

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Μηχανολογών Μηχανικών Τομέας Ρεύστων

Εν φάσει μετρήσεις πεδίου ταχυτήτων εκλυόμενων δινών κυλίνδρου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΓΑΝΕΛΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ-ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής **Δημήτριος Μαθιουλάκης, Καθηγητής ΕΜΠ**

> Αθήνα Ιούλιος 2017

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε πειραματικά το πεδίο ροής στον ομόρρου ενός κυλίνδρου με την μέθοδο PIV (Particle Image Velocimetry) σε συνδυασμό με μετρήσεις πίεσης. Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένας κύλινδρος κατασκευασμένος από Plexiglas, διαμέτρου 60mm και ύψους 225mm. Οι μετρήσεις έγιναν σε αεροδυναμική σήραγγα ανοιχτού κυκλώματος για ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος U=4,83m/sec και αριθμό Reynolds 2x10⁴. Η έρευνα επικεντρώθηκε σε δύο περιοχές δηλαδή κοντά στο σημείο αποκόλλησης της ροής καθώς και στην περιοχή του ομόρρου του κυλίνδρου. Χρησιμοποιώντας το σήμα της πίεσης στην επιφάνεια του κυλίνδρου στη θέση 90⁰ από το σημείο ανακοπής, ελήφθησαν τα μέσα χρονικά πεδία ταχυτήτων σε έξι φάσεις του αρμονικά μεταβαλλόμενου στο χρόνο σήματος της πίεσης καταγράφοντας την εξέλιξη του φαινομένου της έκλυσης δινών από κύλινδρο.

Abstract

The present Diploma Thesis deals with the experimental investigation of the flow field around a stationary cylinder employing the 2D PIV (Particle Image Velocimetry) technique combined with pressure measurements using a pressure sensor. A Plexiglas cylinder was used with a 60mm diameter and a length of 225mm spanning the height of an open loop wind tunnel cross section. The free stream velocity was U=4,83m/sec and the Reynolds number $2x10^4$. Velocity measurements were taken in a region close to one of the two separation points as well as in the near wake of the cylinder. Using the filtered pressure signal, phase averaged velocity measurements were conducted at six phases of the harmonically varying in time pressure signal, showing the evolution of the vortex shedding phenomenon.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα πρέπει να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Δημήτριο Μαθιουλάκη για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ και να εμβαθύνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο Γκιόλα για την βοήθεια, την υποστήριξη και τις γνώσεις που μου προσέφερε και τον υποψήφιο διδάκτορα Καπίρη Παναγιώτη για την σχεδίαση και υλοποίηση του ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας του σήματος πίεσης και του αντίστοιχου λογισμικού. Οφείλω να ευχαριστήσω όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους και ιδιαίτερα την οικογένειά μου και την κοπέλα μου για την υλική και ψυχική υποστήριξη κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
----------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1⁰: Στοιχεία θεωρίας της ρευστομηχανικής	2
1.1 Ροή αέρα γύρω από κύλινδρο	2
1.2 Αστάθεια διατμητικού στρώματος	7
1.3 Ανάπτυξη δινών Von Karman	10
1.4 Κατανομή ταχύτητας και πίεσης στην επιφάνεια του κυλίνδρου	13
1.5 Αποκόλληση της ροής	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2⁰: Βιβλιογραφική ανασκόπηση	8
A combined direct numerical simulation–particle image velocimetry study of the turbulent near wake, Cambridge 2006	e 8
Characteristics of flow over a circular cylinder at Re=140,000, August 28-30,	
2013, Poitiers, France3	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3⁰: Διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα4	2
3.1 Πειραματική διάταξη4	2
3.1.1 Σύντομη περιγραφή της πειραματικής διάταξης4	3
3.1.2 Αεροδυναμική σήραγγα4	4
3.1.3 Συσκευή εκπομπής Laser4	6
3.1.4 Σύστημα καταγραφής/CCDCamera48	8
3.1.5 Τροφοδοτικό καπνού4	9
3.1.6 Αισθητήρας πίεσης-Arduino5	1
3.1.7 Spider8 HBM5	2
3.2 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε5	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4⁰: Πειραματικά αποτελέσματα54	4
4.1 Ανάλυση μετρήσεων πίεσης54	4
4.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων σήματος πίεσης-παλμού	6
4.3 Ανάλυση μετρήσεων ΡΙV6	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5⁰: Συμπεράσματα10	17
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 110	C

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ροή γύρω από έναν κύλινδρο αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα προβλήματα της ρευστομηχανικής. Κατά τη διάρκεια των ετών έχουν αφιερωθεί χιλιάδες εργαστηριακές ώρες και έχουν χρησιμοποιηθεί εκατοντάδες διατάξεις, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός έκλυσης δινών στον ομόρρου του κυλίνδρου. Τα συμπεράσματα που έχουν διατυπωθεί στην πορεία των ερευνών είναι αναρίθμητα, ωστόσο κανείς δεν μπορεί να δώσει απαντήσεις οι οποίες να καλύπτουν με ακρίβεια όλα τα ερωτήματα που προκύπτουν. Διαβάζοντας κάποιος τις προηγούμενες μελέτες που έχουν γίνει, μπορεί να διαπιστώσει πως υπάρχει ένα κενό. Οι περισσότερες έρευνες είτε πειραματικές είτε υπολογιστικές έχουν επικεντρωθεί στον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η ροή του ρευστού και τα υπόλοιπα μεγέθη με τον αριθμό Reynolds. Δύσκολα όμως, μπορεί να βρει κάποιος μια έρευνα γύρω από τον τρόπο που αλλάζει η ροή του ρευστού σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και να συνδυαστεί αυτό με την πίεση που ασκείται στιγμιαία στον κύλινδρο, κάτι που μπορεί να μας οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα για τις καταπονήσεις του σώματος.

Στην παρούσα εργασία επιχειρούμε με την χρήση της τεχνικής 2D PIV και ανάλυσης του σήματος της πίεσης μέσω αισθητήρα πίεσης, να μελετήσουμε τα παραπάνω.

Στο 1° Κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία θεωρίας της ρευστομηχανικής όσον αναφορά την ροή γύρω από κύλινδρο και κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις ερευνητών.

Στο 2° Κεφάλαιο δίνονται συνοπτικά στοιχεία από εργασίες διεθνούς βιβλιογραφίας, παρόμοιες με την παρούσα, που μπορούν να μας δώσουν περαιτέρω πληροφορίες για το αντικείμενο μελέτης.

Στο 3° Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και κάθε παραμέτρου της. Επιπλέον, γίνεται ανάλυση της μεθόδου PIV (Particle Image Velocimetry) που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων της ροής καθώς και της μεθόδου που χρησιμοποιήσαμε για να ταυτίσουμε το σήμα της πίεσης με συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Στο 4° Κεφάλαιο γίνεται παράθεση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τις μετρήσεις πίεσης και για τις μετρήσεις PIV.

Στο 5° Κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα των μετρήσεών συνδυαστικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1⁰:Στοιχεία θεωρίας της ρευστομηχανικής

1.1 Ροή αέρα γύρω από κύλινδρο

Η ροή αέρα γύρω από έναν κύλινδρο αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα μεταξύ διαφόρων τύπων ροής. Έχει μελετηθεί ευρέως λόγω του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει για πολλές εφαρμογές στην καθημερινότητα. Ωστόσο, παρά την απλή γεωμετρία του κυλίνδρου, η δομή της ροής είναι αρκετά περίπλοκη και συμπεριφέρεται διαφορετικά για διάφορους αριθμούς Reynolds. O Williamson (1996) έκανε μια ενδιαφέρουσα έρευνα σχετικά με τα φαινόμενα δυναμικής δίνης μετά από έναν κύλινδρο, με μεταβολή του αριθμού Reynolds. Λόγω της απλότητας του σχήματος του κυλίνδρου, που χαρακτηρίζεται μόνο από τον αριθμό Reynolds. Δογω της απλότητας του σχήματος του κυλίνδρο εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds βασισμένο πάνω στην ταχύτητα της εξωτερικής ροής U και τη διάμετρο D του κυλίνδρου: $Re = \frac{UD}{v}$. Η δομή της ροής πίσω από έναν κύλινδρο είναι συνδυασμός τριών σημαντικών περιοχών: του οριακού στρώματος, του στρώματος διάτμησης και του ομόρρου της ροής.

Για πολύ μικρές τιμές του αριθμού Re, περίπου ίσες με τη μονάδα, η ροή γύρω από τον κύλινδρο είναι συμμετρική, η πίεση στην πίσω πλευρά είναι περίπου ίση με αυτή μπροστά και κατά συνέπεια η αντίσταση του κυλίνδρου οφείλεται αποκλειστικά στην τριβή. Όσο ο αριθμός Re μεγαλώνει, αρχίζει να παρατηρείται αποκόλληση της ροής. Στην πίσω πλευρά του κυλίνδρου εμφανίζονται δύο συμμετρικές δίνες, οι οποίες παραμένουν προσκολλημένες στον κύλινδρο. Μέρος της αντίστασης οφείλεται τώρα στη διαφορά πίεσης ανάμεσα στις ανάντη και κατάντη πλευρές. Η ροή παραμένει μόνιμη μέχρι τον αριθμό Re περίπου 48, οπότε και γίνεται ασταθής και μετατρέπεται σε μη μόνιμη. Όταν συμβεί αυτό σχηματίζονται δίνες εναλλάξ στην πάνω και κάτω πλευρά του κυλίνδρου, οι οποίες εγκαταλείπουν τον κύλινδρο και μετακινούνται στον ομόρρου με ταχύτητα λίγο μικρότερη από αυτήν της εξωτερικής ροής. Παρατηρούνται έτσι πίσω από τον κύλινδρο δύο σειρές δινών, οι οποίες είναι γνωστές με το όνομα «Σειρές του Von Karman» (Karman vortex street). Ο σχηματισμός των δινών είναι ένα περιοδικό φαινόμενο με καλά καθορισμένη συχνότητα. Αν συμβολίζουμε με f τη συχνότητα σχηματισμού δινών (σε Hertz), η αδιάστατη ποσότητα S = fD / U (αριθμός Strouhal) είναι συνάρτηση του αριθμού Re. Για μια μεγάλη περιοχή αριθμών Reynolds από 10000 έως 100000 ο αριθμός Strouhal παραμένει σταθερός και περίπου ίσος με 0,2. Ο συντελεστής αντίστασης ,που οφείλεται κατά κύριο λόγο σε διαφορά πίεσης, επίσης παραμένει σταθερός σε αυτήν την περιοχή, περίπου 1.15. Στο Σχήμα 1.7 φαίνεται η διαμόρφωση της ροής γύρω από τον κύλινδρο για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds.



Σχήμα 1.1: Ροή ρευστού γύρω από έναν κύλινδρο ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds



Σχήμα 1.2: Αριθμός Strouhal συναρτήσει του αριθμού Reynolds

Ο Williamson σχηματοποίησε την όλη συμπεριφορά του κυλίνδρου σε 8 διαφορετικές περιοχές συστημάτων δινών. Όλα αυτά τα συστήματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3, όπου παριστάνεται γραφικά ο συντελεστής βάσης πίεσης (-Cpb,Cpb είναι ο συντελεστής βάσης πίεσης, δηλαδή η πίεση που μετράται στις 180° από το μετωπικό σημείο του κυλίνδρου) σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds.

- ΣΤΡΩΤΟ ΣΤΑΘΕΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Re<49)-(Πάνω από το A): Η ροή στον ομόρρου είναι συμμετρική και σταθερή και το μήκος της μεγαλώνει με την αύξηση του αριθμού Reynolds.
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΡΩΤΗΣ ΔΙΝΗΣ (Re = 49 έως 140 194) (A-B): Αυτό το σύστημα δείχνει την έναρξη της αστάθειας μετά με την ανάπτυξη ενός στρωτού συστήματος δινών και το μήκος της δίνης αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds.
- 3D ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΣΤΟΝ ΟΜΟΡΡΟΥ (Re = 190 έως 260) (B-C): Στον Re=180-194 παρατηρείται η γέννηση των βρόχων δίνης στον ομόρρου, οι οποίες αλλοιώνουν τις πρωτογενείς δίνες με ένα μήκος κύματος μεταξύ 3 και 4 διαμέτρων. Με την αύξηση του αριθμού Reynolds σε περίπου 250, παρατηρείται μια μετάβαση από την κατάσταση Α (βρόγχους δίνης) στην κατάσταση Β (ζεύγη δινών στην κατεύθυνση της ροής).
- ΑΥΞΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΚΛΙΜΑΚΑ (Re = 260 έως 10³) -(C-D): Στον Re=300 η πρωταρχική αστάθεια στον ομόρρου γίνεται παρόμοια με την στρωτή λειτουργία(Σχήμα 1.4), με εξαίρεση την παρουσία λεπτής κλίμακας δινών στην κατεύθυνση της ροής, των οποίων η τρισδιάστατη διαταραχή αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds.
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (Re =10³ έως 2·10⁵)-(D-E): Σε αυτό το σύστημα αναπτύσσεται η αστάθεια του διαχωριστικού διατμητικού στρώματος από τις πλευρές του κυλίνδρου (Σχήμα 1.4) και κατά την αύξηση του αριθμού Reynolds το σημείο μετάβασης στα διαχωριστικά στρώματα διάτμησης κινούνται ανάντη και το μήκος σχηματισμού μειώνεται.
- ΚΡΙΣΙΜΟ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ-(E-G): Σε αυτό το σύστημα ο συντελεστής βάσης πίεσης μειώνεται δραστικά και το οριακό στρώμα διαχωρίζεται πολύ περισσότερο προς τα κάτω. Στο σημείο F φαίνεται να ανασυγκολλείται μία φούσκα μόνο στην μία πλευρά του κυλίνδρου.
- ΥΠΕΡΚΡΙΣΙΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ-(G-H): Σε αυτό το σύστημα η ροή γίνεται συμμετρική.
- ΜΕΤΑ-ΚΡΙΣΙΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ-(Η-J): Σε αυτό το σύστημα το σημείο τυρβώδους μετάβασης μετακινείται ανάντη και ο ομόρους κατάντη γίνεται πλήρως τυρβώδης.



Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση του συντελεστή βάσης πίεσης σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds (Williamson 1996)



Σχήμα 1.4: Οπτικοποίηση της στρωτής και τυρβώδους ροής στον ομόρρου κυλίνδρου (Williamson 1996)

1.2 Αστάθεια διατμητικού στρώματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο σύστημα μετάβασης του διατμητικού στρώματος, αναπτύσσεται η αστάθεια του διατμητικού στρώματος όσο ο αριθμός Reynolds αυξάνεται.

Η αστάθεια του διατμητικού στρώματος προκαλεί την αύξηση του συντελεστή βάσης πίεσης και του αριθμού Strouhal, που ορίζεται ως:

 $St = rac{f_k D}{U_\infty}$, όπου f_k είναι η συχνότητα των von Karman δινών.

