



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

«Μελέτη και βελτιστοποίηση αισθητήρα ροής με εκτεταμένο εύρος τιμών εισόδου»

“Study and optimization of flow sensor with extended measuring range”

Συγγραφέας:

Ευδάκη Αντωνία Μαρία

A.M.: 14071

Επιβλέπων/: Δρ Δ. Ν. Παγώνης

Αιγάλεω, 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

«Μελέτη και βελτιστοποίηση αισθητήρα ροής με εκτεταμένο εύρος τιμών εισόδου»

Συγγραφέας

Ευδάκη Αντωνία Μαρία (Α.Μ.: 51114071)

Επιβλέπων/ουσα

Παγώνης Δημήτρης Νικόλαος
Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

07/10/2021

Εξεταστική Επιτροπή

Παγώνης Δημήτρης
Νικόλαος
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

Δημητρέλλου Σωτηρία
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
ΠΑ.Δ.Α.

Κουμπογιάννης Δημήτριος
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Θ/η κάτωθι υπογεγραμμένης/η Ευδάκη Αντωνία Μαρία του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 51114071 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Θ/Η Δηλών/ούσα



Ευδάκη Αντωνία Μαρία

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δ.Ν. Παγώνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όταν μου ανέθεσε το παρόν θέμα διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον τον ευχαριστώ για την πολύτιμη καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της παρούσας διπλωματικής, όπως επίσης και για την άψογη συνεργασία μας όλον αυτό τον καιρό.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να πω και στον καθηγητή μου, κύριο Θεόδωρο Γεροστάθη για τις εποικοδομητικές υποδείξεις και το χρόνο που αφιέρωσε συμβάλλοντας έτσι και εκείνος στην εκπόνηση της τρέχουσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτριά μου Μπενάκη Βασιλική για την ανταλλαγή απόψεων και πληροφοριών όσον αφορά τις προσομοιώσεις μέσω της πλατφόρμας *Simscale*, όπως και για όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε λόγω της εμπειρίας και της εξοικειώσής της με την προαναφερθείσα πλατφόρμα.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου που με στήριξε και μου συμπαραστάθηκε όλα αυτά τα χρόνια δίνοντας μου κουράγιο και δύναμη να προσπαθώ πάντα για το καλύτερο.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η μελέτη του σχεδιασμού του φορέα ενός θερμικού αισθητήρα, με σκοπό τη διεύρυνση του μετρητικού πεδίου του. Βασικός στόχος της εργασίας ήταν η εύρεση κατάλληλου φορέα, ο οποίος περιλαμβάνει σωλήνα παράκαμψης της ροής, κατά το μήκος του οποίου δε δημιουργούνται στροβιλισμοί στα σημεία που τοποθετούνται οι αισθητήριες διατάξεις, καθ' όλο το εύρος λειτουργίας του, ώστε να έχουμε μεγαλύτερο εύρος μέτρησης και ταυτόχρονα να μην επηρεαστεί η ακρίβεια των μετρήσεων. Μετά τη μελέτη της γεωμετρίας του φορέα, πραγματοποιείται χωριστά και η μελέτη της συνολικής προκύπτουσας αισθητήριας διάταξης και των βασικών μεθόδων μέτρησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μέσω διεξαγωγής προσομοιώσεων της αρχής λειτουργίας της, ώστε να εξακριβωθούν σε μία πρώτη προσέγγιση η μέγιστη δυνατή ακρίβεια και το εύρος λειτουργίας της. Τέλος, πραγματοποιήθηκε επίσης, κατάλληλη μελέτη ως προς το σχεδιασμό της ίδιας της αισθητήριας διάταξης (τοπολογία αισθητήριων στοιχείων), αλλά και του βέλτιστου συνδυασμού υλικών κατασκευής της.

Λέξεις κλειδιά: μοντελοποίηση τύρβης, μετάδοση θερμότητας, τρόποι λειτουργίας θερμικών αισθητήρων, θερμικός αισθητήρας ροής, εύρος λειτουργίας

Abstract

In this thesis the design study of a thermal flow sensor housing is presented. The main purpose of the study was to design an appropriate housing, which includes a bypass pipe flow in order to extend the measuring range of the sensor. By placing the sensory elements inside the bypass where there is no turbulence throughout the desired operating range, the measuring range of the resulting device is extended considerably and at the same time the accuracy of the measurement is increased. Subsequently, a separate study of the sensory device itself and the basic modes of operation (CT or CP) that can be employed followed through appropriate simulations, in order to investigate the resulting maximum possible accuracy and operating range. Finally, the optimal combination of materials employed for the sensing device fabrication and the most efficient sensing element's topology were investigated through a set of separate simulations.

Key words: Turbulence models, flow simulation, heat transfer, thermal flow sensor, thermal sensor mode of operation, measuring range

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Βασικές Αρχές Ρευστομηχανικής.....	3
1.1 Περίληψη.....	3
1.2 Βασικοί ορισμοί ρευστών	3
1.2.1 Ορισμός ρευστού	3
1.2.2 Πυκνότητα ρευστού	3
1.2.3 Ιξώδες ρευστού	3
1.3 Είδη ροής.....	4
1.3.1 Ροή μίας, δύο και τριών διαστάσεων	4
1.3.2 Ασυμπίεστη και συμπιεστή ροή.....	4
1.3.3 Μόνιμη και μη μόνιμη ροή	5
1.3.4 Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή.....	5
1.3.5 Στρωτή και τυρβώδης ροή	5
1.4 Βασικοί ορισμοί ροής.....	7
1.4.1 Πεδίο ροής	7
1.4.2 Πλήρως ανεπτυγμένη ροή.....	7
1.4.3 Οριακό στρώμα (<i>boundary layer</i>).....	7
1.5 Απότομη συστολή- <i>Vena Contracta</i>	8
1.6 Μοντέλα τύρβης.....	9
1.6.1 Μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$	9
1.6.2 Μοντέλο τύρβης <i>Wilcox</i> $k-\omega$	13
1.6.3 Μοντέλο τύρβης $k-\omega$ SST.....	15
Κεφάλαιο 2: Μετάδοση θερμότητας.....	17
2.1 Περίληψη.....	17
2.2 Βασικοί ορισμοί	17
2.2.1 Θερμοκρασία	17

2.2.2	Θερμότητα	17
2.2.3	Θερμική επικοινωνία	17
2.2.4	Θερμική ισορροπία	17
2.2.5	Θερμοδυναμικό σύστημα.....	18
2.2.6	Είδη θερμοδυναμικών συστημάτων.....	18
2.3	Μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας	19
2.3.1	Αγωγή	19
2.3.2	Συναγωγή	24
2.3.3	Θερμική ακτινοβολία	29
Κεφάλαιο 3: Θερμικοί αισθητήρες ροής		32
3.1	Περίληψη.....	32
3.2	Δομή λειτουργίας συστημάτων μέτρησης.....	32
3.3	Είδη συστημάτων μέτρησης.....	32
3.4	Κλίμακες μεγεθών.....	33
3.5	Ορισμός αισθητήρα.....	33
3.6	Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	34
3.7	Διαδικασία ανάπτυξης αισθητήρων	38
3.7.1	Θερμικοί αισθητήρες μέτρησης ροής	39
3.7.2	Σύγκριση δομής θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης.....	40
3.8	Τρόποι λειτουργίας θερμικών αισθητήρων ροής (<i>Modes of operation</i>)	41
3.9	Αισθητήρες ανίχνευσης θερμοκρασίας (RTDs).....	41
3.9.1	Γέφυρα <i>Wheatstone</i>	42
3.9.2	Βασικές ιδιότητες RTD αισθητήρων	43
Κεφάλαιο 4: Εύρεση και σχεδιασμός βέλτιστου φορέα		45
4.1	Περίληψη.....	45
4.2	Μορφολογία φορέα αισθητήρα	45
4.3	Μορφολογία 1η	46

4.4	Μορφολογία 2 ^η	47
4.5	Μορφολογία 3 ^η	48
4.6	Μορφολογία 4 ^η	49
4.7	Μορφολογία 5 ^η	50
Κεφάλαιο 5: Χαρακτηρισμός ροής.....		51
5.1	Περίληψη.....	51
5.2	Παροχή εισόδου	51
5.3	Υπολογισμός ταχύτητας που αντιστοιχεί στην παροχή εισόδου	51
5.4	Χαρακτηρισμός ροής σε συμπιεστή και ασυμπίεστη.....	52
5.5	Χαρακτηρισμός ροής σε στρωτή και τυρβώδη	52
5.6	Τελικά χαρακτηριστικά ροής	52
Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση της ροής στο φορέα		54
6.1	Περίληψη.....	54
6.2	Το πρόγραμμα Simscale.....	54
6.3	Μοντελοποίηση φορέα.....	54
6.4	Παραμετροποίηση της προσομοίωσης.....	57
6.4.1	Επιλογή είδους ροής	57
6.4.2	Επιλογή μοντέλου ανάλυσης της ροής	57
6.4.3	Επιλογή ρευστού και καθορισμός ιδιοτήτων.....	58
6.4.4	Δημιουργία πλέγματος	60
6.4.5	Έναρξη προσομοίωσης και έλεγχος αποτελεσμάτων	62
6.5	Σύγκριση φορέων	63
Κεφάλαιο 7: Προσομοιώσεις ροής σε όλο το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα		66
7.1	Περίληψη.....	66
7.2	Σχεδιασμός βέλτιστης γεωμετρίας φορέα	66
7.3	Προσομοιώσεις ροής της βέλτιστης γεωμετρίας	68
7.4	Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας- απόστασης	72

Κεφάλαιο 8: Σχεδιασμός και τοποθέτηση αισθητήριας διάταξης στο φορέα	74
8.1 Περίληψη.....	74
8.2 Δομή προϋπάρχουσας αισθητήριας διάταξης	74
8.3 Τοποθέτηση αισθητήριων διατάξεων.....	75
8.4 Σχεδιασμός αισθητήριας διάταξης και αρχή λειτουργίας	76
8.4.1 Χρήση αισθητήριου ως θερμό νήμα	77
8.4.2 Χρήση αισθητήρα με διαφορική μέτρηση	77
8.5 Παραμετροποίηση της βασικής γεωμετρίας του αισθητηρίου στοιχείου	78
8.5.1 Περίληψη	78
8.5.2 Μεταβολή απόστασης μεταξύ των θερμίστορ.....	78
8.5.3 Παραμετροποίηση υλικού κατασκευής θερμίστορ (<i>RTDs</i>).....	81
8.5.4 Αλλαγή του τρόπου λειτουργίας από σταθερή ισχύ (<i>CP</i>) σε σταθερή θερμοκρασία (<i>CT</i>)	82
Κεφάλαιο 9: Βελτιστοποίηση γεωμετρίας αισθητηρίου στοιχείου μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων	84
9.1 Περίληψη.....	84
9.2 Σχεδιασμός απλοποιημένου φορέα με ενσωματωμένο αισθητήρα.....	84
9.3 Χαρακτηριστικά ροής στο σωλήνα παράκαμψης	85
9.4 Μοντελοποίηση γεωμετρίας.....	87
9.5 Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας	90
9.5.1 Επιλογή κατάλληλου μοντέλου επίλυσης.....	91
9.5.2 Προσδιορισμός υλικών κατασκευής και ρευστού	92
9.5.3 Καθορισμός αρχικών συνθηκών	95
9.5.4 Καθορισμός οριακών συνθηκών.....	97
9.5.5 Δημιουργία πλέγματος	100
Κεφάλαιο 10: Αποτελέσματα	101
10.1 Περίληψη.....	101

10.2	Μεταβολή απόστασης ανάμεσα στα θερμίστορ.....	101
10.3	Δομικά υλικά διάταξης.....	110
10.4	Αλλαγή τρόπου λειτουργίας από σταθερή ισχύ σε σταθερή θερμοκρασία.....	118
Κεφάλαιο 11: Συμπεράσματα και προτάσεις.....		119
11.1	Συμπεράσματα	119
11.2	Προτάσεις.....	122
Βιβλιογραφία		123
Παράρτημα: Προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας σε όλο το εύρος μέτρησης.....		125

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η μελέτη του σχεδιασμού του φορέα ενός θερμικού αισθητήρα, με σκοπό τη διεύρυνση του εύρους λειτουργίας του. Αυτό επιτυγχάνεται με την εύρεση ενός φορέα, ο οποίος περιλαμβάνει κατάλληλο σωλήνα παράκαμψης της ροής, μέσα στον οποίο όταν εισέρχεται το ρευστό η ταχύτητά του μειώνεται. Με τη μείωση της ταχύτητας του ρευστού η αισθητήρια διάταξη μπορεί να συνεχίζει να μετράει ακόμα και όταν η παροχή εκτός της παράκαμψης αυξάνεται σημαντικά.

Ο σχεδιασμός του σωλήνα παράκαμψης πραγματοποιήθηκε με γνώμονα να μειώνεται η ροή και να «στραγγαλίζεται» σε κάποια σημεία, μέσω κατάλληλης γεωμετρίας. Σε τέτοιου είδους πολύπλοκες γεωμετρίες όμως είναι πιθανή η δημιουργία στροβιλισμοί μετά τις στενώσεις, κοντά στα σημεία που τοποθετούνται οι αισθητήριες διατάξεις, με αποτέλεσμα η ροή να μειώνεται τοπικά λόγω της παρουσίας στροβίλων και η μέτρηση να είναι πλασματική. Για αυτό το λόγο μελετήθηκαν διαφορετικοί τύποι στένωσης και επιλέχθηκε εκείνος στον οποίο δε δημιουργούταν τύρβη εξαιτίας της μορφολογίας του φορέα. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω σειράς προσομοιώσεων μοντελοποίησης της τύρβης για όλο το εύρος λειτουργίας του.

Μετά την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας του φορέα πραγματοποιήθηκε χωριστά και η μελέτη της αισθητήριας διάταξης, μέσω προσομοιώσεων της αρχής λειτουργίας της. Επειδή αναφερόμαστε σε ένα θερμικό αισθητήρα, αυτός αποτελείται από το φορέα, και την αισθητήρια διάταξη στην οποία περιλαμβάνονται τα αισθητήρια στοιχεία στην περίπτωση μας θερμίστορ. Πολύ περιληπτικά, ένα από τα θερμίστορ τροφοδοτείται με ισχύ ικανή ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του τοπικά ($>50^{\circ}\text{C}$ συνήθως) ενώ δημιουργείται αντίστοιχη θερμοκρασιακή κατανομή στην επιφάνεια της αισθητήριας διάταξης. Καθώς το ρευστό εισέρχεται στο φορέα, η θερμοκρασιακή κατανομή επηρεάζεται λόγω φαινομένων μεταφοράς θερμότητας. Μέσω μέτρησης της εν λόγω αλλαγής μπορεί να εξαχθεί η τιμή της διερχόμενης ροής.

Με βάση την παραπάνω αρχή λειτουργίας υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι μέτρησης: η μέτρηση θερμού νήματος και η διαφορική μέτρηση. Μελετήθηκαν και οι δύο μέθοδοι μέτρησης, προκειμένου να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για την ακρίβεια και το εύρος τους.

Τέλος μελετήθηκε περαιτέρω και ο σχεδιασμός της ίδιας της αισθητήριας διάταξης, αρχικά ως προς την τοπολογία των αισθητήριων στοιχείων και στη συνέχεια ως προς τον συνδυασμό των δομικών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για να κατασκευαστεί, ώστε να βελτιστοποιηθεί ως προς την απόδοσή της η συνολική δομή.

Κεφάλαιο 1: Βασικές Αρχές Ρευστομηχανικής

1.1 Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε κάποιους βασικούς ορισμούς που αφορούν γενικά τα ρευστά καθώς και τη ροή τους ώστε να μπορέσουμε να κατανοήσουμε καλύτερα την έννοια και το είδος ροής του αέρα, ως ρευστό που διαπερνά το φορέα, σε διαφορετικές συνθήκες (π.χ. ταχύτητες). Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία επισκόπηση των βασικών και πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μοντέλων τύρβης για τη μοντελοποίηση των ροών, καθώς σε επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις μοντελοποίησης της ροής αέρα μέσα σε κατάλληλο φορέα.

1.2 Βασικοί ορισμοί ρευστών

1.2.1 Ορισμός ρευστού

Με τον όρο ρευστό ονομάζουμε τις ουσίες που παραμορφώνονται συνεχώς υπό την επίδραση διατμητικής τάσης, ανεξάρτητα από το πόσο μικρή είναι η διατμητική τάση. (Σταμάτης Α. Αυλωνίτης- Δημήτρης Α. Αυλωνίτης, Μηχανική των Ρευστών, 4^η έκδοση)

1.2.2 Πυκνότητα ρευστού

Η πυκνότητα ενός ρευστού ορίζεται ως η μάζα ανά μονάδα όγκου. Σε συνθήκες ροής η πυκνότητα μπορεί να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Έτσι η πυκνότητα ενός ρευστού σε ένα σημείο ορίζεται ως: $\lim_{\Delta V \rightarrow \delta V} \frac{\Delta m}{\Delta V}$, όπου Δm η μάζα στον όγκο ΔV και δV ο ελάχιστος όγκος ώστε να είναι το ρευστό συνεχές.

1.2.3 Ιξώδες ρευστού

Το ιξώδες ενός ρευστού μπορεί να θεωρηθεί ως το μέτρο των εσωτερικών τριβών του ρευστού και είναι μία από τις πιο σημαντικές του ιδιότητες αφού καθορίζει το πόσο γρήγορα ρέει το ρευστό αλλά και πόση ενέργεια χάνεται κατά τη ροή του σε αγωγούς, κανάλια και στόμια. Ο λόγος μεταβολής της ταχύτητας, είναι η ύπαρξη της εσωτερικής τριβής, δηλαδή του ιξώδους. Σε ροή μιας διάστασης το ιξώδες μπορεί να ορισθεί ως: $\tau = \mu \frac{dUx(y)}{dy}$, όπου τ είναι η διατμητική τάση, μ το ιξώδες και ο όρος $\frac{dUx(y)}{dy}$ αποτελεί το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας. Η επιρροή της μεταβολής της θερμοκρασίας στο ιξώδες είναι:

- Στα υγρά οι δυνάμεις συνοχής είναι ισχυρές και αποτελούν τον κυρίαρχο παράγοντα του ιξώδους. Η αύξηση της θερμοκρασίας ελαττώνει τις δυνάμεις συνοχής συνεπώς και το ιξώδες.
- Αντίθετα στα αέρια οι δυνάμεις συνοχής είναι αμελητέες. Η αντίσταση τους στις διατμητικές τάσεις οφείλεται στη μεταφορά μοριακής ορμής, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας συνεπώς αυξάνεται και το ιξώδες.

1.3 Είδη ροής

1.3.1 Ροή μίας, δύο και τριών διαστάσεων

- Μονοδιάστατη ροή: Η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού μεταβάλλεται μόνο σε μία διάσταση στο χώρο και πιθανώς και ως προς το χρόνο.

$$u = u(x, t) \quad (1)$$

- Δισδιάστατη ροή: Η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού μεταβάλλεται σε δύο διαστάσεις στο χώρο και πιθανώς και ως προς το χρόνο.

$$u = u(x, y, t) \quad (2)$$

- Τρισδιάστατη ροή: Η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού μεταβάλλεται σε τρεις διαστάσεις στο χώρο και πιθανώς και ως προς το χρόνο.

$$u = u(x, y, z, t) \quad (3)$$

1.3.2 Ασυμπίεστη και συμπιεστή ροή

- Ασυμπίεστη ροή: Όταν η πυκνότητα του ρευστού σε κάθε σημείο του παραμένει σταθερή με το χρόνο. ,

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (4)$$

Για να χαρακτηριστεί μία ροή ασυμπίεστη πρέπει ο αριθμός *Mach* να είναι μικρότερος του 0.3.

$$M = \frac{u}{c} < 0,3 \quad (5)$$

όπου *u* η ταχύτητα του ρευστού και *c* η ταχύτητα του ήχου.

- Συμπιεστή ροή: Η πυκνότητα μεταβάλλεται με το χρόνο. Για να χαρακτηριστεί μία ροή συμπιεστή πρέπει ο αριθμός *Mach* να είναι μεγαλύτερος του 0.3.

$$M = \frac{u}{c} > 0,3 \quad (6)$$

Σε κάθε περίπτωση, εφόσον η πυκνότητα μεταβάλλεται περισσότερο από 1% η ροή θεωρείται συμπιεστή.

1.3.3 Μόνιμη και μη μόνιμη ροή

- Μόνιμη ροή: Η ροή στην οποία το διάνυσμα της ταχύτητας σε κάθε σημείο του πεδίου ροής δε μεταβάλλεται με το χρόνο.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

- Μη μόνιμη ροή: Η ροή στην οποία το διάνυσμα της ταχύτητας σε ένα τυχαίο σημείο μεταβάλλεται με το χρόνο.

$$\frac{\partial u}{\partial t} \neq 0 \quad (8)$$

1.3.4 Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή

- Ομοιόμορφη ροή: Η ροή της οποίας το διάνυσμα της ταχύτητας παραμένει αμετάβλητο σε κάθε σημείο του ρευστού ανεξάρτητα από το χρόνο.
- Ανομοιόμορφη ροή: Η ροή της οποίας το διάνυσμα της ταχύτητας μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο του ρευστού.

1.3.5 Στρωτή και τυρβώδης ροή

- Στρωτή ροή: Η ροή κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται με σταθερή ταχύτητα κατά στρώματα. Θεωρείται λοιπόν, ότι δεν υπάρχουν τριβές. Για το χαρακτηρισμό της ροής ως στρωτή, ο αδιάστατος αριθμός *Reynolds* πρέπει να είναι μικρότερος του 2300:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} < 2300 \quad (9)$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, u η ταχύτητα του, d η διάμετρος του σωλήνα μέσα από τον οποίο περνά και μ το ιξώδες του ρευστού.

- **Τυρβώδης ροή:** Η ροή κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται ακανόνιστα και τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις, δημιουργώντας στροβίλους, πράγμα που προκαλεί την τυχαία μεταβολή της ταχύτητας. Ως επακόλουθο υπάρχουν εσωτερικές τριβές, επομένως λαμβάνεται υπόψη το ιξώδες. Για το χαρακτηρισμό της ροής ως τυρβώδη, ο αδιάστατος αριθμός *Reynolds* πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 4000:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} > 4000 \quad (10)$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, u η ταχύτητα του, d η διάμετρος του σωλήνα μέσα από τον οποίο περνά και μ το ιξώδες του ρευστού.

Μερικά χαρακτηριστικά τυρβώδους ροής μέσα σε αγωγό είναι:

- Η κατανομή ταχυτήτων θα πρέπει να είναι συμμετρική ως προς τον άξονα του αγωγού.
 - Η ταχύτητα στα τοιχώματα του αγωγού θα πρέπει να είναι μηδέν, ενώ η μέγιστη ταχύτητα αναμένεται να παρατηρηθεί στο κέντρο του.
- **Μεταβατική ροή:** Η μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη δε γίνεται απότομα σε ένα σημείο αλλά μεσολαβεί κάποιο ενδιάμεσο τμήμα ροής που ονομάζεται μεταβατική ροή. Ο αδιάστατος αριθμός *Reynolds* έχει τιμές από 2300 έως 4000 όταν η ροή είναι μεταβατική.

$$2300 \leq Re = \frac{\rho u d}{\mu} \leq 4000 \quad (10)$$

Στα μικρο-ρευστά (*microfluids*) που σύμφωνα με τον ορισμό του *Georges Whitesides*, είναι «η επιστήμη και η τεχνολογία συστημάτων χειρισμού πολύ μικρών όγκων ρευστών, χρησιμοποιώντας διαύλους μεταφοράς με διαστάσεις μερικών δεκάδων μικρομέτρων», τα παραπάνω όρια διαφέρουν λίγο. Συγκεκριμένα:

- Στρωτή ροή: $Re < 1800$ (11)
- Τυρβώδης ροή: $Re > 2300$ (12)
- Μεταβατική ροή: $1800 \leq Re \leq 2300$ (13)

(Πηγές: *Whitesides George (2006), 'The Origins and the future of microfluidics*, και *N.T. Nguyen, S.T. Wereley, Fundamentals and applications of microfluidics, Artech house, Norwood, US, 2006*)

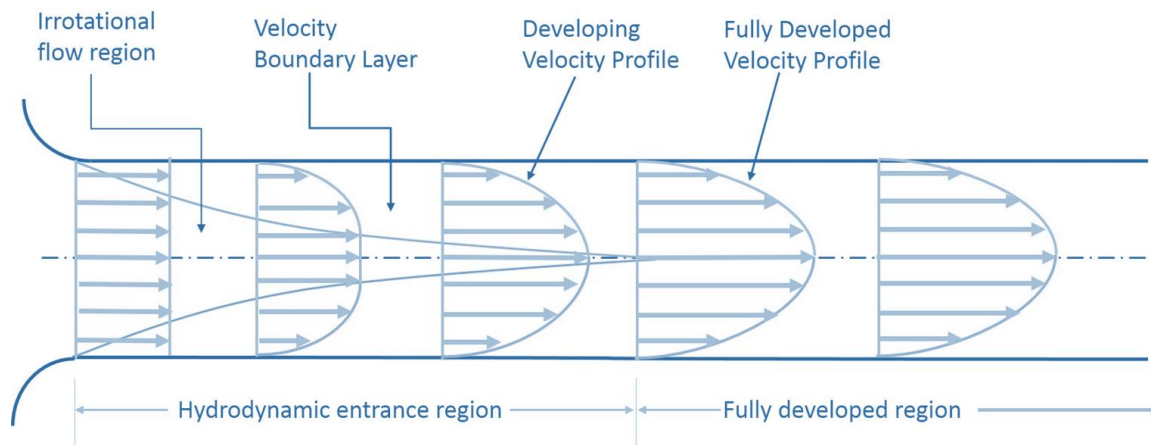
1.4 Βασικοί ορισμοί ροής

1.4.1 Πεδίο ροής

Ο χώρος μέσα στον οποίο κινείται ένα ρευστό ονομάζεται πεδίο ροής. Με τον όρο πεδίο γενικά εννοούμε μια συγκεκριμένη περιοχή του χώρου της οποίας κάθε φυσικό μέγεθος έχει μια ορισμένη τιμή η οποία μπορεί να μένει σταθερή ή να μεταβάλλεται με το χρόνο. Έστω το φυσικό μέγεθος A τότε το πεδίο του A θα εκφράζεται ως: $A(x, y, z, t)$, όπου x, y, z οι συντεταγμένες του χώρου και t ο χρόνος.

1.4.2 Πλήρως ανεπτυγμένη ροή

Θεωρούμε τη στρωτή ροή ενός ασυμπίεστου ρευστού η οποία εισέρχεται σε ευθύγραμμο σωλήνα με ομοιόμορφη ροή. Στην περιοχή εισόδου το οριακό στρώμα ταχύτητας συνεχώς αυξάνει σε πάχος έως η ροή καταστεί σε πλήρως ανεπτυγμένη (*fully developed*). Τα ιξώδη φαινόμενα επικρατούν σε όλη τη διατομή του σωλήνα και η κατανομή των ταχυτήτων δε μεταβάλλεται κατά μήκος της ροής. Το μήκος του σωλήνα εντός του οποίου το πάχος του οριακού στρώματος συνεχώς αυξάνει ονομάζεται υδροδυναμική περιοχή εισόδου, ενώ το υπόλοιπο μήκος του σωλήνα ονομάζεται περιοχή πλήρως ανεπτυγμένης ροής.



Εικόνα 1 Εξέλιξη ροής μέσα σε σωλήνα (Πηγή:http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/4_2-D_ALL.pdf)

1.4.3 Οριακό στρώμα (*boundary layer*)

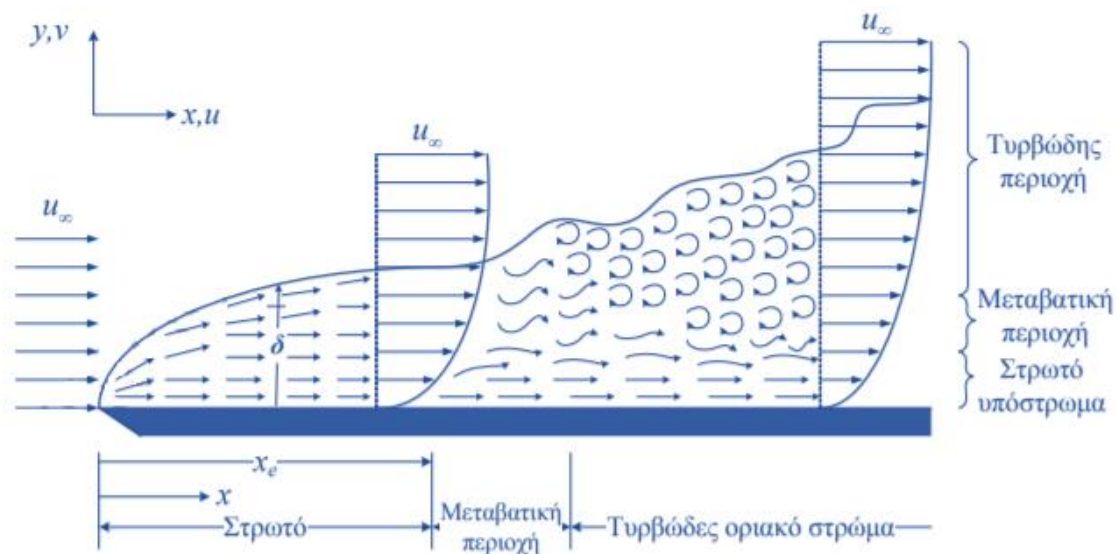
Σύμφωνα με τον *Pandtl* που επινόησε τον όρο του οριακού στρώματος, στην περίπτωση κίνησης ρευστών με σχετικά μικρό ιξώδες πάνω από στερεά, η επίδραση της τριβής περιορίζεται σε ένα πολύ λεπτό στρώμα ρευστού που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του στερεού, το οποίο ονομάζεται οριακό στρώμα.

Κατά αυτόν τον τρόπο το πεδίο ροής μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές περιοχές: το οριακό στρώμα, όπου παρατηρείται μεταβολή της τιμής της ταχύτητας του ρευστού, και την περιοχή που βρίσκεται έξω από αυτό, στην οποία το ιξώδες παύει να αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση της ροής. Το οριακό στρώμα στην περίπτωση της τυρβώδους ροής, αποτελείται από το στρωτό οριακό στρώμα, τη μεταβατική περιοχή και το τυρβώδες οριακό στρώμα και συνδέει την άτριβη ροή με τη ροή των πραγματικών ρευστών. Η απεικόνιση των παραπάνω γίνεται στην Εικόνα 2.

1.4.3.1 Πάχος του οριακού στρώματος (boundary layer thickness)

Το εύρος της περιοχής μεταβολής της ταχύτητας ονομάζεται πάχος του οριακού στρώματος, δ . Το πάχος του οριακού στρώματος δε διατηρείται σταθερό, αλλά αυξάνεται κατά τη φορά κίνησης του ρευστού (βλ. Εικόνα 2). Ο προσδιορισμός του ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του σημείου του πεδίου ροής στο οποίο η ταχύτητα u_x διαφέρει της τοπικής εξωτερικής ταχύτητας u_∞ κατά 1% ή, ισοδύναμα η ταχύτητα u_x έχει αποκατασταθεί κατά 0,99 της ταχύτητας u_∞ .

$$\delta = y|_{u_x=0,99u_\infty} \quad (14)$$

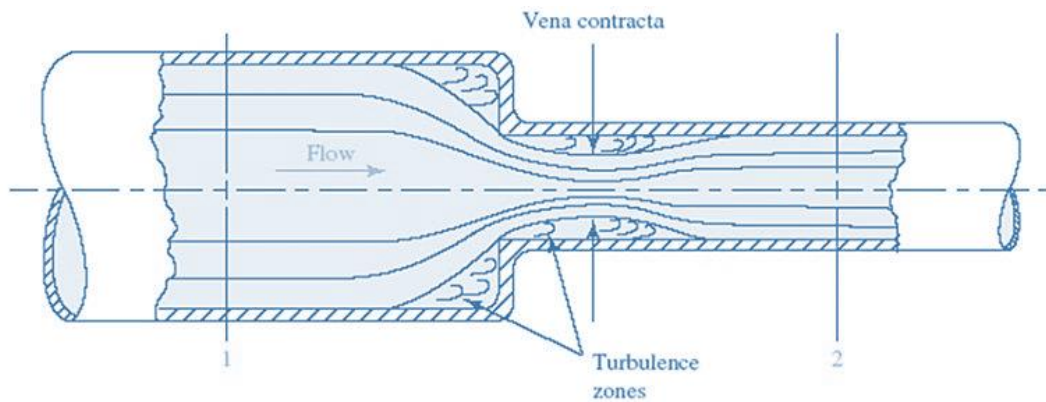


Εικόνα 2 Απεικόνιση οριακού στρώματος (Πηγή: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/4_2-D_ALL.pdf)

1.5 Απότομη συστολή- Vena Contracta

Όταν η διατομή του αγωγού μειώνεται απότομα η ροή λόγω αδράνειας δε μπορεί να ακολουθήσει τις έντονες μεταβολές των τοιχωμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποκολλάται το ρευστό από τα τοιχώματα του μεγάλου αγωγού και να εκτοξεύεται σε μορφή φλέβας μεταβλητής διατομής μέσα στο μικρό αγωγό.

Μετά την αποκόλληση η φλέβα του ρευστού συστέλλεται αρχικά μέχρι μια ελάχιστη διατομή A_c , (γνωστή ως *Vena Contracta*) και ακολούθως διαστέλλεται έως ότου η διατομή της γίνει ίση με τη διατομή A_2 του μικρότερου αγωγού.



Εικόνα 3 Η ροή σε απότομη αλλαγή διατομής αγωγού

1.6 Μοντέλα τύρβης

Η ανάλυση της τυρβώδους ροής είναι μία πολύπλοκη διαδικασία αλλά επειδή η πλειοψηφία των ροών στη φύση είναι τυρβώδεις η χρήση αριθμητικών μεθόδων για την περιγραφή και την πρόβλεψή τέτοιων ροών είναι απαραίτητη.

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. (Γεροστάθης, Θ. Π. & Πέππα, Σ. Κ. 2018)

Τα κυριότερα μοντέλα *RANS* αναλύονται παρακάτω καθώς αυτά χρησιμοποιήθηκαν και στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

1.6.1 Μοντέλο τύρβης k-ε

Το μοντέλο τύρβης k-ε είναι το πιο κοινό μοντέλο που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς ρευστο-μηχανικής (*Computational Fluid Dynamics (CFD)*) για την προσομοίωση των μέσων

χαρακτηριστικών ροής για τις συνθήκες τυρβώδους ροής. Μπορεί επίσης να δηλωθεί ως το απλούστερο μοντέλο στροβιλισμού για το οποίο πρέπει να παρέχονται μόνο αρχικές και/ή οριακές συνθήκες. Δεν υπολογίζει με ακρίβεια τα πεδία ροής που εμφανίζουν βαθμίδες αρνητικής πίεσης, ισχυρής καμπυλότητας στη ροή, επομένως αυτό το μοντέλο θα ήταν μια ακατάλληλη επιλογή για προβλήματα όπως είσοδοι και συμπίεστες. Το μοντέλο k-ε αποδίδει επίσης άσχημα σε μια ποικιλία σημαντικών περιπτώσεων όπως μη περιορισμένες ροές, καμπύλες οριακές στρώσεις, περιστρεφόμενες ροές και ροές σε μη κυκλικούς αγωγούς. Αντιθέτως λειτουργεί καλά για προβλήματα εξωτερικής ροής γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες.

Το μοντέλο k-ε επικεντρώνεται στους μηχανισμούς που επηρεάζουν την τυρβώδη κινητική ενέργεια. Η υποκείμενη υπόθεση αυτού του μοντέλου είναι ότι το τυρβώδες ιξώδες είναι ιστροπικό, με άλλα λόγια, η αναλογία μεταξύ τάσης *Reynolds* και μέσου ρυθμού παραμορφώσεων είναι η ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις.

Πρόκειται για ένα μοντέλο δύο εξισώσεων που δίνει μια γενική περιγραφή της τύρβης μέσω δύο εξισώσεων μεταφοράς (*Partial differential equations (PDEs)*).

- Η πρώτη μεταφερόμενη μεταβλητή είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια (k).
- Η δεύτερη μεταφερόμενη μεταβλητή είναι ο ρυθμός διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ε).

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:

$$k(t) = K + k \quad (15)$$

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

$$K = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2) \quad (16)$$

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

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (17)$$

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:

$$s_{ij}(t) = S_{ij} + s'_{ij} \quad (18)$$

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

$$s_{xx}(t) = S_{xx} + s'_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} \quad (19)$$

$$s_{yy}(t) = S_{yy} + s'_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y} \quad (20)$$

$$s_{zz}(t) = S_{zz} + s'_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z} \quad (21)$$

Αντίστοιχα για τις υπόλοιπες συνιστώσες ισχύει:

$$s_{xy}(t) = S_{xy} + s'_{xy} = s_{yx}(t) = S_{yx} + s'_{yx} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right] \quad (22)$$

$$s_{xz}(t) = S_{xz} + s'_{xz} = s_{zx}(t) = S_{zx} + s'_{zx} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right] \quad (23)$$

$$s_{yz}(t) = S_{yz} + s'_{yz} = s_{zy}(t) = S_{zy} + s'_{zy} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \right] \quad (24)$$

Ορίζουμε ως δυναμικό ιξώδες τύρβης μ_t :

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (25)$$

όπου ε ο ρυθμός διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και C_μ σταθερά που η τιμή της ορίζεται ως 0,09.

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

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho K)}{\partial t}}_1 + \underbrace{div(\rho K U)}_2 = div \left(\underbrace{-PU}_3 + \underbrace{2\mu U S_{ij}}_4 - \underbrace{\rho U \overline{u_i' u_j'}}_5 \right) - \underbrace{2\mu U S_{ij} \cdot S_{ij}}_6 + \underbrace{\rho \overline{u_i' u_j'} \cdot S_{ij}}_7 \quad (26)$$

όπου S_{ij} είναι ο τανυστής του μέσου ρυθμού παραμόρφωσης.

Οι όροι της παραπάνω εξίσωσης μπορούν να αναλυθούν ως εξής:

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 διάχυσης του K
7. Ο ρυθμός καταστροφής του K λόγω της παραγωγής τύρβης

Επίσης η εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k είναι:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}}_1 + \underbrace{div(\rho k U)}_2 = div \left(\underbrace{-p'u'}_3 + \underbrace{2\mu u's'_{ij}}_4 - \underbrace{\rho \frac{1}{2} u_i \cdot u_i' u_j'}_5 \right) - \underbrace{2\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}}_6 - \underbrace{\rho \overline{u_i' u_j'} \cdot S_{ij}}_7 \quad (27)$$

όπου s'_{ij} είναι η συνιστώσα της διακύμανσης του ρυθμού παραμόρφωσης και S_{ij} η μέση τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης.

Οι όροι της παραπάνω εξίσωσης αναλύονται αντίστοιχα ως εξής:

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 διάχυσης του k
7. Ο ρυθμός καταστροφής του k λόγω της παραγωγής τύρβης

Ο όρος του ρυθμού διάχυσης λόγω ιξώδους (βλ. 6) στην παραπάνω εξίσωση εκφράζει τη διάχυση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που προκαλείται από τις μικρότερες δίνες έναντι των τάσεων λόγω του ιξώδους.

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

$$\varepsilon = 2\nu \overline{s'_{ij} s'_{ij}} \quad (28)$$

όπου ν το κινηματικό ιξώδες της τύρβης για το οποίο ισχύει ότι: $\nu = \frac{\mu_t}{\rho}$.

Τελικά, οι δύο βασικές εξισώσεις του μοντέλου k- ε στις οποίες καταλήγουμε όπως αναφέρθηκε και στην αρχή είναι:

1. Εξίσωση κινητικής ενέργειας k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + div(\rho k U) = div \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} grad k \right] + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon = 2\nu \overline{s'_{ij} s'_{ij}} \quad (29)$$

2. Εξίσωση ρυθμού διάχυσης ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + div(\rho \varepsilon U) = div \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} grad \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (30)$$

Οι εξισώσεις αποτελούνται επίσης από ορισμένες ρυθμιζόμενες σταθερές σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ και $C_{2\varepsilon}$. Οι τιμές αυτών των σταθερών έχουν επιτευχθεί με πολλές επαναλήψεις δεδομένων που ταιριάζουν για ένα ευρύ φάσμα τυρβωδών ροών. Οι τιμές τους είναι οι εξής:

- $\sigma_k = 1.00$
- $\sigma_\varepsilon = 1.30$
- $C_{1\varepsilon} = 1.44$
- $C_{2\varepsilon} = 1.92$

Η έννοια των δύο αυτών εξισώσεων θα μπορούσε να εξηγηθεί ως εξής:



1.6.2 Μοντέλο τύρβης Wilcox k- ω

Το μοντέλο k- ω είναι επίσης από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα τυρβώδους ροής στους υπολογισμούς ρευστο-μηχανικής (*Computational Fluid Dynamics (CFD)*). 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. Μοιάζει με το μοντέλο k- ε , ενώ η βασική του διαφορά είναι ότι επιλύει ως προς τη ειδική απόρριψη ω αντί του ρυθμού διάχυσης ε . Είναι και αυτό ένα μοντέλο δύο εξισώσεων, που περιλαμβάνει εξισώσεις μεταφοράς που αντιπροσωπεύουν τις ιδιότητες της τυρβώδους ροής.

- Η πρώτη μεταφερόμενη μεταβλητή είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια, k.
- Η δεύτερη μεταφερόμενη μεταβλητή σε αυτήν την περίπτωση είναι η ειδική απόρριψη, ω .

Η ειδική απόρριψη ορίζεται ως:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (31)$$

Η αναλογία τύρβης είναι η εξής:

$$l_t = \frac{\sqrt{k}}{\omega} \quad (32)$$

Το ιξώδες της τύρβης δίνεται από τον τύπο:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (33)$$

Οι τάσεις Reynolds υπολογίζονται από τον τύπο Boussinesq (Versteeg, H. K. & Malalasekera, M. 2007):

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (34)$$

Αντίστοιχα με το προηγούμενο μοντέλο k-ε οι βασικές εξισώσεις μεταφοράς του k-ω είναι οι εξής:

1. Εξίσωση κινητικής ενέργειας k:

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

όπου ο όρος P_k αντιστοιχεί στο ρυθμό παραγωγής κινητικής ενέργειας και ορίζεται ως:

$$P_k = 2\mu_1 S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad (36)$$

όπου S_{ij} η μέση τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης (αντίστοιχα με το μοντέλο k-ω).

Οι σταθερές σ_k και β που εμφανίζονται στην πρώτη εξίσωση έχουν τις εξής τιμές:

■ $\sigma_k = 2,0$

■ $\beta = 0,09$

2. Εξίσωση ρυθμού διάχυσης ω:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \text{grad} \omega \right] + \gamma_1 \left(2\rho S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (37)$$

Οι σταθερές σ_ω , γ_1 και β_1 που εμφανίζονται στην δεύτερη εξίσωση έχουν τις εξής τιμές:

■ $\sigma_\omega = 2,0$

■ $\gamma_1 = 0,553$

■ $\beta_1 = 0,075$

Το δ_{ij} είναι το δέλτα του Κρόνεκερ.

Και πάλι η έννοια των δύο αυτών εξισώσεων θα μπορούσε να εξηγηθεί ως εξής:



1.6.3 Μοντέλο τύρβης k-ω SST

Το μοντέλο τύρβης k-ω SST είναι ένα μοντέλο εξισορρόπησης με δύο εξισώσεις που χρησιμοποιείται για πολλές αεροδυναμικές εφαρμογές. Είναι ένα υβριδικό μοντέλο που συνδυάζει τα μοντέλα *Wilcox* k-ω και k-ε. Μια συνάρτηση ανάμειξης, ενεργοποιεί το μοντέλο k-ω κοντά στον τοίχωμα και το μοντέλο k-ε στην ελεύθερη ροή. Αυτό διασφαλίζει ότι το κατάλληλο μοντέλο χρησιμοποιείται σε όλο το πεδίο ροής:

- Το μοντέλο k-ω είναι κατάλληλο για προσομοίωση ροής στο ιξώδες υπόστρωμα.
- Το μοντέλο k-ε είναι ιδανικό για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ροής σε περιοχές μακριά από τον τοίχο.

Παρέχει ακριβέστερη πρόβλεψη αποκόλλησης της ροής από άλλα μοντέλα RANS. Έχει παρόμοιες απαιτήσεις ανάλυσης με το μοντέλο k-ω. Ο υπολογισμός τάσης *Reynolds* και η εξίσωση k είναι το όπως και στο αρχικό μοντέλο k-ω του *Wilcox*, αλλά η εξίσωση ε μετατρέπεται σε μια εξίσωση ω αντικαθιστώντας το ε με k·ω. Αυτό δίνει την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho\omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \text{grad}\omega \right] + \gamma_2 \left(2\rho S_{ij}S_{ij} - \frac{2}{3}\rho\omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_2\rho\omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}\omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (38)$$

Η παραπάνω εξίσωση έχει έναν επιπλέον όρο, τον $2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}\omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k}$ ο οποίος προκύπτει από το μετασχηματισμό του ε σε kω. Οι συντελεστές έχουν βελτιστοποιηθεί παίρνοντας τώρα τις εξής τιμές:

- $\sigma_k = 1,0$
- $\sigma_{\omega,1} = 2,0$
- $\sigma_{\omega,2} = 1.17$
- $\gamma_2 = 0,44$
- $\beta = 0,09$
- $\beta_2 = 0,083$

Οι σταθερές C_1 και C_2 αντικαθίστανται από μία σταθερά C η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$C = F_C C_1 + (1 + F_C) C_2 \quad (39)$$

όπου ο όρος F_C είναι η συνάρτηση ανάμειξης και ορίζεται ως:

$$F_C = F_C(l_t/y, Re_y) \quad (40)$$

όπου l_t είναι η αναλογία τύρβης όπως ορίστηκε προηγουμένως και y η απόσταση ενός σημείου από το τοίχωμα του αγωγού όπου ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Re_y = \frac{y^2 \omega}{\nu} \quad (41)$$

Η συνάρτηση F_C προσαρμόζεται έτσι ώστε (i) να είναι μηδέν στην ελεύθερη ροή (τοίχος), (ii) να τείνει προς το ένα στο οριακό στρώμα και (iii) να παράγει μια ομαλή μετάβαση στη διαδρομή μεταξύ του τοίχου και της άκρης του οριακού στρώματος. Με αυτόν τον τρόπο η μέθοδος συνδυάζει το μοντέλο k- ω κοντά στον τοίχο και το μοντέλο k- ϵ στο μακρινό πεδίο με αριθμητικά σταθερό τρόπο.

Το δυναμικό ιξώδες περιορίζεται ώστε να προσφέρει βελτιωμένη απόδοση σε ροές με βαθμίδες αρνητικής πίεσης. Αντίστοιχα, η τυρβώδης παραγωγή κινητικής ενέργειας περιορίζεται για να αποτρέψει τη συσσώρευση τύρβης σε περιοχές στασιμότητας:

1. Περιοριστής ιξώδους:

$$\mu_t = \frac{\alpha_1 \rho k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (42)$$

όπου $S = \sqrt{2\rho S_{ij} S_{ij}}$, $\alpha_1 =$ σταθερά, και F_2 είναι συνάρτηση ανάμειξης.

2. Περιοριστής ρυθμού παραγωγής κινητικής ενέργειας

$$P_k = \min \left(10\beta\rho k\omega, 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \quad (43)$$

1.6.3.1 Σύγκριση μοντέλων

Συνοπτικά μπορούμε να συμπεράνουμε:

Μοντέλα RANS	Χαρακτηριστικά
Μοντέλο τύρβης k- ϵ	Κατάλληλο για προβλήματα εξωτερικής ροής γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες. Δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πολύπλοκες ροές.
Μοντέλο τύρβης Wilcox k- ω	Έχει υψηλές επιδόσεις στο οριακό στρώμα κοντά στα τοιχώματα, έχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε εσωτερικές ροές. Απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς συγκριτικά με το μοντέλο k- ϵ .
Μοντέλο τύρβης SST k- ω	Προσφέρει συνδυαστικά τα οφέλη και των δυο μοντέλων (k- ϵ και k- ω). Απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς από τα παραπάνω μοντέλα τύρβης.

Κεφάλαιο 2: Μετάδοση θερμότητας

2.1 Περίληψη

Στο τρέχον κεφάλαιο θα αναφερθούν και θα αναλυθούν οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας μέσω των υλικών, καθώς στην παρούσα εργασία η μελέτη και η βελτιστοποίηση του αισθητήρα πραγματοποιήθηκαν μέσω προσομοιώσεων της αρχής λειτουργίας του. Καθώς αναφερόμαστε σε έναν θερμικό αισθητήρα ροής, αυτό συνεπάγεται ότι το μέγεθος που μετρήθηκε ήταν η θερμοκρασία όπως μεταβάλλεται με την ύπαρξη ροής με διαφορετικές ταχύτητες. Αυτές οι θερμοκρασιακές αλλαγές επιτυγχάνονται μέσω του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας. Επομένως θεωρείται σκόπιμη η ουσιαστική κατανόηση των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας.

2.2 Βασικοί ορισμοί

2.2.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ένα φυσικό μέγεθος, το οποίο χαρακτηρίζει πόσο θερμό ή πόσο ψυχρό είναι ένα σώμα, σε σχέση με κάποιο άλλο.

2.2.2 Θερμότητα

Θερμότητα είναι ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα σε ένα άλλο, εξ' αιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας τους.

2.2.3 Θερμική επικοινωνία

Θερμική επικοινωνία είναι η επικοινωνία δύο σωμάτων κατά την οποία το ένα σώμα ακτινοβολεί θερμική ενέργεια και το άλλο σώμα δέχεται την ακτινοβολία. Όπως είναι γνωστό η θερμική επικοινωνία συμβαίνει πάντοτε από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα (ή σύστημα).

2.2.4 Θερμική ισορροπία

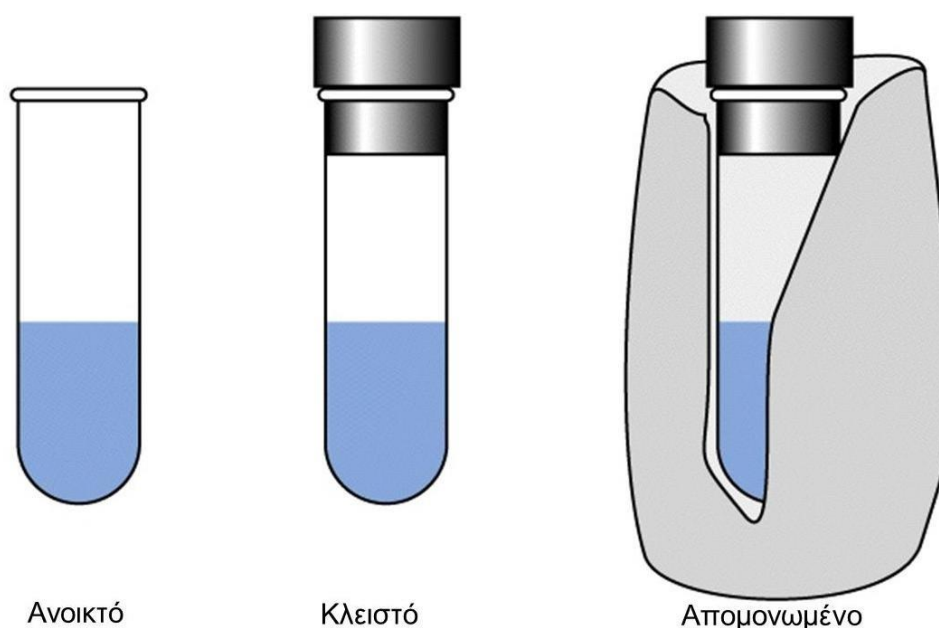
Δύο σώματα που βρίσκονται σε θερμική επικοινωνία, έρχονται σε θερμική ισορροπία, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο, εκμηδενιστεί. Δηλαδή όταν εξισωθούν οι θερμοκρασίες τους.

2.2.5 Θερμοδυναμικό σύστημα

Όταν θέλουμε να πραγματοποιήσουμε μία θερμοδυναμική έρευνα, πρέπει να καθορίσουμε τα όρια μιας περιοχής στην οποία αναφέρεται η έρευνά μας. Η περιοχή αυτή ονομάζεται θερμοδυναμικό σύστημα και αποτελείται από οποιοδήποτε σύνολο μακροσκοπικών αντικειμένων, συγκεκριμένου χώρου, το οποίο δύναται να ανταλλάσσει ενέργεια, ή ύλη αμοιβαία με το περιβάλλον ή με όποιο εξωτερικό μέσον περιβάλλει αυτό σύμφωνα με τις αρχές ή νόμους της θερμοδυναμικής. Η ιδεατή μεμβράνη που χωρίζει το σύστημα από το περιβάλλον του ονομάζεται όριο του συστήματος, ενώ οτιδήποτε βρίσκεται έξω από το σύστημα και δε συμμετέχει σε όσα συμβαίνουν στο σύστημα ονομάζεται περιβάλλον συστήματος.

2.2.6 Είδη θερμοδυναμικών συστημάτων

- Ανοικτό σύστημα καλείται το σύστημα εκείνο, του οποίου τα όρια είναι διαπερατά απ' την ύλη άρα μπορεί να ανταλλάσσει ύλη και ενέργεια με το περιβάλλον.
- Κλειστό σύστημα καλείται το σύστημα εκείνο, του οποίου τα όρια είναι αδιαπέραστα απ' την ύλη, δεν επιτρέπουν δηλαδή την ανταλλαγή ύλης, αλλά επιτρέπουν την ανταλλαγή ενέργειας με το περιβάλλον.
- Αδιαβατικό ή απομονωμένο σύστημα καλείται το σύστημα του οποίου τα όρια είναι αδιαπέραστα από την ύλη και την ενέργεια, δεν επιτρέπουν δηλαδή την ανταλλαγή ούτε ύλης, ούτε ενέργειας με το περιβάλλον του.



Εικόνα 4 Είδη θερμοδυναμικών συστημάτων

2.3 Μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας

Η διαδικασία συναλλαγής ενέργειας που οφείλεται σε διαφορά θερμοκρασίας, είτε σε ακίνητο μέσο, είτε μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων ονομάζεται μετάδοση θερμότητας. Η μετάδοση αυτή πραγματοποιείται πάντοτε με φορά από το θερμότερο προς το ψυχρότερο μέσο, βάσει του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, μέχρι να εξισωθούν οι θερμοκρασίες ώστε να επέλθει θερμοκρασιακή ισορροπία στο θερμοδυναμικό σύστημα.

Η μετάδοση της θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω τριών διαφορετικών μηχανισμών. Αυτοί είναι οι εξής:

- Αγωγή (*conduction*): αναφέρεται στη διάδοση θερμότητας μέσα σε ακίνητο μέσο (στερεό, υγρό, αέριο).
- Συναγωγή (*convection*): αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού (υγρού ή αερίου).
- Θερμική ακτινοβολία (*thermal radiation*): βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, οπότε μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας, χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου μέσου.



Εικόνα 5 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας

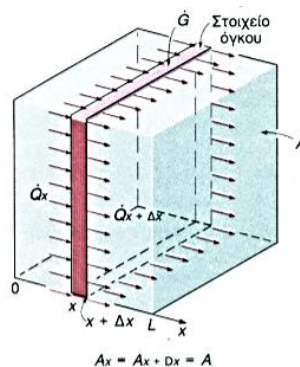
2.3.1 Αγωγή

Η μοντελοποίηση του φυσικού φαινομένου της αγωγής θερμότητας πραγματοποιείται μέσω μιας μερικής διαφορικής εξίσωσης. Η λύση της εξίσωσης αυτής με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες αποτελεί το θερμοκρασιακό πεδίο.

2.3.1.1 Μονοδιάστατη αγωγή

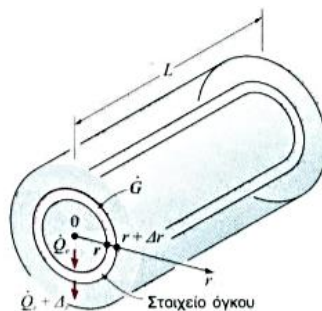
Όταν η ροή που μελετάμε κυριαρχεί σε μία κατεύθυνση και θεωρείται αμελητέα ως προς τις άλλες δύο, τότε η αγωγή θεωρείται ότι πραγματοποιείται σε μία διάσταση, επομένως ονομάζεται μονοδιάστατη. Ορισμένες (και οι πιο συνήθεις) περιπτώσεις προβλημάτων μονοδιάστατης αγωγής είναι:

1. Κάθετα σε μεγάλο επίπεδο (π.χ. τοίχος, υαλοπίνακας, κ.λπ.)



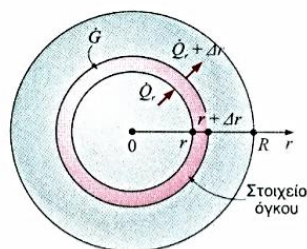
Εικόνα 6 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας διαμέσου ενός στοιχείου όγκου σε ένα μεγάλο επίπεδο τοίχο.

2. Ακτινικά σωλήνα (π.χ. κυλινδρικής ράβδου πυρηνικού καυσίμου, σύρματος ηλεκτρικής αντίστασης, κ.λπ.)



Εικόνα 7 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας διαμέσου ενός στοιχείου όγκου σ' έναν κύλινδρο μεγάλου μήκους.

3. Ακτινικά κελύφους σφαιρικής δεξαμενής, ή μεταλλικής σφαίρας η θερμοκρασία της οποίας μειώνεται ή μένει σταθερή.



Εικόνα 8 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας διαμέσου ενός στοιχείου όγκου σε μία σφαίρα.

Μέσω της εξίσωσης της θερμότητας, που είναι μία μερική διαφορική εξίσωση, μπορούν να προσδιοριστούν: η κατανομή της θερμοκρασίας, ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας και η ροή θερμότητας σε επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά υλικά μέσα με ή χωρίς πηγές θερμότητας ή καταβόθρες. Η εξίσωση της θερμότητας που ισχύει και εφαρμόζεται στη μόνιμη αγωγή ανάλογα την περίπτωση είναι (Απόστολος Πολυζάκης- Σταμάτης Ζώρας- Κων/νος Παπαγεωργίου, *Μετάδοση Θερμότητας και Συσκευές Διεργασιών*):

1. Κάθετα σε επίπεδο- καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q}_{element} = \rho c \frac{\partial T}{\Delta t} \quad (44)$$

2. Ακτινικά σωλήνα- κυλινδρικές συντεταγμένες:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q}_{element} = \rho c \frac{\partial T}{\Delta t} \quad (45)$$

3. Ακτινικά κελύφους σφαιρικής δεξαμενής- Σφαιρικές συντεταγμένες:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q}_{element} = \rho c \frac{\partial T}{\Delta t} \quad (46)$$

όπου:

- ∂r (ή αντίστοιχα ∂x) ακτίνα ή το πάχος που μελετάται και είναι αρκετά μικρό ώστε να εξασφαλίζεται με καλή προσέγγιση ότι η μετάδοση θερμότητας γίνεται μονοσήμαντα.
- $\dot{q}_{element}$ η παραγωγή ή η κατανάλωση ενέργειας
- k η θερμική αγωγιμότητα του υλικού
- T η θερμοκρασία άρα ∂T η μεταβολή της θερμοκρασίας
- ρ η πυκνότητα του υλικού
- c η ειδική θερμότητα του υλικού
- T η θερμοκρασία άρα ∂T η μεταβολή της θερμοκρασίας

Ανάλογα με τις συνθήκες της αγωγής υπάρχουν τρεις περιπτώσεις αγωγής:

1. Η μόνιμη ή σταθερή μετάδοση θερμότητας ($\frac{\partial T}{\Delta t} = 0$)
2. Η μεταβατική χωρίς παραγωγή ή κατανάλωση θερμότητας ($\dot{q}_{element} = 0$)
3. Η μόνιμη χωρίς παραγωγή ή κατανάλωση θερμότητας ($\frac{\partial T}{\Delta t} = 0$ και $\dot{q}_{element} = 0$)

Ως φυσικό επόμενο των παραπάνω περιπτώσεων η εξίσωση της θερμότητας απλοποιείται αντίστοιχα.

