



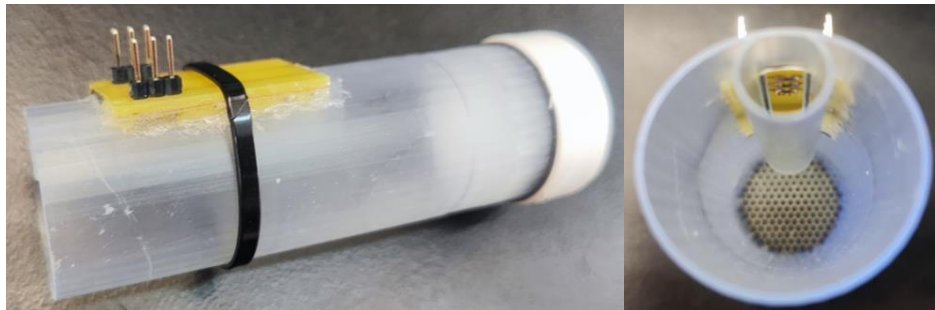
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης**



**Φοιτητής: Ευστράτιος Παπασηφάκης**

**ΑΜ: 19387217**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Γρηγόριος Καλτσάς**

**Καθηγητής**

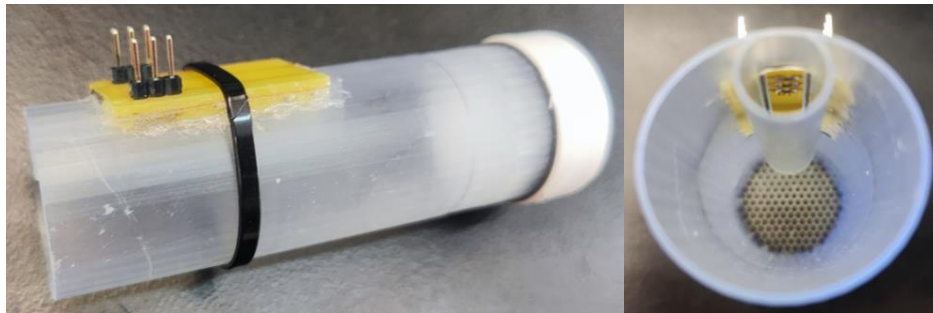
**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Development of a portable spirometer utilizing printed technologies**



**Student: Efstratios Papasifakis**  
**Registration Number: 19387217**

**Supervisor**

**Grigorios Kaltsas**  
**Professor**

**ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2024**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Γρηγόρης Καλτσάς Καθηγητής (Επιβλέπων)	Γεώργιος Πάτσης, Καθηγητής (Μέλος)	Δημήτριος Γουστουρίδης, Αν. Καθηγητής (Μέλος)
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Ευστράτιος Παπασηφάκης,  
Σεπτέμβρης, 2024**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ευστράτιος Παπασηφάκης του Εμμανουήλ, με αριθμό μητρώου 19387217 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής 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 διπλώματός μου.

Ο Δηλών  
Ευστράτιος Παπασηφάκης



## Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης. Πιο συγκεκριμένα στα πλαίσια της εργασίας αρχικά πραγματοποιείται η μελέτη της συσκευασίας (housing) του αισθητήρα μέσω προσομοίωσης και έπειτα η κατασκευή της, καθώς και η κατασκευή του αισθητήρα θερμικού τύπου για την καταμέτρηση της ροής του αέρα. Αρχικά γίνεται εκτενής έρευνα μέσω προσομοιώσεων για την επίδραση της διαμέτρου του σωλήνα στην διαμόρφωση του πεδίου ροής για μέγιστη ροή εισόδου 100L/min. Επίσης αναλύεται η αλληλεπίδραση πλέγματος στην είσοδο της ροής υπό γωνία και μελετάται η διάμετρος και η επίδραση της απόστασης του από την είσοδο του σπιρομέτρου. Ερευνάται το κατάλληλο μήκος του εσωτερικού σωλήνα παράκαμψης (bypass) και γίνονται προσομοιώσεις για την γεωμετρία δύο εσωτερικών bypass. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις ροής και μεταφοράς θερμότητας και με βάση τα αποτελέσματα σχεδιάστηκε θερμικός αισθητήρας αποτελούμενος από τρία θερμίστορ PT100 κατά μήκος της ροής του αέρα τα οποία παρουσιάζουν θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή (PCT). Τα δύο ακριανά στοιχεία λειτουργούν ως αισθητήρες θερμοκρασίας ενώ το μεσαίο ως θερμαινόμενο στοιχείο. Με βάση την θερμοκρασιακή διαφορά που παρουσιάζουν τα αισθητήρια στοιχεία καθώς και από τη μεταβολή θερμοκρασίας του θερμικού στοιχείου λόγω της ροής του αέρα μπορεί να προσδιοριστεί η ταχύτητά του. Η τελική γεωμετρία εκτυπώθηκε με χρήση εκτυπωτή στερεολιθογραφίας (SLA) και ο αισθητήρας δημιουργήθηκε με συμβατικές μεθόδους τυπωμένων κυκλωμάτων σε πλακέτα (PCB) και την χρήση τριών θερμίστορ υψηλής ακρίβειας και ευαισθησίας. Εκτελέστηκαν πειραματικές μετρήσεις για ένα εύρος ταχυτήτων ροής της διάταξης σε λειτουργία σταθερού ρεύματος και εκτιμήθηκαν τα αποτελέσματα για δύο διαφορετικές αρχές λειτουργίας της διάταξης: α) την αρχή θερμού νήματος και β) την διαφορική λειτουργία. Μέσω πειραματικών μετρήσεων με μηδενική ροή εκτιμήθηκε και η ταχύτητα απόκρισης του συστήματος.

## Λέξεις – κλειδιά

Φορητό σπιρόμετρο, εκτύπωση στερεολιθογραφίας, θερμικός αισθητήρας ροής, προσομοιώσεις ροής, προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας.

## **Abstract**

This thesis focuses on the development of a portable spirometer utilizing printing technologies. More specifically it focuses on the development and fabrication of the geometry of the housing as well as a thermal type sensor to measure the air flow. First an extensive investigation is done through simulations on the effect of the pipe diameter on the flow development such as to allow for a maximum inlet flow of 100L/min. The effectiveness of a Honeycomb mesh with an angled inflow is also analyzed and its diameter and distance from the spirometer inlet is studied. The appropriate length of the internal bypass pipe is investigated and simulations are conducted for the geometry of two internal bypasses. Flow and heat transfer simulations were performed and based on the results a thermal sensor was designed, consisting of three PT100 thermistors along the air flow which exhibit a positive temperature coefficient (PCT). The two outer elements are used as temperature sensors while the middle one as a heater. Based on the temperature difference presented by the sensing elements as well as the temperature drop of the thermal element due to air flow, the speed of the flow can be determined. The final geometry was printed using a stereolithography (SLA) printer and the sensor was created using conventional printed circuit board (PCB) methods and the use of three high precision and sensitivity thermistors. Experimental measurements were performed for a range of flow velocities of the device in constant current mode and the results for the operation of the sensor were evaluated based on two distinct working principles : a) Hot wire principle and b) Differential temperature principle. The response time of the system was also assessed under zero flow conditions.

## **Keywords**

Portable spirometer, stereolithography printing, thermal flow sensor, flow simulations, heat transfer simulations.

## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>	<b>8</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>8</b>
<b>Αλφαβητικό Ευρετήριο.....</b>	<b>12</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>13</b>
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας . . . . .	13
Σκοπός και στόχοι . . . . .	13
Μεθοδολογία . . . . .	14
Καινοτομία . . . . .	14
Δομή . . . . .	15
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Θεωρητικό υπόβαθρο/ Τεχνολογία θερμικών Αισθητήρων Ροής...16</b>	<b>16</b>
1.1 Δυναμική της Ροής . . . . .	16
1.1.1 Εσωτερική και εξωτερική ροή . . . . .	16
1.1.2 Στρωτή και τυρβώδης ροή και ροή σε σωλήνα. . . . .	16
1.2 <b>Μεταφορά Θερμότητας . . . . .</b>	<b>17</b>
1.2.1 Μετάδοση - Αγωγή (Conduction) . . . . .	17
1.2.2 Συναγωγή (Convection) . . . . .	18
1.2.3 Ακτινοβολία (Radiation) . . . . .	18
1.3 <b>Θερμικοί Αισθητήρες Ροής και σπιρόμετρα της αγοράς. . . . .</b>	<b>18</b>
1.3.1 Βασικές αρχές λειτουργίας . . . . .	19
1.3.2 Διαθέσιμα προϊόντα της αγοράς . . . . .	21
1.3.3 Αποτελέσματα . . . . .	25
1.3.4 Καμπύλη Ροής-Όγκου (Flow-Volume loop) . . . . .	25
1.3.5 Διόρθωση συνθηκών BTPS. . . . .	26
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Ανάπτυξη γεωμετρίας και προσομοιώσεις ροής.....27</b>	<b>27</b>
2.1 Γεωμετρία Συσκευασίας . . . . .	27
2.2 Επίδραση της διαμέτρου του σωλήνα στην ανάπτυξη της ροής . . . . .	28
2.3 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης πλέγματος με ροή υπό γωνία . . . . .	32
2.4 Μελέτη διαμέτρου πλέγματος . . . . .	37
2.5 Μελέτη απόσταση πλέγματος από την είσοδο. . . . .	41
2.6 Μελέτη του μήκους των bypass . . . . .	44
2.7 Μελέτη εφαρμογής διπλού bypass . . . . .	48
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Προσομοιώσεις θερμικού αισθητήρα.....52</b>	<b>52</b>
3.1 Θερμικός αισθητήρας ροής . . . . .	52
3.2 Μελέτη θερμοκρασιακής βαθμίδας για σταθερή ταχύτητα ροής εισόδου . . . . .	53
3.3 Μελέτη θερμοκρασιακής βαθμίδας για διάφορες ταχύτητες ροής εισόδου. . . . .	57
3.4 Τρισδιάστατες προσομοιώσεις συστήματος θερμικού αισθητήρα. . . . .	59
<b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Πειραματική Διαδικασία.....64</b>	<b>64</b>
4.1 Τεχνολογία εκτύπωσης SLA. . . . .	64
4.2 Ανάπτυξη τελικού συστήματος και πειραματική διάταξη . . . . .	64
4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων . . . . .	67
4.3.1 Μετρήσεις για διάφορες ταχύτητες ροής εισόδου. . . . .	67
4.3.2 Μετρήσεις ταχύτητας απόκρισης χωρίς ροή . . . . .	72
<b>5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....76</b>	<b>76</b>
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....78</b>	<b>78</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Αντιστοιχία ταχύτητας (m/s) και διατομών για Ροή 100L/min.....	29
Πίνακας 2-2. Αντιστοίχιση διαμέτρων με αριθμό Reynolds για 100L/min.....	29
Πίνακας 3-1. Θερμοκρασίες προσομοιώσεων. ....	53
Πίνακας 3-2. Μετρήσεις μεταφοράς θερμότητας 2D.....	55
Πίνακας 3-3. Ταχύτητες εισόδου σε L/min και m/s. ....	57
Πίνακας 4-1. Ευαισθησία αισθητήρα σε λειτουργία θερμού νήματος.....	69
Πίνακας 4-2. Μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας δωματίου $\Delta T_{room\_max}$ (°C).....	71
Πίνακας 4-3. Ταχύτητα απόκρισης θερμικού στοιχείου αισθητήρα.....	72
Πίνακας 4-4. Ταχύτητα απόκρισης αισθητήριων στοιχείων αισθητήρα. ....	73

## Κατάλογος Εικόνων

Σχήμα 1-1. Απεικόνιση ανάπτυξης στρωτής ροής. [1].....	17
Σχήμα 1-2.Spirobank Smart.....	21
Σχήμα 1-3.Contec Handheld SP10 Spirometer.....	22
Σχήμα 1-4. AioCare Spirometry.....	22
Σχήμα 1-5.Portable spirometer Gasboard-702.....	23
Σχήμα 1-6.SpiroSonic mobile.....	23
Σχήμα 1-7.NDD Easy on-PC Spirometer.....	24
Σχήμα 1-8.custo spiro mobile Spirometer.....	24
Σχήμα 1-9.Vitalograph micro Spirometer.....	25
Σχήμα 1-10. Διάγραμμα Ροής-Όγκου [12].....	26
Σχήμα 2-1. Χαρακτηριστικά γεωμετρίας συσκευασίας.....	27
Σχήμα 2-2. Διάγραμμα αριθμού Reynolds – Διαμέτρου.....	29
Σχήμα 2-3. Προσομοιώσεις διαμέτρου σωλήνα για 100L/min. ....	31
Σχήμα 2-4. Σημείο μέτρησης κατά μήκος του κέντρου του σωλήνα.....	31
Σχήμα 2-5. Μέση ταχύτητα ροής για διάμετρο 1 cm , μήκος 12cm, ταχύτητα εισόδου 21,22m/s....	31



Σχήμα 2-6. Ταχύτητα ροής κατά μήκος το κέντρο των σωλήνων για διάφορες διατομές .....	32
Σχήμα 2-7.Αριθμοί Reynolds κατά μήκος το κέντρο των σωλήνων για διάφορες διατομές.....	32
Σχήμα 2-8. Γεωμετρία υπό γωνία 30 μοιρών .....	33
Σχήμα 2-9. Αποτέλεσμα 30 μοιρών χωρίς πλέγμα. ....	33
Σχήμα 2-10. Αποτέλεσμα 30 μοιρών με απόσταση πλέγματος 1cm .....	34
Σχήμα 2-11. Αποτέλεσμα 30 μοιρών με απόσταση πλέγματος 2cm .....	34
Σχήμα 2-12. Μέτρηση κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο.....	34
Σχήμα 2-13. Αποτελέσματα μέτρησης κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο για 30 μοίρες .....	34
Σχήμα 2-14. Μέτρηση κατά μήκος της διαμέτρου 1cm πριν την έξοδο.....	35
Σχήμα 2-15. Αποτελέσματα μέτρησης κατά μήκος της διαμέτρου 1cm πριν την έξοδο για 30 μοίρες .....	35
Σχήμα 2-16. Πλάγια όψη γεωμετρίας υπό γωνία 40 μοιρών .....	36
Σχήμα 2-17. Αποτέλεσμα 40 μοιρών χωρίς πλέγμα .....	36
Σχήμα 2-18. Αποτέλεσμα 40 μοιρών με απόσταση πλέγματος 1cm .....	36
Σχήμα 2-19. Μέτρηση κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο.....	36
Σχήμα 2-20. Αποτελέσματα μέτρησης κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο για 40 μοίρες .....	37
Σχήμα 2-21.Κάτοψη κατά μήκος μέτρησης.....	37
Σχήμα 2-22.Τρισδιάστατη απεικόνιση κατά μήκος μέτρησης. ....	37
Σχήμα 2-23. Κατά μήκος μέση ταχύτητα ροής για εξάγωνο 20mm.....	38
Σχήμα 2-24. Σύγκριση κατά μήκος μετρήσεων. ....	38
Σχήμα 2-25. Κάθετη διατομή ροής για πλέγμα με εξάγωνο 20mm.....	39
Σχήμα 2-26.Πλάγια διατομή τρισδιάστατων αποτελεσμάτων για εξάγωνο 25mm.....	39
Σχήμα 2-27. Πλάγια διατομή τρισδιάστατων αποτελεσμάτων για εξάγωνο 15mm .....	40
Σχήμα 2-28. Πλάγια διατομή τρισδιάστατων αποτελεσμάτων για εξάγωνο 15mm .....	40
Σχήμα 2-29.Μετρήσεις κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο. ....	40
Σχήμα 2-30. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο. ....	40
Σχήμα 2-31. Μετρήσεις κατά μήκος το κέντρο του σπιρομέτρου.....	41
Σχήμα 2-32. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος του κέντρου του σπιρομέτρου.....	41
Σχήμα 2-33. Τρισδιάστατα αποτελέσματα για απόσταση πλέγματος 1cm από την είσοδο.....	42

Σχήμα 2-34. Τρισδιάστατα αποτελέσματα για απόσταση πλέγματος 3cm από την είσοδο.....	42
Σχήμα 2-35. Μετρήσεις κατά μήκος του σπιρομέτρου στο κέντρο του bypass .....	42
Σχήμα 2-36. Κάτοψη μετρήσεων κατά μήκος του σπιρομέτρου στο κέντρο του bypass.....	42
Σχήμα 2-37. Αποτελέσματα κατά μήκος του σπιρομέτρου στο κέντρο του bypass .....	43
Σχήμα 2-38. Μετρήσεις στο κέντρο του bypass .....	43
Σχήμα 2-39. Αποτελέσματα μετρήσεων ταχύτητα στο κέντρο του bypass .....	43
Σχήμα 2-40. Τρισδιάστατα αποτελέσματα για μήκος bypass 5cm.....	44
Σχήμα 2-41. Τρισδιάστατα αποτελέσματα για μήκος bypass 7cm.....	45
Σχήμα 2-42. Μετρήσεις κατά μήκος της διαμέτρου του bypass 1cm πριν την έξοδο.....	45
Σχήμα 2-43. Μετρήσεις κατά μήκος της διαμέτρου εισόδου του bypass.....	45
Σχήμα 2-44. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος της διαμέτρου εισόδου του bypass .....	46
Σχήμα 2-45. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος της διαμέτρου του bypass 1cm πριν την έξοδο. .....	46
Σχήμα 2-46. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος του κέντρου των bypass.....	46
Σχήμα 2-47. Αριθμός Reynolds κατά μήκος το κέντρο του bypass μήκους 5cm.....	47
Σχήμα 2-48. Αριθμός Reynolds κατά μήκος το κέντρο του bypass μήκους 7cm.....	47
Σχήμα 2-49. Σύγκριση αριθμών Reynolds κατά μήκος του κέντρου των bypass με μήκος 5,6 και 7cm.....	47
Σχήμα 2-50. Γεωμετρία διπλού Bypass. ....	48
Σχήμα 2-51. Τρισδιάστατη απεικόνιση ροής πλάγιας όψης διπλού bypass .....	48
Σχήμα 2-52. Αποτελέσματα ροής κατά μήκος του κέντρο των bypass .....	49
Σχήμα 2-53. Αποτελέσματα ροής κατά μήκος της διαμέτρου των bypass στην έξοδο της ροής.....	49
Σχήμα 2-54. Αριθμός Reynolds κατά μήκος του κέντρου των bypass .....	50
Σχήμα 2-55. Υπολογισμός της μέσης ταχύτητας κατά μήκος των bypass.....	50
Σχήμα 2-56. Αποτελέσματα μέσης ταχύτητας κατά μήκος των bypass. ....	51
Σχήμα 2-57. Μέση τιμή αριθμού Reynolds κατά μήκος των bypass.....	51
Σχήμα 3-1. Σχηματικό του κυκλώματος θερμικού αισθητήρα.....	52
Σχήμα 3-2. Αποτελέσματα ροής για το δισδιάστατο μοντέλο.....	53
Σχήμα 3-3. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας για το δισδιάστατο μοντέλο και $\Delta T=25$ . ....	53

Σχήμα 3-4. . Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας για το δισδιάστατο μοντέλο και $\Delta T=75$ . .....	53
Σχήμα 3-5. Κοντινότερη ευθεία κατά μήκος του bypass με κάθετη απόσταση 0,01cm.....	54
Σχήμα 3-6. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας.....	55
Σχήμα 3-7. Ποσοστό θερμοκρασίας σε σχέση με τη κάθετη απόσταση .....	56
Σχήμα 3-8. Αποτελέσματα ταχύτητας ροής κατά μήκος το κέντρο του bypass.....	56
Σχήμα 3-9. Αποτελέσματα μέσης ταχύτητας ροής κατά μήκος το κέντρο του bypass.....	57
Σχήμα 3-10. Δισδιάστατη προσομοίωση για ταχύτητα ροής 0m/s και $\Delta T$ 75 .....	57
Σχήμα 3-11. Αποτελέσματα δισδιάστατων προσομοιώσεων κατά μήκος του bypass με κάθετη απόσταση από το θερμικό στοιχείο 0,01cm.....	58
Σχήμα 3-12. Πλάγια όψη αποτελεσμάτων ταχύτητας ροής τρισδιάστατης προσομοίωσης για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s .....	59
Σχήμα 3-13. Αποτελεσμάτα μεταφοράς θερμότητας τρισδιάστατης προσομοίωσης για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s και $\Delta T=75$ .....	60
Σχήμα 3-14. Μετρήσεις κατά μήκος του bypass για κάθετες αποστάσεις από το θερμοστοιχείο. ....	60
Σχήμα 3-15. Αποτελέσματα για κάθετη απόσταση close (0,01cm), medium (0,05cm) και far (0,15cm).....	60
Σχήμα 3-16. Μετρήσεις κατά μήκος του bypass διαμέσου του θερμοστοιχείου. ....	61
Σχήμα 3-17. Πλάγια όψη αποτελεσμάτων ταχύτητας ροής τρισδιάστατης προσομοίωσης για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s .....	61
Σχήμα 3-18. a) $\Delta T=135$ .....	61
Σχήμα 3-19. b) $\Delta T=75$ .....	61
Σχήμα 3-20. c) $\Delta T=25$ .....	61
Σχήμα 3-21. Πλάγια όψη αποτελεσμάτων μεταφοράς θερμότητας τρισδιάστατης προσομοίωσης για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s .....	61
Σχήμα 3-22. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας θερμοστοιχείου στο κέντρο του σωλήνα για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s. ....	62
Σχήμα 3-23. Αποτελέσματα ταχύτητας ροής κατά μήκος του κέντρου του σωλήνα. ....	62
Σχήμα 3-24. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας θερμοστοιχείου στο κέντρο του σωλήνα για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s και 2,5m/s.....	62
Σχήμα 3-25. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας θερμοστοιχείου στο κέντρο του σωλήνα για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s. ....	63
Σχήμα 4-1. Μοντέλο τελικής γεωμετρίας.....	64

<i>Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης</i>	
Σχήμα 4-2. Πλάγια τομή μοντέλου τελικής γεωμετρίας .....	64
Σχήμα 4-3. Εκτυπωμένη συσκευασία σπιρομέτρου.....	65
Σχήμα 4-4. Κύκλωμα σε διαφανές φιλμ. ....	65
Σχήμα 4-5. Ολοκληρωμένη πλακέτα .....	65
Σχήμα 4-6. Ολοκληρωμένη συσκευή.....	65
Σχήμα 4-7. Πειραματική Διάταξη.....	66
Σχήμα 4-8. Πειραματικές μετρήσεις αντίστασης θερμαντήρα και θερμοκρασίας δωματίου σε σχέση με την ταχύτητα ροής εισόδου.....	67
Σχήμα 4-9. Διαφορά αντίστασης του θερμαντήρα σε σχέση με την ταχύτητα ροής εισόδου.....	68
Σχήμα 4-10. Διαφορά θερμοκρασίας θερμαντήρα χωρίς την επιρροή της θερμοκρασίας δωματίου σε σχέση με την ταχύτητα ροής.....	69
Σχήμα 4-11. Μεταβολή της διαφοράς της αντίστασης των αισθητήριων στοιχείων σε σχέση με την ταχύτητα ροής.....	70
Σχήμα 4-12. Ταχύτητα ροής που διοχετεύεται στο Bypass.....	71
Σχήμα 4-13. Απόκριση συστήματος για 180 δευτερόλεπτα. ....	72
Σχήμα 4-14. Κανονικοποιημένη απόκριση θερμικού στοιχείου στο χρόνο. ....	72
Σχήμα 4-15. Κανονικοποιημένη απόκριση αισθητήριων στοιχείων στο χρόνο.....	73
Σχήμα 4-16. Απόκριση συστήματος για παλμούς με περίοδο 21 δευτερόλεπτα. ....	73
Σχήμα 4-17. Απόκριση συστήματος για παλμούς με περίοδο 64 δευτερόλεπτα. ....	74
Σχήμα 4-18. Απόκριση συστήματος για παλμούς με περίοδο 127 δευτερόλεπτα.....	74

### **Αλφαβητικό Ευρετήριο**

BTPS : Body Temperature, Pressure, Saturated

PCB : Printed Circuit Board

SLPM : Standard Liters Per Minute

SLA : Stereolithography

PCT : Positive Coefficient Temperature

PEF : Peak Expiratory Flow

FVC : Forced Vital Capacity

FEV1 : Forced Expiratory Volume in One Second

MEMS : microelectromechanical systems

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη φορητών συσκευών για την παρακολούθηση και βέλτιστη αντιμετώπιση ασθενειών είναι ένας συνεχώς αναπτυσσόμενος τομέας. Η σπιρομέτρηση είναι μια μέτρηση που παρέχει δεδομένα ζωτικής σημασίας για ασθένειες όπως η χρόνια αποφρακτική πνευμονική νόσος και το άσθμα. Τα δεδομένα που λαμβάνονται μέσω της σπιρομέτρησης συμβάλουν σημαντικά στην εκτίμηση της κατάστασης του ασθενή καθώς και στην ανταπόκριση του σε συγκεκριμένες μεθόδους θεραπείας. Για την ευκολότερη πρόσβαση των χρηστών σε αυτά τα μέσα καθώς και την συχνότερη παρακολούθηση των συμπτωμάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορα φορητά σπιρόμετρα της αγοράς τα οποία βασίζονται σε διάφορα είδη αισθητήρων. Οι συχνότερες αρχές λειτουργίας βασίζονται σε αισθητήρες θερμικού τύπου, αισθητήρες υπερήχων, διαφορικής πίεσης και με την χρήση φτερωτής για την ακριβή μέτρηση της ροής κατά την εισπνοή και εκπνοή του χρήστη. Τα δεδομένα απεικονίζονται σε γράφημα εύκολα αναγνωρίσιμο από ιατρούς. Η ανάπτυξη των φορητών σπιρομέτρων είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς η ευρέα διαθεσιμότητα τους μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην έγκαιρη διάγνωση και την πρόληψη συμπτωμάτων αυξάνοντας την ποιότητα ζωής.

### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της υφιστάμενης εργασίας επικεντρώνεται στην μελέτη των δυναμικών της ροής στο εσωτερικό του σπιρομέτρου καθώς και την μεταφορά θερμότητας του αισθητήρα για την ακριβή καταμέτρηση της ροής.

Η δημιουργία της συσκευασίας γίνεται με την χρήση εκτύπωσης στερεολιθογραφίας (SLA printing) επιτρέποντας την δημιουργία πολύπλοκης γεωμετρίας σε μικρή κλίμακα με την χρήση των ελάχιστων δυνατών πρώτων υλών συμβάλλοντας σημαντικά στην απόδοση της συσκευής καθώς η υψηλή ακρίβεια και η λεία επιφάνεια του τελικού προϊόντος έχει σημαντική επίδραση στην ομαλότητα της ροής.

Οι αισθητήρες ροής θερμικού τύπου μπορούν να προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων με χαμηλό κόστος παραγωγής καθώς δεν απαιτούν κινούμενα μηχανικά μέρη και είναι λιγότερο επιρρεπής σε φθορές κατά την πάροδο του χρόνου. Η χαμηλή κατανάλωση που προσφέρουν τους κάνει ιδανικούς για φορητές εφαρμογές καθώς η τροφοδότηση τους μπορεί να γίνει με την χρήση ενσωματωμένης μπαταρίας ή ακόμα και με την σύνδεση του με κινητά τηλέφωνα (smartphones). Το μικρό μέγεθος των θερμοστοιχείων έχει σημαντικό ρόλο καθώς παρουσιάζει ελάχιστη αντίσταση στην ροή δεδομένου ότι δεν εμποδίζει την φυσική ροή του αέρα μέσα από την διάταξη επιτρέποντας στον χρήστη να αναπνέει ελεύθερα. Ως αποτέλεσμα η χρήση των παραπάνω τεχνολογιών μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην δημιουργία φορητής συσκευής η οποία είναι κατάλληλη για σπιρομέτρηση ειδικά σε χώρους με περιορισμένη πρόσβαση σε εξειδικευμένα ιατρικά μηχανήματα.

### Σκοπός και στόχοι

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της κατάλληλης γεωμετρίας ενός φορητού σπιρομέτρου για την δημιουργία καταλλήλου πεδίου ροής το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί από θερμικού τύπου αισθητήρα.

Στόχο αποτελεί η μελέτη και η κατασκευή της συσκευής με την χρήση τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς και η αξιολόγησή της μέσω πειραματικών μετρήσεων ως προς την ακρίβεια, την γραμμικότητα και την ταχύτητα απόκρισης .

Τα ερευνητικά ερωτήματα που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι :

- Ποια η κατάλληλη διατομή του σωλήνα για μέγιστη ταχύτητα ροής εισόδου 100L/min ;
- Ποια η επιρροή στην ομοιομορφία της ροής και την ανάπτυξη της κατά την χρήση πλέγματος στην είσοδο του σπιρομέτρου ;
- Ποια η επιρροή στην ροή κατά την χρήση εσωτερικού σωλήνα (bypass) με σκοπό την διαμόρφωση της ταχύτητας ροής ;
- Ποια η αναγκαία γεωμετρία του αισθητήρα για μεταφορά θερμότητας και την ανίχνευση της ροής.
- Ποια η ταχύτητα απόκρισης και επαναληψιμότητα του αισθητήρα σε πειραματικές μετρήσεις;
- Ποια η γραμμικότητά και ευαισθησία του αισθητήρα σε πειραματικές μετρήσεις ;

## **Μεθοδολογία**

Έγινε έρευνα για υπάρχουσες εμπορικές διατάξεις φορητών σπιρομέτρων, ανάλυση των τύπων αισθητήρων που χρησιμοποιούν και την αρχή λειτουργίας τους καθώς και ενδεχόμενες αδυναμίες και πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν. Γίνονται βιβλιογραφικές αναφορές για τις αρχές της δυναμικής της ροής και ανάπτυξη στρωτής ροής όπως και για τους τρόπους με τους οποίους μεταφέρεται η θερμότητα

Για την μελέτη για την ανάπτυξη της συσκευασίας του σπιρομέτρου εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για τον χαρακτηρισμό των βασικών διαστάσεων της συσκευασίας όπως η εσωτερική διατομή και το μήκος του σωλήνα. Αναπτύχθηκε πλέγμα από εξάγωνα και μελετήθηκε η επιρροή του μεγέθους του καθώς και η αποτελεσματικότητα του στην δημιουργία στρωτής ροής κατά την είσοδό της υπό γωνία. Αναπτύχθηκε εσωτερικός σωλήνας παράκαμψης (bypass) για την αύξηση της ταχύτητας της ροής για την καλύτερη απόκριση του αισθητήρα και έγινε μελέτη για τις διαστάσεις και την τοποθέτηση του.

Αναπτύχθηκε ο αρχικός αισθητήρας και έγιναν μελέτες για διάφορες ταχύτητες ροής για τον προσδιορισμό της βέλτιστης απόστασης των στοιχείων μεταξύ τους. Για την υλοποίηση συσκευασίας έγινε εκτύπωση με χρήση στερεολιθογραφίας (SLA). Η πλακέτα του αισθητήρα δημιουργήθηκε με συμβατικές μεθόδους τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) και τοποθετήθηκαν τα υψηλής ακρίβειας θερμίστορ.

Εκτελέστηκαν πειραματικές μετρήσεις με σταθερή πηγή ρεύματος και έγινε εκτίμηση των αποτελεσμάτων ως προς την ακρίβεια , επαναληψιμότητα και ταχύτητα απόκρισης του αισθητήρα.

## **Καινοτομία**

Η συσκευή είναι κατάλληλη για φορητή χρήση λόγω του μικρού μεγέθους προσφέροντας μετρήσεις του αναπνευστικού χωρίς την ανάγκη για εξειδικευμένα ιατρικά εργαλεία αποτελώντας ιδανική επιλογή για παρακολούθηση των ασθενών εξ αποστάσεως. Το κύριο κομμάτι της καινοτομίας της συγκεκριμένης έρευνας και κατασκευής βασίζεται σε δύο χαρακτηριστικά. Στον αισθητήρα θερμικού τύπου που χρησιμοποιείται, σε αντίθεση με τα ελάχιστα εμπορικά διαθέσιμα

προϊόντα που βασίζουν την λειτουργία τους σε θερμικούς αισθητήρες. Γίνεται πλήρης ανάλυση του τρόπου λειτουργίας καθώς και της εσωτερικής δομής του σωλήνα παράκαμψης (bypass) που αποσκοπεί στον προσανατολισμό και την ανάπτυξη κατάλληλης ροής ώστε η αλληλοεπίδραση του αισθητήρα να παράγει ικανοποιητικές μετρήσεις. Γίνεται ανάπτυξη και προτυποποίηση του μοντέλου με την χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης σε ένα ενιαίο κομμάτι συμβάλλοντας στην εύκολη και ταχεία κατασκευή. Παράλληλα παρέχει μεγάλες αντοχές και χαμηλό βάρος της συσκευασίας. Η χρήση θερμικού αισθητήρα συμβάλει στην χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθιστώντας το ιδανικό για φορητές εφαρμογές και συμβάλει στην μακροζωία της συσκευής εφόσον δεν απαιτείται συντήρηση καθώς δεν υπάρχουν μηχανικά μέρη.

## **Δομή**

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στην βιβλιογραφία σχετικά με την δυναμική της ροής, την μεταφορά θερμότητας καθώς και έρευνα της αγοράς για διαθέσιμα προϊόντα αναλύοντας τις αρχές λειτουργίας των συχνότερων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ροής.

Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται η γεωμετρία της συσκευασίας μέσω αναλυτικής μελέτης με την χρήση προσομοιώσεων των βασικών χαρακτηριστικών της καθώς και την ανάλυση της επίδρασης του σημείου τοποθέτησης των εσωτερικών γεωμετριών όπως το πλέγμα στην είσοδο και το bypass στο πεδίο ροής που δημιουργείται.

Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύσσεται και γίνεται μελέτη για την διάταξη του θερμικού αισθητήρα με την χρήση προσομοιώσεων ροής και μεταφοράς θερμότητας αποσκοπώντας την εύρεση της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των θερμοστοιχείων καθώς και την επίδρασή τους στον καθορισμό της ροής .

Στο Κεφάλαιο 4 επεξηγείται ο τρόπος κατασκευής της συσκευασίας καθώς και του αισθητήρα, γίνονται πειραματικές μετρήσεις για την εκτίμηση της ακρίβειας και της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται σύνοψη των συμπερασμάτων για τα ευρήματα της μελέτης που προέκυψαν καθώς και αναφορά σε περιορισμούς που υπήρξαν προτείνοντας περαιτέρω κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη της συσκευής.

## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Θεωρητικό υπόβαθρο/ Τεχνολογία θερμικών Αισθητήρων Ροής

### 1.1 Δυναμική της Ροής

Η μελέτη της δυναμικής της ροής των ρευστών αποτελεί θεμελιώδες βήμα στη διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός σπιρομέτρου. Η κατανόηση των φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τη ροή του αέρα μέσα από τους αεραγωγούς και τις διατάξεις του σπιρομέτρου είναι κρίσιμη για την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση των χαρακτηριστικών της ροής, όπως είναι η ταχύτητα, η πίεση, η αντίσταση καθώς και τα χαρακτηριστικά της εσωτερικής και εξωτερικής ροής καθώς και ο χαρακτηρισμός της ως τυρβώδης ή στρωτή συμβάλουν στην απόδοση και την αποτελεσματικότητα του οργάνου.

#### 1.1.1 Εσωτερική και εξωτερική ροή

Η ροή ενός ρευστού σε σχέση με κάποια στερεή επιφάνεια διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες με βάση τα στερεά όρια. Πιο συγκεκριμένα η ροή όπου οροθετείται από στερεές επιφάνειες ονομάζεται εσωτερική ροή, ένα παράδειγμα μιας τέτοιας ροής είναι ένα ρευστό μέσα σε ένα σωλήνα. Σε αυτή την περίπτωση το ρευστό αλληλοεπιδρά συνεχώς με τα τοιχώματα του, η ανάπτυξη της ροής σε μία σταθερή κατάσταση είναι δυνατή και οι απώλειες ενέργειας οφείλονται κυρίως στα τοιχώματα και το μήκος του αγωγού. Αντίστοιχα μια ροή γύρω από ένα στερεό μέσα σε ένα ρευστό χωρίς όρια ονομάζεται εξωτερική ροή, όπως είναι η ροή του αέρα γύρω από ένα αεροσκάφος. Σε αυτή την περίπτωση λόγω του απεριόριστου πεδίου ροής μπορούν να αναπτυχθούν πιο σύνθετα φαινόμενα. [1]

#### 1.1.2 Στρωτή και τυρβώδης ροή και ροή σε σωλήνα.

Στρωτή ροή ονομάζεται η ροή στην οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται σε στρωτά επίπεδα (smooth layers) ενώ τυρβώδης η ροή στην οποία τα σωματίδια ανακατεύονται συνεχώς μεταξύ τους λόγω των ακανόνιστων μεταβολών της ταχύτητας και της κατεύθυνσης της.

