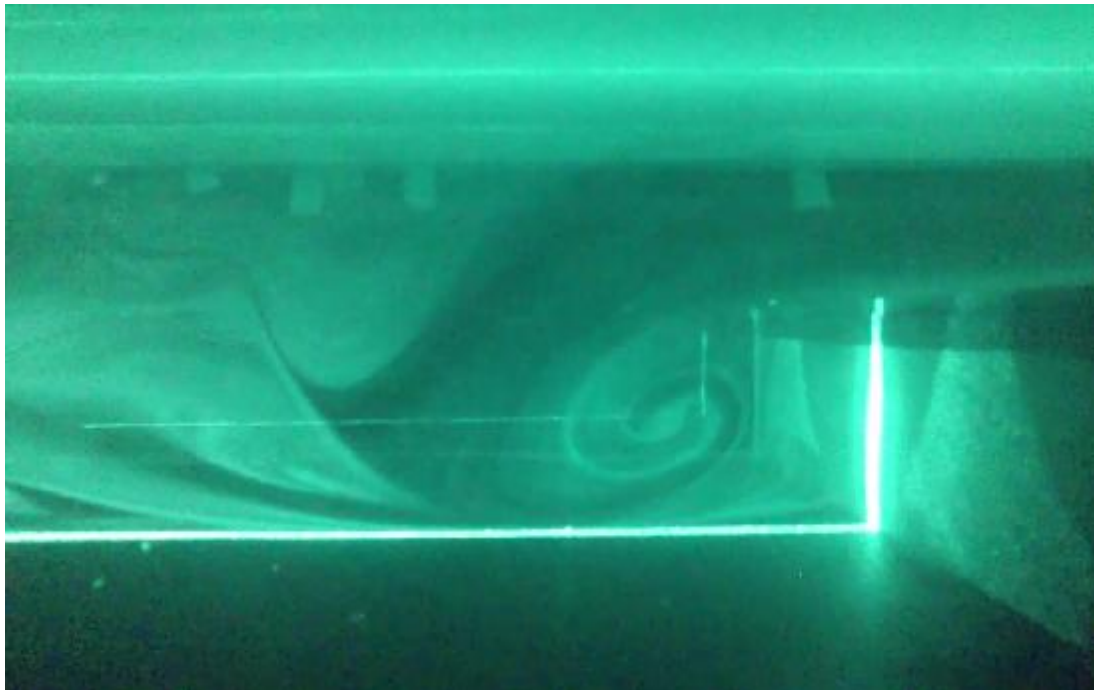


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΡΟΗ ΣΕ ΚΑΝΑΛΙ- ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑ LASER DOPPLER(LDA)



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ

ΣΤΑΥΡΟΣ ΦΩΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή μελέτη έρχεται να ολοκληρώσει την φοίτηση μας στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών Πάτρας. Στο σημείο αυτό θεωρούμε υποχρέωση μας να ευχαριστήσουμε όλους όσους συντέλεσαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής μελέτης. Τα θερμά μας ευχαριστήρια στον επιβλέπων καθηγητή μας κ. Ι. Καλογήρου για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του. Επίσης θερμά ευχαριστήρια απευθύνουμε στον κ. Α. Ρωμαίο καθώς και στον κ. Α. Βούρο για την πολύτιμη βοήθειά τους ώστε επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Τέλος, δεν θα μπορούσαμε να μην απευθύνουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειες μας για την πολύτιμη τους υποστήριξη, ηθική και υλική, που απλόχερα μας προσέφεραν κατά την φοίτηση μας στο ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

.....

.....

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Μηχανική των ρευστών ή αλλιώς Ρευστομηχανική αποτελεί ιδιαίτερο κλάδο της κλασικής μηχανικής με κύριο αντικείμενο έρευνας και μελέτης τη συμπεριφορά των ρευστών επί ασκουμένων δυνάμεων ή προσφοράς ενέργειας σε αυτά. Η Μηχανική των ρευστών ασχολείται με τη ροή των ρευστών, δηλαδή των υγρών και αερίων. Η κατανόηση της μηχανικής των ρευστών έχει ιδιαίτερα σπουδαία σημασία σε πολλούς τομείς Επιστημών όπως στην Ιατρική, επί της ροής και κυκλοφορίας του αίματος, στη Μετεωρολογία, επί των αερίων στρωμάτων, στην Αεροναυπηγική, επί των δυνάμεων που ασκούνται στα αεροσκάφη, στη Μηχανολογία, καθώς αποτελούν ενδεικτικά τομείς που απαιτούν άριστη γνώση των ιδιοτήτων των ρευστών.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την ροή σε κανάλι με την χρήση της μεθόδου της ανεμομετρίας laser doppler (LDA) με σκοπό την εξοικείωση της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων στην πειραματική ρευστομηχανική. Επιπλέον, μέσω αυτής της εργασίας δίνεται η δυνατότητα στους σπουδαστές του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε στο ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας να πειραματιστούν και να εξοικειωθούν με τα ροικά φαινόμενα. Στα πλαίσια του μαθήματος της Μετρολογίας, οι σπουδαστές μπορούν να πειραματιστούν κάνοντας ρυθμίσεις στην συσκευή του λέιζερ καθώς και στο λογισμικό. Όπως επίσης και στα πλαίσια του μαθήματος της Μηχανικής Ρευστών οι φοιτητές του τμήματος, χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη (κανάλι) μπορούν να μελετήσουν φαινόμενα όπως η αποκόλληση του οριακού στρώματος αλλά και η δημιουργία συνεκτικών δομών που εμφανίζονται κατά την ανάμιξη διαφορετικών ρευμάτων αέρα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας κατασκευάστηκε κανάλι (αγωγός) με τις κατάλληλες διαστάσεις για την υλοποίηση των αναγκών του πειράματος. Με τις κατάλληλες τροποποιήσεις ο αέρας που εισέρχεται αρχικά μέσω αξονικού ανεμιστήρα, οδηγείται σε απότομη αύξηση της διατομής «σκαλοπάτι». Για την μέθοδο της οπτικοποίησης του πειράματος χρησιμοποιήθηκε σύστημα λέιζερ με υδρόψυξη για μεγαλύτερη αντοχή στην αύξηση της θερμοκρασίας.

Στην συνέχεια με την βοήθεια ενός συστήματος φακών δημιουργήθηκε φύλλο φωτός προκειμένου να φωτιστεί η πορεία της ροής. Για την κινηματογράφηση της ροής με οπτικά μέσα τροφοδοτήθηκαν σε αυτήν σωματίδια νεφελοποιημένης γλυκερίνης. Θεωρούμε πως ακολουθούν πιστά την ροή χωρίς να την επηρεάζουν λόγω του πολύ μικρού τους μεγέθους. Έτσι με την βοήθεια της συγκέντρωσης των σωματιδίων και την διάθλαση του φωτός (φαινόμενο Doppler) μας δίνεται η δυνατότητα της οπτικής παρακολούθησης και της εκτίμησης της ταχύτητας ροής.

Ρυθμίζοντας την ποσότητα σωματιδίων που παράγει ο νεφελοποιητής καθώς και την ταχύτητα λήψης ή κινηματογράφησης μπορούμε να καταγράψουμε εντυπωσιακά στιγμιότυπα στην απότομη αλλαγή της διατομής. Σε αυτό το σημείο (σκαλοπάτι) παρατηρούμε το ρευστό που αρχικά είναι παγιδευμένο στο κάτω μέρος του αγωγού να συμπαρασύρεται και να αναμιγνύεται με εκείνο που βρίσκεται κεντρικά του καναλιού δημιουργώντας εντυπωσιακούς στροβίλους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1	Σκοπός	1
1.2	Ιστορική ανασκόπηση	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΟΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	
2.1	Περιγραφή της ροής	3
2.2	Χαρακτηρίστηκα ροής	4
2.3	Απώλειες πίεσης	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	
3.1	Ανεμομετρία laser doppler.	12
3.2	Οπτικό σύστημα	18
3.3	Επεξεργασία σήματος	19
3.4	Επιλογή σωματιδίων	20
3.5	Ανίχνευση σωματιδίων (burst detection).	21
3.6	Πηγές θόρυβοι	22
3.7	Επιλογή φίλτρων	23
3.8	Υπολογισμός στατικών μεγεθών.	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	
4.1	Πειραματική εγκατάσταση	27
4.1.1	Νεφελοποιητής	27
4.1.2	Πλέγμα εξομάλυνσης ροής	28
4.1.3	Αγωγός ορθογωνικής διατομής	29
4.1.4	Ανεμιστήρας	30
4.1.5	Συσκευή λέιζερ και φακών για τη δημιουργία φύλλου φωτός και κάμερα	31
4.1.5.1	Περιγραφή επιμέρους εξαρτημάτων	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	
5.1	Δημιουργία στροβίλου κατά την αποκόλληση (πολύ χαμηλές ταχύτητες – ελάχιστη συγκέντρωση σωματιδίων)	38
5.2	Δημιουργία στροβίλου (χαμηλές ταχύτητες)	40
5.3	Μετάβαση από το μέσο στρωτό σε ασταθές πεδίο	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	
6.1	Συνθήκες μέτρησης	50
6.2	Αποτελέσματα σε ροική διαμόρφωση βήματος	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΣΚΟΠΟΣ

Το βιοτικό επίπεδο και η ποιότητα ζωής στην ανθρώπινη κοινωνία θα εξαρτάται πάντα από τις επιστήμες των ρευστών – την δυναμική και την μηχανική- διότι εμπλέκονται σε ένα πλήθος φυσικών και τεχνολογικών εφαρμογών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση και η διεθνής κοινότητα θέτουν ως βασική προϋπόθεση ο σχεδιασμός μηχανών και εγκαταστάσεων να γίνεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση και παράλληλα μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Κατά την διάρκεια των δυο τελευταίων δεκαετιών υπήρξε σημαντική προσπάθεια για την ανάπτυξη μεθόδων και εργαλείων για τον ενεργητικό και παθητικό έλεγχο της ροής. Ο παθητικός έλεγχος της ροής αναφέρεται σε γεωμετρίες και εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται και έχουν μόνιμο χαρακτήρα, ενώ ο ενεργητικός αναφέρεται σε εκείνες τις διατάξεις οι οποίες μπορούν να αλλάζουν δυναμικά συμπεριφορά ανάλογα με τις ανάγκες της ροής σε κάθε περίπτωση.

1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ροή σε κατάντη απότομη διαμόρφωση αποτελεί αντικείμενο μελέτης ως ένα από τα πρώτα, «κλασσικά», προβλήματα ρευστοδυναμικής. Η βιβλιογραφία περιέχει πλήθος εργασιών που στοχεύουν στην καταγραφή και την ανάλυση της ροής χρησιμοποιώντας αναλυτικές, πειραματικές και υπολογιστικές μεθόδους. Οι Eaton και Johnston (1980) ήταν από τους πρώτους που χαρακτήρισαν τη ροή αυτή δημοφιλή καθώς πρόκειται για την πιο απλή ροή που παρουσιάζει αποκόλληση και ανακυκλοφορία. Παρά την απλή της γεωμετρία, η συγκεκριμένη ροή διαχωρίζεται σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά, κάνοντας την αναλυτική προσέγγιση ιδιαίτερα δύσκολη.

Επιπλέον, η χρήση πειραματικών τεχνικών είναι επίσης ευαίσθητη, αφού τα διαφορετικά τμήματα της ροής απαιτούν και διαφορετική προσαρμογή των οπτικών ή παρεμβατικών μεθόδων για τη μέτρηση της ταχύτητας. Τέλος, αναγνωρίζοντας επίσης τη δυσκολία εφαρμογής μοντέλων τύρβης, που είναι αναγκαία σε υψηλούς αριθμούς Reynolds, οι Thangam και Hur (1991), πρότειναν τη συγκεκριμένη ροή ως πρότυπη για την επιτυχία και την επαλήθευση εργαλείων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) καθώς αυτά δοκιμάζονται σε ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα όπως είναι η αποκόλληση.

Η κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός ρευστού που περνά από τη συγκεκριμένη διαμόρφωση βελτιώθηκε κυρίως λόγω της ανάπτυξης πειραματικών τεχνικών. Οι πιο παλιές εργασίες (Armally et al. 1983) στηρίχτηκαν σε τεχνικές οπτικής απεικόνισης της ροής χρησιμοποιώντας ως τροχιοδεικτικά σωματίδια καπνό λαδιού, γύρη ή μελάνι. Σε αυτές παρουσιάστηκαν φωτογραφίες σε πολύ χαμηλές

ταχύτητες, όπου η ροή ήταν κυρίως στρωτή. Σε λίγες περιπτώσεις αναφέρθηκαν μετρήσεις και για το τυρβώδες καθεστώς, που όμως περιορίστηκαν σε περιοχές εκτός των ζωνών της ανακυκλοφορίας (Kim et al. 1980).

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη οπτικών μεθόδων, όπως η μέθοδος PIV (αρχικά της φράσης Particle Image Velocimetry, που στα ελληνικά μεταφράζεται ως μέτρηση ταχύτητας μέσω οπτικοποίησης σωματιδίων) βοήθησαν στην καλύτερη εστίαση στις διάφορες περιοχές και στην παραγωγή αποτελεσμάτων σε περιοχές όπου πριν ήταν αδύνατο (Scanaro και Riethmuller, 1999).

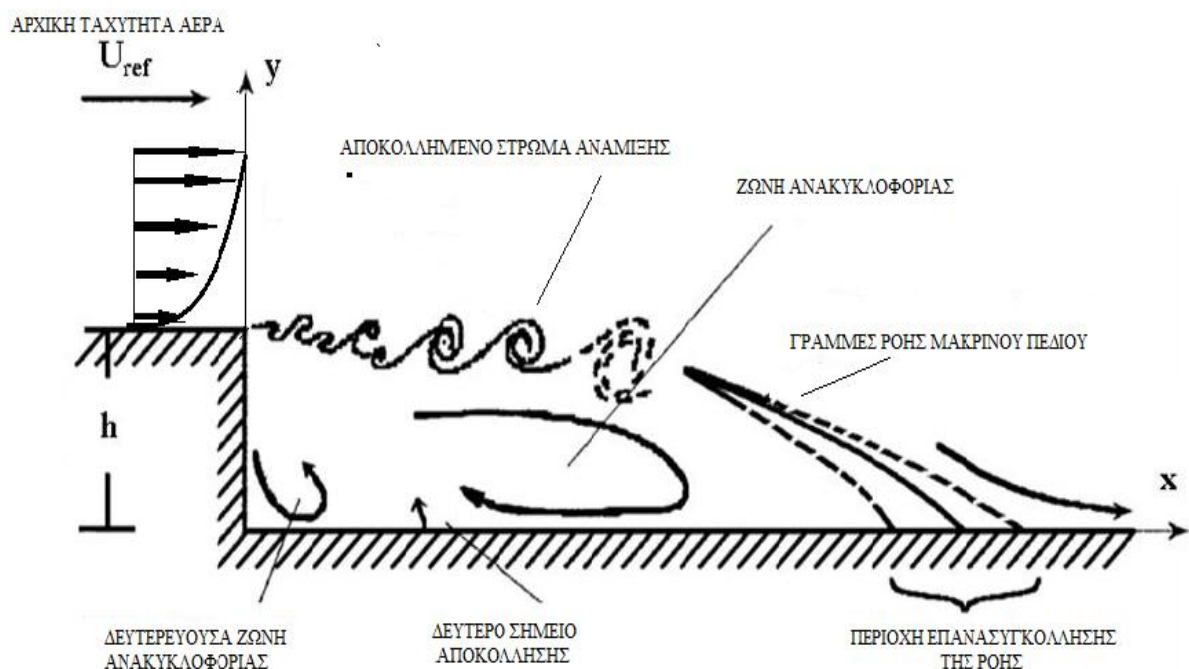
Παράλληλα, η ιλιγγιώδης ανάπτυξη των υπολογιστικών εργαλείων, που με την αύξηση της απόδοσης και χωρητικότητας των υπολογιστών φαίνεται να κυριαρχεί στο χώρο, έδωσε τη δυνατότητα ανάλυσης ακόμα και των μικρότερων δινών και κινήσεων (λίγο πριν το μοριακό επίπεδο) μέσα στο ασταθές περιβάλλον της συγκεκριμένης ροής (Le et al. 1997). Σε τέτοιου τύπου μοντέλα αποτελούν τα μοντέλα προσομοίωσης των «μεγάλων δινών» (Large Eddy Simulation ή LES) και τα μοντέλα απευθείας ανάλυσης όλων των δινών στο πεδίο της ροής (Direct Numerical Simulation ή DNS) (Αρμυρίωτης Α., 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΟΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται η συμπεριφορά του ρευστού στην απότομη αύξηση της διατομής κατά μήκος του ευθύγραμμου αγωγού ορθογωνικής διατομής. Η συμπεριφορά της ροής του αέρα όταν περνά από την μικρότερη στην μεγαλύτερη διατομή του αγωγού παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον όταν δεν υπάρχει μεταβατικό κοίλο τμήμα αλλά ένα κατακόρυφο, δηλαδή ένα κάθετο τμήμα στην ροή (σκαλοπάτι).

Με την αύξηση της διατομής παρουσιάζονται κάποιες μεταβολές, όπως προβλέπει η εξίσωση της συνέχειας η ταχύτητα ροής του αέρα μειώνεται, ωστόσο η συμπεριφορά των γραμμών ροής γίνεται πολύπλοκη. Αρχικά έχουμε την δημιουργία στροβίλου στο κατακόρυφο τμήμα (σκαλοπάτι) λόγω αποκόλλησης του οριακού στρώματος, σε αυτή την περιοχή παρατηρείται μια ισχυρή ζώνη ανακυκλοφορίας, όπου το ρευστό «παγιδεύεται» και στροβιλίζεται με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής. Στην συνέχεια οι γραμμές ροής δείχνουν ότι σε ένα μακρινό πεδίο υπάρχει επανασυγκόλληση της ροής, καθώς υπάρχει ομαλή πορεία στο κατώτερο τμήμα του αγωγού.



Εικόνα 2.1.: Απεικόνιση της ροής στην απότομη διαμόρφωση.

Μία απεικόνιση της απότομης διαμορφώσεως παρατηρείται στην Εικόνα 2.1. παρατηρούνται τα χαρακτηριστικά που προαναφέραμε αλλά και κάποια δευτερεύοντα στοιχεία, όπως η δευτερεύουσα ζώνη ανακυκλοφορίας στο πιο εσωτερικό τμήμα του σκαλοπατιού (Αρμυρίωτης Α., 2012)

2.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΡΟΗΣ

Η ακριβής περιγραφή της ροής εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό Reynolds (Re) και τον λόγο αύξησης της διατομής. Ο λόγος αύξησης της διατομής προκύπτει από τον λόγο της μεγαλύτερης προς την μικρότερη διάμετρο ή ύψος όταν έχουμε δυσδιάστατη γεωμετρία.

$$\frac{H}{(H-h)} \quad (2.1)$$

Όπου:

H = το αρχικό ύψος της διατομής πριν την διαμόρφωση.

Ο αριθμός Reynolds δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Re}_D = \frac{\rho U_{\text{ref}} H}{m} \quad (2.2)$$

Όπου:

ρ = η πυκνότητα του ρευστού (στην περίπτωση μας έχουμε πυκνότητα ίση με του ατμοσφαιρικού αέρα)

H = το αρχικό ύψος της διατομής

U_{ref} = η αρχική ταχύτητα του αέρα.

Η αναλυτική προσέγγιση της ροής είναι ιδιαίτερα δύσκολη για τους εξής λόγους:

- Η ροή παρουσιάζει αποκόλληση και ανακυκλοφορία
- Η ροή διαχωρίζεται σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Τα διάφορα χαρακτηριστικά της ροής απαιτούν διαφορετική προσαρμογή των μεθόδων για την μέτρηση και την μελέτη της ταχύτητας. Οι ταχύτητες που διεξάγονται στο πείραμα είναι πολύ μικρές με αποτέλεσμα η ροή στο μεγαλύτερο μέρος να είναι στρωτή. Με βάση των πειραμάτων που έχουν γίνει για τυπικές γραμμές ροής σε διαφόρους αριθμούς Reynolds της ροής εντός του αγωγού παρατηρούμε ότι

το πεδίο που εξετάζεται διαμορφώνεται σε μία περιοχή από 10^4 έως 800 και οι αριθμοί Reynolds κυμαίνονται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερους αριθμούς.

Η εξίσωση της συνέχειας και της ορμής με την βοήθεια των τανυστών (i, j) μας δείχνουν ότι οι όροι επαναλαμβάνονται για τις διαφορετικές συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας. Ο αριθμός Reynolds που χρησιμοποιείται είναι αυτός της εξίσωσης (1.1).

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i} \quad (2.4)$$

Το ιξώδες είναι η εμφάνιση μακροσκοπικών ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του ρευστού, ως αποτέλεσμα των μακροσκοπικών διαμοριακών δυνάμεων, δηλαδή η εσωτερική τριβή μέσα σε ένα ρευστό και δίνεται από την εξίσωση του Newton για τα ρευστά:

$$t_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

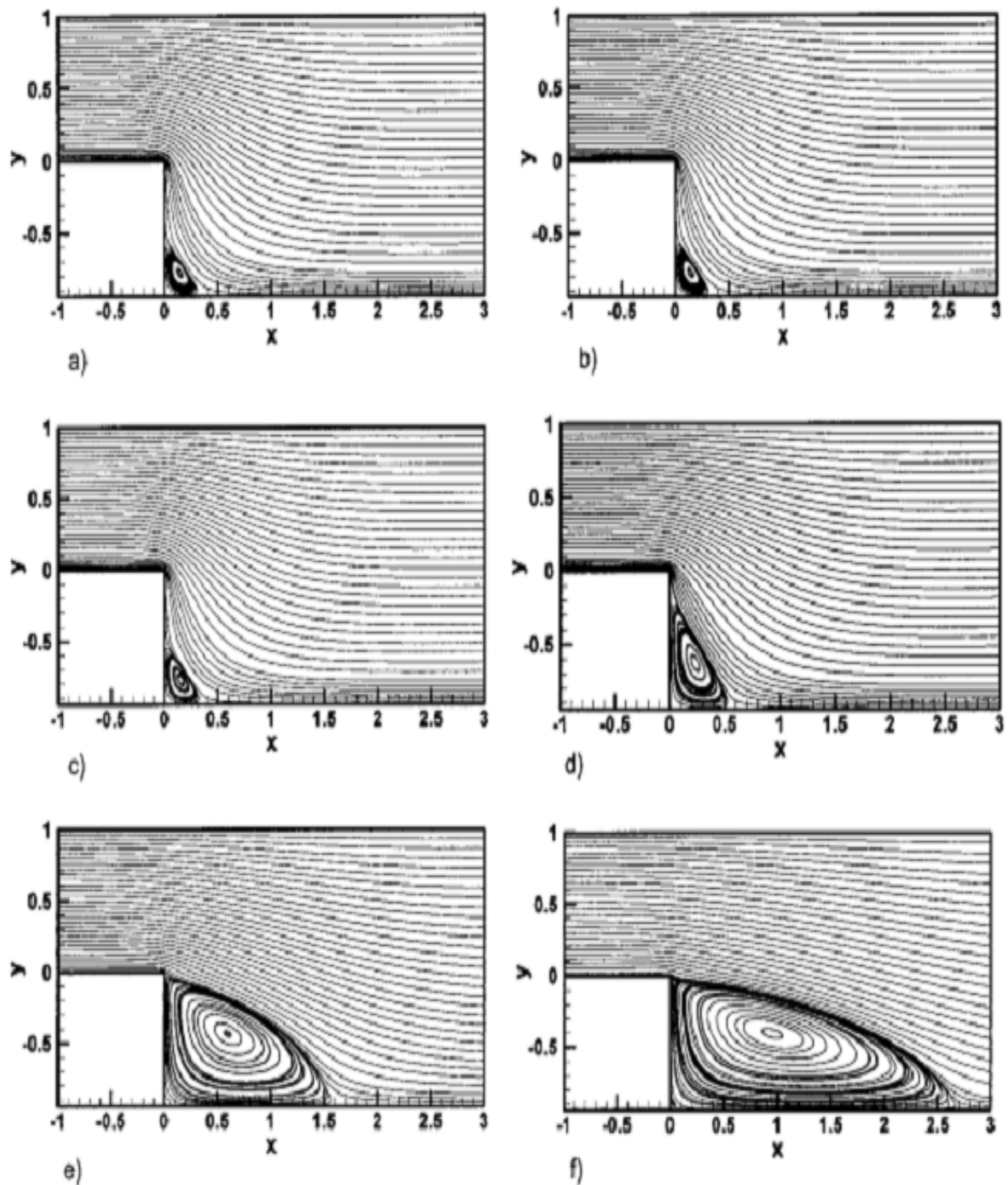
Ο λόγος του ύψους των διατομών κυμαίνεται πολύ κοντά στο 2 και ο αριθμός Reynolds αυξάνεται σταδιακά από το 1 έως το 100, στην εικόνα 1.2. απεικονίζεται η ροή του αέρα σε δυσδιάστατη μορφή των γραμμών ροής για διαφορετικούς χαρακτηριστικούς αριθμούς Reynolds (Αρμυρίωτης Α., 2012).

