εντολή Linear Pattern.

Έτσι, τα δύο διαδοχικά επίπεδα του μεταλλικού πλέγματος (Matrix) είναι σε επαφή μεταξύ τους. Εάν θέλουμε τα πλέγματα να έχουν κάποια στροφή μεταξύ τους, επιτυγχάνεται με την επιλογή Rotate. Τέλος, τα σχεδιασμένα πλέγματα πρέπει να ενωθούν σε ένα σώμα. Αυτό γίνεται με την επιλογή Combine.



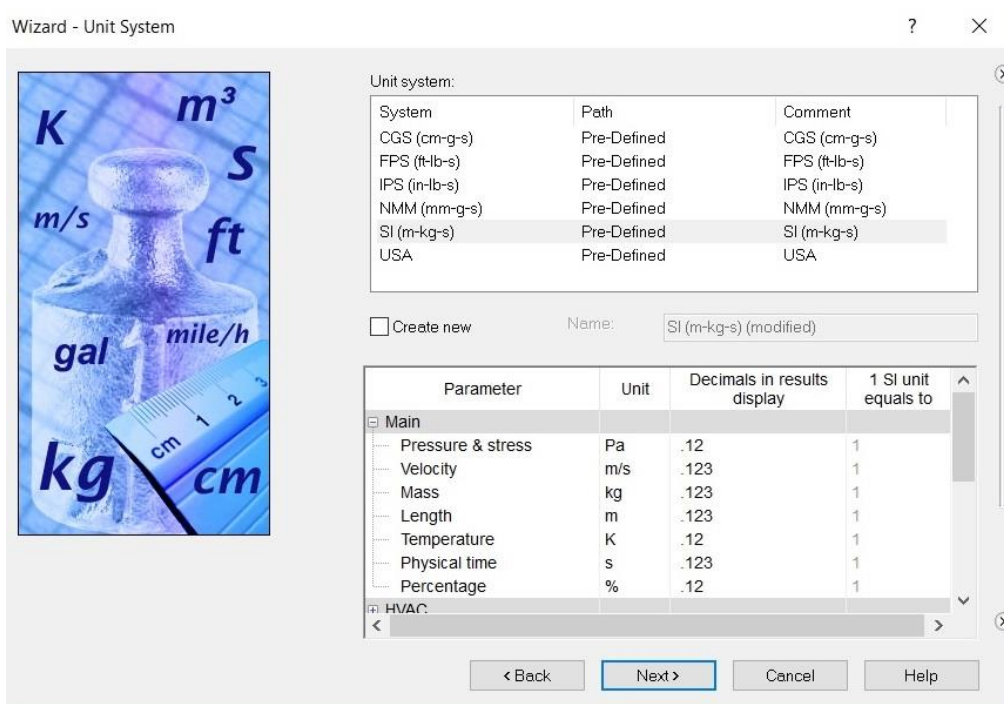
Εικόνα 3.6: Τελική γεωμετρία.

Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή της γεωμετρίας, ξεκινάει η διαδικασία της προσομοίωσης. Αρχικά, πρέπει να γίνει ο ορισμός των παραμέτρων της προσομοίωσης (setup). Επιλέγουμε την εντολή Wizard που βρίσκεται πάνω αριστερά στην επιφάνεια εργασίας για τον ορισμό της προσομοίωσης.



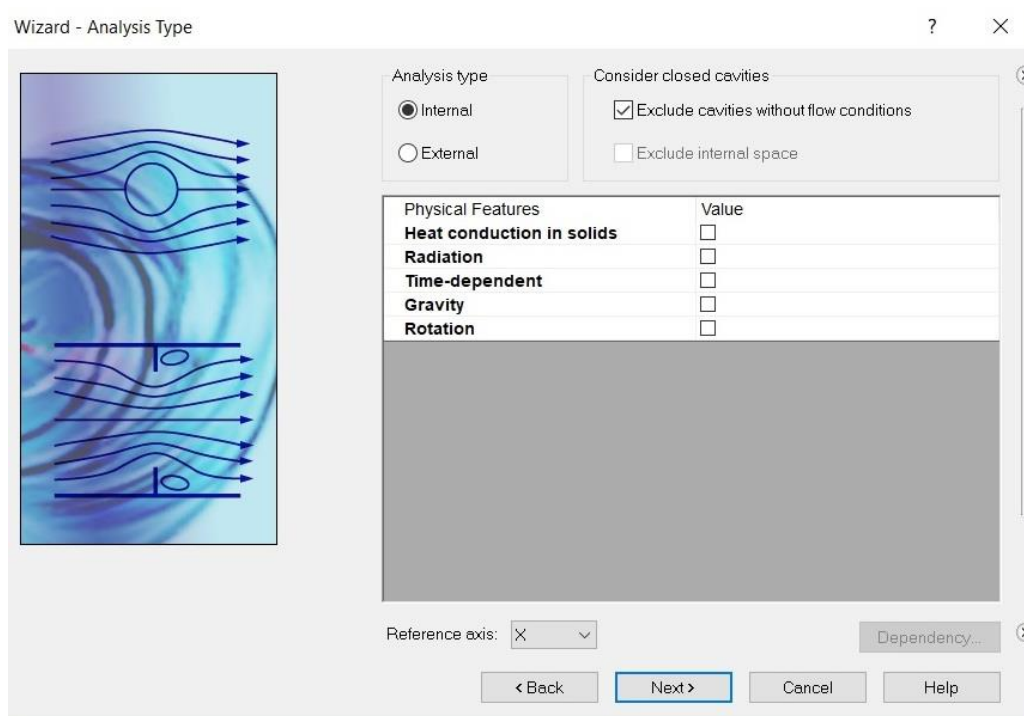
Εικόνα 3.7: Έναρξη Wizard.

Στο πρώτο αναδυόμενο παράθυρο επιλέγουμε το σύστημα μονάδας που θα χρησιμοποιηθεί. Επιλέγεται το σύστημα μονάδας SI και η εντολή συνέχεια (Next).



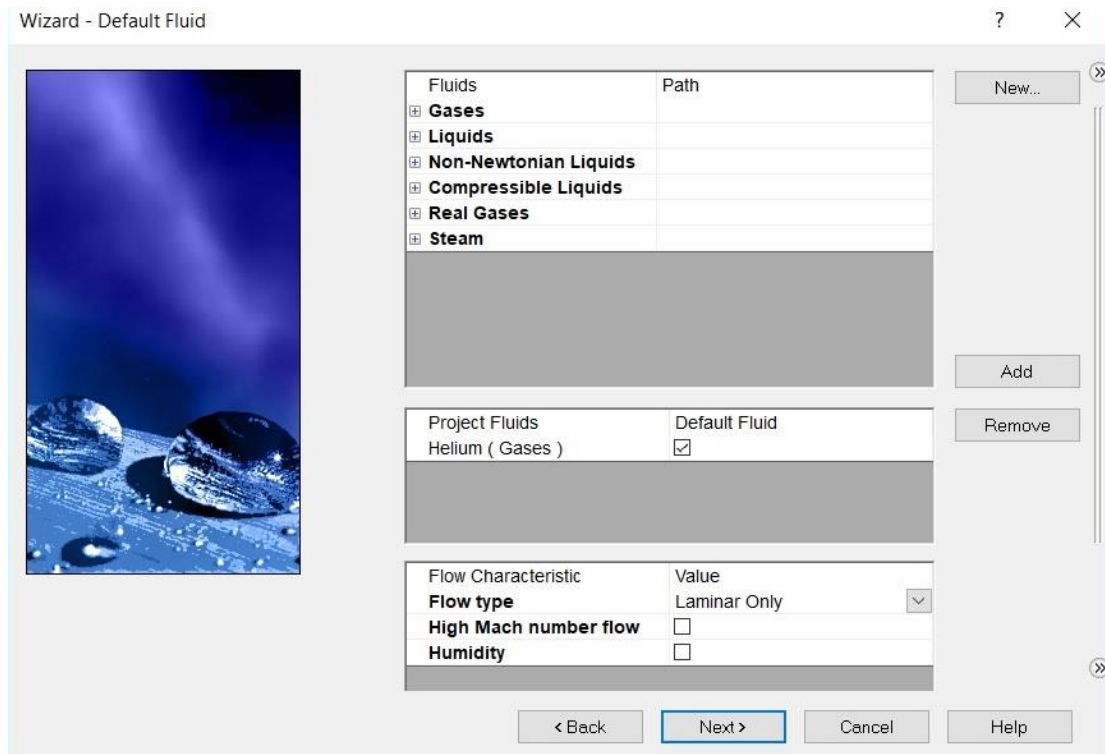
Εικόνα 3.8: Επιλογή συστήματος μονάδας.

Στο δεύτερο παράθυρο επιλέγεται εάν η μελέτη της συνολικής γεωμετρίας θα είναι εσωτερικά (Internal Flow) ή εξωτερικά (External Flow) αυτής. Επιλέγουμε να είναι εσωτερικά (Internal Flow). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής φυσικών χαρακτηριστικών της ροής (π.χ ακτινοβολία, βαρύτητα, θερμική αγωγιμότητα).



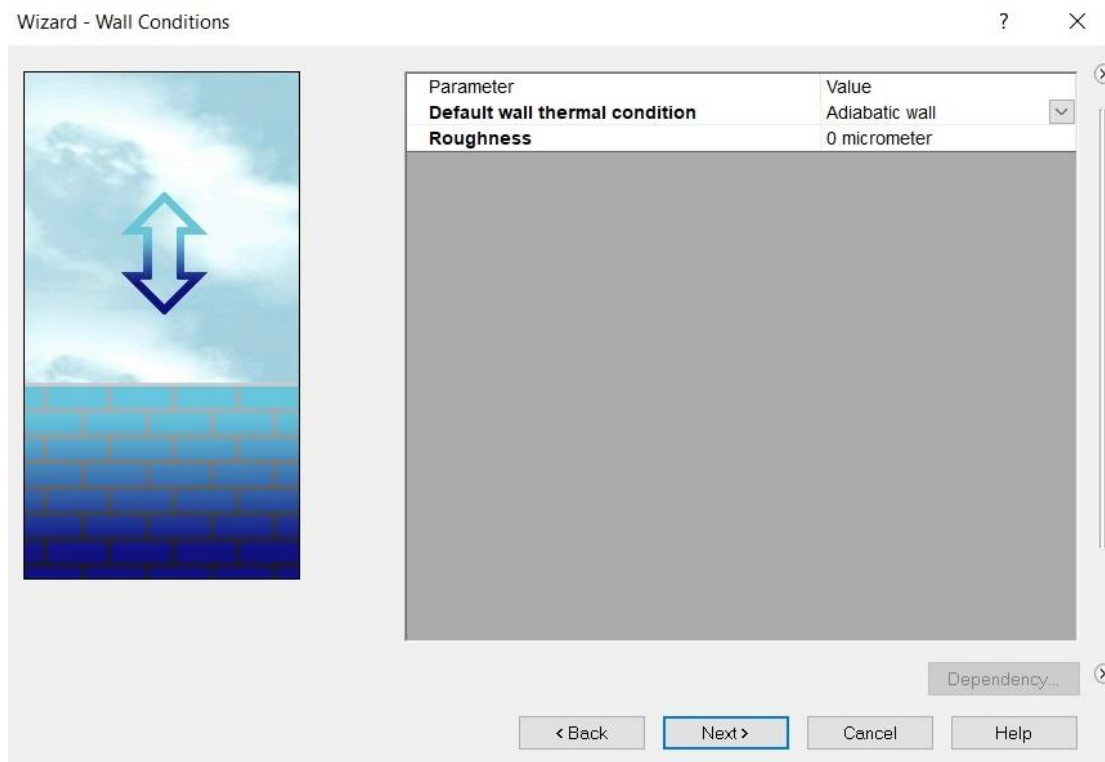
Εικόνα 3.9: Επιλογή είδους ανάλυσης (επιλέγεται *Internal flow*).

Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή του ρευστού (Fluid) που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη και ο τύπος ροής. Το ρευστό στη μελέτη επιλέγεται να είναι ιδανικό αέριο (Gas) και πιο συγκεκριμένα το ήλιο (Helium). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα από την εντολή προσθήκη (Add) της επιλογής άλλου εργαζόμενου μέσου το οποίο δεν υπάρχει στο πρόγραμμα. Τέλος επιλέγεται στα χαρακτηριστικά της ροής (Flow Characteristic), να είναι στρωτή (Laminar) καθώς η ροή του αερίου εντός του αναγεννητή χαρακτηρίζεται από μείωση της ταχύτητας. Λόγω της μικρής υδραυλικής διαμέτρου, ο αριθμός Reynolds της ροής είναι μικρός, και σίγουρα κάτω από διακόσια (200), το οποίο θεωρείται και το όριο για το χαρακτηρισμό της ροής του αερίου εντός του αναγεννητή ως στρωτής (ref).



Εικόνα 3.10: Επιλογή εργαζόμενων μέσων και είδους ροής.

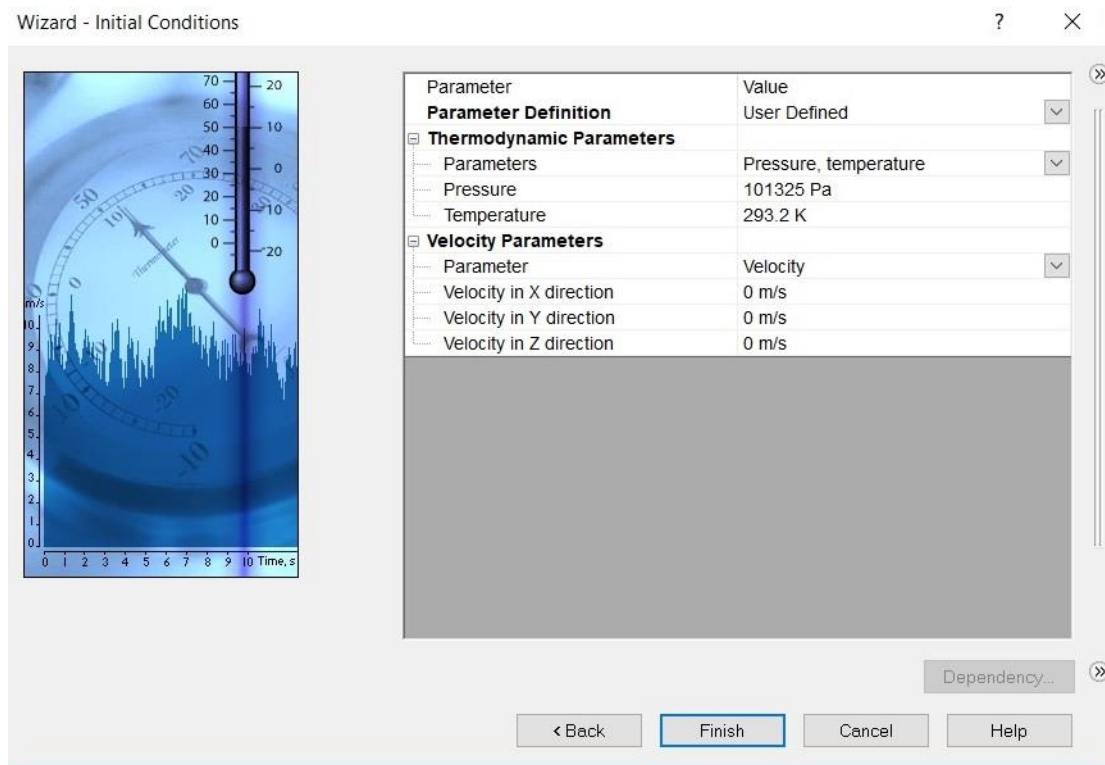
Ύστερα επιλέγονται τα τοιχώματα της γεωμετρίας να είναι αδιαβατικά (adiabatic walls) ώστε να μην υπάρχει συναλλαγή θερμότητας και η τραχύτητα (roughness) να είναι μηδενική.



Εικόνα 3.11: Ορισμός συνθηκών εξωτερικών τοιχωμάτων μονάδας.

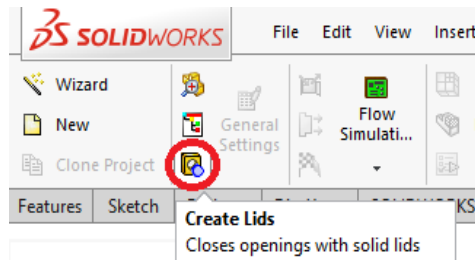
Στο τελευταίο παράθυρο της εντολής wizard γίνεται η επιλογή των συνθηκών λειτουργίας (initial conditions) της μελέτης. Πιο συγκεκριμένα στις θερμοδυναμικές παράμετρους

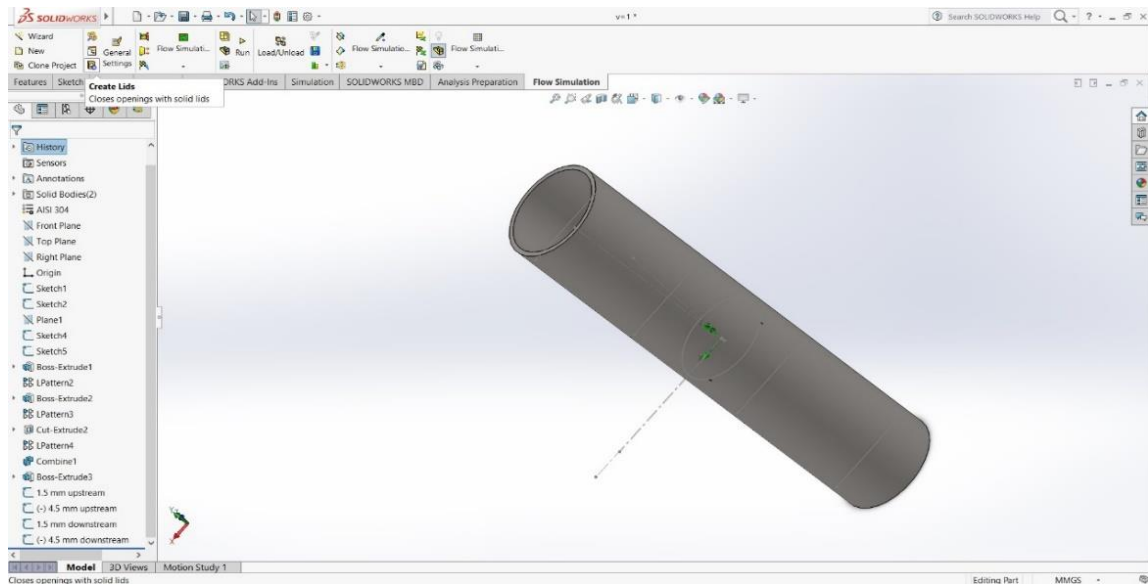
επιλέγεται η θερμοκρασία (temperature) και η πίεση (pressure) με τις οποίες θα εισέλθει το ρευστό στη γεωμετρία.



Εικόνα 3.12: Ορισμός αρχικών συνθηκών ανάλυσης.

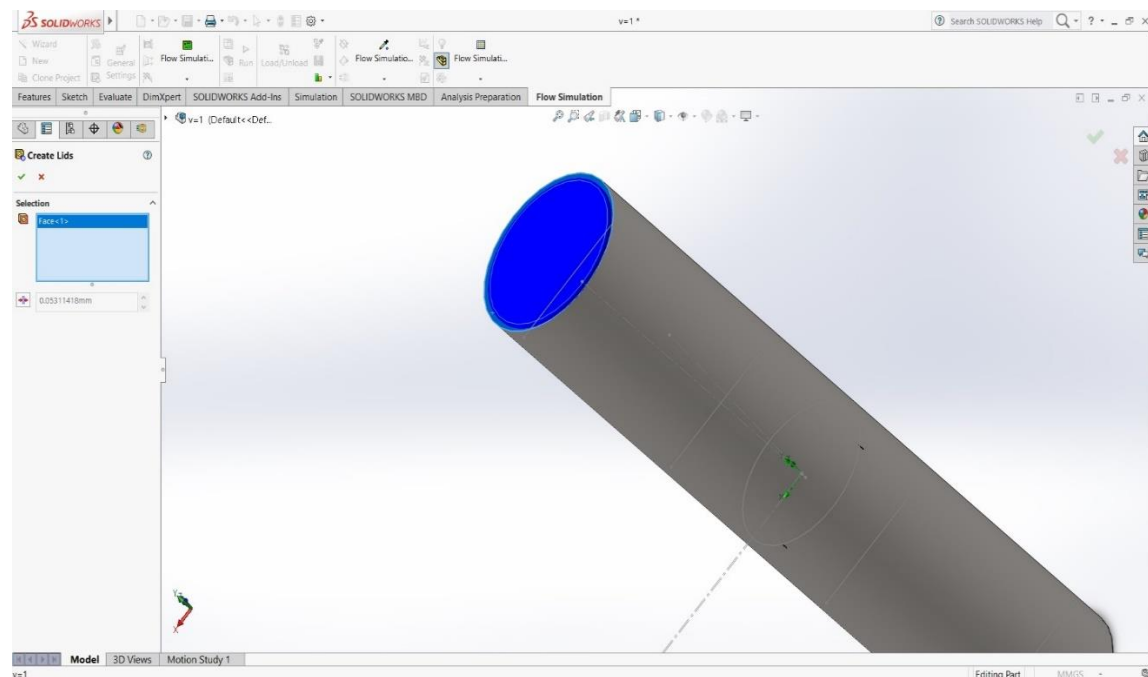
Η επιφάνεια εισόδου και εξόδου του συστήματος που μελετάται καθορίζονται μέσω της συντόμευσης Create Lids η οποία βρίσκεται πάνω αριστερά στην επιφάνεια εργασίας του Solidworks.





Εικόνα 3.13: Συντόμηση Create Lids.

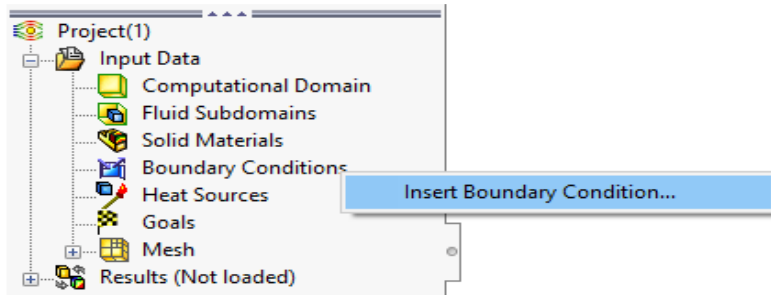
Με τη λειτουργία αυτή, δημιουργούνται δύο «καπάκια» στις δύο άκρες του σωλήνα, τα οποία ορίζουν την είσοδο και την έξοδο. Η επιλογή των επιφανειών στη κυλινδρική γεωμετρία που εξετάζεται γίνεται με αριστερό click στη περίμετρο τους δηλαδή στο δακτύλιο του σωλήνα και όχι στο εσωτερικό του.



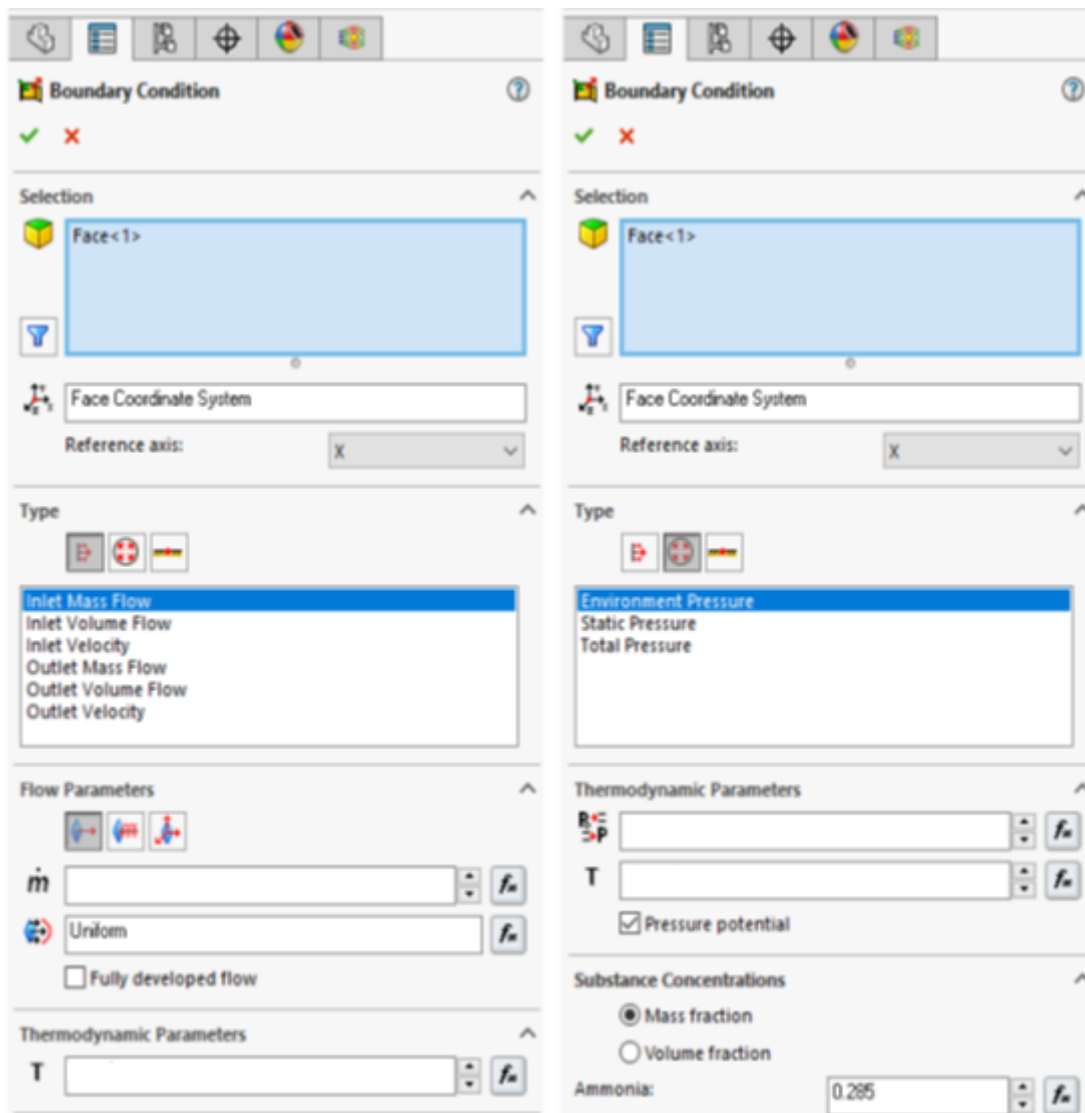
Εικόνα 3.14: Επιλογή Επιφάνειας.

Επιλέγοντας την εντολή Boundary Conditions αριστερά στο παράθυρο ορίζεται η ταχύτητα με την οποία το ρευστό εισέρχεται στο σύστημα από την επιφάνεια εισόδου που έχει επιλεγεί στην παραπάνω εντολή create lids. Επίσης στο κάτω μέρος του παραθύρου του boundary conditions στις θερμοδυναμικές παραμέτρους (thermodynamic parameters) ορίζεται η πίεση με την οποία το ρευστό εξέρχεται από την επιφάνεια εξόδου του

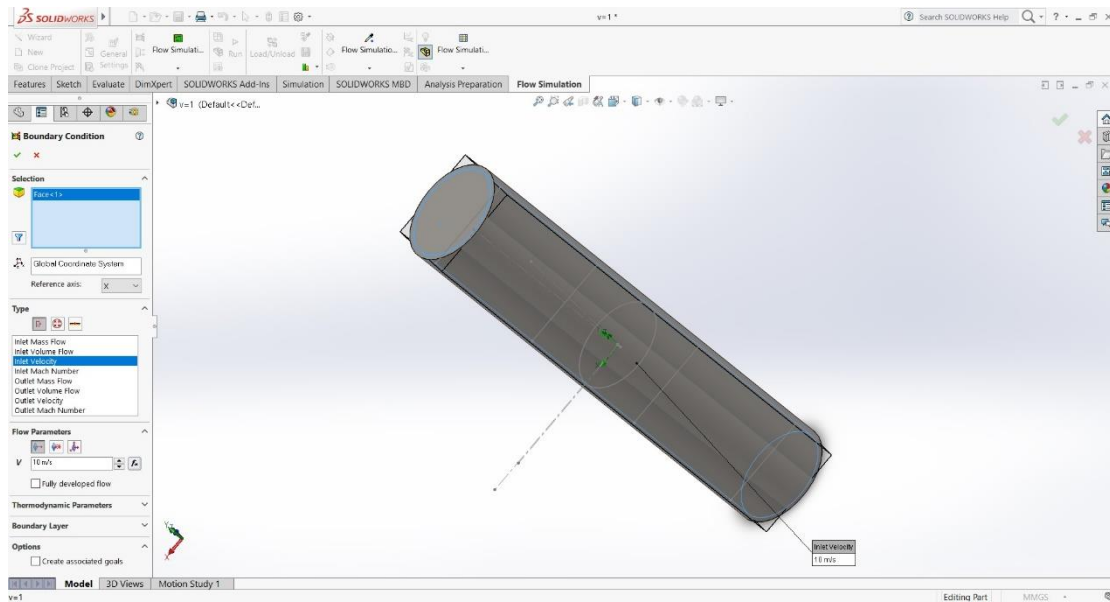
συστήματος ως ίση με την ατμοσφαιρική (101293Pa) και θερμοκρασία περιβάλλοντος (293.15K).