Για τη μέτρηση του ρυθμού αγωγής της θερμότητας χρησιμοποιείται ο νόμος Fourier σύμφωνα με τον οποίο φαίνεται το πόσο εύκολα μεταδίδεται η θερμότητα, επομένως τα υλικά διακρίνονται σε ευθερμαγωγά, ή καλοί αγωγοί θερμότητας, (όπως π.χ. τα μέταλλα) και σε δυσθερμαγωγά, ή κακοί αγωγοί θερμότητας, ή κατ' επέκταση θερμομονωτικά, (όπως π.χ. το ξύλο, ο αμίαντος, τα υγρά και τα αέρια). Για την εφαρμογή του νόμου Fourier πρέπει να γνωρίζουμε την κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσο. Η σχέση που ισχύει για τη μονοδιάστατη αγωγή είναι η παρακάτω:

1. Κάθετα σε επίπεδο- καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\dot{Q} = -kA_x \frac{dT}{dx} \quad (47)$$

όπου $A_x =$ μήκος x πλάτος το εμβαδό του επιπέδου.

2. Ακτινικά σωλήνα- κυλινδρικές συντεταγμένες:

$$\dot{Q} = -kA_r \frac{dT}{dr} \quad (48)$$

όπου $A_r = 2\pi rL$ το εμβαδό του κυλίνδρου.

3. Ακτινικά κελύφους σφαιρικής δεξαμενής- Σφαιρικές συντεταγμένες:

$$\dot{Q} = -kA_r \frac{dT}{dr} \quad (49)$$

όπου $A_r = 4\pi r^2$ το εμβαδό της σφαίρας.

2.3.1.2 Πολυδιάστατη αγωγή

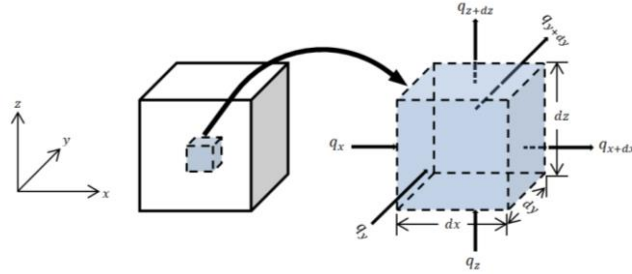
Παρ' ότι τα περισσότερα προβλήματα αγωγής θερμότητας που συναντά κανείς προσεγγίζονται ως μονοδιάστατα, υπάρχουν εφαρμογές που χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη η μετάδοση θερμότητας προς τις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Στις περιπτώσεις αυτές η αγωγή είναι πολυδιάστατη.

Η πολυδιάστατη μετάδοση θερμότητας που αφορά και τις τρεις διαστάσεις, ονομάζεται τρισδιάστατη. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διεργασία μετάδοσης θερμότητας η θερμοκρασία μεταβάλλεται και στις τρεις κατευθύνσεις μέσα στο μέσο. Η κατανομή της θερμοκρασίας σε ολόκληρο το μέσο σε συγκεκριμένο χρόνο θα είναι της μορφής $\theta(x,y,z)$ για καρτεσιανό σύστημα, $\theta(r,\varphi,z)$ για κυλινδρικές συντεταγμένες και $\theta(r,\varphi,\theta)$ για σφαιρικές συντεταγμένες.

Η πολυδιάστατη μετάδοση θερμότητας που η θερμοκρασία μεταβάλλεται κυρίως ως προς δύο κύριες κατευθύνσεις ενώ η μεταβολή ως προς την τρίτη κατεύθυνση (και επομένως και η μετάδοση της θερμότητας) μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα ονομάζεται διςδιάστατη:

Η εξίσωση θερμότητας για πολυδιάστατη αγωγή προσαρμόζεται αντίστοιχα για κάθε περίπτωση ώστε να υπολογίζεται η μεταφορά θερμικής ενέργειας σε όλες τις διευθύνσεις:

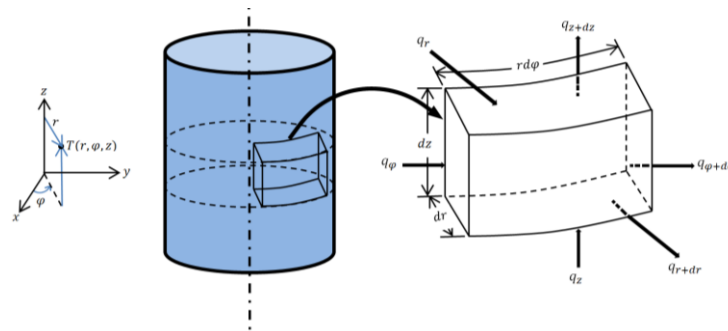
1. Κάθετα σε επίπεδο- καρτεσιανές συντεταγμένες $T(x, y, z)$:



Εικόνα 9 Καρτεσιανές συντεταγμένες

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_{element} = \rho c \frac{\partial T}{\Delta t} \quad (50)$$

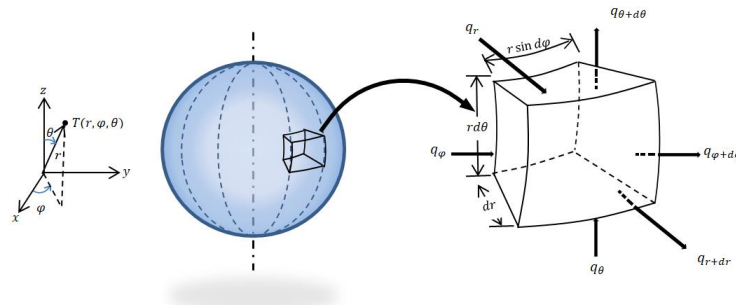
2. Ακτινικά σωλήνα- κυλινδρικές συντεταγμένες $T(r, \varphi, z)$:



Εικόνα 10 Κυλινδρικές συντεταγμένες

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(r k \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_{element} = \rho c \frac{\partial T}{\Delta t} \quad (51)$$

3. Ακτινικά κελύφους σφαιρικής δεξαμενής- Σφαιρικές συντεταγμένες $T(r, \varphi, \theta)$:



Εικόνα 11 Σφαιρικές συντεταγμένες

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{q}_{element} = \rho c \frac{\partial T}{\Delta t} \quad (52)$$

Αντίστοιχα ο νόμος Fourier για τη μέτρηση του ρυθμού αγωγής της θερμότητας έχει τη μορφή:

1. Κάθετα σε επίπεδο- καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\dot{q}_n = -k \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} - k \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} - k \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (53)$$

2. Ακτινικά σωλήνα- κυλινδρικές συντεταγμένες:

$$\dot{q}_n = -k \frac{\partial T}{\partial r} \vec{i} - k \frac{\partial T}{r \partial \varphi} \vec{j} - k \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (54)$$

3. Ακτινικά κελύφους σφαιρικής δεξαμενής- Σφαιρικές συντεταγμένες:

$$\dot{q}_n = -k \frac{\partial T}{\partial r} \vec{i} - k \frac{\partial T}{r \partial \theta} \vec{j} - k \frac{\partial T}{r \sin \theta \partial \varphi} \vec{k} \quad (55)$$

2.3.2 Συναγωγή

Στη συναγωγή η μετάδοση ενέργειας πραγματοποιείται μεταξύ ενός κινούμενου ρευστού και μιας στερεής επιφάνειας. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μετάδοση ενέργειας στη συναγωγή είναι αποτέλεσμα δύο μηχανισμών:

- Της μεταφοράς ενέργειας λόγω της τυχαίας μοριακής κίνησης της ύλης, δηλαδή της διάχυσης,
- Και της συνολικής, μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού, δηλαδή της μαζικής κίνησης μεγάλου αριθμού μορίων του ρευστού σε ομάδες, ο οποίος ονομάζεται μεταφορά.

Όπως καταλαβαίνουμε, η συναγωγή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Κατά τη μοντελοποίηση της και για την εξαγωγή των εξισώσεων που δίνουν το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας συχνά πρέπει να ληφθεί υπόψη και να επιλυθεί και το πρόβλημα ροής των ρευστών.

Χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα τη φύση της ροής στην οποία αναφερόμαστε:

- Την εξαναγκασμένη συναγωγή, όταν η ροή προκαλείται από εξωτερικά αίτια, όπως π.χ. ο αέρας, ένας ανεμιστήρας ή μια αντλία.
- Και την ελεύθερη ή φυσική συναγωγή, όταν η ροή προκαλείται από δυνάμεις άνωσης λόγω διαφορών πυκνότητας στη μάζα του ρευστού που με τη σειρά τους είναι αποτέλεσμα θερμοκρασιακών διαφορών στο ρευστό.

2.3.2.1 Εξαναγκασμένη συναγωγή στο εσωτερικό σωλήνα

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις μετάδοσης θερμότητας ευθύγραμμος σωλήνας σταθερής, κυκλικής διατομής, με στρογγυλεμένο στόμιο, στον οποίο εισέρχεται στρωτή ροή με ομοιόμορφο προφίλ. Με την είσοδο της ροής στο σωλήνα αναπτύσσεται υδροδυναμικό οριακό στρώμα στα τοιχώματα του σωλήνα, η ανάπτυξη του οποίου πρόκειται να σταματήσει όταν το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος ή του οριακού στρώματος ταχύτητας γίνει ίσο με την ακτίνα του αγωγού. Το πρώτο τμήμα της ροής ονομάζεται υδροδυναμικά μεταβατική περιοχή ενώ το δεύτερο υδροδυναμικά πλήρως ανεπτυγμένη ροή.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.3.5 του προηγούμενου κεφαλαίου για τον χαρακτηρισμό της ροής σε στρωτή ή τυρβώδη χρησιμοποιείται ο αδιάστατος αριθμός *Reynolds*, όπου στην περίπτωση σωλήνων ορίζεται ως:

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (56)$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, u_m η μέση ταχύτητα στη διατομή εισόδου, D η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα μέσα από τον οποίο περνά και μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Η μέση ταχύτητα στη διατομή εισόδου είναι ένα υποθετικό μέγεθος, και υπολογίζεται με βάση την παροχή της μάζας από τη σχέση:

$$u_m = \frac{\dot{m}}{\rho A_c} = \frac{\int_{A_c} \rho u dA}{\rho A_c} \quad (57)$$

όπου A_c το εμβαδό της διατομής του αγωγού και \dot{m} η παροχή μάζας του ρευστού.

Ο κρίσιμος αριθμός *Reynolds*, δηλαδή η ανώτατη τιμή που μπορεί να πάρει σε ευθύγραμμους αγωγούς για στρωτή ροή είναι: $Re_{D,cr} \approx 2300$.

Για $2300 \leq Re_{D,cr} \leq 4000$ η ροή εισέρχεται στη μεταβατική περιοχή η οποία καλό είναι να αποφεύγεται στις μελέτες, καθώς η ροή εκεί είναι ασταθής, επομένως τα αποτελέσματα δε θα είναι ακριβή.

Ο κρίσιμος αριθμός *Reynolds*, δηλαδή η κατώτατη τιμή που μπορεί να πάρει σε ευθύγραμμους αγωγούς για να θεωρηθεί η ροή τυρβώδης είναι: $Re_{D,cr} \approx 4000$.

Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης λόγω τριβών χρησιμοποιείται η σχέση υπολογισμού που φαίνεται παρακάτω (Απόστολος Πολυζάκης- Σταμάτης Ζώρας- Κων/νος Παπαγεωργίου, Μετάδοση Θερμότητας και Συσκευές Διεργασιών):

$$\Delta P = f \frac{L \rho u_m^2}{D} \quad (58)$$

όπου L το μήκος του αγωγού και D η εσωτερική του διάμετρος.

Όσον αφορά το σύμβολο f , πρόκειται για το συντελεστή τριβής, που είναι ένας αδιάστατος αριθμός και υπολογίζεται ανάλογα τις παρακάτω περιπτώσεις:

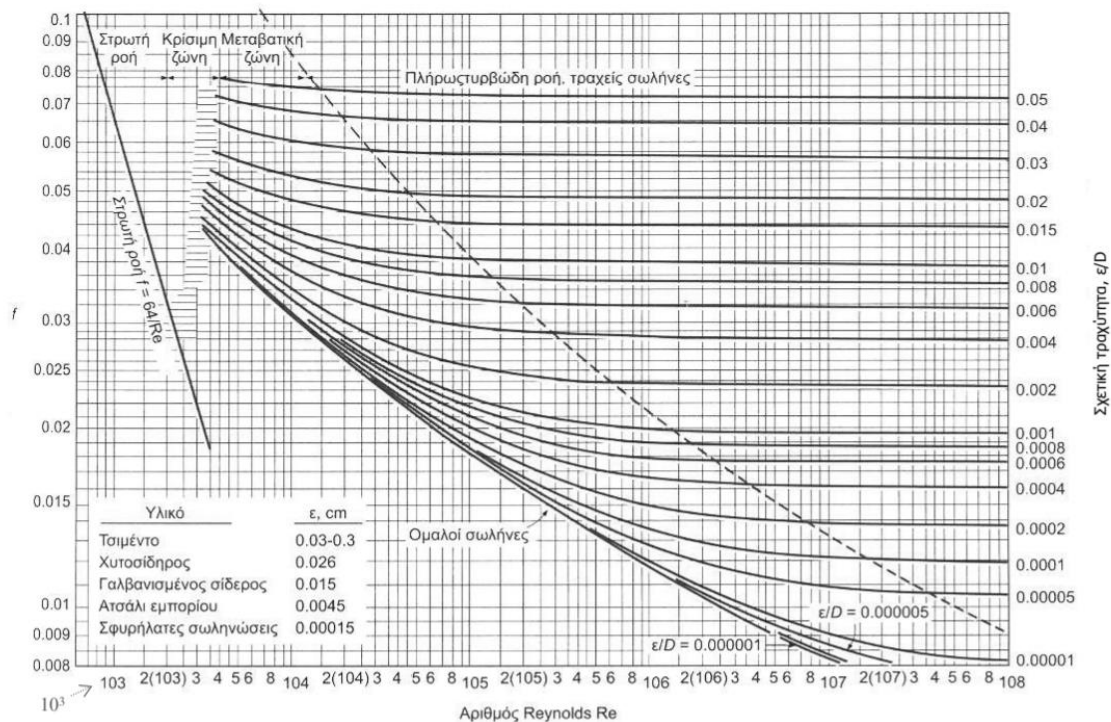
1. Αγωγός με λεία τοιχώματα:

■ $f = \frac{0,316}{Re_D^{0,25}}$, για $Re_D < 2 \cdot 10^4$

■ $f = \frac{0,184}{Re_D^{0,2}}$, για $2 \cdot 10^4 < Re_D < 3 \cdot 10^5$

2. Αγωγός με τοιχώματα που εμφανίζουν τραχύτητα:

Η εκτίμηση του συντελεστή τριβής f πραγματοποιείται από το διάγραμμα *Moody*, συναρτήσει του αριθμού *Reynolds* και της σχετικής τραχύτητας ϵ_s που δίνεται από τον τύπο: $\epsilon_s = \frac{\epsilon}{D}$, όπου ϵ η τραχύτητα που έχει το εκάστοτε υλικό.



Εικόνα 12 Διάγραμμα *Moody*

Η απαραίτητη ισχύς ώστε να υπερνικηθούν οι απώλειες δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{W} = \Delta P \dot{V} \quad (59)$$

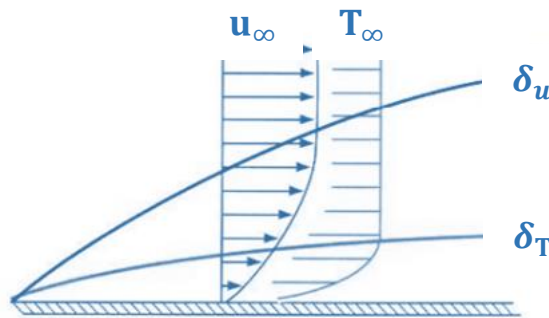
όπου \dot{V} η παροχή όγκου η οποία υπολογίζεται ως: $\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$.

2.3.2.2 Θερμικό οριακό στρώμα

Στη παράγραφο 1.4.3 του πρώτου κεφαλαίου αναφέρθηκε η έννοια του οριακού στρώματος όσον αφορά την ταχύτητα. Σε αναλογία με το οριακό στρώμα ταχύτητας αναπτύσσεται και το θερμικό οριακό στρώμα, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού και στερεού. Όπως είχε αναφερθεί, η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του σημείου του πεδίου ροής στο οποίο η ταχύτητα u_x έχει αποκατασταθεί κατά 0,99 της ταχύτητας u_∞ ονομάζεται πάχος οριακού στρώματος. Αντίστοιχα στην απόσταση από την επιφάνεια στην οποία η διαφορά θερμοκρασίας $T_s - T_\infty$ ισούται με $0,99(T_s - T_\infty)$ ορίζεται το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος.

$$\delta_t = y|_{T_s - T_\infty = 0,99(T_s - T_\infty)} \quad (60)$$

Το οριακό στρώμα θερμοκρασίας έχει την ίδια μορφή με το οριακό στρώματα ταχύτητας, διαφέρει όμως το πάχος τους. Τα δύο οριακά στρώματα, επίσης, δε συμπίπτουν όπως φαίνεται και στην εικόνα:



Εικόνα 13 Σύγκριση πάχους οριακού στρώματος ταχύτητας δ_u και θερμοκρασίας δ_T

2.3.2.3 Ο αριθμός Prandtl

Αριθμός *Prandtl* δείχνει το σχετικό πάχος του οριακού στρώματος ταχύτητας και του οριακού στρώματος θερμοκρασίας. Είναι αδιάστατος αριθμός και ορίζεται ως εξής (Απόστολος Πολυζάκης- Σταμάτης Ζώρας- Κων/νος Παπαγεωργίου, Μετάδοση Θερμότητας και Συσκευές Διεργασιών):

$$Pr = \frac{\text{μοριακή διαχυτότητα ορμής}}{\text{μοριακή διαχυτότητα θερμότητας}} = \frac{\nu}{a} \quad (61)$$

όπου ν το κινηματικό ιξώδες και a η θερμική διαχυτότητα που ορίζεται ως: $a = \frac{k}{\rho c}$.

Επομένως:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{k}{\rho c}} = \frac{\mu c}{k} \quad (62)$$

όπου ν το δυναμικό ιξώδες, c η ειδική θερμότητα και k η θερμική αγωγιμότητα του υλικού.

Το σημείο που αποκαθίστανται οι πλήρως ανεπτυγμένες υδροδυναμικές συνθήκες, άσχετα με το είδος της ροής, ονομάζεται υδροδυναμικό μεταβατικό μήκος (x_v) και εκτιμάται ως εξής:

■ Για στρωτή ροή:

$$\frac{x_v}{D} \approx 0,05 Re_D \quad (63)$$

■ Ενώ για τυρβώδη ροή:

$$\frac{x_v}{D} > 10 \quad (64)$$

Αντίστοιχα για το θερμικό μεταβατικό (x_t) μήκος, στο οποίο μεταβαίνουμε από την θερμικά μεταβατική περιοχή στη θερμικά πλήρως ανεπτυγμένη ροή ισχύουν (*Παπασιώτη Νυμφοδόρα, Φαινόμενα μεταφοράς II*):

■ Για στρωτή ροή:

$$\frac{x_t}{D} \approx 0,05 Re_D \cdot Pr \quad (65)$$

■ Ενώ για τυρβώδη ροή:

$$\frac{x_t}{D} \approx 10 \quad (66)$$

Για να μελετηθεί το θερμικό οριακό στρώμα πρέπει να καθοριστεί μία μέση θερμοκρασία T_m , αντίστοιχη με τη μέση ταχύτητα του υδροδυναμικού οριακού στρώματος. Η μέση θερμοκρασία ορίζεται ως μια σταθερή τιμή, που αν επικρατούσε στην εν λόγω διατομή του αγωγού θα διερχόταν το ίδιο ποσό θερμικής ενέργειας στη μονάδα του χρόνου και υπολογίζεται όπως φαίνεται παρακάτω:

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_v T dA}{\dot{m} c_v} \quad (67)$$

όπου:

- ρ η πυκνότητα του ρευστού,
- u η ταχύτητα,
- c_v η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο,
- T η θερμοκρασία
- \dot{m} η παροχή της μάζας

Βάση τώρα της μέσης θερμοκρασίας, ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας εκφράζεται από τον νόμο ψύξης του Νεύτωνα όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_m) \quad (68)$$

όπου:

- h : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, ο οποίος δεν αποτελεί ιδιότητα του ρευστού και προσδιορίζεται πειραματικά. Εξαρτάται από όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συναγωγή της θερμότητας, όπως η γεωμετρία της επιφάνειας, η φύση της κίνησης, η ταχύτητα, καθώς επίσης και οι ιδιότητες του ρευστού.
- Ατο εμβαδόν της επιφάνειας διαμέσου της οποίας πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας,
- T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος
- Και T_∞ η θερμοκρασία της κύριας μάζας του ρευστού.

2.3.3 Θερμική ακτινοβολία

Η θερμική ακτινοβολία είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα, λόγω της θερμοκρασίας του. Μπορεί να πραγματοποιείται εξίσου από στερεά, υγρά και αέρια σώματα. Ανεξάρτητα από την κατάσταση της ύλης, η εκπομπή ακτινοβολίας μπορεί να αποδοθεί σε αλλαγές των τροχιών των ηλεκτρονίων των ατόμων ή μορίων που απαρτίζουν το υλικό. Η ενέργεια η οποία ακτινοβολείται μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα (φωτόνια). Ενώ για την μεταφορά θερμότητας με αγωγή ή συναγωγή απαιτείται η παρουσία κάποιου υλικού μέσου, για την μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία δεν είναι απαραίτητο. Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι περισσότερο αποτελεσματική στο κενό.

Η μετάδοση της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο, καθώς η κατάσταση της ακτινοβολίας σε συγκεκριμένο χρόνο και σε συγκεκριμένο σημείο του υλικού δε μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα απλό διάνυσμα, όπως στην περίπτωση της αγωγής.

Όλες οι ακτίνες που περνούν σε μια δεδομένη στιγμή από το ίδιο σημείο του υλικού είναι εντελώς ανεξάρτητες η μια από την άλλη, και για να καθορίσουμε συνολικά την κατάσταση της ακτινοβολίας η ένταση της ακτινοβολίας πρέπει να είναι γνωστή σε όλες τις κατευθύνσεις, που είναι άπειρες σε αριθμό.

Παρ' όλα αυτά κάθε επιφάνεια σώματος θερμοκρασίας T_s εκπέμπει θερμότητα μέσω ακτινοβολίας η οποία αποδίδεται σε ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο. Το ανώτατο όριο της εκπεμπόμενης ισχύος δίνεται από το νόμο *Stefan- Boltzmann*:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (69)$$

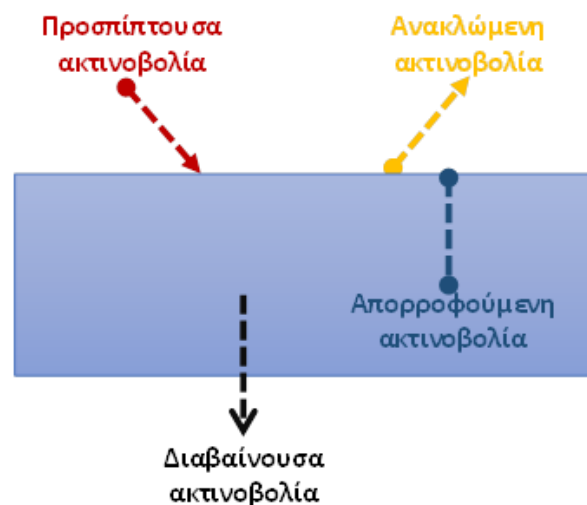
όπου σ είναι η σταθερά *Stefan- Boltzmann*.

Η παραπάνω σχέση αναφέρεται όμως στην ιδανική περίπτωση που έχουμε ένα μέλαν σώμα, δηλαδή απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του και εκπέμπει χωρίς απώλειες. Στην πραγματικότητα όμως εκπέμπεται ένα ποσοστό της ακτινοβολίας που θα εξέπεμπε ένα μελανό σώμα. Ως εκ τούτου η σχέση που αποδίδει την πραγματική ισχύ που εκπέμπεται από ένα σώμα είναι:

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (70)$$

όπου ε είναι ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας και είναι εξαρτώμενος από το υλικό και την ποιότητα της επιφάνειας. Οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι από 0 έως 1.

Ο λόγος, λοιπόν, που η πραγματική ισχύς είναι ποσοστό της ισχύος που θα εκπεμπούταν ιδανικά είναι ότι μέρος αυτής της ενέργειας απορροφάται από το σώμα, ένα άλλο μέρος της ανακλάται, και το υπόλοιπο διαβαίνει μέσα από το σώμα και τέλος εξέρχεται από αυτό.



Εικόνα 14 Ιδιότητες ακτινοβολίας

Οπότε γενικά μπορούμε να πούμε ότι το καθαρό ποσό θερμότητας στη μονάδα του χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας είναι (Κουμπογιάννης Δημήτριος, Συνοπτικές σημειώσεις ακτινοβολίας):

$$\dot{Q} = \frac{\varepsilon A}{(1 - \varepsilon)} (E_b - J) \quad (71)$$

όπου A η επιφάνεια του εμβαδού και J η ακτινοβολία που φεύγει από την επιφάνεια λόγω της εκπομπής και της ανάκλασης και ορίζεται ως το άθροισμα αυτών ($J = \varepsilon E_b + \rho G$, με ρ το συντελεστή ανάκλασης και G την ισχύ ανάκλασης).

Στην παρούσα εργασία δε θα εμβαθύνουμε περαιτέρω στις διάφορες περιπτώσεις συναλλαγής θερμότητας μη μελανών σωμάτων μέσω της θερμικής ακτινοβολίας διότι τόσο στη μελέτη του αισθητήρα όσο και στην προσομοίωση της αρχής λειτουργίας του δε μας απασχόλησε ως μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας.

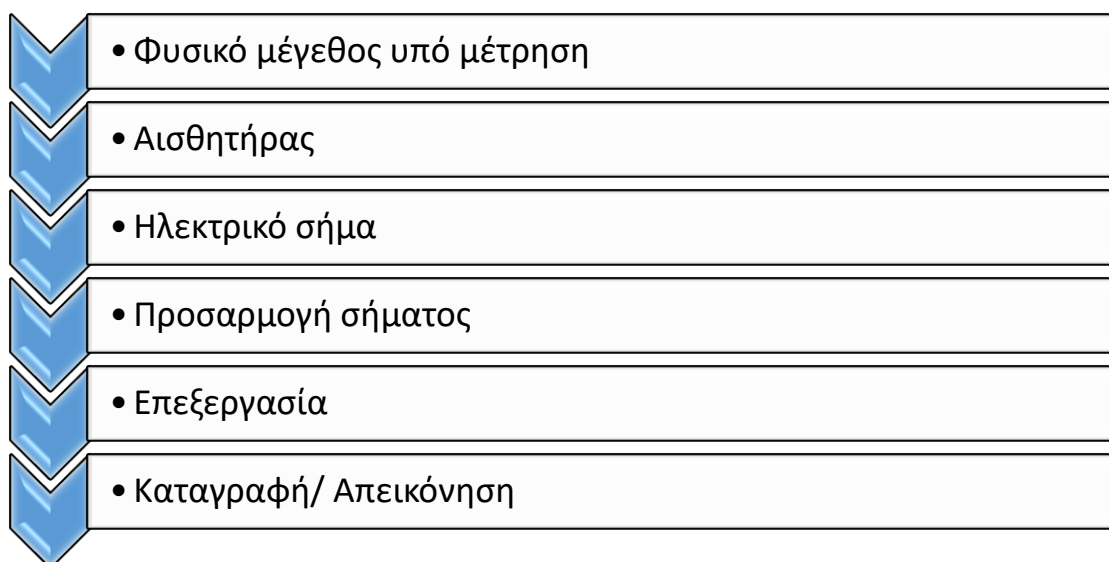
Κεφάλαιο 3: Θερμικοί αισθητήρες ροής

3.1 Περίληψη

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούν κάποιοι ορισμοί σχετικά με τους αισθητήρες και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς θα γίνει και περιγραφή ενός αισθητήρα θερμικής αντίστασης, πάνω στην αρχή λειτουργίας του οποίου βασίστηκαν οι προσομοιώσεις για τη μελέτη αλλά και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του.

3.2 Δομή λειτουργίας συστημάτων μέτρησης

Για να πραγματοποιηθεί μία μέτρηση μέσω ενός μετρητικού συστήματος υπάρχουν συγκεκριμένα στάδια τα οποία ακολουθούνται. Αυτά παρουσιάζονται περιληπτικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1 Στάδια μέτρησης μέσω ενός μετρητικού συστήματος

3.3 Είδη συστημάτων μέτρησης

Τα συστήματα μέτρησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση κάποια κριτήρια όπως αυτά περιγράφονται παρακάτω:

1. Ενεργά και παθητικά συστήματα μέτρησης:
 - Ενεργά: η έξοδος λαμβάνεται στη μορφή τάσης ή ρεύματος χωρίς οποιαδήποτε τροφοδοσία από εξωτερική πηγή.
 - Παθητικά: η έξοδος αποκτάται με την αλλαγή των φυσικών ιδιοτήτων (αντίσταση, επαγωγή και χωρητικότητα) του υλικού επομένως χρειάζονται τροφοδοσία από εξωτερική πηγή.

2. Χρονομεταβλητά και χρονικά αμετάβλητα συστήματα μέτρησης:
 - Χρονομεταβλητά: η χρονική διάρκεια επίδρασης της διέγερσης επηρεάζει την απόκριση του συστήματος.
 - Χρονικά αμετάβλητά: η χρονική διάρκεια επίδρασης της διέγερσης δεν επηρεάζει την απόκριση του συστήματος.
3. Στατικά και Δυναμικά συστήματα μέτρησης:
 - Στατικά: φέρουν στη δομή τους στοιχεία που δεν αποθηκεύουν ενέργεια (π.χ. αντιστάτες). Δεν υπάρχει χρονική καθυστέρηση στην έξοδο σε σχέση με το σήμα διέγερσης.
 - Δυναμικά: φέρουν στη δομή τους στοιχεία που αποθηκεύουν ενέργεια (π.χ. ελατήρια, πυκνωτές). Υπάρχει χρονική καθυστέρηση στην έξοδο σε σχέση με το σήμα διέγερσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αρχικές συνθήκες και η μεταβατική κατάσταση στην έξοδο του συστήματος εκφράζει τη δυναμική συμπεριφορά του ως προς την απόκριση του στη διέγερση.
4. Συνεχή και διακριτά συστήματα μέτρησης:
 - Συνεχή: Η τιμή του μετρήσιμου μεγέθους προσδιορίζεται σε πραγματικό χρόνο (π.χ. μέτρηση πίεσης λαδιού σε εναλλάκτη θερμότητας με αναλογικό μανόμετρο).
 - Διακριτά: Η τιμή του μετρήσιμου μεγέθους προσδιορίζεται σε διακριτό χρόνο (π.χ. δειγματοληπτική μέτρηση παραμέτρων λειτουργίας εργαστηριακής κλίνης κινητήρα DIESEL).

3.4 Κλίμακες μεγεθών

Ανάλογα με το μέγεθος αυτού που θέλουμε να μετρήσουμε υπάρχουν και οι αντίστοιχες κλίμακες μεγεθών, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω:

- Μακροκλίμακα: Είναι δομές του μακρόκοσμου με τάξεις μεγέθους σχετικές με τη μέση ανθρώπινη δραστηριότητα. Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας της επικοινωνίας είναι αναγκαία η μετάβαση στη μακροκλίμακα ώστε να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του σήματος του αισθητήρα και του ανθρώπου.
- Μικροκλίμακα: Διατάξεις της τάξης μερικών δεκάδων μικρόμετρων (μm). Στην κατηγορία ανήκουν τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (*MicroElectroMechanicalSystems- MEMS*).
- Νανοκλίμακα: Δομές με χαρακτηριστική διάσταση νανόμετρων (nm). Οι ιδιότητες των νανοϋλικών και τα φαινόμενα που παρατηρούνται είναι σημαντικά διαφοροποιημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα των μακροδομών.

3.5 Ορισμός αισθητήρα

Αισθητήρας ονομάζεται μία συσκευή που ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος (ερέθισμα) και παράγει από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο ως ηλεκτρικό σήμα. Αποτελεί συνήθως μέρος ενός συστήματος μέτρησης.

3.6 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Οι αισθητήρες δεν είναι ιδανικοί και ως εκ τούτου το σήμα εξόδου τους δεν είναι γραμμικά ανάλογο με την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Οι αποκλίσεις αυτές δημιουργούν σφάλματα στη μέτρηση, και για αυτό λαμβάνονται υπόψη κάποια χαρακτηριστικά αισθητήρων. Μερικά από αυτά είναι συστηματικά (π.χ. βαθμονόμηση) και άλλα τυχαία που παραδείγματος χάριν οφείλονται στο περιβάλλον (βλ. θόρυβος). Τα συστηματικά μπορούν πολλές φορές να αντισταθμιστούν με διάφορες τεχνικές (π.χ. αλλαγή βαθμονόμησης), αντίθετα όμως τα τυχαία σφάλματα δύσκολα αντιμετωπίζονται. Παρακάτω ακολουθούν τα χαρακτηριστικά αυτά, μέσω των οποίων μας δίνεται μία εικόνα του σφάλματος του αισθητήρα:

1. Εύρος (*measurement range*): Τα όρια στα οποία η συσκευή λειτουργεί αξιόπιστα.
2. Ακρίβεια (*accuracy*): Η διαφορά που παρουσιάζει το σήμα εξόδου του αισθητήρα σε σχέση με την πραγματική τιμή.

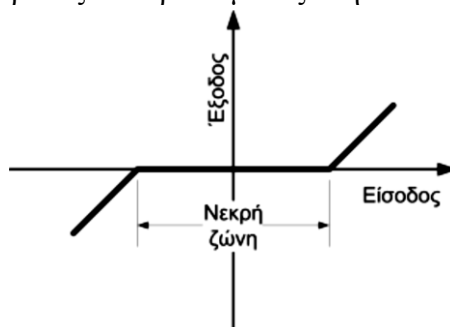
$$e_{\text{res}} = \frac{\text{Μετρούμενη τιμή} - \text{Πραγματική τιμή}}{\text{Πραγματική τιμή}} \quad (72)$$

3. Ανοχή (*tolerance*): Το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να δημιουργήσει ο αισθητήρας.
4. Διακριτική ικανότητα (*resolution*): Η διακριτική ικανότητα ορίζεται ως η ελάχιστη ανιχνεύσιμη μεταβολή του μετρήσιμου μεγέθους που μπορεί να ανιχνευτεί από τον αισθητήρα.
5. Ευαισθησία (*sensitivity*): ορίζεται ως το μέτρο της μεταβολής της εξόδου ενός αισθητήρα για μια δεδομένη μεταβολή του μετρήσιμου μεγέθους.

$$S = \left. \frac{dV}{ds} \right|_{s=s_0} \quad (73)$$

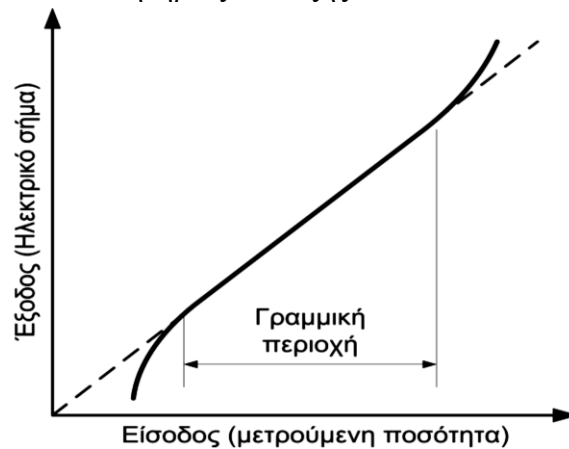
όπου ds είναι η μεταβολή στην τιμή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους και dV η αντίστοιχη μεταβολή στην έξοδο του αισθητήρα.

6. Βαθμονόμηση (*calibration*): Η βαθμολόγηση της κλίμακας σε μονάδες.
7. Νεκρή ζώνη (*dead band zone*): συνήθως αποκαλείται η περιοχή μετρήσεων όπου δεν αποκρίνεται στις μεταβολές του ερεθίσματος στην είσοδο του.



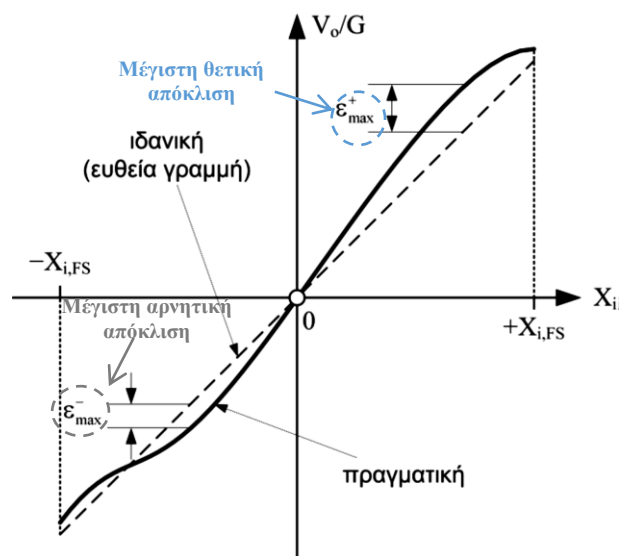
Εικόνα 15 Γραφική αναπαράσταση νεκρής ζώνης αισθητήρα

8. Γραμμικότητα (*Linearity*): Ο βαθμός στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου προσεγγίζει ευθεία ως προς την είσοδο του αισθητήρα. Αποτελεί επιθυμητό χαρακτηριστικό κάθε αισθητήριας διάταξης.



Εικόνα 16 Γραφική αναπαράσταση γραμμικότητας αισθητήρα

9. Μη γραμμικότητα (*Non linearity*): Ορίζεται ως η απόκλιση της πραγματικής χαρακτηριστικής καμπύλης του αισθητήρα με την ιδανική γραμμική συνάρτηση μεταφοράς.

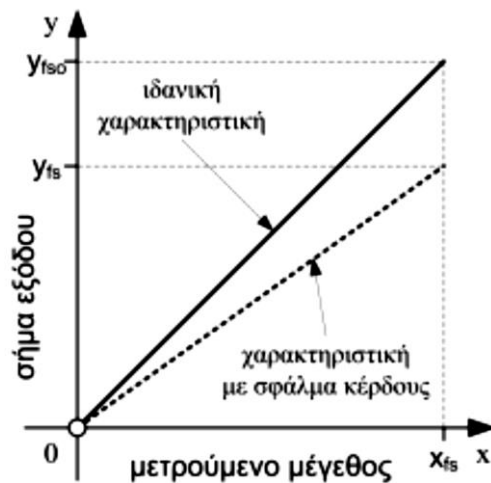


Εικόνα 17 Γραφική αναπαράσταση μη- γραμμικότητας αισθητήρα

10. Ευστάθεια (*stability*): Η μεταβολή της εξόδου σε μεγάλη χρονική περίοδο, χωρίς μεταβολή της εισόδου και των συνθηκών.
11. Υστέρηση (*lag*): το φαινόμενο κατά το οποίο το σήμα εξόδου του αισθητήρα δεν επιστρέφει στην ίδια τιμή όταν το ερέθισμα εισόδου υπόκειται σε παλινδρόμηση μεταξύ δύο σταθερών τιμών.
12. Επαναληψιμότητα (*repeatability*): Το εύρος τιμών στην έξοδο του αισθητήρα για το ίδιο ερέθισμα υπό πανομοιότυπες συνθήκες λειτουργίας.
13. Ολίσθηση (*drift*): αποκαλείται η μεταβολή του σήματος εξόδου για σταθερή τιμή του μεγέθους υπό μέτρηση. Διακρίνεται σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη

- Βραχυπρόθεσμη: Συνήθως οφείλεται σε παράγοντες όπως η μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας (π.χ. μεταβολή της θερμοκρασίας, πίεσης κ.α.)
 - Μακροπρόθεσμη: Συνήθως οφείλεται σε αλλοίωση των επιμέρους υλικών στοιχείων του αισθητήρα (π.χ. καταλυτικό υλικό θερμική μόνωση κ.α.)
14. Σφάλμα: Η διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή και τη πραγματική τιμή.
- Σφάλμα κέρδους: Η αλλαγή της κλίσης της ιδανικής συνάρτησης μεταφοράς ενός αισθητήρα οφείλεται συνήθως σε βλάβη φθορά ή κατασκευαστικό λάθος.

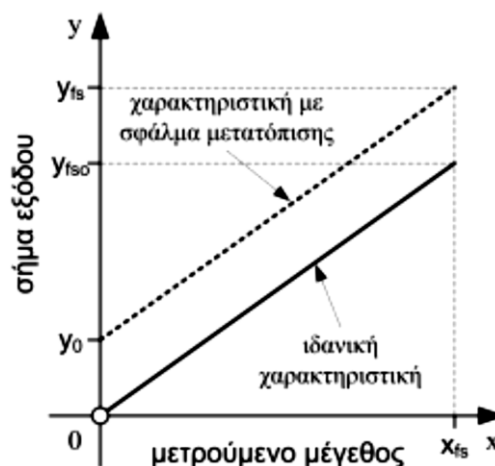
$$e_{\text{gain}} = \frac{y_{fs} - y_{fs_0}}{y_{fs_0}} 100\% \quad (74)$$



Εικόνα 18 Γραφική αναπαράσταση σφάλματος κέρδους

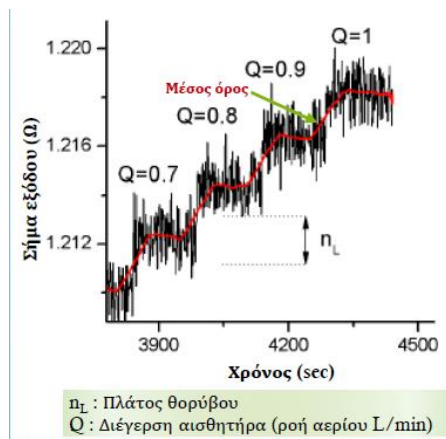
- Σφάλμα μετατόπισης: Η μετατόπιση της χαρακτηριστικής του αισθητήρα χωρίς αλλαγή της κλίσης της οφείλεται συνήθως στις ίδιες αιτίες που προκαλούν το σφάλμα κέρδους.

$$e_{\text{offset}} = \frac{y_0}{y_{fs_0}} 100\% \quad (75)$$



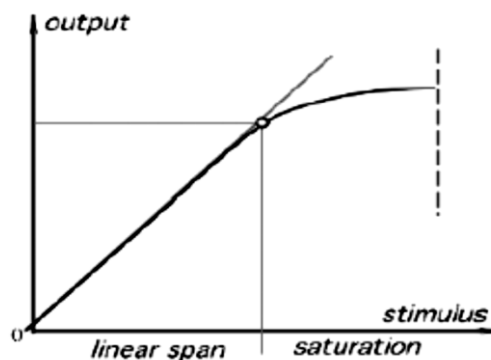
Εικόνα 19 Γραφική αναπαράσταση σφάλματος μετατόπισης

15. Χρόνος λειτουργίας: Ο εκτιμώμενος χρόνος λειτουργίας στα πλαίσια των προδιαγραφών του.
16. Ελάχιστο σήμα κατωφλίου (*threshold signal*): η ελάχιστη τιμή ερεθίσματος εισόδου στην οποία αποκρίνεται ο αισθητήρας.
17. Χρόνος απόκρισης (*time response*): ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να λάβει η έξοδος του αισθητήρα την τελική της τιμή για σταθερή διέγερση εισόδου.
18. Ταχύτητα απόκρισης (*response time*): Η ταχύτητα με την οποία ο αισθητήρας ανταποκρίνεται στις μεταβολές του μετρούμενου μεγέθους.
19. Θόρυβος (*noise*): Ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό όλων των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, το οποίο προέρχεται από πολλούς διαφορετικούς λόγους που ποικίλλουν και αποτελεί συνήθως πηγή σφάλματος. Η βασική κατηγοριοποίηση του θορύβου γίνεται με βάση την προέλευσή του:
 - Ενδογενής θόρυβος (*inherent noise*): προκύπτει εντός του κυκλώματος (π.χ. θερμικός θόρυβος ή θόρυβος Nyquist Johnson κ.α.)
 - Μεταδιδόμενος θόρυβος (*transmitted noise*): αναφέρεται σε θόρυβο που μεταδίδεται στο κύκλωμα από εξωτερικές πηγές (π.χ. ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές).



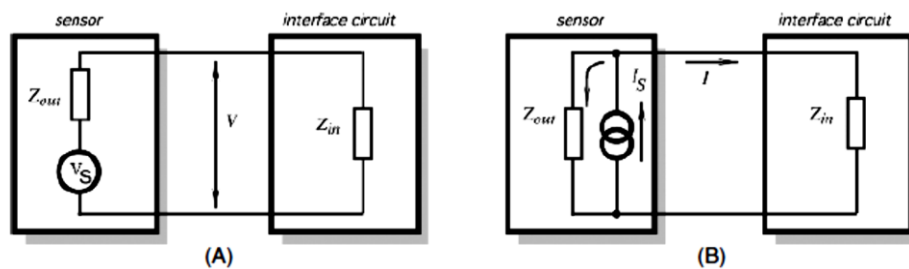
Εικόνα 20 Σήμα εξόδου αισθητήρα με έντονο θόρυβο

20. Κορεσμός (*saturation*): Εμφανής εκτός της γραμμικής περιοχής της χαρακτηριστικής καμπύλης του αισθητήρα.



Εικόνα 21 Γραφική αναπαράσταση κορεσμού αισθητήρα

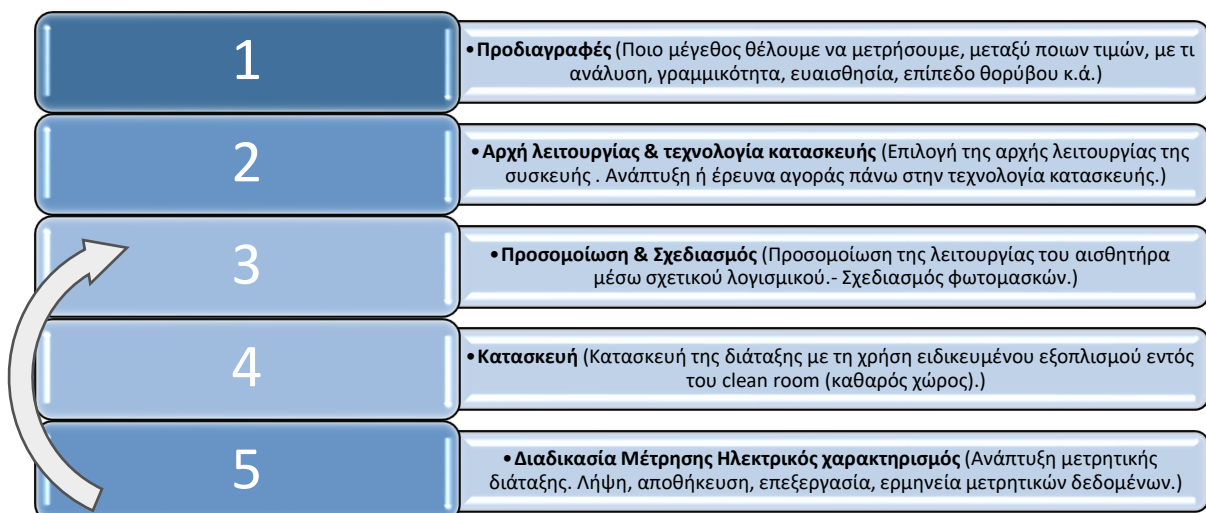
21. Αξιοπιστία (*reliability*): Η ικανότητα της διάταξης να λειτουργεί χωρίς σφάλματα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα εύρυθμης λειτουργίας ή ένας ελάχιστος αριθμός μετρήσεων.
22. Σύνθετη αντίσταση εξόδου (*Output impedance Z_{out}*): Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την τιμή της εμπέδησης σύνθετης αντίστασης εξόδου του αισθητήρα για τη σωστή διασύνδεσή του στο υπόλοιπο κύκλωμα. Ανάλογα με τον τύπο του σήματος εξόδου η τιμή της σύνθετης αντίστασης εξόδου Z_{out} πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στην αντίσταση εισόδου του μετρητικού συστήματος συνεπώς:
- Μεγάλη τιμή στην περίπτωση διασύνδεσης του αισθητήρα ως πηγή τάσης (A).
 - Μικρή τιμή στην περίπτωση διασύνδεσης του αισθητήρα ως πηγή ρεύματος (B).



Εικόνα 22 Διάταξη σύνδεσης ανάλογα την τιμή εμπέδησης

3.7 Διαδικασία ανάπτυξης αισθητήρων

Για το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός αισθητήρα χρειάζεται πρώτα μία μελέτη έπειτα ακολουθεί η κατασκευή και τέλος η δοκιμή του. Στην περίπτωση μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων στη δοκιμή, θα πρέπει να επιστρέψουμε στο στάδιο της μελέτης. Τα βήματα που μόλις περιγράφηκαν φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα:

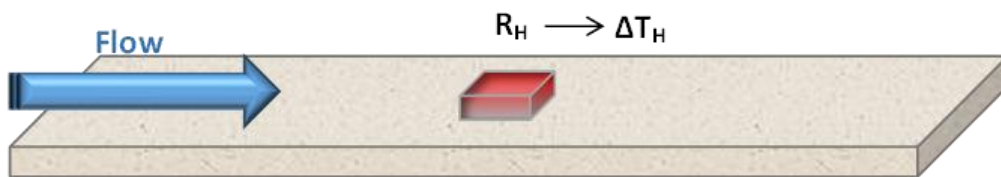


Σχήμα 2 Βήματα ανάπτυξης αισθητήρα

3.7.1 Θερμικοί αισθητήρες μέτρησης ροής

3.7.1.1 Αισθητήρες τύπου Θερμού νήματος (Hot-wire)

Η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα θερμού νήματος μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Στην επιφάνεια κατάλληλου υποστρώματος (πλακέτα) τοποθετείται κατάλληλο μεταλλικό στοιχείο που λειτουργεί ως αντιστάτης (θερμαντήρας – heater). Ο θερμαντήρας διαρρέεται από ρεύμα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κατάλληλου θερμοκρασιακού πεδίου. Με την κίνηση του ρευστού που βρίσκεται σε επαφή με το θερμαντήρα, επέρχεται μια θερμοκρασιακή μεταβολή σε αυτόν ΔT_H λόγω μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής.



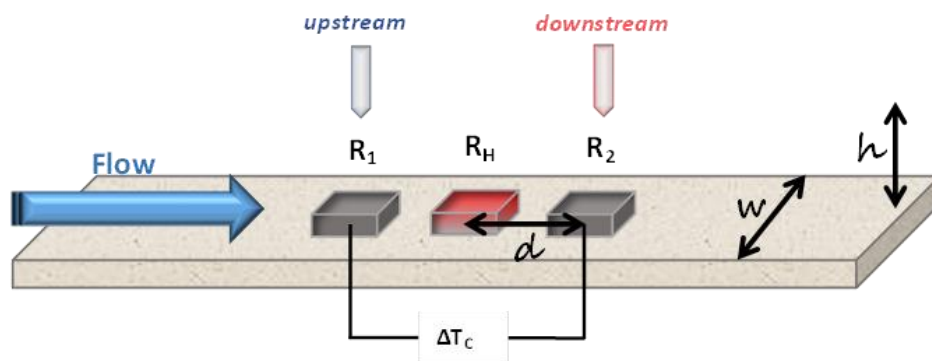
Εικόνα 23 Αισθητήρια δομή με λειτουργία θερμού νήματος

Το σήμα εξόδου του αισθητήρα προκύπτει από την διαφορά στην ωμική αντίσταση του θερμαντήρα χωρίς την ύπαρξη ροής (R_0) και με την ύπαρξη ροής (R) και είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής μεταβολής (ΔT_H):

$$\text{Sensor_signal} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (76)$$

3.7.1.2 Αισθητήρες τύπου Διαφορικής μέτρησης (Calorimetric)

Η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα διαφορικής μέτρησης μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Στην επιφάνεια κατάλληλου υποστρώματος (πλακέτα) τοποθετείται ένα μεταλλικό στοιχείο που αποτελεί τον θερμαντήρα. Υπάρχουν άλλα δύο μεταλλικά, αισθητήρια στοιχεία εκατέρωθεν του θερμαντήρα. Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής συνεπάγεται την ψύξη του αισθητηρίου πριν το θερμαντήρα (*upstream*) και τη θέρμανση του αισθητηρίου μετά το θερμαντήρα (*downstream*). Το σήμα του αισθητήρα στην προκειμένη περίπτωση προέρχεται από τη διαφορά στη θερμοκρασία των δύο αισθητήριων στοιχείων $T_1 - T_2$.



Εικόνα 24 Αισθητήρια δομή με λειτουργία θερμού νήματος

Το σήμα εξόδου του αισθητήρα προκύπτει από την διαφορά στην ωμική αντίσταση του αισθητηρίου πριν το θερμαντήρα (R_1) και του αισθητηρίου μετά το θερμαντήρα (R_2) και είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής μεταβολής (ΔT_H):

$$Sensor_signal = \frac{R_1 - R_{1_0}}{R_{1_0}} - \frac{R_2 - R_{2_0}}{R_{2_0}} \quad (77)$$

Αξίζουν να αναφερθούν κάποια βασικά στοιχεία σε ότι αφορά στη λειτουργία της συγκεκριμένης μεθόδου:

- Η διαφορά θερμοκρασίας ΔT_C οφείλεται στη μετατόπιση της θερμοκρασιακής κατανομής από τη θέση ισορροπίας.
- Παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης χαμηλότερων τιμών ρυθμού ροής, υψηλότερη ευαισθησία, με τίμημα το περιορισμένο φάσμα τιμών για το οποίο είναι σε θέση να παρέχει πληροφορίες, ενώ σημαντικές παραμέτρους αποτελούν:
 - Ρεύμα/Ισχύς στον θερμαντήρα (I_h / P_h)
 - Απόσταση αισθητήριων στοιχείων (d)
 - Ύψος και πλάτος καναλιού (h, w)
 - Υλικά & γεωμετρία κατασκευής

3.7.2 Σύγκριση δομής θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των δύο τρόπων μέτρησης έτσι ώστε να είναι εύκολο να γίνει η σύγκριση μεταξύ τους και να έχουμε μία καθαρότερη εικόνα των δυνατοτήτων τους.

Διαφορική μέτρηση	Θερμό νήμα
Είναι πιο περίπλοκοι λειτουργικά και κατασκευαστικά συγκριτικά με τους αισθητήρες θερμού νήματος	Απλοί κατασκευαστικά αλλά και λειτουργικά
Μικρότερο μετρητικό πεδίο	Μεγαλύτερο μετρητικό πεδίο (άρα μεγαλύτερα βήματα)
Μικρότερος χρόνος απόκρισης	Μεγαλύτερος χρόνος απόκρισης
Υψηλός βαθμός επαναληψιμότητας	
Δεν επηρεάζεται από τυχόν μεταβολές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος	Επηρεάζεται από τυχόν μεταβολές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος
Μεγαλύτερη ακρίβεια	Όχι τόσο καλή ακρίβεια
Δυνατότητα ανίχνευσης μικρότερης ροής	αδυναμία ανίχνευσης μικρότερης ροής
Ανίχνευση φοράς ροής	Δεν ανιχνεύει τη φορά της ροής
Περισσότερος θόρυβος (μπορούν να τοποθετηθούν φίλτρα RC/RLC για τη μείωση του)	Λιγότερος θόρυβος

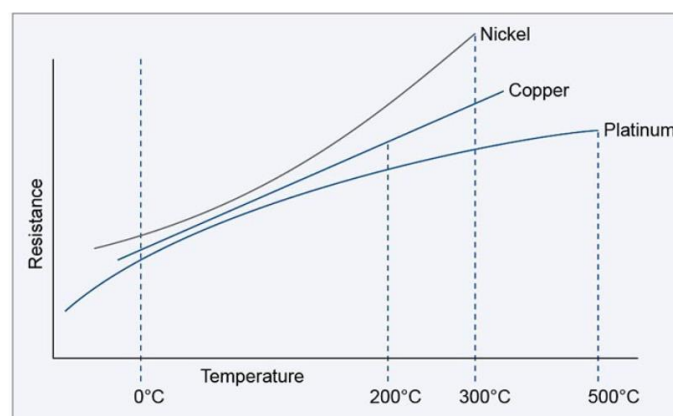
3.8 Τρόποι λειτουργίας θερμικών αισθητήρων ροής (*Modes of operation*)

Υπάρχουν 3 τρόποι λειτουργίας των άνω δομών με βάση την τροφοδοσία τους και το μετρούμενο μέγεθος. Συγκεκριμένα:

- Διατήρηση σταθερού Ρεύματος (*CI mode*)
 - Αποτελεί τον απλούστερο τρόπο διεξαγωγής της μέτρησης.
 - Ο θερμαντήρας τροφοδοτείται συνεχώς με ρεύμα σταθερής έντασης.
 - Στην περίπτωση που ο θερμαντήρας λειτουργεί και ως αισθητήριο στοιχείο (hot wire) το μετρούμενο μέγεθος είναι η μεταβολή της αντίστασής του.
- Διατήρηση σταθερής Θερμοκρασίας (*CT mode*)
 - Η τιμή της θερμοκρασίας του θερμαντήρα διατηρείται σταθερή.
 - Η τιμή της έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας στον θερμαντήρα μεταβάλλεται κατάλληλα ώστε να διατηρηθεί σταθερή η τιμή της αντίστασης του.
 - Το μετρούμενο μέγεθος είναι είτε η τιμή της ισχύος που απορροφάται στον θερμαντήρα είτε εναλλακτικά η τιμή της έντασης του ρεύματος.
- Διατήρηση σταθερής Ισχύος (*CP mode*)
 - Η τιμή της ισχύος στο θερμαντήρα διατηρείται σταθερή.
 - Η τιμή της έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας στο θερμαντήρα μεταβάλλεται κατάλληλα ώστε να διατηρηθεί σταθερή η τιμή της απορροφώμενης ισχύος.
 - Το μετρούμενο μέγεθος σε αυτή την περίπτωση είναι είτε η τιμή της αντίστασης του θερμαντήρα είτε η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος.

