



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

*Πειραματική μελέτη της κίνησης των τοιχωμάτων λεπτότοιχου
εύκαμπτου αγωγού υπό συνθήκες εξαναγκασμένης ροής*

*Experimental study of the wall motion of a collapsible thin-walled tube
under forced flow conditions*

Διπλωματική εργασία

Ευστάθιος Γ. Στέλιος

Επιβλέπων

**Δημήτριος Σ. Μαθιουλάκης,
Καθηγητής Ε.Μ.Π., Τομέας Ρευστών**

Αθήνα, Σεπτέμβρης 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κύριο Δ. Μαθιουλάκη, για την εξαιρετικά σημαντική καθοδήγηση και συμβολή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, καθώς και για την άριστη επικοινωνία που είχαμε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Abstract</u>	4
<u>Θεωρητικό μέρος</u>	6
Κεφάλαιο 1	
1.1 <u>Εισαγωγή</u>	6
1.2 <u>Περιγραφή βασικών φαινομένων</u>	7
1.2.1 <u>Structure-flow interaction</u>	7
1.2.2 <u>Βασικές θέσεις παραμόρφωσης του αγωγού</u>	9
1.2.3 <u>Συσκευή Holt</u>	10
1.2.4 <u>Εργασία των Katz, Augusto, Moreno</u>	11
Κεφάλαιο 2	
2.1 <u>Αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις εύκαμπτου αγωγού</u> ...24	
2.2 <u>Matthias Heil and Jonathan Boyle-2010</u>	30
2.2.1 <u>Περίληψη</u>	30
2.2.2 <u>Μοντέλο</u>	31
2.2.3 <u>Αποτελέσματα</u>	33
2.2.4 <u>Συσχέτιση με το θεωρητικό μηχανισμό αστάθειας</u>	44
2.2.5 <u>Συμπεράσματα</u>	46
<u>Πειραματικό μέρος</u>	50
Κεφάλαιο 3-Πείραμα 1	
3.1 <u>Περιγραφή Πειράματος</u>	50
3.1.1 <u>Πειραματική διατάξη και όργανα μετρήσεων</u>	51
3.1.2 <u>Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας</u>	56
3.2 <u>Αποτελέσματα</u>	59
3.2.1 <u>Συνθήκες και χαρακτηριστικά</u>	59
3.2.2 <u>Πιέσεις</u>	60
3.2.3 <u>Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πίεσης</u>	99
3.2.4 <u>Ταλάντωση εύκαμπτου αγωγού</u>	102
3.3 <u>Σχόλια και συμπεράσματα</u>	109
Κεφάλαιο 4-Πείραμα 2	
4.1 <u>Περιγραφή πειράματος</u>	112
4.1.1 <u>Πειραματική διάταξη και όργανα μετρήσεων</u>	112
4.1.2 <u>Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας</u>	114
4.2 <u>Αποτελέσματα</u>	116
4.2.1 <u>Συνθήκες και χαρακτηριστικά</u>	116
4.2.2 <u>Πιέσεις</u>	122
4.2.3 <u>Ταλάντωση εύκαμπτου αγωγού</u>	141

4.3 <u>Σχόλια και συμπεράσματα</u>	154
4.3.1 <u>Συντονισμός</u>	154
4.3.2 <u>Ιδιοσυχνότητα και καμπύλη στατικής πίεσης</u>	156
Κεφάλαιο 5- <u>Περίληψη</u>	159
<u>Παράρτημα</u>	161
<u>Βιβλιογραφία-References</u>	199

Abstract

Οι ταλαντώσεις εύκαμπτου λεπτότοιχου αγωγού μελετώνται πειραματικά σε συνθήκες εξαναγκασμένης ροής, η οποία επιβάλλεται μέσω δύο διαφορετικών ειδών αντλίας. Προηγείται θεωρητικό μέρος όπου κάνουμε μία ανασκόπηση διάφορων εργασιών που έχουν συμβάλλει σημαντικά στην κατανόησή μας γύρω από το θέμα των εύκαμπτων αγωγών και στη συνέχεια ακολουθεί η πειραματική μελέτη. Η μελέτη πραγματοποιείται μέσω μέτρησης του σήματος πίεσης ανάντι και κατάντι του αγωγού και μέσω επεξεργασίας εικόνων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των ταλαντώσεων του αγωγού. Επιβάλλεται στο σύστημα ροή σταθερής παροχής αρχικά μέσω μίας αντλίας προοδευτικής κοιλότητας χαμηλής παλμικής ροής και σε δεύτερη φάση, μέσω μίας περισταλτικής αντλίας υψηλής παλμικής ροής, χωρίζοντας έτσι την εργασία σε δύο μέρη. Και στα δύο πειράματα, διερευνάται η συμπεριφορά του αγωγού σε ένα εύρος παροχών και εσωτερικών πιέσεων, την οποία πίεση μεταβάλλουμε με τη χρήση βανών. Από την επεξεργασία των εικόνων προκύπτουν το σχήμα του αγωγού για τους διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων (παροχή, εσωτερική πίεση), το πλάτος ταλάντωσης καθώς και η συχνότητα των ταλαντώσεων. Συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά των ταλαντώσεων με το σήμα πίεσης ανάντι και κατάντι του αγωγού και γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού της σχέσης τους με την επιβαλλόμενη ροή. Στο πρώτο πείραμα (αντλία προοδευτικής κοιλότητας), βρέθηκε πως αρχίζουν να εμφανίζονται αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις όταν η εσωτερική πίεση μειωθεί τόσο ώστε να ξεκινήσει να λυγίζει ο αγωγός, και διατηρούνται για μικρές παροχές, μέχρι να μειωθεί αρκετά η εσωτερική πίεση. Αντίθετα, στο δεύτερο πείραμα εμφανίζονται ταλαντώσεις σε κάθε παροχή και εσωτερική πίεση, και μόνο η έντασή τους μεταβάλλεται με αλλαγή των παραμέτρων. Η σύγκριση των συχνοτήτων λειτουργίας της αντλίας, της διακύμανσης της πίεσης και των ταλαντώσεων του εύκαμπτου αγωγού έδειξε πλήρη εξάρτηση του συστήματος από την αντλία, και επιπλέον, σημεία λειτουργίας όπου ενδεχομένως εμφανίζονται φαινόμενα συντονισμού με αποτέλεσμα μέγιστα στο πλάτος απόκρισης του αγωγού και των πιέσεων.

Abstract

The oscillations of a collapsible thin-walled tube are studied experimentally, under the condition of forced flow which is imposed by two different kinds of a pump. The first part of the study is a theoretical review of various papers which have contributed considerably to our understanding of the complex phenomena associated with collapsible tubes, and is then followed by the experimental part. The study is conducted through measuring of the pressure signal, upstream and downstream of the collapsible tube, and through processing of the images captured during tube's oscillations. A steady flow rate is imposed, firstly by a progressive cavity pump of very low pulsatile flow, and secondly by a positive displacement pump of high pulsatile flow, thus dividing the study into two parts. In both experiments, the behaviour of the tube is explored in a range of flow rates and internal pressures, of which the latter is governed by valves. The image processing reveals the shape of the tube in various parameter couples (flow rate, internal pressure), the amplitude and the frequency of the tube's oscillations. The resulting oscillations' characteristics are compared with the pressure signal both upstream and downstream of the tube and their degree of relation with the imposed flow is then examined. During the first experiment (progressive cavity pump), the onset of self-excited oscillations was found to be in line with the beginning of the tube's buckling, which occurs with a lowering of internal pressure. From this point on, the oscillations are preserved, if the flow rate is low enough, up to a certain lowering of internal pressure. On the contrary, in the second experiment, tube's oscillations are present throughout the whole range of parameters, with only their intensity (frequency and amplitude) being changed. Furthermore, the comparison of the pump's operation frequency with the fluctuation of the pressure signal and the tube's oscillations frequency has shown a direct system dependence upon the pump, and additionally, cases where phenomena of resonance may occur.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

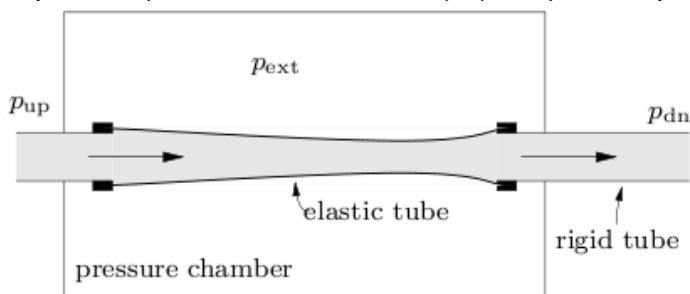
Η κατανόηση των φαινομένων στη ροή υγρού ή αερίου σε εύκαμπτους αγωγούς παραμένει μία από τις πιο δυσεπίλυτες και ενδιαφέρουσες προκλήσεις τόσο σε πειραματικό όσο και σε υπολογιστικό επίπεδο. Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για τον εντοπισμό και την ερμηνεία των πολύπλοκων φαινομένων που συνδέονται με τη ροή στους εύκαμπτους αγωγούς από τη δεκαετία του '70 μέχρι και σήμερα με τις διάφορες απόψεις άλλοτε να συμπορεύονται και άλλοτε να αποκλίνουν. Το κίνητρο για αυτό το αντικείμενο προέρχεται από τη φυσιολογία.

Πιο συγκεκριμένα, πολλοί αγωγοί στο ανθρώπινο σώμα χαρακτηρίζονται ως εύκαμπτοι όπως οι αεραγωγοί του αναπνευστικού συστήματος, οι φλέβες, ορισμένες αρτηρίες και οι αγωγοί στην ουρήθρα. Το χαρακτηριστικό τους είναι τα λεπτά και ευλίσιστα τοιχώματά τους τα οποία υπό ορισμένες συνθήκες υποχωρούν ή φουσκώνουν μεταβάλλοντας έτσι τη διατομή του αγωγού. Γνωστά φαινόμενα όπως οι ήχοι Korotkov ή το σφύριγμα των αναπνευστικών διόδων έχουν συνδεθεί με τις ταλαντώσεις των εύκαμπτων αγωγών και τις αστάθειες που προκαλούνται στη ροή. Επίσης οι αρτηρίες υπόκεινται σε υψηλές μηχανικές τάσεις εξαιτίας της κίνησης του σώματος και των μυών αλλά και από τις μεταβολές της εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης. Οι τελευταίες, υπό τις κατάλληλες συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν το λυγισμό της αρτηρίας ή και την ταλάντωσή της, ένα δυναμικό χαρακτηριστικό εξίσου σημαντικό με την αντοχή ή την ακαμψία μίας αρτηρίας.

Τα βασικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν από γιατρούς και φυσιολόγους, πριν ακόμα γίνουν πειραματικές μελέτες από μηχανικούς, φυσικούς και μαθηματικούς, ήταν η κατάρρευση αυτών των αγωγών σε κάποιες συγκεκριμένες συνθήκες ροής καθώς και η ταλάντωσή τους. Οι φυσιολόγοι που μελέτησαν τη ροή ρευστών σε φλέβες και άλλους αγωγούς λεπτού τοιχώματος ανακάλυψαν χαρακτηριστικά ροής δραστικά διαφορετικά από ροή σε σταθερούς, άκαμπτους αγωγούς. Ερχόμενοι αντιμέτωποι με ένα φαινόμενο που δεν είχε ξαναμελετηθεί πολλοί από αυτούς ανέπτυξαν διάφορες αναλογίες που περιλάμβαναν ροή σε ποτάμια, φράγματα και ανοικτούς αγωγούς. Μερικές από τις πιο σημαντικές δουλειές ήταν αυτές των Holt(1941), Brecher(1956), Rodbard(1955) και Ryder(1944) τη δεκαετία του '40 και '50.

Σύντομα έγινε αντιληπτή η ανάγκη για μία πιο συστηματική μελέτη έτσι ώστε να αποκαλυφθούν τα περίπλοκα φαινόμενα γύρω από τη ροή σε εύκαμπτους αγωγούς. Η πειραματική προσομοίωσή τους έγινε με αγωγούς από ελαστομερή υλικά, όπως λάστιχο, σιλικόνη και άλλα. Ο τεχνητός ελαστικός αγωγός συνδέεται με δύο σταθερούς και άκαμπτους αγωγούς και κλείνεται μέσα σε μια ευρέως

χρησιμοποιούμενη πειραματική συσκευή που ονομάζεται Starling resistor, η οποία κατασκευάστηκε από τους Starling & Knowlton (1912). Η τυπική συσκευή Starling (εικ. 1) στην ουσία αποτελεί ένα θάλαμο πίεσης μέσα στον οποίο βρίσκεται ο εύκαμπτος αγωγός, και επιτρέπει τον έλεγχο της εξωτερικής πίεσης P_{ext} . Ρευστό περνάει μέσα από τον αγωγό με επιβαλλόμενη πίεση ή παροχή.



Εικόνα 1.1 Starling resistor. Τα μαύρα ορθογώνια δείχνουν τις θέσεις στήριξης του εύκαμπτου αγωγού.

1.2 Περιγραφή βασικών φαινομένων

1.2.1 Fluid-structure interaction

Το αντικείμενο μελέτης των ερευνητών είναι η αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού (**fluid-structure interaction**), δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται το ρευστό και κατ' επέκταση η ροή, λόγω της κίνησης των τοιχωμάτων του αγωγού αλλά και η αντίστροφη επιρροή της κίνησης των τοιχωμάτων πάνω στη ροή. Συνεπώς, η προσοχή των μελετητών είναι διπλή:

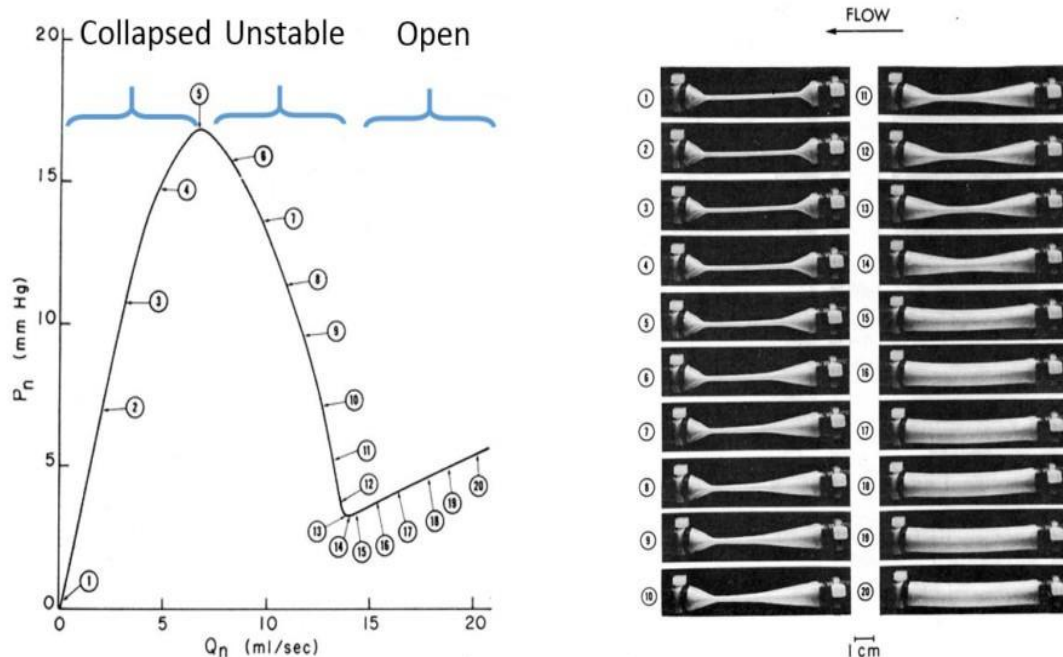
- 1) Στον τρόπο με τον οποίο υποχωρούν τα τοιχώματα και από ποιες παραμέτρους της ροής επηρεάζονται
- 2) Στις μεταβολές της ροής λόγω της μεταβολής του σχήματος του αγωγού.

Πέρα όμως από την απλή μεταβολή στο σχήμα του αγωγού, παρατηρήθηκε πως κάτω από ορισμένες συνθήκες ο ελαστικός αγωγός μπορεί να ταλαντωθεί και μάλιστα σε ειδικότερες περιπτώσεις να ταλαντωθεί με μεταβαλλόμενο πλάτος χωρίς να φθίνει η ταλάντωση στο χρόνο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυτοδιατηρούμενη ταλάντωση εύκαμπτου αγωγού και έχει καταβληθεί σημαντική προσπάθεια για την ερμηνεία του.

Το βασικό μέγεθος το οποίο προκαλεί την παραμόρφωση των εύκαμπτων αγωγών είναι η λεγόμενη διατοιχωματική πίεση (**Transmural Pressure**), που ορίζεται ως η εσωτερική πίεση του αγωγού μείον την εξωτερική ($P_{transmural} = P_{internal} - P_{external}$ ή $P_{tr} = P_{int} - P_{ext}$). Αν θεωρήσουμε σταθερή την εξωτερική πίεση τότε η διατοιχωματική πίεση είναι στην ουσία η εσωτερική πίεση του αγωγού η οποία μεταβάλλεται από την παροχή και το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης). Αμέσως φαίνεται πως οι πρώτες μελέτες που έγιναν θα πρέπει να αφορούσαν τη συσχέτιση της ροής με την διατοιχωματική πίεση και το τελικό αποτέλεσμα της επίδρασης αυτών που ήταν η παραμόρφωση του αγωγού.

Ένας από τους πρώτους μελετητές ήταν ο Conrad (1969) ο οποίος μοντελοποίησε το κύκλωμα του εύκαμπτου αγωγού με ένα αντίστοιχο ηλεκτρικό

κύκλωμα. Στην έρευνα αυτή, ο Conrad αναγνώρισε 3 καταστάσεις του αγωγού (εικ.1.2):



W. Conrad, "Pressure-Flow Relationships in Collapsible Tubes," *IEEE Trans. on Bio. Eng.*, v16, n4, pp. 284–95, 1969.

Εικόνα 1.2 Καμπύλη πτώσης πίεσης στον εύκαμπτο αγωγό συναρτήσει της παροχής. Δεξιά φαίνονται τα αντίστοιχα στιγμιότυπα του αγωγού σε κάθε θέση της καμπύλης. (Conrad, 1969).

- 1) Ανοικτός, κυλινδρικό σχήμα
- 2) Μερική υποχώρηση τοιχωμάτων, ελλειπτικό σχήμα
- 3) Πλήρης κατάρρευση τοιχωμάτων, τα απέναντι τοιχώματα έρχονται σε επαφή και δημιουργούνται δύο λοβοί.

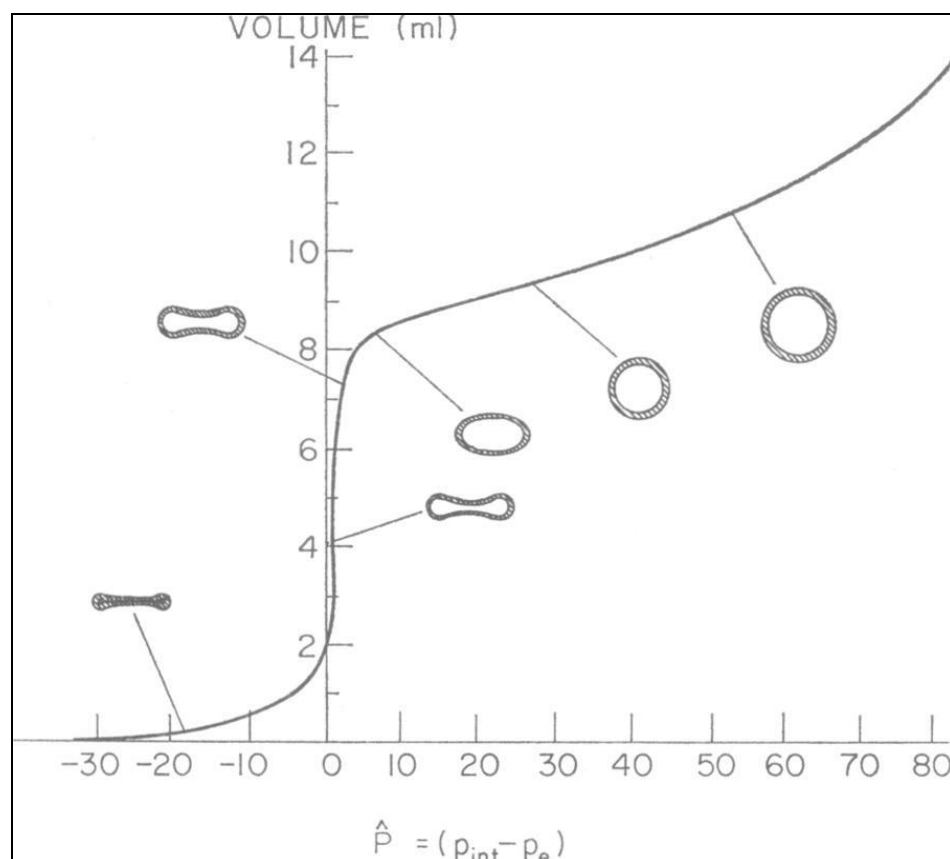
Η σταθερή ροή του αγωγού ήταν μία συνάρτηση της πτώσης πίεσης του αγωγού, συνεπώς θεώρησε τον εύκαμπτο αγωγό ως μια μη γραμμική αντίσταση ελεγχόμενη από την παροχή, της οποίας το σχήμα εξαρτάται από την διατοχωματική πίεση και το κύκλωμα κατάντι του αγωγού. Ένα επίσης πολύ σημαντικό σημείο που διαπιστώθηκε πειραματικά είναι πως όταν ο αγωγός παίρνει το σχήμα συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου, με το λαιμό να δημιουργείται προς την έξοδο της ροής, τότε ο αγωγός αρχίζει να ταλαντώνεται και κάτω υπό ορισμένες συνθήκες οι ταλαντώσεις αυτές μπορεί να αυξάνουν σε πλάτος και ακόμα να διατηρούνται στο χρόνο χωρίς να αποσβένουν.

Αυτή η παρατήρηση είχε γίνει ποιοτικά πολύ νωρίτερα από φυσιολόγους, όμως από τον Conrad και έπειτα απέκτησε ιδιαίτερη σημασία και προσοχή με τους ερευνητές να προσπαθούν μέχρι και σήμερα να εξηγήσουν το μηχανισμό πίσω από την κατάσταση αυτοταλαντώσεων του αγωγού.

Ένα άλλο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μελέτης του Conrad είναι η αρνητική κλίση της Δp (εικ. 1.2) για ένα ορισμένο διάστημα αύξησης της παροχής Q , αποτέλεσμα που δε θα περιμέναμε σε έναν κλασσικό αγωγό, καθώς αύξηση της παροχής συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες και άρα αύξηση της πτώσης πίεσης Δp

διαμέσου του αγωγού. Αυτή την αρνητική κλίση της Δp ο Conrad την ονόμασε αρνητική δυναμική αντίσταση. Στη συνέχεια, στη μελέτη του Katz ακολουθεί διεξοδική ερμηνεία του φαινομένου αυτού.

1.2.2 Βασικές θέσεις παραμόρφωσης του αγωγού

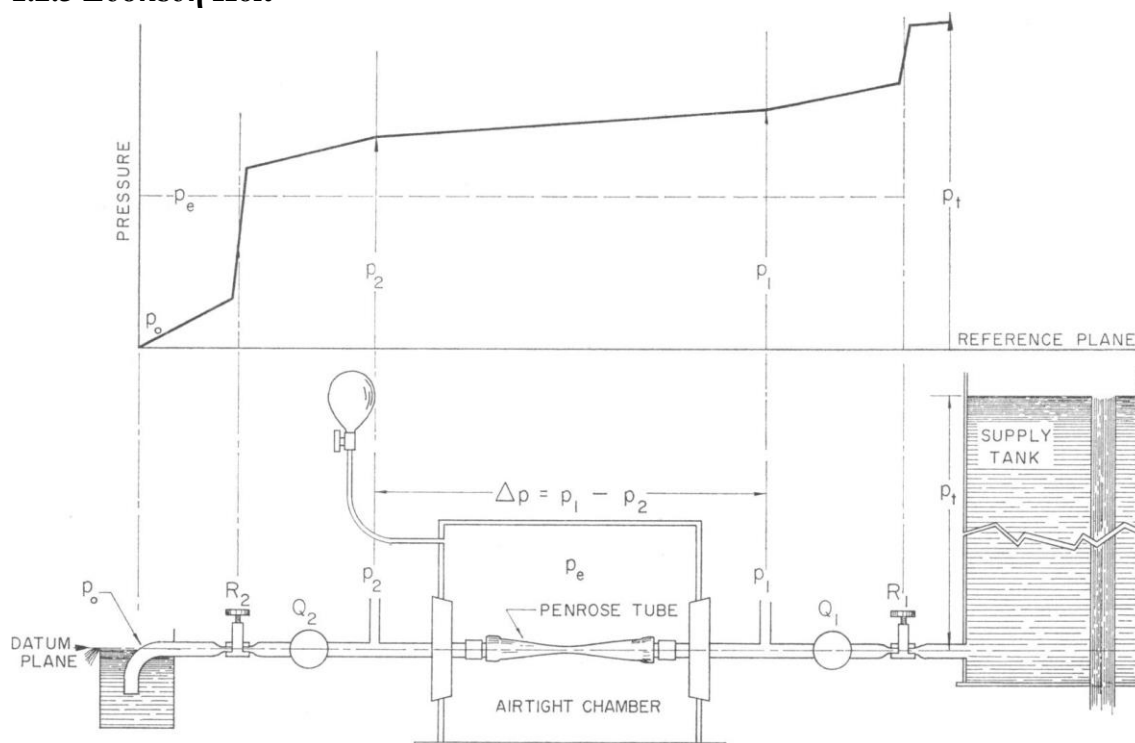


Εικόνα 1.3 Όγκος εύκαμπτου αγωγού ως συνάρτηση της διατοιχωματικής πίεσης. Τυπικές κάθετες διατομές φαίνονται σε διάφορα σημεία της καμπύλης. (Katz et al., 1969)

Ήδη από το 1963 (Alexander R.S.) είχε διαπιστωθεί πειραματικά η σχέση διατοιχωματικής πίεσης με το σχήμα της διατομής του αγωγού και τελικά τον όγκο του (εικ. 1.3). Στο παραπάνω διάγραμμα εντοπίζουμε τις 3 βασικές θέσεις του αγωγού του Conrad. Σε πολύ χαμηλές πιέσεις (P_{17}), δηλαδή ελαφρώς θετικές ή μηδενική, ο αγωγός υποχωρεί και παίρνει ελλειπτική μορφή. Το σημείο στο οποίο γίνεται η υποχώρηση ονομάζεται σημείο λυγισμού και η αντίστοιχη πίεση κρίσιμη πίεση λυγισμού (**Buckling point**). Από εκεί και πέρα περαιτέρω μείωση της διατοιχωματικής πίεσης οδηγεί σε πολύ μεγάλες μεταβολές του όγκου μέχρι ένα σημείο όπου τα απέναντι τοιχώματα έρχονται σε επαφή (**Contact point**). Σε αυτό το σημείο η διατομή τείνει να κλείσει εντελώς αφήνοντας μόνο δύο λοβούς εκατέρωθεν

των σημείων επαφής (Conrad). Αντίθετα, για να ξαναγίνει ο αγωγός κυλινδρικός απαιτείται μια μικρή μεταβολή της πίεσης για αρκετά μεγάλη αύξηση όγκου. Μόλις ο αγωγός επανέλθει στην κυλινδρική του μορφή ακόμα και μεγάλη αύξηση πίεσης δεν οδηγεί σε σημαντική αύξηση όγκου (**inflated position**).

1.2.3 Συσσκευή Holt



Εικόνα 1.4 Σχηματικό διάγραμμα της εργαστηριακής συσκευής του Holt για τη μελέτη της ροής σε εύκαμπτο αγωγό. Οι R_1 και R_2 είναι οι βάνες ελέγχου της ροής, Q , και κατ' επέκταση της εσωτερικής πίεσης του αγωγού P_{int} . Μια τυπική υδραυλική κλίση από τη δεξαμενή τροφοδοσίας (Supply tank) μέχρι την έξοδο του συστήματος φαίνεται πάνω από το διάγραμμα. Οι πιέσεις μετρώνται με διαφορικούς μετατροπείς, ενώ η ροή με ηλεκτρομαγνητικά ροόμετρα. (Holt, 1941)

Στην **εικόνα 1.4** βλέπουμε μια από τις πιο διαδεδομένες πειραματικές συσκευές για τη μελέτη ροής σε εύκαμπτους αγωγούς, την συσκευή Holt. Συγκεκριμένα ο Holt τοποθετεί τον Starling resistor στη μέση ενός σταθερού υδραυλικού δικτύου, όπου τα επίπεδα των δεξαμενών ρυθμίζουν την κλίση της πίεσης και η εξωτερική πίεση του εύκαμπτου αγωγού ρυθμίζεται με μία βαλβίδα που ελέγχει την ποσότητα αέρα στο θάλαμο του αγωγού (airtight chamber). Ανάντι και κατάντι του αγωγού τοποθετούνται βάνες που ρυθμίζουν την παροχή και την εσωτερική πίεση του αγωγού, ενώ υπάρχουν και διάφοροι μετρητές για τη μέτρηση των πιέσεων και παροχών.

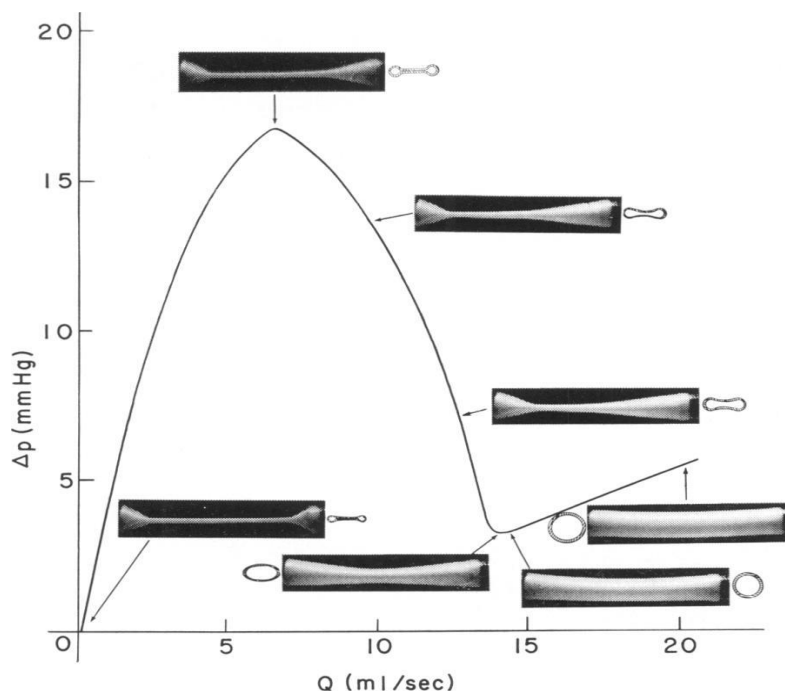
1.2.4 Η εργασία των Adolph Katz, Yu Chen και Augusto Moreno

Flow through a collapsible tube-Experimental analysis and mathematical model (1969)

Σε αυτή την εργασία, οι Adolph Katz, Yu Chen και Augusto Moreno στόχευσαν να χαρακτηρίσουν τις γενικές σχέσεις πίεσης-ροής με οικογένειες καμπυλών προκύπτουσες μεταβάλλοντας μία ποσότητα τη φορά και αφήνοντας τις υπόλοιπες ελεύθερες, χρησιμοποιώντας τη συσκευή Holt. Η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα πειραματικό και ένα υπολογιστικό, το οποίο βασίζεται στη χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου που προκύπτει από την προσεκτική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Ως εύκαμπτο αγωγό χρησιμοποιούν ένα σωλήνα Penrose φτιαγμένο από Latex με πολύ λεπτά τοιχώματα. Συγκεκριμένα, 0.16 cm το πάχος των τοιχωμάτων και 1.23 cm η διάμετρος του αγωγού με το λόγο μήκους διαμέτρου να είναι περίπου 7:1. Ο αγωγός διατηρεί σταθερό το μήκος του αλλά και τη διατομή του στις άκρες καθώς είναι πιασμένος στα σταθερά τοιχώματα των αγωγών που απαρτίζουν το υπόλοιπο δίκτυο. Τέλος, ο θάλαμος στον οποίο είναι κλεισμένος ο αγωγός (εικ. 1.4), όπως είπαμε και παραπάνω εξυπηρετεί τη ρύθμιση της εξωτερικής πίεσης του εύκαμπτου αγωγού.

Όπως είπαμε, η πειραματική μελέτη έγινε μεταβάλλοντας κάθε φορά μία ποσότητα. Αρχικά, οι πρώτες μετρήσεις γίνονται μεταβάλλοντας την παροχή μέσω της αλλαγής του επιπέδου της δεξαμενής παροχής, δηλαδή με τη βοήθεια της βαρύτητας, ανάντι του αγωγού, ή με τη μεταβολή της αντίστασης της βάνας R1. Το μέγεθος που μέτρησαν συναρτήσε της παροχής ήταν η πτώση πίεσης του εύκαμπτου αγωγού Δp ($P_{in}-P_{out}$). Παράλληλα, πήραν φωτογραφικά στιγμιότυπα το αγωγού και έτσι προέκυψε η παρακάτω καμπύλη (εικ. 1.5).



Εικόνα 1.5 μια τυπική καμπύλη πίεσης-ροής εύκαμπτου αγωγού. Δp είναι η πτώση πίεσης στον εύκαμπτο αγωγό. Κάθετες και διαμήκειες διατομές του αγωγού φαίνονται για διάφορες θέσεις.

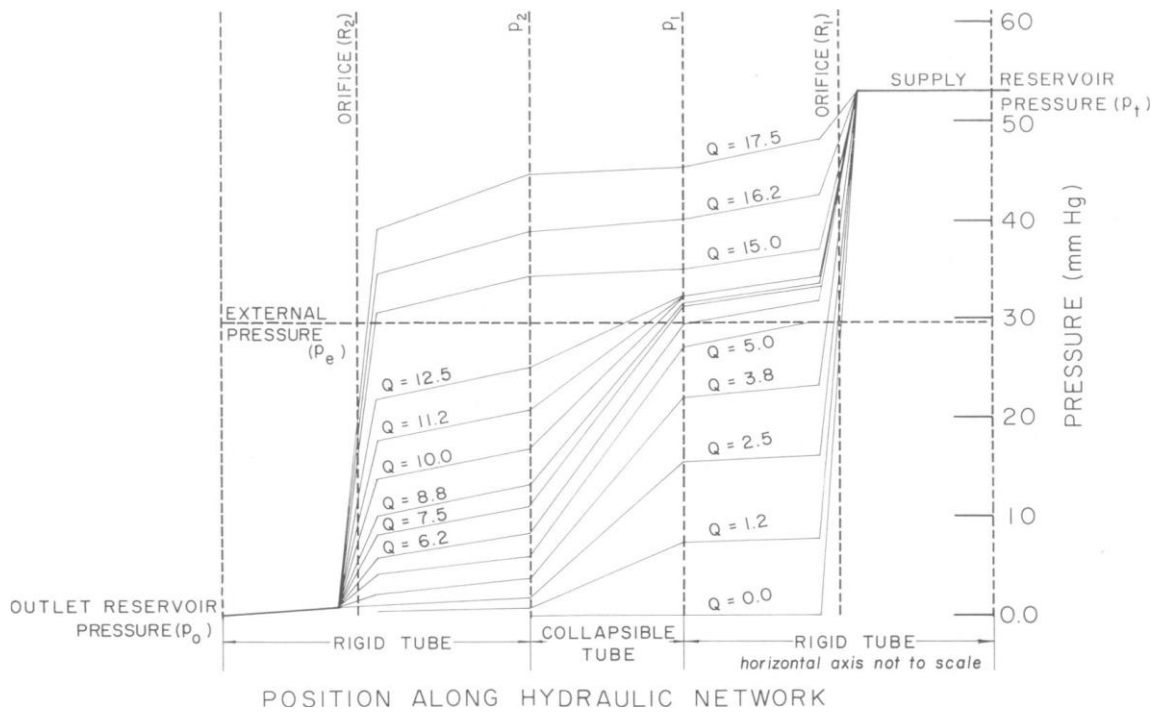
Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της παραπάνω καμπύλης είναι η αρνητική κλίση της Δp για ένα ορισμένο διάστημα που εκτείνεται από παροχές περίπου 7 ml/sec μέχρι 14 ml/sec. Πρόκειται για την αρνητική δυναμική αντίσταση που παρατήρησε και ο Conrad και μία ερμηνεία της είναι η παρακάτω:

Αν διαβάσουμε την καμπύλη της **εικόνας 1.5** απ'τα δεξιά προς τα αριστερά προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Σε μεγάλες παροχές η εσωτερική πίεση του αγωγού (εδώ θα την ονομάζουμε P_c) είναι μεγαλύτερη της εξωτερικής (εδώ θα την ονομάζουμε P_e) και ως αποτέλεσμα ο αγωγός παραμένει άκαμπτος. Λόγω του μικρού μήκους του αγωγού L και διαμέτρου D , η Δp (P_1-P_2) είναι μικρή και ανάλογη της παροχής Q όπως ξέρουμε από τη ρευστομηχανική (Mathioulakis, Anagnostopoulos,

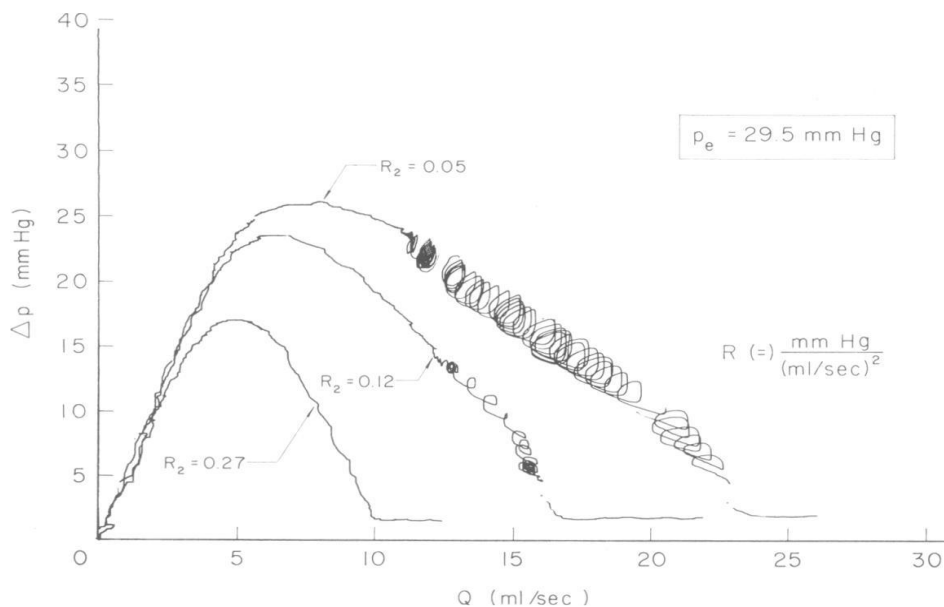
Riziotis, 2015) για στρωτή ροή:
$$\Delta P = \frac{32 \cdot \mu \cdot L \cdot Q}{D^2 \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (1.1)$$

Στη συνέχεια πτώση της Q , μετακινώντας τη δεξαμενή 1 (supply tank) σε χαμηλότερο ύψος ή κλείνοντας τη βάνα R_1 (εδώ η αλλαγή της παροχής γίνεται με τη δεξαμενή), οδηγεί όπως θα περιμέναμε σε έναν κλειστό αγωγό σε χαμηλότερη Δp . Στο σημείο όμως που η P_c προσεγγίζει την P_e έχουμε λυγισμό του αγωγού (**buckling point**) και συνεπώς μείωση της διατομής του. Αυτή η μείωση της διατομής επιφέρει αύξηση της αντίστασης του αγωγού και συνεπώς αύξηση της Δp . Από αυτό το σημείο και έπειτα μικρή μείωση της παροχής Q που συνοδεύεται και από μείωση της πίεσης P_c προκαλεί περαιτέρω σμίκρυνση της διατομής του αγωγού, όπως είδαμε και στο διάγραμμα της **εικόνας 1.5**. Το αποτέλεσμα είναι από το buckling point έως το contact point, η Δp να αυξάνει με μείωση της Q λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της διατομής D . Πράγματι η Δp είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της διαμέτρου της διατομής ($\Delta p \sim D^{-4}$) και ανάλογη της παροχής ($\Delta p \sim Q$) με αποτέλεσμα η μείωση της διαμέτρου να υπερισχύει της μείωσης της παροχής και τελικά η Δp να αυξάνει. Σε αυτή την περιοχή η P_1 μένει σχεδόν σταθερή ενώ η P_2 μειώνεται ταχύτατα. Η αύξηση της Δp σταματά στο contact point, όπου ο αγωγός αποκτά την ελάχιστη διατομή και περαιτέρω μείωση της παροχής και άρα και της P_c δεν οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές του όγκου (βλ. **εικ. 1.3**). Επομένως σε αυτή την περιοχή η Δp καθορίζεται εκ νέου από την παροχή μειούμενη μέχρι το 0 όπου σταματά εντελώς η παροχή. Η περιοχή έντονης μεταβολής της διατομής (**buckling point-contact point**) αν διαβαστεί ανάποδα γίνεται φανερό πως αντιστοιχεί στη δυναμική αντίσταση του Conrad, καθώς παρ' όλο που αυξάνουμε την παροχή, η Δp ή αλλιώς η "αντίσταση" του αγωγού πέφτει.

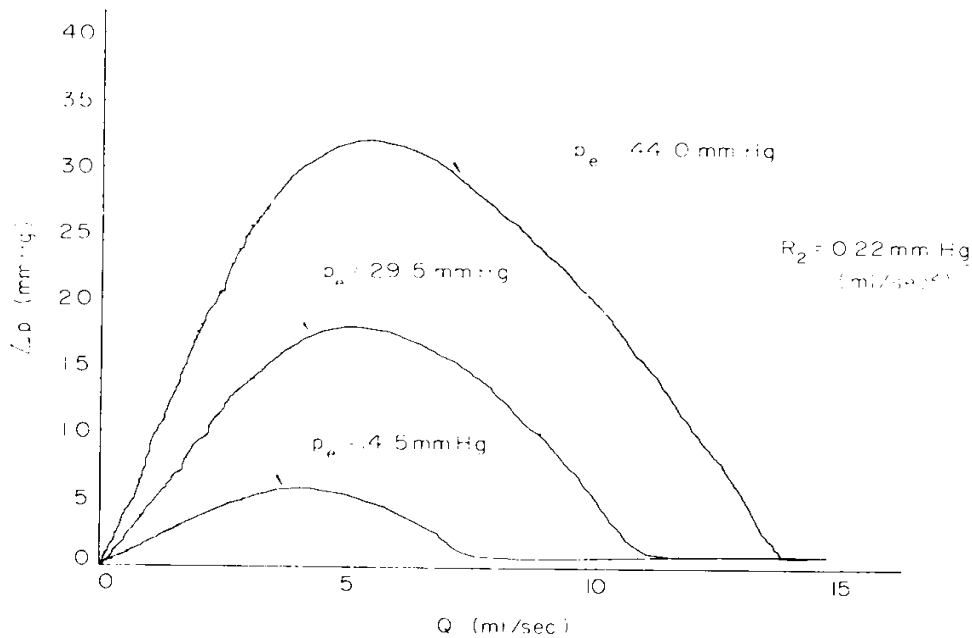
Στη δεύτερη φάση του πειράματος, κρατώντας σταθερή την εξωτερική πίεση, P_e , μεταβάλλουν αυτή τη φορά την αντίσταση R_2 (κατάντι βάνα) και για διαφορετικές θέσεις της R_2 πραγματοποιούν την ίδια διαδικασία μεταβολής της παροχής. Το αποτέλεσμα είναι το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 1.6 Υδραυλικές κλίσεις σε όλο το δίκτυο με την παροχή, Q , σαν παράμετρο. Παρατηρούμε την έντονη αύξηση της Δp του εύκαμπτου αγωγού όταν η εσωτερική πίεση γίνεται μικρότερη της εσωτερικής.



Εικόνα 1.7 Οικογένεια καμπυλών Δp - Q για ροή σε εύκαμπτο αγωγό με σταθερή εξωτερική πίεση p_e . Η κατάντι αντίσταση R_2 , χρησιμοποιείται ως παράμετρος. Αυτο-ταλαντώσεις εμφανίζονται για συγκεκριμένες τιμές της R_2 στην περιοχή αρνητικής δυναμικής αντίστασης.



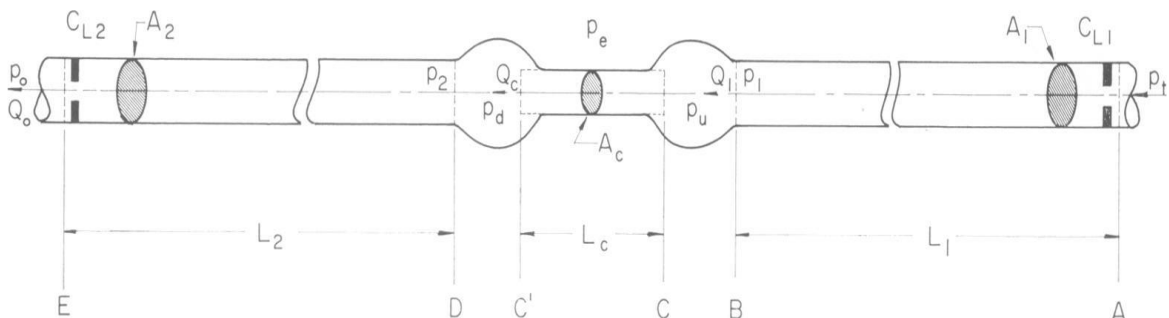
Εικόνα 1.8 Οικογένεια καμπυλών Δp - Q για ροή σε εύκαμπτο αγωγό με δοσμένη κατάντι αντίσταση R_2 . Η εξωτερική πίεση P_e ως παράμετρος.

Παρατηρούμε (εικ. 1.7) πως όσο αυξάνεται η R_2 αυξάνεται και η P_c και επομένως ο λυγισμός πραγματοποιείται σε μικρότερες παροχές Q . Επίσης, εξαιτίας της χαμηλότερης Q η μέγιστη Δp θα είναι και αυτή χαμηλότερη. Με μικρές τιμές της R_2 , παρατηρούνται ταλαντώσεις στην περιοχή αρνητικής κλίσης της Δp .

Στην τρίτη φάση του πειράματος κράτησαν σταθερή την R_2 και μετέβαλλαν την εξωτερική πίεση P_e . Προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (εικ. 1.8). Με αύξηση της εξωτερικής πίεσης η κατάρρευση του αγωγού συμβαίνει σε ελαφρώς αυξημένες παροχές. Εξαιτίας του συνδυασμού υψηλής αντίστασης στη ροή και μεγάλες τιμές ροής η Δp αυξάνει με αύξηση της P_e . Επίσης στους συγκεκριμένους συνδυασμούς δεν εμφανίστηκαν ταλαντώσεις.

Μαθηματικό μοντέλο και προσομοίωσή του

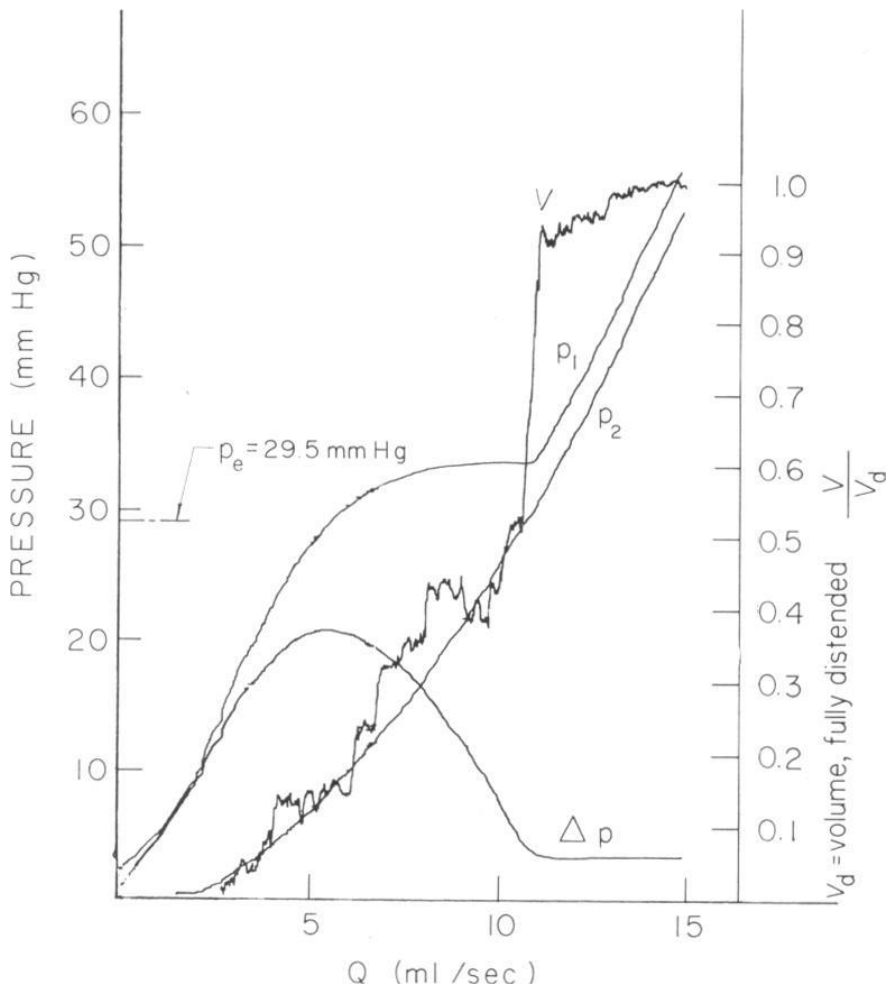
Η παρακάτω εικόνα (εικ. 1.9) δείχνει το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή του εύκαμπτου αγωγού καθώς και κάποιων σημαντικών τμημάτων του υδραυλικού συστήματος. Το υγρό είναι ασυμπίεστο (νερό). Ο εύκαμπτος αγωγός αποτελείται από τρία τμήματα: δύο εύκαμπτα, BC, C'D, συνδεδεμένα με μία μεταβλητής διατομής στένωση CC', της οποίας τη διατομή την ονομάζουμε A_c . Το υπόλοιπο μοντέλο αποτελείται από δύο σταθερά, άκαμπτα τμήματα AB, DE.



Εικόνα 1.9 Ένα εξιδανικευμένο μοντέλο του εύκαμπτου αγωγού στο υδραυλικό σύστημα της εικόνας 1.4.

Η διατομή της στένωσης θεωρείται συνάρτηση της διατοιχωματικής πίεσης του BC. Η λογική είναι η εξής: όταν οι διατοιχωματικές πιέσεις P_u και P_d (σύμφωνα με την **εικόνα 1.9** η P_u αντιστοιχεί στο BC και η P_d στο C'D) είναι θετικές ο εύκαμπτος αγωγός είναι εντελώς ανοικτός και $P_u \approx P_d$. Όταν οι P_u και P_d πλησιάζουν το 0, τότε ο αγωγός υποχωρεί. Από την **εικόνα 1.10** βλέπουμε πως η πτώση πίεσης Δp είναι μικρή μέχρι ο όγκος να μειωθεί περίπου στο 40% της αρχικής του τιμής. Μετά το λυγισμό η P_u θα αρχίσει να αυξάνεται, και κάποια στιγμή θα ξαναγίνει θετική οπότε και αυξάνεται η διατομή CC'. Επομένως, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η διατομή Ac μεταβάλλεται συναρτήσει του P_u .

Μεταβολές στη διατομή μπορούν συμβούν στο κομμάτι BC, και η ροή να αποκτήσει τόσο ακτινική όσο και αξονική κατεύθυνση. Παρ' όλα αυτά η ροή θα θεωρηθεί μονοδιάστατη αξονική. Για να υπάρχει ένα κομμάτι ενιαίας πίεσης, επιλέγεται ο όγκος ελέγχου για το BC έτσι ώστε η πίεση εισόδου και εξόδου σε αυτό να είναι ίσες. Η είσοδος του τομέα BC είναι το σημείο που συνδέεται με τον άκαμπτο αγωγό AB.



Εικόνα 1.10 Όγκος V και πτώση πίεσης Δp ως συνάρτηση της ροής. Ανάντι και κατάντι πιέσεις P_1 και P_2 του εύκαμπτου αγωγού.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από τη μηχανική ρευστών είναι οι εξής:

- Εξίσωση διατήρησης μάζας στο BC:

$$\frac{dV_u}{dt} = Q_1 - Q_c \quad (1.2)$$

όπου V_u ο όγκος του BC και Q_1, Q_2 οι παροχές στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα.

- Ο όγκος V_u είναι συνάρτηση της P_u :

$$\frac{dV_u}{dt} = C_u \cdot \frac{dP_u}{dt} \quad (1.3)$$

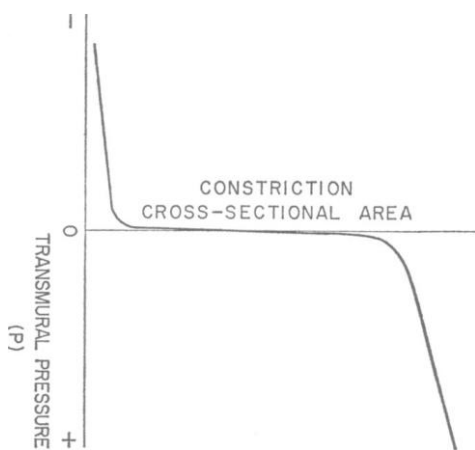
Όπου $C_u = \frac{dV_u}{dP_u}$ η ενδοτικότητα του τοιχώματος, $P_u = p_u - p_e$

- Αντίστοιχα για το τμήμα C'D:

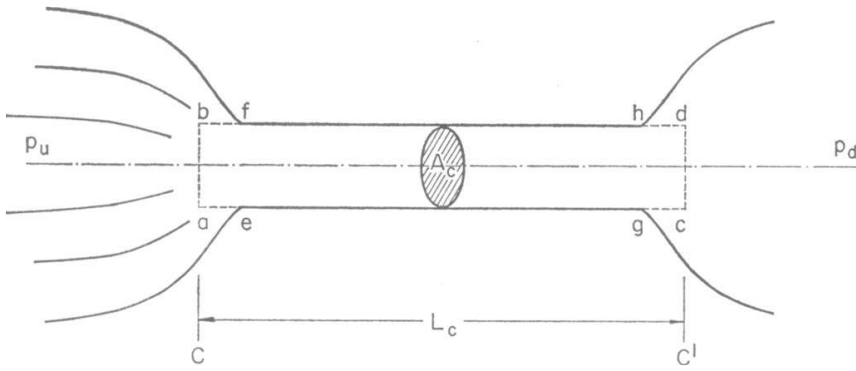
$$C_D \cdot \frac{dP_D}{dt} = Q_c - Q_2 \quad (1.4)$$

Όπου $P_D = p_d - p_e$.

Η **εικόνα 1.11** είναι ένα γράφημα του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής του αγωγού συναρτήσει της διατοιχωματικής πίεσης για το τμήμα CC'. Για να αναπτύξουμε την εξίσωση ορμής σε αυτό το τμήμα πρέπει πρώτα να ορίσουμε τον όγκο ελέγχου. Θεωρούμε αυτό το τμήμα ως κυλινδρικό με μεταβλητή διατομή A_c και μήκος L_c (**εικ. 1.12**). Το L_c είναι ένα ισοδύναμο μήκος και υπολογίζεται από τα πειραματικά δεδομένα. Ανάντι του CC', το εύκαμπτο τμήμα BC θεωρείται σαν μια "δεξαμενή" ενιαίας εσωτερικής πίεσης P_u . Στην κατάντι μεριά το CC' "βλέπει" μία "δεξαμενή" C'D με ενιαία εσωτερική πίεση P_d . Επεκτείνουμε τον όγκο ελέγχου έτσι ώστε η είσοδος και η έξοδος να είναι οι πιέσεις P_u και P_d αντίστοιχα. Τα τοιχώματα του αγωγού αποτελούν το υπόλοιπο σύνορο του όγκου ελέγχου όπως φαίνεται στην **εικόνα 1.12**. Για αυτό τον όγκο ελέγχου έχουμε μεταφορά ορμής στις επιφάνειες bf, ae, hd, gc καθώς και στις ab και cd που είναι κάθετες στον άξονα του αγωγού. Η μεταφορά ορμής στις πρώτες επιφάνειες θα είναι μικρή σε σχέση με τις ab και cd για τους εξής λόγους: (α) το αξονικό διάνυσμα της ταχύτητας είναι μικρό, (β) εφόσον η ακτινική ταχύτητα είναι πολύ μικρότερη της αξονικής, ο ρυθμός μεταφοράς ορμής στον όγκο ελέγχου θα είναι μικρός, (γ) το εμβαδόν αυτών των διατομών είναι μικρό.



Εικόνα 1.11 Εμβαδόν κάθετης διατομής στο κέντρο του τμήματος CC' ως συνάρτηση της διατοιχωματικής πίεσης.



Εικόνα 1.12 Όγκος ελέγχου CC`.

Η εξίσωση ορμής που προκύπτει τελικά για αυτόν τον όγκο ελέγχου είναι:

$$\frac{dQ_C}{dt} = (p_u - p_d) \frac{A_C}{\rho \cdot L_C} - \frac{C_{LC} \cdot Q_C \cdot |Q_C|}{2L_C \cdot A_C} - \frac{8\pi \cdot \mu}{A_C \cdot \rho} \cdot Q_C \quad (1.5)$$

Η αριστερή πλευρά της εξίσωσης αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της παροχής, ενώ η δεξιά τις δυνάμεις που προκαλούν τη μεταβολή. Ο πρώτος όρος είναι η δύναμη πίεσης, ο δεύτερος η αντίσταση λόγω μεταβολής της γεωμετρίας της διατομής, που ουσιαστικά εκφράζεται από τον όρο C_{LC} (**εικ. 1.13**) και ο τρίτος εκφράζει τις απώλειες λόγω συνεκτικότητας. Ο όρος C_{LC} είναι ένας συντελεστής απωλειών που ισοδυναμεί με τις ενεργειακές απώλειες της ροής σε αποκλίνον ακροφύσιο λόγω της μεταβολής της διατομής, δηλαδή αποτελεί έναν συντελεστή αντίστασης της ροής. Αναλυτικά και πειραματικά αποτελέσματα (Katz, 1968) δείχνουν τη σχέση του συντελεστή C_{LC} με τη μεταβολή της διατομής A_C/A_1 , όπου A_1 η αρχική κυκλική διατομή και A_C η τρέχουσα διατομή. (**εικ. 1.13**)

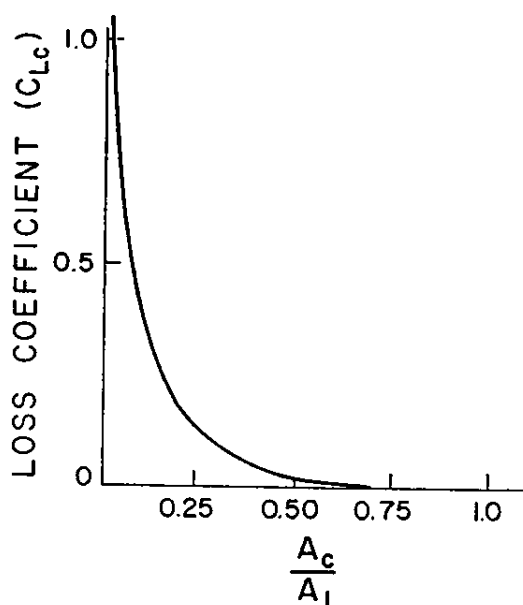
Η αντίσταση στη ροή στα άκαμπτα τμήματα του συστήματος οφείλεται κυρίως στις βάνες, δηλαδή στις αντιστάσεις που αυτές αντιπροσωπεύουν R_1, R_2 . Η εξίσωση ορμής για αυτά τα τμήματα είναι:

$$\frac{dQ_1}{dt} = (p_t - p_u) \cdot \frac{A_1}{\rho \cdot L_1} - \frac{C_{L1} \cdot Q_1 \cdot |Q_1|}{2A_1 \cdot L_1} \quad (1.6)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = (p_d - p_o) \cdot \frac{A_2}{L_2 \cdot \rho} - \frac{C_{L2} \cdot Q_2 \cdot |Q_2|}{2A_2 \cdot L_2} \quad (1.7)$$

Όπου L_1 και L_2 είναι τα μήκη των άκαμπτων τμημάτων όπως φαίνεται στο σχήμα της **εικόνας 1.9**, P_i και P_o είναι οι πιέσεις εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, ενώ η σταθερά $C_{L1,2}$ είναι ο συντελεστής απωλειών των βαλβίδων.

Τελικά καταλήγουμε σε 7 εξισώσεις και δύο εμπειρικές συναρτήσεις που φαίνονται στα διαγράμματα των εικόνων **1.11** και **1.13** για εννιά μεταβλητές $Q_1, Q_2, Q_c, P_U, \rho_u, \rho_d, P_D, C_{LC}, A_c$. Επίσης υπάρχουν δέκα παράμετροι $A_1, A_2, L_1, L_2, L_c, C_{L1}, C_{L2}, C_u, C_d$ και ρ . Με αυτό το μοντέλο μπορεί να μελετηθεί τόσο η μόνιμη ροή όσο και μεταβατικά φαινόμενα που συμβαίνουν στον αγωγό. Όσον αφορά το συντελεστή C_{LC} , η εξάρτησή του από τη γεωμετρία της διατομής έχει διατυπωθεί σε προηγούμενη έρευνα του Adolph Katz όπως είπαμε και πιο πάνω. Παρόλα αυτά οι ενεργειακές απώλειες σαφώς θα έχουν να κάνουν και με το είδος της ροής. Στην παρούσα εργασία, σε όλες τις μετρήσεις ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος του 2400 και έτσι υποθέτουμε τη ροή σε όλες τις περιπτώσεις στρωτή.



Εικόνα 1.13 Συντελεστής ενεργειακών απωλειών για ροή σε συγκλίνον και αποκλίνον ακροφύσιο ως συνάρτηση του εμβαδού της διατομής.

Οι συντελεστές απωλειών για τα διάφορα προφίλ αγωγών (σχήμα διατομής) παίρνονται ως δεδομένα από την εργασία του Albertson (Albertson et al. 1960) και συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (**πίνακας 1.1**).

Η **εικόνα 1.14** είναι η αναλυτική καμπύλη που προκύπτει από το μοντέλο της **εικόνας 1.9**. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι περίπου 1.0 mm. Μια διαφορά 0.5 mm μπορεί σχεδόν να διπλασιάσει την αντίσταση της στρωτής ροής εντός του εύκαμπτου αγωγού και κατά συνέπεια να τριπλασιάσει την πτώση πίεσης Δp .

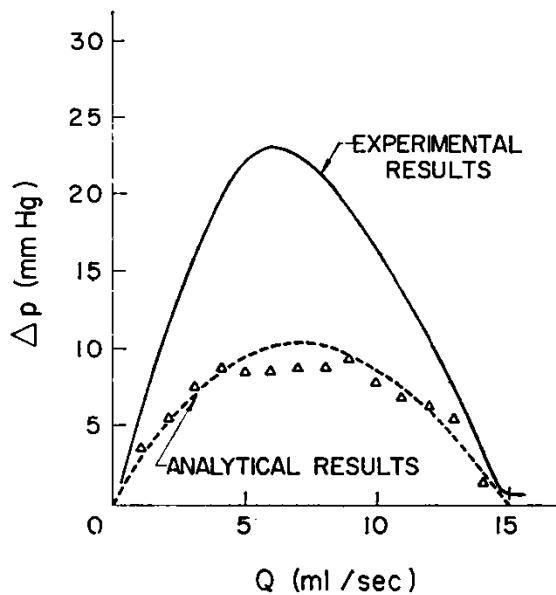
Η διαφορά στις δύο καμπύλες, την πειραματική και την αναλυτική πιθανολογείται να οφείλεται σε τρεις λόγους: (α) η ακρίβεια στις μετρήσεις των προφίλ των διατομών είναι περιορισμένη. Οι τιμές του A_c τείνουν να είναι μεγάλες με αποτέλεσμα πιο μικρούς C_{LC} και πιο μικρές πτώσεις πίεσης Δp . (β) Στον πραγματικό εύκαμπτο αγωγό είναι πολύ πιθανό να υπάρχει ασυμμετρία κατά το λυγισμό του,

TABLE I
PARAMETERS, LOSS COEFFICIENTS, AND COMPUTED PRESSURE DROP
ACROSS A COLLAPSIBLE TUBE ($A_1 = A_2 = 1.17 \text{ cm}^2$)

Q	A_c	A_1/A_c	C_{Lc}	V_c	$\rho \frac{V_c^2}{2} C_{Lc}$	L_c	$\frac{8\pi\mu LQ}{A_c^2}$	Δp	
ml/sec	cm ²			cm/sec	dynes/cm ²	cm	dynes/cm ²	dynes/cm ²	mm Hg
1	0.020	58.5	0.78	25.0	487	6.2	3875	4500	3.37
2	0.023	51.0	0.78	43.5	1476	6.2	5860	7336	5.50
3	0.025	46.6	0.78	60.0	2808	6.0	7210	10018	7.50
4	0.028	41.7	0.78	71.4	3976	6.0	7660	11636	8.73
5	0.031	37.8	0.77	80.6	5002	4.8	6240	11242	8.43
6	0.035	33.5	0.77	85.7	5655	4.8	5890	11545	8.66
7	0.038	30.8	0.76	92.1	6446	4.3	5210	11656	8.74
8	0.042	27.9	0.76	95.2	6887	4.3	4870	11758	8.82
9	0.045	26.0	0.75	100.	7500	4.3	4780	12280	9.21
10	0.049	23.9	0.68	102.	7074	3.3	3440	10515	7.89
11	0.053	22.1	0.55	104.	5949	3.3	3240	9189	6.90
12	0.057	20.5	0.50	105.	5512	3.1	2860	8373	6.29
13	0.08	14.6	0.42	162.	5523*	3.1	1572*	7095	5.32
14	0.16	7.3	0.33	87.	1249*	2.4	328*	1577	1.18
15	0.512	2.3	0.15	29.3	64*	2.4	34*	98	0.07

* Single lumen in tube—all other cases are for two cylindrical tubes as tube opening.

Πίνακας 1.1 Πίνακας του συντελεστή C_{Lc} .



Εικόνα 1.14 Αναλυτικά και πειραματικά αποτελέσματα της πτώσης πίεσης Δp σε συνάρτηση της παροχής Q στον εύκαμπτο αγωγό

γεγονός που αυξάνει το συντελεστή C_{Lc} . Προφανώς στο μαθηματικό μοντέλο δεν υποτίθενται ασυμμετρίες. (γ) Γενικά, υψηλές τιμές A_c έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή αντίσταση στη στρωτή ροή.

Παρόλα αυτά, τα αναλυτικά αποτελέσματα παράγουν παρόμοιας μορφής καμπύλη με τα πειραματικά. Η κορυφή των δύο καμπυλών παρουσιάζεται περίπου για ίδια παροχή ενώ η μέγιστη τιμή της Δp είναι λίγο παραπάνω από διπλάσια στην

πειραματική καμπύλη. Αυτή είναι η περιγραφή του βασικού μηχανισμού της εργασίας των Katz, Chen και Moreno για τη ροή σε εύκαμπτο αγωγό. Η αναλυτική τους υπόθεση βρίσκεται πολύ κοντά με τα πειραματικά αποτελέσματα με μόνο σημαντικό πρόβλημα τον ακριβή προσδιορισμό του όρου C_{LC} . Προτείνουν πως μια καλύτερη εκτίμηση του συντελεστή απωλειών μπορεί να γίνει με την προσεκτική ανάλυση στρωτής ροής σε αποκλίνον ακροφύσιο.

Υπολογιστική προσομοίωση του εύκαμπτου αγωγού

Η υπολογιστική προσομοίωση προφανώς βασίστηκε στο αναπτυχθέν μαθηματικό μοντέλο. Σαν στόχο έχει την ανάπτυξη οικογένειας καμπυλών Q - Δp , παρόμοιες με αυτές των πειραμάτων.

Στην πειραματική μελέτη η κατάντι αντίσταση είναι:

$$R_2 = \frac{\Delta P_2}{Q|Q|} \quad (1.8)$$

Όπου ΔP_2 είναι η πτώση πίεσης στην κατάντι βάννα. Στην υπολογιστική προσομοίωση η κατάντι αντίσταση είναι:

$$C_{r,2} = \frac{\Delta P}{\rho \bar{V}_2 |\bar{V}_2| / 2} \quad (1.9)$$

Όπου \bar{V}_2 είναι η μέση ταχύτητα ροής στη εγκάρσια διατομή του αγωγού. Τα μεγέθη R_2 και C_{L2} συνδέονται με τη σχέση:

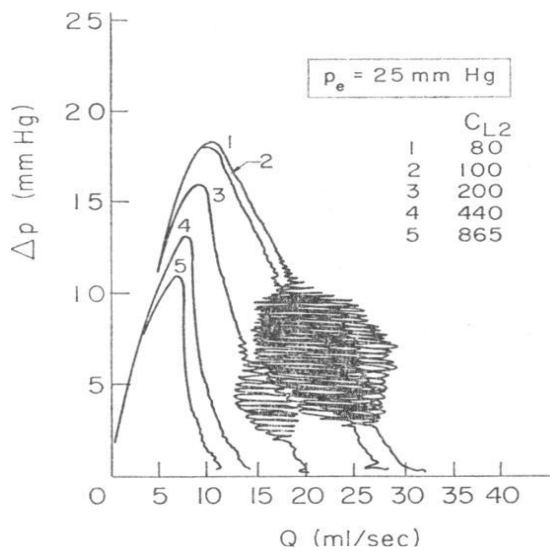
$$C_{L2} = 2gA_{do}^2 R_2 \quad (1.10)$$

Όπου A_{do} είναι το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής της κατάντι βάννας (downstream orifice). Φυσικά, είναι κάπως δύσκολο να υπολογίζεται κάθε φορά το εμβαδόν εντός του στομίου οπότε ρυθμίζεται η τιμή του C_{L2} στον υπολογιστή μέχρι να προκύψει παροχή αντίστοιχη με αυτή του πειράματος. Για να μειωθεί η παροχή, αυξάνεται η C_{L1} που αντιστοιχεί στο κλείσιμο της βάννας όπως θα γινόταν πειραματικά.

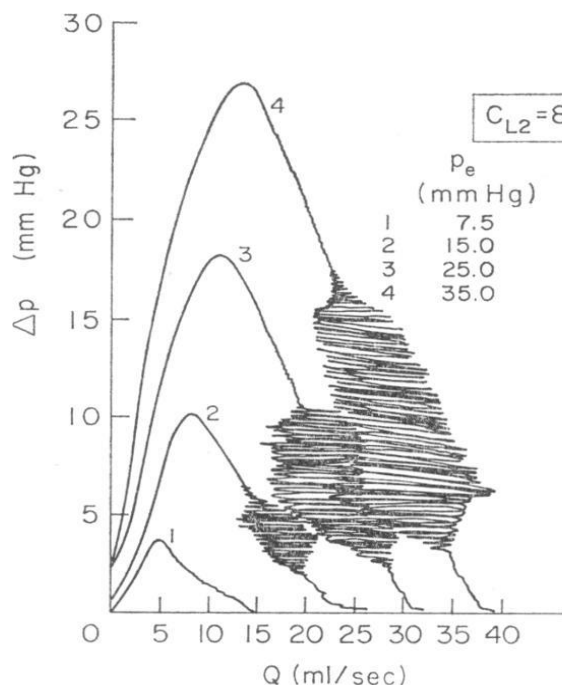
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για σταθερή εξωτερική πίεση Pe και μεταβλητή κατάντι αντίσταση R_2 φαίνονται στην **εικόνα 1.15**. Οι καμπύλες που παράχθηκαν δείχνουν να συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις πειραματικές (**εικ. 1.7**). Με αύξηση του C_{L2} οι καμπύλες μετακινούνται προς τα αριστερά και η μέγιστη τιμή της Δp πέφτει. Οι ταλαντώσεις παρατηρούνται στις πιο χαμηλές τιμές της αντίστασης R_2 στην πλευρά αρνητικής κλίσης της καμπύλης όπως και στα πειραματικά αποτελέσματα.

Σε μία επόμενη προσομοίωση, κρατήθηκε σταθερή η C_{L2} και μεταβλητή η Pe έτσι ώστε να γίνει σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες στην **εικόνα 1.16**. Τα αποτελέσματα και πάλι συμφωνούν. Όπως στο πείραμα, έτσι και εδώ με αυξανόμενη εξωτερική πίεση η Δp αυξάνει και οι καμπύλες μετακινούνται προς τα δεξιά. Επίσης οι ταλαντώσεις εμφανίζονται στις πιο μεγάλες πιέσεις.

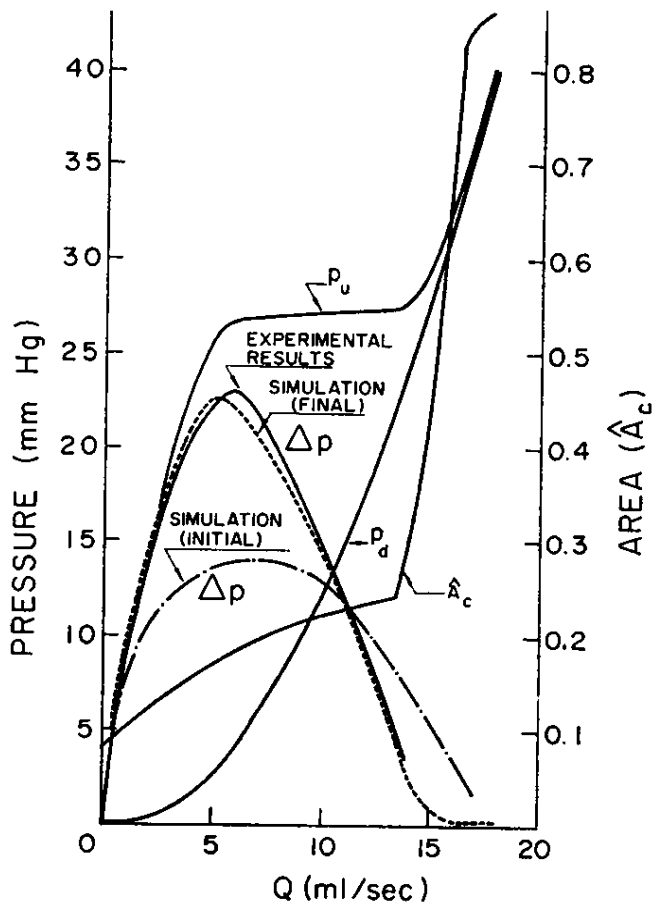
Για ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκε και η καμπύλη της **εικόνας 1.17** σε αντιστοιχία με την **εικόνα 1.10**. Η κορυφή της καμπύλης προσομοίωσης για Δp vs Q είναι περίπου η μισή από την πειραματική. Ήδη έχουμε πει πως υπάρχει μια αμφιβολία και ανακρίβεια για τις τιμές C_{LC} και A_C εξαιτίας σε περιορισμούς στη μέτρηση αυτών των δύο μεγεθών. Με υπολογιστικό "πείραγμα" αυτών των τιμών τα αποτελέσματα μπορούν να προσεγγίσουν τα πειραματικά (δείτε τη διαφορά ανάμεσα σε initial curve και final). Για αυτό το σκοπό ο συντελεστής C_{LC} πρέπει να αυξηθεί μια τάξη μεγέθους.



Εικόνα 1.15 Οικογένεια καμπυλών Δp - Q που προέκυψαν από την προσομοίωση για σταθερή εξωτερική πίεση και μεταβλητή κατάντι αντίσταση C_{L2} . (Συγκρίνετε με τα αποτελέσματα της **εικόνας 1.7**)

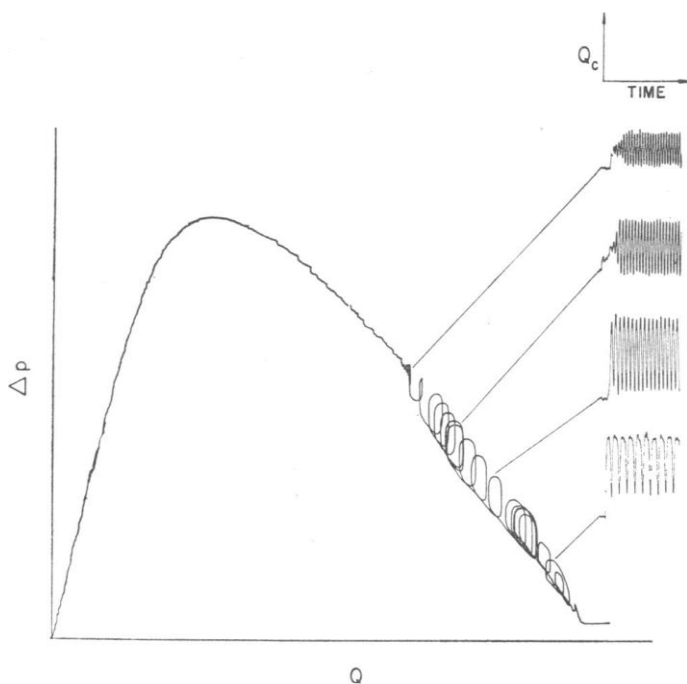


Εικόνα 1.16 Οικογένειες καμπυλών Δp - Q που προέκυψαν από την προσομοίωση για σταθερή κατάντι αντίσταση C_{L2} και μεταβλητή εξωτερική πίεση Pe . (Συγκρίνετε τα αποτελέσματα με αυτά της **εικόνας 1.8**).

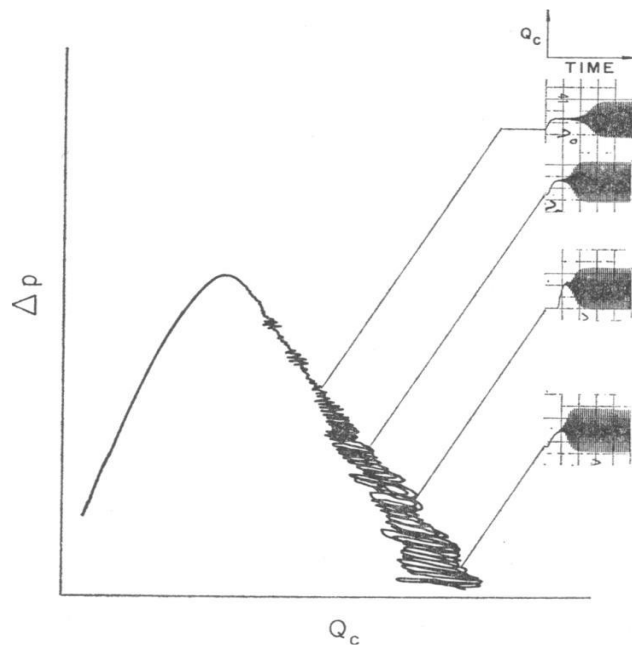


Εικόνα 1.17 Αποτελέσματα προσομοίωσης για εμβεδόν εγκάρσια διατομή A_c , πτώσης πίεσης Δp ως συναρτήσεις της παροχής για ροή σε εύκαμπτο αγωγό. (Συγκρίνετε με την εικόνα 1.10).

Τέλος οι εικόνες 1.18 και 1.19 δείχνουν το μέγεθος των ασταθειών που δημιουργούνται κατά το λυγισμό του αγωγού. Μάλιστα, πάντα ξεκινάνε ακριβώς στην αρχή του λυγισμού, αυξάνεται ο χρόνος ταλάντωσης με μείωση της παροχής ενώ το πλάτος των ταλαντώσεων μειώνεται.



Εικόνα1.18 Πειραματικά αποτελέσματα ταλαντώσεων σε εύκαμπτο αγωγό σε διάφορα σημεία της καμπύλης Δp - Q .



Εικόνα 1.19 Αποτελέσματα προσομοίωσης των ταλαντώσεων σε εύκαμπτο αγωγό σε διάφορα σημεία της καμπύλης Δp - Q .

Τελικά συμπεράσματα της εργασίας

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα του μαθηματικού μοντέλου του εύκαμπτου αγωγού τόσο για σταθερές συνθήκες ροής όσο και για ταλαντωτικές. Η απλότητα του μοντέλου δίνει την ευκαιρία για συγκρίσεις του μοντελοποιημένου εύκαμπτου αγωγού με πραγματικές φλέβες και αρτηρίες, γεγονός που θα μπορούσε να το κάνει ιδιαίτερα χρήσιμο για την περαιτέρω κατανόηση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν σε μια φλέβα ή αρτηρία.

Παρόλα αυτά, περιορισμοί εμφανίζονται κυρίως στον προσδιορισμό των παραμέτρων C_{LC} και A_C . Περισσότερη μελέτη της διάχυσης ενέργειας στο εσωτερικό του εύκαμπτου αγωγού πρέπει να πραγματοποιηθεί για ακριβέστερες τιμές του συντελεστή ενεργειακών απωλειών C_{LC} . Η μέτρηση του εμβαδού της διατομής του εύκαμπτου αγωγού κατά τις συνθήκες κατάρρευσης από την άλλη, είναι κυρίως θέμα εξοπλισμού και μεθόδου μέτρησής του.

Κεφάλαιο 2

2.1 Αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις εύκαμπτου αγωγού

Προηγουμένως, μέσα από την εργασία των Katz, Chen και Moreno, είδαμε πως κάτω από ορισμένες συνθήκες ο εύκαμπτος αγωγός μπορεί να πραγματοποιήσει ταλαντώσεις με περιοδικό τρόπο ή μη, μεγάλου πλάτους και ακόμα ταλαντώσεις που δε φθίνουν στο χρόνο. Το φαινόμενο των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων του αγωγού είναι ίσως το πιο δύσκολο κομμάτι της μελέτης ενός εύκαμπτου αγωγού καθώς έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός μηχανισμού που να το ερμηνεύει χωρίς όμως, ακόμα, κάποια βέβαιη απάντηση. Οι ίδιες οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εμφανίζεται το φαινόμενο δεν έχουν καθοριστεί πλήρως, αφού με μια γρήγορη ματιά στη βιβλιογραφία κανείς μπορεί να διαπιστώσει την πληθώρα διαφορετικών αποτελεσμάτων.

Ο βασικός λόγος για αυτή την απόκλιση αποτελεσμάτων έγκειται στους πολλαπλούς παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο. Το πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού, η παροχή, οι αρχικές συνθήκες, η εξωτερική πίεση, ακόμα και ο τρόπος ή ο ρυθμός μετάβασης από μία τιμή παραμέτρου σε μία άλλη (π.χ. παροχή ή εξωτερική πίεση) μπορούν να αλλάξουν δραστικά τα σημεία ταλάντωσης και το είδος των ταλαντώσεων. Επιπλέον κατά τη διάρκεια ενός πειράματος, η παραμικρή αλλαγή στη ροή ή στην εξωτερική πίεση , όταν ο αγωγός βρίσκεται σε ευαίσθητη κατάσταση, δηλαδή σε διατοιχωματική πίεση κοντά στο μηδέν, μπορεί να προκαλέσει μεγάλη μεταβολή στη διατομή του αγωγού, όπως ήδη έχουμε δει, και αντιστρόφως να επιφέρει σημαντική αλλαγή στην ορμή της ροής.

Παρόλα αυτά, σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε πως οι ταλαντώσεις εμφανίζονται στην περιοχή λυγισμού του αγωγού (Conrad, Katz), όταν και η παραμικρή μεταβολή της διατομής μπορεί να αλλάξει την ορμή του ρευστού, και συνεπώς να μεταβάλλει τη στατική πίεση και τις τάσεις στα τοιχώματα του αγωγού. Μία υπόθεση του μηχανισμού που πυροδοτεί είναι, την κατάσταση αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων του αγωγού εμφανίζεται όταν η ταχύτητα του ρευστού v ξεπεράσει την ταχύτητα της διάδοσης κυμάτων πίεσης c (όταν $v > c$)

(Brower και Scholten 1975, Shapiro 1977, Kamm και Shapiro 1979). Η ταχύτητα c συσχετίστηκε με το διαφορικό $\frac{dP_t}{dA}$ (P_t είναι η διατοχωματική πίεση και A το εμβαδόν της διατομής) μέσω της γνωστής σχέσης Young.

$$c = \sqrt{\frac{A}{\rho} \frac{dP_t}{dA}} \quad (2.1)$$

Όπου ρ =πυκνότητα ρευστού.

Όταν η P_t είναι μηδενική ή ελαφρώς αρνητική, ο αγωγός έχει γίνει τόσο ελαστικός ώστε από εκεί και πέρα μικρές αλλαγές στην διατοχωματική πίεση P_t μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στο εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής A . Όποτε, σύμφωνα με την παραπάνω σχέση το διαφορικό $\frac{dP_t}{dA}$, το οποίο είναι

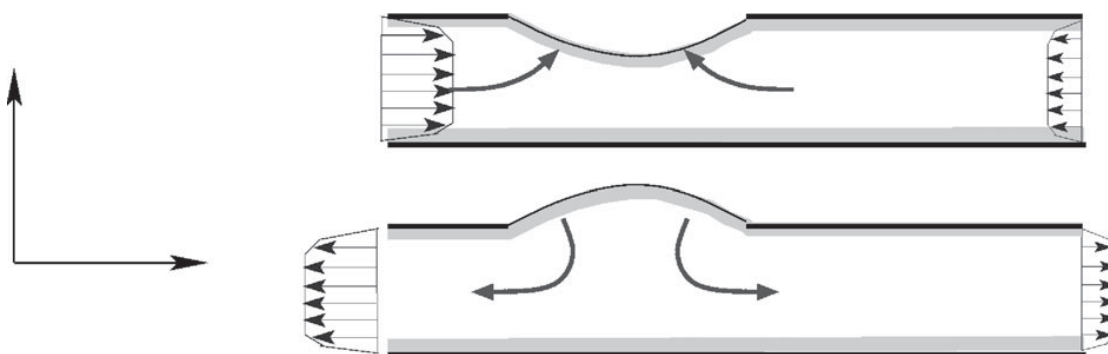
ανάλογο της ακαμψίας του αγωγού, παίρνει πολύ μικρές τιμές, και σε συνδυασμό με τις μικρότερες τιμές του A σε αυτές τις θέσεις (σε σχέση με τον απαραμόρφωτο αγωγό) η ταχύτητα c καταλήγει σε μικρές τιμές. Επομένως, το ρευστό σε αυτές τις θέσεις του αγωγού είναι πιο πιθανό να ξεπεράσει την ταχύτητα c , και τελικά να προκαλέσει την αυτοδιατηρούμενη ταλάντωση του αγωγού. Οι Brower και Scholten (1975) σημειώνουν πως η ταχύτητα των κυμάτων πίεσης παίρνει την ελάχιστη τιμή της ελάχιστα ανάντι της εγκάρσιας διατομής όπου συντελείται ο λυγισμός. Σε αυτήν την περίπτωση, η ταχύτητα της παροχής είναι "υποηχητική", εννοώντας πως είναι μικρότερη της ταχύτητας c , ανάντι του αγωγού, γίνεται "υπερηχητική" ελάχιστα πριν την κρίσιμη διατομή (στο λαιμό του αγωγού) και επανέρχεται σε "υποηχητική" κατάντι του λαιμού μέσω ενός υδραυλικού άλματος.

