



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική μελέτη (μέσω stereo PIV)
τρισδιάστατου πεδίου ροής απότομης
διεύρυνσης ελεγχόμενου από παλλόμενες
δέσμες αέρα

Του:
Κώστα Στείρου

Επιβλέπων:
Αναπλ. Καθηγητής
Δημήτρης Μαθιουλάκης

Ιούλιος 2013



NATIONAL TECHNOLOGICAL UNIVERSITY OF
ATHENS
DEPT. OF MECHANICAL ENGINEERING
FLUIDS SECTION

DIPLOMA THESIS

**Experimental Investigation (via stereo PIV)
of the three dimensional flow field
over a backward facing step controlled
by pulsating air jets**

Author:
Kostas Steiros

Supervisor:
Associate Professor
Demetri Mathioulakis

July 2013

Τελειώνοντας αυτή τη σχολή, ο κλάδος που σίγουρα μπορώ να ξεχωρίσω είναι η μηχανική των ρευστών. Είναι μία πολύ συμπαγής επιστήμη που δίνει έμφαση τόσο στην πρακτική και στην τεχνική, όσο και στη θεωρία. Αυτό είναι που την κάνει ταυτόχρονα απαιτητική, αλλά και ιδιαίτερα γοητευτική. Επίσης, περιλαμβάνει έννοιες όπως η μη γραμμικότητα, η τύρβη και τα coherent structures που δίνουν τροφή στην επιστημονική περιέργεια και στη βασική έρευνα.

Μεγάλη συμβολή στο να γίνει κατανοητή μια τόσο δύσκολη επιστήμη από τους φοιτητές, όσο και στο να τους εμπνεύσει, έχουν οι καθηγητές του τομέα ρευστών της σχολής. Η μεταδοτικότητα, η αγάπη για το αντικείμενο και η καθοδήγηση που προσφέρουν στους φοιτητές σίγουρα ξεπερνάει τον επαγγελματισμό και είναι κάτι που δεν μπορεί να αποδοθεί από αξιολογήσεις.

Σε αυτό το πλαίσιο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντά μου αναπληρωτή καθηγητή Δημήτρη Μαθιουλάκη για την βοήθεια και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Ο χρόνος που μου διέθεσε, η αγάπη του για τη βασική έρευνα, αλλά και το ότι στάθηκε πραγματικός δάσκαλος συντέλεσαν στο να είναι οι τελευταίοι μήνες ευχάριστοι και προσοδοφόροι.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή Σπύρο Βουτσινά και τον καθηγητή Σωκράτη Τσαγγάρη για την υποστήριξη και την καθοδήγησή τους, αλλά και γιατί η διδασκαλία τους συντέλεσε στο να μάθω σε βάθος και να αγαπήσω ένα τόσο ωραίο θέμα όπως η μηχανική των ρευστών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Καπίρη για τη βοήθειά του στο πείραμα, στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων και σε κάθε απορία μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract	v
1 Εισαγωγή	1
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	3
2.1 Δέσμη ρευστού σε ακίνητο μέσο	3
2.1.1 Η σταθερή δέσμη	3
2.1.2 Η παλλόμενη δέσμη	6
2.2 Η διάταξη του ανάποδου σκαλοπατιού	18
2.2.1 Εισαγωγή	18
2.2.2 Ελεύθερη ροή	19
2.2.3 Εξωτερικά διεγερμένη ροή	25
2.3 Η Μέθοδος Proper Orthogonal Decomposition (POD)	29
2.3.1 Εισαγωγή	29
2.3.2 Μαθηματική θεμελίωση	30
2.3.3 Μερικές εφαρμογές του POD στη μηχανική των ρευστών	32
2.3.4 Εφαρμογή του POD σε συνθετικά δεδομένα	36
2.4 Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV)	39
2.4.1 Εισαγωγή	39
2.4.2 Συμβατικό PIV	40
2.4.3 Stereoscopic PIV	44
3 Πειραματική διαδικασία - Ανάλυση αποτελεσμάτων	52
3.1 Εισαγωγή	52
3.2 Η πειραματική διάταξη	52
3.2.1 Η αεροδυναμική σήραγγα	52
3.2.2 Δοκίμιο ανάποδου σκαλοπατιού	54
3.2.3 Ηλεκτροβάννα αέρος	56
3.2.4 Το σύστημα laser	56

3.2.5	Τροφοδοτικό σωματιδίων	58
3.2.6	Κάμερες καταγραφής	59
3.3	Πειράματα	60
3.3.1	Προετοιμασία πειράματος	60
3.3.2	Διαδικασία διακρίβωσης (calibration)	63
3.3.3	Έλεγχος και συμπεριφορά των δεσμών	66
3.3.4	Εκτέλεση πειράματος	69
3.3.5	Επεξεργασία/ μετά-επεξεργασία με το λογισμικό Insight 3G®	70
3.4	Επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα	72
3.4.1	Εισαγωγή	72
3.4.2	Αριθμοί Reynolds και Mach της ροής	72
3.4.3	Εισαγωγή Raw Data - Διόρθωση σφαλμάτων	74
3.4.4	Ανάλυση POD	77
3.4.5	Χαρακτηριστικά των δεσμών	82
3.4.6	Περιοχή ανακυκλοφορίας	99
3.5	Συμπεράσματα	118
	Βιβλιογραφία	120
	Κώδικες MATLAB®	125

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της ροής κατάντη ανάποδου σκαλοπατιού ύψους $h = 41\text{mm}$ ($ER = 1.22$, $AR = 10.2$, $Re_h \approx 10500$) σε συνθήκες ελεύθερης ροής, καθώς και ροής διεγερμένης από συνεχείς και παλλόμενες δέσμες 2 και 10 Hz, εξερχόμενες από το σκαλοπάτι. Για το σκοπό αυτό έγιναν μετρήσεις σε αεροδυναμική σήραγγα, με τη χρήση της μεθόδου Stereo-PIV. Σε όλες τις περιπτώσεις μελετήθηκαν οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας σε επίπεδα κάθετα στη ροή, σε αποστάσεις 0.25, 0.5, 0.75 και $1h$, ενώ στις περιπτώσεις παλλόμενων δεσμών μελετήθηκαν οι χρονικές στιγμές 20, 35, 45, 65 και 85 ms μετά την εντολή για άνοιγμα των οπών των δεσμών. Αναλύθηκε η συμπεριφορά τριών δεσμών και της περιοχής ανακυκλοφορίας βάσει των μέσων πεδίων ταχυτήτων, αλλά και των στιγμιοτύπων, μέσω της μεθόδου POD. Οι δέσμες παρουσίασαν μεγαλύτερη διάχυση από τη συναντώμενη στη βιβλιογραφία, μη αξονοσυμμετρική μορφή και ανομοιόμορφα χαρακτηριστικά. Στις περιπτώσεις με παλλόμενη διέγερση η ροή ήταν κατα βάση αξονοσυμμετρική, ενώ στη συνεχή διέγερση η ροή έχανε την αξονοσυμμετρία της και παρουσίαζε τρισδιάστατα χαρακτηριστικά. Το μέσο ύψος της περιοχής ανακυκλοφορίας εμφάνιζε μείωση της τάξης του 15% στις περιπτώσεις που η ροή διεγειρόταν από παλλόμενες δέσμες με συχνότητα 10Hz και από συνεχείς δέσμες, σε σχέση με την ελεύθερη ροή. Αντίθετα, η συχνότητα διέγερσης των 2Hz είχε μειωμένη επίδραση στο μέσο ύψος της περιοχής ανακυκλοφορίας. Αυτό γινόταν πιο εμφανές μετά την κατάντη απόσταση $0.75h$, όπου το ύψος έπαιρνε τιμές παρόμοιες με αυτές στην περίπτωση χωρίς διέγερση.

Abstract

This Diploma Thesis examines experimentally the flow over a backward facing step $h = 41\text{mm}$ ($ER = 1.22$, $AR = 10.2$, $Re_h \approx 10500$) under different cases: unforced and forced flow excited from pulsating jets of 2 and 10 Hz, and steady jets. Stereo-PIV measurements of the 3-D velocity field were carried out in planes perpendicular to the flow, in longitudinal distances of 0.25, 0.5, 0.75 and $1h$. The behaviour of the jets and the recirculation region was analysed in all cases, using ensemble averaging and POD analysis of the snapshots. The jets presented high diffusion, non-axisymmetric shape and non-uniform characteristics. The flow was 3-D in the case of steady excitation, influenced by the jets. In all other cases the flow retained its axisymmetry. There was a decrease of about 15% of the mean height of the recirculation zone in the cases of pulsating excitation of 10 Hz and steady excitation compared to the unforced case. On the contrary, the pulsating frequency of 2 Hz had poorer influence on the height of the recirculation zone. This was more obvious after the longitudinal distance of $0.75h$, where the height of the recirculation zone had similar values to that of the unforced case.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η αποκόλληση ρευστού από στερεή επιφάνεια, είτε προκαλείται από μεγάλη κλίση πίεσης, είτε από απότομη αλλαγή της γεωμετρίας, είτε από κάποια άλλη αιτία, σχετίζεται σχεδόν πάντα με απώλειες κάποιου είδους (ώσης, αύξηση οπισθέλκουσας, απώλειες επαναφοράς πίεσης κτλ). Αυτές οι απώλειες έχουν ιδιαίτερη σημασία σε κλάδους όπως η αεροναυπηγική, η κατασκευή οχημάτων και ανεμογεννητριών κτλ. Για αυτό το λόγο εδώ και δεκαετίες γίνονται προσπάθειες από τους μηχανικούς να κατανοήσουν τους μηχανισμούς που καθορίζουν μια αποκολλημένη ροή και τους τρόπους ώστε να επιδράσουν και να περιορίσουν την αποκόλληση και να προκαλέσουν επανακόλληση.

Μια πολύ συνηθισμένη διάταξη η οποία χρησιμοποιείται τόσο πειραματικά [11], [12], [15], [16], [17], [19], όσο και υπολογιστικά, [18], [30], [31], για τη μελέτη του μηχανισμού της αποκόλλησης είναι αυτή του ανάποδου σκαλοπατιού, εξαιτίας της απλοποίησης που προκαλεί στη ροή: Η θέση της αποκόλλησης είναι απόλυτα ελεγχόμενη και ανεξάρτητη του Re , και συμβαίνει στη ακμή του σκαλοπατιού λόγω της απότομης αλλαγής της γεωμετρίας. Την αποκόλληση ακολουθεί σχηματισμός φύλλου στροβιλότητας που χαρακτηρίζεται από θετικές ταχύτητες στην πάνω μεριά και αρνητικές ταχύτητες στην κάτω. Τελικά το ρευστό επανακολλάται κατάντη του σκαλοπατιού και σχηματίζει περιοχή ανακυκλοφορίας. Το μήκος επανακόλλησης μπορεί να περιορισθεί με τη χρήση διέγερσης της ροής μέσω δεσμών αέρα εξερχόμενες από το σκαλοπάτι [16], [32].

Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει σε σχέση με τη ροή κατάντη σκαλοπατιού περιορίζονται είτε σε σημειακές μετρήσεις της ταχύτητας [32], [47] είτε σε αποτύπωση δυο συνιστωσών της ταχύτητας σε επίπεδο παράλληλο στη ροή, υποθέτοντας αξονική συμμετρία [9], [16].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια να διερευνηθούν οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας σε επίπεδα κάθετα στη ροή, τόσο για ελεύθερη ροή όσο και για διεγερμένη από είτε παλλόμενες είτε

συνεχείς δέσμες αέρα. Για το σκοπό αυτό έγιναν πειράματα σε αεροσήραγγα όπου είχε τοποθετηθεί δοκίμιο ανάποδου σκαλοπατιού, ενώ οι ταχύτητες αποτυπώθηκαν με τη μέθοδο Stereo-PIV [38]. Τα δεδομένα που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την εξαγωγή των μέσων πεδίων ταχυτήτων, όσο και για τη μελέτη των στιγμιοτύπων μέσω της μεθόδου POD [20].

Σκοπός της εργασίας είναι αρχικά η αποτύπωση της συμπεριφοράς των δεσμών και των χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται σε κάθε περίπτωση. Επίσης, ερευνώνται τα χαρακτηριστικά της περιοχής ανακυκλοφορίας και ειδικότερα η υπόθεση αξονοσυμμετρίας και η ελάττωση του ύψους του φυλλου διάτμησης για κάθε περίπτωση.

Η εργασία δομείται ως εξής: Στο πρώτο μέρος παρατίθεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία συνοψίζονται τα αποτελέσματα ερευνών σχετικά με τα χαρακτηριστικά των δεσμών ρευστού σε ακίνητο μέσο, καθώς και μελέτες σχετικά με τη ροή ρευστού κατάντη ανάποδου σκαλοπατιού. Επίσης παρουσιάζονται η μέθοδος POD και η πειραματική μέθοδος PIV. Στο δεύτερο μέρος γίνεται παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας και της επεξεργασίας των στοιχείων, ενώ γίνεται και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Δέσμη ρευστού σε ακίνητο μέσο

2.1.1 Η σταθερή δέσμη

Η σταθερή δέσμη (steady jet) για ασυμπίεστη ροή, είναι το πιο απλό παράδειγμα δέσμης με την έννοια ότι αποτελεί φαινόμενο σταθερό στο χρόνο. Για αυτό το λόγο είναι και η πιο μελετημένη περίπτωση δέσμης από τους ερευνητές, με την έρευνα να προσφέρει αναλυτικά [2] και αριθμητικά μοντέλα [6], εκτός από πειραματικές μετρήσεις [1], [2]. Στην ακόλουθη ενότητα θα παρουσιαστούν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά της σταθερής δέσμης όσον αφορά το πεδίο ταχυτήτων, το επίπεδο τύρβης, το entrainment καθώς και τις δομές που δημιουργούνται στη ροή. Να σημειώσουμε ότι ως entrainment ορίζουμε την αύξηση της παροχής μάζας που προκαλεί η δέσμη. Αυτό οφείλεται στις διατμητικές τάσεις που προκαλούνται από την επαφή ρευστού μεγαλύτερης ταχύτητας (δέσμη), με ρευστό μικρότερης ταχύτητας (περιβάλλον ρευστό).

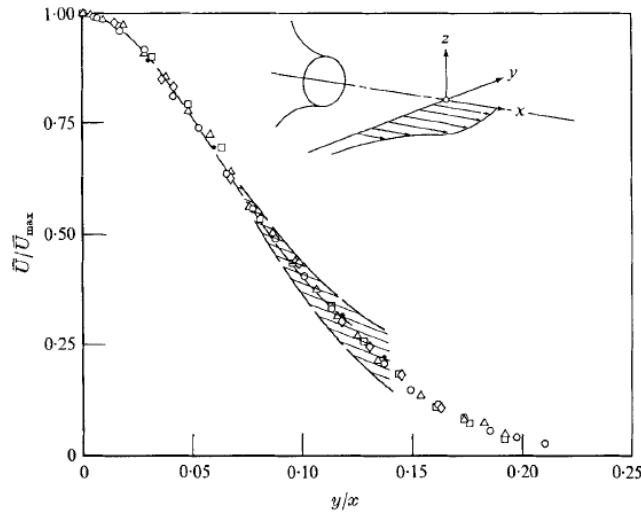
Μία από τις σημαντικές μελέτες έγινε από τους Wygnanski και Fiedler [1] στην οποία μελετήθηκε η αξονοσυμμετρική σταθερή δέσμη με τη χρήση ανεμομετρίας θερμού νήματος (hot wire anemometry). Το ακροφύσιο που εξερχόταν η δέσμη είχε διάμετρο 1.04 in, ενώ ο αδιαστατος αριθμός Reynolds ήταν της τάξης του 10^5 .

Μεταξύ άλλων μελετήθηκε η υπόθεση της ομοιότητας της τυρβώδους αξονοσυμμετρικής σταθερής δέσμης. Ως ομοιότητα εννοούμε την σύμπτωση των κατανομών διαφόρων μεγεθών της δέσμης (όπως μέση ταχύτητα και διακυμάνσεις) ανεξάρτητα της κατάντη απόστασης από τη δέσμη, αφού βέβαια προηγηθεί κατάλληλη αδιαστατοποίηση.

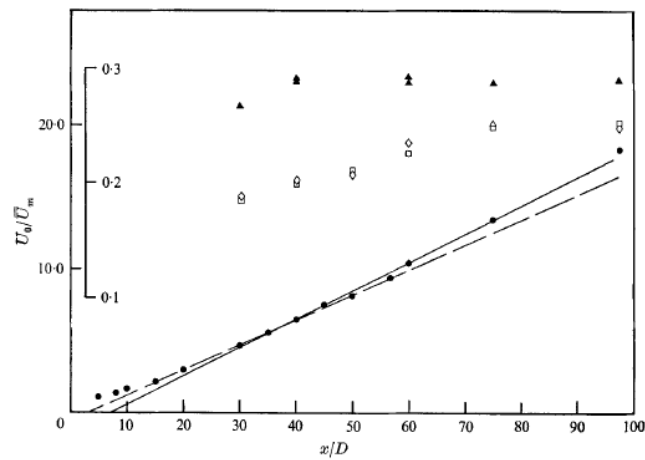
Το σχήμα 2.1 δείχνει την κατανομή της μέσης ταχύτητας της δέσμης για διαφορετικές κατάντη αποστάσεις, που κυμαίνονται από 40 μέχρι

100 διαμέτρους ακροφυσίου. Η ταχύτητα αδιαστατοποίησης είναι η μέγιστη ταχύτητα για κάθε απόσταση, ενώ η απόσταση από τον άξονα συμμετρίας, y , αδιαστατοποιείται με την απόσταση από το ακροφύσιο, x . Από το σχήμα 2.1 φαίνεται ότι υπάρχει όντως ομοιότητα και η κατανομή δεν αλλάζει με την απόσταση x .

Στο σχήμα 2.2 φαίνονται τα επίπεδα τύρβης και η μέση ταχύτητα της ροής στον άξονα της δέσμης για διάφορες αποστάσεις από το ακροφύσιο, όπως μετρήθηκαν από τους Wygnanski και Fiedler. Παρατηρούμε ότι η μέση αξονική ταχύτητα παρουσιάζει ομοιότητα από την απόσταση των 20 διαμέτρων ακροφυσίου. Όσον αφορά τις διαταραχές της ταχύτητας, παρατηρούμε ότι οι αξονικές παρουσιάζουν ομοιότητα 40 διαμέτρους κατάντη, ενώ οι εφαπτομενικές και οι ακτινικές 70 διαμέτρους κατάντη.



Σχήμα 2.1: Κατανομή αδιάστατης μέσης αξονικής ταχύτητας αξονοσυμμετρικής σταθερής δέσμης για διαφορετικές αποστάσεις από το ακροφύσιο. Φαίνεται η ομοιότητα για $x/D > 40$, από [1]. \circ , $x/D = 40$; Δ , 50; \square , 60; \diamond , 70; \bullet , 80



Σχήμα 2.2: Μεταβολή της μέσης ταχύτητας και επιπέδου τύρβης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της δέσμης συναρτήσει της κατάντη απόστασης από το ακροφύσιο. Από [1].
 •, U_0/\bar{U}_m ; ▲, $\sqrt{u'^2}/\bar{U}_m$; □, $\sqrt{v'^2}/\bar{U}_m$; ◇, $\sqrt{w'^2}/\bar{U}_m$

Μια άλλη μελέτη που επικεντρώθηκε στην αλλαγή των χαρακτηριστικών της σταθερής δέσμης συναρτήσει του αριθμού Reynolds, ήταν αυτή των Romano et al [2]. Πιο συγκεκριμένα, έγιναν πειραματικές μετρήσεις του πεδίου ταχυτήτων, σε επίπεδα κάθετα και παράλληλα στον άξονα της δέσμης, για αριθμούς Reynolds που κυμαινόταν από 3,000 έως 30,000.

Για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος PIV¹ σε επίπεδα κάθετα και παράλληλα στον άξονα της δέσμης. Η δέσμη εξερχόταν από σωλήνα που είχε εισαχθεί μέσα στο δοχείο μέτρησης και είχε διάμετρο 2.2 cm. Ο σωλήνας είχε αρκετά μεγάλο μήκος (100 διαμέτρους) έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η ροή είναι τυρβώδης. Να σημειώσουμε ότι το εργαζόμενο μέσο ήταν νερό.

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η πτώση της αδιαστατοποιημένης αξονικής ταχύτητας κατά μήκος του άξονα της δέσμης συναρτήσει της απόστασης κατάντη του σωλήνα. Φαίνονται αποτελέσματα από τις μετρήσεις των [2] με PIV, όσο και με LDA² από τους Amielh et al. Είναι φανερό η πτώση της μέσης ταχύτητας κατάντη και η τάση σύμπτωσης σε μεγαλύτερες τιμές κοντά στις μετρήσεις των Amielh et al. για μεγαλύτερες τιμές Reynolds.

Στο σχήμα 2.4 φαίνονται ενδεικτικά οι RMS τιμές των διακυμάνσεων της αξονικής ταχύτητας στον άξονα της δέσμης για διαφορετικές

¹Παρουσίαση της μεθόδου PIV θα γίνει στο κεφάλαιο 2.4.

²Laser Doppler Anemometry. Πειραματική μέθοδος μέτρησης ταχυτήτων με χρήση του φαινομένου Doppler. Περισσότερα στο [37].

τιμές της κατάντη απόστασης. Παρατηρούμε ότι ακολουθούν ανοδική πορεία μέχρι την απόσταση των 5-6 διαμέτρων που έχουμε σύμπτωση των στρωμάτων διάτμησης (shear layers). Για μικρότερες τιμές Reynolds η σύμπτωση γίνεται πιο κατάντη και για αυτό παρατηρούμε μια αύξηση των διακυμάνσεων.

Στο σχήμα 2.5 φαίνεται ο αδιάστατος ρυθμός entrainment της ροής για την απόσταση των 0.75 διαμέτρων συναρτήσει της ακτινικής απόστασης για διαφορετικές τιμές Reynolds. Οι καμπύλες παρουσιάζουν ελαφρά αρνητική κλίση για αποστάσεις $r/D < 0.5$ ενώ για ακτινικές αποστάσεις μέχρι $r/D \approx 1$ παρουσιάζουν μεγάλη θετική κλίση. Τέλος, για μεγαλύτερες αποστάσεις η τιμή τείνει σε μια σταθερή τιμή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί καθώς στην κατάντη απόσταση της 0.75 διαμέτρου, οι δομές/ δίνες που σχηματίζει η ροή έχουν μεγάλη ισχύ και επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό entrainment. Για ακτινικές αποστάσεις μεγαλύτερες της μίας διαμέτρου αυτές οι δίνες εξασθενούν κάτι που φαίνεται στην πτώση του ρυθμού entrainment. Τέλος, για μικρές αποστάσεις είναι σημαντική η επίδραση του ρεύματος της δέσμης από το σωλήνα και γι' αυτό δεν είναι σημαντικές οι δίνες που σχηματίζονται, άρα και ο ρυθμός entrainment.

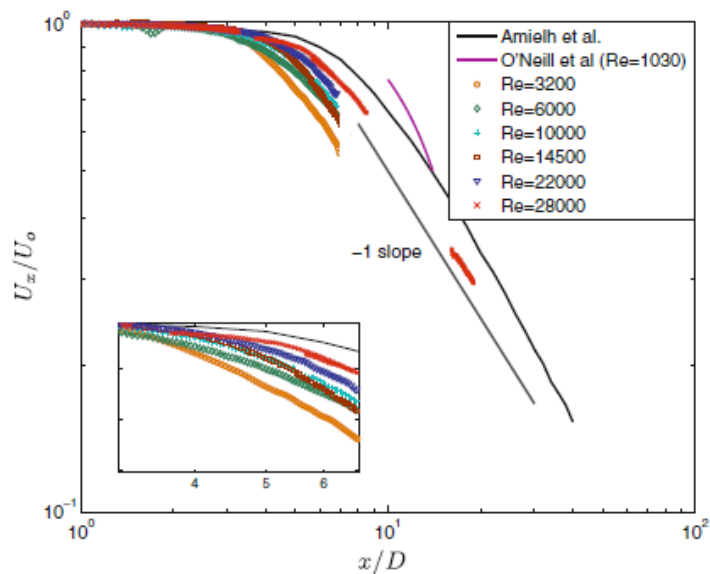
Όσον αφορά τις δομές (coherent structures) που εμφανίζονται στη ροή, αυτές συμπεριλαμβάνουν δινοσωλήνες, δακτύλιους στροβιλότητας και ελικοειδείς στροβίλους που όσο πάμε σε πιο κατάντη αποστάσεις εξασθενούν και γίνονται πιο χαοτικές, ενώ δεν παρουσιάζουν την ευκρίνεια των δομών που εμφανίζονται στην περίπτωση της παλλόμενης δέσμης [7]. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται αυτή η συμπεριφορά όπου για μικρές αποστάσεις από το ακροφύσιο της δέσμης εμφανίζονται δομές, ενώ πιο κατάντη, η ροή γίνεται πιο χαώδης. Η οπτικοποίηση επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μογογιάς στη δέσμη. Το εργαζόμενο μέσο ήταν νερό (από [8]).

Στο σχήμα 2.7 φαίνεται η επίδραση του entrainment στο πεδίο ταχυτήτων, σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της δέσμης. Παρατηρούμε ότι η δέσμη "τραβάει" ρευστό από τον περιβάλλον χώρο, ενώ παρουσιάζονται και κάποια ίχνη δινών [2].

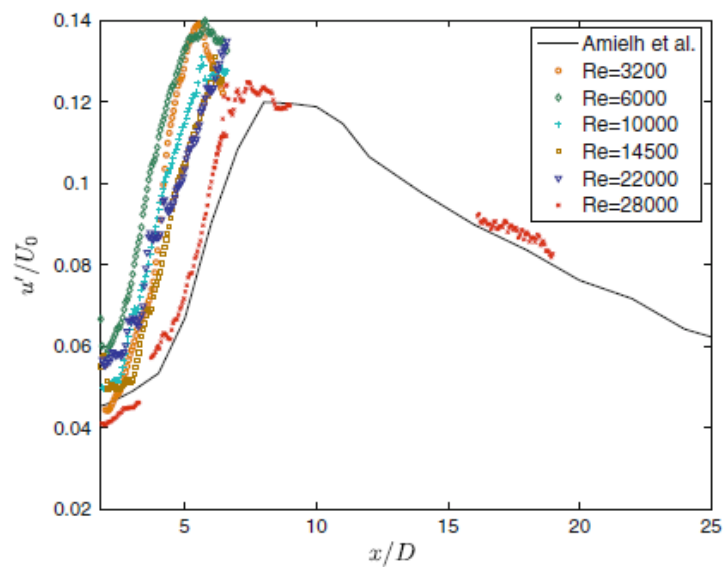
Περισσότερα στοιχεία για τη σταθερή δέσμη θα παρουσιασθούν στην επόμενη ενότητα, όπου θα υπάρξει σύγκριση με την παλλόμενη δέσμη.

2.1.2 Η παλλόμενη δέσμη

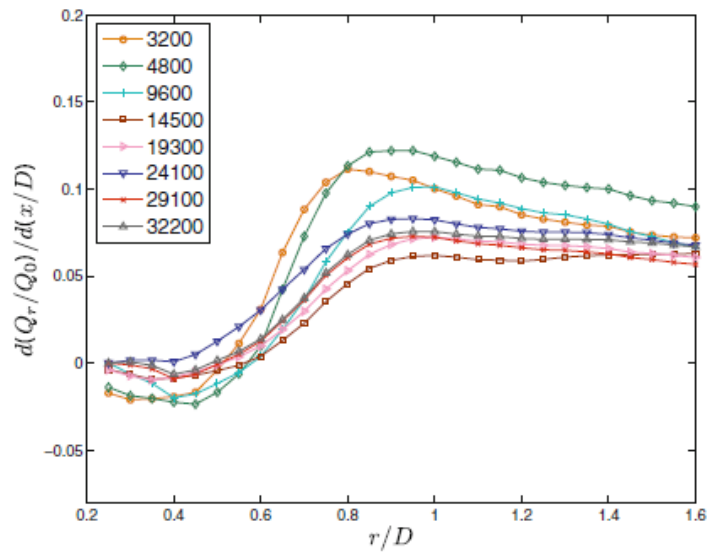
Η παλλόμενη δέσμη (pulsating jet) είναι αντικείμενο μελέτης των ερευνητών από το 1970. Μια από τις πρώτες έρευνες που έγινε από τους Crow και Champagne, [3] έδειξε ότι μια μικρή χρονική διακύμανση της



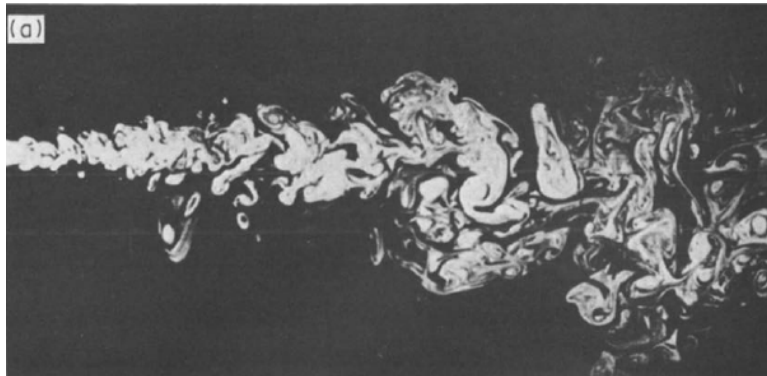
Σχήμα 2.3: Αδιαστατοποιημένη μέση αξονική ταχύτητα σταθερής δέσμης συναρτήσει της κατάντη απόστασης για διαφορετικές τιμές αριθμού Reynolds, στον άξονα της δέσμης. Γίνεται σύγκριση με την κατανομή $(x/D)^{-1}$, μετρήσεις από LDA των Amielh et al. και μετρήσεις του O'Neil. Από [2].



Σχήμα 2.4: RMS της αξονικής ταχύτητας, στον άξονα της σταθερής δέσμης, συναρτήσει της κατάντη απόστασης, για διαφορετικές τιμές Re. Γίνεται σύγκριση με μετρήσεις από LDA των Amielh et al. Από [2].



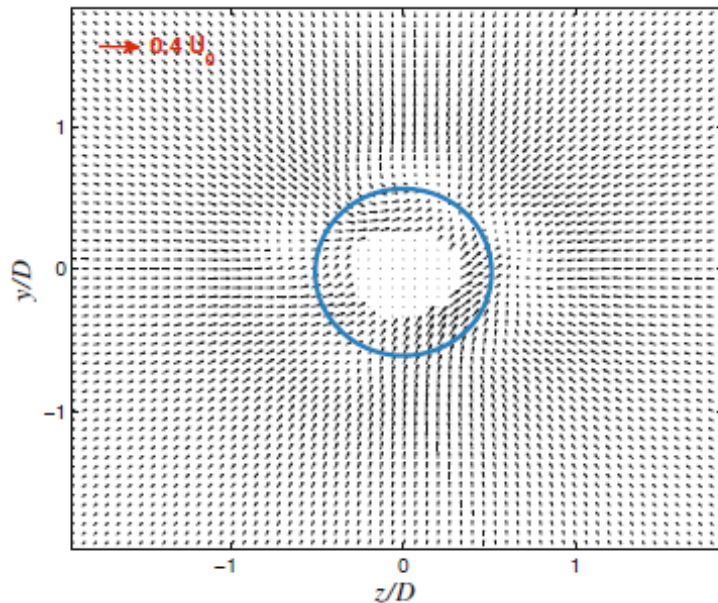
Σχήμα 2.5: Αδιαστατοποιημένος ρυθμός entrainment της σταθερής δέσμης συναρτήσει της ακτινικής απόστασης για $x/D=0.75$, για διαφορετικές τιμές Re . Από [2].



Σχήμα 2.6: Ασπρόμαυρη φωτογραφία αξονοσυμμετρικής σταθερής δέσμης. Η οπτικοποίηση επιτυγχάνεται με τη χρήση μπογιάς. Από [8].

έντασης της δέσμης αυξάνει έως και 32% το entrainment της ροής, ενώ οι Bremhorst και Hollis, [4] έδειξαν ότι με μία πλήρως παλλόμενη δέσμη επιτυγχανόταν έως και διπλασιασμός του entrainment. Μετά από αυτή την ανακάλυψη η παλλόμενη δέσμη έτυχε μεγάλης χρήσης από τη βιομηχανία σε θαλάμους καύσης και σε τεχνικές ανάμιξης ρευστού, ακριβώς για αυτήν την αυξημένη ικανότητα entrainment που παρουσιάζει σχετικά με τη σταθερή δέσμη.

Ωστόσο, το χαρακτηριστικό της μη μόνιμης ροής κάνει δύσκολη την μελέτη του φαινομένου, (πειραματική, υπολογιστική, αναλυτική) και



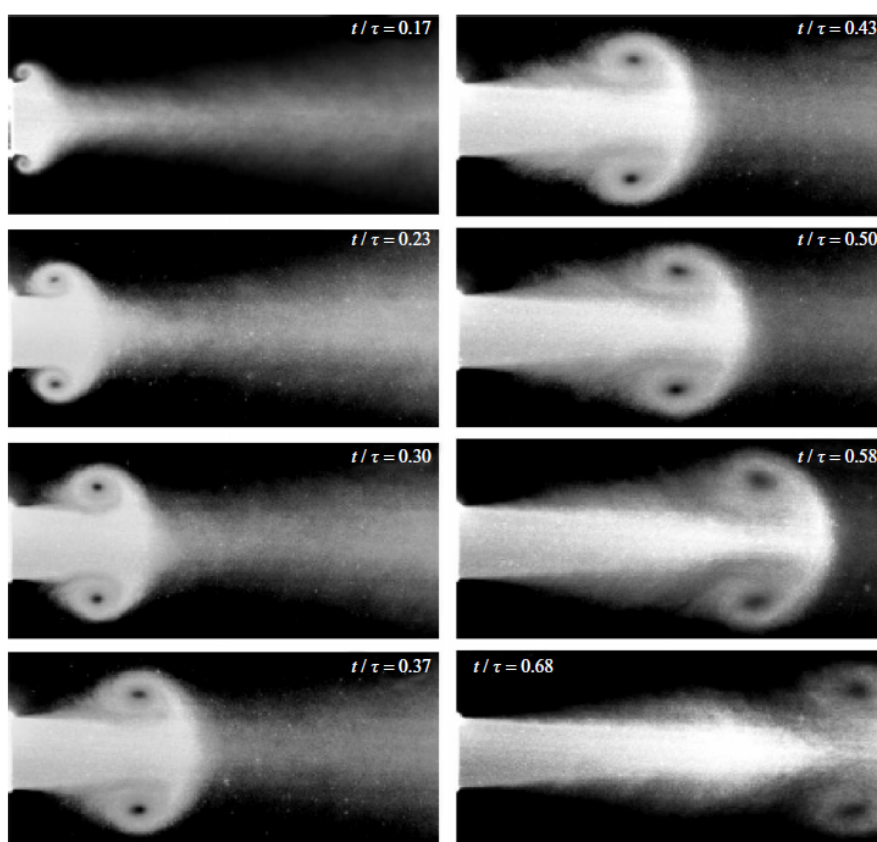
Σχήμα 2.7: Μέσο διανυσματικό πεδίο σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σταθερής δέσμης για κατάντη απόσταση $x/D = 1.5$ και $Re = 19300$. Ο κύκλος συμβολίζει το ακροφύσιο. Φαίνεται ότι η δέσμη λόγω entrainment "τραβάει" ρευστό από τον περιβάλλοντα χώρο. Από [2].

ακόμα και σήμερα η παλλόμενη δέσμη είναι αντικείμενο έρευνας. Στην παρακάτω ενότητα θα παρουσιασθούν ορισμένα χαρακτηριστικά της, όπως η κατανομή των ταχυτήτων, το entrainment και οι διάφορες δομές στη ροή που δημιουργούνται, με τα δύο πρώτα να συγκρίνονται με την περίπτωση της χρονικά αμετάβλητης περίπτωσης για καλύτερη κατανόηση του φαινομένου.

Στην παλλόμενη δέσμη η μεταβολή της ταχύτητας εξόδου από το ακροφύσιο γενικά οδηγεί σε μια επαλληλία από δακτύλιους στροβιλοτήτας (vortex rings) που προκαλούνται από αναδίπλωση του ρευστού, στο εξωτερικό της δέσμης, προς την πίσω ροή. Ο κάθε δακτύλιος ξεκινά να σχηματίζεται τη στιγμή που η ταχύτητα στο άκρο του ακροφυσίου αρχίζει να αυξάνει. Στη συνέχεια, αυξάνει σε μέγεθος, η κυκλοφορία του αυξάνει, μεταφέρεται (convection) κατάντη, ενώ πιο μετά αποκολλάται. Ενδεικτικά, στρόβιλοι που σχηματίζονται από την παλλόμενη δέσμη φαίνονται στο σχήμα 2.8 όπως τους κατέγραψαν οι [5] για αδιάστατο αριθμό Strouhal $St=0.06$ ³, όπου τα μεγέθη αδιαστατοποίησης είναι η μέση ταχύτητα εξόδου του ρευστού από το ακροφύσιο και η διάμετρος

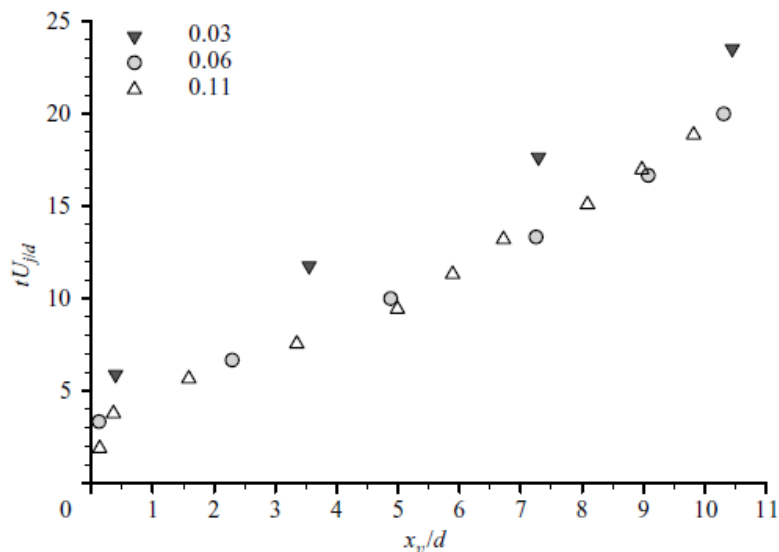
³Ο αριθμός Strouhal ορίζεται ως fL/V , όπου f η συχνότητα του φαινομένου, L ένα χαρακτηριστικό μήκος και V μια χαρακτηριστική ταχύτητα.

του ακροφυσίου. Σε πείραμα που διεξήγαγαν χρησιμοποιώντας την τεχνική PIV κατέγραψαν επίσης τη μεταβολή της θέσης των στροβίλων συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου και για διαφορετικούς αριθμούς Strouhal, σχήμα 2.9. Για κάθε διαφορετικό αριθμό Strouhal (St) δημιουργούταν και διαφορετικό μέγεθος δίνης (παράμετρος L/D). Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι μεγαλύτερη συχνότητα διέγερσης της δέσμης (ή αριθμός St) οδηγεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα δημιουργίας στροβίλων, κοντινότερη χωρική γειτνίαση μεταξύ τους και πιο γρήγορη εξασθένησή τους.



Σχήμα 2.8: Δίνες που σχηματίζονται στα άκρα της παλλόμενης δέσμης για διάφορες χρονικές στιγμές. $St=0.06$. Από [5].

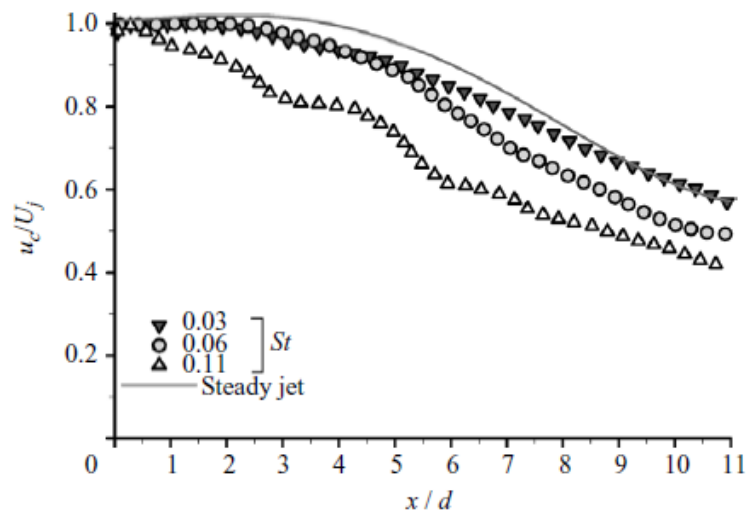
Ένα άλλο σημείο που πρέπει να σταθούμε σε σχέση με την παλλόμενη δέσμη είναι η πτώση της μέσης ταχύτητας στον άξονα και η "διάχυσή" της, συναρτήσει της κατάντη απόστασης. Μία παράμετρος που χρησιμοποιούμε για την απόδοση της διάχυσης της δέσμης είναι η μεταβολή του μισού πλάτους της, δηλαδή η απόσταση από τον άξονα της δέσμης μέχρι το σημείο όπου η μέση ταχύτητα είναι μισή από την



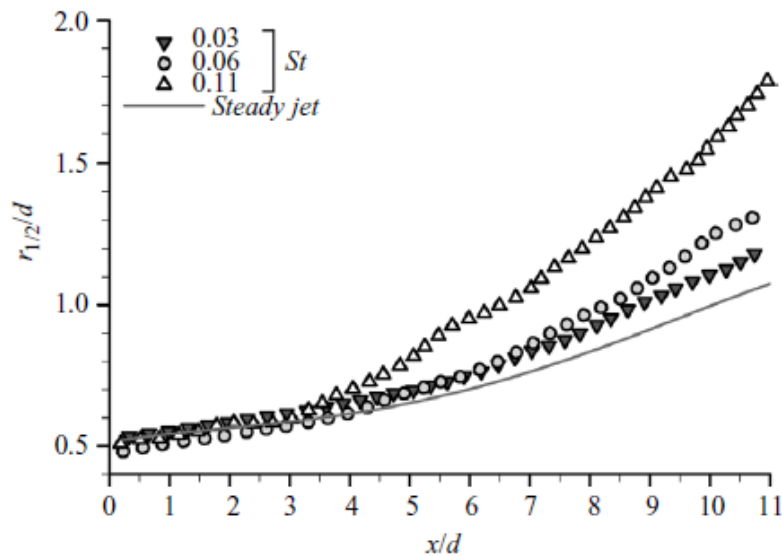
Σχήμα 2.9: Θέση στο χώρο των δινών από παλλόμενη δέσμη συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου, για διαφορετικούς St. Από [5].

μέση ταχύτητα στον άξονα. Τα παραπάνω στοιχεία φαίνονται στα σχήματα 2.10 και 2.11, για διαφορετικούς αριθμούς St και σε σύγκριση με τη σταθερή δέσμη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10, ο ρυθμός ελάττωσης της μέσης ταχύτητας της δέσμης στον άξονά της αυξάνει για μεγαλύτερους αριθμούς St, ενώ φαίνεται ότι ο μικρότερος ρυθμός ελάττωσης εμφανίζεται για το σταθερή δέσμη. Παρόμοια, στο σχήμα 2.11 βλέπουμε ότι ο ρυθμός που διαχέεται η δέσμη στο ακίνητο ρευστό αυξάνει για μεγαλύτερους αριθμούς St, ενώ η μικρότερη διάχυση επιτυγχάνεται για σταθερή δέσμη. Παρατηρούμε μια ξαφνική αύξηση στο ρυθμό διάχυσης της δέσμης για κάποια συγκεκριμένη κατάντη απόσταση x/d , η τιμή της οποίας μεγαλώνει όσο μειώνεται η συχνότητα διέγερσης. Για παράδειγμα, αυτή η ξαφνική αύξηση για $St=0.11$ είναι στο $x/d \approx 4.5$, ενώ για $St=0.03$ είναι στο $x/d \approx 6.5$. Στο σχήμα 2.12 φαίνονται ισοϋψείς της μέσης αξονικής ταχύτητας για $St=0.06$ και για σταθερή δέσμη. Φαίνεται η μεγαλύτερη διάχυση για την παλλόμενη περίπτωση.

Στο σχήμα 2.13 φαίνεται η αδιαστατοποιημένη παροχή μάζας συναρτήσει της κατάντη αδιάστατης απόστασης x/d για παλλόμενη δέσμη διαφόρων αριθμών St, καθώς και για σταθερή (από [5]). Στην παροχή αυτή συνυπολογίζονται οι συνεισφορές από την παροχή μάζας της δέσμης καθώς και το entrainment. Παρατηρούμε ότι η παροχή αυξάνει για τις περιπτώσεις παλλόμενης δέσμης, φαινόμενο που εξηγείται στο αυξημένο entrainment λόγω σχηματισμού δακτυλίων στροβιλότητας όπως



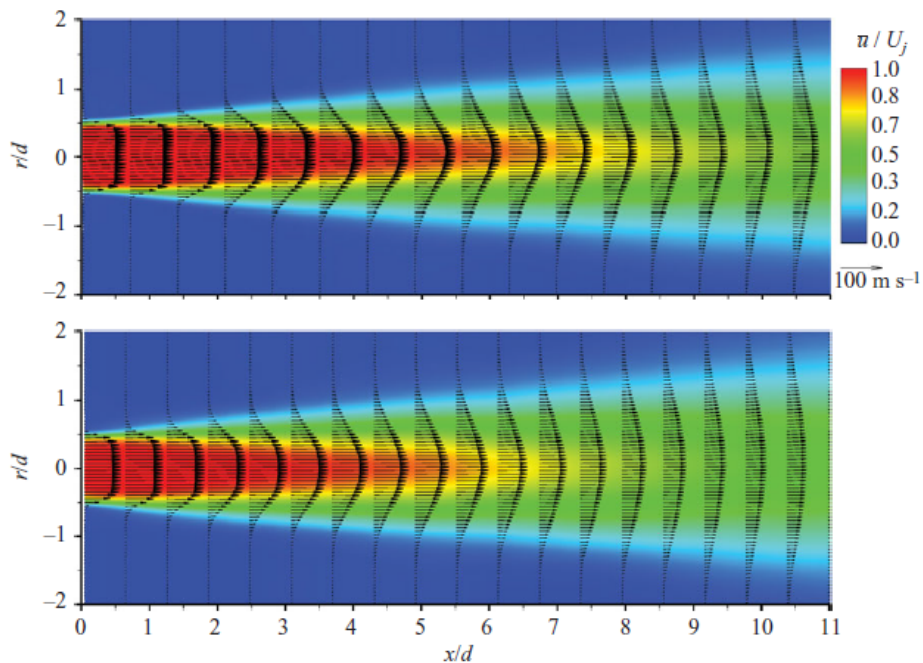
Σχήμα 2.10: Μεταβολή της μέσης ταχύτητας στον άξονα της δέσμης για διαφορετικούς αριθμούς St . Σύγκριση με σταθερή περίπτωση. Από [5].