Από την εικόνα 2.2. φαίνεται ότι για έναν αριθμό Reynolds κοντά στο 500, η αξονική απόσταση όπου η ροή επανασυγκολλάται στο κατώτερο τοίχωμα του αγωγού είναι 10 φορές μεγαλύτερη από το κατακόρυφο τμήμα του αγωγού, που ορίζει το σκαλοπάτι. Με την αύξηση του αριθμού Reynolds έχουμε:

- Αύξηση στο μέγεθος των στροβίλων τόσο σε ύψος όσο και πλάτος χωρίς όμως να ξεπερνά το ύψος του σκαλοπατιού.
- Αύξηση στην απόσταση στην οποία η ροή επανακολλάται στο τοίχωμα.

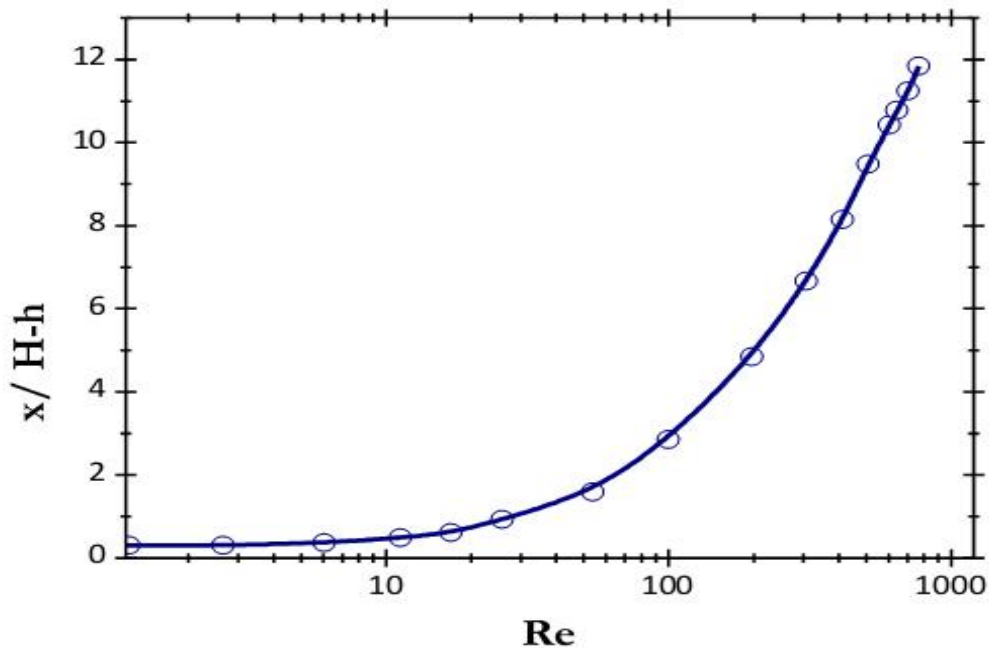
Για να έχουμε καλύτερα συγκριτικά αποτελέσματα των πειραμάτων για διατάξεις διαφορετικών διαστάσεων κάνουμε αδιαστατοποίηση του μήκους

σχηματίζοντας τον λόγο του με το ύψος της αύξησης της διατομής. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται αποτελέσματα για διαφόρους αριθμούς Reynolds (Αρμυρίωτης Α., 2012)



Εικόνα 2.2.: Δυσδιάστατη απεικόνιση γραμμών ροής για αριθμούς Reynolds

(a) 0.001, (b) 0.1, (c) 1, (d) 10, (e) 50, (f) 100.

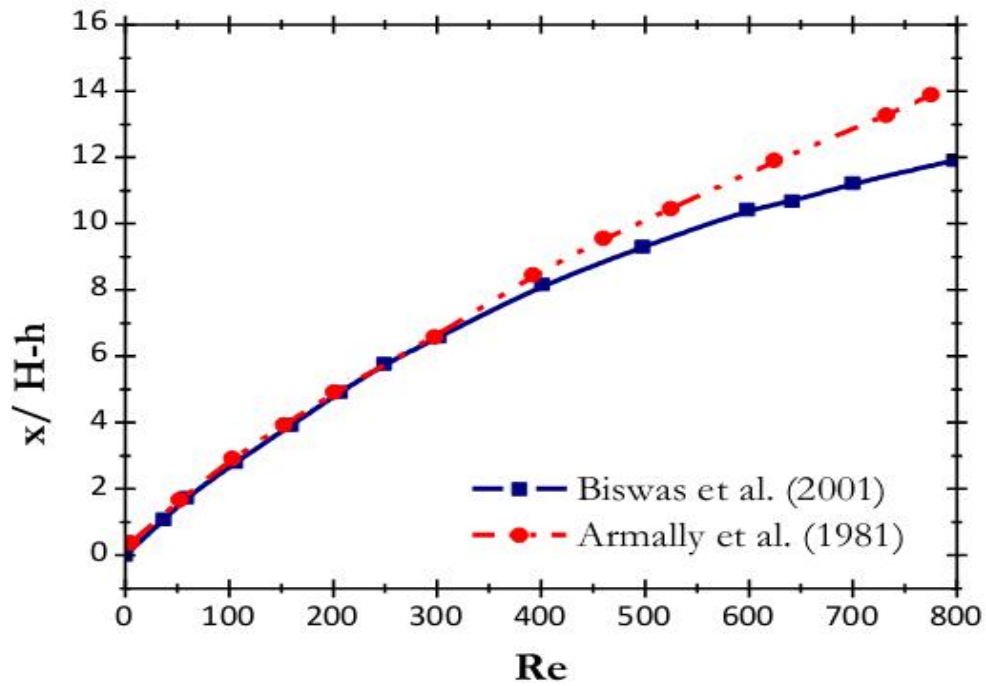


Διάγραμμα 2.1.: Σημείο επανακόλλησης της ροής ως προς το ύψος του σκαλοπατιού σε σχέση με τον αριθμό Reynolds.

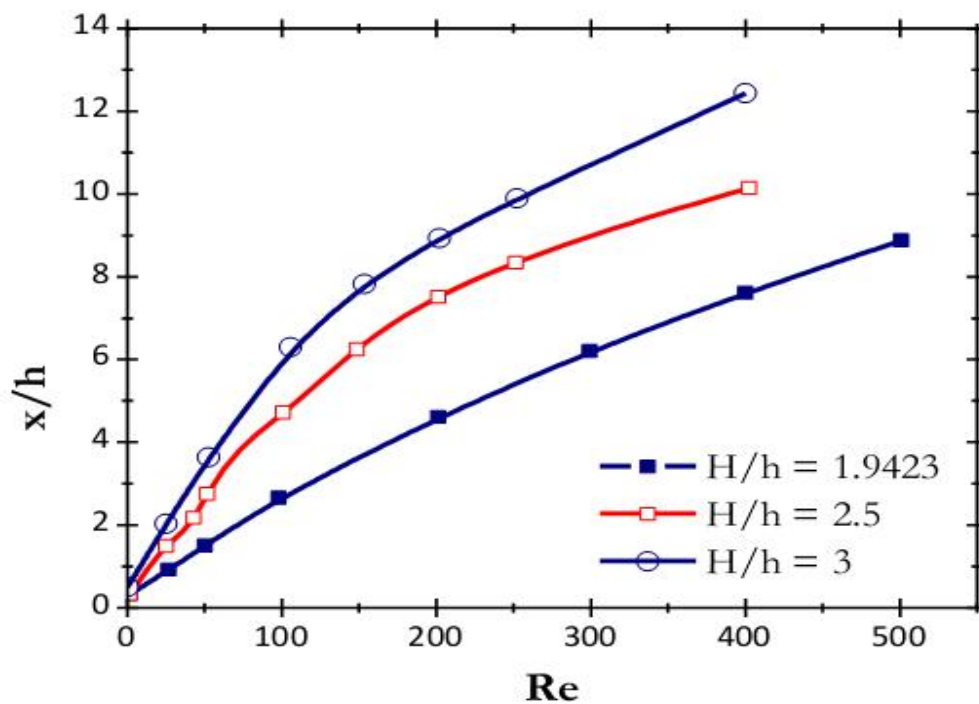
Από το διάγραμμα 2.1. παρατηρείται ότι για έναν αριθμό Reynolds κοντά στο 500, η ροή επανασυγκολλάται στο κατώτερο τοίχωμα του αγωγού και η αξονική απόσταση είναι 10 φορές μεγαλύτερη από το κατακόρυφο τμήμα του, που ορίζει το σκαλοπάτι.

Όταν ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται πολύ κοντά στην μονάδα ($Re \leq 1$) φαίνεται ότι το χαρακτηριστικό μήκος είναι ανεξάρτητο του αριθμού Reynolds και παρουσιάζει τιμές χαμηλότερες και από το 0.5 του σκαλοπατιού. Σε αντίθεση με εκθετική αύξηση του λόγου των μηκών στο συγκεκριμένο τμήμα. Πριν φτάσει ο αριθμός Reynolds στην τιμή 1000 το μήκος επανασυγκόλλησης μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και 12 φορές το ύψος του σκαλοπατιού.

Εστιάζοντας στην περιοχή της αύξησης του μήκους επανασυγκόλλησης μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το μήκος της ζώνης ανακυκλοφορίας του ρευστού μέσα στο κατακόρυφο τμήμα (σκαλοπάτι, Εικόνα 2.1.). Στο διάγραμμα 2.1. παρουσιάζονται αντίστοιχες μετρήσεις σε συγκεκριμένη διάταξη, τα στοιχεία που μπορούμε να λάβουμε είναι ότι μικρές αποκλίσεις υπάρχουν μόνο στις υψηλές τιμές του αριθμού Reynolds. Στο διάγραμμα 2.3. παρατηρείται η εξάρτηση του χαρακτηριστικού μήκους επανασυγκόλλησης της ροής. [Πειραματικά αποτελέσματα των Armally et al.(2001) και Biswas et al (1981 και 2004)].



Διάγραμμα 2.2.: Σημείο επανακόλλησης της ροής ως προς το ύψος του σκαλοπατιού σε σχέση με τον αριθμό Reynolds.



Διάγραμμα 2.3.: Σημείο επανακόλλησης της ροής ως προς το ύψος του σκαλοπατιού σε σχέση με τον αριθμό Reynolds για διάφορες διαστάσεις του κατακόρυφου τμήματος του «σκαλοπατιού».

2.3. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

Για την καλύτερη προσέγγιση του φαινομένου γίνεται η μελέτη των απωλειών πίεσης. Οι απώλειες πίεσης αποτελούν σημαντικό παράγοντα στον καθορισμό της συνολικής απόδοσης της διάταξης, αναλύουμε τις απώλειες σε συγκεκριμένα τμήματα της όπως:

- Απώλειες πίεσης πριν και μετά το σκαλοπάτι λόγω τριβών (γραμμικές απώλειες)
- Απώλειες πίεσης στην αλλαγή της διατομής (τοπικές απώλειες).

Στις παρακάτω εξισώσεις δίνονται οι απώλειες πίεσης σύμφωνα με τις διαφορές περιοχές της γεωμετρίας. Οι γραμμικές απώλειες πίεσης για τις περιοχές πριν και μετά το σκαλοπάτι δίνονται από τις σχέσεις:

$$d p_1 = \frac{l}{Re} \frac{l_1}{b} \frac{r}{2} u_1^2 \quad (2.6)$$

$$d p_2 = \frac{l}{Re} \frac{l_2}{b} \frac{r}{2} u_2^2 \quad (2.7)$$

Η ενδιάμεση τοπική αύξηση πίεσης δίνεται από τον τύπο:

$$d p_{\text{exp}} = \frac{r}{2} (u_1^2 - u_2^2) = \frac{r}{2} \left(1 - \frac{b^2}{H^2} \right) \quad (2.8)$$

Η τοπική απώλεια πίεσης λόγω του σκαλοπατιού είναι:

$$d p_b = x \frac{r}{2} u_1^2 \quad (2.9)$$

Όπου: λ = ο συντελεστής τριβής

Re = ο αριθμός Reynolds

l_1 = το μήκος πριν το σκαλοπάτι

l_2 = το μήκος μετά το σκαλοπάτι

ρ = η πυκνότητα

u_1 = η ταχύτητα πριν το σκαλοπάτι

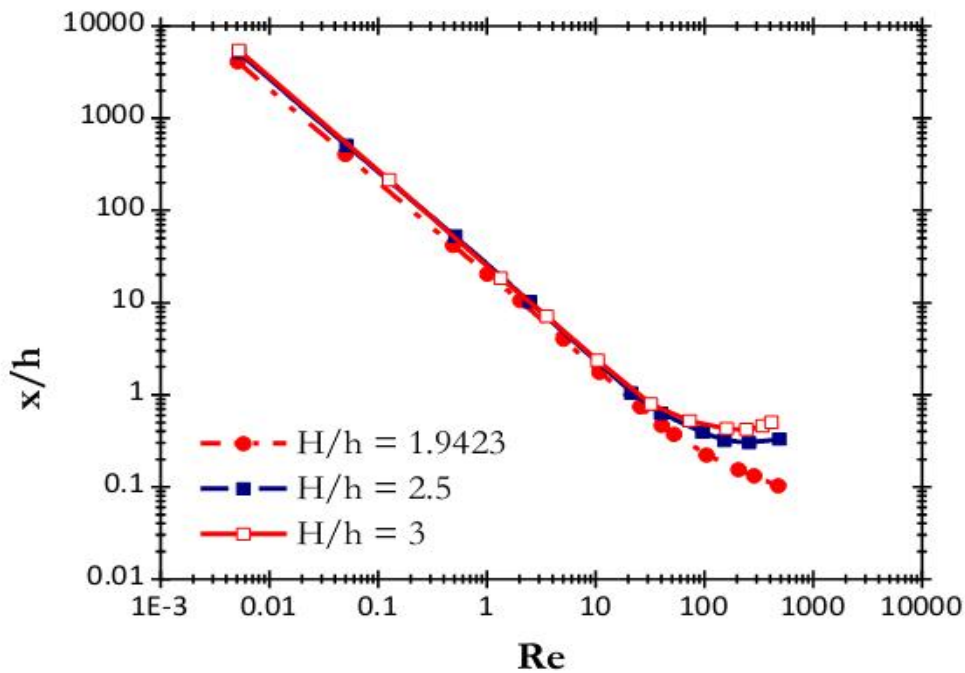
u_2 = η ταχύτητα μετά το σκαλοπάτι

ξ = ο συντελεστής αντίστασης του σκαλοπατιού

h = το ύψος του καναλιού πριν το σκαλοπάτι

H = το ύψος του καναλιού μετά το σκαλοπάτι.

Ο τοπικός συντελεστής αντίστασης ξ εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds και το λόγο H/h όπως αυτό φαίνεται στο παρακάτω Διάγραμμα 2.4.



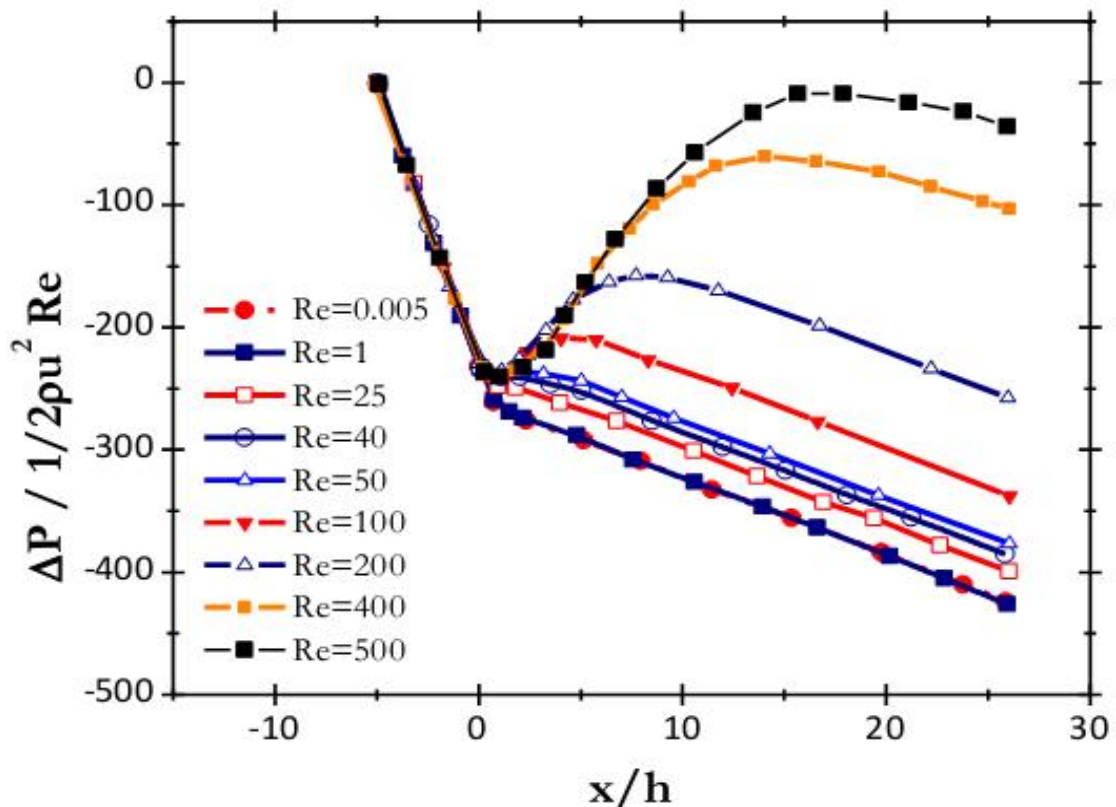
Διάγραμμα 2.4.: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης ξ ανάλογα με τον αριθμό Reynolds και το λόγο αύξησης του ύψους.

Η συνολική πτώση πίεσης της διάταξης δίνεται τελικά από τον τύπο:

$$d p_{tot} = d p_1 + d p_2 - d p_{exp} + d p_b \quad (2.10)$$

Αδιαστατοποιώντας τις απώλειες πίεσης και σε σύγκριση με τον λόγο x/h λαμβάνεται το παραπάνω διάγραμμα 2.4. για τον συνολικό συντελεστή απωλειών της διάταξης. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούνται τα εξής:

- Οι απώλειες πίεσης για διάφορους αριθμούς Reynolds μέχρι και την ακμή του σκαλοπατιού παρουσιάζουν γραμμική μείωση.
- Οι απώλειες πίεσης μετά το σκαλοπάτι για αριθμούς Reynolds μέχρι 40 η πτώση πίεσης συνεχίζεται με μικρότερη κλίση.
- Οι απώλειες πίεσης μετά το σκαλοπάτι για αριθμούς Reynolds μεγαλύτερους του 40 παρατηρείται αύξηση πίεσης μέχρι και το σημείο επανασυγκόλλησης της ροής.
- Η πτώση πίεσης γίνεται γραμμικά με την ίδια σχεδόν κλίση ανεξαρτήτως του αριθμού Reynolds.



Διάγραμμα 2.5.: Διάγραμμα αδιάστατης πίεσης σε σχέση με τον λόγο μήκους επανακόλλησης προς την αρχική διατομή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

3.1. ANEMOMETRIA LASER DOPPLER.

Η ανεμομετρία Laser Doppler (LDA) αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές, μη παρεμβατικές, σημειακές τεχνικές για μετρήσεις ταχυτήτων σε ρευστά, τα χαρακτηριστικά της είναι:

- Μπορεί να μετρήσει έως και τρεις συνιστώσες ταχύτητες.
- Έχει υψηλή χρονική απόκριση.
- Δεν χρειάζεται βαθμονόμηση.
- Απαιτεί την παρουσία σωματιδίων που ακολουθούν πιστά την ροή.
- Απαιτεί οπτικό δρόμο μέχρι το σημείο μέτρησης.
- Συγκεκριμένος όγκος ελέγχου.
- Είναι κατάλληλη για τυρβώδες ροές.

Με την βοήθεια των κατάλληλων σωματιδίων που παρασύρονται από την ροή αποτελώντας ουσιαστικά τα ίχνη της, μπορεί να μετρηθεί η ταχύτητα των σωματιδίων, σαν αποτέλεσμα να μπορεί να καθοριστεί και η ταχύτητα της ροής του αέρα (Βούρος Α, 2008).

Υπάρχουν δύο τρόποι ανίχνευσης της συχνότητας Doppler: η απευθείας ανίχνευση (Direct Detection), και η ετερόδυνη ανίχνευση (Heterodyne Detection). Ο πρώτος τρόπος είναι η απευθείας ανίχνευση και βασίζεται στο φαινόμενο Doppler θεωρώντας το σε δύο φάσεις:

- Στην πρώτη φάση προκύπτει από την πρόσπτωση φωτός από μία πηγή (laser) με μήκος κύματος λ_b , συχνότητας f_b σε ένα κινούμενο σωματίδιο.
- Στη δεύτερη φάση προκύπτει από την σκέδαση του φωτός με συχνότητα f_p από το σωματίδιο που λαμβάνεται από έναν ακίνητο δέκτη με συχνότητα f_r .

Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στη εικόνα 3.1. και η μαθηματική εξίσωση που την χαρακτηρίζει είναι:

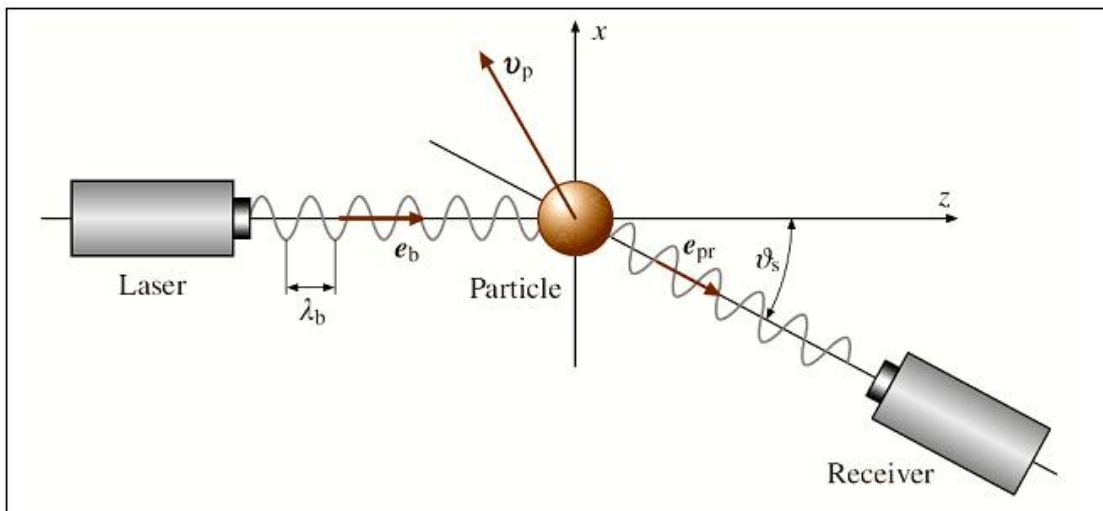
$$f_r = f_b \frac{\left(1 - \frac{u_p e_b}{c}\right)}{\left(1 - \frac{u_p e_{pr}}{c}\right)} \quad (3.1)$$

Όπου:

e_b και e_{pr} = τα μοναδιαία διανύσματα στη διεύθυνση της πηγής του φωτός και του δέκτη, αντίστοιχα

c = η ταχύτητα του φωτός

u_p = η ταχύτητα του σωματιδίου.



Εικόνα 3.1.: Μέτρηση της ταχύτητας ενός κινούμενου σωματιδίου.

Η ταχύτητα του σωματιδίου είναι πολύ μικρότερη της ταχύτητας του φωτός, και διεύθυνση που λαμβάνουμε υπόψη μας είναι η διάφορα των διευθύνσεων της πρόσπτωσης και σκέδασης του φωτός. Η συχνότητα Doppler, που ανιχνεύει ο δέκτης, είναι:

$$f_r = f_b + \frac{u_p (e_{pr} - e_b)}{\lambda_b} \quad (3.2.)$$

Όπου: λ_b = το μήκος κύματος (πηγή laser)

f_b = η συχνότητας σωματιδίου

e_b και e_{pr} = τα μοναδιαία διανύσματα στη διεύθυνση της πηγής του φωτός

και του δέκτη, αντίστοιχα

c = η ταχύτητα του φωτός και u_p η ταχύτητα του σωματιδίου.

Ο δεύτερος τρόπος ανίχνευσης της συχνότητας Doppler είναι η ετερόδυνα ανίχνευση η οποία είναι και η πιο κοινή τεχνική για μετρήσεις με Ταχυμετρία Laser Doppler. Σ' αυτή την τεχνική η Doppler συχνότητα ανιχνεύεται σαν διαφορά συχνότητας μεταξύ του φωτός δύο πηγών. Όταν ακτίνες φωτός από δύο πηγές προστίθενται στην επιφάνεια του φωτοανιχνευτή η διαδικασία μίξης δίνει την διαφορά συχνότητας αφού όλες οι άλλες συχνότητες είναι αρκετά μεγάλες για να ανιχνευθούν.