Επιπλέον, σύμφωνα με τον Bloor(1964), το σημείο έναρξης της τύρβης κινείται ανοδικά κατά την αύξηση του αριθμού Reynolds και φτάνει στο σημείο διαχωρισμού πάνω στον κύλινδρο στον κρίσιμο αριθμό Reynolds ($3 \cdot 10^5$). Οι Schiller και Linke (1933) βρήκαν ότι η κανονικοποιημένη απόσταση μεταξύ του σημείου αποκόλλησης και του σημείου μετάβασης μειώνεται από 1.4 έως 0.7 με την αύξηση του αριθμού Reynolds από $3.5 \cdot 10^3$ έως $8.5 \cdot 10^3$. Πιο πρόσφατα, ο Saad (2007) βρήκε μια σχέση που συνδέει την αδιάστατη θέση του σημείου μετάβασης με τον αριθμό Reynolds:

$$\frac{x_c}{D} = 182.5 \ Re^{-0.664}$$

Σύμφωνα με τον Williamson (1996), η Kelvin-Helmholtz αστάθεια του στρώματος διάτμησης είναι δύο διαστάσεων, ενώ αναπτύσσονται τρισδιάστατες δομές τόσο μικρής κλίμακας (διατμητικό στρώμα), όσο και μεγάλης (von Karman δίνες). Οι μικρής κλίμακας στροβιλοειδείς δομές είναι επίσης γνωστές στην βιβλιογραφία και ως Bloor-Gerrard δίνες.

Παρά το γεγονός ότι η γέννηση των δινών του διατμητικού στρώματος ήταν ήδη γνωστή, ο Bloor(1964) ήταν ο πρώτος που μέτρησε την συχνότητα των κυμάτων αστάθειας του διατμητικού στρώματος. Βρήκε με την μέθοδο του θερμού νήματος ότι ο λόγος μεταξύ της συχνότητας του διατμητικού στρώματος και της συχνότητας της μίας von Karman δίνης είναι ανάλογη με το $Re^{1/2}$ για Re>3 · 10³. Ο Bloor (1964) αιτιολόγησε αυτήν την σχέση υποστηρίζοντας πως η συχνότητα μετάβασης f_{sl} θα πρέπει να είναι ανάλογη με την ταχύτητα κοντά στο σημείο αποκόλλησης U_{SEP} διαιρούμενο με το στιγμιαίο πάχος του διατμητικού στρώματος $θ_{SL}$ έτσι ώστε:

$$\theta_{SL} = \left(\frac{\nu D}{U_{\infty}}\right)^{1/2}$$

Εφόσον ο συντελεστής βάσης πίεσης είναι σχεδόν σταθερός για τον συγκεκριμένο αριθμό Reynolds, η ταχύτητα κοντά στο σημείο αποκόλλησης θα είναι:

$$U_{sep} = U_{\infty}(1 - C_{PB})^{1/2} = const$$

Άρα,

$$f_{SL} = \frac{U_{SEP}}{\Theta_{sl}} = \frac{U_{\infty}^{3/2}}{(vD)^{1/2}}$$

Δεδομένου ότι για όλους τους αριθμούς Reynolds, ο αριθμός Strouhal είναι σχεδόν σταθερός και ορίζοντας ως f_K την συχνότητα των von Karman δινών έχουμε ότι:

$$f_K = \frac{U_\infty}{D}$$

και

$$\frac{f_{SL}}{f_K} = \frac{U_{\infty}^{3/2}}{(vD)^{1/2}} \frac{D}{U_{\infty}} = Re^{1/2}$$

Μετά την Bloor (1964), οι Wei και Smith (1986), χρησιμοποιώντας μια μέθοδο υπολογισμού δινών και με οπτικοποίηση της ροής βρήκαν ότι:

$$\frac{f_{SL}}{f_K} = 0.0047 \ Re^{0.87}$$

Πιο πρόσφατα, οι Thompson και Hourigan (2005) ερμήνευσαν εκ νέου όλα αυτά τα αποτελέσματα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ερμηνεία του φαινομένου που προτείνεται από την Bloor είναι η πιο αξιόπιστη. Την ίδια χρονιά, οι Rajagopalan και Antonia (2005) μέτρησαν τις συχνότητες και σύγκριναν τις τιμές τους με την υπόλοιπη βιβλιογραφία (Σχήμα 1.5). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη εφαρμογή σε όλα τα δεδομένα δίνει έναν εκθέτη ίσο με 0.65.



Σχήμα 1.5: Διακύμανση του f_{SL}/f_K με τον αριθμό Reynolds (Rajagopalan και Antonia 2005)

Εν κατακλείδι, σύμφωνα με τον Norberg (1994), η διακύμανση της συχνότητας διατμητικού στρώματος δεν μπορεί να εκπροσωπηθεί από μία ενιαία σχέση. Παρατήρησε ότι η εξάρτηση του Re από το f_{SL}/f_K μπορεί να χωριστεί σε σειρές, μία με έναν μεγαλύτερο εκθέτη για Re<5 · 10³ και μια με μικρότερο εκθέτη για 5 · 10³ < $Re < 10^5$.

Σύμφωνα με τον Williamson (1996), το μήκος κύματος των δινών του διατμητικού στρώματος (στην κατεύθυνση της ροής) δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\lambda_{SL}}{D} = \frac{37}{Re^{1/2}}$$

Η οποία αν συνδυαστεί με το:

$$rac{L_f}{D}=2$$
 , δίνει $\lambda_{SL} < L_f$,για Re>360

Προφανώς, για να δούμε την αστάθεια στον ομόρρου, δεν αρκεί ότι το μήκος κύματος λ_{SL} θα πρέπει να είναι μικρότερο από το μήκος δίνης L_f . Γι αυτόν τον λόγο, ο Roshko (1993) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι δίνες του διατμητικού στρώματος είναι ανιχνεύσιμες για Re>1.2 · 10³. Στο σχήμα 1.4, η συγχώνευση των δινών του διατμητικού στρώματος με τις von Kàrmàn φαίνεται για $Re = 4 \cdot 10^3$. Μία παρόμοια ερμηνεία δίνεται στην οπτικοποίηση της ροής του Lin (1995). Στο Σχήμα 1.6 μπορεί να φανεί ότι κοντά στο σημείο που βρίσκεται στις 180° από το μπροστινό σημείο το μοτίβο είναι ασαφές ειδικά σε Re=5 · 10³. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από τις δίνες Bloor-Gerrard στο διαχωριστικό στρώμα διάτμησης. Για Re=10⁴ και ακόμα περισσότερο για Re=5·10³ οι μικρής κλίμακας δίνες εντάσσονται στο πλαίσιο των δινών μεγάλης κλίμακας, δηλαδή αυτών που είναι αρκετά καλά αναγνωρίσιμες.



Σχήμα 1.6: Στιγμιαίο μοτίβο ροής (Lin 1995)

Στο σχήμα 1.7 φαίνονται τα στιγμιαία μοτίβα στροβιλισμού στον ομόρου για Re=5·10³ και για Re=10⁴. Το σχήμα 1.7-α δείχνει το κυρίως μοτίβο για Re=5·10³. Υπάρχουν μικρής κλίμακας δίνες οι οποίες συγχωνεύονται σε δύο σαφώς καθορισμένες von Kàrmàn δίνες (στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου) και ένα σύστημα διατμητικού στρώματος. Το σχήμα 1.7-b αναφέρεται στον ίδιο αριθμό Reynolds, αλλά σε αυτήν την περίπτωση το μοτίβο του ομόρου είναι σχεδόν συμμετρικό.

Σύμφωνα με τον Lin (1995), αυτό σημαίνει ότι το περιοδικό φαινόμενο της έκλυσης (shedding) δίνης περιστασιακά διακόπτεται, από την παραγωγή ενός ημί-συμμετρικού μοτίβου. Στον Re=10⁴ υπάρχει ένα κύριο μοτίβο (Σχήμα 1.7-c) της έκλυσης δίνης που επίσης διακόπτεται περιστασιακά από ένα συμμετρικό (Σχήμα 1.7-d). Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ των μοτίβων σε σχέση με τους δύο αριθμούς Reynolds είναι ότι, για τον υψηλότερο Re υπάρχουν καλά σχηματισμένες δίνες μικρής κλίμακας πιο κοντά στο σημείο αποκόλλησης του διατμητικού στρώματος. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως οι παράμετροι, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην διάχυση δινών Lf.



b

Re=5.10³





Σχήμα 1.7: Στιγμιαίο μοτίβο των δομών του ομόρου που φαίνεται η σταθερή θετική (γκρι) και αρνητική (λευκό) στροβιλότητα (Lin 1995).

1.3 Ανάπτυξη δινών Von Karman

To 1912 ο von Kàrmàn ερμήνευσε τις ταλαντώσεις του ομόρου ενός κυλίνδρου ως ένα εγγενές φαινόμενο και για να υποστηρίξει αυτήν την άποψη μελέτησε την σταθερότητα των σειρών-δινών. Βρήκε πως δύο σειρές αντίθετων δινών είναι ασταθείς τόσο σε συμμετρικό όσο και σε ασύμμετρο σχηματισμό εκτός από μια συγκεκριμένη ασύμμετρη γεωμετρία. Δεδομένου ότι η πειραματική διαμόρφωση που λαμβάνεται στον ομόρρου κυλίνδρου είναι παρόμοια με εκείνη που λάμβανε ο von Kàrmàn, η ανάλυσή του είχε μεγάλη επιτυχία. Ωστόσο, η ανάλυσή του απέδειξε μόνο την σταθερότητα σειράς δινών με μη πεπερασμένα χαρακτηριστικά και δεν είναι πλήρως κατανοητή το πώς σχετίζεται με ένα πλατύ σώμα. Με άλλα λόγια, η ανάλυση

αυτή δεν μπορεί να εξηγήσει πως η ροή γύρω από ένα πλατύ σώμα μπορεί να δημιουργήσει σειρές δινών αλλά διαβεβαιώνει πως αν αναπτύσσεται μια τέτοια ροή μπορεί να είναι σταθερή και ορατή σε μεγάλη απόσταση κατάντη.

Κάποιες δεκαετίες αργότερα υπήρξε μια πιο περιγραφική κατανόηση της ανάπτυξης δινών. Ο Gerrard (1966) υποστήριξε πως μια αναπτυσσόμενη δίνη σέρνει το αντίθετο διατμητικό στρώμα από την άλλη πλευρά του ομόρρου και τελικά διακόπτει την παροχή στροβιλισμού στην αναπτυσσόμενη δίνη. Ο Perry (1982) ερμήνευσε την διαδικασία σχηματισμού δίνης από την άποψη των στιγμιαίων γραμμών ροής (Σχήμα 1.8): αρχικά ο ομόρρους κυλίνδρου είναι συμμετρικός, όταν ο ομόρρους αρχίζει την διάχυση ανοίγεται μια τρύπα και το ρευστό κινείται για να γεμίσει αυτήν την τρύπα. Σύμφωνα με το Σχήμα 1.8 η δίνη Α αυξάνεται ακολουθώντας τις διαμορφώσεις από (a) έως (d) μέχρι να αποκτήσει μια μορφή S στο (e). Αυτό το σημείο είναι το αποτέλεσμα της αποσύνδεσης μιας δίνης από τον κύλινδρο και έτσι γεννιέται ο σχηματισμός μιας νέας δίνης (αριστερόστροφα στο (e) στην χαμηλή πλευρά του κυλίνδρου).



Σχήμα 1.8: Μοντέλο διάχυσης δινών με την χρήση στιγμιαίων γραμμών ροής (Perry 1982)

Ο Chyu (1995) απέδειξε, πως ενισχύοντας τις δίνες μικρής κλίμακας με εξωτερική διέγερση, η ανάπτυξη των von Kàrmàn δινών επιταχύνεται από αυτές τις μικρής

κλίμακας, δηλαδή το μήκος σχηματισμού δίνης Lf μειώνεται. Κατά συνέπεια οι δύο παράμετροι που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της έκλυσης δίνης, είναι το μήκος διάχυσης διατμητικού στρώματος και το μήκος σχηματισμού δινών. (Ld και Lf αντίστοιχα, Σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9:Κανονικοποιημένο μήκος διάχυσης διατμητικού στρώματος (a) και μήκος σχηματισμού δινών (b) ως συνάρτηση του Re (Saad 2007).



Σχήμα 1.10: Αριθμός Strouhal ως συνάρτηση του Re (Saad 2007).

Σύμφωνα με τον Gerrard (1966) και τον Saad (2007), η αύξηση του Ld/D οφείλεται στο γεγονός με την αύξηση του Re το σημείο μετάβασης κινείται ανάντη στο στρώμα διάτμησης και κατά συνέπεια το τυρβώδες μήκος του στρώματος διάτμησης

αυξάνεται. Αυτό έχει ως συνέπεια, να συμπαρασύρεται από το διατμητικό στρώμα περισσότερο ρευστό, κάνοντάς το πιο παχύ. Το φαινόμενο αυτό καθυστερεί την έκλυση δίνης καθώς χρειάζεται να επιτευχθεί επαρκής συγκέντρωση στροβιλότητας. Επίσης, όπως ο Re αυξάνεται, το Lf μειώνεται και κατά συνέπεια, η αλληλεπίδραση των δύο διατμητικών στρωμάτων διευκολύνεται καθώς έρχονται πιο κοντά μεταξύ τους. Έτσι η μείωση του Lf τείνει να μειώσει τον περιοδικό χρόνο σχηματισμού δινών. Ως αποτέλεσμα αυτών, οι ενέργειες των δύο μηκών (Ld και Lf) είναι αντίθετες, παράγοντας έναν σχεδόν σταθερό αριθμό Strouhal (Σχήμα 1.10) για ένα ευρύ φάσμα αριθμών Re.

1.4 <u>Κατανομή ταχύτητας και πίεσης στην επιφάνεια του</u> κυλίνδρου

Προκειμένου να μελετήσουμε τη ροή ενός μη συνεκτικού ρευστού γύρω από έναν κύλινδρο, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της επαλληλίας. Στο σχήμα 1.10 φαίνεται η κατανομή των γραμμών ροής γύρω από το σώμα του κυλίνδρου:



Σχήμα 1.10: Κατανομή γραμμών ροής γύρω από κύλινδρο

Η κατανομή της ταχύτητας αποτελεί συνάρτηση της γωνίας θ και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{\theta} = 2Usin\theta$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι κατά την μετακίνησή μας πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου η ταχύτητα της ροής μεταβάλλεται συνεχώς και είναι μεγίστη για: $\vartheta = \pm \pi/2$. Η κατανομή της στατικής πίεσης πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου βρίσκεται γράφοντας την εξίσωση Bernoulli για ένα σημείο που βρίσκεται πολύ μακριά από τον κύλινδρο, όπου επικρατούν συνθήκες αδιατάρακτης ροής, και ένα σημείο πάνω

στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Αμελώντας τους όρους που έχουν σχέση με τις υψομετρικές διαφορές καταλήγω στην παρακάτω σχέση:

$$p + \frac{1}{2} \rho U^2 = p_s + \frac{1}{2} \rho v_{\theta \varepsilon}{}^2$$

,όπου η θέση του σημείου πάνω στον κύλινδρο ορίζεται από τη γωνία θ. Συνεπώς, εφόσον γνωρίζουμε την κατανομή της ταχύτητας συναρτήσει της γωνίας υπολογίζουμε την κατανομή της στατικής πίεσης πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου: $n - n + \frac{1}{2} (1 - 4sin^2 \theta)$

$$p_s = p + \frac{1}{2} \rho U^2 (1 - 4sin^2\theta)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η θεωρητική κατανομή της στατικής πίεσης είναι συμμετρικής μορφής. Η ελάχιστη τιμή της παραπάνω κατανομής είναι για: $\vartheta = \pm \pi/2$.

