



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Υπολογιστική Μελέτη Άντλησης Χωρίς Βαλβίδες και Πιστοποίηση  
Πειραματικών Μετρήσεων σε Κλειστό Βρόχο Αγωγών

Διπλωματική Εργασία  
Χρήστος Καρράς

Επιβλέπων: Δρ. Ε.ΔΙ.Π. Χρήστος Μανόπουλος

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2019



# Υπολογιστική Μελέτη Άντλησης Χωρίς Βαλβίδες και Πιστοποίηση Πειραματικών Μετρήσεων σε Κλειστό Βρόχο Αγωγών

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη αφορά την τρισδιάστατη υπολογιστική ανάλυση ενός φαινομένου άντλησης χωρίς βαλβίδες που παρατηρείται σε κλειστό βρόχο δύο αγωγών, ενός εύκαμπτου και ενός (σχετικά) άκαμπτου. Η μοντελοποίηση βασίζεται σε πειραματική διάταξη κλειστού βρόχου αγωγών [1]. Σε ορισμένο τμήμα του εύκαμπτου αγωγού ασκείται εξωτερική διέγερση με αποτέλεσμα ο αγωγός να παραμορφώνεται, να προκαλεί την κίνηση του ρευστού εντός του και συνεπώς να επιτυγχάνεται η ροή του ρευστού. Σκοπός της εργασίας είναι η υπολογιστική μελέτη της δημιουργούμενης ροής και της σχέσης της συχνότητας διέγερσης του συστήματος με την μέση χρονικά παροχή που αναπτύσσεται με στόχο να ελεγχθεί αν τα αποτελέσματα αυτής της υπολογιστικής μελέτης μπορούν να συμφωνούν με τα μετρηθέντα από την πειραματική διάταξη αποτελέσματα. Η υπολογιστική μελέτη επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων προσομοιώσεων που χρησιμοποιούν μοντέλα της πειραματικής διάταξης. Τα υπολογισμένα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικά μετρηθέντα μεγέθη της ροής για την πιστοποίηση των δεύτερων μέσω των προσομοιώσεων. Αρχικά γίνεται προσπάθεια μοντελοποίησης του συστήματος ως σύζευξης προβλήματος μηχανικής παραμορφώσιμων στερεών και προβλήματος μηχανικής ρευστών και υπολογιστική επίλυση μέσω της μεθόδου Fluid-Structure-Interaction (FSI-Αλληλεπίδραση Ρευστού με παραμορφώσιμη δομή) με χρήση του λογισμικού Ansys Workbench. Λόγω προβλημάτων σύγκλισης του κώδικα που οφείλονταν στις μεγάλες παραμορφώσεις του αγωγού, μελετήθηκε υπολογιστικά μόνο το άκαμπτο τμήμα του αγωγού, χρησιμοποιώντας ως οριακές συνθήκες μετρημένα μεγέθη από το πείραμα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την πειραματική μέτρηση της παροχής μάζας γίνεται πρόβλεψη της αναμενόμενης διαφοράς πίεσης στα άκρα του αγωγού. Αντίστοιχα θεωρώντας γνωστές από τις ίδιες μετρήσεις τις πιέσεις στα άκρα του αγωγού γίνεται πρόβλεψη της χρονικά μεταβαλλόμενης παροχής μάζας. Αυτό γίνεται τόσο σε αγωγό της γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης από την οποία πάρθηκαν οι μετρήσεις, δηλαδή καμπυλόμορφο, όσο και σε ευθύγραμμο αγωγό ίδιου μήκους. Τέλος ως μέρος της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων γίνεται φασική ανάλυση ορισμένων πειραματικά μετρηθέντων μεγεθών.

# **Computational Study of Valveless Pumping and Verification of Experimental measurements in a Closed Pipe Loop**

## **Abstract**

The aim of this work is to study a case of valveless pumping, namely the Liebau phenomenon as it occurs in closed pipe loop systems comprised of two pipes with different elasticity filled with liquid. Periodic stimulation on the more compliant pipe of such a system can result in non-zero net flow rate depending among other parameters on the frequency of the stimulation and the excitation amplitude. The computational models developed in this study are based on an experimental setup by Manopoulos [1], the experimental results of which are compared to and verified by the results obtained from computational analysis. Initially, computational analysis is done by simulating the response of the complete experimental geometry of the closed pipe loop system when subjected to periodic external loads by means of two-way Fluid Structure Interaction methods (2-Way FSI). The shortcomings of this approach lead to the isolation and modeling of the inside domain of the rigid pipe only. In this case the simulations use only Computational Fluid Mechanics methods (CFD) and the boundary conditions used are derived from the experimental results. Two main series of simulations are performed. The first uses the experimental mass flow as a boundary condition, aiming to compute the pressure difference between the tube's ends, by solving the flow domain along the length of the rigid pipe. The second one uses the experimental pressure difference as a boundary condition, solving the above same fluid domain, concluding to the calculation of the mass flow. Simulations are also performed with pressure difference boundary conditions for models with straight pipe geometry of the same length instead of the curved one, to determine whether the curvature affects the results. All the simulations are predicted by using the commercial software ANSYS Workbench. Finally, phase analysis of some experimental results is done between the pressure and the pincher motion signals in order to better understand the response of the system.



# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτον απ' όλους τον επιβλέποντα Δρ. Ε.ΔΙ.Π. Χρήστο Μανόπουλο για την συνεχή συμπαράσταση και στήριξή του, την αμέριστη βοήθεια και συμβουλές του όποτε χρειαζόταν και γενικότερα για την συνολική συνεισφορά του σε όλα τα στάδια της εργασίας, με ιδιαίτερη μνεία στις μετρήσεις της πειραματικής διάταξης που μου παρείχε. Θερμά ευχαριστώ τον Ομότιμο Καθηγητή Σωκράτη Τσαγγάρη για τις υποδείξεις του κυρίως σε θεωρητικά θέματα μηχανικής των ρευστών, καθώς και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητή κ. Σπυρίδωνα Βουτσινά, και Αναπλ. Καθηγητή κ. Λεωνίδα Αλεξόπουλο. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον Γιάννη Σάββα που ως μεταπτυχιακός φοιτητής με παραπλήσιο αντικείμενο μελέτης με βοήθησε τόσο με την καθοδήγησή του σε τεχνικά ζητήματα όσο και με την ανταλλαγή ιδεών σε πάμπολλες δυσκολίες με τις οποίες ήρθα αντιμέτωπος. Ευχαριστώ τον κ. Δημήτρη Δεληκωστίδη για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε εκ μέρους της εταιρίας SIMTEC Software and Services SA. Ευχαριστώ ειδικά τους φίλους μου Μάγδα Κονταδάκη, Κωνσταντίνο Νικολούδη, Ορφέα Μαυρεδάκη και Ηλιάνα Μαντούβαλου για την συνεισφορά στην προσπάθειά μου. Τέλος δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην οικογένειά μου και στους υπόλοιπους φίλους μου που χάρη στην πολύτιμη υποστήριξή τους και την δύναμη που μου δίνουν κατάφερα να ολοκληρώσω αυτήν την εργασία. Είμαι σε όλους ευγνώμων.



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
Abstract.....	iv
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΑΝΤΛΗΣΗ ΧΩΡΙΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ.....	2
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.2 ΠΑΛΙΟΤΕΡΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΑΝΟΙΧΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	2
1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ.....	5
ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΝΔΟΤΙΚΟΤΗΤΕΣ.....	7
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ.....	9
2.2.1 Εξίσωση συνέχειας.....	9
2.2.2 Εξίσωση διατήρησης της ορμής.....	9
2.2.3 Εξισώσεις Tait.....	10
2.2.4 Μοντελοποίηση τύρβης.....	10
2.2.5 Παλλόμενη ροή σε ευθύγραμμο αγωγό.....	11
2.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ.....	11
2.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΟΗΣ ΡΕΥΣΤΟΥ-ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ.....	12
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΕΝΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	18
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ.....	19
3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ.....	25
3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ.....	26
3.4.1 Πλέγματα Στερεών.....	26
3.4.2 Πλέγμα ρευστού.....	29
3.4.3 Ρυθμίσεις πλέγματος ρευστού -Dynamic Meshing.....	33
3.5 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ.....	34
3.5.1 Μοντέλα Transient Structural για αμφίδρομη αλληλεπίδραση.....	34
3.5.1.1 Επαφές και στηρίξεις.....	34
3.5.1.2 Εξωτερικές διεγέρσεις.....	35
3.5.1.3 Λοιπές ρυθμίσεις.....	36
3.5.2 Μοντελοποίηση Fluent για αμφίδρομη αλληλεπίδραση.....	36
3.5.3 Ρυθμίσεις σύζευξης της αλληλεπίδρασης ρευστού με στερεό.....	36
3.5.4 Οριακές συνθήκες και άλλες ρυθμίσεις μοντέλου άκαμπτου αγωγού πειράματος.....	37
3.5.4.1 Γενικές ρυθμίσεις.....	37
3.5.4.2 Οριακές συνθήκες.....	37
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	41
4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ.....	41
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΑΚΑΜΠΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.....	43
4.2.1 Περιπτώσεις προσομοιώσεων με οριακή συνθήκη παροχής μάζας.....	43
4.2.2 Περιπτώσεις προσομοιώσεων με οριακές συνθήκες πίεσης και στα δύο άκρα του αγωγού.....	54

4.2.2.1 Καμπύλος Αγωγός.....	54
4.2.2.2 Ευθύγραμμος αγωγός.....	61
4.3 ΦΑΣΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	62
4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	64

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η χρήση υπολογιστών για την αριθμητική επίλυση φυσικών προβλημάτων είναι πλέον πολύ διαδεδομένη. Για την επιβεβαίωση όμως των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης του μοντέλου που έχει σχεδιαστεί συνηθίζεται να πραγματοποιούνται μετρήσεις σε πειραματικές διατάξεις, οι οποίες προσφέρουν την πραγματική σιγουριά για την ισχύ των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στον πραγματικό κόσμο. Στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας η διαδρομή ήταν η αντίστροφη, αφού έγινε προσπάθεια πρόβλεψης με χρήση προσομοιωτικών εργαλείων, της συμπεριφοράς μιας πειραματικής διάταξης που έχει ήδη μελετηθεί. Στόχος ήταν να ερευνηθεί το κατά πόσο μπορεί να επιτευχθεί ακριβής αριθμητική επίλυση του συγκεκριμένου φυσικού προβλήματος με χρήση του λογισμικού ANSYS Workbench και να πιστοποιηθούν με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα του πειράματος και να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά του ρευστού (πχ το πεδίο ταχυτήτων) που δεν είχαν καταγραφεί κατά την πειραματική διαδικασία..

Αρχικά έγινε η μοντελοποίηση της διάταξης. Ξεκινώντας με απλοποιημένες γεωμετρίες, ιδιότητες υλικών, σύζευξης των σχετικών υπολογιστικών εργαλείων ή/και συνθήκες εξωτερικών διεγέρσεων σταδιακά έγινε προσπάθεια ακριβούς μοντελοποίησης του τρισδιάστατου συστήματος με όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερους όρους. Τα τελικά μοντέλα αυτής της φάσης της διερεύνησης είχαν συνοπτικά τα εξής στοιχεία:

- Τρισδιάστατη γεωμετρική αναπαράσταση του συστήματος, αποτελούμενη από το βρόχο των δύο αγωγών, βάση στήριξης και έμβολο για το στερεό μέρος της διάταξης και το χωρίο του ρευστού εντός του βρόχου για το ρευστό μέρος της διάταξης, σχεδιασμένα με το Design Modeler.
- Τις σχετικές ιδιότητες των στερεών υλικών καθώς και τις εξωτερικές διεγέρσεις σε εύρος συχνοτήτων εισαγόμενες με την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου, εισαγμένα με το Transient Structural
- Τις σχετικές ιδιότητες του ρευστού και τις μεθόδους αριθμητικής επίλυσης του ρευστοδυναμικού προβλήματος από το Fluent
- Αμφίδρομη μέθοδο σύζευξης του στερεού προβλήματος με το ρευστοδυναμικό με χρήση του System Coupling

Αυτή η μέθοδος μοντελοποίησης προσέκρουσε σε πολλές δυσκολίες κατά την εφαρμογή της και τελικά απέβη ουσιαστικά άκαρπη ως προς πολλές παραμέτρους όπως ευκολία σύγκλισης και χρόνος προσομοίωσης, αλλά και το κυρίως ζητούμενο, δηλαδή την απόκριση του συστήματος σε εύρος συχνοτήτων, καθώς δεν επιτεύχθηκε ολοκλήρωση της προσομοίωσης για τις συχνότητες που εμφανίζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Γι' αυτόν τον λόγο αποφασίστηκε να γίνει η συνέχεια των προσομοιώσεων με απλουστευμένο μοντέλο, το οποίο απαρτίζει μόνο το χωρίο του ρευστού και μάλιστα το μέρος εντός του ακάμπτου<sup>1</sup> αγωγού. Θεωρώντας δεδομένες τις μετρηθείσες πιέσεις στην είσοδο και έξοδο αυτού, εκτιμάται η παροχή μάζας στον αγωγό. Στην συνέχεια με δεδομένη την πειραματικά μετρηθείσα παροχή όγκου υπολογίζεται η χρονικά μεταβαλλόμενη διαφορά πίεσης στα άκρα του αγωγού. Γίνονται επίσης προσομοιώσεις θεωρώντας τον αγωγό ως ευθύγραμμο αντί καμπύλο για να ελεγχθεί κατά πόσο επηρεάζει την απόκριση του συστήματος η καμπυλότητά του.

---

1 Στην εργασία οι δύο αγωγοί που σχηματίζουν τον βρόχο αποκαλούνται συχνά “εύκαμπτος” και “άκαμπτος”. Όπως όμως θα συζητηθεί στο κεφάλαιο που αφορά τα υλικά μόνο χάριν ευκολίας και σε αντιδιαστολή με τον “εύκαμπτο” ονομάζεται ο ένας αγωγός “άκαμπτος”. Στην πραγματικότητα και ο “άκαμπτος” αγωγός θεωρείται παραμορφώσιμος και το μέτρο ελαστικότητάς του είναι κατά πολύ μικρότερο των πραγματικά απαραμόρφωτων στοιχείων της διάταξης, δηλαδή της βάσης στήριξης και του εμβόλου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΑΝΤΛΗΣΗ ΧΩΡΙΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κίνηση διαφόρων βιολογικών ρευστών, όπως το αίμα και τα ούρα, είναι απαραίτητη για την φυσιολογική λειτουργία των οργανισμών. Αυτή η κίνηση επιτυγχάνεται με βιολογικούς μηχανισμούς άντλησης, οι οποίοι μπορούν γενικά να χωριστούν σε μηχανισμούς άντλησης με βαλβίδες, στους οποίους αποφρακτικά στοιχεία όπως βαλβίδες ορίζουν μία κατεύθυνση ροής, και σε μηχανισμούς άντλησης χωρίς βαλβίδες, στους οποίους η ροή παλλόμενη αλλάζει κατευθύνσεις στην ίδια διεύθυνση, με τρόπο που η μέση χρονικά παροχή να είναι προς την μία κατεύθυνση.

Παραδείγματα άντλησης χωρίς βαλβίδες από τον χώρο της φυσιολογίας των οργανισμών είναι το κυκλοφορικό σύστημα του αμφίοξου [2], του *Ciona savignyi* [3], των σπονδυλωτών εμβρύων σε αρχικό στάδιο κύησης, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπινων εμβρύων [4][5][6][7][8][9][10], η κυκλοφορία του εγκεφαλονωτιαίου υγρού [11]. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις που παρότι υπάρχουν βαλβίδες η άντληση χωρίς βαλβίδες υποβοηθά και αυξάνει την αντλητική ικανότητα του συστήματος [12][13][14][15][16][17][18][19][20][21][22][23][24][25][26][27][28].

Εμφάνιση τέτοιων φαινομένων άντλησης χωρίς βαλβίδες στην βιολογία ενέπνευσε αρχικά το ενδιαφέρον για μελέτη της και οδήγησε στην ανακάλυψη του φαινομένου Liebau<sup>2</sup>. Το φαινόμενο διαφέρει από την περίσταση, έναν ακόμα τρόπο εμφάνισης άντλησης χωρίς βαλβίδες που εμφανίζεται συχνά στην βιολογία. Σε πολλές περιπτώσεις είναι αντικείμενο έρευνας αν η αντλητική ικανότητα βιολογικών μηχανισμών ή συστημάτων οφείλεται στην περίσταση ή στο φαινόμενο Liebau [5][7][8][9][29][30][31].

### 1.2 ΠΑΛΙΟΤΕΡΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΑΝΟΙΧΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

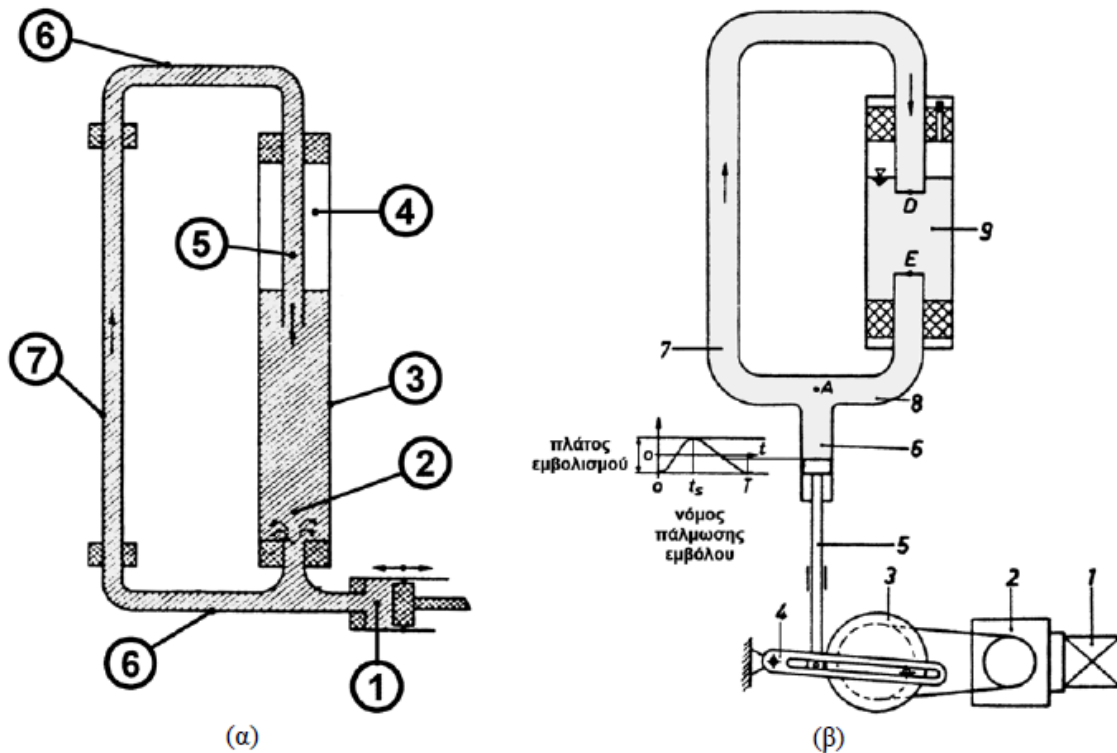
Πειραματικά διατάξεις στις οποίες υπήρχε κλειστό κύκλωμα αγωγού και κυλινδρικό δοχείου, με δημιουργία πάλμωσης του ρευστού από έμβολο ξεκίνησαν μελετούνται σχετικές διατάξεις ποιοτικά από τον Liebau [32] και ποσοτικά από τον Mahrenholtz [33] (Σχήμα 1.2.1).

Σε συνέχεια αυτών των πρώτων πειραματικών διατάξεων οι μελέτες συνεχίστηκαν σε διατάξεις αποτελούμενες από δύο αγωγούς διαφορετικής ελαστικότητας οι οποίοι σχηματίζουν κλειστό βρόχο. Διερευνώντας τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αντλητική ικανότητα σε αυτές τις διατάξεις ο Liebau προτείνει την ύπαρξη ασυμμετριών και την γρήγορη επιτάχυνση και επιβράδυνση κατά την εφαρμογή της παλμικής διέγερσης σαν δύο

---

2 Στο εξής όπου αναφέρεται φαινόμενο άντλησης χωρίς βαλβίδες θα εννοείται το φαινόμενο Liebau.

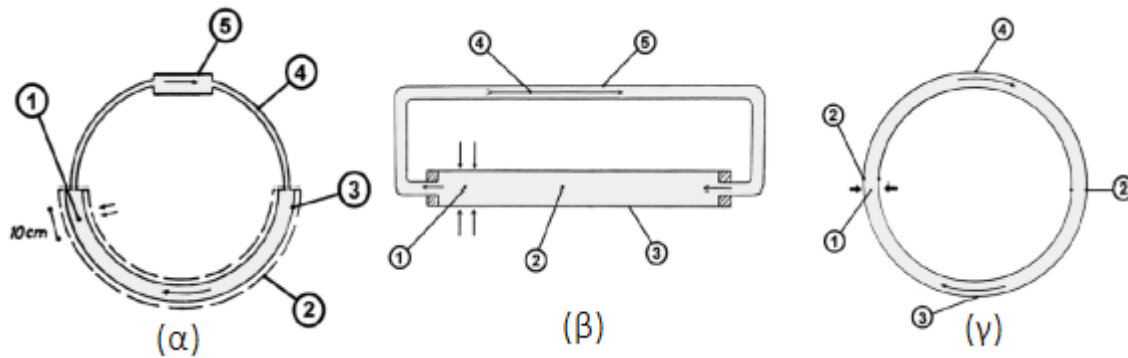
τέτοιες παραμέτρους. Μάλιστα η ύπαρξη ασυμμετρίας μπορεί να αφορά τις διαφορετικές ελαστικότητες των δύο αγωγών, την θέση εφαρμογής της διέγερσης και την γεωμετρία των αγωγών, [34] και [35] (Σχήμα 1.2.2).



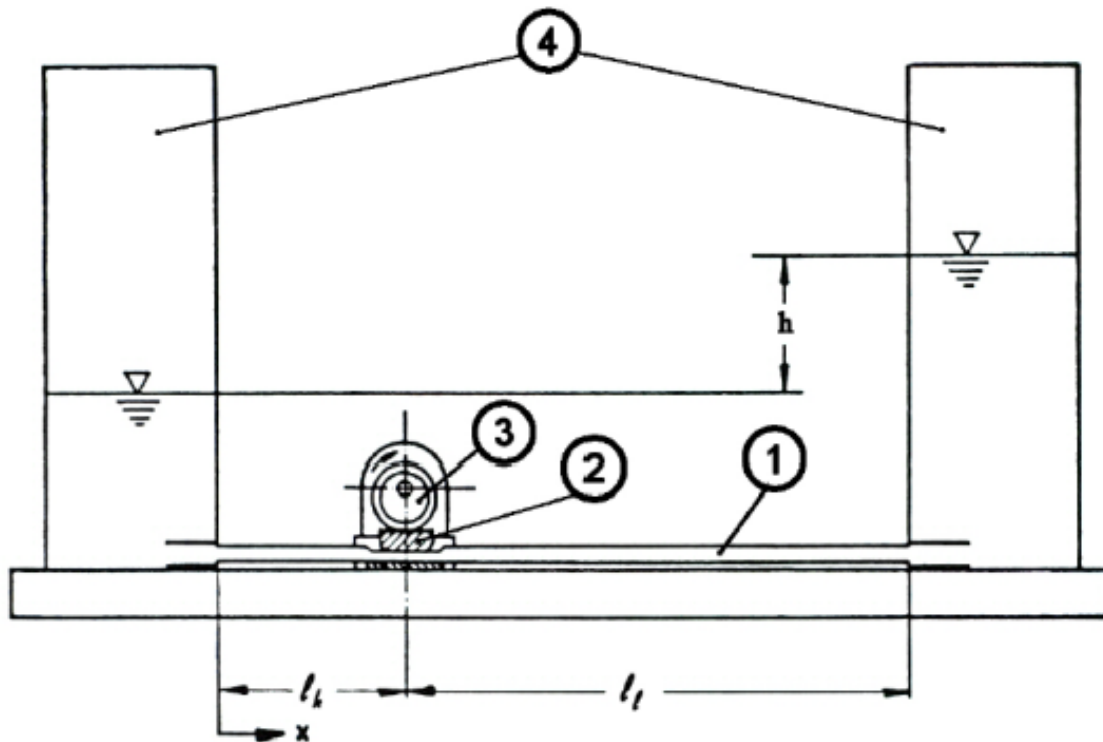
Σχήμα 1.2.1:(α) Πειραματική διάταξη [32]. Διακρίνονται (1) Έμβολο, (2) Νερό με σωματίδια καουτσούκ, (3) Γυάλινο κυλινδρικό δοχείο, (4) Εγκλωβισμένος αέρας, (5), (6), (7) Γυάλινοι αγωγοί. (β) Πειραματική διάταξη [33]. Διακρίνονται (1) Κινητήρας, (2) Μειωτήρας στροφών, (3) Στρόφαλος, (4) Ζύγιστρο, (5) Διωστήρας με έμβολο, (6) κύλινδρος, (7) αγωγός AD, (8) Αγωγός AE, (9) κλειστό δοχείο

Παράλληλα εξετάστηκαν διατάξεις για άντληση χωρίς βαλβίδες με χρήση συστημάτων ανοιχτών αγωγών [13][14][36][37][38]. Σε αυτές τις μελέτες μεταξύ άλλων προσδιορίζονται ως παράγοντες επιρροής της αντλητικής ικανότητας των διατάξεων που χρησιμοποιούνται η συχνότητα, η θέση και το πλάτος διέγερσης του εύκαμπτου αγωγού, η χρονική ασυμμετρία συμπίεσης-αποσυμπίεσης και το μήκος του εύκαμπτου αγωγού (Σχήμα 1.2.3).

Επανερχόμενοι στο φαινόμενο σε κλειστό σύστημα αγωγών η ποσοτική μέση χρονική παροχή διερευνήθηκε και στο [39] με παράμετρο την θέση εφαρμογής και την συχνότητα της διέγερσης. Στην συνέχεια γίνεται προσπάθεια να διευρυνθούν οι παράμετροι ως προς τις οποίες ελέγχεται το φαινόμενο άντλησης χωρίς βαλβίδες [1]. Έτσι γίνονται πειράματα για διαφορετικές συχνότητες και θέση διέγερσης, καθώς και μήκος πέλματος συμπίεσης και πλάτος διέγερσης. Το φαινόμενο έχει μελετηθεί περαιτέρω πειραματικά και θεωρητικά (ενδεικτική βιβλιογραφία [40][41][42][43][44][45][46][47][48][49][50][51][52][53][54][55])



Σχήμα 1.2.2: Διατάξεις κλειστών βρόχων αγωγών χωρίς βαλβίδα με διαφορετική διάμετρο ή/και ελαστικότητα. (α) Διακρίνονται: (1) διεγερόμενο τμήμα μήκους 10 cm, (2) εύκαμπτος σωλήνας χαμηλού μέτρου ελαστικότητας και σχετικά μεγάλης διαμέτρου (δυνάμει), (3) εύκαμπτος σωλήνας χαμηλού μέτρου ελαστικότητας και μικρότερης διαμέτρου, (4) σωλήνας υψηλού μέτρου ελαστικότητας και σχετικά μικρής διαμέτρου, (5) γυάλινος σωλήνας παρατήρησης [34]. (β) Διακρίνονται: (1) σημείο διέγερσης, (2) νερό με σωματίδια από καουτσούκ, (3) ελαστικός αγωγός, (4) κατεύθυνση ροής, (5) ανελαστικός αγωγός [35]. (γ) Διακρίνονται: (1) σημείο διέγερσης, (2) σημεία σύνδεσης των δύο αγωγών, (3) εύκαμπτος σωλήνας χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, (4) σωλήνας υψηλού μέτρου ελαστικότητας [35].



Σχήμα 1.2.3: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης ανοικτού συστήματος εύκαμπτου αγωγού χωρίς βαλβίδες [37]. Διακρίνονται: (1) Εύκαμπτος αγωγός, (2) πέλμα συμπίεσης-αποσυμπίεσης εύκαμπτου αγωγού, (3) έκκεντρο κινούμενο επί του πέλματος από ηλεκτροκινητήρα, (4) συγκοινωνούντα δοχεία μέσω του εύκαμπτου αγωγού



### 1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην προσομοίωση της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης κλειστού βρόχου αγωγών από πειράματα του Μανόπουλου [1] (Σχήμα 1.3.1) και άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η μοντελοποίηση και οι προσομοιώσεις, έγιναν για ειδική περίπτωση, με ορισμένη θέση διέγερσης, μήκος πέλματος συμπίεσης και πλάτος διέγερσης. Επομένως η παράμετρος ως προς την οποία εξετάζεται το φαινόμενο είναι η συχνότητα της διέγερσης.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα ακόλουθα:

- Κλειστό βρόχο αγωγών πληρωμένο με υδατικό διάλυμα NaCl
- Ξύλινη βάση στήριξης βρόχου αγωγών
- Μηχανισμό συμπίεσης ελαστικού αγωγού
- Ρυθμιστικές και μετρητικές διατάξεις όπως ηλεκτρομαγνητικό παροχόμετρο (ροόμετρο), δύο μορφοτροπείς πίεσης, επαγωγικό αναλογικό αισθητήρα απόστασης, αναλογικό ψηφιακό μετατροπέα (ADC)

Ο μηχανισμός συμπίεσης λειτουργεί ως εξής:

Κινητήρας του οποίου οι στρόφες ρυθμίζονται από ποτενσιόμετρο, οδηγεί διωστήρα, ο οποίος με την σειρά του μετακινεί παλινδρομικά άνω-κάτω την άνω πλάκα συμπίεσης η οποία φέρει στερεωμένο με κοχλίες το πέγμα συμπίεσης. Ο αγωγός στηρίζεται στην περιοχή συμπίεσης από υποδοχέα ο οποίος είναι πακτωμένος στην ακίνητη κάτω πλάκα συμπίεσης.

Το σύστημα είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε ο υποδοχέας να μην περιορίζει την κίνηση του εμβόλου ή την παραμόρφωση του ελαστικού αγωγού, το πέγμα της άνω πλάκας να συμπίεζει τον αγωγό κατά το ίδιο ποσοστό καθ' όλο το μήκος του τμήματος συμπίεσης και το πλάτος συμπίεσης να ρυθμίζεται διατηρώντας ίσο τον χρόνο συμπίεσης με τον χρόνο αποσυμπίεσης. Επίσης επιτυγχάνεται ακρίβεια στην συχνότητα και στο πλάτος συμπίεσης.

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τρία πέγματα συμπίεσης διαφορετικού μήκους αλλά στις περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν χρησιμοποιήθηκε πέγμα πάχους 16 mm, πλάτους 50 mm και μήκους 100mm. Το υλικό από το οποίο αποτελείται είναι σκληρό αλουμίνιο (Al50-28).

Ο κλειστός βρόχος αγωγών αποτελείται από εύκαμπτο και άκαμπτο αγωγό. Ο άκαμπτος αποτελείται από δύο τμήματα σωλήνα, τον περιεχόμενο αισθητήρα του ηλεκτρομαγνητικού παροχόμετρου και χάλκινους μαστούς. Τα δύο τμήματα έχουν το ίδιο μήκος και καμπυλότητα ενενήντα μοιρών. Είναι κατασκευασμένα από Plexiglas με εσωτερική διάμετρο 12mm και εξωτερική 14 mm. Στα άκρα τους είναι κολλημένοι με εποξική ενισχυμένη με ατσάλι ρητίνη οι μικρού μήκους χάλκινοι μαστοί διαμέτρου 12 mm που συνδέουν στην μία άκρη με σύνδεσμο τον αισθητήρα του παροχόμετρου και στην άλλη με συνδετικό κολάρο τον εύκαμπτο αγωγό. Ο ένας από τους χάλκινους μαστούς χρησιμεύει και για την γείωση του παροχόμετρου και την μείωση του θορύβου στο σήμα του. Η εσωτερική διάμετρος του παροχόμετρου είναι κι αυτή 12 mm με αποτέλεσμα η εσωτερική διάμετρος του άκαμπτου αγωγού να είναι 12 mm σε όλο το μήκος του, το οποίο είναι 1 m. Λίγο πριν την σύνδεση των χάλκινων μαστών με τον εύκαμπτο αγωγό, οι άκαμπτοι σωλήνες έχουν διαμορφωμένες οπές στις οποίες προσαρτώνται υποδοχείς μεμβρανών με ισχυρή κόλλα δύο συστατικών (εποξική ενισχυμένη με ατσάλι ρητίνη). Μέσω των υποδοχέων γίνεται εισαγωγή αισθητήρων για την μέτρηση της πίεσης του ρευστού σε εκείνη την θέση.

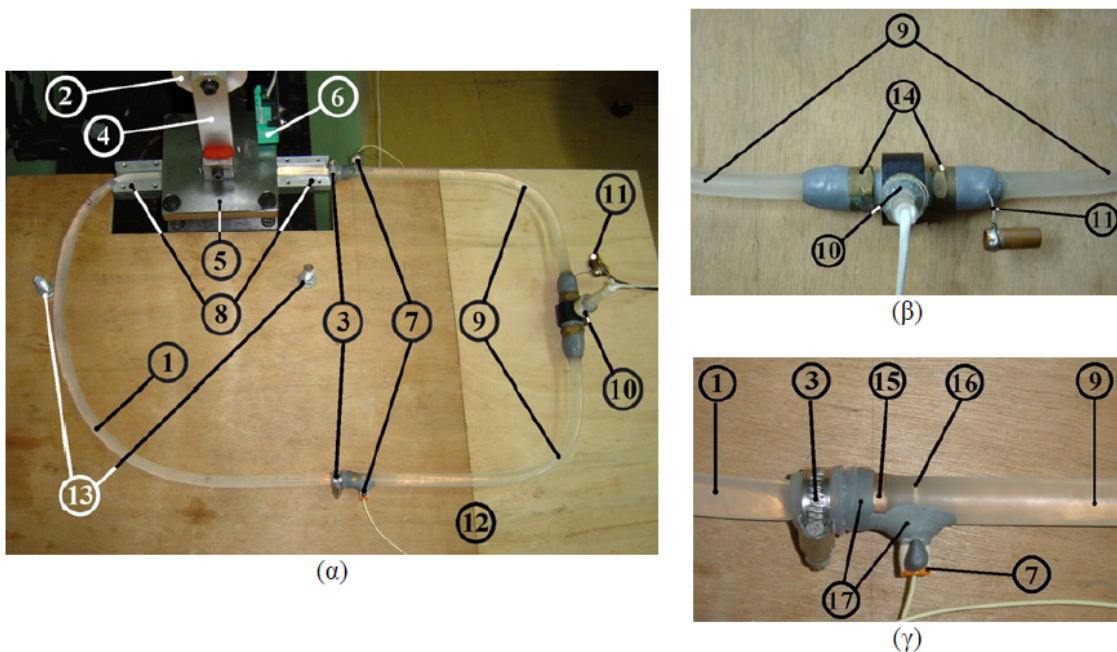
Ο ελαστικός εύκαμπτος αγωγός είναι από σιλικόνη (platinum cured silicone rubber) και έχει επίσης εσωτερική διάμετρο 12 mm και εξωτερική 14 mm. Το μήκος που συμμετέχει στον κλειστό βρόχο είναι επίσης 1 m, άρα το συνολικό μήκος του βρόχου είναι 2 m.

Η βάση στήριξης αλφαδιάζεται ώστε το διάνυσμα της βαρύτητας να είναι παντού κάθετο στο επίπεδο που κείται ο βρόχος.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων μετά την σύνδεση των διαφόρων συσκευών, ο κλειστός βρόχος αγωγών πληρώνεται με απαεριωμένο κορεσμένο διάλυμα NaCl σε απιονισμένο νερό. Η αναλογία του διαλύματος είναι 1 kg NaCl σε 8 kg νερό ώστε η συγκέντρωση των ιόντων να είναι μεγάλη και το παροχόμετρο να λειτουργεί με χαμηλή στάθμη θορύβου. Για όλες τις μετρήσεις λαμβάνονται 600 δεδομένα/s, δηλαδή το χρονικό βήμα ανάμεσα σε διαδοχικές μετρήσεις είναι  $\Delta t=0.00166$  s.

Οι συνθήκες του πειράματος για τις οποίες έγινε η υπολογιστική μελέτη είναι οι εξής:

- Θέση συμπίεσης 150 mm από το σημείο σύνδεσης των σωλήνων. Το μέσο του πέλματος ευθυγραμμίζεται κατακόρυφα με αυτό το σημείο
- Μήκος πέλματος συμπίεσης 100 mm
- Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της πέλματος συμπίεσης 10.05 mm, η οποία αντιστοιχεί σε πλάτος συμπίεσης (μέγιστο ποσοστό μεταβολής της διατομής του αγωγού) 82%
- Συχνότητες διέγερσης από 0 έως 12 Hz περίπου



Σχήμα 1.3.1: [1] Φωτογραφίες (α) της πειραματικής διάταξης, (β) λεπτομέρειας αισθητήρα ηλεκτρομαγνητικού παροχόμετρου και (γ) λεπτομέρειας σημείου σύνδεση εύκαμπτου με άκαμπτο αγωγό. Διακρίνονται: (1) εύκαμπτος αγωγός, (2) σφόνδυλος μηχανισμού συμπίεσης-αποσυμπίεσης, (3) συνδετικό κολάρο σύνδεσης εύκαμπτου με άκαμπτο αγωγό, (4) διωστήρας, (5) άνω πλάκα συμπίεσης, (6) επαγωγικός αναλογικός αισθητήρας προσέγγισης, (7) υποδοχέας μεμβράνης για καθετήρας των μορφοτροπέων πίεσης, (8), υποδοχέας εύκαμπτου αγωγού στο τμήμα συμπίεσης, (9) άκαμπτος σωλήνας, (10) αισθητήρας παροχόμετρου, (11) γείωση παροχόμετρου, (12) βάση στήριξης, (13) κοχλίες ρύθμισης βάσης στήριξης, (14), σύνδεσμος, (15) χάλκινος μαστός σύνδεσης, (16) αισθητήρας του καθετήρα μέτρησης πίεσης, (17) εποξική ενισχυμένη με ασάλι ρητίνη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΝΔΟΤΙΚΟΤΗΤΕΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τους διάφορους τομείς ή κατηγορίες φυσικών προβλημάτων όπως προβλήματα ρευστών, προβλήματα στερεών σωμάτων και προβλήματα μετάδοσης θερμότητας, επειδή οι εξισώσεις που διέπουν τα αντίστοιχα συστήματα είναι σημαντικά διαφορετικές, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές επίλυσης και διαφορετικά υπολογιστικά εργαλεία που είναι κατάλληλα για την αντιμετώπιση του κάθε είδους προβλήματος. Χαρακτηριστικά προβλήματα ρευστών λύνονται με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics, CFD) ενώ για παραμορφώσιμα στερεά συνήθως γίνεται χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis, FEA). Οι διαχωρισμός όμως σε προβλήματα στερεών σωμάτων, ρευστών, μετάδοσης θερμότητας κ.ο.κ. είναι μία απλοϊκή θεώρηση για συστήματα που μπορούμε να αγνοήσουμε κάποια πτυχή τους. Υπάρχουν όμως και συστήματα στα οποία οι διαφορετικοί φυσικοί τομείς συνυπάρχουν και αλληλεπιδρούν με τρόπο που δεν μπορεί να αγνοηθεί, στα οποία μπορούμε να χωρίσουμε το σύστημα σε επιμέρους υποσυστήματα συγκεκριμένης φύσης τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και συνθέτουν μαζί το ολόκληρο σύστημα. Μιλάμε τότε για συζευγμένα συστήματα [56] για τα οποία έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ώστε να λαμβάνεται υπόψιν η αλληλεπίδραση των διαφόρων υπό-συστημάτων στην επίλυσή τους. Ειδικά για την αλληλεπίδραση στερεάς δομής με ρευστό χρησιμοποιείται ο όρος fluid structure interaction (fsi) [57][58]. Μία περίπτωση που δεν μπορεί να παραβλεφθεί η αλληλεπίδραση ρευστού-δομής είναι οι ροές σε παραμορφούμενους, συνήθως εύκαμπτους-μαλακούς αγωγούς. Ειδικά σε ροές βιολογικών ρευστών είναι πολύ συνηθισμένο να λαμβάνεται υπόψιν η αλληλεπίδραση ανάμεσα στους αγωγούς και στο περιεχόμενο ρευστό καθώς η κίνηση του ενός επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κίνηση του άλλου [59][60][61].