Σχήμα 2.11: Μεταβολή του "μισού πλάτους δέσμης" συναρτήσει της αδιάστατης κατάντη απόστασης, για διαφορετικούς αριθμούς St . Σύγκριση με σταθερή περίπτωση. Από [5].

αναφέραμε και πιο πάνω. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι μετά από κάποια απόσταση x/d , που εξαρτάται από τον αριθμό St , ο ρυθμός entrainment του παλλόμενης δέσμης γίνεται σταθερός (σταθερή κλίση καμπύλης) και ίσος με αυτού της σταθερής δέσμης.

Στο σχήμα 2.14 φαίνεται η μεταβολή της αδιάστατης παροχής μά-

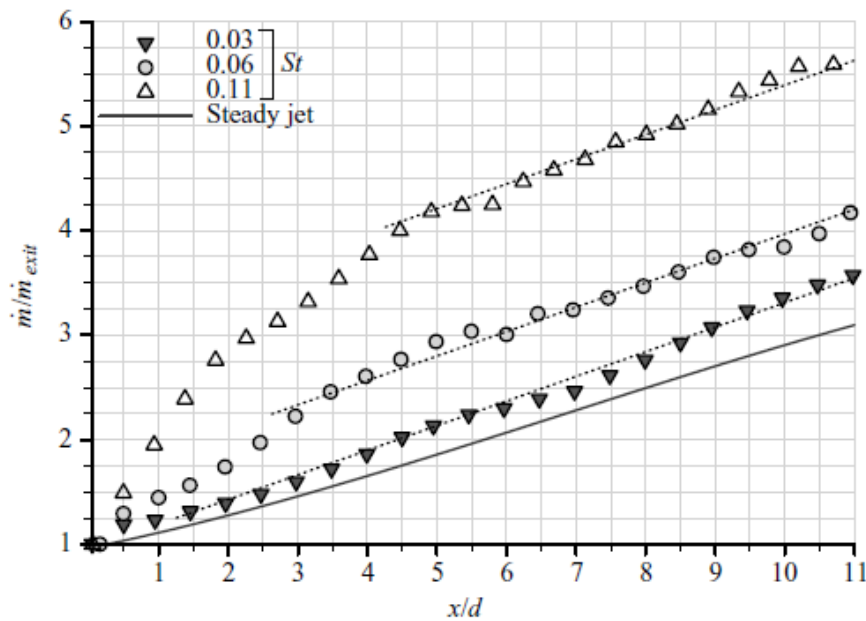


Σχήμα 2.12: Ισοϋψείς της μέσης αξονικής ταχύτητας. Πάνω σταθερή δέσμη, κάτω παλλόμενη με $St=0.06$. Από [5].

ζας συναρτήσει του αριθμού St για την κατάντη αδιάστατη απόσταση $x/d=10$. Παρατηρούμε ότι η αδιάστατη παροχή αυξάνει μέχρι κάποια βέλτιστη τιμή και έπειτα ελαττώνεται. Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται με την εξάρτηση που έχει το entrainment με τις δομές στροβιλότητας. Συγκεκριμένα, ενώ για μικρούς αριθμούς St το entrainment που αντιστοιχεί σε κάθε δακτύλιο στροβιλότητας που σχηματίζεται είναι μεγάλο, αυτά έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και έτσι η παροχή μάζας αυξάνεται πολύ λίγο σε σχέση με τη σταθερή δέσμη. Αυξάνοντας τη συχνότητα, παρατηρείται (σχήμα 2.9) ότι οι δακτύλιοι στροβιλότητας απέχουν μικρότερη απόσταση μεταξύ τους και όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14 το entrainment αυξάνει μέχρι περίπου για $St \approx 0.24$. Για υψηλότερες συχνότητες οι δακτύλιοι στροβιλότητας εξασθενούν πιο γρήγορα και δεν προσφέρουν τόσο πολύ στο entrainment. Σε αυτό οφείλεται και η πτώση του στο διάγραμμα.

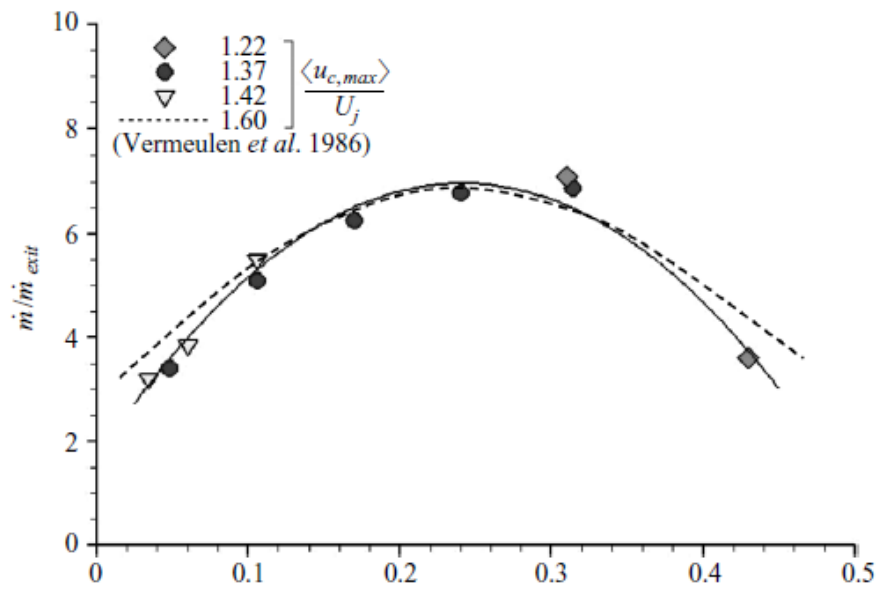
Στο σχήμα 2.15 φαίνεται η μεταβολή της αδιάστατης παροχής ορμής συναρτήσει της κατάντη απόστασης, για δέσμες διαφόρων αριθμών St , καθώς και για την σταθερή περίπτωση. Παρατηρούμε ότι στην παλλόμενη περίπτωση η ροή ορμής αυξάνεται έντονα, μέχρι που σταθεροποιείται μετά από κάποιο σημείο, διαφορετικό για κάθε αριθμό St . Π.χ. για απόσταση $7d$, $5d$ και $2d$ για $St=0.03$, 0.06 και 0.11 αντίστοιχα. Αυτή

η σταθεροποίηση της ορμής οφείλεται στην εξασθένηση-διάχυση των δακτυλίων στροβιλότητας, που οδηγεί την παλλόμενη δέσμη να συμπεριφέρεται σαν σταθερή. Μεγαλύτερες ορμή επιτυγχάνουμε για μεγαλύτερη συχνότητα διέγερσης. Για την σταθερή περίπτωση παρατηρούμε και εκεί μια μικρή αύξηση της ροής ορμής (σαφώς μικρότερη από την παλλόμενη περίπτωση) που αποδίδεται στην αρνητική μέση στατική πίεση στις τυρβώδεις περιοχές της δέσμης (Miller & Comings [43], Hussain & Clark [44]).

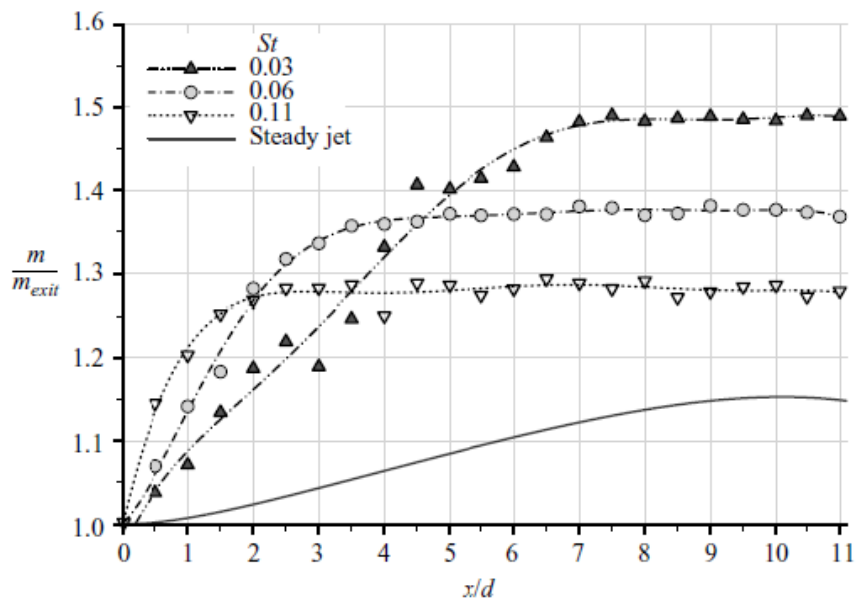


Σχήμα 2.13: Μεταβολή της αδιαστατοποιημένης παροχής μάζας, για παλλόμενη δέσμη, συναρτήσει της κατάντη απόστασης, για διαφορετικούς St. Σύγκριση με σταθερή δέσμη. Από [5].

Τέλος, στο σχήμα 2.16 φαίνονται οι μεταβολές των επιπέδων τύρβης στη γραμμή συμμετρίας της δέσμης, συναρτήσει της κατάντη απόστασης. Φαίνονται περιπτώσεις τόσο για την παλλόμενη περίπτωση διαφόρων αριθμών St, όσο και για την σταθερή περίπτωση. Παρατηρούμε ότι για την σταθερή περίπτωση το επίπεδο τύρβης μεγιστοποιείται στην τιμή 0.13 για την απόσταση $x/d=7.5$. Σχετικά με τις παλλόμενες δέσμες, παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλος ο αριθμός St, τόσο μεγαλώνει το επίπεδο τύρβης. Ωστόσο, για μεγάλες κατάντη αποστάσεις οι παλλόμενες περιπτώσεις και η σταθερή τείνουν να συγκλίνουν. Αυτό οφείλεται όπως είδαμε και παραπάνω στην εξασθένηση των δινών και συνεπώς στην εξομοίωση σταθερής και παλλόμενης περίπτωσης.



Σχήμα 2.14: Μεταβολή της αδιάστατης παροχής μάζας συναρτήσει του αριθμού St . Από [5].

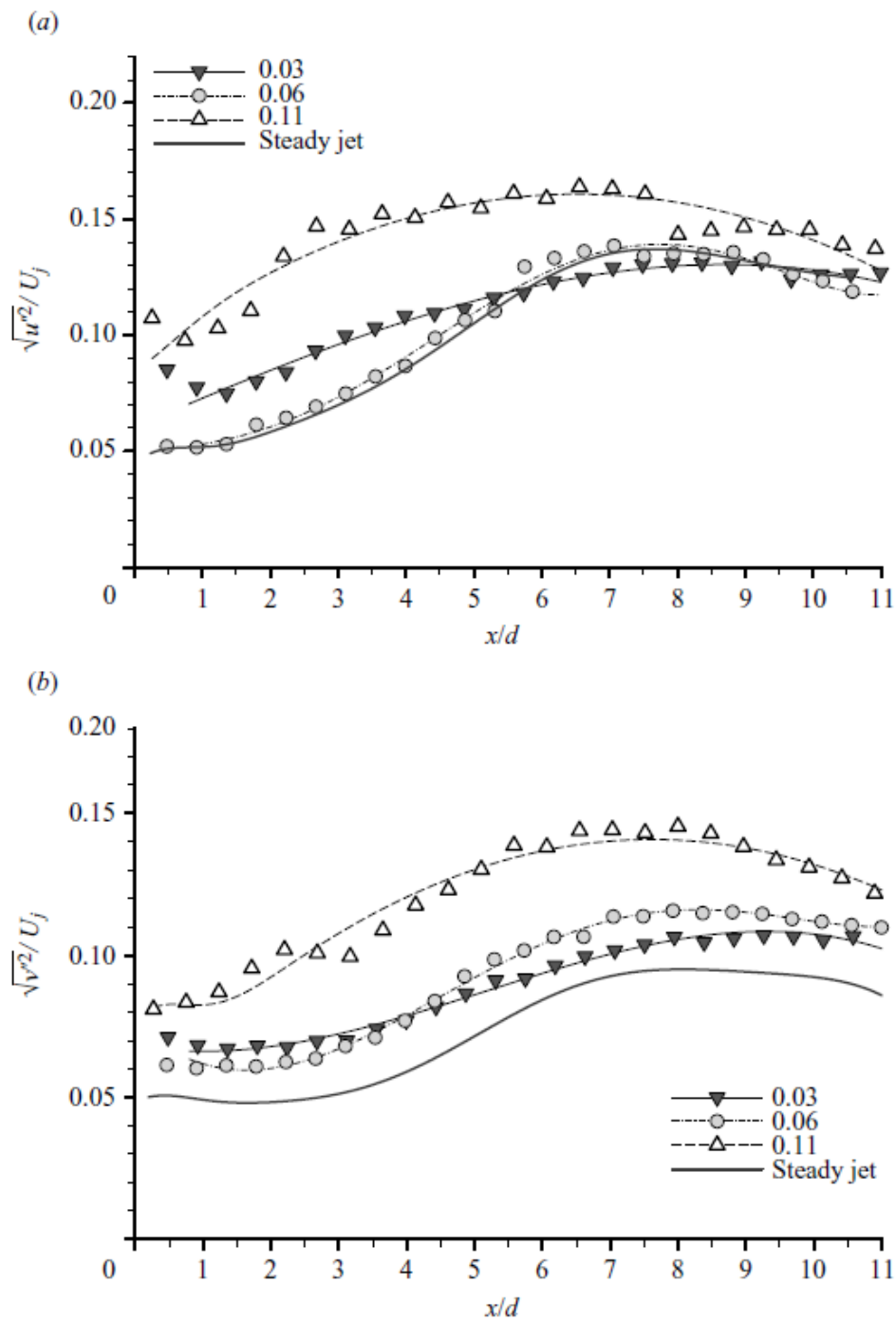


Σχήμα 2.15: Αδιάστατη ροή ορμής παλλόμενης δέσμης συναρτήσει της κατάντη απόστασης για διαφορετικούς αριθμούς St . Σύγκριση με σταθερή δέσμη. Από [5].

Στον πίνακα 2.1 φαίνονται συγκεντρωμένα οι κυριότερες διαφορές μεταξύ σταθερών και παλλόμενων δεσμών.

<i>Χαρακτηριστικά Ροής</i>	<i>Steady Jet</i>	<i>Pulsating Jet</i>
Coherent Structure Intensity	✓	✓ ✓
Self Similarity	✓	–
Entrainment	✓	✓ ✓
Half-width increase downstream	✓	✓ ✓
Axial velocity reduction downstream	✓	✓ ✓
Momentum flux increase downstream	✓	✓ ✓
Turbulence intensity increase downstream	✓	✓ ✓

Πίνακας 2.1: Διαφορές μεταξύ σταθερής και παλλόμενης δέσμης.



Σχήμα 2.16: Μεταβολή των επιπέδων τύρβης στην μέση γραμμή της δέσμης συναρτήσει της κατάντη απόστασης, για παλλόμενες περιπτώσεις διαφορετικών St και για σταθερή δέσμη. (α) αξονική διακύμανση, (β) ακτινική διακύμανση. Από [5].

2.2 Η διάταξη του ανάποδου σκαλοπατιού

2.2.1 Εισαγωγή

Ως διάταξη "ανάποδου σκαλοπατιού" (backward facing step, bfs) εννοούμε την ακαριαία πτώση μιας επίπεδης γεωμετρίας και την συνέχιση της σε διαφορετικό, πιο χαμηλό επίπεδο (σχήμα 2.17).

Το πεδίο ροής κατάντη μιας τέτοιας γεωμετρίας έχει υπάρξει αντικείμενο μελέτης τόσο πειραματικά σε αεροσήραγγες, [11], [12], [15], [16], [17], [19], όσο και υπολογιστικά, [18], [30], [31], από πολλούς ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες λόγω των χαρακτηριστικών που έχει, καθώς και της ποικιλίας των φαινομένων που προκαλεί στη ροή. Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη του σκαλοπατιού μας επιτρέπει τη μελέτη της διαδικασίας επανακόλλησης, με το να ελαχιστοποιεί την επίδραση της αποκόλλησης σε αυτή, καθώς σε άλλου είδους γεωμετρίες μπορεί να υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο [10].

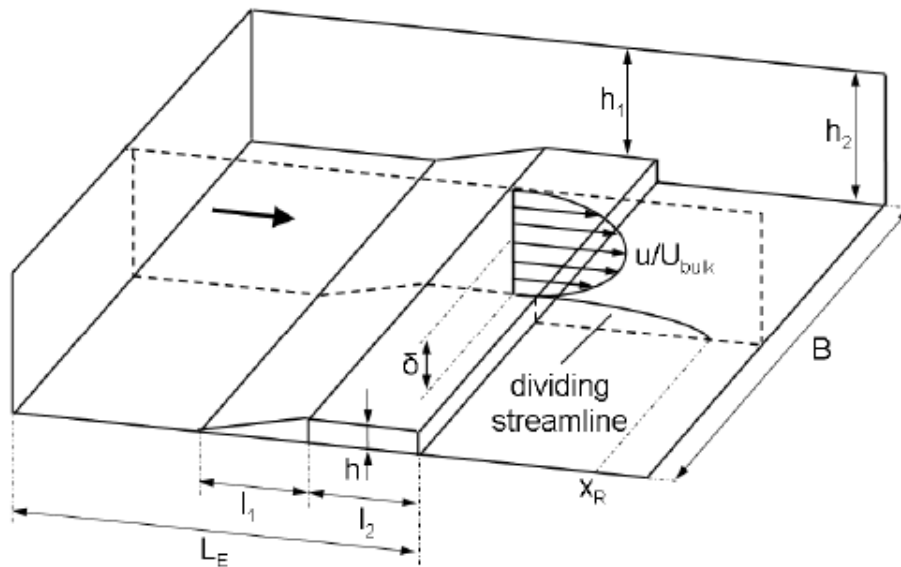
Στη συνέχεια της ενότητας θα δούμε ορισμένα χαρακτηριστικά της ροής κατάντη του σκαλοπατιού, όπως μέσες ταχύτητες, τις δομές που σχηματίζονται στη ροή καθώς και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση, για την περίπτωση της εξαναγκασμένης, όσο και της ελεύθερης ροής κατάντη του σκαλοπατιού.

Αρχικά, θα ορίσουμε ορισμένα χαρακτηριστικά για την διάταξη του σκαλοπατιού που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Ως Aspect Ratio (AR) ορίζουμε το πλάτος του σκαλοπατιού (B) ως προς το ύψος του (h), (βλέπε σχήμα 2.17), ως Expansion Ratio (ER) ορίζουμε το λόγο του ύψους της αεροσήραγγας πριν το σκαλοπάτι προς το ύψος μετά, ως Re_h τον αριθμό Re που περιλαμβάνει την επ' άπειρον ταχύτητα της ροής και το ύψος του Step, ενώ X_r ορίζουμε την μέση απόσταση από το σκαλοπάτι, όπου επανακολλάται η ροή. Ειδικά για το τελευταίο υπάρχουν διαφορετικοί ορισμοί από την βιβλιογραφία, με τον πιο διαδεδομένο αυτόν που ορίζει ως μήκος επανακόλλησης (reatachment length) την απόσταση από το βήμα μέχρι το σημείο που υπάρχει τομή της γραμμής μηδενικής ταχύτητας με τον τοίχο [11].

$$AR = \frac{B}{h} \quad (2.2.1)$$

$$ER = \frac{h_2}{h_1} \quad (2.2.2)$$

$$Re_h = \frac{U_\infty h}{\nu} \quad (2.2.3)$$



Σχήμα 2.17: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του σκαλοπατιού. Από [11].

2.2.2 Ελεύθερη ροή

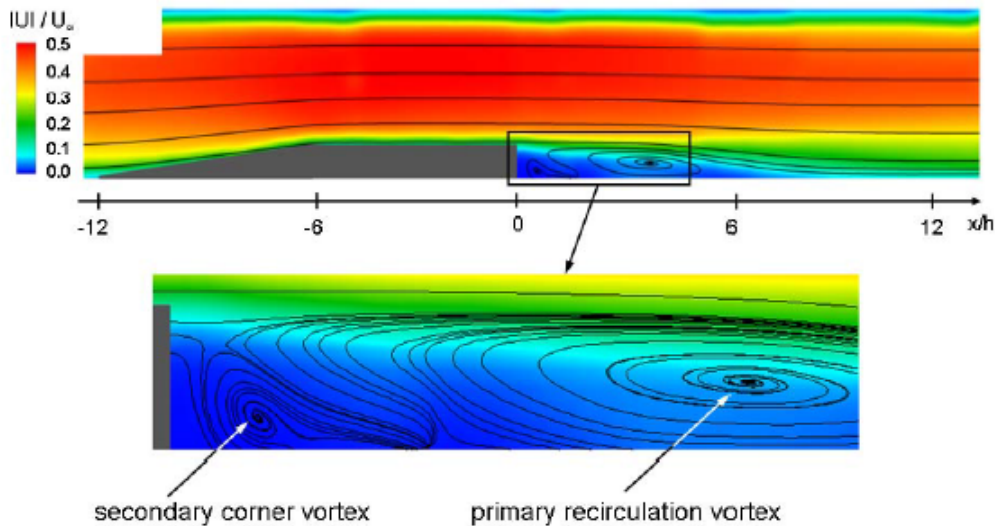
Στην ενότητα αυτή θα δούμε μερικά χαρακτηριστικά της ροής κατάντη του "ανάποδου σκαλοπατιού" χωρίς εξωτερικές διεγέρσεις. Θα εστιάσουμε στη μέση ροή, όσο και στα δυναμικά φαινόμενα.

Χαρακτηριστικά μέσης ροής

Τα βασικά χαρακτηριστικά της μέσης ροής, για ροή κατάντη ανάποδου σκαλοπατιού χωρίς εξωτερική διέγερση, φαίνονται στο σχήμα 2.18. Το τυρβώδες οριακό στρώμα πάχους δ επίπεδης γεωμετρίας, το οποίο έχει δημιουργηθεί ανάντη του σκαλοπατιού, αποκολλάται λόγω της απότομης αλλαγής κλίσης, σχηματίζοντας ένα στρώμα διάτμησης με ρευστό χαμηλής ταχύτητας στην κοιλότητα και ρευστό μεγάλης ταχύτητας από πάνω. Το στρώμα διάτμησης επανακολλάται κατάντη στην απόσταση X_r , δημιουργώντας μια περιοχή ανακυκλοφορίας ανάντη του σημείου επανακολλήσεως. Είναι επίσης ορατός και ένας στρόβιλος αντίθετης φοράς στη γωνία του σκαλοπατιού.

Μια από τις μελέτες που επικεντρώθηκαν στη μεταβολή των χαρακτηριστικών της ροής στο βήμα συναρτήσεως του Re_h ήταν η [12]. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η ροή ($ER=1.94$, $AR=18$) μετρώντας την κατανομή της κατάντη ταχύτητας και το X_r μέσω LDA και υποθέτωντας πλήρως

ανεπτυγμένη διδιάστατη ροή αναγνώρισαν δύο περιοχές όπου υπάρχει διδιάστατος χαρακτήρας της ροής ($Re_h < 200$ και $Re_h > 3000$). Στο ενδιάμεσο η ροή είναι έντονα τριδιάστατη. Επίσης, στην περίπτωση στρωτής ροής ($Re_h < 200$) το X_r αυξάνει με τον Re μέχρι ένα μέγιστο 17h. Στην περίπτωση της μετάβασης, το μήκος επανακόλλησης μειώνεται μέχρι τα έξι μήκη βήματος, ενώ στην τυρβώδη περίπτωση ($Re_h > 3000$) το X_r σταθεροποιείται στα 7h. Επομένως, το μήκος επανακόλλησης κατάντη του βήματος είναι σταθερό και ανεξάρτητο του Re για επαρκώς τυρβώδεις ροές. Αυτή η μείωση του μήκους επανακόλλησης αποδίδεται από τους συγγραφείς σε αύξηση του entrainment του στρώματος διάτμησης κατάντη του σκαλοπατιού, με την αύξηση του Re . Κατά συνέπεια, οδηγούμαστε σε μείωση του όγκου του ρευστού της περιοχής ανακυκλοφορίας και έτσι το μήκος επανακόλλησης μειώνεται.



Σχήμα 2.18: Μέση ταχύτητα και γραμμές ροής ρευστού στο επίπεδο συμμετρίας του bfs. Φαίνονται ο πρωτεύων στρόβιλος ανακυκλοφορίας και ο δευτερεύων γωνιακός στρόβιλος. $Re_h = 4440$. Από [11]

Μια άλλη μελέτη [13] εστίασε στη μεταβολή του μήκους επανακόλλησης όταν μεταβάλλεται το ER και ο Re_h . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.19. Παρατηρούμε ότι η αύξηση του Re_h μειώνει το X_r μέχρι κάποιο σημείο, ενώ για αρκετά μεγάλους Re_h φαίνεται να σταθεροποιείται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Επίσης, στο δεξί διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του X_r συναρτήσει του ER. Για μικρά expansion ratios το X_r αυξάνει ενώ η παράγωγός τους μειώνεται μετά από κάποιο σημείο, διατηρώντας όμως αύξουσα πορεία.

Είναι πολύ σημαντικό να σημειώσουμε ότι πολλές μελέτες που έχουν

<i>Μελέτη</i>	Re_h	AR	ER	X_r/H
Bradssaw and Wong [47]	42000	30.5	1.25	6.0
	39000			7.97
Eaton and Johnston [49]	23000	12	1.667	8.20
	11000			6.97
Kim et al. [52]	30000	24	1.5	7±1
	45000	16		7±1
	33000			7.80
Chun and Sung [32]	23000	12.5	1.5	7.20
	13000			6.75
Kostas, Soria and Chong [9]	46640	62	1.02	4.8

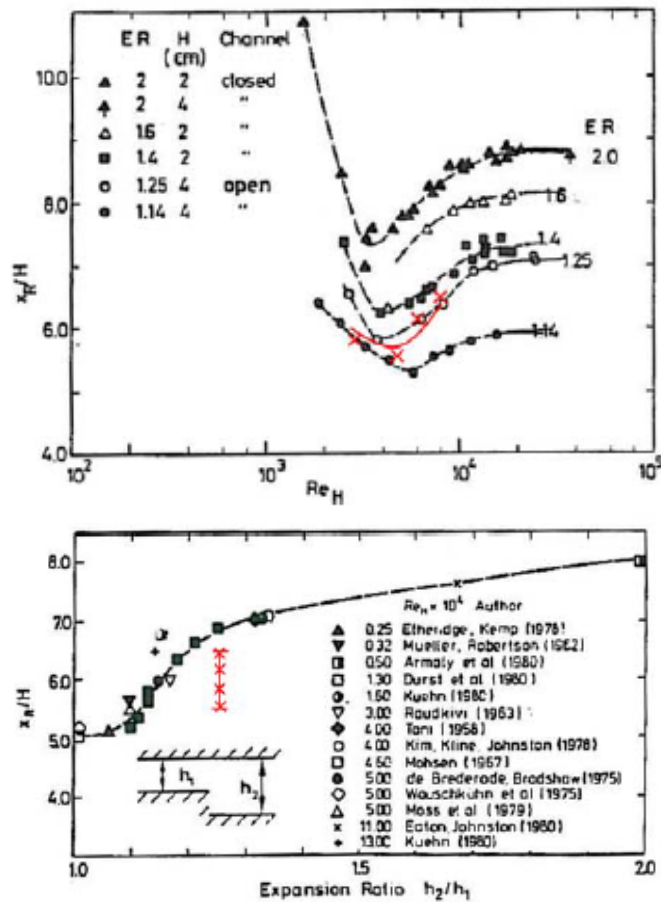
Πίνακας 2.2: Αδιάστατα μήκη επανακόλλησης, από πειραματικές έρευνες για ελευθέρη ροή κατάντη σκαλοπατιού.

γίνει πάνω στο bfs υποθέτουν γενικά διδιάστατη ροή στο επίπεδο συμμετρίας για aspect ratios $AR > 10$. Αριθμητικές προσομοιώσεις [14] δείχνουν ότι τα πλάγια τοιχώματα της σήραγγας μπορεί να προκαλέσουν δέσμες ρευστού από τον τοίχο προς το επίπεδο συμμετρίας, για χαμηλούς Re , αλλοιώνοντας σημαντικά το διδιάστατο χαρακτήρα. Οι [15] επέκτειναν το όριο για διδιάστατη ροή στο $AR > 50$. Αυτό δείχνει ότι οι αναλύσεις πρέπει να είναι προσεχτικές καθώς η υπόθεση της διδιάστατης ροής μπορεί υπό προϋποθέσεις να είναι εσφαλμένη.

Δυναμικά φαινόμενα

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη πειραματικών μεθόδων που επιτρέπουν την ταυτόχρονη χωρική αποτύπωση μεγάλου όγκου δεδομένων (PIV), έγινε δυνατή η καταγραφή και η ανάλυση των διαφόρων μη-μόνιμων δομών και χαρακτηριστικών της ροής που παρατηρούνται στην τυρβώδη ροή κατάντη του σκαλοπατιού, όπως την αναδίπλωση του στρώματος διάτμησης, την ανάπτυξη των δινών, την ταλάντωση του μήκους επανακόλλησης κτλ. Στη συνέχεια θα δούμε με πιο μεγάλη λεπτομέρεια αυτά τα χαρακτηριστικά της ροής του σκαλοπατιού.

Εξαιτίας της απότομης ακαριαίας κλίσης του σκαλοπατιού, το ρευστό αποκολλάται σχηματίζοντας στρώμα διάτμησης όπως αναφέρθηκε πιο πάνω. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με ένα "ελεύθερο στρώμα διάτμησης" (free shear layer) [9], [11], [16], ενώ δημιουργούνται δομές με στροβιλότητα κατά την εγκάρσια κατεύθυνση,



Σχήμα 2.19: Πάνω : Επιρροή του Re_H στο X_r για διαφορετικά ER. Κάτω: Επιρροή του ER στο X_r . Από [11].

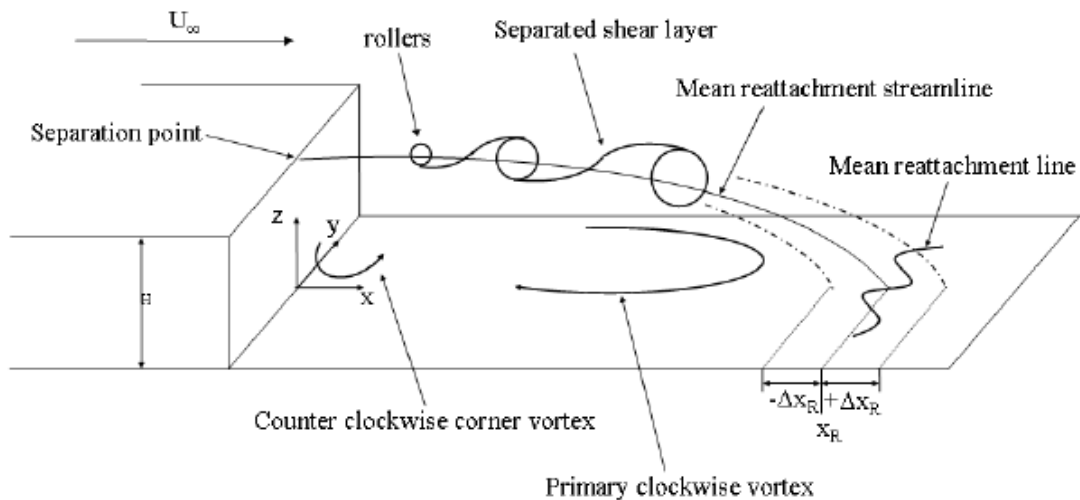
χαρακτηριστική της αστάθειας Kelvin-Helmholtz⁴. Η παραγωγή αυτών των δινών γίνεται με μία μέση συχνότητα, που εκφράζεται με αριθμό $St_{n,\theta} = fh/U = 0.2$, όπου ο δείκτης συμβολίζει την φυσική συχνότητα [16]. Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης των ασταθειών φαίνεται στο σχήμα 2.20.

Στη συνέχεια, βρίσκεται η περιοχή που το στρώμα διάτμησης "αναπτύσσεται" και οι δίνες μεταφέρονται με συναγωγή πιο κατάντη [11]. Η ταχύτητα συναγωγής των δινών υπολογίζεται σε ένα ποσοστό της επ' άπειρου ταχύτητας, συγκεκριμένα με $0.6U_0$, [9]. Γίνεται αντιληπτή μια συγχώνευση των δινών, παράγοντας μεγαλύτερες δίνες. Λόγω αυτής της συγχώνευσης, η φυσική συχνότητα μειώνεται, ενώ η ροή γίνεται τελείως

⁴ Αστάθεια της ροής που παρατηρείται στο φύλλο διάτμησης που προκαλεί η επαφή δύο ρευστών διαφορετικών ταχυτήτων. Περισσότερα στο [7].

ασταθής εξαιτίας της μεγάλης οπισθοροής (backflow) στο μέσο της περιοχής ανακυκλοφορίας. Στιγμιότυπα από τη συγχώνευση των δινών φαίνονται στο σχήμα 2.21. Επίσης, οι [9] υπολόγισαν τη στροβιλότητα, τις τάσεις Reynolds και την τυρβώδη κινητική ενέργεια σε διάφορα επίπεδα για την ίδια περιοχή. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος POD⁵ για την εξαγωγή δομών μεγάλης ενέργειας. Παρατηρήθηκαν δινοσωλήνες και συγχώνευση δινών, που αύξαναν τις τυρβώδεις τάσεις και την τυρβώδη κινητική ενέργεια. Επίσης, το POD έδειξε πιο ομοιόμορφες δομές κοντά στο σκαλοπάτι, ενώ πιο ανομοιόμορφες/ ασταθείς πιο κατάντη. Τέλος, οι συγγραφείς αποδίδουν αυτή την ανομοιομορφία, σε αυξημένο τρισδιάστατο χαρακτήρα των δινών πιο κατάντη.

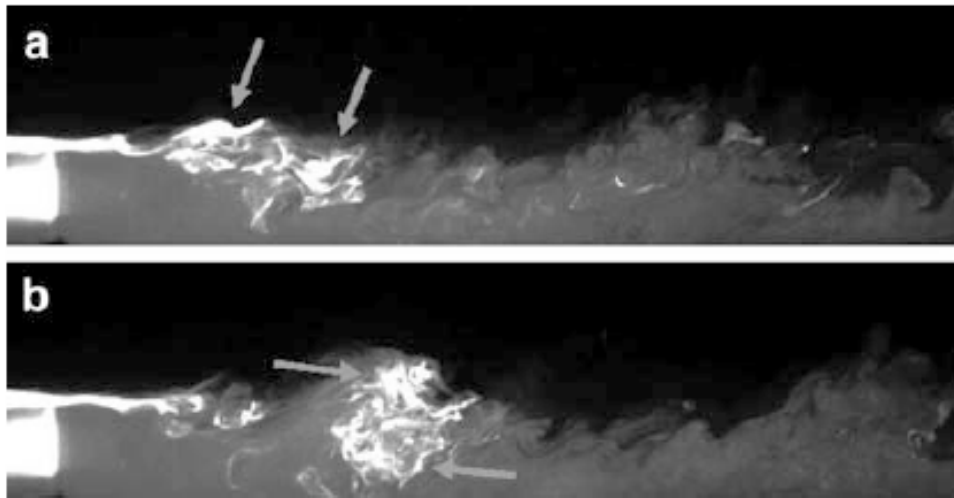
Μία άλλη περιοχή που παρουσιάζει χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά είναι το σημείο που το στρώμα διάτμησης (shear layer) επανακολλάται και προσκρούει στο πάτωμα της σήραγγας. Δημιουργούνται θετικές αξονικές ταχύτητες κατάντη του σημείου επανακόλλησης και αρνητικές αξονικές ταχύτητες ανάντη του σημείου επανακόλλησης. Οι [17] μέτρησαν με PIV την περιοχή ταλάντωσης του μήκους επανακόλλησης $\Delta_r \approx 2h$, ενώ ο αριθμός St της ταλάντωσης ήταν $St_h \approx 0.04$. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα από DNS (Direct Numerical Simulation), από τους [18] που δείχνουν αριθμό $St_h \approx 0.06$.



Σχήμα 2.20: Σχηματική απεικόνιση των μη-μόνιμων φαινομένων σε διάταξη σκαλοπατιού. Από [11].

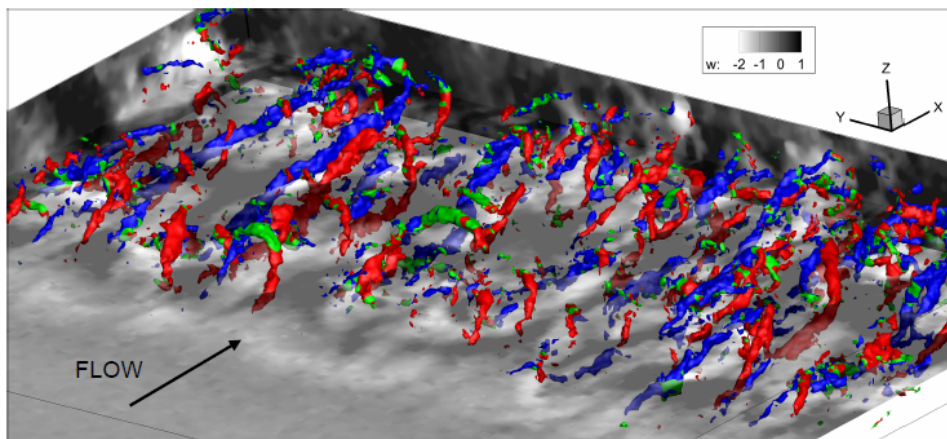
Τέλος, μια περιοχή που παρουσιάζει έντονα τρισδιάστατες δομές, είναι η περιοχή ανακυκλοφορίας. Σε μετρήσεις που πραγματοποίησαν

⁵Η μέθοδος θα αναλυθεί στην ενότητα 2.3.



Σχήμα 2.21: a,b Στιγμιότυπα από τη συγχώνευση των δινών σε περιοχή κατόντη της διάταξης σκαλοπατιού. Με τα βέλη φαίνονται οι δίνες. Από [9].

με τη μέθοδο του tomo-PIV (πειραματική μέθοδος που υπολογίζει το πεδίο ταχυτήτων σε όγκο), οι [19] παρατήρησαν το σχηματισμό "hairpin vortices"⁶ που μεταφέρονται με συναγωγή ($0.42U$) και εξελίσσονται σε πιο χαώδεις δομές κατόντη. Στιγμιότυπο που φαίνεται η εξέλιξη των δομών φαίνεται στο σχήμα 2.22



Σχήμα 2.22: Στιγμιότυπο από περιοχή που περιλαμβάνει την περιοχή ανακυκλοφορίας κατόντη σκαλοπατιού. Φαίνονται οι "hairpin vortices", που εξελίσσονται σε πιο χαώδεις δομές. Από [19].

⁶Στρόβιλοι που εκτείνονται σε τρεις διαστάσεις. Περισσότερα στο [7].

2.2.3 Εξωτερικά διεγερμένη ροή

Συχνότητα διέγερσης

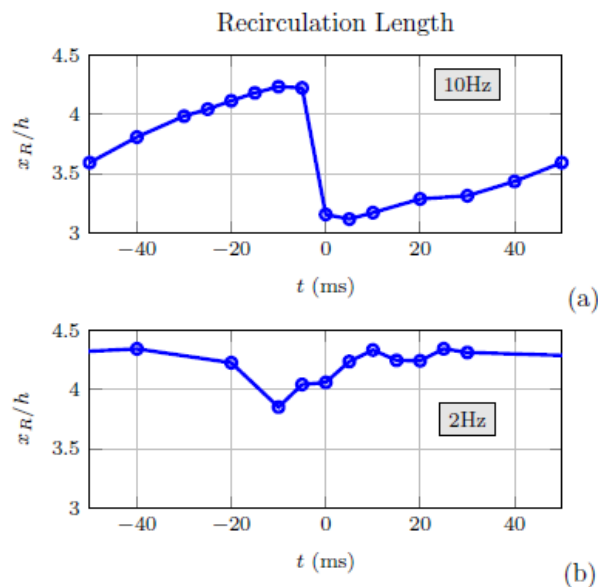
Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, η διάταξη του ανάποδου σκαλοπατιού προκαλεί, λόγω της απότομης γεωμετρίας της, μια σειρά από δίνες στη ροή. Αυτές επιδρούν μεταξύ άλλων στην περιοχή ανακυκλοφορίας και στο μήκος επανακόλλησης με το να τα ελαττώνουν. Για αυτό το λόγο τις περασμένες δεκαετίες έγιναν πολλές προσπάθειες ώστε μέσω απορρόφησης ή φυσήματος ρευστού, να επηρεαστεί η ροή και οι δομές στροβιλότητας που δημιουργούνται με διάφορους τρόπους. Ο Sigurdson [45] κατέληξε ότι η περιοδική διέγερση είναι πιο αποτελεσματική από τη σταθερή, όσον αφορά την επανακόλληση.

Η εξάρτηση της συχνότητας διέγερσης στο μήκος επανακόλλησης έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές: Ο Hasan (1992) [46] χρησιμοποίησε ακουστικούς παλμούς από μικρόφωνο για να ελέγξει το φύλλο διάτμησης, ενώ η βέλτιστη συχνότητα, όσον αφορά την επανακόλληση, βρέθηκε για St_h κοντά στο 0.5. Οι Chun και Sung (1996) [32] και οι Dejoan και Leschinzer, [33] υπολόγισαν τη βέλτιστη συχνότητα: $St_h = 0.2$ που είναι και η φυσική συχνότητα της ροής. Όπως άλλωστε επισημαίνουν οι Becker et al (από [16]) η ενεργειακή απαίτηση ελαχιστοποιείται εάν η συχνότητα διέγερσης είναι κοντά στη φυσική. Στον πίνακα 2.3 φαίνονται συγκεντρωμένες οι πιο αποτελεσματικές συχνότητες διέγερσης, για διαφορετικούς Re, όπως εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία από διάφορους ερευνητές. Να σημειώσουμε ότι η μείωση του μέσου μήκους επανακόλλησης είναι της τάξης του 30%.

Οι Kaporis και Μαθιουλάκης [16] μέτρησαν τις ταχύτητες κατάντη σκαλοπατιού (AR=10.2, ER=1.22, Re=7000) για ελεύθερη ροή, καθώς και για ροή διεγερμένη από δέσμες 10Hz (βέλτιστη) και 2Hz (μη βέλτιστη). Τα πειράματα έγιναν με τη χρήση της μεθόδου PIV σε επίπεδο παράλληλο στη ροή, διερχόμενο από τον άξονα του σκαλοπατιού. Στο σχήμα 2.23 φαίνεται η χρονική μεταβολή του μήκους επανακόλλησης συναρτήσει του χρόνου, για τις δύο περιπτώσεις συχνοτήτων διέγερσης. Παρατηρούμε ότι πριν από το κλείσιμο της βάνας των δεσμών (0 ms) παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις μια ραγδαία μείωση του μήκους ανακυκλοφορίας. Στην πρώτη περίπτωση (βέλτιστη) αυτή αντιστοιχεί σε 29% της μη διεγερμένης ροής. Στη στην δεύτερη (μη βέλτιστη) αυτή είναι μόλις 8 % και η επαναφορά σε επίπεδα της μη διεγερμένης ροής γίνεται πολύ πιο γρήγορα.

Μελέτη	Re_h	St_h	\bar{X}_r reduction
Bhattacharjee et al. [51]	26000	0.35	
Hasan [46]	11000	0.55	
Kiya et al. [53]	12000	1.6	
Eaton and Johnston [49]	39000	0.65	
Zaman and Hussain [50]	32000 ~120000	0.85	
	33000	0.275	
Chun and Sung [32]	23000	0.286	30%
	13000	0.25	30%
Kapiris and Mathioulakis [16]	6940	0.16	20%
Dejoan και Leschinzer [33]	3700	0.2	26%

Πίνακας 2.3: Βέλτιστη συχνότητα διέγερσης σε σχέση με τον αριθμό Re_h .



Σχήμα 2.23: Εξέλιξη του μήκους επανακόλλησης για (a) βέλτιστη διέγερση (10 Hz) (b) μη βέλτιστη συχνότητα (2 Hz). Από [16].