Η ταχύτητα της στρωτής ροής δίνεται απλά ως  $u$ . Στην περίπτωση της τυρβώδης ροής όμως η ταχύτητα δίνεται από την μέση ταχύτητα και το άθροισμα των τριών τυχαίων ταχυτήτων που αντιστοιχούν στους τρεις άξονες του χώρου, οι τυχαίες αυτές ταχύτητες κάνουν την προσομοίωση μη στρωτών ροών πολύ πιο δύσκολη και τα αποτελέσματα τους βασισμένα σε πειραματικές μετρήσεις. [1]

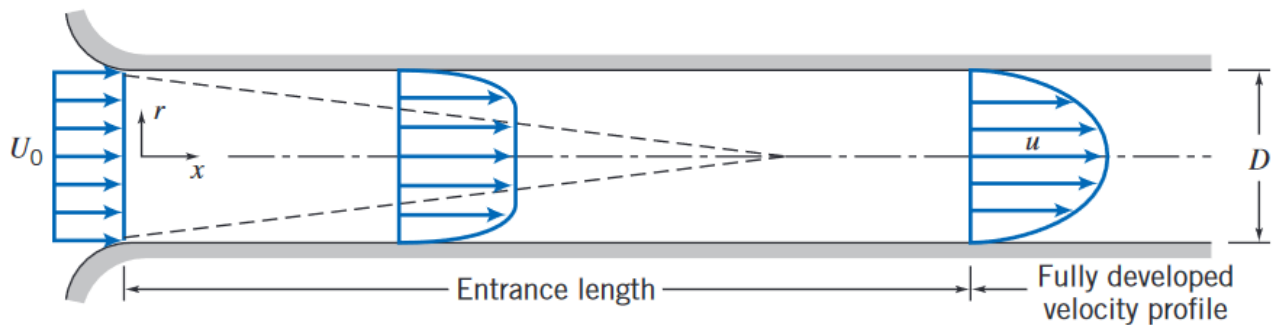
Στην περίπτωση στρωτής ροής σε σωλήνα, η ροή έχει ομοιόμορφη ταχύτητα εισόδου  $U_0$ . Λόγω της στρωτής ροής θεωρείται δεδομένη συνθήκη μη-ολίσθησης (no-slip condition) σύμφωνα με την οποία σε ένα στερεό τοίχωμα, η ταχύτητα του ρευστού δίπλα από το τοίχωμα είναι ίση με την ταχύτητα του τοιχώματος, δηλαδή η ταχύτητα του ρευστού στο σημείο επαφής με το στερεό είναι μηδενική. Η συνθήκη αυτή επηρεάζει την ανάπτυξη της ροής καθώς η ταχύτητα του μέσου αυξάνεται στο κέντρο του σωλήνα για την αντιστάθμιση της μηδενικής ταχύτητας στα τοιχώματα του για την διατήρηση της μάζας του ρευστού. Όταν το προφίλ της ροής σταθεροποιηθεί και δεν μεταβάλλεται πλέον στο μήκος του σωλήνα τότε η στρωτή ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως (Σχήμα 1-1). Το αναγκαίο μήκος αυτό για την πλήρη ανάπτυξη της ροής ορίζεται από την διάμετρο του σωλήνα καθώς και τον αριθμό Reynolds από τον παρακάτω τύπο:



$$L \approx 0,06 \cdot \text{Re} \cdot D$$

(1)

Όπου  $L$  το απαιτούμενο μήκος,  $\text{Re}$  ο αριθμός Reynolds και  $D$  η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα.



Σχήμα 1-1. Απεικόνιση ανάπτυξης στρωτής ροής. [1]

Ο αριθμός Reynolds είναι ένας αδιάστατος αριθμός που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της ροής ενός ρευστού. Ορίζεται ως:

$$\text{Re} = (\rho \cdot u \cdot L) / \mu$$

(2)

όπου:

- $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,
- $u$  είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα της ροής,
- $L$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος (όπως η διάμετρος ενός σωλήνα),
- $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Ο αριθμός Reynolds μας επιτρέπει να κατανοήσουμε πότε η ροή θα είναι στρωτή ( $\text{Re} < 2000$ ), μεταβατική ή τυρβώδης ( $\text{Re} > 4000$ ) και χρησιμοποιείται για την επίβλεψη της μεταβολής της ροής καθώς και σε διάφορες εξισώσεις. [2-3]

## 1.2 Μεταφορά Θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας είναι μια θεμελιώδης διαδικασία η οποία είναι απαραίτητη για την ορθή λειτουργία των θερμικών αισθητήρων ροής. Η μεταφορά θερμότητας χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες και πιο συγκεκριμένα στην αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία.

### 1.2.1 Μετάδοση - Αγωγή (Conduction)

Η αγωγή είναι η διαδικασία διάδοσης θερμότητας μέσω της ύλης χωρίς να υπάρχει μακροσκοπική κίνηση της. Στα στερεά, η αγωγή συμβαίνει μέσω της δόνησης των ατόμων και των μορίων καθώς και μέσω της κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες συσχετίζονται με μεγαλύτερες μοριακές ενέργειες, μέσω των συγκρούσεων των μορίων με παραπάνω ενέργεια από τα υπόλοιπα γύρω τους μεταφέρεται η ενέργεια τους στα λιγότερο ενεργειακά φορτισμένα μόρια. Ως αποτέλεσμα η αγωγή γίνεται πάντα προς την κατεύθυνση της μικρότερης θερμοκρασίας. Ο νόμος του Fourier περιγράφει την αγωγή θερμότητας και δίνεται από την εξίσωση:

$$q = -k \cdot \nabla T$$

(3)

όπου  $q$  είναι η θερμική ροή,  $k$  η θερμική αγωγιμότητα και  $\nabla T$  η βαθμίδα θερμοκρασίας. [4]

## 1.2.2 Συναγωγή (Convection)

Η συναγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας που δημιουργείται από την κίνηση ενός ρευστού σε μοριακό επίπεδο λόγω του φαινομένου της διάχυσης. Η κίνηση του ρευστού προκαλείται από τις διαφορές πυκνότητας λόγω θερμοκρασιακών διαφορών καθώς και σε μακροσκοπικό επίπεδο δηλαδή στην εξαναγκασμένη κίνηση του υγρού όπου η κίνηση προκαλείται από εξωτερικές δυνάμεις όπως ανεμιστήρες και αντλίες [4].

Αξιοσημείωτη είναι η επιρροή της συνθήκης μηδενικής ολίσθησης κατά την θερμική αλληλεπίδραση ενός ρευστού με ένα στερεό σώμα. Σε αυτή την περίπτωση το οριακό στρώμα που δημιουργείται και έχει μηδενική ταχύτητα ροής επιδρά στην ανταλλαγή θερμότητας και πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την τοποθέτηση ενός θερμικού αισθητήρα ροής.

Ο νόμος του Newton για τη ψύξη περιγράφει τη συναγωγή:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

όπου  $q$  είναι η θερμική ροή,  $h$  ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας,  $A$  η επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας,  $T_s$  η θερμοκρασία της επιφάνειας και  $T_\infty$  η θερμοκρασία του ρευστού μακριά από την επιφάνεια.

Η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας στο σημείο που η ταχύτητα ροής είναι μηδενική γίνεται μόνο μέσω του μηχανισμού της διάχυσης. Λόγω της εξαναγκασμένης ροής όμως το οριακό στρώμα μεγαλώνει και η θερμότητα παρασύρεται και άγεται σε όλο το ρευστό. Για κάθε περίπτωση που η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από αυτή του ρευστού θα υπάρξει συναγωγή και θα μεταφερθεί θερμότητα από την επιφάνεια προς το ρευστό [4-5].

## 1.2.3 Ακτινοβολία (Radiation)

Η θερμική ακτινοβολία ονομάζεται η ενέργεια που εκπέμπεται από μία ύλη σε μη μηδενική θερμοκρασία. Αυτή η εκπομπή μπορεί να αποδίδεται σε μεταβολές των ενεργειακών στοιβάδων των υλικών. Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και έχει μεγαλύτερη απόδοσή στο κενό καθώς δεν απαιτεί μέσο για να συμβεί [4-5].

Όλα τα σώματα εκπέμπουν ακτινοβολία ανάλογα με τη θερμοκρασία τους σύμφωνα με το νόμο του Stefan-Boltzmann:

$$q = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (5)$$

όπου  $q$  είναι η θερμική ροή,  $\epsilon$  η εκπομπή της επιφάνειας,  $\sigma$  η σταθερά του Stefan-Boltzmann,  $A$  η επιφάνεια και  $T$  η θερμοκρασία της επιφάνειας σε Kelvin [5].

## 1.3 Θερμικοί Αισθητήρες Ροής και σπιρόμετρα της αγοράς.

Τα νοσήματα του αναπνευστικού όπως είναι η χρόνια αποφρακτική πνευμονική νόσος και το άσθμα δυσκολεύουν καθημερινά τις ζωές ενός μεγάλου ποσοστού του πληθυσμού. Λόγω της δυσκολίας στην έγκαιρη διάγνωση τους και την κατάλληλη αντιμετώπιση τους τα ποσοστά των ατόμων που επηρεάζουν τέτοιες παθήσεις όλο και αυξάνονται. Για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης γίνονται προσπάθειες δημιουργίας φορητών και οικονομικών σπιρομέτρων [6].

Το σπιρόμετρο είναι ένα ιατρικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του όγκου και της ροής του αέρα που εισπνέει και εκπνέει ένας ασθενής. Ο ασθενής τοποθετεί ένα ειδικό στόμιο στο στόμα του και ακολουθεί τις οδηγίες του ιατρού ή του τεχνικού για να εκπνεύσει ή να εισπνεύσει αέρα σε χρονικό διάστημα. [7]

Παρόλο που οι μετρήσεις αυτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μόνες τους για τη διάγνωση μιας νόσου, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες που είναι χρήσιμες για τους ιατρούς και τους ερευνητές. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση ασθενών με αυξημένο κίνδυνο αναπνευστικών προβλημάτων, για την εξέταση της φυσικής κατάστασης τους και για σκοπούς παρακολούθησης σε άτομα που εκτίθενται σε επιβλαβείς συνθήκες για το αναπνευστικό σύστημα. Επίσης, μπορούν να βοηθήσουν στη διάγνωση και την παρακολούθηση πνευμονικών παθήσεων, όπως άσθμα, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ), και πνευμονία. [6-8]

Η πρόσφατη πανδημία τονίζει περαιτέρω την χρησιμότητα φορητών σπιρομέτρων καθώς τα αποτελέσματα που παρουσιάζουν δεν αποκλίνουν σε σχέση με τις μετρήσεις που γίνονται σε ιατρικούς χώρους [9]. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την εφαρμογή της τηλεϊατρικής, η οποία έχει θετική επιρροή στον έλεγχο των συμπτωμάτων, αυξάνοντας την ποιότητα ζωής [10]. Επιπλέον η δια ζώσης σπιρομέτρηση απαιτεί μέτρα προστασίας όσο για τον ασθενή τόσο και για τον χειριστή, αυξάνοντας τον χρόνο και την πολυπλοκότητα της διαδικασίας. [11]

Με βάση τα παραπάνω, τα σπιρόμετρα αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για την αξιολόγηση της λειτουργίας του πνευμονικού συστήματος και την παρακολούθηση της απόκρισης στη θεραπεία σε ασθενείς με πνευμονικές παθήσεις. Η χρήση τους είναι απαραίτητη και για κλινικές και επιδημιολογικές έρευνες.

Μεγάλη σημασία έχει επίσης η ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων καθώς λανθασμένες μετρήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε παρερμηνευση των αποτελεσμάτων και εσφαλμένη θεραπεία. Τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί σε έρευνες και χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης είναι περιορισμένα, ειδικότερα για μεγαλύτερες ηλικίες κάτι που αποτελεί μια ακόμα πρόκληση στην σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων [12] [7].

### **1.3.1 Βασικές αρχές λειτουργίας**

Κάθε σπιρόμετρο είναι αναγκαίο να λαμβάνει μετρήσεις για την ταχύτητα της ροής του αέρα που περνάει από αυτό, ως αποτέλεσμα επιλέγονται διάφοροι τύποι αισθητήρων που παρέχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις του κάθε κατασκευαστή.

Ένα είδος αισθητήρα ροής είναι ο μετρητής με φτερωτή, ο πιο συχνός τύπος αισθητήρα με αυτή την αρχή λειτουργίας είναι το σπιρόμετρο τύπου Wright's όπου χρησιμοποιείται ένας ανεμοδείκτης (προπέλα) ο οποίος περιστρέφεται ανάλογα με την ροή του αέρα. Όταν ο ασθενής εισπνέει ή εκπνέει η ροή του αέρα εξαναγκάζει την κίνηση της προπέλας, Αρχικά υπήρχε μηχανική ένωση με μια βελόνα για την ένδειξη της ροής, η σύγχρονη προσέγγιση μίας τέτοιας εφαρμογής χρησιμοποιεί μία πηγή υπέρυθρου φωτός καθώς και ένα φωτοανιχνευτή για την καταμέτρηση των περιστροφών της προπέλας και μέσα από αυτήν την πληροφορία εξάγεται η ταχύτητά και όγκος ροής του αερίου.[13] Η εφαρμογή αυτής της αρχής λειτουργίας είναι αρκετά απλή, αντιμετωπίζονται όμως δυσκολίες στην ακρίβεια, καθώς επρόκειτο για κινούμενα μηχανικά μέρη είναι αναπόφευκτο να αποφευχθούν τυχόν φθορές. Λόγω της φύσης αυτής της εφαρμογής συνήθως σε μικρές ροές οι τιμές του αισθητήρα είναι μικρότερες από τις πραγματικές λόγω της αναπόφευκτης τριβής που υπάρχει και για μεγαλύτερες τιμές η διατήρηση της ορμής της προπέλας οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές από τις πραγματικές [14]. Έχει επίσης ερευνηθεί η ίδια αρχή λειτουργίας για μικροηλεκτρομηχανικά (MEMS) συστήματα [15]. Μία εφαρμογή που έχει

υλοποιηθεί αντικαθιστά την χρήση υπερήχων με στάτορες της οποίους τοποθετούνται πηνία. Με την περιστροφή της προπέλας αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού (τάση) και η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητα ροής [16].

Μία θερμική αρχή λειτουργίας βασίζεται στο ανεμόμετρο θερμού νήματος (Hot wire anemometer), όπου και χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρικά αγώγιμο σύρμα στο μονοπάτι της ροής. Το σύρμα θερμαίνεται σε σταθερή θερμοκρασία, συνήθως περίπου στους 400C, αλλά σε εφαρμογές για σπιρόμετρο η θερμοκρασία αυτή είναι πολύ χαμηλότερη, η εξισορρόπηση του συστήματος σε συγκεκριμένη θερμοκρασία συνήθως γίνεται μέσω μιας γέφυρας Wheatstone, Όταν το αέριο περνάει πάνω από το σύρμα η θερμοκρασία του μειώνεται και μέσω της γέφυρας εφαρμόζεται ρεύμα στο σύρμα για την επαναφορά της θερμοκρασίας του στα επιθυμητά όρια. Με την μέτρηση του διορθωτικού αυτού ρεύματος ή την μεταβολή της αντίστασης του νήματος, καθώς αυτή είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του, μπορεί να προσδιοριστεί η ταχύτητα ροής του αερίου. Για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και δεύτερο σύρμα σε κοντινή απόσταση από το θερμαινόμενο, το οποίο παραμένει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και λειτουργεί ως αισθητήρας θερμοκρασίας και παράλληλα συμβάλει στην αναγνώριση της κατεύθυνσης της ροής. Βασικό στην παραπάνω αρχή λειτουργίας έχουν κατασκευαστεί και εξεταστεί με πειραματικές μετρήσεις αισθητήρες πολλαπλών κατευθύνσεων, χρησιμοποιώντας συνολικά πέντε στοιχεία, εκ των οποίων το ένα λειτουργεί ως θερμοαντήρας και περιμετρικά του βρίσκονται τα αισθητήρια στοιχεία. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να εξαχθεί η κατεύθυνση της ροής [17-18]. Αυτός ο τύπος αισθητήρα προσφέρει μεγάλη ακρίβεια, ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες ροής [13]. Η συγκεκριμένη αρχή λειτουργίας έχει μελετηθεί περαιτέρω σε μικρο-ροές αποδεικνύοντας την λειτουργικότητα των θερμικών αισθητήρων ακόμα και για πολύ μικρές κλίμακες έχοντας συνάμα την ικανότητα της βελτιστοποίησης της ακρίβειας για συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων ροής [19-23]. Υπάρχει παράλληλα δυνατότητα εκτύπωσης (screen-printing) των στοιχείων σε εύκαμπτα υλικά, μειώνοντας το κόστος κατασκευής και αυξάνοντας το εύρος χρήσεων σε εφαρμογές στις οποίες συμβατικές πλακέτες (PCB) δεν μπορούν να εφαρμοστούν διατηρώντας τα χαρακτηριστικά των θερμικών αισθητήρων [24].

Μία ακόμα βασική αρχή λειτουργίας αισθητήρων ροής είναι οι αισθητήρες υπερήχων. Όταν υπέρηχοι μεταδίδονται μέσα από ένα αέριο που ρέει, η ταχύτητα τους αλλάζει ανάλογα με την ροή του αερίου. Όταν η κατεύθυνση της ροής του αερίου ταυτίζεται με αυτή του υπέρηχου η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται ενώ όταν οι κατευθύνσεις είναι αντίθετες η ταχύτητα μειώνεται αντίστοιχα. Η πιο σύνηθες υλοποίηση περιλαμβάνει δύο πηγές υπερήχων και δύο αισθητήρες με αντίθετες κατευθύνσεις οι οποίοι τοποθετούνται διαγώνια κατά μήκος του σπιρομέτρου [13]. Σήματα υπερήχων στέλνονται από τη κάθε πηγή σε συγκεκριμένο χρόνο. Όταν υπάρξει ροή, η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν οι υπέρηχοι στο αέριο αυξάνεται ή μειώνεται εάν το αέριο έχει την ίδια ή αντίθετη φορά με αυτούς αντίστοιχα, λόγω της διαφοράς αυτής στο χρόνο μετάδοσης το σήμα φτάνει νωρίτερα η αργότερα στον αισθητήρα και ως αποτέλεσμα η ταχύτητα και ο όγκος του αερίου μπορεί να υπολογιστεί από την διάφορα χρόνου των σταλμένων σημάτων. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει καλή ακρίβεια και ευαισθησία στις μετρήσεις καθώς και μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς ιδιαίτερη συντήρηση καθώς δεν υπάρχουν κινούμενα ή θερμαινόμενα μέρη που να χρειάζονται καθαρισμό. [14] Η ακρίβεια μπορεί να επηρεαστεί από μεγάλες αλλαγές στη θερμοκρασία και την πίεση.

Ένα ακόμα είδος είναι αυτό της διαφορικής πίεσης ή αλλιώς πνευμοταχογράφος (Pneumotachograph). Η ροή του αερίου εμποδίζεται με κάποιο υλικό με συγκεκριμένη αντίσταση ως αποτέλεσμα να δημιουργείται διαφορά πίεσης πριν και μετά το υλικό, αυτή η διαφορά μετρείται

Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης

με κατάλληλο αισθητήρα και μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα ροής και ο όγκος του αερίου. Για την μεγαλύτερη ακρίβεια της μέτρησης το υλικό που χρησιμοποιείται για την δημιουργία της αντίστασης σχεδιάζεται κατάλληλα για να παρέχει στρωτή ροή, κάτι τέτοιο συνήθως επιτυγχάνεται με πολλούς παράλληλους σωλήνες μικρής διαμέτρου από τους οποίους εξαναγκάζεται να περάσει το αέριο. Για την αποφυγή συσσώρευσης υγρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο θερμικό στοιχείο. Η συνολική αντίσταση θα πρέπει να είναι μικρή έτσι ώστε οι ασθενείς να μπορούν να αναπνέουν μέσα από αυτό με ευκολία. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν σε πολλαπλά σημεία του σωλήνα αυξάνοντας την ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Γίνονται επίσης προσπάθειες για την δημιουργία αισθητήρα ροής που χρησιμοποιεί πρόβολο καθώς και χωρητικό αισθητήρα πίεσης για την καταμέτρηση της ταχύτητας ροής. Η ροή οδηγείται στην επιφάνεια του προβόλου ο οποίος είναι συνδεδεμένος με χωρητικούς αισθητήρες πίεσης. Από την καταμέτρηση των αισθητήρων μπορεί να εξαχθεί η ταχύτητα ροής. Το μικρό μέγεθος του καθώς και οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν δείχνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στοχεύοντας σε σπιρομετρικές εφαρμογές και ιδιαίτερα στην ενσωμάτωση του σε κινητά τηλέφωνα [25]

### 1.3.2 Διαθέσιμα προϊόντα της αγοράς

Στην αγορά υπάρχουν διάφορα είδη σπιρομέτρων με σκοπό την ευρύτερη διαθεσιμότητα τους, πιο συγκεκριμένα παρακάτω γίνεται αναφορά σε φορητά σπιρόμετρα που έχουν ως σκοπό την χρήση για συνεχή παρακολούθηση του ασθενή, καθώς αποτελούν ένα μέσο για την διάγνωση και εύρεση της βέλτιστης αγωγής για διάφορες αναπνευστικές παθήσεις.

Website	Όνομασία προϊόντος	Εταιρία που το παρέχει
<a href="https://spirometry.com/en/products/spirobank-smart">https://spirometry.com/en/products/spirobank-smart</a>	<b>Spirobank Smart</b>	Medical International Research (MIR)



Σχήμα 1-2.Spirobank Smart

Το SpirobankSmart συνδέεται με κινητά μέσω Bluetooth 5.0 και προσφέρει αποτελέσματα πραγματικού χρόνου. Η αρχή λειτουργίας του είναι αμφίδρομη τουρμπίνα. Οι τουρμπίνες είναι μίας χρήσης, προσφέρεται όμως και επιλογή επαναχρησιμοποιούμενης εάν η χρήση της γίνεται μόνο από έναν ασθενή. Η εταιρία προσφέρει επίσης εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού στοχευμένα σε προγραμματιστές για Android και iOS.

Website	Όνομασία προϊόντος	Εταιρία που το παρέχει
<a href="https://contecmedsystem.com/product/contec-sp10_rechargeable_digital_medical_portable_spirometer_lung_function_check">https://contecmedsystem.com/product/contec-sp10_rechargeable_digital_medical_portable_spirometer_lung_function_check</a>	<b>Contec Handheld SP10 Spirometer</b>	CONTEC MEDICAL SYSTEMS CO, LTD



**Σχήμα 1-3. Contec Handheld SP10 Spirometer**

Το Contec Handheld SP10 είναι φορητό σπιρόμετρο που διαθέτει οθόνη με χρώματα 1.8 ιντσών μέσα από την οποία εμφανίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς των αποτελεσμάτων σε υπολογιστή, η βαθμονόμηση καθώς και ειδοποιήσεις εάν η ταχύτητα ροής ή ο όγκος του αέρα ξεπεράσει κάποια προκαθορισμένα όρια.

Website	Ονομασία προϊόντος	Εταιρία που το παρέχει
<a href="https://intl.vyaire.com/products/aioicaretm-spirometry">https://intl.vyaire.com/products/aioicaretm-spirometry</a>	<b>AioCare™ Spirometry</b>	Vyaire Medical



**Σχήμα 1-4. AioCare Spirometry**

Το **AioCare™ Spirometry** αποτελεί ένα επαγγελματικό σύστημα για την εξέταση και παρακολούθηση ενός ασθενή ακόμα και στο σπίτι του. Το προϊόν συνδέεται σε εφαρμογή για smartphones μέσω Bluetooth 4.0 και παρέχεται και Online πλατφόρμα για την άμεση πρόσβαση των αποτελεσμάτων από τους ιατρούς. Το προϊόν δεν χρειάζεται βαθμονόμηση, πληροί τις προϋποθέσεις του GDPR και τα δεδομένα είναι ασφαλισμένα με το SSL (Secure Sockets Layer) πρωτόκολλο και μπορούν να εξαχθούν και ως PDF.

Website	Ονομασία προϊόντος	Εταιρία που το παρέχει
<a href="https://en.gassensor.com.cn/Spirometer/info_itemid_125.html">https://en.gassensor.com.cn/Spirometer/info_itemid_125.html</a>	<b>Portable spirometer Gasboard-702</b>	Cubic Sensor and Instrument Co.,Ltd



**Σχήμα 1-5. Portable spirometer Gasboard-702**

Το Gasboard-702 είναι ένα φορητό σπιρόμετρο όπου επικεντρώνεται στην οικιακή χρήση καθώς έχει μικρό βάρος και μέγεθος και δεν απαιτείται βαθμονόμηση καθώς χρησιμοποιεί τεχνολογία υπερήχων. Παρέχει επίσης ενσωματωμένη οθόνη όπου και εμφανίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και το ιστορικό τους. Δεν αναφέρεται κάποια περεταίρω δυνατότητα σύνδεσης με υπολογιστή .

Website	Ονομασία προϊόντος	Εταιρία που το παρέχει
<a href="https://spirosonic.com/product/spirosonic-mobile-ultrasonic-spirometer">https://spirosonic.com/product/spirosonic-mobile-ultrasonic-spirometer</a>	<b>SpiroSonic mobile</b>	SpiroSonic Uscom



**Σχήμα 1-6. SpiroSonic mobile**

Το SpiroSonic είναι ακόμα ένα σπιρόμετρο που συνδέεται μέσω Bluetooth με κινητά, χρησιμοποιεί τεχνολογία υπερήχων πολλών κατευθύνσεων για βέλτιστα αποτελέσματα και η αποστείρωση του γίνεται εύκολα καθώς δεν διαθέτει κινούμενα μέρη. Διαθέτει λογισμικό και για υπολογιστές καθώς και αυτόματη βαθμονόμηση .

Website	Ονομασία προϊόντος	Εταιρία που το παρέχει
<a href="https://nddmed.com/products/spirometers/easy-on-pc#sales">https://nddmed.com/products/spirometers/easy-on-pc#sales</a>	<b>NDD Easy on-PC Spirometer</b>	NDD medical



**Σχήμα 1-7.NDD Easy on-PC Spirometer**

Το NDD pc spirometer χρησιμοποιεί επίσης τεχνολογία υπερήχων για τις μετρήσεις. Είναι συμβατό με υπολογιστές και ταμπλέτες με λειτουργικό Windows όπου και εμφανίζονται όλες οι μετρήσεις.

Website	Ονομασία προϊόντος	Εταιρία που το παρέχει
<a href="https://www.promed.ie/custo-spiro-mobile-spirometer.html">https://www.promed.ie/custo-spiro-mobile-spirometer.html</a>	<b>custo spiro mobile Spirometer</b>	Promed



**Σχήμα 1-8.custo spiro mobile Spirometer**

Το custo spiro mobile Spirometer αποτελεί μια πιο επαγγελματική αλλά εξίσου φορητή λύση για σπιρομέτρηση. Με το προϊόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κατάλληλα φίλτρα για την καταπολέμηση των μικροβίων. Η χρήση του γίνεται αποκλειστικά με χρήση υπολογιστή με τον οποίο συνδέεται μέσω καλωδίου USB και συνοδεύεται από το κατάλληλο λογισμικό. Διαθέτει επίσης αισθητήρα κλίσης για την ανίχνευση της στάσης του χρήστη με σκοπό την μείωση των σφαλμάτων και αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων. Χρησιμοποιεί αισθητήρα διαφορικής πίεσης με στοιχείο αντίστασης κατάλληλο για δημιουργία στρωτής ροής .

Website	Ονομασία προϊόντος	Εταιρία που το παρέχει
<a href="https://vitalograph.com/product/micro-spirometer/">https://vitalograph.com/product/micro-spirometer/</a>	<b>Vitalograph micro Spirometer</b>	Vitalograph





**Σχήμα 1-9.Vitalograph micro Spirometer**

Το Vitalograph είναι ένα φορητό σπιρόμετρο το οποίο διαθέτει οθόνη αφής για εύκολη και γρήγορη χρήση, δεν έχει κινούμενα μέρη και επίσης διαθέτοντας φίλτρα τα οποία χρησιμοποιούνται κατά την χρήση για την αντιμετώπιση των μικροβίων. Συνοδεύεται από λογισμικό το οποίο επιτρέπει την μετατροπή των αποτελεσμάτων σε PDF καθώς και ενημέρωση του λογισμικού της συσκευής.

### **1.3.3 Αποτελέσματα**

Όλα τα παραπάνω προϊόντα προσφέρουν μία φορητή λύση για κατοίκων σπιρομέτρηση και συνεχώς παρακολούθηση ασθενών. Χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικοί τύποι αισθητήρων ροής με τον κάθε τύπο να έχει πλεονεκτήματα καθώς και αδυναμίες. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται είτε σε ενσωματωμένη οθόνη του προϊόντος ή στο συνοδευόμενο λογισμικό για κινητό ή υπολογιστή και είναι εύκολα στην χρήση. Επίσης κάποια από τα προϊόντα διαθέτουν και αποσπώμενα στόμια με αντιμικροβιακά φίλτρα για την ευκολότερη αποστείρωση του εξοπλισμού.

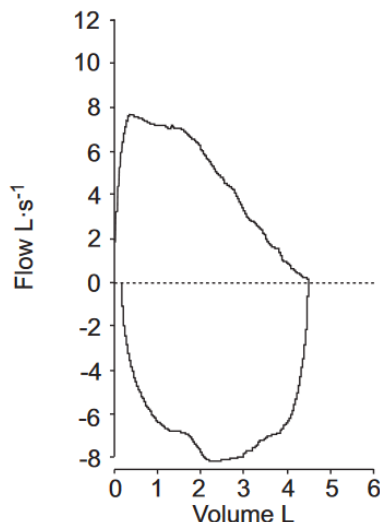
### **1.3.4 Καμπύλη Ροής-Όγκου (Flow-Volume loop)**

Το πιο κρίσιμο αποτέλεσμα των μετρήσεων είναι το διάγραμμα ροής-όγκου (Flow-Volume loop) καθώς παρέχει έναν ολοκληρωμένο και αντιπροσωπευτικό τρόπο παρουσίασης της αναπνευστικής λειτουργίας. Εμφανίζει τις αναλογίες της ροής αέρα και του όγκου του αέρα σε διαφορετικά στάδια της αναπνοής, που είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση του αναπνευστικού συστήματος. Οι αλλαγές στην καμπύλη Ροής-Όγκου μπορούν να οδηγήσουν σε διάγνωση διάφορων παθήσεων καθώς και την παρακολούθηση του ασθενή και την ανταπόκριση που έχει σε εκάστοτε θεραπεία.

Για να δημιουργηθεί αυτό το διάγραμμα θα πρέπει να έχουν γίνει τουλάχιστον τρεις ορθές μετρήσεις του FEV1 (Forced Expiratory Volume in 1 second), δηλαδή του εξαναγκασμένα εκπνεόμενου όγκου αέρα σε ένα δευτερόλεπτο και του FVC (Forced Vital Capacity) δηλαδή το μέγιστο εξαναγκασμένα εκπνεόμενου αέρα έπειτα από μία πλήρη εισπνοή. Μία ακόμα μέτρηση που δεν είναι απαραίτητη για το διάγραμμα Ροής-Όγκου έχει όμως μεγάλη σημασία είναι το PEF (Peak Expiratory Flow) δηλαδή την μέγιστη ταχύτητα ροής εκπνοής. [\[26\]](#)

Το διάγραμμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-10 παρόλο την μικρή έκταση του προσφέρει συμπτυκνωμένες πληροφορίες με ξεκάθαρο τρόπο. Αποτελείται από δύο φάσεις, η φάση της εκπνοής όπου και απεικονίζεται με θετική ροή (L/s) και εύκολα μπορεί να εξαχθεί η μέγιστη ταχύτητα εκπνοής (PEF) δηλαδή το μέγιστο θετικό σημείο του κάθετου άξονα καθώς και ο μέγιστος όγκος των πνευμόνων από το μέγιστο σημείο του οριζόντιου άξονα. Η δεύτερη φάση είναι αυτή της εισπνοής και εμφανίζεται με αρνητική ροή.

Διάφορα χαρακτηριστικά των καμπύλων όπως επίπεδες κορυφές, ασυμμετρίες ή σπασμένες γραμμές σε συνδυασμό με το ιατρικό ιστορικό του ασθενούς και άλλα διαγνωστικά τεστ μπορούν να υποδείξουν διάφορες παθολογίες.



Σχήμα 1-10. Διάγραμμα Ροής-Όγκου [12]

### 1.3.5 Διόρθωση συνθηκών BTPS

Τα αποτελέσματα θεωρούνται αποδεκτά για ιατρικές διαγνώσεις μόνο εάν έχει γίνει κατάλληλη διόρθωση για θερμοκρασία σώματος και πίεση περιβάλλοντος με υγρασία. Για την κατάλληλη διόρθωση θα πρέπει να γίνεται σωστή και ακριβής μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας καθώς και την θερμοκρασία του χρήστη.

Η μετατροπή των μετρήσεων σε BTPS συνθήκες είναι αναγκαία για να διορθωθεί η επίδραση της θερμοκρασίας, της πίεσης και της υγρασίας στα αποτελέσματα της μέτρησης. Το BTPS αναφέρεται στη θερμοκρασία σώματος (Body Temperature), την πίεση της ατμόσφαιρας (Barometric Pressure) και την κορεσμένη (Saturated Humidity) υγρασία.

Κατά τη διάρκεια της εκπνοής ή εισπνοής, ο αέρας αλληλοεπιδρά με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία του αέρα μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, η μετατροπή σε BTPS συνθήκες επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από διαφορετικές μετρήσεις και ανάμεσα σε διαφορετικούς ασθενείς, εξαλείφοντας τις διαφορές που οφείλονται στις διαφορές των περιβαλλοντικών συνθηκών.

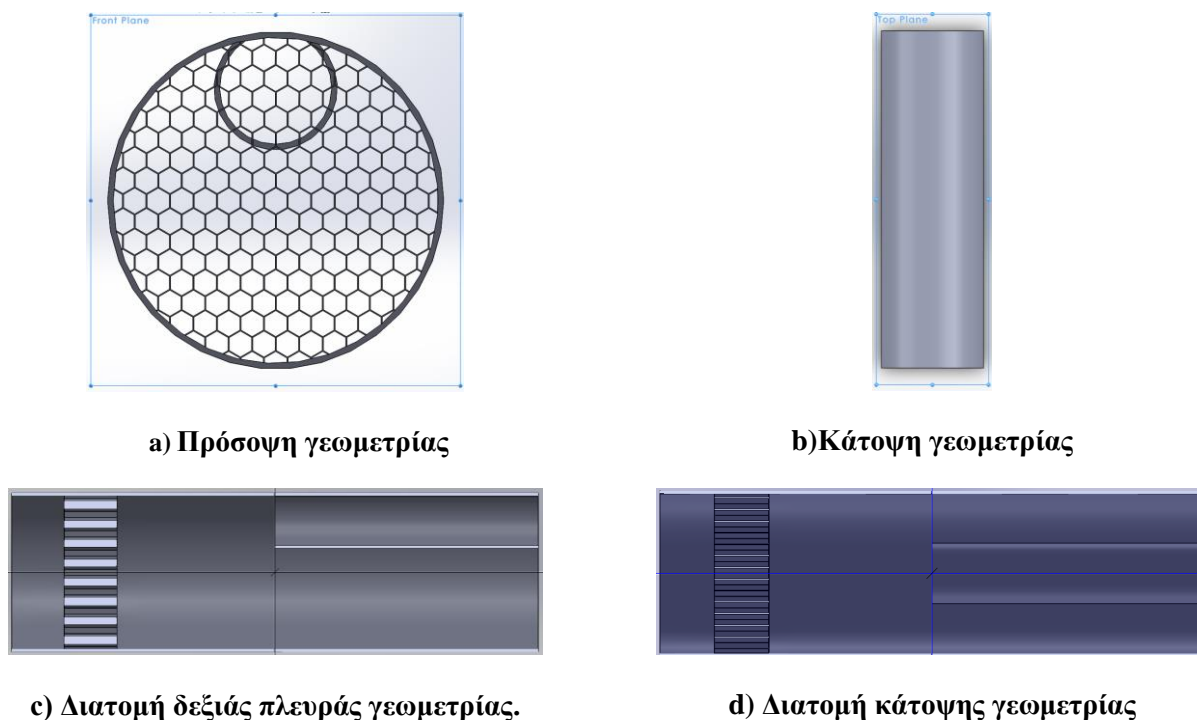
Χωρίς τη μετατροπή σε BTPS, οι μετρήσεις δεν είναι έγκυρες καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τις αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της μέτρησης και δεν είναι συγκρίσιμες με παλαιότερες μετρήσεις. Έτσι, η μετατροπή σε BTPS είναι απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να εξασφαλίζει την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων του σπιρομέτρου.[26]

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Ανάπτυξη γεωμετρίας και προσομοιώσεις ροής.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύεται η ανάπτυξη της γεωμετρίας του περιβλήματος του σπιρομέτρου το οποίο έχει ως σκοπό την δημιουργία προβλέψιμης στρωτής ροής καθώς και την καταμέτρηση της ταχύτητας της με θερμικό αισθητήρα. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται με την χρήση του προγράμματος COMSOL, εξάγονται κατάλληλες μετρήσεις και σύμφωνα με αυτές διαμορφώνεται η τελική γεωμετρία του σπιρομέτρου.

### 2.1 Γεωμετρία Συσκευασίας

Στα παρακάτω Σχήμα 2-1 εμφανίζεται η γεωμετρία του περιβλήματος που αναπτύχθηκε. Αποτελείται από έναν κύριο σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 2.9cm, εξωτερικής διαμέτρου 3cm και συνολικού μήκους 10 cm. Κοντά στην είσοδο της ροής έχει τοποθετηθεί ένα πλέγμα (honeycomb) από εξάγωνα μήκους 1cm με σκοπό την δημιουργία στρωτής ροής. Επίσης κατασκευή ενός εσωτερικού σωλήνα έχει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση του αισθητήρα, αυτό συμβαίνει για δύο κύριους λόγους. Η ταχύτητα της ροής κατά μήκος του σπιρομέτρου, ακόμα και για ταχύτητες εισόδου 100L/min δεν είναι αρκετές για την διέγερση του αισθητήρα μειώνοντας την απόκριση και την ευαισθησία του, το φαινόμενο αυτό γίνεται ακόμα πιο έντονο για μικρότερες ταχύτητες εισόδου καθιστώντας τον αισθητήρα ανίκανο να ανιχνεύσει ροή. Το φαινόμενο της μηδενικής ολίσθησης στην επιφάνεια του σωλήνα κατά το οποίο, σε ανεπτυγμένη στρωτή ροή η ταχύτητα του αερίου σε σχέση με την σταθερή επιφάνεια γίνεται μηδενική αποτελεί ακόμα ένα εμπόδιο στην ορθή καταμέτρηση της ροής. Για τους παραπάνω λόγους κοντά στην έξοδο έχει τοποθετηθεί ένας μικρότερος σωλήνας παράκαμψης (bypass), με εσωτερική διάμετρο 0.95cm και μήκος από 5 έως και 7 εκατοστά. Λόγω της μικρότερης διατομής η ταχύτητα ροής κατά μήκος του αυξάνεται συμβάλλοντας στην μεγαλύτερη ακρίβειά των μετρήσεων



Σχήμα 2-1. Χαρακτηριστικά γεωμετρίας συσκευασίας

## 2.2 Επίδραση της διαμέτρου του σωλήνα στην ανάπτυξη της ροής

Η μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα εισόδου για την συγκεκριμένη εφαρμογή έχει επιλεγθεί να είναι 100L/min. Για να επιτευχθεί αυτή η τιμή είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της ταχύτητας σε m/s για την συγκεκριμένη γεωμετρία. Πιο συγκεκριμένα, η ροή ισούται με το γινόμενο της ταχύτητας ροής και της επιφάνειας της εγκάρσιας διατομής της γεωμετρίας.

$$\Phi = V * A, \text{ όπου} \quad (6)$$

- $\Phi$  : ροή του μέσου σε L/min
- $V$  : Η ταχύτητα ροής σε m/s
- $A$  : Η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής της γεωμετρίας.