3.9 Αισθητήρες ανίχνευσης θερμοκρασίας (RTDs)

Ο RTD (*Resistance Temperature Detector*) είναι ένα αισθητήριο στοιχείο, του οποίου η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του. Η αντίσταση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του αισθητήρα. Η σχέση αντίστασης έναντι θερμοκρασίας είναι γνωστή οπότε έχοντας την τιμή της αντίστασης μπορεί να βρεθεί η θερμοκρασία.



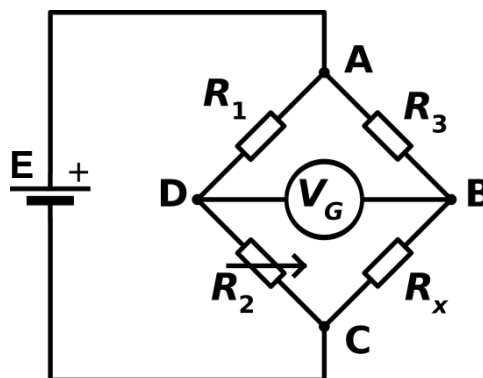
Εικόνα 25 Διάγραμμα αντίστασης- θερμοκρασίας PT100 για διάφορα υλικά (Πηγή: *Understanding RTDs-* <https://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/understanding-rtds.html>)

Το RTD είναι μια παθητική συσκευή. Δεν παράγει έξοδο από μόνη της. Χρησιμοποιούνται εξωτερικές ηλεκτρονικές συσκευές για τη μέτρηση της αντίστασης του αισθητήρα περνώντας ένα μικρό ηλεκτρικό ρεύμα από τον αισθητήρα για να δημιουργηθεί αντίστοιχα μια τάση. Συνήθως η ένταση του ρεύματος είναι 1 mA έως 5 mA χωρίς κίνδυνο αυτοθέρμανσης.

Επομένως η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι θέμα μέτρησης της αντίστασης. Να σημειωθεί ότι κατά τη μέτρηση της αντίστασης του στοιχείου ανίχνευσης, όλοι οι εξωτερικοί παράγοντες πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ή να αντισταθμιστούν, προκειμένου να επιτευχθεί ακριβής ένδειξη.

3.9.1 Γέφυρα Wheatstone

Η γέφυρα *Wheatstone* είναι ένα απλό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μίας άγνωστης αντίστασης (βλ. Εικόνα 26). Αποτελείται από τέσσερις αντιστάσεις (R_1, R_2, R_3, R_x), και μία πηγή ρεύματος. Χρησιμοποιείται για τον ακριβή προσδιορισμό αντιστάσεων και την εύρεση σφαλμάτων σε αισθητήριες διατάξεις, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στη μεταβολή αντίστασης του αισθητήριου στοιχείου.



Εικόνα 26 Διάταξη γέφυρας *Wheatstone*

Η εύρεση της άγνωστης αντίστασης πραγματοποιείται όταν το κύκλωμα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή δε διαρρέεται από ρεύμα ($I = 0$). Στην περίπτωση αυτή η διαφορά τάσης μεταξύ των σημείων D και B ισούται με 0 ($\Delta V = 0$). Για να ισχύει αυτό θα πρέπει η διαφορά τάσης μεταξύ των σημείων D και A, καθώς επίσης κι η διαφορά τάσης μεταξύ των D και C να είναι ίσες ($V_{DA} = V_{DC}$). Το ίδιο πρέπει να ισχύει και για τις διαφορές δυναμικού μεταξύ των B και A αλλά και B και C ($V_{BA} = V_{BC}$).

Όταν το κύκλωμα είναι σε κατάσταση ισορροπίας ισχύουν τα παρακάτω:

$$I_1 = I_2 \text{ και } I_3 = I_x \quad (78)$$

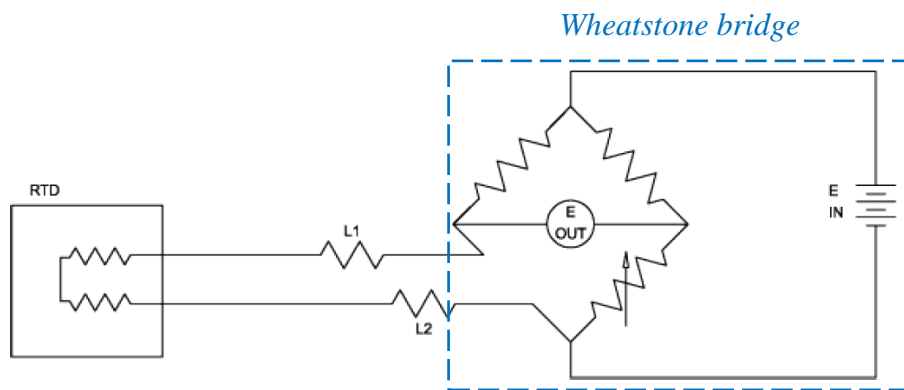
Από το νόμο του Ohm: $I = VR$, έχουμε:

$$VR_1 = VR_2 \text{ και } VR_3 = VR_x \quad (79)$$

Διαιρώντας την εξίσωση $VR_1 = VR_3$ με την εξίσωση $VR_2 = VR_x$ έχουμε:

$$\frac{VR_1}{VR_2} = \frac{VR_3}{VR_x} \rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \rightarrow R_x = R_2 \frac{R_3}{R_1} \quad (80)$$

Οπότε υπολογίζεται και η ζητούμενη αντίσταση. Στην περίπτωση μέτρησης μέσω στοιχείου RTD, η άγνωστη αντίσταση είναι η το ίδιο το RTD (βλ. Εικόνα 27).



Εικόνα 27 Απεικόνιση διάταξης αισθητήρα RTD ενσωματωμένο σε γέφυρα Wheatstone

Για οποιαδήποτε άλλη κατάσταση όπου $\Delta V \neq 0$ ισχύει ότι:

$$\Delta V = E \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right] \quad (81)$$

3.9.2 Βασικές ιδιότητες RTD αισθητήρων

Αρχικά πρέπει να αναφέρουμε ότι για μεταλλικούς αντιστάτες ($0 < T < 661^\circ \text{ C}$), ισχύει η εξίσωση *Callendar-Van Dusen*, μέσω της οποίας υπολογίζεται η αντίσταση του αισθητήριου στοιχείου:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \quad (82)$$

όπου: $A = \alpha + \frac{\alpha \cdot \delta}{100}$ και $B = \frac{-\alpha \cdot \delta}{100^2}$

Με: $\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 + R_0}$ και $\delta = \frac{R_0[1 + \alpha(260)] - R_{200}}{4.16 R_0 \cdot \alpha}$

Οπότε καταλήγουμε:

$$R(T) \approx R_0[1 + \alpha_T(T - T_0)] \quad (83)$$

όπου α_T : γραμμικός θερμικός συντελεστής της αντίστασης (*linear thermal coefficient of resistance– TCR*)

Όσον αφορά τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες τύπου αντίστασης, τα πιο συνήθη είναι ο χαλκός (*Cu*), το νικέλιο (*Ni*) και ο λευκόχρυσος (*Pt*). Ωστόσο σε βιομηχανικές εφαρμογές (βλ. ναυτική μηχανολογία) συνήθως γίνεται χρήση αισθητηρίων αντίστασης λευκόχρυσου (*Pt*).

Υπάρχουν δύο διαθέσιμα βιομηχανικά πρότυπα:

- PT 100 (Αντίσταση 100 *Ohm* στους 0° C και 1385 *Ohm* στους 100° C)
- PT 1000 (Αντίσταση 1000 *Ohm* στους 0° C και 1385 *Ohm* στους 100° C)

Επίσης υπάρχουν τρεις τυπικές κατηγορίες ανοχής για DIN RTD. Αυτές οι ανοχές ορίζονται ως εξής:

- *DIN Class A*: $\pm(0.15 + .002 |T|^\circ\text{C})$
- *DIN Class B*: $\pm(0.3 + .005 |T|^\circ\text{C})$
- *DIN Class C*: $\pm(1.2 + .005 |T|^\circ\text{C})$

Τέλος να αναφέρουμε ότι τα αισθητήρια RTDs χαρακτηρίζονται από μεγάλο εύρος μέτρησης, ακρίβεια και γραμμικότητα.

Κεφάλαιο 4: Εύρεση και σχεδιασμός βέλτιστου φορέα

4.1 Περίληψη

Σκοπός του σχεδιασμού διαφορετικών φορέων είναι να βρεθεί η βέλτιστη γεωμετρία κατά την οποία δε δημιουργούνται στροβιλισμοί τοπικά στο σημείο μέτρησης που οφείλονται στη γεωμετρία του φορέα. Ο λόγος είναι ότι τέτοιοι στροβιλισμοί μπορούν να μειώσουν τοπικά την ταχύτητα που μετράμε και ως εκ τούτου οι μετρήσεις του αισθητήρα να μην είναι πραγματικές. Για αυτό το λόγο δοκιμάστηκαν αρκετές παραλλαγές όσον αφορά τη γεωμετρία και το είδος των «στραγγαλισμών».

4.2 Μορφολογία φορέα αισθητήρα

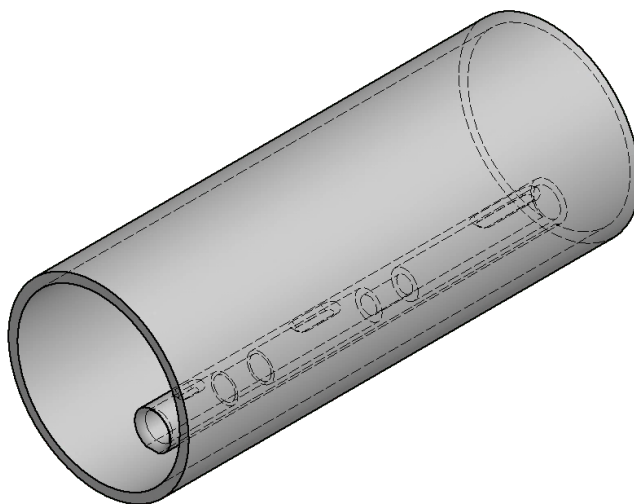
Η φιλοσοφία της σχεδίασης αφορά κυλινδρικό αγωγό διατομής 100 mm και πάχους τοιχώματος 5 mm στο κάτω μέρος του οποίου και υπάρχει αγωγός μικρότερης διατομής, 20 mm και πάχους τοιχώματος 2.5 mm ο οποίος λειτουργεί ως *bypass* «στραγγαλίζοντας» τη ροή σε είτε ένα είτε δύο σημεία.

Οι «στραγγαλισμοί» αυτοί δημιουργούν δύο ή τρία διαμερίσματα- βαθμίδες αντίστοιχα στο κάτω μέρος καθενός εκ των οποίων, θα τοποθετηθεί το αισθητήριο ροής. Οι φορείς των αισθητηρίων στοιχείων έχουν σχεδιαστεί με οπές εξόδου μετά από κάθε «στραγγαλισμό», γεγονός στο οποίο οφείλεται η μείωση της ταχύτητας στην επόμενη βαθμίδα. Ιδανικά ο αισθητήρας κάθε βαθμίδας θα έχει εύρος μέτρησης περίπου 10 m/s και οι ταχύτητες που θα μετρηθούν θα κυμαίνονται περίπου από 0 έως 20 m/s.

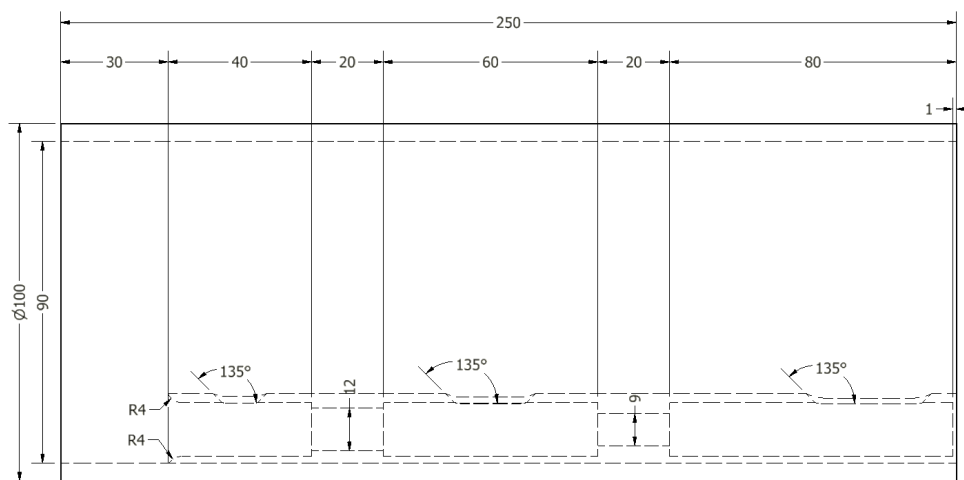
Δοκιμάστηκαν πέντε βασικές παραλλαγές για το φορέα με σκοπό την εύρεση εκείνου του οποίου η γεωμετρία εξαλείφει τους στροβιλισμούς στα σημεία τοποθέτησης των αισθητηρίων. Οι παραλλαγές αυτές περιγράφονται συνοπτικά και παραθέτονται και τα αντίστοιχα σχέδια που πραγματοποιήθηκαν (απαραίτητες όψεις και διαστάσεις) στις ενότητες που ακολουθούν.

4.3 Μορφολογία 1η

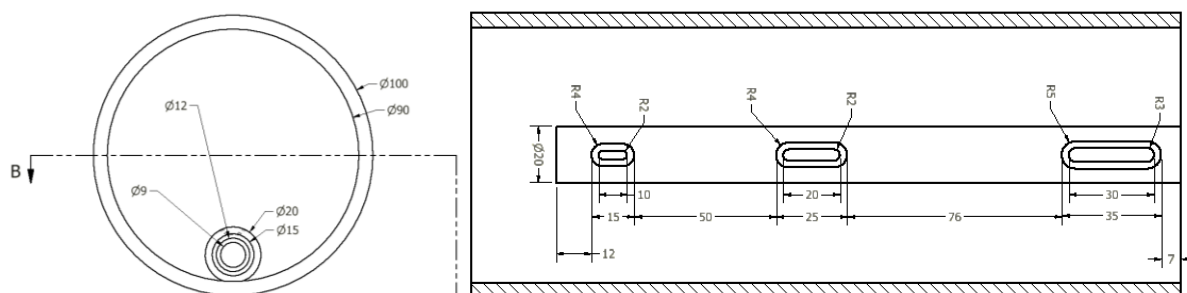
Σύντομη περιγραφή γεωμετρίας: Σωλήνας με ενσωματωμένο αγωγό παράκαμψης (*bypass*) της ροής με δύο «στραγγαλισμούς», απλές κυλινδρικές στενώσεις, τρία διαμερίσματα και τρεις σπές εξόδου του ρευστού.



Εικόνα 28 Μορφολογία 1^η: Προοπτική όψη



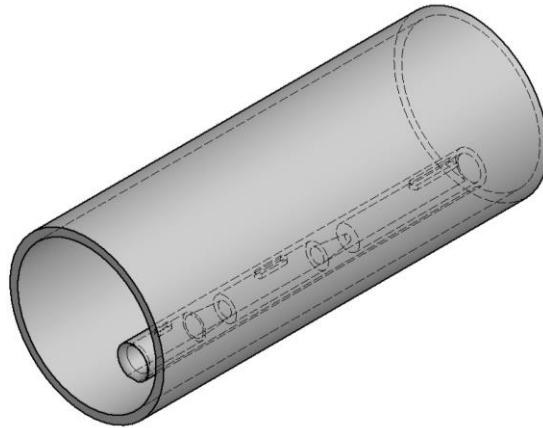
Εικόνα 29 Πρόψη



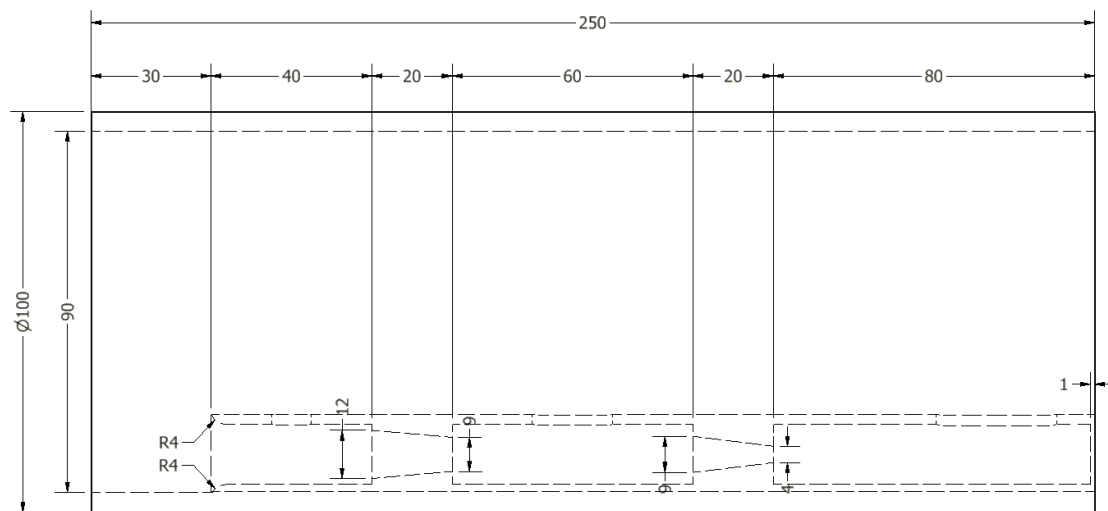
Εικόνα 30 Αριστερά: Πλάγια αριστερή όψη Δεξιά: Άνοψη (Τομή B-B')

4.4 Μορφολογία 2^η

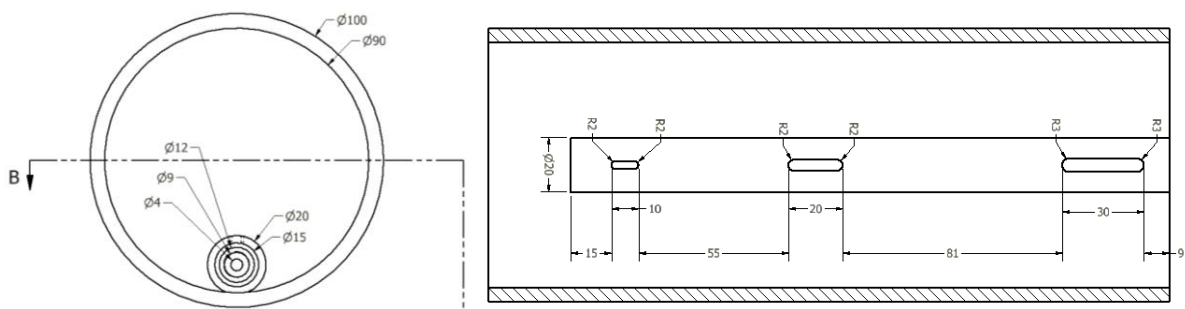
Σύντομη περιγραφή γεωμετρίας: Σωλήνας με ενσωματωμένο αγωγό παράκαμψης (*bypass*) της ροής με δύο «στραγγαλισμούς» κωνικής διατομής με κλίση, τρία διαμερίσματα και τρεις οπές εξόδου του ρευστού.



Εικόνα 31 Μορφολογία 2^η: Προοπτική όψη



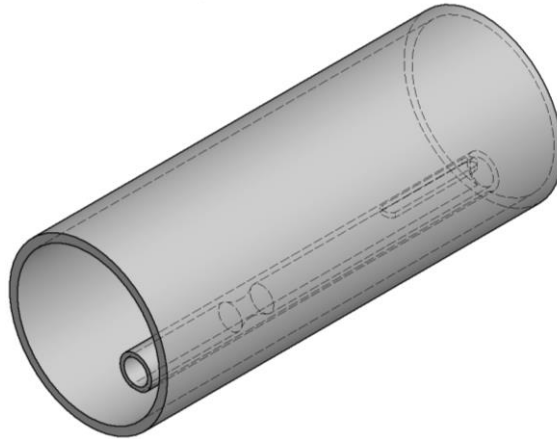
Εικόνα 32 Πρόοψη



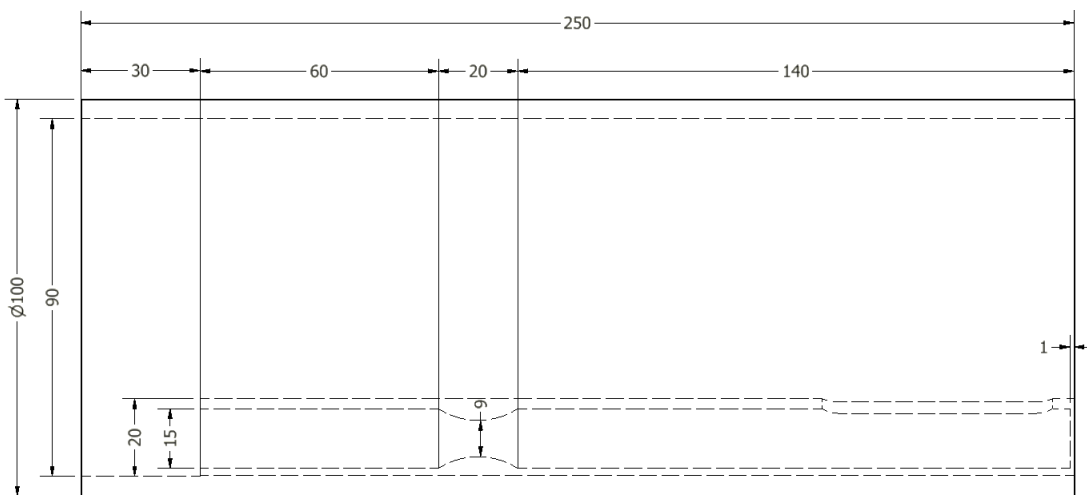
Εικόνα 33 Αριστερά: Πλάγια αριστερή όψη Δεξιά: Άνοψη (Τομή B-B')

4.5 Μορφολογία 3^η

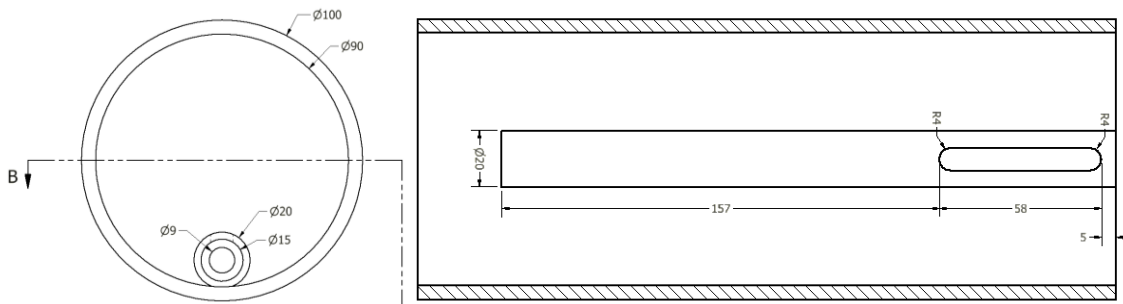
Σύντομη περιγραφή γεωμετρίας: Σωλήνας με ενσωματωμένο αγωγό παράκαμψης (*bypass*) της ροής με ένα «στραγγαλισμό», με ελλειπτική στένωση, δύο διαμερίσματα και μία οπή εξόδου του ρευστού.



Εικόνα 34 Μορφολογία 3^η: Προοπτική όψη



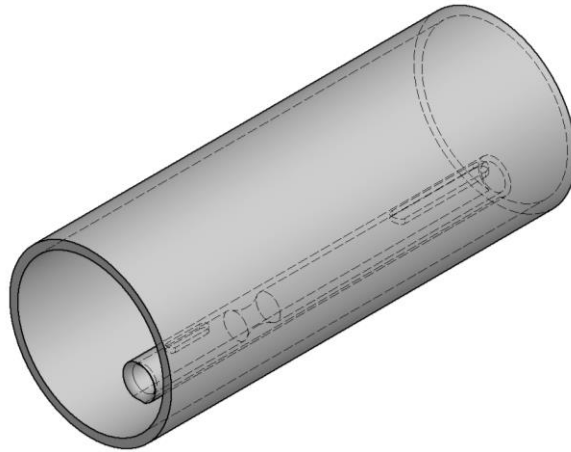
Εικόνα 35 Πρόοψη



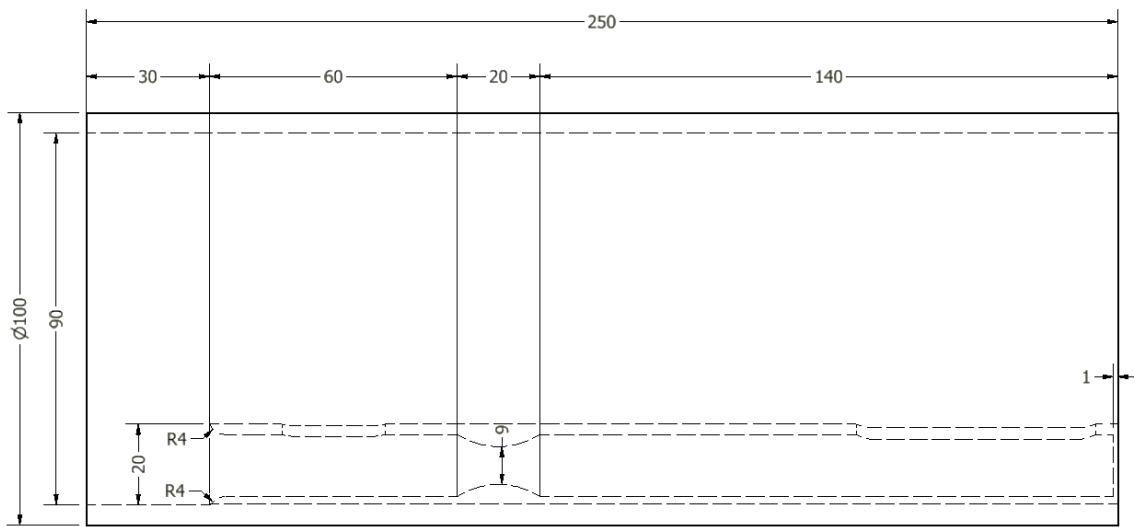
Εικόνα 36 Αριστερά: Πλάγια αριστερή όψη Δεξιά: Άνοψη (Τομή B-B')

4.6 Μορφολογία 4^η

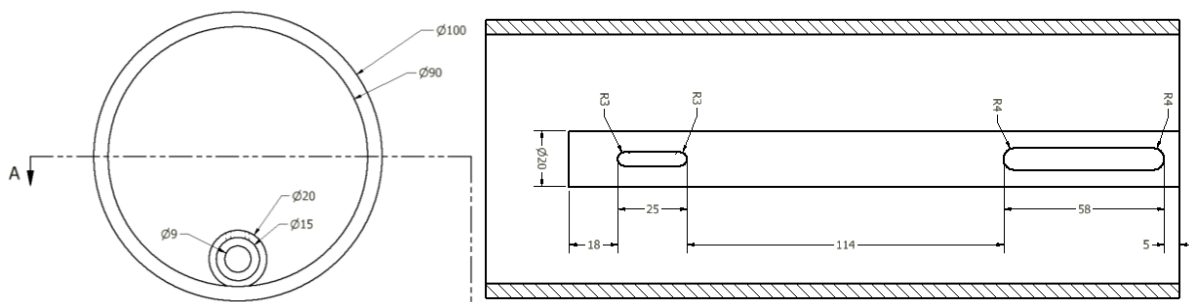
Σύντομη περιγραφή γεωμετρίας: Σωλήνας με ενσωματωμένο αγωγό παράκαμψης (*bypass*) της ροής με ένα «στραγγαλισμό», με ελλειπτική στένωση, δύο διαμερίσματα και δύο οπές εξόδου του ρευστού.



Εικόνα 37 Μορφολογία 4^η: Προοπτική όψη



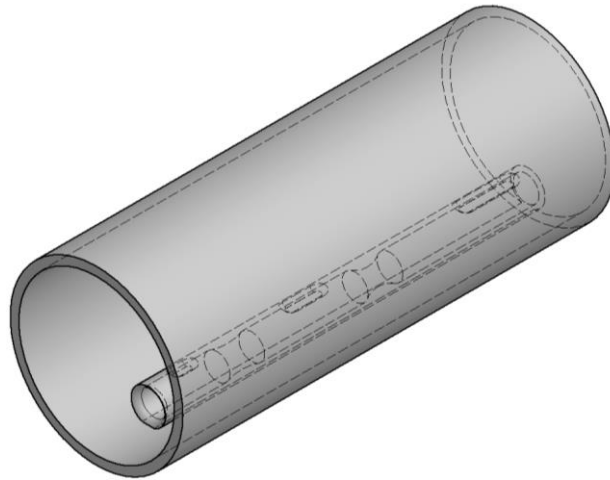
Εικόνα 38 Πρόοψη



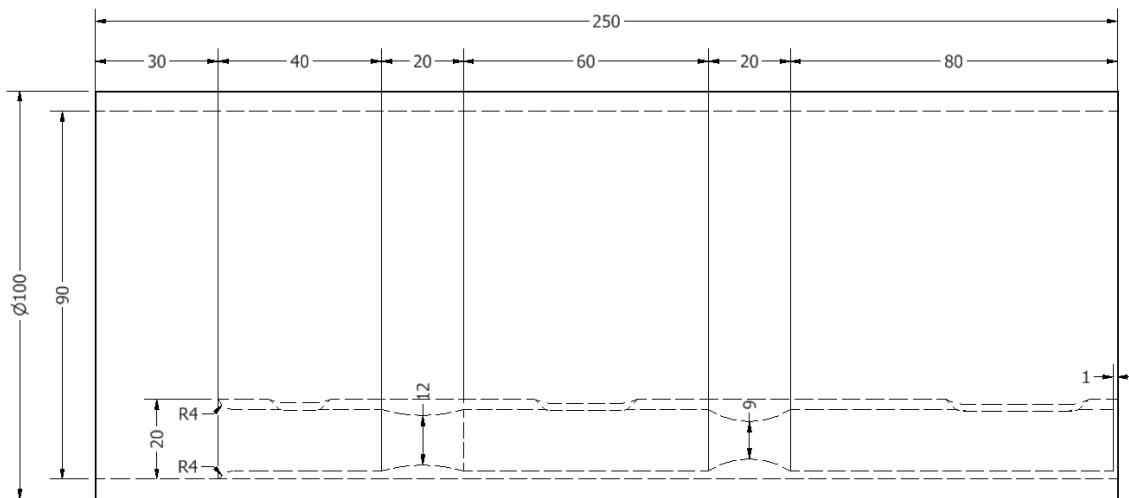
Εικόνα 39 Αριστερά: Πλάγια αριστερή όψη Δεξιά: Άνοψη (Τομή A-A')

4.7 Μορφολογία 5^η

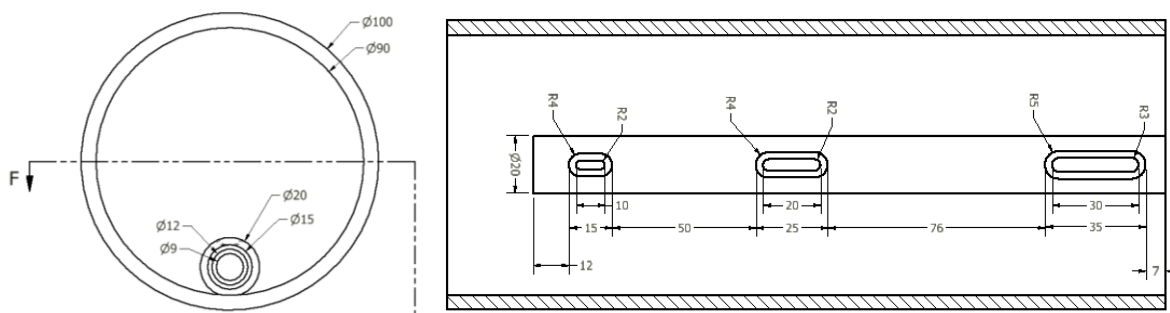
Σύντομη περιγραφή γεωμετρίας: Σωλήνας με ενσωματωμένο αγωγό παράκαμψης (*bypass*) της ροής με δύο «στραγγαλισμούς», με ελλειπτικές στενώσεις, τρία διαμερίσματα και τρεις οπές εξόδου του ρευστού.



Εικόνα 40 Μορφολογία 5^η: Προοπτική όψη



Εικόνα 41 Πρόοψη



Εικόνα 42 Αριστερά: Πλάγια αριστερή όψη Δεξιά: Άνοψη (Τομή F-F')

Κεφάλαιο 5: Χαρακτηρισμός ροής

5.1 Περίληψη

Προτού πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε προσομοίωση για τη μοντελοποίηση της ροής είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά της, ώστε να κάνουμε τις σωστές επιλογές στο πρόγραμμα προσομοιώσεων και τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβή.

5.2 Παροχή εισόδου

Οι προσομοιώσεις που έγιναν αφορούν παροχές από 0-600 kg/h, θεωρώντας ότι ο αισθητήρας θα προσαρμοστεί σε τυπική μηχανή εσωτερικής καύσης σχετικά μικρής υποδύναμης.

(Πηγή: *IVECO N45 MST technical manual*,

<https://www.fptindustrial.com/global/en/engines/off-road/construction/n45>)

Αρχικά για τη μετατροπή της παροχής από [kg/h] σε [m³/s] ισχύει ότι:

$$\dot{v}[\text{m}^3/\text{s}] = \frac{\dot{m}[\text{kg}/\text{h}]}{\rho[\text{kg}/\text{m}^3] \cdot 3600 [\text{s}]} \quad (84)$$

όπου:

- \dot{m} η παροχή σε [kg/h]
- Και ρ η πυκνότητα του αέρα που λαμβάνεται ως 1.164 [kg/m³] σε θερμοκρασία $T = 25^\circ\text{C}$ και πίεση $P = 1 \text{ bar}$

5.3 Υπολογισμός ταχύτητας που αντιστοιχεί στην παροχή εισόδου

Η ταχύτητα υπολογίστηκε μέσω της παροχής ώστε να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν παρακάτω οι παρακάτω (βλ. αριθμό Mach) και να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων:

$$\dot{v}[\text{m}^3/\text{s}] = u[\text{m}/\text{s}] \cdot A[\text{m}^2] \rightarrow u[\text{m}/\text{s}] = \frac{\dot{v}[\text{m}^3/\text{s}]}{A[\text{m}^2]} \quad (85)$$

όπου:

- u η ζητούμενη ταχύτητα σε [m/s]
- Και A το εμβαδόν κυλινδρικής διατομής $A = \pi \cdot r^2 = 0,0071 \text{ m}^2$

5.4 Χαρακτηρισμός ροής σε συμπιεστή και ασυμπίεστη

Πριν πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε προσομοίωση έγινε διάκριση της ροής σε συμπιεστή ή ασυμπίεστη μέσω του αριθμού *Mach*:

$$M = \frac{u[m/s]}{c[m/s]} \quad (86)$$

όπου:

- u η ταχύτητα του ρευστού σε $[m/s]$
- και c η ταχύτητα του ήχου, η οποία για ατμοσφαιρικό αέρα θερμοκρασίας $T = 20^\circ\text{C}$ είναι ίση με $c = 343 [m/s]$.

5.5 Χαρακτηρισμός ροής σε στρωτή και τυρβώδη

Για τη διάκριση της ροής σε στρωτή ή τυρβώδη υπολογίστηκε ο αριθμός *Reynolds*:

$$Re = \frac{\rho[kg/m^3] \cdot u[m/s] \cdot d[m]}{\mu[kg/m \cdot s]} \quad (87)$$

όπου:

- ρ η πυκνότητα του αέρα που λαμβάνεται ως $1,164 [kg/m^3]$ σε θερμοκρασία $T = 25^\circ\text{C}$ και πίεση $P = 1 \text{ bar}$
- u η ταχύτητα του ρευστού σε $[m/s]$
- d η διάμετρος του σωλήνα παράκαμψης που ισούται με $d = 0,015 \text{ m}$
- Και μ το ιξώδες του αέρα στους $T = 20^\circ\text{C}$ είναι ίσο με $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$

5.6 Τελικά χαρακτηριστικά ροής

Θεωρώντας ένα εύρος μέτρησης από 0 έως 600 kg/h και σύμφωνα με τους άνω υπολογισμούς διαμορφώθηκε ο κάτωθι συγκεντρωτικός πίνακας:

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά ροής

\dot{m} [kg/h]	\dot{v} [m ³ /s]	u [m/s]	M [-]	Re [-]	
600	0,1432	20,2	0,0589 <0,3	19594 >2300	Ασυμπίεστη Τυρβώδης
500	0,1193	16,8	0,0491 <0,3	16329 >2300	Ασυμπίεστη Τυρβώδης
400	0,0955	13,5	0,0393 <0,3	13063 >2300	Ασυμπίεστη Τυρβώδης
300	0,0716	10,1	0,0294 <0,3	9797 >2300	Ασυμπίεστη Τυρβώδης
200	0,0477	6,7	0,0196 <0,3	6531 >2300	Ασυμπίεστη Τυρβώδης
50	0,0119	1,7	0,0049 <0,3	1633 <1800	Ασυμπίεστη Στρωτή
30	0,0072	1,0	0,0029 <0,3	980 <1800	Ασυμπίεστη Στρωτή

Επομένως σύμφωνα με τον αριθμό *Mach* η ροή είναι ασυμπίεστη για όλο το εύρος ταχυτήτων επομένως και παροχών στο οποίο εργαζόμαστε (0-20 m/s).

Σύμφωνα με τον αριθμό *Reynolds* και τα όρια που αφορούν τα μικρο-ρευστά η ροή είναι:

- Τυρβώδης για ταχύτητες περίπου 3- 20 m/s, ή αντίστοιχα για παροχές 100- 600 kg/h.
- Στρωτή για ταχύτητες περίπου 1- 2 m/s, ή αντίστοιχα για παροχές 0- 50 kg/h.

Να σημειωθεί ότι για το χαρακτηρισμό της ροής έχουν ληφθεί υπόψη η γεωμετρία των σωλήνων παράκαμψης και όχι η γεωμετρία του μεγάλου σωλήνα του φορέα.

Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση της ροής στο φορέα

6.1 Περίληψη

Αφού πραγματοποιήθηκε ο χαρακτηρισμός της ροής στις ταχύτητες που μας ενδιαφέρουν, πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες προσομοιώσεις της ροής στο φορέα για ασυμπίεστη ροή, και παροχή εισόδου 600 kg/h για τους διάφορους τύπους φορέων που σχεδιάστηκαν. Για να καταλήξουμε στη βέλτιστη λύση, επιλέχθηκε η προσομοίωση της υψηλότερης παροχής καθώς είναι εκείνη στην οποία δημιουργείται η περισσότερη τύρβη. Το μοντέλο που προτιμήθηκε είναι το *SST k- ω* που αφορά τυρβώδεις ροές καθώς, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.6.3 παρέχει ακριβέστερη πρόβλεψη αποκόλλησης της ροής από τα άλλα μοντέλα.

6.2 Το πρόγραμμα Simscale

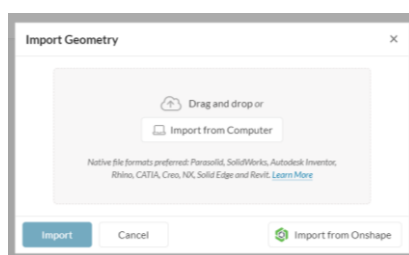
Το *Simscale* είναι ένα προϊόν λογισμικού που αναπτύχθηκε από την *Simscale GmbH* και επιτρέπει την υπολογιστική δυναμική ρευστών, την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και τις θερμικές προσομοιώσεις. Το βασικό λογισμικό (*backend*) της πλατφόρμας χρησιμοποιεί τους ανοιχτούς κώδικες:

- *FEA: Code_Aster and CalculiX*
- *CFD: OpenFOAM*

Αξίζει να αναφερθεί ότι για να χρησιμοποιήσει κανείς το πρόγραμμα θα πρέπει απλώς να δημιουργήσει ένα λογαριασμό. Στη δωρεάν χρήση όμως του προγράμματος υπάρχει όριο ωρών χρήσης (*core hours*), που είναι οι 3000 ενώ η μέγιστη διάρκεια μιας προσομοίωσης δε μπορεί να ξεπεράσει τα 500 λεπτά. Αν οι απαιτήσεις του χρήστη δεν ικανοποιούνται θα πρέπει να αγοράσει την πλήρη έκδοση του προγράμματος.

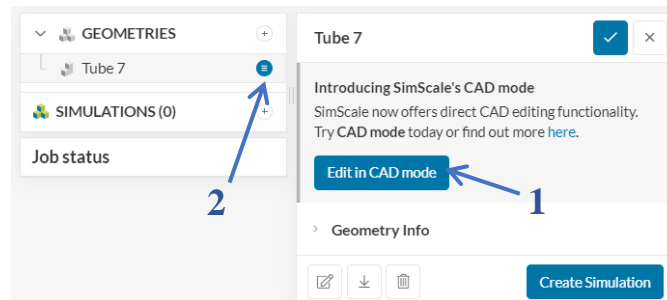
6.3 Μοντελοποίηση φορέα

Αρχικά εισήχθη η γεωμετρία με την οποία επιθυμούσαμε να πραγματοποιηθεί η δοκιμαστική προσομοίωση.



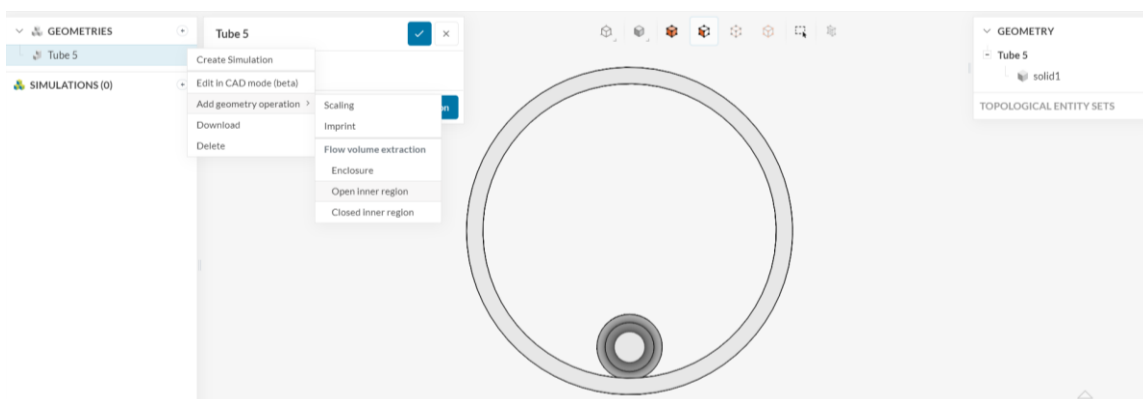
Εικόνα 43 Εισαγωγή σχεδίου στο Simscale

Η μοντελοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε σε μορφή σχεδιαστικού περιβάλλοντος CAD (1), είτε απευθείας από το μενού που εμφανίζεται δίπλα από το όνομα του αρχείου (2). Στην προσομοίωση της ροής επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος.



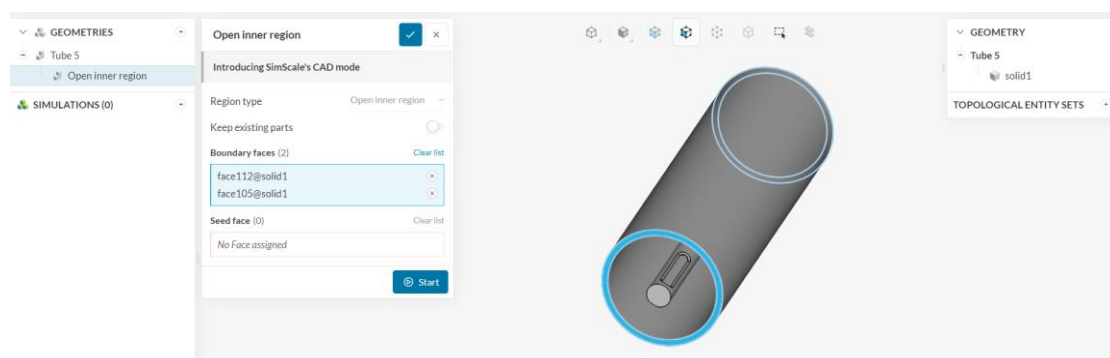
Εικόνα 44 Τρόποι μοντελοποίησης σχεδίου

Αρχικά, προσδιορίστηκε η περιοχή της ροής και «ξεχώρισε» από το εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα του φορέα.



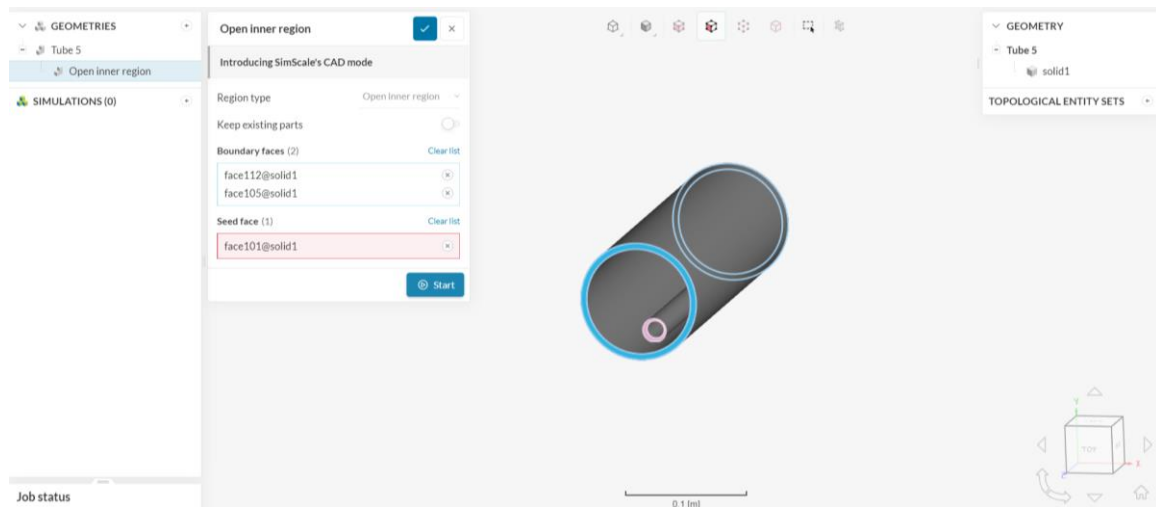
Εικόνα 45 Προσδιορισμός της ανοικτής εσωτερικής περιοχής του σωλήνα

Για να γίνει αυτό οριοθετήθηκε η περιοχή των τοιχωμάτων, επιλέγοντας το πάχος στην αρχή και το τέλος του μήκους του εξωτερικού σωλήνα, δηλαδή το εξωτερικό «δαχτυλίδι» στο μπροστά καθώς και το πίσω μέρος:



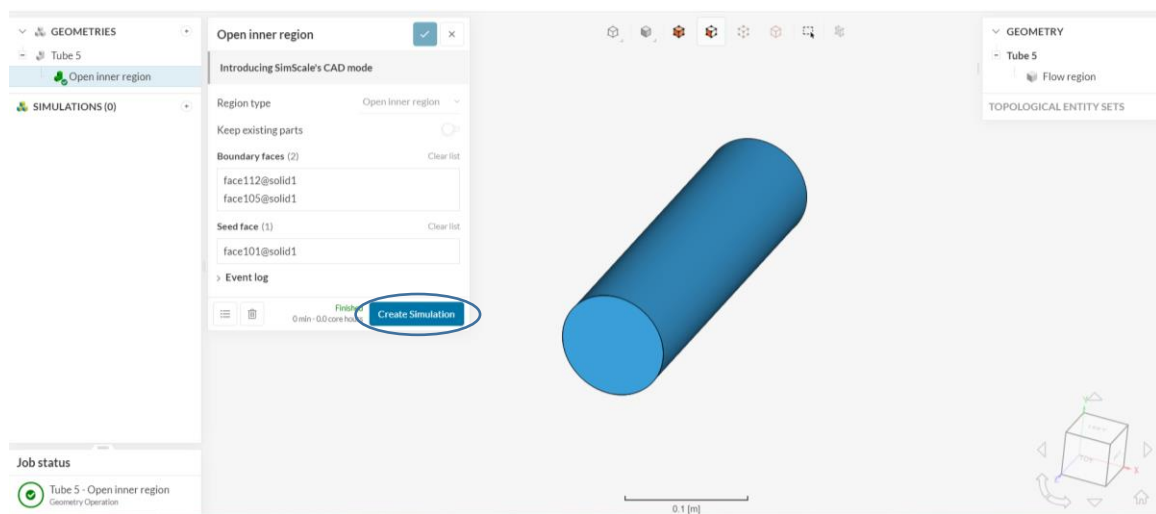
Εικόνα 46 Προσδιορισμός οριακών επιφανειών

Τέλος ορίζεται η επιφάνεια εισροής, δηλαδή το «δαχτυλίδι» του σωλήνα παράκαμψης στην περίπτωση μας:



Εικόνα 47 Προσδιορισμός εκχύλισης ροής

Πατώντας το κουμπί *Start* καθορίζεται η περιοχή της ροής μέσα στο σωλήνα και μπορούμε να προχωρήσουμε στα επόμενα στάδια παραμετροποίησης της προσομοίωσης.

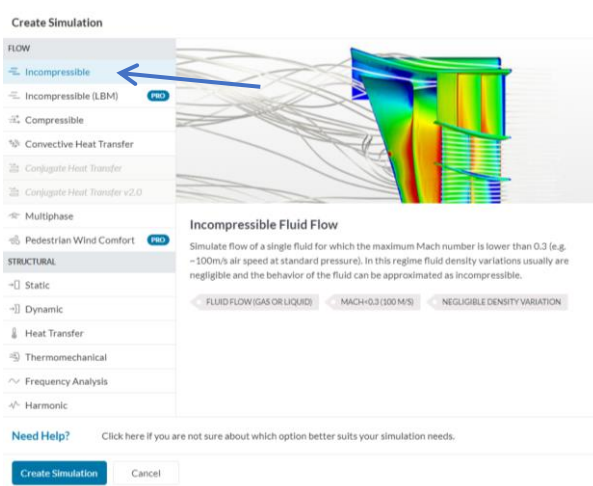


Εικόνα 48 Μοντελοποίηση της ροής

6.4 Παραμετροποίηση της προσομοίωσης

6.4.1 Επιλογή είδους ροής

Στο υπολογιστικό μέρος διαπιστώθηκε πως ο αριθμός *Mach* για ταχύτητες από 0-20 m/s είναι μικρότερος του 0,3, οπότε επιλέγουμε την ασυμπίεστη ροή κατά την οποία οι διακυμάνσεις της πυκνότητας υγρού θεωρούνται αμελητέες.



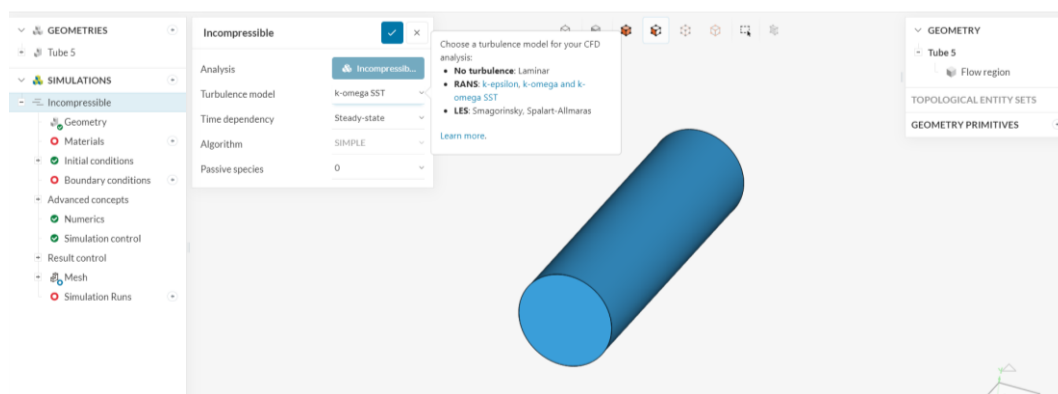
Εικόνα 49 Δημιουργία προσομοίωσης

6.4.2 Επιλογή μοντέλου ανάλυσης της ροής

Επιλέχθηκε το μοντέλο τύρβης SST k- ω , το οποίο είναι ένα συνδυαστικό μοντέλο των μοντέλων (βλ. Ενότητα 1.6):

- k- ϵ , το οποίο προβλέπει τη συμπεριφορά του ρευστού πολύ μακριά από τα όρια (τοίχωμα)
- και k- ω , το οποίο προβλέπει τη συμπεριφορά του ρευστού πολύ κοντά στο τοίχωμα.

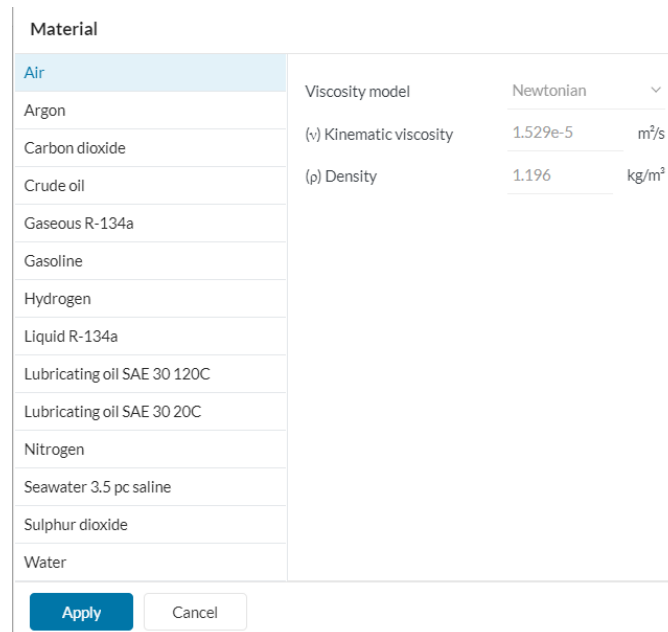
Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να μελετήσει τη συμπεριφορά της ροής κοντά και μακριά από τον τοίχο. Υπενθυμίζεται ότι η ροή θεωρείται τυρβώδης για ταχύτητες πάνω από 2 m/s (βλ. Ενότητα 5.6)



Εικόνα 50 Επιλογή μοντέλου τύρβης

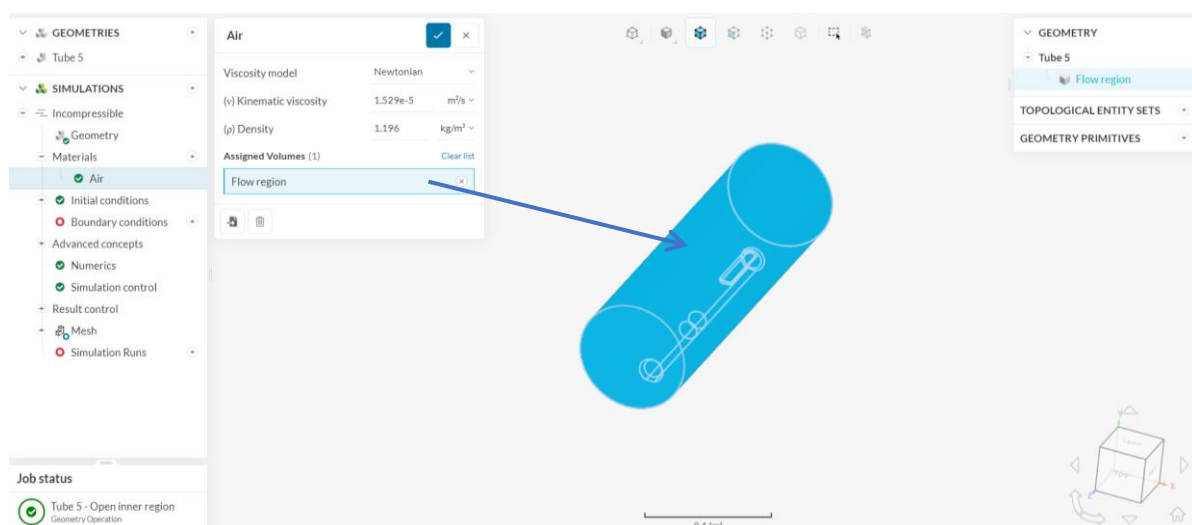
6.4.3 Επιλογή ρευστού και καθορισμός ιδιοτήτων

Στο επόμενο βήμα επιλέγουμε το ρευστό που διαπερνά τον αγωγό, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο αέρας. Το πρόγραμμα εμφανίζει αυτόματα τις ιδιότητες του, δηλαδή το κινηματικό ιξώδες και την πυκνότητα του και αν θέλουμε μπορούμε να κάνουμε κάποια αλλαγή στις προσυμπληρωμένες τιμές. Στη δική μας περίπτωση οι τιμές δεν αλλάχθηκαν.



Εικόνα 51 Παράθυρο επιλογής ρευστού

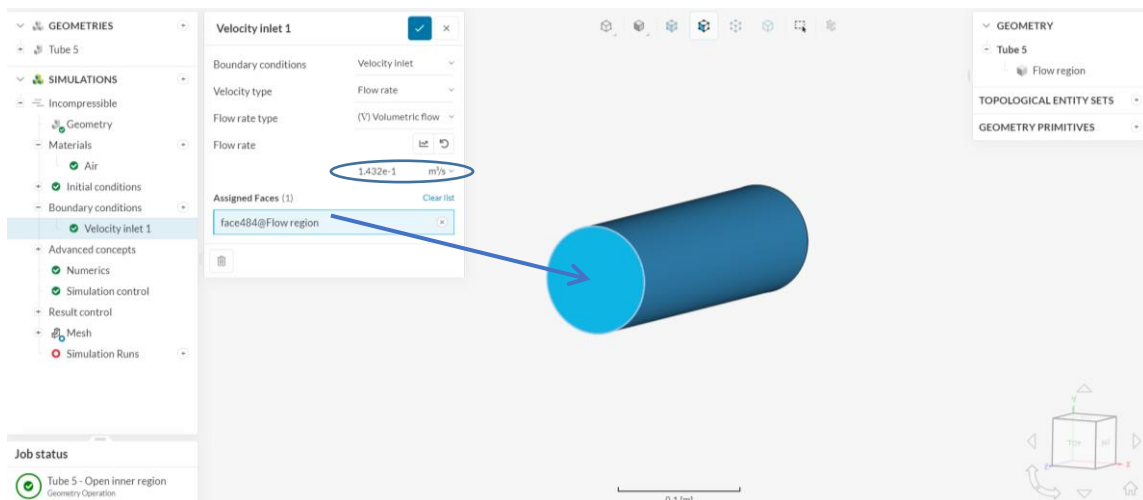
Μετά τον προσδιορισμό του ρευστού πρέπει να προσδιοριστεί και ο όγκος ο οποίος καταλαμβάνει. Έτσι επιλέγεται ο όγκος της ροής όπως προέκυψε από τη μοντελοποίηση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 52.



