



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία»

Διπλωματική εργασία

**Επανασχεδιασμός Φορέα Αισθητήρα Ροής Βιομηχανικού Τύπου με Σκοπό
την Τροποποίηση των Χαρακτηριστικών Λειτουργίας του**

Redesign of a Flow Sensor's Housing for Optimum Performance



Φοιτητής:

Κωνσταντίνος Οικονομόπουλος

Επιβλέπων: Δημήτριος-Νικόλαος Παγώνης, Αναπλ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Αιγάλεω

Φεβρουάριος 2021

Εξεταστική Επιτροπή Μεταπτυχιακής Εργασίας:

Σωτηρία Δημητρέλλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Γεώργιος Λιβανός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Δημήτριος-Νικόλαος Παγώνης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κωνσταντίνος Οικονομόπουλος του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 1719, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία» του Τμήματος Ναυπηγών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

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

Ο Δηλών



Οικονομόπουλος Κωνσταντίνος

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον επανασχεδιασμό και την ακόλουθη κατασκευή ενός μετρητικού συστήματος για την μέτρηση παροχής εισαγωγής αέρα σε μηχανή εσωτερικής καύσης. Κύριος στόχος της εργασίας ήταν ο βέλτιστος επανασχεδιασμός του συστήματος μέσω προσθήκης κατάλληλου φορέα διαμόρφωσης ροής. Ο φορέας ενσωματώθηκε στην αρχική αισθητήρια διάταξη με σκοπό να διευρυνθεί το αρχικό εύρος μέτρησης του. Για την εκτίμηση της ανεπτυγμένης ροής μέσα στον φορέα πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες προσομοιώσεις μέσω λογισμικού ενώ ακολούθησε η κατασκευή του με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή. Στο τελικό στάδιο πραγματοποιήθηκε ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός του αισθητήρα σε πραγματικές συνθήκες στην εργαστηριακή κλίνη του εργαστήριου των ναυπηγών μηχανικών.

Abstract

This dissertation focuses on the redesign and optimization of an existing measurement system for determining the air intake of an internal combustion engine. The main goal of the thesis was the enhancement of the system through the addition of a suitable flow modulator (integrated into the original sensor device) in order to expand its initial measuring range. For the estimation of the developed flow, appropriate simulations were performed, followed by its manufacture through the use of a 3D printer. In the final stage, the electrical characterization of the resulting sensor was performed in real conditions on an appropriate engine testbed in the naval engineering laboratory.

Εκτεταμένη περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον επανασχεδιασμό και την κατασκευή κατάλληλου φορέα όπου θα ενσωματωθεί σε αυτόν υπάρχουσα αισθητήρια διάταξη ροής με σκοπό να διευρυνθεί το αρχικό εύρος μέτρησης της.

Το πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εστιάζει στο θεωρητικό υπόβαθρο της μηχανικής ρευστών και πιο συγκεκριμένα στην συμπεριφορά της ροής ρευστών μέσα σε σωλήνες. Έπειτα αναλύεται η χρήση βασικών μοντέλων τύρβης για την μοντελοποίηση της και πώς πραγματοποιήθηκε η επιλογή συγκεκριμένων μοντέλων με βάση τις ανάγκες της διπλωματικής.

Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια συνοπτική παρουσίαση των βασικών αρχών της μεταφοράς θερμότητας (στην οποία βασίζεται η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου αισθητήρα) και περιγράφονται οι κύριοι τύποι των αισθητήρων ροής που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τρισδιάστατη σχεδίαση του φορέα, καθώς και η αναγκαία προσομοίωση της διαμόρφωσης ροής σε αυτόν μέσω πεπερασμένων στοιχείων με στόχο τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του και συγκεκριμένα της εσωτερικής παράκαμψης που φέρει.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης γενικότερα και τα απαραίτητα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για να κατασκευαστεί ο φορέας μέσω του τρισδιάστατου εκτυπωτή του εργαστήριου της σχολής.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται το κυρίως πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, όπου αποτελείται από την ενσωμάτωση της αισθητήριας διάταξης στο φορέα που κατασκευάστηκε και την τοποθέτηση της συνολικής διάταξης στην εισαγωγή αέρα της μηχανής της εργαστηριακής κλίνης του τμήματος. Καταγράφηκαν οι αντίστοιχες μετρήσεις οι οποίες συλλέχθηκαν κατά τη λειτουργία της μηχανής και πραγματοποιήθηκε ανάλυση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	7
Μηχανική ρευστών	12
1.1 Εισαγωγή στην μηχανική των ρευστών	12
1.1.1 Ροή μέσα σε σωλήνα.....	12
1.1.2 Αρχή διατήρησης της μάζας.....	12
1.1.3 Πυκνότητα.....	13
1.1.4 Ιξώδες και διατμητική τάση	13
1.1.5 Αριθμός Reynolds.....	14
1.1.6 Όριο χωρίς Ολίσθηση	15
1.2 Χαρακτηριστικά Ταχύτητας ροής μέσα σε αγωγούς.....	16
1.2.1 Στρωτή ροή.....	16
1.2.2 Τυρβώδης ροή	19
1.2.3 Τυρβώδης διατμητική τάση.....	20
1.2.4 Οριακό στρώμα τυρβώδους ροής	22
1.2.5 Συνθήκες εισόδου σε κυλινδρικό αγωγό.....	22
1.3 Είδη μοντέλων τυρβώδης ροής	23
1.3.1 Μοντέλο Spalart-Allmaras	24
1.3.2 Μοντέλο k-ε	24
1.3.3 Μοντέλο k-ω.....	27
1.3.4 Μοντέλο RNG k-εpsilon	28
1.3.5 Μοντέλο k-ω SST	29
Μεταφορά θερμότητας.....	30
2.1 Μεταφορά θερμότητας	30
2.2 Αγωγή	30
2.3 Συναγωγή	31
2.4 Ακτινοβολία	32
Αισθητήρες ροής	34
3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Αισθητήρες ροής	34
3.3 Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων	35
3.3.1 Συνάρτηση μεταφοράς.....	35

3.3.2 Ακρίβεια	36
3.3.3 Βαθμονόμηση	36
3.3.4 Υστέρηση	36
3.3.5 Κορεσμός	37
3.3.6 Ευαισθησία.....	37
3.3.7 Εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου	38
3.3.8 Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου.....	38
3.3.9 Θόρυβος	38
3.4 Αισθητήρες ροής μάζας αέρα (Mass Flow Sensor).....	39
3.5 Αισθητήρες ροής θερμού νήματος	39
3.5.1 Θερμίστορ Θετικού Συντελεστή Θερμοκρασίας PTC	40
3.5.2 Θερμίστορ Αρνητικού Συντελεστή Θερμοκρασίας NTC.....	41
3.6 Τρόποι λειτουργίας Θερμικών αισθητήρων ροής θερμού νήματος.....	42
3.7 Βασικά κυκλώματα αισθητήρων ροής θερμού νήματος	42
3.7.1 Διαιρέτης τάσης.....	42
3.7.2 Γέφυρα Wheatstone	43
Πειραματική διαδικασία	45
4.1 Εισαγωγή.....	45
4.2 Σχεδιασμός Φορέα.....	45
4.3 Εισαγωγή της γεωμετρίας στο πρόγραμμα προσομοιώσεων	48
4.4 Υπολογισμός αριθμού Reynolds του φορέα	49
4.5 Προσθήκη του μοντέλου φυσικής.....	50
4.6 Επιλογή πλέγματος	51
4.7 Υπολογισμός προσομοίωσης	51
5.1 Εισαγωγή.....	57
5.2.1 Selective Laser Sintering (SLS).....	57
5.2.2 Fused deposition modeling (FDM).....	58
5.2.3 Stereolithography (SLA)	59
5.3 Εκτύπωση – κατασκευή του φορέα μέσω του τρισδιάστατου εκτυπωτή CubeX.....	60
5.4 Αισθητήρια διάταξη.....	65
Εργαστηριακό Πείραμα.....	66
6.1 Εισαγωγή.....	66
6.2 Τοποθέτηση αισθητήριας διάταξης στην εργαστηριακή κλίνη του τμήματος	66
6.3 Προϋπάρχουσα βαθμονόμηση με αρχικό φορέα.....	68
6.5 Βαθμονόμηση νέου αισθητήρα που προκύπτει με χρήση του νέου φορέα.....	69
6.6 Ανάλυση μετρήσεων νέας αισθητήριας διάταξης ροής	72

Συμπεράσματα.....	74
7.1 Συμπεράσματα.....	74
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	74
Βιβλιογραφία.....	75

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Απεικόνιση οριακού στρώματος.....	14
Εικόνα 2: Σχετική κίνηση ρευστού και επιφάνειας.....	15
Εικόνα 3: Διαφοροποίηση προφίλ ταχύτητας σε μεταβαλλόμενη διάμετρο σωλήνα.....	16
Εικόνα 4: Κίνηση ενός στοιχείου του ρευστού μέσα σε έναν κυλινδρικό αγωγό.....	17
Εικόνα 5: Περιγραφή ελεύθερου σώματος σε κυλινδρικό όγκο ελέγχου.....	17
Εικόνα 6: Κατανομή των διατρητικών τάσεων σε κυλινδρικό αγωγό.....	18
Εικόνα 7: Προφίλ ταχύτητας μέσα σε κυλινδρικό αγωγό(a. στρωτή ροή, b. τυρβώδης ροή).....	19
Εικόνα 8: Διαφορά οριακού στρώματος μεταξύ στρωτής(a) και τυρβώδης(b) ροής.....	20
Εικόνα 9: Μέση χρονική τιμή της ταχύτητας σε τυρβώδη ροή.....	21
Εικόνα 10: Είδη στρωμάτων σε προφίλ τυρβώδης ροής.....	22
Εικόνα 11: Διακρίνονται περιοχή: εισόδου, αναπτυσσόμενη ροή και πλήρως αναπτυγμένη ροή σε σωλήνα κυκλικής διατομής (περίπτωση στρωτής ροής).....	23
Εικόνα 12: Κατάταξη επεξεργαστικής ισχύς συνηθέστερων υπολογιστικών μοντέλων τύρβης RANS.....	24
Εικόνα 13: Μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας με αγωγιμότητα.....	30
Εικόνα 14: Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	31
Εικόνα 15: Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας πάνω σε επιφάνεια.....	32
Εικόνα 16: Αρχή λειτουργίας αισθητήρων.....	34
Εικόνα 17: Ροή σε κυλινδρικό αγωγό.....	35
Εικόνα 18: Φαινόμενο υστέρησης κατά την παλινδρόμηση δυο τιμών.....	37
Εικόνα 19: Γραφική παράσταση αισθητήρα με κορεσμό.....	37
Εικόνα 20: a. σήμα χωρίς θόρυβο b. με προσθετικός θόρυβος c. πολλαπλασιαστικός θόρυβος.....	39
Εικόνα 21: Αισθητήρας εισαγωγής αέρα θερμού νήματος (hot-wire).....	39
Εικόνα 22: Θερμίστορ τύπου NTC.....	40
Εικόνα 23: Μεταβολή αντίστασης σε σχέση μετρούμενης θερμοκρασίας, θερμικού αισθητήρα PTC.....	41
Εικόνα 24: Εύρος θερμίστορ NTC.....	41
Εικόνα 25. Κύκλωμα αισθητηρίου ροής τύπου NTC με διαιρετή τάσης.....	42
Εικόνα 26. Κύκλωμα αισθητηρίου ροής τύπου NTC με σταθερή πηγή έντασης.....	43
Εικόνα 27: Υπολογισμός αντίστασης θερμίστορ RT σε κύκλωμα Wheatstone.....	44

Εικόνα 28: Διαστάσεις, γεωμετρία όψεων του φορέα	46
Εικόνα 29: Πρόσοψη φορέα (α), στόμια παράκαμψης φορέα (β)	46
Εικόνα 30: Πίσω όψη του φορέα	47
Εικόνα 31: Άνω όψη του φορέα	47
Εικόνα 32: Εισαγωγή σχεδίου στο υπολογιστικό πρόγραμμα	48
Εικόνα 33: Επιλογή παραμέτρων του ρευστού στον σωλήνα για ταχύτητα 30m/s.....	50
Εικόνα 34. Επιλογή πλέγματος μέτριας πυκνότητας	51
Εικόνα 35: Τομή φορέα σε χρωματική απεικόνιση μεταβολής ταχύτητας κατά το μήκος του για ταχύτητα 30m/s	52
Εικόνα 36: Προσθήκη συγκεκριμένων συντεταγμένων	53
Εικόνα 37: Γράφημα ταχύτητας σημείου που αντιστοιχεί στη θέση του αισθητήρα για 30m/s..	53
Εικόνα 38: Γράφημα ταχύτητας σημείου που αντιστοιχεί στη θέση του αισθητήρα για 5m/s....	54
Εικόνα 39: Προσθήκη δευτέρου σημείου μέσω της εντολής Cut Line 3D	55
Εικόνα 40: Γράφημα ταχύτητας που αντιστοιχεί στο ολικό μήκος της παράκαμψης του φορέα για αρχική ταχύτητα 30m/s.....	55
Εικόνα 41: Γράφημα ταχύτητας που αντιστοιχεί στο ολικό μήκος της παράκαμψης του φορέα για αρχική ταχύτητα 5 m/s.....	56
Εικόνα 42: Μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης SLS.....	58
Εικόνα 43: Σύστημα εκτύπωσης Fused deposition modelling.....	58
Εικόνα 44: Γράφημα διαδικασίας εκτύπωσης με στερεολιθογραφία.....	60
Εικόνα 45: Προεπισκόπηση μοντέλου εκτύπωσης στο λογισμικό του CubeX.....	61
Εικόνα 46: Υλικό εκτύπωσης PLA	61
Εικόνα 47: Παράμετροι εκτύπωσης λογισμικού CubeX.....	62
Εικόνα 48: Εκτιμώμενος χρόνος κατασκευής του μοντέλου.....	63
Εικόνα 49: Επιλογή αρχείου προς εκτύπωση	63
Εικόνα 50: Μπροστινή όψη φορέα(α), ενσωματωμένο το στόμιο παράκαμψης διαμέτρου οπής 4mm(b)	64
Εικόνα 51: Πάνω όψη φορέα(α), πίσω όψη φορέα(b)	64
Εικόνα 52: Στόμια παράκαμψης	65
Εικόνα 53: Αισθητήρας ροής με θερμίστορ PTC υψηλής ακρίβειας.	65
Εικόνα 54: Κινητήρας και ηλεκτρομαγνητική πέδη εργαστηριακής κλίνης.....	66
Εικόνα 55: Νέα αισθητήρια διάταξη.....	67
Εικόνα 56: Σύνδεση της νέας αισθητήριας διάταξης με τον σωλήνα εισαγωγής της μηχανής ...	67
Εικόνα 57: Αρχικός φορέας δοκίμων	68
Εικόνα 58: Εργαστηριακές μετρήσεις προυπάρχουσας αισθητήριας διάταξης σταθερού ρεύματος	68
Εικόνα 59: Γράφημα τάσης(V) – παροχής(Lt/min) προϋπάρχοντος αισθητήρα ροής τύπου NTC	69

Εικόνα 60: Πηγή/πολύμετρο ρεύματος (soursemeter) Keithley 2612b.	70
Εικόνα 61: Τρέχουσες μετρήσεων εργαστηριακού κινητήρα	71
Εικόνα 62: Εργαστηριακές μετρήσεις νέας αισθητήριας διάταξης σταθερού ρεύματος	71
Εικόνα 63: Γραφική παράσταση μεταβολής τάσης εξόδου (V) - παροχής αέρα (SLPM) με χρήση πέδης	72
Εικόνα 64: Γραφική παράσταση μεταβολής τάσης εξόδου (V) - παροχής αέρα (SLPM) χωρίς χρήση πέδης	73

Μηχανική ρευστών

1.1 Εισαγωγή στην μηχανική των ρευστών

Η μηχανική ρευστών ασχολείται με τη συμπεριφορά των ρευστών σε κατάσταση ηρεμίας και σε κίνηση. Η γνώση και η κατανόηση των βασικών αρχών και εννοιών της μηχανικής ρευστών είναι απαραίτητες για την ανάλυση οποιουδήποτε συστήματος στο οποίο το ρευστό είναι το μέσο εργασίας. Η εφαρμογή των αρχών της μηχανικής ρευστών χρησιμοποιείται ευρύτατα στην κατασκευή αεροσκαφών, πλοίων, υποβρύχιων αυτοκίνητων κτλ.

Η μηχανική ρευστών, ειδικά ο τομέας της υδροδυναμικής είναι ένας δυναμικά εξελισσόμενος ερευνητικά τομέας για πολλούς με άλματα ή μερικώς επιλυμένα προβλήματα ενώ σε κάποιες περιπτώσεις είναι μαθηματικά πολύπλοκη (πχ επίλυση των διαφορικών εξισώσεων Navier Stokes). Για το λόγο αυτό, σε πολλές περιπτώσεις γίνεται χρήση κατάλληλων αριθμητικών μεθόδων, μέσω εξειδικευμένων υπολογιστικών πακέτων. Ένας από του πιο διαδεδομένους συγχρόνους τρόπους επίλυσης μαθηματικών προβλημάτων της ρευστομηχανικής άλλωστε είναι η υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) όπου αναπτύσσεται μια προσεγγιστική μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής ρευστών.

1.1.1 Ροή μέσα σε σωλήνα

Η ροή ενός υγρού ή αερίου μέσω σωλήνων ή αγωγών χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης και δίκτυα διανομής υγρών. Τα περισσότερα ρευστά, ειδικά υγρά, μεταφέρονται σε κυκλικούς αγωγούς. Αυτό συμβαίνει επειδή οι σωλήνες με κυκλική διατομή μπορούν να αντέξουν μεγάλες πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού τους μέρους χωρίς σημαντικές παραμορφώσεις. Μη κυκλικοί σωλήνες συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης κτιρίων όπου η διαφορά πίεσης είναι σχετικά μικρή, το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης είναι χαμηλότερο και ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος για αγωγούς.

1.1.2 Αρχή διατήρησης της μάζας

Σε μια ροή ενός ρευστού, η μέση ταχύτητα παραμένει σταθερή σε ασυμπίεστη ροή προϋποθέτοντας ότι η διατομή του σωλήνα παραμένει σταθερή και χαρακτηρίζεται ως μέση ταχύτητα V_{avg} . Η πυκνότητα του ρευστού θεωρητικά αλλάζει λόγω διαφοράς θερμοκρασίας, στην πράξη όμως έχουμε τις ιδιότητες του ρευστού σταθερές για κάποιο

μέσο ορό θερμοκρασίας που θεωρείται ότι είναι σταθερός. Η τριβή μεταξύ των σωματιδίων ρευστού σε έναν σωλήνα προκαλεί ελαφρά αύξηση θερμοκρασίας στο ρευστό με αποτέλεσμα την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της τριβής θέρμανσης είναι συνήθως πολύ μικρή για να δικαιολογηθεί οποιαδήποτε υπολογιστική εξέταση και επομένως αγνοείται (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014). Η αρχή της διατήρησης της μάζας ενός ρευστού μέσα σε έναν κυκλικό αγωγό θα είναι:

$$\dot{m} = \rho V_{\text{avg}} A_c = \int_{A_c} \rho u(r) dA_c \quad (1)$$

Όπου \dot{m} είναι ο ρυθμός ροής μάζας, ρ η πυκνότητα του ρευστού, A_c το εμβαδόν του υλικού και $u(r)$ το προφίλ της ταχύτητας.

Στη συνέχεια, η μέση ταχύτητα για ασυμπιεστή ροή σε έναν κυκλικό σωλήνα ακτίνας R μπορεί εκφράζεται ως:

$$V_{\text{avg}} = \frac{\int_{A_c} \rho u(r) dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho u(r) 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad (2)$$

Επομένως, όταν γνωρίζουμε το ρυθμό ροής ή το προφίλ ταχύτητας, ο μέσος όρος της ταχύτητας μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα.

1.1.3 Πυκνότητα

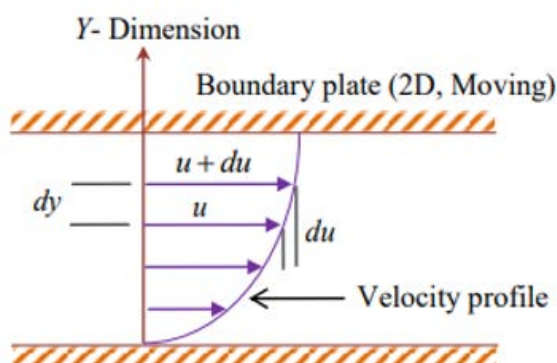
Η πυκνότητα ή η πυκνότητα μάζας ενός ρευστού ορίζεται ως η αναλογία μάζας-όγκου. Έτσι, η μάζα ανά μονάδα όγκου ενός ρευστού ονομάζεται πυκνότητα και δηλώνεται με kg/m^3 . Η πυκνότητα των ρευστών μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, ενώ η αέρια αλλάζει με τη διακύμανση της πίεσης και της θερμοκρασίας (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014). Μαθηματικά, η πυκνότητα μάζας αναγράφεται ως:

$$\rho = \frac{\text{Mass of fluid}}{\text{Volume of fluid}} \quad (3)$$

1.1.4 Ιξώδες και διατμητική τάση

Το ιξώδες ορίζεται ως η ιδιότητα η οποία καθορίζει το μέγεθος της αντίστασης που υφίσταται ένα ρευστό κάτω από συνθήκες διάτμησης. Το οριακό στρώμα είναι ένα λεπτό στρώμα ενός κινουμένου ρευστού κοντά στη στερεά επιφάνεια ενός τοιχώματος όπου βρίσκεται σε επαφή με αυτό. Ορίζουμε ως διατμητική τάση το γινόμενο του ρυθμού μεταβολής της ταχύτητας (σε σχέση με το ύψος των στρωμάτων du/dy , βλ. εικόνα 1) με το ιξώδες του ρευστού. Επομένως η διατμητική τάση είναι ανάλογη με την κλίση της ταχύτητας κάθετα στον άξονα όπου βρίσκονται τα διαδοχικά στρώματα του ρευστού (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014). Ως εκ τούτου η διατμητική τάση ορίζεται ως εξής:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4)$$



Εικόνα 1: Απεικόνιση οριακού στρώματος

[Cengel, A. & Cimbala, J. Fluid Mechanics, New York, 2014]

1.1.5 Αριθμός Reynolds

Σε κάθε κινούμενο ρευστό επιδρούν δυο διαφορετικές δυνάμεις, η δύναμη της αδράνειας και του ιξώδους. Εμπειρικά θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι η αδράνεια είναι η τάση των ρευστών να ρέουν συνεχώς όπου σε κάποιες προκαλεί διαταραχή στη ροή, ενώ το ιξώδες τείνει να ομαλοποιεί τη ροή. Σε παχύρευστα ρευστά για παράδειγμα σαν το μελί, το ιξώδες σχεδόν πάντα υπερτερεί. Λιγότερο παχύρευστα ρευστά, όπως για παράδειγμα το νερό και ο αέρας, τείνουν προς την αδράνεια η οποία δημιουργεί αστάθεια που εξελίσσεται εντέλει σε τύρβη όπως θα δούμε παρακάτω. Κατηγοριοποιούμε τις ροές μέσα σ αυτό το εύρος (ομαλή ροή-ασταθή ροή/τύρβη) με τον αριθμό Reynolds (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014).

Ο αριθμός Reynolds λοιπόν είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων μιας ροής προς το ιξώδες. Είναι ένας αριθμός χωρίς διάσταση και χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση της μορφής της ροής των ρευστών.

Ο αριθμός Reynolds για εσωτερική ροή σε έναν κυκλικό σωλήνα εκφράζεται ως:

$$\text{Re} = \frac{\text{Inertial forces}}{\text{Viscous forces}} = \frac{V_{\text{avg}} D}{\nu} = \frac{\rho V_{\text{avg}} D}{\mu} \quad (5)$$

όπου V η ταχύτητα του ρευστού, ρ η πυκνότητα του ρευστού D η διάμετρος του σωλήνα

Σε μικρούς ή μέτριους αριθμούς Reynolds, οι ιξώδεις δυνάμεις είναι αρκετά μεγάλες για να καταστείλουν αυτές τις διακυμάνσεις έχοντας στρωτή ροή (βλ. ενότητα 1.2.1). Σε μεγάλους αριθμούς Reynolds, οι αδρανειακές δυνάμεις είναι μεγάλες σε σχέση με τις ιξώδεις δυνάμεις και έχουμε τυρβώδη ροή (βλ. ενότητα 1.2.2). Ο αριθμός Reynolds με τον οποίο η στρωτή ροή γίνεται σταδιακά η τυρβώδης ροή ονομάζεται μεταβατικό στάδιο. Η

τιμή της μεταβατική ροής Reynolds είναι διαφέρει ανάλογα με την γεωμετρία και συνθήκες ροής.

