



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

---

*Πειραματική μελέτη ασταθειών της ροής  
στο εσωτερικό εύκαμπτου σωλήνα*

*Experimental study of flow instabilities  
inside a collapsible tube*

---

Διπλωματική Εργασία

Μαρία Γ. Χριστοδουλοπούλου

Επίβλεψη

Δημήτριος Σ. Μαθιουλάκης,  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	1
Abstract.....	2
Εισαγωγή.....	3

## Κεφάλαιο 1

### Προηγούμενες σχετικές μελέτες

1.1. Εργασία των Adolph I. Katz, Yu Chen, Augusto H. Moreno (1969).....	5
1.2. Εργασία των X.L. Yang, Y.Liu, J.M. Yang (2007).....	24
1.3. Εργασία των Δ.Μαθιουλάκη, Δ.Κουνάδη (Συνέδριο,2009).....	36

## Κεφάλαιο 2

### Περιγραφή πειραματικής διάταξης

2.1. Πειραματική διάταξη.....	44
2.2. Όργανα μετρήσεων.....	47
2.3. Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV) .....	49

## Κεφάλαιο 3

### Λαδιδικασία εκπόνησης των πειραμάτων και αποτελέσματα

3.1. Πείραμα 1 <sup>ο</sup> .....	51
3.2. Πείραμα 2 <sup>ο</sup> .....	74
3.3. Πείραμα με διάλυμα NaI.....	106

## **Κεφάλαιο 4**

<b><u>Συμπεράσματα</u></b> .....	<b>109</b>
----------------------------------	------------

## **Παράρτημα Α**

<b><u>Εύρεση περιγράμματος αγωγού</u></b> .....	<b>110</b>
---	------------

<b><u>Κώδικες MATLAB</u></b> .....	<b>113</b>
------------------------------------	------------

<b><u>Βιβλιογραφία</u></b> .....	<b>116</b>
----------------------------------	------------

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε πειραματικά η αστάθεια της ροής νερού στο εσωτερικό εύκαμπτου, διαφανούς, λεπτότοιχου αγωγού διαμέτρου 8mm και μήκους 45 mm, κατασκευασμένου από ελαστομερές σιλικονούχο υλικό (Sylgard 184). Υπό συγκεκριμένες συνθήκες ο αγωγός τίθεται σε αυτοταλάντωση (αυξομειούμενης της διατομής του αγωγού), ενώ ταυτόχρονα η παροχή του ρευστού παραμένει σταθερή. Υπό τις συνθήκες αυτές, με τη βοήθεια μετρητικής διάταξης 2D-PIV, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του πεδίου ταχυτήτων στο εσωτερικό του αγωγού συναρτήσει του χρόνου στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του (ο διαμήκης άξονας του αγωγού ήταν οριζόντιος). Μέσω επεξεργασίας των ληφθεισών εικόνων του αγωγού προσδιορίστηκε το περίγραμμά του συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές τις πίεσης ανάντι-κατάντι του αγωγού. Η ροή, λίγο πριν αρχίσει η περιοδική αυτοταλάντωση του αγωγού, ήταν ασταθής δημιουργούμενης μιας ελαφρά ασύμμετρης στένωσης περί το μέσον του μήκους του αγωγού, μέγιστης γωνίας περίπου  $20^\circ$ , η οποία ταλαντωνόταν κατά μήκος του αγωγού. Στο αποκλίνον τμήμα της στένωσης (διαχύτης) εμφανίζονταν περιοχές αποκολλημένης ροής ή περιοχές χαμηλών ταχυτήτων οι οποίες μετατοπίζονταν από την μια πλευρά της διατομής του αγωγού στην αντιδιαμετρική της χωρίς συστηματικό τρόπο. Αντιθέτως, ανάντι της στένωσης, η ροή ήταν προσκολλημένη χωρίς ασυμμετρίες.

## **ABSTRACT**

In the present diploma thesis, flow instabilities within an elastic, transparent, thin walled tube were experimentally examined. The tube was made of an elastomer material (Sylgard 184). Under certain pressure conditions, self-oscillations were induced in the tube, although the flow rate remained constant. Using 2D-PIV, the axial and radial velocity components were measured on a vertical tube symmetry plane. Moreover, the tube wall coordinates along the tube axis were calculated for various upstream-downstream pressure values. Generally, the flow was unstable when the tube was on the “verge” of oscillation. In the latter case, a “neck” was created and backflow regions were observed in the diffuser part of the neck being moved from one part to the opposite part of the tube wall with no systematic way. In contrast, the flow was attached and symmetric upstream of the stenosis.

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η ροή στο εσωτερικό ενός εύκαμπτου αγωγού χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού, δηλαδή από το πώς επηρεάζεται το ρευστό λόγω της κίνησης των τοιχωμάτων του αγωγού αλλά και το αντίστροφο, δηλαδή ποια είναι η κίνηση και παραμόρφωση του αγωγού λόγω των ασκούμενων δυνάμεων από το ρευστό. Η παραπάνω αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη όταν ο αγωγός αρχίζει να αυτοταλαντώνεται σχηματίζοντας μια στένωση περί το μέσον του μήκους του. Η ταλάντωση του αγωγού προκαλείται από τις μικρές διατοιχωματικές πιέσεις, δηλαδή μικρές διαφορές πίεσης εκατέρωθεν του τοιχώματος του αγωγού. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως σε βιορευστομηχανικές εφαρμογές. Κάποιες από αυτές τις περιπτώσεις είναι:

- Η ροή του αίματος στις αρτηρίες. Για παράδειγμα στις ενδομυοκαρδιακές στεφανιαίες αρτηρίες κατά τη συστολή της αριστερής κοιλίας ή όταν τους ασκείται εξωτερική πίεση, όπως στην πιεσομετρία.
- Η ροή του αίματος στις φλέβες. Όταν βρίσκονται πάνω από το ύψος της καρδιάς και η εσωτερική πίεση είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής λόγω της βαρύτητας ή όταν πιέζονται από τους συστελλόμενους σκελετικούς μύες, όπως στη μυϊκή αντλία που επιστρέφει το αίμα από τα πόδια στην καρδιά.
- Η ροή στην ουρήθρα. Κατά τη διαδικασία της ούρησης εμφανίζεται το φαινόμενο σταθεροποίησης της παροχής.

- Η ροή στους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος. Για παράδειγμα η παροχή αέρα στους μεγάλους ενδοθωρακικούς αεραγωγούς του πνεύμονα κατά τη βεβιασμένη εκπνοή ή το βήχα. Επίσης και η ροή στα πνευμονικά τριχοειδή αγγεία.
- Οι ταλαντώσεις που προκαλούνται κατά τη ροή σε διάφορες αναπνευστικές εφαρμογές, όπως το ροχαλιτό, ο συριγμός και η φώνηση.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική μελέτη ασταθειών της ροής διαμέσου εύκαμπτου αγωγού λίγο πριν τεθεί σε περιοδική αυτοταλάντωση.

Η εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Παρουσίαση προηγούμενων σχετικών μελετών.

Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Περιγραφή της πειραματικής διάταξης.

Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Διαδικασία εκπόνησης του πειράματος και αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κύριο Δ. Μαθιουλάκη για την πολύ σημαντική καθοδήγησή του, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατό να προκύψει η παρούσα εργασία.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον κ. Δ. Γιασεμίδη, υποψήφιο διδάκτορα, για την σημαντική βοήθεια που παρείχε σχετικά με τη μέθοδο PIV καθώς και με τη χρήση του λογισμικού MATLAB.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

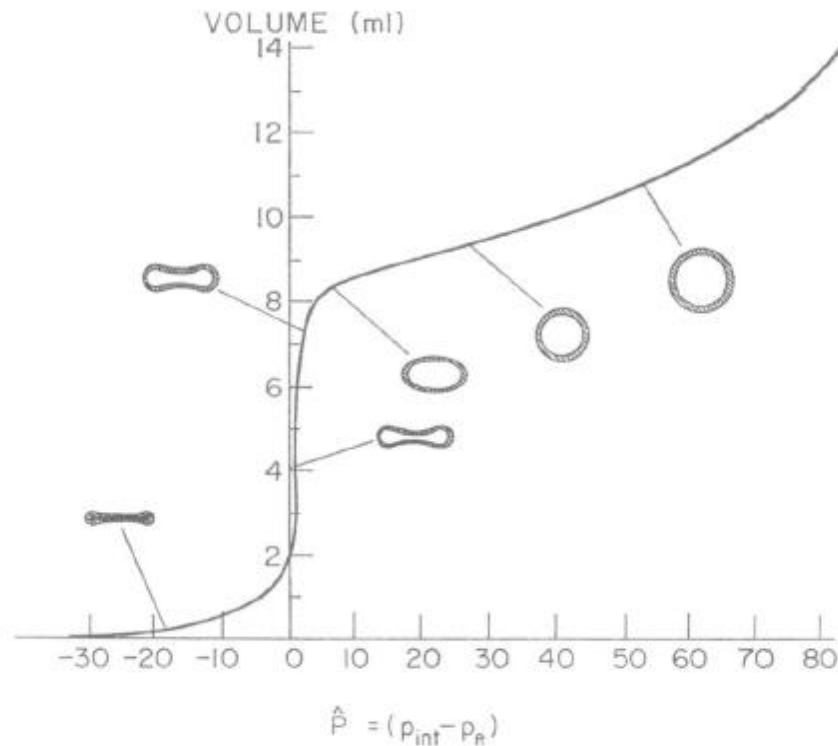
## ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

1.1. Adolph I. Katz, Yu Chen, Augusto H. Moreno (1969)

### ΡΟΗ ΜΕΣΑ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΑΓΩΓΟ

Οι Adolph I. Katz, Yu Chen, Augusto H. Moreno μελέτησαν τη ροή μέσα σε εύκαμπτο αγωγό, ο οποίος όταν η διαφορά πίεσης ( $p_{in}-p_{out}$ ) πλησίαζε το μηδέν συρρικνωνόταν. Από αυτή τη διαφορά πίεσης εξαρτάται η διατομή του αγωγού, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τη γεωμετρία της ροής. Μέσω πειραματικών και υπολογιστικών διαδικασιών προσδιόρισαν αυτή τη σχέση καθώς και τη σχέση της ενέργειας που χάνεται από το ρευστό με τη διατομή του σωλήνα.

Συγκεκριμένα, επικέντρωσαν το ενδιαφέρον τους σε αγωγούς με πολύ λεπτό τοίχωμα, οι οποίοι φαίνονταν να έχουν περιοχές με πολύ μικρή αντίσταση στις μηχανικές παραμορφώσεις. Δηλαδή, όταν ο αγωγός ήταν άδειος ή η εξωτερική πίεση ήταν ίση με την εσωτερική, η διατομή δεν παρέμενε κυλινδρική αλλά 'έπαιρνε' ένα ελλειπτικό σχήμα. Αντίστροφα, για να επαναφέρουν τη διατομή του αγωγού σε κυλινδρικό σχήμα, αρκούσε μια μικρή αύξηση της εσωτερικής πίεσης για να αυξηθεί κατά πολύ ο όγκος. Για πιέσεις πολύ μεγαλύτερες απ' αυτή, ο όγκος αυξανόταν ελάχιστα. Ο αγωγός συμπεριφερόταν σαν κάθε ελαστικός αγωγός που λόγω των ιδιοτήτων του υλικού του αντιστέκεται στην αύξηση της διαμέτρου του. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.1.1.



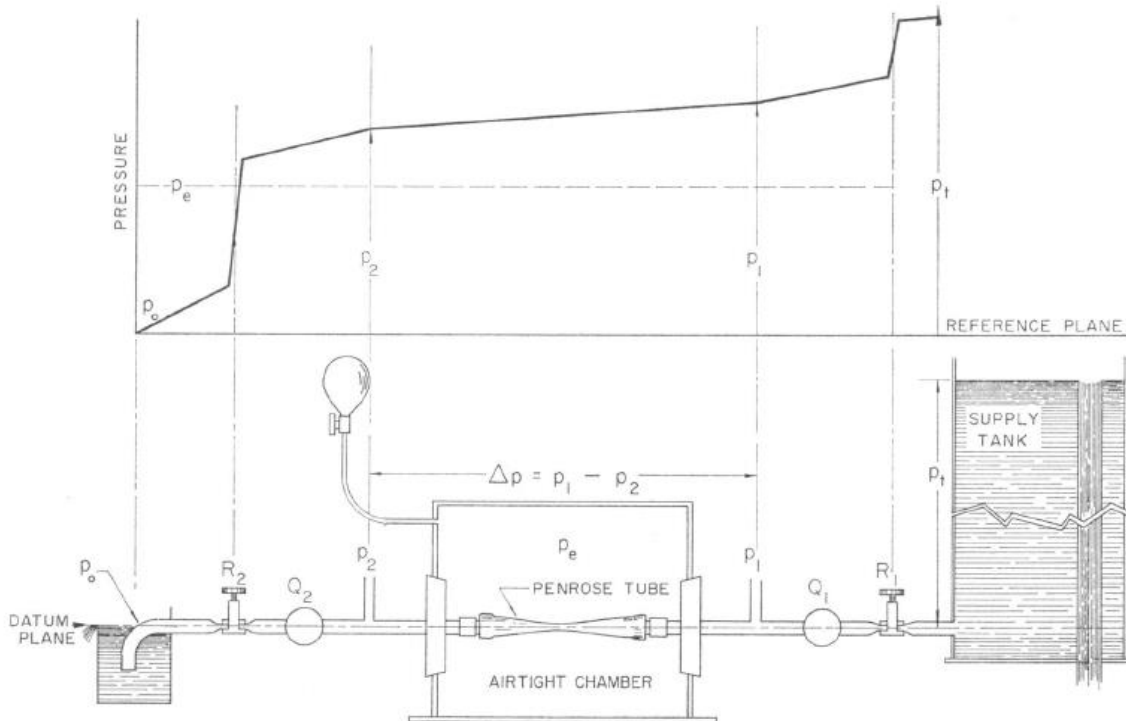
Σχήμα 1.1.1: Η διαφορά πίεσης και το πώς διαμορφώνεται κάθε φορά η διατομή του αγωγού.

Οι εύκαμπτοι αυτοί αγωγοί θα μπορούσαν να προσομοιώνουν τις φλέβες καθώς και τις αναπνευστικές οδούς των θηλαστικών, στις οποίες η πίεση του ρευστού εσωτερικά είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή εξωτερικά. Επομένως, η διαφορά πίεσης εσωτερικά-εξωτερικά (διατοιχωματική πίεση) ή κατά μήκος του αγωγού ήταν ένα ενδιαφέρον φαινόμενο για μελέτη.

Από προηγούμενα πειράματα, οι Adolph I. Katz, Yu Chen, Augusto H. Moreno ‘κράτησαν’ συνοπτικά τα εξής:

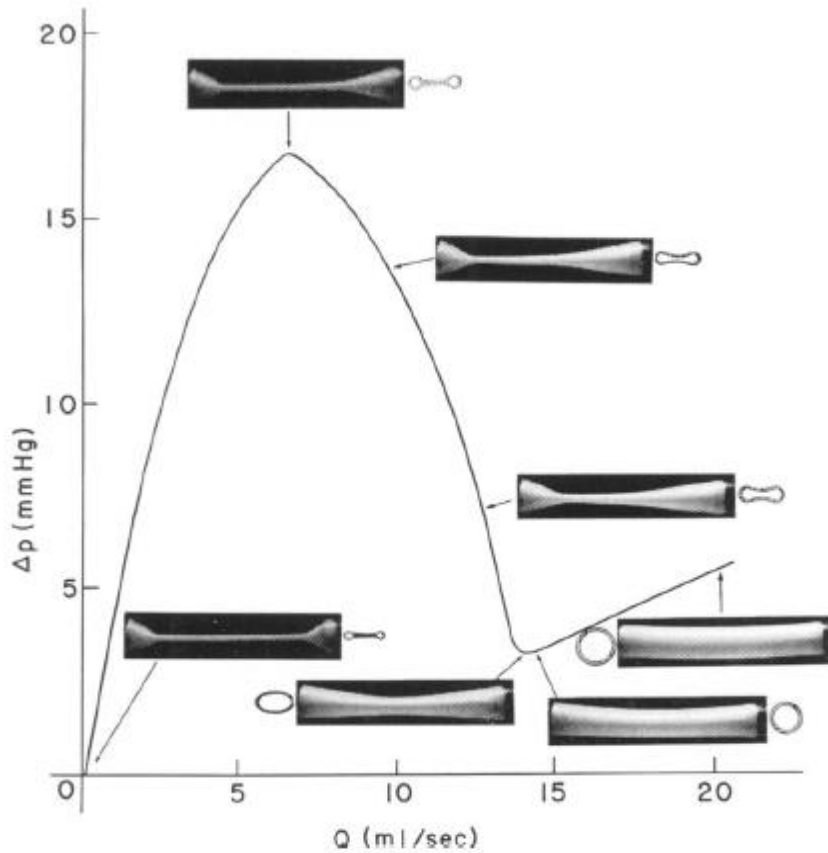
- i. Αυξάνοντας το ύψος της στάθμης του δοχείου ανάντι του αγωγού και επομένως της πίεσης παροχής, αυξάνεται η ροή. Όμως, μειώνοντας την πίεση εξόδου από τον αγωγό, η ροή μπορεί να αυξηθεί, να μείνει σταθερή ή και να μειωθεί, αφού εξαρτάται από το αν ο αγωγός μένει ανοικτός ή κλείνει λόγω της διαφοράς πίεσης.
- ii. Αυξάνοντας την πίεση στο δοχείο που περιβάλλει τον αγωγό, η ροή μειώνεται.
- iii. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ο αγωγός αυτοταλαντώνεται με συχνότητα και τρόπο που εξαρτώνται από την ελαστικότητα του υλικού του τοιχώματος του, την παροχή και την πίεση εξόδου.

Στο Σχήμα 1.1.2 φαίνεται ο αγωγός, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από latex, έχει πάχος 0.16cm, διάμετρο 1.23cm, και λόγο μήκους/πλάτους 7:1. Η διατομή στα δύο άκρα του παραμένει σταθερή γιατί είναι συνδεδεμένος με δύο άκαμπτους σωλήνες. Το διαφανές αεροστεγές δοχείο μέσα στο οποίο τοποθετήθηκε ο αγωγός εξυπηρετεί στη ρύθμιση της εξωτερικής πίεσης.



Σχήμα 1.1.2. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης, όπου R1 και R2 ρυθμιστικές βάνες, Q η παροχή και  $p_c$  η πίεση στον εύκαμπτο αγωγό.

Στο Σχήμα 1.1.3 φαίνεται πως αλλάζοντας με σταθερό ρυθμό την παροχή μεταβαλλόταν και η διαφορά πίεσης στα άκρα του σωλήνα ( $\Delta p = p_1 - p_2$ ). Αυτό συνέβαινε είτε μεταβάλλοντας το ύψος της στάθμης στο δοχείο παροχής είτε αλλάζοντας την παροχή μέσω της βάνας R1 ανάντι του αγωγού. Οι φωτογραφίες δείχνουν τις αλλαγές στο σχήμα και τη διατομή του σωλήνα.

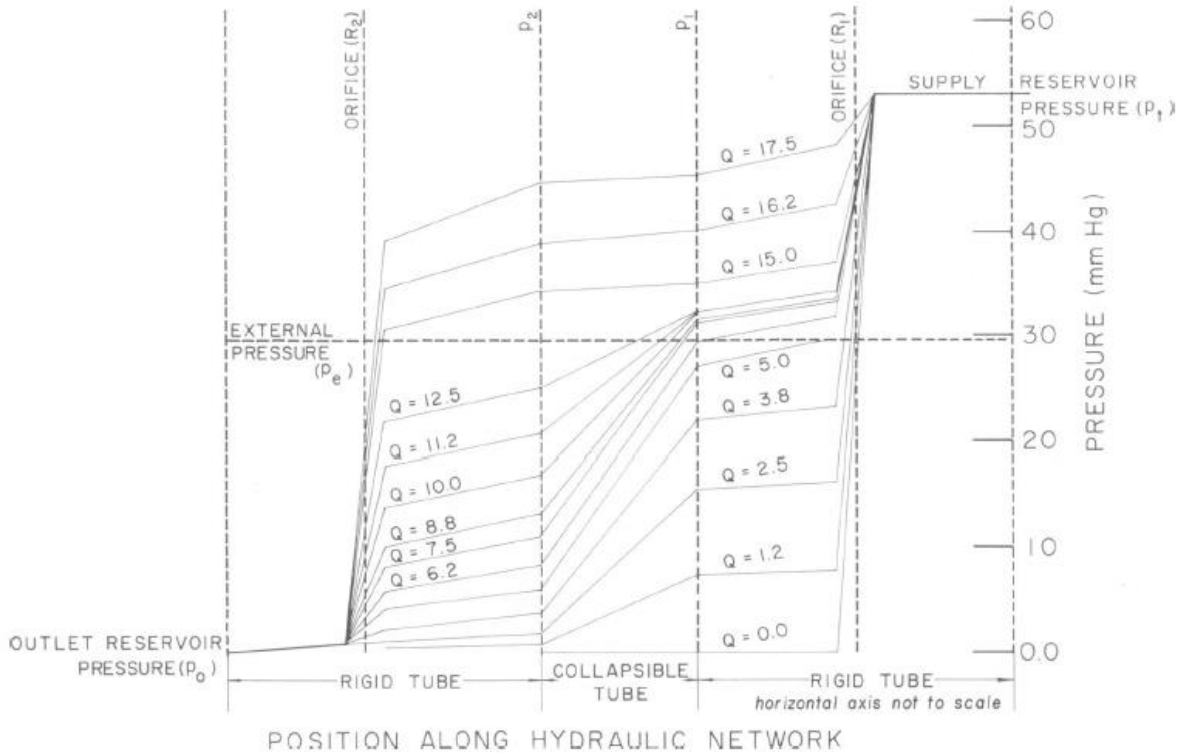


Σχήμα 1.1.3: Μεταβολή της διαφοράς πίεσης σε σχέση με την παροχή.

Στο Σχήμα 1.1.4 φαίνεται αναλυτικότερα η παροχή και η πίεση στις δύο βάνες, ανάντι ( $p_1$ ) και κατάντι ( $p_2$ ). Η εξωτερική πίεση παραμένει σταθερή στα 30mmHg. Αλλάζοντας τον συντελεστή αντίστασης R1 ( $\frac{mmHg}{ml/sec^2}$ ), οι πιέσεις  $p_1$ ,  $p_2$  άλλαζαν, όπως και η πίεση  $p_c$ , που είναι η πίεση σ' ένα σημείο μεταξύ των R1 και R2, τέτοια ώστε  $p_2 < p_c < p_1$ .

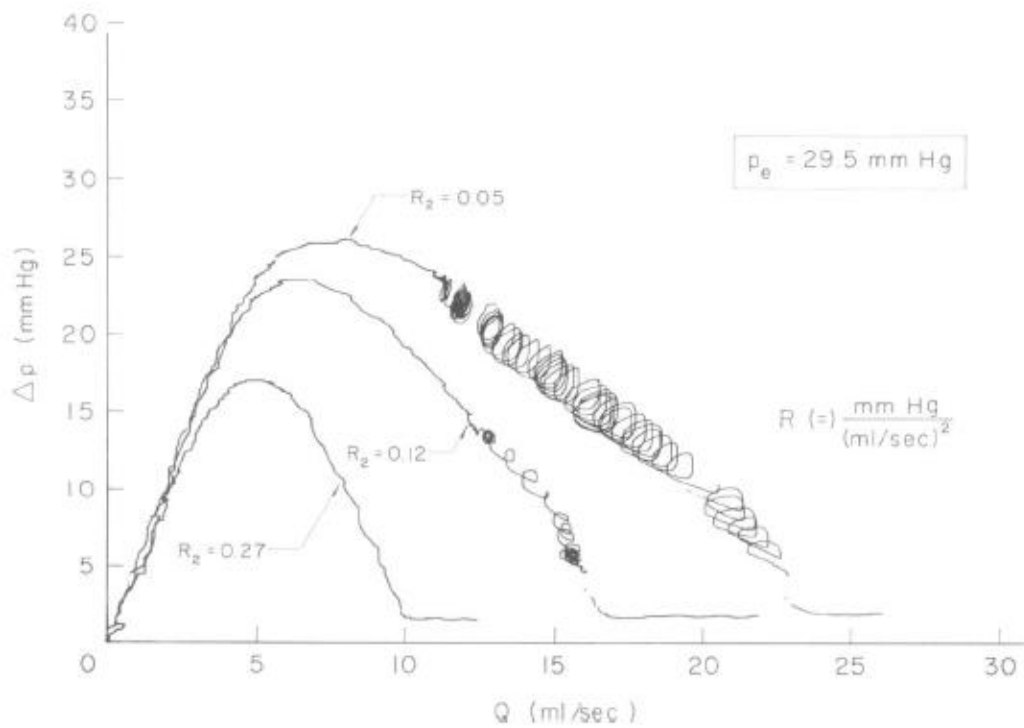
Σε μεγάλες παροχές, παρατηρήθηκε πως η  $p_c$  έπαιρνε τιμές μεγαλύτερες της εξωτερικής πίεσης,  $p_e$ , ο αγωγός συνέχιζε να είναι σε διαστολή και η διαφορά πίεσης,  $\Delta p$ , ήταν μικρή. Καθώς η παροχή μειωνόταν, η  $p_c$  'έπεφτε' και αυτή, ώσπου έφτανε τη τιμή της  $p_e$ .

Σε αυτό το σημείο, ο αγωγός άρχιζε και συρρικνωνόταν, και η  $\Delta p$  αυξανόταν πολύ. Από εκεί κι έπειτα, μικρές αυξήσεις στην  $R1$  μείωναν ελάχιστα την παροχή καθώς ο σωλήνας παρέμενε συνεπτυγμένος και η  $\Delta p$  συνέχιζε ν' αυξάνεται. Στην περιοχή αυτή η  $p_1$  παρέμενε σταθερή και η  $p_2$  μειωνόταν σημαντικά. Με περαιτέρω μείωση, όμως, της παροχής,  $Q$ , από μία τιμή και έπειτα, η  $\Delta p$  μειωνόταν ανάλογα με αυτή, μέχρι να μηδενιστούν και οι δύο.



Σχήμα 1.1.4: Πίεση και παροχή στις δύο βάνες ανάλογα με τον συντελεστή απωλειών  $R1$ , με σταθερή εξωτερική πίεση.

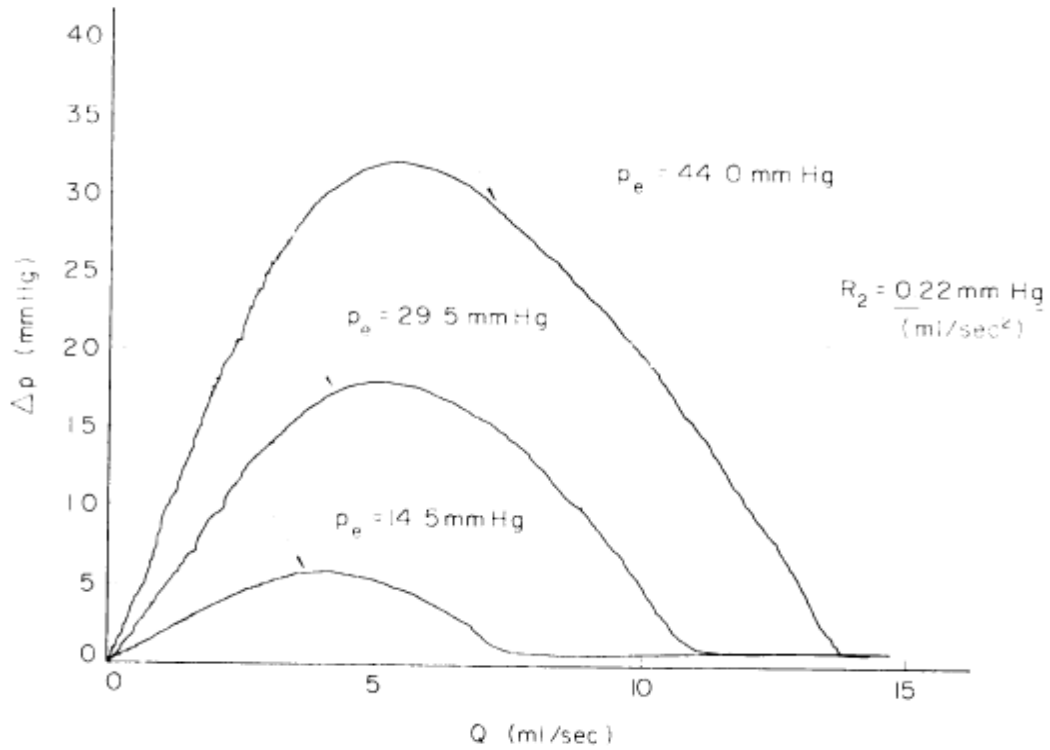
Στο Σχήμα 1.1.5 φαίνεται πάλι η σχέση  $\Delta p$ - $Q$ , μεταβάλλοντας όμως αυτή τη φορά, την  $R2$  και κρατώντας σταθερή την  $p_e$ . Για μικρές τιμές της  $R2$ , η πτώση της πίεσης είναι επίσης μικρή και η πίεση μέσα στον αγωγό είναι σχεδόν ίση με την εξωτερική. Έτσι, η συρρίκνωση αρχίζει να εμφανίζεται σε μεγάλες παροχές. Το αντίθετο συμβαίνει για μεγάλες τιμές της  $R2$ , όπου η πίεση στον αγωγό αυξάνεται και τότε η συρρίκνωσή του αρχίζει να εμφανίζεται σε μικρότερες παροχές. Η μέγιστη τιμή της  $\Delta p$  μειώνεται όσο αυξάνεται η  $R2$ . Για τις μικρότερες τιμές της  $R2$  συνέβαιναν αυτοταλαντώσεις στην περιοχή της αρνητικής κλίσης. Μπορούσε όμως πάντα να βρεθεί μια κρίσιμη τιμή της  $R2$  για την οποία αυτές θα έπαυαν.



Σχήμα 1.1.5: Πτώση πίεσης κατά μήκος της σωλήνωσης, με παράμετρο την παροχή  $Q$ , για σταθερή εξωτερική πίεση.

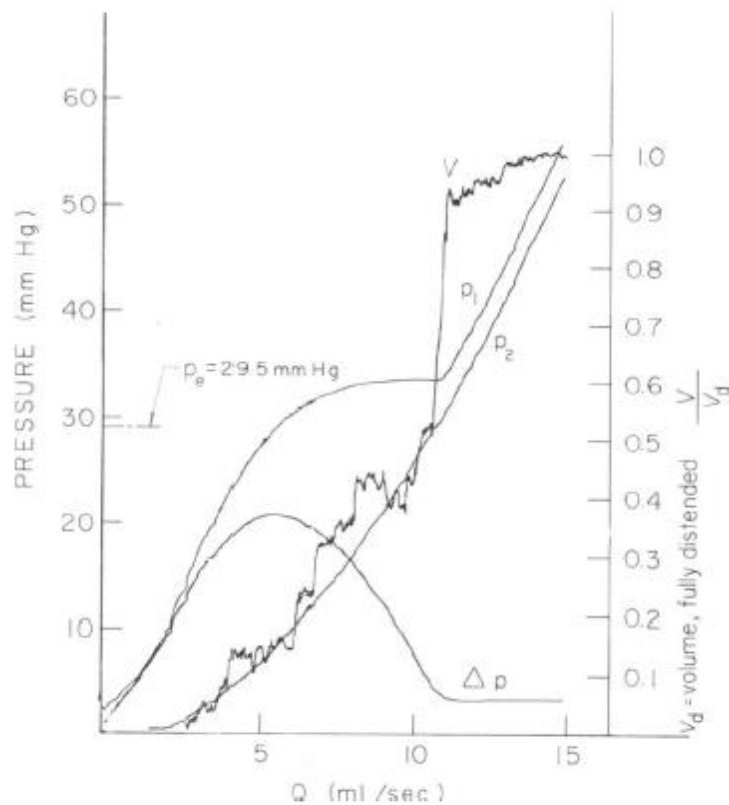
Στο Σχήμα 1.1.6, παρατηρούμε τις καμπύλες  $\Delta p$ - $Q$  για σταθερό  $R_2$  αλλά μεταβαλλόμενη εξωτερική πίεση. Αυξάνοντας την  $p_e$ , η συρρίκνωση του αγωγού εμφανίζεται σε μεγάλες παροχές.

Λόγω της μεγάλης αντίστασης στη ροή αλλά και της μεγάλης παροχής, η μέγιστη  $\Delta p$  αυξάνεται με την αύξηση της  $p_e$ .



Σχήμα 1.1.6: Πίεση και παροχή στις δύο βάνες ανάλογα με την εξωτερική πίεση, με σταθερό συντελεστή απωλειών  $R_2$ .

Στο Σχήμα 1.1.7, φαίνονται οι πιέσεις  $p_1$  και  $p_2$ , η διαφορά πίεσης  $\Delta p$  καθώς και ο όγκος  $V$  ως προς την παροχή  $Q$ .



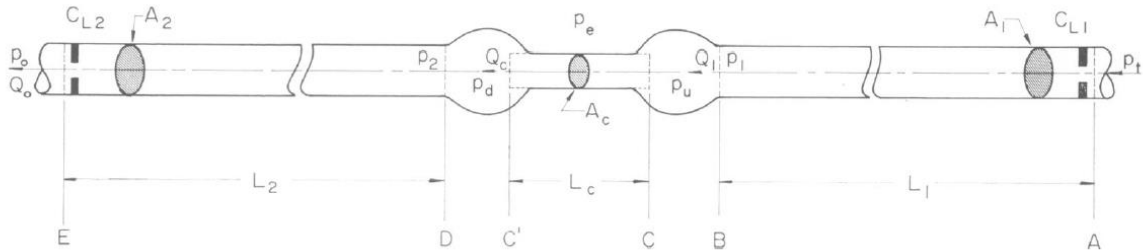
Σχήμα 1.1.7: Οι πιέσεις  $p_1$  και  $p_2$ , η διαφορά πίεσης  $\Delta p$  και ο όγκος  $V$  σε σχέση με την παροχή  $Q$ .

Επειδή οι καμπύλες  $\Delta p$ - $Q$  δείχνουν ότι η παροχή  $Q$  δεν εξαρτάται μονοσήμαντα από την πτώση πίεσης  $\Delta p$ , δεν μπορούσαν να προβλέψουν την παροχή ξέροντας την πτώση πίεσης και τις παραμέτρους του συστήματος, όπως έκαναν σε ένα γραμμικό υδραυλικό δίκτυο. Σε έναν εύκαμπτο αγωγό δεν έπρεπε να ξέρουν μόνο τα παραπάνω, αλλά και το σημείο λειτουργίας. Αυτό είναι τυπικό χαρακτηριστικό μη-γραμμικών συστημάτων.



## ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο Σχήμα 1.1.8 φαίνεται σχηματικά το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να περιγραφεί το εύκαμπτο τμήμα του αγωγού καθώς και τα σημαντικότερα επιμέρους τμήματα του υδραυλικού συστήματος. Ο ταλαντευόμενος αγωγός απαρτίζεται από τρία τμήματα: δύο μαλακά τμήματα BC και C'D, συνδεδεμένα με το εύκαμπτο τμήμα, C'C που έχει μεταβλητή διατομή ίδια σε όλο το μήκος του.



Σχήμα 1.1.8: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για να περιγραφεί το ταλαντευόμενο σύστημα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διατομή του αγωγού εξαρτάται από τη διατοιχωματική πίεση ( $\Delta p = p_{in} - p_{out}$ ). Συγκεκριμένα, όταν οι διατοιχωματικές πιέσεις ( $\widehat{P}_u = p_u - p_e$  και  $\widehat{P}_d = p_d - p_e$ ) είναι θετικές και  $\widehat{P}_u \approx \widehat{P}_d$ , ο αγωγός είναι τελείως ανοικτός και αντίθετα, όταν οι  $\widehat{P}_u$  και  $\widehat{P}_d$  πλησιάζουν το μηδέν, ο αγωγός ξεκινά να συρρικνώνεται.

Στο Σχήμα 1.1.7, παραπάνω, παρατηρούμε πως η πτώση της πίεσης είναι μικρή μέχρι ο όγκος του σωλήνα να 'πέσει' στο 40% της αρχικής του τιμής. Οπότε, πριν ο αγωγός συρρικνωθεί δεν έχει διαφορά αν χρησιμοποιούμε την  $\widehat{P}_u$  ή την  $\widehat{P}_d$  για να μεταβάλλουμε τη διατομή  $A_c$ . Όταν όμως ο αγωγός συρρικνωθεί, η  $\widehat{P}_u$  (δηλαδή η πίεση ανάντι), αυξάνεται και όταν έχει τέτοια τιμή έτσι ώστε η  $\widehat{P}_u$  να είναι θετική, αυξάνεται και η διατομή του αγωγού. Επομένως, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η διατομή  $A_c$  μεταβάλλεται συναρτήσει του  $\widehat{P}_u$ .

Στο τμήμα BC είναι πιθανές οι μεταβολές στη διατομή, και η ροή μπορεί να έχει τόσο ακτινική όσο και αξονική συνιστώσα. Η εξίσωση της συνέχειας (ή διατήρησης μάζας) για την ομοιόμορφη πίεση στο τμήμα BC είναι:

$$\frac{dV_u}{dt} = (Q_1 - Q_2) \quad (1.1.1)$$

όπου,

$V_u$  είναι ο όγκος του τμήματος BC και  $Q_1, Q_2$  οι παροχές στον άκαμπτο τμήμα AB και στο τμήμα CC' αντίστοιχα.

Ο όγκος του εύκαμπτου αγωγού είναι ανάλογος της διατοιχωματικής πίεσης  $\widehat{P}_u$ , οπότε

$$\frac{dV_u}{dt} = C_u \frac{d\widehat{P}_u}{dt} \quad (1.1.2)$$

όπου  $C_u = dV_u/d\widehat{P}_u$  η ενδοτικότητα του τμήματος.

Από τις (1) και (2) προκύπτει:

$$C_u \frac{d\widehat{P}_u}{dt} = (Q_1 - Q_2) \quad (1.1.3)$$

όπου  $\widehat{P}_u$  η διατοιχωματική πίεση ανάντι του ταλαντευόμενου αγωγού

$$\widehat{P}_u = p_u - p_e \quad (1.1.4)$$

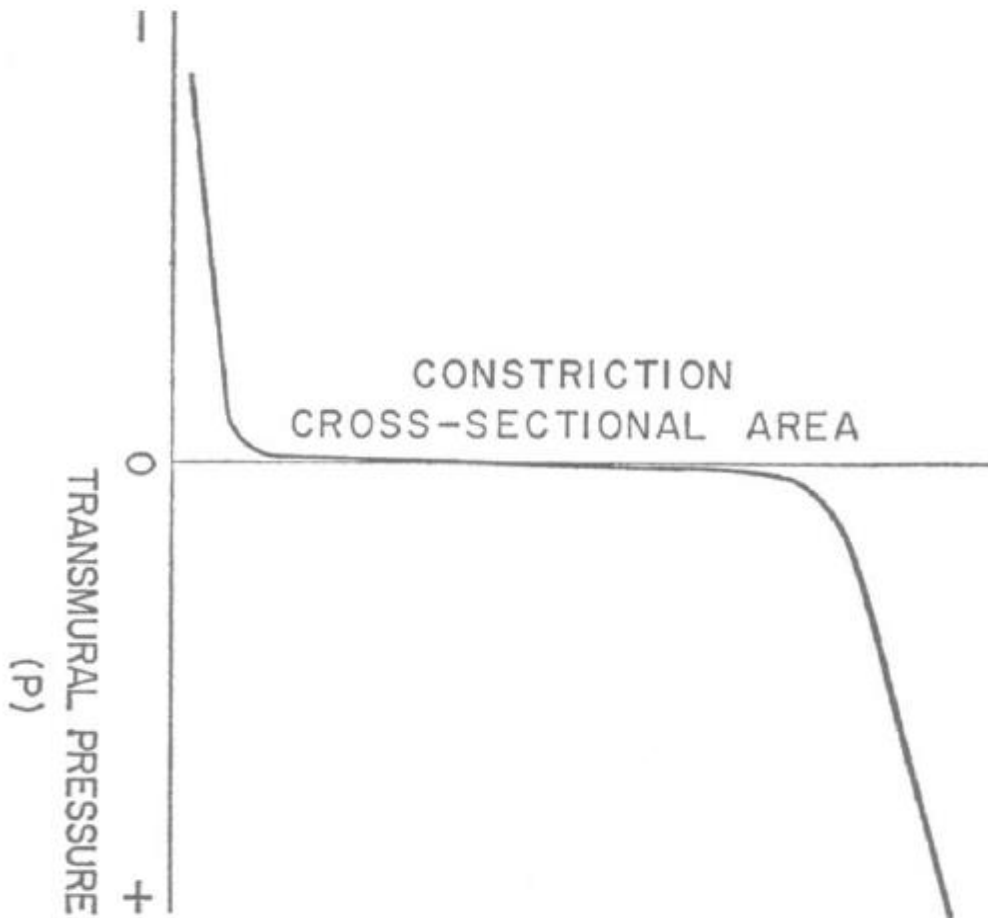
Αντίστοιχα για το τμήμα C'D:

$$C_d \frac{d\widehat{P}_d}{dt} = (Q_c - Q_2) \quad (1.1.5)$$

όπου  $\widehat{P}_d$  η διατοιχωματική πίεση κατάντι του εύκαμπτου αγωγού

$$\widehat{P}_d = p_d - p_e \quad (1.1.6)$$

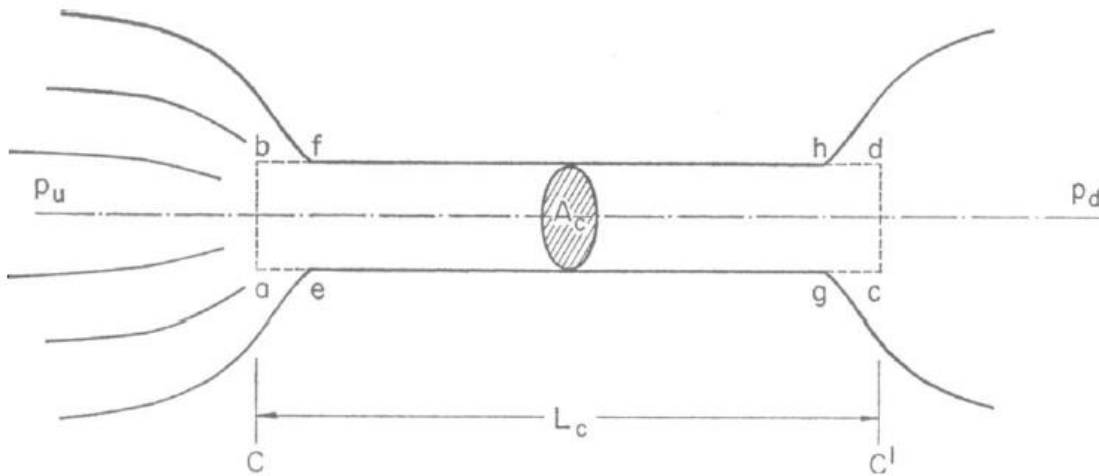
Στο Σχήμα 1.1.9 φαίνεται η σχέση της διατομής του αγωγού με τη διατοιχωματική πίεση.



Σχήμα 1.1.9: Διατοιχωματική πίεση και διατομή του αγωγού.