Εικόνα 52 Προσδιορισμός όγκου ρευστού

Επόμενο και άκρως σημαντικό βήμα για τη μοντελοποίηση της τύρβης είναι οριακές συνθήκες. Ως οριακές συνθήκες δίνεται μία πληθώρα επιλογών από το πρόγραμμα ανάλογα του τι είναι γνωστό στο πρόβλημα που πρόκειται να λυθεί. Πρέπει να οριστούν τουλάχιστον δύο οριακές συνθήκες.

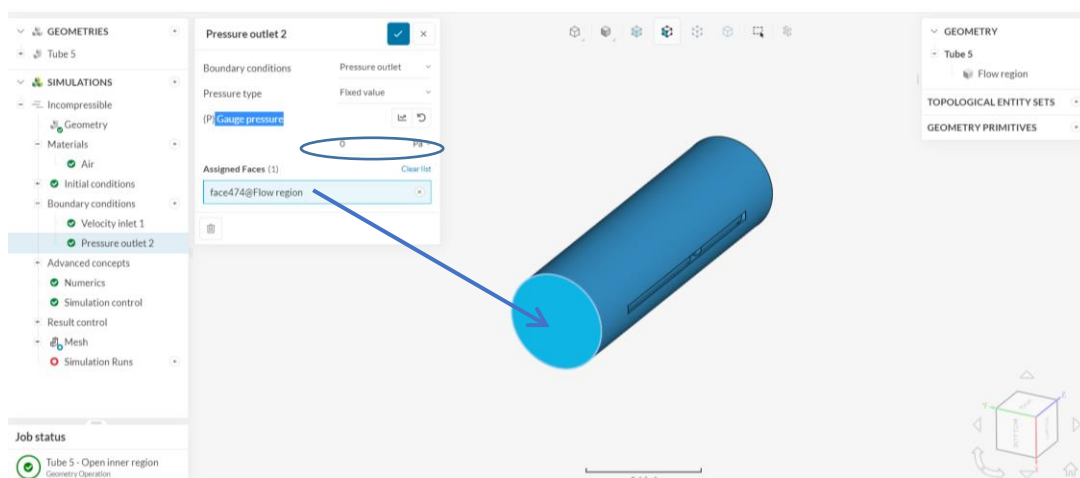
- Ως πρώτη οριακή συνθήκη επιλέχθηκε η ταχύτητα εισόδου που αντιστοιχεί στη μέγιστη παροχή που μελετάται, δηλαδή τα 600 kg/h. Για να ολοκληρωθεί ο ορισμός της οριακής συνθήκης επιλέχθηκε και η επιφάνεια από την οποία εισέρχεται το ρευστό με τη συγκεκριμένη ταχύτητα, όπως δείχνει το βέλος στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53 Οριακές συνθήκες: Ταχύτητα εισόδου

Η επιλογή των 600 kg/h έγινε ώστε να καθοριστεί αρχικά, η βέλτιστη τοπολογία φορέα, λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη παροχή αέρα.

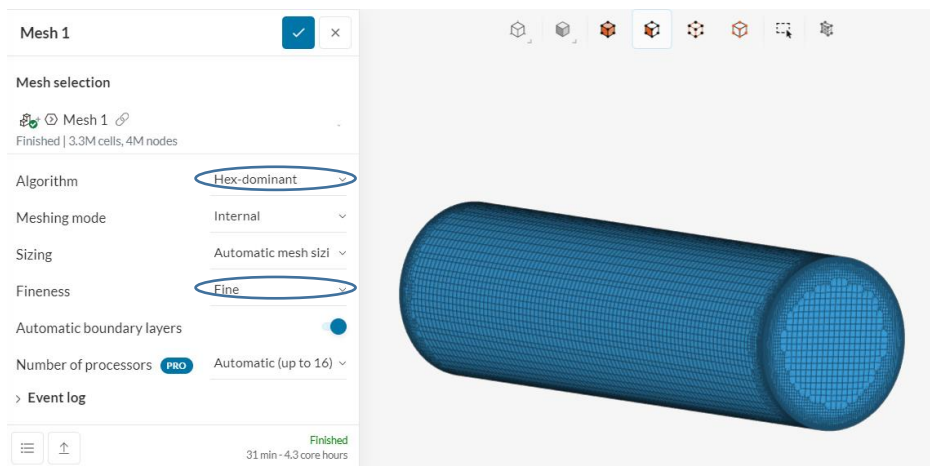
- Η δεύτερη οριακή συνθήκη που προσδιορίστηκε είναι η πίεση στην έξοδο του φορέα η οποία θεωρήθηκε μηδενική εφόσον η ροή είναι ασυμπίεστη.



Εικόνα 54 Οριακές συνθήκες: Πίεση εξόδου

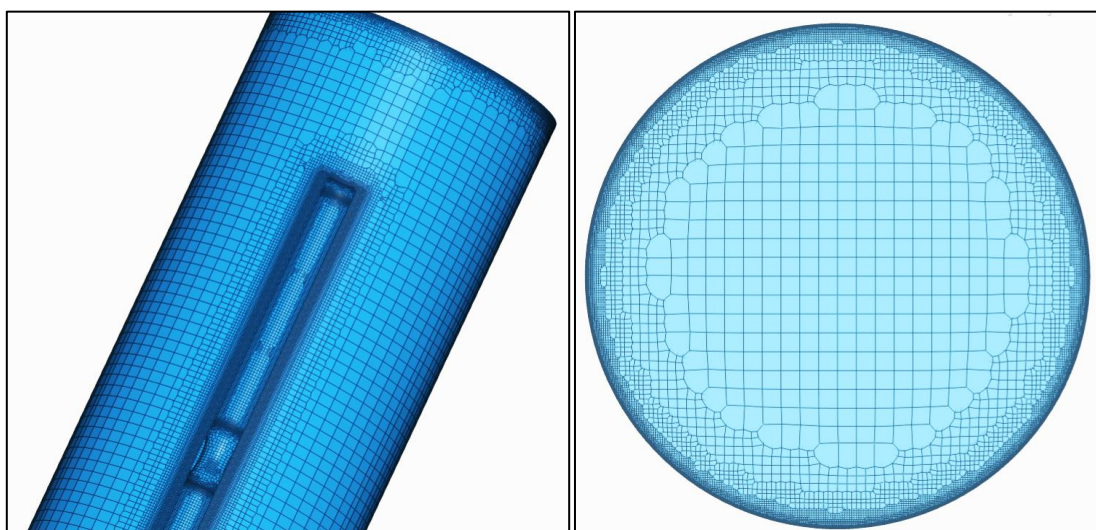
6.4.4 Δημιουργία πλέγματος

Τελικό στάδιο πριν την προσομοίωση αποτελεί η δημιουργία πλέγματος. Το πλέγμα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και ως εκ τούτου πρέπει να καθορισθεί σωστά. Χρειαζόμαστε όσο πιο πυκνό πλέγμα είναι δυνατό να δημιουργηθεί και επειδή έχουμε περίπλοκη γεωμετρία πρέπει στις αλλαγές της γεωμετρίας το πλέγμα να πυκνώνει. Για προσομοιώσεις ροής και μόνο, ενδείκνυται το εξαγωνικό πλέγμα υψηλής ποιότητας (*fine mesh*).



Εικόνα 55 Κυβελωτό πλέγμα υψηλής ποιότητας

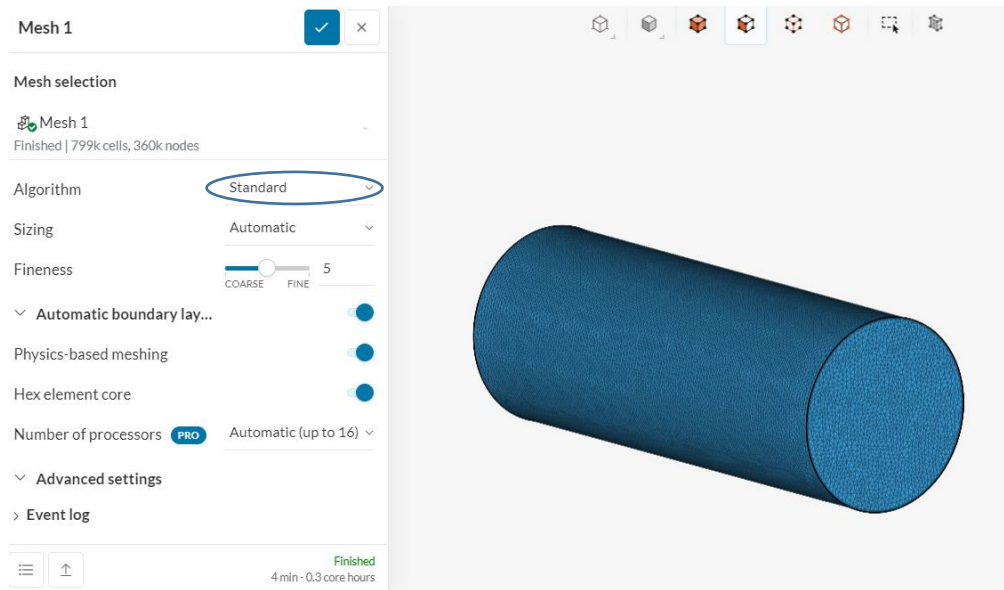
Ο λόγος που προτιμάται είναι διότι η κυβελωτή μορφή του πυκνώνει στις ακμές δημιουργώντας τα επιθυμητά επίπεδα για τη σωστότερη ανάλυση της ροής ακόμα και στα σημεία που έχουμε απότομη αλλαγή της γεωμετρίας, όπως είναι οι ακμές και οι στραγγαλισμοί ροής που υπάρχουν στο σωλήνα.



Εικόνα 56 Μεγέθυνση πλέγματος στις ακμές και τις περιοχές απότομης αλλαγής στη γεωμετρία

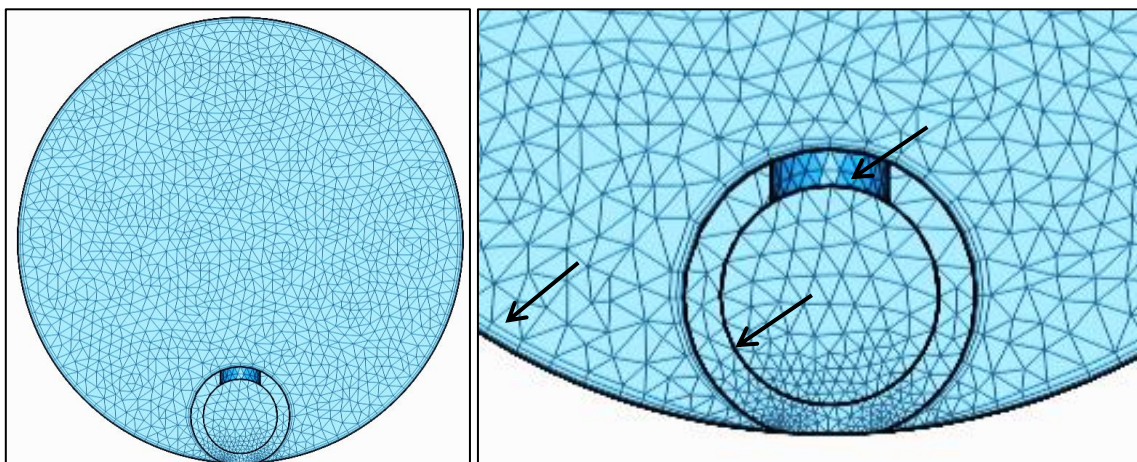
Να αναφερθεί ότι όσο πιο υψηλής ποιότητας είναι ένα πλέγμα, συνεπάγεται ότι χωρίζεται σε μικρότερα κελιά, γεγονός το οποίο καθυστερεί σημαντικά τη δημιουργία του αλλά και την προσομοίωση, δίνει όμως σαφώς καλύτερα αποτελέσματα.

Για λόγους πληρότητας στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται η τελική μορφή του πλέγματος όταν επιλέγεται ο προκαθορισμένος τύπος τριγωνικής μορφής πλέγματος για να κατανοήσουμε καλύτερα το λόγο που δεν επιλέχθηκε.



Εικόνα 57 Προκαθορισμένο πλέγμα

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στην Εικόνα 58 η εν λόγω επιλογή δημιουργεί ένα ομοιόμορφο πλέγμα καθ' όλη την επιφάνεια του μοντέλου. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα στρώματα δημιουργούνται μόνο περιμετρικά του μεγάλου σωλήνα και όχι στο μικρό ούτε όμως και στα κομβικά σημεία του μοντέλου.

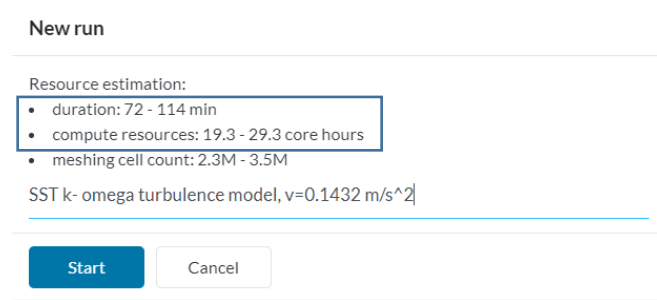


Εικόνα 58 Σφάλματα τριγωνικού πλέγματος

6.4.5 Έναρξη προσομοίωσης και έλεγχος αποτελεσμάτων

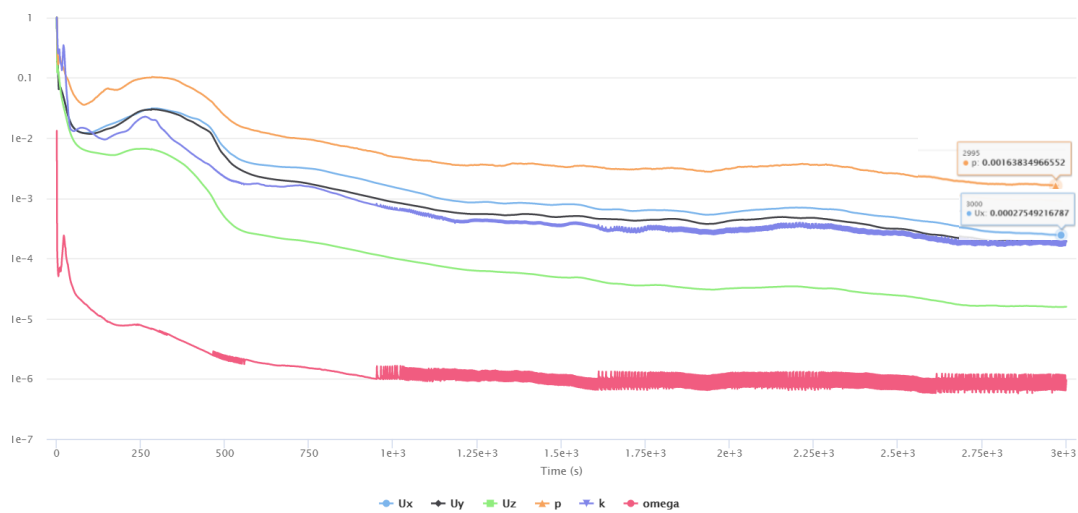
Εφόσον προσδιορίστηκαν όλα τα προαπαιτούμενα, μπορεί να ξεκινήσει η προσομοίωση. Στο αντίστοιχο αναδυόμενο «παράθυρο» αναφέρονται πληροφορίες σχετικά με τον εκτιμώμενο χρόνο μέχρι την ολοκλήρωσή της και τις ώρες που θα καταναλώσει το πρόγραμμα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από το λογαριασμό μας.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.2 παραπάνω, οι ώρες που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα δωρεάν έχουν ένα όριο. Το ίδιο ισχύει και για τη μέγιστη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Ως εκ τούτου καλό θα ήταν να κοιτάμε αυτά τα δύο στοιχεία πριν ξεκινήσουμε την προσομοίωση για να είμαστε σίγουροι ότι θα ολοκληρωθεί επιτυχώς.



Εικόνα 59 Έναρξη της προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι μετά το τέλος κάθε προσομοίωσης πρέπει να ελέγχονται τα Διαγράμματα σύγκλισης (*Convergence plots*). (Διδακτικές σημειώσεις Θ. Γεροστάθη). Στην περίπτωση μας επιβεβαιώθηκε ότι τα υπολείμματα (*residuals*) συγκλίνουν σωστά, δηλαδή ότι πέφτουν κάτω από 10^{-3} ώστε να θεωρούνται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιόπιστα (βλ. Εικόνα 60).

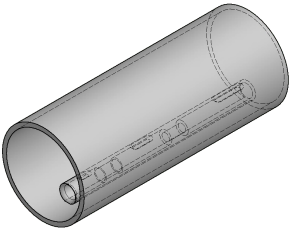
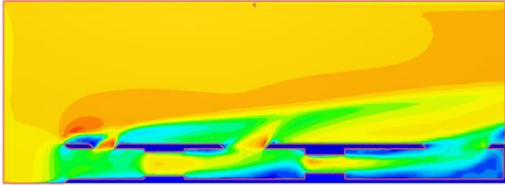
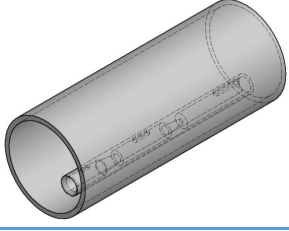
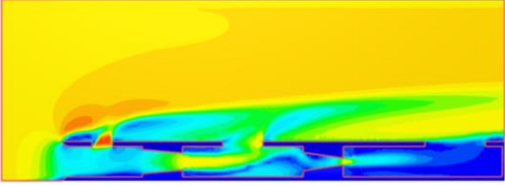

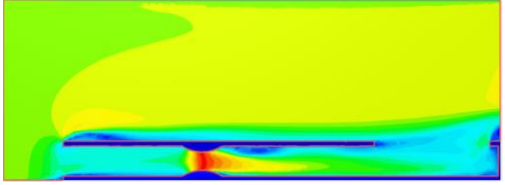
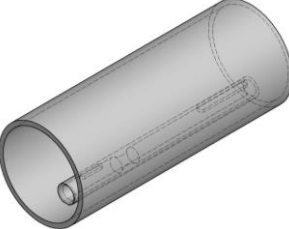
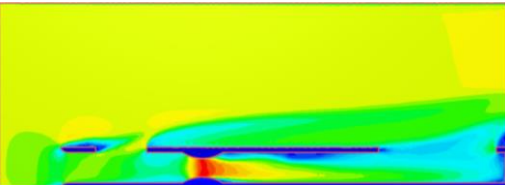
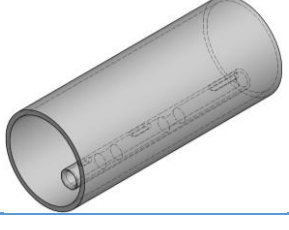
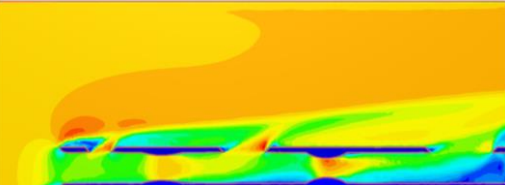


Εικόνα 60 Διαγράμματα σύγκλισης με αποδεκτές καμπύλες

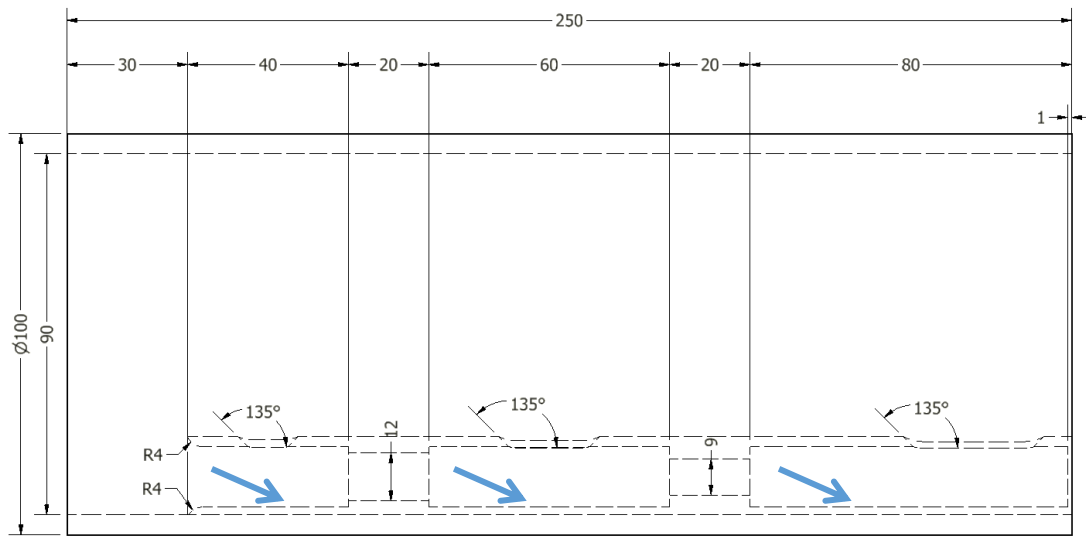
6.5 Σύγκριση φορέων

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε συγκεντρωτικά όλους τους φορείς που προσομοιώθηκαν, μαζί με τα κύρια χαρακτηριστικά τους αλλά και το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της ροής στον καθένα από αυτούς ξεχωριστά. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας, ώστε να μπορούμε να δούμε τις διαφορές και να κάνουμε ευκολότερα τη σύγκριση.

Πίνακας 2 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοιώσεων ροής σε διαφορετικούς φορείς

Γεωμετρία	Τύπος στένωσης	Αριθμός στενώσεων	Οπές εξόδου	Αποτέλεσμα προσομοίωσης
Μορφολογία 1 	Κυλινδρικής διατομής στένωση	2	3	
Μορφολογία 2 	Κωνικής διατομής στένωση	2	3	
Μορφολογία 3 	Ελλειπτικής διατομής στένωση	1	1	
Μορφολογία 4 	Ελλειπτικής διατομής στένωση	2	2	
Μορφολογία 5 	Ελλειπτικής διατομής στένωση	2	3	

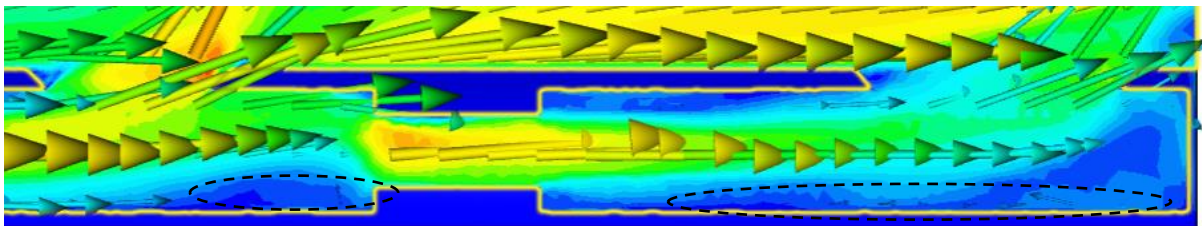
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το αισθητήριο στοιχείο δύναται να τοποθετηθεί στο κάτω μέρος του φορέα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 61 (βλ. μπλε βέλη).



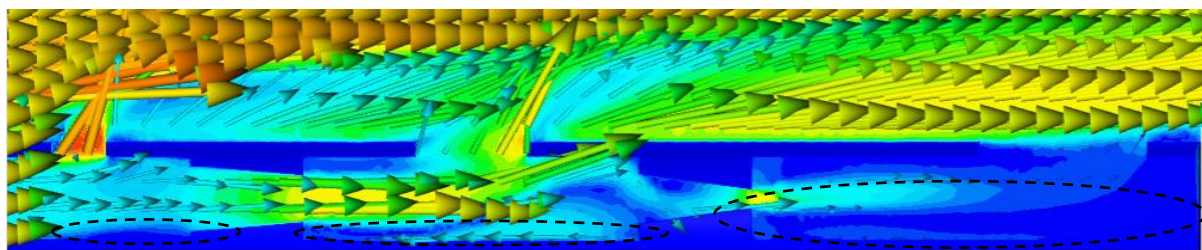
Εικόνα 61 Σημεία τοποθέτησης αισθητήρα

Στα σημεία όπου πρόκειται να τοποθετηθούν αισθητήρια θέλουμε να αποφύγουμε τη δημιουργία τύρβης όπου μειώνει την ταχύτητα ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση και τα αποτελέσματα να είναι πραγματικά.

Παρατηρήθηκε ότι στις μορφολογίες 1 και 2 υπάρχει επιστροφή ροής μετά από κάθε στένωση δημιουργώντας έτσι στροβιλισμούς, όπου το χρώμα είναι μπλε η ταχύτητα μηδενίζει και έχουμε επιστροφή ροής. Συνεπώς αυτές απορρίφθηκαν.

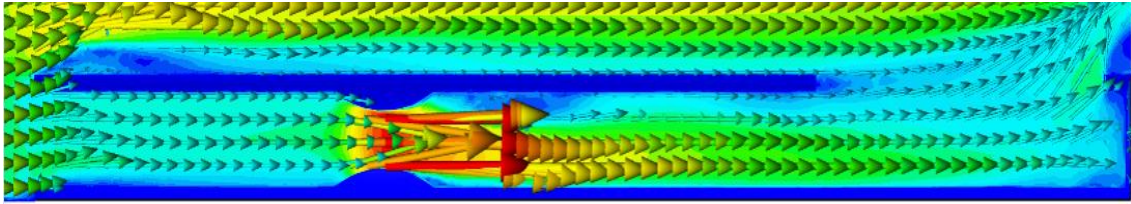


Εικόνα 62 Προβληματικές περιοχές της 1^{ης} μορφολογίας

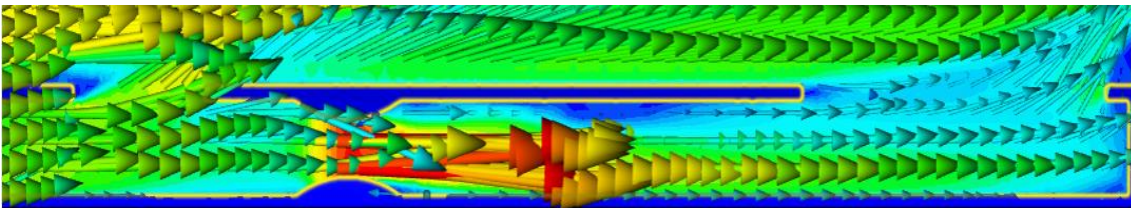


Εικόνα 63 Προβληματικές περιοχές της 2^{ης} μορφολογίας

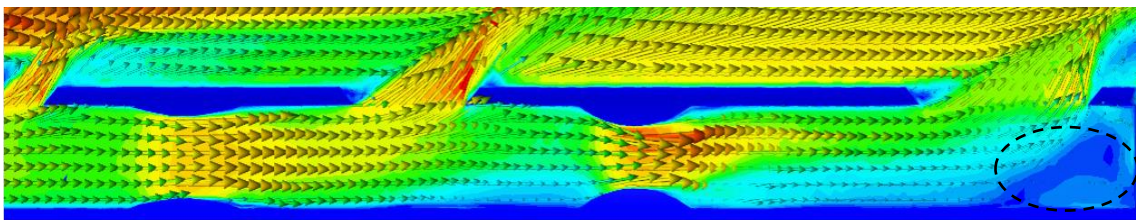
Στις μορφολογίες 3, 4 και 5 που οι στενώσεις είναι ελλειπτικές παρατηρήθηκε πιο ομοιόμορφη ροή κοντά στα τοιχώματα και ειδικότερα στις μορφολογίες 3 και 4 που έχουν μία στένωση και η γεωμετρία τους είναι πιο απλή.



Εικόνα 64 Προβληματικές περιοχές της 3^{ης} μορφολογίας



Εικόνα 65 Προβληματικές περιοχές της 4^{ης} μορφολογίας



Εικόνα 66 Προβληματικές περιοχές της 5^{ης} μορφολογίας

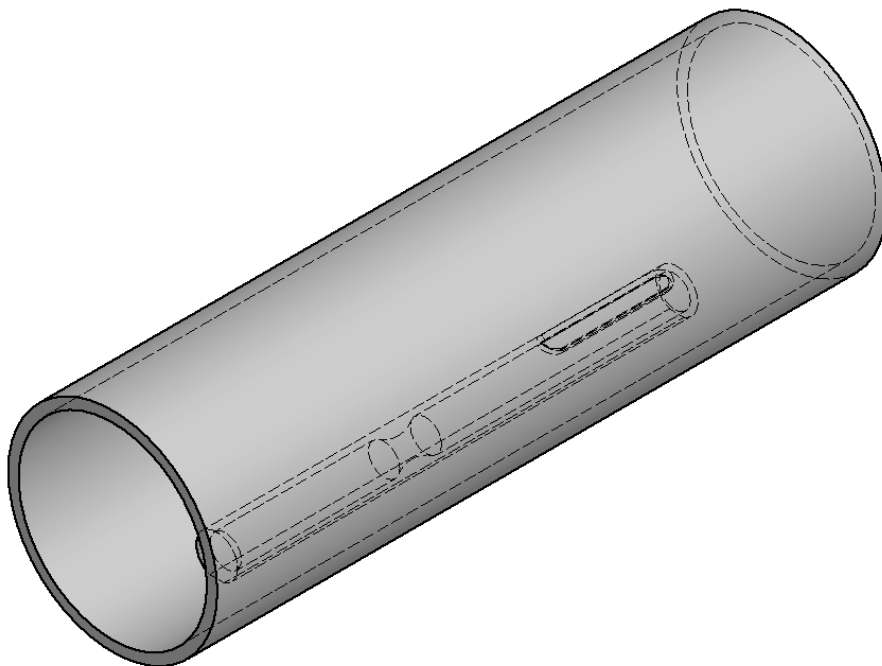
Κεφάλαιο 7: Προσομοιώσεις ροής σε όλο το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα

7.1 Περίληψη

Έχοντας καταλήξει στη βέλτιστη μορφολογία του φορέα, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιούνται προσομοιώσεις τόσο για χαμηλές όσο και για υψηλές ροές, στη γεωμετρία του φορέα που κατασκευάστηκε ως βέλτιστη βάση της μελέτης που έγινε στο κεφάλαιο 636.5. Σκοπός των προσομοιώσεων είναι να μελετηθεί το διευρυμένο εύρος λειτουργίας του αισθητήρα, καθώς και ο καθορισμός του σημείου που θα τοποθετηθεί ακριβώς το αισθητήριο στοιχείο.

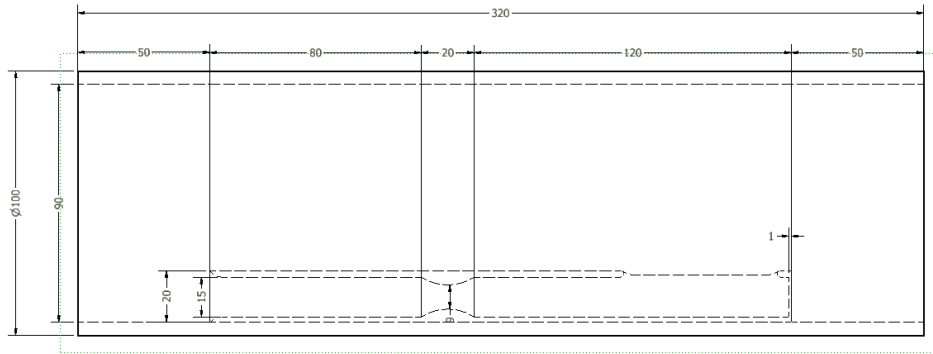
7.2 Σχεδιασμός βέλτιστης γεωμετρίας φορέα

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες προσομοιώσεις σε διάφορες γεωμετρίες, δημιουργήθηκε η τελική μορφή του φορέα με μία ελλειπτική στένωση και μία οπή εξόδου, η οποία βασίζεται στις μορφολογίες No3 και No4 που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4: .

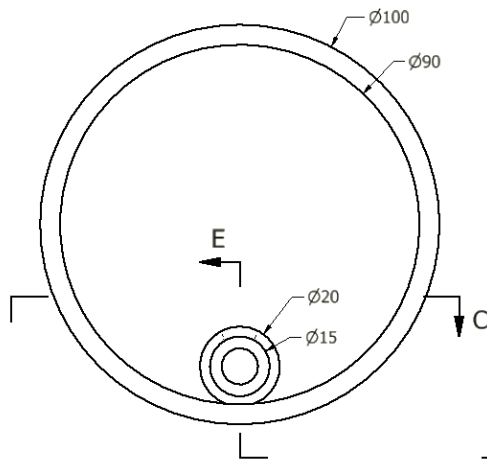


Εικόνα 67 Τελική μορφή γεωμετρίας φορέα

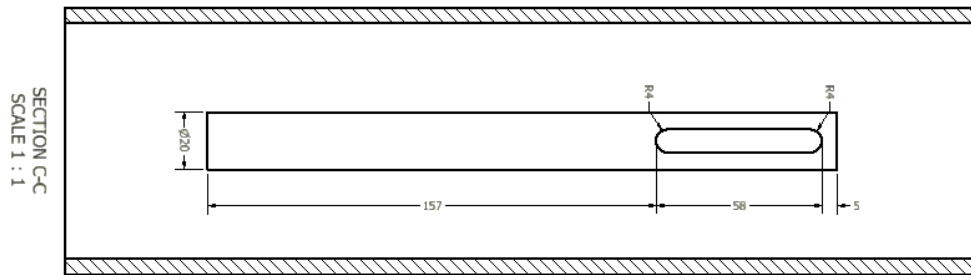
Ακολουθούν τα σχέδια με τις ακριβείς διαστάσεις όπως προκύπτουν από τον τελικό σχεδιασμό.



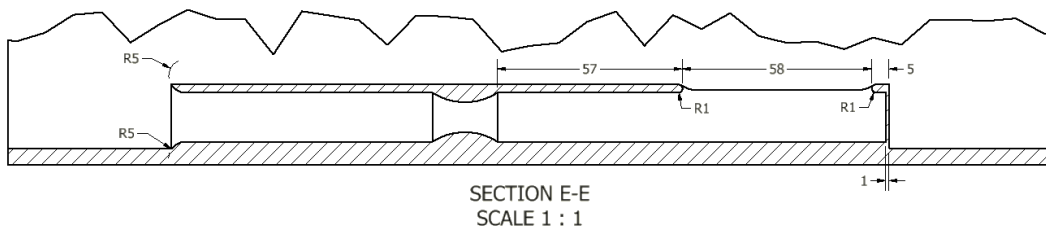
Εικόνα 68 Πρόοψη



Εικόνα 69 Πλάγια αριστερή όψη



Εικόνα 70 Τομή C-C'



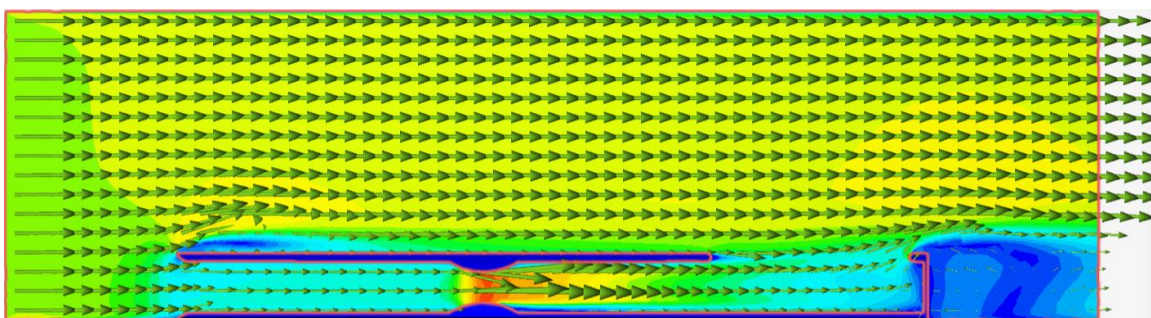
Εικόνα 71 Τομή E-E'

7.3 Προσομοιώσεις ροής της βέλτιστης γεωμετρίας

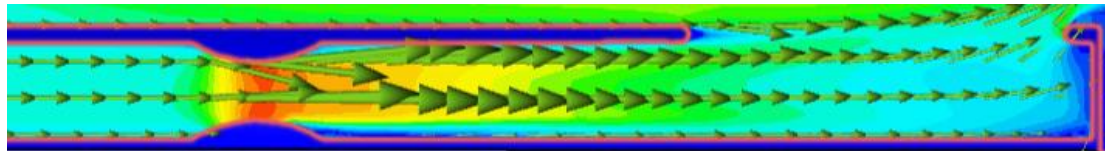
Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για ασυμπίεστη ροή για διαφορετικές ταχύτητες εισόδου από 0-20 m/s. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης SST k- ω για ταχύτητες από 5-20 m/s δηλαδή για παροχές περίπου 150-600 kg/h και το μοντέλο *laminar* (χωρίς τύρβη) για μικρότερες από 150 kg/h παροχές.

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τις προσομοιώσεις φαίνονται στις παρακάτω εικόνες, οι οποίες δείχνουν την πορεία και την ταχύτητα της ροής του φορέα. Η κατανομή των ταχυτήτων κατά μήκος του σωλήνα είναι η εξής:

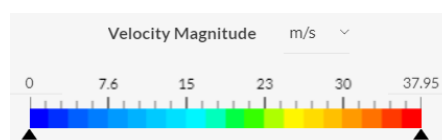
■ Για παροχή $\dot{v} = 600$ kg/h



Μεγέθυνση της περιοχής τοποθέτησης αισθητηρίου στοιχείου:

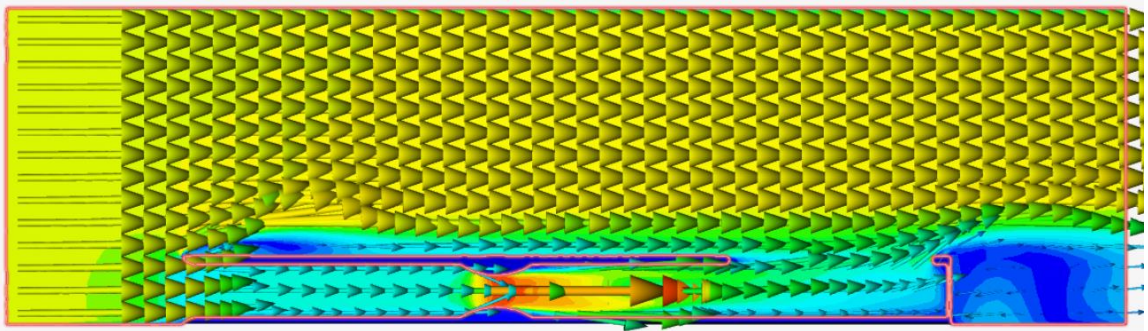


Υπόμνημα ταχυτήτων:

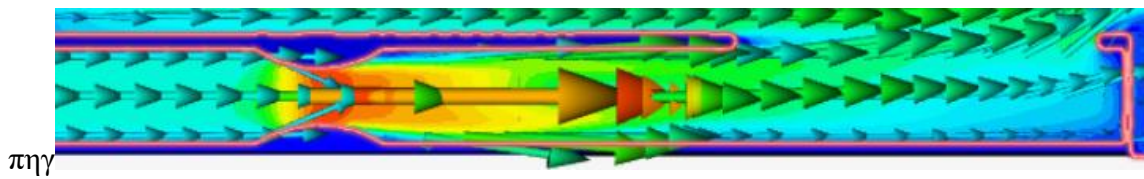


Εικόνα 72 Μοντέλο προσομοίωσης: SST k- ω , παροχή: $\dot{v} = 600$ kg/h

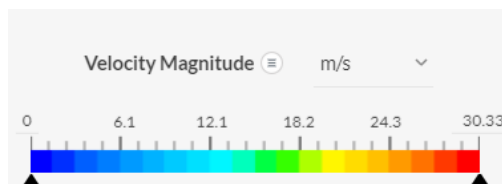
■ Για παροχή $\dot{v} = 500 \text{ kg/h}$



Μεγέθυνση της περιοχής τοποθέτησης αισθητηρίου στοιχείου:

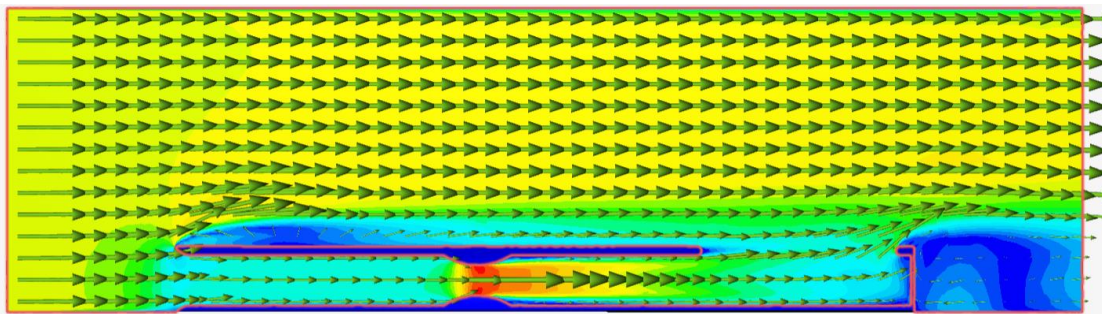


Υπόμνημα ταχυτήτων:

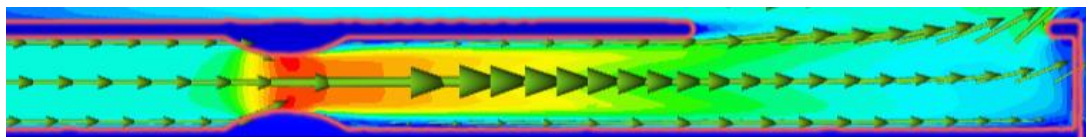


Εικόνα 73 Μοντέλο προσομοίωσης: SST k- ω , παροχή: $\dot{v} = 500 \text{ kg/h}$

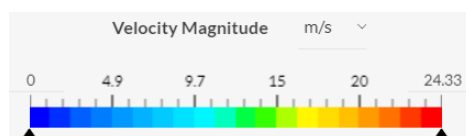
■ Για παροχή $\dot{v} = 400 \text{ kg/h}$



Μεγέθυνση της περιοχής τοποθέτησης αισθητηρίου στοιχείου:

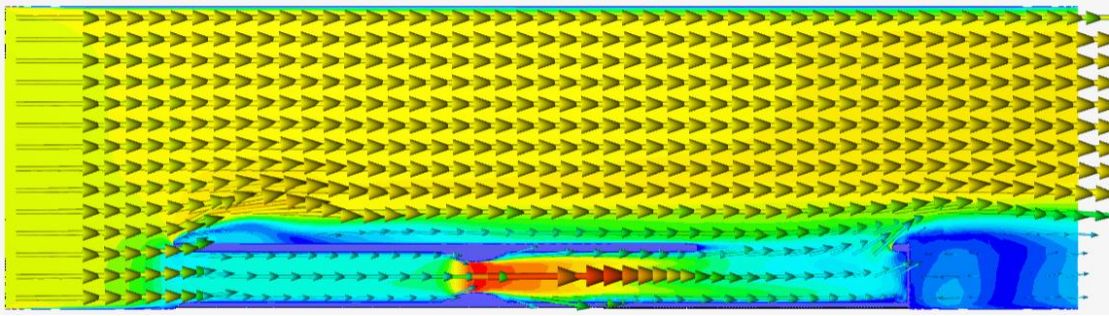


Υπόμνημα ταχυτήτων:

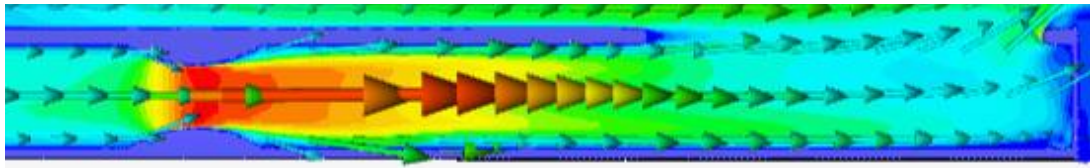


Εικόνα 74 Μοντέλο προσομοίωσης: SST k- ω , παροχή: $\dot{v} = 400 \text{ kg/h}$

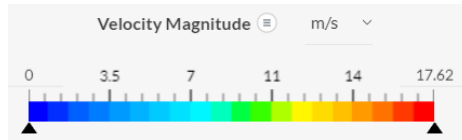
■ Για παροχή $\dot{v} = 300 \text{ kg/h}$



Μεγέθυνση της περιοχής τοποθέτησης αισθητηρίου στοιχείου:

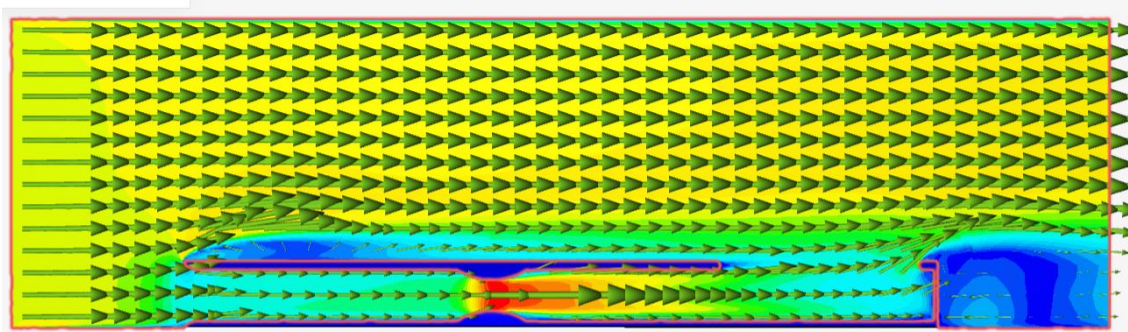


Υπόμνημα ταχυτήτων:

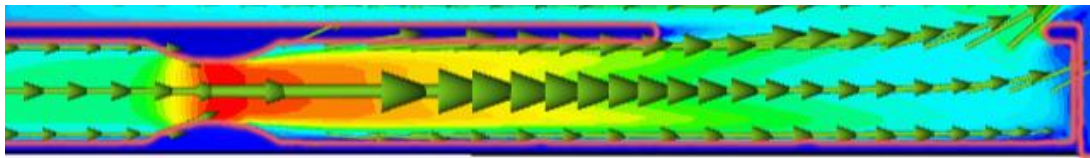


Εικόνα 75 Μοντέλο προσομοίωσης: SST $k-\omega$, παροχή: $\dot{v} = 300 \text{ kg/h}$

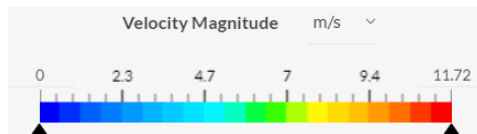
■ Για παροχή $\dot{v} = 200 \text{ kg/h}$



Μεγέθυνση της περιοχής τοποθέτησης αισθητηρίου στοιχείου:

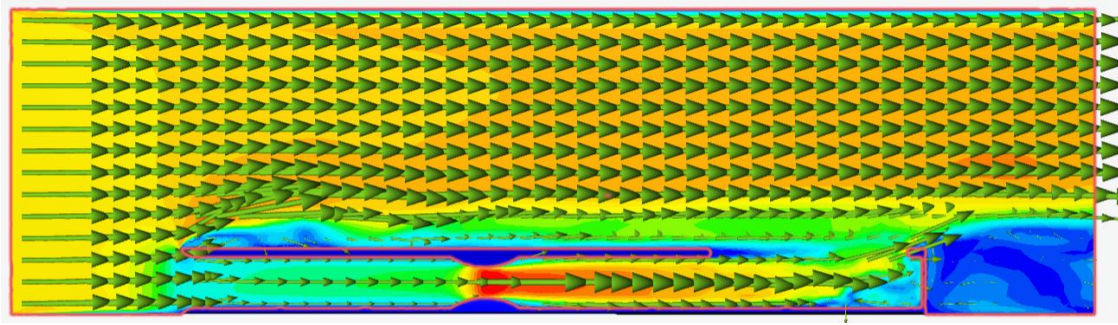


Υπόμνημα ταχυτήτων:

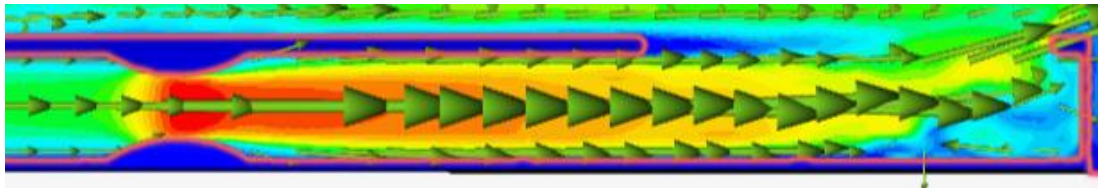


Εικόνα 76 Μοντέλο προσομοίωσης: SST $k-\omega$, παροχή: $\dot{v} = 200 \text{ kg/h}$

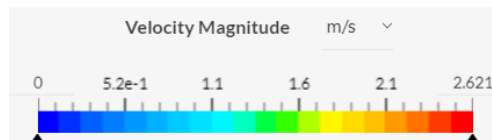
■ Για παροχή $\dot{v} = 50 \text{ kg/h}$



Μεγέθυνση της περιοχής τοποθέτησης αισθητηρίου στοιχείου:

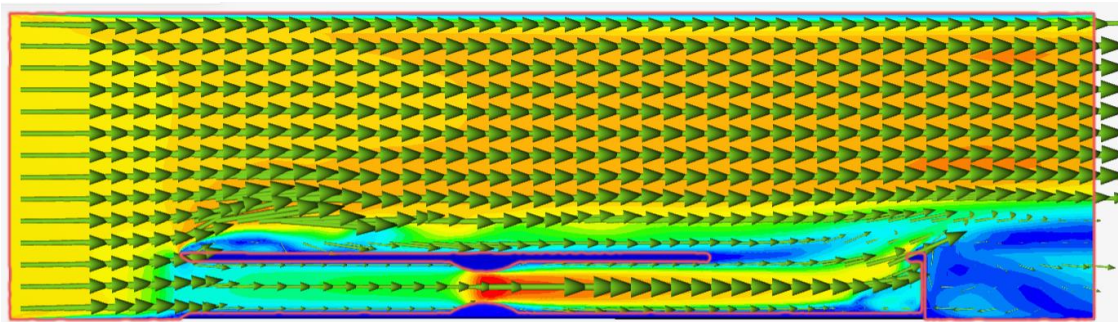


Υπόμνημα ταχυτήτων:

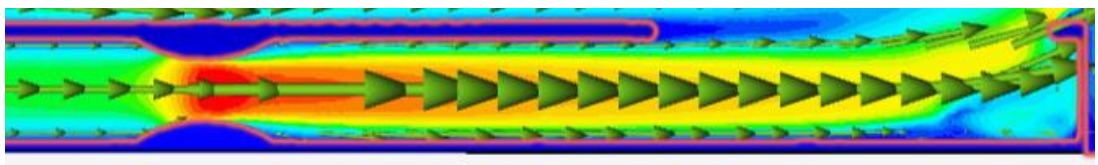


Εικόνα 77 Μοντέλο προσομοίωσης: *Lamina*, παροχή: $\dot{v} = 50 \text{ kg/h}$

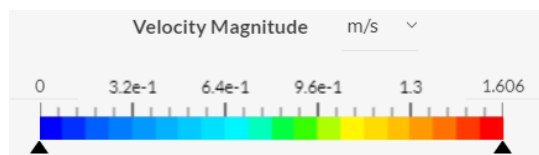
■ Για παροχή $\dot{v} = 30 \text{ kg/h}$



Μεγέθυνση της περιοχής τοποθέτησης αισθητηρίου στοιχείου:



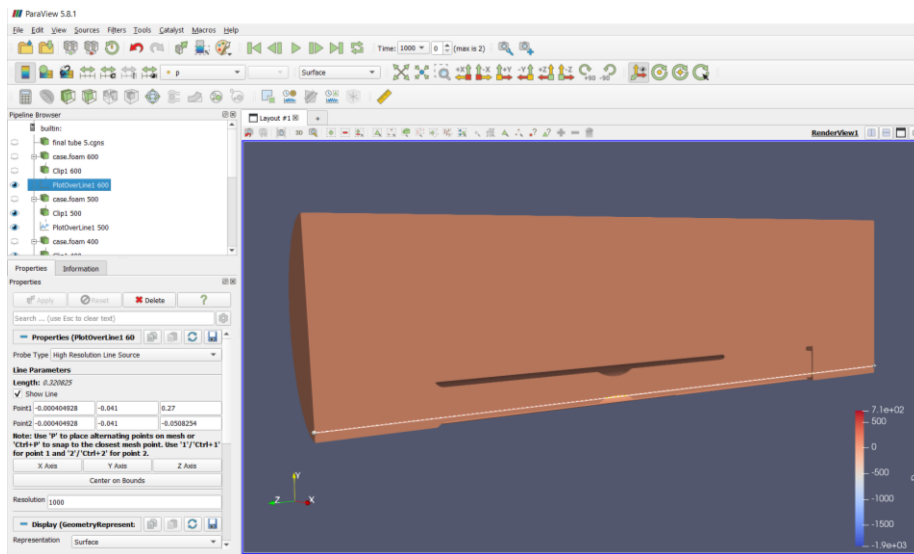
Υπόμνημα ταχυτήτων:



Εικόνα 78 Μοντέλο προσομοίωσης: *Lamina*, παροχή: $\dot{v} = 30 \text{ kg/h}$

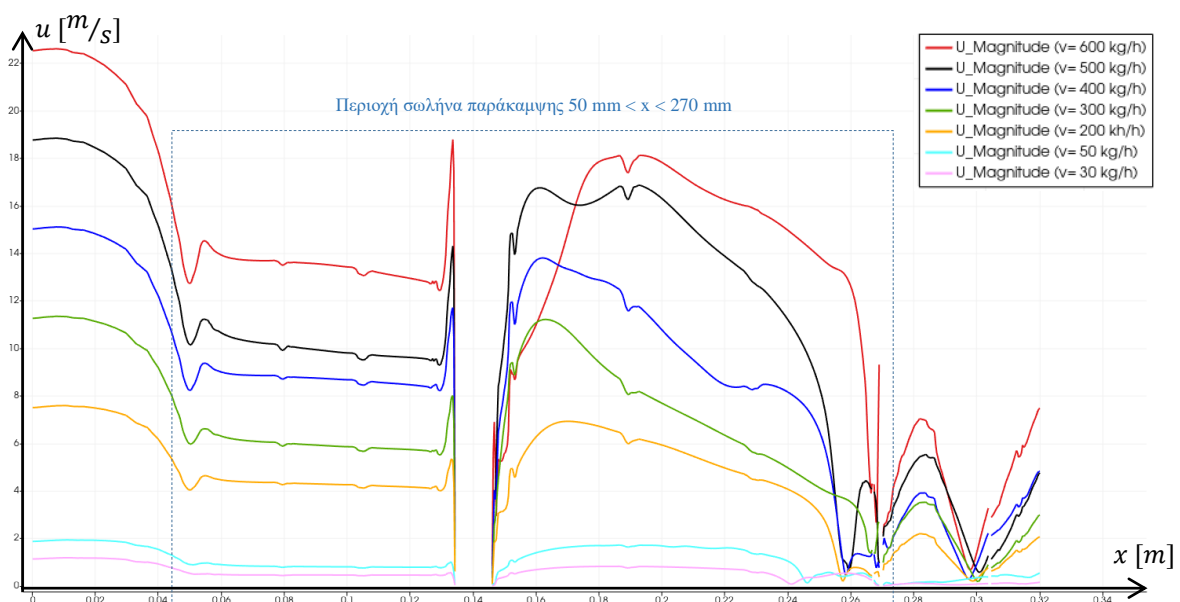
7.4 Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας- απόστασης

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *Paraview* μέσω του οποίου εισήχθη το αρχείο *case.foam* της εκάστοτε προσομοίωσης, δηλαδή το αρχείο που περιέχει όλα τα αποτελέσματα από την προσομοίωση και είναι άμεσα προσπελάσιμο μέσω της πλατφόρμας *Simscale*. Αφού έγινε μία τομή στη γεωμετρία δημιουργήθηκαν διαγράμματα ταχυτήτων σε σχέση με την απόσταση κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα παράκαμψης δηλαδή εκεί που θα τοποθετηθούν τα αισθητήρια για τις διαφορετικές παροχές για τις οποίες έγιναν οι προσομοιώσεις.



Εικόνα 79 Τομή σωλήνα με δημιουργία διαγράμματος βάση γραμμής κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα παράκαμψης

Παρακάτω παραθέτεται το συγκριτικό διάγραμμα ταχυτήτων απόστασης για διαφορετικές παροχές:



Εικόνα 80 Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας σε σχέση με την απόσταση για διάφορες παροχές

Θεωρώντας ότι το αισθητήριο ροής μπορεί να μετρήσει ιδανικά ταχύτητες από 0-10 m/s.

Παρατηρούμε ότι:

- Για παροχή 600 kg/h δε μπορεί να μετρηθεί η ταχύτητα σε κανένα σημείο του σωλήνα παράκαμψης διότι πιθανότατα έρχεται σε κορεσμό καθ' όλο το μήκος του.
- Για παροχή 500 kg/h μπορεί να μετρηθεί στο πρώτο διαμέρισμα πριν τη στένωση ($100 \text{ mm} < x < 130 \text{ mm}$).
- Για παροχές 300-400 kg/h μπορεί να μετρηθεί η ταχύτητα καθ' όλο το μήκος του πρώτου διαμερίσματος ($50 \text{ mm} < x < 130 \text{ mm}$) και στο δεύτερο διαμέρισμα από τα 210 mm έως και τα 250 mm,
- Για παροχές από 200 kg/h και κάτω μπορεί να μετρηθεί καθ' όλο το μήκος και των δύο διαμερισμάτων ($100 \text{ mm} < x < 130 \text{ mm}$ και $150 \text{ mm} < x < 270 \text{ mm}$).

Σημείωση: για παροχές από 200 kg/h και κάτω η μέτρηση με τον αισθητήρα μπορεί να γίνει εκτός του σωλήνα παράκαμψης, διότι οι ταχύτητες εισόδου είναι μικρότερες από 10 m/s.

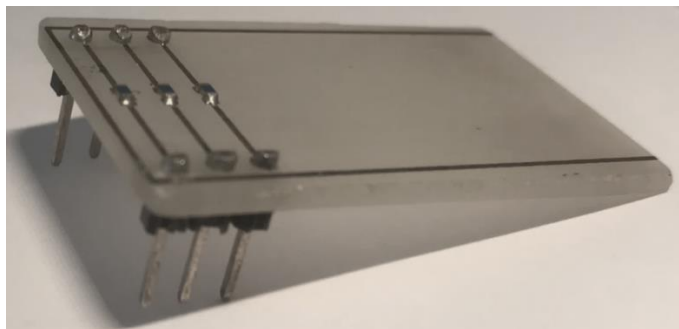
Κεφάλαιο 8: Σχεδιασμός και τοποθέτηση αισθητήριας διάταξης στο φορέα

8.1 Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο εστιάζουμε κυρίως στην αισθητήρια διάταξη στην οποία βασίζεται η λειτουργία της συνολικής δομής. Παρουσιάζονται εναλλακτικά σενάρια πάνω στα οποία θα πραγματοποιηθούν κατάλληλες προσομοιώσεις (βλ. Κεφάλαιο 6:), με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας του αισθητήρα, συμπεριλαμβανομένων της γεωμετρίας του φορέα, την τοπολογία αλλά και το υλικό κατασκευής των αισθητήριων στοιχείων (θερμίστορ) που βρίσκονται ολοκληρωμένα στη διάταξη. Συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζεται η βασική δομή της προϋπάρχουσας αισθητήριας διάταξης και οι θέσεις που δύναται αυτή να τοποθετηθεί στο φορέα με τη βέλτιστη γεωμετρία (βλ. Κεφάλαιο 7:). Ακολουθεί η ανάλυση της γενικής αρχής λειτουργίας ενός θερμικού αισθητήρα ροής ενώ στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαφορετικά σενάρια (με τα αντίστοιχα σχέδια) που θα χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων.