Μέχρι τώρα, η ικανότητα πρόβλεψης της απαρχής των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων παραμένει ένα δυσεπίλυτο θέμα. Οι Cancelli και Pedley (1985) και αργότερα ο Jensen (1992) πρότειναν ένα μονοδιάστατο μοντέλο δίνοντας έμφαση στις ενεργειακές απώλειες εξαιτίας του διαχωρισμού της ροής κατάντι του λαιμού. Ένα βελτιωμένο δισδιάστατο μοντέλο προτάθηκε από τους Luo & Pedley (1996), στο οποίο η ροή επιλύεται ανάμεσα σε δύο σταθερές πλάκες, ένα κομμάτι εκ της μίας έχει αντικατασταθεί με μία ελαστική μεμβράνη, όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.1**. Η μεμβράνη θεωρείται χωρίς μάζα με μηδενική αντίσταση στην κάμψη και υποκείμενη σε εφελκυστική τάση. Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου συγκρίνονται πολύ θετικά με αντίστοιχα πειραματικά αλλά μόνο για πολύ μικρούς Reynolds, της τάξης του 10^2 . Τα αποτελέσματα των Luo & Pedley δείχνουν πως η σχέση $v > c$ δεν είναι απαραίτητη για τη δημιουργία ταλαντώσεων, καθώς λαμβάνουν υπ'όψη και τις ενεργειακές απώλειες.

Οι Luo & Pedley (1996) υπολόγισαν το ρυθμό διάχυσης της ενέργειας του ρευστού κατά τη ροή σε μια προσπάθεια να επαληθεύσουν τον ισχυρισμό των Cancelli και Pedley (1985), ότι η μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας, που κρίθηκε απαραίτητη για τη δημιουργία των ταλαντώσεων, συμβαίνει στο λαιμό που σχηματίζει ο αγωγός κατά την κατάρρευσή του. Τελικά οι υπολογισμοί τους έδειξαν πως μεγάλο μέρος της ενέργειας χάνεται στα τοιχώματα upstream (ανάντι) της διατομής κατάρρευσης (Carpenter & Pedley 2003). Αργότερα οι Pedley & Luo (1998) προσπάθησαν να χρησιμοποιήσουν την τεχνική Von Karman-Pohlhausen

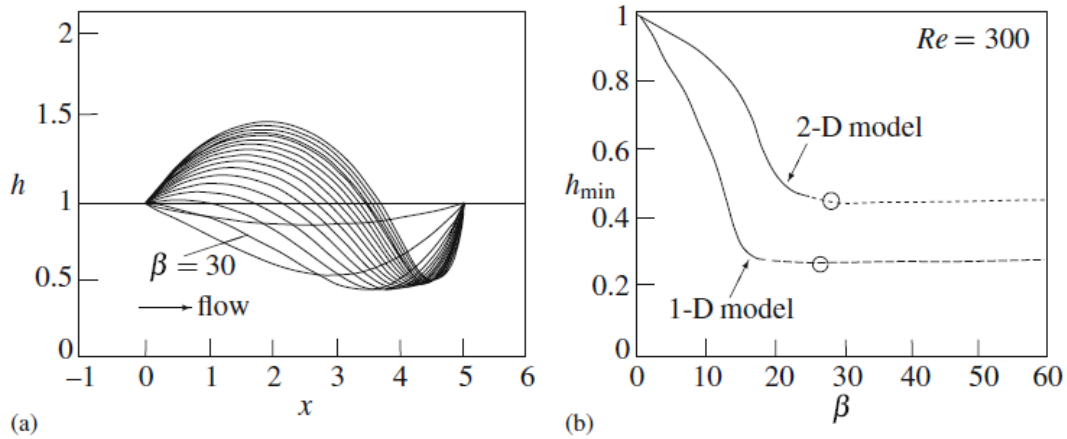
ώστε να ενσωματώσουν αυτά τα ευρήματα σε ένα βελτιωμένο 1D μοντέλο. Δυστυχώς, τα αποτελέσματα του νέου μοντέλου δεν ήρθαν σε συμφωνία με την δισδιάστατη προσομοίωσή τους (1996).

Μερικά αποτελέσματα της εργασίας των Luo & Pedley (1996) φαίνονται στις **εικόνες 2.2** και **2.3**. Σε αυτά τα διαγράμματα ο αριθμός Reynolds κρατείται σταθερός (300) και η τάση της αδιάστατης (και χωρίς μάζα) μεμβράνης συνεχώς μειωνόταν. Το διάγραμμα **2.2(α)** δείχνει πως μεταβάλλεται το σχήμα της μεμβράνης καθώς η τάση T μειώνεται. Όσο πέφτει η T η μεμβράνη αρχίζει να υποχωρεί μέχρι ενός σημείου έπειτα από το οποίο δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή στο πλάτος του καναλιού. Όμως, η κοιλότητα που δημιουργείται φαίνεται να κινείται downstream (κατάντι) του αγωγού ενώ παράλληλα δημιουργείται ένα φούσκωμα προς τα έξω (αντίθετα με την υποχώρηση) που εντοπίζεται upstream (ανάντι) του αγωγού. Καθώς η T μειώνεται πέρα από ένα κρίσιμο σημείο αρχίζει να εμφανίζεται περιοδική ταλαντωτική συμπεριφορά όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.3 (α)**. Περαιτέρω μείωση της T οδηγεί σε ακόμα πιο έντονη αστάθεια **(β),(γ),(δ)** που χαρακτηρίζεται από ταλαντώσεις υψηλότερης συχνότητας καθώς και από υπέρθεση διαφορετικών ταλαντωτικών καταστάσεων. Μεγάλο μέρος της μελέτης των τελευταίων χρόνων έχει επικεντρωθεί στην εξήγηση αυτών των αποτελεσμάτων.

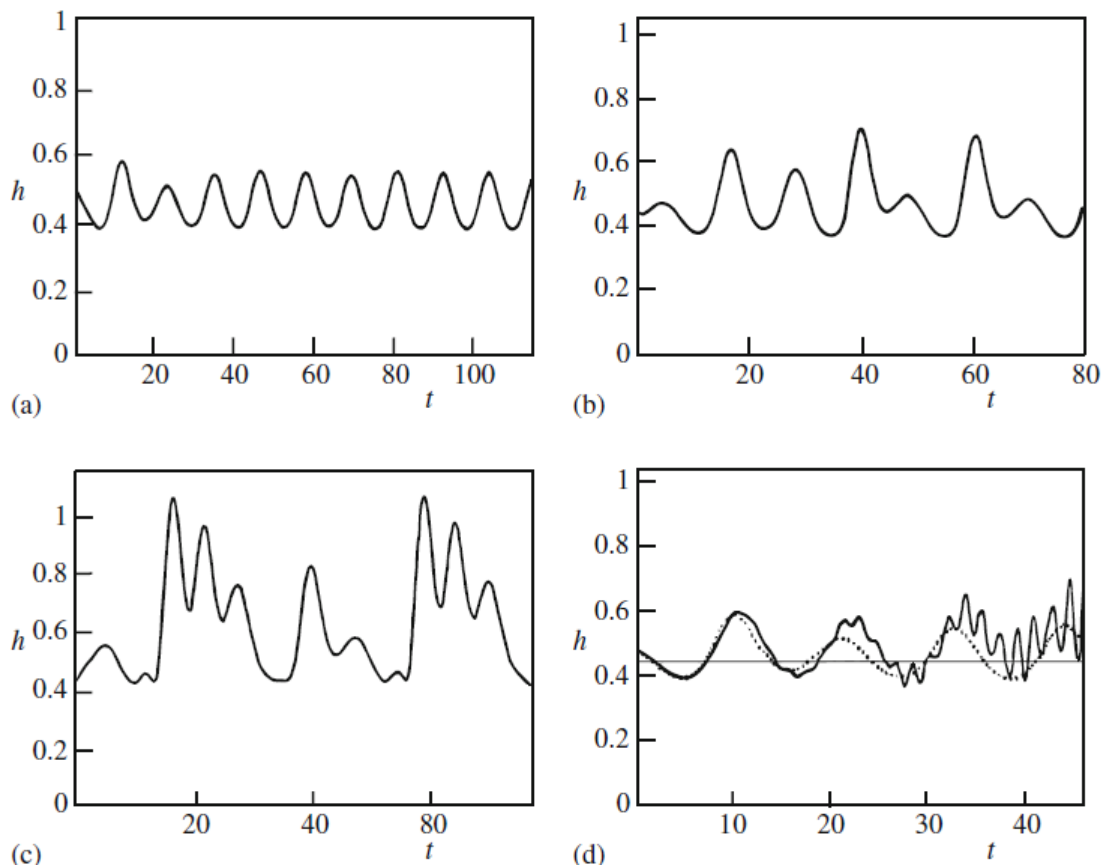


Εικόνα 2.1 Σκαρίφημα του 2D μοντέλου των Pedley & Luo (1996)

Οι επιπλέον συχνότητες που εμφανίζονται δείχνουν ότι η εισαγωγή αδράνειας τοιχωμάτων (**εικ. 2.3 (d)**) στο σύστημα, επιτρέπει τη δημιουργία υψηλότερων συχνοτήτων ταλαντώσεων. Σε μια δεύτερη εργασία των Luo & Pedley για το 1998, οι ερευνητές βρίσκουν πως δεν πρόκειται για μία απλή υπέρθεση συχνοτήτων αλλά πως οι υψηλότερης συχνότητας ταλαντώσεις μεγαλώνουν σε μέγεθος και τελικά κυριαρχούν πάνω στη συμπεριφορά του συστήματος. Οι Pedley και Luo αξιώνουν πως σε κάθε περίπτωση, η αύξηση του πλάτους των υψηλής συχνότητας ταλαντώσεων δημιουργείται λόγω μεταφοράς ενέργειας από το ρευστό στα τοιχώματα, το οποίο γίνεται δυνατό χάρη στη διαφορά φάσης των μεταβολών στη ροή και της χρονικής μετατόπισης των τοιχωμάτων. Μια διαφορά φάσης που οφείλεται στο γεγονός πως υπάρχει αδράνεια στο σύστημα.



Εικόνα 2.2 (α) Αποτελέσματα προσομοίωσης για το σχήμα μεμβράνης με σταθερό αριθμό Reynolds ($=300$) και μεταβλητή παράμετρο τάσης β ($\beta \propto \frac{1}{T}$). Luo & Pedley (1996). (β) Αποτελέσματα του ελαχίστου πλάτους καναλιού των δύο μοντέλων, κατά τη διάρκεια σταθερής ροής ως προς την παράμετρο β για σταθερό $Re(=300)$. Οι καμπύλες με τη διακοπόμενη ροή δείχνουν σημεία τα οποία αργότερα φάνηκε πως είναι ασταθή λόγω μικρής T . Οι κύκλοι στις δύο καμπύλες σηματοδοτούν την εμφάνιση του upstream φουσκώματος της μεμβράνης.



Εικόνα 2.3 Μετατόπιση μεμβράνης h σε συγκεκριμένο σημείο ($x=0.7$) ως συνάρτηση του χρόνου κατά τη διάρκεια ταλαντώσεων. $Re=300$. (α) $\beta=30$; (β) $\beta=32.5$; (γ) $\beta=35$; (δ) $\beta=30$, μάζα $M=0.1$ (στις άλλες περιπτώσεις μηδενική μάζα).

Η συμβολή των Pedley και Luo είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς προτείνουν έναν καινούριο μηχανισμό δημιουργίας αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων μέσω μεταφοράς ενέργειας από το ρευστό στα τοιχώματα, και επίσης αναδεικνύουν τη σημασία της αδράνειας των τοιχωμάτων και κατ' επέκταση του πάχους των τοιχωμάτων. Από το 1998 και μετά, γίνεται μια στροφή στο ενδιαφέρον των ερευνητών προς τη δημιουργία των ταλαντώσεων και τους πολύπλοκους μηχανισμούς που κρύβονται πίσω από αυτές.

Σε ένα review paper των Matthias Heil & Jensen (2003), οι δύο ερευνητές προσφέρουν μία θεωρητική ανάλυση των μέχρι τώρα προτεινόμενων μοντέλων και καταλήγουν σε έναν απλοποιημένο μηχανισμό με τον οποίο τα τοιχώματα μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από τη μέση ροή στο μοντέλο των Pedley & Luo (1996,1998) που φαίνεται στην **εικόνα 2.1**. Υποθέτοντας ότι η μεμβράνη εκτελεί ταλαντώσεις 'τύπου 1' (χαρακτηρίζεται από ένα απλό ακρότατο στη μετατόπιση στη μέση περίπου του μήκους της μεμβράνης), η ταλαντωτική κίνηση του τοιχώματος μετατοπίζει περιοδικά ένα μέρος του υγρού και έτσι παράγεται ταλαντωτική αξονική ροή (sloshing flow), η οποία μπορεί και να αλλάξει κατεύθυνση. Αυτή η ταλαντωτική ροή, δεδομένου πως το εύκαμπτο κομμάτι είναι αρκετά μικρό μπορεί να συμβεί και στα upstream και downstream άκαμπτα τμήματα του συστήματος μέσω μεταφοράς ορμής. Οι Heil και Jensen αποσυνθέτουν το πεδίο ροής u^* στο μέσο όρο, \bar{u}^* , και σε μία περιοδική διαταραχή $u^* = (\bar{u}^*, u^*)$. Έπειτα έδειξαν πως το \bar{u}^* καθορίζεται από μία

ισορροπία μεταξύ αδράνειας ρευστού στην αξονική κατεύθυνση, $\rho \cdot \frac{\partial u^*}{\partial t^*}$ και της

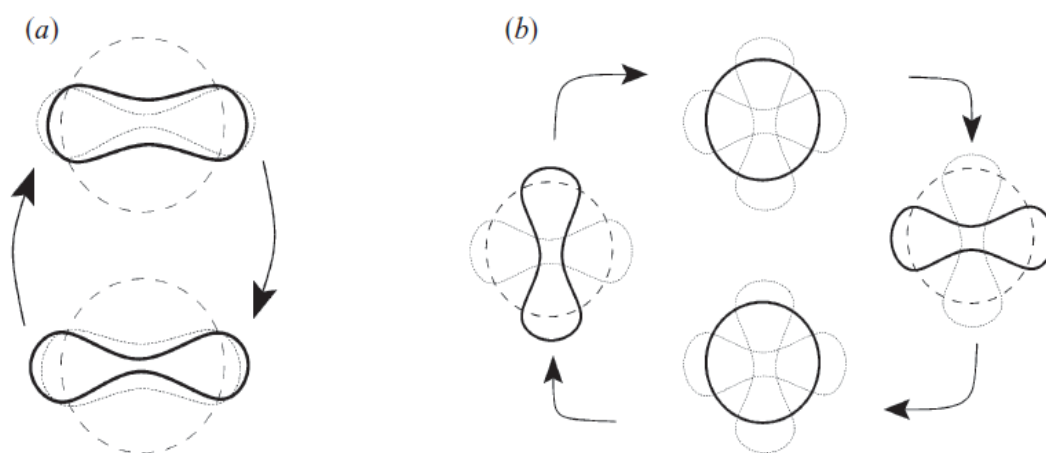
κλίσης της πίεσης στην αξονική κατεύθυνση, $\frac{\partial p^*}{\partial t^*}$, επιφέροντας ως αποτέλεσμα ένα

αμβλύ προφίλ ταχύτητας ρευστού στο μεγαλύτερο μέρος του καναλιού, με λεπτά στρώματα Stokes κοντά στα τοιχώματα. Σε γενικές γραμμές, οι ταλαντωτικές ροές εκατέρωθεν της μεμβράνης μπορεί να έχουν διαφορετικά πλάτη, γεγονός που εξαρτάται από το μήκος των upstream και downstream άκαμπτων τμημάτων. Για παράδειγμα, αν το downstream άκαμπτο τμήμα είναι πολύ μεγαλύτερο του upstream, το μεγαλύτερο μέρος του ρευστού θα μετατοπιστεί προς το upstream λόγω μικρότερης αντίστασης στη ροή (που έχει να κάνει φυσικά με τη μικρότερη μάζα ρευστού που υπάρχει στο upstream και άρα μικρότερης αδράνειας). Η παρατήρηση κλειδί στην εργασία των Jansen & Heil (2003) είναι πως η ταλαντωτική ροή (sloshing flow), καθώς μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση, παράγει μια εισροή ή εκροή κινητικής ενέργειας στην είσοδο ή έξοδο του συστήματος. Αν το πλάτος ταλάντωσης της ροής στην είσοδο (upstream) είναι μεγαλύτερο από αυτό της εξόδου, τότε οι ταλαντωτική ροή δημιουργεί μια εισροή ενέργειας στο σύστημα. Αν αυτή η επιπλέον κινητική ενέργεια ξεπερνάει τις απώλειες συνεκτικότητας που συνοδεύουν την ταλαντωτική ροή λόγω του ιξώδους του ρευστού, τότε η μεμβράνη μπορεί να απορροφήσει ενέργεια από τη μέση ροή και οι ταλαντώσεις της να αυξηθούν σε πλάτος.

Αυτή τη θεωρητική προσέγγιση στο μοντέλο των Pedley & Luo (1996,1998) έσπευσαν να την επαληθεύσουν μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης για μεγάλες τάσεις τοιχώματος (T). Τα αποτελέσματα έδειξαν εξαιρετική συμφωνία με το θεωρητικό μοντέλο της μεταφοράς ενέργειας από το ρευστό στο τοίχωμα.

Οι Heil & Waters (2006) έδειξαν, πως ο μηχανισμός των Jensen & Heil (2003) δεν μπορεί να σταθεί στην περίπτωση των πραγματικών τρισδιάστατων εύκαμπτων αγωγών. Αυτό συμβαίνει διότι, σε έναν αρχικά κυλινδρικό αξονομετρικό αγωγό, ένας ελαφρύς λυγισμός με πλάτος μετατόπισης της τάξης του $O(\epsilon)$ θα επιφέρει μεταβολή όγκου μεγέθους μόλις $O(\epsilon^2)$. Συνεπώς, στην περίπτωση του τρισδιάστατου αγωγού οι ταλαντωτικές ροές είναι πολύ πιο αδύναμες σε σχέση με το δισδιάστατο μοντέλο των Pedley & Luo (εικ. 2.1). Αντιθέτως, οι Heil & Waters (2006) έδειξαν πως σε τρισδιάστατους αξονομετρικούς κυλινδρικούς εύκαμπτους αγωγούς, η μεταβολή που προκαλούν στη ροή οι μικρού πλάτους ταλαντώσεις έχει να κάνει με τη δημιουργία κάθετων ροών που αναπτύσσονται στις παραμορφωμένες κάθετες διατομές και γύρω από αυτές. Επιπλέον, οι κάθετες ροές δεν αλληλεπιδρούν με τη μέση αξονική ροή, επομένως ο εύκαμπτος αγωγός δεν μπορεί να απορροφήσει ενέργεια από τη μέση ροή και τελικά οι απώλειες συνεκτικότητας "σβήνουν" τις ταλαντώσεις.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως φθίνουσες ταλαντώσεις τύπου B (βλ. Εικόνα 2.4) γύρω από μη-συμμετρική λυγισμένη θέση μπορούν να μεταβούν σε τύπου A ταλαντώσεις πριν, αναπόφευκτα, καταλήξουν στη θέση ισορροπίας τους. Στην παρούσα έρευνα οι Heil & Waters αξίωσαν πως, θεωρητικά, η αντίστροφη μετάβαση μπορεί επίσης να συμβεί. Αν η αρχική ταλάντωση, τύπου A, γίνεται γύρω από λυγισμένη θέση ισορροπίας, και αυξάνει σε πλάτος, τότε αν αυτό αυξηθεί σημαντικά μπορεί να περάσει σε μία νέα κατάσταση όπου θα ταλαντώνεται γύρω από μία νέα θέση ισορροπίας στην οποία η ταλάντωση να είναι τύπου B.



Εικόνα 2.4 Απεικόνιση της εγκάρσιας διατομής εύκαμπτου αγωγού κατά τη διάρκεια (α) 'Τύπου A' και (β) 'Τύπου B' ταλαντώσεων. Οι διακοπτόμενες γραμμές δείχνουν την απαραμόρφωτη θέση του αγωγού ενώ οι αχνές αντιπροσωπεύουν τις πιο ακραία παραμορφωμένες θέσεις (11).

Σε μία επόμενη εργασία (2008), οι Heil & Waters ανέλυσαν τον ενεργειακό ισολογισμό σε σύστημα εύκαμπτου αγωγού που ταλαντώνεται, του οποίου τα τοιχώματα όμως εκτελούν δεδομένες κινήσεις (καθορισμένες υπολογιστικά) με περίοδο T^* , και έχουν δεδομένο σχήμα, δηλαδή εγκάρσια διατομή. Έδειξαν, πως εφόσον το πλάτος ταλάντωσης των ροών (sloshing flow), που αλλάζουν κατεύθυνση λόγω της κίνησης των τοιχωμάτων, είναι μεγαλύτερο στην είσοδο (κατά την κατεύθυνση της μέσης ροής) από ότι στην έξοδο του συστήματος, τότε τα τοιχώματα μπορούν όντως να απορροφήσουν ενέργεια από τη μέση ροή, δεδομένου πως η μέση ροή ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή. Παρόλα αυτά, όπως υποδεικνύει η προηγούμενη έρευνά τους (2006), αυτή η απορρόφηση ενέργειας μπορεί να συμβεί αποτελεσματικά μόνο αν ο αγωγός εκτελεί ταλάντωση γύρω από λυγισμένη θέση ισορροπίας. Οι Heil & Waters αξιολογούν πως σε έναν εύκαμπο αγωγό η παροχή για την οποία η απορρόφηση ενέργειας των τοιχωμάτων γίνεται σημαντική, συνδέεται με την παροχή πέρα από την οποία αυξάνουν σε πλάτος οι ταλαντώσεις. Υποθέτοντας, ότι η περίοδος της ταλάντωσης T^* εξαρτάται από μια δυναμική ισορροπία μεταξύ

αδράνειας ρευστού και της ακαμψίας των τοιχωμάτων K , έτσι ώστε $T^* \propto \alpha \sqrt{\frac{\rho}{K}}$, όπου α και ρ είναι η απαραμόρφωτη ακτίνα του αγωγού και η πυκνότητα του ρευστού αντίστοιχα, οι Heil & Waters (2008) θεώρησαν ότι ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, στον οποίο ξεκινάνε οι αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις πρέπει να συσχετίζεται με τα υπόλοιπα μεγέθη κάπως έτσι:

$$\text{Re}_{crit} = \frac{U_{crit} \cdot \rho \cdot \alpha}{\mu} \sim \sqrt{\frac{\alpha}{\mu}} \sqrt{\rho \cdot K} \quad (2.2)$$

Όπου μ είναι η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού, και ο αριθμός Reynolds ορίζεται από την ταχύτητα της μέσης ροής του καναλιού. Αυτή η συσχέτιση επαληθεύτηκε και από άλλη ανεξάρτητη έρευνα (Whittaker et al. 2010).

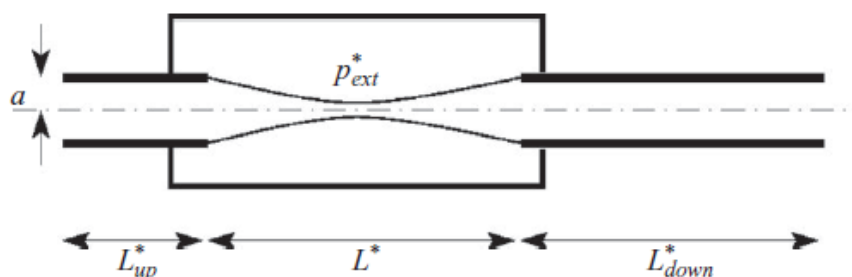
2.2 Matthias Heil and Jonathan Boyle-2010

2.2.1 Περίληψη

Η εργασία των Heil & Boyle (2010) αποτελεί μία προσομοίωση που σκοπό έχει την διερεύνηση του μηχανισμού ανάπτυξης των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων σε τρισδιάστατο εύκαμπο αγωγό στον οποίο επιβάλλεται ως βασική οριακή συνθήκη η παροχή στην είσοδο του συστήματος. Ο μηχανισμός που εξετάζεται είναι αυτός που αρχικά προτάθηκε από τους Jensen & Heil (2003) και εν συνεχεία βελτιώθηκε από τους Heil & Waters (2006,2008). Σε πρώτη φάση, οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις τείνουν να εμφανίζονται από σταθερές θέσεις ισορροπίας όπου ο αγωγός είναι λυγισμένος μη-αξονομετρικά. Σε δεύτερη φάση, ακολουθούν τις αύξουσες ταλαντώσεις στην κατάσταση όπου έχουν αποκτήσει μεγάλο πλάτος και εντοπίζουν διαφορές ανάμεσα

σε κοντούς (μικρού μήκους αγωγούς) και μακρής αγωγούς. Καταλήγουν στο ότι η περίοδος των ταλαντώσεων και ο κρίσιμος Re , πέρα από τον οποίο το πλάτος των ταλαντώσεων αυξάνει συμφωνούν με τις θεωρητικές προβλέψεις που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο.

2.2.2 Το μοντέλο



Εικόνα 2.5 Σκαρίφημα της συσκευής Starling, ένας εύκαμπτος αγωγός με λεπτά τοιχώματα, με τις δύο άκρες του σφικτά τοποθετημένες σε άκαμπτους αγωγούς. Ο εύκαμπτος αγωγός βρίσκεται μέσα σε δοχείο πίεσης.

Θεωρούμε στρωτή ροή συνεκτικού υγρού (πυκνότητας ρ και δυναμικής συνεκτικότητας μ) μέσα από εύκαμπτο αγωγό απαραμόρφωτης ακτίνας a και μήκους L^* , σφικτά τοποθετημένου πάνω σε δύο άκαμπτους αγωγούς με μήκη L_{up}^* και L_{down}^* όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.5**. Καθώς η εισροή κινητικής ενέργειας μεγιστοποιείται όταν οι μεταβολές στην ταχύτητα της εξόδου είναι μικρές, οδηγούμε τη ροή μέσω σταθερής παροχής, $\dot{V}^* = \dot{V}_0^*$, στο τέλος του downstream άκαμπτου αγωγού. Πειραματικά, αυτή η συνθήκη ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια ογκομετρική αντλία τοποθετούμενη στο τέλος του downstream αγωγού. Η ροή είναι μόνιμη και στρωτή.

Ο αγωγός μοντελοποιείται με ελαστικά λεπτά τοιχώματα πάχους h , σταθεράς Young E , και λόγου Poisson ν και υπόκειται σε εξωτερική πίεση P_{ext}^* καθώς και στις τριβές που προκαλεί η κίνηση του ρευστού. Αδιαστατοποιούνται όλα τα μήκη με την απαραμόρφωτη ακτίνα a (όταν ο αγωγός βρίσκεται στην αρχική του κυλινδρική θέση), την ταχύτητα του ρευστού ως $U = \frac{V_0^*}{a^2}$, και την πίεση του ρευστού ως $p^* = (\mu U / a) \cdot p$. Ο χρόνος αδιαστατοποιείται στον εσωτερικό χρόνο της ροής ως $t^* = (a / U) \cdot t$.

Το καρτεσιανό σύστημα αξόνων ορίζεται ως (x_1, x_2, x_3) , με τα x_1 και x_2 να είναι οι κάθετοι άξονες της εγκάρσιας διατομής του αγωγού όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.6** και x_3 είναι ο διαμήκης άξονας, θετικός κατά την κατεύθυνση της ροής.

Η ροή καθορίζεται από τις αδιάστατες Navier-Stokes εξισώσεις:

$$\text{Re} \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \nabla^2 \vec{u}, \quad \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.3)$$

Η συνθήκη μη εισχώρησης στα τοιχώματα είναι:

$$\vec{u} = \frac{\partial \mathbf{R}_w}{\partial t} \quad (2.2), \quad \text{όπου } \mathbf{R}_w \text{ είναι το διάνυσμα θέσης των τοιχωμάτων και εξαρτάται από το χρόνο και τα } x_1, x_2, \text{ δηλαδή } \mathbf{R}_w(x_1, x_2, t).$$

Στην είσοδο υποθέτουμε παράλληλη αξονική ροή, χωρίς τριβές:

$$p = u_1 = u_2 = 0 \quad \text{για } x_3 = 0 \quad (2.4)$$

Στην έξοδο υποθέτουμε παράλληλη ροή και καθορισμένη παροχή:

$$u_1 = u_2 = 0 \quad \text{και} \quad \int u_3 dA = \dot{V}_0 = \pi \quad \text{για } x_3 = L_{\text{total}} (= L_{\text{up}} + L + L_{\text{down}}) \quad (2.5)$$

Αδιαστατοποιούνται όλες οι μηχανικές τάσεις στα στερεά τοιχώματα του αγωγού στην ακαμψία του αγωγού:

$$\mathbf{K} = \frac{E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^3 \quad (2.6)$$

Το διάνυσμα θέσης \mathbf{R}_w του τοιχώματος υπολογίζεται από την αρχή των εικονικών μετατοπίσεων:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^L E^{\alpha\beta\gamma\delta} (\gamma_{\alpha\beta} \cdot \delta \cdot \gamma_{\gamma\delta} + \frac{1}{12} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \cdot \kappa_{\alpha\beta} \cdot \delta \cdot \kappa_{\gamma\delta}) dx_1 dx_2 = \frac{1}{12} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^L f \cdot \delta R_w \cdot \sqrt{A} dx_1 dx_2 \quad (2.7)$$

Όπου $\gamma_{\alpha\beta}$ και $\kappa_{\alpha\beta}$ είναι οι τανυστές εφελκυσμού και κάμψης, αντίστοιχα, $E^{\alpha\beta\gamma\delta}$ είναι ο τανυστής τέταρτης τάξης των ελαστικών σταθερών. Το διάνυσμα f είναι το διάνυσμα φόρτισης και αποτελείται από τα εξής μέρη:

$$f_i = p_{ext} \cdot N_i - Q \cdot (p \cdot N_i - (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \cdot N_j) \quad (2.8)$$

όπου

$$Q = \frac{U \cdot \mu}{\alpha \cdot K} \quad (2.9)$$

Και N_i το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στα τοιχώματα και στην είσοδο έξοδο του αγωγού με κατεύθυνση προς τα έξω.

Για συγκεκριμένη γεωμετρία αγωγού (κυλινδρική), μπορούμε να πούμε πως το πρόβλημα του εύκαμπτου αγωγού καταλήγει να καθορίζεται από τρεις βασικές παραμέτρους:

$$(\alpha) \quad Re = \frac{\rho \cdot \alpha \cdot U}{\mu}, \quad (\beta) \quad Q = \frac{U \cdot \mu}{\alpha \cdot K}, \quad \text{και} \quad (\gamma) \quad P_{ext} \quad (2.10)$$

οι οποίες αντιπροσωπεύουν (α) το λόγο της αδράνειας του ρευστού προς τη συνεκτικότητά του, (β) το λόγο των συνεκτικών δυνάμεων του ρευστού προς την ακαμψία των τοιχωμάτων και (γ) την εξωτερική πίεση του εύκαμπτου αγωγού. Επίσης εισάγουμε την υλική παράμετρο H :

$$H = \frac{Re}{Q} = \frac{\rho \cdot \alpha^2 \cdot K}{\mu^2} = c \quad (2.11)$$

Παρατηρούμε πως αυτή είναι σταθερή. Για δεδομένη λοιπόν τιμή του Re , την οποία εμείς καθορίζουμε μέσω της παροχής και άρα της ταχύτητας, η παράμετρος Q ακολουθεί τις άλλες δυο $Q=Re/H$.

2.2.3 Αποτελέσματα

Κοντοί αγωγοί

Χαρακτηριστικά μεγέθη του εύκαμπτου αγωγού:

Μήκος $L=10$

Πάχος τοιχωμάτων $h/a=1/20$

Λόγος Poisson $\nu=0.49$

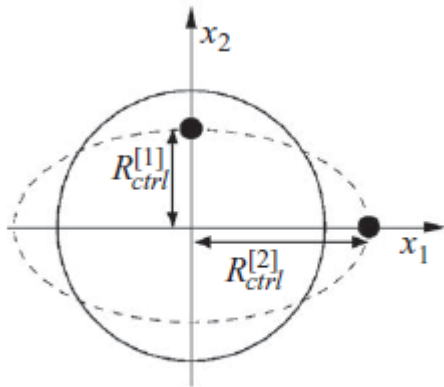
$L_{up}=1$

$L_{down}=8$

$H=10^4$

Η έρευνα της συμπεριφοράς του αγωγού μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης με τα χαρακτηριστικά που περιγράψαμε παραπάνω (2.2-2.11), γίνεται σε όλη την εργασία

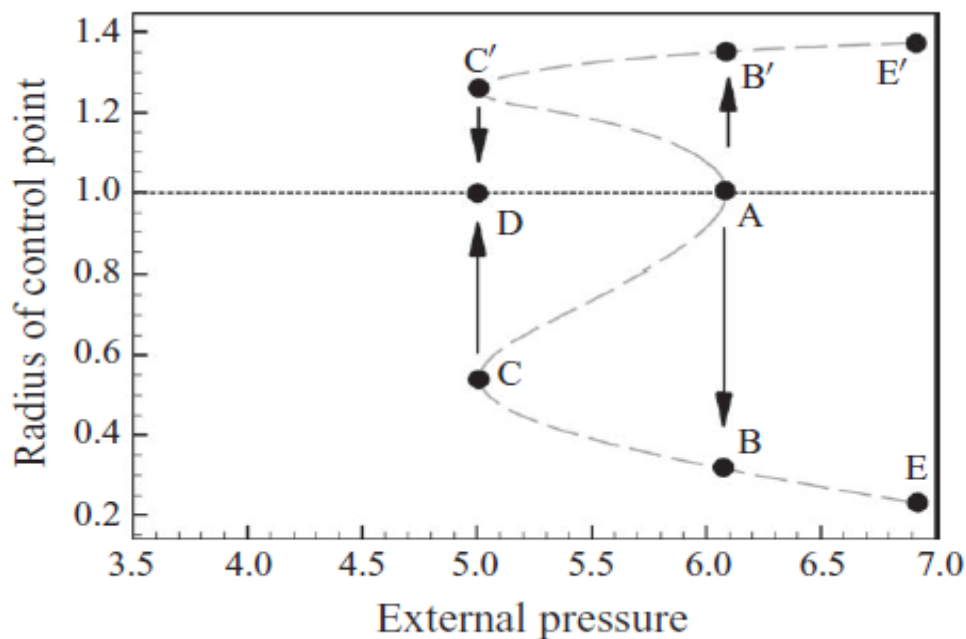
με τον εξής τρόπο: επιλέγουμε διάφορους αριθμούς Reynolds, και χρησιμοποιούμε ως ελεγχόμενη μεταβλητή την εξωτερική πίεση P_{ext} για να ελέγξουμε το λυγισμό του αγωγού. Η παραμόρφωση του αγωγού χαρακτηρίζεται από δύο ακτίνες ελέγχου R_{ctrl}^1 και R_{ctrl}^2 οι οποίες βρίσκονται στην εγκάρσια διατομή στη μέση του εύκαμπτου αγωγού. Η R_{ctrl}^1 κινείται πάνω στον άξονα x_2 και η R_{ctrl}^2 πάνω στον άξονα x_1 (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6 Εγκάρσια διατομή του εύκαμπτου αγωγού στη μέση του μήκους του αγωγού ($L/2$). Οι ακτίνες R_{ctrl}^1 , R_{ctrl}^2 χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν την παραμόρφωση του αγωγού.

Θέσεις ισορροπίας

Αρχικά, γίνεται μια προσέγγιση της συμπεριφοράς του αγωγού κάτω από την επίδραση της εξωτερικής πίεσης P_{ext} , εν απουσία ροής, για να διαπιστωθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτίο-μετατόπιση (το φορτίο είναι η εξωτερική πίεση και η μετατόπιση ελέγχεται με τις ακτίνες ελέγχου R_{ctrl}^1 , R_{ctrl}^2).



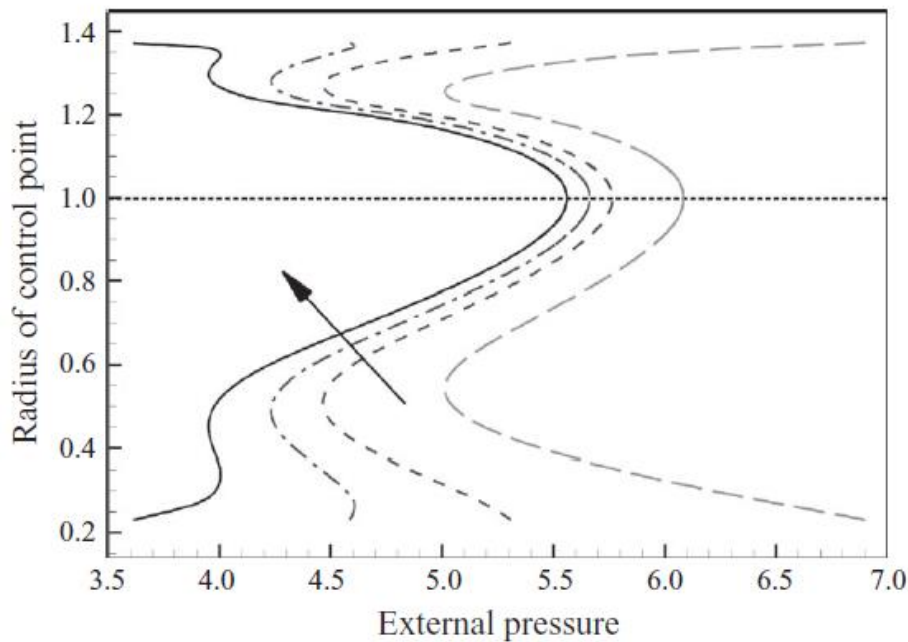
Εικόνα 2.7 Το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης του εύκαμπτου αγωγού σε απουσία ροής (ακίνητο ρευστό) για $L=10$, $\nu=0.49$, $h/a=1/20$

Στο διάγραμμα της **εικόνας 2.7** παρατηρούμε πως για αρκετά μικρές τιμές της εξωτερικής πίεσης ο αγωγός παραμένει κυλινδρικός (inflated), δηλαδή οι ακτίνες ελέγχου έχουν την τιμή 1 (οι ακτίνες ελέγχου παρουσιάζονται ως προς την απαραμόρφωτη ακτίνα a , δηλαδή απεικονίζουν τη σχετική μετατόπιση των τοιχωμάτων κατά μήκος των x_1, x_2). Σε αυτή την κατάσταση, ο αγωγός είναι σχεδόν άκαμπτος και χρειάζονται μεγάλες μεταβολές στην εξωτερική πίεση για να υπάρξει πολύ μικρή αξονομετρική μεταβολή στο σχήμα της διατομής. Αυτή η κατάσταση αντιπροσωπεύεται από την ευθεία διακοπτόμενη γραμμή όπου $R_{ctrl}=1$ (στην πραγματικότητα έχει μια ελαφριά αρνητική κλίση). Το σημείο A ($P_{ext}=6.09$) του διαγράμματος είναι το σημείο κρίσιμης εξωτερικής πίεσης ή αλλιώς εξωτερικής πίεσης λυγισμού, όπου η αξονομετρική θέση γίνεται στατικά ασταθής και ο αγωγός λυγίζει μη-αξονομετρικά. Οι ακτίνες ελέγχου μεταπηδούν στις θέσεις B και B', όπου τα γράμματα χωρίς τόνο συμβολίζουν την τιμή του R_{ctrl}^1 και με τόνο του R_{ctrl}^2 . Από αυτό το σημείο και πέρα για $P_{ext} > P_{ext}^{(buckling)}$, οι μόνες στατικές θέσεις ισορροπίας είναι λυγισμένες μη-αξονομετρικές θέσεις και βρίσκονται στο τμήμα καμπύλης B-E (και B'-E' αντίστοιχα). Αυτή η απότομη μη συνεχής αλλαγή στη θέση των τοιχωμάτων έχει ονομαστεί διακλάδωση Hopf. Στο τμήμα B-E, περαιτέρω αύξηση της εξωτερικής πίεσης ενισχύει την κατάρρευση μέχρι το σημείο επαφής (contact point) το οποίο όμως η παρούσα έρευνα δε μελετά (το σημείο E είναι η πιο ακραία λυγισμένη θέση του αγωγού). Μείωση στην εξωτερική πίεση, από το σημείο B, ξαναανοίγει την αγωγή μέχρι να εξαφανιστούν οι λυγισμένες θέσεις ισορροπίας στο σημείο C ($P_{ext}=5.01$). Παρατηρούμε σε αυτό το σημείο, πως για τις πιέσεις που αντιστοιχούν στον κλάδο B-C, έχουμε και αξονομετρικές θέσεις ισορροπίας και μη-αξονομετρικές. Για αυτό το λόγο η συγκεκριμένη διακλάδωση ορίζεται ως υποκρίσιμη, δηλαδή βρίσκεται πίσω από την κρίσιμη πίεση λυγισμού, ενώ αντίθετα, η B-E ορίζεται ως υπερκρίσιμη. Τέλος, ο κλάδος C-A αντιπροσωπεύει τις ασταθείς μη-αξονομετρικές θέσεις.

Η **εικόνα 2.8** δείχνει πως η ροή ρευστού επηρεάζει τις σταθερές θέσεις του αγωγού σε τρεις τιμές Reynolds ($Re=65, 85, 105$, αυξανόμενος κατά την κατεύθυνση του βέλους από 0 έως 105). Εφ' όσον έχουμε ροή, έχουμε και πτώση πίεσης Δp λόγω συνεκτικότητας. Η πίεση στην είσοδο του συστήματος κρατιέται σταθερή επομένως έχουμε μικρότερη εσωτερική πίεση εντός του εύκαμπτου αγωγού άρα και για κάθε τιμή της εξωτερικής πίεσης προκύπτει μικρότερη διατοιχωματική πίεση (αλγεβρικά). Συνεπώς, ο αγωγός με ροή εκτίθεται σε μεγαλύτερο φορτίο από ότι ο αγωγός χωρίς ροή για ίδια εξωτερική πίεση λόγω της μικρότερης εσωτερικής πίεσης σε ροή και άρα αντίστασης στο λυγισμό. Για αυτό το λόγο βλέπουμε να μετακινείται προς τα αριστερά το σημείο λυγισμού του αγωγού καθώς όσο αυξάνει ο Re τόσο αυξάνει και η πτώση πίεσης Δp .

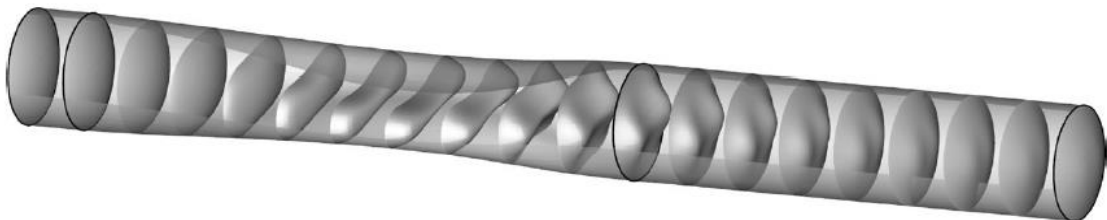
Μόλις ο αγωγός λυγίσει, η μείωση του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής του αγωγού αυξάνει την αντίσταση στη ροή και επομένως και την πτώση πίεσης Δp . Επιπλέον, η σμίκρυνση της διατομής προκαλεί τοπική αύξηση της ταχύτητας του ρευστού (διότι επιβάλλουμε σταθερή παροχή) και μία επιπρόσθετη πτώση πίεσης, όπως γνωρίζουμε από τη σχέση του Bernoulli. Και οι δύο παράγοντες αποσταθεροποιούν έντονα την ισορροπία του αγωγού. Στο διάγραμμα της **εικόνας 2.8** φαίνεται πως για $Re=85, 105$ δημιουργείται ένα δεύτερο οριακό σημείο πέρα από το οποίο (δηλαδή για μεγαλύτερη εξωτερική πίεση) δεν υπάρχουν σταθερές

λυγισμένες θέσεις. Επίσης, παρατηρούμε πως για τους ίδιους αριθμούς Re δεν υπάρχουν σταθερές θέσεις ισορροπίας σε εξωτερικές πιέσεις μεγαλύτερες της πίεσης λυγισμού.



Εικόνα 2.8 Το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης του αγωγού για $Re=0,65,85,105$ (αυξανόμενου κατά την κατεύθυνση της ροής) για αγωγό μήκους $L=10$ και $H=10^4$.

Η **εικόνα 2.9** απεικονίζει το πεδίο ροής (προφίλ αξονικής ταχύτητας) για λυγισμένη θέση ισορροπίας σε $Re=105$. Η αύξηση της αξονικής ταχύτητας στις παραμορφωμένες διατομές γίνεται εμφανής. Παρ' όλα αυτά σε αυτόν τον σχετικά χαμηλό Reynolds, η διάχυση της ορμής προς τα τοιχώματα είναι ανεπαίσθητη και μέσα σε λίγες διατομές η ροή επιστρέφει σε προφίλ Poiseuille.

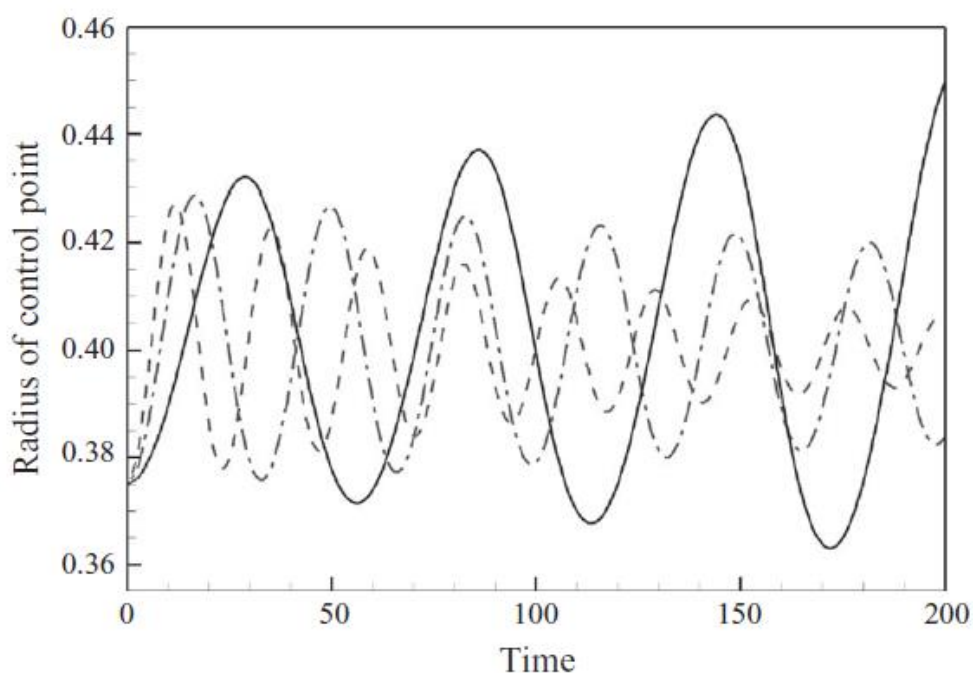


Εικόνα 2.9 Σταθερό πεδίο ροής σε λυγισμένο αγωγό ($R_{ctrl}^1=0.25$) για $Re=105$. Η απεικόνιση δείχνει τα 3/4 των τοιχωμάτων και τα προφίλ της αξονικής ταχύτητας. Οι πυκνές μαύρες γραμμές δείχνουν τις βάσεις των άκαμπτων τμημάτων.

Ασταθείς περιοχές

Οι ασταθείς περιοχές χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση ταλαντώσεων. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τη μελέτη τους είναι η εξής: χρησιμοποιούμε μια σταθερή λύση ως σημείο έναρξης ($t=0$). Για $t>0$, αλλάζουμε την P_{ext} και καταγράφουμε την αντίδραση του συστήματος ως προς το χρόνο. Επικεντρωνόμαστε στις μη-αξονικές θέσεις ισορροπίας καθώς, σύμφωνα με τους Heil & Waters (2008), αυτές είναι πιο πιθανές να παρουσιάσουν το μηχανισμό αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων που περιεγράφηκε στις παραπάνω παραγράφους.

Ως αρχική θέση επιλέγεται η θέση ισορροπίας για $R_{ctrl}^1(t=0)=0.375$. Για $t>0$ ρυθμίζουμε την P_{ext} σε μια τιμή που να αντιστοιχεί σε λυγισμένη θέση ισορροπίας. Ως τέτοια επιλέγεται η $R_{ctrl}^1=0.4$. Η εξέλιξη του συστήματος για ένα μικρό εύρος Reynolds (85,95,105) φαίνεται στην **εικόνα 2.10**. Για μικρούς Reynolds το σύστημα εκτελεί ταλαντώσεις τύπου 'A' που φθίνουν στο χρόνο, γύρω από τη νέα θέση ισορροπίας ($R_{ctrl}^1=0.4$). Αύξηση του Re, αυξάνει το πλάτος ταλάντωσης, την περίοδο ενώ μειώνει το ρυθμό απόσβεσης. Για $Re=105$, η ταλάντωση αυξάνει σε πλάτος με το χρόνο, υποδεικνύοντας ότι η νέα θέση δεν είναι σταθερή.

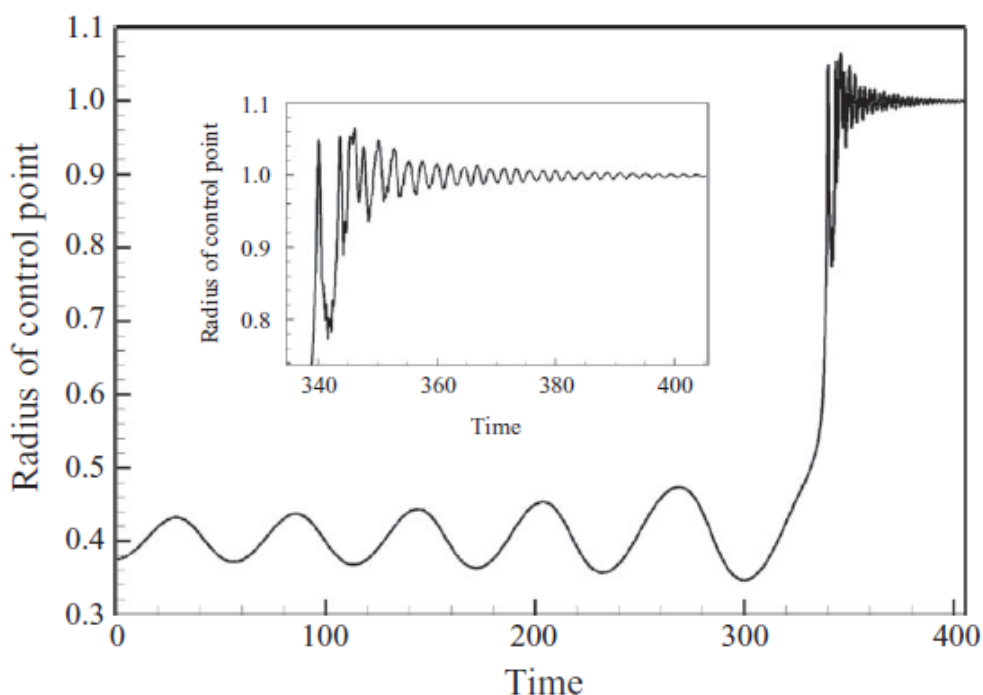


Εικόνα 2.10 Εξέλιξη της ακτίνας ελέγχου R_{ctrl}^1 για $Re=85,95,105$ (από το μικρότερο πλάτος ταλάντωσης στη μεγαλύτερο). Σε κάθε περίπτωση για $t=0$ έχουμε $R_{ctrl}^1=0.375$ και για $t>0$, $R_{ctrl}^1=0.4$.

Η **εικόνα 2.11** ακολουθεί την ταλάντωση για την περίπτωση $Re=105$. Αρχικά, ο αγωγός εκτελεί ταλαντώσεις γύρω τύπου 'A' γύρω από τη θέση ισορροπίας R_{ctrl}^1 με αυξανόμενο πλάτος. Καθώς το πλάτος αυξάνει, το σύστημα φτάνει ολοένα και πιο κοντά στην αξονομετρική θέση ισορροπίας του αγωγού (απαραμόρφωτη θέση) όταν περνάει από τη λιγότερο λυγισμένη θέση κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης. Για $t=335$ περίπου, παρατηρούμε πως ο χαρακτήρας της ταλάντωσης αλλάζει δραματικά

και η ταλάντωση συνολικά μεταπηδά γύρω από την αξονομετρική θέση ισορροπίας. Στη νέα θέση ο αγωγός εκτελεί τύπου 'B' ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας που φθίνουν στο χρόνο.

Αυτή η συμπεριφορά έρχεται σε αντιστοιχία με τη θεωρητική πρόβλεψη των Heil & Waters (2006) όπου επίσης παρατηρούν πως οι μικρού πλάτους, τύπου 'B' ταλαντώσεις, γύρω από την αξονομετρική θέση, μετατοπίζουν πολύ μικρό όγκο ρευστού. Για αυτό το λόγο το πλάτος της ταλαντωτικής ροής, που είναι βασικό στοιχείο στο μηχανισμό των Jensen & Heil (2003), μειώνεται και επακολούθως και η εισροή κινητικής ενέργειας με αποτέλεσμα να 'σβήσουν' οι ταλαντώσεις, όπως και είχε προβλεφθεί.



Εικόνα 2.11 Εξέλιξη της R_{ctrl}^1 στο χρόνο για $Re=105$

Για τη συγκεκριμένη γεωμετρία αγωγού πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων χωρίς να βρεθεί κάποια περίπτωση όπου ο αγωγός να εκτελεί αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις, καθώς σε όποιες περιπτώσεις υπήρχε αύξηση του πλάτους αυτή τελικά οδηγούταν από την αξονομετρική θέση, γινόταν η μεταπήδηση σε αυτή και τελικά έφθινε η ταλάντωση.

Μακριοί αγωγοί

Η αδυναμία εύρεσης αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων για τη γεωμετρία αγωγού της προηγούμενης παραγράφου, έχει να κάνει με το γεγονός ότι η αλληλεπίδραση ρευστού-τοιχωμάτων είναι εξαιρετικά αποσταθεροποιητική με αποτέλεσμα να μειώνει το εύρος εξωτερικών πιέσεων για τις οποίες έχουμε μη-

αξονομετρικές θέσεις ισορροπίας σε ένα εύρος, όπου για αυτές τις εξωτερικές πιέσεις, η αξονομετρική θέση ισορροπίας είναι ακόμα στατικά σταθερή. Δηλαδή σε κάθε μη-αξονομετρική θέση ισορροπίας αντιστοιχεί η αξονομετρική (για ίδια εξωτερική πίεση), γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα οι αυξανόμενου πλάτους ταλαντώσεις τελικά να μεταπηδούν γύρω από την αξονική θέση ισορροπίας, στην οποία όπως έχουν δείξει οι Heil & Waters (2006), δεν μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στον όγκο του αγωγού και άρα και στην ορμή του ρευστού. Το τελικό αποτέλεσμα είναι αυτές οι ταλαντώσεις να μην μπορούν να διατηρηθούν και τελικά να αποσβένουν.

Άρα για να πετύχουμε αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις λογικά πρέπει να σκεφτούμε ως εξής: 1) Να αλλάξουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, έτσι ώστε οι διακλαδώσεις να είναι υπερκρίσιμες και όχι υποκρίσιμες, δηλαδή για μία μη-αξονομετρική θέση ισορροπίας η αξονομετρική να είναι ασταθής. 2) Να μειώσουμε την επίδραση της εξαιρετικά αποσταθεροποιητικής αλληλεπίδρασης ρευστού-στερεού. Το πρώτο μπορούμε να το πετύχουμε με αύξηση της αξονικής τάσης των τοιχωμάτων ή με αύξηση του μήκους του αγωγού ενώ το δεύτερο αυξάνοντας την ακαμψία των τοιχωμάτων μέσω αύξησης της υλικής παραμέτρου H . Σε αυτό το σημείο της εργασίας συνδυάζονται και οι δύο προσεγγίσεις, καθώς αυξάνουμε το μήκος του εύκαμπτου αγωγού στην τιμή $L=20$ (από 10) και το H στην τιμή 10^5 (από 10^4).

Σταθερές λύσεις

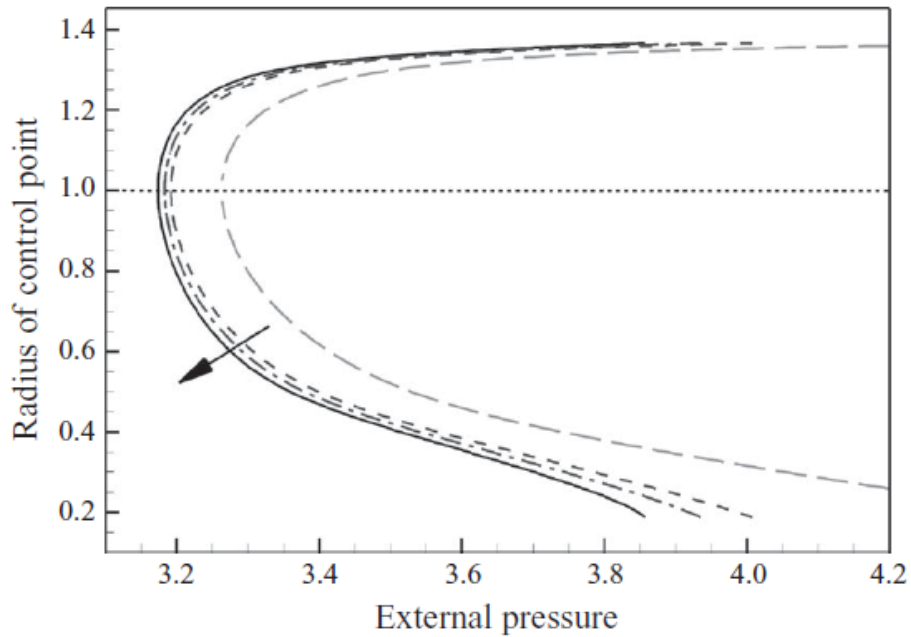
Η αύξηση στο μήκος του αγωγού αλλάζει τον χαρακτήρα της διακλάδωσης με τέτοιο τρόπο ώστε ο λυγισμός τώρα να συμβαίνει μέσω υπερκρίσιμης διακλάδωσης ανεξάρτητα από την παρουσία ή μη ροής (εικόνα 2.12). Η αύξηση στην παράμετρο H μειώνει σε τέτοιο βαθμό την αποσταθεροποιητική επίδραση της αλληλεπίδρασης ρευστού στερεού ώστε σχεδόν για κάθε εξωτερική πίεση να υπάρχει και μία στατικά σταθερή, λυγισμένη θέση ισορροπίας.

Ασταθείς περιοχές

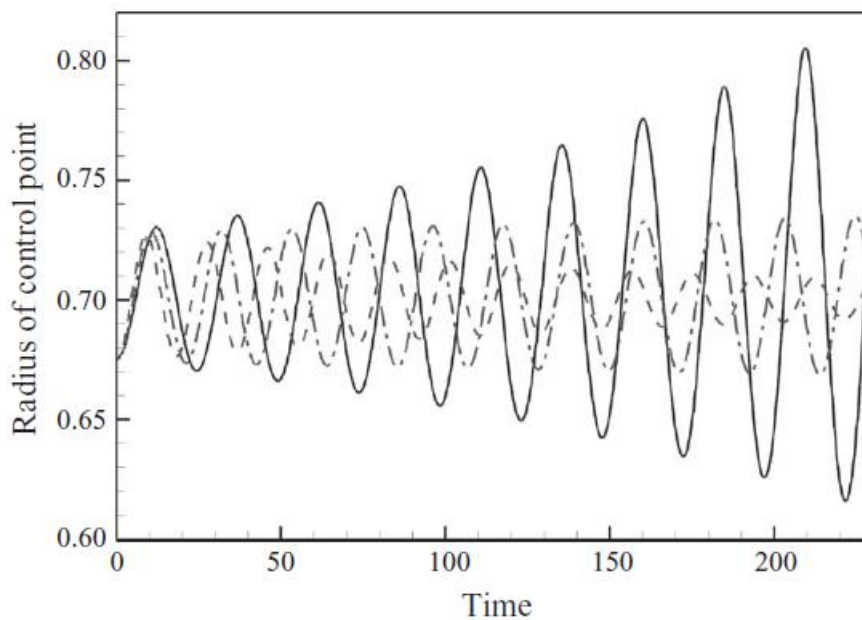
Η εικόνα 2.13 δείχνει τα αποτελέσματα των χρονικά εξαρτώμενων προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία με την παράγραφο **κοντοί αγωγοί-ασταθείς** περιοχές. Εδώ για αρχική θέση ($t=0$), θέτουμε την σταθερή λύση για την οποία $R_{crit}^1=0.675$, και για $t>0$, θέτουμε την P_{ext} στην απαιτούμενη για θέση ισορροπίας $R_{crit}^1=0.7$. Όπως και στους κοντούς αγωγούς, έτσι και εδώ ο αγωγός εκτελεί αποσβένουσες ταλαντώσεις γύρω από τη νέα θέση ισορροπίας για τους μικρότερους Re . Αύξηση στον αριθμό Re οδηγεί σε αύξηση της περιόδου και του πλάτους της ταλάντωσης και σε μείωση του ρυθμού απόσβεσής της. Για $Re=100$, έχουμε ταλάντωση με συνεχώς αυξανόμενο πλάτος.

Η εικόνα 2.14 ακολουθεί την εξέλιξη των αυξανόμενων ταλαντώσεων στην κατάσταση μεγάλου πλάτους. Όπως συνέβη και στην προηγούμενη περίπτωση, ο αγωγός αρχικά πραγματοποιεί ταλαντώσεις τύπου 'Α' με αυξανόμενο πλάτος γύρω από τη μη-αξονομετρική θέση. Καθώς το πλάτος αυξάνει, ο αγωγός πλησιάζει την αξονομετρική θέση με τη σημαντική διαφορά όμως, πως τώρα, η αξονομετρική θέση

δεν αποτελεί σταθερή θέση ισορροπίας λόγω της υπερκρίσιμης μορφής των διακλαδώσεων.



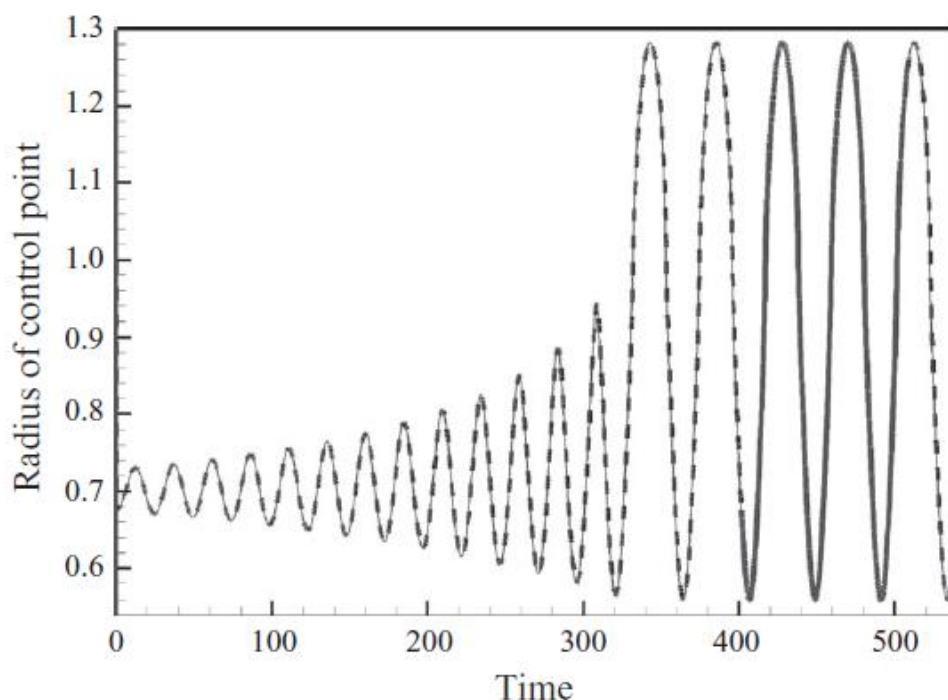
Εικόνα 2.12 Η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για $Re=0,80,90,100$ (αυξανόμενος με τη φορά του βέλους) για αγωγό με $L=20, H=10^5$.



Εικόνα 2.13 Εξέλιξη της ακτίνας ελέγχου R_{ctrl}^1 για $Re=80$ (διακοπτόμενη καμπύλη), $Re=90$ (διακοπτόμενη με τελεία), $Re=100$ (συνεχής). Σε καθε περίπτωση, ως αρχική θέση χρησιμοποιείται η θέση ισορροπίας για $R_{ctrl}^1=0.675$. Για $t>0$, ορίζουμε στην εξωτερική πίεση την τιμή η οποία αντιστοιχεί σε θέση ισορροπίας $R_{ctrl}^1=0.7$.

Μόλις το σύστημα έχει απορροφήσει αρκετή ενέργεια από τη ροή, γίνεται δυνατό να περάσει την αξονομετρική κατάσταση, επιτρέποντας στον αγωγό να περάσει σε ταλαντώσεις τύπου 'B' τις οποίες και διατηρεί εφόσον η ροή παραμείνει ως έχει.

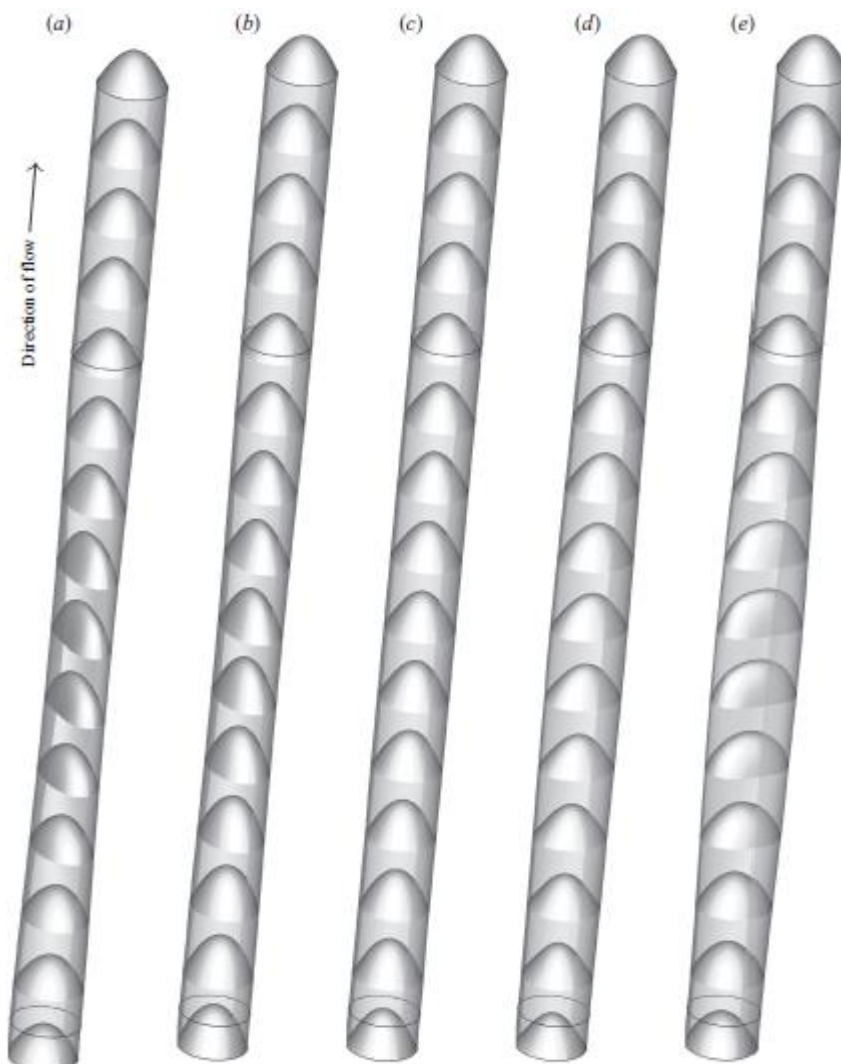
Η **εικόνα 2.15** δείχνει αντιπροσωπευτικές στιγμές από το σχήμα των τοιχωμάτων και των αξονικών προφίλ ταχυτήτων. Οι **εικόνες 2.15 (α) και 2.15 (ε)** αποτυπώνουν τις ακραία λυγισμένες θέσεις με διαφορετικό άξονα να υπόκεινται στη μέγιστη μετατόπιση, όπως συμβαίνει στις ταλαντώσεις τύπου 'B'. Η περιοδική μεταβολή στον όγκο του αγωγού παράγει ισχυρές ταλαντωτικές ροές οι οποίες επηρεάζουν τα προφίλ ταχυτήτων. Σε γενικές γραμμές, το πεδίο ταχυτήτων είναι αρκετά ομαλό, γεγονός που διευκολύνει την επίλυσή του.



Εικόνα 2.14 Εξέλιξη της ακτίνας ελέγχου R_{ctrl}^1 για $Re=100$.

Συγκριτικά με τις αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις των δισδιάστατων μοντέλων των Pedley (1996,1998) και Jensen & Heil (2003) παρατηρούμε κάποιες σημαντικές διαφορές. Σε ένα δισδιάστατο κανάλι (**εικ. 2.1**), οι ακραίες θέσεις στην περιοδική κίνηση του τοιχώματος βρίσκονται μακρύτερα από τη θέση ισορροπίας και έτσι προκύπτει ένα πιο κλειστό κανάλι στην ακραία θέση λυγισμού. Η περιοδική κίνηση ενός σημείου ελέγχου του τοιχώματος γύρω από τη απαραμόρφωτη θέση, με πλάτος A και συχνότητα ω , έτσι ώστε $R_{ctrl}^1 \approx 1 + A \cos(\omega t)$, παράγει περιοδικές αλλαγές (με συχνότητα ω) στον όγκο του ρευστού που βρίσκεται στο κανάλι. Σε αρκετά μεγάλη συχνότητα, παράγεται περιοδική ταλαντωτική ροή που χαρακτηρίζεται από αμβλύ προφίλ ταχυτήτων (**εικ. 2.1**), έτσι ώστε $u \sim A\omega \sin(\omega t)$: αυτές οι ταλαντωτικές ροές επιφέρουν μεγάλες μεταβολές της αξονικής πίεσης,

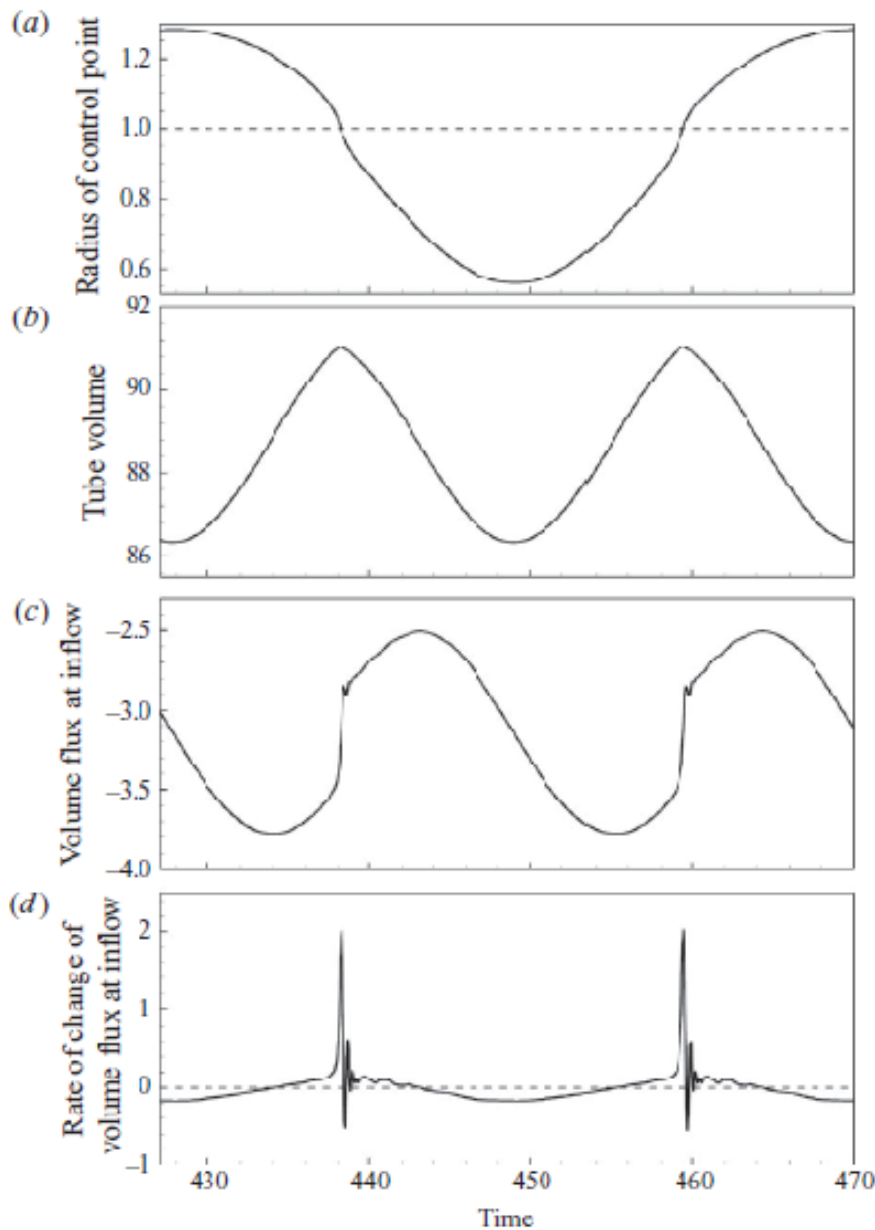
$\frac{\partial p}{\partial x} \sim A\omega^2 \cos(\omega t)$, χωρίς διαφορά φάσης από την κίνηση του τοιχώματος
 (περίπτωση μηδενικής μάζας τοιχώματος).



Εικόνα 2.15 Αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα των προφίλ ταχυτήτων κατά τη διάρκεια μισής περιόδου αυτοδιατηρούμενης ταλάντωσης τύπου ‘B’ για $Re=100$. Οι εικόνες αποτυπώνουν τα 3/4 των τοιχωμάτων του αγωγού και τα προφίλ των αξονικών ταχυτήτων. Οι πυκνές γραμμές υποδεικνύουν τις ακμές των άκαμπτων τμημάτων.

Εν αντιθέσει, σε έναν τρισδιάστατο εύκαμπτο αγωγό που εκτελεί ταλαντώσεις τύπου ‘B’, ο όγκος του ελαχιστοποιείται δύο φορές μέσα σε μία περίοδο και αντίστοιχα μεγιστοποιείται δύο φορές όταν ο αγωγός περνάει από την αξονομετρική θέση (R_{crit}^1). Αυτό διαπιστώνεται από τα διαγράμματα της **εικόνας 2.16**. Σε γενικές γραμμές, η κίνηση του σημείου ελέγχου είναι περίπου αρμονική και ο όγκος του

αγωγού, $V_{\text{tube}}(t)$, σχηματίζει μία έντονη κορυφή (μέγιστο) όταν $R_{\text{ctrl}}^1=1$. Ο αγωγός βρίσκεται σε μία από τις δύο πιο ακραία λυγισμένες θέσεις για $t=450$.



Εικόνα 2.16 Διαγράμματα χρόνου (α) της ακτίνας ελέγχου, $R_{\text{ctrl}}^1(t)$, (β) του όγκου του αγωγού, $V_{\text{tube}}(t)$, (γ) της παροχής όγκου στην είσοδο του upstream άκαμπτου

αγωγού, $V_{\text{up}}(t)$, (δ) το ρυθμό μεταβολής της παροχής του όγκου, $\frac{d\dot{V}_{\text{up}}}{dt}$, κατά τη διάρκεια της αυτοδιατηρούμενης, τύπου ‘B’, ταλάντωσης του αγωγού όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.4**.

Στη στιγμή $t=450$, ο αγωγός αποκτά τον ελάχιστο όγκο, τα τοιχώματα του αγωγού έχουν μηδενική ταχύτητα (ακραία θέση ταλάντωσης) και η παροχή όγκου στην είσοδο του upstream άκαμπτου αγωγού είναι ίση με την μέση παροχή,

$\dot{V}_{up} = \int \vec{u} \cdot \vec{n} dA = -\dot{V}_0 = -\pi$ (η παροχή είναι αρνητική διότι το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n} έχει κατεύθυνση προς τα έξω σε κάθε τοίχωμα, οπότε στην είσοδο θα έχει αντίθετη κατεύθυνση από το διάνυσμα της ταχύτητας \mathbf{u} . Καθώς ο αγωγός ανοίγει και πάλι, η παροχή όγκου $V_{up}(t)$, μεγαλώνει και με πολύ γρήγορο ρυθμό αύξησης φτάνει τη μέση παροχή για $t=460$, στη θέση $Re_{crit}^1=1$. Η απότομη κλίση της παροχής όγκου που φαίνεται από τα διαγράμματα **εικόνα 2.16 (c,d)** στην ουσία φανερώνει μία απότομη επιβράδυνση της ροής σε αυτό το σημείο ($t=460$), η οποία, για να είναι εφικτή, απαιτεί μία μεγάλη κλίση της αξονικής πίεσης παραγόμενη από μία μεγάλη αύξηση πίεσης στην έξοδο του συστήματος (downstream). Η ξαφνική αύξηση της πίεσης, όταν ο αγωγός βρίσκεται στην αξονομετρική θέση, πιθανότατα παράγει παροδικές ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας κατά τη διάρκεια των οποίων αξονομετρικά (προσεγγιστικά) κύματα πίεσης διαδίδονται κατά μήκος του αγωγού.

2.2.4 Συσχέτιση με το θεωρητικό μηχανισμό αστάθειας

Ο μηχανισμός ανάπτυξης των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων των Heil & Waters (2008) βασίστηκε σε μία ανάλυση ενεργειακού ισολογισμού του συστήματος. Σε συμφωνία με την αδιαστατοποίηση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα, η ανάλυση τους προβλέπει πως η αδιάστατη περίοδος της ταλάντωσης πρέπει να κλιμακώνεται:

$$T = \frac{T^* \cdot U}{a} \sim \sqrt{Re \cdot Q} = \frac{Re}{\sqrt{H}} \quad (2.12)$$

Η αναλογία του θεωρητικού κρίσιμου αριθμού Re (δηλαδή αριθμός Re για τον οποίο εμφανίζονται αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις) με την υλική παράμετρο H είναι:

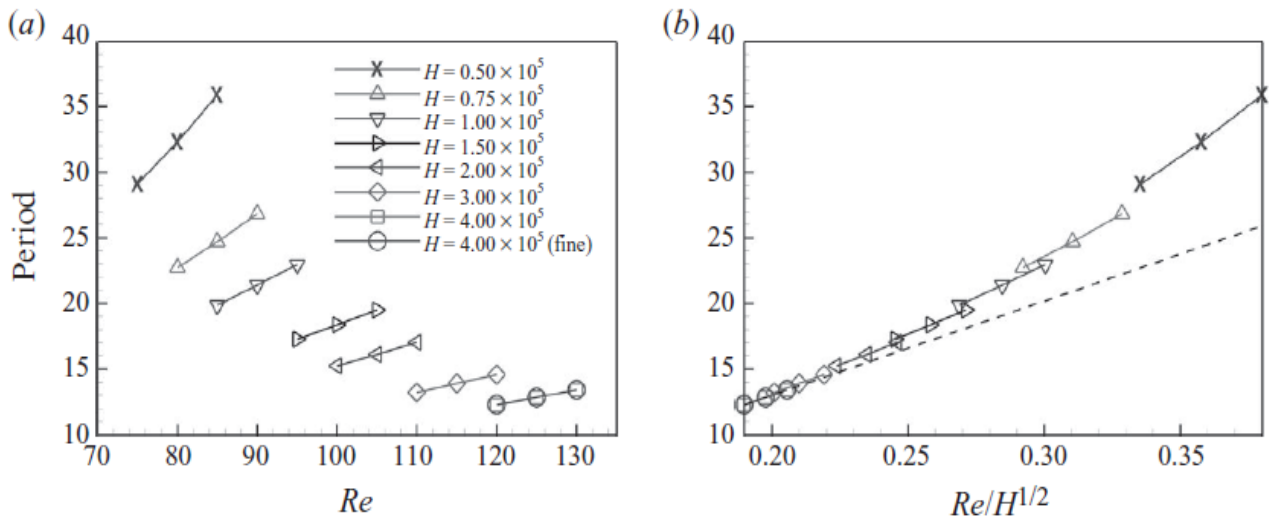
$$Re_{crit} \sim \sqrt{\frac{a}{\mu}} \sqrt{\rho K} = H^{1/4} \quad (2.13)$$

Προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τους παραπάνω θεωρητικούς τύπους πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές του H και για Re κοντά στον Re_{crit} . Για κάθε περίπτωση η προσομοίωση αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων έγινε με τον ίδιο τρόπο των προηγούμενων παραγράφων. Ο ρυθμός αύξησης λ και η περίοδος T βρέθηκαν με μία προσαρμογή Levenberg-Marquardt της ακτίνας Re_{crit}^1 στη συνάρτηση προσαρμογής:

$$R_{fit}(t) = \bar{R} + R \exp(\lambda t) \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right) \quad (4.3)$$

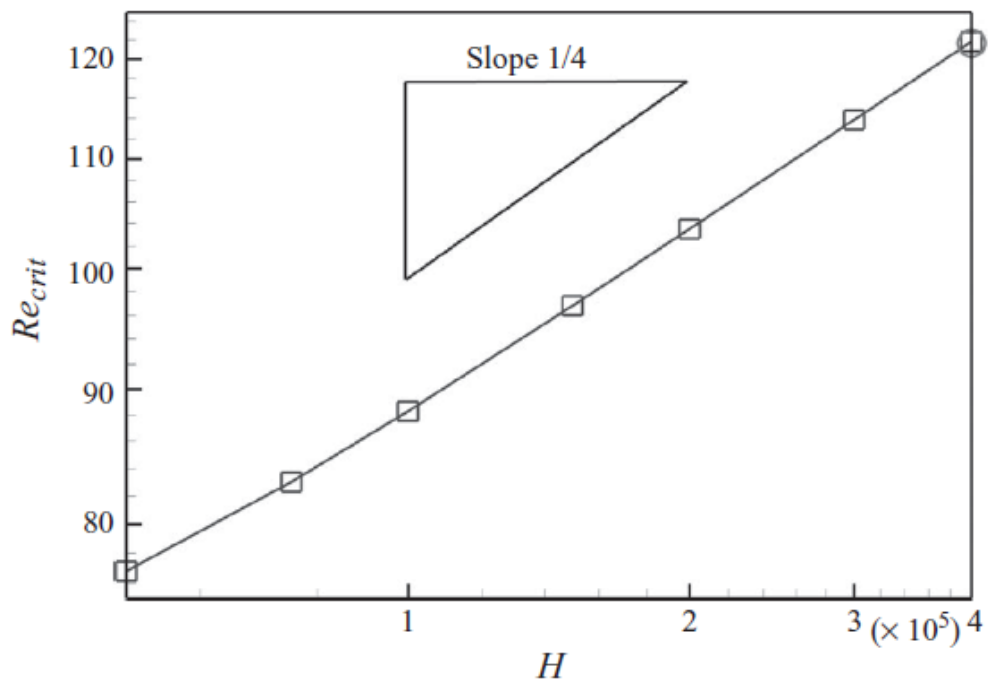
Ο κρίσιμος αριθμός Re_{crit} βρίσκεται από την συνθήκη $\lambda(Re_{crit})=0$.

Η **εικόνα 2.17** δείχνει την περίοδο των ταλαντώσεων συναρτήσει του αριθμού Re για ένα εύρος τιμών H . Τρεις μόνο τιμές Re χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε H , αλλά από αυτές φαίνεται μία γραμμική αύξηση της περιόδου ταλάντωσης όπως υποδεικνύει η εξίσωση 4.1. Επιπλέον, η περίοδος μειώνεται με άυξηση του H , όπως



Εικόνα 2.17 (α) Η περίοδος της ταλάντωσης συναρτήσει του αριθμού Re για ένα εύρος τιμών H . (β) Τα ίδια δεδομένα συναρτήσει του $\frac{Re}{\sqrt{H}}$. Η συνεχής διακοπτόμενη γραμμή είναι προέκταση της καμπύλης για $H=4 \cdot 10^5$. Το υπόμνημα του (α) ισχύει και για το (β).

προβλέπεται από την υπόθεση πως οι ταλαντώσεις εξαρτώνται από μία ισορροπία μεταξύ αδράνειας ρευστού και ακαμψίας τοιχωμάτων. Η **εικόνα 2.17(β)** δείχνει την απόκλιση των προσομοιώσεων από τη θεωρητική πρόβλεψη.



Εικόνα 2.18 Ο κρίσιμος αριθμός Re_{crit} συναρτήσει του H .

Η **εικόνα 2.18** δείχνει το διάγραμμα του κρίσιμου Re_{crit} ως συνάρτηση του H . Ξανά, η συμφωνία με τη θεωρητική πρόβλεψη, $Re_{crit} \sim H^{1/4}$, είναι αρκετά ικανοποιητική και όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της **εικόνας 2.17 (b)** η απόκλιση μειώνεται με αυξανόμενο H .

2.2.5 Συμπεράσματα

Η εργασία των Heil & Boyle στην ουσία αποτελεί την πρώτη αριθμητική προσομοίωση αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων σε τρισδιάστατο εύκαμπτο αγωγό. Οδηγούμενοι από προηγούμενες προβλέψεις, θεωρητικές, πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες, εφήρμοσαν τις απαραίτητες συνοριακές συνθήκες οι οποίες να διευκολύνουν την ανάπτυξη των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων μέσω του μηχανισμού αστάθειας που πρότειναν οι Jensen & Heil (2003). Για αρκετά μεγάλους αγωγούς, η συμπεριφορά του συστήματος βρέθηκε να συμφωνεί ποιοτικά με τις θεωρητικές προβλέψεις, παρόλο που στις περισσότερες περιπτώσεις η συχνότητα των ταλαντώσεων δεν ήταν ιδιαίτερα υψηλή. Πιο συγκεκριμένα, η εξάρτηση της περιόδου της ταλάντωσης και ο κρίσιμος Reynolds από τις παραμέτρους του συστήματος (π.χ του H) βρέθηκε να είναι συνεπής με τις θεωρητικές σχέσεις των Heil & Waters (2008) και Whittaker et al. (2010), οι οποίες βασίστηκαν στον ισολογισμό ενέργειας του αγωγού με δοσμένη την κίνηση των τοιχωμάτων. Εστιάζοντας στις αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις, παρατηρήθηκε πως αυτές ξεκινάνε ως τύπου ‘Α’ ταλαντώσεις γύρω από μία λυγισμένη μη-αξονομετρική θέση ισορροπίας. Στη συνέχεια μεγαλώνουν σε πλάτος μέχρι ένα σημείο όπου το σύστημα ‘ξεπερνά’ την, στατικά ασταθή, αξονομετρική θέση. Η αξονομετρική θέση αποτελεί ασταθή θέση μόνο στους μακρύτερους αγωγούς καθώς η διακλάδωση του λυγισμού αποδείχθηκε πως είναι υπερ-κρίσιμη ενώ αντίθετα, στους κοντούς αγωγούς είναι υπο-κρίσιμες ως επί το πλείστον, επιτρέποντας έτσι στον αγωγό να έχει δύο θέσεις ισορροπίας για την ίδια εξωτερική πίεση (μία λυγισμένη και την αξονομετρική). Μόλις ξεπεράσει την αξονομετρική θέση, το σύστημα ηρεμεί σε μία κατάσταση ταλαντώσεων τύπου ‘Β’ και μεγάλου πλάτους, σε ικανοποιητική συμφωνία με την υπόθεση των Heil & Waters (2006).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μόνο γεωμετρίες αγωγού, αλλά παρόλα αυτά ήταν αρκετές για να φανεί η επιρροή του μήκους του αγωγού στην εξέλιξη των ταλαντώσεων. Επίσης τα μήκη των άκαμπτων τμημάτων παίζουν και αυτά σημαντικό ρόλο στη φύση των ταλαντώσεων.