Γενικότερα, η ροή σε έναν αγωγό μπορεί να είναι ομαλή, ή στρωτή γνωστή και ως ιξώδης ροή. Σε αυτόν τον τύπο ροής, το ρευστό ρέει σε στρώσεις ή ελασματοποιήσεις χωρίς να προκαλεί ταραχές ή στροβιλισμούς. Θα μπορούσε να αποτυπωθεί ως παράδειγμα αν σε έναν διαφανή αγωγό εγχύσουμε μια βαφή στο ρέον ρεύμα. Η βαφή θα ρέει ομαλά σε μια ευθεία γραμμή επιβεβαιώνοντας την ομαλή (στρωτή) ροή. Καθώς ο ρυθμός ροής του ρευστού αυξάνεται, η ταχύτητα αυξάνεται αλλάζοντας τη ροή από στρωτή ροή σε τυρβώδη (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014).

Υπό τις περισσότερες συνθήκες, η ροή σε έναν κυκλικό σωλήνα είναι:

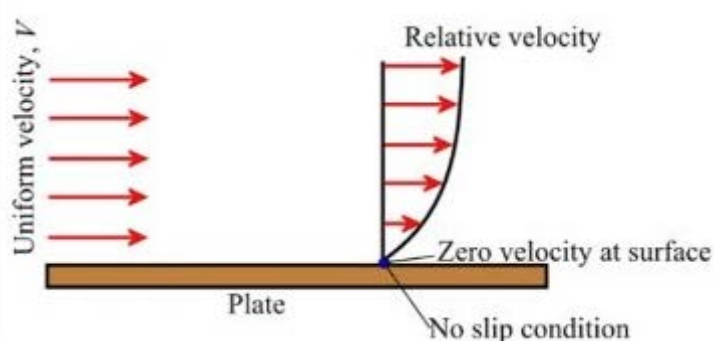
$$Re \leq 2300 \text{ Στρωτή ροή}$$

$$2300 \leq Re \leq 4000 \text{ Μεταβατική ροή}$$

$$Re \geq 4000 \text{ Τυρβώδης ροή}$$

1.1.6 Όριο χωρίς Ολίσθηση

Είναι γνωστό αναμφίβολα ότι όταν ένα κινούμενο ρευστό έρχεται σε επαφή με ένα συμπαγές σώμα, το οριακό σημείο του ρευστού που έρχεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του σώματος, λέγεται όριο χωρίς ολίσθηση. Η κατάσταση του ορίου ολίσθησης χωρίς να υπάρχει μετατόπιση ταχύτητας, προϋποθέτει ότι η ταχύτητα του στρώματος ρευστού είναι ίδια με την ταχύτητα αυτού του ορίου. Η υποθετική απόσταση από το αρχικό μέτωπο του αγωγού έως το εσωτερικό σημείο στο οποίο η ταχύτητα μηδενίζεται αναφέρεται ως μήκος ολίσθησης (βλ. εικόνα 2) (Shaughnessy, E. J. Jr. 2005).



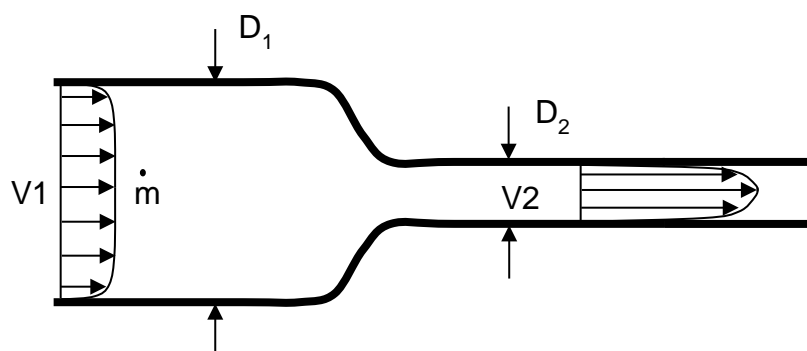
Εικόνα 2: Σχετική κίνηση ρευστού και επιφάνειας

[Cengel, A. & Cimbala, J. Fluid Mechanics, New York, 2014]

Το μήκος ολίσθησης εξαρτάται μόνο από τη σύζευξη του ρευστού και του στερεού και μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά. Σε γενικές γραμμές η οριακή κατάσταση ολίσθησης μπορεί να εφαρμοστεί στις περισσότερες εφαρμογές σε ασυμπίεστα ρευστά με χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους πάνω από 300 nm. Όποτε δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της οριακής συνθήκης ολίσθησης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η ταχύτητα στο όριο είναι μη μηδενική.

1.2 Χαρακτηριστικά Ταχύτητας ροής μέσα σε αγωγούς

Λόγω του φαινομένου του ορίου χωρίς ολίσθηση, η ταχύτητα στα τοιχώματα μιας ροής σωλήνα ή ενός αγωγού είναι μηδενική. Σε μια ροή ενός ρευστού, η μέση ταχύτητα παραμένει σταθερή σε ασυμπίεστη ροή προϋποθέτοντας ότι και η διατομή του σωλήνα παραμένει σταθερή και χαρακτηρίζεται όπως προαναφέρθηκε, ως μέση ταχύτητα V_{avg} . Λαμβάνουμε υπόψη ότι το όριο χωρίς ολίσθηση προκαλεί διατμητική τάση και τριβή κατά μήκος των τοιχωμάτων ενός κυκλικού αγωγού. Για αγωγούς σταθερής διαμέτρου και ασυμπίεστη ροή, το V_{avg} παραμένει το ίδιο ακόμα και αν αλλάξει το προφίλ ταχύτητας. Αλλά για σωλήνες με μεταβαλλόμενη διάμετρο έχουμε διαφορετική ταχύτητα με αρχή διατήρησης της μάζας $V_1 \neq V_2$. (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014).

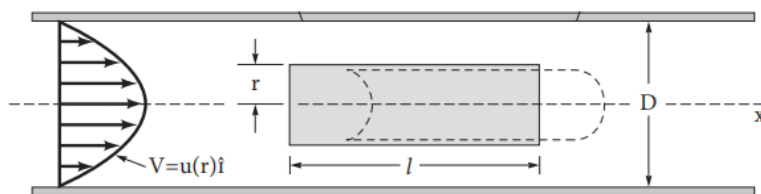


Εικόνα 3: Διαφοροποίηση προφίλ ταχύτητας σε μεταβαλλόμενη διάμετρο σωλήνα

[Cengel, A. & Cimbala, J. Fluid Mechanics, New York, 2014]

1.2.1 Στρωτή ροή

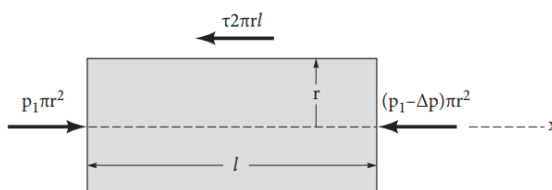
Στρωτή ροή είναι ο τύπος ροής ρευστού στον οποίο το ρευστό κινείται ομαλά, σε αντίθεση με μια τυρβώδη ροή, στην οποία το ρευστό υφίσταται ακανόνιστες διακυμάνσεις ή ανάμιξη. Η στρωτή ροή μερικές φορές ονομάζεται και απλουστευμένη ροή όπου η ταχύτητα, η πίεση και άλλες ιδιότητες ροής σε κάθε σημείο του ρευστού παραμένουν σταθερές. Μπορούμε να παρομοιάσουμε την στρωτή ροή ως μια οριζόντια επιφάνεια αποτελούμενη από λεπτά στρώματα, όλα παράλληλα μεταξύ τους. Το ρευστό που έρχεται σε επαφή με την οριζόντια επιφάνεια είναι στάσιμο, με όλα τα υπόλοιπα στρώματα να «γλιστρούν» το ένα πάνω στο άλλο. Η στρωτή ροή είναι κοινή μόνο σε περιπτώσεις στις οποίες το κανάλι ροής είναι σχετικά μεγάλο ή το ρευστό κινείται αργά και το ιξώδες του είναι σχετικά υψηλό ή όλα τα προηγούμενα (Shaughnessy, E. J. Jr. 2005).



Εικόνα 4: Κίνηση ενός στοιχείου του ρευστού μέσα σε έναν κυλινδρικό αγωγό

[Πρίνος, Π. Υδραυλική Κλειστών & Ανοιχτών Αγωγών, Θεσσαλονίκη, 2013]

Παραπάνω (βλ. εικόνα 4) βλέπουμε ένα μέρος του ρευστού σε κυλινδρικό σχήμα που κινείται σε έναν κυλινδρικό αγωγό. Επειδή η ταχύτητα δεν είναι ομοιόμορφη κατά το μήκος του κυλίνδρου, οι επίπεδες επιφάνειες του συγκεκριμένου ρευστού στοιχείου παραμορφώνονται κατά την κίνηση του μέσα στον κυλινδρικό αγωγό. Αν η ροή μέσα στον σωλήνα είναι πλήρως αναπτυγμένη και σε μόνιμη κατάσταση, η στρέβλωση που θα υποστεί κάθε επιφάνεια του ρευστού στοιχείου θα είναι ίδια, χωρίς να υπάρχει επιτάχυνση καθώς ρέει (Πρίνος, Π. 2013).



Εικόνα 5: Περιγραφή ελεύθερου σώματος σε κυλινδρικό όγκο ελέγχου

[Πρίνος, Π. Υδραυλική Κλειστών & Ανοιχτών Αγωγών, Θεσσαλονίκη, 2013]

Εφόσον δεν υπάρχουν σημαντικές βαρυτικές επιδράσεις και η πίεση μένει σταθερή σε κάθε διατομή του κυλινδρικού αγωγού, τότε η πίεση στις διατομές του αγωγού είναι $p = p_1$ και $p_2 = p_1 - \Delta p$. Οι δυνάμεις που δρουν στις επιφάνειες του κυλινδρικού αγωγού μπορούν να γραφτούν ως (Πρίνος, Π. 2013):

$$F_x = (p_1)\pi r^2 - (p_1 - \Delta p)\pi r^2 - (\tau)2\pi r l = 0 \quad (6)$$

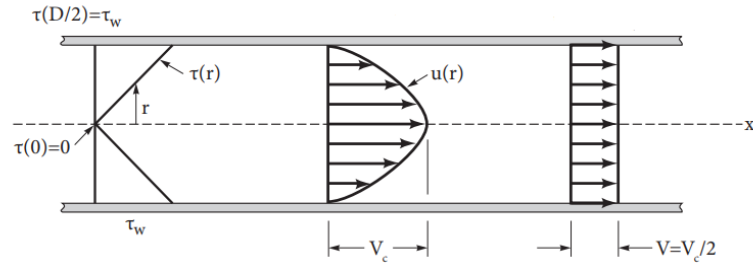
Απλοποιώντας έχουμε την ισορροπία δυνάμεων του ρευστού σωματιδίου ως εξής:

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{2\tau}{r} \quad (7)$$

Όπου αντιπροσωπεύει τις δυνάμεις που απαιτούνται για να γίνει η κίνηση του ρευστού στοιχείου κατά το μήκος του κυλινδρικού αγωγού. Ο λόγος $2\tau/r$ είναι η διατμητική τάση που δρα στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Επομένως θα μπορούσαμε να γράψουμε την κατανομή των διατμητικών τάσεων ως:

$$\tau = \frac{2\tau_w r}{D} \quad (8)$$

Όπου $\tau = Cr$, ο αριθμός C είναι ένας σταθερός αριθμός έχοντας $r=0$ λόγω ότι δεν υπάρχουν διατμητικές τάσεις στον άξονα του αγωγού, $\tau_w = \tau(D/2)$ η διατμητική τάση στα τοιχώματα του κυλίνδρου.



Εικόνα 6: Κατανομή των διατμητικών τάσεων σε κυλινδρικό αγωγό

[Πρίνος, Π. Υδραυλική Κλειστών & Ανοιχτών Αγωγών, Θεσσαλονίκη, 2013]

Η πτώση πίεσης και η διατμητική τάση που δρα στις επιφάνειες του κυλίνδρου συσχετίζοντας με την προηγούμενη σχέση (8) μας δίνουν:

$$\Delta p = \frac{4l\tau_w}{D} \quad (9)$$

Η διατμητική τάση ενός ρευστού είναι ανάλογη με την κλίση της ταχύτητας:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr} \quad (10)$$

Το αρνητικό πρόσημο μας εξηγεί ότι $\tau > 0$ για du/dr δηλαδή ότι υπάρχει μείωση της ταχύτητας καθώς απομακρυνόμαστε από τον άξονα του κυλίνδρου. Συνδυάζοντας την παραπάνω εξίσωση με αυτή των δυνάμεων που απαιτούνται για να κινηθεί το στοιχείο του ρευστού μέσα στον κυλινδρικό αγωγό έχουμε τον εξής τύπο (Πρίνος, Π. 2013):

$$\frac{du}{dr} = -\left(\frac{\Delta p}{2\mu l}\right)r \quad (11)$$

Ολοκληρώνοντας έχουμε το προφίλ της ταχύτητας:

$$\int du = -\frac{\Delta p}{2\mu l} \int r dr \quad (12)$$

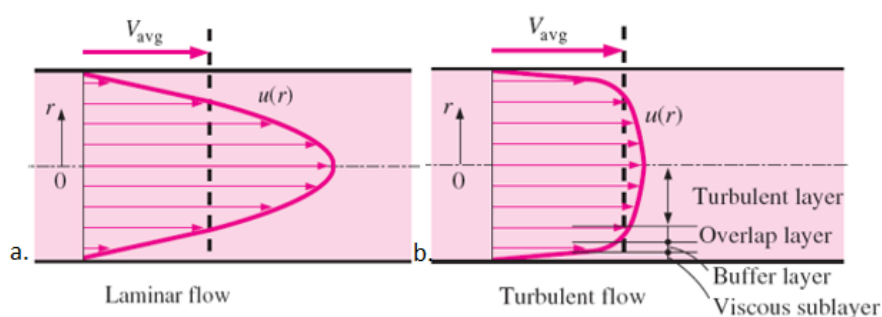
Ή αλλιώς:

$$u = -\left(\frac{\Delta p}{4\mu l}\right)r^2 + c_1 \quad (13)$$

1.2.2 Τυρβώδης ροή

Τυρβώδης ροή είναι ο τύπος ροής ρευστού στον οποίο το ρευστό υφίσταται ακανόνιστες διακυμάνσεις ή ανάμιξη, σε αντίθεση με τη στρωτή ροή, στην οποία το ρευστό κινείται σε ομαλές διαδρομές ή στρώσεις. Στην τυρβώδη ροή, η ταχύτητα του ρευστού σε ένα σημείο υφίσταται συνεχώς αλλαγές τόσο στο μέγεθος όσο και στην κατεύθυνση.

Τα περισσότερα είδη ροής ρευστού είναι τυρβώδους ροής. Κοινά παραδείγματα τυρβώδους ροής είναι η ροή του αίματος στις αρτηρίες, η μεταφορά πετρελαίου σε αγωγούς, η ροή λάβας ή του νερού που εκτοπίζει μια προπέλα πλοίου, τα ωκεάνια ρεύματα, η ατμόσφαιρα, η ροή μέσω αντλιών και στροβίλων, η ροή αέρα γύρω από τις άκρες των πτερυγίων των αεροσκαφών κ.ά. (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014) (Fox, R. W. McDonald, A.T. Pritchard, P. J. 2004).



Εικόνα 7: Προφίλ ταχύτητας μέσα σε κυλινδρικό αγωγό (α. στρωτή ροή, β. τυρβώδης ροή)

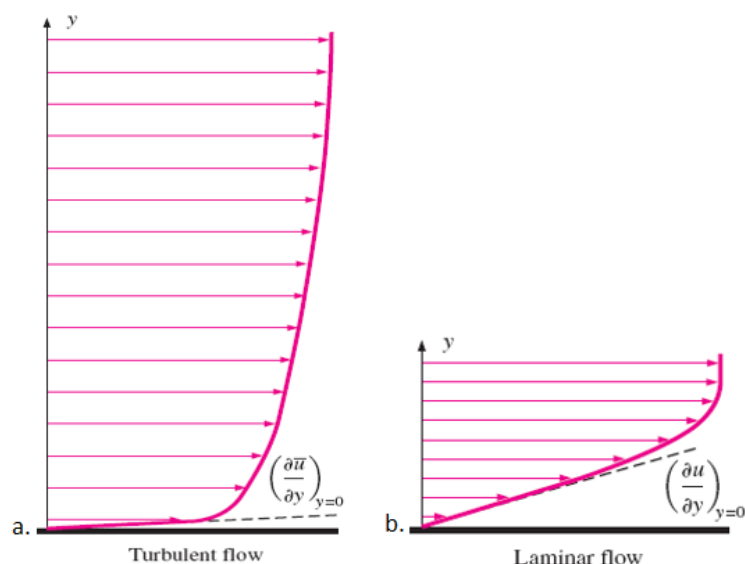
[Cengel, A. & Cimbala, J. Fluid Mechanics, New York, 2014]

Οι περισσότερες ροές που συναντώνται στην τεχνική πρακτική είναι τυρβώδους ροής. Ωστόσο, η τυρβώδη ροή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, παραμένοντας σε μεγάλο βαθμό πολύ δύσκολη να υπολογιστεί με ακρίβεια. Συνήθως γίνεται χρήση σε πειράματα και με εμπειρικούς ή ημι-εμπειρικούς συσχετισμούς που αναπτύχθηκαν για διάφορες καταστάσεις μέσω πειραμάτων.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της τύρβης είναι οι διαφορετικές κλίμακες μετατόπισης που εμφανίζουν αυτές οι ροές. Οι τυρβώδεις ροές αποτελούνται από πολλαπλές δίνες διάφορων μεγεθών, που ονομάζονται Eddies και είναι σαν στρόβιλοι σε διάφορα μεγέθη και μορφές. Όλες αυτές οι δίνες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και διασπώνται σε ολοένα και μικρότερες δίνες, έως ότου όλη αυτή η διαδικασία μετατραπεί σε θερμότητα.

Αυτές οι διακυμάνσεις περιέχουν έναν επιπλέον μηχανισμό για την ορμή και την μεταφορά ενέργειας. Στη στρωτή ροή, η ορμή και η ενέργεια μεταφέρονται διαμέσου ρευμάτων με μοριακή διάχυση. Στην τυρβώδη ροή, οι ταραχώδεις ροές μεταφέρουν μάζα, ορμή και

ενέργεια σε άλλες περιοχές ροής πολύ πιο γρήγορα από τη μοριακή διάχυση. Έτσι σχετίζονται με πολύ υψηλότερες τιμές τριβής, μεταφοράς θερμότητας και συντελεστών μεταφοράς μάζας από τη στρωτή ροή. Με αποτέλεσμα στην τυρβώδη ροή να προκαλούνται σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές της ταχύτητας, της θερμοκρασίας, της πίεσης και ακόμη και της πυκνότητας (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014).

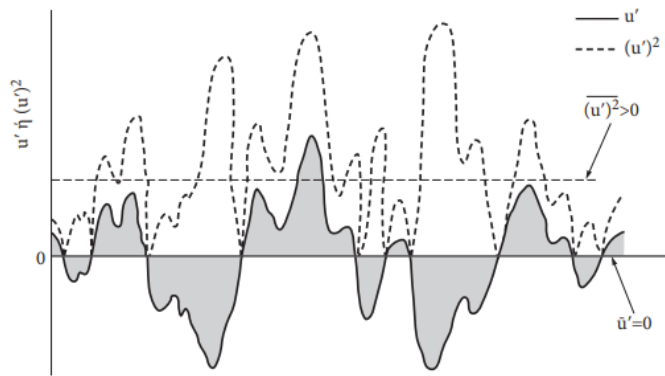


Εικόνα 8: Διαφορά οριακού στρώματος μεταξύ στρωτής(α) και τυρβώδης(β) ροής

[Cengel, A. & Cimbala, J. Fluid Mechanics, New York, 2014]

1.2.3 Τυρβώδης διατμητική τάση

Η μεγαλύτερη διαφορά της τυρβώδους ροής με την στρωτή είναι στην τυχαία και χαοτική συμπεριφορά των παραμέτρων του ρευστού, όπως την πίεση την ταχύτητα, την διατμητική τάση και την θερμοκρασία. Το προφίλ ταχύτητας είναι σχεδόν παραβολικό στη στρωτή ροή, ενώ αντίθετα γίνεται πιο επίπεδο ή «πληρέστερο» σε τυρβώδη ροή. Η πληρότητα αυξάνεται με τον αριθμό Reynolds και το προφίλ ταχύτητας γίνεται πιο ομοιόμορφο. Ωστόσο η ταχύτητα ροής στο τοίχωμα ενός σταθερού σωλήνα είναι πάντα μηδέν (όριο χωρίς ολίσθηση).



Εικόνα 9: Μέση χρονική τιμή της ταχύτητας σε τυρβώδη ροή

[Πρίνος, Π. Υδραυλική Κλειστών & Ανοιχτών Αγωγών, Θεσσαλονίκη, 2013]

Όπως μας δείχνει το παραπάνω σχήμα, παρατηρούμε τις τυχαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας σε μια τυρβώδη ροή όπου u' είναι η μέση χρονική τιμή και $(u')^2$ το τετράγωνό της. Υπολογίζουμε την ταχύτητα με βάση την μέση χρονική της τιμή, επειδή στην τυρβώδη ροή έχουμε τυχαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας σε σχέση με την στρωτή ροή όπου μπορούμε να την υπολογίσουμε ευκολότερα με γεωμετρικούς μαθηματικούς τύπους.

Εφόσον έχουμε $u=u(x, y, z, t)$ όπου είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα x τότε η μέση χρονική τιμή της ταχύτητας θα είναι (Πρίνος, Π. 2013):

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(x, y, z, t) dt \quad (14)$$

Το χρονικό διάστημα T θα είναι πιο μεγάλο από την περίοδο των διακυμάνσεων αλλά πιο μικρό από τις τυχαίες αστάθειες της μέσης ταχύτητας. Η διακύμανση της ταχύτητας u' είναι το χρονικό μεταβαλλόμενο μέρος που διαφέρει από τη μέση τιμή και ισχύει:

$$u = \bar{u} + u' \quad \text{ή} \quad u' = u - \bar{u} \quad (15)$$

Η μέση χρονική τιμή των διακυμάνσεων ισούται με 0, αφού οι διακυμάνσεις μπορούν να κατανεμηθούν ίσα και στις δυο πλευρές του μέσου ορού ως εξής:

$$\bar{u}' = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (u - \bar{u}) dt = \frac{1}{T} \left(\int_{t_0}^{t_0+T} u dt - \bar{u} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \right) = \frac{1}{T} (T\bar{u} - T\bar{u}) = 0 \quad (16)$$

Όπως επίσης παρατηρούμε στο σχήμα, η τιμή του μέσου όρου είναι θετική επειδή το τετράγωνο μιας ποσότητας δεν γίνεται να είναι αρνητικό. Έτσι έχουμε:

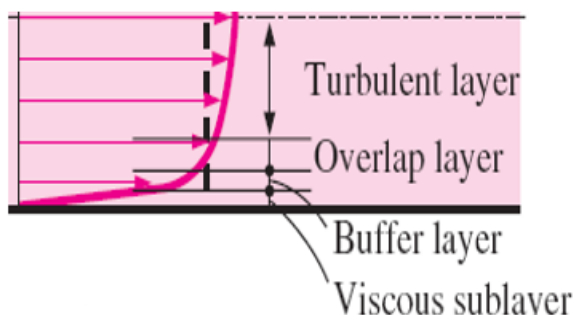
$$\overline{(u')^2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (u')^2 dt > 0 \quad (17)$$

1.2.4 Οριακό στρώμα τυρβώδους ροής

Η τυρβώδης ροή κατά μήκος ενός ορίου μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τέσσερις περιοχές που χαρακτηρίζονται από την απόσταση των τοιχωμάτων ενός στερεού σώματος.

Τα χαρακτηριστικά της ροής σε κάθε μια από αυτές τις περιοχές είναι πολύ σημαντικά, δεδομένου ότι θέτουν την διαφοροποίηση της ροής στον υπόλοιπο αγωγό. Οποιαδήποτε ανωμαλία ή τραχύτητα στην επιφάνεια του, μπορεί να διαταράξει τη μορφολογία του στρώματος και να επηρεάσει τη ροή. Επομένως, σε αντίθεση με τη στρωτή ροή, ο συντελεστής τριβής στην τυρβώδη ροή είναι μια ισχυρή συνάρτηση της τραχύτητας της επιφάνειας.

Πρώτο στρώμα έχουμε το Ιξώδες (Viscous Sublayer, βλ. εικόνα 10), όπου το προφίλ της ταχύτητας είναι σχεδόν γραμμικό και η ροή είναι πιο απλουστευμένη. Έπειτα έχουμε το Ρυθμιστικό στρώμα (Buffer layer) όπου οι ταραχώδεις επιδράσεις της ροής γίνονται πιο σημαντικές. Μετά έχουμε το Μεταβατικό στρώμα (Overlap Layer) όπου οι επιδράσεις της τυρβώδους ροής γίνονται ακόμα πιο ισχυρές αλλά εξακολουθούν να μην κυριαρχούν. Το τελευταίο είναι το Εξωτερικό στρώμα (Turbulent layer) όπου τα τυρβώδη αποτελέσματα κυριαρχούν σε σχέση με τα προγενέστερα στρωματά (Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. 2014).