8.2 Δομή προϋπάρχουσας αισθητήριας διάταξης

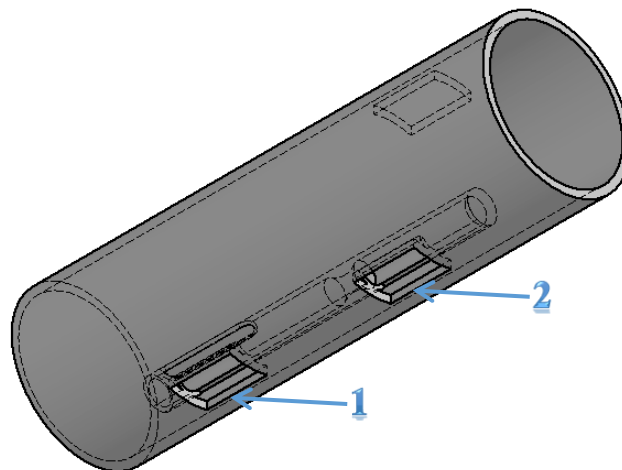
Ο σχεδιασμός του αισθητήρα για την προσομοίωση της αρχής λειτουργίας του έγινε βάση προϋπάρχουσας αισθητήριας διάταξης που έχει κατασκευαστεί στο ίδρυμα για τη διεξαγωγή αντίστοιχου πειράματος. Η δομή της είναι η εξής: αποτελείται από μια πλάκα υλικού *FR4* ενώ στην επιφάνειά του έχουν τοποθετηθεί τρία θερμίστορ από λευκόχρυσο. Οι διαστάσεις της είναι 40 mm x 24 mm και το πάχος της αισθητήρια διάταξης είναι 1,4 mm. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο αντίστοιχος φορέας του αισθητήρα, δηλαδή ο σωλήνας της πραγματικής αισθητήριας διάταξης, η δομή της οποίας η τοπολογία μελετήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια , είναι κατασκευασμένη από *PLA (Polylactic acid)*.



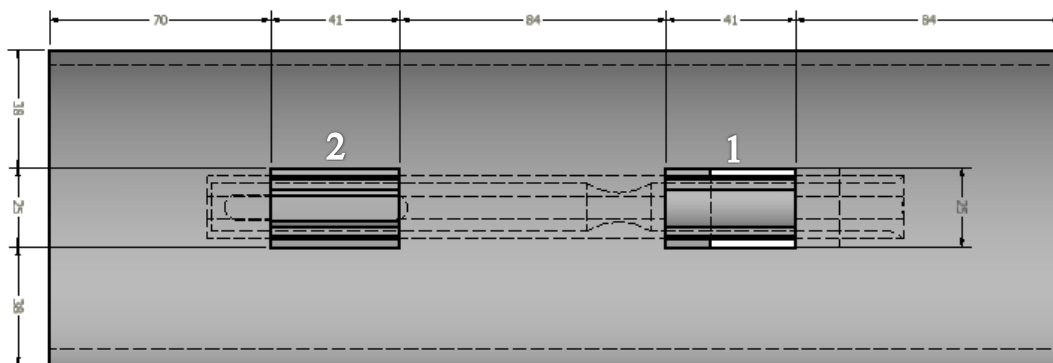
Εικόνα 81 Πραγματική αισθητήρια διάταξη

8.3 Τοποθέτηση αισθητήριων διατάξεων

Ως αποτέλεσμα της προηγούμενης μελέτης (βλ. Κεφάλαιο 7:) επιλέχθηκαν τρία σημεία στα οποία θα τοποθετηθούν οι αισθητήριες διατάξεις με διαστάσεις 40 mm x 24 mm. Οι αντίστοιχες οπές που δημιουργήθηκαν για αυτό το λόγο στο φορέα είναι διαστάσεων 41 mm x 25 mm, δηλαδή μεγαλύτερες κατά 1 mm, ώστε να μπορέσουν να προσαρμοστούν κατάλληλα. Οι δύο θα τοποθετηθούν στο σωλήνα παράκαμψης, ένας στο πρώτο διαμέρισμα και ένας στο δεύτερο διαμέρισμα για τη μέτρηση των ταχυτήτων για παροχές 300-500 kg/h.

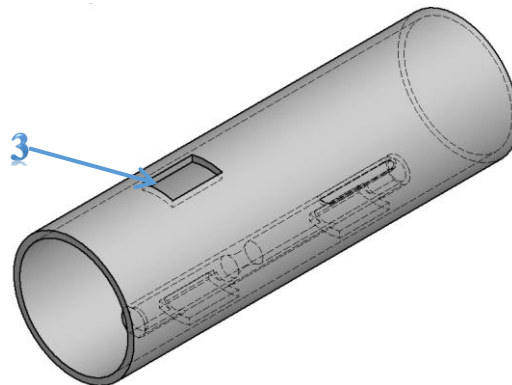


Εικόνα 82 Θέση οπών για τοποθέτηση αισθητήριων διατάξεων στο σωλήνα παράκαμψης

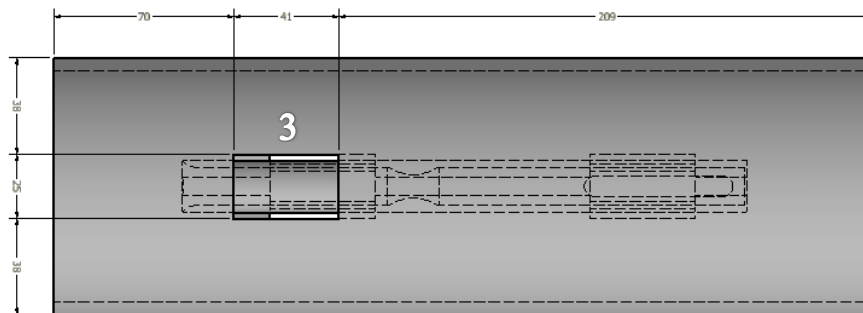


Εικόνα 83 Κάτοψη οπών 1 και 2 για την τοποθέτηση αισθητήριων διατάξεων

Ο τρίτος θα τοποθετηθεί αντιδιαμετρικά στο πάνω μέρος του φορέα, εκτός παράκαμψης, για τη μέτρηση ταχυτήτων για παροχές από 50 kg/h και κάτω.



Εικόνα 84 Θέση οπής για τοποθέτηση αισθητήριας διάταξης στο σωλήνα εκτός παράκαμψης



Εικόνα 85 Κάτοψη οπής 3 για την τοποθέτηση αισθητήριας διάταξης

8.4 Σχεδιασμός αισθητήριας διάταξης και αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας της αισθητήριας διάταξης έχει ως εξής: αποτελείται από μία πλακέτα μονωτικού υλικού πάνω στην οποία είναι τοποθετημένα τρία αισθητήρια στοιχεία- θερμίστορ (RTDs). Το μεσαίο αισθητήριο στοιχείο τροφοδοτείται με συγκεκριμένη ισχύ και έτσι θερμαίνεται. Μέσω του φαινομένου της αγωγής η θερμοκρασία της πλακέτας (υπόστρωμα) και των άλλων δύο αισθητήριων στοιχείων εκατέρωθεν αυξάνεται.

Αρχικά, μετρούνται οι θερμοκρασίες χωρίς την ύπαρξη ροής, όπου μόνο ο μηχανισμός της αγωγής λαμβάνει χώρα. Στη συνέχεια, καθώς αυξάνεται η παροχή του ρευστού που διαπερνάει το σωλήνα (το ρευστό βρίσκεται σε θερμοκρασία σημαντικά μικρότερη από το θερμαινόμενο στοιχείο) μέσω του μηχανισμού συναγωγής μέρος της θερμότητας μεταδίδεται πλέον στο ρευστό και έτσι η θερμοκρασία του αισθητηρίου στοιχείου που τροφοδοτείται με ισχύ μειώνεται (θεωρώντας ότι τροφοδοτείται με σταθερή ισχύ), ενώ αντίστοιχα του ρευστού αυξάνεται. Η θερμοκρασία των άλλων δύο αισθητηρίων στοιχείων μεταβάλλεται επίσης.

Στις επόμενες δύο ενότητες, παρουσιάζονται, συνοπτικά, οι δύο κύριοι τρόποι μέτρησης της ροής του διερχομένου ρευστού μέσω της αρχής λειτουργίας που μόλις περιγράφηκε.

8.4.1 Χρήση αισθητήριου ως θερμό νήμα

Στη συγκεκριμένη περίπτωση μετράται η διαφορά θερμοκρασίας μόνο του μεσαίου αισθητήριου στοιχείου με και χωρίς την ύπαρξη ροής. Ισχύει:

$$\Delta T = T_{middle_thermistor_0} - T_{middle_thermistor} \quad (88)$$

όπου $T_{middle_thermistor_0}$ η θερμοκρασία του μεσαίου θερμίστορ (θερμαντήρα) χωρίς την ύπαρξη ροής.

Η διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) είναι ανάλογη της μεταβολής της αντίστασης (ΔR) και υπολογίζεται βάση της σχέσης που συνδέει τη θερμοκρασία με την αντίσταση, που ισχύει για το πρότυπο θερμικών αισθητήριων PT 100. Για αρχικές θερμοκρασίες από μηδέν και άνω ($0 - 850^\circ\text{C}$) ισούται με:

$$R_T = R_0[1 + (3,9083 \times 10^{-3})T + (-5,775 \times 10^{-7})T^2] \quad (89)$$

όπου R_T η αντίσταση που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία T και R_0 η αντίσταση που αντιστοιχεί στους 0°C , η οποία είναι 100Ω .

Επομένως η μεταβολή της αντίστασης υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta R = R_T - R_{heater} \quad (90)$$

όπου R_{heater} η αντίσταση του μεσαίου αισθητήριου στοιχείου χωρίς την ύπαρξη ροής.

8.4.2 Χρήση αισθητήρα με διαφορική μέτρηση

Σε αυτή την περίπτωση μετράται η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο πρώτο και το τρίτο αισθητήριο στοιχείο $\Delta T = T_{right_thermistor} - T_{left_thermistor}$ χωρίς την ύπαρξη ροής και συγκρίνεται με την αντίστοιχη όταν διέρχεται το ρευστό. Η θερμοκρασία συνδέεται με την αντίσταση κάθε στοιχείου μέσω της σχέσης αντίστασης- θερμοκρασίας. Να σημειωθεί ότι η αντίσταση του αισθητήριου στο μέτωπο της ροής ορίζεται ως $R_{upstream}$ ενώ αντίστοιχα ορίζουμε ως $R_{downstream}$ την αντίσταση του τρίτου στοιχείου.

Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων που μόλις περιγράφηκαν είναι ότι η μέτρηση θερμού νήματος έχει μεγαλύτερο μετρητικό πεδίο (μέτρηση υψηλότερων παροχών), ενώ στη διαφορική μέτρηση έχουμε μικρότερο μετρητικό πεδίο (ο κορεσμός επέρχεται πιο γρήγορα) αλλά με καλύτερη ακρίβεια μέτρησης.

8.5 Παραμετροποίηση της βασικής γεωμετρίας του αισθητήριου στοιχείου

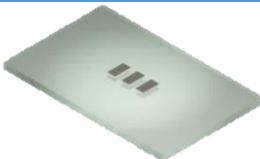


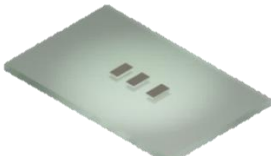
8.5.1 Περίληψη

Βασικός σκοπός της παραμετροποίησης της βασικής γεωμετρίας της αισθητήριας διάταξης (και για τους δύο προαναφερόμενους τρόπους μέτρησης -θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης) είναι η εύρεση της παροχής για την οποία ο αισθητήρας έρχεται σε κορεσμό (δηλαδή περαιτέρω αύξηση της παροχής δεν επιφέρει πλέον μεταβολή στην έξοδό του), για διαφορετικούς συνδυασμούς κατάλληλων δομικών υλικών (υποστρώματος και θερμικών αισθητηρίων) καθώς και απόστασης μεταξύ των αισθητήριων στοιχείων, με σκοπό να διευρυνθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το μετρητικό πεδίο του αισθητήρα. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν οι βασικές παραλλαγές της προϋπάρχουσας γεωμετρίας που παρουσιάζονται στις επόμενες υποενότητες.

8.5.2 Μεταβολή απόστασης μεταξύ των θερμίστορ

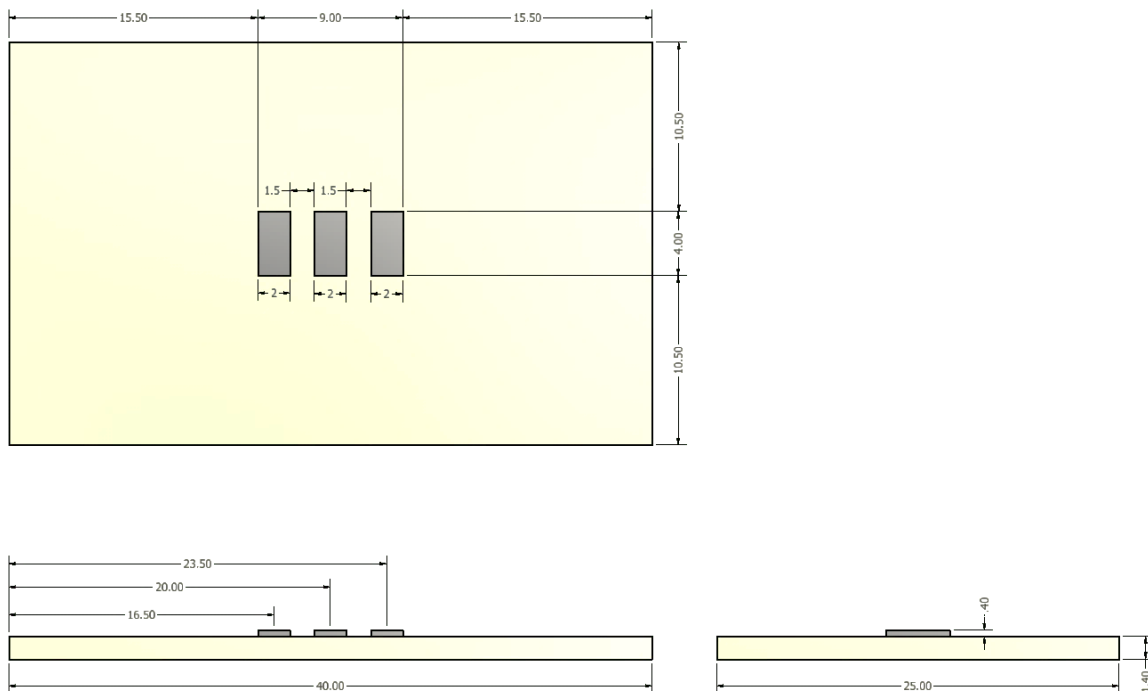
Η αισθητήρια δομή θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένη από το υλικό *FR4 (Glass-Reinforced Epoxy Laminate Material)* και τρία αισθητήρια στοιχεία από λευκόχρυσο. Οι παραλλαγές γίνονται μόνο ως προς την απόσταση ανάμεσα στα αισθητήρια στοιχεία, ενώ οι κύριες διαστάσεις και τα υλικά παραμένουν τα ίδια. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι κάτωθι αποστάσεις όπως αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3 Αποστάσεις μεταξύ θερμίστορ ανά περίπτωση

Περίπτωση	Εικόνα	Απόσταση ανάμεσα στα θερμίστορ [mm]	
1 ^η		1,5	Συμμετρική
2 ^η		2,4	Συμμετρική
3 ^η		3,6	Συμμετρική
4 ^η		2/ 2,8	Ασύμμετρη

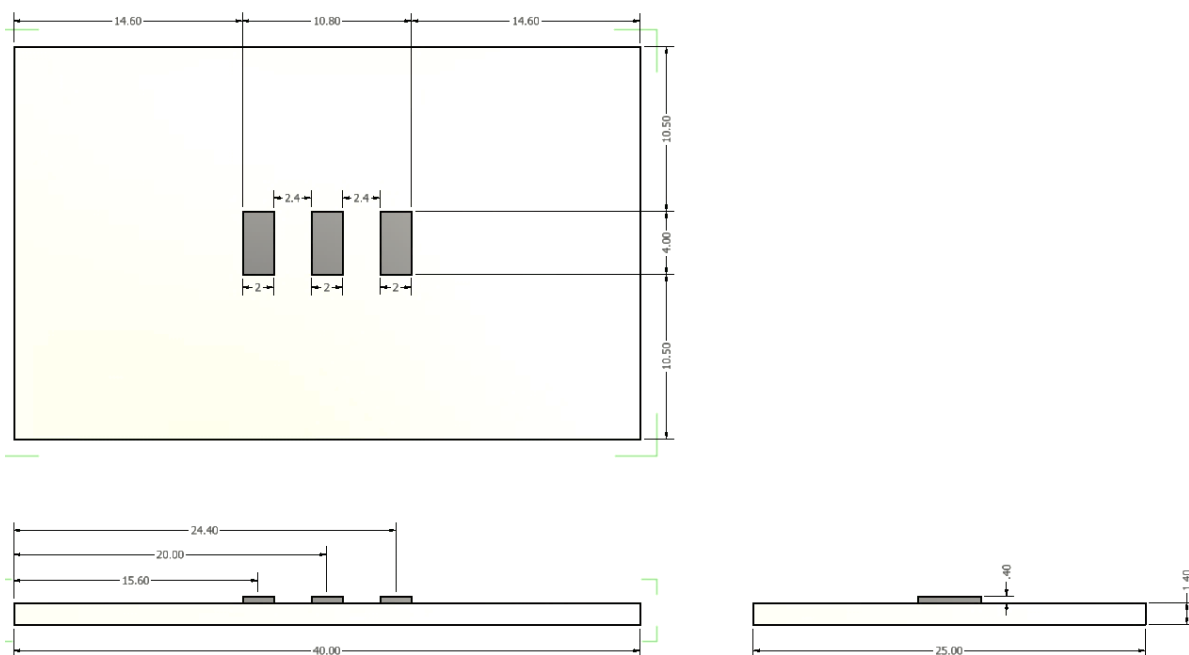
Ακολουθούν τα σχέδια με τις ακριβείς διαστάσεις της κάθε περίπτωσης:

■ Περίπτωση 1^η



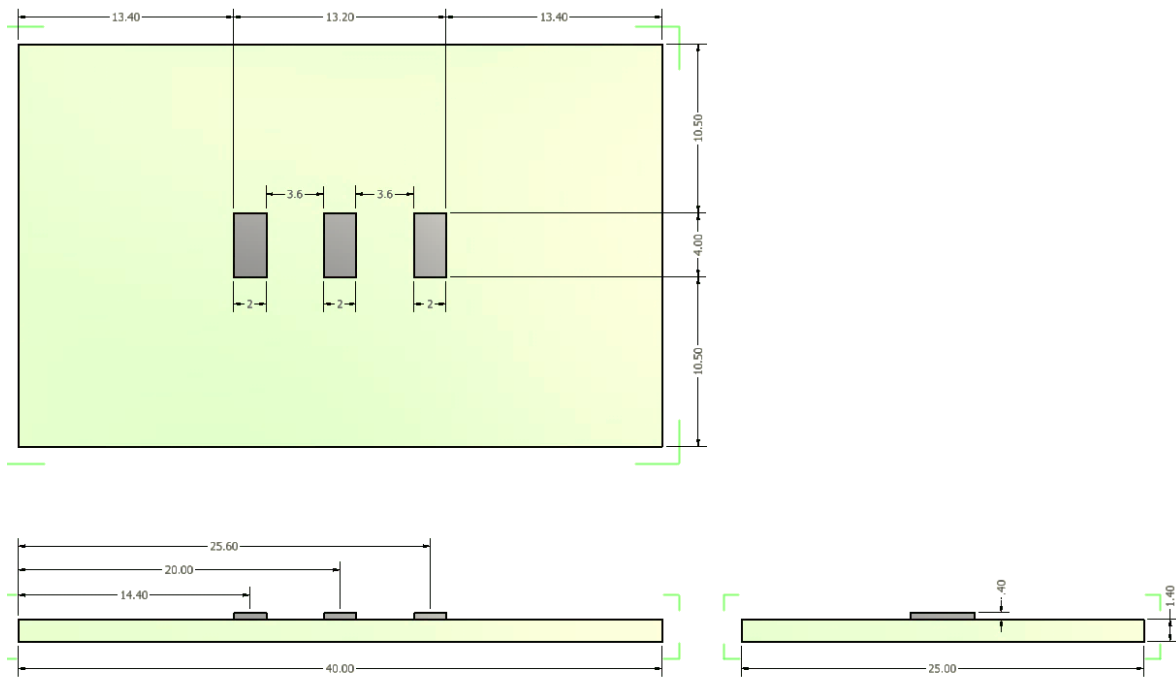
Εικόνα 86 Όψεις αισθητήριας διάταξης περίπτωσης 1

■ Περίπτωση 2^η



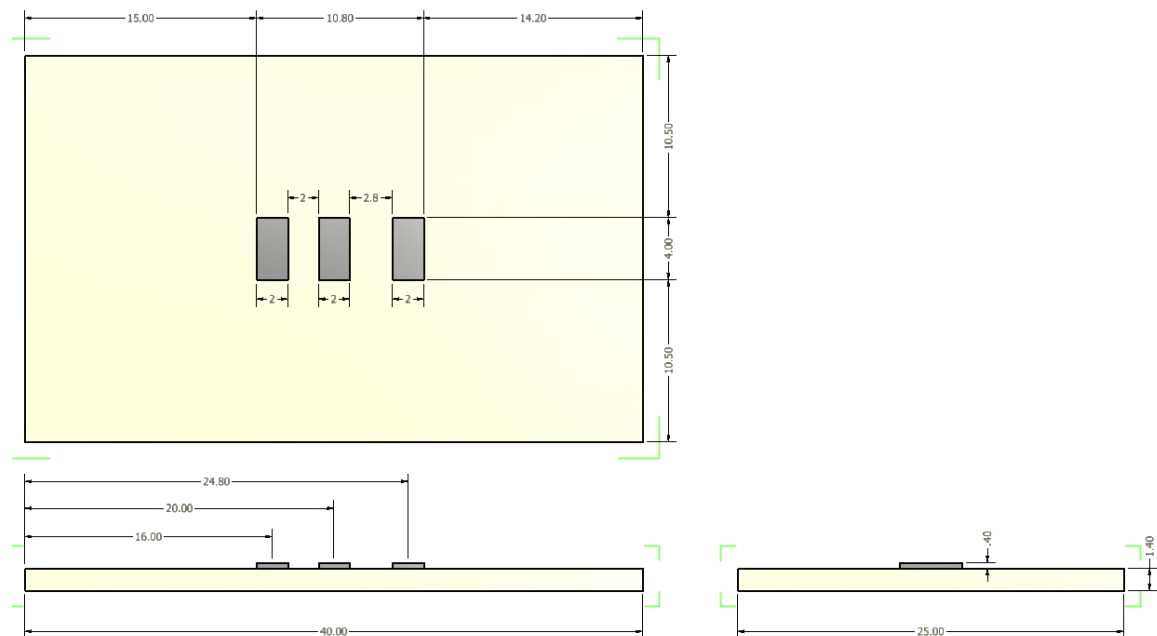
Εικόνα 87 Όψεις αισθητήριας διάταξης περίπτωσης 2

■ Περίπτωση 3^η



Εικόνα 88 Όψεις αισθητήριας διάταξης περίπτωσης 3

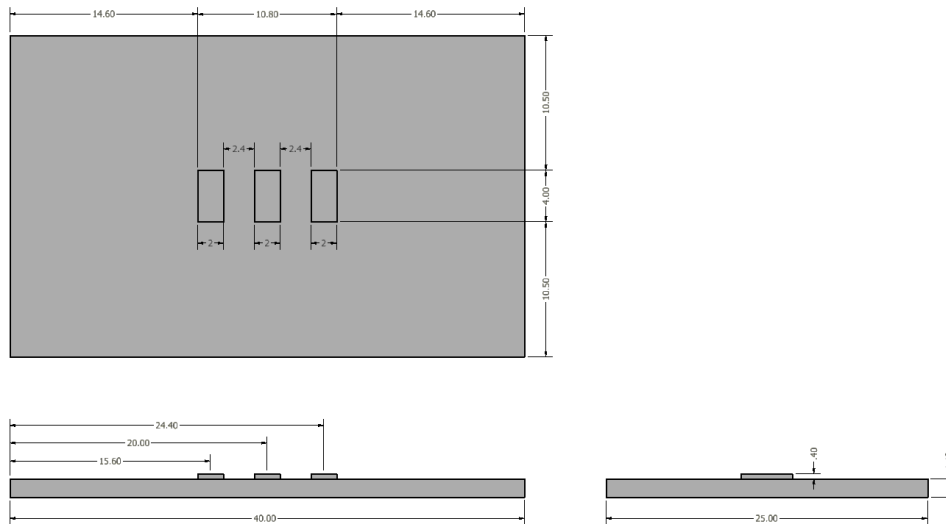
■ Περίπτωση 4



Εικόνα 89 Όψεις αισθητήριας διάταξης περίπτωσης 4


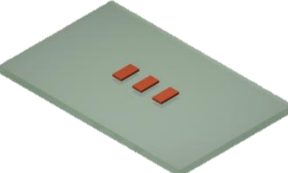
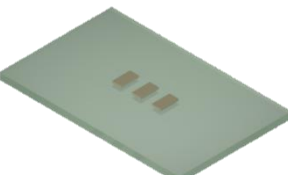
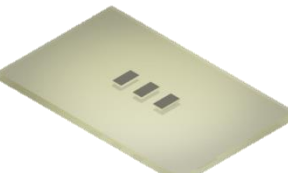
8.5.3 Παραμετροποίηση υλικού κατασκευής θερμίστορ (RTDs)

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι κύριες διαστάσεις όσο και η απόσταση μεταξύ των θερμίστορ παραμένουν σταθερά. Αυτό που αλλάζει κάθε φορά είναι τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.



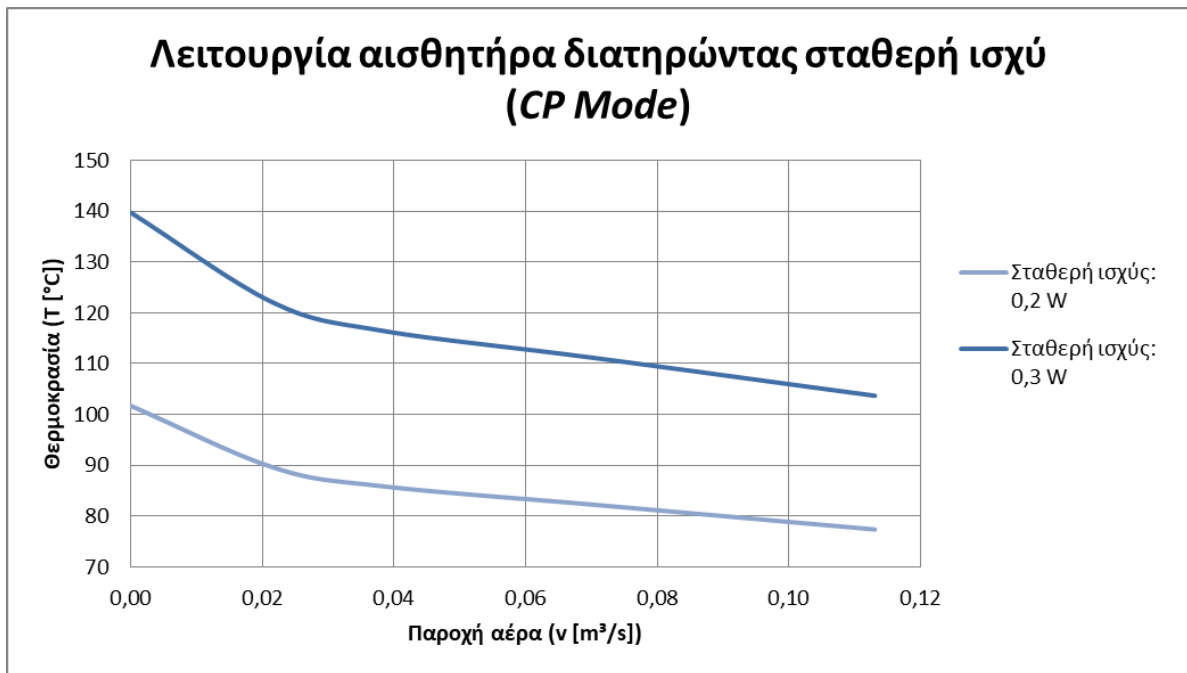
Εικόνα 90 Όψεις αισθητήριας διάταξης με διαστασιολόγηση

Πίνακας 4 Πίνακας υλικών αισθητήριας διάταξης

Εικόνα	Υλικό αισθητήριας διάταξης	Υλικό θερμίστορ
	FR4	Λευκόχρυσος
	FR4	Χαλκός
	FR4	Νικέλιο
	PLA	Λευκόχρυσος

8.5.4 Αλλαγή του τρόπου λειτουργίας από σταθερή ισχύ (CP) σε σταθερή θερμοκρασία (CT)

Χρησιμοποιώντας τη μορφολογία όπου η απόσταση μεταξύ των θερμίστορ είναι 2,4 mm και το υλικό κατασκευής τους είναι ο λευκόχρυσος, ενώ το υπόστρωμα είναι κατασκευασμένο από υλικό FR4, πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες προσομοιώσεις ροής, όπως θα δούμε και στο Κεφάλαιο 9.5, με σταθερή ισχύ τροφοδοσίας του θερμαντήρα 0,2 W και 0,3 W αντίστοιχα.



Εικόνα 91 Διάγραμμα θερμοκρασίας θερμαντήρα σε σχέση με την παροχή για ισχύ 0,2 W και 0,3 W αντίστοιχα

Παρατηρήθηκε ότι για χαμηλές παροχές η απαιτούμενη ισχύς για να παραμείνει σταθερή η θερμοκρασία ($T = 101,7 \text{ }^\circ\text{C}$) μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά και μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια μέσω του τύπου της γραμμικής παρεμβολής.

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) \quad (91)$$

οπότε λύνοντας την εξίσωση (91) ως:

$$P_{(T=101,7 \text{ }^\circ\text{C})} = 0,2 + \frac{0,3 - 0,2}{T_{(P=0,3)} - T_{(P=0,2)}} \cdot (101,7 - T_{(P=0,2)}) \quad (92)$$

Καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα στον οποίο περιλαμβάνονται οι τιμές ισχύος ανάλογα την τιμή της παροχής ώστε η θερμοκρασία του θερμαντήρα να παραμένει σταθερή στους $101,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Πίνακας 5 Απαιτούμενη ισχύς για τη διατήρηση θερμοκρασίας θερμαντήρα στους 101,7 °C.

Παροχή	Ταχύτητα ρευστού	Λειτουργία Σταθερής Ισχύος				Λειτουργία Σταθερής Θερμοκρασίας	
		T	P	T	P	T	P
\dot{m}	v	[°C]	[W]	[°C]	[W]	[°C]	[W]
[kg/h]	[m/s]	[°C]	[W]	[°C]	[W]	[°C]	[W]
3,55	2,40	77,40	0,2	103,700	0,3	101,7	0,29
0,68	0,46	89,58		122,000			0,24
0,00	0,00	101,70		139,700			0,20

Οι παραπάνω τιμές επαληθεύονται με κατάλληλες προσομοιώσεις. Στις οριακές συνθήκες για κάθε παροχή δόθηκε και η αντίστοιχη ισχύς και το αποτέλεσμα της μέγιστης θερμοκρασίας στο θερμαντήρα ήταν 101,7 στις μικρές παροχές, ενώ παρουσίασε μικρή απόκλιση στις μεγάλες παροχές.

Κεφάλαιο 9: Βελτιστοποίηση γεωμετρίας αισθητήριου στοιχείου μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων

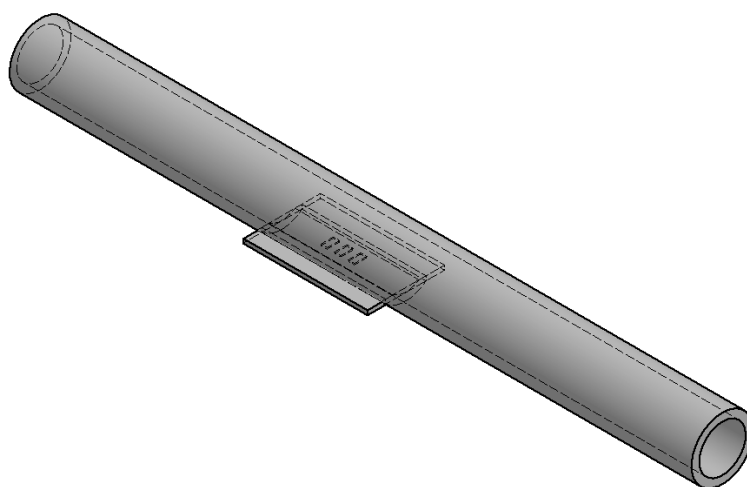
9.1 Περίληψη

Στο τρέχον κεφάλαιο πραγματοποιείται μία μελέτη σε ότι αφορά την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας και τη μέθοδο μέτρησης που χρησιμοποιείται. Ως εκ τούτου θα δούμε τη διαδικασία της προσομοίωσης μεταφοράς θερμότητας, ξεκινώντας από το σχεδιασμό του απλοποιημένου πλέον μοντέλου με απώτερο σκοπό την προσομοίωση της λειτουργίας του και την εξαγωγή αποτελεσμάτων που μας επιτρέπουν τη σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης που μπορούν να εφαρμοστούν, των διαφορετικών δομικών υλικών και αποστάσεων των αισθητήριων στοιχείων (θερμίστορ).

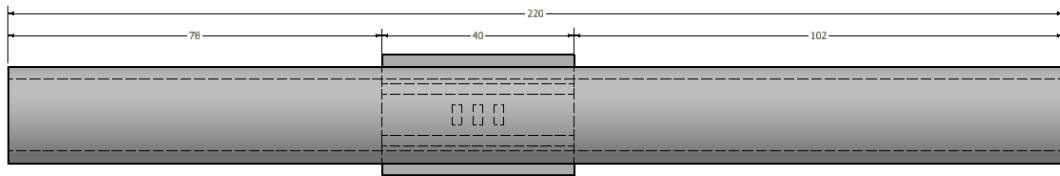
9.2 Σχεδιασμός απλοποιημένου φορέα με ενσωματωμένο αισθητήρα

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι επιλέχθηκε να απλοποιηθεί το μοντέλο για να είναι πιο εύκολα πραγματοποιήσιμη η διαδικασία προσομοίωσης στην πλατφόρμα *Simscale*. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε μόνο ο σωλήνας παράκαμψης, γνωρίζοντας πλέον τις τιμές της παροχής εσωτερικά από την προηγούμενη μελέτη, χωρίς κάποια στένωση ή οπή εξόδου του ρευστού.

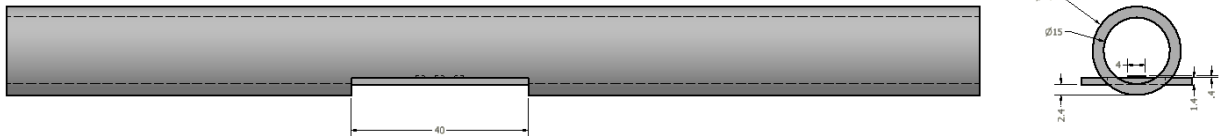
Η εξωτερική διάμετρος διατηρήθηκε 20 cm ενώ η εσωτερική παραμένει 15 cm όπως και στον αρχικό φορέα στον οποίο βασίστηκε. Επίσης, ο φορέας είναι ανοιχτός και από τις δύο πλευρές και έχει σχεδιαστεί με ειδική εγκοπή στο κάτω μέρος του ώστε να «προσαρμοστεί» ο αισθητήρας.



Εικόνα 92 Γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας



Εικόνα 93 Κάτοψη μοντέλου

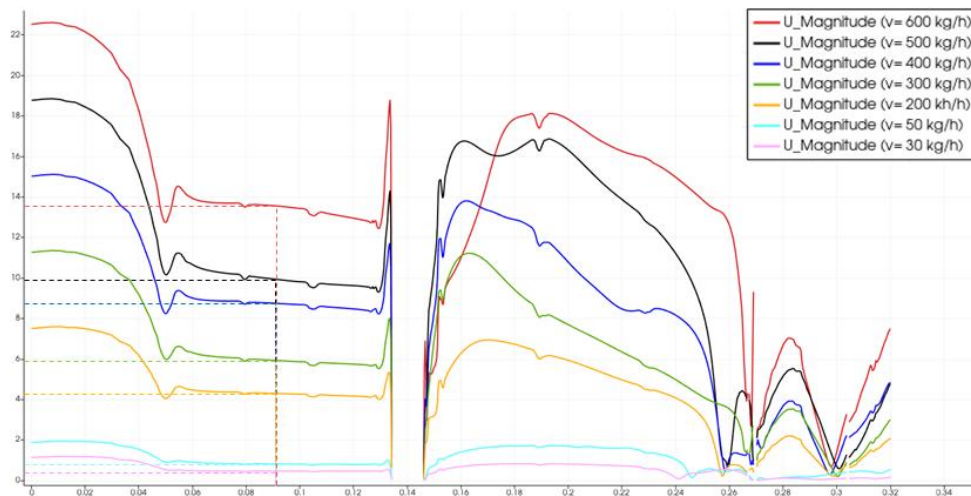


Εικόνα 94 Αριστερά: Πρόοψη μοντέλου Δεξιά: Αριστερή πλάγια όψη

9.3 Χαρακτηριστικά ροής στο σωλήνα παράκαμψης

Στο παραπάνω μοντέλο οι τιμές ταχυτήτων εισόδου αντιστοιχούν στις ταχύτητες που βρέθηκαν στο πρώτο διαμέρισμα του σωλήνα παράκαμψης στις προσομοιώσεις ροής (βλ. Ενότητα 7.3), εκεί δηλαδή που θα τοποθετηθεί το αισθητήριο στοιχείο. Σύμφωνα με τις προηγηθείσες προσομοιώσεις στην ενότητα 7.4 θα πρέπει να υπολογιστούν εκ νέου τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της ροής βάση των νέων ταχυτήτων πριν προχωρήσουμε στην προσομοίωση.

Στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι προσομοιώσεις που έγιναν αφορούσαν παροχές από 0-600 kg/h. Σε κάθε παροχή αντιστοιχεί και μία ταχύτητα εισόδου και αυτή η ταχύτητα εισόδου αντιστοιχίζεται με την ανάλογη ταχύτητα στο σωλήνα παράκαμψης (βλ. διακεκομμένες γραμμές στο γράφημα και Πίνακας 6). Έτσι από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις προκύπτουν:



Εικόνα 95 Αντιστοίχιση ταχυτήτων

Πίνακας 6 Πίνακας αντιστοίχισης ταχυτήτων

\dot{V} [kg/h]	Ταχύτητα εισόδου εκτός παράκαμψης ($x=0$ m)	Ταχύτητα εισόδου σε σωλήνα παράκαμψης της ροής ($x=0,9$ m)
	$u_{x=0}$ [m/s]	$u_{x=0,9}$ [m/s]
600	20,20	13,56
500	16,83	9,93
400	13,47	8,74
300	10,10	5,92
200	6,73	4,29
50	1,68	0,81
30	1,01	0,46

Το επόμενο απαραίτητο βήμα για το χαρακτηρισμό της ροής είναι η διάκρισή της σε συμπίεστη ή ασυμπίεστη μέσω του υπολογισμού του αριθμού *Mach*:

$$M = \frac{u[m/s]}{c[m/s]} \quad (93)$$

όπου:

- u η ταχύτητα του ρευστού σε [m/s]
- και c η ταχύτητα του ήχου, η οποία για ατμοσφαιρικό αέρα θερμοκρασίας $T = 20^\circ\text{C}$ είναι ίση με $c = 343$ [m/s].

Έπειτα, για τη διάκριση της ροής σε στρωτή ή τυρβώδη υπολογίστηκε ο αριθμός *Reynolds*:

$$Re = \frac{\rho[kg/m^3] \cdot u[m/s] \cdot d[m]}{\mu[kg/m \cdot s]} \quad (94)$$

όπου:

- ρ η πυκνότητα του αέρα που λαμβάνεται ως 1.164 [kg/m³] σε θερμοκρασία $T = 25^\circ\text{C}$ και πίεση $P = 1$ bar
- u η ταχύτητα του ρευστού σε [m/s]
- d η διάμετρος του σωλήνα παράκαμψης που ισούται με $d = 0.015$ m
- Και μ το ιξώδες του αέρα στους $T = 20^\circ\text{C}$ είναι ίσο με $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$

Από όπου και προέκυψε ο πίνακας με τα παρακάτω στοιχεία:

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά ροής βάση των ταχυτήτων αντιστοίχισης

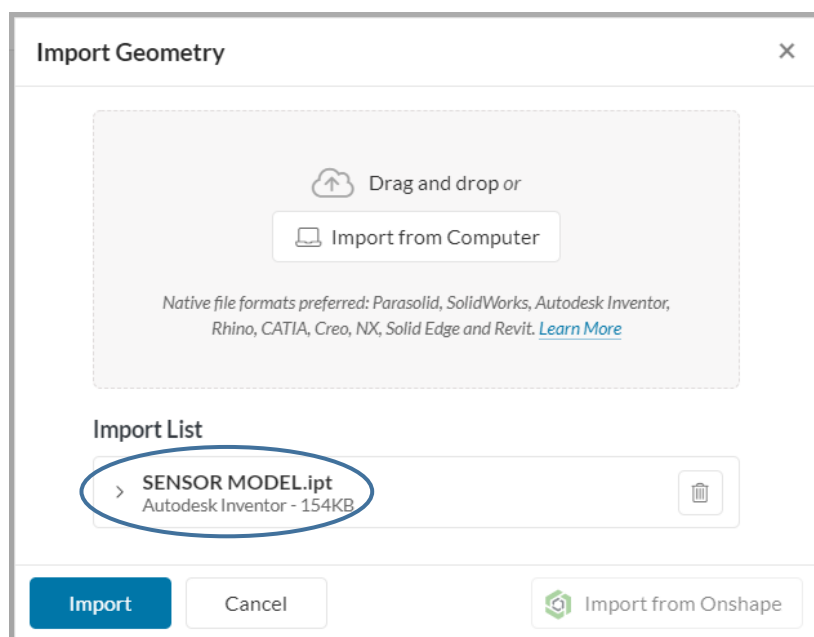
Παροχή	Ταχύτητα	Αριθμός <i>Mach</i>			Αριθμός <i>Reynolds</i>		
\dot{v}	u	M			Re		
$[m^3/s]$	$[m/s]$	[-]			[-]		
0,1432	13,56	0,040	<0,3	Ασυμπίεστη	13150	>2300	Τυρβώδης
0,1193	9,93	0,029	<0,3	Ασυμπίεστη	9629	>2300	Τυρβώδης
0,0955	8,74	0,025	<0,3	Ασυμπίεστη	8482	>2300	Τυρβώδης
0,0716	5,92	0,017	<0,3	Ασυμπίεστη	5746	>2300	Τυρβώδης
0,0477	4,29	0,013	<0,3	Ασυμπίεστη	4161	>2300	Τυρβώδης
0,0119	0,81	0,002	<0,3	Ασυμπίεστη	785	<1800	Στρωτή
0,0072	0,46	0,001	<0,3	Ασυμπίεστη	446	<1800	Στρωτή

Παρατηρούμε ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η ροή είναι ασυμπίεστη καθ' όλο το εύρος μετρήσεων, ενώ χαρακτηρίζεται και ως τυρβώδης, με εξαίρεση τις πολύ χαμηλές ταχύτητες, κοντά στο μηδέν.

9.4 Μοντελοποίηση γεωμετρίας

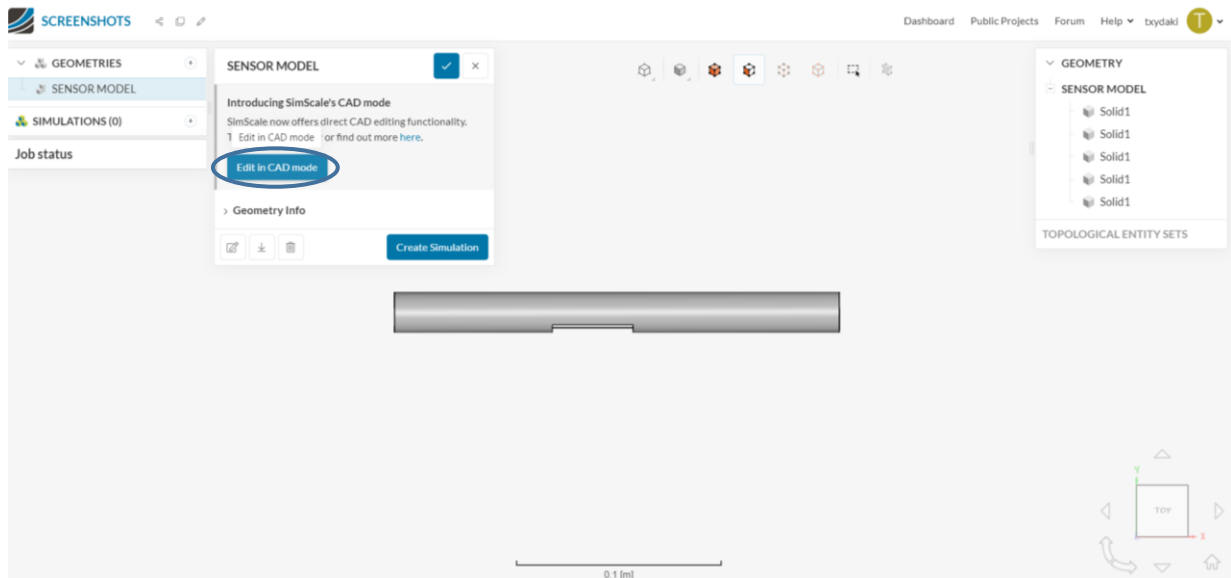
Αντίστοιχα με τη μοντελοποίηση της συνολικής γεωμετρίας (βλ. Ενότητες 6.3 και 6.4), η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν παρόμοια. Συγκεκριμένα:

Αρχικά εισήχθη η παραπάνω γεωμετρία στο πρόγραμμα.



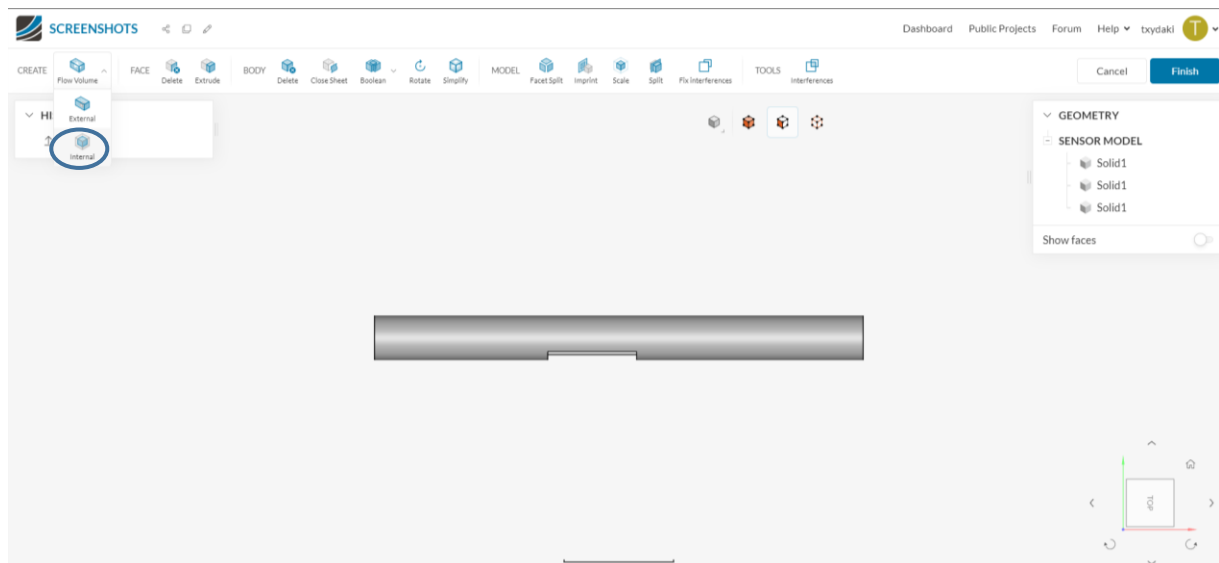
Εικόνα 96 Εισαγωγή μοντέλου στο Simscale

Έπειτα έγινε εξεργασία του σχεδίου ώστε να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση και να μπορέσουμε να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα της προσομοίωσης. Για το σχεδιασμό στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε το σχεδιαστικό περιβάλλον τύπου CAD της πλατφόρμας *Simscale*.



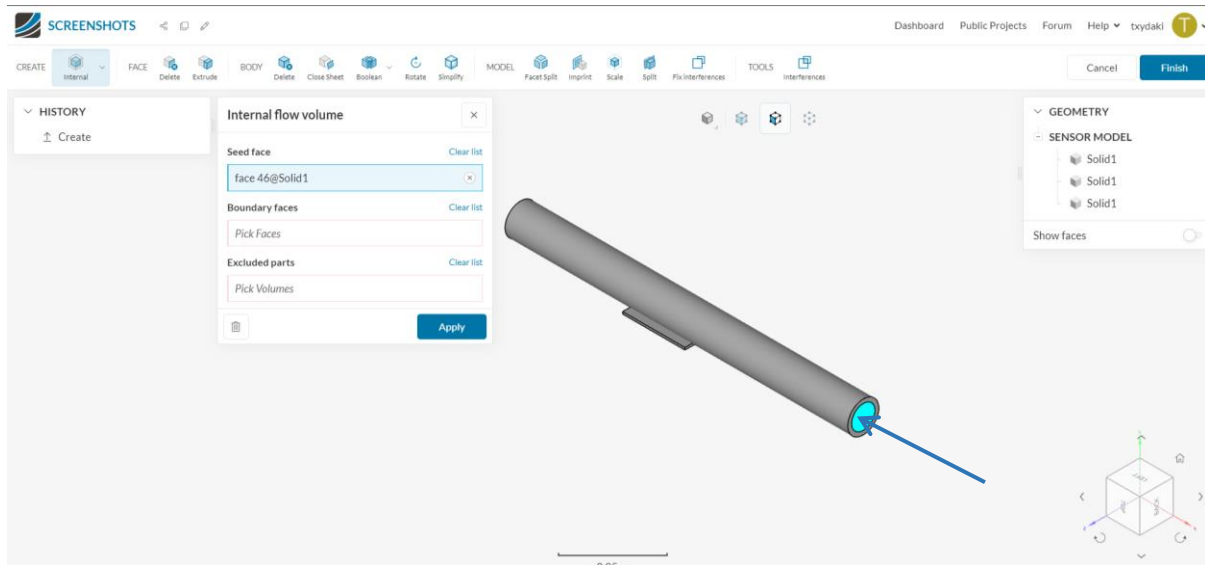
Εικόνα 97 Επεξεργασία γεωμετρίας σε σχεδιαστικό περιβάλλον CAD

Το επόμενο βήμα είναι να προσδιορίσουμε που είναι η ροή η οποία μας ενδιαφέρει να προσομοιώσουμε. Στη δική μας περίπτωση ενδιαφερόμαστε για τη ροή ρευστού εντός του σωλήνα, οπότε επιλέγουμε την εντολή *Internal Flow Volume*, όπως ακριβώς φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



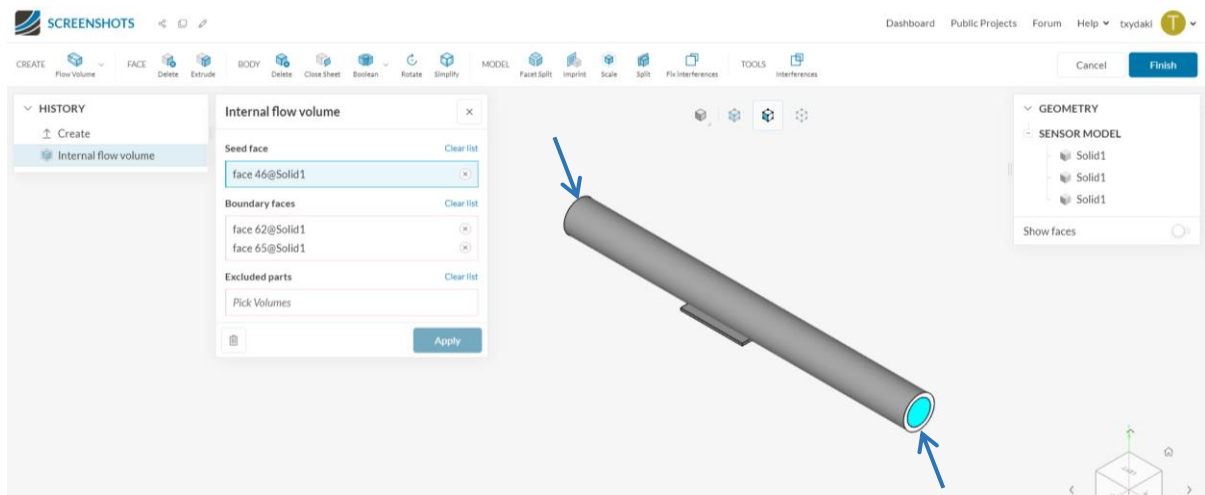
Εικόνα 98 Καθορισμός της ροής εσωτερικά του σωλήνα

Επιλέγουμε την εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα (βλ. περιοχή σιέλ χρώματος στην Εικόνα 99) ως επιφάνεια εισροής (*seed face*).



Εικόνα 99 Καθορισμός σημείου εκχύλισης της ροής

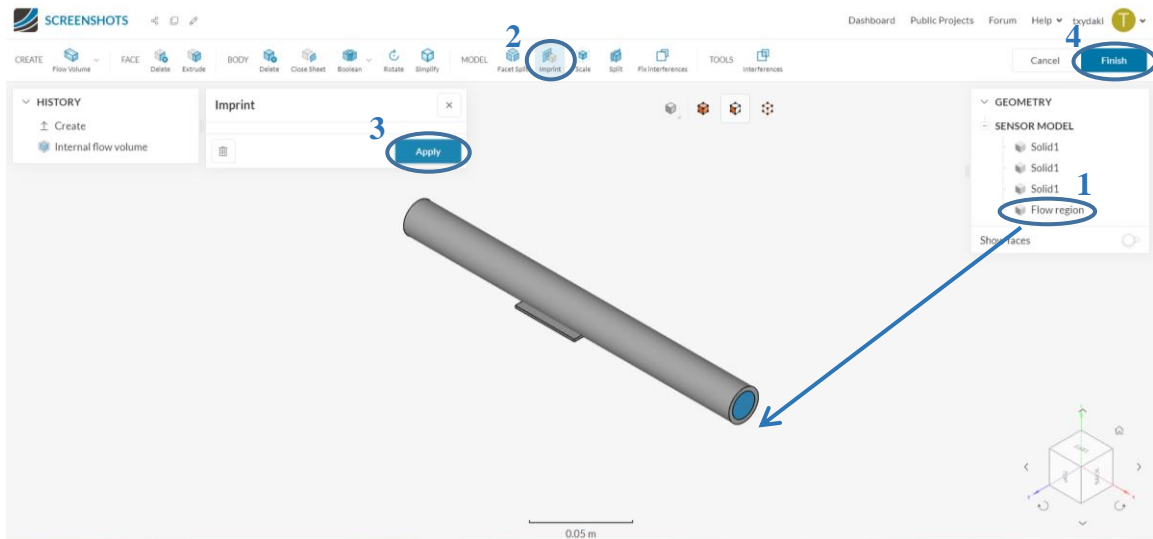
Αμέσως μετά ζητείται να οριοθετηθεί η περιοχή της ροής για αυτό το λόγο επιλέγεται η περιοχή στα δύο άκρα του σωλήνα όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 100, δηλαδή το εξωτερικό «δαχτυλίδι» στο μπροστινό και στο πίσω μέρος (βλ. λευκό χρώμα στην εικόνα):



Εικόνα 100 Προσδιορισμός οριακών επιφανειών

Αφού βεβαιωθούμε ότι έχει πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση, δηλαδή έχει πλέον δημιουργηθεί ένας νέος όγκος που αντιπροσωπεύει τη ροή (*Flow Region*) (βλ. βήμα 1 Εικόνα 101), επιλέγουμε την εντολή *Imprint* ώστε το επεξεργασμένο σχέδιο να αποτυπωθεί ως ξεχωριστή γεωμετρία (βλ. βήμα 2 Εικόνα 101) και το εφαρμόζουμε (βλ. βήμα 3 Εικόνα 101).

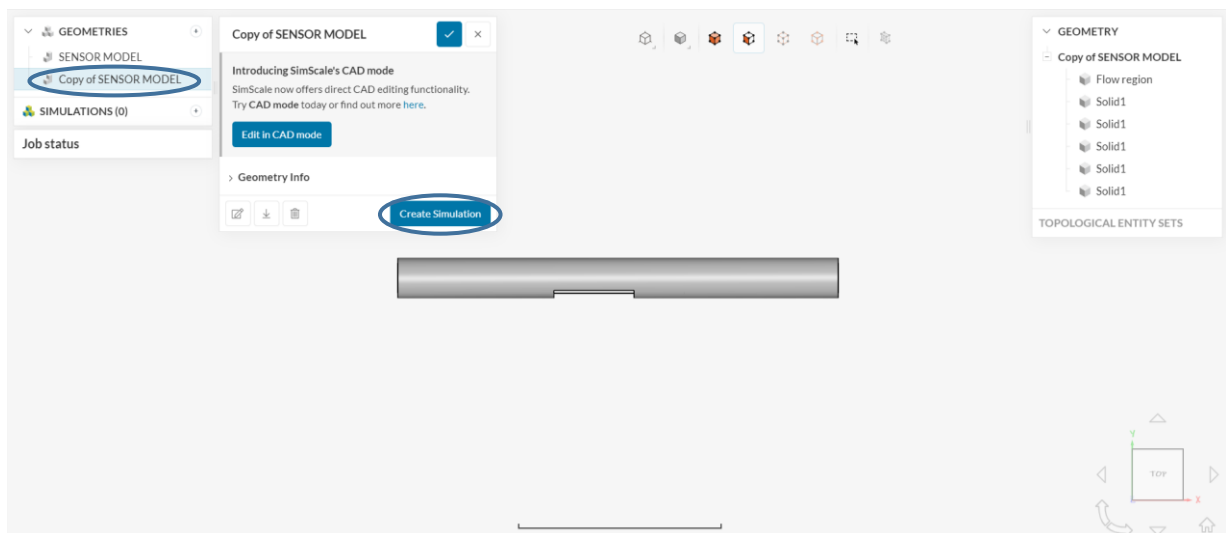
Με αυτόν τον τρόπο έχουμε και τις δύο γεωμετρίες διαθέσιμες, την αρχική, που περιλαμβάνει την κατασκευή και την επεξεργασμένη στην οποία έχει προστεθεί η ύπαρξη ροής. Αυτό μας επιτρέπει να κάνουμε στο ίδιο project αν το επιθυμούμε προσομοιώσεις κατασκευαστικές στις οποίες δεν υπάρχει ροή χρησιμοποιώντας το αρχικό μας αρχείο. Τέλος επιλέγουμε *Finish* ώστε να επανέλθουμε στο αρχικό μενού (βλ. βήμα 4 Εικόνα 101).