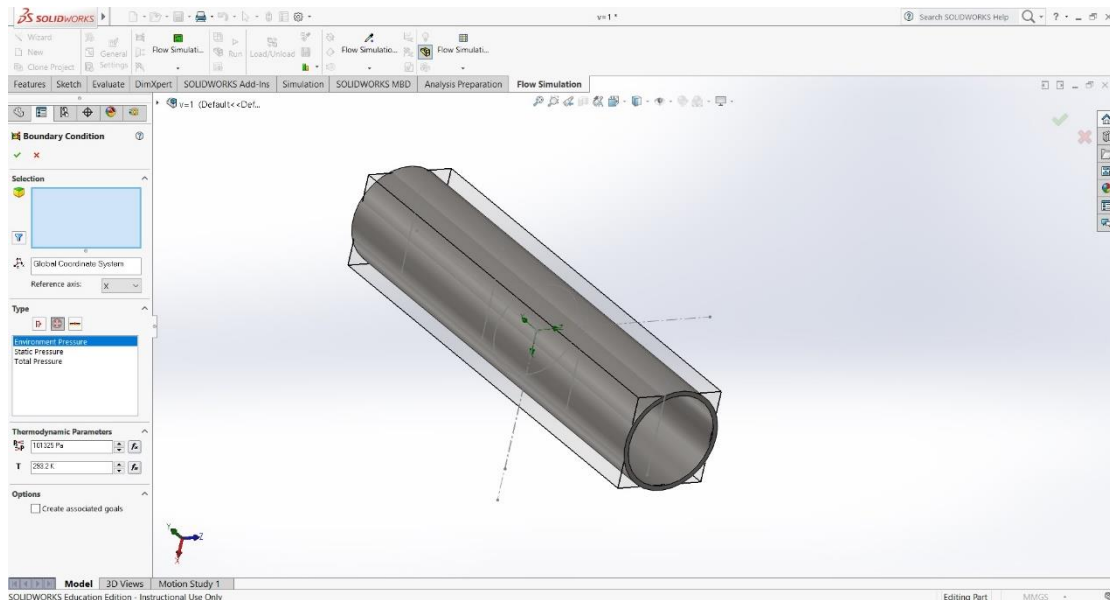
Εικόνα 3.15: Ορισμός νέας οριακής συνθήκης.



Εικόνα 3.16: Ορισμός οριακών συνθηκών για είσοδο (αριστερά) και για έξοδο (δεξιά).

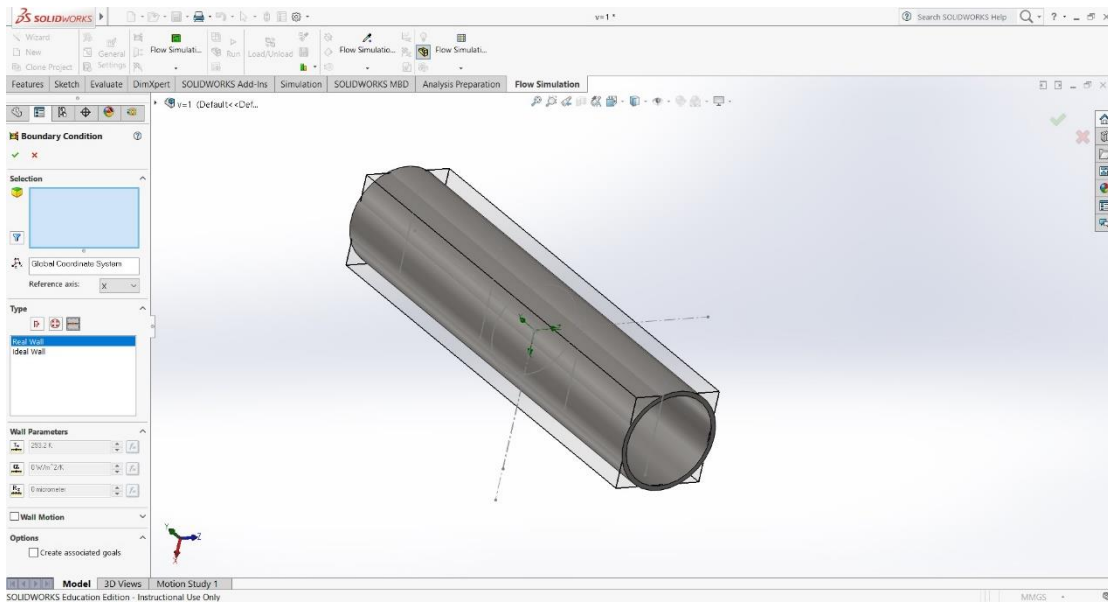


Εικόνα 3.17: Κατάσταση Εισόδου (Inlet conditions).



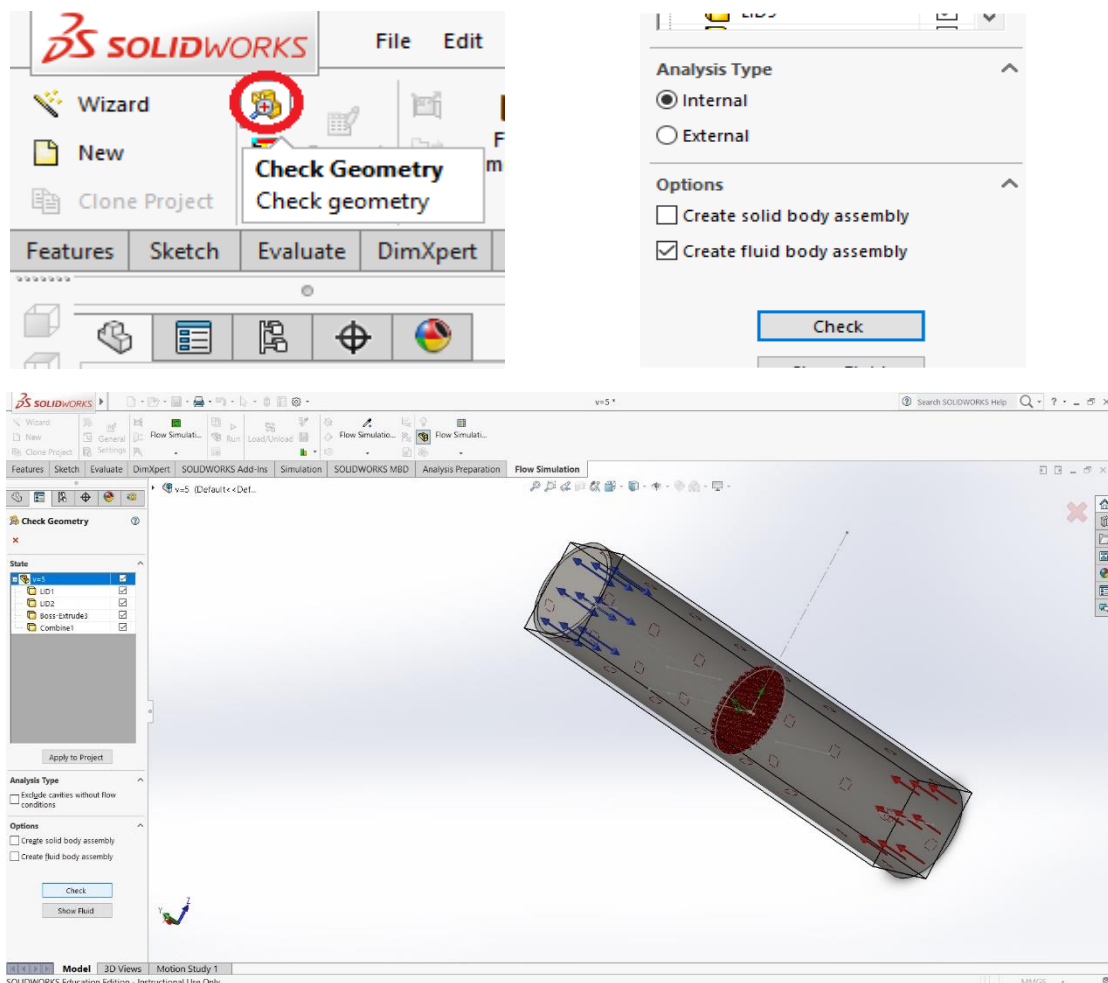
Εικόνα 3.18: Κατάσταση Εξόδου (Outlet Condition).

Τέλος επιλέγεται πραγματικός τοίχος (Real Wall) για το μεταλλικό πλέγμα και για τον εσωτερικό τοίχο της σωλήνωσης. Με την επιλογή του πραγματικού τοίχου (Real Wall), η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια του τοιχώματος είναι μηδενική, ενώ δίπλα στο τοίχωμα έχει πολύ μικρή τιμή. Αυτό αντιστοιχεί στην πραγματική ροή ενός αερίου, λόγω τριβών, ενώ στο κέντρο της διατομής η ταχύτητα του αερίου είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα, δεν επιλέγεται ιδανικός τοίχος (Ideal Wall). Στην περίπτωση αυτή, δεν θα υπήρχαν τριβές μεταξύ του αερίου και του τοιχώματος. Έτσι, τα αποτελέσματα στη προσομοίωση της ροής (Flow Simulation) δεν θα αντιστοιχούν σε ρεαλιστικά αποτελέσματα.



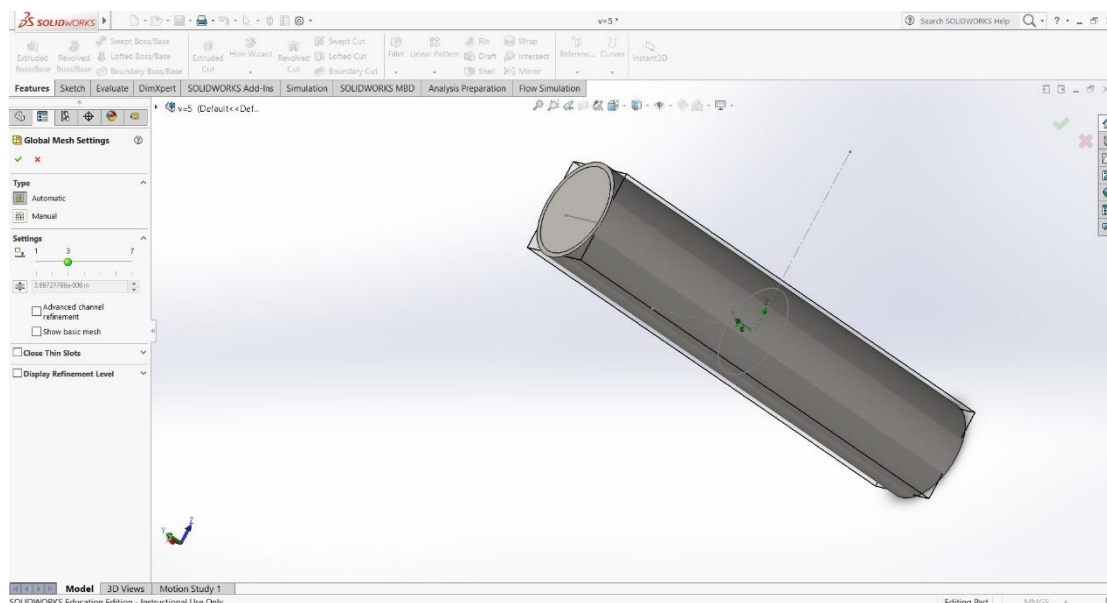
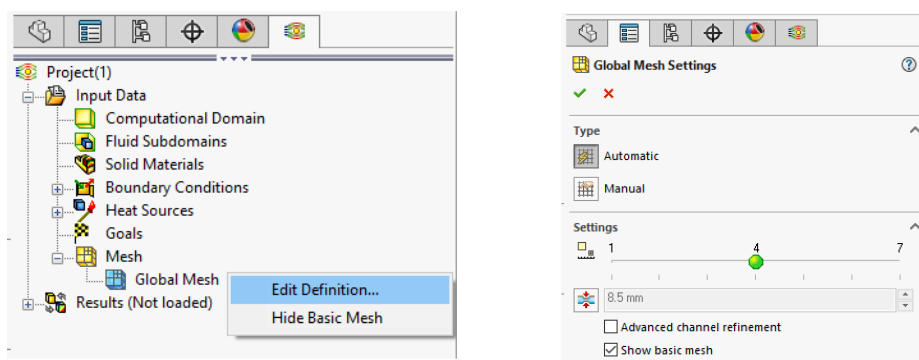
Εικόνα 3.19: Κατάσταση τοιχώματος (Wall condition).

Πριν από την προσομοίωση με την εντολή Check Geometry δημιουργείται ο όγκος του αερίου το οποίο θα μελετηθεί, καθώς γίνεται και έλεγχος της γεωμετρίας ώστε να εντοπιστούν και να διορθωθούν τυχόν αστοχίες οι οποίες θα οδηγούσαν σε λανθασμένα αποτελέσματα.



Εικόνα 3.20: Έλεγχος Γεωμετρίας.

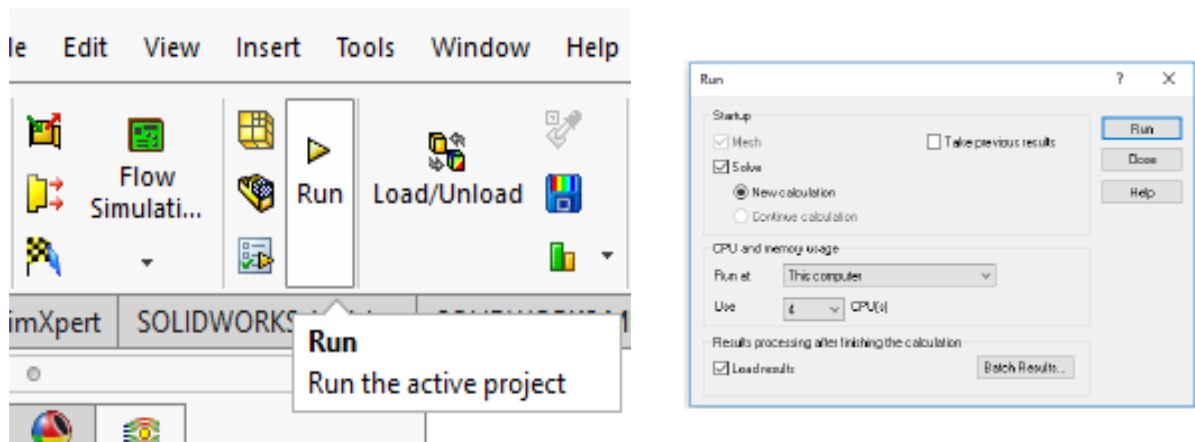
Με την επιλογή της εντολής Global Mesh Settings διαμορφώνεται το πόσο αραιό ή πυκνό θα είναι το υπολογιστικό πλέγμα. Το υπολογιστικό πλέγμα είναι ο χωρισμός του όγκου του αερίου και του στερεού της προσομοίωσης σε μικρά κελιά, στα οποία επιλύονται οι εξισώσεις του προγράμματος (π.χ συνέχειας, ορμής, ενέργειας). Υπάρχει δυνατότητα επιλογής επτά διαφορετικών επιπέδων. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των επιπέδων το πλέγμα γίνεται πιο πυκνό ενώ όσο μειώνεται πιο αραιό. Η επιλογή πυκνότερου πλέγματος συνεπάγεται μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια στα τελικά αποτελέσματα αλλά απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και χρόνο. Ο στόχος λοιπόν είναι η επιλογή ενός επιπέδου που θα οδηγήσει σε αρκετά ακριβή λύση σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 3.21: Επιλογή Χαρακτηριστικών Πλέγματος.

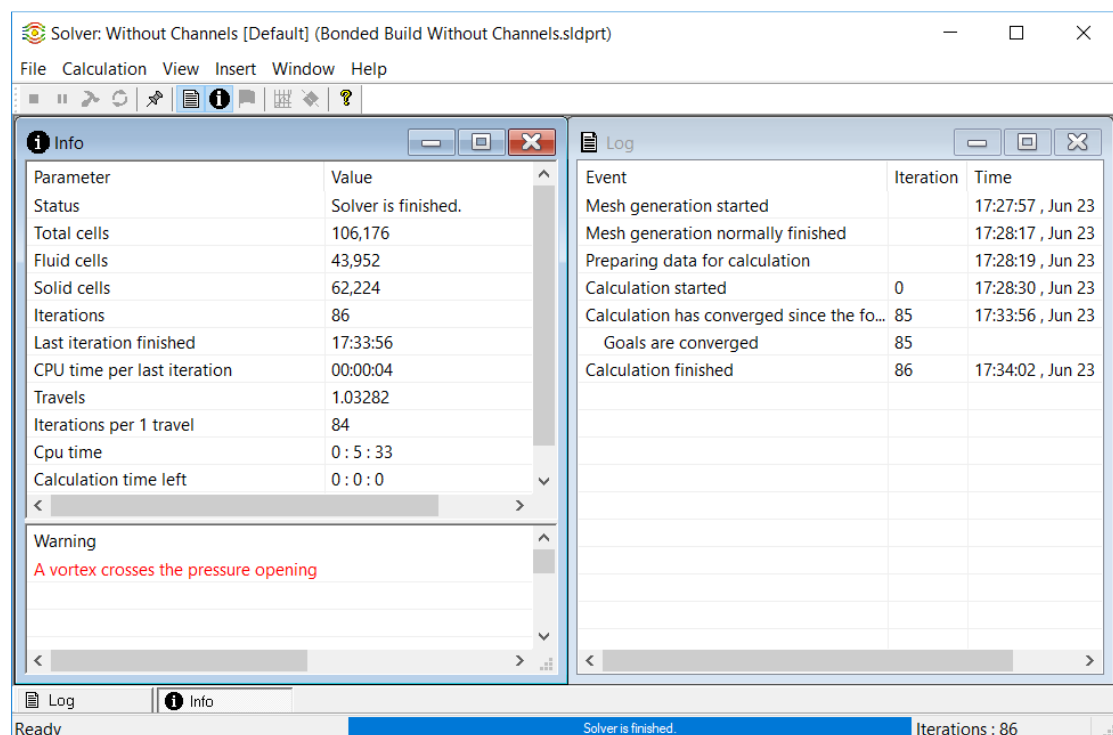
Τέλος επιλέγεται η εντολή Run η οποία βρίσκεται στο κέντρο και επάνω στην επιφάνεια εργασίας του Solidworks. Με την συγκεκριμένη εντολή αναδύεται ένα καινούριο παράθυρο στο οποίο επιλέγεται η υπολογιστική ισχύς που θέλει ο χρήστης να δώσει για τη

διεκπεραίωση της προσομοίωσης της ροής (Flow Simulation). Το μέγεθος της ισχύος επιλέγεται μέσω του αριθμού των πυρήνων της CPU που επιλέγουμε να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση. Αφού έχει οριστεί το μέγεθος της ισχύος επιλέγεται ξανά η εντολή Run με την οποία ξεκινάει η προσομοίωση της ροής (Flow Simulation).



Εικόνα 3.22: Αναδυόμενο παράθυρο εντολής Run.

Τέλος, με την επιλογή Results στην αριστερή στήλη, μπορούμε να επιλέξουμε τον τρόπο της παρουσίασης των αποτελεσμάτων που μας ενδιαφέρουν. Υπάρχουν πολλές επιλογές, όπως ισοψείς καμπύλες (isosurfaces). Στο πρώτο τουλάχιστον κομμάτι των ευρημάτων της εργασίας, για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα XY (XY plots).



Εικόνα 3.23: Σύνοψη υπολογιστικής διαδικασίας μετά την ολοκλήρωσή της.

4. Αρχικά Τρεξίματα & Δοκιμές

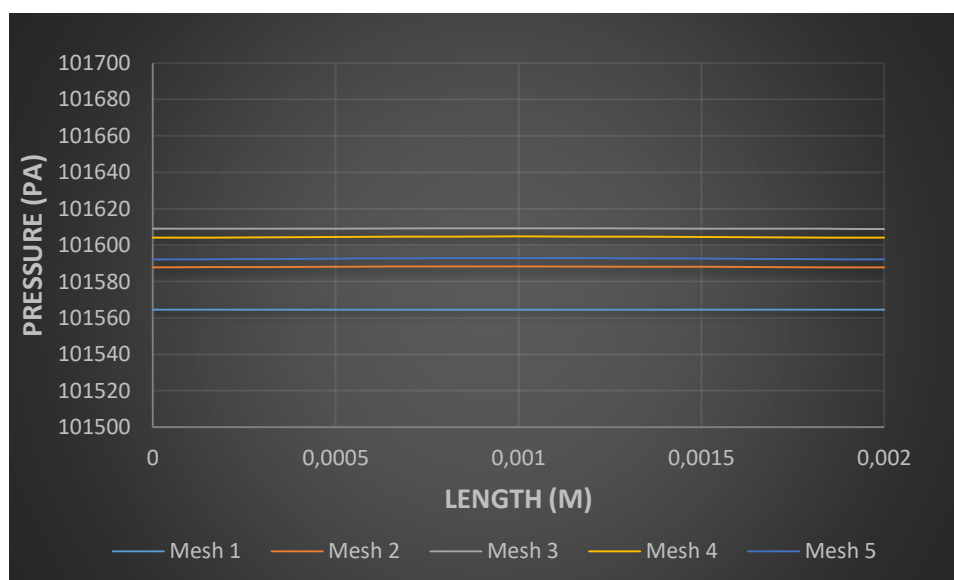
4.1 Περίληψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τις δοκιμές προσομοίωσης της ροής σε περιβάλλον Solidworks. Οι δοκιμές που έγιναν ήταν αρκετές ώστε τα τελικά αποτελέσματα να είναι πιο εμπειριστατωμένα σε σχέση με τη μεταβολή της ταχύτητας του αερίου στον αναγεννητή. Οι γεωμετρίες μεταλλικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτή του ενός φύλλου και των δύο φύλλων ευθυγραμμισμένω μεταξύ τους. Επίσης η ταχύτητες της ροής μέσα στον αναγεννητή ήταν αντίστοιχα 5 m/s και 50 m/s. Οι μετρήσεις της ταχύτητας έγιναν κατά μήκος της γεωμετρίας του αναγεννητή σε αρκετά σημεία. Τα σημεία πριν το πλέγμα αναφέρονται ως upstream (ανάντη), ενώ αυτά μετά το πλέγμα ως downstream (κατάντη). Ο στόχος ήταν η μελέτη της αξονική κατανομής της ταχύτητας στα επιλεγμένα σημεία. Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας στην αξονική διεύθυνση, μέσω του υπολογισμού του ολοκληρώματος της ταχύτητας κατά μήκος της διαμέτρου του αναγεννητή δεν έγινε στην παρούσα εργασία, καθώς ξεφεύγει από το αντικείμενό της, Η μέση ταχύτητα όμως αναμένεται να είναι σταθερή εξαιτίας της εξίσωσης της συνέχειας και της ελάχιστης αλλαγής της πυκνότητας λόγω της πολύ μικρής τιμής της πτώσης πίεσης σε σχέση με την πίεση του αερίου.

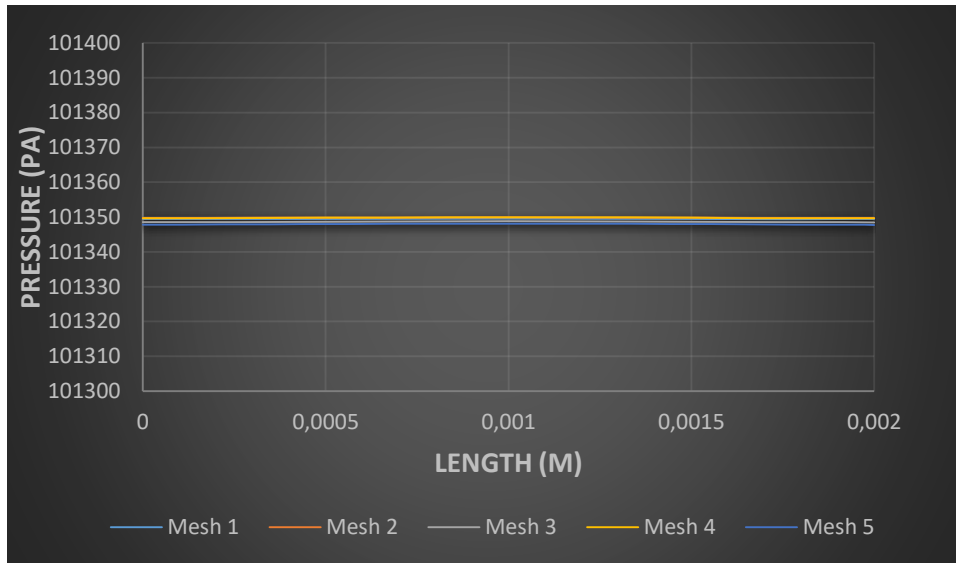
4.2 Δοκιμές με Διαφορετικές Γεωμετρίες

4.2.1 Επιλογή Πλέγματος & Σημείων για τις Δοκιμές

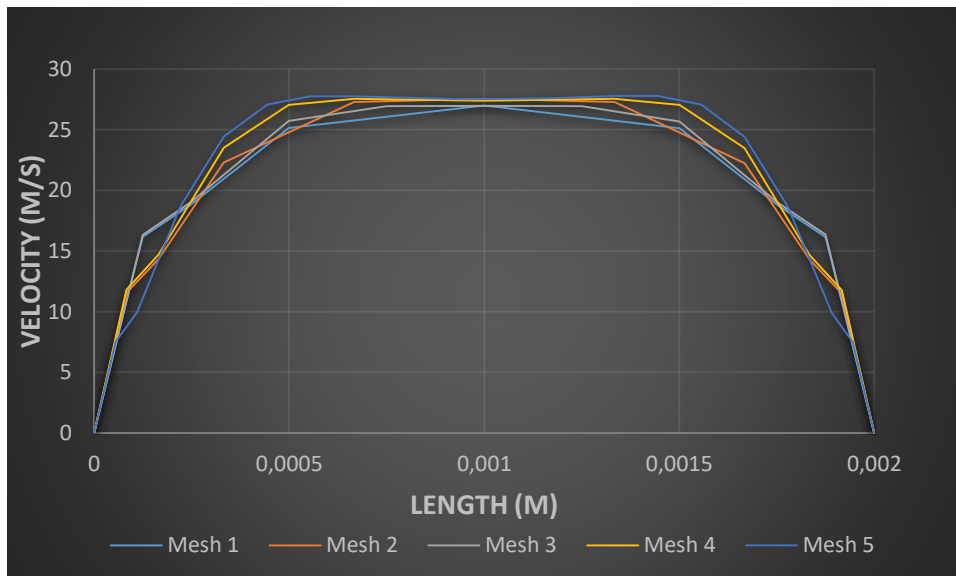
Ύστερα από αρκετές προσομοιώσεις για την βέλτιστη επιλογή πλέγματος και σημείων που θα χρησιμοποιηθούν στα παρακάτω κεφάλαια και υποκεφάλαια για δοκιμές προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα. Παρουσιάζεται η αξονική κατανομή της πίεσης και της ταχύτητας για πέντε (5) διαφορετικά πλέγματα, 1.5 mm ανάντη και κατάντη του πλέγματος.