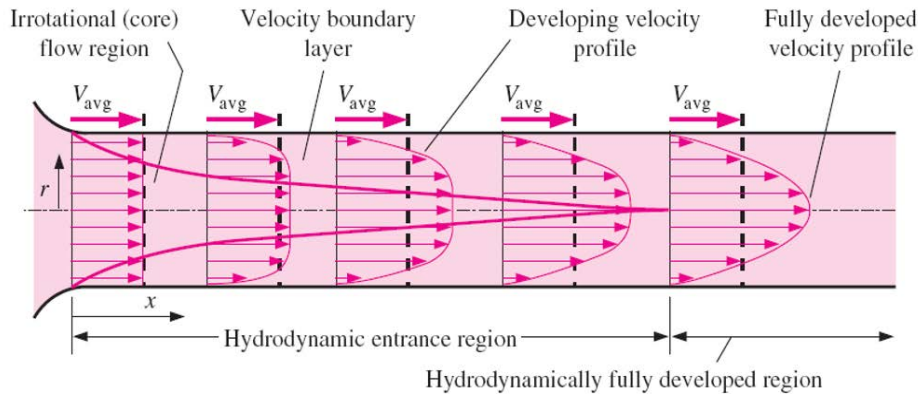


Εικόνα 10: Είδη στρωμάτων σε προφίλ τυρβώδους ροής

[Cengel, A. & Cimbala, J. Fluid Mechanics, New York, 2014]

1.2.5 Συνθήκες εισόδου σε κυλινδρικό αγωγό

Στην περίπτωση που ένα ρευστό εισέρχεται μέσα σε έναν αγωγό με στρογγυλεμένο στόμιο, η ταχύτητα που θα κατανεμηθεί στην είσοδο του στομίου θα είναι ομοιόμορφη. Εξαιτίας της διατμητικής τάσης που θα αναπτύσσεται στο ρευστό από την παρουσία των τοιχωμάτων του σωλήνα, η ταχύτητα θα πρέπει να αυξηθεί στο κέντρο του αγωγού ενώ αντίθετα να ελαττωθεί στα άκρα του. Ορίζουμε ως υδροδυναμικό μήκος εισόδου L την ελάχιστη απόσταση από είσοδο του αγωγού που απαιτείται για να αναπτυχθεί πλήρως η ροή.



Εικόνα 11: Διακρίνονται περιοχή: εισόδου, αναπτυσσόμενη ροή και πλήρως αναπτυγμένη ροή σε σωλήνα κυκλικής διατομής (περίπτωση στρωτής ροής)

[Cengel, A. & Cimbala, J. Fluid Mechanics, New York, 2014]

Στην περίπτωση στρωτή ροής αποδεικνύεται ότι το υδροδυναμικό μήκος εισόδου δίνεται περίπου ως [Πρίνος, Π. 2013]:

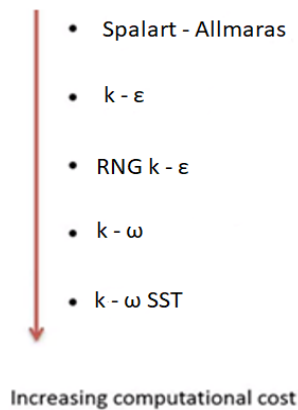
$$\frac{l_{\text{εισ}}}{D} = 0.06\text{Re} \quad (18)$$

Στην τυρβώδη ροή, το Ρευστοδυναμικό δυναμικό μήκος εισόδου μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$\frac{l_{\text{εισ}}}{D} = 4.4(\text{Re})^{1/6} \quad (19)$$

1.3 Είδη μοντέλων τυρβώδης ροής

Η πλειοψηφία των ροών στη φύση είναι τυρβώδεις γι' αυτό είναι απαραίτητη η χρήση αριθμητικών μεθόδων για την περιγραφή και την πρόβλεψή τους. Ο στόχος της μοντελοποίησης της τύρβης (turbulence modeling) είναι να αναπτυχθούν εξισώσεις που προβλέπουν τις μέσες τιμές της ταχύτητας, πίεσης, θερμοκρασίας σε συνάρτηση του χρόνου. Υπάρχουν τρεις κύριοι μέθοδοι υπολογισμών για την μοντελοποίηση της τύρβης. Τα μοντέλα τύρβης RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes), η μοντελοποίηση μεγάλων δινών LES (Large-Eddy Simulation,) και η άμεση αριθμητική προσομοίωση DNS (Direct Numerical Simulation). Η χρήση της μεθόδου μοντελοποίησης RANS είναι πιο διαδεδομένη επειδή προσομοιώνει όλο το φάσμα του στροβιλισμού δίνοντας τις μέσες τιμές της ταχύτητας, πίεσης, θερμοκρασίας χωρίς υπολογισμό της πλήρους δομής της ροής ως συνάρτηση του χρόνου όπου βασίζονται οι υπόλοιπες δυο μέθοδοι. Τα κυριότερα μοντέλα RANS παρουσιάζονται στην εικόνα 12 (από το λιγότερο σε απαιτήσεις επεξεργαστικής ισχύς έως το μεγαλύτερο) (Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. 2018):



Εικόνα 12: Κατάταξη επεξεργαστικής ισχύς συνηθέστερων υπολογιστικών μοντέλων τύρβης RANS

Στην συνέχεια, αναλύουμε περιληπτικά τα παραπάνω μοντέλα τύρβης RANS δίνοντας περισσότερο βάση στα μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$ και $k-\omega$ τα οποία και δοκιμάστηκαν σε κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα για να μοντελοποιήσουμε την τύρβη του φορέα που σχεδιάσαμε.

1.3.1 Μοντέλο Spalart-Allmaras

Το μοντέλο Spalart-Allmaras πρόκειται για μοντέλο χαμηλού αριθμού Reynolds με μέτριες απαιτήσεις ανάλυσης και μπορεί να επιλύσει ολόκληρο το πεδίο ροής μέχρι ένα συμπαγές τοίχωμα. Η εμπειρία δείχνει ότι αυτό το μοντέλο δεν υπολογίζει με ακρίβεια πεδία που εμφανίζουν ροή διάτμησης, διαχωρισμένη ροή ή στροβιλισμό αποσύνθεσης.

Το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras είναι ένα μοντέλο στροβιλισμού σχεδιασμένο κυρίως για αεροδυναμικές εφαρμογές. Το μοντέλο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για πολλές εφαρμογές εφαρμοσμένης μηχανικής, ιδίως για εφαρμογές αεροτομών και λεπίδων στροβίλου. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές που περιλαμβάνουν περιοχές ελεύθερης διάτμησης τύπου τζετ (αεριοστρόβιλου) (Versteeg, H. K. & Malalasekera, M. 2007) (Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. 2018).

1.3.2 Μοντέλο $k-\epsilon$

Το μοντέλο $k-\epsilon$ είναι ένα από τα πιο χρησιμοποιημένα μοντέλα στροβιλισμού για βιομηχανικές εφαρμογές. Λύνει ταυτόχρονα δύο μεταβλητές, k την κινητική ενέργεια στροβιλισμού και ϵ το ρυθμό διάχυσης-εκφυλισμού της κινητικής ενέργειας στροβιλισμού. Το συγκεκριμένο μοντέλο ιστορικά υπήρξε πολύ δημοφιλές για βιομηχανικές εφαρμογές λόγω του καλού ρυθμού σύγκλισης και των σχετικά χαμηλών απαιτήσεων επεξεργαστικής ισχύς. Να αναφέρουμε ότι δεν υπολογίζει με ακρίβεια τα πεδία ροής που εμφανίζουν βαθμίδες αρνητικής πίεσης, ισχυρής καμπυλότητας στη ροή. Επίσης λειτουργεί καλά για προβλήματα εξωτερικής ροής γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες. Οι βασικές εξισώσεις που βασίζεται το μοντέλο φαίνονται παρακάτω (Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. 2018) (Versteeg, H. K. & Malalasekera, M. 2007):

Η στιγμιαία κινητική ενέργεια $k(t)$ ανά μονάδα μάζας μιας τυρβώδους ροής μας δίνεται από τον εξής τύπο:

$$k(t) = K + k \quad (20)$$

Αποτελεί το άθροισμα της μέσης κινητικής ενέργειας K και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k . Ο τύπος της μέσης κινητικής ενέργειας στους τρεις άξονες xx', yy', zz' είναι:

$$K = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2) \quad (21)$$

Αντίστοιχα ο τύπος της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στους τρεις άξονες xx', yy', zz' είναι:

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (22)$$

όπου u'^2, v'^2, w'^2 , οι συνιστώσες της ταχύτητας στους άξονες xx', yy', zz'

Αντίστοιχα ο στιγμιαίος ρυθμός παραμόρφωσης ενός στοιχείου ρευστού, $S_{ij}(t)$ σε μια τυρβώδη ροή είναι:

$$s_{ij}(t) = S_{ij} + s'_{ij} \quad (23)$$

Όπου στο πεδίο ροής xx', yy', zz' έχουμε:

$$\begin{aligned} s_{xx}(t) &= S_{xx} + s'_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} \\ s_{yy}(t) &= S_{yy} + s'_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y} \\ s_{zz}(t) &= S_{zz} + s'_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z} \end{aligned} \quad (24)$$

Αντίστοιχα για τις υπόλοιπες συνιστώσες ισχύει:

$$\begin{aligned} s_{xy}(t) &= S_{xy} + s'_{xy} = s_{yx}(t) = S_{yx} + s'_{yx} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right] \\ s_{xz}(t) &= S_{xz} + s'_{xz} = s_{zx}(t) = S_{zx} + s'_{zx} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right] \\ s_{yz}(t) &= S_{yz} + s'_{yz} = s_{zy}(t) = S_{zy} + s'_{zy} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

Ορίζουμε ως ιξώδες τύρβης μ_t :

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (26)$$

όπου ε ο ρυθμός εκφυλισμού της κινητικής ενέργειας

Η εξίσωση για τη μέση κινητική ενέργεια K είναι η εξής:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \text{div}(\rho K \mathbf{U}) = \text{div}(-P\mathbf{U} + 2\mu \mathbf{U} S_{ij} - \rho \mathbf{U} \overline{u_i' u_j'}) - 2\mu S_{ij} \cdot S_{ij} - (-\rho \overline{u_i' u_j'} \cdot S_{ij}) \quad (27)$$

1 2 3 4 5 6 7

Όπου S_{ij} ο ταυστής του μέσου ρυθμού παραμόρφωσης. Συνεχίζοντας αναλύουμε την παραπάνω εξίσωση ανά μέλη:

1. Ο ρυθμός μεταβολής της μέσης κινητικής ενέργειας K
2. Η μεταφορά της K μέσω συναγωγής
3. Η μεταφορά της K με πίεση
4. Η μεταφορά της K με τάσεις λόγω ιξώδους
5. Η μεταφορά της K με τάσεις Reynolds
6. Ο ρυθμός εκφυλισμού του K
7. Ο ρυθμός καταστροφής του K λόγω της παραγωγής τύρβης

Επίσης η εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k είναι:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div}(-\overline{p' \mathbf{u}'} + 2\mu \overline{\mathbf{u}' s'_{ij}} - \rho \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i' u_j'}) - 2\mu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} + (-\rho \overline{u_i' u_j'} \cdot S_{ij}) \quad (28)$$

1 2 3 4 5 6 7

Όπου s'_{ij} η συνιστώσα της διακύμανσης του ρυθμού παραμόρφωσης και S_{ij} η μέση τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης. Οι συντελεστές 1-7 είναι οι ακόλουθοι:

1. Ο ρυθμός μεταβολής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k
2. Η μεταφορά της k μέσω συναγωγής
3. Η μεταφορά της k με πίεση
4. Η μεταφορά της k με τάσεις λόγω ιξώδους
5. Η μεταφορά της k με τάσεις Reynolds

6. Ο ρυθμός εκφυλισμού του k

7. Ο ρυθμός καταστροφής του k λόγω της παραγωγής τύρβης

Ο όρος εκφυλισμού λόγω ιξώδους (συνιστώσα 6) στην άνω εξίσωση (28) εκφράζει τον εκφυλισμό της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που προκαλείται από τις μικρότερες δίνες έναντι των τάσεων λόγω του ιξώδους.

Ο ρυθμός εκφυλισμού ανά μονάδα όγκου ε δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{s_{ij}' \cdot s_{ij}'} \quad (29)$$

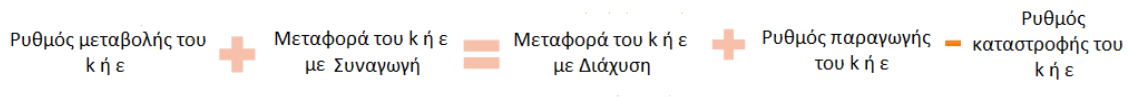
όπου το κινηματικό ιξώδες της τύρβης ν εκφράζεται με την σχέση $\mu_t = \rho \nu_{v1}$

Οι βασικές εξισώσεις που καταλήγουμε για το μοντέλο k - ε είναι οι εξής:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (30)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (31)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, μπορούμε πολύ περιληπτικά να συμπεράνουμε ότι:



Οι σταθερές στις άνω εξισώσεις είναι $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\varepsilon = 1.30$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, f_{v1} όπου αποτελεί πρόσθετη συνάρτηση απόσβεσης τοιχώματος.

1.3.3 Μοντέλο k - ω

Το μοντέλο k - ω είναι παρόμοιο με το μοντέλο k - ε . Η βασική του διαφορά είναι ότι επιλύει ως προς k την τυρβώδη κινητική ενέργεια και ως προς ω μέγιστη την συχνότητα τύρβης. Έχει υψηλές επιδόσεις στο οριακό στρώμα κοντά στο τοίχωμα, σε ροές χωρίς σημαντικές διατμητικές τάσεις και ροές σε μικρούς αριθμούς Reynolds. Το μοντέλο k - ω είναι χρήσιμο σε πολλές περιπτώσεις όπου το μοντέλο k - ε δεν είναι ακριβές, όπως εσωτερικές ροές, ροές που εμφανίζουν έντονη καμπυλότητα, διαχωρισμένες ροές και πίδακες. Ορίζουμε ως συχνότητα τύρβης (Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. 2018) (Versteeg, H. K. & Malalasekera, M. 2007):

$$\omega = \varepsilon / k \quad (32)$$

Η κλίμακα του μήκους είναι η εξής:

$$l = \frac{\sqrt{k}}{\omega} \quad (33)$$

Το ιξώδες της τύρβης δίνεται από τον τύπο:

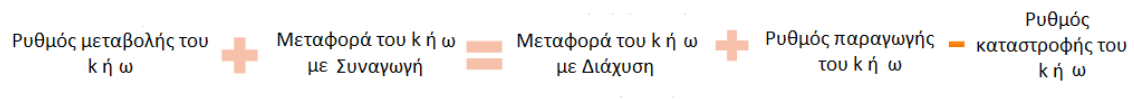
$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (34)$$

Αντίστοιχα με το προηγούμενο μοντέλο $k-\varepsilon$ οι βασικές εξισώσεις μεταφοράς του $k-\omega$ είναι οι εξής:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (35)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} \omega \right] + \gamma_1 \left(2\rho S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (36)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, μπορούμε πολύ περιληπτικά να συμπεράνουμε ότι:



Ο ρυθμός παραγωγικής κινητικής ενέργειας εκφράζεται με τον τύπο:

$$P_k = \left(2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \quad (37)$$

όπου S_{ij} η μέση τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης (αντίστοιχα με το μοντέλο $k-\varepsilon$)

Οι σταθερές τιμές έχουν τις εξής τιμές: $\sigma_k = 2.0$, $\sigma_\omega = 2.0$, $\gamma_1 = 0.553$, $\beta_1 = 0.075$, $\beta^* = 0.09$ και δ_{ij} το δέλτα του κρόνεκερ.

1.3.4 Μοντέλο RNG $k-\varepsilon$

Το μοντέλο *RNG $k-\varepsilon$* είναι μια παραλλαγή του $k-\varepsilon$ που χρησιμοποιείται με στόχο να βελτιώσει τις αδυναμίες του. Είναι κατάλληλο για συνθέτες ροές με διάτμηση σε τυχαίες καταπονήσεις αλλά για μέτριο στροβιλισμό. Όπως για παράδειγμα αποκόλληση δινών και οριακού στρώματος από μη αεροδυναμικά στρωματά (Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. 2018).

1.3.5 Μοντέλο $k-\omega$ SST

Το μοντέλο $k-\omega$ SST είναι ένας συνδυασμός του μοντέλου $k-\varepsilon$ στην ελεύθερη ροή και του μοντέλου $k-\omega$ κοντά στα τοιχώματα. Προσφέρει συνδυαστικά τα οφέλη και των δυο μοντέλων ($k-\varepsilon$ και $k-\omega$) ενώ παρέχει ακριβέστερη πρόβλεψη αποκόλλησης της ροής από άλλα μοντέλα RANS. Έχει παρόμοιες απαιτήσεις ανάλυσης με το μοντέλο $k-\omega$ (Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. 2018).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε μοντέλου που αναφέραμε (Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. 2018). Να σημειωθεί ότι στα πλαίσια τις παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν το μοντέλο RANS τύρβης $k-\omega$.

Μοντέλα RANS	Περιγραφή
Spalart-Allmaras	<ul style="list-style-type: none">• Κατάλληλο σε προβλήματα εξωτερικής αεροδυναμικής.• Μικρότερη ακρίβεια από άλλα μοντέλα τύρβης.
Standard $k-\varepsilon$	<ul style="list-style-type: none">• Κατάλληλο για αρχικές επαναλήψεις και παραμετρικές μελέτες.• Δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πολύπλοκες ροές.
RNG $k - \varepsilon$	<ul style="list-style-type: none">• Κατάλληλο για σύνθετες ροές με διάτμηση που περιλαμβάνουν ταχεία καταπόνηση, βελτιώνει αδυναμίες του $k-\varepsilon$.
Standard $k-\omega$	<ul style="list-style-type: none">• Έχει υψηλές επιδόσεις στο οριακό στρώμα κοντά στα τοιχώματα, έχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε εσωτερικές ροές.
SST $k-\omega$	<ul style="list-style-type: none">• Προσφέρει συνδυαστικά τα οφέλη και των δυο μοντέλων ($k-\varepsilon$ και $k-\omega$).• Απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς από τα παραπάνω μοντέλα τύρβης.

2

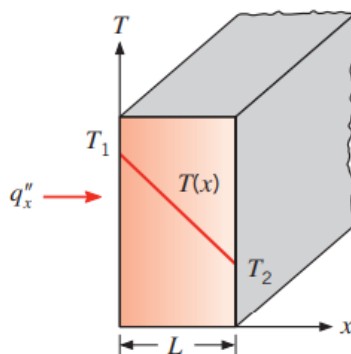
Μεταφορά θερμότητας

2.1 Μεταφορά θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας είναι η διαδικασία μετάδοσης της θερμικής ενέργειας λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας από ένα σώμα (ρευστό ή στερεό) με υψηλότερη θερμοκρασία σε ένα άλλο με μικρότερη θερμοκρασία. Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μέσω τριών θεμελιωδών μηχανισμών (μηχανισμοί αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας). Οι επόμενες ενότητες αναλύουν συνοπτικά τις βασικές αρχές για κάθε μηχανισμό (Pitts, D. & Sissom, L. 2004).

2.2 Αγωγή

Η αγωγή είναι ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας στον οποίο η ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ σωματιδίων μέσω επαφής από το θερμότερο στο ψυχρότερο. Η αγωγή μπορεί να θεωρηθεί ως η μεταφορά ενέργειας από το πιο ενεργητικό στο λιγότερο ενεργητικό σωματίδιο μιας ουσίας, λόγω αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Σε ρευστά και ηλεκτρικά μη αγώγιμα στερεά, πιστεύεται ότι η μεταφορά θερμότητας προκαλείται από την διαμήκη ταλάντωση της δομής του πλέγματος τους και ονομάζεται πλέγμα κυμάτων μεταφοράς θερμότητας (Bergman, T. L. Lavine, A. S. Incropera, F. P. Dewitt, D. P. 2011).



Εικόνα 13: Μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας με αγωγιμότητα

[Bergman, T. Lavine, A. Incropera, F. Dewitt, D Introduction to Heat Transfer, USA, 2011]

Για την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, η βασική εξίσωση μεταφοράς είναι γνωστή ως νόμος του Fourier. Για μονοδιάστατο επίπεδο τοίχωμα που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η εξίσωση ρυθμού της μεταφοράς της θερμότητας είναι η εξής:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (38)$$

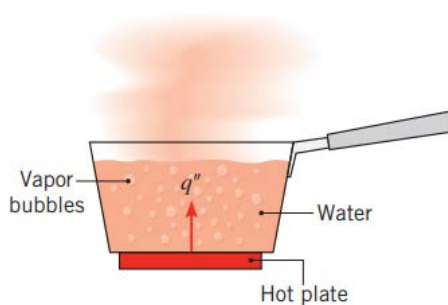
Όπου q'' (ροή θερμότητας) ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στην κατεύθυνση x κάθετη στην επιφάνεια (βλ. εικόνα 13) όπου είναι ανάλογος με την κλίση της θερμοκρασίας στην κατεύθυνση x . Η παράμετρος k είναι μια πειραματική σταθερά (διαφορετική για κάθε υλικό) γνωστή και ως θερμική αγωγιμότητα. Το σύμβολο μείον εκφράζει το γεγονός ότι η θερμότητα μεταφέρεται προς την κατεύθυνση της μειωμένης θερμοκρασίας. Σε συνθήκες σταθερής κατάστασης η άνω εξίσωση εκφράζεται ως:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (39)$$

2.3 Συναγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι το αποτέλεσμα της θερμική αλληλεπίδρασης μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού. Εκφράζει δηλαδή την ενέργεια που συνάγεται από η προς ένα στερεό σώμα όταν εκτεθεί σε ένα κινούμενο ρευστό που έχει θερμοκρασιακή διαφορά με αυτό.

Ο τρόπος μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή αποτελείται από δύο μηχανισμούς. Εκτός από την μεταφορά ενέργειας λόγω τυχαίας μοριακής κίνησης (διάχυση), η ενέργεια μεταφέρεται επίσης από την μάζα του ρευστού σε κίνηση (Ikeya, Y. Orli, R. Fukagata, Koji. Alfredsson, H. P. 2017).



Εικόνα 14: Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

[Bergman, T. Lavine, A. Incropera, F. Dewitt, D Introduction to Heat Transfer, USA, 2011]

Στην παραπάνω εικόνα (βλ. εικόνα 14) παρατηρούμε την μεταφοράς θερμότητας που οφείλεται σε κίνηση ρευστού που προκαλείται από τις φυσαλίδες ατμών που παράγονται στο κάτω μέρος ενός δοχείου με βραστό νερό. Να σημειωθεί ότι παράλληλα υπάρχει μεταφορά θερμότητας με αγωγή από την ζεστή επιφάνεια στο σκεύος. Η εξίσωση της

μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή είναι η εξής (Ikeya, Y. Orlu, R. Fukagata, Koji. Alfredsson, H. P. 2017):

$$q = h(T_w - T_f) \quad (40)$$

Όπου q ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, T_w η θερμοκρασία τοίχου και T_f η θερμοκρασία ρευστού ελεύθερης ροής.

2.4 Ακτινοβολία

Η θερμική ακτινοβολία είναι η διαδικασία με την οποία η ενέργεια, εκπέμπεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, από μια θερμαινόμενη επιφάνεια προς όλες τις κατευθύνσεις με την ταχύτητα του φωτός.

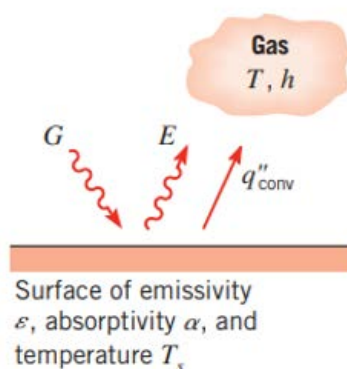
Η θερμική ακτινοβολία κυμαίνεται σε μήκος κύματος που αντιστοιχεί από υπέρυθη έως υπεριώδη ακτινοβολία(συμπεριλαμβανομένου του ορατού φάσματος).

Η ένταση και η κατανομή της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία της εκπεμπόμενης επιφάνειας. Σύμφωνα με τον νομό του Stefan - Boltzmann, η συνολική ενέργεια ακτινοβολίας της θερμότητας που εκπέμπεται από μια επιφάνεια δίνεται από τον τύπο (Bergman, T. L. Lavine, A. S. Incropera, F. P. Dewitt, D. P. 2011):

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (41)$$

όπου το T_s είναι η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας και το σ η σταθερά του Stefan-Boltzmann.

Ο ρυθμός με τον οποίο ένα σώμα ακτινοβολεί (ή απορροφά) θερμική ακτινοβολία εξαρτάται επίσης από τη φύση της επιφάνειας. Η θέρμανση της Γης από τον Ήλιο είναι ένα παράδειγμα μεταφοράς ενέργειας με ακτινοβολία .