Εφόσον χρησιμοποιείται σωλήνας, η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του δίνεται από τον τύπο:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (7)$$

όπου D η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα σε m.

Για  $\Phi=100$  L/min και d η διάμετρος του σωλήνα σε cm, η εξίσωση της ταχύτητας εισόδου σε m/s σε σχέση με την διάμετρο D ενός σωλήνα γίνεται:

$$\begin{aligned} \Phi(d) = V * A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 V \Rightarrow V &= \frac{\Phi}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{100L/min}{\pi \left(\frac{d * 10 - 2}{2}\right)^2} = \frac{\frac{0.1 m^3/min}{60}}{\pi \left(\frac{d * 10 - 2}{2}\right)^2} \\ &= \frac{21,22065908}{d^2} m/s \end{aligned} \quad (8)$$

Αναγκαίο για τον χαρακτηρισμό της ροής είναι και ο αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds δίνεται από τον τύπο:

$$Re = \frac{v \rho d}{\eta}, \text{ όπου:} \quad (9)$$

- Re: Ο αριθμός Reynolds
- v: Η ταχύτητα ροής σε m/s
- $\rho$ : Η πυκνότητα του μέσου,  $\rho_{air} = 1,204 \text{ kg/m}^3 @ 101kpa, 20C$
- d : Η διάμετρος του σωλήνα,  $d = 2.9 \times 10^{-2} \text{ m}$
- $\eta$ : Το ιξώδες του μέσου διάδοσης,  $\eta_{air} = 1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

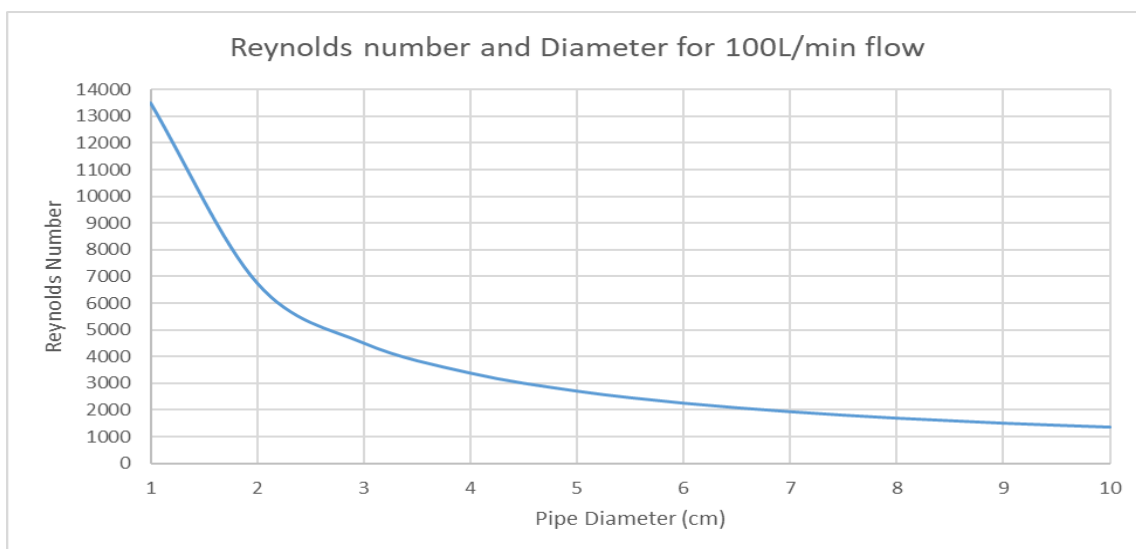
Εφαρμόζοντας τους παραπάνω τύπους για διάφορες διατομές λαμβάνουμε τα αποτελέσματα του Πίνακα 2-1

**Πίνακας 2-1. Αντιστοιχία ταχύτητας (m/s) και διατομών για Ροή 100L/min**

diameter (cm)	m/s for 100L/min	Reynolds Number
1	21,22	13508
1,5	9,43	9005
2,1	4,81	6432
2,9	2,52	4658

**Πίνακας 2-2. Αντιστοίχιση διαμέτρων με αριθμό Reynolds για 100L/min**

Diameter	Reynolds number
1	13508
2	6754
3	4502
4	3377
5	2701
6	2251
7	1929
8	1688
9	1500
10	1350



**Σχήμα 2-2. Διάγραμμα αριθμού Reynolds – Διαμέτρου**

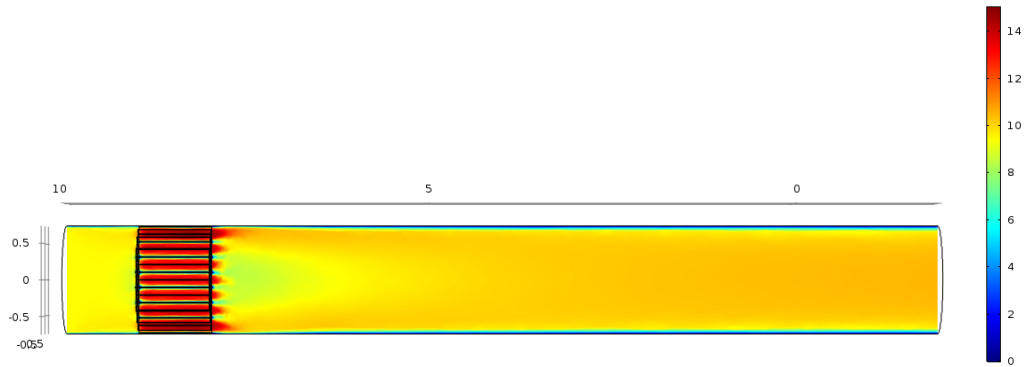
Παρατηρείται ότι καθώς ο αριθμός Reynolds είναι αντιστρόφως ανάλογος με την τετραγωνική ρίζα της επιφάνειας της διατομής, για μικρότερες τιμές διαμέτρου αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η ταχύτητα ροής για την διατήρηση των 100L/min. Από το Σχήμα 2-2 παρατηρείται η μεταβατική ροή ( $2000 < \text{Reynolds} < 4000$ ) για διάμετρο μεγαλύτερη των 3,5cm καθώς και στρωτή ροή ( $\text{Reynolds} < 2000$ ) για διάμετρο μεγαλύτερη από 7cm. Για να υπάρχει πλήρως στρωτή ροή η διάμετρος θα πρέπει να είναι πάνω από 7cm καθώς και το μήκος του σωλήνα αρκετά μεγάλο ώστε

να αναπτυχθεί πλήρως η ροή, για την συγκεκριμένη εφαρμογή αυτά τα μεγέθη δεν είναι κατάλληλα για την φορητότητα της συσκευής.

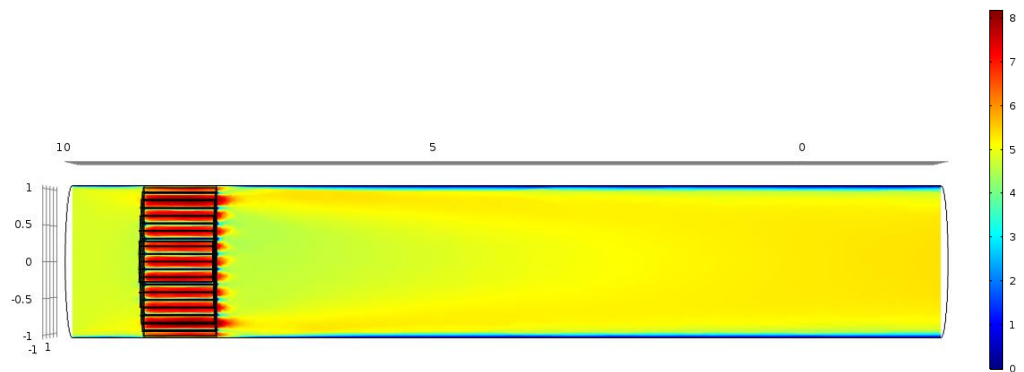
Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για 4 διαφορετικές διαμέτρους όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-1. Το μήκος του σωλήνα για κάθε προσομοίωση ήταν σταθερό στα 12cm. Επίσης έχει τοποθετηθεί πλέγμα πολυγώνων διαμέτρου 0,2cm με απόσταση 1 cm από την είσοδο και μήκος 1cm κατά μήκος του σωλήνα.



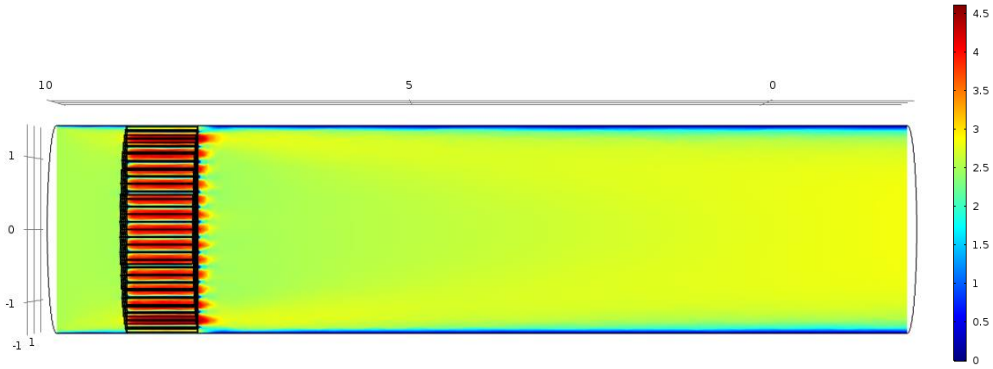
**a) Εσωτερική Διάμετρος 1cm , Μήκος 12cm, Ταχύτητα ροής εισόδου 21,22 m/s**



**b) Εσωτερική Διάμετρος 1,5cm , Μήκος 12cm, Ταχύτητα ροής εισόδου 9,43 m/s**



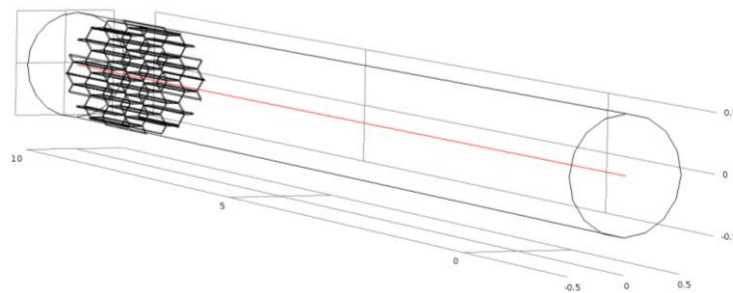
**c) Εσωτερική Διάμετρος 2,1cm , Μήκος 12cm, Ταχύτητα ροής εισόδου 4,81 m/s**



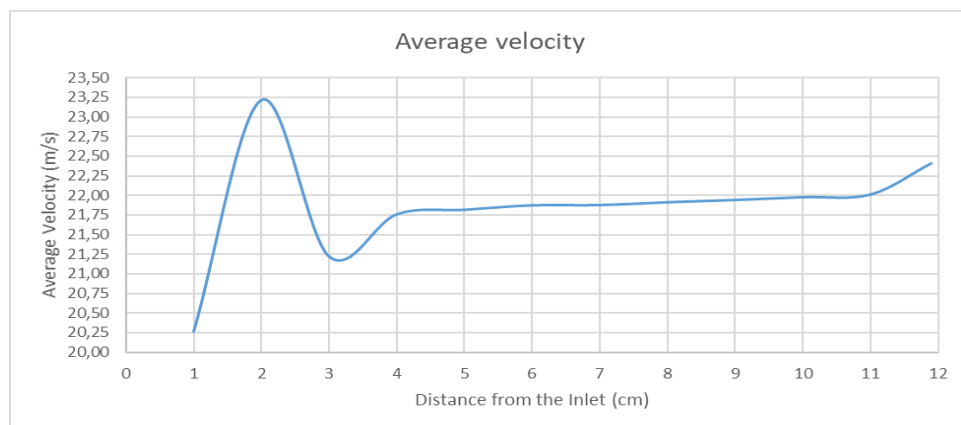
**d) Εσωτερική Διάμετρος 2,9cm , Μήκος 12cm, Ταχύτητα ροής εισόδου 2,52 m/s**

**Σχήμα 2-3. Προσομοιώσεις διαμέτρου σωλήνα για 100L/min.**

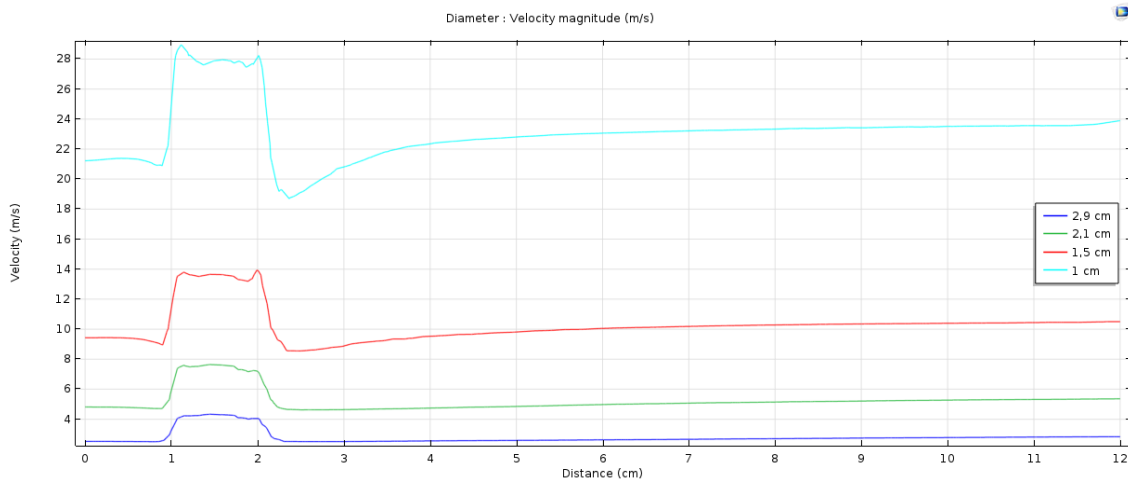
Από τα παραπάνω δεδομένα εξάχθηκαν μετρήσεις για την κατά μήκος ταχύτητα ροής στο κέντρο των σωλήνων, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 2-4, καθώς και η μέση τιμή της ταχύτητας για τον σωλήνα με διάμετρο 1cm και από τα αποτελέσματα υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds . Η μέση ταχύτητα είναι αναγκαία να μετρηθεί καθώς λόγω της στρωτής ροής που δημιουργείται, η ταχύτητα στο κέντρο του σωλήνα είναι μέγιστη.



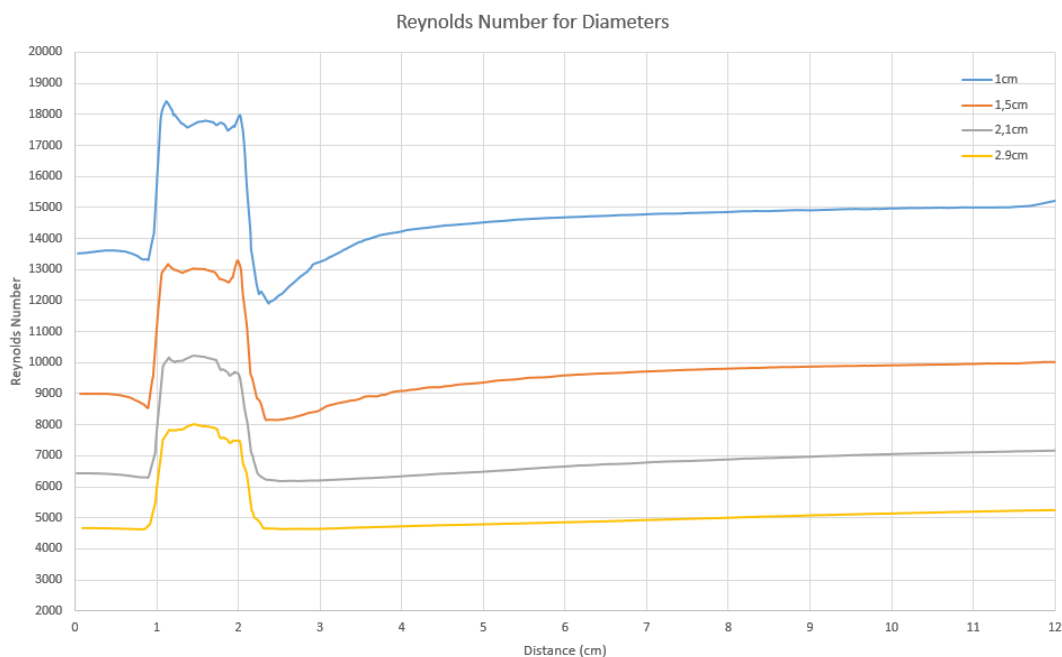
**Σχήμα 2-4. Σημείο μέτρησης κατά μήκος του κέντρου του σωλήνα**



**Σχήμα 2-5. Μέση ταχύτητα ροής για διάμετρο 1 cm , μήκος 12cm, ταχύτητα εισόδου 21,22m/s**



Σχήμα 2-6. Ταχύτητα ροής κατά μήκος το κέντρο των σωλήνων για διάφορες διατομές



Σχήμα 2-7. Αριθμοί Reynolds κατά μήκος το κέντρο των σωλήνων για διάφορες διατομές

Από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας για το διάστημα από 1 μέχρι 2 cm, κάτι που οφείλεται στην παρουσία του πλέγματος, εφόσον η διάμετρος του πλέγματος είναι μικρότερη από του σωλήνα αναπτύσσεται μεγαλύτερη ταχύτητα. Για το διάστημα 2 μέχρι 5 cm η ταχύτητα αυξάνεται και αναπτύσσεται η ροή. Τέλος για 5 μέχρι 12 cm η ροή έχει αναπτυχθεί και παρατηρείται διαφορά ταχύτητας  $\Delta V$  ίση με 0 έως 1,3.

Οι αριθμοί Reynolds παρουσιάζουν ίδια μορφολογία με τις ταχύτητες καθώς η διάμετρος του σωλήνα παραμένει σταθερή, ως αποτέλεσμα η μόνη εξαρτώμενη μεταβλητή είναι η ταχύτητα ροής.

### 2.3 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης πλέγματος με ροή υπό γωνία

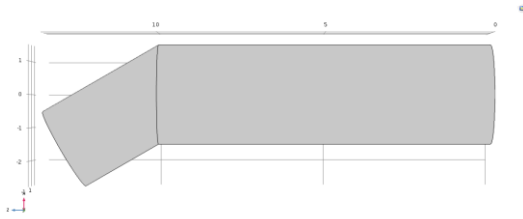
Κρίσιμη είναι η εξέταση της αποτελεσματικότητας του πλέγματος για την εξομάλυνση και την δημιουργία στρωτής ροής σε περίπτωση που η εισερχόμενη ροή βρίσκεται υπό γωνία. Εξετάζονται



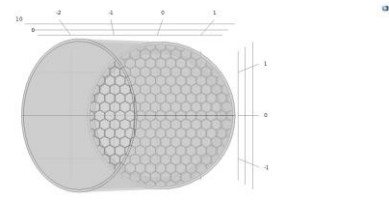
Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης

2 γωνίες εισόδου στις 30 και 40 μοίρες και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με απόσταση 1 και 2 cm από την είσοδο καθώς και χωρίς την χρήση πλέγματος.

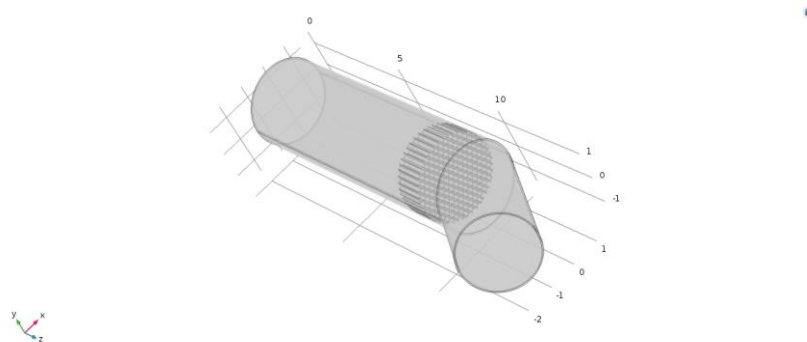
Η αρχική γεωμετρία της [υποενότητας 2.1](#) μορφοποιήθηκε προσθέτοντας σωλήνα μήκους 4cm στην είσοδο, ο οποίος ήταν υπό γωνία 30 μοιρών σε σχέση με την υπόλοιπη γεωμετρία όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2-8.



a) Πλάγια όψη γεωμετρίας .



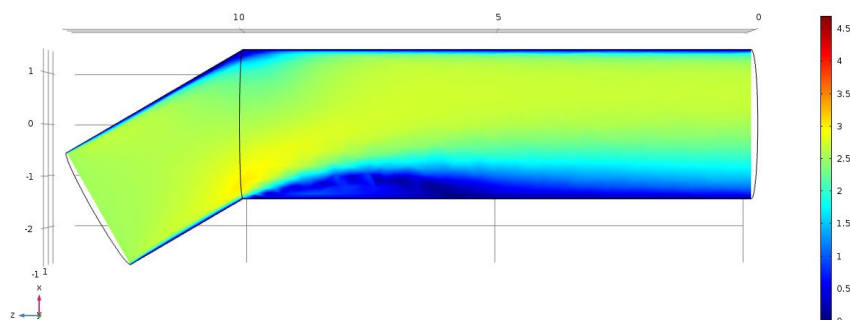
b) Εμπρόσθια όψη γεωμετρίας.



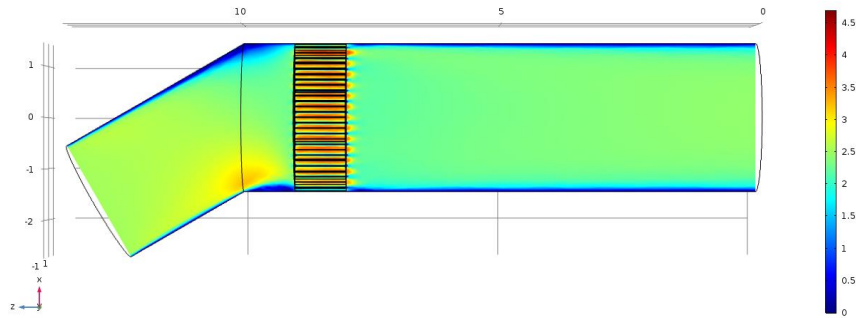
c) Τρισδιάστατη όψη γεωμετρίας.

Σχήμα 2-8. Γεωμετρία υπό γωνία 30 μοιρών

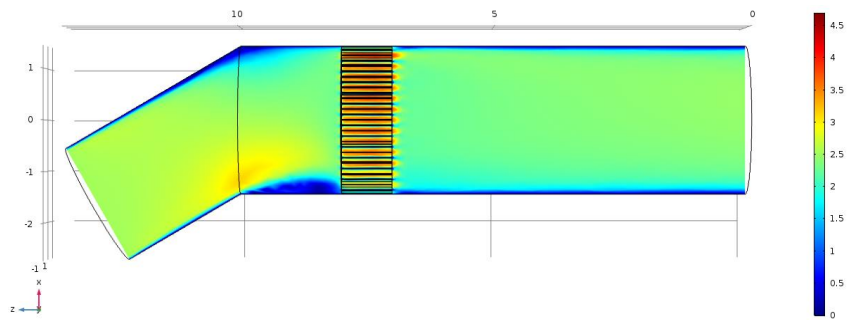
Εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις για ταχύτητα εισόδου 2,523m/s που αντιστοιχεί σε 100L/min και παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα σε τρισδιάστατη μορφή.



Σχήμα 2-9. Αποτέλεσμα 30 μοιρών χωρίς πλέγμα.

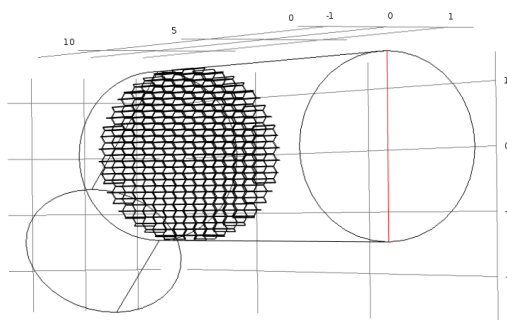


Σχήμα 2-10. Αποτέλεσμα 30 μοιρών με απόσταση πλέγματος 1cm

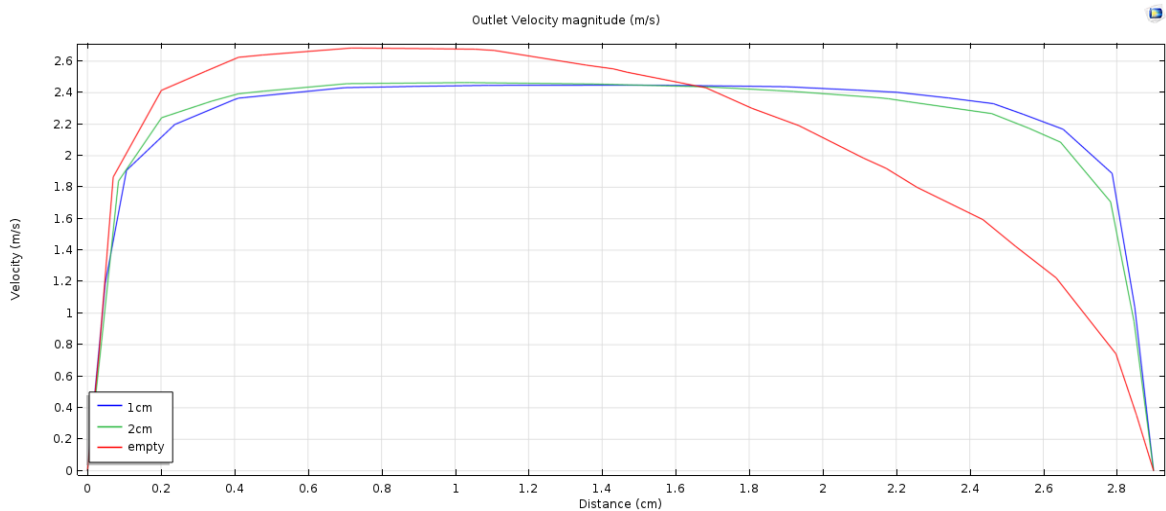


Σχήμα 2-11. Αποτέλεσμα 30 μοιρών με απόσταση πλέγματος 2cm

Για την περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων μετρήθηκε η ταχύτητα ροής στην έξοδο των σωλήνων κατά μήκος της διαμέτρου τους.



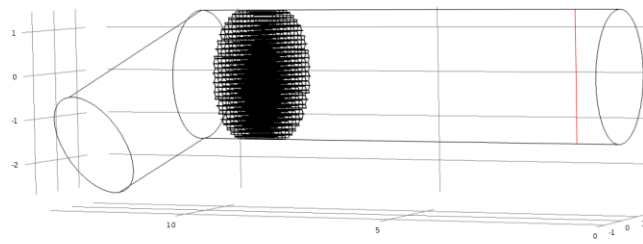
Σχήμα 2-12. Μέτρηση κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο



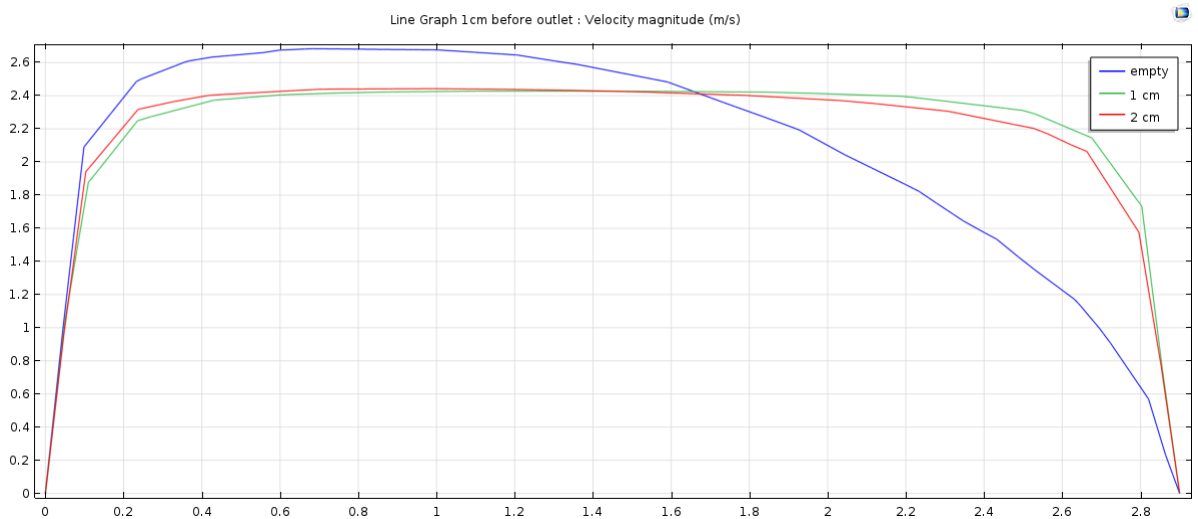
Σχήμα 2-13. Αποτελέσματα μέτρησης κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο για 30 μοίρες ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ευστράτιος Παπασηφάκης

Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης

Για την περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς έγινε και μέτρηση 1cm πριν την έξοδο της ροής για την παρατήρηση τυχόν φαινομένων.



**Σχήμα 2-14. Μέτρηση κατά μήκος της διαμέτρου 1cm πριν την έξοδο**

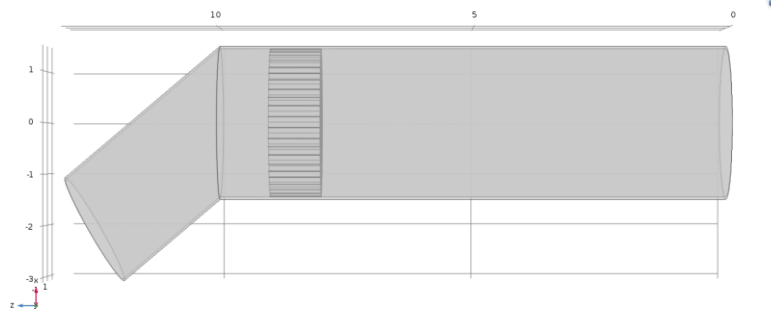


**Σχήμα 2-15. Αποτελέσματα μέτρησης κατά μήκος της διαμέτρου 1cm πριν την έξοδο για 30 μοίρες**

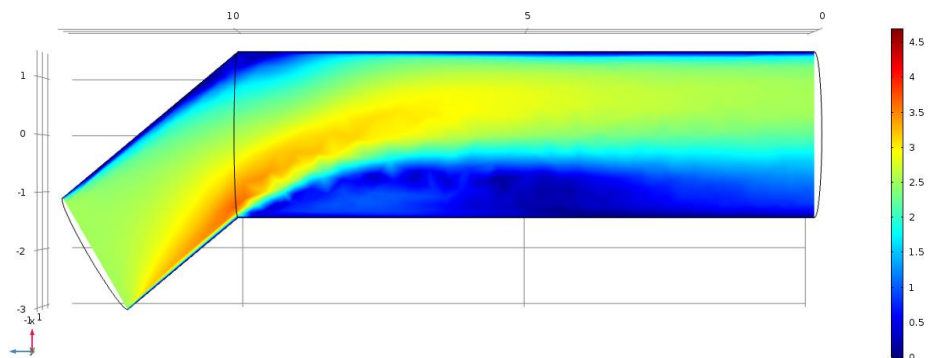
Δεν παρατηρείται μετρήσιμη διαφορά στην κατανομή της ροής κατά την έξοδο από τον σωλήνα καθώς το Σχήμα 2-13 και Σχήμα 2-15 δεν παρουσιάζουν διαφορές.

Από τα τρισδιάστατα αποτελέσματα αλλά και από τα γραφήματα της ταχύτητας κατά μήκος της διαμέτρου της εξόδου παρατηρείται ότι το πλέγμα συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην ομαλή διαμόρφωση της ροής όταν αυτή εισέρχεται στην είσοδο υπό γωνία. Για την περίπτωση της απόστασης πλέγματος για 2cm παρατηρείται μια μικρή αλλά μετρήσιμη απόκλιση στην ανάπτυξη της ροής σε σχέση με το 1cm κάτι που οφείλεται στην μικρότερη απόσταση που είχε να ταξιδέψει το μέσο (αέρας).

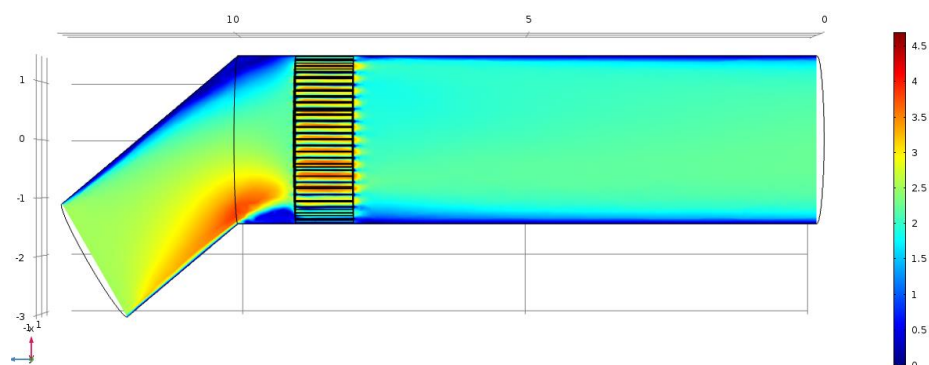
Έπειτα δημιουργήθηκε η γεωμετρία και έγιναν οι αντίστοιχες προσομοιώσεις υπό γωνία εισόδου 40 μοιρών και απόσταση πλέγματος από την είσοδο 1cm.



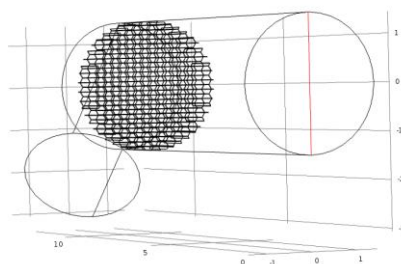
Σχήμα 2-16. Πλάγια όψη γεωμετρίας υπό γωνία 40 μοιρών



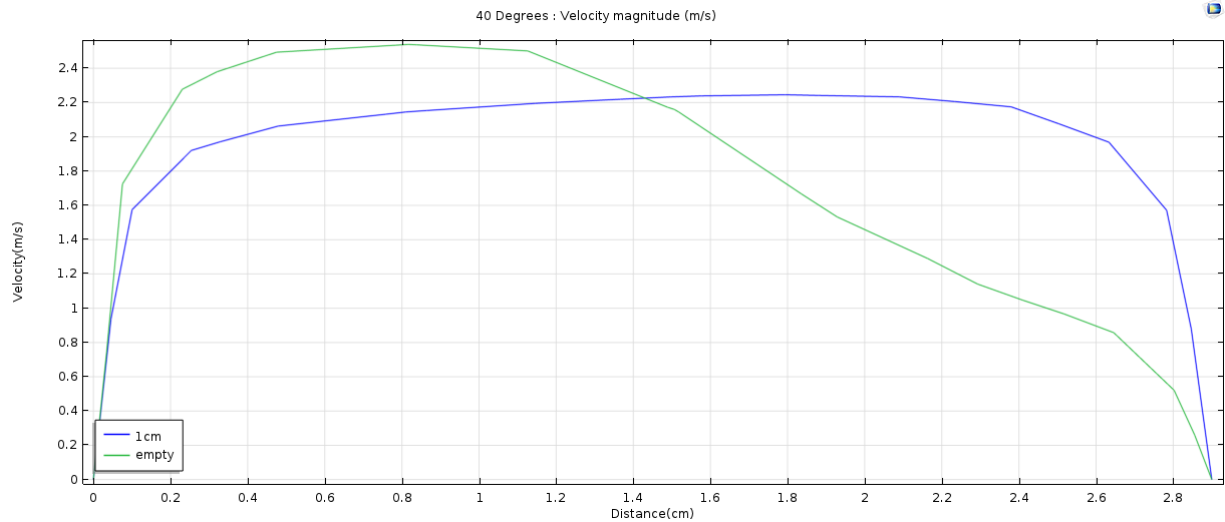
Σχήμα 2-17. Αποτέλεσμα 40 μοιρών χωρίς πλέγμα



Σχήμα 2-18. Αποτέλεσμα 40 μοιρών με απόσταση πλέγματος 1cm



Σχήμα 2-19. Μέτρηση κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο



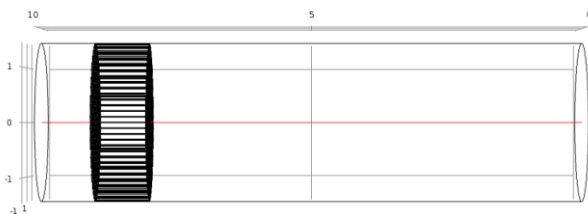
Σχήμα 2-20. Αποτελέσματα μέτρησης κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο για 40 μοίρες

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την βελτίωση στην ομοιόμορφη κατανομή της ροής όπως διακρίνεται από το τρισδιάστατο γράφημα αλλά και της ταχύτητας κατά μήκος της διαμέτρου εξόδου και για μεγαλύτερες γωνίες εισόδου. Η δραματική αλλαγή στην ομοιομορφία της ροής μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην απόκριση του αισθητήρα καθώς η επαναληψιμότητα των μετρήσεων και η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων επηρεάζεται άμεσα.