Υπάρχουν τρεις τεχνικές για την πραγματοποίηση της ετερόδυνης ανίχνευσης:

- Η τεχνική διπλής ακτίνας (dual beam system), όπου συνδυάζονται οι ακτίνες που προέρχονται από περίθλαση δύο ακτίνων Laser, με διαφορετικά μοναδιαία διανύσματα, στο ίδιο σωματίδιο.
- Η τεχνική ακτίνας αναφοράς (reference beam system), όπου μια ασθενής ακτίνα Laser κατευθύνεται από την πηγή συνδυάζεται με ακτίνα που έχει υποστεί περίθλαση από κινούμενο σωματίδιο.
- Η τεχνική διπλής ανίχνευσης (dual scatter system), όπου συνδυάζονται τα ηλεκτρικά σήματα δύο φωτοανιχνευτών, που συλλέγουν από διαφορετικές διευθύνσεις την περίθλαση της ίδιας ακτίνας Laser σ' ένα κινούμενο σωματίδιο.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε με την τεχνική της διπλής ακτίνας η οποία παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως η ευκολία στην ευθυγράμμιση των οπτικών του συστήματος και η μη εξάρτηση της συχνότητας Doppler από την θέση των οπτικών συλλογής του φωτός, αυτοί είναι και οι λόγοι που την κάνουν ευρέως χρησιμοποιούμενη.

Η τεχνική της διπλής ακτίνας συνεισφέρει στην αφαίρεση του όρου που προκύπτει από το γινόμενο της ταχύτητας με το διάνυσμα της πρόπτωσης του φωτός από την πηγή. Η αρχική ακτίνα χωρίζεται σε δυο ακτίνες ίδιας έντασης που προσπίπτουν στο σωματίδιο. Ο ακίνητος δέκτης λαμβάνει το κύμα και των δύο που είναι:

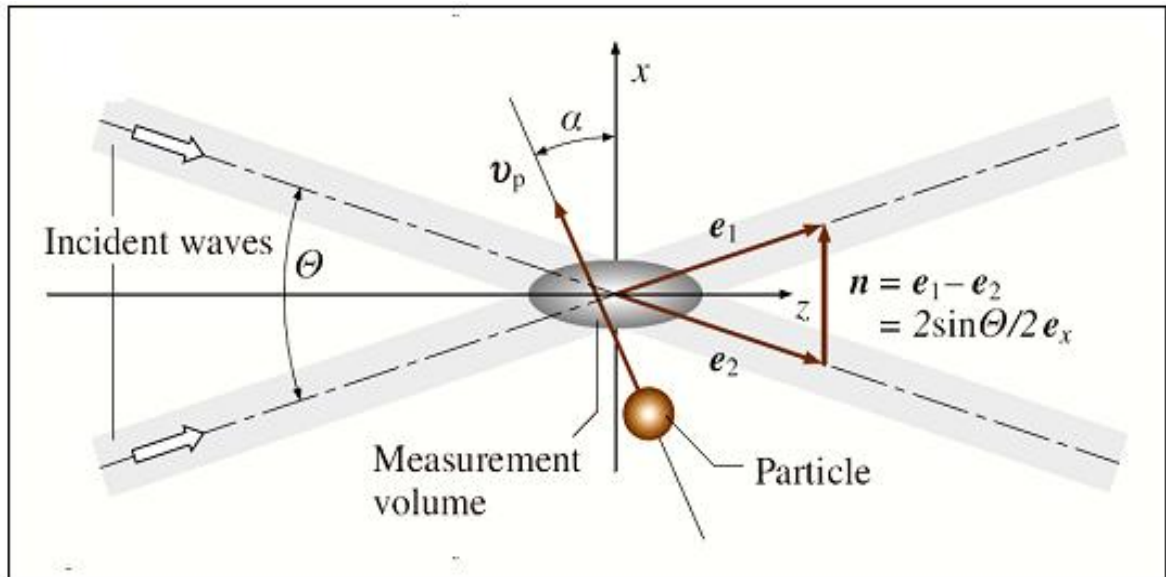
$$f_1 = f_b + \frac{u_p (e_{pr} - e_1)}{I_b} \quad (3.3)$$

$$f_2 = f_b + \frac{u_p (e_{pr} - e_2)}{I_b}$$

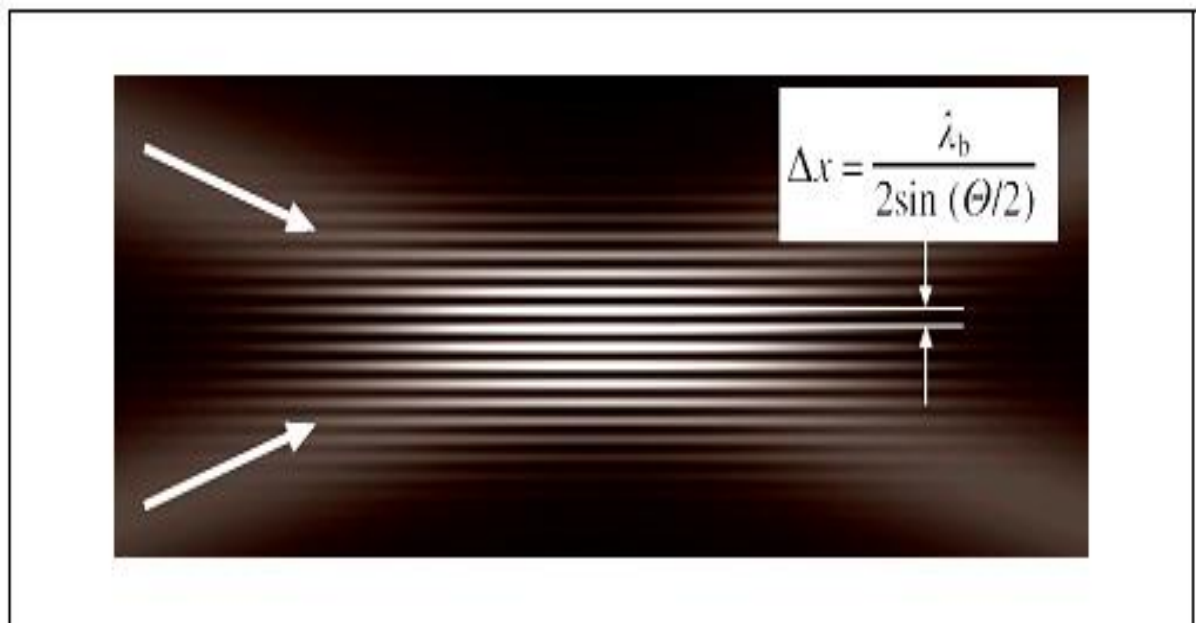
Από τη συμβολή των δύο κυμάτων προκύπτει η τελική συχνότητα που λαμβάνει ο δέκτης, και είναι:

$$f_D = f_1 - f_2 = \frac{u_p (e_1 - e_2)}{I_b} = \frac{2 \sin (\Theta / 2)}{I_b} |u_p| \cos a = \frac{2 \sin (\Theta / 2)}{I_b} u_{p \perp} \quad (3.4)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι η συχνότητα Doppler είναι ανάλογη της ταχύτητας του σωματιδίου στην διεύθυνση x .



Εικόνα 3.2.: Μέθοδος διπλής ακτίνας.



Εικόνα 3.3.: Διαμόρφωση του όγκου ελέγχου από τις ακτίνες laser.

Με το μοντέλο των κροσσών συμβολής μπορεί να δοθεί ένας διαφορετικός τρόπος περιγραφής της συγκεκριμένης μεθόδου. Στην Εικόνα 2.3. παρατηρούμε ότι στο σημείο συμβολής των δύο ακτινών σχηματίζεται ένας όγκος ελέγχου αποτελούμενος από σκοτεινές και φωτεινές περιοχές με την μορφή που προσεγγίζει ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Από τον τρόπο που εστιάζουν οι δέσμες εξαρτώνται και οι διαστάσεις του όγκου ελέγχου (Βούρος Α, 2008).

Οι ακτίνες χαρακτηρίζονται από μία κανονική κατανομή της έντασής τους και, καθώς εστιάζονται, αποκτούν ένα πάχος (waist) d_{w1} , που εξαρτάται από την εστιακή απόσταση του φακού f , το μήκος κύματος I_b και τη διάμετρο των ακτίνων πριν το φακό d_{w0} .

$$d_{w1} = \frac{4 f I_b}{p d_{w0}} \quad (3.5)$$

Η διάμετρος στην παραπάνω εξίσωση αναφέρεται ουσιαστικά στην διάμετρο για την οποία η ένταση έχει μειωθεί κατά $1/e^2$ της μέγιστης έντασης της ακτίνας. Οι διαστάσεις του όγκου ελέγχου δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} a_o &= \frac{d_{w1} / 2}{\cos(\Theta / 2)} \\ b_o &= \frac{d_{w1}}{2} \\ c_o &= \frac{d_{w1}}{\sin(\Theta / 2)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Ο αριθμός των κροσσών συμβολής δίνεται από την εξίσωση:

$$N_{fr} = \frac{2 d_{w1} \tan(\Theta / 2)}{I_b} \quad (3.7)$$

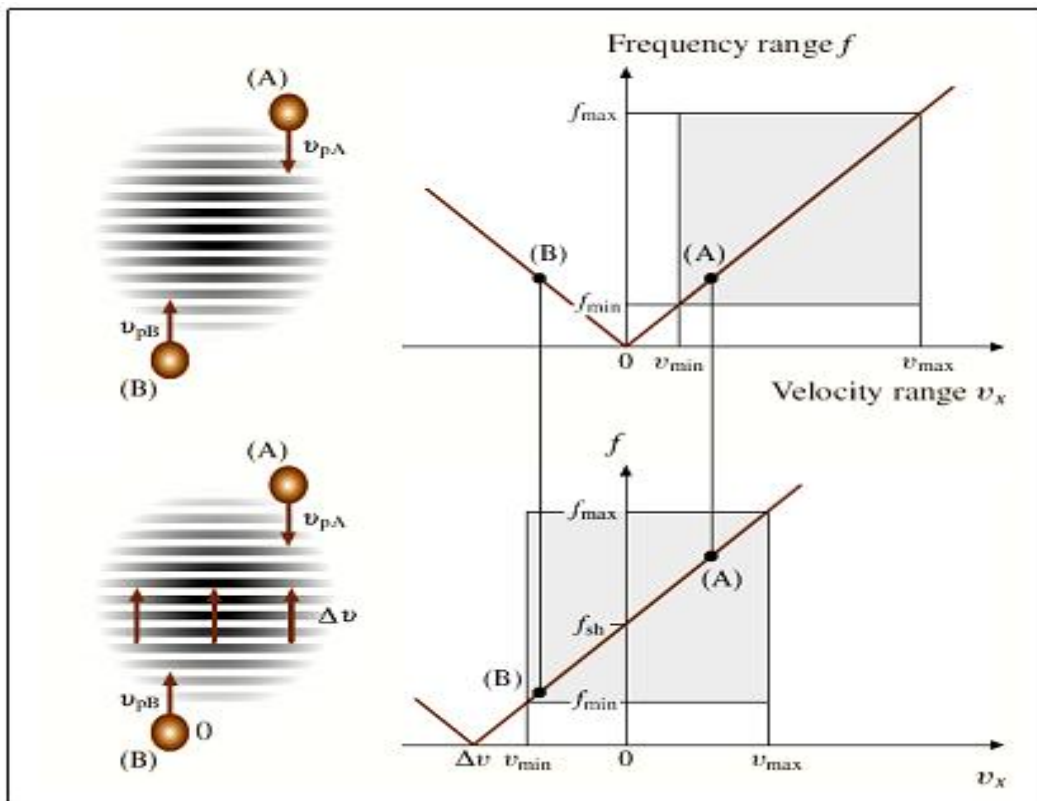
Κάθε σωματίδιο που περνάει από τον όγκο ελέγχου έχει σαν αποτέλεσμα την σκέδαση του φωτός με χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν στην πορεία του μέσα από τις σκοτεινές και φωτεινές περιοχές. Από την απόσταση Δx των κροσσών προκύπτει η συχνότητα Doppler:

$$f_D = \frac{u_{p\perp}}{\Delta x} = 2 \frac{u_{p\perp}}{I_b} \sin(\Theta/2) \quad (3.8)$$

Μία από τις βασικές απαιτήσεις κατά τη μέτρηση είναι ο διαχωρισμός του πρόσημου της ταχύτητας, καθώς όπως φαίνεται από τις εξισώσεις 2.4 και 2.5, αρχικά η πληροφορία αυτή δεν λαμβάνεται και τα σωματίδια τα οποία έχουν αντίθετη ταχύτητα δίνουν ουσιαστικά το ίδιο σήμα.

Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται η μετατόπιση της συχνότητας (frequency shift) της μίας από τις δύο δέσμες, f_{sh} , η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση των κροσσών συμβολής. Ένα σωματίδιο με μηδενική ταχύτητα μέσα στον όγκο ελέγχου ουσιαστικά αντιστοιχεί στην συχνότητα μετατόπισης και τα σωματίδια που έχουν κάποια ταχύτητα έχουν σαν αποτέλεσμα μια συχνότητα μεγαλύτερη ή μικρότερη από αυτήν ανάλογα με την κίνηση των κροσσών (Εικόνα 3.4).

Η μετατόπιση της συχνότητας των προσπιπτουσών ακτινών, προσθέτει μια επί πλέον μετατόπιση στην συχνότητα Doppler. Οι κροσσοί συμβολής κινούνται κάθετα προς το επίπεδό τους και ένα σωματίδιο ακίνητο στον όγκο ελέγχου δίνει σήμα στον φωτοανιχνευτή ανάλογο με την συχνότητα μετατόπισης επιτρέποντας έτσι τον καθορισμό της διεύθυνσης της κίνησης. (Βούρος Α, 2008).



Εικόνα 3.4.: Μέτρηση ταχύτητας χωρίς και χρησιμοποιώντας μετατόπιση συχνότητας.

3.2. ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

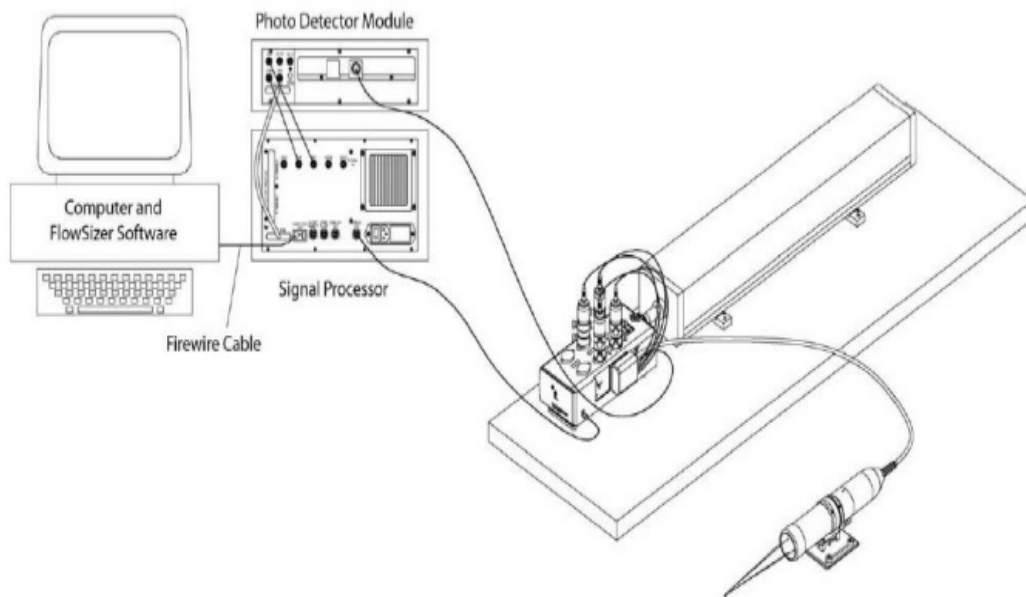
Για την μετρητική τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορα οπτικά συστήματα, όμως κάθε επιλογή σχετίζεται άμεσα με την ίδια την εφαρμογή που μελετάται αλλά και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, οι όποιοι είναι:

- Η προσπελασιμότητα της πειραματικής διάταξης.
- Η απόσταση των οπτικών μεταφοράς και η συλλογή από τη ροή που μελετάται
- Το εύρος των ταχυτήτων που πρέπει να μετρηθούν.
- Το αριθμό των συνιστωσών της ταχύτητας που εξετάζονται.
- Τον τύπο των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται σαν ίχνη κ.α.

Με βάση τον άξονα της δέσμης φωτός η ανίχνευση της συχνότητας του φωτός που σκεδάζεται μπορεί να γίνει από οποιαδήποτε γωνία. Παρατηρείτε όμως ότι η ένταση του φωτός στην προς τα εμπρός κατεύθυνση (forward scattering) είναι σχεδόν τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την κατεύθυνση προς τα πίσω (back scattering), γεγονός που δείχνει ότι ειδικά για πηγές μικρής ισχύος, τα οπτικά συλλογής πρέπει να τοποθετούνται γενικά απέναντι από τα οπτικά μεταφοράς.

Σαν αποτέλεσμα της διάταξης αυτής είναι η αύξηση της ισχύος του σήματος, οι μικρές γωνίες απόκλισης από τον άξονα της πηγής βοηθούν στην αύξηση της ποιότητας του σήματος, λόγω της αποφυγής της διάχυσης, που επηρεάζει το σήμα στον δέκτη, ή αλλιώς στον φωτοπολλαπλασιαστή (Βούρος Α, 2008).

Τα δύο συστήματα οπτικών μετάδοσης και συλλογής, που χρησιμοποιήθηκαν για την ταυτόχρονη μέτρηση της αξονικής και ακτινικής ή εγκάρσιας ταχύτητας τοποθετήθηκαν σε αντίθετες κατευθύνσεις και μπορούσαν να μετακινηθούν στις τρεις διευθύνσεις κρατώντας την ίδια σχετική θέση μεταξύ τους. Με τη βοήθεια ενός διαχωριστή (beam splitter), η αρχική ακτίνα από κάθε πηγή (laser He-Ne, ισχύος 16mW) διαχωριζόταν σε δυο παράλληλες μεταξύ τους ακτίνες, των οποίων η απόσταση ήταν 50 mm. Με την παρεμβολή ενός φακού, οι δυο ακτίνες εστιάζονταν σε απόσταση 605 mm με ημί-γωνία διασταύρωσης 2 μοίρες, περίπου. Ο όγκος ελέγχου είχε διάμετρο 243μm και μήκος 5,8 mm, και αποτελούνταν από 64 κροσσούς με απόσταση 7,67μm μεταξύ τους. Για τη μετατόπιση της συχνότητας 40 MHz που επιβλήθηκε στη μία από τις δύο ακτίνες κάθε συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν κύτταρα Bragg. Τα οπτικά συλλογής αποτελούνταν από συστήματα φακών ίδιας εστιακής απόστασης με τους φακούς μετάδοσης, και δύο ακόμα φακούς μικρότερης εστιακής απόστασης (200mm), που εστίαζαν το είδωλο του όγκου ελέγχου σε δύο φωτοπολλαπλασιαστές (Dantec 905X0081) με διάσταση οπής (pinhole) 0,2 mm.



Εικόνα 3.5.: Τυπική διάταξη οπτικού συστήματος.

Η διάσταση της οπής του φωτοπολλαπλασιαστή σε συνδυασμό με τις εστιακές αποστάσεις των φακών συλλογής επηρεάζουν την έκταση της περιοχής από την οποία μπορεί να λαμβάνεται σήμα, καθώς η συγκεκριμένη περιοχή διαφέρει από τον όγκο ελέγχου που σχηματίζουν οι δέσμες.

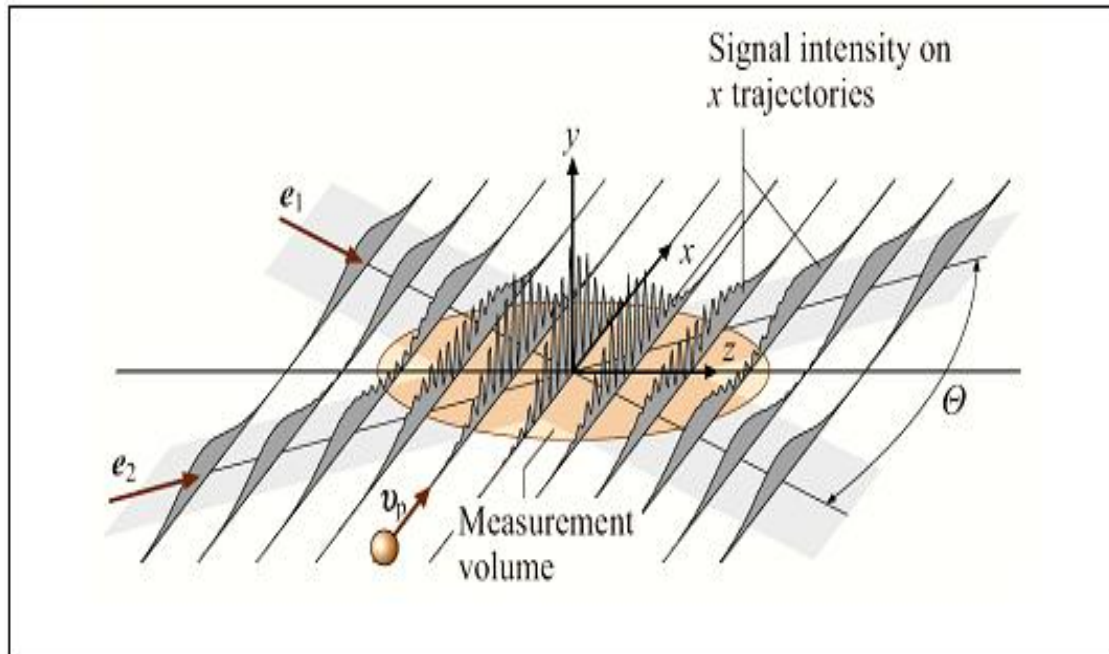
Στην περίπτωση που τα οπτικά συλλογής και μετάδοσης βρίσκονται στον ίδιο άξονα περιορίζεται η διάμετρος του όγκου ελέγχου, ενώ στην περίπτωση που τα οπτικά βρίσκονται σε υπό γωνία μεταξύ τους, περιορίζεται το μήκος του. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι από την περιοχή που λαμβάνονται οι μετρήσεις επηρεάζονται από τους παραμέτρους επεξεργασίας σήματος. Ωστόσο η αύξηση της ευαισθησίας του φωτοπολλαπλασιαστή συνεπάγεται την λήψη πληροφορίας από περιοχές με χαμηλή φωτεινότητα δηλαδή στα όρια των ακτινών (Βούρος Α, 2008).

3.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ

Το ορατό αποτέλεσμα που μας παρέχει η LDA δεν είναι η ταχύτητα των σωματιδίων αλλά το σήμα Doppler που μεταφέρει ο φωτοπολλαπλασιαστής και περιέχει τη συχνότητα Doppler. Ο φωτοπολλαπλασιαστής αποκρίνεται μόνο στην περίπτωση που κάποιο σωματίδιο περάσει από τον όγκο ελέγχου, δηλαδή το σήμα δεν είναι συνεχές. Κάθε ένα από τα σωματίδια παράγει ένα χαρακτηριστικό σήμα το οποίο ονομάζεται Doppler Burst, το σήμα αυτό αποτελείται από μηδενικές και μη μηδενικές τιμές, οι οποίες κυμαίνονται μέσα στα όρια της κανονικής κατανομής που αντιστοιχεί στην ένταση του φωτός πάνω στην ακτίνα.

Η μορφή του σήματος Doppler Burst εξαρτάται από τρεις παράγοντες και είναι οι εξής:

- Μέγεθος σωματιδίου.
- Πορεία σωματιδίου.
- Ταχύτητα σωματιδίου.



Εικόνα 3.6.: Δημιουργία σήματος μέσα στον όγκο ελέγχου.

Η επεξεργασία του σήματος γίνεται με σκοπό τον υπολογισμό της ταχύτητας αλλά και τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της ροής, όπως τα τυρβώδη μεγέθη. Αρχικά, το σήμα Doppler ψηφιοποιείται με τη βοήθεια ενός μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) υπόκειται σε φασματική ανάλυση, με τον Αναλυτή Φάσματος Burst Spectrum Analyzer, από όπου εξάγεται το φάσμα συχνοτήτων του σήματος. Η μέγιστη κορυφή του φάσματος αντιστοιχεί στη συχνότητα Doppler (Βούρος Α, 2008).

3.4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Το μέγεθος των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται σαν ίχνη της ροής στην ανεμομετρία Laser Doppler παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Παρατηρείτε ότι τα σωματίδια μεγάλης διαμέτρου έχουν σαν αποτέλεσμα την υψηλή στάθμη σήματος, αυτό βοηθά στον διαχωρισμό του από τον θόρυβο, όμως τα αποτελέσματα δεν είναι αξιόπιστα, αφού η απόκρισή τους σε σχέση με την ταχύτητα της ροής είναι μεγάλη (Βούρος Α, 2008).

Σε αντίθεση με τα σωματίδια μικρής σχετικά διαμέτρου έχουν καλύτερη συμπεριφορά στο να ακολουθήσουν πιστά τη ροή, όμως παράγουν χαμηλότερης στάθμης σήμα. Σε σχέση με τη πορεία τους μέσα στον όγκο ελέγχου μπορεί να οδηγήσουν τελικά στη μη καταγραφή της ταχύτητάς τους. Στα πειράματα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν σταγονίδια νερού και γλυκερίνης, τα οποία παράγονταν από έναν νεφελοποιητή. Η μέση διάμετρος τους (d_{mean}) ήταν 4 μ m. Ο χρόνος απόκρισης των σωματιδίων ήταν κατά πολύ μικρότερος από την μικρότερη χρονική κλίμακα της ροής.