Για να βρεθεί η εξίσωση της ορμής στο τμήμα C'C αρχικά προσδιορίστηκε ο όγκος ελέγχου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.10, θεωρήθηκε το συρρικνωμένο τμήμα σαν κύλινδρος με μεταβαλλόμενη διατομή  $A_c$  και σταθερό μήκος  $L_c$ . Ανάντι του C'C, δηλαδή στο τμήμα BC, επικρατούσε εσωτερική πίεση  $p_u$  και αντίστοιχα στο C'D,  $p_d$ .

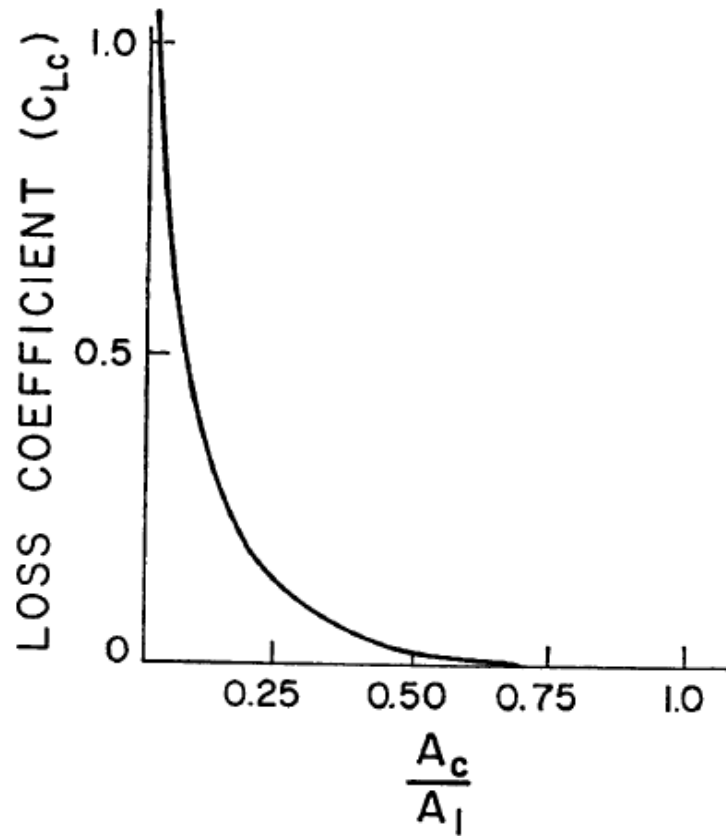
Ο όγκος ελέγχου επεκτάθηκε προς τις ανάντι και κατάντι κατευθύνσεις έως ότου οι πιέσεις στα άκρα του να γίνουν ίσες με τις  $p_u$  και  $p_d$  αντίστοιχα. Το τοίχωμα του αγωγού θεωρήθηκε σαν το πλευρικό όριο του όγκου ελέγχου, για τον οποίο παρατηρήθηκε μεταφορά της ορμής κατά μήκος των επιφανειών bf, ae, hd και gc καθώς και κατά μήκος των ab και cd.



Σχήμα 1.1.10: Το συρρικνωμένο τμήμα του αγωγού με μεταβαλλόμενη διατομή  $A_c$  και σταθερό μήκος  $L_c$ .

Ανομοιόμορφη ροή παρατηρήθηκε από το ανάντι τμήμα (BC') μέσω του εύκαμπτου αγωγού (CC') προς το κατάντι τμήμα (C'D). Ανάλυση του τμήματος BD, (Σχήμα 1.1.8), έδειξε πως η απώλεια ενέργειας στο τμήμα του αγωγού που συγκλίνει, είναι αμελητέα. Επομένως, ο συντελεστής απωλειών,  $C_{L_c}$ , είναι ίσος με τον συντελεστή απώλειας ενέργειας στο τμήμα που ο αγωγός αποκλίνει.

Στο παρακάτω σχήμα, Σχήμα 1.1.11, φαίνεται η σχέση συντελεστή,  $C_{L_c}$  - διατομής.



Σχήμα 1.1.11: Ο συντελεστής  $C_{Lc}$  σε σχέση με την αδιαστατοποιημένη διατομή,  $A_c/A_1$ .

Η αντίσταση στη ροή στα άκαμπτα τμήματα του αγωγού οφείλεται κυρίως στις βάνες και αντιστοιχεί στους συντελεστές απωλειών  $R_1$  και  $R_2$ . Επομένως, οι εξισώσεις της ορμής σε αυτά τα τμήματα είναι οι εξής:

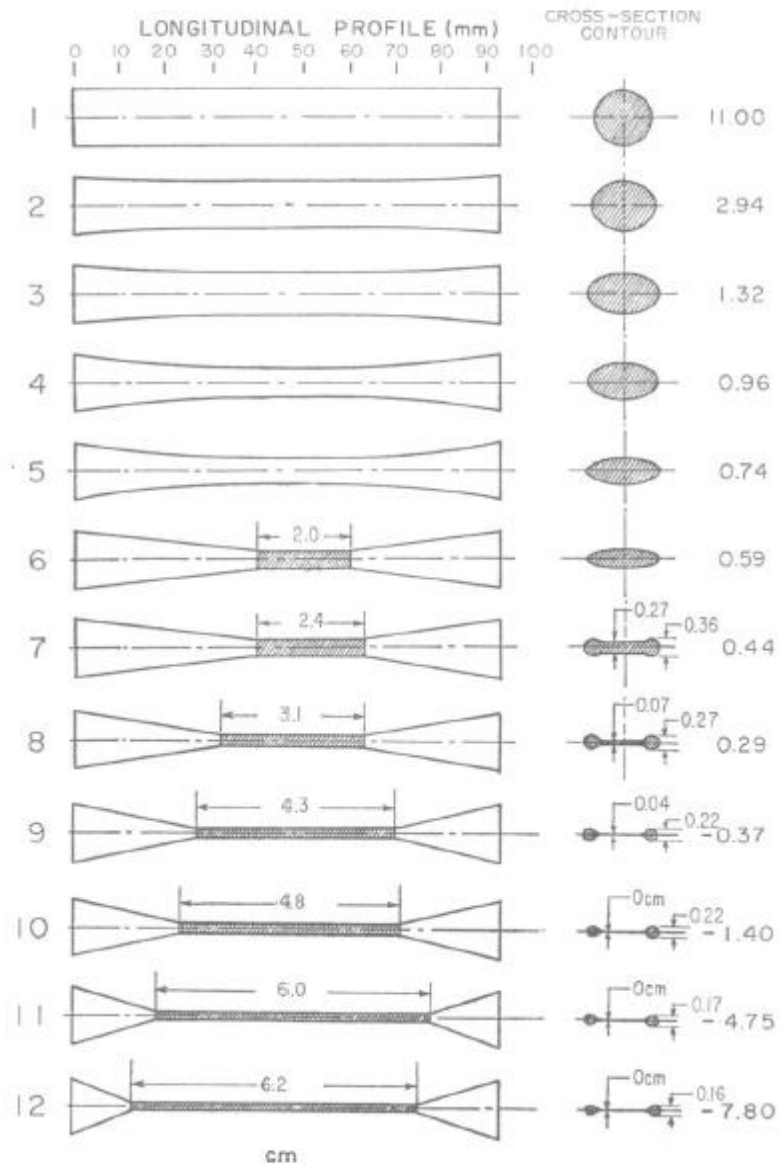
$$\frac{dQ_1}{dt} = (p_t - p_u) \frac{A_1}{\rho L_1} - \frac{C_{L1} Q_1 \square Q_1 \square}{2A_1 L_1} \quad (1.1.7)$$

Και

$$\frac{dQ_2}{dt} = (p_d - p_o) \frac{A_2}{\rho L_2} - \frac{C_{L2} Q_2 \square Q_2 \square}{2A_2 L_2} \quad (1.1.8)$$

Όπου,  $C_L$  ο συντελεστής απωλειών της βάνας.

Ακολουθεί το Σχήμα 1.1.12, όπου φαίνεται η διατομή κατά μήκος του αγωγού για διάφορες τιμές της διατοιχωματικής πίεσης. Ο  $C_{Lc}$  προκύπτει από τη γεωμετρία του αγωγού.



Σχήμα 1.1.12: Η διατομή κατά μήκος του αγωγού για διάφορες τιμές της διατοιχωματικής πίεσης.

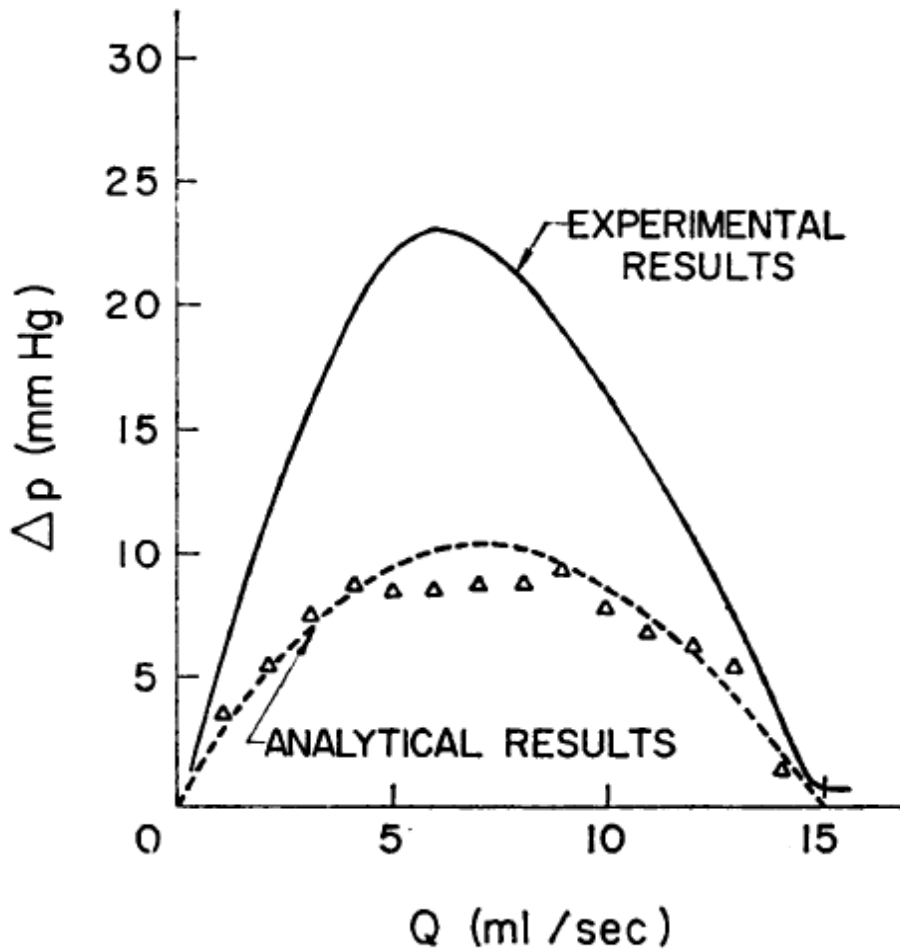
Επίσης, ο συντελεστής απωλειών  $C_{Lc}$ , εκτός από τη γεωμετρία του αγωγού εξαρτάται και από το αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης. Για τον προσδιορισμό της ροής χρησιμοποίησαν τα πειραματικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.5, όπου  $R_2=0.12$ . Ο αριθμός Reynolds ήταν συνεχώς μικρότερος από 2400. Επομένως, το συμπέρασμα ήταν πως η ροή ήταν στρωτή είτε ο αγωγός ήταν ανοικτός είτε όχι. Για τα διάφορα προφίλ του αγωγού δίνονται στη συνέχεια οι τιμές του συντελεστή απωλειών (Πίνακας 1.1.1).

Πίνακας 1.1.1

$Q$	$A_c$	$A_1/A_c$	$C_{Lc}$	$V_c$	$\rho \frac{V_c^2}{2} C_{Lc}$	$L_c$	$\frac{8\pi\mu LQ}{A_c^2}$	$\Delta p$	
<i>ml/sec</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>			<i>cm/sec</i>	<i>dynes/cm<sup>2</sup></i>	<i>cm</i>	<i>dynes/cm<sup>2</sup></i>	<i>dynes/cm<sup>2</sup></i>	<i>mm Hg</i>
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

Εφόσον ο συρρικνωμένος σωλήνας έχει πεπερασμένο μήκος, ελήφθη υπόψη και η απώλεια ενέργειας λόγω του ιξώδους του ρευστού, για να καθορίσουν την ολική διαφορά πίεσης στα άκρα του συρρικνωμένου τμήματος του σωλήνα.

Στο Σχήμα 1.1.13 φαίνεται η καμπύλη  $\Delta p$ - $Q$  με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά και τη μαθηματική ανάλυση.



Σχήμα 1.1.13: Η καμπύλη  $\Delta p$ - $Q$  με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά και τη μαθηματική ανάλυση.

Η διαφορά μεταξύ των αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά το  $\Delta p$  ίσως οφειλόταν στους εξής παράγοντες:

- i. Μη υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων. Οι υψηλές τιμές της  $A_c$  οδήγησαν σε χαμηλές τιμές για το  $C_{Lc}$ .
- ii. Η ασυμμετρία της πραγματικής στένωσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλότερες τιμές για το  $C_{Lc}$  αντίθετα με αυτή την περίπτωση που θεωρήθηκε συμμετρική.
- iii. Υψηλές τιμές για την  $A_c$  οδήγησαν σε χαμηλότερες τιμές για την αντίσταση Poiseuille.

Παρ' όλα αυτά, τα αναλυτικά αποτελέσματα δίνουν παρόμοια καμπύλη  $\Delta p$ - $Q$  με τα πειραματικά. Τα μέγιστα των δύο καμπυλών παρουσιάζονται για την ίδια παροχή. Επίσης, η μέγιστη τιμή της  $\Delta p$ , σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, είναι διπλάσια εκείνης που προέκυψε από τη μαθηματική ανάλυση και επομένως προκύπτει μια σωστή τάξη μεγέθους για το  $C_{Lc}$ .



## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάστηκε παραπάνω καθώς και το υδραυλικό δίκτυο (Σχήμα 1.1.2) ‘έτρεξε’ σε υπολογιστή EAI 680. Η γεωμετρία της διατομής θεωρήθηκε συνάρτηση της διατοιχωματικής πίεσης  $A_c = A_c(\bar{P}_u)$  και ο συντελεστής απωλειών,  $C_{L,c}$ , βασίστηκε στα δεδομένα του Πίνακα 1.1.1.

Στην πειραματική μελέτη οι απώλειες κατάντι του αγωγού ήταν:

$$R_2 = \frac{\Delta p_2}{Q|Q|} \quad (1.1.9)$$

όπου  $\Delta p_2$  η κατάντι πτώση πίεσης.

Ενώ στην προσομοίωση είναι:

$$C_{r,2} = \frac{\Delta p}{\rho \vec{V}_2 |\vec{V}_2| / 2} \quad (1.1.10)$$

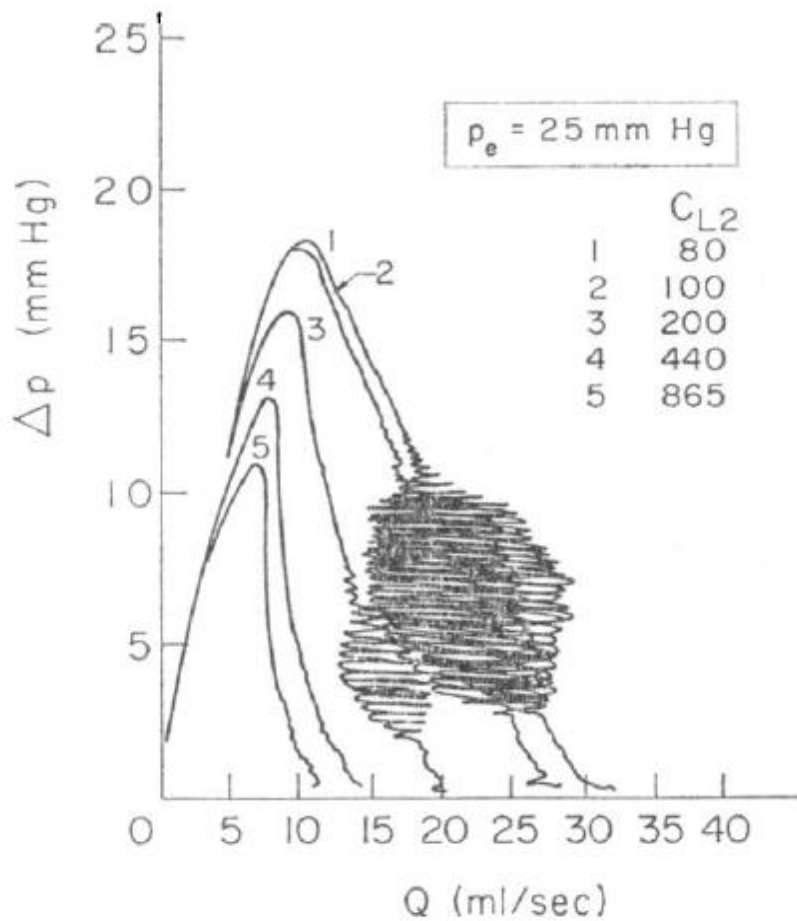
όπου  $\vec{V}_2$  η μέση ταχύτητα στην κάθετη διατομή του αγωγού.

Οι  $R_2$  και  $C_{L,2}$  συνδέονται με την εξής σχέση:

$$C_{L,2} = 2gA_{d_0}^2 R_2 \quad (1.1.11)$$

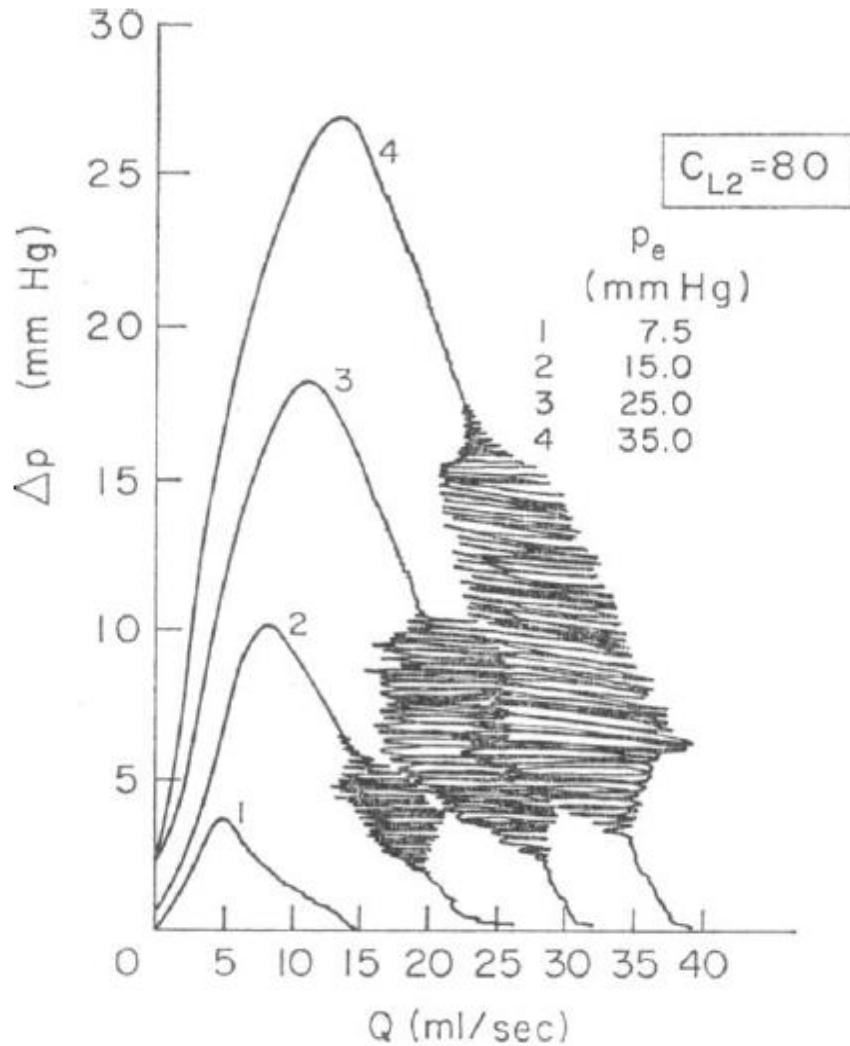
όπου  $A_{d_0}$  η διατομή στην κατάντι βάνα.

Επειδή όμως το μέγεθος της  $A_{d_0}$  είναι άγνωστο, επιλέχθηκε συντελεστής  $C_{L,2}$  τέτοιος ώστε να ανταποκρίνεται στο πείραμα. Για τη μείωση της παροχής ή διαφορετικά την αύξηση των απωλειών  $R_1$ , ο συντελεστής  $C_{L,1}$  αυξάνεται. Στο Σχήμα 1.1.14 δίνονται οι καμπύλες  $\Delta p$ - $Q$  για σταθερή εξωτερική πίεση  $p_e$  και μεταβαλλόμενο  $C_{L,2}$ . Οι καμπύλες φαίνεται να συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχήμα 1.1.5). Με την αύξηση του  $C_{L,2}$ , παρατηρείται μείωση της μέγιστης  $\Delta p$ , η οποία μετατοπίζεται και προς τα αριστερά.



Σχήμα 1.1.14: Οι καμπύλες  $\Delta p$ - $Q$  για σταθερή εξωτερική πίεση  $p_e$  και μεταβαλλόμενο  $C_{L2}$ .

Στο Σχήμα 1.1.15 δίνονται οι καμπύλες  $\Delta p$ - $Q$  για μεταβαλλόμενη εξωτερική πίεση  $p_e$  και σταθερό συντελεστή  $C_{L2}$ . Επίσης, και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα φαίνεται να συγκλίνουν (σύγκριση με Σχήμα 1.1.6). Με αύξηση της  $p_e$  η κορυφή του  $\Delta p$  αυξάνεται και μετατοπίζεται ταυτόχρονα προς τα δεξιά.



Σχήμα 1.1.15: Οι καμπύλες  $\Delta p$ - $Q$  για μεταβαλλόμενη εξωτερική πίεση  $p_e$  και σταθερό συντελεστή  $C_{L,2}$ .

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στον υπολογιστή επιβεβαίωσαν το μαθηματικό μοντέλο και για την περίπτωση που υπάρχει σταθερότητα αλλά και ταλάντωση. Με βάση αυτό το μοντέλο θα μπορούσε κανείς να εντοπίσει τις διαφορές μεταξύ του σωλήνα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα και των φλεβών αλλά και να συσχετίσει τις δύο αυτές περιπτώσεις.

## 1.2. X.L. Yang, Y.Liu, J.M. Yang (2007)

### ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΕΡΕΟΥ-ΡΕΥΣΤΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΠΝΕΥΜΟΝΙΚΗΣ ΑΡΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ

Οι X.L. Yang, Y.Liu, J.M. Yang μελέτησαν την αλληλεπίδραση ενός ρευστού με το τοίχωμα του αγωγού μέσα στον οποίο κινείται και συγκεκριμένα σε μια πνευμονική αρτηριακή διακλάδωση. Η μελέτη αυτή έγινε υπολογιστικά χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα FLUENT.

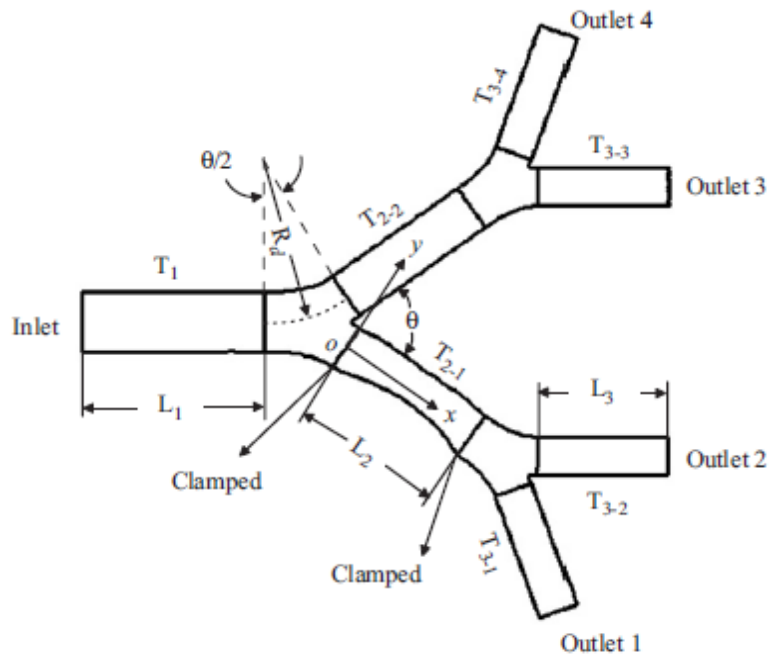
Παρατηρήθηκε πως μεγάλη παραμόρφωση της δομής επηρέαζε σημαντικά το πεδίο ροής ενώ η πίεση του ρευστού επηρέαζε επίσης σε μεγάλο βαθμό, τη δομή. Η ταλάντωση, την οποία υφίστατο ο αγωγός, προκαλούσε μεγάλη συστολή της διατομής καθώς και αύξηση των απωλειών της ροής.

Συγκεκριμένα:

Το αιμοφόρο αγγεία στους πνεύμονες έχουν πολλές διακλαδώσεις, και η πίεση του αίματος εκεί είναι εξαιρετικά χαμηλή. Οι αρτηρίες στους πνεύμονες έχουν λεπτά τοιχώματα, τα οποία μπορεί να συμπτυχθούν όταν αυξάνεται η ενδοπερικαρδιακή πίεση σε ασθενείς με προβλήματα στα αιμοφόρα αγγεία των πνευμόνων. Εφόσον η ροή στη διακλάδωση μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά τη συρρίκνωση της διακλάδωσης, είναι σημαντικό να αναλυθεί η αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού στις διακλαδώσεις των αεραγωγών. Στη συγκεκριμένη μελέτη αναπτύχθηκε μία αριθμητική μέθοδος έτσι ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα αυτής της αλληλεπίδρασης. Ένα εμπορικό πρόγραμμα CFD, το FLUENT, χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του πεδίου ροής, ενώ για το τοίχωμα χρησιμοποιήθηκε ένας in-house κώδικας πεπερασμένων στοιχείων. Ο στόχος είναι να εξεταστεί η επίδραση που έχει η ροή στη διακλάδωση πάνω στη σύμπτυξη του αγωγού.

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Αφού οι αρτηριακές και αναπνευστικές διακλαδώσεις είναι παρόμοιες στους πνεύμονες, σχεδίασαν ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο με βάση τη γεωμετρία των αναπνευστικών οδών. Το μοντέλο αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.2.1 ενώ στον Πίνακα 1.2.1, φαίνονται όλες οι σχετικές γεωμετρικές παράμετροι.



Σχήμα 1.2.1. Σχηματική αναπαράσταση της πνευμονικής αρτηριακής διακλάδωσης.

Generation number	Diameter, $D$ (mm)	Length, $L$ (mm)	Thickness, $h$ (mm)
1	3.5	10.7	—
2	2.8	9.0	0.07
3	2.24	7.6	—

Bifurcating angle,  $\theta = 70^\circ$ ;  
 $R_d = 3^\circ D_d^2$

<sup>a</sup> $D_d$  is the diameter of the associated daughter tube.

Πίνακας 1.2.1. Γεωμετρικές παράμετροι.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.1, το τμήμα του αγωγού  $T_{2-1}$  είναι αυτό που ταλαντώνεται ενώ τα υπόλοιπα είναι άκαμπτα. Ο λόγος των διαμέτρων ( $\frac{D_1}{D_2}$ ) ακολουθεί το νόμο του Murray:  $D_1^3 = 2D_2^3$ .

Διακριτοποίηση των στερεών τοιχωμάτων:

Η μορφή της δομής είναι σύμφωνη με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \text{ στο εσωτερικό} \quad (1.2.1)$$

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i, \text{ στα όρια} \quad (1.2.2)$$

όπου  $\sigma_{ij}$  ο τανυστής των τάσεων,  $n_j$  το κάθετο στο τοίχωμα (με φορά προς τα έξω) και  $t_i$  η εξωτερική δύναμη που ασκείται στο όριο. Το τοίχωμα θεωρείται «μέτρια» ελαστικό, με λόγο Poisson,  $\nu=0.49$ .

Για την διάκριση των λεπτών τοιχωμάτων της δομής χρησιμοποιήθηκαν υβριδικά, επίπεδα, τριγωνικά στοιχεία. Κάθε κόμβος του παραπάνω στοιχείου είχε έξι βαθμούς ελευθερίας. Τέτοιου είδους στοιχεία έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε γραμμική στατική ανάλυση αλλά και σε μη-γραμμικά στατικά και δυναμικά προβλήματα. Στη μη-γραμμική ανάλυση, πριν τη τελική κατάσταση ισορροπίας, η εξωτερική δύναμη διαχωρίστηκε σε αρκετά τμήματα και ασκήθηκε σταδιακά, όπου σε κάθε στάδιο εφαρμόστηκε επαναληπτική διαδικασία. Στα δύο άκρα του εύκαμπτου αγωγού, τοποθετήθηκαν σφιγκτήρες και επομένως όλοι οι βαθμοί ελευθερίας ήταν μηδέν.

Διακριτοποίηση του ρευστού:

Για την συνεκτική ροή χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Navier-Stokes:

$$\vec{u}\nabla = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\vec{u} \quad (1.2.3)$$

Η ροή του αίματος θεωρείται ασυμπίεστη, νευτώνια και στρωτή. Σε όλα τα τοιχώματα, εφαρμόστηκε η συνθήκη της μη-ολίσθησης. Στην είσοδο, θεωρήθηκε πως η κατανομή της ταχύτητας είναι παραβολική. Επίσης, σε όλες τις εξόδους η στατική πίεση θεωρήθηκε ίση με μηδέν.

### Παράμετροι και λεπτομέρειες των αριθμητικών υπολογισμών:

Η σύζευξη ρευστού-στερεού έγινε προσεγγιστικά. Η περιοχή του ρευστού χωρίστηκε σε μη-δομημένα εξάεδρα στοιχεία και επομένως τα στοιχεία των ορίων της περιοχής θεωρήθηκαν τετράπλευρα. Επίσης, θεωρήθηκε πως τα λεπτά τοιχώματα του αγωγού είναι εκείνα που διαχωρίζουν τα όρια του αγωγού από την περιοχή του ρευστού. Επομένως, κάθε τετράπλευρο στοιχείο των συνόρων της περιοχής του ρευστού, χωρίζεται σε δυο τριγωνικά στοιχεία, τα οποία ταυτόχρονα αποτελούν και στοιχεία του στερεού.

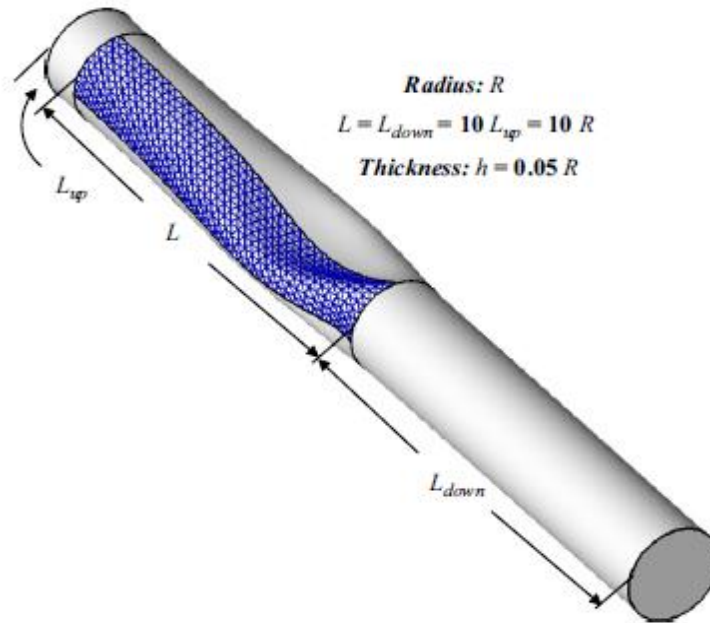
Επειδή η πίεση του ρευστού ήταν σχεδόν συμμετρική ως προς το επίπεδο  $z=0$ , αρκούσε να μελετηθεί μόνο το μισό τμήμα της δομής. Το στερεό (το μισό), που εξετάστηκε, χωρίστηκε σε 1200 τριγωνικά στοιχεία και ολόκληρη η περιοχή του ρευστού χωρίστηκε σε 118353 εξάεδρα. Οι τιμές αυτές καθορίστηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικά πλέγματα από χονδροειδή, τα οποία σταδιακά εξελίσσονταν σε λεπτά, μέχρι η εσωτερική πίεση και οι κατανομές της παροχής μάζας στις τέσσερις εξόδους να συγκλίνουν με ακρίβεια 0.5 %.

Για έναν ευθύ αγωγό με φορτίο συμμετρικό, ήταν δύσκολο να επιτευχθεί η σύμπτυξή του και γι' αυτό συνήθως προκαλούνταν μια μικρή διαταραχή στο φορτίο, η οποία ανάγκαζε τον αγωγό να συρρικνωθεί με έναν προκαθορισμένο τρόπο. Για το παρόν μοντέλο, αφού η κατανομή της πίεσης δεν ήταν συμμετρική ως προς τον άξονα του αγωγού, δεν υπήρχε λόγος να προκληθεί κάποια διαταραχή γιατί η σύμπτυξή του μπορούσε να επιτευχθεί εύκολα.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### Επαλήθευση:

Η μαθηματική τεχνική που προτάθηκε επαληθεύτηκε χρησιμοποιώντας την περίπτωση δημοσίευσης των Hazel και Heil, 2003, όπου ο ταλαντευόμενος αγωγός στηριζόταν σε δύο άκαμπτους σωλήνες (Σχήμα 1.2.2).



Σχήμα 1.2.2: Σχηματική αναπαράσταση του αγωγού καθώς ταλαντώνεται.

Οι παράμετροι είναι οι ίδιες με των Hazel και Heil, συγκεκριμένα,  $H=0$  και  $1000$  και  $Re=0$  και  $128$  αντίστοιχα, όπου:

$$Re = \frac{2\rho UR}{\mu} \quad (1.2.4)$$

και

$$H = \frac{Re}{Q} = \frac{\rho KR^2}{\mu^2} \quad (1.2.5)$$

όπου  $U$  η μέση ταχύτητα,  $\rho$  η πυκνότητα,  $\mu$  η δυναμική συνεκτικότητα,  $R$  η ακτίνα του αγωγού,  $Q$  η αδιάστατη παράμετρος, που αντιστοιχεί στο λόγο των ρευστομηχανικών τάσεων του ρευστού προς τις μηχανικές τάσεις του υλικού λόγω της παραμόρφωσης των τοιχωμάτων και ορίζεται ως εξής:

$$Q = \frac{\mu U}{RK} \quad (1.2.6)$$



και  $K$  συντελεστής, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

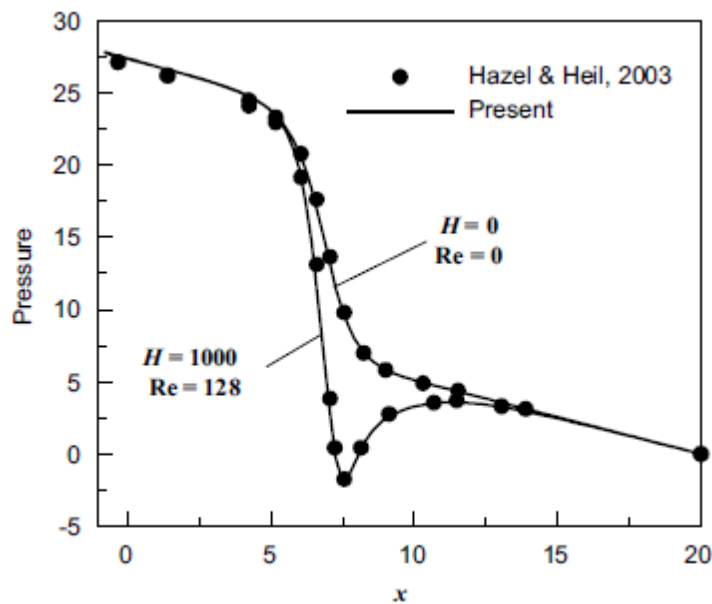
$$K = \frac{E \left(\frac{h}{R}\right)^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1.2.7)$$

όπου  $E$  ο συντελεστής Young,  $\nu$  ο λόγος Poisson και  $h$  το πάχος του τοιχώματος.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε πως μεγαλύτερο  $Q$  σημαίνει και μεγαλύτερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ρευστού και των τοιχωμάτων της δομής. Επιπλέον, η αδιάστατη παράμετρος  $H$  εξαρτάται αποκλειστικά από τα υλικά του συστήματος, οπότε για δεδομένο ρευστό και αγωγό, παραμένει σταθερή.

Μια διαταραχή της εξωτερικής πίεσης ( $p_{ext}$ ) αναγκάζει τον αγωγό σε σύμπτυξη με  $N=2$  ( $N$  είναι ο κυματάριθμος κατά μήκος της περιφέρειας του σωλήνα).

Στο Σχήμα 1.2.3 φαίνεται η σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα του παρόντος μοντέλου και στα αποτελέσματα των Hazel και Heil για την αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής των αγωγών (εύκαμπτου και άκαμπτου).



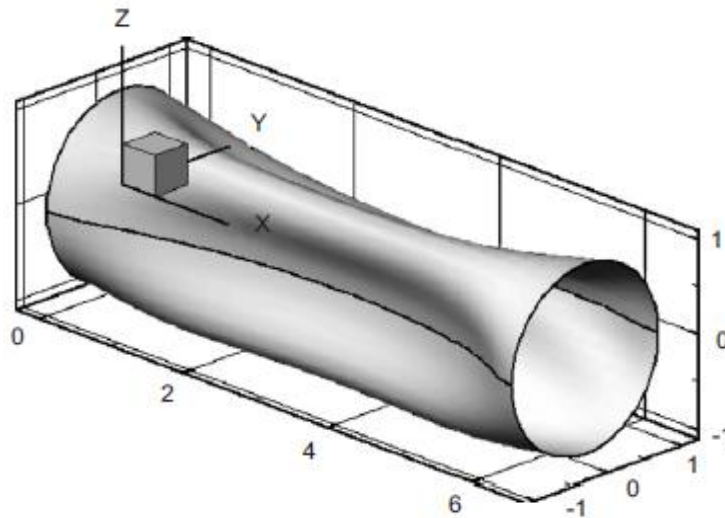
Σχήμα 1.2.3: Η αδιαστατοποιημένη πίεση κατά μήκος του άξονα του αγωγού.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται να συμφωνούν με εξαιρετική ακρίβεια, με τη μεγαλύτερη απόκλιση να κυμαίνεται στο 0.6%.

Επίδραση της διακλάδωσης στον εύκαμπτο αγωγό:

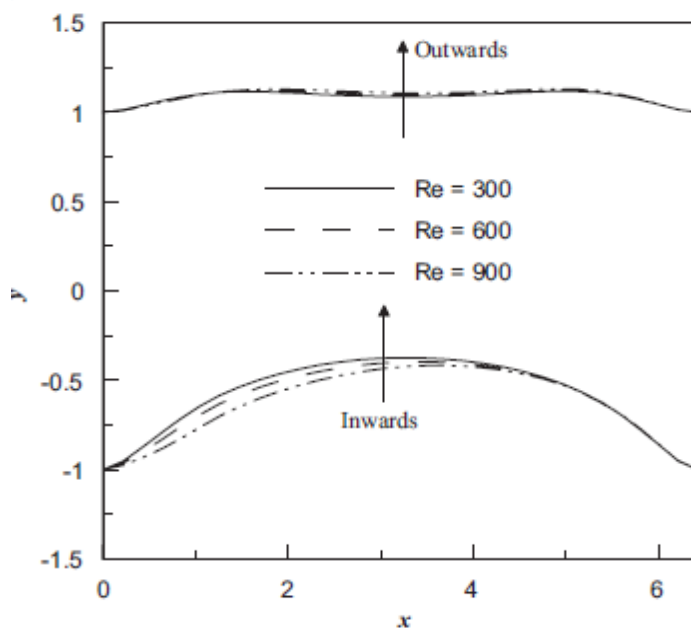
Στο μοντέλο της πνευμονικής αρτηριακής διακλάδωσης το  $H$  υπολογίστηκε με βάση την ακτίνα του συμπυκθέντος αγωγού ( $T_{2-1}$ ), αλλά ο υπολογισμός του αριθμού  $Re$  βασίστηκε στη μέση ταχύτητα στο εσωτερικό του αγωγού ( $T_1$ ), συγκεκριμένα  $H = \frac{\rho K R_{2-1}^2}{\mu^2}$  και  $Re = \frac{2\rho U_1 R_1}{\mu}$ . Επιπροσθέτως, οι πιέσεις «κανονικοποιήθηκαν» με το  $K$  και τα μήκη αντίστοιχα με την ακτίνα του εύκαμπτου αγωγού,  $R_{2-1}$ . Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, το πάχος του αγωγού θεωρήθηκε ίσο με 0.05, το  $H$  τέθηκε σταθερό και ίσο με  $H=10^4$  και η εξωτερική πίεση τέθηκε  $p_{ext}=20$ , ενώ προσομοιώθηκαν τρεις αριθμοί  $Re$  έτσι ώστε να ερευνηθεί η επιρροή της ορμής του ρευστού στην παραμόρφωση του αγωγού.

Το Σχήμα 1.2.4 που ακολουθεί δείχνει τη διαμόρφωση του αγωγού για  $Re=900$ . Το σχήμα του αγωγού παραμορφώνεται με  $N=3$ , αφού το εύκαμπτο τμήμα έχει μικρό λόγο μήκους/ακτίνας ( $L/R=6.43$ ). Γύρω από τον συμπυκμένο αγωγό υπάρχουν τρεις λοβοί. Ο ένας είναι στο  $z=0$  και οι άλλοι δύο είναι συμμετρικοί ως προς αυτόν. Οι τρεις αυτοί λοβοί σχηματίζουν ένα ισόπλευρο τρίγωνο. Αυτό συμβαίνει διότι το εξωτερικό τοίχωμα του  $T_{2-1}$  κινείται προς το εσωτερικό ενώ το εσωτερικό τοίχωμα κινείται προς το εξωτερικό. Η διαμόρφωση του αγωγού εξαρτάται τόσο από την κατανομή της πίεσης όσο και από το λόγο μήκους- ακτίνας.



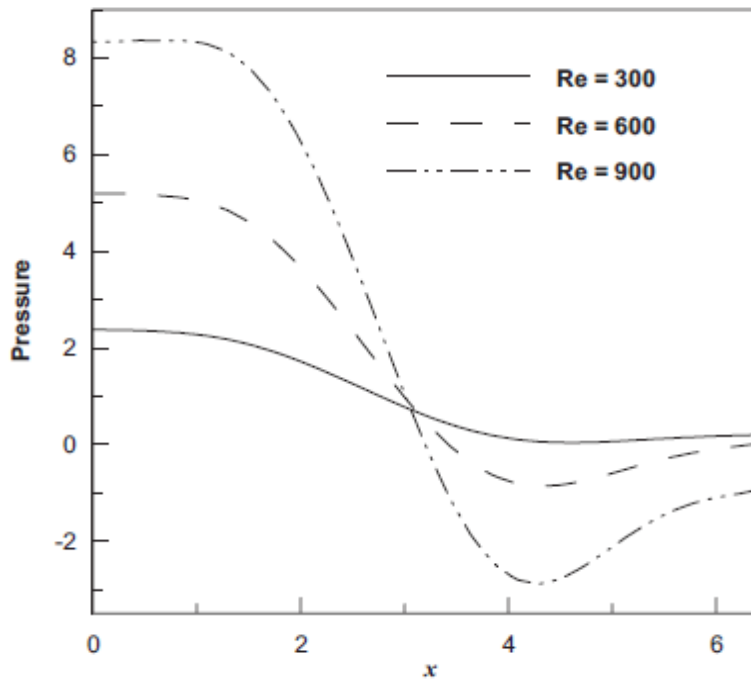
Σχήμα 1.2.4: Η παραμόρφωση του αγωγού για  $Re=900$ .