Το υπολογιστικό μοντέλο είχε ως βασική παράμετρο την ροή, η οποία ήταν καθορισμένη μέσω της παροχής αλλά και επιβαλλόμενη σε συγκεκριμένο σημείο, στο τέλος του downstream άκαμπτου αγωγού. Αυτή η επιλογή έγινε διότι βάσει του μηχανισμού αστάθειας των Heil & Jensen (2003), η συγκεκριμένη θέση της υποθετικής αντλίας, καθώς και το μήκος των άκαμπτων τμημάτων μπορούν να κάνουν το σύστημα πιο ευαίσθητο στην εμφάνιση αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων. Παρόλα αυτά, εάν τοποθετήσουμε την αντλία στο upstream τμήμα του αγωγού ή/και αλλάξουμε τη σχέση μήκους των upstream και downstream τμημάτων, και πάλι μπορεί να αναπτυχθούν αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις οι οποίες όμως πλέον δε θα ερμηνεύονται με το μηχανισμό αστάθειας Heil & Jensen (2003).

Εφόσον ο μηχανισμός αστάθειας ερευνά ταλαντώσεις που επηρεάζονται από μία δυναμική σχέση μεταξύ αδράνειας ρευστού και ακαμψίας αγωγού, η αδράνεια των τοιχωμάτων δε συμπεριλήφθηκε στο μοντέλο. Αυτή η παραδοχή είναι πολύ πιθανό να δικαιολογείται για πολύ ελαφρά και λεπτά τοιχώματα. Από την άλλη όμως, η εισαγωγή της μάζας του αγωγού στο μοντέλο (εφόσον είναι σχετικά μεγαλύτερη του μηδενός) θα προκαλέσει διαφορά φάσης στην ταλάντωση της ροής και των τοιχωμάτων με αποτέλεσμα πιο περίπλοκα φαινόμενα και πιθανότατα την ανάπτυξη δύο ειδών ταλαντώσεων με διαφορετικό πλάτος και περίοδο ταλάντωσης (Luo & Pedley 1996 βλ. **εικόνα 2.3 (d)**).

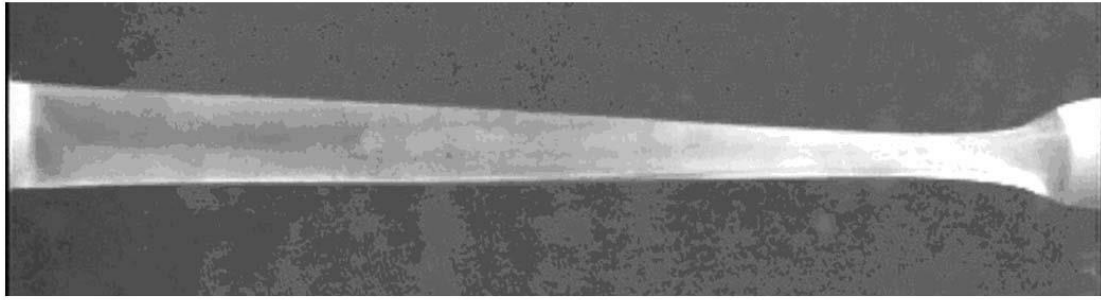
Επιπλέον, σε όλες τις προσομοιώσεις η ροή ήταν αξονομετρική, ανεξάρτητα από τις διαταραχές στην ταχύτητα και την κατεύθυνση λόγω της μετατόπισης των τοιχωμάτων. Για τους αριθμούς Re που χρησιμοποιήθηκαν αυτή η υπόθεση φαντάζει ως αρκετά λογική. Στην πραγματικότητα όμως, τόσο χαμηλοί Reynolds είναι δύσκολο να επιτευχθούν πειραματικά (ακόμα και για ρευστό με μεγαλύτερο ιξώδες), και σε μεγαλύτερους Re είναι αρκετά πιθανό να μην έχουμε συμμετρία στη ροή, γεγονός το οποίο προσθέτει ακόμα ένα βαθμό επιρροής στο σύστημα όπως έδειξαν οι Kouanis & Mathioulakis (1999).

Το ίδιο εργαστήριο (Yiasemides, Argyris & Mathioulakis, 2016) πως η εναλλασσόμενη ροή κατάντι του λαιμού που δημιουργείται λόγω της χαμηλής διατοιχωματικής πίεσης, είναι υπεύθυνη για την δημιουργία των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων και όχι κάποια ταλαντωτική ροή στην είσοδο του συστήματος, καθώς αυτή ήταν απύσχα. Η διάταξη που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία είναι η κλασσική συσκευή Holt, συνεπώς η παροχή επιβάλλεται μέσω της βαρύτητας και όχι μέσω κάποιας αντλίας.

Πιο συγκεκριμένα, οι Mathioulakis, Argyris και Yiasemides (2016) πραγματοποίησαν PIV μετρήσεις ταχύτητας για δύο διαφορετικές καταστάσεις του αγωγού, ώστε να καταγράψουν το δισδιάστατο πεδίο ταχυτήτων στο σημείο έντονης κατάρρευσης του αγωγού, δηλαδή στο λαιμό. Στην πρώτη κατάσταση, ο αγωγός ταλαντώνεται μη-περιοδικά ενώ στη δεύτερη έχει περάσει στη φάση των αυτοδιατηρούμενων περιοδικών ταλαντώσεων.

Στην πρώτη κατάσταση, φαίνεται πως λίγο πριν την έναρξη των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων το σημείο έντονης κατάρρευσης του αγωγού παίρνει τη μορφή ενός 'διαχύτη' με γωνία που ξεπερνά τις 20° (βλ. **εικόνα 2.19**). Σε αυτήν την κλίση, η ροή διαχωρίζεται από την αξονική και εναλλάσσεται μεταξύ των απέναντι τοιχωμάτων πυροδοτώντας με αυτό τον τρόπο έναν πιθανό μηχανισμό δημιουργίας αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων.

Στη δεύτερη κατάσταση, δύο βασικά συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν από την αποτελέσματα του πεδίου ταχυτήτων της **εικόνας 2.20**. (1) Υπάρχει μία περιοχή γύρω από τον άξονα συμμετρίας του αγωγού με πρακτικά μηδενική ταχύτητα ρευστού η οποία δεν είναι στάσιμη αλλά αντιθέτως, ταλαντώνεται κατά την κατεύθυνση της αξονικής ροής. Αυτή η περιοχή συμπίπτει με το λαιμό του αγωγού, όπου τα απέναντι τοιχώματα πλησιάζουν μεταξύ τους και έτσι αναγκάζουν το ρευστό να κινηθεί προς τα πλάγια σχηματίζοντας τα δύο γνωστά jet streams. (2) Εμφανίζεται ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση της επιβαλλόμενης ροής (προς τα πίσω) όταν ο αγωγός επιστρέφει στην αξονομετρική θέση του. Αυτή η μεταβολή της ροής μπορεί



(a)

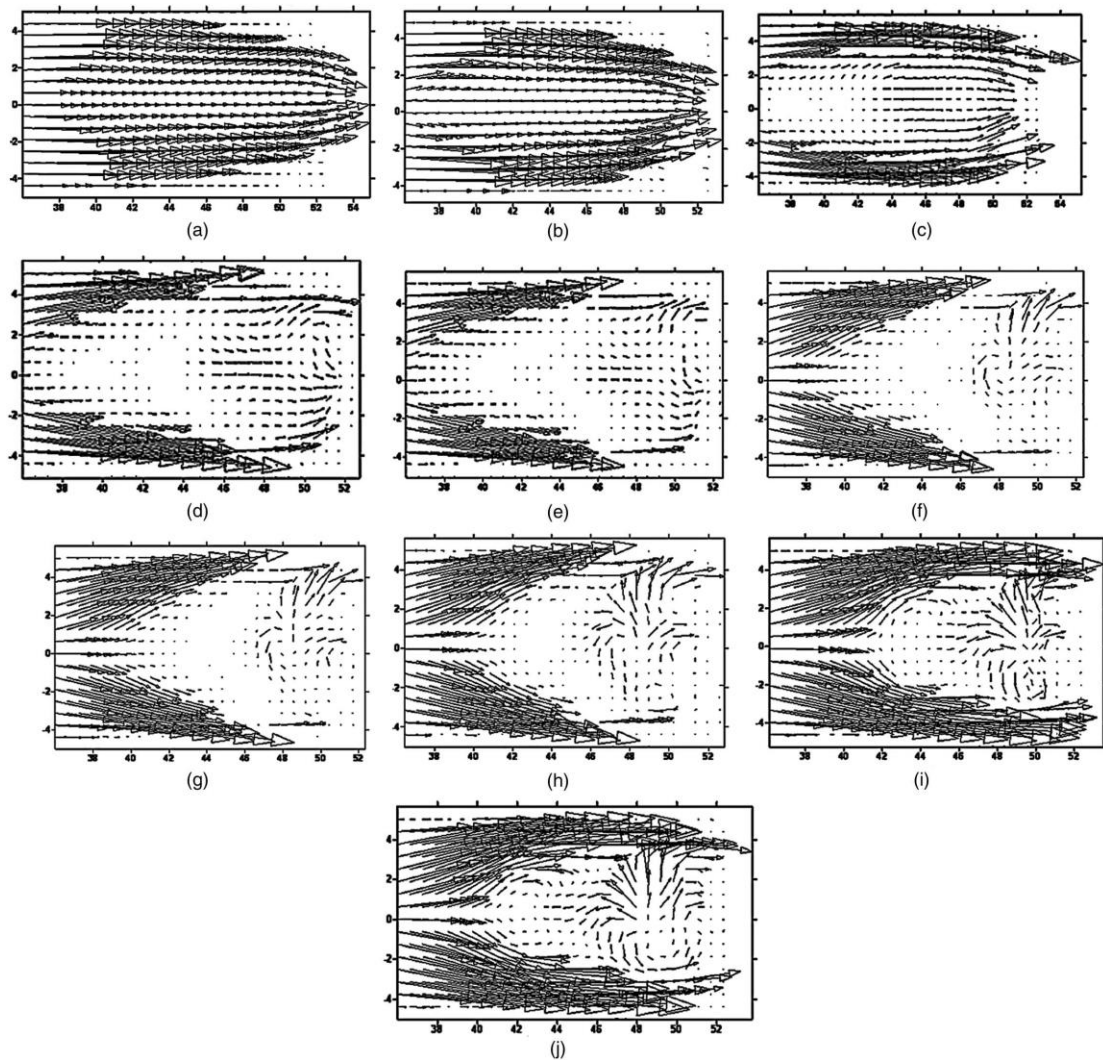


(b)

Εικόνα 2.19 Δύο όψεις του παραμορφωμένου αγωγού: (a) κάθετο επίπεδο, (b) οριζόντιο επίπεδο (κάτοψη αγωγού). Κατεύθυνση ροής από αριστερά προς τα δεξιά. (Yasemides, Argyris & Mathioulakis, 2016)

να αποδοθεί στην κίνηση των τοιχωμάτων, τα οποία καθώς απομακρύνονται προς την αξονομετρική θέση δημιουργούν μια τοπική υποπίεση και ‘ρουφάνε’ το ρευστό κατά το μήκος της τροχιάς τους. Η ταχύτητα της ροής των jets φτάνει τέσσερις φορές την ταχύτητα της μέσης αξονικής ροής.

Συνοπτικά μπορούμε να πούμε πως η κάθετη ροή που εμφανίζεται στην περιοχή του λαιμού, όταν η εσωτερική πίεση πέσει τόσο ώστε η παραμορφωμένη περιοχή να σχηματίζει γωνία μεγαλύτερη των 20° , είναι πιθανότατα υπεύθυνη για την έναρξη των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων. Από εκεί και πέρα, η περιοδική κίνηση των τοιχωμάτων συμπαρασύρει μέρος της ροής λόγω τοπικής υποπίεσης και η κάθετη στα τοιχώματα ροή που δημιουργείται συνεισφέρει στη διατήρηση της κίνησης των τοιχωμάτων μέσω μεταφοράς της ορμής της σε αυτά. Διαφαίνεται δηλαδή, ένας μηχανισμός τροφοδοσίας της κίνησης των τοιχωμάτων μέσω μεταφοράς ενέργειας από το ρευστό παρόμοιος με αυτόν των Jensen & Heil (2003), με τη διαφορά ότι εδώ η ροή στην είσοδο του αγωγού είναι ομαλή και η εναλλασσόμενη ροή δημιουργείται κατάντι του λαιμού του αγωγού. Φυσικά να τονίσουμε πως είναι διαφορετικές οι συνθήκες της ροής στις δύο εργασίες: Στην εργασία των Heil & Boyle (2010), όπου επιβεβαιώνουν τον μηχανισμό των Heil & Jensen η ροή επιβάλλεται με αντλία στο τέλος του downstream άκαμπτου τμήματος ενώ στην εργασία των Μαθιουλάκη, Γιασεμίδη και Αργύρη επιβάλλεται μέσω της βαρύτητας.



Εικόνα 2.20 Πεδίο ταχυτήτων στο οριζόντιο επίπεδο για δέκα στιγμές μίας περιόδου κατά τη διάρκεια αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων. (Yasemides, Argyris, Mathioulakis, 2016)

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η παρούσα πειραματική μελέτη χωρίζεται σε δύο μέρη, σε καθένα από τα οποία υλοποιείται μια διαφορετική υδραυλική διάταξη, με κοινό στοιχείο φυσικά τον εύκαμπτο αγωγό. Και στα δύο πειράματα, η παροχή επιβάλλεται μέσω ογκομετρικής αντλίας και διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από την πίεση που επικρατεί στο σύστημα. Αυτή η επιλογή πρωτίστως έγινε με βασικό στόχο την αναπαραγωγή του υπολογιστικού μοντέλου των Matthias Heil & Jonathan Boyle (2010) σε μία πραγματική πειραματική διάταξη. Λάβαμε ως κριτήριο τους λόγους που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία και προσπαθήσαμε να δημιουργήσουμε τις ανάλογες συνθήκες ροής. Για αυτό το σκοπό, στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε αντλία προοδευτικής κοιλότητας η οποία προσφέρει μικρή σταθερή παροχή, ανεξάρτητη των πιέσεων, με πολύ χαμηλή πάλμωση. Η πάλμωση της ροής αποτέλεσε ένα σημαντικό εμπόδιο στη συγκεκριμένη πειραματική μελέτη καθώς η παρουσία της επηρεάζει άμεσα την ταλαντωτική συμπεριφορά του εύκαμπτου αγωγού. Παρ' όλα αυτά, μία επιβαλλόμενη πάλμωση στο σύστημα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς πολλές από τις ιατρικές εφαρμογές στις οποίες έχουμε αναφερθεί εντοπίζονται στο κυκλοφορικό σύστημα, όπου φυσικά το ρόλο της αντλίας παίζει η καρδιά επιβάλλοντας μία καθαρά παλμική ροή. Για αυτό το λόγο, το δεύτερο πείραμα έχει ως σκοπό να μελετήσει τη συμπεριφορά του αγωγού κάτω από συνθήκες σταθερής παλμικής ροής μέσω περισταλτικής αντλίας.

Κεφάλαιο 3

Πείραμα 1

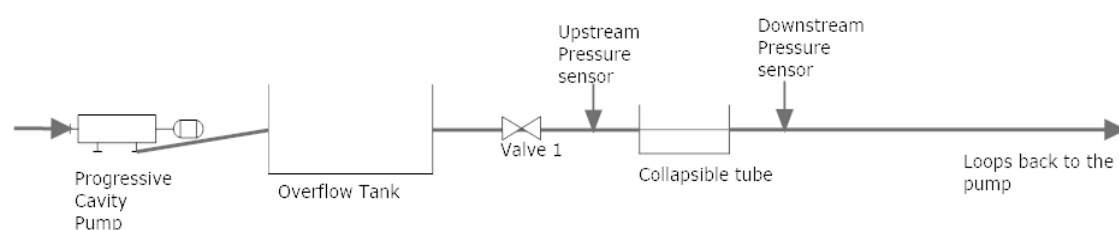
3.1 Περιγραφή πειράματος

Σε αυτό το πείραμα βασικός σκοπός ήταν η πειραματική υλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου των Matthias Heil & Jonathan Boyle και η διερεύνηση του μηχανισμού Jensen & Heil (2003), καθώς φυσικά, και οι προεκτάσεις και βελτιώσεις αυτού (Heil & Waters (2006;2008), Heil & Boyle (2010)). Δυστυχώς το ακριβές υπολογιστικό μοντέλο ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθεί κυρίως για δύο λόγους. Όπως είδαμε πιο πάνω, η υλική παράμετρος H κινείται μεταξύ των τιμών 10^4 και 10^5 , τιμές που πρακτικά είναι πολύ μικρές καθώς είτε απαιτούν πολύ μικρό Re ($H=Re/Q=\rho a^2 K/\mu^2$), είτε πολύ μικρή ακαμψία αγωγού K . Αύξηση του ιξώδους του ρευστού να μεν βοηθάει αλλά μέχρι ένα σημείο στο οποίο και πάλι δεν πετυχαίνουμε τους εξαιρετικά μικρούς Reynolds της υπολογιστικής μελέτης. Ένας δεύτερος λόγος είναι ο λόγος πάχους διαμέτρου του εύκαμπτου αγωγού καθώς δε διαθέταμε τόσο λεπτό αγωγό στο εργαστήριο. Σε κάθε περίπτωση, το πείραμα διεξήχθη με τα δικά του χαρακτηριστικά συστήματος, ενώ όσον αφορά την υπόλοιπη διάταξη, προσπαθήσαμε να είμαστε όσο το δυνατόν πιο κοντά στην υπολογιστική μελέτη.

3.1.1 Πειραματική διάταξη και όργανα μετρήσεων

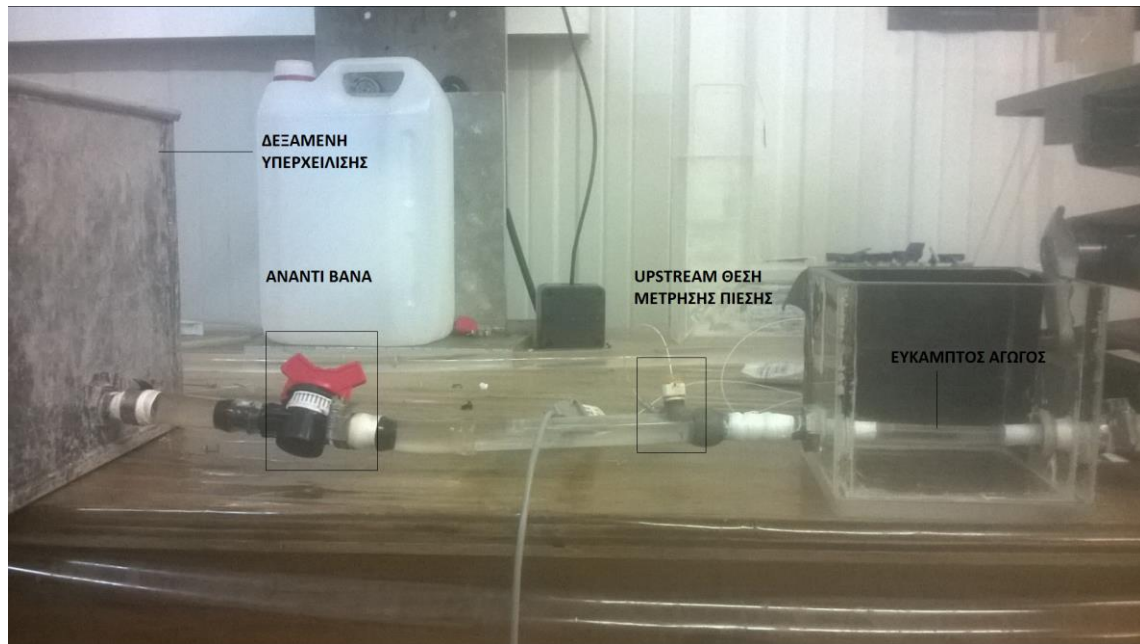
Το βασικότερο τμήμα της διάταξης είναι προφανώς ο εύκαμπτος αγωγός (εικόνα 3.3). Οι χαρακτηριστικές διαστάσεις του είναι: (1) Μήκος αγωγού $L=70\text{mm}$, (2) εσωτερική διάμετρος αγωγού $d=8\text{mm}$, (3) πάχος αγωγού $h=1\text{mm}$, (4) συνεπώς εξωτερική διάμετρος $D=10\text{mm}$. Είναι κατασκευασμένος από ελαστομερές υλικό Sylgard 184 της εταιρείας Dow Corning και επεξεργασμένος σε μικρή торνευτική εργαλειομηχανή του εργαστηρίου. Κατάντι (downstream) και ανάντι του αγωγού (upstream)¹, βρίσκονται οι άκαμπτοι αγωγοί, κατασκευασμένοι από κοινό πλαστικό εσωτερικής διαμέτρου 15 mm και λόγου μήκους $L_{\text{down}}/L_{\text{up}}=8$, μέσα από τους οποίους διακινείται το ρευστό. Επίσης, 10 εκατοστά upstream του εύκαμπτου αγωγού τοποθετείται μια μικρή χειροκίνητη βάνα με την οποία μεταβάλλουμε την εσωτερική πίεση του εύκαμπτου αγωγού. Το downstream άκαμπτο τμήμα καταλήγει στην αντλία προοδευτικής κοιλότητας (εικόνα 3.6), η οποία παρέχει τη σταθερή παροχή της διάταξης. Τέλος, η αντλία συνδέεται με μία δεξαμενή υπερχειλίσσης όπου καταλήγει το ρευστό, και μέσω υπερχειλίσσης περνάει στο upstream άκαμπτο τμήμα της διάταξης (εικόνα 3.2). Το ρευστό που χρησιμοποιούμε είναι νερό στους 20°C , πυκνότητας $\rho=1000\text{kg/m}^3$ και δυναμικής συνεκτικότητας $\mu=0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$. Ο εύκαμπτος αγωγός τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση, σε ορθογωνικό δοχείο, κατασκευασμένο από Plexiglass, $120\times 120\times 100\text{ mm}$ και πάχους 10mm (εικόνα 3.4,3.5). Για να στηριχθεί ο αγωγός, ανοίξαμε δύο οπές στο δοχείο μέσα από τις οποίες γίνεται η σύνδεσή του με τα upstream και downstream άκαμπτα τμήματα της διάταξης. Το δοχείο είναι ανοικτό από πάνω και έτσι η εξωτερική πίεση που επικρατεί είναι η ατμοσφαιρική. Επιπλέον στη μία πλευρά του δοχείου, τοποθετήσαμε μαύρη ταινία, έτσι ώστε να έχουμε ικανοποιητική αντίθεση κατά τη διάρκεια των λήψεων με κάμερα. Για τη σύνδεση των επιμέρους τμημάτων χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικοί σφιγκτήρες, αφού πρώτα έγινε στεγανοποίηση με Teflon για να αποφευχθούν διαρροές.

Schematic diagram-Experiment 1

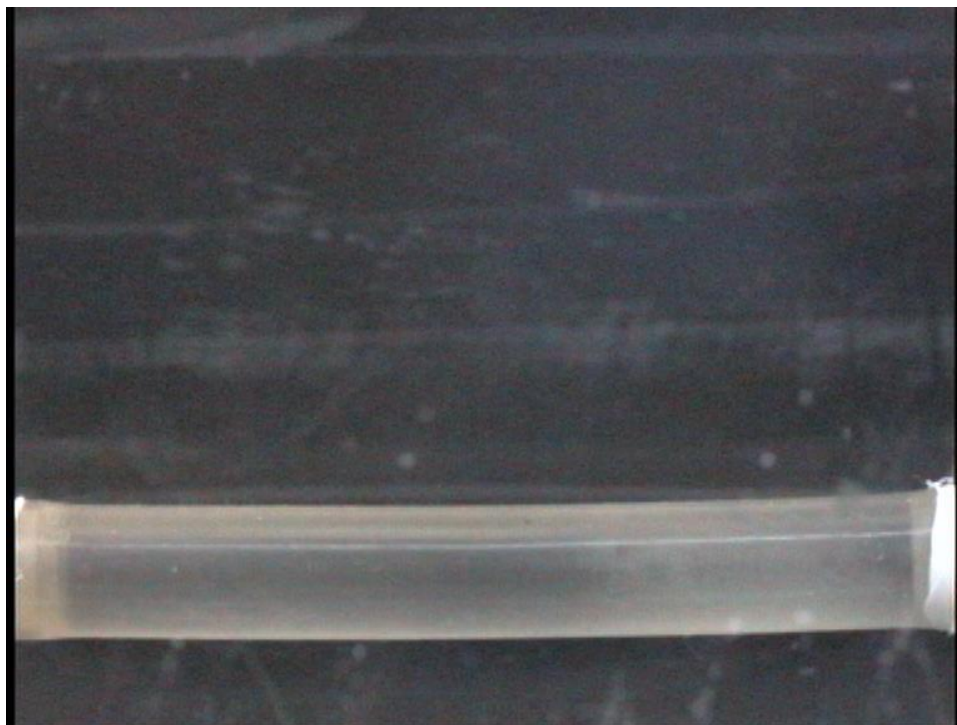


Εικόνα 3.1 Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης του πρώτου πειράματος.

¹ Καθ'όλη την έκταση της εργασίας θα χρησιμοποιούμε τους όρους upstream και downstream αντί για ανάντι και κατάντι αντίστοιχα.



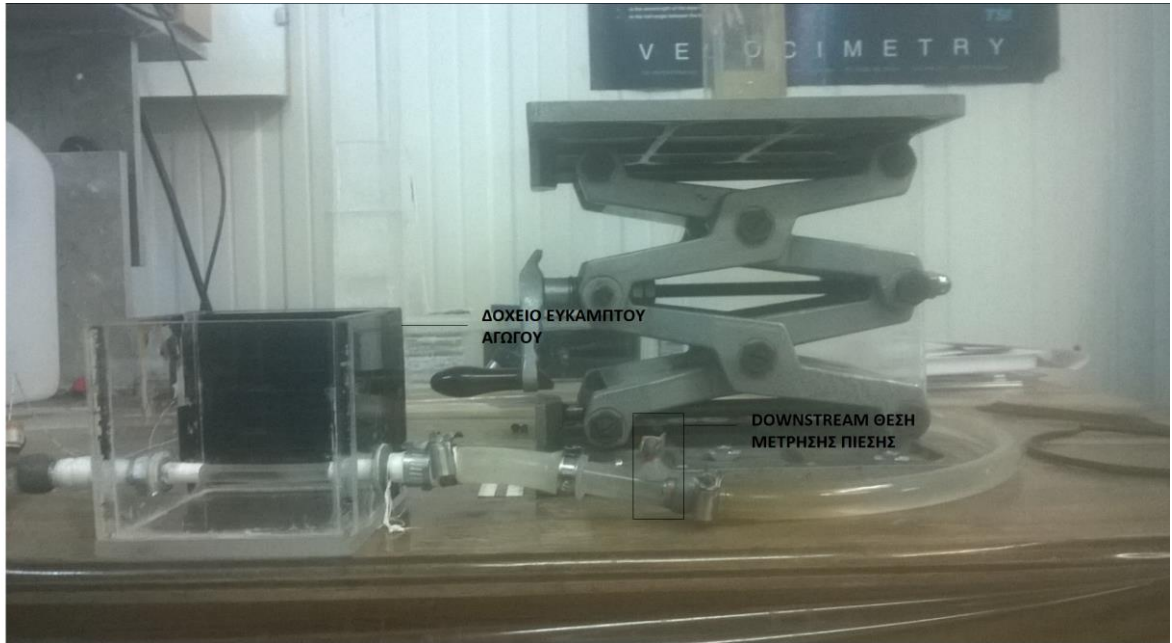
Εικόνα 3.2 Upstream τμήμα της διάταξης. Από τα αριστερά στα δεξιά βλέπουμε την δεξαμενή υπερχείλισης, τη βάνα ελέγχου της εσωτερικής πίεσης, το upstream σημείο μέτρησης της πίεσης και το δοχείο μέσα στο οποίο στηρίζεται ο εύκαμπτος αγωγός.



Εικόνα 3.3 Εύκαμπτος αγωγός σε ηρεμία (απαραμόρφωτη θέση).



Εικόνα 3.4 Plexiglass δοχείο, μέσα στο οποίο στηρίζεται ο εύκαμπτος αγωγός. Ο αγωγός είναι εκτεθειμένος σε ατμοσφαιρική πίεση. Πίσω από τον αγωγό φαίνεται το μαύρο background που χρησιμοποιήσαμε για καλύτερες λήψεις.



Εικόνα 3.5 Δοχείο εύκαμπτου αγωγού και downstream τμήμα δικτύου, το οποίο καταλήγει στην αντλία. Δεξιά του δοχείου μπορεί να παρατηρηθεί το σημείο μέτρησης της downstream πίεσης.



Εικόνα 3.6 Αντλία προοδευτικής κοιλότητας. Αποτελεί την κατάληξη του downstream τμήματος.

Όργανα μετρήσεων και λογισμικό

Χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα:

Αντλία προοδευτικής κοιλότητας

Αντλία προοδευτικής κοιλότητας (Progressive Cavity Pump) της εταιρείας PCM της σειράς 011M6F. Αποτελείται από δύο εσωτερικά ελικοειδή γρανάζια, εκ των οποίων το ένα περιστρέφεται (ρότορας) και το άλλο παραμένει ακίνητο (στάτορας). Με την κίνηση του ρότορα καλύπτονται τα διάφορα κενά που υπάρχουν μεταξύ των δύο γραναζιών και έτσι το ρευστό εξαναγκάζεται σε αξονική μετατόπιση.



Εικόνα 3.7 Αντλία PCM, series 011M6F, προοδευτικής κοιλότητας (progressive cavity pump).

Κάμερα

Χρησιμοποιήθηκε η Sony CCD-IRIS με microlens φακό, ανάλυσης 768x576 pixels και συχνότητας λήψης 25 fps.

Αισθητήρας πίεσης Millar

Καθετήρας πίεσης που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των πιέσεων upstream και downstream του εύκαμπτου αγωγού (δε λάβαμε ταυτόχρονες μετρήσεις upstream και downstream). Μετράει ολική πίεση, είναι σταθερής ευαισθησίας και διαθέτει μία διακριτική ικανότητα περίπου 0.5 mmH₂O.

ADC Spider

Analog to digital converter Spider, ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό σήμα του αισθητήρα σε ψηφιακό.

Λογισμικό Catman

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογιστή για την αποθήκευση του σήματος πίεσης.

Λογισμικό Pinnacle Studios

Χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος εξόδου της κάμερας και την απομόνωση των επιθυμητών frames.

Matlab (Mathworks)

Το βασικό λογισμικό επεξεργασίας των σημάτων πίεσης, της επεξεργασίας των εικόνων και γενικότερα του μεγαλύτερου όγκου των αποτελεσμάτων που προκύπτουν στην εργασία.

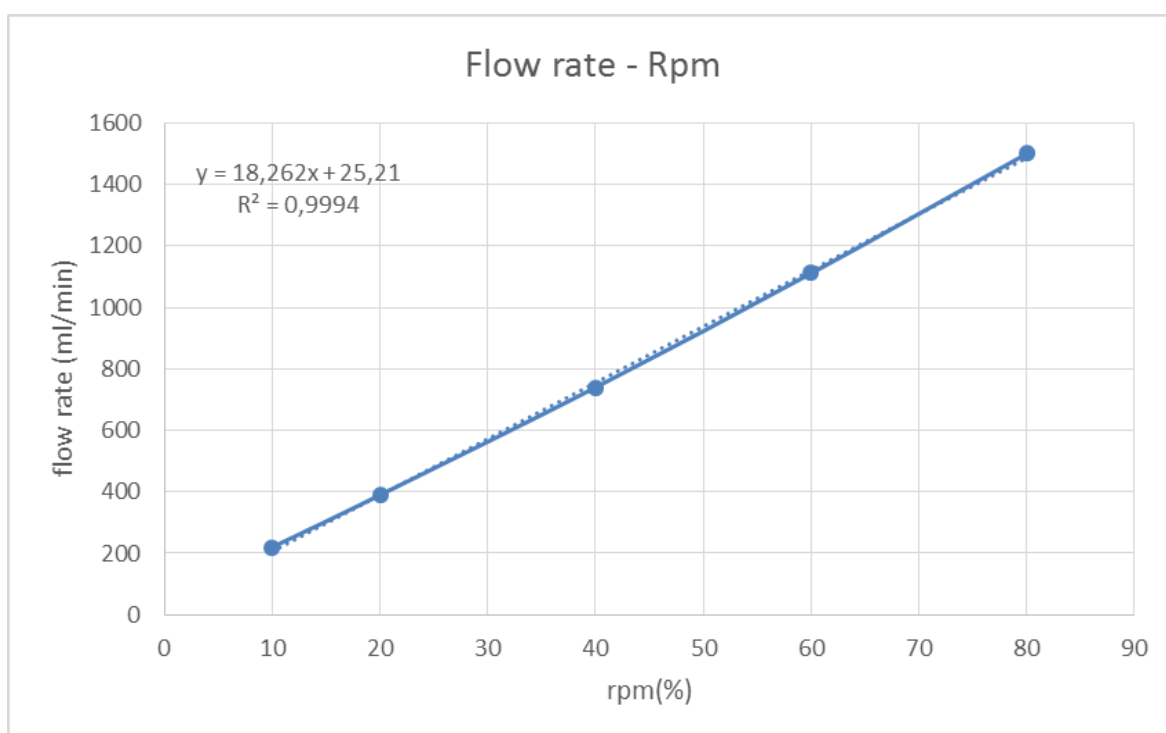
Excel

Το γνωστό λογισμικό spreadsheet της Microsoft για τη δημιουργία μερικών από τα διαγράμματα της εργασίας.

3.1.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Οι πειραματικές μετρήσεις αφορούν την καταγραφή των πιέσεων upstream και downstream του εύκαμπτου αγωγού, την απεικόνιση του σχήματος του αγωγού, καθώς και την καταγραφή των χαρακτηριστικών της ταλάντωσης των τοιχωμάτων του αγωγού (είδος ταλάντωσης, πλάτος ταλάντωσης, περίοδος ταλάντωσης), όποτε αυτή εμφανίζεται, για μεταβαλλόμενη εσωτερική πίεση σε διάφορες παροχές.

Πρώτη εργασία του πειράματος ήταν η δημιουργία της καμπύλης παροχής της αντλίας και η εξέταση της σταθερότητας της παροχής ακόμα και σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης της διάταξης. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιήθηκε βαθμονομημένο ογκομετρικό δοχείο στο οποίο κατέληγε το νερό και με ένα απλό χρονόμετρο μετρούσαμε σε πόσα δευτερόλεπτα διακινούνταν 500 ml νερού. Η αντλία διαθέτει ενσωματωμένο inverter που επιτρέπει τη ρύθμιση των στροφών και κατ' επέκταση της παροχής. Μετρήσαμε το χρόνο που διακινούνται 500 ml δύο φορές για τις επιλεγμένες στροφές, για διάφορες στροφές της αντλίας. Σε κάθε δεύτερη μέτρηση μεταβάλλαμε με τυχαίο τρόπο την εσωτερική πίεση της διάταξης μέσω της βάνας για να διαπιστώσουμε εάν η παροχή μένει σταθερή. Η διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων για συγκεκριμένες στροφές ήταν μικρότερη του 1% όποτε δεχόμαστε ότι η αντλία για συγκεκριμένες στροφές διατηρεί σταθερή παροχή ανεξάρτητα από την εσωτερική αντίσταση του δικτύου. Η καμπύλη που προέκυψε είναι η εξής (εικ. 3.8):

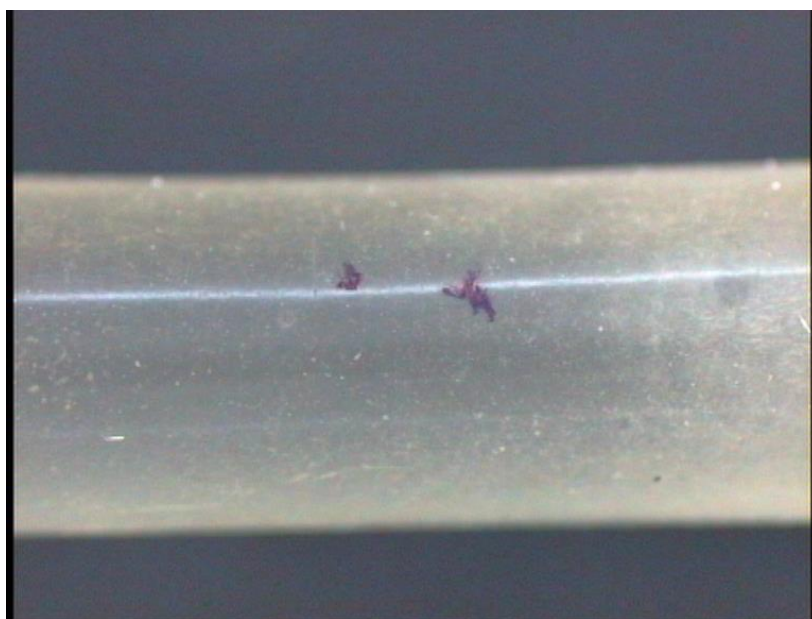


Εικόνα 3.8 Η καμπύλη παροχής στροφών της αντλίας που προέκυψε από 5 πειραματικά σημεία. Με διακεκομμένη γραμμή είναι η ευθεία αναδρομής.

Παρατηρούμε πως τα σημεία πρακτικά σχηματίζουν ευθεία καθώς ο δείκτης R^2 είναι πολύ κοντά στη μονάδα, γεγονός που αναμέναμε καθώς ο κατασκευαστής δίνει ευθεία καμπύλη. Με βάση λοιπόν την εξίσωση αναδρομής που προκύπτει $y=18.262x+25.21$ υπολογίζουμε οποιαδήποτε παροχή επιθυμούμε.

Στη συνέχεια, διερευνούμε ποιοτικά τη συμπεριφορά του συστήματος για διάφορες παροχές και θέσεις της βάνας έχοντας ως κύριο ενδιαφέρον την εύρεση των συνθηκών που οδηγούν τον εύκαμπτο αγωγό σε αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις. Η διαδικασία αυτή γίνεται με συστηματικό τρόπο έτσι ώστε να εξετάσουμε όσες

περισσότερες περιπτώσεις μπορούμε. Έτσι, ξεκινάμε από τις μικρότερες δυνατές στροφές, ανεβαίνουμε κατά 5% rpm, και για κάθε παροχή μετακινούμε με πολύ μικρά βήματα τη βάνα. Παρατηρούμε τον αγωγό με τη βοήθεια της κάμερας έτσι ώστε να έχουμε μία πολύ κοντινή λήψη του εύκαμπτου αγωγού (**εικ. 3.9**). Βρέθηκε πως οι παροχές για τις οποίες παρατηρούνταν ταλάντωση ήταν οι πιο χαμηλές από αυτές που μπορούσε να προσφέρει η αντλία (**πίνακας 3.1**, βλ. **επίσης πίνακα 3.2**).



Εικόνα 3.9 Η κοντινή λήψη της κάμερας απεικονίζει μόλις 22 mm του συνολικού μήκους του αγωγού.

rpm(%)	flow rate (ml/min)
10	208,5
15	300,145
20	391,79

Πίνακας 3.1 Οι παροχές για τις οποίες κάτω από συγκεκριμένες εσωτερικές πιέσεις είχαμε εμφάνιση ταλαντώσεων.

Αφού εντοπίσαμε το εύρος των παροχών στο οποίο εμφανίζονται ταλαντώσεις, σημειώνουμε πάνω στη βάνα, με τη βοήθεια ενός υποδεκάμετρου, τις θέσεις για τις οποίες έχουμε ταλάντωση. Τελικά ορίζουμε 7 θέσεις, από την πλήρη ανοικτή βάνα (position 0) μέχρι την θέση 6 (position 6) όπου τα τοιχώματα του αγωγού έχουν έρθει σε επαφή. Οι ποιοτικές παρατηρήσεις συνοψίζονται στον **πίνακα 3.2**. Στις παροχές 300 ml/min και 390 ml/min ήδη από τη θέση 5 έχουμε επαφή τοιχωμάτων, οπότε σε αυτές τις παροχές δεν εξετάζουμε τη θέση 6. Στην υπόλοιπη εργασία χρησιμοποιούμε τις θέσεις της βάνας ως σημείο αναφοράς και τις

αντιστοιχούμε με τις μέσες πιέσεις που επικρατούν upstream και downstream του αγωγού για κάθε παροχή. Προφανώς, με μεταβολή της παροχής αυξάνονται οι απώλειες και έχουμε μεγαλύτερη πτώση πίεσης κατά μήκος του δικτύου, αλλάζει όμως και το σχήμα του αγωγού που όπως ήδη έχουμε δει επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις πιέσεις upstream και downstream.

Για να συνοψίσουμε, τα αποτελέσματα που ακολουθούν αποκτήθηκαν ακολουθώντας την εξής διαδικασία: (1)Ξεκινάμε από την παροχή που αντιστοιχεί στα 10 rpm. (2)Μεταβάλλουμε τη θέση της βάνας από τη θέση 0 μέχρι τη θέση 6. (3)Για κάθε θέση βιντεοσκοπούμε τον εύκαμπτο αγωγό και λαμβάνουμε την ένδειξη πίεσης πρώτα upstream και μετά (4)downstream με τη βοήθεια του αισθητήρα Millar, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το ADC Spyder και τελικά με τον υπολογιστή στον οποίο έχουμε εγκατεστημένο το λογισμικό Catman. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για τις επόμενες δύο παροχές. Όλη η επεξεργασία των μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένου και του image processing έγιναν στη MATLAB. Η απομόνωση των εικόνων που μας ενδιέφεραν έγιναν με το λογισμικό Pinnacle Studios.

Q(ml/min)	Position of valve							
	0	1	2	3	4	5	6	
210	open	open	open	oscillation	oscillation	buckled	strongly buckled	
300	open	open	open	oscillation	oscillation	strongly buckled	not investigated	
390	open	open	open	buckled	buckled	strongly buckled	not investigated	

Πίνακας 3.2 ποιοτική διερεύνηση του εύκαμπτου αγωγού με τη βοήθεια της κάμερας.

3.2 Αποτελέσματα

3.2.1 Συνθήκες και χαρακτηριστικά

Συνοψίζοντας τα χαρακτηριστικά του εύκαμπτου αγωγού και των συνθηκών ροής έχουμε τα εξής:

Εύκαμπτος αγωγός: Μήκος $L=70$ mm (άξονας x), διάμετρος $d_0=8$ mm (απαραμόρφωτο κυλινδρικό σχήμα), πάχος $h=1$ mm, σταθερά Young $E=1.25$ MPa, λόγος Poisson $\nu=0.49$.

Η ακαμψία των τοιχωμάτων έτσι όπως ορίζεται στην εργασία των Heil & Boyle (2010) είναι:

$$K = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{d_0}{2}\right)^3} = 2141.9 Pa \quad (3.1)$$

για απαραμόρφωτο αγωγό.

Ρευστό: Ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιούμε νερό με τα εξής χαρακτηριστικά μεγέθη: $T=20^{\circ}\text{C}$, $\rho=1000\text{kg/m}^3$, $\mu=0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Ροή: Θεωρούμε στρωτή ροή, με ομοιόμορφο προφίλ ταχυτήτων (Poiseuille flow) παράλληλη με τον άξονα του αγωγού ($u_y=0$) χωρίς ολίσθηση στα τοιχώματα. Η μέση

ταχύτητα του νερού για τις παραπάνω παροχές θα είναι:
$$U = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi\left(\frac{d_0}{2}\right)^2}$$

Δηλαδή: $U_{10}=0.07\text{ m/s}$, $U_{15}=0.1\text{ m/s}$, $U_{20}=0.13\text{ m/s}$, όπου οι δείκτες αντιστοιχούν στο ποσοστό των μέγιστων rpm της αντλίας (δηλ. U_{10} είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού για 10% rpm της αντλίας).

Ενώ οι αντίστοιχοι Reynolds θα είναι ($Re = \frac{\rho d_0 U}{2\mu}$):

$Re_{10}=279$, $Re_{15}=398$, $Re_{20}=517$

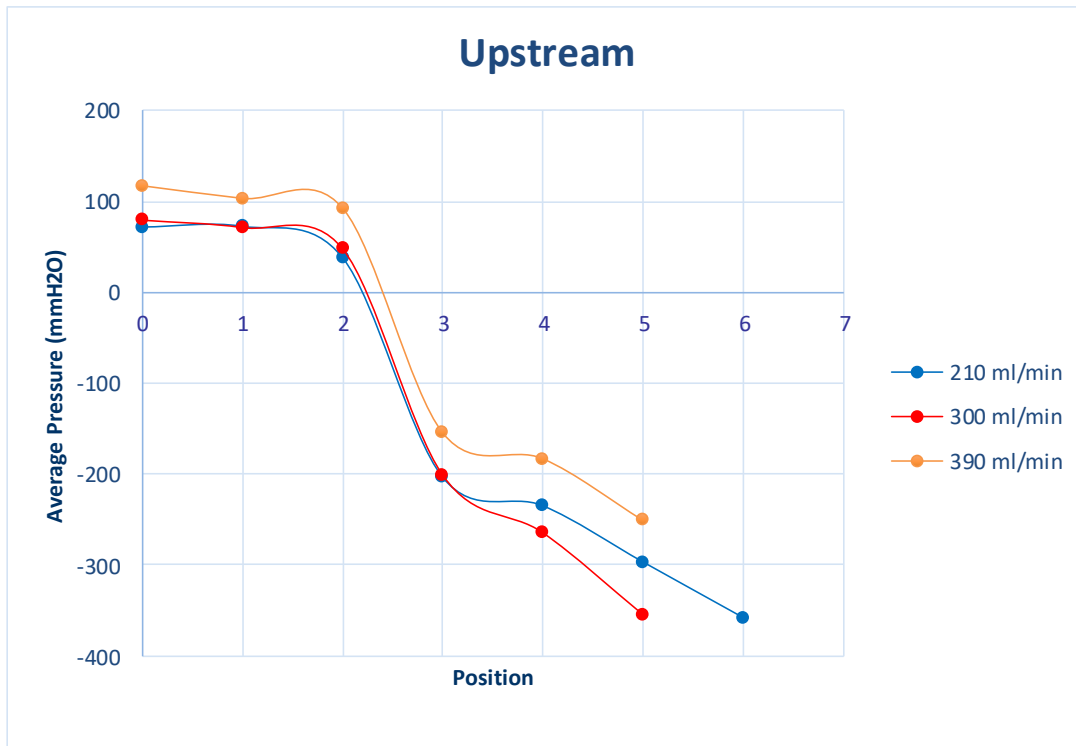
Ήδη βλέπουμε πως είμαστε αρκετά πάνω από τους Re στους οποίους έγινε η εργασία των Heil & Boyle (2010) ($Re=65-105$), παρόλα αυτά μπορούμε να εξετάσουμε την εξάρτηση του κρίσιμου Re από την υλική παράμετρο H, καθώς και την περίοδο ταλάντωσης όπου έχουμε αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις.

Η υλική παράμετρος είναι $H=34\cdot 10^6$. ($H=10^4-10^5$, στην εργασία των Boyle & Heil)

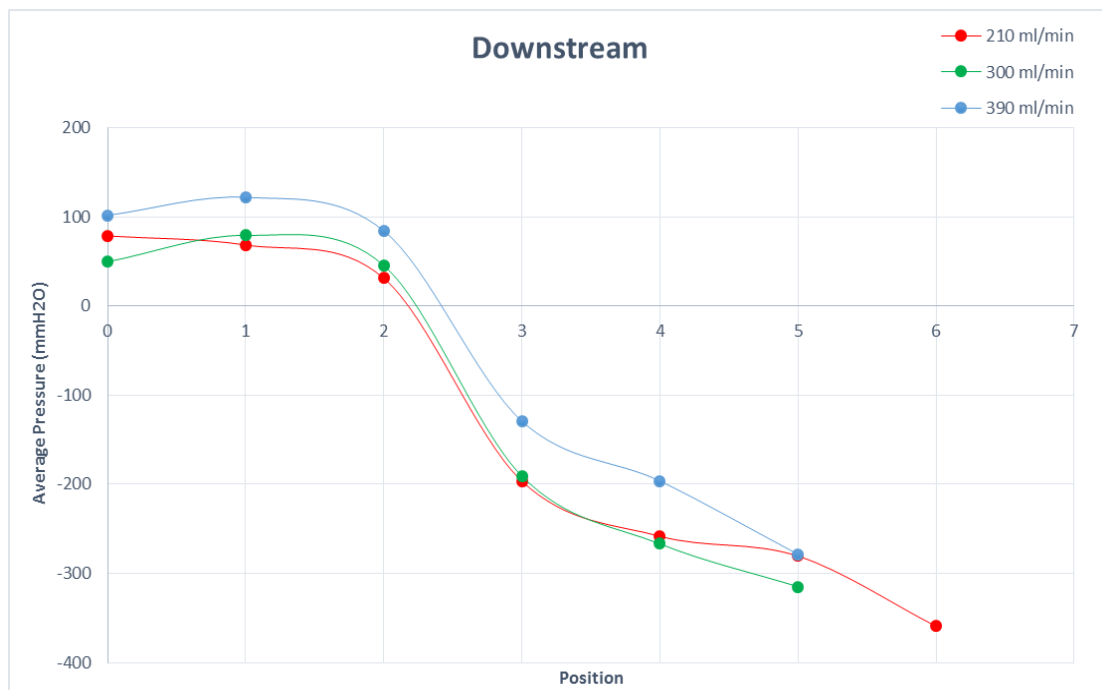
3.2.2 Πιέσεις

Η εξωτερική πίεση είναι πάντα η ατμοσφαιρική, οπότε την αφαιρούμε πάντα από τις μετρήσεις μας, δηλαδή ορίζουμε σαν 0 την ατμοσφαιρική. Αυτό σημαίνει πως η διατοιχωματική πίεση του αγωγού ταυτίζεται με την τιμή της εσωτερικής πίεσης. Αντίθετα, η εσωτερική πίεση αλλάζει μέσω της βάνας, στην οποία ήδη έχουμε ορίσει 7 θέσεις με βάση τις ποιοτικές παρατηρήσεις που κάναμε πριν λάβουμε τις μετρήσεις. Οι εσωτερικές πιέσεις που επικρατούν upstream και downstream του εύκαμπτου αγωγού εξαρτώνται τόσο από τη θέση της βάνας όσο και από την παροχή και αποτελούν ένα από τα βασικά αντικείμενα μελέτης. Παρόλα αυτά υπάρχει η ανάγκη να αντιστοιχίσουμε τις θέσεις της βάνας σε πιέσεις. Για αυτό το λόγο σχηματίζουμε τις καμπύλες της **εικόνας 3.10(α),(β)** με τις μέσες πιέσεις upstream και downstream¹. Μια σημαντική παρατήρηση που πρέπει να γίνει σε αυτό το σημείο είναι πως καθόλη τη διάρκεια της εργασίας χρησιμοποιούμε **peak to peak πλάτη ταλάντωσης της πίεσης**. Αυτό συμβαίνει διότι σε πολλές περιπτώσεις η μέση τιμή δε βρίσκεται στη μέση των δύο ακροτάτων, οπότε μία αποτύπωση του τυπικού πλάτους ($(\max-\min)/2$) δε θα έδινε ξεκάθαρη εικόνα. Δηλαδή, οπουδήποτε στην εργασία αναφερόμαστε σε πλάτη πίεσης (Pressure amplitudes, σε πολλά διαγράμματα) πάντα εννοούμε peak to peak πλάτη πίεσης.

¹ Χρησιμοποιούμε τις μέσες πιέσεις καθώς σε κάποιες θέσεις έχουμε ταλάντωση και άρα και μεγαλύτερο εύρος πιέσεων, αλλά ακόμα και στις σταθερές θέσεις έχουμε διακύμανση της πίεσης που καθορίζεται από την ευαισθησία του αισθητήρα πίεσης.



Εικόνα 3.10 (α) Μέση upstream πίεση συναρτήσει των θέσεων της βάνας για όλες τις παροχές.



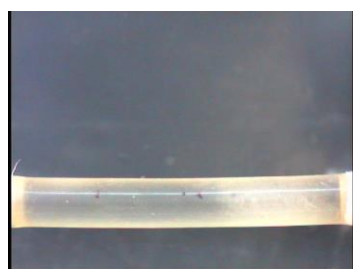
Εικόνα 3.10 (β) Μέση downstream πίεση συναρτήσει των θέσεων της βάνας για όλες τις παροχές.

Από τις παραπάνω καμπύλες παρατηρούμε πως οι upstream και downstream πιέσεις είναι περίπου ίσες για κάθε θέση και κάθε παροχή. Αυτό συμβαίνει κατά κύριο λόγο εξαιτίας των πολύ μικρών παροχών και άρα της πολύ μικρής πτώσης πίεσης που συντελείται ανάμεσα στις δύο θέσεις μετρήσεων. Η καμπύλη των 390 ml/min ξεχωρίζει λίγο πιο πάνω από τις άλλες δύο λόγω της αύξησης της ταχύτητας (θυμίζουμε πως ο αισθητήρας μας μετράει ολική πίεση). Ένα μη αναμενόμενο σημείο είναι αυτό της θέσης 1 στο downstream διάγραμμα για τις παροχές 300 και 390 ml/min. Φαίνεται πως η μέση πίεση σε σχέση με το σημείο 0 ανεβαίνει, γεγονός που δε θα το περιμέναμε καθώς έχει αυξηθεί η αντίσταση της βάνας. Αυτό το αποτέλεσμα ξεφεύγει από τα όρια του στατιστικού σφάλματος και ενδεχομένως να οφείλεται σε ανθρώπινο σφάλμα κατά τη μέτρηση. Υπενθυμίζεται πως οι upstream και downstream πιέσεις δεν ελήφθησαν ταυτόχρονα και συνεπώς μια σύγκρισή τους με σκοπό τον προσδιορισμό του Δp θα ήταν λανθασμένη, ειδικά αν σκεφτούμε πως έτσι και αλλιώς η Δp θα ήταν πολύ μικρή λόγω των μικρών Re και της μικρής απόστασης των σημείων μέτρησης. Παρ' όλες τις ατέλειες των συγκεκριμένων διαγραμμάτων μπορούμε να πάρουμε μία εικόνα για την εξέλιξη των πιέσεων συναρτήσει της θέσης της βάνας. Όλες οι καμπύλες ακολουθούν μια παρόμοια εξέλιξη με βασικό χαρακτηριστικό την απότομη πτώση πίεσης στη θέση 3. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, σε αυτή τη θέση έχουμε το λυγισμό του αγωγού καθώς και την εμφάνιση ταλαντώσεων.

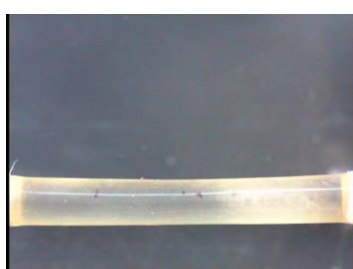
Στη συνέχεια παραθέτουμε τις μετρήσεις των πιέσεων συναρτήσει του χρόνου για κάθε θέση και παροχή και τα στιγμιότυπα του σχήματος του αγωγού. Καταλήγουμε σε σύγκριση των πιέσεων αλλά και του πλάτους των πιέσεων και επιπλέον συγκρίνουμε αυτά τα αποτελέσματα με τη γεωμετρία του αγωγού και με τις θέσεις ταλάντωσης του αγωγού.

Παροχή 210 ml/min

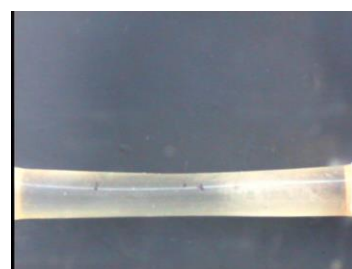
(α) θέση 0,1,2



(β) θέση 3



(γ) θέση 4



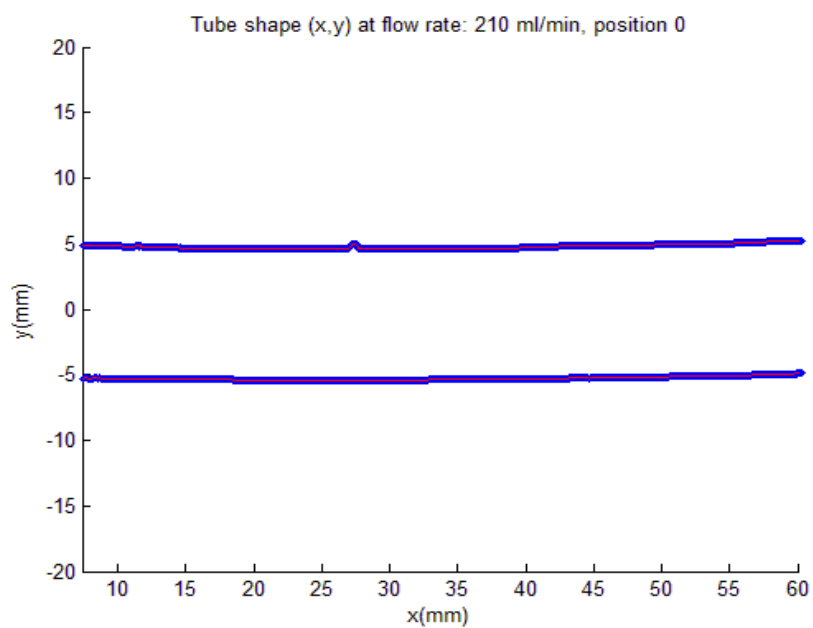
(δ) θέση 5



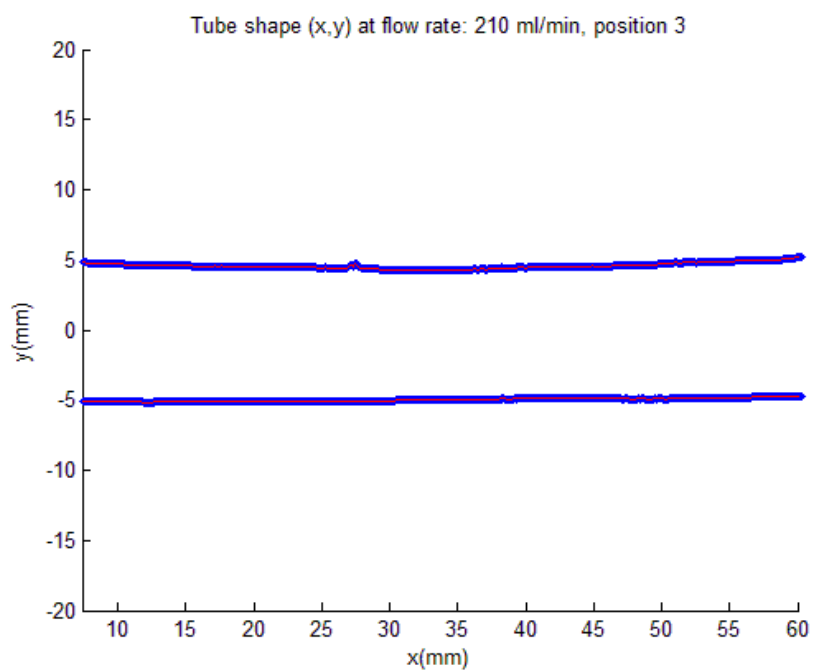
(ε) θέση 6

Εικόνα 3.11 Εξέλιξη της διατομής του αγωγού συναρτήσει της θέσης της βάνας για 210 ml/min.

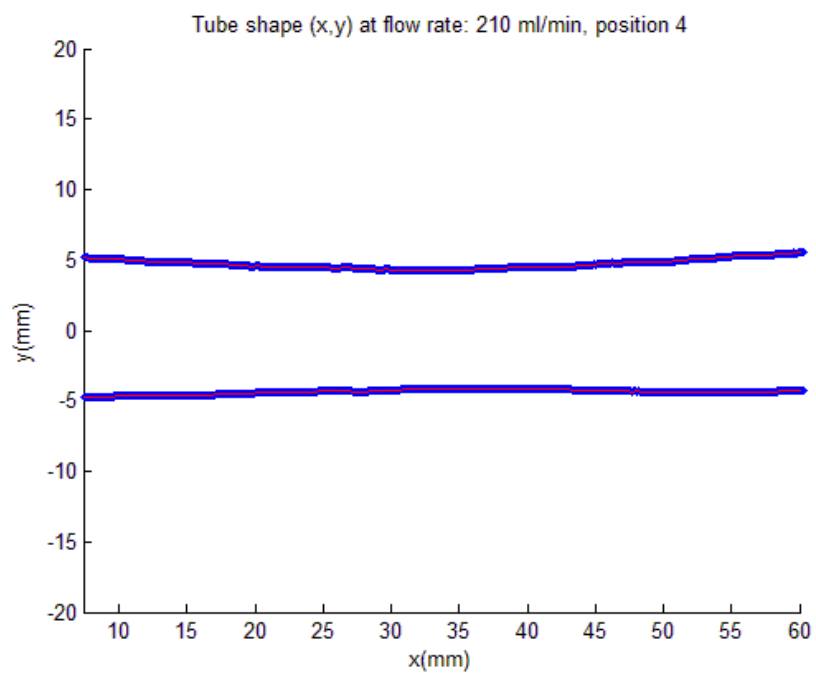
(α) θέση 0,1,2



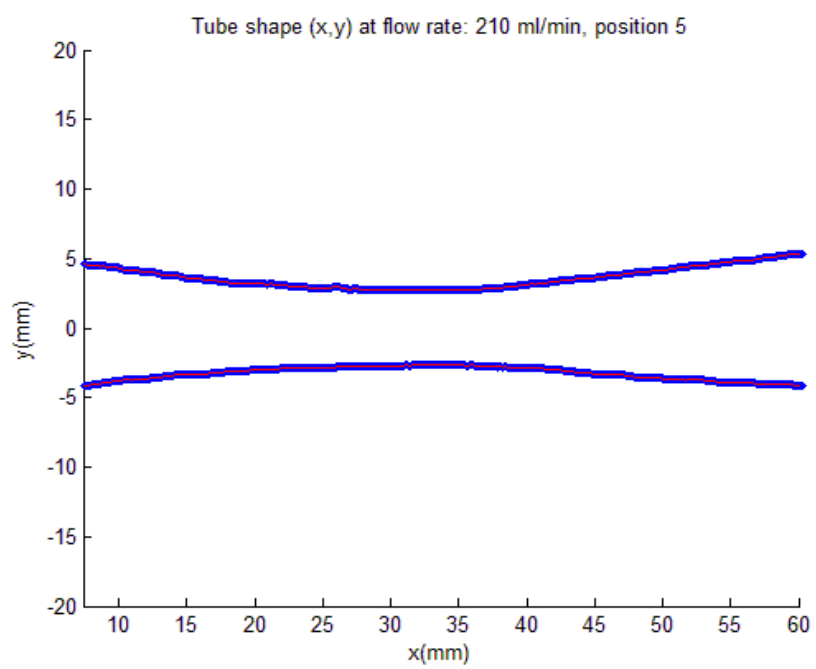
(β) θέση 3



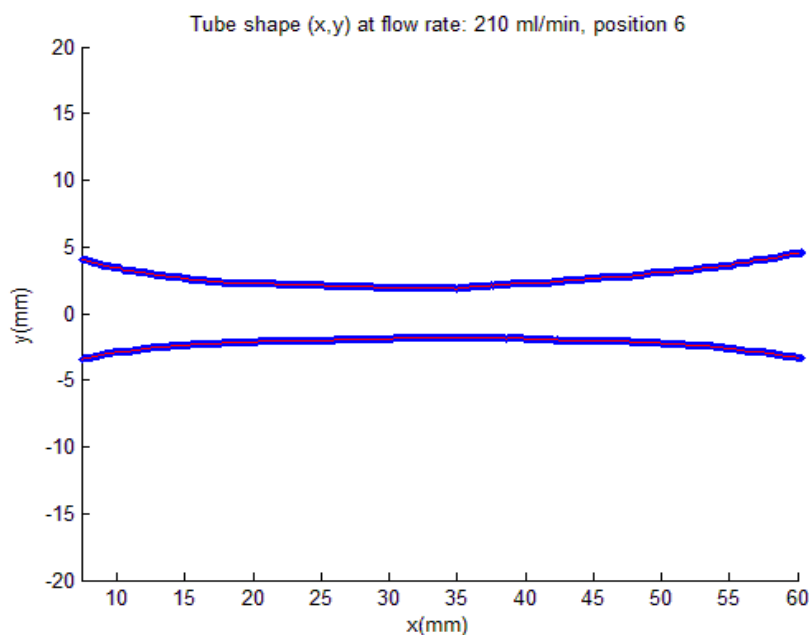
(γ) θέση 4



(δ) θέση 5



(ε) θέση 6



Εικόνα 3.12 Σχήμα αγωγού για τις 7 θέσεις βάνας για παροχή 210 ml/min.

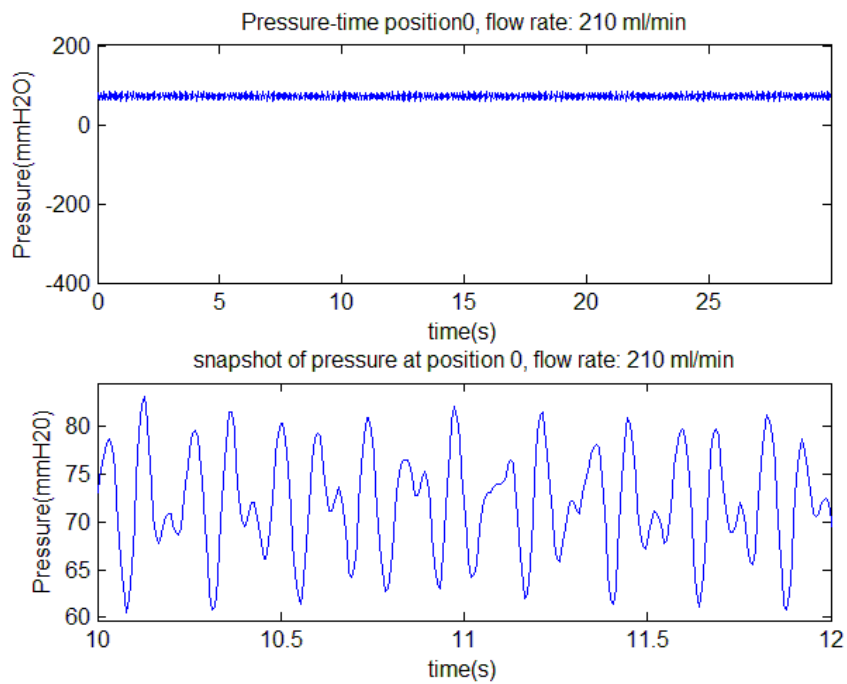
Στην **εικόνα 3.11** βλέπουμε τα στιγμιότυπα του αγωγού για τις 7 θέσεις της βάνας για παροχή 210 ml/min έτσι όπως τα κατέγραψε η κάμερα. Στην **εικόνα 3.12** έχουμε αποτυπώσει σε x,y διάγραμμα το σχήμα του αγωγού μέσω επεξεργασίας των εικόνων στην Matlab³. Χάρη στην έντονη αντίθεση του αγωγού με το background και τη βοήθεια κάποιων αυτοσχέδιων φίλτρων, απομονώσαμε τον αγωγό και στη συνέχεια γνωρίζοντας το μέγεθος των pixels σε mm σχηματίσαμε τα αντιδιαμετρικά τοιχώματα του αγωγού, από όπου μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τη διάμετρο του αγωγού. Να σημειωθεί πως στα διαγράμματα x,y έχουμε ‘κόψει’ τις άκρες, δηλαδή τις πλευρές στις οποίες στηρίζεται ο αγωγός καθώς σε πολλές φωτογραφίες υπήρχαν μαύρες λωρίδες σε αυτή την περιοχή καθώς και κάποια φωτεινά σημεία εκτός αγωγού που εμπόδιζαν την ακριβή αποτύπωση του. Για αυτό το λόγο ο άξονας x δεν ξεκινά από το 0 και δεν τελειώνει στα 70 mm που είναι και το συνολικό μήκος του αγωγού. Επίσης για τον ίδιο λόγο στην **εικόνα 3.12 (ε)** φαίνεται να έχουν συρρικνωθεί και τα ακλόνητα σημεία στήριξης, διότι στην πραγματικότητα τα σημεία αυτά δε φαίνονται στα διαγράμματα x,y (ο άξονας x ξεκινά περίπου από τα 8mm).

Οι βασικές παρατηρήσεις που μπορούμε να κάνουμε είναι πως από τη θέση 3 η εσωτερική πίεση πέφτει αρκετά (κάτω από την ατμοσφαιρική βλ. **εικόνες 3.10 (α),(β)**) και για αυτό αρχίζει ο λυγισμός του αγωγού. Από τη θέση 4 και μετά ο λυγισμός γίνεται ιδιαίτερα έντονος μέχρι τη θέση 6 που σχεδόν ακουμπάνε τα τοιχώματα. Στην **εικόνα 3.12 (ε)** δε φαίνεται να βρίσκονται τόσο κοντά τα τοιχώματα διότι απεικονίζονται τα εξωτερικά τοιχώματα. Ακολουθούν οι πιέσεις για κάθε θέση.

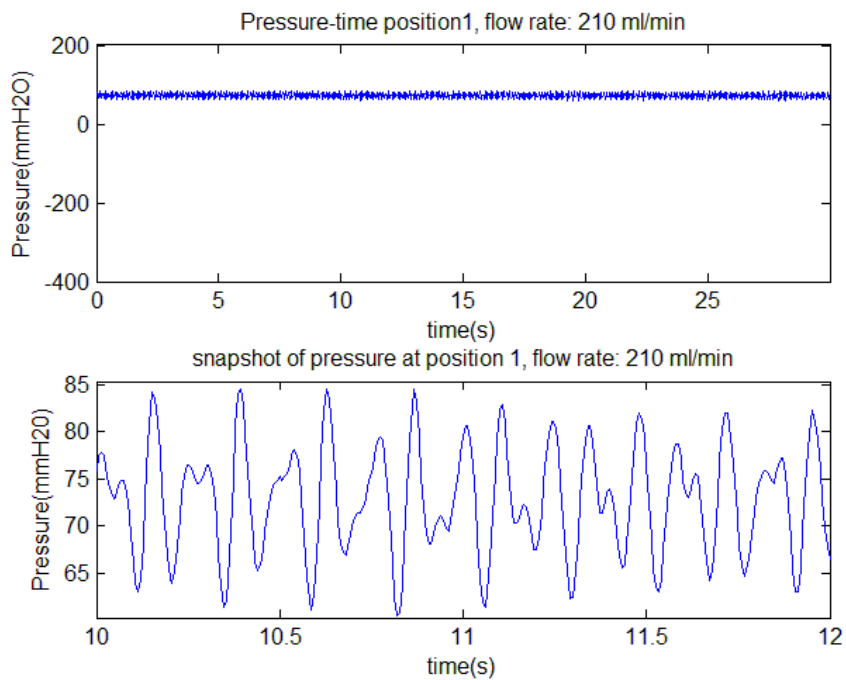
³ Όλοι οι κώδικες (scripts) που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των εικόνων αλλά και των δεδομένων πίεσης βρίσκονται στο παράρτημα.

Upstream

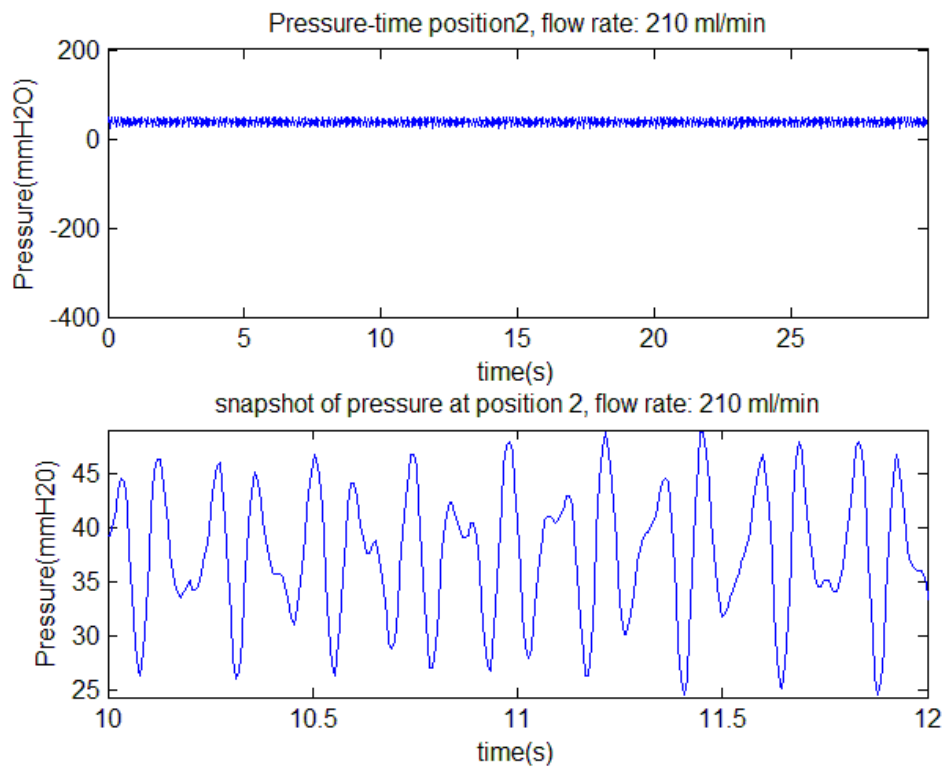
(α) θέση 0



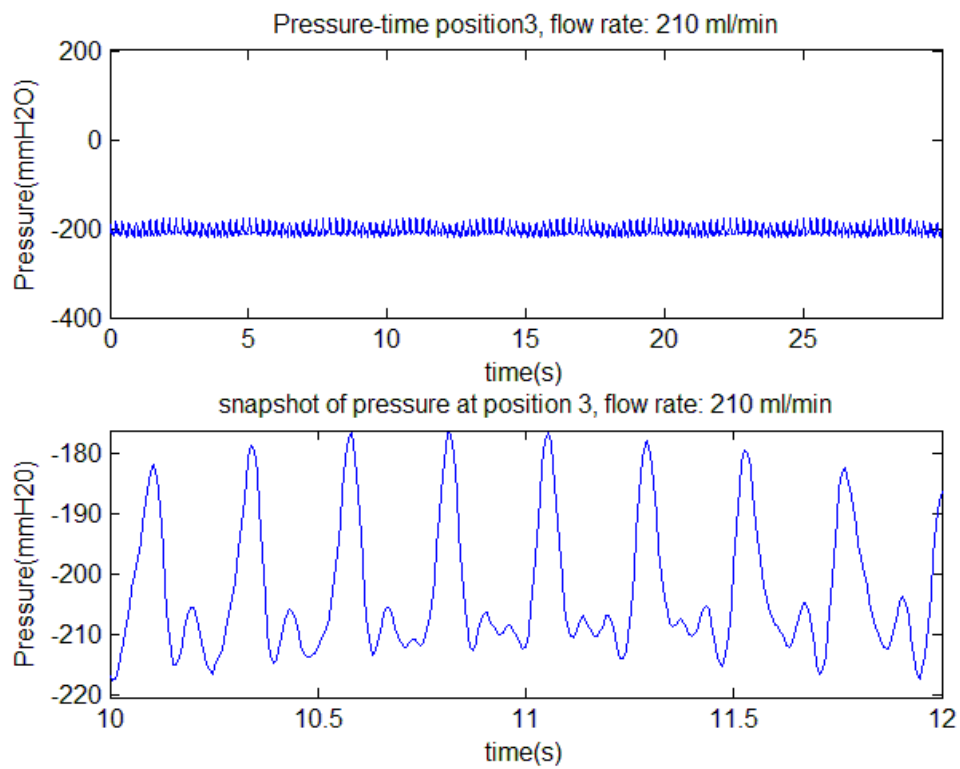
(β) θέση 1 (upstream)



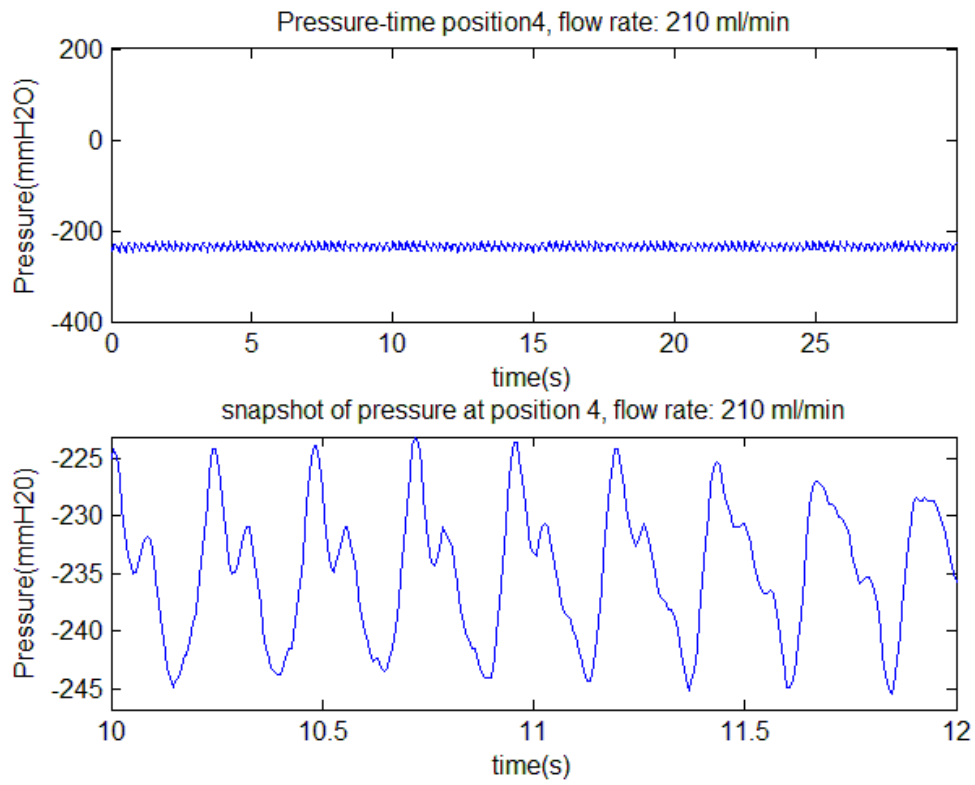
(γ) θέση 2 (upstream)



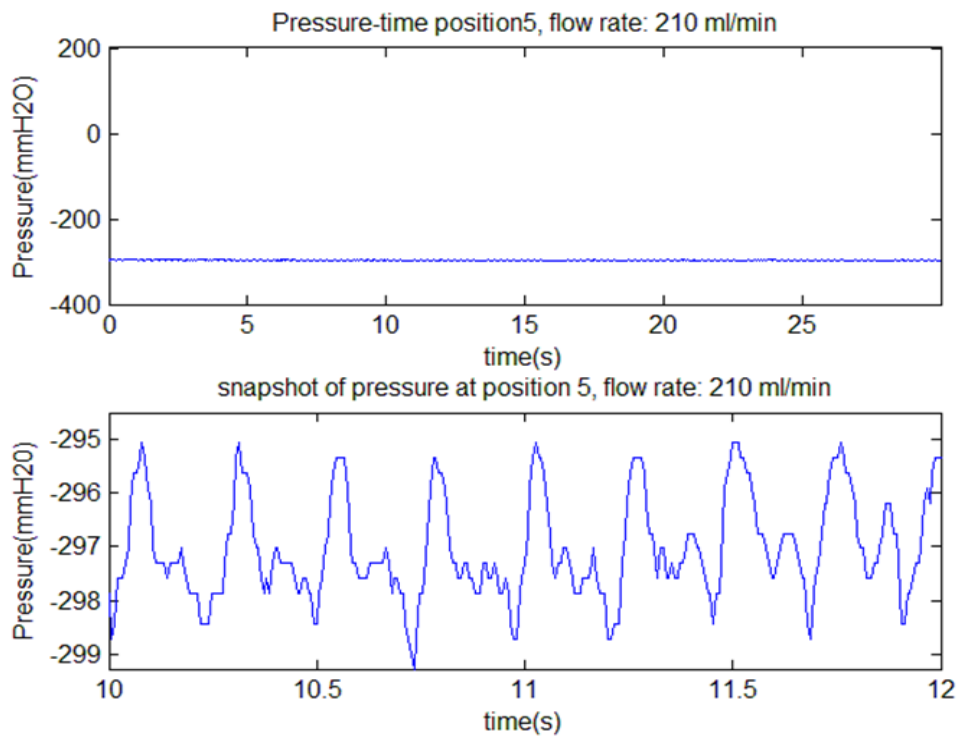
(δ) θέση 3 (upstream)



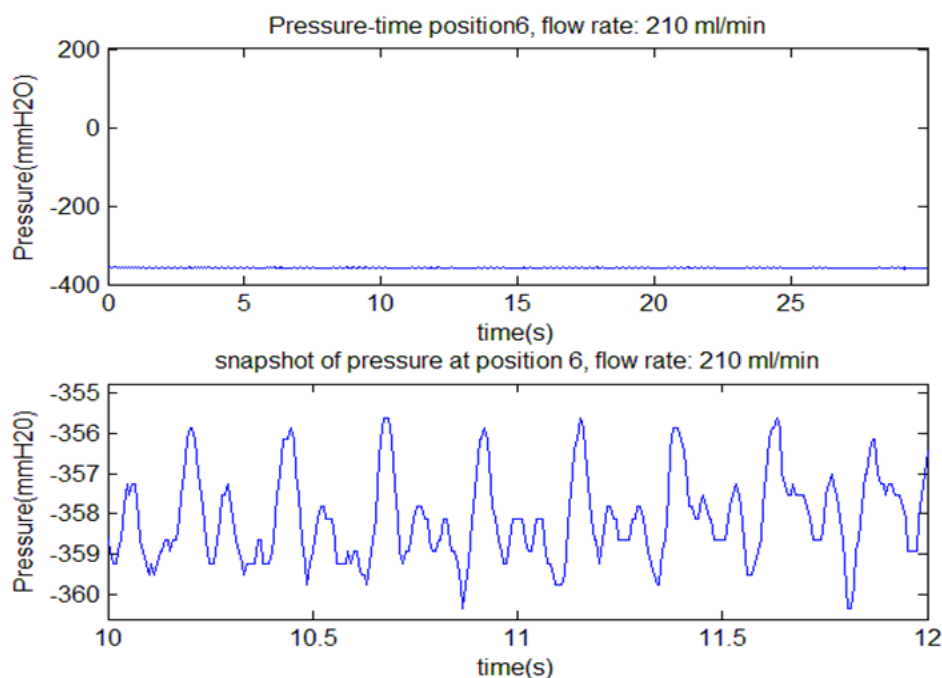
(ε) θέση 4 (upstream)



(στ) θέση 5 (upstream)



(ζ) θέση 6 (upstream)



Εικόνα 3.13 Διακύμανση της upstream πίεσης συναρτήσει του χρόνου στις διάφορες θέσεις της βάνας για παροχή 210 ml/min.

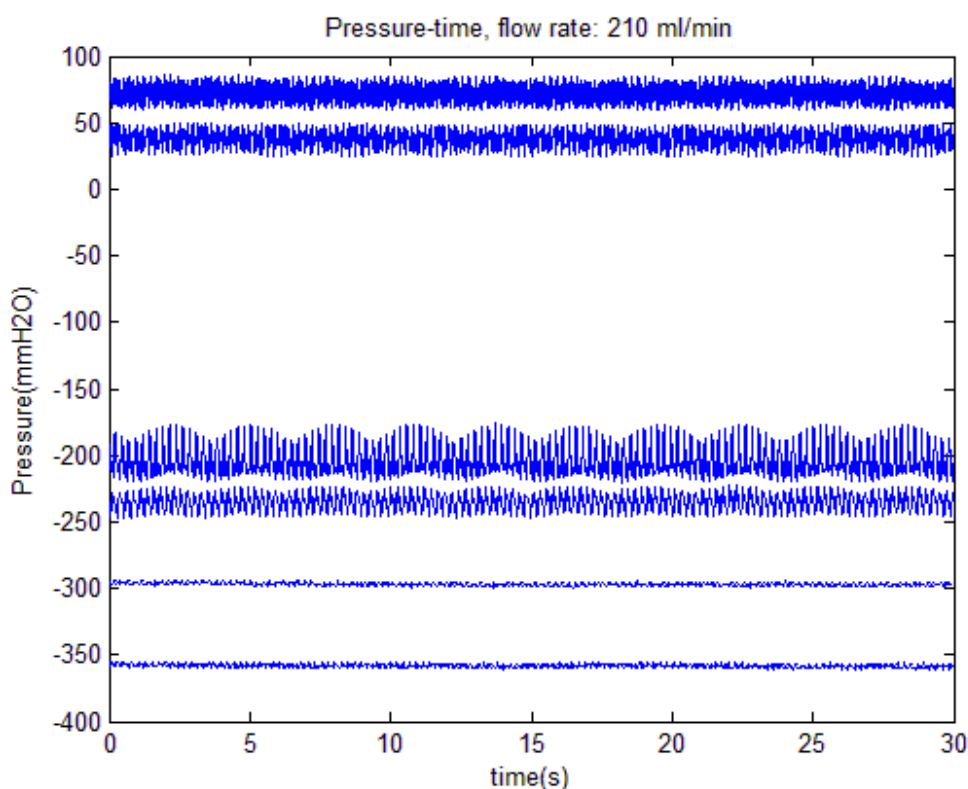
Από τη διακύμανση της πίεσης στο χρόνο (**εικ. 3.13**) μπορούμε να παρατηρήσουμε πως στη θέση 3 όπου παρατηρείται για πρώτη φορά ο λυγισμός και η πίεση έχει πέσει κάτω από την ατμοσφαιρική (μικρότερη του 0), το πλάτος της διακύμανσης της πίεσης μεγαλώνει υποδεικνύοντας κάποιο είδος ταλάντωσης του αγωγού σε αυτή τη θέση. Πράγματι, στη θέση 3 έχουμε ήδη διαπιστώσει ποιοτικά την ταλάντωση του αγωγού.

Στην **εικόνα 3.14** διαβάζοντας από πάνω προς τα κάτω το διάγραμμα, ξεκινάμε με τη θέση 0 και καταλήγουμε (μικρότερη πίεση) στη θέση 6. Βλέπουμε μια σύγκριση της διακύμανσης των upstream πιέσεων και διαπιστώνουμε το αρκετά μεγαλύτερο πλάτος της θέσης 3 της τάξης των 40 mmH₂O (μέση πίεση περίπου -200mmH₂O). Στις θέσεις 0,1,2,4 επίσης παρατηρείται ένα πλάτος ταλάντωσης της τάξης των 20 mmH₂O, ενώ στις θέσεις 5,6 το πλάτος είναι αμελητέο, δηλαδή πολύ κοντά στα όρια του στατιστικού σφάλματος του αισθητήρα. Για μία πιο άμεση σύγκριση των πλατών ταλάντωσης σχεδιάζουμε την καμπύλη της **εικόνας 3.15** μαζί με τις μέγιστες και ελάχιστες πιέσεις σε κάθε θέση.

Βλέπουμε πως καθώς μειώνεται η μέση upstream πίεση (δηλαδή αυξάνεται η αντίσταση της βάνας) το πλάτος της πίεσης τείνει να αυξηθεί μέχρι ένα μέγιστο σημείο όπου πιθανότατα έχουμε την πιο έντονη ταλάντωση του αγωγού και από εκεί και πέρα μειώνεται όσο τα τοιχώματα πλησιάζουν μεταξύ τους, δηλαδή όσο πέφτει περαιτέρω η εσωτερική πίεση.