Εικόνα 15: Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας πάνω σε επιφάνεια

[Bergman, T. Lavine, A. Incropera, F. Dewitt, D Introduction to Heat Transfer, USA, 2011]

Η ακτινοβολία μπορεί προέρχεται από μια ειδική πηγή (π.χ ήλιος). Ανεξάρτητα από την/ τις πηγές, ορίζουμε το ρυθμό με τον οποίο η ακτινοβολία προσπίπτει σε μια μονάδα επιφάνειας με το γράμμα G . Ο ρυθμός απορρόφησης της ακτινοβολημένης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται απορροφητικότητα και η σχέση της είναι:

$$G_{\text{abs}} = \alpha G$$

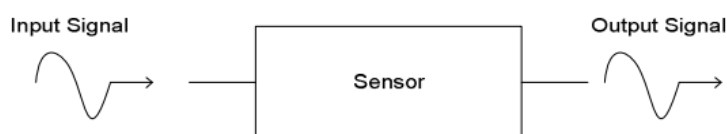
Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δυο σωμάτων με διαφορετικές θερμοκρασίες γενικότερα εξαρτάται από τις επιφανειακές ιδιότητες και την θερμοκρασία της κάθε επιφάνειας. Η βασική εξίσωση που ισχύει παρέχεται από τον τύπο (Bergman, T. L. Lavine, A. S. Incropera, F. P. Dewitt, D. P. 2011):

$$q = \sigma \varepsilon f A (T_1^4 - T_2^4) \quad (42)$$

Οπού σ η σταθερά Stefan-Boltzmann, A η επιφάνεια, ε η ικανότητα εκπομπής του θερμού σώματος και κυμαίνεται $0 \leq \varepsilon \leq 1$, f ο γεωμετρικός παράγοντας που εξαρτάται από τον προσανατολισμό μεταξύ των επιφανειών.

3.1 Εισαγωγή

Ένας αισθητήρας ορίζεται συχνά ως συσκευή που λαμβάνει και αποκρίνεται σε ένα σήμα ή μια διέγερση. Για παράδειγμα αισθητήρες φυσικοί υπάρχουν και στους ζωντανούς οργανισμούς που ανταποκρίνονται συνήθως σε διέγερση η οποία έχει να κάνει με ηλεκτροχημικά αίτια. Γενικότερα ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή που λαμβάνει ένα ερέθισμα για παράδειγμα οπτικό, ηλεκτρικό, μηχανικό ή φυσικό και αποκρίνεται με ένα ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα εξόδου του αισθητήρα μπορεί να έχει τη μορφή τάσης (V) ή ρεύματος (I) (βλ. εικόνα 16).



Εικόνα 16: Αρχή λειτουργίας αισθητήρων

[Intro to Sensors, <http://engineering.nyu.edu/gk12/amps-cbri/pdf/Intro%20to%20Sensors.pdf>]

3.2 Αισθητήρες ροής

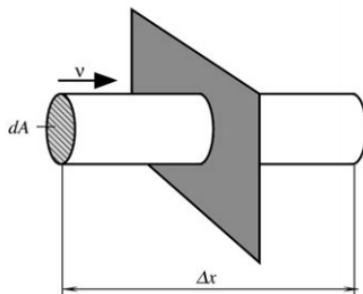
Οι αισθητήρες ροής πιο συχνά αναφέρονται ως μετρητές ροής (Flow meter) και είναι ηλεκτρονικές συσκευές που μετράνε ή ρυθμίζουν τον ρυθμό ροής των ρευστών μέσα σε σωλήνες και αγωγούς.

Ένα από τα βασικά στοιχεία της φυσικής των αισθητήρων ροής είναι αρχή διατήρησης της μάζας. Η μάζα ενός συστήματος παραμένει σταθερή στο χρόνο ανεξάρτητα το είδος διεργασίας την οποία υφίσταται το σύστημα. Αν υπάρχει εισροή ή εκροή μάζας εντός των ορίων, το άθροισμα της εισροής και της εκροής πρέπει να είναι μηδέν (Fraden, Jacob. 2010).

$$\frac{dM_{in}}{dt} = \frac{dM_{out}}{dt} \quad (43)$$

όπου M_{in} η εισερχομένη μάζα σε σύστημα και M_{out} η εξερχομένη μάζα από το σύστημα

Κατά την ροή ενός ρευστού υπό σταθερές συνθήκες, η ταχύτητα σε ορισμένο σημείο είναι σταθερή σε σχέση με το χρόνο. Όταν έχουμε ροή ρευστού σε αγωγό κυκλικής διατομής με σταθερή διατομή A , η ταχύτητα ροής θα διαφέρει ανάλογα το σημείο και την απόσταση από τα τοιχώματα του αγωγού.



Εικόνα 17: Ροή σε κυλινδρικό αγωγό

[Fraden, J. Handbook of Modern Sensors, New York, 2016]

Ο όγκος του κινούμενου μέσου που διέρχεται ένα δεδομένο επίπεδο κάθετα στον κυκλικό αγωγό σε ένα καθορισμένο το χρονικό διάστημα Δt είναι (Παγώνης, Δ. Ν. 2018):

$$\Lambda = \frac{V}{\Delta t} = \int \frac{\Delta x}{\Delta t} dA = \int v dA \quad (44)$$

Οπού Λ η ροή του ρευστού V η ταχύτητα του κινούμενου μέσου που πρέπει να ενσωματωθεί στην διατομή A , ενώ το Δx είναι η μετατόπιση του όγκου.

$$v_a = \frac{\int v dA}{A} \quad (45)$$

όπου v_a η μέση ταχύτητα ροής σε όλη την επιφάνεια του κυκλικού αγωγού A

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

3.3.1 Συνάρτηση μεταφοράς

Δεδομένου ότι τα περισσότερα ερεθίσματα σε ένα αισθητήρα δεν είναι ηλεκτρικά, από την είσοδο στην έξοδο ένας αισθητήρας μπορεί να εκτελέσει πολλά βήματα μετατροπής σήματος προτού παράγει και εξάγει το τελικό ηλεκτρικό σήμα. Για παράδειγμα στον αισθητήρα πίεσης οπτικών ινών, προκύπτει πρώτα πίεση στην οπτική ίνα η οποία με τη σειρά της προκαλεί μεταβολή στον δείκτη διάθλασης, στην συνέχεια αλλάζει την οπτική

ανιχνεύεται μέσω κατάλληλου κυκλώματος με χρήση φωτοδιόδων. Ως αποτέλεσμα το σήμα εξόδου μεταβάλλεται αντίστοιχα (Fraden, Jacob. 2010).

Μια ιδανική συνάρτηση μπορεί να δηλωθεί με τη μορφή πίνακα τιμών, γραφήματος ή μαθηματικής εξίσωσης. Μια ιδανική (θεωρητική) σχέση εξόδου-ερεθίσματος χαρακτηρίζεται από τη λεγόμενη συνάρτηση μεταφοράς. Αυτή η συνάρτηση καθορίζει την σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού σήματος S που παράγεται από τον αισθητήρα και το ερέθισμα $s = f(s)$. Αυτή η συνάρτηση μπορεί να είναι μια απλή γραμμική σύνδεση ή μια μη γραμμική, όπως λογαριθμική ή εκθετική. Σε πολλές περιπτώσεις η σχέση είναι μονοδιάστατη, όπως για παράδειγμα η έξοδος έναντι ενός ερεθίσματος εισόδου. Μια μονοδιάστατη γραμμική σχέση είναι η εξής (Fraden, Jacob. 2010):

$$S = a + bs \quad (46)$$

Όπου a είναι το σήμα εξόδου σε σήμα μηδενικής εισόδου και b η κλίση, όπου μερικές φορές ονομάζεται και ευαισθησία. Το S είναι ένα από τα χαρακτηριστικά της εξόδου του ηλεκτρικού σήματος που χρησιμοποιείται από τις συσκευές λήψης δεδομένων ως έξοδος του αισθητήρα. Μπορεί να είναι πλάτος και η συχνότητα (φάση), ανάλογα με τις ιδιότητες του αισθητήρα.

3.3.2 Ακρίβεια

Ακρίβεια είναι η διαφορά που παρουσιάζει το σήμα εξόδου του αισθητήρα σε σχέση με την πραγματική τιμή. Η διαφορά μεταξύ της μετρηθείσας τιμής και της πραγματικής τιμής μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τύπο (Fraden, Jacob. 2010):

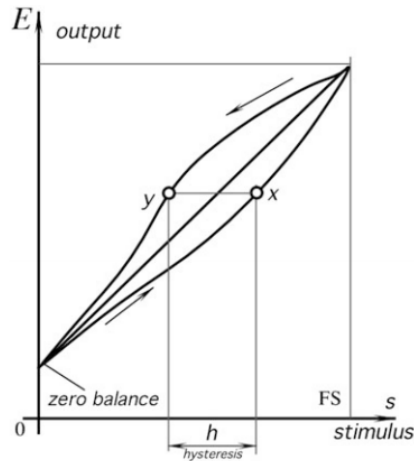
$$e_{\text{res}} = \frac{\text{Result} - \text{True Value}}{\text{True Value}} \quad (47)$$

3.3.3 Βαθμονόμηση

Ο όρος «βαθμονόμηση» ενός αισθητήρα ή ενός συστήματος μέτρησης συγχέεται μερικές φορές με τη «ρύθμιση». Αναφέρεται ως η διαδικασία καθορισμού της συνάρτησης μεταφοράς του αισθητήρα και πραγματοποιείται μέσω σύγκρισης του σήματος εξόδου, με το αντίστοιχο σήμα εξόδου ενός ήδη βαθμονομημένου αισθητήρα. Η βαθμονόμηση μπορεί να διακριθεί σε στατική $s(t) = a$, όπου a σταθερά και δυναμική όπου η τιμή της διέγερσης του αισθητήρα είναι μεταβαλλόμενη στο χρόνο $s(f) = f(t)$ (Fraden, Jacob. 2010).

3.3.4 Υστέρηση

Υστέρηση ονομάζουμε ένα σφάλμα ή μια απόκλιση που δημιουργείται όταν το σήμα εξόδου του αισθητήρα δεν επανέρχεται στην ίδια τιμή σε περίπτωση παλινδρόμησης του ερεθίσματος εισόδου μεταξύ δυο σταθερών τιμών (βλ. Εικόνα 18) (Fraden, Jacob. 2010).

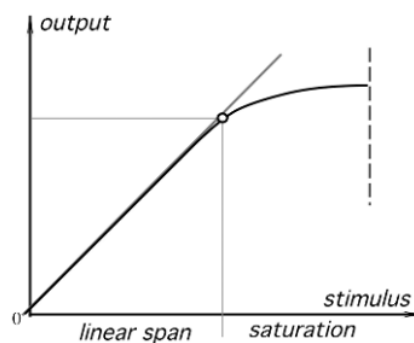


Εικόνα 18: Φαινόμενο υστέρησης κατά την παλινδρόμηση δυο τιμών

[Fraden, J. Handbook of Modern Sensors, New York, 2010]

3.3.5 Κορεσμός

Σε κάθε αισθητήρα ακόμα και αν έχει μια γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, αυξάνοντας διαδοχικά την τιμή του μετρούμενου μεγέθους, θα παρατηρήσουμε ότι από μια τιμή εισόδου και μετά η έξοδος του αισθητήρα (σήμα εξόδου) δεν θα ανταποκρίνεται πλέον (ο αισθητήρας εμφανίζει μη γραμμικότητα/κορεσμό). Περαιτέρω αύξηση στο ερέθισμα οδηγεί στο ίδιο αποτέλεσμα (βλ. εικόνα 19) (Fraden, Jacob. 2010).



Εικόνα 19: Γραφική παράσταση αισθητήρα με κορεσμό

[Fraden, J. Handbook of Modern Sensors, New York, 2016]

3.3.6 Ευαισθησία

Η ευαισθησία του αισθητήρα ορίζεται ως η ελάχιστη είσοδος της φυσικής παραμέτρου υπό μέτρηση που θα δημιουργήσει μια ανιχνεύσιμη αλλαγή εξόδου. Δίνεται από τη σχέση (Fraden, Jacob. 2010):

$$S = \frac{dY}{dX} \quad (48)$$

Οπού dX η μεταβολή στην τιμή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους και dY η αντίστοιχη μεταβολή στην έξοδο του αισθητήρα.

3.3.7 Εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου

Το εύρος πλήρους σήματος εισόδου ορίζεται ως η αριθμητική διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή ερεθίσματος που μπορεί να δεχθεί ένας αισθητήρας (Παγώνης, Δ. Ν. 2018).

$$IFS = S_{\max} - S_{\min} \quad (49)$$

3.3.8 Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου

Το εύρος πλήρους σήματος εξόδου ορίζεται ως η αριθμητική διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή σήματος εξόδου σε όλο το πεδίο τιμών του ερεθίσματος S . (Παγώνης, Δ. Ν. 2018).

$$FSO = S_{\max} - S_{\min} \quad (50)$$

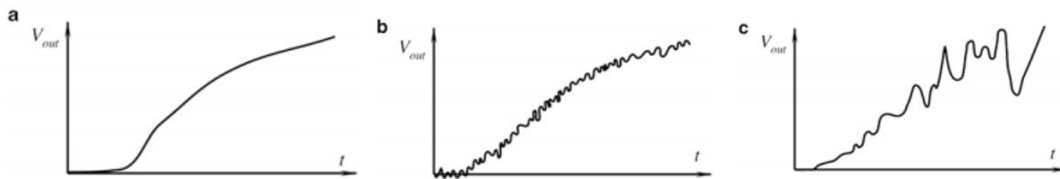
3.3.9 Θόρυβος

Θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε το θόρυβο ως κάποιες παρεμβολές που «αλλοιώνουν» τα επιθυμητά σήματα και δεν σχετίζονται με αυτά. Γενικά ο στόχος σε κάθε αισθητήρα είναι η μεγιστοποίηση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο, ελαχιστοποιώντας τον θόρυβο. Οι βασικές κατηγορίες του θορύβου είναι δυο, ο ενδογενής θόρυβος που αναπτύσσεται εσωτερικά στον αισθητήρα και ο μεταδιδόμενος που μεταφέρεται από εξωτερικές πηγές. Ο βαθμός στον οποίο ένα σήμα εξόδου επηρεάζεται από έναν μεταδιδόμενο θόρυβο μετράτε με τον εξής τύπο (Παγώνης, Δ. Ν. 2018):

$$SNR_{db} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_m}{V_n} \right) \quad (51)$$

όπου V_m η μέση τιμή της τάσης του σήματος και V_n η μέση τιμή θορύβου της τάσης

Ο ενδογενής θόρυβος προκύπτει εντός του αισθητήρα (π.χ. θερμικός θόρυβος). Ο μεταδιδόμενος θόρυβος οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες π.χ. από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και μη επαρκή μόνωση της καλωδίωσης που φέρει το σήμα εξόδου του αισθητήρα. Ο θόρυβος μπορεί να είναι προσθετικός ή πολλαπλασιαστικός στο σήμα εξόδου του αισθητήρα (βλ. Εικόνα 20) (Παγώνης, Δ. Ν. 2018).



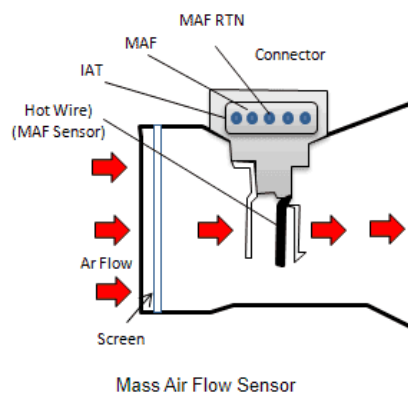
Εικόνα 20: α. σήμα χωρίς θόρυβο β. με προσθετικός θόρυβος γ. πολλαπλασιαστικός θόρυβος

[Fraden, J. Handbook of Modern Sensors, New York, 2010]

3.4 Αισθητήρες ροής μάζας αέρα (Mass Flow Sensor)

Γενικότερα οι αισθητήρες ροής μάζας αέρα (MAF) είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της παροχής του αέρα, μετρώντας είτε τον όγκο (V) είτε τη μάζα (\dot{m}) του αέρα που ρέει σε έναν αγωγό. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία για τη μέτρηση της εισαγωγής αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Οι πληροφορίες της παροχής αέρα που δίνει ένας αισθητήρας MAF στην μονάδα ελέγχου του κινητήρα είναι απαραίτητες για την σωστή έγχυση μάζας καυσίμου και συνεπώς την καλή λειτουργία του κινητήρα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων ροής μάζας αέρα. Οι πιο συνηθισμένοι βασίζονται στην αισθητήρια διάταξη τύπου θερμού νήματος που αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 21: Αισθητήρας εισαγωγής αέρα θερμού νήματος (hot-wire)

[Air Flow Sensors, Oem for BMW Go world auto cars]

3.5 Αισθητήρες ροής θερμού νήματος

Οι αισθητήρες ροής θερμού νήματος βασίζουν τη λειτουργία τους σε αντιστάσεις συνήθως από κεραμικό υλικό ημιαγωγού ευαίσθητες στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή (βλ. ενότητα 2.3). Συνεπώς οι συγκεκριμένες αντιστάσεις είναι σκόπιμα σχεδιασμένες ώστε να

είναι θερμικά ευαίσθητες, με την ικανότητα να αλλάζουν την ηλεκτρική τους αντίσταση άμεσα σε οποιαδήποτε αλλαγή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου. Η σχέση μεταξύ αντίστασης ενός θερμικού αισθητήρα ροής και θερμοκρασίας εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση (MIL-HDBK-338, 1998).

$$\frac{R(T)}{R(T_0)} = e^{-\beta \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]} \quad (52)$$

Όπου $R(T)$ είναι η αντίσταση σε κάποια θερμοκρασία, $R(T_0)$ είναι η αντίσταση σε μια αρχική μέτρηση αναφοράς θερμοκρασίας, β η σταθερά διάχυσης θερμοκρασίας του υλικού.

Οι αισθητήρες ροής θερμού νήματος μπορούν να κάνουν χρήση (για την αντίσταση) θερμίστορ θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (PTC) ή θερμίστορ αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (NTC). Το τυπικό χαρακτηριστικό των θερμίστορ είναι η ευαισθησία τους στη θερμοκρασία (εμφανίζει σημαντικά διαφορετικές τιμές αντίστασης σε διαφορετικές θερμοκρασίες). Η αντίσταση ενός θερμίστορ θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (PTC) γίνεται μεγαλύτερη όταν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη. Όσον αφορά τα θερμίστορ με αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας (NTC), όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο χαμηλότερη θα είναι η αντίσταση αυτού.

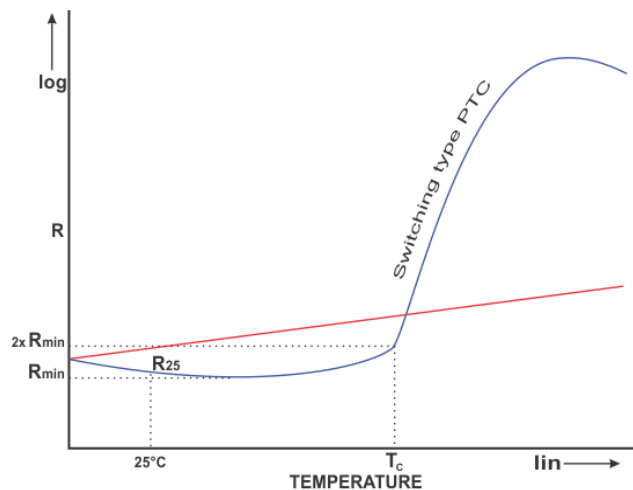


Εικόνα 22: Θερμίστορ τύπου NTC

[Amphenol Advanced Sensors, NTC Thermistor]

3.5.1 Θερμίστορ Θετικού Συντελεστή Θερμοκρασίας PTC

Όπως ήδη αναφέραμε τα θερμίστορ τύπου PTC είναι αντιστάσεις με θετικό συντελεστή θερμοκρασίας, πράγμα που σημαίνει ότι η αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Κατασκευάζονται με βάση το πυρίτιο (ημιαγωγό υλικό), ενώ χρησιμοποιούνται ευρέως σε αισθητήρες ροής. Υπάρχουν επίσης θερμίστορ PTC, κατασκευασμένα από ειδικό πλαστικό. Παρακάτω (βλ. εικόνα 23) παρατηρούμε την μεταβολή της αντίστασης ενός θερμίστορ PTC σε σχέση με την θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας (έως ότου φτάσει σε μια συγκεκριμένη κρίσιμη θερμοκρασία) αρχικά οδηγεί σε μια μείωση. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται περαιτέρω, η αντίσταση αυξάνεται δραματικά (Amphenol Advanced Sensors, 2015).

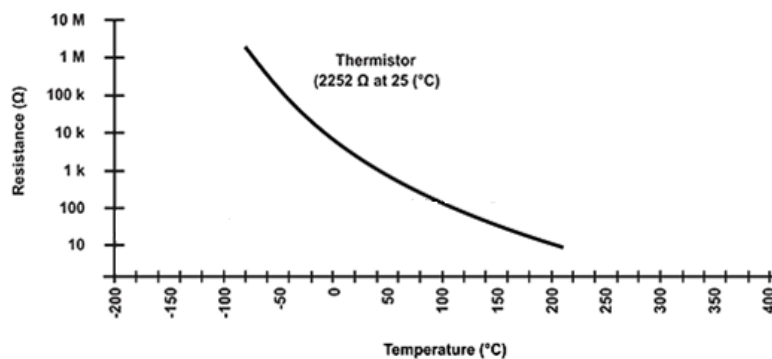


Εικόνα 23: Μεταβολή αντίστασης σε σχέση μετρούμενης θερμοκρασίας, θερμικού αισθητήρα PTC

[Amphenol Advanced Sensors, PTC Thermistor]

3.5.2 Θερμίστορ Αρνητικού Συντελεστή Θερμοκρασίας NTC

Τα θερμίστορ NTC είναι αντιστάσεις με αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας, δηλαδή η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αισθητήρες ροής μάζας αέρα (MAF). Τα θερμίστορ NTC χρησιμοποιούνται συνήθως σε εύρος από -55°C έως 200°C μετρούμενης θερμοκρασίας, επίσης υπάρχουν ειδικές κατηγορίες θερμίστορ NTC που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν το απόλυτο μηδέν ($-273,15^\circ\text{C}$) (EE Power, *NTC thermistor*):



Εικόνα 24: Εύρος θερμίστορ NTC

[NTC Thermistor, <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/#>]

Όπως φαίνεται από το σχήμα, τα θερμίστορ NTC έχουν μια αντίστροφος ανάλογη μεταβολή μετρούμενης θερμοκρασίας και ωμικής αντίστασης. Καθώς αυξάνεται η μετρούμενη θερμοκρασία μειώνεται η ωμική αντίσταση του αισθητήρα.

3.6 Τρόποι λειτουργίας Θερμικών αισθητήρων ροής θερμού νήματος

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι λειτουργίας στους θερμικούς αισθητήρες ροής με την. Η πρώτη κατηγορία αισθητήρων ροής βασίζεται στην διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας (CT mode). Στους συγκεκριμένους αισθητήρες η ένταση του ρεύματος τροφοδοσίας μεταβάλλεται ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία της αντίστασης (θερμαντήρας) σταθερή. Οι αλλαγές της τιμής της έντασης του ρεύματος είναι το μετρούμενο μέγεθος για τον αισθητήρα (Παγώνης, Δ. Ν. 2018).

Στην συνέχεια έχουμε τους θερμικούς αισθητήρες ροής με διατήρηση σταθερής Ισχύος (CP mode). Η τιμή της έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας μεταβάλλεται όπως και στους αισθητήρες ροής με σταθερή θερμοκρασία, με την διαφορά ότι το μετρούμενο μέγεθος τους, είναι η απορροφούμενη ισχύ από την αντίσταση (Παγώνης, Δ. Ν. 2018).

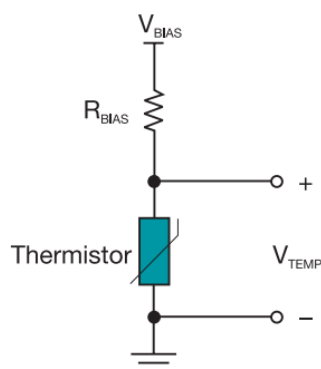
Τέλος έχουμε τον τρόπο λειτουργίας με διατήρηση σταθερής έντασης. Σε αυτήν την περίπτωση η αντίσταση του αισθητήρα διαρρέεται με ρεύμα σταθερής έντασης. Παρακάτω θα αναλύσουμε τον συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας αυτών των αισθητήρων επειδή βασίζονται στον τρόπο λειτουργίας της αισθητήριας διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί στην πειραματική διαδικασία .

3.7 Βασικά κυκλώματα αισθητήρων ροής θερμού νήματος

Τα πιο συχνά κυκλώματα που συναντούμε στις περισσότερες αισθητήριες διατάξεις για την μέτρηση της μεταβολής σε ωμική αντίσταση είναι οι διατάξεις «Διαιρέτη τάσης» και «γέφυρα Wheatstone» οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

3.7.1 Διαιρέτης τάσης

Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, όταν το ρεύμα (I) διαρρέεται μέσα σε μια ωμική αντίσταση, θα δημιουργηθεί τάση (V) στα άκρα της. Συνεπώς οποιαδήποτε αλλαγή στην αντίστασή της ως αποτέλεσμα αλλαγών στη θερμοκρασία που βρίσκεται μπορεί να ανιχνευθεί μέσω της αλλαγής τάσης στα άκρα της V_{TEMP} (βλ. εικόνα 25).