Η αλληλεπίδραση ρευστού-δομής μπορεί να θεωρηθεί μονόδρομη ή αμφίδρομη [62]. Στην περίπτωση του πειράματος που μελετάται στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αμφίδρομη αλληλεπίδραση του στερεού σώματος του βρόχου αγωγών με το εσωτερικό ρευστό (2-way fsi). Αυτό γιατί δεν μπορεί να αγνοηθεί ούτε η επίδραση του στερεού στην ροή του ρευστού ούτε η επίδραση του ρευστού στην παραμόρφωση του στερεού τοιχώματος. Σε άλλα συστήματα η επίδραση του ενός υποσυστήματος στο άλλο μπορεί να αγνοηθεί οπότε θεωρούμε μονόδρομη αλληλεπίδραση ρευστού-δομής (1-way fsi). Αν για παράδειγμα η ροή του ρευστού παραμορφώνει ελάχιστα ή καθόλου το στερεό σώμα προτιμάται συνήθως μονόδρομη θεώρηση.

Δύο γενικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση συζευγμένων συστημάτων έχουν αναπτυχθεί: “Μονολιθικές” μέθοδοι (monolithic methods) και “κατατμημένες” μέθοδοι (partitioned methods). Οι ειδοποιός διαφορά τους έγκειται στο ότι οι μεν μονολιθικές μέθοδοι διακριτοποιούνται και επιλύονται μαζί από έναν επιλύτη συζευγμένου συστήματος (fsi solver) ενώ οι κατατμημένες μέθοδοι χρησιμοποιούν διαφορετικούς επιλύτες για τα υποσυστήματα διαφορετικού τομέα φυσικής [63][64]. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη προσέγγιση που υποστηρίζεται από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε (Ansys Workbench). Το λογισμικό αυτό

περιέχει τον επιλύτη του Ansys Fluent που χρησιμοποιεί μεθόδους πεπερασμένων όγκων για την επίλυση του ρευστοδυναμικού πεδίου και επιλύτη του Transient Structural που χρησιμοποιεί μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των εξισώσεων των στερεών σωμάτων. Την ομαλή συνεργασία και ανταλλαγή δεδομένων των επιλυτών αναλαμβάνει το System Coupling (Σύζευξη Συστημάτων) του προγράμματος.

Ειδικά τα προβλήματα μηχανικής ρευστών παρουσιάζουν συχνά μεγάλες δυσκολίες στην επίλυση λόγω των ιδιοτήτων των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του ρευστού. Καθώς προστίθεται και επιπλέον πολυπλοκότητα στο σύστημα από την αμφίδρομη αλληλεπίδραση με τα στερεά σώματα, πολύ γρήγορα μπορεί να προσκρούσουμε σε αστάθειες και εμπόδια που εμποδίζουν την σύγκλιση και τελικά οι επιλύτες αποτυγχάνουν. Έτσι και καθώς υπήρχαν ήδη επαρκείς μετρήσεις από το πείραμα που να αρκούν για την επίλυση του ρευστού, στην πορεία προτιμήθηκε με βάση αυτές τις μετρήσεις να χρησιμοποιηθεί μόνο ο επιλύτης του Ansys Fluent απλοποιώντας το μοντέλο της διάταξης και κρατώντας μόνο το εσωτερικό του ακάμπτου σωλήνα, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να λυθεί χωρίς την συμμετοχή στερεού.

## 2.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ

Πριν δούμε τον τρόπο που λύνονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούν οι επιλύτες θα πρέπει να εξετάσουμε το ποιες είναι αυτές και πώς προκύπτουν, ξεκινώντας από τις αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημά μας. Σκοπός στην περίπτωση του ρευστοδυναμικού προβλήματος είναι ο υπολογισμός του πεδίου ταχυτήτων και του πεδίου πιέσεων. Σημειώνουμε εδώ πώς θα αναφερθούν εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορες θεωρήσεις για το σύστημα, αυτό δεν σημαίνει πώς σε κάθε θεώρηση λύνονται όλες οι εξισώσεις. Ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται αλλάζει και το “σετ” εξισώσεων προς επίλυση. Για παράδειγμα ανάλογα με τον αν μοντελοποιείται ή όχι τύρβη στο μοντέλο θα λυθούν οι RANS ή οι εξισώσεις NS.

### 2.2.1 Εξίσωση συνέχειας

Ξεκινώντας με τις εξισώσεις για το ρευστοδυναμικό πεδίο, από τις πιο βασικές εξισώσεις και που λύνεται πάντα είναι η εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση διατήρησης της μάζας. Εκφράζει την βασική αρχή ότι μάζα δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται από το πουθενά και χρησιμοποιήθηκε στην μορφή [65][66][67]:

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

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $\vec{u}$  το διάνυσμα ταχύτητας και  $S_m$  όρος “πηγής”, όρος δηλαδή που εκφράζει την απώλεια ρευστού από το πεδίο. Κατά την διεξαγωγή του πειράματος αναφέρεται ότι υπήρχαν μικρές απώλειες ρευστού από τις θέσεις μέτρησης της πίεσης. Για αυτές τις απώλειες δεν υπάρχουν τιμές ενώ αναφέρεται πως ήταν πολύ μικρές, οπότε θεωρήθηκε πως ο όρος πηγής είναι ίσος με 0 χωρίς αυτό να επηρεάζει σημαντικά την σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις. Επιπλέον κατά την διεξαγωγή του πειράματος είχαν ληφθεί μέτρα για να περιοριστεί η επίδραση αυτού του φαινομένου στα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα πριν από κάθε πειραματική δοκιμή ελεγχόταν η πίεση ηρεμίας εσωτερικά του βρόχου και με τρόπο που να μην ταραξεί το σύστημα ή προσθέτει αέρα, ο αγωγός πληρωνόταν με διάλυμα μέχρι η ένδειξη της πίεσης να είναι ίδια όπως στην αρχή κάθε δοκιμής.

Στις περιπτώσεις που το ρευστό θεωρείται ασυμπιεστο η εξίσωση διατήρησης της μάζας απλοποιείται στην:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

### 2.2.2 Εξίσωση διατήρησης της ορμής

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής του ρευστού αποτελεί ουσιαστικά την έκφραση του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα στα ρευστά. Σε αδρανειακό σύστημα αναφοράς και για Νευτώνειο ρευστό περιγράφεται σε γενική μορφή από τις εξισώσεις Navier-Stokes [65][66][67]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu [(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} I]) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

όπου  $p$  η στατική πίεση,  $\mu$  ο συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας ή ιξώδες του ρευστού,  $I$  ο μοναδιαίος πίνακας,  $\vec{g}$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\vec{F}$  οι υπόλοιπες εξωτερικές δυνάμεις ανά μονάδα όγκου. Ο πρώτος όρος του πρώτου μέλους της εξίσωσης εκφράζει την μεταβολή της ορμής ανά μονάδα χρόνου ενώ ο δεύτερος την μεταβολή της ορμής λόγω της εισόδου ή της εξόδου ρευστού από το πεδίο. Στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης είναι οι όροι που εκφράζουν τις διάφορες δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό, ξεκινώντας από την δύναμη λόγω της στατικής πίεσης, συνεχίζοντας με τις δυνάμεις λόγω συνεκτικότητας και τέλος με τις βαρυτικές και λοιπές εξωτερικές δυνάμεις.

### 2.2.3 Εξισώσεις Tait

Αν και οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής είναι αρκετές για να λυθεί το πεδίο ροής στις περιπτώσεις που λύνεται μόνο αυτό, δεν είναι αρκετές στις περιπτώσεις που έχουμε σύζευξη με το μηχανικό μέρος του συστήματος. Συγκεκριμένα και όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο ο τρόπος που επιτυγχάνεται η σύζευξη απαιτεί να θεωρηθεί η πυκνότητα μεταβλητή. Η μεταβολή της πυκνότητας θέλουμε να αποδοθεί αποκλειστικά ως ισόθερμη αλλαγή πίεσης, για αυτό χρησιμοποιείται η καταστατική εξίσωση Tait για συμπιεστό υγρό (υπό σταθερή θερμοκρασία) [68][69][70]. Η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης είναι:

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n = \frac{K}{K_0}$$

με

$$K = K_0 + n \Delta p$$

και

$$\Delta p = p - p_0$$

όπου  $\rho_0$  η πυκνότητα αναφοράς (σε πίεση αναφοράς)  $p_0$  η πίεση αναφοράς  $K_0$  το μέτρο ελαστικότητας αναφοράς (σε πίεση αναφοράς),  $K$  το μέτρο ελαστικότητας,  $n$  ο εκθέτης της πυκνότητας.

### 2.2.4 Μοντελοποίηση τύρβης

Η μοντελοποίηση της τύρβης είναι ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει κανείς σε προβλήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, αφού το να προκύψει κατευθείαν ως μέρος των αριθμητικών λύσεων των εξισώσεων Navier-Stokes απαιτεί πολύ λεπτομερή διακριτοποίηση τόσο του χώρου όσο και του χρόνου. Για να υπερνικηθεί αυτό το εμπόδιο και να μεταβούμε σε μεθόδους πιο οικονομικές από άποψη χρόνου και υπολογιστικών απαιτήσεων χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα τύρβης. Για τον τρόπο που καταλήγουμε σε αυτά παραπέμπουμε στην βιβλιογραφία [66][67][71], αναφέρεται μόνο πως αντί των εξισώσεων Navier-Stokes λύνονται οι Reynolds Averaged Navier Stokes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

με επιπλέον άγνωστο τις τάσεις Reynolds:  $\overline{u_i' u_j'}$

οι οποίες υπολογίζονται από όποιο μοντέλο τύρβης χρησιμοποιηθεί. Σε όσες προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τύρβης έγινε χρήση του μοντέλου τύρβης K-ε και διαπιστώθηκε πως τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων δεν διέφεραν σημαντικά από τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων με την υπόθεση της στρωτής ροής.

## 2.2.5 Παλλόμενη ροή σε ευθύγραμμο αγωγό

Η περιοδική κίνηση του εμβόλου δημιουργεί περιοδικές αλλαγές στην γεωμετρία, τις πιέσεις και την παροχή στον αγωγό. Ένας χρήσιμος δείκτης που χαρακτηρίζει τις περιοδικές ροές είναι ο αριθμός Womersley [72] που συνδέει ένα χαρακτηριστικό μήκος (ακτίνα αγωγού), την συχνότητα και το κινηματικό ιξώδες του ρευστού με

την σχέση  $\alpha = R \sqrt{\frac{2\pi f}{\nu}}$  όπου ως γνωστόν είναι  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  το κινηματικό ιξώδες. Στην περίπτωση που εξετάζουμε ο  $\alpha$  εξαρτάται μόνο από την συχνότητα.

Η ύπαρξη της περιοδικότητας στα διάφορα μεγέθη μας επιτρέπει να τα συσχετίσουμε και με βάση την διαφορά φάσης τους ή την υστέρηση του ενός ως προς το άλλο (lag). Σε ευθύγραμμο αγωγό κυκλικής διατομής αναμένεται η διαφορά φάσης μεταξύ της πίεσης και της παροχής να πλησιάζει τις 90 μοίρες καθώς αυξάνεται ο αριθμός Womersley (άρα και η συχνότητα) [73][74]. Οι πειραματικές μετρήσεις ωστόσο έχουν διαφορετική συμπεριφορά. Περισσότερα σχετικά στα Κεφάλαια των αποτελεσμάτων.

## 2.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

Η βασική εξίσωση κίνησης που λύνεται στην ανάλυση των στερεών παραμορφώσιμων δομών είναι της μορφής [75]:  $\vec{F}(t) = M \ddot{\vec{u}} + C \dot{\vec{u}} + K \vec{u}$ , όπου  $\vec{F}$  το διάνυσμα των δυνάμεων, M το μητρώο μάζας, C το μητρώο απόσβεσης, K το μητρώο δυσκαμψίας και  $\vec{u}$  το διάνυσμα θέσης των κόμβων. Σε τέτοια εξίσωση μπορούμε να καταλήξουμε για παράδειγμα μέσω της αρχής των δυνατών έργων  $\delta U = \delta V$  όπου U είναι η εσωτερική ενέργεια παραμόρφωσης και V το εξωτερικό έργο λόγω των ασκούμενων φορτίων [76]. Η εσωτερική ενέργεια παραμόρφωσης μπορεί να συσχετιστεί με τις τάσεις και τις παραμορφώσεις, ενώ για ισότροπα γραμμικά ελαστικά υλικά οι τάσεις συνδέονται με τις παραμορφώσεις σύμφωνα με τον γενικευμένο νόμο του Hooke:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [\sigma_{ij}(1+\nu) - \nu \delta_{ij} \sigma_{kk}]$$

Μετά την χρονική διακριτοποίηση οι εξισώσεις γίνονται αλγεβρικές και το σύστημα λύνεται επαναληπτικά [77].

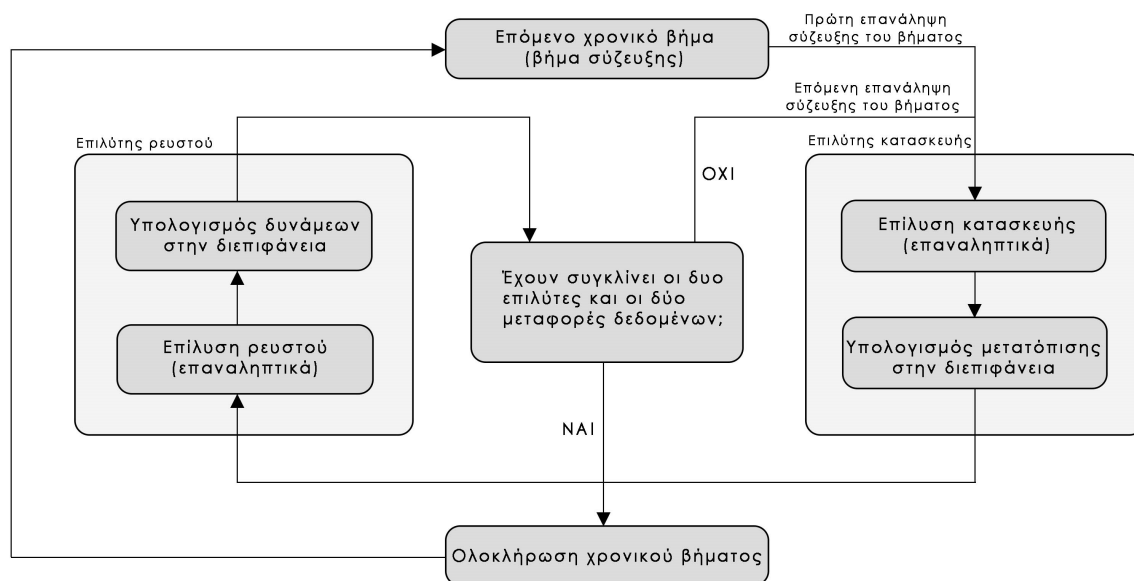
## 2.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΟΗΣ ΡΕΥΣΤΟΥ-ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ

Η σύζευξη των δύο υποσυστημάτων γίνεται μέσω του Systems Coupling του Ansys Workbench. Αυτό ουσιαστικά συντονίζει την σειρά με την οποία γίνονται οι επιλύσεις και τις ανταλλαγές των δεδομένων. Οι ανταλλαγές αυτές αναφέρονται στην διεπιφάνεια που χωρίζει το στερεό από το ρευστό, δηλαδή στην εσωτερική επιφάνεια του αγωγού και την εξωτερική επιφάνεια του ρευστού. Τα δεδομένα που ανταλλάσσονται αφορούν με κατεύθυνση από τον επιλύτη του στερεού τοιχώματος προς τον επιλύτη του ρευστού τις μετατοπίσεις των κόμβων της διεπιφάνειας, και με κατεύθυνση από το ρευστό προς το στερεό τοίχωμα τις δυνάμεις που προκύπτουν από την πίεση που ασκεί το ρευστό στον αγωγό. Μετά από κάθε ανταλλαγή γίνεται έλεγχος σύγκλισης των δεδομένων στην διεπιφάνεια. Αναλυτικά η επαναληπτική μέθοδος σύζευξης είναι ξεκινώντας από την πρώτη επανάληψη είναι:

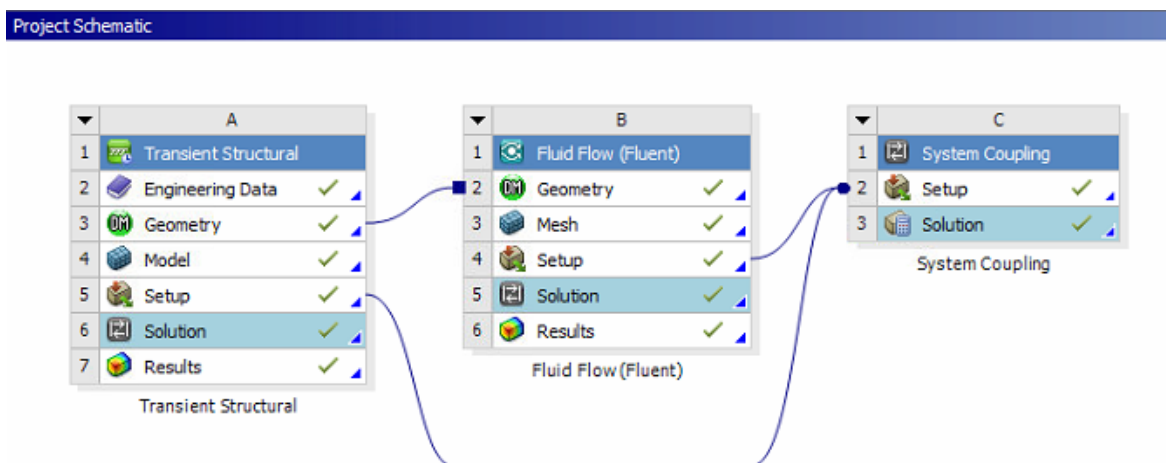
Ξεκινά ένα βήμα σύζευξης (coupling step) και ταυτόχρονα και η πρώτη επανάληψη σύζευξης (coupling iteration). Σε κάθε επανάληψη σύζευξης αρχικά ο επιλύτης του στερεού τοιχώματος λύνει επαναληπτικά το μοντέλο της δομής αγνοώντας ουσιαστικά τις αλλαγές στο ρευστό. Αφού υπολογίσει με βάση τις δικές του διεγέρσεις ποιες είναι οι μετατοπίσεις στην διεπιφάνεια τις επικοινωνεί στον επιλύτη της δυναμικής του ρευστού με μία μεταφορά δεδομένων (data transfer). Η σχετική αλλαγή της θέσης της διεπιφάνειας ορίζει ουσιαστικά την ταχύτητα του ρευστού σε αυτήν. Ο δεύτερος επιλύτης αναλαμβάνει να λύσει επαναληπτικά το ρευστό και ως μέρος της λύσης του βρίσκει και τις δυνάμεις που ασκούνται στην διεπιφάνεια από την πίεση του ρευστού. Αυτές οι δυνάμεις μεταφέρονται ως δεύτερη ανταλλαγή δεδομένων στον επιλύτη του στερεού τοιχώματος. Εφόσον δεν έχει υπάρξει σύγκλιση ή ο αριθμός των επαναλήψεων σύζευξης δεν έχει φτάσει τον μέγιστο, ξεκινά η επόμενη επανάληψη σύζευξης. Σε αυτήν ο επιλύτης του ρευστού πέρα από τις εξωτερικές διεγέρσεις που είχε προηγουμένως λαμβάνει υπόψιν και τις δυνάμεις στην διεπιφάνεια λόγω του ρευστού όπως υπολογίστηκαν στην προηγούμενη επανάληψη σύζευξης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου είτε συγκλίνουν όλα τα μέρη της επίλυσης, δηλαδή το στερεό τοίχωμα, το ρευστό και οι δύο μεταφορές δεδομένων, είτε ο αριθμός των επαναλήψεων σύζευξης φτάσει τον μέγιστο που έχει οριστεί. Σε κάθε περίπτωση το βήμα σύζευξης ολοκληρώνεται και το πρόγραμμα προχωρά στο επόμενο βήμα.

Η διαδικασία φαίνεται στο διαγραμματικά στο Σχήμα 2.4.1 ενώ στο περιβάλλον του Ansys Workbench η σύζευξη μέσω System Coupling και οι διασυνδέσεις των διαφόρων υποσυστημάτων φαίνονται όπως στο Σχήμα 2.4.2.



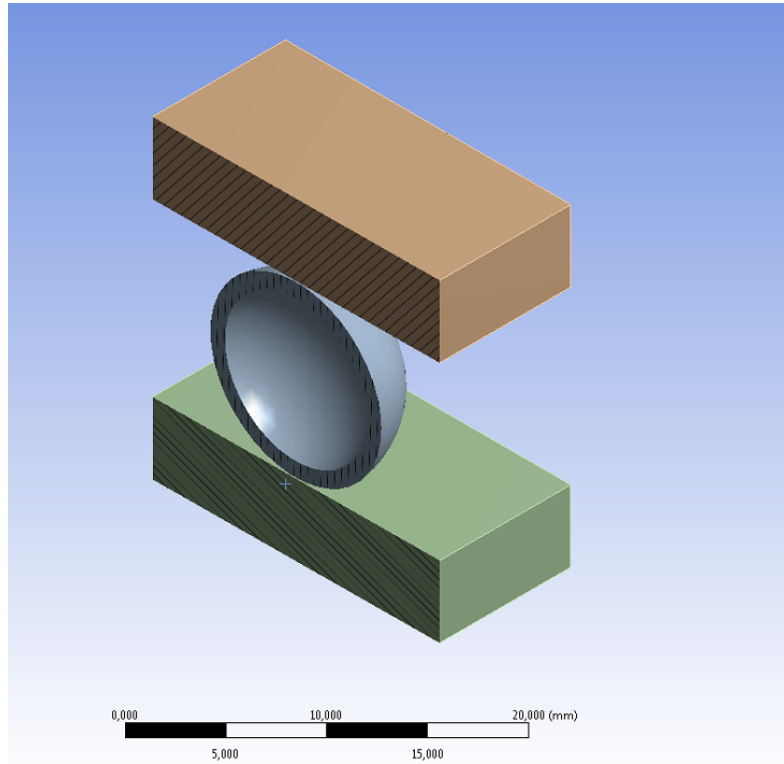


Σχήμα 2.4.1: Διαγραμματική απεικόνιση αλγορίθμου αμφίδρομης σύζευξης



Σχήμα 2.4.2: Σύζευξη μέσω System Coupling στο περιβάλλον του Ansys Workbench

Όπως φαίνεται η σύζευξη του structural με το fluent γίνεται με την ανταλλαγή δεδομένων για την επιφάνεια fsi μόνο στο τέλος κάθε χρονικού βήματος του αντίστοιχου επιλύτη και όχι κατά την διάρκειά του. Αυτό σημαίνει πως κατά την διάρκεια επίλυσης των εξισώσεων του structural για ένα χρονικό βήμα, η αντίδραση από το ρευστό είναι σταθερή και ίση με την αντίδραση που υπολογίστηκε από το fluent στην τελευταία ανταλλαγή δεδομένων. Αφού το βήμα ολοκληρωθεί το αποτέλεσμα που θα σταλεί στο fluent θα είναι ένας βρόχος με διαφορετικό όγκο, με αποτέλεσμα, αν έχουμε θεωρήσει την πυκνότητα σταθερή, να έχουμε διαφορετική μάζα ρευστού! Μάλιστα το ρευστό που “χάθηκε” ή “κερδήθηκε” ανάλογα με το αν ο όγκος αυξήθηκε ή μειώθηκε δεν έχει πλέον κανένα τρόπο να επηρεάσει το σύστημα-δεν υπάρχει πουθενά. Το αποτέλεσμα είναι δηλαδή το ίδιο με το να χρησιμοποιούσαμε μονόδρομη αλληλεπίδραση στην μοντελοποίηση. Σε ένα παράδειγμα συμπίεσης σφαιρικού κελύφους πληρωμένου με νερό μπορούμε να επαληθεύσουμε την παραπάνω διαπίστωση (Σχήματα 2.4.3-7).



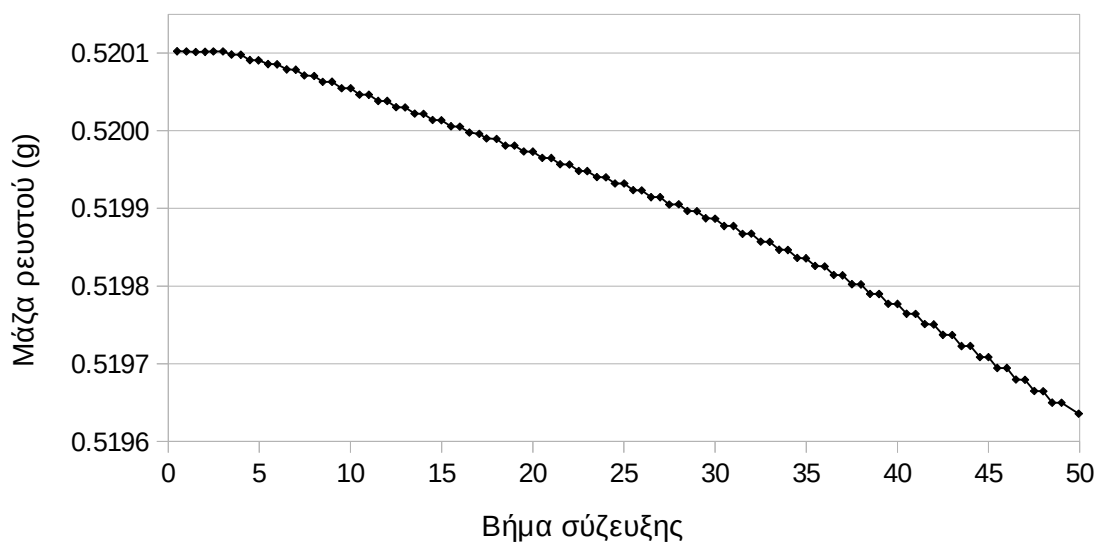
Σχήμα 2.4.3: Το σφαιρικό κέλυφος από σιλικόνη εσωτερικής διαμέτρου 10 mm και εξωτερικής διαμέτρου 12 mm συμπιέζεται κατακόρυφα κατά 0.25 mm σε διάρκεια 0.25 s.

Ενώ στις περιπτώσεις της μονόδρομης αλληλεπίδρασης και της αμφίδρομης αλληλεπίδρασης με σταθερή πυκνότητα, σε κάθε επανάληψη σύζευξης ο όγκος και η μάζα παραμένουν στην τιμή της πρώτης επανάληψης, δηλαδή χάνονται οριστικά, στην περίπτωση της αμφίδρομης αλληλεπίδρασης με συμπιεστό ρευστό κάθε επανάληψη σύζευξης ενός βήματος σύζευξης επαναφέρει ως ένα βαθμό τον χαμένο όγκο και μάζα. Ποσοτικά ξεκινώντας από μάζα  $5.2010241 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$

στις δύο πρώτες περιπτώσεις η τελική τιμή είναι  $5.1963416 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$  και  $5.1963413 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$  αντίστοιχα, οπότε έχουμε μείωση  $9.0 \cdot 10^{-2} \%$ . Στην περίπτωση του συμπιεστού ρευστού η τελική μάζα είναι  $5.2009182 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$  δηλαδή η μάζα μειώνεται  $2.0 \cdot 10^{-3} \%$ .

### Μάζα ρευστού συναρτήσει βημάτων σύζευξης

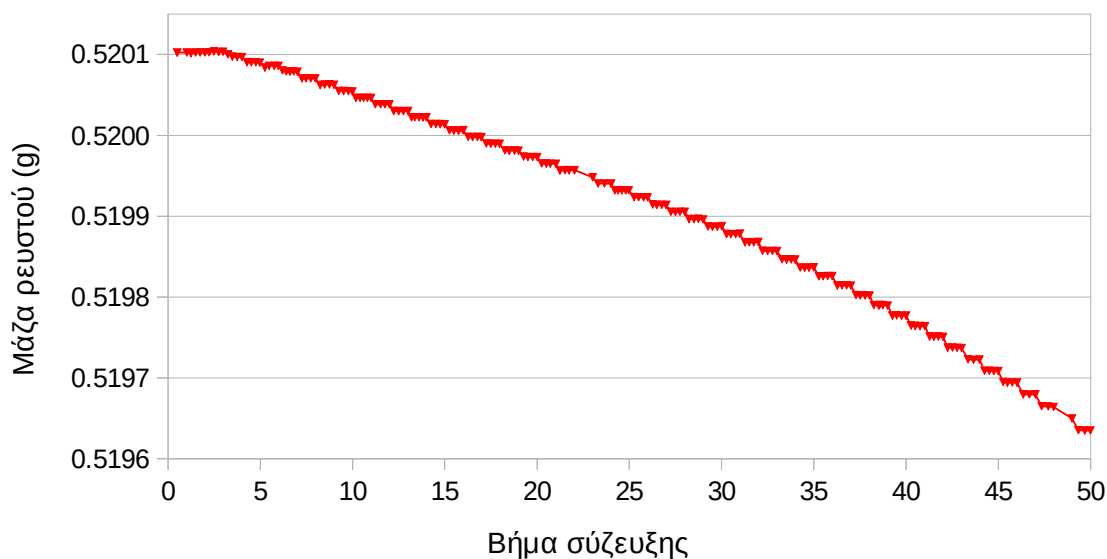
Μονόδρομη Αλληλεπίδραση



Σχήμα 2.4.4: Μείωση μάζας ρευστού σε προσομοίωση συμπιεζόμενης σφαίρας πληρωμένης με νερό για την περίπτωση σύζευξης με μονόδρομη αλληλεπίδραση

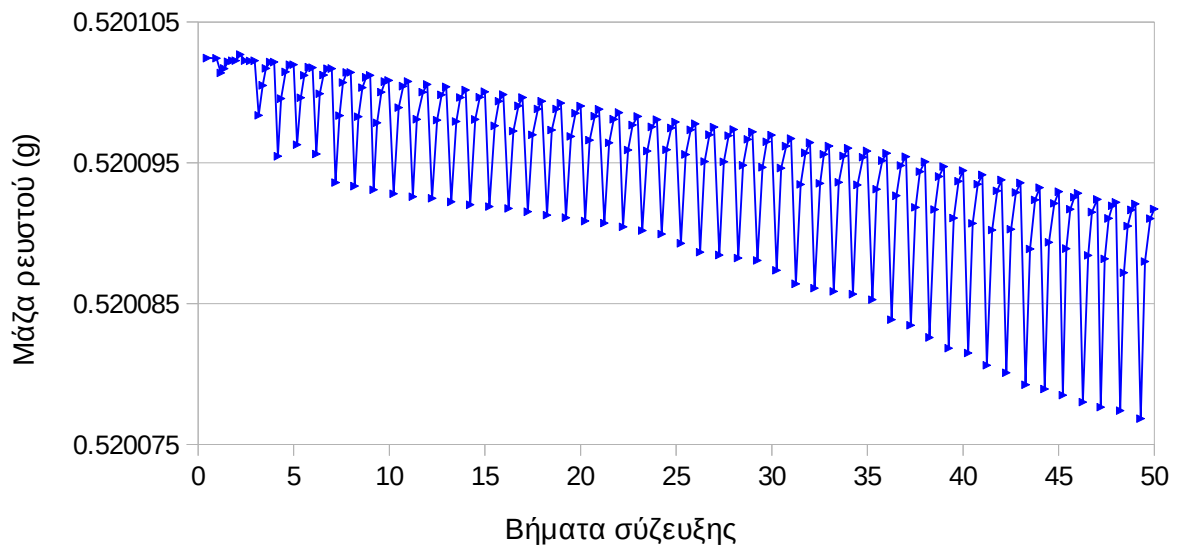
### Μάζα ρευστού συναρτήσει βημάτων σύζευξης

Αμφίδρομη αλληλεπίδραση με σταθερή πυκνότητα



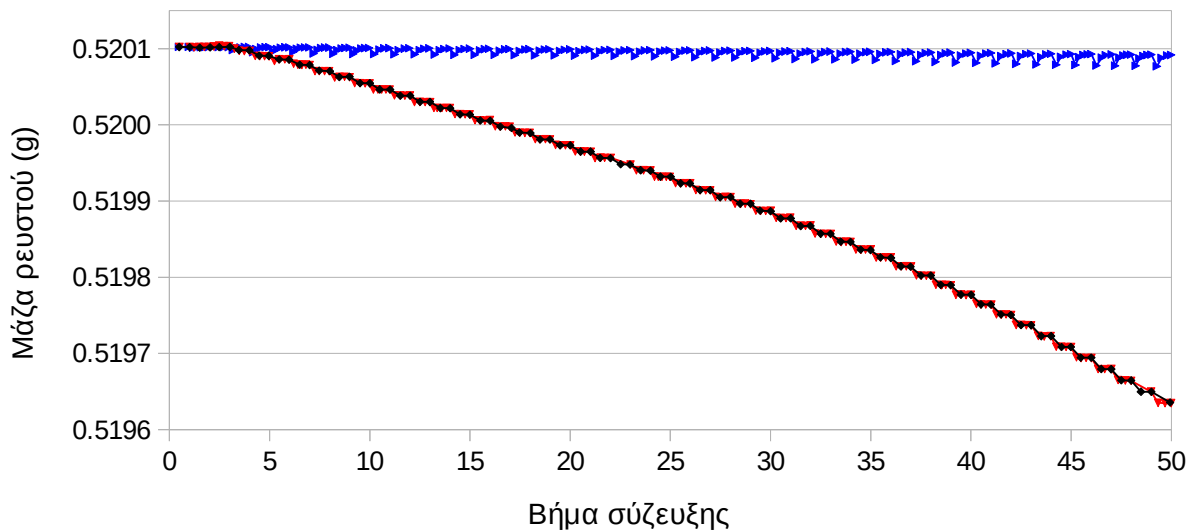
Σχήμα 2.4.5: Μείωση μάζας ρευστού σε προσομοίωση συμπιεζόμενης σφαίρας πληρωμένης με νερό για την περίπτωση σύζευξης με αμφίδρομη αλληλεπίδραση με σταθερή πυκνότητα ρευστού

Μάζα ρευστού συναρτήσει βημάτων σύζευξης  
 Αμφίδρομη Αλληλεπίδραση με Μεταβλητή Πυκνότητα



Σχήμα 2.4.6: Μείωση μάζας ρευστού σε προσομοίωση συμπιεζόμενης σφαίρας πληρωμένης με νερό για την περίπτωση σύζευξης με αμφίδρομη αλληλεπίδραση με μεταβλητή πυκνότητα ρευστού

Επίδραση της επιλογής τρόπου αλληλεπίδρασης στην "χαμένη" μάζα ρευστού



- ◆— Μονόδρομη Αλληλεπίδραση
- ▼— Αμφίδρομη Αλληλεπίδραση με σταθερή πυκνότητα
- ▲— Αμφίδρομη αλληλεπίδραση με μεταβλητή πυκνότητα

Σχήμα 2.4.7: Σύγκριση της μείωσης μάζας ρευστού σε προσομοιώσεις συμπιεζόμενης σφαίρας πληρωμένης με νερό για τις διάφορες περιπτώσεις σύζευξης

Έτσι γίνεται φανερό γιατί χρησιμοποιούνται οι καταστατικές εξισώσεις Tait. Η πυκνότητα θεωρείται μεταβλητή και όταν το fluent λαμβάνει τα δεδομένα μετά την ολοκλήρωση ενός βήματος από το structural στο οποίο ο όγκος μειώθηκε, το ρευστό πλέον θεωρείται πως συμπιέστηκε και αυξάνεται η πυκνότητά του και η πίεσή του. Η αύξηση στην πίεση οδηγεί στην άσκηση δύναμης στο τοίχωμα λόγω της συμπίεσης που έγινε, πράγμα που ήταν αδύνατο με την θεώρηση της σταθερής πυκνότητας. Αυτή η δύναμη στο τοίχωμα μεταφέρεται μέσω της σύζευξης στο στερεό τμήμα όπου αυτήν την φορά συνυπολογίζεται στην παραμόρφωση για το ίδιο χρονικό βήμα οπότε στο τέλος του βήματος η μείωση του όγκου είναι μικρότερη. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την συνολική σύγκλιση του βήματος όταν και η μείωση του όγκου και της μάζας θα είναι κατά πολύ μικρότερη. Η μάζα δεν μένει ανεπηρέαστη αφού σε κάθε βήμα σύζευξης πλησιάζει την μάζα στο προηγούμενο βήμα όμως όταν συγκλίνει και προχωρά στο επόμενο βήμα δεν έχει προλάβει να φτάσει την προηγούμενη τιμή της και παραμένει μικρότερη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΕΝΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τους σκοπούς της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν εύρος διαφορετικών μοντέλων με στόχο την σταδιακά ακριβέστερη προσέγγιση της πραγματικής διάταξης. Τα αρχικά μοντέλα είναι μικρότερα τόσο από άποψη γεωμετρικών διαστάσεων όσο και από άποψη πολυπλοκότητας στην φυσική που μοντελοποιείται. Δοκιμάζονται στην συνέχεια διάφορες προσεγγίσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά της διάταξης, όπως για παράδειγμα η γεωμετρική προσθήκη περιοριστικών δακτυλίων για την συγκράτηση του αγωγού στην επιφάνεια στήριξης, η διαφορετική υλοποίηση των επαφών των σωμάτων ή διαφορετικές μέθοδοι διακριτοποίησης. Καταλήγουμε έτσι σε ένα τελικό μοντέλο πλήρους γεωμετρίας με τα επιμέρους χαρακτηριστικά επιλεγμένα έτσι ώστε να υποβοηθάται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων διατηρώντας παράλληλα το μοντέλο πιστό στο πείραμα.