Παρόλα αυτά, downstream του εύκαμπτου αγωγού δεν παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά στο πλάτος ταλάντωσης των πιέσεων, όπως φαίνεται από τις **εικόνες 3.16-3.18**. Αντιθέτως, το πλάτος ταλάντωσης παίρνει τη μέγιστη τιμή του στην πλήρως ανοικτή θέση και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι να φτάσει τα όρια

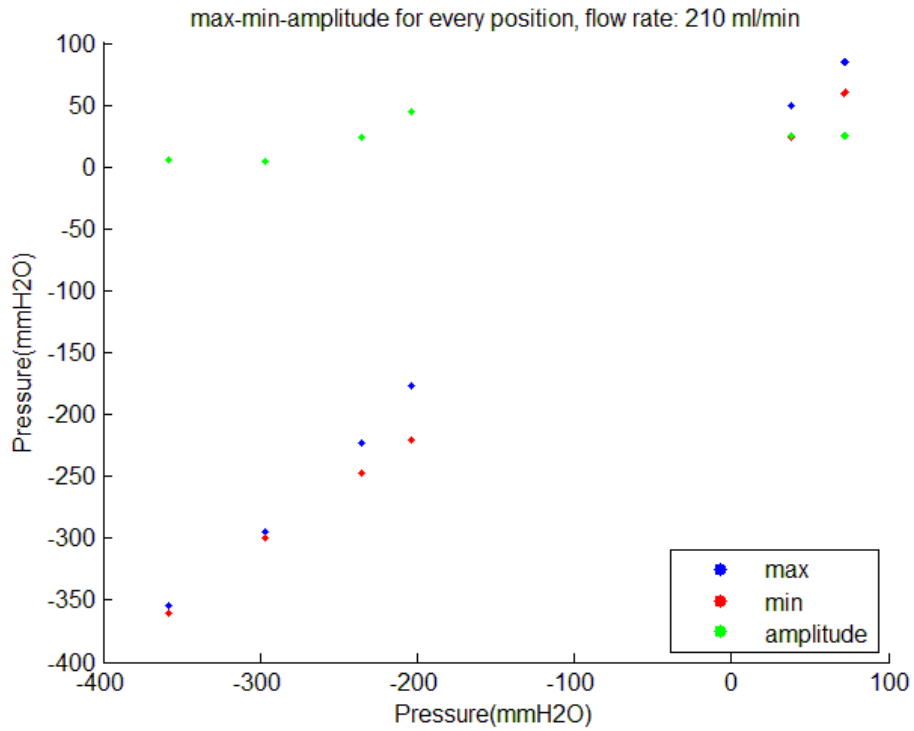
στατιστικής διακύμανσης του αισθητήρα ήδη περίπου από την θέση 4, στην οποία έχει παρατηρηθεί ταλάντωση του εύκαμπτου αγωγού.⁴ Η βασική περίοδος των ταλαντώσεων σε όλες τις περιπτώσεις (downstream και upstream) είναι $T=0.24$ sec, ενώ εμφανίζονται ταυτόχρονα και μικρότερου πλάτους ταλαντώσεις με μεγαλύτερες συχνότητες που φθάνουν μέχρι τα 10 Hz περίπου.



Εικόνα 3.14 Η upstream πίεση συναρτήσει του χρόνου για όλες τις θέσεις της βάνας. Η αντιστοίχιση της κάθε καμπύλης με την αντίστοιχη θέση της βάνας μπορεί από την καμπύλη της **εικόνας 3.10**. Η ανοικτή βάνα (θέση 0) με την θέση 1 δεν μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους καθώς η αντίσταση της βάνας σε αυτή τη θέση είναι πολύ μικρή και επιπλέον ο αγωγός διατηρεί το αρχικό σχήμα του.

Στη συνέχεια αυτής της ενότητας παρουσιάζονται τα ίδια μορφής διαγράμματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

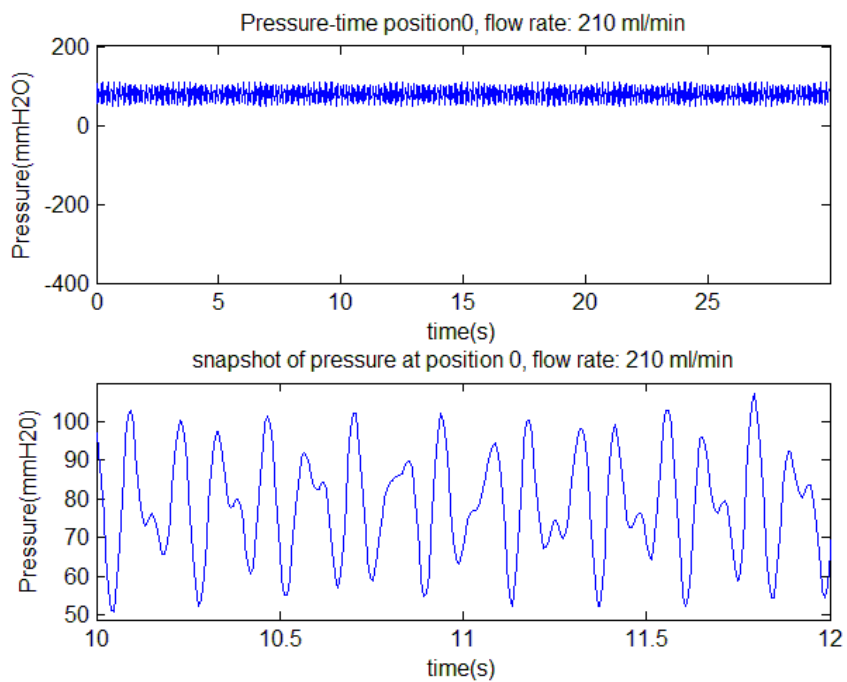
⁴ Οι θέσεις όπου παρουσιάζεται ταλάντωση του εύκαμπτου αγωγού θα μελετηθούν ξεχωριστά και θα συγκριθούν με τις μετρήσεις των πιέσεων.



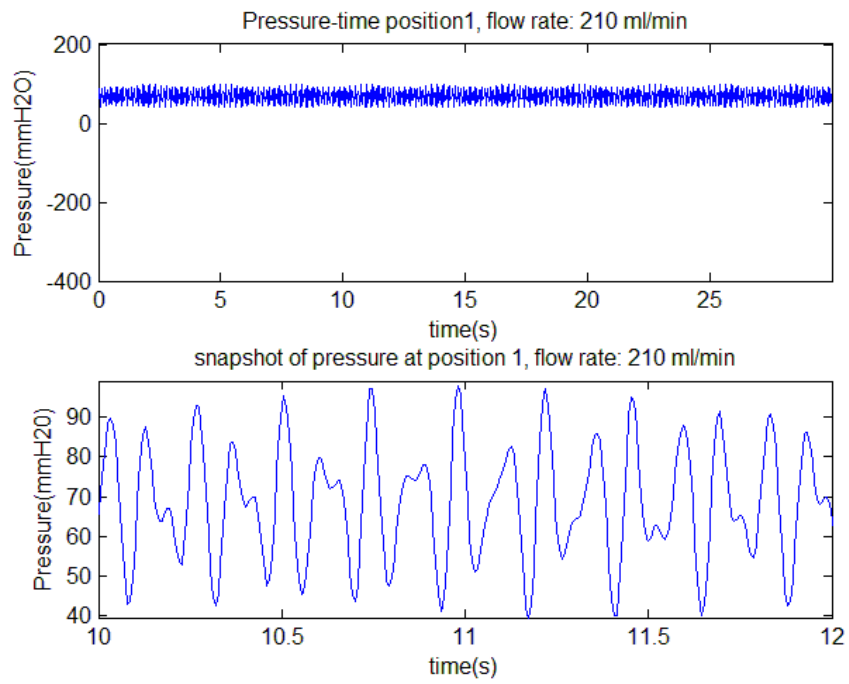
Εικόνα 3.15 Απεικόνιση των σημείων πλάτους, μέγιστης και ελάχιστης πίεσης για κάθε θέση, έτσι όπως προέκυψαν από την επεξεργασία του σήματος στην Matlab.

Downstream

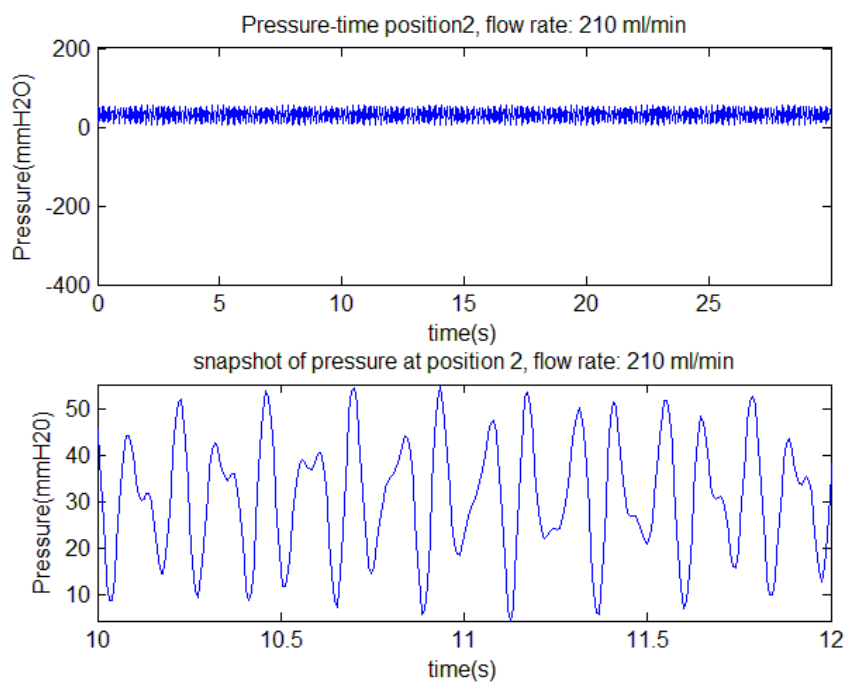
(α) θέση 0 (downstream)



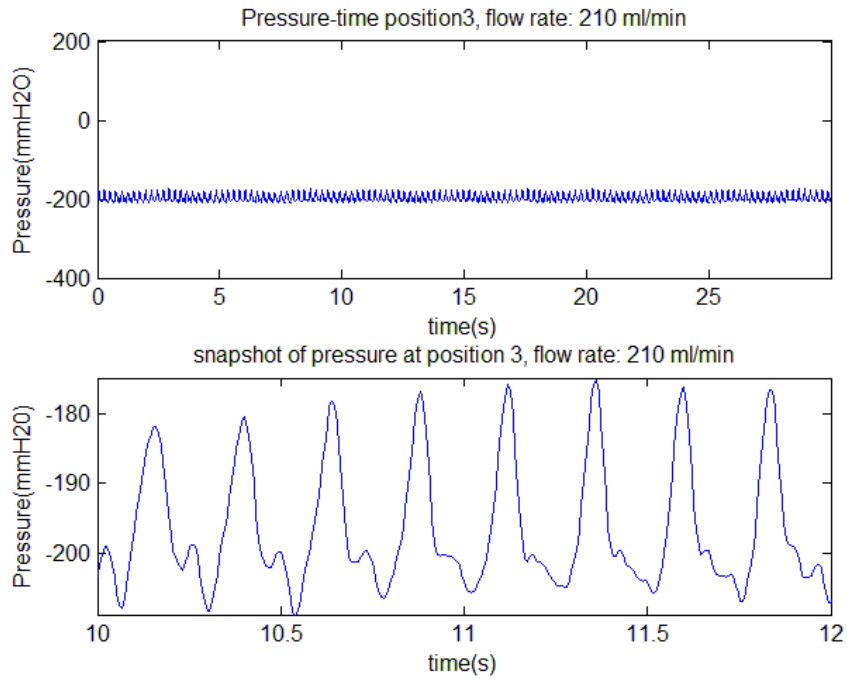
(β) θέση 1 (downstream)



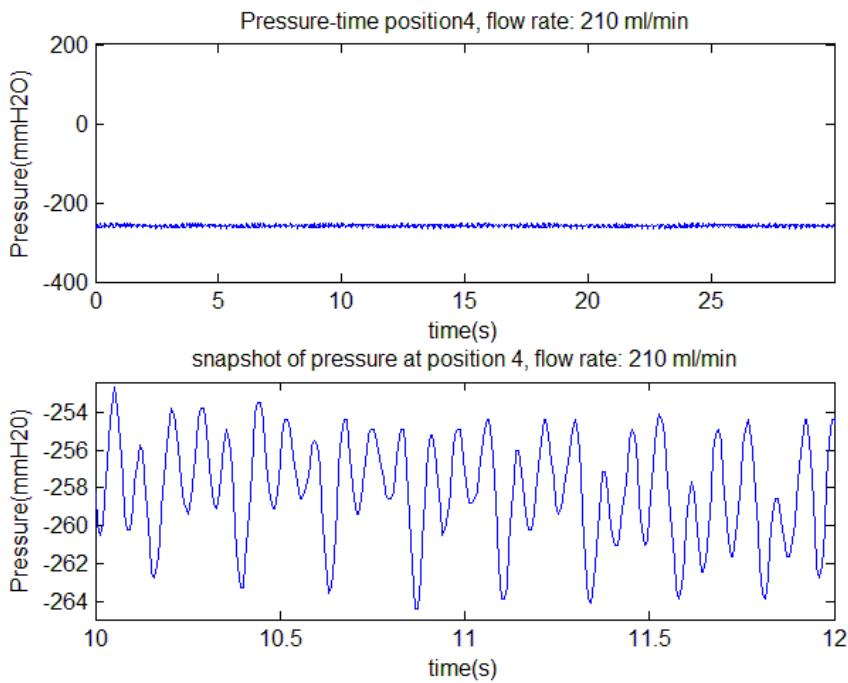
(γ) θέση 2 (downstream)



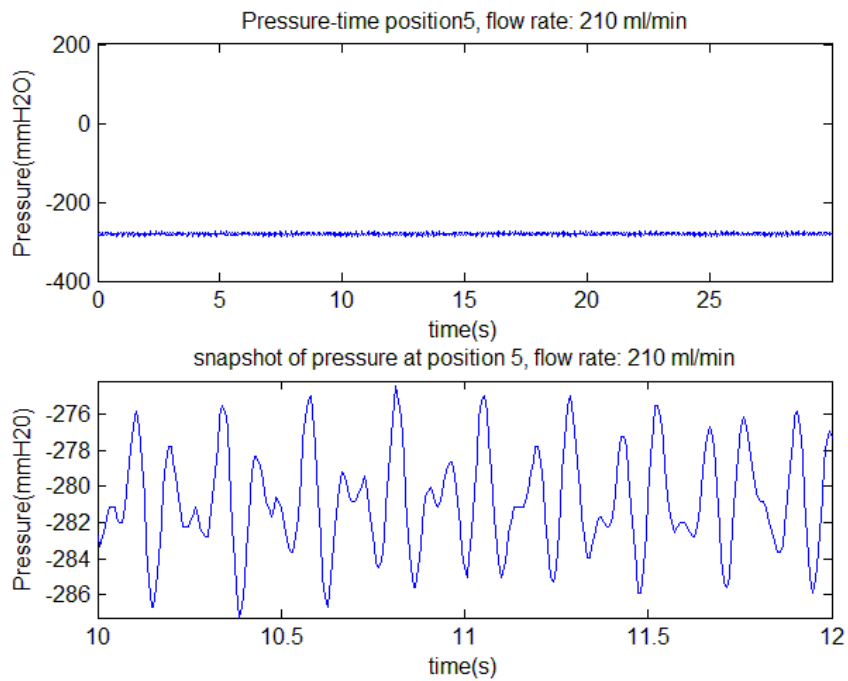
(δ) θέση 3 (downstream)



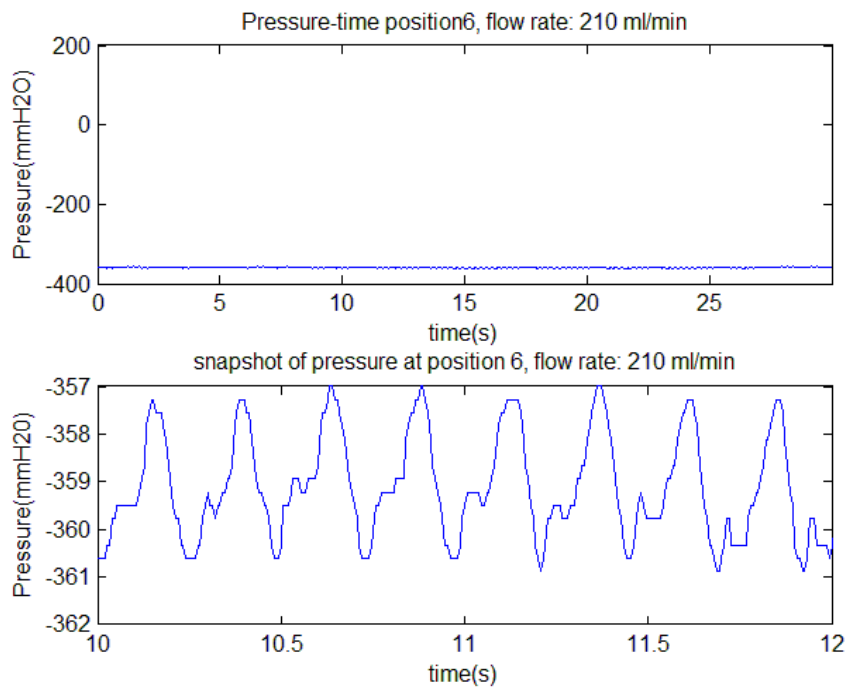
(ε) θέση 4 (downstream)



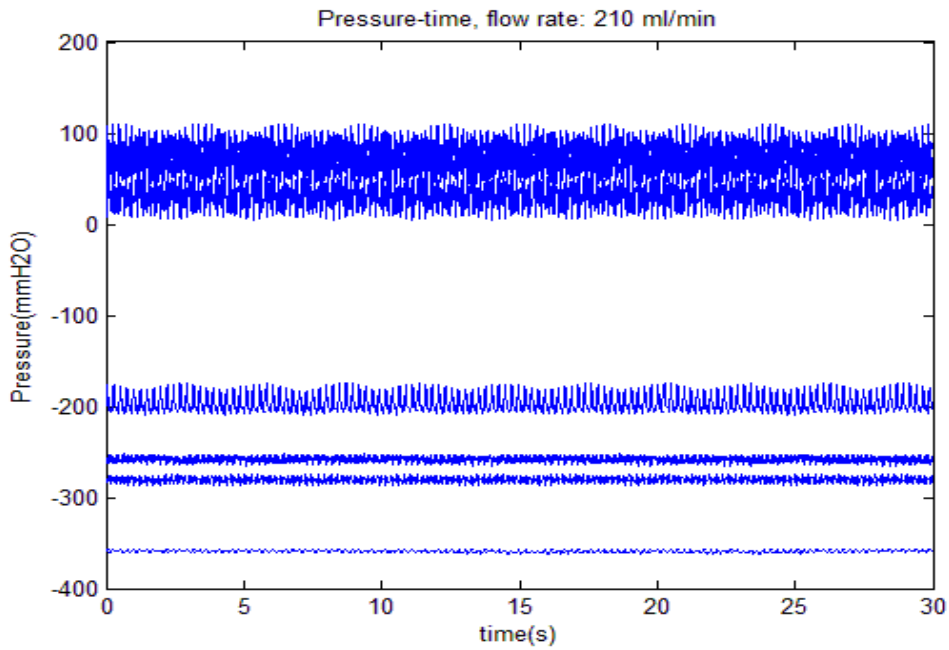
(στ) θέση 5 (downstream)



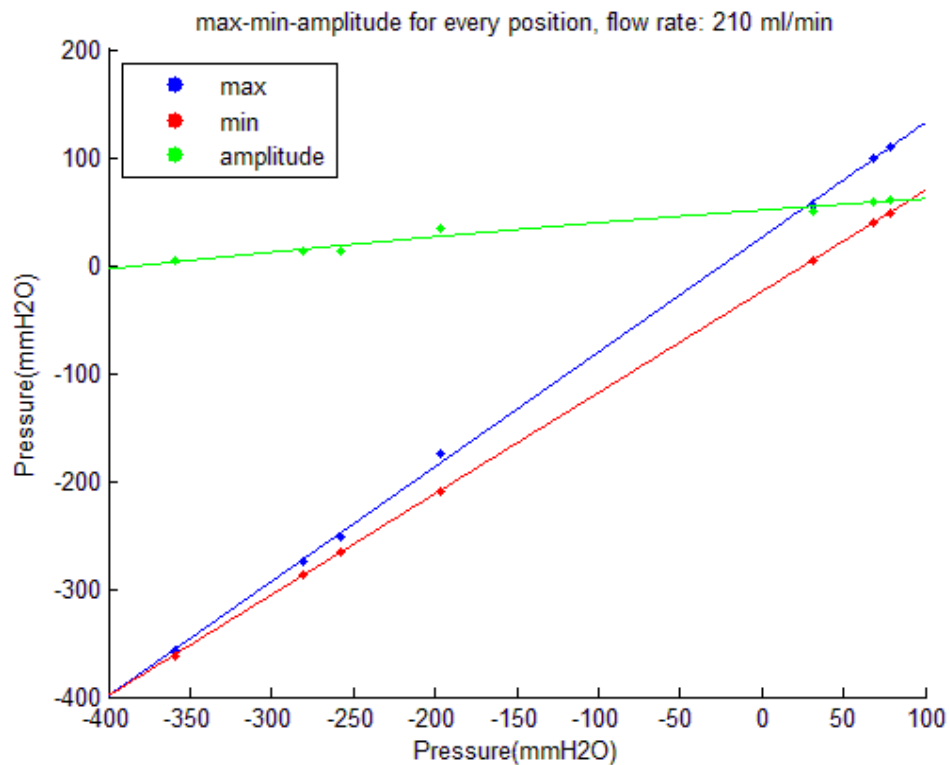
(ε) θέση 6 (downstream)



Εικόνα 3.16 Διακύμανση της downstream πίεσης συναρτήσει του χρόνου στις διάφορες θέσεις της βάνας για παροχή 210 ml/min.



Εικόνα 3.17 Η downstream πίεση συναρτήσει του χρόνου για όλες τις θέσεις της βάνας για παροχή 210 ml/min.



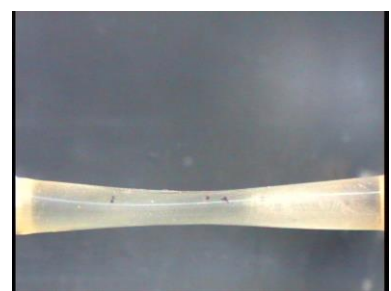
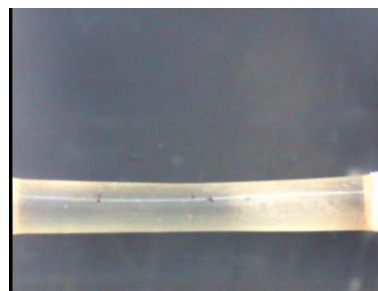
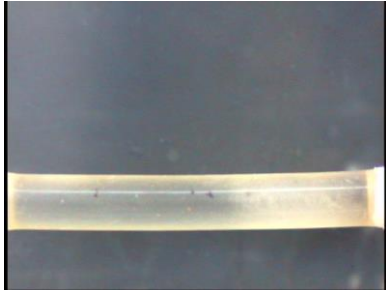
Εικόνα 3.18 Καμπύλες προσαρμογής μέγιστης, ελάχιστης και πλάτους πίεσης συναρτήσει της μέσης πίεσης downstream ή αλλιώς της θέσης της βάνας.

Παροχή 300 ml/min

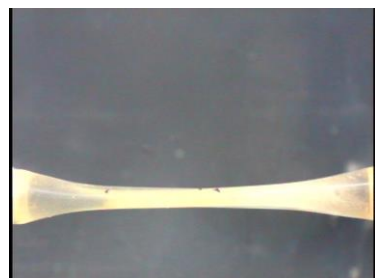
(α) θέση 0,1,2

(β) θέση 3

(γ) θέση 4

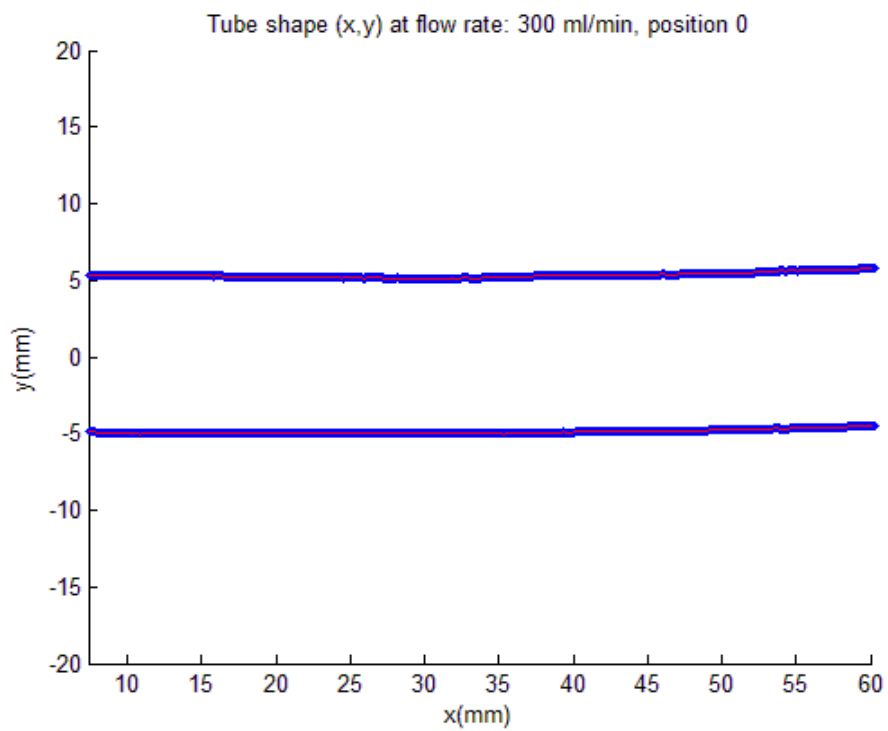


(δ) θέση 5

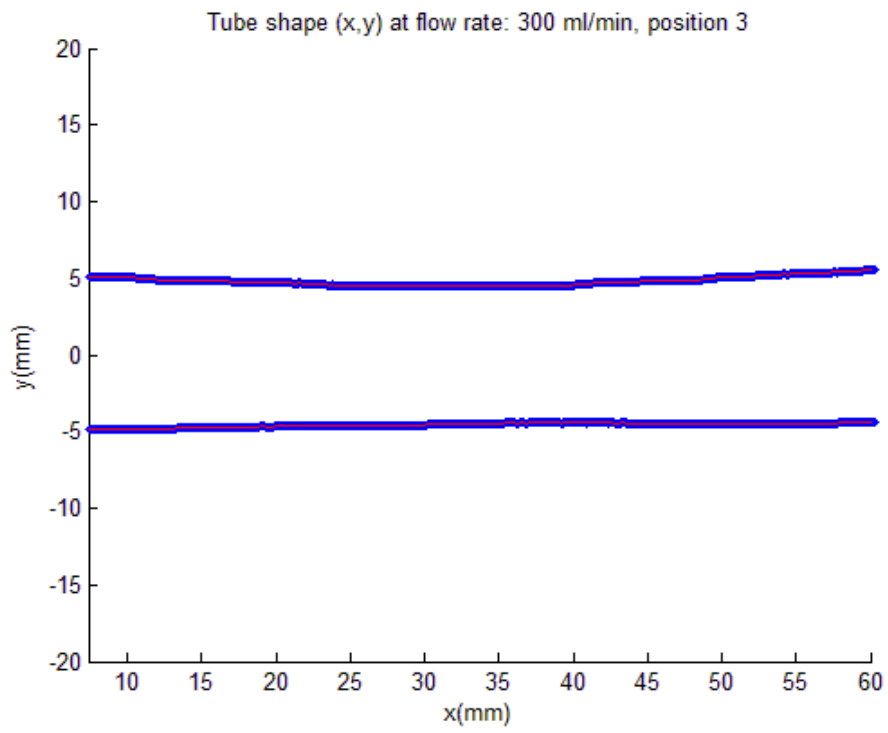


Εικόνα 3.19 Εξέλιξη της διατομής του αγωγού συναρτήσει της θέσης της βάνας για παροχή 300 ml/min.

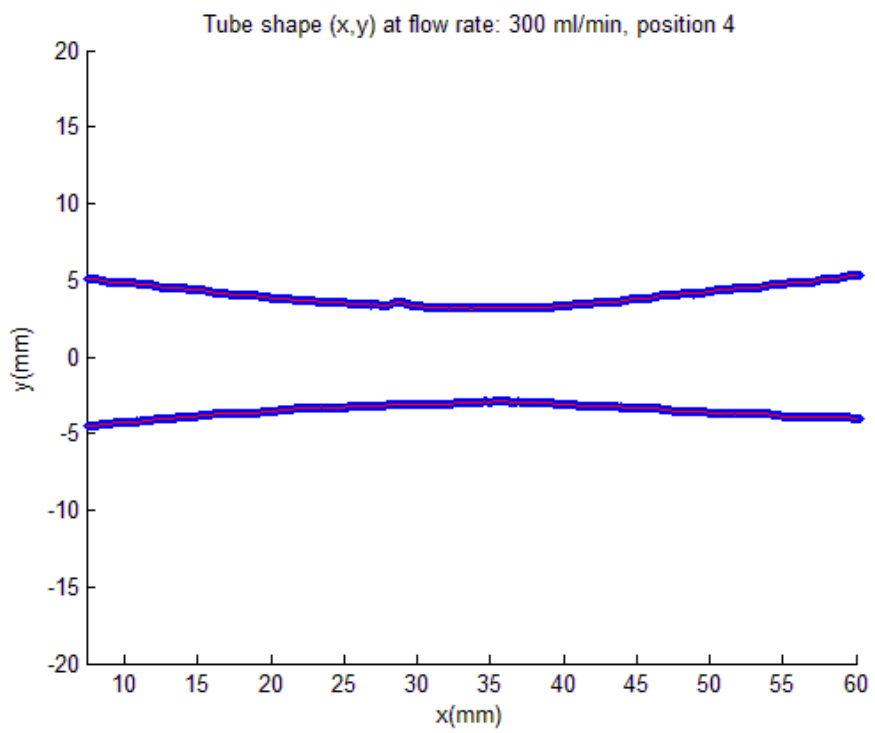
(α) θέση 0,1,2



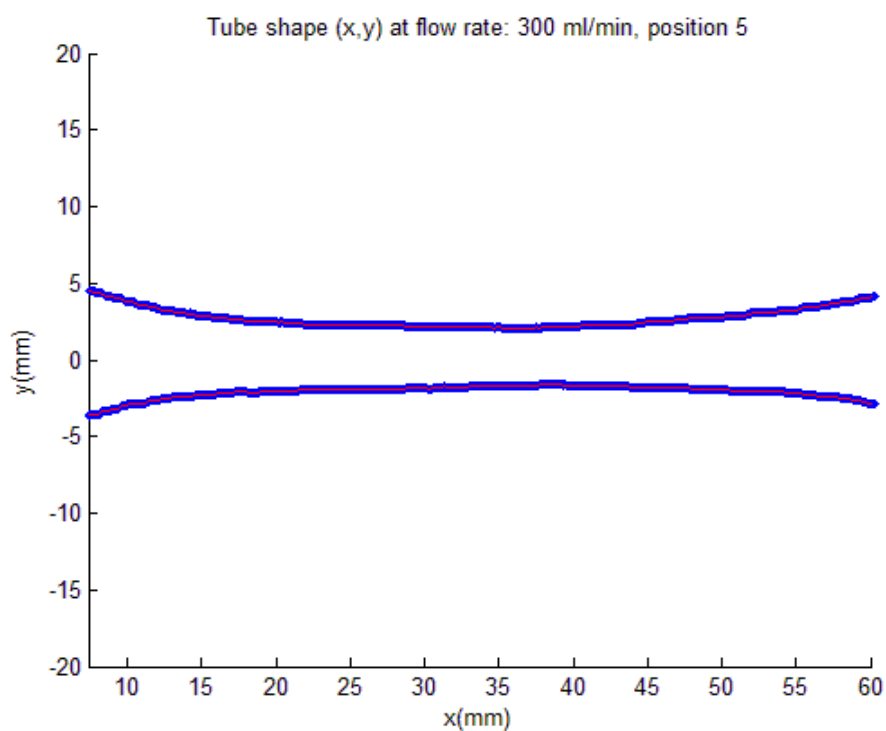
(β) θέση 3



(γ) θέση 4



(δ) θέση 5

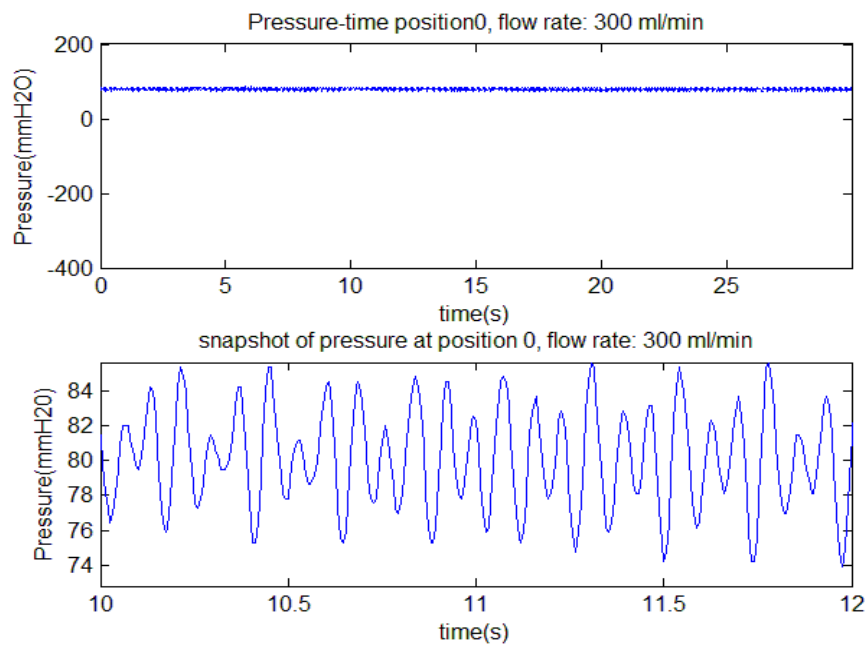


Εικόνα 3.20 Σχήμα αγωγού για τις 7 θέσεις βάνας για παροχή 300 ml/min.

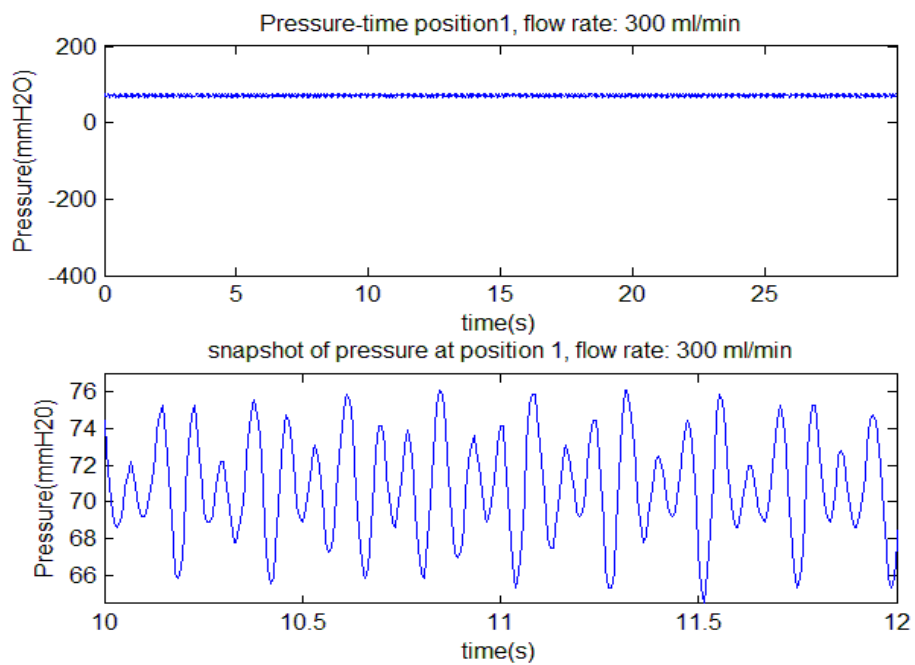
Οι εικόνες **3.19,3.20** προέκυψαν με αντίστοιχο τρόπο με αυτό των **εικόνων 3.1,3.2**, και μας δίνουν μία αίσθηση της εικόνας του αγωγού. Ο λυγισμός και πάλι ξεκινά στη θέση 3, όπου έχουμε και εμφάνιση ταλαντώσεων και στη θέση 5 τα τοιχώματα φτάνουν πολύ κοντά μεταξύ τους. Η θέση 6 εδώ έχει παραληφθεί διότι είχαμε επαφή τοιχωμάτων και πολύ χαμηλή πίεση downstream, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την είσοδο αέρα στο δίκτυο. Ακολουθούν οι μετρήσεις της πίεσης upstream και downstream του αγωγού.

Upstream

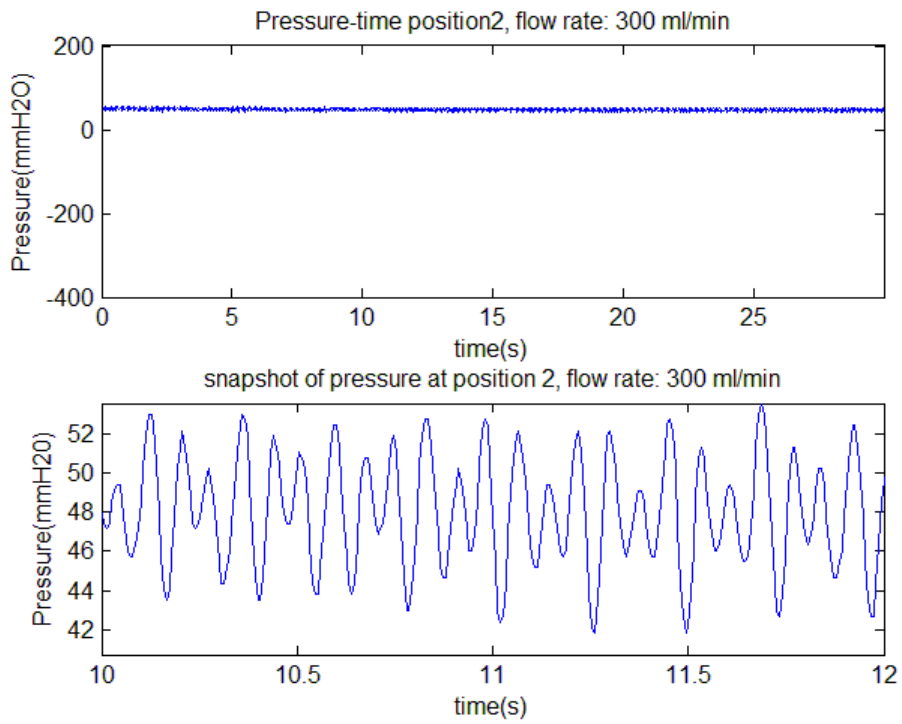
(α) θέση 0 (upstream)



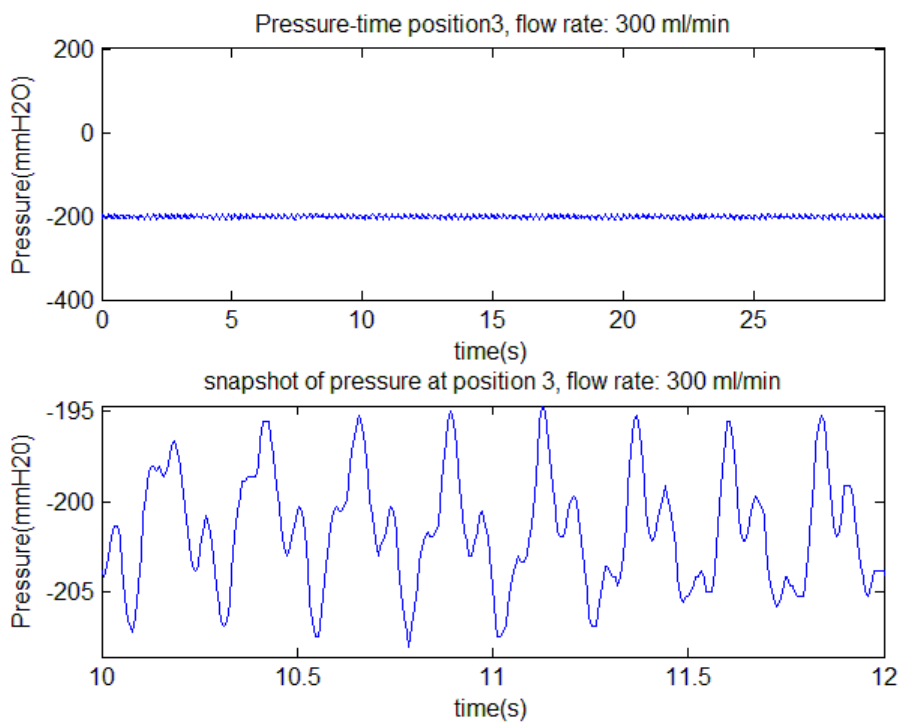
(β) θέση 1 (upstream)



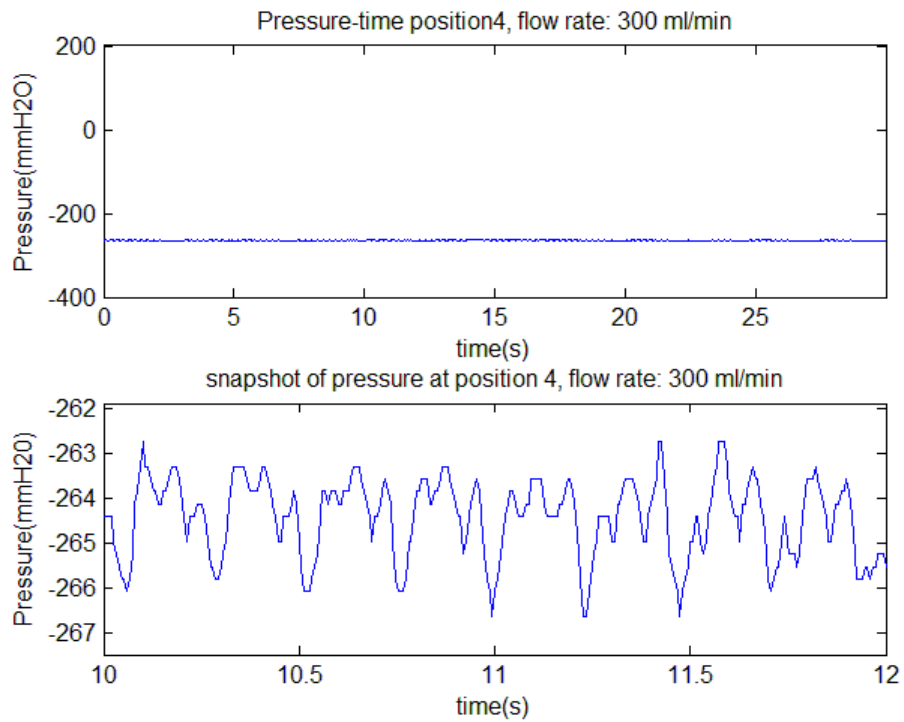
(γ) θέση 2 (upstream)



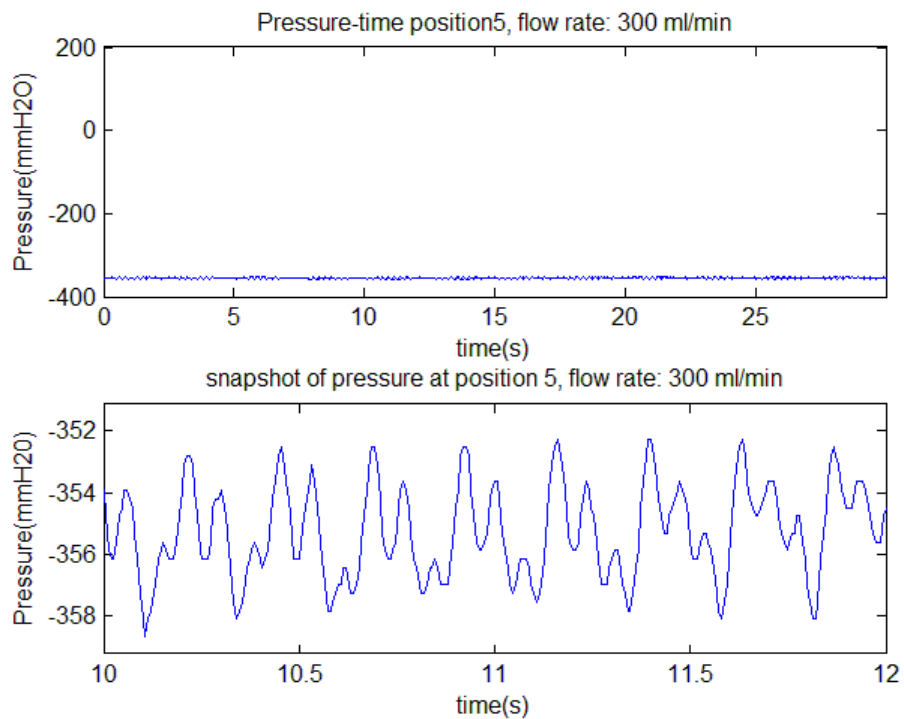
(δ) θέση 3 (upstream)



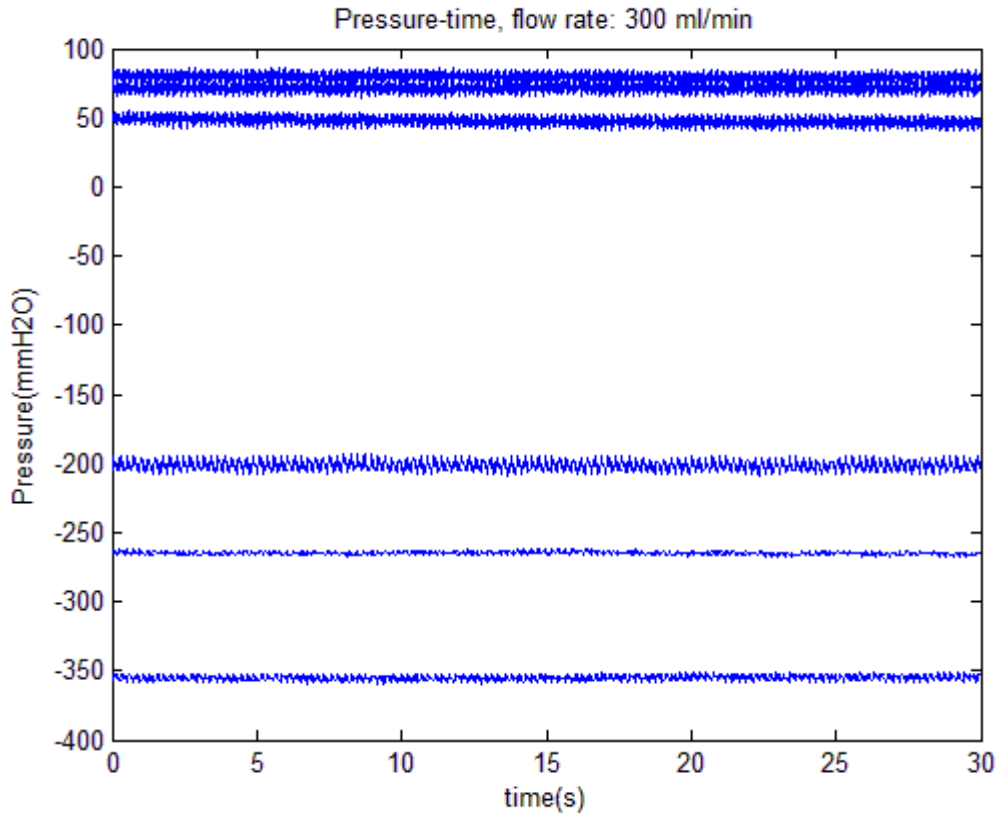
(ε) θέση 4 (upstream)



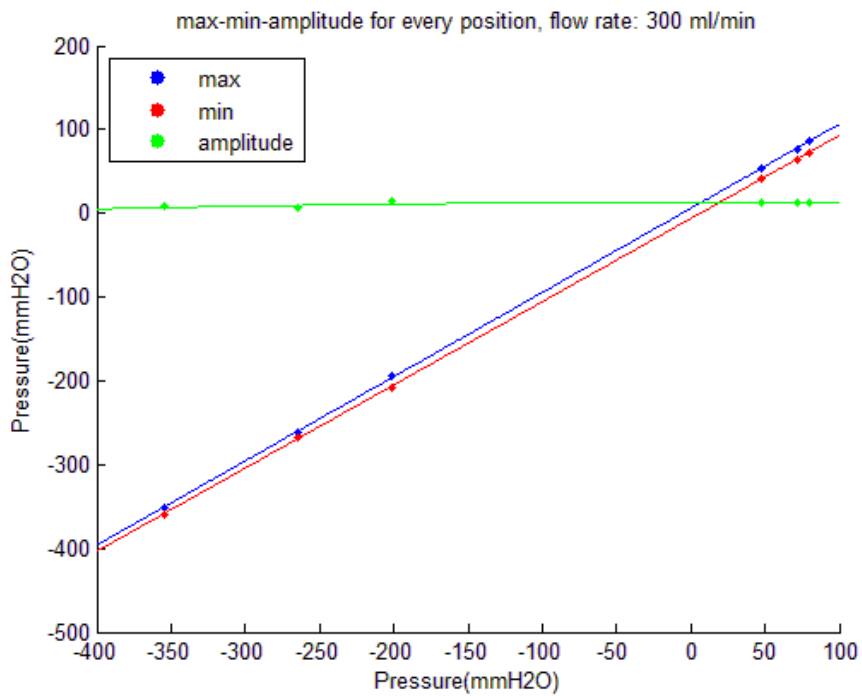
(στ) θέση 5 (upstream)



Εικόνα 3.21 Διακύμανση των upstream πιέσεων συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες θέσεις της βάνας για παροχή 300 ml/min.



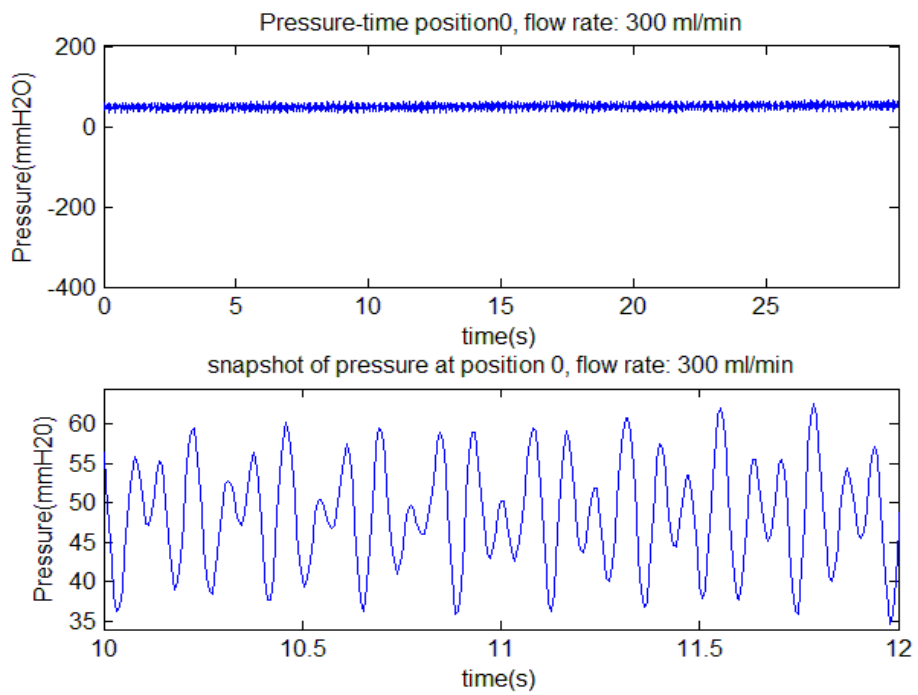
Εικόνα 3.22 Η upstream πίεση συναρτήσει του χρόνου για όλες τις θέσεις της βάνας για παροχή 300 ml/min.



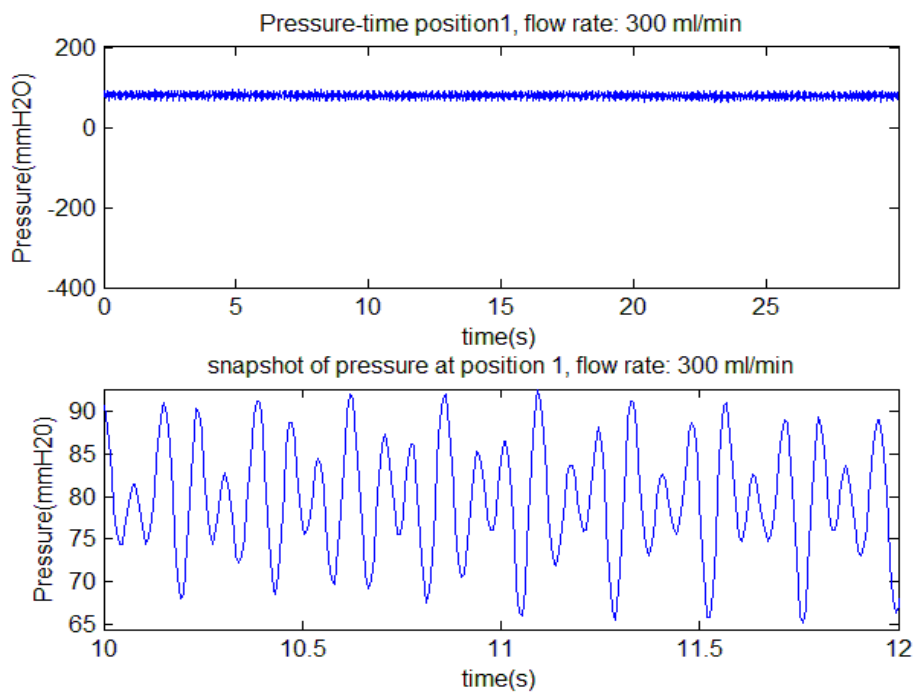
Εικόνα 3.23 Καμπύλες μέγιστης, ελάχιστης και πλάτους πιέσεων για παροχή 300 ml/min, upstream του αγωγού.

Downstream

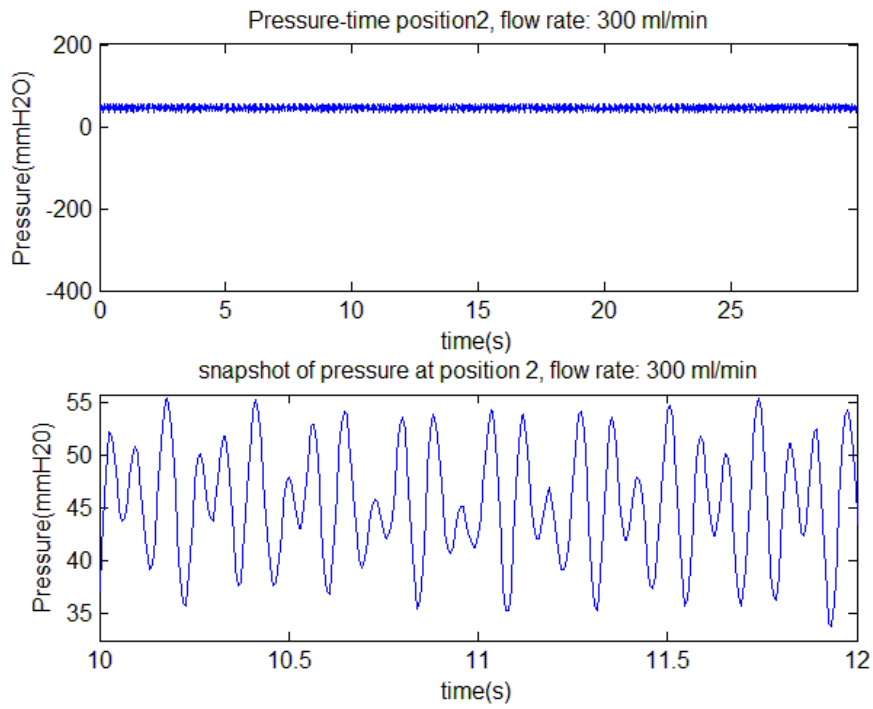
(α) θέση 0 (downstream)



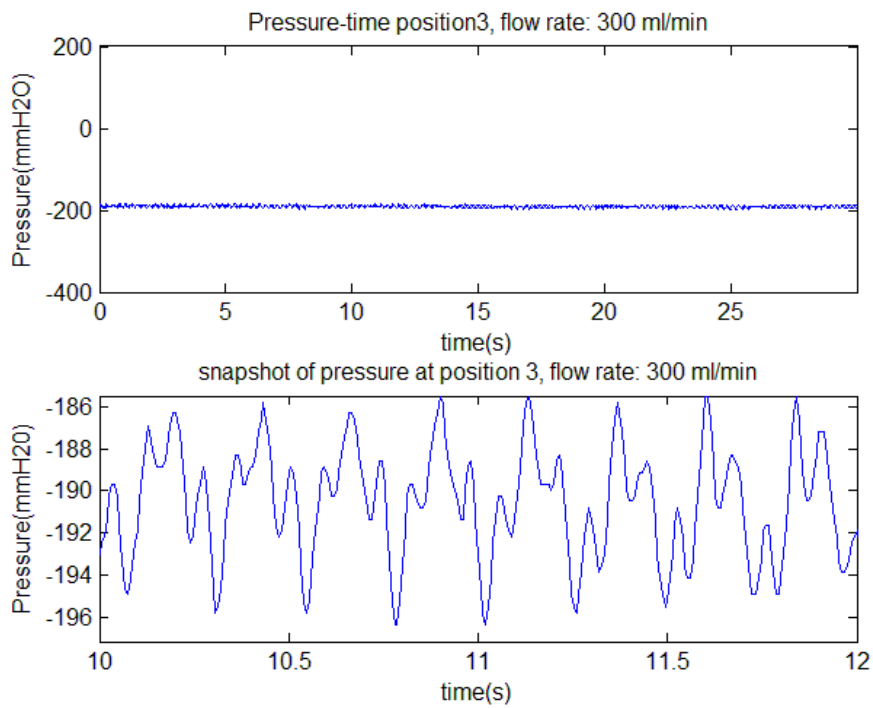
(β) θέση 1



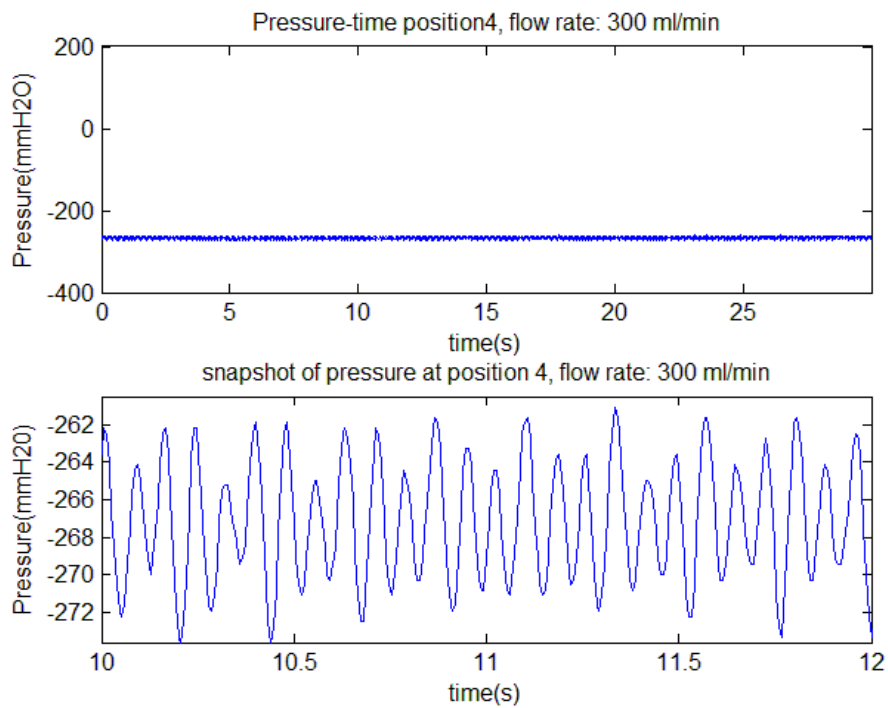
(γ) θέση 2



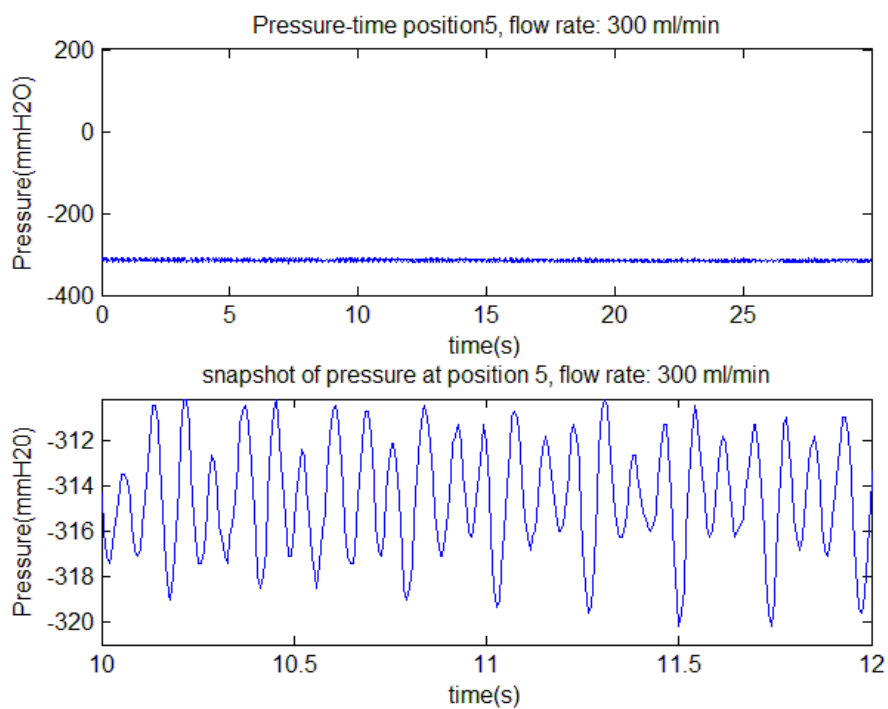
(δ) θέση 3



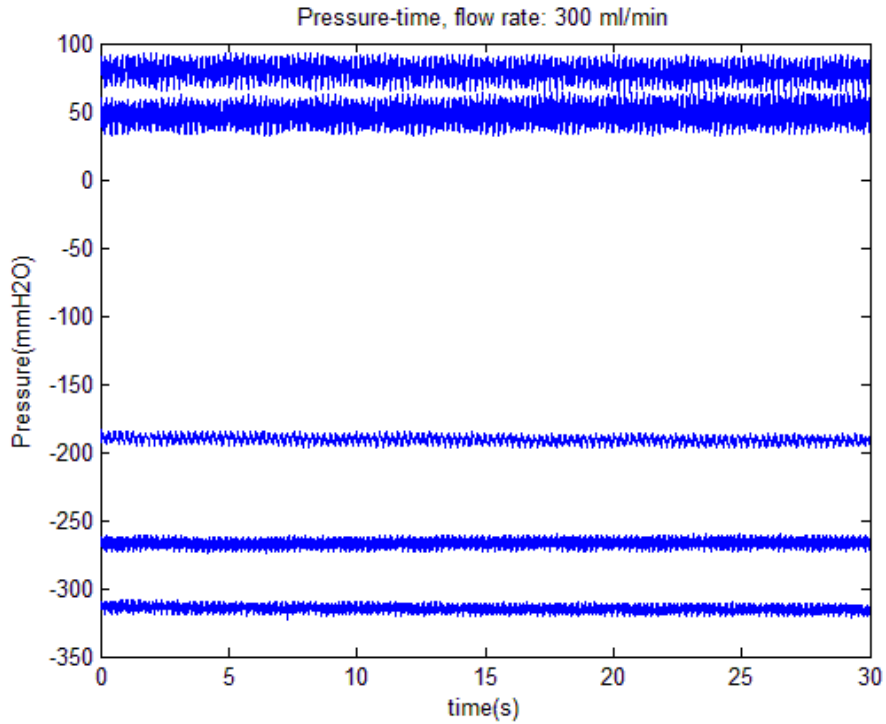
(ε) θέση 4



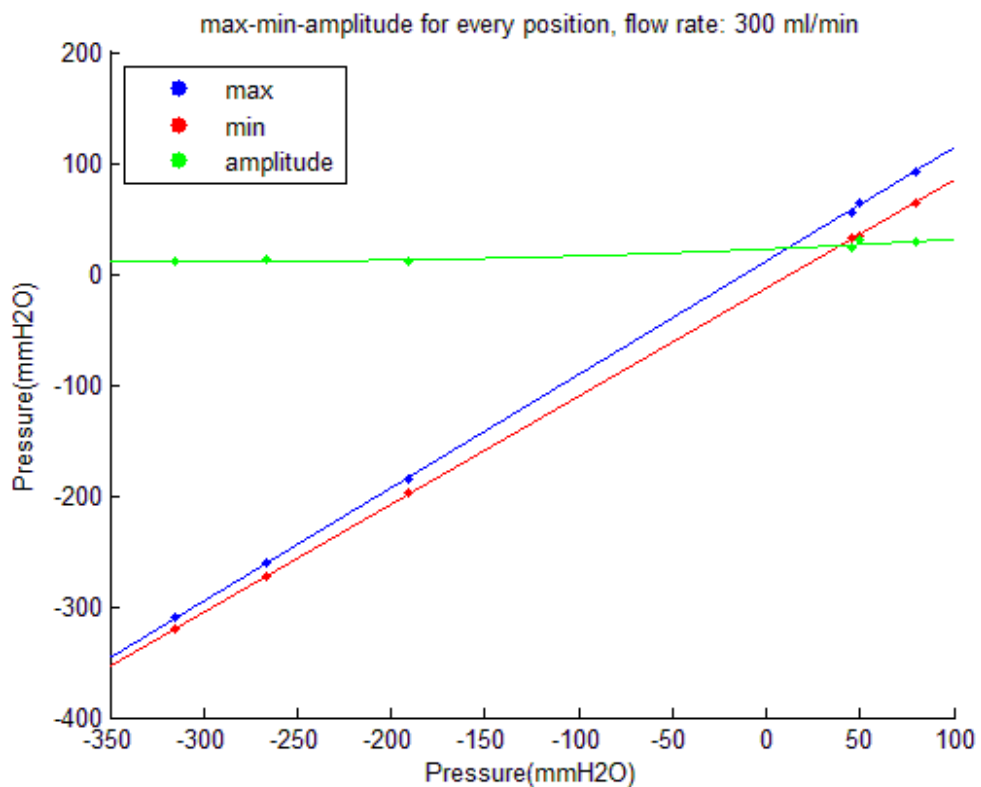
(στ) θέση 5



Εικόνα 3.24 Διακόμανση της downstream πίεσης συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες θέσεις της βάνας για παροχή 300ml/min.



Εικόνα 3.25 Η downstream πίεση συναρτήσει του χρόνου για όλες τις θέσεις της βάνας για παροχή 300 ml/min.



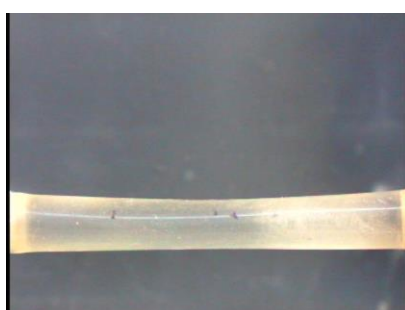
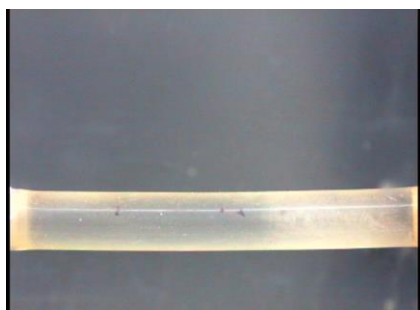
Εικόνα 3.26 Οι καμπύλες προσαρμογής της μέγιστης, ελάχιστης και του πλάτους πίεσης για 300ml/min, downstream του αγωγού.

Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από τις εικόνες 3.21 έως 3.26 είναι πως το πλάτος των πιέσεων τόσο downstream όσο και upstream έχει μειωθεί σημαντικά σε σχέση με τις καμπύλες των 210 ml/min, στις δε upstream πιέσεις σχεδόν μηδενίζεται, υπονοώντας πως ενδεχομένως να μην υπάρχει ταλάντωση σε καμία θέση σε αυτήν την παροχή (300 ml/min). Η μείωση αυτή είναι περίπου 50% των πλατών πίεσης σε σχέση με αυτές των 210 ml/min τόσο upstream όσο και downstream του αγωγού, σε οποιαδήποτε θέση βάνας εκτός από τη θέση 5 downstream, όπου έχουμε περίπου το ίδιο πλάτος. Οι κυματομορφές των πιέσεων διατηρούν το ίδιο σχήμα με αυτές των 210 ml/min. Η βασική περίοδος των ταλαντώσεων είναι σε όλες τις περιπτώσεις $T=0.24$ sec, ενώ εμφανίζονται και μικρότερου πλάτους ταλαντώσεις με μεγαλύτερες συχνότητες, περίπου 10 Hz.

Παροχή 390 ml/min

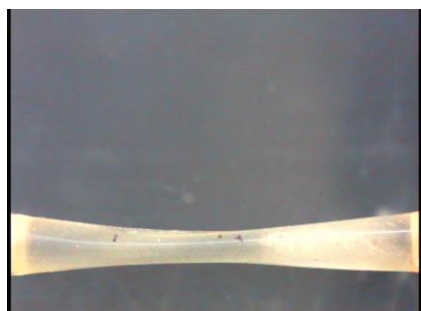
(α) θέση 0,1,2

(β) θέση 3



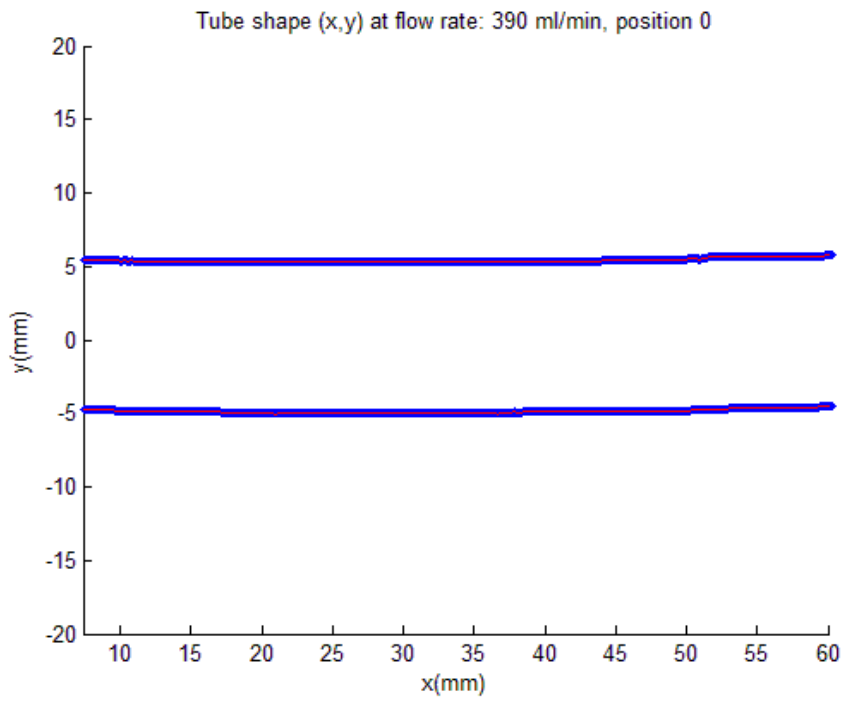
(γ) θέση 4

(δ) θέση 5

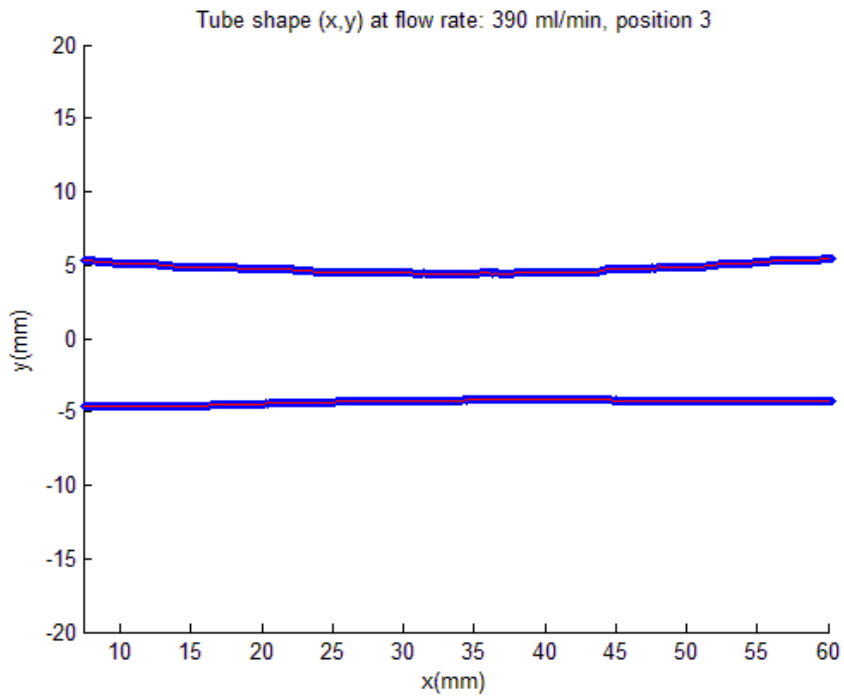


Εικόνα 3.27 Εξέλιξη της διατομής του αγωγού συναρτήσει της θέσης της βάνας για παροχή 300 ml/min.

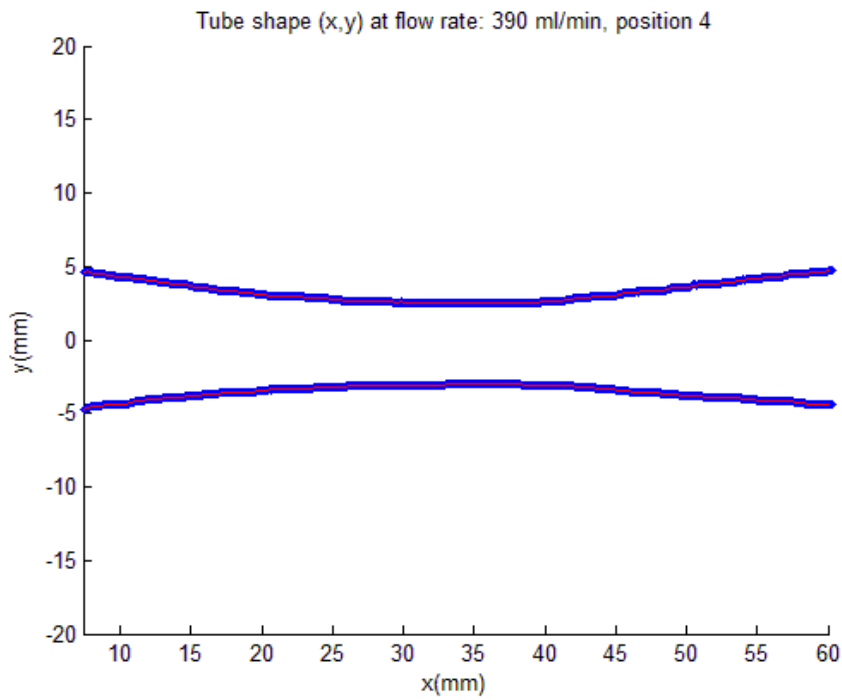
(α) θέση 0,1,2



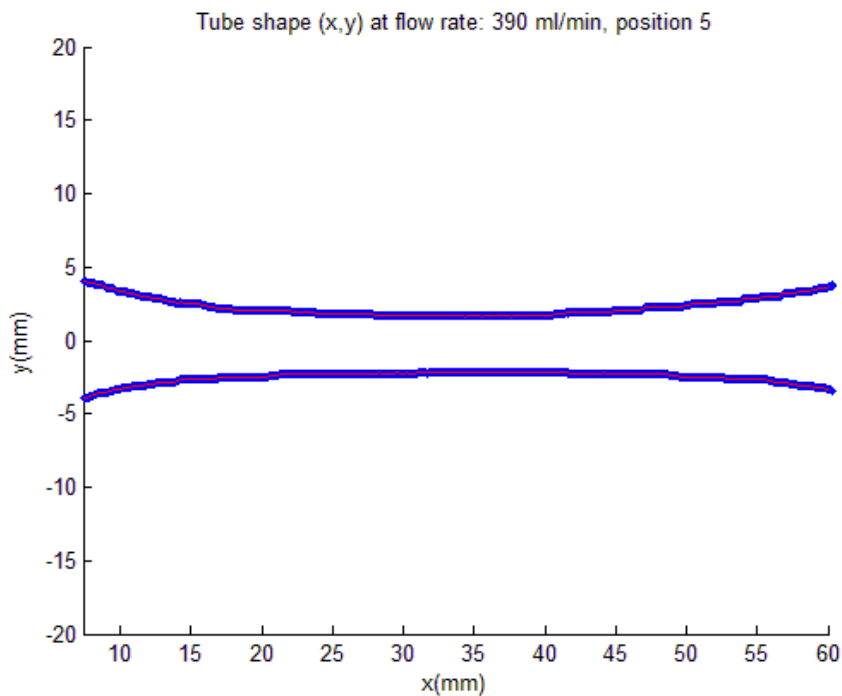
(β) θέση 3



(γ) θέση 4



(δ) θέση 5

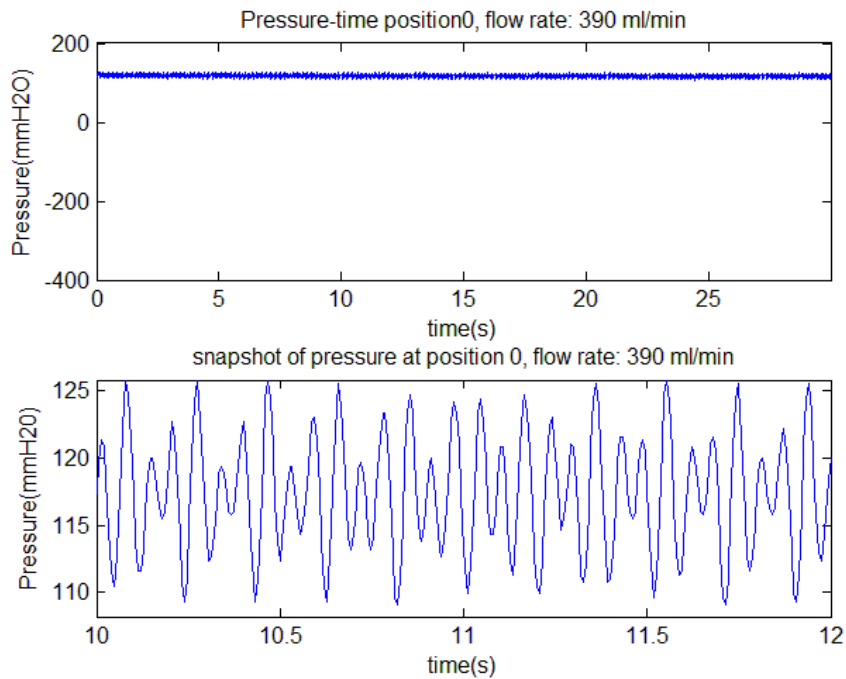


Εικόνα 3.28 Σχήμα αγωγού για τις 7 θέσεις βάνας για παροχή 390 ml/min.

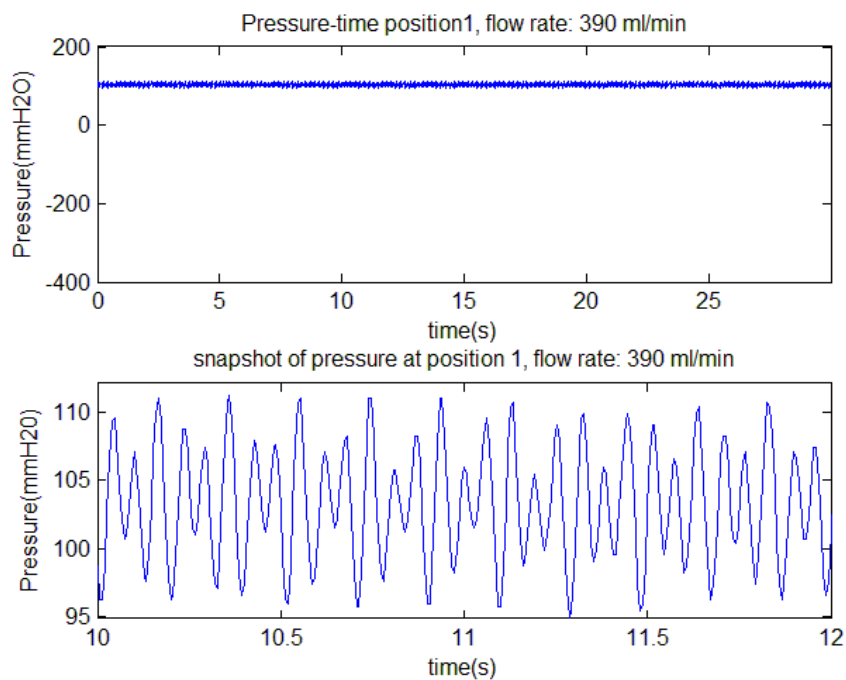
Ξαναβλέπουμε το ίδιο μοτίβο στο σχήμα του αγωγού με τις προηγούμενες περιπτώσεις, δηλαδή σχεδόν ανεπαίσθητες διαφοροποιήσεις μεταξύ των θέσεων 0,1 και 2, αρχή του λυγισμού στη θέση 3 και από εκεί και πέρα έντονο λυγισμό μέχρι την επαφή των τοιχωμάτων. Ακολουθούν οι μετρήσεις πίεσης.

Upstream

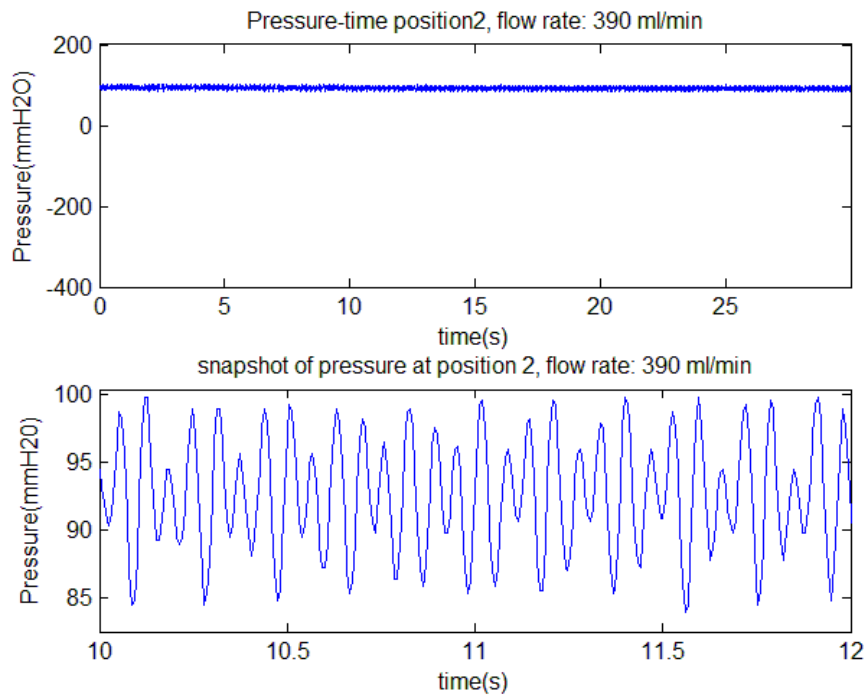
(α) θέση 0 (upstream)



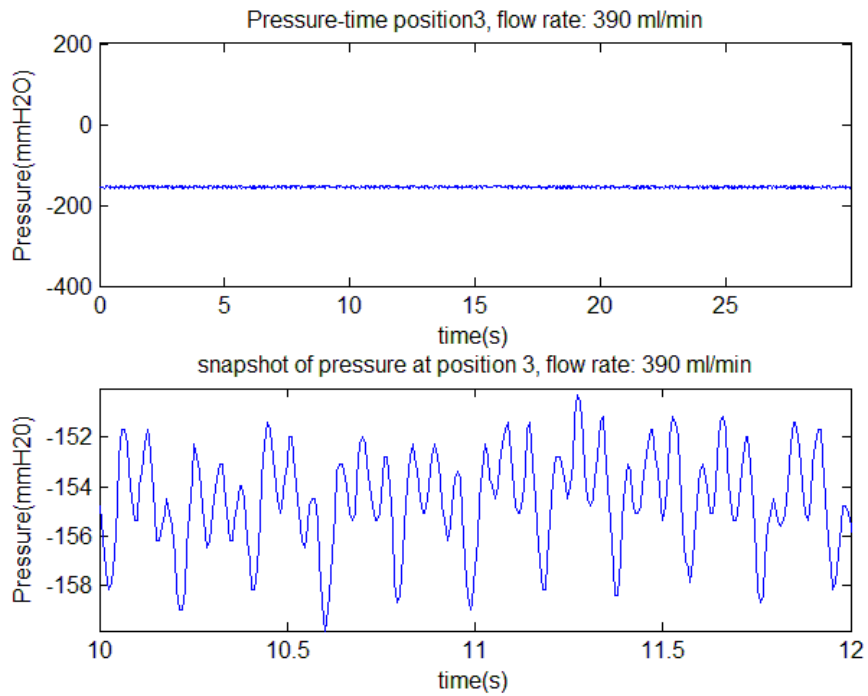
(β) θέση 1 (upstream)



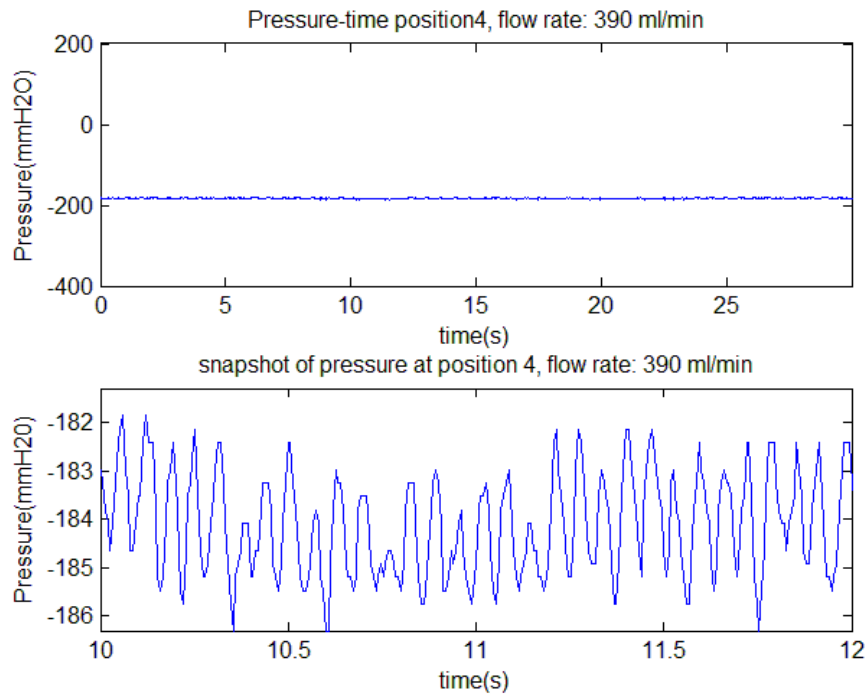
(γ) θέση 2 (upstream)



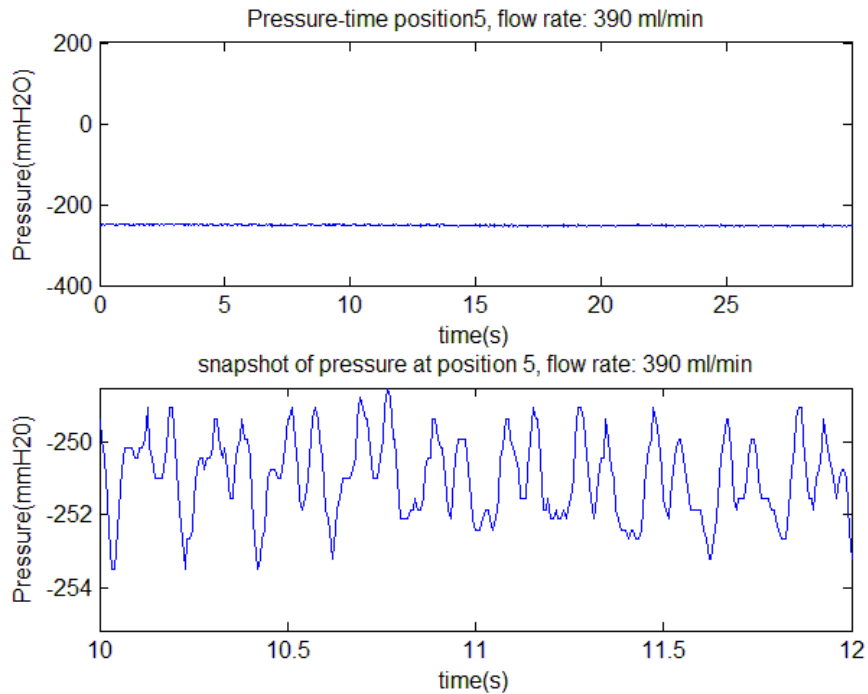
(δ) θέση 3 (upstream)



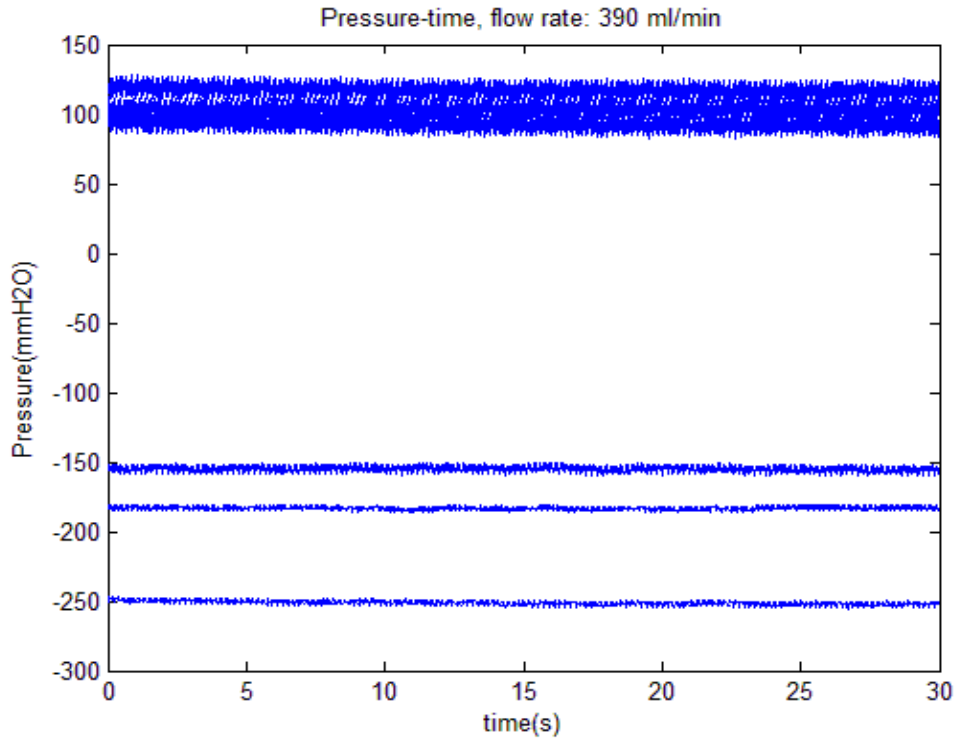
(ε) θέση 4 (upstream)



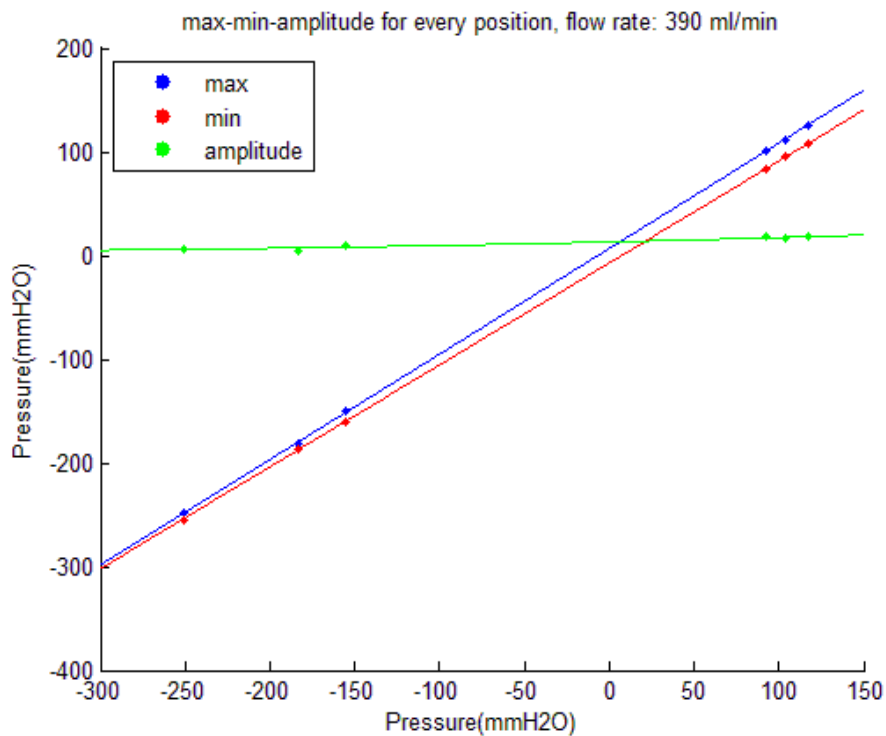
(στ) θέση 5 (upstream)



Εικόνα 3.29 Διακύμανση της upstream πίεσης συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες θέσεις της βάνας για παροχή 390 ml/min.