Στο Σχήμα 1.2.5 φαίνεται η επίδραση του αριθμού  $Re$  στην παραμόρφωση των τοιχωμάτων του αγωγού. Όσον αφορά το «βαθουλωμένο» μέρος του σωλήνα, παρατηρήθηκε πως αυξάνοντας τον  $Re$ , ο βαθμός παραμόρφωσης μειώνεται. Για  $Re=300$ , η εντονότερη σύμπτυξη παρατηρείται στη μέση του αγωγού, όπου  $x=3.22$  και αντίστοιχα για  $Re=900$  παρατηρείται στο σημείο όπου  $x=3.65$ . Αντίθετα, «φουσκωμένο» μέρος του αγωγού, ο αριθμός  $Re$  έχει πολύ μικρή επίδραση στη διαμόρφωση του αγωγού.



Σχήμα 1.2.5: Το σχήμα του αγωγού για διάφορες τιμές του  $Re$ .

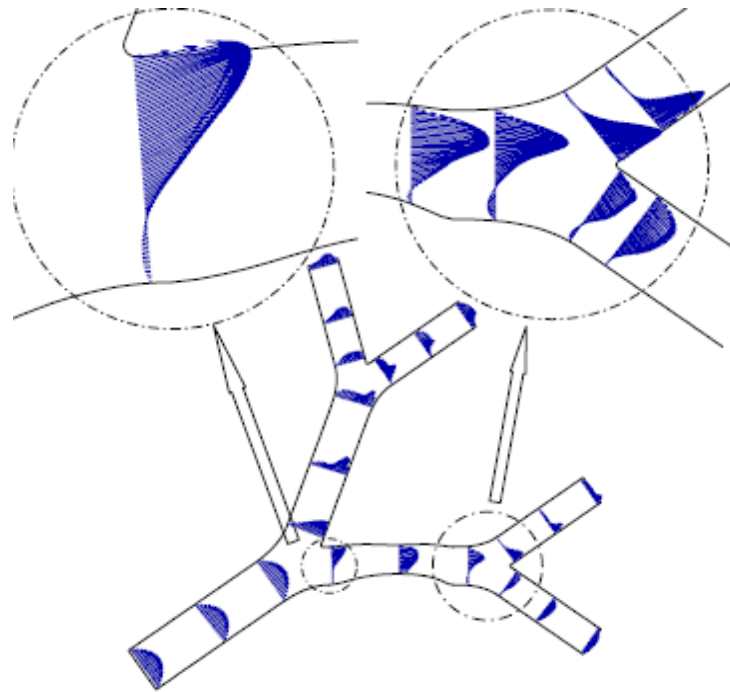
Η αδιαστατοποιημένη κατανομή πίεσης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του αγωγού φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 1.2.6).



Σχήμα 1.2.6: Η αδιαστατοποιημένη πίεση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του αγωγού.

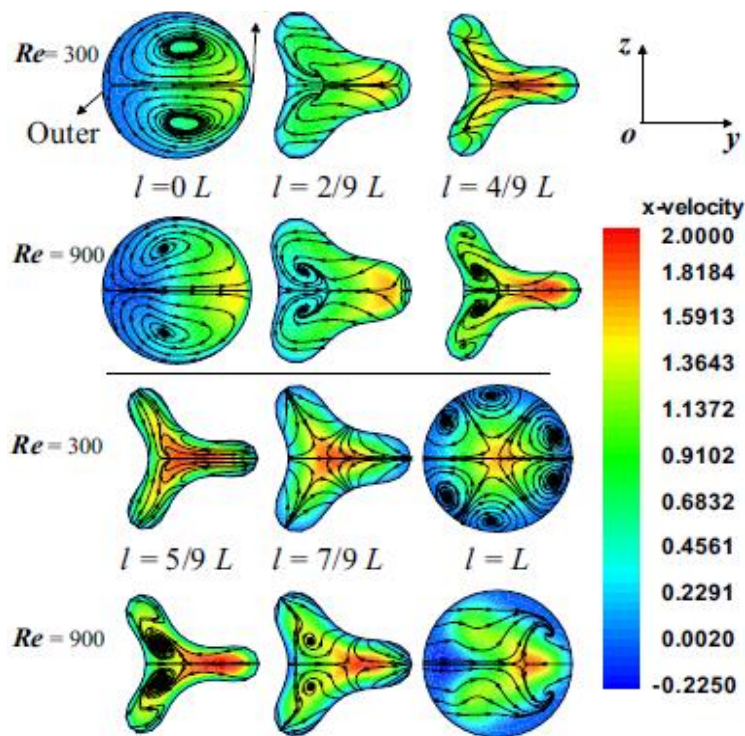
Παρατηρείται πως η πίεση αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός  $Re$ , γεγονός που είναι λογικό, καθώς η ροή είναι ανάλογη με τη ροή Poiseuille, στην οποία η πτώση πίεσης είναι ανάλογη της ταχύτητας, έτσι όταν αυξάνεται η ταχύτητα αυξάνεται και η πτώση πίεσης. Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο είναι πως σε υψηλούς αριθμούς  $Re$  (600 και 900), η πτώση πίεσης είναι αρνητική στο σημείο όπου έχουμε τη μεγαλύτερη σύμπτυξη κατάντι. Αλλά για  $Re=300$ , η πτώση πίεσης είναι πάντα θετική. Επίσης, για  $Re=600$ , στο τέλος του συμπτυχθέντος αγωγού, η πτώση πίεσης γίνεται θετική, για  $Re=900$  όμως εξακολουθεί να είναι αρνητική.

Στο Σχήμα 1.2.7 φαίνεται το πεδίο ροής στο επίπεδο  $z=0$  για  $Re=900$ . Τα προφίλ της ταχύτητας έχουν παραμορφωθεί λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων. Όπως φαίνεται στις μεγεθύνσεις, υπάρχει ανακυκλοφορία ανάντι και κατάντι του συμπτυχθέντος αγωγού. Μια πιθανή εξήγηση αυτού είναι πως ο συμπτυχθείς αγωγός δημιουργεί ένα jet, και η αντίσταση σε αυτού δημιουργεί ανακυκλοφορία ανάντι, ενώ το ίδιο το jet δημιουργεί ανακυκλοφορία κατάντι. Πρέπει να σημειωθεί πως δεν υπάρχει ανακυκλοφορία για  $Re=300$ , καθώς η αρνητική κλίση πίεσης δεν είναι αρκετή για να οδηγήσει σε αποκόλληση του οριακού στρώματος.



Σχήμα 1.2.7: Το πεδίο ροής στο  $z=0$  για  $Re=900$ .

Στο Σχήμα 1.2.8 δίνονται τα διανύσματα της αξονικής ταχύτητας καθώς ο αγωγός ταλαντώνεται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του για  $Re= 300$  και  $600$  αντίστοιχα. Το  $l$  είναι η απόσταση από την είσοδο του εύκαμπτου σωλήνα. Το μέτρο της ταχύτητας έχει κανονικοποιηθεί ως προς τη μέση ταχύτητα στην είσοδο του  $T_1$ .



Σχήμα 1.2.8: Το πεδίο ροής για  $Re=300$  και  $900$ .

Στην είσοδο ( $l=0L$ ), η ταχύτητα μετατοπίζεται προς το μέσα τοίχωμα, με αποτέλεσμα μεγάλες αξονικές ταχύτητες εκεί και για τους δύο αριθμούς Reynolds. Όμως, σε αυτό το σημείο, παρατηρείται ανακυκλοφορία της ροής, δηλαδή, η αξονική ταχύτητα παίρνει αρνητικές τιμές κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα για  $Re=900$ . Για  $l=2/9L$ , η αξονική ταχύτητα αυξάνεται κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα επειδή το κανάλι μέσα στο οποίο κινείται το ρευστό στενεύει. Η δευτερεύουσα ροή κινείται από το τοίχωμα του αγωγού προς το κέντρο του και τους λοβούς. Για  $l=4/9L$ , η αξονική ταχύτητα εξακολουθεί να αυξάνεται λόγω της περαιτέρω συστολής, ενώ η δευτερεύουσα ροή κινείται και πάλι προς το κέντρο του αγωγού. Εκεί υπάρχει μία συμβολή για  $Re=300$  και δύο συμβολές για  $Re=900$ . Η μεγαλύτερη αξονική ταχύτητα παρατηρείται στο λοβό κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα εξαιτίας των φυγοκεντρικών δυνάμεων. Το ίδιο συμβαίνει και για  $l=5/9L$ . Από το σημείο  $l=5/9L$  και μετά, ο αγωγός έχει αρχίσει να ανοίγει ξανά και να σχηματίζει κατά κάποιο τρόπο ένα διαχύτη. Στο σημείο  $l=7/9L$ , το πεδίο της αξονικής ταχύτητας έχει ένα σχήμα «καρδιάς» για  $Re=900$ . Για  $l=L$ , στο τέλος δηλαδή του αγωγού, όταν  $Re=300$ , το προφίλ της αξονικής ταχύτητας έχει διαμορφωθεί σχεδόν πλήρως, με τις μεγαλύτερες σχεδόν τιμές της στο κέντρο του αγωγού. Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον φαινόμενο είναι ότι η δευτερεύουσα ροή σχηματίζει έξι δίνες (τρία ζεύγη) κοντά στο τοίχωμα. Για  $Re=900$ , η δευτερεύουσα ροή εξασθενεί και παρατηρούνται τρεις ανακυκλοφορίες, όμως το προφίλ της αξονικής ταχύτητας εξακολουθεί να είναι μετατοπισμένο (το μέγιστο της ταχύτητας δεν βρίσκεται στο μέσο).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά από την αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ρευστού-στερεού, οι X.L. Yang, Y.Liu, J.M. Yang κατέληξαν στα εξής:

- Ο αγωγός συμπύσσεται με κυματάριθμο  $N=3$  λόγω του μικρού λόγου μήκους/ακτίνας κι έτσι σχηματίζεται ένα ισόπλευρο τρίγωνο.
- Η μεγάλη πτώση πίεσης σε μεγαλύτερους  $Re$  έχει σαν αποτέλεσμα το σημείο με τη μεγαλύτερη σύμπτυξη να κινείται προς τα κάτω.
- Η σύμπτυξη του αγωγού μεταβάλλει σημαντικά τη ροή στη διακλάδωση. Για ροή με μεγάλη ορμή, παρατηρήθηκε οπισθοροή ανάντι και κατάντι του συμπυκθέντος αγωγού.

1.3. Δ.Μαθιουλάκης, Δ.Κουνάδης (3<sup>rd</sup> International Conference on Experiments/Process/System Modeling/Simulation & Optimization, 3<sup>rd</sup> IC-EpsMsO, Athens, 8-11 July, 2009)

### ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕΣΑ ΣΕ ΑΥΤΟΤΑΛΑΝΤΟΥΜΕΝΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΑΓΩΓΟ

Οι Δ.Μαθιουλάκης, Δ.Κουνάδης μελέτησαν τη ροή ενός ρευστού, συγκεκριμένα μίγματος γλυκερίνης-νερού, σε εύκαμπτο αγωγό. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, τέτοιου είδους αγωγοί αρχίζουν να αυτοταλαντώνονται. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα στη ροή του αίματος στις αρτηρίες, όταν δημιουργούνται ήχοι Korotkoff, ή στη ροή στους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος, όταν έχουμε ροχαλητό.

Η ταλάντωση που συμβαίνει στους αγωγούς οφείλεται στη μη γραμμική σχέση μεταξύ της μεταβολής της διαφοράς πίεσης εσωτερικά – εξωτερικά του αγωγού ( $p_{in}-p_{out}$ ) και της διατομής του. Όταν η διαφορά πίεσης πλησιάζει το μηδέν, η ροή γίνεται ασταθής και η διατομή αλλάζει σημαντικά, ακόμα και για μικρές μεταβολές στην πίεση. Συγκεκριμένα, καθώς μειώνεται η διαφορά πίεσης, η διατομή εξελίσσεται από κυλινδρική σε ελλειπτική και καταλήγει να έχει το σχήμα ενός οκτώ(8). Στη τελευταία περίπτωση η ροή χωρίζεται σε δύο τμήματα ενώ έχει σχηματιστεί ένας ‘λαιμός’ στον αγωγό, ο οποίος μετατοπίζεται κατάντι, και ο αγωγός κλείνει για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Όμως, εξαιτίας της ελαστικότητας του αγωγού, το ρευστό συνεχίζει να μπαίνει στον αγωγό, με αποτέλεσμα η στατική πίεση να αυξάνεται και τελικά ο αγωγός να ανοίγει ξανά.

Αφού συμβεί αυτό, η πίεση μετά το ‘λαιμό’ πέφτει σημαντικά. Γενικά, το εύρος των τιμών της κατάντι πίεσης είναι πολύ μεγάλο σε αντίθεση με αυτό που συμβαίνει ανάντι, όπου η ροή είναι πιο ομαλή. Επίσης, η παροχή στη διάρκεια της ταλάντωσης διατηρείται λίγο πολύ η ίδια.

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε δύο δοχεία με διάλυμα γλυκερίνης-νερού αναλογίας 40/60 κατ’ όγκο. Η υψομετρική διαφορά των δοχείων ήταν στα 1.6 m. Η επιλογή αυτού του διαλύματος έγινε έτσι ώστε να αποφευχθούν ή τουλάχιστον να μειωθούν, φαινόμενα διάθλασης του laser μεταξύ του υγρού και του αγωγού.



Ο αγωγός, κατασκευασμένος από το ελαστομερές υλικό Sylgard 184, μήκους 63 mm, εξωτερικής διαμέτρου 10 mm και πάχους τοιχώματος 0.2 mm, αφού συνδέθηκε με αγωγούς Plexiglas (εξωτερικής διαμέτρου 10 mm και πάχους τοιχώματος 1 mm), τοποθετήθηκε 900 mm κάτω από το ανάντι υπερυψωμένο δοχείο.

Η ροή του ρευστού οφειλόταν στη βαρύτητα αλλά ρυθμιζόταν από δύο βάνες, η πρώτη ανάντι και η δεύτερη κατάντι του εύκαμπτου αγωγού.

Ο αγωγός ήταν βυθισμένος μέσα σε δοχείο με διάλυμα γλυκερίνης, όμοιο με αυτό που έρεε , έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα διάθλασης και να εφαρμοστεί σωστά η μέθοδος PIV.

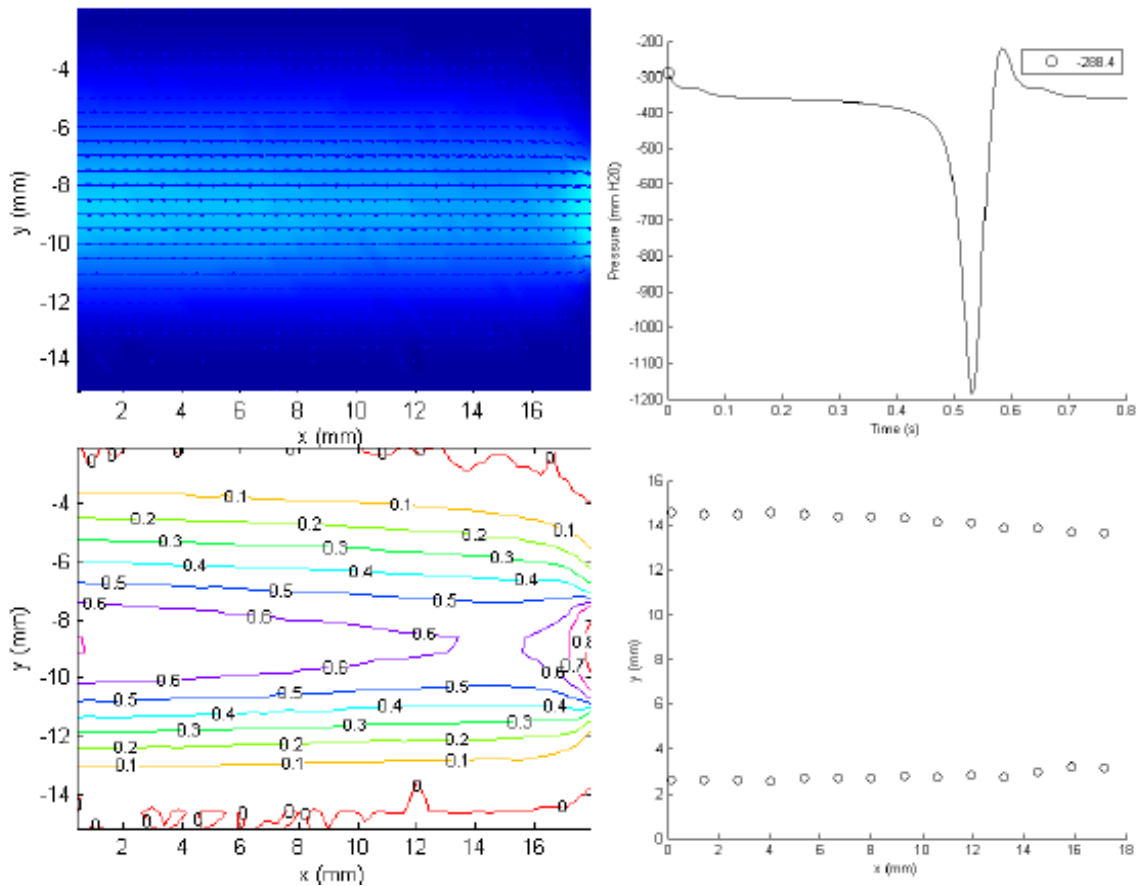
Η στατική πίεση, ανάντι και κατάντι του αγωγού, μετρούταν αντίστοιχα με δύο καθετήρες πίεσης Millar. Ο καθετήρας Millar είναι διάταξη μετρήσεως πίεσης που αποτελείται από ένα στοιχείο αισθητήρα (πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα πίεσης) προσαρμοσμένο στο άκρο ενός λεπτού καλωδίου και μετατρέπει την πίεση σε ηλεκτρικό σήμα. Στο άλλο άκρο είναι τοποθετημένη κατάλληλη έξοδος που συνδέεται με τον ψηφιοποιητή σήματος (16 bit).

Για τη μετατροπή του αναλογικού ηλεκτρικού σήματος σε ψηφιακό χρησιμοποιήθηκε η μονάδα Spider 8 της εταιρείας HBM, η οποία έχει το δικό της (A/D) μετατροπέα. Κάθε A/D μετατροπέας λειτουργεί συγχρονισμένα, έχει μέγιστη συχνότητα ψηφιοποίησης 9600 μετρήσεις/sec και ρυθμό δειγματοληψίας 16 bit.

Το πεδίο ταχυτήτων, σε οριζόντιο επίπεδο το οποίο περιλάμβανε το διαμήκη άξονα του αγωγού, καταγράφηκε με το 2D-PIV. Το συγκεκριμένο επίπεδο επιλέχθηκε, έτσι ώστε να είναι παράλληλο με τον κύριο άξονα της ελλειπτικής διατομής που 'παίρνει' κάποιες φορές η διατομή του αγωγού. Επιλέχθηκαν δέκα στιγμές εντός μιας περιόδου και για καθεμία από αυτές πάρθηκαν 100 ζεύγη φωτογραφιών, από τις οποίες εξήχθησαν με τη βοήθεια λογισμικού τα διανύσματα της ταχύτητας, καθώς και οι συντεταγμένες των τοιχωμάτων του αγωγού.

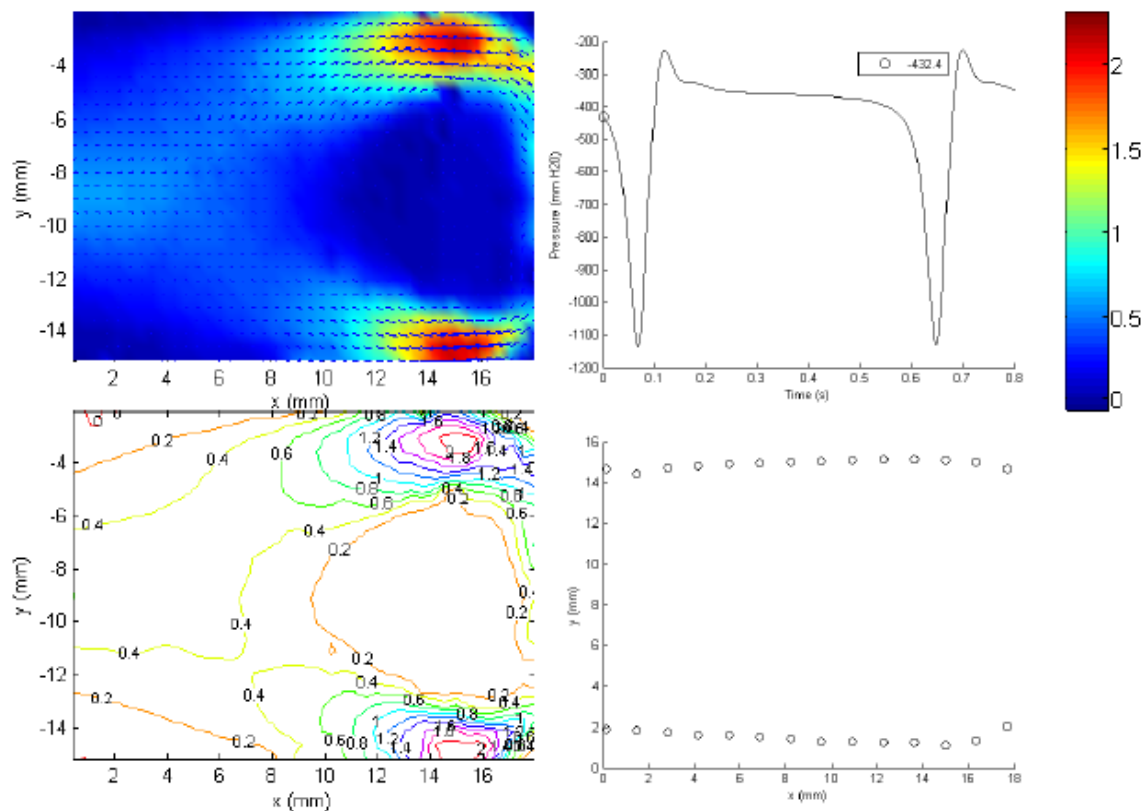
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 1.2.1) φαίνεται η ροή στον αγωγό λίγο πριν την έξοδό του και κάποια στιγμή πριν την παραμόρφωσή του. Συγκεκριμένα έχουμε τα διανύσματα της ταχύτητας, το μέτρο της σε m/s, την μεταβολή της πίεσης σε σχέση με το χρόνο και το περίγραμμα του αγωγού.



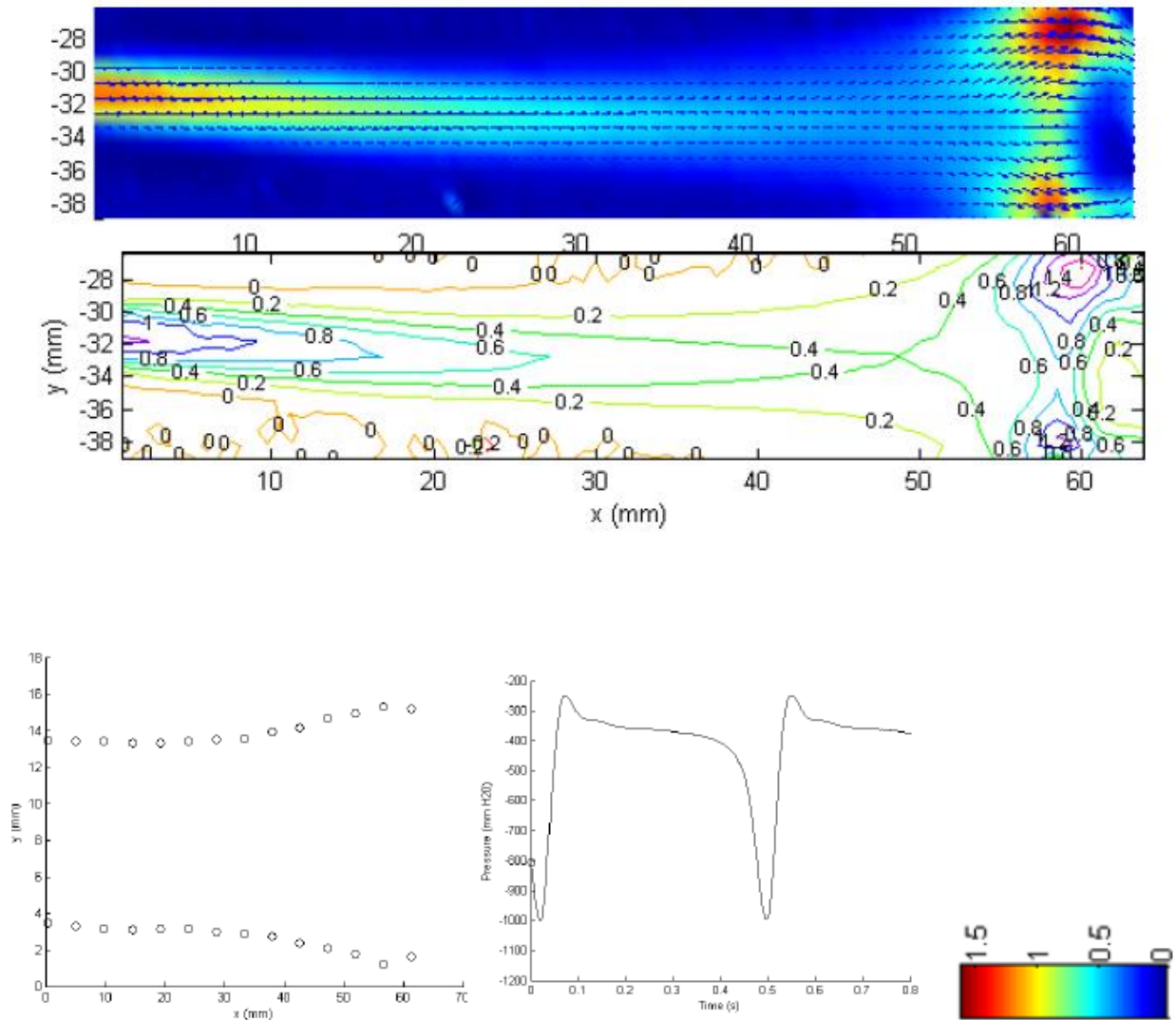
Σχήμα 1.2.1: Η ροή στον αγωγό σε σημείο λίγο πριν την έξοδο.

Στα επόμενα διαγράμματα (Σχήμα 1.2.2), βλέπουμε τα αντίστοιχα με το Σχήμα 1.2.2 αλλά σε κάποια στιγμή που ο αγωγός έχει πλέον συμπυκθεί. Η ροή, όπως παρατηρούμε, έχει χωριστεί σε δύο τμήματα και η διατομή του αγωγού έχει πάρει το σχήμα ενός 8. Επίσης, η ταχύτητα της ροής έχει τετραπλασιαστεί σε σχέση με τη ταχύτητα πριν τη σύμπτυξη.



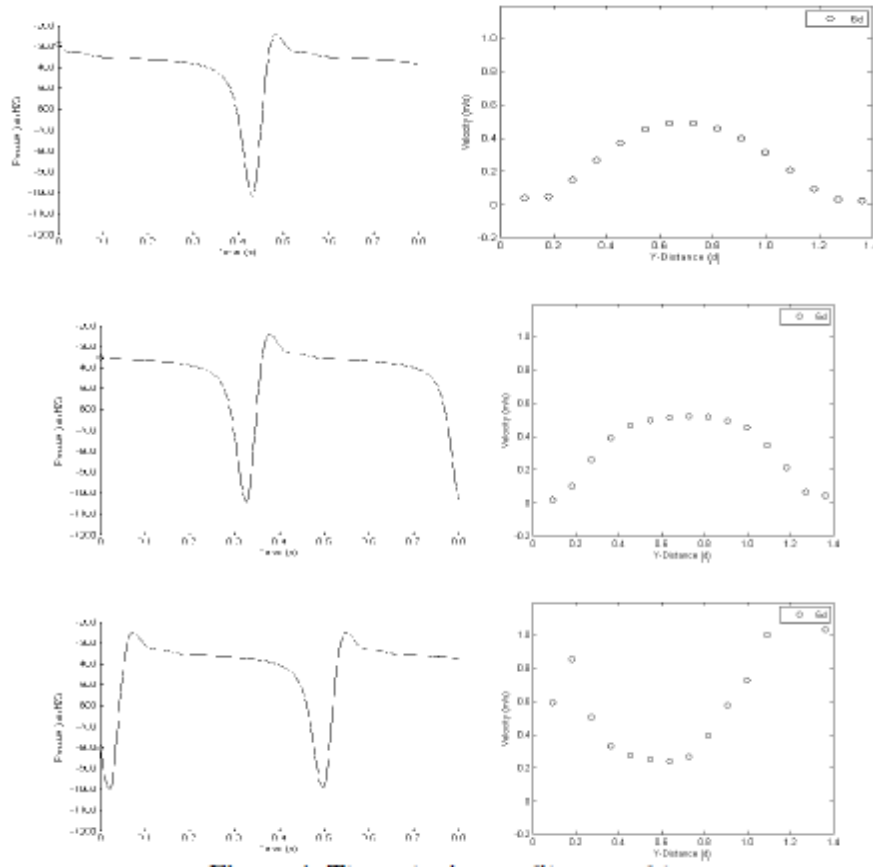
Σχήμα 1.2.2: Η ροή στην έξοδο του αγωγού όταν έχει συμπυκθεί.

Στο Σχήμα 1.2.3, το πεδίο ταχυτήτων φαίνεται κατά μήκος όλου του αγωγού.



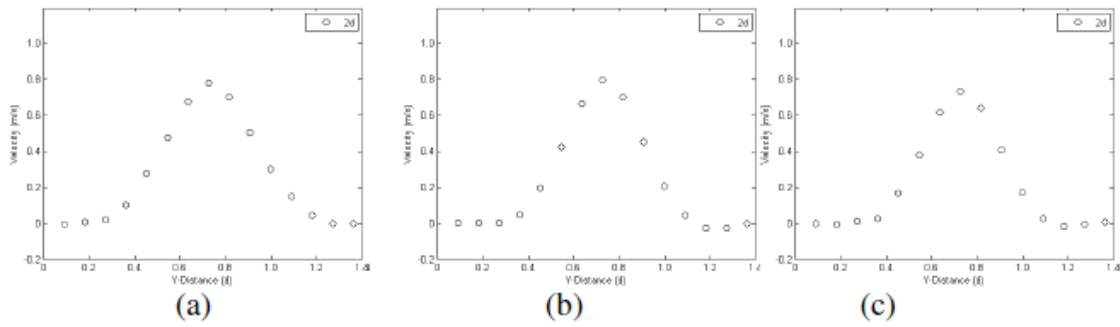
Σχήμα 1.2.3: Το πεδίο ταχυτήτων κατά μήκος όλου του αγωγού.

Στο Σχήμα 1.2.4 φαίνονται οι ταχύτητες λίγο πριν την έξοδο του αγωγού, συγκεκριμένα για  $x=6d$ , όπου  $d$  είναι η διάμετρος του αγωγού. Βλέπουμε πως όταν ο αγωγός δεν είναι παραμορφωμένος, το προφίλ της ταχύτητας είναι περίπου παραβολικό, στη φάση της σύμπτυξης είναι ίσιο και μετά παρουσιάζει 2 μέγιστα εκτός του άξονα, τα οποία αντιστοιχούν στα 2 jets.



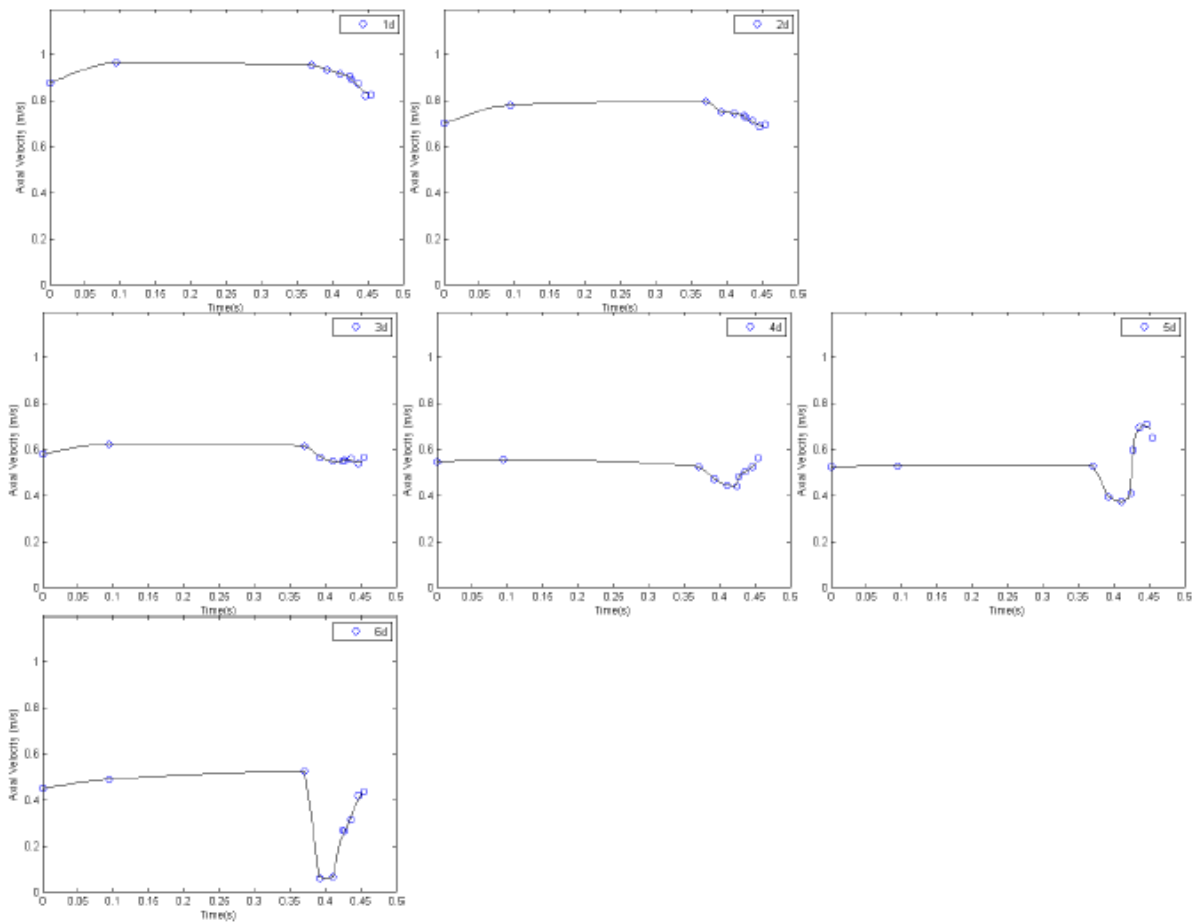
Σχήμα 1.2.4: Οι ταχύτητες στη διατομή  $x=6d$ .

Στο Σχήμα 1.2.5, έχουμε τις ταχύτητες στη διατομή με  $x=2d$  για τις ίδιες χρονικές στιγμές με το Σχήμα 1.2.4. Παρατηρούμε ότι όταν ο αγωγός ταλαντώνεται, στην είσοδο του αγωγού η ταχύτητα του ρευστού δεν αλλάζει, σε αντίθεση με τις σημαντικές αλλαγές στην έξοδο.



Σχήμα 1.2.5: Οι ταχύτητες στη διατομή  $x=2d$ .

Παρακάτω, στο Σχήμα 1.2.6, φαίνεται η ταχύτητα σε έξι διαφορετικές διατομές ( $x=1d, 2d, 3d, 4d, 5d, 6d$ ). Είναι προφανές πως οι μεταβολές της ταχύτητας στην είσοδο είναι πολύ μικρές σε σχέση με αυτές στην έξοδο του αγωγού, ειδικά μετά τα 350 msec, όπου ο αγωγός έχει αρχίσει να παραμορφώνεται.



Σχήμα 1.2.6: Η ταχύτητα σε έξι διαφορετικές διατομές ( $x=1d, 2d, 3d, 4d, 5d, 6d$ ).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το παραπάνω πείραμα, φάνηκε πως η ταχύτητα στην είσοδο του αγωγού ουσιαστικά δεν άλλαζε κατά το πέρασμα του χρόνου, σε αντίθεση με την ταχύτητα στην έξοδο, η οποία μεταβαλλόταν αρκετά γρήγορα. Κατά την διάρκεια της παραμόρφωσης, στην έξοδο του αγωγού, δημιουργούνταν δύο jets με ταχύτητα μέτρου τέσσερις φορές μεγαλύτερου από αυτό της ταχύτητας στην είσοδο. Ταυτόχρονα, η διατομή του αγωγού άλλαζε από κυλινδρική σε ελλειπτική και η πίεση έπεφτε πολύ γρήγορα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

### 2.1. Πειραματική διάταξη

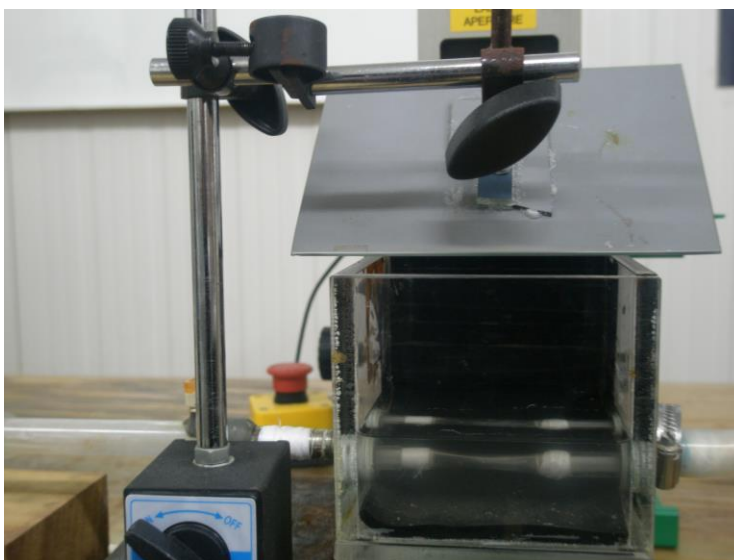
Η πειραματική διάταξη απαρτίζεται από τα εξής μέρη:

1.Εύκαμπτο αγωγό κατασκευασμένο από το ελαστομερές Sylgard 184 της εταιρίας Dow Corning μήκους 45mm,πάχους 0.25mm και εσωτερικής διαμέτρου 8mm.

2.Δύο δεξαμενές ρευστού τοποθετημένες η μια ανάντι και η άλλη κατάντι του αγωγού. Η πρώτη βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού να είναι 640mm ψηλότερα από το επίπεδο που είναι τοποθετημένος ο αγωγός και η δεύτερη 105mm χαμηλότερα από τον αγωγό. Είναι κατασκευασμένες από λαμαρίνα πάχους 2 mm, διαστάσεων 200x210x270. Επίσης, είναι χωρισμένες σε δύο τμήματα, έτσι ώστε η στάθμη του ρευστού να διατηρείται σταθερή μέσω υπερχειλίσης. Η ροή του ρευστού γίνεται μεταξύ των δύο δεξαμενών εκ των οποίων η κατάντι μετατοπίζεται καθ' ύψος μεταβάλλοντας με τον τρόπο αυτόν την πίεση στο εσωτερικό του ελαστικού αγωγού.

3.Το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιήθηκε είναι το νερό. Η πυκνότητα του για  $T=20^{\circ}\text{C}$  είναι  $1000\text{kg/m}^3$  και ο δείκτης διάθλασης 1.33. Προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες παρατήρησης και λήψης των εικόνων, ο αγωγός τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση, σε ορθογωνικό δοχείο, το οποίο επίσης περιείχε μικρή ποσότητα νερού ώστε ο αγωγός να είναι βυθισμένος σε βάθος 30mm. Το δοχείο αυτό, είναι από Plexiglas διαστάσεων 120x120x110 και πάχους 10mm. Για να στηριχθεί ο εύκαμπτος αγωγός, ανοίχθηκαν δύο οπές στη δεξαμενή για να περάσουν δύο άκαμπτοι αγωγοί στους οποίους τον συνδέσαμε. Το δοχείο είναι ανοικτό στο πάνω μέρος και ο αγωγός βρίσκεται υπό σταθερή εξωτερική πίεση ίση με την πίεση περιβάλλοντος αυξημένη κατά το βάθος του νερού των 30mm. Πάνω από το δοχείο αυτό τοποθετήθηκε ορθογωνικός καθρέφτης που σχημάτιζε γωνία 45 μοιρών με την κατακόρυφο. Έτσι το φύλλο φωτός που έδινε το laser έπεφτε πάνω στο καθρέφτη, αντανακλάτο και έπεφτε κατακόρυφα στο σωλήνα κατά τον διαμήκη του άξονα.





Εικόνα 2.1.1: Ο εύκαμπτος αγωγός τοποθετημένος σε ορθογωνικό δοχείο με νερό. Πάνω από το δοχείο φαίνεται και ο καθρέφτης, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την αντανάκλαση του φύλλου φωτός του .

4. Δύο σφαιρικές βάνες R1 και R2 τοποθετημένες ανάντι και κατάντι του αγωγού αντίστοιχα.

5. Πλαστικοί σωλήνες εσωτερικής διαμέτρου 15mm και μήκους ικανού ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης διαμόρφωση της ροής, που χρησιμοποιούνται για τη διακίνηση του νερού μεταξύ των δεξαμενών (το συνολικό μήκος του πλαστικού σωλήνα ανάντι του εύκαμπτου αγωγού είναι 2930 mm, ενώ το συνολικό μήκος του πλαστικού σωλήνα κατάντι του εύκαμπτου αγωγού είναι 1600 mm). Για την σύνδεση, όπου χρειάστηκε μεταξύ των σωληνώσεων, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικοί σφιγκτήρες αφού πρώτα έγινε στεγανοποίηση με Teflon.

6.Περισταλτική αντλία τύπου WATSON-MARLOW 502 S, μέγιστης παροχής 1.7 lt/min. Η περισταλτική αντλία αναρροφά το νερό από την κατάντι δεξαμενή και το μεταφέρει στην ανάντι. Το πλεονέκτημα της είναι η υψηλή της ακρίβεια και η εύκολη βαθμονόμηση ενώ δεν χρειάζεται καθαρισμό μετά την πλήρωση καθώς το ρευστό έρχεται σε επαφή μόνο με το σωλήνα.



Εικόνα 2.1.2: Περισταλτική αντλία τύπου WATSON-MARLOW 502 S.