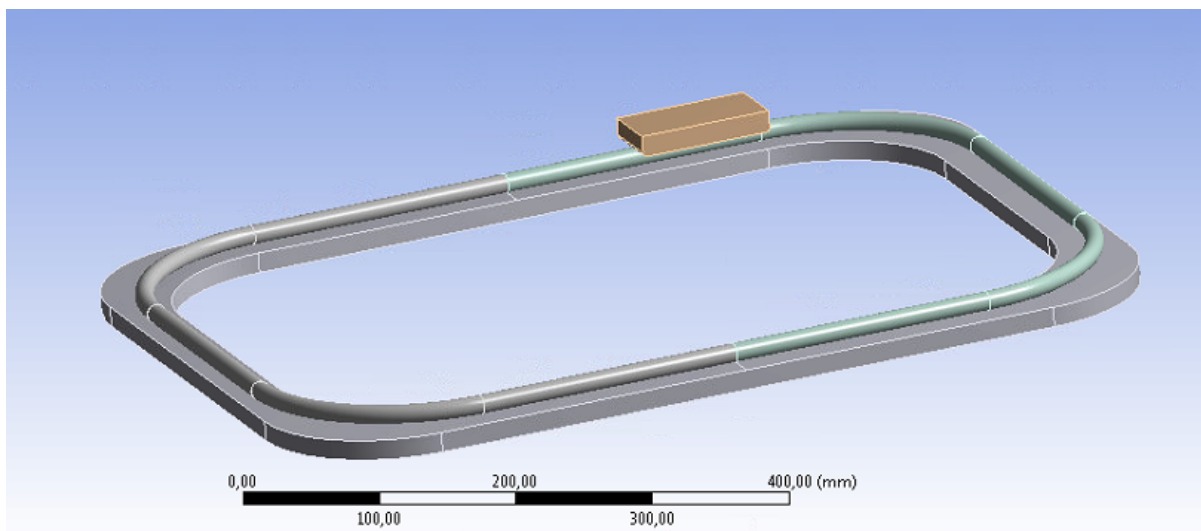
Καθώς τα αποτελέσματα αυτής της μοντελοποίησης κρίθηκαν ανεπαρκή ακολούθησε η διαφορετική μοντελοποίηση με την θεώρηση μόνο της γεωμετρίας του εσωτερικού του ακάμπτου αγωγού. Αυτήν την φορά μοντελοποίηση έγινε εξ αρχής με την πραγματική γεωμετρία του αγωγού καθώς και για το πραγματικό μήκος αγωγού θεωρώντας τον αγωγό ευθύ. Σε αυτά τα γεωμετρικά μοντέλα έγιναν προσομοιώσεις με κάθε φορά επιλογή διαφορετικού συνδυασμού οριακών συνθηκών στα άκρα του αγωγού, οι οποίες προέρχονταν από τις πειραματικές μετρήσεις.

Τα προαναφερθέντα μοντέλα καθώς και ο τρόπος δημιουργίας τους αναφέρονται αναλυτικότερα σε αυτό το κεφάλαιο.

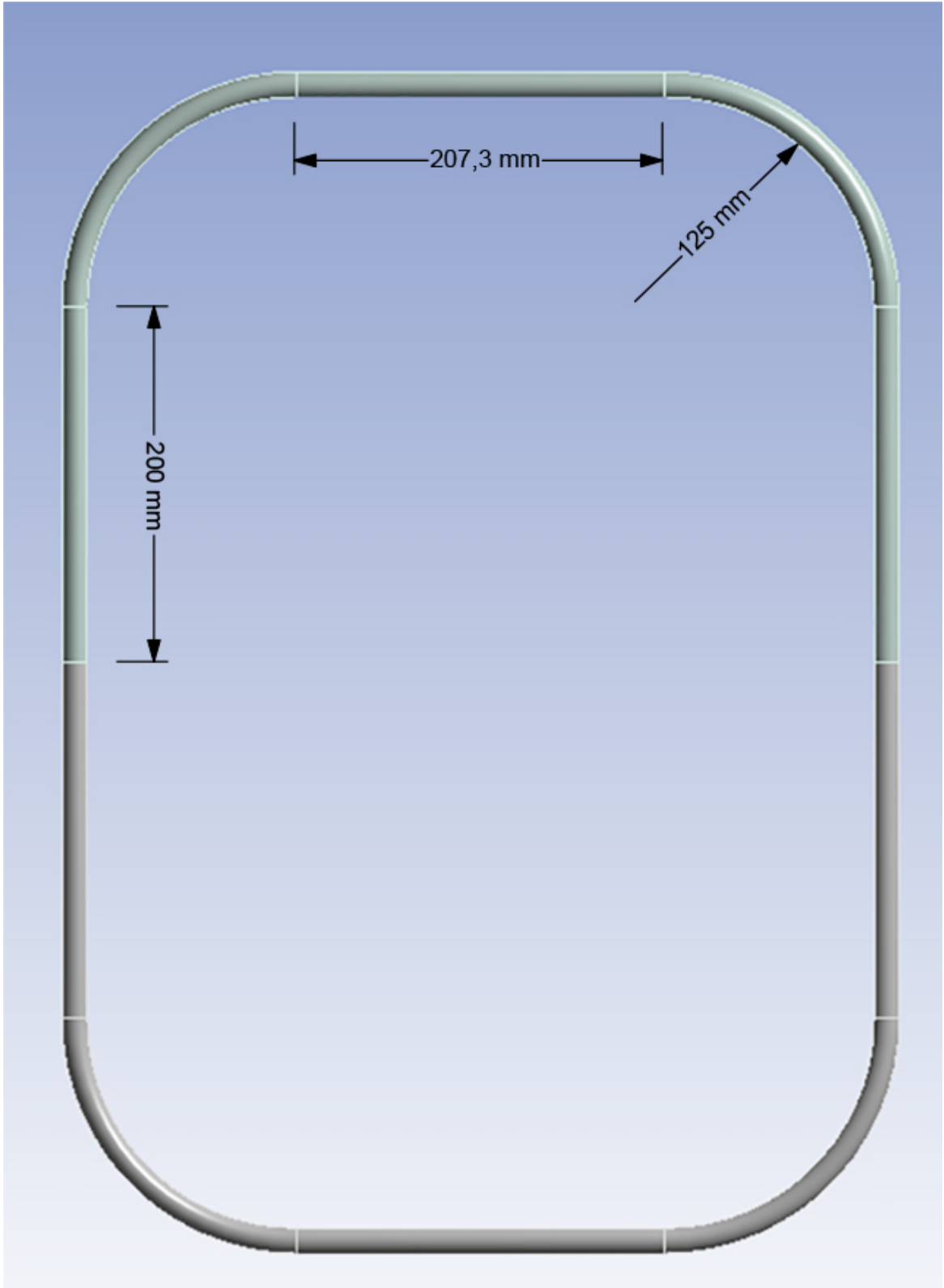
## 3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ

Εκτενέστερα περιγράφεται η γεωμετρία τριών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την διάταξη: του τελικού μοντέλου που λαμβάνει υπόψιν και τη μηχανική του παραμορφώσιμου αγωγού και δύο που μοντελοποιούν μόνο το εσωτερικό του άκαμπτου αγωγού. Οι γεωμετρίες των λοιπών μοντέλων και μικρές παραλλαγές τους που χρησιμοποιήθηκαν δεν θα περιγραφούν αναλυτικά.

Η τελική γεωμετρία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την αμφίδρομη προσομοίωση και των επιμέρους στοιχείων που το απαρτίζουν φαίνονται στα σχήματα 3.2.1-5. Σε αυτή την γεωμετρία ο βρόχος έχει τις πραγματικές του διαστάσεις δηλαδή αποτελείται από έναν εύκαμπτο αγωγό μήκους 1 m και έναν άκαμπτο αγωγό μήκους 1 m. Η βάση στήριξης σχεδιάζεται μόνο γύρω από τον βρόχο. Το έμβολο δεν έχει το σχήμα του πέλματος συμπίεσης, δηλαδή ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο αλλά προσθέτουμε και μια μικρή ακτίνα καμπυλότητας για διευκόλυνση της σύγκλισης:

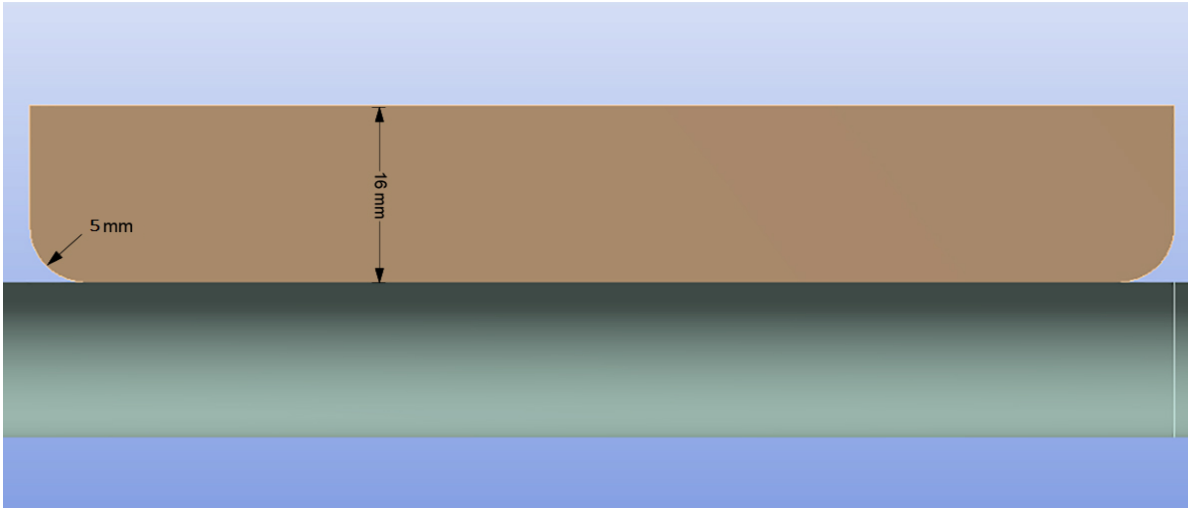


Σχήμα 3.2.1: Όψη του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις αμφίδρομης αλληλεπίδρασης

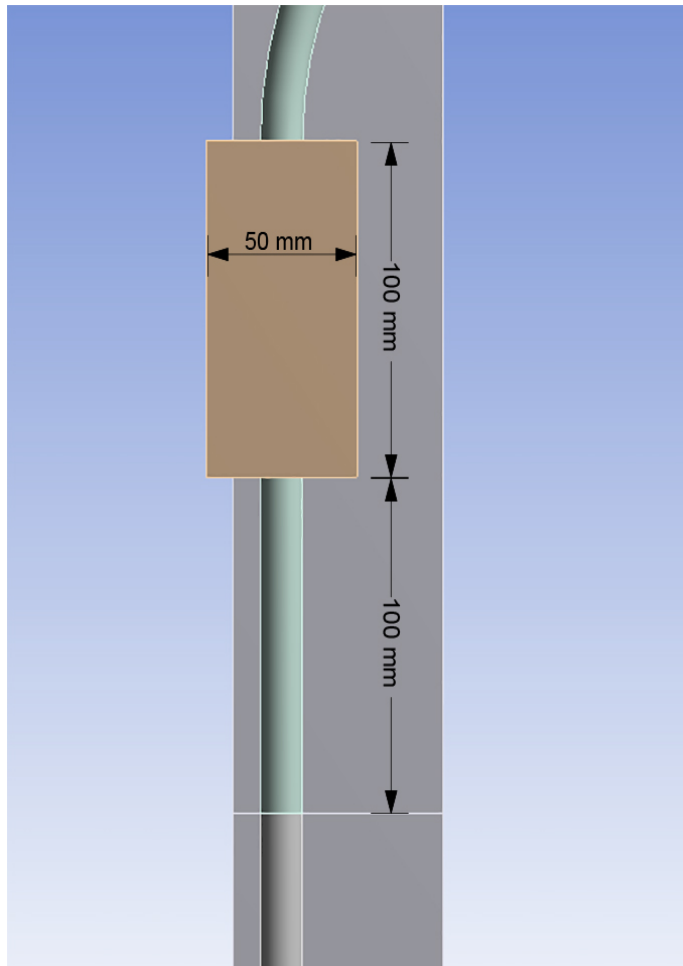


Σχήμα 3.2.2: Κάτοψη του βρόχου αγωγών. Ο άκαμπτος αγωγός είναι συμμετρικός με τον εύκαμπτο

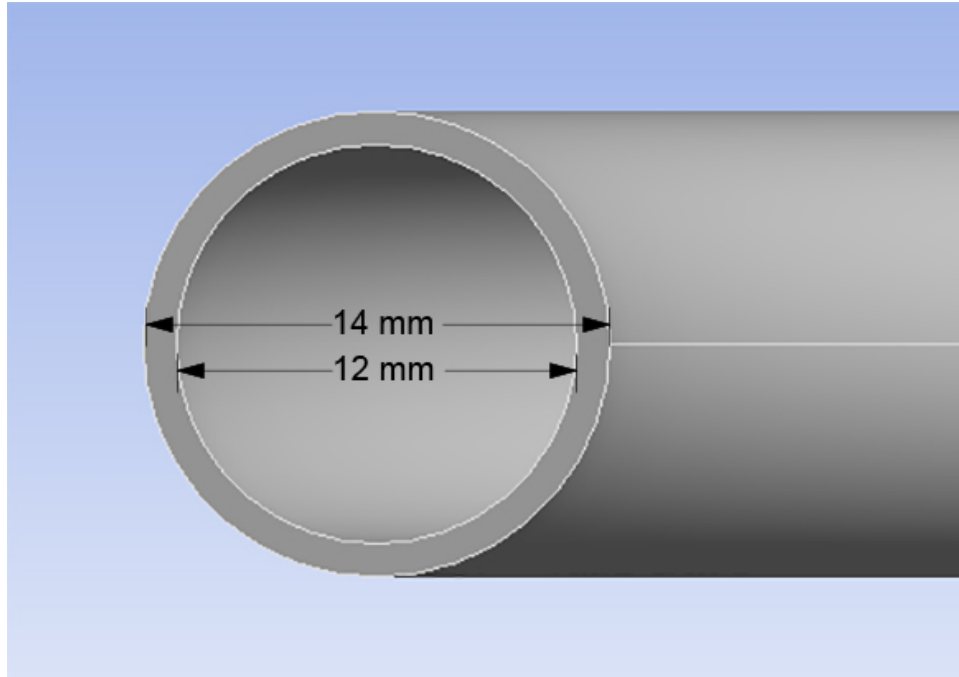




Σχήμα 3.2.3: Διαστάσεις του εμβόλου

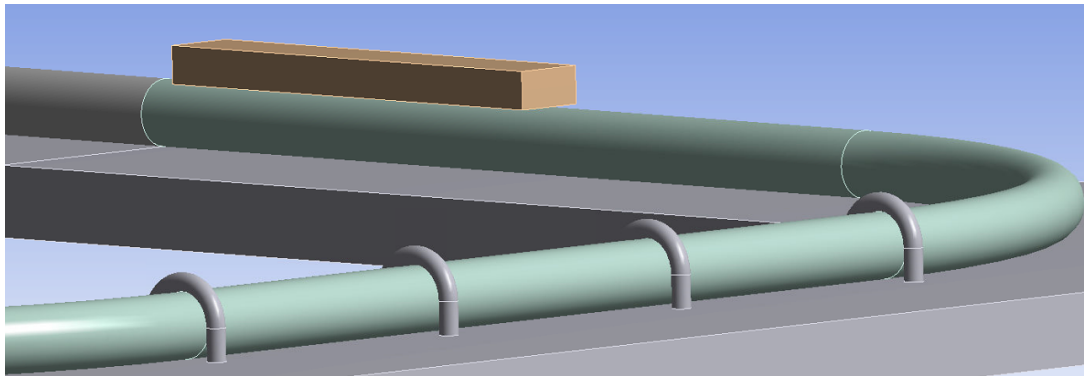


Σχήμα 3.2.4: Θέση του εμβόλου στον εύκαμπτο αγωγό

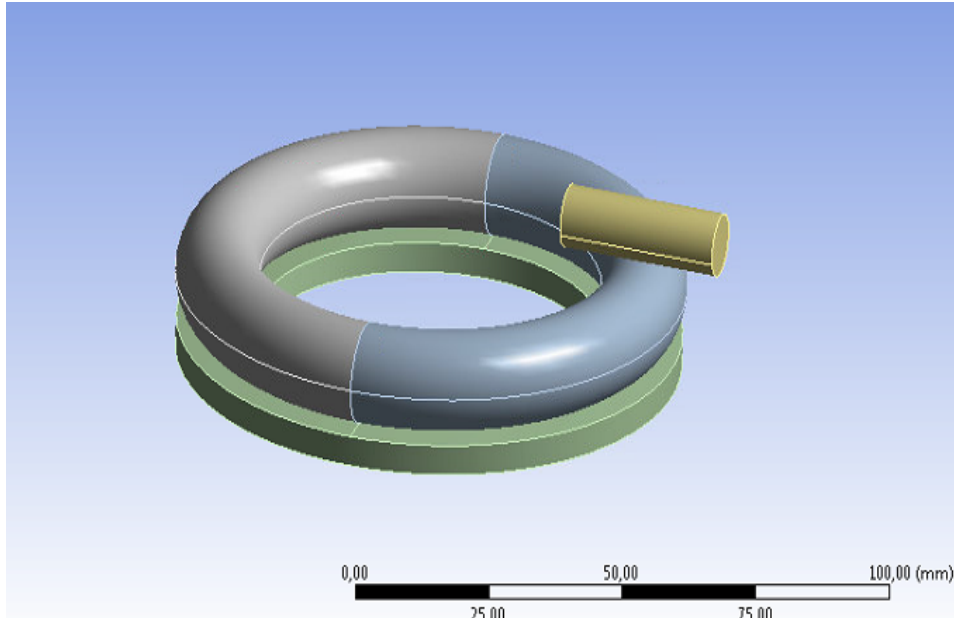


Σχήμα 3.2.5: Εσωτερική και εξωτερική διάμετρος του βρόχου

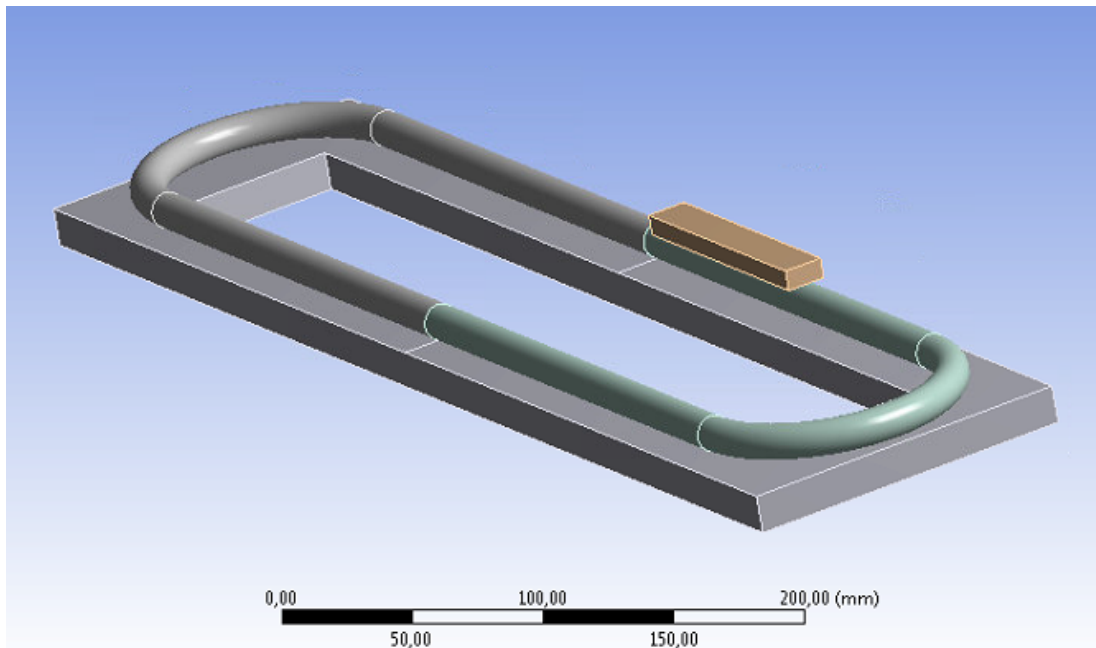
Γεωμετρίες άλλων μοντέλων αμφίδρομης αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιήθηκαν για να διερευνήσουν είτε την φυσική συμπεριφορά του συστήματος είτε την επίδραση διαφορετικών πλεγμάτων και συμπεριλάμβαναν το στερεό μέρος εμφανίζονται στα σχήματα 3.2.6-9.



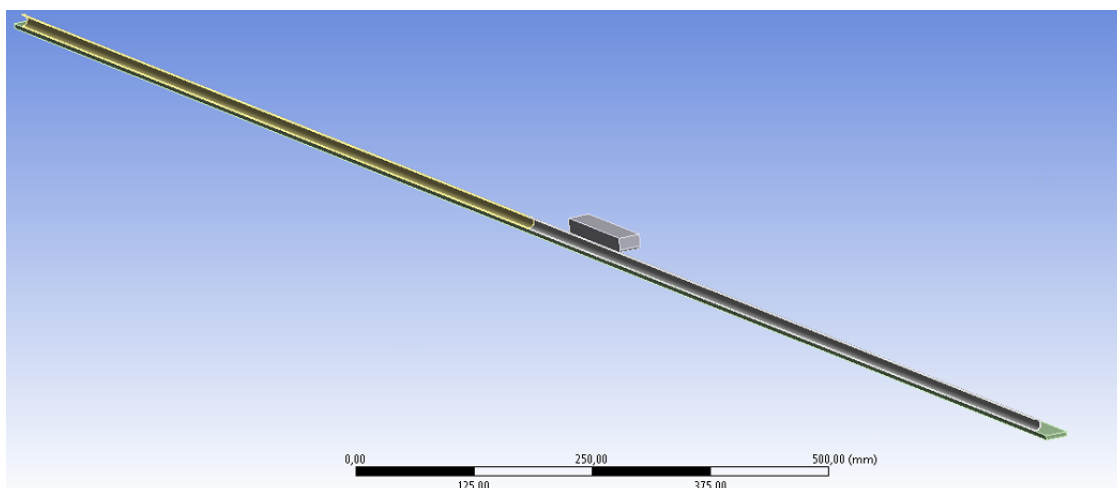
Σχήμα 3.2.6: Μοντέλο με τέσσερις περιοριστικούς δακτυλίους που έχουν προστεθεί γεωμετρικά στο εύκαμπτο τμήμα



Σχήμα 3.2.7: Μοντέλο μικρότερης γεωμετρίας με κυκλικό βρόχο



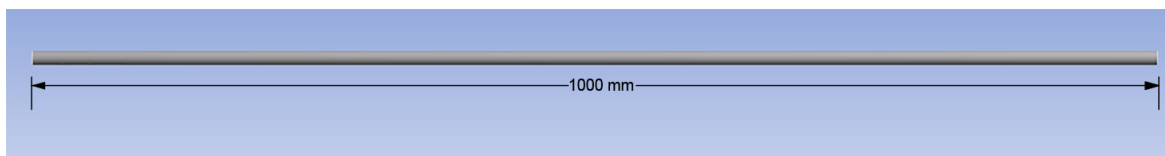
Σχήμα 3.2.8: Μοντέλο μικρότερης γεωμετρίας με βρόχο σχήματος ομοίου με τον πραγματικό



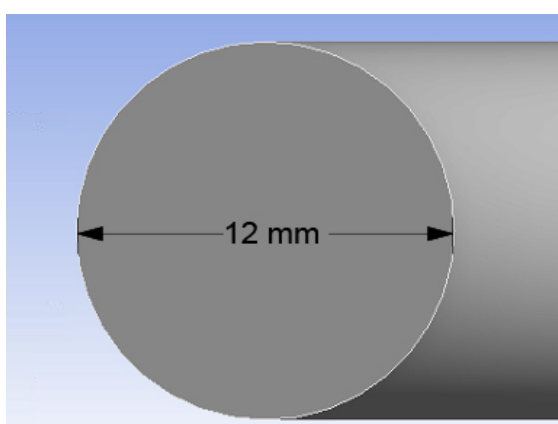
Σχήμα 3.2.9: Μοντέλο ευθύ αγωγού συνολικού μήκους 2 m. Το πρόβλημα σε αυτήν την περίπτωση είναι συμμετρικό και μοντελοποιείται η μισή γεωμετρία

Η δεύτερη κατηγορία μοντέλων που αποτελείται μόνο από το εσωτερικό του άκαμπτου αγωγού σχεδιάστηκε θεωρώντας τον αγωγό καμπύλο είτε ευθύ. Σε αυτήν την περίπτωση κατά την κίνηση του εμβόλου ο χώρος που εξετάζουμε παραμένει εντελώς απαραμόρφωτος καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου.

Οι δύο γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση μοντελοποίησης μόνο του εσωτερικού του άκαμπτου αγωγού είναι μία καμπύλη (ίδια με του σχήματος 3.2.2 θεωρώντας μόνο τον έναν από τους δύο αγωγούς του βρόχου) και μία ευθεία (ευθύς αγωγός μήκους 1 m-Σχήμα 3.2.10). Η διατομή και στις δύο περιπτώσεις είναι κυκλική διαμέτρου 12 mm (Σχήμα 3.2.11).



Σχήμα 3.2.10: Εσωτερικό άκαμπτου ευθύ αγωγού μήκους 1 m



Σχήμα 3.2.11: Διατομή άκαμπτου αγωγού για την περίπτωση της καμπύλης και ευθείας γεωμετρίας

### 3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι μεγάλης σημασίας καθώς η χρήση διαφορετικών υλικών για τον αγωγό δημιουργεί ασυμμετρία που είναι απαραίτητη για την εμφάνιση μη μηδενικής μέσης παροχής. Μεγάλη σημασία έχουν προφανώς και οι ιδιότητες του ρευστού. Η ακριβής μηχανική συμπεριφορά των υλικών δεν είναι γνωστή. Γίνεται η υπόθεση πως συμπεριφέρονται ως ισότροπα, γραμμικά ελαστικά υλικά. Άλλη υπόθεση που θα μπορούσε να γίνει ειδικά για την σιλικόνη θα ήταν να θεωρηθεί ως υπερελαστικό υλικό συμπεριφοράς Mooney Rivlin [78][79]. Το υλικό του εύκαμπτου αγωγού είναι σιλικόνη (platinum cured silicone rubber) και του αποδίδονται οι ιδιότητες  $E=1.97 \text{ MPa}$ ,  $\nu=0.49$  και  $\rho=1130 \text{ kg/m}^3$  [80], όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας,  $\nu$  ο λόγος Poisson και  $\rho$  η πυκνότητα. Το υλικό του άκαμπτου αγωγού θεωρείται εξ ολοκλήρου Plexiglas με ιδιότητες  $E=3.3 \text{ GPa}$ ,  $\nu=0.35$  και  $\rho=1190 \text{ kg/m}^3$  [81].

Τα υλικά της βάσης στήριξης και του εμβόλου στα πλαίσια των προσομοιώσεων θεωρούνται πλήρως άκαμπτα και οι δυνάμεις, τάσεις και παραμορφώσεις που εμφανίζονται σε αυτά δεν ενδιαφέρουν οπότε και τα ακριβή χαρακτηριστικά των υλικών τους είναι άνευ ουσιαστικής σημασίας. Αντί για τα πραγματικά τους υλικά (κάποιο μοντέλο ξύλου για την βάση και A150-28 για το έμβολο) το υλικό που τους αποδίδεται στο Ansys είναι “structural steel” που αποτελεί ένα από τα προκαθορισμένα υλικά του προγράμματος με ιδιότητες  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $\nu=0.3$  και  $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ . Ορισμένες από τις ιδιότητες του ρευστού είναι γνωστές υπό συνθήκες. Συγκεκριμένα το ρευστό του πειράματος είναι υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου πυκνότητας  $\rho=1079.135591 \text{ kg/m}^3$  και κινηματικού ιξώδους  $\nu=1.1299624 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  στους 20 βαθμούς Κελσίου. Με αυτές τις ιδιότητες εισάγεται στην περίπτωση που λύνεται μόνο το ρευστοδυναμικό πρόβλημα. Επειδή δεν είναι γνωστές οι ιδιότητες του διαλύματος ως συμπιεστού ρευστού (δηλαδή οι ιδιότητες για τις καταστατικές εξισώσεις Tait) στις προσομοιώσεις αμφίδρομης αλληλεπίδρασης χρησιμοποιούνται ιδιότητες νερού. Έτσι θεωρούμε  $p_0=101325 \text{ Pa}$ ,  $\rho_0=998.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $K_0=2.2 \text{ GPa}$ ,  $n=7.15$ .

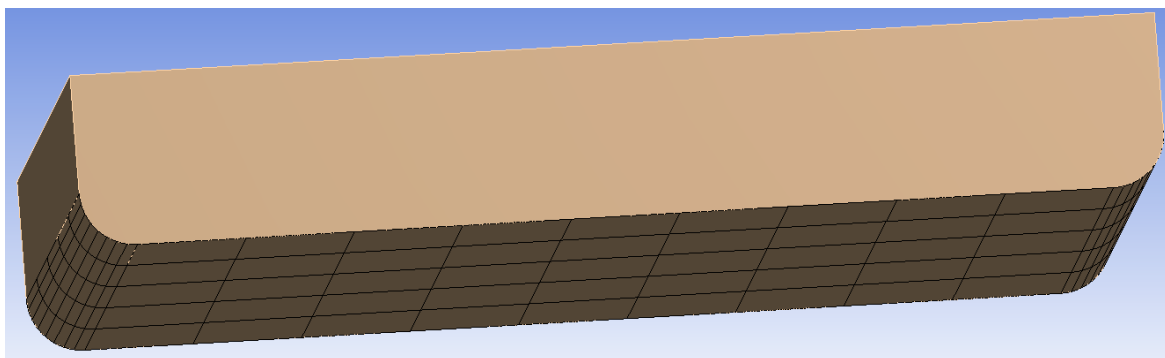
## 3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ

Τα πλέγματα στον αγωγό και στο ρευστό είναι ένα από τα ζητήματα που δημιούργησαν αρκετά προβλήματα στην επίλυση καθώς υπόκεινται σε μεγάλες παραμορφώσεις με αποτέλεσμα να αποτυγχάνουν λόγω υπερβολικής παραμόρφωσης (highly distorted elements) και αρνητικών όγκων κελιών (negative cell volumes) αντίστοιχα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της διάταξης σε σχέση με την υπολογιστική της μοντελοποίηση είναι ότι οι μεγαλύτερες διαστάσεις έχουν μεγάλη διαφορά με τις μικρότερες (πχ μήκος αγωγού 2 m σε σχέση με πάχος 1mm). Όμως τα στοιχεία του πλέγματος θα πρέπει να “πιάνουν” τις μικρότερες διαστάσεις με αποτέλεσμα να διαστασιολογούνται με βάση αυτές. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλος αριθμός στοιχείων τόσο στον αγωγό όσο και στο ρευστό.

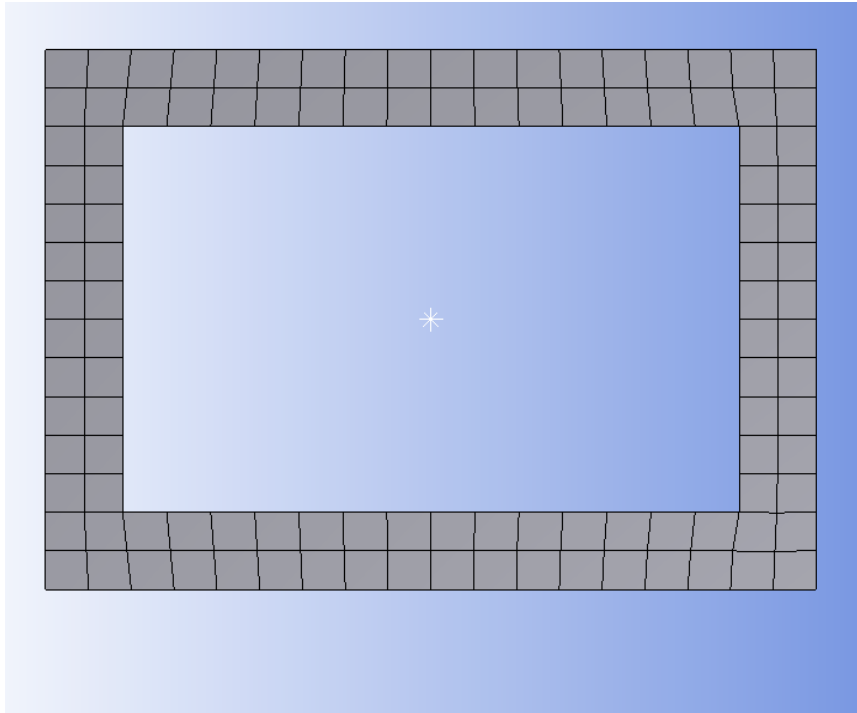
### 3.4.1 Πλέγματα Στερεών

Τα πλέγματα στη βάση στήριξης και το έμβολο (Σχήματα 3.4.1-2) είναι δομημένα και επιφανειακά καθώς δεν μας ενδιαφέρουν οι τάσεις στο εσωτερικό τους αλλά μόνο η επαφή με τον αγωγό. Πλέγμα δημιουργείται μόνο στην πάνω επιφάνεια της πλάκας στήριξης που είναι αυτή που έρχεται σε επαφή με τον αγωγό, καθώς και μόνο σε επιφάνειες του εμβόλου που μπορεί να έρθουν σε επαφή με τον αγωγό. Το σχήμα των στοιχείων είναι τετραπλευρικά και με δοκιμές βρέθηκε κατάλληλο μέγεθός τους ώστε να υλοποιούνται επαρκώς οι επαφές αλλά χωρίς υπερβολικά μεγάλο αριθμό κόμβων που θα καθυστερούν τις προσομοιώσεις. Για επιπλέον περιορισμό του αριθμού των στοιχείων της πλάκας στήριξης όπως αναφέρθηκε εκλέχθηκε και το τελικό σχήμα της.

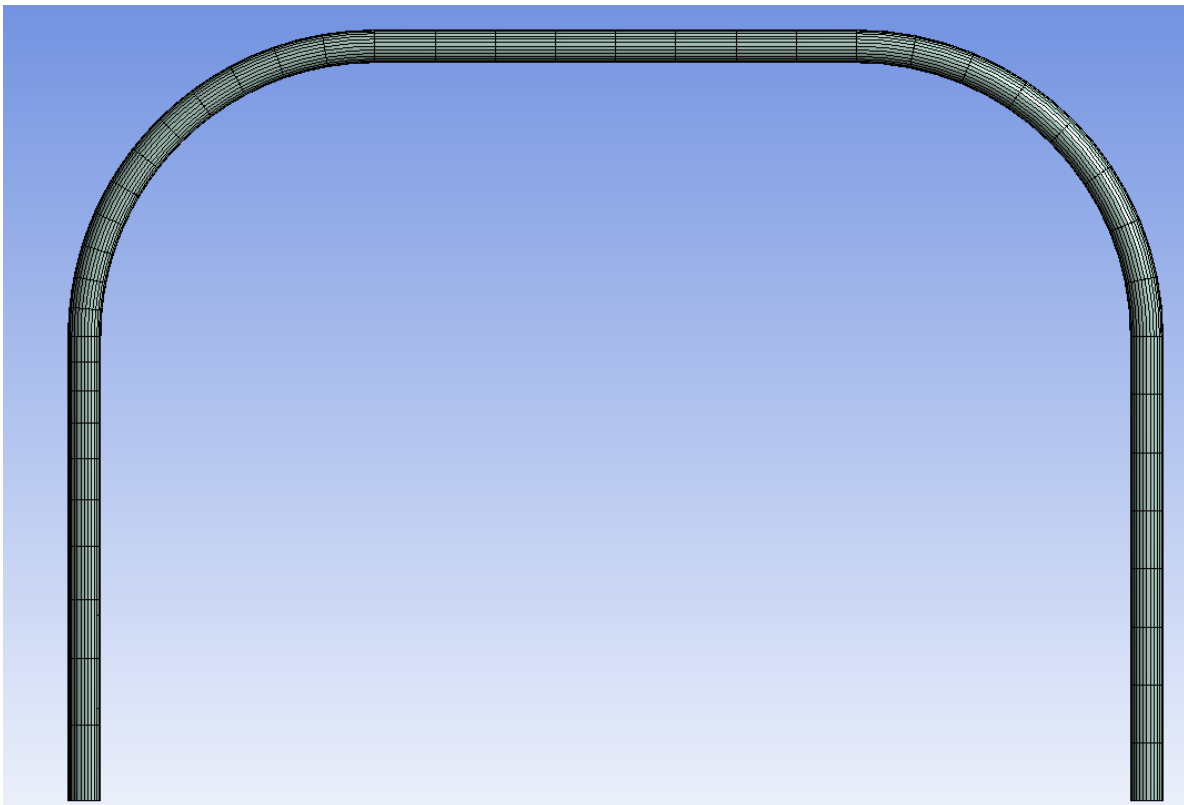
Για τον βρόχο κύριο μέλημα ήταν η ακριβής πλεγματοποίηση με μικρό αριθμό κελιών. Γι’ αυτό παρότι έγιναν δοκιμές με πρισματικά και τετραεδρικά πλέγματα, εν τέλει επιλέχθηκε να γίνει πλεγματοποίηση με εξαεδρικά στοιχεία. Τεχνική που χρησιμοποιήθηκαν για να μειωθεί ο αριθμός των στοιχείων ειδικά στον αγωγό είναι η χρήση μακρόστενων στοιχείων, με πύκνωση του πλέγματος στοχευμένα κοντά στην περιοχή του εμβόλου. Αυτό έγινε με χρήση της μεθόδου sweep (Σχήματα 3.4.3-5).