Ο συγκεκριμένος τύπος σωματιδίων αποτελεί κοινή λύση για μετρήσεις ταχύτητας σε ροές αερίων. Ωστόσο, ο συνδυασμός του μέσου με την φύση αλλά και τη συγκέντρωση των τροχιοδεικτικών σωματιδίων, επηρεάζουν σημαντικά την πυκνότητα και την ποιότητα του σήματος (data density), οπότε για κάθε σημείο πρέπει να επιβάλλονται ασφαλή κριτήρια για την καταγραφή της μέτρησης.

Η επιλογή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση του σήματος αλλά και την εγκυρότητα του δείγματος αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, δεν διαφέρει μόνο από πείραμα σε πείραμα αλλά και από περιοχή σε περιοχή μέσα στην ίδια την ροή. Οι απαιτήσεις από μία τέτοια μελέτη είναι πάντα κοινές και σχετίζονται με:

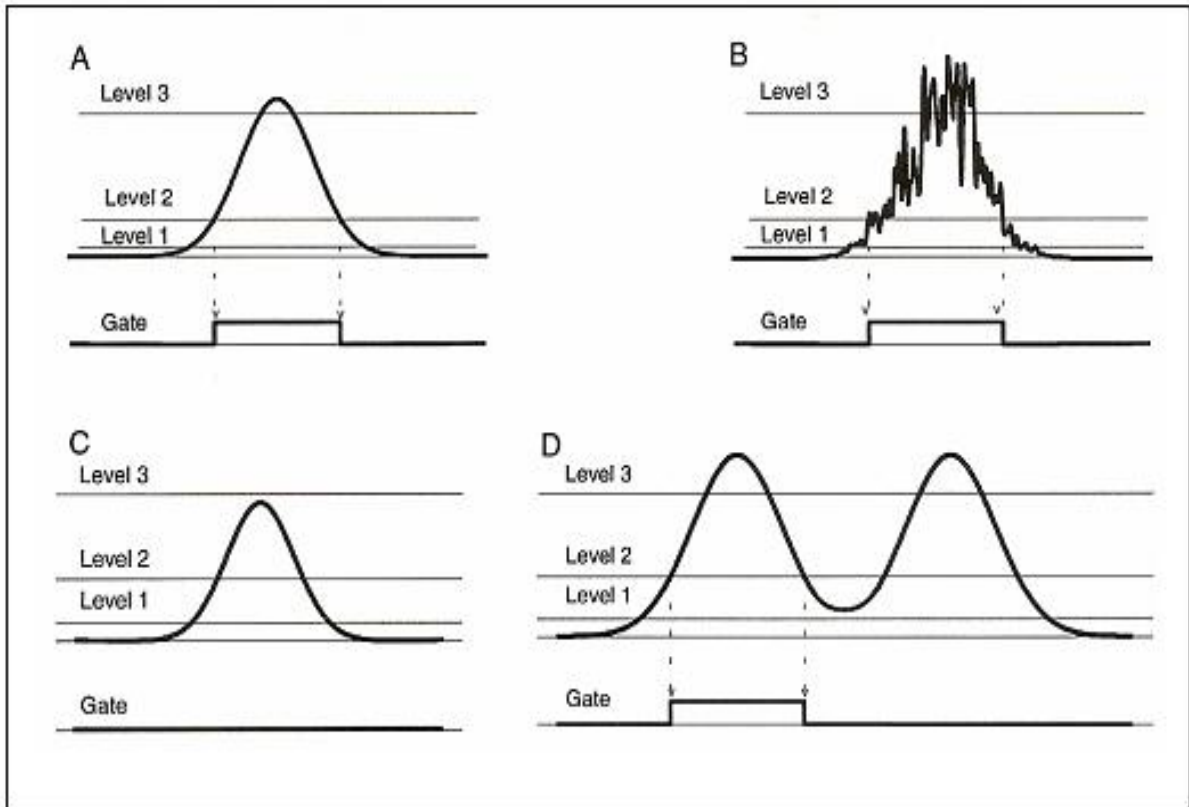
- Την ρύθμιση των ορίων (filters).
- Το κέρδος (gain).
- Την επιβολή κριτηρίων για τα «επιτυχημένα» δείγματα με βάση ένα όριο (threshold) και κάποιο ελάχιστο αριθμό κροσσών συμβολής.
- Την εξασφάλιση μιας ικανοποιητικής ταχύτητας δειγματοληψίας.

3.5. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (Burst detection)

Το χαρακτηριστικό σήμα που εμφανίζεται από τη διαδρομή ενός σωματιδίου μέσα στον όγκο ελέγχου παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.6. Ωστόσο, η υπέρβαση του θορύβου στις περισσότερες φορές δημιουργεί προβλήματα κατά την απεικόνιση του σήματος. Η εικόνα του σήματος σε πραγματικό χρόνο διαφέρει σημαντικά ως προς την καθαρότητά του. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα σύστημα αξιολόγησης των δειγμάτων, χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά επίπεδα έντασης του σήματος για την ανίχνευση των σωματιδίων (Βούρος Α, 2008).

Η περίοδος της καταγραφής ξεκινά από τη στιγμή που το σήμα ξεπερνά το δεύτερο επίπεδο και σταματά όταν το σήμα πέφτει κάτω από αυτό, καταλήγοντας έτσι σε ένα συμμετρικό όγκο ελέγχου για κάθε σωματίδιο (Εικόνα σχήμα 2.7., Σχήμα Α). Οι ταλαντώσεις του σήματος γύρω από το δεύτερο επίπεδο δεν επηρεάζουν τη μέτρηση, καθώς αυτή ξεκινά, τελειώνει και επιβεβαιώνεται με βάση τα άλλα δύο επίπεδα (Εικόνα 2.7. Σχήμα Β).

Κανένα σωματίδιο δεν καταγράφεται αν η ένταση του σήματος δεν ξεπεράσει το τρίτο επίπεδο ενώ η επόμενη μέτρηση μπορεί να ξεκινήσει μόνο όταν το σήμα έχει πέσει κάτω από το πρώτο επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται ότι η μέτρηση αφορά σε ένα μοναδικό σωματίδιο (Εικόνα 3.7. Σχήματα C και D).



Εικόνα 3.7.: Ανίχνευση και έλεγχος σωματιδίου με χρήση τριών επιπέδων.

3.6. ΠΗΓΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

Το σήμα περιέχει «θόρυβο», ο οποίος μπορεί να προέρχεται από το οπτικό σύστημα και από τα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος. Το οπτικό σύστημα δημιουργεί θόρυβο μέσω τυχαίων διακυμάνσεων των ακτινών ή ακόμα μέσω ταλαντώσεων στις οποίες υπόκειται (random noise). Ο ηλεκτρονικός θόρυβος σχετίζεται με την λειτουργία των φωτοπολλαπλασιαστών (shot, thermal noise).

Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο θόρυβος μπορεί να προέλθει και από μη καλά γειωμένα ηλεκτρονικά στοιχεία της εγκατάστασης (ground noise). Επιπλέον, από την ανεπιθύμητη διάχυση, που μπορεί να προκύψει από τον τρόπο με τον οποίο τοποθετούνται τα οπτικά συλλογής και μετάδοσης σε συνδυασμό με τα σωματίδια που δεν συνεισφέρουν σε μέτρηση, μπορεί να επιδράσει ως θόρυβος (Βούρος Α, 2008).

Ο λόγος σήματος προς τον θόρυβο (signal-to-noise ratio) μας δίνει ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για την εκτίμηση του θορύβου που υπάρχει μέσα στο σήμα. Μπορεί να από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{SNR}{db} = +10 \log \left(\frac{s_s^2}{s_n^2} \right) \quad (3.9)$$

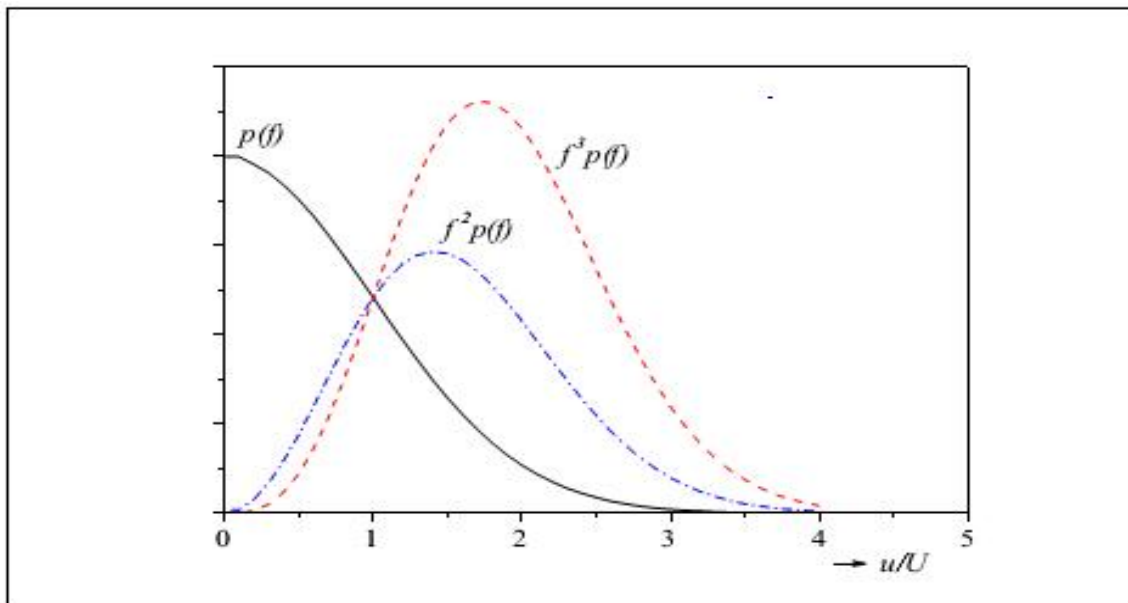
Όπου: s_n^2 = η διακύμανση του σήματος

s_s^2 = η διακύμανση του θορύβου.

Με την παραγωγή σήματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε κάθε σημείο μέτρησης γίνεται εκτίμηση του συγκεκριμένου μεγέθους. Κατά την πειραματική διαδικασία η συγκεκριμένη παράμετρος έχει καθοριστική σημασία στον καθορισμό του ποσοστού των επιτυχημένων δειγμάτων.

3.7. ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΙΛΤΡΩΝ

Η χρήση των φίλτρων παίζει σημαντικό ρόλο στην ανεμομετρία Doppler. Τα άνω και κάτω φίλτρα βοηθούν τον επεξεργαστή να μην λαμβάνει τις συχνότητες που αντιστοιχούν σε εξωγενείς παράγοντες (όπως ο θόρυβος) αλλά μόνο εκείνες που αντιστοιχούν στην κίνηση των σωματιδίων.



Διάγραμμα 3.1.: Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας μέσης τιμής και ανώτερων ροπών της ταχύτητας.

Με την εφαρμογή τους έχουμε την λήψη ενός καθαρού σήματος με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις. Ωστόσο, μερικές φορές η χρήση των

φίλτρων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα μέσω του αποκλεισμού τιμών, οι οποίες πρέπει να συνεισφέρουν στον υπολογισμό των στατικών μεγεθών (Βούρος Α, 2008).

Η μέση τιμή που προκύπτει από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι ίση με το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$\bar{f} = \int_{-\infty}^{\infty} f p (f) df \quad (3.10)$$

Όμως, με την επιβολή των φίλτρων, η μέση τιμή προκύπτει από ένα ολοκλήρωμα με πεπερασμένα όρια. Δηλαδή:

$$\bar{f} = \int_{f_l}^{f_h} f p (f) df \quad (3.11)$$

και για τις ανώτερες ροπές:

$$\overline{f^n} = \int_{f_l}^{f_h} f^n (f) df \quad (3.12)$$

Η επιλογή των φίλτρων θεωρείται μια από τις σημαντικές διαδικασίες, καθώς η επιβολή τους μπορεί να καταλήξει σε λανθασμένα συμπεράσματα σε σχέση με το μέσο πεδίο ή τα ανώτερα στατιστικά μεγέθη. Έτσι, για μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που προσεγγίζει την κανονική κατανομή, η ελάχιστη απαίτηση σε άνω (f_h) και κάτω (f_l) φίλτρα, για σωστές μετρήσεις της μέσης τιμής, U , είναι:

$$\frac{f_h - f_l}{2 f} = \frac{3u}{U} \quad (3.13)$$

ενώ για σωστές μετρήσεις της διακύμανσης, u , θα πρέπει:

$$\frac{f_h - f_l}{2 f} = \frac{6u}{U} \quad (3.14)$$

Αντίστοιχα, για τον σωστό υπολογισμό των ροπών ανώτερης τάξης τα όρια πρέπει να αυξηθούν ακόμα περισσότερο (Βούρος Α., 2008).

3.8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.

Κάποιες ιδιομορφίες παρουσιάζονται στον υπολογισμό των στατικών μεγεθών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι άλλες τεχνικές χρησιμοποιούν σταθερή ταχύτητα δειγματοληψίας σε αντίθεση με την συγκεκριμένη τεχνική όπου οι χρόνοι στους οποίους παρουσιάζονται σωματίδια μέσα στον όγκο ελέγχου είναι ακανόνιστοι (Σχήμα 3.8). Ωστόσο, η παρουσία των σωματιδίων μέσα στον όγκο ελέγχου εξαρτάται από την ταχύτητά τους, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένους μέσους όρους των στατιστικών αν για το «ζύγισμα» χρησιμοποιηθεί το πλήθος των δειγμάτων (Βούρος Α., 2008).

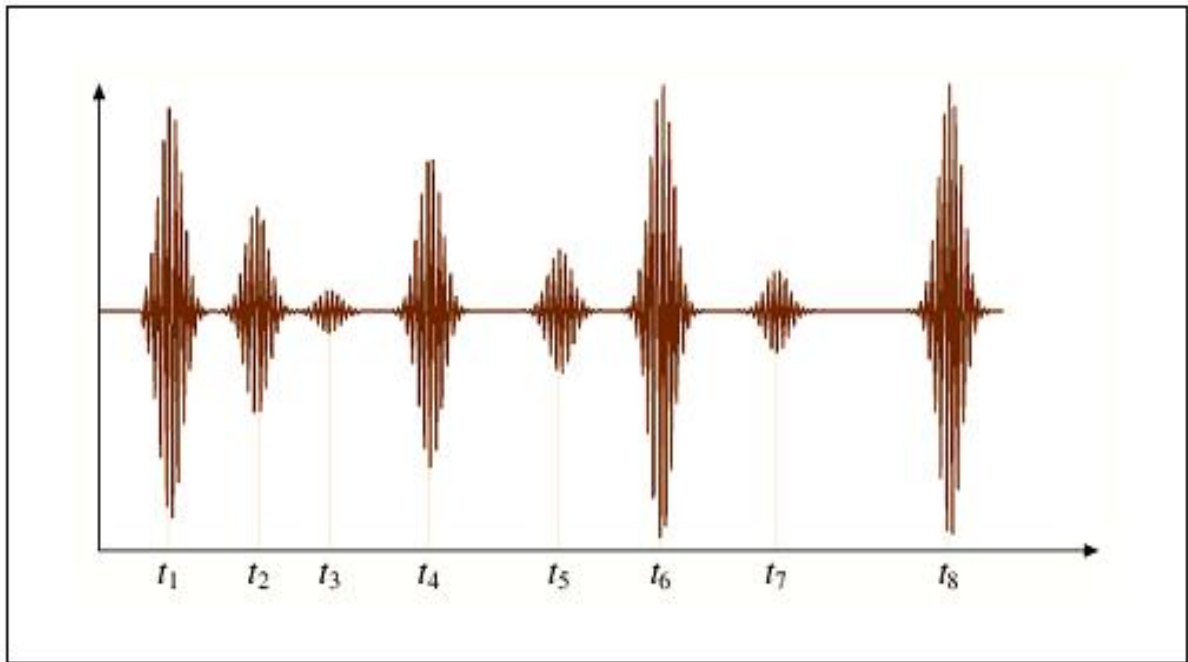
Στην προσπάθεια διόρθωσης των αποκλίσεων από τους πραγματικούς μέσους όρους, στην συγκεκριμένη περίπτωση οι στιγμιαίες τιμές της ταχύτητας «ζυγίστηκαν» με το χρόνο παραμονής των αντίστοιχων δειγμάτων μέσα στον όγκο ελέγχου. Έτσι, η μέση τιμή της ταχύτητας και τα ανώτερα στατιστικά μεγέθη της ροής λαμβάνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \quad (3.15)$$

$$\overline{u^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \quad (3.16)$$

$$\overline{u^m} = \frac{\sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^m \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \quad (3.17)$$

$$\overline{u^m v^n} = \frac{\sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^m (V_i - \bar{V})^n \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \quad (3.18)$$



Εικόνα 3.8.: Σήμα για ακανόνιστους χρόνους άφιξης σωματιδίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Αρχικά ο αέρας με την βοήθεια του αξονικού ανεμιστήρα εισέρχεται στον αγωγό. Στην συνέχεια τροφοδοτούμε τον αέρα με σωματίδια, τα οποία παράγονται από μίγμα νερού και γλυκερίνης στην συσκευή του νεφελοποιητή. Κατά την είσοδο του ρευστού στο κανάλι έχουμε τοποθετήσει πλέγμα για την επίτευξη της εξομάλυνσης της ροής. Κατά την διάρκεια της κίνησης του αέρα στο εσωτερικό του καναλιού γίνεται ορατή η πορεία της ροής του καθώς το φύλο φωτός που παράγεται από το λέιζερ προσκρούει στα σωματίδια. Αφού ο αέρας διανύσει την απαιτούμενη απόσταση για την πλήρη ανάπτυξη της ροής εντός του καναλιού συναντά απότομη αύξηση της διατομής (σκαλοπάτι). Σε αυτό το σημείο μελετάμε τα ροϊκα φαινόμενα που δημιουργούνται και λαμβάνουμε τις απαραίτητες μετρήσεις. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στις Εικόνες του Κεφαλαίου.

Το σύνολο της πειραματικής διάταξης αποτελείται από τα επιμέρους στοιχεία τα οποία θα αναλυθούν στις επόμενες σελίδες:

- Ø Νεφελοποιητής (νερού-γλυκερίνης) για την παραγωγή σωματιδίων.
- Ø Αξονικός Ανεμιστήρας.
- Ø Πλέγμα εξομάλυνσης της ροής.
- Ø Αγωγός Ορθογωνικής διατομής (κανάλι).
- Ø Συσκευή λέιζερ και φακών για τη δημιουργία φύλλου φωτός και κάμερα.

4.1.1. ΝΕΦΕΛΟΠΟΙΗΤΗΣ

Ο νεφελοποιητής είναι μια συσκευή η οποία στην ουσία πρόκειται για ένα ιατρικό εξάρτημα το οποίο δημιουργεί την νεφελοποίηση υγρών ουσιών και την κατάποση τους μέσω της αναπνευστικής οδού των ασθενών. Η αρχή λειτουργίας της συσκευής βασίζεται στην παροχή αέρα υπό πίεση μέσω μιας βαλβίδας στο δοχείο με υγρό, παράγοντας ένα νέφος που αποτελείται από τα σταγονίδια της υγρής ουσίας. Ο νεφολοποιητής του πειράματος αποτελείται από ένα δοχείο για υγρό χωρητικότητας 50ml, που στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε υδατικό διάλυμα γλυκερίνης με κατ' όγκο αναλογία 25% έως 40% ανάλογα με την επιθυμητή ευκρίνεια και πυκνότητα του νέφους.



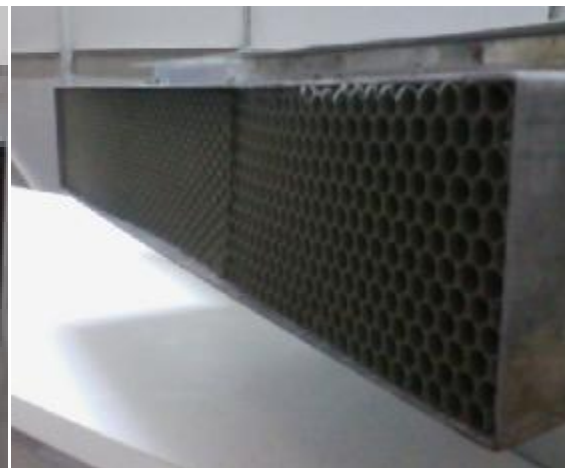
Εικόνα 4.1.: Νεφελοποιητής.

4.1.2. ΠΛΕΓΜΑ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ ΡΟΗΣ

Πλέγμα εξομάλυνσης της ροής στεραιομένο στην έξοδο του ανεμιστήρα. Κάθε οπή του πλέγματος έχει διάμετρο 4mm και μήκος περίπου 10cm και συμβάλει στην ευθυγράμμιση των ροικών γραμμών



Εικόνα 4.2.(α): Πλέγμα εξομάλυνσης της ροής.



Εικόνα 4.2.(β): Πλέγμα εξομάλυνσης της ροής σε πλάγια όψη.

4.1.3. ΑΓΩΓΟΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Ο αγωγός έχει μήκος 4500mm και έχει ορθογωνική διατομή με διαστάσεις 420x140 mm. Σε μήκος 3500mm από την αρχή του καναλιού έχουμε δημιουργήσει σκαλοπάτι με διαστάσεις 420x70mm μέχρι το τέλος του. Τις επιφάνειες, από το σκαλοπάτι μέχρι το τέλος, τις έχουμε επενδύσει με μαύρο ματ αυτοκόλλητο έτσι ώστε να αποφεύγονται οι αντανακλάσεις κατά την διάρκεια της κινηματογράφησης. Το κανάλι είναι κατασκευασμένο από ξύλο mdf και στην δεξιά και αριστερή πλευρά έχουμε τοποθετήσει plexi-glass πάχους 5 mm. Τα ξύλινα μέρη της αεροσήραγγας είναι στερεωμένα μεταξύ τους με βίδες, ενώ για την συγκράτηση του plexi-glass έχει κατασκευαστεί κατά μήκος του αγωγού σφηνόδρομος πάνω και κάτω στις ξύλινες επαφές. Όλη η κατασκευή του καναλιού στηρίζεται σε βάση από χάλυβα.



Εικόνα 4.3.: Κανάλι (Αγωγός).



Εικόνα 4.4.: Πλάγια όψη καναλιού (λεπτομέρεια σκαλοπατιού).



Εικόνα 4.5.: Πρόσοψη καναλιού.

4.1.4. ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ

Ο ανεμιστήρας που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος είναι αξονικός και τροφοδοτείται με ρεύμα τάσης 220V και έντασης 0.5 A. Είναι της εταιρίας ZIEHL ABEGG με μέγιστη παροχή αέρα $V_{\max} = 1275 \text{ m}^3 / \text{h}$ και μέγιστη πίεση $P_{\max} = 6 \text{ mmHg}$. Η ρύθμιση του εύρους της ταχύτητας του αέρα, που κυμαίνεται από 0,9 έως 5,5 m/s, γίνεται με βοήθεια ροοστάτη.



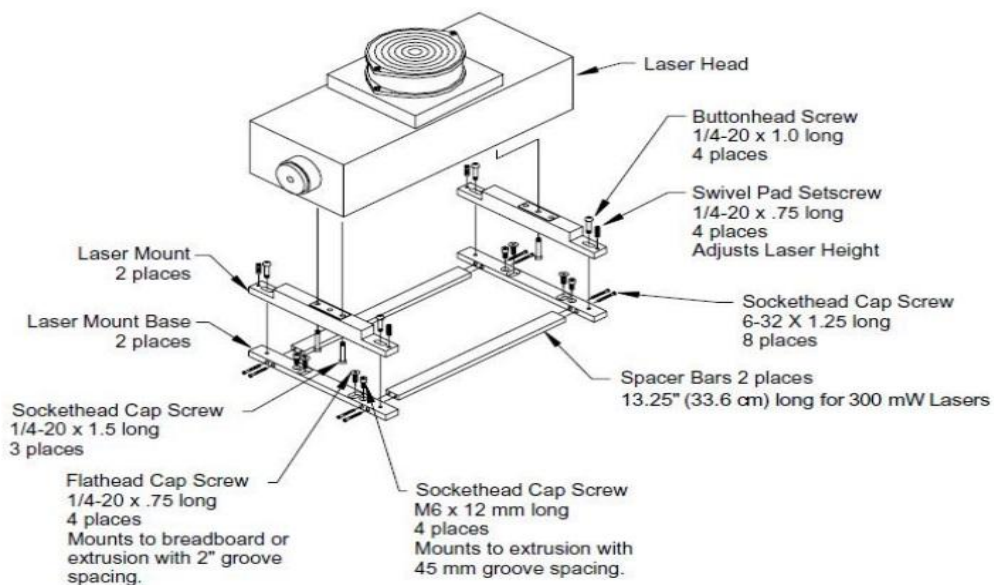
Εικόνα 4.6.: Αξονικός ανεμιστήρας.