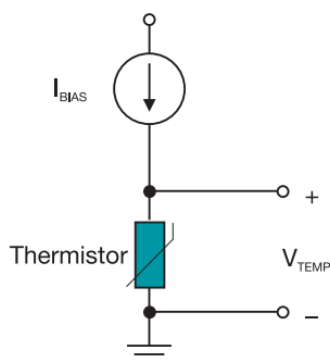


$$V_{TEMP} = V_{BIAS} [R_{TH} / (R_{TH} + R_{BIAS})] \quad (53)$$

Εικόνα 25. Κύκλωμα αισθητηρίου ροής τύπου NTC με διαιρετή τάσης

[Texas Instruments, Temperature sensing with thermistors, Διάταξη κυκλώματος αισθητηρίου ροής με διαιρετή τάσης]

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ένα θερμίστορ (αισθητήριο στοιχείο) με κύκλωμα διαιρετή τάσης. Αρχικά έχουμε μία σταθερή τάση τροφοδοσίας V_{BIAS} που εφαρμόζεται στο συνολικό κύκλωμα. Κατά την αλλαγή τιμής της ωμική αντίστασης R_{TH} (μεταβολή της θερμοκρασίας από μια διερχομένη μάζα αέρα), παίρνουμε στα άκρα της το σήμα εξόδου του αισθητήρα που εκφράζεται σε ηλεκτρική τάση V_{TEMP} .



$$I_{BIAS} = V_{TEMP}/R_{TH} \quad (54)$$

Εικόνα 26. Κύκλωμα αισθητηρίου ροής τύπου NTC με σταθερή πηγή έντασης

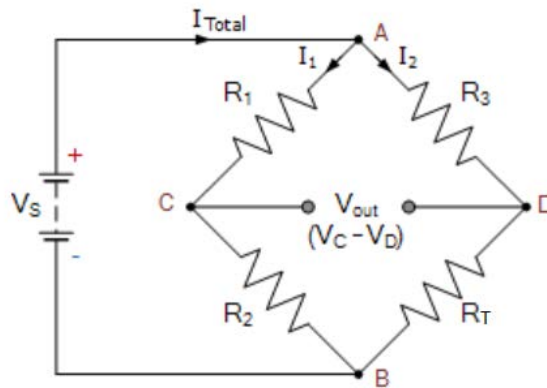
[Texas Instruments, Temperature sensing with thermistors, Διάταξη κυκλώματος αισθητηρίου ροής με σταθερή πηγή έντασης]

Στην εικόνα (26) βλέπουμε ένα αντίστοιχο κύκλωμα με το προηγούμενο αλλά με την διαφορά ότι αντί να έχουμε τροφοδοσία μέσω σταθερής τάσης, έχουμε αντίστοιχα σταθερή πηγή ρεύματος (I) που διαρρέει την αντίσταση του θερμίστορ. Και σε αυτήν την περίπτωση η οποιαδήποτε αλλαγή τιμής της ωμική αντίστασης R_{TH} (μεταβολή της θερμοκρασίας από μια διερχομένη μάζα αέρα), οδηγεί σε μεταβολή της τάσης V_{TEMP} .

3.7.2 Γέφυρα Wheatstone

Η Γέφυρα Wheatstone αναπτύχθηκε αρχικά από τον Charles Wheatstone για τη μέτρηση άγνωστων τιμών αντίστασης και ως μέσο βαθμονόμησης οργάνων μέτρησης. Το πλεονέκτημα της γέφυρας Wheatstone είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει με ακρίβεια πολύ χαμηλές τιμές αντιστάσεων (κάτω από milli-Ohms).

Ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone έχει δύο ακροδέκτες εισόδου και δύο ακροδέκτες εξόδου αποτελούμενους από τέσσερις αντιστάσεις διαμορφωμένες σε τύπο ρόμβου (βλ. εικόνα 27). Το εν λόγω κύκλωμα (Wheatstone Bridge) δεν είναι τίποτα περισσότερο από δύο διαιρέτες τάσεων παράλληλα συνδεδεμένους οι οποίοι τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή.



Εικόνα 27: Υπολογισμός αντίστασης θερμίστορ R_T σε κύκλωμα Wheatstone

[Electronics Tutorials, Wheatstone Bridge, <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>]

Όταν η γέφυρα Wheatstone είναι σε ισορροπία ($V_{out} = 0$) ισχύει ότι:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_T} \quad (55)$$

Όταν η γέφυρα Wheatstone δεν είναι σε ισορροπία ($V_{out} \neq 0$) ισχύει ότι:

$$V_{out} = V_s \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_T}{R_3} \right) \quad (56)$$

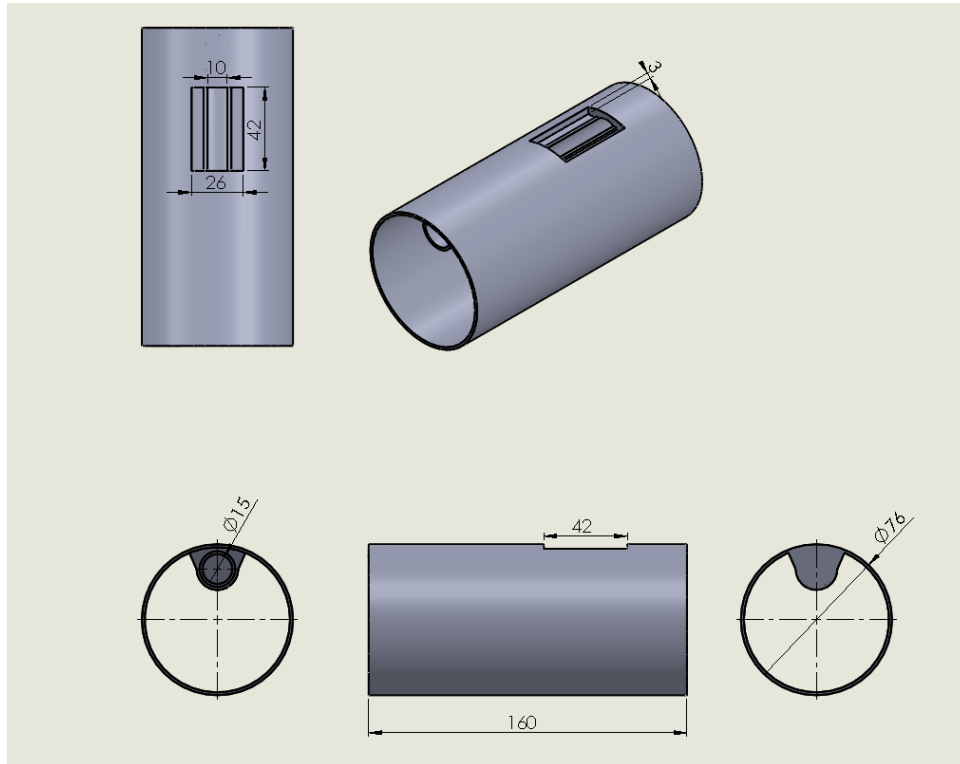
Η R_T υπολογίζεται μεσω των άνω δυο εξισώσεων.

4.1 Εισαγωγή

Όπως είχε αναφερθεί στην εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας για να επιτευχθεί η επέκταση του μετρητικού πεδίου του προϋπάρχοντος αισθητήρα, θα πρέπει μέσω κατάλληλου φορέα (housing), να γίνει η διαμόρφωση της ροής πάνω στο αισθητήριο στοιχείο (θερμίστορ) για την μείωση της ταχύτητας του αέρα και αντίστοιχα την ελάττωση απαγωγής θερμότητας από το στοιχείο. Αρχικά πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός του φορέα με το σχεδιαστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS 2019 ενώ ακολούθησαν κατάλληλες προσομοιώσεις μέσω λογισμικού αριθμητικής επίλυσης.

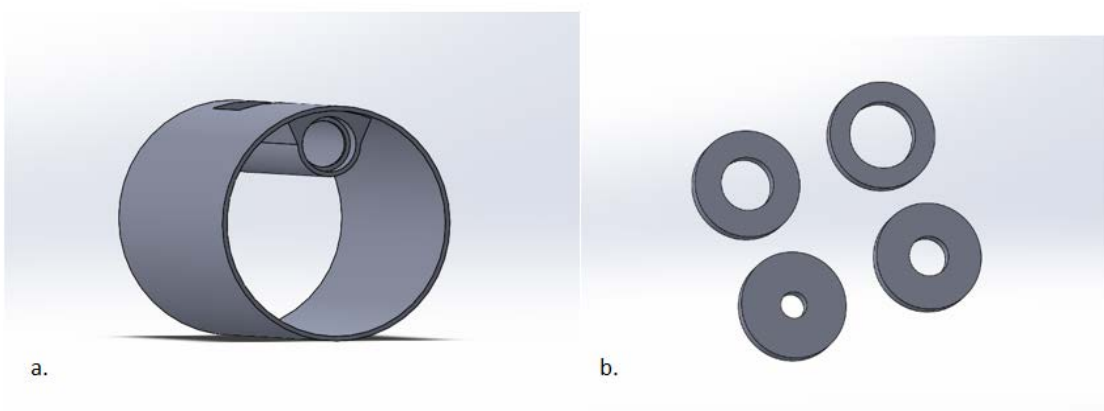
4.2 Σχεδιασμός Φορέα

Το σχεδιαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα από τα δημοφιλέστερα λογισμικά σχεδιασμού με υπολογιστή (CAD) παγκοσμίως και χρησιμοποιείται σε βιομηχανικούς σχεδιασμούς όπως αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική, ιατρικές συσκευές, ρομποτική- αυτοματοποίηση και πολλά άλλα. Παρακάτω (βλ. εικόνα 28) βλέπουμε τις κύριες διαστάσεις και τη βασική γεωμετρία του φορέα.



Εικόνα 28: Διαστάσεις, γεωμετρία όψεων του φορέα

Ο σωλήνας κυλινδρικής διατομής που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι στα πρότυπα των διαστάσεων του ήδη υπάρχοντος πλαστικού εύκαμπτου σωλήνα εισαγωγής αέρα στον κινητήρα, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτόν. Το μήκος του σωλήνα ανέρχεται στα 160 mm , ενώ η εξωτερική διάμετρος ανέρχεται στα 76 mm . Όπως παρατηρούμε, στο εσωτερικό του εξωτερικού σωλήνα έχει σχεδιαστεί ένας σωλήνας μικρότερης διαμέτρου 15 mm με μήκος 150 mm όπου πραγματοποιείται η αναγκαία παράκαμψη του αέρα. Να τονίσουμε ότι η χρήση της παράκαμψης οδηγεί στην μείωση της ροής του εισερχομένου αέρα προς τον αισθητήρα ροής.



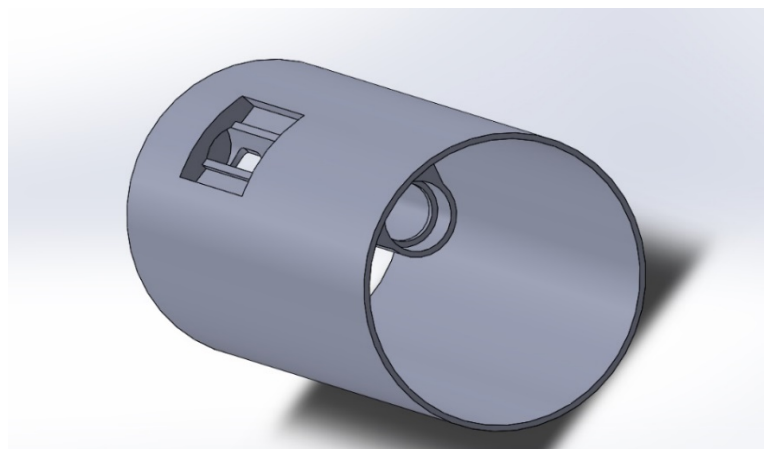
Εικόνα 29: Πρόσωση φορέα (α), στόμια παράκαμψης φορέα (β)

Όπως βλέπουμε στην εικόνα (28a), μέσα στον σωλήνα της παράκαμψης έχει σχεδιαστεί μια εσοχή πάχους 1,5mm. Μέσω της εσοχής μπορούμε να προσαρμόσουμε στο σωλήνα παράκαμψης (bypass, βλ. εικόνα 29a), στόμια με διαφορετική διάμετρο οπής (βλ. εικόνα 29b) αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά της εσωτερικής ροής (bypass) χωρίς να χρειάζεται επανεκτύπωση του φορέα. Η κατασκευή διαφορετικής διαμέτρου στομιών προέκυψε λόγω της ανάγκης διεξαγωγής πολλαπλών δοκιμών.



Εικόνα 30: Πίσω όψη του φορέα

Συνεχίζοντας, βλέπουμε το πίσω μέρος του φορέα (βλ. εικόνα 30) το οποίο θα εφαρμοστεί στον εύκαμπτο σωλήνα εισαγωγής αέρα του κινητήρα. Παρατηρούμε ότι η έξοδος του φορέα πραγματοποιείται μέσω κατάλληλης οπής κάθετα στον σωλήνα παράκαμψης (bypass). Με αυτόν τον τρόπο, τυχόν επιστροφή αέρα από τον κινητήρα (backflow) δεν επηρεάζει την λειτουργία του αισθητήρα δημιουργώντας αποκλίσεις/«θόρυβο» στη μέτρηση.



Εικόνα 31: Άνω όψη του φορέα

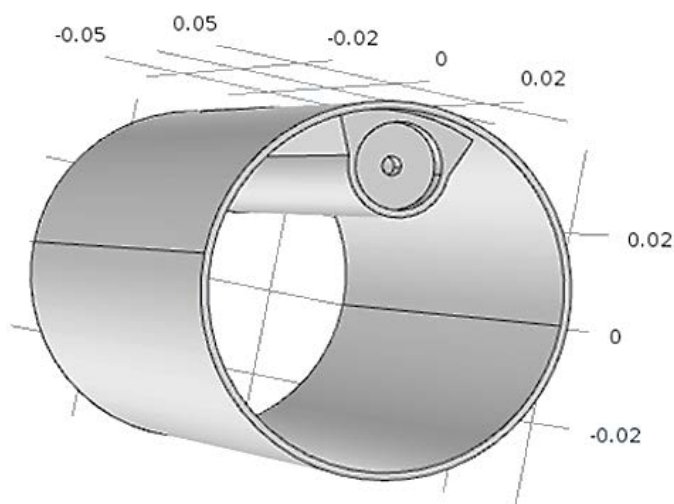
Στη παραπάνω εικόνα (31) παρατηρούμε την άνω όψη του φορέα, όπου έχει σχεδιαστεί το μέρος που θα ενσωματωθεί το αισθητήριο στοιχείο (θερμίστορ). Οι αυλακώσεις που έχουν σχεδιαστεί αριστερά και δεξιά του διακένου, παρέχουν χώρο για τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις(κολλήσεις αγωγών/επαφών). Να τονιστεί ότι το θερμίστορ τοποθετείται μέσα στην ροή αέρα κοντά στα τοιχώματα του κυλινδρικού αγωγού, χωρίς να υπάρχουν κενά που θα οδηγούσαν σε διαρροή.

4.3 Εισαγωγή της γεωμετρίας στο πρόγραμμα προσομοιώσεων

Τα λογισμικά προσομοίωσης επιλύουν μεσω κατάλληλων αριθμητικών μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων. Γενικότερα εμπεριέχουν ένα ευρύ πεδίο υπολογιστικών μεθόδων που αποσκοπούν στην προσέγγιση λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων για πολυσύνθετα φαινόμενα φυσικής όπως για παράδειγμα της ροής, της μετάδοσης θερμότητας και άλλων όπου σχετίζονται με τους κλάδους της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, ηλεκτρονικής, νανοτεχνολογία, ιατρικής και άλλους κλάδους της επιστήμης.

Να τονιστεί ότι ανάλογα με το προς επίλυση πρόβλημα, απαιτείται από τον χρήστη ένα βασικό επίπεδο γνώσεων σχετικά με αυτό (ρευστομηχανικής στη συγκεκριμένη περίπτωση) ώστε να μπορέσει να κατανοήσει τις λειτουργίες (πχ επιλογή φυσικής μοντέλου) και τις αντίστοιχες λύσεις που προκύπτουν.

Το επόμενο βήμα μετά τη δημιουργία της γεωμετρίας του φορέα, είναι να γίνει η εισαγωγή της στο υπολογιστικό πρόγραμμα σχετικά ευκολά, καθώς συνήθως υπάρχει άμεση σύνδεση και αλληλεπίδραση με το λογισμικό της σχεδίασης. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αλλάξουμε γρήγορα και εύκολα στοιχεία μιας γεωμετρίας και ταυτόχρονα να γίνεται ο συγχρονισμός.



Εικόνα 32: Εισαγωγή σχεδίου στο υπολογιστικό πρόγραμμα

Το επόμενο βήμα που ακολουθούμε ενώ έχουμε κάνει με επιτυχία την εισαγωγή του σχεδίου από το SOLIDWORKS, είναι να επιλέξουμε και να προσδιορίσουμε τις

επιφάνειες στις οποίες θα έχουμε την είσοδο και την έξοδο του ρευστού. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ σημαντική επειδή το υπολογιστικό πρόγραμμα δε μπορεί να τις αντιληφθεί/προσδιορίσει αυτόματα.

Στη συνέχεια επιλέγουμε τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση. Κατά κανόνα υπάρχει η ικανότητα επιλογής πληθώρας υλικών για διαφορετικά προβλήματα φυσικής. Τα υλικά που επιλέγονται στην περίπτωση μας είναι το ακρυλικό πλαστικό για το σωλήνα και αέρα για το ρευστό.

4.4 Υπολογισμός αριθμού Reynolds του φορέα

Για να υπολογίσουμε πρακτικά τον αριθμό Reynolds της παροχής του αέρα εισαγωγής, θα πάρουμε κατάλληλες τιμές από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα της κλίνης του εργαστήριου των Ναυπηγών Μηχανικών. Το εύρος της παροχής εισαγωγής αέρα MAF στον κινητήρα κυμαίνεται από 100 - 600 kg/h για στροφές rpm με φορτίο. Παίρνοντας το σαν σημείο αναφοράς έχουμε τα εξής:

$$\dot{m} = \rho A V$$

Όπου \dot{m} η παροχή μάζας αέρα στα 100 kg/h ή 1,66 kg/m η ελάχιστη παροχή μάζας αέρα στον κινητήρα και αντίστοιχα 600 kg/h ή 10 kg/m η μέγιστη. V η ταχύτητα m/s, η πυκνότητα του αέρα 1,2922 kg/m³, A η κυκλική επιφάνεια του σωλήνα σε m² όπου η σχέση:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Η εσωτερική διάμετρος του φορέα μας είναι στα 73 mm. Αρά υπολογίζουμε την επιφάνεια:

$$A = 4,18 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Συνεπώς η ταχύτητα μας στην εισαγωγή του σωλήνα είναι:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A}$$

$$V_{min} = 307,32 \text{ m/min} \quad \text{ή} \quad 5,12 \text{ m/s}$$

$$V_{max} = 1851,37 \text{ m/min} \quad \text{ή} \quad 30,86 \text{ m/s}$$

Για να υπολογίσουμε τον αριθμό Reynolds παίρνουμε τον τύπο:

$$Re = \frac{\text{Inertial Forces}}{\text{Viscous Forces}} = \frac{V_{avg} D}{\nu} = \frac{\rho V_{avg} D}{\mu}$$

Όπου $\rho/\mu = \nu = 1,568 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ το κινηματικό ιξώδες για τον αέρα

$$Re_{min} = 23.836,73$$

$$Re_{max} = 143.672,2$$

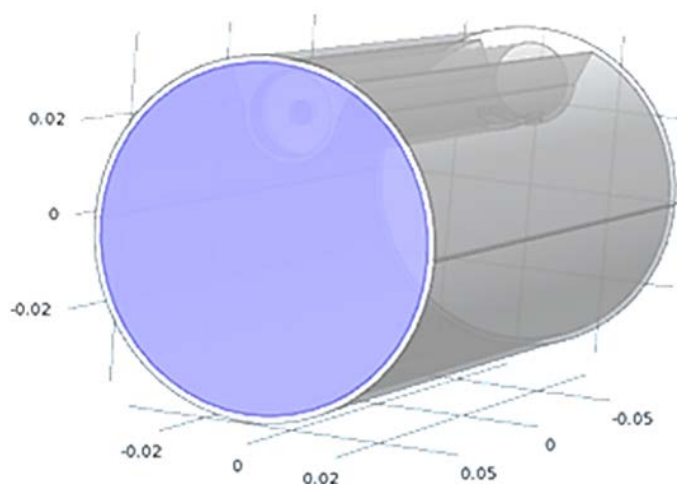
Ο αριθμός Reynolds και για την ελάχιστη παροχή αέρα όπως και για την μέγιστη μας δείχνει ότι έχουμε τυρβώδη ροή ($Re > 4000$)

4.5 Προσθήκη του μοντέλου φυσικής

Το επόμενο βήμα είναι η διαδικασία της δημιουργίας προσομοίωσης, στο σημείο αυτό θα πρέπει να επιλέξουμε το μοντέλο φυσικής που πρόκειται να μελετηθεί και να ορίσουμε όλες τις οριακές συνθήκες. Να τονιστεί ότι δεν υπάρχει όριο στον αριθμό ή το είδος του μοντέλου φυσικής που πρόκειται να μελετηθεί.

Στην συγκεκριμένη μελέτη ασχολούμαστε με την ροή του ρευστού η οποία βρίσκεται σε φάση στροβιλισμού λόγω των υψηλών αριθμών Reynolds που εξηγήσαμε σε προηγούμενη ενότητα (βλ. ενότητα 4.4). Για τον λόγο αυτό επιλέγουμε ως το πλέον κατάλληλο, το μοντέλο τύρβης $k-\omega$ για τον υπολογισμό της εσωτερικής ροής με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια κοντά στα τοιχώματα (βλ. ενότητα 1.3.3).

Αμέσως μετά επιλέγουμε στην ενότητα του μοντέλου φυσικής, τα υλικά που χρησιμοποιούνται (επιλέγεται ως ρευστό ο αέρας). Επίσης, επιλέγουμε τις δύο όψεις της γεωμετρίας του φορέα ως εισροή και εκροή του ρευστού και ορίζουμε τις αντίστοιχες ταχύτητες (βλ. εικόνα 33).



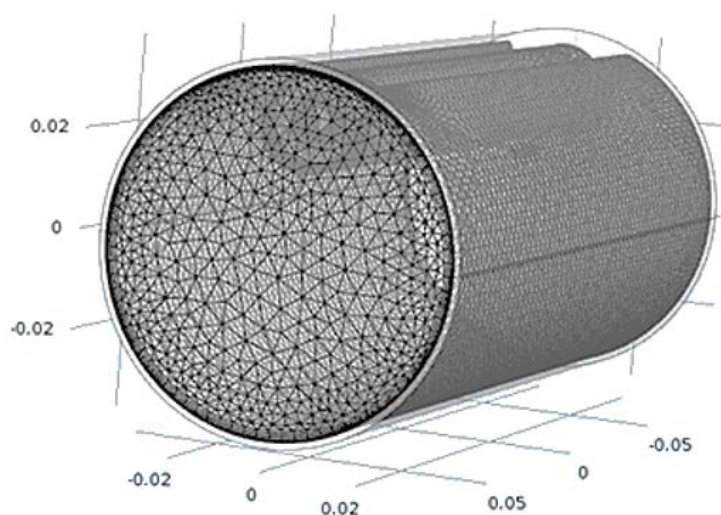
Εικόνα 33: Επιλογή παραμέτρων του ρευστού στον σωλήνα για ταχύτητα 30m/s

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα (33) έχουμε επιλέξει για εισαγωγή του αέρα το μπροστινό σημείο του φορέα το οποίο απαριθμείται με το νούμερο «8» και έχει «μπλε» απόχρωση. Αντίστοιχα για την έξοδο του ρευστού χρησιμοποιούμε το πίσω μέρος του φορέα. Επιπροσθέτως έχουμε επιλέξει ελάχιστη ταχύτητα 5 m/s και μέγιστη 30 m/s οι οποίες βασίζονται σε πραγματικές συνθήκες πειράματος.

4.6 Επιλογή πλέγματος

Η διαδικασία κατασκευής του πλέγματος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέρος της προσομοίωσης. Μέσω του πλέγματος, η συνολική γεωμετρία του μοντέλου χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές από γεωμετρικά σχήματα (κελιά) δημιουργώντας αντίστοιχους κόμβους όπου το λογισμικό επιλύει τις αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις με τη διαδικασία της διακριτοποίησης.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε έχει πολλές επιλογές σχετικά με τη δημιουργία πλέγματος. Μπορεί να γίνει επιλογή μεταξύ διαφορετικών μοντέλων πλέγματος σε διαφορετικές κλίμακες, ξεκινώντας από το πιο αραιό πλέγμα έως το πιο πυκνό. Επίσης μπορούμε να συνδυάσουμε διαφορετικά είδη πλέγματος σε συγκεκριμένες επιφάνειες. Αυτή η επιλογή είναι πολύ χρήσιμη γιατί μας δίνει την δυνατότητα να εστιάσουμε στις επιφάνειες του μοντέλου μας που μας ενδιαφέρουν περισσότερο. Στην δική μας περίπτωση έγιναν κατάλληλες δοκιμές με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος (από μέτριο έως πολύ πυκνό) και δεν παρατηρήσαμε κάποια ουσιαστική διαφορά στα αποτελέσματα. Έτσι, καταλήξαμε στην χρήση ενός πλέγματος μέτριας πυκνότητας.