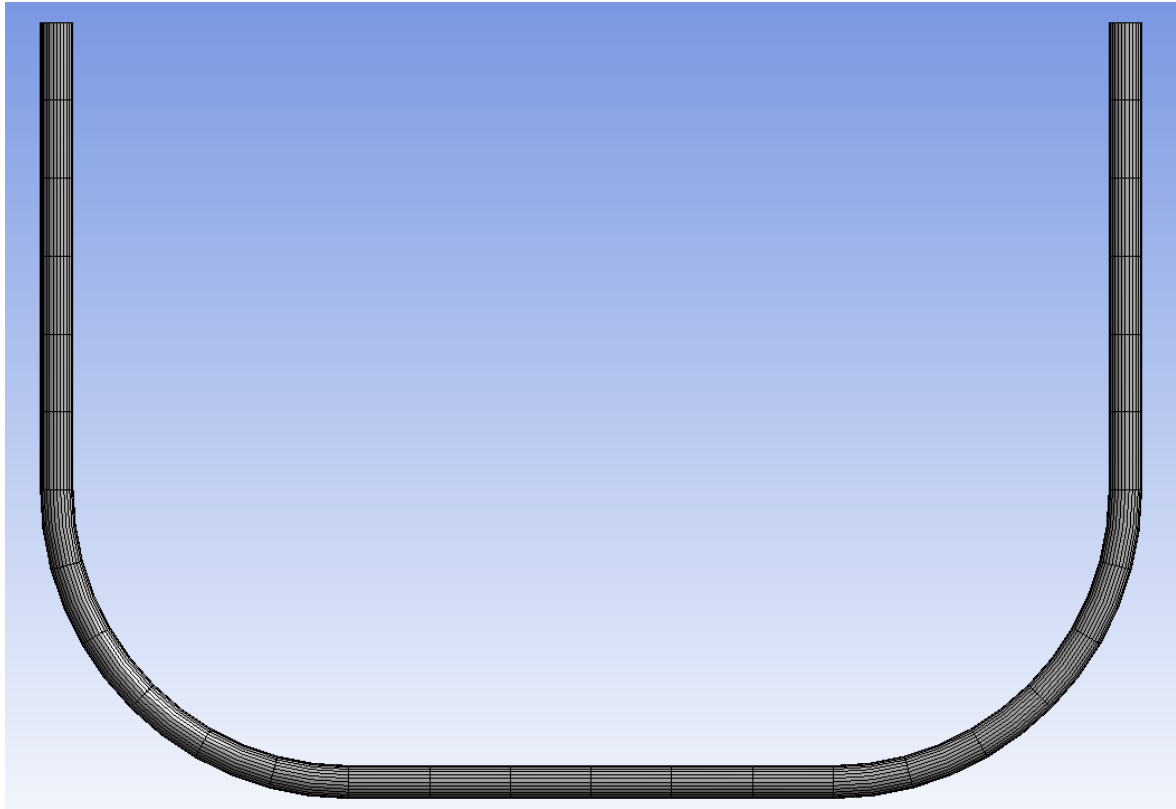
Σχήμα 3.4.1: Επιφανειακό πλέγμα εμβόλου



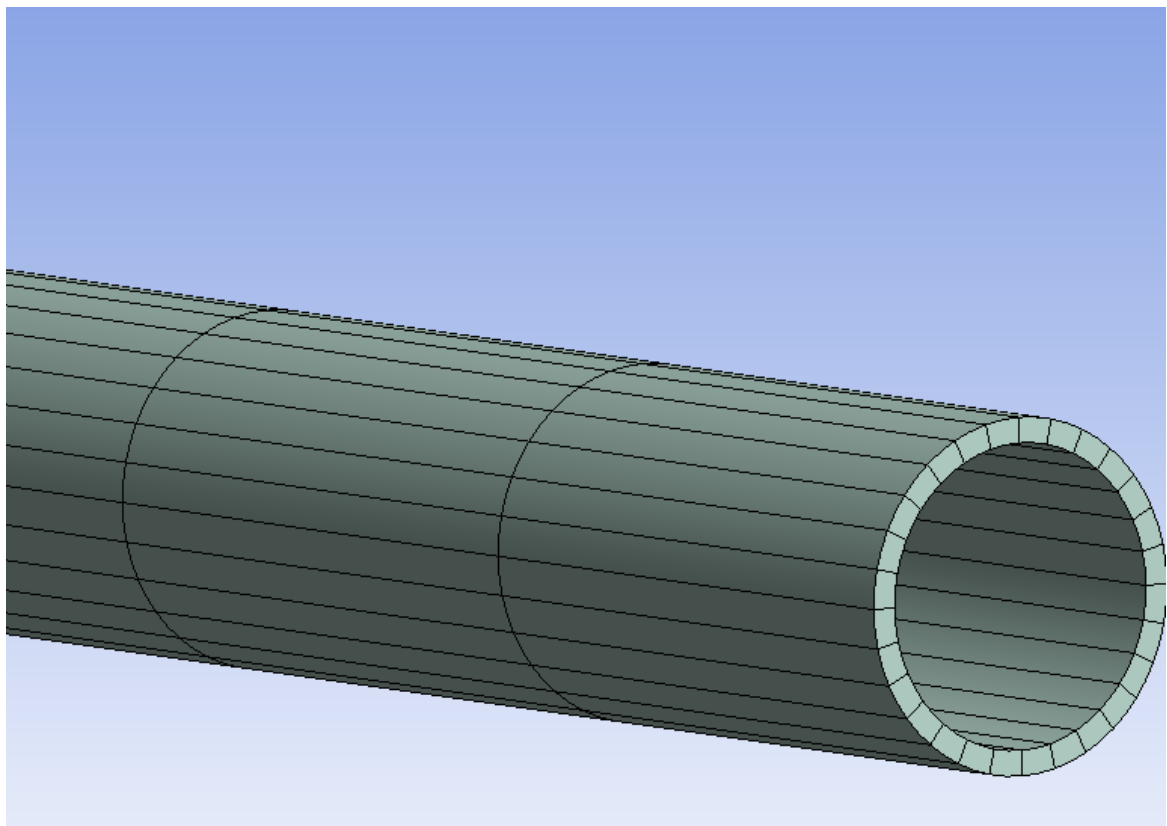
Σχήμα 3.4.2: Επιφανειακό πλέγμα βάσης στήριξης



Σχήμα 3.4.3: Πλέγμα εύκαμπτου αγωγού με μακρόστενα εξαεδρικά στοιχεία



*Σχήμα 3.4.4: Πλέγμα άκαμπτου αγωγού με μακρόστενα εξαεδρικά στοιχεία*

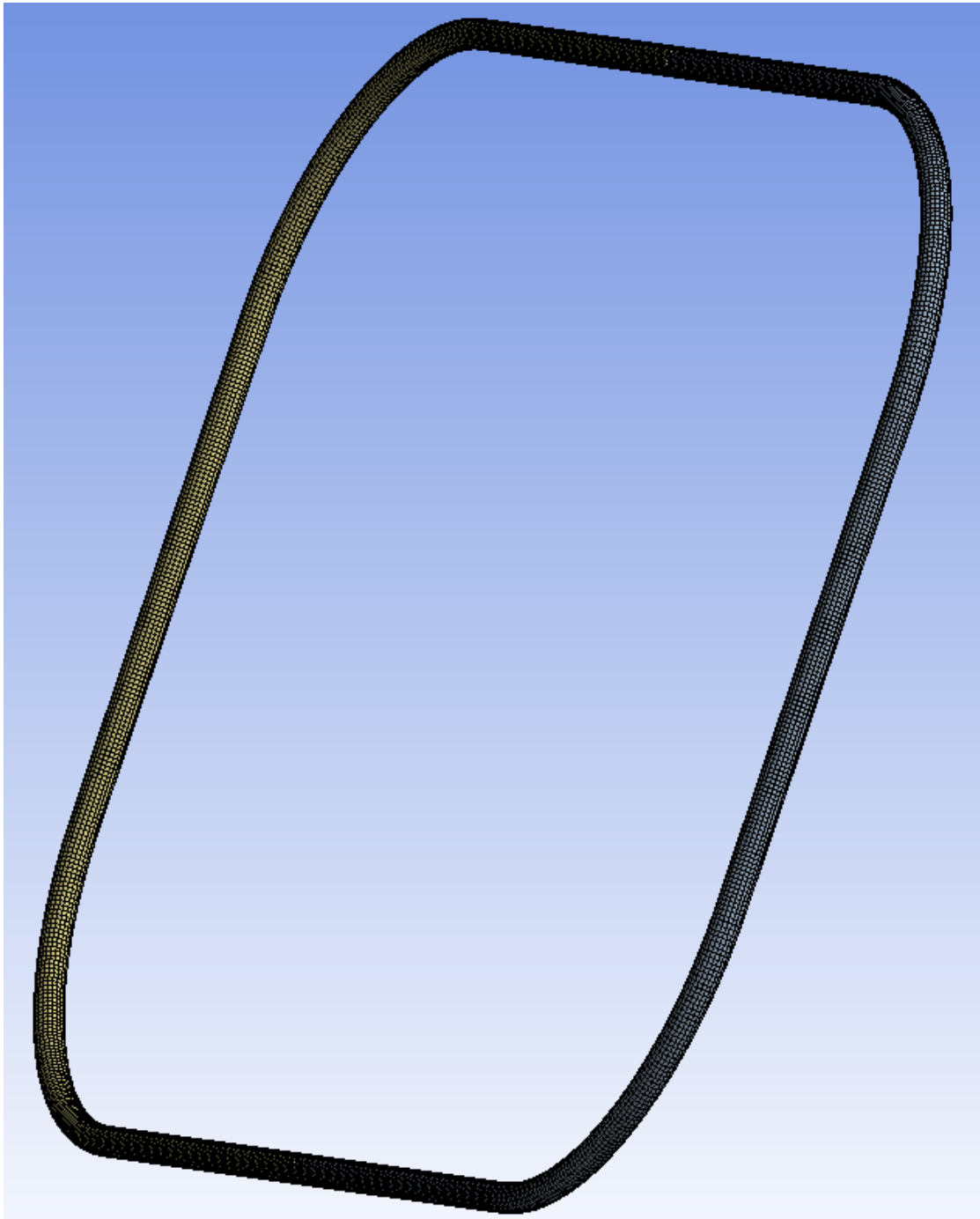


*Σχήμα 3.4.5: Λεπτομέρεια πλέγματος εύκαμπτου αγωγού*

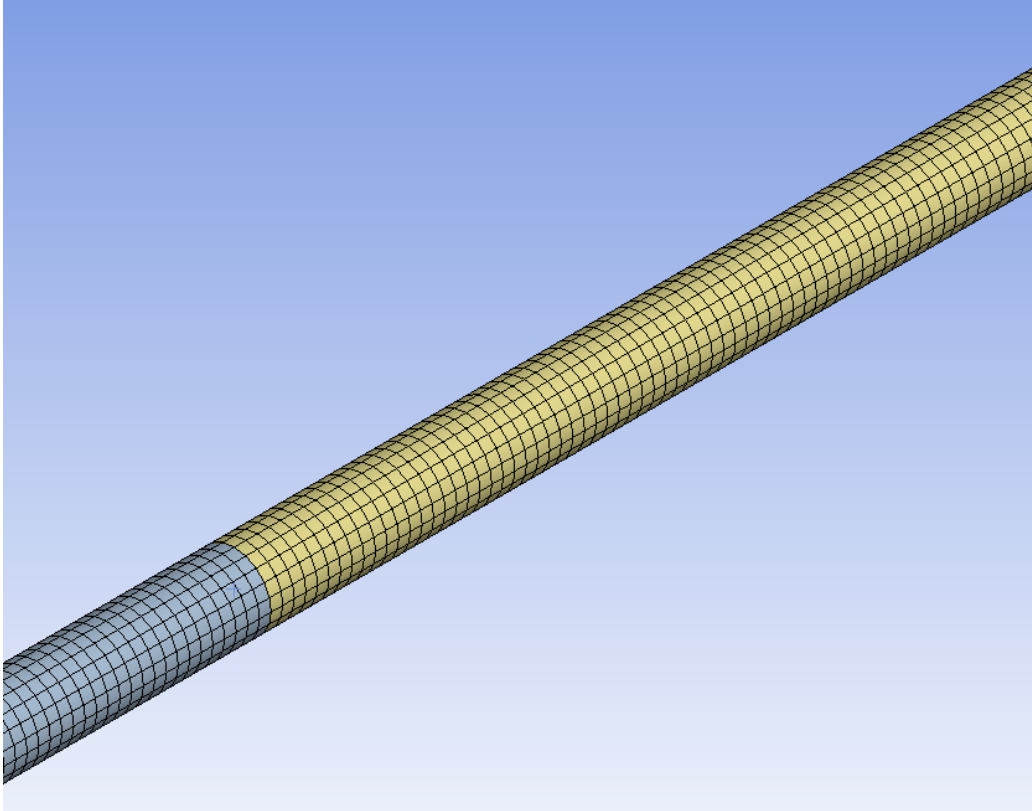


### 3.4.2 Πλέγμα ρευστού

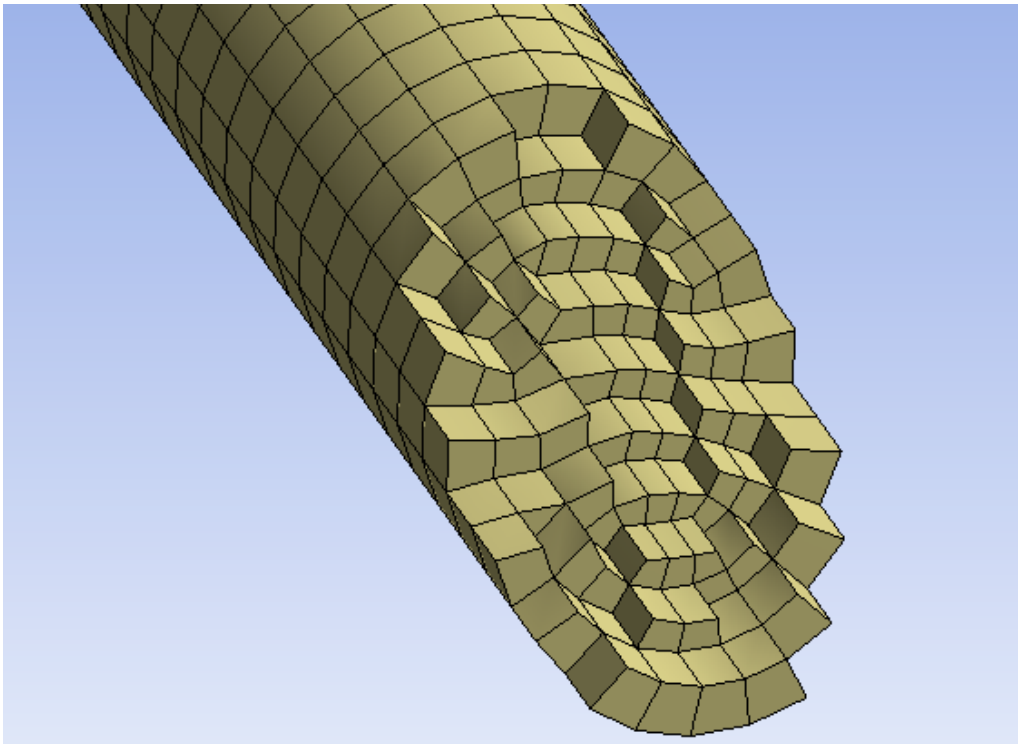
Στην περίπτωση του ρευστού έγινε πλεγματοποίηση τόσο με τετραεδρικά κελιά όσο και με εξαεδρικά. Στις περιπτώσεις της αμφίδρομης αλληλεπίδρασης ρευστού-δομής λόγω του μεγαλύτερου γεωμετρικά χωρίου αλλά και του περισσότερου χρόνου που απαιτείται ούτως ή άλλως για την προσομοίωση προτιμήθηκαν εξαεδρικά κελιά για να μειωθεί ο αριθμός τους (Σχήματα 3.4.6-8).



Σχήμα 3.4.6: Εξαεδρικό πλέγμα ρευστού για τις προσομοιώσεις της αμφίδρομης αλληλεπίδρασης

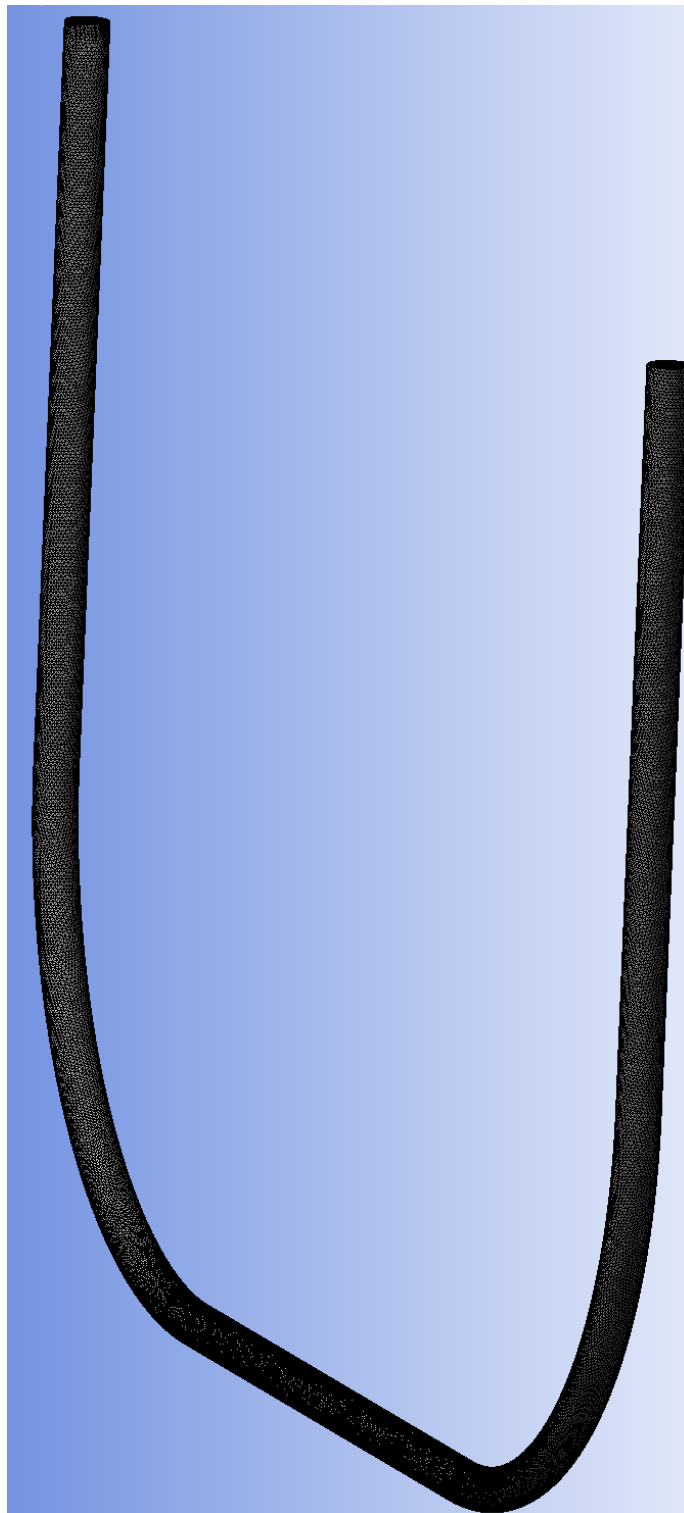


Σχήμα 3.4.7: Λεπτομέρεια εξαεδρικού πλέγματος ρευστού των προσομοιώσεων αμφίδρομης αλληλεπίδρασης

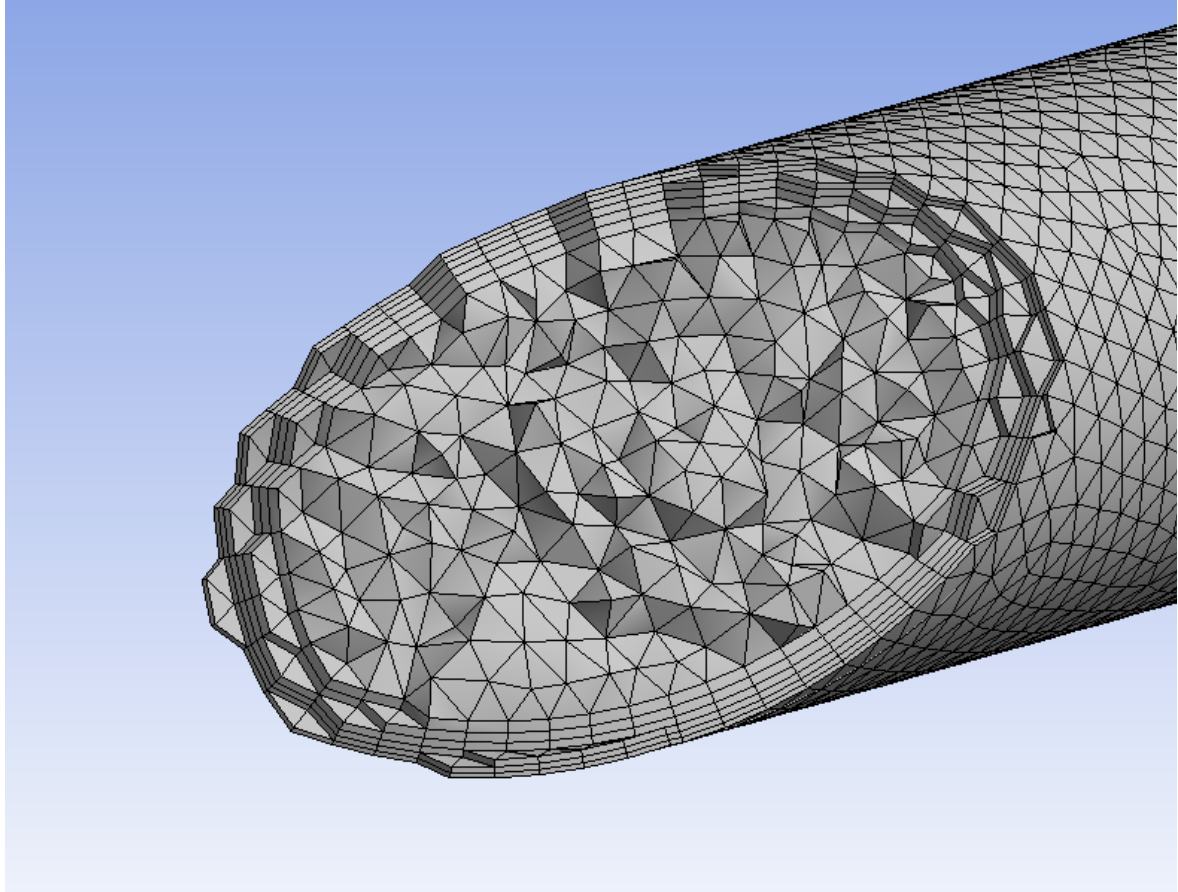


Σχήμα 3.4.8: Τομή του ρευστού στην οποία φαίνονται ολόκληρα τα εσωτερικά κελιά του εξαεδρικού πλέγματος πλέγματος του ρευστού

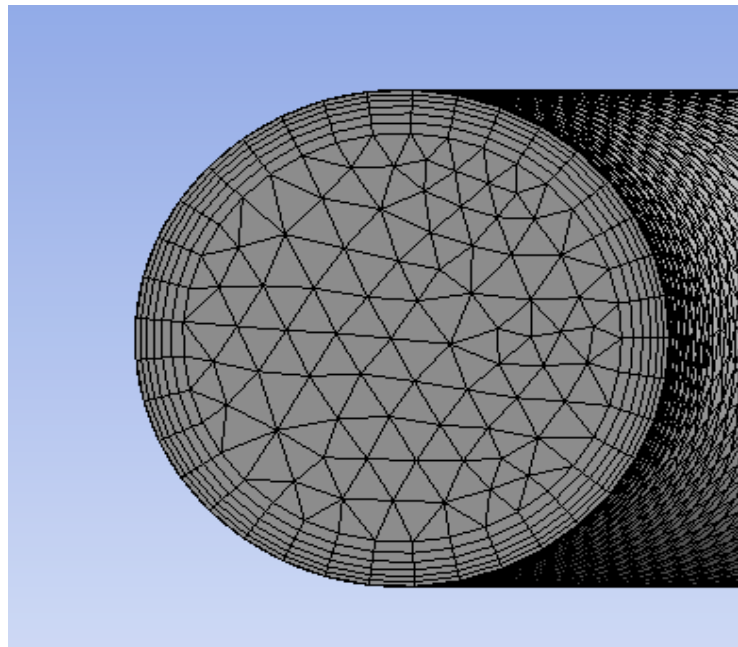
Στην μοντελοποίηση μόνο του εσωτερικού του ακάμπτου αγωγού προτιμήθηκαν τετραεδρικά κελιά. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν και πυκνότερα στρώματα κελιών κοντά στα τοιχώματα (inflation layers) για την καλύτερη ανάλυση του οριακού στρώματος (Σχήματα 3.4.9-11).



*Σχήμα 3.4.9: Τετραεδρικό πλέγμα ρευστού για τις προσομοιώσεις μόνο εντός του ακάμπτου αγωγού*

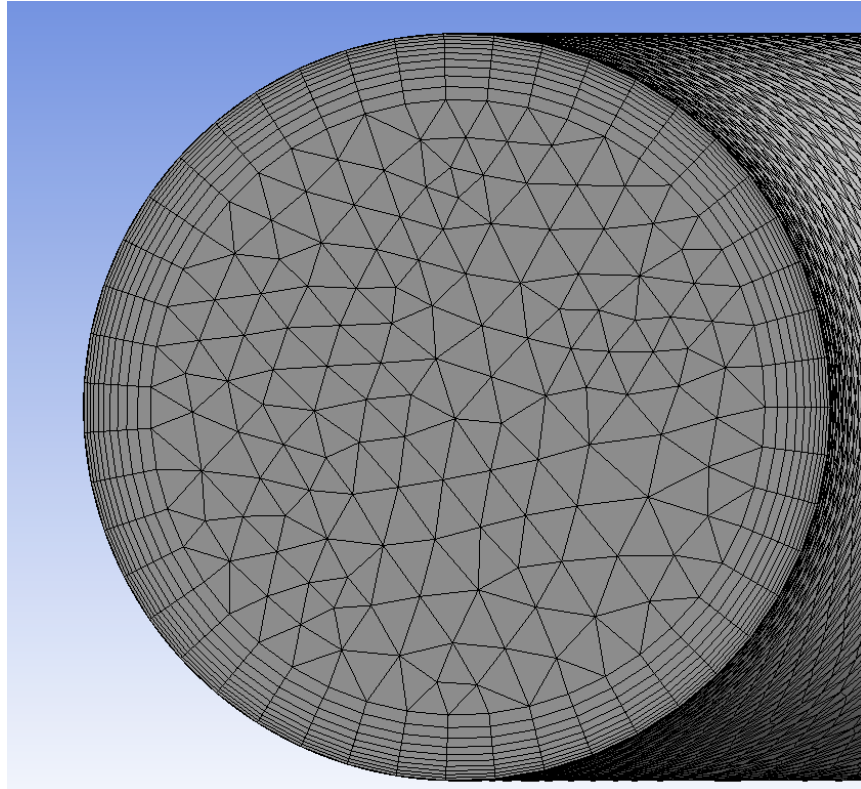


Σχήμα 3.4.10: Τομή του ρευστού στην οποία φαίνονται στο πλέγμα για τις προσομοιώσεις εντός του άκαμπτου αγωγού και τα πρισματικά κελιά κοντά στο τοίχωμα του αγωγού



Σχήμα 3.4.11: Όψη του πλέγματος του ρευστού για τις προσομοιώσεις εντός του άκαμπτου αγωγού

Για λόγους ελέγχου της ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα έγινε και πύκνωσή του (Σχήμα 3.4.12).



Σχήμα 3.4.12: Πυκνωμένο πλέγμα ρευστού για τις προσομοιώσεις εντός το ακάμπτου αγωγού

### 3.4.3 Ρυθμίσεις πλέγματος ρευστού -Dynamic Meshing

Η κίνηση των τοιχωμάτων του βρόχου οδηγεί σε διαφορετικά σχήματα στο χωρίο που κινείται το ρευστό, τα οποία “ακολουθεί” και το πλέγμα του ρευστού (Arbitrary Lagrangian-Eulerian description [82]). Αυτό γίνεται με την βοήθεια της δυναμικής πλεγματοποίησης (dynamic meshing [83]) και συγκεκριμένα μέσω εξομάλυνσης του πλέγματος (smoothing) και της επαναπλεγματοποίησης (remeshing). Η εξομάλυνση δεν αλλάζει τον αριθμό και τις συσχετίσεις μεταξύ των στοιχείων, αλλά αρκείται στο να παραμορφώσει το σχήμα και το μέγεθός τους. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση είναι της διάχυσης (diffusion). Η παραμόρφωση κοντά στο σύνορο που κινείται διαχέεται στο υπόλοιπο πλέγμα σύμφωνα με εξίσωση της μορφής:

$$\nabla(\gamma \nabla \vec{u})=0$$

όπου  $\vec{u}$  είναι η ταχύτητα με την οποία μετατοπίζεται το πλέγμα. Ο συντελεστής διάχυσης  $\gamma$  καθορίζει τον τρόπο που διαχέεται η κίνηση του συνόρου του πλέγματος στο εσωτερικό του. Η διατύπωση για τον συντελεστή  $\gamma$  που χρησιμοποιείται είναι

$$\gamma = \frac{1}{d^\alpha}$$

δηλαδή είναι συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης από το σύνορο  $d$ . Η μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει η παράμετρος  $\alpha$  είναι 0, οπότε η παραμόρφωση διαχέεται ομοιόμορφα στο πλέγμα. Όσο η τιμή της αυξάνει οδηγεί στην απορρόφηση της κίνησης από τα πιο απομακρυσμένα από το τοίχωμα κελιά, διατηρώντας την ποιότητα του πλέγματος κοντά στο σύνορο.

Η επαναπλεγματοποίηση ελέγχει την ποιότητα των κελιών του πλέγματος και αν δεν πληρούν τα κριτήρια που έχουν τεθεί δοκιμάζει να ξαναφτιάξει τοπικά πλέγμα με καλύτερες ιδιότητες. Στην συνέχεια ελέγχει αν τα νέα κελιά πληρούν τα κριτήρια ποιότητας και ανάλογα είτε διατηρεί το νέο πλέγμα υπολογίζοντας τις τιμές των αγνώστων για τα νέα κελιά με παρεμβολή από τα προηγούμενα, ή απορρίπτει τα νέα κελιά και συνεχίζει με το προηγούμενο πλέγμα.

Η ύπαρξη ισχυρής σύζευξης μπορεί να οδηγήσει σε αριθμητικές ταλαντώσεις και γενικότερη αστάθεια. Για να καταπολεμηθούν τέτοια φαινόμενα συνήθως στα προβλήματα αλληλεπίδρασης ρευστού-δομής χρησιμοποιούνται μέθοδοι σταθεροποίησης [84][85]. Στην μέθοδο που ακολουθήθηκε η σταθεροποίηση εφαρμόζεται στο γραμμικό σύστημα που προκύπτει από την διακριτοποίηση της εξίσωσης της συνέχειας και στα κελιά που εφάπτονται του κινούμενου συνόρου [83]. Χρησιμοποιείται μέθοδος βασισμένη στον όγκο των κελιών  $V$  (volume-based method) κατά την οποία οι διαγώνιοι όροι του σχηματιζόμενου από την εξίσωση συνέχειας πίνακα αλλάζουν σύμφωνα με την:

$$\alpha_{i,j,s} = \alpha_{i,j} + KV \text{ αν } i = j, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$$

όπου  $K$  ο παράγοντας κλίμακας (scale factor) και  $n$  ο αριθμός των κελιών. Η τιμή του  $K$  επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης και όχι την τελική λύση.

## 3.5 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ

### 3.5.1 Μοντελα Transient Structural για αμφίδρομη αλληλεπίδραση

#### 3.5.1.1 Επαφές και στηρίξεις

Μετά τον ορισμό των γεωμετριών των στερεών ορίζονται οι τρόποι που αλληλεπιδρούν, δηλαδή οι επαφές τους. Το Ansys επιτρέπει τον ορισμό πολλών διαφορετικών ειδών επαφών. Οι δύο που χρησιμοποιήθηκαν τελικά είναι η επαφή bonded και η επαφή frictional. Η bonded είναι η απλούστερη επαφή και ορίζει στα στοιχεία που εφάπτονται τις ίδιες μετατοπίσεις. Με αυτόν τον τρόπο ορίζουμε κάθε φορά την επαφή στην σύνδεση των δύο αγωγών, του εύκαμπτου με τον άκαμπτο. Αυτή η υλοποίηση επιτυγχάνει την σύνδεση των αγωγών της χωρίς κανένα επιπλέον γεωμετρικό στοιχείο ή περίπλοκη εξίσωση που να κρατά τους δύο αγωγούς ενωμένους, μένουν συνέχεια λόγω της bonded επαφής. Είναι σαφές ότι τέτοιου είδους επαφή δεν χρειάζεται επιπλέον επαναλήψεις για σύγκλιση. Πάραυτα η σύνδεση αυτή είναι και πολύ περιοριστική, δεν αφήνει την άνεση στο σύστημα να κινηθεί πιο ελεύθερα. Γι' αυτόν τον λόγο δεν προτιμήθηκε στις συνδέσεις της βάσης με τους αγωγούς ή του εμβόλου με τους αγωγούς. Αντί αυτής της επαφής προτιμήθηκε η επαφή με τριβή με αυθαίρετο συντελεστή τριβής 0.8. Με τον ίδιο τρόπο ορίστηκε και η επαφή στην περίπτωση των γεωμετρικά ορισμένων περιοριστικών δακτυλίων.

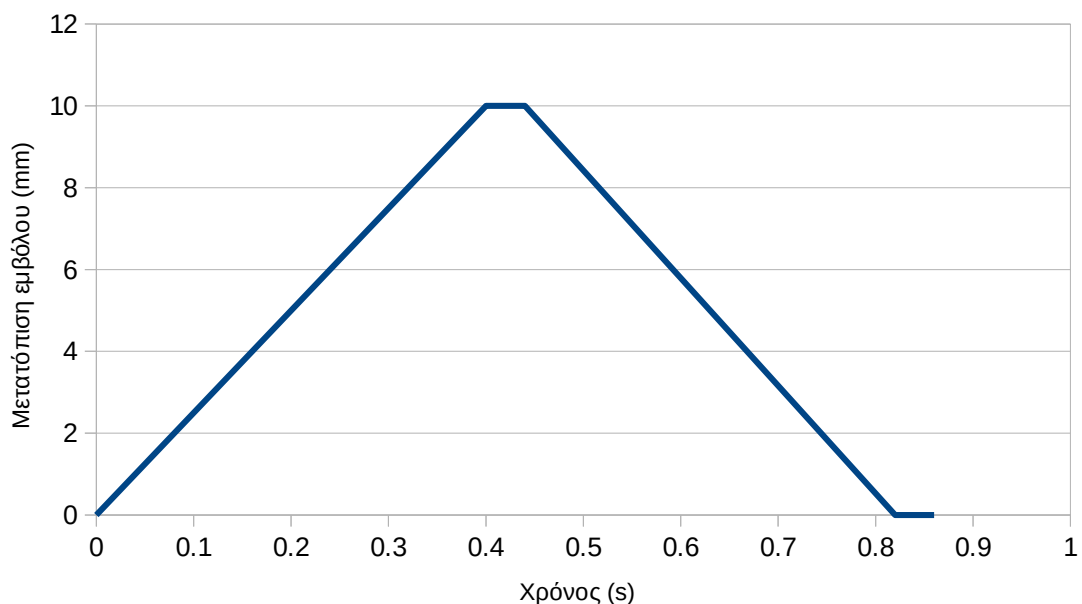
Η μοντελοποίηση αυτή όμως για τους δακτυλίους δεν ήταν αποτελεσματική και δοκιμάστηκαν επιπλέον μέθοδοι περιορισμού της κίνησης του αγωγού χωρίς την γεωμετρική παρουσία δακτυλίων. Μία μέθοδος ήταν η προσθήκη στηρίξεων στον αγωγό με την μορφή frictionless support, δηλαδή επιφανειών επί των αγωγών στις οποίες δεν μπορούσε να υπάρχει μετατόπιση στους κόμβους κάθετη στην επιφάνεια. Άλλη μέθοδος ήταν μετά την πλεγματοποίηση, αυθαίρετη επιλογή κόμβων του πλέγματος στους οποίους οι μετατοπίσεις (nodal displacements) οριζόντουσαν 0.

Στην περίπτωση του ευθύ αγωγού δύο επιπλέον ρυθμίσεις ήταν ο ορισμός του επιπέδου συμμετρίας καθώς και ο ορισμός κοινών μετατοπίσεων στους κόμβους των ανοιχτών άκρων του αγωγού. Αυτό γίνεται με την λογική πως ο ευθύς αγωγός προέρχεται από την τομή και “ξεδίπλωμα” του καμπύλου, οπότε χωρικά τα ανοιχτά άκρα του αγωγού αναφέρονται στα ίδια σημεία και πρέπει οι μετατοπίσεις τους να είναι οι ίδιες.

### 3.5.1.2 Εξωτερικές διεγέρσεις

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των εξωτερικών διεγέρσεων. Αρχικά ορίζεται το βαρυτικό πεδίο με επιτάχυνση  $9806.6 \text{ mm/s}^2$  και κατεύθυνση προς τα κάτω. Ορίζεται επίσης η στήριξη της βάσης ως μηδενική μετατόπιση στην κάτω πλευρά της. Ορίζεται η εσωτερική επιφάνεια του βρόχου ως διεπιφάνεια ρευστού-στερεού (fluid structure interface) και τέλος ορίζεται η μετατόπιση της πάνω πλευράς του εμβόλου. Αυτό γίνεται δίνοντας την θέση του εμβόλου σε ορισμένες χρονικές στιγμές, και μεταξύ εκείνων των χρόνων για τις υπόλοιπες θέσεις γίνεται γραμμική παρεμβολή.

Συνήθως το έμβολο μετακινείται σε χρόνο λιγότερο από το μισό της περιόδου μέχρι το μέγιστο πλάτος, παραμένει σε εκείνη την θέση για μικρό χρονικό διάστημα και επιστρέφει στην αρχική του θέση. Αυτή η υλοποίηση επιτυγχάνει τις επιθυμητές συχνότητες βοηθώντας και στην σύγκλιση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της κίνησης του εμβόλου για συχνότητα 1.19 Hz φαίνεται στο Σχήμα 3.5.1.