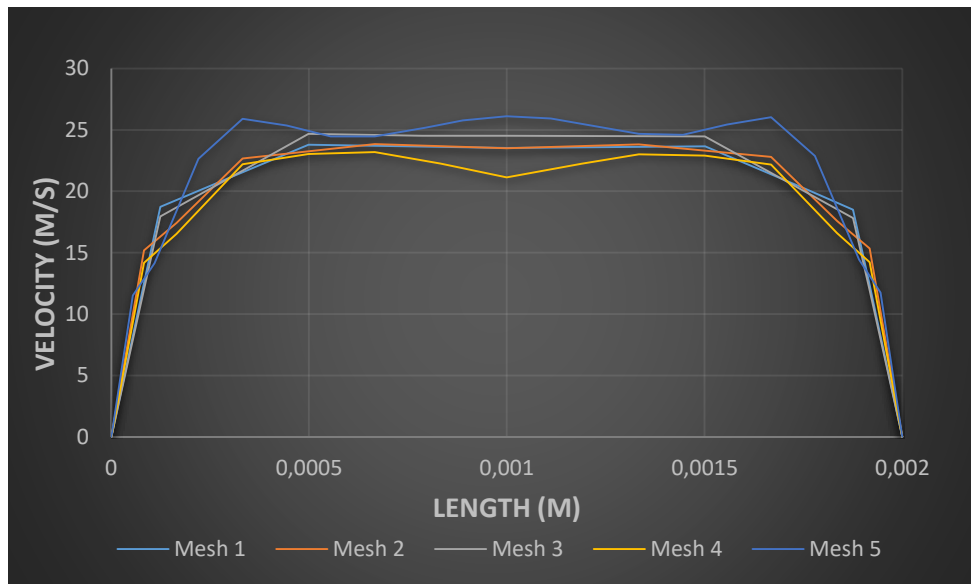
Διάγραμμα 4.1: Σύγκριση πίεσης διαφορετικών πλεγμάτων σε απόσταση 1.5 mm Upstream.



Διάγραμμα 4.2: Σύγκριση πίεσης διαφορετικών πλεγμάτων σε απόσταση 1.5 mm Downstream.



Διάγραμμα 4.3: Σύγκριση ταχύτητας αερίου διαφορετικών πλεγμάτων σε απόσταση 1.5 mm Upstream.

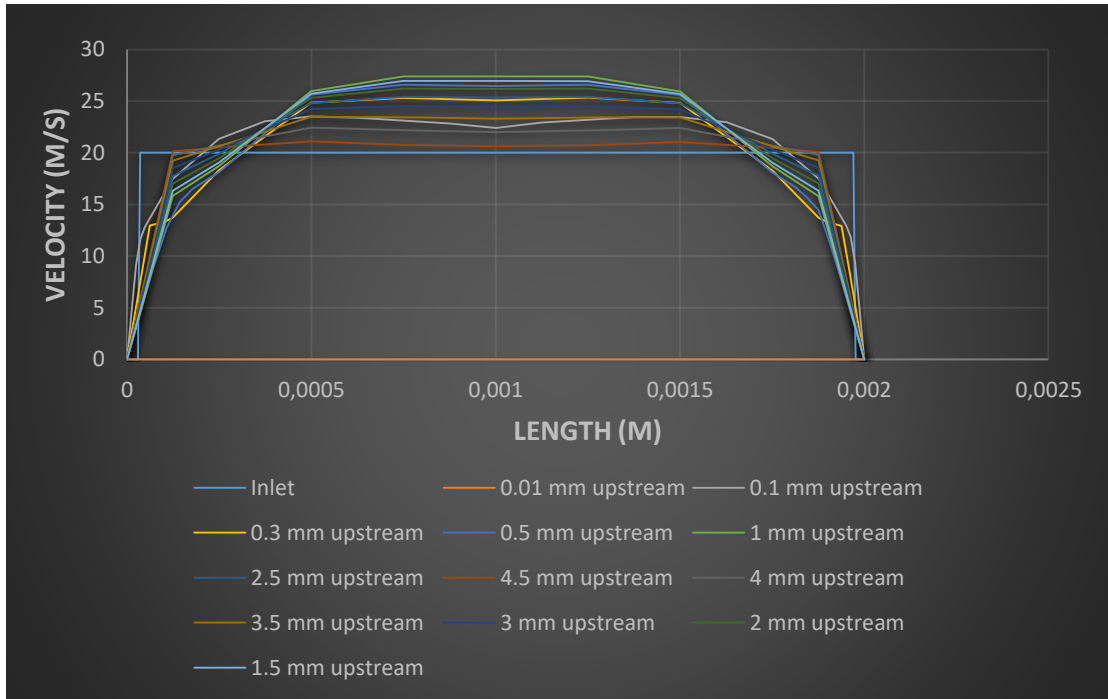


Διάγραμμα 4.4: Σύγκριση ταχύτητας αερίου διαφορετικών πλεγμάτων σε απόσταση 1.5 mm Downstream.

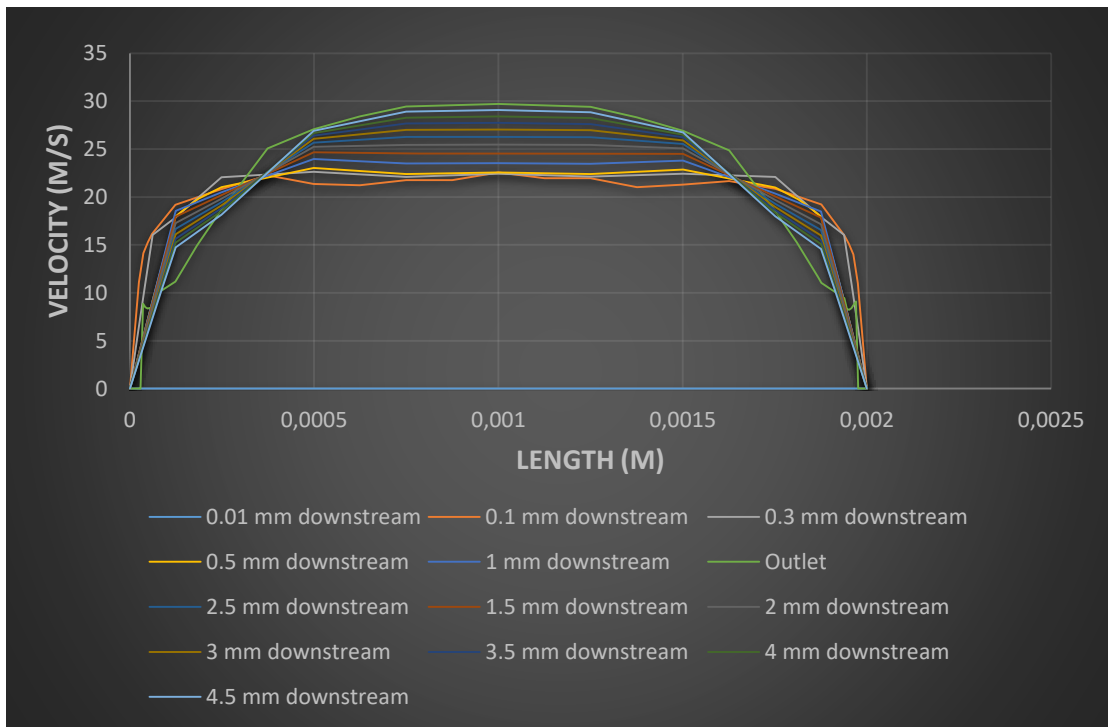
Στα διαγράμματα 4.1, 4.2, 4.3 και 4.4 μπορεί να παρατηρηθεί ότι για διαφορετικά πλέγματα η κατανομή της πίεσης και της ταχύτητας στο 1.5 mm upstream και downstream αντίστοιχα είναι ίδιες ή έχουν μικρές διαφορές. Ειδικότερα, η διαφορά της κατανομής της πίεσης μεταξύ των πλεγμάτων είναι αμελητέα σε σχέση με τη τάξη μεγέθους της πίεσης στη γεωμετρία. Επιπλέον, τα προφίλ της ταχύτητας έχουν μικρές μεταβολές μεταξύ τους και οι μεταβολές αυτές κρίνονται ελάχιστα σημαντικές ως προς τα αποτελέσματα που στοχεύονται να εξαχθούν από την παρούσα διπλωματική.

Παράλληλα, ο χρόνος κάθε δοκιμής αυξάνεται με πυκνότερο πλέγμα. Επομένως από τη στιγμή που η αλλαγή πλέγματος δεν διαφοροποιεί τα αποτελέσματα των δοκιμών και αυξάνει το χρόνο της προσομοίωσης, προτιμήθηκε η χρήση ενός σχετικά «ελαφρού» υπολογιστικού πλέγματος. Χρησιμοποιήθηκε το πλέγμα 2 (mesh 2). Πρέπει να σημειωθεί ότι για τις προσομοιώσεις με ένα μεταλλικό φύλλο ο απαιτούμενος χρόνος ακόμα και με το «πλέγμα 4» ήταν πολύ μικρός, λιγότερος από 10 λεπτά. Όμως, ο απαιτούμενος χρόνος της προσομοίωσης αυξανόταν εκθετικά για περισσότερα μεταλλικά φύλλα, ή για φύλλα σε στροφή μεταξύ τους. Από τη στιγμή που η χρήση υπολογιστικού πλέγματος με περισσότερα στοιχεία ήταν σχεδόν αδύνατη για προσομοιώσεις με τρία ή τέσσερα φύλλα πλέγματος, προτιμήθηκε να διατηρηθεί η ίδια ρύθμιση για το πλέγμα σε όλες τις προσομοιώσεις.

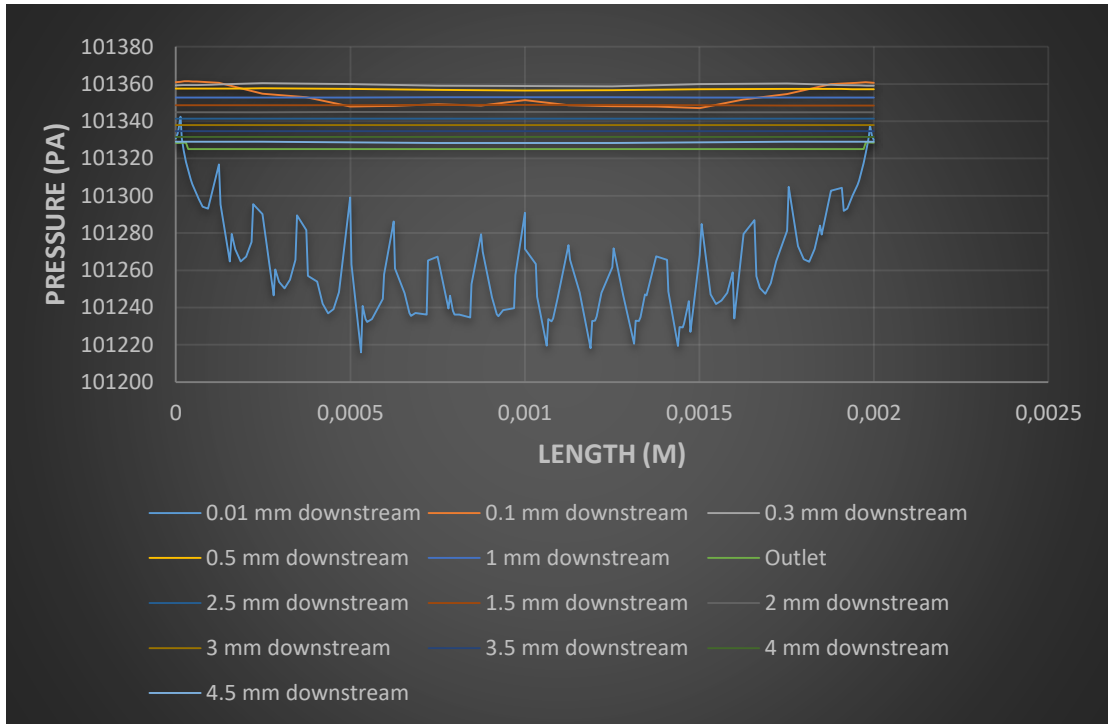
Η επιλογή σημείων για τη μέτρηση διάφορων μεγεθών στη γεωμετρία έγινε κατόπιν δοκιμών και αποτελεσμάτων που προέκυψαν και παρατίθενται μέσα από τα επόμενα διαγράμματα.



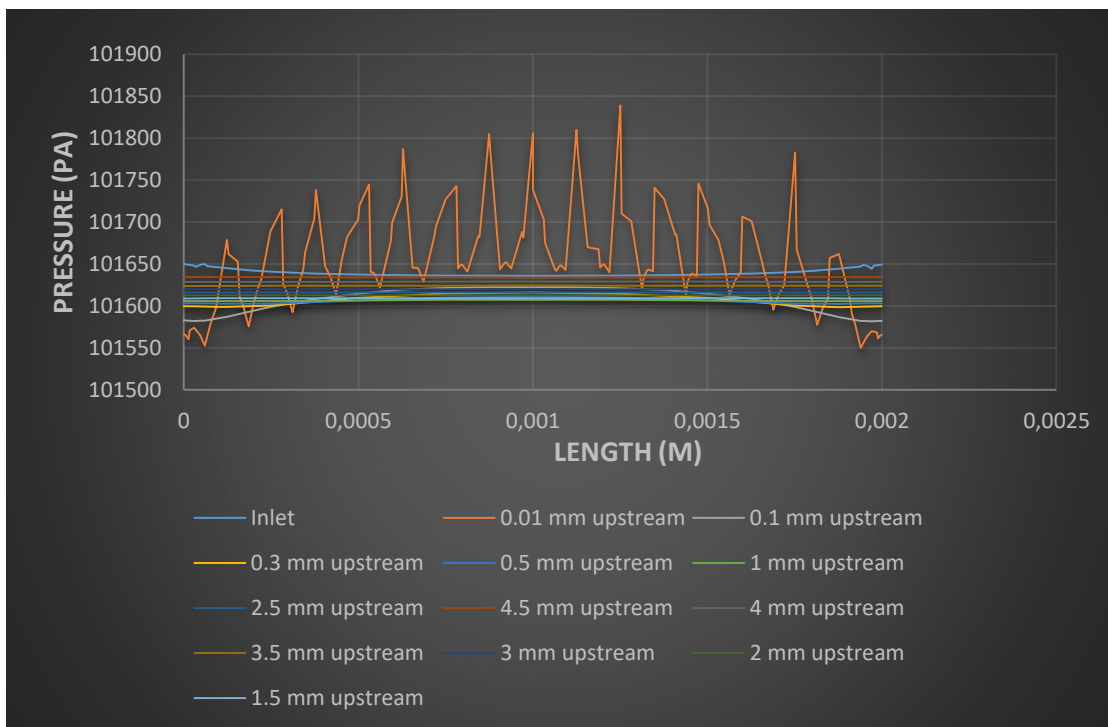
Διάγραμμα 4.5: Κατανομή ταχύτητας αερίου για ταχύτητα εισόδου 20 m/s Inlet.



Διάγραμμα 4.6: Κατανομή ταχύτητας αερίου για ταχύτητα εισόδου 20 m/s Outlet.



Διάγραμμα 4.7: Κατανομή πίεσης αερίου για ταχύτητα εισόδου 20 m/s Outlet.



Διάγραμμα 4.8: Κατανομή πίεσης αερίου για ταχύτητα εισόδου 20 m/s Inlet.

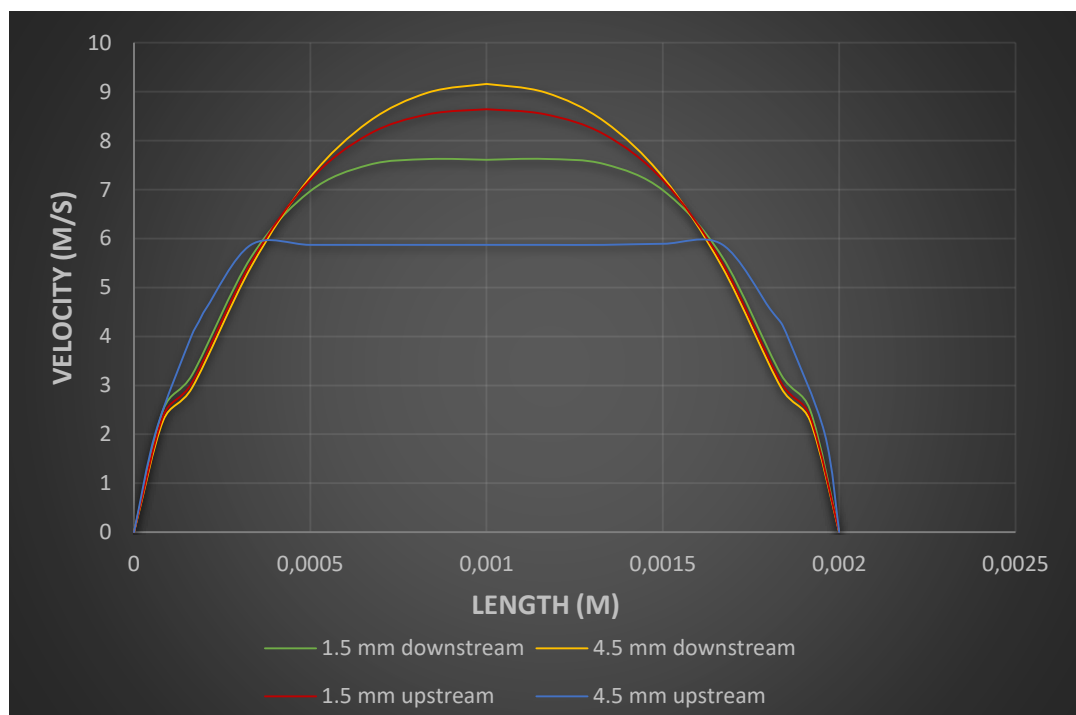
Από τα διαγράμματα 4.5, 4.6, 4.7 και 4.8 παρατηρείται ότι η κατανομή της ταχύτητας και της πίεσης για εργαζόμενο μέσο με ταχύτητα εισόδου 20 m/s σε πολύ μικρές αποστάσεις από το πλέγμα δεν είναι σταθερές. Ειδικά στην περίπτωση της πίεσης, βλέπουμε πολύ μεγάλες διακυμάνσεις κοντά στο πλέγμα. Η κατάσταση αρχίζει να ομαλοποιείται για απόσταση 0.5 mm πέρα από το πλέγμα του αναγεννητή.

Εν τέλει, τα σημεία τα οποία επιλέχθηκαν και στα οποία υπάρχει σταθερή κατανομή πίεσης και ταχύτητας είναι 1.5 mm και 4.5 mm upstream και downstream αντίστοιχα. Τα σημεία που απέχουν 4.5 mm από το πλέγμα του αναγεννητή είναι πολύ κοντά στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα και θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες εισόδου και εξόδου του αερίου. Στα σημεία 1.5 mm ανάντη και κατάντη του πλέγματος, η πίεση του αερίου είναι ίδια σε όλο το μήκος της ακτίνας του αγωγού.

Η επιλογή έγινε και με βάση το ότι η απόσταση μεταξύ των δύο επιπέδων 1.5 mm πριν και μετά το υπολογιστικό πλέγμα είναι η ίδια με την απόσταση μεταξύ 4.5 mm και 1.5 mm ανάντη και κατάντη (3 mm). Αυτό έγινε διότι η μετρούμενη διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο σημείων που απέχουν 1.5 mm από το πλέγμα οφείλεται σε ένα μεγάλο ποσοστό στο υπολογιστικό πλέγμα και σε ένα πολύ μικρότερο στις τριβές του αγωγού. Διατηρώντας αυτήν την αναλογία, μπορούσε να γίνει ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης του αερίου μεταξύ του πλέγματος και των επιφανειών που απέχουν 1.5 mm από αυτό λόγω τριβής. Αυτό εξηγείται καλύτερα στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5).

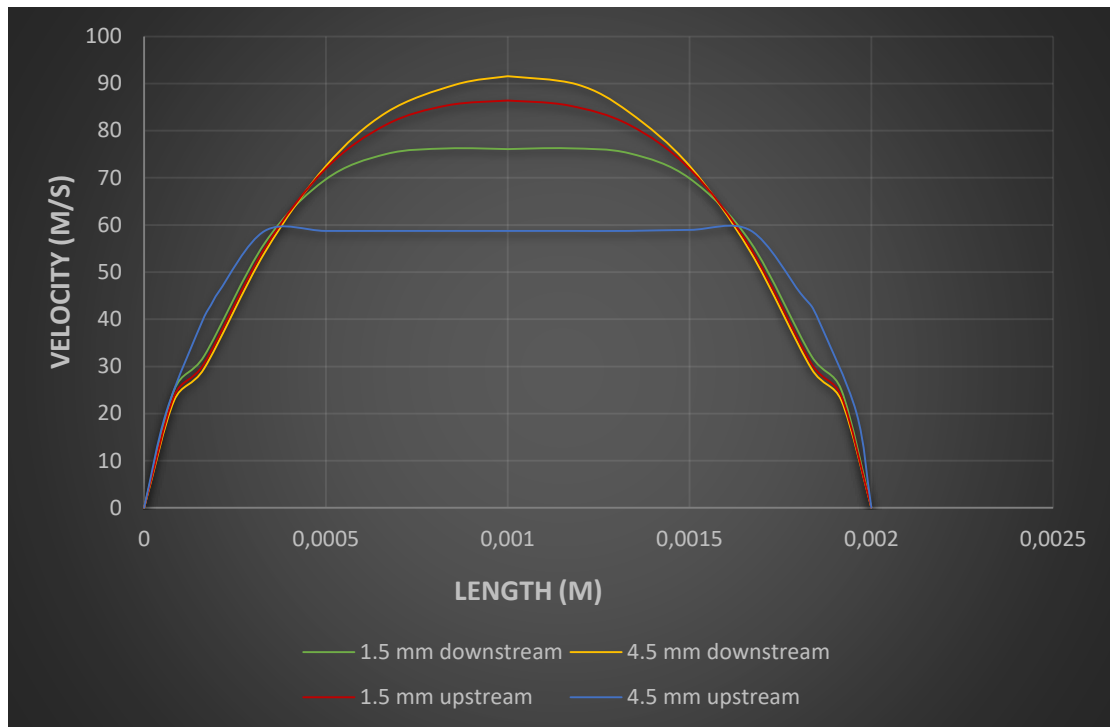
4.2.2 Δοκιμές & Αποτελέσματα

Αρχικά οι δοκιμές ξεκίνησαν με τη διάταξη του μεταλλικού πλέγματος του αναγεννητή να αποτελείται από ένα φύλλο και η ταχύτητα να εισέρχεται στον όγκο ελέγχου με 5 m/s. Οι μετρήσεις της ταχύτητας έγιναν κοντά στην είσοδο του αναγεννητή, δηλαδή στα 4.5 mm πριν το μεταλλικό πλέγμα, αλλά και στα 1.5 mm πριν το πλέγμα, σε μία απόσταση που θεωρείται αρκετά κοντά στο πλέγμα ώστε να φαίνονται οι επιδράσεις του στη ροή του αερίου, αλλά και αρκετά μακριά από το πλέγμα ώστε η ταχύτητα να είναι ομοιόμορφη. Αντίστοιχα, ελήφθησαν μετρήσεις στα 1.5 mm μετά το μεταλλικό πλέγμα και στα 4.5 mm, αρκετά κοντά στην έξοδο του σωλήνα.



Διάγραμμα 4.9: Κατανομή ταχύτητας 5 m/s σε αναγεννητή ενός φύλλου.

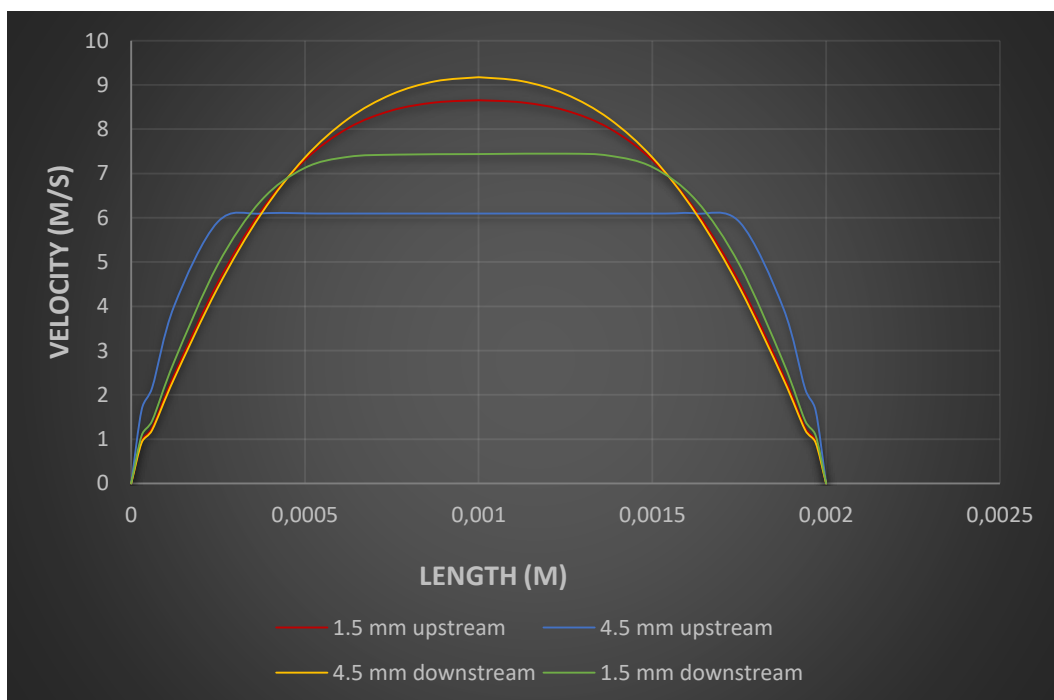
Η επόμενη δοκιμή πραγματοποιήθηκε για την ίδια γεωμετρία αλλά για ταχύτητα αερίου πολύ μεγαλύτερη της τάξεως των 50m/s. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα ίδια σημεία του όγκου ελέγχου, τα οποία περιεγράφηκαν στο παραπάνω διάγραμμα.



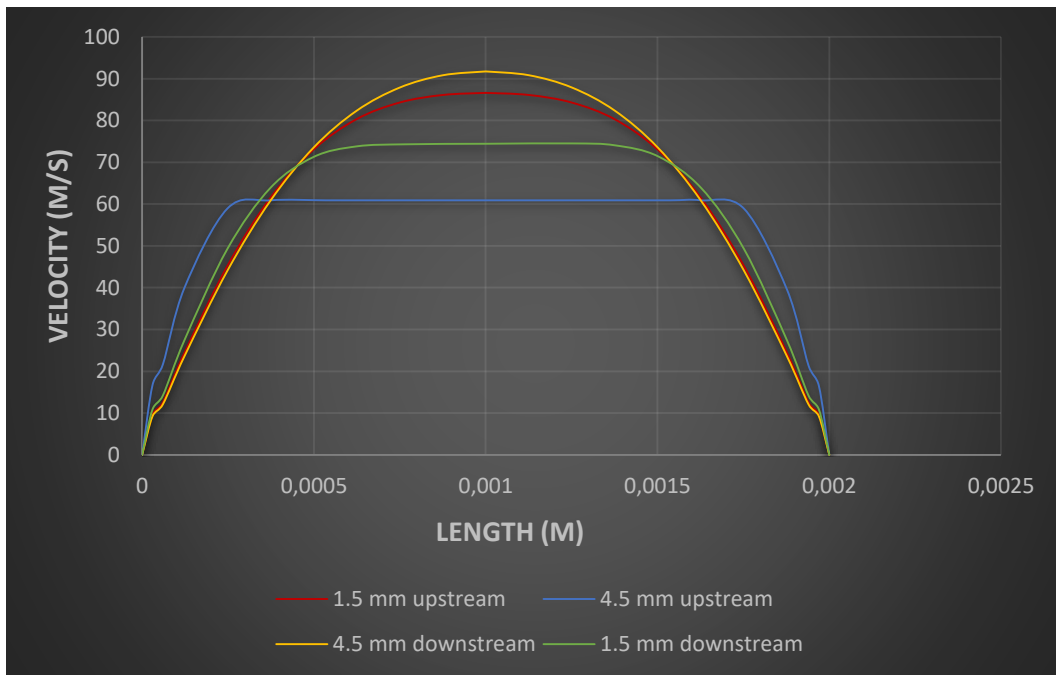
Διάγραμμα 4.10: Κατανομή ταχύτητας 50 m/s σε αναγεννητή ενός φύλλου.