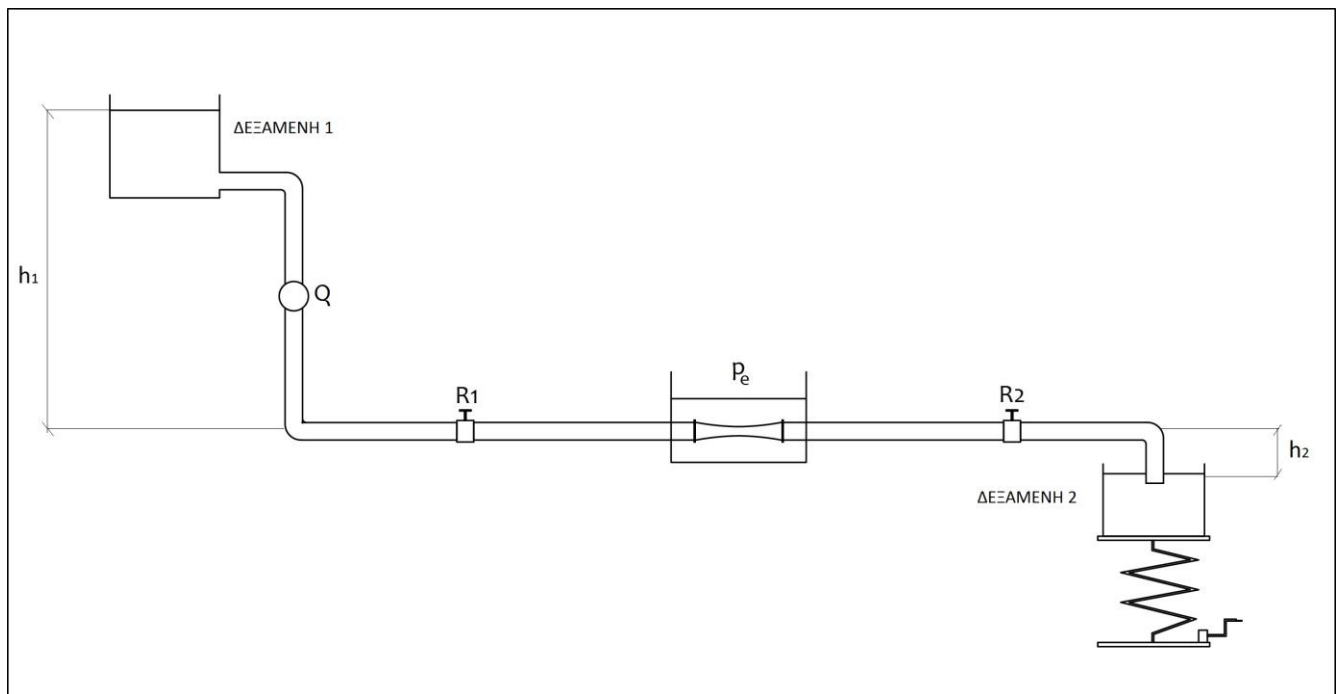
## 2.2. Όργανα μετρήσεων

Χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα:

1. Παροχόμετρο επιπλέοντος σώματος HOSCO. Για τη μέτρηση της παροχής χρησιμοποιήθηκε ένα παροχόμετρο επιπλέοντος σώματος HOSCO, το οποίο τοποθετήθηκε μετά την ανάντι δεξαμενή και πριν τον εύκαμπτο αγωγό. Μονάδα μέτρησης: λίτρα ανά ώρα (LPH). Αποτελείται από δύο στοιχεία, ένα γυάλινο, διαφανή, κωνικό σωλήνα στον οποίο ρέει το ρευστό και ένα πλωτήρα ο οποίος κινείται ελεύθερα κατά μήκος του σωλήνα. Η ροή ασκεί κατακόρυφη δύναμη-αντίσταση στον πλωτήρα μετατοπίζοντάς τον. Ο πλωτήρας ανεβαίνει τόσο ώστε να υπάρξει ισορροπία δυνάμεων μεταξύ βάρους του πλωτήρα, της άνωσης και της αντίστασης.



Εικόνα 2.2.1: Παροχόμετρο επιπλέοντος σώματος HOSCO.



Σχήμα 2.1.1: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης, όπου  $R_1$  και  $R_2$  οι ρυθμιστικές βάνες ανάντι και κατάντι του αγωγού αντίστοιχα,  $Q$  το παροχόμετρο,  $h_1$  η υψομετρική διαφορά της 1<sup>ης</sup> δεξαμενής και του αγωγού, η οποία παραμένει σταθερή και  $h_2$  η υψομετρική διαφορά του αγωγού και της 2<sup>ης</sup> δεξαμενής, η οποία μεταβάλλεται. Ο εύκαμπτος αγωγός βρίσκεται μέσα σε δοχείο με νερό.

### 2.3. Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV)

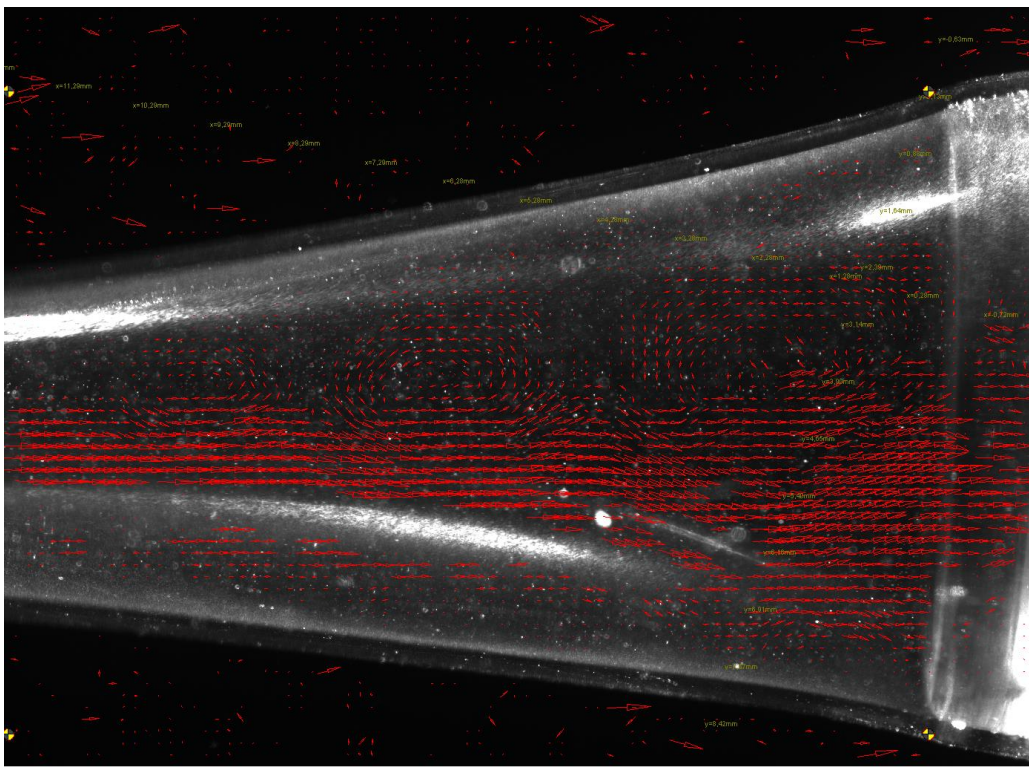
#### Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV):

Το πεδίο ροής καταγράφηκε στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού, ο οποίος είναι σε οριζόντια θέση, με τη χρήση συστήματος 2D-PIV της εταιρείας Oxford Lasers. Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV) είναι μια οπτική μέθοδος απεικόνισης ροής που χρησιμοποιείται στην εκπαίδευση και την έρευνα. Χρησιμοποιείται για μέτρηση ταχυτήτων ρευστο. Η μέθοδος αποτελεί μια μη επεμβατική τεχνική μέτρησης της ταχύτητας του ρευστού, ταυτόχρονα σε πλήθος σημείων ενός επιπέδου. Οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας στο ίδιο επίπεδο προσδιορίζονται από την ανάλυση ζεύγους ψηφιακών εικόνων στις οποίες καταγράφεται η κίνηση γυάλινων σωματιδίων που εμπεριέχονται στο εργαζόμενο μέσο και καθίστανται ορατά, φωτιζόμενα από φύλλο φωτός και ακολουθούν πιστά τη δυναμική της ροής. Τα γυάλινα σωματίδια, σφαιρικού σχήματος, έχουν μέση διάμετρο 10 $\mu$ m και λειτουργούν ως σκεδαστές φωτός. Η πυκνότητά τους είναι προσεγγιστικά ίση με του εργαζόμενου μέσου, με αποτέλεσμα να αιωρούνται και να μην καθιζάνουν. Το φύλλο φωτός παράγεται από πηγή παλλόμενου laser, μήκους κύματος 808nm και βρίσκεται εκτός του ορατού φάσματος του φωτός. Το διάστημα μεταξύ δύο αναλαμπών του laser επιλέχθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα 200ms.



Εικόνα 2.3.1: Παλλόμενο laser της Oxford Lasers, μήκους κύματος 808nm.

Για την καταγραφή των εικόνων χρησιμοποιείται κάμερα CCD (Charge Coupled Device), η οποία επιτρέπει τη λήψη έως και 6 ζευγών/δευτερόλεπτο σε συνδυασμό με macro φακό (tamron) για μεγέθυνση. Τα δεδομένα μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου υπόκεινται σε ψηφιακή επεξεργασία με τη βοήθεια του λογισμικού VidPIV v4.6 όπου τελικά πραγματοποιείται η εξαγωγή των διανυσμάτων της ταχύτητας του ρευστού. Η λεπτομερής διαδικασία επεξεργασίας των εικόνων καθώς και εξαγωγής και βελτιστοποίησης των διανυσμάτων γίνεται με τη βοήθεια του MATLAB.



Εικόνα 3.2.2: Φωτογραφία του αγωγού με το πεδίο ροής έτσι όπως επεξεργάστηκε από το λογισμικό VidPIV.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

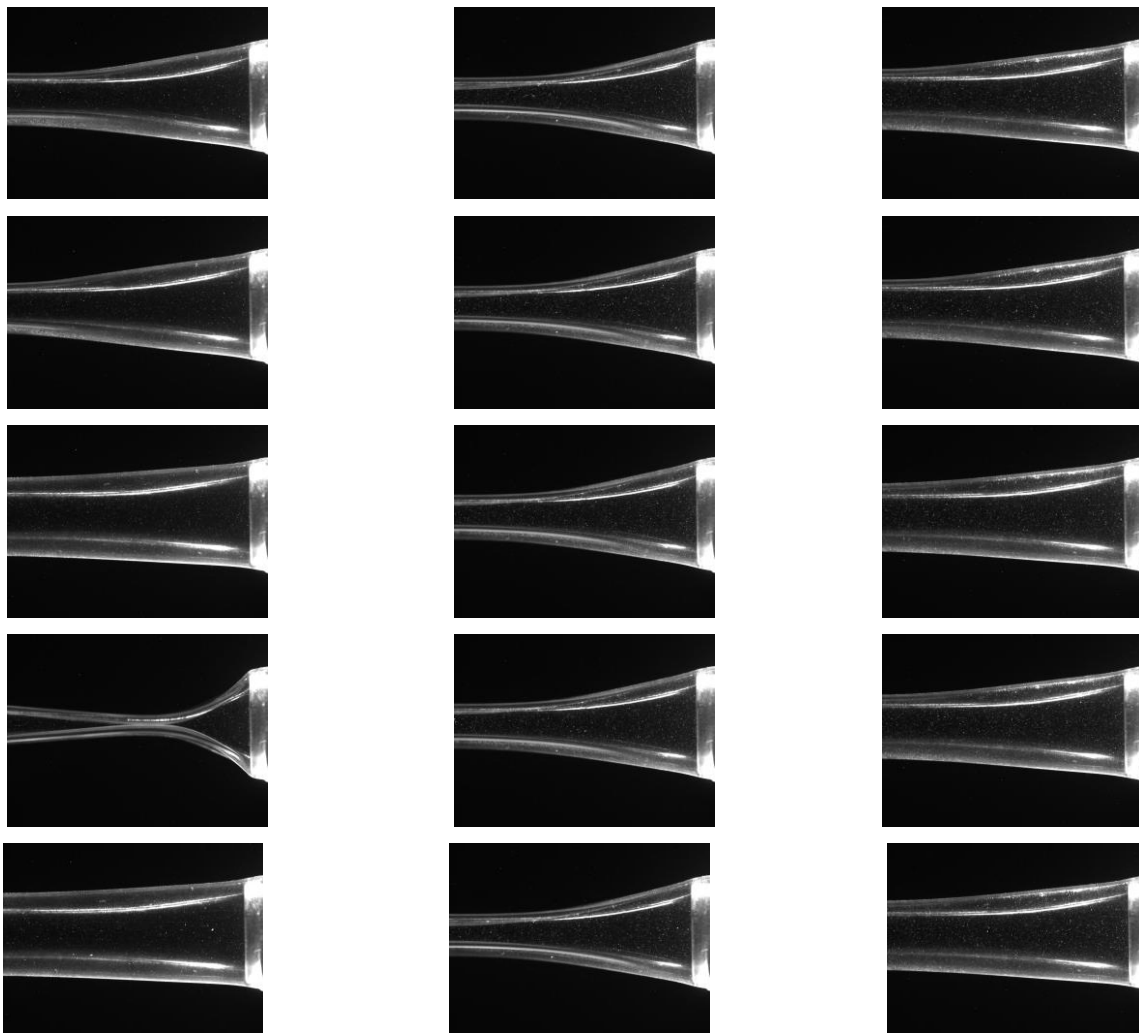
## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα. Αυτό συνέβη γιατί, αφού έγινε το πρώτο πείραμα και οι πρώτες παρατηρήσεις αποφασίσαμε να ελέγξουμε λεπτομερέστερα τη μεταβατική φάση, όπου ο αγωγός περνά από την ταλάντωση στην ηρεμία εντοπίζοντας αστάθειες της ροής. Για να το επιτύχουμε αυτό, στο δεύτερο πείραμα, μειώσαμε το βήμα μεταβολής της στάθμης της κατάντι δεξαμενής από τα 2mm στο 1mm.

### 3.1.ΠΕΙΡΑΜΑ 1<sup>ο</sup>

Αφού ετοιμάστηκαν τα μετρητικά όργανα, η πειραματική διάταξη τέθηκε σε λειτουργία. Η ανάντι βάνα ανοίχθηκε πλήρως όπως και η κατάντι και η παροχή διατηρήθηκε σταθερή στα 0.91 lt/min. Το ύψος της στάθμης του ανάντι δοχείου παρέμεινε σταθερό στα 640mm πάνω από το ύψος του σωλήνα. Σταδιακά μεταβάλλουμε το ύψος στάθμης του κατάντι δοχείου, αρχίζοντας απ' τα 105mm κάτω από τον αγωγό. Για τη συγκεκριμένη υψομετρική διαφορά των δύο δοχείων ο αγωγός τέθηκε σε αυτοταλάντωση. Το ύψος στάθμης του κατάντι δοχείου αυξανόταν με βήμα των 2 mm (περίπου 2% της αρχικής υψομετρικής διαφοράς αγωγού-ύψους στάθμης κατάντι δεξαμενής) και σε κάθε περίπτωση καταγραφόταν με την κάμερα η ροή στην έξοδο του σωλήνα. Από τις μετρήσεις που καταγράφηκαν, επικεντρωθήκαμε σε είκοσι περιπτώσεις διαφορετικού ύψους στάθμης του κατάντι δοχείου (κάτω απ' το ύψος του σωλήνα) και συγκεκριμένα από h=65mm, όπου είχαμε κανονική ταλάντωση έως h=27mm, όπου η ταλάντωση είχε σβήσει.

Αρχικά, παρατίθενται φωτογραφίες της εξόδου του αγωγού (η ροή είναι από αριστερά προς τα δεξιά) σε διάφορες φάσεις, ξεκινώντας από τη φάση της ταλάντωσης έως ότου αυτή πάψει. Επιλέχθηκε η έξοδος του σωλήνα γιατί εκεί παρατηρήθηκε γενικότερα αστάθεια της ροής και συγκεκριμένα δημιουργία δινών και αποκόλληση της ροής.



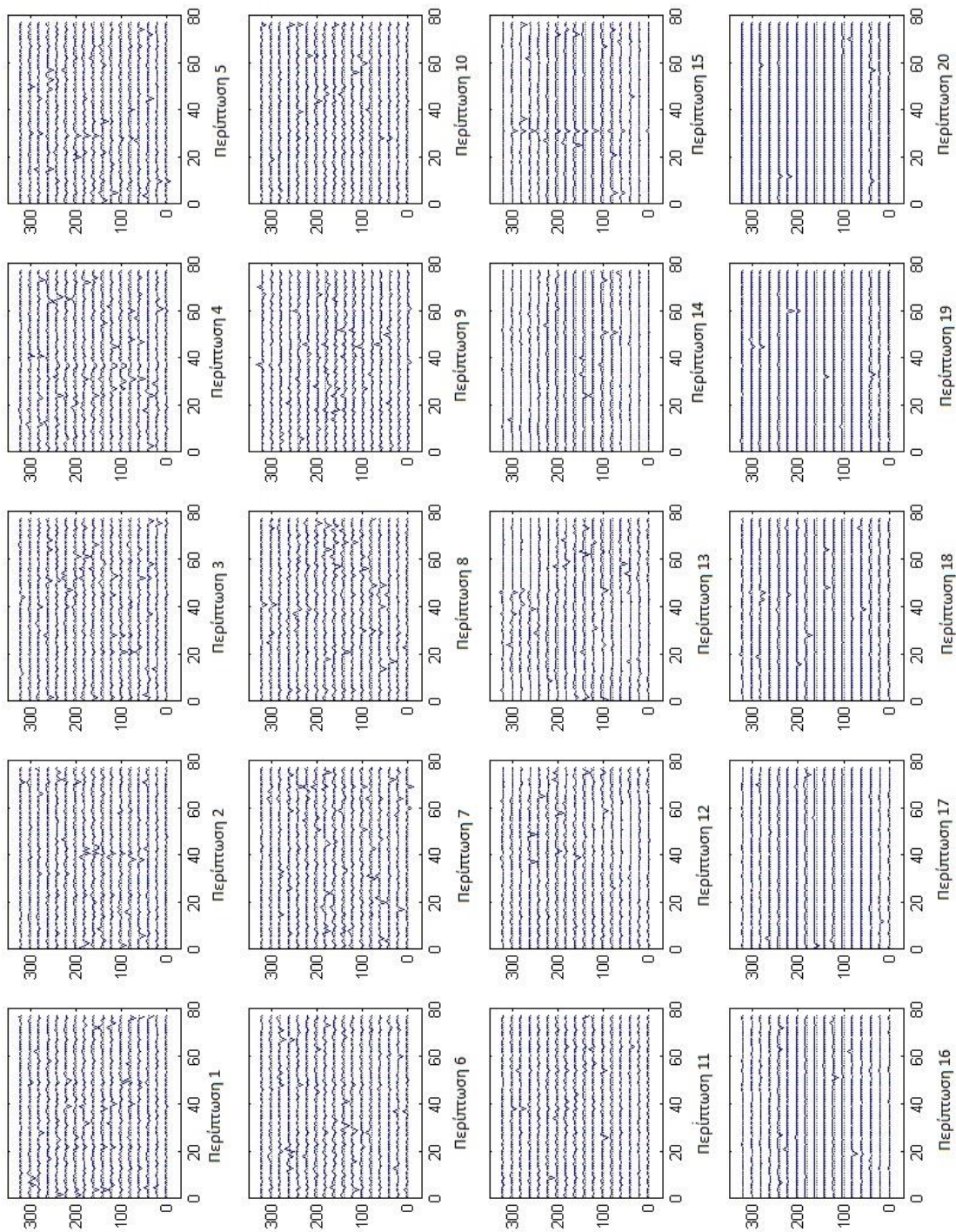
Εικόνα 3.1.1: Στην πρώτη, δεύτερη και τρίτη στήλη φαίνεται μια αλληλουχία φωτογραφιών του αγωγού στις περιπτώσεις 3, 14 και 20 αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες παραπάνω, στην πρώτη περίπτωση ο αγωγός ταλαντώνεται κανονικά (ύψος στάθμης κατάντι δεξαμενής 61mm κάτω από το σωλήνα), στη δεύτερη περίπτωση (ύψος στάθμης κατάντι δεξαμενής 39mm) ο αγωγός βρίσκεται σε μια μεταβατική φάση και τέλος στη τρίτη περίπτωση (ύψος στάθμης κατάντι δεξαμενής 27mm) η ταλάντωση έχει σχεδόν πάψει.



Η επεξεργασία των εικόνων που ελήφθησαν έγινε με τη μέθοδο PIV και στη συνέχεια, έχοντας τα διανύσματα της ταχύτητας και με τη βοήθεια της MATLAB (στο Παράρτημα Α δίνονται ενδεικτικά κάποιοι από τους κώδικες) καταλήξαμε στα παρακάτω αποτελέσματα.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Διάγραμμα 3.1.1) φαίνονται αδιαστατοποιημένες ως προς την ταχύτητα εισόδου,  $(U_{in} = \frac{303mm}{sec})$ , οι αξονικές ταχύτητες σε 17 συγκεκριμένα σημεία μιας διατομής του αγωγού κοντά στην έξοδο του συναρτήσει του αριθμού εικόνας. Η συχνότητα λήψης φωτογραφιών είναι περίπου 5 φωτογραφίες/δευτερόλεπτο. Ξεκινώντας από πάνω αριστερά και συνεχίζοντας οριζόντια, παρατηρούμε το πώς εξελίσσεται η ταχύτητα από τη φάση που ο αγωγός ταλαντώνεται έως τη φάση που η ταλάντωση έχει πρακτικά σταματήσει.

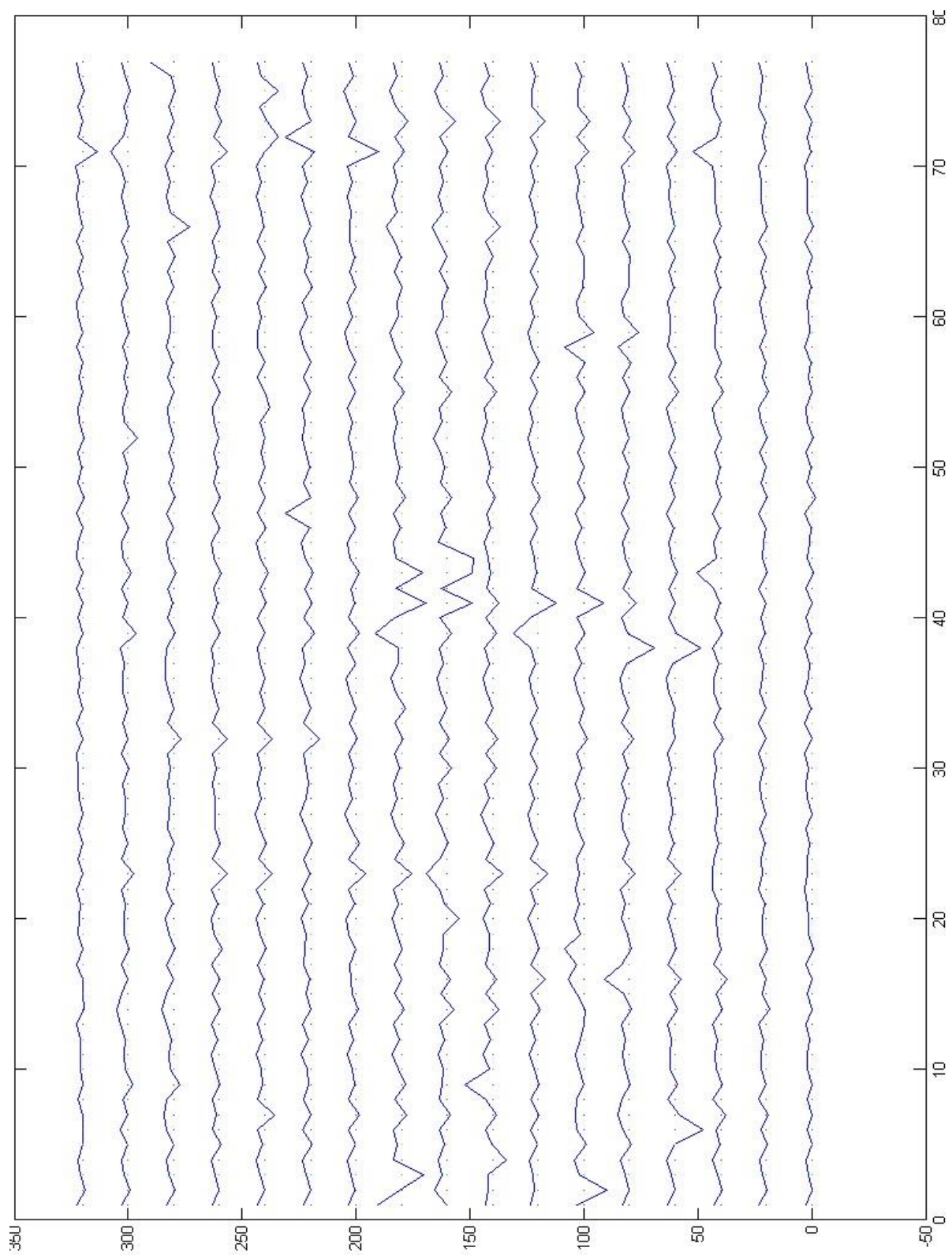


Διάγραμμα 3.1.1: Οι ταχύτητες σε 17 συγκεκριμένα σημεία μιας διατομής του αγωγού προς την έξοδό του.

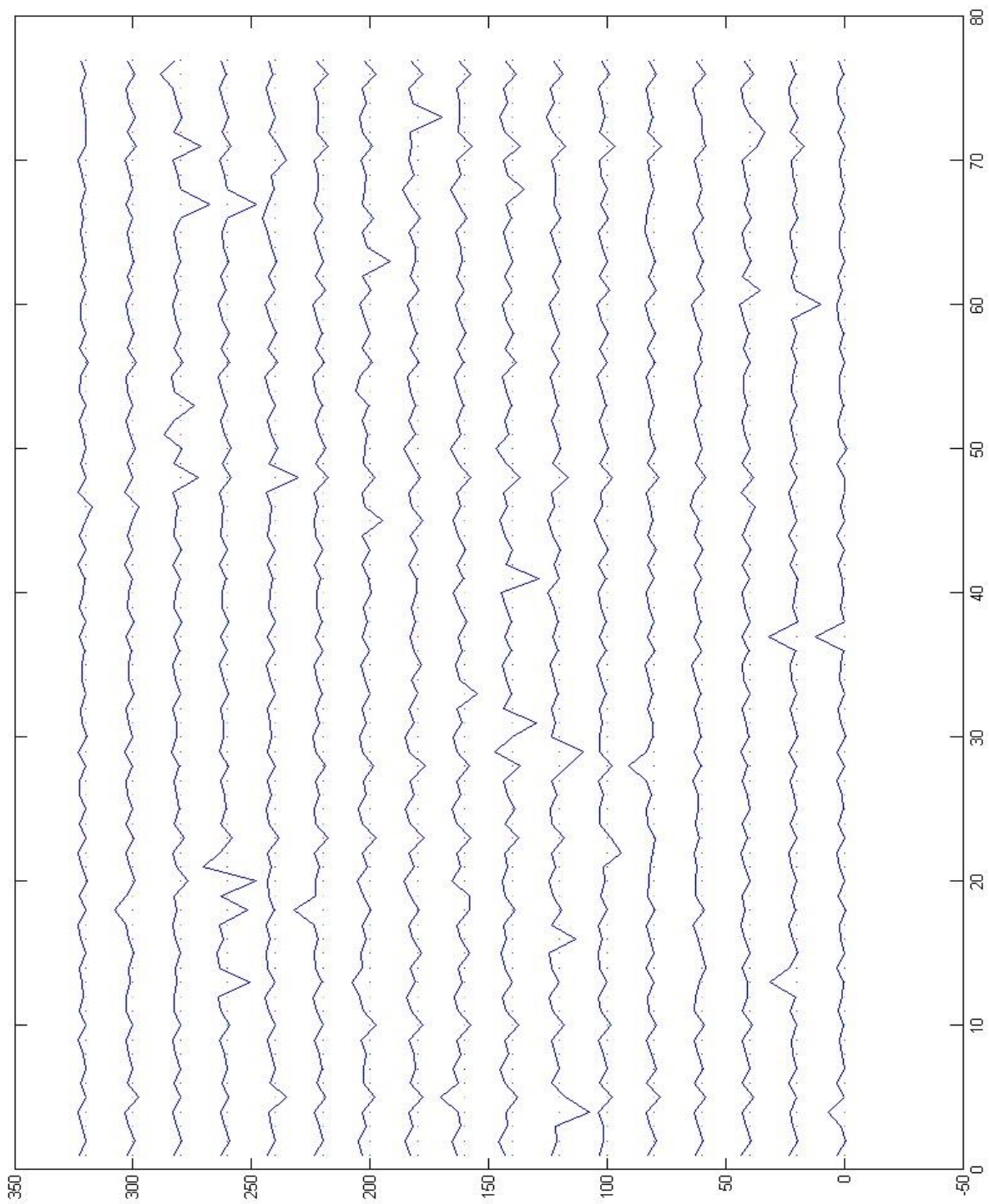
Παρατηρείται πως από την 1<sup>η</sup> φάση έως περίπου την 15<sup>η</sup> γίνεται έντονα η ταλάντωση. Από την 13<sup>η</sup> όμως περίπτωση (ύψος στάθμης 41mm κάτω απ' τον αγωγό), η ταλάντωση αρχίζει να σβήνει και έως και την 16<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 35mm κάτω απ' τον αγωγό), θα μπορούσαμε να πούμε ότι βρισκόμαστε σε μια μεταβατική περιοχή, στην οποία παρατηρείται αποκόλληση της ροής ( $u \approx 0 \text{ mm/sec}$ ), πάνω ή κάτω του οριζόντιου άξονα συμμετρίας του αγωγού ή και εκατέρωθεν. Δηλαδή, η ροή περιορίζεται κατά κάποιο τρόπο στο κέντρο του αγωγού.

Στις φάσεις 17-20, η ροή είναι πιο ομαλή, χωρίς πολλές διακυμάνσεις στις ταχύτητες, ώσπου ο αγωγός παύει σχεδόν να ταλαντώνεται, όταν το ύψος της στάθμης έχει φτάσει στα 27mm κάτω από τον αγωγό.

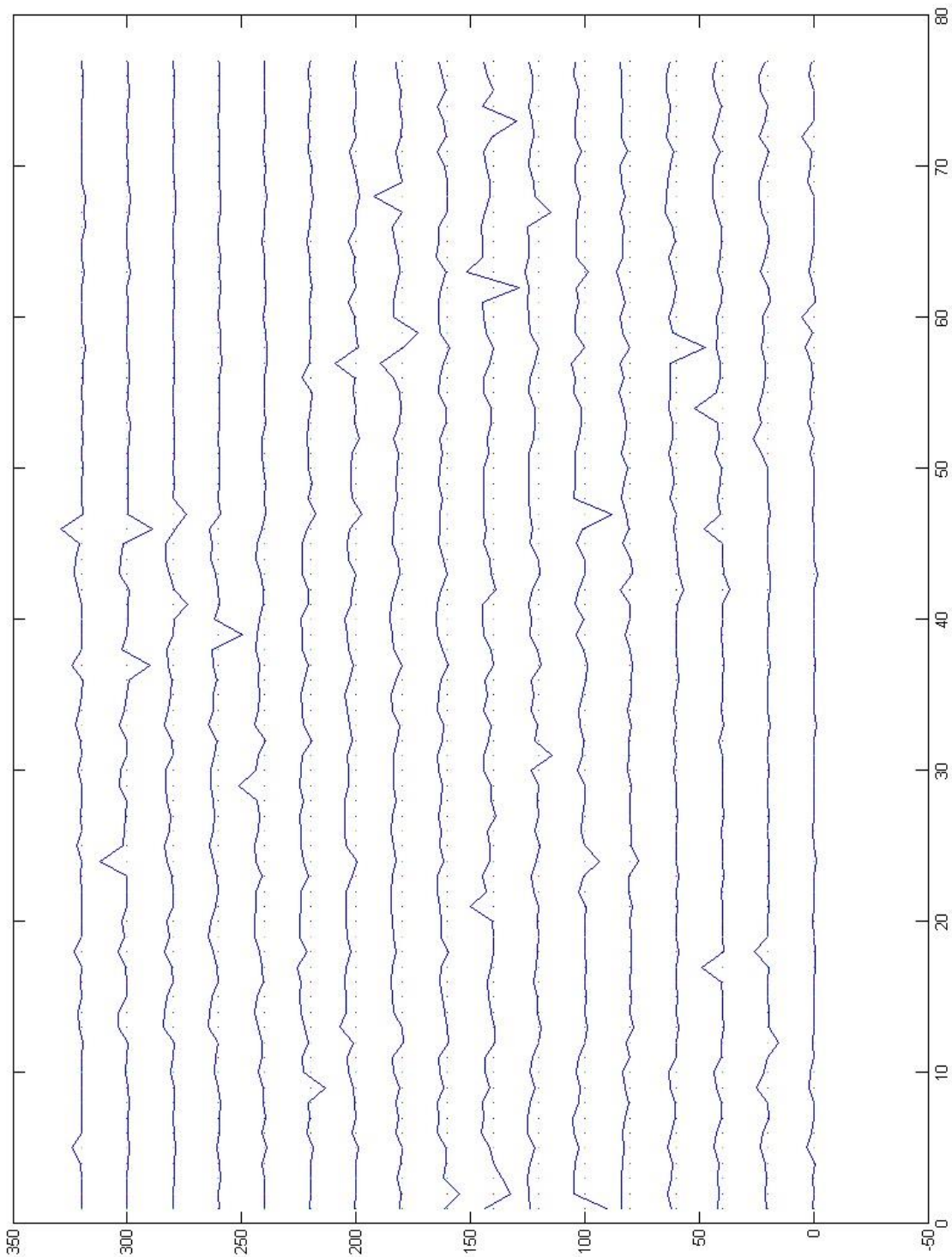
Στα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 3.1.2 έως 3.1.8) φαίνεται με περισσότερη λεπτομέρεια πως μεταβάλλεται χρονικά η ταχύτητα για καθένα από τα 17 επιλεγθέντα σημεία της συγκεκριμένης διατομής του αγωγού με το πέρασμα του χρόνου σε 7 αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις. Για καθένα από τα 17 σημεία της διατομής ο άξονας του μηδέν απεικονίζεται με διακεκομμένες γραμμές.



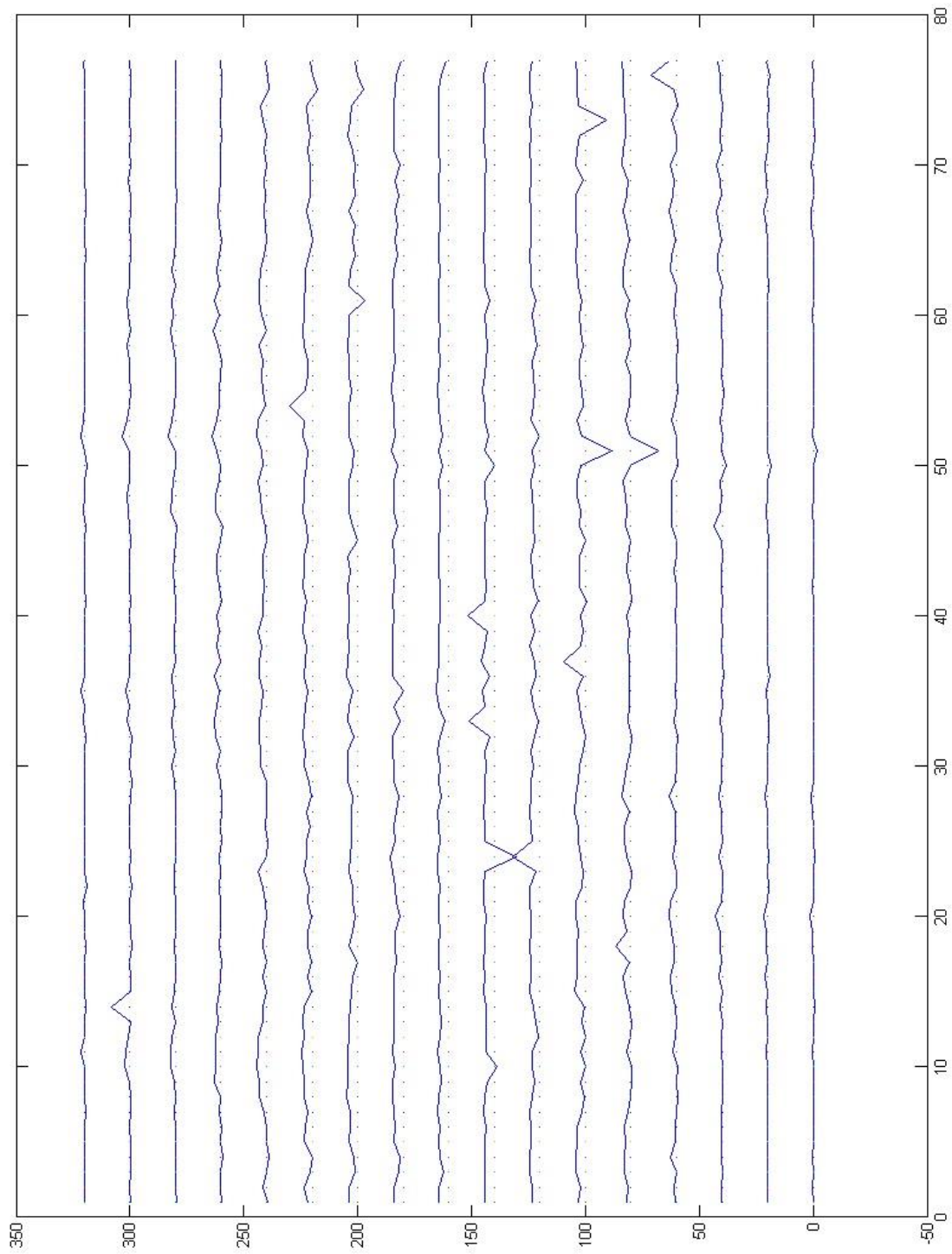
Διάγραμμα 3.1.2: Οι ταχύτητες στη 2<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 63 mm κάτω από τον αγωγό).



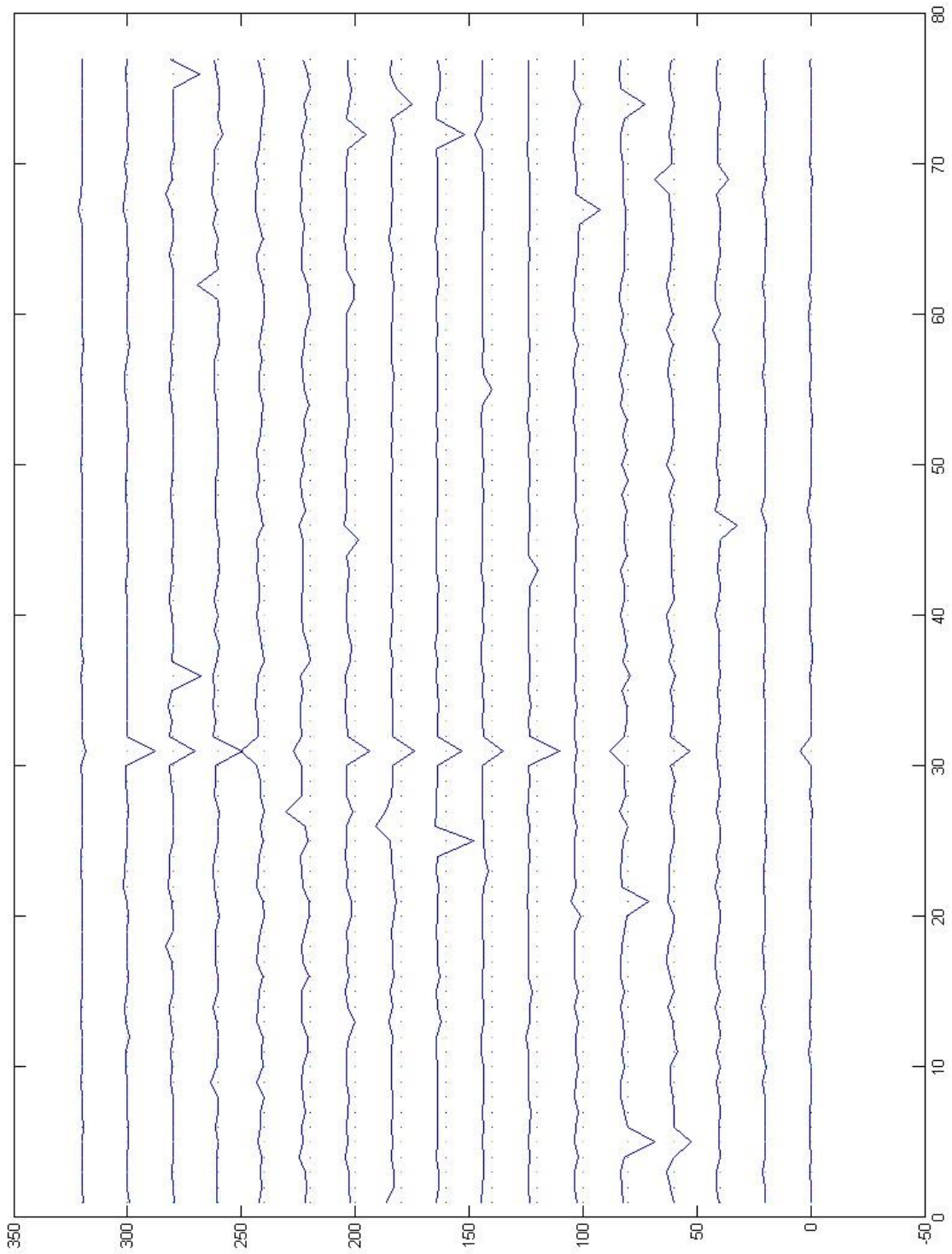
Διάγραμμα 3.1.3: Οι ταχύτητες στην 6<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 55mm κάτω από τον αγωγό).



Διάγραμμα 3.1.4: Οι ταχύτητες στη 13<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 41mm κάτω από τον αγωγό).