Η κατανομή της στατικής πίεσης πάνω στον κύλινδρο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 1.11: Κατανομή στατικής πίεσης στην επιφάνεια κυλίνδρου

Από το παραπάνω διάγραμμα βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Μόνο στην περιοχή της εισερχόμενης ροής η πειραματική καμπύλη της στατικής πίεσης πλησιάζει τη θεωρητική.
- Στην περιοχή της απερχόμενης ροής οι δύο καμπύλες αποκλίνουν σημαντικά και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση συνεκτικού ρευστού, η πίεση στην περιοχή -π/2 < θ < + π/2 συνεχώς αυξάνει και εμποδίζει το ρευστό να μείνει προσκολλημένο πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, από κάποιο σημείο και μετά να έχουμε αποκόλληση της ροής και σχηματισμό στροβιλισμών(δίνες).

1.5 Αποκόλληση της ροής

Όταν η ροή αναπτύσσεται υπό ορισμένες συνθήκες (σε καμπύλο στερεό τοίχωμα ή σε τοίχωμα με προεξοχές) δέχεται την επίδραση εξωτερικής κλίσης πίεσης. Η κλίση της πίεσης μπορεί να είναι αρνητική ή θετική. Η αρνητική κλίση πίεσης είναι «ευνοϊκή» γιατί προκαλεί δυνάμεις με κατεύθυνση παράλληλη προς το τοίχωμα που βοηθούν τα σωματίδια του ρευστού να υπερνικήσουν την τριβή στο τοίχωμα και κατά συνέπεια η ελεύθερη ροή επιταχύνεται. Η θετική κλίση πίεσης, αντίθετα, είναι «δυσμενής», γιατί προκαλεί δυνάμεις σε κατεύθυνση παράλληλη προς το τοίχωμα που αντιτίθενται στην κίνηση των σωματιδίων του ρευστού και ως αποτέλεσμα η ροή επιβραδύνεται.



Σχήμα 1.12: Κατανομή της ταχύτητας u (δεξιά) και της παραγώγου της (αριστερά) κατά μήκος του οριακού στρώματος, για θετική (πράσινο) και αρνητική (κόκκινο) κλίση πίεσης.

Η επιβράδυνση αυτή προκαλεί συνεχή μείωση της συνιστώσας της ταχύτητας που είναι παράλληλη προς το τοίχωμα. Όταν αυτή μειωθεί αρκετά σε σχέση με την ταχύτητα που είναι κάθετη στο τοίχωμα, τότε προκαλείται ανοδική κίνηση (προς την ελεύθερη ροή) στα σωματίδια που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αποκόλληση οριακού στρώματος (flow separation) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.13(β,γ)



Σχήμα 1.13: Συμπεριφορά της ροής γύρω από έναν κύλινδρο καθώς αυξάνει ο αριθμός Reynolds

Για αριθμούς Reynolds μικρότερους του 1 το μέρος της ροής όπου οι επιδράσεις συνεκτικότητας είναι σημαντικές είναι μεγάλο (μήκος αρκετών διαμέτρων πριν και μετά τον κύλινδρο). Καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνει, η περιοχή μπροστά από τον κύλινδρο όπου έχουμε συνεκτικές επιδράσεις μειώνεται πολύ (Σχήμα 1.13β).Στο ίδιο σχήμα διακρίνουμε και το σημείο αποκόλλησης (separation location),όπου οι δυνάμεις αδράνειας είναι πολύ μεγάλες και τα σωματίδια δεν μπορούν να ακολουθήσουν την επιφάνεια του κυλίνδρο, όπου τα σωματίδια του ρευστού κινούνται αρχικά αντίθετα προς τη φορά της ροής και στη συνέχεια περιφερειακά μέσα σ' αυτήν την περιοχή (separation bubble). Τέλος, για ακόμη μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds,(Σχήμα 1.13γ) η περιοχή συνεκτικών επιδράσεων περιορίζεται ουσιαστικά στην περιοχή μετά τον κύλινδρο ενώ μόνον μία λεπτή περιοχή, η περιοχή του οριακού στρώματος δ<< D, έχει να κάνει με τριβή πάνω στον κύλινδρο.

Στο σχήμα 1.14 παρουσιάζεται αναλυτικά ο μηχανισμός αποκόλλησης κατά τη ροή ενός σωματιδίου στην επιφάνεια του κυλίνδρου:



Σχήμα 1.14: Μηχανισμός αποκόλλησης της ροής στην επιφάνεια κυλίνδρου.

Ένα σωματίδιο του ρευστού καθώς κινείται μέσα στην περιοχή του οριακού στρώματος ξεκινώντας από το σημείο Α προς το σημείο F δέχεται την ίδια κατανομή πίεσης με τα σωματίδια που βρίσκονται στα όρια του οριακού στρώματος, δηλαδή την κατανομή πίεσης μη συνεκτικής ροής. Ωστόσο, λόγω της τριβής στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του κυλίνδρου, το σωματίδιο του ρευστού που κινείται μέσα στο οριακό στρώμα χάνει ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας. Αυτή η απώλεια κινητικής ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα το σωματίδιο του ρευστού να μην έχει αρκετή ενέργεια για να υπερβεί την συνεχώς αυξανόμενη στατική πίεση από το σημείο C μέχρι το σημείο F. Το έλλειμμα αυτό κινητικής ενέργειας φαίνεται με σαφήνεια στο προφίλ ταχύτητας του σημείο C. Έτσι το σωματίδιο του ρευστού δεν είναι σε θέση να κινηθεί μέχρι το σημείο F. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι να έχουμε αποκόλληση (separation) του ρευστού από την επιφάνεια του κυλίνδρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2⁰: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 S. DONG, G. E. KARNIADAKIS, A. EKMEKCI, D. ROCKWELL.

A combined direct numerical simulation–particle image velocimetry study of the turbulent near wake, Cambridge 2006.

Μία συνδυαστική αριθμητική προσομοίωση και μέτρηση με PIV της τύρβης στον ομόρου.

Ερευνάται ο ομόρους ενός κυλίνδρου σε τιμές του αριθμού Reynolds που αντιστοιχούν στην έναρξη και ανάπτυξη των ασταθειών διατμητικών στρωμάτων. Με το συνδυασμό ποσοτικής πειραματικής απεικόνισης και άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης σε Re = 3900/4000 και 10 000, αποδεικνύεται ότι η διάρθρωση της ροής είναι κυρίως μεταβλητή. Στον υψηλότερο αριθμό Reynolds, τα μήκη της φούσκας στον ομόρου και του διαχωριστικού διατμητικού στρώματος μειώνονται σημαντικά. Αντίστοιχα τα πρότυπα διακύμανσης της ταχύτητας και της έντασης του Reynolds συστέλλονται προς τη βάση του κυλίνδρου. Οι αυξημένες τιμές της έντασης του Reynolds στις ανάντη θέσεις στην διαχωρισμένη στιβάδα δείχνει νωρίτερη έναρξη της μετάβασης σε διατμητικό στρώμα. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνδέονται στενά με τις λεπτομέρειες της αστάθειας διατμητικού στρώματος, το οποίο οδηγεί σε δίνες μικρής κλίμακας. Οι προσομοιώσεις των δινών διατμητικού στρώματος χαρακτηρίζονται από μια ευρυζωνική αιχμή σε Re = 3900 και μια ευρυζωνική υψηλής φασματικής πυκνότητας με ακρότατο σε Re = 10 000 στα φάσματα ισχύος.

Στο Re = 10 000, φαίνονται συγκεντρώσεις μικρής κλίμακας του στροβιλισμού στο στρώμα διάτμησης λίγο μετά το διαχωρισμό και, αντίστοιχα, η μεγάλης κλίμακας Kàrmàn δίνες σχηματίζονται κοντά στη βάση του κυλίνδρου. Αυτή η κατάσταση του στρώματος διάτμησης έρχεται σε αντίθεση με τη δομή σε σημαντικά χαμηλότερες τιμές του Reynolds, για την οποία λαμβάνει χώρα η έναρξη της πρώτης συγκέντρωσης μικρής κλίμακας του στροβιλισμού κατάντη του διαχωρισμού. Με βάση τις πειραματικές έρευνες προηγούμενων αναλυτών, τα πρότυπα σε Re = 4000 και 10000 είναι αντιπροσωπευτικά του φαινομένου μετάβασης στις διαχωριστικές συγκρίσεις της παρούσας έρευνας.

Στο σχήμα 2.1 συγκρίνεται η κανονικοποιημένη από άκρο σε άκρο στροβιλότητα $\frac{\overline{\omega}_z D}{U_0}$

μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης. Έχουμε σχεδιάσει περιγράμματα στροβιλότητας σε Re = 4000 για PIV και σε Re = 3900 για DNS στα ίδια επίπεδα περιγράμματα. Το οπτικό πεδίο της ροής σε αυτό και τα επόμενα περιγράμματα είναι επίσης το ίδιο στο πείραμα και στην προσομοίωση, με 0.148 <x / D <2.053 και -0.968 <y / D <0,976 για Re = 3900/4000, και 0.148 <x / D <2.053 και -0.978 <y / D <0,966 για Re = 10 000. Το μοντέλο του μέσου στροβιλισμού από την προσομοίωση και το πείραμα είναι παρόμοια. Οι κατανομές στροβιλότητας παρουσιάζουν απουσία σημαντικών επιπέδων στροβιλισμού μέσα στην κυλινδρική βάση σε αυτόν τον αριθμό Reynolds, ένα χαρακτηριστικό που παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Lin (1995).Επιπλέον, οι δύο στιβάδες διάτμησης εκτείνονται από το κέντρο του κυλίνδρου στα 1.65Dκαι 1.74D, αντίστοιχα, στην προσομοίωση και το πείραμα.



Σχήμα 2.1: Περίγραμμα της κανονικοποιημένης από άκρο σε άκρο στροβιλότητας (a) PIV σε Re = 4000 (b) DNS σε Re = 3900. Και στις δύο περιπτώσεις $\left|\frac{\overline{\omega}_z D}{U_0}\right| = 2.58$ και $\left|\Delta \frac{\overline{\omega}_z D}{U_0}\right| = 0.64.$



Σχήμα 2.2: Περίγραμμα της κανονικοποιημένης από άκρο σε άκρο στροβιλότητας σε Re =10000 (a) PIV (b) DNS. Και στις δύο περιπτώσεις $\left|\frac{\overline{\omega}_z D}{U_0}\right| = 1.61$ και $\left|\Delta \frac{\overline{\omega}_z D}{U_0}\right| = 0.32$.

Για την σύγκριση με Re = 3900/4000, στο σχήμα 2.2 σχεδιάζουμε τα περιγράμματα της κανονικοποιημένης από άκρο σε άκρο στροβιλότητας σε αριθμό Reynolds Re = 10 000 από το πείραμα και την προσομοίωση. Τα πειραματικά και DNS αποτελέσματα πάλι απεικονίζονται με το ίδιο περίγραμμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια πρότυπα κατανομής στροβιλότητας και πάλι παρατηρήθηκαν τόσο πειραματικά όσο και για την προσομοίωση. Το DNS εμφανίζει αξιοσημείωτα επίπεδα στροβιλισμού στην περιοχή της επιφάνειας του κυλίνδρου πάνω και κάτω από τη βάση του κυλίνδρου στο Re = 10 000, ένα χαρακτηριστικό που δεν είναι ανιχνεύσιμο στο πειραματικό αποτέλεσμα. Υποψιαζόμαστε ότι η απουσία αυτή οφείλεται στην περιορισμένη ανάλυση του PIV στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Στο Re = 10 000 το στρώμα διάτμησης είναι σημαντικά μικρότερο από ό, τι στο Re = 3900/4000, που εκτείνεται προς τα κάτω του κέντρου του κυλίνδρου σε απόσταση 1.29D και 1.35D, αντίστοιχα, για την προσομοίωση και το πείραμα. Από την άλλη πλευρά, το άκρο του κατά μέσου όρου στρώματος στροβιλισμού είναι σημαντικά παχύτερο από ότι στη Re = 3900/4000. Δηλαδή, αυτό διογκώνεται προς τα μέσα προς το άξονα. Οι διαφορές στη δομή στροβιλότητας που παρουσιάζονται εδώ μεταξύ Re = 3900/4000 και 10 000 είναι σύμφωνο με τις προηγούμενες παρατηρήσεις, οι οποίες δείχνουν ότι η περιοχή μετάβασης στις von Kàrmàn δίνες, κινείται προς τον κύλινδρο με αύξηση του αριθμού Reynolds (Linke 1931, Bloor 1964 Wei & Smith 1986, Kourta 1987, Unal & Rockwell 1988, Lin 1995, Prasad & Williamson 1997, Noca 1998, Norberg 1998).

Στο σχήμα 3, σχεδιάζουμε το περίγραμμα της κανονικοποιημένης έντασης Reynolds $\frac{\langle u'v' \rangle}{U_0^2}$ σε Re = 3900/4000, όπου u' και v' η ταχύτητα στην κατεύθυνση της ροής και η ταχύτητα της εγκάρσιας ροής, αντίστοιχα. Τέσσερις διαφορετικές «λοβοί» είναι εμφανείς και στα δύο σχέδια, δύο μικρές συστάδες στο μπροστινό μέρος και δύο μεγάλες περαιτέρω προς τα κάτω. Αυτοί είναι αντι-συμμετρικοί ως προς τον κεντρικό άξονα. Η ένταση Reynolds παρουσιάζει μια απουσία σημαντικών επιπέδων στην περιοχή βάσης και στο στρώμα διάτμησης κοντά στον κύλινδρο, αναφέροντας είτε μικρά μεγέθη των διακυμάνσεων και / ή την έλλειψη σημαντικής συσχέτισης των

διακυμάνσεων στον ομόρου του κυλίνδρου μεταξύ της κατεύθυνσης και εγκάρσιας ροής. Οι θέσεις των κυρίαρχων κορυφών Reynolds είναι σε x / D = 1,90 και 2,05, αντίστοιχα, για την προσομοίωση και το πείραμα. Αυτές οι κυρίαρχες κορυφές της κατανομής έντασης Reynolds έχουν επίπεδα 0,14 και 0,11, αντίστοιχα, για προσομοίωση και πείραμα. Σημειώστε, ωστόσο, ότι οι «ουρές» των προτύπων Reynolds, οι οποίες εκτείνονται προς τα ανάντη, είναι μεγαλύτερες για την προσομοίωση απ ό, τι για το πείραμα. Αυτές οι ουρές συμπίπτουν με τις περιοχές από το άκρο των στρωμάτων διάτμησης (βλέπε σχήμα 2.1), και τα αξιοσημείωτα επίπεδα έντασης Reynolds σε αυτές τις περιοχές προκύπτουν από την αστάθεια διατμητικού στρώματος και την κυλιόμενη κίνηση των δινών διάτμησης στρωμάτων. Η «ουρά» σε προσομοιώσεις μπορεί να είναι αποτέλεσμα νωρίτερης έναρξης της μετάβασης.