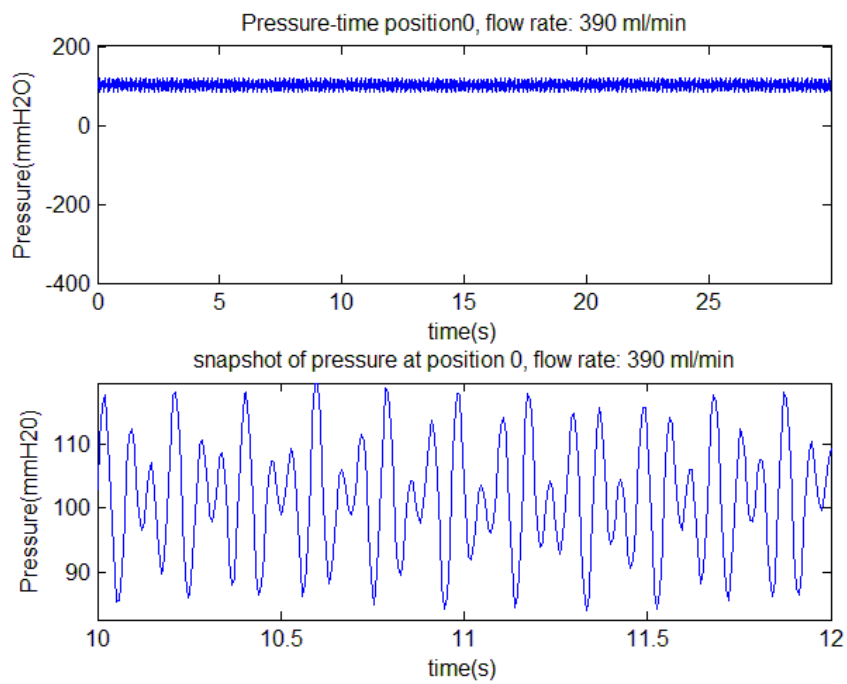
Εικόνα 3.30 Upstream πιέσεις για όλες τις θέσεις της βάνας συναρτήσει του χρόνου για παροχή 390 ml/min. Παρατηρείται η μικρή διαφορά που έχουν οι πρώτες 3 θέσεις μεταξύ τους σε αντίθεση με τις υπόλοιπες (αρνητικές πιέσεις).



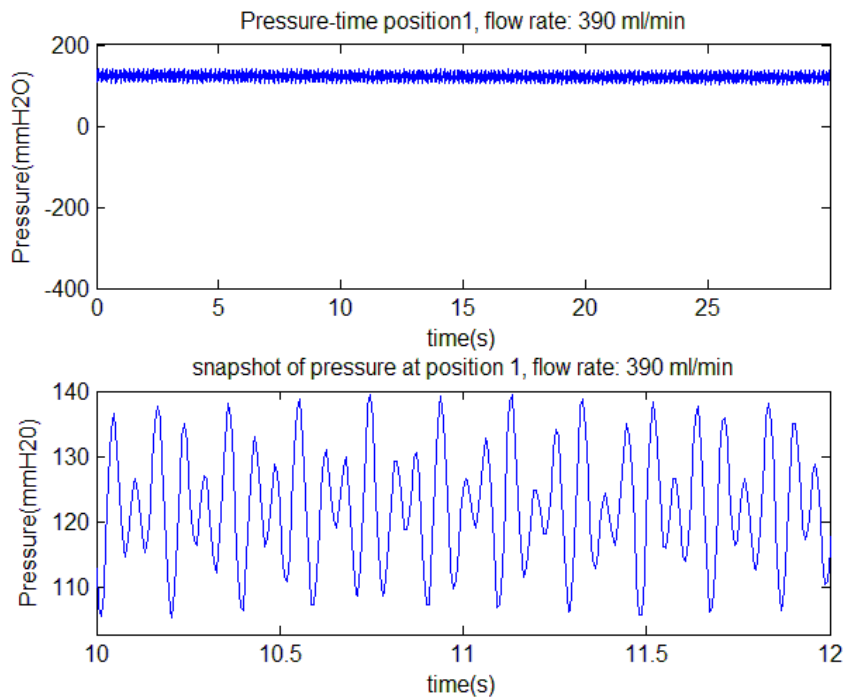
Εικόνα 3.31 Μέγιστη, ελάχιστη και πλάτος πίεσης για 390ml/min, downstream.

Downstream

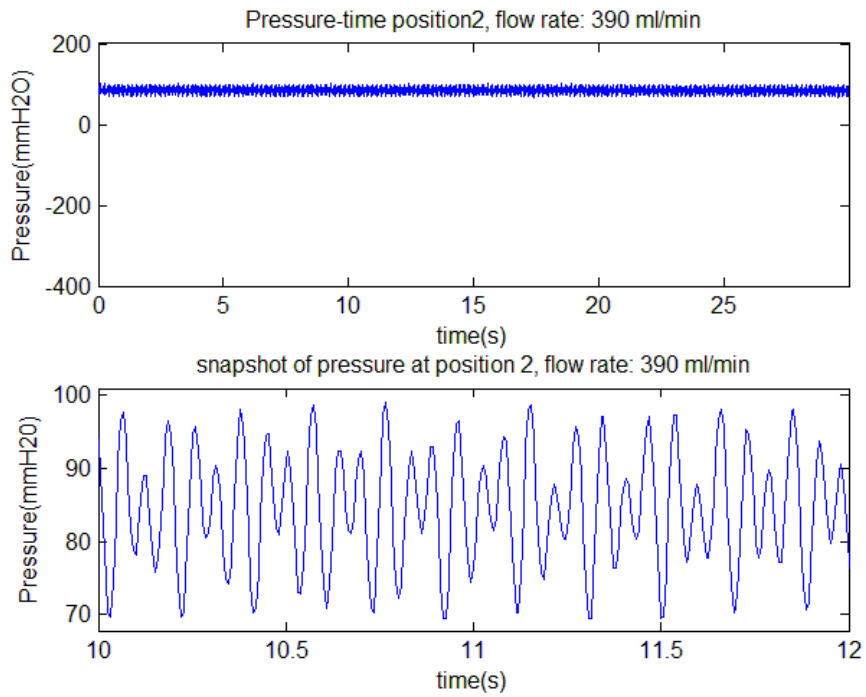
(α) θέση 0 (downstream)



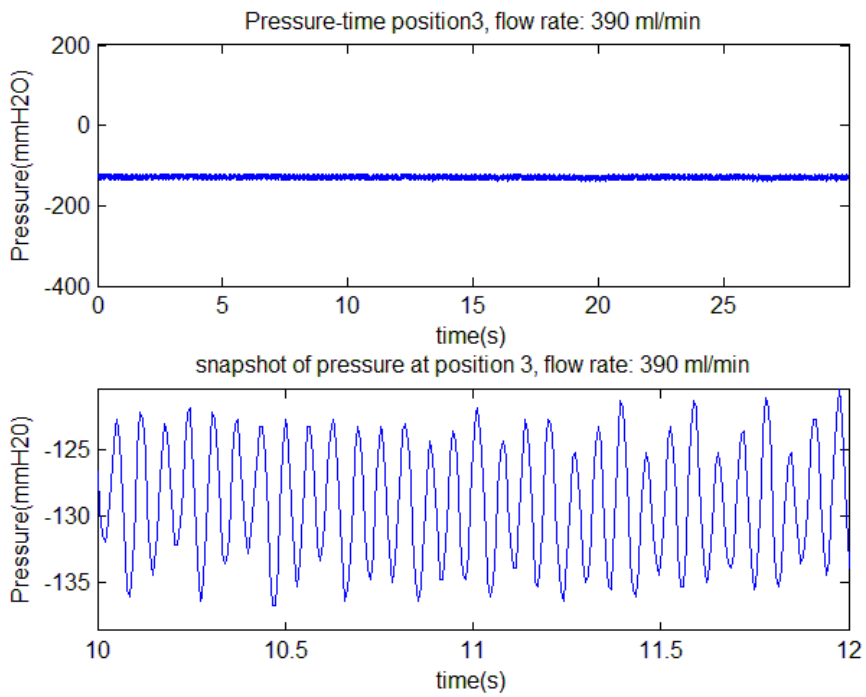
(β) θέση 1 (downstream)



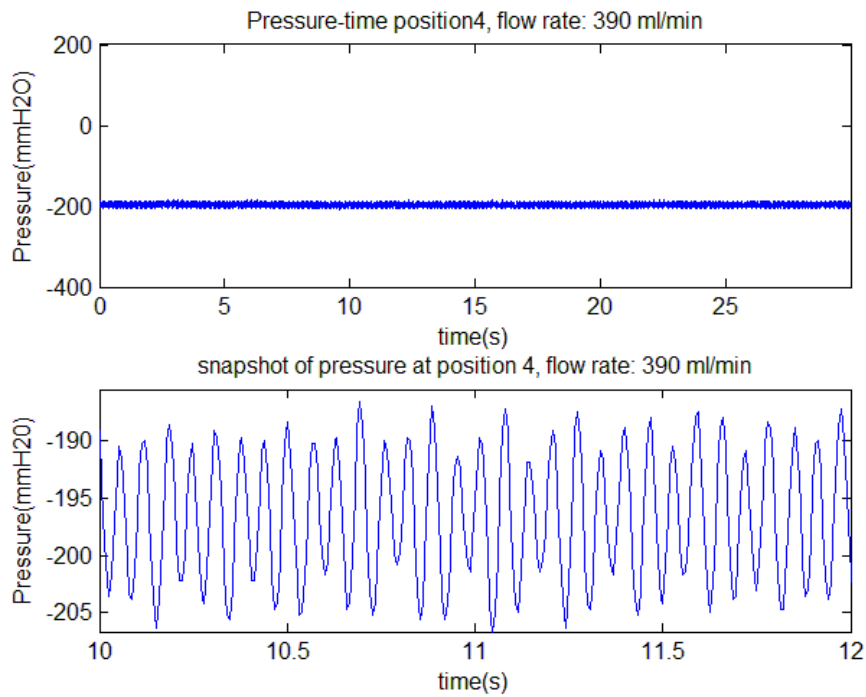
(γ) θέση 2 (downstream)



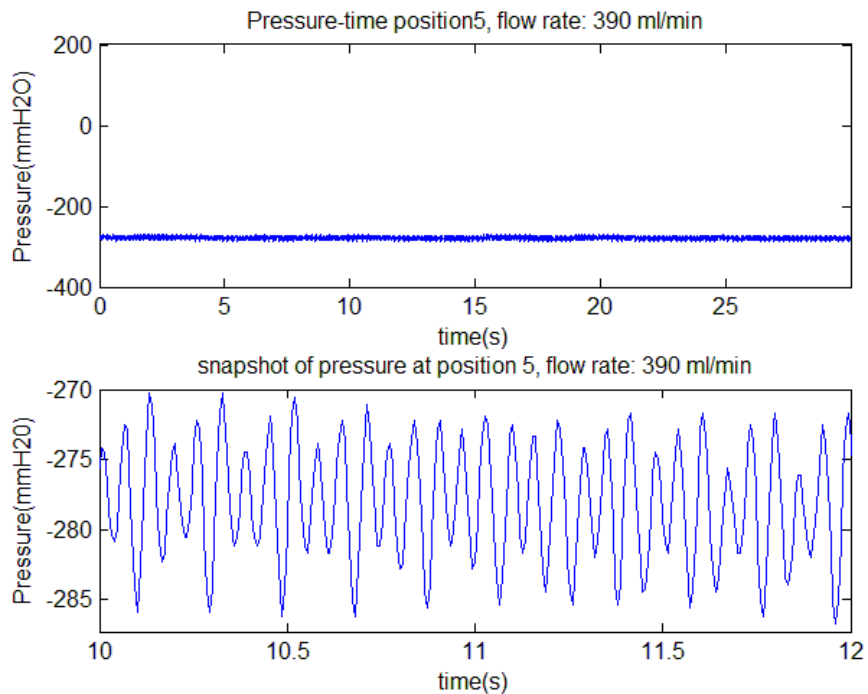
(δ) θέση 3 (downstream)



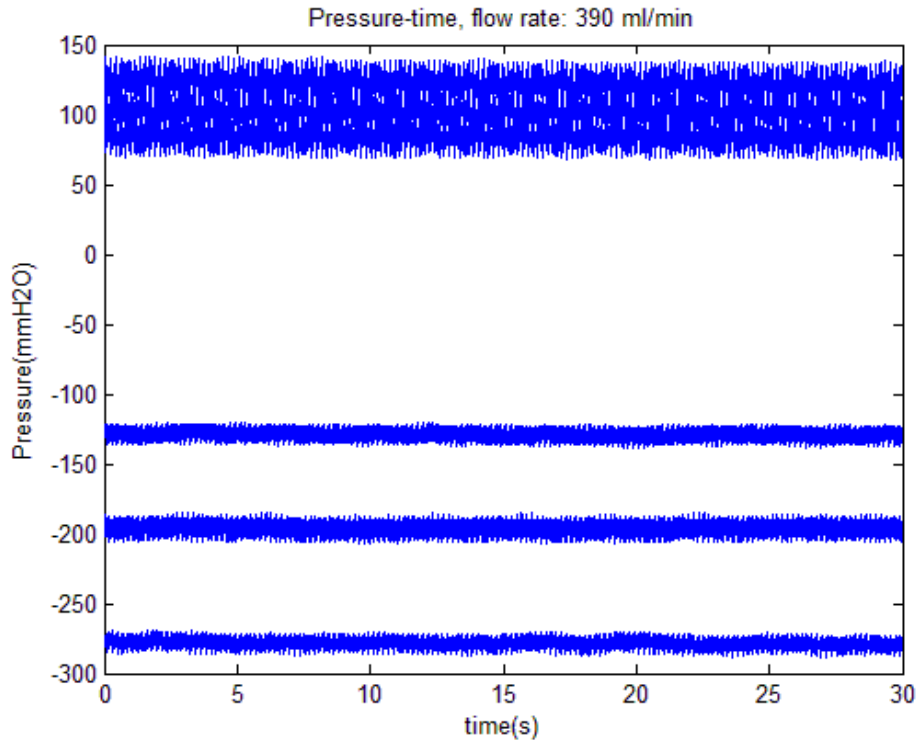
(ε) θέση 4 (downstream)



(στ) θέση 5 (downstream)



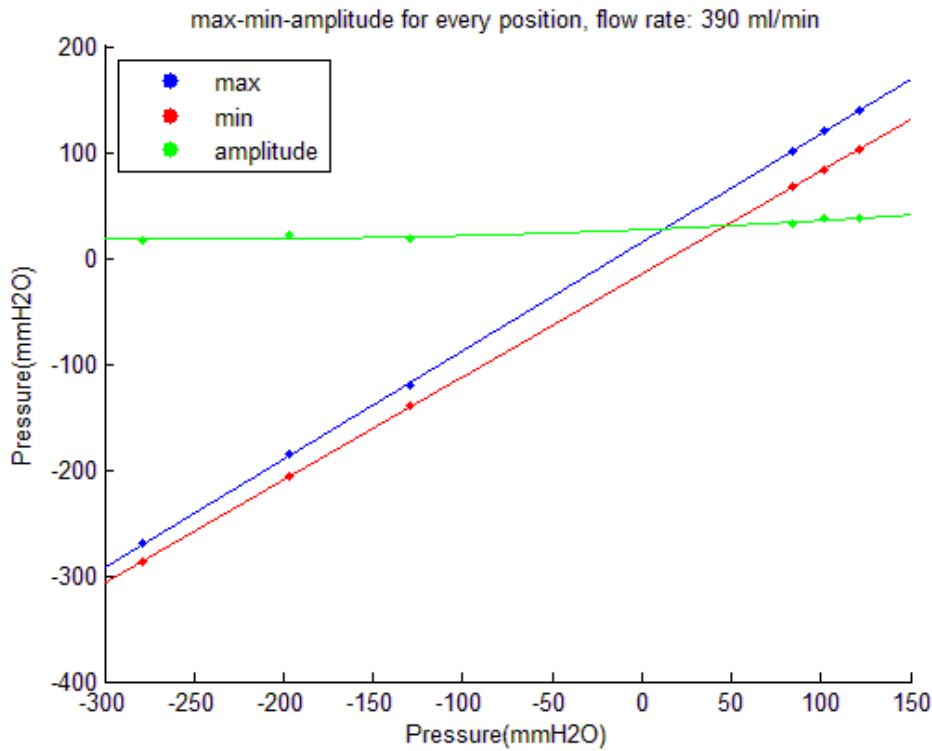
Εικόνα 3.32 Διακύμανση της πίεσης συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες θέσεις της βάνας για παροχή 390ml/min.



Εικόνα 3.33 Downstream διακύμανση πίεσης συναρτήσει του χρόνου για όλες τις θέσεις της βάνας για παροχή 390 ml/min. Διαβάζοντας από πάνω προς τα κάτω πρώτη είναι η θέση 1 και μετά η θέση 0 και καταλήγουμε στη θέση 6 (μικρότερη πίεση).

Σε αυτή την παροχή (390 ml/min) παρατηρούμε μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης της πίεσης ιδιαίτερα για την downstream πίεση. Η εξέλιξη του πλάτους πίεσης είναι, τόσο για upstream όσο και για downstream, ιδιαίτερα ομαλή και προσεγγίζει την ευθεία γραμμή. Τα μεγαλύτερα πλάτη παρατηρούνται στις πιο ανοικτές θέσεις, πριν αρχίσει ο λυγισμός, γεγονός που και πάλι όπως και στην περίπτωση των 300 ml/min ίσως μαρτυρά απουσία ταλαντώσεων των τοιχωμάτων. Η διατήρηση του πλάτους ταλάντωσης στην πολύ κλειστή θέση (θέση 6) για την downstream πίεση μπορεί να οφείλεται σε κάποια διατάραξη της ροής ή ακόμα και σε εισροή αέρα στο δίκτυο λόγω της πολύ χαμηλής πίεσης του αγωγού, η οποία αλλοιώνει τα αποτελέσματα. Εδώ η βασική περίοδος ταλάντωσης έχει πέσει και είναι ίση με $T=0.19$ sec, ενώ και πάλι υπάρχουν μικρότερου πλάτους ταλαντώσεις με μεγαλύτερες συχνότητες έως και 10Hz.

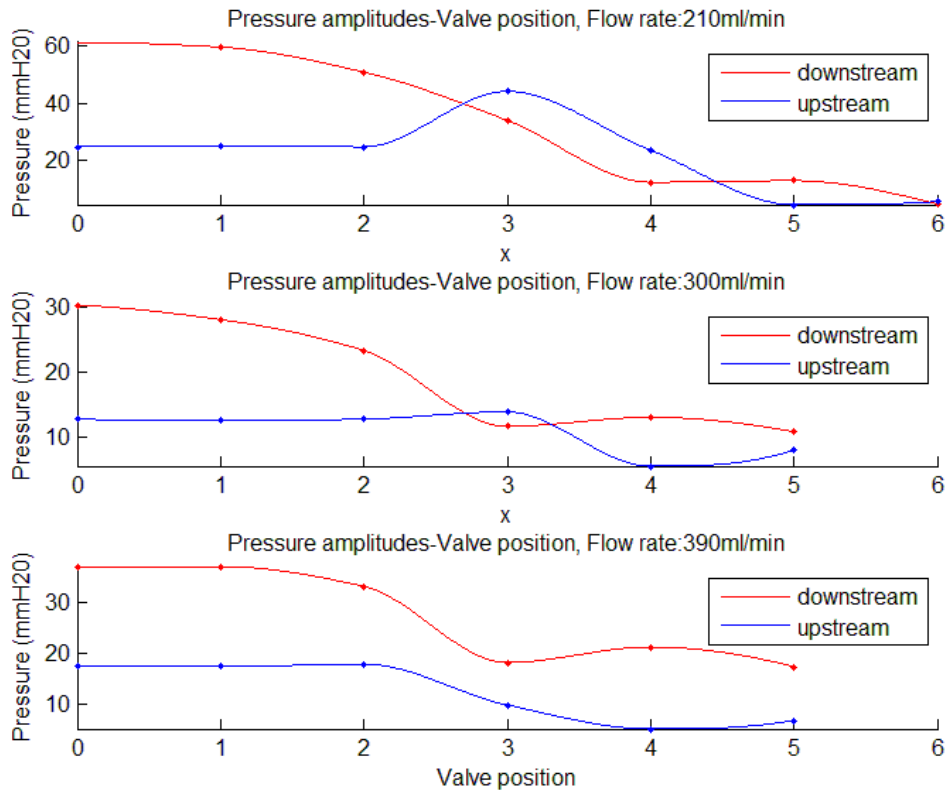
Όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων των σημάτων πίεσης αλλά και οι καμπύλες που προέκυψαν θα συγκριθούν στην επόμενη παράγραφο (βλ. 3.2.3), όπου χαράσσουμε επιπλέον καμπύλες και με τις τρεις παροχές (εικ. 3.36,3.37) μαζί, αλλά και downstream, upstream πιέσεις μαζί (εικ. 3.35) για μία πιο άμεση και ξεκάθαρη εικόνα της συμπεριφοράς της πίεσης.



Εικόνα 3.34 Μέγιστες, ελάχιστες πιέσεις και πλάτος πιέσεων συναρτήσει της θέσης της βάνας για παροχή 390 ml/min, downstream του αγωγού.

3.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πίεσης

Η εξέλιξη του πλάτους ταλάντωσης των σημάτων πίεσης είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς μεταβολές του αποκαλύπτουν αλλαγές στη ροή που πιθανότατα προκαλούνται από κίνηση των τοιχωμάτων του αγωγού ή από μεταβολή της διατομής του. Περιοδικές αλλαγές στην πίεση τροφοδοτούνται από την περιοδικότητα της ροής που επιβάλλεται από μία επίσης περιοδική κίνηση των τοιχωμάτων του εύκαμπτου αγωγού. Η βασική αιτία έχει να κάνει με τη μεταβλητή αντίσταση της διατομής του αγωγού. Μία υπόθεση είναι πως όταν, στιγμιαία, η διατομή φτάνει στο μικρότερο εμβαδόν της, δηλαδή στη μεγαλύτερη αντίσταση, τότε αυξάνει η πίεση upstream της διατομής κατάρρευσης και στη συνέχεια ξαναπέφτει όταν ανοίγει ο αγωγός. Αυτή η μεταφορά πληροφορίας από το λαιμό μέχρι τον αισθητήρα στην upstream θέση γίνεται μέσω του ρευστού, συνεπώς πρέπει να υπάρχει μια μικρή διαφορά φάσης ανάμεσα στη ταλάντωση του αγωγού και αυτή της πίεσης αλλά η περίοδος αναμένεται να είναι ίδια. Αντιθέτως, η downstream πίεση να μην ακολουθεί την ίδια τροχιά με την upstream όσον αφορά τις μέσες πιέσεις (βλ. **εικόνα 3.10**), παρουσιάζει όμως σημαντική διαφορά στην εξέλιξη του πλάτους ταλάντωσης. Στην **εικόνα 3.35** συγκρίνουμε την εξέλιξη των πλατών ταλάντωσης upstream και downstream για κάθε παροχή και παρατηρούμε πως στη θέση 3 για 210 ml/min ενώ το πλάτος ταλάντωσης upstream μεγαλώνει, το πλάτος ταλάντωσης downstream συνεχίζει την καθοδική του πορεία.

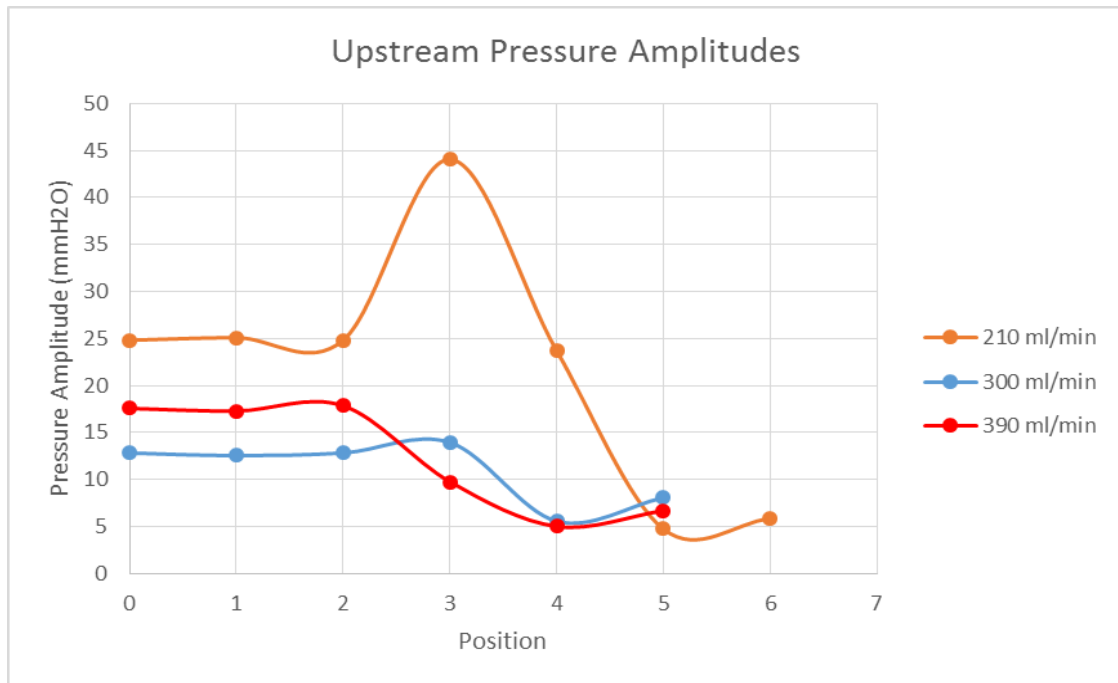


Εικόνα 3.35 Σύγκριση των Upstream και downstream πλάτων πίεσης συναρτήσει της θέσης της βάνας για τις τρεις παροχές του πειράματος.

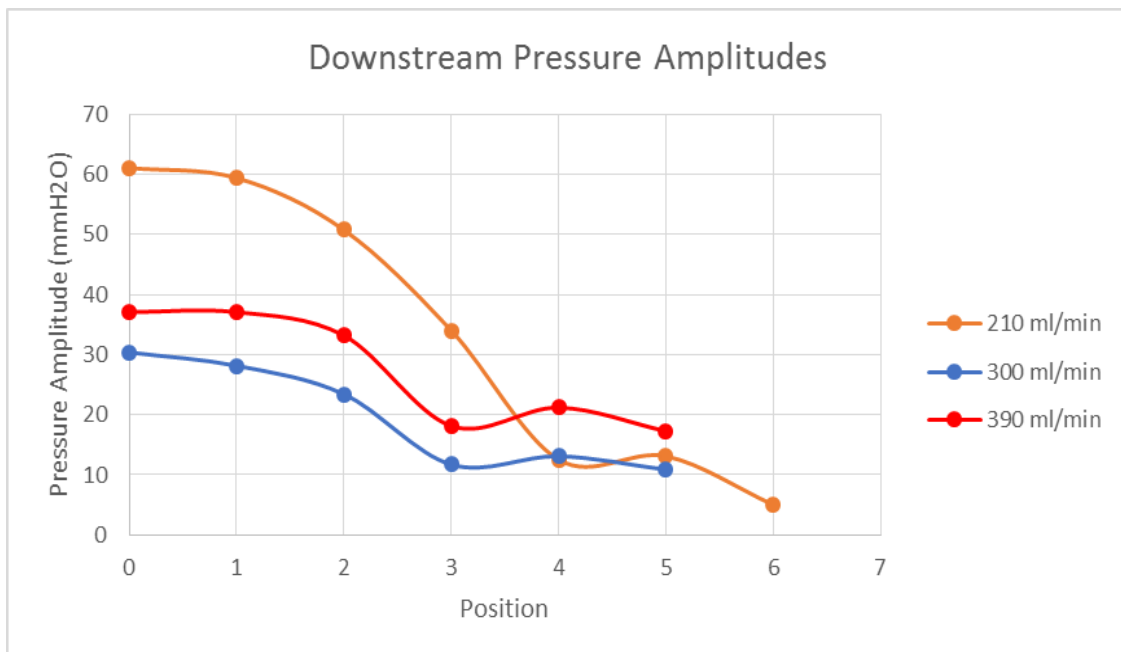
Ένα δεύτερο βασικό στοιχείο που προκύπτει είναι τα μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης της downstream πίεσης, τα οποία στις αρχικές θέσεις είναι παραπάνω από 200% μεγαλύτερα των upstream. Αυτή η διαφορά, πιθανότατα, οφείλεται στο γεγονός ότι ο αγωγός δρα ως αποσβεστήρας και όταν δημιουργείται ο λαιμός, ταυτόχρονα φουσκώνει το ανάντι τμήμα του αγωγού μετριάζοντας έτσι την αύξηση της upstream πίεσης. Στη θέση 3 και 4 της βάνας για 210 ml/min το upstream πλάτος ξεπερνά το downstream. Στη θέση του λυγισμού (θέση 3) για 300ml/min τα πλάτη είναι περίπου ίσα ενώ στην τελευταία περίπτωση (παροχή 390 ml/min) έχουν την ίδια εξέλιξη συναρτήσει της πτώσης πίεσης του δικτύου κρατώντας τη διαφορά τους σχετικά σταθερή, εκτός από τη θέση λυγισμού όπου παρατηρείται ένα τοπικό ελάχιστο για το downstream πλάτος.

Στις εικόνες 3.36,3.37 συγκρίνουμε, ξεχωριστά για upstream και downstream, τα πλάτη πίεσης για τις τρεις παροχές. Εδώ γίνονται πιο ξεκάθαρα αντιληπτές οι μεγαλύτερες τιμές του πλάτους ταλάντωσης για 210 ml/min, τόσο upstream όσο και downstream. Με αύξηση της παροχής τα πλάτη πέφτουν αλλά ξαναυξάνονται για παροχή 390 ml/min. Επίσης, σε αυτά τα διαγράμματα φαίνεται πιο καθαρά το peak στο upstream πλάτος ταλάντωσης στη θέση 3 για παροχή 210 ml/min, όπου παρατηρείται ταλάντωση του εύκαμπτου αγωγού με σχετικά μεγάλο πλάτος. Αντίθετα, στο downstream πλάτος διακρίνονται τοπικά ελάχιστα στη θέση 3 για παροχές 390 και 300 ml/min και στη θέση 4 για παροχή 210 ml/min.

Αυτά τα ακρότατα εμφανίζονται σε περιοχές που παρατηρήσαμε ταλαντώσεις. Συνεπώς, μία σύγκριση της κίνησης των τοιχωμάτων με τις πιέσεις είναι απαραίτητη.



Εικόνα 3.36 Διάγραμμα upstream πλάτους πίεσης συναρτήσει της θέσης της βάνας για τις τρεις παροχές του πειράματος. Η προσαρμογή των πειραματικών σημείων (1 για κάθε θέση) έχει γίνει με b-splines.



Εικόνα 3.37 Διάγραμμα downstream πλάτους πίεσης συναρτήσει της θέσης της βάνας για τις τρεις παροχές του πειράματος. Η προσαρμογή των πειραματικών σημείων (1 για κάθε θέση) έχει γίνει με b-splines.

3.2.4 Ταλάντωση εύκαμπτου αγωγού

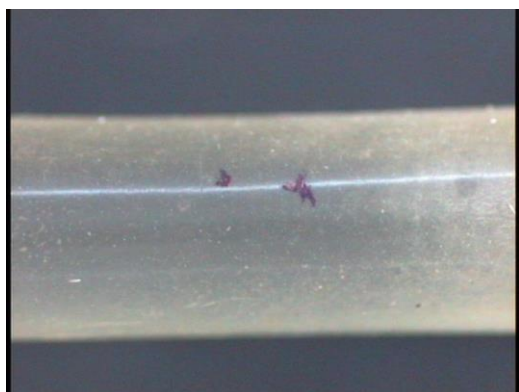
Οι συνθήκες για τις οποίες εντοπίσαμε, με τη βοήθεια της κάμερας, ταλαντώσεις του εύκαμπτου αγωγού είναι οι εξής:

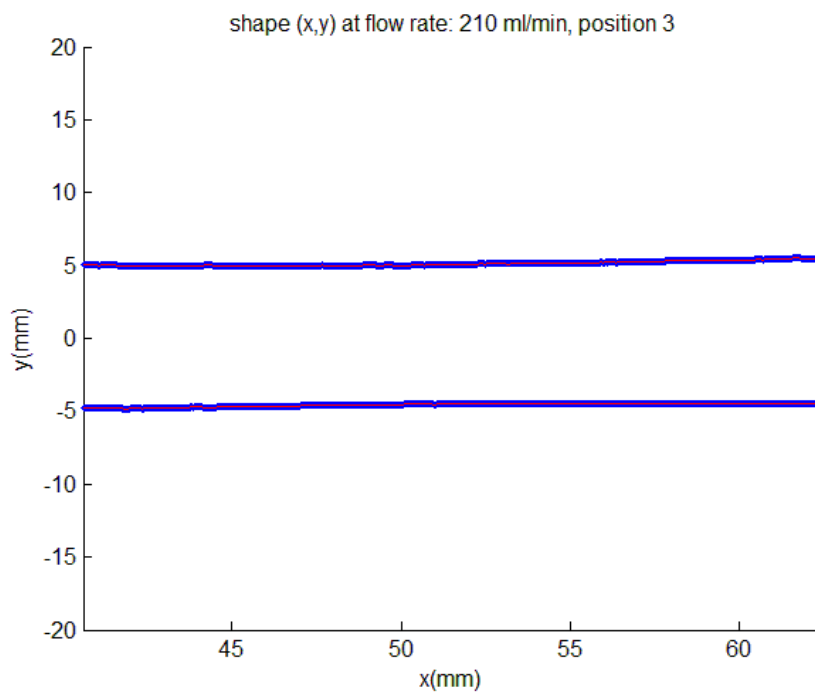
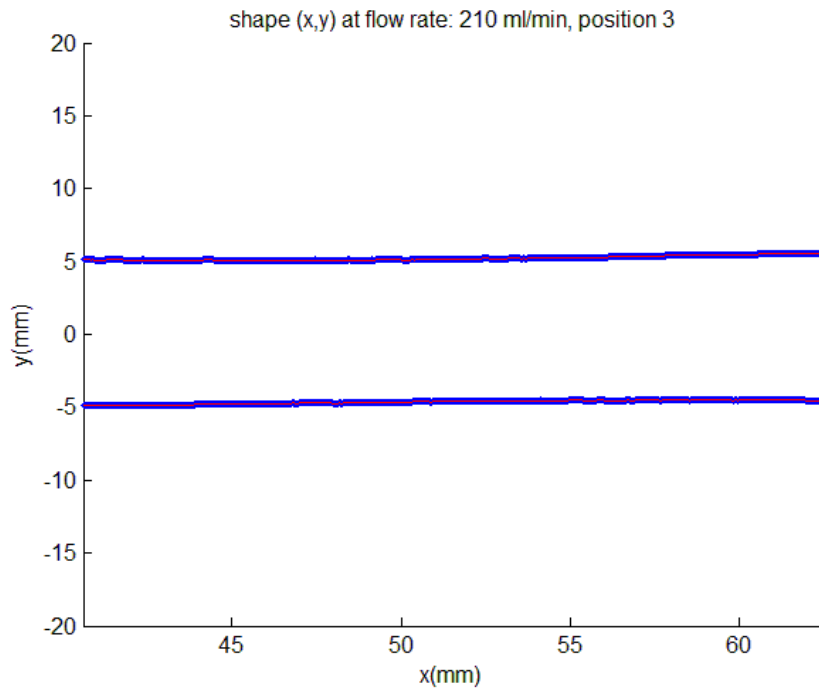
- (1) Για παροχή 210 ml/min και θέση βάνας 3,4
- (2) Για παροχή 300 ml/min και θέση βάνας 3,4
- (3) Για παροχή 390 ml/min και θέση βάνας 3

Από αυτές τις περιπτώσεις πιο έντονες ήταν οι ταλαντώσεις για παροχή 210 ml/min. Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, πήραμε πιο κοντινές λήψεις, όπως της **εικόνας 3.38**, καθώς οι ταλαντώσεις ήταν αρκετά μικρού πλάτους. Πάνω στον αγωγό σημειώνουμε το κέντρο του κατά τον άξονα x (35 mm από αριστερά). Στη συνέχεια απομονώσαμε αρκετά συνεχόμενα frames από κάθε λήψη με τη χρήση του λογισμικού Pinnacle Studio 12 τα οποία επεξεργαζόμαστε στη Matlab με σκοπό να αποτυπώσουμε το σχήμα του αγωγού σε κάθε frame. Ο κώδικας της επεξεργασίας των εικόνων βρίσκεται στο παράρτημα Α, στο τέλος της εργασίας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με αυτή της παραγράφου **3.2.2** (βλ. σελ.65) για την εύρεση των σχημάτων του αγωγού και συνοψίζεται στην εξής λογική. Απομονώνουμε τον αγωγό από το background χάρη στην έντονη διαφορά της έντασης φωτεινότητας (το background είναι μαύρο). Η απομόνωση γίνεται απλά ορίζοντας ένα κατώφλι κάτω από το οποίο θεωρούμε πως το pixel δε αποτελεί μέρος του αγωγού. Εξετάζουμε αυτή τη συνθήκη για κάθε pixel της εικόνας και έτσι τελικά κρατάμε μόνο τον αγωγό από το εκάστοτε frame. Έπειτα, ξεχωρίζουμε τα όρια του αγωγού, δηλαδή το πάνω και κάτω τοίχωμα του αγωγού έτσι όπως φαίνεται στο επίπεδο όπου έχουμε κάνει τις λήψεις (βλ. **εικόνα 3.38**), μετατρέπουμε τα pixels σε mm και τελικά αποτυπώνουμε το σχήμα του αγωγού σε διάγραμμα x,y όπως της **εικόνας 3.39**. Αυτή η διαδικασία, φυσικά επαναλαμβάνεται μέσω ενός βρόχου για όλα τα frames. Έτσι, μπορούμε να συγκρίνουμε τις διαφορές που προκύπτουν στη διάμετρο του αγωγού από frame σε frame και ορίζοντας ένα σημείο ελέγχου να σχεδιάσουμε την κίνηση των τοιχωμάτων συναρτήσεως του χρόνου. Ως τέτοιο, ορίζουμε το μέσο όρο από όλα τα σημεία του πάνω τοιχώματος από κάθε frame και πλοτάρουμε την εξέλιξή συναρτήσεως του χρόνου. Η κάμερα πραγματοποιεί λήψεις των 25 fps οπότε η χρονική απόσταση δύο frame είναι $1/25=0.04$ sec.

Επειδή χρησιμοποιήθηκαν αρκετά frames για το σχεδιασμό της κίνησης των τοιχωμάτων, θα παρουσιάσουμε μόνο κάποια ενδεικτικά.

Εικόνα 3.38 Στιγμιότυπο του εύκαμπτου αγωγού κατά τη διάρκεια ταλάντωσης για παροχή 210 ml/min στη θέση 3 της βάνας.

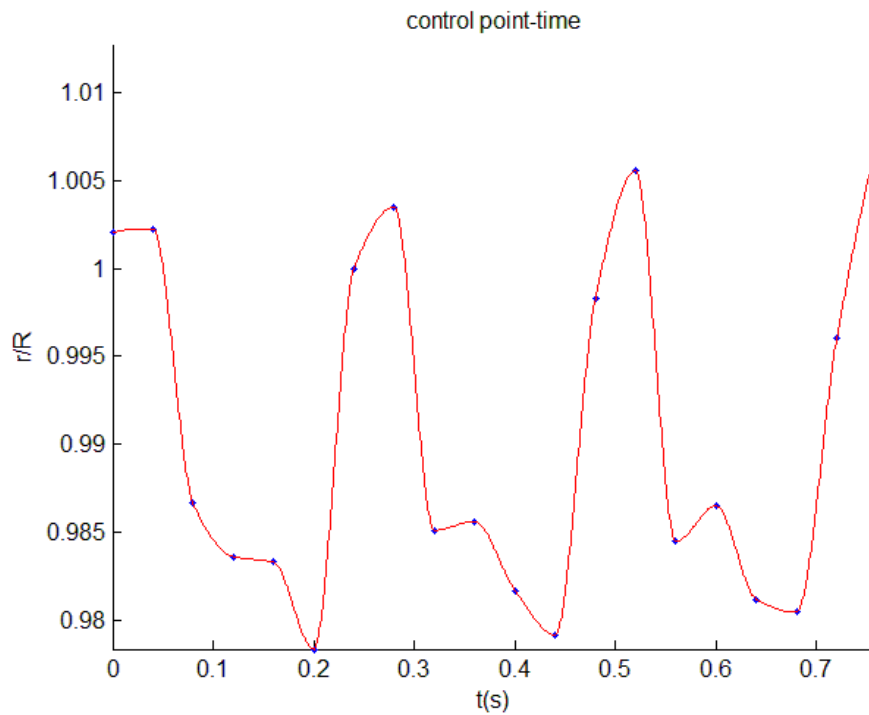




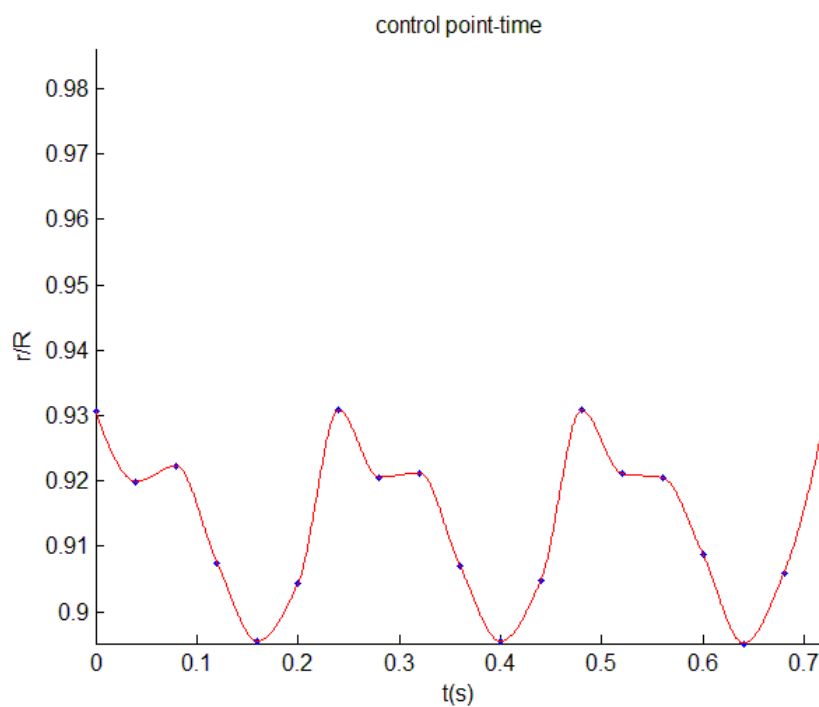
Εικόνα 3.39 Σχήμα αγωγού για δύο συνεχόμενα frames κατά τη διάρκεια ταλάντωσης στη θέση 3 της βάνας για παροχή 210 ml/min.

Βλέπουμε πως είναι πολύ δύσκολο να διακρίνουμε κάποια διαφορά στο σχήμα καθώς οι ταλαντώσεις είναι μικρού πλάτους. Με το σημείο ελέγχου όμως μπορούμε να δούμε πιο αναλυτικά την κίνηση των τοιχωμάτων και να προσδιορίσουμε τόσο το πλάτος τους όσο και την περίοδο ταλάντωσής τους.

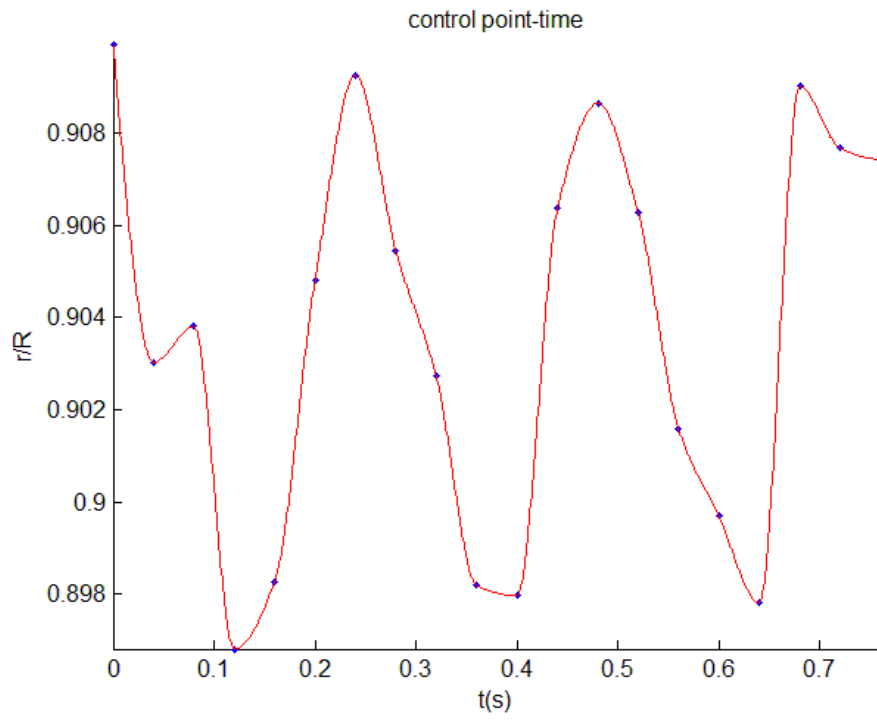
(α) 210 ml/min, θέση 3



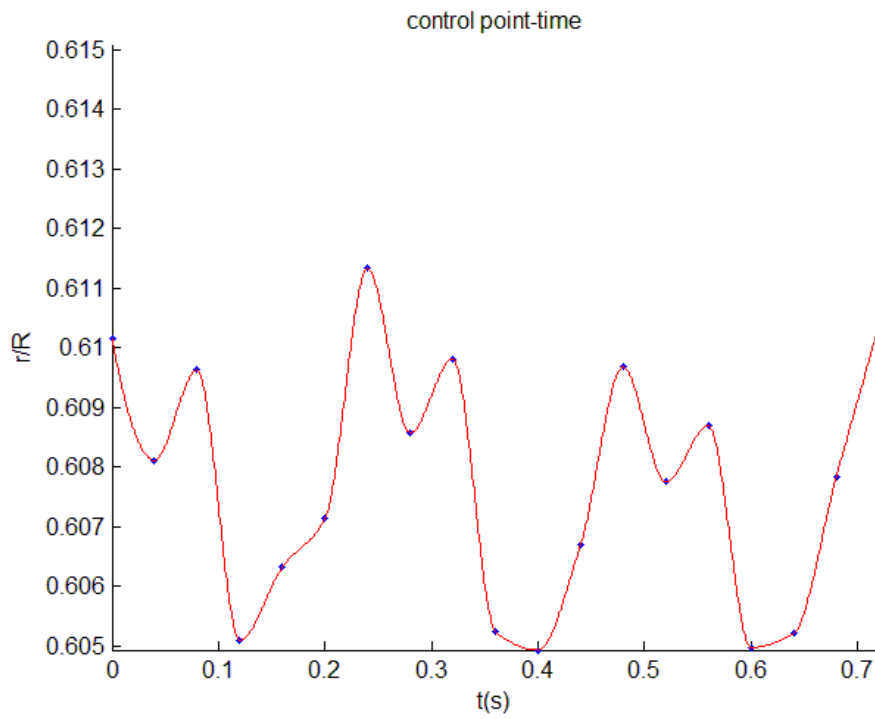
(β) 210 ml/min, θέση 4



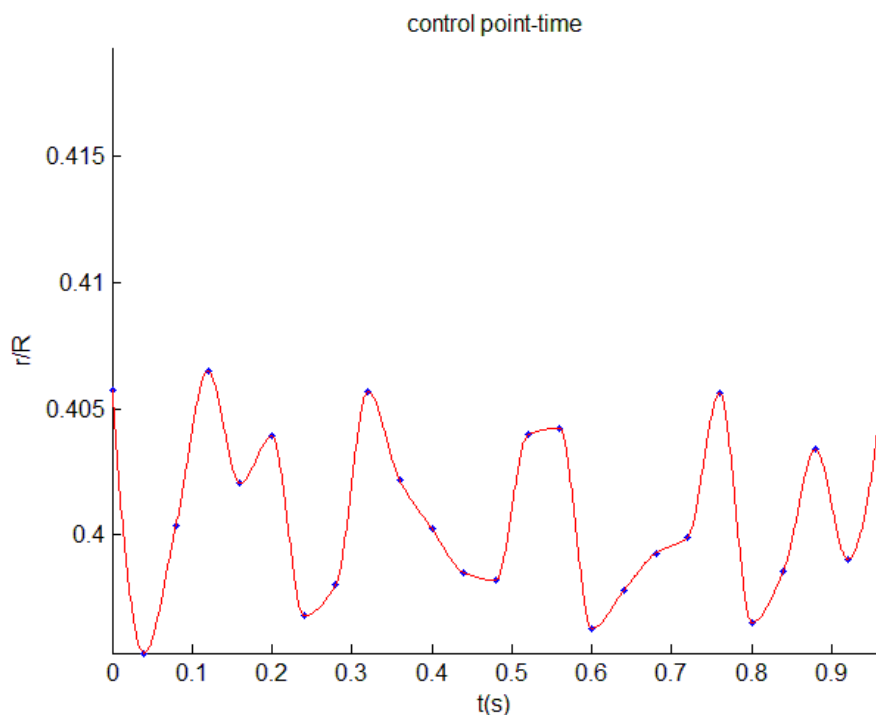
(γ) 300 ml/min, θέση 3



(δ) 300 ml/min, θέση 4



(ε) 390 ml/min, θέση 3



Εικόνα 3.40 Εξέλιξη του σημείου ελέγχου συναρτήσει του χρόνου. Στον άξονα y έχουμε το ποσοστό της ακτίνας σε σχέση με την απαραμόρφωτη ακτίνα.

Στην **εικόνα 3.40** αποτυπώνεται η εξέλιξη του σημείου ελέγχου συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες περιπτώσεις. Τα μπλε σημεία αντιπροσωπεύουν το σημείο ελέγχου, δηλαδή ουσιαστικά τη θέση του πάνω τοιχώματος κάθε χρονική στιγμή. Η κόκκινη καμπύλη αποτελεί την καμπύλη προσαρμογής (PCHIP). Η θέση έχει μετρηθεί από τον άξονα συμμετρίας του αγωγού και έχει διαιρεθεί με την απαραμόρφωτη ακτίνα (5 mm). Από την εξέταση των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτουν τα εξής:

(α) 210 ml/min, θέση 3

Εδώ παρατηρούνται δύο ταλαντώσεις, μία βασική και μία με πολύ μικρότερο πλάτος αλλά ίδια περίοδο ταλάντωσης. Το πλάτος ταλάντωσης της μεγαλύτερης ταλάντωσης είναι $A=0.014$ της απαραμόρφωτης ακτίνας R , ή $1.4\%R$. Η περίοδος ταλάντωσης είναι $T=0.24$ sec. Να σημειώσουμε πως οι διαφορές κάποιων σημείων μεταξύ τους ενδέχεται να είναι μικρότερες του ενός pixel⁵. Αυτό συμβαίνει διότι, από κάθε frame παίρνουμε ένα μέσο όρο από την περιοχή του λαιμού των σημείων του άνω τοιχώματος, οπότε σε κάποιες περιπτώσεις τα σημεία που προκύπτουν από δύο διαδοχικά frames μπορεί να βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους.

⁵Ένα pixel είναι περίπου 0.03mm, δηλαδή 0.6% της απαραμόρφωτης ακτίνας R .

(β) 210 ml/min, θέση 4

Και εδώ έχουμε υπέρθεση ταλαντώσεων με ίδια περίοδο αλλά διαφορετικό πλάτος. Το πλάτος της βασικής ταλάντωσης είναι $A=0.016$ της ακτίνας R , ή $1.6\%R$. Η περίοδος ταλάντωσης είναι $T=0.24$ sec.

(γ) 300 ml/min, θέση 3

Εδώ η ταλάντωση φαίνεται πιο ομαλή με πλάτος $A=0.65\%R$ και περίοδο $T=0.24$ sec.

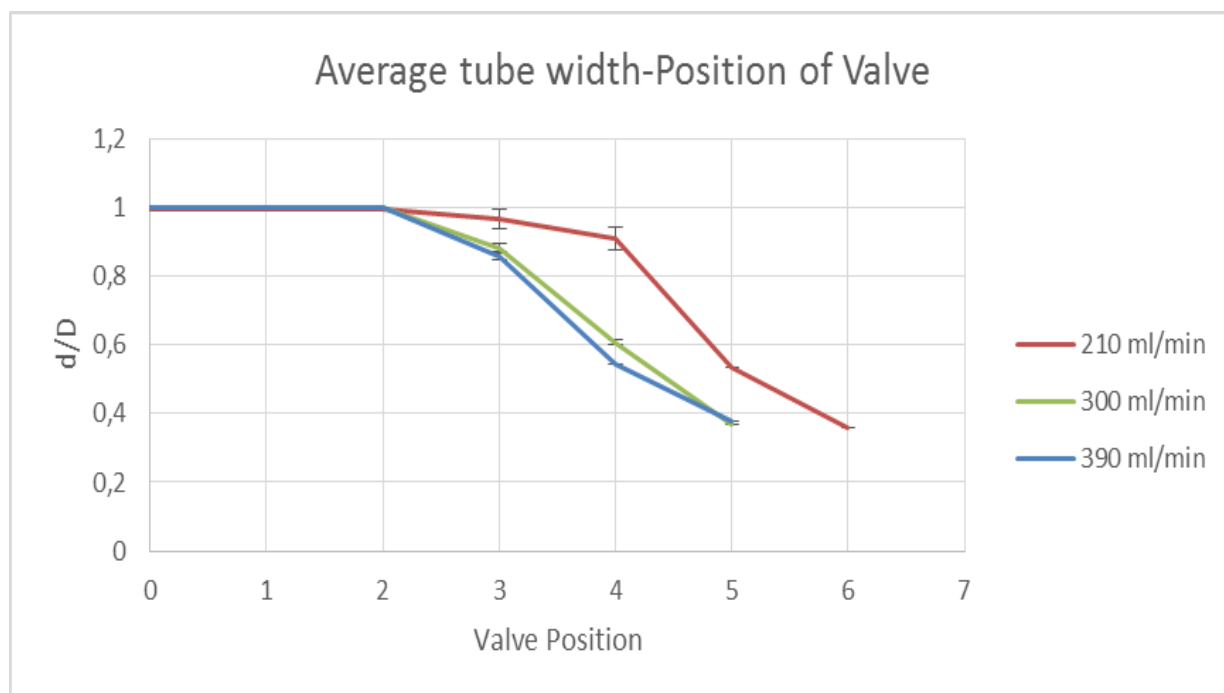
(δ) 300 ml/min, θέση 4

Εδώ πλέον το πλάτος είναι πολύ μικρό και για αυτό ίσως να φαίνεται πιο έντονη η δεύτερη ταλάντωση. $A=0.3\%R$, δηλαδή περίπου ένα pixel πλάτος ταλάντωσης, που φυσικά μπορεί να οφείλεται σε σφάλμα κατά το image processing. Περίοδος $T=0.2$ sec αλλά δε φαίνεται να παραμένει σταθερή. Το πιθανότερο είναι πως αυτές οι πολύ μικρές μεταβολές είναι στα όρια της ανάλυσης της εικόνας και είναι πολύ δύσκολο να πούμε αν υπάρχει ταλάντωση ή όχι.

(ε) 390 ml/min, θέση 3

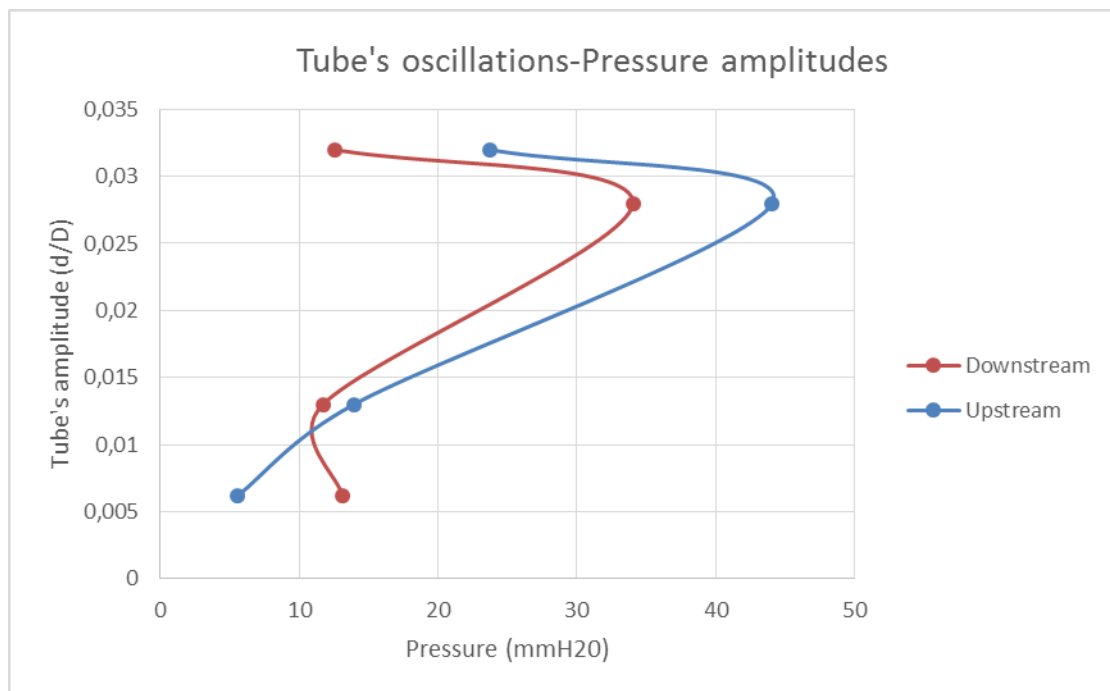
Πρακτικά δεν έχουμε ταλάντωση.

Από αυτά τα αποτελέσματα μπορούμε να χαράξουμε την καμπύλη της διαμέτρου του αγωγού συναρτήσει της θέσης της βάνας για τις τρεις παροχές (εικ. 3.41), σημειώνοντας και το πλάτος ταλάντωσης έτσι όπως προέκυψε από τα διαγράμματα της εικόνας 3.40.



Εικόνα 3.41 Μέση διάμετρος της διατομής κατάρρευσης του αγωγού, αδιαστατοποιημένη με την απαραμόρφωτη διάμετρο D . Οι μπάρες στις καμπύλες υποδεικνύουν το πλάτος ταλάντωσης.

Τέλος, χαράσσουμε την καμπύλη πλάτους ταλάντωσης του αγωγού συναρτήσει του πλάτους πίεσης (εικόνα 3.42). Οι θέσεις που εντοπίσαμε ταλάντωση είναι τέσσερεις και παρατηρείται πως στις τρεις από αυτές όπου η ταλάντωση είναι πιο έντονη, το upstream πλάτος πίεσης είναι μεγαλύτερο από το downstream. Αυτές οι θέσεις, δηλαδή οι θέσεις ταλάντωσης είναι και οι μοναδικές περιπτώσεις όπου το upstream πλάτος είναι μεγαλύτερο του downstream, όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από την εικόνα 3.35. Επίσης διαπιστώνεται πως το μεγαλύτερο πλάτος πίεσης δεν αντιστοιχεί με τη μεγαλύτερη πλάτος ταλάντωσης του αγωγού.



Εικόνα 3.42 Σχετικό πλάτος ταλάντωσης αγωγού συναρτήσει του πλάτους πίεσης. Οι κουκίδες αποτελούν τα 4 σημεία ταλάντωσης του αγωγού.

3.3 Σχόλια και Συμπεράσματα

Οι βασικές παρατηρήσεις που έχουμε κάνει για τα σήματα πίεσης και τις ταλαντώσεις του εύκαμπτου αγωγού μπορούν να συνοψιστούν στα εξής. Παρατηρείται πάντα ένα πλάτος ταλάντωσης της πίεσης ακόμα και όταν η βάνα είναι ανοικτή (θέσεις 0,1)(βλ. **εικόνες 3.36,3.37**). Ιδιαίτερα στο downstream σημείο μέτρησης της πίεσης, το πλάτος για αυτές τις θέσεις είναι αρκετά μεγάλο, περίπου 2.4 φορές το upstream πλάτος. Μετά τη θέση 1 το downstream πλάτος ακολουθεί καθοδική πορεία εμφανίζοντας 3 τοπικά ελάχιστα. Το ένα στη θέση 4 για παροχή 210 ml/min, και τα άλλα δύο στη θέση 3 για παροχές 300 και 390 ml/min. Σε αυτές τις θέσεις έχουμε παρατηρήσει ταλάντωση του αγωγού εκτός από τη θέση 3 για παροχή 390 ml/min. Upstream έχουμε ένα μεγάλο peak στη θέση 3 για παροχή 210 ml/min και ένα μικρότερο στη θέση 3 για παροχή 300 ml/min. Και οι δύο αυτές θέσεις αποτελούν θέσεις ταλάντωσης. Για περαιτέρω πτώση της μέσης πίεσης το πλάτος μειώνεται και upstream και downstream. Η συχνότητα του σήματος πίεσης, όπως είδαμε στην ενότητα **3.2.2**, γενικά παραμένει σταθερή εκτός από την παροχή 390 ml/min όπου έχουμε αύξησή της. Έχουμε για 210 ml/min $f_{210}=4.16$ Hz ($T_{210}=0.24$ sec), για 300 ml/min $f_{300}=4.16$ Hz ($T_{300}=0.24$ sec), για 390 ml/min $f_{390}=5.26$ Hz ($T_{390}=0.19$ sec).

Τα χαρακτηριστικά των ταλαντώσεων του εύκαμπτου αγωγού προέκυψαν από την εξέταση των **εικόνων 3.40(α)-(ε)**. Τα μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης είναι στις θέσεις 3,4 για παροχή 210 ml/min(βλ. σελ. 100,101). Μικρότερες ταλαντώσεις έχουμε στις θέσεις 3,4 για παροχή 300 ml/min, ενώ στη θέση 3 για παροχή 390 ml/min αποφανθήκαμε πως το πλάτος ταλάντωσης είναι πολύ μικρό για τη συγκεκριμένη ανάλυση της κάμερας. Η συχνότητα ταλάντωσης σε αυτές τις θέσεις είναι $f=4.16$ Hz ($T=0.24$ sec), εκτός από τη θέση 4 για παροχή 300 ml/min όπου φαίνεται ελαφρώς υψηλότερη αλλά δεν μπορεί να γίνει ασφαλής εκτίμησή της με τα δεδομένα που διαθέτουμε.

Επίσης, από την **εικόνα 3.41** φαίνεται η εξέλιξη της διατομής κατάρρευσης του αγωγού σε συνάρτηση με τη θέση της βάνας. Επιβεβαιώνεται πως ο λυγισμός του αγωγού ξεκινάει μετά τη θέση 2, όπου η εσωτερική μέση πίεση γίνεται αρνητική (βλ. **εικόνα 3.10**), δηλαδή η διατοιχωματική πίεση μικρότερη του μηδενός.

Από αυτές τις παρατηρήσεις μπορούν να προκύψουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα αλλά και μια προσπάθεια ερμηνείας αυτών. Κατ' αρχάς το γεγονός ότι σε όλα τα σήματα πίεσης, υπάρχει ταλάντωση ανεξάρτητα της παρουσίας ή όχι ταλαντώσεων του αγωγού, υποδηλώνει μια μόνιμη διέγερση του συστήματος. Αυτή η διακύμανση της πίεσης πρέπει να οφείλεται στην αντλία η οποία εισάγει μια μικρή πάλμωση. Η συχνότητα της κυματομορφής της πίεσης ταυτίζεται με τα RPM της αντλίας μόνο στην περίπτωση των 210 ml/min (250 RPM ή 4.16 Hz συχνότητα της αντλίας). Για 300 ml/min παραμένει στα 4.16 Hz, ενώ για 390 ml/min αυξάνει στα 5.26 Hz (ή 315 RPM) αλλά δε συμπίπτει με τη συχνότητα της αντλίας για αυτή την παροχή (400 RPM).

Έπειτα, το γεγονός ότι το πλάτος downstream είναι μεγαλύτερο από το upstream (βλ. **εικόνες 3.35,3.36,3.37**), ίσως να οφείλεται στο ότι ο εύκαμπτος αγωγός λειτουργεί σαν αποσβεστήρας αυτών των παλμών που εισάγει η αντλία και έτσι, δεδομένου ότι η αντλία βρίσκεται downstream του εύκαμπτου αγωγού, upstream του αγωγού η πάλμωση αυτή καταλήγει εξασθενημένη. Το ότι ο αγωγός δεν

ταλαντώνεται στις θέσεις 0,1,2 οφείλεται στην θετική τιμή της διατοιχωματικής πίεσης (η μέση πίεση είναι ακόμα μεγαλύτερη του 0, βλ. **εικόνα 3.10**) για την οποία δε λυγίζει ο αγωγός. Δηλαδή οι εφελκυστικές τάσεις στα τοιχώματα είναι τόσο μεγάλες ώστε να εμποδίζουν την κίνηση. Στη συνέχεια, όταν η μέση εσωτερική πίεση γίνει αρνητική (άρα και η διατοιχωματική), τότε ο αγωγός υποχωρεί και γίνεται πολύ πιο ευλύγιστος, οπότε πλέον μπορεί να ταλαντωθεί κάτω από την επίδραση της παλμικής ροής. Παρατηρούμε πως η συχνότητα ταλάντωσης του αγωγού ($f=4.16$ Hz. Βλ. πιο πάνω) δε συμπίπτει με τη συχνότητα της πίεσης σε όλες τις θέσεις. Συνεπώς, έχουμε μία ταλάντωση που ναι μεν πυροδοτείται από τη πτώση της διατοιχωματικής πίεσης αλλά διατηρείται από την αλληλεπίδραση ρευστού-τοιχώματος (fluid-structure interaction).

Παρόλα αυτά η κίνηση των τοιχωμάτων έχει και αυτή μία επίδραση στη ροή η οποία φαίνεται πιο καθαρά στη θέση 3 για παροχή 210 ml/min (βλ. **εικόνα 3.36**), όπου συμπίπτουν η ταλάντωση του αγωγού με το peak στο upstream πλάτος ταλάντωσης της πίεσης. Όπως είπαμε και στην παράγραφο **3.2.3**, (βλ. σελ. **99**), κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης έχουμε μεταβολή της πίεσης στον εύκαμπτο αγωγό η οποία μεταφέρεται μέσω της ροής στο upstream σημείο μέτρησης πίεσης. Επίσης από την **εικόνα 3.42** φαίνεται πως στα σημεία ταλάντωσης του αγωγού, το upstream πλάτος πίεσης είναι μεγαλύτερο από το downstream. Τα αντίστοιχα downstream σημεία ακολουθούν την ίδια μορφή καμπύλης με τα upstream αλλά με μικρότερο πλάτος πίεσης εκτός από την τελευταία θέση ταλάντωσης που είναι όμως και η πιο ισχυρή (0.3%R). Το γεγονός αυτό ίσως συνδέεται με την υπόθεση των Heil & Jensen (2003). Οι δύο ερευνητές υποστηρίζουν πως εφόσον το downstream τμήμα του δικτύου είναι αρκετά μεγαλύτερο από το upstream (όντως, είναι $L_{down}=8L_{up}$), τότε η κίνηση των τοιχωμάτων θα μετατοπίσει ρευστό προς το upstream τμήμα, που προσφέρει μικρότερη αδρανειακή αντίσταση. Αυτό ίσως αποτυπώνεται στην αύξηση του upstream πλάτους πίεσης αλλά όχι του downstream. Δηλαδή η ταλάντωση στο δίκτυο γίνεται μεταξυ της δεξαμενής και του εύκαμπτου αγωγού.

Οι Heil και Waters (2008) βρίσκουν πως για να είναι αποτελεσματικός ο μηχανισμός Jensen & Heil (2003) και τελικά να απορροφήσουν τα τοιχώματα του αγωγού ενέργεια από τη ροή θα πρέπει η ταλάντωση να γίνει γύρω από λυγισμένη θέση ισορροπίας αλλά και η ταλάντωση στη ροή να είναι ισχυρότερη upstream από ότι downstream του αγωγού έτσι ώστε τελικά να έχουμε εισροή κινητικής ενέργειας στον εύκαμπτο αγωγό. Οι Heil και Boyle (2010) επιβεβαιώνουν αυτή την υπόθεση για μακριούς αγωγούς ($L=20$, μήκος αδιαστατοποιημένο με την ακτίνα), διαπιστώνοντας πως οι αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις εμφανίζονται όταν πληρούνται οι συνθήκες των Heil & Waters. Στο παρόν πείραμα, οι αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις εμφανίζονται σε τέσσερα σημεία, τα τρία εκ των οποίων πληρούν τις παραπάνω συνθήκες. Από την **εικόνα 3.41** διαπιστώνουμε ότι οι ταλαντώσεις γίνονται γύρω από λυγισμένη θέση ισορροπίας ενώ από την **εικόνα 3.42** επιβεβαιώνουμε πως το upstream πλάτος πίεσης είναι μεγαλύτερο από το downstream εκτός από την τελευταία θέση ταλάντωσης που όμως είναι σχεδόν ανεπαίσθητη. Συνεπώς, είναι πολύ πιθανό οι αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις του πειράματος να δημιουργούνται με το μηχανισμό των Jensen και Heil (2003).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων στην εργασία των Heil και Boyle είναι πως αυτές αυξάνουν σε πλάτος όταν η ροή ξεπερνά

έναν κρίσιμο αριθμό Reynolds ανάλογο του $H^{1/4}$. Στην παρούσα εργασία δε φάνηκε σε καμία περίπτωση να έχουμε αύξηση του πλάτους ταλάντωσης του αγωγού κατά τη διάρκεια κάποιας ταλάντωσης του. Επιπλέον, βρέθηκε πως με περαιτέρω αύξηση της ροής δεν εμφανίζονταν ταλαντώσεις, γεγονός που ίσως υποδεικνύει πως υπάρχει και ένας άνω κρίσιμος αριθμός Reynolds, πέρα από τον οποίο η ροή γίνεται αρκετά ισχυρή και τα τοιχώματα του αγωγού δεν μπορούν πλέον να την επηρεάσουν στον ίδιο βαθμό.

Τέλος συγκρίνουμε τους Re (279, 398, 517 και $H=34 \cdot 10^6$) του πειράματος με τη θεωρητική συσχέτιση των Heil & Boyle (2010) (41)

$$T = \frac{T^* \cdot U}{a} \sim \sqrt{\text{Re} \cdot Q} = \frac{\text{Re}}{\sqrt{H}} \quad \text{για να διαπιστώσουμε πως δεν μπορούμε να}$$

βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα καθώς οι χρόνοι περιόδου που προκύπτουν είναι $T_{279}=0.049$, $T_{398}=0.069$, $T_{517}=0.09$ sec, πολύ διαφορετικοί των περιόδων του πειράματος. Οι διαφορές στις συνθήκες του πειράματος από την προσομοίωση σίγουρα επηρεάζουν τα αποτελέσματα και δεν επιτρέπουν μια ακριβή υλοποίηση του μοντέλου Heil & Boyle (2010). Παρόλα αυτά, βρέθηκε ένα κοινό σημείο στις συνθήκες γύρω από το σχηματισμό των αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων που φαίνεται να επαληθεύει την υπόθεση των Jensen & Heil και Heil & Waters.

Κεφάλαιο 4

Πείραμα 2

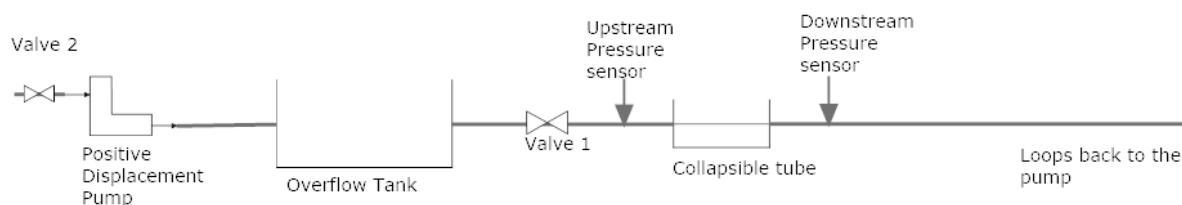
4.1 Περιγραφή πειράματος

Στο δεύτερο πείραμα διερευνούμε την επίδραση της πάλμωσης στο σύστημα την οποία εφαρμόζουμε μέσω περισταλτικής αντλίας. Η παλμική ροή που δημιουργείται με αυτού του είδους αντλία είναι αρκετά εντονότερη από αυτήν του πειράματος 1, καθώς πλέον ο αγωγός μπορεί να ταλαντωθεί σε οποιοσδήποτε συνθήκες ανεξάρτητα της μέσης εσωτερικής πίεσης, δηλαδή ανεξάρτητα της διατοιχωματικής πίεσης. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, έχουμε πλήρη ταύτιση της συχνότητας ταλάντωσης τόσο των πιέσεων όσο και των τοιχωμάτων του αγωγού, με τη συχνότητα της αντλίας. Δηλαδή, σε αυτό το πείραμα έχουμε ένα δίκτυο πλήρως εξαρτημένο από τη σταθερή παλμική παροχή της αντλίας. Η παροχή δεν υπόκειται σε μεταβολές μέσω αλλαγής πίεσης, αλλά με σκοπό την διερεύνηση της συμπεριφοράς του εύκαμπτου αγωγού χρησιμοποιούμε δύο βάνες (βλ. **εικόνα 4.1**) για να ελέγχουμε την πτώση πίεσης εντός του αγωγού.

4.1.1 Πειραματική διάταξη και όργανα μετρήσεων

Η διάταξη του δεύτερου πειράματος είναι επί της ουσίας ίδια με του πρώτου (βλ. **3.1.1**, σελ. **51**) με δύο βασικές διαφορές. Η εξαναγκασμένη ροή επιβάλλεται μέσω περισταλτικής αντλίας (βλ. **εικόνα 4.3**) και επιπλέον προσθέτουμε άλλη μία βάνη κατάντι του εύκαμπτου αγωγού σε αρκετά μεγάλη απόσταση από αυτόν (βλ. **εικόνα 4.1,4.2**).

Schematic diagram-Experiment 2



Εικόνα 4.1 Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης του δεύτερου πειράματος.



Εικόνα 4.2 δεύτερη βάνα downstream του εύκαμπτου αγωγού, λίγο πριν εισέλθει το ρευστό στην αντλία.

Όργανα μετρήσεων

Χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα και προγράμματα:

Περισταλτική αντλία

Περισταλτική αντλία Watson Marlow 323. Πρόκειται για αντλία θετικής μετατόπισης, στην οποία η μετατόπιση του ρευστού γίνεται με τη βοήθεια τριών ράουλων που συμπιέζουν ένα ευλίγιστο λάστιχο από το οποίο περνάει το ρευστό. Η ύπαρξη τριών ράουλων σημαίνει πως όταν ο ηλεκτρικός κινητήρας στρέφεται με x στροφές η συχνότητα με την οποία θα μεταβάλλεται η πίεση θα είναι $3x$.



Εικόνα 4.3 Περισταλτική αντλία Watson&Marlow 323.

Κάμερα

Αισθητήρας πίεσης Miller

ADC Spyder

Λογισμικό Catman

Λογισμικό Pinnacle Studios

Matlab

Excel

Τα όργανα μέτρησης και προγράμματα είναι τα ίδια του πρώτου πειράματος (βλ. ενότητα **3.1.1**).

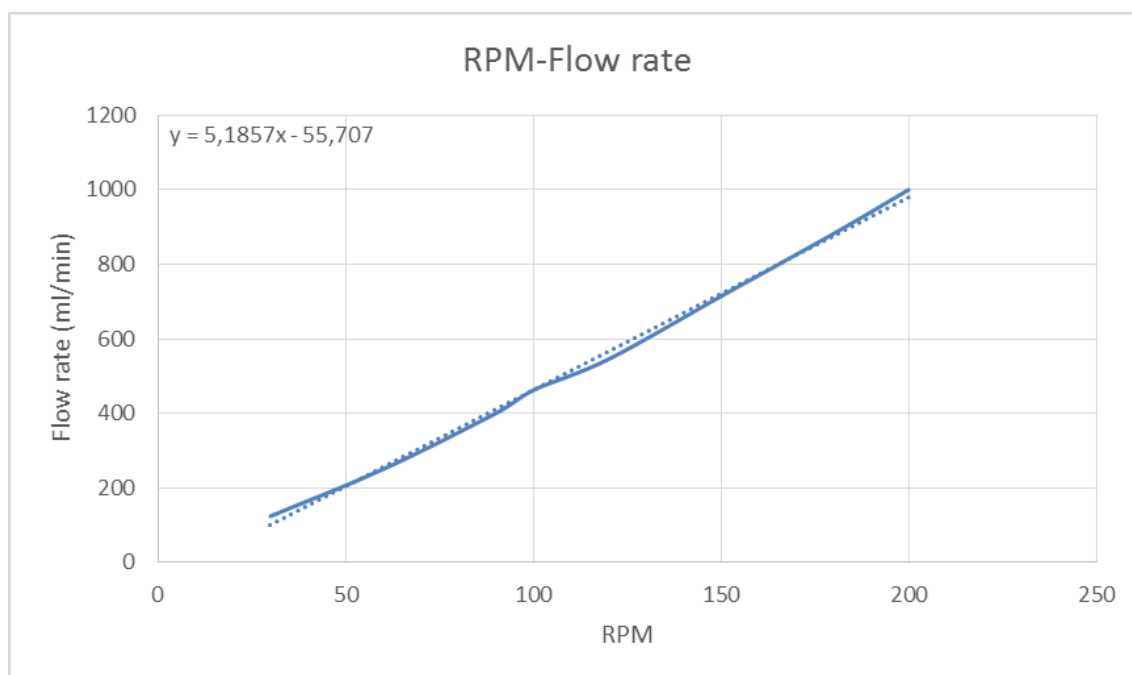
4.1.2 Περιγραφή Πειραματικής διαδικασίας

Σκοπός του πειράματος είναι οι μέτρηση των πιέσεων upstream και downstream του εύκαμπτου αγωγού και η εξέταση της κίνησης των τοιχωμάτων του. Η διερεύνηση γίνεται σε ένα μεγάλο εύρος παροχών (σε αντίθεση με το πείραμα 1) και σε διάφορες θέσεις των δύο βανών. Ξεκινάμε από μία συχνότητα αντλίας 30 rpm και ανεβαίνουμε κατά 10 rpm μέχρι τα 180. Στην ουσία, όπως φαίνεται από την περιγραφή της αντλίας που έγινε ακριβώς πιο πάνω, η πραγματική συχνότητα της αντλίας είναι η τριπλάσια αυτής. Δηλαδή ξεκινάμε από 90 rpm και καταλήγουμε στα 540 rpm ανεβαίνοντας ανά 30. Επειδή όμως η αντλία ανέγραφε τις στροφές του κινητήρα χρησιμοποιούμε αυτές, δηλαδή τις διαιρεμένες δια του 3. Ορίζουμε 4 θέσεις σε κάθε βάνα με την 0 να είναι η εντελώς ανοικτή και την 3 να είναι η πιο κλειστή. Για κάθε συχνότητα αντλίας παίρνουμε μετρήσεις πίεσης upstream και downstream μεταβάλλοντας κατά μία τη θέση κάθε βάνας ξεχωριστά. Δηλαδή, όταν μεταβάλλουμε τη θέση της upstream βάνας αφήνουμε τη downstream βάνα εντελώς ανοικτή (θέση 0) και το ανάποδο⁶. Στη συνέχεια, εντοπίζουμε τις παροχές για τις οποίες είχαμε πιο εμφανείς ταλαντώσεις και βιντεοσκοπούμε τον αγωγό. Μετά, ακολουθεί η επεξεργασία των μετρήσεων και των εικόνων και η εξέταση των αποτελεσμάτων.

Στις θέσεις χαμηλής συχνότητας, μέχρι 50 rpm περίπου, παρατηρήθηκε πως οι ταλαντώσεις του αγωγού ήταν πολύ μικρού πλάτους, ενώ για οποιαδήποτε θέση της βάνας 2 η αυξημένη εσωτερική πίεση του αγωγού έκανε τις ταλαντώσεις ακόμα πιο ισχνές. Για αυτό το λόγο οι εικόνες που πήραμε από τον εύκαμπτο αγωγό αφορούν παροχές που αντιστοιχούν σε 70 rpm και πάνω, μέχρι τα 160. Οι ταλαντώσεις είναι όλες περίπου αζονομετρικές.

Πριν όμως από οποιαδήποτε μέτρηση, αντιστοιχήσαμε τα rpm της αντλίας με την πραγματική παροχή. Για αυτό το σκοπό χρονομετρήσαμε, με τη βοήθεια ογκομετρικού δοχείου, το χρόνο που χρειάζεται η αντλία για να γεμίσει 500 ml του δοχείου αυτού. Κατά τη διάρκεια της ογκομέτρησης ελέγξαμε και αν όντως η παροχή παραμένει σταθερή με αλλαγή πίεσης του δικτύου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην **εικόνα 4.4** και στον **πίνακα 4.1**.

⁶ Για την υπόλοιπη εργασία θα ονομάζουμε την upstream βάνα, βάνα 1 και την downstream, βάνα 2.



Εικόνα 4.4 Παροχή αντλίας σε ml/min συναρτήσει της συχνότητας της αντλίας σε RPM.

Frequency(Hz)	RPM	Flow rate(ml/min)
0,50	30	99,864
0,67	40	151,721
0,83	50	203,578
1,00	60	255,435
1,17	70	307,292
1,33	80	359,149
1,50	90	411,006
1,67	100	462,863
1,83	110	514,72
2,00	120	566,577
2,17	130	618,434
2,33	140	670,291
2,50	150	722,148
2,67	160	774,005
2,83	170	825,862
3,00	180	877,719

Πίνακας 4.1 Αντιστοίχιση συχνότητας, σε Hz και rpm, σε παροχή (ml/min).