Σχήμα 3.5.1: Νόμος πάλμωσης του εμβόλου για συχνότητα 1.19 Hz

### 3.5.1.3 Λοιπές ρυθμίσεις

Άλλες ρυθμίσεις του Transient structural ήταν η επιλογή Large Deflections: On, και η επιλογή του τελικού χρόνου καθώς και του χρονικού βήματος. Ο τελικός χρόνος εξαρτάται από την συχνότητα καθώς και από τον αριθμό των περιόδων που προσομοιώνονται. Η διάρκεια των χρονικών βημάτων ήταν συνήθως στο εύρος 0,05-0,005 s, ενώ στην περίπτωση που παρουσιάζεται στα αποτελέσματα ήταν 0,02 s.

## 3.5.2 Μοντελοποίηση Fluent για αμφίδρομη αλληλεπίδραση

Μετά τον ορισμό της γεωμετρίας στο fluent και αφού έχει οριστεί το υλικό του ρευστού, ορίζεται το είδος της ροής, οι οριακές συνθήκες και ρυθμίσεις πλέγματος (dynamic mesh) και λοιπές ρυθμίσεις επιλυτών. Για τις περιπτώσεις της αμφίδρομης αλληλεπίδρασης στερεού ρευστού αυτά έχουν ως εξής:

Ορισμός βαρύτητας με τον ίδιο τρόπο όπως στο structural, επιλύτης τύπου πίεσης (pressure-based type solver), συζευγμένο σχήμα σύζευξης πίεσης-ταχύτητας (Pressure-velocities coupling scheme: coupled), χωρικές διακριτοποιήσεις δεύτερης τάξης σε πίεση, πυκνότητα, ορμή, καθώς και χρονική διακριτοποίηση δεύτερης τάξης (Second order transient formulation). Ως όριο σύγκλισης επιλέγονται τα υπόλοιπα (residuals) των εξισώσεων συνέχειας και ορμής να είναι μικρότερα του  $10^{-3}$ .

Για το είδος της ροής επιλέχθηκε στρωτή ροή αφού έγιναν και προσομοιώσεις θεωρώντας την ροή τυρβώδη με μοντέλο τύρβης k-ε και τα αποτελέσματα εμφανιζόντουσαν ίδια. Στις οριακές συνθήκες ορίζεται η εξωτερική επιφάνεια ως διεπιφάνεια αλληλεπίδρασης ρευστού-καιτασκευής. Στην συνέχεια στις ρυθμίσεις πλέγματος επιλέγεται σταθεροποίηση volume-based με παράγοντα κλίμακας (scale factor) 100. Στις ρυθμίσεις πλέγματος ορίζεται και όλο το πλέγμα ως πλέγμα που παραμορφώνεται (deforming mesh) στο οποίο ενεργοποιούνται οι επιλογές εξομάλυνσης (smoothing) με συντελεστή διάχυσης 1 και επαναδιακριτοποίησης πλέγματος (remeshing).

Τέλος γίνεται αρχικοποίηση ορίζοντας για χρόνο 0 την ταχύτητα και την πίεση μηδενικές.

Στην περίπτωση που προσομοιώνεται ο ευθύς αγωγός προστίθεται οριακή συνθήκη περιοδικότητας ώστε τα άκρα του αγωγού να θεωρούνται η ίδια επιφάνεια και έτσι να κλείνει ο βρόχος και οριακή συνθήκη συμμετρίας στην εσωτερική επιφάνεια του ρευστού.

## 3.5.3 Ρυθμίσεις σύζευξης της αλληλεπίδρασης ρευστού με στερεό

Στις ρυθμίσεις σύζευξης τίθενται οι ελάχιστες και οι μέγιστες επαναλήψεις σύζευξης. Ελάχιστη είναι κάθε φορά 1 και μέγιστες συχνότερα επιλεγόντουσαν οι 20. Ορίζονται επίσης οι δύο μεταφορές δεδομένων με τα κριτήρια σύγκλισής τους (RMS convergence Target)  $10^{-2}$  και συντελεστή υποχαλάρωσης 1.



## **3.5.4 Οριακές συνθήκες και άλλες ρυθμίσεις μοντέλου άκαμπτου αγωγού πειράματος**

### **3.5.4.1 Γενικές ρυθμίσεις**

Ο τύπος του επιλύτη είναι πάλι βασισμένος στην πίεση (pressure based solver type) με σχήμα PISO. Στις εξισώσεις γίνεται χωρική διακριτοποίηση πρώτης τάξης στην ορμή, δεύτερης τάξης στην πίεση και χρονική διακριτοποίηση πρώτης τάξης. Τα υπόλοιπα (residuals) των εξισώσεων ορμής και συνέχειας για να επιτευχθεί η σύγκλιση η τίθενται στο  $10^{-3}$ . Η ροή ορίζεται στρωτή, και το πλέγμα δεν παραμορφώνεται. Η αρχικοποίηση γίνεται συνήθως από τις τιμές των ταχυτήτων και πίεσης που χρησιμοποιούνται στην είσοδο και άρα εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες.

### **3.5.4.2 Οριακές συνθήκες**

#### **3.5.4.2.1 Οριακές συνθήκες εξηγμένες από τις πειραματικές μετρήσεις**

Για τις περιπτώσεις του καμπύλου αγωγού έγιναν δύο σειρές προσομοιώσεων στο εύρος των συχνοτήτων. Στην πρώτη σειρά προσομοιώσεων οι οριακές συνθήκες είναι στο ένα άκρο η πειραματική διαφορά πίεσης στα άκρα του άκαμπτου αγωγού και στο άλλο άκρο μηδενική πίεση (στο εξής αναφέρονται ως οριακές συνθήκες πίεσης). Στην δεύτερη σειρά προσομοιώσεων στο ένα άκρο του αγωγού ορίζεται σαν οριακή συνθήκη η πειραματική παροχή μάζας και στο άλλο άκρο ορίζεται μηδενική πίεση (στο εξής αναφέρονται ως οριακή συνθήκη παροχής).

Στον ευθύ αγωγό έγιναν προσομοιώσεις για επιλεγμένες συχνότητες με οριακές συνθήκες στο ένα άκρο την διαφορά πίεσης και στο άλλο άκρο μηδενική πίεση (αντίστοιχα με την περίπτωση οριακών συνθηκών πιέσεων για τον καμπύλο αγωγό).

Σημειώνεται πως για να επιλεγθεί σαν οριακή συνθήκη σε κάποια επιφάνεια η (στατική) πίεση η επιφάνεια πρέπει να οριστεί σαν είσοδος (inlet). Έτσι εμφανίζεται εξερχόμενη ροή από επιφάνεια εισόδου (backflow) κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Αν δεν κάνουμε κάποια ρύθμιση το Fluent θεωρεί πως η πίεση που δίνουμε σε εκείνους τους χρόνους είναι ολική, επομένως πρέπει να επιλέξουμε πως η πίεση που δίνουμε και για εκείνους τους χρόνους είναι η στατική (backflow specification method: static pressure).

#### **3.5.4.2.2 Διερεύνηση εγκυρότητας αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με οριακές συνθήκες στατικής πίεσης σε είσοδο και έξοδο**

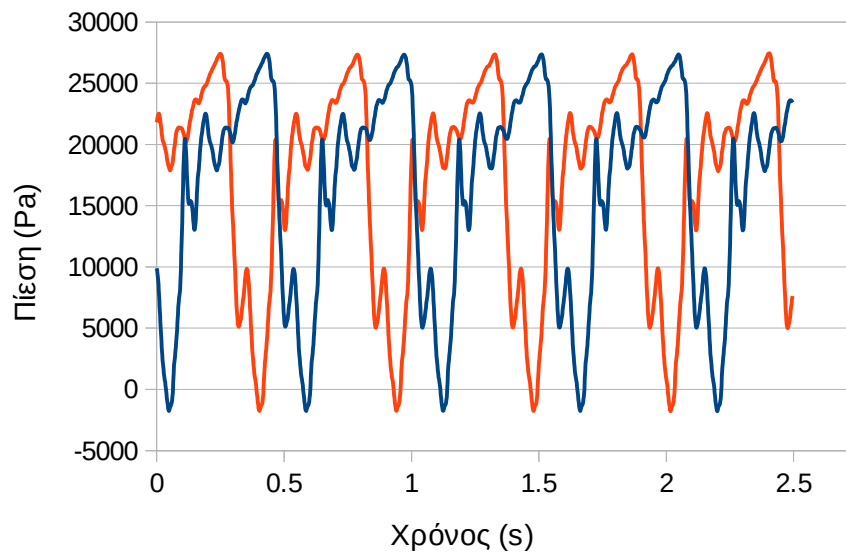
Ο ορισμός οριακών συνθηκών (στατικής) πίεσης και στα δύο άκρα του αγωγού οδηγεί στο πρόβλημα της δημιουργίας ενός πολύ πιο ασταθούς συστήματος, επειδή η ορμή που περνά από τα όρια του πεδίου δεν συνδέεται άμεσα με την στατική πίεση. Έτσι ενώ στην περίπτωση με την οριακή συνθήκη παροχή μάζας συνήθως από την πρώτη περίοδο τα αποτελέσματα παραμένουν τα ίδια από περίοδο σε περίοδο, στην περίπτωση της οριακής

συνθήκης στατικής πίεσης πρέπει να περάσει μεγάλος αριθμός περιόδων ώστε να σταθεροποιηθεί σε κάποια τιμή η μέση παροχή μάζας, που οδηγεί σε πολύ πιο χρονοβόρες προσομοιώσεις.

Για να επιβεβαιωθεί πως παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα είναι χρήσιμα έγινε μία ακόμη σειρά προσομοιώσεων για την συχνότητα 1.86 Hz. Σε αυτήν την σειρά μετρήσεων κατασκευάστηκαν “μετατοπισμένες αριστερά” κυματομορφές της πίεσης όπως μετρήθηκε στο ένα άκρο του αγωγού, δηλαδή ουσιαστικά η κυματομορφή αυτής της πίεσης σε εύρος αρνητικών διαφορών φάσης (έως -180 μοίρες). Από την αρχική καμπύλη αφαιρέθηκαν οι μετατοπισμένες και το αποτέλεσμα ορίστηκε ως οριακή συνθήκη στο ένα άκρο του αγωγού (Σχήμα 3.5.2), ενώ στο άλλο άκρο ορίστηκε μηδενική πίεση (στο εξής αναφέρονται ως οριακή συνθήκη διαφοράς μετατοπισμένων πιέσεων).

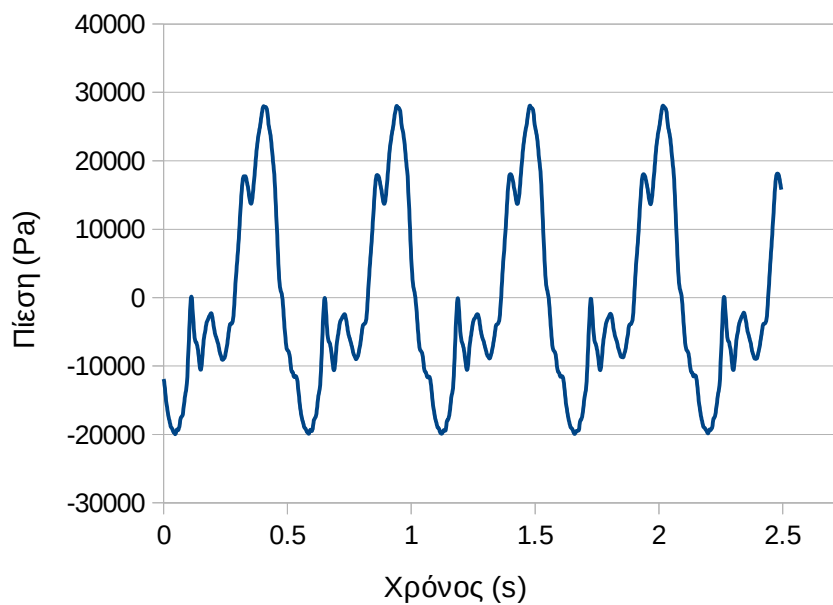
Παράδειγμα αποτελεσμάτων από αυτήν την σειρά προσομοιώσεων φαίνεται στο σχήμα 3.5.3. Εμφανίζεται η αργή σύγκλιση προς ορισμένη μέση παροχή που όπως αναφέρθηκε οφείλεται στην ύπαρξη μόνο οριακών συνθηκών στατικής πίεσης στα άκρα του αγωγού. Στο σχήμα 3.5.4 παρουσιάζονται οι μέσες παροχές που προκύπτουν συναρτήσει της διαφοράς φάσης ή του αριθμών βημάτων της μετατόπισης ανάμεσα στην αρχική και την μετατοπισμένη καμπύλη πίεσης. Φαίνεται πως δημιουργείται μέση παροχή η οποία αυξάνει καθώς αυξάνει η διαφορά φάσης μέχρι η διαφορά φάσης να γίνει 90 μοίρες. Στη συνέχεια καθώς η διαφορά φάσης πλησιάζει τις 180 μοίρες η παροχή πλησιάζει το 0. Αυτό είναι και το αναμενόμενο αποτέλεσμα: Για μηδενική διαφορά φάσης οι καμπύλες συμπίπτουν άρα δεν δημιουργείται διαφορά φάσης. Καθώς η διαφορά φάσης αυξάνεται η διαφορά των δύο καμπυλών μεγαλώνει και δημιουργείται παροχή. Για γωνία  $\pi/4$  η παροχή είναι μέγιστη και στην συνέχεια παρότι η διαφορά των καμπυλών συνεχίζει να μεγαλώνει μέχρι για γωνία  $\pi/2$ , η παροχή μικραίνει καθώς σε γωνία  $\pi/2$  αναμένεται η δημιουργούμενη παροχή κατά την μισή περίοδο να αντισταθμίζεται από την αντίθετη παροχή στο υπόλοιπο της περιόδου.

Επομένως από αυτές τις προσομοιώσεις έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα και συμπεριφορά και επιβεβαιώνεται πως παρά τον θόρυβο των πειραματικών μετρήσεων και τις εγγενείς δυσκολίες της προσομοίωσης με οριακές συνθήκες στατικής πίεσης μπορούμε να προχωρήσουμε στην σειρά προσομοιώσεων με τις οριακές συνθήκες των μετρήσεων του πειράματος.



— Μετρηθείσα πίεση στο ένα άκρο του ακάμπτου αγωγού (συχνότητα 1.86 Hz)  
— Ίδια πίεση μετατοπισμένη κατά -123 μοίρες (110 χρονικά βήματα)

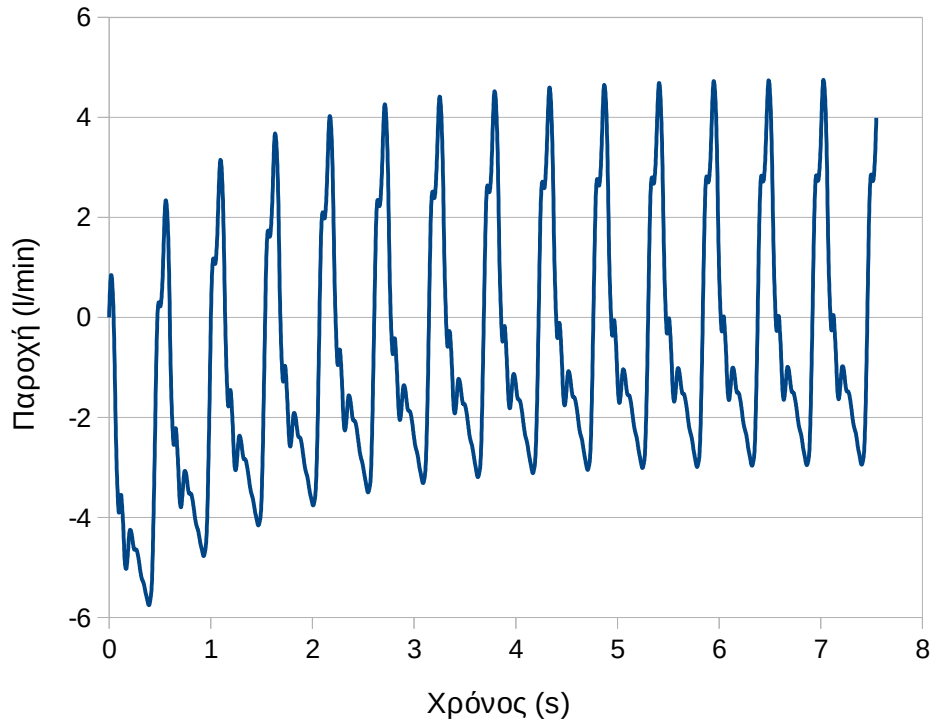
(α)



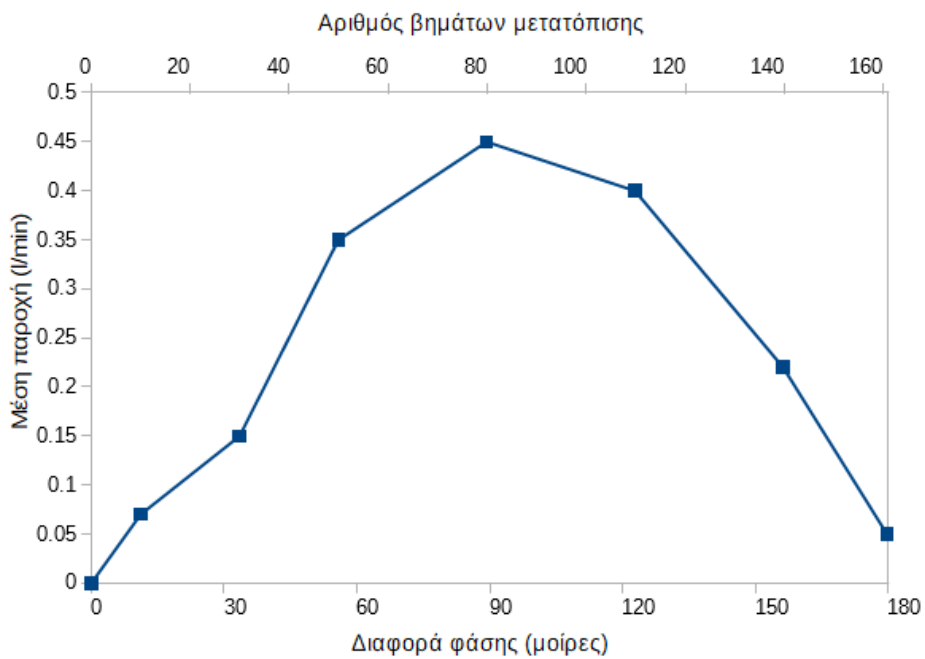
— Διαφορά αρχικής και μετατοπισμένης πίεσης

(β)

Σχήμα 3.5.2: (α) Παράδειγμα αρχικής και μετατοπισμένης κατά -123 μοίρες καμπύλης πίεσης, (β) Διαφορά των δύο πιέσεων του (α) συναρτήσει του χρόνου. Αυτή η καμπύλη αποτελεί τελικά την οριακή συνθήκη στο ένα άκρο του αγωγού



Σχήμα 3.5.3: Παροχή συναρτήσει του χρόνου για οριακή συνθήκη μετατοπισμένων πιέσεων με διαφορά φάσης 33 μοίρες (30 χρονικά βήματα)



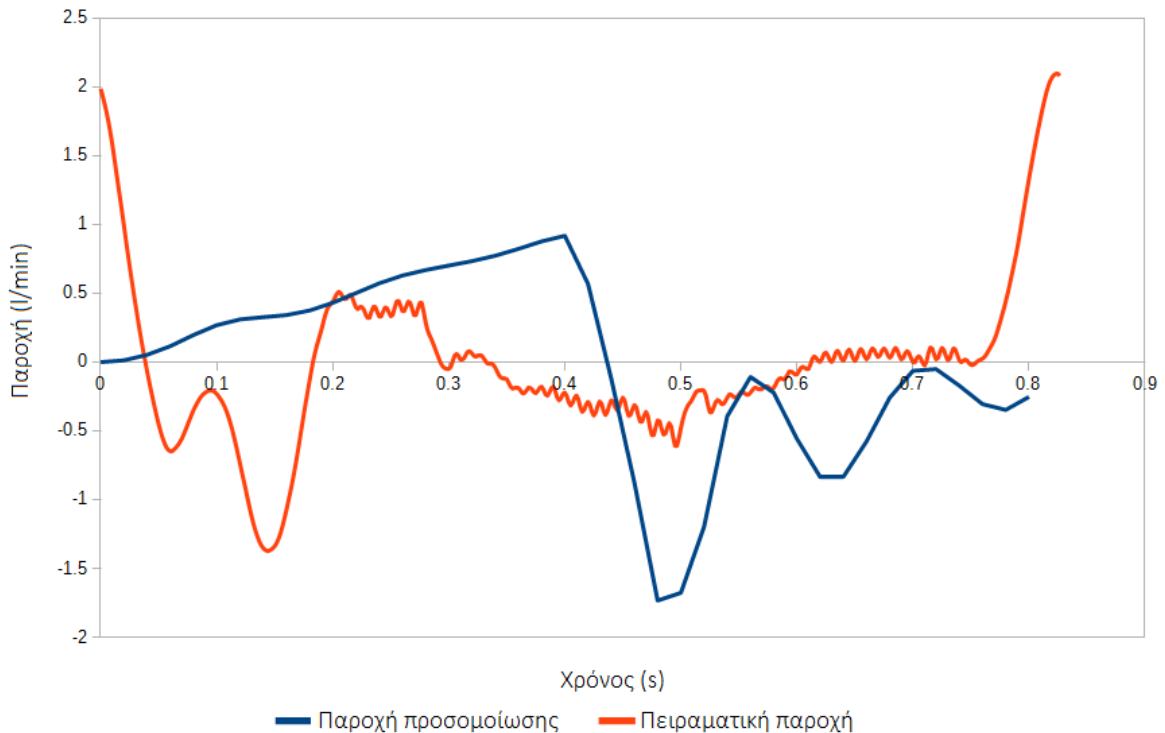
Σχήμα 3.5.4: Μέση παροχή προσομοιώσεων με οριακή συνθήκη διαφοράς μετατοπισμένων πιέσεων συναρτήσει της σχετικής μετατόπισης των πιέσεων

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης ρευστού-δομής εξετάζονται οι πιέσεις στα σημεία σύνδεσης του εύκαμπτου με τον άκαμπτο αγωγό και η παροχή όγκου στο μέσον του άκαμπτου αγωγού. Η μέση παροχή για συχνότητα 1.19 Hz υπολογίζεται 0.0103 l/min ενώ πειραματικά είχε μετρηθεί 0.0133 l/min. Παρότι η μέση παροχή προκύπτει σχετικά κοντινό μέγεθος, όταν συγκρίνουμε τις κυματομορφές των παροχών και αφού τις διορθώσουμε ώστε να ξεκινούν και οι δύο από την αρχική θέση του εμβόλου φαίνεται πως ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η μέση παροχή διαφέρει σημαντικά (Σχήμα 4.1.1). Η διαφορά μπορεί να οφείλεται μεταξύ άλλων στην μεταβατικότητα της πρώτης επανάληψης και στο σχετικά μεγάλο χρονικό βήμα που δεν μπορεί να προβλέψει τις σύντομες ταλαντώσεις των ρευστοδυναμικών μεγεθών. Είναι προφανές επίσης πως η φάση των δύο κυματομορφών είναι σημαντικά διαφορετική, πράγμα που ίσως άλλαζε πάλι με την προσομοίωση μεγαλύτερου αριθμού περιόδων ώστε να εξαλειφθούν τα μεταβατικά φαινόμενα.



Σχήμα 4.1.1: Σύγκριση πειραματικής παροχής με παροχή από προσομοίωση 2-way FSI για συχνότητα 1.19 Hz

Σε κάθε περίπτωση η προσομοίωση και το πείραμα ουσιαστικά “συμφωνούν” πως σε αυτήν την συχνότητα δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της άντλησης χωρίς βαλβίδες.

Όπως έχει αναφερθεί δεν ήταν δυνατόν να αναπαραχθούν οι συνθήκες του πειράματος με την μέθοδο της αμφίδρομης αλληλεπίδρασης για μεγαλύτερες συχνότητες. Τα κύρια σφάλματα που προέκυπταν κατά τις προσπάθειες επίλυσης συμπυκνώνονται κυρίως σε τρεις κατηγορίες: Πρόβλημα μη σύγκλισης είτε στον επιλύτη του στερεού τοιχώματος είτε συνηθέστερα στον επιλύτη του ρευστού, υπερβολική παραμόρφωση των στοιχείων του στερεού τοιχώματος και εμφάνιση κελιών με αρνητικούς όγκους στο ρευστοδυναμικό χωρίο. Σφάλματα λόγω υπερβολικής παραμόρφωσης των στοιχείων του στερεού τοιχώματος εμφανίζονταν συνήθως σε δύο χρονικές στιγμές: στην αρχή της προσομοίωσης λόγω υπερβολικά απότομης αύξησης του φορτίου και στην στιγμή της μέγιστης συμπίεσης λόγω του μεγάλου πλάτους της συμπίεσης. Στην πρώτη περίπτωση υπήρχαν δύο κύριες μέθοδοι για να αντιμετωπισθεί το σφάλμα. Η πρώτη είναι να εφαρμοστεί το φορτίο πιο ομαλά, που σημαίνει είτε σε μεγαλύτερο χρόνο είτε ξεκινώντας από μικρότερες παραμορφώσεις. Η περίπτωση της εφαρμογής σε μεγαλύτερο χρόνο έρχεται σε άμεση σύγκρουση με την ανάγκη επίτευξης μεγαλύτερης συχνότητας, ενώ η περίπτωση της αρχής με μικρότερες παραμορφώσεις συνήθως απλά μεταθέτει το πρόβλημα για επόμενο σημείο της προσομοίωσης εφόσον το πλάτος της παραμόρφωσης παραμένει το ίδιο. Έτσι μένει η δεύτερη μέθοδος για την αντιμετώπιση του σφάλματος των υπερβολικά παραμορφωμένων στοιχείων, η οποία είναι η μείωση του χρονικού βήματος. Παρότι αυτό θεωρητικά θα έπρεπε να οδηγεί σε ευκολότερη σύγκλιση, μη εμφάνιση υπερβολικά παραμορφωμένων στοιχείων και τελικά προσομοιώσεις με μεγαλύτερη συχνότητα διέγερσης, το αποτέλεσμα στην πραγματικότητα ήταν συστηματική αποτυχία στην σύγκλιση των προσομοιώσεων. Αυτή η αποτυχία επέμενε για πλήθος διαφορετικών ρυθμίσεων, όπως αλλαγές στην χαλάρωση των ρευστοδυναμικών εξισώσεων, στην μέθοδο επίλυσης, στην χωρική διακριτοποίηση και σε λοιπές ρυθμίσεις. Η μείωση στο χρονικό βήμα θα μπορούσε να βοηθήσει και στο άλλο σφάλμα που οδηγούσε στην αποτυχία των προσομοιώσεων, αυτό της εμφάνισης κελιών με αρνητικό όγκο στο ρευστοδυναμικό πεδίο. Τα κελιά αυτά προέκυπταν πάλι εξαιτίας της μεγάλης συμπίεσης στην χρονική στιγμή που το έμβολο βρίσκεται στην κατώτερη θέση του καθώς και στις απότομες αλλαγές στην μετατόπισή του και στην αποφυγή τους βοηθούσε η παραμονή του εμβόλου στην κατώτερη θέση για μερικά χρονικά βήματα.

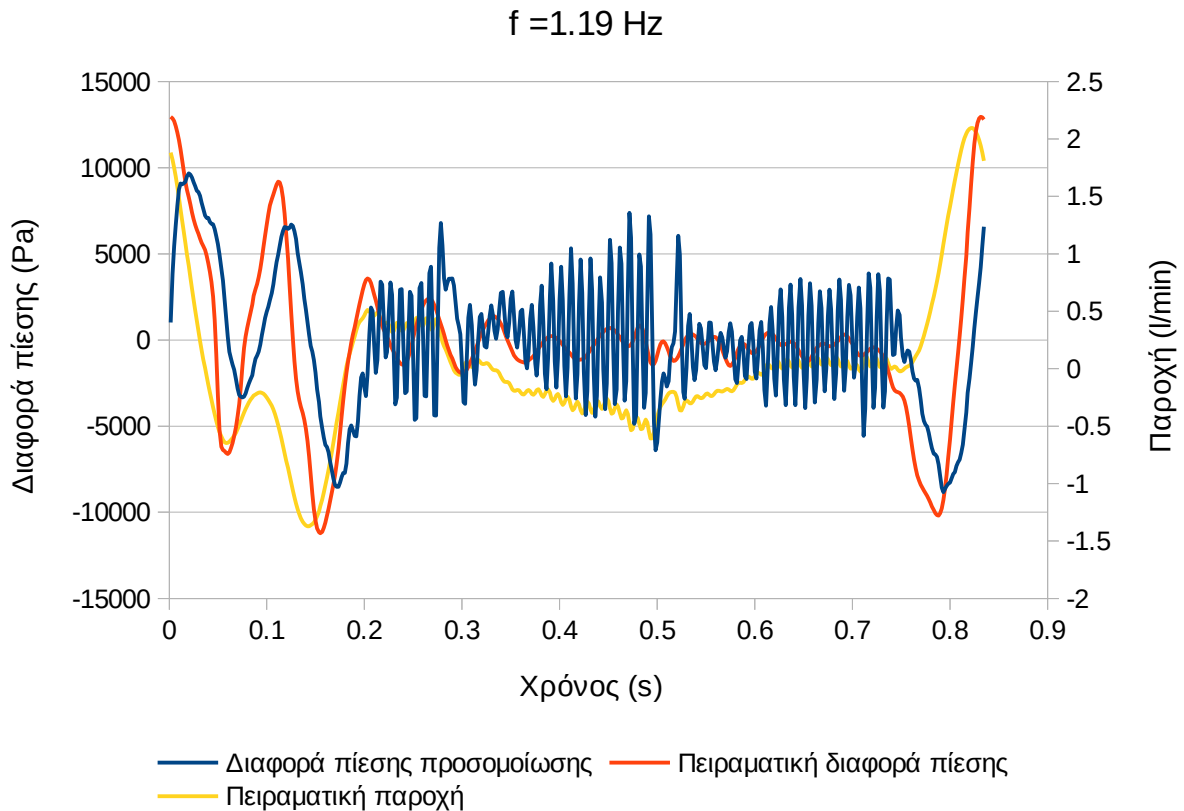
Πέρα από αυτά τα σφάλματα που οδηγούσαν σε πλήρη αδυναμία συνέχισης των προσομοιώσεων υπήρχαν επιπλέον δυσκολίες και σφάλματα που οδηγούσαν σε αποτελέσματα αμφισβητήσιμης εγκυρότητας. Αναφέρονται δύο εκ των βασικότερων από αυτά. Το πρώτο είναι πως όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4, παρά την χρήση των εξισώσεων Tait η σύγκλιση της μάζας σε ορισμένη τιμή παίρνει μεγάλο χρόνο και αριθμό επαναλήψεων οπότε οδηγούμασταν σε αποτελέσματα με μεταβλητή μάζα κατά την διάρκεια της περιόδου: Η μάζα του ρευστού εντός του αγωγού μειωνόταν καθώς το έμβολο συμπιέζε τον αγωγό και αυξανόταν όταν επέστρεφε στην αρχική του θέση, πράγμα εντελώς αφύσικο. Το δεύτερο είναι πως κατά την υλοποίηση των επαφών, ειδικά ανάμεσα στο έμβολο και τον εύκαμπτο αγωγό, παρατηρείτο εισχώρηση του εμβόλου στον αγωγό. Αυτό καταπολεμήθηκε ως ένα βαθμό με την χρήση διαφορετικού σχήματος στο έμβολο, με κατάλληλη επιλογή ρυθμίσεων στην ανίχνευση της επαφής καθώς και με την κατασκευή πυκνότερου πλέγματος στα σημεία της επαφής αλλά ήταν ένα πρόβλημα που συνέχιζε να εμφανίζεται.

Ο συνδυασμός αυτών των προβλημάτων καθώς και ο μεγάλος χρόνος που απαιτείτο για κάθε δοκιμή οδήγησε στην αδυναμία να συνεχιστούν οι προσομοιώσεις με το μέγιστο πλάτος συμπίεσης για υψηλότερες τιμές συχνότητων όπου το φαινόμενο απόδοσης μη μηδενικής μέσης χρονικά παροχής είναι εντονότερο και τελικά στην απόφαση να απορριφθεί η μέθοδος της αμφίδρομης αλληλεπίδρασης για την διερεύνηση του φαινομένου και την πιστοποίηση των πειραματικών μετρήσεων και να συνεχιστούν οι προσομοιώσεις μόνο με το ρευστοδυναμικό χωρίο, με τα αποτελέσματα που φαίνονται στις επόμενες ενότητες.

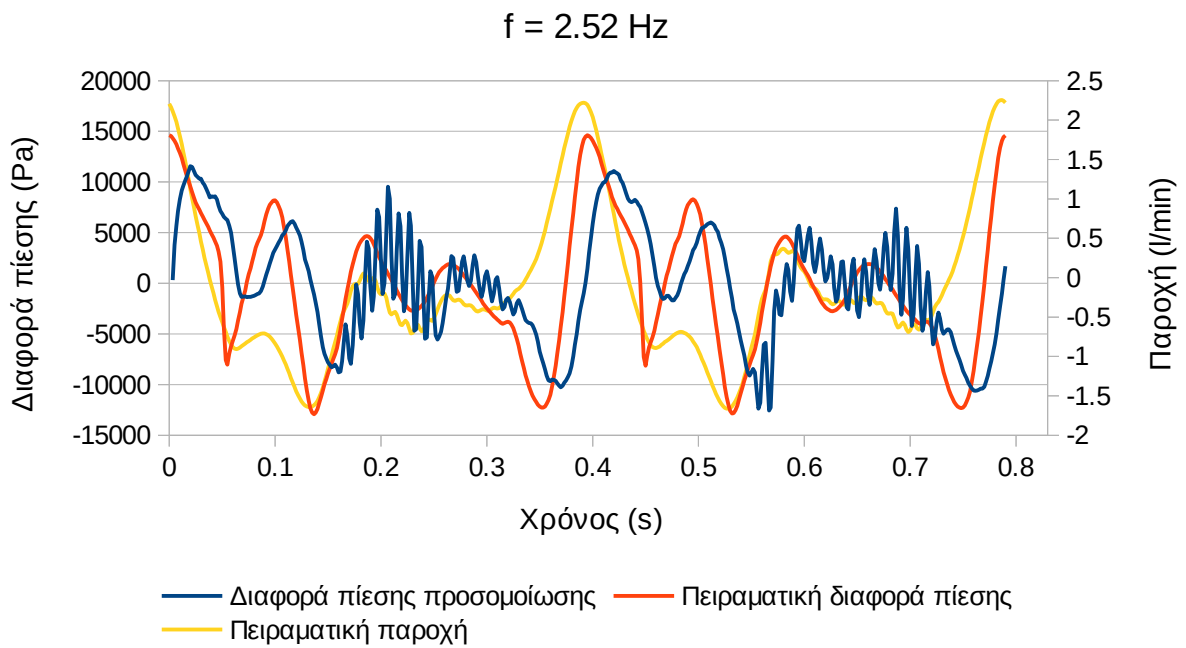
## 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΑΚΑΜΠΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

### 4.2.1 Περιπτώσεις προσομοιώσεων με οριακή συνθήκη παροχής μάζας

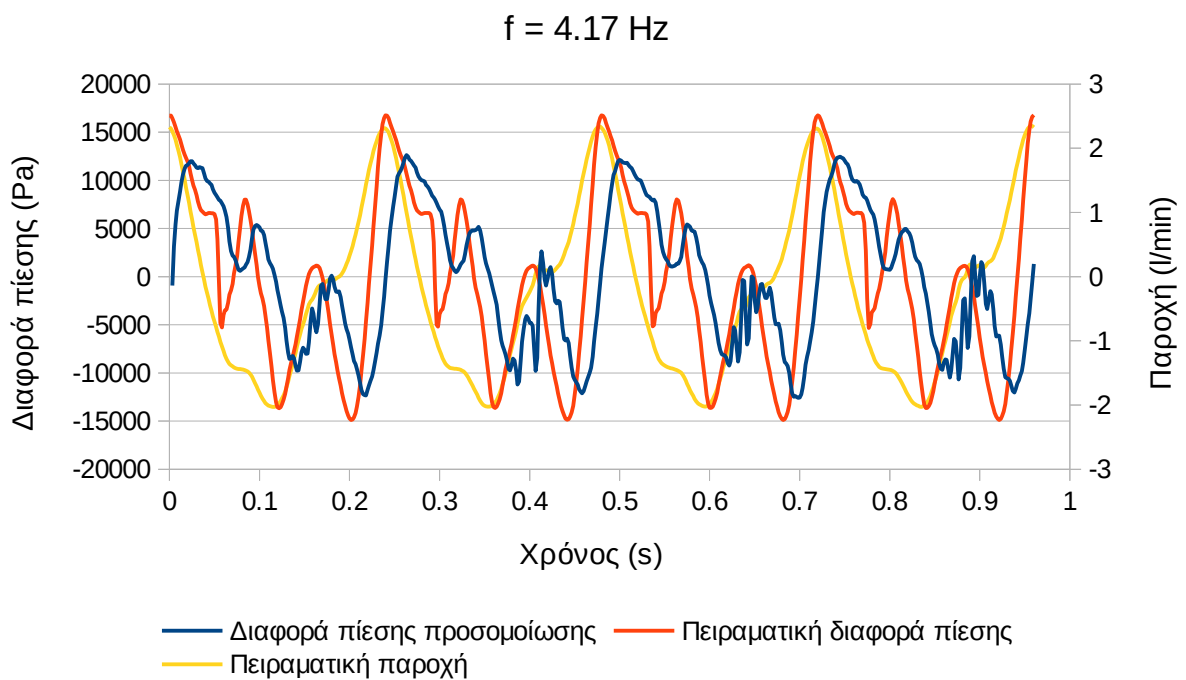
Για τις προσομοιώσεις στο εσωτερικό του άκαμπτου αγωγού με οριακές συνθήκες στο ένα άκρο την παροχή μάζας και στο άλλο άκρο μηδενική πίεση χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις παροχής από όλο το εύρος συχνοτήτων ~1-12 Hz (μερικά από τα αποτελέσματα της προκύπτουσας διαφοράς πίεσης συναρτήσει του χρόνου στα Σχήματα 4.2.1-6). Σε χαμηλές συχνότητες παρατηρείται πως η μετρηθείσα παροχή και διαφορά πίεσης είναι για ένα μέρος της περιόδου πολύ μικρές που ίσως προκαλεί προβλήματα στην σύγκλιση και αφύσικες προβλέψεις με μεγάλες και γρήγορες ταλαντώσεις στην διαφορά πίεσης (Σχήμα 4.2.1). Τέτοιες αφύσικες προβλέψεις εξαλείφονται καθώς η συχνότητα αυξάνεται και δεν υπάρχουν μέρη της περιόδου με τόσο μικρές τιμές παροχής και διαφοράς πίεσης (Σχήμα 4.2.4).