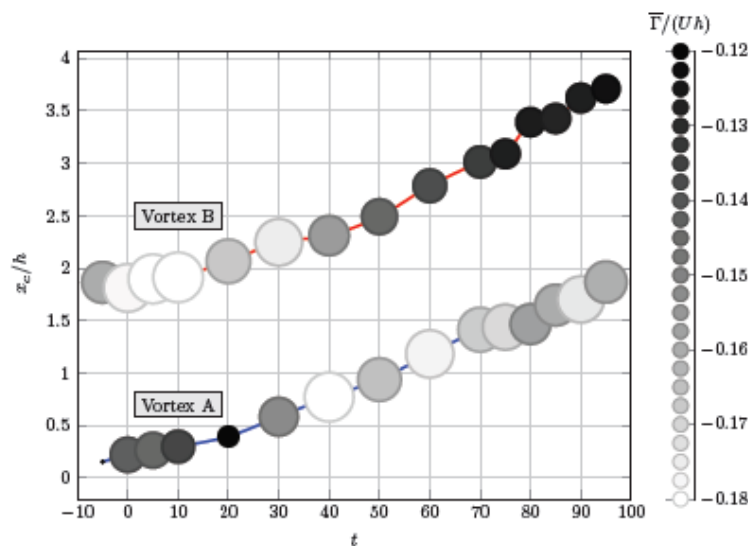
Δυναμικά φαινόμενα στην περιοχή ανακυκλοφορίας

Η περιοδική διέγερση οδηγεί στο σχηματισμό δινών που μεταφέρονται κατάντη. Όπως αναφέραμε παραπάνω, [16] μελέτησαν αυτούς

τους σχηματισμούς, για δύο διαφορετικές συχνότητες διέγερσης (10-2 Hz) παλλόμενης δέσμης (βέλτιστη-μη βέλτιστη) με τη χρήση PIV στον άξονα συμμετρίας του σκαλοπατιού.

Η περίπτωση της βέλτιστης συχνότητας διέγερσης (10 Hz) χαρακτηρίζεται από τη συνύπαρξη δύο δινών στη ροή, μίας που σχηματίζεται από τις δέσμες (vortex A) και μίας που έχει μεταφερθεί με συναγωγή κατάντη από τον προηγούμενο κύκλο (vortex B). Η ταχύτητα που μεταφέρονται οι δίνες κυμαίνεται μεταξύ 0.3U και 0.6U [16]. Οι τροχιές των δύο δινών και η κυκλοφορία τους φαίνονται στο σχήμα 2.24. Παρατηρούμε ότι η απόσταση των δύο δινών είναι περίπου σταθερή για κάθε χρονική στιγμή. Επίσης, η κυκλοφορία του στροβίλου A φαίνεται να αυξάνει με την απόσταση και το χρόνο, ενώ του B να μειώνεται.

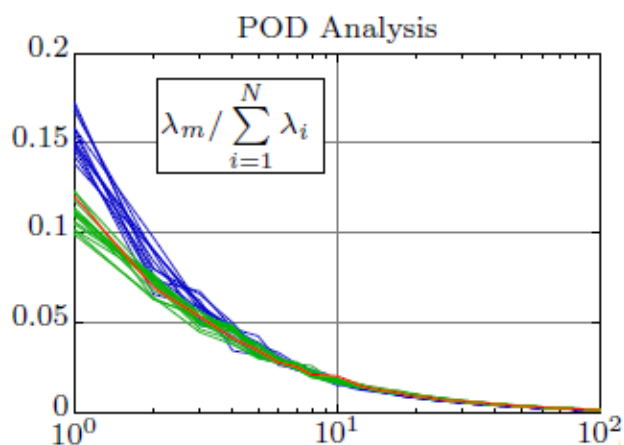
Στην περίπτωση της μη βέλτιστης συχνότητας διέγερσης (2 Hz) αντίθετα, δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιο συστηματικό μοτίβο όπως στην άλλη περίπτωση. Κάτι τέτοιο αποδίδεται στη μεγάλη χρονική διάρκεια μεταξύ των δύο φυσημάτων της δέσμης. Αυτή η έλλειψη "οργάνωσης" της ροής απεικονίζεται στο σχήμα 2.25, όπου φαίνεται η κατανομή των ιδιοτιμών σε σχέση με τα POD modes για τις δύο περιπτώσεις και τη μη διεγερμένη ροή. Παρατηρούμε ότι οι τέσσερις πρώτες ιδιοτιμές είναι πολύ μεγαλύτερες στην περίπτωση της βέλτιστα διεγερμένης ροής (μπλε καμπύλη) σε σχέση με την μη διεγερμένη ροή (κόκκινη) και την μη-βέλτιστα διεγερμένη (πράσινη).



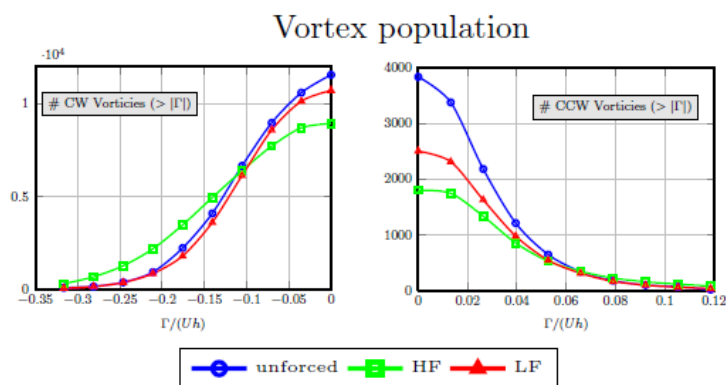
Σχήμα 2.24: Τροχιές των στροβίλων A και B και η κυκλοφορία τους συναρτήσει του χρόνου. Από [16].

Στο σχήμα 2.26 βλέπουμε τον αριθμό των στροβίλων ωρολογιακών

(CW) και ανθρωρολογιακών (CCW) για τις τρεις περιπτώσεις ροής. Παρατηρούμε ότι στη βέλτιστη συχνότητα ο συνολικός αριθμός των CW στροβίλων μειώνεται, όμως αυξάνονται οι στροβίλοι με μεγάλη κυκλοφορία, σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις (μη βέλτιστη και καθόλου διέγερση). Οι CCW στροβίλοι, που συνδέονται με τις δίνες στην γωνία του σκαλοπατιού, δείχνουν να μειώνονται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης [16].



Σχήμα 2.25: Ιδιοτιμές έναντι POD mode βέλτιστη περίπτωση (μπλε καμπύλη), μη-βέλτιστη (πράσινη) και καθόλου διέγερση (κόκκινη). Από [16]



Σχήμα 2.26: Πλήθος ωρολογιακών (CW) και ανθρωρολογιακών (CCW) στροβίλων συναρτήσεις της κυκλοφορίας. Από [16].

2.3 Η Μέθοδος Proper Orthogonal Decomposition (POD)

2.3.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονες πειραματικές και αριθμητικές έρευνες στη μηχανική των ρευστών παράγουν μεγάλο όγκο δεδομένων. Η πιο συνήθης επεξεργασία αυτών των δεδομένων εστιάζει στα χαρακτηριστικά της μέσης ροής (Reynolds averaging). Ωστόσο, τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει η αντίληψη στην ερευνητική κοινότητα ότι με κατάλληλη επεξεργασία των στιγμιαίων δεδομένων μπορούμε να κατανοήσουμε σε μεγαλύτερο βάθος τους μηχανισμούς που υπάρχουν στη ροή, όπως η τύρβη και οι δομές στροβιλότητας. Αυτές οι δομές (coherent structures, CS), πιστεύεται ότι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε φαινόμενα όπως η τυρβώδης ανάμιξη και η τυρβώδης συναγωγή γενικότερα, και για αυτό το λόγο η προσπάθεια αναγνώρισης και η εξαγωγή τους από το πεδίο ροής είναι από τις πιο σημαντικές περιοχές έρευνας τα τελευταία χρόνια στη μηχανική των ρευστών.

Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα για την εξαγωγή των CS είναι αυτή του *Proper Orthogonal Decomposition* (POD). Το POD εισήχθη στην έρευνα για την τύρβη από τον Lumley το 1967, αλλά είχε χρησιμοποιηθεί και από άλλους ερευνητές ανεξάρτητα, πριν από αυτόν όπως οι Kosambi (1943), ο Loeve (1945), Karhunen (1946), Rougachev (1953) και ο Obukhov (1954). Για τις αναφορές παραπέμπουμε στο [21]. Να σημειώσουμε ότι το POD είναι γνωστό και με άλλα ονόματα, όπως Karhunen-Loeve decomposition, principal component analysis (PCA), singular value decomposition (SVD) και empirical eigenfunction decomposition μεταξύ άλλων. Οι χρήσεις του ποικίλουν: ανάλυση εικόνας, ανάλυση σήματος, συμπίεση δεδομένων, ωκεανογραφία, μετεωρολογία, ακόμα και ψυχολογία και οικονομικές επιστήμες [21].

Στην ενότητα που ακολουθεί, θα παρουσιασθεί για λόγους πληρότητας συνοπτικά η μαθηματική θεμελίωση του POD και κάποιες ιδιότητές του και θα ορισμένες μερικές εφαρμογές του με παραδείγματα στη μηχανική των ρευστών, καθώς και δοκιμές του POD σε συνθετικά δεδομένα.

2.3.2 Μαθηματική θεμελίωση

Το ευθύ πρόβλημα

Η βασική ιδέα πίσω από το POD, όπως το περιγράφουν οι [20], είναι η εξής: Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια τυχαία διανυσματική συνάρτηση $f(\vec{x}, t)$, ορισμένη σε ένα πεπερασμένο χωρίο D και ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq T$. Σκοπός μας είναι να προβάλλουμε τη συνάρτηση $f(\vec{x}, t)$ σε συναρτήσεις βάσης $\varphi^{(k)}(\vec{x})$, στοχεύοντας στο βέλτιστο αποτέλεσμα⁷ (optimality). Αυτή η συνθήκη μας οδηγεί [20] στην επίλυση της εξής ολοκληρωματικής εξίσωσης Fredholm:

$$\int_D R(\vec{x}, \vec{x}') \varphi(\vec{x}') dx' = \lambda \varphi(\vec{x}) \quad (2.3.1)$$

όπου το μέγεθος $R(\vec{x}, \vec{x}')$ είναι γνωστό σαν πυρήνας. Το $R(\vec{x}, \vec{x}')$ είναι η μέση χωρική συνάρτηση ετεροσυσχέτισης δύο σημείων $\equiv \langle f(\vec{x}, t) f(\vec{x}', t) \rangle$ με $\langle . \rangle$ να εννοούμε το ensemble average. Από την λύση της εξίσωσης 2.3.1 βρίσκουμε τα $\varphi^{(k)}$ και λ_k που είναι οι εμπειρικές ιδιοσυναρτήσεις (empirical eigenfunctions) και εμπειρικές ιδιοτιμές (empirical eigenvalues) αντίστοιχα. Η συνθήκη ορθογωνικότητας ισοδυναμεί με την γραμμική ανεξαρτησία των συναρτήσεων βάσης (εμπειρικών ιδιοσυναρτήσεων) :

$$(\varphi^{(k)}, \varphi^{(l)}) \equiv \int_D \varphi^{(k)}(\vec{x}) \varphi^{(l)*}(\vec{x}) = \delta_{kl} \quad (2.3.2)$$

όπου το * εκφράζει το μιγαδικό συζυγή και δ_{kl} είναι το δέλτα του Kronecker.

Έτσι, όπως αναφέραμε παραπάνω, η αρχική συνάρτηση $f(\vec{x}, t)$ μπορεί να αναδομηθεί από ένα γραμμικό συνδυασμό των ιδιοσυναρτήσεων (εξίσωση 2.3.4) χρησιμοποιώντας χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές, $a^{(k)}(t)$. Αυτοί οι συντελεστές υπολογίζονται προβάλλοντας τη συνάρτηση $f(\vec{x}, t)$ στο χώρο των ιδιοσυναρτήσεων :

$$a^{(k)}(t) = \frac{(f(\vec{x}, t), \varphi^{(k)}(\vec{x}))}{(\varphi^{(k)}(\vec{x}), \varphi^{(k)}(\vec{x}))} \quad (2.3.3)$$

και η αρχική συνάρτηση αναδομείται ως εξής:

$$f(\vec{x}, t) \approx \sum_{k=1}^K a^{(k)}(t) \varphi^{(k)}(\vec{x}) \quad (2.3.4)$$

⁷δηλαδή ο αριθμός των συναρτήσεων βάσης (modes) που απαιτούνται για την αναδόμηση του αρχικού πεδίου ελαχιστοποιείται

Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή και ως proper orthogonal decomposition του $f(\vec{x}, t)$.

Η μέθοδος των στιγμιοτύπων

Η μέθοδος των στιγμιοτύπων (snapshots) εισήχθη από τον Sirovich το 1987 [55]. Πρόκειται για μια αριθμητική διαδικασία που μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο και υπολογιστικό κόστος στον υπολογισμό του προβλήματος ιδιοτιμών 2.3.1. Η ιδέα έχει ως εξής: Σε πειραματικές μετρήσεις, τα δεδομένα, $f(\vec{x}, t)$, περιορίζονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό από στιγμιότυπα (snapshots ή frames), M , ορισμένα σε έναν αριθμό από πλεγματικά σημεία, N . Συμβολίζουμε με $[u^i]_{i=1}^M$. Συνήθως δε ισχύει δε ότι $N \gg M$. Το πρόβλημα ιδιοτιμών τότε εκφυλίζεται σε $N \times N$. Ο Sirovich παρατήρησε ότι το πρόβλημα ιδιοτιμών μπορεί να μειωθεί σε $M \times M$ στην διακριτοποιημένη μορφή του προβλήματος ως εξής: Εάν φ είναι ιδιοδιάνυσμα του προβλήματος, τότε:

$$\varphi^{(k)} = \sum_{k=1}^M \Phi^{(k)} u^k \quad (2.3.5)$$

όπου οι συντελεστές $\Phi_n^{(k)}$ μένουν να προσδιορισθούν. Τότε, η 2.3.1 μπορεί να μετασχηματισθεί σε:

$$\left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u^i \otimes u^i, \sum_{k=1}^M \Phi^{(k)} u^k \right) = \lambda \sum_{k=1}^M \Phi^{(k)} u^k \quad (2.3.6)$$

όπου \otimes είναι το τανυστικό γινόμενο. Το αριστερό μέρος μπορεί να μετασχηματισθεί σε:

$$\sum_{i=1}^M \left[\sum_{k=1}^M \frac{1}{M} (u^i, u^k) \Phi^{(k)} \right] u^i$$

και καταλήγουμε στην εύρεση των συντελεστών $\Phi_n^{(k)}$:

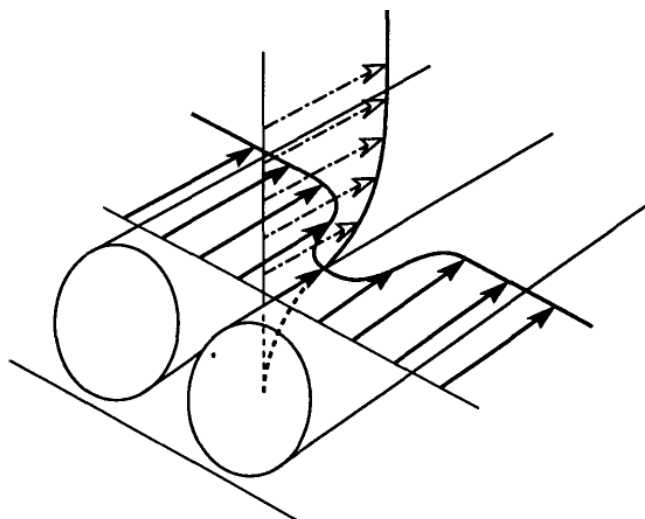
$$\sum_{k=1}^M \frac{1}{M} (u^i, u^k) \Phi^{(k)} = \lambda \Phi^{(i)} \quad i = 1, \dots, M \quad (2.3.7)$$

Η εξίσωση 2.3.7 είναι μια στήλη ενός $M \times M$ προβλήματος ιδιοτιμών. Να σημειώσουμε ότι για να ισχύουν τα παραπάνω, πρέπει τα snapshots $[u^i]_{i=1}^M$ να είναι γραμμικά ανεξάρτητα (υπόθεση εργοδικότητας).

2.3.3 Μερικές εφαρμογές του POD στη μηχανική των ρευστών

Ροές περιορισμένες από τοιχώματα

Στις αρχικές εφαρμογές του POD στην έρευνα σχετικά με την τύρβη, οι Bakewell και Lumley μέτρησαν τις συσχετίσεις δύο σημείων στα τοιχώματα ενός αγωγού με πλήρως ανεπτυγμένη ροή. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την ομογένεια της ροής ανακατασκεύασαν τα coherent structures. Το αποτέλεσμα ήταν ένα ζεύγος δινοσωλήνων, με αντίστροφη περιστροφή σαν αυτούς στο σχήμα 2.27. Οι Herzog et al. διεξήγαγαν το ίδιο πείραμα με τους Bakewell και Lumley, μετρώντας πειραματικά την τρισδιάστατη ροή μέσα σε ένα σωλήνα, με εργαζόμενο μέσο γλυκερίνη, για Reynolds 8750. Μέτρησαν τις διαμήκεις και εγκάρσιες ταχύτητες με τη χρήση θερμού film, ενώ την τρίτη συνιστώσα την υπολόγισαν από υπόθεση ασυμπιέστου ρευστού. Έχοντας πολύ καλή χρονική ανάλυση, αλλά μικρή χωρική, δεν έκαναν αναδόμηση των πεδίων ταχυτήτων, αλλά παρουσίασαν τα ιδιοδιανύσματα της ροής (modes). Οι Sirovich et al. και οι Ball et al. χρησιμοποίησαν ξεχωριστά δεδομένα από DNS για ροή μέσα σε κανάλι, για Re 1500 και 4000 αντίστοιχα. Υπολόγισαν τη χρονική μεταβολή των συντελεστών των modes του POD και ανέλυσαν τα κύματα που αναπτύσσονται στη ροή. Τέλος οι Moin και Moser χρησιμοποίησαν δεδομένα από DNS σε ροή στο στάδιο μετάβασης στην τύρβη σε οριακά στρώματα επιπέδων πλακών. Για την ανάλυση χρησιμοποίησαν τρισδιάστατο POD. Αναφορές από [20].



Σχήμα 2.27: Σχηματική απεικόνιση ενός ζεύγους δινοσωλήνων με αντίθετη περιστροφή. Από [20].

Τυρβώδη φύλλα διάτμησης

Μεταξύ των πρώτων ερευνών σχετικά με ελεύθερα φύλλα διάτμησης (free shear layers) με τη χρήση POD ήταν αυτές των Glauser et al. [22], οι οποίοι μελέτησαν τη ροή δέσμης. Βρήκαν ότι η πλειονότητα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας μπορούσε να εντοπιστεί σε έναν αριθμό modes και πρότειναν έναν μηχανισμό παραγωγής της.

Οι Sirovich et al μελέτησαν επίσης τη ροή από δέσμες [23], μέσω πειραματικών δεδομένων, όσο και υπολογιστικών προσομοιώσεων. Με την χρήση POD μελέτησαν δομές μεγάλης κλίμακας και τους μηχανισμούς της ανάμιξης και του entrainment.

Οι Kirby et al μελέτησαν τα διδιάστατα πεδία πίεσης και πυκνότητας ορμής από υπολογιστικές προσομοιώσεις υπερηχητικών φύλλων διάτμησης. Εστίασαν στη συμπίεση δεδομένων και στην εξαγωγή των POD modes (αναφορές από [20]).

Οι Kostas, Soria και Chong [9] ανέλυσαν δεδομένα PIV από τη ροή κατάντη ενός "ανάποδου σκαλοπατιού" για $Re_h = U_\infty h/\nu = 4600$ (βασισμένο στο ύψος του σκαλοπατιού και της επ' άπειρου ταχύτητας). Χρησιμοποίησαν τη μεθοδολογία POD τόσο για τη διακύμανση της ταχύτητας, όσο και για το πεδίο στροβιλότητας σε διάφορα επίπεδα. Μέσω της εξαγωγής των modes μεγαλύτερης ενέργειας και της αναδόμησης των πεδίων ταχυτήτων και στροβιλότητας, ανέλυσαν τη συνεισφορά των δομών μεγάλης και μικρής κλίμακας στην παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας και στις τάσεις Reynolds.

Τέλος, οι Kapiris και Mathioulakis [16] χρησιμοποίησαν το POD σε δεδομένα από μετρήσεις PIV σε διάταξη "ανάποδου σκαλοπατιού" στο επίπεδο συμμετρίας, στο οποίο υπήρχε εξωτερική διέγερση από παλλόμενες δέσμες, προερχόμενες από το τοίχωμα του σκαλοπατιού. Μέσω του POD, μεταξύ άλλων, φιλτράρισαν το πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας του ρευστού, μέσω της αναδόμησης του από τα πιο ενεργητικά modes, και έτσι εντόπισαν πιο εύκολα τα κέντρα των δομών στροβιλότητας.

Πρόβλεψη της χρονικής μεταβολής πεδίου ταχυτήτων

Τα τελευταία χρόνια έχει επιτευχθεί η πειραματική μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων με καλή χωρική διακριτοποίηση. Η επεξεργασία τέτοιων πεδίων με τη χρήση μεθοδολογιών όπως το POD έχει βοηθήσει ιδιαίτερα την έρευνα όσον αφορά την κατανόηση των βασικών μηχανισμών της ροής, την αναγνώριση των coherent structures, καθώς και την έρευνα πάνω στον έλεγχο ροής. Η γνώση όμως της χρονικής μεταβολής πεδίου ταχυτήτων είναι κάτι που σήμερα ακόμα είναι δύσκολο να αποκτηθεί.

Η μέθοδος PIV είναι η συνήθης μέθοδος για την μέτρηση πεδίου ταχυτήτων, όμως η εκδοχή της που μετράει χρονικές μεταβολές (time resolved PIV) είναι εξαιρετικά δαπανηρή και σπάνια. Επιπλέον δεν μας παρέχει πολύ καλή χρονική απόκριση και έτσι η χρήση της περιορίζεται σε ροές μικρής ταχύτητας [24]. Συνεπώς η συνηθισμένη χρήση του PIV δεν περιλαμβάνει τη χρονική εξέλιξη των φαινομένων.

Από την άλλη μεριά, υπάρχουν πολλές σημειακές μετρητικές τεχνικές με πολύ καλή χρονική απόκριση, όπως το θερμό νήμα και το laser doppler. Με τη χρήση τους όμως δεν είναι πάντα εύκολο να πάρουμε μετρήσεις που να καλύπτουν όλες τις χωρικές κλίμακες της ροής. Να σημειώσουμε ότι πυκνή διάταξη τέτοιων αισθητήρων, ώστε να επιτύχουμε καλή χωρική διακριτοποίηση (σχήμα 2.28), είναι πολύ επεμβατική τις περισσότερες φορές. Σε αυτό το πλαίσιο, τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια να προβλεφθεί η χρονική εξέλιξη του πεδίου ταχυτήτων και των δομών της ροής με στατιστικές τεχνικές.



Σχήμα 2.28: Πολλαπλοί αισθητήρες από θερμό νήμα. Από [25].

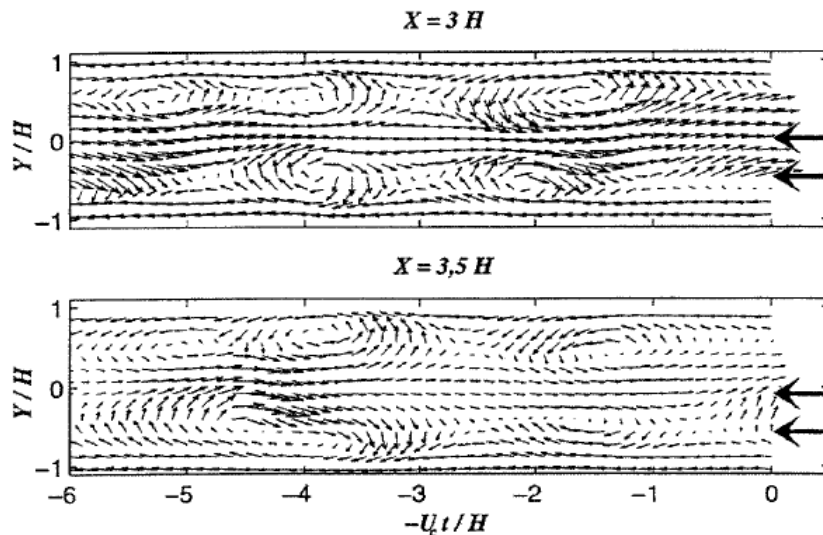
Μία μεθοδολογία που συνδυάζει τις μεθόδους linear stochastic estimation⁸ (LSE) και POD είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε από τους Ukeiley et al. και Bonnet et al. (αναφορές από [25]). Στη μέθοδο αυτή προβλεπόταν το χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ταχυτήτων με τη χρήση του LES, από αρκετούς ανιχνευτές θερμού νήματος, ενώ στη συνέχεια με τη χρήση του POD εξαγόntonταν οι χρονικές μεταβολές των coherent structures.

⁸Η LSE είναι μια στατιστική μέθοδος που μας επιτρέπει να αποτυπώσουμε χωρικά χαρακτηριστικά της ροής που είναι συσχετισμένα με το μετρούμενο σήμα. Περισσότερα για το LSE στο [26]

Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως συμπληρωματική (complementary method)[25]. Το σχήμα 2.29 δείχνει ένα παράδειγμα συμπληρωματικής μεθόδου από μία τυρβώδη δέσμη. Οι μετρήσεις αποκτήθηκαν με τη χρήση δύο ανιχνευτών θερμού νήματος (βέλη).

Μια ακόμη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης των coherent structures, αναπτύχθηκε από τους [24]. Συνδύασαν σημειακές μετρήσεις που εξελίσσονταν στο χρόνο, καθώς και μετρήσεις από σύνηθες PIV (non time-resolved). Τέλος, χρησιμοποίησαν και ένα αναλυτικό μοντέλο της ροής. Η μεθοδος POD χρησιμοποιήθηκε για να αναδομηθεί η ροή από τα πιο ενεργητικά modes. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποίησαν τη μέθοδο LSE για να υπολογίσουν μια εκτίμηση του χρονικά μεταβαλλόμενου πεδίου ταχυτήτων και το συνδύασαν με ένα αναλυτικό μοντέλο της ροής. Το αποτέλεσμα συνδυάστηκε με τις μετρήσεις PIV μέσω ενός φίλτρου Kalman. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στην περίπτωση ομόρρου επίπεδης πλάκας με αμβλύ πίσω άκρο.

Τέλος, αναφέρουμε την έρευνα των Legrand et al. [27], [28], στην οποία θέτοντας κάποιες προϋποθέσεις για τη ροή προσπάθησαν να αποτυπώσουν τη χρονική μεταβολή του πεδίου ταχυτήτων, με αφετηρία snapshots από μετρήσεις PIV. Η μεθοδός τους στηρίζεται σε χρήση των συντελεστών των τριών πρώτων modes του POD και σε μια τεχνική ετεροσυσχέτισης. Τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν με δεδομένα από CFD και time resolved PIV.



Σχήμα 2.29: Εξαγωγή CS με τη χρήση της συμπληρωματικής μεθόδου, από δύο ανιχνευτές θερμού νήματος (βέλη). Έχουν αποτυπωθεί μόνο οι συνεισφορές από τα δύο πρώτα modes του POD. Από [25]

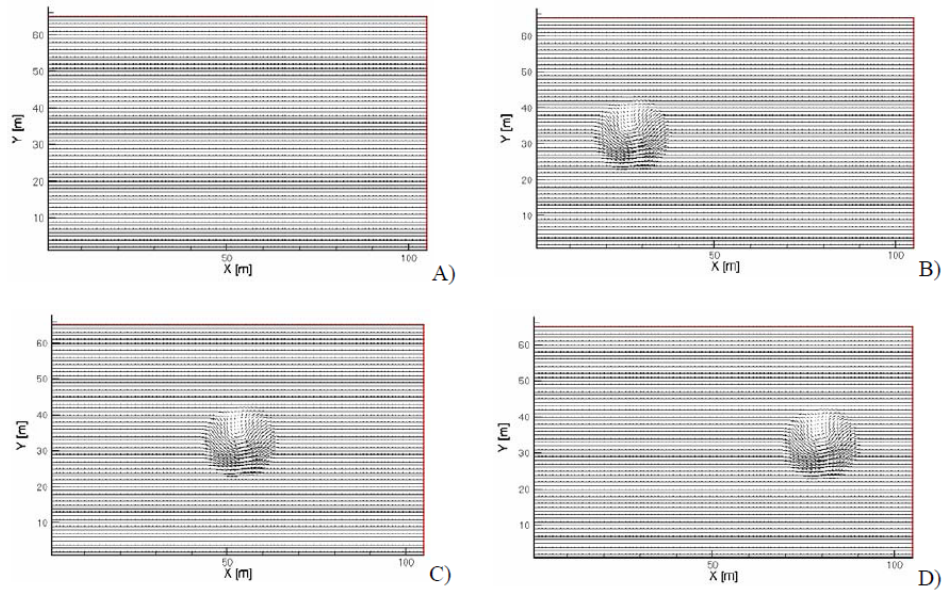
2.3.4 Εφαρμογή του POD σε συνθετικά δεδομένα

Όπως είδαμε παραπάνω, το POD χρησιμοποιείται τόσο για σκοπούς φιλτραρίσματος του αρχικού πεδίου ταχυτήτων, όσο και για ανάλυση και αξιοποίηση των modes, καθώς αυτά περιέχουν δομές και μοιάζουν με πεδία ροής [20]. Αυτή η τελευταία χρήση παρουσιάζει κινδύνους, καθώς αυτές οι δομές μπορεί να μην έχουν φυσική σημασία. Η μέθοδος ετεροσυσχέτισης που περιέχει το POD συνενώνει την χρονική πληροφορία (snapshots) και δημιουργεί χωρικές δομές που είναι "στατιστικά παρούσες", [29], χωρίς απαραίτητα να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

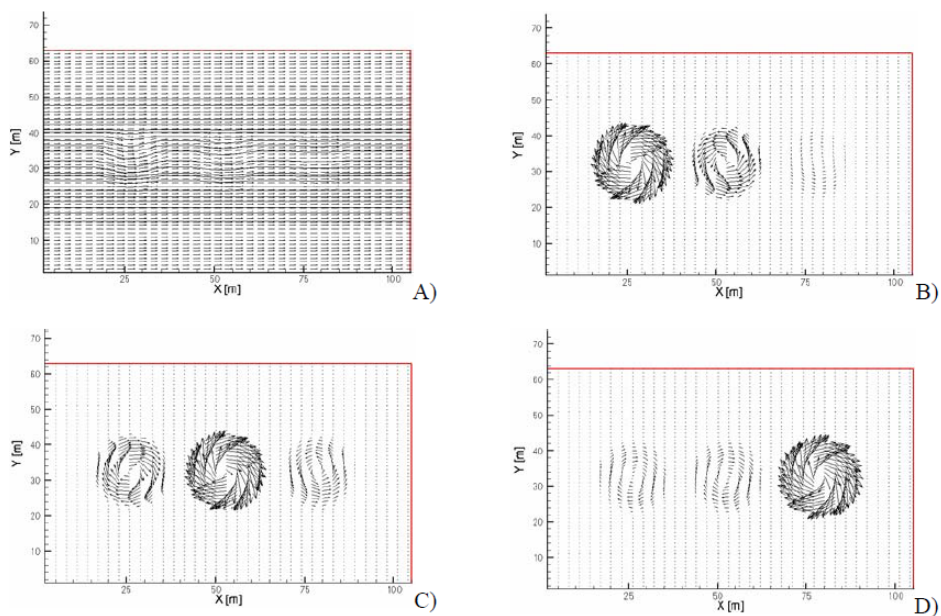
Για την εξακρίβωση ακριβώς αυτής της φυσικής σημασίας των modes, οι [29] εφάρμοσαν τη μέθοδο snapshot POD σε δύο περιπτώσεις συνθετικών δεδομένων και ανέλυσαν τα αποτελέσματα σε σχέση με το πόσο ανταποκρίνονται στα αρχικά δεδομένα.

Στην πρώτη περίπτωση τα στιγμιότυπα απεικόνιζαν ομοιόμορφα πεδία ροής με διακριτούς στροβίλους όπως φαίνεται στο σχήμα 2.30. Από την POD ανάλυση, τα τέσσερα πρώτα modes, σχήμα 2.31, περιείχαν την περισσότερη κινητική ενέργεια, με τα υπόλοιπα να έχουν σημαντικά λιγότερη. Το mode 1 έχει πολλές ομοιότητες με το μέσο πεδίο των snapshots. Στα modes 2,3 και 4 τα χωρικά χαρακτηριστικά των στροβίλων διατηρούνται από το αρχικό πεδίο, αλλά τα χρονικά χαρακτηριστικά έχουν "συνενωθεί" με τους 3 στροβίλους να συνυπάρχουν σε κάθε mode.

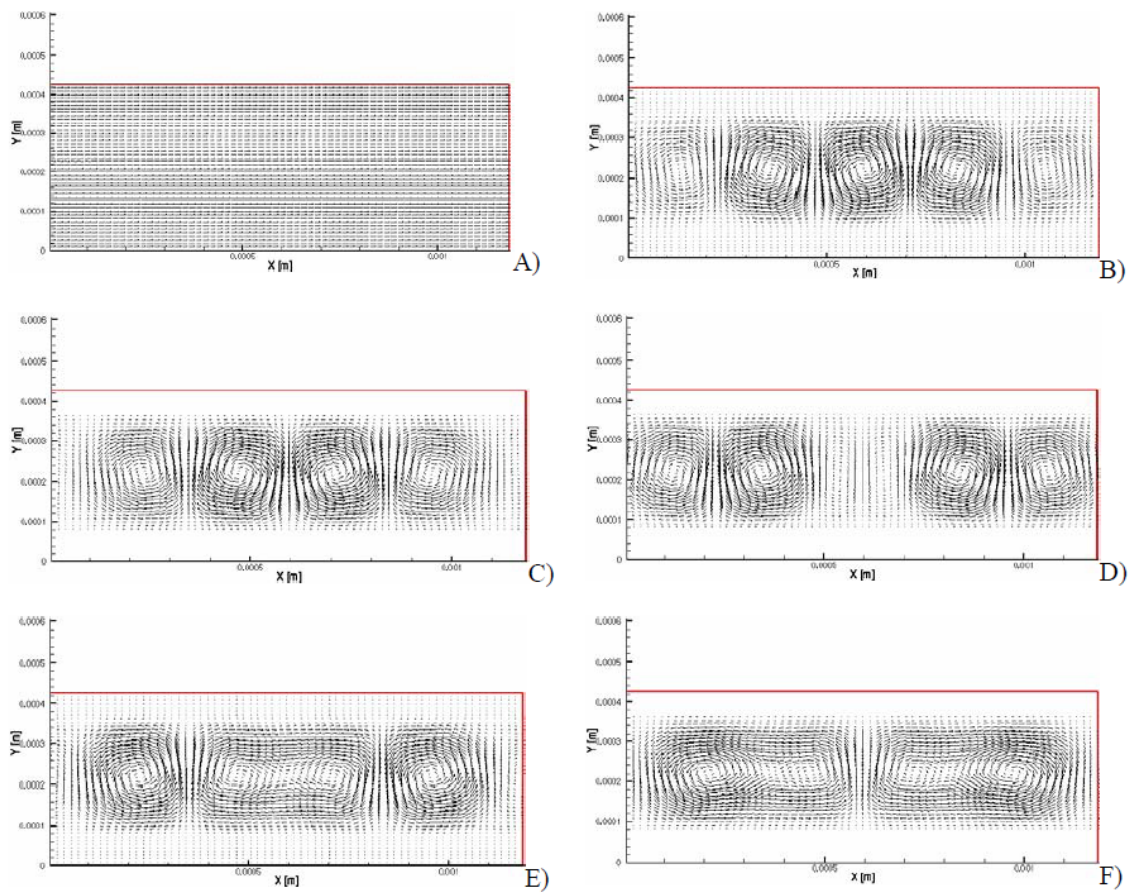
Στη δεύτερη περίπτωση τα στιγμιότυπα απεικόνιζαν στρόβιλο που ξεκινούσε από το αριστερό κομμάτι του frame και κινούνταν κατά 5% της διαμέτρου του σε κάθε snapshot (ημισυνεχής κίνηση). Σε αυτή την περίπτωση τα modes δεν παρουσίαζαν διακριτό διαχωρισμό στην κινητική τους ενέργεια (όπως στην προηγούμενη περίπτωση που τα τέσσερα πρώτα είχαν τάξη μεγέθους παραπάνω από τα υπόλοιπα), αλλά μια συνεχή πτώση. Τα 6 πρώτα modes φαίνονται στο σχήμα 2.32. Παρατηρούμε ότι το πρώτο mode εξακολουθεί να έχει ομοιότητες με το μέσο πεδίο των snapshots. Τα υπόλοιπα 5 modes δεν παρουσιάζουν διακριτούς στροβίλους όπως στην πραγματικότητα, αλλά μια εικόνα "συνένωσης" των αρχικών snapshots, καθώς και δομές σαν ζεύγη στροβίλων. Σε μεγαλύτερο ακόμα ονομαστικό αριθμό, τα modes δείχνουν ακόμα μικρότερες δομές που είναι μαθηματικές και δεν έχουν σχέση με την πραγματικότητα.



Σχήμα 2.30: Συνθετικό πεδίο ταχυτήτων. A) Ομοιόμορφο πεδίο ροής (50% των snapshots), B) Στρόβιλος στο αριστερό μέρος (30% των snapshots), C) Στρόβιλος στο μέσο (15% των snapshots), D) Στρόβιλος στο δεξιό μέρος (5% των snapshots). Από [29].



Σχήμα 2.31: Διακριτή περίπτωση συνθετικού πεδίου (μη επικαλυπτόμενοι στρόβιλοι). A) Mode 1, B) Mode 2, C) Mode 3, D) Mode 4. Από [29].



Σχήμα 2.32: POD modes από επικαλυπτόμενους, διακριτούς στροβίλους (ημισυνεχής κίνηση). A) Mode 1, B) Mode 2, C) Mode 3, D) Mode 4, E) Mode 5, F) Mode 6. Από [29].

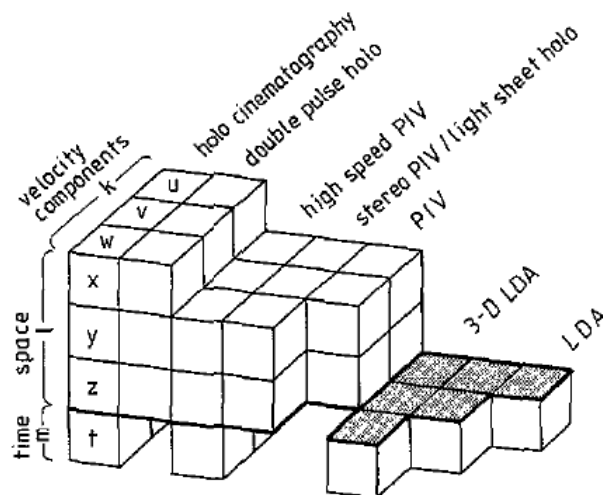
2.4 Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV)

2.4.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες το εύρος των προβλημάτων μηχανικής ρευστών που ερευνάται από τους μελετητές έχει αυξηθεί σημαντικά. Ισχυροί υπολογιστές και εξελιγμένες πειραματικές διατάξεις επιτρέπουν τη μοντελοποίηση και μελέτη περίπλοκων φαινομένων, όπως την εξέλιξη μη μόνιμων ροών.

Σε συμφωνία με τα παραπάνω, οι μετρητικές τεχνικές της μηχανικής των ρευστών έχουν εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη διαφόρων εργαλείων, όπως Hot wire anemometry, Laser Doppler Velocimetry, τεχνικές Schlieren, οπτικοποίηση με καπνό, holographic cinematography, διάφορες μεθόδους PIV (stereo, tomo, συμβατικό) κ.α.

Οι τεχνικές μέτρησης ταχύτητας διαφέρουν ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, το πόσο επεμβατικές είναι και ως προς τις διαστάσεις που διαπραγματεύονται (χωρικές και χρονική). Η ταξινόμηση των μεθόδων ([34]) μπορεί να γίνει με τις παραμέτρους (k, l, m) , όπου το $k = 1, 2, 3$ αντιπροσωπεύει τον αριθμό των συνιστωσών της ταχύτητας που μετρούνται, το $l = 1, 2, 3$ τον αριθμό των χωρικών διαστάσεων που διαπραγματεύεται η τεχνική και το $m = 0, 1$ το αν η τεχνική μετράει φαινόμενα σε μία χρονική στιγμή ή αν οι μετρήσεις εξελίσσονται στο χρόνο. Σχηματική αναπαράσταση αυτής της κατηγοριοποίησης φαίνεται στο σχήμα 2.33.



Σχήμα 2.33: Κατηγοριοποίηση τεχνικών μέτρησης ρευστού σύμφωνα με τις παραμέτρους (k, l, m) . Από [34].

2.4.2 Συμβατικό PIV

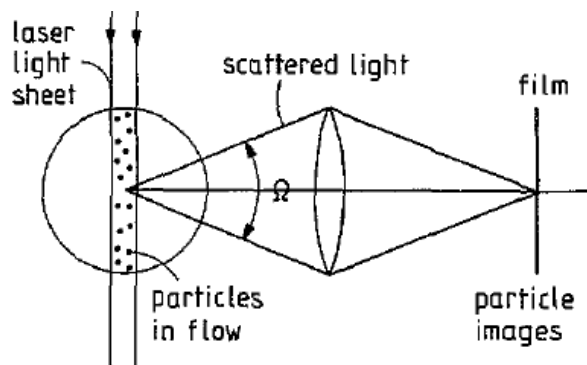
Βασικές αρχές λειτουργίας

Η μέθοδος PIV είναι τεχνική μέτρησης της ταχύτητας ρευστού ταυτόχρονα σε πλέγμα (grid) σημείων που προσδιορίζεται από ένα φύλλο φωτός (συνήθως laser). Τις βασικές αρχές λειτουργίας της εισήγαγε ο Adrian [35]. Η πιο συνήθης εκδοχή της υπολογίζει τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας που ορίζουν το επίπεδο του φύλλου φωτός, για αυτό έχει μεγαλύτερη εφαρμογή σε περιπτώσεις που η ροή είναι παράλληλη στο επίπεδο μέτρησης, με μικρές ταχύτητες κάθετες σε αυτό. Πρόκειται για μια μη επεμβατική τεχνική⁹ που χρησιμοποιεί ανάλυση εικονών στις οποίες καταγράφονται οι θέσεις σωματιδίων, τα οποία παρασύρονται και αιωρούνται στο ρευστό, με τη χρήση CCD βιντεοκάμερας.

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην βασική σχέση:

$$\vec{u} = \Delta \vec{s} / \Delta t \quad (2.4.1)$$

για τον υπολογισμό της ταχύτητας. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση βιντεοκάμερας, κάθετης στο επίπεδο μέτρησης, αποτυπώνονται οι θέσεις των σωματιδίων σε δύο περιπτώσεις που διαφέρουν κατά το χρονικό διάστημα Δt . Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του παλλόμενου φύλλου φωτός¹⁰. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης PIV φαίνεται στο σχήμα 2.34. Έτσι αποτυπώνονται τα σωματίδια σαν φωτεινές κουκίδες σε μαύρο φόντο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.35.



Σχήμα 2.34: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης PIV. Από [34].

Στη συνέχεια χωρίζουμε τις φωτογραφίες σε ορθογώνια συνήθως χωρία και υπολογίζουμε τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης της συνάρτησης

⁹Με την έννοια ότι δεν επηρεάζει τη ροή.

¹⁰Το παλλόμενο φύλλο φωτός προτιμάται από το συνεχές, γιατί δημιουργεί ένα "στραβοσκοπικό" φαινόμενο που "παγώνει" τα σωματίδια και δεν δημιουργεί σφάλματα για ροές μεγάλων ταχυτήτων [34].

φωτεινότητας (I) 2.4.2 για τις δύο διαφορετικές στιγμές.

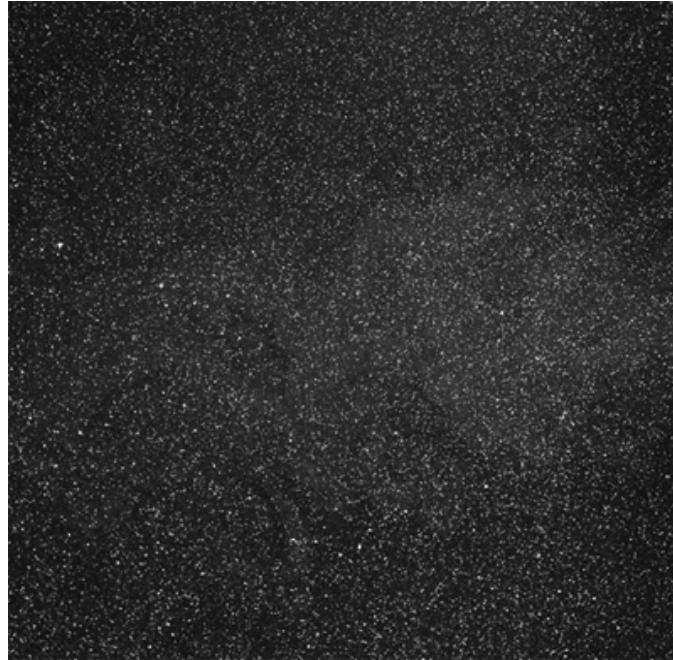
$$\varphi(\tau_x, \tau_y) = \int \int I_1(x, y) I_2(x + \tau_x, y + \tau_y) dx dy \quad (2.4.2)$$

Αυτό υπολογιστικά επιτυγχάνεται με τη χρήση μετασχηματισμού Fourier για τη συνέλιξη και αντίστροφου Fourier για την επιστροφή στο πεδίο του χρόνου, οπότε η 2.4.2 μετασχηματίζεται σε:

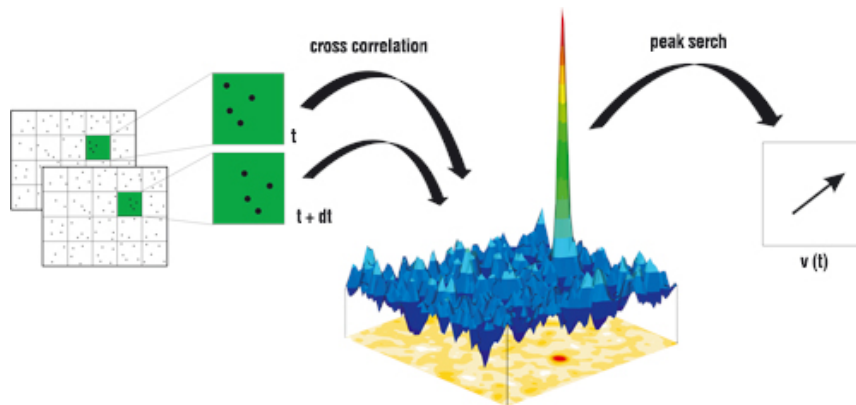
$$\varphi(\tau_x, \tau_y) = F^{-1}[F(I_1)F^*(I_2)] \quad (2.4.3)$$

όπου $F^*(I_2)$ είναι ο συζυγής μιγαδικός του μετασχηματισμού Fourier.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι μια συνάρτηση που ορίζεται στο χωρίο που εφαμόστηκε η ετεροσυσχέτιση και μεγιστοποιείται σε θέση που αντιστοιχεί στο μέτρο και τη φορά της μέσης στατιστικώς μετατόπισης των σωματιδίων. Διαιρώντας με το χρόνο μεταξύ των φωτογραφιών, υπολογίζουμε την ταχύτητα του σωματιδίου και συνεπώς του ρευστού. Δηλαδή, κάθε χωρίο ελέγχου αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα ταχύτητας. Σχηματική μορφή της παραπάνω διαδικασίας και τυπική μορφή κατανομής συνάρτησης ετεροσυσχέτισης φαίνονται στο σχήμα 2.36.