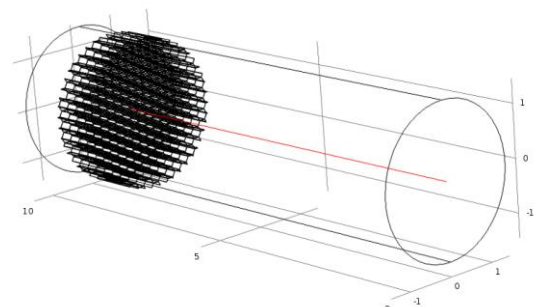
## 2.4 Μελέτη διαμέτρου πλέγματος

Είναι φανερή η αποτελεσματικότητα του πλέγματος στην δημιουργία στρωτής και ομοιόμορφης ροής. Η μορφολογία του όμως θα πρέπει να επιτρέπει την ελαχιστοποίηση της αντίστασης στην ροή καθώς ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί να αναπνέει ελεύθερα μέσα από το σπιρόμετρο καθώς και να μελετηθεί η αλληλοεπίδραση του με την μορφολογία του σωλήνα παράκαμψης (bypass).

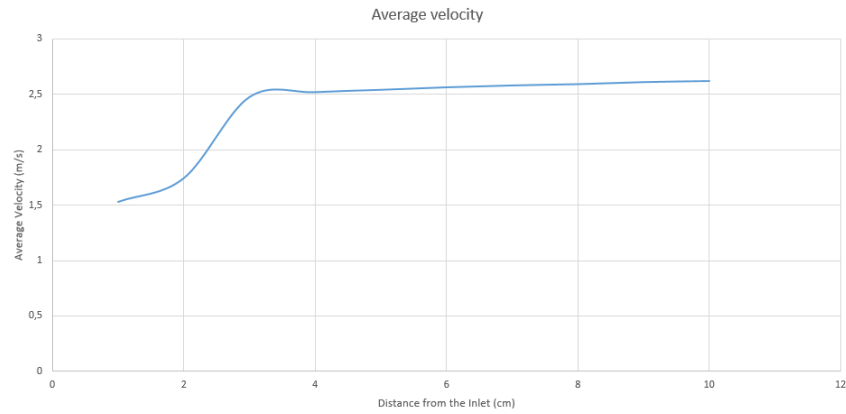
Αρχικά έγιναν δοκιμές για την σύγκριση του μεγέθους των εξάγωνων του πλέγματος. Πιο συγκεκριμένα συγκρίνονται τρία διαφορετικά μεγέθη διαμέτρου , για 15 , 20 και 25 mm με όλα να έχουν μήκος 1cm. Για την σύγκριση αυτών των γεωμετριών μετρήθηκε και συγκρίθηκε η ταχύτητα ροής κατά μήκος του κέντρου του σωλήνα όπως απεικονίζεται από την κόκκινη γραμμή στις παρακάτω εικόνες με συνολικό μήκος 10cm και εσωτερική διατομή 2,9cm .



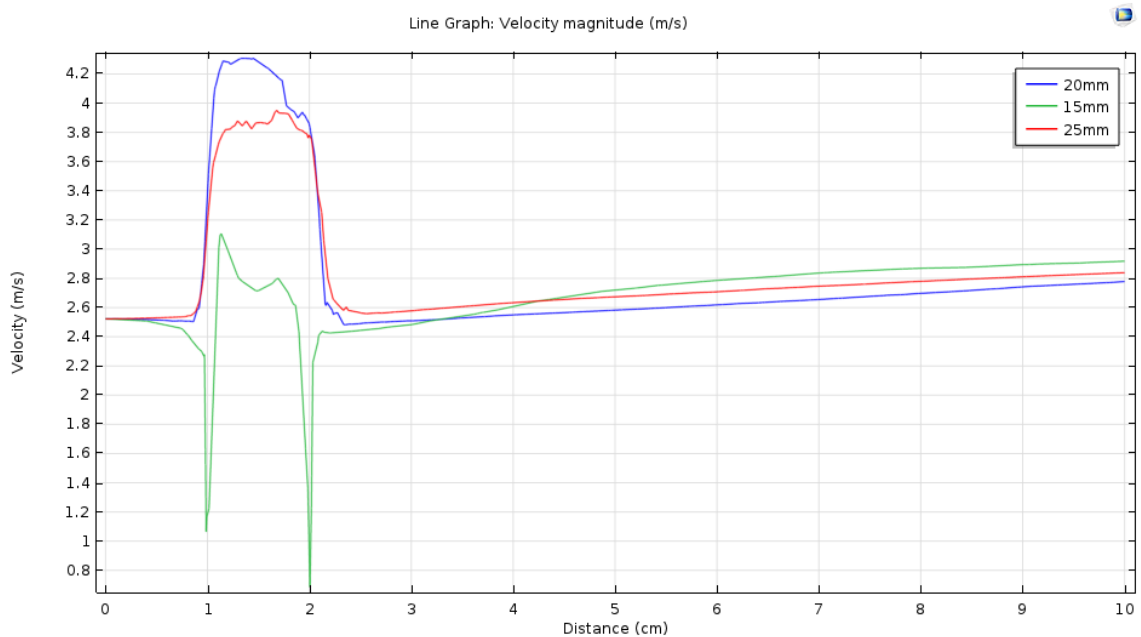
Σχήμα 2-21. Κάτοψη κατά μήκος μέτρησης.



Σχήμα 2-22. Τρισδιάστατη απεικόνιση κατά μήκος μέτρησης.

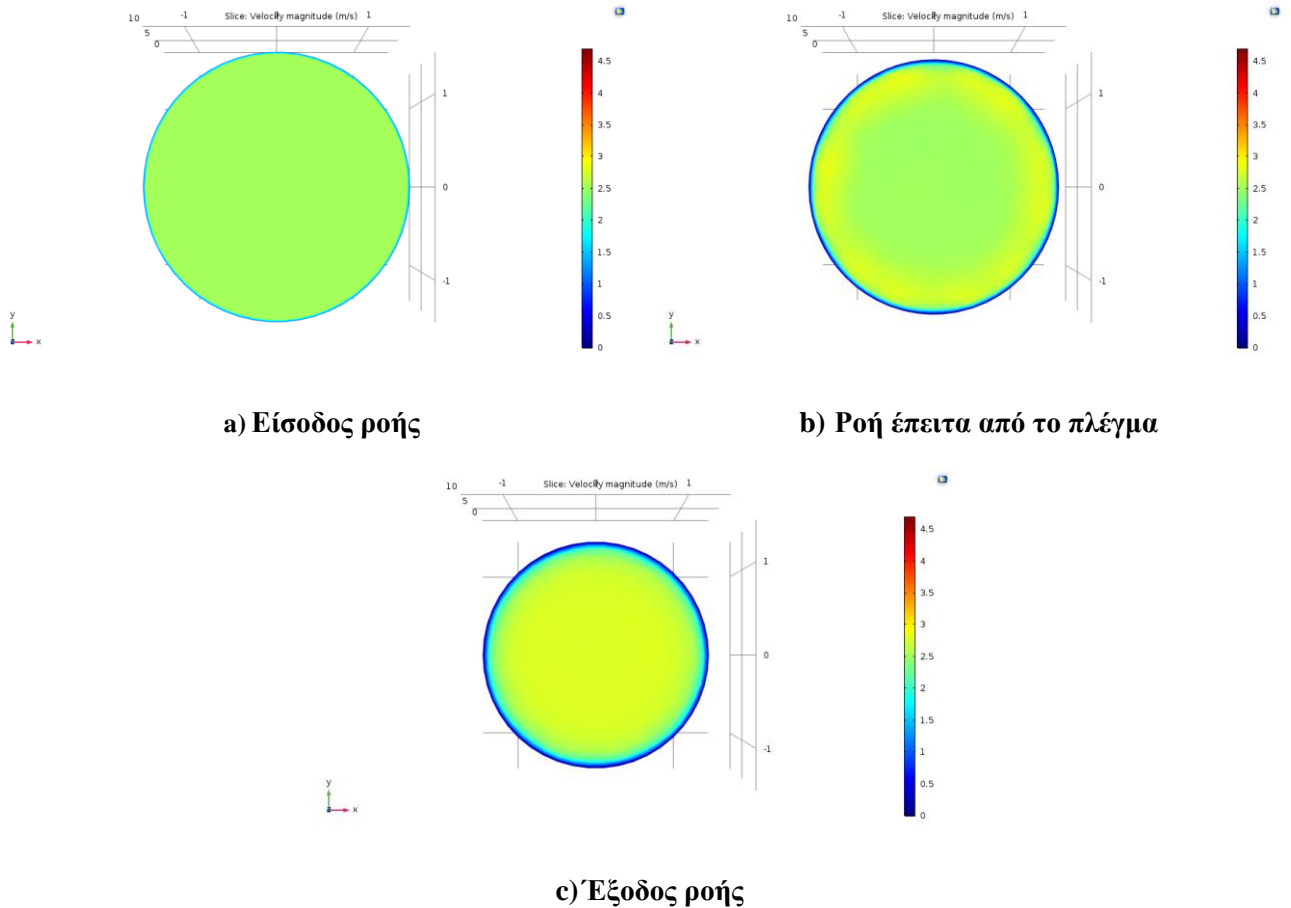


Σχήμα 2-23. Κατά μήκος μέση ταχύτητα ροής για εξάγωνα 20mm



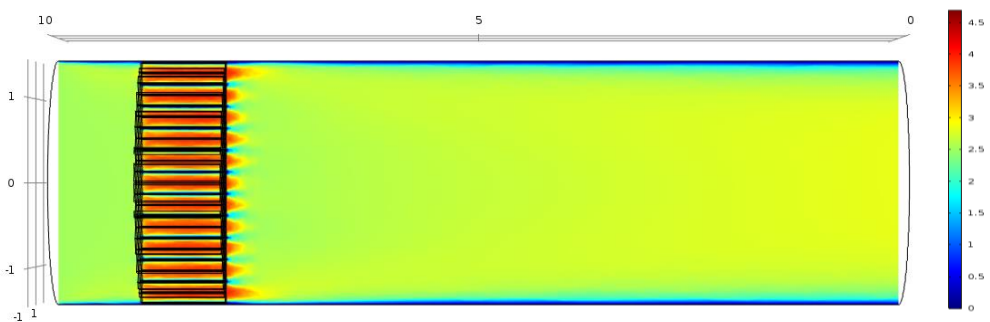
Σχήμα 2-24. Σύγκριση κατά μήκος μετρήσεων.

Από το παραπάνω Σχήμα 2-24 παρατηρείται ότι για τα εξάγωνα με διάμετρο 15mm υπάρχει μια πολύ μικρή αύξηση της ταχύτητας στα 1-2 εκατοστά από την είσοδο, καθώς σε εκείνο το σημείο βρίσκεται το πλέγμα. Για διαμέτρους 20mm και 25mm η αύξηση της ταχύτητας είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη. Από το πλέγμα και έπειτα παρατηρείται μία σταθερή αύξηση της ταχύτητας σε όλες τις περιπτώσεις με τα 20mm να παρουσιάζουν την μεγαλύτερη γραμμικότητα σε αυτό το εύρος.

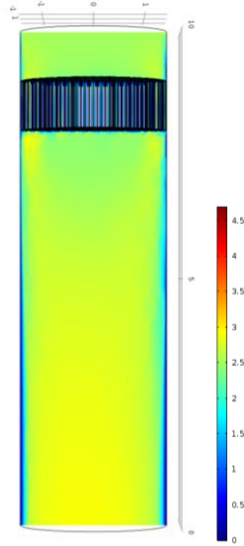


**Σχήμα 2-25. Κάθετη διατομή ροής για πλέγμα με εξάγωνο 20mm**

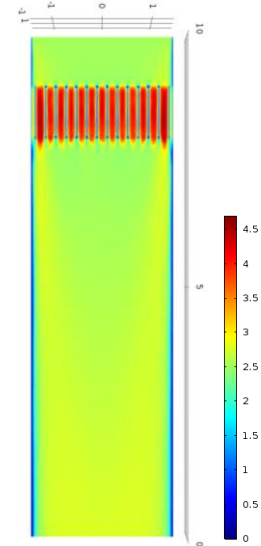
Από τις παραπάνω τρισδιάστατες κάθετες διατομές στο Σχήμα 2-25 ,στην είσοδο της ροής παρατηρείται ομοιόμορφη ταχύτητα ροής σε όλη την επιφάνεια της διατομής, αμέσως μετά το πλέγμα παρατηρούνται κάποια σημεία με αυξημένη ταχύτητα, τα οποία δημιουργούνται από την μικρότερη διατομή των εξάγωνων του πλέγματος και την αύξηση της ταχύτητας ροής μέσα από αυτό, στην έξοδο παρατηρείται ροή με την μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο και σχεδόν μηδενική στα τοιχώματα του σωλήνα, υποδεικνύοντας την ανάπτυξη στρωτής ροής.



**Σχήμα 2-26.Πλάγια διατομή τρισδιάστατων αποτελεσμάτων για εξάγωνο 25mm**

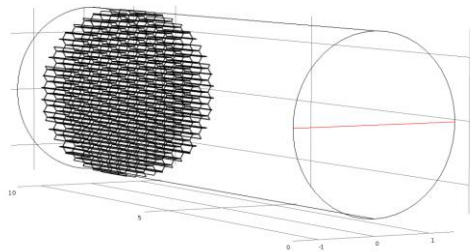


Σχήμα 2-27. Πλάγια διατομή τρισδιάστατων αποτελεσμάτων για εξάγωνο 15mm

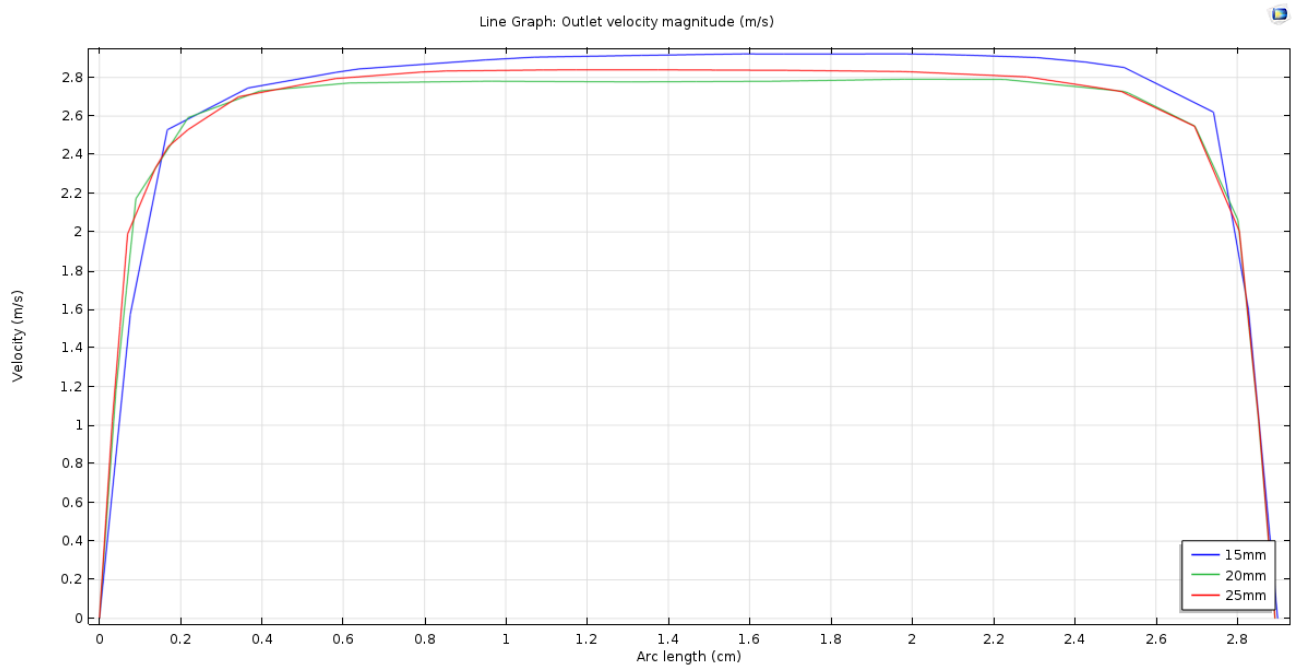


Σχήμα 2-28. Πλάγια διατομή τρισδιάστατων αποτελεσμάτων για εξάγωνο 15mm

Για την περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων έγιναν και μετρήσεις της ταχύτητας κατά μήκος της διαμέτρου της εξόδου.



Σχήμα 2-29. Μετρήσεις κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο.



Σχήμα 2-30. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο.



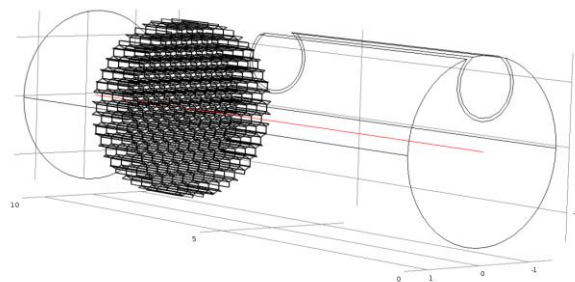
Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτόπωσης

Από το Σχήμα 2-30 στην περίπτωση των 15mm παρατηρείται μεγαλύτερη ταχύτητα ροής εξόδου, στο Σχήμα 2-27 όμως παρατηρείται αρκετά μικρότερη ταχύτητα στην περιοχή του πλέγματος συγκριτικά με τις άλλες διατομές, αυτή η συμπεριφορά υποδεικνύει μεγάλη αντίσταση στην ροή, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Για τις διαμέτρους των 20 και 25mm παρατηρούνται μικρές διαφορές τόσο στην ταχύτητα κατά μήκος του σωλήνα καθώς και κατά μήκος της διαμέτρου στην έξοδο. Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία επιλέχθηκε η διατομή των 20mm ως βέλτιστη καθώς δεν περιορίζει την ροή αλλά παράλληλα προσφέρει τον μέγιστο αριθμό εξάγωνων που μπορούν να τοποθετηθούν στην περιορισμένη επιφάνεια της διατομής του σωλήνα, συμβάλλοντας στην δημιουργία στρωτής ροής.

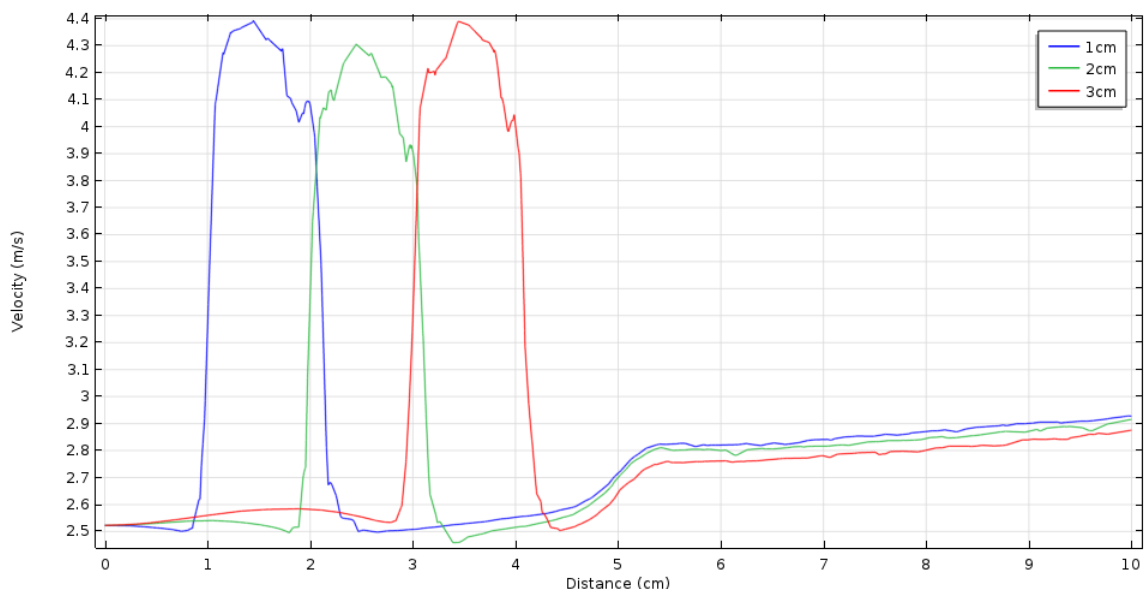
## 2.5 Μελέτη απόσταση πλέγματος από την είσοδο.

Η απόσταση του πλέγματος από την είσοδο μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη της ροής εφόσον μεταβάλλεται η απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει το ρευστό από το πλέγμα έως την έξοδο καθώς και λόγω της μεταβολής της απόστασης μεταξύ του πλέγματος και του bypass

Έγιναν τρεις δοκιμές για την απόσταση του πλέγματος από την είσοδο για την μελέτη τους στην επιρροή της ανάπτυξης της ροής κατά μήκος του σπιρομέτρου. Πιο συγκεκριμένα η διατομή των εξάγωνων του πλέγματος ήταν σταθερή στα 20mm και έγιναν προσομοιώσεις για απόσταση από την είσοδο ίση με 1,2 και 3cm. Στην γεωμετρία υπάρχει και το bypass με μήκος 5cm και διατομή 0,95cm.



Σχήμα 2-31. Μετρήσεις κατά μήκος το κέντρο του σπιρομέτρου

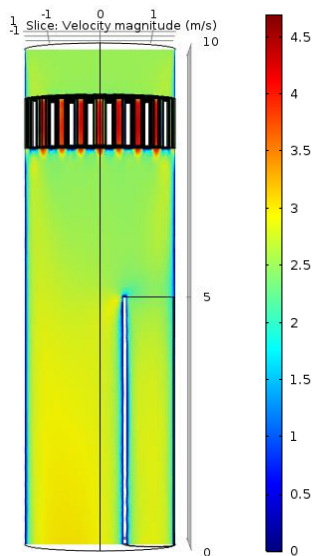


Σχήμα 2-32. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος του κέντρου του σπιρομέτρου

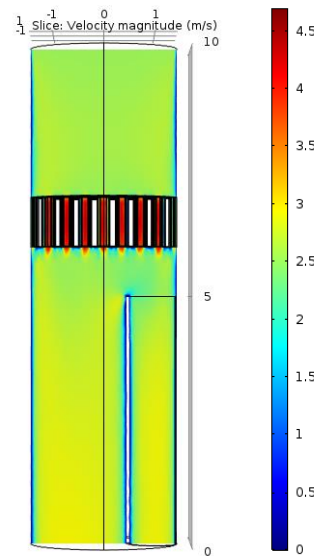
Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά μήκος του κέντρου του σπιρομέτρου παρατηρείται μια μικρή αύξηση της ταχύτητα της τάξης των 0,6 m/s για την μικρότερη απόσταση του πλέγματος από την είσοδο. Η μεγαλύτερη απόσταση του πλέγματος από την έξοδο επιτρέπει στην ροή να αναπτυχθεί περισσότερο και να αυξηθεί η ταχύτητα της.

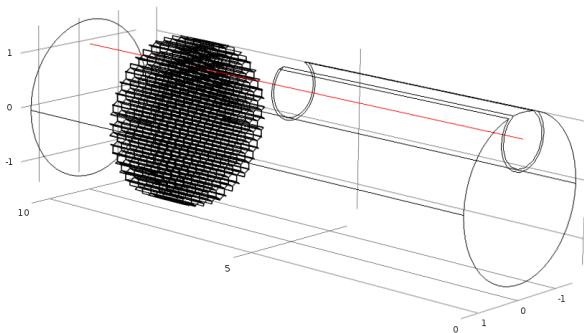
Έπειτα διερευνήθηκε περαιτέρω η επιρροή του πλέγματος στην ανάπτυξη της ροής στο εσωτερικό του bypass. Για την ακριβέστερη σύγκριση των αποτελεσμάτων έγιναν μετρήσεις στο κέντρο του bypass τόσο για το μήκος του (5cm) όσο και για το συνολικό μήκος της γεωμετρίας (10cm).



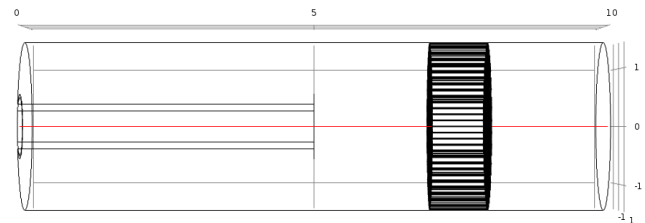
Σχήμα 2-33. Τρισδιάστατα αποτελέσματα για απόσταση πλέγματος 1cm από την είσοδο



Σχήμα 2-34. Τρισδιάστατα αποτελέσματα για απόσταση πλέγματος 3cm από την είσοδο

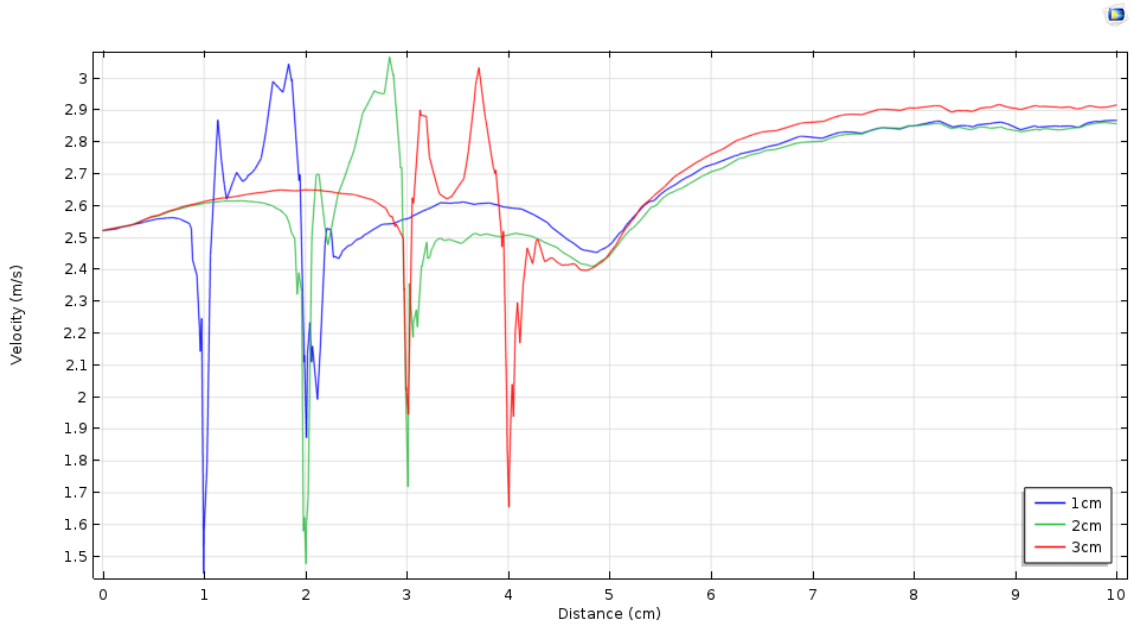


Σχήμα 2-35. Μετρήσεις κατά μήκος του σπιρομέτρου στο κέντρο του bypass

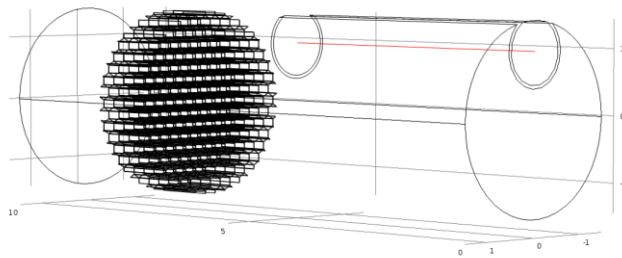


Σχήμα 2-36. Κάτοψη μετρήσεων κατά μήκος του σπιρομέτρου στο κέντρο του bypass

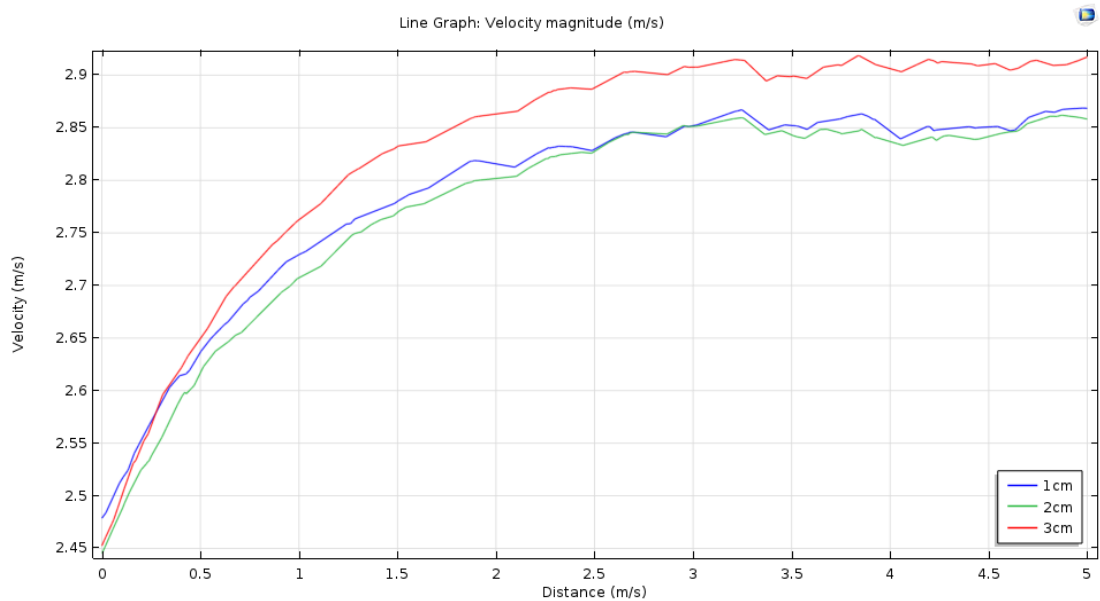
Έπειτα εξάχθηκε η ταχύτητα κατά μήκος του σπιρομέτρου στο κέντρο του bypass και δημιουργήθηκε το Σχήμα 2-37 για την ευκολότερη σύγκριση της συμπεριφοράς της ροής



Σχήμα 2-37. Αποτελέσματα κατά μήκος του σπιρομέτρου στο κέντρο του bypass



Σχήμα 2-38. Μετρήσεις στο κέντρο του bypass



Σχήμα 2-39. Αποτελέσματα μετρήσεων ταχύτητα στο κέντρο του bypass

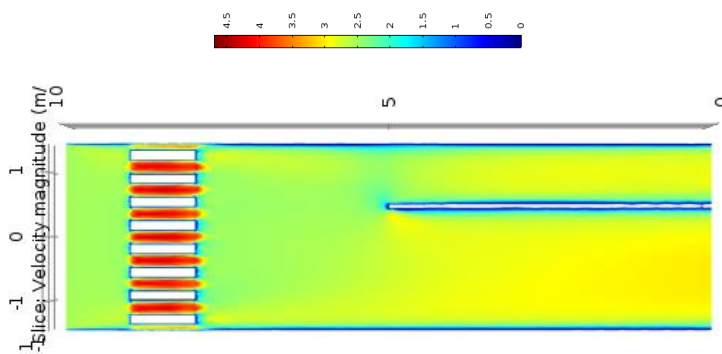
Παρατηρείται αισθητή αύξηση της ταχύτητας μέσα στο bypass για την απόσταση των 3cm της τάξης του 0,05 m/s , για τις περιπτώσεις των 1 και 2 cm δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη απόκλιση. Αυτή η αύξηση μπορεί να αποδοθεί στην μικρότερη απόσταση μεταξύ πλέγματος και bypass και στις μεγαλύτερες ταχύτητες στην έξοδο του πλέγματος λόγω των μικρότερων διαμέτρων. Ως βέλτιστη επιλογή κρίνεται η απόσταση 1cm του πλέγματος από την είσοδο καθώς δίνει την μέγιστη απόσταση για την εξομάλυνση των μεγάλων ταχυτήτων από το πλέγμα

## 2.6 Μελέτη του μήκους των bypass

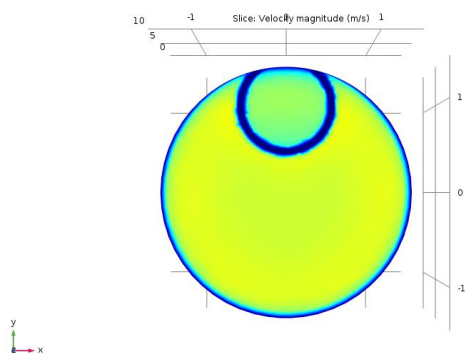
Για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε εσωτερικός σωλήνας παράκαμψης (bypass) εφόσον έχει συγκριθεί με τον εξωτερικό και έχει αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα καθώς η ροή αναπτύσσεται γρηγορότερα, δηλαδή σε μικρότερο μήκος και η ταχύτητα που αναπτύσσεται είναι μεγαλύτερη για την ίδια διάμετρο [27].

Το μήκος του bypass επηρεάζει τις μετρήσεις καθώς η μικρότερη διατομή του σε σχέση με την διατομή του σπιρομέτρου καθώς και το συνολικό μήκος του συμβάλουν στην αύξηση της ταχύτητας ροής. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και η συνθήκη μηδενικής ολίσθησης στα τοιχώματα του καθώς η ροή του αέρα πάνω από τον αισθητήρα είναι απαραίτητη για την λήψη ορθών μετρήσεων.

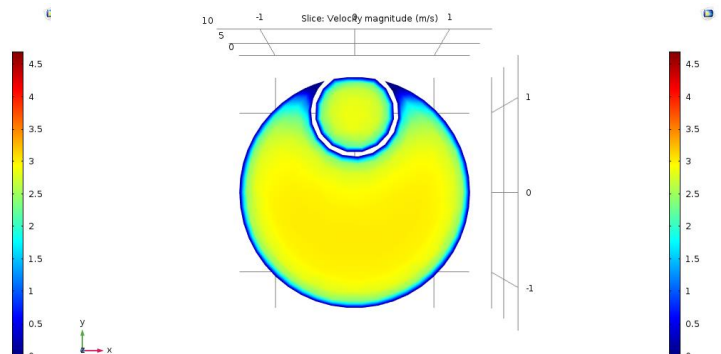
Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για τρία μήκη των bypass για 7,6 και 5 cm, η απόσταση πλέγματος από την είσοδο ήταν 1cm με διαμέτρους 20mm και ταχύτητα ροής εισόδου 2.523m/s.



a) Πλάγια διατομή σπιρομέτρου

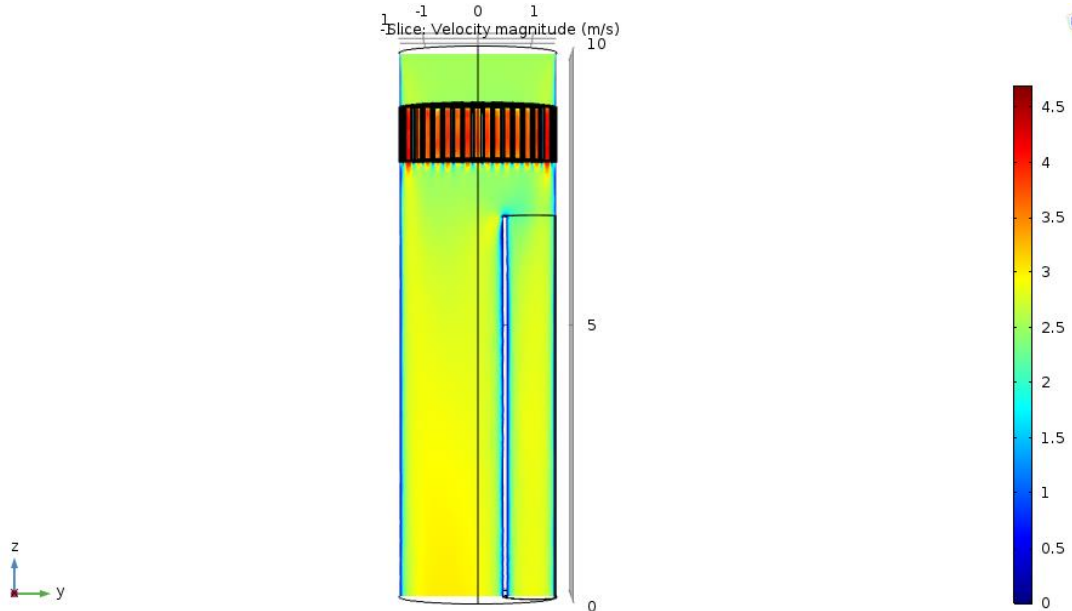


b) Εμπρόσθια κάθετη διατομή είσοδο του bypass

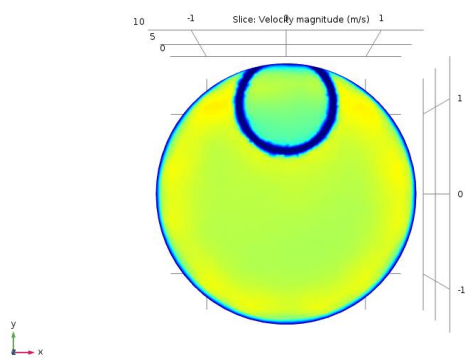


c) Εμπρόσθια κάθετη διατομή στην έξοδο του bypass

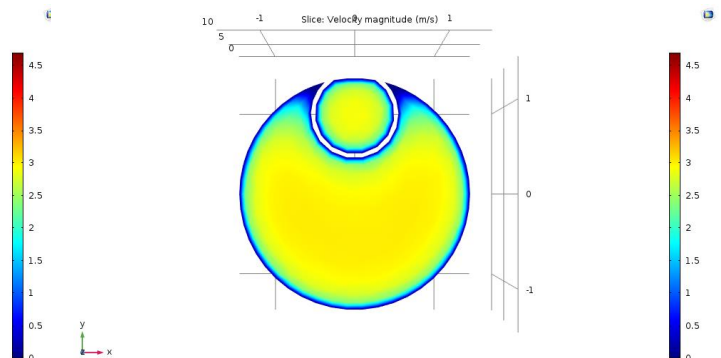
Σχήμα 2-40. Τρισδιάστατα αποτελέσματα για μήκος bypass 5cm



**a) Πλάγια διατομή σπιρομέτρου**



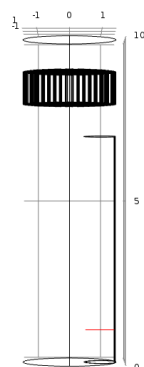
**b) Εμπρόσθια κάθετη διατομή στην είσοδο του bypass**



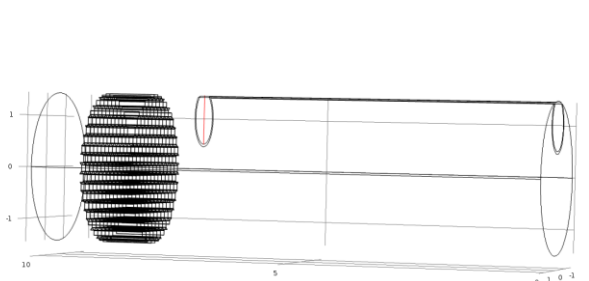
**c) . Εμπρόσθια κάθετη διατομή στην έξοδο του bypass**

**Σχήμα 2-41. Τρισδιάστατα αποτελέσματα για μήκος bypass 7cm**

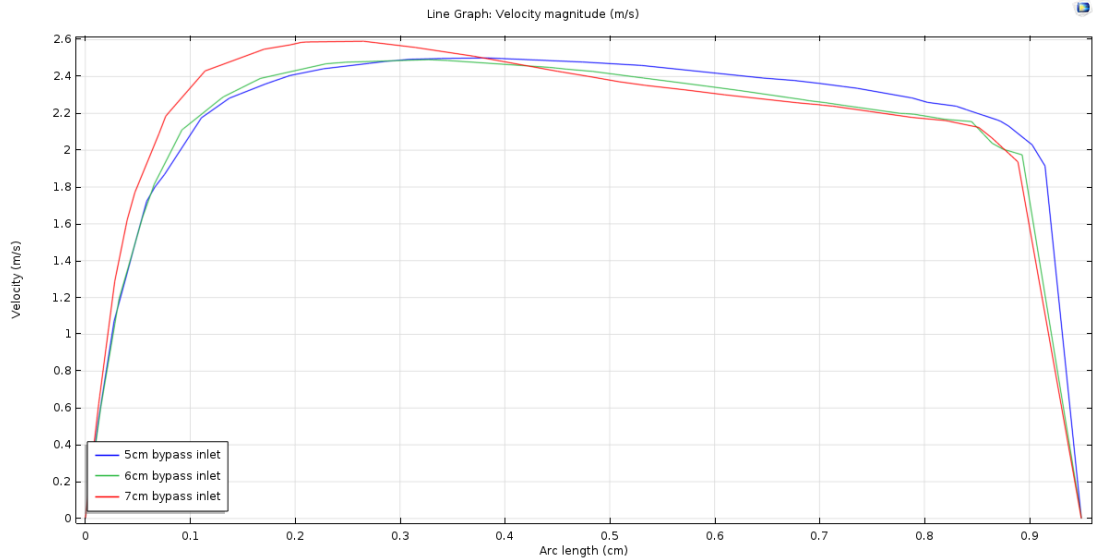
Από τις παραπάνω τρισδιάστατες προσομοιώσεις από το Σχήμα 2-40 και Σχήμα 2-41 παρατηρείται η όμοια ανάπτυξη της ροής. Στην περίπτωση των 7cm η είσοδος του Bypass βρίσκεται αρκετά κοντά στο πλέγμα και φαίνεται να διοχετεύεται αυξημένη ταχύτητα ροής.