Σχήμα 4.2.1: Αποτελέσματα διαφοράς πίεσης συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 1.19 Hz. Παρατηρούνται έντονες ταλαντώσεις στην πρόβλεψη της διαφοράς πίεσης, χαρακτηριστικό των προσομοιώσεων σε χαμηλές συχνότητες

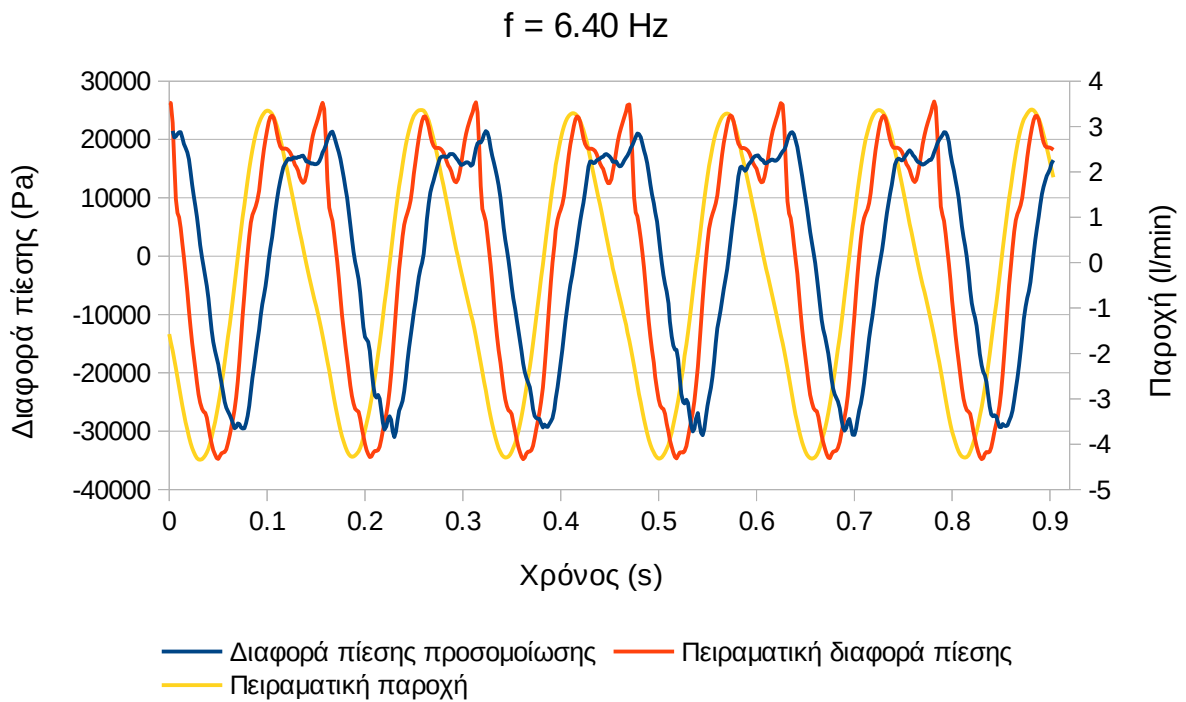


Σχήμα 4.2.2: Αποτελέσματα διαφοράς πίεσης συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 2.52 Hz. Παρατηρούνται σχετικά μικρότερες ταλαντώσεις σε σχέση με το σχήμα 4.2.1.1 αλλά ακόμη έντονες.

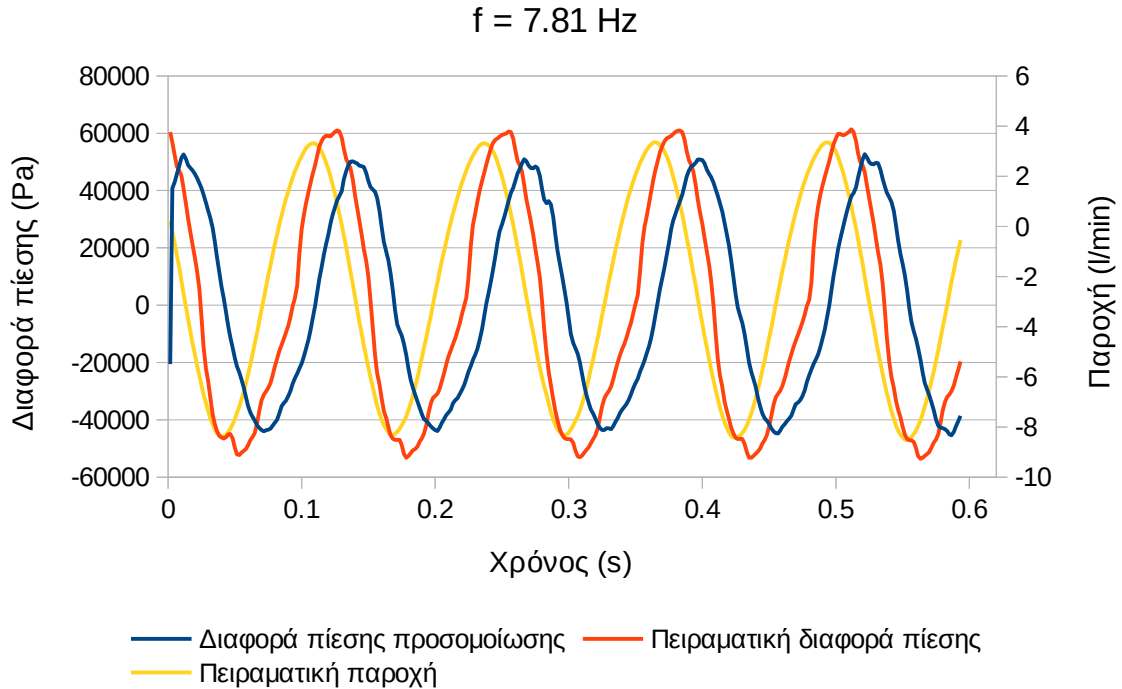


Σχήμα 4.2.3: Αποτελέσματα διαφοράς πίεσης συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 4.17 Hz. Οι ταλαντώσεις είναι πλέον πολύ μικρότερες

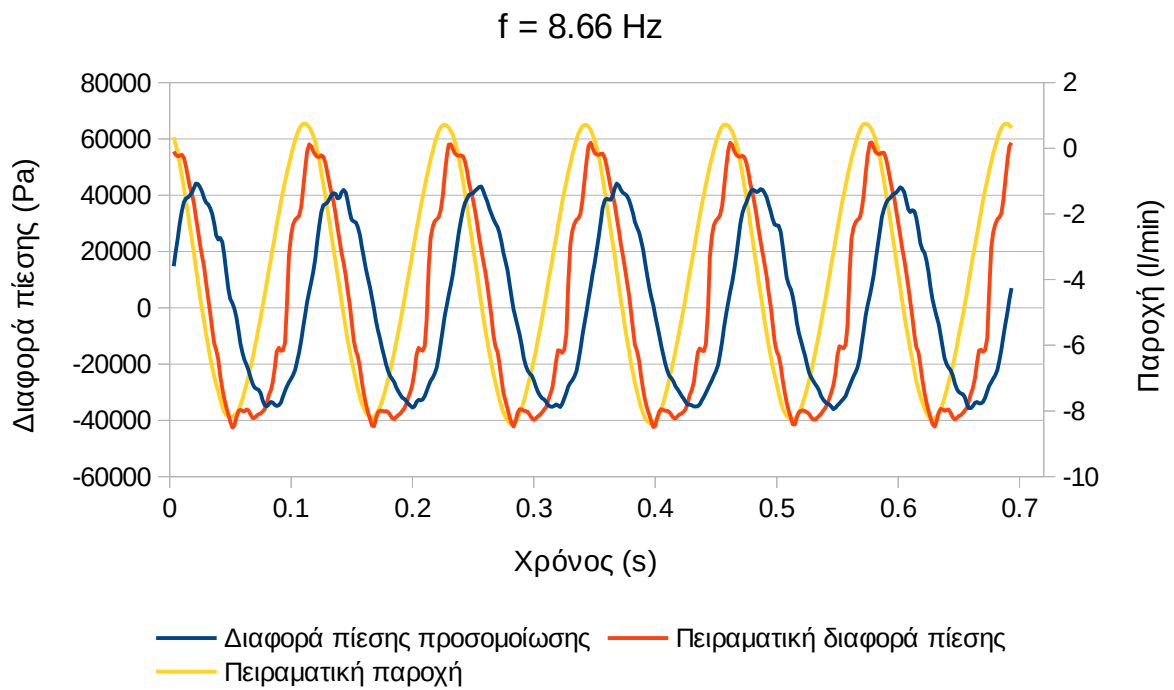




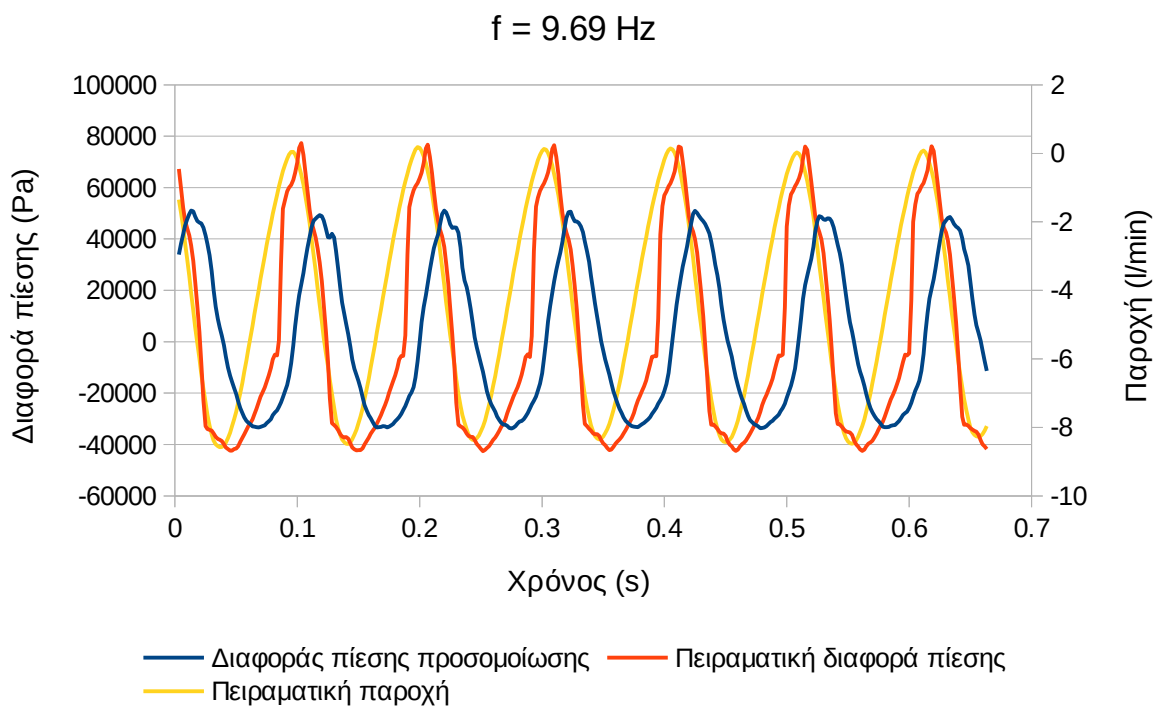
Σχήμα 4.2.4: Αποτελέσματα διαφοράς πίεσης συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 6.40 Hz. Οι ταλαντώσεις στην διαφορά πίεσης που εμφανιζόταν σε χαμηλότερες συχνότητες έχουν εξαλειφθεί.



Σχήμα 4.2.5: Αποτελέσματα διαφοράς πίεσης συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 7.81 Hz.



(α)



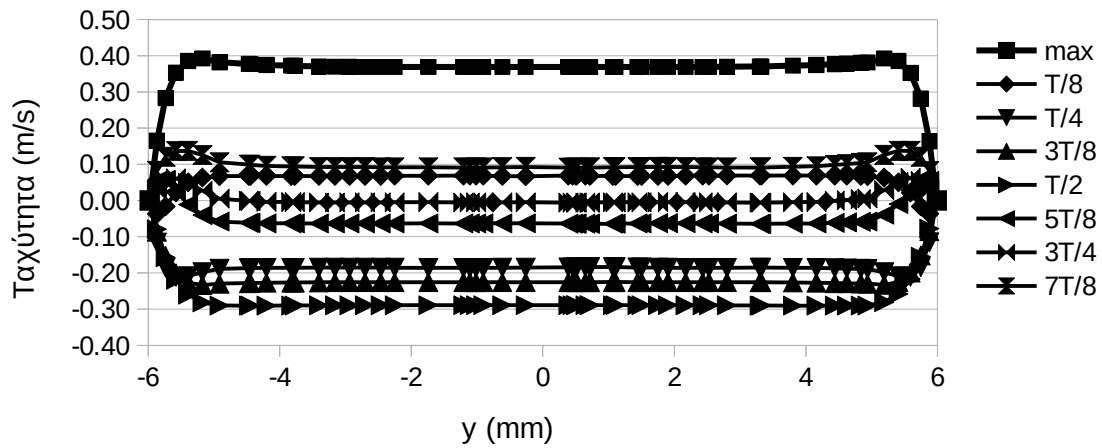
(β)

Σχήμα 4.2.6: Αποτελέσματα διαφοράς πίεσης συναρτήσει του χρόνου για προσομοιώσεις με οριακή συνθήκη παροχής και υψηλές συχνότητες (α) 8.66 και (β) 9.69 Hz. Παρατηρούνται τα αυξημένα πλέον πλάτη στις διαφορές πίεσης.

Στα σχήματα 4.2.7-10 φαίνονται τα προφίλ ταχύτητας που προκύπτουν για διάφορες χρονικές στιγμές κατά την διάρκεια της περιόδου. Τα προφίλ ταχύτητας αναφέρονται σε διάμετρο της διατομής στον μέσον του μήκους του αγωγού. Ως αρχή του χρόνου στα διαγράμματα τίθεται η χρονική στιγμή που η διαφορά πίεσης μεγιστοποιείται, ενώ σαν αρχή της περιόδου τίθεται η χρονική στιγμή που μεγιστοποιείται η παροχή.

### Προφίλ Ταχυτήτων στο Μέσο του Αγωγού

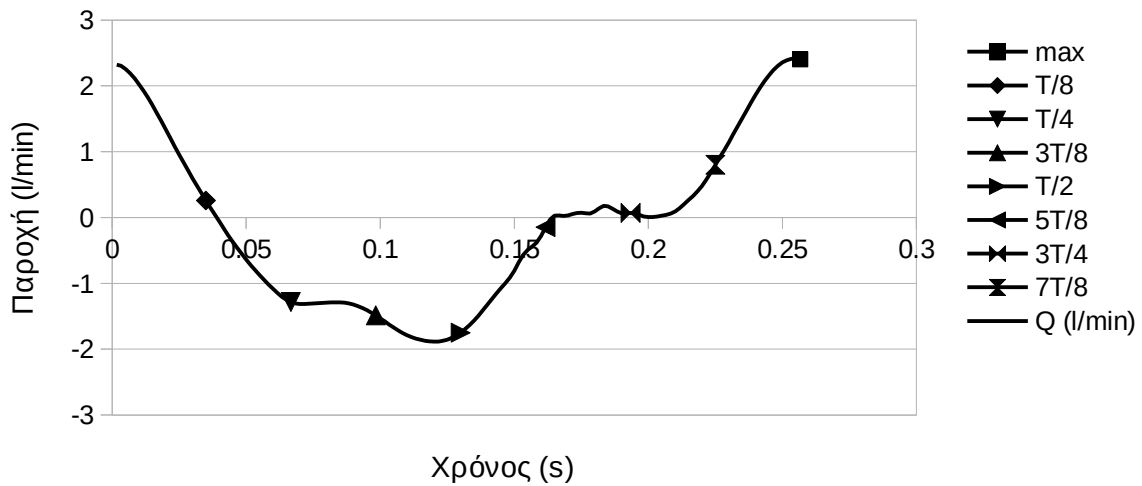
3.90 Hz



(α)

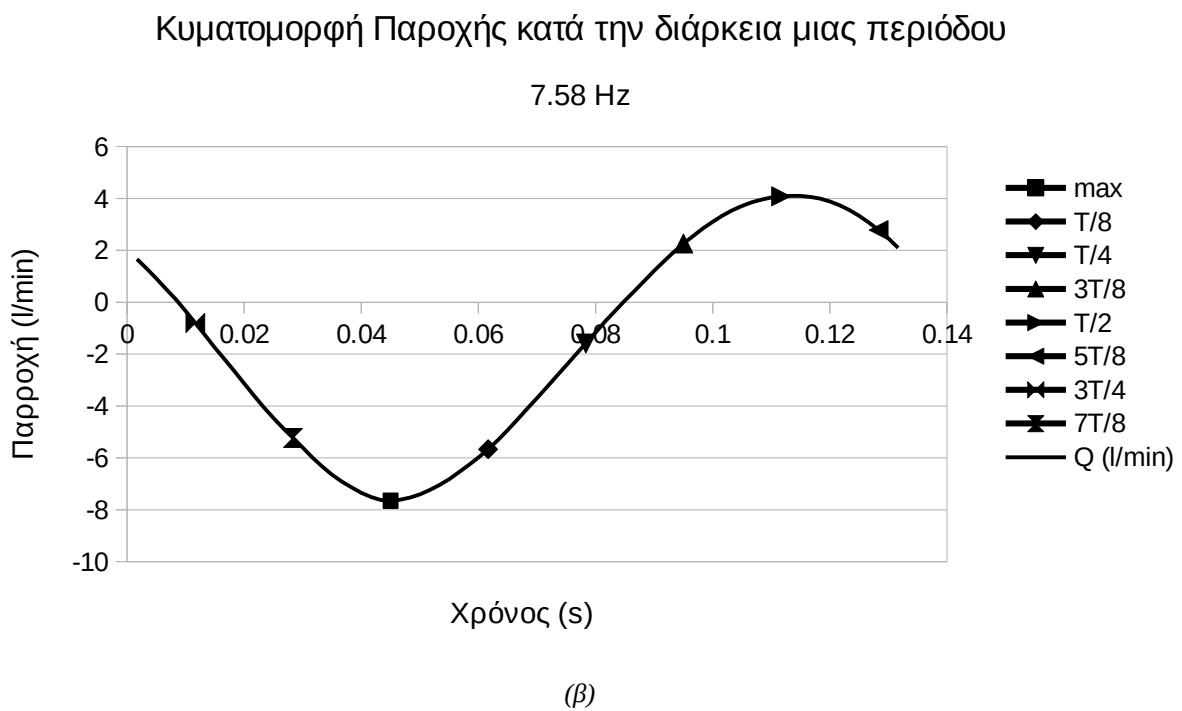
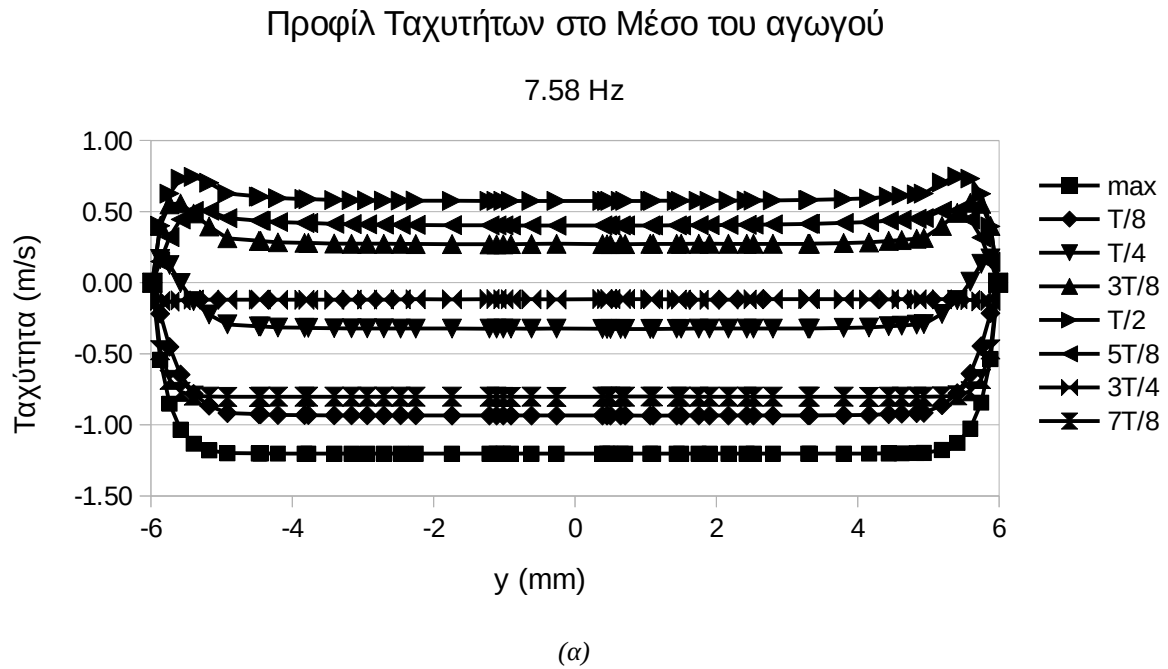
### Κυματομορφή Παροχής στην διάρκεια μιας περιόδου

3.90 Hz



(β)

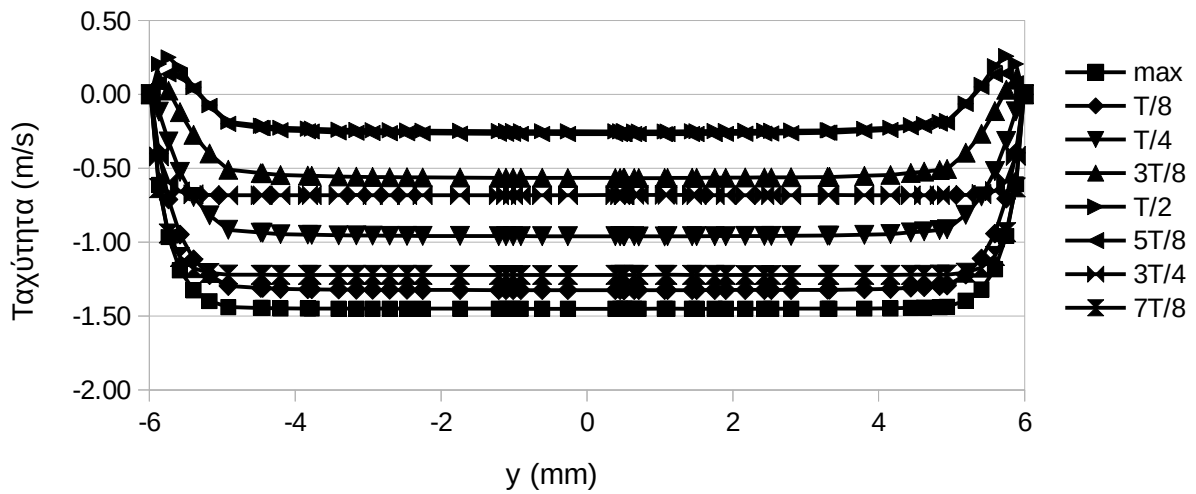
Σχήμα 4.2.7: (α): Προφίλ ταχυτήτων σε διάμετρο της διατομής στο μέσον του αγωγού για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 3.90 Hz. (β): Χρονικά σημεία στην καμπυλομορφή μίας περιόδου της παροχής για τα οποία έχουν εξαχθεί τα προφίλ του (α).



Σχήμα 4.2.8: (α): Προφίλ ταχυτήτων σε διάμετρο της διατομής στο μέσον του αγωγού για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 7.58 Hz. (β): Χρονικά σημεία στην κυματομορφή μίας περιόδου της παροχής για τα οποία έχουν εξαχθεί τα προφίλ του (α).

### Προφίλ Ταχυτήτων στο μέσο του αγωγού

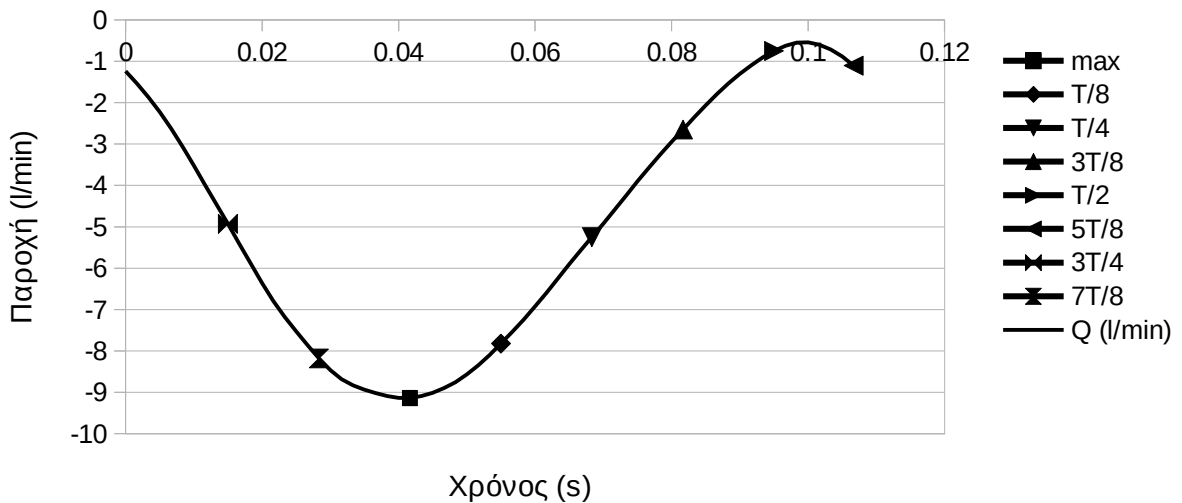
9.26 Hz



(α)

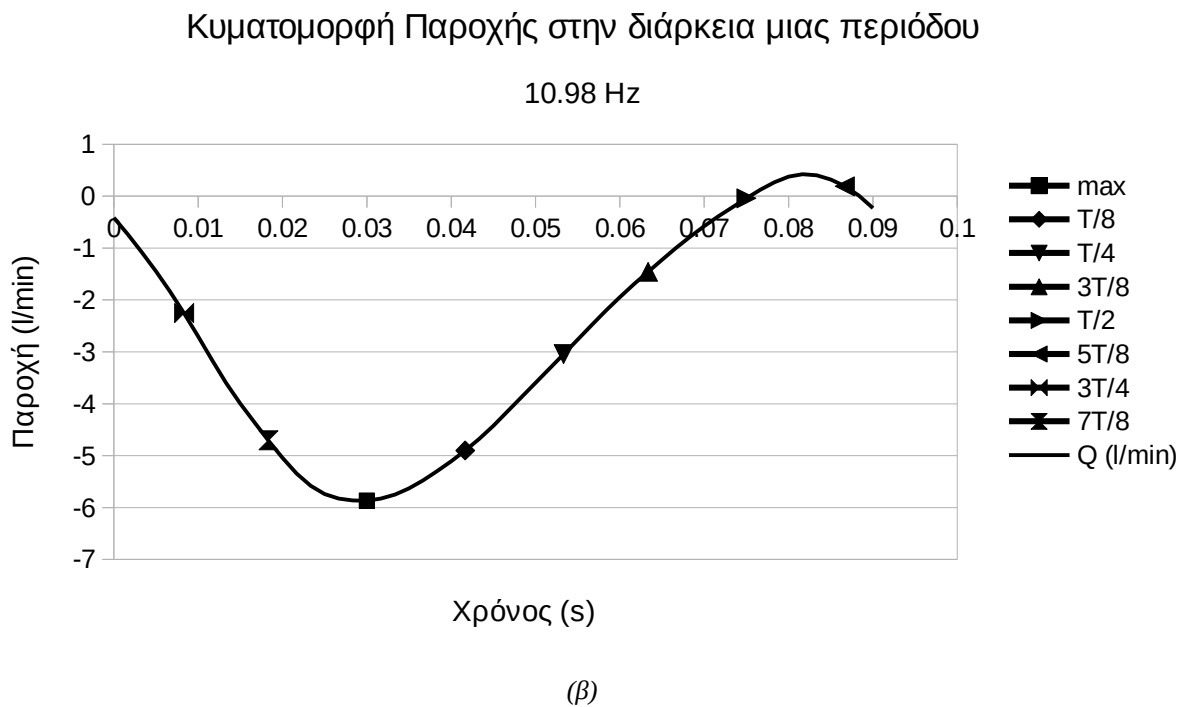
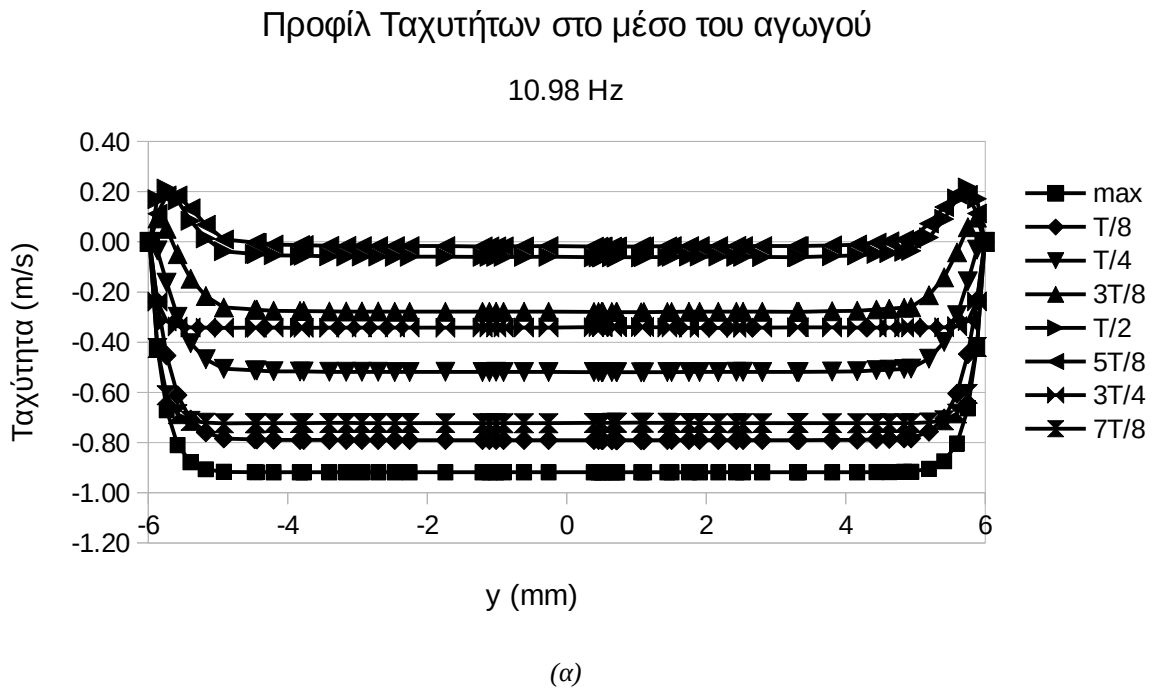
### Κυματομορφή Παροχής στην διάρκεια μιας περιόδου

9.26 Hz



(β)

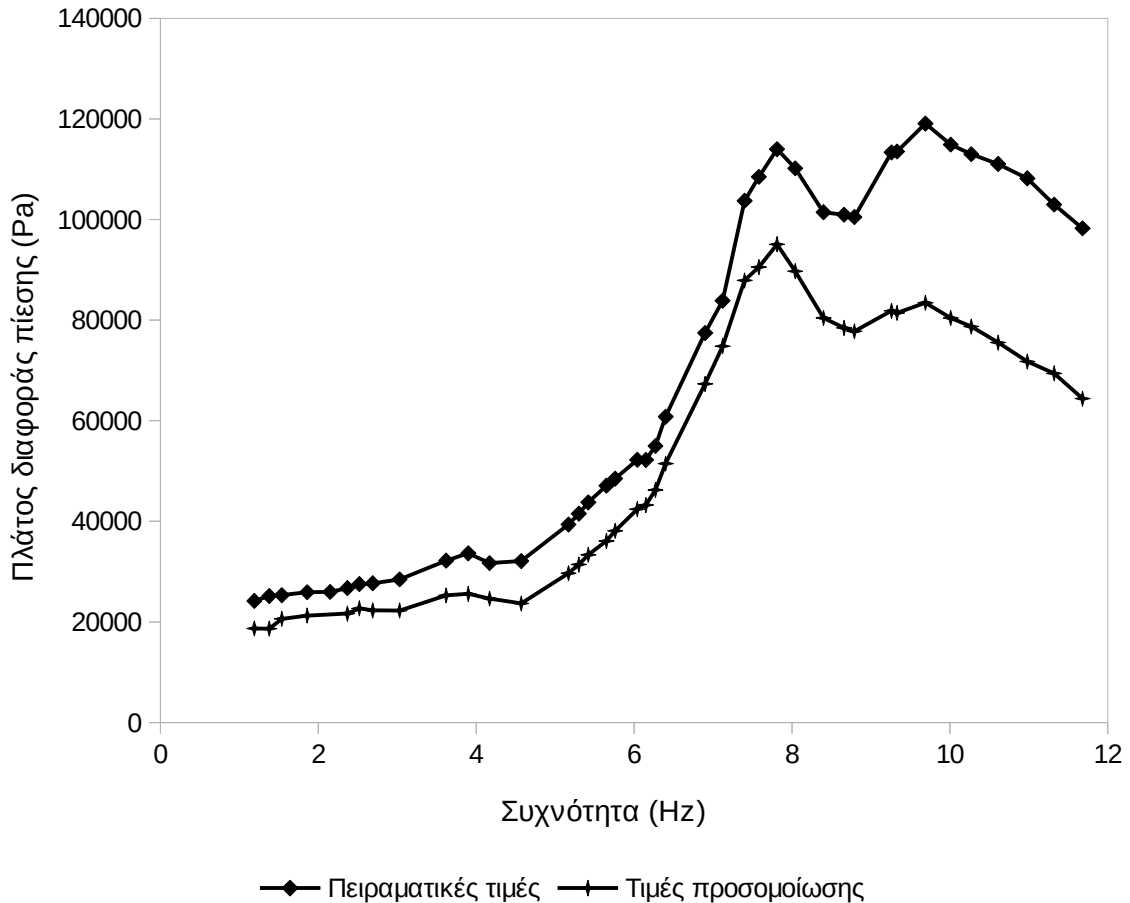
Σχήμα 4.2.9: (α): Προφίλ ταχυτήτων σε διάμετρο της διατομής στο μέσον του αγωγού για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 9.26 Hz. (β): Χρονικά σημεία στην καμπυλομορφή μίας περιόδου της παροχής για τα οποία έχουν εξαχθεί τα προφίλ του (α).



Σχήμα 4.2.10: (α): Προφίλ ταχυτήτων σε διάμετρο της διατομής στο μέσον του αγωγού για προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής και συχνότητα 10.98 Hz. (β): Χρονικά σημεία στην καμπυλομορφή μίας περιόδου της παροχής για τα οποία έχουν εξαχθεί τα προφίλ του (α).

Συγκρίνοντας την πειραματικά μετρηθείσα διαφορά πίεσης και αυτήν που υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις, παρατηρούμε πως οι τιμές της προσομοίωσης παρότι προσεγγίζουν και ποιοτικά “ακολουθούν” ως ένα βαθμό τις πειραματικές τιμές, είναι γενικά κατ’ απόλυτο τιμή μικρότερες.

Αυτό αποτυπώνεται και στην σύγκριση των πλατών της διαφοράς πίεσης (Σχήμα 4.2.11). Το πλάτος της διαφοράς πίεσης προκύπτει στις προσομοιώσεις πάντα μικρότερο, και η απόκλιση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα.



Σχήμα 4.2.11: Σύγκριση πειραματικού πλάτους διαφοράς πίεσης με πλάτος διαφοράς πίεσης όπως προκύπτει από προσομοιώσεις με οριακή συνθήκη παροχής συναρτήσεως της συχνότητας

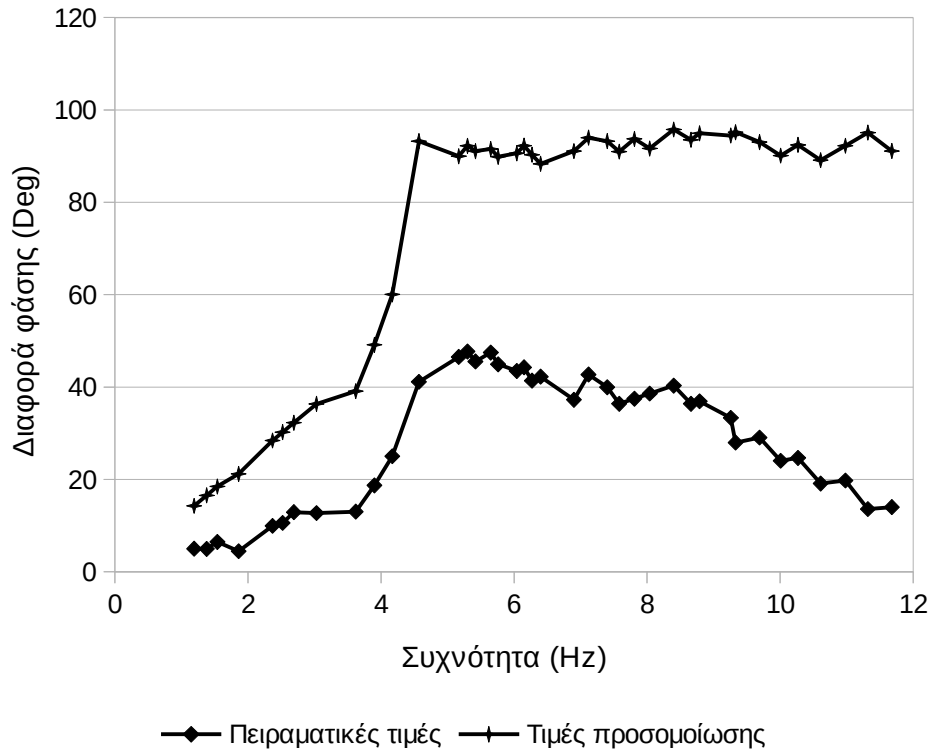
Παρατηρείται επίσης διαφορά φάσης ανάμεσα στις κυματομορφές των σχημάτων 4.2.1-6. Βλέποντας για παράδειγμα τα μέγιστα σε οποιοδήποτε από τα σχήματα φαίνεται να εμφανίζονται πρώτα στην παροχή, έπειτα στην πειραματικά μετρηθείσα διαφορά πίεσης και τέλος στην υπολογισμένη από τις προσομοιώσεις διαφορά πίεσης. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις συναρτήσεις ετεροσυσχέτισης των τριών μεγεθών, από τις οποίες προκύπτουν οι διαφορές φάσης που οδηγούν σε καλύτερη ταύτιση των καμπυλών<sup>3</sup>. Οι πιθανές διαφορές φάσης είναι αυτές που

3 Σε αυτό το σημείο και όπου αλλού έγινε υπολογισμός της διαφοράς φάσης μεταξύ καμπυλών, αυτό έγινε με την βοήθεια της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης `corr` του λογισμικού GNU octave[86]. Αυτή υπολογίζει την ετεροσυσχέτιση μεταξύ δύο

$$\text{καμπυλών } X \text{ και } Y \text{ ως } R(k) = \sum_{i=1}^N x_{i+k} \text{conj}(y_i) \text{ όπου } \text{conj} \text{ εννοείται ο συζυγής μιγαδικός δηλαδή } y_i \text{ αφού}$$

ασχολούμαστε μόνο με πραγματικές καμπύλες. Το  $k$  είναι η υστέρηση και με την παραπάνω συνάρτηση που λειτουργεί σαν ένα ολοκλήρωμα του γινομένου των δύο καμπυλών βρίσκεται για ποια υστέρηση “ταυτίζονται” καλύτερα. Η υστέρηση αυτή αντιστοιχεί σε χρονική διαφορά με βάση τον ρυθμό δειγματοληψίας και άρα με διαφορά φάσης ανάλογα την συχνότητα της περιόδου των καμπυλών.