Σχήμα 2.35: Αποτύπωση σωματιδίων από βιντεοκάμερα για τη μέθοδο PIV.



Σχήμα 2.36: Διαδικασία υπολογισμού ταχυτήτων μεθόδου PIV και τυπική μορφή συνάρτησης ετεροσυσχέτισης. Από [42].

Φωτισμός της ροής- Σωματίδια

Για το φωτισμό της ροής στο επίπεδο μέτρησης συνήθως χρησιμοποιείται ως φωτεινή πηγή Laser συνεχούς ή διακοπτόμενης λειτουργίας λόγω της δυνατότητάς τους να παράγουν δέσμη μεγάλης ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας.

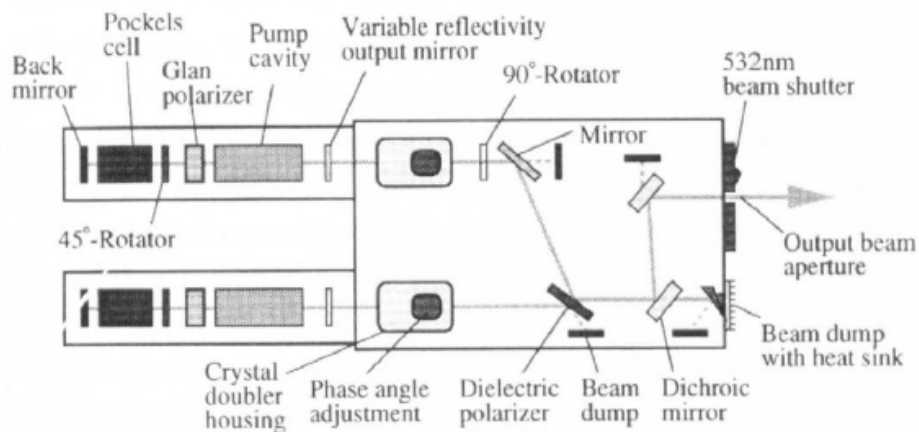
Οι πηγές Laser συνεχούς λειτουργίας είναι πιο φτηνές σε σχέση με τις παλμικής λειτουργίας και χρησιμοποιούνται σε ροές χαμηλής σχετικά ταχύτητας. Αντίθετα, οι πηγές παλμικής λειτουργίας χρησιμοποιούνται σε ροές υψηλών ταχυτήτων. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η παλμική τους λειτουργία "παγώνει" τα σωματίδια. Αντίθετα, με συνεχές laser τα σωματίδια θα αποτυπώνονταν με μια γραμμή στο μέσο καταγραφής, ανάλογης της ταχύτητάς τους. Επίσης, τα παλμικά Laser περιέχουν μεγαλύτερη ενέργεια ανά παλμό σε σχέση με τα συνεχή. Αυτό τα κάνει ιδανικά για τις ροές μεγάλων ταχυτήτων, καθώς τα σωματίδια δεν παραμένουν στο φύλλο του Laser για μεγάλο χρονικό διάστημα και έτσι απαιτείται μεγάλη ισχύς για την καταγραφή τους. Στους πίνακες 2.4 και 2.5 φαίνονται μερικοί χαρακτηριστικοί τύποι Laser για παλμική και συνεχή λειτουργία ([37]).

Συνεχή Laser	Μήκος Κύματος (nm)	Ισχύς (W)
He-Ne	633	μέχρι 0.05
Argon-Ion	514	5

Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά συνεχή Laser. Από [37].

Παλλόμενα Laser	Μήκος Κύματος (nm)	Διάρκεια Παλμού (ns)	Ενέργεια ανά Παλμό (J)	Συχνότητα Παλμών (Hz)
Ruby	694	20	10	1
Nd: Yag	503	10	500	50
Ατμών Χαλκού	511-578	20	0.002	8000

Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά παλλόμενα Laser. Από [37].



Σχήμα 2.37: Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού laser Nd:YAG. Από [36].

Τα σωματίδια που συνηθίζονται στη μέθοδο PIV πρέπει αφενός να ακολουθούν αξιόπιστα τη ροή, για να ταυτίζεται η μετρούμενη ταχύτητα με αυτή του ρευστού, ενώ αφετέρου να έχουν τη δυνατότητα καλής σκέδασης του φωτός. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά είναι αντικρουόμενα, με την έννοια ότι με την αύξηση του μεγέθους του σωματιδίου έχουμε καλύτερη σκέδαση του φωτός, ενώ με την μείωσή του καλύτερη αξιοπιστία στην κίνηση. Τέλος, τα ιδανικά σωματίδια θα πρέπει να έχουν την ίδια πυκνότητα με το περιβάλλον ρευστό, για να αποφεύγονται φαινόμενα άνωσης [36], [37].

Τα σωματίδια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως αέριας φάσης (φυσαλίδες ηλίου/ σωματίδια καπνού), υγρής (σταγόνες λαδιού) και

στερεής (διοξείδιο του τιτανίου). Οι τυπικές διαστάσεις των σωματιδίων κυμαίνονται για εφαρμογές στον αέρα από 0.3 έως 3 μm , ενώ σε υγρά από 5 έως 50 μm . Στις υγρές ροές χρησιμοποιούνται συνήθως υγρά ή στερεά σωματίδια, ενώ εάν το περιβάλλον ρευστό είναι αέρας χρησιμοποιούνται συνήθως υγρά ή στερεά σωματίδια.

Ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται στις μετρήσεις PIV είναι η μεγέθυνση της διαμέτρου του σωματιδίου όταν αυτή παρατηρείται στο είδωλό του. Η πραγματική διάμετρος d διαφέρει από στην αντίστοιχη του ειδώλου d_i όπως φαίνεται από την εξίσωση 2.4.4.

$$d_i = \sqrt{(Md)^2 + d_D^2} \quad (2.4.4)$$

όπου M είναι ο συντελεστής μεγέθυνσης και d_D η διάμετρος του σωματιδίου λόγω περίθλασης, δηλαδή η μεγέθυνση του ειδώλου του σωματιδίου λόγω των ομόκεντρων κύκλων που σχηματίζονται στο είδωλο όταν φως πέφτει πάνω σε σφαιρικά σωματίδια [37]. Ένα άλλο στοιχείο που μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις είναι το βάθος πεδίου της κάμερας, αφού όσο μεγαλώνει, η κάμερα μπορεί να αναγνωρίζει σωματίδια που δεν ανήκουν στο ίδιο επίπεδο προκαλώντας σφάλματα.

2.4.3 Stereoscopic PIV

Στη μέθοδο stereoscopic (stereo) PIV χρησιμοποιούμε δύο κάμερες για να αποτυπώσουμε τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας, πάνω σε ένα επίπεδο που φωτίζεται από το laser. Συνεπώς βάσει της ταξινόμησης που εισήχθη προηγουμένως (σχήμα 2.33), πρόκειται για μία (3, 2, 0) τεχνική.

Αυτή η μέθοδος της χρήσης δύο καμερών/ φωτογραφικών μηχανών για την αντίληψη του "βάθους" χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες σε πολλούς επιστημονικούς τομείς [38]. Στην πραγματικότητα, αυτή η μέθοδος μιμείται τον τρόπο της ανθρώπινης όρασης, που επιτρέπει τον διαχωρισμό κοντινών και μακρινών αντικειμένων. Ενώ η όραση από ένα καταγραφικό μέσο μπορεί να αναγνωρίσει μετατοπίσεις πάνω στο επίπεδο λήψης ($\delta x, \delta y$), έχοντας ως πληροφορία δύο εξισώσεις, με δύο καταγραφικά μέσα μπορούμε να έχουμε και την πληροφορία δz , με την εισαγωγή άλλων δύο εξισώσεων. Στην περίπτωση του ανθρώπου αυτή την επίλυση την κάνει ο εγκέφαλος, ενώ στη μέθοδο PIV ειδικοί αλγόριθμοι.

Διατάξεις Stereo PIV

Όλα τα στεροσκοπικά συστήματα πρέπει να ικανοποιούν τη βασική προϋπόθεση της ταυτόχρονης λήψης του ίδιου αντικειμένου, από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Για την επίτευξη αυτού χρησιμοποιούνται πολλές διατάξεις stereo PIV, που μπορούν να διαχωρισθούν σε "συστήματα πλευρικής μετατόπισης" (translation systems) και σε "περιστροφικά συστήματα" (rotational systems) [38].

Διάταξη πλευρικής μετατόπισης. Σε αυτή τη διάταξη οι άξονες και των δύο καμερών τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους, έτσι ώστε είναι κάθετες στη δέσμη laser, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.38. Η συμμετρία που φαίνεται στο σχήμα δεν είναι απαραίτητη, αν και συνήθως προτιμάται. Αυτή η διάταξη περιγράφεται από τους Jacquot και Rastogi (1981), Sinha (1988), Lawson και Wu (1997) (από [38]).

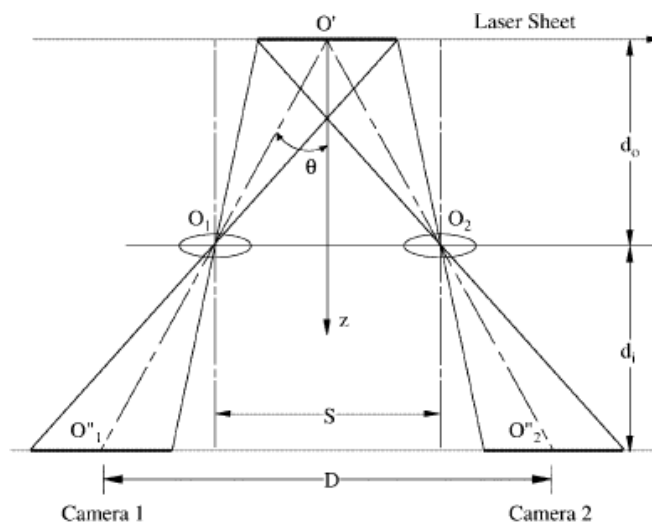
Το κύριο προτέρημα αυτής της διάταξης είναι η απλότητά της. Επειδή το επίπεδο λήψης (επίπεδο laser), το επίπεδο του φακού και το επίπεδο του καταγραφικού μέσου-film (image plane) βρίσκονται σε παράλληλα επίπεδα, η εικόνα υπόκειται σε ομοιόμορφη μεγέθυνση [38]. Ακόμα, εξαιτίας της παραλληλότητας των επιπέδων δεν χρειάζεται κάποια ειδική ρύθμιση στην εστίαση των φακών και οι κάμερες συμπεριφέρονται σαν το απλό PIV, πράγμα που διευκολύνει την πειραματική διαδικασία. Τέλος, η χωρική διακριτοποίηση του πεδίου που προκύπτει από συνδυασμό των δύο καμερών, δεν διαφέρει από αυτό της κάθε κάμερας ξεχωριστά. Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η μικρή κοινή επιφάνεια καταγραφής των δύο καμερών, που περιορίζει το μέγεθος του τελικού πεδίου και κυρίως τα αυξημένα σφάλματα που προκαλεί η μικρή σχετικά τιμή της γωνίας θ (σχήμα 2.38) στις συνιστώσες των διανυσμάτων που είναι κάθετες στο επίπεδο μέτρησης.

Οι γεωμετρικές σχέσεις που μας δίνουν τις μετατοπίσεις των σωματιδίων (δx , δy , δz) με βάση τις μετατοπίσεις στα επίπεδα που καταγράφουν οι δύο κάμερες (δX_1 , δY_1), (δX_2 , δY_2) φαίνονται στις εξισώσεις 2.4.5, 2.4.6, 2.4.7.

$$\delta z = \frac{-d_0(\delta X_1 - \delta X_2)}{M_n S - (\delta X_1 - \delta X_2)} \quad (2.4.5)$$

$$\delta x = \frac{\delta X_1(x - S/2) - \delta X_2(x + S/2)}{M_n S - (\delta X_1 - \delta X_2)} \quad (2.4.6)$$

$$\delta y = \frac{-y\delta z}{d_0} + \frac{\delta Y_1 + \delta Y_2}{2M_n} \left[\frac{\delta z}{d_0} - 1 \right] \quad (2.4.7)$$



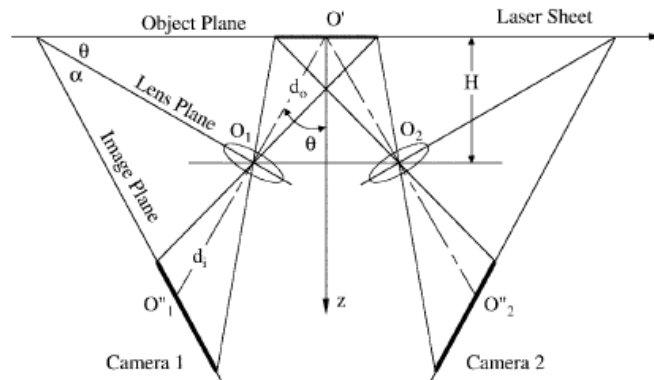
Σχήμα 2.38: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης παράλληλης μετατόπισης. Από [38].

όπου $M_n = d_i/d_0$.

Όπως προαναφέρθηκε, από τις δύο κάμερες προκύπτουν τέσσερις εξισώσεις από τις οποίες μόνο τρεις είναι αναγκαίες. Η πρόσθετη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την ακρίβεια της dy [38].

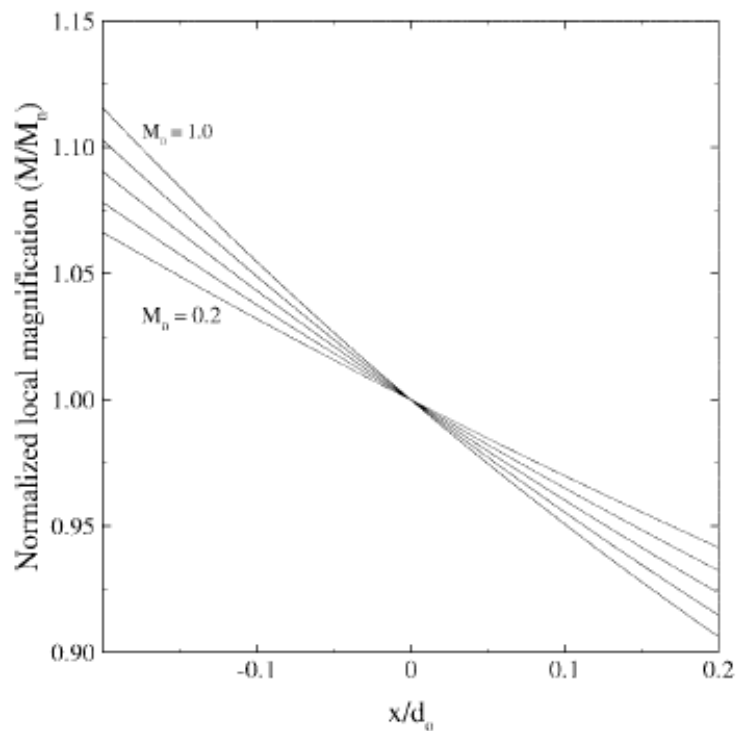
Περιστροφική διάταξη. Το όριο στην τιμή της γωνίας θ (σχήμα 2.38) δεν υπάρχει στην περίπτωση περιστροφικής διάταξης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.39, οι άξονες των δύο καμερών δεν είναι πια παράλληλοι μεταξύ τους, αλλά έχουν στραφεί με τρόπο που να τέμνονται με το επίπεδο του laser στον άξονα συμμετρίας. Με αυτόν τον τρόπο η γωνία θ μπορεί να πάρει πολύ μεγαλύτερες τιμές και έτσι να μειωθούν τα σφάλματα που σχετίζονται με τα διανύσματα κάθετα στο επίπεδο μέτρησης [38].

Για να διατηρηθεί καλή η εστίαση σε αυτήν την περίπτωση που οι κάμερες αποτυπώνουν επίπεδο που δεν είναι παράλληλο με τον φακό, πρέπει να τηρηθεί η "συνθήκη Scheimpflug". Σύμφωνα με αυτή, πρέπει το επίπεδο του φακού, το επίπεδο του συστήματος καταγραφής (image plane) και το επίπεδο του laser (object plane), να τέμνονται σε μια κοινή γραμμή (σχήμα 2.39). Αυτή η μη παραλληλία των τριών επιπέδων επιφέρει ανομοιομορφία στη μεγέθυνση της εικόνας λήψης (σχήμα 2.40). Ένα πρόσθετο πρόβλημα που προκαλεί η περιστροφική διάταξη είναι η αποτύπωση εικόνων που είναι παραμορφωμένες κατά αντίθετο τρόπο. Τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται με τη χρήση παρεμβολής



Σχήμα 2.39: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης περιστροφικού συστήματος. Από [38].

των συντεταγμένων [38] και με τη χρήση κατάλληλων συναρτήσεων μεταφοράς για μετασχηματισμό των συντεταγμένων [39].

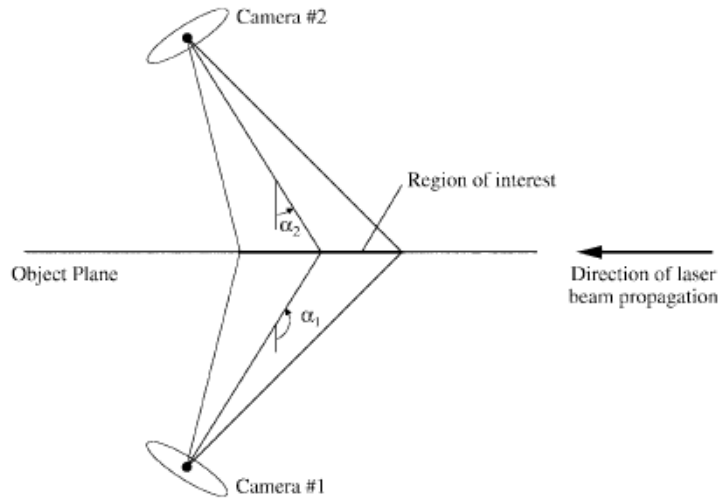


Σχήμα 2.40: Αδιάστατη μεγέθυνση έναντι αδιάστατης απόστασης, για στρεφόμενο σύστημα. Από [38].

Μια παραλλαγή του στρεφόμενου συστήματος με τη χρήση της συν-

θήκης Scheimplug, είναι αυτή που εισήχθη από τον Willert [40] και φαίνεται στο σχήμα 2.41. Σε αυτήν την περίπτωση, οι δύο κάμερες είναι τοποθετημένες εκατέρωθεν του φύλλου laser. Με αυτήν την μέθοδο επιτυγχάνεται και στις δύο κάμερες παρόμοια παραμόρφωση (από αντίθετη παραμόρφωση για κάμερες στην ίδια μεριά του laser) και forward scattering, σχήμα 2.42, που ισοδυναμεί με καλύτερο φωτισμό των σωματιδίων και στις δύο κάμερες.

Τέλος, να σημειώσουμε ότι οι εξισώσεις που εξάγουν τα τρία διανύσματα μετατόπισης μπορούν να μετατραπούν σε μορφή που μοιάζει ή είναι ταυτόσημη με τις εξισώσεις 2.4.5, 2.4.6 και 2.4.7, [38].

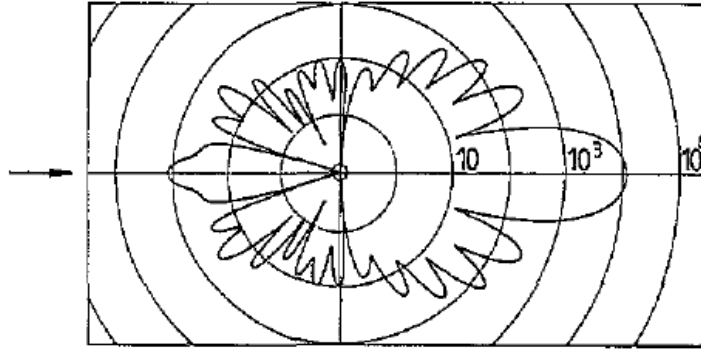


Σχήμα 2.41: Stereoscopic PIV με κάμερες εκατέρωθεν του φύλλου laser. Από [40].

Ανάλυση σφαλμάτων

Οι αβεβαιότητες των υπολογιζόμενων μετατοπίσεων (δx , δy , δz), μπορούν να συσχετισθούν με τις γεωμετρικές παραμέτρους των καμερών και τις μετρούμενες μετατοπίσεις από κάθε κάμερα,[35],[38], τόσο για στρεφόμενα συστήματα, όσο και για παράλληλης μετατόπισης. Υποθέτοντας ότι οι μεταβλητές είναι ασυσχέτιστες και με τυπική απόκλιση σ , έχουμε :

$$\begin{aligned} \left[\frac{\sigma_{\delta z}}{\delta z} \right]^2 &= (\sigma_{\delta X_1}^2 + \sigma_{\delta X_2}^2) \left[\frac{d_0}{M_n S \delta z} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_S}{S} \right]^2 \\ &+ \left[\frac{\sigma_{M_n}}{M_n} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{d_0}}{d_0} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.4.8)$$



Σχήμα 2.42: Διασκόρπιση (scattering) από laser που προσκρούει σε σωματίδιο. Φαίνεται ότι η ένταση κατά την κατεύθυνση (βέλος) του laser (forward scattering) είναι μεγαλύτερη. Από [34].

$$\begin{aligned} \left[\frac{\sigma_{\delta x}}{\delta x} \right]^2 &= \left[\frac{\sigma_{\delta X_1} (x - s/2)}{M_n S \delta x} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{\delta X_1} (x + s/2)}{M_n S \delta x} \right]^2 \\ &+ \left[\frac{\sigma_{M_n}}{M_n} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_S \delta z x}{S \delta x d_0} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_x \delta z}{\delta x d_0} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.4.9)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{\sigma_{\delta y}}{\delta y} \right]^2 &= (\sigma_{\delta X_1}^2 + \sigma_{\delta X_2}^2) + \left[\frac{y}{M_n S \delta y} \right]^2 + (\sigma_{\delta Y_1}^2 + \sigma_{\delta Y_2}^2) \\ &\times \left[\frac{1}{M_n S \delta y} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{M_n}}{M_n} \left(1 + \frac{\delta z y}{\delta y d_0} \right) \right]^2 \\ &+ \left[\frac{\sigma_S \delta z y}{S \delta y d_0} \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_y \delta z}{S \delta y d_0} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.4.10)$$

όπου $\sigma_{\delta X_j}$ προκύπτουν από την επεξεργασία της κάθε μίας φωτογραφίας PIV και περιλαμβάνουν τυχαία και συστηματικά σφάλματα [38]. Τα υπόλοιπα σφάλματα σ_x , σ_y , σ_S , σ_{M_n} , σ_{d_0} είναι σφάλματα που προκύπτουν από τη μέτρηση των διαφόρων αποστάσεων μέσω της κάμερας.

Αν υποθέσουμε ότι $\sigma_{\delta X_1} = \sigma_{\delta X_2} = \sigma_{\delta Y_1} = \sigma_{\delta Y_2} = \sigma_{\delta X}$ και $x = y = 0$ τότε το σχετικό σφάλμα της συνιστώσας των διανυσμάτων μέτρησης κάθετης στο επίπεδο του laser γίνεται :

$$\frac{\sigma_{\delta z}}{\sigma_{\delta x}} = \frac{\sigma_{\delta z}}{\sigma_{\delta y}} = 2 \frac{d_0}{S} = \frac{1}{\tan \theta} \quad (2.4.11)$$

όπου φαίνεται η εξάρτησή του από τη γωνία θ όπως είχε προλεχθεί. Στο σχήμα 2.39 φαίνεται η μεταβολή του σχετικού σφάλματος που συζητήθηκε παραπάνω, για περιστρεφόμενα συστήματα και συστήματα παράλληλης μετατόπισης.

Μέθοδοι εξαγωγής τελικού πεδίου

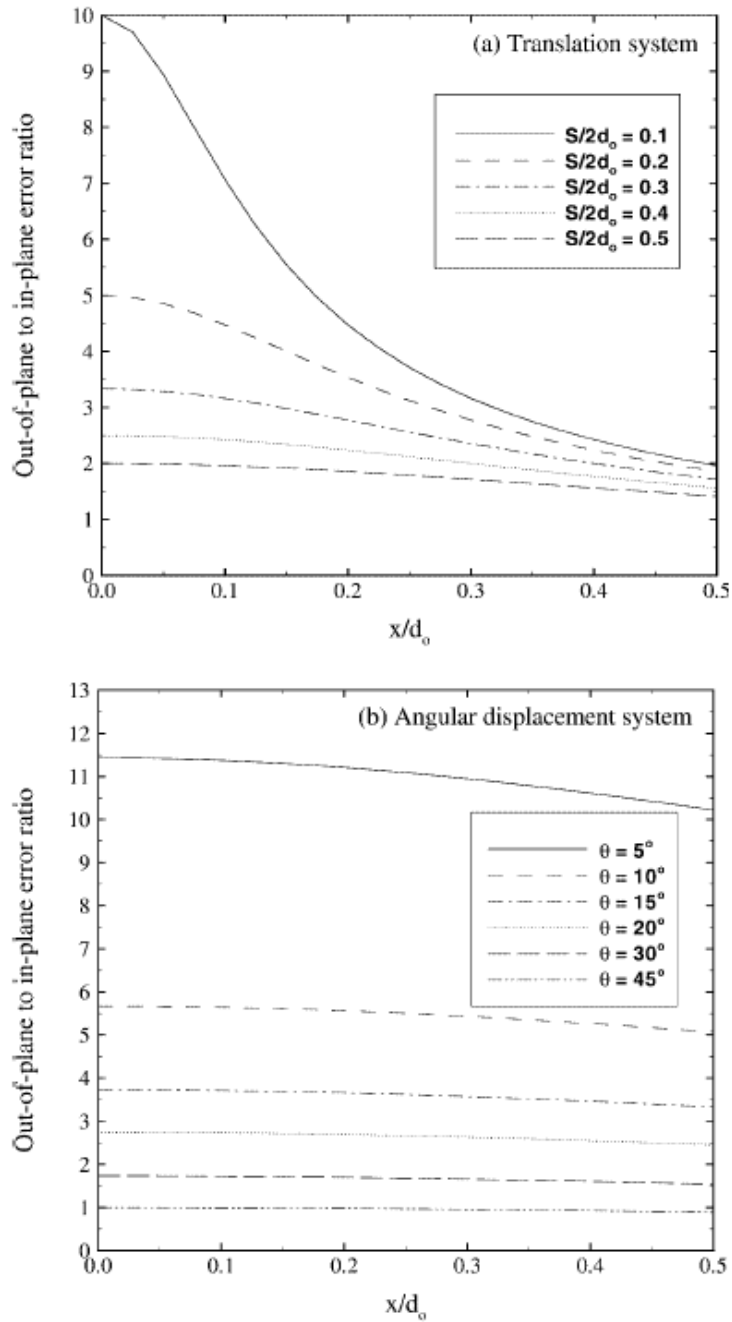
Κάθε ζευγάρι διανυσματικών πεδίων που παράγει το Stereo PIV πρέπει να συνδυασθεί για να παραχθούν τα τρισδιάστατα διανύσματα. Ουσιαστικά, καταλήγουμε σε μία εξίσωση της μορφής

$$\vec{x} = \vec{f}(\vec{X})$$

όπου \vec{x} τα παραγόμενα διανύσματα, \vec{X} τα αρχικά και μένει να καθορισθεί η συνάρτηση \vec{f} (mapping function). Υπάρχουν δύο τρόποι που επιτυγχάνεται η ανασύνθεση των πεδίων: (i) Η γεωμετρική ανασύνθεση και (ii) Με calibration.

Η γεωμετρική ανασύνθεση χρησιμοποιείται κυρίως από τα συστήματα πλευρικής μετατόπισης, όπου η μεγέθυνση είναι ομοιόμορφη. Για τη χρήση αυτής της μεθόδου χρειάζεται γνώση της γεωμετρίας που μελετάται.

Η ανασύνθεση με calibration χωρίζεται σε 2D και 3D και απαιτεί ένα "στόχο" που τοποθετείται στο επίπεδο του laser, με σημεία γνωστής απόστασης σημειωμένα πάνω του. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει η απεικόνιση των σωστών αποστάσεων. Το 2D calibration απαιτεί γνώση της γεωμετρίας που μελετάται, ενώ στο 3D calibration δεν είναι απαραίτητο μέσω της τοποθέτησης του στόχου σε παραπάνω από ένα επίπεδα. Οι μέθοδοι με calibration είναι ιδανικές για στρεφόμενα συστήματα [38].



Σχήμα 2.43: Μεταβολή του σχετικού σφάλματος $\frac{\sigma_{\delta z}}{\sigma_{\delta x}} = \frac{\sigma_{\delta z}}{\sigma_{\delta y}}$, με την διαμήκη απόσταση, για $y=z=0$ για τα δύο συστήματα. Από [38]

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διαδικασία - Ανάλυση αποτελεσμάτων

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτή το μέρος θα γίνει περιγραφή των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα και του πειράματος. Τέλος, θα παρουσιασθεί η ανάλυση και η επεξεργασία των δεδομένων και θα γίνει σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

3.2 Η πειραματική διάταξη

3.2.1 Η αεροδυναμική σήραγγα

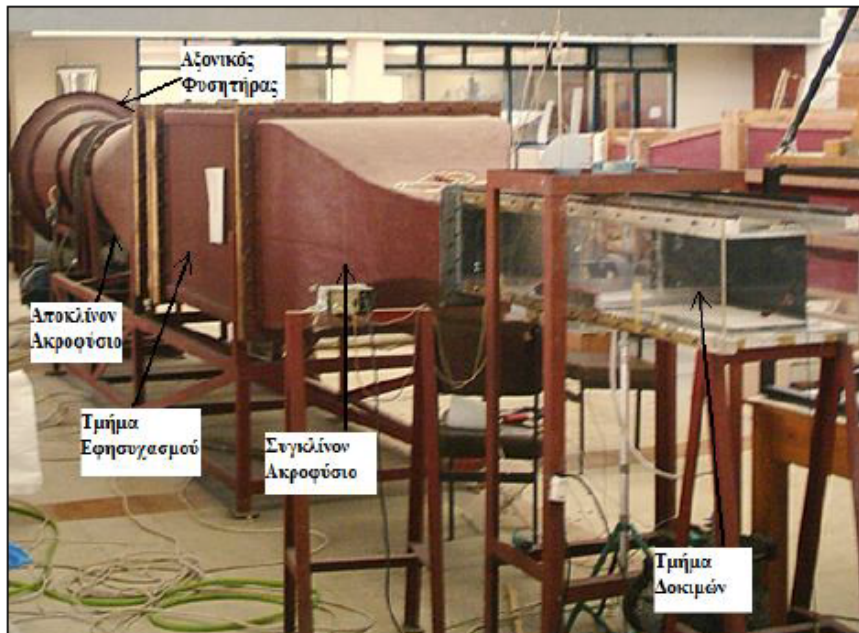
Η αεροδυναμική σήραγγα είναι εργαλείο που χρησιμοποιείται από τους ερευνητές για την μελέτη της ροής αέρα καθώς αλληλεπιδρά με στερεά σώματα. Σκοπός της είναι η παραγωγή ρεύματος αέρα ελεγχόμενων ιδιοτήτων (ταχύτητα, επίπεδο τύρβης).

Η σήραγγα που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς του πειράματος είναι τύπου ανοιχτού κυκλώματος, υποηχητική - χαμηλής ταχύτητας και συνεχούς λειτουργίας. Η κίνηση του αέρα γίνεται μέσω ενός φυσητήρα αξονικού τύπου, ενώ μέσω της ρύθμισης των στροφών του (με τη χρήση ενός ρυθμιστή που διαθέτει στρόφαλο) επιτυγχάνεται η ρύθμιση της ταχύτητας της ροής. Το εύρος των ταχυτήτων που μπορεί να επιτύχει η σήραγγα κυμαίνεται μεταξύ 3 m/sec και 20 m/sec (σαφώς πολύ χαμηλότερα από την ταχύτητα του ήχου σε φυσιολογικές συνθήκες). Στον πίνακα 3.1 φαίνονται τα τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της αεροσήραγγας.

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Τύπος	VM 60.10.28°
Στροφές (RPM)	2910
Ισχύς κινητήρα (HP)	7.5
Ωφέλιμη ολική πίεση (kg/m ²)	70

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά της αεροδυναμικής σήραγγας που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα. Από [36].

Σχηματική διάταξη της σήραγγας φαίνεται στο σχήμα 3.1. Παρατηρούμε ότι η μορφή της παρουσιάζει ένα αποκλίνον τμήμα, το οποίο καταλήγει σε ένα τμήμα εφησυχασμού ενώ τέλος υπάρχει ένα συγκλίνον τμήμα. Αυτή η διάταξη, σε συνδυασμό με ειδικά τοποθετημένα πλέγματα μειώνουν τις δίνες και το επίπεδο τύρβης της ροής. Επίσης υπάρχουν τοποθετημένα και ειδικά φίλτρα τα οποία απομακρύνουν σωματίδια από τη ροή. Να σημειώσουμε ότι τα φίλτρα αυτά είχαν αφαιρεθεί στο πείραμα για να μπορούν να διέλθουν τα σωματίδια για το PIV.



Σχήμα 3.1: Η αεροδυναμική σήραγγα του ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα. Φαίνονται τα διάφορα κομμάτια που την αποτελούν. Από [36].

Το τμήμα που γίνονται οι δοκιμές (σχήμα 3.1), είναι ορθογωνικής διατομής, διαστάσεων $L \times D \times H = 150\text{cm} \times 42\text{cm} \times 22.5\text{cm}$, μήκος, πλάτος και ύψος αντίστοιχα. Το υλικό κατασκευής του τμήματος δοκιμών είναι διαφανές plexiglass, το οποίο επιτρέπει την είσοδο των ακτίνων laser και την καταγραφή της ροής από τις κάμερες. Η οροφή του plexiglass είναι αποσπώμενη (καπάκι), ώστε να είναι εφικτή η παρέμβαση.

3.2.2 Δοκίμιο ανάποδου σκαλοπατιού

Το μοντέλο του ανάποδου σκαλοπατιού (backward facing step, bfs) που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία (σχήμα 3.2) τοποθετήθηκε στην αρχή του τμήματος δοκιμών της αεροσήραγγας, ενώ ο άξονας συμμετρίας του έχει κατεύθυνση παράλληλη στην ροή. Το πίσω μέρος του δοκιμίου έχει μεγάλη καμπυλότητα, για να αποφευχθούν ανωμαλίες στη ροή. Η διατομή του μπροστινού μέρους του σκαλοπατιού (διατομή απότομης διερεύνησης) έχει διαστάσεις $D \times H = 420\text{mm} \times 41\text{mm}$, πλάτος επί ύψος αντίστοιχα, ενώ το συνολικό μήκος του δοκιμίου (κατά την αξονική κατεύθυνση) έχει μήκος 42mm . Συνεπώς μπορούμε να προσδιορίσουμε τα μεγέθη Aspect Ratio και Expansion Ratio όπως τα ορίσαμε στο κεφάλαιο 2.2.1. Συγκεκριμένα τα μεγέθη παίρνουν τις τιμές:

$$ER = \frac{H_{bfs}}{H_{bfs} - H_{wt}} = 1.22$$

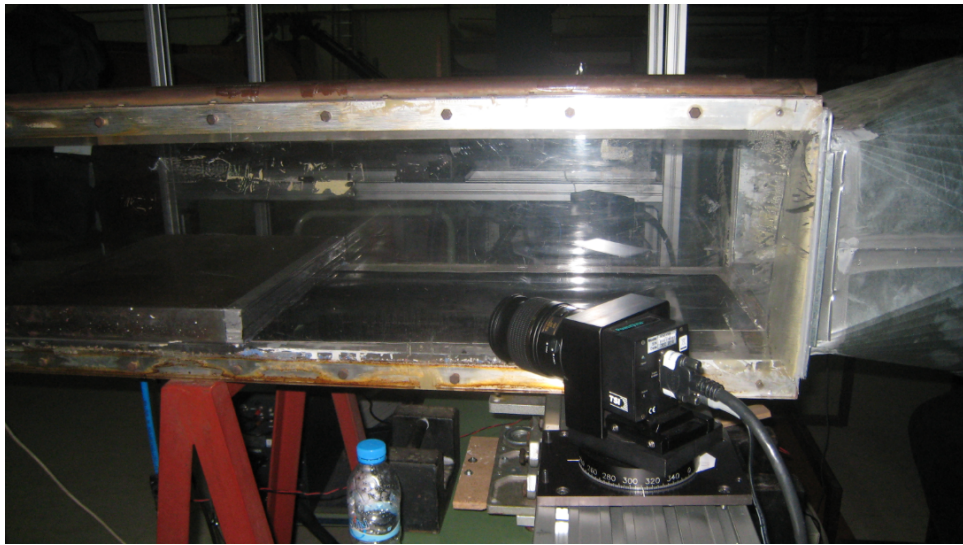
$$AR = \frac{D_{bfs}}{H_{bfs}} = 10.2$$

όπου H_{bfs} και H_{wt} είναι το ύψος του step και της σήραγγας σε εκείνο το σημείο αντίστοιχα, ενώ D_{bfs} είναι το πλάτος του δοκιμίου του step. Το Aspect Ratio είναι μεγαλύτερο του 10, ένα όριο που μας εγγυάται διδιάστατη ροή, τουλάχιστον κοντά στον άξονα του step [16].

Σε απόσταση 6mm κάτω από την ακμή του step βρίσκεται μια σχισμή (slot), κάτω από την οποία βρίσκεται μια σειρά 20 οπών, με διάμετρο περίπου 2mm. Ο αέρας εξέρχεται με τη μορφή δεσμών από τις οπές, προσκρούει στο μπροστινό τοίχωμα του δοκιμίου και τέλος εξέρχεται από τη σχισμή.

Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται μέσω ενός σωλήνα παροχής αέρα, το άλλο άκρο του οποίου συνδέεται με την ηλεκτροβαλβίδα του συστήματος η οποία ελέγχει την τροφοδοσία. Το εσωτερικό του δοκιμίου είναι κούφιο και ο σωλήνας τροφοδοσίας διακλαδίζεται σε τέσσερις σωλήνες μικρότερων διαμέτρων που παρέχουν τον αέρα τελικά στις οπές.

Στα σχήματα 3.3 και 3.4 φαίνεται το δοκίμιο του step από μπροστά, στην κανονική του διάταξη και με αφαιρεμένη την πρόσοψη αντίστοιχα.

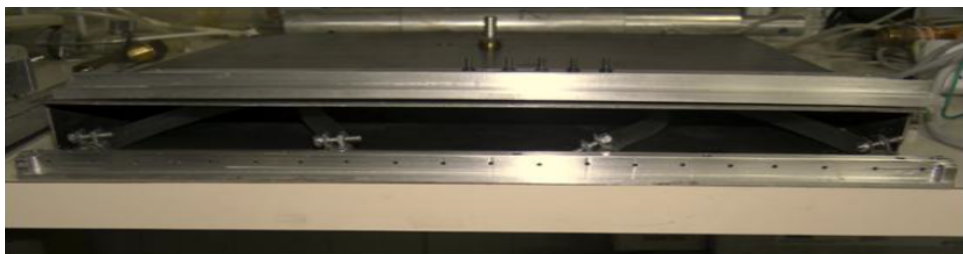


Σχήμα 3.2: Το δοκίμιο του ανάποδου σκαλοπατιού.

Φαίνονται η σχισμή που εξέρχεται ο αέρας, οι σωλήνες τροφοδοσίας και οι είκοσι οπές όπου εξέρχονται οι δέσμες.



Σχήμα 3.3: Το μπροστινό μέρος του step. Φαίνεται η σχισμή που εξέρχεται ο αέρας, 6mm κάτω από την ακμή. Από [36].



Σχήμα 3.4: Το step με αφαιρεμένο το μπροστινό μέρος. Φαίνονται οι τέσσερις σωλήνες τροφοδοσίας και οι 20 οπές που εξέρχονται οι δέσμες για να πάνε στη σχισμή. Από [36].

3.2.3 Ηλεκτροβάννα αέρος

Η ηλεκτροβάννα αέρος που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των δεσμών στα πειράματα είναι της εταιρίας MAC, σειρά 100. Στον πίνακα 3.2 φαίνονται τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά της ηλεκτροβάννας.

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Εργαζόμενο μέσο	Συμπιεσμένος αέρας, κενό, αδρανή αέρια
Λίπανση	Μη αναγκαία
Προστασία	IP 65
Εύρος πίεσης (bar)	Πίεση κενού έως 10
Διήθηση (μ)	40
Στόμιο (mm)	2
Μέγιστη ροή (6 bar, $\Delta P=1\text{bar}$), (Nl/min)	180
Ρυθμός διαρροών (cm^3/min)	50
Εύρος τάσης (%)	-15 έως της ονομαστικής
Ισχύς (W)	1-17

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά της ηλεκτροβάννας. Από [36].

3.2.4 Το σύστημα laser

Το σύστημα laser που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα PIV είναι το PIV laser II-30, σειράς solo, της εταιρίας Wave Research. Είναι τύπου Nd:YAG διπλής κεφαλής και είναι ιδανικό για τη χρήση σε πειράματα PIV, τόσο για πειράματα με εργαζόμενο μέσο νερό, όσο και για αέρα. Στους πίνακες 3.3, 3.4 και 3.5 φαίνονται ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά, μεγέθη και συνθήκες λειτουργίας του laser.



Σχήμα 3.5: Σύστημα laser Solo II-30. Από [36].

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Ρυθμός Επανάληψης (Hz)	30×2
Ενέργεια (mJ)	30
Ενεργειακή σταθερότητα ($\pm\%$)	4
Διάμετρος ακτίνας (mm)	3
Εύρος παλμού (ns)	3-5
Απόκλιση (mrad)	<3
Σταθερότητα εστίασης ακτίνας (urad)	<100

Πίνακας 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του laser. Από [36].

Χαρακτηριστικά	Τιμές	
Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	350	
Σχετική υγρασία (%)	178	
Τάση (VAC)	95-240	
Ισχύς (W)	Στα 15 Hz	800
	Στα 30 Hz	900

Πίνακας 3.4: Συνθήκες λειτουργίας του laser. Από [36].

Διαστάσεις/ Βάρος	Κεφαλή laser	Τροφοδοτικό
Μήκος (mm)	350	461
Πλάτος (mm)	178	194
Ύψος (mm)	81	363
Βάρος (kg)	4.5	22

Πίνακας 3.5: Ονομαστικές διαστάσεις και βάρος laser. Από [36].

3.2.5 Τροφοδοτικό σωματιδίων

Όπως αναφέραμε στην ενότητα 2.4, για την οπτικοποίηση της ροής χρησιμοποιούνται σωματίδια. Στην περίπτωση μας, αυτά ήταν σταγονίδια καπνού από λάδι τα οποία παράγονταν από ένα τροφοδοτικό καπνού, μοντέλο 9307 της εταιρίας TSI. Στους πίνακες 3.6, 3.7 και 3.8 φαίνονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του τροφοδοτικού. Να σημειώσουμε ότι για την παραγωγή καπνού χρησιμοποιήθηκε ελαιόλαδο, καθώς το τροφοδοτικό λειτουργεί καλύτερα με αυτό.

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Διάμετρος Σωλήνα Εξόδου Αερολύματος (cm)	Εσωτερική 0.95
	Εξωτερική 1.59
Ρυθμός ροής αερολύματος (l/min)	30
Μέσο μέγεθος σωματιδίων (μm)	1

Πίνακας 3.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας καπνού. Από [36].

Συνθήκες λειτουργίας		Τιμές
Πίεση Τροφοδοτικού αέρα (kPa)	Ελάχιστη	170
	Μέγιστη	2720
Θερμοκρασία τροφοδοτικού αέρα (°C)	Συνθήκες λειτουργίας	20
	Μέγιστη	65
Εσωτερική πίεση αέρα (kPa)	Συνθήκες λειτουργίας	170
	Μέγιστη	550
Αντίθληψη (kPa)	Μέγιστη	10

Πίνακας 3.7: Συνθήκες λειτουργίας τροφοδοτικού. Από [36].

Διαστάσεις/ Βάρος	Τιμές
Διάμετρος (cm)	350
Ύψος (cm)	39.5
Βάρος (kg)	3.9

Πίνακας 3.8: Ονομαστικές διαστάσεις και βάρος τροφοδοτικού καπνού. Από [36].

3.2.6 Κάμερες καταγραφής

Οι δύο κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν μοντέλο POWER VIEW PLUS 4P της εταιρίας TSI. Οι κάμερες αυτές λειτουργούν με ρυθμό καταγραφής 16 καρέ / δευτερόλεπτο (16 fps) και διαθέτουν χωρική ανάλυση 4 Mpixels με ανάλυση 2048×2048 pixels. Στον πίνακα 3.9 φαίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των καμερών.