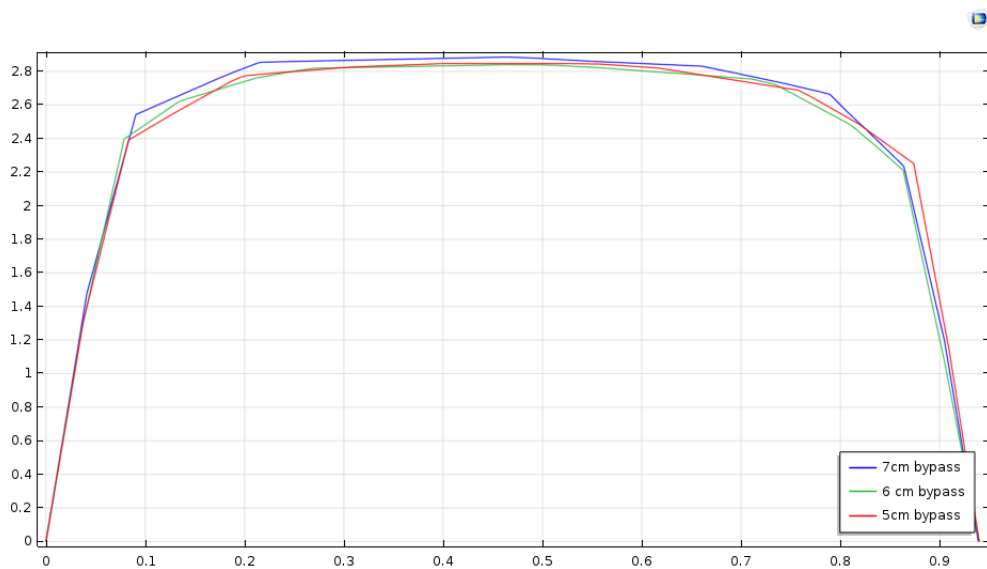
**Σχήμα 2-42. Μετρήσεις κατά μήκος της διαμέτρου του bypass 1cm πριν την έξοδο.**



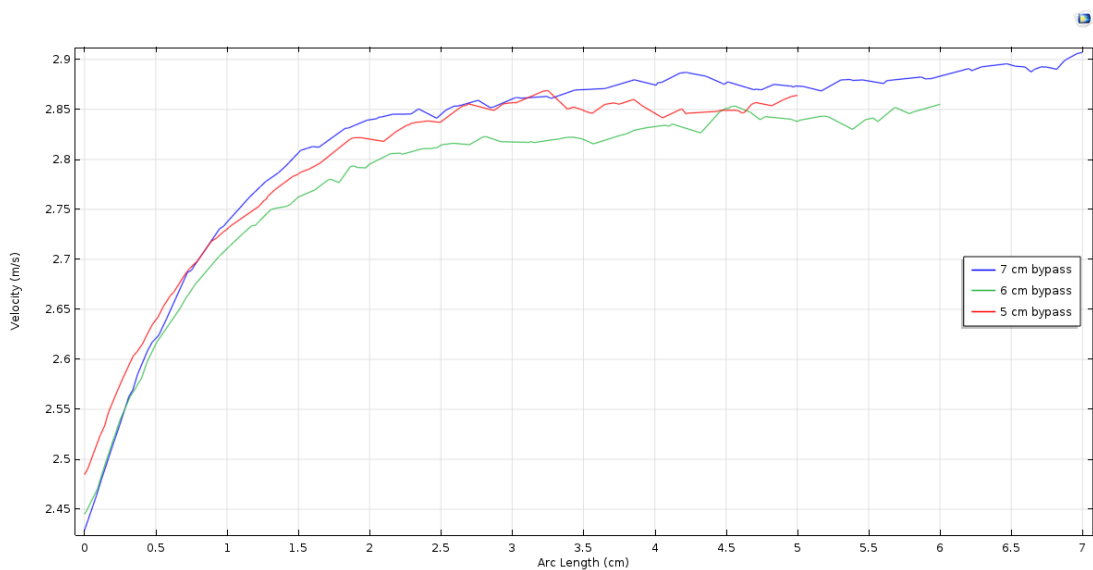
**Σχήμα 2-43. Μετρήσεις κατά μήκος της διαμέτρου εισόδου του bypass**



Σχήμα 2-44. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος της διαμέτρου εισόδου του bypass



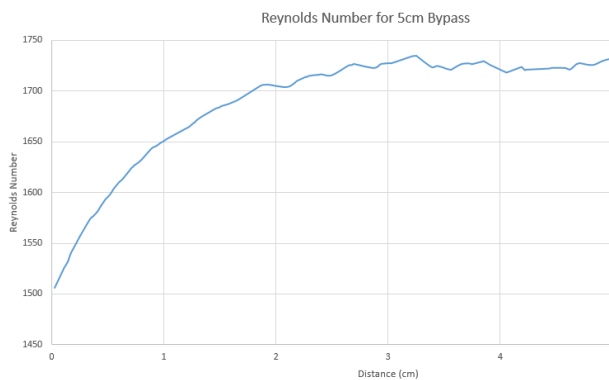
Σχήμα 2-45. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος της διαμέτρου του bypass 1cm πριν την έξοδο.



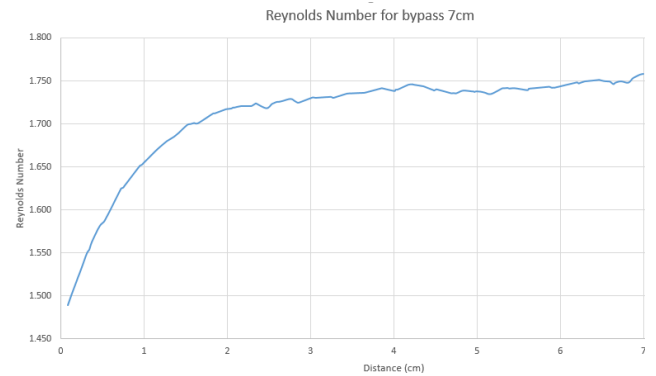
Σχήμα 2-46. Αποτελέσματα μετρήσεων κατά μήκος του κέντρου των bypass

Από τα αποτελέσματα της ταχύτητας κατά μήκος της διαμέτρου του bypass στο Σχήμα 2-46, κατά την οποία η είσοδος της ροής αντιστοιχεί σε απόσταση 0cm, παρατηρείται η πιο ομοιόμορφη κατανομή της ροής σε όλο το μήκος της διατομής του σωλήνα μήκους 5cm ενώ για τα δυο μεγαλύτερα μήκη παρατηρείται αυξανόμενη ανισορροπία η οποία δημιουργείται από τις υψηλότερες ταχύτητες που δημιουργούνται λόγω του πλέγματος.

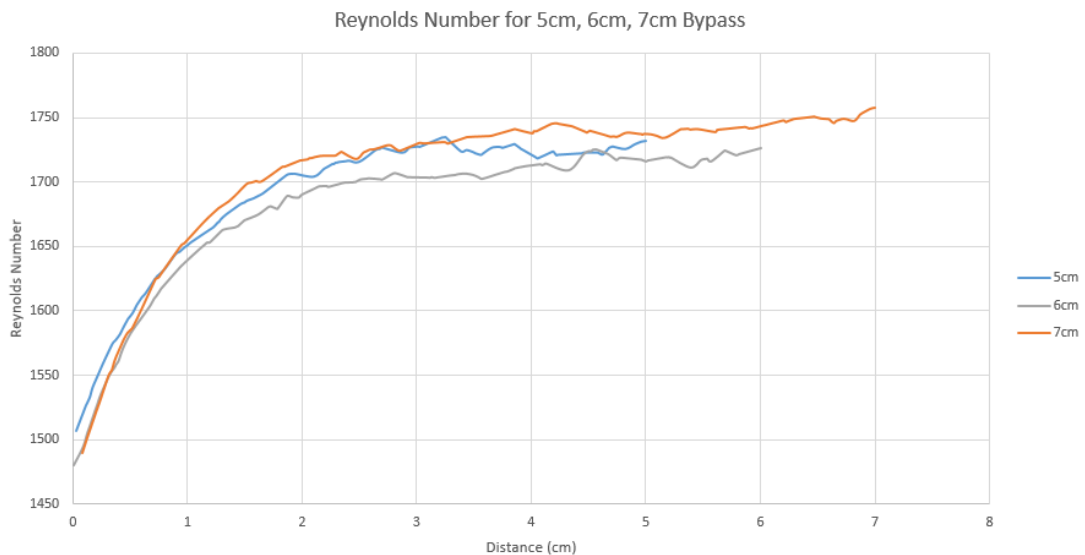
Παρατηρείται επίσης ότι οι ταχύτητες κατά μήκος των σωλήνων και για τις τρεις περιπτώσεις να έχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους, μετά τα 3cm από την είσοδο του bypass η ροή έχει αναπτυχθεί και η ταχύτητα παραμένει σταθερή κάνοντας εφικτή την μέτρηση της ροής στα 2cm από την έξοδο του bypass.



Σχήμα 2-47. Αριθμός Reynolds κατά μήκος το κέντρο του bypass μήκους 5cm



Σχήμα 2-48. Αριθμός Reynolds κατά μήκος το κέντρο του bypass μήκους 7cm



Σχήμα 2-49. Σύγκριση αριθμών Reynolds κατά μήκος του κέντρου των bypass με μήκος 5,6 και 7cm

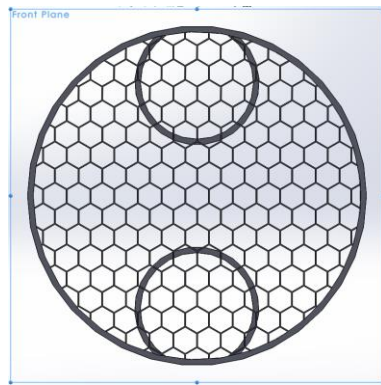
Ο αριθμός Reynolds για όλες τις εφαρμογές παραμένει κάτω από 1800 υποδεικνύοντας στρωτή ροή, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό για τα βέλτιστα αποτελέσματα κατά την μέτρηση της ταχύτητας της.

Ως βέλτιστο μήκος του bypass επιλογή για την συγκεκριμένη εφαρμογή κρίνεται το μήκος των 5cm του bypass προσφέροντας την μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ του πλέγματος και την είσοδο του bypass καθώς και την πλήρη ανάπτυξη της ροής κατά το μήκος του.

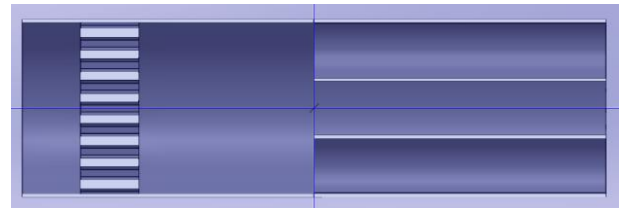
## 2.7 Μελέτη εφαρμογής διπλού bypass

Μια προοπτική εξέλιξης της γεωμετρίας με σκοπό την βελτιστοποίηση της είναι η δημιουργία διάταξης με 2 bypass. Η γεωμετρία αυτή παρέχει συμμετρία και έχει ως σκοπό την βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος καθώς για την αστοχία του υλικού απαιτείται η ταυτόχρονη αποτυχία δύο αυτούσιων αισθητήρων. Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση αισθητήρων με διαφορετικό ιδανικό εύρος μέτρησης ταχύτητας ροής αυξάνοντας την ακρίβεια για περισσότερες εφαρμογές και καθιστώντας το σύστημα πιο προσαρμοστικό. Η ευαισθησία σε παρεμβολές και ακραίες τιμές επίσης βελτιώνεται δραματικά καθώς μπορεί να γίνει σύγκριση δύο διαφορετικών μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η αντοχή και η αξιοπιστία της κατασκευής.

Η γεωμετρία που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει δύο bypass μήκους 5cm και διαμέτρου 0,95cm, το πλέγμα διαμέτρου 20mm και τον σωλήνα με εσωτερική διάμετρο 2,9cm και μήκος 10cm.

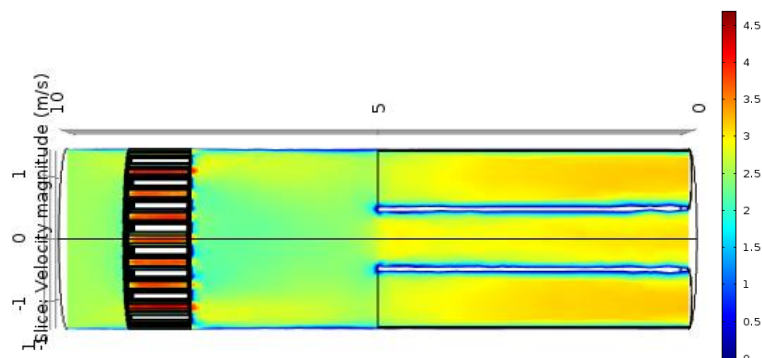


a) Εμπρόσθια όψη



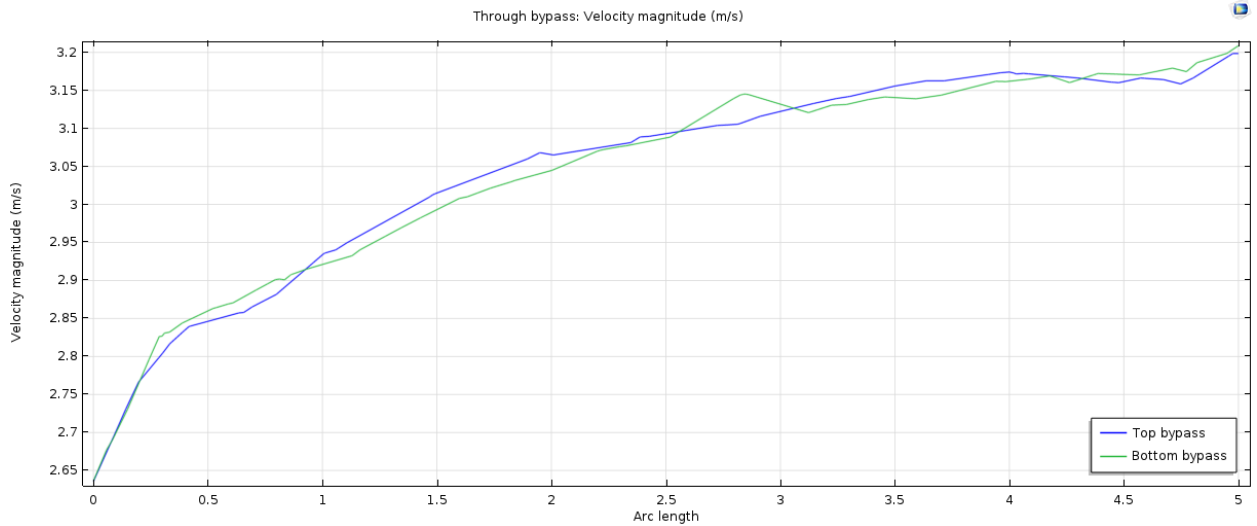
b) Πλάγια όψη

Σχήμα 2-50. Γεωμετρία διπλού Bypass.

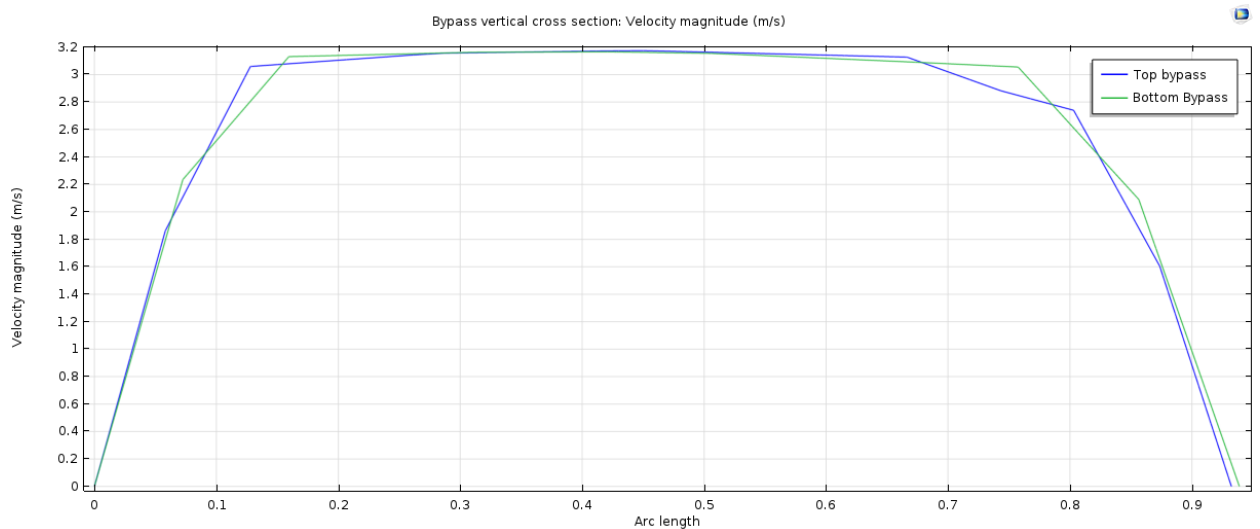


Σχήμα 2-51. Τρισδιάστατη απεικόνιση ροής πλάγιας όψης διπλού bypass



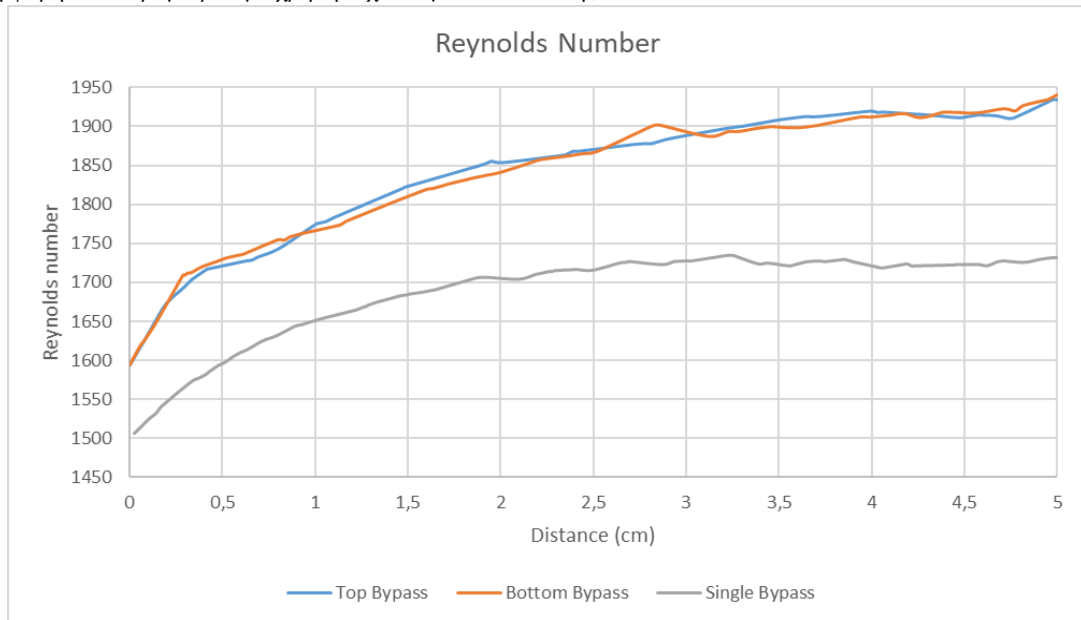


**Σχήμα 2-52. Αποτελέσματα ροής κατά μήκος του κέντρου των bypass**



**Σχήμα 2-53. Αποτελέσματα ροής κατά μήκος της διαμέτρου των bypass στην έξοδο της ροής**

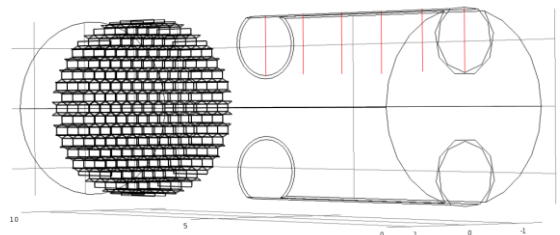
Στην πλάγια όψη που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-511 παρατηρείται ότι ο χώρος από τον οποίο μπορεί να περάσει το αέριο είναι μικρότερος σε σχέση με την περίπτωση του ενός bypass. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας της ροής όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα της ταχύτητας του Σχήμα 2-52 καθώς και από τον αριθμό Reynolds στο Σχήμα 2-54. Οι μέσες ταχύτητες του Σχήμα 2-56 κατά μήκος των διαμέτρων στις εξόδους των δύο bypass ταυτίζονται σχεδόν πλήρως, γεγονός το οποίο οφείλεται στον συμμετρικό σχεδιασμό της κατασκευής τους.



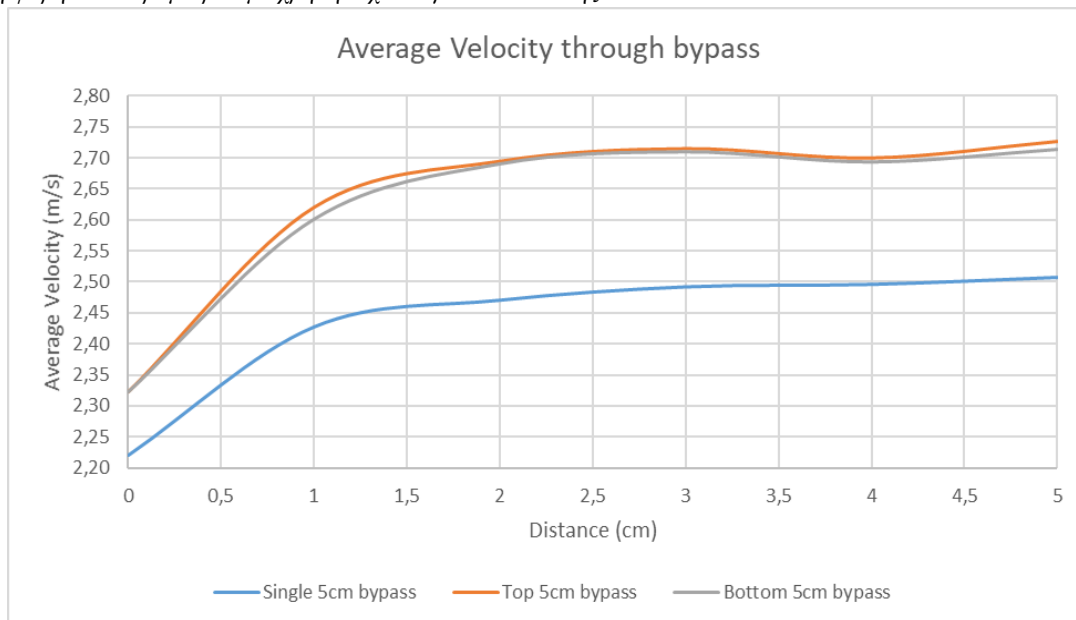
**Σχήμα 2-54. Αριθμός Reynolds κατά μήκος του κέντρου των bypass**

Ο αριθμός Reynolds αυξάνεται κατά 100 μονάδες στην είσοδο και παραπάνω από 200 μονάδες στην έξοδο λόγω της αυξημένης ταχύτητας, παρά την μεγάλη αύξηση η μέγιστη τιμή παραμένει κάτω από 2000 και συνάμα εντός το εύρος της στρωτής ροής.

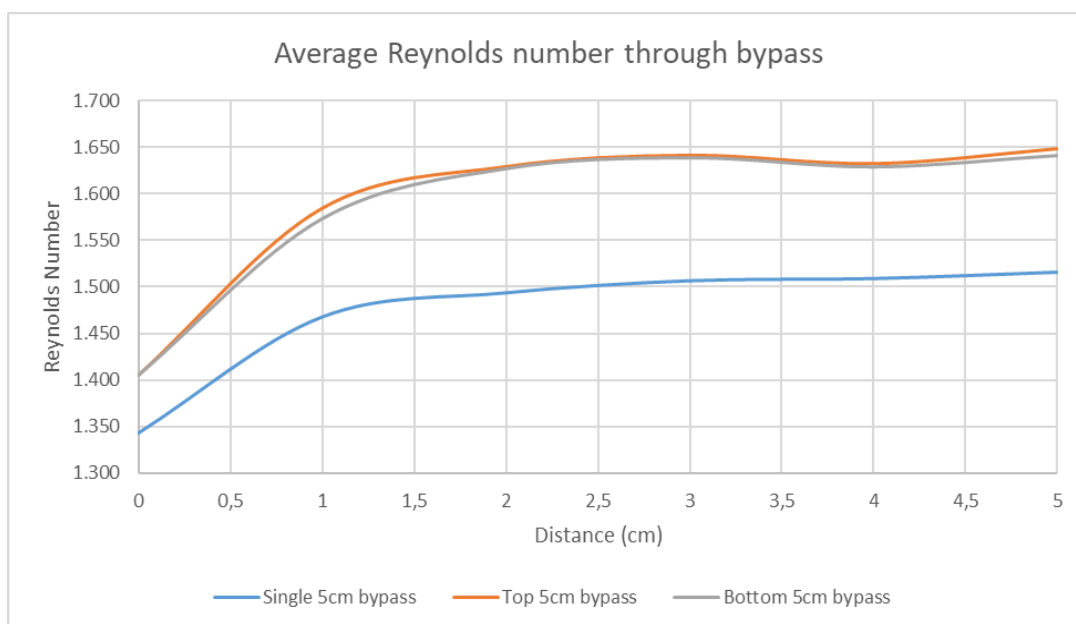
Έπειτα έγιναν μετρήσεις για την μέση ταχύτητα κατά μήκος των bypass, τα αποτελέσματα εξάχθηκαν μετρώντας την μέση τιμή της ταχύτητας κατά μήκος της διαμέτρου των bypass όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-56 και έπειτα δημιουργήθηκε το αντίστοιχο Σχήμα 2-57 με τα αποτελέσματα στα οποία η απόσταση 0 είναι η είσοδος της ροής του bypass και η απόσταση 5 η έξοδος του.



**Σχήμα 2-55. Υπολογισμός της μέσης ταχύτητας κατά μήκος των bypass**



Σχήμα 2-56. Αποτελέσματα μέσης ταχύτητας κατά μήκος των bypass.



Σχήμα 2-57. Μέση τιμή αριθμού Reynolds κατά μήκος των bypass

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η ταχύτητα στο κέντρο του bypass αναπτύσσεται πλήρως μετά από τα 4cm από την είσοδο, η μέση ταχύτητα όμως εξομαλύνεται το ίδιο γρήγορα με αυτή του ενός bypass (Σχήμα 2-56). Αυτή η συμπεριφορά θα μπορούσε να υποδείξει την διαμόρφωση στρωτής ροής κατά την οποία η ταχύτητα στο κέντρο του σωλήνα είναι μέγιστη και κοντά στα τοιχώματα ελάχιστη τονίζοντας παράλληλα της σημασίας της μέσης ταχύτητας για την δημιουργία μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας.

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Προσομοιώσεις θερμικού αισθητήρα.

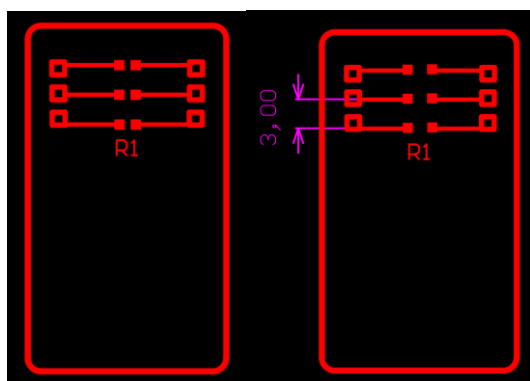
Οι προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας σε θερμικούς αισθητήρες σπιρομέτρων είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης αυτών των συσκευών. Στα σπιρόμετρα, οι θερμικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ακριβή μέτρηση της ροής του αέρα μέσω της ανίχνευσης των αλλαγών στη θερμοκρασία που προκαλούνται από τη ροή του ρευστού. Μέσω προσομοιώσεων πρέπει να προσδιοριστούν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά για την καλύτερη δυνατή απόδοση και ακρίβεια των μετρήσεων.

#### 3.1 Θερμικός αισθητήρας ροής

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι θερμικού τύπου και κατασκευάστηκε με την χρήση συμβατικών μεθόδων εκτύπωσης πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB). Χρησιμοποιήθηκαν τρία θερμίστορ θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (PTC) με ονομαστική αντίσταση 100 Ohm για θερμοκρασία μηδέν βαθμούς κελσίου. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας θερμού νήματος οποιοδήποτε από τα θερμίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας ροής με την θέρμανση του σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και την μέτρηση της είτε της πτώσης της θερμοκρασίας λόγω της ψύξης του αέρα που διέρχεται από αυτό, ή μετρώντας το ρεύμα που είναι αναγκαίο για την αντιστάθμιση της ψύξης και την διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας του στοιχείου [28]. Η συγκεκριμένη λειτουργία αποφέρει ακριβείς αποτελέσματα ακόμα και για πολύ μικρές ροές [29] [21] [23].

Ένας άλλος τρόπος λειτουργίας του αισθητήρα είναι με την χρήση της θερμοδομετρικής αρχής λειτουργίας, κατά την οποία το μεσαίο θερμοστοιχείο θερμαίνεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασίας και με βάση της διαφοράς θερμοκρασίας των διπλανών στοιχείων μπορεί να προσδιοριστεί η ταχύτητα καθώς και η κατεύθυνση της ροής [17-18].

Η κύρια μεταβλητή στον σχεδιασμό ενός τέτοιου θερμικού αισθητήρα είναι η απόσταση μεταξύ των στοιχείων καθώς επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα ροής που είναι ιδανική για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Για μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των αισθητήρων το ρευστό έχει παραπάνω χρόνο να επαναφέρει την θερμοκρασία του από το θερμαινόμενο στοιχείο μέχρι το αισθητήριο, κάτι που μπορεί να μειώσει την διαφορά θερμοκρασίας που μετριέται κάνοντας το ιδανικότερη επιλογή για μέτρηση μεγαλύτερων ταχυτήτων ροής. Για χαμηλές ταχύτητες το ρευστό παραμένει για παραπάνω χρόνο κοντά στο θερμαινόμενο στοιχείο αυξάνοντας την θερμοκρασία του κάνοντας την απόσταση των στοιχείων πιο κρίσιμη, αυξάνοντας την ευαισθησία του αισθητήρα για μικρότερες ταχύτητες ροής.



Σχήμα 3-1. Σχηματικό του κυκλώματος θερμικού αισθητήρα.

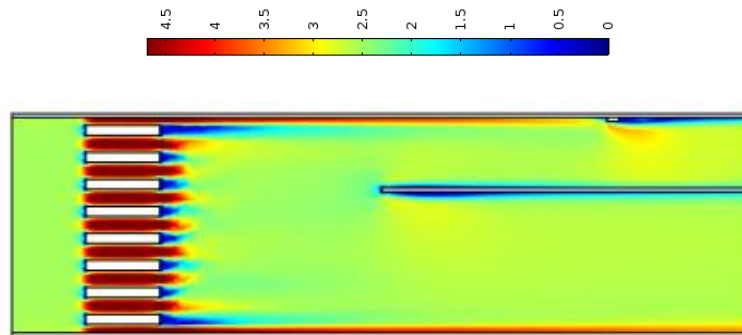
### 3.2 Μελέτη θερμοκρασιακής βαθμίδας για σταθερή ταχύτητα ροής εισόδου

Επιλέχθηκαν τρεις θερμοκρασίες για τις οποίες εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-1, η ταχύτητα ροής εισόδου παρέμεινε ίδια στα 2,523m/s.

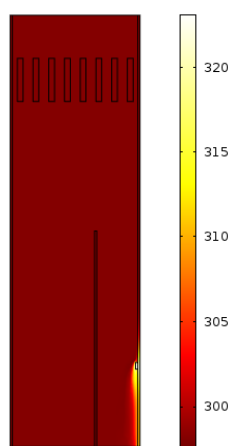
Πίνακας 3-1. Θερμοκρασίες προσομοιώσεων.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Θερμοκρασία αισθητήρα	Διαφορά θερμοκρασιών- $\Delta T$
25 °C ή 298,15 K	50°C ή 323,15 K	25
25 °C ή 298,15 K	100°C ή 373,15 K	75
25 °C ή 298,15 K	160°C ή 433,15K	135

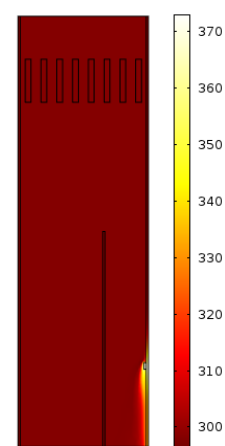
Εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας και για την σύγκριση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 3-2. Αποτελέσματα ροής για το δισδιάστατο μοντέλο.



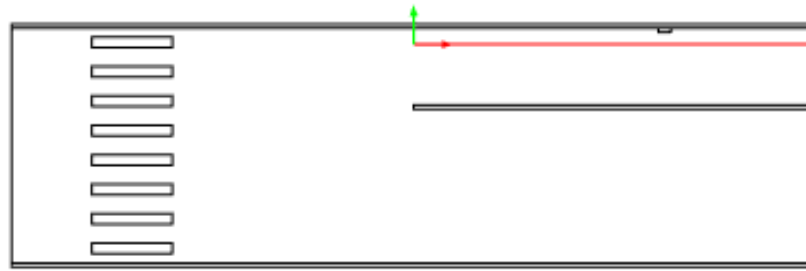
Σχήμα 3-3. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας για το δισδιάστατο μοντέλο και  $\Delta T=25$ .



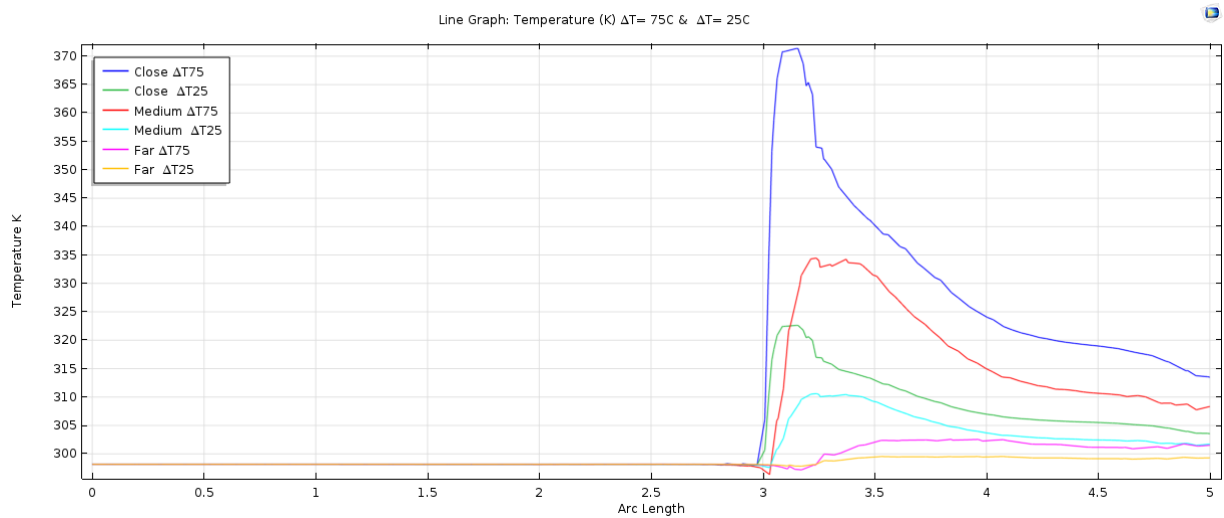
Σχήμα 3-4. . Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας για το δισδιάστατο μοντέλο και  $\Delta T=75$ .

Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτόπωσης

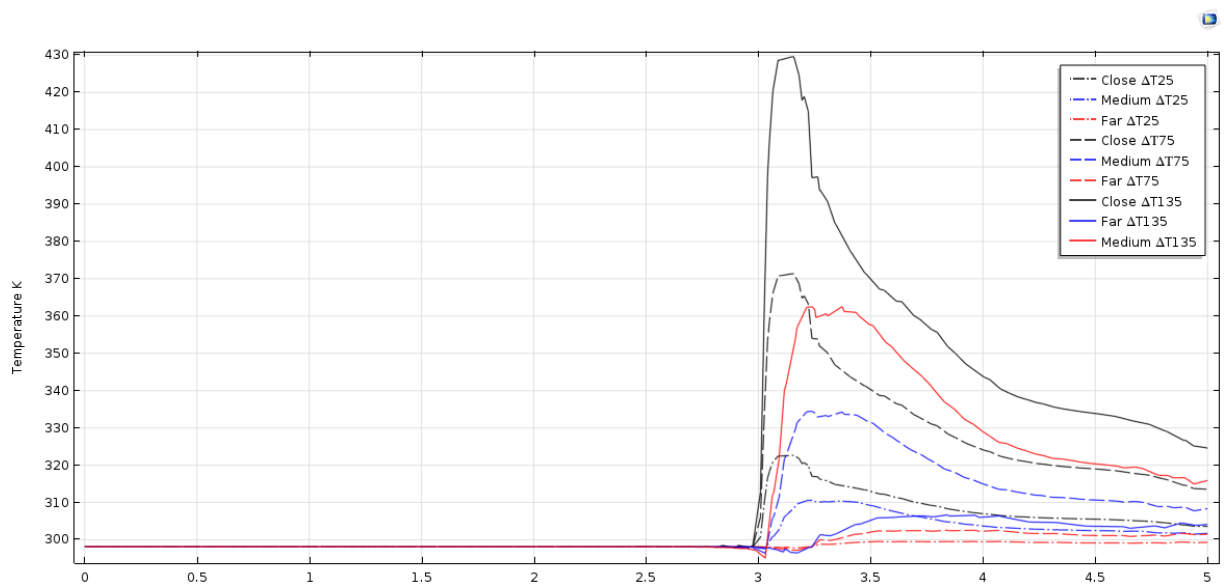
Λήφθηκαν μετρήσεις για τρεις διαφορετικές ευθείες κατά μήκος του bypass , η κοντινότερη (close) απέχει κάθετη απόσταση 0,01 cm από το θερμοστοιχείο , η μεσαία (medium) 0,05cm και η πιο απομακρυσμένη (far) 0,15cm. Η τοποθέτηση του θερμοστοιχείου έχει γίνει για απόσταση 1,8cm από την έξοδο του bypass.



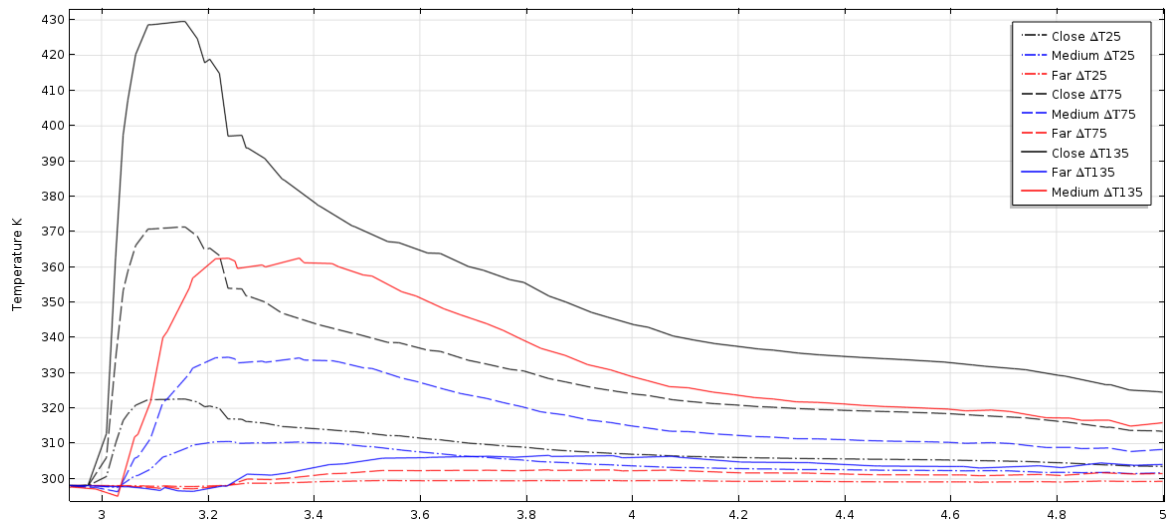
Σχήμα 3-5. Κοντινότερη ευθεία κατά μήκος του bypass με κάθετη απόσταση 0,01cm



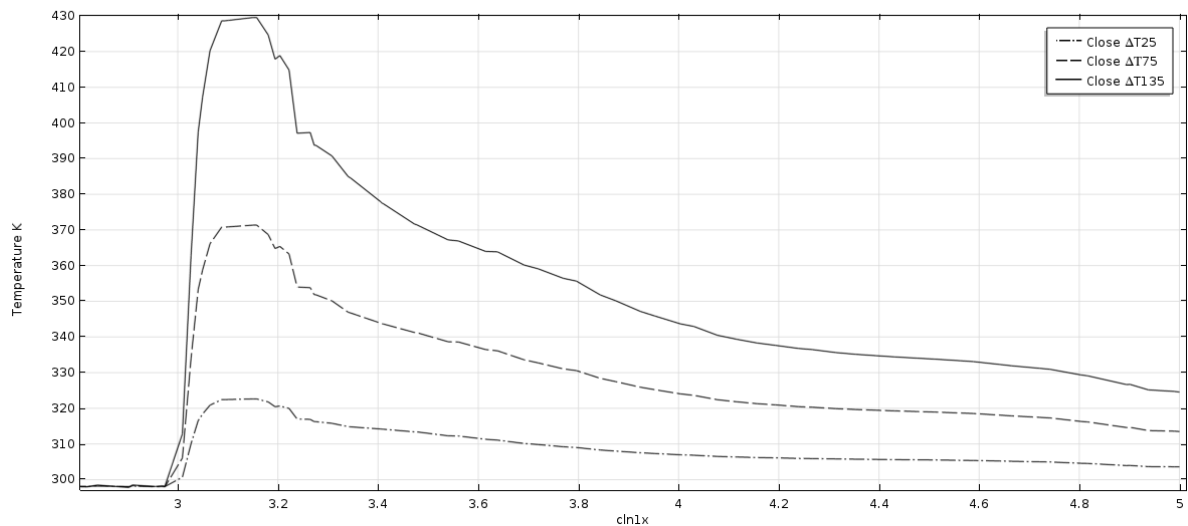
a)  $\Delta T = 25$  και  $\Delta T=75$



b)  $\Delta T = 25$ ,  $\Delta T=75$  και  $\Delta T=135$



c)  $\Delta T = 25$ ,  $\Delta T=75$  και  $\Delta T=135$



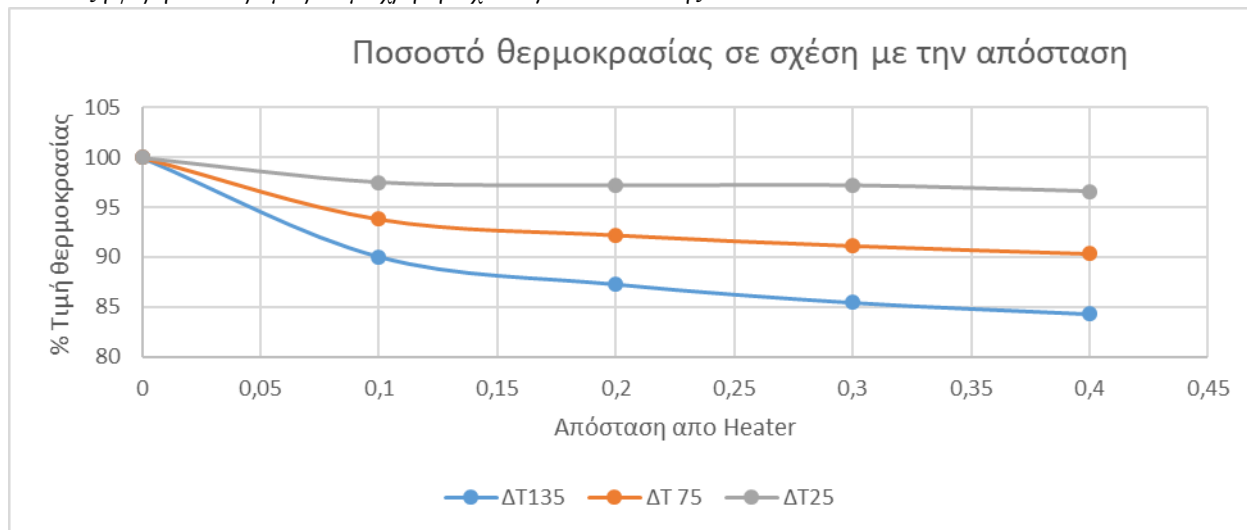
α) Για κοντινή απόσταση με  $\Delta T = 25$ ,  $\Delta T=75$  και  $\Delta T=135$

Σχήμα 3-6. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας

Στο παραπάνω Σχήμα 3-6 το θερμοστοιχείο βρίσκεται στην θέση 3,045 μέχρι 3,2 cm. Από το διάγραμμα της απόκρισης του θερμοαντήρα στο 2D για την κοντινότερη απόσταση μπορούμε να εξάγουμε τις παρακάτω μετρήσεις στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2. Μετρήσεις μεταφοράς θερμότητας 2D

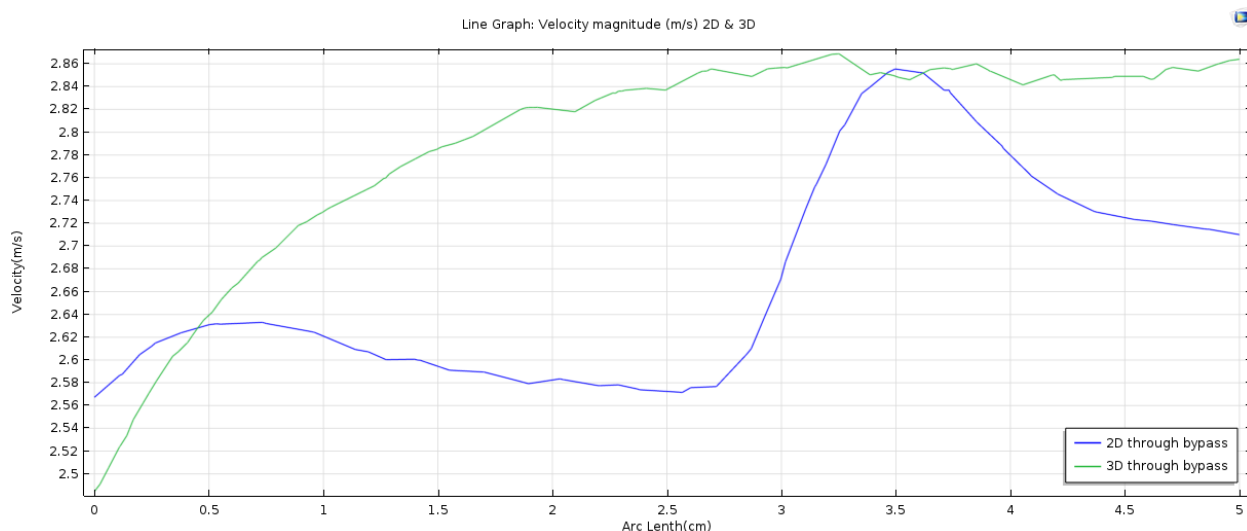
Θερμοκρασία Heater (K) ( $\Delta T$ )	Θερμοκρασία 0,1cm (K)(%)	Θερμοκρασία 0,2cm (K)(%)	Θερμοκρασία 0,3cm (K)(%)	Θερμοκρασία 0,4cm (K)(%)
433,15 (135)	390 (90,03%)	378 (87,27)	370 (85,42)	365 (84,27)
373,15 (75)	350 (93,80)	344 (92,19)	340 (91,12)	337 (90,13)
323,15 (25)	315 (97,38)	314 (97,17)	314 (97,17)	312 (96,55)



**Σχήμα 3-7. Ποσοστό θερμοκρασίας σε σχέση με τη κάθετη απόσταση**

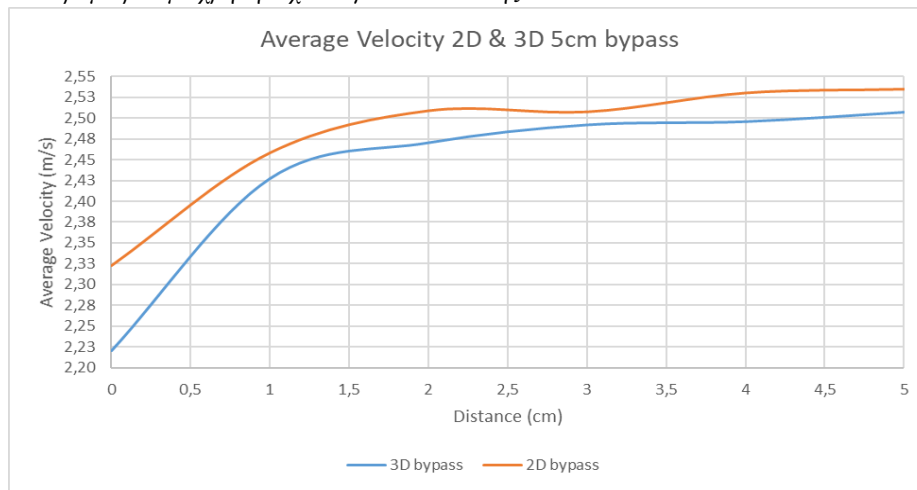
Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά μετά το θερμαντήρα (distance >3,2cm) και έχοντας λιγότερο από το 50% του  $\Delta T$  για απόσταση 0,5cm. Επίσης η μεγαλύτερη πτώση της θερμοκρασίας σε σχέση με την απόσταση εμφανίζεται για τα μεγαλύτερα  $\Delta T$ , κάτι το οποίο οφείλεται στην μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας του θερμαντήρα σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η ταχύτητα εισόδου είναι 2,523m/s όπως και στις αντίστοιχες 3D προσομοιώσεις. Συγκρίνοντας με τα προηγούμενα αποτελέσματα, υπάρχει μια μικρή μείωση της ταχύτητας στο κέντρο του bypass σε σχέση με την αντίστοιχη μέτρηση της 3D προσομοίωσης, η ταχύτητα στο σημείο του αισθητήρα στην δισδιάστατη προσομοίωση αντιστοιχεί σε αυτή που έχει μετρηθεί από την τρισδιάστατη, η μέση τιμή της ταχύτητας όμως είναι ελάχιστα αυξημένη και έχει πολύ μικρή απόκλιση.



**Σχήμα 3-8. Αποτελέσματα ταχύτητας ροής κατά μήκος το κέντρο του bypass.**





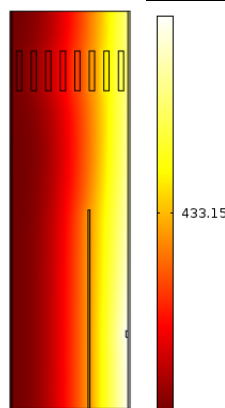
Σχήμα 3-9. Αποτελέσματα μέσης ταχύτητας ροής κατά μήκος το κέντρο του bypass.

### 3.3 Μελέτη θερμοκρασιακής βαθμίδας για διάφορες ταχύτητες ροής εισόδου.

Για την εύρεση της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των στοιχείων του αισθητήρα πρέπει να ληφθεί υπόψη το εύρος της ταχύτητας ροής που θα μπορεί να γίνει ανιχνεύσιμο και να μετρηθεί με καλή ακρίβεια. Για αυτό τον σκοπό εκτελέστηκαν προσομοιώσεις στο δισδιάστατο μοντέλο για τις πέντε διαφορετικές ταχύτητες εισόδου του Πίνακα 3-3.

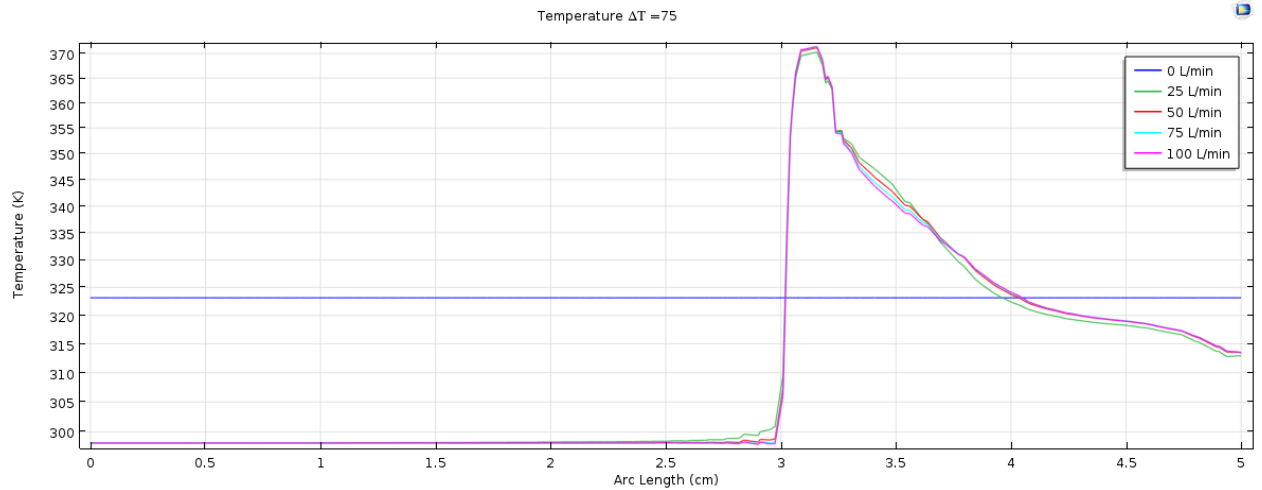
Πίνακας 3-3. Ταχύτητες εισόδου σε L/min και m/s.

L/min	Inlet speed (m/s)	Reynolds Number
0	0	0
25	0,63	1164
50	1,26	2329
75	1,89	3493
100	2,52	4658

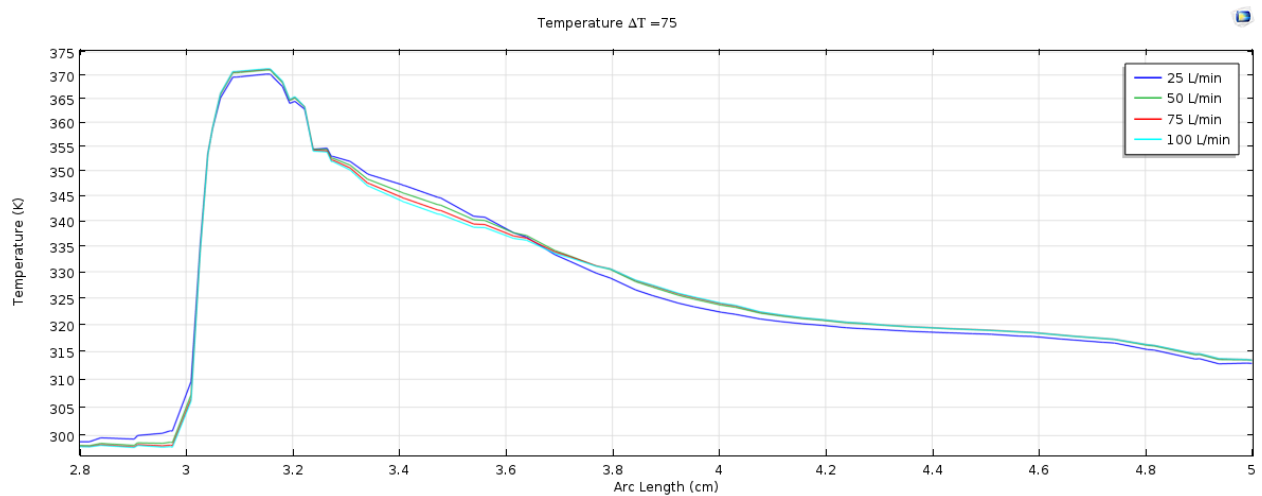


Σχήμα 3-10. Δισδιάστατη προσομοίωση για ταχύτητα ροής 0m/s και  $\Delta T$  75

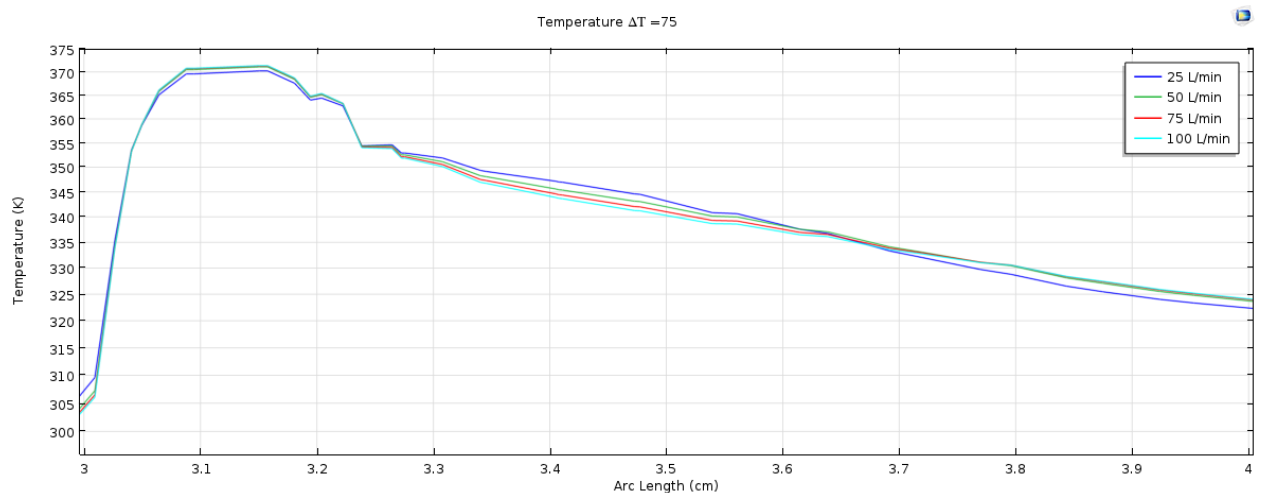
Η διαφορά θερμοκρασίας του αισθητήρα σε σχέση με το περιβάλλον παραμένει σταθερή και ίση με  $\Delta T=75$  για τις παρακάτω μετρήσεις



**a) Εύρος 0-5cm**



**b) Εύρος 2,8 – 5cm, χωρίς μέτρηση μηδενικής ροής**



**c) Εύρος 3-4cm, χωρίς μέτρηση μηδενικής ροής**

**Σχήμα 3-11. Αποτελέσματα δισδιάστατων προσομοιώσεων κατά μήκος του bypass με κάθετη απόσταση από το θερμικό στοιχείο 0,01cm.**

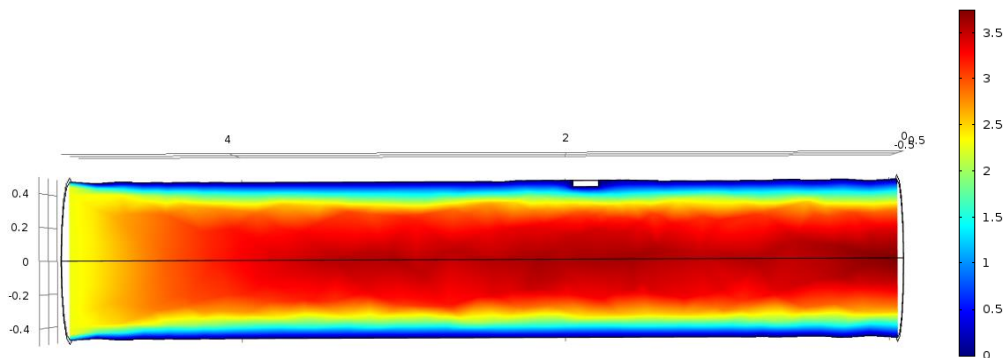
Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτόπισης

Η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με την ροή είναι της τάξης των 4K, Για μικρότερη ταχύτητα ροής παρατηρείται μεγαλύτερη θερμοκρασία καθώς το ρευστό έχει περισσότερο χρόνο να απορροφήσει θερμοκρασία από το θερμαινόμενο στοιχείο.

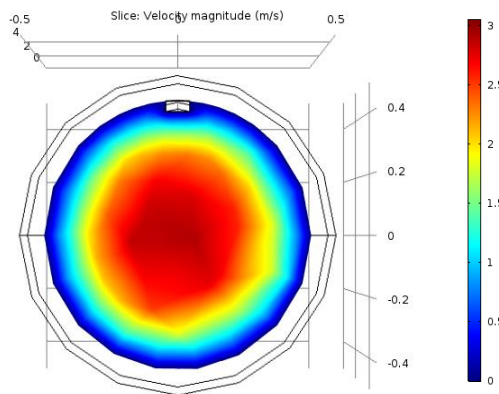
Παρατηρείται γραμμική συμπεριφορά στο διάστημα 3,3 με 3,55 που αντιστοιχεί σε απόσταση 1 με 3,5 χιλιοστά από το θερμαντήρα.

### 3.4 Τρισδιάστατες προσομοιώσεις συστήματος θερμικού αισθητήρα.

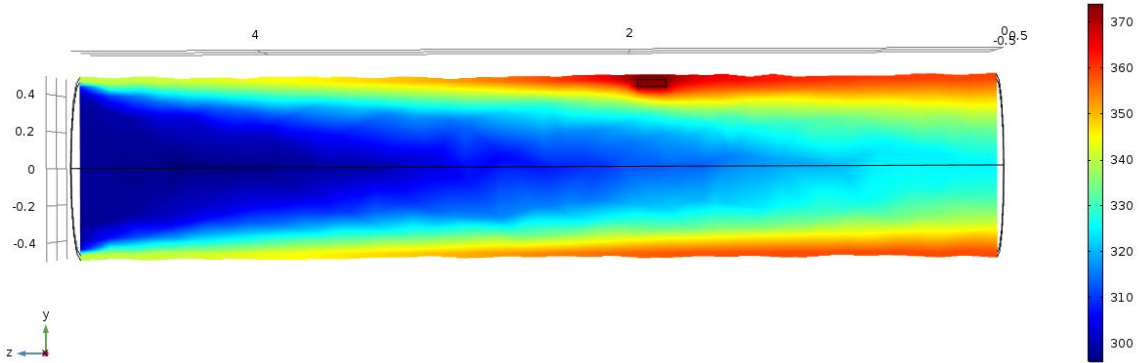
Από το προηγούμενο κεφάλαιο παρατηρούμε ότι για το bypass των 5 cm, η ταχύτητα από στο κέντρο του σταθεροποιείται στα 2.85 m/s και η μέση ταχύτητα σταθεροποιείται στα 2.5m/s. Παρακάτω γίνονται δοκιμές σε 3D μοντέλο με διαστάσεις ίδιες με αυτές του bypass (0.95cm διάμετρο και 5cm μήκος). Δημιουργήθηκε η αντίστοιχη γεωμετρία και έγιναν δοκιμές για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η ταχύτητα του μέσου διάδοσης σταθεροποιείται στα 2,85m/s (έχοντας όμως μικρότερη μέση ταχύτητα) και στην δεύτερη περίπτωση η μέση ταχύτητα σταθεροποιείται στα 2,5m/s για μεγαλύτερη μέγιστη ταχύτητα.



Σχήμα 3-12. Πλάγια όψη αποτελεσμάτων ταχύτητας ροής τρισδιάστατης προσομοίωσης για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s

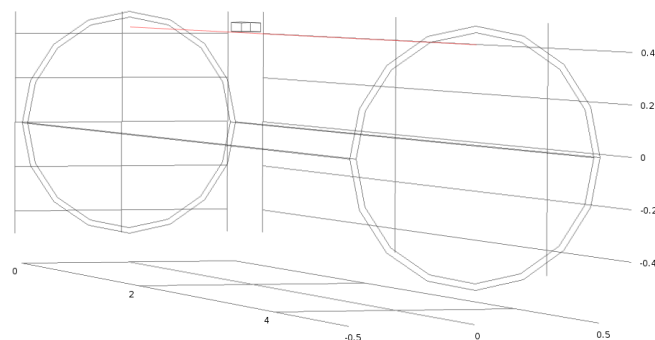


a) Εμπρόσθια διατομή

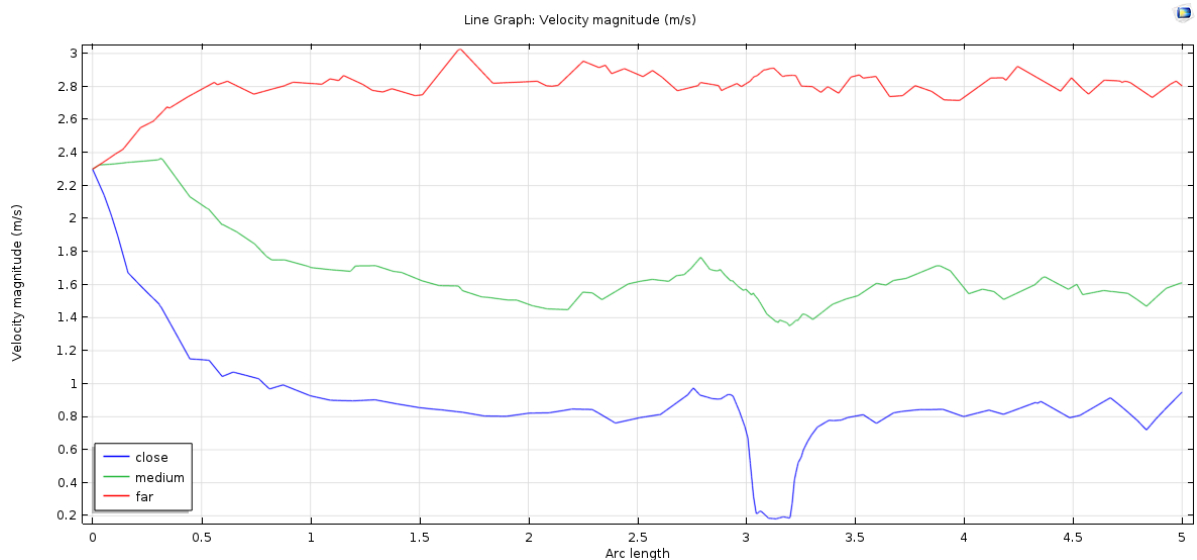


b) Πλάγια όψη

Σχήμα 3-13. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας τρισδιάστατης προσομοίωσης για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s και  $\Delta T=75$



Σχήμα 3-14. Μετρήσεις κατά μήκος του bypass για κάθετες αποστάσεις από το θερμοστοιχείο.

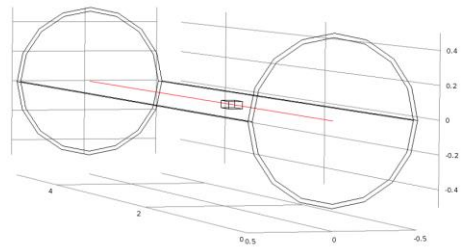


Σχήμα 3-15. Αποτελέσματα για κάθετη απόσταση close (0,01cm), medium (0,05cm) και far (0,15cm)

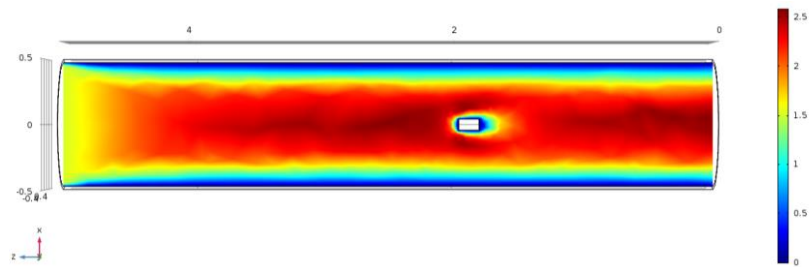
Στο Σχήμα 2-13 παρατηρείται το φαινόμενο της μηδενικής ολίσθησης κατά το οποίο η ταχύτητα στο όριο της επιφάνειας του σωλήνα είναι μηδενική. Το γεγονός αυτό επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων καθώς το θερμικό στοιχείο είναι τοποθετημένο πολύ κοντά σε αυτό το όριο. Στην αρχική γεωμετρία το πρόβλημα αυτό καταπολεμάται με την χρήση του πλέγματος καθώς και του bypass στο οποίο εισέρχεται η ροή από το πλέγμα η οποία δεν έχει αναπτύξει οριακό στρώμα.

Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης

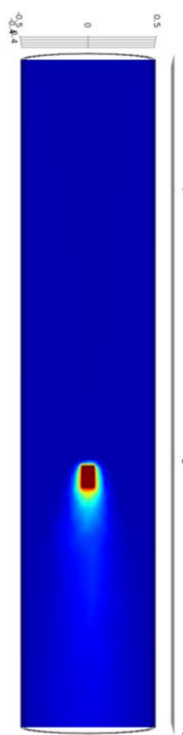
Έπειτα εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για ταχύτητα εισόδου 1.8m/s που κατά μήκος του σωλήνα αναπτύσσονται σε 2,85m/s



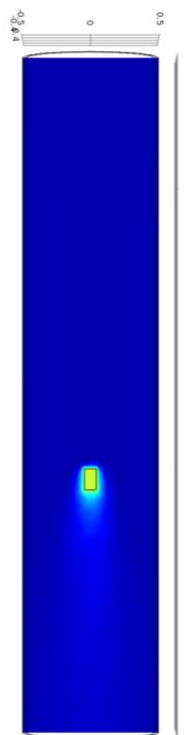
Σχήμα 3-16. Μετρήσεις κατά μήκος του bypass διαμέσου του θερμοστοιχείου.



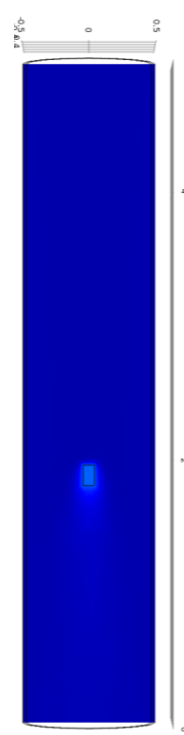
Σχήμα 3-17. Πλάγια όψη αποτελεσμάτων ταχύτητας ροής τρισδιάστατης προσομοίωσης για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s



Σχήμα 3-18. a)  $\Delta T = 135$

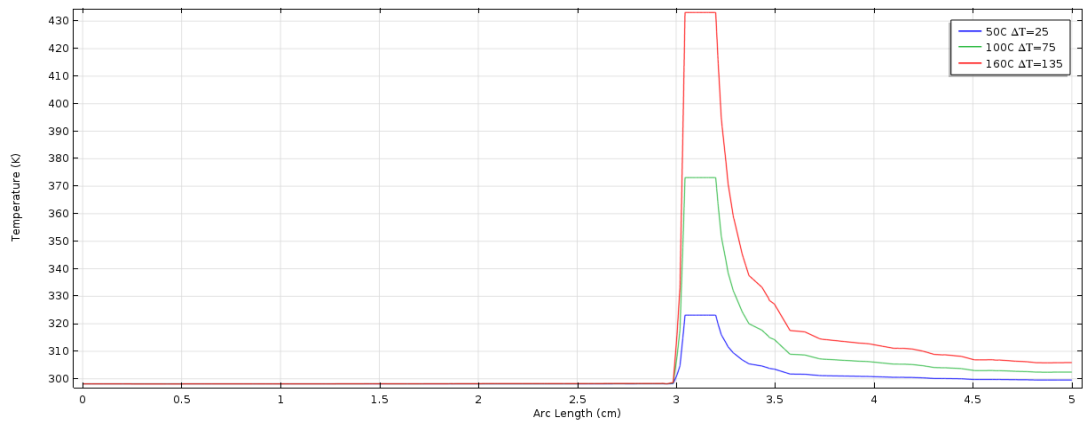


Σχήμα 3-19. b)  $\Delta T = 75$

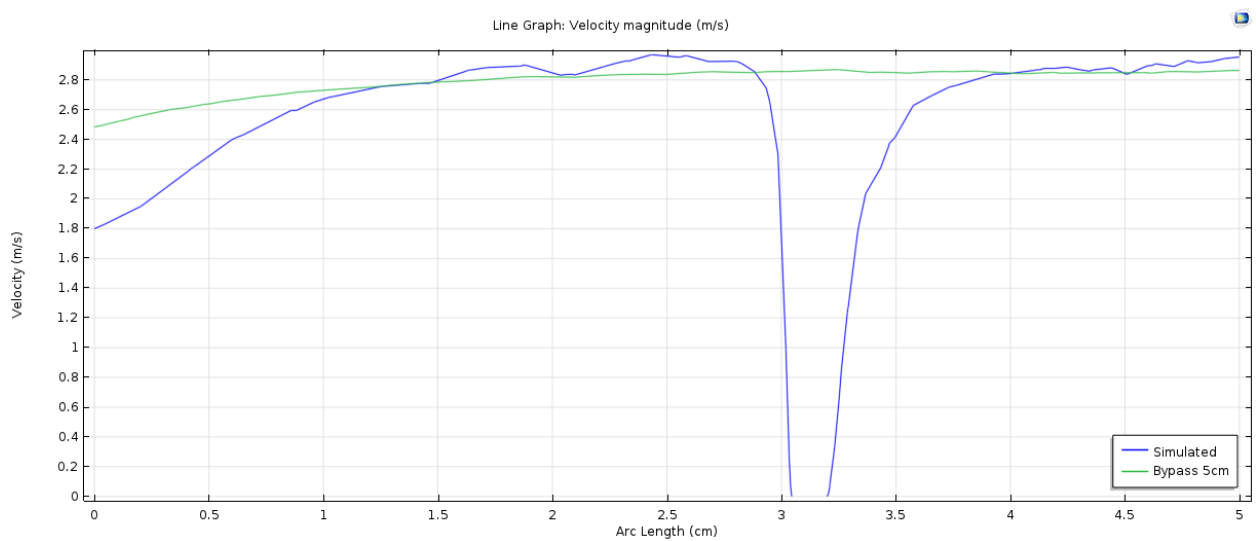


Σχήμα 3-20. c)  $\Delta T = 25$

Σχήμα 3-21. Πλάγια όψη αποτελεσμάτων μεταφοράς θερμότητας τρισδιάστατης προσομοίωσης για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s

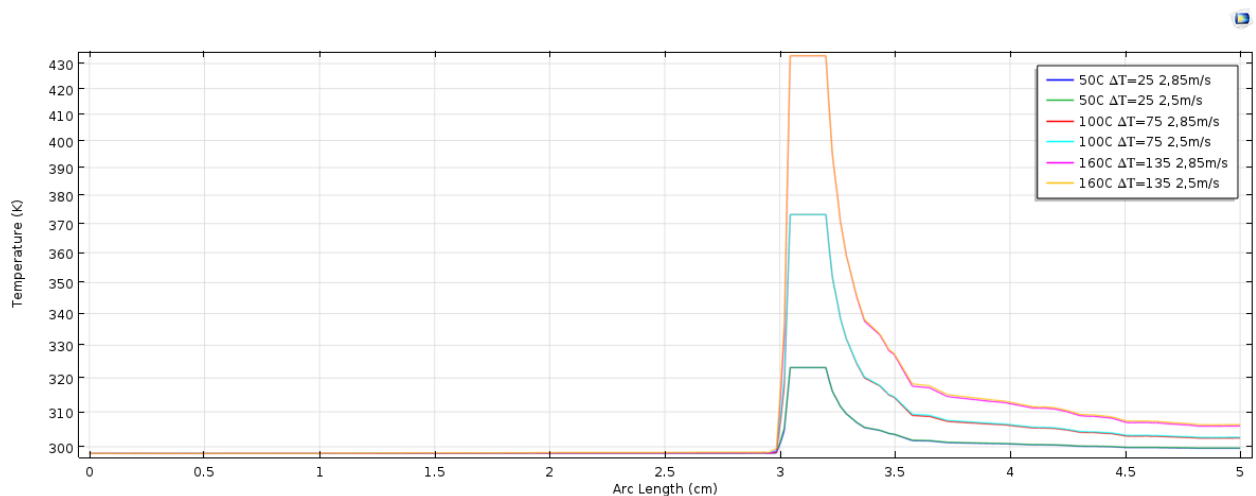


Σχήμα 3-22. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας θερμοστοιχείου στο κέντρο του σωλήνα για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s.