4.2 Αποτελέσματα

4.2.1 Συνθήκες και χαρακτηριστικά

Τα χαρακτηριστικά του εύκαμπτου αγωγού είναι ίδια με το πρώτο πείραμα, δηλαδή:

Μήκος $L=70$ mm (άξονας x), διάμετρος $d_0=8$ mm (απαραμόρφωτο κυλινδρικό σχήμα), πάχος $h=1$ mm, σταθερά Young $E=1.25$ MPa, λόγος Poisson $\nu=0.49$.

Η ακαμψία των τοιχωμάτων έτσι όπως ορίζεται στην εργασία των Heil & Boyle (2010) είναι:

$$K = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{d_0}{2}\right)^3} = 2141.9 Pa \quad (4.1)$$

για απαραμόρφωτο αγωγό.

Για τα άκαμπτα τμήματα ισχύει και πάλι ο λόγος $L_{down}/L_{up}=8$.

Η ροή επιβάλλεται μέσω της περισταλτικής αντλίας, είναι σταθερή και ανεξάρτητη των πιέσεων και έντονα παλμική. Την παλμική ροή την ορίζουμε ως τη ροή της οποίας το προφίλ ταχυτήτων μεταβάλλεται με σταθερή περιοδικότητα η οποία εξαρτάται από τον αριθμό Womersley ($\alpha=R^*(\omega\rho/\mu)^{1/2}$), όπου το ω είναι η κυκλική συχνότητα της πρώτης αρμονικής που προκύπτει από ανάλυση Fourier στη ταλάντωση της πίεσης της ροής. Αυτή η αρμονική συμπίπτει με την συχνότητα της αντλίας, άρα το ω είναι η κυκλική συχνότητα της αντλίας. Τα υπόλοιπα μεγέθη είναι γνωστά για νερό στους 20°C . Δηλαδή, $\rho=1000\text{kg/m}^3$, $\mu=0.001$ Pa*s. Στην παρούσα εργασία ο αριθμός Womersley κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\alpha=12.27-30.08$.

Όπως και πριν (πείραμα 1), η εξωτερική πίεση είναι πάντα η ατμοσφαιρική, οπότε την αφαιρούμε πάντα από τις μετρήσεις μας, δηλαδή ορίζουμε σαν 0 την ατμοσφαιρική. Αυτό σημαίνει πως η διατοιχωματική πίεση του αγωγού ταυτίζεται με την τιμή της εσωτερικής πίεσης.

Εξαιτίας της έντονης ταλάντωσης της ροής άρα και της πίεσης είναι δύσκολο να αντιστοιχίσουμε τις θέσεις της βάνας με κάποια πίεση όπως κάναμε στο πρώτο πείραμα, παρόλα αυτά στις **εικόνες 4.5,4.6** σχεδιάζουμε τις καμπύλες πίεσης συναρτήσει της παροχής για κάθε θέση της βάνας έτσι ώστε να έχουμε μία εικόνα της πτώσης πίεσης(ή αύξησης πίεσης στην περίπτωση της βάνας 2) που συντελείται κάθε φορά που αλλάζουμε θέση στις βάνες.

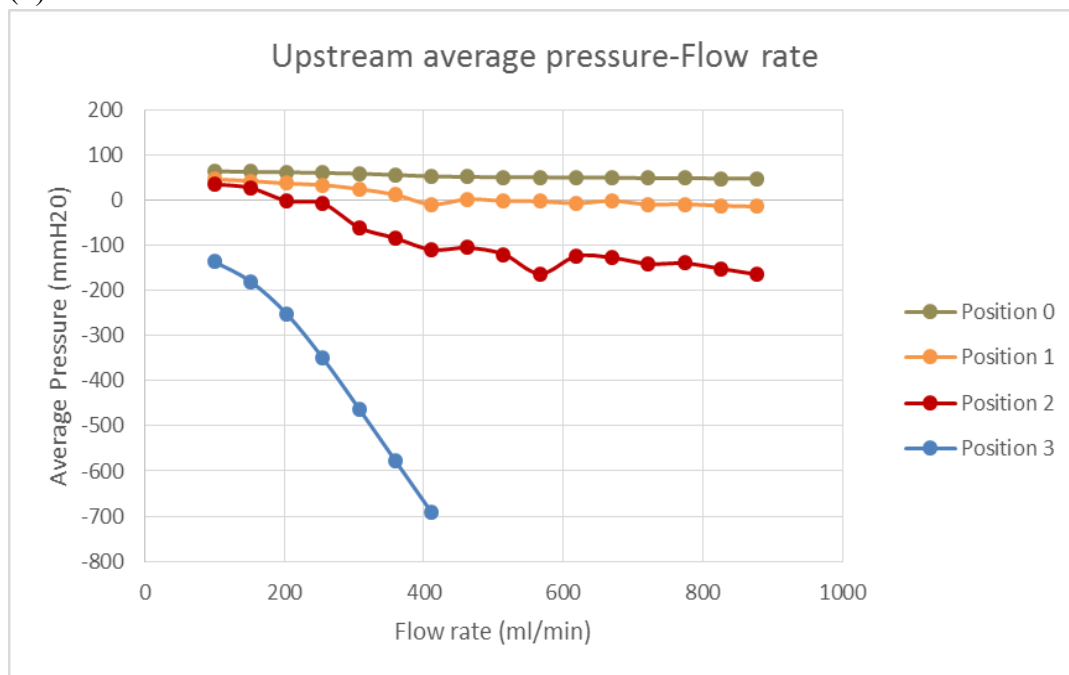
Η **εικόνα 4.7** απεικονίζει τη μορφή του σήματος πίεσης για διάφορες ενδεικτικές θέσεις και παροχές και επίσης δίνει την ανάλυση Fourier του σήματος από όπου παίρνουμε την πρώτη αρμονική⁷. Από την ανάλυση Fourier και την εξέταση των διαγραμμάτων που προκύπτουν, παρατηρούμε πως η πρώτη αρμονική είναι πάντα ίση με τη συχνότητα της αντλίας. Για παράδειγμα αν πάρουμε τυχαία το

⁷ Την πρώτη αρμονική τη βρίσκουμε με ανάλυση Fast Fourier η οποία έγινε στη Matlab και ο κώδικας βρίσκεται στο παράρτημα.

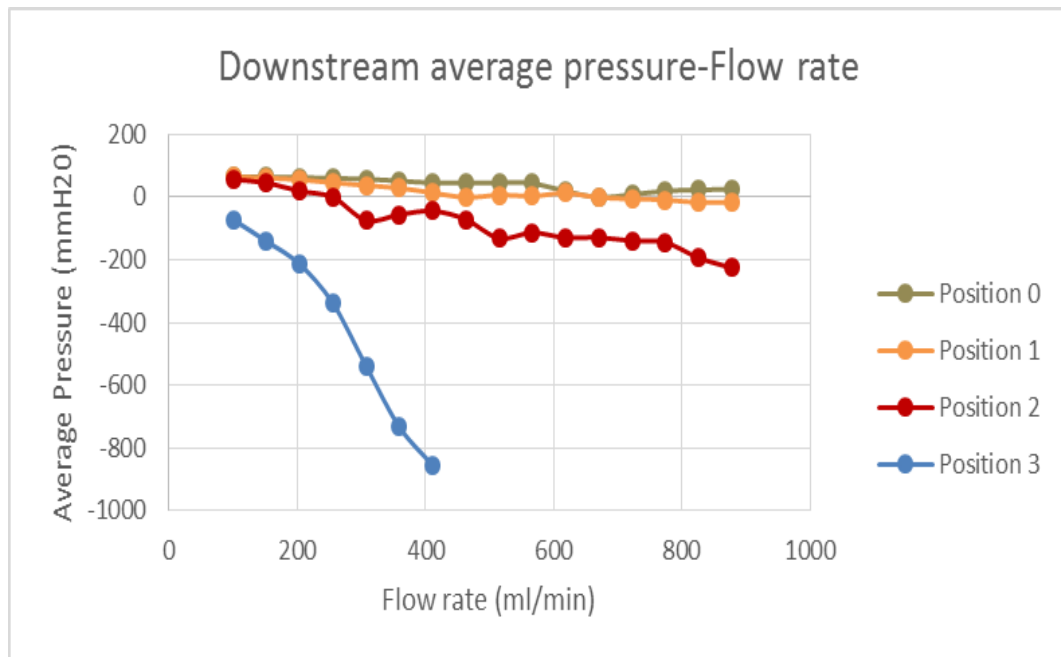
διάγραμμα **εικόνα 4.7(δ)**, όπου απεικονίζεται το σήμα πίεσης για 120 rpm, και θέση 1 για τη βάνα 1, τότε βρίσκουμε πως η κυρίαρχη συχνότητα είναι 6Hz (βλ. **εικόνα 4.8**).

Αν διαιρέσουμε τα 120 rpm με 60 sec για να βρούμε τη συχνότητα σε Hz, τότε προκύπτει συχνότητα αντλίας 2Hz. Θυμίζουμε όμως, πως η πραγματική συχνότητα είναι τρεις φορές την αναγραφόμενη στην αντλία για το λόγο που εξηγήσαμε παραπάνω. Αυτή η ισότητα ισχύει ανεξαρτήτως θέσης βάνας ή σημείου μέτρησης πίεσης (downstream, upstream). Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι η ταλάντωση της πίεσης εξαρτάται μόνο από την αντλία και επειδή σε κάθε θέση έχουμε ταλάντωση του αγωγού, συμπεραίνουμε πως η κίνηση των τοιχωμάτων δεν επιφέρει κάποια αλλαγή στη ροή upstream ή downstream αυτού, αντιθέτως η κίνηση τους πιθανότατα είναι εξαρτημένη από τη συχνότητα της αντλίας και άρα της πίεσης της ροής. Στη συνέχεια της εργασίας (βλ. **4.2.3**) συγκρίνουμε τη συχνότητα της αντλίας και με αυτήν των τοιχωμάτων για περαιτέρω διερεύνηση της συσχέτισής τους.

(α)

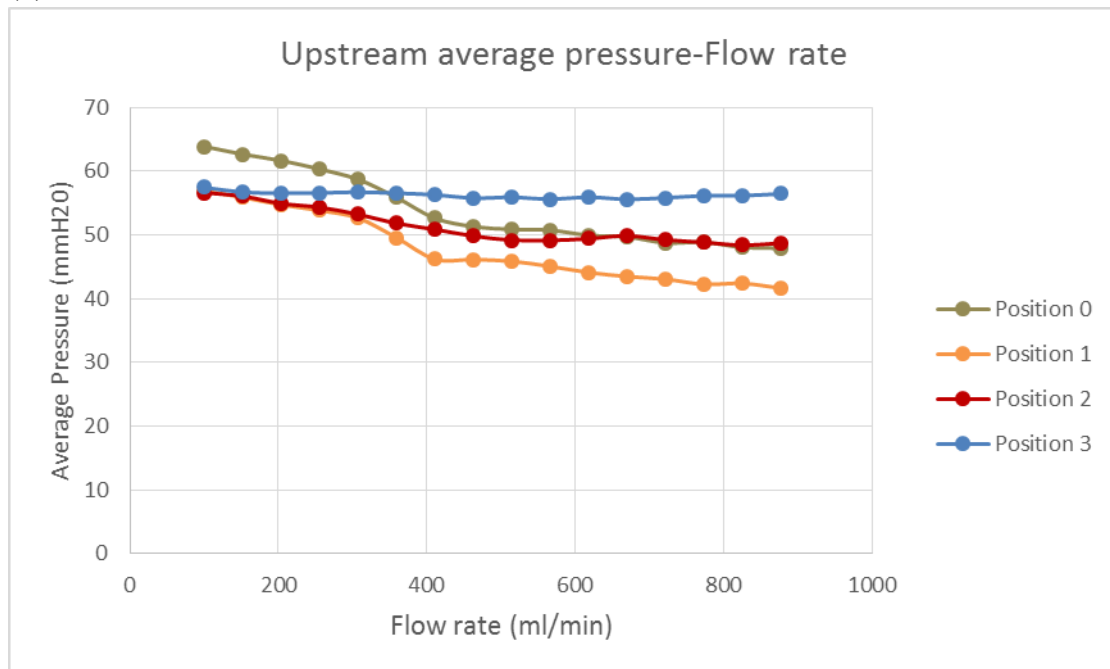


(β)

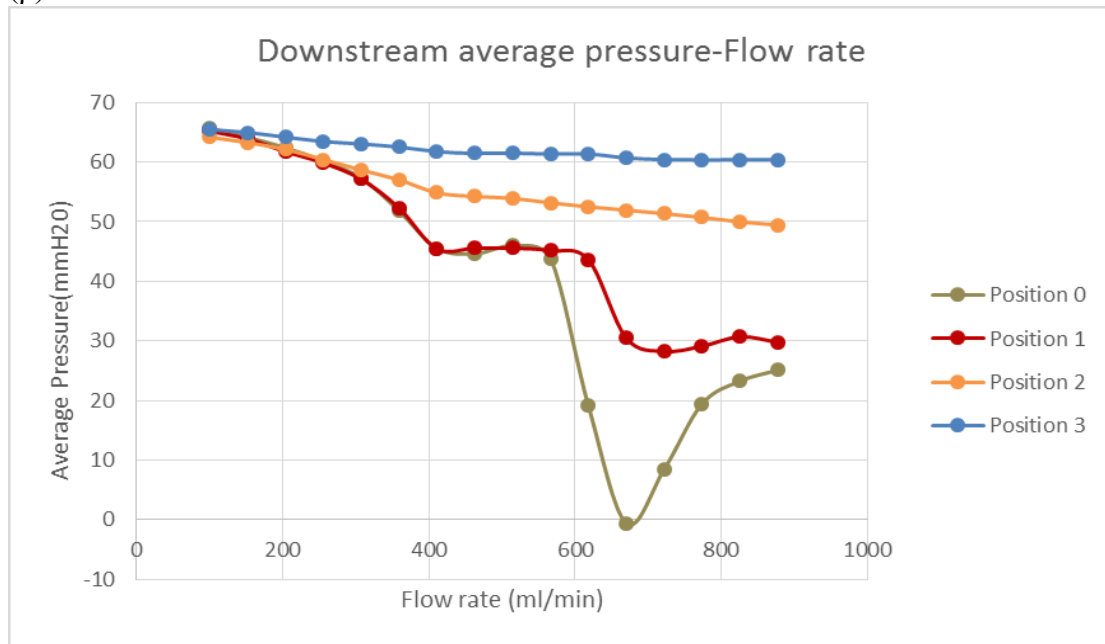


Εικόνα 4.5 Upstream (α) και downstream (β), μέση πίεση συναρτήσει της παροχής για όλες τις θέσεις της βάνας 1.

(α)

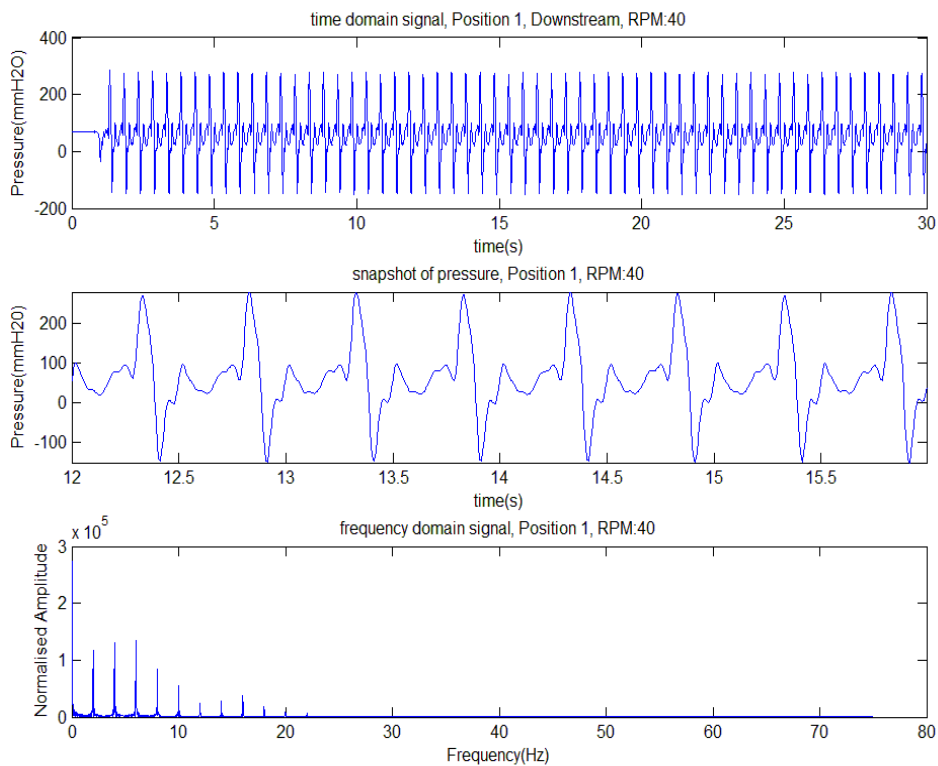


(β)

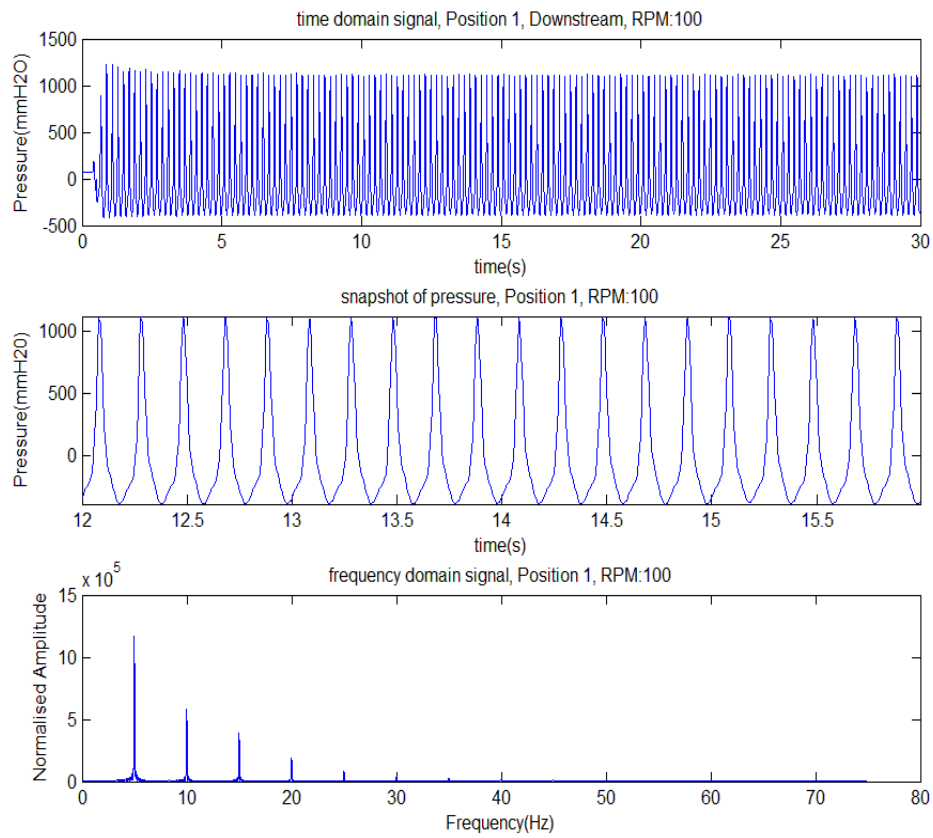


Εικόνα 4.6 Upstream (α) και downstream (β), μέση πίεση συναρτήσει της παροχής για όλες τις θέσεις της βάνας 2.

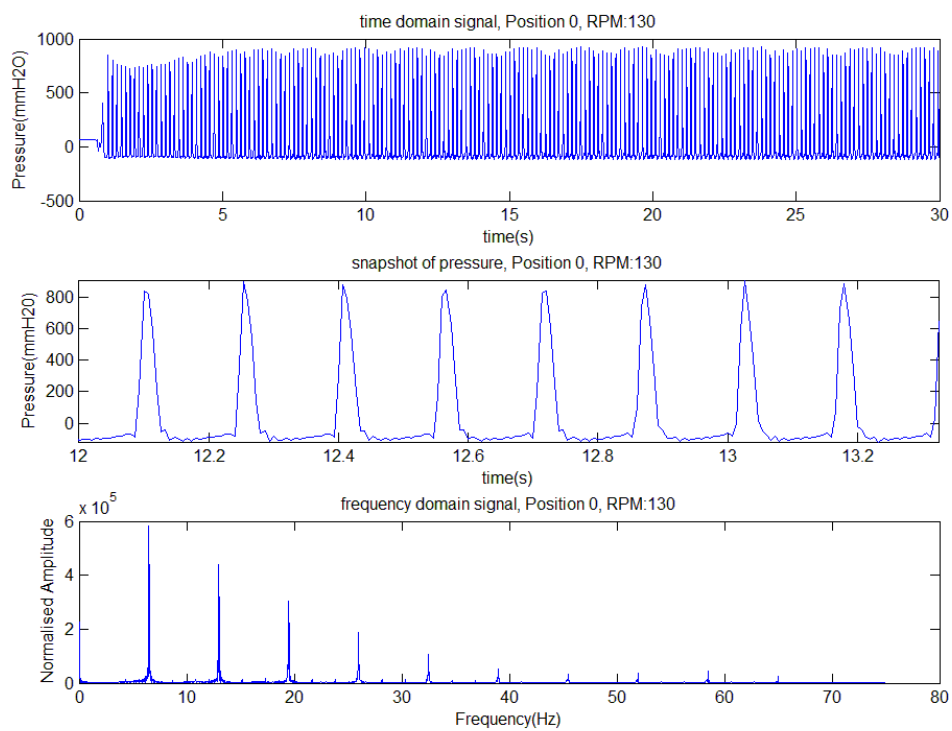
(α)



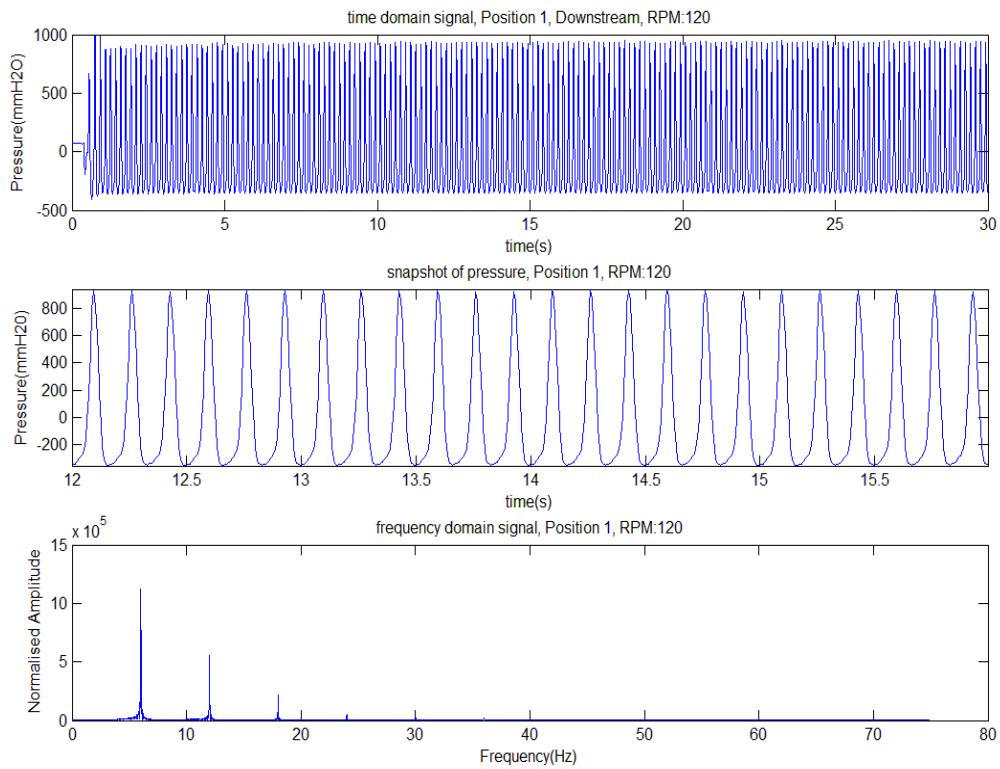
(β)



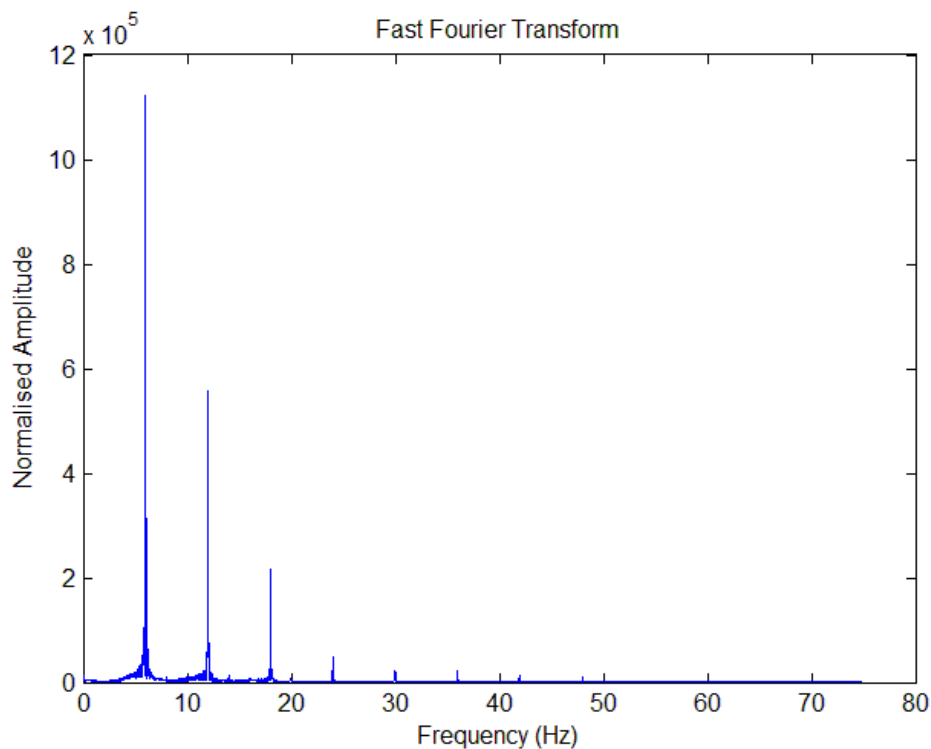
(γ)



(δ)



Εικόνα 4.7 Σήμα πίεσης και ανάλυση Fourier στις περιπτώσεις: (α) rpm 40, θέση 1 βάνας 1, downstream μέτρηση, (β) rpm 100, θέση 1 βάνας 1, downstream μέτρηση, (γ) rpm 130, θέση 0, upstream μέτρηση, (δ) rpm 120, θέση 1 βάνας 1, downstream μέτρηση.



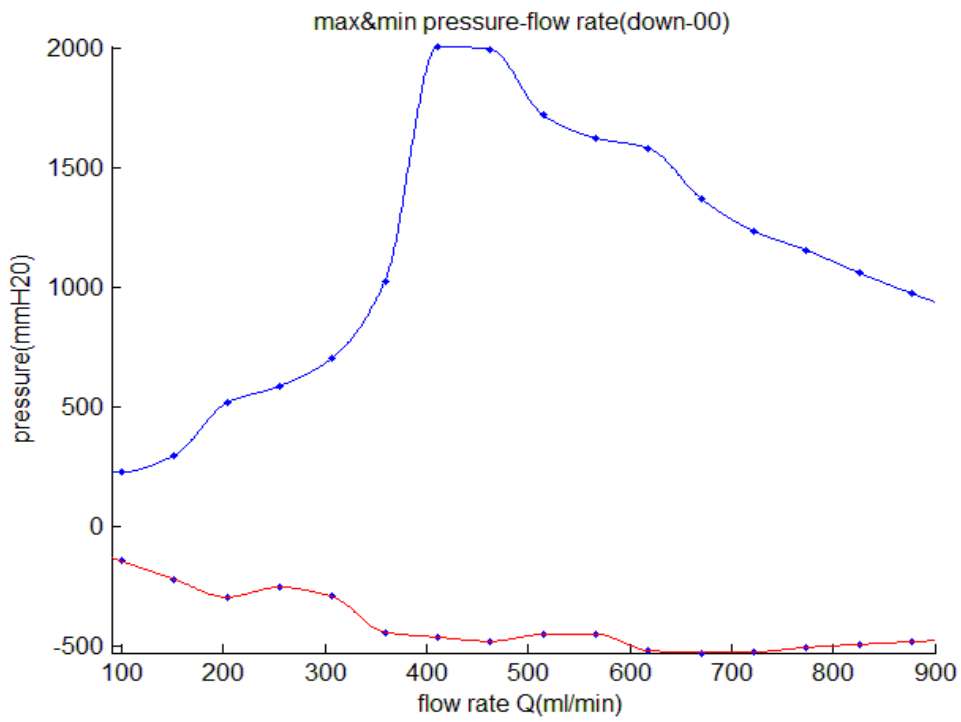
Εικόνα 4.8 Μετασχηματισμός FFT σήματος πίεσης για 120 rpm από όπου προκύπτει πρώτη αρμονική 6 Hz.

4.2.2 Πιέσεις

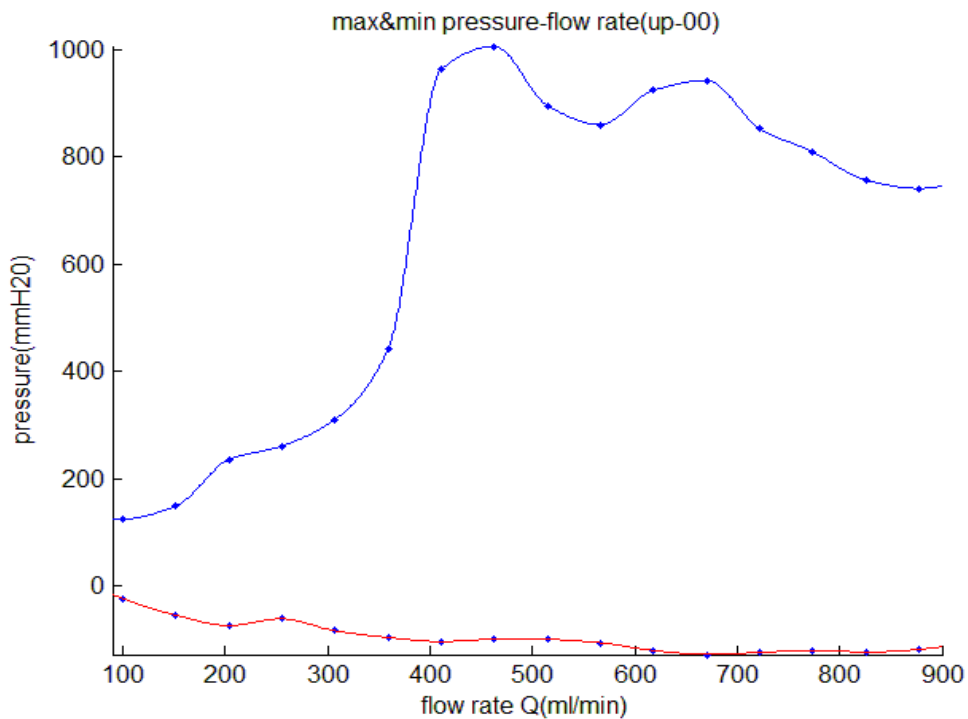
Σε αυτή την παράγραφο παραθέτουμε τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των πιέσεων, όπου ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα πλάτη των ταλαντώσεων των πιέσεων για τις διάφορες θέσεις. Τα διαγράμματα περιέχουν συγκρίσεις των upstream, downstream για μία συγκεκριμένη θέση βάνας, αλλά και ξεχωριστά upstream από downstream για όλες τις θέσεις μιας βάνας, δηλαδή είτε σύγκριση upstream, downstream, είτε σύγκριση θέσεων βάνας. Επίσης, χαράσσουμε και καμπύλες αδιαστατοποιημένης πίεσης όπου η πίεση P^* έχει αδιαστατοποιηθεί με την ποσότητα $\rho U^2/2$ (U η μέση ταχύτητα του ρευστού, ρ η πυκνότητά του). Όλες οι καμπύλες κατασκευάζονται συναρτήσει της παροχής. Μια σημαντική παρατήρηση που πρέπει να γίνει σε αυτό το σημείο είναι πως καθόλη τη διάρκεια της εργασίας χρησιμοποιούμε **peak to peak πλάτη ταλάντωσης της πίεσης**. Αυτό συμβαίνει διότι σε πολλές περιπτώσεις η μέση τιμή δε βρίσκεται στη μέση των δύο ακροτάτων, οπότε μία αποτύπωση του τυπικού πλάτους $((\max-\min)/2)$ δε θα έδινε ξεκάθαρη εικόνα. Δηλαδή, οπουδήποτε στην εργασία αναφερόμαστε σε πλάτη πίεσης (Pressure amplitudes, σε πολλά διαγράμματα), πάντα εννοούμε peak to peak πλάτη πίεσης.

Θέση 0 (Ανοικτές και οι δύο βάνες)

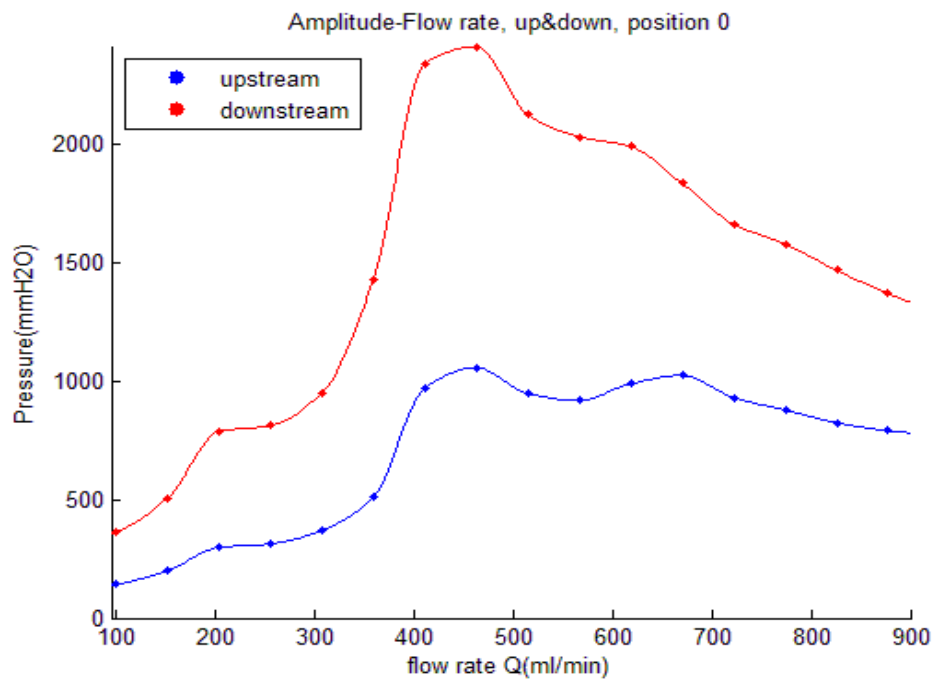
(α)



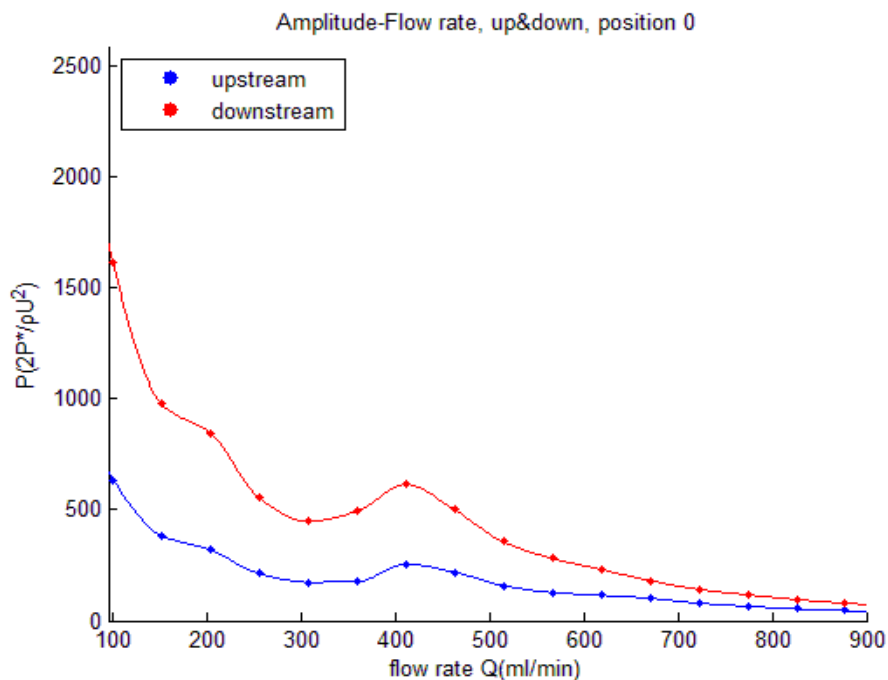
(β)



(γ)



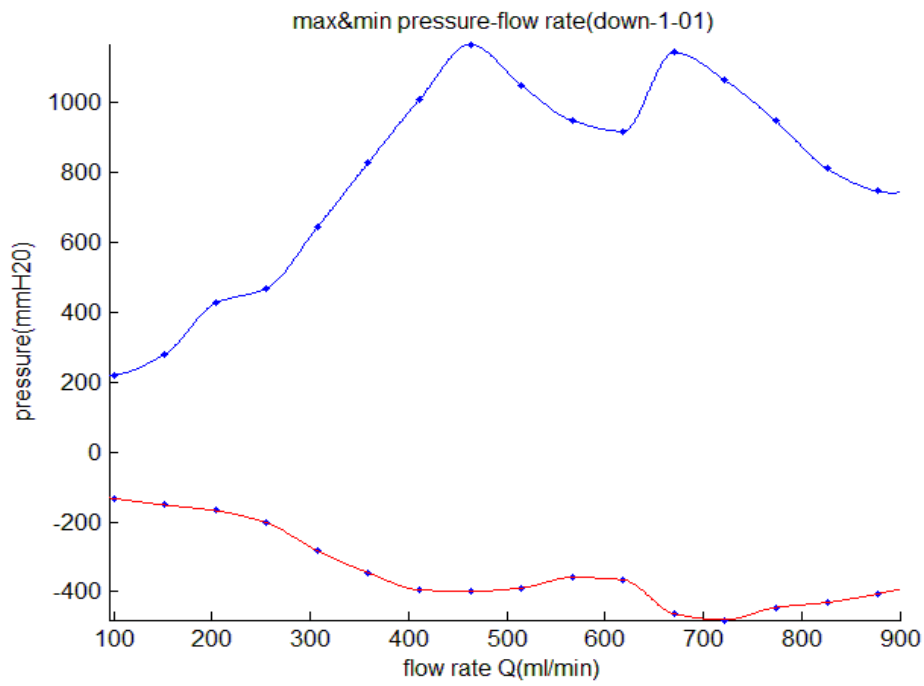
(δ)



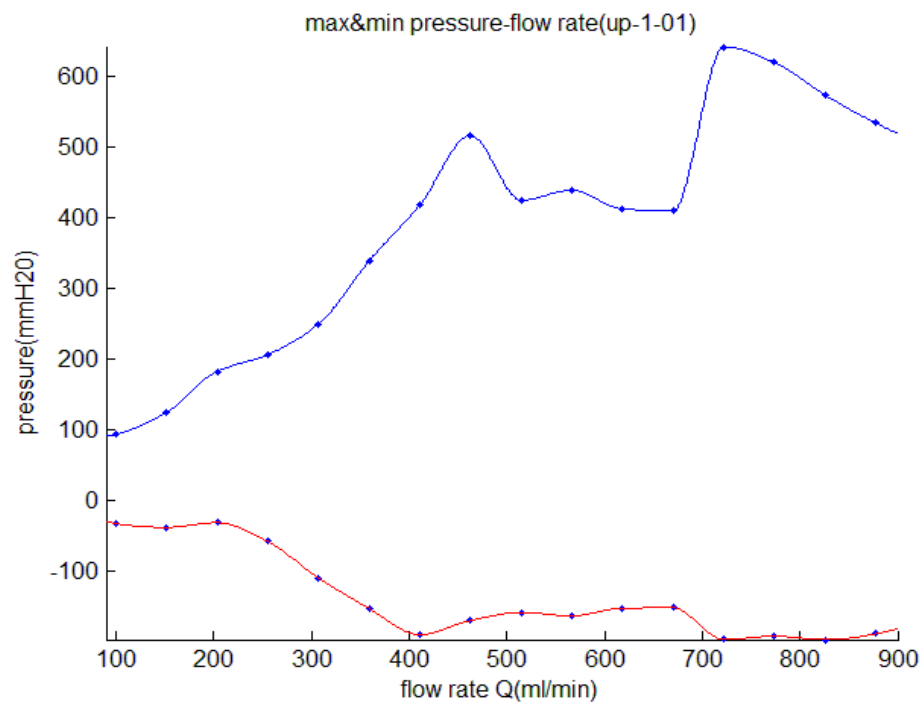
Εικόνα 4.9 Τα διαγράμματα (α),(β) δείχνουν τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση downstream και upstream αντίστοιχα, το (γ) απεικονίζει τα πλάτη ταλάντωσης upstream και downstream μαζί, και το (δ) συγκρίνει τα ίδια πλάτη αλλά αδιαστατοποιημένα με την ποσότητα $\rho U^2/2$. Θέση 0 (και οι δύο βάνες ανοικτές). Η καμπύλη προσαρμογής έχει κατασκευαστεί με b-splines.

Θέση 1-Βάνα 1

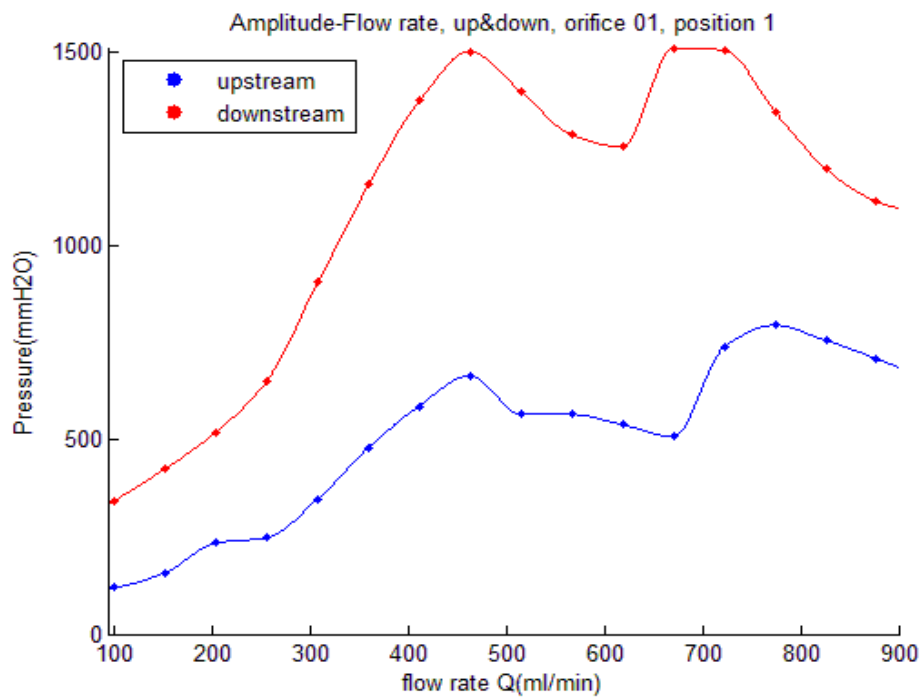
(α)



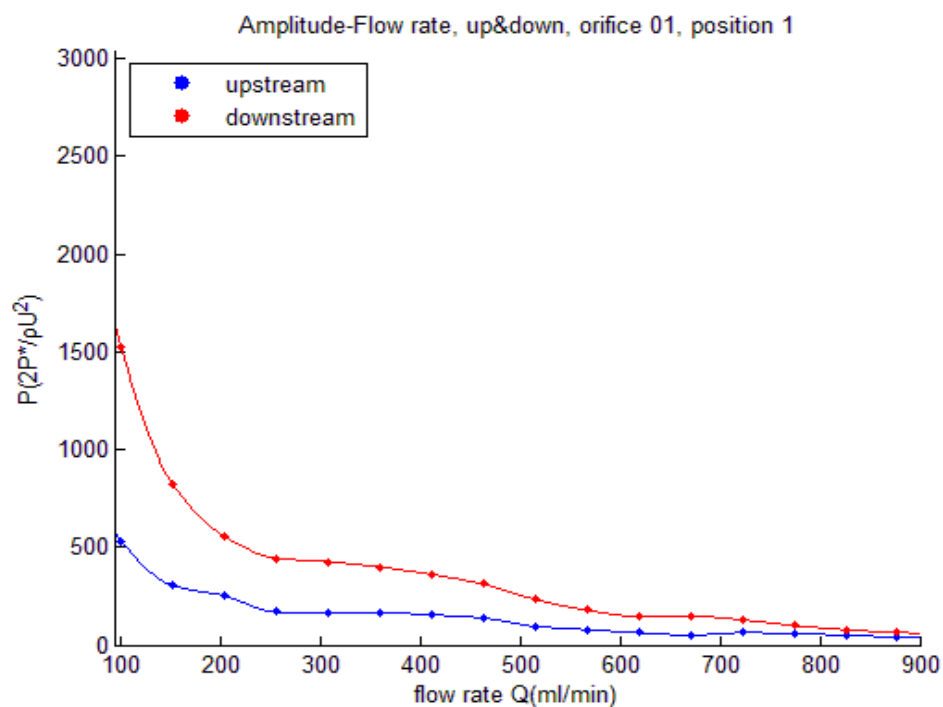
(β)



(γ)



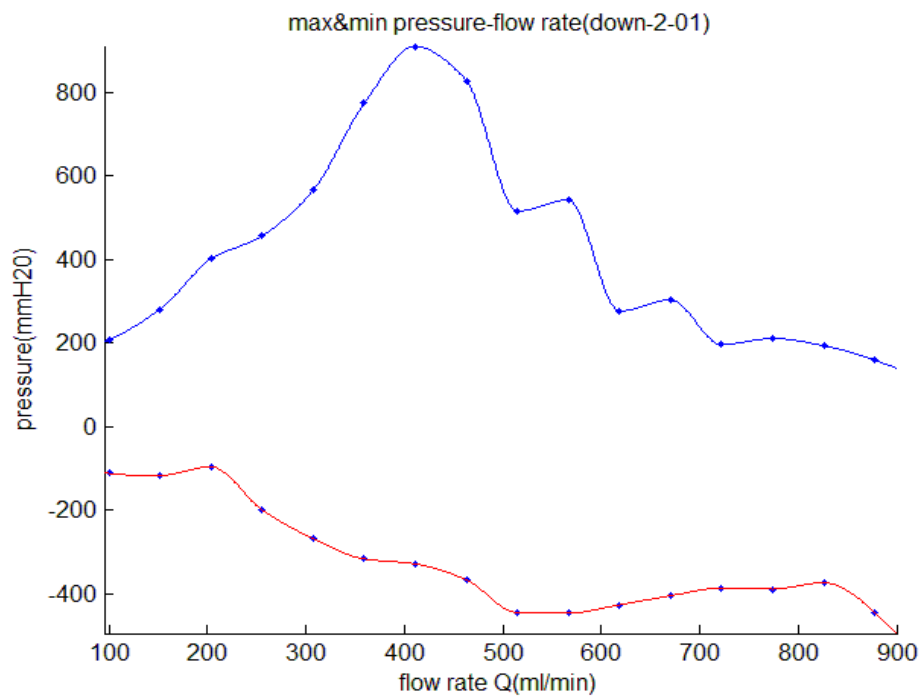
(δ)



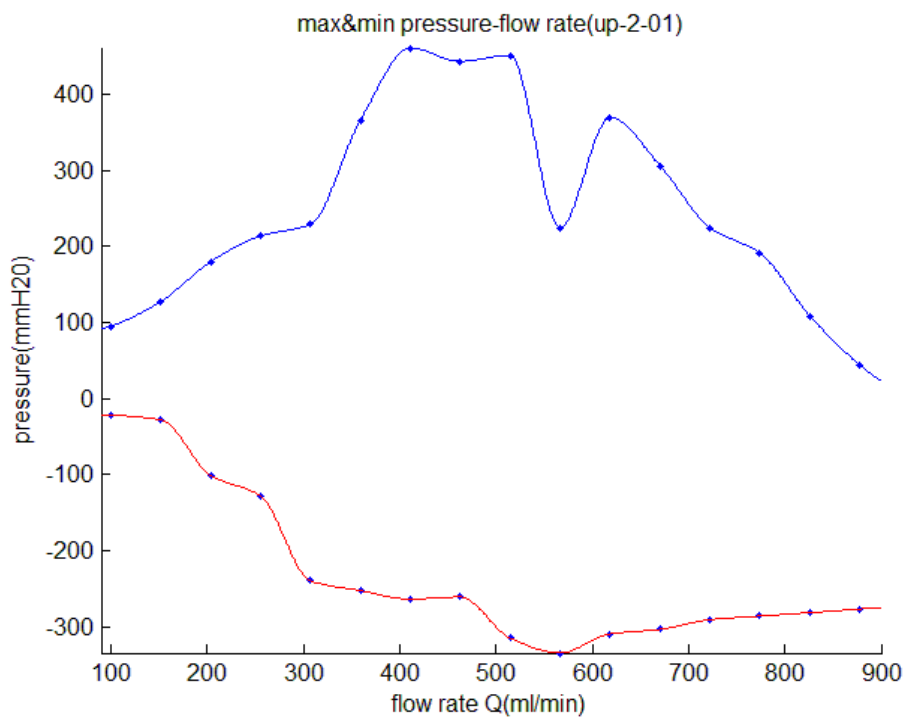
Εικόνα 4.10 Τα διαγράμματα (α),(β) δείχνουν τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση downstream και upstream αντίστοιχα, το (γ) απεικονίζει τα πλάτη ταλάντωσης upstream και downstream μαζί, και το (δ) συγκρίνει τα ίδια πλάτη αλλά αδιαστατοποιημένα με την ποσότητα $\rho U^2/2$. Θέση 1, Βάνα 1. Η καμπύλη προσαρμογής έχει κατασκευαστεί με b-splines.

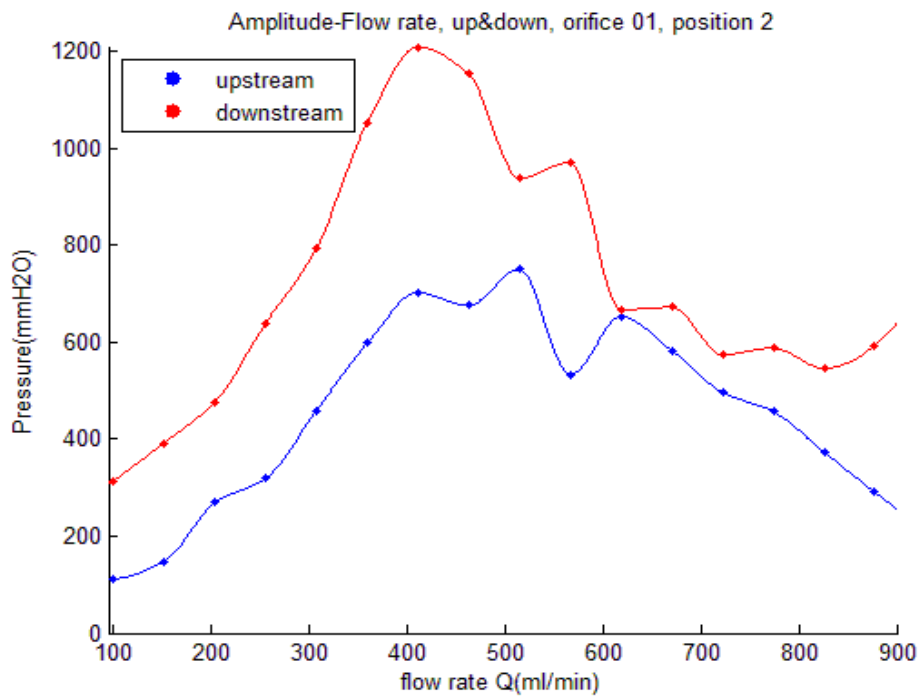
Θέση 2-Βάνα 1

(α)

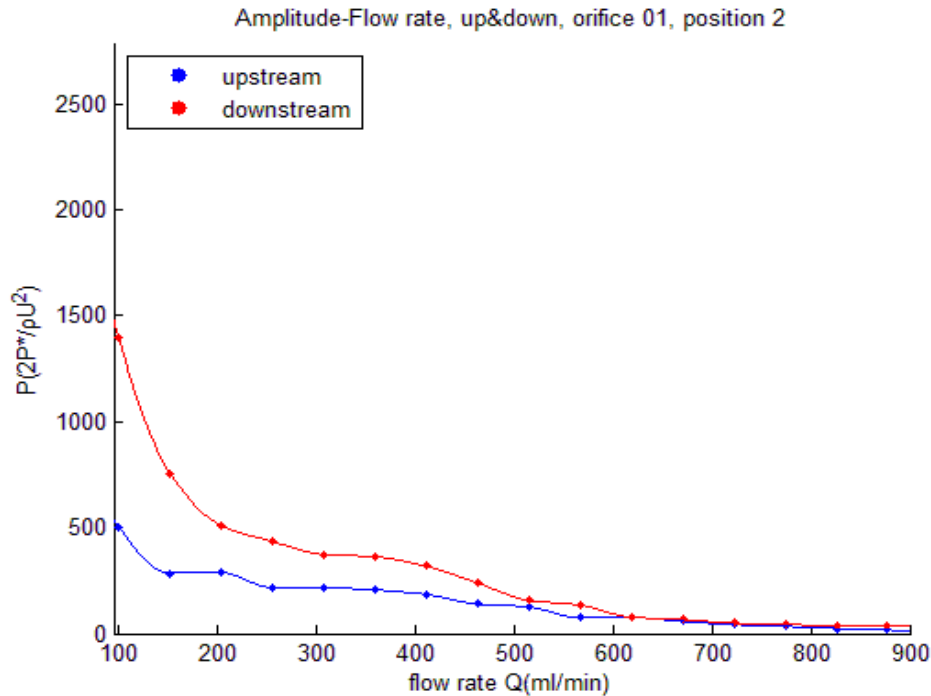


(β)





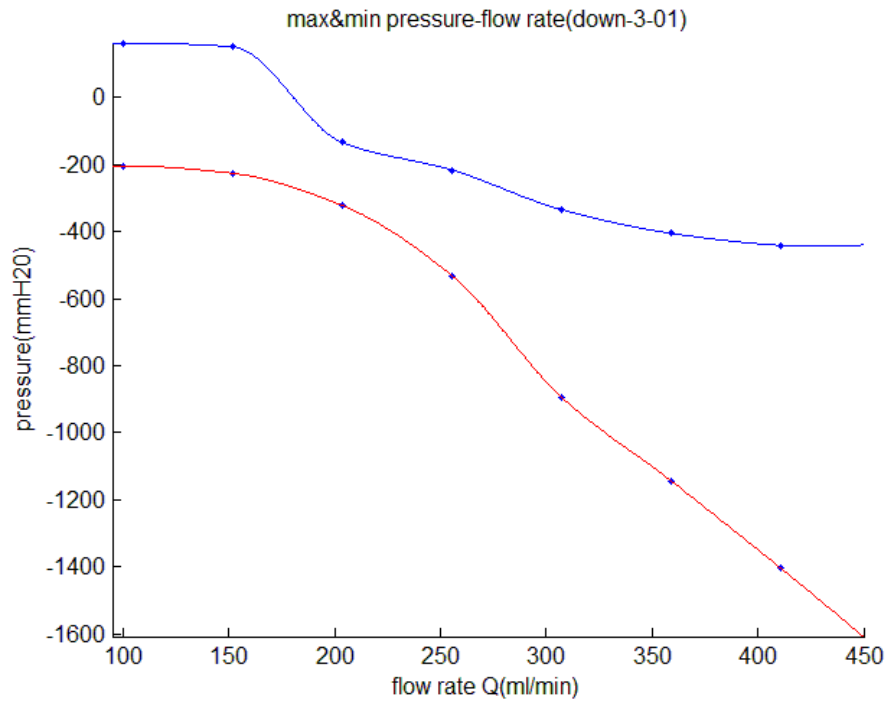
(δ)



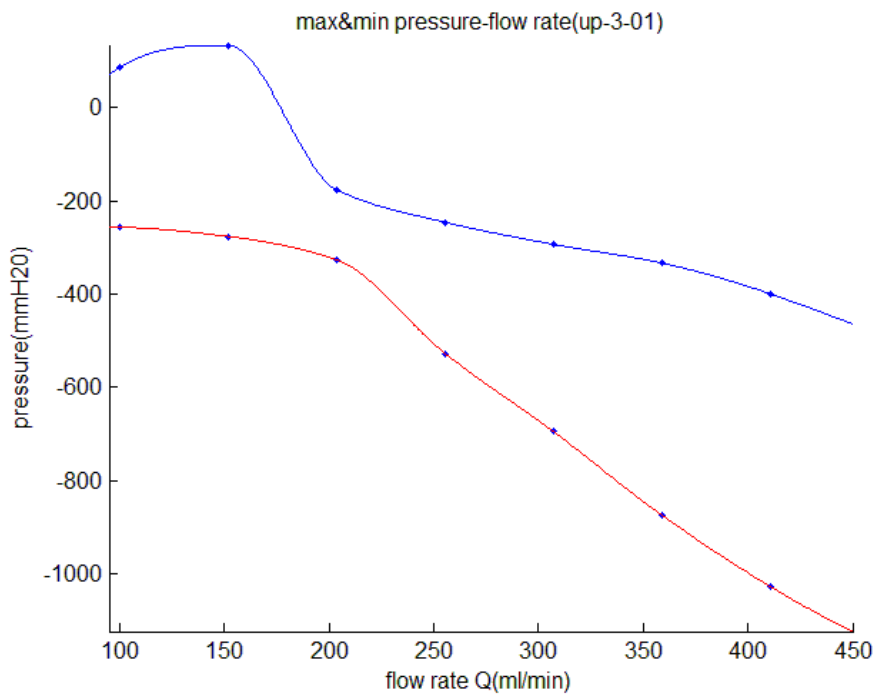
Εικόνα 4.11 Τα διαγράμματα (α),(β) δείχνουν τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση downstream και upstream αντίστοιχα, το (γ) απεικονίζει τα πλάτη ταλάντωσης upstream και downstream μαζί, και το (δ) συγκρίνει τα ίδια πλάτη αλλά αδιαστατοποιημένα με την ποσότητα $\rho U^2/2$. Θέση 2, Βάνα 1. Η καμπύλη προσαρμογής έχει κατασκευαστεί με b-splines.

Θέση 3-Βάνα 1

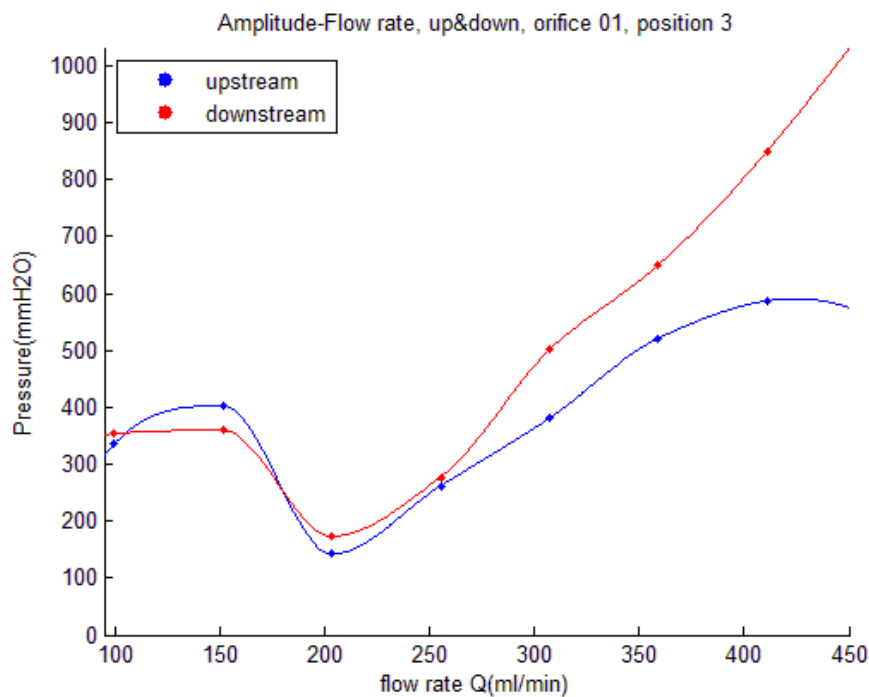
(α)



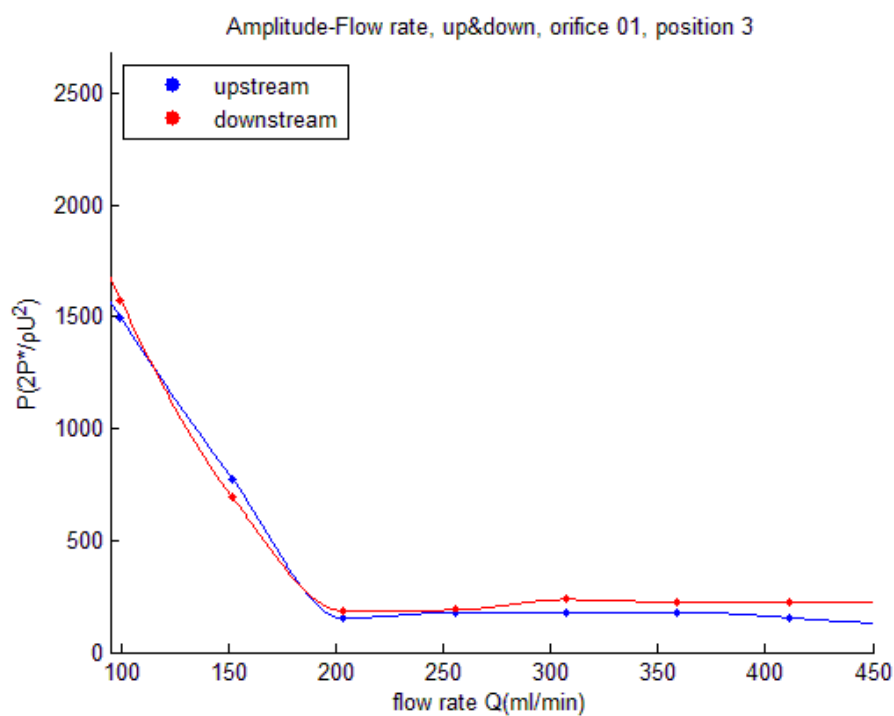
(β)



(γ)



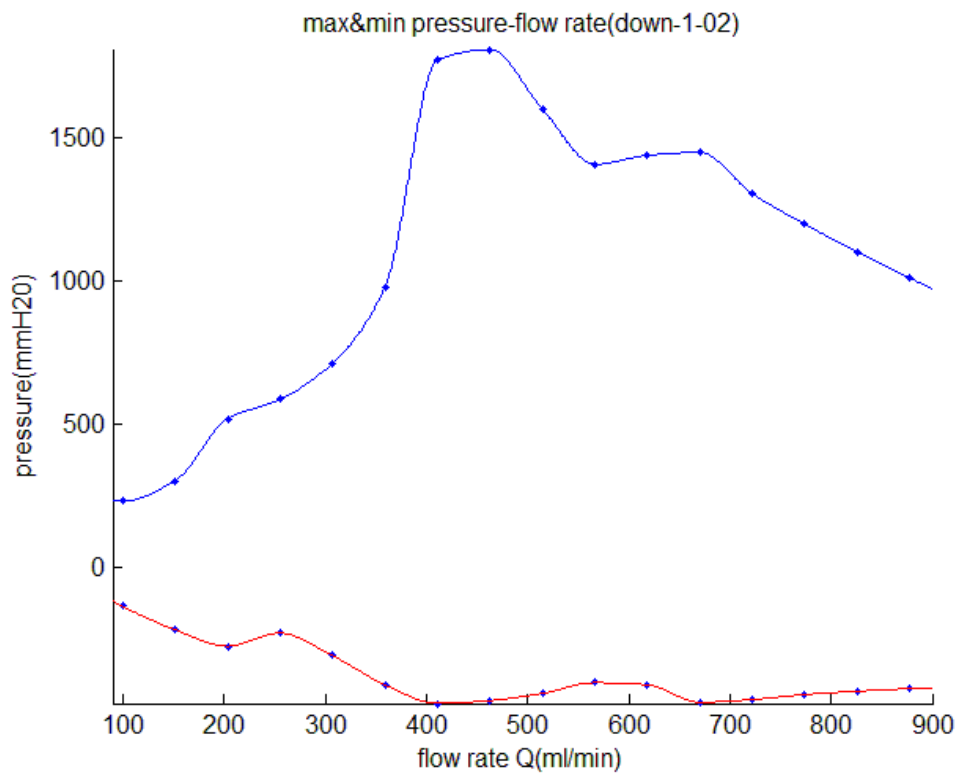
(δ)



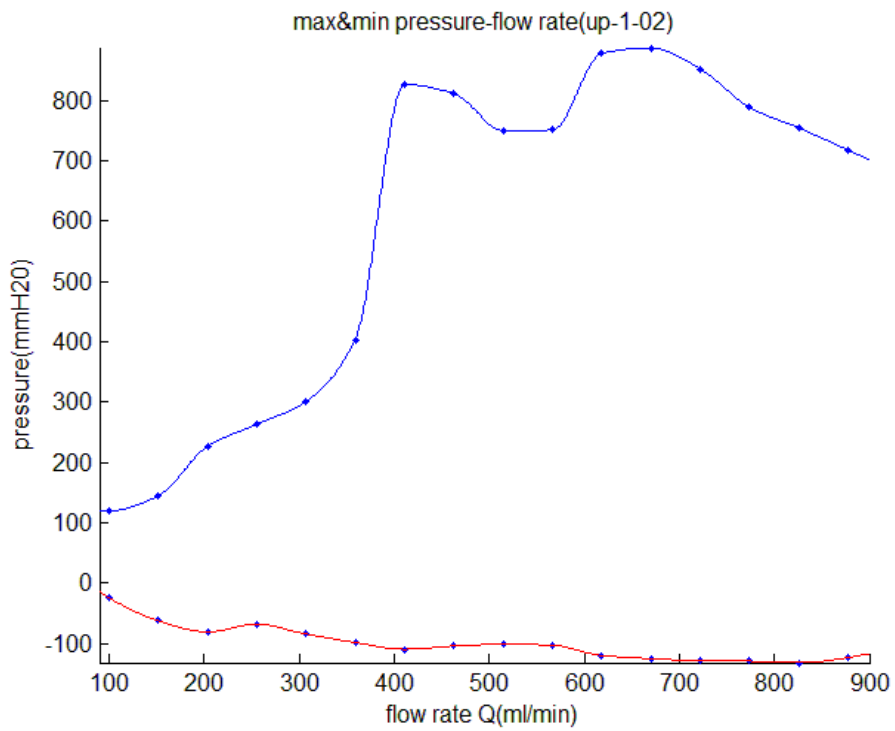
Εικόνα 4.12 Τα διαγράμματα (α),(β) δείχνουν τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση downstream και upstream αντίστοιχα, το (γ) απεικονίζει τα πλάτη ταλάντωσης upstream και downstream μαζί, και το (δ) συγκρίνει τα ίδια πλάτη αλλά αδιαστατοποιημένα με την ποσότητα $\rho U^2/2$. Θέση 3, Βάνα 1. Η καμπύλη προσαρμογής έχει κατασκευαστεί με b-splines.

Θέση 1-Βάνα 2

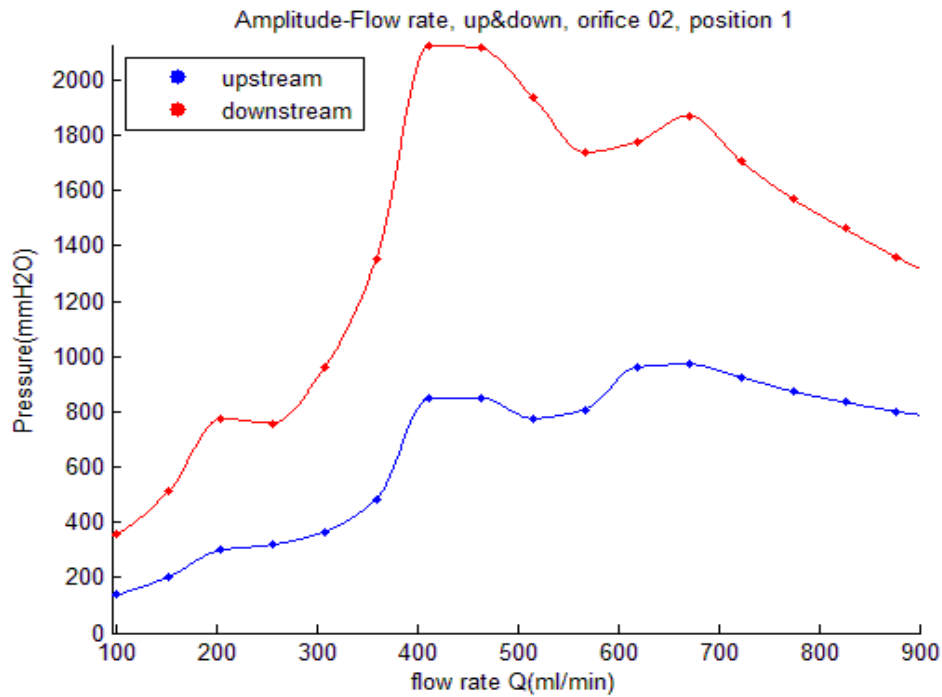
(α)



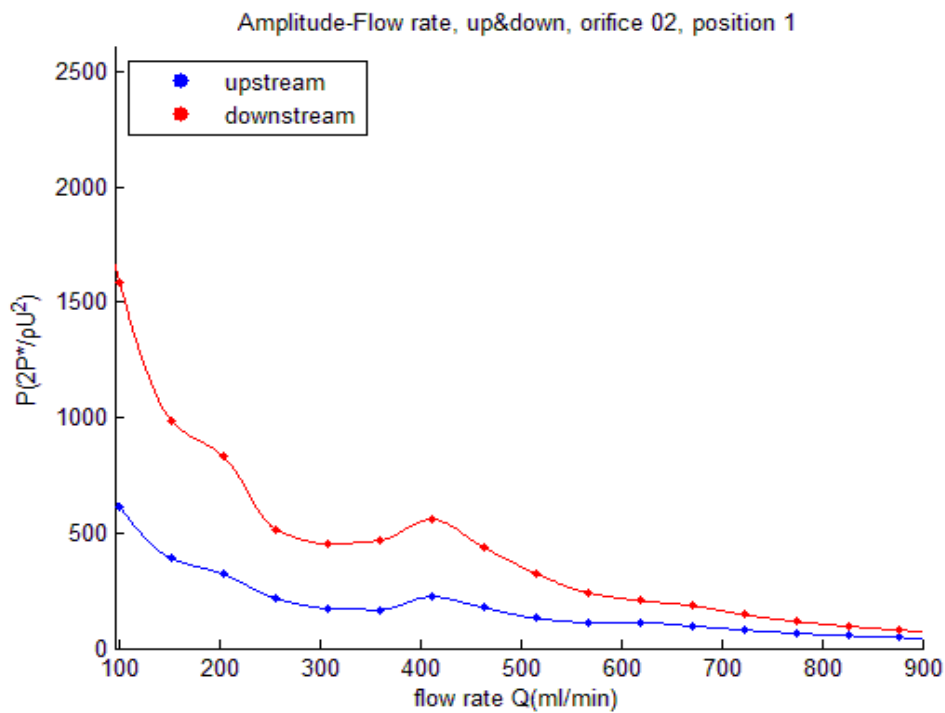
(β)



(γ)



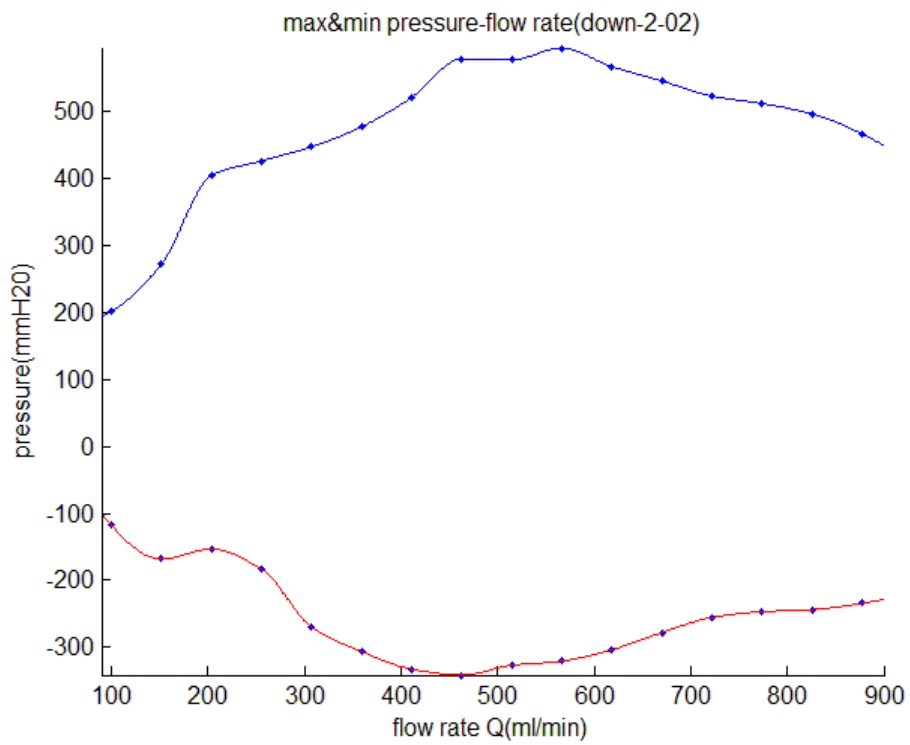
(δ)



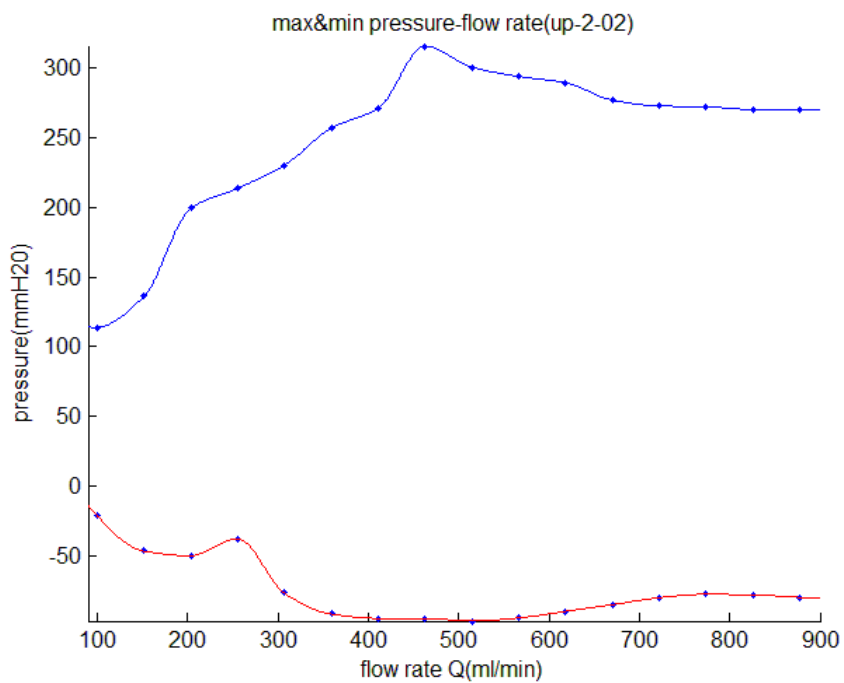
Εικόνα 4.13 Τα διαγράμματα (α),(β) δείχνουν τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση downstream και upstream αντίστοιχα, το (γ) απεικονίζει τα πλάτη ταλάντωσης upstream και downstream μαζί, και το (δ) συγκρίνει τα ίδια πλάτη αλλά αδιαστατοποιημένα με την ποσότητα $\rho U^2/2$. Θέση 1, Βάνα 2. Η καμπύλη προσαρμογής έχει κατασκευαστεί με b-splines.

Θέση 2-Βάνα 2

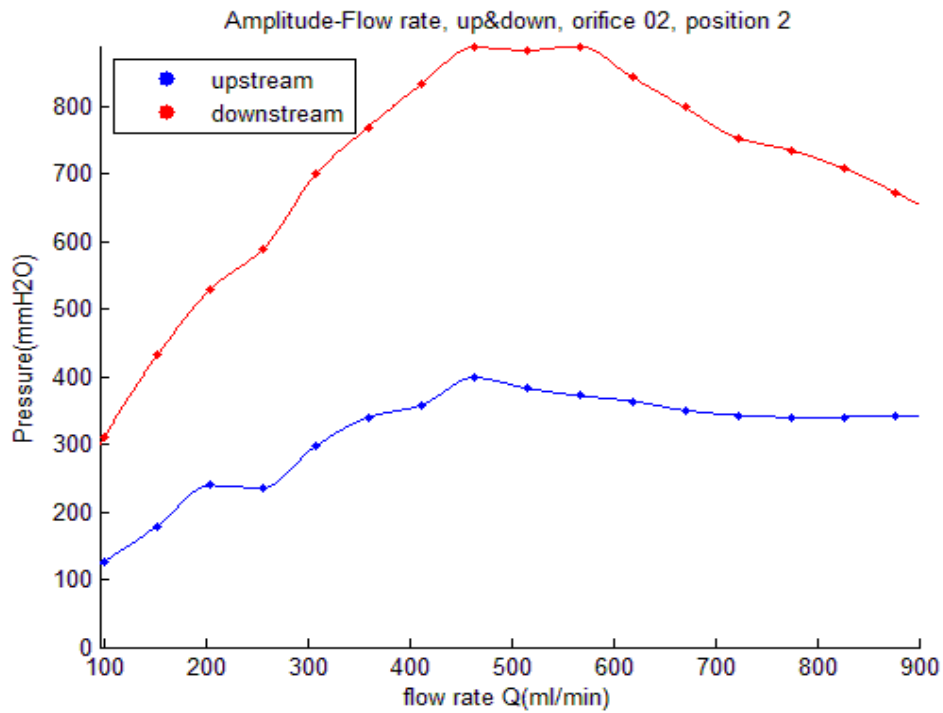
(α)



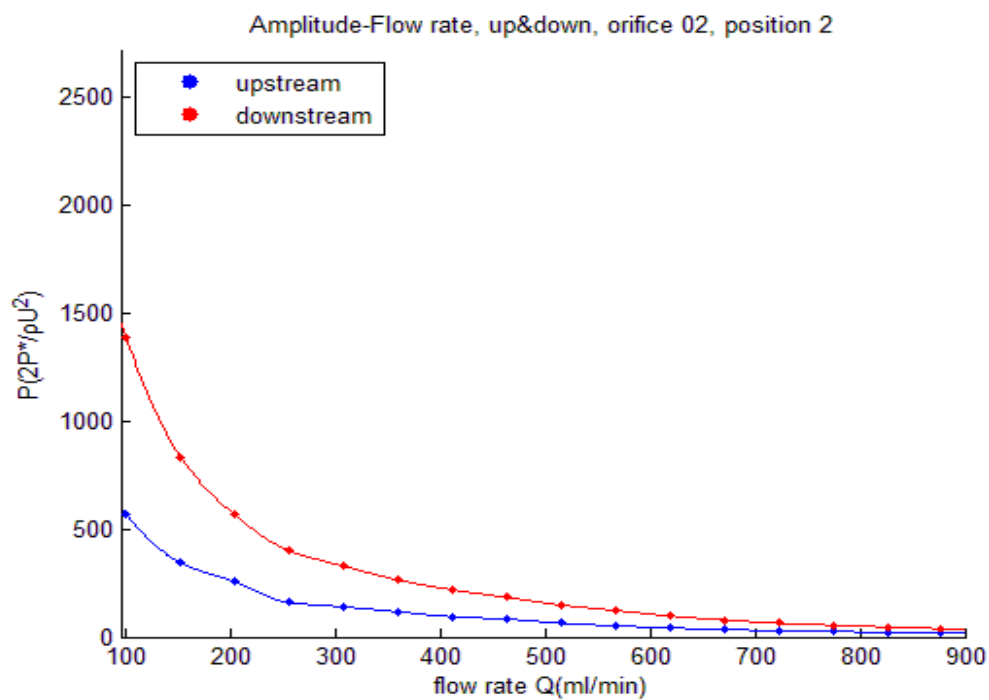
(β)



(γ)



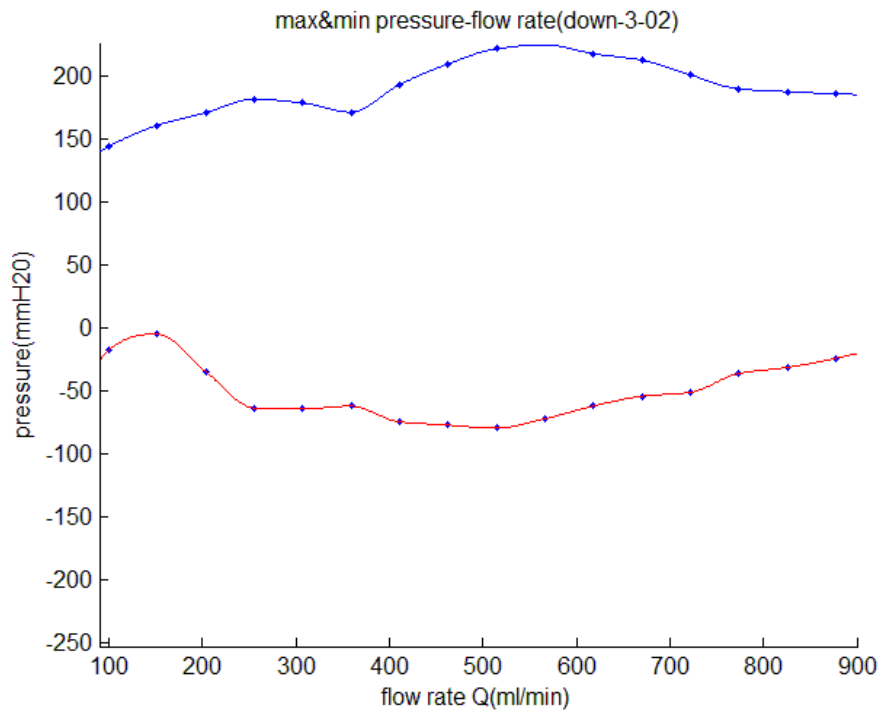
(δ)



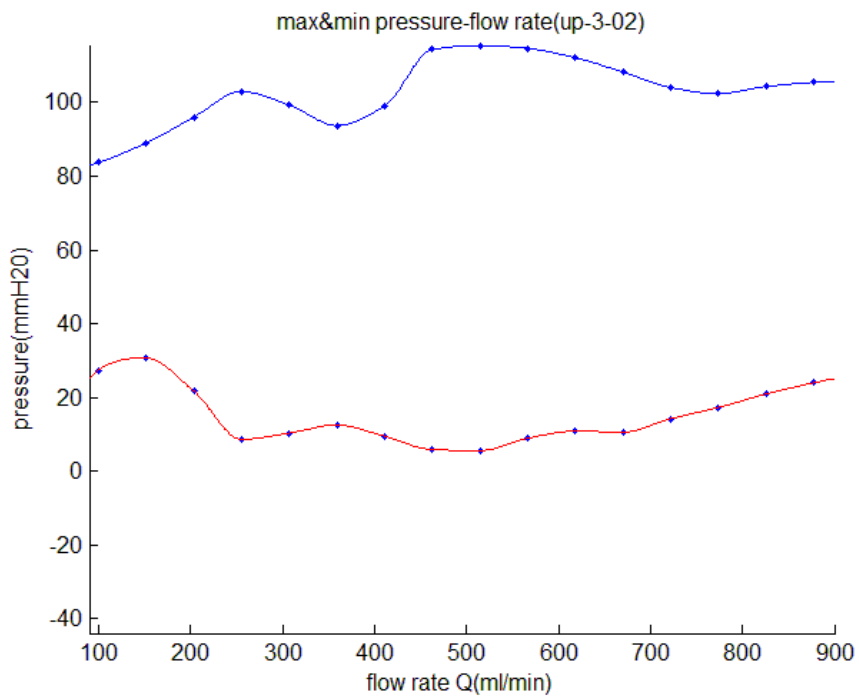
Εικόνα 4.14 Τα διαγράμματα (α),(β) δείχνουν τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση downstream και upstream αντίστοιχα, το (γ) απεικονίζει τα πλάτη ταλάντωσης upstream και downstream μαζί, και το (δ) συγκρίνει τα ίδια πλάτη αλλά αδιαστατοποιημένα με την ποσότητα $\rho U^2/2$. Θέση 2, Βάνα 2. Η καμπύλη προσαρμογής έχει κατασκευαστεί με b-splines.