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Αριθμός Εικονοστοιχείων	2048×2048
Μέγεθος Εικονοστοιχείων (μm)	7.4 × 7.4
Δυναμικό εύρος (bits)	12
Ρυθμός καρέ (fps)	16
Φακός	F-mount

Πίνακας 3.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά καμερών. Από [56].

3.3 Πειράματα

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιασθούν τα βήματα για την λήψη μετρήσεων με τη χρήση stereo PIV όσον αφορά τις κάμερες, το λογισμικό και τα λοιπά εξαρτήματα. Να σημειώσουμε ότι πρόκειται περί stereo PIV περιστροφικού συστήματος, με τις δύο κάμερες να κοιτάνε το φύλλο laser από την ίδια μεριά (σχήμα 2.39).

Σκοπός του πειράματος είναι η αποτύπωση των πεδίων ταχυτήτων σε επίπεδα κάθετα στη ροή, που απέχουν 10, 20, 30 και 40 mm από το step, και σε διαφορετικές περιπτώσεις ροής (σύνολο 48 περιπτώσεις):

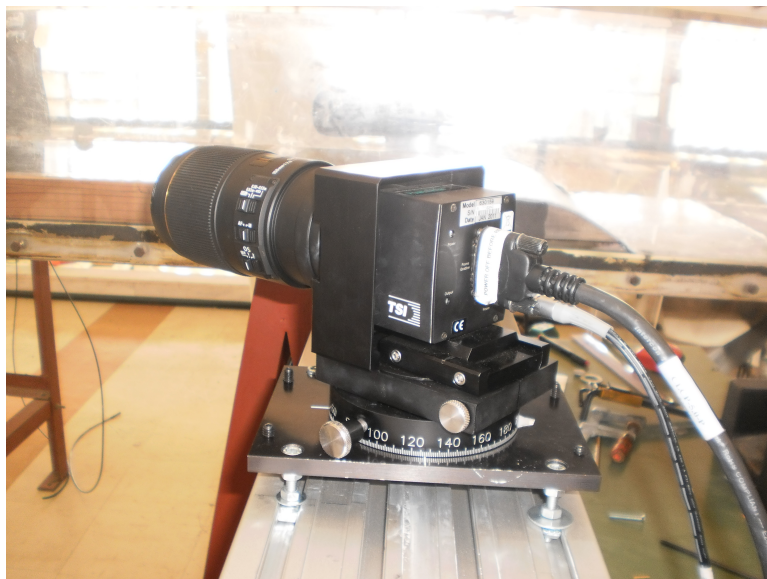
- Ροή χωρίς διέγερση.
- Ροή διεγερμένη από σταθερές δέσμες (steady jets).
- Ροή διεγερμένη από παλλόμενες δέσμες με συχνότητα 10Hz (βέλτιστο), 20, 35, 45, 65, 85 ms μετά την εντολή για άνοιγμα των ηλεκτροβανών των δεσμών.
- Ροή διεγερμένη από παλλόμενες δέσμες με συχνότητα 2Hz (μη βέλτιστο), 20, 35, 45, 65, 85 ms μετά την εντολή για άνοιγμα των ηλεκτροβανών των δεσμών.

Όπου βέλτιστο και μη βέλτιστο αντιστοιχούν στον βαθμό μείωσης της περιοχής ανακυκλοφορίας [16].

3.3.1 Προετοιμασία πειράματος

Σε αυτήν τη φάση προετοιμάζεται η σήραγγα, συνδέονται τα μηχανήματα και γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες ώστε να γίνουν οι μετρήσεις. Συγκεκριμένα, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

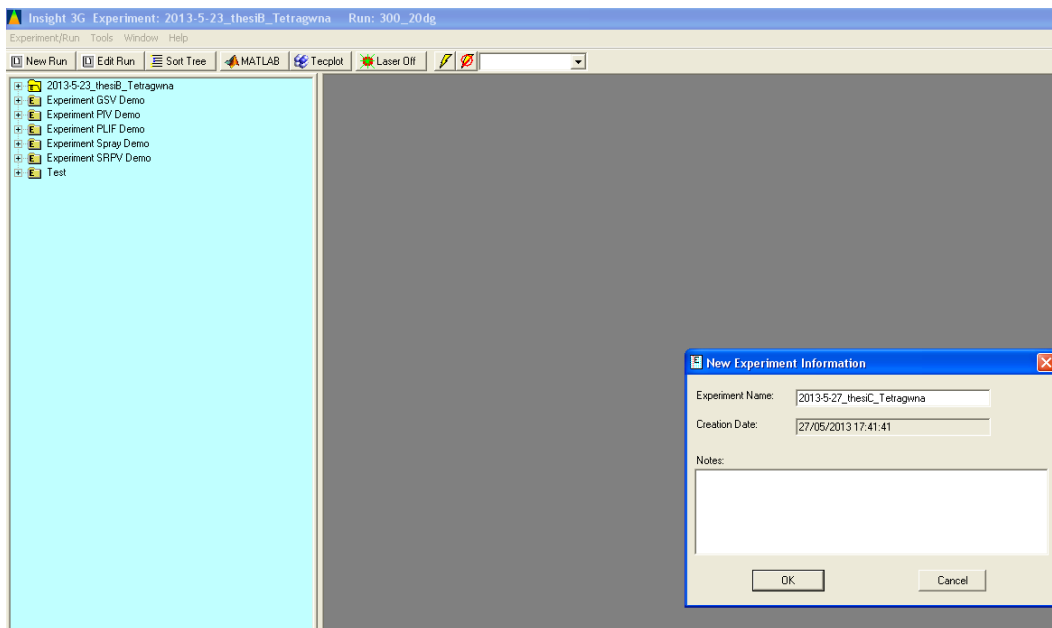
1. Σημειώνεται ευθεία στο πάτωμα της σήραγγας, στην περιοχή μέτρησης, η οποία είναι κάθετη στο step και βρίσκεται στον άξονα της σήραγγας.
2. Σημειώνονται τέσσερις ευθείες στο πάτωμα της σήραγγας, κάθετες στην προηγούμενη γραμμή οι οποίες είναι τοποθετημένες σε απόσταση 10, 20, 30 και 40 mm από το step. Αυτά θα είναι τα επίπεδα μέτρησης που θα χρησιμοποιήσουμε.
3. Βιδώνουμε τη μεταλλική βάση για τις κάμερες πάνω σε αυτοσχέδιο "μηχανισμό μετατόπισης".
4. Βιδώνουμε τις κάμερες πάνω στη μεταλλική βάση (σχήμα 3.6) και τις κατευθύνουμε προς το πρώτο σημάδι (10 mm). Φροντίζουμε να απέχουν ίδια απόσταση από τη γραμμή στο κέντρο της σήραγγας, για συμμετρική εικόνα, και να σχηματίζουν γωνία μεταξύ τους $2\theta \approx 90^\circ$, σχήμα 2.39. Αυτό γίνεται για να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.43.
5. Αυξάνουμε την πίεση στο συμπιεστή αέρα (σχήμα 3.7), πάνω από τα 5 bar, για να χρησιμοποιήσουμε την πίεση στο τροφοδοτικό καπνού και στις δέσμες. Συνδέουμε με το σύστημα πεπιεσμένου αέρα το τροφοδοτικό και την τροφοδοσία των δεσμών.
6. Συνδέουμε στην πρίζα και στον Η/Υ τις κάμερες, φροντίζοντας να είναι κλειστές. Προσέχουμε η κάμερα Α να συνδεθεί με τη θέση Α στον Η/Υ (αντίστοιχα για την κάμερα Β), διαφορετικά οι μετρήσεις και συνεπώς τα διανύσματα ταχύτητας μπορεί να έχουν αντίθετη φορά από την επιθυμητή. Συνδέουμε με το synchroniser κάμερες, laser και τον υπολογιστή που ελέγχει τις βάνες των δεσμών.
7. Τοποθετούμε το laser πάνω σε μεταλλική διάταξη (σχήμα 3.6), παράλληλα στη σήραγγα και στο κατάλληλο ύψος.
8. Ελέγχουμε την ταχύτητα του αέρα στη σήραγγα ώστε να είναι η επιθυμητή, περίπου 4 m/sec. Η μέτρηση γίνεται με μανόμετρο.
9. Εκκινούμε το πρόγραμμα Insight 3G®. Δημιουργούμε νέο φάκελο πειράματος, σχήμα 3.8. Επιλέγουμε :
New experiment → Εισάγουμε όνομα
New run → Εισάγουμε όνομα



Σχήμα 3.6: Κάμερα πάνω στη μεταλλική βάση.



Σχήμα 3.7: Ταμπλό ελέγχου συμπιεστή αέρα.



Σχήμα 3.8: Επιλογή καινούριου πειράματος στο λογισμικό Insight 3®G.

3.3.2 Διαδικασία διακρίβωσης (calibration)

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.4.3, στο Stereo PIV είναι υποχρεωτικός ο καθορισμός μιας mapping function για να παραχθεί το πεδίο τρισδιάστατων διανυσμάτων από διδιάστατα διανύσματα. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιούμε τη μέθοδο 3D calibration με στόχο που έχει πληροφορία σε δύο επίπεδα (σχήμα 3.9), και με τη χρήση του λογισμικού Insight 3G®. Συγκεκριμένα, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα.

1. Τοποθετείται ο στόχος πάνω στο γραμμή (επίπεδο) που γίνεται το calibration ώστε να εφάπτεται με αυτή, και η πλευρά που έχει τους καθρέφτες να "κοιτάει" το laser.
2. Ρύθμιση του laser ώστε να κατευθύνεται στον καθρέφτη που δεν βρίσκεται στο μέσο του στόχου (ο μεσαίος καθρέφτης είναι για πείραμα με τις κάμερες εκατέρωθεν του φύλλου laser). Προσέχουμε το φύλλο laser να μη σχηματίζει γωνία με τον καθρέφτη. Αυτό μπορεί να επαληθευθεί εάν η αντανάκλασή του επιστρέφει ακριβώς στην πηγή του laser.
3. Στρέφουμε τις κάμερες ελαφρά μέχρι να δείχνουν κατοπτρικά την ίδια εικόνα (στόχο). Προσέχουμε ώστε οι κάμερες να "βλέπουν"

τουλάχιστον μια σειρά με κουκίδες πάνω από το σταυρό του στόχου, που πρέπει να είναι περίπου στο κέντρο της εικόνας, αλλιώς υπάρχουν πρόσθετα σφάλματα. Αυξομειώνουμε τη φωτεινότητα των καμερών ρυθμίζοντας το διάφραγμα.

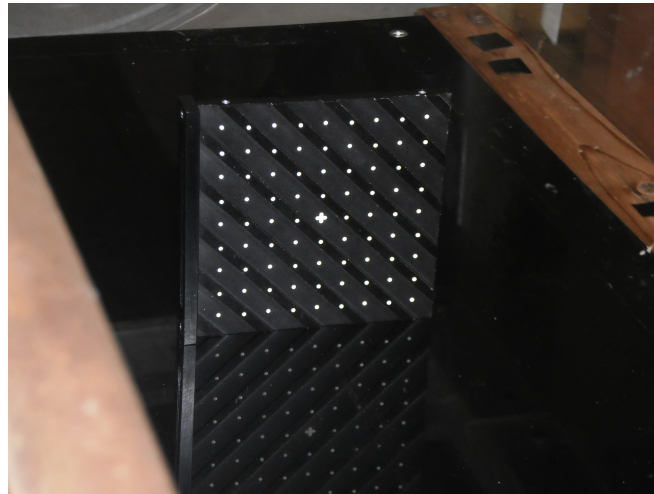
4. Φτιάχνουμε την ευκρίνεια των καμερών. Αυτό επιτυγχάνεται εστιάζοντας το φακό και στρέφοντας το ρυθμιστικό του καταγραφικού ώστε να ικανοποιείται ο κανόνας Scheimpflug, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.39. Ουσιαστικά αυτό γίνεται με δοκιμές μέχρι να έχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα και στις δύο κάμερες.

Επιλέγουμε τις εξής ρυθμίσεις στο λογισμικό Insight 3G® :

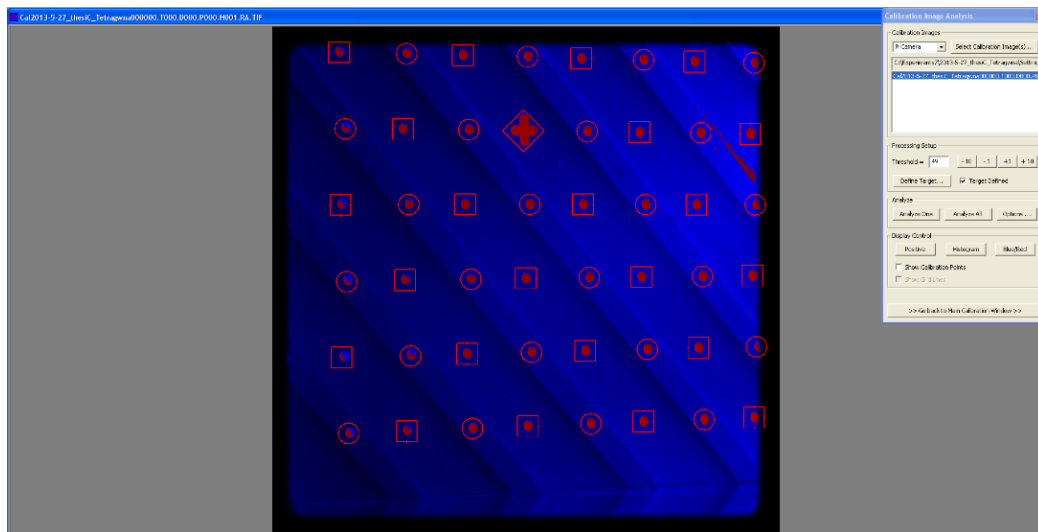
1. Tools: Capture Perspective Calibration Images, όπου αποτυπώνουμε τις φωτογραφίες calibration για τις δύο κάμερες.
2. Application: Stereo PIV.
3. Create new: Calibration 1.
4. Create new CPT file.
5. Select calibration images, όπου επιλέγουμε την φωτογραφία calibration για την πρώτη κάμερα (έστω αριστερή).
6. Define target, όπου επιλέγουμε τις εξής ρυθμίσεις.
 - Two planes.
 - Same side of the light sheet.
 - Define grid.
7. Αυξομειώνουμε τη φωτεινότητα με την επιλογή Threshold, ώστε να είναι τα σημάδια (σταυροί και κουκίδες) κόκκινα και το φόντο μπλε (σχήμα 3.10).
8. Για τυχόν πρόσθετες επιλογές, όπως εισαγωγή μάσκας για να αφαιρέσουμε μη επιθυμητά κομμάτια από την calibration image επιλέγουμε options.
9. Analyze One.
10. Επιστροφή στο Βήμα 5 και επανάληψη των βημάτων για την άλλη κάμερα.
11. Edit Cameras/ Select CPT files για left και right cameras.

12. Compute calibration.

13. View CPT : Show grid lines/ show calibration points, για να δούμε το πλέγμα που έχει κατασκευασθεί.



Σχήμα 3.9: Στόχος με δύο επίπεδα για calibration.



Σχήμα 3.10: Αναγνώριση σημαδιών στόχου από το λογισμικό Insight 3G® για την δεξιά κάμερα. Αριστερά φαίνεται παράθυρο με κάποιες από τις επιλογές για το calibration.

3.3.3 Έλεγχος και συμπεριφορά των δεσμών

Triggering ηλεκτροβανών

Ο έλεγχος των δεσμών γίνεται με τη χρήση Η/Υ, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τις ηλεκτροβαλβίδες αέρος. Να σημειώσουμε ότι οι ηλεκτροβαλβίδες είναι συνδεδεμένες και με την παροχή πεπιεσμένου αέρα από το υπόγειο του εργαστηρίου (σχήμα 3.7). Σκοπός μας είναι η καταγραφή της ροής σε ίδιες φάσεις, δηλαδή πολλαπλές φορές σε ίδιο ακριβώς χρόνο μετά το άνοιγμα των βανών. Συνεπώς, πρέπει να επιτευχθεί ο έλεγχος των ηλεκτροβανών ώστε να είναι ανοικτές για σταθερό χρόνο, να ανοίγουν με σταθερή συχνότητα και τέλος να στέλνεται σήμα στον υπολογιστή που είναι εγκατεστημένο το λογισμικό insight 3G® και στο synchroniser ώστε να γίνονται αποτυπώσεις φωτογραφιών από τις κάμερες σε συγκεκριμένο χρόνο μετά την εντολή για άνοιγμα των ηλεκτροβανών.

Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με τη χρήση υπολογιστή, όπου είναι εγκατεστημένο λογισμικό προγράμματος πραγματικού χρόνου Real Time Application Interface (RTAI), ενώ το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των παλμών είναι το scilab/ scicos® (αντίστοιχο του simulink®). Μέσω του λογισμικού ρυθμίζεται η περίοδος διέγερσης της ηλεκτροβαλβίδας T_{jet} , καθώς και ο χρόνος που αυτή παραμένει ανοικτή μέσα σε μια περίοδο, δηλαδή το D_{jet} . Επίσης στέλνεται σήμα στο synchroniser, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ώστε να ενεργοποιούνται οι κάμερες¹.

Απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να αποτυπώνεται το φαινόμενο σε φάση, είναι η περίοδος που στέλνεται σήμα στις κάμερες (και άρα στο laser) να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου που ανοίγουν οι ηλεκτροβάνες.

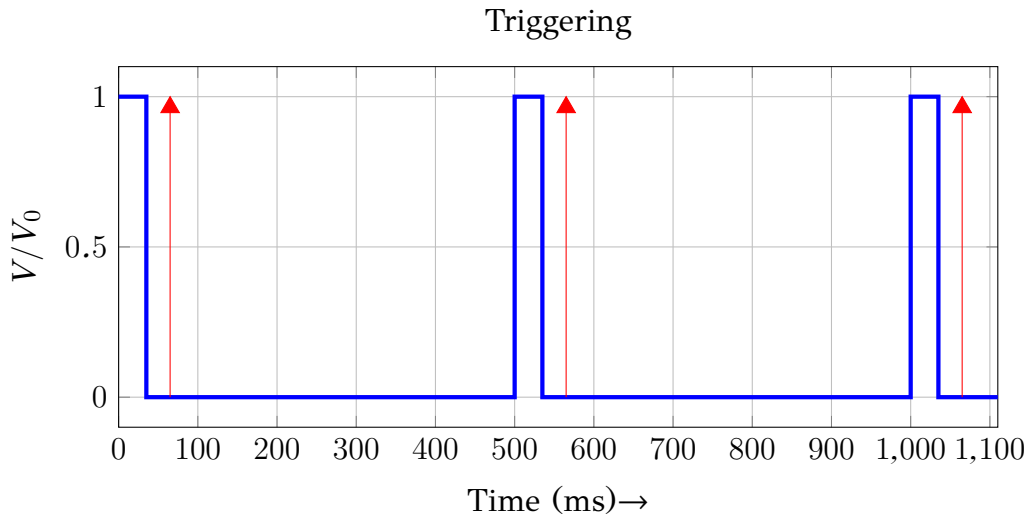
$$T_{laser} = \lambda T_{jet}$$

Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε περίοδος ηλεκτροβανών $T_{jet} = 100ms$ και $T_{jet} = 500ms$. Για το laser επιλέχθηκε περίοδος $T_{jet} = 500ms$. Συνεπώς, το λ είχε τις τιμές 5 και 1. Η διάρκεια που έμενε ανοικτή η ηλεκτροβάννα ήταν $D_{jet} = 35ms$. Στο σχήμα 3.11 φαίνεται ένα παράδειγμα triggering για ηλεκτροβάννα που ανοίγει με περίοδο 500ms, ενώ το laser ενεργοποιείται 65ms μετά την εντολή ανοίγματος της ηλεκτροβάννας.

Τα παραπάνω ισχύουν στις περιπτώσεις που έχουμε μη-μόνιμα φαινόμενα, δηλαδή παλλόμενες δέσμες. Στην περίπτωση των σταθερών δεσμών το σύστημα ελέγχου των ηλεκτροβανών βραχυκυκλώνεται, ώστε

¹Περισσότερα για τον μηχανισμό λειτουργίας του triggering και του προγραμματισμού του στο [41].

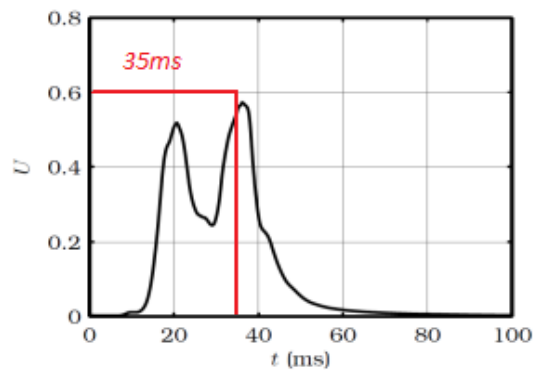
να δέχονται μόνιμα τάση και να είναι ανοικτές, ενώ στην περίπτωση ροής χωρίς διέγερση δεν συνδέεται ο υπολογιστής και οι ηλεκτροβάνες είναι μόνιμα κλειστές.



Σχήμα 3.11: Παράδειγμα Triggering. Ο μπλε τετραγωνικός παλμός αντιπροσωπεύει την εντολή για άνοιγμα της ηλεκτροβάνας, με διάρκεια 35ms και περίοδο 500ms, ενώ η κόκκινη συνάρτηση Dirac την ενεργοποίηση του laser 60ms μετά την εντολή.

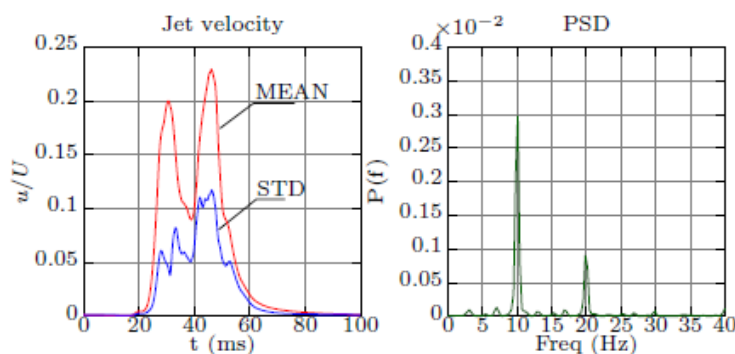
Απόκριση - συμπεριφορά των δεσμών

Αν και το ηλεκτρονικό σύστημα που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο στέλνει σταθερούς παλμούς πλάτους 35ms, οι ηλεκτροβαλβίδες έχουν καθυστέρηση στην απόκρισή τους τόσο στο άνοιγμα, όσο και στο κλείσιμό τους [16], [36]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12, όπου η απόκριση των δεσμών έχει μετρηθεί με θερμό νήμα, το μηχανικό κομμάτι των ηλεκτροβανών καθυστερεί να ανοίξει περίπου 15ms, ενώ καθυστερεί να κλείσει 10ms. Συνεπώς, οι ηλεκτροβάνες είναι ανοικτές για χρονικό διάστημα 30 αντί για 35ms, ενώ οι δέσμες αποκτούν σημαντική ταχύτητα τη χρονική στιγμή 15ms.



Σχήμα 3.12: Ο παλμός για το άνοιγμα των ηλεκτροβανών (κόκκινος παλμός) και η απόκριση των δεσμών, μετρημένη με θερμό νήμα από [36]. Φαίνεται μια καθυστέρηση περίπου 15 ms στο άνοιγμα και 10 ms στο κλείσιμο των ηλεκτροβανών.

Η μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας μίας δέσμης για συχνότητα 10Hz (βέλτιστο) και της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου, φαίνονται στο σχήμα 3.13. Επίσης φαίνεται και το φάσμα των συχνοτήτων, όπου η κυρίαρχη συχνότητα είναι αυτή των 10Hz, ενώ φαίνεται και μια άλλη κυρίαρχη συχνότητα στα 20Hz. Το ταλαντωτικό φαινόμενο που συνδέεται με αυτήν τη δεύτερη συχνότητα φαίνεται και στη μεταβολή της μέσης ταχύτητας, όπου παρουσιάζει ένα τοπικό ελάχιστό, μειώνεται και ξανά-αυξάνεται μέχρι μια άλλη μέγιστη τιμή. Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται κυρίως στις ανακλάσεις των κυμάτων μέσα στη σχισμή (slot) του σκαλοπατιού που εξέρχεται ο αέρας, [36].



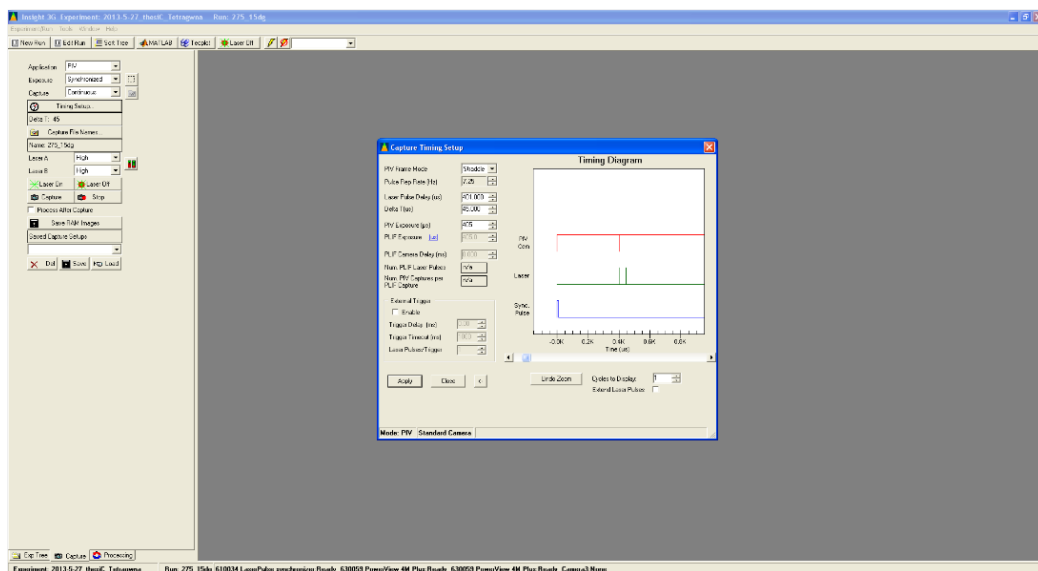
Σχήμα 3.13: Αριστερά: Μεταβολή της μέσης ταχύτητας των δεσμών και της τυπικής απόκλισής τους συναρτήσει του χρόνου, μετρημένες με θερμό νήμα, από [16]. Δεξιά: το φάσμα των συχνοτήτων.

3.3.4 Εκτέλεση πειράματος

Αφού κάνουμε την προετοιμασία για το πείραμα και το calibration, είμαστε έτοιμοι να κάνουμε τις μετρήσεις. Αρχικά ρυθμίζουμε το laser μέσω του προγράμματος Insight 3G® (σχήμα 3.14). Επιλέγουμε:

- PIV Frame Mode: Straddle. Η κάμερα καταγράφει δύο διαδοχικές εικόνες για την εφαρμογή της ετεροσυσχέτισης.
- Pulse Repl Rate (Hz): 2: Η συχνότητα δειγματοληψίας. Να σημειωθεί ότι όσο ο δίσκος του H/Y γέμιζε, αυτή η συχνότητα έτεινε να μειωθεί, χωρίς να γίνει αλλαγή στις ρυθμίσεις.
- Laser Pulse Delay (μ s): 401
- Delta T (μ s): 80.
- PIV Exposure (μ s): 405

Να σημειώσουμε ότι οι πιο πάνω ρυθμίσεις έγιναν για όλες τις περιπτώσεις εκτός από αυτές που μελετήθηκαν μόνιμα φαινόμενα (διέγερση με σταθερές δέσμες και ροή χωρίς δέσμες). Εκεί η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 4 Hz.



Σχήμα 3.14: Ρυθμίσεις laser για το πείραμα PIV.

Στη συνέχεια έγιναν οι εξής ενέργειες:

1. Καταγραφή 300 snapshots στο επίπεδο για κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.
2. Παράλληλη μετακίνηση του μηχανισμού που εδράζονταν οι κάμερες κατά 10mm κατάντη.
3. Παράλληλη μετακίνηση του laser πάνω στην μεταλική διάταξη κατά 10mm κατάντη.
4. Ρύθμιση καμερών μέσω της εστίασης και του ρυθμιστικού Scheimpflug για τυχόν μικρά σφάλματα κατά τη μετακίνηση.
5. Επανάληψη των βημάτων 1-4 για το καινούριο επίπεδο.

3.3.5 Επεξεργασία/ μετά-επεξεργασία με το λογισμικό Insight 3G®

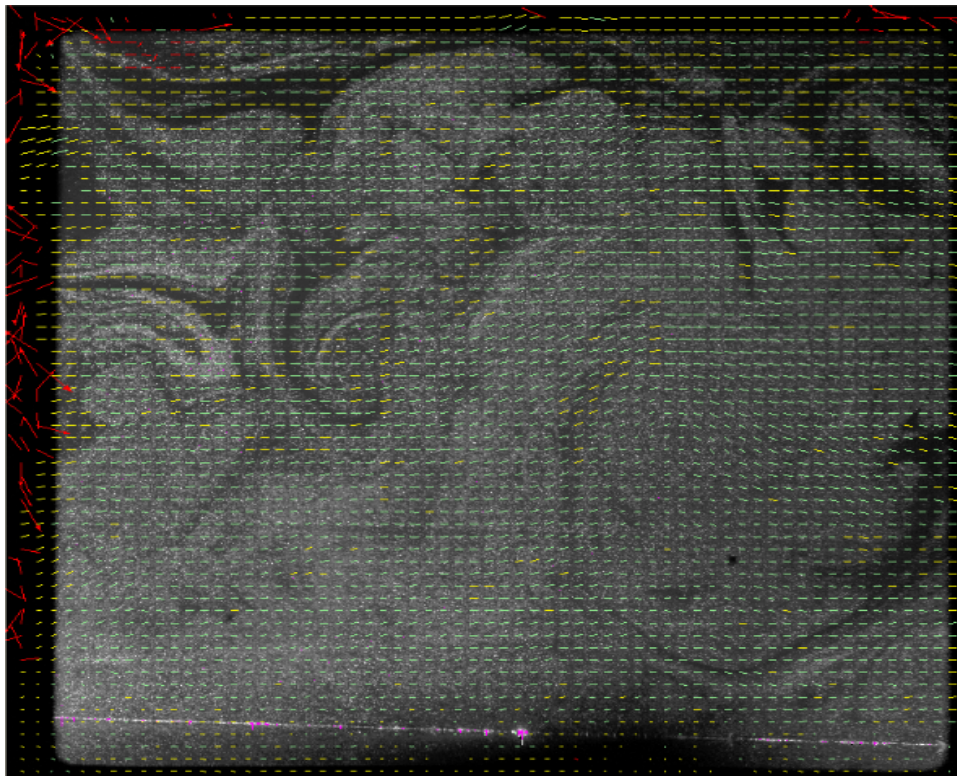
Μετά από την λήψη των φωτογραφιών της ροής γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων από το λογισμικό Insight 3G®. Για το πείραμα διατηρήθηκαν οι προεπιλεγμένες (default) ρυθμίσεις του λογισμικού.

Αρχικά γίνεται η επεξεργασία (processing), που σκοπό έχει την σύγκριση περιοχών δύο διαδοχικών φωτογραφιών με τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης, τον εντοπισμό των κορυφών των συναρτήσεων ετεροσυσχέτισης και τη σύγκρισή τους με θόρυβο ώστε το πεδίο ταχυτήτων να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Στην περίπτωσή μας επιλέχθηκε λόγος $\text{peak to noise ratio} = 1.35 - 1.5$. Τελικά, γίνεται η ετεροσυσχέτιση και παράγονται διδιάστατα διανυσματικά πεδία.

Έπειτα, γίνεται η μετα-επεξεργασία (post-processing), όπου τα διανύσματα που το λογισμικό δεν αναγνωρίζει ως έγκυρα απορρίπτονται, ενώ όσα είναι δυνατό αντικαθίστονται με παρεμβολή. Στο σχήμα 3.15 φαίνεται ένα διδιάστατο πεδίο ταχυτήτων που έχει υποστεί μετα-επεξεργασία. Με πράσινο είναι τα διανύσματα που το λογισμικό αποδέχεται ως σωστά, με κίτρινο όσα απορρίφθηκαν και αντικαταστάθηκαν με παρεμβολή, ενώ με κόκκινα όσα δεν ήταν δυνατό να αντικατασταθούν.

Τέλος, το λογισμικό χρησιμοποιεί την εικόνα calibration και κατασκευάζει το τριδιάστατο πεδίο βάσει των διδιάστατων, από τις δύο κάμερες.

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία processing και post-processing υπάρχουν στο εγχειρίδιο οδηγιών του Insight 3G® και στο [36].



Σχήμα 3.15: Διδιάστατο πεδίο ταχυτήτων μετά το στάδιο της μετα-επεξεργασίας από το λογισμικό Insight 3G ®

3.4 Επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα

3.4.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθεί η διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων, με το λογισμικό Matlab® και θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα. Τέλος, αυτά θα σχολιασθούν και θα γίνει σύγκριση με αποτελέσματα άλλων ερευνών όπου αυτό είναι εφικτό. Υπενθυμίζουμε ότι εξετάστηκαν 48 περιπτώσεις ροής κατάντη του σκαλοπατιού:

- Ροή χωρίς διέγερση.
- Ροή διεγερμένη από συνεχείς δέσμες αέρα.
- Ροή διεγερμένη από παλλόμενες δέσμες, με συχνότητα 10Hz (optimum), 20, 35, 45, 65, 85 ms μετά την εντολή για άνοιγμα των ηλεκτροβανών των δεσμών.
- Ροή διεγερμένη από παλλόμενες δέσμες με συχνότητα 2Hz (non-optimum), 20, 35, 45, 65, 85 ms μετά την εντολή για άνοιγμα των ηλεκτροβανών.

Καθένα από τα παραπάνω για τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις από το step (10, 20, 30, 40 mm). Σε κάθε περίπτωση αποτυπώθηκαν 300 snapshots.

Να σημειωθεί ότι όλες οι αποστάσεις έχουν αδιαστατοποιηθεί με το ύψος του σκαλοπατιού ($h=41\text{mm}$) και οι ταχύτητες με την επ' άπειρον ταχύτητα U_∞ που μετρήθηκε 4.1 m/sec για τα πειράματα με δέσμες συχνότητας 10 Hz και με τις συνεχείς δέσμες, ενώ 3.75 m/sec για τα πειράματα με δέσμες συχνότητας 2 Hz και χωρίς δέσμες.

3.4.2 Αριθμοί Reynolds και Mach της ροής

Ο αριθμός Reynolds (Re) της ροής ορίζεται ως:

$$Re = \frac{\bar{u}L}{\nu} \quad (3.4.1)$$

όπου \bar{u} είναι η επ' άπειρον ταχύτητα της ροής, L ένα χαρακτηριστικό μήκος και ν η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού. Στην περίπτωσή μας θα ορίσουμε δύο διαφορετικούς αριθμούς Re, λαμβάνοντας διαφορετικό χαρακτηριστικό μήκος για τις δύο περιπτώσεις. Αρχικά θα χρησιμοποιήσουμε την υδραυλική διάμετρο της αεροσύγγας D_H , ώστε να προσδιορίσουμε εάν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης και έπειτα το ύψος

του σκαλοπατιού h , για να είμαστε συνεπείς με τη βιβλιογραφία σχετικά με τη μελέτη της ροής κατάντη γεωμετρίας σκαλοπατιού.

Η υδραυλική διάμετρος ορίζεται ως :

$$D_H = \frac{4A}{S} \quad (3.4.2)$$

Όπου A είναι το εμβαδόν του αγωγού και S η βρεχόμενη περίμετρος της διατομής του αγωγού. Θεωρώντας ως εξεταζόμενο τμήμα της αεροσήραγγας το κομμάτι πάνω από το δοκίμιο του σκαλοπατιού (ορθογώνια γεωμετρία) υπολογίζουμε (βλέπε ενότητα 3.2.2) :

$$D_H = \frac{4[(H_{bfs} - H_{wt})D_{bfs}]}{2[(H_{bfs} - H_{wt}) + D_{bfs}]} = 127.9mm$$

Η ταχύτητα της ροής μετρήθηκε περίπου $\bar{u} \approx 4m/s$, ενώ μια τυπική τιμή της κινηματικής συνεκτικότητας του αέρα είναι $\nu = 15.6 \cdot 10^{-6} m^2/s$. Συνεπώς, έχουμε:

$$Re_{D_H} = \frac{\bar{u}D_H}{\nu} \approx 33000$$

Η ροή μέσα σε σωλήνα μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια τυρβώδης εάν ο αριθμός Re ξεπερνά το 10000 [54]. Επομένως αφού $Re_{D_H} \gg 10000$ έχουμε τυρβώδη ροή.

Όσον αφορά το ύψος του σκαλοπατιού, ο αριθμός Re υπολογίζεται ($h = 41mm$) :

$$Re_h = \frac{\bar{u}h}{\nu} \approx 10500$$

Ο αριθμός Mach (Ma) της ροής ορίζεται ως:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (3.4.3)$$

όπου V είναι η σχετική ταχύτητα της ροής και c η ταχύτητα του ήχου. Για $V = 4m/s$ και τυπική ταχύτητα του ήχου $340^\circ C$ έχουμε:

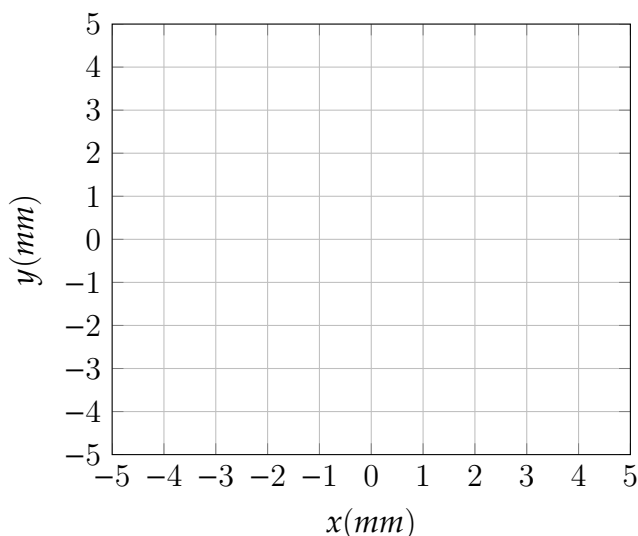
$$Ma \approx 0.012$$

Η ροή θεωρείται ασυμπίεστη για $Ma < 0.3$ [54], κάτι που προφανώς ισχύει στην περίπτωσή μας.

3.4.3 Εισαγωγή Raw Data - Διόρθωση σφαλμάτων

Το λογισμικό Insight 3G μετά το τέλος των πειραμάτων δημιουργεί ένα πλήθος αρχείων με κατάληξη *.v3d, ένα για κάθε snapshot. Αυτά περιέχουν την πληροφορία του διανυσματικού πεδίου της ταχύτητας (u, v, w) , καθώς και του πλέγματος που είναι ορισμένο (x, y) . Το πλέγμα ήταν τετράγωνο με χωρική διακριτοποίηση $\approx 1mm$, ενώ εκτεινόταν περίπου $\pm 35mm$ από το κέντρο του step κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (x άξονας) και $+20 - 31mm$ από την ακμή του step κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση (y άξονας), σχήμα 3.16. Το πλέγμα που κατασκευάστηκε ήταν 71×53 κόμβων.

Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στη Matlab® για περαιτέρω επεξεργασία μετατοπίστηκε η αρχή των αξόνων 9 mm κατακόρυφα, για να συμπίπτει με την ακμή του step, ενώ οι τιμές v και w της ταχύτητας (κατακόρυφη και διαμήκης) εισήχθησαν αντίθετες από τις τιμές του Insight 3G®, για να είναι σύμφωνες με το σύστημα συντεταγμένων που ορίσαμε.



Σχήμα 3.16: Ενδεικτικό τμήμα πλέγματος από Stereo PIV

Στη συνέχεια έγινε αναγνώριση και διόρθωση τυχόν σφαλμάτων και διόρθωση αυτών. Τα σφάλματα ήταν δύο ειδών:

- Σφάλματα που αναγνώρισε το λογισμικό Insight 3G®, οπότε τα διανύσματα των ταχυτήτων είχαν αντικατασταθεί από το λογισμικό με την τιμή 0.

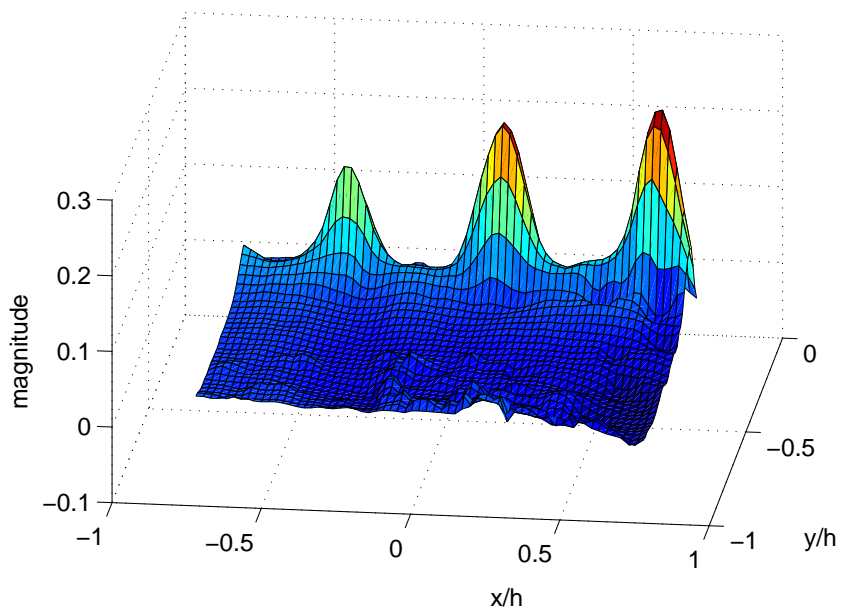
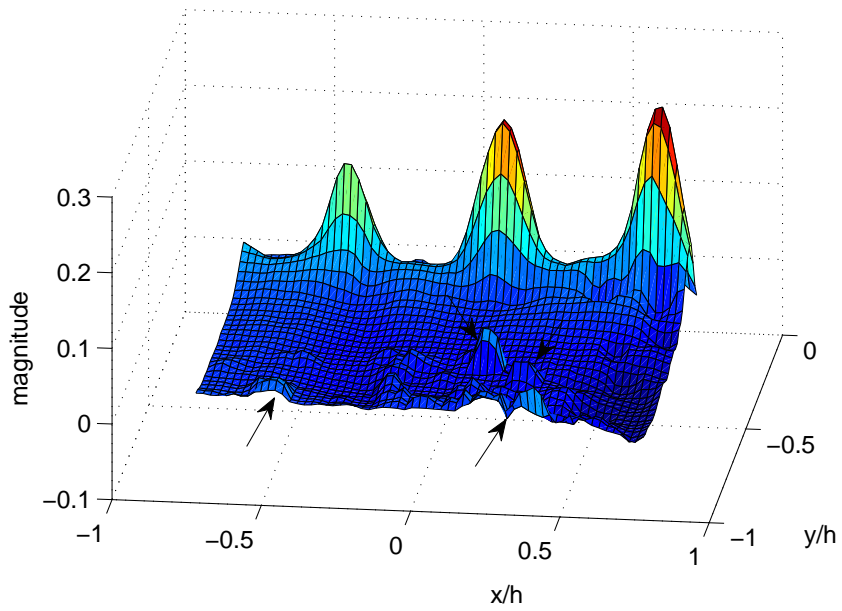
- Σφάλματα που αναγνωρίστηκαν "με το μάτι" εφόσον παρατηρείτω μια παράλογη τιμή (spike) που επαναλαμβανόταν στα περισσότερα snapshots.

Το πρώτο είδος σφαλμάτων ήταν πιο εύκολο να εντοπιστεί, καθώς εντοπιζόταν κυρίως στα άκρα του πλέγματος και εμφανιζόταν στα αρχικά δεδομένα (raw data) ως περιοχές με μηδενικά, ενώ το δεύτερο είδος ήθελε προσεχτική παρατήρηση.

Η αντικατάσταση των προβληματικών τιμών έγινε με τον εξής τρόπο: Εντοπίστηκαν τα όρια της περιοχής αντικατάστασης N, S, W, E (North, South, West, East) και αντικαταστάθηκαν οι τιμές $u(j,i)$ με γραμμική παρεμβολή:

$$u_n(j, i) = \frac{u_n(N, i) + u_n(S, i) + u_n(j, W) + u_n(j, E)}{4}$$

όπου $n = 1, 2, 3$ οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας. Στο σχήμα 3.17 φαίνεται παράδειγμα μιας τέτοιας διόρθωσης.



Σχήμα 3.17: Παράδειγμα διόρθωσης σφαλμάτων για την αξονική ταχύτητα (w). Πάνω το αρχικό πεδίο, κάτω το διορθωμένο. Με τα βέλη κάποιες διορθώσεις.