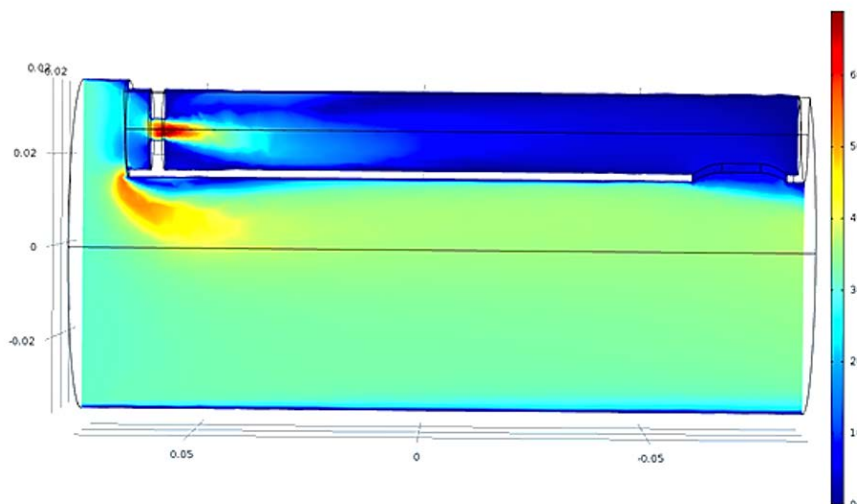
Εικόνα 34. Επιλογή πλέγματος μέτριας πυκνότητας

4.7 Υπολογισμός προσομοίωσης

Εφόσον ολοκληρώθηκαν οι εισαγωγές των παραμέτρων στα παραπάνω βήματα, προχωράμε στην εκτέλεση της προσομοίωσης. Ως επόμενο βήμα είναι απαραίτητη η προσθήκη μιας μελέτης για το μοντέλο. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία προκαθορισμένων τύπων μελέτης (δυναμικών ή στατικών) που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση επιλέγουμε στατική μελέτη (η ροή εισόδου, η θερμοκρασία κτλ. έχουν σταθερή τιμή σε σχέση με τον χρόνο).

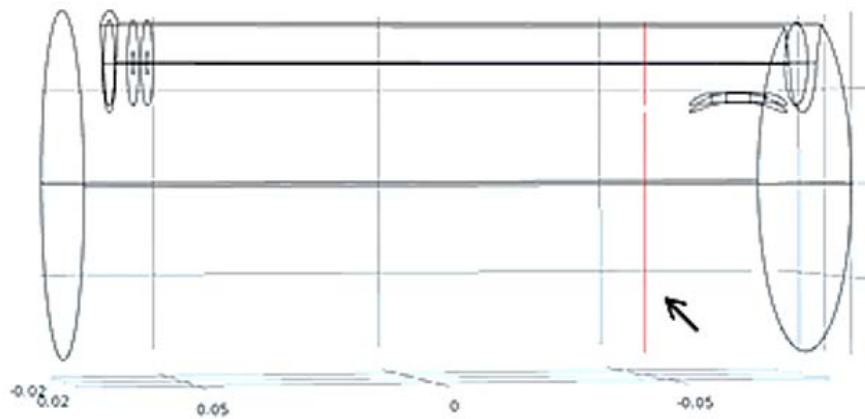
Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν περισσότερο μέσω γραφικών παραστάσεων ή

τρισεδιάστατων απεικονίσεων. Αρχικά επιλέγουμε να δούμε το σημαντικότερο στοιχείο των αποτελεσμάτων το οποίο είναι η μείωση της ταχύτητας του ρευστού μέσα στον σωλήνα της παράκαμψης.



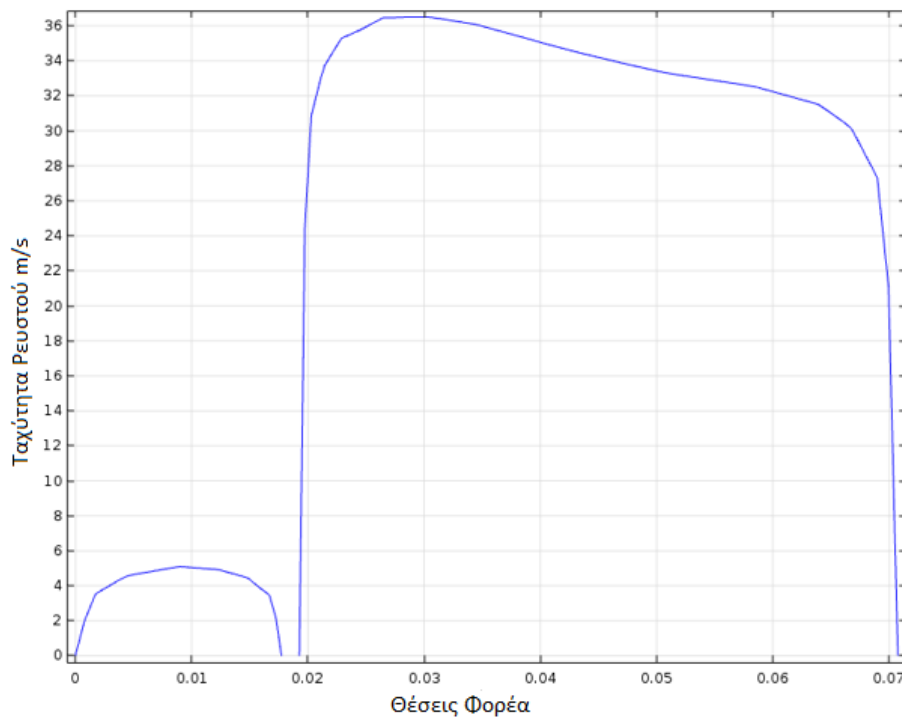
Εικόνα 35: Τομή φορέα σε χρωματική απεικόνιση μεταβολής ταχύτητας κατά το μήκος του για ταχύτητα 30m/s

Στα παραπάνω αποτελέσματα (τομή φορέα, βλ. εικόνα 35) παρατηρούμε τη διακύμανση της ταχύτητας κατά το μήκος του φορέα. Διακρίνουμε την ελάχιστη τιμή της ταχύτητας (0 m/s) όπου αντιστοιχεί στο βαθύ μπλε χρώμα και την μέγιστη (60 m/s) που αντιστοιχεί στο κόκκινο χρώμα. Όπως παρατηρούμε υπάρχει μια ραγδαία αύξηση στο σημείο που βρίσκεται το στόμιο στην είσοδο της παράκαμψης του φορέα. Στην συνέχεια ακολουθεί σταδιακή μείωση της ταχύτητας κατά το μήκος της παράκαμψης. Για να δούμε τα αποτελέσματα με ακρίβεια, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε επιπλέον εργαλεία που διαθέτουν πρακτικά όλα τα εν λόγω λογισμικά. Συγκεκριμένα, θα πρέπει αρχικά να ορίσουμε συγκεκριμένα σημεία μέσα στον φορέα όπου αφορούν το μέρος που έχει τοποθετηθεί το αισθητήριο στοιχείο πάνω στον φορέα εγκάρσια της τομής του.



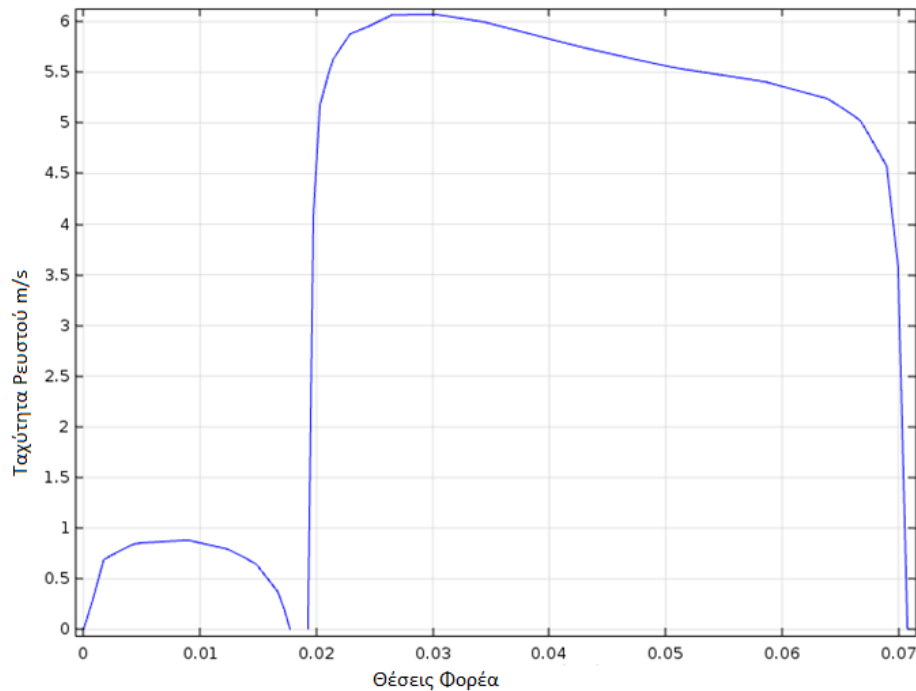
Εικόνα 36: Προσθήκη συγκεκριμένων συντεταγμένων

Στην εικόνα 36 παρατηρούμε την γραμμή κόκκινου χρώματος πάνω στην οποία μπορούμε να συλλέξουμε τις τιμές της ταχύτητας ροής που έχει δημιουργηθεί (βλ. βέλος εικόνα 36).



Εικόνα 37: Γράφημα ταχύτητας σημείου που αντιστοιχεί στη θέση του αισθητήρα για 30m/s.

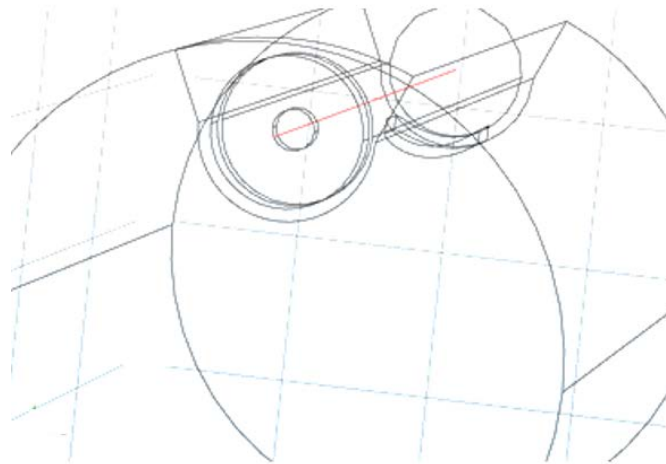
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε τη διακύμανση της ταχύτητας εγκάρσια της τομής του φορέα, στο σημείο που θεωρητικά θα τοποθετηθεί το αισθητήριο στοιχείο για αρχική ταχύτητα εισαγωγής αέρα 30 m/s . Στον άξονα yy' είναι οι τιμές της ταχύτητας ενώ στον άξονα xx' τα σημεία κάθετα στον φορέα (διεύθυνση zz'). Παρατηρούμε δυο διαφορετικές καμπύλες που έχουν δημιουργηθεί. Η πρώτη καμπύλη αριστερά αντιστοιχεί στην ταχύτητα που αναπτύσσεται στον σωλήνα παράκαμψης. Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στα 5 m/s για την θέση 0.01 (κέντρο του σωλήνα). Η δεύτερη καμπύλη αντιστοιχεί στην ταχύτητα που αναπτύσσεται στον εξωτερικό σωλήνα. Η μέγιστη τιμή της αντιστοιχεί στα 36 m/s . Επίσης διακρίνουμε ένα μικρό κενό ανάμεσα στις καμπύλες το οποίο και είναι το πάχος του σωλήνα παράκαμψης στο οποίο όπως είναι φυσικό δεν έχουμε ροή. Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για αρχική ταχύτητα 30 m/s στην εισαγωγή του φορέα, έχουμε 5 m/s μέγιστη ταχύτητα ροής στο σημείο του αισθητήριου στοιχείου.



Εικόνα 38: Γράφημα ταχύτητας σημείου που αντιστοιχεί στη θέση του αισθητήρα για 5 m/s .

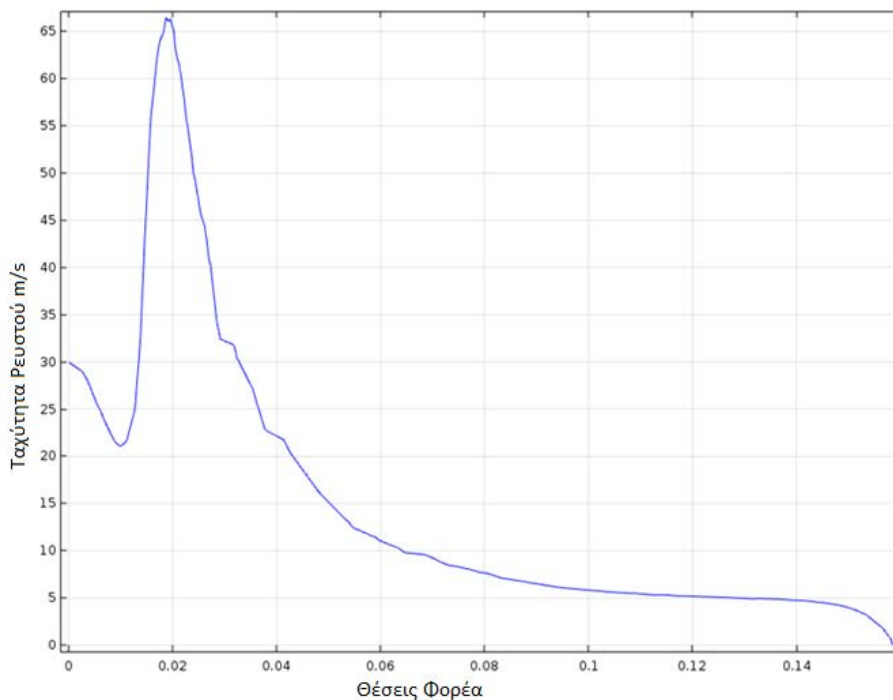
Στο δεύτερο γράφημα (βλ. εικόνα 38) παρατηρούμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα για αρχική ταχύτητα εισαγωγής στα 5 m/s . Βλέπουμε ότι στην καμπύλη της παράκαμψης η μέγιστη τιμή της ταχύτητας είναι περίπου στα $0,85$, ενώ στον εξωτερικό σωλήνα η μέγιστη ταχύτητα ροής φτάνει στα 6 m/s .

Για να παρατηρήσουμε την διακύμανση της ταχύτητας κατά το μήκος της παράκαμψης, ορίσαμε αντίστοιχα δυο καταλληλά σημεία (είσοδο-έξοδος του ρευστού στην παράκαμψη του φορέα, βλ. εικόνα 39).



Εικόνα 39: Προσθήκη δευτέρου σημείου μέσω της εντολής Cut Line 3D

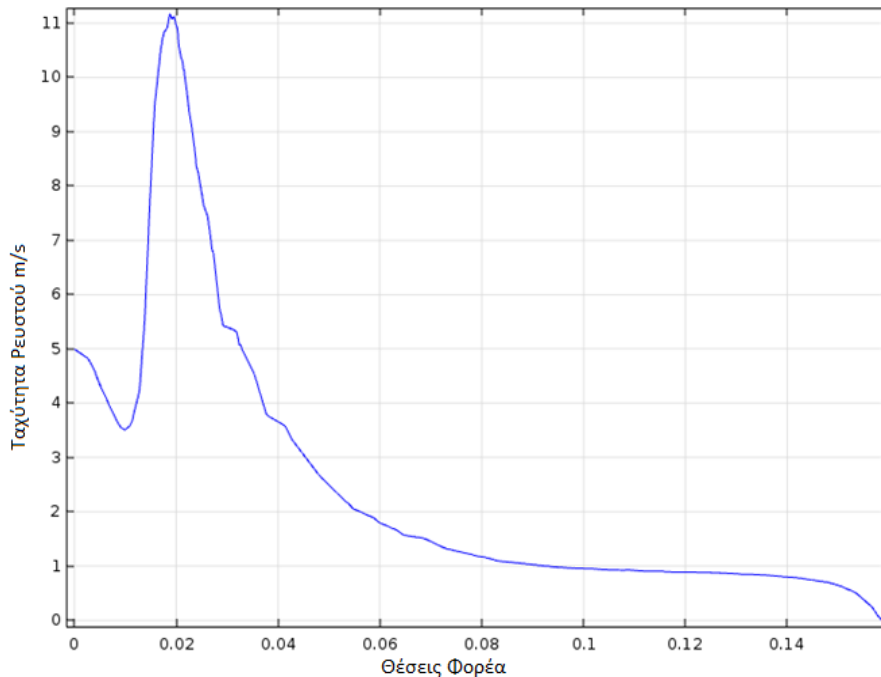
Στο επόμενο γράφημα επιλέγουμε συγκεκριμένα σημεία διότι θέλουμε να παρατηρήσουμε την διακύμανση της ταχύτητας σε όλο το μήκος της παράκαμψης του φορέα.



Εικόνα 40: Γράφημα ταχύτητας που αντιστοιχεί στο ολικό μήκος της παράκαμψης του φορέα για αρχική ταχύτητα 30m/s

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε την διακύμανση της ταχύτητας σε ολόκληρο το μήκος της παράκαμψης του φορέα. Στον άξονα yy' είναι οι τιμές της ταχύτητας ενώ στον xx' τα σημεία κάθετα στον φορέα (διεύθυνση zz'). Αρχικά όπως ορίσαμε η ταχύτητα ροής

του αέρα στην αρχή της παράκαμψης είναι στα 30 m/s . Αμέσως μετά παρατηρούμε μια ελαφριά μείωση της ταχύτητας (21 m/s περίπου). Έπειτα η τιμή της ταχύτητας αυξάνεται ραγδαία στα 65 m/s κατά την εισαγωγή του στομίου της παράκαμψης, λόγω της απότομης μείωσης της διαμέτρου στα 5 mm με αποτέλεσμα τον «στραγγαλισμό» της ροής (βλ. εικόνα 41). Στην συνέχεια παρατηρείται σταδιακή μείωση και σταθεροποίηση της ταχύτητας περίπου στα 5 m/s κατά το μήκος του φορέα.



Εικόνα 41: Γράφημα ταχύτητας που αντιστοιχεί στο ολικό μήκος της παράκαμψης του φορέα για αρχική ταχύτητα 5 m/s

Αντίστοιχα παρατηρούμε τα αποτελέσματα για αρχική ταχύτητα εισαγωγής αέρα στα 5 m/s . Παρατηρούμε επίσης μια ελαφρά μείωση της ταχύτητας ($3,5\text{ m/s}$ περίπου). Έπειτα η τιμή της ταχύτητας αυξάνεται ραγδαία στα 11 m/s κατά την εισαγωγή του στομίου της παράκαμψης λόγω της απότομης μείωσης της διαμέτρου και στην συνέχεια παρατηρείται επίσης σταδιακή μείωση και σταθεροποίηση της ταχύτητας περίπου στο 1 m/s κατά το μήκος του φορέα.

Κατασκευή φορέα μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή

5.1 Εισαγωγή

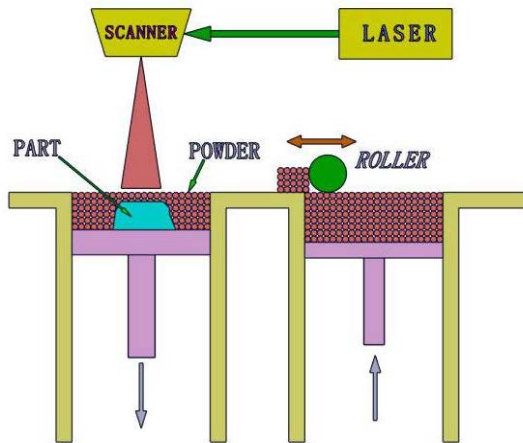
Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η διαδικασία μετατροπής οποιουδήποτε ψηφιακού αρχείου σε πραγματικό αντικείμενο. Το αρχικό σχέδιο πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου λογισμικού σχεδιασμού CAD. Υπάρχουν τρεις βασικοί μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης, η Selective Laser sintering (SLS) η Fused Deposition modeling (FDM) και η στερεολιθογραφία (SLA).

5.2.1 Selective Laser Sintering (SLS)

Η αρχή λειτουργίας της SLS βασίζεται στην σύντηξη σκόνης με τη βοήθεια υπέρυθρου λέιζερ η οποία βοηθά τους κόκκους της σκόνης να σταθεροποιηθούν λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο σημείο που ακτινοβολείται. Στον εκτυπωτή SLS υπάρχει η βάση «κλίνη» (bed) στην οποία απλώνονται λεπτά στρώματα σκόνης και μέσω της διαδικασίας της πυρσυσσωμάτωσης το μείγμα από σκόνη μετατρέπεται σε συμπαγές υλικό σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία.

Η σκόνη διασκορπίζεται σε ένα πολύ λεπτό στρώμα στο πάνω μέρος της πλατφόρμας στο εσωτερικό του θαλάμου κατασκευής. Ο εκτυπωτής προθερμαίνει τη σκόνη σε θερμοκρασία όπου πρέπει να βρίσκεται ακριβώς κάτω από το σημείο τήξης του υλικού. Αυτό θα διευκολύνει το λέιζερ να αυξήσει τη θερμοκρασία συγκεκριμένων περιοχών της σκόνης. Το λέιζερ σαρώνει μια διατομή του τρισδιάστατου μοντέλου και θερμαίνει τη σκόνη πάνω από το σημείο τήξης του υλικού. Αυτό θα συντήξει τα σωματίδια της σκόνης ώστε για να δημιουργήσει ένα στερεό μέρος. Η αχρησιμοποίητη σκόνη θα στηρίζει το τμήμα κατά την εκτύπωση. Η πλατφόρμα κινείται προς τα κάτω κατά ένα στρώμα στο θάλαμο κατασκευής, και στη συνέχεια ένας κύλινδρος εφαρμόζει ένα νέο στρώμα σκόνης στην κορυφή. Στη συνέχεια, το λέιζερ σαρώνει την επόμενη διατομή.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθούν τα μέρη όπου θα αφεθούν για να επανέλθουν στη θερμοκρασία δωματίου σταδιακά μέσα στον εκτυπωτή. Μόλις ψυχθούν τα μέρη, ο χειριστής μπορεί να αφαιρέσει τον θάλαμο κατασκευής από τον εκτυπωτή για να διαχωρίσει τα τυπωμένα μέρη και να καθαρίσει την περίσσεια σκόνη (Tanerxun.com, 2019).



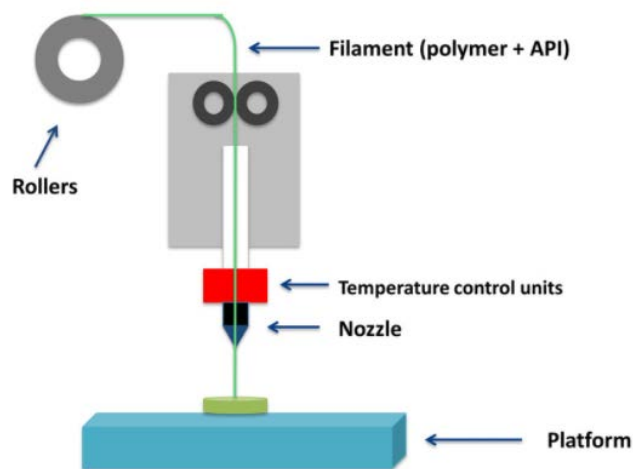
Εικόνα 42: Μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης SLS

[<https://www.tanerxun.com/principle-of-3d-printing-sls/.html>]

5.2.2 Fused deposition modeling (FDM)

Η μοντελοποίηση εναπόθεσης (FDM), επίσης γνωστή ως κατασκευή συντηγμένων ιών (FFF), είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές FDM δημιουργούν εξαρτήματα με τήξη και εξώθηση θερμοπλαστικού νήματος, το οποίο εναποθέτει στρώμα ανά στρώμα στην περιοχή κατασκευής.

Το FDM λειτουργεί με μια σειρά από θερμοπλαστικά, όπως ABS, PLA, και διάφορα μείγματά τους. Η τεχνική είναι κατάλληλη για γρήγορη και χαμηλού κόστους τρισδιάστατης εκτύπωσης απλών ανταλλακτικών και εξαρτημάτων (Palermo, E. 2013).