Θέση 3-Βάνα 2

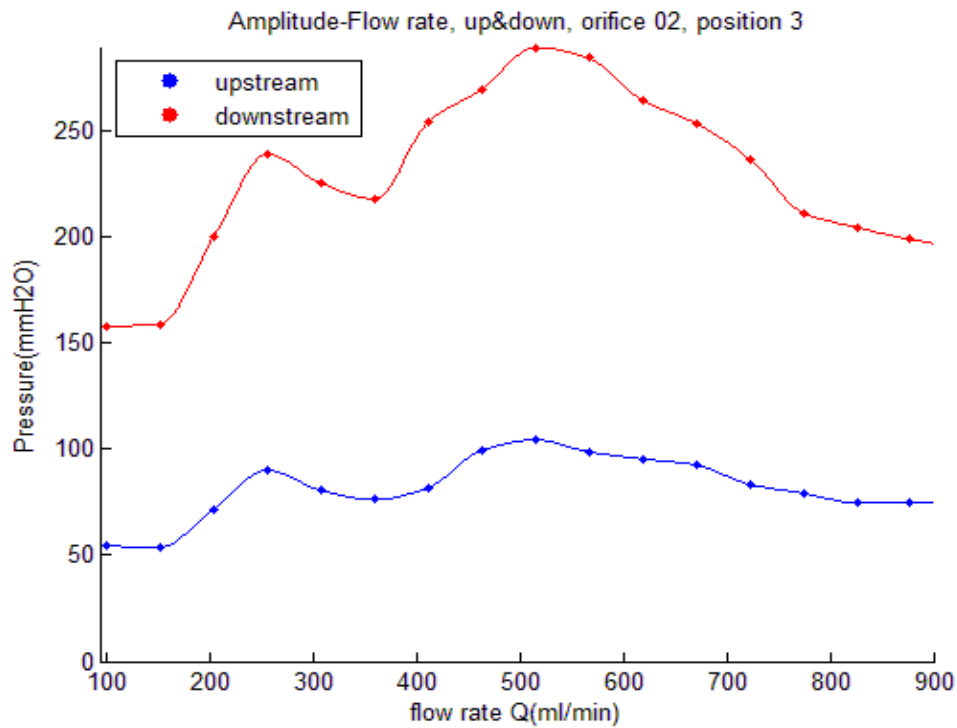
(α)



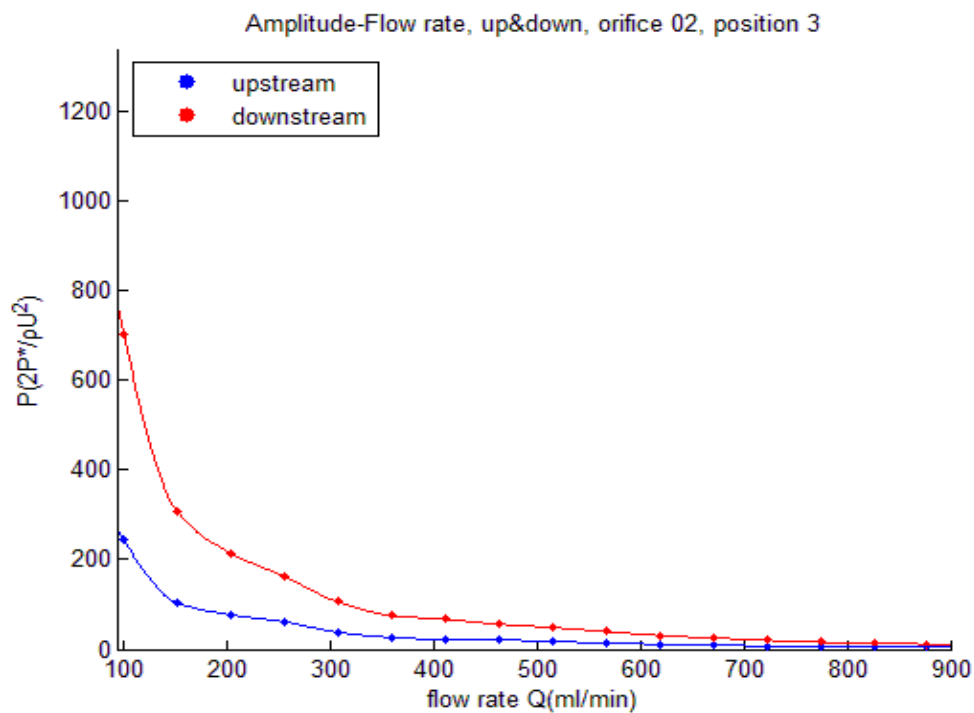
(β)



(γ)



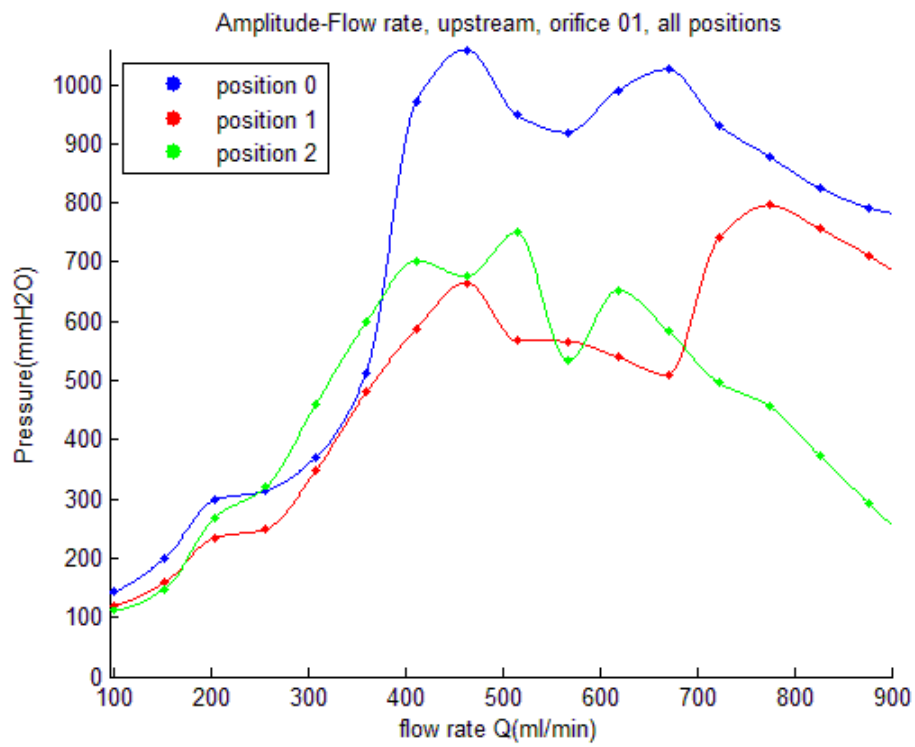
(δ)



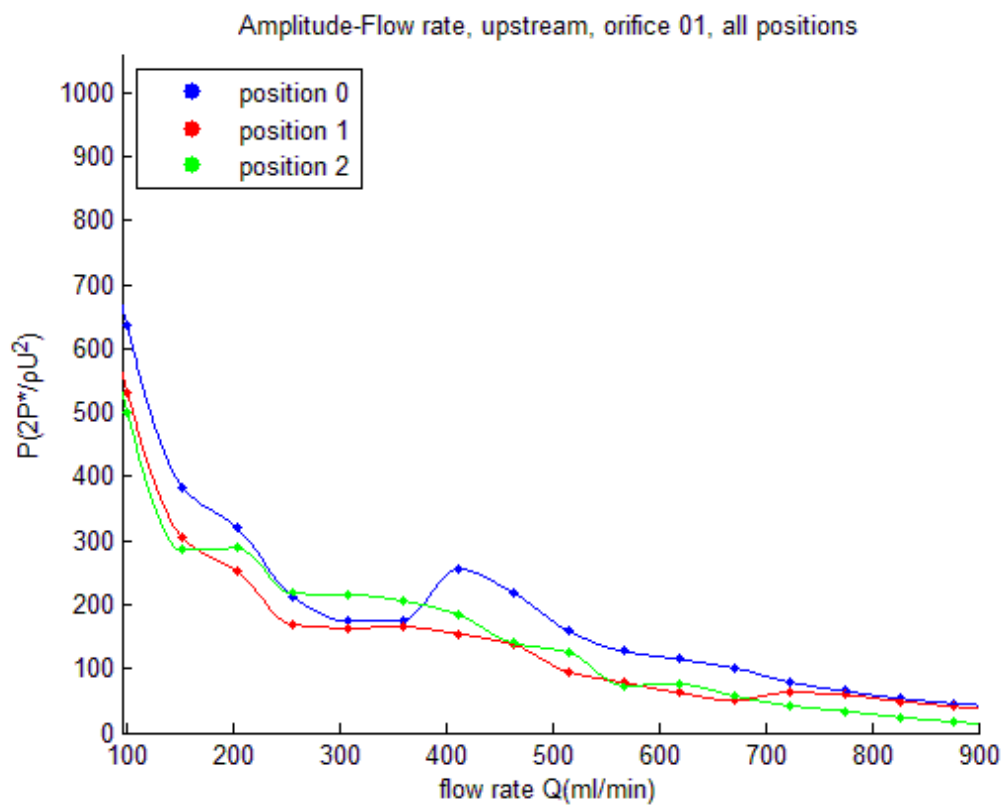
Εικόνα 4.15 Τα διαγράμματα (α),(β) δείχνουν τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση downstream και upstream αντίστοιχα, το (γ) απεικονίζει τα πλάτη ταλάντωσης upstream και downstream μαζί, και το (δ) συγκρίνει τα ίδια πλάτη αλλά αδιαστατοποιημένα με την ποσότητα $\rho U^2/2$. Θέση 3, Βάνα 2. Η καμπύλη προσαρμογής έχει κατασκευαστεί με b-splines.

Βάνα 1

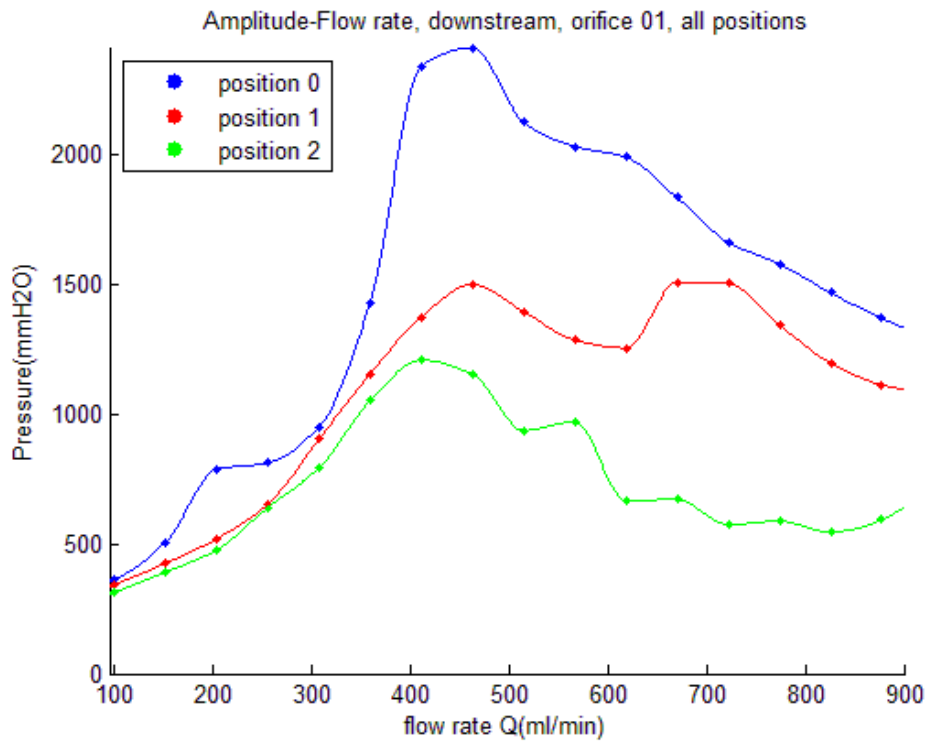
(α) upstream



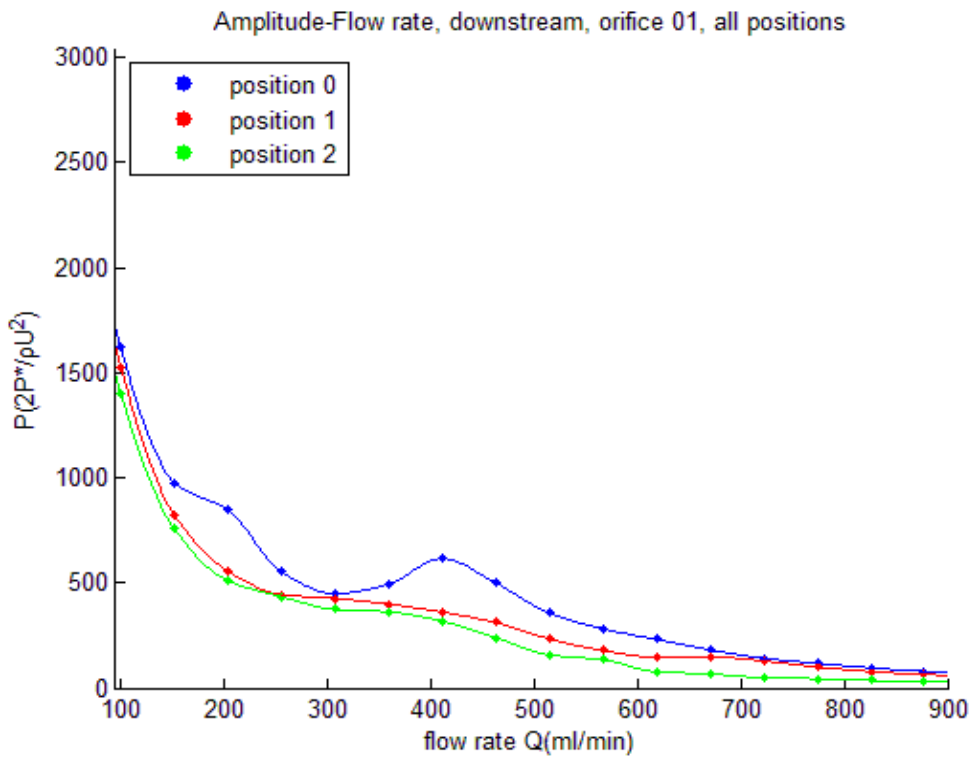
(β) upstream (Αδιάστατο)



(γ) downstream



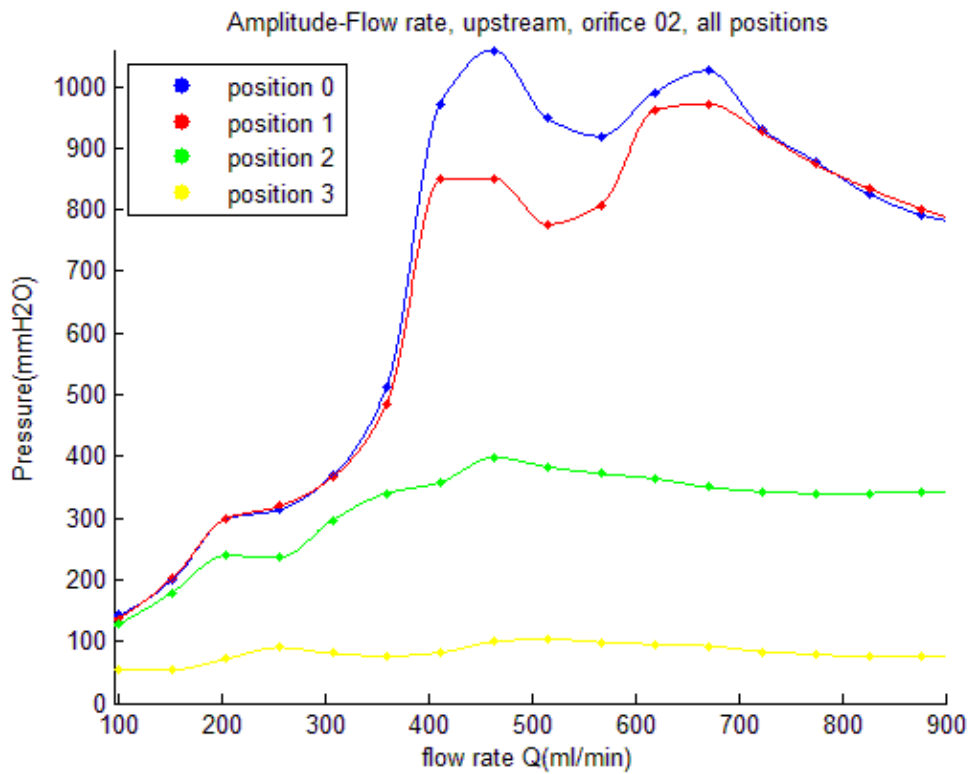
(δ) downstream (Αδιάστατο)



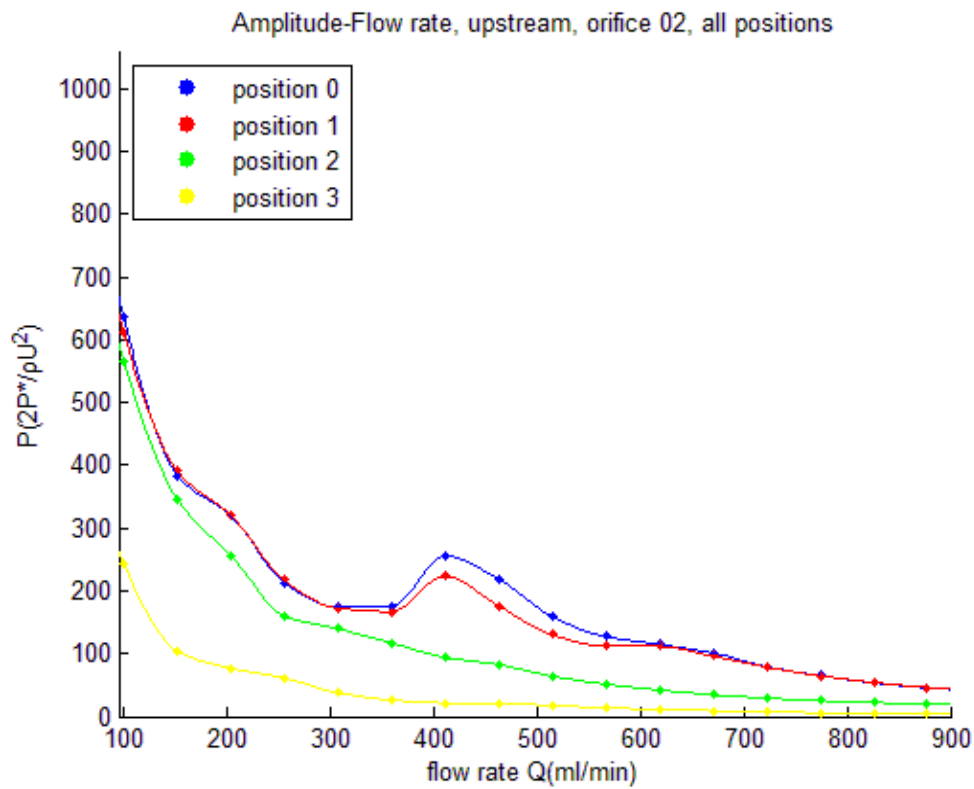
Εικόνα 4.16 Καμπύλες πλάτους πίεσης για όλες τις θέσεις της βάνας 1. (α) upstream πλάτος πίεσης, (β) upstream αδιάστατο πλάτος πίεσης, (γ) downstream πλάτος πίεσης, (δ) downstream αδιάστατο πλάτος πίεσης.

Βάνα 2

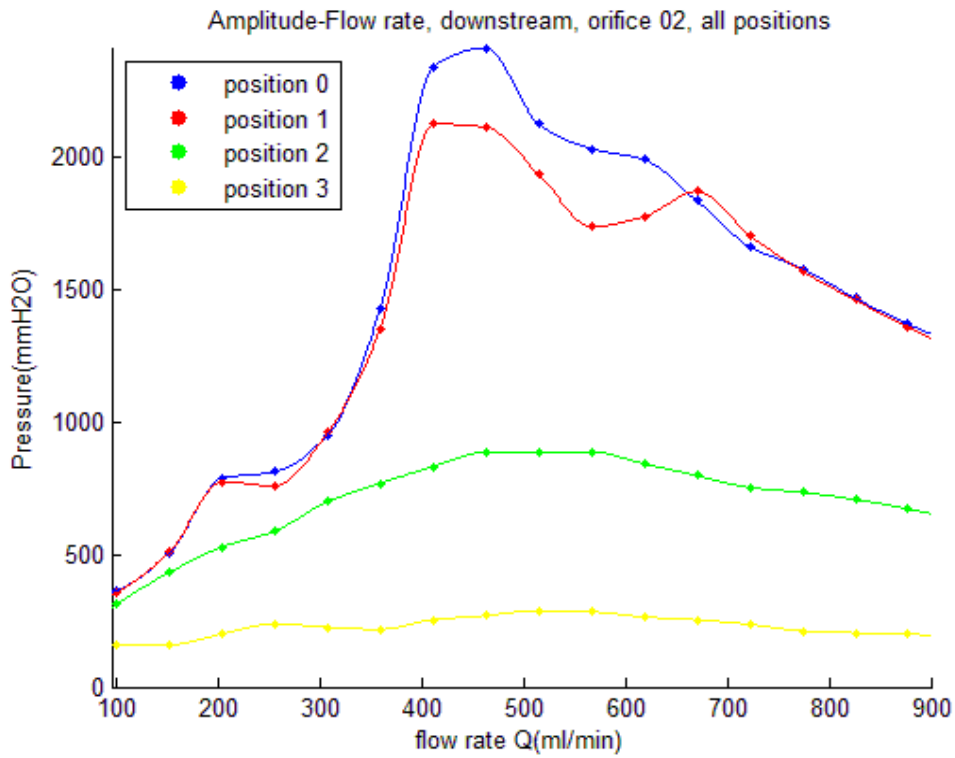
(α) upstream



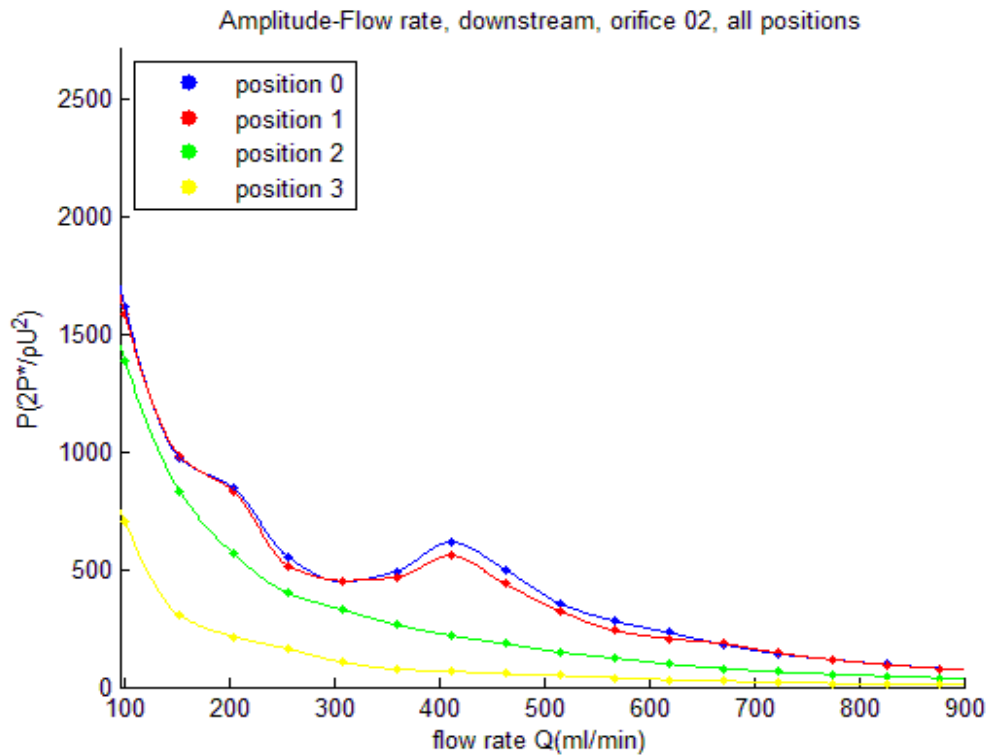
(β) upstream (Αδιάστατο)



(γ) downstream



(δ) downstream (Αδιάστατο)



Εικόνα 4.17 Καμπύλες πλάτους πίεσης για όλες τις θέσεις της βάνας 2. (α) upstream πλάτος πίεσης, (β) upstream αδιάστατο πλάτος πίεσης, (γ) downstream πλάτος πίεσης, (δ) downstream αδιάστατο πλάτος πίεσης.

Από τις **εικόνες 4.9** με **4.17** προκύπτουν κάποιες βασικές παρατηρήσεις. Πρώτον, σε αντίθεση με το πείραμα 1, εδώ βλέπουμε πως το πλάτος ταλάντωσης της πίεσης είναι μεγαλύτερο downstream του εύκαμπτου αγωγού και όχι upstream, κάτι που ισχύει σταθερά για όλες τις συνθήκες παροχής και εσωτερικής πίεσης. Όσον αφορά τη βάνα 1 (ανάντι βάνα), παρατηρείται ένα μέγιστο τόσο upstream όσο και downstream στα 400-500 ml/min το οποίο παραμένει σε όλες τις θέσεις της βάνας (βλ. **εικόνα 4.9-4.12**). Ο ρυθμός αύξησης του πλάτους από την αρχική παροχή μέχρι το συγκεκριμένο peak του πλάτους είναι πολύ υψηλός για τις περιπτώσεις των θέσεων 0,1,2. Στην ανοικτή βάνα (βλ. **εικόνα 4.9**) μετά το peak έχουμε σταδιακή πτώση του πλάτους ενώ στις θέσεις 1,2 δημιουργούνται περισσότερα ακρότατα μετά τα 500 ml/min. Συγκεκριμένα, στη θέση 1 (βλ. **εικόνα 4.10**) σχηματίζεται δεύτερο peak στο πλάτος στα 700 ml/min και αρχίζει να μειώνεται και πάλι μετά τα 800 ml/min. Στη θέση 2 (βλ. **εικόνα 4.11**), το μέγιστο των 400-500 ml/min παραμένει, αλλά μετά από αυτή τη θέση φαίνεται να υπάρχουν αστάθειες με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφόρων ακροτάτων. Στη θέση 3(βλ. **εικόνα 4.12**), η μέση εσωτερική πίεση είναι πλέον αρνητική. Τα upstream και downstream πλάτη πίεσης είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, παρουσιάζουν ένα τοπικό ελάχιστο στα 200 ml/min και μετά, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, ο ρυθμός αύξησης τους πλάτους είναι πολύ υψηλός. Στη θέση 3 για τη βάνα 1 διερευνήσαμε την εξέλιξη της πίεσης μόνο μέχρι τα 450 ml/min καθώς, σε υψηλότερες συχνότητες αντλίας, σε συνδυασμό με την μικρή εσωτερική πίεση σε αυτή τη θέση, παρουσιάστηκαν διάφορα προβλήματα στο δίκτυο με το σημαντικότερο να είναι η εισροή αέρα.

Για τη βάνα 2 (κατάντι) έχουμε να παρατηρήσουμε πως στη θέση 1 (βλ. **εικόνα 4.13**) η μορφή του πλάτους πίεσης είναι παρόμοια με την ανοικτή θέση, δηλαδή έχουμε και πάλι το peak στα 400-500 ml/min ενώ στα 700ml/min έχουμε τοπικό μέγιστο, το οποίο διακρίνεται πιο έντονα στο downstream πλάτος. Στις επόμενες θέσεις (βλ. **εικόνα 4.14,4.15**) ομαλοποιούνται οι καμπύλες ενώ η τιμή του πλάτους πέφτει αρκετά, τόσο downstream όσο και upstream σε σχέση με τη θέση 1 αλλά και με τη βάνα 1.

Στις **εικόνες 4.16,4.17** έχουμε μια πιο άμεση σύγκριση των θέσεων κάθε βάνας και από όπου μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής: (α) Τα πλάτη πίεσης μειώνονται και με μείωση της εσωτερικής πίεσης αλλά και με αύξηση αυτής (δηλαδή όσο κλείνουμε οποιαδήποτε από τις δύο βάνες) με εξαίρεση το upstream πλάτος πίεσης για τη θέση 2 της βάνας 1, το οποίο μέχρι περίπου τα 700 ml/min είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της θέσης 1 της βάνας 1(ανάντι) (βλ. **εικόνα 4.16(α),(β)**). (β) Τα πλάτη πίεσης μετά στις θέσεις 2,3 για τη βάνα 2 είναι αρκετά μικρότερα από τα αντίστοιχα της βάνας 1. (γ) Το peak στις καμπύλες για παροχή 400-500 ml/min είναι παρών σε όλες τις θέσεις για τη βάνα 1, με μειούμενο πλάτος όσο αυξάνει ο αριθμός της θέσης ενώ στη βάνα 2, εξαφανίζεται στις θέσεις 2 και 3.

4.2.3 Ταλάντωση εύκαμπτου αγωγού

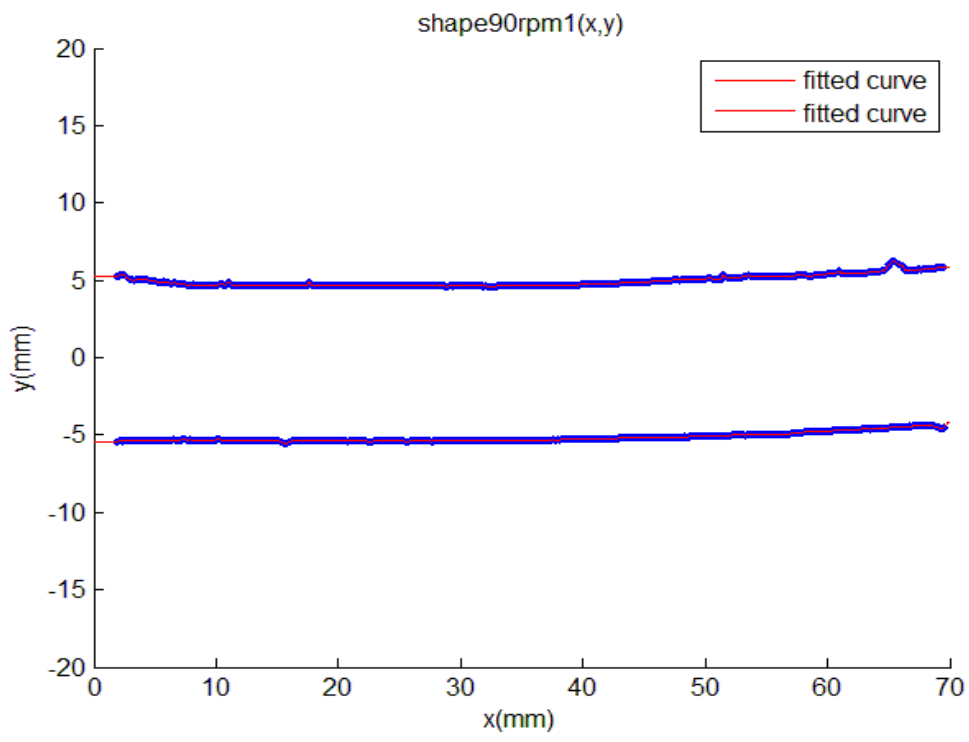
Σε αυτήν την παράγραφο εξετάζουμε την ταλάντωση του αγωγού για διάφορες συνθήκες. Από την ανάλυση των πιέσεων προκύπτουν δύο ενδιαφέρουσες περιοχές παροχών με εύρος περίπου 100 ml/min. Αυτές είναι περιοχή 400-500 ml/min και 700-800 ml/min, στις οποίες για μεταβολή της βάνας 1 έχουμε δυο τοπικά

μέγιστα στο πλάτος πίεσης, ένα εκ των οποίων, ανάλογα τη θέση, είναι ολικό μέγιστο της καμπύλης. Με το σταδιακό κλείσιμο της βάνα 2, τα πλάτη πίεσης γίνονται ομοιόμορφα, μειώνονται σε απόλυτη τιμή και επιπλέον οι ταλαντώσεις του εύκαμπτου αγωγού γίνονται μικρότερες. Για αυτούς τους λόγους, επιλέξαμε να εξετάσουμε συγκεκριμένες παροχές και να μεταβάλλουμε την εσωτερική πίεση μόνο με τη βάνα 1 ενώ αφήνουμε τη βάνα 2 μονίμως ανοικτή. Οι παροχές που εξετάσαμε είναι οι εξής: 310-515 ml/min και 670-775 ml/min, οι οποίες αντιστοιχούν στα εξής RPM αντλίας: 70, 80, 90, 100, 110, 140, 150, 160. Οι θέσεις της βάνας 1 που εξετάσαμε είναι οι 0,1,2. Η θέση 3 προκαλούσε προβλήματα στο δίκτυο από τα 90-100 RPM και πάνω, και έτσι δεν τη συμπεριλαμβάνουμε στην εργασία.

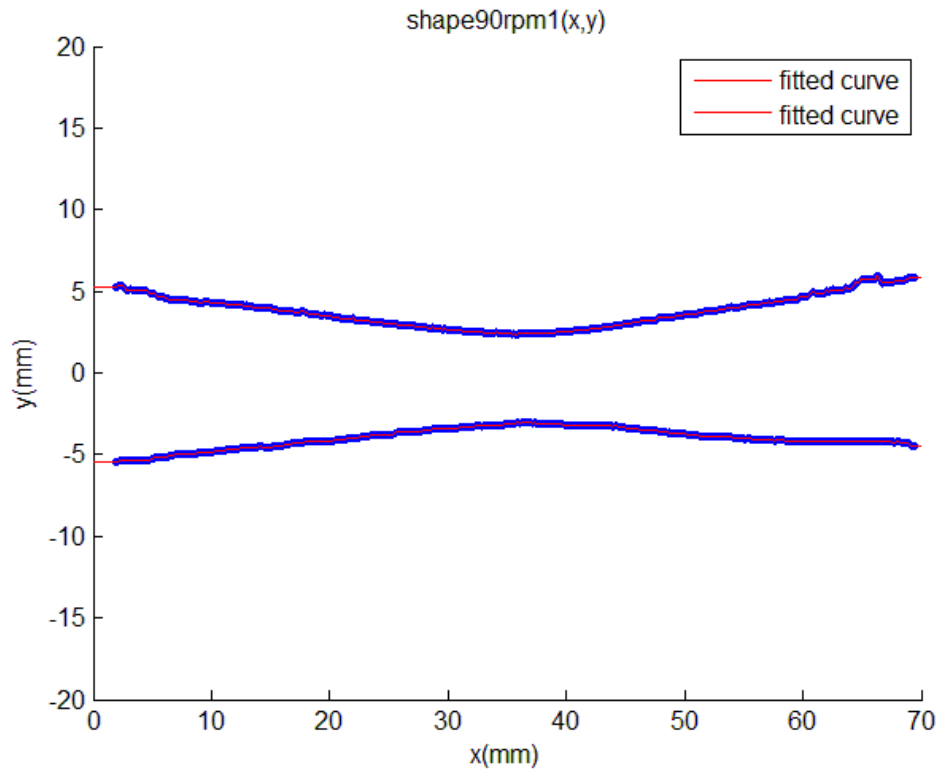
Η επεξεργασία των εικόνων έχει σκοπό την εύρεση του πλάτους και της περιόδου ταλάντωσης του εύκαμπτου αγωγού σε κάθε θέση, όπου ορίζεται όπως και πριν, δηλαδή από τη συχνότητα της αντλίας ή την παροχή και από τη θέση της βάνας 1. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με αυτή του πειράματος 1 και οι κώδικες καθώς και μία σύντομη περιγραφή τους βρίσκονται στο παράρτημα. Προσπαθήσαμε να απομονώσουμε, δηλαδή, τον αγωγό από το background και στη συνέχεια να βρούμε το περίγραμμά του. Παρόλα αυτά, σε αυτό το πείραμα, η απομόνωση του αγωγού δεν ήταν εύκολη κυρίως διότι υπήρχε οπτικός θόρυβος στο background που εμπόδιζε τον ορισμό του περιγράμματος. Για την επίλυση του προβλήματος προσπαθήσαμε να δημιουργήσουμε ένα ικανοποιητικό επίπεδο φιλτραρίσματος, ανάλογα την περίπτωση, με όχι πάντοτε επιθυμητά αποτελέσματα. Ένα δεύτερο πρόβλημα ήταν οι περιπτώσεις υψηλής συχνότητας ταλαντώσεων του αγωγού. Η κάμερα έχει συχνότητα λήψης 25 fps, η οποία αποδεικνύεται αρκετά μικρή στις μεγάλες συχνότητες της αντλίας (140, 150, 160 RPM) με αποτέλεσμα σε κάποια frames η κίνηση του τοιχώματος να είναι θολή. Τελικά, το αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα όσον αφορά την εύρεση πλάτους του αγωγού καθώς μας αρκούν μερικά καθαρά frames που να απεικονίζουν τον αγωγό στις δύο ακραίες θέσεις ταλάντωσης. Με την περίοδο τα πράγματα γίνονται λίγο πιο δύσκολα καθώς χρειαζόμαστε μία αλληλουχία frames για να αποτυπώσουμε τη χρονική εξέλιξη μίας ταλάντωσης. Σε κάποιες περιπτώσεις αυτό δεν ήταν δυνατό, όμως σε αρκετές έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια ακολουθούν κάποια ενδεικτικά διαγράμματα με το περίγραμμα του αγωγού έτσι όπως προέκυψε από την επεξεργασία των εικόνων, οι καμπύλες πλάτους ταλάντωσης του αγωγού, μία σύγκριση του πλάτους του αγωγού με τα πλάτη πίεσης και τέλος οι περίοδοι των ταλαντώσεων του αγωγού. Από την **εικόνα 4.18** διακρίνεται ο λαιμός του αγωγού περί το μέσο του αγωγού (30 με 40 mm). Στην **εικόνα 4.19** γίνεται η σύγκριση των περιγραμμάτων με τις πραγματικές εικόνες. Μερικές διαφορές που μπορεί να παρατηρήσει κανείς στα περιγράμματα των **εικόνων 4.18** και **4.19** (π.χ. τα περιγράμματα της εικόνας 4.18 είναι πιο ομαλά) υπάρχουν διότι εικόνες σαν και την **4.19** χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του κώδικα, οπότε σε πολλές περιπτώσεις ακολούθησε και δευτερεύουσα επεξεργασία στα περιγράμματα για να διορθωθούν μικρές ατέλειες όπου αυτό ήταν εφικτό.

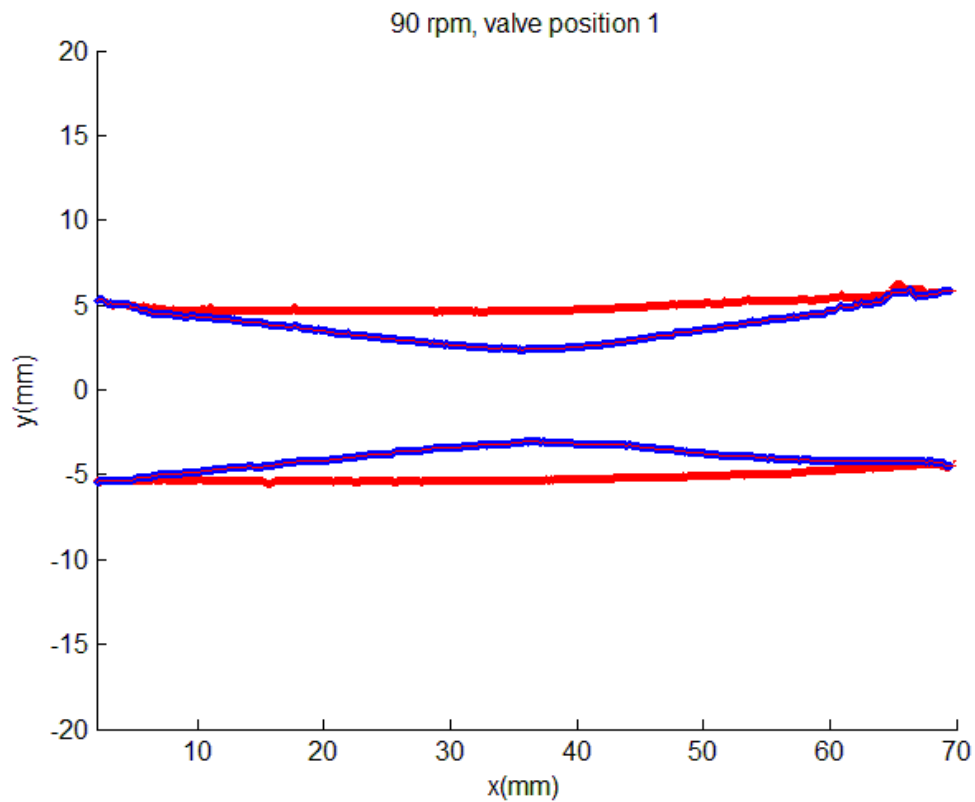
(a)



(b)

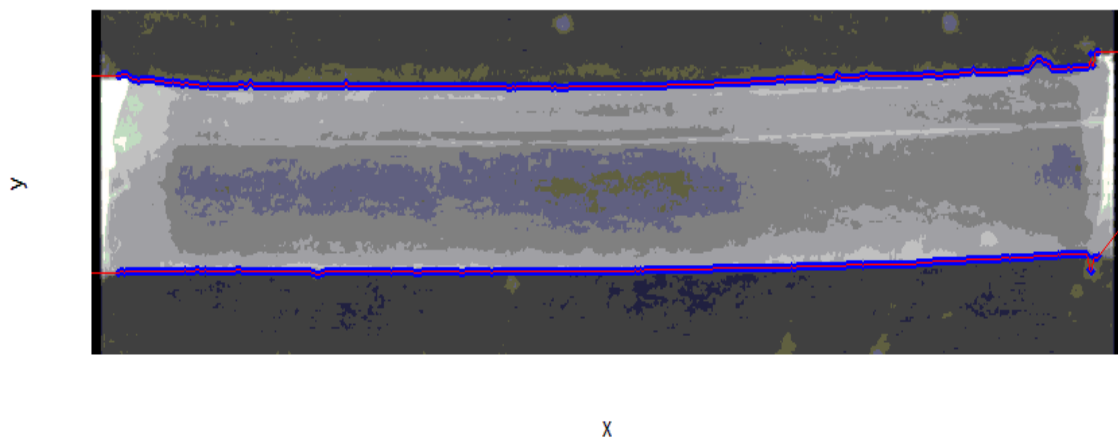


(c)

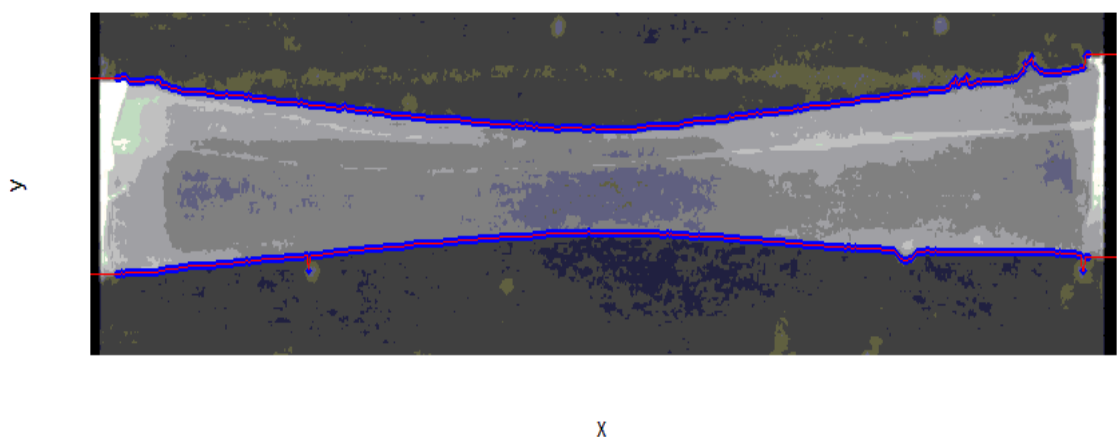


Εικόνα 4.18 (a) Θέση μέγιστης διατομής κατά την ταλάντωση του εύκαμπτου αγωγού στα 90 rpm για τη θέση 1 της βάνας 1. (b) Θέση ελάχιστης διατομής (περίπου στο μέσο του αγωγού) για τις ίδιες συνθήκες. (c) Υπέρθωση των εικόνων (a),(b), με κόκκινο η (a) και μπλε η (b).

(α)



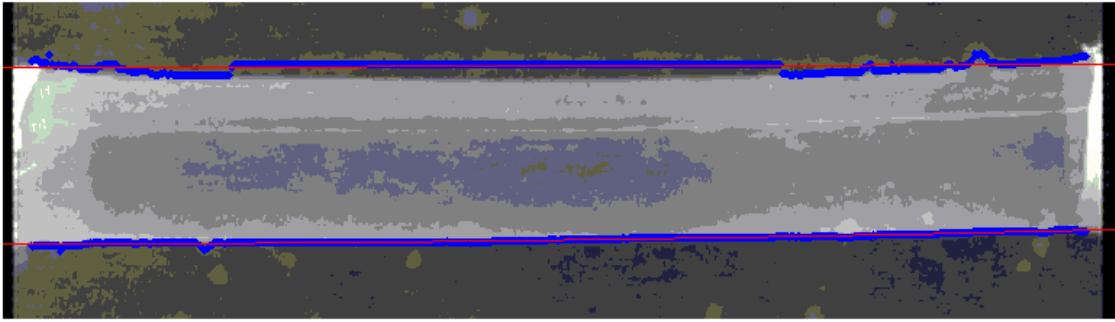
(β)



Εικόνα 4.19 Σύγκριση των περιγραμμάτων της εικόνας 4.18 με την πραγματική λήψη. (α) Η χρονική στιγμή από την οποία προέκυψε το περίγραμμα της εικόνας 4.18 (α). (β) Η αντίστοιχη χρονική στιγμή της εικόνας 4.18 (β).

Αφού αναγνωρίσουμε τις ακραίες θέσεις της διατομής που μεταβάλλεται πιο έντονα (λαιμός) μπορούμε να βρούμε το πλάτος ταλάντωσης του αγωγού. Από την εικόνα 4.18 φαίνεται πως σε διάφορα σημεία υπάρχουν ατέλειες στο σχήμα του αγωγού, οι οποίες όμως δε μας εμποδίζουν στην εύρεση του πλάτους ταλάντωσης καθώς μπορούμε να επικεντρωθούμε μόνο στις διατομές έντονης κατάρρευσης και να κόψουμε το υπόλοιπο σχήμα. Παρόλα αυτά, λόγω των δυσκολιών που περιεγράψαμε παραπάνω, συγκρίναμε κάθε περίγραμμα με την πραγματική εικόνα έτσι ώστε να επιβεβαιώσουμε τη σωστή λειτουργία του κώδικα ή να τον βελτιώσουμε, και εν τέλει να χρησιμοποιήσουμε μόνο τα περιγράμματα που δεν είχαν κάποια σημαντική απόκλιση γύρω από τη θέση έντονης κατάρρευσης (βλ. εικόνα 4.19).

y

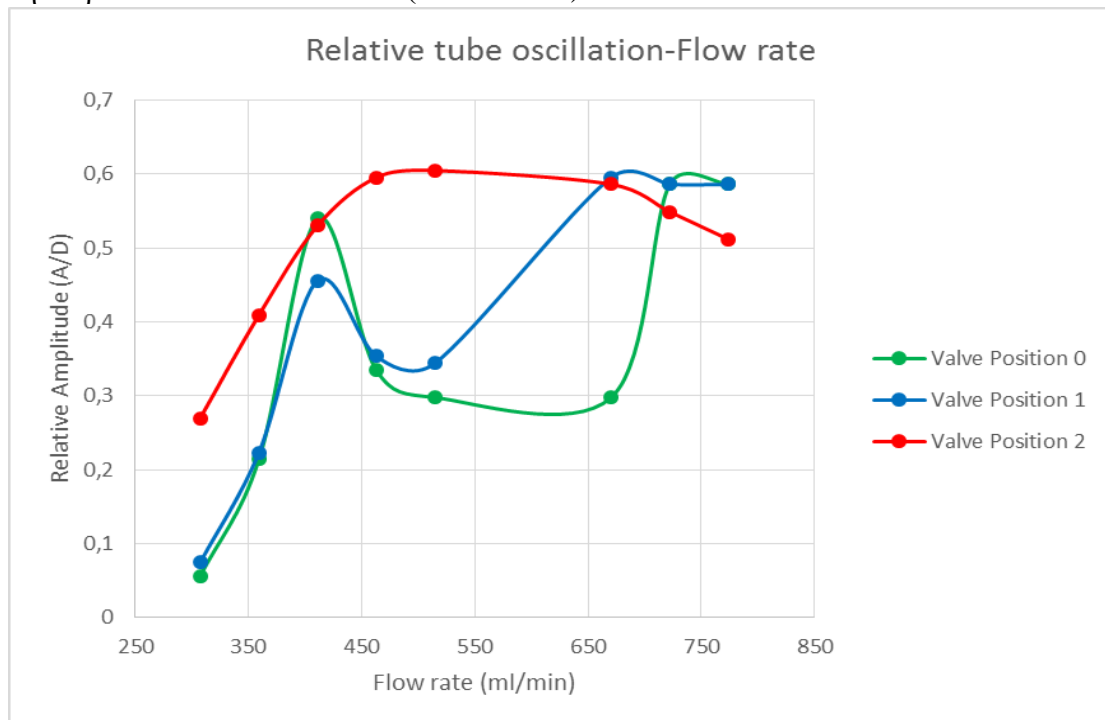


x

Εικόνα 4.20 Σύγκριση περιγράμματος με την πραγματική εικόνα για 100 rpm και ανοικτή βάνα. Μπορούμε να διακρίνουμε την απόκλιση που υπάρχει στο πάνω τοίχωμα και πως αυτό θα μας έδινε μεγαλύτερη διάμετρο αγωγού από την πραγματική.

Περιγράμματα, όπως το παραπάνω (**εικόνα 4.20**) κρίθηκαν εσφαλμένα και δε χρησιμοποιήθηκαν⁸.

Από τα περιγράμματα που κατασκευάσαμε προκύπτει το πλάτος ταλάντωσης του αγωγού συναρτήσει της παροχής για τις 3 θέσεις της βάνας 1 που εξετάσαμε (**εικόνα 4.21**). Επιπλέον, ορίζουμε ένα control point στο πάνω τοίχωμα της διατομής κατάρρευσης (λαιμός) και παρουσιάζουμε το ανώτατο και κατώτερο σημείο του κατά τη διάρκεια των ταλαντώσεων (**εικόνα 4.22**).

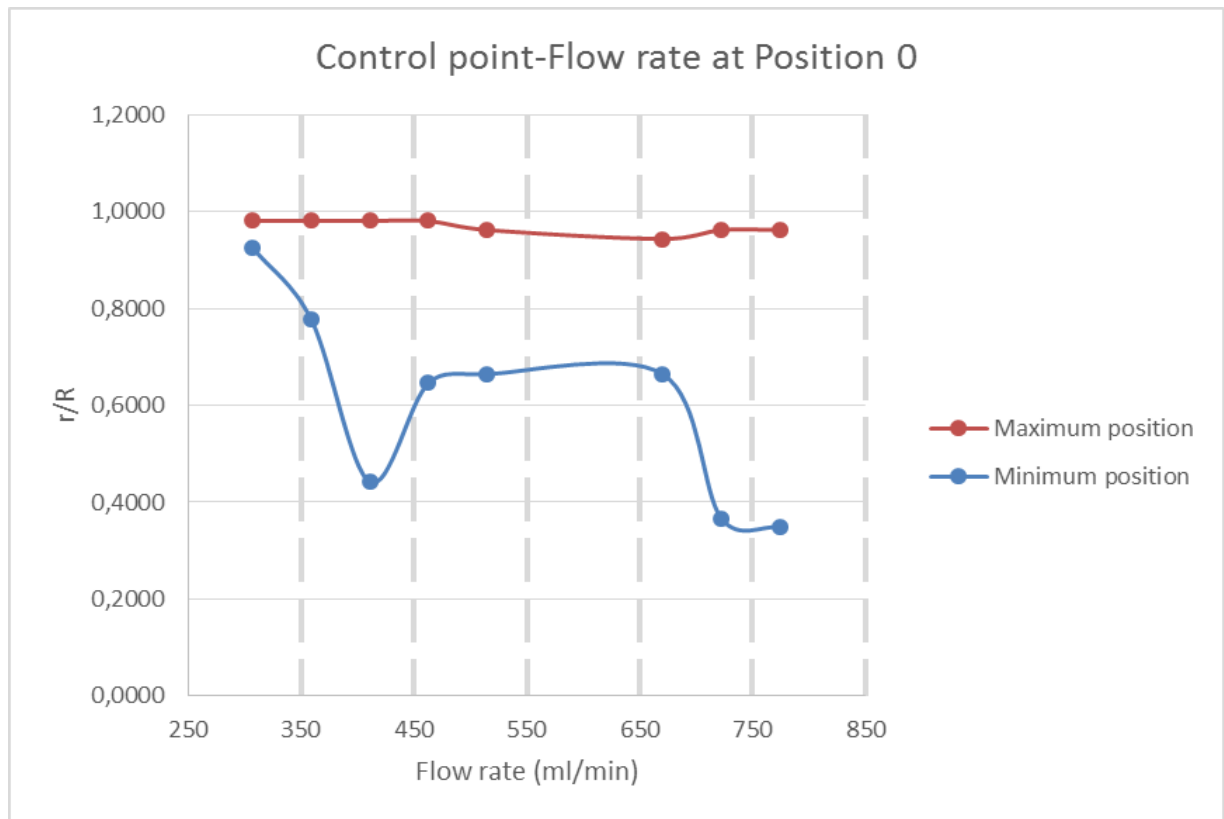


Εικόνα 4.21 Το πλάτος ταλάντωσης του αγωγού A σε σχέση με την απαραμόρφωτη διάμετρό του D, συναρτήσει της παροχής για τις τρεις θέσεις της βάνας 1. Οι κουκκίδες είναι τα σημεία λήψεων και οι καμπύλες σχεδιάστηκαν με χρήση b-splines.

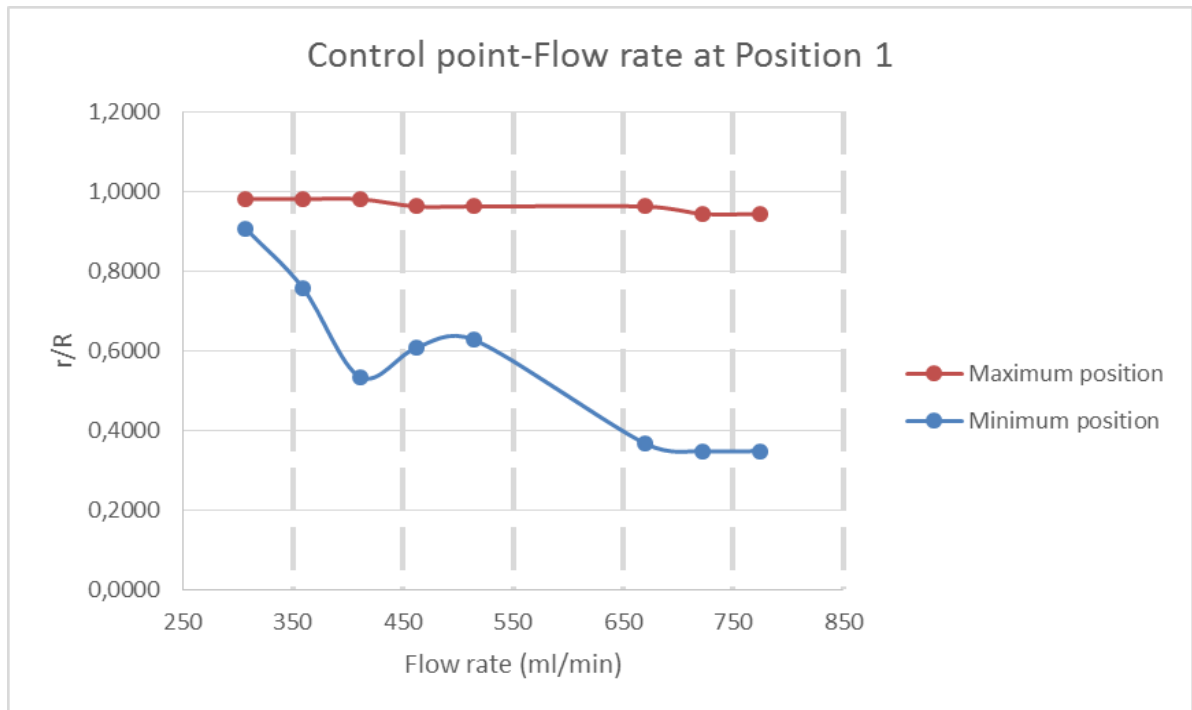
⁸ Η κόκκινη καμπύλη που παρατηρείται στις εικόνες (fitted curve) αποτελεί την καμπύλη προσαρμογής των σημείων που προέκυψαν με τη μέθοδο PCHIP. Πρόκειται για τμηματική παρεμβολή Hermite (PieCewise Hermite InterPolation).

Η πρώτη παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι η ταύτιση των τοπικών μεγίστων του πλάτους ταλάντωσης στις θέσεις 0,1 με τα αντίστοιχα τοπικά μέγιστα στις downstream και upstream πιέσεις στις ίδιες θέσεις (βλ. **εικόνα 4.16**). Η διαφορά που εντοπίζεται είναι στα 460 ml/min (100rpm) όπου το πλάτος ταλάντωσης του αγωγού πέφτει ενώ το πλάτος της πίεσης παραμένει υψηλό. Στο δεύτερο μέγιστο, στην περιοχή των 650-750 ml/min έχουμε το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης αγωγού, κάτι το οποίο βλέπουμε να συμβαίνει μόνο στη θέση 1 όσον αφορά τις πιέσεις και όχι στη θέση 0. Δεύτερη σημαντική παρατήρηση είναι το μεγάλο πλάτος ταλάντωσης του αγωγού στη θέση 2, το οποίο μεγιστοποιείται στα 460 ml/min(100rpm) και παραμένει σταθερό με αύξηση της παροχής, μέχρι που αρχίζει να ξαναπέφτει μετά τα 650 ml/min.

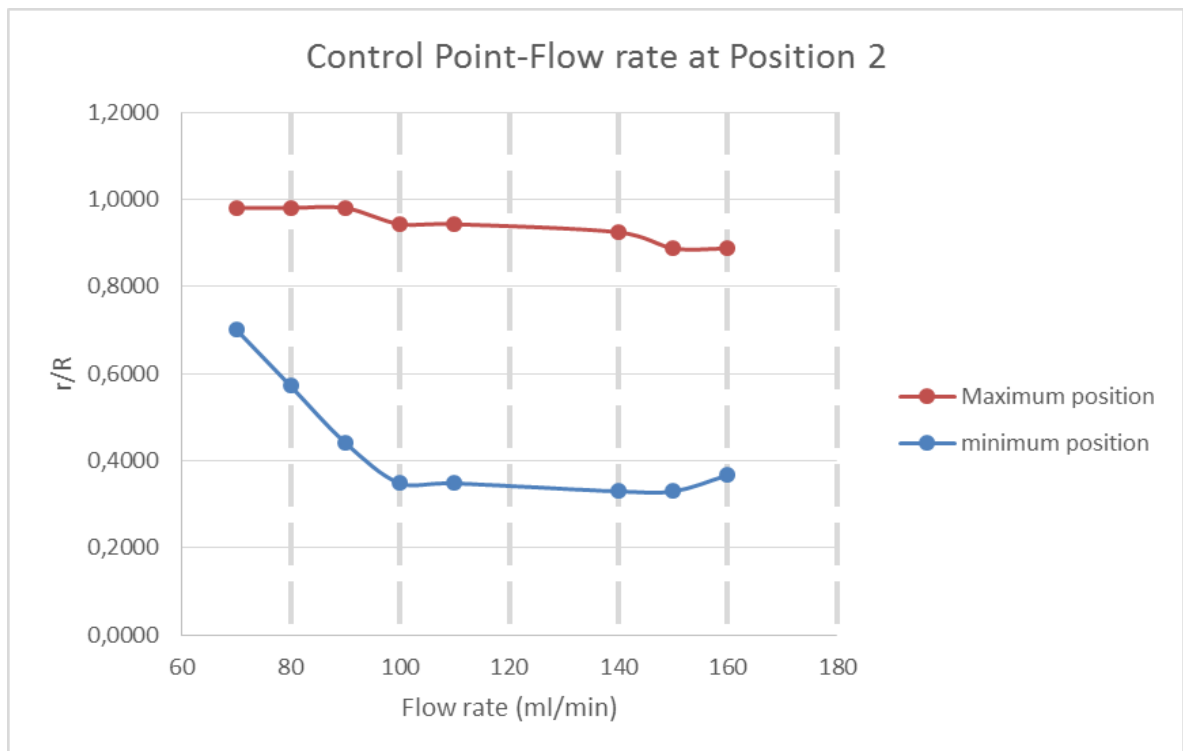
(α)



(β)



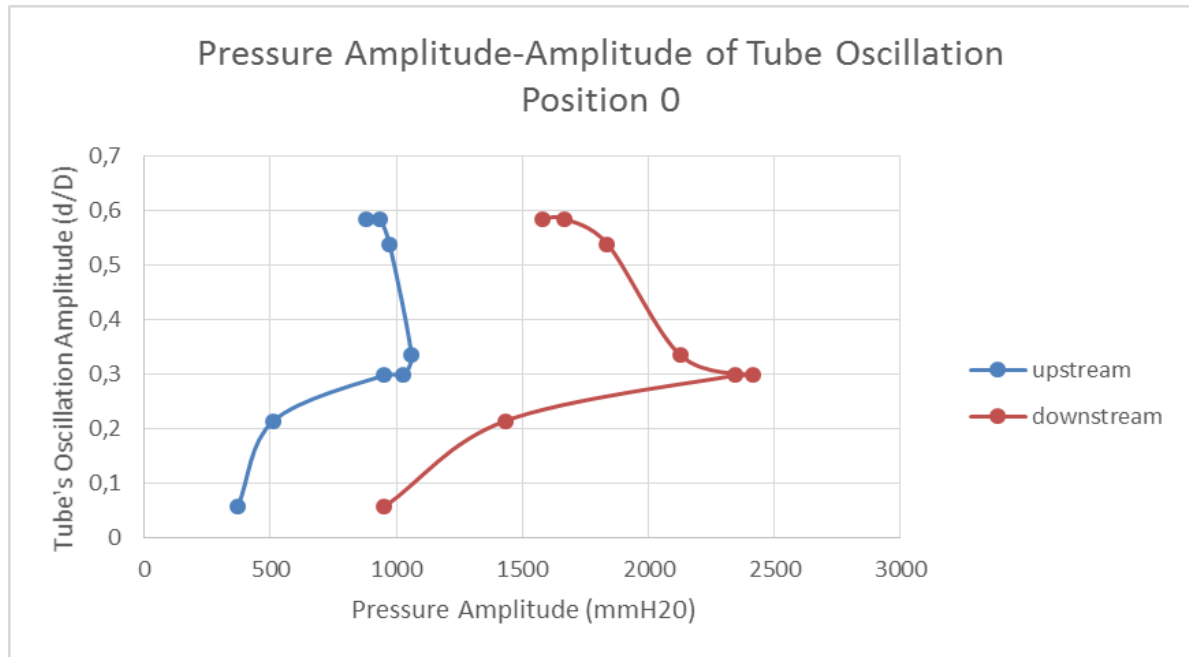
(γ)



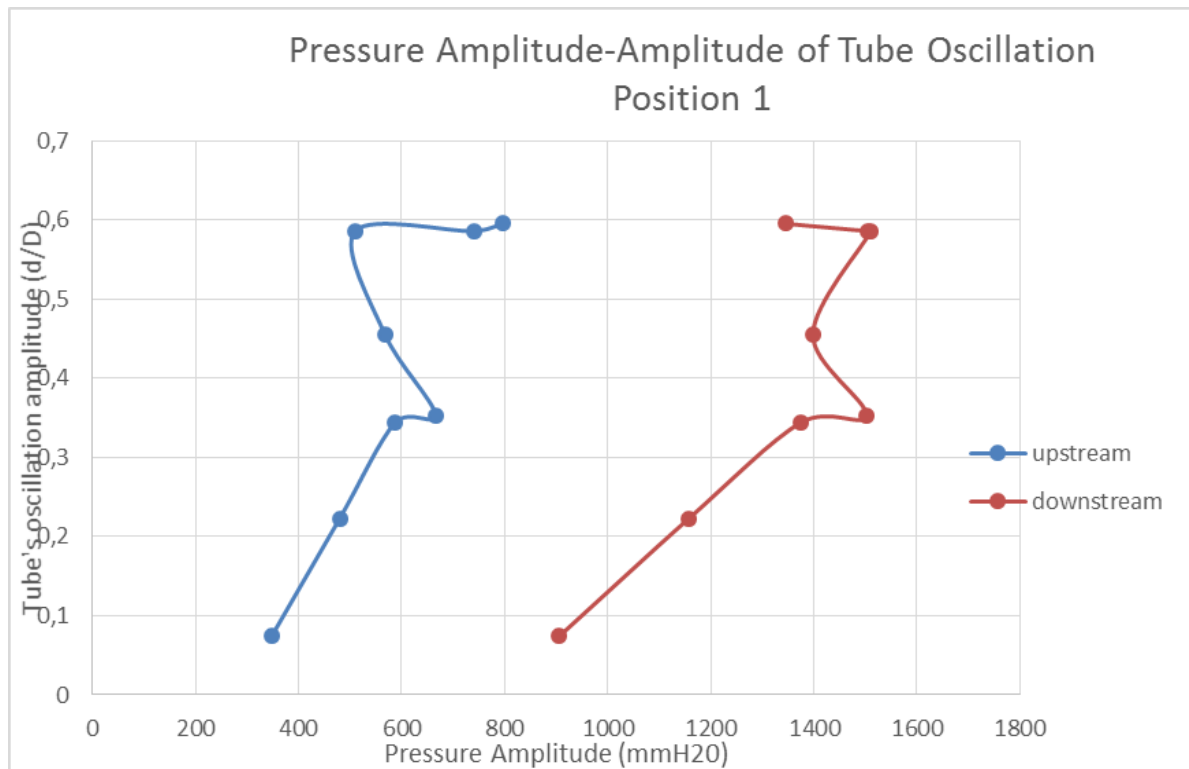
Εικόνα 4.22 Καμπύλες μέγιστης και ελάχιστης θέσης του σημείου ελέγχου του άνω τοιχώματος σε σχέση με την απαραμόρφωτη ακτίνα R, συναρτήσει της παροχής. (α) Θέση 0 βάνας 1, (β) Θέση 1 βάνας 1, (γ) Θέση 2 βάνας 1.

Στην **εικόνα 4.23** επιχειρούμε μια πιο άμεση σύγκριση του πλάτους ταλάντωσης του αγωγού με το πλάτος ταλάντωσης της πίεσης. Βλέπουμε πως το μέγιστο πλάτος πίεσης δεν ταυτίζεται με το μέγιστο πλάτος αγωγού παρά μόνο στη θέση 1 (**εικόνα 4.23 (β)**).

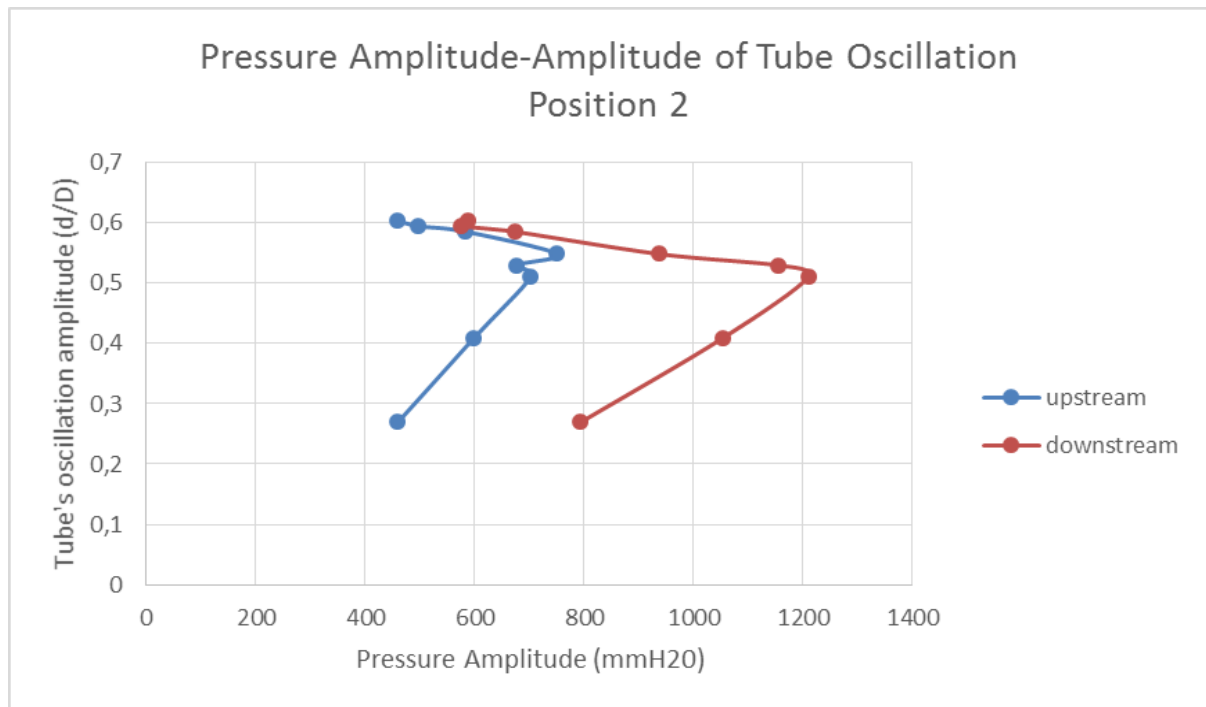
(α)



(β)



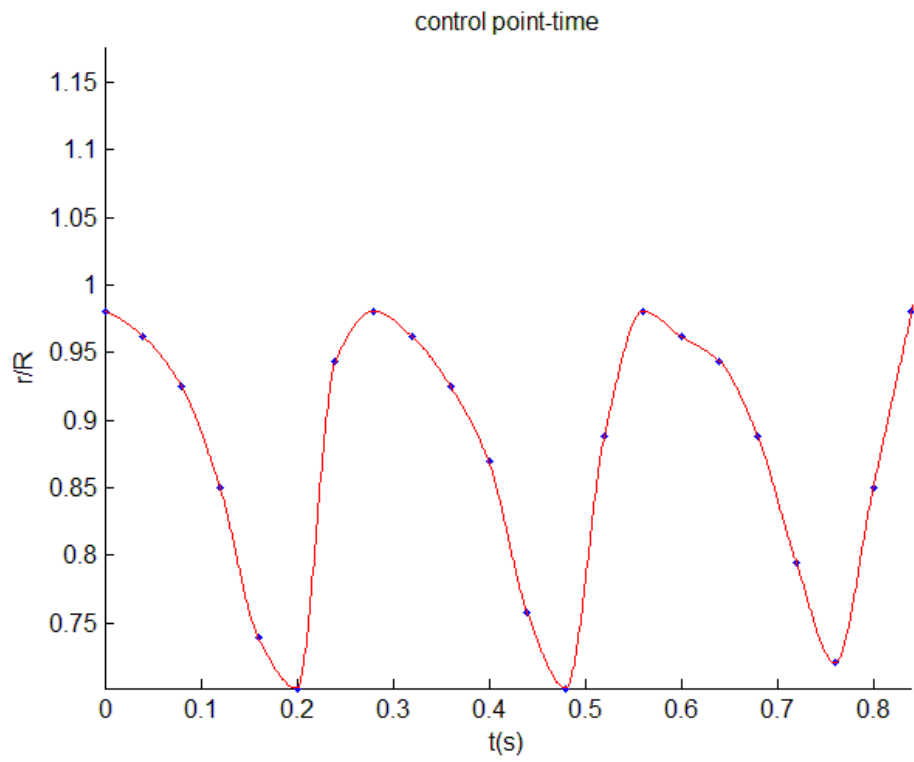
(γ)



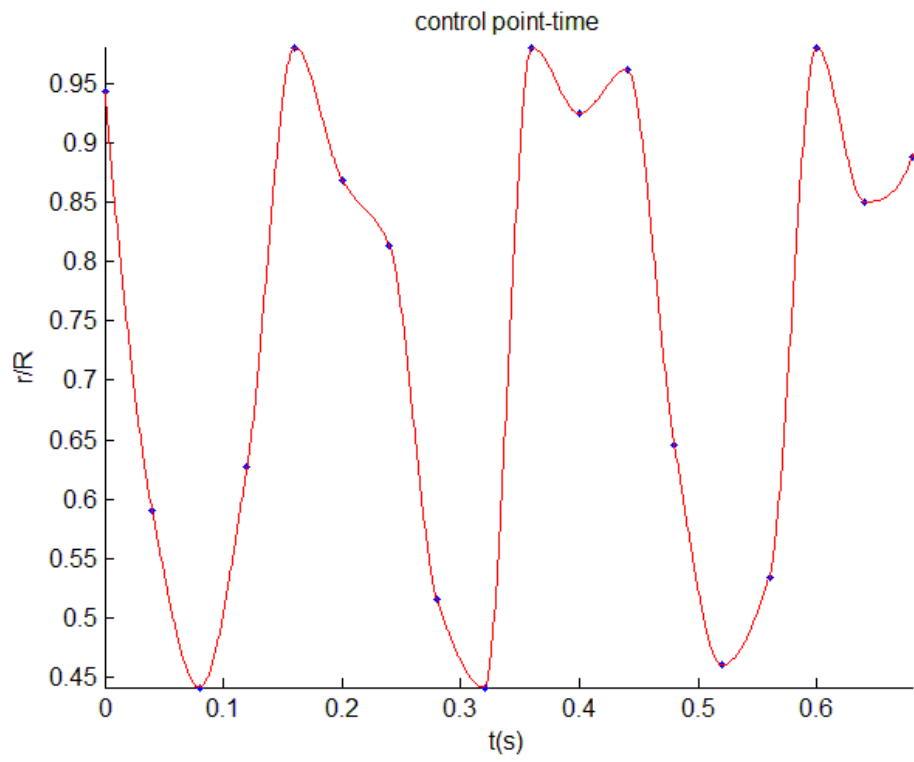
Εικόνα 4.23 Πλάτος ταλάντωσης του αγωγού συναρτήσει του πλάτους πίεσης upstream και downstream του αγωγού. (α) Θέση 0, (β) Θέση 1 βάνας 1, (γ) Θέση 2 βάνας 1.

Τέλος, παρουσιάζουμε την ταλάντωση του άνω τοιχώματος του αγωγού σε συνάρτηση με το χρόνο από όπου προκύπτει η περίοδος της ταλάντωσης. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούμε το control point που ορίσαμε προηγουμένως και πλοτάρουμε τη θέση στην οποία βρίσκεται σε κάθε frame συναρτήσει του χρόνου. Για αυτή τη διαδικασία χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε διαδοχικά frames, πράγμα το οποίο, λόγω της ποιότητας των εικόνων καθώς και του frame rate της κάμερας δεν ήταν πάντα εφικτό. Παρόλα αυτά από τις περιπτώσεις που επεξεργαστήκαμε προέκυψε μία παρατήρηση που ενδεχομένως είναι λογικό να γενικευθεί σε όλες τις περιπτώσεις. Η **εικόνα 4.24** παρουσιάζει 5 ταλαντώσεις τυχαία επιλεγμένες από τις συνολικά 18 για τις οποίες μπορούσαμε να κατασκευάσουμε την καμπύλη control point-χρόνος.

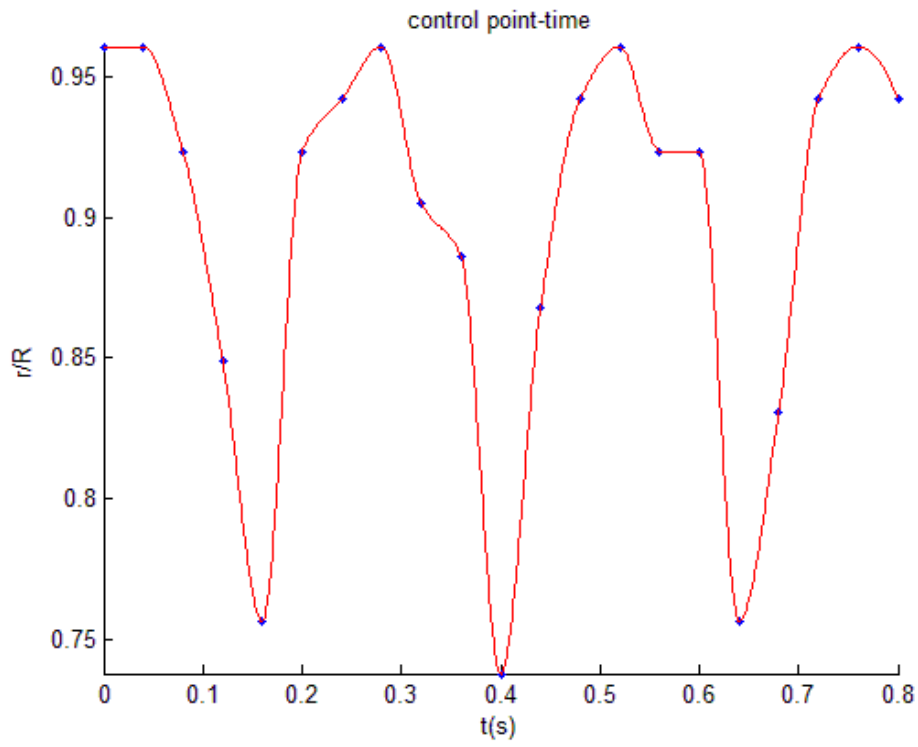
(α) 70 rpm Position 2



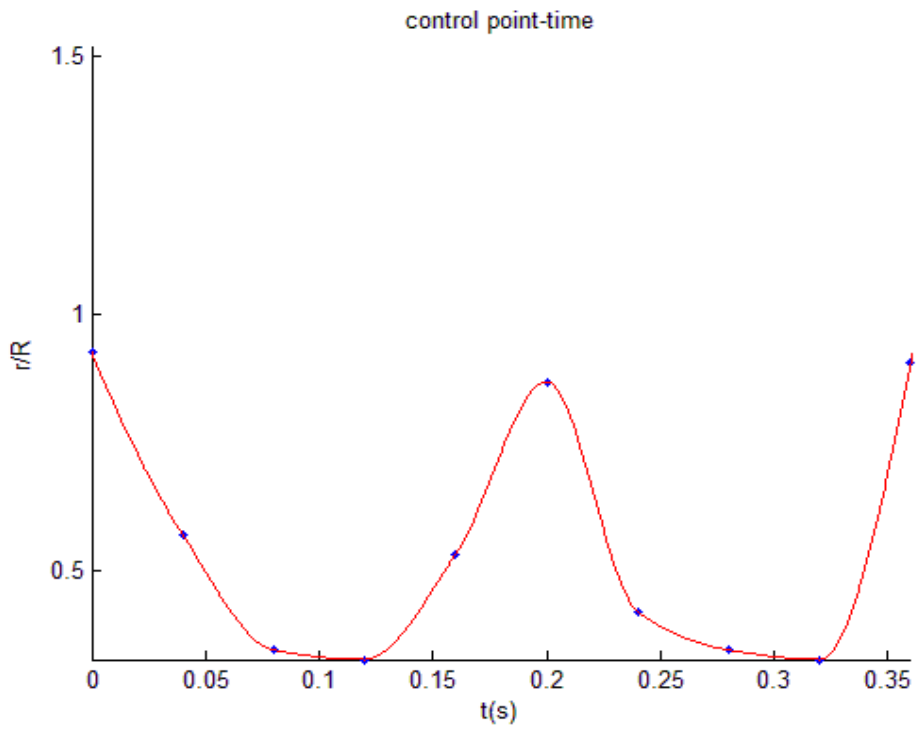
(β) 90 rpm Position 0



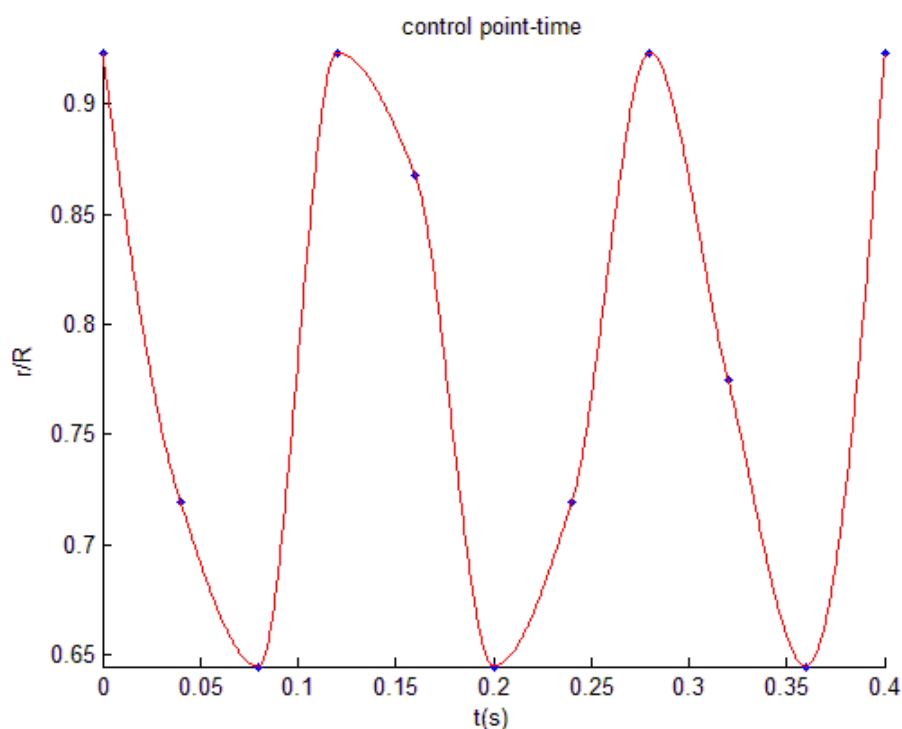
(γ) 80 rpm Position 1



(δ) 110 rpm Position 2



(ε) 140 rpm Position 0



Εικόνα 4.24 Θέση του άνω τοιχώματος στη διατομή κατάρρευσης (λαιμός) συναρτήσει του χρόνου για τις εξής θέσεις: (α) 70 rpm(310 ml/min), θέση 2, (β) 80 rpm(360 ml/min), θέση 1, (γ) 90 rpm(410 ml/min), θέση 0, (δ) 110 rpm(515 ml/min), θέση 2, (ε) 140 rpm(670 ml/min), θέση 0.

Στην **εικόνα 4.24** φαίνεται η χρονική εξέλιξη της ταλάντωσης του άνω τοιχώματος (αντίστοιχη είναι και αυτή του κάτω καθώς είναι αξονομετρική η ταλάντωση) για τις τυχαίες θέσεις (α) 70 rpm και θέση βάνας 2, (β) 80 rpm και θέση βάνας 1, (γ) 90 rpm και θέση βάνας 0, (δ) 110 rpm και θέση βάνας 2, (ε) 140 rpm και θέση βάνας 0. Κάθε κουκίδα στις παραπάνω καμπύλες αντιπροσωπεύει το σημείο ελέγχου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, και οι κόκκινες καμπύλες είναι οι καμπύλες προσαρμογής PCHIP. Η δυσκολία του να πάρουμε πολλά διαδοχικά frames όσο αυξάνεται η συχνότητα της αντλίας γίνεται αντιληπτό από τη μειούμενη πυκνότητα σημείων ελέγχου όσο προχωράμε από το (α) προς το (ε). Για το διάγραμμα **4.24 (α)**, η περίοδος της ταλάντωσης είναι $T=0.28\text{sec}$ και αν προσέξουμε, η μετάβαση από την ανώτερη θέση ταλάντωσης προς την κατώτερη είναι πιο αργή κατά 0.18 sec από την αντίθετη κίνηση προς τα πάνω. Αυτή η πιο αργή μετάβαση από την ανώτερη στην κατώτερη θέση διατηρείται και στα διαγράμματα **4.24 (β)**, **4.24(γ)** όπου επιπλέον παρατηρείται και ένα γόνατο κατά την ίδια μετάβαση, το οποίο ενδεχομένως σηματοδοτεί μια δεύτερη μικρότερη ταλάντωση. Οι περίοδοι είναι για το **(β)** $T=0.25\text{ sec}$ και για το **(γ)** $T=0.24\text{ sec}$. Για τα διαγράμματα **(δ),(ε)** έχουμε λιγότερα διαδοχικά frames οπότε δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα πως έχει χαθεί το γόνατο, αλλά γενικά οι ταλαντώσεις φαίνονται πιο ομαλές. Η περίοδος για το **(δ)** δε φαίνεται να είναι σταθερή, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στα λίγα σημεία

από τα οποία κατασκευάζεται η καμπύλη, παρόλα αυτά παίρνοντας τον μέσο όρο των δύο ταλαντώσεων που βλέπουμε προκύπτει $T=0.18$ sec. Για το (ϵ) προκύπτει ο μέσος όρος περιόδου $T=0.14$ sec.

Οι περίοδοι ταλαντώσεων του εύκαμπτου αγωγού βρίσκονται πολύ κοντά τόσο στην πρώτη αρμονική των πιέσεων όσο και στη συχνότητα της αντλίας. Ειδικότερα :

(i) Περίπτωση 70 rpm, θέση 2

Περίοδος ταλάντωσης αγωγού $T_{70,2}=0.28$ sec ή $f=3.58$ Hz.

Συχνότητα αντλίας $f=70*3/60=3.5$ Hz.

(ii) Περίπτωση 80 rpm, θέση 1

Περίοδος ταλάντωσης αγωγού $T_{80,1}=0.25$ sec ή $f=4$ Hz.

Συχνότητα αντλίας $f=80*3/60=4$ Hz.

(iii) Περίπτωση 90 rpm, θέση 0

Περίοδος ταλάντωσης αγωγού $T_{90,0}=0.24$ sec ή $f=4.16$ Hz.

Συχνότητα αντλίας $f=90*3/60=4.5$ Hz.

(iv) Περίπτωση 110 rpm, θέση 2

Περίοδος ταλάντωσης αγωγού $T_{110,2}=0.18$ sec ή $f=5.56$ Hz.

Συχνότητα αντλίας $f=110*3/60=5.5$ Hz.

(v) Περίπτωση 140 rpm , θέση 0

Περίοδος ταλάντωσης αγωγού $T_{140,0}=0.14$ sec ή $f=7.14$ Hz.

Συχνότητα αντλίας $f=140*3/60=7$ Hz.

Παρατηρούμε πως όντως οι συχνότητες ταλάντωσης του αγωγού έχουν μικρή απόκλιση από τη συχνότητα της αντλίας. Συγκεκριμένα (i) $\sigma=3\%$, (ii) $\sigma=0\%$, (iii) $\sigma=7.5\%$, (iv) $\sigma=1.1\%$, (v) $\sigma=2\%$. Επιπλέον η περίοδος της ταλάντωσης δε φαίνεται να επηρεάζεται από τη θέση της βάνας 1. Παρόμοια εικόνα φάνηκε και στις υπόλοιπες θέσεις για τις οποίες κατασκευάσαμε καμπύλες θέσης άνω τοιχώματος της διατομής κατάρρευσης ως προς το χρόνο, με την απόκλιση να μην περνά σε καμία περίπτωση το 10%. Συνεπώς, μπορούμε να υποθέσουμε πως η ταλάντωση του εύκαμπτου αγωγού εξαρτάται από τη συχνότητα της αντλίας και την ταλάντωση της πίεσης της ροής που αυτή προκαλεί.

4.3 Σχόλια και συμπεράσματα

4.3.1 Συντονισμός

Συνοπτικά, το 2^ο πείραμα έδειξε πως η ταλάντωση του αγωγού είναι εξαρτημένη από τη συχνότητα λειτουργίας της αντλίας καθώς η περίοδος των ταλαντώσεων του αγωγού ακολουθεί τη συχνότητα της αντλίας με μία απόκλιση το πολύ 10%, όπως είδαμε στην παράγραφο 4.2.3 (βλ. σελ.154). Το πλάτος ταλάντωσης του αγωγού μεγιστοποιείται για (εικόνα 4.21):

(α) Την ανοικτή θέση (θέση 0), στα 400 ml/min(90 rpm) και στην περιοχή 700-750 ml/min(150-160 rpm). Το μέγιστο πλάτος στα 90 rpm είναι το 55% της απαρμόρφωτης διαμέτρου του αγωγού D, και στην περιοχή 150-160 rpm είναι το 60% της απαρμόρφωτης διαμέτρου D.

(β) Τη θέση 1 της βάνας 1, στα 400 ml/min(90 rpm) και στην περιοχή 650-750 ml/min(140-160 rpm). Στα 90 rpm το πλάτος φτάνει το 45% του D, και στην περιοχή 140-160 rpm φτάνει το 60% του D.

(γ) Τη θέση 2 της βάνας 1, στην περιοχή των 450 ml/min(100 rpm)-750 ml/min(160 rpm). Το πλάτος σε όλη αυτή την περιοχή είναι περίπου 60% του D.

Όσον αφορά τις πιέσεις παρατηρήσαμε σταθερή διαφορά στο downstream με το upstream πλάτος πίεσης, με το downstream να είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερο από το upstream. Γενικά, όσο κλείνουμε οποιαδήποτε από τις δύο βάνες το πλάτος της πίεσης μειώνεται και ειδικά για την θέση 3 της βάνας 2 έχουμε το μικρότερο πλάτος και παράλληλα τις πιο ισχνές ταλαντώσεις του εύκαμπτου αγωγού. Το πλάτος πίεσης μεγιστοποιείται για **(εικόνα 4.16,4.17)**:

(α) Μία περιοχή 400-450 ml/min(90-100 rpm) σχεδόν σε κάθε θέση των βανών εκτός από τη θέση 2 και 3 της βάνας 2, όπου η καμπύλη του πλάτους πίεσης έχει ομαλοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό. Το μέγιστο πλάτος εμφανίζεται για ανοικτές βάνες(θέση 0) και παίρνει τιμές upstream 1100 mmH₂O, και downstream 2500 mmH₂O.

(β) Για ανοικτές βάνες, στα 650 ml/min(140 rpm). Εδώ εμφανίζεται μόνο upstream αυτό το μέγιστο και είναι 1000 mmH₂O.

(γ) Για τη βάνα 1 στη θέση 1, σε μία περιοχή 650-700 ml/min(140-150 rpm). Εδώ το μέγιστο πλάτος παίρνει τιμές 1500 mmH₂O downstream και 800 mmH₂O upstream.

(δ) Για τη βάνα 1 στη θέση 2 η κατάσταση δεν είναι ξεκάθαρη καθώς εμφανίζονται αρκετά τοπικά ακρότατα μετά τα 100 rpm (450 ml/min).