Στο διαγράμματα 4.9 και 4.10 για ένα φύλλο μεταλλικού πλέγματος παρατηρείται ομοιόμορφη ταχύτητα σε όλη τη διατομή του αναγεννητή. Η ταχύτητα στο μέσο αυξάνεται και καθώς πλησιάζει στην έξοδο μειώνεται.

Στη συνέχεια, έγινε η ίδια μελέτη για μεταλλικό πλέγμα δύο ευθυγραμμισμένων φύλλων. Η ταχύτητα του αερίου στην είσοδο του αγωγού είναι ξανά 5 και 50 m/s. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 4.11: Κατανομή ταχύτητας 5 m/s σε αναγεννητή δύο φύλλων.



Διάγραμμα 4.12: Κατανομή ταχύτητας 50 m/s σε αναγεννητή δύο φύλλων.

Τα διαγράμματα 4.11 και 4.12 ακολουθούν το ίδιο μοτίβο κατανομής της ταχύτητας με αυτά του ενός φύλλου. Οι διαφορές τους είναι αμελητέες καθώς η πτώση πίεσης και στην περίπτωση του ενός και δύο φύλλων μεταλλικού πλέγματος είναι μικρή οπότε δεν αλλάζει κάτι εμφανώς.

Συμπερασματικά για τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως κοντά στο τοίχωμα η ταχύτητα είναι ίση με το μηδέν (0). Θεωρητικά στην είσοδο η ταχύτητα είναι ομοιόμορφη και όσο προχωράμε μεγαλώνει η ταχύτητα στο κεντρικό τμήμα και μειώνεται προς τα άκρα. Βλέπουμε πως όσο φθάνουμε προς την έξοδο στο κομμάτι 0 - 5 mm η πτώση είναι πιο απότομη. Όμως, η μέση ταχύτητα που θα προκύψει με τον υπολογισμό του ολοκληρώματος της ταχύτητας ως προς τη διάμετρο είναι σταθερή και ίση με την ταχύτητα εισόδου.

5. Μελέτη Πτώσης Πίεσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν για διάφορους αριθμούς φύλλων μεταλλικού πλέγματος. Δοκιμάστηκε ροή διαμέσων ενός (1), δύο (2), τριών (3) και τεσσάρων (4) μεταλλικών πλεγμάτων τοποθετημένων σε παράλληλη διεύθυνση μεταξύ τους. Επίσης δοκιμάστηκε και η ροή διαμέσων δύο (2) πλεγμάτων, τα οποία είναι σε στροφή μεταξύ τους, κάτι που βρίσκεται πιο κοντά στις συνθήκες ενός πραγματικού αναγεννητή. Πιο αναλυτικά μέσα από τα διαγράμματα μελετάται η πτώση πίεσης του εργαζόμενου μέσου σε σχέση με την ταχύτητα που αναπτύσσει. Παράλληλα παρουσιάζονται διάφοροι συντελεστές του αερίου οι οποίοι μεταβάλλονται ανάλογα με τη γεωμετρία του πλέγματος. Τέλος γίνεται σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μεταλλικών πλεγμάτων για την επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας.

5.1 Σχεδιασμός Εκπόνησης Δοκιμών & Αποτελέσματα

5.1.1 Υπολογισμός Πτώσης Πίεσης

Ο υπολογισμός πτώσης πίεσης πραγματοποιήθηκε κατόπιν μετρήσεως αυτής 1.5 mm πριν και 1.5 mm μετά το μεταλλικό πλέγμα. Η πτώση πίεσης οφείλεται κατά κύριο λόγο στο μεταλλικό πλέγμα και εξαρτάται από την πυκνότητα αυτού. Επίσης η πτώση πίεσης είναι αποτέλεσμα των τριβών που δημιουργούνται μεταξύ του εργαζόμενου μέσου (αερίου) και του σωλήνα στο οποίο κινείται.

Για παράδειγμα, εξετάζουμε τη ροή αερίου διαμέσω ενός μεταλλικού πλέγματος με ταχύτητα εισόδου ίση με 20 m/s. Μετρήθηκε η πίεση σε τέσσερα σημεία: Αμέσως μετά την είσοδο, 1.5 mm πριν το μεταλλικό πλέγμα, 1.5 mm μετά το πλέγμα και λίγο πριν την έξοδο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1. Από αυτόν, προκύπτουν οι πτώσεις της πίεσης στα τρία διαστήματα που ορίζονται. Αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Υπολογίζεται επίσης η πτώση της πίεσης ανά μονάδα μήκους του αγωγού.

Σημείο	Πίεση (Pa)
Είσοδος (inlet)	101633.6
1.5(mm) πριν το πλέγμα (upstream)	101609.0
1.5(mm) μετά το πλέγμα (downstream)	101344.6
Έξοδος (outlet)	101331.3

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα μέτρησης πίεσης.

Διάστημα	Πτώση Πίεσης (Pa)	Πτώση πίεσης / μήκος (Pa/mm)
Είσοδος – 1.5(mm) upstream	24.6	8.2
1.5(mm) upstream – 1.5(mm) downstream	264.5	88.2
1.5(mm) downstream – Έξοδος	13.3	4.45

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα πτώσης πίεσης και πτώσης πίεσης ανά μονάδα μήκους.

Παρατηρούμε πως η πτώση πίεσης μεταξύ των σημείων πριν και μετά το πλέγμα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της πτώσης που υπολογίστηκε στα άλλα δύο διαστήματα. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς στα δύο ακραία διαστήματα η πτώση πίεσης προκύπτει μόνο από την τριβή του ρευστού στα τοιχώματα του αγωγού, ενώ στο ενδιάμεσο τμήμα υπάρχει η τριβή

και η επίδραση του πλέγματος. Βλέπουμε όμως, ότι η επίδραση του πλέγματος είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την επίδραση της τριβής. Δευτερευόντως, παρατηρούμε ότι η πτώση πίεσης είναι αρκετά μεγαλύτερη πριν από το μεταλλικό πλέγμα.

Για να υπολογίσουμε ακριβώς την πτώση της πίεσης που προκύπτει από την παρουσία του πλέγματος, χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα στην τελευταία στήλη του Πίνακα 5.2, τα οποία δείχνουν την πτώση πίεσης ανά χιλιοστό του αγωγού. Θεωρούμε πως η πτώση πίεσης λόγω τριβής ανά μονάδα μήκους στο τελευταίο 1.5 mm πριν το πλέγμα είναι ίση με την αντίστοιχη μείωση της πίεσης μεταξύ της εισόδου και του σημείου 1.5 mm πριν τον αγωγό. Αντίστοιχα θεωρούμε και για το τμήμα μετά το πλέγμα. Αυτό γίνεται σαφές στον παρακάτω πίνακα. Υπολογίζουμε την πτώση πίεσης λόγω της τριβής στα διαστήματα μήκους 1.5 mm πριν και μετά το πλέγμα, και την αφαιρούμε από την πτώση πίεσης που έχει εξαχθεί από το πρόγραμμα. Έτσι, υπολογίζεται η πτώση της πίεσης που οφείλεται αποκλειστικά στην ύπαρξη του πλέγματος και στα φαινόμενα που δημιουργούνται λόγω αυτού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλους τους υπολογισμούς στην εργασία σχετικά με την πτώση πίεσης.

Διάστημα	Πτώση πίεσης
1.5(mm) upstream – 1.5(mm) downstream (total)	264.5 (Pa)
Είσοδος – 1.5(mm) upstream (ανά μονάδα μήκους - λόγω τριβών)	8.2 (Pa/mm)
1.5(mm) upstream – πλέγμα (ανά μονάδα μήκους – λόγω τριβών)	8.2 (Pa/mm)
1.5(mm) upstream – πλέγμα (λόγω τριβών)	12.3 (Pa)
1.5(mm) downstream – Έξοδος (ανά μονάδα μήκους - λόγω τριβών)	4.45 (Pa/mm)
Πλέγμα – 1.5(mm) downstream (ανά μονάδα μήκους - λόγω τριβών)	4.45 (Pa/mm)
Πλέγμα – 1.5(mm) downstream (λόγω τριβών)	6.4 (Pa)
1.5(mm) upstream – 1.5 (mm) downstream (λόγω τριβών)	18.7 (Pa)
1.5(mm) upstream – 1.5(mm) downstream (λόγω πλέγματος)	245.8 (Pa)

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα πτώσης πίεσης λόγω τριβών.

5.1.2 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Ένα Φύλλο Μεταλλικού Πλέγματος

Αρχικά η μελέτη επικεντρώνεται στη πτώση της πίεσης για αναγεννητή με σχεδιασμό μεταλλικού πλέγματος ενός φύλλου. Το εύρος των ταχυτήτων που επιλέχθηκαν είναι από 0.5 m/s έως 100 m/s. Ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων της πρώτης δοκιμής καθώς και των υπολοίπων έγιναν με τις παρακάτω εξισώσεις και συνοψίζονται στο παρακάτω πίνακα. Η καταστατική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της πυκνότητας:

$$\text{Καταστατική εξίσωση: } \rho = \frac{P}{R \cdot T}$$

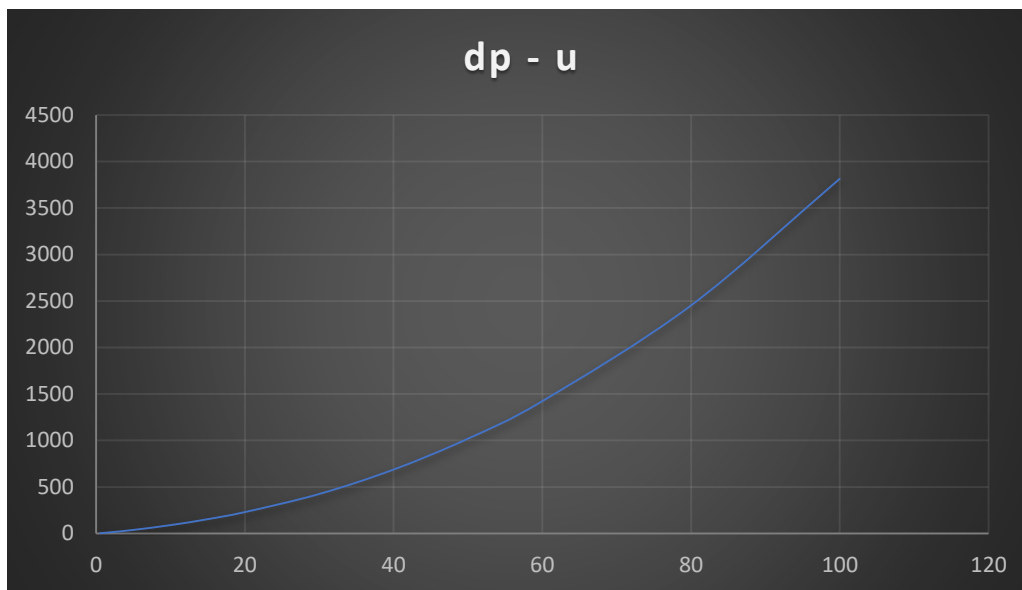
$$\text{Αριθμός Reynolds: } Re = \frac{\rho \cdot u \cdot dh}{\mu}$$

Συντελεστής τριβής: $C_f = \frac{dp \cdot m \cdot dh^2}{2\mu \cdot L_\mu^2 \cdot \dot{m}}$ $f = \frac{C_f}{Re}$

U (m/s)	dp (Pa)	Re	f	Cf	ρ (kg/m ³)
0.5	3.16	0.23	212.62	50.46	0.166
1	6.45	0.47	108.51	51.51	0.166
2	13.48	0.94	56.74	53.88	0.166
5	38.04	2.37	25.62	60.82	0.166
10	89.71	4.74	15.10	71.71	0.166
15	153.77	7.12	11.50	81.94	0.166
20	245.8	9.49	9.68	91.98	0.166
30	424.85	14.24	7.94	113.20	0.166
40	687.66	18.98	7.23	137.41	0.166
50	1019.84	23.73	6.86	163.04	0.166
60	1423.50	28.48	6.65	189.95	0.166
80	2452.88	37.97	6.45	245.08	0.166
100	3815.29	47.47	6.42	304.97	0.166

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής σε αναγεννητή με ένα φύλλο μεταλλικού πλέγματος.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου.



Διάγραμμα 5.1: Μεταβολή πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητή με ένα φύλλο μεταλλικού πλέγματος.

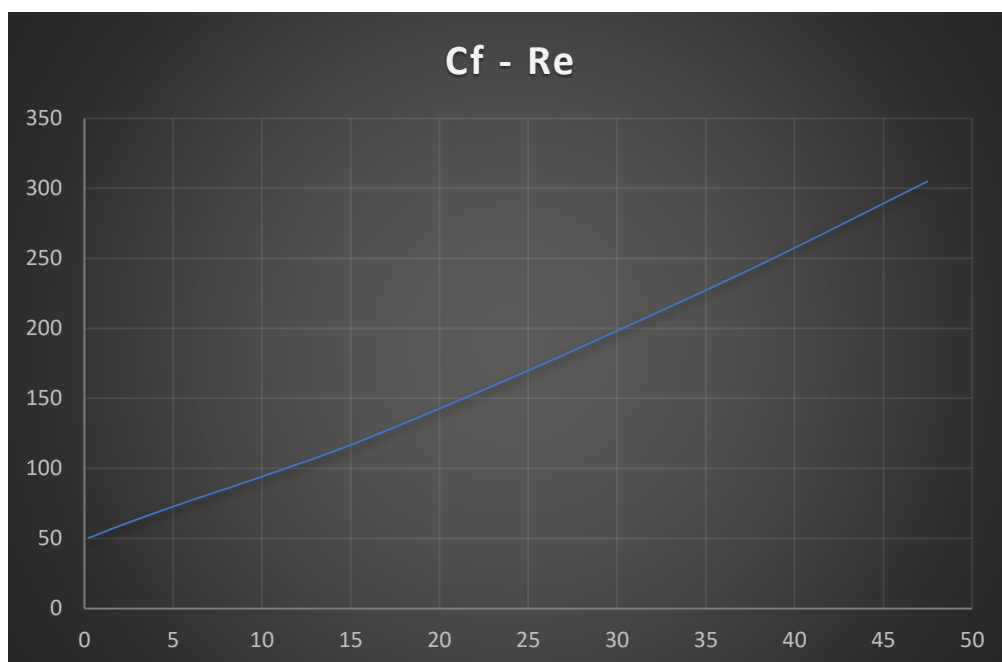
Στο διάγραμμα 5.1 παρατηρείται πως για μικρές ταχύτητες η πτώση πίεσης αυξάνεται αναλογικά με την ταχύτητα, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ο ρυθμός αύξησης της μεταβολής της πίεσης είναι θετικός, δηλαδή μία σταθερή αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μεγαλύτερη πτώση πίεσης από ότι για μικρότερες ταχύτητες. Ένα όριο θα μπορούσε να τεθεί γύρω στα 30 m/s.

Αν εκφραζόταν η πτώση πίεσης ως προς την ταχύτητα με τη μορφή εξίσωσης, θα αποτελούσαν από δύο όρους: Έναν ανάλογο της ταχύτητας και έναν ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του

αερίου στην είσοδο του σωλήνα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξησή της, κατά απόλυτη τιμή, όταν διέρχεται από το πλέγμα. Αυτό συνδέεται με μεγαλύτερη μείωση της πυκνότητας του αερίου (από την εξίσωση της συνέχειας) και συνεπώς με μεγαλύτερη μείωση της πίεσης.

Στη συγκεκριμένη εργασία, επειδή η δυναμική πίεση είναι πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους σε σχέση με την ολική πίεση, η πυκνότητα θεωρείται προσεγγιστικά σταθερή. Αυτό δεν είναι λάθος, καθώς η πτώση πίεσης είναι πολύ μικρή σε σχέση με την πίεση της εισόδου. Όμως, ακόμα και έτσι, το φαινόμενο της αύξησης του ρυθμού μεταβολής της πτώσης πίεσης με την ταχύτητα είναι εμφανές.

Στο τελευταίο διάγραμμα (5.2) για ένα φύλλο αναγεννητή απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής σε σχέση με τον αριθμό Reynolds. Η σχέση αυτή (C_f - Re) είναι σημαντική για την περιγραφή του αναγεννητή ως προς την πτώση πίεσης σε εφαρμογές που σχετίζονται με μηχανές Stirling. Από το διάγραμμα παρατηρούμε πως ο συντελεστής τριβής με τον αριθμό Reynolds έχουν μια σχέση περίπου γραμμική.



Διάγραμμα 5.2: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητή με ένα φύλλο μεταλλικού πλέγματος.

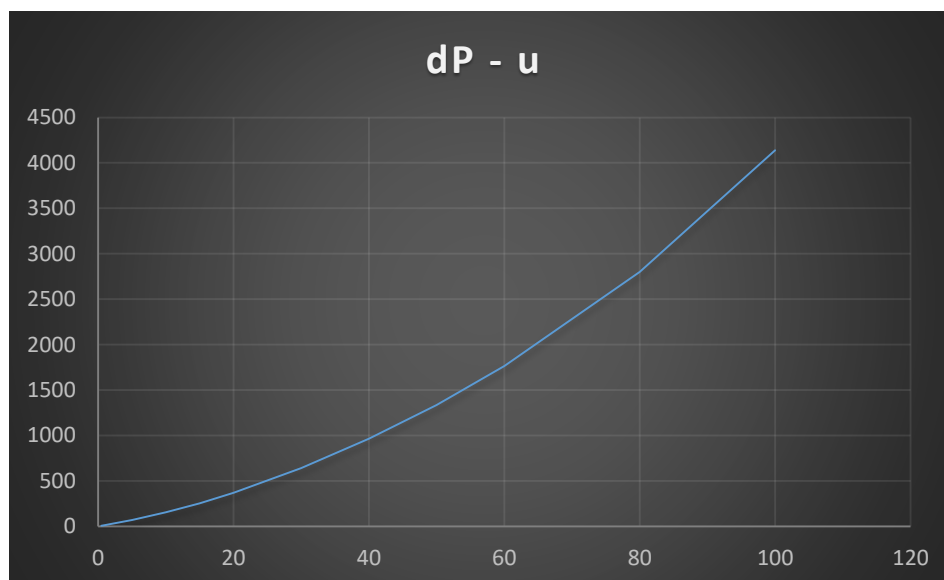
5.1.3 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Δύο Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν στα επόμενα διαγράμματα για αναγεννητή με μεταλλικό πλέγμα δύο και τριών φύλλων ακολουθούν το ίδιο πρότυπο μεταβολής πίεσης όπως σε αυτό με το ένα φύλλο όμως η τάξη μεγέθους της διαφοράς πίεσης είναι αρκετά μεγαλύτερη στα πλέγματα με δύο και τρία φύλλα.

U (m/s)	dp (Pa)	Re	f	Cf	ρ (kg/m ³)
0.5	6.22	0.23	209.75	49.78	0.166
1	13.40	0.47	112.81	53.55	0.166
2	27.10	0.94	57.05	54.17	0.166
5	70.61	2.37	23.77	56.44	0.166
10	155.01	4.74	13.05	61.95	0.166
15	254.73	7.12	9.53	67.87	0.166
20	369.08	9.49	7.76	73.75	0.166
30	640.79	14.24	5.99	85.36	0.166
40	964.22	18.98	5.07	96.34	0.166
50	1336.26	23.73	4.49	106.81	0.166
60	1763.34	28.48	4.12	117.45	0.166
80	2800.80	37.97	3.68	139.92	0.166
100	4138.21	47.47	3.48	165.39	0.166

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής σε αναγεννητή με δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου για αναγεννητή με μεταλλικό πλέγμα δύο φύλλων.

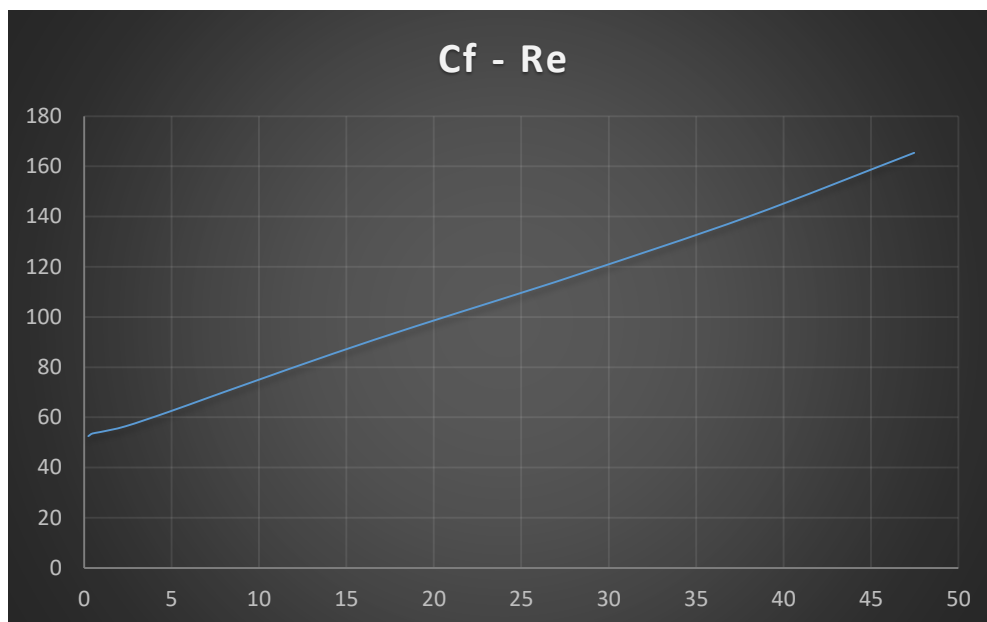


Διάγραμμα 5.3: Μεταβολή πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητή με δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Όπως και στο διάγραμμα για ένα φύλλο έτσι και σε αυτό για δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος παρατηρείται πως για μικρές ταχύτητες η πτώση πίεσης αυξάνεται αναλογικά με

την ταχύτητα, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ο ρυθμός αύξησης της μεταβολής της πίεσης είναι θετικός.

Στο επόμενο διάγραμμα για δύο φύλλα αναγεννητή απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής σε σχέση με τον αριθμό Reynolds.



Διάγραμμα 5.4: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητή με δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Από το διάγραμμα 5.4 παρατηρούμε πως ο συντελεστής τριβής με τον αριθμό Reynolds έχουν μια σχέση περίπου γραμμική.

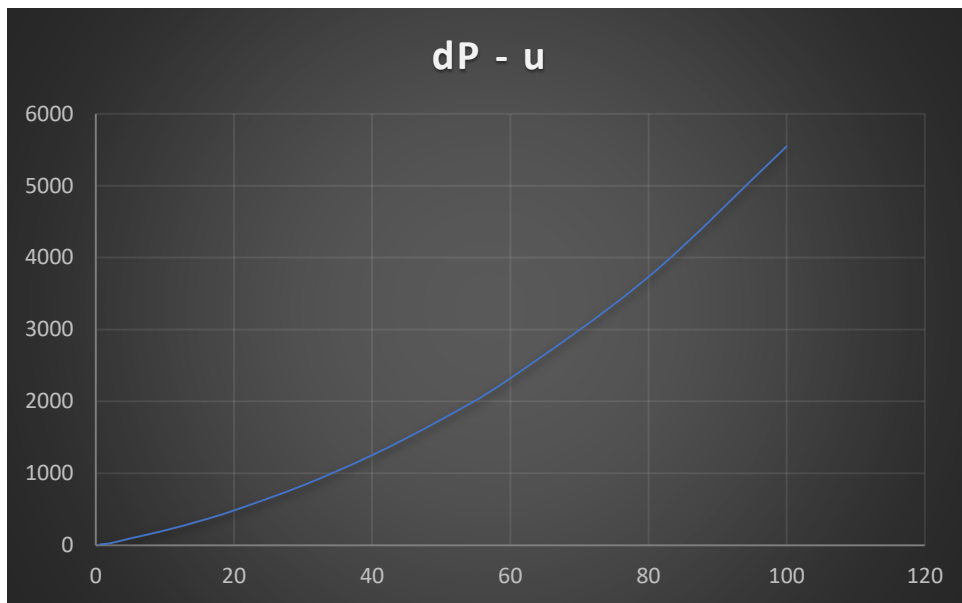
5.1.4 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Τρία Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος

Στο παρών υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέσα από πίνακες και διαγράμματα για τις δοκιμές στον αναγεννητή με τρία φύλλα μεταλλικό πλέγμα.

U (m/s)	dp (bar)	Re	f	Cf	ρ (kg/m ³)
0.5	9.15	0.23	205.57	48.79	0.166
1	18.41	0.47	103.34	49.05	0.166
2	27.10	0.94	38.03	49.90	0.166
5	96.33	2.37	21.62	51.33	0.166
10	207.46	4.74	11.64	55.27	0.166
15	337.38	7.12	8.41	59.93	0.166
20	485.41	9.49	6.8	64.66	0.166
30	834.79	14.24	5.20	74.14	0.166
40	1254.48	18.98	4.40	83.56	0.166
50	1748.99	23.73	3.92	93.20	0.166
60	2323.57	28.48	3.62	103.18	0.166
80	3731.98	37.97	3.27	124.29	0.166
100	5545.80	47.47	3.11	147.76	0.166

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής σε αναγεννητή με τρία φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

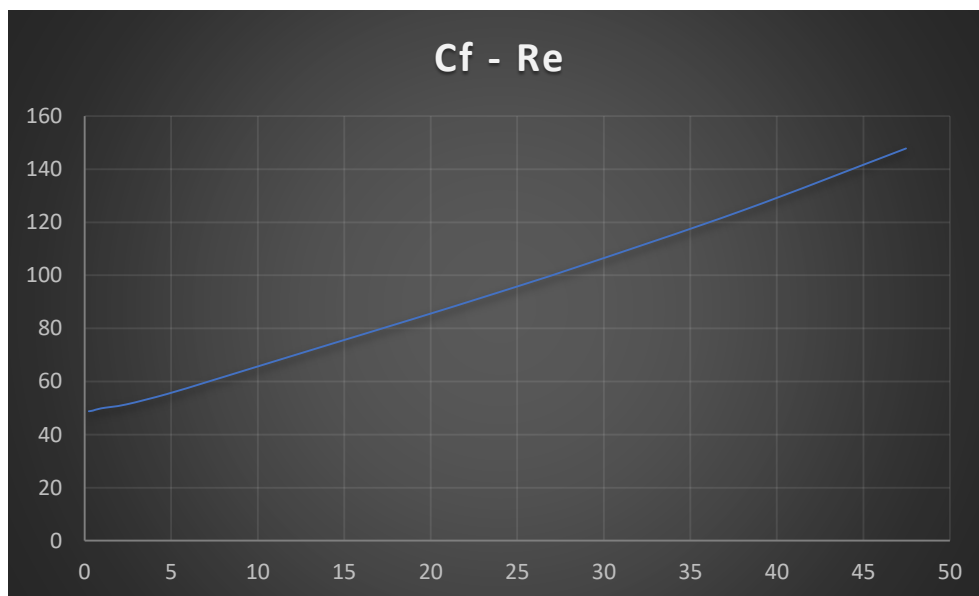
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου για αναγεννητή με μεταλλικό πλέγμα τριών φύλλων.