Εικόνα 101 Ολοκλήρωση μοντελοποίησης

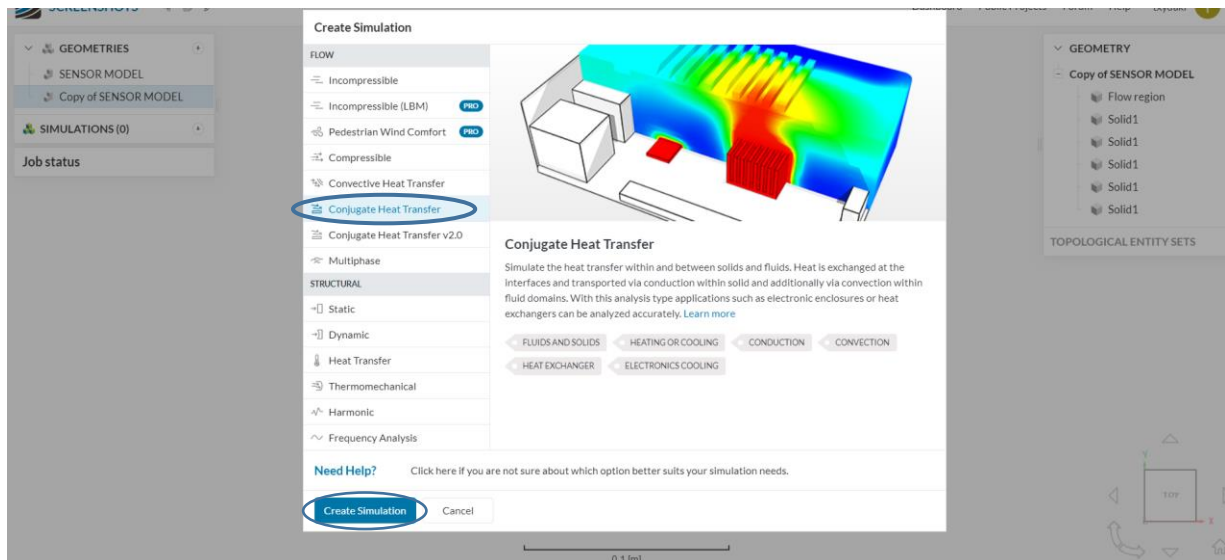
9.5 Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας

Όπως προαναφέρθηκε μέσω της εντολής *Imprint* δημιουργήθηκε ένα επεξεργασμένο αντίγραφο του σχεδίου που εισήχθη και με βάση αυτό πραγματοποιείται η προσομοίωση.



Εικόνα 102 Εντολή *Imprint*

Ως βασικός τύπος προσομοίωσης επιλέγεται προσομοίωση με ροή για μετάδοση θερμότητας με συναγωγή, δηλαδή τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενός κινούμενου ρευστού και ένα στερεού.

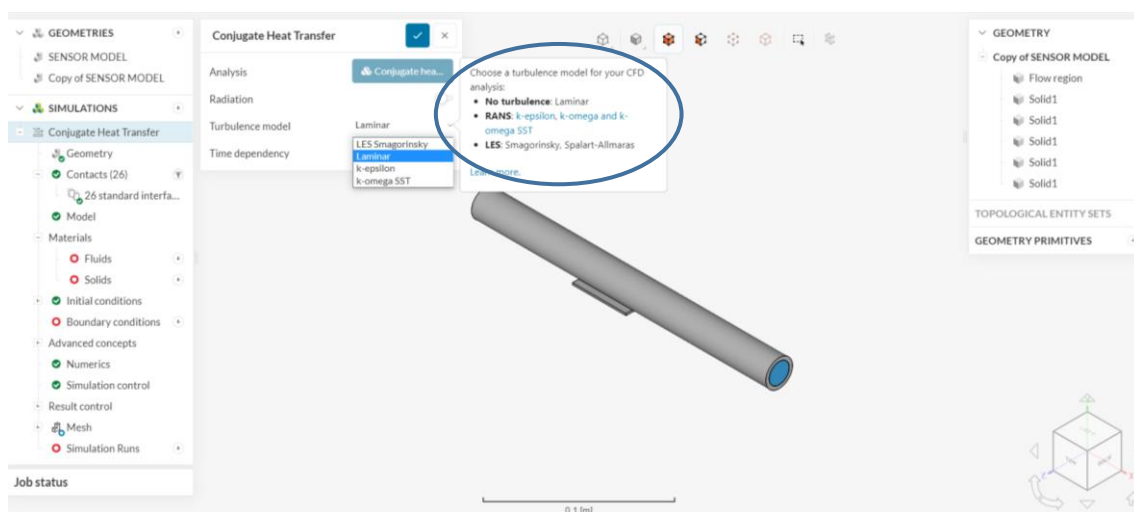


Εικόνα 103 Είδος προσομοίωσης: Σύνθετη μεταφορά θερμότητας

9.5.1 Επιλογή κατάλληλου μοντέλου επίλυσης

Γενικότερα όπως έχουμε ήδη αναφέρει (βλ. ενότητα 9.3), ανάλογα με την παροχή που θα τεθεί και βάσει του αριθμού *Reynolds* που υπολογίζεται μέσω αυτής επιλέγουμε το κατάλληλο μοντέλο επίλυσης (*solver*). Δηλαδή:

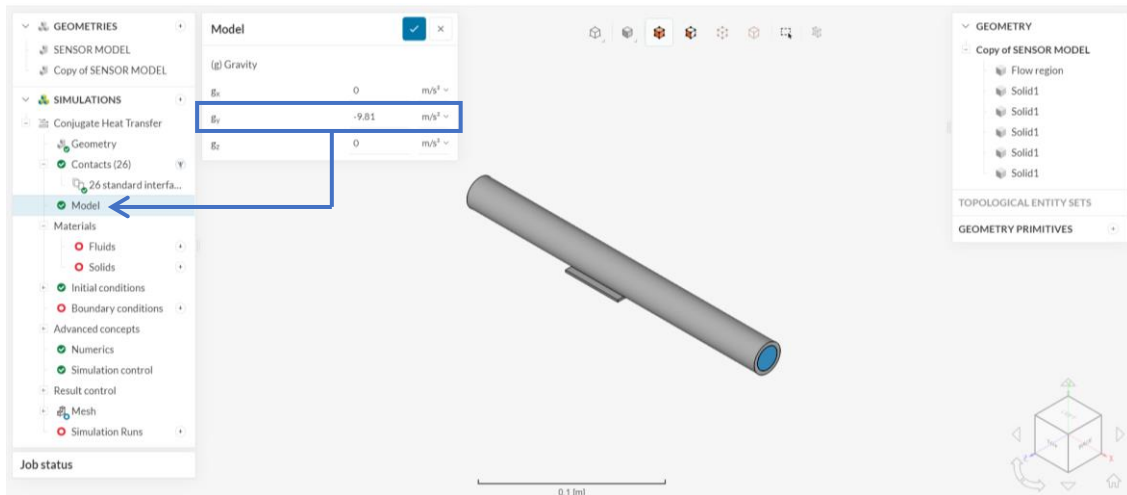
- *Laminar* για στρωτή ροή
- Ή *k- ω SST* για τυρβώδη ροή



Εικόνα 104 Επιλογή κατάλληλου μοντέλου τύρβης

9.5.2 Προσδιορισμός υλικών κατασκευής και ρευστού

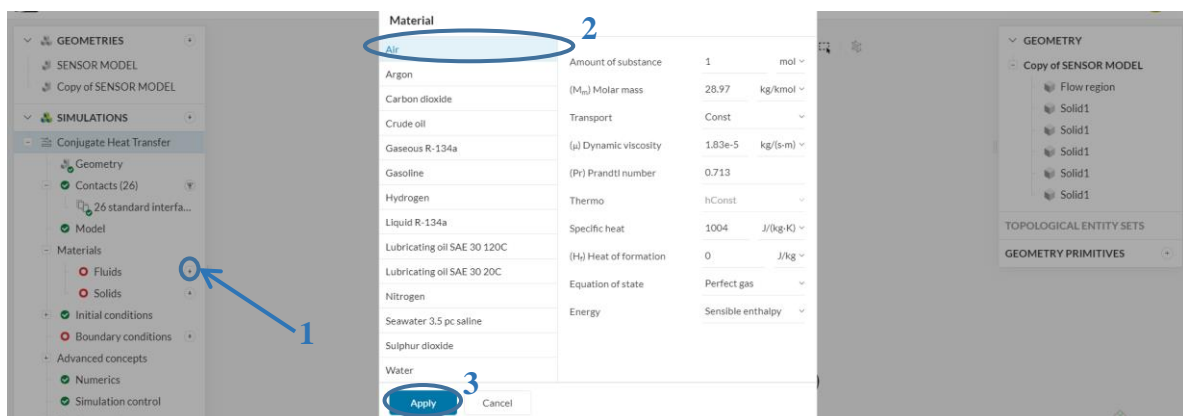
Στο επόμενο βήμα απαιτείται να προσδιοριστεί η επιτάχυνση της βαρύτητας και η κατεύθυνση της βάσει του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων (βλ. Εικόνα 105). Για τη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε $9,81 \text{ m/s}^2$ στην κατεύθυνση y . Να επισημανθεί ότι αυτή η πληροφορία έχει ιδιαίτερη σημασία στη φυσική συναγωγή.



Εικόνα 105 Προσδιορισμός κατεύθυνσης της επιτάχυνσης της ταχύτητας

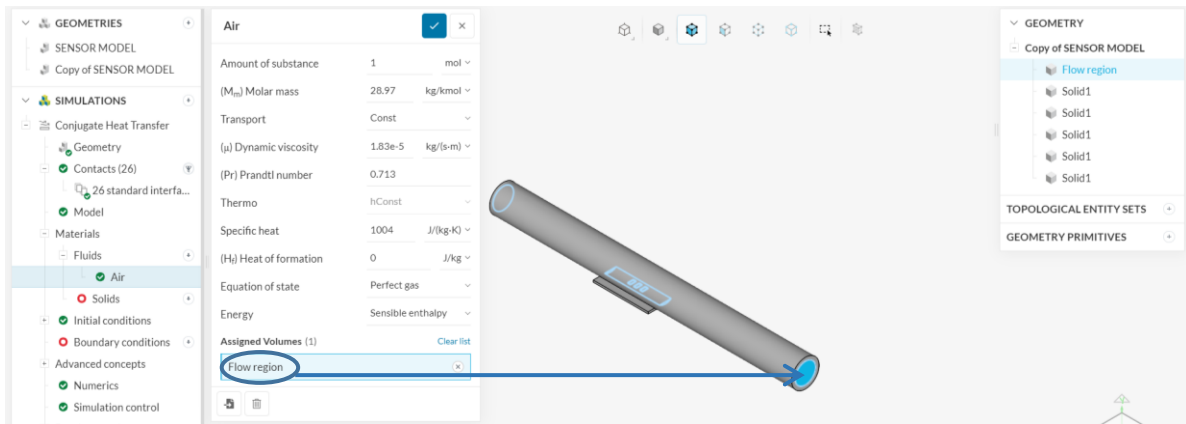
Στο σημείο αυτό προσδιορίζονται τα υλικά από τα οποία αποτελείται το μοντέλο που θέλουμε να προσομοιώσουμε.

Αρχικά ορίζεται ο τύπος του ρευστού μέσα στο σωλήνα, που στην περίπτωση μας είναι αέρας (βλ. βήμα 1,2 Εικόνα 106). Οι ιδιότητες του κάθε υλικού εισάγονται αυτόματα, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να τροποποιηθούν αν κριθεί απαραίτητο. Έχοντας ολοκληρώσει τον έλεγχο των ιδιοτήτων του υλικού που επιλέχθηκε, το εφαρμόζουμε πατώντας *Apply* (βλ. βήμα 3 Εικόνα 106).



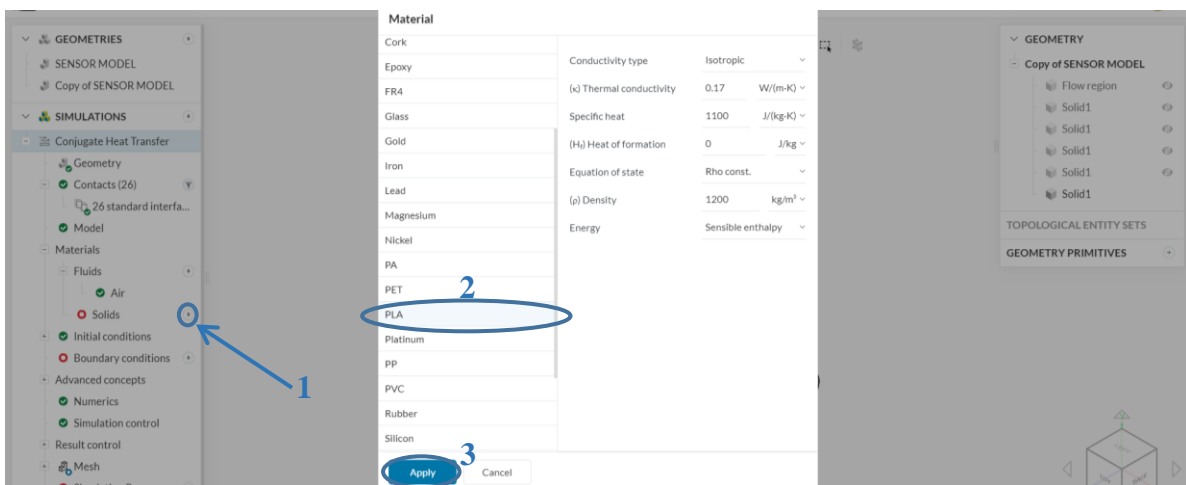
Εικόνα 106 Καθορισμός υλικού ρευστού

Για να ολοκληρωθεί η εφαρμογή του υλικού πρέπει να προσδιοριστεί και ο όγκος στον οποίο αφορά το υλικό. Ως εκ τούτου επιλέγεται το στερεό «*flow region*», το οποίο θεωρείται και ο όγκος του αέρα.

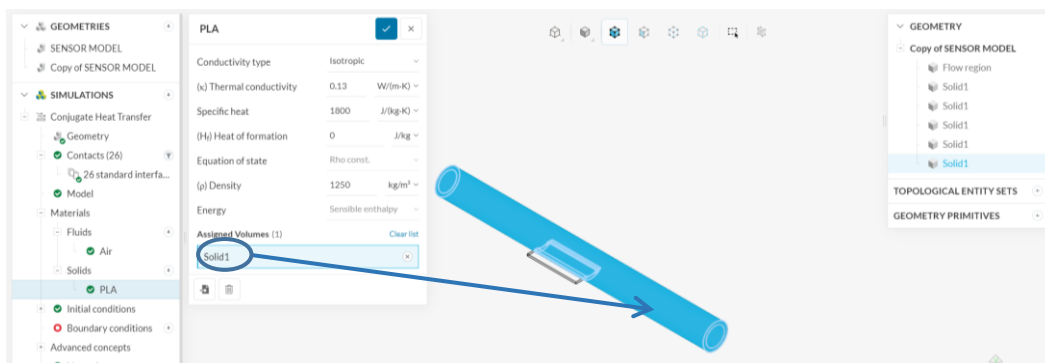


Εικόνα 107 Καθορισμός όγκου ρευστού

Αντίστοιχα προσδιορίζονται και τα στερεά υλικά (βλ. βήμα 1 Εικόνα 108). Ξεκινώντας από το σωλήνα όπου είναι φτιαγμένος από PLA, επιλέχθηκε το υλικό (βλ. βήμα 2,3 Εικόνα 108) που αντιστοιχεί στο σωλήνα.

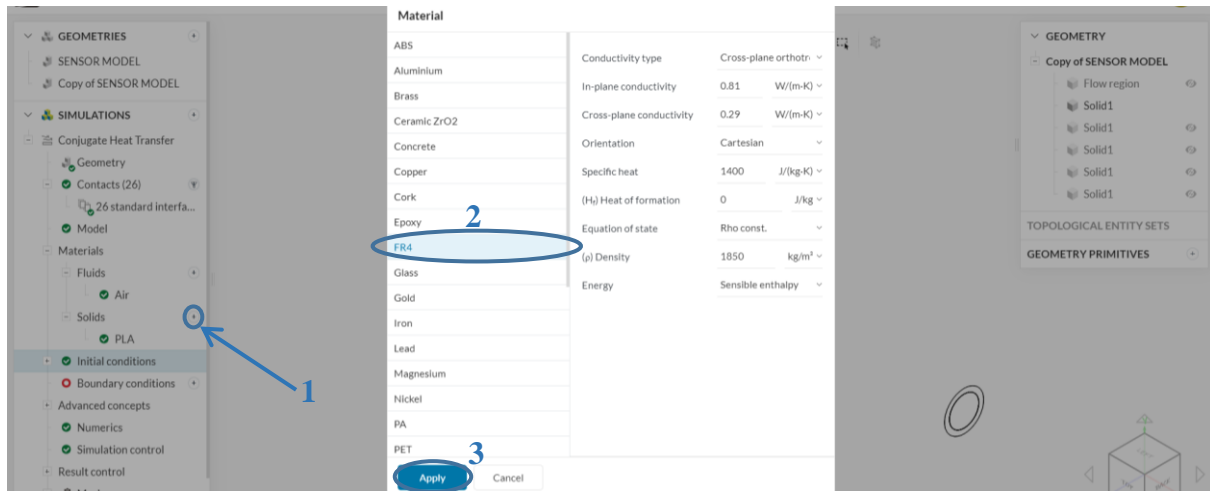


Εικόνα 108 Καθορισμός υλικού σωλήνα

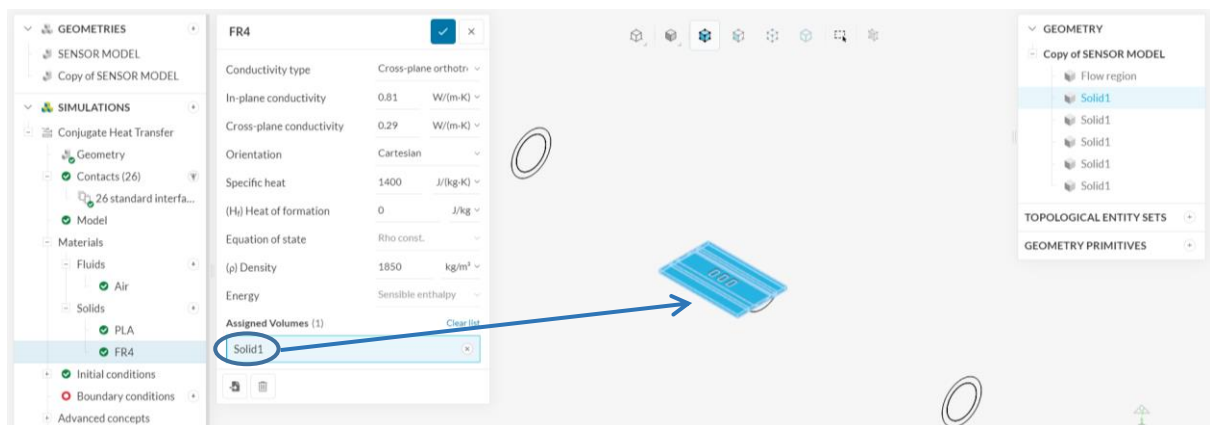


Εικόνα 109 Καθορισμός όγκου σωλήνα

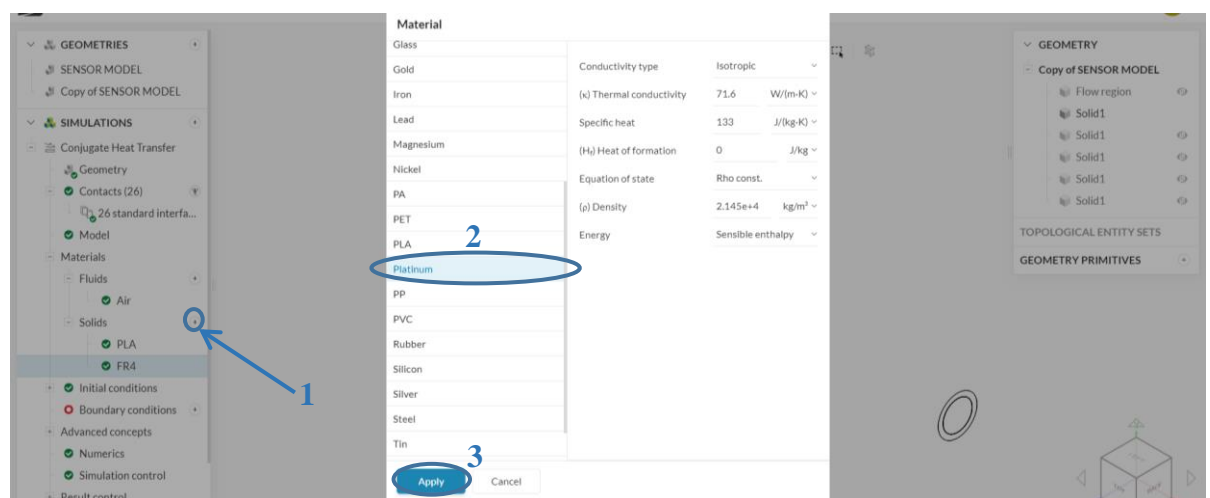
Ομοίως προσδιορίζονται η πλάκα του αισθητήρα, υλικού *FR4* (βλ. Εικόνα 110 και Εικόνα 111) και τα θερμίστορ, που είναι φτιαγμένα από λευκόχρυσο (βλ. Εικόνα 112 και Εικόνα 113):



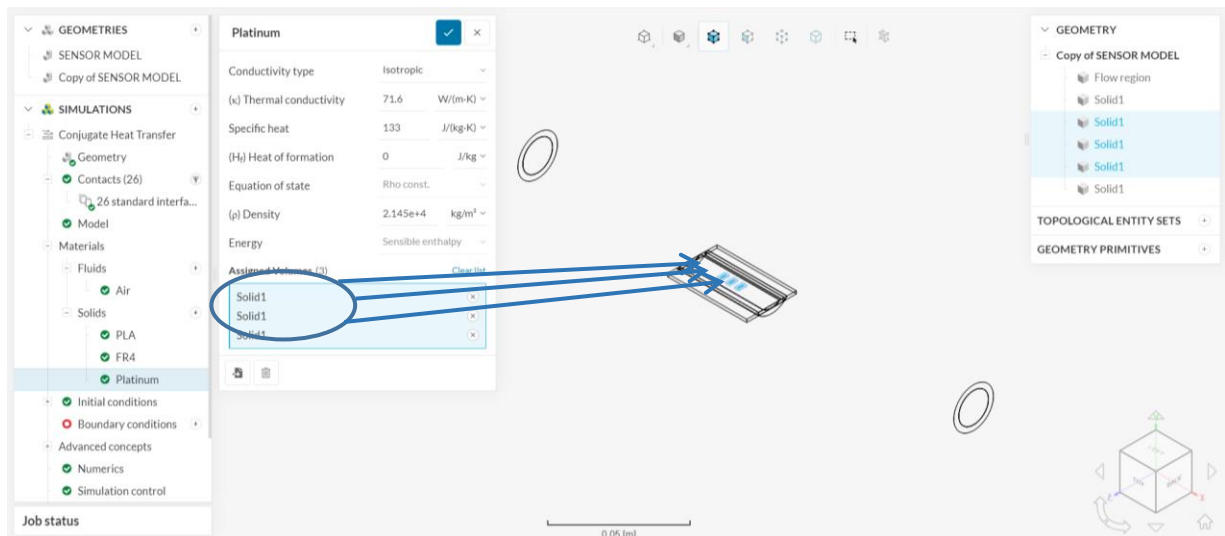
Εικόνα 110 Καθορισμός υλικού αισθητήριας διάταξης



Εικόνα 111 Καθορισμός όγκου αισθητήριας διάταξης αισθητήρα



Εικόνα 112 Καθορισμός υλικού αισθητήριων στοιχείων (θερμίστορ)

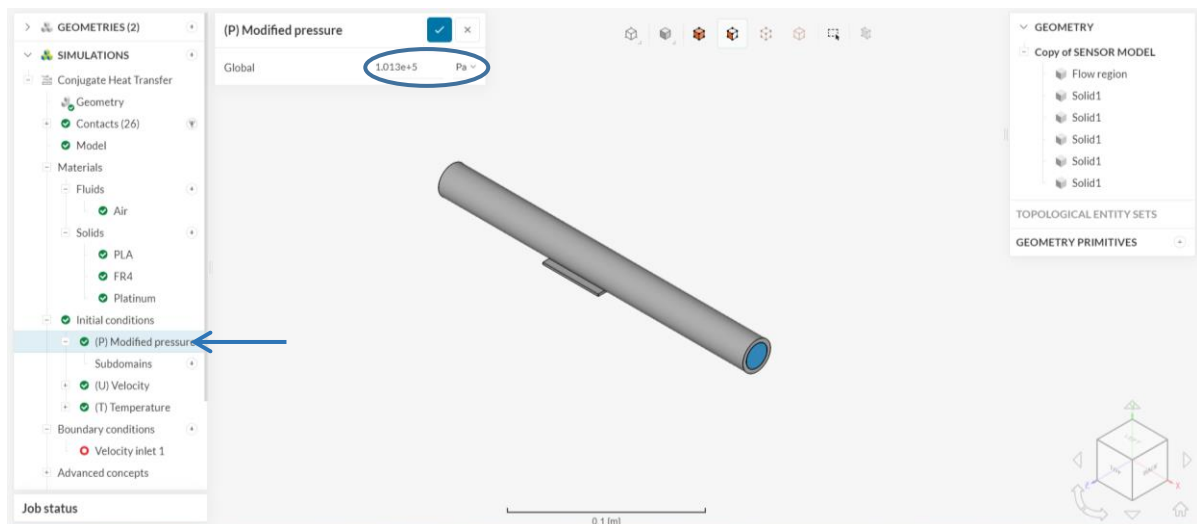


Εικόνα 113 Καθορισμός όγκου αισθητήριων στοιχείων (θερμίστορ)

9.5.3 Καθορισμός αρχικών συνθηκών

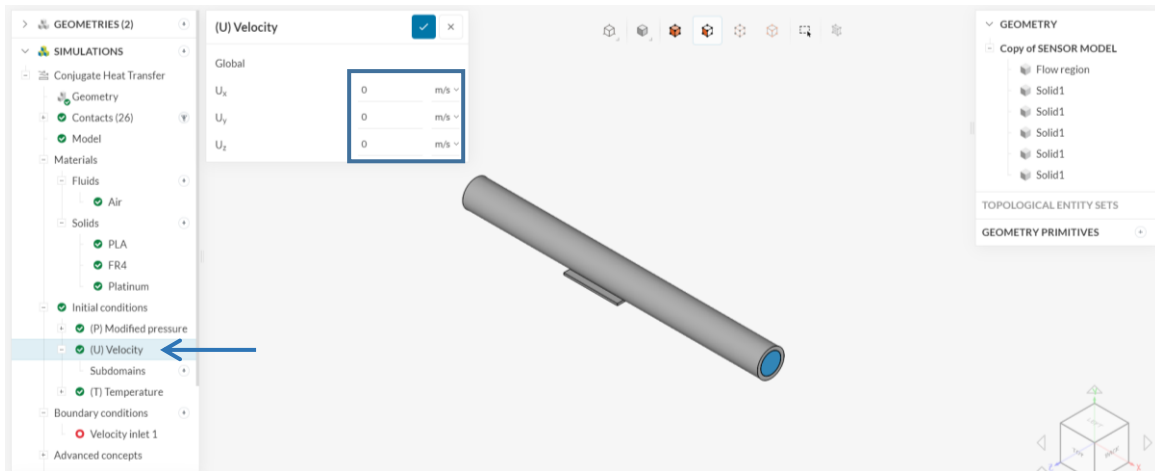
Αφού έχουν προσδιοριστεί τα υλικά, έπεται ο ορισμός των αρχικών συνθηκών οι οποίες είναι:

- η αρχική πίεση, όπου προκαθορισμένη είναι η ατμοσφαιρική, και αυτή και διατηρούμε στις προσομοιώσεις που θα πραγματοποιηθούν (βλ. Εικόνα 114),



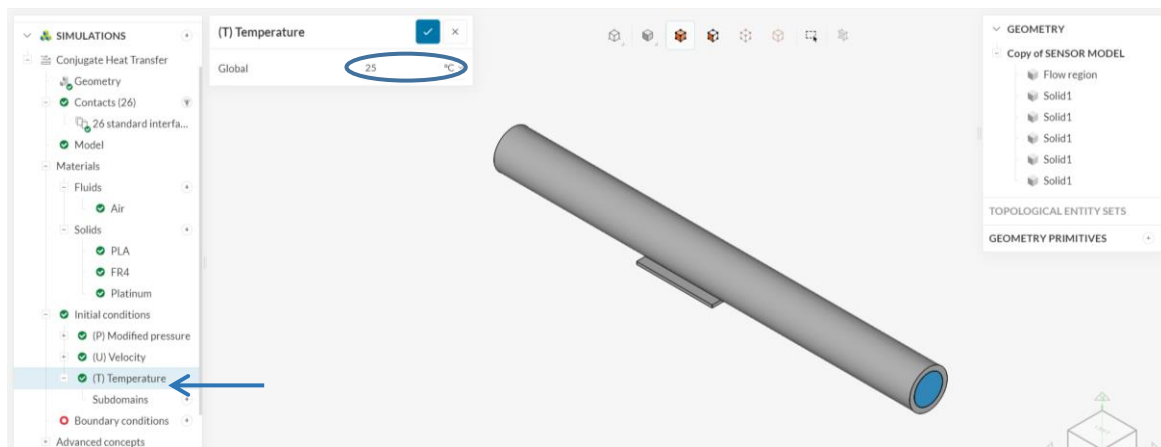
Εικόνα 114 Αρχικές συνθήκες: Καθορισμός πίεσης

- η αρχική ταχύτητα, αν υπάρχει. Στην περίπτωση μας δεν έχουμε αρχική ταχύτητα αφού το ρευστό είναι αρχικά ακίνητο (βλ. Εικόνα 115).



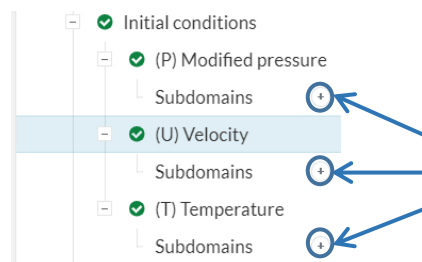
Εικόνα 115 Αρχικές συνθήκες: Καθορισμός ταχύτητας

- η αρχική θερμοκρασία η οποία ορίστηκε 25° C και λήφθηκε ως θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επίσης θα πρέπει να ορισθεί και η θερμοκρασία στην οποία θεωρήθηκε η πυκνότητα του αέρα και χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό του αριθμού *Reynolds* (βλ. Εικόνα 116).



Εικόνα 116 Αρχικές συνθήκες: Καθορισμός θερμοκρασίας

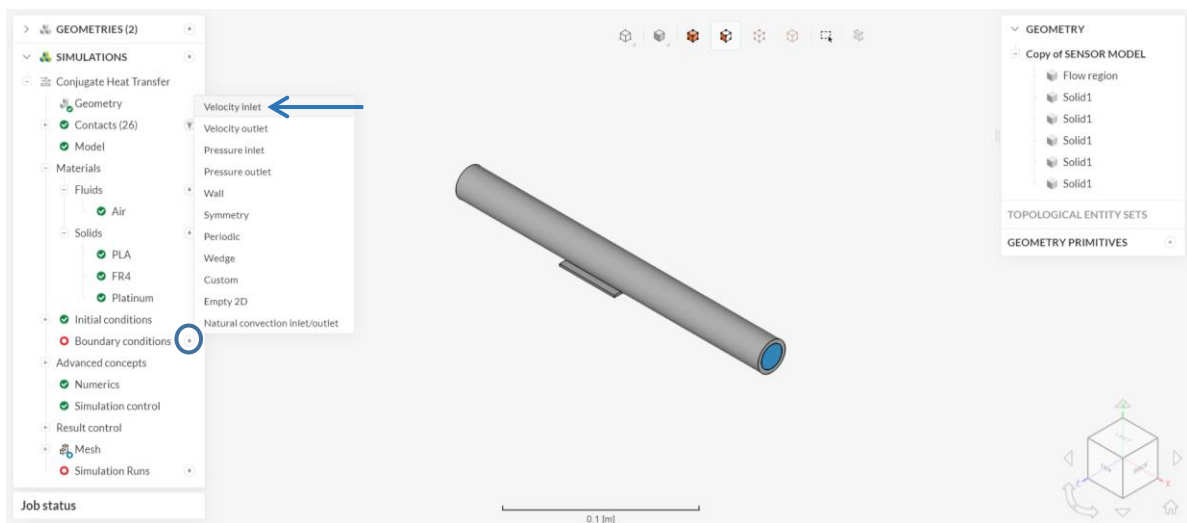
Σημείωση: Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα σε όλες τις αρχικές συνθήκες υπάρχει η επιλογή *Subdomains* όπου μέσα από αυτή δίνεται η δυνατότητα να οριστούν διαφορετικές αρχικές συνθήκες σε διαφορετικά μέρη του μοντέλου.



Εικόνα 117 Υποτομείς

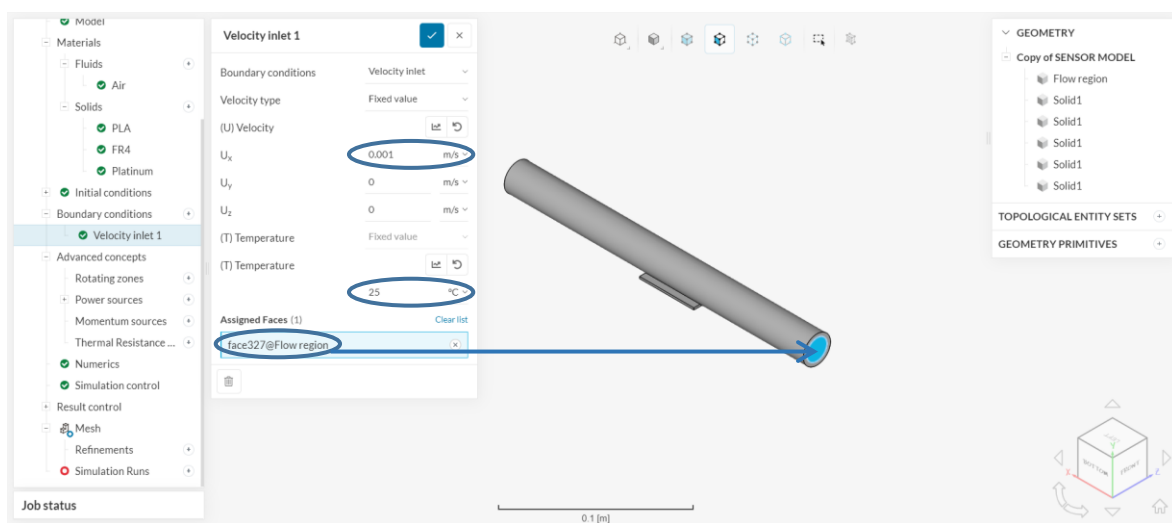
9.5.4 Καθορισμός οριακών συνθηκών

Όπως είδαμε και στις προηγούμενες αντίστοιχες ενότητες, στο εν λόγω πρόγραμμα δίνεται ένα αρκετά μεγάλο εύρος μεγεθών που δύναται να προσδιοριστούν ως οριακές συνθήκες. Στη δική μας περίπτωση θα χρησιμοποιηθούν οι παροχές (ταχύτητες) που αντιστοιχούν στο σωλήνα παράκαμψης του αρχικού φορέα στην περιοχή που θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας, η πίεση κατά την έξοδο του ρευστού από το σωλήνα και η ισχύς με την οποία τροφοδοτείται ο θερμαντήρας.



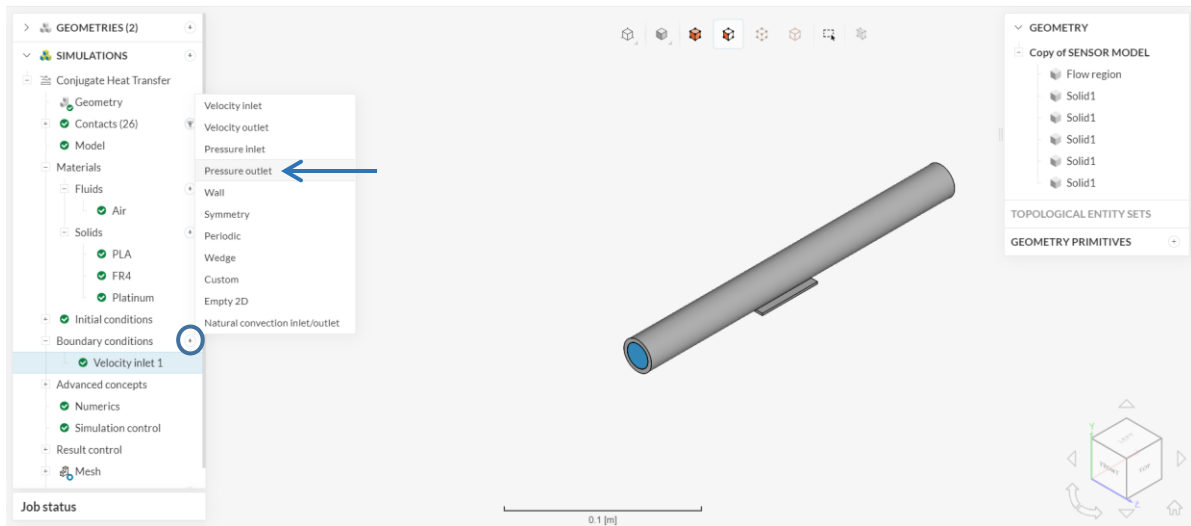
Εικόνα 118 Οριακές συνθήκες: Καθορισμός ταχύτητας εισόδου

Αφού επιλεγεί ως οριακή συνθήκη ορίζεται η ταχύτητα στην κατάλληλη κατεύθυνση και η επιφάνεια εισόδου της ταχύτητας. Στο ίδιο παράθυρο καθορίζεται επίσης και η θερμοκρασία του ρευστού (βλ. Εικόνα 119).

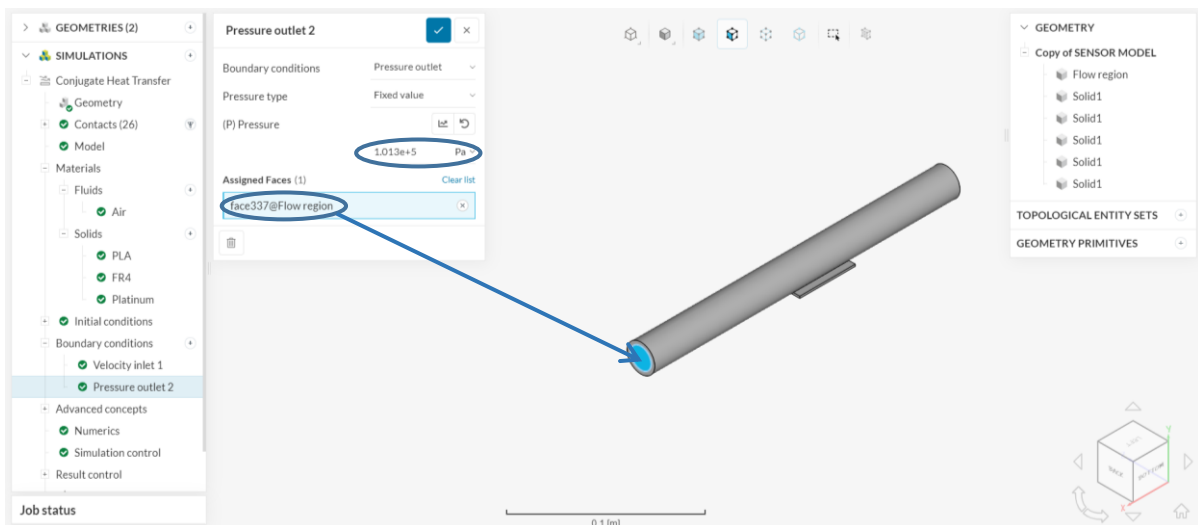


Εικόνα 119 Οριακές συνθήκες: Καθορισμός επιφάνειας από την οποία εισέρχεται το ρευστό με την ταχύτητα εισόδου

Αντίστοιχα, ως δεύτερη οριακή συνθήκη επιλέγεται η πίεση εξόδου, όπως προ αναφέρθηκε (βλ. Εικόνα 120). Η πίεση κατά την έξοδο του ρευστού από το σωλήνα ισούται με την ατμοσφαιρική λόγω του ότι η ροή θεωρείται ότι είναι ασυμπίεστη, οπότε αφήνεται η προεπιλεγμένη τιμή και ορίζεται η επιφάνεια εξόδου (βλ. Εικόνα 121).

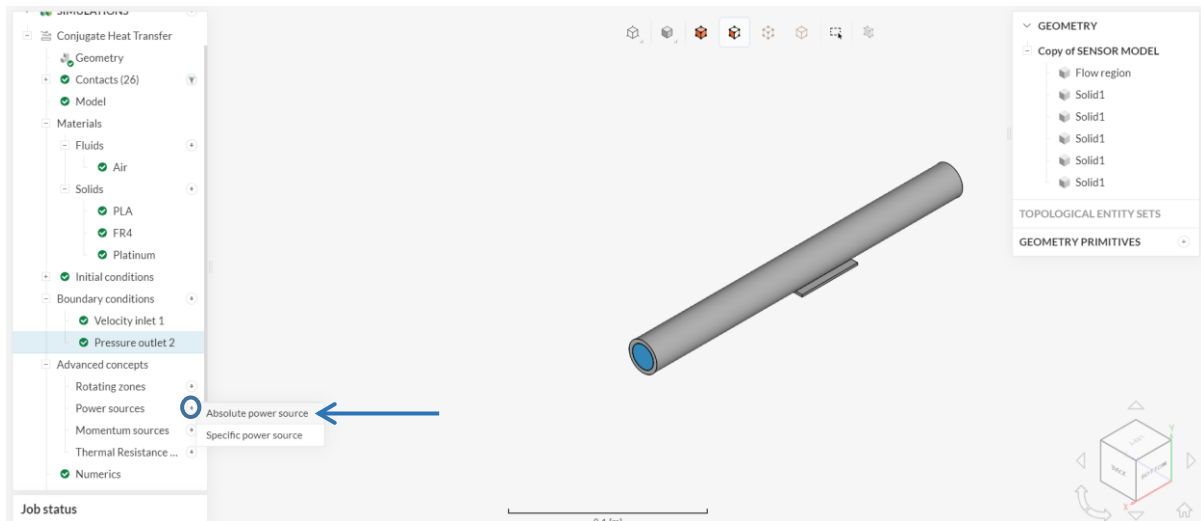


Εικόνα 120 Οριακές συνθήκες: Καθορισμός πίεσης εξόδου

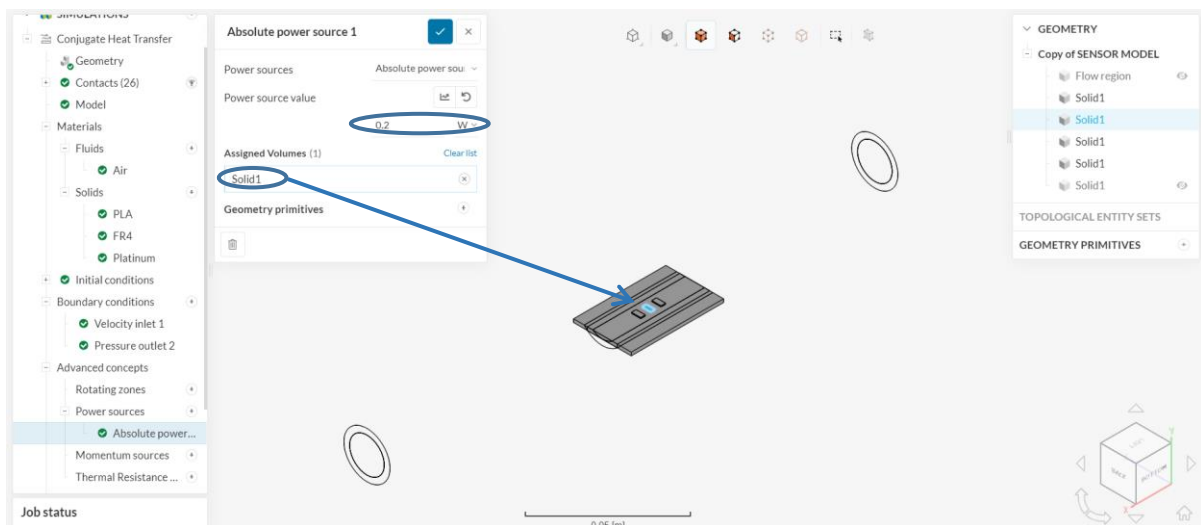


Εικόνα 121 Οριακές συνθήκες: Καθορισμός επιφάνειας που εντοπίζεται η πίεση εξόδου

Ο επόμενος παράγοντας που πρέπει να καθοριστεί είναι η ισχύς που διατηρείται σταθερή στο θερμαντήρα. Οπότε ως τελευταία οριακή συνθήκη καθορίζεται η ισχύς από εξωτερική πηγή. (βλ. Εικόνα 122) Η τιμή που τέθηκε για την ισχύ είναι 200 mW και ο όγκος που επιλέχθηκε είναι το μεσαίο θερμίστορ, που αποτελεί το θερμαντήρα (βλ. Εικόνα 123).



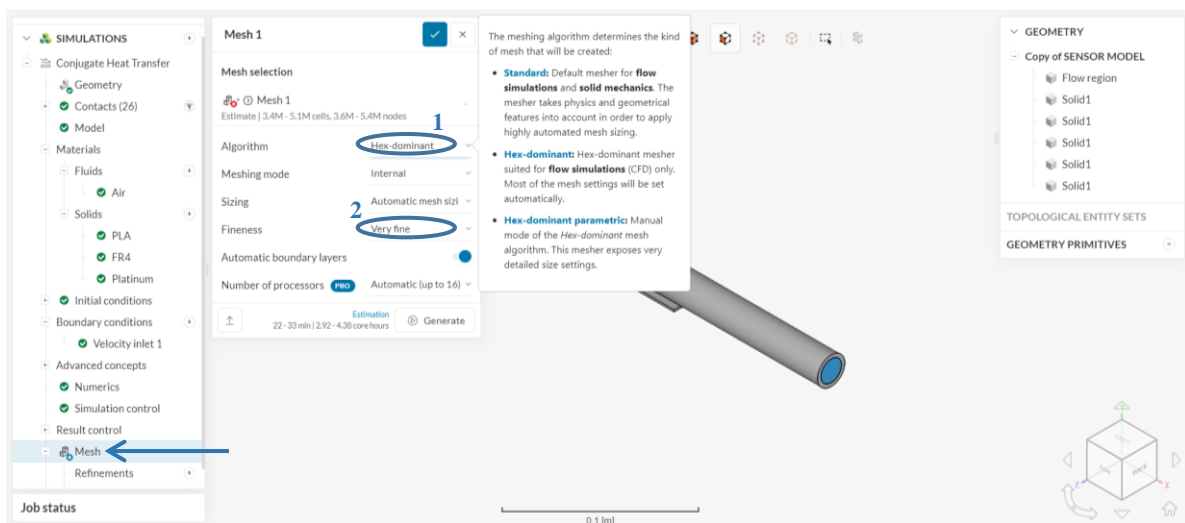
Εικόνα 122 Προηγμένες έννοιες: Απόλυτη ισχύς



Εικόνα 123 Προηγμένες έννοιες: καθορισμός θερμαντήρα

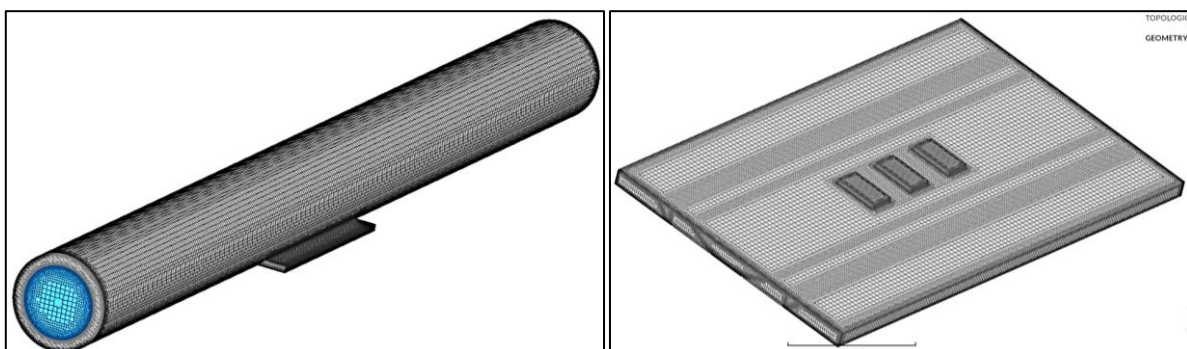
9.5.5 Δημιουργία πλέγματος

Αντίστοιχα με τις προαναφερθείσες προσομοιώσεις (βλ. Κεφάλαιο 6:), τελικό στάδιο πριν την έναρξη της προσομοίωσης αποτελεί η δημιουργία πλέγματος. Επειδή η προσομοίωση που πρόκειται να πραγματοποιηθεί περιλαμβάνει ροή, επιλέγεται το κυψελωτό πλέγμα (βλ. βήμα 1 Εικόνα 124). Όπως είναι λογικό, χρειαζόμαστε όσο το δυνατόν πιο πυκνό πλέγμα ώστε να έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στα αποτελέσματα (βλ. βήμα 2 Εικόνα 124).



Εικόνα 124 Δημιουργία πλέγματος

Ενδεικτικά στην Εικόνα 125 παρουσιάζεται το προκύπτον πλέγμα. Παρατηρούμε ότι είναι αρκετά πυκνό, ενώ η πυκνότητά του αυξάνεται στις ακμές και στα σημεία που αλλάζει απότομα η γεωμετρία εξασφαλίζοντας αποτελέσματα με μεγαλύτερη εγκυρότητα.



Εικόνα 125 Τυπικό προκύπτον πλέγμα: Αριστερά για το σωλήνα παράκαμψης και δεξιά της αισθητήριας δομής πάνω στην οποία διακρίνονται τα θερμίστορ

Κεφάλαιο 10: Αποτελέσματα

10.1 Περίληψη

Στην τρέχουσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την παραμετροποίηση της τοπολογίας και των δομικών υλικών της αισθητήριας διάταξης (βλ. κεφάλαιο 8.5). Να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία του θερμαντήρα για ροή που αντιστοιχεί σε 600 kg/h στο σωλήνα εκτός παράκαμψης, αντιστοιχεί στην αρχική θερμοκρασία θερμαντήρα (T_{heater_0}), ενώ η αντίστοιχη παροχή που εισέρχεται στο σωλήνα παράκαμψης είναι μόλις 20 kg/h . Να αναφερθεί ότι στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται μόνο τα κύρια αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στο παράρτημα της διπλωματικής.

10.2 Μεταβολή απόστασης ανάμεσα στα θερμίστορ

Έχοντας σχεδιάσει τις αντίστοιχες αισθητήριες διατάξεις πραγματοποιήθηκαν μέσω της πλατφόρμας *Simscale* προσομοιώσεις για συγκεκριμένες τιμές παροχής αέρα. Επίσης, η ισχύς στο θερμαντήρα θεωρείται ίση με $0,2 \text{ W}$. Για κάθε μία απόσταση παρουσιάζονται:

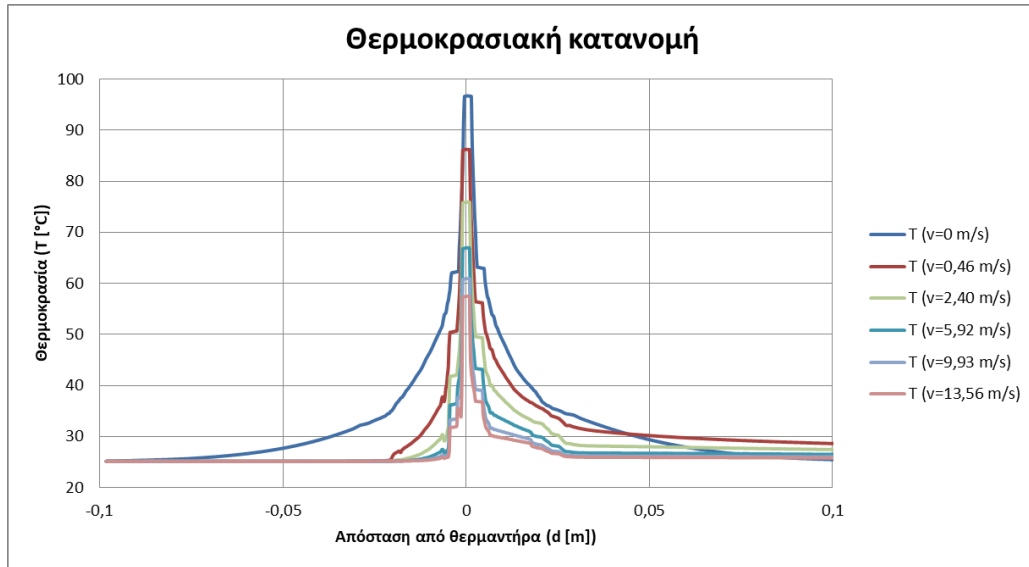
- ο πίνακας θερμοκρασιών των αισθητήριων στοιχείων μαζί με το γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής που δημιουργήθηκε βάση του πίνακα,
- ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο βασίστηκαν το διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης σε σχέση με την παροχή ανάλογα τον τρόπο λειτουργίας του αισθητήρα (θερμό νήμα και διαφορική μέτρηση).
- και το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας σε σχέση με την παροχή μέσω του οποίου γίνεται η σύγκριση των δύο λειτουργιών.