(ε) Για τη βάνα 2 στη θέση 1, σε μία περιοχή 600-700 ml/min(130 -150 rpm). Εδώ το μέγιστο πλάτος παίρνει τιμές 1750 mmH₂O downstream και 950 mmH₂O upstream.

Η μεγιστοποίηση του πλάτους ταλάντωσης του αγωγού συμπίπτει αρκετά καλά, στην περιοχή 650-750 ml/min(140-160 rpm), με τη μεγιστοποίηση του πλάτους ταλάντωσης της πίεσης στην ίδια περιοχή. Όσον αφορά το μέγιστο στα 90 και 100 rpm που παρατηρούμε στο πλάτος πίεσης, το αντίστοιχο στον εύκαμπτο αγωγό εμφανίζεται μόνο στα 90 rpm στις θέσεις 0 και 1 αλλά και στα 90 και στα 100 rpm στη θέση 2. Η απόκλιση που υπάρχει είναι της τάξης του 10%. Μία υπόθεση είναι πως τα μέγιστα που παρατηρούνται σε αυτή την περιοχή συχνότητων τόσο στις πιέσεις όσο και στο πλάτος ταλάντωσης του αγωγού (10% απόκλιση στο πλάτος του

αγωγού), ενδεχομένως να οφείλονται σε συντονισμό του συστήματος με τη συχνότητα διέγερσης που επιβάλλει η αντλία. Αν όμως συνυπολογίσουμε και την απόσβεση ζ του συστήματος τότε από τη δυναμική μηχανών (Κάναρχος & Αντωνιάδης 1998) γνωρίζουμε πως η γενική σχέση που περιγράφει το σύστημά μας είναι:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\zeta\omega\frac{dx}{dt} + \omega^2x = \frac{F_c \cos(\Omega t) + F_s \sin(\Omega t)}{m} \quad (4.2)$$

Όπου το δεξί μέλος της εξίσωσης περιγράφει την αρμονική διέγερση της αντλίας που επιβάλλεται στο σύστημα, με το Ω να είναι η συχνότητα διέγερσης της αντλίας και m η μάζα του συστήματος (στην περίπτωση μας ουσιαστικά είναι η μάζα του ρευστού, καθώς θεωρούμε πολύ μικρή την μάζα του υπόλοιπου δικτύου σε σχέση με το ρευστό). Στο αριστερό μέλος της εξίσωσης έχουμε την έκφραση της αποσβένουσας ταλάντωσης του συστήματος ρευστού-εύκαμπτου αγωγού (θεωρούμε πως ταλαντώνονται σε συμφωνία φάσης ρευστό και εύκαμπτος αγωγός), όπου ζ η σταθερά απόσβεσης του συστήματος που παίρνει τις τιμές $0 < \zeta < 1$, και ω η ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Αν επιλύσουμε την παραπάνω διαφορική με μετασχηματισμό Laplace καταλήγουμε στην εξής συνάρτηση μεταφοράς:

$$H(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\Omega / \omega)^2]^2 + [2\zeta\Omega / \omega]^2}} \quad (4.3)$$

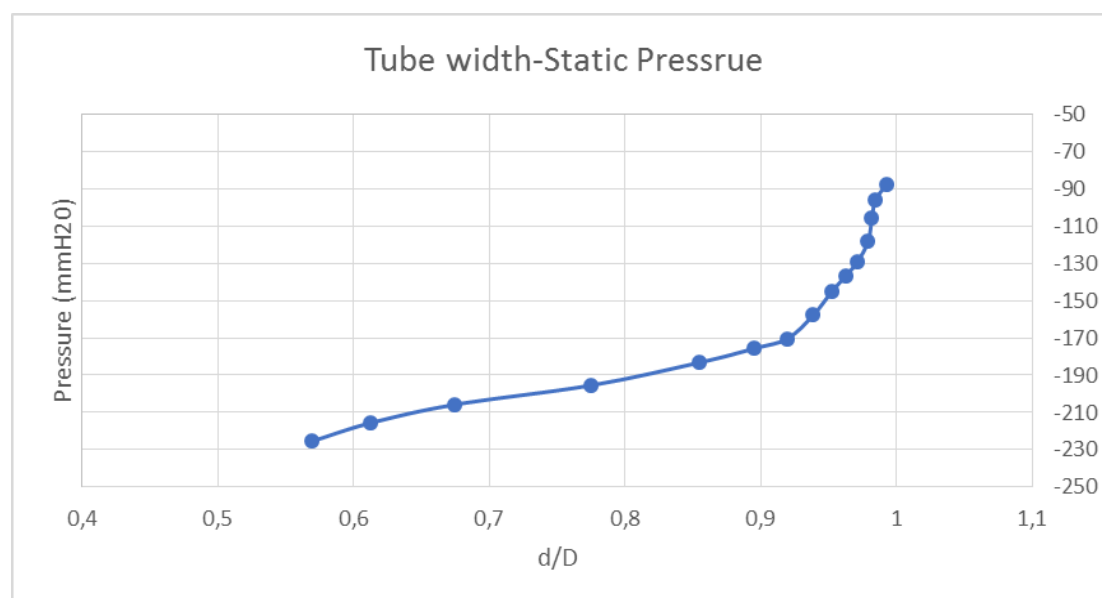
Όπου $H(\Omega)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς η οποία εκφράζει το λόγο εύρους απόκρισης προς το εύρος διέγερσης του συστήματος. Αν $\zeta=0$, τότε για $\Omega=\omega$ η $H(\Omega)$ τείνει στο άπειρο δηλαδή, το εύρος απόκρισης γίνεται πολύ μεγαλύτερο του εύρους διέγερσης. Τότε λέμε πως έχουμε συντονισμό, δηλαδή μεγιστοποίηση του $H(\Omega)$. Στην περίπτωση μας για $0 < \zeta < 1$ και $\Omega=\omega$ θα ήταν $H(\Omega)=1/2\zeta$, όμως το μέγιστο $H(\Omega)$ εμφανίζεται για $\Omega/\omega < 1$. Γενικά όσο αυξάνει η τιμή του ζ μικραίνει η μέγιστη τιμή του $H(\Omega)$ και εμφανίζεται για λόγους $\Omega/\omega < 1$. Στην επόμενη παράγραφο (4.3.2), θα εξετάσουμε την ιδιοσυχνότητα του συστήματος για να διερευνήσουμε το κατά πόσο συμβαίνει συντονισμός. Ένα από τα δύο μέγιστα του πλάτους απόκρισης του εύκαμπτου αγωγού είδαμε πως εμφανίζεται για 90 rpm της αντλίας ή αλλιώς για 4.5 Hz συχνότητα διέγερσης. Το άλλο εμφανίζεται σε ένα εύρος 140-160 rpm ή αλλιώς 7-8Hz. Με βάση τα παραπάνω ένας λόγος $\Omega/\omega=0.9$ ενδεχομένως να είναι πολύ κοντά στο λόγο συντονισμού του συστήματος ανάλογα με τη τιμή του ζ , και η αρχική απόκλιση που θεωρήσαμε ίση με 10% στην πραγματικότητα να είναι πολύ μικρότερη.

4.3.2 Ιδιοσυχνότητα και στατική καμπύλη πίεσης

Εδώ παρουσιάζουμε μερικά χαρακτηριστικά του εύκαμπτου αγωγού που χρησιμοποιήσαμε (ίδιος και για τα δύο πειράματα) καθώς και του δικτύου. Αρχικά, εξετάσαμε τη στατική συμπεριφορά του αγωγού συναρτήσει του ύψους πίεσης. Η εικόνα 4.25 δείχνει τη μεταβολή της διατομής κατάρρευσης του αγωγού συναρτήσει της εσωτερικής του πίεσης για συνθήκες μη ροής. Την μείωση της εσωτερικής πίεσης την πετύχαμε μειώνοντας τη στάθμη μιας δεξαμενής συνδεδεμένης με τον εύκαμπτο

αγωγό. Την πίεση τη λάβαμε μέσω του αισθητήρα πίεσης Miller και του λογισμικού Catman, ενώ τις φωτογραφίες του αγωγού σε κάθε θέση της πήραμε με την κάμερα Sony CCD-IRIS, και τη βοήθεια του λογισμικού Pinnacle Studio. Η διαδικασία επεξεργασίας του σήματος πίεσης και των εικόνων είναι ίδια με αυτή των πειραμάτων.

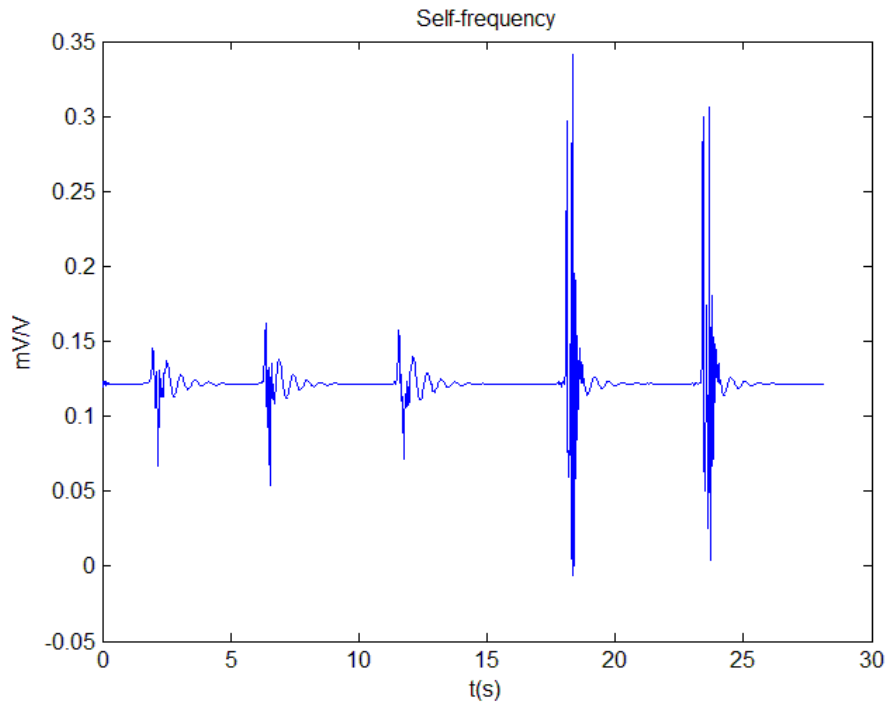
Από την **εικόνα 4.25** φαίνεται πως ο λυγισμός του αγωγού ξεκινά περίπου στα -80 με -100 mmH₂O και μειώνεται σταδιακά μέχρι τα -175mmH₂O. Στη συνέχεια ακολουθεί μείωση της διατομής κατάρρευσης με έντονο ρυθμό. Σε δεύτερη φάση, εξετάσαμε την ιδιοσυχνότητα του δικτύου (βλ. **εικ. 4.26**) προκαλώντας μια στιγμιαία διέγερση του συστήματος και παρατηρώντας μέσω της πίεσης τη συμπεριφορά του. Το σήμα πίεσης που προέκυψε είναι αυτό της **εικόνας 4.26**.



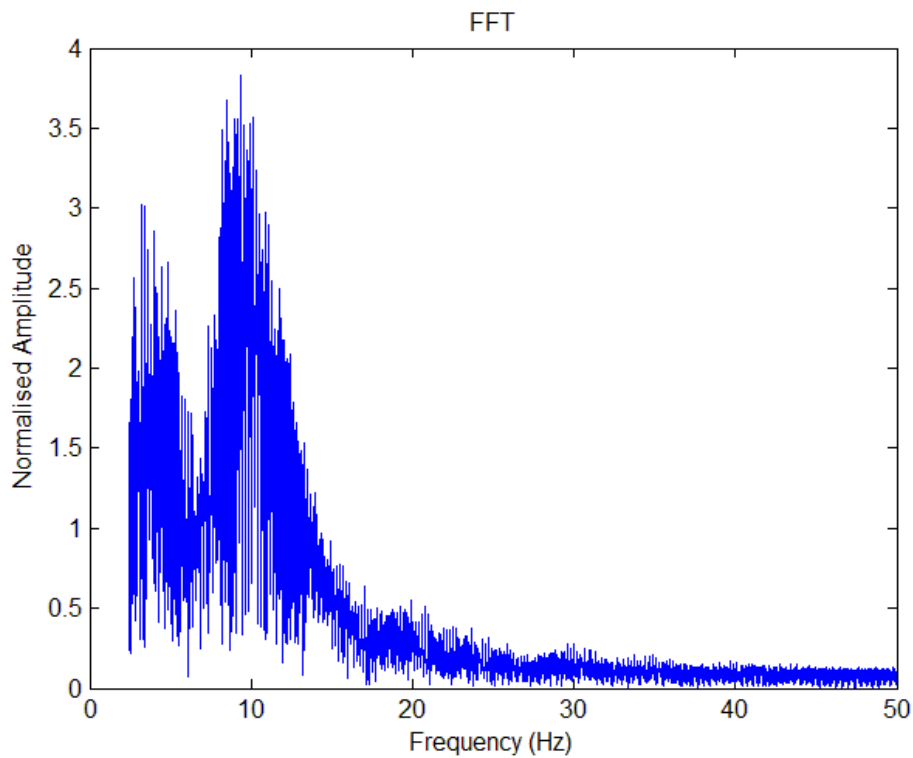
Εικόνα 4.25 Σχετική διάμετρος διατομής κατάρρευσης d ως προς την απαραμόρφωτη διατομή D , συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης.

Μετασηματίζουμε το σήμα πίεσης της **εικόνας 4.26** με FFT ώστε να βρούμε τις επικρατούσες αρμονικές και κυρίως σε ποια συχνότητα εμφανίζονται. Από την **εικόνα 4.27** προκύπτει πως η ιδιοσυχνότητα ω_1 της πρώτης αρμονικής βρίσκεται σε ένα εύρος 8-11 Hz, ενώ η ιδιοσυχνότητα ω_2 της δεύτερης αρμονικής (υπο-αρμονική) είναι στα 3.5-5 Hz. Ο συντελεστής απόσβεσης προκύπτει από τον τύπο $\zeta = (1/2\pi) \ln(x_1/x_2)$, όπου x_1, x_2 είναι δύο διαδοχικές κορυφές του σήματος πίεσης. Προκύπτει $\zeta = 0.14$.

Με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος 2 ο λόγος Ω/ω για $\Omega = 4.5\text{Hz}$ (90 rpm) και $\omega_2 = 3.5\text{-}5\text{Hz}$ κυμαίνεται στην περιοχή $\Omega/\omega_2 = 0.9\text{-}1.28$. Όπως είπαμε και πιο πάνω (βλ. **σελ. 155,156**), για $\zeta > 0$ ο λόγος συντονισμού είναι μικρότερος της μονάδας άρα είναι αρκετά πιθανό το σύστημα να συντονίζεται για τη συγκεκριμένη διέγερση της αντλίας στην υπο-αρμονική με ιδιοσυχνότητα $\omega_2 = 4.5\text{-}5\text{Hz}$ (στις πιο μικρές ιδιοσυχνότητες ο λόγος $\Omega/\omega > 1$). Στην περιοχή της πρώτης αρμονικής με ιδιοσυχνότητα $\omega_1 = 8\text{-}11\text{ Hz}$ πάλι μπορεί να έχουμε συντονισμό στη συχνότητα διέγερσης 160 rpm (8 Hz) όπου ο λόγος $\Omega/\omega_1 = 1\text{-}0.72$. Ξανά, ανάλογα την τιμή του ζ , ένας από αυτούς του λόγους μπορεί να είναι ο λόγος για τον οποίο μεγιστοποιείται η συνάρτηση μεταφοράς $H(\Omega)$, δηλαδή το πλάτος ταλάντωσης. Θυμίζουμε πως σε αυτή



Εικόνα 4.26 Σήμα πίεσης μετά από 5 στιγμιαίες διεγέρσεις του συστήματος.



Εικόνα 4.27 Fast Fourier transform στο σήμα πίεσης της εικόνας 4.26.

τη συχνότητα εμφανίζεται και το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης του αγωγού (60%D), αν και δεν είναι η μοναδική συχνότητα για την οποία εμφανίζεται.

Κεφάλαιο 5

Περίληψη

Σε αυτή την πειραματική μελέτη εξετάσαμε τη συμπεριφορά του αγωγού όταν αυτός υποβάλλεται σε εξαναγκασμένη ροή μέσω μίας αντλίας σταθερής παροχής (ογκομετρικής). Χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικού τύπου αντλίες, στο πρώτο πείραμα αντλία προοδευτικής κοιλότητας ασθενούς παλμικής ροής και στο δεύτερο περισταλτική αντλία έντονης παλμικής ροής. Στο πρώτο πείραμα εξετάσαμε μικρό εύρος παροχών αλλά περισσότερες θέσεις της ανάντι βάνας, δηλαδή είχαμε μεγαλύτερο εύρος εσωτερικών πιέσεων. Αντίθετα, στη δεύτερη αντλία ερευνήσαμε μεγάλο εύρος παροχών, ενώ προσθέσαμε και μία δεύτερη βάνα κατάντι του εύκαμπτου αγωγού για να εξετάσουμε και πιο μεγάλες εσωτερικές πιέσεις. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκε διακύμανση στην πίεση, που οφείλεται στην παλμική ροή που επιβάλλει η κάθε αντλία. Η διακύμανση στην περίπτωση του πρώτου πειράματος ήταν της τάξης των μερικών δεκάδων mmH₂O ενώ στο δεύτερο πείραμα τα μέγιστα πλάτη έφταναν και 2500 mmH₂O.

Στο δεύτερο πείραμα η περιοδική μεταβολή της πίεσης είναι τόσο μεγάλη ώστε να εξαναγκάζει τον αγωγό σε ταλάντωση σε κάθε παροχή και κάθε εσωτερική πίεση (θέση βάνας), με το πλάτος απόκρισης του αγωγού να πέφτει σε υψηλή εσωτερική πίεση (μεταβολή θέσης στη βάνα 2). Η συχνότητα διέγερσης της αντλίας με τις συχνότητες απόκρισης της πίεσης και της ταλάντωσης του αγωγού βρέθηκε ότι συμφωνούν σε όλες τις περιπτώσεις, ένα αποτέλεσμα που δείχνει την εξάρτηση των ταλαντώσεων από την επιβαλλόμενη ροή της αντλίας. Μάλιστα, σε κάποιες συγκεκριμένες περιοχές λειτουργίας της αντλίας (90-100 rpm και 140-160 rpm) παρατηρήθηκαν μέγιστα τόσο στις καμπύλες πίεσης όσο και στην καμπύλη πλάτους ταλάντωσης του αγωγού. Αυτά τα μέγιστα δείχθηκε ότι μπορεί να οφείλονται σε συντονισμό του συστήματος με την αντλία. Τέλος, για το πείραμα 2, βρέθηκε πως το downstream πλάτος πίεσης είναι πάντα μεγαλύτερο του upstream και μειώνεται όσο κλείνει οποιαδήποτε από τις δύο βάνες.

Το ίδιο εύρημα είχαμε, όσον αφορά τα πλάτη πίεσης, και για το πείραμα 1. Εδώ η διακύμανση της πίεσης ήταν πολύ μικρότερη αλλά σταθερά μεγαλύτερη downstream από upstream. Η ερμηνεία που δώσαμε για αυτή την παρατήρηση έχει να κάνει με τη διάταξη που επιλέξαμε και για τα δύο πειράματα, και πιο συγκεκριμένα με την τοποθέτηση των αντλιών downstream του εύκαμπτου αγωγού. Υποθέσαμε πως ο εύκαμπτος αγωγός λειτουργεί σαν αποσβεστήρας αυτών των παλμών πίεσης και τελικά στο upstream τμήμα η παλμική ροή είναι κάπως εξασθενημένη.

Από αυτό το μοτίβο εξαιρούνται όμως οι θέσεις αυτοδιατηρούμενων ταλαντώσεων του αγωγού όπου για τρεις από τις 4 συνολικά τέτοιες θέσεις το upstream πλάτος πίεσης ξεπερνά το downstream (210 ml/min, θέση βάνας 3,4 ; 300 ml/min, θέση βάνας 3,4). Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να εξηγείται από το μηχανισμό Jensen & Heil (2003), σύμφωνα με τον οποίο αν το downstream τμήμα του δικτύου είναι αρκετά μεγαλύτερο από το upstream τότε, μόλις ξεκινήσει να ταλαντώνεται ο αγωγός θα δημιουργηθούν μεγαλύτερες ταλαντώσεις στη ροή upstream του αγωγού

άρα και μεγαλύτερη διακύμανση στην πίεση λόγω της μικρότερης αδρανειακής αντίστασης σε αυτό το τμήμα του δικτύου. Αυτή η ταλάντωση στη ροή upstream του αγωγού μπορεί να επιφέρει εισροή κινητικής ενέργειας στον εύκαμπτο αγωγό και τελικά να συμβάλει στη διατήρηση των ταλαντώσεων. Επίσης, με αύξηση της παροχής οι ταλαντώσεις εξαφανίζονται γεγονός που ίσως υποδεικνύει μία περιοχή Re για την οποία συμβαίνουν οι αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις. Τέλος, με μείωση της εσωτερικής πίεσης του αγωγού μειώνεται το πλάτος ταλάντωσης της πίεσης τόσο upstream όσο και downstream και στα δύο πειράματα.

Κλείνοντας, να επισημάνουμε πως η απευθείας σύγκριση των απόλυτων τιμών πίεσης upstream και downstream δεν ήταν δυνατή καθώς λάβαμε τις μετρήσεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και επιπλέον τα δύο σημεία εισόδου του αισθητήρα πίεσης δεν ήταν ακριβώς στο ίδιο ύψος. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις πολύ μικρής εσωτερικής πίεσης είχαμε εισροή αέρα downstream του εύκαμπτου αγωγού, που εμπόδιζε τις μετρήσεις. Παρόλα αυτά η σύγκριση των πλατών πίεσης μπορεί να θεωρηθεί αρκετά αξιόπιστη. Τέλος, στην επεξεργασία των εικόνων είχαμε κάποιες δυσκολίες που πήγαζαν κυρίως από τη συχνότητα λήψης της κάμερας ή από την όχι ιδανική αντίθεση φωτεινότητας, ενώ και οι κώδικες που αναπτύχθηκαν, πολλές φορές έπρεπε να αναπροσαρμοστούν για να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα, η ακρίβεια των οποίων όμως δεν ήταν πάντα εφικτή.

Παράρτημα

Κώδικες Matlab και σύντομη περιγραφή τους

Πείραμα 1

Στο πείραμα 1 (αντλία προοδευτικής κοιλότητας, βλ. κεφάλαιο 3, σελ. 50) χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικοί κώδικες (scripts), ένας για την ανάλυση του σήματος πίεσης και ένας για την επεξεργασία των εικόνων (image processing).

Pressure analysis

```
v=input('flow rate: ');
cd ..\;

switch v
    case '10'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july\upstream\10';
cd(path);
filename1='10up_%d.asc';
nf=7;
cell1=cell(1,nf);

filename2='10raw_data%d.fig';
filename3='10raw_data%d.bmp';

    title1='Pressure-time position%d, flow rate: 210 ml/min';
    filename4='zPressure-time%d, flow rate.fig';
    filename5='zPressure-time%d, flow rate.bmp';

title2='Pressure-time, flow rate: 210 ml/min';
filename6='Pressure-time all positions, flow rate.fig';
filename7='Pressure-time all positions, flow rate.bmp';

    title3='max-min-amplitude for every position, flow rate: 210
ml/min';
    fig3='max-min-amplitude for every position, flow rate.fig';
    bmp3='max-min-amplitude for every position, flow rate.bmp';

    title4='snapshot of pressure at position %d, flow rate: 210
ml/min';

filename8='time domain signal, position %d, flow rate: 210
ml/min';
filename9='Frequency domain signal, position %d, flow rate: 210
ml/min';
filename10='Frequency domain signal, position %d, flow rate.fig';
filename11='Frequency domain signal, position %d, flow rate.bmp';
```

```

    case '15'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july\upstream\15';
cd(path);
filename1='15up_%d.asc';
nf=6;
cell1=cell(1,nf);

filename2='15raw_data%d.fig';
filename3='15raw_data%d.bmp';

title1='Pressure-time position%d, flow rate: 300 ml/min';
filename4='zPressure-time%d, flow rate.fig';
filename5='zPressure-time%d, flow rate.bmp';

title2='Pressure-time, flow rate: 300 ml/min';
filename6='Pressure-time all positions, flow rate.fig';
filename7='Pressure-time all positions, flow rate.bmp';

    title3='max-min-amplitude for every position, flow rate: 300
ml/min';
    fig3='max-min-amplitude for every position, flow rate.fig';
    bmp3='max-min-amplitude for every position, flow rate.bmp';

    title4='snapshot of pressure at position %d, flow rate: 300
ml/min';

filename8='time domain signal, position %d, flow rate: 300
ml/min';
filename9='Frequency domain signal, position %d, flow rate: 300
ml/min';
filename10='Frequency domain signal, position %d, flow rate.fig';
filename11='Frequency domain signal, position %d, flow rate.bmp';

    case '20'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july\upstream\20';
cd(path);
filename1='20up_%d.asc';
nf=6;
cell1=cell(1,nf);

filename2='20raw_data%d.fig';
filename3='20raw_data%d.bmp';

title1='Pressure-time position%d, flow rate: 390 ml/min';
filename4='zPressure-time%d, flow rate.fig';
filename5='zPressure-time%d, flow rate.bmp';

title2='Pressure-time, flow rate: 390 ml/min';
filename6='Pressure-time all positions, flow rate.fig';
filename7='Pressure-time all positions, flow rate.bmp';

```

```

    title3='max-min-amplitude for every position, flow rate: 390
ml/min';
    fig3='max-min-amplitude for every position, flow rate.fig';
    bmp3='max-min-amplitude for every position, flow rate.bmp';

    title4='snapshot of pressure at position %d, flow rate: 390
ml/min';

filename8='time domain signal, position %d, flow rate: 390
ml/min';
filename9='Frequency domain signal, position %d, flow rate: 390
ml/min';
filename10='Frequency domain signal, position %d, flow rate.fig';
filename11='Frequency domain signal, position %d, flow rate.bmp';

end

for i=0:nf-1
    file1=sprintf(filename1,i);
    cell1{1,i+1}=importdata(file1);
end
%raw data

for j=1:nf
    plot(cell1{1,j}(:,1),cell1{1,j}(:,2));
    hold on
    title(sprintf('raw data position%d',j-1)), xlabel('time(s)'),
ylabel('mV/V');
    hold on
    saveas(gcf,sprintf(filename3,j-1)),
saveas(gcf,sprintf(filename2,j-1));
    hold off
end

%pressure-time
for k=1:nf
    cell1{1,k}(:,2)=(cell1{1,k}(:,2)-0.085)*2789;
end

for t=1:nf
    plot(cell1{1,t}(:,1),cell1{1,t}(:,2));
    hold on
    title(sprintf(title1,t-1)), xlabel('time(s)'),
ylabel('Pressure(mmH2O)'), axis([-inf inf -400 200]);
    hold on
    saveas(gcf,sprintf(filename4,t-1)),
saveas(gcf,sprintf(filename5,t-1));
    hold off
end

%pressure-time all positions

```

```

for t=1:nf
    plot(cell1{1,t}(:,1),cell1{1,t}(:,2));
    hold on
    title(title2), xlabel('time(s)'), ylabel('Pressure(mmH2O)');
    hold on
    saveas(gcf,sprintf(filename6,t-1)),
saveas(gcf,sprintf(filename7,t-1));
    hold on
end
    hold off
%maxima,minima,amplitudes
A=zeros(nf,4);
for j=1:nf
    A(j,1)=max(cell1{1,j}(1500:3000,2));
    A(j,2)=min(cell1{1,j}(1500:3000,2));
    A(j,3)=mean(cell1{1,j}(:,2));
    A(j,4)=max(cell1{1,j}(1500:3000,2))-
min(cell1{1,j}(1500:3000,2));
end

%max&min sunarthsei twn average, dhladh twn 8esewn

    fit1=fit(A(:,3),A(:,1),'poly1');
    fit2=fit(A(:,3),A(:,2),'poly1');
    fit3=fit(A(:,3),A(:,4),'poly2');
    scatter(A(:,3),A(:,1),10,'b','filled');
    hold on
    scatter(A(:,3),A(:,2),10,'r','filled');
    hold on
    scatter(A(:,3),A(:,4),10,'g','filled');
    hold on
    plot(fit1,'b');
    hold on
    plot(fit2,'r');
    hold on
    plot(fit3,'g');
    hold on
    title(title3),
                                xlabel('Pressure(mmH2O)'),
ylabel('Pressure(mmH2O)'),
legend('max','min','amplitude','location','northwest');
    hold on
    saveas(gcf,fig3), saveas(gcf,bmp3);
    hold off

%
%
%.....
%.....
%FFT

Fs=150;
nfft=length(cell1{1,1});

```

```

nfft2=2^nextpow2(nfft);
xfft=Fs*(0:(nfft2/2)-1)/nfft2;
for k=1:nf
    ff=fft(cell1{1,k}(:,2),nfft2);
    fff=ff(1:nfft2/2);
    subplot(2,1,1);
    plot(cell1{1,k}(:,1),cell1{1,k}(:,2),'b');
    title(sprintf(filename8,k-1)),          xlabel('time(s)'),
ylabel('Amplitude(mmH2O)');
    subplot(2,1,2)
    plot(xfft,abs(fff),'b');
    title(sprintf(filename9,k-1)),          xlabel('Frequency(Hz)'),
ylabel('Normalised Amplitude');
    %axis([-inf inf -inf 100]);
    saveas(gcf,sprintf(filename10,k-1)),
saveas(gcf,sprintf(filename11,k-1));
    hold off
end

%.....
% %sun8eta diagrammata
cd ..\;
filename1='%dup_%d.asc';
FN='%d';
k=[10 15 20];
cell2=cell(1,3);
cell3=cell(1,3);

for i=1:3
    D=dir([sprintf(FN,k(i)),'\*.asc']);
    nf=length(D(not([D.isdir])));
    cell1=cell(1,nf);
    A=zeros(nf,4);
    if i==1
        path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july\upstream\10';
    elseif i==2
        path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july\upstream\15';
    else
        path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july\upstream\20';
    end
    cd(path);

    for j=0:nf-1
        file1=sprintf(filename1,k(i),j);
        cell1{1,j+1}=importdata(file1);
        cell1{1,j+1}(:,2)=(cell1{1,j+1}(:,2)-0.085)*2789;
        A(j+1,1)=max(cell1{1,j+1}(1500:3000,2));
        A(j+1,2)=min(cell1{1,j+1}(1500:3000,2));
        A(j+1,3)=mean(cell1{1,j+1}(:,2));
    end
end

```

```

        A(j+1,4)=max(cell11{1,j+1}(1500:3000,2))-
min(cell11{1,j+1}(1500:3000,2));
        fig1=plot(cell11{1,j+1}(:,1),cell11{1,j+1}(:,2));
        hold on

    end
    hold on
    saveas(fig1,sprintf('%d.fig',i));
    hold off
    cell2{1,i}=A;
    cd '..\';
end

%P-Time apo oles tis paroxes
c=hgload('1.fig');
v=hgload('2.fig');
u=hgload('3.fig');

figure
h(1)=subplot(3,1,1);
h(2)=subplot(3,1,2);
h(3)=subplot(3,1,3);

copyobj(allchild(get(c,'CurrentAxes')),h(1));
copyobj(allchild(get(v,'CurrentAxes')),h(2));
copyobj(allchild(get(u,'CurrentAxes')),h(3));

B1=[0 1 2 3 4 5 6];
B2=[0 1 2 3 4 5];

fita1=fit(B1',cell2{1,1}(:,1),'PCHIP');
fita2=fit(B1',cell2{1,1}(:,2),'PCHIP');
fita3=fit(B1',cell2{1,1}(:,3),'poly1');
fita4=fit(B1',cell2{1,1}(:,4),'smoothingspline');
fitb1=fit(B2',cell2{1,2}(:,1),'PCHIP');
fitb2=fit(B2',cell2{1,2}(:,2),'PCHIP');
fitb3=fit(B2',cell2{1,2}(:,3),'poly1');
fitb4=fit(B2',cell2{1,2}(:,4),'smoothingspline');
fitc1=fit(B2',cell2{1,3}(:,1),'PCHIP');
fitc2=fit(B2',cell2{1,3}(:,2),'PCHIP');
fitc3=fit(B2',cell2{1,3}(:,3),'poly1');
fitc4=fit(B2',cell2{1,3}(:,4),'smoothingspline');

scatter(B1',cell2{1,1}(:,4),10,'b','filled');
hold on
scatter(B2',cell2{1,2}(:,4),10,'r','filled');
hold on
scatter(B2',cell2{1,3}(:,4),10,'g','filled');
hold on
plot(fita4,'b');
hold on
plot(fitb4,'r');
hold on
plot(fitc4,'g');

```

```

title('upstream amplitudes for all flow rates'),
xlabel('positions'), ylabel('Pressure(mmH2O)'), legend('flow
rate: 210 ml/min','flow rate: 300 ml/min','flow rate: 390
ml/min'), axis([-inf inf -100 100]);
hold off

%max-min pressures vs positions

scatter(B1',cell2{1,1}(:,1),10,'b','filled');
hold on
scatter(B1',cell2{1,1}(:,2),10,'b','filled');
hold on
scatter(B2',cell2{1,2}(:,1),10,'r','filled');
hold on
scatter(B2',cell2{1,2}(:,2),10,'r','filled');
hold on
scatter(B2',cell2{1,3}(:,1),10,'g','filled');
hold on
scatter(B2',cell2{1,3}(:,2),10,'g','filled');
hold on
m1=plot(fita1,'b');
hold on
plot(fita2,'b');
hold on
m2=plot(fitb1,'r');
hold on
plot(fitb2,'r');
hold on
m3=plot(fitc1,'g');
hold on
plot(fitc2,'g');
title('upstream max-min for all flow rates'), xlabel('Position'),
ylabel('Pressure(mmH2O)'), legend([m1 m2 m3],'flow rate: 210
ml/min','flow rate: 300 ml/min','flow rate: 390
ml/min','location','northwest');
hold off

%

%edw einai to average se sxesh me th 8esh
scatter(B1',cell2{1,1}(:,3),10,'b','filled');
hold on
scatter(B2',cell2{1,2}(:,3),10,'r','filled');
hold on
scatter(B2',cell2{1,3}(:,3),10,'g','filled');
hold on
plot(fita3,'b');
hold on
plot(fitb3,'r');
hold on
plot(fitc3,'g');
title('upstream average for all flow rates'), xlabel('Position'),
ylabel('Pressure(mmH2O)'), legend('flow rate: 210 ml/min','flow
rate:300 ml/min','flow rate: 390 ml/min');
hold off

```

```

%zoom-in stis pieseis (period, amplitude, etc...)

stitle1='snapshot of pressure at position %d.fig';
stitle2='snapshot of pressure at position %d.bmp';

for j=1:nf
    subplot(2,1,1)
    plot(cell1{1,j}(:,1),cell1{1,j}(:,2));
    title(sprintf(title1,j-1)),                xlabel('time(s)'),
ylabel('Pressure(mmH2O)'), axis([-inf inf -400 200]);
    subplot(2,1,2)
    plot(cell1{1,j}(:,1),cell1{1,j}(:,2));
    title(sprintf(title4,j-1)),                xlabel('time(s)'),
ylabel('Pressure(mmH2O)'), axis([10 12 A(j,2) A(j,1)]);
    saveas(gcf,sprintf(stitle1,j-1)),
saveas(gcf,sprintf(stitle2,j-1));
    hold off
end

```

Ο κώδικας Pressure analysis φορτώνει τα .asc αρχεία τα οποία περιέχουν το ψηφιοποιημένο σήμα πίεσης που λάβαμε από τον αισθητήρα Millar. Η συχνότητα λήψης είναι 150 Hz και η ακρίβεια των μετρήσεων είναι 0.0001 mV/V. Μετατρέπουμε αυτό το σήμα σε mmH2O, αφού πρώτα έχουμε ορίσει το σημείο 0 (το οποίο ταυτίζεται με την ατμοσφαιρική πίεση) αλλά και τη σταθερά c=2789 mmH20/mV/V. Ο υπόλοιπος κώδικας αφορά την κατασκευή των διάφορων διαγραμμάτων, στα οποία περιλαμβάνεται πλάτος πίεσης, μέγιστα, ελάχιστα κ.λ.π., αλλά και την ανάλυση Fourier του σήματος πίεσης (FFT).

Image processing

```

v=input('enter a filename: ');

switch v
    case '10_3'
        path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july_videos\Tube          frames\upstream\10\oscillatory
position 3';
        cd(path);
        filename='10up_3_%d.bmp';
        nf=20;

    case '10_4'
        path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july_videos\Tube          frames\upstream\10\oscillatory
position 4';
        cd(path);
        filename='10up_4_%d.bmp';
        nf=19;

    case '15_3'

```



```

        path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july_videos\Tube          frames\upstream\15\oscillatory
position 3';
        cd(path);
        filename='15up_3_%d.bmp';
        nf=20;

        case '15_4'
            path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july_videos\Tube          frames\upstream\15\oscillatory
position 4';
            cd(path);
            filename='15up_4_%d.bmp';
            nf=19;

        case '20_3'
            path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\26july_videos\Tube          frames\upstream\20\oscillatory
position 3';
            cd(path);
            filename='20up_3_%d.bmp';
            nf=25;

end

switch v
    case '20_3'
        c=8.200;
    case '10_3'
        c=7.400;
    case '10_4'
        c=7.400;
    case '15_3'
        c=7.400;
    case '15_4'
        c=7.400;
end

m=[0 3 4 5 6];

cell1=cell(3,nf);
cell2=cell(2,nf);
a=0.03;

for i=1:nf
    d=imread(sprintf(filename,i));           %diavasma arxeiwn
    u=d(:, :, 1);
    [M,N]=size(u);
    yuppx1=zeros(2,N-39);
    ydownpx1=zeros(2,N-39);
    yup=zeros(2,N-39);
    ydown=zeros(2,N-39);
    dlt=zeros(2,N-39);
    for k=20:N-20

```

```

        idx=find(u(:,k)>150); %xrhsimopoiw
range(20:N-20) gt stis

yuppxl(1,k-19)=idx(1);
yuppxl(2,k-19)=k;
ydownpxl(1,k-19)=idx(end);
ydownpxl(2,k-19)=k;

yup(1,k-19)=(576-idx(1))*a-c; %akres ths photo exw
maures lwrides
yup(2,k-19)=40+k*a;
ydown(1,k-19)=(576-idx(end))*a-c;
ydown(2,k-19)=40+k*a;
%     dlt(1,k-19)=(idx(end)-idx(1))*a;
%     dlt(2,k-19)=k*a;
end

% %filtro sthn antlia 2 (πειραμα 2)

%     for n=2:N-39
%         if abs(yup(1,n)-yup(1,n-1))>0.2;
%             yup(1,n)=yup(1,n-1);
%         end
%     end
% %     ydown(1,1)=-5.5;
%     for n=2:N-39
%         if abs(ydown(1,n)-ydown(1,n-1))>0.2;
%             ydown(1,n)=ydown(1,n-1);
%         end
%     end
%     for n=2:N-39
%         if abs(yuppxl(1,n)-yuppxl(1,n-1))>6;
%             yuppxl(1,n)=yuppxl(1,n-1);
%         end
%     end
% %     ydownpxl(1,1)=155;
%     for n=2:N-39
%         if abs(ydownpxl(1,n)-ydownpxl(1,n-1))>6;
%             ydownpxl(1,n)=ydownpxl(1,n-1);
%         end
%     end

dlt(1,:)=yup(1,:)-ydown(1,:);
dlt(2,:)=yup(2,:);
cell1{1,i}=yup-0.2; %apo8hkeuw
tous pinakes se cells
cell1{2,i}=ydown-0.2;
cell1{3,i}=dlt;
cell2{1,i}=yuppxl;
cell2{2,i}=ydownpxl;
end

%eyresh platous talantwshs

A=zeros(1,nf);

```

```

for z=1:nf
    A(1,z)=min(cell11{3,z}(1,300:500));
end

p=max(A)-min(A);

%control point
B=zeros(1,nf);
C=zeros(1,nf);

for b=1:nf
    B(1,b)=mean(cell11{1,b}(1,:));
    C(1,b)=mean(cell11{2,b}(1,:));
end

avgup=mean(B);
avgdown=mean(C);
G=[max(B) min(B);max(C) min(C)];

T=(0:0.04:(nf-1)*0.04);
fit1=fit(T',(B) ,'PCHIP');
scatter(T,(B),10,'filled');
hold on
plot(fit1,'r')
hold on
title('control point-time'), xlabel('t(s)'), ylabel('r/R'),
legend('off'), axis([0 (nf-1)*0.04 -inf inf]);
hold on
saveas(gcf,'amplitude_time.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_time.bmp');

high=max(B);
low=min(B);

switch v
    case '70rpm0'
        textname2='ctrl70rpm_0.txt';
        file0=fopen(textname2,'w');
        fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
        textname='Amplitude70rpm_0.txt';
        file1=fopen(textname,'w');
        fprintf(file1,'%4f',p);

    case '70rpm1'
        textname2='ctrl70rpm_1.txt';
        file0=fopen(textname2,'w');
        fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
        textname='Amplitude70rpm_1.txt';
        file1=fopen(textname,'w');
        fprintf(file1,'%4f',p);

    case '70rpm2'
        textname2='ctrl70rpm_2.txt';
        file0=fopen(textname2,'w');
        fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);

```

```

textname='Amplitude70rpm_2.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'%4f',p);

case '70rpm3'
textname2='ctrl70rpm_3.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
textname='Amplitude70rpm_3.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'%4f',p);

case '80rpm0'
textname2='ctrl80rpm_0.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
textname='Amplitude80rpm_0.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'%4f',p);

case '80rpm1'
textname2='ctrl80rpm_1.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
textname='Amplitude80rpm_1.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'%4f',p);

case '80rpm2'
textname2='ctrl80rpm_2.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
textname='Amplitude80rpm_2.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'%4f',p);

case '80rpm3'
textname2='ctrl80rpm_3.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
textname='Amplitude80rpm_3.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'%4f',p);

case '90rpm0'
textname2='ctrl90rpm_0.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
textname='Amplitude90rpm_0.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'%4f',p);

case '90rpm1'
textname2='ctrl90rpm_1.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'%4f %4f',high,low);
textname='Amplitude90rpm_1.txt';

```

```

file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '90rpm2'
textname2='ctrl90rpm_2.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude90rpm_2.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '90rpm3'
textname2='ctrl90rpm_3.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude90rpm_3.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '100rpm0'
textname2='ctrl100rpm_0.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude100rpm_0.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '100rpm1'
textname2='ctrl100rpm_1.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude100rpm_1.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '100rpm2'
textname2='ctrl100rpm_2.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude100rpm_2.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '110rpm0'
textname2='ctrl110rpm_0.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude110rpm_0.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '110rpm1'
textname2='ctrl110rpm_1.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude110rpm_1.txt';
file1=fopen(textname, 'w');

```

```

fprintf(file1, '%.4f', p);

case '110rpm2'
textname2='ctrl110rpm_2.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude110rpm_2.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '140rpm0'
textname2='ctrl140rpm_0.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude140rpm_0.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '140rpm1'
textname2='ctrl140rpm_1.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude140rpm_1.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '140rpm2'
textname2='ctrl140rpm_2.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude140rpm_2.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '150rpm0'
textname2='ctrl150rpm_0.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude150rpm_0.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '150rpm1'
textname2='ctrl150rpm_1.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude150rpm_1.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

case '150rpm2'
textname2='ctrl150rpm_2.txt';
file0=fopen(textname2, 'w');
fprintf(file0, '%.4f %.4f', high, low);
textname='Amplitude150rpm_2.txt';
file1=fopen(textname, 'w');
fprintf(file1, '%.4f', p);

```

```

case '160rpm0'
textname2='ctrl160rpm_0.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'% .4f % .4f',high,low);
textname='Amplitude160rpm_0.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'% .4f',p);

case '160rpm1'
textname2='ctrl160rpm_1.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'% .4f % .4f',high,low);
textname='Amplitude160rpm_1.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'% .4f',p);

case '160rpm2'
textname2='ctrl160rpm_2.txt';
file0=fopen(textname2,'w');
fprintf(file0,'% .4f % .4f',high,low);
textname='Amplitude160rpm_2.txt';
file1=fopen(textname,'w');
fprintf(file1,'% .4f',p);

end
%
%
%
%diagrammata.....
.....
switch v
    case '10_3'

filename1='shape position 3 flow rate 10%d.bmp';
filename2='amplitude position 3 flow rate 10%d.bmp';
filename3='superimposing70rpm0_%d.bmp';
string1='shape (x,y) at flow rate: 210 ml/min, position 3';
string2='Tube width at flow rate: 210 ml/min, position 3';
%
        case '10_4'

filename1='shape position 4 flow rate 10%d.bmp';
filename2='amplitude position 4 flow rate 10%d.bmp';
filename3='superimposing70rpm0_%d.bmp';
string1='shape (x,y) at flow rate: 210 ml/min, position 4';
string2='Tube width at flow rate: 210 ml/min, position 4';
%
        case '15_3'

filename1='shape position 3 flow rate 15%d.bmp';
filename2='amplitude position 3 flow rate 15%d.bmp';
filename3='superimposing70rpm0_%d.bmp';
string1='shape (x,y) at flow rate: 300 ml/min, position 3';
string2='Tube width at flow rate: 300 ml/min, position 3';

case '15_4'

```

```

filename1='shape position 4 flow rate 15%d.bmp';
filename2='amplitude position 4 flow rate 15%d.bmp';
filename3='superimposing70rpm0_%d.bmp';
string1='shape (x,y) at flow rate: 300 ml/min, position 4';
string2='Tube width at flow rate: 300 ml/min, position 4';

%
case '20_3'

filename1='shape position 3 flow rate 20%d.bmp';
filename2='amplitude position 3 flow rate 20%d.bmp';
filename3='superimposing70rpm0_%d.bmp';
string1='shape (x,y) at flow rate: 390 ml/min, position 3';
string2='Tube width at flow rate: 390 ml/min, position 3';

end
% %
% %
for j=1:nf
    file1=sprintf(filename1,j);
    file2=sprintf(filename2,j);
    file3=sprintf(filename3,j);

f1=fit((cell1{1,j}(2,:))', (cell1{1,j}(1,:))', 'smoothingspline');
f2=fit((cell1{2,j}(2,:))', (cell1{2,j}(1,:))', 'smoothingspline');

f3=fit((cell1{3,j}(2,:))', (cell1{3,j}(1,:))', 'smoothingspline');
scatter((cell1{1,j}(2,:)), (cell1{1,j}(1,:)), 10, 'filled');
hold on
plot(f1);
hold on
scatter((cell1{2,j}(2,:)), (cell1{2,j}(1,:)), 10, 'filled');
hold on
plot(f2);
hold on
title(string1),          xlabel('x(mm)'),          ylabel('y(mm)'),
legend('off'), axis([40.60 62.44 -20 20]);
saveas(gcf, file1);
hold off
plot(cell1{3,j}(2,:), cell1{3,j}(1,:));
plot(f3);
hold on
title(string2),          xlabel('x(mm)'),          ylabel('y(mm)'),
legend('off'), axis([40.60 62.44 -20 20]);
saveas(gcf, file2);
hold off
r=imread(sprintf(filename, j));
u1=r(350:550, :, 1);
f4=fit((cell2{1,j}(2,:))', (cell2{1,j}(1,:))', 'poly2');
f5=fit((cell2{2,j}(2,:))', (cell2{2,j}(1,:))', 'poly2');
imshow(u1);
hold on
scatter((cell2{1,j}(2,:)), (cell2{1,j}(1,:)), 10, 'filled');
hold on

```



```

plot(f4);
hold on
scatter((cell2{2,j}(2,:)),(cell2{2,j}(1,:)),10,'filled');
hold on
plot(f5);
hold on
legend('off');
saveas(gcf,file3);
hold off
end

```

Ο παραπάνω κώδικας απομονώνει τον αγωγό από το background εκμεταλλευόμενος την αντίθεσή τους. Ταυτόχρονα μετατρέπει τα pixels κάθε εικόνας σε mm, την οποία σχέση τη βρίσκουμε μετρώντας τα pixel της απαραμόρφωτης διαμέτρου του αγωγού η οποία ξέρουμε ότι είναι 10 mm. Στη συνέχεια, πλοτάρει το άνω και κάτω τοίχωμα του αγωγού. Από αυτά τα δεδομένα μπορούμε να βρούμε την ελάχιστη και μέγιστη διατομή στο σύνολο των frames από κάθε video και έτσι να ορίσουμε το πλάτος ταλάντωσης. Επιπλέον από κάθε frame ορίζουμε ένα control point, το οποίο προκύπτει από το μέσο όρο των σημείων που βρίσκονται πιο κοντά στη διατομή κατάρρευσης και αφορά μόνο το πάνω τοίχωμα. Αυτό το control point το πλοτάρουμε συναρτήσει του χρόνου δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ δύο frame είναι ίση με 1/25 sec. Τέλος, πλοτάρουμε το σχήμα του αγωγού που προέκυψε πάνω στην πραγματική εικόνα για να διαπιστώσουμε την ακρίβεια του κώδικα. Ο κώδικας χωρίζεται με την εντολή switch case, διότι σε κάθε περίπτωση (διαφορετική παροχή ή/και εσωτερική πίεση) ενδεχομένως χρειαζόταν κάποιες τροποποιήσεις για να παράξει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Πείραμα 2

Στο πείραμα 2 (περισταλτική αντλία, βλ. **κεφάλαιο 4, σελ. 112**) χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω ξεχωριστοί κώδικες διότι προχωρούσαμε πιο διερευνητικά. Οι κώδικες αφορούν, όπως και στο πείραμα 1 την επεξεργασία του σήματος πίεσης και των εικόνων του εύκαμπτου αγωγού.

Conversion

```

file=input('give a filename:');
l=load(file);

x1=l(:,1);
x2=(l(:,2)-0.034)*2789;
v=[x1';x2'];

[pathstr,name,ext]=fileparts(file);
file1=sprintf('%s.txt',name);
file2=fopen(file1,'w');
fprintf(file2,'%7.4f % .4f\r\n',v);

image=sprintf('%s.bmp',name);

plot(x1,x2)

```

```
saveas(gcf, image)
```

Ο κώδικας conversion απλά μετατρέπει τα αρχεία .asc με το ψηφιοποιημένο σήμα πίεσης σε καμπύλες πίεσης-χρόνου με μονάδες mmH20. Χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστά από τους μεγαλύτερους κώδικες για δύο λόγους. (1) Για να μπορούμε άμεσα να δούμε την πραγματική πίεση την ώρα που παίρναμε τις μετρήσεις, (2) Επειδή οι μετρήσεις ήταν πολλές δεν έγιναν όλες την ίδια μέρα, με αποτέλεσμα το αρχικό σημείο 0 που έδινε ο αισθητήρας, δηλαδή η ατμοσφαιρική πίεση, να μην έχει πάντα την ίδια τιμή.

Conversion to Q,f

```
%directories,paths,etc
v=input('give place of measurement(e.g. up-1-02): ');
switch v
    case 'down-0-00'

path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna00\down';
cd(path);
filename='%drpm_down_1June.txt';
textname1='maxmin_down_q_15july.txt';
textname2='maxmin_down_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(down-00)';
titlename2='max&min pressure-frequency(down-00)';
figname1='q-maxmin-down-0-00.fig';
bmpname1='q-maxmin-down-0-00.bmp';
figname2='f-maxmin-down-0-00.fig';
bmpname2='f-maxmin-down-0-00.bmp';
nf=16;
        case 'up-0-00'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna00\up';
cd(path);
filename='%drpm_up_1June.txt';
textname1='maxmin_up_q_15july.txt';
textname2='maxmin_up_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(up-00)';
titlename2='max&min pressure-frequency(up-00)';
figname1='q-maxmin-up-0-00.fig';
bmpname1='q-maxmin-up-0-00.bmp';
figname2='f-maxmin-up-0-00.fig';
bmpname2='f-maxmin-up-0-00.bmp';
nf=16;
        case 'up-1-01'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna01\up';
cd(path);
filename='%drpm_up_1_26may.txt';
textname1='maxmin_up_1_q_15july.txt';
textname2='maxmin_up_1_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(up-1-01)';
titlename2='max&min pressure-frequency(up-1-01)';
```

```

filename1='q-maxmin-up-1-01.fig';
bmpname1='q-maxmin-up-1-01.bmp';
filename2='f-maxmin-up-1-01.fig';
bmpname2='f-maxmin-up-1-01.bmp';
nf=16;
    case 'up-2-01'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna01\up';
cd(path);
filename='%drpm_up_2_26may.txt';
textname1='maxmin_up_2_q_15july.txt';
textname2='maxmin_up_2_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(up-2-01)';
titlename2='max&min pressure-frequency(up-2-01)';
filename1='q-maxmin-up-2-01.fig';
bmpname1='q-maxmin-up-2-01.bmp';
filename2='f-maxmin-up-2-01.fig';
bmpname2='f-maxmin-up-2-01.bmp';
nf=16;
    case 'up-3-01'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna01\up';
cd(path);
filename='%drpm_up_3_30may.txt';
textname1='maxmin_up_3_q_15july.txt';
textname2='maxmin_up_3_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(up-3-01)';
titlename2='max&min pressure-frequency(up-3-01)';
filename1='q-maxmin-up-3-01.fig';
bmpname1='q-maxmin-up-3-01.bmp';
filename2='f-maxmin-up-3-01.fig';
bmpname2='f-maxmin-up-3-01.bmp';
nf=7;
    case 'down-1-01'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna01\down';
cd(path);
filename='%drpm_down_1_26may.txt';
textname1='maxmin_down_1_q_15july.txt';
textname2='maxmin_down_1_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(down-1-01)';
titlename2='max&min pressure-frequency(down-1-01)';
filename1='q-maxmin-down-1-01.fig';
bmpname1='q-maxmin-down-1-01.bmp';
filename2='f-maxmin-down-1-01.fig';
bmpname2='f-maxmin-down-1-01.bmp';
nf=16;
    case 'down-2-01'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna01\down';
cd(path);
filename='%drpm_down_2_26may.txt';
textname1='maxmin_down_2_q_15july.txt';
textname2='maxmin_down_2_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(down-2-01)';

```

```

titlename2='max&min pressure-frequency(down-2-01)';
filename1='q-maxmin-down-2-01.fig';
bmpname1='q-maxmin-down-2-01.bmp';
filename2='f-maxmin-down-2-01.fig';
bmpname2='f-maxmin-down-2-01.bmp';
nf=16;
    case 'down-3-01'
        path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna01\down';
cd(path);
filename='%drpm_down_3_30may.txt';
textname1='maxmin_down_3_q_15july.txt';
textname2='maxmin_down_3_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(down-3-01)';
titlename2='max&min pressure-frequency(down-3-01)';
filename1='q-maxmin-down-3-01.fig';
bmpname1='q-maxmin-down-3-01.bmp';
filename2='f-maxmin-down-3-01.fig';
bmpname2='f-maxmin-down-3-01.bmp';
nf=7;
    case 'up-1-02'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna02\up';
cd(path);
filename='%drpm_up_1_1June.txt';
textname1='maxmin_up_1_q_15july.txt';
textname2='maxmin_up_1_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(up-1-02)';
titlename2='max&min pressure-frequency(up-1-02)';
filename1='q-maxmin-up-1-02.fig';
bmpname1='q-maxmin-up-1-02.bmp';
filename2='f-maxmin-up-1-02.fig';
bmpname2='f-maxmin-up-1-02.bmp';
nf=16;
    case 'up-2-02'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna02\up';
cd(path);
filename='%drpm_up_2_1June.txt';
textname1='maxmin_up_2_q_15july.txt';
textname2='maxmin_up_2_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(up-2-02)';
titlename2='max&min pressure-frequency(up-2-02)';
filename1='q-maxmin-up-2-02.fig';
bmpname1='q-maxmin-up-2-02.bmp';
filename2='f-maxmin-up-2-02.fig';
bmpname2='f-maxmin-up-2-02.bmp';
nf=16;
    case 'up-3-02'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna02\up';
cd(path);
filename='%drpm_up_3_1June.txt';
textname1='maxmin_up_3_q_15july.txt';
textname2='maxmin_up_3_f_15july.txt';

```

```

titlename1='max&min pressure-flow rate(up-3-02)';
titlename2='max&min pressure-frequency(up-3-02)';
figname1='q-maxmin-up-3-02.fig';
bmpname1='q-maxmin-up-3-02.bmp';
figname2='f-maxmin-up-3-02.fig';
bmpname2='f-maxmin-up-3-02.bmp';
nf=16;
    case 'down-1-02'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna02\down';
cd(path);
filename='%drpm_down_1_1June.txt';
textname1='maxmin_down_1_q_15july.txt';
textname2='maxmin_down_1_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(down-1-02)';
titlename2='max&min pressure-frequency(down-1-02)';
figname1='q-maxmin-down-1-02.fig';
bmpname1='q-maxmin-down-1-02.bmp';
figname2='f-maxmin-down-1-02.fig';
bmpname2='f-maxmin-down-1-02.bmp';
nf=16;
    case 'down-2-02'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna02\down';
cd(path);
filename='%drpm_down_2_1June.txt';
textname1='maxmin_down_2_q_15july.txt';
textname2='maxmin_down_2_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(down-2-02)';
titlename2='max&min pressure-frequency(down-2-02)';
figname1='q-maxmin-down-2-02.fig';
bmpname1='q-maxmin-down-2-02.bmp';
figname2='f-maxmin-down-2-02.fig';
bmpname2='f-maxmin-down-2-02.bmp';
nf=16;
    case 'down-3-02'
path='C:\Users\stathis\Desktop\Διπλωματική\Tube-
Pressures\Pressures\Vanna02\down';
cd(path);
filename='%drpm_down_3_1June.txt';
textname1='maxmin_down_3_q_15july.txt';
textname2='maxmin_down_3_f_15july.txt';
titlename1='max&min pressure-flow rate(down-3-02)';
titlename2='max&min pressure-frequency(down-3-02)';
figname1='q-maxmin-down-3-02.fig';
bmpname1='q-maxmin-down-3-02.bmp';
figname2='f-maxmin-down-3-02.fig';
bmpname2='f-maxmin-down-3-02.bmp';
nf=16;
end

cell1=cell(1,nf);
if nf==16
    i=[30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180];
else

```

```

        i=[30 40 50 60 70 80 90];
end

q=i*5.1857-55.707;
f=(i/60)*3;

for k=1:nf
    filename1=sprintf(filename,i(k));
    cell1{k}=importdata(filename1);
end

max1=zeros(1,nf);
min1=zeros(1,nf);

for j=1:nf
    max1(j)=max(cell1{j}(450:end,2));
    min1(j)=min(cell1{j}(450:end,2));
end

x=[q;max1;min1];
y=[f;max1;min1];
file1=fopen(textname1,'w');
file2=fopen(textname2,'w');
fprintf(file1,'%0f %0.4f %0.4f\r\n',x);
fprintf(file2,'%0f %0.4f %0.4f\r\n',y);

%max&mins each case

f1=fit(q,max1,'PCHIP');
f2=fit(q,min1,'PCHIP');
f3=fit(f,max1,'PCHIP');
f4=fit(f,min1,'PCHIP');
scatter(q,max1,10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
scatter(q,min1,10,'filled');
hold on
plot(f2,'r');
hold on
title(titlename1), xlabel('flow rate Q (ml/min)'),
ylabel('pressure(mmH20)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
saveas(gcf,figname1), saveas(gcf,bmpname1);
hold off
scatter(f,max1,10,'filled');
hold on
plot(f3,'b');
hold on
scatter(f,min1,10,'filled');
hold on
plot(f4,'r');
hold on
title(titlename2), xlabel('frequency f (Hz)'),
ylabel('pressure(mmH20)'), legend('off');
saveas(gcf,figname2), saveas(gcf,bmpname2);
hold off

```

Εδώ μετατρέπουμε τα rpm σε παροχή και συχνότητα αντλίας και πλοτάρουμε τα μέγιστα και ελάχιστα του σήματος πίεσης από τα οποία μετά θα προκύψουν τα πλάτη πίεσης. Και πάλι, έχουμε ξεχωρίσει αυτόν το κώδικα από τον κυρίως κώδικα για λόγους εποπτείας.

Amplitudes

```
%amplitude of pressures
v1=input('conversion to Q or F?: ');
v2=input('type of curve(individual/up&down for each position/all
positions): ');

tf=14;
cell1=cell(1,tf);

filename='matrix%d.txt';
for j=1:tf
    cell1{1,j}=importdata(sprintf(filename,j));
end
%conversion to pressure
cell1{1,1:2}(:,2)=(cell1{1,1:2}(:,2)-0.084)*2789;
cell1{1,3:4}(:,2)=(cell1{1,3:4}(:,2)-0.020)*2789;
cell1{1,5}(:,2)=(cell1{1,5}(:,2)-0.028)*2789;
cell1{1,6:7}(:,2)=(cell1{1,6:7}(:,2)-0.020)*2789;
cell1{1,8}(:,2)=(cell1{1,8}(:,2)-0.028)*2789;
cell1{1,9:14}(:,2)=(cell1{1,9:14}(:,2)-0.084)*2789;

switch v1
    case 'Q'
%conversion to flow rate Q
cell1{1,:}(:,1)=cell1{1,:}(:,1)*5.1857-55.707;
switch v2
    case 'individual'
%plots
f1=fit(cell1{1,1}(:,1)',cell1{1,1}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,1}(:,1),cell1{1,1}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-flow rate-up-0-00'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH2O)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up_0_00.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up_0_00.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,2}(:,1)',cell1{1,2}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,2}(:,1),cell1{1,2}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
```

```

title('amplitude-flow    rate-down-0-00'),    xlabel('flow    rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow    rate_down_0_00.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_down_0_00.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,3}(:,1)',cell1{1,3}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,3}(:,1),cell1{1,3}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-flow    rate-up-1-01'),    xlabel('flow    rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow    rate_up_1_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up_1_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,4}(:,1)',cell1{1,4}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,4}(:,1),cell1{1,4}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-flow    rate-up-2-01'),    xlabel('flow    rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow    rate_up_2_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up_2_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,5}(:,1)',cell1{1,5}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,5}(:,1),cell1{1,5}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-flow    rate-up-3-01'),    xlabel('flow    rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow    rate_up_3_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up_3_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,6}(:,1)',cell1{1,6}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,6}(:,1),cell1{1,6}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-flow    rate-down-1-01'),    xlabel('flow    rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on

```



```

saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_1_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_1_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,7}(:,1)',cell1{1,7}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,7}(:,1),cell1{1,7}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-flow rate-down-2-01'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_2_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_2_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,8}(:,1)',cell1{1,8}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,8}(:,1),cell1{1,8}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-flow rate-down-3-01'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_3_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_3_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,9}(:,1)',cell1{1,9}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,9}(:,1),cell1{1,9}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-flow rate-up-1-02'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_up_1_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_up_1_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,10}(:,1)',cell1{1,10}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,10}(:,1),cell1{1,10}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-flow rate-up-2-02'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_up_2_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_up_2_02.bmp');
hold off

```

```

f1=fit(cell1{1,11}(:,1)',cell1{1,11}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,11}(:,1),cell1{1,11}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-flow      rate-up-3-02'),      xlabel('flow      rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_flow      rate_up_3_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_up_3_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,12}(:,1)',cell1{1,12}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,12}(:,1),cell1{1,12}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-flow      rate-down-1-02'),      xlabel('flow      rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_flow      rate_down_1_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_1_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,13}(:,1)',cell1{1,13}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,13}(:,1),cell1{1,13}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-flow      rate-down-2-02'),      xlabel('flow      rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_flow      rate_down_2_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_2_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,14}(:,1)',cell1{1,14}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,14}(:,1),cell1{1,14}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-flow      rate-down-3-02'),      xlabel('flow      rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_flow      rate_down_3_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_down_3_02.bmp');
hold off
    case 'up&down for each position'

%gia ka8e 8esh up&down mazi, me ble einai to upstream me red
einai to
%downstream

```

```

f1=fit(cell11{1,1}(:,1)',cell11{1,1}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell11{1,2}(:,1)',cell11{1,2}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell11{1,1}(:,1),cell11{1,1}(:,2),10,'filled');
hold on
scatter(cell11{1,2}(:,1),cell11{1,2}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r');
hold on
title('amplitude-flow rate-up&down-0-00'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'ampliude_flow rate_up&down_0_00.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up&down_0_00.bmp');
hold off

f1=fit(cell11{1,3}(:,1)',cell11{1,3}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell11{1,6}(:,1)',cell11{1,6}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell11{1,3}(:,1),cell11{1,3}(:,2),10,'filled');
hold on
scatter(cell11{1,6}(:,1),cell11{1,6}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r');
hold on
title('amplitude-flow rate-up&down-1-01'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'ampliude_flow rate_up&down_1_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up&down_1_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell11{1,4}(:,1)',cell11{1,4}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell11{1,7}(:,1)',cell11{1,7}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell11{1,4}(:,1),cell11{1,4}(:,2),10,'filled');
hold on
scatter(cell11{1,7}(:,1),cell11{1,7}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r');
hold on
title('amplitude-flow rate-up&down-2-01'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'ampliude_flow rate_up&down_2_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up&down_2_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell11{1,5}(:,1)',cell11{1,5}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell11{1,8}(:,1)',cell11{1,8}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell11{1,5}(:,1),cell11{1,5}(:,2),10,'filled');
hold on
scatter(cell11{1,8}(:,1),cell11{1,8}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r');
hold on

```

```

title('amplitude-flow rate-up&down-3-01'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH2O)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'ampliude_flow rate_up&down_3_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_up&down_3_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,9}(:,1)', cell1{1,9}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,12}(:,1)', cell1{1,12}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,9}(:,1), cell1{1,9}(:,2), 10, 'filled');
hold on
scatter(cell1{1,12}(:,1), cell1{1,12}(:,2), 10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b'), plot(f2, 'r');
hold on
title('amplitude-flow rate-up&down-1-02'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH2O)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'ampliude_flow rate_up&down_1_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_flow rate_up&down_1_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,10}(:,1)', cell1{1,10}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,13}(:,1)', cell1{1,13}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,10}(:,1), cell1{1,10}(:,2), 10, 'filled');
hold on
scatter(cell1{1,13}(:,1), cell1{1,13}(:,2), 10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b'), plot(f2, 'r');
hold on
title('amplitude-flow rate-up&down-2-02'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH2O)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'ampliude_flow rate_up&down_2_02.fig'),
saveas(gcf, 'ampliude_flow rate_up&down_2_02.fig');
hold off

f1=fit(cell1{1,11}(:,1)', cell1{1,11}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,14}(:,1)', cell1{1,14}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,11}(:,1), cell1{1,11}(:,2), 10, 'filled');
hold on
scatter(cell1{1,14}(:,1), cell1{1,14}(:,2), 10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b'), plot(f2, 'r');
hold on
title('amplitude-flow rate-up&down-3-02'), xlabel('flow rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH2O)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'ampliude_flow rate_up&down_3_02.fig'),
saveas(gcf, 'ampliude_flow rate_up&down_3_02.fig');
hold off
    case 'all positions'

```

```

%oles oi 8eseis mazi upstream, vanna01
%ble(0),red(1),green(2),yellow(3)
f1=fit(cell1{1,1}(:,1)',cell1{1,1}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell1{1,3}(:,1)',cell1{1,3}(:,2)','PCHIP');
f3=fit(cell1{1,4}(:,1)',cell1{1,4}(:,2)','PCHIP');
f4=fit(cell1{1,5}(:,1)',cell1{1,5}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,1}(:,1),cell1{1,1}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,3}(:,1),cell1{1,3}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,4}(:,1),cell1{1,4}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,5}(:,1),cell1{1,5}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r'), plot(f3,'g'), plot(f4,'y');
hold on
title('amplitude-flow      rate-up-01'),      xlabel('flow      rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH2O)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow      rate_up_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up_01.bmp');
hold off

%oles oi 8eseis mazi downstream, vanna01
f1=fit(cell1{1,2}(:,1)',cell1{1,2}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell1{1,6}(:,1)',cell1{1,6}(:,2)','PCHIP');
f3=fit(cell1{1,7}(:,1)',cell1{1,7}(:,2)','PCHIP');
f4=fit(cell1{1,8}(:,1)',cell1{1,8}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,2}(:,1),cell1{1,2}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,6}(:,1),cell1{1,6}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,7}(:,1),cell1{1,7}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,8}(:,1),cell1{1,8}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r'), plot(f3,'g'), plot(f4,'y');
hold on
title('amplitude-flow      rate-down-01'),      xlabel('flow      rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH2O)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow      rate_down_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_down_01.bmp');
hold off

%oles oi 8eseis mazi upstream, vanna02
f1=fit(cell1{1,1}(:,1)',cell1{1,1}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell1{1,9}(:,1)',cell1{1,9}(:,2)','PCHIP');
f3=fit(cell1{1,10}(:,1)',cell1{1,10}(:,2)','PCHIP');
f4=fit(cell1{1,11}(:,1)',cell1{1,11}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,1}(:,1),cell1{1,1}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,9}(:,1),cell1{1,9}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,10}(:,1),cell1{1,10}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,11}(:,1),cell1{1,11}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r'), plot(f3,'g'), plot(f4,'y');
hold on

```

```

title('amplitude-flow      rate-up-02'),      xlabel('flow      rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow      rate_up_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_up_02.bmp');
hold off

%oles oi 8eseis mazi downstream, vanna02
f1=fit(cell1{1,2}(:,1)',cell1{1,2}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,12}(:,1)',cell1{1,12}(:,2)', 'PCHIP');
f3=fit(cell1{1,13}(:,1)',cell1{1,13}(:,2)', 'PCHIP');
f4=fit(cell1{1,14}(:,1)',cell1{1,14}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,2}(:,1),cell1{1,2}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,12}(:,1),cell1{1,12}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,13}(:,1),cell1{1,13}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,14}(:,1),cell1{1,14}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r'), plot(f3,'g'), plot(f4,'y');
hold on
title('amplitude-flow      rate-down-02'),      xlabel('flow      rate
Q(ml/min)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_flow      rate_down_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_flow rate_down_02.bmp');
hold off
end

%.....
.....
...
    case 'F'
%conversion to frequency
cell1{1,:}(:,1)=(cell1{1,:}(:,1)/60)*3;
switch v2
    case 'individual'
f1=fit(cell1{1,1}(:,1)',cell1{1,1}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,1}(:,1),cell1{1,1}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-up-0-00'),      xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'),      axis([90      inf      -inf      inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_0_00.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_0_00.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,2}(:,1)',cell1{1,2}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,2}(:,1),cell1{1,2}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on

```

```

title('amplitude-frequency-down-0-00'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_0_00.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_0_00.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,3}(:,1)',cell1{1,3}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,3}(:,1),cell1{1,3}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-up-1-01'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_1_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_1_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,4}(:,1)',cell1{1,4}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,4}(:,1),cell1{1,4}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-up-2-01'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_2_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_2_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,5}(:,1)',cell1{1,5}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,5}(:,1),cell1{1,5}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-up-3-01'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_3_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_3_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,6}(:,1)',cell1{1,6}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,6}(:,1),cell1{1,6}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-down-1-01'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on

```

```

saveas(gcf, 'amplitude_frequency_down_1_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_down_1_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,7}(:,1)',cell1{1,7}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,7}(:,1),cell1{1,7}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-frequency-down-2-01'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_down_2_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_down_2_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,8}(:,1)',cell1{1,8}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,8}(:,1),cell1{1,8}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-frequency-down-3-01'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_down_3_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_down_3_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,9}(:,1)',cell1{1,9}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,9}(:,1),cell1{1,9}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-frequency-up-1-02'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up_1_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up_1_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,10}(:,1)',cell1{1,10}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,10}(:,1),cell1{1,10}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b');
hold on
title('amplitude-frequency-up-2-02'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up_2_02.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up_2_02.bmp');
hold off

```



```

f1=fit(cell1{1,11}(:,1)',cell1{1,11}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,11}(:,1),cell1{1,11}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-up-3-02'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_3_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_3_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,12}(:,1)',cell1{1,12}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,12}(:,1),cell1{1,12}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-down-1-02'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_1_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_1_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,13}(:,1)',cell1{1,13}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,13}(:,1),cell1{1,13}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-down-2-02'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_2_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_2_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,14}(:,1)',cell1{1,14}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,14}(:,1),cell1{1,14}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b');
hold on
title('amplitude-frequency-down-3-02'), xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([90 inf -inf inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_3_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_3_02.bmp');
hold off

```

case 'up&down for each position'

```

%gia ka8e 8esh up&down mazi, me ble einai to upstream me red
einai to

```

```

%downstream
f1=fit(cell1{1,1}(:,1)',cell1{1,1}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,2}(:,1)',cell1{1,2}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,1}(:,1),cell1{1,1}(:,2),10, 'filled');
hold on
scatter(cell1{1,2}(:,1),cell1{1,2}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b'), plot(f2, 'r');
hold on
title('amplitude-frequency-up&down-0-00'),
xlabel('frequency(Hz)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf
-inf inf]), legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up&down_0_00.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up&down_0_00.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,3}(:,1)',cell1{1,3}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,6}(:,1)',cell1{1,6}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,3}(:,1),cell1{1,3}(:,2),10, 'filled');
hold on
scatter(cell1{1,6}(:,1),cell1{1,6}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b'), plot(f2, 'r');
hold on
title('amplitude-frequency-up&down-1-01'),
xlabel('frequency(Hz)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf
-inf inf]), legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up&down_1_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up&down_1_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,4}(:,1)',cell1{1,4}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,7}(:,1)',cell1{1,7}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,4}(:,1),cell1{1,4}(:,2),10, 'filled');
hold on
scatter(cell1{1,7}(:,1),cell1{1,7}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b'), plot(f2, 'r');
hold on
title('amplitude-frequency-up&down-2-01'),
xlabel('frequency(Hz)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf
-inf inf]), legend('off');
hold on
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up&down_2_01.fig'),
saveas(gcf, 'amplitude_frequency_up&down_2_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,5}(:,1)',cell1{1,5}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,8}(:,1)',cell1{1,8}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,5}(:,1),cell1{1,5}(:,2),10, 'filled');
hold on
scatter(cell1{1,8}(:,1),cell1{1,8}(:,2),10, 'filled');
hold on
plot(f1, 'b'), plot(f2, 'r');

```

```

hold on
title('amplitude-frequency-up&down-3-01'),
xlabel('frequency(Hz)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf
-inf inf]), legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up&down_3_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up&down_3_01.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,9}(:,1)',cell1{1,9}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell1{1,12}(:,1)',cell1{1,12}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,9}(:,1),cell1{1,9}(:,2),10,'filled');
hold on
scatter(cell1{1,12}(:,1),cell1{1,12}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r');
hold on
title('amplitude-frequency-up&down-1-02'),
xlabel('frequency(Hz)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf
-inf inf]), legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up&down_1_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up&down_1_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,10}(:,1)',cell1{1,10}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell1{1,13}(:,1)',cell1{1,13}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,10}(:,1),cell1{1,10}(:,2),10,'filled');
hold on
scatter(cell1{1,13}(:,1),cell1{1,13}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r');
hold on
title('amplitude-frequency-up&down-2-02'),
xlabel('frequency(Hz)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf
-inf inf]), legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up&down_2_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up&down_2_02.bmp');
hold off

f1=fit(cell1{1,11}(:,1)',cell1{1,11}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell1{1,14}(:,1)',cell1{1,14}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,11}(:,1),cell1{1,11}(:,2),10,'filled');
hold on
scatter(cell1{1,14}(:,1),cell1{1,14}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r');
hold on
title('amplitude-frequency-up&down-3-02'),
xlabel('frequency(Hz)'), ylabel('amplitude(mmH20)'), axis([95 inf
-inf inf]), legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up&down_3_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up&down_3_02.bmp');
hold off

```

```

    case 'all positions'

%oles oi 8eseis mazi upstream, vanna01
f1=fit(cell1{1,1}(:,1)',cell1{1,1}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,3}(:,1)',cell1{1,3}(:,2)', 'PCHIP');
f3=fit(cell1{1,4}(:,1)',cell1{1,4}(:,2)', 'PCHIP');
f4=fit(cell1{1,5}(:,1)',cell1{1,5}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,1}(:,1),cell1{1,1}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,3}(:,1),cell1{1,3}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,4}(:,1),cell1{1,4}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,5}(:,1),cell1{1,5}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r'), plot(f3,'g'), plot(f4,'y');
hold on
title('amplitude-frequency-up-01'),          xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'),          axis([95      inf      -inf      inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_01.bmp');
hold off

%oles oi 8eseis mazi downstream, vanna01
%ble(0),red(1),green(2),yellow(3)
f1=fit(cell1{1,2}(:,1)',cell1{1,2}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,6}(:,1)',cell1{1,6}(:,2)', 'PCHIP');
f3=fit(cell1{1,7}(:,1)',cell1{1,7}(:,2)', 'PCHIP');
f4=fit(cell1{1,8}(:,1)',cell1{1,8}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,2}(:,1),cell1{1,2}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,6}(:,1),cell1{1,6}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,7}(:,1),cell1{1,7}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,8}(:,1),cell1{1,8}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r'), plot(f3,'g'), plot(f4,'y');
hold on
title('amplitude-frequency-down-01'),          xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'),          axis([95      inf      -inf      inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_01.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_01.bmp');
hold off

%oles oi 8eseis mazi upstream, vanna02
f1=fit(cell1{1,1}(:,1)',cell1{1,1}(:,2)', 'PCHIP');
f2=fit(cell1{1,9}(:,1)',cell1{1,9}(:,2)', 'PCHIP');
f3=fit(cell1{1,10}(:,1)',cell1{1,10}(:,2)', 'PCHIP');
f4=fit(cell1{1,11}(:,1)',cell1{1,11}(:,2)', 'PCHIP');
scatter(cell1{1,1}(:,1),cell1{1,1}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,9}(:,1),cell1{1,9}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,10}(:,1),cell1{1,10}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,11}(:,1),cell1{1,11}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r'), plot(f3,'g'), plot(f4,'y');
hold on

```

```

title('amplitude-frequency-up-02'),          xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'),          axis([95      inf      -inf      inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_up_02.bmp');
hold off

%oles oi 8eseis mazi downstream, vanna02
f1=fit(cell1{1,2}(:,1),'cell1{1,2}(:,2)','PCHIP');
f2=fit(cell1{1,12}(:,1),'cell1{1,12}(:,2)','PCHIP');
f3=fit(cell1{1,13}(:,1),'cell1{1,13}(:,2)','PCHIP');
f4=fit(cell1{1,14}(:,1),'cell1{1,14}(:,2)','PCHIP');
scatter(cell1{1,2}(:,1),cell1{1,2}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,12}(:,1),cell1{1,12}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,13}(:,1),cell1{1,13}(:,2),10,'filled'),
scatter(cell1{1,14}(:,1),cell1{1,14}(:,2),10,'filled');
hold on
plot(f1,'b'), plot(f2,'r'), plot(f3,'g'), plot(f4,'y');
hold on
title('amplitude-frequency-down-02'),          xlabel('frequency(Hz)'),
ylabel('amplitude(mmH20)'),          axis([95      inf      -inf      inf]),
legend('off');
hold on
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_02.fig'),
saveas(gcf,'amplitude_frequency_down_02.bmp');
hold off
end
end

```

Εδώ έχουμε τη δημιουργία όλων των διαγραμμάτων του πειράματος 2. Ξανά, χωρίζουμε τον κώδικα σε επιμέρους κομμάτια με την εντολή switch case για να εξετάζεται κάθε περίπτωση και να διαπιστώνονται τυχόντα λάθη.

Image processing 1

Εδώ ο κώδικας είναι παρόμοιος με τον κώδικα image processing του πειράματος 1, με τη διαφορά ότι προστέθηκαν κάποιες διορθώσεις σε προβλήματα που εμφανίστηκαν σε κάποιες περιπτώσεις (blurring, low intensity contrast). Οι διορθώσεις αυτές βρίσκονται στο σημείο του κώδικα που είναι σημειωμένο σαν comment το "filtro sthn antlia 2 (πείραμα 2)". Αυτές οι διορθώσεις δεν ισχύουν για όλες τις περιπτώσεις διότι γίνονταν δοκιμαστικά και δεν έχουν καταγραφεί με ένα σαφώς ορισμένο προγραμματιστικό τρόπο.

Image processing 2

```

%%
filename='pos%d.bmp';
nf=15;

```

```

yup=zeros(nf,1);

```

```

        ydown=zeros (nf,1);
        yuppxl=zeros (nf,1);
        ydownpxl=zeros (nf,1);
        A=zeros (nf,1);

for i=1:nf
    if i<7
        a=0.027;
        c=8.7;
        k=236;
    elseif i>12
        a=0.027;
        c=8.7;
        k=173;
    else
        a=0.027;
        c=8.7;           %8.7 best value
        k=344;
    end

        I=imread(sprintf(filename,i));
        %Y=rgb2grey(I);
        bw=im2bw(I,0.5);
        Ifilled=imfill(bw,'holes');

        idx=find(bw(:,k)==1);
        yuppxl(i,1)=idx(1);
        ydownpxl(i,1)=idx(end);
        yup(i,1)=(576-idx(1))*a-c;
        ydown(i,1)=(576-idx(end))*a-c;

        %A(:,1)=yup-ydown;
end
%%
A(:,1)=yup-ydown;
file=fopen('width.txt','w');
fprintf(file,'%6.4f\r\n',A);

```

Αυτός ο κώδικας χρησιμοποιήθηκε ως εναλλακτικό κομμάτι των πιο μεγάλων κώδικων image processing, όπου αυτό ήταν δυνατό, δηλαδή όπου η εικόνα ήταν αρκετά καθαρή. Ο συγκεκριμένος κώδικας μετατρέπει την εικόνα σε binary (im2bw), και επιτρέπει τον ακριβή ορισμό του περιγράμματος του αγωγού. Για να λειτουργήσει καλά πρέπει να υπάρχει έντονη αντίθεση φωτεινότητας μεταξύ αγωγού και background.

FFT

```

Fs=150;
nfft=length(cell1{1,1});
nfft2=2^nextpow2(nfft);
xfft=Fs*(0:(nfft2/2)-1)/nfft2;
for k=1:nf
    ff=fft(cell1{1,k}(:,2),nfft2);
    fff=ff(1:nfft2/2);
    subplot(2,1,1);

```

```

    plot(cell1{1,k}(:,1),cell1{1,k}(:,2),'b');
    title(sprintf(filename8,j(k))),          xlabel('time(s)'),
ylabel('Pressure(mmH2O)');
    subplot(2,1,2)
    plot(xfft,abs(fff),'b');
    title(sprintf(filename9,j(k))),          xlabel('Frequency(Hz)'),
ylabel('Normalised Amplitude');
    %axis([-inf inf -inf 100]);
    saveas(gcf,sprintf(filename10,j(k))),
saveas(gcf,sprintf(filename11,j(k)));
    hold off

end

```

Τέλος, αυτός είναι ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε όλους τους μετασχηματισμούς Fast Fourier.

Βιβλιογραφία-References

- Albertson, M. L., J. R. Barton, and D. B. Simons (1960). Fluid Mechanics for Engineers. *Prentice-Hall International, Co., Englewood Cliffs*. 290.
- Alexander, R.S. (1963). In Handbook of Physiology, Circulation. *The American Physiological Society, Washington, D. C.* 2:1075.
- Brecher, G. A. (1956). Venous Return. *Grune and Stratton, Inc., New York*. 54.
- Brower, R. W., and Scholten, C. (1975). Experimental evidence on the mechanism for the instability of flow in collapsible vessels. *Med. Biol. Eng., vol. 13(6), pp. 839–845*.
- Cancelli, C., and Pedley, T. J. (1985). A separated-flow model for collapsible-tube oscillations. *J. Fluid Mech., vol. 157, pp. 375–404*.
- Carpenter, P. W., and Pedley, T. J. (2003). Flow past highly compliant boundaries and in collapsible tubes. *Proceedings of the IUTAM Symposium held at the University of Warwick, UK, 26-30 March 2001*.
- Conrad, W. A. (1969). Pressure-flow relationships in collapsible tubes. *IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-16(4), pp. 284–295*.

- Heil, M., and Boyle, J. (2010). Self-excited oscillations in three-dimensional collapsible tubes: Simulating their onset and large-amplitude oscillations. *J. Fluid Mech.* (2010), vol. 652, pp. 405-426.
- Heil, M., and Jensen, O. E. (2003). Flows in deformable tubes and channels-Theoretical models and biological applications. In *Flow past highly compliant boundaries and in collapsible tubes* (ed. Carpenter P. W. and Pedley T. J.)
- Heil, M., and Waters, S. (2006). Transverse flows in rapidly oscillating, elastic cylindrical shells. *J. Fluid Mech.*, Vol. 547, pp. 185-214.
- Heil, M., and Waters, S. (2008). How rapidly oscillating tubes extract energy from a viscous mean flow. *J. Fluid Mech.*, vol. 601, pp. 199-227.
- Holt, J. P. (1941). *Amer. J. Physiol.* pp. 134-292.
- Jensen, O. E. (1992). Chaotic oscillations in a simple collapsible-tube model. *J. Fluids Struct.*, vol. 114(1), pp. 55-59.
- Jensen, O. E., and Heil, M. (2003). High-frequency self-excited oscillations in a collapsible-channel flow. *J. Fluid Mech.*, Vol. 481, pp. 235-268.
- Kamm, R. G., and Shapiro, A. H. (1979). Unsteady flow in a collapsible tube subjected to external pressure or body forces. *J. Fluid Mech.*, vol. 95(01), pp. 1-78.
- Kanarchos, A., and Antoniadis, I. (1998). Δυναμική μηχανών. *Papasotiriou*, vol. 1, pp. 1.1-1.6.
- Katz, A. I., Yu Chen, and Moreno, A. H. (1969). Flow through a collapsible tube. Experimental analysis and mathematical model. *Biophysical Journal.*, vol. 9, pp. 1261-1278.
- Katz, A. I. (1968). A Model for the Dynamics of the Inferior Vena Cava of the Terrestrial Mammalian Cardiovascular System. *Ph.D, Thesis. Rutgers University, New Brunswick.*
- Knowlton, F. P., and Starling, E. H. (1912). The influence of variations in temperature and blood pressure on the performance of the isolated mammalian heart. *J. Physiol.*, vol. 44, pp. 206-219.
- Luo, X. Y., and Pedley, T. J. (1996). A numerical simulation of steady flow in a 2-D collapsible channel. *J. Fluids Struct.*, vol. 9(2), pp. 149-174.

- Luo, X. Y., and Pedley, T. J. (1998). The effects of wall inertia on flow in a two-dimensional collapsible channel. *J. Fluid Mech.*, vol. 363, pp. 253–280.
- Kouanis, K., and Mathioulakis, D. S. (1999). Experimental flow study within a self oscillating collapsible tube. *J. Fluids Struct.*, vol. 13(1), pp. 61–73.
- Mathioulakis, D. S., and Anagnostopoulos, I., and Riziotis, V. (2015). Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική (Applies Fluid Mechanics). *NTUA*, vol. 1, pp. 1.1-1.16.
- Rodbard, S. (1955). Circulation., pp. 11-280.
- Ryder, H. W., Molle W. E., and Ferris, JR, E. B. (1944). *J. Clin. Invest.*, pp. 23-333.
- Shapiro, A. H. (1977). Steady flow in collapsible tubes. *Trans ASME J. Biomech. Eng.*, vol. 99(3), pp. 126–147.
- Whittaker, R. J., Heil, M., Jensen, O. E., and Waters, S. L. (2010). Predicting the onset of high frequency self-excited oscillations in elastic-walled tubes. *Proc. R. Soc. A*, vol. 466, pp. 3635–3657.
- Yasemides, D., Argyris, A., and Mathioulakis, D. S. (2016). Transitory and periodic flow in a self-oscillating collapsible tube: Experimental study. *J. Energy Eng.*, pp. 04017001.1-04017001.11.