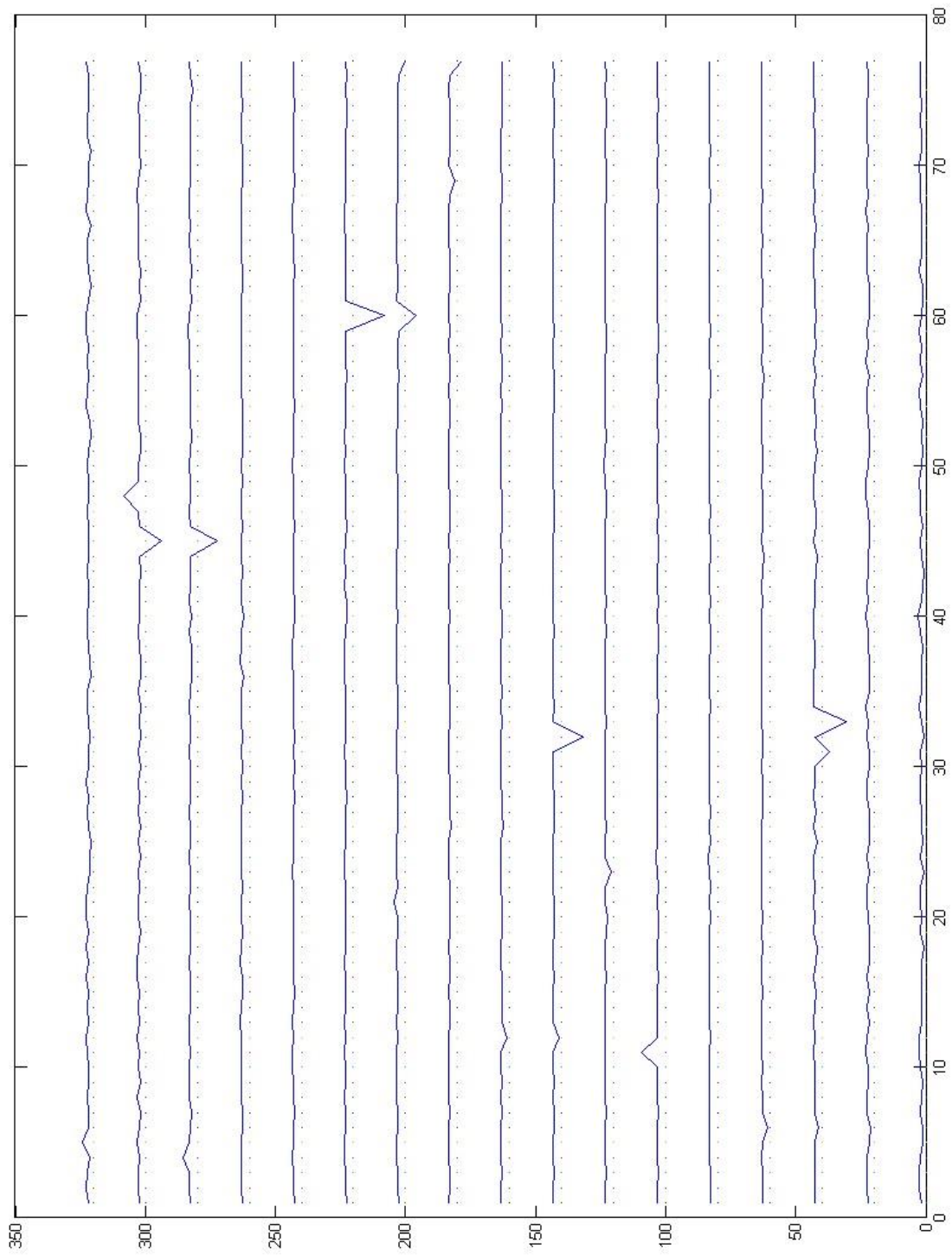


Διάγραμμα 3.1.5: Οι ταχύτητες στη 14<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 39mm κάτω από τον αγωγό).

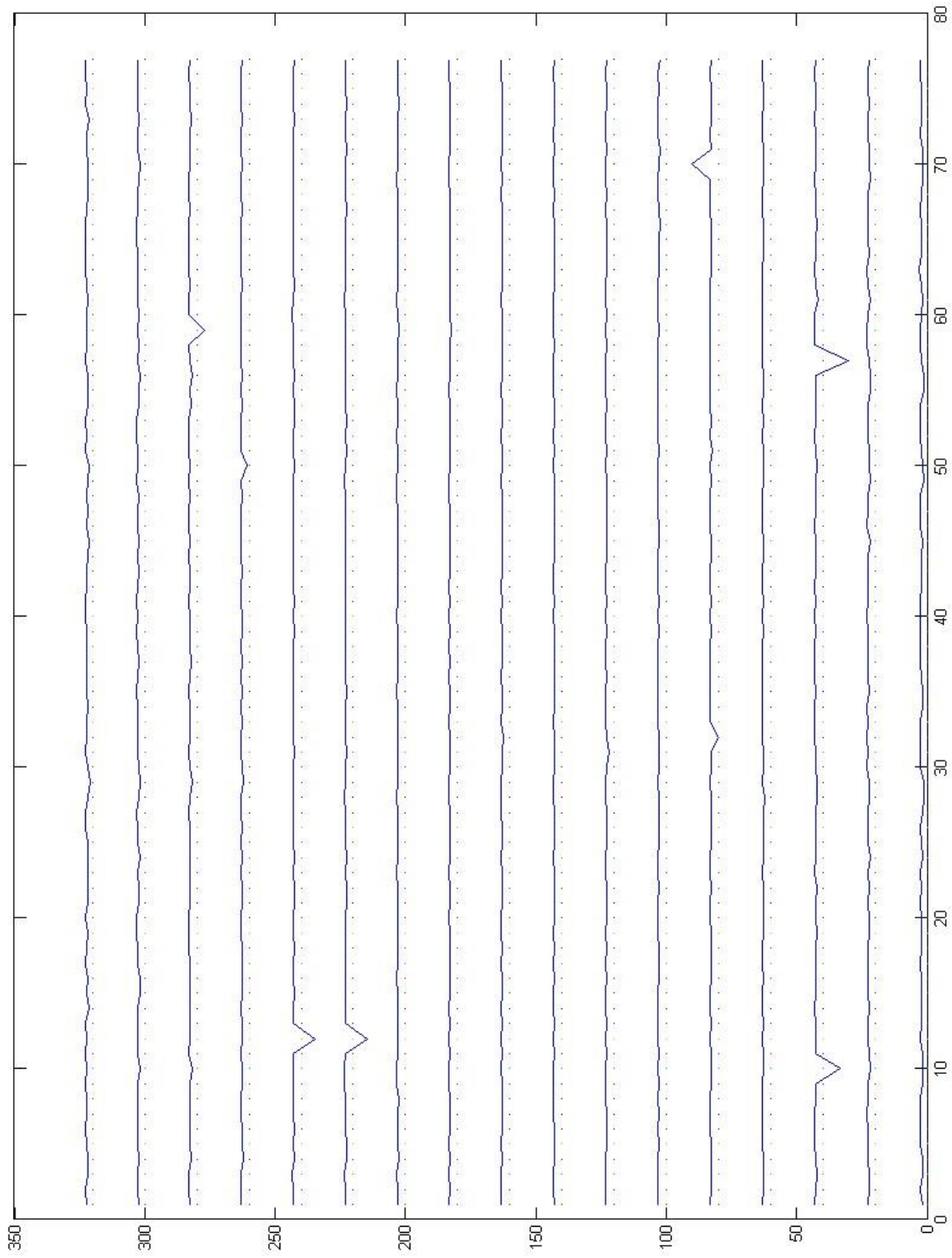


Διάγραμμα 3.1.6: Οι ταχύτητες στη 15<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 37mm κάτω από τον αγωγό).





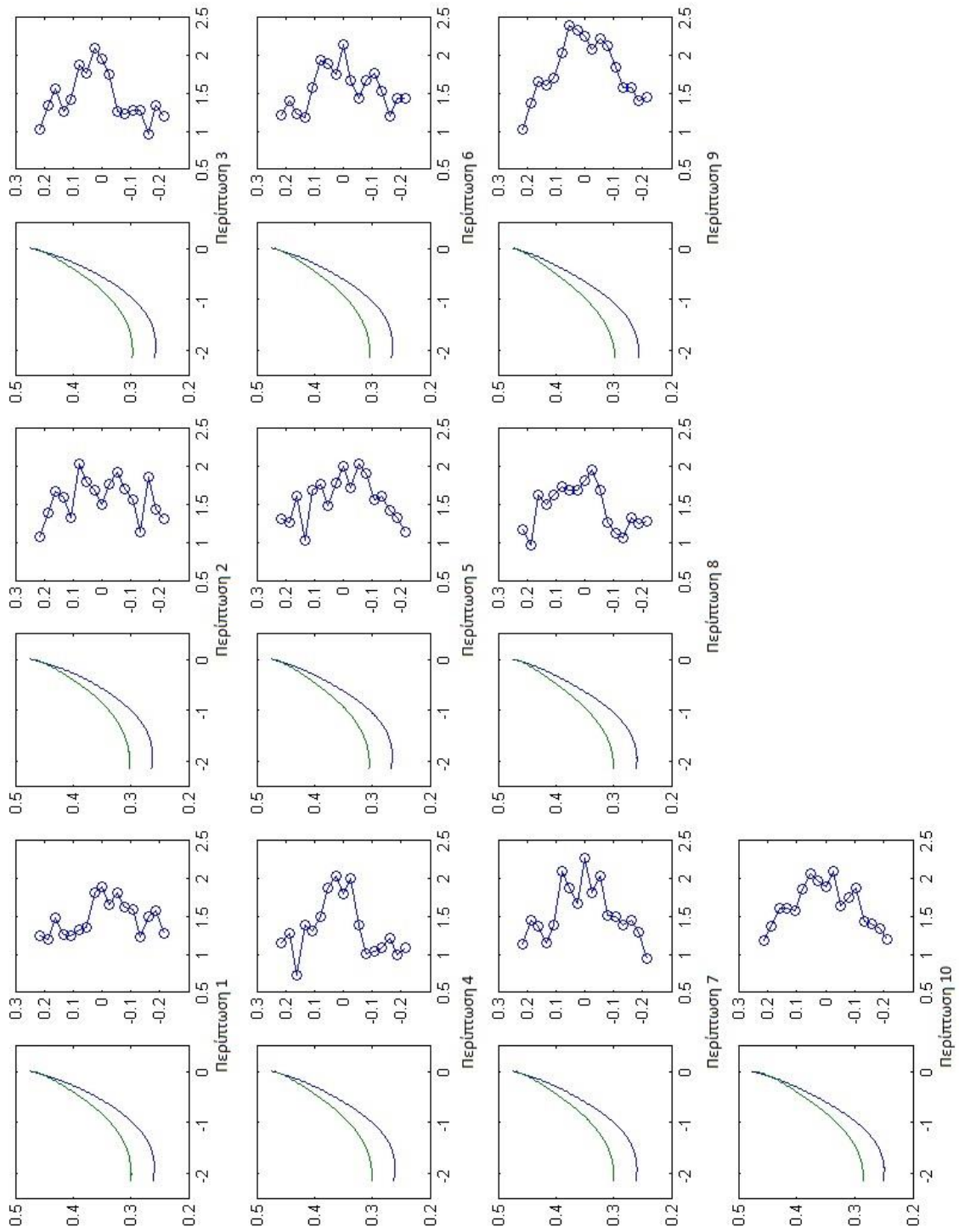
Διάγραμμα 3.1.7: Οι ταχύτητες στη 19<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 29mm κάτω από τον αγωγό).



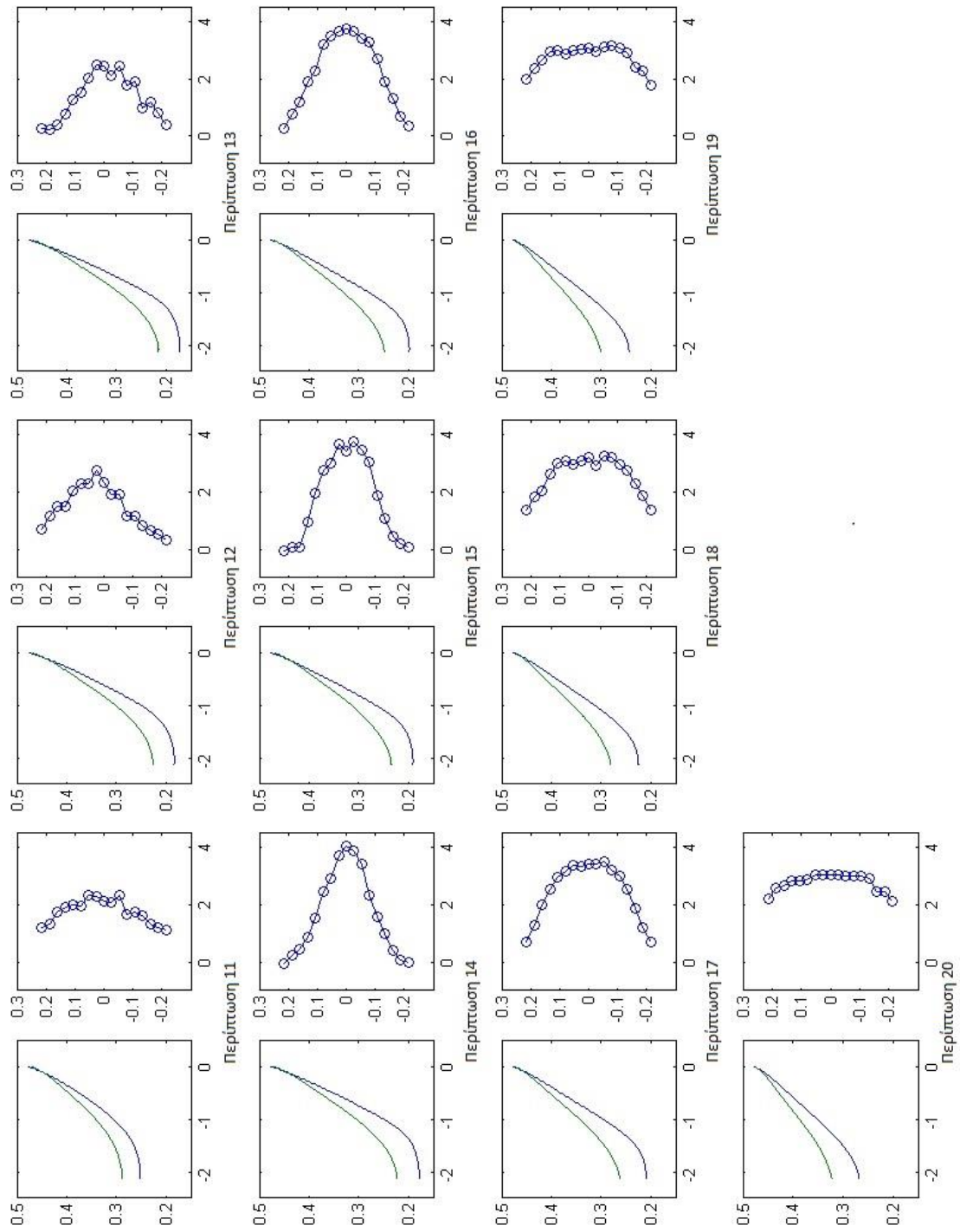
Διάγραμμα 3.1.8: Οι ταχύτητες στην 20<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 27mm κάτω από τον αγωγό).

Στα παρακάτω διαγράμματα ( Διαγράμματα 3.1.9 και 3.1.10) δίνονται τα μέσα όρια του αγωγού (απόσταση του τοιχώματος του αγωγού από τον αξονά του αδιαστατοποιημένο με τη διάμετρο του αγωγού) για καθεμία από τις είκοσι περιπτώσεις (στο Παράρτημα Α αναφέρεται λεπτομερώς η διαδικασία εύρεσης του περιγράμματος του αγωγού) με βάση τις 75 εικόνες που ελήφθησαν σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα, φαίνεται το πάνω όριο (μπλε) του αγωγού και το κάτω (πράσινο) το οποίο είναι όμως αναδιπλωμένο ως προς τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας του άκαμπτου σωλήνα στον οποίο είναι συνδεδεμένος ο ελαστικός αγωγός (δεξί μέρος της φωτογραφίας). Το παρουσιάζουμε με τη μορφή αυτή για να φαίνεται καλύτερα η (α)συμμετρία των ορίων ενώ τα διαγράμματα των ταχυτήτων είναι αδιαστατοποιημένα ως προς την ταχύτητα εισόδου. Στα διαγράμματα αυτά, καθώς και στα υπόλοιπα, στον άξονα x αναφέρεται η απόσταση από την έξοδο του αγωγού ( $x=0$ ) αδιαστατοποιημένη με τη διάμετρό του.

Στο Διάγραμμα 3.1.9 φαίνονται οι δέκα πρώτες περιπτώσεις, ξεκινώντας από πάνω αριστερά, όπου γίνεται ταλάντωση και στο Διάγραμμα 3.1.10 φαίνονται οι δέκα τελευταίες περιπτώσεις, όπου η ταλάντωση έχει αρχίσει να εξασθενεί.



Διάγραμμα 3.1.9: Μέσα όρια αγωγού και ταχύτητες για τις δέκα πρώτες περιπτώσεις (ύψος στάθμης από 65 έως 47mm-ανά 2mm- κάτω από τον αγωγό).



Διάγραμμα 3.1.10: Μέσα όρια αγωγού και ταχύτητες για τις δέκα τελευταίες περιπτώσεις (ύψος στάθμης από 45 έως 27mm κάτω από τον αγωγό).

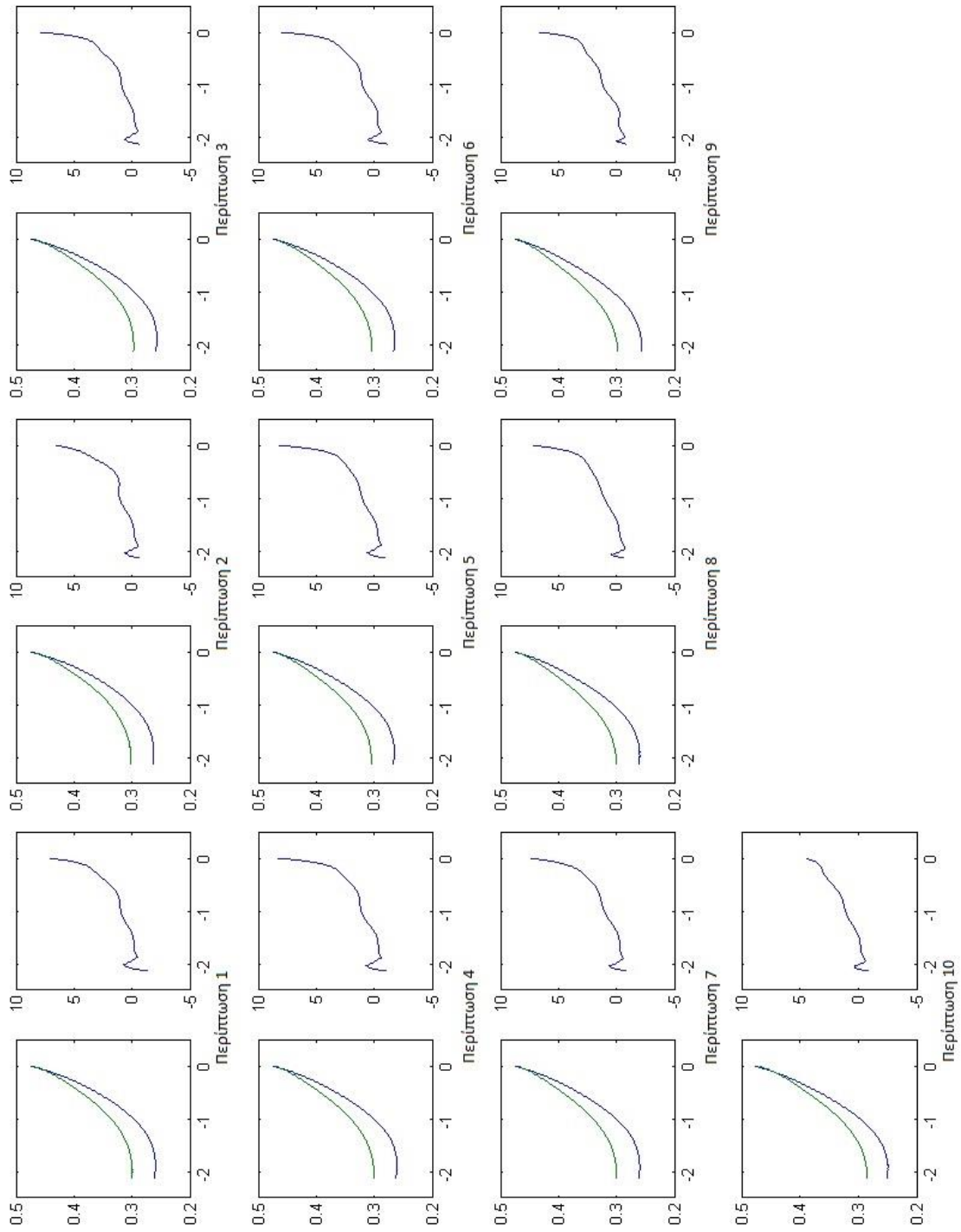
Είναι εμφανές πως σε όλες τις περιπτώσεις δεν υπάρχει συμμετρία των ορίων του αγωγού, αφού αυτά δεν ταυτίζονται. Γενικώς υπάρχει μια ασυμμετρία μεταξύ των δύο ορίων της τάξης του 5% της διαμέτρου με το πάνω όριο να είναι πλησιέστερο προς τον άξονα του αγωγού. Επίσης, η ακτίνα στη μικρότερη διατομή του λαιμού κυμαίνεται μεταξύ 20% και 30% της διαμέτρου.

Στις περιπτώσεις 1 έως 10 περίπου, που γίνεται ταλάντωση, παρατηρούνται διακυμάνσεις στις ταχύτητες, οι οποίες δεν ακολουθούν έναν συγκεκριμένο ρυθμό αλλά είναι ασταθείς. Σε καμία όμως περίπτωση δεν εμφανίζεται αποκόλληση της ροής.

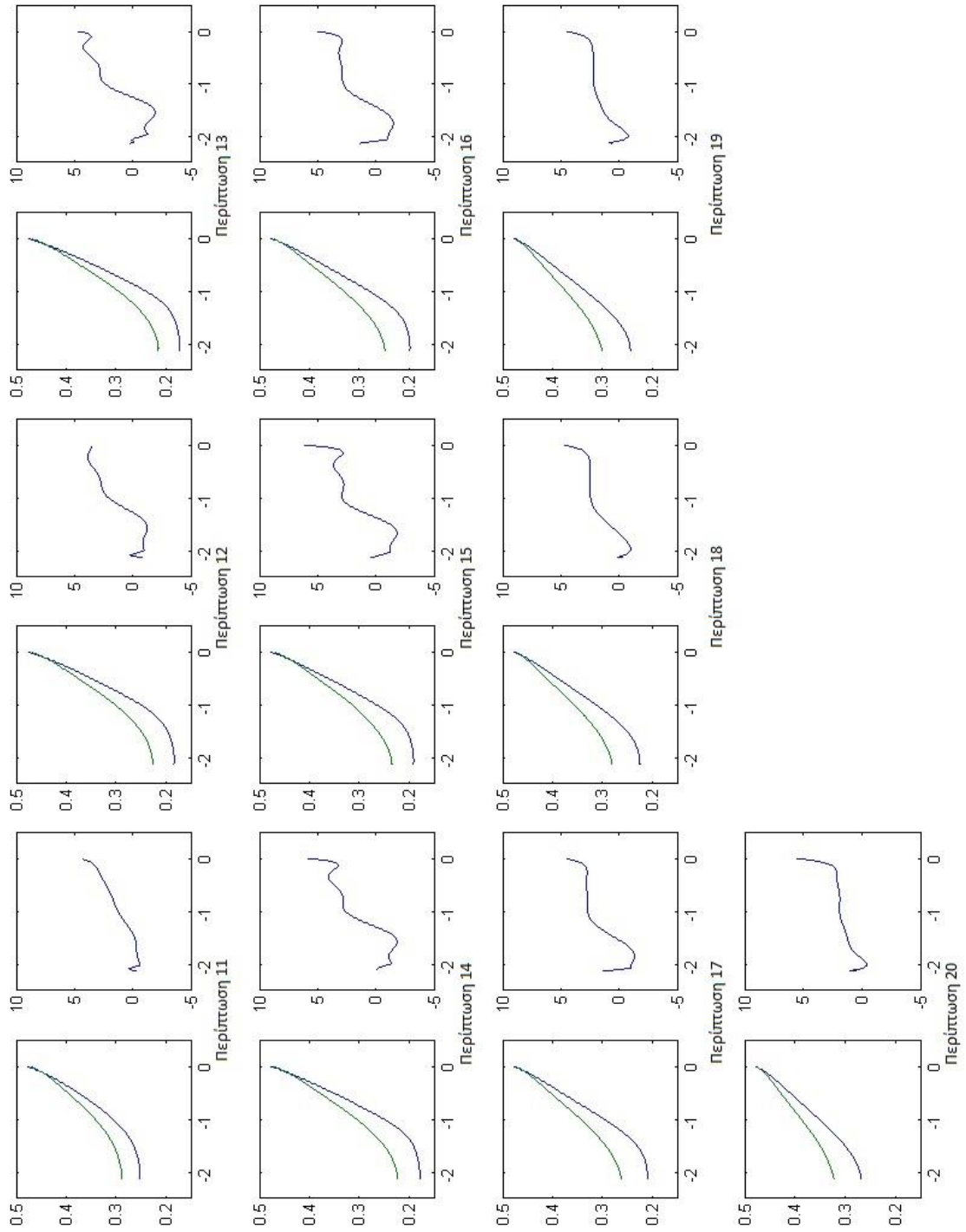
Στις περιπτώσεις 13 έως 18, οι οποίες είναι και οι μεταβατικές για την ταλάντωση, τα διαγράμματα ταχυτήτων παρουσιάζουν μια συμμετρία. Ταυτόχρονα, βλέπουμε πως η ροή περιορίζεται γύρω από τον άξονα του αγωγού, ενώ κοντά στα οριά του η ταχύτητα μηδενίζεται, δηλαδή έχουμε αποκόλληση της ροής. Αυτό είναι πιο εμφανές στις περιπτώσεις 14 και 15.

Στις φάσεις 19 έως 20, όπου η ταλάντωση έχει πια σβήσει, παρατήρηται μια αρκετά ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα ( Διαγράμματα 3.1.11 και 3.1.12) των ορίων του αγωγού, όπως και προηγουμένως και δεξιά τους η διαφορά των απολύτων μέσων γωνιών του πάνω και κάτω ορίου ως προς τον άξονα συμμετρίας κατά το μήκος του σωλήνα.



Διάγραμμα 3.1.11: Μέσα όρια και διαφορά απολύτων μέσων γωνιών για τις δέκα πρώτες περιπτώσεις (ύψος στάθμης από 65 έως 47mm κάτω από τον αγωγό).

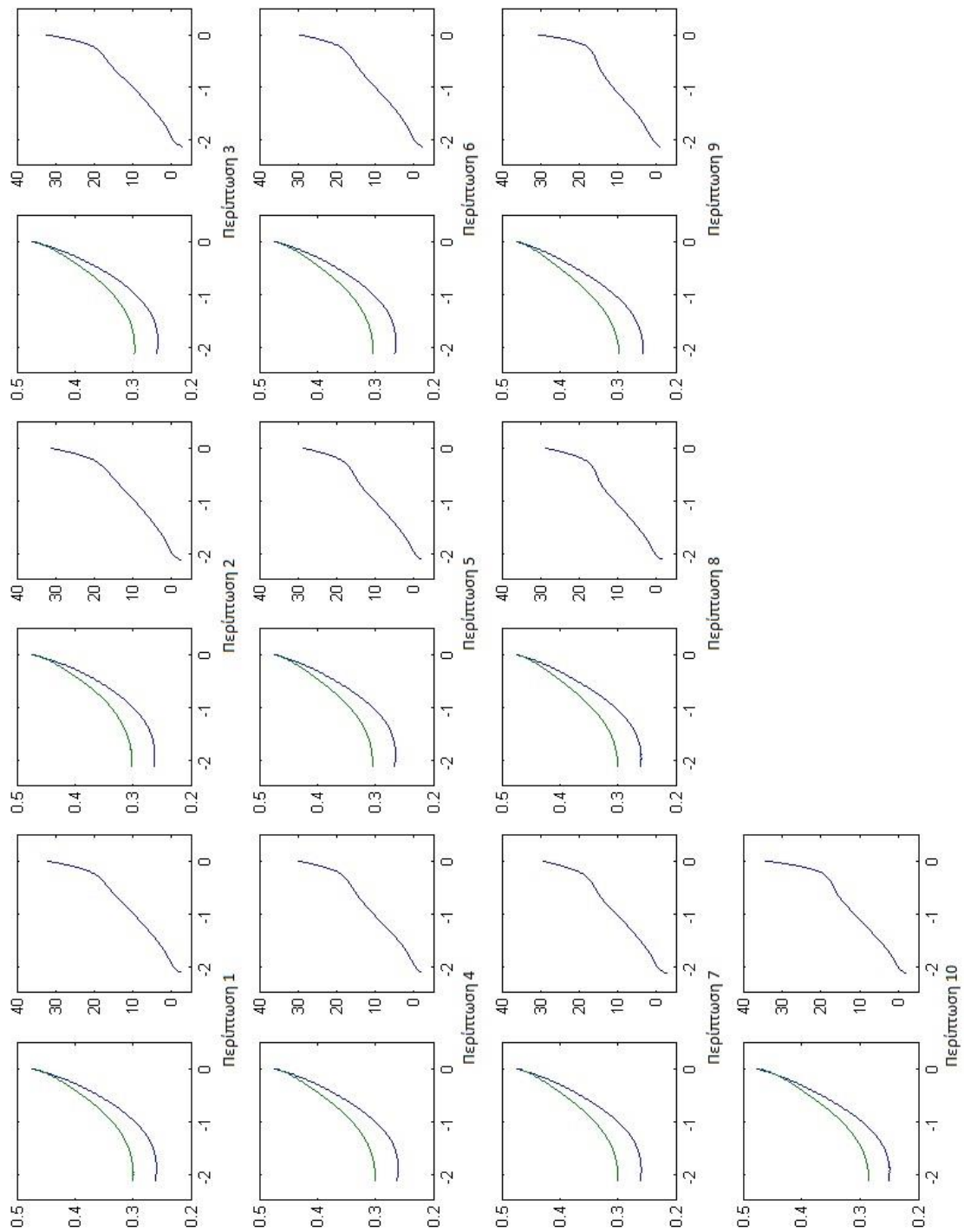


Διάγραμμα 3.1.12: Μέσα όρια και διαφορά απολύτων μέσων γωνιών για τις δέκα τελευταίες περιπτώσεις ( ύψος στάθμης από 45 έως 27mm κάτω από τον αγωγό).

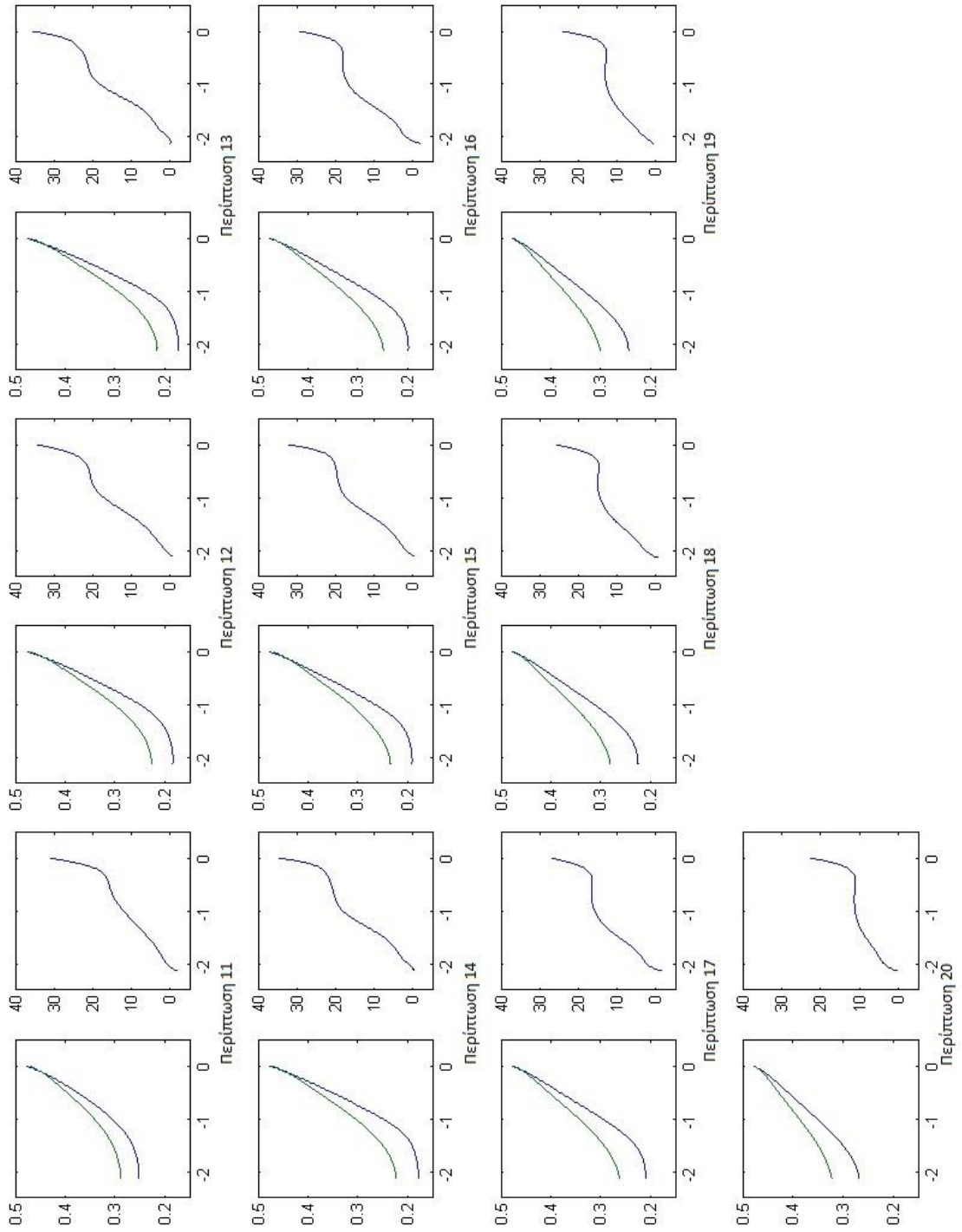


Στη μεταβατική φάση, από την ταλάντωση στην ηρεμία, δηλαδή στις περιπτώσεις 11 έως 18, παρατηρείται μείωση της διαφοράς των απολύτων μέσων γωνιών, γεγονός που σημαίνει πως τα όρια του αγωγού είναι σχετικά συμμετρικά ως προς τον άξονα του αγωγού. Μεγαλύτερη διαφορά γωνιών παρατηρείται όταν έχουμε κανονική ταλάντωση (περιπτώσεις 1-10), δηλαδή, εμφανίζεται μια μεγαλύτερη ασυμμετρία μεταξύ των αντιδιαμετρικών σημείων του αγωγού.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα (Διαγράμματα 3.1.13 και 3.1.14) των ορίων όπως και προηγουμένως και δεξιά τους τα διαγράμματα των ολικών μέσων γωνιών κατά μήκος του αγωγού, δηλαδή η γωνία του διαχύτη κατά το μήκος του.



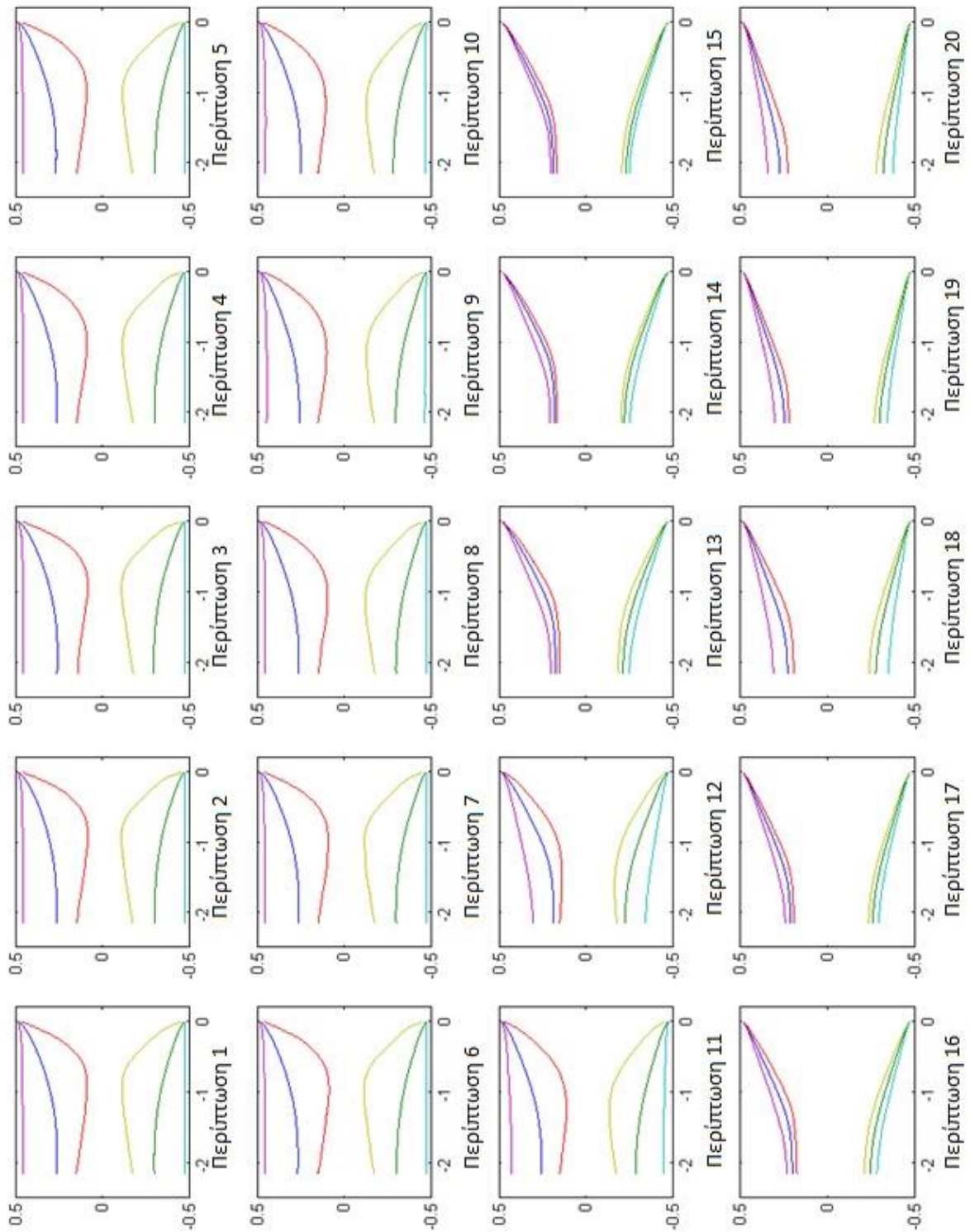
Διάγραμμα 3.1.13: Μέσα όρια και ολική μέση γωνία για τις δέκα πρώτες περιπτώσεις ( ύψος στάθμης από 65 έως 47mm κάτω από τον αγωγό).



Διάγραμμα 3.1.14: Μέσα όρια και διαφορά απολύτων μέσων γωνιών για τις δέκα τελευταίες περιπτώσεις ( ύψος στάθμης από 45 έως 27mm κάτω από τον αγωγό).

Παρατηρείται πως η γωνία του διαχύτη είναι κατά τη φάση της ταλάντωσης κατά μέσον όρο περίπου 20 μοίρες ενώ αυτή γίνεται περίπου η μισή όταν τείνει να σταματήσει η ταλάντωση.

Τέλος, στο Διάγραμμα 3.1.15, φαίνονται τα μέγιστα, ελάχιστα και μέσα όρια για κάθε περίπτωση (1-20).



Διάγραμμα 3.1.15: Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα όρια για κάθε περίπτωση.

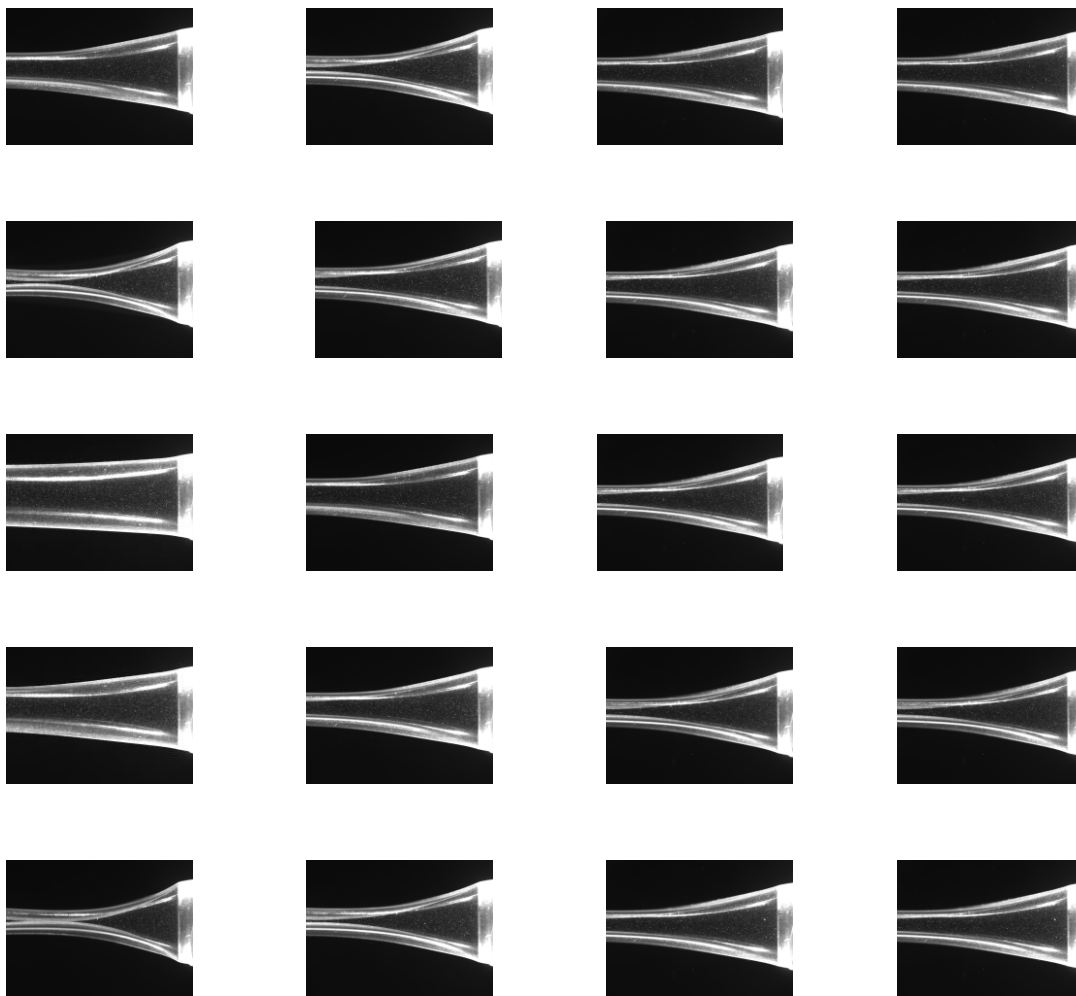
Κατά τη φάση της περιοδικής ταλάντωσης του αγωγού, ο αγωγός ανοίγει εντελώς (σε κάποια φάση της περιοδικής κίνησης) αλλά κλείνει και πολύ, καθώς τα ελάχιστα όρια του αγωγού πλησιάζουν πολύ κοντά μεταξύ τους. Καθώς όμως η ταλάντωση αρχίζει να σβήνει, τα όρια του αγωγού δεν μεταβάλλονται έντονα, όπως φαίνεται και στις τελευταίες περιπτώσεις.