Διάγραμμα 5.5: Μεταβολή πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητή με τρία φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Τα συμπεράσματα για τρία φύλλα μεταλλικού πλέγματος είναι αντίστοιχα με αυτά για ένα και δύο φύλλα. Παρατηρείται πως για μικρές ταχύτητες η πτώση πίεσης αυξάνεται αναλογικά με την ταχύτητα, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες η αύξηση της πτώσης πίεσης είναι εντονότερη.

Στο επόμενο διάγραμμα για τρία φύλλα αναγεννητή απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής σε σχέση με τον αριθμό Reynolds.



Διάγραμμα 5.6: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητή με τρία φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε πως ο συντελεστής τριβής με τον αριθμό Reynolds έχουν μια σχέση που μπορεί να εκφρασθεί ως γραμμική.

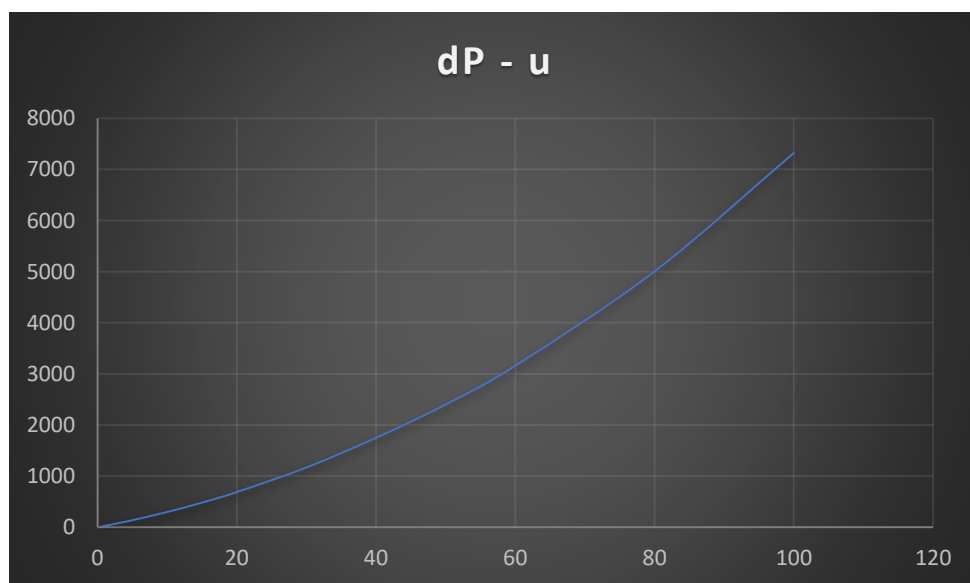
5.1.5 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Τέσσερα Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος

Τα αποτελέσματα της δοκιμής για αναγεννητή με μεταλλικό πλέγμα τεσσάρων φύλλων που πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Solidworks παρατίθενται στο παρακάτω πίνακα.

U (m/s)	dp (bar)	Re	f	Cf	ρ (kg/m ³)
0.5	13.02	0.23	219.22	52.03	0.166
1	26.13	0.47	109.99	52.21	0.166
2	52.91	0.94	55.68	52.86	0.166
5	137.84	2.37	23.20	55.09	0.166
10	298.56	4.74	12.56	59.66	0.166
15	481.73	7.12	9.01	64.17	0.166
20	688.53	9.49	7.24	68.79	0.166
30	1170.45	14.24	5.47	77.96	0.166
40	1750.5	18.98	4.60	87.45	0.166
50	2403.41	23.73	4.04	96.05	0.166
60	3162.82	28.48	3.69	105.34	0.166
80	5007.31	37.97	3.29	125.08	0.166
100	7322.84	47.47	3.08	146.33	0.166

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής σε αναγεννητή με τρία φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

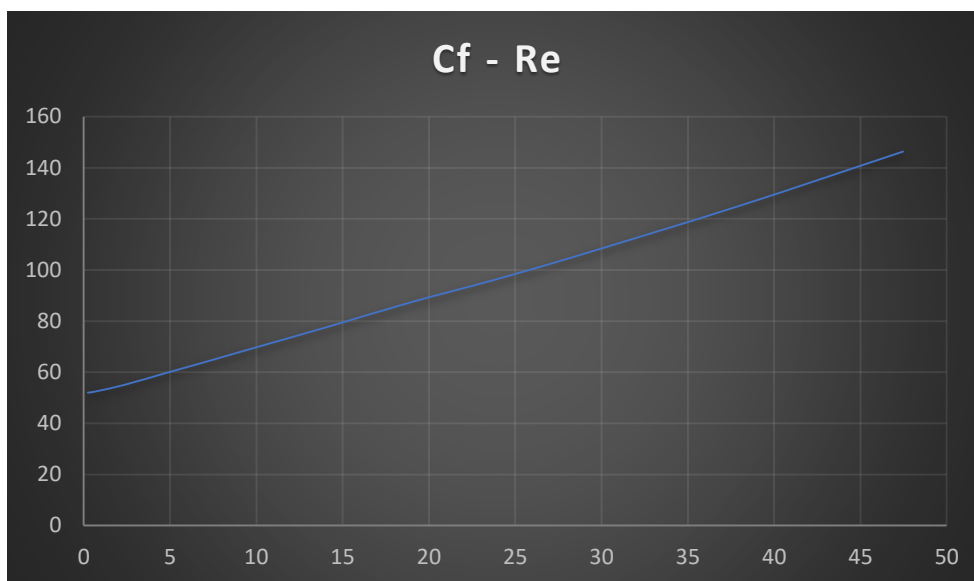
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου για αναγεννητή με μεταλλικό πλέγμα τεσσάρων φύλλων.



Διάγραμμα 5.7: Μεταβολή πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητή με τέσσερα φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Όπως και στο διάγραμμα για ένα, δύο και για τρία φύλλα έτσι και σε αυτό για τέσσερα φύλλα μεταλλικού πλέγματος παρατηρείται πως για μικρές ταχύτητες η πτώση πίεσης αυξάνεται αναλογικά με την ταχύτητα, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ο ρυθμός αύξησης της μεταβολής της πίεσης είναι θετικός.

Στο επόμενο διάγραμμα για τρία φύλλα αναγεννητή απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής σε σχέση με τον αριθμό Reynolds. Από το διάγραμμα παρατηρούμε πως ο συντελεστής τριβής με τον αριθμό Reynolds έχουν μια σχέση περίπου γραμμική.



Διάγραμμα 5.8: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητή με τέσσερα φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

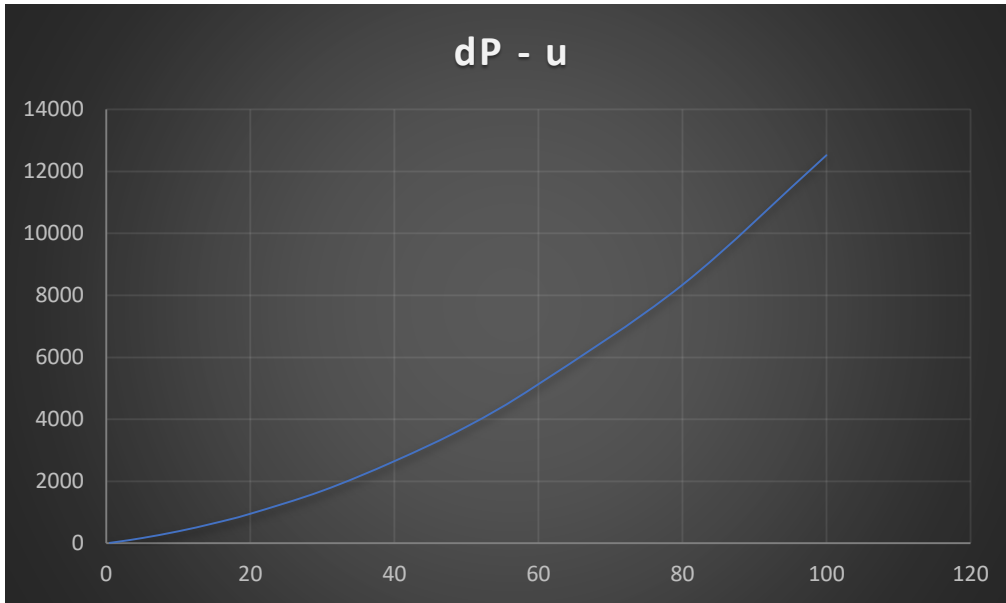
5.1.6 Διάγραμμα Πτώσης Πίεσης για Δύο Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος σε στροφή μεταξύ τους

Τέλος πραγματοποιήθηκε δοκιμή για δύο φύλλα στριμμένα μεταξύ τους. Αρχικά έγινε προσομοίωση με γωνία στροφής των φύλλων ίση με 5° . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω μέσα από πίνακες και διαγράμματα.

U (m/s)	dp (bar)	Re	f	Cf	ρ (kg/m ³)
0.5	15.45	0.23	346.85	82.33	0.166
1	31.18	0.47	175.00	83.07	0.166
2	63.55	0.94	89.16	84.66	0.166
5	170.76	2.37	38.33	90.99	0.166
10	386.86	4.74	21.71	103.08	0.166
15	650	7.12	16.21	115.46	0.166
20	953.4	9.49	13.37	127.01	0.166
30	1694.55	14.24	10.56	150.50	0.166
40	2650	18.98	9.29	176.52	0.166
50	3760	23.73	8.44	200.36	0.166
60	5134.9	28.48	8.00	228.03	0.166
80	8339.6	37.97	7.31	277.75	0.166
100	12523.43	47.47	7.02	333.68	0.166

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής σε αναγεννητή με δύο στριμμένα φύλλα μεταλλικού πλέγματος με 5° .

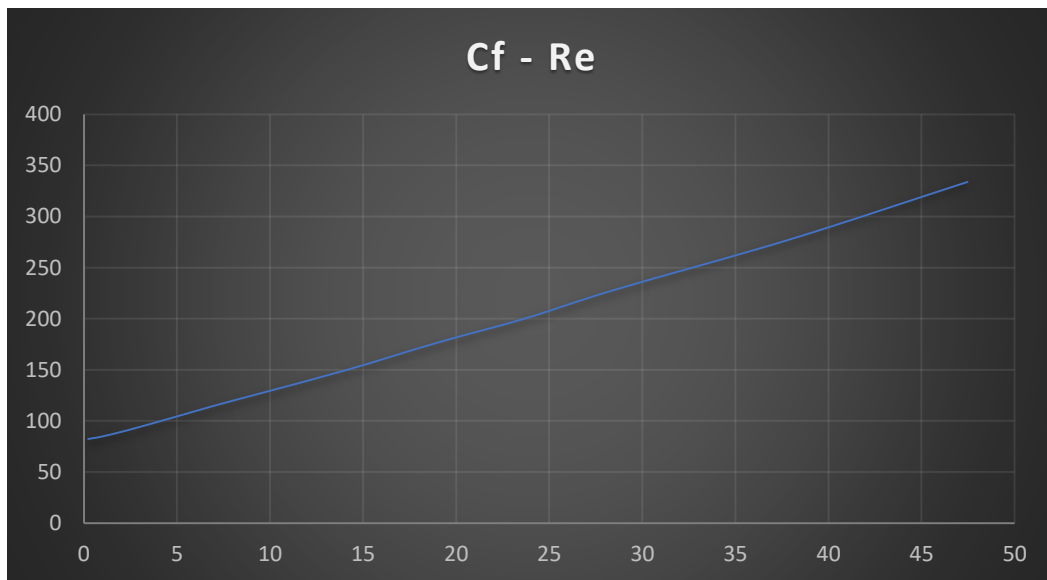
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου για αναγεννητή με μεταλλικό πλέγμα δύο στριμμένων φύλλων.



Διάγραμμα 5.9: Μεταβολή πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητή με δύο στριμμένα φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Αυτό που παρατηρείται, ακόμα και για δύο στριμμένα φύλλα μεταλλικού πλέγματος για μικρές ταχύτητες η πτώση πίεσης αυξάνεται αναλογικά με την ταχύτητα, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ο ρυθμός αύξησης της μεταβολής της πίεσης είναι θετικός.

Στο επόμενο διάγραμμα για τρία φύλλα αναγεννητή απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής σε σχέση με τον αριθμό Reynolds.



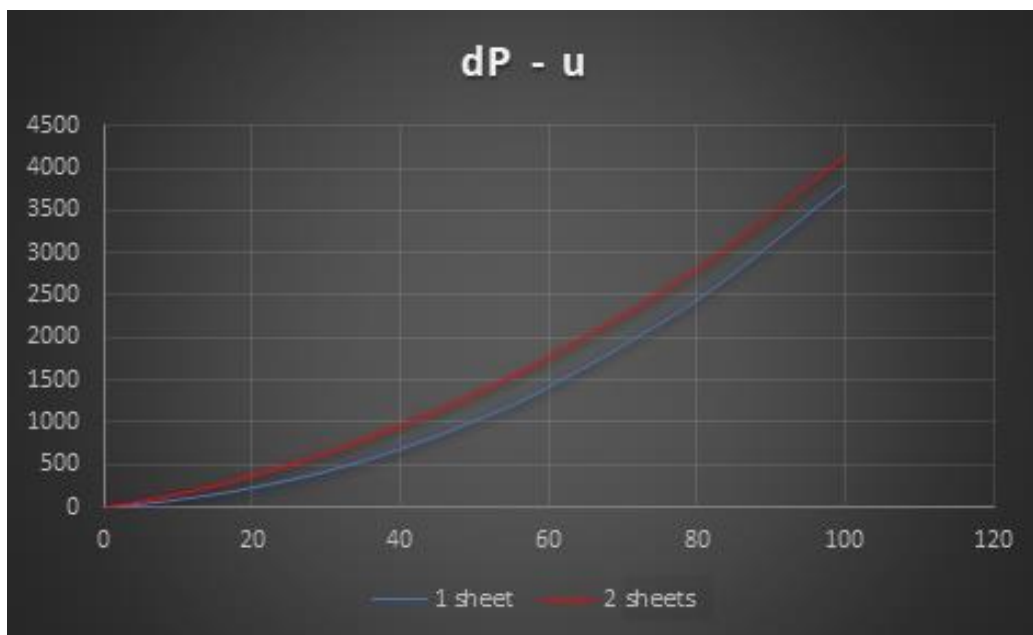
Διάγραμμα 5.10: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητή με δύο στριμμένα φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε πως ο συντελεστής τριβής με τον αριθμό Reynolds έχουν μια σχέση περίπου γραμμική.

5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμών

5.2.1 Διάγραμμα Σύγκρισης Πτώσης Πίεσης Μεταξύ Μεταλλικού Πλέγματος Ενός & Δύο Φύλλων

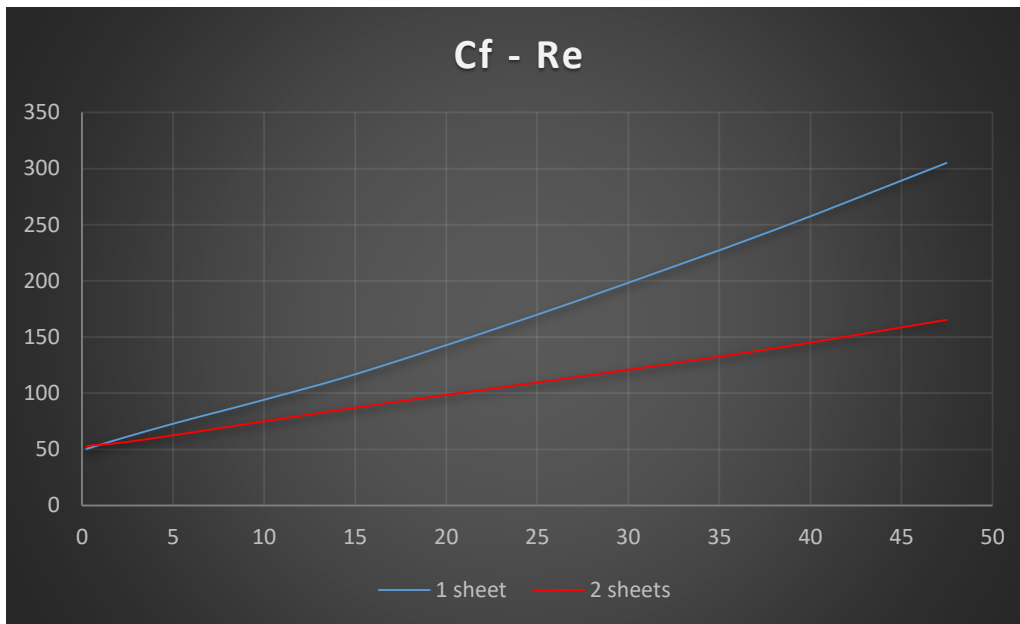
Ύστερα από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για ένα και δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος ξεχωριστά στο παρών κεφάλαιο γίνεται σύγκριση μεταξύ τους και τα ευρήματα παρατίθενται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.11: Σύγκριση μεταβολής πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητές με ένα και δύο φύλλα αντίστοιχα.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η πτώση πίεσης αυξάνεται, αλλά είναι μικρότερη από το διπλάσιο της πτώσης πίεσης για το ένα φύλλο. Αυτό συνεπάγεται σε μικρότερο συντελεστή τριβής, διότι το μήκος του αναγεννητή διπλασιάζεται, οπότε ο μικρότερος συντελεστής είναι αναμενόμενος σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση.

Συντελεστής τριβής:
$$C_f = \frac{dp \cdot m \cdot dh^2}{2\mu \cdot L_\mu^2 \cdot \dot{m}}$$

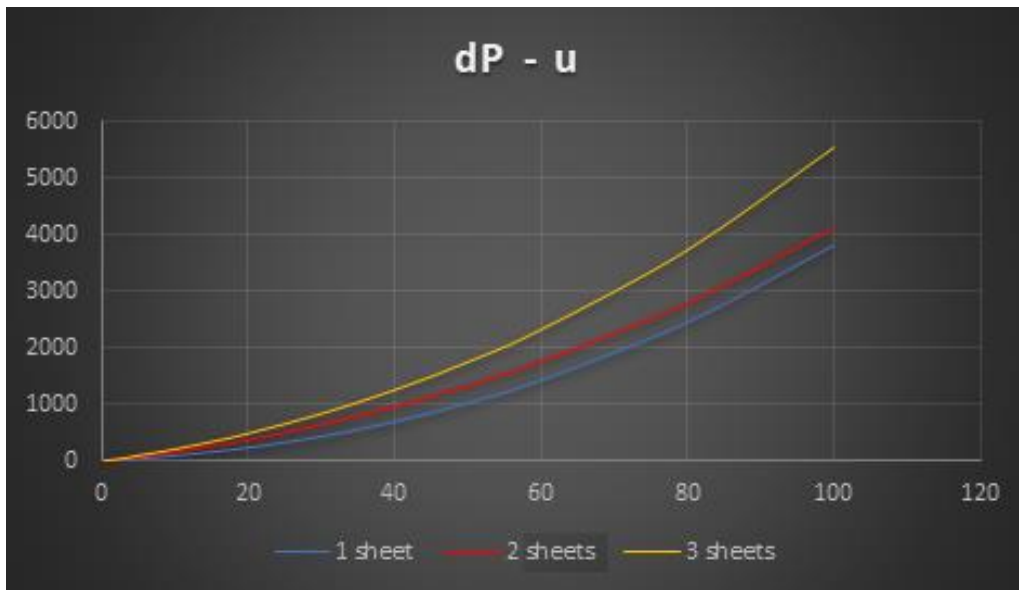


Διάγραμμα 5.12: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητές με ένα και δύο φύλλα αντίστοιχα.

Η διαφορά των τιμών των συντελεστών τριβής C_f για ίδιες συνθήκες αριθμών Reynolds μεγαλώνει για μεγάλες ταχύτητες. Η μικρή αύξηση της πτώσης πίεσης αρχικά θεωρείται πως οφείλεται στο ότι τα φύλλα είναι ευθύγραμμα μεταξύ τους. Άρα το ρευστό δεν υποχρεώνεται να αλλάξει πορεία και η πίεση πέφτει λίγο λόγω της επιπλέον τριβής του αερίου στο δεύτερο φύλλο. Η απόδειξη ή μη της θεωρίας αυτής θα φανεί στην μελέτη της πτώσης πίεσης και των συντελεστών που προκύπτουν από την προσομοίωση των στριμμένων φύλλων.

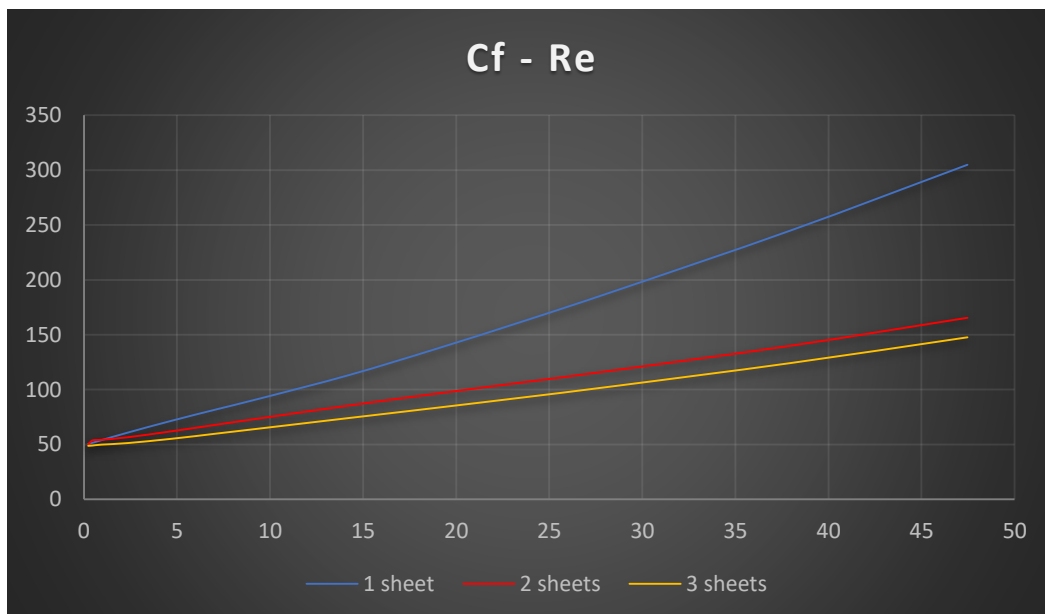
5.2.2 Διαγράμματα Σύγκρισης Πτώσης Πίεσης & Friction Factor Μεταξύ Μεταλλικού Πλέγματος Ενός, Δύο & Τριών Φύλλων.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των προσομοιώσεων για ένα, δύο και τρία φύλλα. Μέσω αυτών, θα δούμε εάν επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα από τη σύγκριση του ενός και των δύο φύλλων.



Διάγραμμα 5.13: Σύγκριση μεταβολής πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητές με ένα, δύο & τρία φύλλα αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα 5.13 παρατηρούμε ότι η πτώση πίεσης αυξάνεται. Αυτό συνεπάγεται σε μικρότερο συντελεστή τριβής, διότι το μήκος του αναγεννητή τριπλασιάζεται, οπότε ο μικρότερος συντελεστής είναι αναμενόμενος. Η επιπλέον αύξηση της πτώσης πίεσης που οφείλεται στο τρίτο φύλλο είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αύξηση που προκλήθηκε από το δεύτερο φύλλο. Για αυτό οι καμπύλες της πτώσης πίεσης απέχουν περισσότερο μεταξύ τους και αυτές στο επόμενο διάγραμμα 5.14 απέχουν λιγότερο σε σχέση με το διάγραμμα 5.12 για τη σύγκριση ένα και δύο φύλλων.

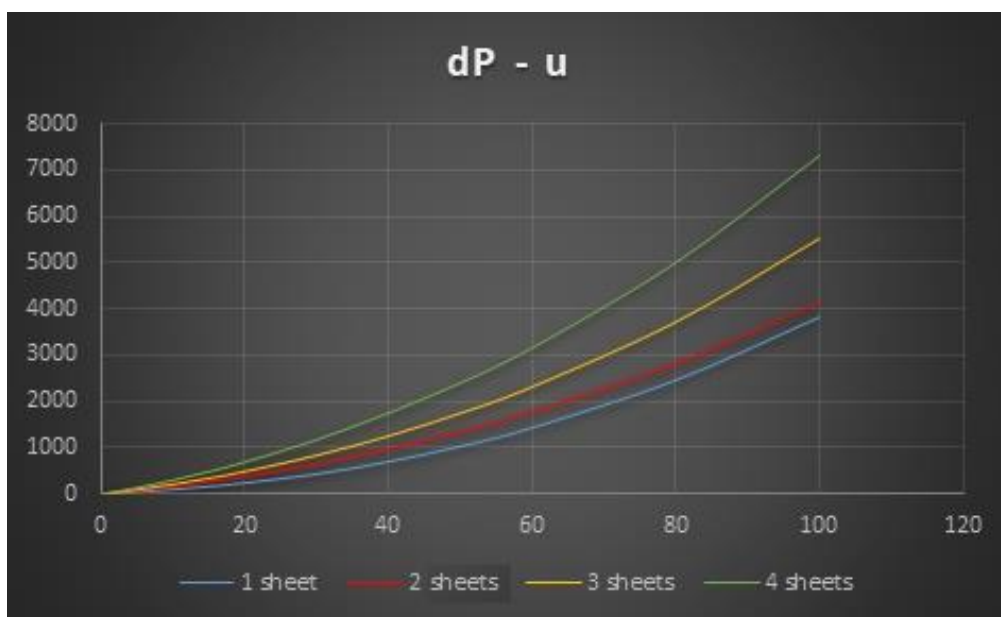


Διάγραμμα 5.14: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητές με ένα, δύο & τρία φύλλα αντίστοιχα.

5.2.3 Διαγράμματα Σύγκρισης Πτώσης Πίεσης & Friction Factor Μεταξύ Μεταλλικού Πλέγματος Ενός, Δύο, Τριών & Τεσσάρων Φύλλων.

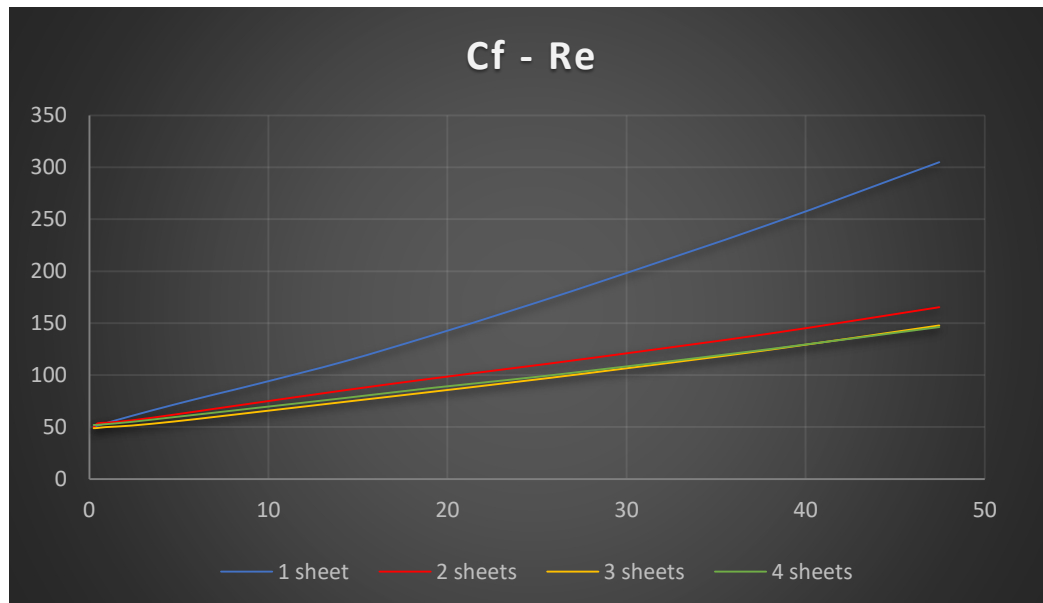
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο χρησιμοποιούμε στη δοκιμή και τέταρτο φύλλο στο μεταλλικό πλέγμα. Δεν έγιναν δοκιμές με περισσότερα φύλλα στον αναγεννητή καθώς χρειαζόταν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και αρκετός χρόνος για κάθε μια από αυτές κάτι το οποίο δεν διατίθενται.