Εικόνα 43: Σύστημα εκτύπωσης Fused deposition modelling

[<https://rapidfab.ricoh-europe.com/technologies/fused-deposition-modelling/>]

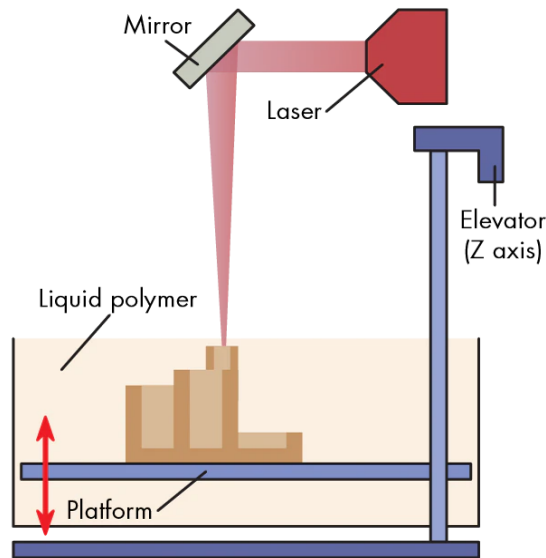
Οι εκτυπωτές FDM χρησιμοποιούν δύο είδη υλικών, ένα υλικό μοντελοποίησης, το οποίο αποτελεί το τελικό αντικείμενο και ένα υλικό υποστήριξης, το οποίο λειτουργεί ως ικρίωμα για να υποστηρίξει το αντικείμενο καθώς εκτυπώνεται. Κατά την εκτύπωση αυτά τα θερμοπλαστικά υλικά έχουν τη μορφή νημάτων, είναι τυλιγμένα σε 'κουλούρα' και τροφοδοτούνται μέσω ενός ακροφυσίου εξώθησης. Το ακροφύσιο λιώνει τα νήματα και τα εξωθεί σε μια βάση, ονομάζεται πλατφόρμα κατασκευής ή «τραπέζι». Τόσο το ακροφύσιο όσο και η βάση ελέγχονται από έναν υπολογιστή που μεταφράζει τις διαστάσεις ενός αντικειμένου σε συντεταγμένες xx' , yy' και zz' .

Το ακροφύσιο εξώθησης κινείται πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής οριζόντια και κάθετα, σχεδιάζοντας μια τομή ενός αντικειμένου πάνω στην πλατφόρμα. Αυτό το λεπτό στρώμα πλαστικού ψύχεται, σκληραίνει και συγκολλάται με το προηγούμενο στρώμα. Μόλις ολοκληρωθεί ένα στρώμα, η βάση χαμηλώνει για να δημιουργηθεί χώρος για το επόμενο στρώμα πλαστικού. Ο χρόνος εκτύπωσης εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου που κατασκευάζεται. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως η στερεολιθογραφία (SLA) ή η επιλεκτική σύντηξη λέιζερ (SLS), το FDM είναι μια αργή διαδικασία.

Μόλις ένα αντικείμενο βγει από τον εκτυπωτή FDM, τα υλικά υποστήριξης του αφαιρούνται είτε με εμβάπτιση του αντικειμένου σε διάλυμα νερού και απορρυπαντικού, είτε στην περίπτωση θερμοπλαστικών στηριγμάτων, τραβώντας το υλικό στήριξης με το χέρι. Τα αντικείμενα μπορούν επίσης να τρίβονται, να χρωματίζονται ή να επικαλύπτονται με κατάλληλα υλικά για να βελτιώσουν τη λειτουργία και την εμφάνισή τους (Palermo, E. 2013).

5.2.3 Stereolithography (SLA)

Η στερεολιθογραφία ήταν η πρώτη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κόσμο και εξακολουθεί να είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες για επαγγελματίες. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές ρητίνης (SLA) χρησιμοποιούν λέιζερ για να σκληρύνουν την υγρή ρητίνη σε συμπαγές πλαστικό σε μια διαδικασία που ονομάζεται φωτοπολυμερισμός. Τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται μέσω της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης SLA έχουν την υψηλότερη ανάλυση και ακρίβεια από όλες τις πλαστικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Παρακάτω αναλύεται η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης τρισδιάστατης εκτύπωσης (Konta, A. K. Pina, M. G. Serrano, D. R. 2017)



Εικόνα 44: Γράφημα διαδικασίας εκτύπωσης με στερεολιθογραφία

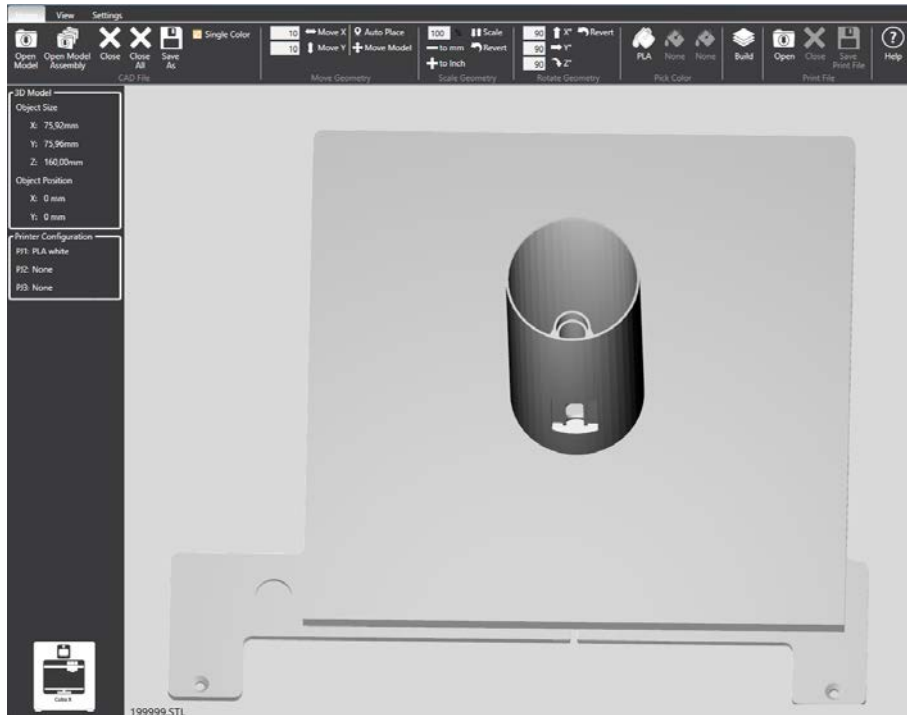
[<https://www.tanerxun.com/principle-of-3d-printing-stereolithography/.html>]

Στην αρχή, η πλατφόρμα κατασκευής βυθίζεται στη δεξαμενή του εκτυπωτή η οποία εμπεριέχει υγρή ρητίνη. Το λέιζερ ενεργοποιείται και αντανακλάται στον καθρέφτη σάρωσης. Ο καθρέφτης κατευθύνει τη δέσμη λέιζερ στη ρητίνη και εντοπίζει την περιοχή όπου θα ξεκινήσει η εκτύπωση του μοντέλου. Η ρητίνη σκληραίνει και δημιουργείται το πρώτο στρώμα στην πλατφόρμα κατασκευής.

Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής κατεβαίνει κατά ύψος ενός στρώματος και το λέιζερ ενεργοποιείται ξανά και σχηματίζει τη γεωμετρία του επόμενου στρώματος. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου εκτυπωθεί το πλήρες μοντέλο 3D. Τέλος, αφού έχει δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο, για την απομάκρυνση της μη σκληρυσμένης ρητίνης χρησιμοποιείται διάλυμα ισοπροπυλικής αλκοόλης (IPA) (Konta, A. K. Pina, M. G. Serrano, D. R. 2017).

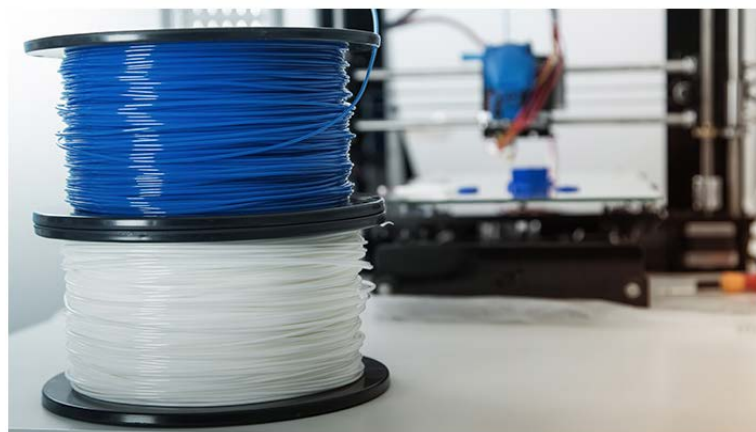
5.3 Εκτύπωση – κατασκευή του φορέα μέσω του τρισδιάστατου εκτυπωτή CubeX

Για να ξεκινήσουμε τη διαδικασία δημιουργίας ενός εκτυπωμένου μέρους από ένα μοντέλο 3D, θα πρέπει να αποθηκεύσουμε το αρχείο μας από το SOLIDWORKS σε μορφή STL. Πριν από την εκτύπωση του εξαρτήματος, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό CubeX, για να δημιουργηθεί κατάλληλο αρχείο το οποίο θα μεταφερθεί μέσω μέσου αποθήκευσης (usb stick) στον εκτυπωτή μας. Υστέρα ο εκτυπωτής θα δημιουργήσει το μοντέλο με την μέθοδο Fused deposition modeling (FDM). Παρακάτω παρουσιάζονται περιληπτικά τα απαραίτητα βήματα.



Εικόνα 45: Προεπισκόπηση μοντέλου εκτύπωσης στο λογισμικό του CubeX

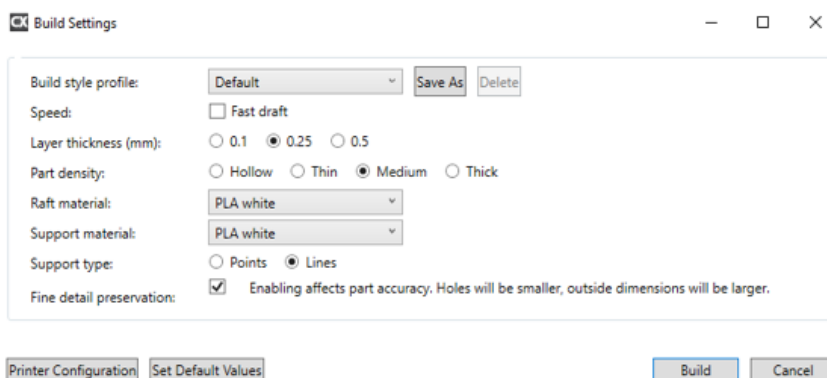
Επιλέγοντας πάνω αριστερά στην εντολή «Open Model» (βλ. εικόνα 45) μπορούμε πολύ ευκολά να εισάγουμε το μοντέλο που θέλουμε προϋποθέτοντας ότι είναι σε μορφή αρχείου STL. Το λογισμικό του CubeX μας δίνει την δυνατότητα να μετακινήσουμε το αντικείμενο στο μέρος που επιθυμούμε πάνω στην ψηφιακή πλατφόρμα εκτύπωσης ή να το περιστρέψουμε. Μεσω της εντολής «Auto Place» το τοποθετήσαμε ακριβώς στο κέντρο.



Εικόνα 46: Υλικό εκτύπωσης PLA

[<https://www.3dnatives.com/en/pla-3d-printing-guide-190820194/>]

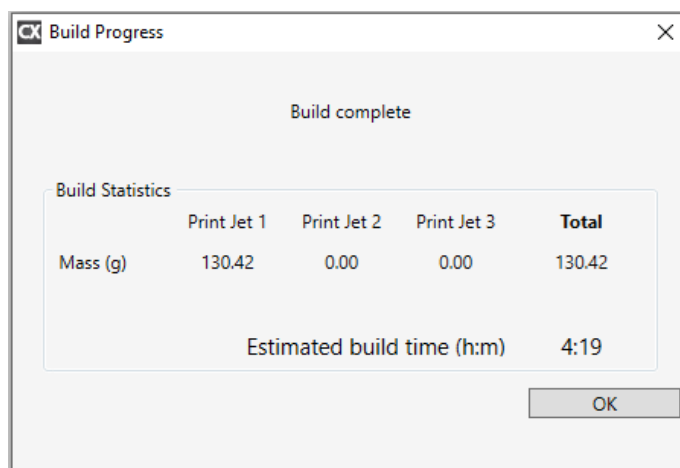
Το υλικό κατασκευής του μοντέλου μας είναι το PLA (βλ. εικόνα 47). Το συγκεκριμένο υλικό είναι Πολυγαλακτικό οξύ το οποίο παράγεται από ανακυκλώσιμα υλικά και έχει την υφή ενός σκληρού πλαστικού.



Εικόνα 47: Παράμετροι εκτύπωσης λογισμικού CubeX

Στη συνέχεια αφού έχουμε προσαρμόσει το μοντέλο μας όπως επιθυμούμε, μπορούμε να προχωρήσουμε στις ρυθμίσεις κατασκευής του φορέα μας. Με την εντολή «Build» μπορούμε να θέσουμε παραμέτρους εκτύπωσης όπως το πάχος στρώματος του μοντέλου, την πυκνότητα του αντικειμένου και το υλικό υποστήριξης. Επιλέγουμε 0,25 mm για πάχος στρώματος και πυκνότητα εκτύπωσης «Medium». Για υλικό υποστήριξης επιλέγουμε το ίδιο υλικό με το υλικό κατασκευής. Ο όρος «υλικό υποστήριξης» αναφέρεται στη δομή χαμηλής πυκνότητας που δημιουργεί ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής προκειμένου να υποστηρίξει τυχόν τμήματα προεξοχών ή υψηλότερων στρωμάτων που υπάρχουν στο μοντέλο σας. Εκτυπώνεται σε μορφή χαμηλής πυκνότητας για να μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα από το μοντέλο σας μετά την παραγωγή.

Μετα την επιλογή των παραμέτρων εκτύπωσης, επιλέγουμε την εντολή «Build». Το λογισμικό του CubeX θα επεξεργαστεί τα στοιχεία και τις παραμέτρους που του θέσαμε και θα μας υπολογίσει τον χρόνο που θα χρειαστεί για να κατασκευαστεί το μοντέλο μας, όπως και το απαραίτητο βάρος του υλικού εκτύπωσης (βλ. εικόνα 48).



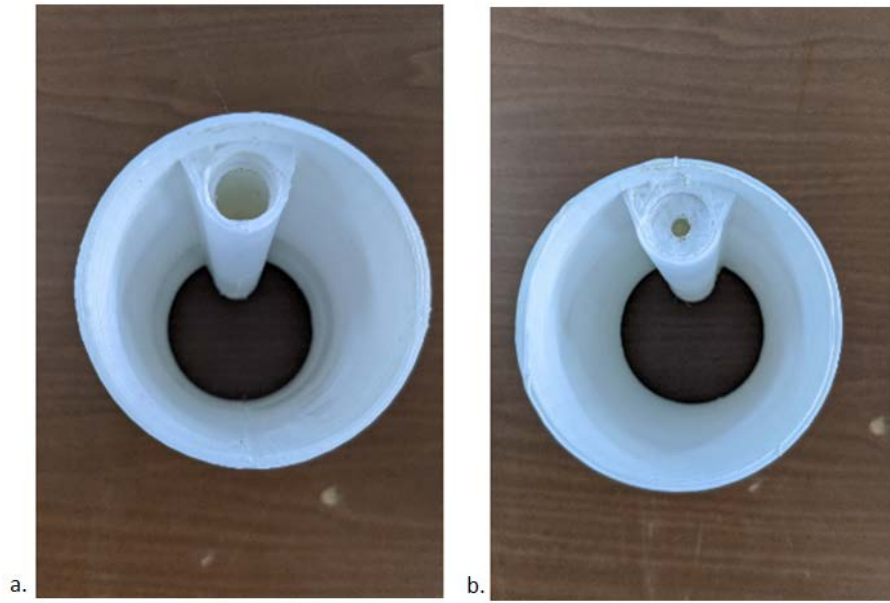
Εικόνα 48: Εκτιμώμενος χρόνος κατασκευής του μοντέλου

Όπως παρατηρούμε στην παραπάνω εικόνα ο εκτιμώμενος χρόνος που μας υπολόγισε το λογισμικό είναι τέσσερις ώρες και δεκαεννέα λεπτά. Επίσης, μας δείχνει την εκτιμωμένη μάζα του μοντέλου στα 130,42 γραμμάρια. Στην συνέχεια επιλέγοντας την εντολή «save», αποθηκεύεται το μοντέλο μας σε μορφή αρχείου bfb. Μετέπειτα αντιγράφουμε το αρχείο μας στο μέσο μεταφοράς (usb stick) και το τοποθετούμε στην θύρα του τρισδιάστατου εκτυπωτή για να ξεκινήσουμε την διαδικασία εκτύπωσης.

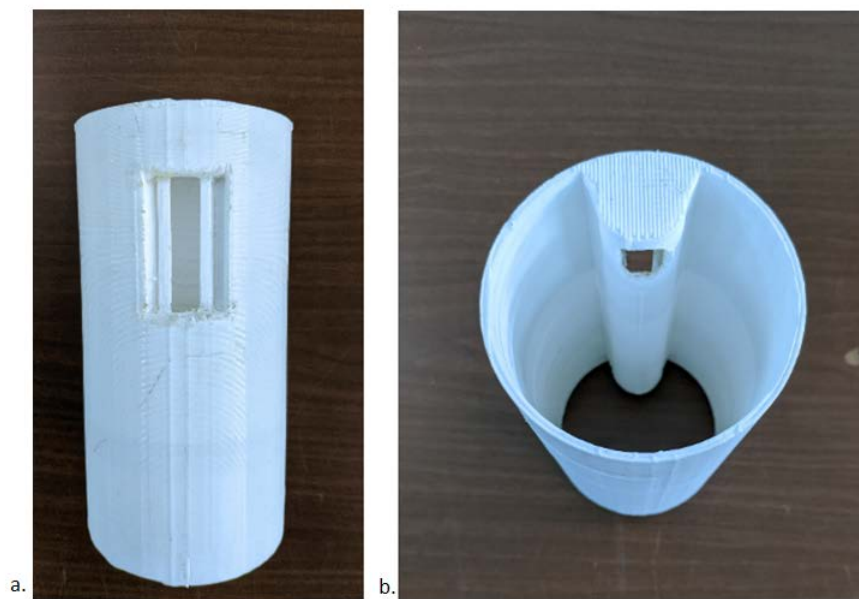


Εικόνα 49: Επιλογή αρχείου προς εκτύπωση

Έχοντας τοποθετήσει στην πλατφόρμα εκτύπωσης ένα λεπτό στρώμα με την ειδική κόλλα του CubeX επιλέγουμε «Print» από το κύριο μενού. Χρησιμοποιώντας τα βέλη στο κάτω μέρος της οθόνης, μεταβαίνουμε στο αρχείο που θέλουμε να εκτυπώσουμε και επιλέγοντας το, αρχίζει η διαδικασία της εκτύπωσης. Παρακάτω, παραθέτουμε τυπικές εικόνες του εκτυπωμένου φορέα.



Εικόνα 50: Πρόσοψη φορέα (a), ενσωματωμένο το στόμιο παράκαμψης διαμέτρου οπής 4mm (b)



Εικόνα 51: Άνω όψη φορέα (a), πίσω όψη φορέα (b)



Εικόνα 52: Στόμια παράκαμψης

5.4 Αισθητήρια διάταξη

Η αισθητήρια διάταξη ροής είναι τύπου θερμού νήματος. Γίνεται χρήση τριών θερμίστορ τύπου PTC υψηλής ακριβείας. Τα συγκεκριμένα θερμίστορ είναι από την εταιρεία Vishay και παρουσιάζουν αντίσταση 100 Ohms σε μηδέν βαθμούς Κελσίου. Όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες, το αισθητήριο μπορεί να λειτουργήσει και με διαφορική μέτρηση όπου το μεσαίο θερμίστορ είναι ο θερμαντήρας και τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της κατανομής της θερμότητας και της κατεύθυνσης του αέρα.



Εικόνα 53: Αισθητήρας ροής με θερμίστορ PTC υψηλής ακριβείας.

6

Εργαστηριακό Πείραμα

6.1 Εισαγωγή

Μετά την περάτωση του σχεδιαστικού μέρους και της κατασκευής του φορέα από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστήριου των Ναυπηγών μηχανικών, θα συνεχίσουμε στο τελευταίο σκέλος της εργασίας με την πραγματοποίηση των εργαστηριακών μετρήσεων. Μέσω αυτών μπορούμε να εξακριβώσουμε πειραματικά τη διερεύνηση του εύρους της νέας αισθητήριας διάταξης.

6.2 Τοποθέτηση αισθητήριας διάταξης στην εργαστηριακή κλίνη του τμήματος

Το τμήμα διαθέτει εργαστηριακή κλίνη αποτελούμενη από έναν τετράχρονο Diesel IVECO N45 MST τεσσάρων κυλίνδρων με μέγιστη συνεχή ισχύ 82 kW στις 2200 rpm , μέγιστη αποδιδόμενη ροπή 420 Nm . Η κλίνη ενσωματώνει επίσης κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική πέδη μέγιστης συνεχούς ισχύος 150 kW .



Εικόνα 54: Κινητήρας και ηλεκτρομαγνητική πέδη εργαστηριακής κλίνης

Παρακάτω (βλ. εικόνα 55) παρουσιάζεται η τελική αισθητήρια διάταξη (φορέας στον έχει ενσωματωθεί η αισθητήρια διάταξη ροής). Επίσης παρουσιάζεται η ενσωμάτωση της στην εργαστηριακή κλίνη στην εισαγωγή αέρα του κινητήρα μέσω ευκάμπτου σωλήνα. Να επισημανθεί ότι ο συγκεκριμένος κινητήρας απαιτεί 615 kg/h παροχή αέρα σε πλήρες φορτίο.



Εικόνα 55: Νέα αισθητήρια διάταξη



Εικόνα 56: Σύνδεση της νέας αισθητήριας διάταξης με τον σωλήνα εισαγωγής της μηχανής

6.3 Προϋπάρχουσα βαθμονόμηση με αρχικό φορέα

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η ίδια αισθητήρια διάταξη ροής έχει βαθμονομηθεί στο παρελθόν στον κινητήρα της κλίνης του εργαστηρίου με φορέα χωρίς παράκαμψη (bypass) με περιορισμένη λειτουργία (βλ. επόμενη ενότητα). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο αρχικός φορέας που είχε χρησιμοποιηθεί.

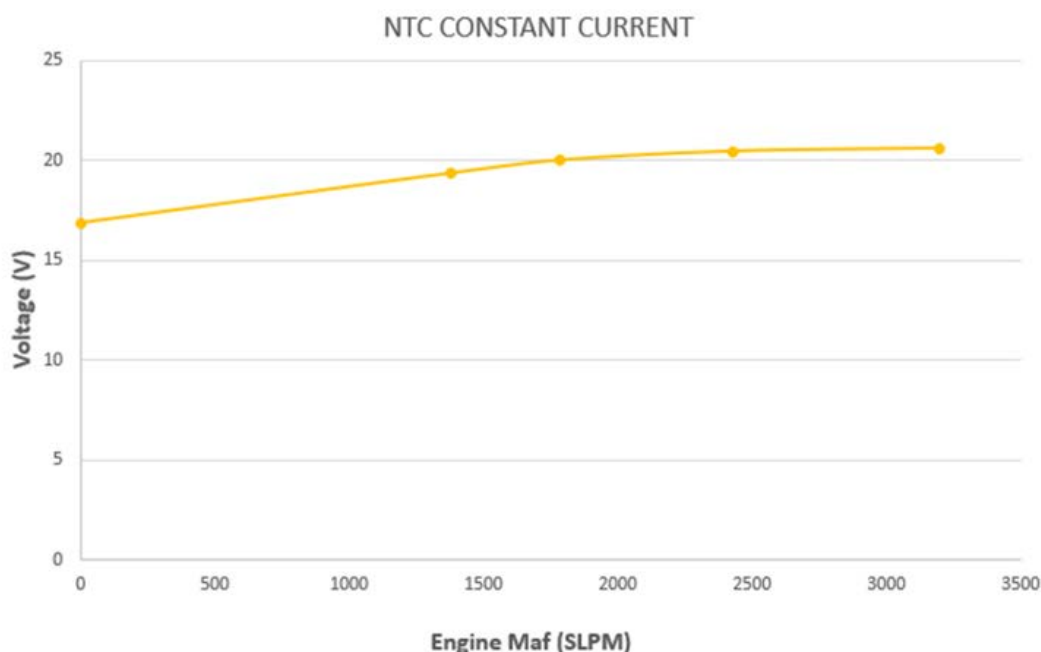


Εικόνα 57: Αρχικός φορέας δοκίμων

Η βαθμονόμηση (CI-constant current) με τον αρχικό φορέα φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα για ένα εύρος στροφών κινητήρα, ενώ ακολουθεί το αντίστοιχο γράφημα (βλ. εικόνα 58).