Περίπτωση 1^η: Απόσταση ανάμεσα στα θερμίστορ $1,5 \text{ mm}$

Πίνακας 8 Πίνακας θερμοκρασιών αισθητήριων στοιχείων

Κεντρική παροχή	Παροχή σωλήνα παράκαμψης		Ταχύτητα	Θερμαντήρας	Αριστερό θερμίστορ	Δεξί θερμίστορ
\dot{m}	\dot{m}	\dot{v}	v	T_{heater}	T_L	T_R
[kg/h]	[kg/h]	[m ³ /s]	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]
600	20,08	0,005	13,56	57,60	31,81	36,87
500	14,70	0,004	9,93	61,10	33,32	39,15
300	8,77	0,002	5,92	67,10	36,27	43,28
120	3,55	0,001	2,40	76,10	41,87	49,50
30	0,68	0,000	0,46	89,26	50,51	56,33
0	0,00	0,000	0,00	96,9	62,17	62,17

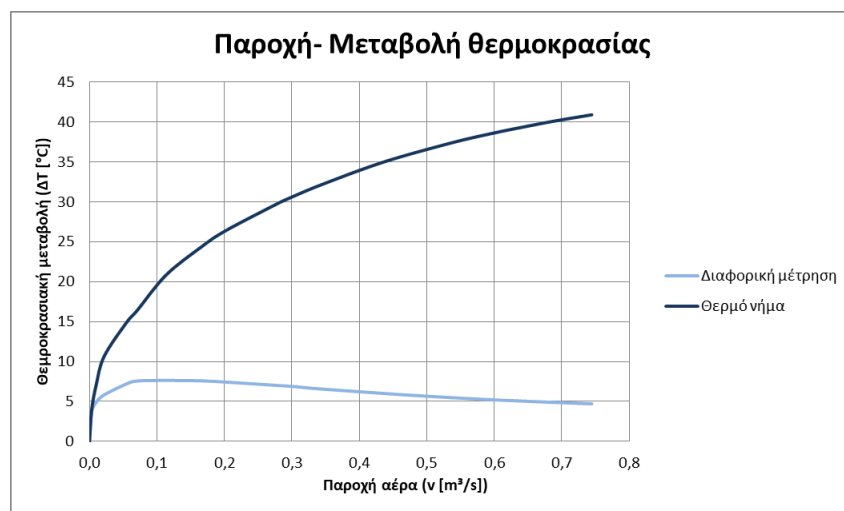
$$T_{heater_0} = T_{max} = 96,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Εικόνα 126 Γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής

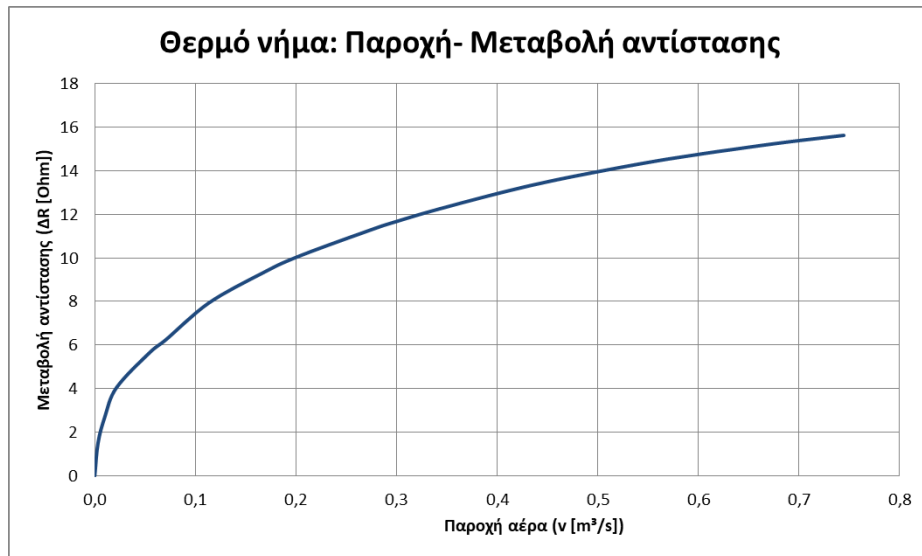
Πίνακας 9 Μεταβολή θερμοκρασίας και αντίστασης

Hot wire			Calorimetric		
$\Delta T = T_{heater_0} - T_{heater}$	R	ΔR	$\Delta T = T_R - T_L$	$R_{upstream}$	$R_{downstream}$
[°C]	[Ohm]	[Ohm]	[°C]	[Ohm]	[Ohm]
39,30	122,32	15,01	5,06	112,37	114,33
35,80	123,66	13,67	5,83	112,96	115,21
29,80	125,96	11,36	7,01	114,10	116,81
20,80	129,41	7,92	7,63	116,26	119,20
10,64	133,28	4,05	5,83	119,59	121,83
0,00	137,33	0,00	0,00	124,08	124,08

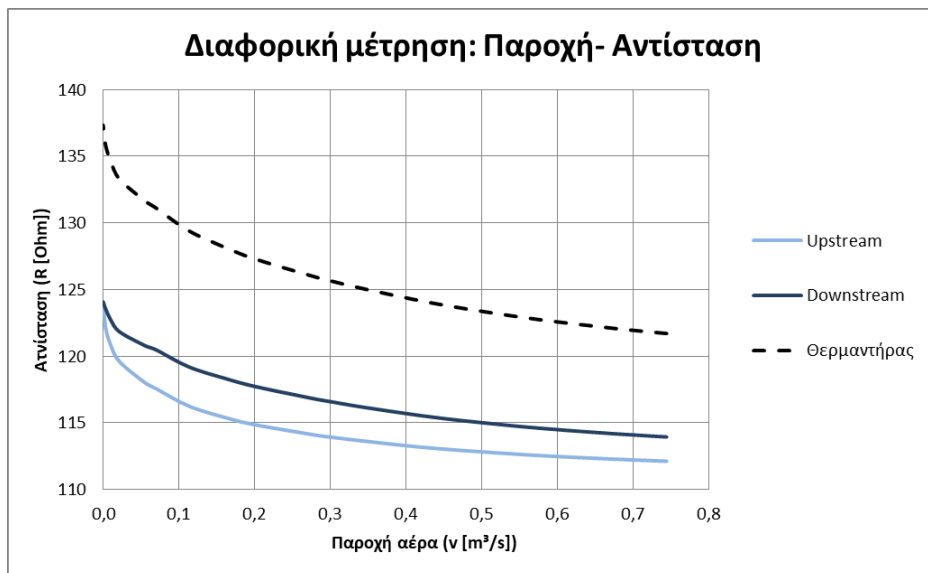


Εικόνα 127 Συγκριτικό γράφημα θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης

$$R_{heater_0} = 137,33 \text{ Ohm}$$



Εικόνα 128 Γράφημα Παροχής- Μεταβολής της αντίστασης για θερμό νήμα



Εικόνα 129 Γράφημα Παροχής- Αντίστασης για διαφορική μέτρηση

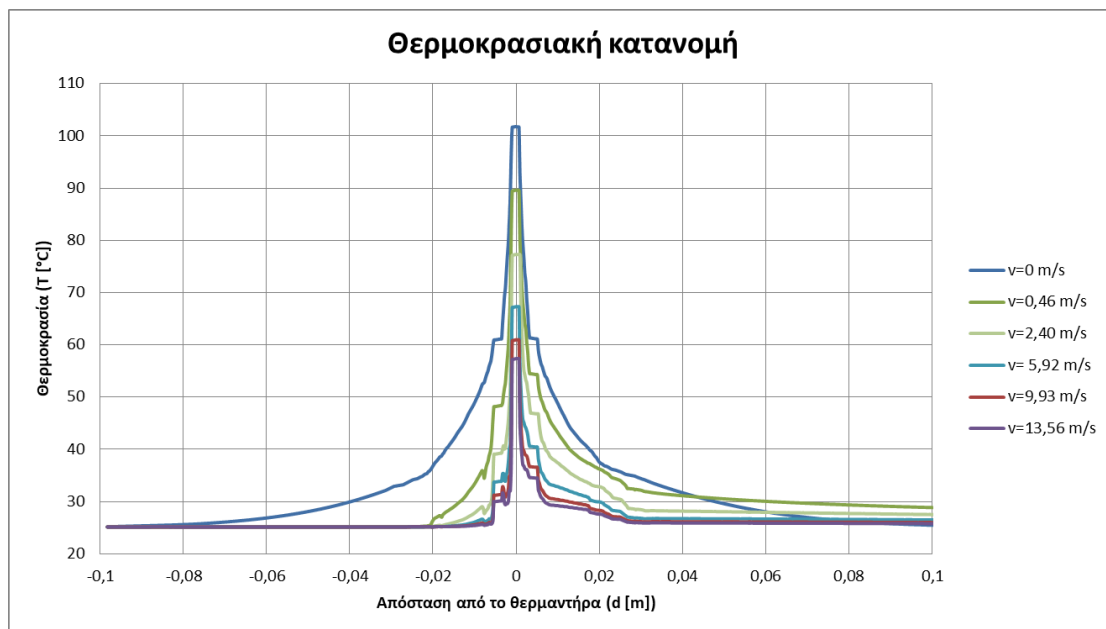
Σημείωση: Να επισημανθεί ότι η αντίσταση του αισθητήριου στοιχείου μπορεί να βρεθεί εύκολα μέσω της θερμοκρασίας του σύμφωνα με την χαρακτηριστική $R-T$ βλ. σχέση (89).

Περίπτωση 2^η: Απόσταση ανάμεσα στα θερμίστορ 2,4 mm

Πίνακας 10 Πίνακας θερμοκρασιών αισθητήριων στοιχείων

Κεντρική παροχή	Παροχή σωλήνα παράκαμψης		Ταχύτητα	Θερμαντήρας	Αριστερό θερμίστορ	Δεξί θερμίστορ
\dot{m}	\dot{m}	\dot{v}	v	T_{heater}	T_L	T_R
[kg/h]	[kg/h]	[m ³ /s]	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]
600	20,08	0,005	13,56	57,30	30,05	34,57
500	14,70	0,004	9,93	60,94	31,31	36,67
300	8,77	0,002	5,92	67,28	33,79	40,53
120	3,55	0,001	2,40	77,40	39,14	46,89
30	0,68	0,000	0,46	89,70	48,25	54,43
0	0,00	0,000	0,00	101,70	61,01	61,01

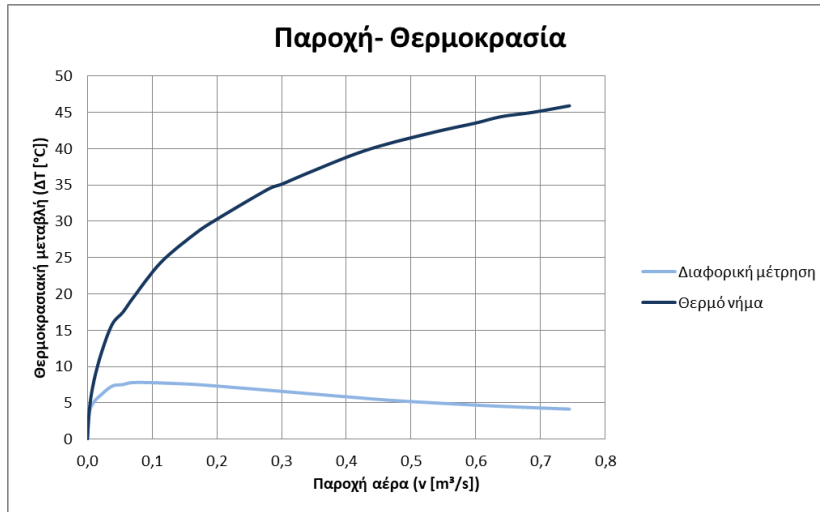
$$T_{heater_0} = T_{max} = 101,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Εικόνα 130 Γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής

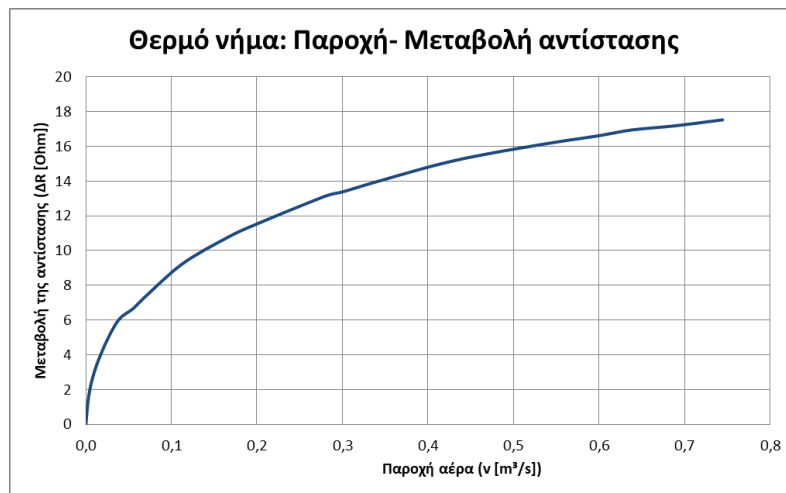
Πίνακας 11 Μεταβολή θερμοκρασίας και αντίστασης

Hot wire			Calorimetric		
$\Delta T = T_{heater_0} - T_{heater}$	R	ΔR	$\Delta T = T_R - T_L$	$R_{upstream}$	$R_{downstream}$
[°C]	[Ohm]	[Ohm]	[°C]	[Ohm]	[Ohm]
44,40	122,20	16,95	4,53	111,69	113,44
40,76	123,60	15,55	5,36	112,18	114,25
34,42	126,03	13,12	6,74	113,14	115,75
24,30	129,90	9,25	7,75	115,21	118,20
12,00	134,59	4,56	6,18	118,72	121,10
0,00	139,15	0,00	0,00	123,63	123,63

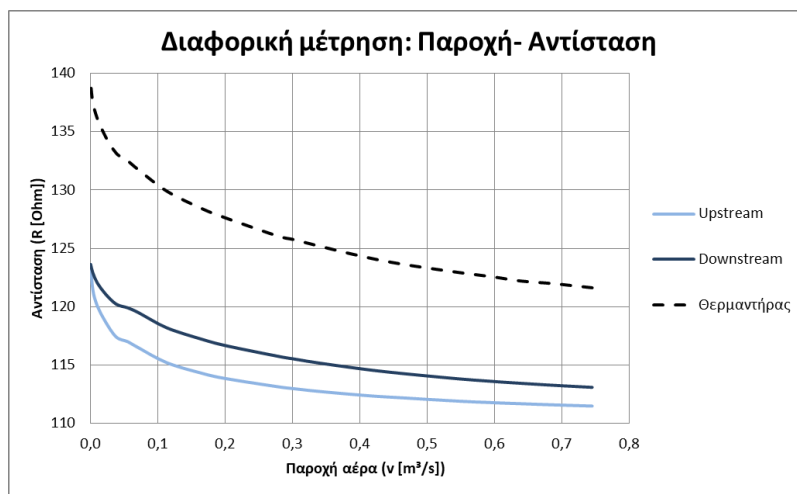


Εικόνα 131 Συγκριτικό γράφημα θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης

$$R_{heater_0} = 139,15 \text{ Ohm}$$



Εικόνα 132 Γράφημα Παροχής- Μεταβολής της αντίστασης για θερμό νήμα



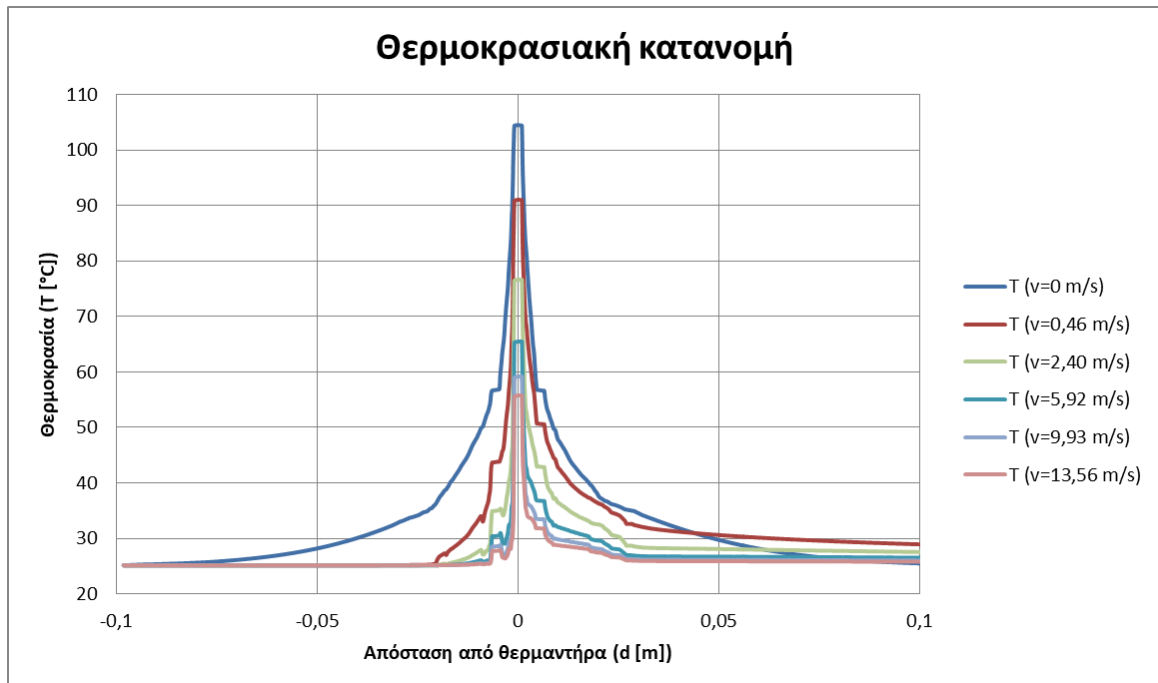
Εικόνα 133 Γράφημα Παροχής- Αντίστασης για διαφορική μέτρηση

Περίπτωση 3^η: Απόσταση ανάμεσα στα θερμίστορ 3,6 mm

Πίνακας 12 Πίνακας θερμοκρασιών αισθητήριων στοιχείων

Κεντρική παροχή	Παροχή σωλήνα παράκαμψης		Ταχύτητα	Θερμαντήρας	Αριστερό θερμίστορ	Δεξί θερμίστορ
\dot{m}	\dot{m}	\dot{v}	v	T_{heater}	T_L	T_R
[kg/h]	[kg/h]	[m ³ /s]	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]
600	20,08	0,005	13,56	55,90	27,75	31,83
500	14,70	0,004	9,93	59,30	28,57	33,48
300	8,77	0,002	5,92	65,60	30,43	36,81
120	3,55	0,001	2,40	76,80	34,97	42,95
30	0,68	0,000	0,46	91,20	43,75	50,67
0	0,00	0,000	0,00	104,70	56,75	56,75

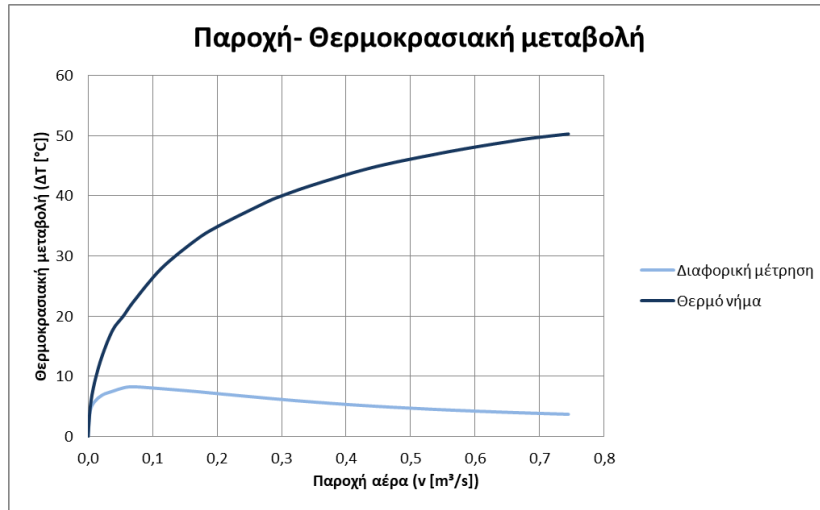
$$T_{heater_0} = T_{max} = 104,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Εικόνα 134 Γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής

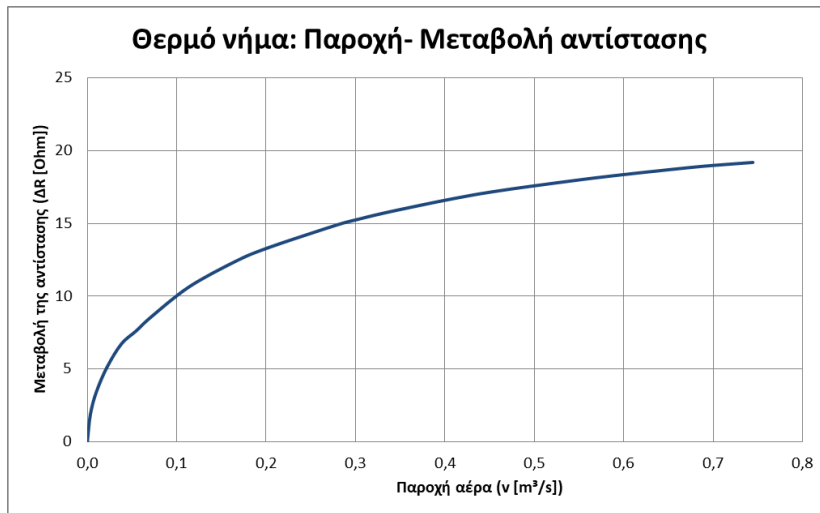
Πίνακας 13 Μεταβολή θερμοκρασίας και αντίστασης

Hot wire			Calorimetric		
$\Delta T = T_{heater_0} - T_{heater}$	R	ΔR	$\Delta T = T_R - T_L$	$R_{upstream}$	$R_{downstream}$
[°C]	[Ohm]	[Ohm]	[°C]	[Ohm]	[Ohm]
48,80	121,67	18,62	4,08	110,80	112,38
45,40	122,97	17,31	4,92	111,12	113,02
39,10	125,39	14,90	6,38	111,84	114,31
27,90	129,68	10,61	7,97	113,60	116,68
13,50	135,16	5,12	6,92	116,99	119,66
0,00	140,29	0,00	0,00	121,99	121,99

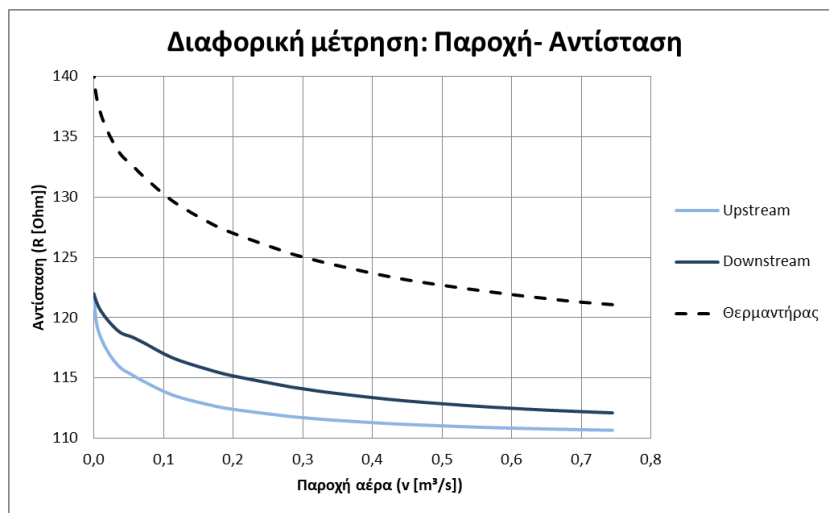


Εικόνα 135 Συγκριτικό γράφημα θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης

$$R_{heater_0} = 140,29 \text{ Ohm}$$



Εικόνα 136 Γράφημα Παροχής- Μεταβολής της αντίστασης για θερμό νήμα



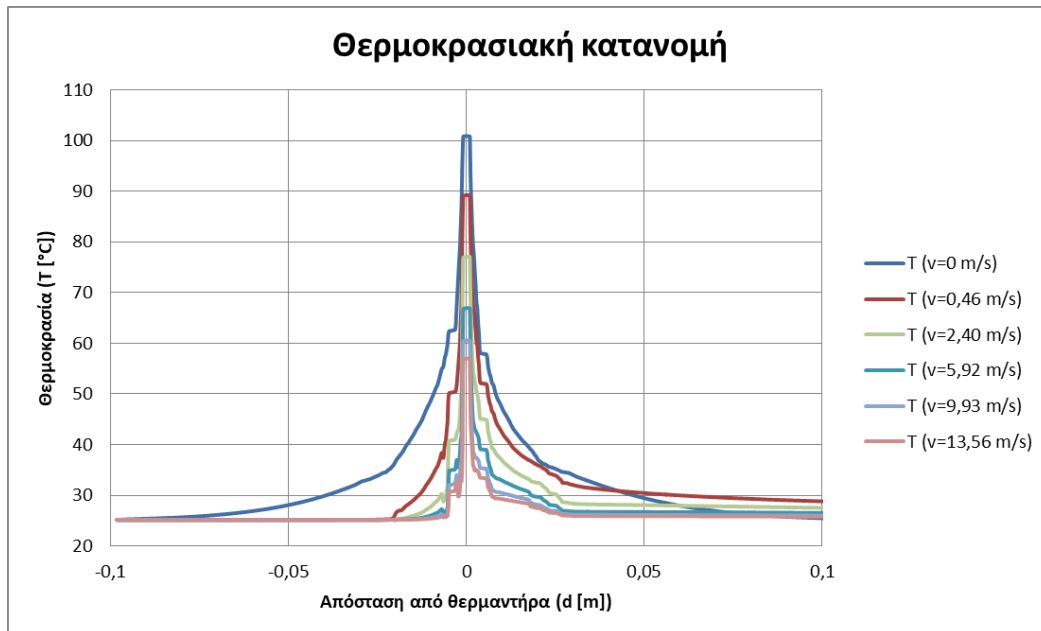
Εικόνα 137 Γράφημα Παροχής- Αντίστασης για διαφορική μέτρηση

Περίπτωση 4^η: Ασύμμετρη απόσταση ανάμεσα στα θερμίστορ (2/ 2,8 mm)

Πίνακας 14 Πίνακας θερμοκρασιών αισθητήριων στοιχείων

Κεντρική παροχή	Παροχή σωλήνα παράκαμψης		Ταχύτητα	Θερμαντήρας	Αριστερό θερμίστορ	Δεξί θερμίστορ
\dot{m}	\dot{m}	\dot{v}	v	T_{heater}	T_L	T_R
[kg/h]	[kg/h]	[m ³ /s]	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]
600	20,08	0,005	13,56	57,10	30,76	33,42
500	14,70	0,004	9,93	60,70	32,12	35,32
300	8,77	0,002	5,92	67,10	34,98	39,05
120	3,55	0,001	2,40	77,20	40,87	45,02
30	0,68	0,000	0,46	89,40	50,29	52,06
0	0,00	0,000	0,00	101,10	62,50	62,50

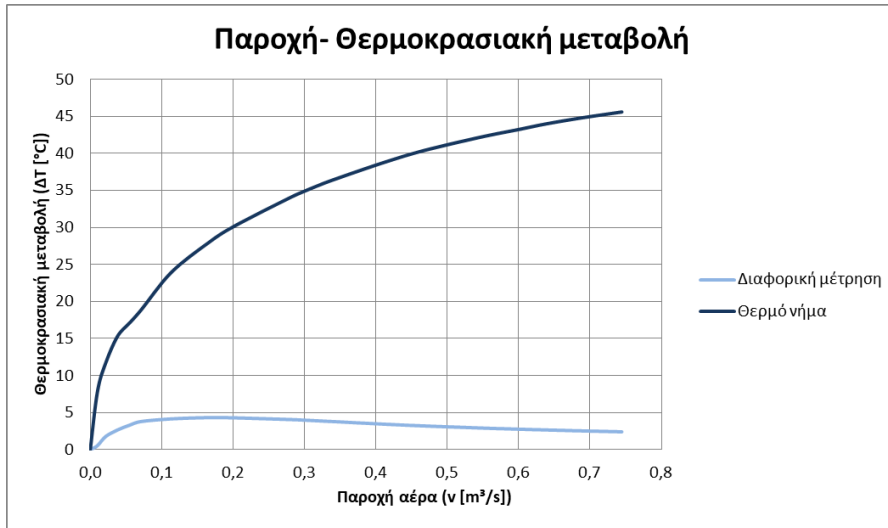
$$T_{heater_0} = T_{max} = 101,10 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Εικόνα 138 Γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής

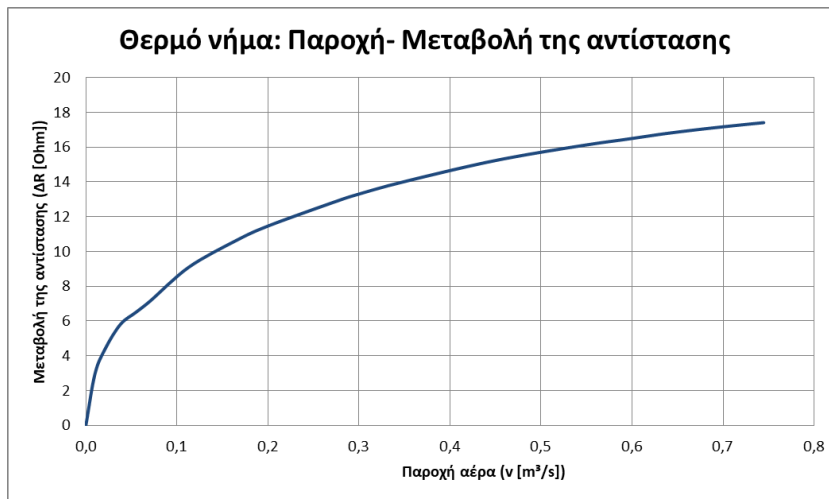
Πίνακας 15 Μεταβολή θερμοκρασίας και αντίστασης

Hot wire			Calorimetric		
$\Delta T = T_{heater_0} - T_{heater}$	R	ΔR	$\Delta T = T_R - T_L$	$R_{upstream}$	$R_{downstream}$
[°C]	[Ohm]	[Ohm]	[°C]	[Ohm]	[Ohm]
44,00	122,13	16,79	2,66	111,97	113,00
40,40	123,51	15,41	3,20	112,49	113,73
34,00	125,96	12,96	4,07	113,60	115,17
23,90	129,83	9,09	4,15	115,88	117,48
11,70	134,48	4,44	1,77	119,51	120,19
0,00	138,92	0,00	0,00	124,20	124,20

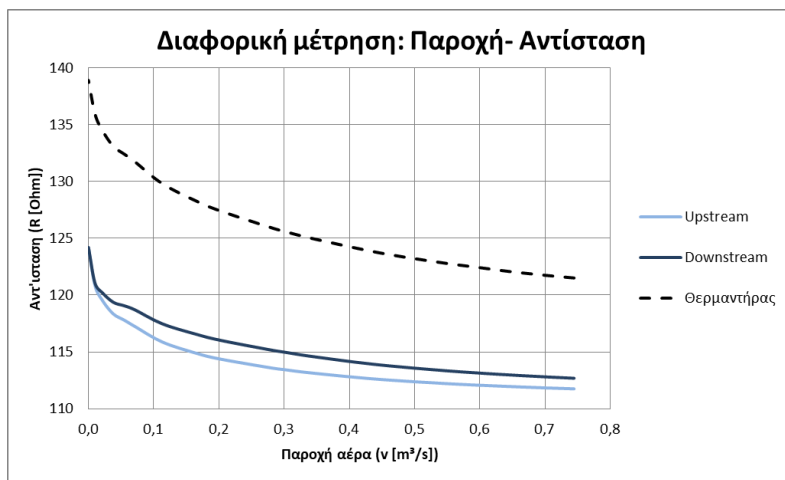


Εικόνα 139 Συγκριτικό γράφημα θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης

$$R_{heater_0} = 138,92 \text{ Ohm}$$



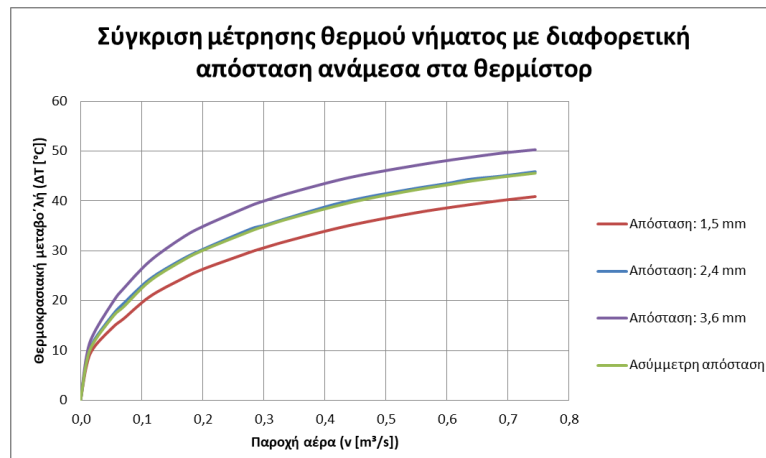
Εικόνα 140 Γράφημα Παροχής- Μεταβολής της αντίστασης για θερμό νήμα



Εικόνα 141 Γράφημα Παροχής- Αντίστασης για διαφορική μέτρηση

Οπότε συνοπτικά έχουμε:

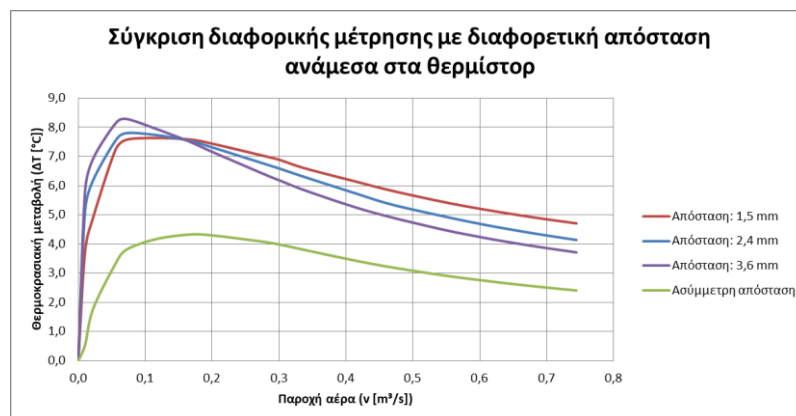
- για μέτρηση θερμού νήματος



Εικόνα 142 Συγκριτικό διάγραμμα για μέτρηση θερμού νήματος

Σημείωση: Στο διάγραμμα της Εικόνα 143 παρατηρείται σχετικά μικρή διαφορά στη θερμοκρασία του θερμαντήρα. Ο λόγος είναι η ελαφρώς διαφορετική συνολική θερμική αντίσταση για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ θερμαντήρα και θερμίстор εκατέρωθεν, η οποία διαφοροποιεί τη μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής. Επίσης, μπορεί να υπάρχει και μια μικρή διαφορά λόγω διαφορετικού μοντέλου (και αντίστοιχου πλέγματός του σε κάθε περίπτωση).

- για διαφορική μέτρηση



Εικόνα 143 Συγκριτικό διάγραμμα για μέτρηση θερμού νήματος

10.3 Δομικά υλικά διάταξης

Επιλέγοντας και παραμετροποιώντας διαφορετικά υλικά μέσω της πλατφόρμας *Simscale* πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τις αντίστοιχες παροχές που λήφθηκαν υπόψη και στις προηγούμενες προσομοιώσεις όπου υπήρχε μεταβολή απόστασης των θερμίстор. Να επισημανθεί ότι η τοπολογία παραμένει σταθερή για όλες τις περιπτώσεις. Δηλαδή, η

απόσταση μεταξύ του κάθε θερμιστορ από το θερμαντήρα είναι σταθερή και ίση με 2,4 mm. Για κάθε ένα συνδυασμό υλικών παρουσιάζονται:

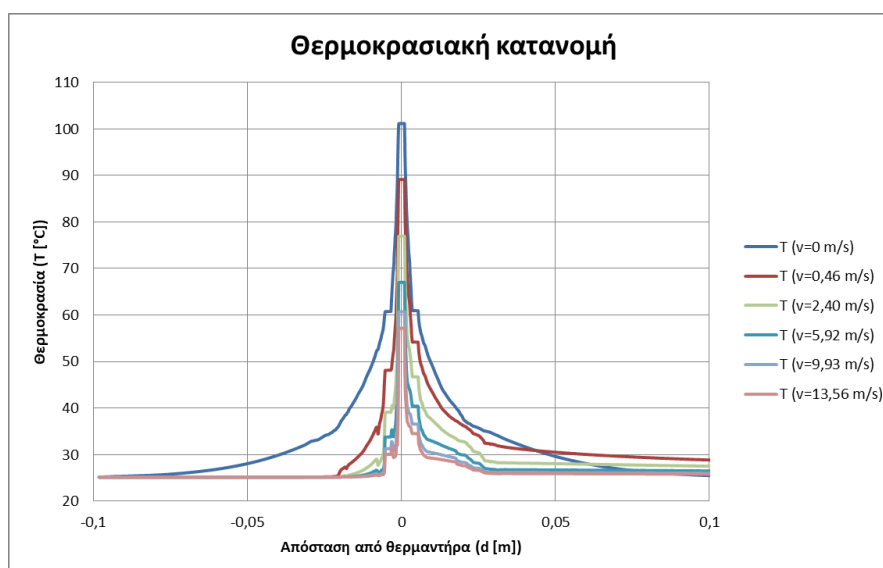
- ο πίνακας θερμοκρασιών των αισθητήριων στοιχείων μαζί με το γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής που δημιουργήθηκε βάση του πίνακα,
- ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο βασίστηκαν το διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης σε σχέση με την παροχή ανάλογα τον τρόπο λειτουργίας του αισθητήρα (θερμό νήμα και διαφορική μέτρηση).
- και το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας σε σχέση με την παροχή μέσω του οποίου γίνεται η σύγκριση των δύο λειτουργιών.

Περίπτωση 1^η: Θερμίστορ από χαλκό και αισθητήρια διάταξη από *Glass-reinforced epoxy laminate (FR4)*

Πίνακας 16 Πίνακας θερμοκρασιών αισθητήριων στοιχείων

Κεντρική παροχή	Παροχή σωλήνα παράκαμψης		Ταχύτητα	Θερμαντήρας	Αριστερό θερμίστορ	Δεξί θερμίστορ
\dot{m}	\dot{m}	\dot{v}	v	T_{heater}	T_L	T_R
[kg/h]	[kg/h]	[m ³ /s]	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]
600	20,08	0,005	13,56	57,20	30,05	34,51
500	14,70	0,004	9,93	60,80	31,26	36,58
300	8,77	0,002	5,92	67,10	33,79	40,43
120	3,55	0,001	2,40	77,00	39,11	46,73
30	0,68	0,000	0,46	89,20	48,13	54,19
0	0,00	0,000	0,00	101,20	60,75	60,75

$$T_{heater_0} = T_{max} = 101,20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

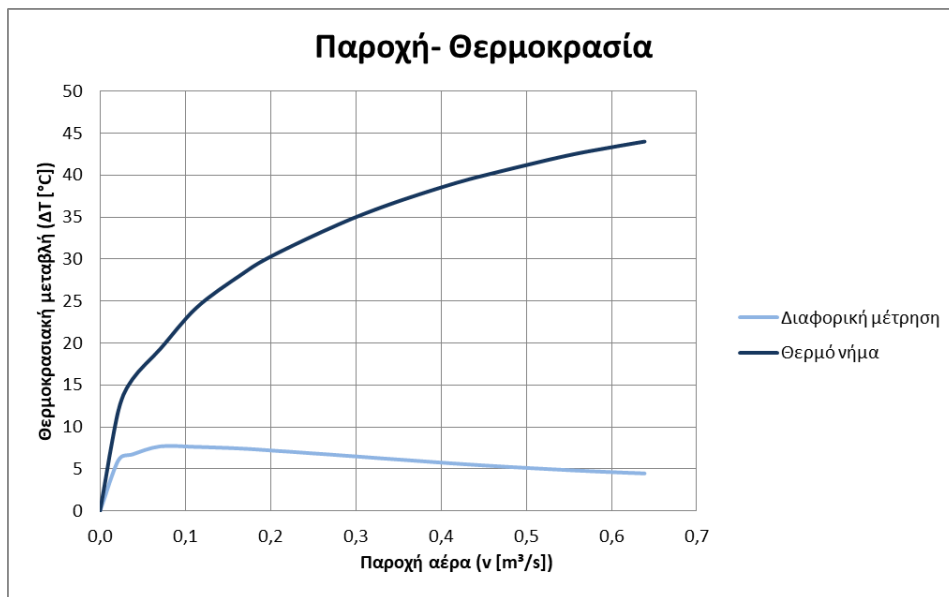


Εικόνα 144 Γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής

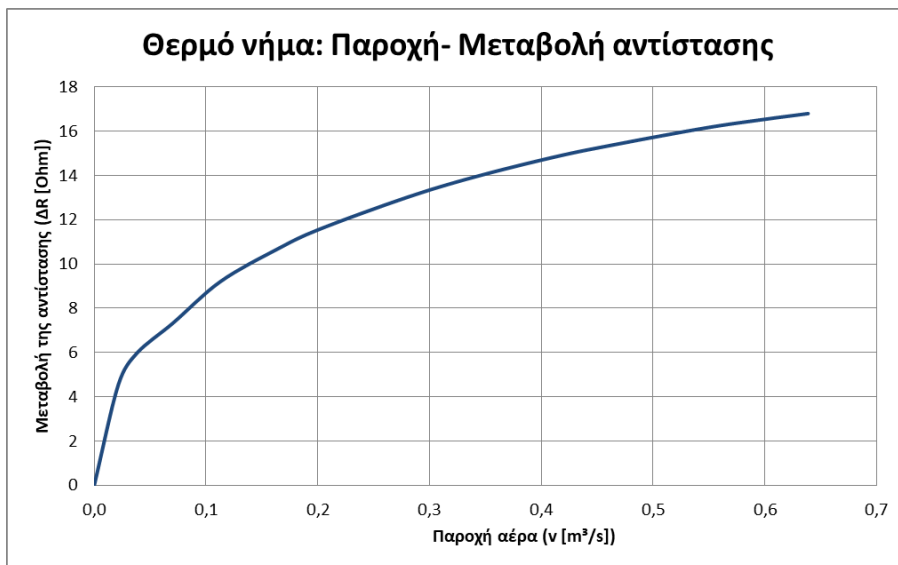
Πίνακας 17 Μεταβολή θερμοκρασίας και αντίστασης

Hot wire			Calorimetric		
$\Delta T = T_{heater_0} - T_{heater}$	R	ΔR	$\Delta T = T_R - T_L$	$R_{upstream}$	$R_{downstream}$
[°C]	[Ohm]	[Ohm]	[°C]	[Ohm]	[Ohm]
44,00	122,17	16,79	4,46	111,69	113,42
40,40	123,55	15,41	5,31	112,16	114,22
34,10	125,96	13,00	6,65	113,14	115,71
24,20	129,75	9,21	7,63	115,20	118,14
12,00	134,40	4,56	6,05	118,68	121,01
0,00	138,96	0,00	0,00	123,53	123,53

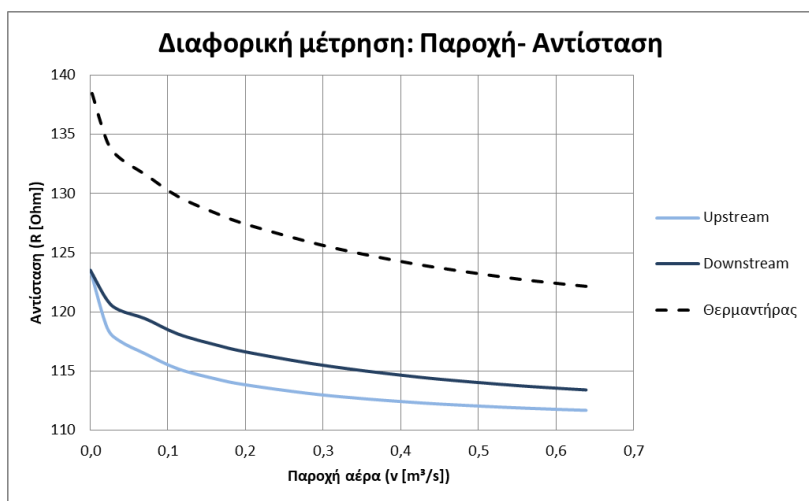
$$R_{heater_0} = 138,96 \text{ Ohm}$$



Εικόνα 145 Συγκριτικό γράφημα θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης



Εικόνα 146 Γράφημα Παροχής- Μεταβολής της αντίστασης για θερμό νήμα



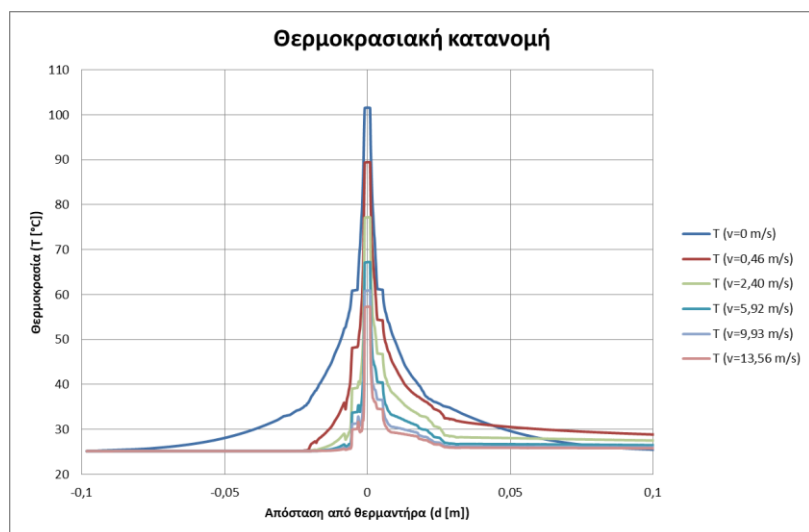
Εικόνα 147 Γράφημα Παροχής- Αντίστασης για διαφορική μέτρηση

Περίπτωση 2^η: Θερμίστορ από νικέλιο και αισθητήρια διάταξη από *Glass-reinforced epoxy laminate (FR4)*

Πίνακας 18 Πίνακας θερμοκρασιών αισθητήριων στοιχείων

Κεντρική παροχή	Παροχή σωλήνα παράκαμψης		Ταχύτητα	Θερμαντήρας	Αριστερό θερμίστορ	Δεξί θερμίστορ
\dot{m}	\dot{m}	\dot{v}	v	T_{heater}	T_L	T_R
[kg/h]	[kg/h]	[m³/s]	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]
600	20,08	0,005	13,56	57,40	30,06	34,56
500	14,70	0,004	9,93	61,00	31,28	36,63
300	8,77	0,002	5,92	67,30	33,81	40,51
120	3,55	0,001	2,40	77,30	39,16	46,85
30	0,68	0,000	0,46	89,60	48,24	54,36
0	0,00	0,000	0,00	101,70	60,96	60,96

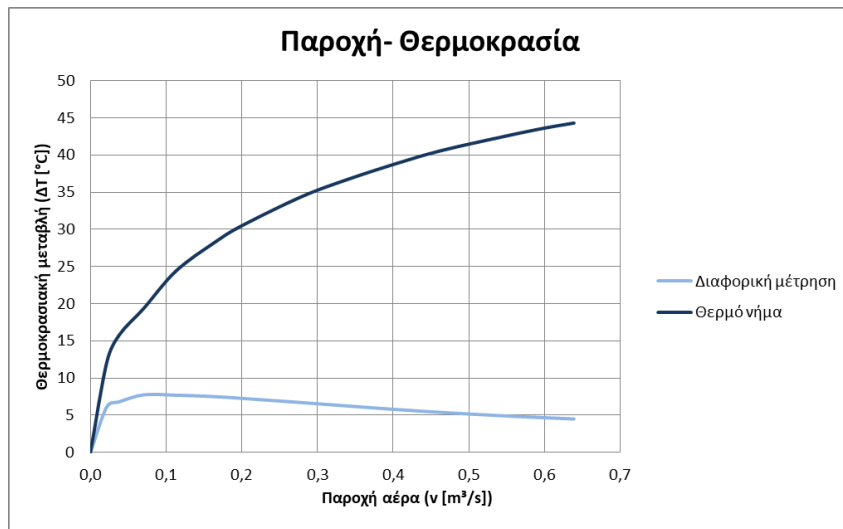
$$T_{heater_0} = T_{max} = 101,70 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Εικόνα 148 Γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής

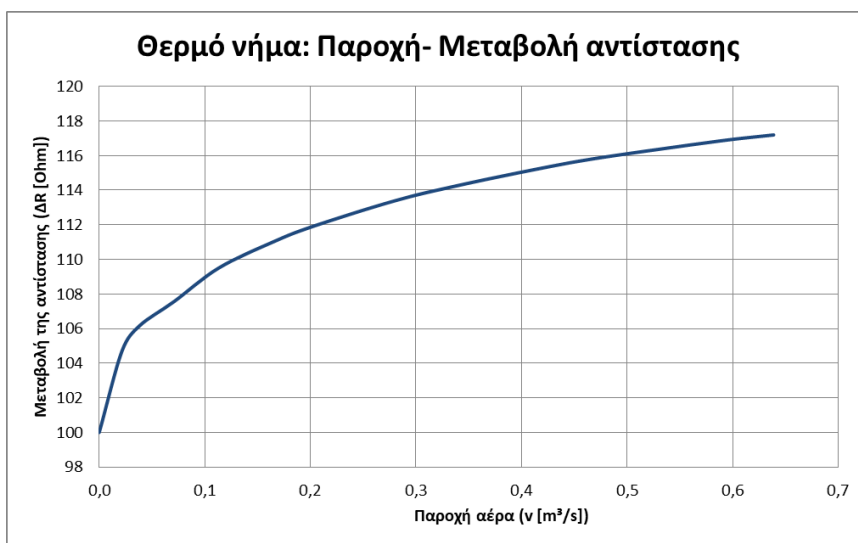
Πίνακας 19 Μεταβολή θερμοκρασίας και αντίστασης

Hot wire			Calorimetric		
$\Delta T = T_{heater_0} - T_{heater}$	R	ΔR	$\Delta T = T_R - T_L$	$R_{upstream}$	$R_{downstream}$
[°C]	[Ohm]	[Ohm]	[°C]	[Ohm]	[Ohm]
44,30	122,24	117,19	4,49	111,70	113,44
40,70	123,63	115,81	5,35	112,17	114,24
34,40	126,04	113,38	6,69	113,15	115,74
24,40	129,87	109,50	7,69	115,22	118,18
12,10	134,55	104,72	6,12	118,72	121,08
0,00	139,15	100,00	0,00	123,61	123,61

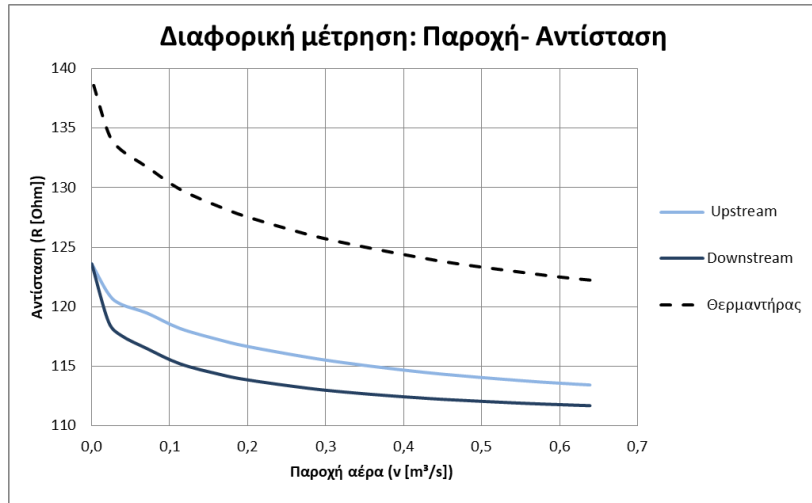


Εικόνα 149 Συγκριτικό γράφημα θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης

$$R_{heater_0} = 139,15 \text{ Ohm}$$



Εικόνα 150 Γράφημα Παροχής- Μεταβολής της αντίστασης για θερμό νήμα



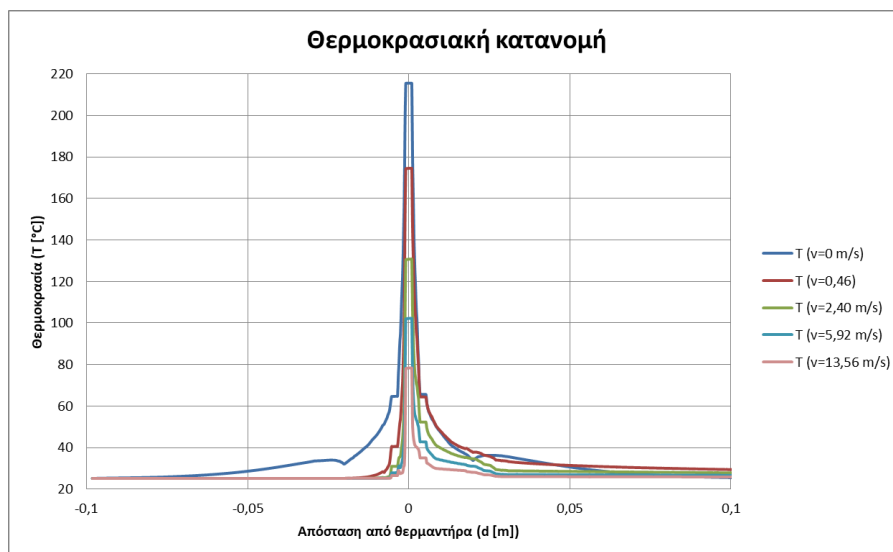
Εικόνα 151 Γράφημα Παροχής- Αντίστασης για διαφορική μέτρηση

Περίπτωση 3^η: Θερμίστορ από λευκόχρυσο και αισθητήρια διάταξη από PLA

Πίνακας 20 Πίνακας θερμοκρασιών αισθητήριων στοιχείων

Κεντρική παροχή	Παροχή σωλήνα παράκαμψης		Ταχύτητα	Θερμαντήρας	Αριστερό θερμίστορ	Δεξί θερμίστορ
\dot{m}	\dot{m}	\dot{v}	v	T_{heater}	T_L	T_R
[kg/h]	[kg/h]	[m³/s]	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]
600	20,08	0,005	13,56	78,50	26,57	35,05
500	14,70	0,004	9,93	86,70	26,94	37,64
300	8,77	0,002	5,92	102,40	27,89	42,79
120	3,55	0,001	2,40	130,90	30,96	52,30
30	0,68	0,000	0,46	174,70	40,58	64,42
0	0,00	0,000	0,00	215,70	64,71	64,71

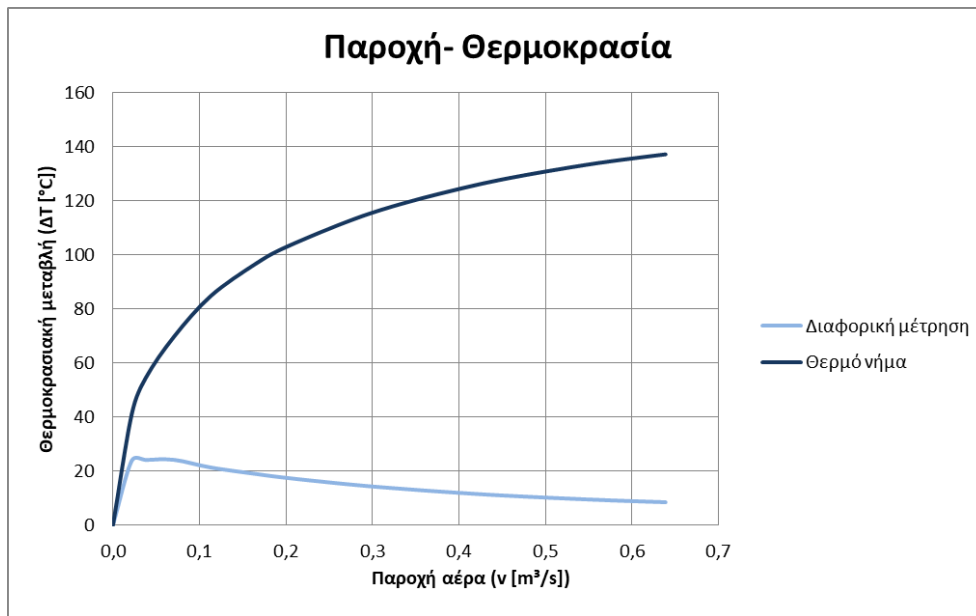
$$T_{heater_0} = T_{max} = 215,70 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Εικόνα 152 Γράφημα θερμοκρασιακής κατανομής

Πίνακας 21 Μεταβολή θερμοκρασίας και αντίστασης

Hot wire			Calorimetric		
$\Delta T = T_{heater_0} - T_{heater}$	R	ΔR	$\Delta T = T_R - T_L$	$R_{upstream}$	$R_{downstream}$
[°C]	[Ohm]	[Ohm]	[°C]	[Ohm]	[Ohm]
137,20	130,32	152,50	8,48	110,34	113,63
129,00	133,45	150,25	10,70	110,49	114,63
113,30	139,42	144,15	14,90	110,85	116,62
84,80	150,17	132,45	21,34	112,05	120,28
41,00	166,52	116,57	23,84	115,76	124,94
0,00	181,62	100,00	0,00	125,05	125,05

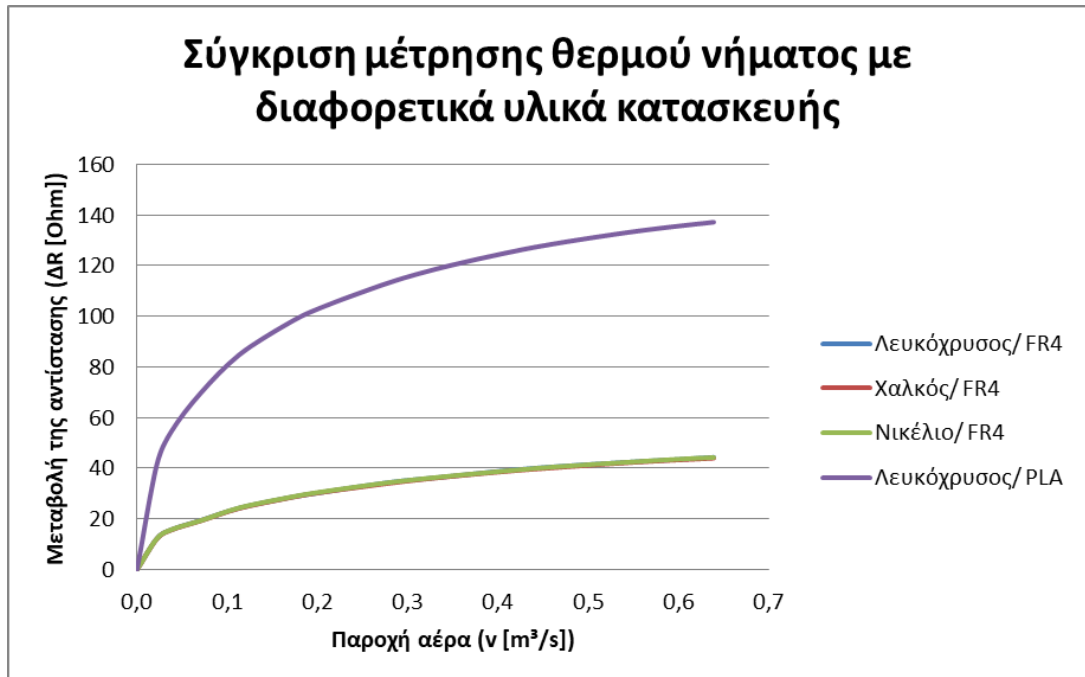


Εικόνα 153 Συγκριτικό γράφημα θερμού νήματος και διαφορικής μέτρησης

Σημείωση: Η περίπτωση του υποστρώματος κατασκευασμένο από υλικό PLA πραγματοποιήθηκε καθαρά για λόγους σύγκρισης, καθώς το υπόστρωμα θα λιώσει με την αύξηση θερμοκρασίας σε αυτή την παρεχόμενη ισχύ, (η μέγιστη θερμοκρασία ισούται με 216 °C). Για το λόγο αυτό δεν κρίθηκε σκόπιμο να γίνει περαιτέρω ανάλυση διαγραμμάτων.

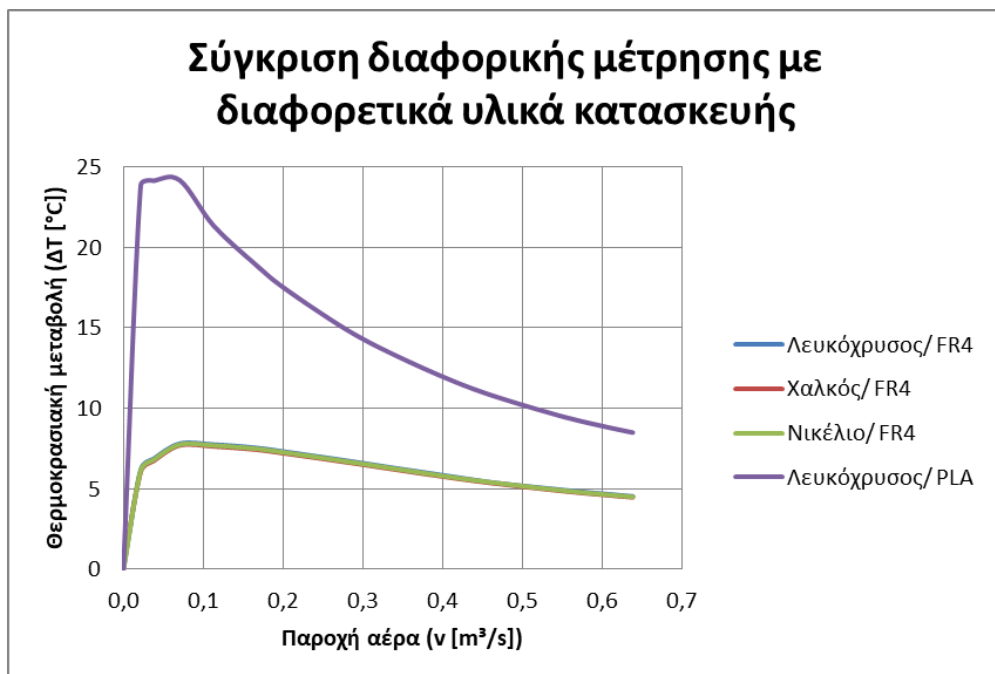
Οπότε συνοπτικά έχουμε:

- για μέτρηση θερμού νήματος



Εικόνα 154 Συγκριτικό διάγραμμα για μέτρηση θερμού νήματος

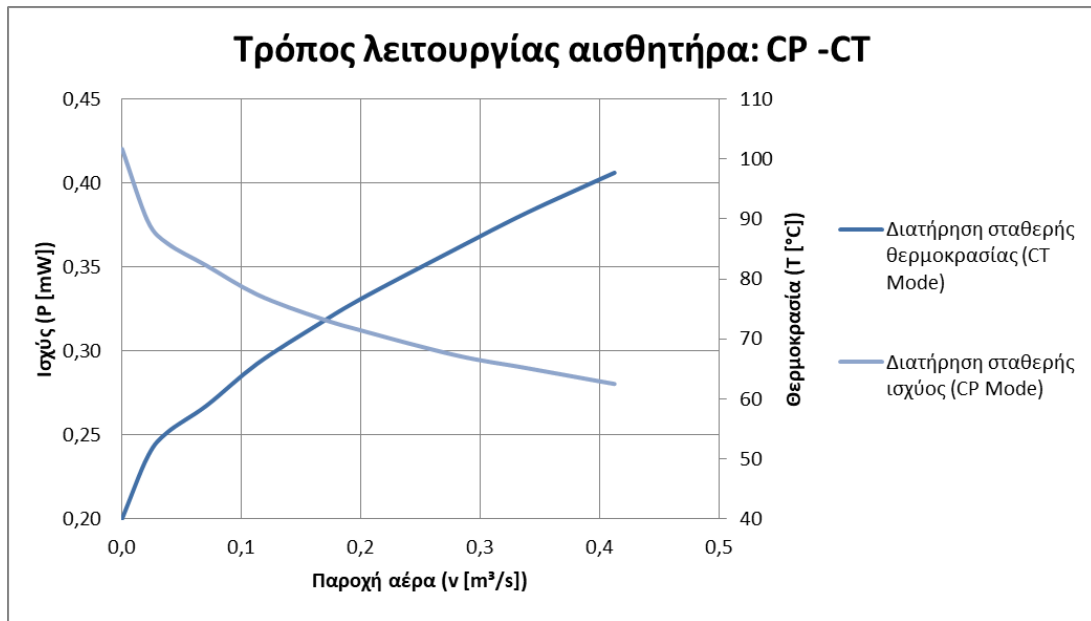
- για διαφορική μέτρηση



Εικόνα 155 Συγκριτικό διάγραμμα για μέτρηση θερμού νήματος

10.4 Αλλαγή τρόπου λειτουργίας από σταθερή ισχύ σε σταθερή θερμοκρασία

Τέλος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τις ίδιες παροχές ξεκινώντας από ισχύ 0,2 W και αυξάνοντας την ισχύ κατάλληλα ώστε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του θερμαντήρα στους 101,7 °C (βλ. Κεφάλαιο 8.5.4). Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκρισης των δύο τρόπων λειτουργίας.