### 3.2.ΠΕΙΡΑΜΑ 2<sup>ο</sup>

Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε υπό τις ίδιες συνθήκες όπως το πρώτο. Αυξάνοντας το ύψος της στάθμης της κατάντι δεξαμενής με βήματα του 1mm αυτή τη φορά (περίπου 1% της αρχικής υψομετρικής διαφοράς αγωγού-κατάντι δεξαμενής) πήραμε μετρήσεις για δώδεκα περιπτώσεις από τις οποίες “κρατήσαμε” τις τέσσερις (43, 42, 41 και 40mm κάτω από τον αγωγό), όπου είναι εμφανής η μετάβαση του αγωγού από την ταλάντωση στην ηρεμία. Με τον ίδιο τρόπο, όπως και στο προηγούμενο πείραμα, επεξεργαστήκαμε τις μετρήσεις με το λογισμικό VidPIV v4.6 και στη συνέχεια με τη MATLAB και καταλήξαμε στα παρακάτω αποτελέσματα. Αυτή τη φορά χωρίσαμε τον αγωγό σε τμήματα (έξοδος- είσοδος- μέση) και εξετάσαμε το καθένα ξεχωριστά.

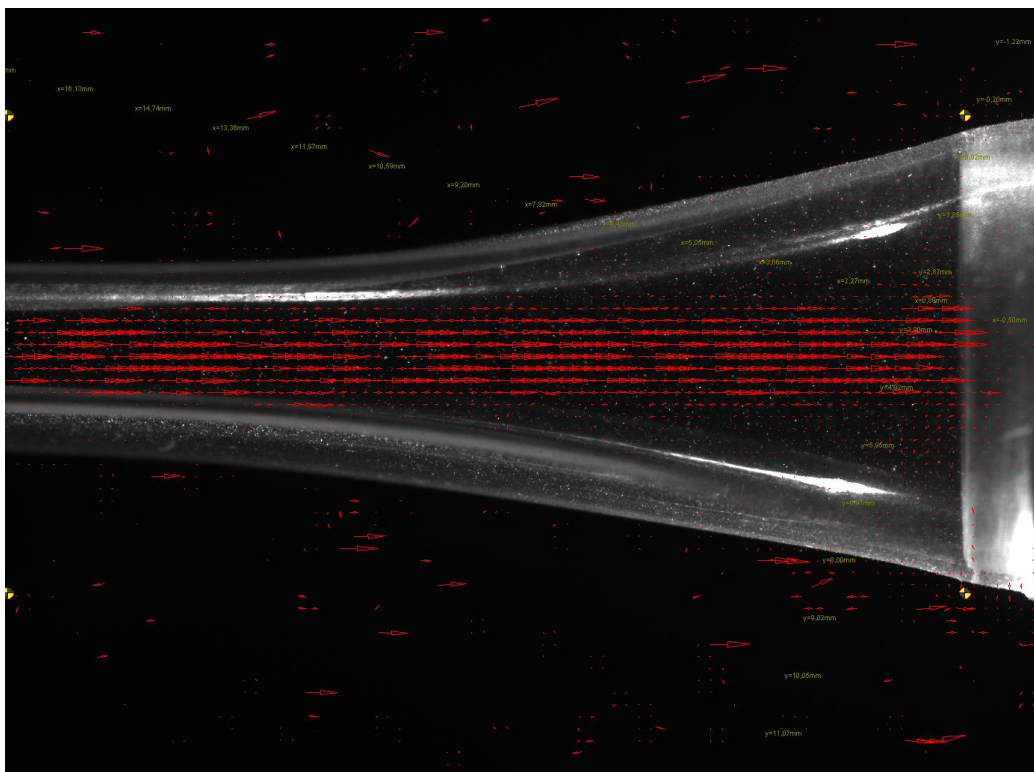
### Έξοδος αγωγού.

Αρχικά δίνονται διαδοχικές φωτογραφίες του αγωγού για καθεμία από τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάζουμε.

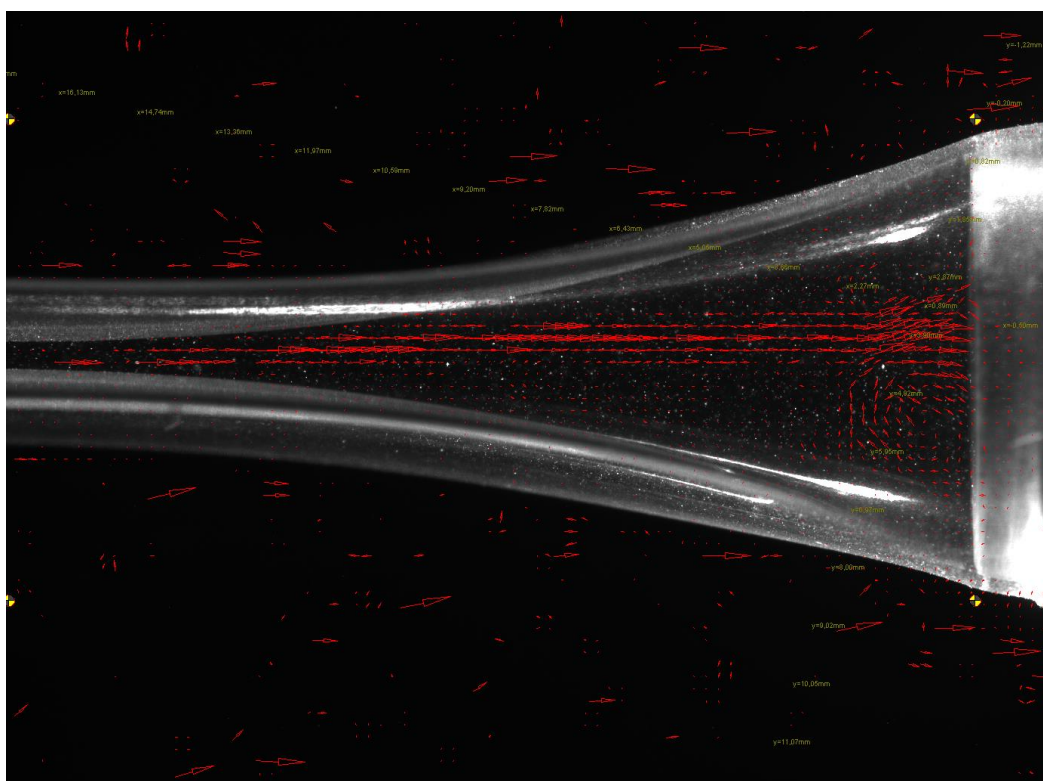


Εικόνα 3.2.1: Διαδοχικές φωτογραφίες του αγωγού για καθεμία από τις τέσσερις περιπτώσεις (ανά στήλη). Η πρώτη στήλη είναι για ύψος στάθμης 43mm κάτω από τον αγωγό, η δεύτερη αντίστοιχα για 42mm, η τρίτη για 41mm και η τέταρτη στήλη για 40mm.

Στη συνέχεια δίνονται φωτογραφίες, οι οποίες αφορούν κάποιες αντιπροσωπευτικές εικόνες του πεδίου ταχυτήτων της ροής.

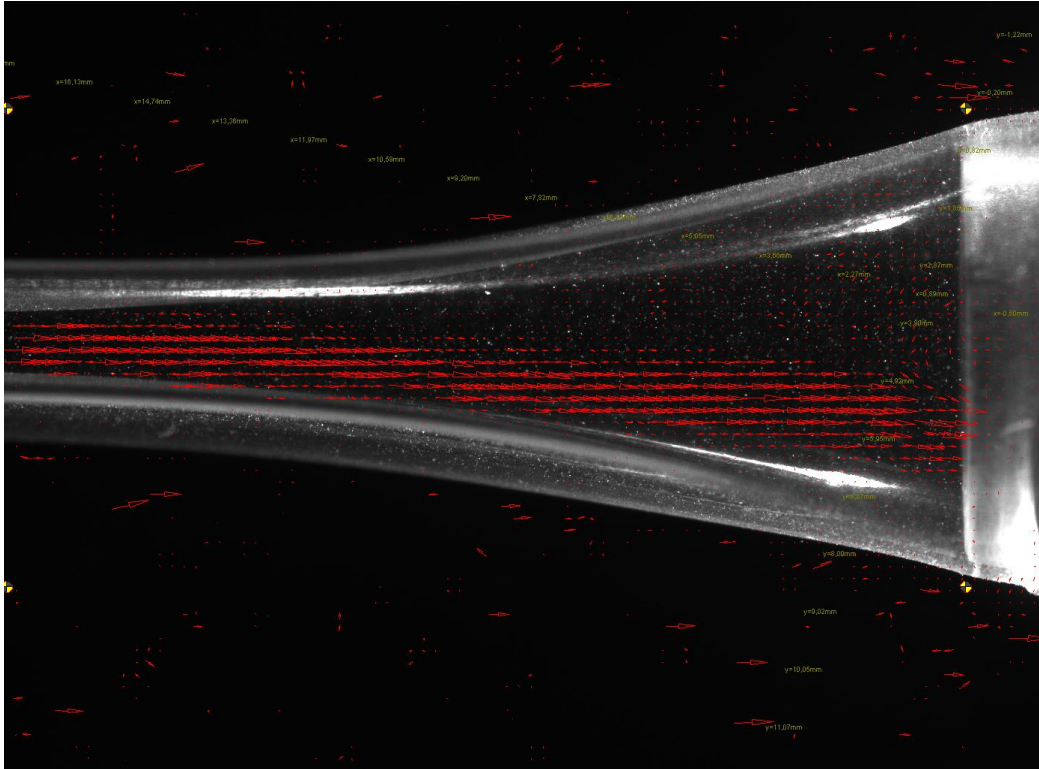


Εικόνα 3.2.2: Η ροή είναι αποκολλημένη εκατέρωθεν του άξονα του αγωγού.

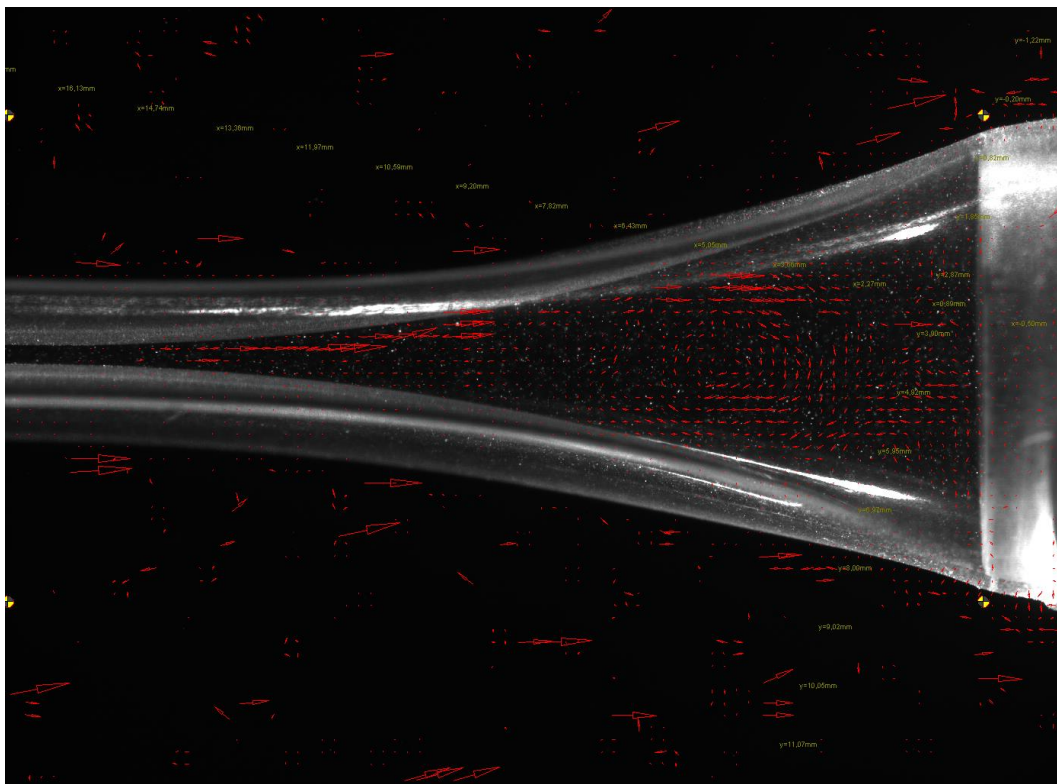


Εικόνα 3.2.3: Αποκόλληση της ροής κάτω και πάνω από τον άξονα του αγωγού καθώς και μια δίνη προς την έξοδο του αγωγού (κάτω δεξιά).

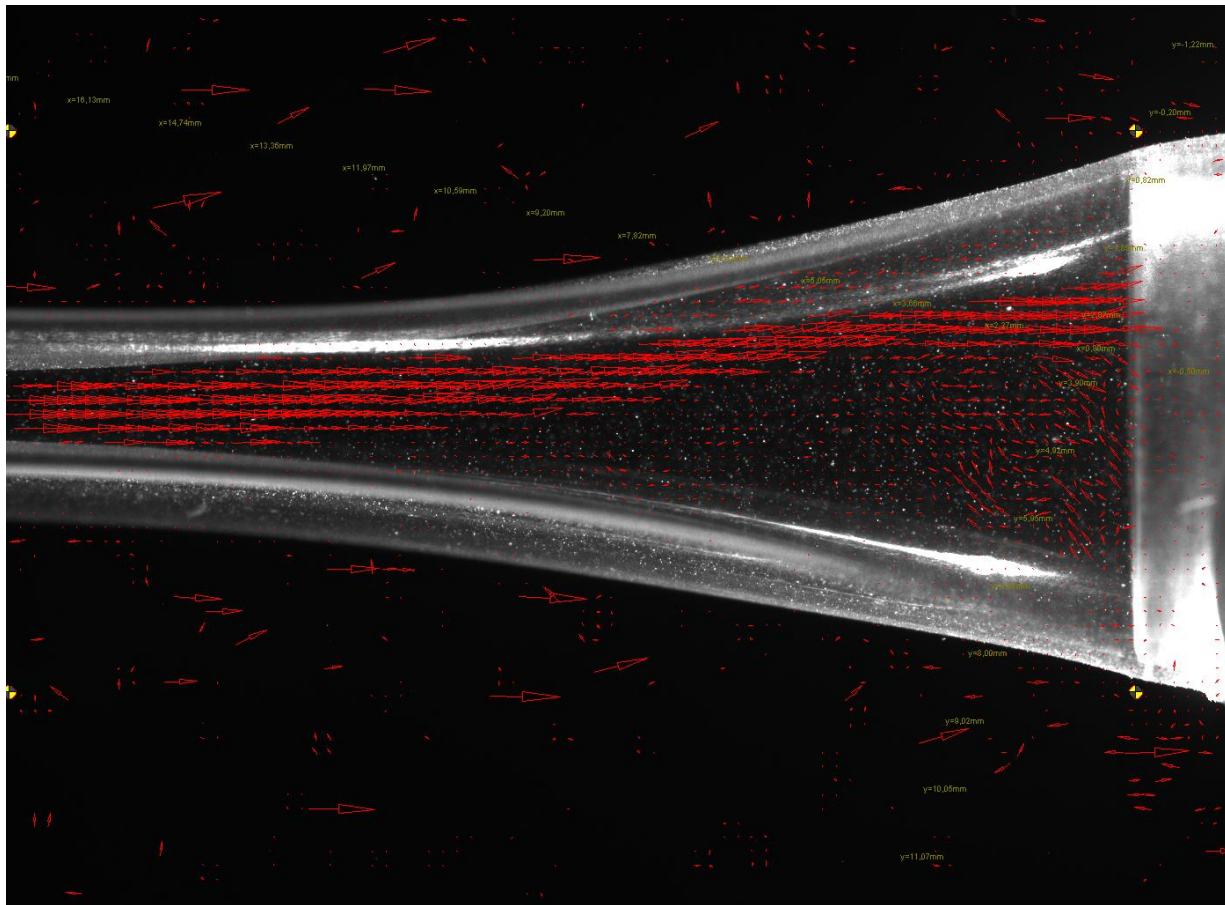




Εικόνα 3.2.4: Η ροή είναι αποκολλημένη στην πάνω πλευρά της εξόδου.

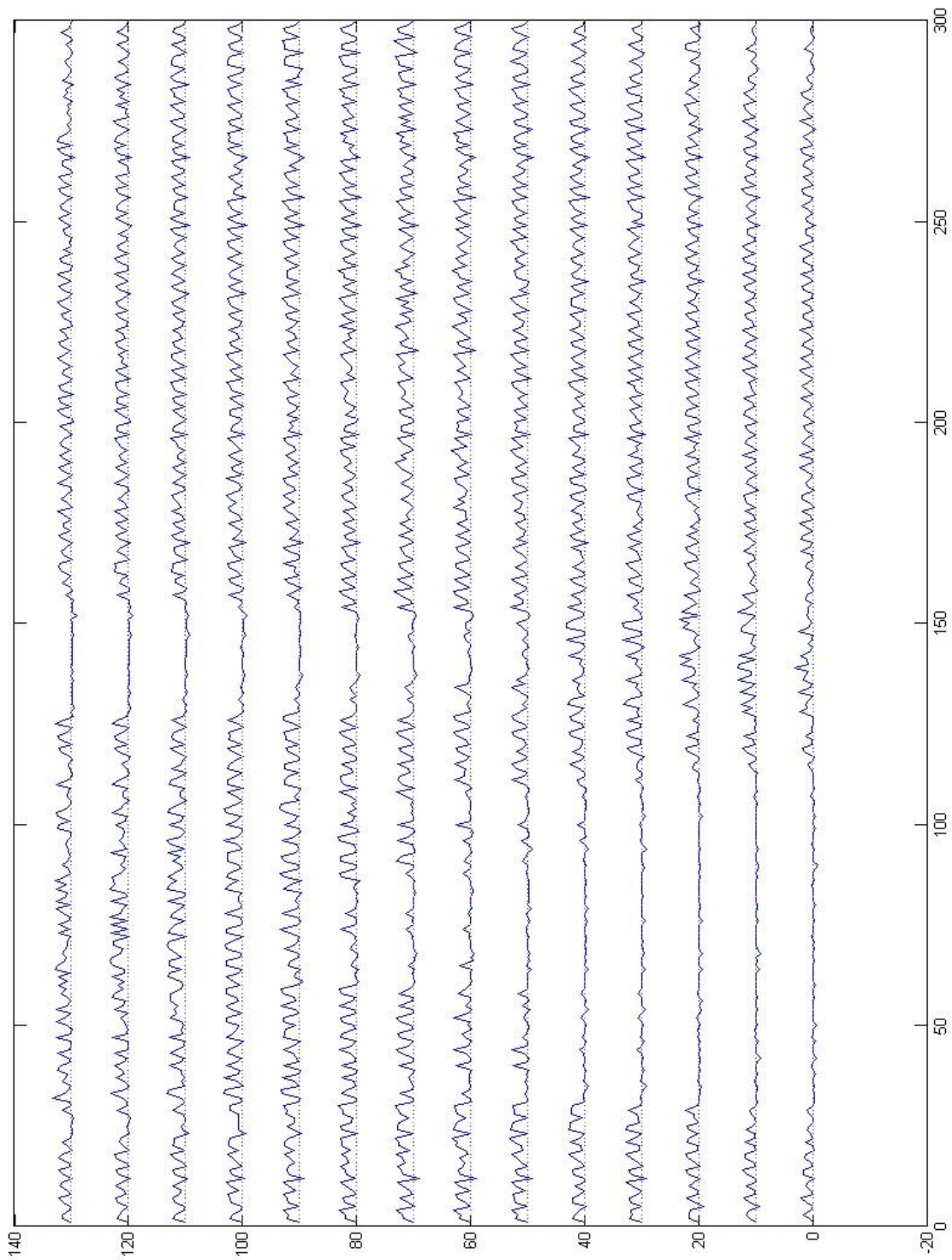


Εικόνα 3.2.5: Δίνη στο κέντρο του αγωγού.

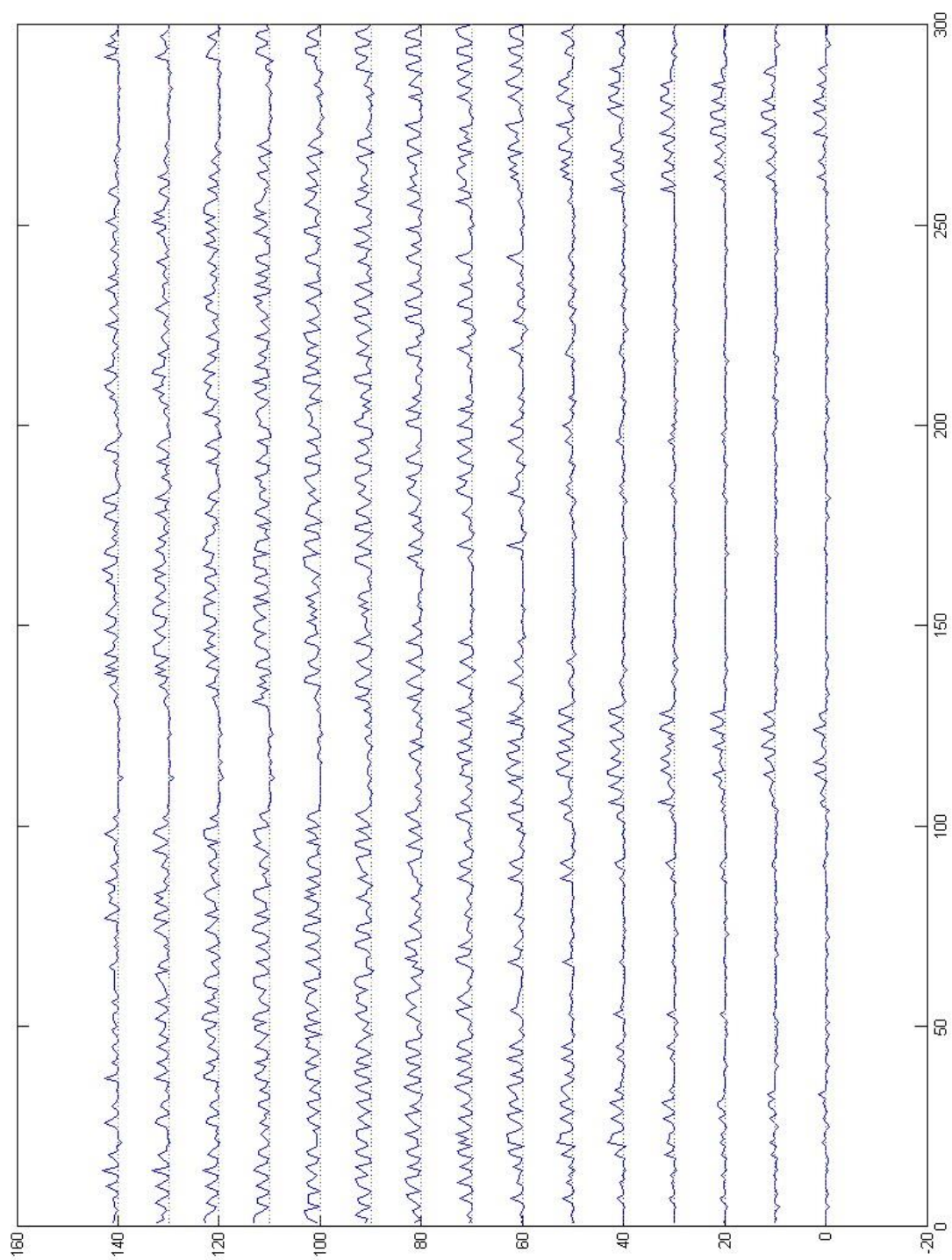


Εικόνα 3.2.6: Αποκόλληση της ροής και σχηματισμός δινών στο κάτω μέρος του αγωγού.

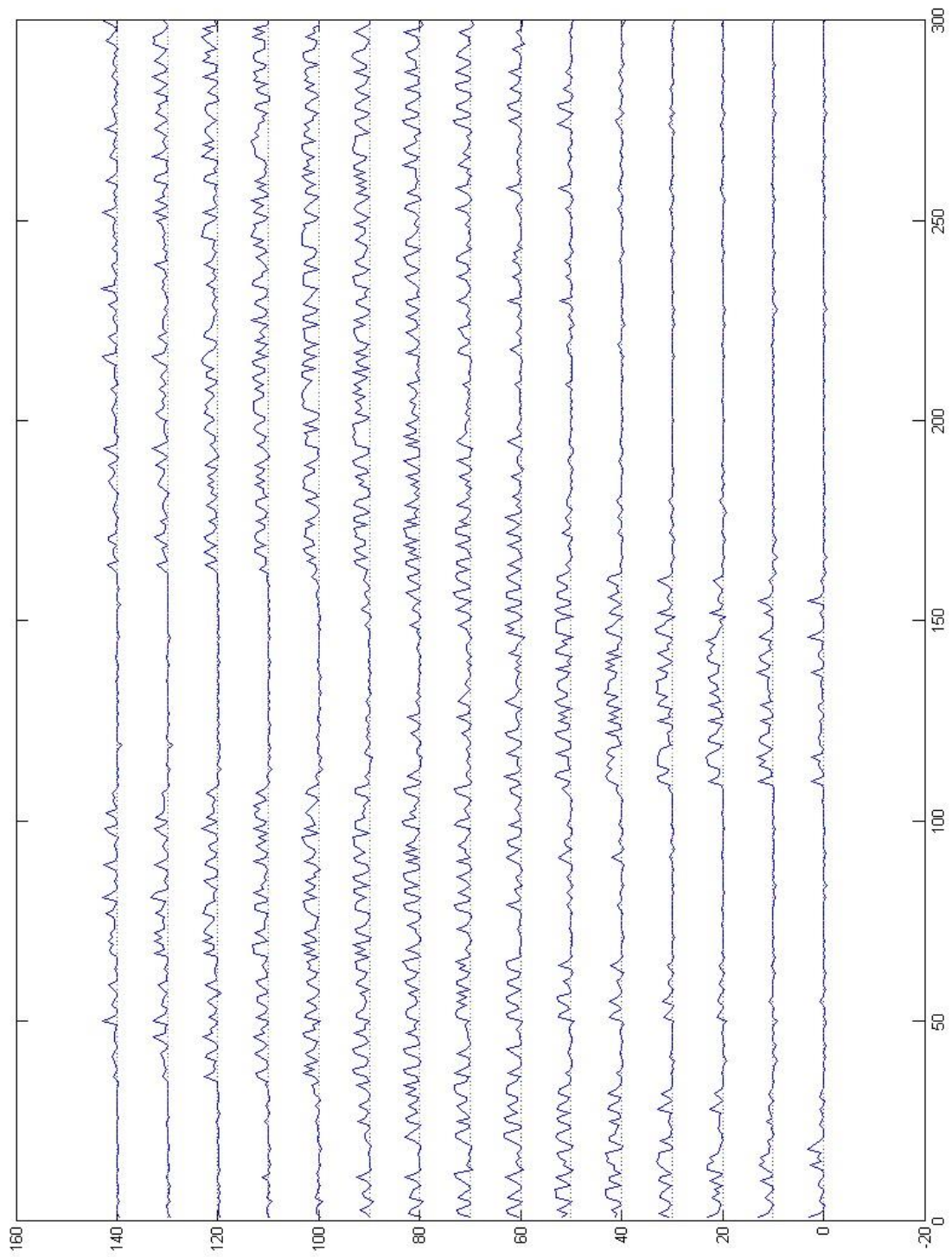
Ακολουθούν τα διαγράμματα (Διαγράμματα 3.2.1 έως 3.2.4) των ταχυτήτων σε δεκατέσσερα συγκεκριμένα σημεία μιας εγκάρσιας διατομής του αγωγού κοντά στην έξοδο, σε σχέση με το χρόνο. Οι διακεκομμένες γραμμές αποτελούν τον άξονα του μηδέν για κάθε σημείο.



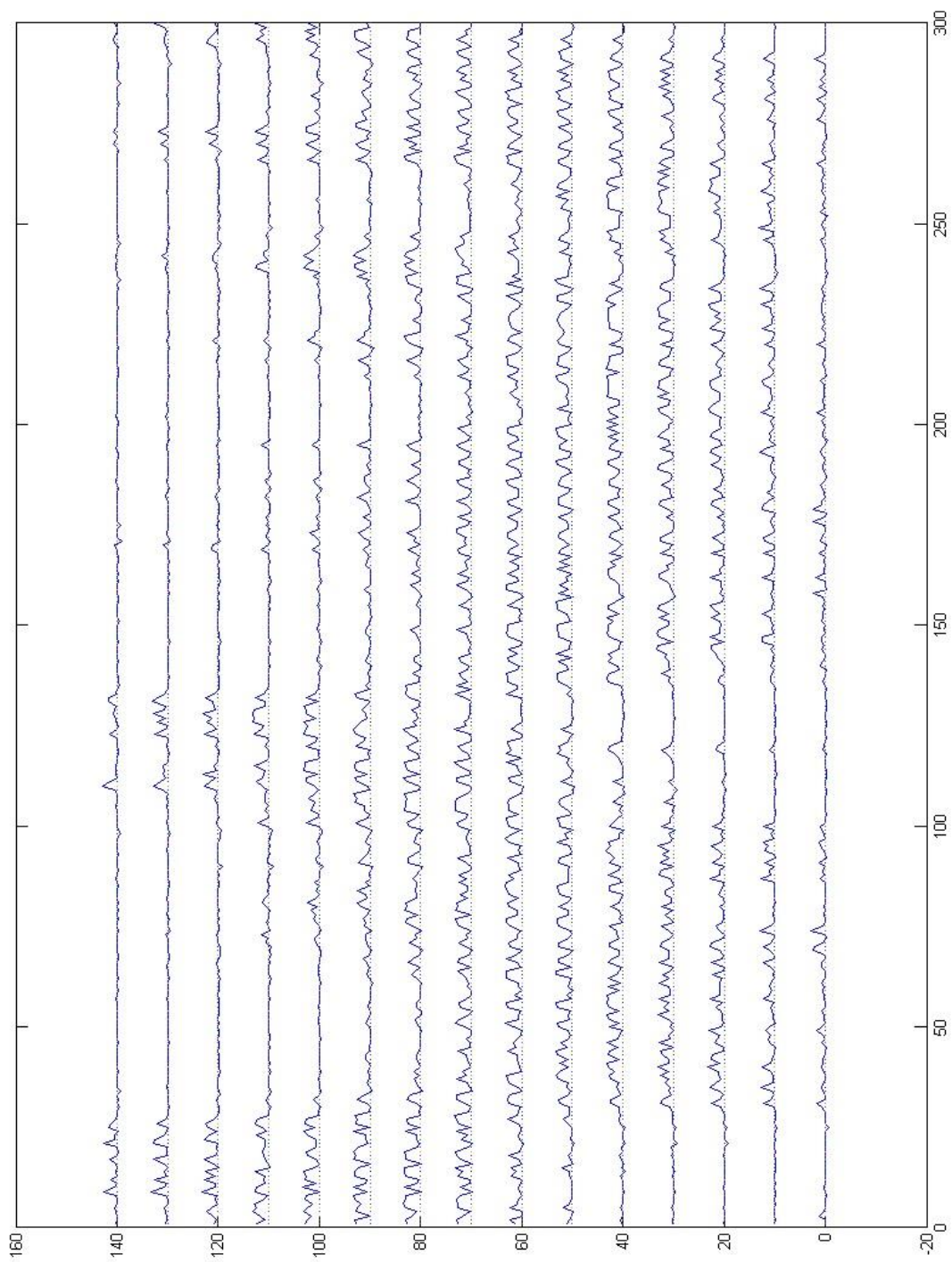
Διάγραμμα 3.2.1: Οι ταχύτητες στην 1<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 43mm κάτω από τον αγωγό).



Διάγραμμα 3.2.2: Οι ταχύτητες στη 2<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 42mm κάτω από τον αγωγό).



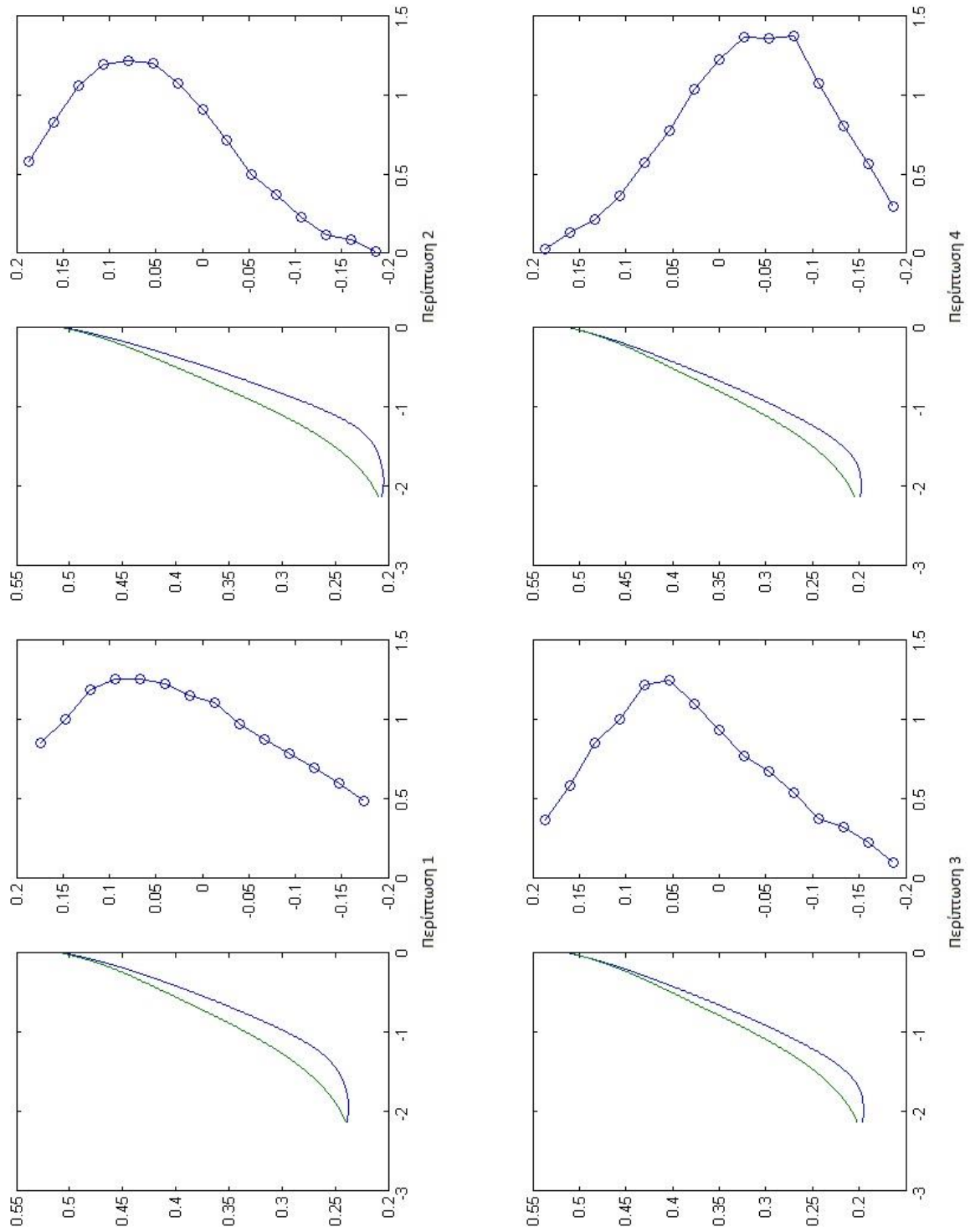
Διάγραμμα 3.2.3: Οι ταχύτητες στη 3<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 41mm κάτω από τον αγωγό).



Διάγραμμα 3.2.4: Οι ταχύτητες στη 4<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 40mm κάτω από τον αγωγό).

Το ενδιαφέρον φαινόμενο που παρουσιάζεται μέσω των προηγούμενων χρονοσειρών της ταχύτητας είναι η εμφάνιση περιοχών χαμηλών ταχυτήτων, δηλαδή αποκολλημένων περιοχών οι οποίες μεταφέρονται από την μια πλευρά του αγωγού στην άλλη χωρίς κάποιον συστηματικό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι η αποκόλληση της ροής συμβαίνει πότε στο ένα τοίχωμα του αγωγού και πότε στο αντιδιαμετρικό του, χαρακτηριστικό της ροής σε διαχύτες μεγάλων γωνιών.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί ( Διάγραμμα 3.2.5 ) δίνονται τα μέσα όρια του αγωγού με το πάνω όριο (μπλέ) ως έχει και το κάτω (πράσινο) αναδιπλωμένο ως προς τον οριζόντιο άξονα του δεξιού άκαμπτου σωλήνα. Στον άξονα x φαίνεται η απόσταση από την έξοδο του εύκαμπτου σωλήνα, αδιαστατοποιημένη με τη διάμετρο του αγωγού (το ίδιο ισχύει και για τα μετέπειτα διαγράμματα που δείχνουν τα όρια στο δεξί άκρο του αγωγού). Δεξιά των διαγραμμάτων των ορίων παρατίθενται τα διαγράμματα των μέσων ταχυτήτων, αδιαστατοποιημένων ως προς την ταχύτητα εισόδου ( $U_{in} = \frac{303mm}{sec}$ ), για τα 14-15 επιλεγθέντα σημεία και στις 4 περιπτώσεις. Οι ταχύτητες δίνονται σε σχέση με την απόσταση αυτών των 14 σημείων από τον οριζόντιο άξονα του δεξιού άκαμπτου σωλήνα, η οποία έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς τη διάμετρο του αγωγού. Η 1<sup>η</sup> περίπτωση είναι στα 43mm κάτω από τον αγωγό και στις ακόλουθες περιπτώσεις η υψομετρική διαφορά στάθμης-αγωγού μειώνεται κατά 1mm κάθε φορά.

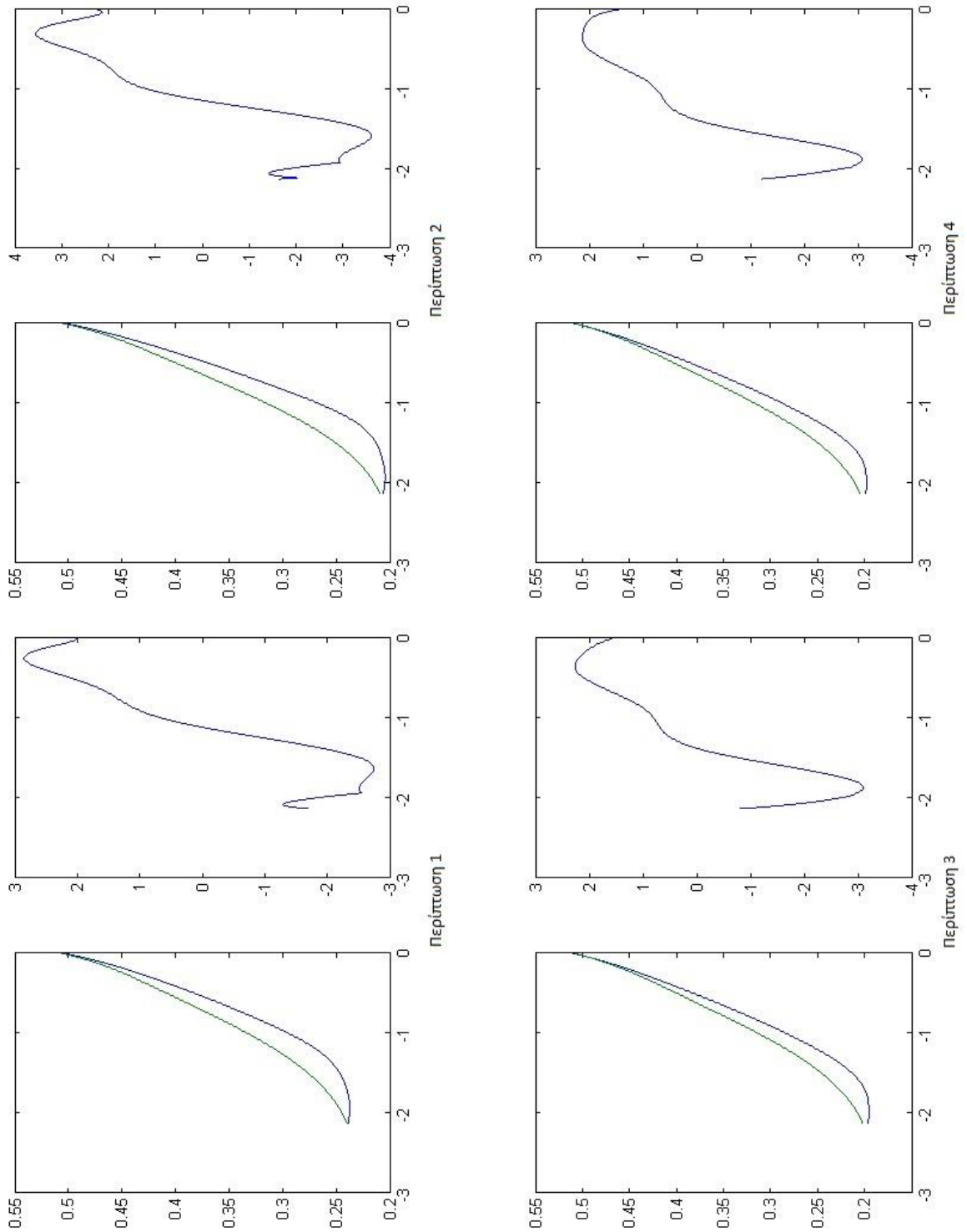


Διάγραμμα 3.2.5: Μέσα όρια αγωγού και ταχύτητες.



Παρατηρούμε πως στο κάτω μέρος του σωλήνα υπάρχουν σημεία όπου η ταχύτητα παίρνει αρνητικές τιμές ή πολύ μικρές τιμές που σημαίνει ότι σε αυτές τις περιοχές υπάρχει αποκόλληση της ροής. Καθώς η ταλάντωση «σβήνει», παρατηρούμε πως η αποκόλληση της ροής μεταφέρεται κατά κάποιο τρόπο στο πάνω μέρος του αγωγού, δηλαδή πάνω από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας του.