Στο διάγραμμα 5.15 παρατηρούμε ότι η πτώση πίεσης αυξάνεται περισσότερο σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές για λιγότερα φύλλα μεταλλικού πλέγματος και πιο συγκεκριμένα ήταν 33% μεγαλύτερη από αυτήν με τα τρία φύλλα πλέγματος.



Διάγραμμα 5.15: Σύγκριση μεταβολής πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητές με ένα, δύο, τρία & τέσσερα φύλλα αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα 5.16 παρατηρούμε ότι ο συντελεστής τριβής παραμένει ίδιος με αυτόν στη δοκιμή με τα τρία φύλλα αναγεννητή.

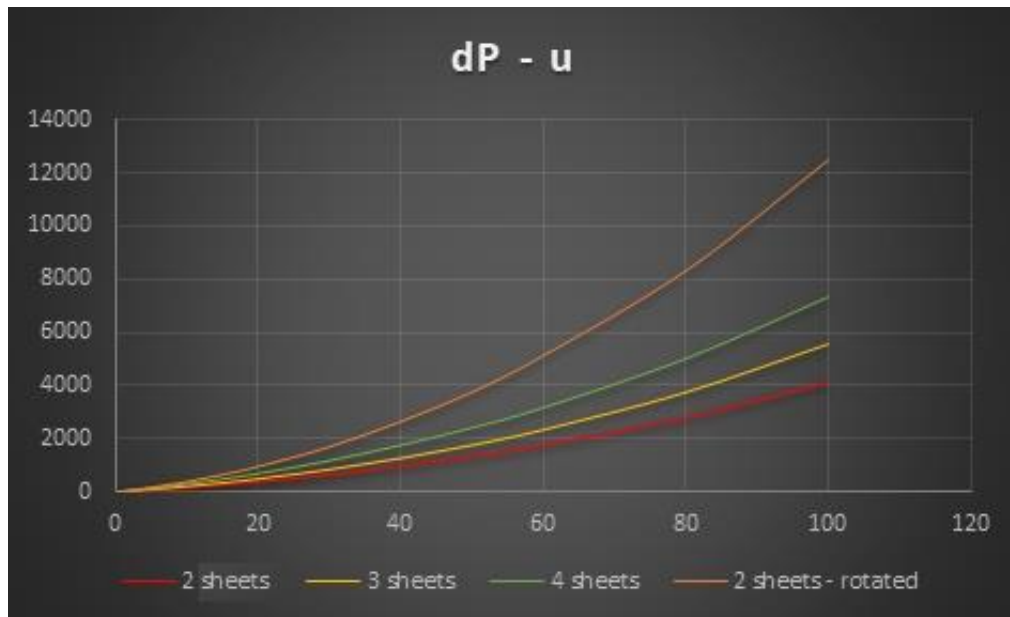


Διάγραμμα 5.16: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητές με ένα, δύο, τρία & τέσσερα φύλλα αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί να ειπωθεί πως ο συντελεστής τριβής (C_f) τείνει προς το να αποκτήσει κάποιες σταθερές τιμές για συγκεκριμένα Reynolds οι οποίες δεν αλλάζουν με την προσθήκη άλλων φύλλων. Τέλος μπορούμε να υποθέσουμε πως αν ο αναγεννητής είχε N αριθμό φύλλων θα είχε σχεδόν τον ίδιο συντελεστή τριβής, επομένως μπορούμε να υποθέσουμε και τη συνολική πτώση πίεσης ενός αναγεννητή με N αριθμό φύλλων.

5.2.4 Διαγράμματα Σύγκρισης Πτώσης Πίεσης & Friction Factor Μεταξύ Μεταλλικού Πλέγματος Δύο, Τριών, Τεσσάρων & Δύο Στριμμένων Φύλλων.

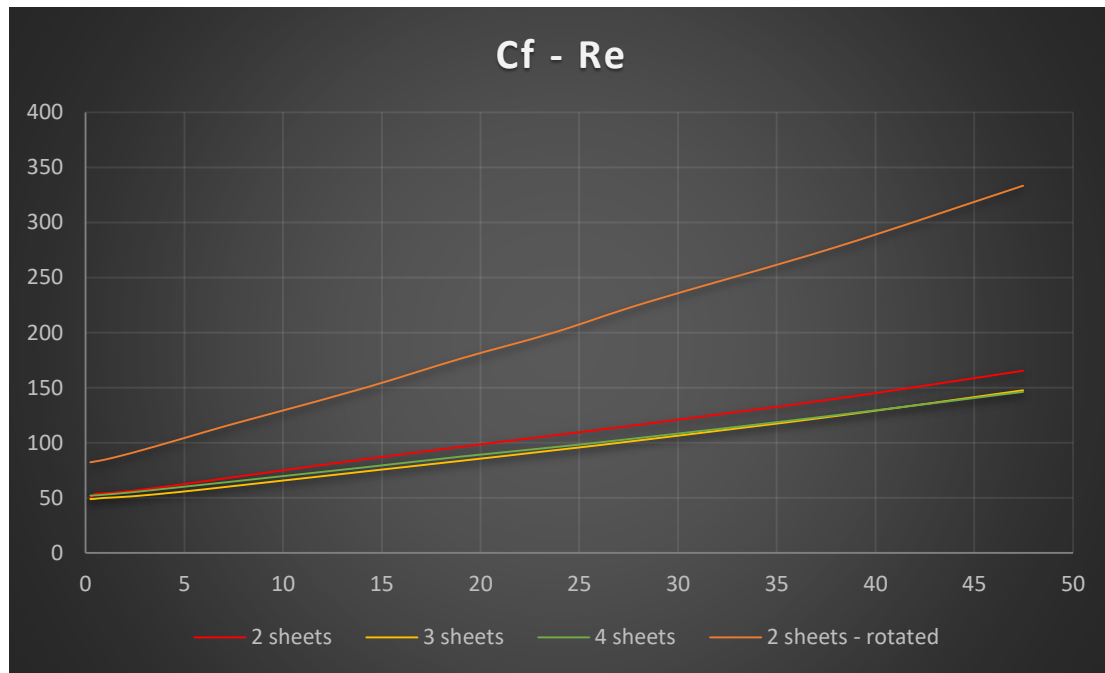
Στη συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε μεταλλικό πλέγμα με δύο στριμμένα φύλλα. Η στροφή των φύλλων έγινε 5° . Λόγω της στροφής των φύλλων η πορεία του ρευστού εντός του αναγεννητή αλλάζει υποχρεωτικά. Έτσι, αναμένεται μεγαλύτερη πτώση πίεσης. Δεν έγιναν δοκιμές με περισσότερα φύλλα στον αναγεννητή στριμμένα μεταξύ τους, καθώς χρειαζόταν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και απαιτούνταν υπερβολικά πολύς χρόνος για κάθε μια προσομοίωση.



Διάγραμμα 5.17: Σύγκριση μεταβολής πίεσης αερίου αναλογικά με τη ταχύτητα σε αναγεννητές με δύο, τρία, τέσσερα και δύο στριμμένα φύλλα αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα 5.17 παρατηρείται η μεγάλη αύξηση της διαφοράς πίεσης όταν τα φύλλα του μεταλλικού πλέγματος του αναγεννητή έχουν στραφεί αυτό γιατί η επιφάνεια του πλέγματος μεγαλώνει εμποδίζοντας το ρευστό να διέλθει μέσω αυτού το ίδιο εύκολα σε σχέση με όταν τα φύλλα είναι σε σειρά μεταξύ τους. Παράλληλα για μικρές ταχύτητες η πτώση πίεσης αυξάνεται αναλογικά με την ταχύτητα, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ο ρυθμός αύξησης της μεταβολής της πίεσης είναι θετικός.

Αντίστοιχα παρατηρούμε και στο διάγραμμα 5.18 για τη μεταβολή του συντελεστή τριβής πως είναι αρκετά μεγαλύτερος εκείνος με τα δύο στριμμένα φύλλα διότι μεγαλώνει η πτώση πίεσης. Όλα τα αποτελέσματα για προσομοίωση με δύο φύλλα στριμμένα μεταξύ τους κατά 5 μοίρες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9. Μπορούμε να συμπεράνουμε πως ο λόγος της πτώσης πίεσης για μεταλλικό πλέγμα με δύο φύλλα στριμμένα και δύο όχι στριμμένα τείνει σε έναν αριθμό με τριπλάσια πτώση πίεσης για το πλέγμα με στριμμένα φύλλα.



Διάγραμμα 5.18: Μεταβολή friction factor αναλογικά με αριθμό Reynolds σε αναγεννητές με δύο, τρία, τέσσερα και δύο στριμμένα φύλλα αντίστοιχα.

U (m/s)	dp (bar) Δύο φύλλα με κλίση	dp (bar) Δύο φύλλα χωρίς κλίση	Πηλίκο φύλλων με κλίση και χωρίς κλίση
0.5	15.45	6.22	2.48
1	31.18	13.40	2.32
2	63.55	27.10	2.34
5	170.76	70.61	2.41
10	386.86	155.01	2.49
15	650	254.73	2.55
20	953.4	369.08	2.58
30	1694.55	640.79	2.64
40	2650	964.22	2.74
50	3760	1336.26	2.81
60	5134,9	1763.34	2.91
80	8339,6	2800.80	2.97
100	12523,43	4138.21	3.02

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής σε αναγεννητή με δύο στριμμένα φύλλα μεταλλικού πλέγματος και σύγκριση με μεταλλικό πλέγμα δύο φύλλων σε ευθεία μεταξύ τους διάταξη.

Αφού επιβεβαιώθηκε ότι η στροφή των φύλλων του πλέγματος κατά μία γωνία οδήγησε σε μεγάλη αύξηση της πτώσης πίεσης, η τελευταία δοκιμή είχε στόχο να εξετασθεί η επίδραση του μεγέθους της γωνίας της σχετικής στροφής των πλεγμάτων. Έτσι, έγινε προσομοίωση σε αγωγό με δύο μεταλλικά φύλλα στριμμένα μεταξύ τους κατά 25°. Λόγω του μεγάλου χρόνου και υπολογιστικών πόρων που απαιτούνταν για τη συγκεκριμένη προσομοίωση, η δοκιμή έγινε μόνο για δύο ταχύτητες εισόδου του αερίου, για 5 και 20 m/s. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10.

Ταχύτητα (m/s)	dp (Δύο φύλλα ίδιας διάταξης)	dp (Δύο φύλλα στριμμένα 5°)	dp (Δύο φύλλα στριμμένα 25°)
5	70.61	170.76	165.35
20	369.08	953.40	925.58

Πίνακας 5.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων πτώσης πίεσης σε αναγεννητή με δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος σε ίδια διάταξη, στριμμένα 5° και 25° αντίστοιχα.

Παρατηρείται πως για ίδιες ταχύτητες 5 m/s και 20 m/s η πτώση πίεσης για τις διατάξεις με φύλλα στριμμένα είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή με τα φύλλα στη σειρά αυτό γιατί το αέριο (He) αναγκάζεται να αλλάξει πορεία εσωτερικά του πλέγματος. Παράλληλα η διαφορά της πτώσης πίεσης για δύο φύλλα στριμμένα 5° και δύο φύλλα στριμμένα 25° είναι μικρή. Επομένως, επιβεβαιώνεται πως μία οποιαδήποτε στροφή μεταξύ των φύλλων του πλέγματος αυξάνει την πτώση πίεσης σε σχέση με την περίπτωση όπου όλα τα φύλλα είναι στριμμένα μεταξύ τους. Όμως δεν μπορεί να υπάρξει κάποιο εμπειριστατωμένο συμπέρασμα για την επίδραση της γωνίας στροφής στην πτώση της πτώση πίεσης. Για να γίνει αυτό, θα χρειάζονται και άλλες δοκιμές σε διαφορετικές ταχύτητες και μοίρες οι οποίες ήταν αδύνατες στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής λόγω της μεγάλης απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος.

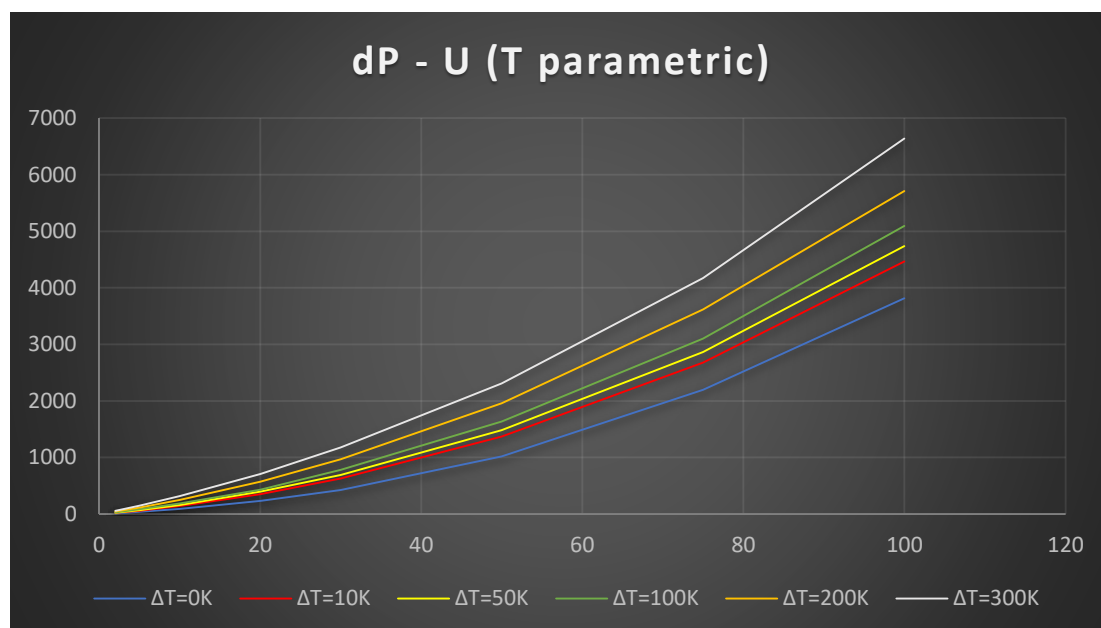
6. Μελέτη Μεταφοράς Θερμότητας

6.1 Προσομοιώσεις & Αποτελέσματα για Διαφορετικές Θερμοκρασίες Πλέγματος

Στο παρόν κεφάλαιο οι δοκιμές θα γίνουν στο ίδιο εύρος ταχυτήτων αλλά με διαφορετική θερμοκρασία πλέγματος κάθε φορά εισάγοντας έτσι την έννοια της μεταφοράς θερμότητας στις προσομοιώσεις για πιο εμπειριστατωμένο αποτέλεσμα. Οι τιμή της θερμοκρασίας στην είσοδο και έξοδο του αναγεννητή παραμένει σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία στους 293K.

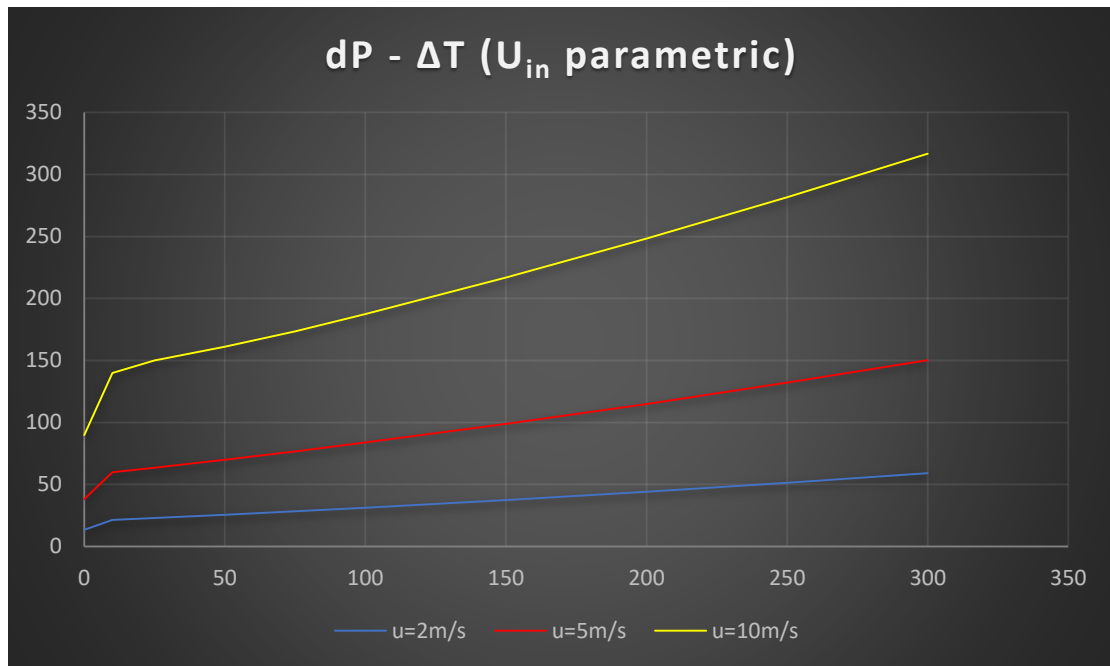
6.1.1 Διαγράμματα για Ένα Φύλλο Μεταλλικού Πλέγματος Διαφορετικών Θερμοκρασιών

Αρχικά η πρώτη προσομοίωση έγινε με διαφορετική θερμοκρασία μεταλλικού πλέγματος ενός φύλλου. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο διάγραμμα 6.1. Παρατηρείται ότι για μεταλλικό πλέγμα με μεγαλύτερη θερμοκρασία η διαφορά πίεσης είναι μεγαλύτερη. Αυτό είναι αναμενόμενο με βάση τη θεωρία, διότι η μεγαλύτερη θερμοκρασία μειώνει την πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου που στη συγκεκριμένη μελέτη είναι το ήλιο (ιδανικό αέριο). Λόγω της εξίσωσης συνέχειας η ταχύτητα μεγαλώνει οπότε για μεγαλύτερη ταχύτητα υπάρχει μεγαλύτερη πτώση πίεσης, όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

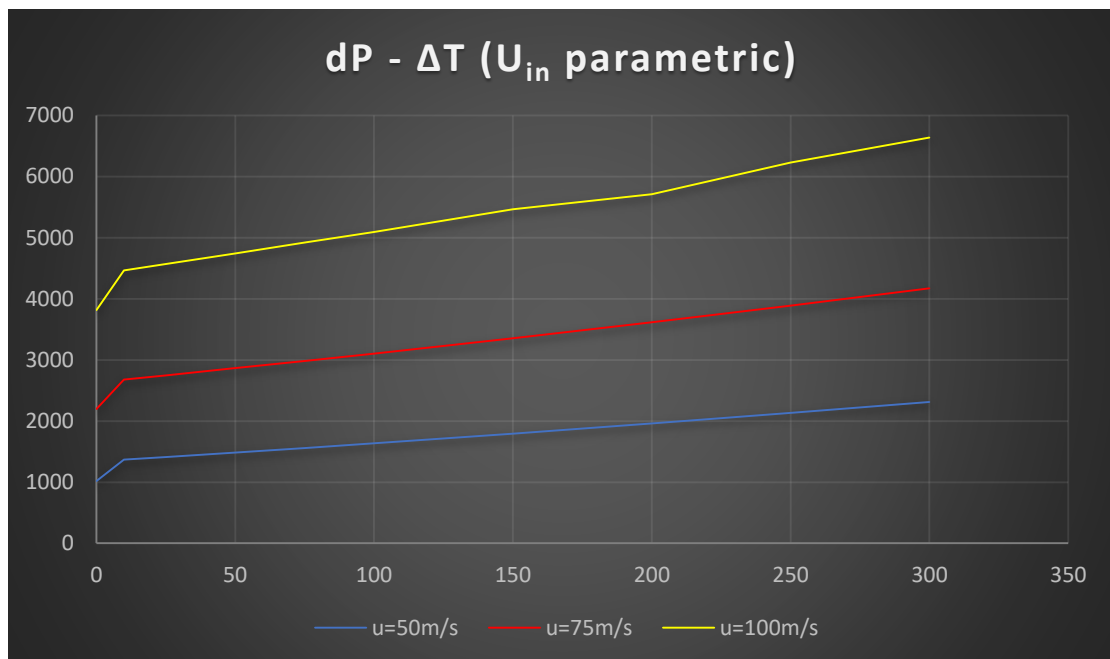


Διάγραμμα 6.1: Πτώση πίεσης με διαφορετική θερμοκρασία μεταλλικού πλέγματος ενός φύλλου.

Στα διαγράμματα 6.2 και 6.3 μελετάται η πτώση πίεσης με τη διαφορά θερμοκρασίας εισόδου-πλέγματος με παράμετρο την ταχύτητα εισόδου. Οι ταχύτητες που μελετήθηκαν είναι οι εξής: 2m/s, 5m/s, 10m/s, 50m/s, 75m/s, 100m/s. Το πρώτο διάγραμμα αφορά τις ταχύτητες 2m/s, 5m/s, 10m/s και το δεύτερο τις 50m/s, 75m/s, 100m/s. Η παρουσίαση χωρίζεται σε δύο διαγράμματα για το λόγο ότι οι τιμές της πτώσης πίεσης αυξάνονται πολύ με την ταχύτητα και η κατανόηση ενός ενιαίου διαγράμματος θα ήταν πολύ δύσκολη.



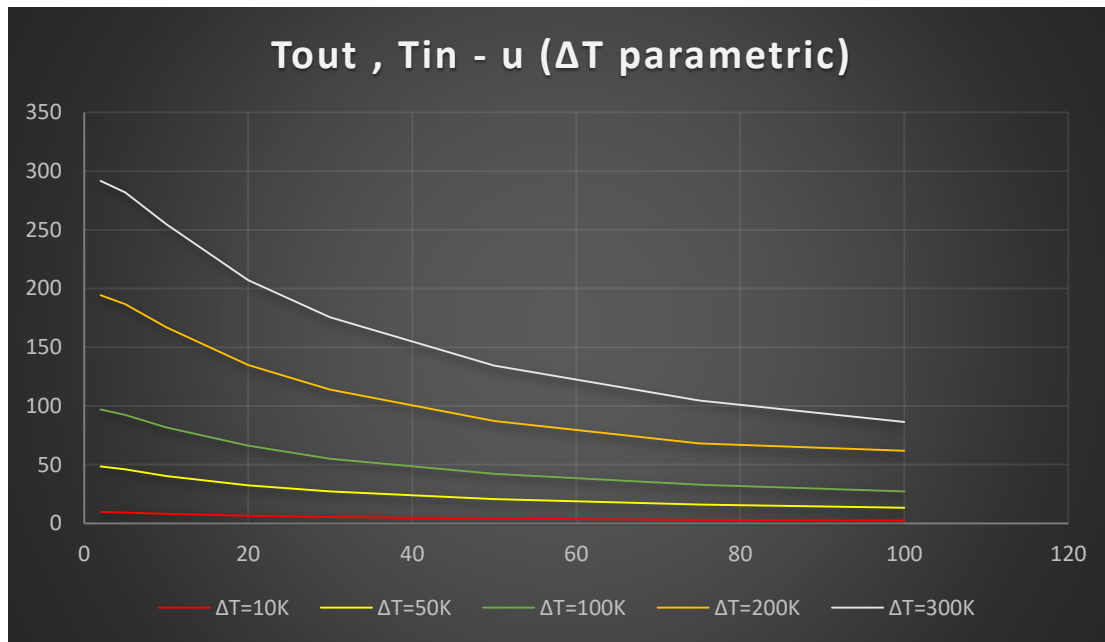
Διάγραμμα 6.2: Πτώση πίεσης με τη διαφορά θερμοκρασίας εισόδου-πλέγματος με παράμετρο την ταχύτητα εισόδου.



Διάγραμμα 6.3: Πτώση πίεσης με τη διαφορά θερμοκρασίας εισόδου-πλέγματος με παράμετρο την ταχύτητα εισόδου.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται αύξηση της πτώσης πίεσης για πιο ζεστά πλέγματα. Η αύξηση είναι πολύ μεγάλη για μικρότερες διαφορές θερμοκρασίας (ΔT) και στη συνέχεια ο ρυθμός αύξησης πέφτει και σταθεροποιείται. Η πτώση πίεσης είναι μεγαλύτερη για μεγάλες ταχύτητες εισόδου.

Στο διάγραμμα 6.4 μελετάται η θερμοκρασία εξόδου (άξονας Y) με την ταχύτητα εισόδου του αερίου στο σωλήνα (άξονας X) με παράμετρο τη διαφορά θερμοκρασίας πλέγματος – εισόδου.



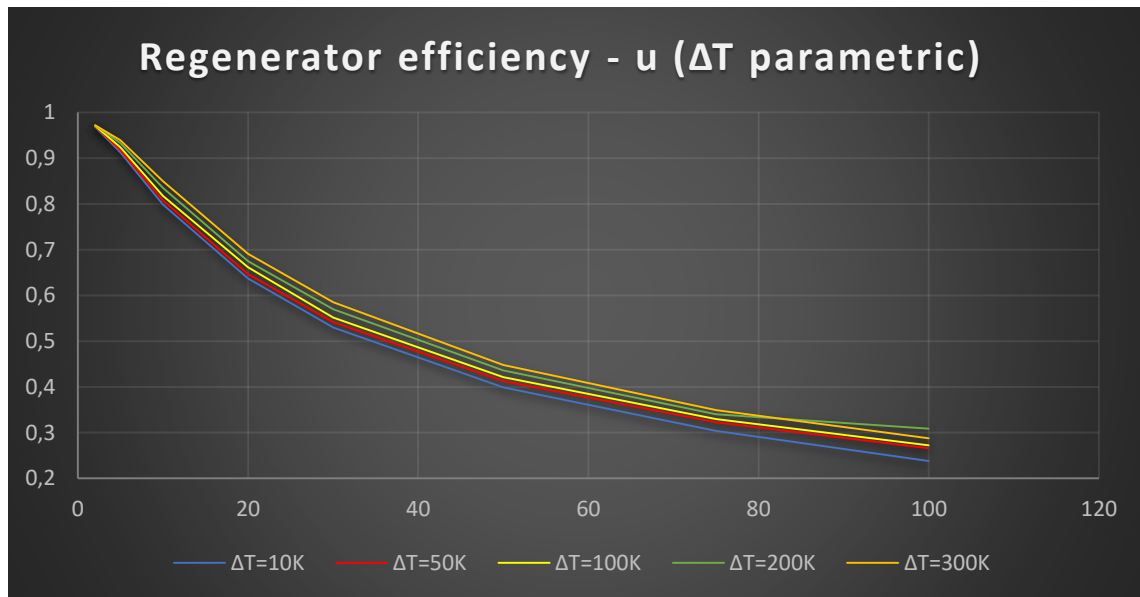
Διάγραμμα 6.4: Θερμοκρασία εξόδου με την ταχύτητα εισόδου και παράμετρο τη διαφορά θερμοκρασίας πλέγματος – εισόδου.

Στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτό πως όσο μεγαλώνει η ταχύτητα εισόδου του αερίου, τόσο μειώνεται η θερμοκρασία εξόδου. Για πολύ μικρές ταχύτητες εισόδου έως 5m/s, η θερμοκρασία του αερίου στην έξοδο είναι ίδια ή σχεδόν ίδια με τη θερμοκρασία του πλέγματος. Η πτώση της θερμοκρασίας εξόδου με την αύξηση της ταχύτητας είναι ραγδαία. Αυτό είναι λογικό καθώς όσο μεγαλώνει η ταχύτητα, διέρχεται μεγαλύτερη ποσότητα ρευστού από τον όγκο που ορίζεται από το πλέγμα και για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Όμως, το πλέγμα που βρίσκεται υπό σταθερή θερμοκρασία έχει συγκεκριμένο ποσό θερμότητας να δώσει. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται σε μεγαλύτερη ποσότητα ρευστού, άρα είναι αναμενόμενο πως όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του ρευστού τόσο μικρότερη θα είναι η θερμοκρασία του.

Τέλος στο διάγραμμα 6.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα για την απόδοση του αναγεννητή σε σχέση με την ταχύτητα του εργαζόμενου μέσου με παράμετρο τη διαφορά θερμοκρασίας για αναγεννητή με ένα φύλλο μεταλλικού πλέγματος.