4.1.5. ΣΥΣΚΕΥΗ ΛΕΙΖΕΡ ΚΑΙ ΦΑΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΦΥΛΛΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΚΑΜΕΡΑ

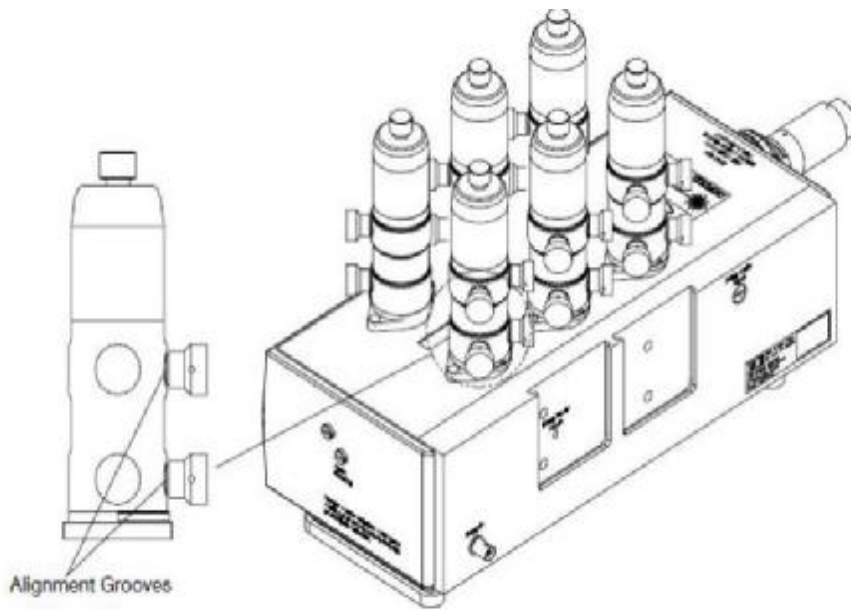


Εικόνα 4.7.: Συσκευή Laser

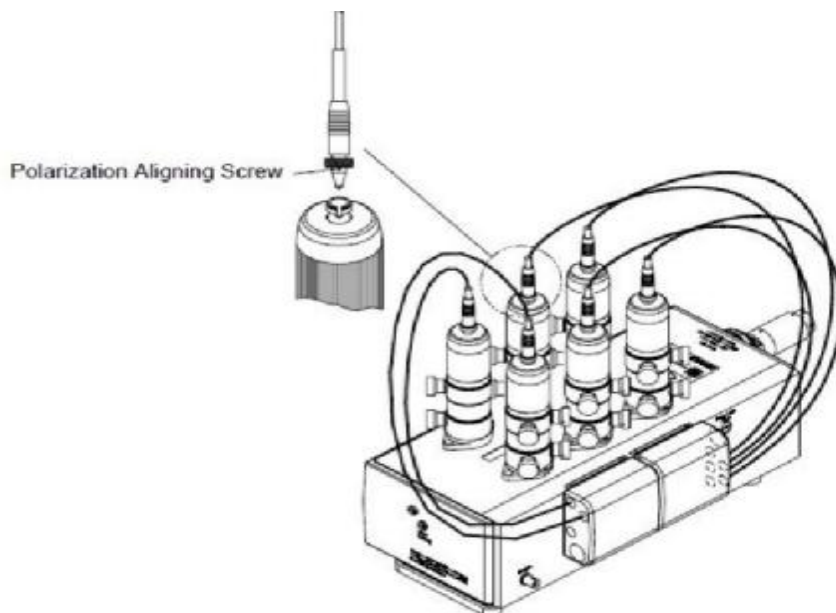
4.1.5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ



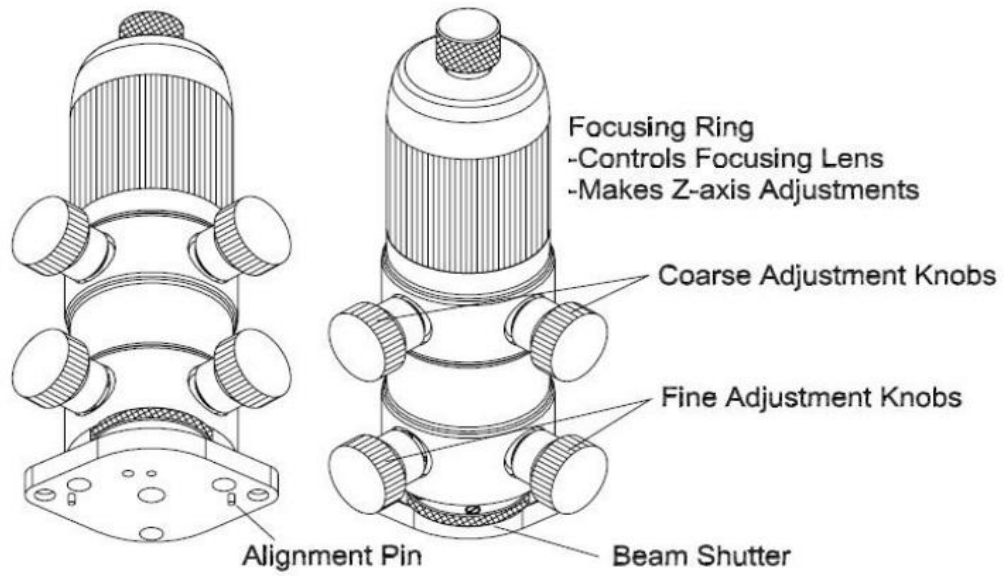
Εικόνα 4.8.: LA-300 Melles Griot Laser Head, Maximum power 300 mW



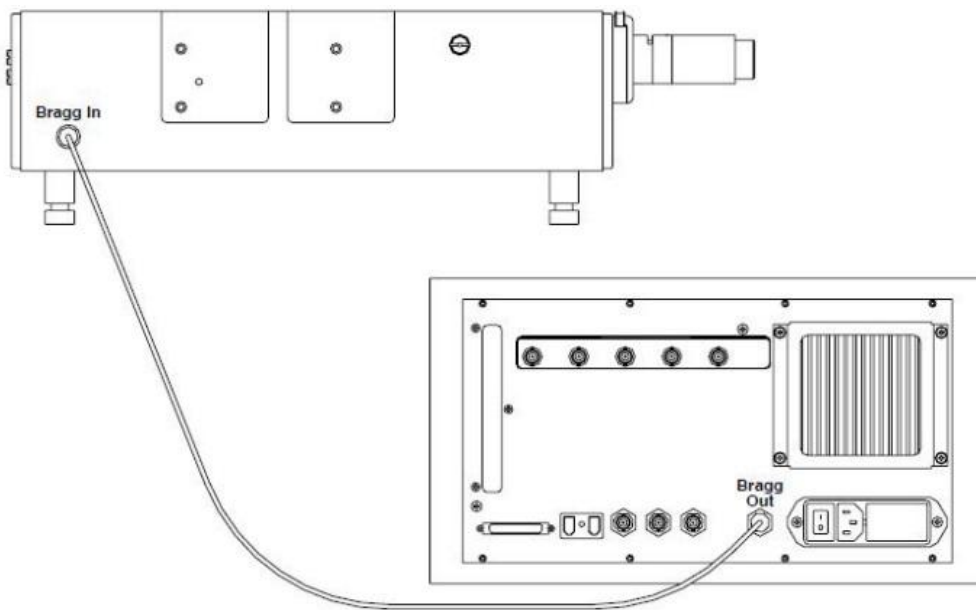
Εικόνα 4.9.: Fiberlight™ Multicolor Beam Separator and couplers 2 Couplers για κάθε παραγόμενη δέσμη. Η αρχική δέσμη Laser, προερχόμενη από την κεφαλή, «σπάει» σε 2 δέσμες οι οποίες έχουν διαφορά 40 MHz.



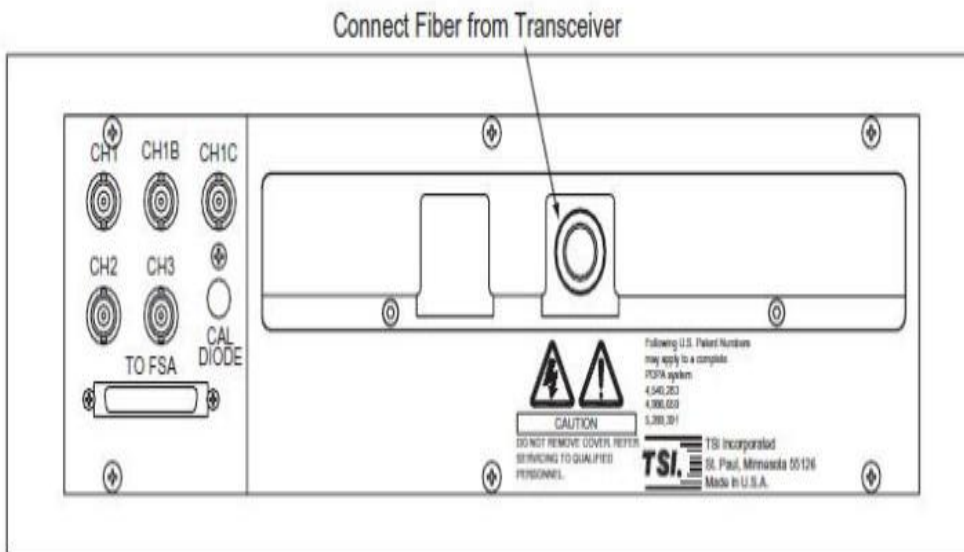
Εικόνα 4.10.: Συνδεσμολογία junction box με couplers.



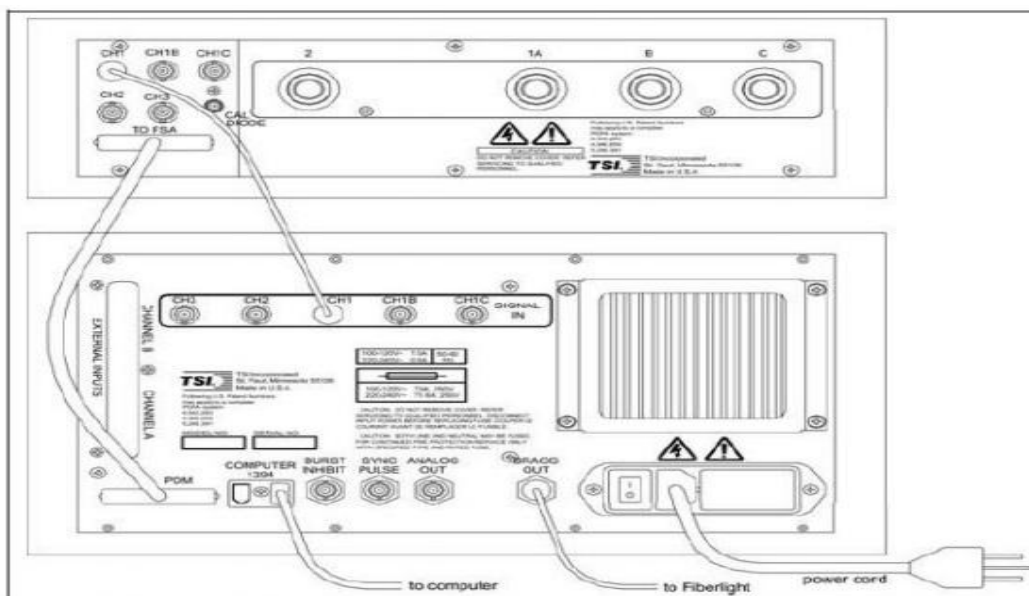
Εικόνα 4.11.: Ρυθμιστικοί κοχλίες στην περιφέρεια κάθε coupler.



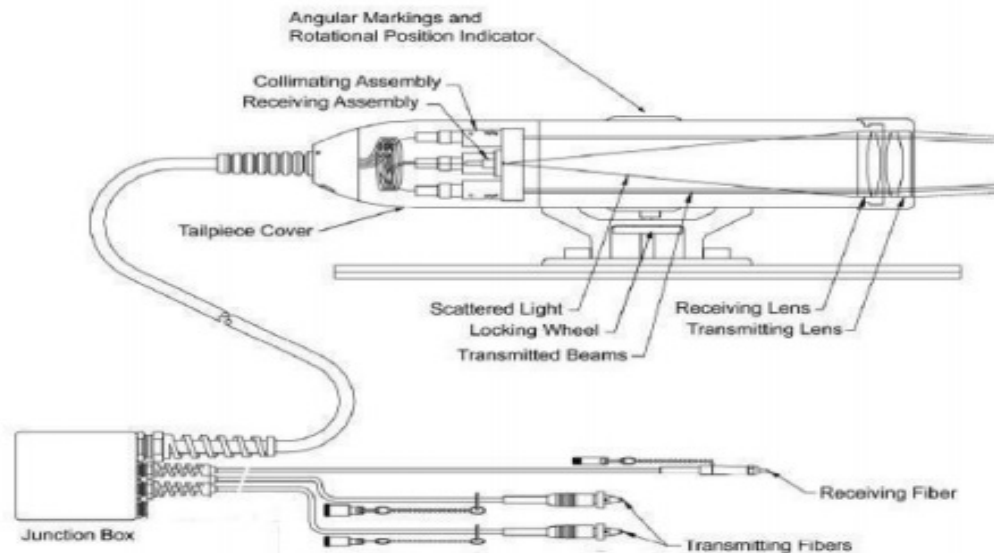
Εικόνα 4.12.: Σύνδεση επεξεργαστή σήματος FSA 3500 με το multicolor beam separator



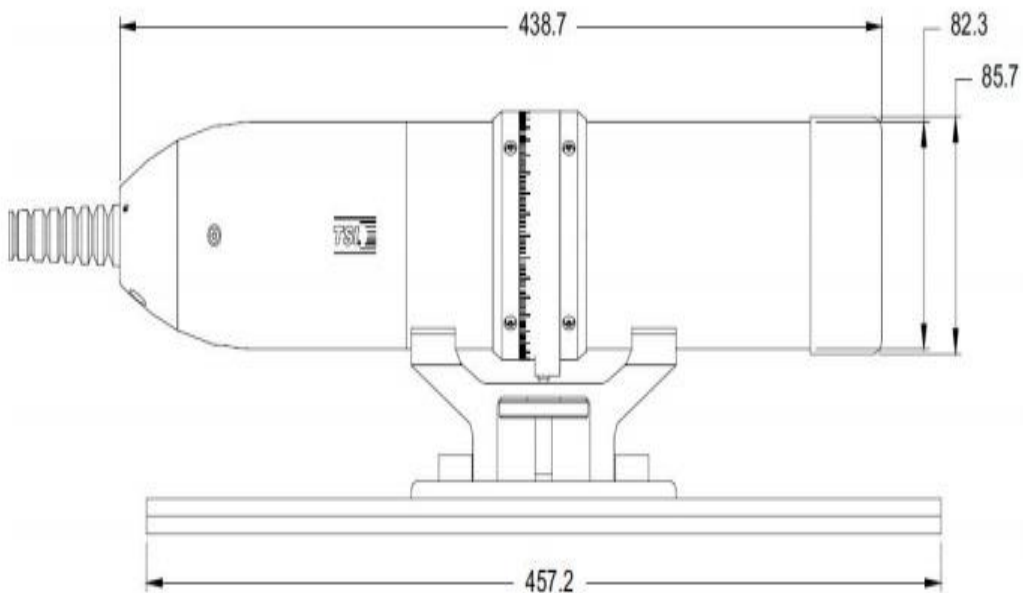
Εικόνα 4.13.: Πίσω όψη Φωτοδέκτη (Photo Detector Module PDM 1000). Διακρίνονται η θύρα επιστροφής του σήματος, περιέχοντας την σκεδαζόμενη ακτινοβολία (connect Fiber from Transceiver), η θύρα επικοινωνίας με τον επεξεργαστή σήματος(signal processor FSA 3500) και οι υποδοχές για τα καλώδια, ένα για κάθε κανάλι, 1D LDV στην περίπτωση μας.



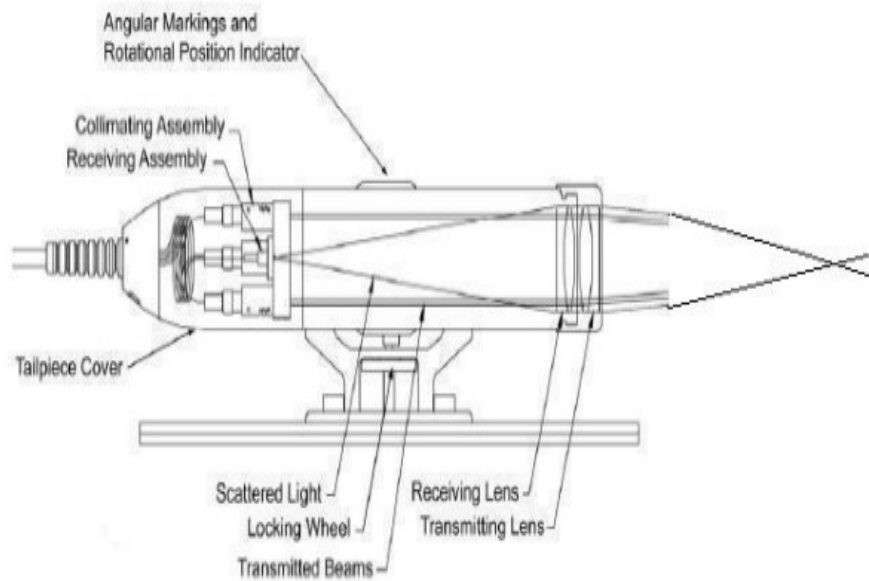
Εικόνα 4.14 Πίσω όψη Φωτοδέκτη (Photo Detector Module PDM 1000) και Επεξεργαστή Σήματος (Signal Processor FSA 3500). Διακρίνονται οι απαιτούμενες επιμέρους συνδέσεις: θύρες επικοινωνίας (PDM με FSA, FSA με H/Y, FSA με bragg cell)



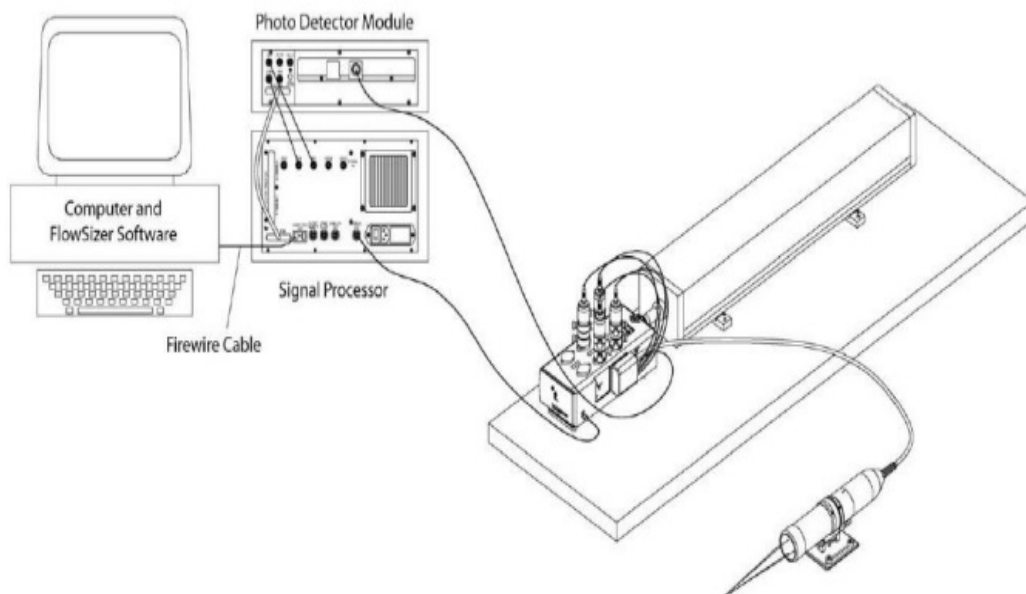
Εικόνα 4.15.: Συνδεσμολογία σημάτων με junction box και probe. Το «χοντρό» καλώδιο, το οποίο συνδέεται στην βάση του probe, αντιπροσωπεύει την οπτική ίνα μέσω της οποίας μεταφέρονται οι 2 δέσμες Laser.



Εικόνα 4.16.: Βασικές διαστάσεις TSI TR60 series probe.



Εικόνα 4.17.: TSI TR60 probe τομή. Διακρίνονται οι 2 ενσωματωμένοι φακοί, $1^{\circ\sigma}$ εστίασης δεσμών (transmitting lens) και $2^{\circ\sigma}$ συλλογής σκεδαζόμενης ακτινοβολίας (receiving lens).



Εικόνα 4.18.: Γενική παρουσίαση διάταξης LDV μιας διάστασης, 1D. Διακρίνονται τα 6 επιμέρους συστήματα: Κεφαλή Laser, Multicolor beam separator, Φωτοδέκτη (Photo Detector Module), Επεξεργαστής σήματος (Signal Processor), Probe και H/Y με εγκατεστημένο το λογισμικό FlowSizer.

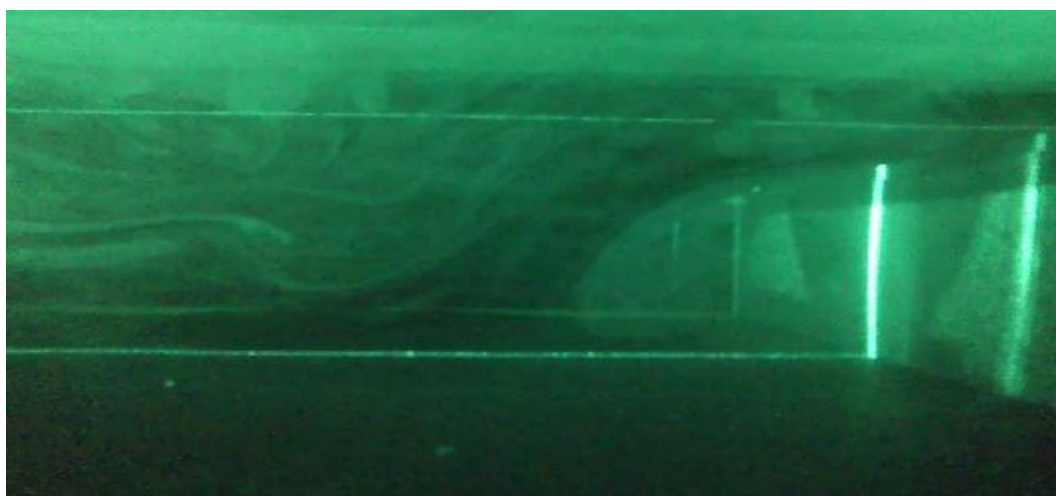


Εικόνα 4.19.: Καθρέπτης για την κατεύθυνση της δέσμης

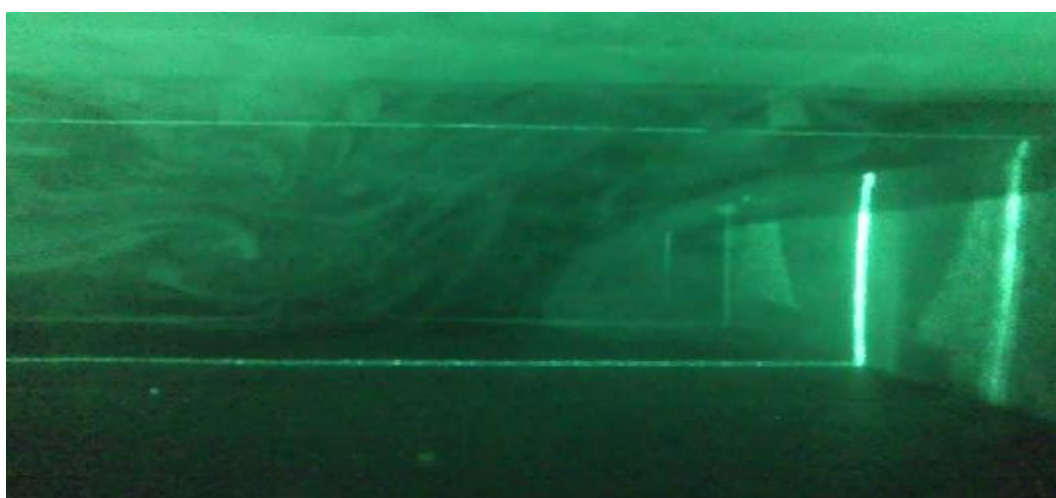
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

5.1. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ (ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ – ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ)

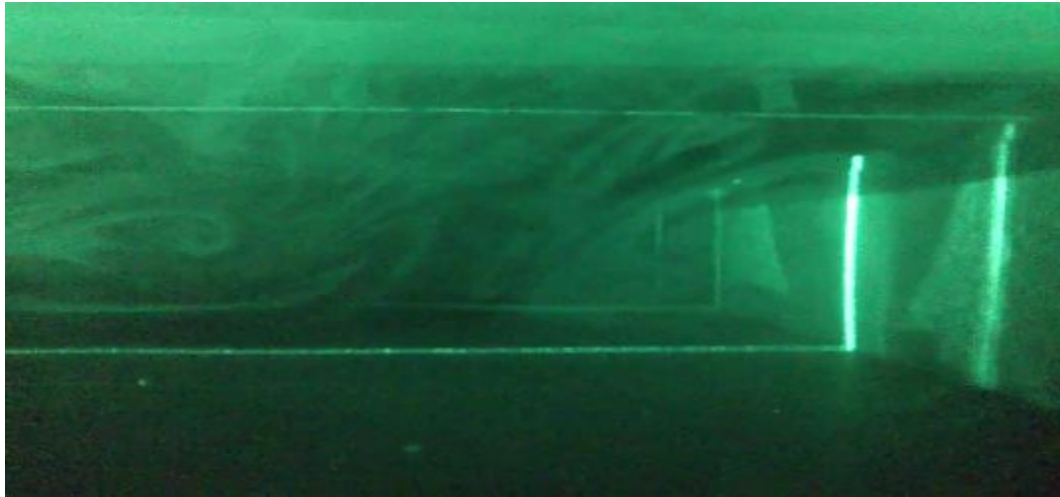
Στην συνέχεια πραγματοποιείτε απεικόνιση κατά την δημιουργία του στροβίλου και κατά την διάρκεια αποκόλλησης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι διατηρήθηκαν πολύ χαμηλές ταχύτητες και υπήρχε η ελάχιστη συγκέντρωση σωματιδίων.