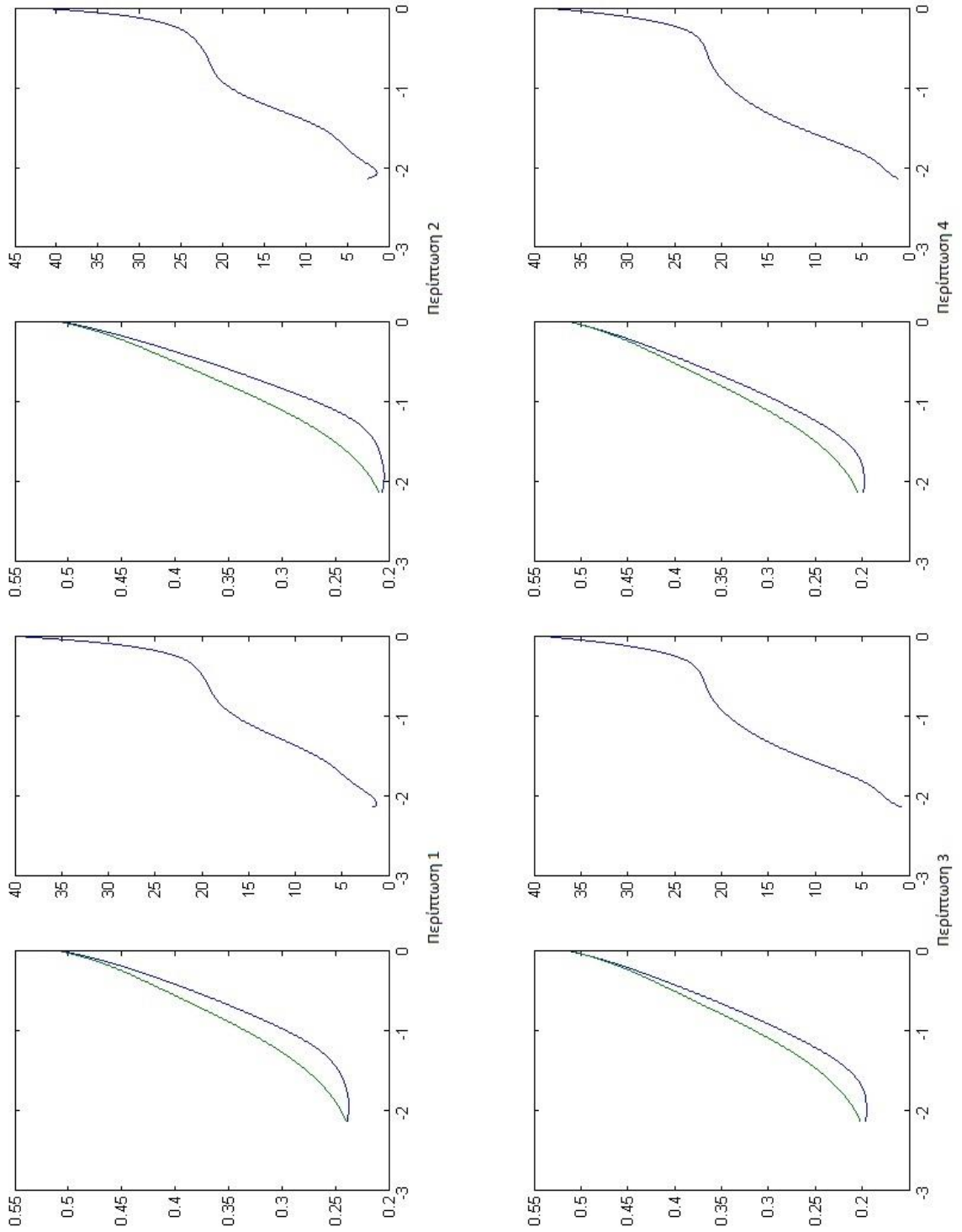
Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα των ορίων του αγωγού (Διάγραμμα 3.2.6) όπως και προηγουμένως, σε σχέση όμως με τη διαφορά των απολύτων μέσων γωνιών του διαχύτη που σχηματίζεται, για την καθεμία από τις τέσσερις περιπτώσεις που έχουμε σε σχέση με το μήκος του σωλήνα.



Διάγραμμα 3.2.6: Μέσα όρια και διαφορά απολύτων μέσων γωνιών.

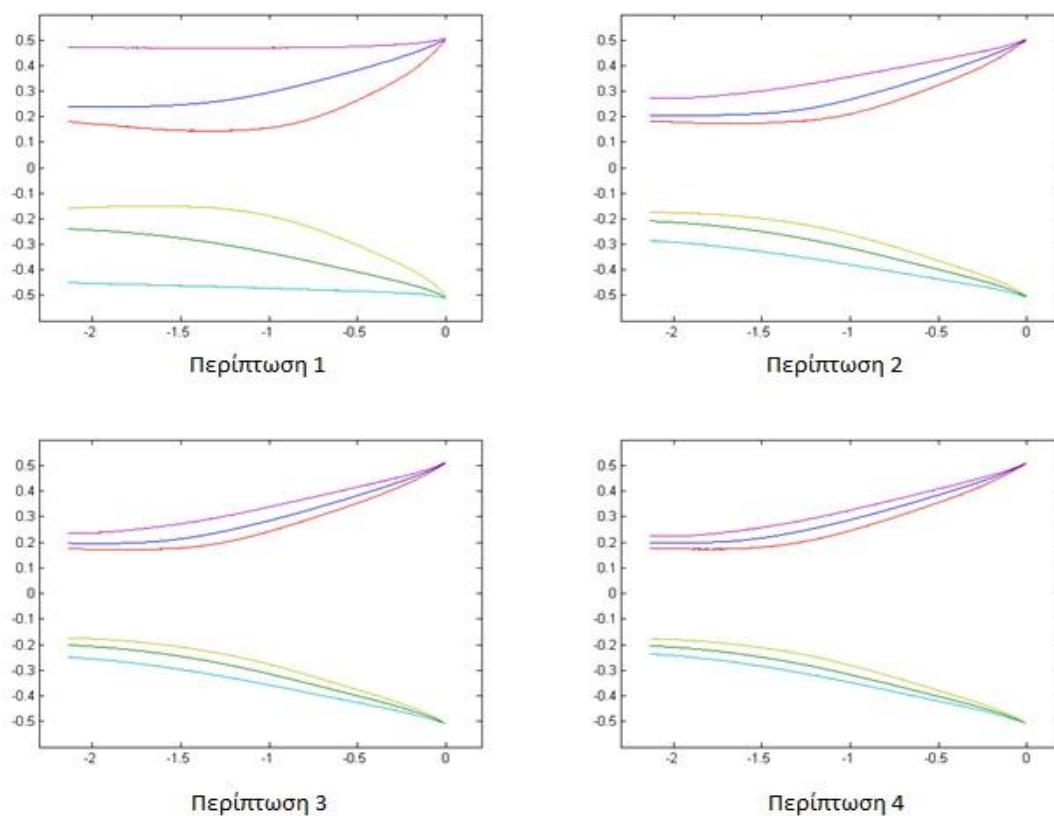
Παρατηρούμε πως στη μεταβατική φάση, κυρίως στο δευτερο και τρίτο διάγραμμα, η διαφορά των απολύτων μέσων γωνιών είναι αρκετά μεγάλη. Συγκεκριμένα κυμαίνεται από  $-4^\circ$  έως  $4^\circ$ . Αυτό ίσως συμβαίνει γιατί σε αυτή τη φάση ο αγωγός ταλαντώνεται με μεγάλο πλάτος («ανοίγει» και «κλείνει» τελείως, όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες) και είναι εμφανής ο σχηματισμός διαχύτη.

Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα των ορίων του αγωγού (Διάγραμμα 3.2.7), όπως και προηγουμένως, σε σχέση όμως με την ολική μέση γωνία, για την καθεμία από τις τέσσερις περιπτώσεις που έχουμε, σε σχέση με το μήκος του σωλήνα.



Διάγραμμα 3.2.7: Μέσα όρια και ολική μέση γωνία.

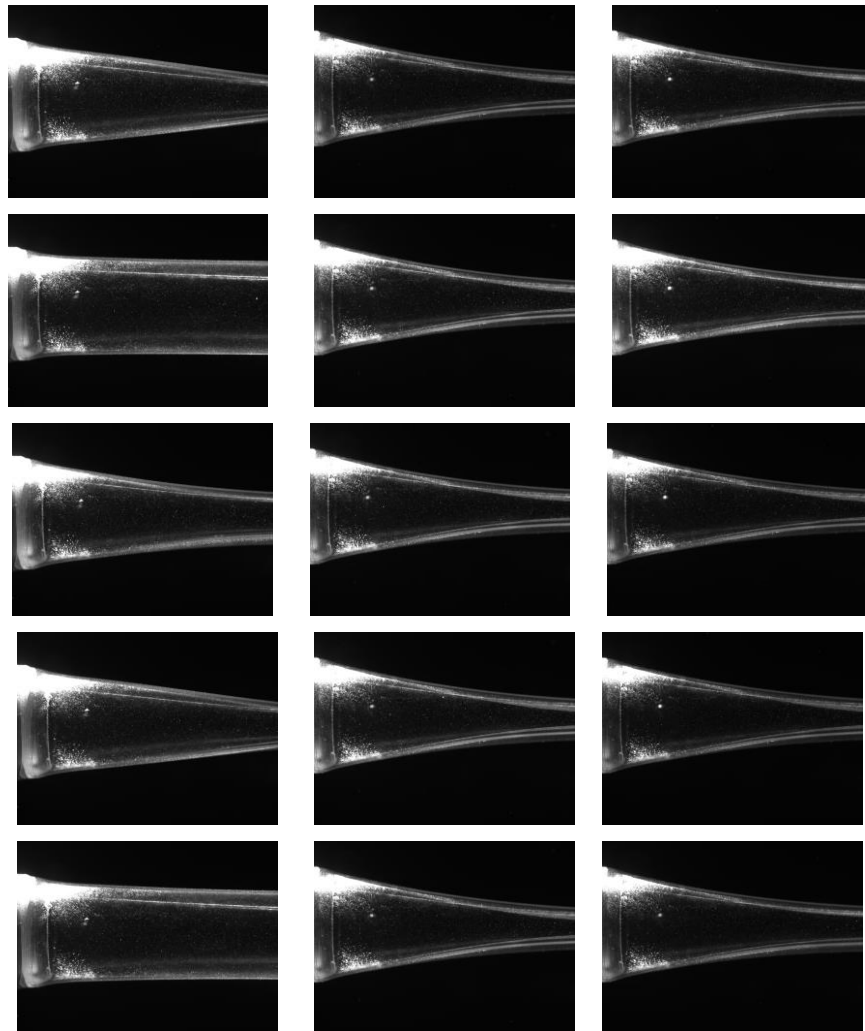
Ακολουθεί το Διάγραμμα 3.2.8, στο οποίο φαίνονται τα μέγιστα, ελάχιστα και μέσα όρια του αγωγού και για τις τέσσερις περιπτώσεις.



Διάγραμμα 3.2.8: Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα όρια για κάθε περίπτωση.

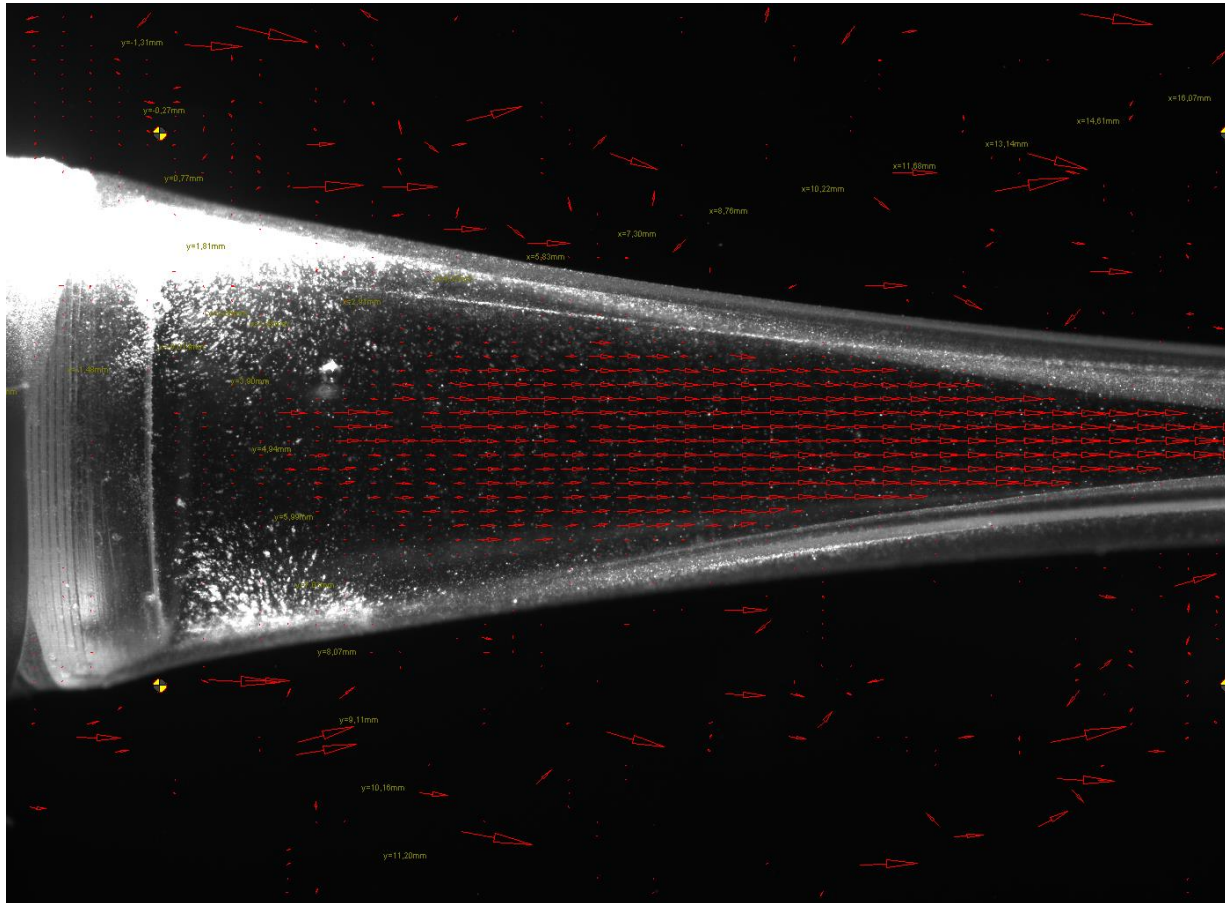
### Είσοδος αγωγού.

Αρχικά δίνονται διαδοχικές φωτογραφίες του αγωγού για τις τρεις πρώτες περιπτώσεις από αυτές που εξετάζουμε.

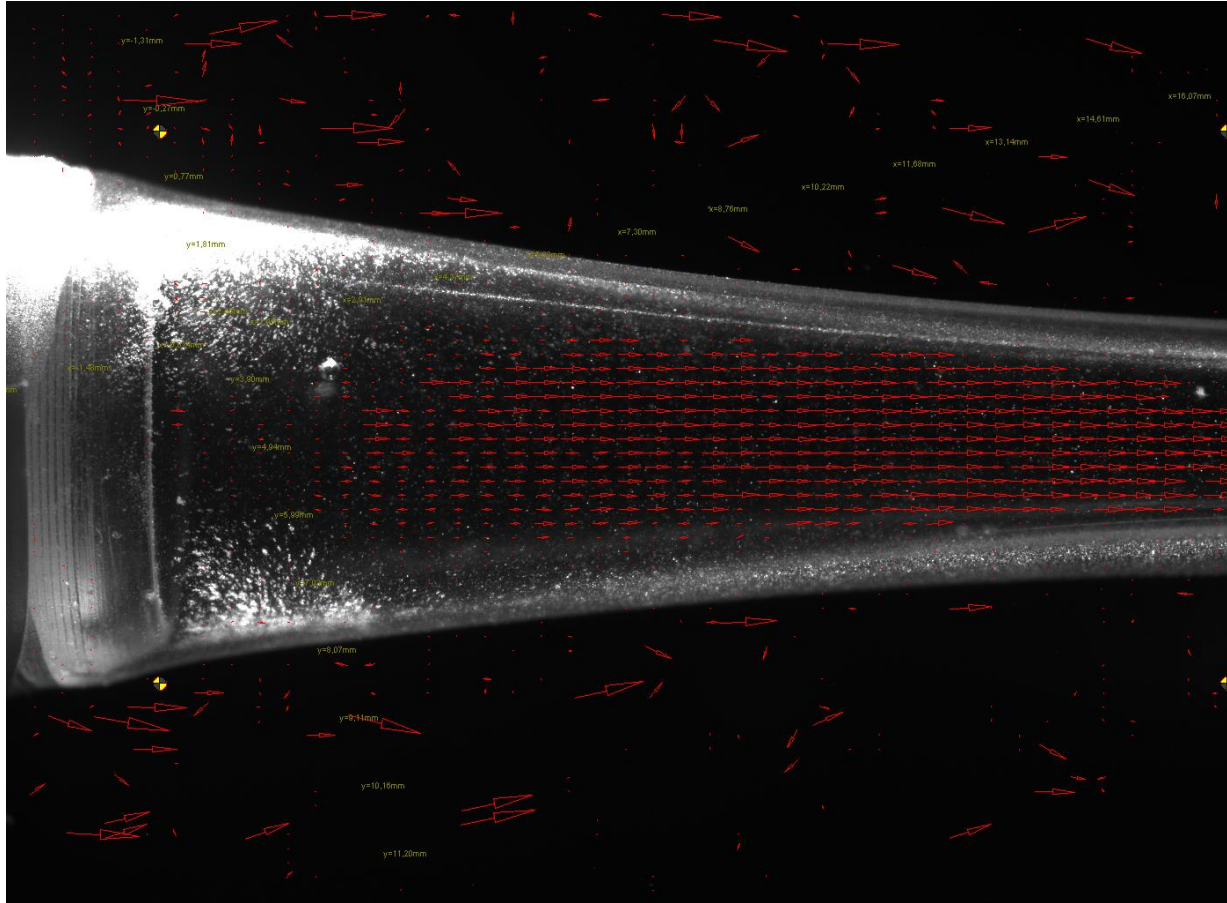


Εικόνα 3.2.7: Διαδοχικές φωτογραφίες του αγωγού για καθεμία (ανά στήλη) από τις τρεις πρώτες περιπτώσεις. ). Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί σε ύψος στάθμης 43mm κάτω από τον αγωγό, η δεύτερη αντίστοιχα σε 42mm και η τρίτη σε 41mm.

Στη συνέχεια δίνονται επιλεκτικά κάποιες αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες της ροής στο αριστερό άκρο του αγωγού.

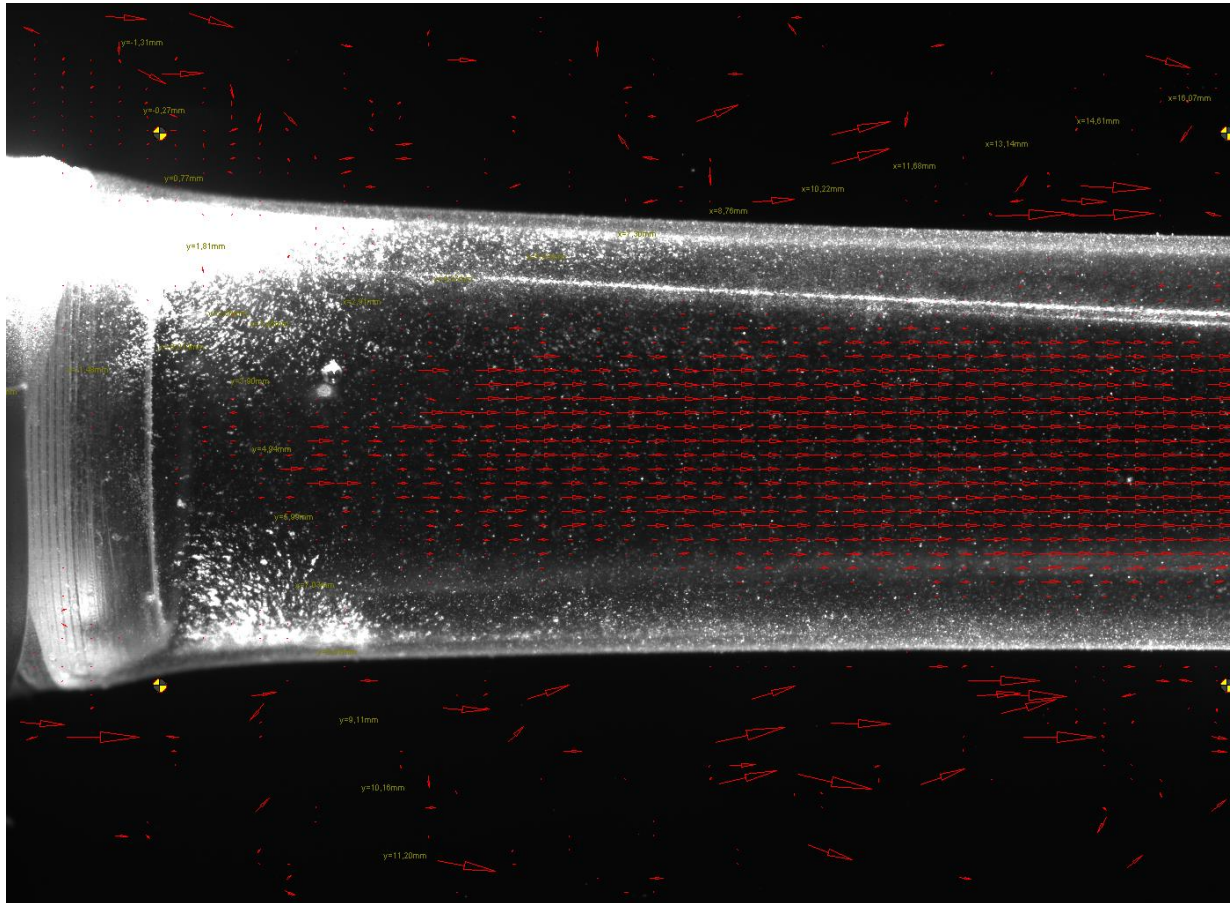


Εικόνα 3.2.8: Ομοιόμορφη ροή όταν ο αγωγός είναι σχεδόν κλειστός στο φωτιζόμενο επίπεδο. Προφανώς είναι ανοικτός στο οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 3.2.9: Ομοιόμορφη ροή όταν ο αγωγός είναι σχεδόν ανοικτός.

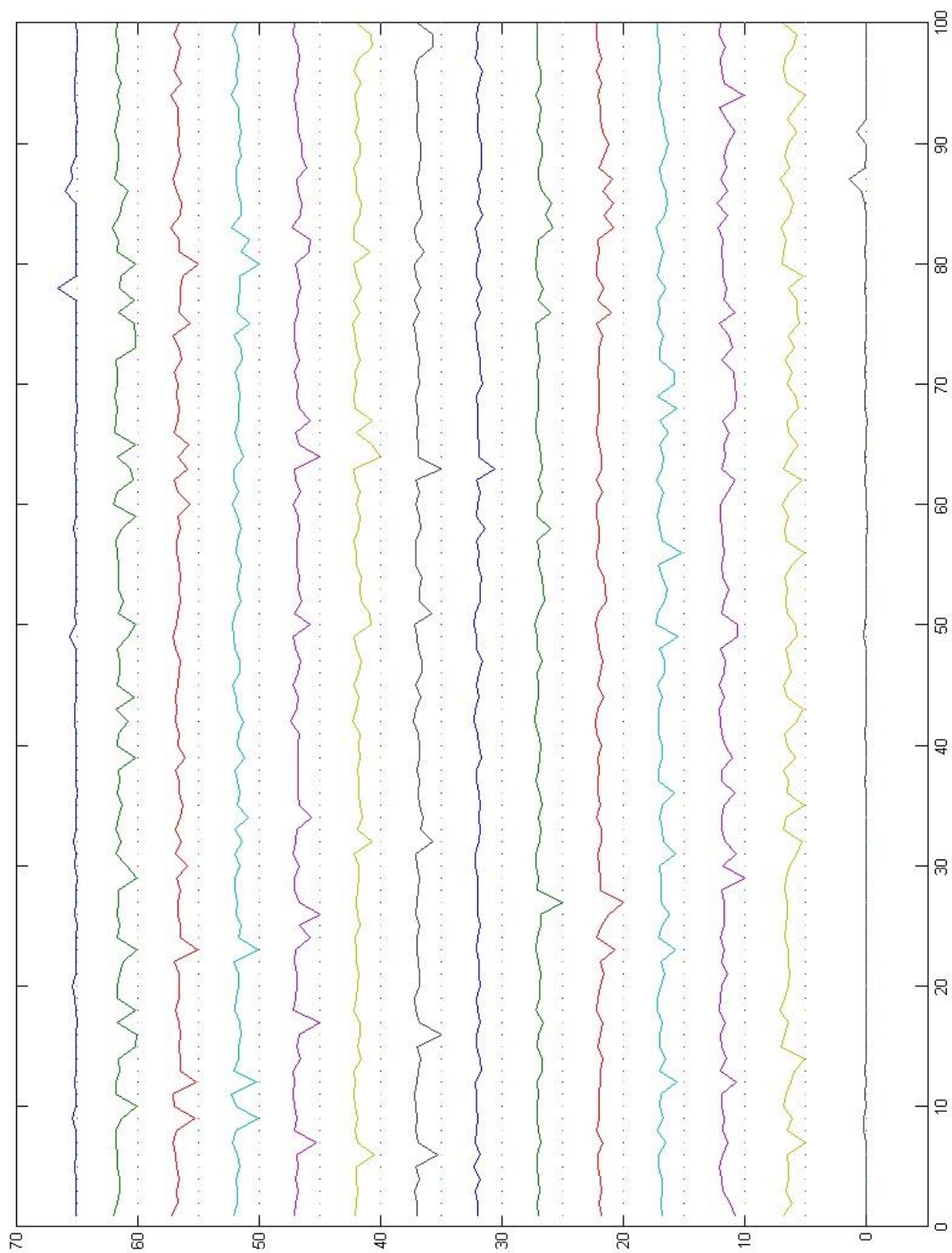




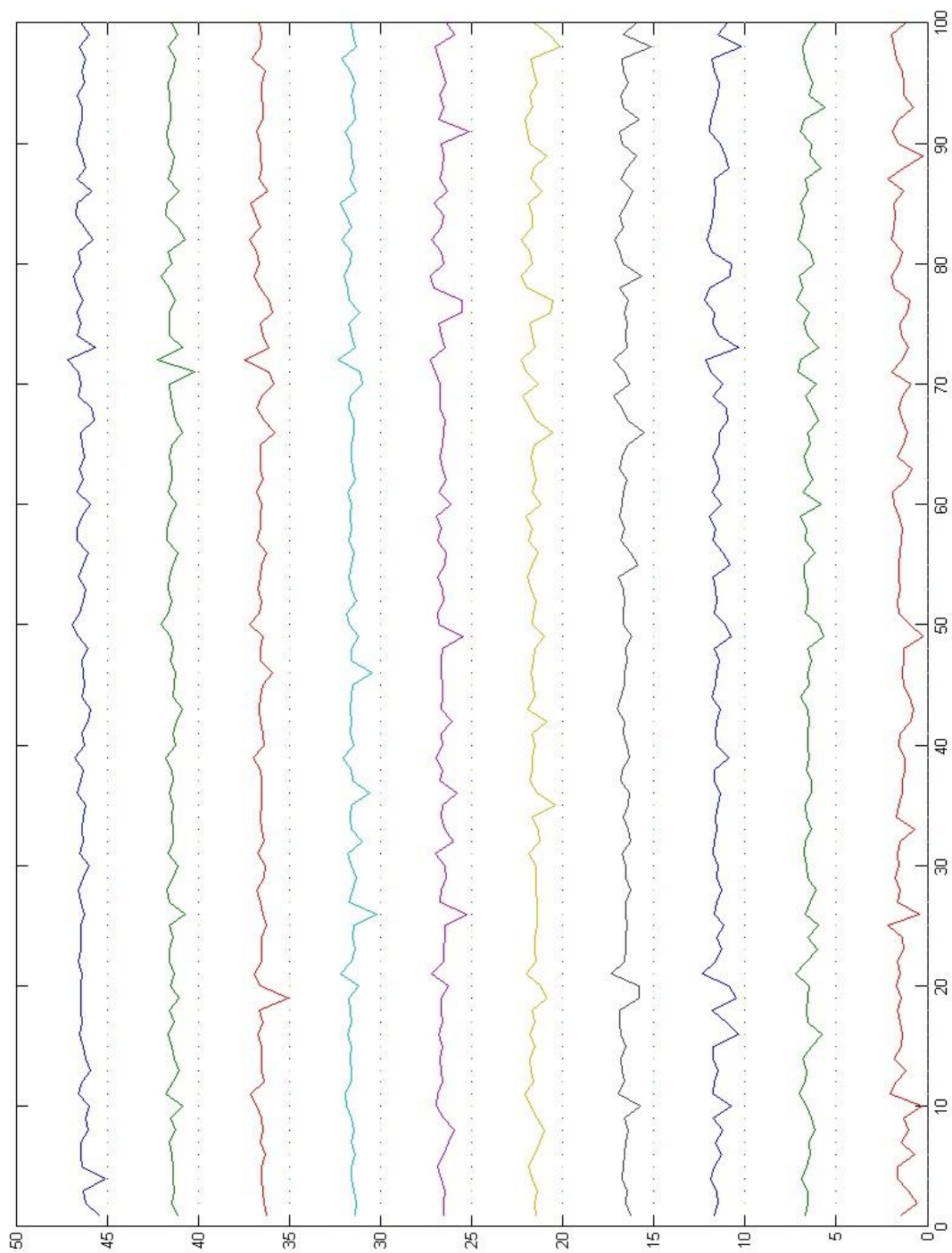
Εικόνα 3.2.10: Ομοιόμορφη ροή όταν ο αγωγός είναι ανοικτός.

Γενικά παρατηρείται στην είσοδο του αγωγού ομοιομορφία στη ροή.

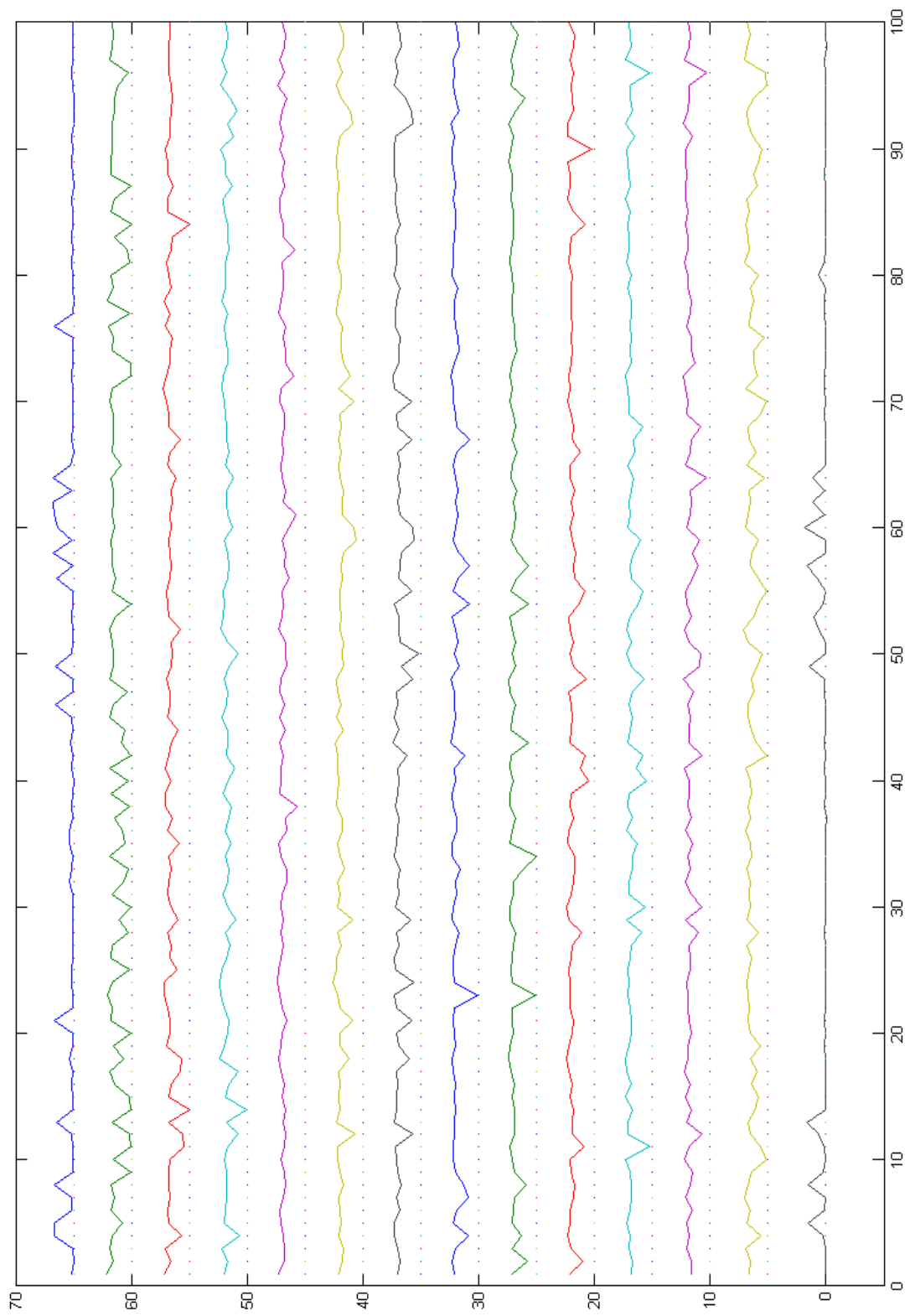
Ακολουθούν τα διαγράμματα της ταχύτητας (Διαγράμματα 3.2.9 έως 3.2.11) σε σχέση με το χρόνο (αριθμό εικόνας) για το αριστερό τμήμα του αγωγού, για 10-15 σημεία μιας διατομής κοντά στην είσοδο, για τις τρεις πρώτες περιπτώσεις. Η ταχύτητα είναι αδιαστατοποιημένη ως προς την ταχύτητα εισόδου. Για κάθε σημείο η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τη γραμμή του μηδέν.



Διάγραμμα 3.2.9: Οι ταχύτητες για την 1<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 43mm κάτω από τον αγωγό).



Διάγραμμα 3.2.10: Οι ταχύτητες για την 2<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 42mm κάτω από τον αγωγό).



Διάγραμμα 3.2.11: Οι ταχύτητες για την 3<sup>η</sup> περίπτωση (ύψος στάθμης 41mm κάτω από τον αγωγό).

Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα των ορίων του αγωγού και δεξιά αυτών των μέσων ταχυτήτων για το καθένα από τα επιλεχθέντα σημεία της διατομής για όλες τις περιπτώσεις (Διάγραμμα 3.2.12).

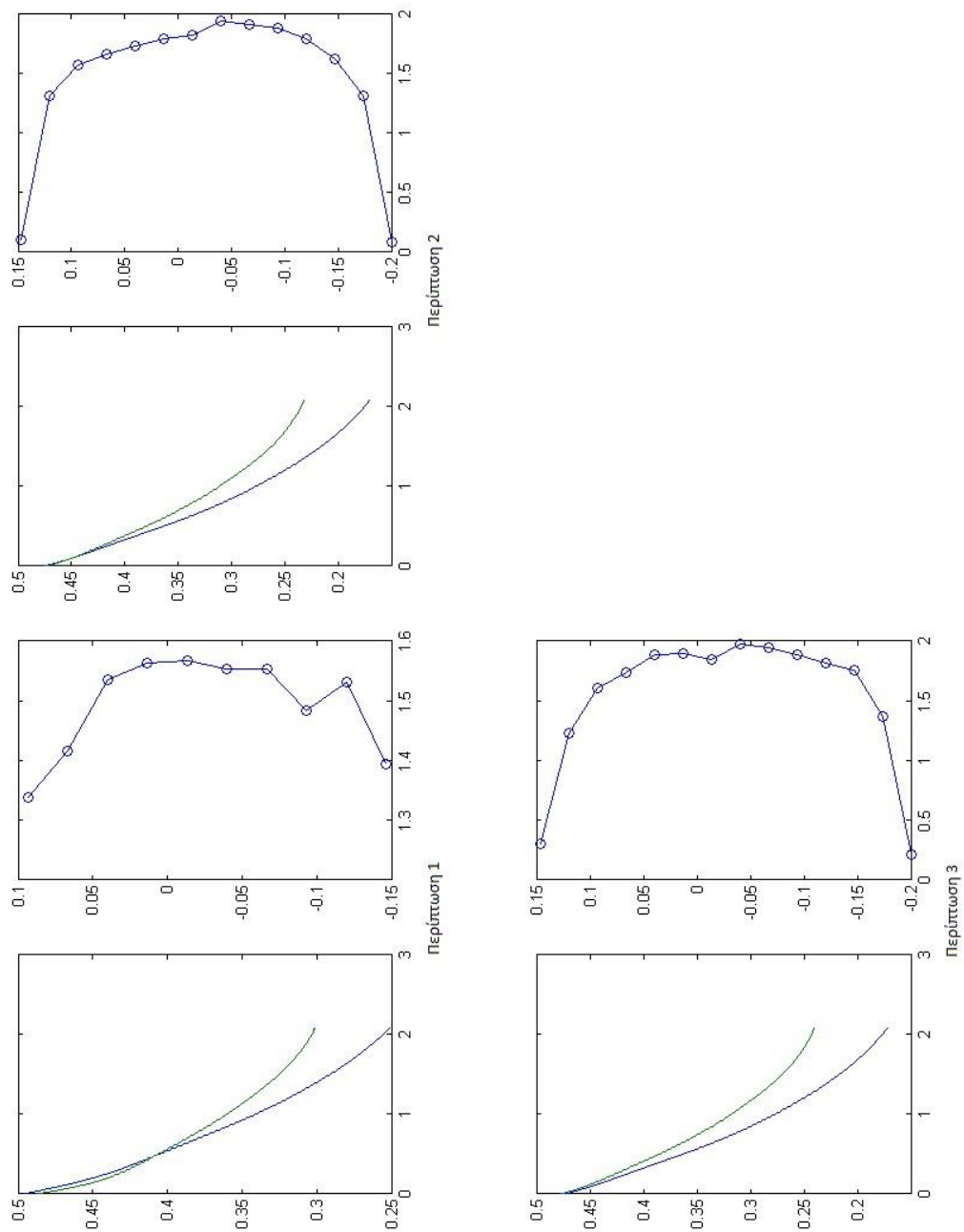
Η 1<sup>η</sup> περίπτωση είναι στα 43mm κάτω από τον αγωγό και στις ακόλουθες περιπτώσεις η υψομετρική διαφορά στάθμης-αγωγού μειώνεται κατά 1mm κάθε φορά.

Στο Διάγραμμα 3.2.13 φαίνονται τα όρια μαζί με τη διαφορά των απολύτων μέσων γωνιών του διαχύτη που σχηματίζεται.

Στο Διάγραμμα 3.2.14 δίνονται επίσης τα όρια μαζί με την ολική γωνία του διαχύτη.

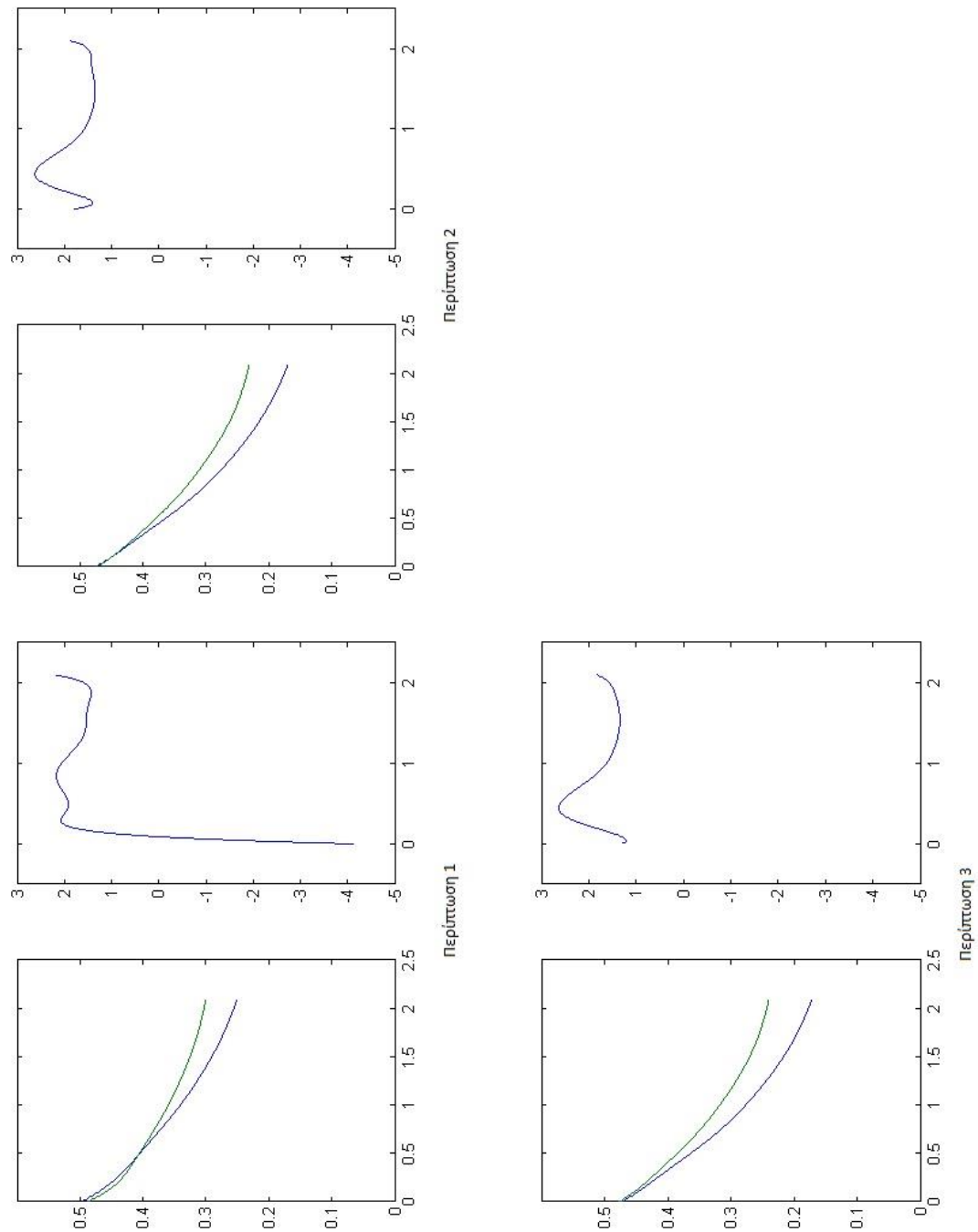
Στο Διάγραμμα 3.2.15 φαίνονται τα μέγιστα, ελάχιστα και τα μέσα όρια του αγωγού για τις τρεις αυτές περιπτώσεις.

Ο άξονας x, για όλα αυτά τα διαγράμματα, είναι η απόσταση από την είσοδο του σωλήνα αδιαστατοποιημένη με τη διάμετρό του.