Εξίσωση απόδοσης αναγεννητή:
$$n = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{matrix} - T_{in}}$$

Είναι προφανές πως σε έναν ιδανικό αναγεννητή, η θερμοκρασία εξόδου του αερίου ισούται με τη θερμοκρασία του μεταλλικού πλέγματος.

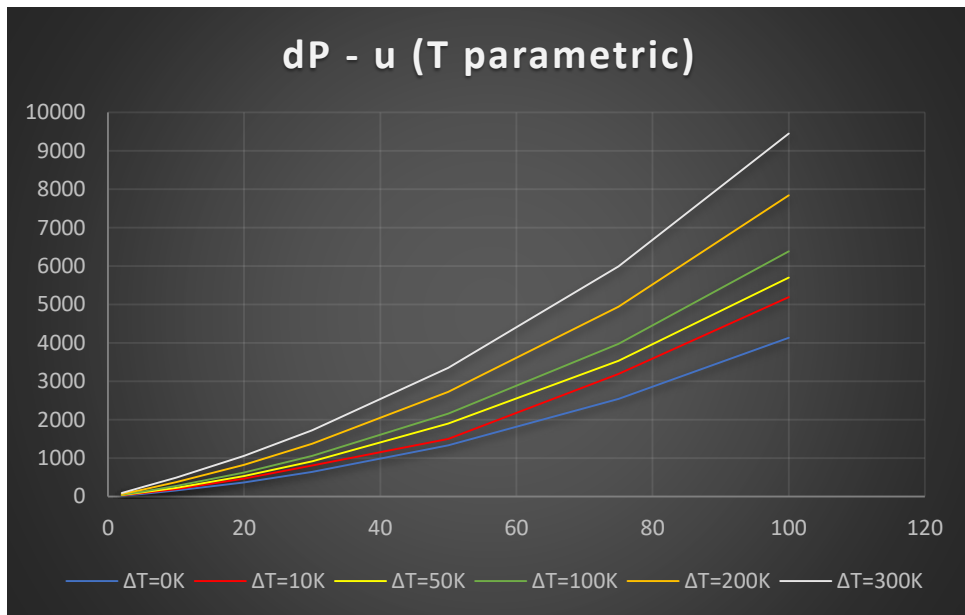


Διάγραμμα 6.5: Απόδοση αναγεννητή σε σχέση με την ταχύτητα του εργαζόμενου μέσου και παράμετρο τη διαφορά θερμοκρασίας.

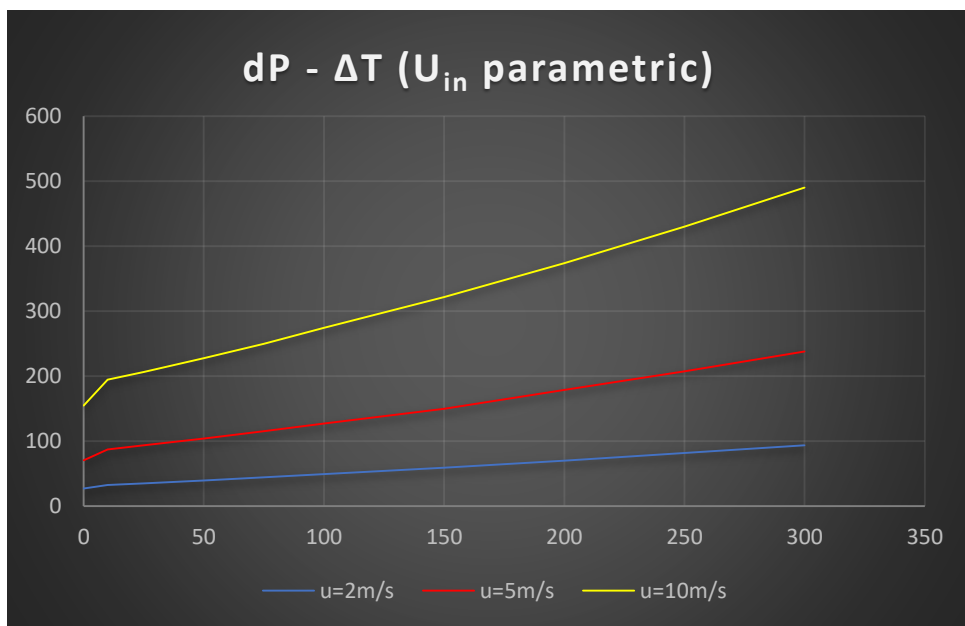
Στο διάγραμμα 6.5 παρατηρείται η μείωση της απόδοσης του αναγεννητή καθώς η ταχύτητα του εργαζόμενου μέσου αυξάνεται. Όταν η ταχύτητα του πλησιάζει τα 100m/s η απόδοση του βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα κάνοντας τον αναγεννητή και κατά συνέπεια τη μηχανή στην οποία θα τοποθετηθεί μη αποδοτική. Τα αποτελέσματα από το διάγραμμα είναι αναμενόμενα καθώς η δοκιμή έγινε για ένα φύλλο μεταλλικού πλέγματος. Παρατηρείται επιπλέον μια μικρή εξάρτηση της απόδοσης του αναγεννητή από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πλέγματος και του αερίου στην είσοδο. Η απόδοση είναι λίγο μεγαλύτερη για μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας.

6.1.2 Διαγράμματα για Δύο Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος Διαφορετικών Θερμοκρασιών

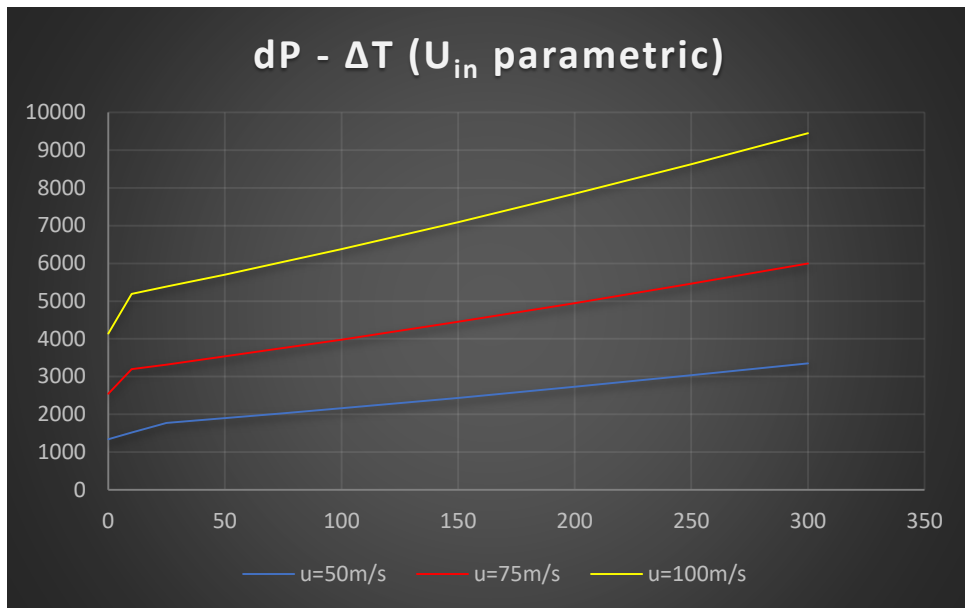
Στο παρών υποκεφάλαιο πραγματοποιούνται ίδιες δοκιμές με το προηγούμενο αλλάζοντας μόνο τη γεωμετρία του μεταλλικού πλέγματος και πιο συγκριμένα προσθέτοντας ένα ακόμα φύλλο στην ίδια ευθεία με το προηγούμενο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται μέσα από διαγράμματα και είναι παρόμοια με εκείνα για μεταλλικό πλέγμα ενός φύλλου.



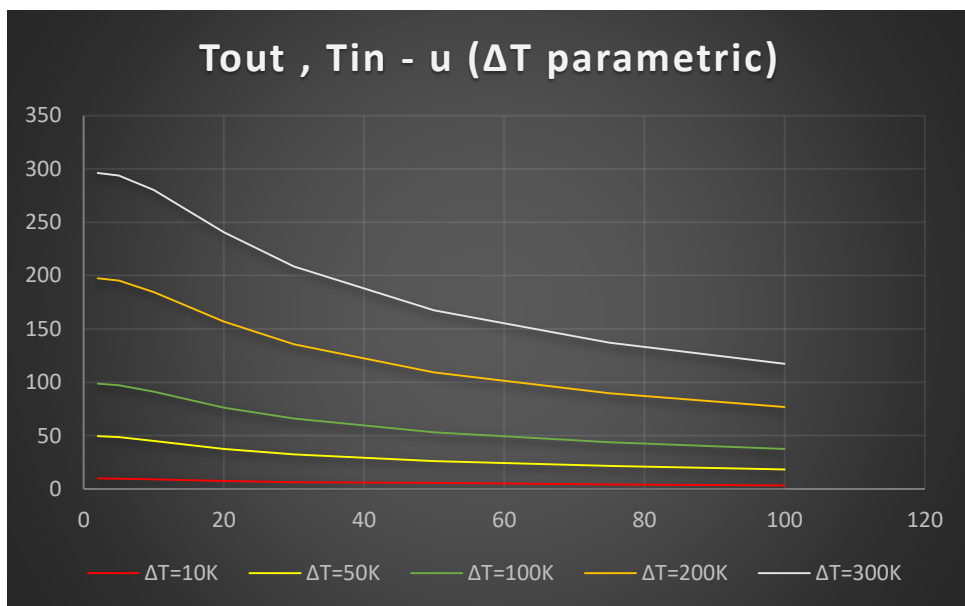
Διάγραμμα 6.6: Πτώση πίεσης με διαφορετική θερμοκρασία μεταλλικού πλέγματος δύο φύλλων.



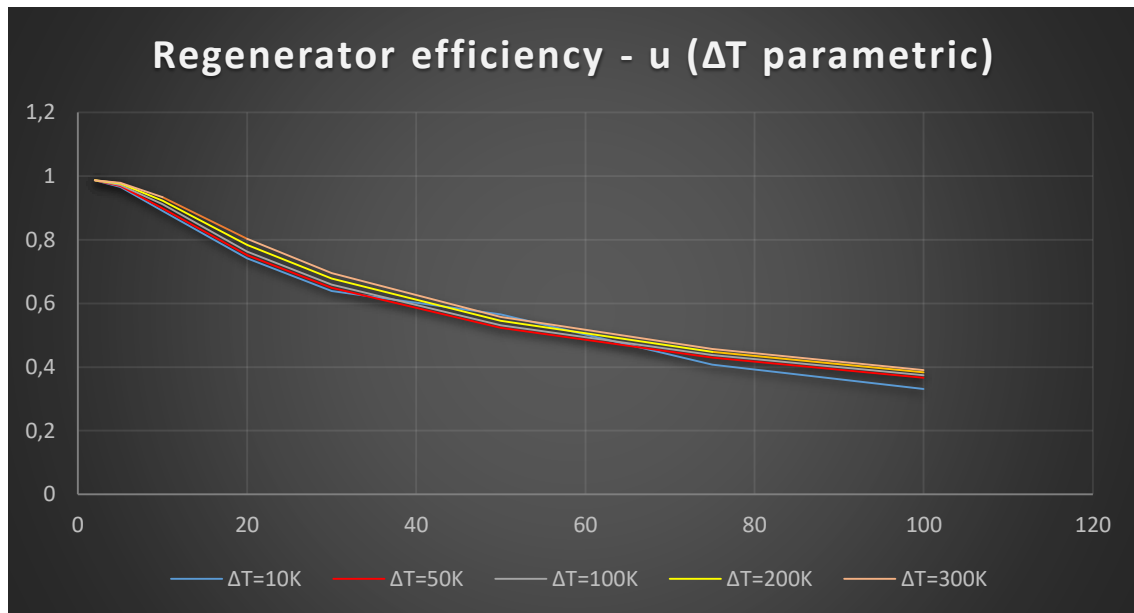
Διάγραμμα 6.7: Πτώση πίεσης με τη διαφορά θερμοκρασίας εισόδου-πλέγματος με παράμετρο την ταχύτητα εισόδου για δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος.



Διάγραμμα 6.8: Πτώση πίεσης με τη διαφορά θερμοκρασίας εισόδου-πλέγματος με παράμετρο την ταχύτητα εισόδου για δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος.



Διάγραμμα 6.9: Θερμοκρασία εξόδου με την ταχύτητα εισόδου και παράμετρο τη διαφορά θερμοκρασίας πλέγματος – εισόδου.



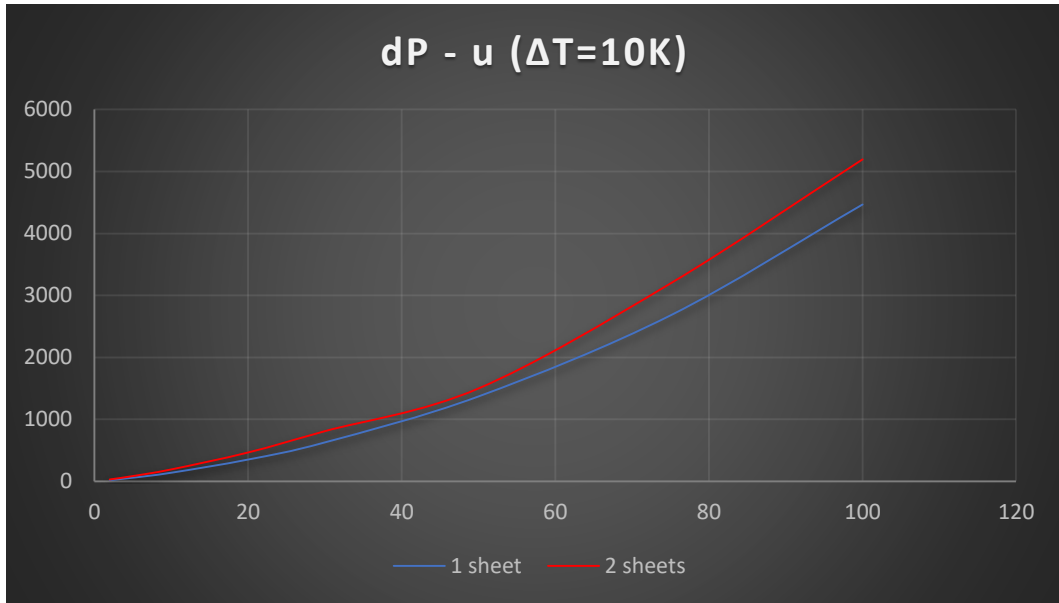
Διάγραμμα 6.10: Απόδοση αναγεννητή σε σχέση με την ταχύτητα του εργαζόμενου μέσου και παράμετρο τη διαφορά θερμοκρασίας.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε:

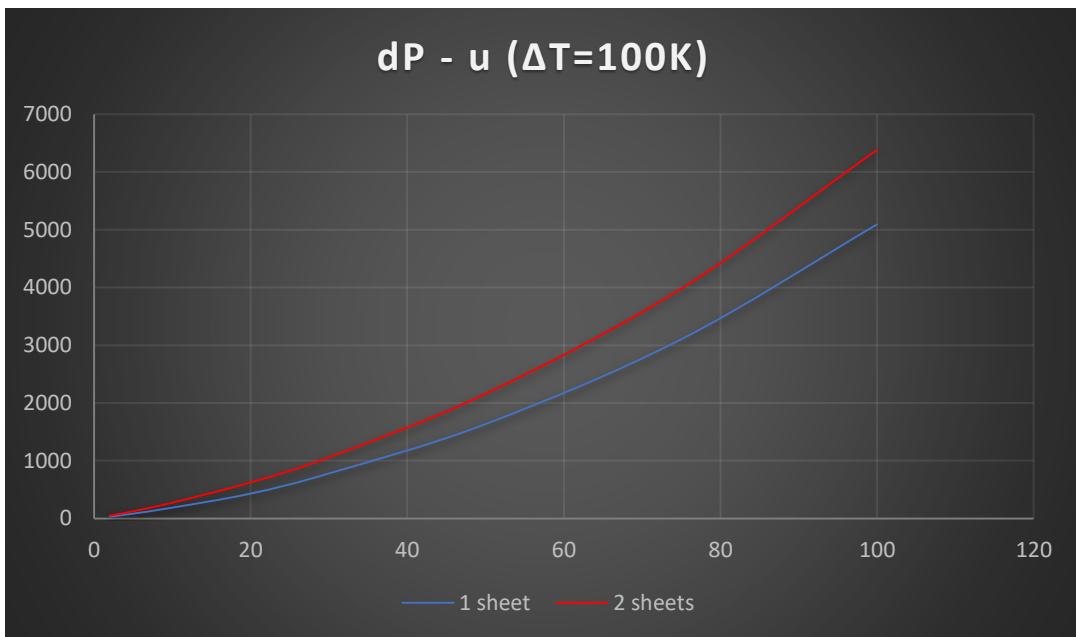
- Αύξηση της πτώσης πίεσης για μεγαλύτερη θερμοκρασία πλέγματος και ίδια ταχύτητα εισόδου του αερίου στο διάγραμμα 6.6.
- Αύξηση της πτώσης πίεσης με αύξηση ταχύτητας εισόδου και θερμοκρασίας στα διαγράμματα 6.7 και 6.8 αντίστοιχα.
- Μείωση θερμοκρασίας εξόδου με αύξηση ταχύτητας στο διάγραμμα 6.9.
- Μείωση απόδοσης του αναγεννητή με αύξηση ταχύτητας στο διάγραμμα 6.10.

6.1.3 Διαγράμματα Σύγκρισης Αναγεννητή με Ένα & Δύο Φύλλα Μεταλλικού Πλέγματος Διαφόρων Θερμοκρασιών.

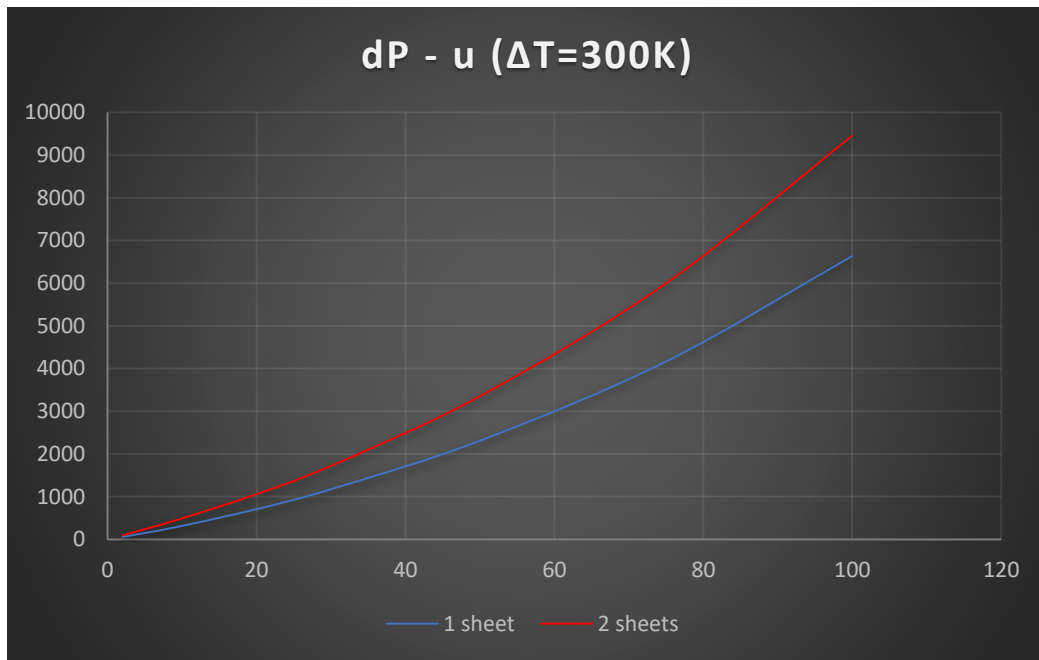
Στα διαγράμματα του παρόντος υποκεφαλαίου γίνεται σύγκριση αναγεννητή με ένα και δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος για διαφορετικές διαφορές θερμοκρασίας (ΔT).



Διάγραμμα 6.11: Σύγκριση μεταβολής πίεσης αερίου με τη ταχύτητα σε αναγεννητές με ένα και δύο φύλλα αντίστοιχα και $\Delta T=10K$.



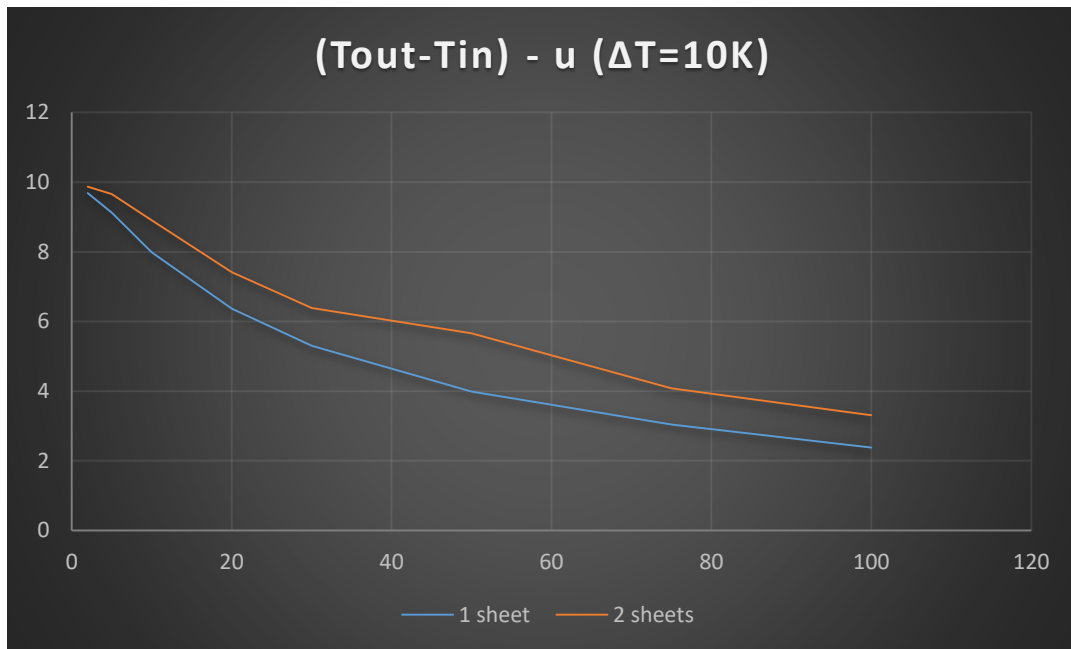
Διάγραμμα 6.12: Σύγκριση μεταβολής πίεσης αερίου με τη ταχύτητα σε αναγεννητές με ένα και δύο φύλλα αντίστοιχα και $\Delta T=100K$.



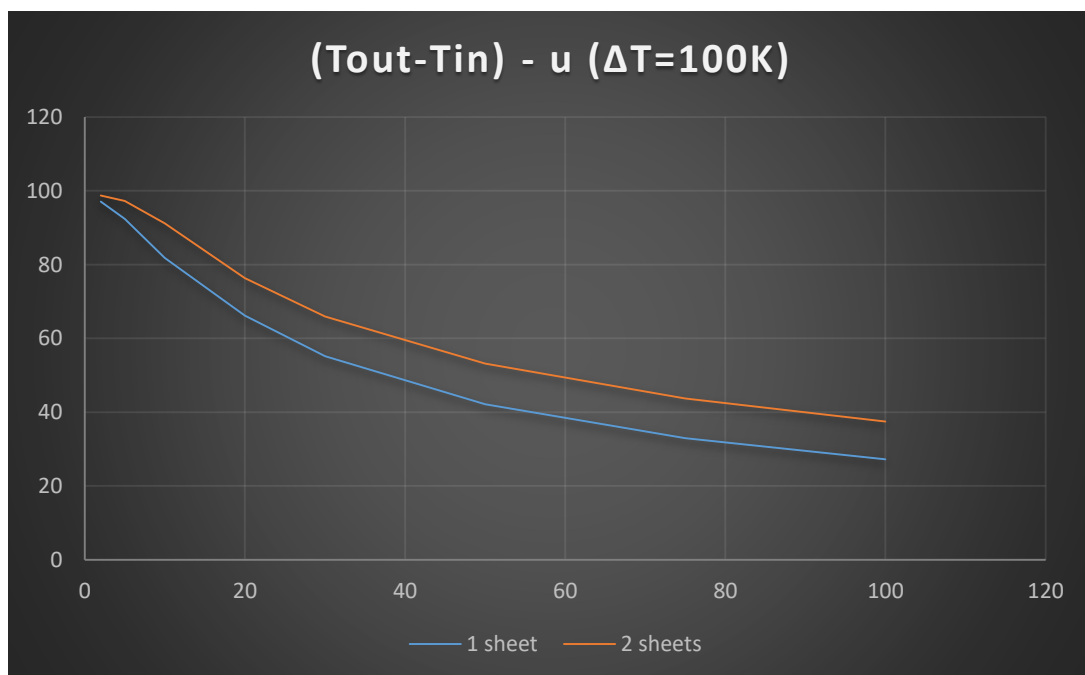
Διάγραμμα 6.13: Σύγκριση μεταβολής πίεσης αερίου με τη ταχύτητα σε αναγεννητές με ένα και δύο φύλλα αντίστοιχα και $\Delta T=300K$.

Όσον αφορά την πτώση πίεσης, στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η πτώση πίεσης αυξάνεται, αλλά είναι μικρότερη από το διπλάσιο της πτώσης πίεσης για το ένα φύλλο. Αυτό οδηγεί σε μικρότερο συντελεστή τριβής, διότι το μήκος του αναγεννητή διπλασιάζεται, οπότε ο μικρότερος συντελεστής είναι αναμενόμενος σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση. Τέλος όσο αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) αυξάνεται και η πτώση της πίεσης του. Τα αποτελέσματα αυτά συνδέονται με τα ευρήματα του προηγούμενου υποκεφαλαίου σχετικά με τη σχέση πτώσης πίεσης και διαφοράς θερμοκρασίας, καθώς και με τη σχέση αριθμού φύλλων – πτώσης πίεσης που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

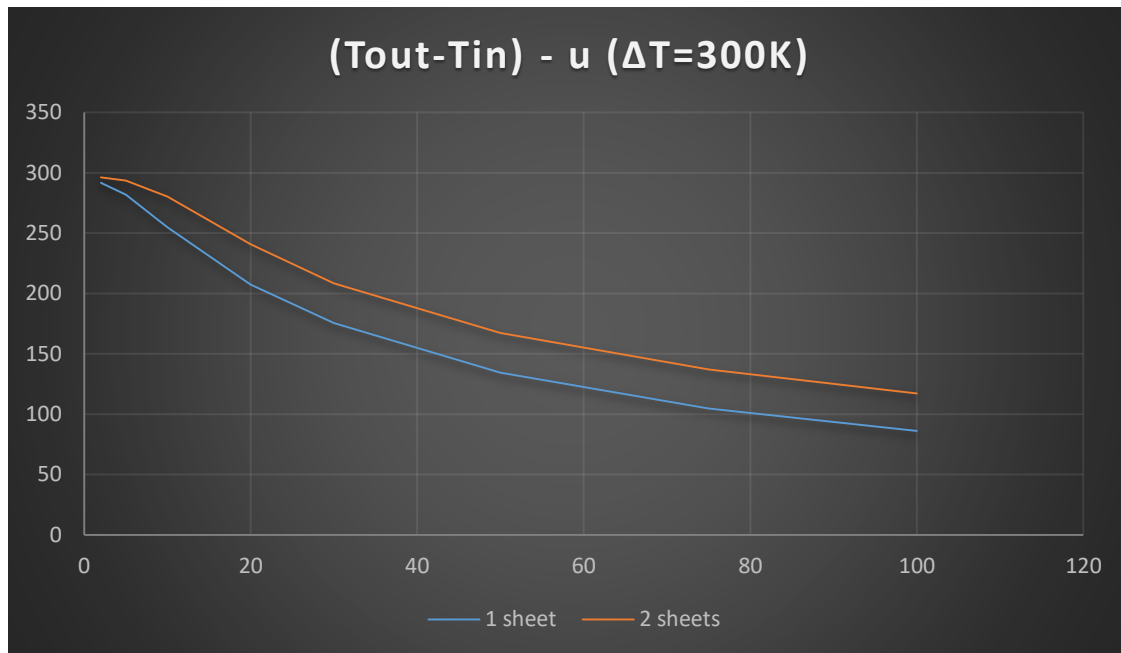
Στα επόμενα διαγράμματα παρατίθενται τα αποτελέσματα δοκιμών για τη διαφορά της θερμοκρασίας εισόδου – εξόδου σε σχέση με τη ταχύτητα του αερίου καθώς και της απόδοσης του αναγεννητή σε σχέση με την ταχύτητα του αερίου. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για $\Delta T=10K$, $\Delta T=100K$ και $\Delta T=300K$. Στα διαγράμματα 6.14 - 6.16 παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των δύο φύλλων μεταλλικού πλέγματος το αέριο εξέρχεται με μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με την περίπτωση ενός μεταλλικού πλέγματος, για ίδια ταχύτητα εισόδου. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς υπάρχει διπλάσια ποσότητα μετάλλου που προσφέρει θερμότητα στο αέριο, ενώ και η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας είναι διπλάσια. Παρόλα αυτά, όσο μεγαλώνει η ταχύτητα εισόδου, η θερμοκρασία εξόδου του αερίου μειώνεται σημαντικά και στην περίπτωση των δύο μεταλλικών πλεγμάτων. Επίσης, παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών εισόδου-εξόδου για τα δύο πλέγματα είναι λιγότερο από διπλάσια σε σχέση με το ένα πλέγμα. Πιθανώς να απαιτείται η ύπαρξη πολλών στρωμάτων από μεταλλικά φύλλα ώστε η θερμοκρασία εξόδου του αερίου να προσεγγίζει αυτή του μεταλλικού πλέγματος για μεγάλες ταχύτητες εισόδου.