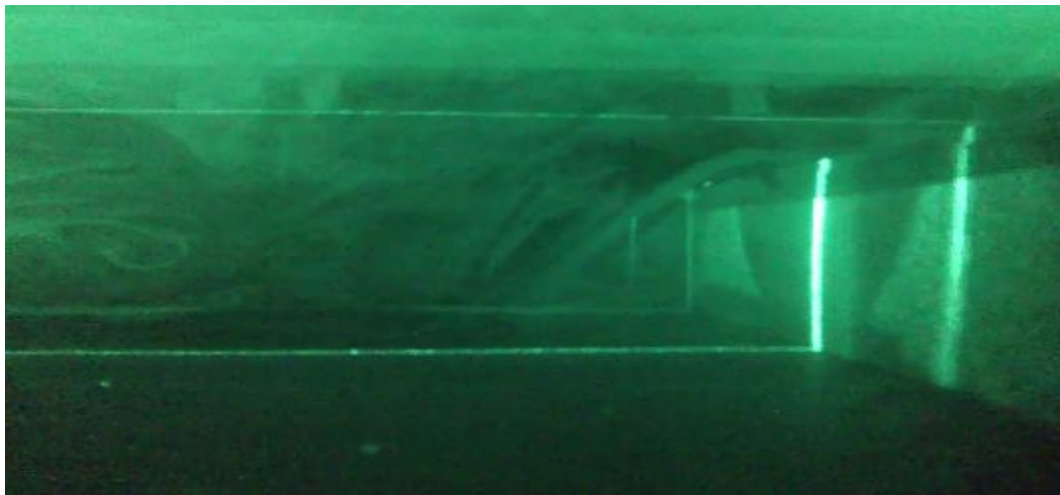
Εικόνα 5.1.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (i).



Εικόνα 5.2.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (ii).



Εικόνα 5.3.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (iii).



Εικόνα 5.4.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (iv)

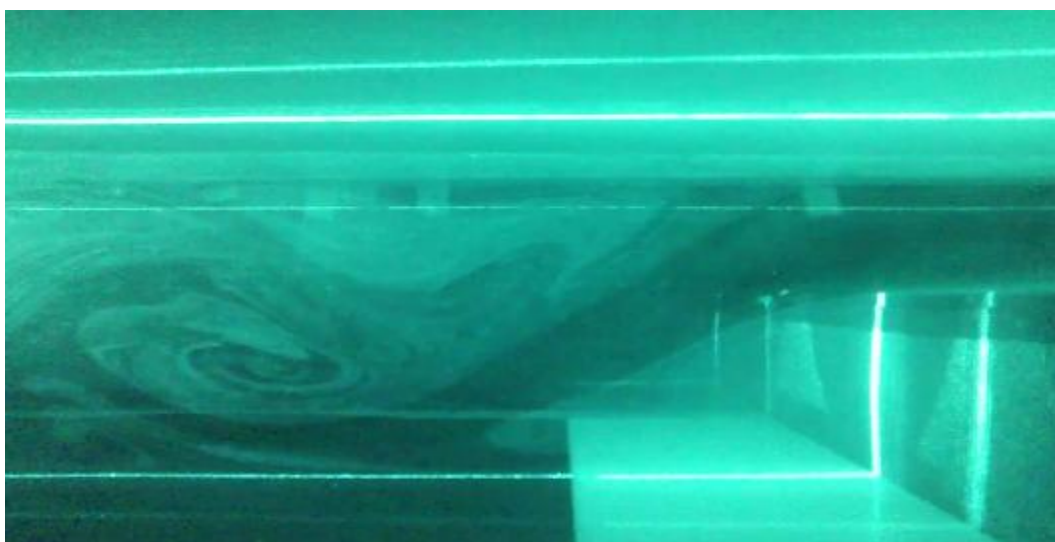
Οι εικόνες αυτού του εδάφιου αποτελούν τη πορεία της δημιουργίας του στροβίλου σε πολύ χαμηλές τιμές της ταχύτητας της ροής και σε μικρή συγκέντρωση σωματιδίων. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα σωματίδια τροφοδοτούνται στην ροή με την βοήθεια του νεφελοποιητή και σε χαμηλό ρυθμό, ο οποίος είναι ανάλογος της ταχύτητας μας. Παρατηρώντας την οπτικοποίηση καταλήγουμε στην δημιουργία στροβίλου μετά την απότομη διαμόρφωση του αγωγού – κανάλι το «σκαλοπάτι». Τα στιγμιότυπα της οπτικοποίησης δείχνουν πως μια ίνα ρευστού περιστρέφεται μέσα στη ζώνη ανακυκλοφορίας και στην συνέχεια μεταφέρεται και παραμορφώνεται κατά μήκος του καναλιού.

5.2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ (ΧΑΜΗΛΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ)

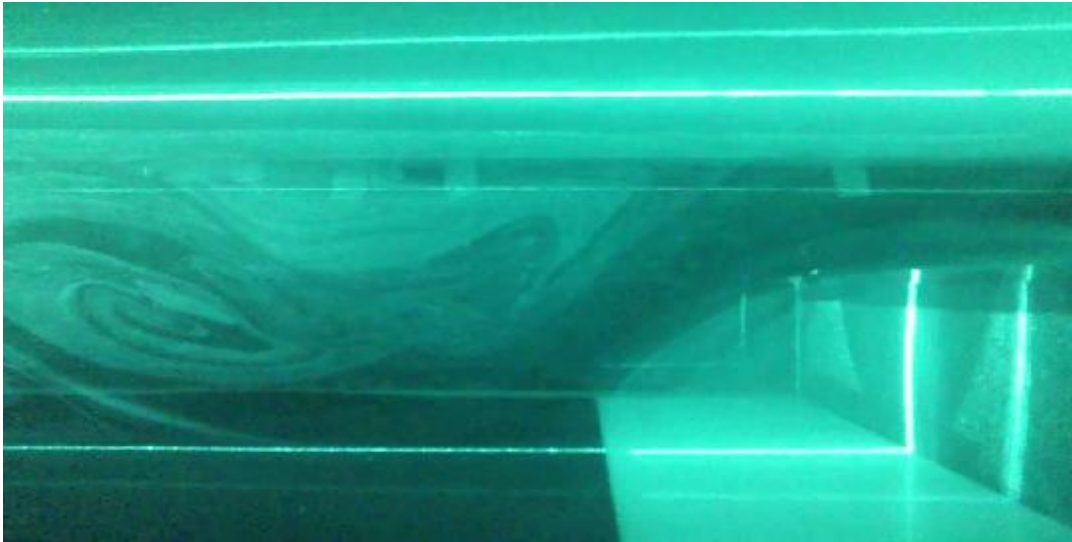
Στο παρακάτω εδάφιο ακολουθεί απεικόνιση κατά την δημιουργία στροβίλου σε χαμηλές ταχύτητες. Ακολουθείτε δηλαδή η ίδια διαδικασία με τον ίδιο στόχο, την οπτική απεικόνιση της ζώνης ανακυκλοφορίας αμέσως μετά την απότομη διαμόρφωση. Όμως σε αυτή την περίπτωση, δεν έχει δοθεί ακόμα ταχύτητα στη ροή μέσω του ανεμιστήρα και τα τροχοδεικτικά σωματίδια έχουν διαχυθεί μέσα στο κανάλι.



Εικόνες 5.5.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (i).



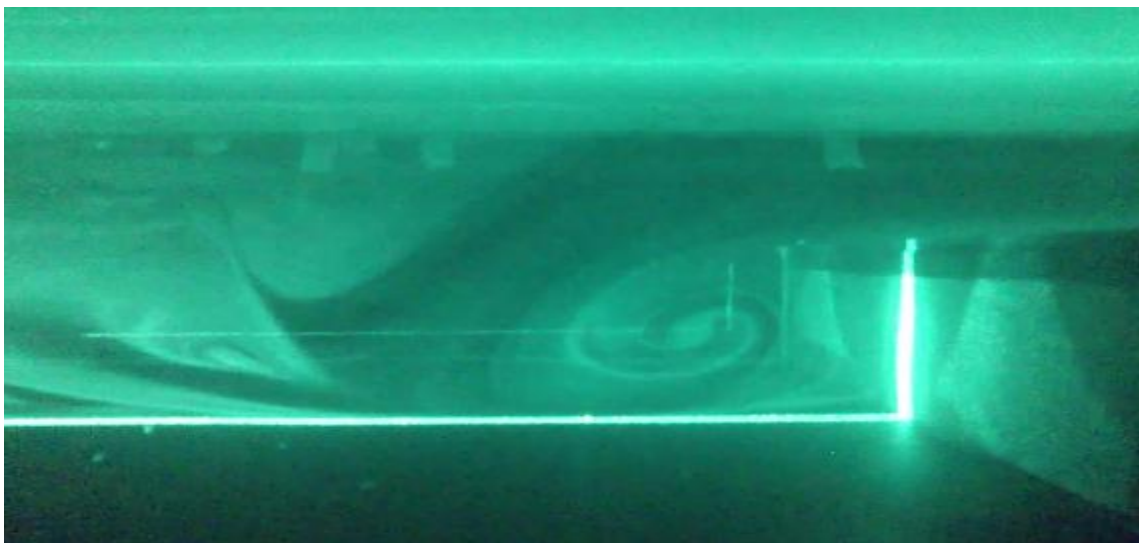
Εικόνες 5.6.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (ii).



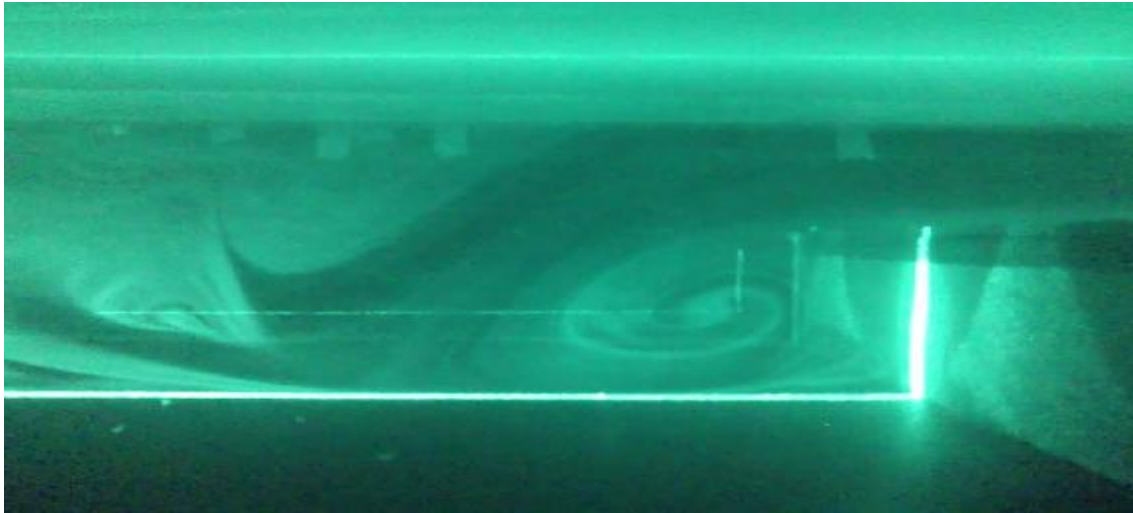
Εικόνες 5.7.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (iii).



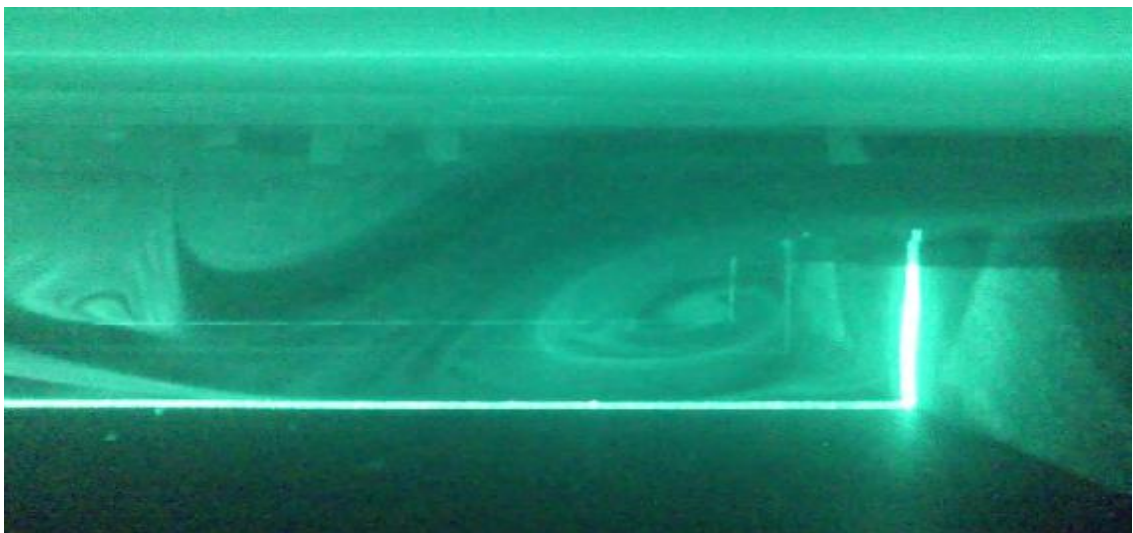
Εικόνες 5.8.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (iv).



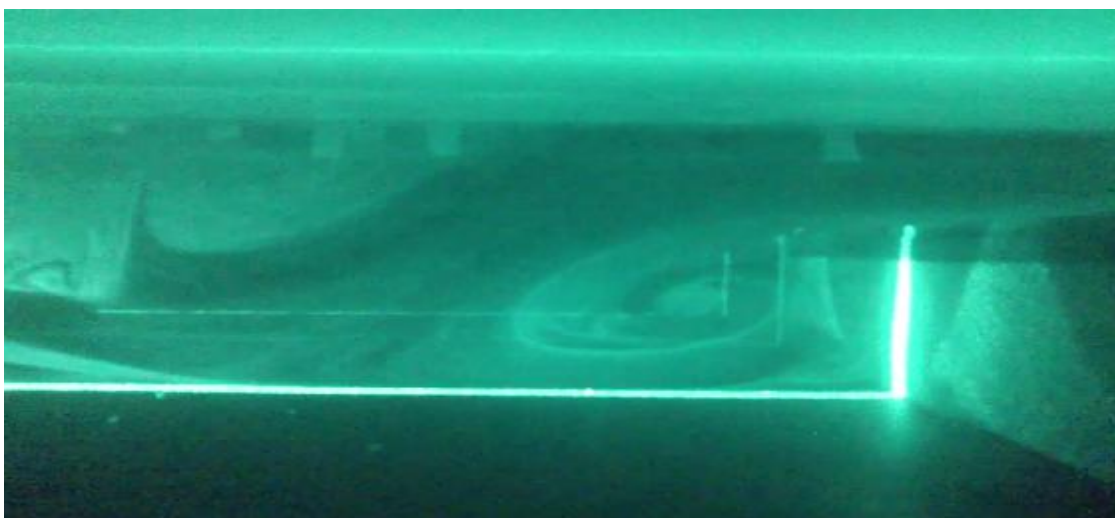
Εικόνες 5.9.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (v).



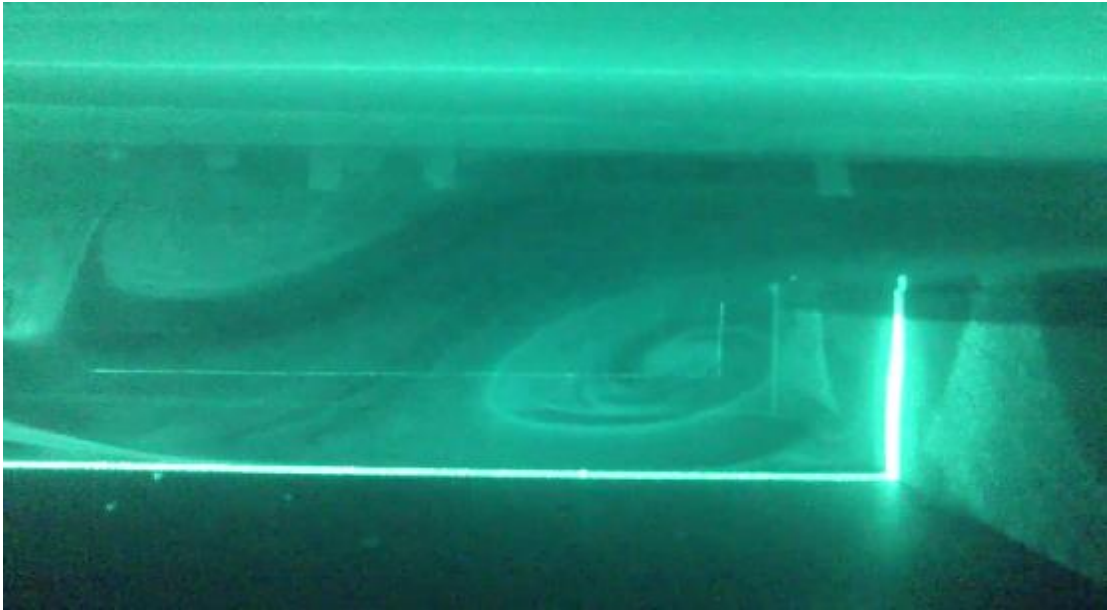
Εικόνες 5.10.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (vi).



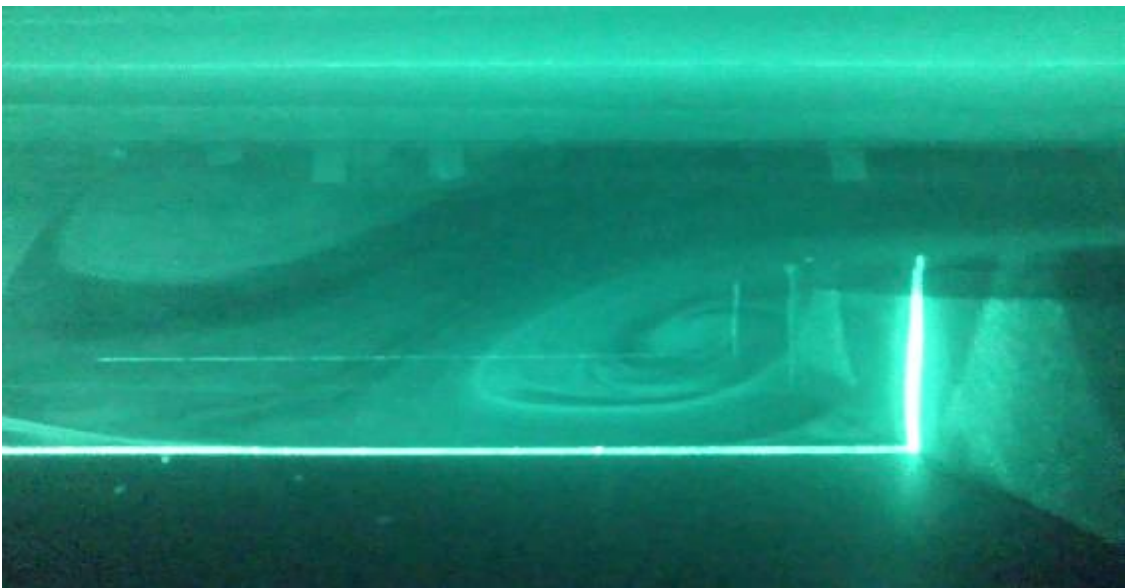
Εικόνες 5.11.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (vii).



Εικόνες 5.12.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (viii).



Εικόνες 5.13.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (ix).

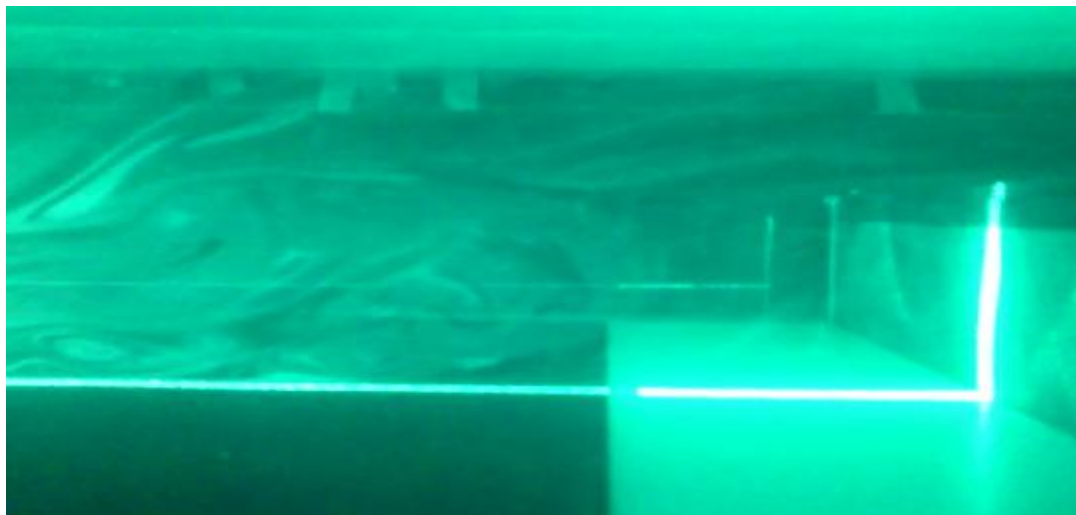


Εικόνες 5.14.: Στιγμιότυπα δημιουργίας στροβίλου (x).

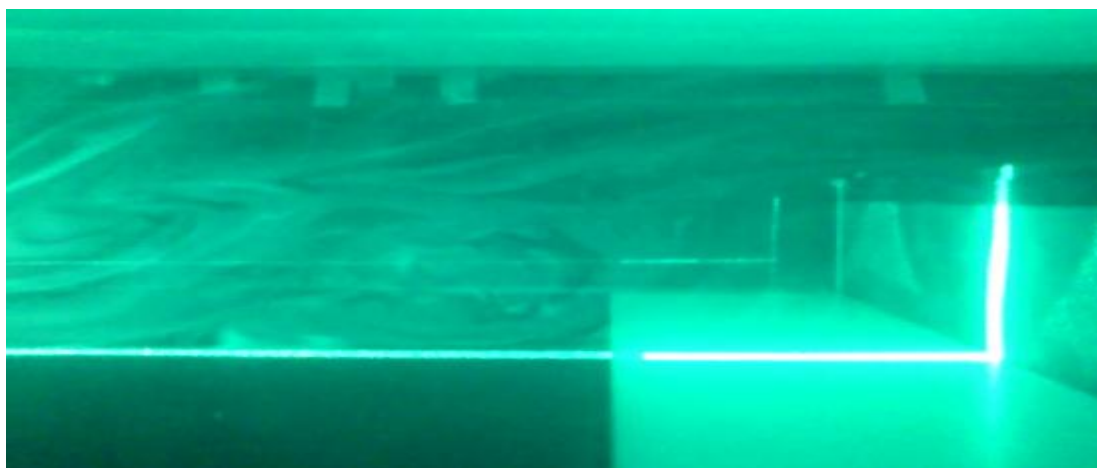
Όπως προαναφέραμε ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για την λήψη των εικόνων. Η απεικόνιση της ζώνης ανακυκλοφορίας αμέσως μετά την απότομη διαμόρφωση δείχνει την σαφώς μεγαλύτερη συγκέντρωσή των σωματιδίων με αποτέλεσμα την πιο έντονη στην αποτύπωσή της. Στην πειραματική διαδικασία της αυτής της περίπτωσης παρατηρείται επίσης, η περιστροφή του ρευστού μέσα στην περιοχή της ανακυκλοφορίας, καθώς και η διόγκωση και η παραμόρφωσή της αφού η ταχύτητα της ροής αυξάνεται.