Σχήμα2.3: Περιγράμματα της κανονικοποιημένης έντασης Reynolds: (a) PIV σε Re=4000 (b) DNS σε Re=3900. Και στις δύο περιπτώσεις $\left|\frac{\langle u'v' \rangle}{U_0^2}\right|_{min} = 0.03$ και $\left|\frac{\Delta \langle u'v' \rangle}{U_0^2}\right| = 0.01.$

Το σχήμα 2.4 δείχνει την σύγκριση της κανονικοποιημένης έντασης Reynolds για Re = 10 000 σε πείραμα και προσομοίωση. Η συνολική μορφή αυτών των μοντέλων είναι παρόμοια με αυτά για Re = 3900/4000 που δίνονται στο Σχήμα 2.3. Συστάδες με χαμηλό επίπεδο έντασης Reynolds και πάλι παρατηρήθηκαν σε θέσεις ανάντη των κυρίαρχων ομάδων. Ωστόσο, ολόκληρο το μοτίβο της έντασης Reynolds έχει μετακινηθεί μια σημαντική απόσταση ανάντη, σε σχέση με τα πρότυπα σε Re =

3900/4000. Η θέση της κορυφής έντασης Reynolds είναι τώρα στο x / D = 1.4, έχει επίπεδα 0,15 και 0,14, αντίστοιχα, για την προσομοίωση και το πείραμα. Επιπλέον, τα μικρής κλίμακας συμπλέγματα έντασης Reynolds βρίσκονται αμέσως κατάντη της βάσης του κυλίνδρου. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι ανάντη προεκτάσεις της μεγάλης κλίμακας συστάδας, κατά μήκος της θέσεως της διαχωριστικής στρώσης διάτμησης προς το σημείο του διαχωρισμού επί της επιφάνειας του κυλίνδρου. Αυτές οι επιμήκεις περιοχές είναι ενδεικτικές της πρώιμης μετάβασης της διαχωρισμένης στιβάδας. Και για τα δύο, πείραμα και προσομοίωση, η άκρη της επεκταμένης ανάντη περιοχής φθάνει ανοδικά την βάση του κυλίνδρου.



Σχήμα 2.4: Περιγράμματα της κανονικοποιημένης έντασης Reynolds σε Re=10 000: (a) PIV (b) DNS. Και στις δύο περιπτώσεις $\left|\frac{\langle u'v' \rangle}{U_0^2}\right|_{min} = 0.03$ και $\left|\frac{\Delta \langle u'v' \rangle}{U_0^2}\right| = 0.01$.

Μετά εξετάζουμε τα χαρακτηριστικά μέσης ροής στον ομόρου κυλίνδρου. Το σχήμα 2.5 συγκρίνει την κατανομή της κανονικοποιημένης ταχύτητας στην κατεύθυνση της ροής $\frac{u}{U_0}$ από το πείραμα σε Re = 4000 (Σχήμα 2.5a) και από την προσομοίωση σε Re = 3900 (Σχήμα 2.5b). Αυτά τα μοντέλα της μέσης ταχύτητας στην κατεύθυνση της ροής, δείχνουν μια εύκολα αναγνωρίσιμη φούσκα αρνητικών ταχυτήτων, δηλαδή, την αντίστροφη ροή. Η θέση και το μέγεθος της ελάχιστης βρίσκονται κοντά για την προσομοίωση και το πείραμα. Για τις εικόνες PIV, το μέγιστο μέγεθος από την αρνητική ταχύτητα είναι $\frac{u}{U_0}$ = 0,252 και 0,228 για Re = 4000 και Re = 10 000, αντίστοιχα, στις προσομοιώσεις, είναι 0,291 και 0,249 για τους δύο αυτούς Reynolds αριθμούς. Ο Norberg (1998) λαμβάνει αυτές τις τιμές με μετρήσεις ροομετρικού λέιζερ Doppler (LDV). Από παρεμβολή των αποτελεσμάτων του, παίρνουμε μια στρογγυλεμένη τιμή

του $\frac{u}{u_0}$ = 0.44 σε Re = 4000 και 0,38 σε Re=10 000. Η έκτασης την κατεύθυνση της φούσκας μπορεί να αξιολογηθεί κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της. Τα μήκη των φυσαλίδων, δηλαδή η απόσταση από τη βάση του κυλίνδρου προς τη θέση της ταχύτητας επί του επιπέδου συμμετρίας είναι 1.47D και 1.36D, αντίστοιχα, για το πείραμα και την προσομοίωση.



Σχήμα 2.5: Περιγράμματα της κανονικοποιημένης ταχύτητας στην κατεύθυνση της ροής: (a) PIV σε Re=4000 (b) DNS σε Re=3900. Και στις δύο περιπτώσεις $\frac{u}{u_0}\Big|_{min} = -0.252$ και $\Big|\frac{\Delta u}{u_0}\Big| = 0.063$



Σχήμα 2.6: Περιγράμματα της ταχύτητας στην κατεύθυνση της ροής σε Re=10 000: (a) PIV (b) DNS. Και στις δύο περιπτώσεις $\frac{u}{U_0}\Big|_{min} = -0.228$ και $\Big|\frac{\Delta u}{U_0}\Big| = 0.038$.

Το Σχήμα 2.6 δείχνει μία αντίστοιχη σύγκριση της κανονικοποιημένης μέσης ταχύτητας στην κατεύθυνση της ροής $\frac{u}{U_0}$ μεταξύ του πειράματος (Σχήμα 2.6a) και της προσομοίωσης (Σχήμα 2.6b) σε Re = 10 000. Εξετάζει την περιοχή των αρνητικών (ανάντη προσανατολισμό) ταχυτήτων που ορίζεται από τις διακεκομμένες γραμμές. Τόσο η θέση όσο και το μέγεθος της μεγαλύτερης τιμής είναι παρόμοιες για την προσομοίωση και το πείραμα. Το συνολικό μήκος της φούσκας, ωστόσο, είναι 0.78D και 0.82D για το πείραμα και την προσομοίωση, αντίστοιχα.

Τα σχέδια της κατανομής της κανονικοποιημένης ταχύτητας r.m.s. στην κατεύθυνση της ροής $\frac{u'}{U_0}$, δίνονται στο Σχήμα 2.7 για Re = 4000/3900. Παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις στις διαχωριστικές στρώσεις διάτμησης, και δύο μέγιστα που σχετίζονται με το σχηματισμό δίνης. Οι κατάντη θέσεις των r.m.s. μέγιστων είναι περίπου x / D = 1,55 για την προσομοίωση και 1,72 για το πείραμα, και η αντίστοιχη αιχμή τιμής είναι 0,45 και 0,425.

Η σύγκριση των διακυμάνσεων της κανονικοποιημένης ταχύτητας r.m.s. στην κατεύθυνση $\frac{u'}{U_0}$ σε Re = 10 000 μεταξύ του πειράματος και της προσομοίωσης απεικονίζεται στο σχήμα 2.8. Ενώ η συνολική μορφή της κατανομής στο Re = 10 000 είναι παρόμοια με εκείνη στον μικρότερο αριθμό Reynolds, οι θέσεις των μέγιστων r.m.s. έχουν μετακινηθεί προς τα πάνω για x / D = 1,13 και 1,14, αντίστοιχα, για την προσομοίωση και το πείραμα, και οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές είναι οι ίδιες, $\frac{u'}{U_0}$ = 0,5.



Σχήμα 2.6: Περιγράμματα της κανονικοποιημένης ταχύτητας r.m.s. στην κατεύθυνση της ροής : (a) PIV σε Re=4000 (b) DNS σε Re=3900. Και στις δύο περιπτώσεις $\frac{u'}{U_0}\Big|_{min} = 0.1$ και $\Big|\frac{\Delta u'}{U_0}\Big| = 0.025$.



Σχήμα 2.7: Περιγράμματα της κανονικοποιημένης ταχύτητας r.m.s. στην κατεύθυνση της ροής σε Re=10 000: (a) PIV (b) DNS. Και στις δύο περιπτώσεις $\left. \frac{u'}{U_0} \right|_{min} = 0.1$ και $\left| \frac{\Delta u'}{U_0} \right| = 0.025.$

Οι ανωτέρω συγκρίσεις μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για Re = 3900/4000 και 10 000 έδειξαν μια σχετικά υψηλή ευαισθησία των στατιστικών χαρακτηριστικών του κυλίνδρου μετά τις διακυμάνσεις του αριθμού Reynolds. Όλα τα δεδομένα δείχνουν σημαντικές μεταβολές όταν ο αριθμός Reynolds αυξάνεται από 4000 σε 10 000. Η αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ του πειράματος και της προσομοίωση δείχνει ότι η προσομοίωση μετράει και τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου μετάβασης κατά μήκος τις διαχωριστικής στρώσης διάτμησης.

Κατά τη μετάβαση, τα διαχωριστικά διατμητικά στρώματα πίσω από τον κύλινδρο γίνονται ασταθή, και δίνες μικρής κλίμακας μπορεί να παρατηρηθούν σαφώς στα διατμητικά στρώματα (αποκαλούμενες δίνες διάτμησης στρώματος). Γι αυτό διερευνάται η επίδραση του αριθμού Reynolds στο διατμητικό στρώμα αστάθειας. Το σχήμα 2.8 δείχνει ένα στιγμιαίο διάνυσμα της ταχύτητας, σε ένα δισδιάστατο x -y σύστημα της περιοχής της ροής σε αριθμό Reynolds Re = 3900. Στο διαχωριστικό διατμητικό στρώμα παρατηρούνται σαφώς καθορισμένες με κλίμακες μήκους περίπου το ένα τέταρτο της διαμέτρου του κυλίνδρου. Αυτές οι δίνες διάτμησης-στρώματος προκύπτουν από την Kelvin-Helmholtz αστάθεια.



Σχήμα 2.8: Διάνυσμα στιγμιαίας ταχύτητας σε δισδιάστατο σύστημα (x,y) που δείχνει τις δίνες διατμητικού στρώματος σε Re= 3900.

Οι δίνες διατμητικού στρώματος παρατηρήθηκαν να εμφανίζονται σε υψηλότερες συχνότητες από τις Strouhal δίνες, σε συμφωνία με προηγούμενες πειραματικές παρατηρήσεις. Το σχήμα 2.9 (a) δείχνει τη χρονικά την στιγμιαία ταχύτητα εγκάρσιας ροής σε ένα σημείο (x, y, z) = (0,54, 0,65, 2,0), το οποίο βρίσκεται στο πέρασμα των

δινών στρώματος διάτμησης στο άνω στρώμα διάτμησης (να σημειωθεί ότι η γραμμή (x, y) = (0,0, 0,0) συμπίπτει με τον κυλινδρικό άξονα. Για να προσδιοριστεί η συχνότητα των δινών διάτμησης στρωμάτων, υπολογίζουμε τα φάσματα ισχύος των ταχυτήτων ροής στο στρώμα διάτμησης. Στο σχήμα 2.9(b), σχεδιάζουμε τα φάσματα ισχύος των ταχυτήτων στην κατεύθυνση και εγκάρσιας ροής στο σημείο x = 0,54 και γ = 0,65. Το φάσμα είναι κατά μέσο όρο πάνω από τα αντίστοιχα σημεία κατά μήκος της ομογενούς κατεύθυνσης Ζ. Η συχνότητα Strouhal, *f_K*, και οι αρμονικές της χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα οξείες κορυφές στα φάσματα ροής. Επιπλέον, μια άλλη κορυφή μπορεί να παρατηρηθεί, που αντιστοιχεί στη συχνότητα των δινών διάτμησης στρωμάτων (f_{SL}), σε μια τιμή σημαντικά υψηλότερη από την συχνότητα Strouhal. Η φασματική κορυφή στα f_{SL} φαίνεται να είναι ευρεία, σε αντίθεση με την απότομη κορυφή στη συχνότητα Strouhal και των αρμονικών της. Η ευρυζωνική κορυφή στα f_{SL} δείχνει ότι οι δίνες διάτμησης-στρώματος συμβαίνουν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι σύμφωνα με προηγούμενες πειραματικές παρατηρήσεις (Prasad & Williamson 1997, Cardell 1993, Norber 1987).



Σχήμα 2.9: Αστάθεια διατμητικού στρώματος σε Re=3900. Χρονική μεταβολή της στιγμιαίας εγκάρσιας ταχύτητας (a) φάσμα ισχύος ταχύτητας (b) στο σημείο *x* =0.54 και *y* =0.65.

Οι περισσότερες παρατηρήσεις σχετικά με τις δίνες στρώματος διάτμησης σε Re = 3900 μπορούν να επεκταθούν σε υψηλότερο αριθμό Reynolds Re = 10 000. Στο σχήμα 2.10, μπορούμε σχεδιάσουμε τα διανύσματα ταχύτητας σε ένα δισδιάστατο x -y σύστημα της περιοχής ροής για να απεικονίσει τις δίνες διάτμησης στρωμάτων σε Re = 10 000. Δίνες με κλίμακες μήκους περίπου το ένα δέκατο της διαμέτρου του κυλίνδρου είναι εμφανείς στα διατμητικά στρώματα. Σε σύγκριση με Re = 3900, αυτές οι δίνες διατμητικού στρώματος διακρίνονται σε περιοχές περισσότερο προς τα

ανάντη σε Re = 10 000, υποδεικνύοντας ότι το σημείο μετάβασης κινείται ανοδικά καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνεται.



Σχήμα 2.10: Διάνυσμα στιγμιαίας ταχύτητας σε δισδιάστατο σύστημα (x,y) που δείχνει τις δίνες διατμητικού στρώματος σε Re= 10 000.

Τα χαρακτηριστικά των ταχυτήτων διάτμησης στρωμάτων σε Re = 10 000 καταδεικνύονται στο σχήμα 2.11(a), στο οποίο σχεδιάζουμε χρονικά την ταχύτητα εγκάρσιας ροής στο σημείο (x, y, z) = (0,42, 0,55, 2,3) στη δίοδο των δινών διάτμησης στρωμάτων. Οι διακυμάνσεις υψηλής συχνότητας που προκαλούνται από δίνες διάτμησης-στρώματος κυριαρχούν στην ταχύτητα εγκάρσιας ροής με ουσιαστικά μεγαλύτερο εύρος διακύμανσης σε Re = 10 000, ενώ οι διακυμάνσεις στην Strouhal συχνότητα που προκαλείται από το σχηματισμό δίνης Kàrmàn είναι δύσκολα αισθητές, σε αντίθεση με Re = 3900 (βλέπε σχήμα 2.9). Το φάσμα ισχύος της εγκάρσιας ροής ταχύτητας στο σημείο x = 0,42 και y = 0,55 δείχνεται στο σχήμα 2.11(b). Η συχνότητα Strouhal f_K έχει μια απότομη φασματική κορυφή, παρόμοια με εκείνη στο Re = 3900. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του φάσματος, ωστόσο, είναι

συχνότητα δίνης διάτμησης στρωμάτων. Αυτό δείχνει ότι οι δίνες διάτμησης στρωμάτων χαρακτηρίζονται από μια ζώνη συχνοτήτων σε Re = 10 000, που κυμαίνονται 7,83 - 15,83, όταν ομαλοποιηθούν από τη συχνότητα Strouhal.