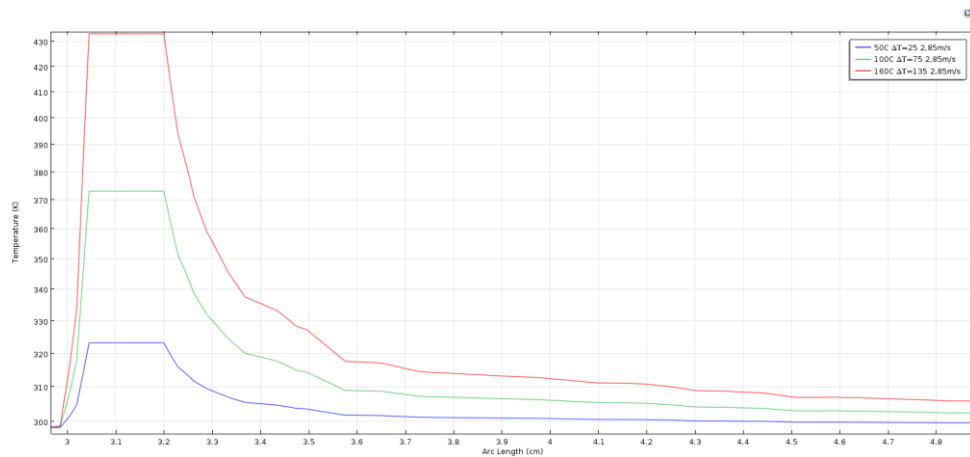
Σχήμα 3-23. Αποτελέσματα ταχύτητας ροής κατά μήκος του κέντρου του σωλήνα.

Έπειτα γίνονται οι ίδιες μετρήσεις για ταχύτητα 2,5m/s που είναι και η μέση ταχύτητα που μετρήσαμε στην [Ενότητα 2.2](#) και αντιστοιχεί σε ταχύτητα εισόδου 1,52m/s



Σχήμα 3-24. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας θερμοστοιχείου στο κέντρο του σωλήνα για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s και 2,5m/s.

Παρατηρείται ότι οι κυματομορφές της θερμοκρασίας σε σχέση με την ταχύτητα ροής ταυτίζονται σχεδόν πλήρως για τις δύο ταχύτητες ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-24, με βάση αυτό το στοιχείο μπορεί να αποφανθεί ότι η μεταβολή της ταχύτητας κατά 0,35 m/s δεν είναι αρκετή για να υπάρξει διαφορά στην απόκριση του θερμοστοιχείου για οποιαδήποτε θερμοκρασία.



**Σχήμα 3-25. Αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας θερμοστοιχείου στο κέντρο του σωλήνα για ταχύτητα εισόδου 2,85 m/s.**

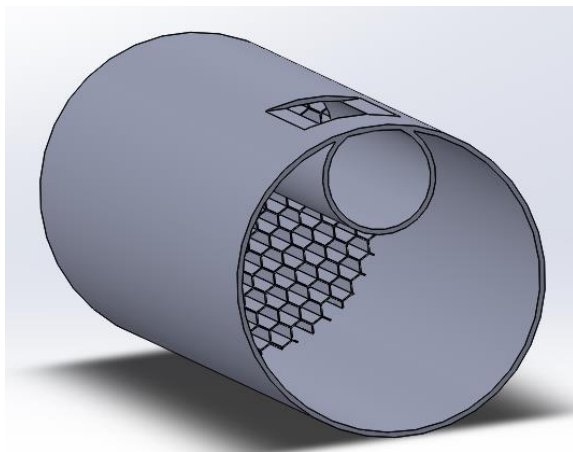
Η θερμοκρασία που μετρήθηκε από τις τρισδιάστατες προσομοιώσεις μειώνεται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με τις μετρήσεις των αντίστοιχων δισδιάστατων δοκιμών. Ένας από τους παράγοντες που μπορεί να συμβάλουν σε αυτή την συμπεριφορά είναι η γεωμετρία στην οποία όλες οι πλευρές του αισθητήρα είναι εκτεθειμένες στην ροή και ως αποτέλεσμα η διάχυση της θερμοκρασίας είναι πολύ πιο έντονη.

Σύμφωνα με τα συνολικά αποτελέσματα η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων μπορεί να είναι 0,3cm έχοντας ένα μεγάλο εύρος χρήσης για διάφορες θερμοκρασίες και ταχύτητες ροής.

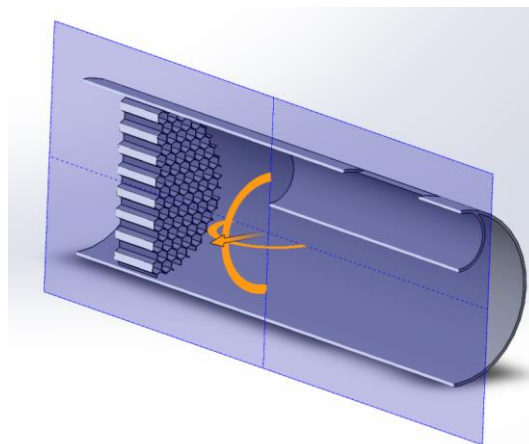
## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Πειραματική Διαδικασία

### 4.1 Τεχνολογία εκτύπωσης SLA.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μέσω στερεολιθογραφίας (SLA) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής κατά την οποία χρησιμοποιείται η ιδιότητα του φωτοπολυμερισμού για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων. Η διαδικασία ξεκινά με την έκθεση υγρής ρητίνης (φωτοπολυμερές) σε υπεριώδη ακτινοβολία, συνήθως από λέιζερ, το οποίο πολυμερίζει και στερεοποιεί σταδιακά τα στρώματα του υλικού σε τρισδιάστατη μορφή, σύμφωνα με το σχέδιο που έχει δοθεί από ένα ψηφιακό μοντέλο CAD. Οι εκτυπώσεις με την χρήση SLA προσφέρουν μεγάλη ταχύτητα, ακρίβεια και λεπτομέρεια, καθώς και τη δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων γεωμετριών, καθιστώντας την ιδανική για την υλοποίηση πρωτοτύπων. Είναι αναγκαία η επεξεργασία του εκτυπωμένου υλικού για την αφαίρεση υποστηρικτικών δομών και την πλήρη σκλήρυνση του αντικειμένου [30]. Η τελική γεωμετρία που εκτυπώθηκε εμφανίζεται στο παρακάτω Σχήμα 4-1 ενώ στο Σχήμα 4-2 μπορούν να διακριθούν καλύτερα οι εσωτερικές δομές.



Σχήμα 4-1. Μοντέλο τελικής γεωμετρίας

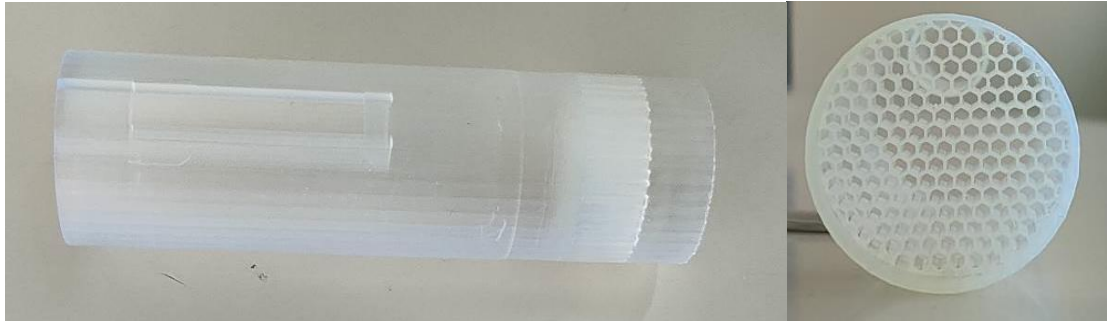


Σχήμα 4-2. Πλάγια τομή μοντέλου τελικής γεωμετρίας

### 4.2 Ανάπτυξη τελικού συστήματος και πειραματική διάταξη

Η συσκευασία κατασκευάστηκε με χρήση εκτυπωτή στερεολιθογραφίας (Formlabs Form 3+) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3, με ιδιαίτερα ικανοποιητική ποιότητα εκτύπωσης καθώς όλες οι δομές δημιουργήθηκαν με μεγάλη λεπτομέρεια όπως ήταν κατασκευασμένες στο CAD μοντέλο. Η συσκευασία αποτελείται από τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά. Τον κύριο σωλήνα που αποτελεί το περίβλημα της συσκευασίας και έχει εσωτερική διάμετρο 2.9cm με το πάχος των τοιχωμάτων ίσο με 2mm και συνολικό μήκος 10cm. Τον εσωτερικό σωλήνα παράκαμψης με εσωτερική διάμετρο 0,95cm και μήκος 5cm. Το εξάγωνο πλέγμα με διατομές των 20mm σε απόσταση 1cm από την είσοδο της ροής που. Καθώς και την οπή στην οποία τοποθετείται ο αισθητήρας με μήκος 3cm και πλάτος 9mm. Μετά την δημιουργία της δομής, αφαιρέθηκαν τα στηρίγματα τα οποία ήταν αναγκαία για την εκτύπωση της γεωμετρίας, αφαιρέθηκε η υγρή ρητίνη με την χρήση ισοπροπυλικής αλκοόλης και όλη η διάταξη εκτέθηκε σε UV φως για την πλήρη σκλήρυνση του υλικού.





Σχήμα 4-3. Εκτυπωμένη συσκευασία σπιρομέτρου.

Η πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε με διαδικασία φωτοευαίσθητης εγχάραξης τυπωμένης πλακέτας. Πιο συγκεκριμένα σχεδιάστηκε το κύκλωμα με την χρήση του λογισμικού Altium και έγινε η εκτύπωση του σε διαφανές φιλμ (Σχήμα 4-4). Έπειτα τοποθετήθηκε το σχέδιο πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα και εκτέθηκε σε UV φως καθιστώντας το φωτοευαίσθητο φιλμ διαλυτό στα επόμενα βήματα και προστατεύοντας το σχέδιο στα σημεία που δεν έχουν εκτεθεί στο φως. Η πλακέτα βυθίστηκε στο διάλυμα ανάπτυξης (developing solution) και έπειτα στο διάλυμα χάραξης (etching solution) για την αφαίρεση του περιττού φωτοευαίσθητου υλικού και του χαλκού αντίστοιχα. Έγινε κόψιμο της πλακέτας στις σωστές διαστάσεις, τρυπήθηκαν οι οπές και έγινε η κόλληση των αισθητήρων [31] καθώς και ακιδοσειράς για ευκολότερη σύνδεση (Σχήμα 4-5).

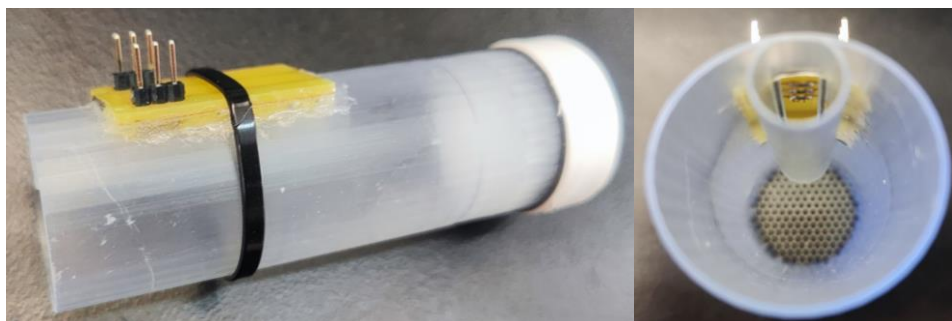


Σχήμα 4-4. Κύκλωμα σε διαφανές φιλμ.

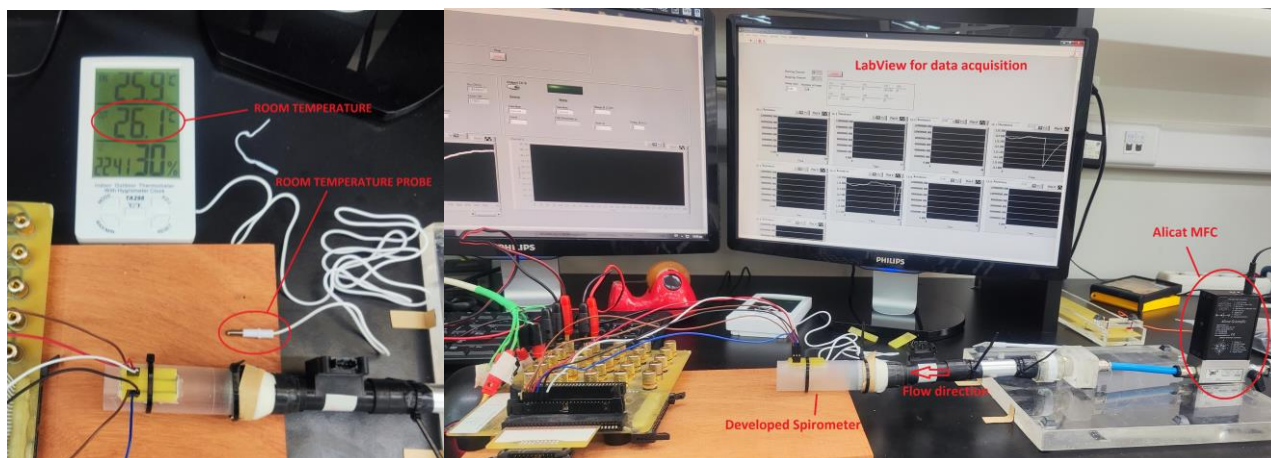


Σχήμα 4-5. Ολοκληρωμένη πλακέτα

Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στο προκαθορισμένο σημείο με τα ενεργά και παθητικά στοιχεία να είναι προς την έξοδο. Συνεπώς η θέση του αισθητήρα είχε απόσταση 1,8cm από την έξοδο. Έγινε μόνωση με χρήση πολύ λεπτής ταινία διπλής όψης στα σημεία επαφής της πλακέτας με τη συσκευασία καθώς και χρήση κόλας περιμετρικά στα σημεία επαφής με τη συσκευασία για την διασφάλιση αεροστεγής επαφής.



Σχήμα 4-6. Ολοκληρωμένη συσκευή



Σχήμα 4-7. Πειραματική Διάταξη

Για τον έλεγχο και την ρύθμιση της ταχύτητα ροής αέρα εισόδου χρησιμοποιήθηκε μετρητής ροής ακριβείας (Alicat MFC) με μέγιστη ταχύτητα ροής 25 L/min.

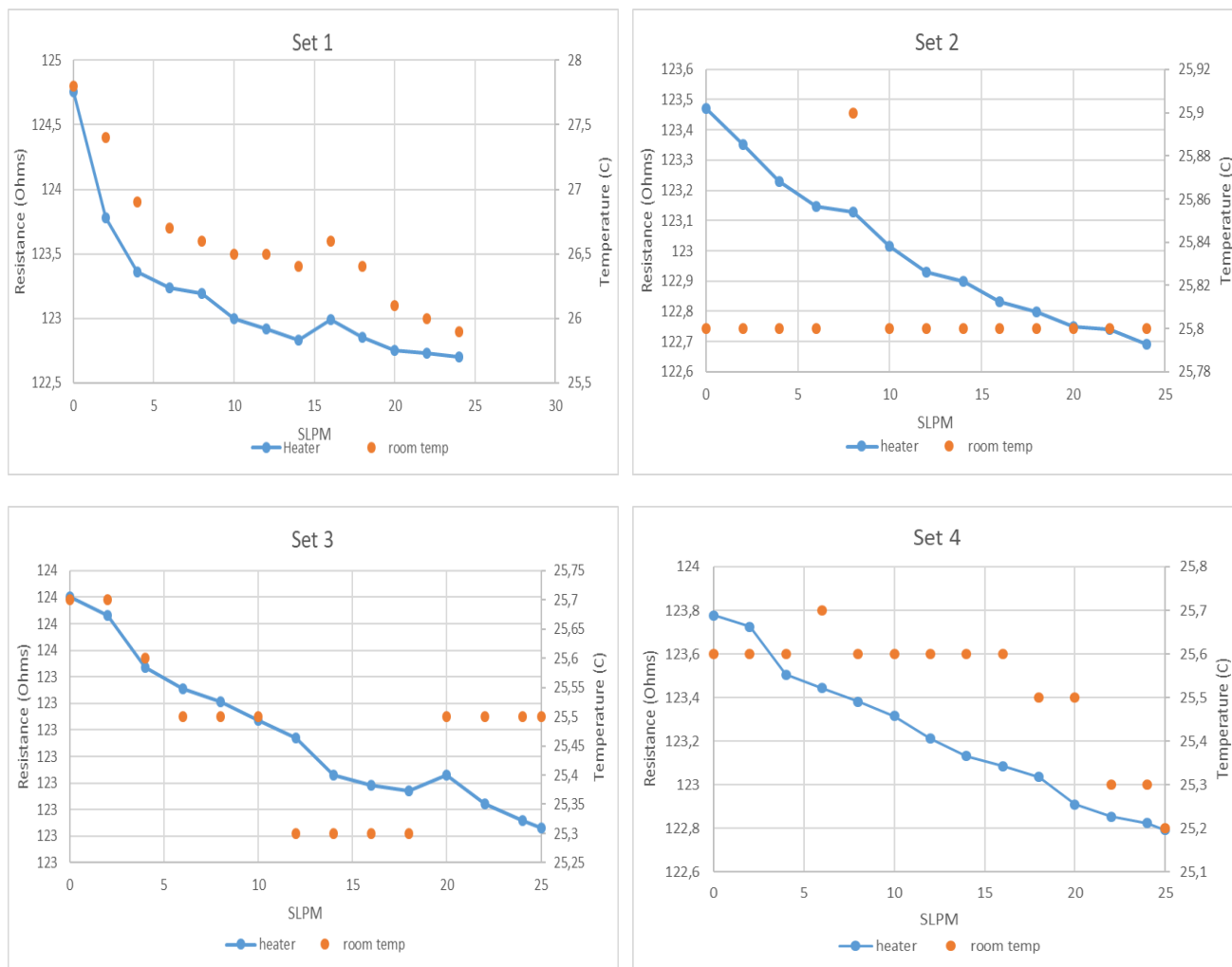
Ο τρόπος λειτουργίας του αισθητήρα ήταν με συνεχές ρεύμα (Constant Current) με την χρήση Keithley 2612 Source Meter για την τροφοδοσία καθώς και ένα Keithly 2000 Multimeter για την ταυτόχρονη μέτρηση των τιμών αντίστασης των στοιχείων. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με την χρήση του προγράμματος LabVIEW για την ανάλυση και παρουσίαση τους.

Για την καταγραφή των μετρήσεων το σύστημα βρισκόταν σε σταθερή κατάσταση για τουλάχιστον πέντε λεπτά. Έπειτα γινόταν καταγραφή των αποτελεσμάτων, μεταβολή της ταχύτητα ροής εισόδου και διαδικασία επαναλαμβανόταν.

### 4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

#### 4.3.1 Μετρήσεις για διάφορες ταχύτητες ροής εισόδου.

Λήφθηκαν τέσσερις σειρές μετρήσεων κατά τις οποίες έγινε η τροφοδότηση του μεσαίου στοιχείου με σταθερό ρεύμα 26mA θερμαίνοντας το στοιχείο σε μέγιστη θερμοκρασία 55 - 60°C. Ταυτόχρονα γινόταν συνεχής καταγραφή της αντίστασης του θερμαντήρα καθώς και των δύο ακόμα αισθητήριων στοιχείων για τιμές ροής εισόδου 0 έως 25 SLPM με μεταβολή ανά δύο SLPM. Παράλληλα γινόταν η μέτρηση της θερμοκρασίας του χώρου. Οι μετρήσεις της αντίστασης του θερμαντήρα καθώς και της θερμοκρασίας του χώρου παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα 4-8.



**Σχήμα 4-8. Πειραματικές μετρήσεις αντίστασης θερμαντήρα και θερμοκρασίας δωματίου σε σχέση με την ταχύτητα ροής εισόδου.**

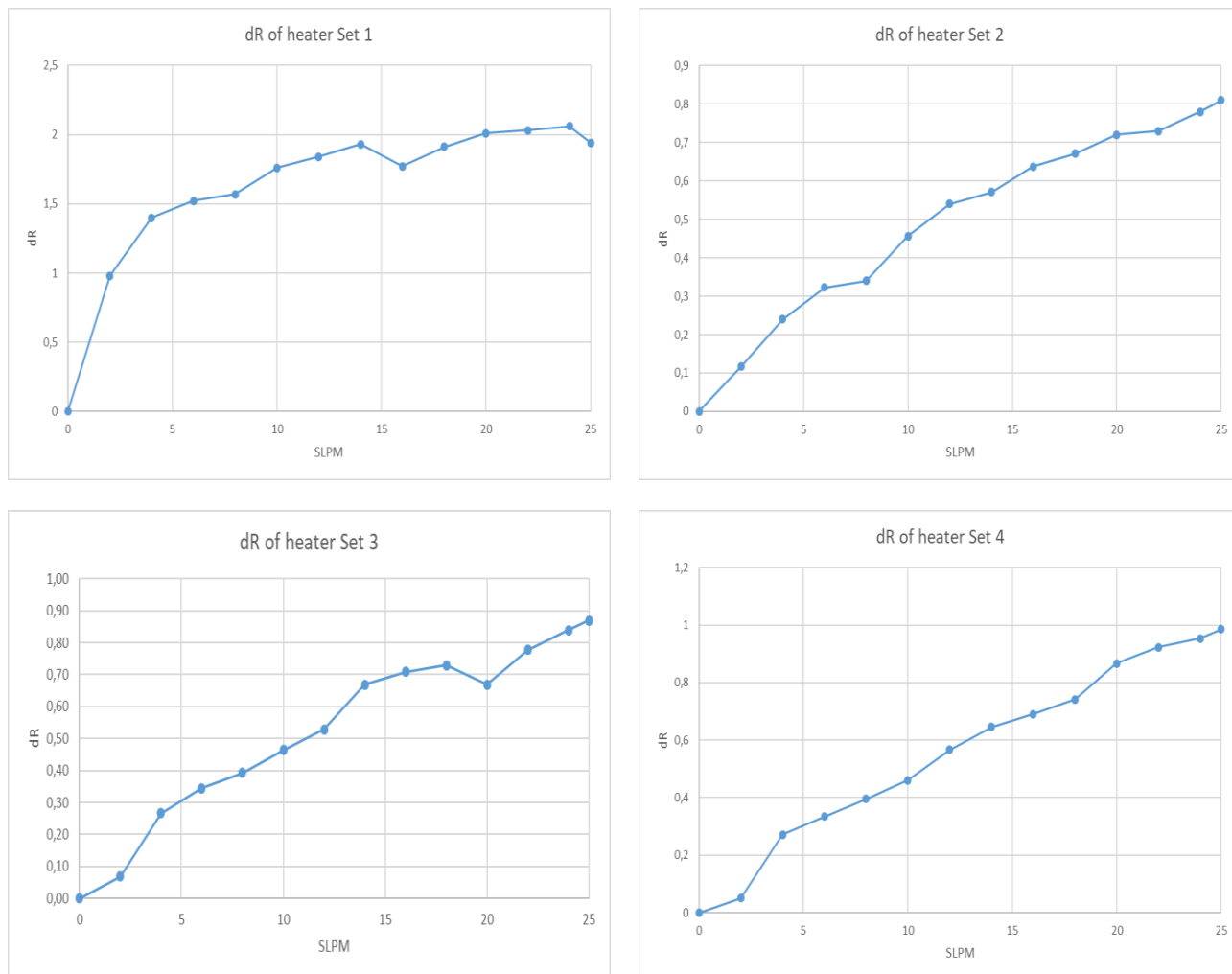
Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του χώρου μπορεί να έχει μεγάλη επιρροή στην αντίσταση του θερμαντήρα όπως γίνεται ιδιαίτερα εμφανές από την μέτρηση των 16 SLPM στην πρώτη σειρά μετρήσεων στο παραπάνω Σχήμα 4-8. Είναι εμφανές ότι η αντίσταση του στοιχείου και συνάμα η θερμοκρασία του μειώνεται συστηματικά με την αύξηση της ροής στην συγκεκριμένη μέτρηση, αλλά η αντίσταση αυξήθηκε καθώς αυξήθηκε και η θερμοκρασία του περιβάλλον χώρου .

Από τις παραπάνω μετρήσεις μπορούν να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα με βάση δύο διαφορετικές αρχές λειτουργίας. Οι αρχές αυτές είναι η λειτουργία θερμού νήματος κατά την οποία η θερμοκρασία του θερμαντήρα μειώνεται καθώς η ροή αυξάνεται και η δεύτερη αρχή βασίζεται

Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης

στην διαφορά θερμοκρασίας των δύο στοιχείων δίπλα από το θερμαντήρα, τα οποία χωρίς ροή αέρα θα έχουν την ίδια θερμοκρασία, με την αύξηση της ροής όμως η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους αυξάνεται καθώς ο θερμικός λοβός που δημιουργεί ο θερμαντήρας μετατοπίζεται ως προς την κατεύθυνση της ροής.

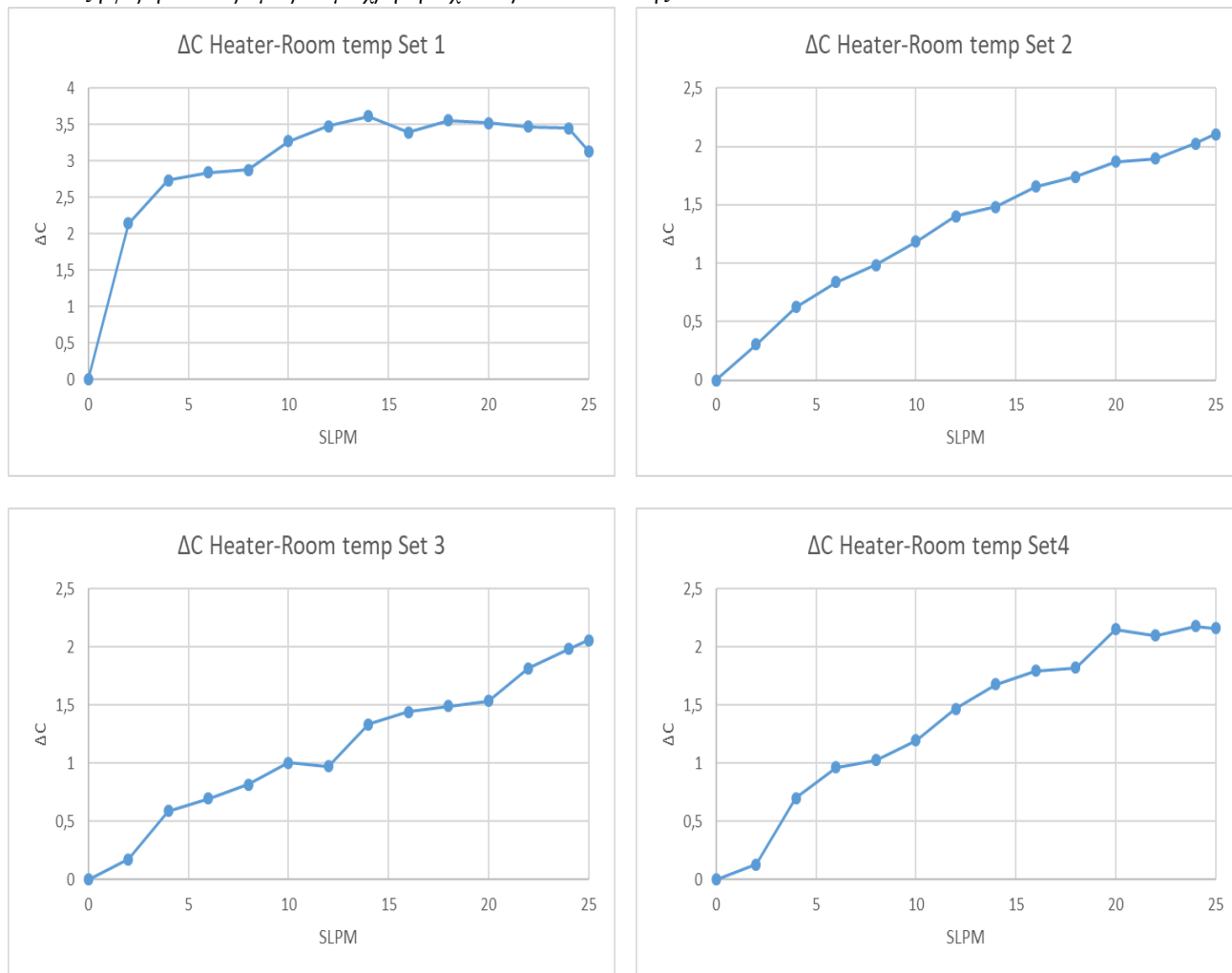
Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν την μεταβολή της αντίστασης σε σχέση με την ταχύτητα ροής του θερμαντήρα.



**Σχήμα 4-9. Διαφορά αντίστασης του θερμαντήρα σε σχέση με την ταχύτητα ροής εισόδου.**

Στα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανής η γραμμική απόκριση του θερμικού στοιχείου σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την πρώτη, όμως δεν έχει συνυπολογιστεί η επίδραση που είχε η μεταβολή της θερμοκρασίας του χώρου. Για την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων χωρίς την επιρροή της θερμοκρασίας δωματίου γίνεται η μετατροπή τους σε βαθμούς κελσίου μέσω την εξίσωσης  $((R_{\text{sensor}}/100)-1)/0,003851$  όπου  $R_{\text{sensor}}$  η αντίσταση του αισθητήρα και έπειτα αφαιρείται η θερμοκρασία δωματίου.

Υπολογίστηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) του αισθητήρα σε σχέση με την θερμοκρασία δωματίου όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4-10, πιο συγκεκριμένα έγινε η μετατροπή της τιμής της αντίστασης του θερμαινόμενου στοιχείου του αισθητήρα σε βαθμούς κελσίου, από την τιμή αυτή αφαιρέθηκε η θερμοκρασία δωματίου και βρέθηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με την ταχύτητα ροής εισόδου.



**Σχήμα 4-10. Διαφορά θερμοκρασίας θερμαντήρα χωρίς την επιρροή της θερμοκρασίας δωματίου σε σχέση με την ταχύτητα ροής.**

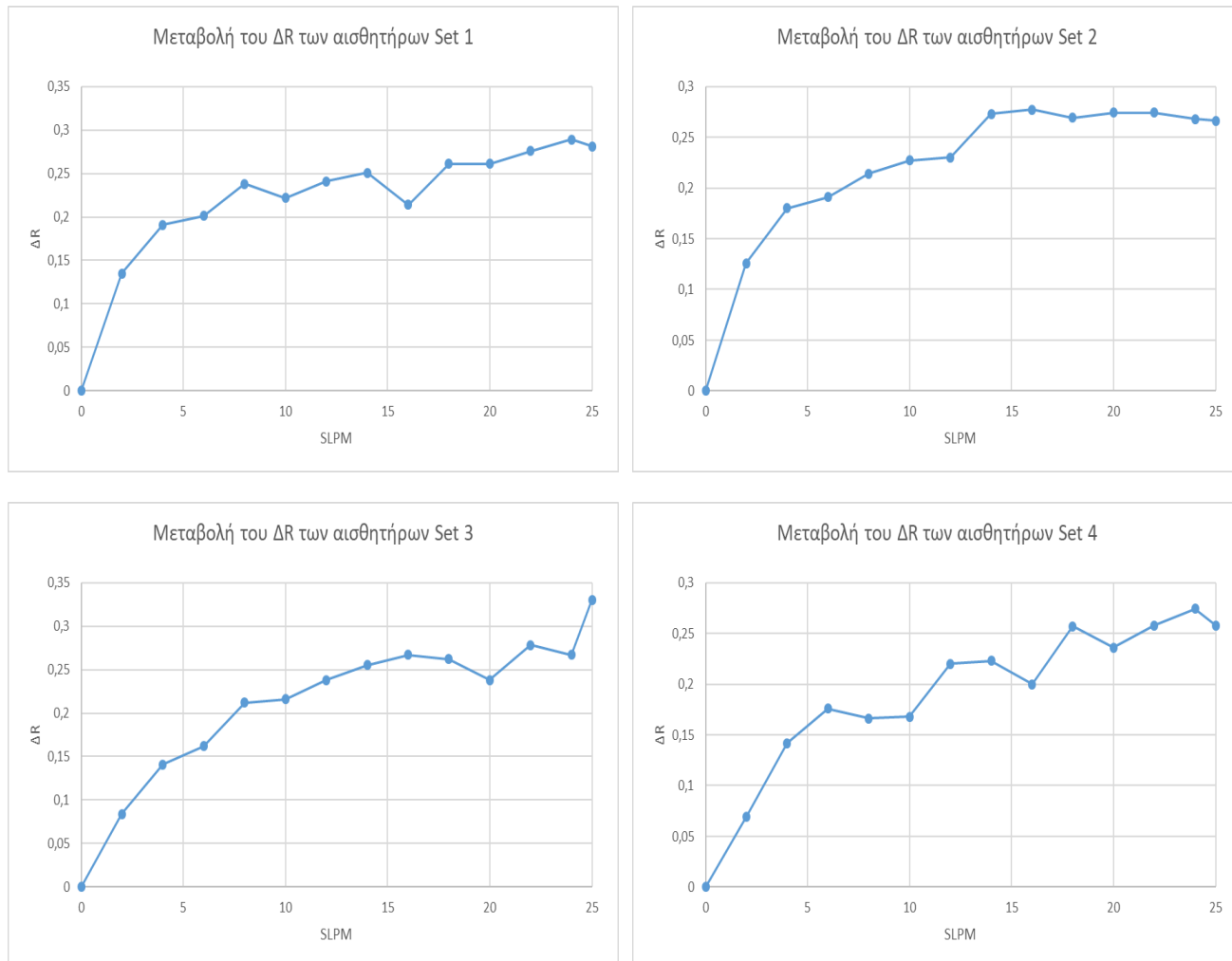
Λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της θερμοκρασίας του χώρου στο παραπάνω Σχήμα 4-10, επιβεβαιώνεται πως η απόκριση του αισθητήρα σε λειτουργία θερμού νήματος είναι γραμμική .

Στα διαγράμματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 4-10 εφαρμόστηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Η κλίση της ευθείας αυτής εκφράζει την ευαισθησία του αισθητήρα για το διάστημα 0-25 SLPM και αναγράφεται αναλυτικά στον Πίνακα 4-1. Η πρώτη σειρά μετρήσεων δεν λήφθηκε υπόψη καθώς λόγω ανεξέλεγκτων συνθηκών δεν απέδωσε συγκρίσιμα αποτελέσματα. Ο μέσος όρος των τριών κλίσεων είναι 0,0805 και συνεπάγεται πως ευαισθησία του αισθητήρα είναι 0,0805 °C/SLPM.

**Πίνακας 4-1. Ευαισθησία αισθητήρα σε λειτουργία θερμού νήματος.**

Σειρά μετρήσεων	Κλίση Ευθείας (ευαισθησία αισθητήρα [°C/SLPM])
Σειρά 2	0,0785
Σειρά 3	0,0765
Σειρά 4	0,0866

Έπειτα βρέθηκε η μεταβολή της διαφοράς της αντίστασης των αισθητήριων στοιχείων για την αξιολόγηση της απόκρισής τους και την αξιολόγηση του συστήματος ως προς την διαφορική (θερμιδομετρική) αρχή λειτουργίας.