5.3. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΣΟ ΣΤΡΩΤΟ ΣΕ ΑΣΤΑΘΕΣ ΠΕΔΙΟ

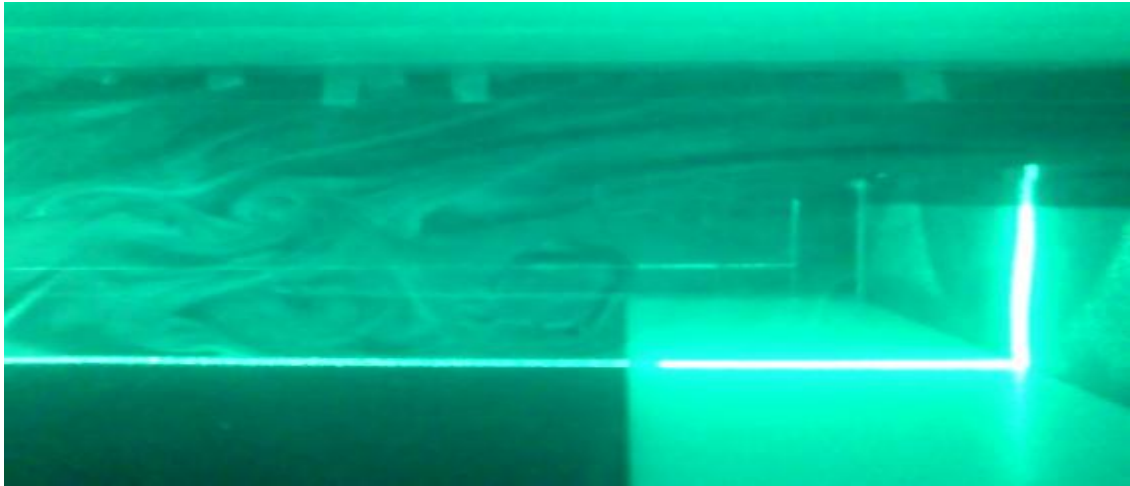
Στην συνέχεια πραγματοποιείται η απεικόνιση της μετάβασης από το μέσο στρωτό πεδίο σε ασταθές πεδίο, είναι δηλαδή η μετάβαση από τη στρωτή ροή στην ασταθή και αργότερα στην τυρβώδη. Και σε αυτήν την περίπτωση ακολουθείται η ίδια διαδικασία τοποθετώντας τα σωματίδια στο κανάλι πριν την έναρξη του πειράματος, και καθώς η ταχύτητα είναι πολύ μικρή είναι δυνατό να αποτυπωθεί αρχικά το μέσο πεδίο της συγκέντρωσης.



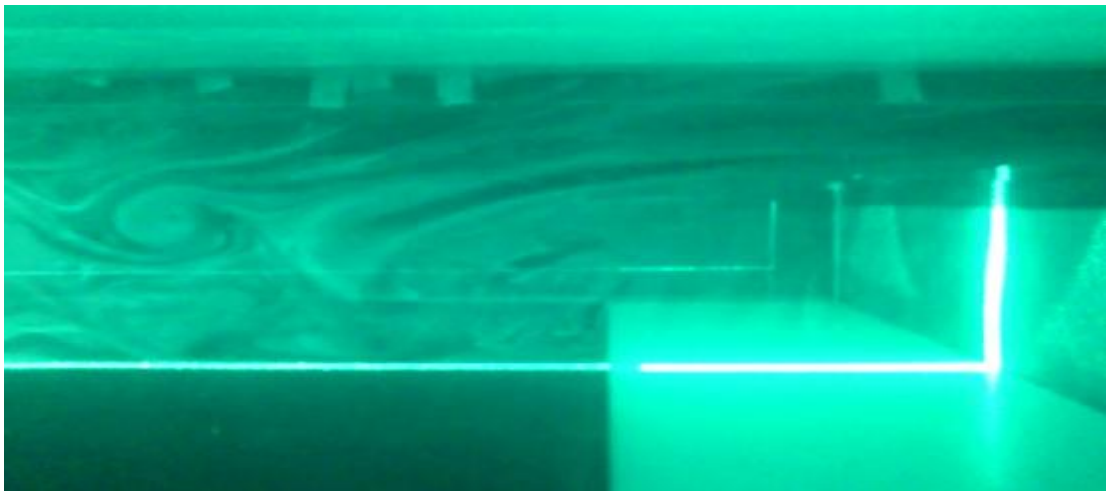
Εικόνες 5.15.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (i).



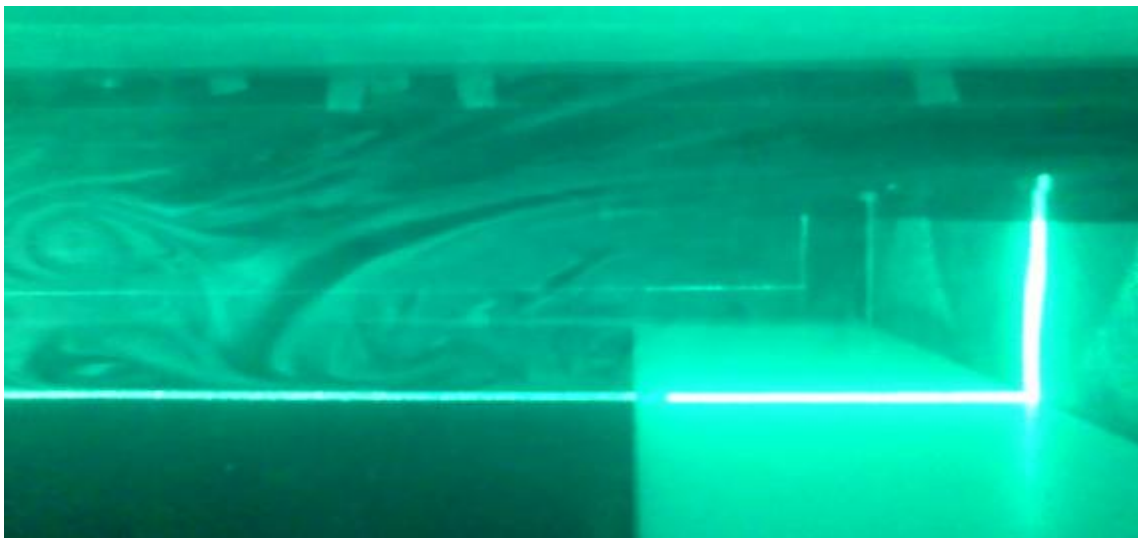
Εικόνα 5.16.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (ii).



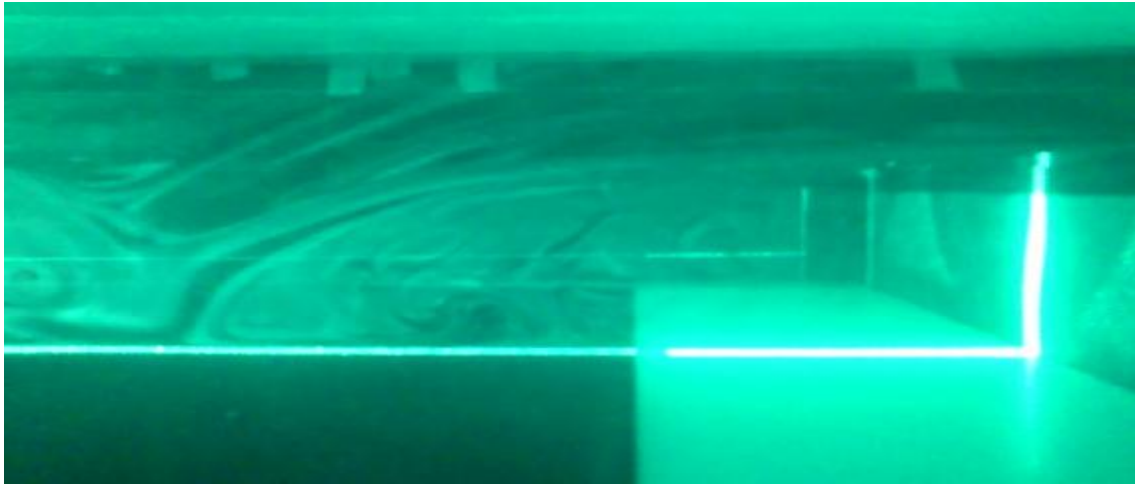
Εικόνα 5.17.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (iii).



Εικόνα 5.18.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (iv)



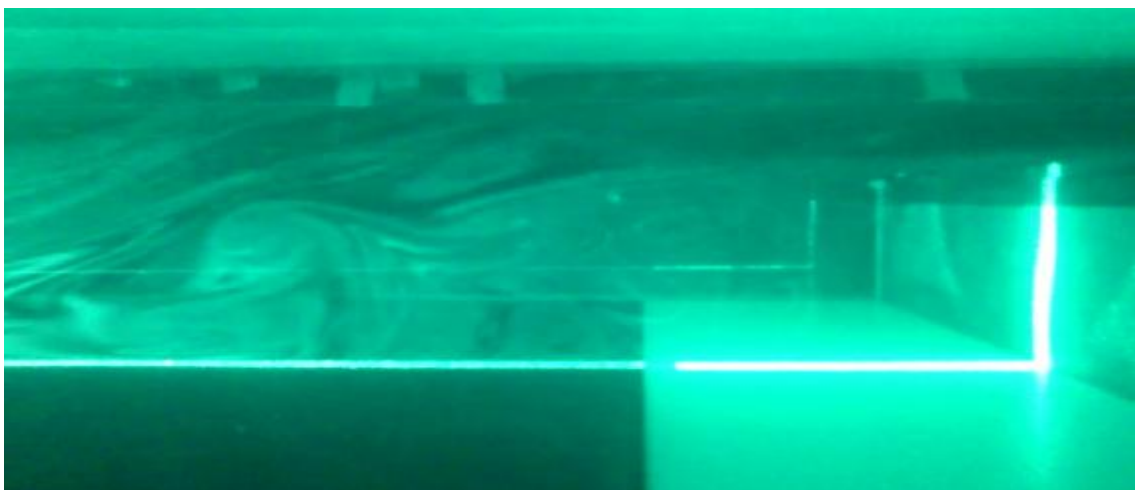
Εικόνα 5.19.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (v).



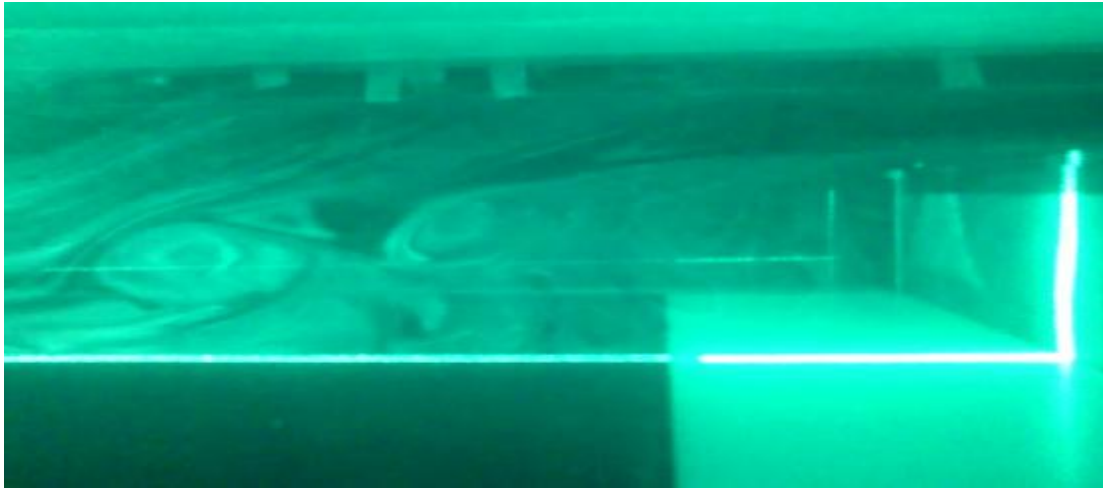
Εικόνα 5.20.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (vi).



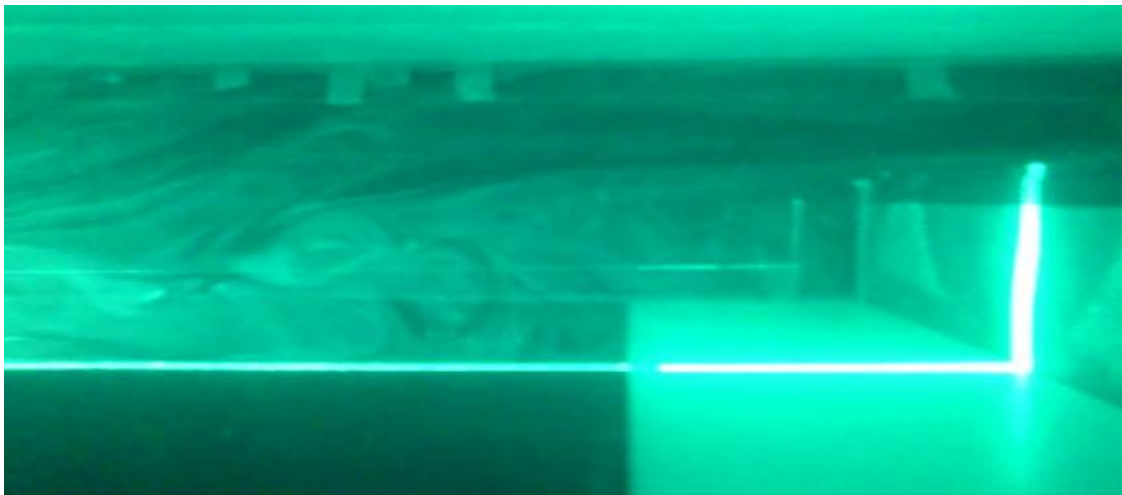
Εικόνα 5.21.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (vii).



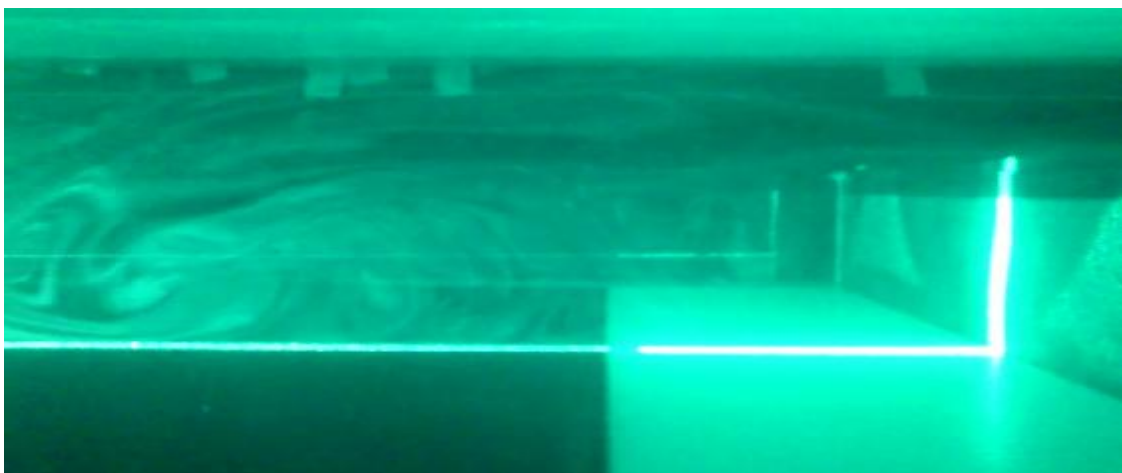
Εικόνα 5.22.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (viii)



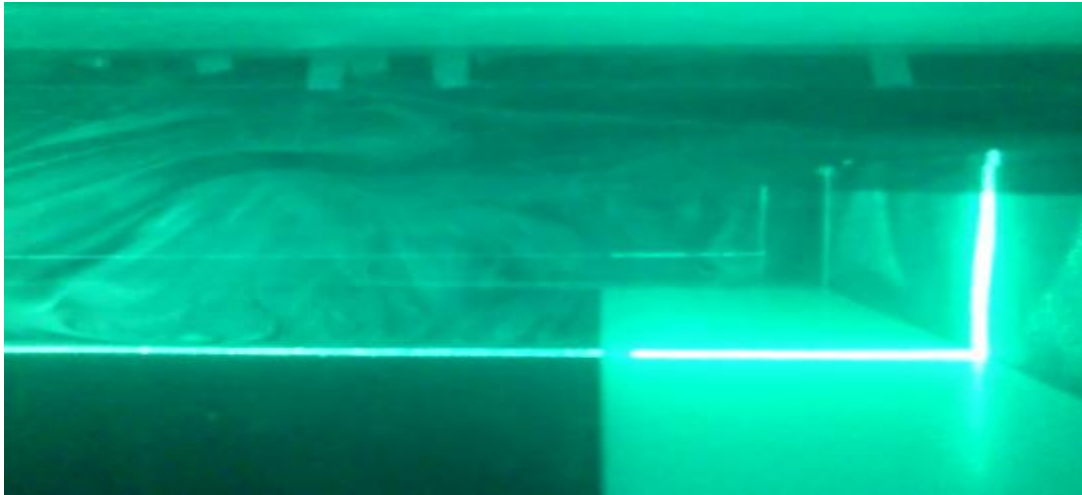
Εικόνα 5.23.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (ix).



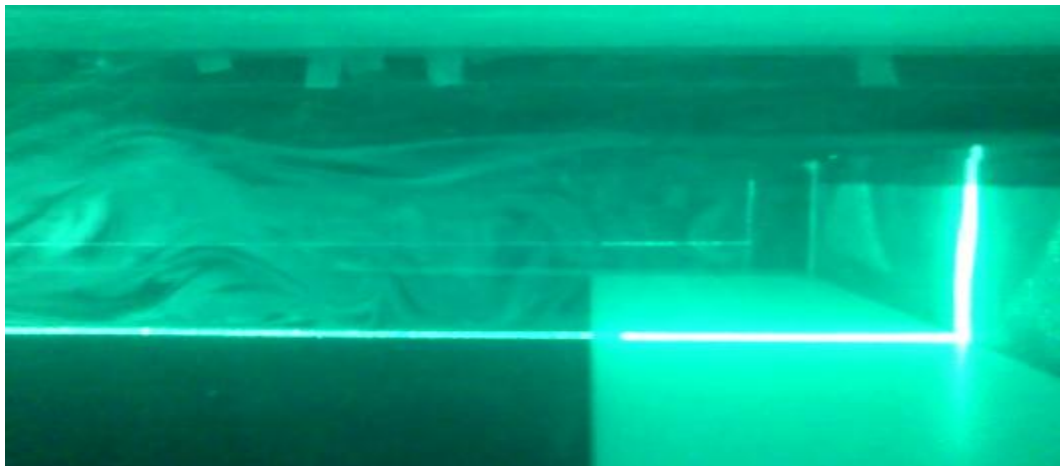
Εικόνα 5.24.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (x).



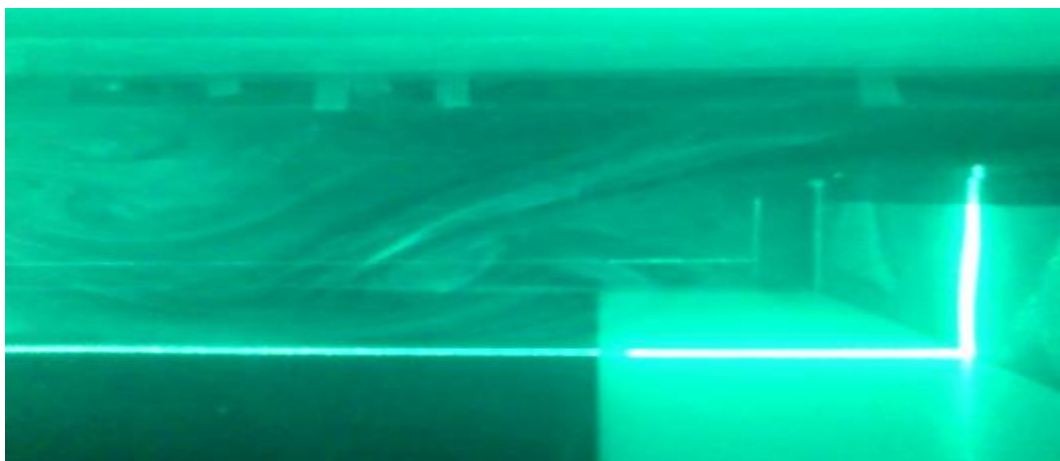
Εικόνα 5.25.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (xi).



Εικόνα 5.26.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (xii).



Εικόνα 5.27.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (xiii).



Εικόνα 5.28.: Στιγμιότυπα μετάβασης από στρωτό σε ασταθές πεδίο (xiv).

Οι παραπάνω εικόνες, όπως προαναφέραμε απεικονίζουν την μετάβαση από τη στρωτή ροή στην ασταθή και αργότερα στην τυρβώδη. Τα σωματίδια και σε αυτή την περίπτωση τοποθετήθηκαν στο κανάλι πριν την έναρξη του πειράματος και η ταχύτητα που δόθηκε ήταν πολύ μικρή. Η συγκέντρωση των σωματιδίων αποτελεί ουσιαστικά ένδειξη της στροβιλότητας της ροής. Όπως επίσης και η ταχύτητα της ροής αυξάνεται. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η διόγκωση της ζώνης ανακυκλοφορίας και η εκκίνηση ασταθειών, που έχει ως συνέπεια την περιοδική εμφάνιση στροβίλων ανάμιξης ρευστού που βρίσκεται «παγιδευμένο» στο κατώτερο τμήμα του καναλιού με ρευστό υψηλότερης ταχύτητας, που βρίσκεται στο κέντρο του.

Στην συνέχεια έχουμε την αλλαγή της ροής σε τυρβώδη. Σε αυτήν την περίπτωση η διάταξη των στροβίλων δεν φαίνεται να είναι το ίδιο συστηματική, καθώς αποκαλύπτονται δομές πολύ μικρότερης κλίμακας, που δημιουργούν μια περισσότερο «χαοτική» εικόνα, από την οποία ακριβώς και προκύπτει ο τυρβώδης χαρακτήρας της ροής.

Ωστόσο, κατά την πειραματική διαδικασία γίνεται μια προσπάθεια καταγραφής της επίδρασης μια οπής αναρρόφησης, που έχει διαμορφωθεί στο κατώτερο τμήμα του καναλιού αμέσως μετά την απότομη διαμόρφωση. Η οπή αυτή χρησιμοποιείται σαν απλή οπή αναρρόφησης, ενώ στο μέλλον αναμένεται να προσαρμοστεί μηχανισμός ελέγχου (συνθετική δέσμη εκροής), που θα μπορεί περιοδικά να απορροφά και να εκτονώνει ρευστό, παραμορφώνοντας τη ζώνη ανακυκλοφορίας. Επιπλέον, απεικονίζεται η αναρρόφηση ρευστού από το εξωτερικό περιβάλλον λόγω της χαμηλής πίεσης μέσα στη ζώνη ανακυκλοφορίας. Ακριβώς πάνω από την οπή διακρίνεται μια φλέβα ρευστού, που εμποδίζει το σχηματισμό τη ζώνης ανακυκλοφορίας στην περιοχή. Παρατηρείται ότι η τελευταία φαίνεται να έχει μετατοπιστεί σε μεγαλύτερη απόσταση από τη διαμόρφωση, ενώ και πάλι λόγω του ασταθούς χαρακτήρα της ροής, παράγονται συνεκτικές δομές, που οργανώνονται, περιστρέφονται και ταξιδεύουν κατά μήκος του καναλιού.