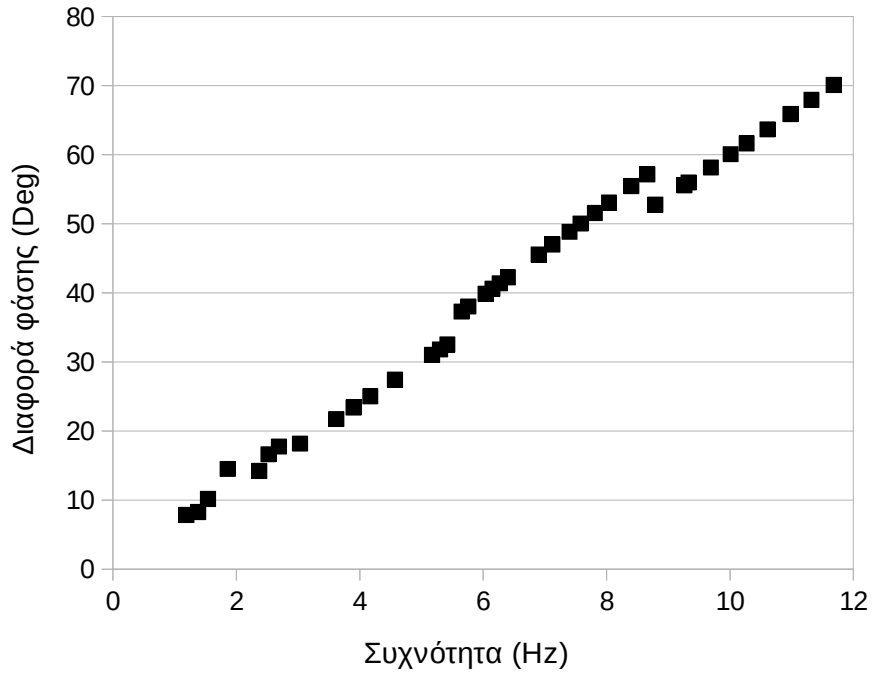
αντιστοιχούν σε ακέραια πολλαπλάσια του ρυθμού δειγματοληψίας που ταυτίζεται με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Έτσι προκύπτουν τα σχήματα 4.2.12-13 στα οποία εμφανίζονται οι διαφορές φάσης ανάμεσα στα τρία μεγέθη. Το σχήμα 4.2.13 έχει προκύψει από την ετεροσυσχέτιση των καμπυλομορφών των διαφορών πιέσεων αλλά εκφράζει και την διαφορά των καμπυλών του σχήματος 4.2.12.



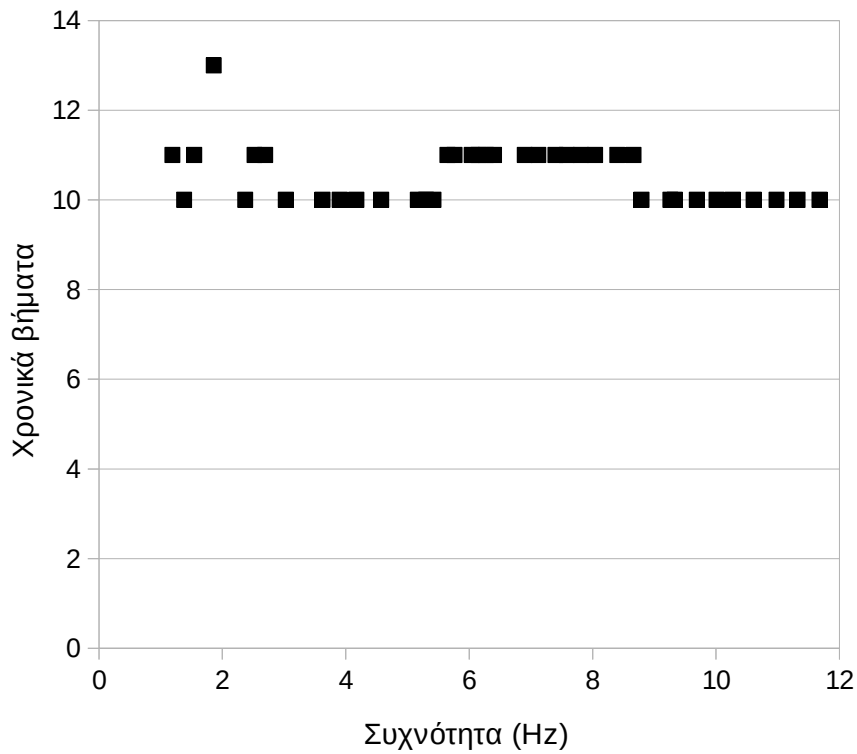
Σχήμα 4.2.12: Σύγκριση διαφορών φάσης των κυματομορφών της διαφοράς πίεσης και της παροχής ανάμεσα σε προσομοιώσεις με οριακές συνθήκες παροχής και πείραμα συναρτήσει της συχνότητας

Φαίνεται ότι η διαφορά πίεσης που προκύπτει από τις προσομοιώσεις με οριακή συνθήκη παροχής έπεται της παροχής περισσότερο από όσο η πειραματικά μετρηθείσα διαφορά πίεσης. Παρατηρείται επίσης ότι η διαφορά ανάμεσα στην αναμενόμενη από τα πειράματα διαφορά φάσης και την προκύπτουσα από τις προσομοιώσεις αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα που μπορεί να οφείλεται στο ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα οι τυχόν ανακλάσεις κυμάτων που εμφανίζονται στο πείραμα γίνονται εντονότερες, ενώ στο μοντέλο της προσομοίωσης λόγω του “ανοιχτού” σχεδιασμού του δεν μπορούν να εμφανιστούν. Όμως αν εκφράσουμε το πόσο έπεται η υπολογισθείσα από τις προσομοιώσεις διαφορά πίεσης, της πειραματικής διαφοράς πίεσης, όχι ως διαφορά φάσης -δηλαδή γωνία που εξαρτάται και από την συχνότητα της κυματομορφής- όπως στο σχήμα 4.2.1.13, αλλά ως χρονικά βήματα (ή χρόνο) όπως στο σχήμα 4.2.1.14, η ποσότητα αυτή είναι σχεδόν σταθερή και περίπου ίση με 10 χρονικά βήματα (0.0167 s). Δηλαδή ανεξάρτητα από την συχνότητα διέγερσης οι κυματομορφή της διαφοράς πίεσης που προκύπτει από τις προσομοιώσεις έπεται της κυματομορφής της πειραματικής διαφοράς πίεσης περίπου σταθερό χρόνο.





Σχήμα 4.2.13: Διαφορά φάσης ανάμεσα σε πειραματική διαφορά πίεσης και διαφορά πίεσης από προσομοίωση με οριακή συνθήκη παροχής συναρτήσει της συχνότητας

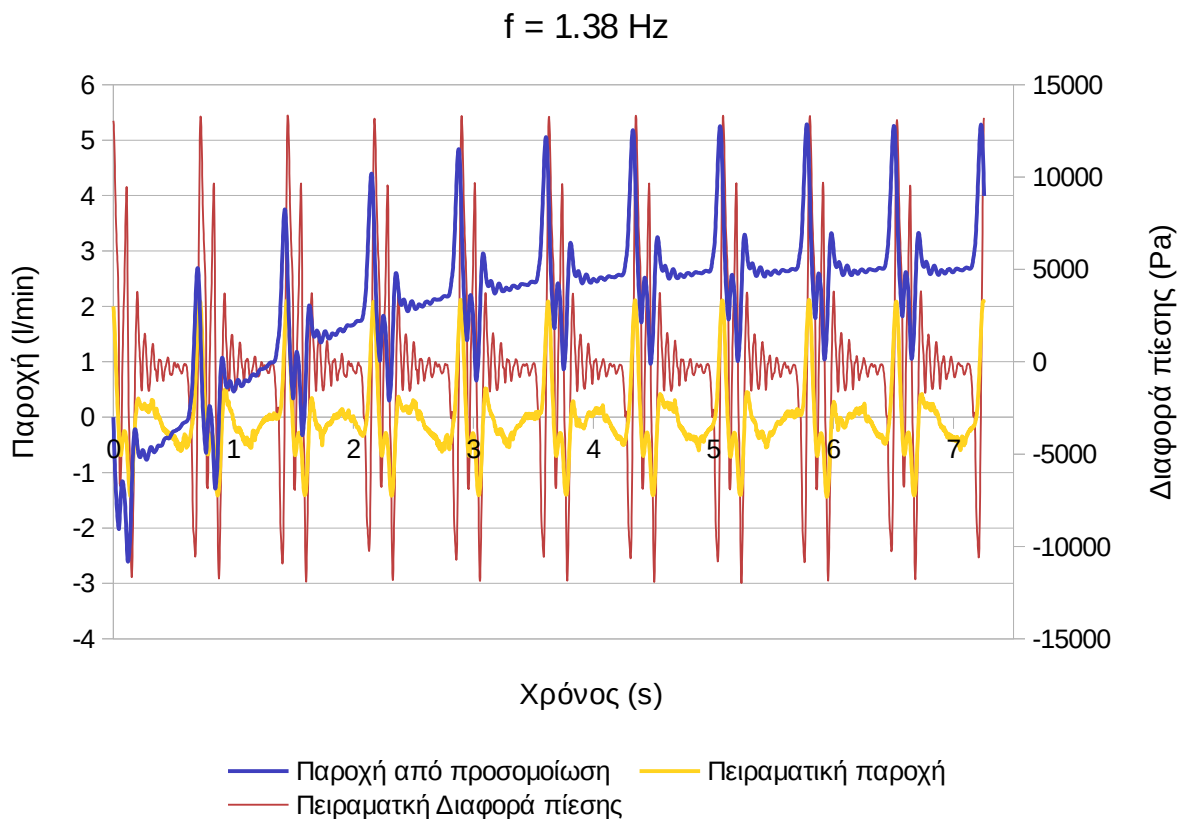


Σχήμα 4.2.14: Αριθμός χρονικών βημάτων που αντιστοιχεί στην διαφορά φάσης του σχήματος 4.2.13 συναρτήσει της συχνότητας

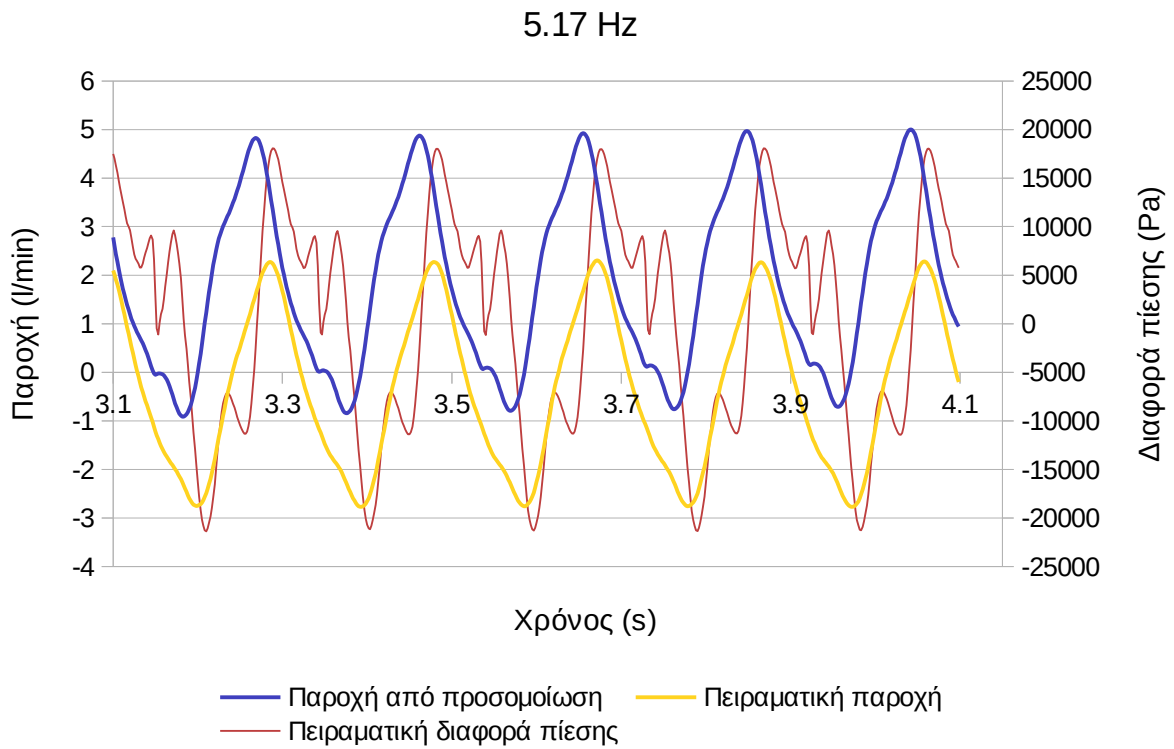
## 4.2.2 Περιπτώσεις προσομοιώσεων με οριακές συνθήκες πίεσης και στα δύο άκρα του αγωγού

### 4.2.2.1 Καμπύλος Αγωγός

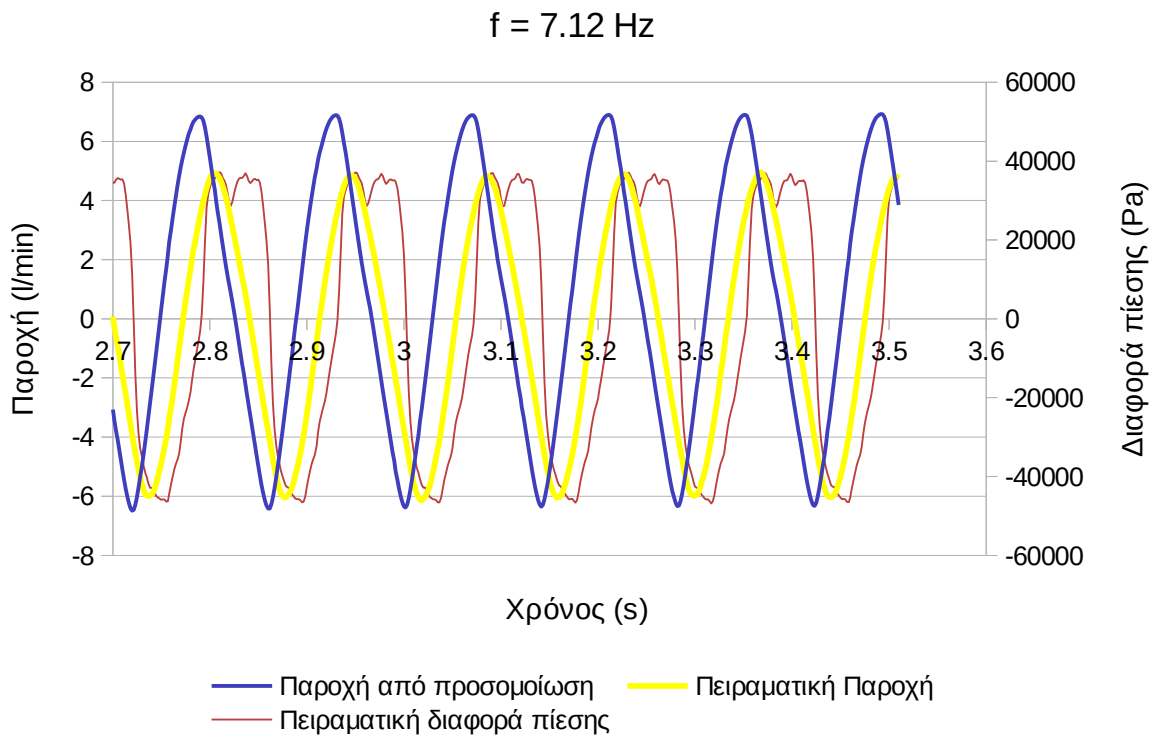
Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.4.2 με τις προσομοιώσεις μετατοπισμένων πιέσεων η σύγκλιση της προσομοίωσης με οριακές συνθήκες στατικής πίεσης και στα δύο άκρα του αγωγού είναι δυσκολότερη και πιο χρονοβόρα. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 4.2.15 όπου η παροχή από την προσομοίωση με οριακή συνθήκη πίεσης απεικονίζεται από την αρχή του χρόνου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ακολουθούν αντίστοιχη πορεία και για τις υπόλοιπες συχνότητες, όμως στα σχήματα 4.2.16-19 απεικονίζεται η παροχή που υπολογίζεται στις προσομοιώσεις όχι από χρόνο μηδέν αλλά από μεταγενέστερο χρόνο ώστε να είναι ευκολότερα διακριτές οι καμπυλομορφές. Παρά την δυσκολία στην σύγκλιση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναμένεται να είναι χρήσιμα και σε αυτήν την περίπτωση καθώς όπως φαίνεται και στα αναφερθέντα σχήματα τελικά η μέση παροχή σταθεροποιείται. Παρότι η μέση παροχή αργεί να σταθεροποιηθεί, το πλάτος της παροχής σε μία περίοδο όπως και το “σχήμα” της παραμένουν περίπου σταθερά και γι’ αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του μέσου πλάτους και στις συναρτήσεις ετεροσυσχέτισης.



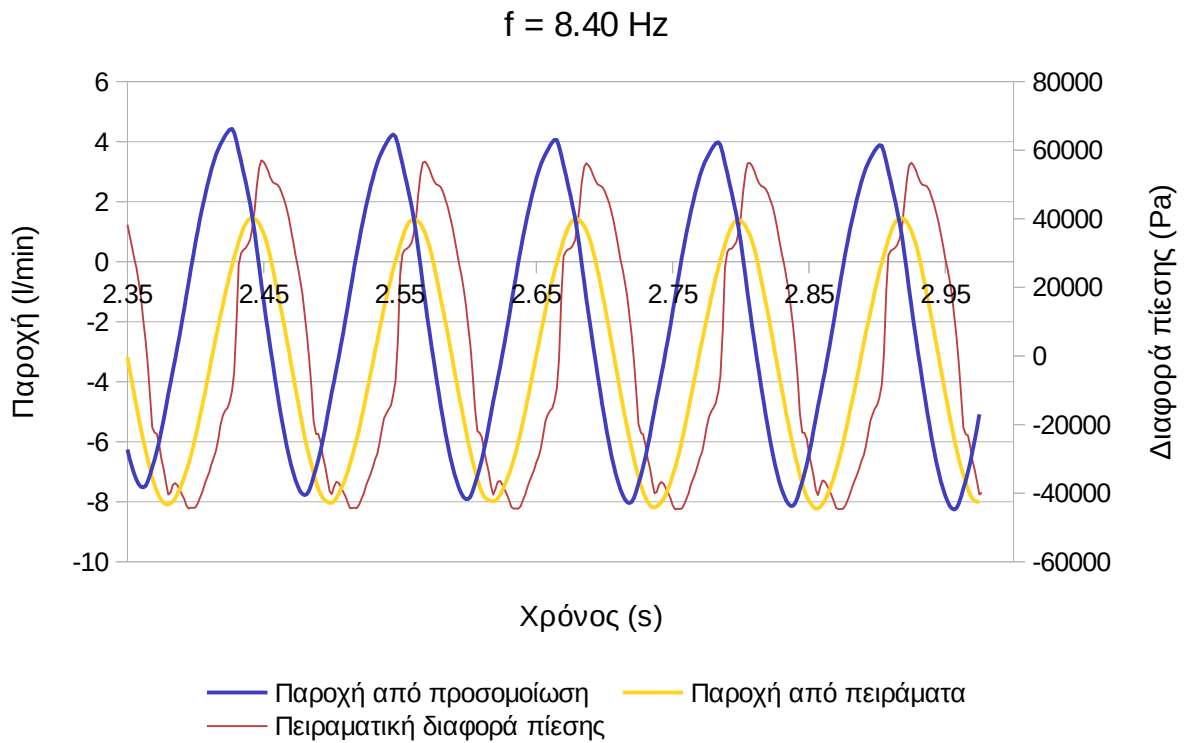
Σχήμα 4.2.15: Αποτελέσματα παροχής συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη διαφοράς πίεσης συχνότητας 1.38 Hz. Παρατηρείται σύγκλιση που διαρκεί πολλές περιόδους σε μία μέση παροχή



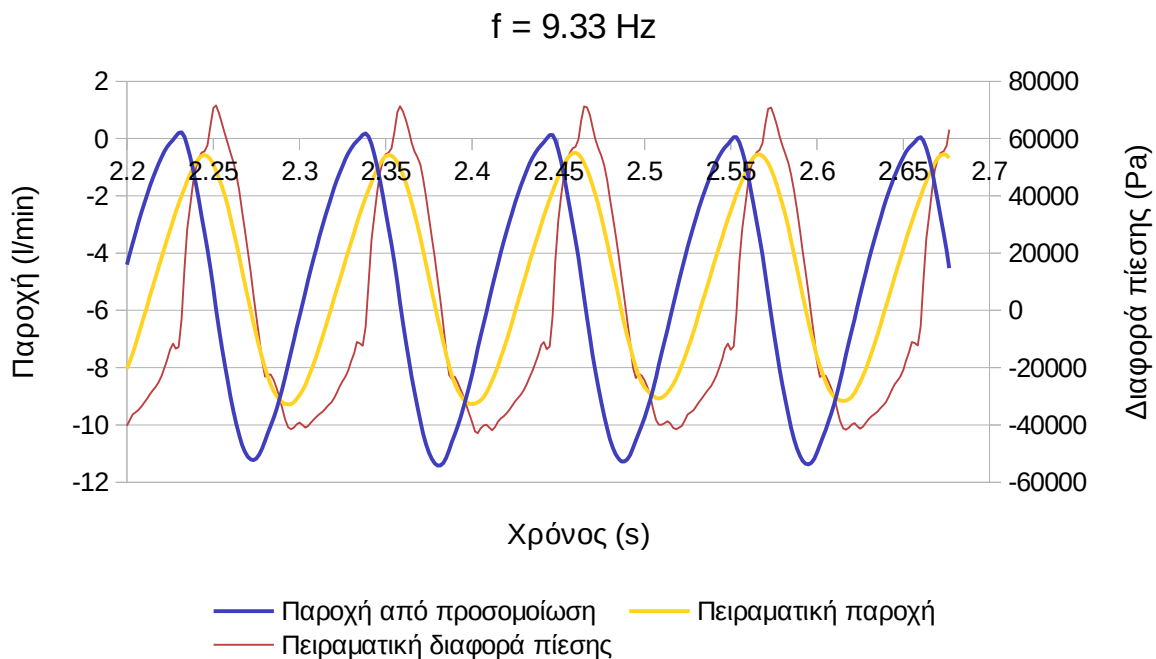
Σχήμα 4.2.16: Αποτελέσματα παροχής συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη διαφοράς πίεσης συχνότητας 5.17 Hz.



Σχήμα 4.2.17: Αποτελέσματα παροχής συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη διαφοράς πίεσης συχνότητας 7.12 Hz.



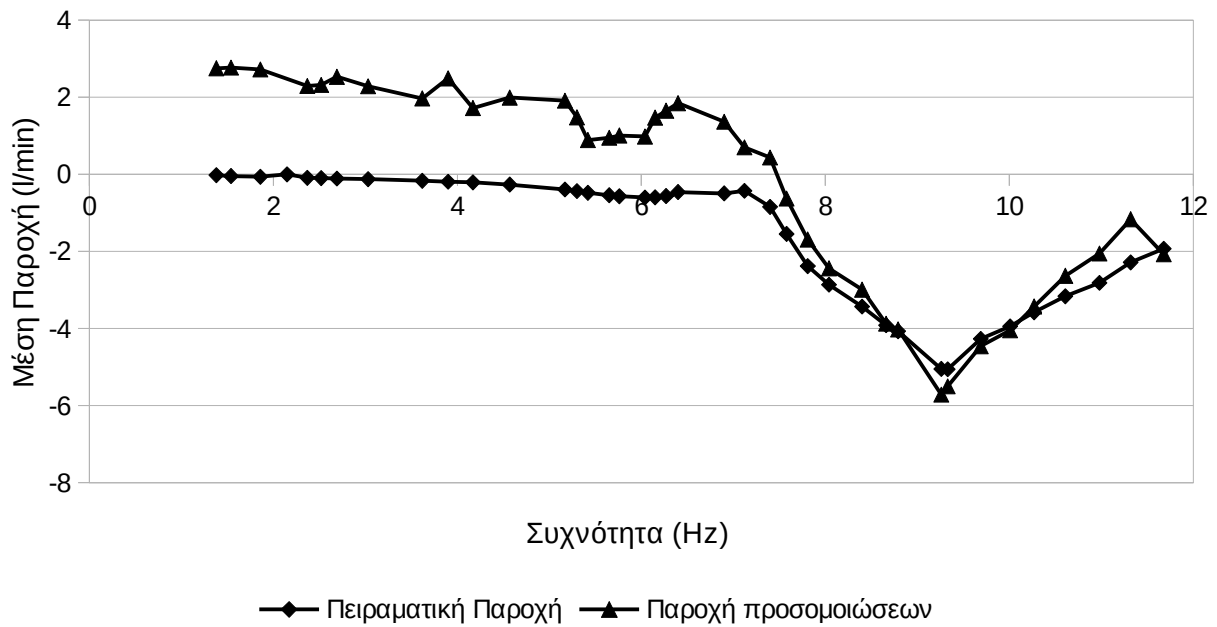
Σχήμα 4.2.18: Αποτελέσματα παροχής συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη διαφοράς πίεσης συχνότητας 8.40 Hz.



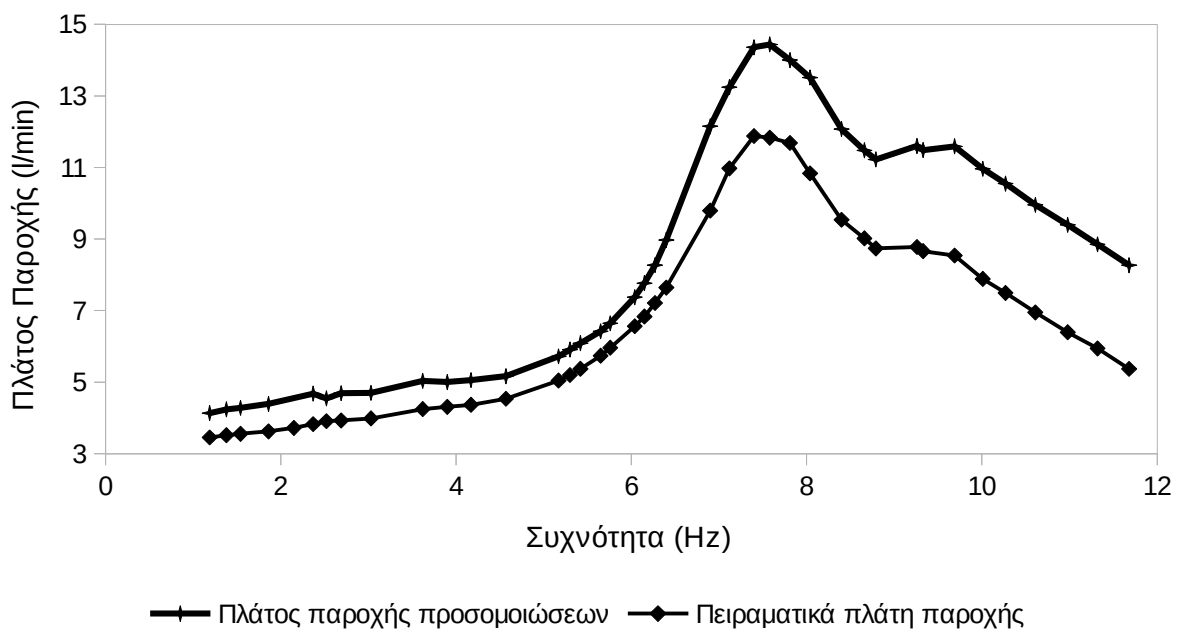
Σχήμα 4.2.19: Αποτελέσματα παροχής συναρτήσει του χρόνου για προσομοίωση με οριακή συνθήκη διαφοράς πίεσης συχνότητας 9.33 Hz.

Σε συχνότητες μακριά από τις συχνότητες που εμφανίζεται στα πειράματα αυξημένη παροχή, δηλαδή για συχνότητες περίπου έως 7 Hz, η παροχή συγκλίνει σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις μετρηθείσες. Σε μεγαλύτερες

συχνότητες οι προσομοιώσεις προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα, αφού η μέση παροχή συγκλίνει σε τιμές κοντά στις πειραματικές (Σχήμα 4.2.20). Παρ' όλα αυτά το πλάτος της παροχής υπολογίζεται πάντα μεγαλύτερο (Σχήμα 4.2.21).

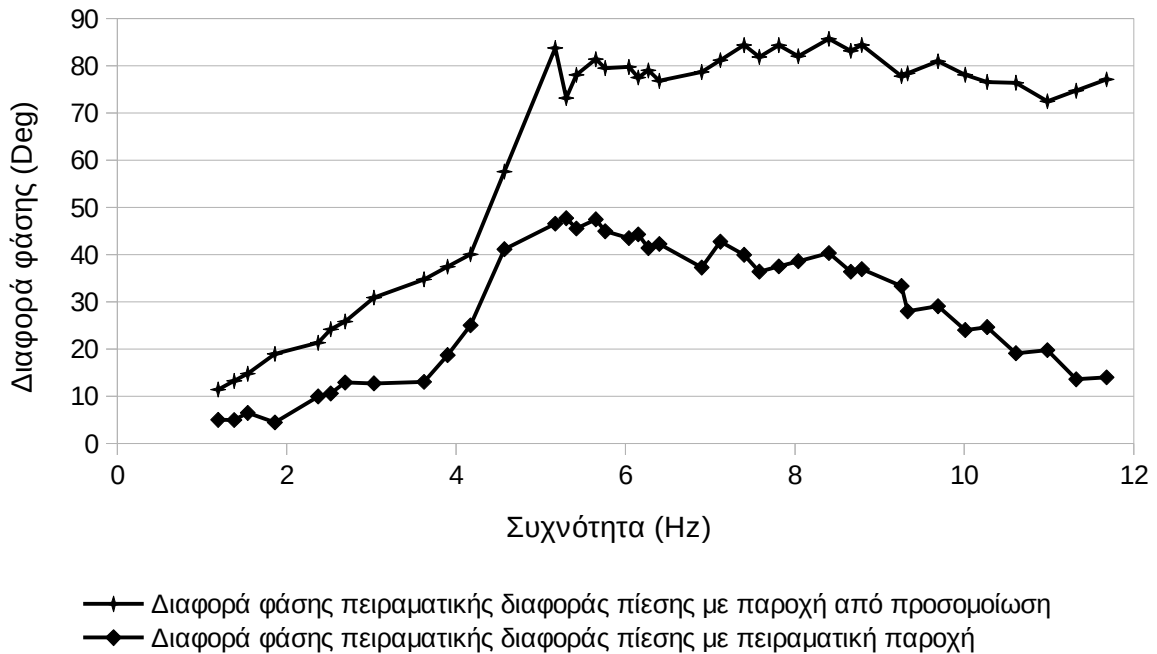


Σχήμα 4.2.20: Σύγκριση ανάμεσα σε πειραματικής μέσης παροχή και μέση παροχή από προσομοιώσεις με οριακές συνθήκες πίεσης συναρτήσει της συχνότητας



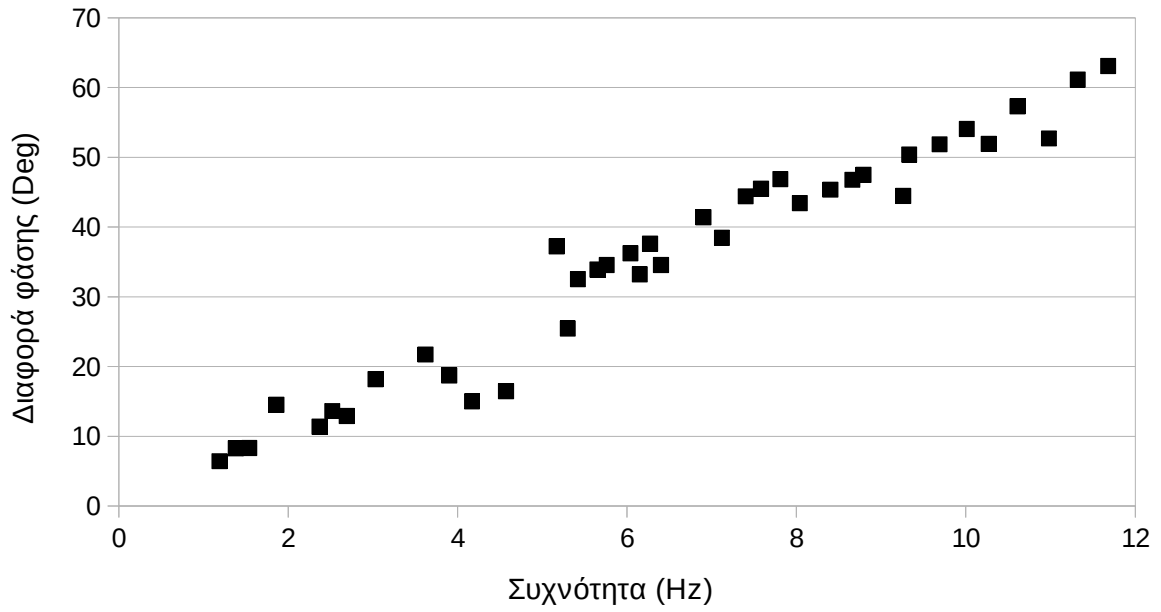
Σχήμα 4.2.21: Σύγκριση ανάμεσα σε πειραματικό πλάτος παροχής και πλάτος παροχής από προσομοιώσεις με οριακές συνθήκες πίεσης συναρτήσει της συχνότητας

Αντίστοιχα με την περίπτωση των προσομοιώσεων με οριακές συνθήκες παροχής έγινε ο υπολογισμός της διαφοράς φάσης ανάμεσα στα διάφορα μεγέθη και σε αυτήν την σειρά προσομοιώσεων. Στις προσομοιώσεις με οριακές συνθήκες πίεσης οι διαφορές φάσεις αναφέρονται σε διαφορά φάσης πειραματικής διαφοράς πίεσης με παροχή από προσομοίωση (Σχήμα 4.2.22) και πειραματική παροχή με παροχή από προσομοίωση (Σχήμα 4.2.23).

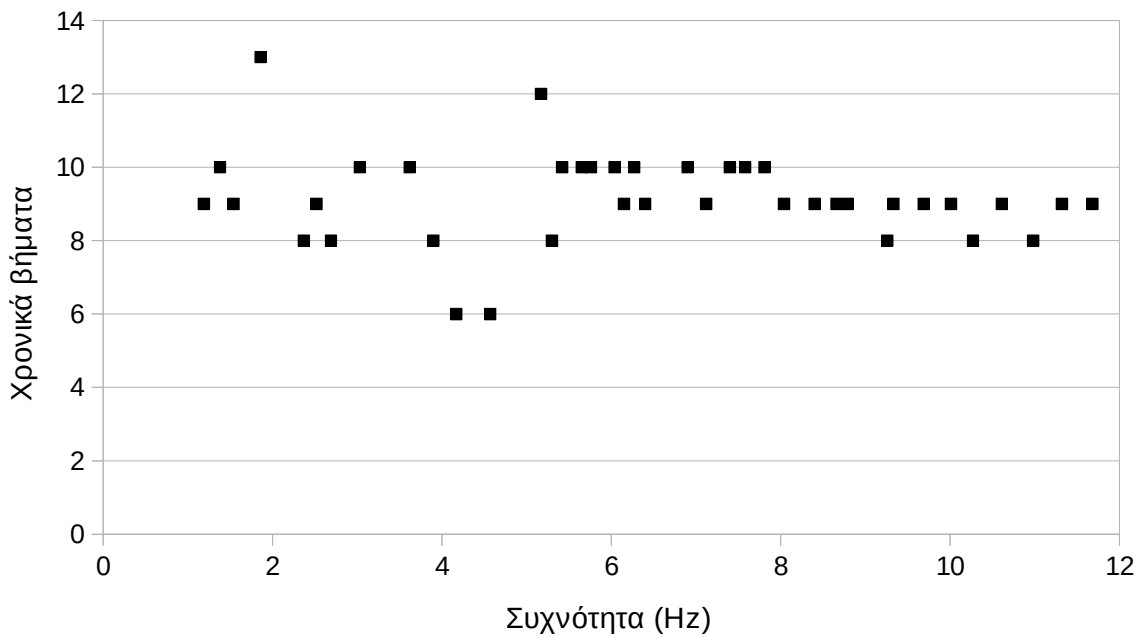


Σχήμα 4.2.22: Σύγκριση διαφορών φάσης των κυματομορφών της διαφοράς πίεσης και της παροχής ανάμεσα σε προσομοιώσεις με οριακές συνθήκες πίεσης και πείραμα συναρτήσει της συχνότητας

Παρατηρείται πώς όπως και στην προηγούμενη σειρά προσομοιώσεων έτσι και σε αυτήν καθώς η συχνότητα αυξάνει η διαφορά φάσης ανάμεσα σε πίεση και παροχή πλησιάζει τις 90 μοίρες. Επίσης η απόσταση ανάμεσα στις διαφορές φάσης που υπολογίζονται από τις προσομοιώσεις και τις διαφορές φάσης που υπολογίζονται από τα πειραματικά δεδομένα αυξάνει με την συχνότητα (Σχήμα 4.2.23). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.24 αν εκφράσουμε την διαφορά φάσης ανάμεσα στην πειραματική καμπυλομορφή της παροχής και την καμπυλομορφή της παροχής από τις προσομοιώσεις με οριακές συνθήκες πίεσης ως αριθμό χρονικών βημάτων (ή χρόνου) κατά τον οποίο απέχουν ειδικά για μεγάλες συχνότητες, ο αριθμός αυτός μένει περίπου σταθερός και ίσος με 9 χρονικά βήματα (0.015 s).