Measurements at 03/03/2016	ENGINE RPM	I (mA)	V (V)	Engine MAF (kg/h)	Engine Load	Engine MAF (m ³ /min)	Engine MAF (Lt/min)	Average Air Velocity (m/min)
INCREASING FLOW	0	5	16,85	0	NO	0	0	0
	782	5	19,35	107	NO	1,380075324	1380,075324	313,6534827
	1218	5	20	138,4	NO	1,785069391	1785,069391	405,6975888
	1662	5	20,45	188,2	NO	2,427384822	2427,384822	551,6783686
	1452	5	20,6	248	YES	3,198679255	3198,679255	726,972558
DECREASING FLOW						0	0	0
	0	5	16,3	0	NO	0	0	0
	1000	5	18,85	111,5	NO	1,438115875	1438,115875	326,844517
	1200	5	19,13	133	NO	1,71542073	1715,42073	389,8683476
	1650	5	19,75	189	NO	2,437703142	2437,703142	554,0234413

Εικόνα 58: Εργαστηριακές μετρήσεις προϋπάρχουσας αισθητήριας διάταξης σταθερού ρεύματος

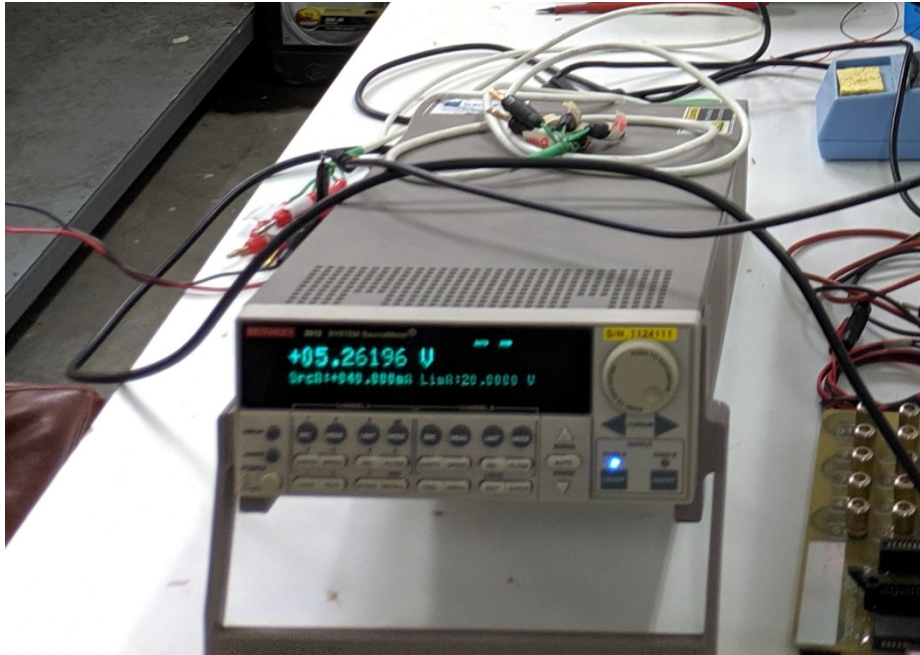


Εικόνα 59: Γράφημα τάσης (V) – παροχής (Lt/min) προϋπάρχοντος αισθητήρα ροής τύπου NTC

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω γράφημα (βλ. εικόνα 59) ο αισθητήρας παρουσιάζει κορεσμό (σταθεροποίηση τάσης στα άκρα του θερμίστορ) λόγω έντονης πτώσης θερμοκρασίας στην αισθητήρια διάταξη τύπου NTC κατά την αύξηση της παροχής αέρα εισόδου στον κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι παρουσιάζεται κορεσμός στην παροχή 1.715,42 Lt/min που αντιστοιχεί σε τάση εξόδου περίπου στα 20 V ενώ δεν είναι εφικτή η ακριβής μέτρηση της παροχής για τιμές μεγαλύτερες από 2.437,70 Lt/min όπου πλέον η χαρακτηριστική καμπύλη τείνει σε ευθεία. Είναι χαρακτηριστική η μείωση στη μεταβολή του σήματος εξόδου από 20,45 V σε 20,60 V (διαφορά στα 150 mV) για αύξηση παροχής περίπου 700 Lt/min. Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι ο αισθητήρας παρουσιάζει κορεσμό στην μικρότερη δυνατή παροχή αέρα (δηλαδή αμέσως όταν ενεργοποιείται ο κινητήρας).

6.5 Βαθμονόμηση νέου αισθητήρα που προκύπτει με χρήση του νέου φορέα

Η διαδικασία βαθμονόμησης του νέου αισθητήρα που προκύπτει με χρήση του νέου φορέα διάταξης πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο σταθερής έντασης ρεύματος (CI) όπως η αρχική για λόγους σύγκρισης. Πολύ συνοπτικά, μέσω μιας ανεξάρτητης πηγής ρεύματος παρέχεται ρεύμα (I) σταθερής έντασης που διαρρέει το θερμίστορ PTC. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μηχανής καθώς η αντίσταση του θερμίστορ αλλάζει λόγω διακυμάνσεων της θερμοκρασίας (βλ. μεταβαλλόμενη παροχή αέρα), αναπτύσσεται μια αντίστοιχη τάση εξόδου (V) στα άκρα του. Για να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις, έγινε χρήση κατάλληλου ψηφιακού πολύμετρου με πολύ μικρό χρόνο απόκρισης.

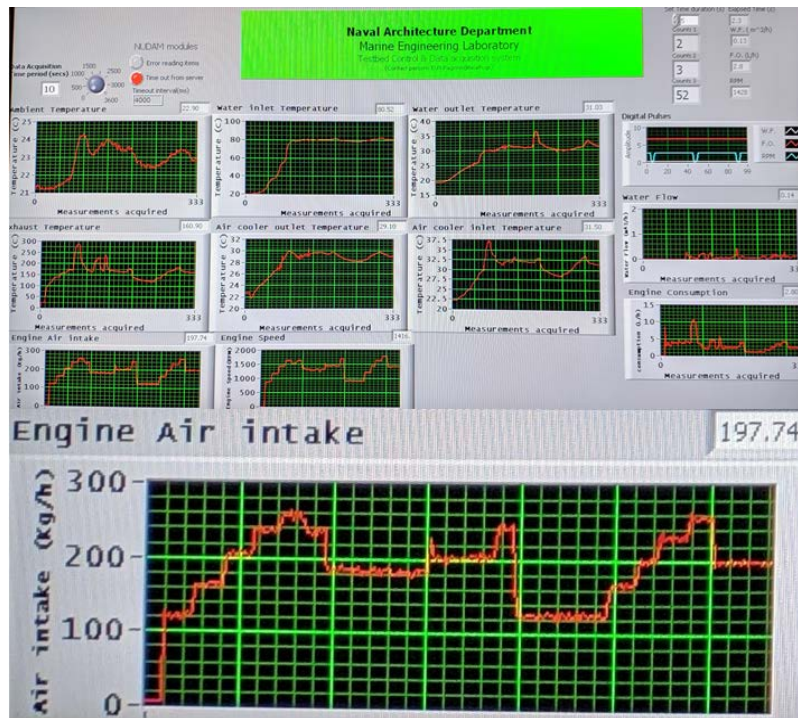


Εικόνα 60: Πηγή/πολύμετρο ρεύματος (sourcemeter) Keithley 2612b.

Να επισημανθεί ότι το συγκεκριμένο όργανο μέτρησης (βλ. εικόνα 60) έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα σαν πηγή ρεύματος παρέχοντας μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων έως και επτά δεκαδικών ψηφίων. Στο συγκεκριμένο πείραμα είναι πολύ χρήσιμη η συγκεκριμένη δυνατότητα καθώς μέσω των δύο καναλιών που διαθέτει, μπορούμε να βλέπουμε τη διακύμανση της τάσης στην έξοδο του αισθητήρα ενώ παράλληλα μας δίνει την επιλογή να καταγράφουμε και να επιβλέπουμε την τιμή της έντασης του ρεύματος που έχουμε ρυθμίσει ως πηγή.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε συνοψίζεται ως εξής: Αρχικά ρυθμίσαμε την ένταση του ρεύματος που θα διαρρέει τον αισθητήρα στα 40mA, καταγράφοντας την αντίστοιχη τάση εξόδου. Η συγκεκριμένη τιμή ρεύματος αντιστοιχεί σε ισχύ επαρκή ώστε να θερμανθεί το θερμίστορ καταλληλά (περίπου 90-100°C). Στην συνέχεια, θέσαμε σε λειτουργία τον εργαστηριακό κινητήρα και καταγράψαμε την πτώση τάσης (V) στην έξοδο του αισθητήρα ροής για συγκεκριμένο εύρος στροφών που αντιστοιχούν σε διαφορετική παροχή αέρα.

Η κλίνη είναι εφοδιασμένη με αυτοματοποιημένο σύστημα καταγραφής λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα σε πραγματικό χρόνο (μέτρηση της κατανάλωσης καυσίμου, ογκομετρικής παροχής αέρα, θερμοκρασίας, παροχής και θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου κτλ.) και σύστημα επεξεργασίας, αποθήκευσης/απεικόνισης των δεδομένων καταγραφής (βλ. εικόνα 61).



Εικόνα 61: Τρέχουσες μετρήσεων εργαστηριακού κινητήρα

Οι μετρηθείσες τιμές παροχής αέρα εισαγωγής του κινητήρα (kg/h) για συγκεκριμένο εύρος στροφών καθώς και οι αντίστοιχες τιμές λειτουργίας του αισθητήρα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα (βλ. εικόνα 62).

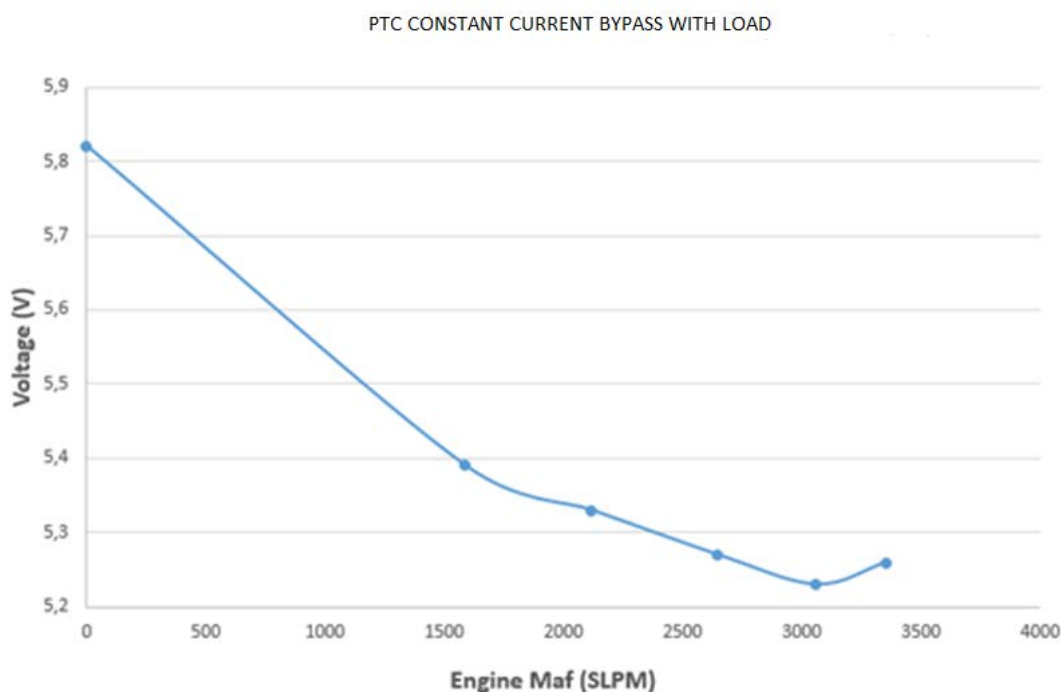
Μετρήσεις Αισθητήρα με Χρήση Νέου Φορέα. α									
ENGINE RPM	I (mA)	V (Volts)	Engine MAF (kg/h)	R_heater	% of R Change	Load (Nm)	Engine MAF (m³/min)	Engine MAF (Lt/min)	Average Air Velocity (m/sec)
0	40	5,82	0	145,50	0,00	no	0,00	0,00	0,00
883	40	5,39	123	134,75	7,39	no	1,59	1586,44	6,01
1170	40	5,33	164	133,25	8,42	no	2,12	2115,26	8,01
1440	40	5,27	205	131,75	9,45	no	2,64	2644,07	10,02
1625	40	5,23	237	130,75	10,14	no	3,06	3056,80	11,58
1538	40	5,26	260	131,50	9,62	124,00	3,35	3353,45	12,70
1630	40	5,26	238	131,50	9,62	no	3,07	3069,70	11,63
1330	40	5,34	180	133,50	8,25	no	2,32	2321,62	8,79
1260	40	5,35	184	133,75	8,08	90,00	2,37	2373,21	8,99
1710	40	5,25	247	131,25	9,79	no	3,19	3185,78	12,07
Μετρήσεις Αισθητήρα με Χρήση Νέου Φορέα. β									
0	40	5,82	0	145,50	0,00	no	0,00	0,00	0,00
915	40	5,41	128	135,25	7,04	no	1,65	1650,93	6,25
1217	40	5,34	167	133,50	8,25	no	2,15	2153,95	8,16
1435	40	5,28	200	132,00	9,28	no	2,58	2579,58	9,77
1620	40	5,25	230	131,25	9,79	no	2,97	2966,52	11,24
1785	40	5,23	260	130,75	10,14	no	3,35	3353,45	12,70
1425	40	5,29	198	132,25	9,11	no	2,55	2553,78	9,67

Εικόνα 62: Εργαστηριακές μετρήσεις νέας αισθητήριας διάταξης σταθερού ρεύματος

6.6 Ανάλυση μετρήσεων νέας αισθητήριας διάταξης ροής

Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα (βλ. εικόνα 62) η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε σε δυο στάδια με ή χωρίς χρήση πέδης. Η χρήση της πέδης οδηγεί σε αύξηση του μηχανικού φορτιού του κινητήρα και αντίστοιχα σε αύξηση της παροχής αέρα σε αυτόν. Ως γενικό συμπέρασμα, ο αισθητήρας δεν φαίνεται πλέον να παρουσιάζει κορεσμό όσο αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα (δηλαδή παροχή αέρα σε αυτόν). Συγκεκριμένα, η τάση στα άκρα του θερμίστορ, μειώνεται πλέον σταδιακά καθώς αυτό ψύχεται όπως είναι αναμενόμενο (PTC τύπου θερμίστορ).

Για να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις για μεγαλύτερες παροχές αέρα έγινε χρήση της πέδης. Η αντίστοιχη γραφική παράσταση της μεταβολής της τάσης εξόδου του αισθητήρα σε σχέση με την παροχή αέρα παρουσιάζεται στην εικόνα 63. Όπως παρατηρούμε όμως στον πίνακα (βλ. μέτρηση των 1538 στροφών rpm με τιμή φορτιού (πέδη) στα 124Nm, η τάση στην έξοδο του αισθητήρα αυξάνεται, λόγω αντίστοιχης αύξησης της αντίστασης του θερμίστορ) το οποίο αποτελεί ένδειξη μείωσης της παροχής αέρα ενώ συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο (βλ. επίσης γραφική παράσταση όπου για παροχή 3350 Lt/m η τάση της εξόδου του αισθητήρα αυξάνεται).

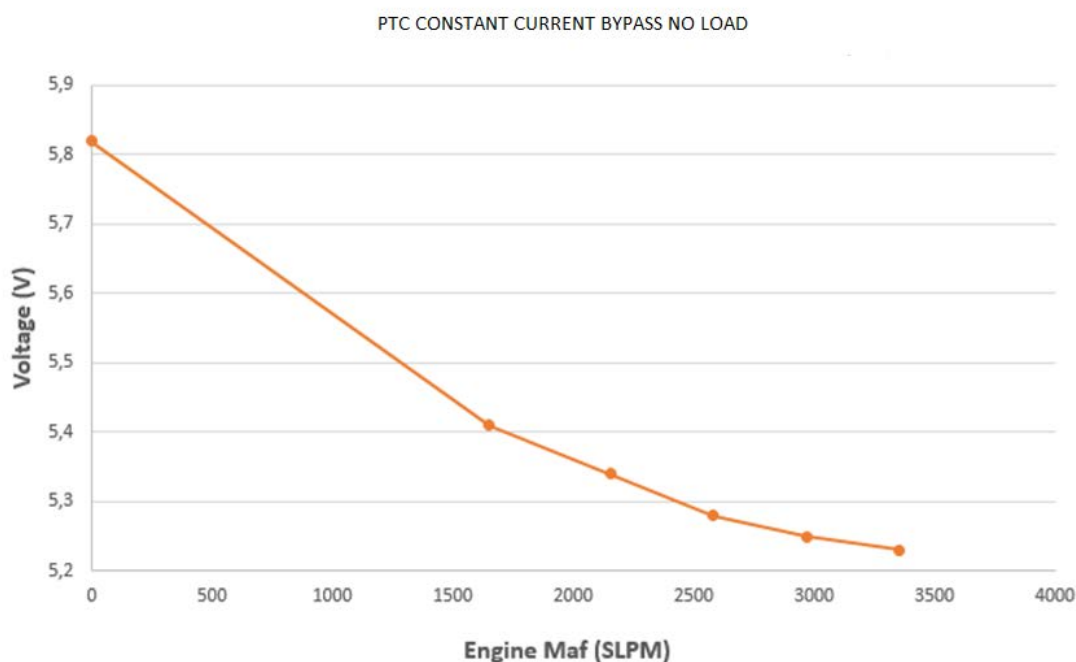


Εικόνα 63: Γραφική παράσταση μεταβολής τάσης εξόδου (V) - παροχής αέρα (SLPM) με χρήση πέδης

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι καθώς μπαίνει σε εφαρμογή η πέδη η λειτουργία του αισθητήρα επηρεάζεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να μη λειτουργεί σωστά. Καθώς η πέδη είναι ηλεκτρομαγνητική (Eddy Currents) δεν μπορούμε να αποκλείσουμε την μη ορθή

λειτουργία των οργάνων μέτρησης λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε αυτά ή στην καλωδίωση διασύνδεσης του αισθητήρα.

Για την εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας του αισθητήρα ανεξάρτητα της πέδης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δεύτερο στάδιο χωρίς τη χρήση της (βλ. εικόνα 62.β), θέτοντας σε λειτουργία τον κινητήρα μέχρι το επιτρεπτό ασφαλές όριο των στροφών του. Η αντίστοιχη μεταβολή της εξόδου τάσης του αισθητήρα στην αντίστοιχη αύξηση της παροχής παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα (βλ. εικόνα 64). Όπως παρατηρούμε υπάρχει πλέον μια αναλογική πτώση τάσης στην έξοδο του αισθητήρα χωρίς να υπεισέρχεται σε κορεσμό, επιβεβαιώνοντας τη δυσλειτουργία του μόνο κατά τη διάρκεια της χρήσης πέδης. Συγκεκριμένα, για την ίδια παροχή αέρα των 260 kg/h (3353 SLPM) ο αισθητήρας πλέον ανταποκρίνεται επιτυχώς. Η αύξηση του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα κάνοντας χρήση του νέου φορέα (σε σχέση με τη χρήση του αρχικού φορέα) είναι εμφανής από 1800 SLPM σε άνω των 3350 SLPM.



Εικόνα 64: Γραφική παράσταση μεταβολής τάσης εξόδου (V) - παροχής αέρα (SLPM) χωρίς χρήση πέδης

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε η μελέτη, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός κατάλληλου φορέα όπου ενσωματώθηκε σε αυτόν, υπάρχουσα αισθητήρια διάταξη ροής με στόχο την διερεύνηση του αρχικού εύρους μέτρησής της.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια βιβλιογραφική αναφορά των βασικών αρχών ρευστομηχανικής και πιο συγκεκριμένα στην συμπεριφορά της ροής ρευστών μέσα σε κυκλικούς αγωγούς. Έπειτα, έγινε ανάλυση των βασικών μοντέλων τύρβης και η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου για την μοντελοποίηση που ακολουθήσε με βάση τις ανάγκες της διπλωματικής.

Σε μεταγενέστερο στάδιο, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός και η απαραίτητη μοντελοποίηση της γεωμετρίας του φορέα μέσω κατάλληλων λογισμικών προγραμμάτων. Στα τελευταία στάδια ολοκλήρωσης της διπλωματικής, πραγματοποιήθηκαν η κατασκευή του φορέα μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή και η βαθμονόμηση/χαρακτηρισμός μέσω των κατάλληλων εργαστηριακών μετρήσεων της νέας αισθητήριας διάταξης που αναπτύχθηκε.

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων συμπεραίνουμε ότι ο τελικός αισθητήρας με τη βοήθεια του νέου φορέα ανταποκρίνεται σε αλλαγές μετρήσεων παροχής αέρα έως 3350 *Lt/m* χωρίς να παρουσιάζει εμφανώς κορεσμό (ψύξη της αντίστασης του αισθητήρα) στη λειτουργία του. Σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί με την προϋπάρχουσα αισθητήρια διάταξη, η νέα τελική διάταξη παρουσιάζει σχεδόν το διπλάσιο εύρος τιμών εισόδου αφού είναι σε θέση να μετρήσει παροχή αέρα 3350 *SLPM* περίπου που αντιστοιχούν σε 260 *kg/h* έναντι 1800 *SLPM* (140 *kg/h*) κάνοντας χρήση του αρχικού φορέα.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ως μία πιθανή και ενδιαφέρουσα πρόταση για περαιτέρω μελέτη στο συγκεκριμένο αντικείμενο προτείνεται η διερεύνηση της δυνατότητας λειτουργίας του αισθητήρα σε περισσότερο διευρυμένο εύρος τιμών, μέσω περαιτέρω βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του φορέα. Επίσης, εξίσου σημαντική είναι και η διερεύνηση της δυσλειτουργίας που παρατηρήθηκε στον αισθητήρα με εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής πέδης της εργαστηριακής κλίνης.

Βιβλιογραφία

- [1] Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. Third edition, New York, McGraw-Hill.
- [2] Shaughnessy, E. J. Jr. (2005). *Introduction to Fluid Mechanics*. New York Oxford University Press, pp791-817
- [3] Fox, R. W. McDonald, A.T. Pritchard, P. J. (2004). *Introduction to Fluid Mechanics*. Sixth edition, John Wiley & Sons, Inc, pp19-40
- [4] Versteeg, H. K. & Malalasekera, M. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method*. Second edition, Pearson Education Limited, pp40-98
- [5] Davidson, L. (2018). *An Introduction to Turbulence Models*. Chalmers University of Technology, pp5-37
- [6] Simulating Turbulent Flow in COMSOL Multiphysics®, <https://www.comsol.com/video/simulating-turbulent-flow-in-comsol-multiphysics>
- [7] Menter, F. R. (1994). *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. AIAA Journal, pp1598–1605.
- [8] Πρίνος, Π. (2013). *Υδραυλική Κλειστών & Ανοιχτών Αγωγών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, pp259-262
- [9] Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. (2018). *Υπολογιστική ρευστοδυναμική με εφαρμογές στη Ναυπηγική και τη Ναυτική Μηχανολογία, μοντέλα τύρβης*. Σημειώσεις θεωρίας, σχολή Ναυπηγών Μηχανικών Πα.Δα
- [10] Bergman, T. L. Lavine, A. S. Incropera, F. P. Dewitt, D. P.(2011). *Introduction to Heat Transfer*. Sixth edition, John Wiley & Sons, Inc. pp67-70, 378-382
- [11] Ikeya, Y. Orlu, R. Fukagata, Koji. Alfredsson, H. P. (2017). *Towards a theoretical model of heat transfer for hot-wire anemometry close to solid walls*. International Journal of Heat and Fluid Flow, pp248-249
- [12] Pitts, D. & Sissom, L. (2004). *Μεταφορά Θερμότητας*. Δεύτερη έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, pp9-30
- [13] Fraden, Jacob. (2010). *Handbook of Modern Sensors*. Physics, Designs, and Applications, Fourth Edition, Springer Science+Business Media
- [14] Παγώνης, Δ. Ν. (2018). *Σύγχρονες Αισθητήριες Διατάξεις Πλοίου*. Κύρια χαρακτηριστικά αισθητήρων, Αρχή λειτουργίας βασικών τύπων αισθητήρων, σημειώσεις Θεωρίας σχολή Ναυπηγών Μηχανικών Πα.Δα
- [15] MIL-HDBK-338, (1998). *Electronic Reliability Design Handbook*. https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC_Crane/SD-18/Test%20Methods/MILHDBK338B.pdf

- [16] Amphenol Advanced Sensors, (2015). *PTC Thermistors*.
<https://www.mouser.com/pdfDocs/AAS-Ptc-Thermistors-Training.pdf>
- [17] EE Power. *NTC thermistor*. <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/#>
- [18] Padilla, B. (2020). Temperature sensing with thermistors. Texas Instruments
- [19]Tanerxun.com. (2019). *Principle of 3d printing-Selective laser sintering (SLS)*.
<https://www.tanerxun.com/principle-of-3d-printing-sls/.html>
- [20] Palermo, E. (2013). *Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method*.<https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [21] Konta, A. K. Pina, M. G. Serrano, D. R. (2017). *Personalised 3D Printed Medicines: Which Techniques and Polymers Are More Successful?*. Madrid