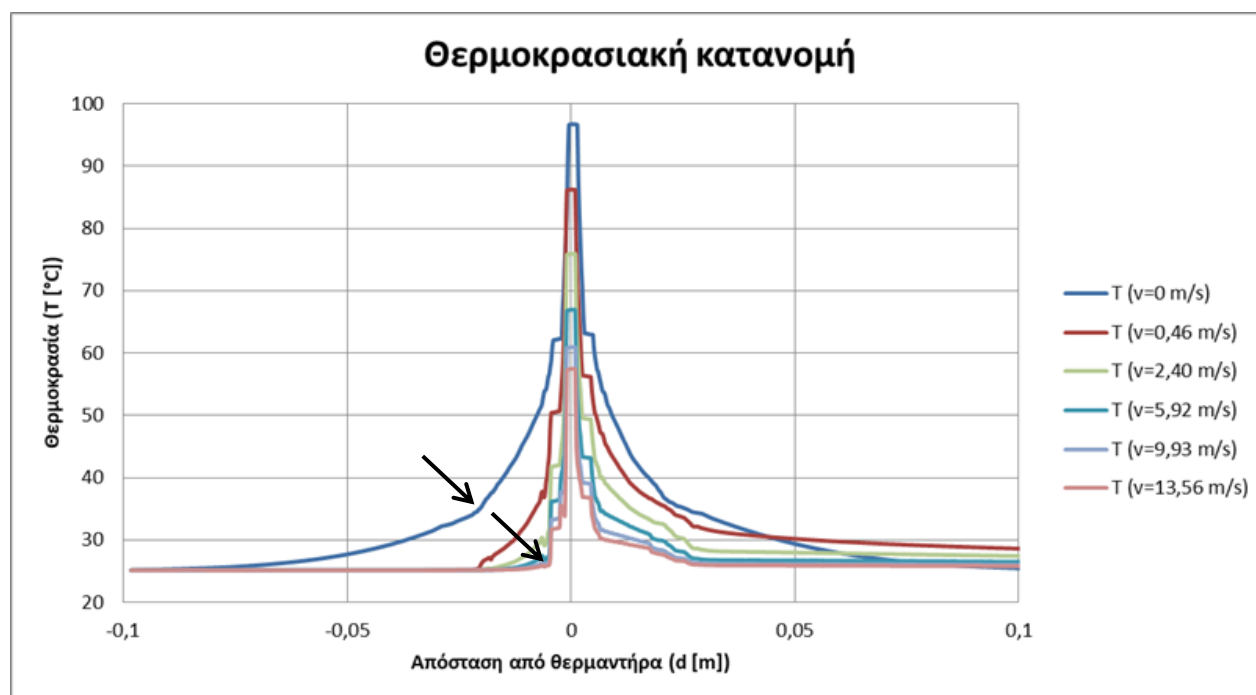


Εικόνα 156 Συγκριτικό διάγραμμα τρόπων λειτουργίας αισθητήρα

Κεφάλαιο 11: Συμπεράσματα και προτάσεις

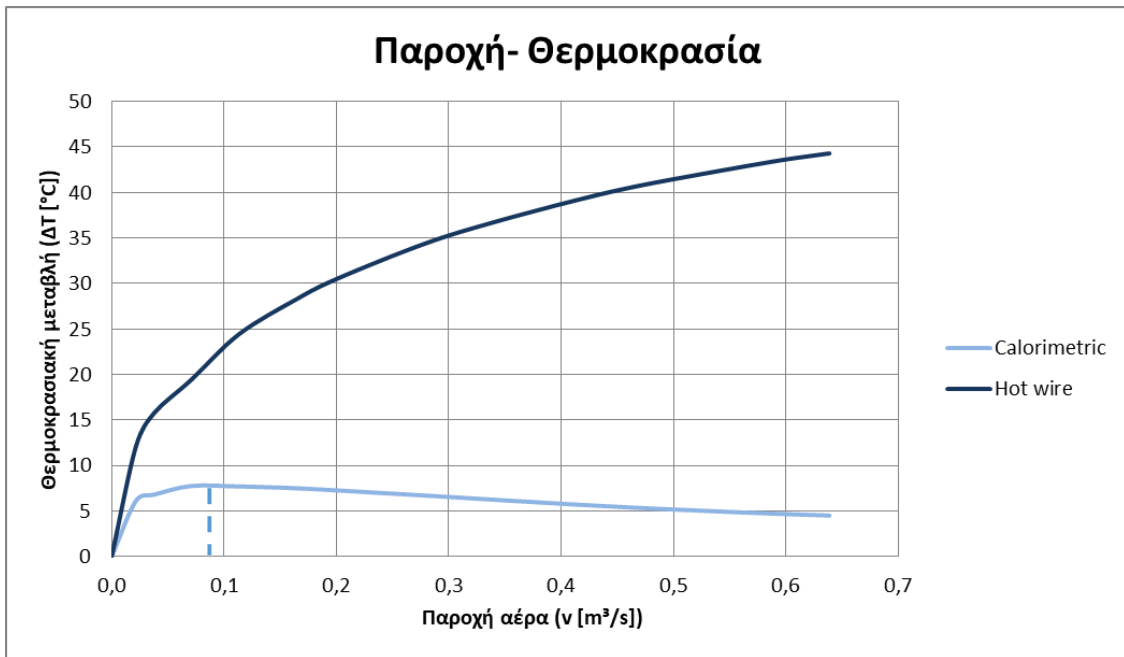
11.1 Συμπεράσματα

Αρχικά παρατηρούμε (σε σχέση με την αρχή λειτουργίας του αισθητήρα) ότι σε κάθε περίπτωση η μεταβολή του θερμοκρασιακού πεδίου σε σχέση με την αρχή λειτουργίας του αισθητήρα είναι συμμετρική εκατέρωθεν του θερμαντήρα. Η κατανομή παραμορφώνεται, όμως όταν υπάρχει ροή, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο. Ανάλογη του μεγέθους της ροής είναι και η παραμόρφωση της κατανομής.



Εικόνα 157 Ενδεικτική θερμοκρασιακή κατανομή

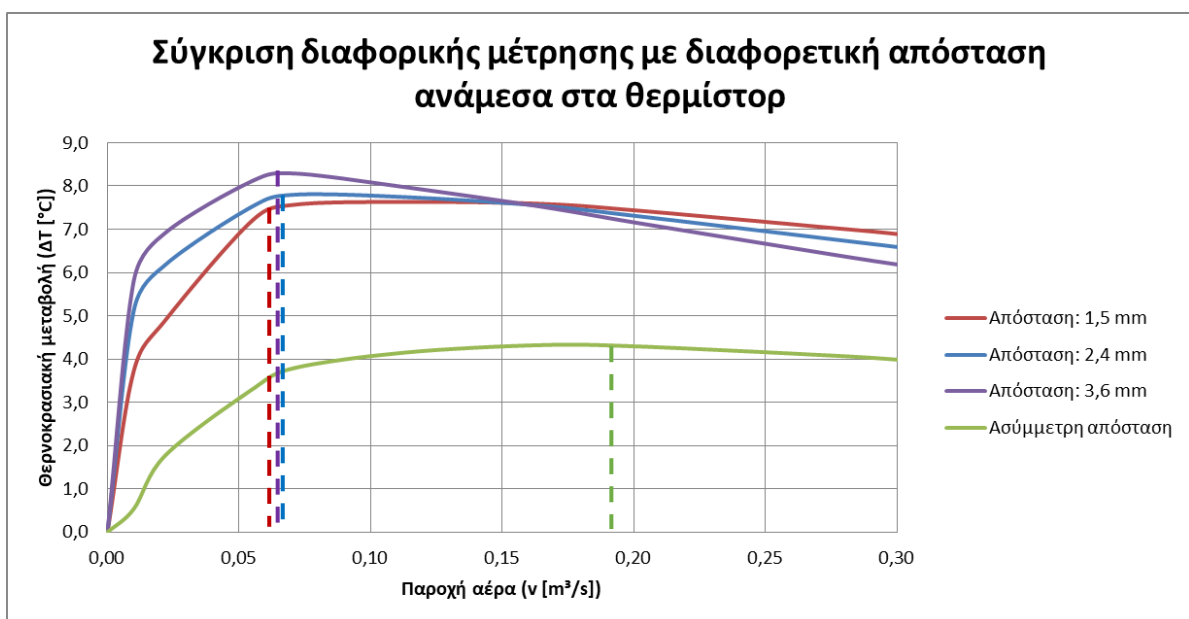
Το επόμενο που μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε είναι ότι η διαφορική μέτρηση παρουσιάζει μικρότερο μετρητικό πεδίο και αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής- παροχής, αφού περίπου στο $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ παροχής αέρα επέρχεται κορεσμός. Αντίθετα στη μέτρηση θερμού νήματος το μετρητικό πεδίο είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα της Εικόνα 158, αφού στα $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$ παροχής αέρα ο αισθητήρας συνεχίζει να μετράει, ενώ δεν φαίνεται να έχει επέλθει κορεσμός. Τα παραπάνω αποτελούν και τη βασική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μεθόδων λειτουργίας σε ένα θερμικό αισθητήρα [Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογίας Αισθητήριων διατάξεων», Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών 2021, Δ.Ν. Παγώνης]



Εικόνα 158 Σύγκριση μετρητικού πεδίου με θερμό νήμα και διαφορική μέτρηση

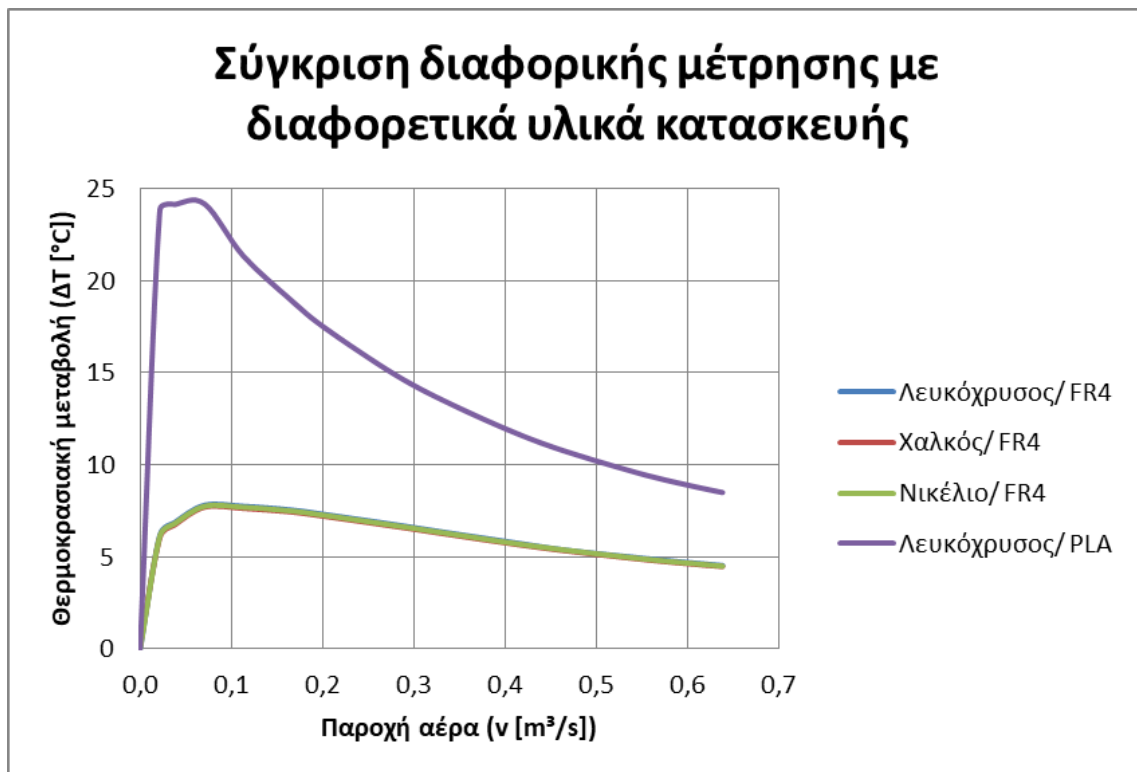
Όσον αφορά τη διαφορική μέτρηση, όσο μεγαλύτερη η απόσταση ανάμεσα στα θερμίστορ, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια μέτρησης του αισθητήρα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνα 159 όταν η απόσταση είναι 3,6 mm το εύρος τιμών εξόδου είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο π.χ. για απόσταση 1,5 mm.

Από το ίδιο διάγραμμα παρατηρούμε επίσης ότι στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των θερμίστορ είναι ασύμμετρη, η ακρίβεια μέτρησης είναι χαμηλότερη, διευρύνεται όμως σημαντικά το μετρητικό πεδίο, που πλησιάζει τα 0,20 m³/s.



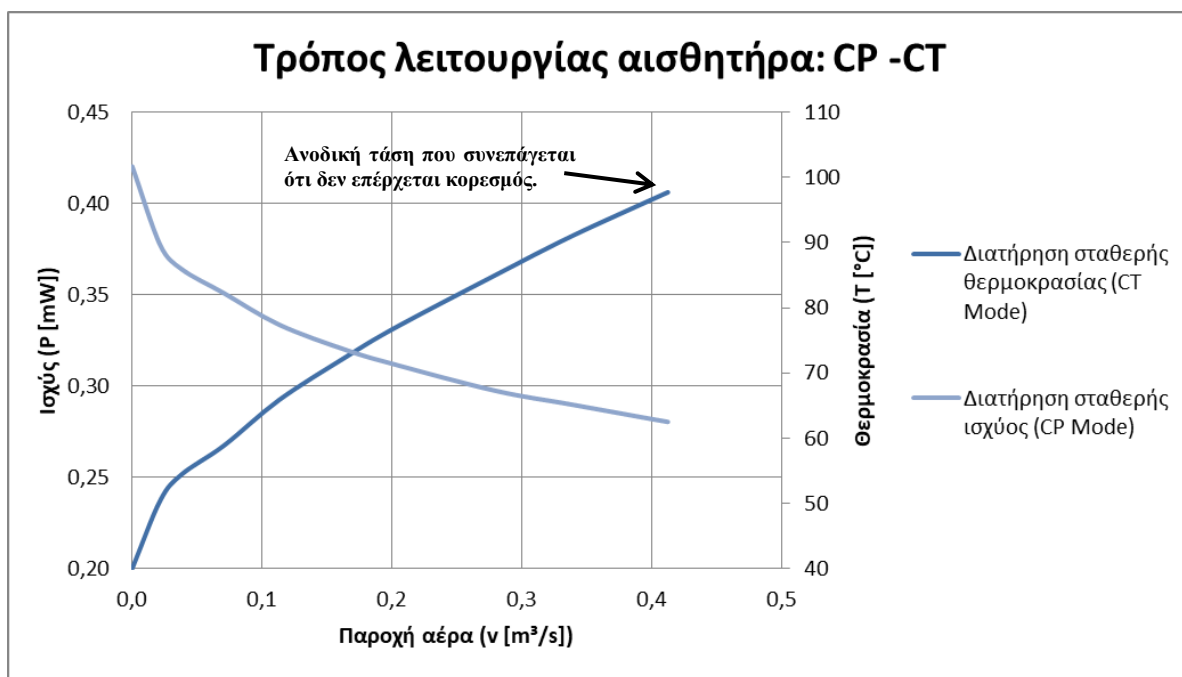
Εικόνα 159 Σημείο κορεσμού διαφορική μέτρησης για διαφορετική απόσταση ανάμεσα στα θερμίστορ

Όσον αφορά τα διαφορετικά υλικά κατασκευής, το νικέλιο, ο λευκόχρυσος και ο χαλκός δίνουν όμοια αποτελέσματα, ως αναμενόμενο. Αντίθετα το υπόστρωμα από PLA αντί για FR4, παρότι δεν αλλάζει σημαντικά το μετρητικό πεδίο, αυξάνει τη μέγιστη θερμοκρασία στη θερμοκρασιακή κατανομή, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την απαιτούμενη ισχύ για τη λειτουργία του αισθητήρα με ίδια περίπου θερμοκρασία στο θερμαντήρα σε ποσοστό που ξεπερνάει το 50%.



Εικόνα 160 Σύγκριση υλικών κατασκευής αισθητήρα για διαφορική μέτρηση

Τέλος όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα (βλ. Κεφάλαιο 10.4) διατηρώντας την ισχύ σταθερή το μετρητικό πεδίο της διαφορικής μέτρησης παραμένει σταθερό, μη ξεπερνώντας τα $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Διατηρώντας όμως σταθερή τη θερμοκρασία του θερμαντήρα για όλες τις τιμές παροχής το μετρητικό πεδίο αυξάνεται δραστικά (βλ. Εικόνα 161). Πρακτικά, ο περιορισμός σε αυτή την περίπτωση είναι η καταστροφή του θερμικού στοιχείου λόγω υπερβολικής παρεχόμενης ισχύος.



Εικόνα 161 Συγκριτικό διάγραμμα τρόπων λειτουργίας αισθητήρα

11.2 Προτάσεις

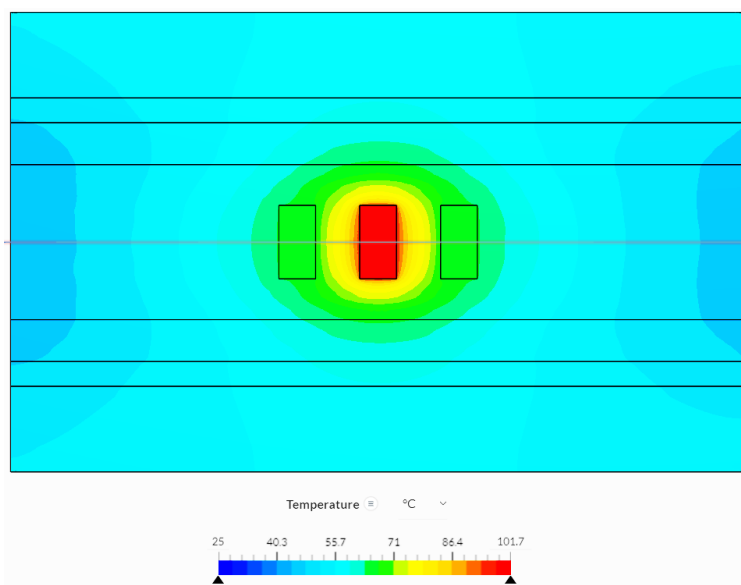
Μία πολύ ενδιαφέρουσα πρόταση βάση της παρούσας μελέτης και βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε, είναι η κατασκευή της συγκεκριμένης διάταξης μέσω του τρισδιάστατου εκτυπωτή που υπάρχει στο τμήμα μας ώστε να πραγματοποιηθούν οι αντίστοιχες μετρήσεις και να μελετηθεί το ποσοστό ακρίβειας των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε επίσης η κατασκευή του αισθητήρα με θερμίστορ από λευκόχρυσο και υπόστρωμα από υλικό PLA, καθώς παρατηρείται ότι μειώνεται η απαιτούμενη ισχύς για τη λειτουργία του αισθητήρα συγκριτικά με το υπόστρωμα από υλικό FR4. Φυσικά, οποιαδήποτε περαιτέρω μελέτη με σκοπό τη βελτιστοποίηση ενός θερμικού αισθητήρα συμπεριλαμβανομένου του φορέα, είναι εξίσου σημαντική.

Βιβλιογραφία

- [1] connectivity, T. (n.d.). *Understanding RTDs*. Ανάκτηση Αύγουστος 2021, από TE connectivity: <https://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/understanding-rtds.html>
- [2] Malalasekera, H. K. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (Second Edition εκδ.). Pearson.
- [3] *Platinum resistance temperature sensors PT100*. (n.d.). Ανάκτηση Αύγουστος 2021, από KONGSBERG: https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/tsiec751_ce.pdf
- [4] *Wheatstone bridge*. (n.d.). Ανάκτηση Αύγουστος 2021, από Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge
- [5] *Αρχές Μηχανολογίας*. (n.d.). Ανάκτηση Αύγουστος 2021, από 2ο Επάλ Ηρακλείου: <http://2epal-am.weebly.com/thetaepsilonhrhomuomicrontauetataualpha---thetaepsilonhrhomuomicronkapparhoalphasigmaiotaalpha.html>
- [6] Αυλωνίτης Α. Σταμάτης, Α. Α. (2009). *Μηχανική των Ρευστών* (4η Έκδοση εκδ.). Ίων. Καλαϊτζάκης Κώστας, Κ. Ε. (2010). *Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες*. Κλειδάριθμος. Κολλιόπουλος, Ν. (2001). *Βασική ηλεκτρολογία*.
- [7] Νυμφοδόρα, Π. (n.d.). *ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ II: Ενότητα 2η- Μονοδιάστατη αγωγή*. Ανάκτηση Ιούλιος 2021, από <https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/METAL100/Ph-Met-II-2.AOC.pdf>
- [8] *Ο Νόμος του Fourier και η εξίσωση της θερμοτητας*. (n.d.). Ανάκτηση Ιούλιος 2021, από http://www.eng.ucy.ac.cy/aprodromou/courses/mmk312/download/MMK312_L2.pdf
- [9] ΠΟΛΥΖΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ, Ζ. Σ. (2018). *ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ*.

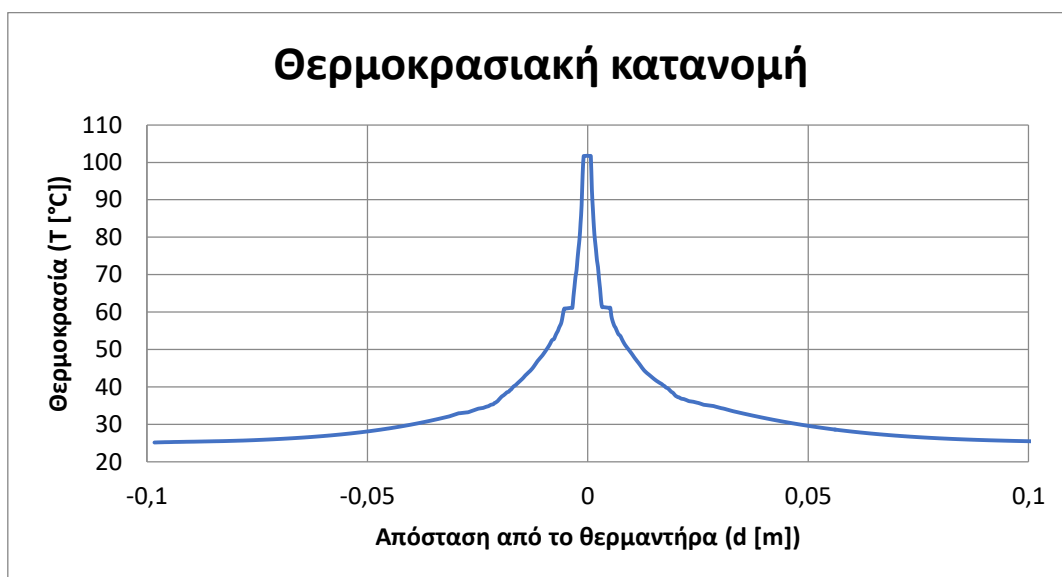
Παράρτημα: Προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας σε όλο το εύρος μέτρησης

Αρχικά προσομοιώθηκε η μηδενική ταχύτητα ώστε να έχουμε μία εικόνα της θερμοκρασιακής μεταβολής όταν δεν υπάρχει ροή. Το αποτέλεσμα ως αναμενόμενο είναι συμμετρικό και η μέγιστη θερμοκρασία στο μεσαίο θερμίστορ ανέρχεται στους 101.7°C .



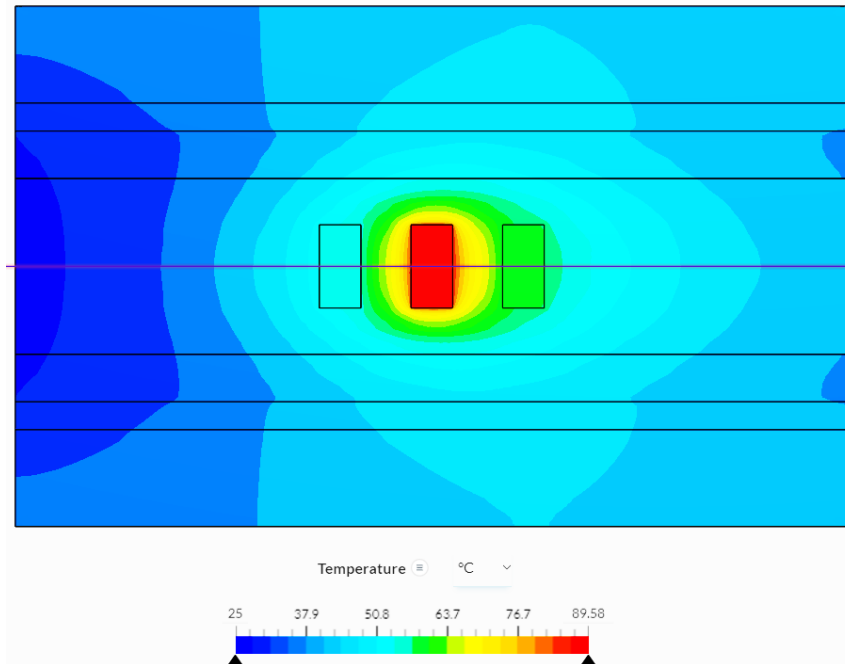
Εικόνα 162 Εικόνα προσομοίωσης συνδυαστικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και συναγωγή)

Το διάγραμμα θερμοκρασιών είναι και αυτό συμμετρικό και έχει σχήμα συμμετρικό όπως είναι αναμενόμενο.

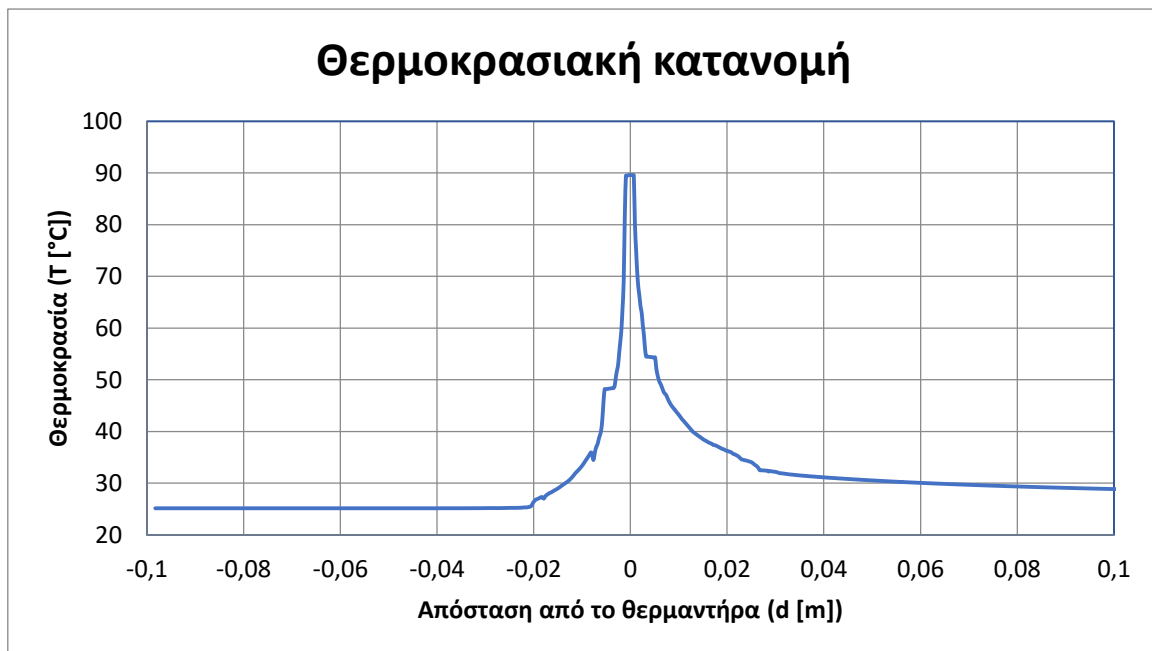


Εικόνα 163 Θερμοκρασιακή κατανομή

Για ταχύτητα 0,46 m/s η συμμετρικότητα πλέον δεν ισχύει ενώ η μέγιστη θερμοκρασία (στην επιφάνεια του θερμαντήρα) έχει πλέον μικρότερη τιμή ίση με 89,58° C.

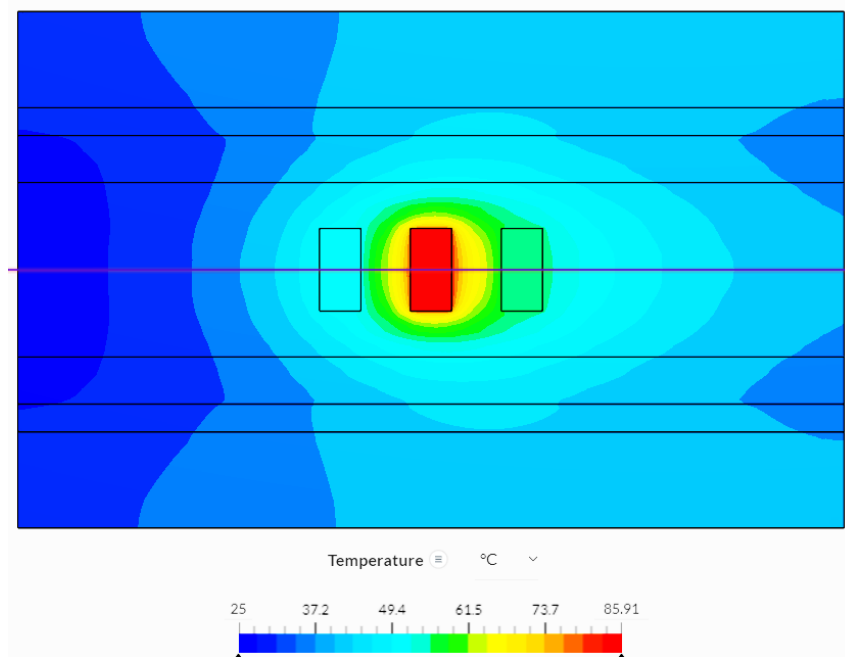


Εικόνα 164 Εικόνα προσομοίωσης συνδυαστικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και συναγωγή)

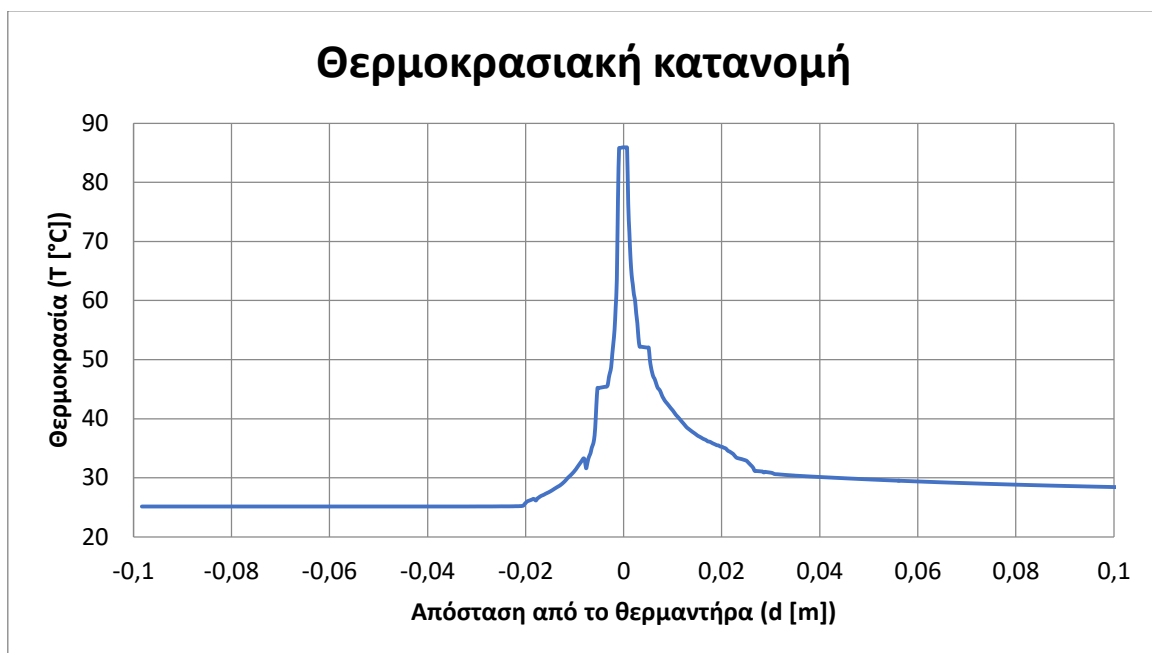


Εικόνα 165 Θερμοκρασιακή κατανομή

Για ταχύτητα 0,81 m/s η μέγιστη θερμοκρασία (στην επιφάνεια του θερμαντήρα) έχει τιμή ίση με 85,91° C.

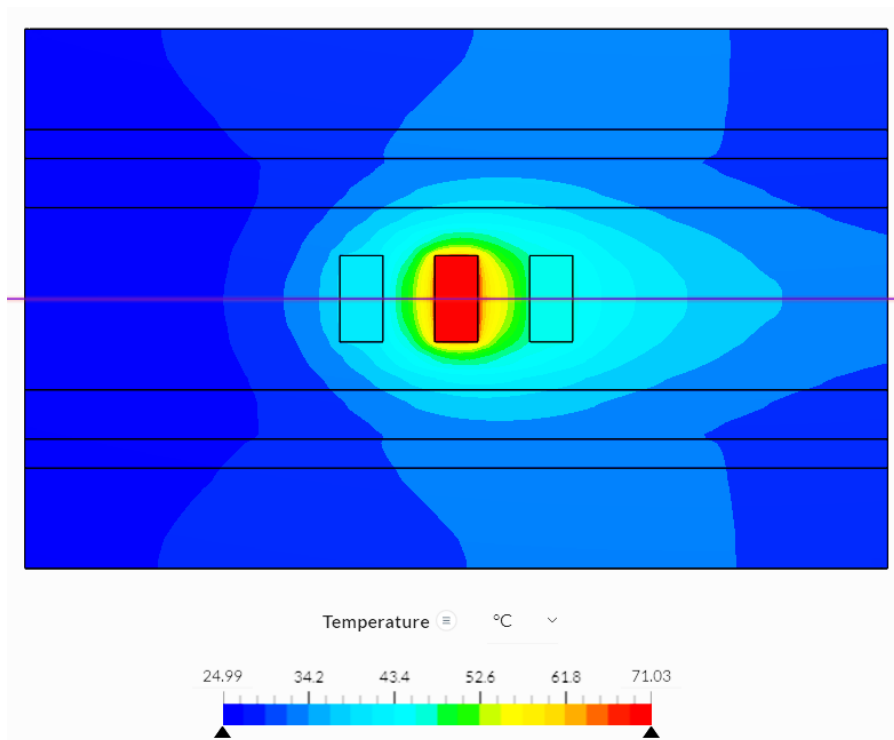


Εικόνα 166 Εικόνα προσομοίωσης συνδυαστικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και συναγωγή)

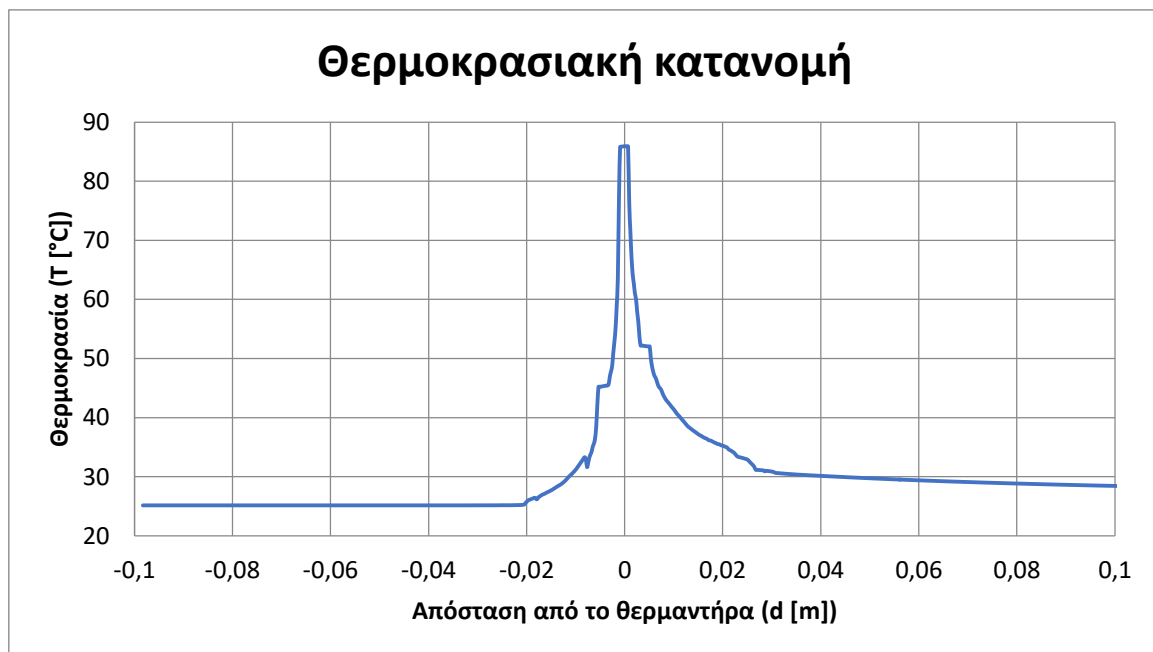


Εικόνα 167 Θερμοκρασιακή κατανομή

Για ταχύτητα 4,29 m/s η μέγιστη θερμοκρασία (στην επιφάνεια του θερμαντήρα) έχει τιμή ίση με 71,03° C.

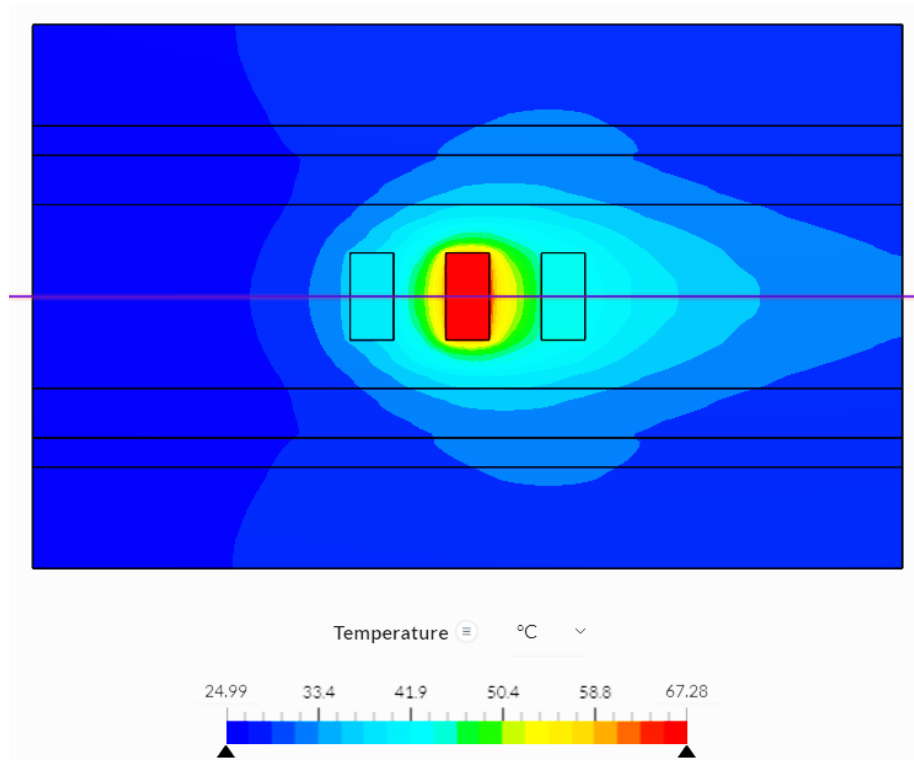


Εικόνα 168 Εικόνα προσομοίωσης συνδυαστικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και συναγωγή)

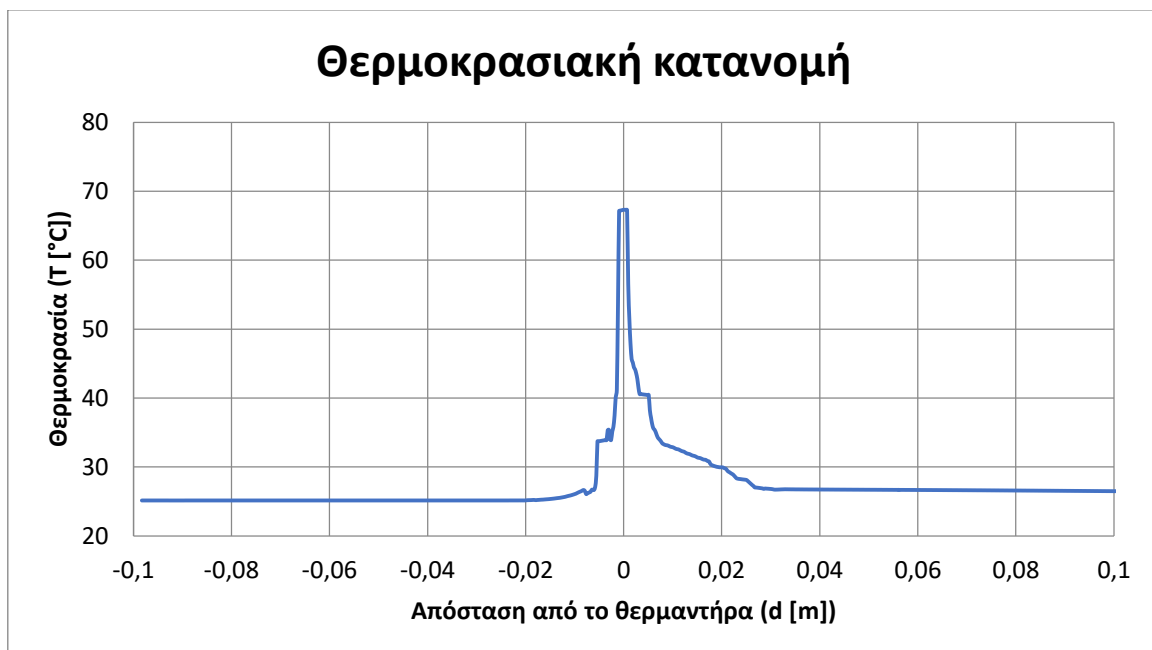


Εικόνα 169 Θερμοκρασιακή κατανομή

Για ταχύτητα 5,92 m/s η μέγιστη θερμοκρασία (στην επιφάνεια του θερμαντήρα) έχει τιμή ίση με 67,28° C.

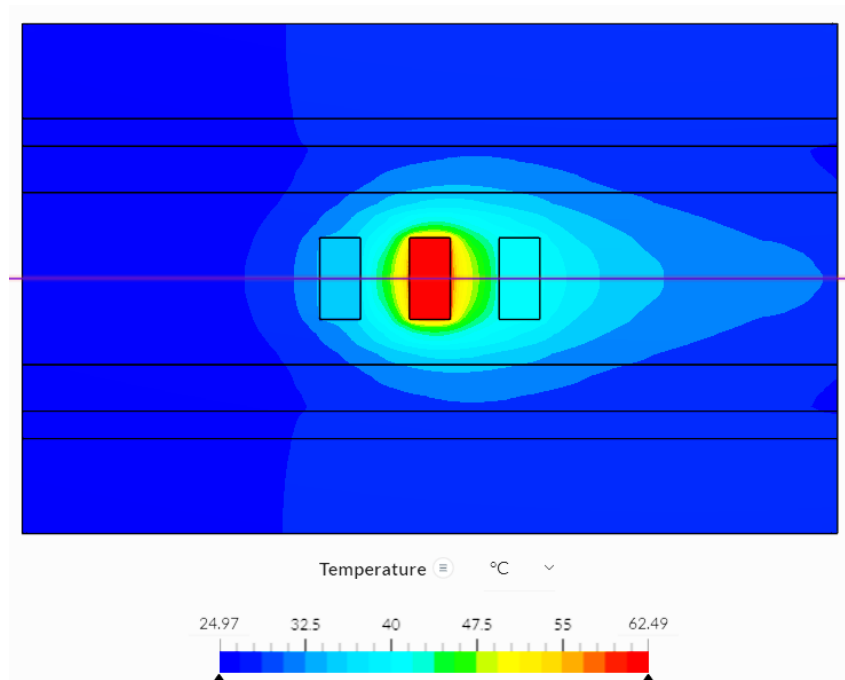


Εικόνα 170 Εικόνα προσομοίωσης συνδυαστικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και συναγωγή)

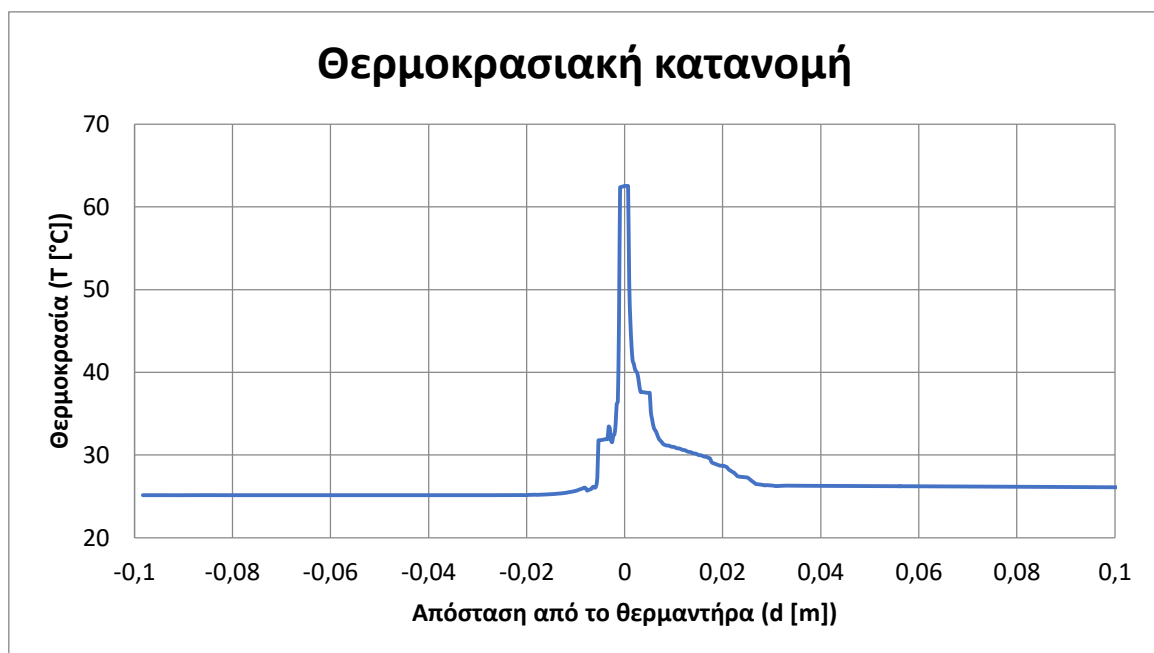


Εικόνα 171 Θερμοκρασιακή κατανομή

Για ταχύτητα 8,74 m/s η μέγιστη θερμοκρασία (στην επιφάνεια του θερμαντήρα) έχει τιμή ίση με 62,49° C.

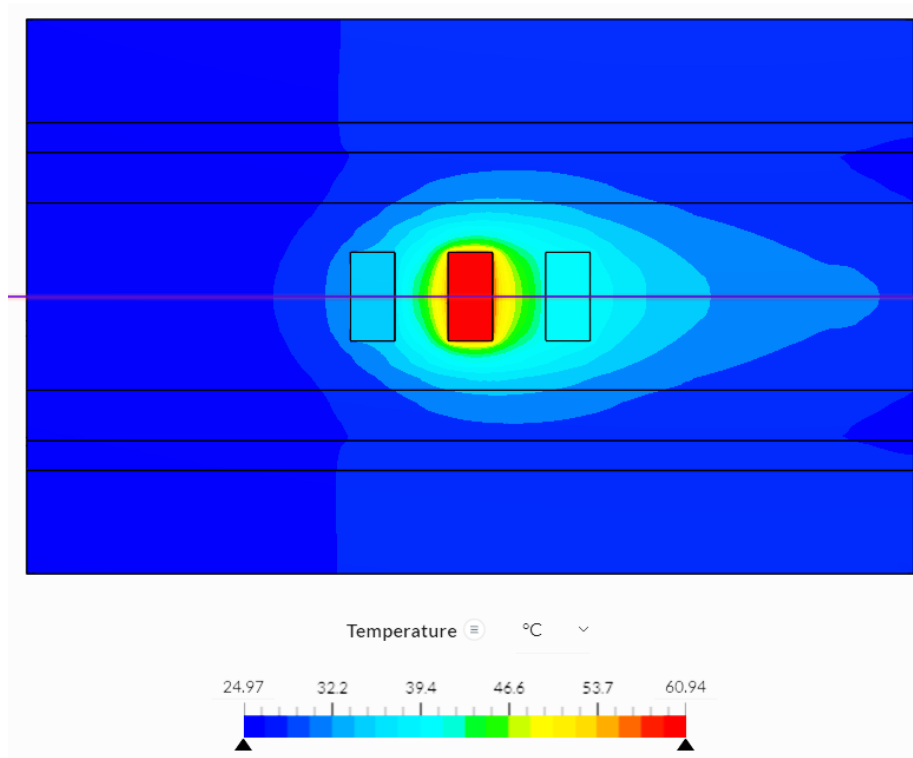


Εικόνα 172 Εικόνα προσομοίωσης συνδυαστικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και συναγωγή)

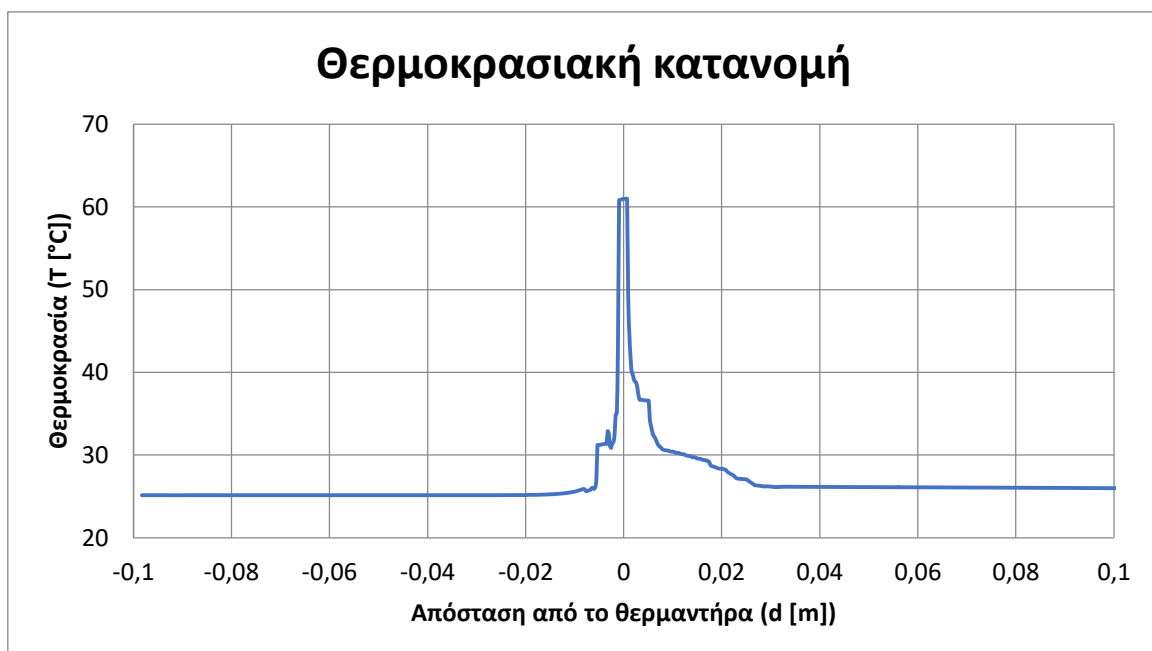


Εικόνα 173 Θερμοκρασιακή κατανομή

Για ταχύτητα 9,93 m/s η μέγιστη θερμοκρασία (στην επιφάνεια του θερμαντήρα) έχει τιμή ίση με 60,94° C.

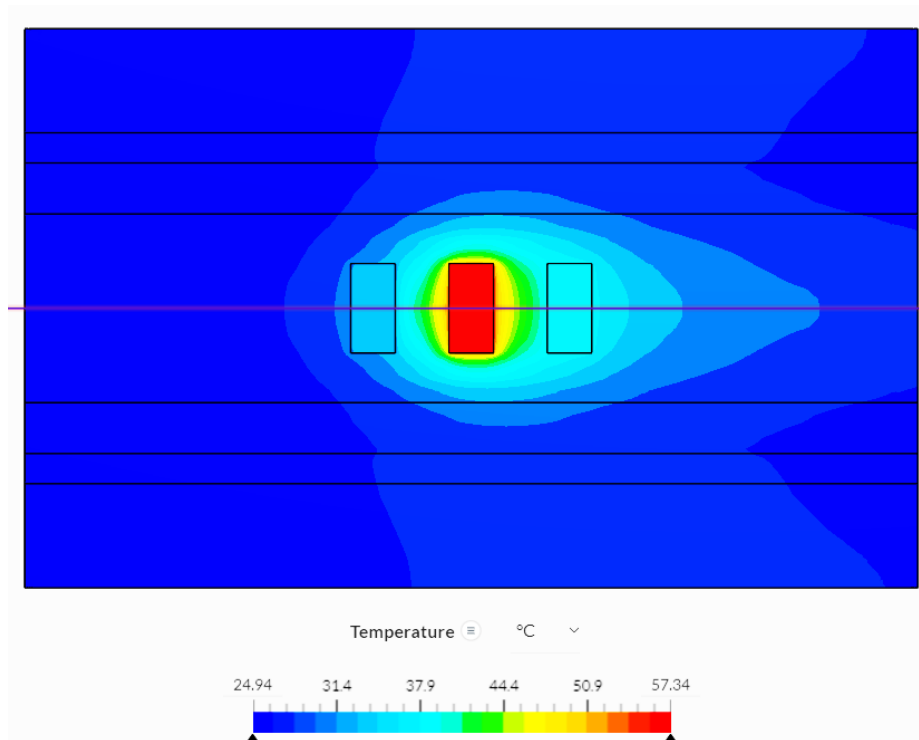


Εικόνα 174 Εικόνα προσομοίωσης συνδυαστικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και συναγωγή)

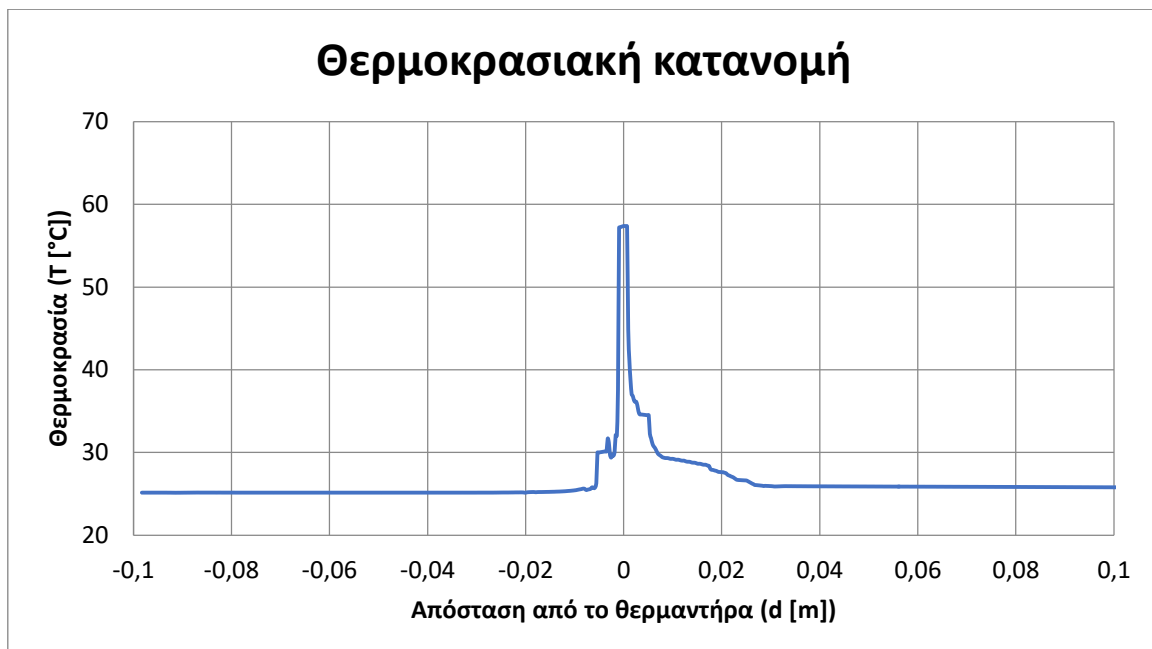


Εικόνα 175 Θερμοκρασιακή κατανομή

Ενώ για ταχύτητα 13,56 m/s η μέγιστη θερμοκρασία (στην επιφάνεια του θερμαντήρα) έχει τιμή ίση με 57,94° C.



Εικόνα 176 Εικόνα προσομοίωσης συνδυαστικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και συναγωγή)



Εικόνα 177 Θερμοκρασιακή κατανομή