Διάγραμμα 6.14: Σύγκριση διαφοράς θερμοκρασίας εισόδου – εξόδου με ταχύτητα για $\Delta T=10K$

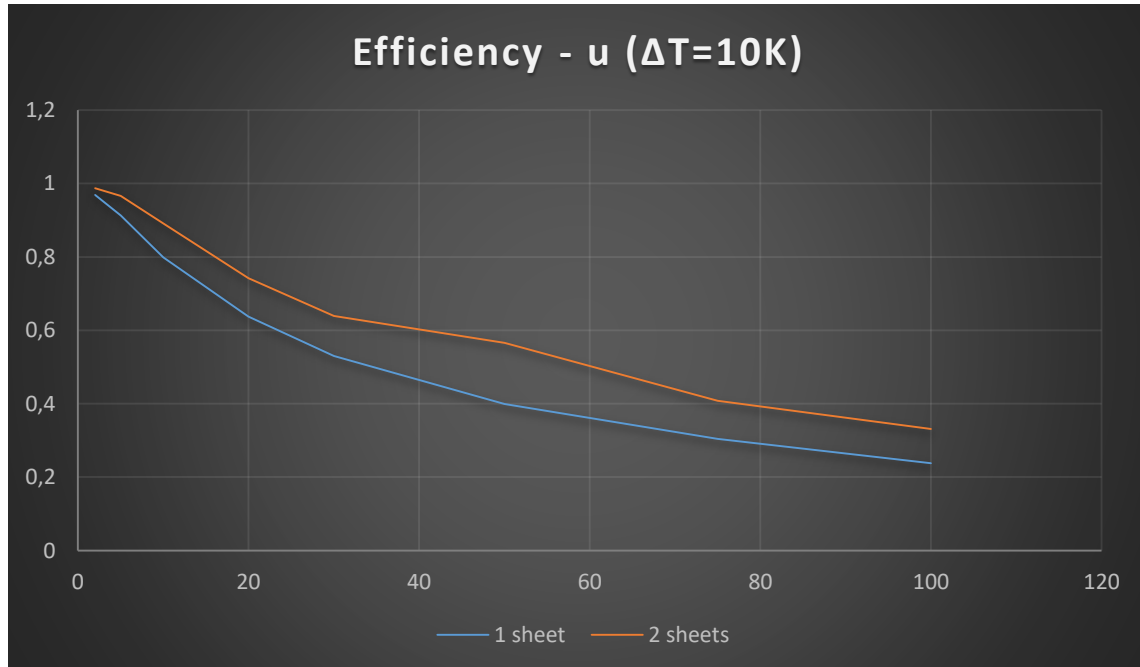


Διάγραμμα 6.15: Σύγκριση διαφοράς θερμοκρασίας εισόδου – εξόδου με ταχύτητα για $\Delta T=100K$

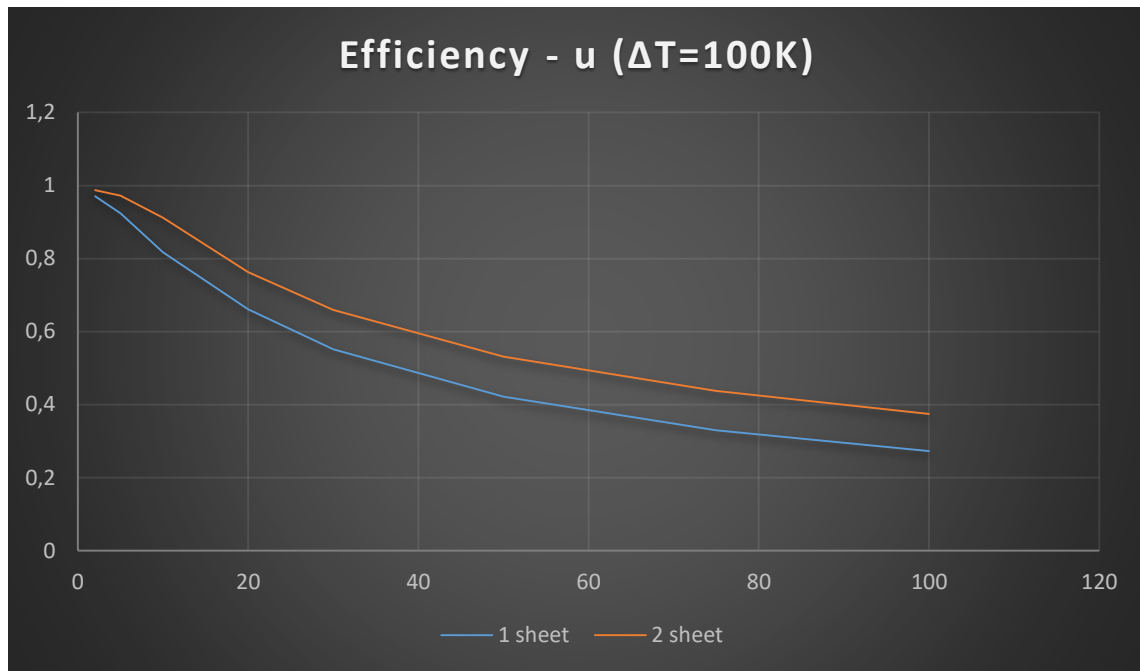


Διάγραμμα 6.16: Σύγκριση διαφοράς θερμοκρασίας εισόδου – εξόδου με ταχύτητα για $\Delta T=300K$

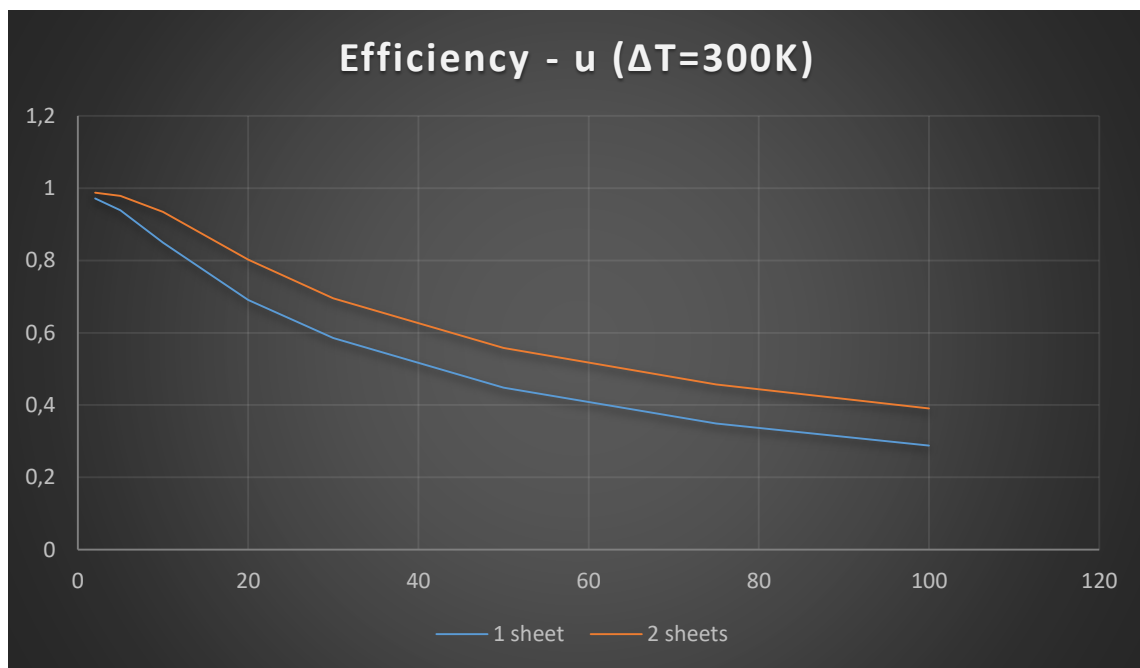
Αντίστοιχα συμπεράσματα με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του αγωγού εξάγονται και από τα διαγράμματα 6.17 – 6.19 όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της απόδοσης του αναγεννητή. Στην περίπτωση των δύο φύλλων ο αναγεννητής είναι πιο αποδοτικός, ενώ η μεταβολή της απόδοσης του αναγεννητή με την ταχύτητα εισόδου είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις (ένα και δύο φύλλα).



Διάγραμμα 6.17: Σύγκριση απόδοσης αναγεννητή με ταχύτητα για $\Delta T=10K$



Διάγραμμα 6.18: Σύγκριση απόδοσης αναγεννητή με ταχύτητα για ΔT=100K



Διάγραμμα 6.19: Σύγκριση απόδοσης αναγεννητή με ταχύτητα για ΔT=300K

6.1.4 Διαγράμματα Nusselt - Reynolds

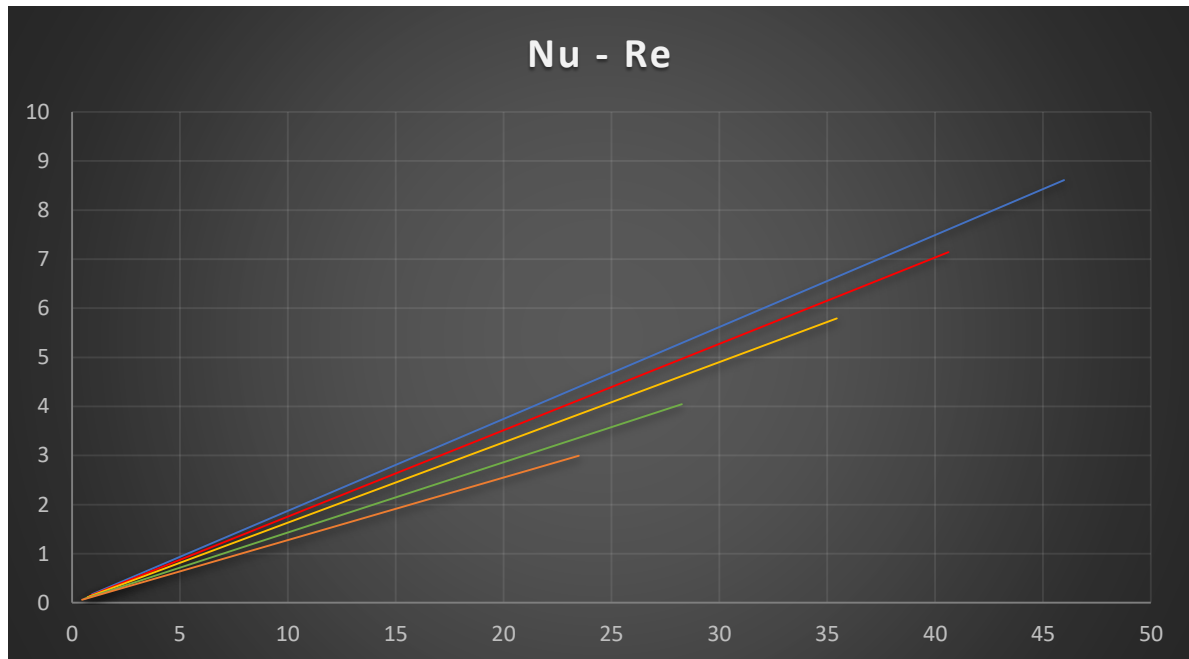
Ο αριθμός Nusselt είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που χαρακτηρίζει την μεταφορά θερμότητας. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις.

Μεταφορά θερμότητας: $Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$

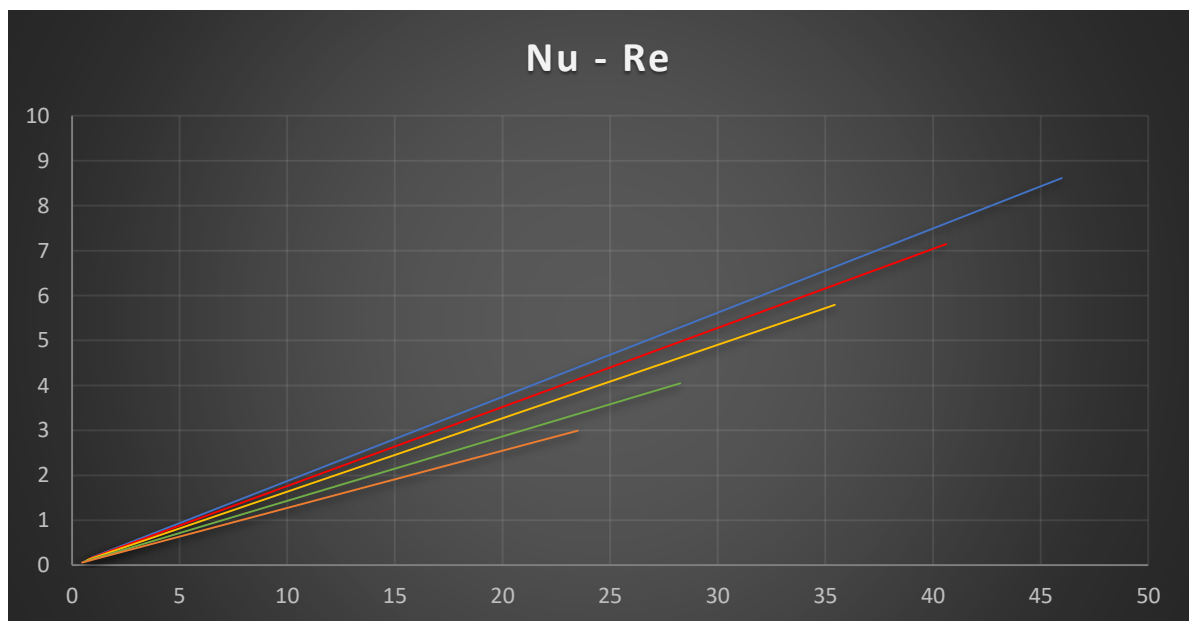
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας:
$$h = \frac{Q}{A_w (T_{gas} - T_{matrix})}$$

Αριθμός Nusselt:
$$Nu = \frac{b \cdot dh}{k}$$

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παραθέτουν τον αριθμό Nusselt σε σχέση με τον αριθμό Reynolds για ένα και δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος αναγεννητή αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6.20: Σύγκριση αριθμού Nusselt με αριθμό Reynolds για ένα φύλλο μεταλλικού πλέγματος.



Διάγραμμα 6.21: Σύγκριση αριθμού Nusselt με αριθμό Reynolds για δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος.

Γενικά φαίνεται πως η συσχέτιση μεταξύ των αριθμών Nusselt και Reynolds είναι γραμμική. Φαίνεται πως δεν μεταβάλλεται σημαντικά με τον αριθμό φύλλων. Στα διαγράμματα 6.20 και 6.21 οι γραμμές με μεγαλύτερο αριθμό Reynolds αντιστοιχούν σε μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας (ΔT). Τέλος για μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) και ίδιο αριθμό Reynolds ο αριθμός Nusselt αυξάνεται. Στα παραπάνω διαγράμματα η γραμμή με το μεγαλύτερο αριθμό Reynolds και αριθμό Nusselt αντιστοιχεί για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T=10K$. Οι υπόλοιπες όσο μειώνονται οι αριθμοί Reynolds και Nusselt αντιστοιχούν για διαφορά θερμοκρασίας μεγαλύτερη, $\Delta T=50K$, $\Delta T=100K$, $\Delta T=200K$ και $\Delta T=300K$ αντίστοιχα.

6.1.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μεταφοράς Θερμότητας Δύο & Δύο Φύλλων Στριμμένων Μεταλλικού Πλέγματος

Έπειτα από προσομοιώσεις για δύο φύλλα και δύο φύλλα στριμμένα μεταλλικού πλέγματος αναγεννητή για $\Delta T=100K$ και $\Delta T=200K$ παρατίθενται τα αποτελέσματα στους παρακάτω πίνακες, για μεταλλικό πλέγμα με τα φύλλα τοποθετημένα στην ευθεία μεταξύ τους, και για πλέγμα με τα φύλλα στριμμένα μεταξύ τους.

Μεταλλικό πλέγμα δύο φύλλων χωρίς κλίση						
Velocity 5m/s			Velocity 50m/s			
	Δp (Pa)	ΔT (K)	Efficiency	Δp (Pa)	ΔT (K)	Efficiency
$\Delta T=100K$	127.13	97.25	0.97	2159.27	53.12	0.53
$\Delta T=200K$	178.84	195.32	0.97	2727.59	109.06	0.54

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής σε αναγεννητή με δύο φύλλα μεταλλικού πλέγματος για $\Delta T=100K$ & $\Delta T=200K$.

Μεταλλικό πλέγμα δύο φύλλων με κλίση						
Velocity 5m/s			Velocity 50m/s			
	Δp (Pa)	ΔT (K)	Efficiency	Δp (Pa)	ΔT (K)	Efficiency
$\Delta T=100K$	258,75	97,03	0,97	4879,8	58,33	0,58
$\Delta T=200K$	363,21	195,35	0,97	6207,14	119,2	0,59

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής σε αναγεννητή με δύο φύλλα στριμμένα μεταλλικού πλέγματος για $\Delta T=100K$ & $\Delta T=200K$.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των δοκιμών παρατηρείται πως η διαφορά πίεσης (Δp) για μεταλλικό πλέγμα δύο στριμμένων φύλλων είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των δύο ευθυγραμμισμένων φύλλων σε όλες τις περιπτώσεις δοκιμών με διαφορετικές παραμέτρους. Παράλληλα η διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) και η απόδοση του αναγεννητή παραμένει ίδια για τις δύο περιπτώσεις με διαφορετικές διατάξεις πλέγματος αλλά για μικρές ταχύτητες αερίου της τάξεως των 5m/s. Αντίθετα για μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου

της τάξεως των 50m/s η διαφορά της θερμοκρασίας (ΔT) και η απόδοση του αναγεννητή είναι μεγαλύτερες στις προσομοιώσεις με μεταλλικό πλέγμα αναγεννητή διάταξης δύο στριμμένων φύλλων κατά 5°.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η χρήση μεταλλικού πλέγματος στριμμένων φύλλων είναι πιο αποτελεσματική για τη μεταφορά θερμότητας μέσα στον αναγεννητή και κατά συνέπεια της απόδοσης του και της μηχανής στην οποία είναι εγκαταστημένη. Οδηγεί όμως σε σημαντικά μεγαλύτερη πτώση πίεσης. Συνεπώς, η χρήση φύλλων στην ευθεία ή σε στροφή μεταξύ τους εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται και από το αν το πρωταρχικό ενδιαφέρον είναι η μικρή πτώση πίεσης ή η μεγάλη μεταφορά θερμότητας. Για παράδειγμα, σε μια μηχανή μικρή θερμοκρασιακή διαφοράς ίσως να ήταν προτιμότερο μεταλλικό πλέγμα με πολύ μικρή στροφή των φύλλων. Αντίθετα, ένας αναγεννητής με φύλλα τοποθετημένα στην ευθεία θα ήταν ακατάλληλος για έναν κινητήρα μεγάλης ισχύος, όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο άκρων του αναγεννητή υπερβαίνει τα 500 K.

7. Σύνοψη & Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη έγινε με τη χρήση του προγράμματος Solidworks. Το πλήθος των μεταλλικών φύλλων καθώς και του επιπέδου του μεταλλικού πλέγματος είχε μεγάλη επίδραση στο χρόνο που απαιτείται για κάθε προσομοίωση. Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την προσομοίωση με τέσσερα φύλλα μεταλλικού πλέγματος ήταν περίπου πενήντα φορές μεγαλύτερος από εκείνον για μεταλλικό πλέγμα ενός φύλλου. Επίσης στις προσομοιώσεις με αρκετά μεταλλικά φύλλα το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αραιό. Συνεπώς μπορεί να ειπωθεί πως το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι αρκετά καλό στη σχεδίαση διάφορων γεωμετρικών αλλά κρίνεται ότι πιθανώς είναι κατάλληλο μόνο για σχετικά απλές εφαρμογές.

Σε όλες τις προσομοιώσεις το ρευστό διήλθε μέσω κυκλικού αγωγού. Στις αρχικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν συμπεραίνεται πως η ταχύτητα του ρευστού, όσο αυτό προχωράει προς την έξοδο του αγωγού αυξάνεται στο κέντρο του αγωγού και μειώνεται κοντά στα τοιχώματα. Επίσης κοντά στο πλέγμα το μέτρο της αυξομειώνεται αρκετά κάνοντάς τη ασταθείς.

Από τις δοκιμές για την πτώση της πίεσης συμπεραίνεται πως η αύξηση των μεταλλικών φύλλων στο πλέγμα σε ευθεία διάταξη μεταξύ τους αυξάνει τη πίεση αλλά όχι αναλογικά. Συνεπώς τοποθετώντας δεύτερο φύλλο στη διάταξη η πτώση πίεσης είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή του ενός φύλλου. Επίσης ο συντελεστής τριβής μειώθηκε περαιτέρω στις αντίστοιχες δοκιμές για τρία και τέσσερα φύλλα μεταλλικού πλέγματος, με την τάση της μεταβολής να μειώνεται όσο αυξάνονται τα φύλλα. Έτσι μπορεί να ειπωθεί πως τοποθετώντας περισσότερα φύλλα, ο συντελεστής τριβής θα είναι πολύ κοντά σε αυτόν που υπολογίστηκε για τα τέσσερα φύλλα. Τέλος η τοποθέτηση φύλλων με κλίση κάποιων μοιρών αυξάνει σημαντικά τη πτώση πίεσης καθώς το αέριο (He) αναγκάζεται να αλλάξει πορεία εσωτερικά του πλέγματος. Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν η διαφορά της πτώσης πίεσης μεταξύ δύο φύλλων με στροφή 5° και 25° είναι αρκετά μικρή. Συμπερασματικά η μεταβολή της σχετικής γωνίας μεταλλικών φύλλων σε στροφή δεν επηρεάζει αρκετά την πτώση πίεσης.

Παράλληλα, παρατηρείται πως για μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου και μεταλλικού πλέγματος αυξάνεται η πτώση πίεσης για ίδια ταχύτητα εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον. Επίσης, η μεγάλη ταχύτητα εισόδου του αερίου συνεπάγεται με μειωμένη θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου-εξόδου του ρευστού. Αυτό συμβαίνει καθώς για μεγαλύτερη ταχύτητα σε συγκεκριμένο χρόνο (dt) περνάει μεγαλύτερο ποσό αερίου από εκείνο το χώρο οπότε το πλέγμα που έχει την ίδια θερμοκρασία δίνει την ίδια θερμότητα σε μεγαλύτερη ποσότητα αερίου.

Με τη τοποθέτηση και δεύτερου φύλλου στον αναγεννητή αυξήθηκε η θερμοκρασία εξόδου του αερίου και συνεπώς η απόδοσή του όπως και αναμενόταν. Για χαμηλή ταχύτητα η θερμοκρασία παραμένει σταθερή ενώ αντίθετα για μεγάλη στο πλέγμα με φύλλα σε κλίση η θερμοκρασία αυξήθηκε. Συμπερασματικά για χαμηλή ταχύτητα του αερίου προτιμάται η χρήση του πλέγματος με τα φύλλα σε ίδια διάταξη, αλλά για μεγαλύτερες ταχύτητες έχουμε δυο αντικρουόμενες τάσεις και η τελική επιλογή εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί ο αναγεννητής.

Βιβλιογραφία

- [1] Stig Kildegard Andersen, Henrik Carlsen, Per Grove Thomsen. Preliminary results from simulations of temperature oscillations in Stirling engine regenerator matrices, 2005.
- [2] S.C.Costa, Harritz Barrutia, Jon Ander Esnaola, Mustafa Tutar. Numerical study of the heat transfer in wound woven wire matrix of a Stirling regenerator, 2015.
- [3] S.C.Costa, I. Barreno, M. Tutar, J.A. Esnaola, H. Barrutia. The thermal non-equilibrium porous media modelling for CFD study of woven wire matrix of a Stirling regenerator, 2015.
- [4] Sol-Carolina Costa, Mustafa Tutar, Igor Barreno, Jon-Ander Esnaola, Haritz Barrutia, David García, Miguel-Angel Gonzalez, Jesús-Ignacio Prieto. Experimental and numerical flow investigation of Stirling engine regenerator, 2015.
- [5] Ρογδάκης Δ. Εμμανουήλ. Θερμοδυναμική II, 2013
- [6] S.C. Costa, Harritz Barrutia, Jon Ander Esnaola, Mustafa Tutar. Numerical study of the pressure drop phenomena in wound woven wire matrix of a Stirling regenerator, 2012.
- [7] Wen-Lih Chen, King-Leung Wong, Yu-Feng Chang. A numerical study on the effects of moving regenerator to the performance of a b-type Stirling engine, 2014.
- [8] Cadartifex Solidworks 2018. A Power Guide for Beginners and Intermediate Users.
- [9] William R. Martini. Stirling Engine Design Manual, 1983.
- [10] James R. Senft. Mechanical Efficiency of Heat Engines, 2003.
- [11] R.A. Pinker and M. V. Herbert. Pressure loss associated with compressible flow through square-mesh wire gouzes, 1967.
- [12] Wen-Lih Chen, King-Leung Wong, Hung-En Chen. An experimental study on the performance of the moving regenerator for a c-type twin power piston Stirling engine, 2013.
- [13] Bernd Thomas, Deborah Pittman Reutlingen University, UPDATE ON THE EVALUATION OF DIFFERENT CORRELATIONS FOR THE FLOW FRICTION FACTOR AND HEAT TRANSFER OF STIRLING ENGINE REGENERATORS, 2000.

Ιστοσελίδες & Σύνδεσμοι

- [14] American Stirling Company, <https://www.stirlingengine.com>
- [15] The Stirling Engine, https://www.mpoweruk.com/stirling_engine.htm
- [16] ScienceDirect Stirling Engine, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/stirling-engine>
- [17] Stirling Engine Regenerator, <https://www.physicsforums.com/threads/stirling-engine-regenerator.651666/>

[18] The Efficiency of the Regenerator in the Stirling Engine, <http://www.stirling-fette.de/etatherm.htm>

[19] Solidworks flow simulation tutorial: fluid flow problems, <https://www.fisherunitech.com/blog/solidworks-flow-simulation-tutorial-fluid-flow-problems>

[20] Free-Piston Stirling Engine Generators, <https://www.intechopen.com/books/energy-conversion-current-technologies-and-future-trends/free-piston-stirling-engine-generators>

[21] Ohio University, <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/intro.html>