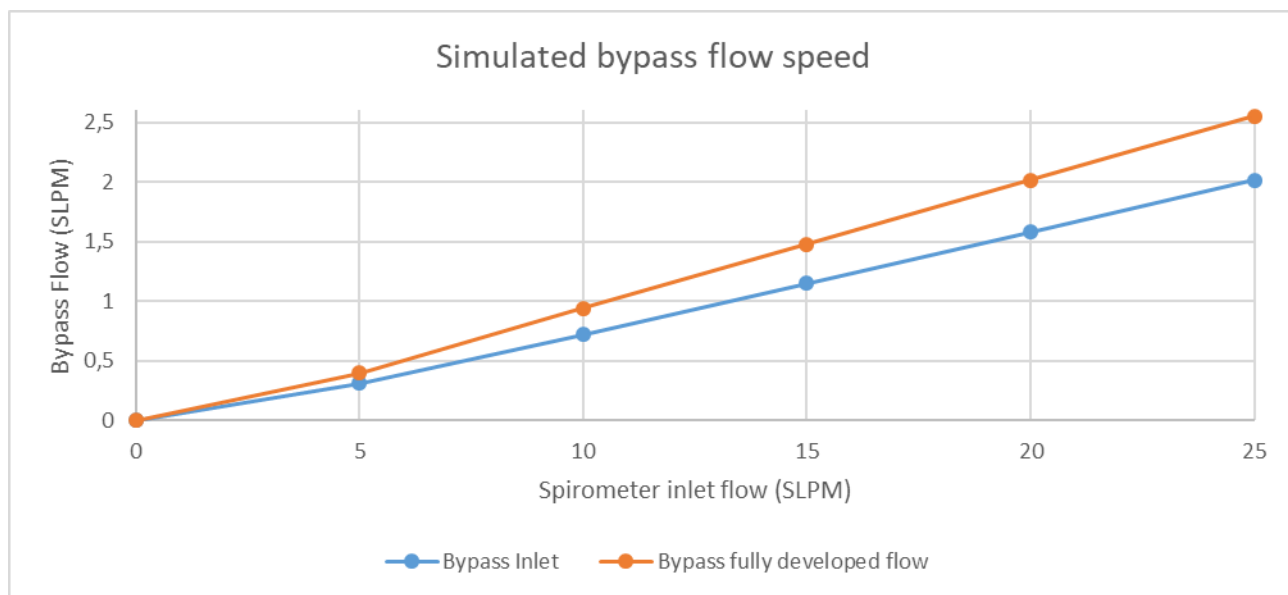


**Σχήμα 4-11. Μεταβολή της διαφοράς της αντίστασης των αισθητήριων στοιχείων σε σχέση με την ταχύτητα ροής.**

Η απόκριση των αισθητήριων φαίνεται να έχει κάποια γραμμικότητα ιδιαίτερα για μικρότερες ταχύτητες ροής, στις υψηλότερες ταχύτητες φαίνεται να υπάρχει κάποιο σημείο κορεσμού. Επίσης παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των στοιχείων είναι αρκετά μικρή και φαίνεται να έρχεται σε κορεσμό σε μερικές σειρές μετρήσεων, η συμπεριφορά αυτή μπορεί να προέρχεται αρχικά λόγω της μειωμένης ροής κατά μήκος του bypass εφόσον μόνο ένα κλάσμα της ροής διοχετεύεται σε αυτό, με αποτέλεσμα η ταχύτητα της ροής να είναι μικρότερη από την είσοδο και η θερμοκρασία που μεταφέρεται να είναι μειωμένη. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται και μέσω των προσομοιώσεων.

Στο Σχήμα 4-12 εμφανίζεται η ταχύτητα της ροής στην είσοδο καθώς και κοντά στην έξοδο του bypass για διάφορες ροές εισόδου του σπιρομέτρου. Η ροή που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του bypass αντιστοιχεί περίπου στο 10% της αρχικής ροής. Η πτώση στην ροή είναι ένας από τους

παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόκριση του αισθητήρα και να ευθύνεται για το κορεσμό που παρουσιάζει η θερμομετρική αρχή λειτουργίας.



Σχήμα 4-12. Ταχύτητα ροής που διοχετεύεται στο Bypass.

Δημιουργήθηκε ο παρακάτω Πίνακας 4-2 στον οποίο αναγράφεται η μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας δωματίου κατά την διάρκεια των τεσσάρων σειρών μέτρησης.

Πίνακας 4-2. Μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας δωματίου  $\Delta T_{room\_max}$  ( $^{\circ}C$ )

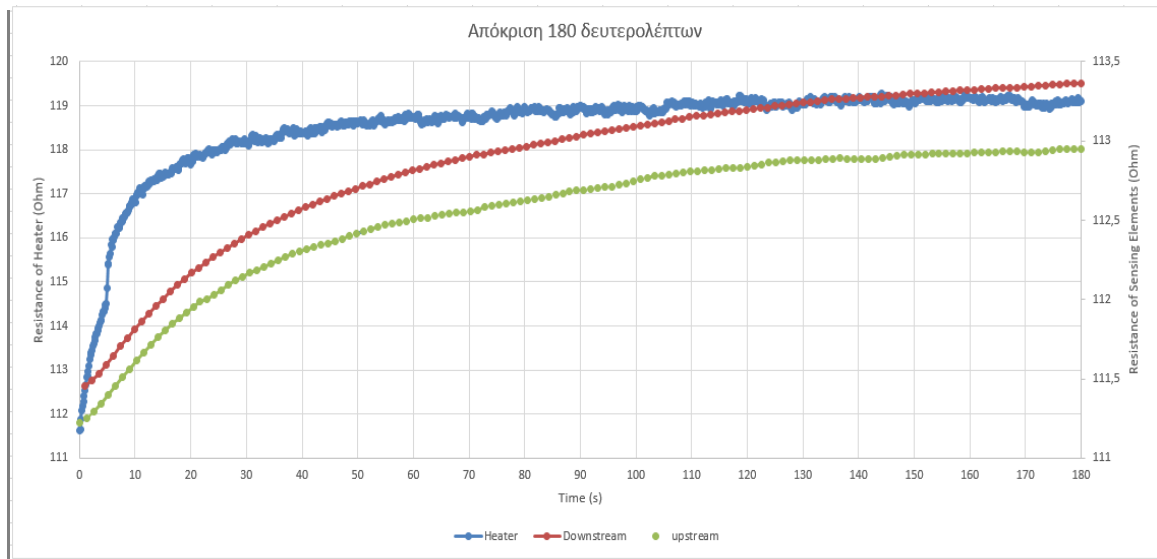
Σειρά μετρήσεων	Μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας δωματίου $\Delta T_{room\_max}$ ( $^{\circ}C$ )
Σειρά 1 (Set 1)	$\Delta T = 1,9$
Σειρά 2 (Set 2)	$\Delta T = 0,1$
Σειρά 3 (Set 3)	$\Delta T = 0,4$
Σειρά 4 (Set 4)	$\Delta T = 0,5$

Παρατηρείται η συστηματικά μικρότερη γραμμικότητα των στοιχείων κατά την πρώτη σειρά μετρήσεων γεγονός το οποίο πιθανόν οφείλεται στην μεγάλη μεταβολή της θερμοκρασίας του χώρου κατά την διάρκεια των μετρήσεων σύμφωνα με τον Πίνακα 4-2.

Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψη πως το φαινόμενο του κορεσμού για τις μεγαλύτερες ταχύτητες ροής οφείλεται στην αρχή λειτουργίας σταθερού ρεύματος κατά την οποία η θερμοκρασία του θερμαντήρα μειώνεται κατά την αύξηση της ροής. Ως αποτέλεσμα η ψύξη του θερμαντήρα αποτελεί αντιμαχόμενο μηχανισμό μειώνοντας την θερμοκρασία και συνάμα επηρεάζοντας την αγωγή της θερμότητας από τον θερμαντήρα ως προς το αισθητήριο στοιχείο.

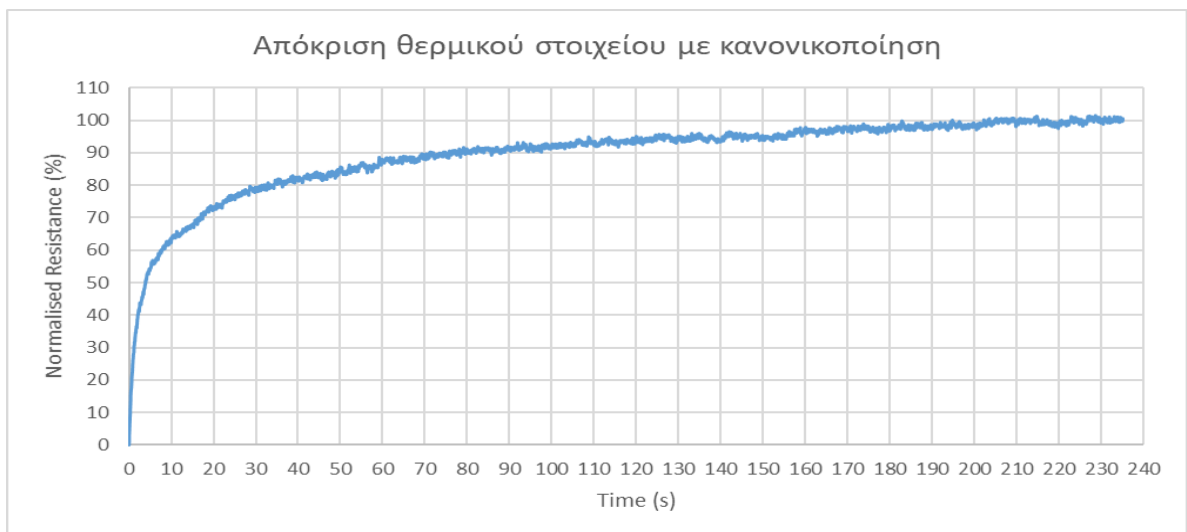
### 4.3.2 Μετρήσεις ταχύτητας απόκρισης χωρίς ροή

Εκτελέστηκαν στατικές μετρήσεις χωρίς ύπαρξη ροής με σταθερή τροφοδοσία ρεύματος του θερμικού στοιχείου στα 26mA για την εκτίμηση της ταχύτητας απόκρισης του αισθητήρα καθώς και μετρήσεις κατά τις οποίες το θερμικό στοιχείο είχε περιοδικό σήμα εισόδου για την εκτίμηση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων .



Σχήμα 4-13. Απόκριση συστήματος για 180 δευτερόλεπτα.

Για την ευκολότερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων έγινε κανονικοποίηση της απόκρισης των στοιχείων για εύρος 0-100 (%).



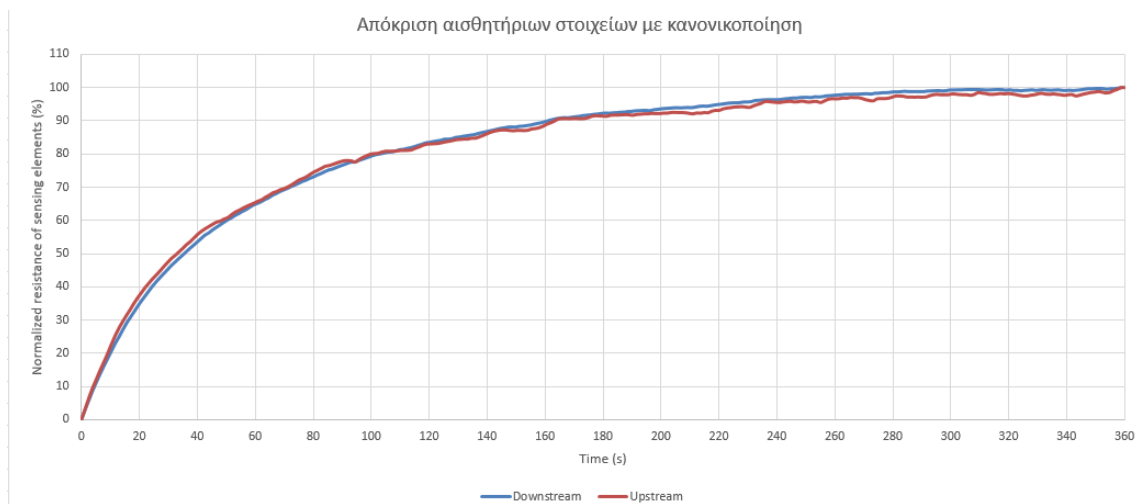
Σχήμα 4-14. Κανονικοποιημένη απόκριση θερμικού στοιχείου στο χρόνο.

Πίνακας 4-3. Ταχύτητα απόκρισης θερμικού στοιχείου αισθητήρα.

Rise Time (10% - 90%)	80 Seconds
Rise Time (20% - 80%)	40 Seconds
Settling Time (0%-95%)	160 Seconds

Ο χρόνος απόκρισης του αισθητήρα είναι σχετικά μικρός μέχρι το 60% της μέγιστης τιμής (<10 sec) με την ταχύτητα του όμως να μειώνεται δραματικά όσο πλησιάζει την τιμή ισορροπίας.





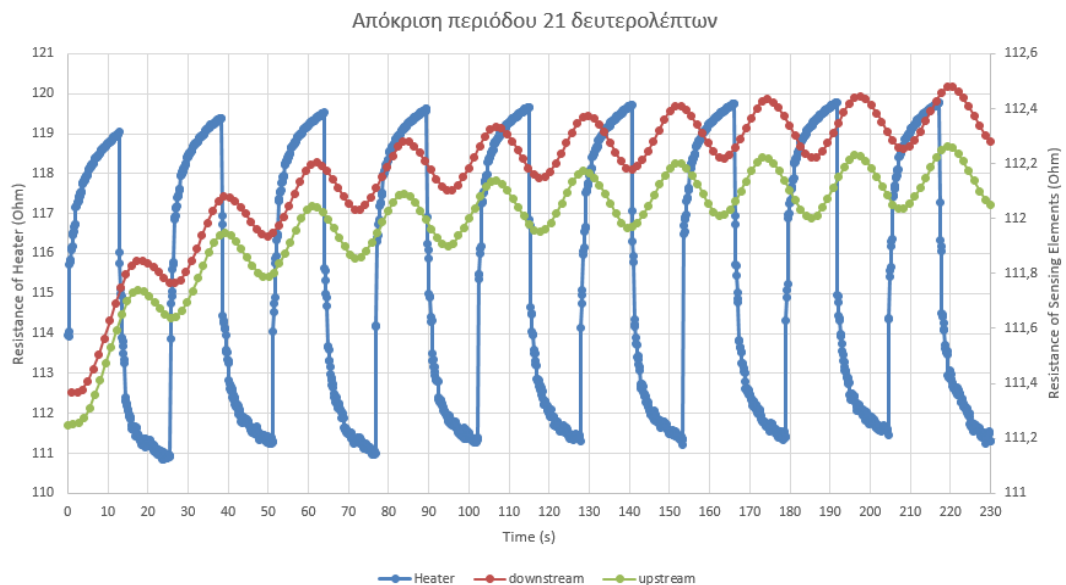
**Σχήμα 4-15. Κανονικοποιημένη απόκριση αισθητήριων στοιχείων στο χρόνο.**

**Πίνακας 4-4. Ταχύτητα απόκρισης αισθητήριων στοιχείων αισθητήρα.**

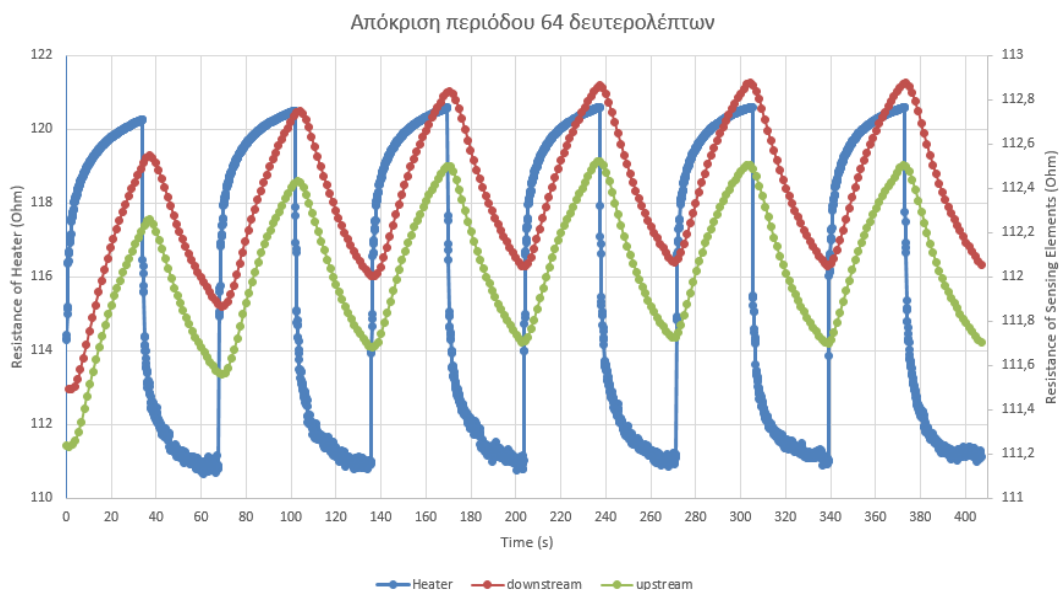
Rise Time (10% - 90%)	155 Seconds
Rise Time (20% - 80%)	90 Seconds
Settling Time (0%-95%)	210 Seconds

Παρατηρείται ότι η απόκριση των αισθητήριων στοιχείων (Πίνακας 4-4) είναι αρκετά πιο αργή από αυτή του θερμαντήρα (Πίνακας 4-3) καθώς χρειάζονται σχεδόν το διπλάσιο χρόνο ανόδου (Rise Time), η ταχύτητα της απόκρισης οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τις συγκεκριμένες μετρήσεις η μεταφορά της θερμότητας γίνεται μόνο μέσω του φαινομένου της συναγωγής και συνεπάγεται ότι ο θερμαντήρας θα πρέπει να θερμάνει τον περιβάλλοντα αέρα για να γίνει ανιχνεύσιμη η αλλαγή της θερμοκρασίας από τα διπλανά στοιχεία.

Έπειτα το θερμαινόμενο στοιχείο τροφοδοτήθηκε με περιοδικό ρεύμα για τρεις διαφορετικές περιόδους.

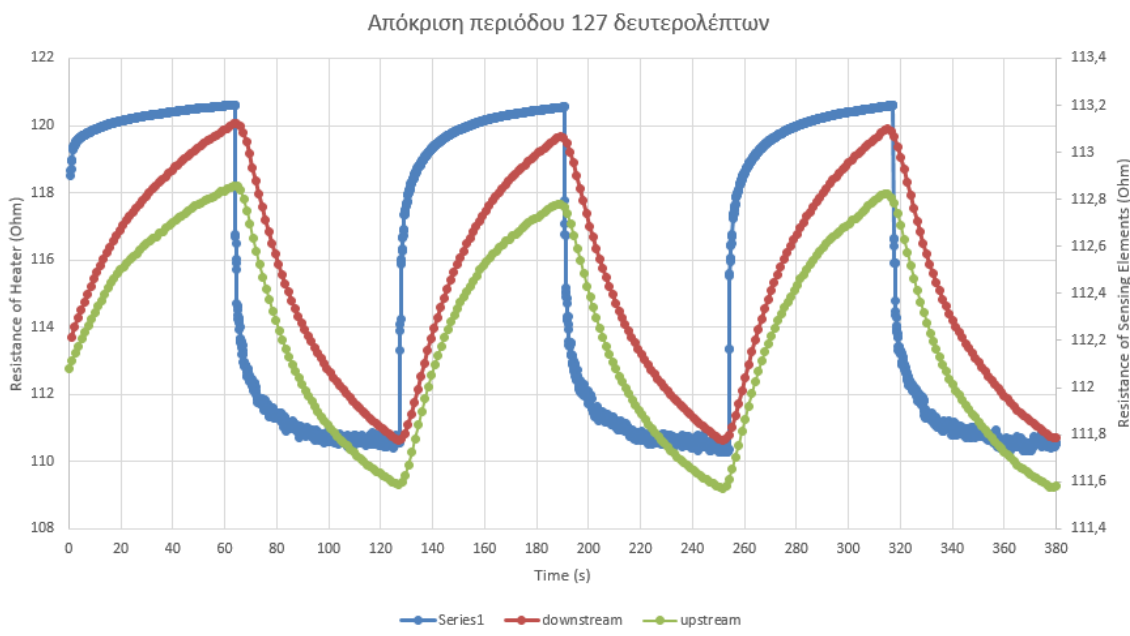


**Σχήμα 4-16. Απόκριση συστήματος για παλμούς με περίοδο 21 δευτερόλεπτα.**



**Σχήμα 4-17. Απόκριση συστήματος για παλμούς με περίοδο 64 δευτερόλεπτα.**

Παρατηρείται ιδιαίτερα από το Σχήμα 4-16 καθώς και στις πρώτες περιόδους στο Σχήμα 4-17 πως η θερμοκρασία του θερμικού στοιχείου φτάνει αμέσως τα μέγιστα επίπεδα ενώ τα αισθητήρια στοιχεία φτάνουν σε πιο σταθερά επίπεδα έπειτα από κάποιους κύκλους. Αυτό ωφελείται στις διαφορετικές σταθερές χρόνου που βρέθηκαν στις αποκρίσεις των στοιχείων, όπως αναγράφεται στον Πίνακα 4-3 και στον Πίνακα 4-4 , αλλά και στη θερμότητα που εκπέμπει το θερμικό στοιχείο η οποία με την πάροδο του χρόνου φέρνει σε κορεσμό το περιβάλλον γύρω του διατηρώντας την θερμοκρασία σταθερή.



**Σχήμα 4-18. Απόκριση συστήματος για παλμούς με περίοδο 127 δευτερόλεπτα.**

Στο Σχήμα 4-18 είναι εμφανές η επαναληψιμότητα που παρουσιάζουν τα στοιχεία καθώς σε κάθε περίοδο η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που παρουσιάζουν έχει πολύ μικρές αποκλίσεις.

*Ανάπτυξη φορητού σπιρομέτρου με χρήση τεχνολογιών εκτύπωσης*

Η απόκριση κατά την κάθοδο (Fall Time) του θερμικού στοιχείου καθώς και των αισθητήριων στοιχείων φαίνεται να ακολουθεί την ίδια μορφολογία και χρόνους απόκρισης με αυτούς της ανόδου.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε συσκευασία καθώς και θερμικός αισθητήρας ροής για φορητές σπιρομετρικές εφαρμογές. Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος καθώς και την δημιουργία επιθυμητής ροής. Εξήχθησαν οι βέλτιστες διαστάσεις των εσωτερικών γεωμετριών όπως το μήκος του bypass καθώς και η διάμετρος του πλέγματος. Σύμφωνα με την βέλτιστη γεωμετρία που βρέθηκε έγινε η κατασκευή της συσκευασίας με την χρήση εκτυπωτή στερεολιθογραφίας (SLA printer) και δημιουργήθηκε ο αισθητήρας ροής με συμβατική μέθοδο κατασκευής πλακέτας τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB). Μέσω πειραματικών μετρήσεων έγινε μία αρχική αξιολόγηση του ολοκληρωμένου συστήματος ως προς την ακρίβεια και ευαισθησία του καθώς και την ταχύτητα απόκρισής του.

Πιο συγκεκριμένα η εσωτερική διατομή του σπιρομέτρου που επιλέχθηκε αποσκοπεί στην μείωση του αριθμού Reynolds, ο οποίος συσχετίζεται αντίστροφα με την διάμετρο ενός σωλήνα, διατηρώντας όμως τις διαστάσεις σε πλαίσια κατάλληλα για την φορητότητα της συσκευής. Παρατηρήθηκε ότι παρόλο το μικρό μήκος των 10 εκατοστών του κύριου σωλήνα, η ενσωμάτωση πλέγματος στην είσοδο καθώς και εσωτερικού σωλήνα παράκαμψης (bypass) επιτρέπει την πλήρη ανάπτυξη στρωτής ροής χωρίς να γίνεται υπέρβαση των θεωρητικών τιμών και να υπάρχει μετάβαση σε τυρβώδη κατάσταση. Οι διαστάσεις των οπών του πλέγματος επιλέχθηκαν στα 20mm για την ελαχιστοποίηση της αντίστασης της ροής του αερίου. Το μήκος του bypass επιλέχθηκε στα 5cm εφόσον η ροή αναπτύσσεται πλήρως σε αυτό το μήκος. Ο θερμικός αισθητήρας σύμφωνα με τις προσομοιώσεις έχει ένα εύρος αποστάσεων μεταξύ των στοιχείων στο οποίο παρουσιάζει καλή ευαισθησία για ευρύ φάσμα ταχυτήτων ροής. Η απόσταση που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι 3 mm. Παράλληλα το μικρό τους μέγεθος επιτρέπει την ομαλή ροή του αέρα γύρω τους. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και ιδιαίτερα σε λειτουργία θερμού νήματος με σταθερή τροφοδοσία ρεύματος αποδίδουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας του χώρου είναι μεγάλη αυξάνοντας την δυσκολία της πειραματικής διαδικασίας. Η λειτουργία θερμού νήματος αποδίδει αποτελέσματα με ικανοποιητική γραμμικότητα σε όλο το εύρος των ταχυτήτων που έγιναν δοκιμές. Ο χρόνος ανόδου (10%-90%) του θερμαντήρα βρέθηκε ίσος με 80 δευτερόλεπτα και ο αντίστοιχος χρόνος των αισθητήριων στοιχείων διπλάσιος. Η ευαισθησία του αισθητήρα σε λειτουργία θερμού νήματος ισούται με 0,0805 °C/SLPM, αποτελώντας μετρήσιμη και ικανοποιητική απόκριση. Η αρχή λειτουργίας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των αισθητήριων στοιχείων φαίνεται να μην έχει τόσο γραμμική απόκριση υποδηλώνοντας είτε μικρότερη ευαισθησία στην μεταβολή της ροής ή τον κορεσμό του αισθητήρα λόγω της μειωμένης ροής μέσω του bypass.

Συνολικά, η προοπτική κατασκευής φορητού σπιρομέτρου με τεχνολογίες εκτύπωσης φαίνεται να είναι αρκετά υποσχόμενη. Για την συγκεκριμένη διάταξη υπήρξαν διάφοροι περιορισμοί οι οποίοι αποτελούν και προοπτικές ανάπτυξης :

- Ένας από τους περιορισμούς που έχει η παραπάνω πειραματική διάταξη είναι η μέγιστη ταχύτητα ροής εισόδου κατά την οποία εξετάστηκε ο αισθητήρας. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με μέγιστη ταχύτητα ροής τετραπλάσια από αυτή για την οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Θα πρέπει να εξεταστεί η απόκρισή του αισθητήρα σε μεγαλύτερες ροές για τον χαρακτηρισμό της διάταξης καθώς και με μεγαλύτερα ρεύματα

εισόδου τα οποία θα συμβάλουν σε μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά με αυτή του περιβάλλον χώρου, πιθανόν επηρεάζοντας και την ταχύτητα απόκρισης του.

- Η χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της συσκευής συμβάλλει σημαντικά στην φορητότητα της. Υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης κατάλληλου κυκλώματος καθώς και σχετικού λογισμικού που θα επιτρέπει την ενσύρματη σύνδεση της συσκευής με κινητά τηλέφωνα. Με αυτό τον τρόπο η τροφοδότηση της συσκευής καθώς και η αποθήκευση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω κινητών διατάξεων .
- Η χρήση εξωτερικού αισθητήρα θερμοκρασίας για την καταγραφή του περιβάλλοντος χώρου αποτελεί ένα αναγκαίο βήμα την ευκολότερη και ακριβέστερη διόρθωση των μετρήσεων καθώς η επίδραση της μεταβολής της εξωτερικής θερμοκρασίας δεν είναι πάντα αμελητέα. Παράλληλα είναι μια αναγκαία προϋπόθεση για όλα τα εμπορικά σπιρόμετρα [14].
- Η εξέταση του αισθητήρα με τροφοδοσία σταθερής θερμοκρασίας (Constant Temperature) μπορεί να αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα εφόσον καταπολεμάται το φαινόμενο της ψύξης του αισθητήρα βοηθώντας στην διαφορική λειτουργία. Παράλληλα μπορεί να εκτιμηθεί η απόκριση του και σε λειτουργία θερμού νήματος μετρώντας το ρεύμα που θα είναι αναγκαίο για την διατήρηση της θερμοκρασίας του. Μια τέτοια διάταξη μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση αναλογικού κυκλώματος γέφυρας Wheatstone καθώς και με την χρήση μικροελεγκτή [32-34]. Παράλληλα καθίσταται δυνατή η περαιτέρω βελτιστοποίηση της απόκρισης του αισθητήρα οδηγώντας σε γρηγορότερη σταθεροποίηση του συστήματος. [35]
- Η δημιουργία αντίστοιχου θερμικού αισθητήρα με την χρήση ευκάμπτων υλικών μπορεί να αποφέρει κάποια πλεονεκτήματα. Η χρήση ευκάμπτων υλικών θα συμβάλει στην εφαρμογή του αισθητήρα στην επιφάνεια του σπιρομέτρου δημιουργώντας μια λεία συνεχόμενη επιφάνεια , βοηθώντας στην ομαλή διαμόρφωση της ροής [36]. Θα μπορούσε περαιτέρω να μελετηθεί η τοποθέτηση των στοιχείων στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα για την αποφυγή της επίδρασης της υγρασίας καθώς και την ευκολότερη απολύμανση των επιφανειών.[37]

Η διαδικασία της μελέτης και έρευνας στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πρόσφερε μια εν τω βάθει κατανόηση στην δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, την ελεγχόμενη ανάπτυξη πεδίου ροής καθώς και την μελέτη της μεταφοράς θερμότητας. Η δημιουργία καλής ροής εργασιών (work flow) ήταν ένα κρίσιμο κομμάτι για την επίτευξη του στόχου στο προβλεπόμενο χρονικό διάστημα. Η μετάβαση από την θεωρία στην πράξη έχει σημαντικό ρόλο στην επίλυση προβλημάτων και την εφαρμογή της θεωρίας για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος. Η πειραματική διαδικασία διεύρυνε σε μεγάλο βαθμό την πρακτική εμπειρία μέσω της χρήσης εργαστηριακού εξοπλισμού όπως ο τρισδιάστατος εκτυπωτής στερεολιθογραφίας. Επίσης συνέβαλε στην εξοικείωση με εργαλεία αναγκαία για τη δημιουργία πλακέτας PCB καθώς και με εξοπλισμό όπως η ψηφιακή πηγή ρεύματος και πολυμέτρου μέσα από την διαδικασία των μετρήσεων. Με αυτούς τους τρόπους η διπλωματική αυτή πρόσφερε ένα ολοκληρωμένο εύρος γνώσεων και εμπειριών σε θεωρητικό καθώς και πρακτικό επίπεδο.

## Αναφορές

- [1] P. J. Pritchard and J. W. Mitchell, *Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics*, 9th ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2015.
- [2] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, and W. W. Huebsch, *Fundamentals of fluid mechanics 7E*, 7th ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2012
- [3] M. A. Henderson and C. Runcie, “Gas, tubes and flow,” *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, vol. 18, no. 4, pp. 180–184, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.mpaic.2017.01.009.
- [4] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2006.
- [5] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 2009.
- [6] WHO | Asthma [WWW Document], n.d. WHO. URL: <https://www.who.int/respiratory/asthma/en/>.
- [7] J. F. Morris, “Spirometry in the evaluation of pulmonary function.,” *PubMed*, vol. 125, no. 2, pp. 110–8, Aug. 1976, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/969495>
- [8] V. C. Moore, “Spirometry: step by step,” *Breathe*, vol. 8, no. 3, pp. 232–240, Jan. 2012, doi: 10.1183/20734735.0021711.
- [9] Ł. Kołtowski *et al.*, “Remotely supervised spirometry versus laboratory-based spirometry during the COVID-19 pandemic: a retrospective analysis,” *Respiratory Research*, vol. 25, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1186/s12931-023-02586-0.
- [10] N. Wellmann *et al.*, “Enhancing adult asthma Management: A review on the utility of remote home spirometry and mobile applications,” *Journal of Personalized Medicine*, vol. 14, no. 8, p. 852, Aug. 2024, doi: 10.3390/jpm14080852.
- [11] A. Klain, C. Indolfi, G. Dinardo, F. Decimo, and M. M. Del Giudice, “Covid-19 and spirometry in this age,” ~ *the α Italian Journal of Pediatrics/Italian Journal of Pediatrics*, vol. 48, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.1186/s13052-022-01199-5.
- [12] Richards, J. A. (2014). Office spirometry—indications and limitations. *SA Fam Pract*, 48(2), 48-51. <https://doi.org/10.1080/20786204.2006.10873340>
- [13] F. Roberts, Measurement of volume and flow in gases, *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, Orthopaedics and Reconstructive Surgery 7 (2006) 100–104, <https://doi.org/10.1383/anes.2006.7.3.100>.
- [14] N. Mandal, Respirometers including spirometer, pneumotachograph and peak flow meter, *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, Paediatrics 7 (2006) 1–5, <https://doi.org/10.1383/anes.2006.7.1.1>.
- [15] F. Hedrich, K. Kliche, M. Storz, H. Ashauer, and R. Zengerle, “Thermal flow sensors for MEMS spirometric devices,” *Procedia Chemistry*, vol. 1, no. 1, pp. 911–914, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.proche.2009.07.227.

- [16] S. Habibiabad, Y. S. Doğrusöz, and M. İ. Beyaz, “Characterization and performance estimation of a MEMS spirometer,” *Procedia Engineering*, vol. 168, pp. 1020–1023, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.330.
- [17] D. Barmpakos, A. Moschos, T. Syrovy, T. Koutsis, L. Syrova, and G. Kaltsas, “A fully printed flexible multidirectional thermal flow sensor,” *Flexible and Printed Electronics*, vol. 5, no. 3, p. 035005, Aug. 2020, doi: 10.1088/2058-8585/aba6f4.
- [18] D. Barmpakos, I. Th. Famelis, A. Moschos, D. Marinatos, and G. Kaltsas, “Design and evaluation of a multidirectional thermal flow sensor on flexible substrate,” *Journal of Sensors*, vol. 2019, pp. 1–10, Feb. 2019, doi: 10.1155/2019/8476489.
- [19] G. P. Patsis, K. Ninos, D. Mathioulakis, and G. Kaltsas, “Simulation and experimental evaluation of gas mass flow transfer rate in microchannels,” *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 447–450, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.12.111.
- [20] A. Petropoulos, D. N. Pagonis, and G. Kaltsas, “A multi-range PCB-MEMS microfluidic flow sensor with adjustable sensitivity,” *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 799–802, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.12.196.
- [21] A. Petropoulos and G. Kaltsas, “Study and evaluation of a PCB-MEMS liquid microflow sensor,” *Sensors*, vol. 10, no. 10, pp. 8981–9001, Oct. 2010, doi: 10.3390/s101008981.
- [22] A. Petropoulos, G. Kaltsas, T. Speliotis, and A. G. Nassiopoulou, “Evaluation of a gas flow sensor implemented on organic substrate,” *Physica Status Solidi. C, Conferences and Critical Reviews/Physica Status Solidi. C, Current Topics in Solid State Physics*, vol. 5, no. 12, pp. 3839–3842, Oct. 2008, doi: 10.1002/pssc.200780163.
- [23] Ch. Stamatopoulos, A. Petropoulos, D. S. Mathioulakis, and G. Kaltsas, “Study of an integrated thermal sensor in different operational modes, under laminar, transitional and turbulent flow regimes,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, no. 8, pp. 1687–1693, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2008.06.003.
- [24] A. Moschos, T. Syrovy, L. Syrova, and G. Kaltsas, “A screen-printed flexible flow sensor,” *Measurement Science and Technology*, vol. 28, no. 5, p. 055105, Feb. 2017, doi: 10.1088/1361-6501/aa5fa0.
- [25] E. Ghafar-Zadeh *et al.*, “Toward spirometry-on-chip: design, implementation and experimental results,” *Microsystem Technologies*, vol. 23, no. 10, pp. 4591–4598, Nov. 2016, doi: 10.1007/s00542-016-3200-0.
- [26] M.R. Miller, Standardisation of spirometry, *Eur. Resp. J.* 26 (2005) 319–338, <https://doi.org/10.1183/09031936.05.00034805>.
- [27] T. Koutsis, P. Pikasis, A. Psyrris, and G. Kaltsas, “A thermal flow sensor with a 3D printed housing for spirometry applications,” *Microelectronic Engineering*, vol. 226, p. 111286, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.mee.2020.111286.
- [28] M. Laghrouche, L. Montes, J. Boussey, and S. Ameer, “Low-cost embedded spirometer based on micro machined polycrystalline thin film,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 22, no. 2, pp. 126–130, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2010.12.012.

[29] A. Perera, P. Friedrich, and R. Ledermüller, “Novel hot-wire based spirometry is highly accurate at low flow rates,” *Current Directions in Biomedical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 513–515, Sep. 2018, doi: 10.1515/cdbme-2018-0123.

[30] <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>

[31] Beyschlag, V., *Temperature Dependent Platinum Thin Film Chip Resistor.*, n.d.

[32] R. Y. Que, R. Zhu, Q. Z. Wei, and Z. Cao, “Temperature compensation for thermal anemometers using temperature sensors independent of flow sensors,” *Measurement Science and Technology*, vol. 22, no. 8, p. 085404, Jul. 2011, doi: 10.1088/0957-0233/22/8/085404.

[33] G. Kaltsas, P. Katsikogiannis, P. Asimakopoulos, and A. G. Nassiopoulou, “A smart flow measurement system for flow evaluation with multiple signals in different operation modes,” *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 11, pp. 3617–3624, Oct. 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/11/047.

[34] P. Asimakopoulos, G. Kaltsas, and A. G. Nassiopoulou, “A microcontroller-based interface circuit for data acquisition and control of a micromechanical thermal flow sensor,” *Journal of Physics Conference Series*, vol. 10, pp. 301–304, Jan. 2005, doi: 10.1088/1742-6596/10/1/074.

[35] P. Freymuth, “Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers,” *Journal of Physics E Scientific Instruments*, vol. 10, no. 7, pp. 705–710, Jul. 1977, doi: 10.1088/0022-3735/10/7/012.

[36] A. Petropoulos, D. N. Pagonis, and G. Kaltsas, “Flexible PCB-MEMS Flow Sensor,” *Procedia Engineering*, vol. 47, pp. 236–239, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.127.

[37] A. Moschos, A. Petropoulos, E. Zervas, S. Athinaios, and G. Kaltsas, “Thermal flow measurements by a flexible sensor, implemented on the external surface of the flow channel,” *Procedia Engineering*, vol. 87, pp. 1366–1369, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.697.