3.4.4 Ανάλυση POD

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3, η μέθοδος POD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς φιλτραρίσματος, ώστε να απομακρυνθούν οι μεγάλες συχνότητες της τύρβης. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να κάνουμε πιο εύκολη επεξεργασία και ανάλυση στα "καθαρισμένα" snapshots. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, το snapshot POD εφαρμόστηκε για την αναδόμηση (reconstruction) των διαταραχών της ταχύτητας, δηλαδή των στιγμιαίων ταχυτήτων αφού αφαιρεθεί από αυτές η μέση χρονικά τιμή (εξίσωση 3.4.4).

$$u'_i = u_i - \bar{u}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.4.4)$$

Μετά από την εφαρμογή του POD, οι διαταραχές της ταχύτητας υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} u'(x, y, t) &= \sum_i^M a(i, t) \phi_u^i(x, y) \\ v'(x, y, t) &= \sum_i^M a(i, t) \phi_v^i(x, y) \\ w'(x, y, t) &= \sum_i^M a(i, t) \phi_w^i(x, y) \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

όπου M είναι ο αριθμός των PIV snapshots, $\phi^i(x, y)$ είναι το POD mode, διανυσματικό πεδίο με τρεις συνιστώσες ($\phi_u^i(x, y)$, $\phi_v^i(x, y)$, $\phi_w^i(x, y)$) και i είναι ο αύξων αριθμός του mode. Εφόσον η ανάλυση έγινε σε 300 snapshots, ο συνολικός αριθμός των modes για κάθε περίπτωση ήταν 300.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.3 στη μέθοδο snapshot POD δεν είναι αναγκαίος ο άμεσος υπολογισμός του πίνακα ετεροσυσχέτισης (εξίσωση 2.3.1) και επίλυση $N \times N$ προβλήματος ιδιοτιμών, όπου N είναι ο αριθμός των κόμβων του προβλήματος. Αντίθετα, το πρόβλημα μπορεί να εκφυλιστεί στην επίλυση ενός $M \times M$ ιδιοπροβλήματος εξίσωση (2.3.7).

Ο πίνακας αυτός (autocovariance matrix) στην περίπτωσή μας κατασκευάζεται ως εξής: Αρχικά, κατασκευάζουμε τον πίνακα U (εξίσωση 3.4.6), που πρόκειται για πίνακα $3N \times M$, αφού έχουμε N κόμβους, M snapshots και 3 συνιστώσες ταχύτητας.

$$U = \begin{bmatrix} u_1^1 & \cdots & u_1^M \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_N^1 & \cdots & u_N^M \\ v_1^1 & \cdots & v_1^M \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_N^1 & \cdots & v_N^M \\ w_1^1 & \cdots & w_1^M \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_N^1 & \cdots & w_N^M \end{bmatrix} \quad (3.4.6)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον πίνακα R , $M \times M$

$$R = U^T U \quad (3.4.7)$$

και υπολογίζουμε τις ιδιοτιμές του λ_i και τα ιδιοδιανύσματά του, Φ_i . Τα modes φ_i που μας ενδιαφέρουν, καθώς και οι συντελεστές τους $a(i, t)$ μπορούν να υπολογισθούν βάσει των σχέσεων:

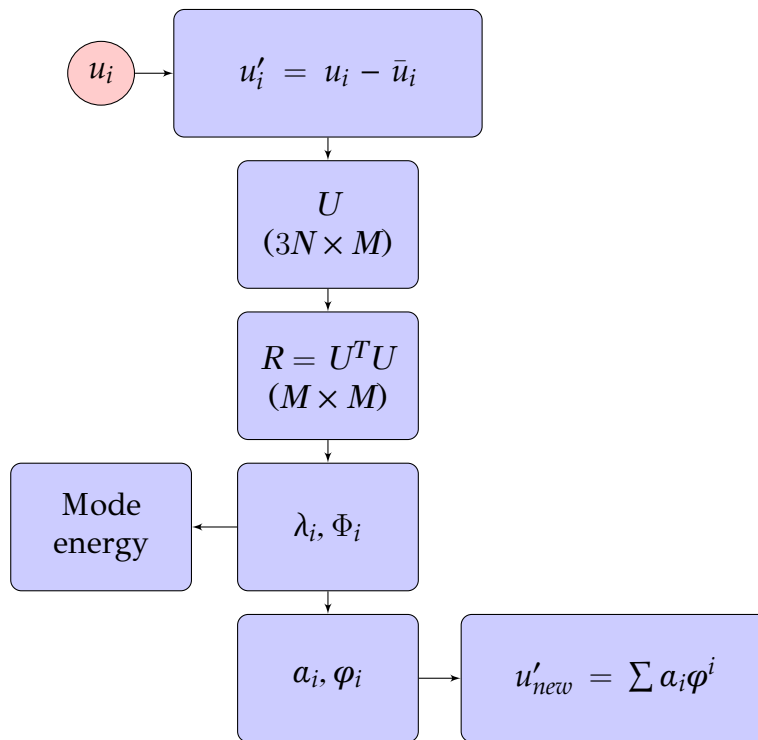
$$\varphi_i = U \Phi_i \quad (3.4.8)$$

$$a(i, t) = \varphi_i^T U \quad (3.4.9)$$

Όπου τα διανύσματα φ_i (modes) διαιρούνται συνήθως με το μέτρο τους ώστε να γίνουν μοναδιαία. Τα modes εξάγονται με βάση το πόσο "ενεργητικά" ή πόσο αντιπροσωπευτικά του αρχικού πεδίου είναι. Μέτρο για αυτό είναι οι ιδιοτιμές λ_i που δείχνουν το ποσοστό της ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε mode. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που σχετίζεται με κάθε mode μπορεί να υπολογισθεί ως εξής [16]:

$$E_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^M \lambda_i} \quad (3.4.10)$$

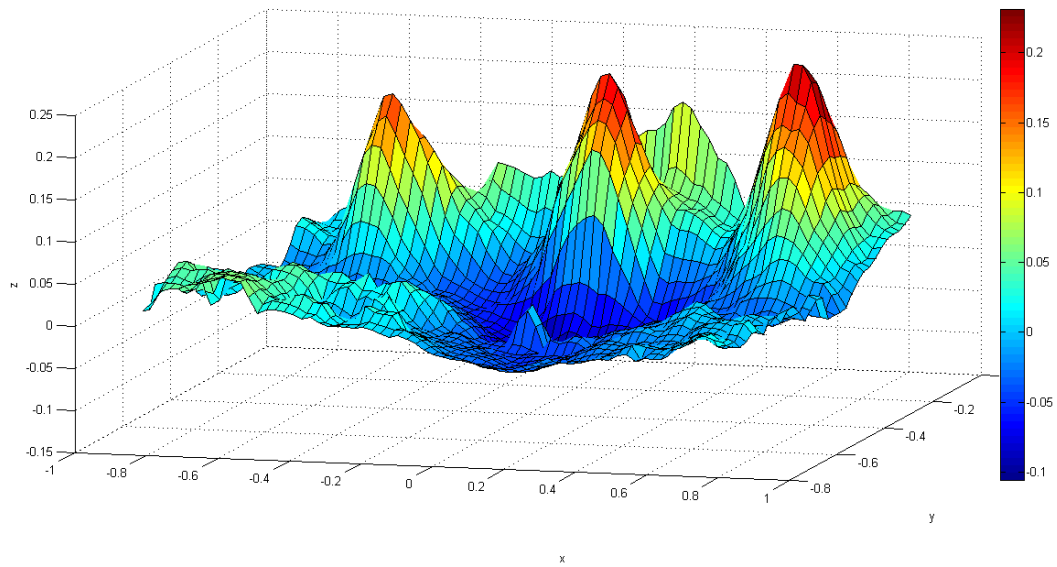
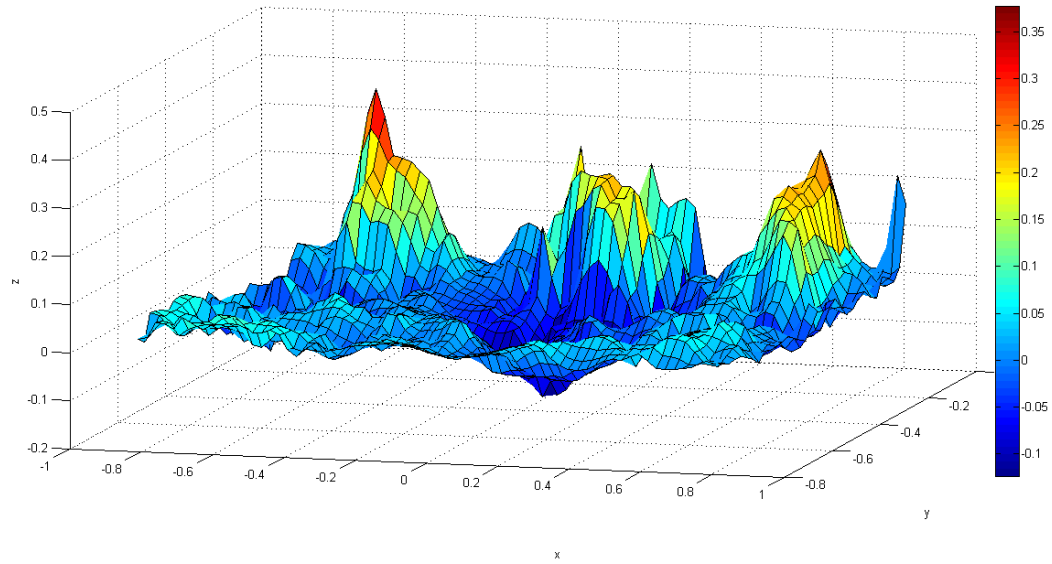
Τέλος, αφού αναδομήσουμε τις διακυμάνσεις της ταχύτητας (σχέση 3.4.5) από όσα modes θεωρούμε επαρκή, προσθέτουμε τη μέση ταχύτητα για να πάρουμε τελικά τα φιλτραρισμένα πεδία ταχυτήτων. Διάγραμμα ροής της παραπάνω μεθόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



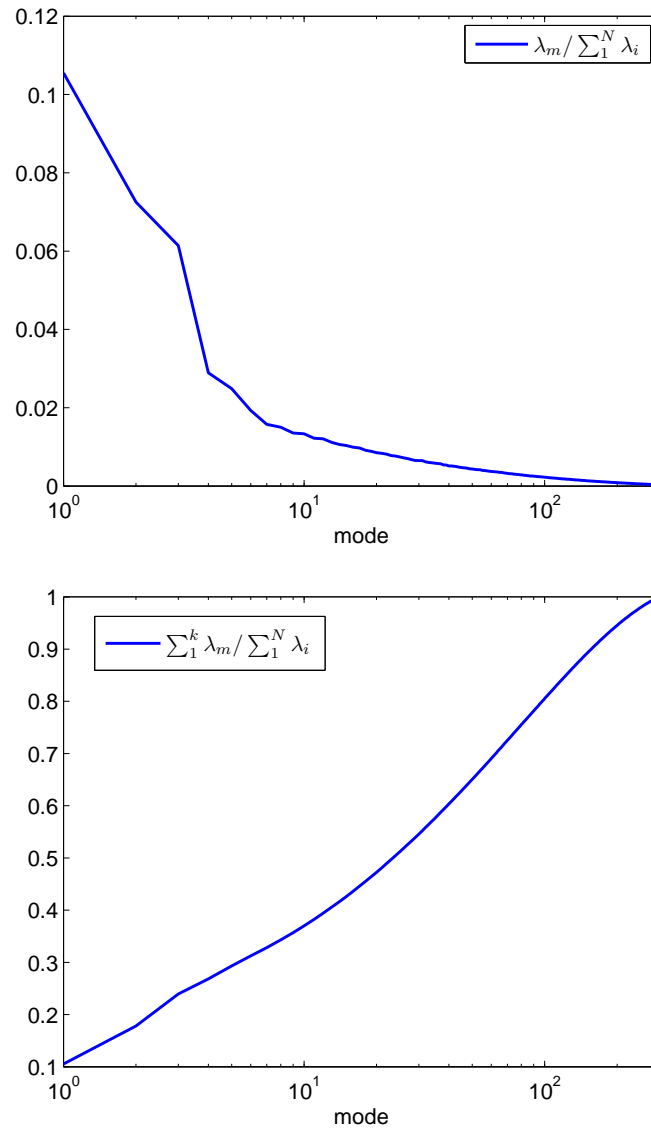
Σχήμα 3.18: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου snapshot POD για τις διακυμάνσεις της ταχύτητας

Στο σχήμα 3.19 φαίνεται παράδειγμα φιλτραρίσματος ενός snapshot για την περίπτωση της διέγερσης με παλλόμενες δέσμες με συχνότητα 10Hz, 10mm κατάντη του step. Η αναδόμηση του snapshot έγινε με τη χρήση των 10 πρώτων modes (που περιέχουν τη μεγαλύτερη ενέργεια). Στο σχήμα 3.20 φαίνεται το ποσοστό της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που αντιπροσωπεύει κάθε mode, όπως ορίζεται από την εξίσωση 3.4.10. Τα 10 πρώτα modes περιέχουν το $\approx 40\%$ της τυρβώδους κινητικής ενέργειας των snapshots.

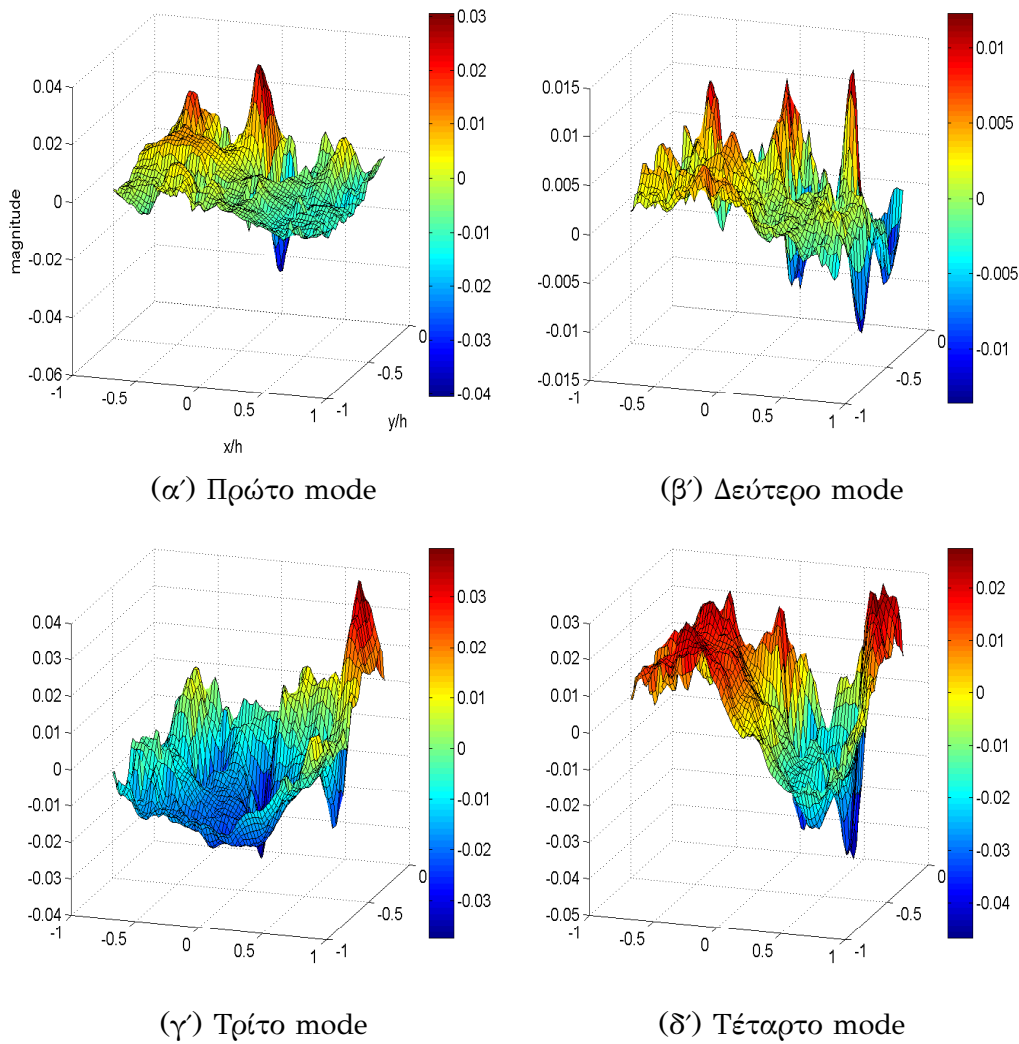
Στο σχήμα 3.21 φαίνονται τα τέσσερα πρώτα modes της αξονικής ταχύτητας για την περίπτωση που εξετάζουμε. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει ο αύξων αριθμός των modes, απεικονίζουν όλο και πιο αυθαίρετες, μη - ρελιστικές μορφές. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με την πτώση της ενέργειας των modes, για μεγαλύτερο αύξοντα αριθμό.



Σχήμα 3.19: Παράδειγμα φιλτραρίσματος της αξονικής ταχύτητας w , με χρήση POD. Πάνω, το πραγματικό snapshot. Κάτω, το snapshot με χρήση των 10 πρώτων modes.



Σχήμα 3.20: Ιδιοτιμές που αντιστοιχούν σε POD modes. Πάνω, έναντι mode. Κάτω, αθροιστικό διάγραμμα.



Σχήμα 3.21: POD modes για την αξονική ταχύτητα

3.4.5 Χαρακτηριστικά των δεσμών

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η ροή κατόντη του ανάποδου σκαλοπατιού διεγείρεται από δέσμες αέρα, οι οποίες είναι είτε παλλόμενες, με συχνότητες 10 και 2 Hz, είτε σταθερές. Με τη χρήση του Stereo PIV καταγράφηκαν τα χαρακτηριστικά από τρεις δέσμες, όπου φαίνονται καθαρά στην απόσταση 10mm (5 διαμέτρων οπής δέσμης) κατόντη του σκαλοπατιού. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις λόγω της διάχυσης οι δέσμες δεν εμφανίζονταν καθαρά.

Μέσα πεδία αξονικής ταχύτητας δεσμών

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιάσουμε τα μέσα πεδία των αξονικών ταχυτήτων, για απόσταση 10 mm κατάντη του σκαλοπατιού, με τη μορφή ισοϋψών.

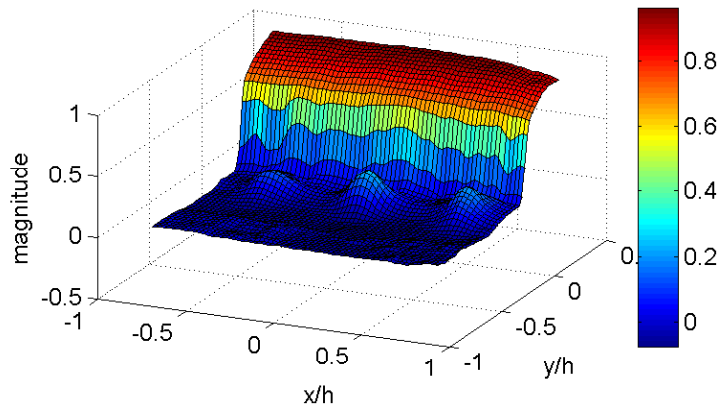
Ο υπολογισμός των μέσων πεδίων έγινε με το μέσο όρο των ταχυτήτων από τα 300 διαφορετικά snapshots που αποτυπώθηκαν. Δηλαδή για κάθε συνιστώσα της ταχύτητας έχουμε:

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \frac{1}{300} \sum_{n=1}^{300} u^n \\ \bar{v} &= \frac{1}{300} \sum_{n=1}^{300} v^n \\ \bar{w} &= \frac{1}{300} \sum_{n=1}^{300} w^n\end{aligned}\tag{3.4.11}$$

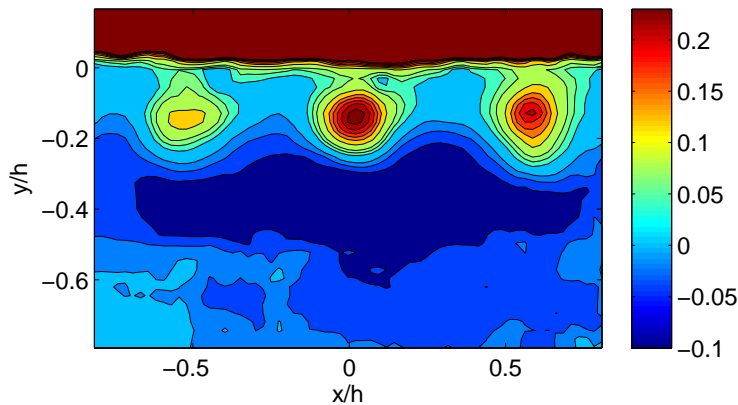
Όπου \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} είναι τα μέσα διανυσματικά πεδία ταχυτήτων που προκύπτουν και u^n , v^n , w^n τα διανυσματικά πεδία κάθε snapshot. Ουσιαστικά ο μέσος όρος δρα σαν χαμηλοπερατό φίλτρο που "κόβει" τις ψηλές συχνότητες τις τύρβης και μας επιτρέπει μια καλύτερη κατανόηση του φαινομένου.

Για λόγους κατανόησης της γεωμετρίας των επιπέδων λήψης, στα σχήματα 3.22, 3.23, φαίνεται η σύγκριση δύο απεικονίσεων της μέσης αξονικής ταχύτητας, για την περίπτωση παλλόμενων δεσμών 10Hz, 35 ms μετά το άνοιγμα της βαλβίδας των δεσμών και για απόσταση 10mm από το step. Το πάνω σχήμα είναι με μορφή επιφάνειας, όπου x είναι η εγκάρσια απόσταση, y η κάθετη και z είναι το μέτρο της αξονικής ταχύτητας. Η ακμή του step βρίσκεται στην ευθεία $y/h = 0$, ενώ το "πάτωμα" της αεροσήραγγας στην ευθεία $y/h = -1$, καθώς τα μήκη έχουν αδιαστατοποιηθεί με το ύψος του step. Είναι ορατά τρία βουναλάκια που είναι τα ίχνη των τριών δεσμών στην αξονική ταχύτητα, ενώ φαίνονται και τα όρια του free stream πάνω από το step. Όμοια, στο διάγραμμα ισοϋψών παρατηρούμε τις μεγάλες ταχύτητες του free stream πάνω από το step και τα "βουναλάκια" των τριών δεσμών. Η ροή έρχεται προς τα θετικά του άξονα w, άρα στην περίπτωση των ισοϋψών, κατά πάνω μας.

Στη συνέχεια τα μεγέθη θα απεικονιστούν με μορφή ισοϋψών, καθώς μας δείχνουν περισσότερη "ποσοτική" πληροφορία.



Σχήμα 3.22: Διάγραμμα επιφάνειας της μέσης αξονικής ταχύτητας για κατανόηση της γεωμετρίας που εξετάζεται. Φαίνεται το free stream πάνω από την ακμή του step ($y/h=0$), το ίχνος των δεσμών (βουναλάκια) και το πάτωμα της αεροσήραγγας ($y/h=-1$).



Σχήμα 3.23: Ισοϋψείς μέσων αξονικών ταχυτήτων, αντίστοιχες του σχήματος 3.22. Το ρευστό εξέρχεται από το επίπεδο παρατήρησης.

Στα σχήματα 3.24 και 3.25 φαίνονται οι ισοϋψείς των μέσων αξονικών ταχυτήτων, σε διάφορες περιπτώσεις που διακρίνονται εμφανώς ίχνη από δέσμες (σταθερές και παλλόμενες), δηλαδή στο επίπεδο μέτρησης των 10mm κατάντη από το σκαλοπάτι. Ειδικά για την παλλόμενη περίπτωση οι δέσμες είναι εμφανείς για χρονικές στιγμές 20, 35 και 45ms μετά την εντολή για άνοιγμα της ηλεκτροβάνας. Επίσης, οι δέσμες έχουν αποτυπωθεί και στο επίπεδο των 20mm κατάντη του σκαλοπατιού μόνο για την συχνότητα των 2 Hz και τις χρονικές στιγμές 35 και 45 ms μετά την εντολή για άνοιγμα της ηλεκτροβάνας.

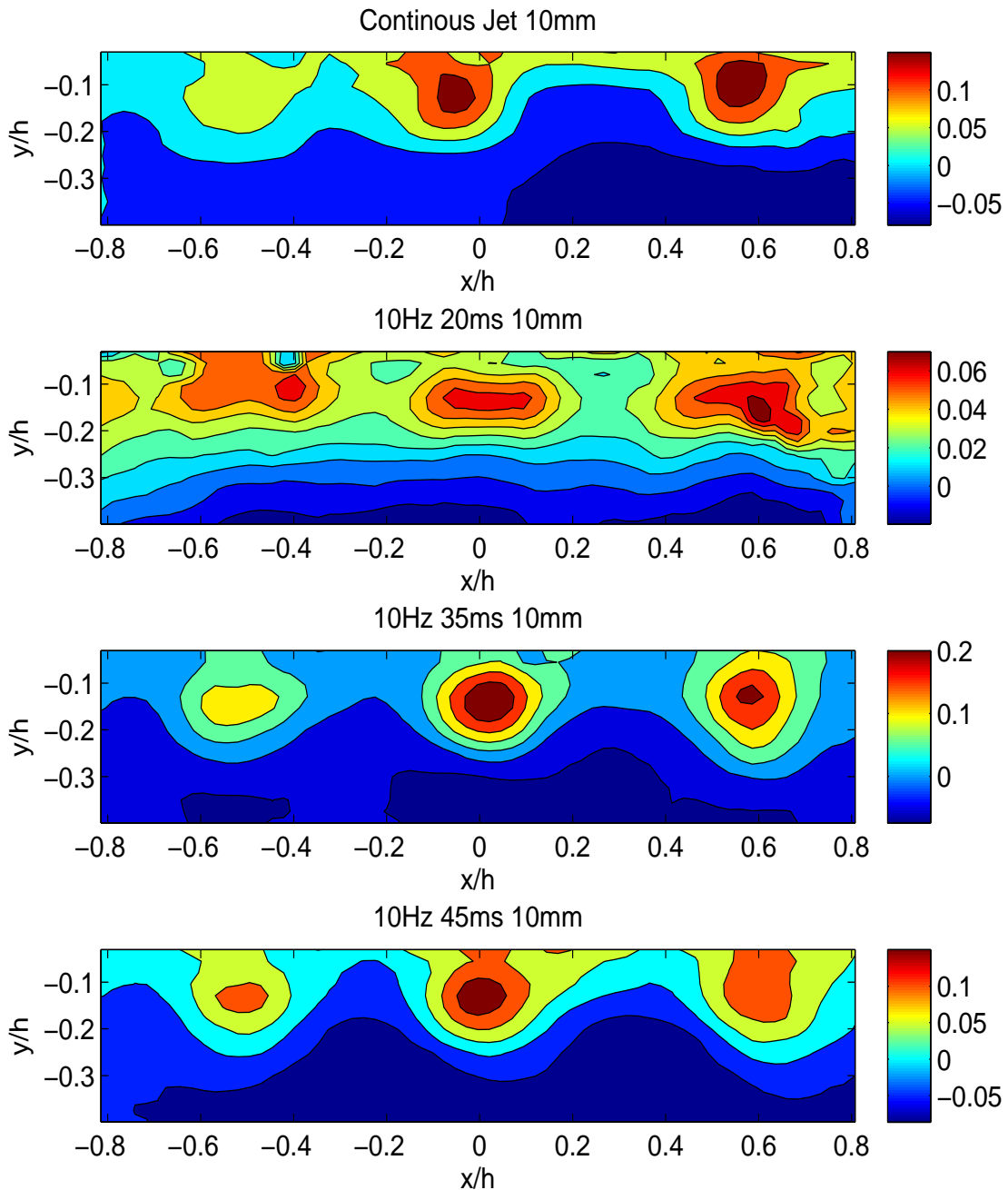
Βάσει αυτών των σχημάτων μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις. Αρχικά μπορούμε να επισημάνουμε ότι ποιοτικά οι τρεις δέσμες διαφέρουν ως προς την έντασή τους. Πιο συγκεκριμένα, η δέσμη που εμφανίζεται αριστερά στα σχήματα παρουσιάζει μικρότερες αξονικές ταχύτητες, σε όλες τις περιπτώσεις. Η μεσαία δέσμη και η δεξιά παρουσιάζουν παρόμοιες ταχύτητες (η μεσαία φαίνεται να υπερέχει λίγο). Αυτή η διαφορά στις ταχύτητες των δεσμών προκαλεί όπως θα δούμε στη συνέχεια μη αξονοσυμμετρική ροή σε πολλές περιπτώσεις, ενώ μπορεί πιθανόν να εξηγηθεί στο "βούλωμα" κάποιων οπών του σκαλοπατιού από ακαθαρσίες (σχήμα 3.4).

Η χρονική εξέλιξη των παλλόμενων δεσμών είναι αναμενόμενη. Αρχικά, σε χρονική στιγμή 20ms μετά την εντολή για άνοιγμα της ηλεκτροβάνας, οι δέσμες είναι πολύ αδύναμες στο επίπεδο των 10mm. Στη συνέχεια, για χρονική στιγμή 35ms παρατηρείται η μέγιστη ταχύτητα των δεσμών, ενώ για 45ms έχουμε πάλι εξασθένηση. Για 65ms και 85ms οι δέσμες είναι σχεδόν μη ανιχνεύσιμες και για αυτό δεν παρουσιάζονται σε σχήμα. Το παραπάνω φαινόμενο έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με την συμπεριφορά των δεσμών όπως αυτή περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.3.3: Καθώς ανοίγει η βάνα, οι δέσμες παρουσιάζουν μικρές ταχύτητες που στην συνέχεια φτάνουν σε ένα μέγιστο και φθίνουν πάλι. Αντίστοιχα και στο επίπεδο μέτρησης, παρουσιάζεται η ίδια συμπεριφορά με μία διαφορά φάσης που οφείλεται στην απόσταση που πρέπει να διανύσει το ρευστό. Στο επίπεδο 20mm κατάντη του σκαλοπατιού είναι εμφανείς μόνο οι δέσμες που διεγείρονται με συχνότητα 2Hz και μόνο για χρονικές στιγμές 35 και 45ms, αφού ο αέρας από τις δέσμες δεν έχει φτάσει ακόμα τη χρονική στιγμή 20ms.

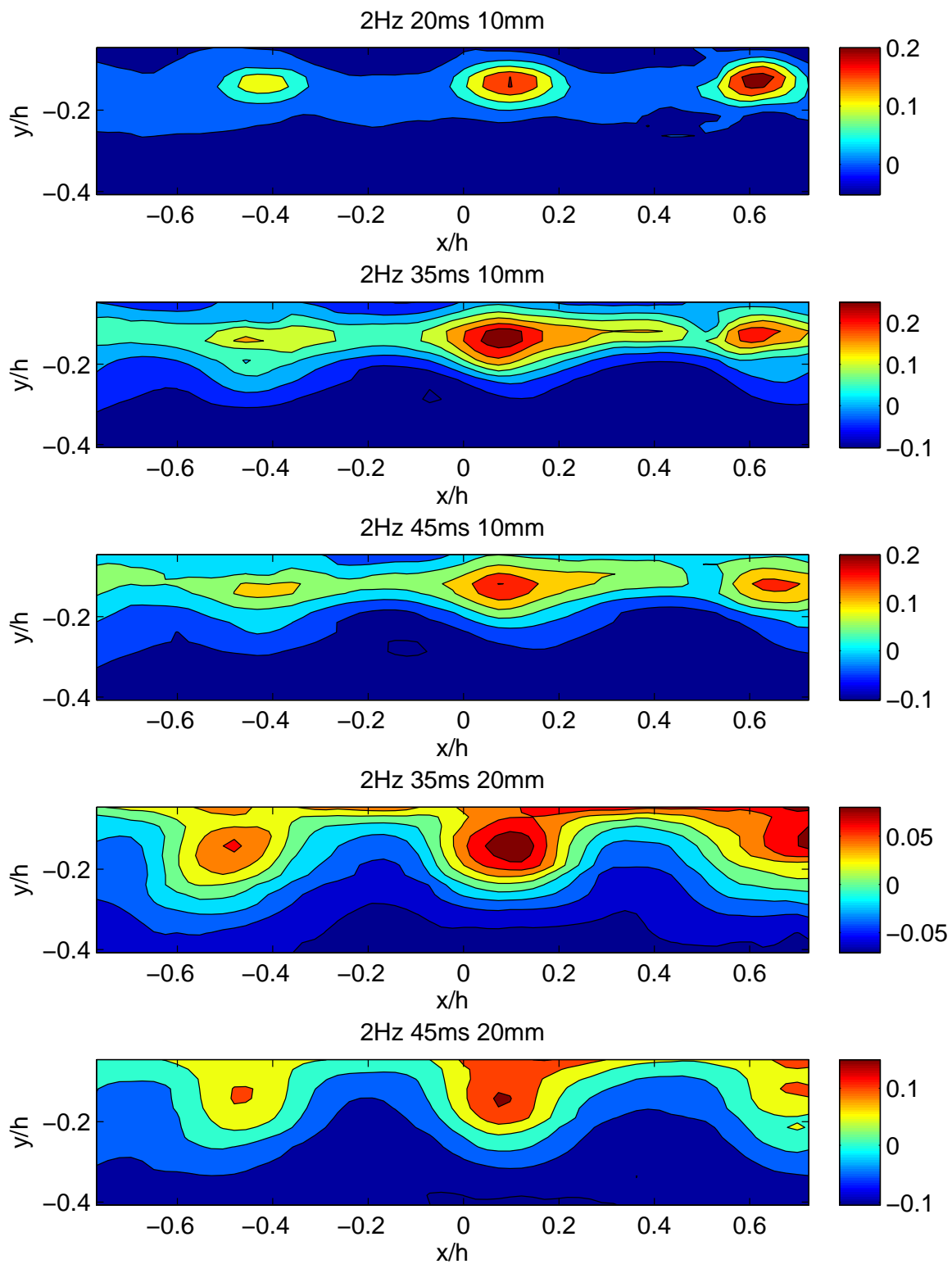
Η μορφή των δεσμών σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι αξονοσυμμετρική και παρουσιάζει ελλειπτική μορφή. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αέρας δεν εξέρχεται από οπές στο περιβάλλον ρευστό, όπως επισημάνθηκε στο κεφάλαιο 3.2.2, αλλά μετά τις οπές ο αέρας συγκρούεται σε τοίχωμα και τελικά εξέρχεται από λεπτή σχισμή (slot). Συνεπώς ο αέρας αναδύεται και εξέρχεται από όλο το μήκος της σχισμής (φυσικά είναι ισχυρότερος στα σημεία που αντιστοιχούν οι οπές). Αυτό το φαινόμενο προκαλεί "επιμύκηση" στα πλάγια των δεσμών.

Αυτή η "ιδιομορφία" των δεσμών στο πείραμα πιθανόν να είναι η αιτία που οι δέσμες εμφανίζουν πιο μεγάλη διάχυση σε σχέση με τις τιμές που δίνονται από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, για το επίπεδο των 10mm ή 5 διαμέτρων ακροφυσίου των δεσμών (εφόσον οι δέσμες εξέρχονται από οπές των 2mm όπως επισημάνθηκε στο κεφάλαιο 3.2.2), η βιβλιογραφία δίνει τιμές για το "μισό πλάτος δέσμης" ($r_{1/2}$), όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 2.1, μεταξύ 0.6 και 0.8 διαμέτρους ακροφυσίου για

σταθερές και παλλόμενες δέσμες αντίστοιχα [1], [4]. Στην περίπτωση μας, το μέγεθος $r_{1/2}$ παρουσίαζε τιμές από 1-3 διαμέτρους ακροφυσίου, ανάλογα με την περίπτωση και σε ποιο άξονα της έλλειψης της δέσμης γίνονταν οι υπολογισμοί.



Σχήμα 3.24: Ισοϋφείς μέσω αξονικών ταχυτήτων w/U_∞ στην γειτονιά των δεσμών, για σταθερές δέσμες και παλλόμενες με συχνότητα 10Hz.



Σχήμα 3.25: Ισοϋφείς μέσωσν αξονικών ταχυτήτων w/U_∞ στην γειτονιά των δεσμών, για παλλόμενες δέσμες με συχνότητα 10Hz.

Τυρβώδης κινητική ενέργεια δεσμών

Ένα άλλο στοιχείο που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η μελέτη του επιπέδου τύρβης και των τάσεων Reynolds των δεσμών. Οι τάσεις Reynolds ορίζονται για ασυμπέστο ρευστό (αμελώντας την πυκνότητα):

$$R_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} \quad (3.4.12)$$

όπου $i, j = 1, 2, 3$ είναι δείκτες για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και ο τόνος αντιπροσωπεύει τις διακυμάνσεις της. Παρατηρούμε ότι ο R_{ij} είναι ένας συμμετρικός τανυστής 3×3 .

Αριθμητικά οι τάσεις Reynolds υπολογίστηκαν ως εξής, για κάθε περίπτωση που απαρτίζεται από 300 snapshots:

$$R_{ij} = -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{300} u_i^n u_j^n$$

όπου οι διακυμάνσεις της ταχύτητας υπολογίστηκαν ως η διαφορά των στιγμιαίων ταχυτήτων (snapshots) από το μέσο όρο:

$$u'_i = u_i - \bar{u}_i$$

Σε πολλές περιπτώσεις δεν παρουσιάζονται οι τάσεις Reynolds, αλλά οι RMS τιμές των διακυμάνσεων. Δηλαδή:

$$u_{rms} = \sqrt{\overline{u'^2}} \quad (3.4.13)$$

Στο σχήμα 3.26 φαίνεται η διακύμανση (RMS) της αξονικής ταχύτητας για την περίπτωση όπου δρουν συνεχείς δέσμες, καθώς και για παλλόμενες με συχνότητα 10Hz, 20 ms μετά την εντολή για άνοιγμα της ηλεκτροβάνας, στο επίπεδο των 10mm. Οι τιμές τους (κοντά στο 0.1 αδιάστατη τιμή) συμφωνούν με τη βιβλιογραφία [2], [5] (σχήματα 2.4, 2.16).

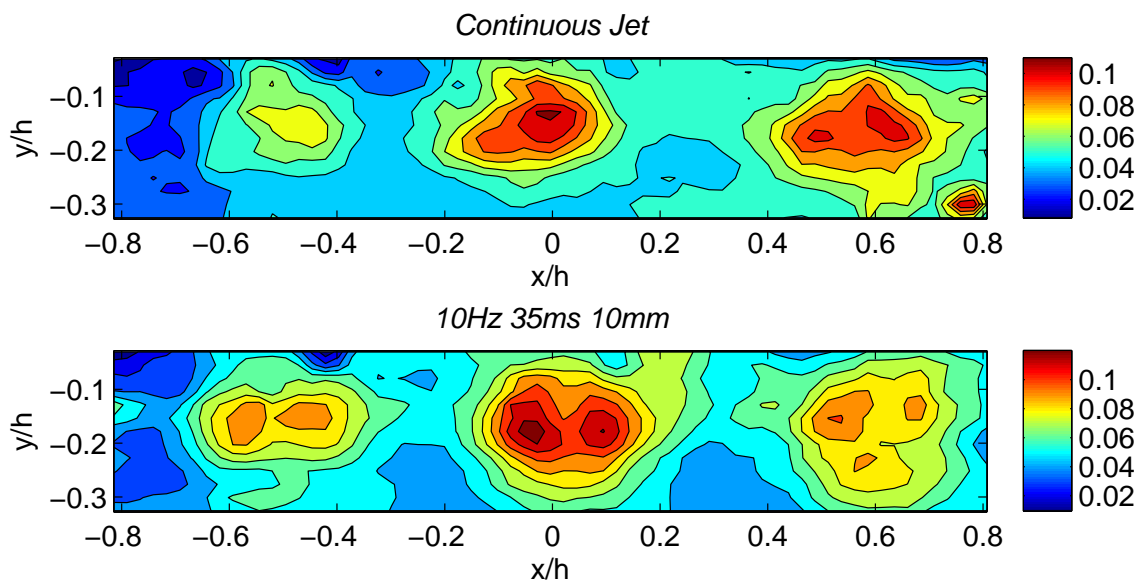
Στο σχήμα 3.27 φαίνεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια (αδιαστατοποιημένη με το τετράγωνο της επ' απείρου ταχύτητας) για ορισμένες περιπτώσεις που είναι εμφανής η επίδραση των δεσμών. Ως τυρβώδη κινητική ενέργεια k , ορίζουμε το μέγεθος [54]:

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.4.14)$$

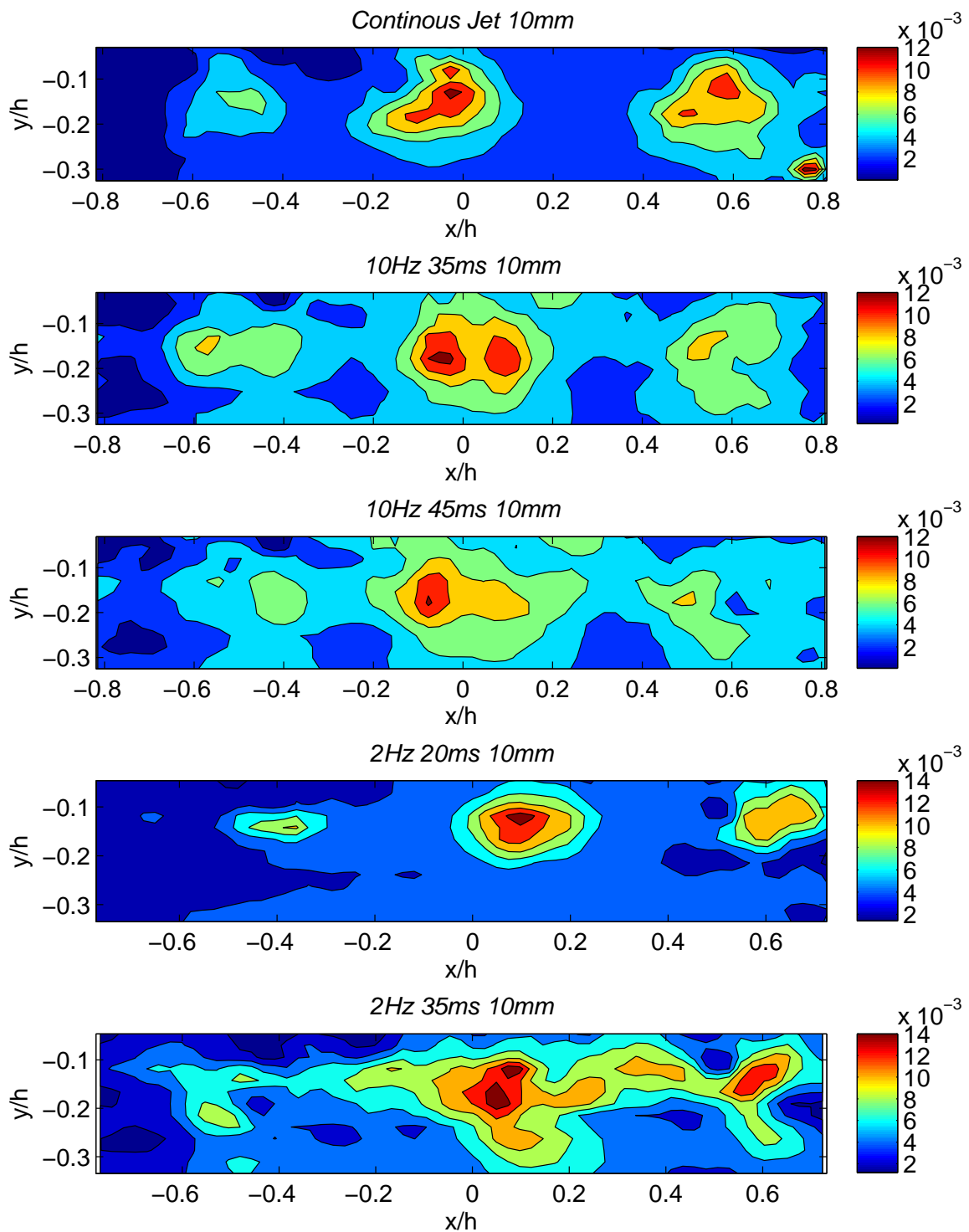
Παρατηρούμε ότι όπως στις ισοϋψείς των μέσων αξονικών ταχυτήτων, έτσι και εδώ οι δέσμες δεν είναι ομοιόμορφες: Μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζει η μεσαία δέσμη ενώ ακολουθεί η δεξιά και τέλος η αριστερή, σε συμφωνία με τις προηγούμενες παρατηρήσεις. Οι μέγιστες

τιμές που παρουσιάζονται είναι περίπου 12×10^{-3} (αδιάστατο μέγεθος) ενώ στην περίπτωση των 2Hz παρατηρούμε λίγο πιο μεγάλες τιμές (κοντά στο 14×10^{-3}).

Να σημειώσουμε ότι μια μικρή μετακίνηση που φαίνεται στα κέντρα των δεσμών μεταξύ των περιπτώσεων 2 και 10 Hz, οφείλεται στο ότι τα πειράματα έγιναν σε διαφορετικές μέρες και τα επίπεδα μέτρησης δεν ήταν ταυτόσημα για τις δύο περιπτώσεις λόγω σφάλματος. Έτσι, βλέπουμε μια πλασματική μετακίνηση των δεσμών προς τα δεξιά.



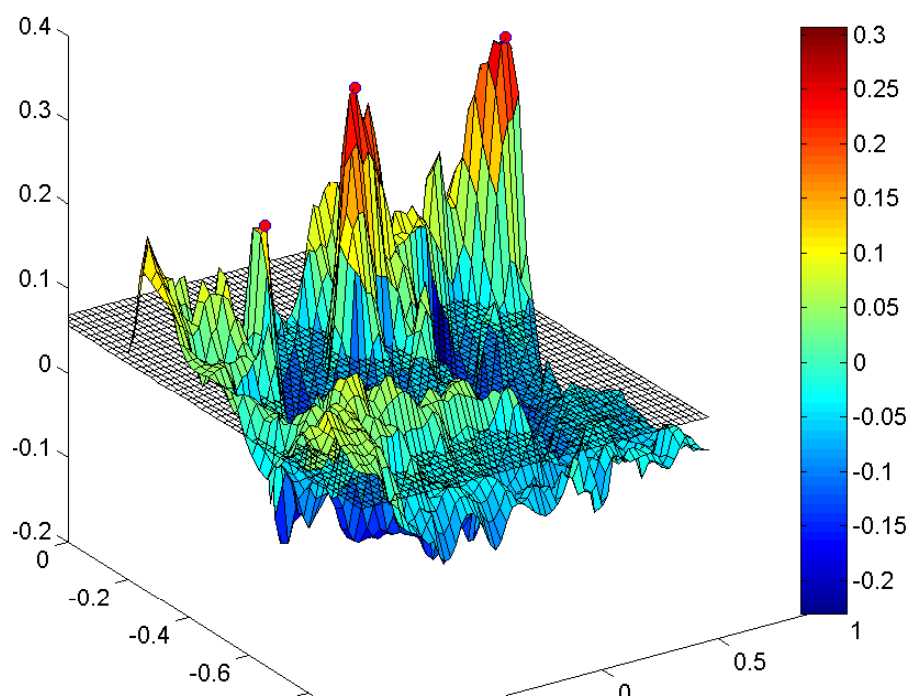
Σχήμα 3.26: Διακύμανση της αξονικής ταχύτητας $\sqrt{w'^2}/U_\infty$ για επιλεγμένες περιπτώσεις.