Σχήμα 2.11: Αστάθεια διατμητικού στρώματος σε Re=10 000. Χρονική μεταβολή της στιγμιαίας εγκάρσιας ταχύτητας (a) φάσμα ισχύος ταχύτητας (b) στο σημείο *x* =0.42 και *y* =0.55.

Στο σχήμα 2.12, φαίνονται οι συχνότητες διάτμησης-στρώματος από την τρέχουσα προσομοίωση για Reynolds αριθμούς Re = 3900 και 10 000, και από προηγούμενες πειραματικές μετρήσεις ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds. Έχουμε χρησιμοποιήσει τη μέση τιμή της συχνότητας διάτμησης-στρώματος, $f_{SL} = (f_{SL}^{L} + f_{SL}^{H})/2=11.83$, στο περίγραμμα για Re = 10 000. Οι συχνότητες διάτμησης-στρώματος από την παρούσα DNS μελέτη συμφωνούν με τις πειραματικά μετρούμενες τιμές.



Σχήμα 2.12: Διακύμανση της συχνότητας διατμητικού στρώματος ως προς τον αριθμό Reynolds.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Στην εργασία αυτή, έχουν διερευνηθεί οι επιπτώσεις του αριθμού Reynolds, στα στατιστικά χαρακτηριστικά του ομόρου ενός κυλίνδρου και στην αστάθεια διάτμησης στρωμάτων στη μεταβατική περιοχή. Με το συνδυασμό των μετρήσεων PIV και άμεσων αριθμητικών προσομοιώσεων σε αριθμούς Re = 3900/4000 και 10 000. Παρατηρούμε ότι τα στατιστικά στοιχεία ροών, όπως η μέση ταχύτητα και η στροβιλότητα, η ένταση Reynolds, και η ταχύτητα r.m.s., μεταβάλλονται με την μεταβολή του αριθμού Reynolds.
- Μια γενική παρατήρηση είναι ότι τα κύρια χαρακτηριστικά όλων των ποσοτικών μοντέλων κινούνται ανοδικά με την αύξηση του αριθμού Reynolds.
 Μοτίβα της μέσης (χρόνος-κατά μέσο όρο) ταχύτητας στην κατεύθυνση της ροής δείχνουν ότι η φούσκα που περικλείει την περιοχή των αρνητικών της ταχύτητας στον ομόρου γίνεται σημαντικά μικρότερη, δηλαδή η θέση της
μηδενικής ταχύτητας κατά μήκος του επίπεδο συμμετρίας της φούσκας κινείται ανοδικά με την αύξηση του αριθμού Reynolds.

- Τα αντίστοιχα μοντέλα των μέσων, από άκρο σε άκρο στροβιλισμού, διακυμάνσεων του πεδίου ταχύτητας, τα ακρότατα της ταχύτητας στην κατεύθυνση της ροής και η ένταση Reynolds μειώνονται προς τη βάση του κυλίνδρου με αυξανόμενο αριθμό Reynolds.
- Η διακύμανση του αριθμού Reynolds επηρεάζει επίσης την αστάθεια διάτμησης στρωμάτων σημαντικά. Σε Re = 3900, οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η ταχύτητα διάτμησης-στρώματος χαρακτηρίζεται από υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις μικρού πλάτους που προκαλείται από διάτμηση στιβάδας δινών επάνω στην κορυφή των διακυμάνσεων μεγάλης κλίμακας που προκαλείται από τις Kàrmàn δίνες με σχηματισμό στη συχνότητα Strouhal. Όσο ο αριθμός Reynolds αυξάνεται σε 10 000, οι διακυμάνσεις υψηλής συχνότητας που προκαλούνται από δίνες διατμητικού στρώματος παρατηρήθηκε να κυριαρχούν στην ταχύτητα διάτμησης-στρώματος στρώματος και να συντρίβει τις διακυμάνσεις που προκαλούνται από τον σχηματισμό τις Kàrmàn δίνες.
- Η σύγκριση με προηγούμενες μετρήσεις δείχνει ότι οι συχνότητες διάτμησηςστρώματος από την παρούσα μελέτη συμφωνούν αρκετά με τις πειραματικά μετρημένες τιμές και ακολουθούν τον νόμο Re0.67 που προτείνεται από τους Prasad & Williamson (1997).
- Τέλος, για την ολοκλήρωση της μελέτης στα σχήματα 2.13 και 2.14 δείχνονται οι συντελεστές οπισθέλκουσας (Drag) και άνωσης (lift) και η σύγκριση του συντελεστή βάσης πίεσης (ως προς την γωνία του κυλίνδρου) για υψηλή και χαμηλή ανάλυση του πλέγματος της προσομοίωσης με την μελέτη του Norberg.



Σχήμα 2.13: Χρονική μεταβολή των συντελεστών οπισθέλκουσας και άνωσης σε Re=10000 (υψηλή ανάλυση)



Σχήμα 2.14: Σύγκριση του συντελεστή βάσης πίεσης μεταξύ προσομοίωσης (Re=10 000) και πειραματικών δεδομένων (Re=8000), Norberg(1992).

2.2 Hyunsik Kim, Jungil Lee, Jooha Kim, Haecheon Choi

CHARACTERISTICS OF FLOW OVER A CIRCULAR CYLINDER AT Re=140,000, August 28-30, 2013 Poitiers, France.

Χαρακτηριστικά της ροής στον ομόρου κυκλικού κυλίνδρου σε Re=140,000.

Ένας κυκλικός κύλινδρος είναι ένα αντιπροσωπευτικό πλατύ σώμα, που βρίσκουμε στις δομές, όπως η ανεμογεννήτρια, φανοστάτης, κλπ. Η ροή πάνω από ένα κυκλικό κύλινδρο σε υποκρίσιμο αριθμό Reynolds παρουσιάζει διάφορα φαινόμενα της ροής συμπεριλαμβανομένου του οριακού στρώματος, το διαχωρισμό, την εξέλιξη στρώματος διάτμησης και δίνες στον ομόρου. Επομένως, έχουν υπάρξει πολυάριθμες μελέτες για την κατανόηση της ροής πάνω από ένα κυκλικό κύλινδρο πειραματικά και αριθμητικά. Ωστόσο, τα πειραματικά αποτελέσματα από διάφορες ερευνητές δείχνουν μη αμελητέες διαφορές μεταξύ τους (Bearman 1969, Achenbach και Heinecke 1981, Farell και Blessmann 1983, Cantwell & Coles 1983, Szepessy και Bearman 1992). Επιπλέον, έγιναν κάποιες προσπάθειες να προβλεφθεί η ροή γύρω από ένα κυκλικό κύλινδρο με την χρήση μεγάλων προσομοιώσεων δινών (LES, Fröhlich κ.ά., 1998, Breuer, 2000), αλλά οι μελέτες αυτές αντιμετωπίζονται μόνο με τις επιπτώσεις των αριθμών, όπως το σύστημα πλέγματος, μοντέλα ανάλυσης και δεν θα μπορούσε να αξιολογηθεί η προβλέψιμη απόδοση από αριθμητική προσομοίωση λόγω της διασποράς στο πειραματικό αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, στην παρούσα μελέτη, ερευνούμε την ροή πάνω από ένα κυκλικό κύλινδρο σε υποκρίσιμο Reynolds αριθμός (140,000) τόσο από την πειραματική όσο και από αριθμητικές προσεγγίσεις.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το παρόν πείραμα διεξάγεται σε μια κλειστού τύπου αεροδυναμική σήραγγα, της οποίας το μέγεθος δοκιμής είναι 900 mm × 900 mm. Η ένταση στροβιλισμού είναι χαμηλότερη από 0,3% κατά την ταχύτητα ελεύθερης ροής 20 m / s. Το σχήμα 2.15a δείχνει το σχηματικό διάγραμμα της παρούσας πειραματικής διάταξης. Ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από ABS ρητίνη με τη διάμετρο d = 70 mm. Ο λόγος διαστάσεων του κυλίνδρου είναι 11,4. Το πάχος του οριακού στρώματος για την σήραγγα-τοίχωμα είναι περίπου 25 mm σε 20 m / s. Μια πλάκα, εγκαθίσταται σε απόσταση 35 mm από την κορυφή και τον πυθμένα του τμήματος δοκιμής για την αφαίρεση της επίδραση του οριακού στρώματος. Η οπισθέλκουσα δύναμη στον κύλινδρο μετριέται απευθείας χρησιμοποιώντας δύο κύτταρα φορτίου που έχουν εγκατασταθεί στο άκρο του κυλίνδρου. Εκεί βρίσκονται εννέα οπές για τη μέτρηση της πίεσης. Η απόσταση μεταξύ των οπών είναι 70 mm και κάθε οπή συνδέεται άμεσα με την scannivalve με σωλήνα. Η ταχύτητα ελεύθερης ροής κυμαίνεται από 20 έως 55 m / s, που αντιστοιχούν στους αριθμούς Reynolds 90.000 - 260.000.



Σχήμα 2.15: Πειραματική διάταξη για (a) δύναμη και πίεση (b) PIV μετρήσεις.

Το σχήμα 2.15b δείχνει το σχηματικό διάγραμμα για τις μετρήσεις σωματιδίων μέσω PIV. Το σύστημα PIV αποτελείται από ένα λέιζερ 120 mJ, μία κάμερα CCD με 2048 × 2048 pixels και μια γεννήτρια καθυστέρησης. Η μέτρηση της ταχύτητας διεξάγεται σε επίπεδο xy κατά το κέντρο του ανοίγματος του κυλίνδρου. Ένας φακός 60 mm τοποθετημένη στην ψηφιακή φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιείται για να παρέχει ένα οπτικό πεδίο, του οποίου το μέγεθος είναι 130 mm × 130 mm.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Στην παρούσα μελέτη, για Re=140,000 χρησιμοποιούνται, για ασυμπίεστο ρευστό, οι εξισώσεις Navier-Stokes και για την ένταξη του χρόνου η μέθοδος Crank-Nicolson. Για την χωρική διακριτοποίηση, χρησιμοποιείται ένα υβριδικό σύστημα του Yun (2006). Το σχήμα 2.16a δείχνει το σχηματικό διάγραμμα του υπολογιστικού συστήματος και τις οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται. Το υπολογιστικό πεδίο είναι : $-15 \le x / d \le 15$, $-25 \le y / d \le 25$, και $0 \le z / d \le \pi$, όπου x, y, και z υποδεικνύουν την κατεύθυνση της ροής, την κάθετη στην ροή και την εγκάρσια ροή αντίστοιχα. Στην είσοδο έχουμε ταχύτητα ομοιόμορφης ελεύθερης ροής και στην έξοδο χρησιμοποιείται οριακή συνθήκη: dui/dt+cdui/dx=0, όπου ui είναι η ταχύτητα, t είναι ο χρόνος και c είναι η μέση ταχύτητα εξόδου. Μια οριακή συνθήκη Neumann χρησιμοποιείται στα όρια του μακρινού πεδίου. Ο αριθμός των σημείων του πλέγματος που χρησιμοποιούνται στην παρούσα LES μελέτη είναι 1041 (x) × 501 (y) × 81 (z). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16b, το υπολογιστικό πλέγμα για την παρούσα μελέτη είναι συγκεντρωμένο κοντά στο όριο του κυκλικού κυλίνδρου και στον ομόρου.



Σχήμα 2.16: (a)Σχηματικό διάγραμμα του υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες, (b) τυπικό πλέγμα στον ομόρου κυλίνδρου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο Πίνακας 2.17 δείχνει, κατά μέσο όρο(ως προς τον χρόνο) τον συντελεστή οπισθέλκουσας, τον συντελεστή βάσης πίεσης, και τον αριθμό Strouhal σε Re =140,000 από τις παρούσες LES και τα πειράματα μαζί με εκείνων που προέρχονται από προηγούμενη πειραματική εργασία (Cantwell καιColes, 1983).

	C_D	C_{Pb}	St
Present (LES)	1.223	-1.30	0.200
Present (experiment)	1.267	-1.36	-
Cantwell and Coles (1983; experiment)	1.237	-1.21	0.179

Σχήμα 2.17: Χαρακτηριστικά της ροής για Re =140,000.

Όπως φαίνεται τα στατιστικά χαρακτηριστικά από LES και πείραμα συμφωνούν μεταξύ τους όπως και με παλιότερες μετρήσεις. Το Σχήμα 2.18 δείχνει τις παραλλαγές της οπισθέλκουσας και των συντελεστών βάσης πίεσης με τον αριθμό Reynolds. Τόσο οι συντελεστές οπισθέλκουσας όσο και βάσης πίεσης από το σημερινό πείραμα παραμένουν σχεδόν σταθεροί στο υποκρίσιμο φάσμα αριθμού Reynolds (Re <200.000). Οι συντελεστές οπισθέλκουσας και βάσης πίεσης της παρούσας μελέτης δείχνουν συμφωνία με εκείνες των West και Apelt (1982), αλλά είναι εντελώς διαφορετικές από εκείνες των Farell και Blessmann(1983). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι ακραίες πλάκες απουσίαζαν στο πείραμα των Farell και Blessmann(1983), και αυτό επέτρεψε την ανάπτυξη του οριακού στρώματος στην σήραγγα ώστε να επηρεάσει τη ροή πάνω από ένα κυκλικό κύλινδρο.



Σχήμα 2.18: Παραλλαγές του συντελεστή (a)οπισθέλκουσας και (b)βάσης πίεσης.

Το Σχήμα 2.19 δείχνει το χρονικό μέσο όρο στην κατεύθυνση της ροής και το εγκάρσιο προφίλ ταχύτητας σε τέσσερις θέσεις στην κατεύθυνση πίσω από τον κύλινδρο που λαμβάνεται από την παρούσα LES και το πείραμα. Στο Σχήμα 2.19α, τα προφίλ ταχύτητας στην κατεύθυνση της ροής από τις παρούσες LES και το πείραμα είναι συνολικά σε συμφωνία μεταξύ τους, ενώ εκείνες της παρούσας LES είναι ελαφρώς μη αναμενόμενες στο y / d>



Σχήμα 2.19:Προφίλ της μέσης ταχύτητας: (a)στην κατεύθυνση της ροής (b) εγκάρσια.