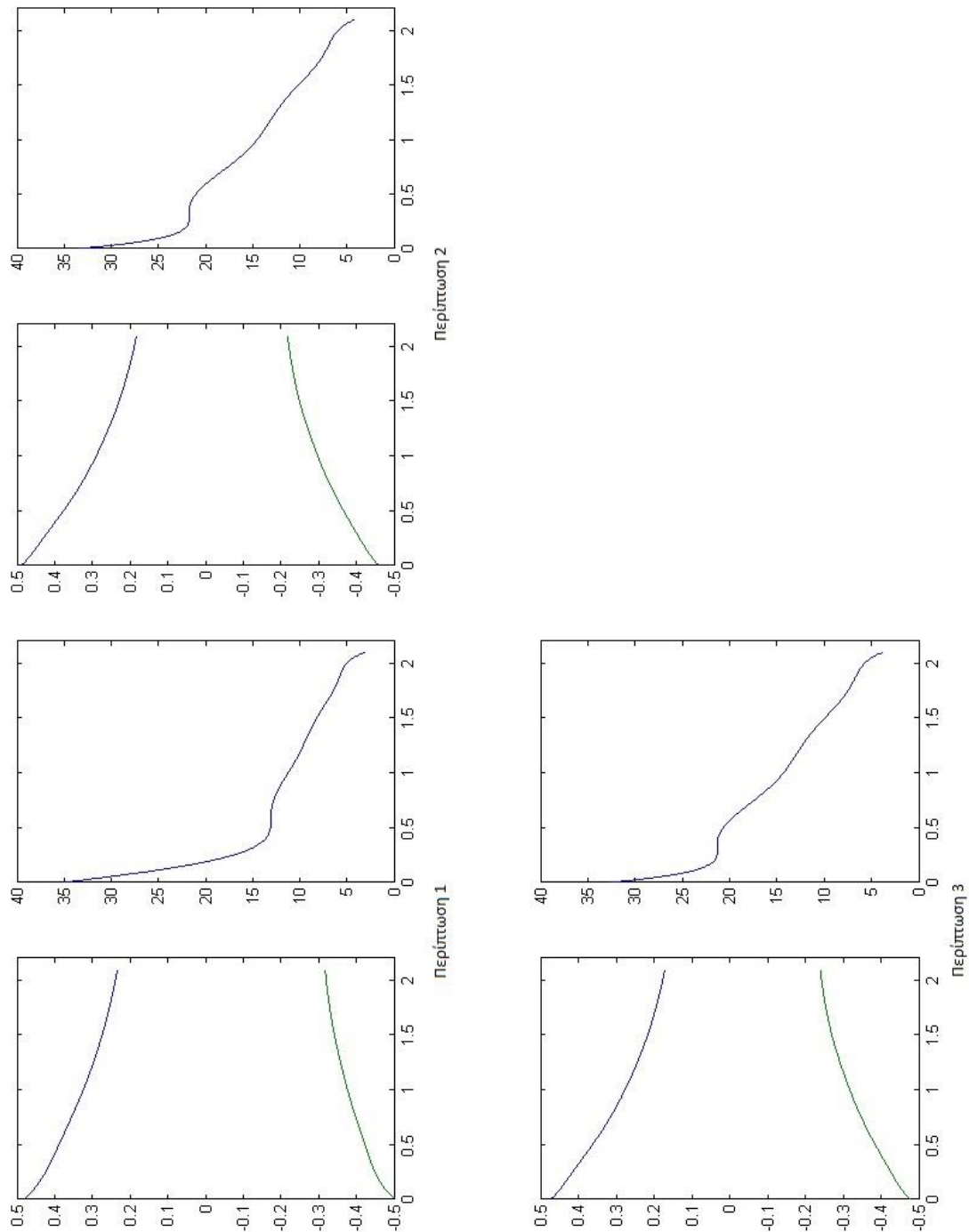
Διάγραμμα 3.2.12: Μέσα όρια και ταχύτητες.

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα οι ταχύτητες στην είσοδο του αγωγού δεν έχουν εμφανή διαφορά εκτός από την πρώτη περίπτωση όπου το προφίλ της ταχύτητας είναι λιγότερο ομαλό.



Διάγραμμα 3.2.13: Μέσα όρια και διαφορά απολύτων μέσων γωνιών.

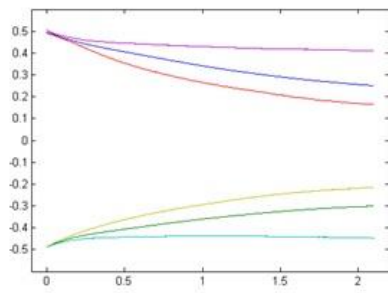
Όπως φαίνεται παραπάνω, η διαφορά των απόλυτων μέσων γωνιών στην είσοδο του αγωγού δεν διαφέρει, εκτός από την πρώτη περίπτωση, όπου το εύρος των γωνιών είναι μεγαλύτερο.



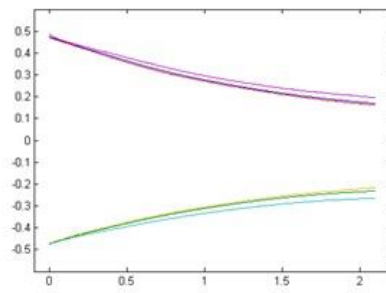
Διάγραμμα 3.2.14: Μέσα όρια και ολική γωνία του διαχύτη.

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως η ολική γωνία στην είσοδο του αγωγού δεν διαφέρει ιδιαίτερα από περίπτωση σε περίπτωση.

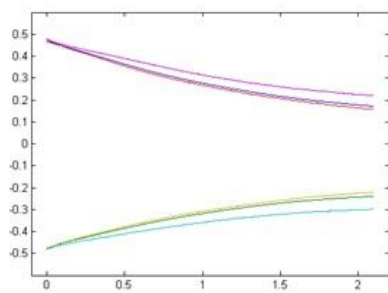




Περίπτωση 1



Περίπτωση 2



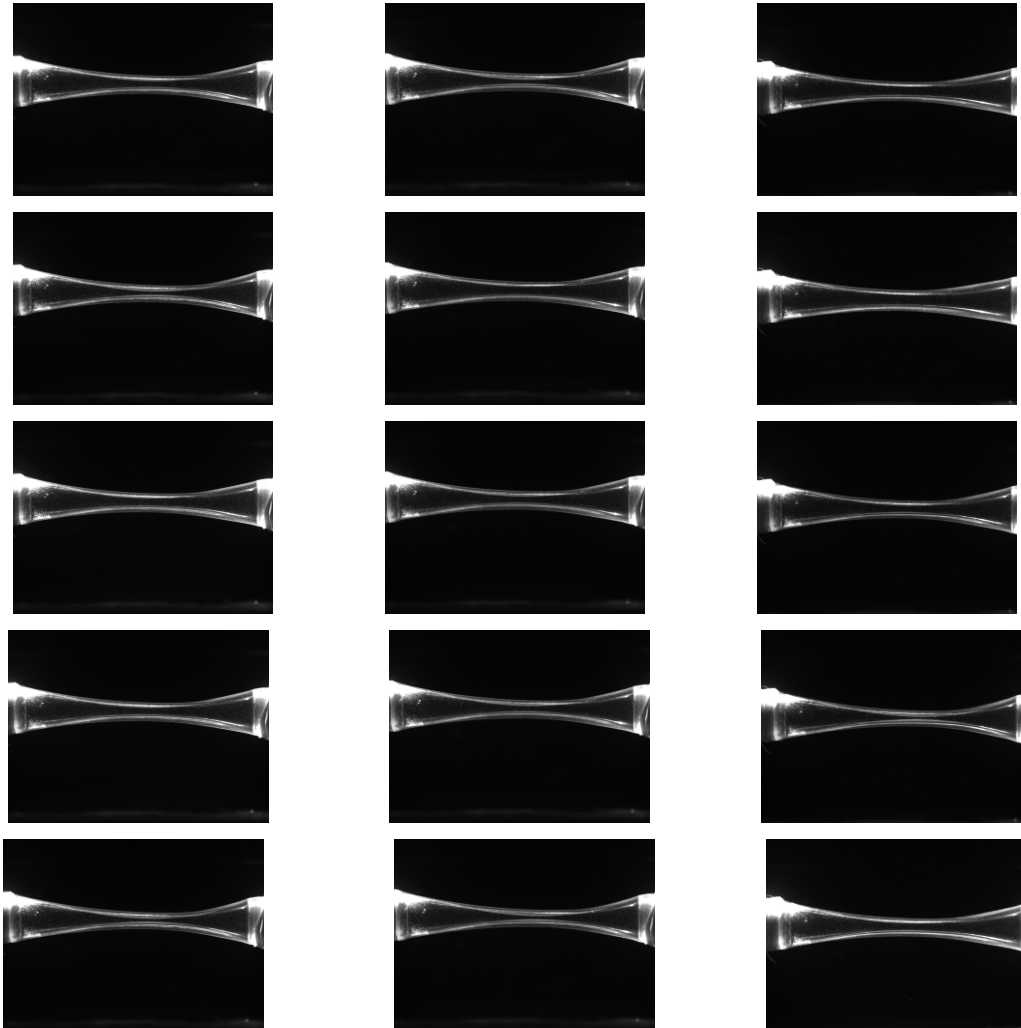
Περίπτωση 3

Διάγραμμα 3.2.15: Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα όρια για κάθε περίπτωση.

Στην πρώτη περίπτωση όπου συμβαίνει ταλάντωση, η διαφορά των μέγιστων και των ελάχιστων ορίων είναι εμφανώς μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Μέση (ολόκληρος ο αγωγός):

Ακολουθούν φωτογραφίες του αγωγού για καθεμία από τις τρεις πρώτες περιπτώσεις.



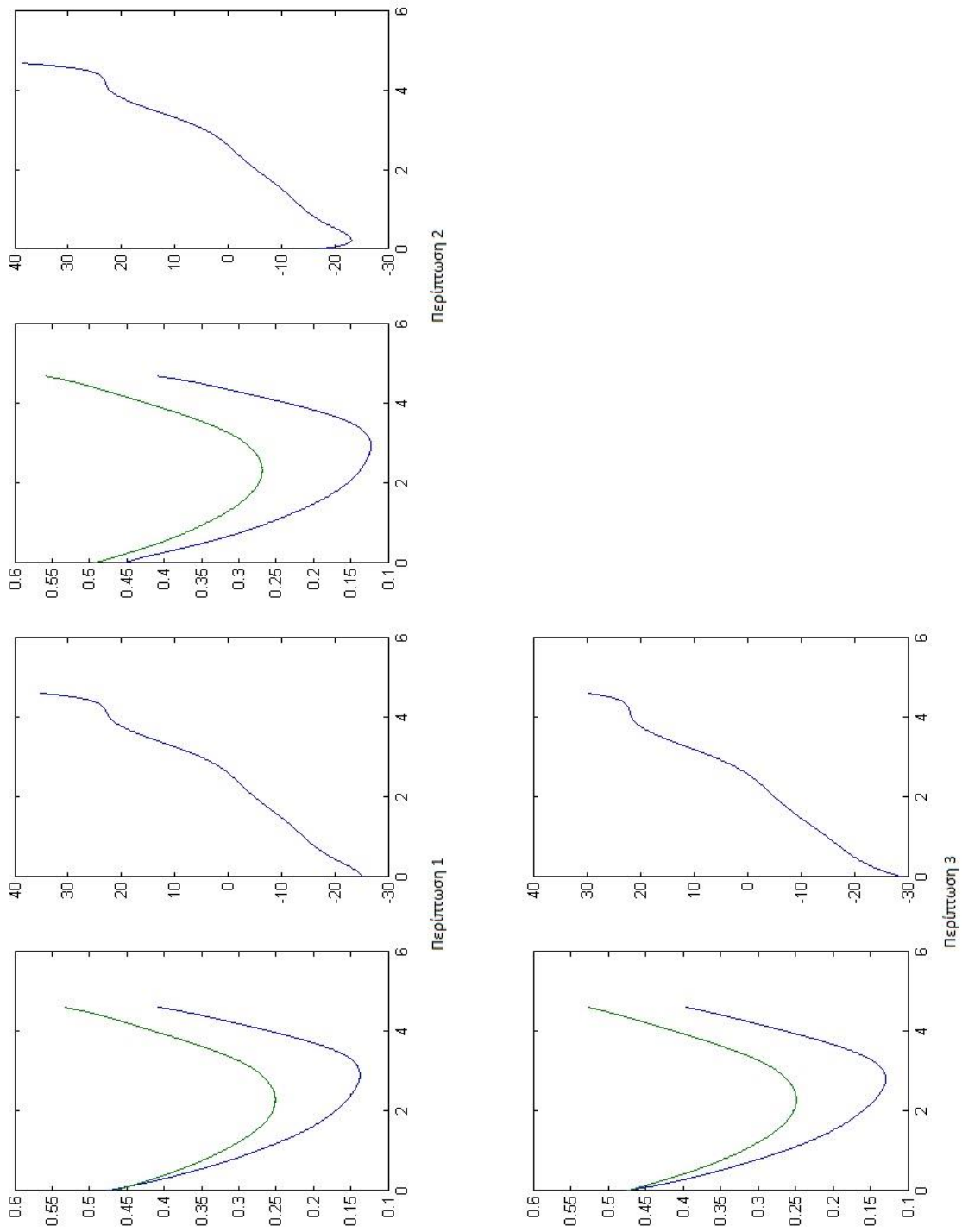
Εικόνα 3.2.11: Διαδοχικές φωτογραφίες ολόκληρου του αγωγού για τις τρεις πρώτες περιπτώσεις (ανά στήλη). Η πρώτη στήλη είναι για ύψος στάθμης 43mm κάτω από τον αγωγό, η δεύτερη αντίστοιχα για 42mm και η τρίτη για 41mm.

Στο Διάγραμμα 3.2.16 δίνονται επίσης τα όρια μαζί με την ολική γωνία όλου του αγωγού.

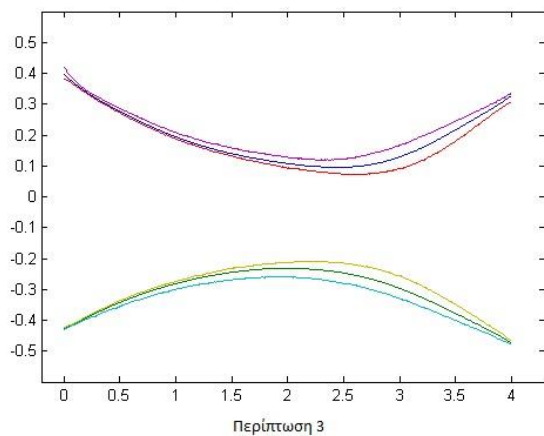
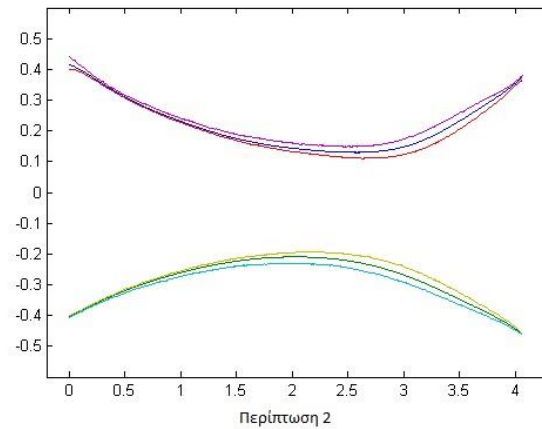
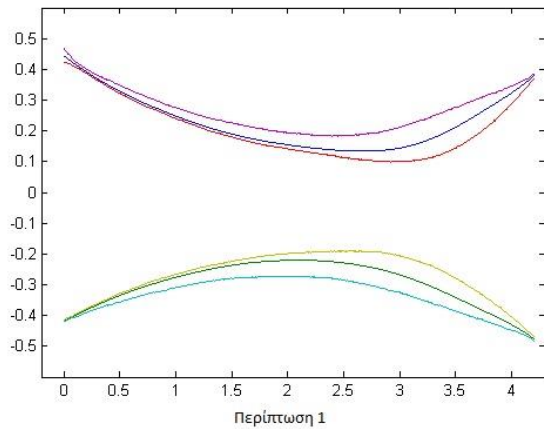
Στο Διάγραμμα 3.2.17 φαίνονται τα μέγιστα, ελάχιστα και τα μέσα όρια του αγωγού για τις τρεις αυτές περιπτώσεις.

Η 1<sup>η</sup> περίπτωση είναι στα 43mm κάτω από τον αγωγό και στις ακόλουθες περιπτώσεις η υψομετρική διαφορά στάθμης-αγωγού μειώνεται κατά 1mm κάθε φορά.

Ο άξονας x, για όλα αυτά τα διαγράμματα, είναι η απόσταση από το αριστερό άκρο του σωλήνα αδιαστατοποιημένη με τη διάμετρό του.



Διάγραμμα 3.2.16: Μέσα όρια και ολική γωνία.



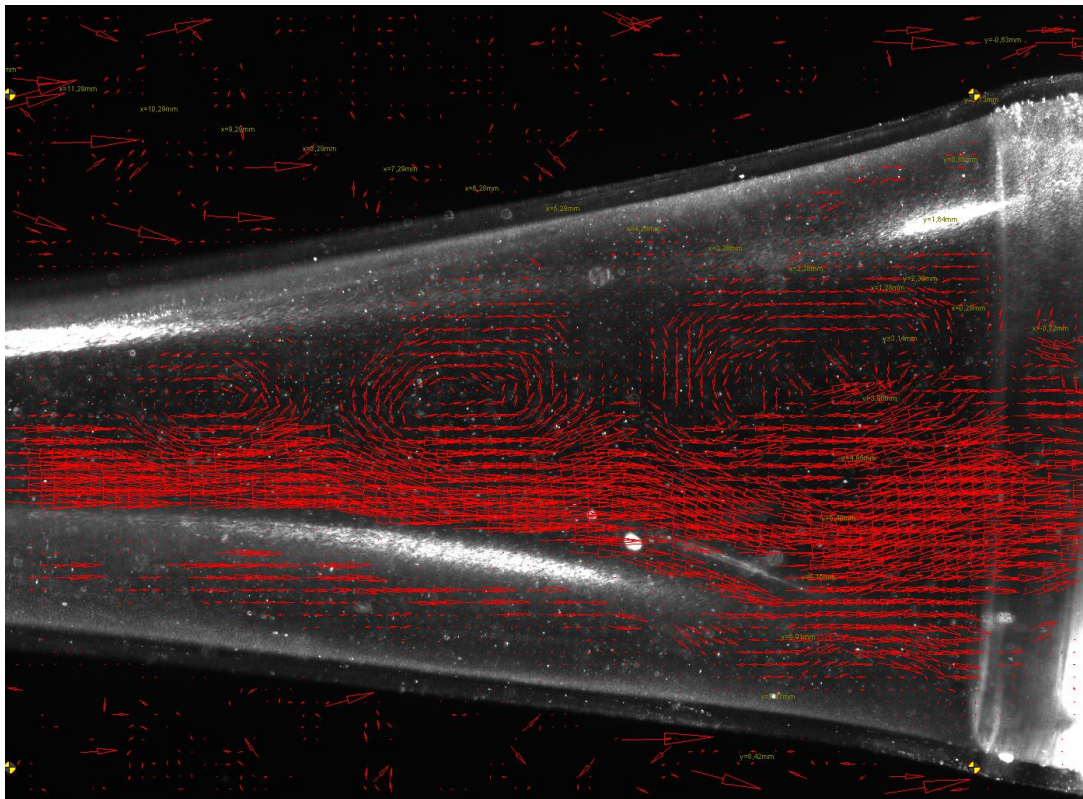
Διάγραμμα 3.2.17: Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα όρια.

Στην πρώτη περίπτωση όπου συμβαίνει ταλάντωση, η διαφορά των μέγιστων και των ελάχιστων ορίων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

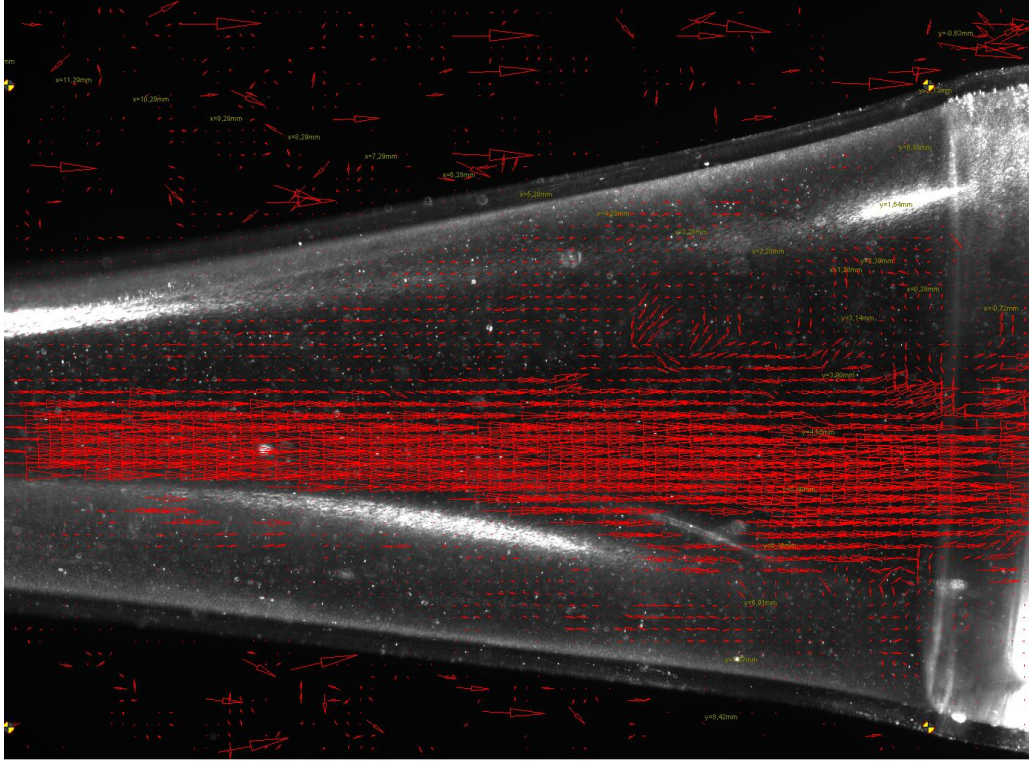
Παρατηρείται επίσης, πως τα όρια στην έξοδο του αγωγού δεν συμπίπτουν. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αγωγός δεν είναι εντελώς οριζόντιος αλλά το αριστερό άκρο του είναι τοποθετημένο λίγο πιο ψηλά από το δεξί.

### 3.3 ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΑ NaI

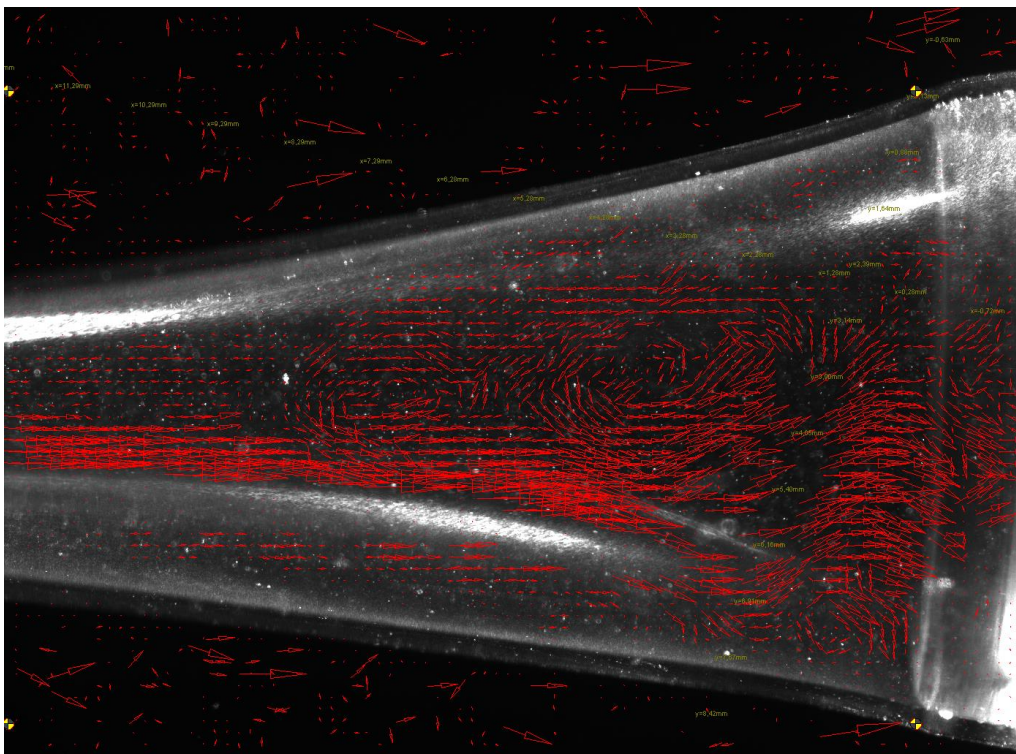
Πριν από τα παραπάνω πειράματα πραγματοποιήθηκε ένα άλλο, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ως ρευστό υδατικό διάλυμα NaI (περίπου 50% w/w). Επειδή σε αυτή την περίπτωση οι φωτογραφίες είναι πιο σαφείς (αυτό οφείλεται στο ότι ο δείκτης διάθλασης του διαλύματος αυτού είναι σχεδόν ίδιος με του ελαστομερούς, που είναι περίπου 1.41), παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες έτσι ώστε να γίνει πιο κατανοητό το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής και της εμφάνισης δινών.



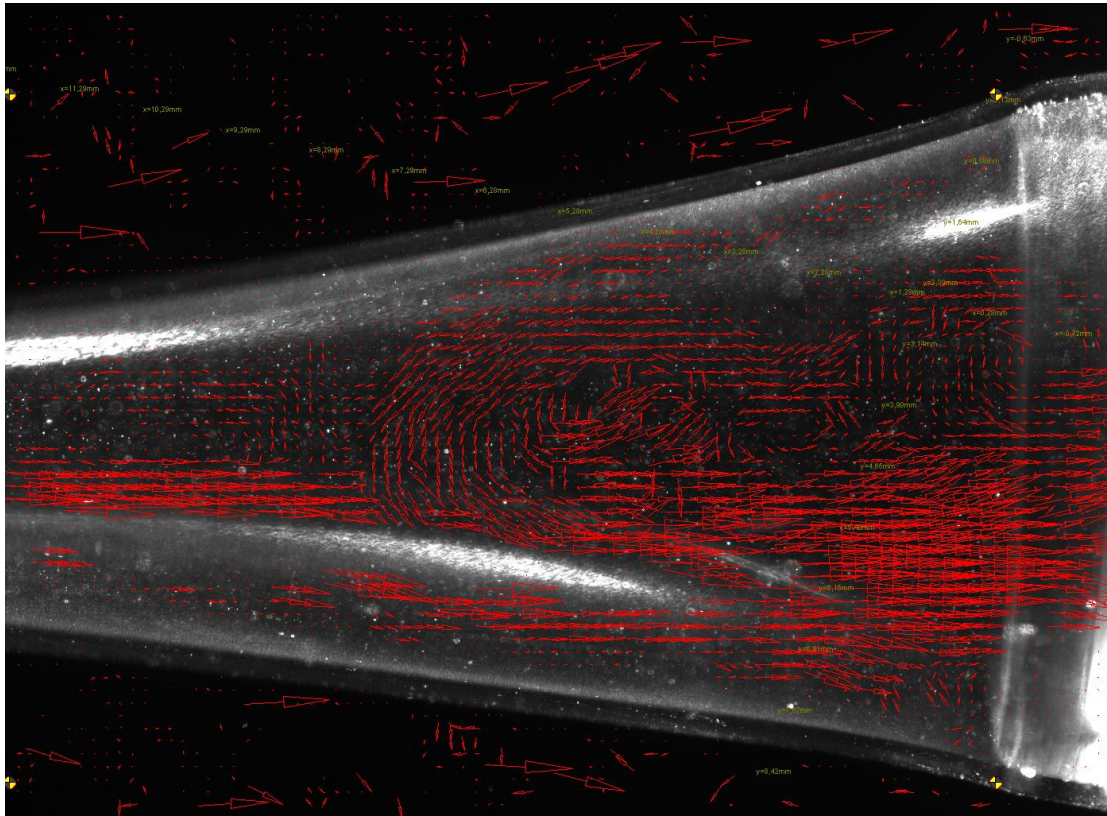
Εικόνα 3.3.1: Σχηματισμός δινών κατάντι του «λαιμού».



Εικόνα 3.3.2: Στρωτή ροή στο κάτω μέρος του αγωγού και αποκόλληση της ροής στο πάνω μέρος της εξόδου.



Εικόνα 3.3.3: Χαοτική ροή με εμφανή σχηματισμό δινών.



Εικόνα 3.3.4: Σχηματισμός δίνης καθώς και αποκόλληση της ροής στο πάνω μέρος του αγωγού.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετρήθηκε η ροή στο εσωτερικό λεπτότοιχου, ελαστικού αγωγού με τη βοήθεια μετρητικής διάταξης 2D-PIV καταγράφοντας το πεδίο ταχυτήτων στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού, ο οποίος ήταν τοποθετημένος οριζόντια. Η ροή γινόταν με τη βαρύτητα μεταξύ δύο δεξαμενών νερού εκ των οποίων η ελεύθερη στάθμη της κατάντι δεξαμενής μεταβαλλόταν με σκοπό τον ακριβέστερο έλεγχο της πίεσης στο εσωτερικό του σωλήνα. Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Σε κατάσταση μικρών διατοιχωματικών πιέσεων, ο αγωγός συρρικνώνεται σχηματίζοντας μια στένωση (λαιμό), της οποίας η διατομή αυξομειώνεται με το χρόνο. Η ταλάντωση του τοιχώματος του αγωγού αρχικώς είναι τυχαία, ενώ κατεβάζοντας τη στάθμη της κατάντι δεξαμενής ως προς τον αγωγό, μετατρέπεται σε περιοδική.
- Η ροή λίγο πριν την έναρξη της περιοδικής ταλάντωσης του αγωγού ήταν ασταθής. Συγκεκριμένα, εμφανίστηκαν στο αποκλίνον τμήμα της στένωσης του αγωγού, περιοχές ανακυκλοφορίας (χαμηλές και αρνητικές ταχύτητες), οι οποίες μετατοπίζονταν από τη μια πλευρά του τοιχώματος στην άλλη κατά τυχαίο τρόπο.
- Η μικρότερη ακτίνα του αγωγού κυμαινόταν μεταξύ 20% και 30% της διαμέτρου του αγωγού πριν την έναρξη της περιοδικής ταλάντωσης.
- Η μεγαλύτερη γωνία του διαχύτη ήταν κατά μέσον όρο περίπου 20° ενώ πολύ κοντά στην έξοδο έφτανε τις 40°.
- Η απόσταση των αντιδιαμετρικών σημείων του αγωγού από τον άξονά του, στο κατακόρυφο επίπεδο που έγιναν οι μετρήσεις, παρουσίαζε μια μέγιστη ασυμμετρία της τάξης του 5% της διαμέτρου, ενώ όσον αφορά τη γωνία που σχημάτιζαν τα όρια του αγωγού με τον άξονα συμμετρίας υπήρχε μια διαφορά της τάξης των 5°.
- Στην είσοδο του αγωγού, η ροή ήταν κατά κύριο λόγο ομοιόμορφη, χωρίς κάποιου είδους αστάθειες.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

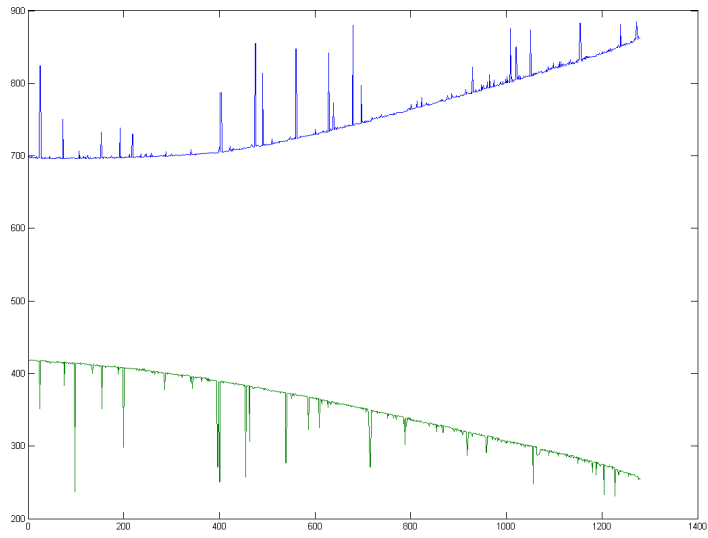
### ΕΥΡΕΣΗ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ

Για κάθε  $x$  στην εικόνα, το πρόγραμμα που βρίσκει το περίγραμμα ξεκινάει από το πάνω-πάνω σημείο και προχωράει προς τα κάτω. Αν η διαφορά στην φωτεινότητα μεταξύ δύο γειτονικών σημείων είναι μεγαλύτερη από 3, θεωρούμε πως στο σημείο εκείνο είναι το όριο του αγωγού (αυτό γιατί ο αγωγός είναι φωτεινός ενώ το φόντο μαύρο). Με τον τρόπο αυτόν βρίσκουμε το πάνω όριο. Για το κάτω όριο το πρόγραμμα κάνει ακριβώς το ίδιο αλλά ξεκινά από κάτω. Έτσι, καθορίζεται το περίγραμμα του αγωγού με αρκετή σαφήνεια. Υπάρχουν όμως κάποια σημεία εκτός του αγωγού, που επειδή είναι πιο φωτεινά από το φόντο (ίσως να είναι σωματίδια σκόνης τα οποία αντανακλούν στο φως), το πρόγραμμα θεωρεί πως το όριο του αγωγού είναι εκεί. Για να απαλλαγούμε από τα σημεία αυτά, κάνουμε τα όρια πιο ομαλά σε δύο βήματα (αυτό για κάθε εικόνα):

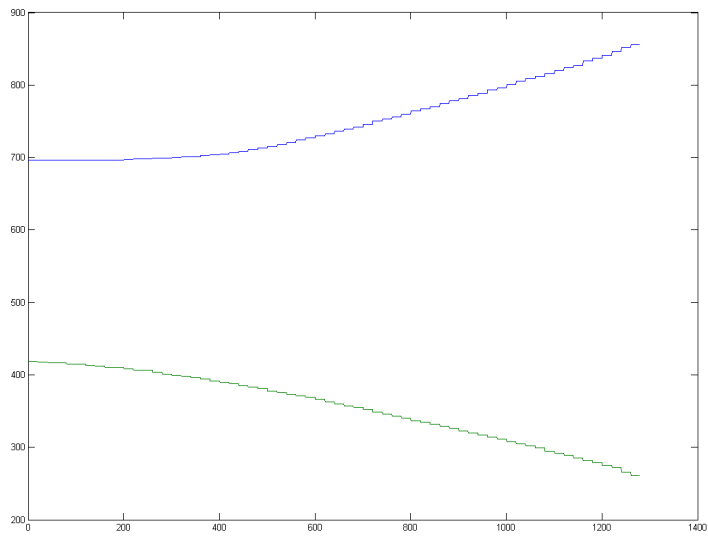
1<sup>ο</sup> βήμα: Χωρίζουμε οριζόντια την εικόνα σε διαστήματα πλάτους 20 Pixel. Για κάθε διάστημα, θέτουμε πως η τεταγμένη του πάνω ορίου είναι το ελάχιστο  $y$  του αρχικού περιγράμματος στο διάστημα αυτό. Επίσης, η τεταγμένη του κάτω ορίου είναι το μέγιστο  $y$  του αρχικού περιγράμματος στο διάστημα αυτό. Έτσι, παίρνουμε πάνω και κάτω όρια που αποτελούνται από «σκαλοπάτια». Δεν είναι ακόμα εντελώς ομαλά, αλλά είναι πιο σαφή.

2<sup>ο</sup> βήμα: Προσεγγίζουμε τα όρια που πήραμε προηγουμένως με πολυώνυμα 9<sup>ου</sup> βαθμού (αυτό το κάνουμε για να βρούμε την κλίση και συνεπώς τη γωνία σε κάθε σημείο). Έπειτα, συγκρίνουμε τα όρια με αυτές τις προσεγγίσεις. Εάν η διαφορά ορίου-πολυωνύμου, σε κάποιο  $x$ , είναι μεγαλύτερη από μια ανοχή, θεωρούμε πως το όριο σε αυτό το σημείο είναι αυτό που δίνεται από το πολυώνυμο. Αυτό το κάνουμε αρκετές φορές, με την ανοχή να είναι όλο και μικρότερη κάθε φορά. Με τον τρόπο αυτό τα όρια προσεγγίζονται με μεγάλη ακρίβεια.

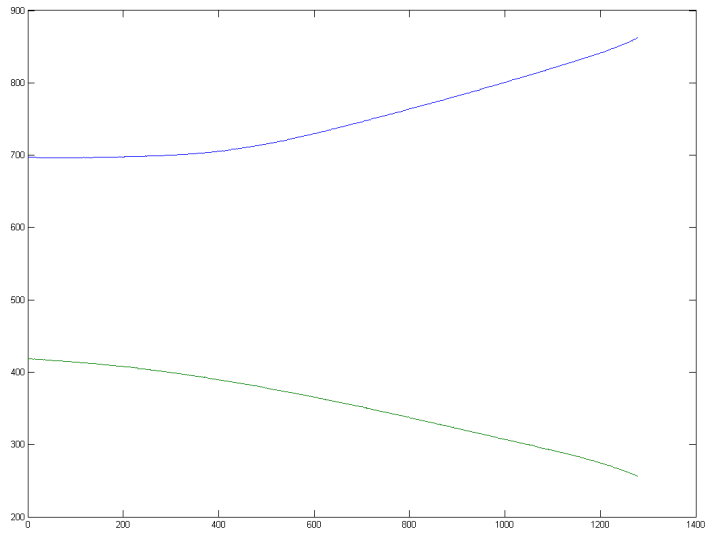
Παρακάτω δίνονται εικόνες για κάθε στάδιο κατά την ομαλοποίηση του περιγράμματος του αγωγού και ενδεικτικά κάποιοι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν στη MATLAB.



Στόδιο 1°



Στόδιο 2°



Στόδιο 3<sup>ο</sup>

## ΚΩΔΙΚΕΣ MATLAB

```
d1=['0' '1' '2']
d2=['0' '1' '2' '3' '4' '5' '6' '7' '8' '9']
d3=['0' '1' '2' '3' '4' '5' '6' '7' '8' '9']

B1=zeros(300,1280,12); B2=zeros(300,1280,12); tol=3; u=zeros(300,3082,12);
v=u; norm=v;

for c=8:11
    for i=1:3
        for j=1:10
            for k=1:10
                s2=['f:\Tube\8\export' d1(i) d2(j) d3(k) '.dat'];
                s3=['f:\Tube\8\' d1(i) d2(j) d3(k) 'c.bmp'];
                I=imread(s3);
                a=importdata(s2);
                n=(i-1).*100+(j-1).*10+k
                u(n, :, 1)=-a(:, 3); v(n, :, 1)=-a(:, 4);
                norm(n, :, 1)=sqrt(a(:, 3).^2+a(:, 4).^2);

                for x=1:1280;
                    for y=135:512;
                        if I(y,x)-I(y-1,x)>tol B(2.*n-1,x)=y-1; break
                    end
                end
                for y=228:512;
                    if I(1024-y,x)-I(1025-y,x)>tol B(2.*n,x)=1025-y; break
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end
```

Παραπάνω φαίνεται ένα ενδεικτικό πρόγραμμα στη Matlab, που χρησιμοποιείται για την εύρεση του περιγράμματος του αγωγού (εδώ το δεξί του άκρο). Το πρόγραμμα φορτώνει διαδοχικά τις φωτογραφίες του αγωγού (συγκεκριμένα, τη δεύτερη φωτογραφία από κάθε ζεύγος, διότι είναι πιο φωτεινή) και βρίσκει το περίγραμμα, τις συντεταγμένες του οποίου τις αποθηκεύει στους πίνακες B1 και B2 (για το πάνω και το κάτω όριο αντίστοιχα). Το περίγραμμα το εντοπίζει συγκρίνοντας τη φωτεινότητα γειτονικών (στον y άξονα) σημείων, για όλα τα x. Αν η διαφορά στη φωτεινότητα ξεπεράσει την τιμή tol, θεωρείται πως το όριο του αγωγού είναι στο σημείο εκείνο, και το πρόγραμμα προχωράει στην επόμενη τιμή του x.

```

SB3=B1; SB4=B2; step=20
for c=8:11
    for n=1:300
        for i=1:1280./step
            max1=max(SB3(n,(i-1).*step+1:i.*step,c));
            SB3(n,(i-1).*step+1:i.*step,c)=max1;
            min2=min(SB4(n,(i-1).*step+1:i.*step,c));
            SB4(n,(i-1).*step+1:i.*step,c)=min2;
            count=[c,n]
        end
    end
end

SB1=B1; SB2=B2;
for c=8:11
    for n=1:300
        for i=1:1280
            if abs(SB3(n,i,c)-SB1(n,i,c))>30    SB1(n,i,c)=SB3(n,i,c);
            end
            if abs(SB4(n,i,c)-SB2(n,i,c))>30    SB2(n,i,c)=SB4(n,i,c);
            end
            count=[c,n]
        end
    end
end

coef1=zeros(79,10,12); coef2=zeros(79,10,12);
tol=[100,90,80,70,60,50,40,30,20,15,14,13,12,11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1,0.5];
x=[1:1280];
ws = warning('off','all');

for c=8:11
    for n=1:300
        for i=1:25;

            p1=polyfit(x,SB1(n,:,c),9);
            coef1(n,:,c)=p1;
            for j=1:1280;
                fit1=polyval(p1,j);
                if abs(SB1(n,j,c)-fit1)>tol(i)    SB1(n,j,c)=fit1;
                end
            end

            p2=polyfit(x,SB2(n,:,c),9);
            coef2(n,:,c)=p2;
            for j=1:1280;
                fit2=polyval(p2,j);
                if abs(SB2(n,j,c)-fit2)>tol(i)    SB2(n,j,c)=fit2;
                end
            end

        end

        count=[c,n]
    end
end

```

Ο παραπάνω κώδικας στη Matlab πρώτα ομαλοποιεί τα περιγράμματα και ύστερα τα προσεγγίζει με όλο και πιο ακριβή πολυώνυμα 9<sup>ου</sup> βαθμού. Τους συντελεστές των πολυωνύμων τους σώζει στους πίνακες coef1 και coef2 (για το πάνω και το κάτω όριο αντίστοιχα), και τα ίδια τα ομαλοποιημένα όρια στους πίνακες SB1 και SB2, για το πάνω και το κάτω όριο αντίστοιχα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Δ.Σ.Μαθιουλάκης, Ι.Σ.Αναγνωστόπουλος, Δ.Γ.Τουζόπουλος, «Βιομηχανική Ρευστομηχανική», Εκδόσεις Ε.Μ.Π. (2006).
2. Σωκράτης Τσαγγάρης, «Μηχανική των Ρευστών», Εκδόσεις Συμείων (2005).
3. Γιώργος Μπεργελές, «Υπολογιστική Ρευστομηχανική», Εκδόσεις Συμείων (2006).
4. Αναστάσιος Αργύρης, «Μελέτη του πεδίου ροής στο εσωτερικό αυτοταλαντούμενου ελαστικού αγωγού με χρήση PIV», Διπλωματική Εργασία (2011).
5. Αικατερίνη Λάσκαρη, «Πειραματική μελέτη ροής σε ελαστικούς αγωγούς σταθερού και μεταβλητού πάχους», Διπλωματική Εργασία (2002).
6. D.Kounadis & D.S.Mathioulakis, “Flow velocity measurements inside a self-oscillating collapsible tube”, 3<sup>rd</sup> IC-EpsMsO (2009).
7. K.Kounanis & D.S.Mathioulakis, “Experimental flow study within a self-oscillating collapsible tube, Journal of Fluids and Structures (1999).
8. X.L.Yang, Y.Liu & J.m. Yang, “Fluid-structure interaction in a pulmonary arterial bifurcation”, Journal of Biomechanics (2007).
9. Christopher D.Bertram, “Flow-induced oscillation of collapsed tubes and airway structures, Respiratory Physiology & Neurobiology (2008).
10. Matthias Heil, “Stokes flow in collapsible tubes: computation and experiment”, Journal of Fluids Mechanics (1997).
11. Matthias Heil & Sarah L. Waters, “How rapidly oscillating collapsible tubes extract energy from a viscous mean flow”, Journal of Fluids Mechanics (2008).
12. Adolph I.Katz, Yu Chen & Augusto Moreno, “Flow through a collapsible tube”, Biophysical Journal (1969).
13. K.Pielhop, M.Klaas & W.Schroeder, “Analysis of the unsteady flow in an elastic stenotic vessel, European Journal of Mechanics B/Fluids (2012).
14. Christopher D.Bertram, “Fluid flow in distensible vessels”, Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology (2009).
15. William A. Conrad, “Pressure-flow relationships in collapsible tubes”, IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering (1969).