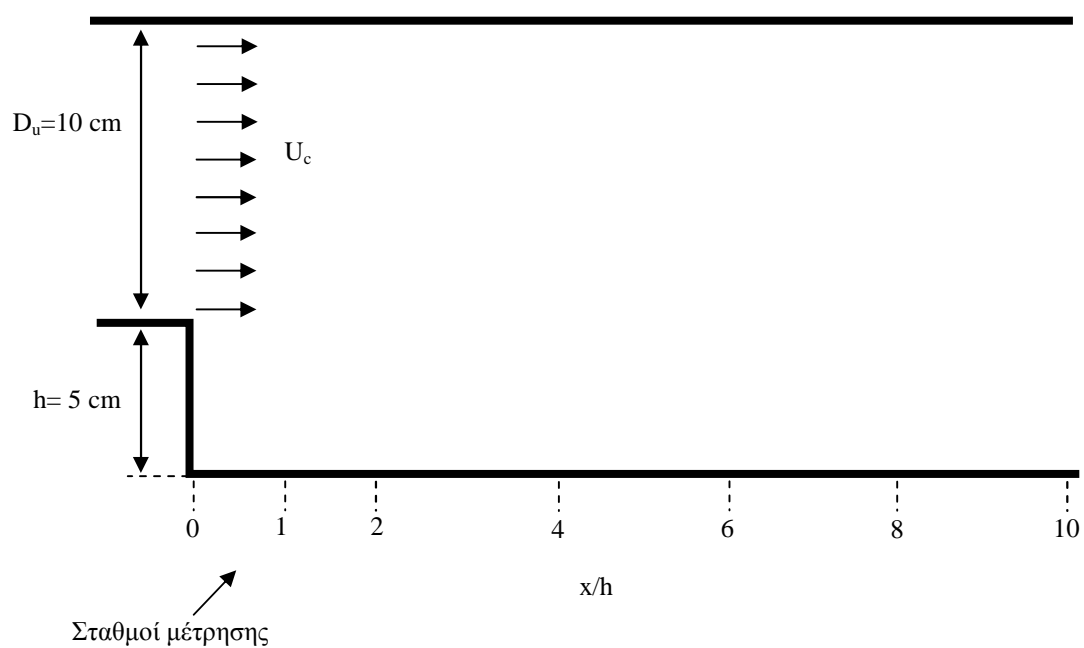
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

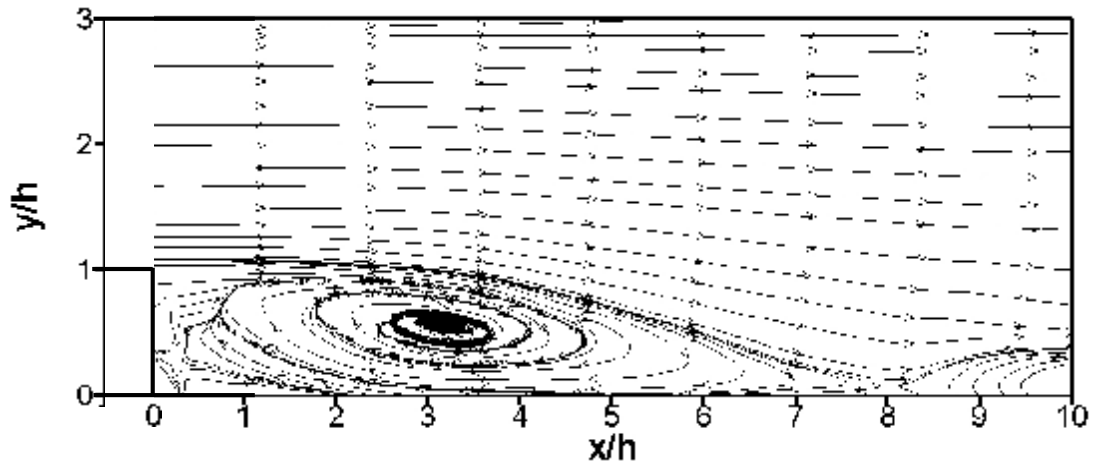
Ταχύτητα αναφοράς, $U_c = 1.7 \text{ m/s}$

Ύψος σκαλοπατιού, $h = 0.05 \text{ m}$

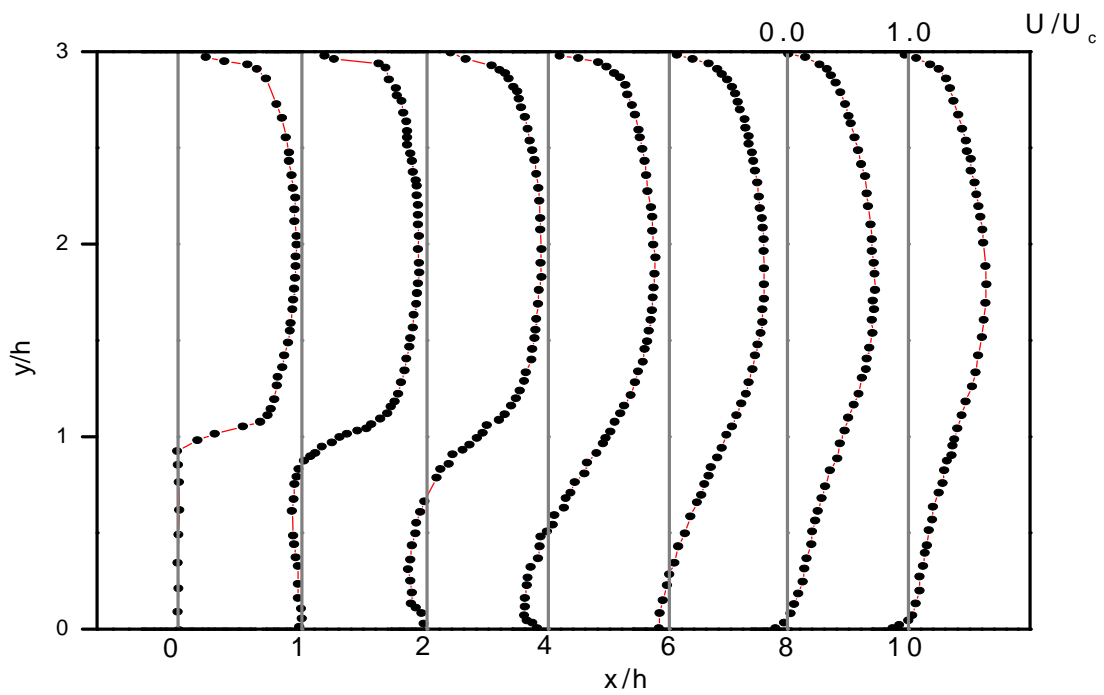
Αριθμός Reynolds, $Re = \frac{U_c \cdot h}{\nu} = 5540$



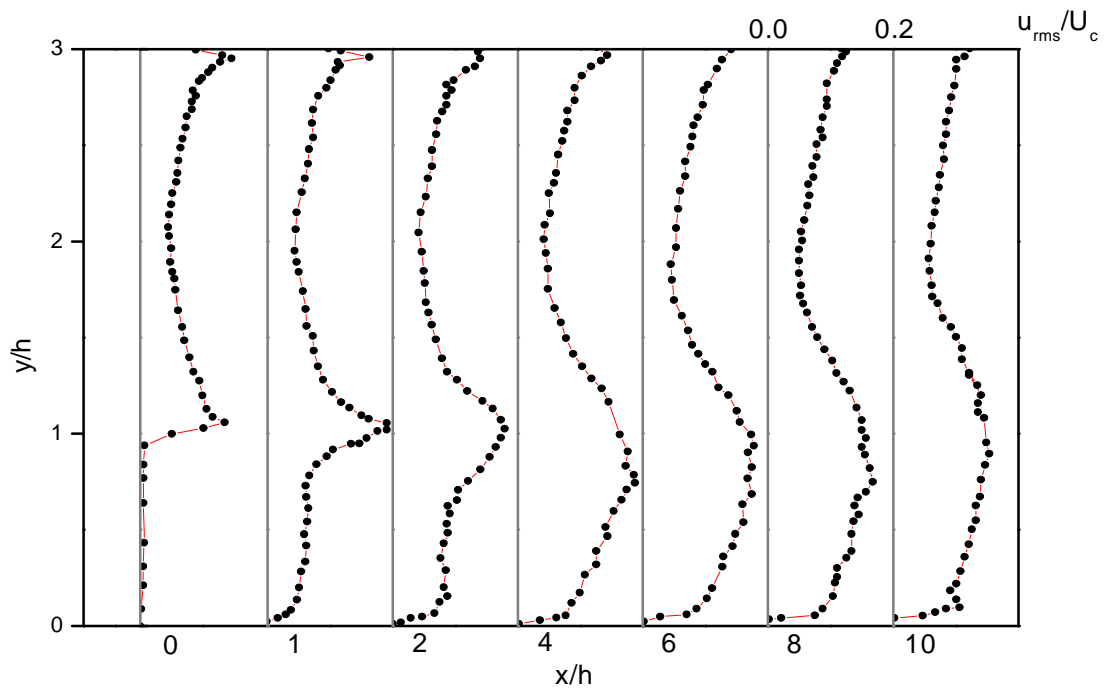
Σχήμα 6.1.: Ονοματολογία - συνθήκες ροής βήματος και θέσεις μέτρησης.



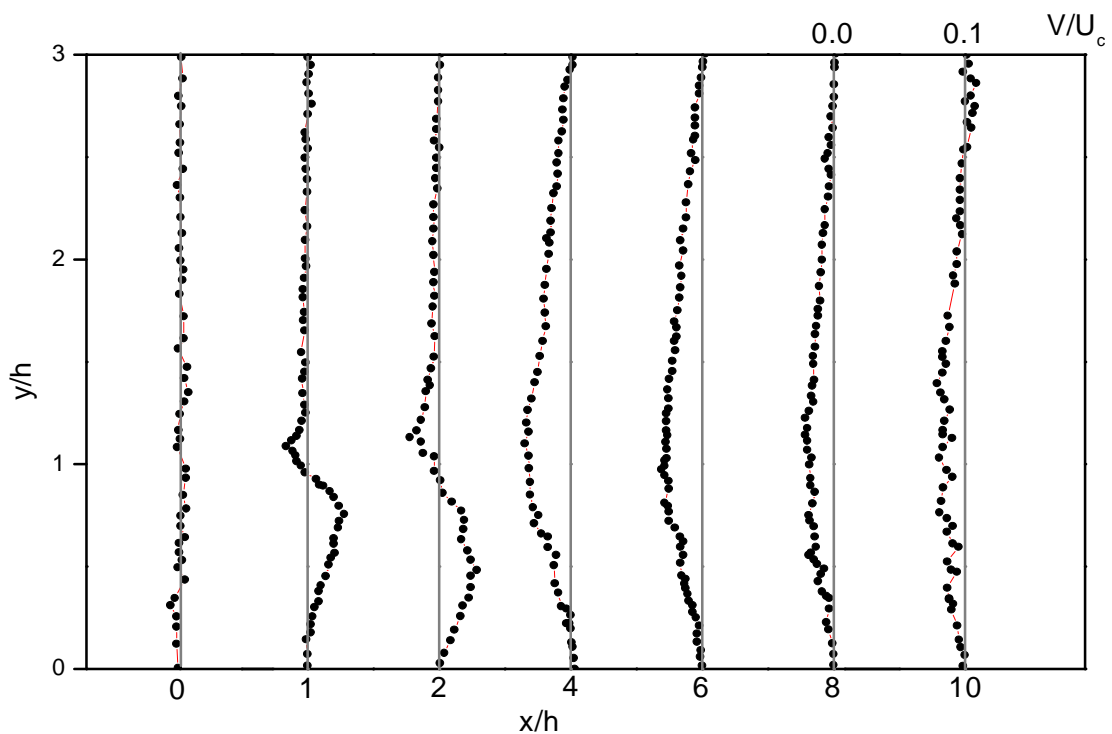
Σχήμα 6.2.: Διάγραμμα ροϊκών γραμμών.



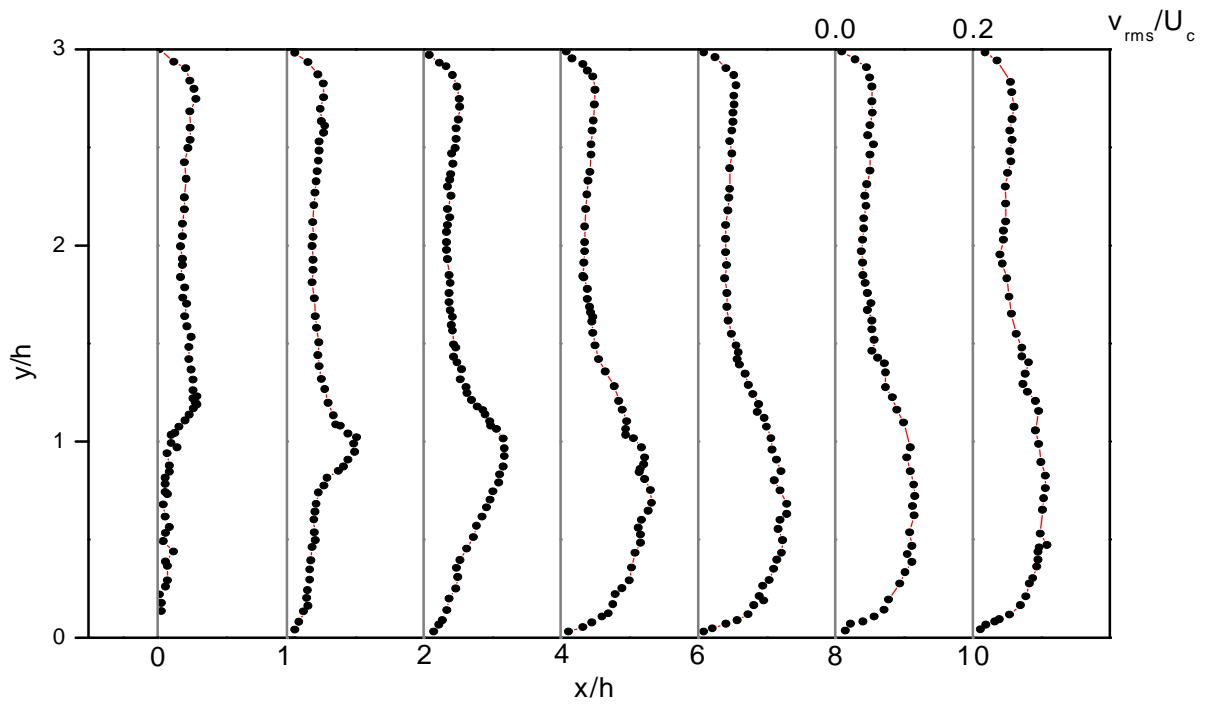
Σχήμα 6.3.: Αδιάστατες κατανομές της μέσης διαμήκουσ συνιστώσας της ταχύτητας, U/U_c , σε διαφορετικούς σταθμούς μέτρησης κατά μήκος της ροής.



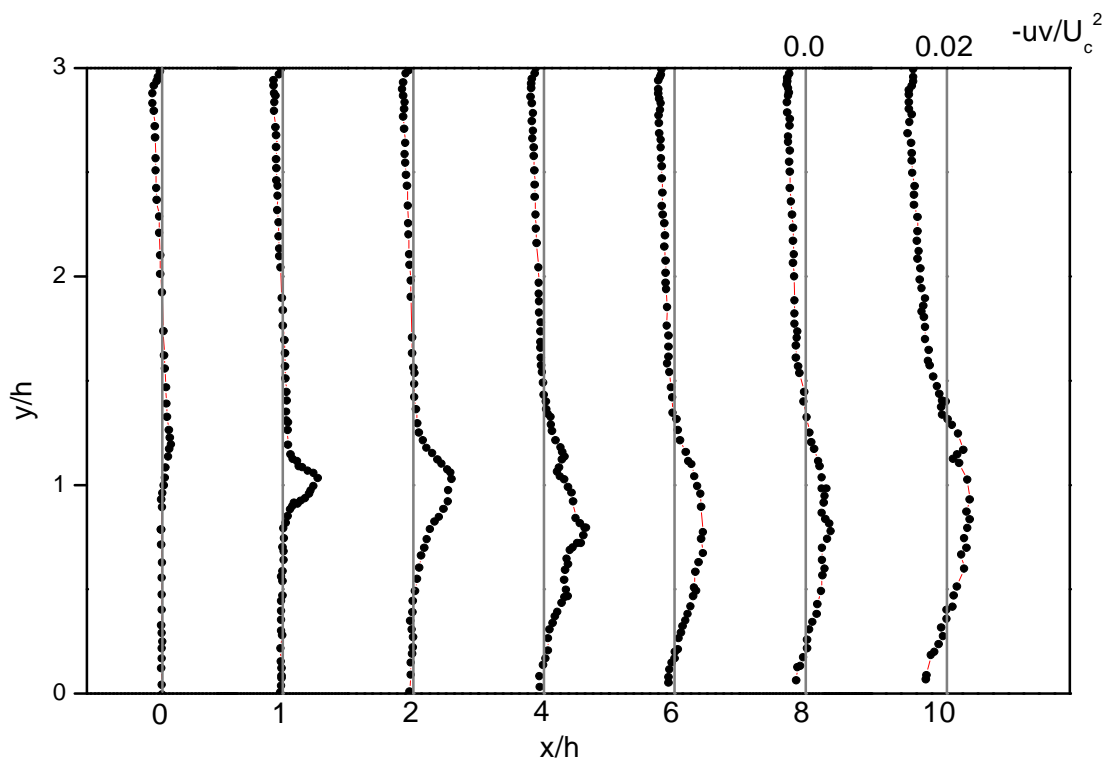
Σχήμα 6.4.: Αδιάστατες κατανομές της τυπικής απόκλισης της διαμήκουσ συνιστώσας της ταχύτητας, u_{rms}/U_c , σε διαφορετικούς σταθμούς μέτρησης κατά μήκος της ροής.



Σχήμα 6.5.: Αδιάστατες κατανομές της μέσης κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας, V/U_c , σε διαφορετικούς σταθμούς μέτρησης κατά μήκος της ροής.



Σχήμα 6.6.: Αδιάστατες κατανομές της τυπικής απόκλισης της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας, v_{rms}/U_c , σε διαφορετικούς σταθμούς μέτρησης κατά μήκος της ροής.



Σχήμα 6.7.: Αδιάστατες κατανομές των διατμητικών τάσεων, uv/U_c^2 , σε διαφορετικούς σταθμούς μέτρησης κατά μήκος της ροής.

6.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΡΟΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΗΜΑΤΟΣ

Η τεχνική LDA που μελετήθηκε και αναλύθηκε στα προηγούμενα Κεφάλαια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε για λήψη μετρήσεων σε ροή βήματος. Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε έχει την δυνατότητα να επιτρέπει την ταυτόχρονη μέτρηση του πεδίου ταχύτητας σε δυο διευθύνσεις, τη διαμήκη και την εγκάρσια (κατακόρυφη). Η γεωμετρία της βηματικής διαμόρφωσης, οι θέσεις μέτρησης, καθώς και οι ροϊκές συνθήκες του πειράματος απεικονίζονται στο Σχήμα 6.1.

Η εξέλιξη του προφίλ της οριζόντιας μέσης ταχύτητας απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Η αντιστροφή της ροής, που οφείλεται στην ανακυκλοφορία αμέσως μετά το βήμα, εμφανίζεται εντονότερα στις θέσεις $x/h=1, 2, 4$ και 6 . Ταυτόχρονα, το εγκάρσιο εύρος της ζώνης αρνητικής ταχύτητας συρρικνώνεται με την εξέλιξη της ροής και περιορίζεται όλο και περισσότερο στην περιοχή κοντά στο κάτω τοίχωμα.

Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται η εξέλιξη της εγκάρσιας μέσης ταχύτητας. Στις θέσεις $x/h=1$ και 2 εμφανίζεται έντονη η ανοδική κίνηση για $y/h \leq 1$. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περιοχή αυτή βρίσκεται το ανάντη τμήμα της ζώνης ανακυκλοφορίας η οποία έχει περιστροφή σύμφωνη με τους δείκτες του ωρολογίου (θετική στροβιλότητα). Στις επόμενες θέσεις μέτρησης ($x/h \geq 4$) η ροή κατευθύνεται προς τα κάτω σε όλο το εγκάρσιο εύρος του καναλιού λόγω της επίδρασης του κατάντη τμήματος της περιοχής ανακυκλοφορίας.

Η ταυτόχρονη μέτρηση της διαμήκουσ και της εγκάρσιας μέσης ταχύτητας που περιγράφηκε στα Σχήματα 6.2 και 6.3 επέτρεψε τον προσδιορισμό του διανύσματος της μέσης ταχύτητας σε κάθε θέση μέτρησης. Από τα διανύσματα της μέσης ταχύτητας προέκυψε η απεικόνιση των ροϊκών γραμμών σε όλο το εύρος των μετρήσεων. Οι ροϊκές γραμμές απεικονίζονται στο Σχήμα 6.4. Η φυσαλίδα ανακυκλοφορίας καταλαμβάνει την περιοχή $0 \leq x/h \leq 8$ και $0 \leq y/h \leq 1$.

Οι τυρβώδεις διακυμάνσεις της διαμήκουσ, της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας και της διατμητικής τάσης δείχνονται στα Σχήματα 6.5, 6.6 και 6.7 αντίστοιχα. Οι διαμήκεισ διακυμάνσεις είναι περισσότερο έντονες μέσα στη στροβιλιζόμενη περιοχή ανακυκλοφορίας και ιδιαίτερα στη μεθόριό της, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.4 και 6.5. Επίσης, όπως είναι φυσικό, είναι ιδιαίτερα υψηλές κοντά στο οριακό στρώμα του άνω τοιχώματος.

Παρόμοια εικόνα μεγιστοποίησης στη μεθόριο παρουσιάζουν και οι εγκάρσιες διακυμάνσεις καθώς και οι διατμητικές τάσεις. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7, η διάτμηση είναι ιδιαίτερα ισχυρή στο σύνορο της περιδινούμενης περιοχής, γεγονός αναμενόμενο, αλλά και στο πάνω μέρος της ροής, ιδιαίτερα στους τελευταίους σταθμούς μέτρησης. Αυτό οφείλεται στην ανομοιογένεια του μέσου πεδίου ταχύτητας στο μέρος της ροής πάνω από τη στροβιλιζόμενη ζώνη όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις του μέσου πεδίου του Σχήματος 6.2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσης πτυχιακής εργασίας αναλύονται στο Κεφάλαιο 5 όπου πραγματοποιήθηκε η οπτικοποίηση και στο Κεφάλαιο 6 όπου αναγράφονται οι συνθήκες των πειραματικών μετρήσεων και τα διαγράμματα που προέκυψαν από αυτές. Η πειραματική εργασία πραγματοποιήθηκε στην πειραματική συσκευή κανάλι και μελετήθηκε ροϊκή περίπτωση της απότομης αλλαγής της διατομής (σκαλοπάτι). Για την λήψη των απαραίτητων συνιστωσών της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε η μετρητική τεχνική LDA. Αποτέλεσμα όλων αυτών ήταν η εξοικείωση με την διαδικασία λήψης των μετρήσεων στην πειραματική ρευστομηχανική αλλά και η ικανότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων της παρούσας πειραματικής διαδικασίας με πειραματικές μελέτες που έχουν εκπονηθεί στο παρελθόν.

Κατά την πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες τροποποιήσεις του αέρα για την εισχώρηση του στον αγωγό και στην συνέχεια την απότομη διατομή του καναλιού. Για την κινηματογράφηση της ροής με οπτικά μέσα τροφοδοτήθηκαν σε αυτήν σωματίδια που ακολουθούν πιστά την ροή χωρίς να την επηρεάζουν λόγω του πολύ μικρού τους μεγέθους. Με την συγκέντρωση των σωματιδίων και την διάθλαση του φωτός πραγματοποιήθηκε οπτική παρακολούθηση και της εκτίμησης της ταχύτητας ροής.

Οι εικόνες του Κεφαλαίου 5 απεικονίζουν τα χαρακτηριστικά της ροής σε κάθε πεδίο. Η οπτική απεικόνιση της ροής σε κάθε περίπτωση προσαρμόστηκε στις ιδιότητες της ροής σε κάθε ζώνη από τις προαναφερόμενες. Αυτή ήταν και η μεγαλύτερη δυσκολία του πειράματος, το οποίο χρειάζεται να βελτιωθεί και να συστηματοποιηθεί στο μέλλον. Επίσης, ένα από τα βασικότερα προβλήματα ήταν η καταστροφή των δομών που δημιουργούνται κατά τη τροφοδοσία των σωματιδίων, οι οποίες παρεμβάλλονται ουσιαστικά στη ροή και κάνουν την αποτύπωση των μηχανισμών της ροής δύσκολη. Επιπλέον, η ροή θα πρέπει να ελέγχεται σε ακόμα χαμηλότερες ταχύτητες. Η μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων, που λόγω της ζώνης ανακυκλοφορίας μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με οπτική μέθοδο και δίνει την δυνατότητα ποσοτικοποιημένων αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο 6 πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις και η καταγραφή των συνθηκών ροής βήματος και θέσεις μέτρησης. Η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε κάτω από τις εξής ροϊκές παραμέτρους οι οποίες είναι α) η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας, β) η διαμήκη συνιστώσα της ταχύτητας και γ) τις διαιτητικές τάσεις, με αποτέλεσμα την δημιουργία διαγραμμάτων και την σύγκριση κάθε περίπτωσης.

Τέλος, τα πειρατικά αποτελέσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας για την οπτικοποίηση και την μετρητική τεχνική LDA είναι πανομοιότυπα με πειραματικές διαδικασίες που εκπονήθηκαν στο παρελθόν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βούρος Α., 2008, Διδακτορική Διατριβή, *Μελέτη Διατάξεων Σταδιακής Καύσης*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
2. Αρμυρίωτης Α., 2012, *Οπτική απεικόνιση ροών αέρα γύρω από σώματα*, Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, Αθήνα.
3. Ρωμαίος Α., 2012, *Μετρολογία ενεργειακών συστημάτων*, Τ.Ε.Ι δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.
4. Νανούσης Δ., 2003, *Ρευστομηχανική, Α' Τόμος* Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
5. Νανούσης Δ., 2003, *Ρευστομηχανική, Β' Τόμος* Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
6. Boree, J., Ben, L. & Bazile R., 2003, *Optical Methods for the Measurement of Constant and Variable Density Flows*, Intl Summerschool on Variable Density Turbulent Flows, Barcelona.
7. Panidis, Th. & Sommerfeld, M., 1996, *The Locus of Centres Method for LDA and PDA Measurements*, *Proceedings of the 8th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon.
8. Sommerfeld, M., 1994, *Application of Optical Non-Intrusive Measurement Techniques for Studies of Gas-Solid Flows*, LSTM, Erlangen.
9. Armaly B.F., Durst F., Pereira J.C.F., Schonung B., 1983, *Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow*, *Journal of Fluid Mechanics*.
10. Bayal O., Erbas N., Koklu M. ,2004, *Control of separated flow past a backward facing step in a microchannel*, *Microfluid/Nanofluid*.
11. Biswas G., Breuer M., Durst F., 2004, *Bacward-facing step flows for various expansion ratios at low and moderate Reynolds numbers*, *Journal of Fluids Engineering*.
12. Okada K., Fujii K., Miyaji K., 2009, *Computational study of the separated flow structure induced by the synthetic jet on a backward-facing step*, *10th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization*, Moscow, Russia
13. Eaton J.K., Johnston J.P., 1980, *Turbulent flow reattachment: an experimental study of the flow and structure behind a backward-facing step*, Report. Thermosciences Division, Dept. Mech. Eng., Stanford University, Stanford, CA, USA.

14. Kim J., Kline S.J., Johnston J.P., 1980, *Investigation of a reattaching turbulent shear layer flow over a backward-facing step. Journal of Fluids Engineering*, Transactions of the ASME.
15. http://www.iatrikionline.gr/IB_121/04.pdf
16. http://repository.edulll.gr/edulll/retrieve/4542/1296_01.pdf
17. <http://iek-tripol.ark.sch.gr/autosch/joomla15/images/simeioseis/Reynolds.pdf>
18. http://hydro.ntua.gr/faculty/stamou/gr/appl_hydr/fluid_mech_1.pdf
19. <http://el.wikipedia.org/wiki>