Σχήμα 3.27: Τυρβώδης κινητική ενέργεια k/U_∞^2 δεσμών για διαφορετικές περιπτώσεις.

Μέγιστη ταχύτητα δεσμών και θέσεις εμφάνισης

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των μέγιστων ταχυτήτων των δεσμών, καθώς και τρισδιάστατα ραβδογράμματα που απεικονίζουν τις θέσεις που εμφανίζονται αυτά τα μέγιστα. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε αλγόριθμος που να ανιχνεύει τα παραπάνω στοιχεία σε κάθε snapshot. Εξαιτίας της τύρβης, έπρεπε να ορισθούν με προσοχή τα όρια της γειτονιάς των τριών δεσμών ώστε να μην υπάρχει σφάλμα κατά τον εντοπισμό του μεγίστου (σχήμα 3.28). Αυτός ο εντοπισμός έγινε στα 300 snapshot για κάθε περίπτωση.

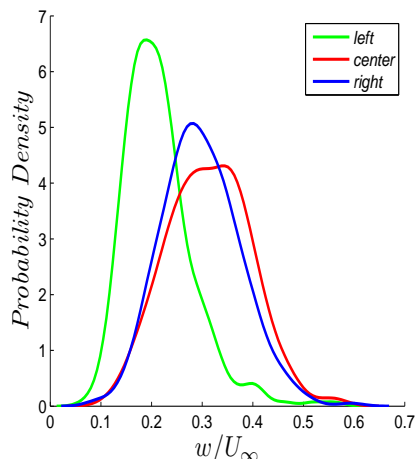


Σχήμα 3.28: Παράδειγμα εντοπισμού των μέγιστων αξονικών ταχυτήτων των δεσμών (κόκκινοι κύκλοι) σε ένα snapshot.

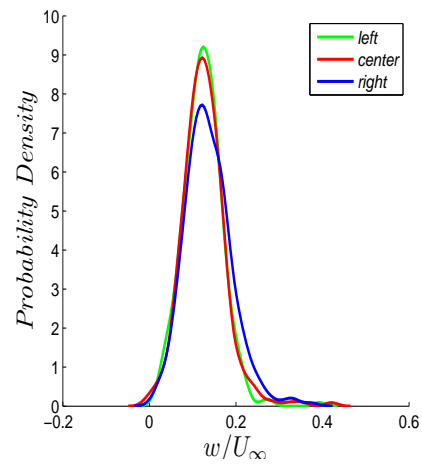
Στα σχήματα 3.29, 3.31 φαίνονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των μεγίστων ταχυτήτων των τριών δεσμών για διαφορετικές περιπτώσεις μέτρησης. Παρατηρούμε ότι η μεσαία (center) δέσμη παρουσιάζει συστηματικά τις μεγαλύτερες ταχύτητες, ενώ η αριστερή (left) τις μικρότερες, κάτι που είχαμε διαπιστώσει ποιοτικά και από τη μελέτη των μέσων πεδίων αξονικών ταχυτήτων. Οι κατανομές των ταχυτήτων μοιάζουν στις περισσότερες περιπτώσεις με κανονικές.

Ένα σημείο που πρέπει να σταθούμε είναι ότι οι μέσες τιμές των μέγιστων ταχυτήτων υπερέχουν σημαντικά από τις μέγιστες ταχύτητες των μέσων πεδίων ταχυτήτων, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.4.5. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κατανομές έχουν προκύψει από τις μέγιστες ταχύτητες σε κάθε σημείο στην γειτονιά των δεσμών, ενώ στα μέσα πεδία εξετάζουμε τις ταχύτητες σε κάθε σημείο ξεχωριστά. Να σημειωθεί ότι κατασκευάζοντας τις κατανομές με τη χρήση snapshots αναδομημένα από POD (δεν παρουσιάζονται), οι μέσες τιμές των κατανομών έτειναν να συμπέσουν με αυτές από τα μέσα πεδία, καθώς φιλτράροντας την τύρβη τα snapshots τείνουν να μοιάσουν στο μέσο πεδίο.

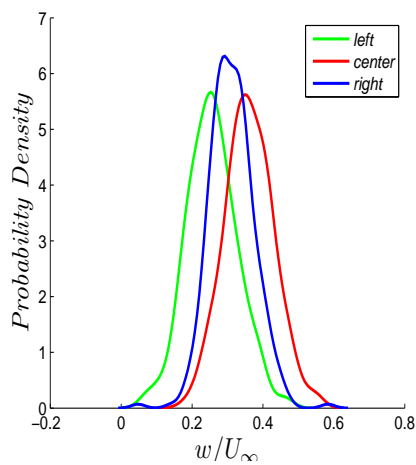
Στα σχήματα 3.30, 3.32 φαίνεται η κατανομή των θέσεων (x,y) που παρουσιάστηκε η μέγιστη αξονική ταχύτητα σε κάθε περίπτωση (κέντρο του jet). Σε κάθε σχήμα απεικονίζονται οι διακυμάνσεις των κέντρων και των τριών δεσμών. Με τη χρήση του POD η διακύμανση αυτών των θέσεων μειωνόταν σημαντικά.



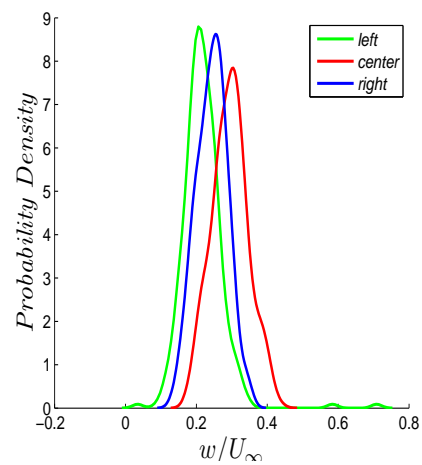
(α) Continuous Jet 10mm



(β) 10Hz 20ms 10mm

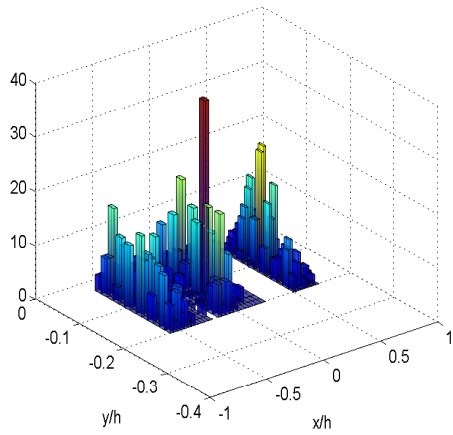


(γ) 10Hz 35ms 10mm

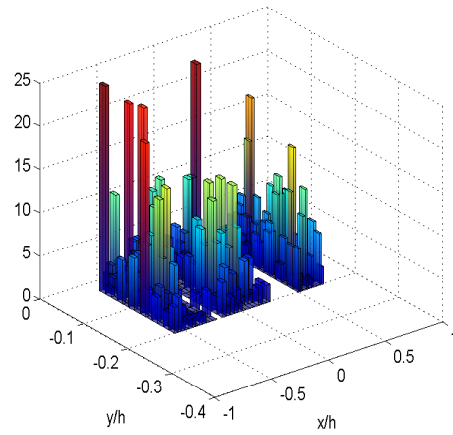


(δ) 10Hz 45ms 10mm

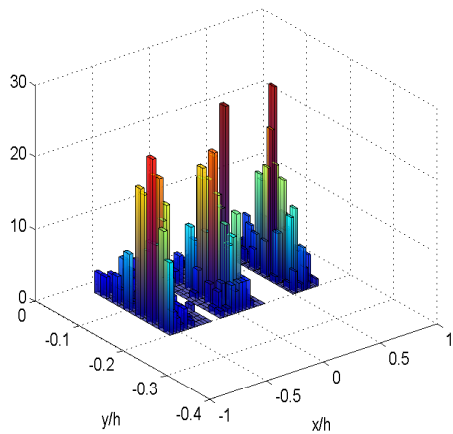
Σχήμα 3.29: Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τη μέγιστη αξονική ταχύτητα των jets, σε διαφορετικές περιπτώσεις.



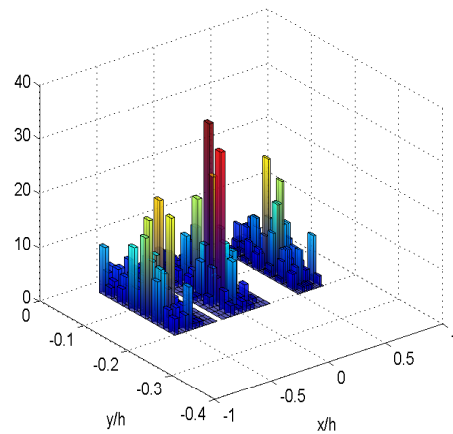
(α) Continuous Jet 10mm



(β) 10Hz 20ms 10mm

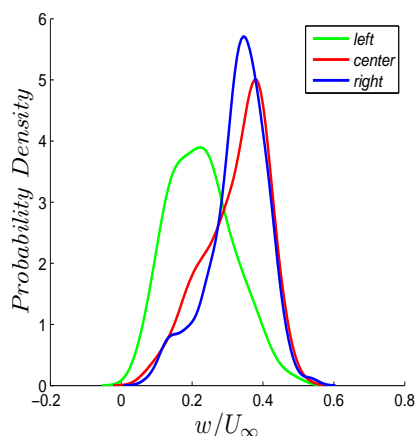


(γ) 10Hz 35ms 10mm

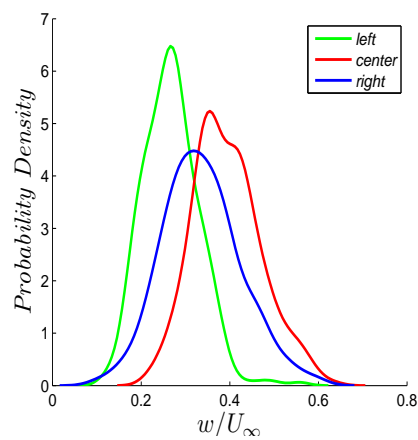


(δ) 10Hz 45ms 10mm

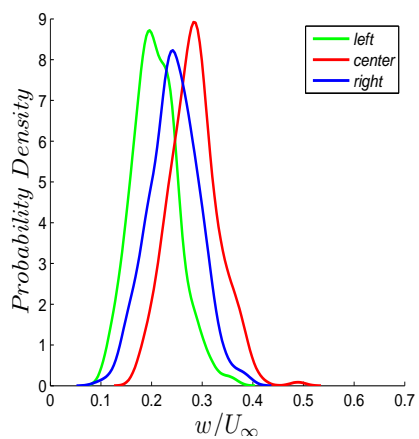
Σχήμα 3.30: Τρισδιάστατα ιστογράμματα της θέσης (x, y) που εμφανίζονται τα μέγιστα των jets, για διαφορετικές περιπτώσεις.



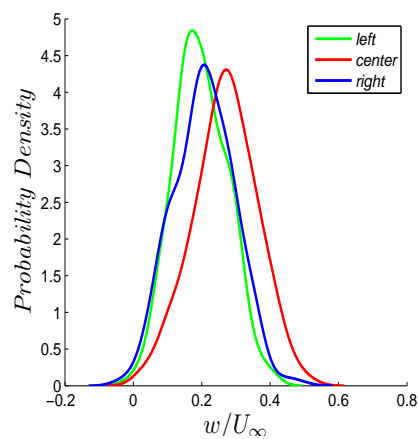
(α) 2Hz 20ms 10mm



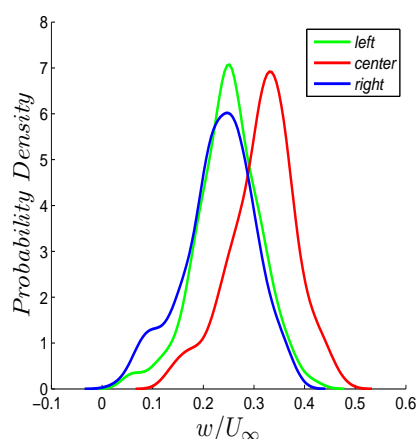
(β) 2Hz 35ms 10mm



(γ) 2Hz 45ms 10mm

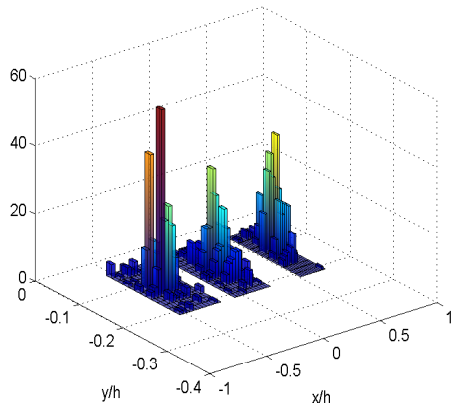


(δ) 2Hz 35ms 20mm

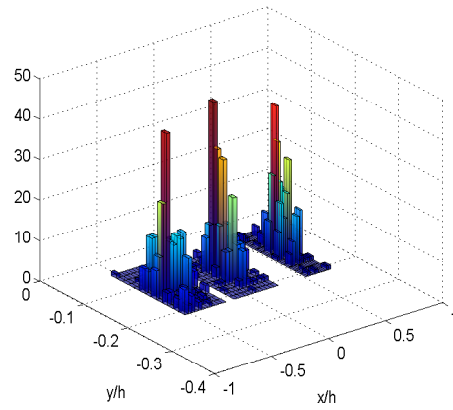


(ε) 2Hz 45ms 20mm

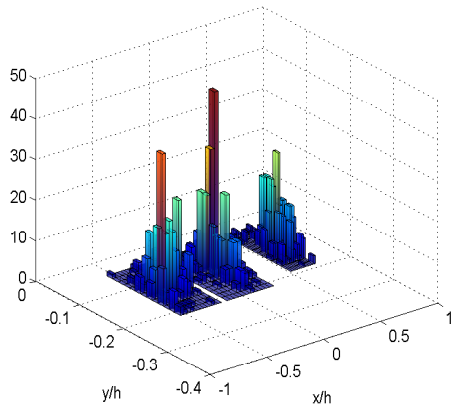
Σχήμα 3.31: Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τη μέγιστη αξονική ταχύτητα των jets, σε διαφορετικές περιπτώσεις.



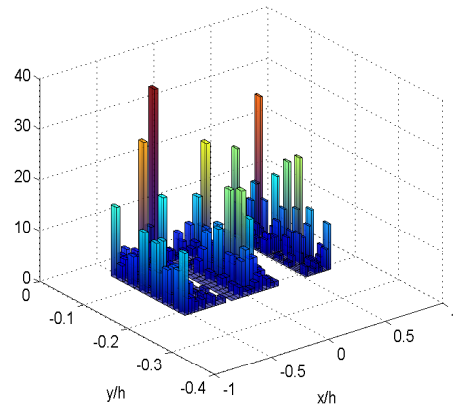
(α') 2Hz 20ms 10mm



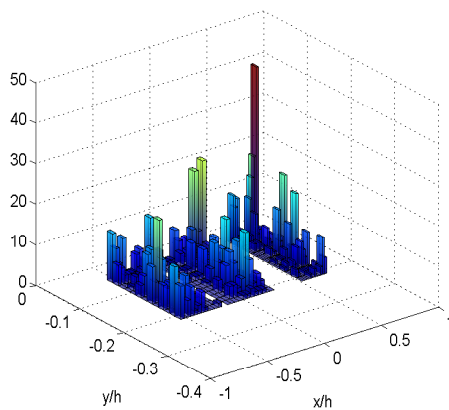
(β') 2Hz 35ms 10mm



(γ') 2Hz 45ms 10mm



(δ') 2Hz 35ms 20mm



(ϵ') 2Hz 45ms 20mm

Σχήμα 3.32: Τρισδιάστατα ιστογράμματα της θέσης (x, y) που εμφανίζονται τα μέγιστα των jets, για διαφορετικές περιπτώσεις.

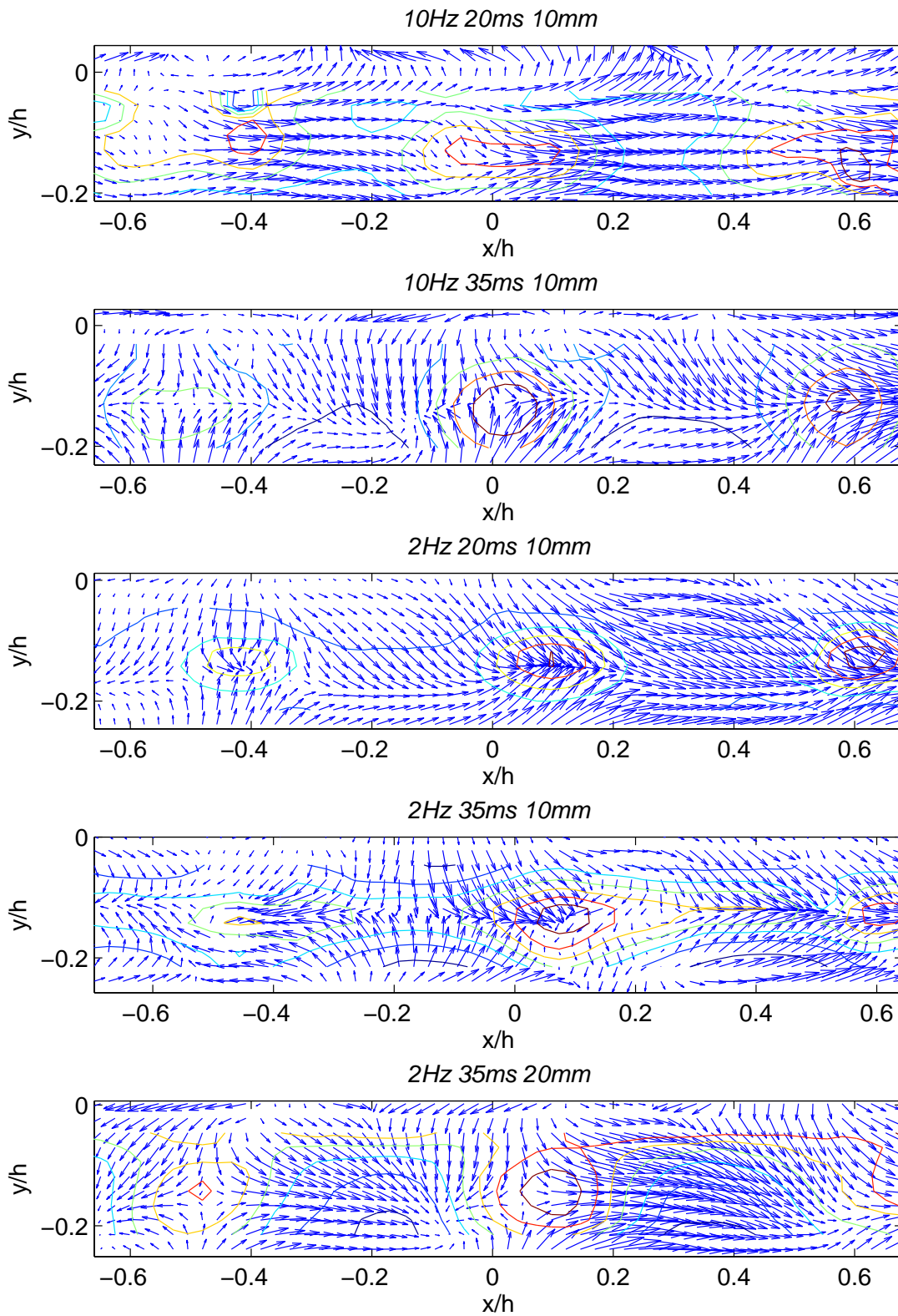
Entrainment δεσμών

Την έννοια του entrainment την ορίσαμε στο κεφάλαιο 2.1, ως την αύξηση της παροχής μάζας που παρατηρείται σε ορισμένες ροές λόγω διάτμησης. Όπως έχουμε αναφέρει στην ίδια ενότητα, το entrainment στις δέσμες έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές [1], [2],[3],[5], [7], ενώ με τη μέθοδο PIV έχει επιτευχθεί η καταγραφή της κίνησης του ρευστού από τον περιβάλλοντα χώρο προς τον άξονα της δέσμης (σχήμα 2.7 [2]), λόγω ακριβώς της επίδρασης του entrainment.

Στο σχήμα 3.33 φαίνεται η κίνηση του ρευστού ($x-y$ επίπεδο) όπως καταγράφηκε στην παρούσα εργασία, σε χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Ταυτόχρονα απεικονίζονται και ισοϋψείς αξονικών ταχυτήτων για να προσδιορίζονται τα κέντρα των δεσμών. Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της σχετικά μεγάλης κατάντη απόστασης από το ακροφύσιο των δεσμών (5 διάμετροι ακροφυσίου έναντι 1.5 διάμετροι στους [2]), τα αποτελέσματα δεν ήταν τόσο καθαρά σε ορισμένες περιπτώσεις όπως στις σταθερές δέσμες και για αυτό δεν παρουσιάζονται.

Παρατηρούμε ότι κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση (y άξονας), το ρευστό κατευθύνεται σε όλες τις περιπτώσεις προς το κέντρο των δεσμών, ένδειξη ότι όχι μόνο οι δέσμες "τραβάνε" ρευστό από την περιοχή κάτω από την ακμή του σκαλοπατιού, αλλά και από την περιοχή του "ελεύθερου ρεύματος" (free stream). Αυτή η τάση του ρευστού είναι ιδιαίτερα ισχυρή στις περιπτώσεις των παλλόμενων δεσμών σε επίπεδο 10mm κατάντη του σκαλοπατιού και 35 ms μετά την εντολή για άνοιγμα της ηλεκτροβάνας, που όπως έχουμε δει οι δέσμες είναι ιδιαίτερα ισχυρές. Περιέργως, η τάση αυτή της ροής φαίνεται αρκετά καθαρά στις περιπτώσεις των 20ms ενώ δεν παρουσιάζεται για 45ms που οι δέσμες είναι πιο ισχυρές συγκριτικά (πάντα για παλλόμενες δέσμες και 10mm κατάντη του σκαλοπατιού). Αυτό πιθανόν να εξηγείται στο ότι στα 45ms το jet είναι σε φάση εξασθένησης, ενώ στα 20ms σε φάση ισχυροποίησης.

Κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (x άξονας), δεν μπορούμε να βγάλουμε ξεκάθαρα συμπεράσματα, καθώς ενώ το ρευστό δείχνει να δέχεται κάποια επίδραση από τις δέσμες, αυτή δεν μπορεί να καθοριστεί με σαφήνεια. Σε κάποιες περιπτώσεις φαίνεται να "έλκεται" από τον πυρήνα των δεσμών (2Hz 20ms 10mm αριστερή δέσμη), ενώ σε κάποιες άλλες να αποκλίνει από τους πυρήνες (10Hz 35ms 10mm αριστερή δέσμη). Αυτή η συμπεριφορά συμφωνεί με την μη-ύπαρξη αξονοσυμμετρίας που παρατηρήθηκε πιο πριν στα κεφάλαια 3.4.5, 3.4.5 και πιθανότατα οφείλεται στην εξαγωγή αέρα όχι μόνο από τα σημεία που βρίσκονται οι οπές των δεσμών αλλά από όλη τη σχισμή (slot) του σκαλοπατιού, όπως αυτή περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.2.2.



Σχήμα 3.33: Κίνηση ρευστού από τον περιβάλλοντα χώρο προς τον άξονα της δεσμών λόγω entrainment. Απεικονίζονται ισοϋψείς αξονικής ταχύτητας, ώστε να φαίνονται τα κέντρα των δεσμών.

3.4.6 Περιοχή ανακυκλοφορίας

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε ορισμένα χαρακτηριστικά της περιοχής ανακυκλοφορίας, όπως τις ταχύτητες που αναπτύσσονται σε αυτή και τα όριά της. Ως περιοχή ανακυκλοφορίας ορίζουμε το κομμάτι εκείνο του πεδίου ταχυτήτων που επικρατούν αρνητικές αξονικές ταχύτητες (backflow).

Όρια περιοχών ανακυκλοφορίας

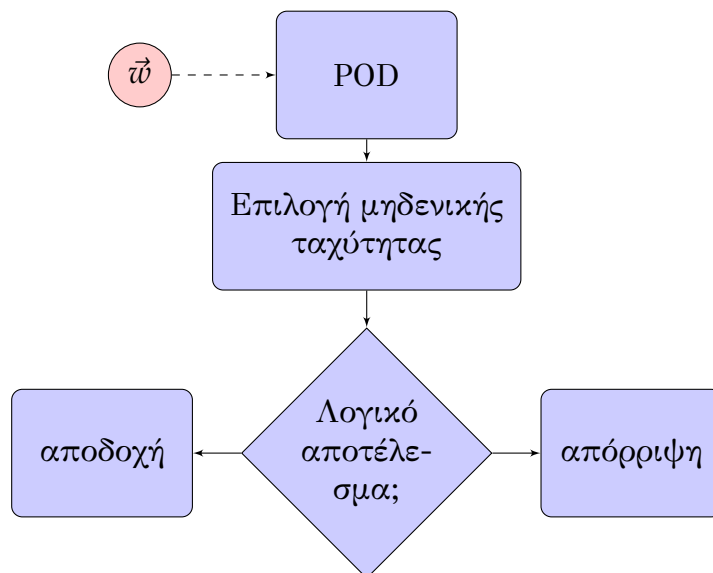
Τα όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας είναι τα σημεία εκείνα στο πεδίο ταχυτήτων, που η αξονική ταχύτητα μηδενίζεται. Ουσιαστικά πρόκειται για μια γραμμή μηδενικής αξονικής ταχύτητας. Για την ανίχνευσή της, υπολογίστηκαν οι γραμμές μηδενικής ταχύτητας σε κάθε snapshot και μετά υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των γραμμών και οι τυπικές τους αποκλίσεις (σχήματα 3.35 έως 3.44).

Ο αλγόριθμος υπολογισμού χρησιμοποιούσε αναδομημένα διανυσματικά πεδία με εφαρμογή της μεθοδολογία POD χρησιμοποιώντας 50 modes, που αντιστοιχούν στη χρήση μόνο του 50% της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Στη συνέχεια, επιλεγόταν η ισοϋψής μηδενικής ταχύτητας που μας ενδιέφερε, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις υπήρχαν πολλές περιοχές που λόγω της τύρβης παρουσίαζαν τοπικά μηδενικές ταχύτητες. Τέλος, αν κάποιο snapshot παρουσίαζε γραμμή μηδενικής ταχύτητας που ήταν μη λογική (για παράδειγμα πολύ χαμηλή σε σχέση με τις άλλες) απορριπτόταν. Τα snapshots που απορρίφθηκαν δεν ξεπερνούσαν το 10-15% των συνολικών. Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου υπολογισμού φαίνεται στο σχήμα 3.34.

Όσον αφορά τις γραμμές μηδενικής ταχύτητας, παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν διαφορετική μορφή ανάλογα με την περίπτωση. Ειδικότερα, στην περίπτωση των παλλόμενων δεσμών με συχνότητα διέγερσης 10Hz και για επίπεδο μέτρησης 10mm, η μέση γραμμή ξεκινά να είναι σχεδόν ευθεία (ως προς τον x άξονα) στα 20ms μετά την εντολή για άνοιγμα της ηλεκτροβάνας, ενώ η τυπική της απόκλιση είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Στη συνέχεια, καθώς ο αέρας των δεσμών φτάνει στο επίπεδο (35 και 45ms), η γραμμή τείνει να πάρει μια ημιτονοειδή μορφή, ενώ η τυπική της απόκλιση μειώνεται (σημάδι οργάνωσης της ροής). Καθώς οι δέσμες σταδιακά εξασθενούν, ο ημιτονοειδής χαρακτήρας τείνει να χαθεί και τελικά η γραμμή επανέρχεται σχεδόν στην αρχική της μορφή (85ms) καθώς ο κύκλος έρχεται στο τέλος του. Είναι εμφανής μια αξονοσυμμετρία και το φαινόμενο μοιάζει διδιάστατο.

Στα άλλα επίπεδα μέτρησης τα ταλαντωτικά χαρακτηριστικά της γραμμής δεν είναι εμφανή, καθώς οι δέσμες έχουν διαχυθεί και δεν

επηρεάζουν αυτές καθ' αυτές το πεδίο ταχυτήτων. Όσο κινούμαστε σε πιο κατάντη επίπεδα, οι γραμμές τείνουν να "χαμηλώσουν", καθώς το φύλλο διάτμησης "χαμηλώνει" και αυτό, όπως έχει παρατηρηθεί, ώστε να επανακολληθεί σε μεγαλύτερες κατάντη αποστάσεις [16], [32]. Περιστασιακά, βλέπουμε ένα ξαφνικό χαμήλωμα της γραμμής για κάποια χρονική στιγμή μέτρησης ενώ μετά επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα, στην ίδια απόσταση μέτρησης (σχήματα 3.38γ', 3.38β', 3.38δ') που μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη δίνης τη χρονική στιγμή που είναι εμφανής το "χαμήλωμα" της γραμμής όπως παρατηρήθηκε και από τους [16]. Και σε αυτά τα επίπεδα είναι εμφανής ο διδιάστατος χαρακτήρας της ροής.



Σχήμα 3.34: Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου υπολογισμού της γραμμής μηδενικής ταχύτητας σε κάθε snapshot.

Οι ίδιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για την περίπτωση των παλλόμενων δεσμών με συχνότητα 2Hz, με τη διαφορά ότι τα ταλαντωτικά φαινόμενα της γραμμής μπορούν να παρατηρηθούν και στο επίπεδο μέτρησης 20mm κατάντη του σκαλοπατιού (σχήματα 3.39γ', 3.39δ'), καθώς όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα τα ίχνη των δεσμών είναι εμφανή και σε αυτό το επίπεδο στην αξονική ταχύτητα. Μπορούμε και πάλι να παρατηρήσουμε διδιάστατο χαρακτήρα της ροής, ειδικά για αποστάσεις από 20mm κατάντη του σκαλοπατιού και μεγαλύτερες.

Στην περίπτωση των συνεχών δεσμών (σχήμα 3.43) μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις είναι εμφανής ένας πολύ

έντονος τριδιάστατος χαρακτήρας της ροής, που ενισχύεται όσο η κατάντη απόσταση από το σκαλοπάτι μεγαλώνει. Αυτό προφανώς σχετίζεται με την διαφορά που έχουν οι δέσμες μεταξύ τους και αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην απόσταση των 10mm φαίνεται ένας κυματισμός της γραμμής, όπως και στις περιπτώσεις των παλλόμενων δεσμών, αλλά σε αντίθεση με αυτές είναι ακανόνιστος.

Στην περίπτωση της ελεύθερης ροής χωρίς διέγερση (σχήμα 3.44) προφανώς δεν είναι ορατός κανένας κυματισμός, εφόσον δεν υπάρχουν δέσμες. Η ροή είναι ουσιαστικά αξονοσυμμετρική για αποστάσεις μεγαλύτερες από 20mm, ενώ η γραμμή μηδενικής ταχύτητας είναι εμφανώς πιο ψηλά σχετικά με τις περιπτώσεις διέγερσης με δέσμες.

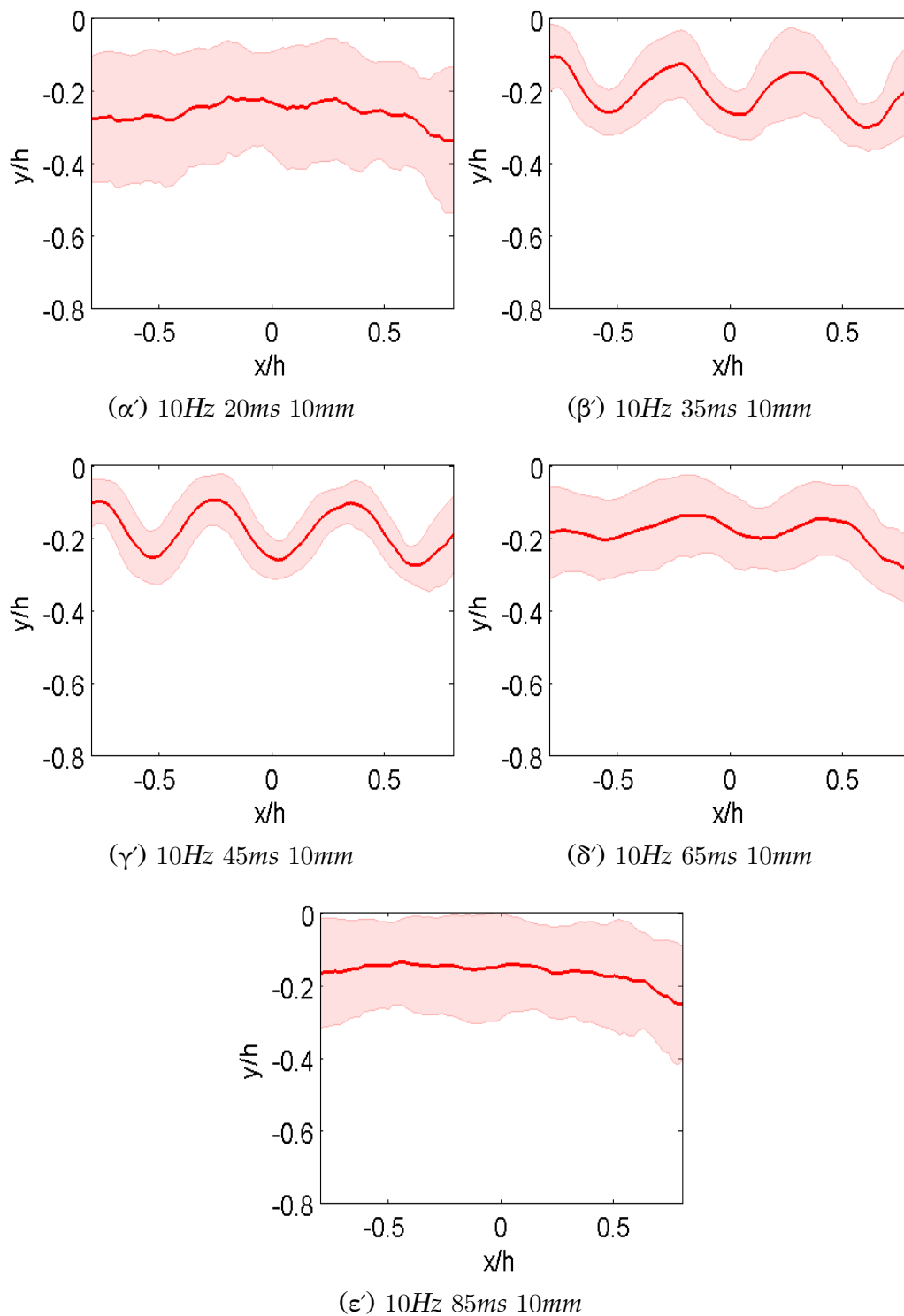
Στα σχήματα 3.45, 3.46 και 3.47 φαίνονται συγκεντρωμένες οι γραμμές μηδενικής ταχύτητας (όριο περιοχής ανακυκλοφορίας), όπου φαίνεται η εξέλιξή τους χωρικά. Τα σημεία των διαγραμμάτων αντιστοιχούν στο μέσο ύψος της γραμμής (χωρικά), ενώ οι μπάρες δείχνουν τα μέγιστα και τα ελάχιστα που μπορεί να πάρει σε κάθε επίπεδο η μέση γραμμή. Οι τυπικές αποκλίσεις που είχαν υπολογισθεί δεν παρουσιάζονται. Να σημειωθεί ότι ο κατακόρυφος άξονας δεν έχει ως αρχή του το ύψος της ακμής του σκαλοπατιού, αλλά τον πυθμένα της αεροσήραγγας. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην κατάντη απόσταση από το σκαλοπάτι, αδιαστατοποιημένη με το ύψος του σκαλοπατιού ($h = 41mm$).

Στα σχήματα 3.45 και 3.46 που αντιστοιχούν στις περιπτώσεις των 10Hz και 2Hz αντίστοιχα μπορούμε σε γενικές γραμμές να κάνουμε τις ίδιες παρατηρήσεις που έγιναν και πιο πάνω: Οι ακραίες τιμές των γραμμών τείνουν να έχουν μικρότερη απόκλιση πηγαίνοντας σε πιο κατάντη αποστάσεις, καθώς δεν υπάρχει η επίδραση των δεσμών που τις καμπυλώνει. Γενικά παρατηρούμε μία τάση η γραμμή να πέφτει σε ύψος, ακολουθώντας την πτώση του φύλλου διάτμησης [16], χωρίς βέβαια αυτό να είναι απόλυτο καθώς πολλές φορές φαίνεται μια τοπική πτώση και στην συνέχεια επαναφορά (σχήματα 3.45β', 3.46α') πιθανότατα σημάδι, όπως είπαμε και προηγουμένως, παρουσίας δίνης που τοπικά περιορίζει την περιοχή ανακυκλοφορίας.

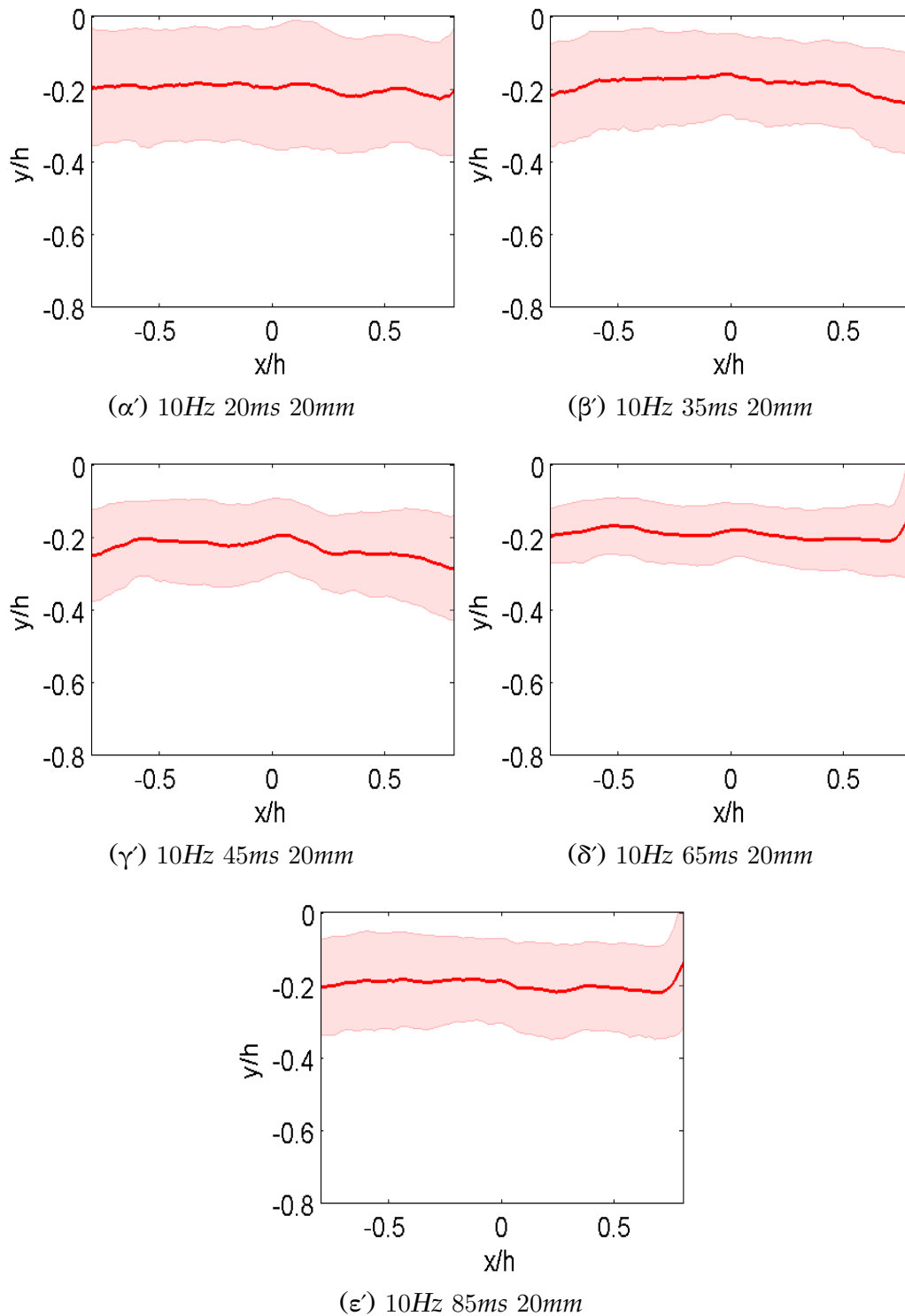
Στο σχήμα 3.47 φαίνονται οι μέσες τιμές (χρονικά) των ορίων της περιοχής ανακυκλοφορίας, όπως υπολογίσθηκαν από τις διάφορες χρονικές στιγμές και οι περιοχές ανακυκλοφορίας για σταθερές δέσμες και χωρίς διέγερση. Κάτω φαίνονται όλες μαζί σε σύγκριση. Παρατηρούμε ότι συγκριτικά, η περιοχή ανακυκλοφορίας είναι πιο μικρή για τις περιπτώσεις με συνεχή διέγερση καθώς και με παλλόμενη, με συχνότητα 10Hz. Συγκεκριμένα παρατηρούμε μια μείωση της τάξης του 15%. Οι δύο αυτές περιπτώσεις παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, με σταθερή μείωση της περιοχής ανακυκλοφορίας. Η περίπτωση χωρίς

διέγερση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη περιοχή ανακυκλοφορίας για όλες τις αποστάσεις, ενώ η τελευταία δείχνει να μειώνεται ελαφρά με την αύξηση της απόστασης όπως είναι αναμενόμενο. Όσον αφορά την περίπτωση διέγερσης με 2Hz, παρατηρούμε ότι ενώ για μικρές αποστάσεις παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με αυτή των 10Hz, για αποστάσεις από 0.75 ύψη σκαλοπατιού και πάνω παρουσιάζει ανοδική τάση και τείνει να ταυτιστεί με την περίπτωση χωρίς διέγερση.

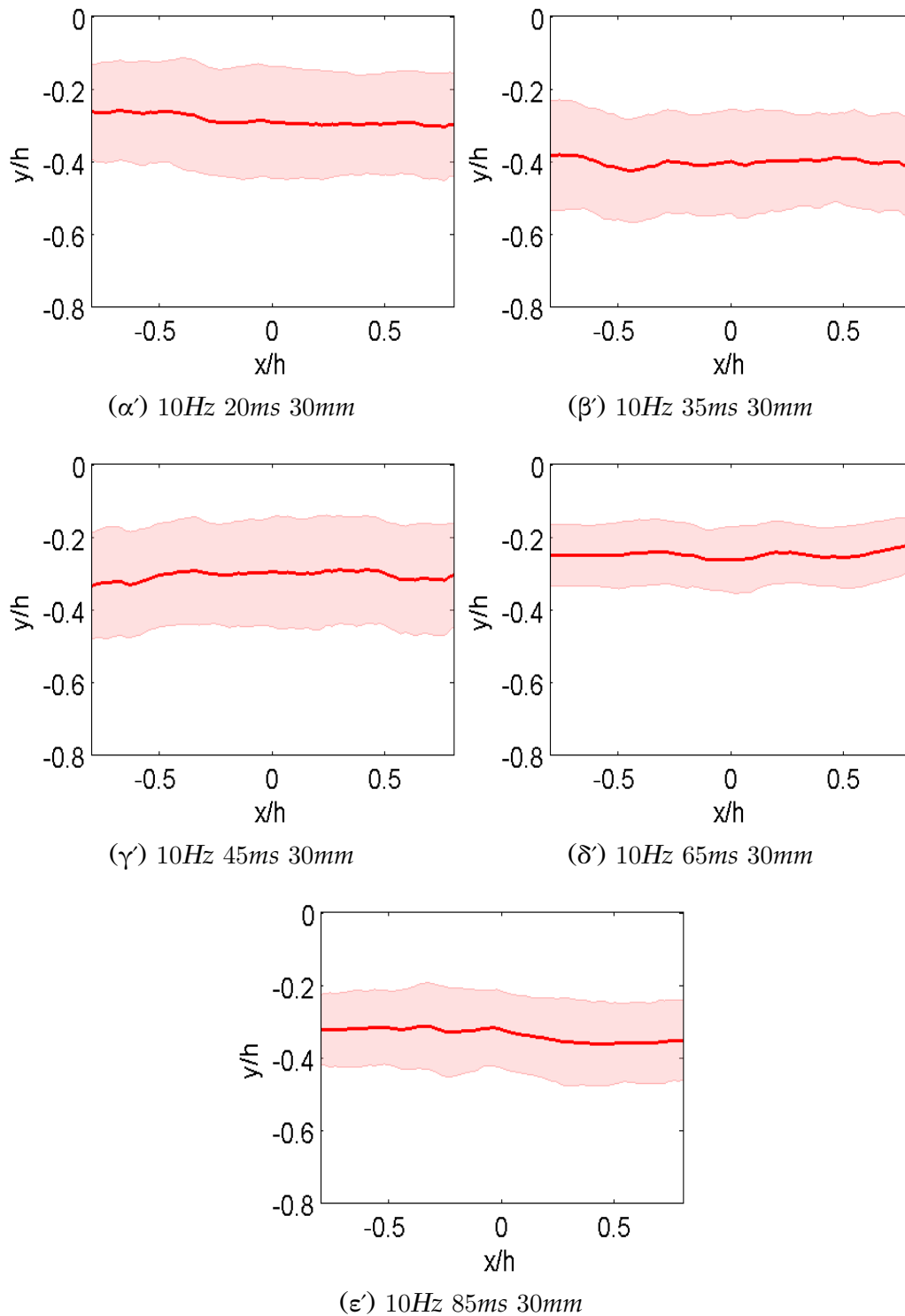
Τα παραπάνω δικαιολογούν τις ονομασίες που είχαν δωθεί νωρίτερα στις συχνότητες διέγερσης (βέλτιστη 10Hz, μη-βέλτιστη 2Hz) καθώς αντιπροσωπεύουν την αποτελεσματικότητά τους σχετικά με τον περιορισμό του φύλλου διάτμησης. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τις μετρήσεις άλλων ερευνητών [16], [32], [33] σχετικά με τη βέλτιστη συχνότητα διέγερσης και επιβεβαιώνουν το φαινόμενο αυτό και στις 3 διαστάσεις. Σχετικά με την συνεχή διέγερση, φαίνεται να μην έχει διαφορά από την παλλόμενη όπως είχε καταλήξει ο Sigurdson [45]. Αυτό ίσως οφείλεται στη μικρή απόσταση από το σκαλοπάτι και στην ασυμμετρία που παρατηρήθηκε στο πεδίο ταχυτήτων, δηλαδή είναι τοπικό φαινόμενο τόσο ως προς τη διαμήκη, όσο και ως προς την εγκάρσια απόσταση.