Το Σχήμα 2.20 δείχνει τις διακυμάνσεις των προφίλ της ρίζας μέσου τετραγώνου (RMS) στην κατεύθυνση της ροής και εγκάρσιας ταχύτητας σε τέσσερις θέσεις πίσω από τον κύλινδρο. Σε όλες τις θέσεις, τα αποτελέσματα από LES είναι σε συμφωνία με εκείνα από το πείραμα.



Σχήμα 2.20: Προφίλ της ρίζας μέσου τετραγώνου (RMS) της ταχύτητας (a)στην κατεύθυνση της ροής (b) εγκάρσια.

Το σχήμα 2.21 δείχνει τα περιγράμματα της στιγμιαίας από άκρο σε άκρο στροβιλότητας σε ένα επίπεδο x-y κοντά στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Όπως φαίνεται μετά το διαχωριστικό στρώμα, εμφανίζονται η αστάθεια διατμητικού στρώματος όπως και δίνες μικρής κλίμακας.



Σχήμα 2.21: Περιγράμματα της από άκρο σε άκρο στροβιλότητας στον ομόρου κυλίνδρου.

Τέλος το Σχήμα 2.22a δείχνει τις χρονικές μεταβολές των συντελεστών οπισθέλκουσας και άνωσης από το παρόν LES. Στο σχήμα, τα Α και Β αντιπροσωπεύουν περιπτώσεις

όπου οι έχουμε τις πιο χαμηλές και υψηλές τιμές των συντελεστών, αντίστοιχα. Για να εξεταστεί η ροή στις περιπτώσεις Α και Β, στο σχήμα 2.22b φαίνονται οι στιγμιαίες στροβιλοειδείς δομές μεγάλης κλίμακας που προσδιορίζονται από το πρότυπο ISO. Στο παράδειγμα του Α, η στροβιλοειδής δομή κοντά στον κύλινδρο είναι παραμορφωμένη κατά μήκος της από άκρο σε άκρο κατεύθυνσης και η απόπτωση δίνης είναι σχετικά αδύναμη. Οι χαμηλές τιμές των συντελεστών στην περίπτωση Α μπορεί να αποδοθεί σε αυτή την αδύναμη στροβιλοειδή δομή στον ομόρου. Από την άλλη πλευρά, κατά το παράδειγμα Β, η διακύμανση της στροβιλοειδούς δομής από διαστάσεων, και η δίνη που προκαλείται στον ομόρου είναι ισχυρή. Αυτή η συμπεριφορά της στροβιλοειδούς δομής είναι υπεύθυνη για την υψηλή τιμή των συντελεστών στην περίπτωση Β.



Σχήμα 2.22: Αποτελέσματα της μελέτης για Re=140,000: (a)χρονικές διακυμάνσεις των συντελεστών οπισθέλκουσας και άνωσης (b) στιγμιαίες δομές δινών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

3.1 Πειραματική διάταξη

Στο πείραμα αυτό καταγράφηκε το πεδίο ταχυτήτων της ροής αέρα γύρω από έναν κύλινδρο με την μέθοδο PIV (Particle Image Velocimetry) και παράλληλα καταγράφηκε η πίεση στην επιφάνεια του κυλίνδρου στις 90 μοίρες από το σημείο ανακοπής. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε υποηχητική αεροδυναμική σήραγγα ανοικτού κυκλώματος (ατμοσφαιρικός αέρας ως εργαζόμενο μέσο) και ορθογωνικής διατομής (400mm x 225mm). Το τμήμα δοκιμών της αεροδυναμικής σήραγγας αποτελείτο από διαφανή τοιχώματα από Plexiglas, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη οπτική πρόσβαση για τη χρήση της τεχνικής PIV. Ο κύλινδρος τοποθετήθηκε με τον διαμήκη του άξονα κατακόρυφο ενώ στο μέσον του μήκους του ανοίχθηκε οπή για την σύνδεσή της με μορφοτροπέα πίεσης διαφορικού τύπου (HONEYWELL NSC series, εύρους +/- 1 in H₂O). Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα της πειραματικής διάταξης με τις κύριες συνιστώσες του συστήματος PIV.



3.1.1 <u>Σύντομη περιγραφή της πειραματικής διάταξης-</u> διαδικασίας

Ο κύλινδρος τοποθετείται στο κέντρο του πλάτους του τμήματος δοκιμών της αεροδυναμικής σήραγγας. Τίθεται σε λειτουργία ο φυσητήρας της σήραγγας, ο οποίος δημιουργεί ρεύμα αέρα.

Καταγράφονται οι συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν, θερμοκρασία, πίεση με τη βοήθεια θερμομέτρου (P310) και διαφορικού μανομέτρου (FURNESS, εύρους +/-200Pa), αντίστοιχα μέσω των οποίων προσδιορίζεται η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος.

Στη συνέχεια, ενεργοποιούμε το σύστημα τροφοδοσίας καπνού, διαχέοντας σταγονίδια λαδιού μέσα στη ροή. Τα σταγονίδια αυτά έχουν μέση διάμετρο 1μm και χρησιμεύουν ως «ιχνηλάτες» της ροής. Το τροφοδοτικό καπνού συνδέεται με την αεροδυναμική σήραγγα μέσω ενός ακροφυσίου, το οποίο τοποθετείται στην αναρρόφηση αέρα του φυσητήρα ,ώστε να μην επηρεάζει τη ροή.

Αμέσως μετά τοποθετούνται η συσκευή εκπομπής Laser με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργεί ένα φύλλο φωτός κάθετο στον διαμήκη άξονα του κυλίνδρου και η κάμερα (CCD-Camera), πάνω από το τμήμα δοκιμών, καταγράφοντας 300 ζεύγη εικόνων για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση.

Καθώς το Laser φωτίζει το επίπεδο που εξετάζεται, το φως σκεδάζεται από τα σταγονίδια του λαδιού και η κάμερα καταγράφει τη θέση τους για δυο χρονικές στιγμές t και t+Δt, όπου Δτ=80μs. Η επιλογή του χρονικού αυτού διαστήματος έγινε με κριτήριο την ορθή λειτουργία της τεχνικής PIV, που απαιτεί η μετατόπιση των σωματιδίων εντός του Δt να μην υπερβαίνει το 1/4 του μήκους του παραθύρου interrogation. Μέσω της καταγραφής αυτής, και με γνωστή τη χρονική διαφορά των δυο εικόνων, προκύπτουν τα διάνυσματα ταχύτητας του ρευστού επί του φωτιζόμενου επιπέδου.

Παράλληλα, ο αισθητήρα πίεσης που βρίσκεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου καταγράφει την διαφορά της πίεσης μεταξύ της επιφάνειας του κυλίνδρου όπου έχει γίνει η διαάνοιξη της οπής και της πίεσης που επικρατεί στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Η δεύτερη θεωρείται οτι δεν μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του πειράματος. Το σήμα του αισθητήρα φιλτράρεται και ενισχύεται έτσι ώστε η έξοδός του να είναι ένα αρμονικά μεταβαλλόμενο σήμα με μεταβλητό πλάτος και περίοδο. Το σήμα αυτό στη συνέχεια οδηγείται σένα μικροεπεξεργαστή (ARDUINO UNO) ο οποίος μέσω κατάλληλου λογισμικού παράγει παλμούς τάσης 0-5 V σε κατάλληλες χρονικές στιγμές. Οι παλμοί αυτοί αποτελεούν το σήμα σκανδαλισμού (external trigger) του συστήματος PIV, για τη λήψη εικόνων σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Επίσης, το σήμα της πίεσης και οι παραγόμενοι παλμοί τάσης οδηγούνται σε αναλογικόψηφιακό μεετατροπέα (SPIDER8, HBM) για ψηφιοποίηση και περαιτέρω ανάλυση.

3.1.2 <u>Αεροδυναμική σήραγγα</u>

Η σήραγγα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι αεροδυναμική σήραγγα ανοικτού τύπου, δηλαδή ο αέρας αναρροφάται και απελευθερώνεται στο περιβάλλον, χαμηλής ταχύτητας και συνεχούς λειτουργίας. Η ταχύτητας της ροής κυμαίνεται από 2-20m/s και η ρύθμισή της γίνεται μέσω της ρύθμισης των στροφών του αξονικού φυσητήρα, με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή με χειροστρόφαλο. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της:

Χαρακτηριστικά Αεροδυναμικής Σήραγγας		
Κατασκευάστρια Εταιρεία	Neovent	
Τύπος	VM 60.10.2 8°	
Ονομαστική ισχύς κινητήρα	7.5 HP	
Στροφές	<mark>έως 2 910</mark> rpm	
Ωφέλιμη Ολική Πίεση	70 kp/m ²	
Ταχύτητα Ρεύματος Αέρα	2 – 20 m/s	

Σχήμα 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της αεροδυναμικής σήραγγας του Τομέα Ρευστών του ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

Στο τμήμα δοκιμών της παραπάνω διάταξης,τα τοιχώματα αποτελούνται από διάφανο Plexiglas προκειμένου να γίνει εφικτή η καταγραφή των δεδομένων. Αυτό το τμήμα είναι ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 400mm x 225mm και μήκος 1500mm. Οι προς μελέτη διατάξεις (στο πείραμά μας κύλινδρος) τοποθετούνται σε απόσταση περίπου 840-850mm από την είσοδο του τμήματος. Προκειμένου να μπορέσουμε να έχουμε μια ακριβή εικόνα για τη διαμόρφωση της ροής γύρω από τον κύλινδρο, καλύψαμε το τμήμα δοκιμών της αεροδυναμικής σήραγγας με ένα μαύρο πανί (λόγω φωτισμού) και αφήνοντας ανοιχτό μόνο το κομμάτι στο οποίο εστιάζει η κάμερα, κατορθώσαμε και πήραμε πλήρη εικόνα.



Σχήμα 3.2: Αεροδυναμική σήραγγα ΕΜΠ και τμήμα δοκιμών καλυμμένο με μαύρο πανί



3.1.3 <u>Συσκευή εκπομπής Laser</u>

Η συσκευή εκπομπής Laser που χρησιμοποιήθηκε, είναι το σύστημα PIV Laser II-30 της σειράς Solo, που κατασκευάζεται από την εταιρεία New Wave Research. Η συσκευή είναι τύπου Nd: YAG διπλής κεφαλής και παρέχει μια υψηλά σταθερή δέσμη πράσινου φωτός για εφαρμογές PIV(Particle Image Velocimetry). Αποτελείται από το τροφοδοτικό και την κεφαλή. Η κεφαλή, η οποία είναι υδρόψυκτη και συνδέεται με το τροφοδοτικό του συστήματος, τοποθετήθηκε σε απόσταση περίπου δύο μέτρων από τον κύλινδρο, την δεξιά πλευρά της αεροδυναμικής σήραγγας με τέτοιο τρόπο, ώστε η δέσμη του πράσινου φωτός να τέμνει τον κύλινδρο του πειράματος κάθετα.

Το τροφοδοτικό της συσκευής εγκαταστάθηκε με προσοχή και συνδέθηκε με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να πάρουμε τα κατάλληλα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 3.4: Κεφαλή συσκευής εκπομπής Laser



Σχήμα 3.5: Τροφοδοτικό συσκευής εκπομπής Laser

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά, οι λειτουργικές απαιτήσεις, καθώς και οι ονομαστικές διαστάσεις της συσκευής.

Χαρακτηριστικά Συσκευής Sold	o II-30 PIV Nd:YAG Laser System	
Ενέργεια	30 mJ	
Ενεργειακή Σταθερότητα	±4%	
Διάμετρος Δέσμης Laser	3 mm	
Πλάτος Έντασης	3 – 5 ns	
Απόκλιση	< 4 mrad	
Σταθερότητα Εστίασης Ακτίνας	> 3 urad	
Περιοδική Απόκλιση	± 1 ns	
Λειτουργικέ	ς Απαιτήσεις	
Θερμοκρασία	10 - 30 °C	
Σχετική Υγρασία	20 - 80 %	
Τάση	95 – 240 V	
Ισχύς	900 W	
Ονομαστικές Διαστάσεις	Τροφοδοτικού / Κεφαλής	
Μήκος	461 mm / 350 mm	
Πλάτος	194 mm / 178 mm	
γψος	363 mm / 81 mm	
Βάρος	22 kg / 4.5 kg	

Σχήμα 3.6:Τεχνικά χαρακτηριστικά, λειτουργικές απαιτήσεις και ονομαστικές διαστάσεις συσκευής εκπομπής Laser.

3.1.4 <u>Σύστημα καταγραφής/CCD Camera</u>

Το καταγραφικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα, είναι η κάμερα POWER VIEW 1.4MP,μοντέλο 630066 της εταιρείας TSI με φακό 35mm, 1:2 D NICON, f2. Η συγκεκριμένη κάμερα παρέχει τη δυνατότητα μεταβλητού χρόνου έκθεσης, μικρούς χρόνους εναλλαγής καρέ (frame straddling times) και είναι σχεδιασμένη για εφαρμογές PIV, microPIV και PLIF. Η κάμερα τοποθετήθηκε σε απόσταση 400mm κάθετα πάνω από το τμήμα δοκιμών και για τη στήριξή της χρησιμοποιήθηκαν δύο αντίβαρα των 5kg το κάθε ένα.

Για την επεξεργασία των πληροφοριών, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο της TSI ,Insight 3G,ενώ ένας συγχρονιστής παρέχει καθυστέρηση παλμών ,ώστε να υπάρχει μια χρονική ακολουθία στην καταγραφή των ζευγών –εικόνων του πεδίου ροής σε καλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Η λογισμική πλατφόρμα του συγκεκριμένου λογισμικού πακέτου, δίνει τη δυνατότητα έκθεσης της έντασης κάθε pixel, μέσω ενός προγράμματος ψευδοχρωματικής έκθεσης, ώστε τα pixels με μικρή ένταση να μπορούν να εντοπιστούν.



Σχήμα 3.7: CCD-Camera:POWER VIEW 1.4 MP

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας, όπως αυτά δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Χαρακτηριστικά Κάμερας POWE	R VIEW [™] 1.4MP, No. 630066, TSI [®]
Αριθμός Pixels	1 376 (H) × 1 040 (V)
Μέγεθος Pixel	6.45 μm × 6.45 μm
Θερμοκρασία CCD	-12 °C
	(η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή με ένα σύστημα ψύξης δύο σταδίων: ψύκτης Peltier για περιβάλλον χαμηλού θορύβου & σύστημα ψύξης πεπιεσμένου αέρα)
Δυναμικό Εύρος	12-bit
Ρυθμός Καρέ (Frame Rate)	10 fps (frames per second)
Φασματικό Εύρος	270 – 1 100 nm
Κβαντική Απόδοση	62 % στα 500 nm
Ενεργοποιούμενος Χρόνος Έκθεσης	500 ns - 1 000 s
Ελάχιστος Χρόνος Εναλλαγής Καρέ ΡΙV	200 ns
Βάση Φακού	f-mount
Μήκος Καλωδίου Μεταφοράς Δεδομένων	5 m (Ομοαξονικό)
Interface K	PCI Board Υψηλής Ταχύτητας

Σχήμα 3.8:Τεχνικά χαρακτηριστικά κάμερας POWER VIEW 1.4MP, No 630066, TSI

3.1.5Τροφοδοτικό καπνού

Το τροφοδοτικό καπνού που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα, είναι το μοντέλο 9307,Oil Droplet Generator της εταιρείας TSI και είναι κατάλληλο για την τροφοδοσία ροών μικρών και μεγάλων ταχυτήτων, κατά τη διάρκεια μετρήσεων PIV(Particle Image Velocimetry) και LDV(Laser Doppler Velocimetry), είτε σε αεροδυναμικές σήραγγες, είτε σε περιοχές μεγάλης ροής.