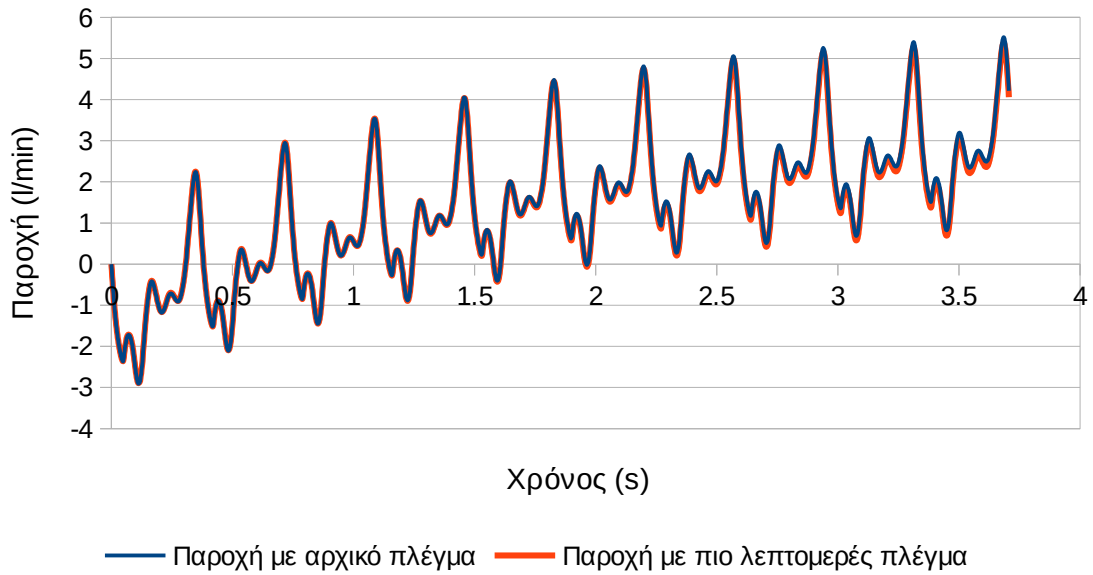


Σχήμα 4.2.23: Διαφορά φάσης ανάμεσα σε πειραματική παροχή και παροχή από προσομοίωση με οριακές συνθήκες πίεσης συναρτήσει της συχνότητας



Σχήμα 4.2.24: Αριθμός χρονικών βημάτων που αντιστοιχεί στην διαφορά φάσης του σχήματος 4.2.23 συναρτήσει της συχνότητας

Σε έλεγχο εξάρτησης από την διακριτοποίηση μπορούμε να δούμε ότι τόσο η λεπτομερέστερη διακριτοποίηση ως προς το χωρικό πλέγμα (Σχήμα 4.2.25) όσο και ως προς τον χρόνο (Σχήμα 4.2.26) δεν φαίνεται να οδηγούν σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα, επομένως οι λύσεις των προσομοιώσεων είναι ανεξάρτητες από το πλέγμα.:



Σχήμα 4.2.25: Σύγκριση παροχής που υπολογίζεται από προσομοίωση με οριακές συνθήκες πίεσης και με το αρχικό πλέγμα (των σχημάτων 3.4.9-11) ή με λεπτομερέστερο πλέγμα (του σχήματος 3.4.12) για συχνότητα 2.69 Hz

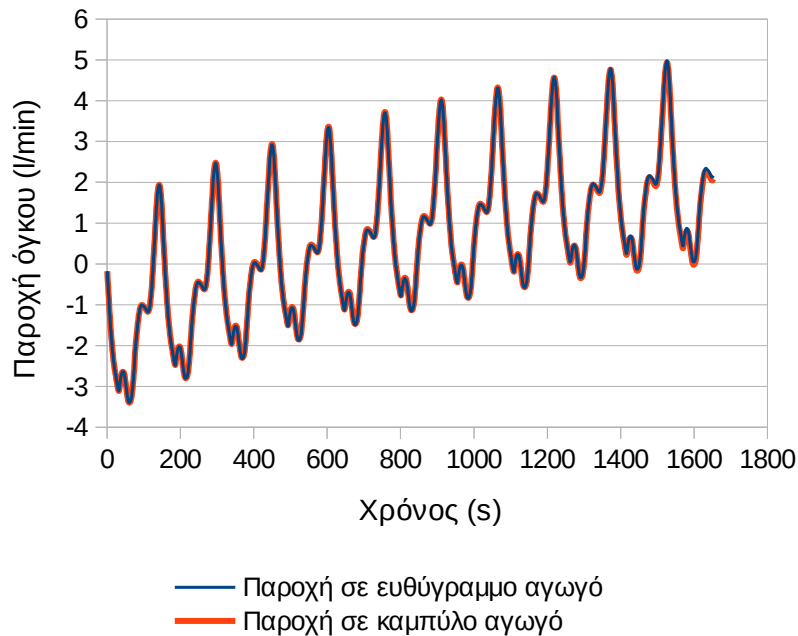


Σχήμα 4.2.26: Σύγκριση παροχής συναρτήσει του χρόνου που υπολογίζεται σε προσομοιώσεις με οριακές συνθήκες πίεσης και με βήμα 1/600 s ή βήμα 1/1200 s για συχνότητα 1.54 Hz

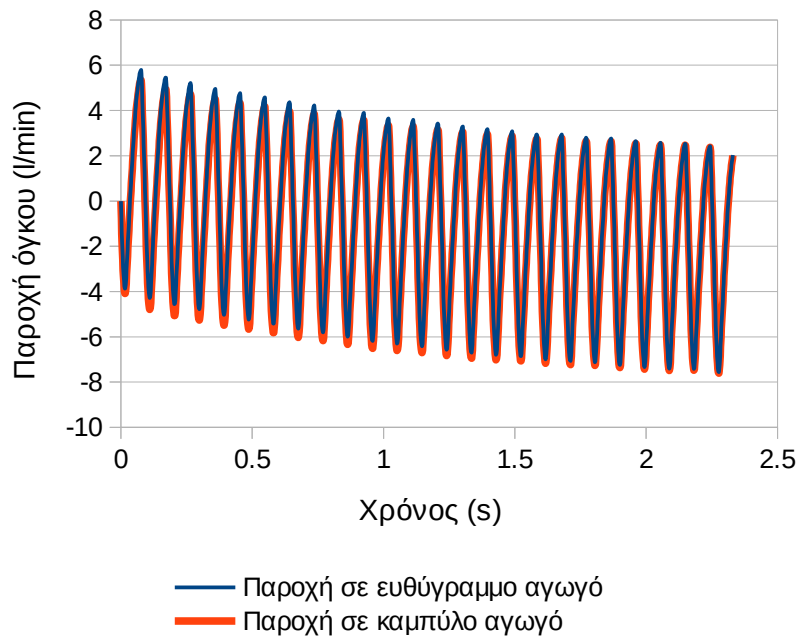


#### 4.2.2.2 Ευθύγραμμος αγωγός

Προσομοιώσεις σε ευθύ αγωγό έγιναν πάλι με οριακή συνθήκη πίεσης (Σχήματα 4.2.27-28) και όπως φαίνεται συμβαδίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό με την περίπτωση του καμπύλου αγωγού και γι' αυτό διακόπηκαν πριν συγκλίνουν εντελώς, θεωρώντας πως όλα τα αποτελέσματα σε ευθύ αγωγό ταυτίζονται με τα αντίστοιχα σε καμπύλο και πως δηλαδή η επίδραση της καμπυλότητας στα αποτελέσματα είναι αμελητέα.



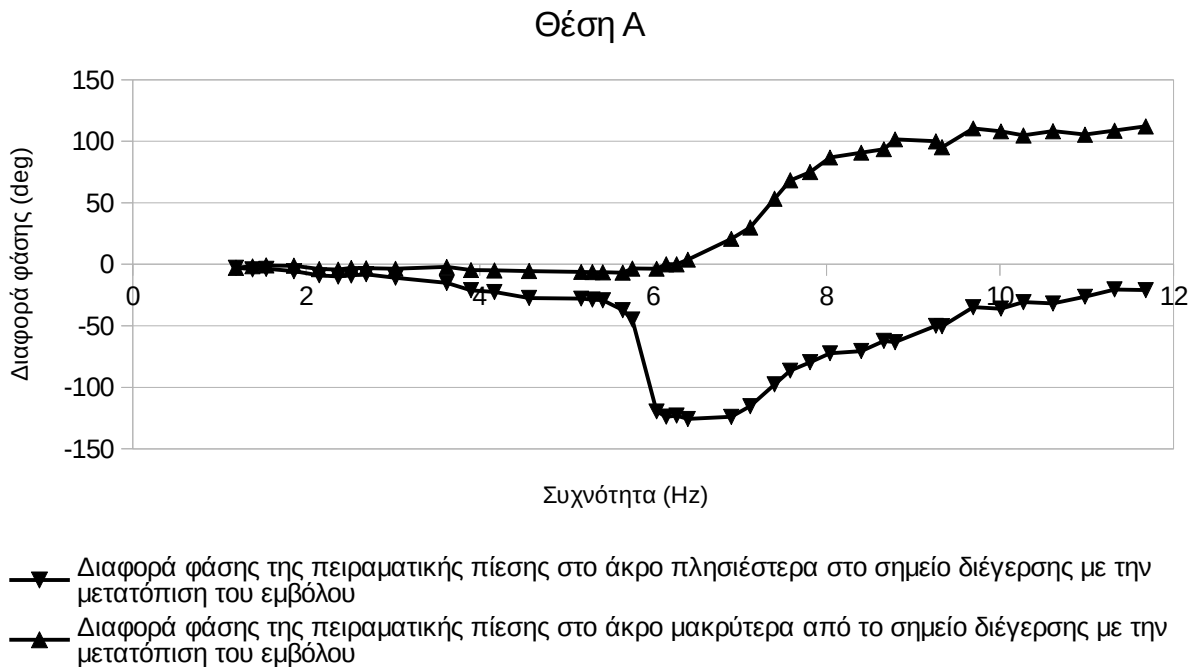
Σχήμα 4.2.27: Σύγκριση παροχής σε καμπυλόγραμμο και ευθύγραμμο αγωγό για συχνότητα 3.90 Hz



Σχήμα 4.2.28: Σύγκριση παροχής σε καμπυλόγραμμο και ευθύγραμμο αγωγό για συχνότητα 10.61 Hz

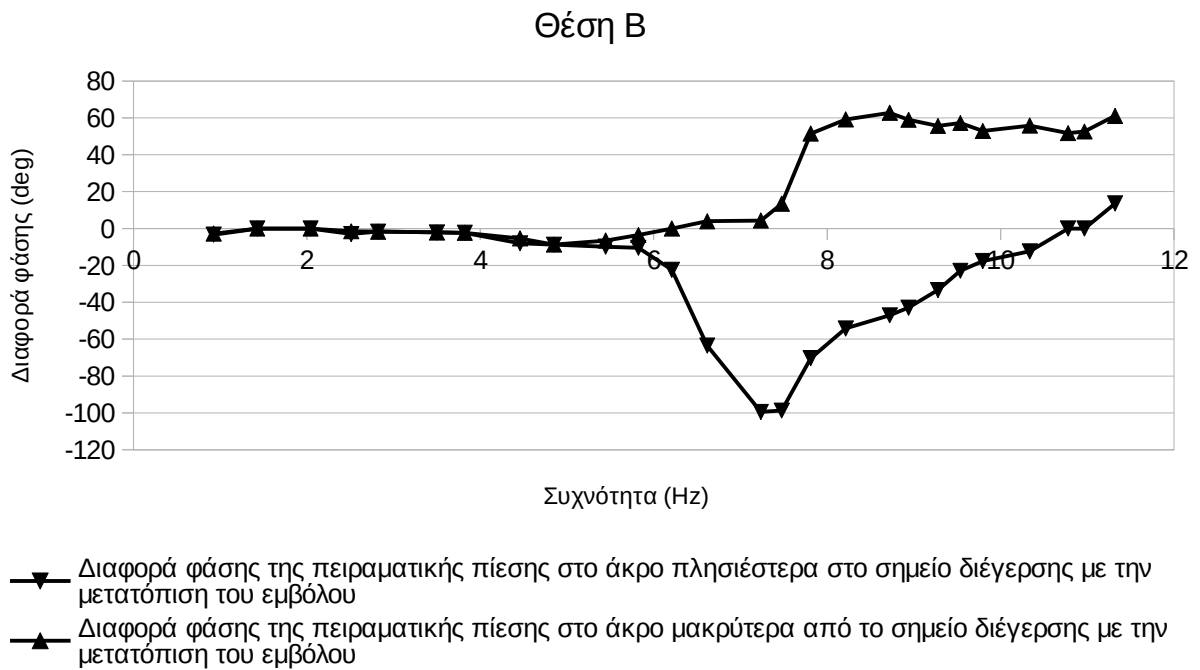
### 4.3 ΦΑΣΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η συσχέτιση των φάσεων των μεγεθών που έχει γίνει στα προηγούμενα κεφάλαια βοηθά να κατανοήσουμε την συμπεριφορά τόσο του φυσικού φαινομένου όσο και των περιορισμών που προκύπτουν από τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις. Κρίθηκε έτσι σκόπιμο να γίνει επιπλέον ανάλυση στις φάσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων, και δει στις διαφορές της φάσης των μετρηθείσων πιέσεων στα δύο άκρα του αγωγού με την φάση του εμβόλου στην παλινδρομική κίνησή του. Ο υπολογισμών των σχετικών διαφορών φάσης έγινε για δύο διαφορετικές θέσεις του εμβόλου σε σχέση με το σημείο σύνδεσης του εύκαμπτου με τον άκαμπτο αγωγό: Θέση Α που απέχει απόσταση 150 mm από το άκρο του εύκαμπτου αγωγού, δηλαδή την ίδια θέση για την οποία έγιναν και όλες οι προσομοιώσεις, καθώς και θέση Β που απέχει απόσταση 330 mm από το άκρο του εύκαμπτου αγωγού, δηλαδή βρίσκεται πιο “κεντρικά” άρα και πιο “συμμετρικά” στον εύκαμπτο αγωγό. Οι διαφορές φάσης που υπολογίστηκαν φαίνονται στα σχήματα 4.3.1 και 4.3.2.



Σχήμα 4.3.1: Διαφορές φάσης ανάμεσα στις πειραματικά μετρηθήσους πιέσεις στα άκρα του άκαμπτου αγωγού και στην μετατόπιση του εμβόλου για την περίπτωση που η διέγερση εφαρμόζεται στην Θέση Α, δηλαδή σε απόσταση 150 mm από το άκρο του εύκαμπτου αγωγού

Στο σχήμα 4.3.1 φαίνεται πως ενώ η πίεση στο μακρινό άκρο του αγωγού σε σχέση με το σημείο διέγερσης είναι σχεδόν συμφασική με την μετατόπιση του εμβόλου για συχνότητα περίπου έως 6 Hz, αυξάνει με σχετικά μεγάλο ρυθμό μέχρι τα 7 Hz και από τα 8 Hz και μετά αυξάνει με μικρό ρυθμό. Αντίθετα η διαφορά φάσης της πίεσης στο άκρο του αγωγού που βρίσκεται πλησιέστερα στο σημείο διέγερσης με την μετατόπιση του εμβόλου μειώνεται με μικρό ρυθμό μέχρι περίπου τα 6 Hz, όταν και παρουσιάζει μεγάλη και απότομη πτώση. Στην συνέχεια μένει περίπου σταθερή μέχρι τα 7 Hz, ενώ από τα 7 Hz και μετά αυξάνει σταδιακά. Έχει ενδιαφέρον η παρατήρηση πως και οι δύο διαφορές φάσης ξεκινούν να αυξάνονται κατ’ απόλυτο τιμή περίπου στην ίδια συχνότητα και μάλιστα πριν αρχίσει να εμφανίζεται ανάπτυξη μέσης παροχής από το φαινόμενο της άντλησης χωρίς βαλβίδες. Επίσης αφού το φαινόμενο αρχίσει να εμφανίζεται οι δύο διαφορές φάσης κινούνται περίπου με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 4.3.2: Διαφορές φάσης ανάμεσα στις πειραματικά μετρηθήσες πιέσεις στα άκρα του άκαμπτου αγωγού και στην μετατόπιση του εμβόλου για την περίπτωση που η διέγερση εφαρμόζεται στην Θέση B, δηλαδή σε απόσταση 330 mm από το άκρο του εύκαμπτου αγωγού

Στο σχήμα 4.3.2 φαίνεται πως η συμπεριφορά των διαφορών φάσης ανάμεσα στις πιέσεις των δύο άκρων του αγωγού και της μετατόπισης του εμβόλου στην περίπτωση της διέγερσης στην Θέση B εμφανίζει μεγάλες ομοιότητες με την περίπτωση της διέγερσης στην Θέση A. Μία σημαντική διαφορά ανάμεσα στα δύο σχήματα αφορά τις τιμές των διαφορών φάσης, που στην Θέση A είναι γενικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με την Θέση B. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη ένταση του φαινομένου, αφού με την μεταφορά της θέσης διέγερσης “κεντρικότερα” στον εύκαμπτο αγωγό η ασυμμετρία είναι μικρότερη.

## 4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η πειραματική διάταξη του [1] μελετήθηκε υπολογιστικά ουσιαστικά με δύο προσεγγίσεις: (α) Μέσω αμφίδρομης αλληλεπίδρασης ρευστού-στερεού σώματος και (β) με χρήση μετρήσεων στα άκρα του άκαμπτου αγωγού και χρήση μόνο υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Η πρώτη προσέγγιση απέτυχε να επιβεβαιώσει τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς οι προσομοιώσεις δεν επιτεύχθηκαν σε συχνότητες στις οποίες υπάρχει ενδιαφέρον από την άποψη του φαινομένου άντλησης χωρίς βαλβίδες.

Στην δεύτερη προσέγγιση έγιναν δύο βασικές σειρές μετρήσεων για όλες τις συχνότητες που διέφεραν στην οριακή συνθήκη εισόδου στον άκαμπτο αγωγό: στην πρώτη αυτή ήταν η παροχή μάζας ενώ στην δεύτερη η στατική πίεση. Αυτές δεν πέτυχαν την πειραματικά μετρηθείσα διαφορά πίεσης και παροχή όγκου αντίστοιχα με μεγάλη ακρίβεια, ωστόσο (με εξαίρεση την προβλεφθείσα παροχή σε χαμηλές συχνότητες) ακολουθούσαν την τάση που παρατηρήθηκε στο πείραμα για αυτά τα μεγέθη. Η παρατήρηση πως και στις δύο σειρές μετρήσεων η διαφορά φάσης ανάμεσα στην παροχή και την διαφορά πίεσης τείνει προς τις 90 μοίρες καθώς αυξάνεται η συχνότητα όπως προβλέπει η θεωρία Womersley για ευθύγραμμο αγωγό, καθώς και η παρατήρηση πως οι προσομοιώσεις δεν οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα όταν ο αγωγός είναι ευθύγραμμος μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι προσομοιώσεις συμφωνούν μεταξύ τους στο ότι οι μετρήσεις που κάθε φορά τέθηκαν ως οριακές συνθήκες αποτελούν τελικά τιμές που αντιστοιχούν σε παλλόμενη ροή. Με άλλα λόγια και τα δύο σετ οριακών συνθηκών οδηγούν στην δημιουργία παλλόμενης ροής σε ευθύγραμμο αγωγό, άρα και σε αγωγό της γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης αφού όπως φάνηκε από τις προσομοιώσεις η αλλαγή στην καμπυλότητα δεν προκαλεί σημαντική μεταβολή στα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Η διαφορετική διαφορά φάσης καθώς αυξάνει η συχνότητα στην περίπτωση των πειραματικών μετρήσεων μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη του κλειστού κυκλώματος το οποίο δημιουργεί ανακλάσεις στα δημιουργούμενα κύματα, φαινόμενο που δεν μπορεί να προσομοιωθεί στο μοντέλο μόνο του εσωτερικού του άκαμπτου αγωγού. Λαμβάνοντας αυτά υπόψιν μπορούμε να πούμε πως η δεύτερη σειρά προσομοιώσεων συμφωνεί με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και ως ένα βαθμό τα επιβεβαιώνει και τα πιστοποιεί.

Ωστόσο υπάρχει προφανώς χώρος για περαιτέρω διερεύνηση και εμβάθυνση της παρούσας μελέτης. Ένα βασικό πρόβλημα κατά την διάρκεια της εργασίας ήταν το θέμα της τάξης μεγέθους του πειράματος. Το φαινόμενο της άντλησης χωρίς βαλβίδες εμφανίζεται και σε μικρότερες διατάξεις-διατάξεις που οι μέγιστες διαστάσεις τους δεν διαφέρουν τόσο με τις ελάχιστές τους και οι οποίες θα ήταν πολύ πιο εύκολο και υπολογιστικά οικονομικό να γίνει πιστοποίηση πειραματικών μετρήσεων μέσω προσομοιώσεων. Επίσης είναι φανερό πως ακόμα και όταν υπάρχουν οι μετρήσεις στα άκρα του άκαμπτου αγωγού η ύπαρξη του υπόλοιπου κυκλώματος επηρεάζει σημαντικά το φαινόμενο άρα για ακριβέστερες προσομοιώσεις θα έπρεπε με κάποιον τρόπο να συμπεριληφθεί, εξάλλου αυτό προσπαθεί ουσιαστικά να πετύχει η πρώτη προσέγγιση της αμφίδρομης αλληλεπίδρασης. Για να δουλέψει αυτή η προσέγγιση καλύτερα θα μπορούσαν για παράδειγμα να χρησιμοποιηθούν νόμοι πάλμωσης πιο πιστοί στους πειραματικούς, να γίνουν λεπτομερέστερα πλέγματα και να χρησιμοποιηθούν μικρότερα χρονικά βήματα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1: Μανόπουλος Χ., Μελέτη Αντλητικών Φαινομένων σε ιατροβιολογικές εφαρμογές, μέσω αλληλεπίδρασης ρευστού και κίνησης σώματος, Διαπανεπιστημικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών στην βιοϊατρική τεχνολογία Πανεπιστήμιο Πατρών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2009
- 2: Moller P.C., Philpott C.W., The circulatory system of amphioxus (*Branchiostoma floridae*), *Journal of Morphology*, 139, 389-406, 1973
- 3: Lindsay D. Waldrop, Laura A. Miller, The role of the pericardium in the valveless, tubular heart of the tunicate *Ciona savignyi*, *Journal of Experimental Biology*, 218, 2753-2763, 2015
- 4: T. Kenner, M. Moser, I. Tanev, K. Ono, The Liebau-effect or on the optimal use of energy for the circulation of blood, *Scripta Medica (BRNO)*, 73, 9-14, 2000
- 5: Männer J., Wessel A., Yelbuz TM., How does the tubular embryonic heart work? Looking for the physical mechanism generating unidirectional blood flow in the valveless embryonic heart tube., *Developmental Dynamics*, 239, 1035-1046, 2010
- 6: Sperelakis N., Pacemaker Mechanisms in Myocardial Cells during Development of Embryonic Chick Hearts, *Cardiac Rate and Rhythm*, 17, 129-165, 1982
- 7: Forouhar AS., Liebling M., Hickerson A., Nasiraei-Moghaddam A, Tsai HJ, Hove JR, Fraser SE, Dickinson ME, Gharib M., The embryonic vertebrate heart tube is a dynamic suction pump., *Science*, 312, 751-753, 2006
- 8: Maes F., Chaudry B., Van Ransbeec P., Verdonck P., The Pumping Mechanism of Embryonic Hearts, ,37, 470-473, 2011
- 9: Maes F., Chaudry B., Segers P., Ransbeec P., Verdonck P., Visualization and Modeling of the Flow in the Embryonic Heart, , 22, 1875-1878, 2009
- 10: Hiermeier, F.; Männer, J, Kinking and Torsion Can Significantly Improve the Efficiency of Valveless Pumping in Periodically Compressed Tubular Conduits. Implications for Understanding of the Form-Function Relationship of Embryonic Heart Tubes, *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, 4, 19, 2017
- 11: Longatti P., The Liebau Phenomenon: A Translational Approach to New Paradigms of CSF Circulation and Related Flow Disturbances, *Child's Nervous System*, 34, 227-233, 2018 doi:10.1007/s00381-017-3653-1
- 12: Ozanam M., De la circulation veineuse par influence, *Comptes rendus Hebdomadaires des Séances de L'Académie des Sciences*, 93, 92-94, 1881
- 13: Liebau G., Arterielle Pulsation und venöse Repulsion, *Zeitschrift für die Gesamte Experimentelle Medizin*, 123, 71-90, 1954
- 14: Liebau G., Über ein ventillosoes Pumpprinzip, *Naturwissenschaften*, 41, 327, 1954
- 15: Liebau G., Ursache und Wirkung des hohen Druckgefälles im Arteriolenbereich, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, 47, 385-393, 1958
- 16: Liebau G., Beobachtungen über ventillose Förderung im Kapillargewebe-Kreislauf, *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Kreislaufforschung*, 29, 152-155, 1963
- 17: Liebau G., Über die funktionelle Bedeutung der Venenklappen, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, 52, 419-424, 1963
- 18: Liebau G., Über periphere Blutförderung, Pestel E., Liebau G., Phänomen der pulsierenden Strömung im Blutkreislauf aus technologischer, physiologischer und klinischer Sicht, *Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich*, 738/738a\*67-781970
- 19: Beattie C., Guerci A.D., Hall T., Borkon A.M., Baumgartner W., Stuart R.S., Peters J., Halperin H., Robotham J.L., Mechanisms of blood flow during pneumatic vest cardiopulmonary resuscitation, *Journal of Applied Physiology*, 70, 454-465, 1991
- 20: Criley J.M., Niemann J.T., Rosborough J.P., Ung S., Suzuki J., The heart is a conduit in CPR, *Critical Care Medicine*, 9, 373-374, 1981
- 21: Rudikoff M.T., Maughan W.L., Efron M., Freund P., Weisfeldt M.L., Mechanisms of blood flow during cardiopulmonary resuscitation, *Circulation*, 61, 345-352, 1980
- 22: Werner J.A., Greene H.L., Janko C.L., Cobb L.A., Visualization of cardiac valve motion in man during external chest compression using two-dimensional echocardiography: Implications regarding the mechanism of blood flow, *Circulation*, 63, 1417-1421, 1981
- 23: Halperin H.R., Tsitlik J.E., Beyar R., Chandra N., Guerci A.D., Intrathoracic pressure fluctuations move blood during CPR: Comparison of hemodynamic data with predictions from a mathematical model, *Annals of Biomedical Engineering*, 15, 385-403, 1987
- 24: Ikomi E., Fluid Pressures in the Rabbit Popliteal Afferent Lymphatics During Passive Tissue Motion, *Lymphology*, 30, 13-23, 1997
- 25: Ikomi F., Schmid-Schonbein GW., Lymph Pump Mechanics in the Rabbit Hind Leg", *the American Journal of Physiology*, 271, H171-183, 1996 doi: 10.1152/ajpheart.1996.271.1.H173
- 26: Scallan J. P., Zawieja S. D., Castorena-Gonzalez J. A., Davis M. J., Lymphatic Pumping; Mechanics, Mechanisms and Malfunction, *The Journal of Physiology*, 594, 5749-5768, 2016 doi: 10.1113/JP272088
- 27: Zawieja DC., Contractile Physiology of Lymphatics, *Lymphatic Research and Biology*, 7, 87-96, 2009 doi: 10.1089/lrb.2009.0007
- 28: Reddy NP., Lymph Circulation: Physiology, Pharmacology, and Biomechanics, *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 14, 45-91, 1986

- 29: Waldrop L., Miller L., Large-amplitude, Short-wave Peristalsis and its Implications for Transport, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 15, 629, 2016 <https://doi.org/10.1007/s10237-015-0713-x>
- 30: Kozlovsky P., Bryson-Richardson R.J., Jaffa A.J., Rosenfeld M., Elad D., The Driving Mechanism for Unidirectional Blood Flow in the Tubular Embryonic Heart, *Annals of Biomedical Engineering*, 44, 3069, 2016 <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1620-8>
- 31: Baird A., Waldrop L., Miller L., Neuromechanical Pumping: Boundary Flexibility and Traveling Depolarization Waves Drive Flow within Valveless, Tubular hearts, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 32, 829-846, 2015 <https://doi.org/10.1007/s13160-015-0195-3>
- 32: Liebau G., Prinzipien kombinierter ventillosen Pumpen, abgeleitet vom menschlichen Blutkreislauf, *Naturwissenschaften*, 42, 339, 1955
- 33: Mahrenholtz O., Untersuchungen zum Liebauschen Strömungsprinzip, *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Kreislaufforschung*, 29, 155-159, 1963
- 34: Liebau G., Die Strömungsprinzipien des Herzens, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, 44, 677-684, 1955
- 35: Liebau G., Aus welchem Grunde bleibt die Blutförderung durch das Herz bei valvulärem Versagen erhalten?, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, 45, 481-488, 1956
- 36: Liebau G., Herzpulsation und Blutbewegung, *Zeitschrift für die Gesamte Experimentelle Medizin*, 125, 482-498, 1955
- 37: Bredow H.-J., Untersuchungen über ein vom menschlichen Kreislauf abgeleitetes, ventilloles Strömungsprinzip, *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Kreislaufforschung*, 34, 296-300, 1968
- 38: Mahrenholtz O., Bredow H.-J., Modelle ventillosen Pumpen, Pestel E., Liebau G., Phänomen der pulsierenden Strömung im Blutkreislauf aus technologischer, physiologischer und klinischer Sicht, *Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich*, 738/738a\*79-871970
- 39: Bovard M.S., Connell W.R., Moore S.E., Palladino J.L., Quantifying impedance defined flow, *Proceedings of the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 30th Annual Northeast Bioengineering Conference*, 17-18 April, 192-193, 2004
- 40: Timmerman S., Ottesen J.T., Novel Characteristics of Valveless Pumping, *Physics of Fluids*, 21, , 2009 <https://doi.org/10.1063/1.3114603>
- 41: Zislin, V.; Rosenfeld, M., Impedance Pumping and Resonance in a Multi-Vessel System, *Bioengineering*, 5, 63, 2018
- 42: Lee V.C.C., Abakar Y.A., Woo K.C., Performance Evaluation of Multi-Stage Open-Loop Impedance Pump, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 12, 11, 2007 <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0079-1>
- 43: Lee V.C.C., Abakar Y.A., Woo K.C., Valveless Pumping Using a Two-Stage Impedance Pump, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 311-318, 2013 <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0270-x>
- 44: Lee V.C.C., Chong J.C., Effects of Intermediary Reservoir in a Two-Stage Impedance Pump, *MATEC web of Conferences*, The 9th International Unimas Stem Engineering Conference (ENCON 2016) "Innovative Solutions for Engineering and Technology Challenges", 87, 2017 <https://doi.org/10.1051/mateconf/20178702028>
- 45: Eun-ok J, Do Wan K., Jonggul L., Wanho L., Multidimensional Open System for Valveless Pumping, *Bulletin of the Korean Mathematical Society*, 52, 1973-2000, 2015 <https://doi.org/10.4134/BKMS.2015.52.6.1973>
- 46: Eun-ok J., Do Wan K., Valveless Pumping in Open Tank System Using Energy Conserving Compartment Model, *Bulletin of Korean Mathematical Society*, 49, 961-987, 2012 <https://doi.org/10.4134/BKMS.2012.49.5.961>
- 47: Roshenfeld M., Avrahami I., net Flow Rate Generation by a Multi-Pincher Impedance Pump, *Computers and Fluids*, 39, 1634-1643, 2010 <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.05.016>
- 48: Shin S.J., Sung H.J., Three-Dimensional Simulation of a Valveless Pump, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31, 942-951, 2010 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.05.001>
- 49: Manopoulos C.G., Mathioulakis D.S, Tsangaris S.G., One-Dimensional Model of Valveless Pumping in a Closed Loop and a Numerical Solution, *Physics of Fluids*, 18, , 2006 <https://doi.org/10.1063/1.2165780>
- 50: Borzi A., Propst G., Numerical investigation of the Liebau phenomenon, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik*, 54, 1050-1072, 2003 doi: 10.1007/s00033-003-1108-x
- 51: Samson O., A Review of Valveless Pumping: History, Applications and Recent Developments., , 2007
- 52: Ottesen. J.T., Valveless Pumping in a Fluid-Filled Closed Elastic Tube-System; One-Dimensional Theory with Experimental Validation, *Journal of Mathematical Biology*, 46, 309-332, 2003 doi: 10.1007/s00285-002-0179-1
- 53: Bringley T.T., Childress S., Vandenberghe N., Zhang J., An Experimental Investigation and a Simple model of a Valveless Pump, *Physics of Fluids*, 20, , 2008 <https://doi.org/10.1063/1.2890790>
- 54: Auerbach D., Moehring W., Moser M., An Analytic Approach to the Liebau problem of Valveless Pumping, *Cardiovascular Engineering: An International Journal*, 4, 201-207, 2004 doi: 10.1023/B:CARE.0000031549.13354.5e
- 55: Meier J.A., A Novel Experimental Study of a Valveless Impedance Pump for Applications at Lab-on-Chip , *Microfluidic and Biomedical Device Size Scales*, California Institute of Technology 2011
- 56: Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7th Edition, Butterworth-Heinemann, 2013
- 57: Ungert H.-J., *Fluid-Structure Interaction: Modelling, Simulation, Optimization*, , , 2006
- 58: Bazilevs Y., Takizawa K., Tezduyar T., Fluid-structure interaction, *Computational Mechanics*, 55, 1057-1058, 2015 doi: 10.1007/s00466-015-1162-1.
- 59: Xenos M, Raptis A., Fluid Structure Interaction for Biomedical Applications, *Journal of Applied and Computational Mathematics*, 3, 187, 2014 doi: 10.4172/2168-9679.1000187

- 60: Lee S.H., Kang S., Hur N., Jeong S-K., A Fluid-Structure Interaction Analysis on Hemodynamics in Carotid Artery Based on Patient-Specific Clinical Data, *Journal of Mathematical Science and Technology*, 26, 3821-3833, 2012  
<https://doi.org/10.1007/s12206-012-1008-0>
- 61: Degroote J., Swillens A., Bruggeman P., haelterman R., Segers P., Vierendeels J., Simulation of Fluid-Structure Interaction with the Interface Artificial Compressibility Method, *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 26, 276-289, 2010 <https://doi.org/10.1002/cnm.1276>
- 62: Benra F.-K., Dohmen H.J., Pei J., Schuster S., Wan B., A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions, *Journal of Applied Mathematics*, , 2011 <https://doi.org/10.1155/2011/853560>
- 63: Rugonyi S., Bathe K.J., On finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions, *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2(2), 195-212, 2001
- 64: langer U, Yang H., Numerical simulation of fluid–structure interaction problems with hyperelastic models: A monolithic approach, *Mathematics and Computers in Simulation*, 145, 186-208, 2018 doi: 10.1016/j.matcom.2016.07.008
- 65: ANSYS®, Fluent, Release 18.0, Help System, Theory Guide, 1.2 Continuity and Momentum Equations, ANSYS, Inc.,
- 66: Τσαγγάρης Σ., Μηχανική των Ρευστών: Θεωρία και Ασκήσεις,, Συμμεών, 2013
- 67: Μπεργελές Γ., Υπολογιστική Ρευστομηχανική,, Συμμεών, 2012
- 68: Tait P.G., Voyage of H.M.S. Challenger, *Physics and Chemistry*, 2, 76, 1889
- 69: Hayward A.T.J., Compressibility Equations for Liquids: A Comparative Study, *British Journal of Applied Physics*, 18, 965-977, 1967
- 70: ANSYS®, Fluent, Release 18.0, Help System, User’s Guide, 7.3.4. Compressible Liquid Density Method, ANSYS, Inc.,
- 71: ANSYS®, Fluent, Release 18.0, Help System, User’s Guide, 7.3.4. Compressible Liquid Density Method, ANSYS, Inc. ,
- 72: Womersley J.R., An elastic tube theory of pulse transmission and oscillatory flow in mammalian arteries, *Wright Air Development Center*, 1957
- 73: Uchida S., The pulsating viscous flow superposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in a circular pipe, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, 7, 403, 1956 <https://doi.org/10.1007/BF01606327>
- 74: Womersley J.R., Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known, *Journal of Physiology*, 127, 553-563, 1955
- 75: Lloyd B., Szekely G., Harders M., Identification of Spring Parameters for Deformable Object Simulation, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13, 1081-1094, 2007 doi: 10.1109/TVCG.2007.1055
- 76: ANSYS®, Academic Research Mechanical, Release 18.0, Help System, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications, 2. Structures, ANSYS, Inc.,
- 77: ANSYS®, Academic Research Mechanical, Release 18.0, Help System, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications, 17.2 Transient Analysis, ANSYS, Inc.,
- 78: Mooney M.J., A Theory of Large Deformation, *Journal of Applied Physics*, 11, 582-592, 1940 doi: 10.1063/1.1712836
- 79: Rivlin R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. IV. Further Developments of the General Theory, *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 241, 379-397, 1948 doi: 10.1098/rsta.1948.0024.
- 80: ILASTIC® biomedical grade liquid silicone rubbers, Data sheet, “Liquid silicone rubber raw materials for medical device and component fabrication in the healthcare industry”, Ref. no. 52-1030D-01, Dow Corning Corporation, Wiesbaden, Germany 2009
- 81: Wunderlich W, Physical constants of poly (methyl methacrylate). *Polymer*, 4th Brandrup J et al., John Wiley & sons Inc., 1999 0-471-16628-6
- 82: Donea J., Huerta A., Ponthot J.-Ph., Rodriguez-Ferran A., Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods,, , , doi:10.1002/0470091355.ecm009
- 83: ANSYS®, Fluent, Release 18.0, Help System, User’s Guide, 10.6 Using Dynamic Meshes, ANSYS, Inc.,
- 84: Lu Q., Guleryuz E., Vellakal M., Taha A., korie S., Cordoba P, Convergence Analyses for Fluid-Structure Interaction Simulation in a Thin Hyper-elastic Pipe, , 142, <http://www.iccfd.org/iccfd10/papers/ICCFD10-142-Paper.pdf>
- 85: Khurram R.A., Masud A., A Multiscale/stabilized Formulation of the Incompressible Navier–Stokes Equations for Moving Boundary Flows and Fluid–structure Interaction, *Computational Mechanics*, 38, 403-416, 2006 <https://doi.org/10.1007/s00466-006-0059-4>
- 86: John W. Eaton, David Bateman, Søren Hauberg, Rik Wehbring (2018). GNU Octave version 4.4.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations., <https://www.gnu.org/software/octave/doc/v4.4.1/>