Ουσιαστικά πρόκειται για έναν ψεκαστήρα οποίος μέσω ενός ακροφυσίου τροφοδοτεί τη ροή με σταγονίδια λαδιού. Για τη λειτουργία του χρησιμοποιείται ελαιόλαδο. Πεπιεσμένος αέρας από το σύστημα παροχής του εργαστηρίου ρευστομηχανικής, ψεκάζει το λάδι στο ρεζερβουάρ της γεννήτριας για τη δημιουργία σταγονιδίων. Το ακροφύσιο είναι τοποθετημένο στην είσοδο της αεροδυναμικής σήραγγας(αναρρόφηση αέρα) και η ποσότητα του καπνού ελέγχεται από την παροχή του αέρα μέσω μιας χειροκίνητης βάνας.



Σχήμα 3.9: Παροχή συστήματος καπνού στη ροή

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι ονομαστικές διαστάσεις του τροφοδοτικού καπνού, όπως αυτά δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Oil I	Droplet Generator, TSI 9307
Πίεση Αέρα Παροχής	170 kPa (Ελάχιστη)
	2 720 kPa (Μέγιστη)
Θερμοκρασία Αέρα Παροχής	20 °C (Κανονική Λειτουργία)
	65 °C (Μέγιστη)
Εσωτερική Πίεση Αέρα	170 kPa (Κανονική Λειτουργία)
	550 kPa (Μέγιστη)
Μέγιστη Οπισθέλκουσα Πίεση	120 kPa
Ρυθμός Ροής Αερολύματος	30 l/min (Κανονική Λειτουργία)
Μέσο Μέγεθος Σταγονιδίου	1 μm (για ελαιόλαδο)
Ονομαστικές	Διαστάσεις
Υψος	395 mm
Διάμετρος	150 mm
Διάμετρος Σωλήνα Εξόδου Αερολύματος	15.9 mm (Εξωτερική)
	9.5 mm (Εσωτερική)
Βάρος	3.9 kg

Σχήμα 3.10 :Τεχνικά χαρακτηριστικά και ονομαστικές διαστάσεις συστήματος τροφοδοσίας καπνού, Oil Droplet Generator.

3.1.6 <u>Αισθητήρας πίεσης-Arduino</u>

Οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας τον αισθητήτα διαφορικής πίεσης της σειράς NSC της HONEYWELL με εύρος μέτρησης +-1in H2O. Η πλήρης κλίμακα είναι περίπου 17,7mV/V. Ένας κατάλληλος ενισχυτής σήματος έχει σχεδιαστεί και εφαρμοστεί σε ηλεκτρονικό κύκλωμα για να μεγιστοποιήσει την ευαισθησία για ένα μονοπολικό 0-5V εύρος ADC που διαθέτει ο μικροεπεξεργαστής ARDUINO. Έτσι, η ενίσχυση που εφαρμόστηκε ήταν Gain = 66 με μια δεύτερης τάξης βαθυπερατού φίλτρου στα 160 Hz. Ο μηχανισμός trigger υλοποιείται με λογισμικό μέσα στον μικροεπεξεργαστή Με αυτόν τον τρόπο φιλτραρίστηκαν οι μεταβολές της πίεσης και Arduino. καταγράφηκε ένα σχεδόν ημιτονοειδές σήμα μεταβλητού πλάτους και συχνότητας. Στη συνέχεια, κατάλληλο λογισμικό MATLAB εντόπιζε την αρχή της κάθε περιόδου η οποία ταυτίζονταν με τη μεταβολή της πίεσης από μικρότερη σε μεγαλύτερη τιμή από τη μέση τιμή της πίεσης. Στη συνέχεια, ορίζονταν μέσω του προγράμματος ένα αυθαίρετο χρονικό διάστημα το οποίο αποτελούσε την χρονική καθυστέρηση σε σχέση με την αρχή της περιόδου (π.χ. 10ms, 20ms κτλ) κατά την οποία ο μικροεπεξεργαστής παρήγαγε έναν παλμό τάσης για τον έλεγχο του συστήματος PIV.



Σχήμα 3.11: Arduino uno και η συνδεσμολογία του

3.1.7 Spider8 HBM

Η συσκευή Spider8, της εταιρίας HBM, είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης με τεχνολογία carrier-frequency για αντιστάτες ή επαγωγικούς μετατροπείς. Χρησιμοποιείται για ηλεκτρικές μετρήσεις μηχανικών μεταβλητών (στατικών ή μεταβλητών), όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση η πίεση, η δύναμη, η επιτάχυνση και η θερμοκρασία. Η διέγερση σήματος, η ψηφιοποίηση, η σύνδεση με τον υπολογιστή και η σύνδεση για τις 8 υποδοχές συνδυάζονται σε μία ενιαία μονάδα. Η σύνδεση με τον υπολογιστή γίνεται με βάση το λογισμικό CATMAN Express HBM και μας δίνει την δυνατότητα για την απόκτηση, εμφάνιση, επεξεργασία και αρχειοθέτηση των μετρούμενων τιμών με μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας 9.9Hz ανά κανάλι.



Σχήμα 3.12: Spider8 HBM/ υποδοχές

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Spider8 όπως αυτά δίνονται από την κατασκευαστική εταιρία.

Τεχνικά χαρακτηριστικά Spider8/HBM		
Συχνότητα	4.8 kHz	
Δυνατότητα μετρήσεων	1-9600 sec	
Τεχνολογία	S/G αντιστάσεις ή επαγωγικοί μετατροπείς	
Μετρήσεις		
	Δυνατότητα μετρήσεων ταυτόχρονα	
	σε όλες τις υποδοχές	

Σχήμα 3.13 : Τεχνικά χαρακτηριστικά Spider8

3.2 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Στο πείραμά μας προκειμένου να επεξεργαστούμε τις φωτογραφίες που λάβαμε μέσω του PIV, χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό Insight3d, το οποίο δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της μετατόπισης των σκεδαστών στο προεπιλεγμένο χρονικό διάστημα Δt σε μονάδες pixel. Γνωρίζοντας τη σχέση των pixel- mm (στην προκειμένη περίπτωση ήταν 17.3pixel/mm) έγινε ο υπολογισμός των ταχυτήτων για κάθε παράθυρο υπολογισμού (interrogation window) που επελέγη να είναι τετραγωνικό με διαστάσεις 64pixel x 64 pixel (ή 3.7mm x 3.7mm). Αυτό έγινε εφικτό αφού βαθμονομήσαμε το σύστημα και όλα τα μεγέθη του προς μελέτη αντικειμένου ήταν γνωστά.

Επίσης όσον αναφορά την επεξεργασία του σήματος της πίεσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CATMAN Express HBM, το οποίο μας έδωσε την δυνατότητα ψηφιοποίησης του σήματος και του παλμού του arduino και την καταγραφή της χρονικής ακολουθίας του. Ως αποτέλεσμα στον υπολογιστή έχουμε κατεγραμμένες τις χρονοσειρές της πίεσης και τους παραγόμενους παλμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4⁰: Πειραματικά αποτελέσματα

Για να πετύχουμε τον σκοπό μας, δηλαδή την καταγραφή της εξέλιξης της ροής του αέρα γύρω από έναν κύλινδρο και συγκεκριμένα την εξέλιξη των εκλυόμενων δινών, οι μετρήσεις μας πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικές χρονοκαθυστερήσεις (delay) παραγωγής παλμού ελέγχου του συστήματος PIV. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων για κάθε περίπτωση delay του παλμού (σε milliseconds). Οι περιπτώσεις μας είναι: zerodelay (χωρίς χρονοκαθυστέρηση του παλμού), 10delay (10 ms χρονοκαθυστέρηση παλμού), 20delay (20 ms χρονοκαθυστέρηση του παλμού) , 30delay (30 ms χρονοκαθυστέρηση παλμού) , 40delay (40 ms χρονοκαθυστέρηση παλμού), 50delay (50 ms χρονοκαθυστέρηση παλμού). Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα σχετικά με τις μετρήσεις πίεσης, ακολουθούν τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις PIV και τέλος ένας συνδυασμός αυτών που θα οδηγήσει σε συμπεράσματα.

4.1 <u>Ανάλυση μετρήσεων πίεσης</u>

 Το λογισμικό CATMAN Express HBM μας δίνει τη δυνατότητα καταγραφής του σήματος της πίεσης συναρτήσει του χρόνου και του παλμού. Χρησιμοποιώντας την MATLAB μπορούμε να αναλύσουμε αυτά τα μεγέθη. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χρονοσειρές του σήματος της πίεσης (μπλε χρώμα) συναρτήσει του χρόνου και ο παλμός (κόκκινο χρώμα) για κάθε περίπτωση. Παρατηρώντας τα διαπιστώνουμε οτι η περίοδος και το πλάτος μεταβάλλονται ενώ η παραγωγή του παλμού δεν γίνεται με σταθερό ρυθμό.



Σχήμα 4.1.1: Παλμός και σήμα της πίεσης συναρτήσει του χρόνου για zerodelay



Σχήμα 4.1.2: Παλμός και σήμα της πίεσης συναρτήσει του χρόνου για 10delay



Σχήμα 4.1.3: Παλμός και σήμα της πίεσης συναρτήσει του χρόνου για 20delay



Σχήμα 4.1.4: Παλμός και σήμα της πίεσης συναρτήσει του χρόνου για 30delay



Σχήμα 4.1.5: Παλμός και σήμα της πίεσης συναρτήσει του χρόνου για 40delay



Σχήμα 4.1.6: Παλμός και σήμα της πίεσης συναρτήσει του χρόνου για 50delay

 Αναλύοντας το σήμα της πίεσης διαπιστώνεται οτι η περίοδός του είναι μεταβλητή καθώς και το πλάτος του. Παρακάτω παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία όσον αναφορά την συχνότητα εμφάνισης των διάφορων τιμών που παίρνει η περίοδος μέσω ιστογράμματος καθώς και η μέση τιμή και η τυπική της απόκλιση για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.1.7: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών της περιόδου για delayzero με μέση τιμή 56,4 ms και τυπική απόκλιση 7,95 ms



Σχήμα 4.1.8: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών της περιόδου για 10delay με μέση τιμή 55,3 ms και τυπική απόκλιση 5,55 ms



Σχήμα 4.1.9: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών της περιόδου για 20delay με μέση τιμή 55,8 ms και τυπική απόκλιση 6,59 ms



Σχήμα 4.1.10: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών της περιόδου για 30delay με μέση τιμή 55,8 ms και τυπική απόκλιση 7,36 ms



Σχήμα 4.1.11: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών της περιόδου για 40delay με μέση τιμή 56,3 ms και τυπική απόκλιση 6,37 ms



Σχήμα 4.1.12: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών της περιόδου για 50delay με μέση τιμή 55,3 ms και τυπική απόκλιση 6,18 ms

 Όσον αναφορά το πλάτος του σήματος της πίεσης παρατηρούμε ότι επίσης είναι μεταβλητό σε κάθε περίπτωση κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται στατιστικά όσον αναφορά την συχνότητα εμφάνισης των διάφορων τιμών που παίρνει το πλάτος (peak to peak) μέσω ιστογράμματος καθώς και η μέση τιμή και η τυπική απόκλισή του για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.1.13: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών του πλάτους για delayzero με μέση τιμή 0,1088V και τυπική απόκλιση 0,0505V



Σχήμα 4.1.14: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών του πλάτους για 10delay με μέση τιμή 0,1083V και τυπική απόκλιση 0,0535V



Σχήμα 4.1.15: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών του πλάτους για 20delay με μέση τιμή 0,0998V και τυπική απόκλιση 0,0496V



Σχήμα 4.1.16: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών του πλάτους για 30delay με μέση τιμή 0,1092V και τυπική απόκλιση 0,0411V



Σχήμα 4.1.17: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών του πλάτους για 40delay με μέση τιμή 0,1083V και τυπική απόκλιση 0,0412V



Σχήμα 4.1.18: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης τιμών του πλάτους για 50delay με μέση τιμή 0,1074V και τυπική απόκλιση 0,0441V

 Ένα από τα πιο σημαντικά σημεία της παρούσας μελέτης είναι ο παλμός που μας δίνει το Arduino στην επιλεγμένη χρονοκαθυστέρηση. Αποτελεί το εργαλείο για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε την εξέλιξη της δίνης ή ακόμα και την κίνηση των σωματιδίων στον ομόρρου του κυλίνδρου. Αυτό που πρέπει να σημειώσουμε, ώστε να μπορέσουμε να συνδυάσουμε τις μετρήσεις του σήματος της πίεσης με αυτές του PIV, είναι το σημείο της περιόδου της αρμονικής της πίεσης στο οποίο εμφανίζεται ο παλμός. Παρακάτω ξεκινώντας από την περίπτωση των 10delay, παρουσιάζεται το σημείο (ποσοστό) της περιόδου που παράγεται ο κάθε παλμός στις περιπτώσεις μας (στην περίπτωση του delayzero ο παλμός εμφανίζεται στην αρχή της περιόδου).



Σχήμα 4.1.19: Σημείο (ποσοστό) της περιόδου που παράγεται ο κάθε παλμός για 10delay



Σχήμα 4.1.20: Σημείο (ποσοστό) της περιόδου που παράγεται ο κάθε παλμός για 20delay



Σχήμα 4.1.21: Σημείο (ποσοστό) της περιόδου που παράγεται ο κάθε παλμός για 30delay



Σχήμα 4.1.22: Σημείο (ποσοστό) της περιόδου που παράγεται ο κάθε παλμός για 40delay



Σχήμα 4.1.23: Σημείο (ποσοστό) της περιόδου που παράγεται ο κάθε παλμός για 50delay

4.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων σήματος πίεσης-παλμού

- Όσον αναφορά την μεταβαλλόμενη περίοδο και το μεταβαλλόμενο πλάτος (peak to peak) μπορούμε να παρατηρήσουμε πως η μέση τιμή και των δύο μεταβλητών δεν μεταβάλλεται πολύ στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, κάτι που μας δείχνει οτι ησυχνότητα των εκλυομένων δινών κατά μέσο όρο είναι αρκετά σταθερή. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή της περιόδου κυμαίνεται από 55,3 ms έως 56,4 ms και η μέση τιμή του πλάτους του σήματος της πίεσης κυμαίνεται από 0,0998 Volt έως 0,1092 Volt.
- Όσον αναφορά την παραγωγή των παλμών τάσης, αυτοί εμφανίζονται για κάθε φάση σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα. Διαπιστώνεται οτι το εύρος εμφάνισης είναι αρκετά μεγάλο και επομένως απαιτείται σε μελλοντική εργασία βελτίωση του αντίστοιχου λογισμικού. Παρά το πρόβλημα αυτό, οι μετρήσεις κατέγραψαν με σαφήνεια την παρουσία των δινών και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους.


Σχήμα 4.2.1: Συνοπτική παρουσίαση των σημείων που εμφανίζεται ο παλμός μέσα σε μια περίοδο (σήμα πίεσης: μπλε χρώμα, παλμός: κόκκινο χρώμα)

4.3 <u>Ανάλυση μετρήσεων PIV</u>

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δυο περιοχές γύρω από τον κύλινδρο για κάθε μία από τις παραπάνω έξι περιπτώσεις delay του παλμού. Οι δύο θέσεις επιλέχθηκαν ώστε να μπορεί να παρατηρηθεί η εξέλιξη-συνέχεια του διατμητικού στρώματος και των δινών που δημιουργούνται κοντά καθώς και λίγο πιο μακρυά από την επιφάνεια του κυλίνδρου. Τα πειραματικά αποτελέσματα εντοπίζονται γύρω από τις περιοχές που φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 4.3.1) και είναι οι εξής:

 Περιοχή Α: είναι η περιοχή δεξιά από τον κύλινδρο (αν υποθέσουμε ότι κινούμαστε κατά στην κατεύθυνση της ροής), και κοντά στο σημείο αποκόλλησης της ροής • **Περιοχή Β**: είναι η περιοχή στον "κοντινό" ομόρρου του κυλίνδρου.



Σχήμα 4.3.1: Περιοχές πειραματικών αποτελεσμάτων

Στις δύο παραπάνω περιοχές πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για μία ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος της σήραγγας, προκειμένου να παρατηρήσουμε τις μεταβολές στην πορεία του ρευστού γύρω από το εμπόδιο (στην παρούσα εργασία κύλινδρος). Το μέτρο της ταχύτητας που χρησιμοποιήσαμε ήταν 4,83 m/s. Αξίζει να σημειωθεί οτι ελήφθησαν 300 ζεύγη εικόνων για κάθε μια από τις έξι φάσεις του περιοδικού σήματος που εξετάστηκαν ώστε το δείγμα να πλησιάζει τον πραγματικό μέσο όρο του πεδίου ταχύτητας.

Παρακάτω, για τις δύο παραπάνω περιοχές θα παρουσιαστούν για κάθε περίπτωση delay κάποια βασικά μεγέθη όπως ο μέσος όρος των διανυσμάτων της ταχύτητας, η αδιάστατη αξονική ταχύτητα, οι αδιάστατες τυπικές αποκλίσεις των δυο συνιστωσών της ταχύτητας, η στροβιλότητα του πεδίου ροής και η αδιάστατη κυκλοφορία των δινών.

• Περιοχή Α

Για την συγκεκριμένη περιοχή, υπολογίσαμε το μέσο πεδίο ταχύτητας, το προφίλ της αδιάστατης εγκάρσιας ταχύτητας, τις αδιάστατες τυπικές αποκλίσεις της ταχύτητας (rms), την στροβιλότητα του πεδίου ροής, την διαταραχή της γωνίας του διανύσματος της ταχύτητας για ένα σημείο κοντά στο σημείο αποκόλλησης της ροής και την κυκλοφορία των δινών όπου αυτές υπάρχουν ανά 1,85mm από το κέντρο τους, για κάθε μία από τις περιπτώσεις delay. Στα σχήματα 4.3.2-4.3.7 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση 10delay, στα σχήματα 4.3.14-4.3.19 παρουσιάζονται τα σχήματα για την περίπτωση 20delay, στα σχήματα 4.3.20-4.3.26 παρουσιάζονται τα σχήματα για την περίπτωση 30delay, στα σχήματα 4.3.27-4.3.33 παρουσιάζονται τα σχήματα για την περίπτωση 40delay

και στα σχήματα 4.3.34-4.3.40 παρουσιάζονται τα σχήματα για την περίπτωση 50delay.



Σχήμα 4.3.3: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (zerodelay)



Σχήμα 4.3.4: Διαταραχή της γωνίας του διανύσματος της ταχύτητας με μέση τιμή -9,71° (zerodeay)





Σχήμα 4.3.7: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (zerodelay)



Σχήμα 4.3.9: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (10delay)



Σχήμα 4.3.11: Πεδίο στροβιλότητας (10delay)



Σχήμα 4.3.12: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (10delay)



Σχήμα 4.3.13: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (10delay)



Σχήμα 4.3.15: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (20delay)



Σχήμα 4.3.16: Διαταραχή της γωνίας του διανύσματος της ταχύτητας με μέση τιμή -11,4° (20deay)



Σχήμα 4.3.17: Πεδίο στροβιλότητας (20delay)



Σχήμα 4.3.18: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (20delay)



Σχήμα 4.3.19: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (20delay)



Σχήμα 4.3.21: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (30delay)



Σχήμα 4.3.22: Διαταραχή της γωνίας του διανύσματος της ταχύτητας με μέση τιμή -9,76° (30deay)



Σχήμα 4.3.23: Πεδίο στροβιλότητας (30delay)



Σχήμα 4.3.24: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (30delay)



Σχήμα 4.3.25: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (30delay)



Σχήμα 4.3.26: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (30delay)



Σχήμα 4.3.27: Μέσο πεδίο ταχυτήτων (40delay)



Σχήμα 4.3.28: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (40delay)



Σχήμα 4.3.29: Διαταραχή της γωνίας του διανύσματος της ταχύτητας με μέση τιμή -8,1° (40deay)



Σχήμα 4.3.31: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (40delay)



Σχήμα 4.3.32: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (40delay)



Σχήμα 4.3.33: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (40delay)



Σχήμα 4.3.35: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (50delay)



Σχήμα 4.3.36: Διαταραχή της γωνίας του διανύσματος της ταχύτητας με μέση τιμή -7,85° (50deay)



Σχήμα 4.3.37: Πεδίο στροβιλότητας (50delay)



Σχήμα 4.3.38: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (50delay)



Σχήμα 4.3.39: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (50delay)



Σχήμα 4.3.40: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (50delay)

• Περιοχή Β

Για την συγκεκριμένη περιοχή, υπολογίσαμε το μέσο πεδίο ταχύτητας, το προφίλ της αδιάστατης αξονικής ταχύτητας, τις αδιάστατες ταχύτητες rms, την στροβιλότητα του πεδίου ροής και την κυκλοφορία των δινών όπου αυτές υπάρχουν ανά 1,85mm από το κέντρο τους, για κάθε μία από τις περιπτώσεις delay. Στα σχήματα 4.3.41-4.3.46 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση zerodelay, στα σχήματα 4.3.47-4.3.52 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση zerodelay, στα σχήματα 4.3.53-4.3.58 παρουσιάζονται τα σχήματα για την περίπτωση 20delay, στα σχήματα 4.3.59-4.3.64 παρουσιάζονται τα σχήματα για την περίπτωση την περίπτωση 30delay, στα σχήματα 4.3.65-4.3.70 παρουσιάζονται τα σχήματα για την περίπτωση τα σχήματα για την περίπτωση 40delay και στα σχήματα 4.3.71-4.3.76 παρουσιάζονται τα σχήματα για την περίπτωση 50delay.



Σχήμα 4.3.41: Μέσο πεδίο ταχυτήτων (zerodelay)



Σχήμα 4.3.42: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (zerodelay)



Σχήμα 4.3.44: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (zerodelay)



Σχήμα 4.3.45: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (zerodelay)



Σχήμα 4.3.46: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (zerodelay)



Σχήμα 4.3.48: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (10delay)



Σχήμα 4.3.50: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (10delay)



Σχήμα 4.3.51: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (10delay)



Σχήμα 4.3.52: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (10delay)



Σχήμα 4.3.53: Μέσο πεδίο ταχυτήτων (20delay)



Σχήμα 4.3.54: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (20delay)



Σχήμα 4.3.56: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (20delay)



Σχήμα 4.3.57: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (20delay)



Σχήμα 4.3.58: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (20delay)



Σχήμα 4.3.60: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (30delay)



Σχήμα 4.3.62: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (30delay)



Σχήμα 4.3.63: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (30delay)



Σχήμα 4.3.64: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (30delay)



Σχήμα 4.3.66: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (40delay)



Σχήμα 4.3.68: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (40delay)


Σχήμα 4.3.69: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (40delay)



Σχήμα 4.3.70: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (40delay)



Σχήμα 4.3.72: Αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αδιαστατοποιημένο με το ελεύθερο ρεύμα (50delay)



Σχήμα 4.3.74: Αξονική συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (50delay)



Σχήμα 4.3.75: Εγκάρσια συνιστώσα RMS ταχύτητας αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα (50delay)



Σχήμα 4.3.76: Απόλυτη τιμή της κυκλοφορίας της δίνης αδιαστατοποιημένη με το ελεύθερο ρεύμα και την διάμετρο του κυλίνδρου (50delay)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°:Συμπεράσματα

Παρατηρώντας παράλληλα τα μέσα πεδία ταχύτητας για κάθε περίπτωση delay και την εμφάνιση του κάθε παλμού μέσα σε μια περίοδο της χρονοσειράς του σήματος της πίεσης, εξάγουμε κάποια βασικά συμπεράσματα για την σχέση του διατμητικού στρώματος και των δινών που δημιουργούνται με την πίεση που δέχεται ο κύλινδρος και το σήμα από τον αισθητήρα.



Σχήμα 5.1: Συνοπτικό σχήμα σήματος πίεσης-παλμού-πεδίων ταχύτητας

Παράλληλα εάν αναλογιστούμε πως ο αισθητήρας πίεσης βρίσκεται στις 90 μοίρες από το σημείο ανακοπής, δηλαδή πάνω στον κύλινδρο στην περιοχή Α, μπορούμε να συγκρίνουμε αυτά τα δεδομένα με το μέτρο της ταχύτητας του σημείου που βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον κύλινδρο στην περιοχή Α. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως μεταβάλλεται το μέτρο της ταχύτητας του συγκεκριμένου σημείου με το πέρασμα του χρόνου δηλαδή σε κάθε περίπτωση delay.



Σχήμα 5.2: Μέτρο της ταχύτητας κάτω από τον αισθητήρα πίεσης σε κάθε delay

Συμπερασματικά:

- Η ροή έχει την τάση να απομακρυνθεί από τον κύλινδρο σχηματίζοντας γωνίες της τάξης των 10⁰ ως προς την κατεύθυνση του ελεύθερου ρεύματος και στη συνέχεια πιο κατάντι λόγω της καμπύλωσης του φύλλου διάτμησης το ρευστό κατευθύνεται προς το κέντρο του ομόρρου.
- Επίσης, το μέτρο της ταχύτητας στην περιοχή αυτή (Α) είναι περίπου 50% μεγαλύτερο από την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος και αυξομειώνεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Συγκεκριμένα, αυξάνεται στην περιοχή εμφάνισης της δίνης και μειώνεται κατά την εμφάνιση δίνης στο άλλο σημείο αποκόλλησης
- Η παραγόμενη δίνη εμφανίζεται σε απόσταση περίπου μιας ακτίνας κυλίνδρου από την επιφάνεια του κυλίνδρου, κινούμενη τις επόμενες χρονικές στιγμές προς το κέντρο του ομόρρου.
- Κατά την παραγωγή της δίνης η πίεση στην επιφάνεια του κυλίνδρου έχει την τάση να μειωθεί στην περιοχή εμφάνισής της ενώ την ίδια χρονική περιόδο η πίεση στο άλλο σημείο αποκόλλησης έχει την τάση να αυξηθεί.
- Η κυκλοφορία της δίνης αυξάνει από το κέντρο της προς τα έξω παίρνοντας αδιάστατες τιμές Γ/DU έως 0.9. Παρόμοιες τιμές έχουν επίσης καταγραφεί από άλλες πειραματικές εργασίες της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.
- Η ταχύτητα της δίνης αποτελεί ένα μικρό ποσοστό της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος της τάξης του 20% και κατά τις δυο κατευθύνσεις (x-y)
- Οι διαταραχές της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας του ρευστού παίρνουν μεγάλες τιμές στην περιοχή του φύλλου διάτμησης και είναι περίπου διπλάσιες από τις αντίστοιχες της εγκάρσιας συνιστώσας.
- Η εγκάρσια συνιστώσα παίρνει μικρές τιμές σε σχέση με την αξονική συνιστώσα στην περιοχή του φύλλου διάτμησης ενώ στο κέντρο του ομόρρου και οι δύο συνιστώσες είναι της ίδιας τάξης
- Η στροβιλότητα παίρνει μεγάλες τιμές στην περιοχή του φύλλου διάτμησης με αδιάστατες τιμές της τάξης του 10.
- Το μέτρο της ταχύτητας κατάντι του κυλίνδρου και περί το κέντρο του ομόρρου είναι πολύ μικρότερο από εκείνο του ελεύθερου ρεύματος γεγονός που εξηγεί την εμφάνιση της οπισθέλκουσας επί του κυλίνδρου.
- Στην περιοχή του ομόρρου (Β) εμφανίζονται δίνες δεξιόστροφες και αριστερόστροφες με μια διαφορά φάσης οι μεν ως προς τις δε κινούμενες από τις θέσεις παραγωγής τους προς το κέντρο του ομόρρου ενώ κυκλοφορία και των δυο δινών είναι της ίδιας τάξης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τσαγγάρης Σ,2005.*Μηχανική των Ρευστών*. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.

2. Μαθιουλάκης Δ,2006.*Μηχανική Ρευστών ΙΙ.* Σημειώσεις για το προπτυχιακό μάθημα *Μηχανική Ρευστών ΙΙ,* Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.

3. Παπανικολάου Π,2010. Στοιχεία Μηχανικής των Ρευστών.

4. Bloor MS (1964). The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. J. Fluid Mech.

5. Bloor MG and Gerrard JH (1966). Measurements on turbulent vortices in a cylinder wake.

6. Braza M, Perrin R and Hoarau Y (2006). Turbulence properties in the cylinder wake at high Reynolds numbers.

7. Chyu C, Lin JC, Sheridan J and Rockwell D (1995). Karman vortex formation from a cylinder: Role of phase-locked Kelvin-Helmholtz vortices.

8. Dong, S., Karniadakis, G.E., Ekmekci and Rockwell D. (2006) ,"A combined direct numerical simulation–particle image velocimetry study of the turbulent near wake", J. Fluid Mech

9. Gerrard JH (1966). The mechanism of the vortex formation region of vortices behind bluff bodies.

10. Hyunsik Kim, Jungil Lee, Jooha Kim, Haecheon Choi. Characteristics of flow over a circular cylinder at Re=140,000

11. Norberg C (1994). An experimental investigation of flow around a circular cylinder: influence of aspect ration.

12. Williamson, C. H. K. (1996), "Vortex dynamics in a cylinder wake", Annu. Rev. Fluid Mech