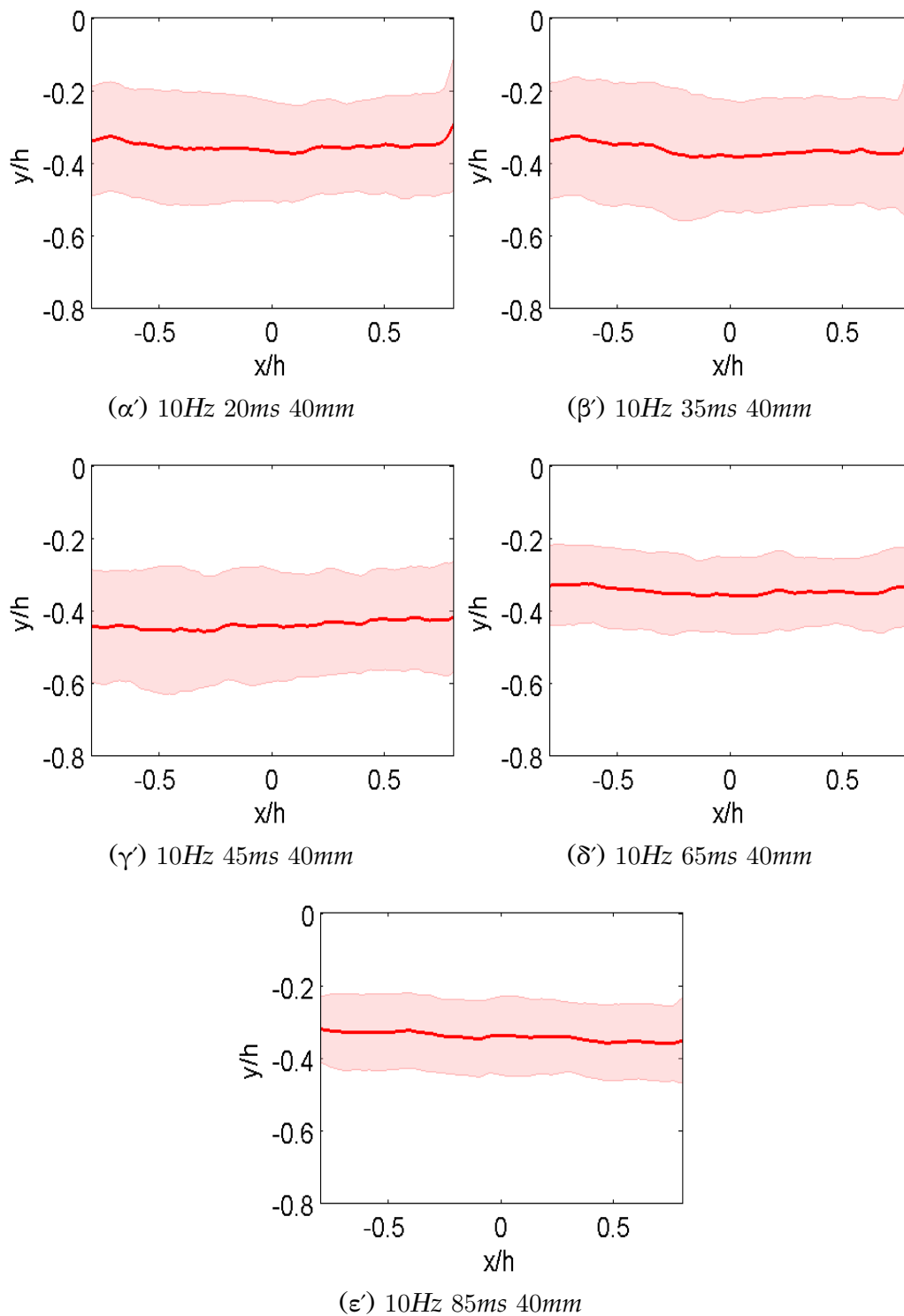
Σχήμα 3.35: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



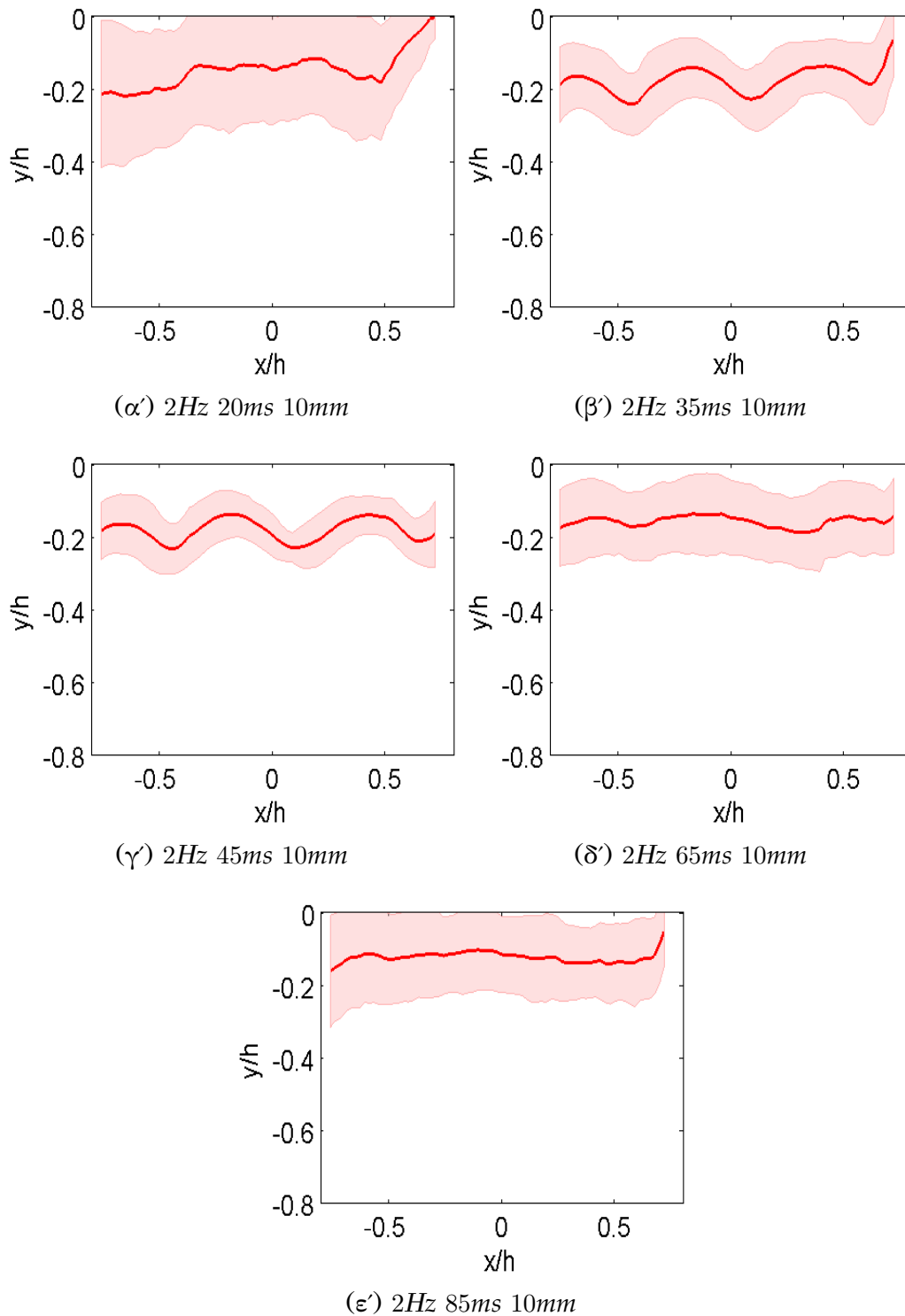
Σχήμα 3.36: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



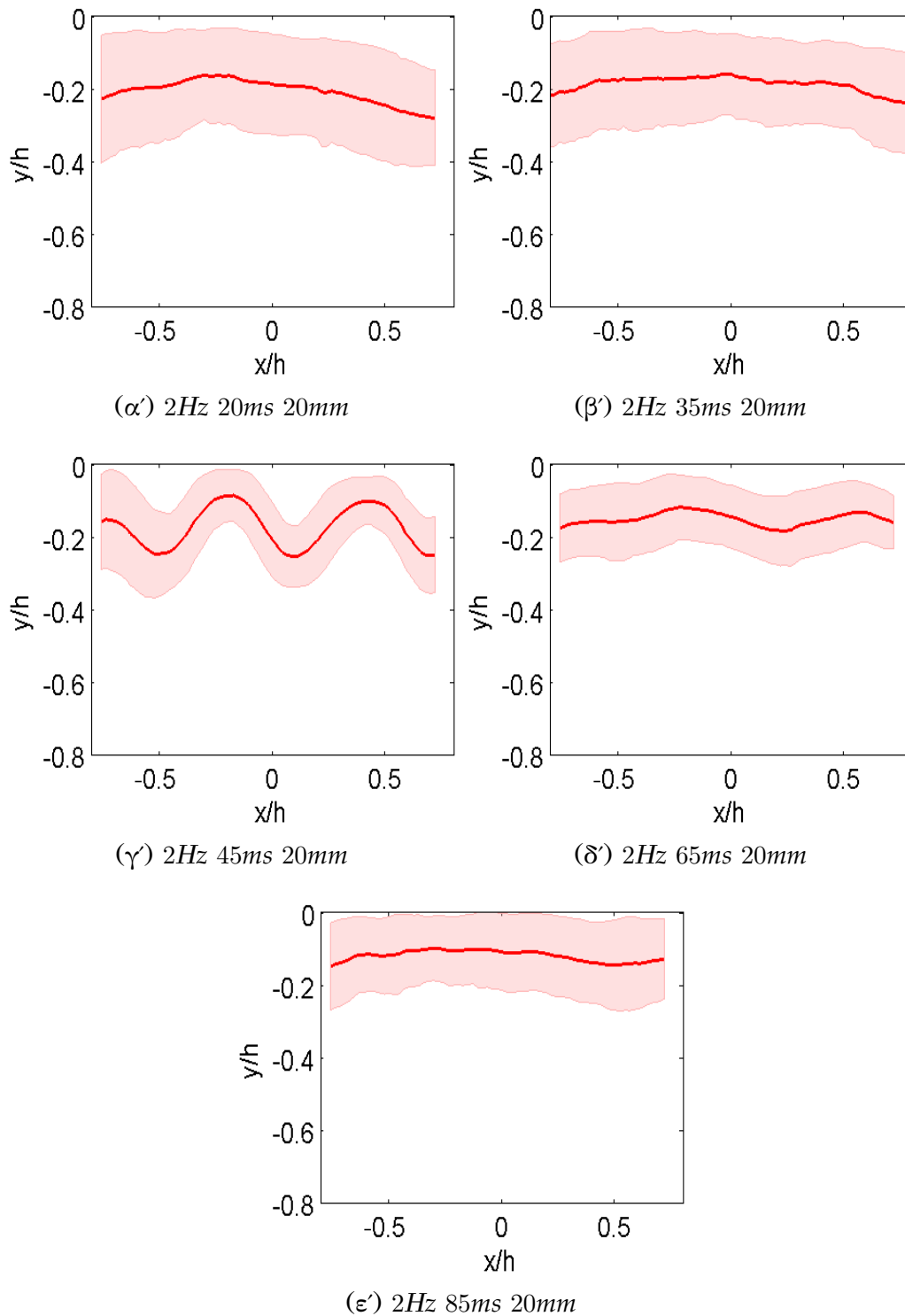
Σχήμα 3.37: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



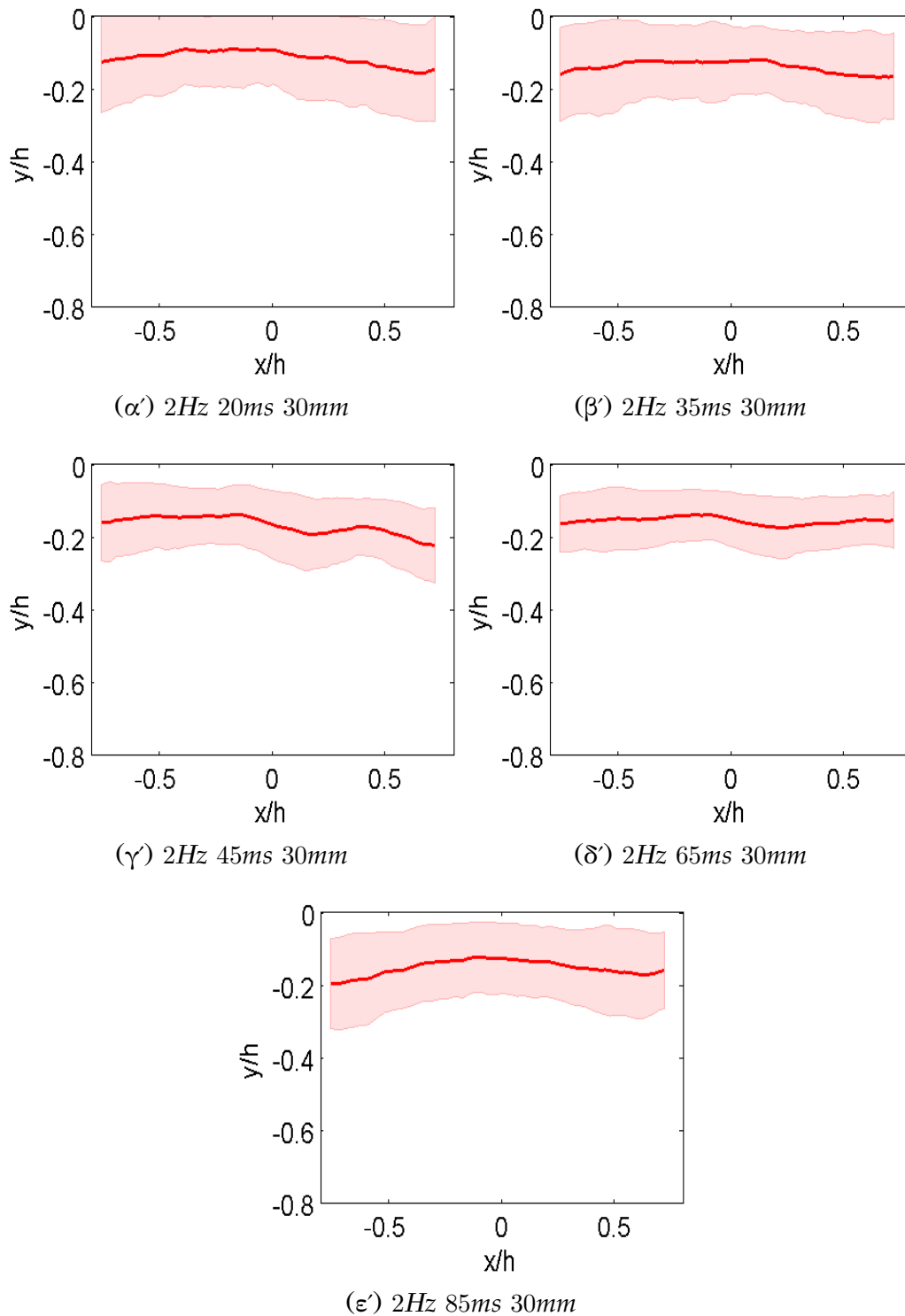
Σχήμα 3.38: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



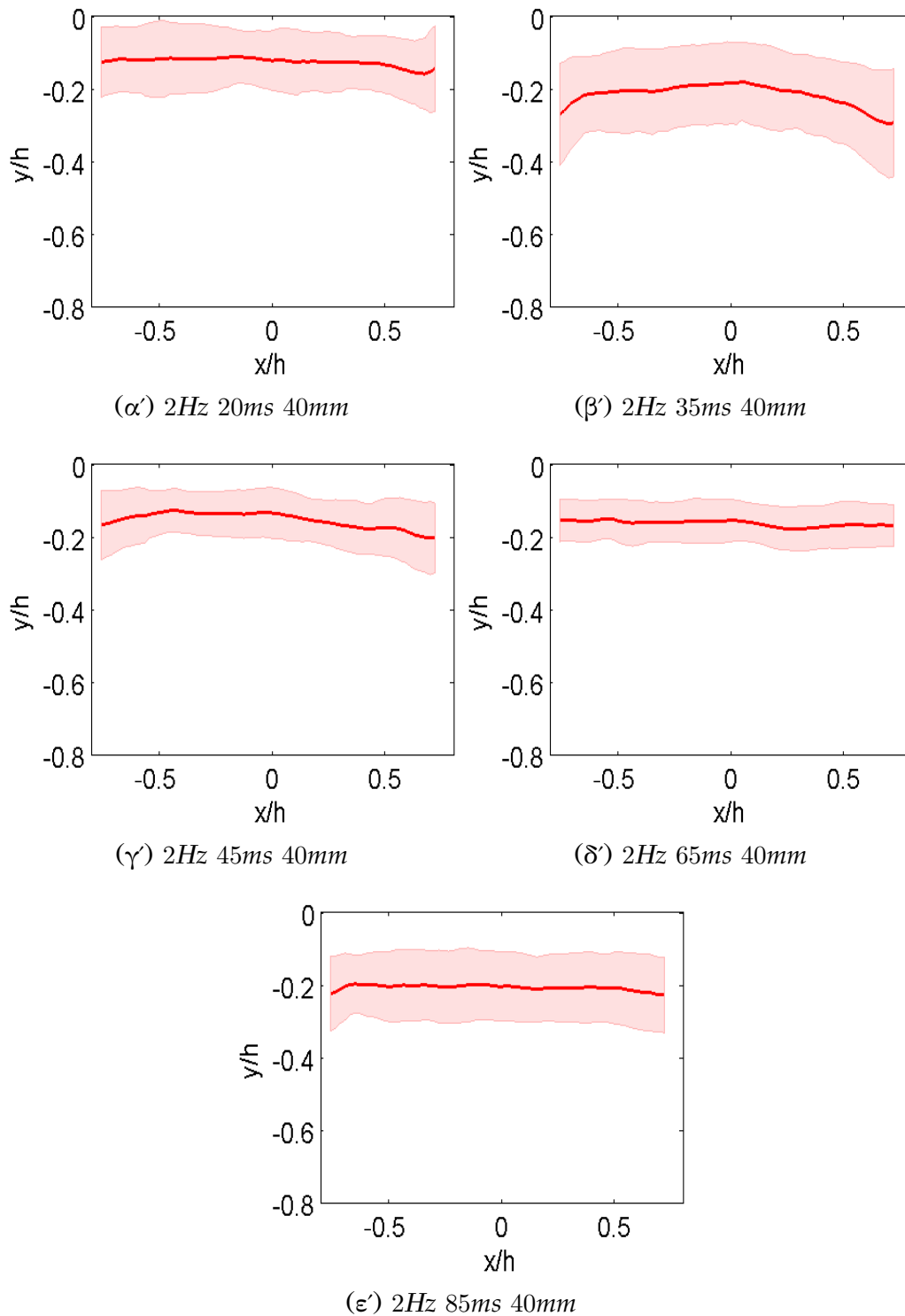
Σχήμα 3.39: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



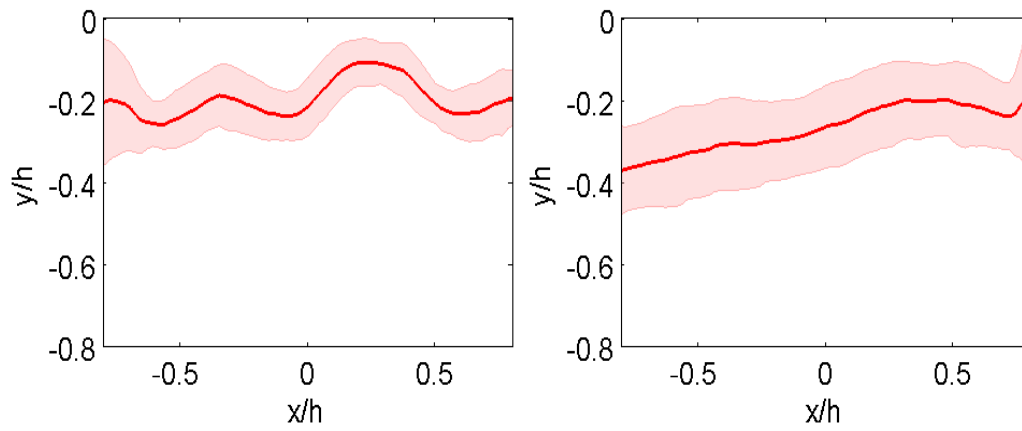
Σχήμα 3.40: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



Σχήμα 3.41: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις

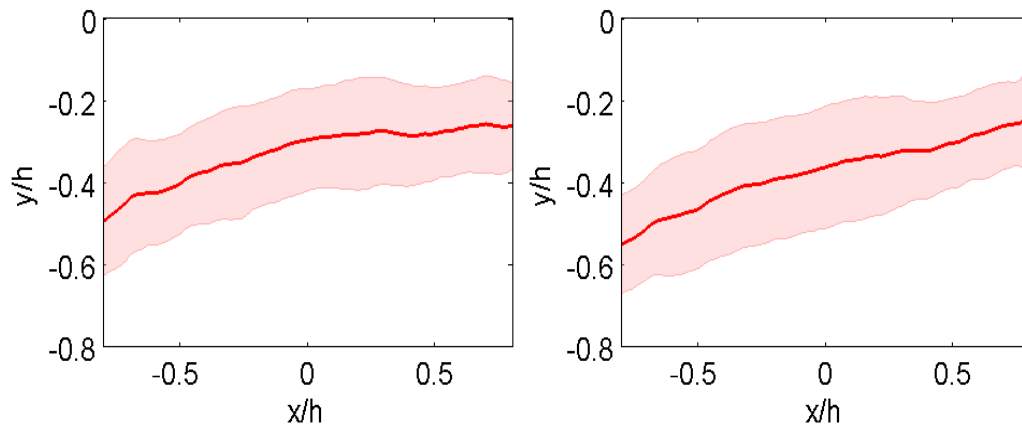


Σχήμα 3.42: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



(α) Continuous Jet 10mm

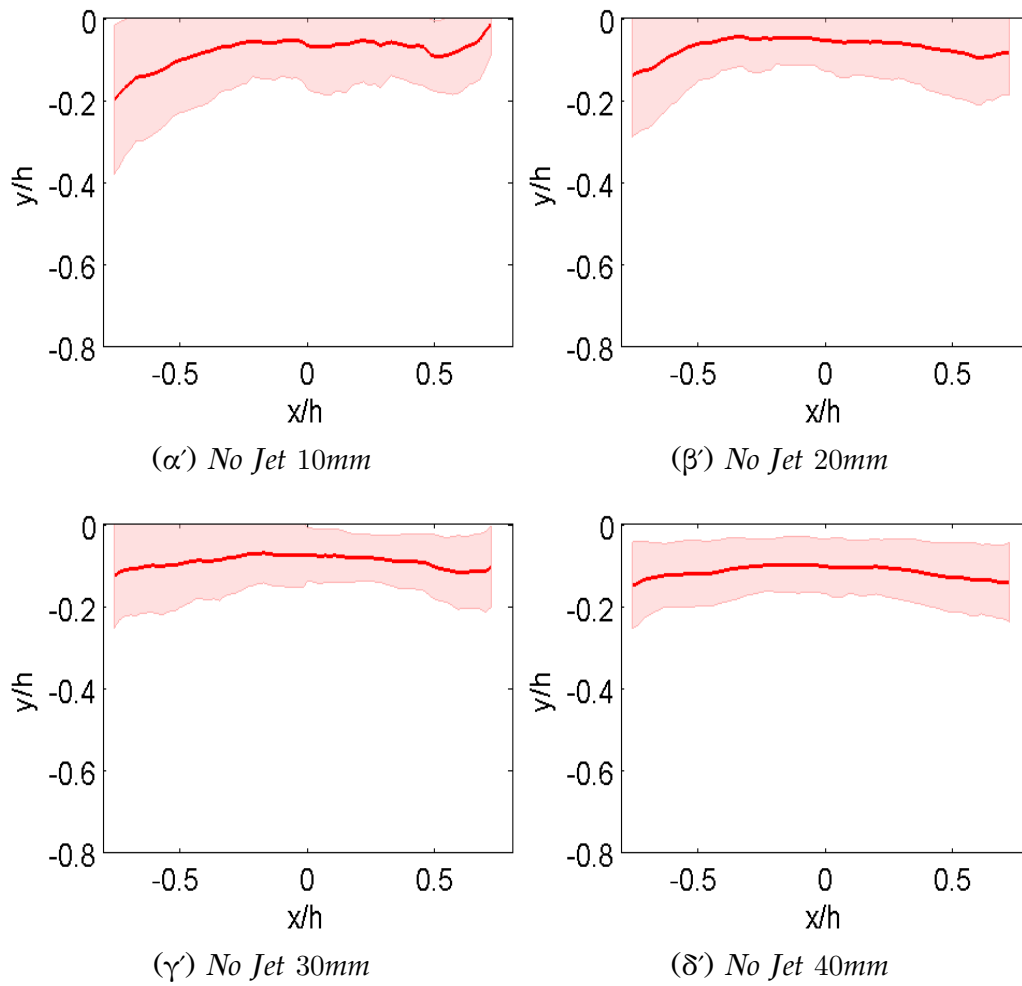
(β) Continuous Jet 20mm



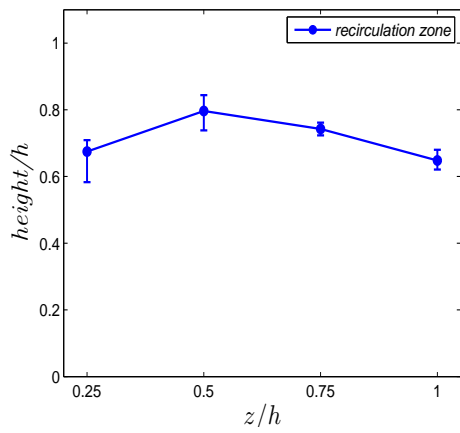
(γ) Continuous Jet 30mm

(δ) Continuous Jet 40mm

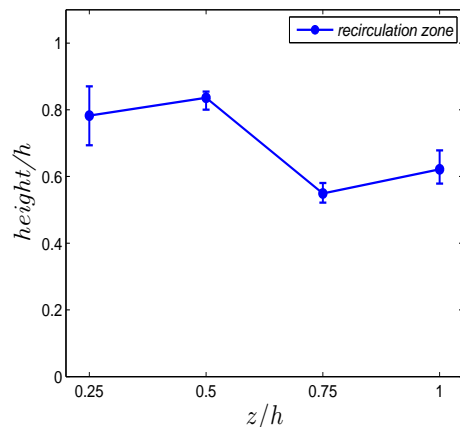
Σχήμα 3.43: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



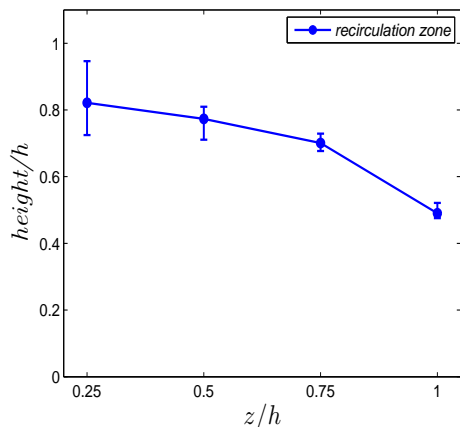
Σχήμα 3.44: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση της περιοχής που μηδενίζεται η αξονική ταχύτητα -όρια της περιοχής ανακυκλοφορίας- για διαφορετικές περιπτώσεις



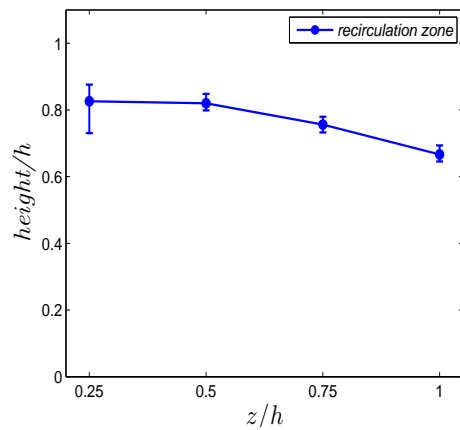
(α') 10Hz 20ms



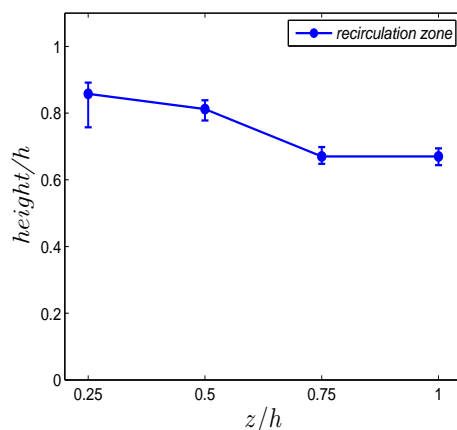
(β') 10Hz 35ms



(γ') 10Hz 45ms

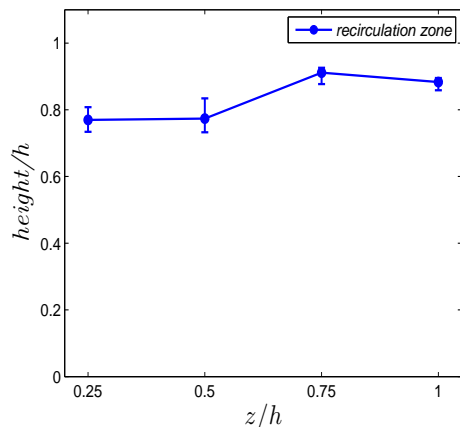


(δ') 10Hz 65ms

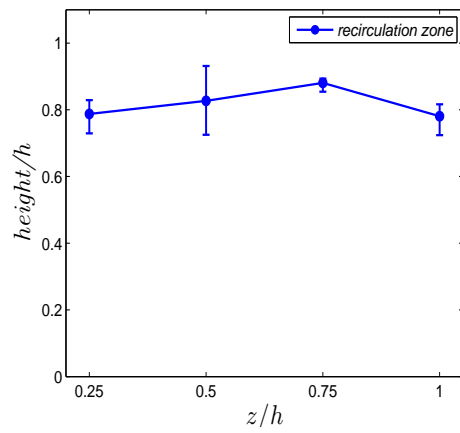


(ϵ') 10Hz 85ms

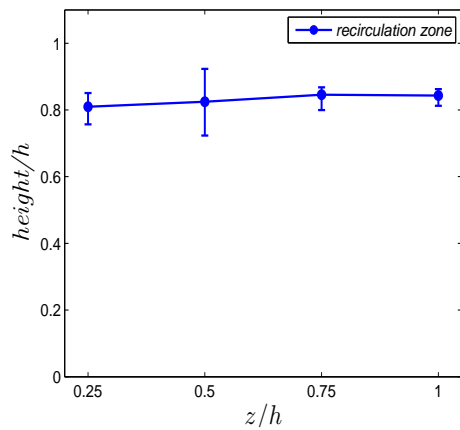
Σχήμα 3.45: Περιοχή ανακυκλοφορίας για διαφορετικές περιπτώσεις.



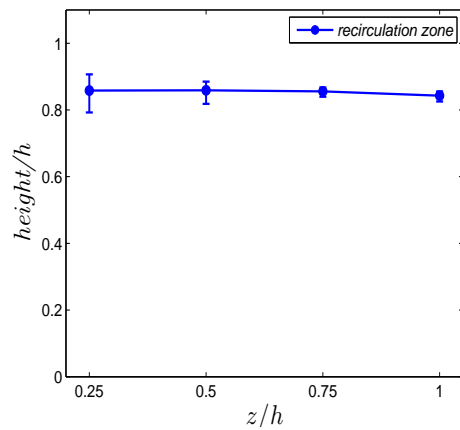
(α') 2Hz 20ms



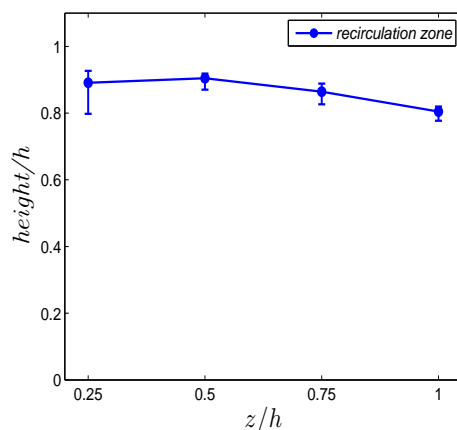
(β') 2Hz 35ms



(γ') 2Hz 45ms

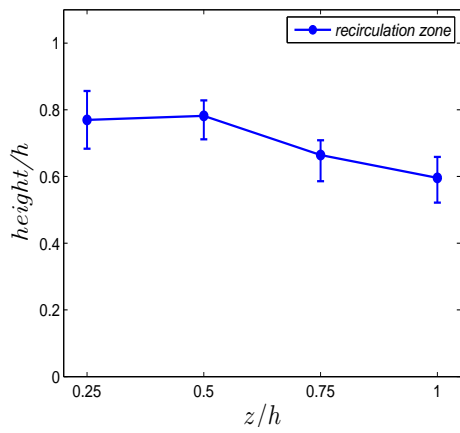


(δ') 2Hz 65ms

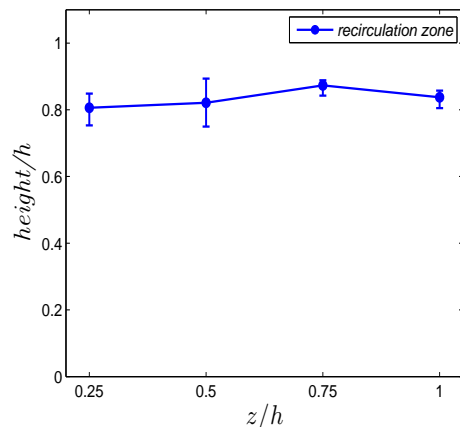


(ϵ') 2Hz 85ms

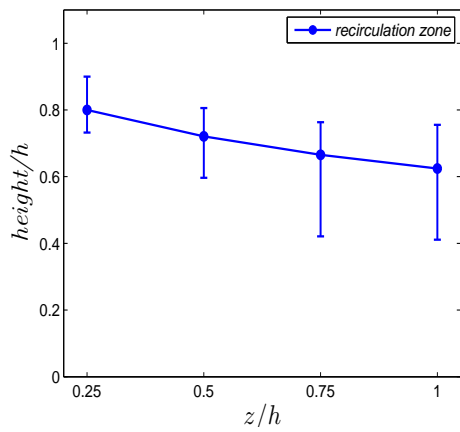
Σχήμα 3.46: Περιοχή ανακυκλοφορίας για διαφορετικές περιπτώσεις.



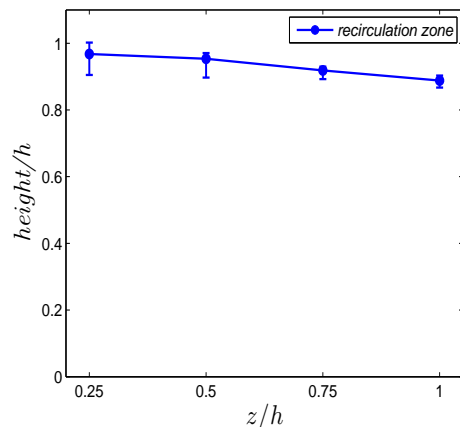
(α') 10Hz time mean



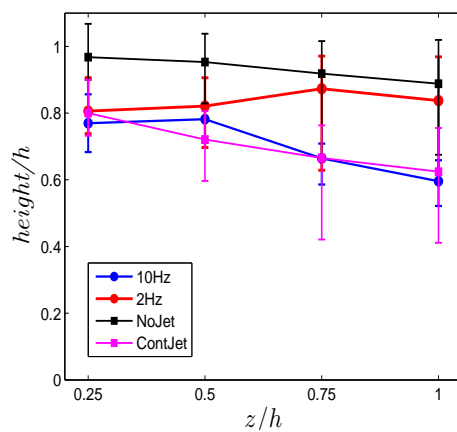
(β') 2Hz time mean



(γ') Continuous Jet



(δ') No Jet



(ε') Σύγκριση μέσων τιμών

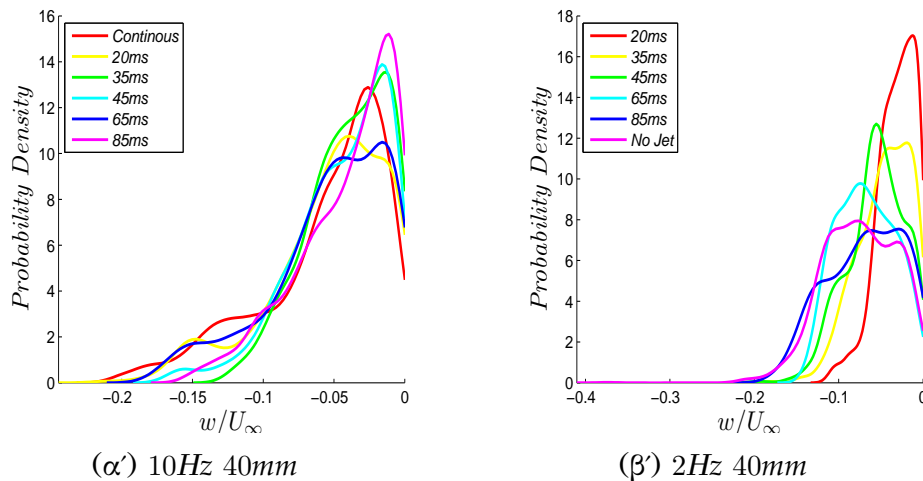
Σχήμα 3.47: Μέση περιοχή ανακυκλοφορίας για διαφορετικές περιπτώσεις. Κάτω, σύγκρισή τους.

Αρνητικές αξονικές ταχύτητες

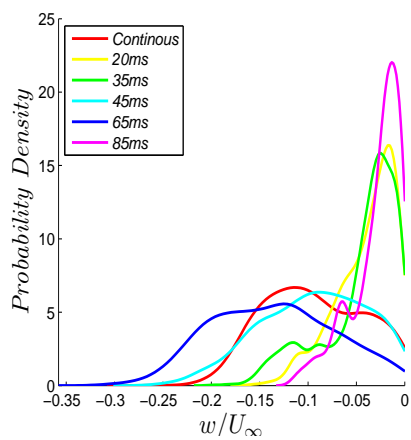
Στα σχήματα 3.48 και 3.49 φαίνονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των αρνητικών ταχυτήτων του πεδίου ταχυτήτων. Οι κατανομές αυτές έχουν αποκοπή για τιμές μεγαλύτερες του μηδενός, καθώς οι συναρτήσεις παρουσίαζαν μικρά θετικά κομμάτια λόγω συνέχειας της καμπύλης, παρόλο που τα ιστογράμματα από τα οποία προήλθαν δεν είχαν θετικές τιμές. Συνεπώς, το εμβαδόν τους είναι ελαφρά μικρότερο της μονάδας.

Παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερη κατάντη απόσταση, οι αρνητικές ταχύτητες αυξάνουν με μέγιστες τιμές στα 10mm περίπου $-0.2U_\infty$ (επ' άπειρον ταχύτητα), στα 20mm περίπου $-0.25U_\infty$, στα 30mm περίπου $-0.3U_\infty$ και στα 40mm περίπου $-0.4U_\infty$.

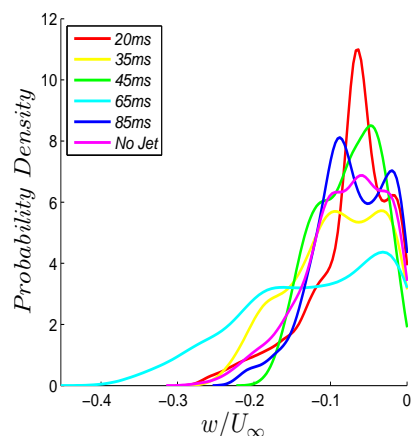
Οι κατανομές δεν παρουσιάζουν κάποια ομοιομορφία, ενώ απέχουν πολύ από την κανονική κατανομή.



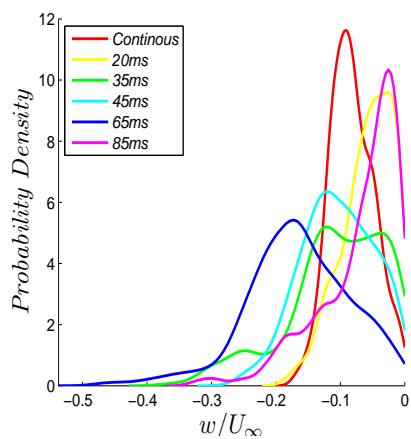
Σχήμα 3.48: Περιοχή ανακυκλοφορίας για διαφορετικές περιπτώσεις.



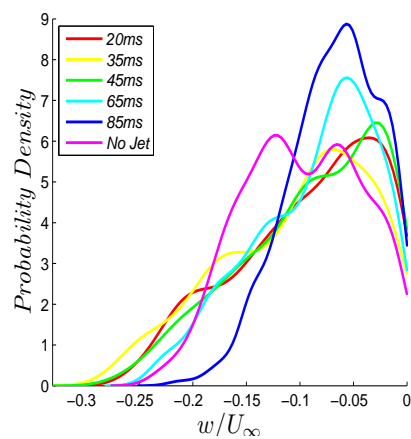
(α') 10Hz 10mm



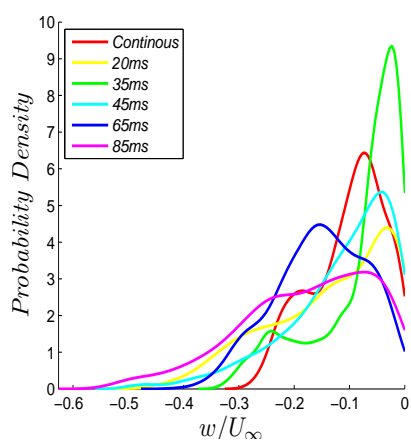
(β') 2Hz 10mm



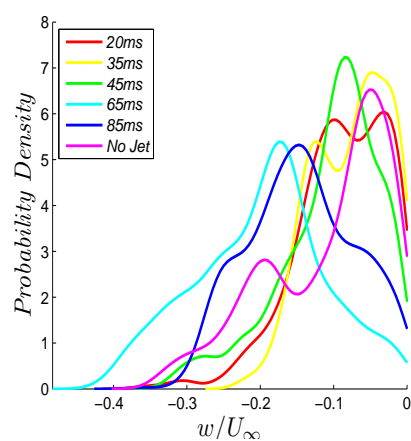
(γ') 10Hz 20mm



(δ') 2Hz 20mm



(ε') 10Hz 30mm



(σ') 2Hz 30mm

Σχήμα 3.49: Περιοχή ανακυκλοφορίας για διαφορετικές περιπτώσεις.

3.5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ροή αέρα κατάντη σκαλοπατιού ($Re_h \approx 10500$) για περιπτώσεις ελεύθερης ροής και διεγερμένης με συνεχείς και παλλόμενες δέσμες (10 και 2Hz). Έγιναν μετρήσεις των τριών συνιστωσών της ταχύτητας με Stereo-PIV σε επίπεδα κάθετα στη ροή, σε αποστάσεις 10, 20, 30 και 40mm από το σκαλοπάτι. Αναλύθηκε η συμπεριφορά των δεσμών και της περιοχής ανακυκλοφορίας, για κάθε περίπτωση.

Οι τρεις δέσμες που αποτυπώθηκαν παρουσίασαν έντονη διάχυση σε σχέση με αυτή που συναντάται στη βιβλιογραφία, ενώ παρατηρείται απουσία αξονοσυμμετρίας σε πολλές περιπτώσεις. Τα παραπάνω πιθανότατα οφείλονται στο ότι ο αέρας δεν εξέρχεται από οπές στο περιβάλλον ρευστό, αλλά από μια διαμήκη σχισμή (slot). Οι διακυμάνσεις (RMS) των ταχυτήτων των δεσμών συμφωνούν με τις απαντώμενες στη βιβλιογραφία.

Οι δέσμες επίσης δεν παρουσίαζαν ομοιόμορφα χαρακτηριστικά, με την αριστερή να είναι αισθητά πιο αδύναμη από τις άλλες δύο. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι η οπή που εξέρχεται ο αέρας είχε βουλώσει. Κατ' επέκταση, και άλλες δέσμες του σκαλοπατιού πιθανόν να παρουσιάζουν τέτοια ανομοιόμορφη συμπεριφορά.

Αυτή η ανομοιομορφία εισάγει έντονα τρισδιάστα χαρακτηριστικά στη ροή σε κάποιες περιπτώσεις, ενώ σε κάποιες άλλες δεν φαίνεται να επηρεάζει την αξονοσυμμετρία. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις που η ροή διεγείρεται από συνεχείς δέσμες τα όρια των περιοχής ανακυκλοφορίας (γραμμική μηδενικής αξονικής ταχύτητας) δεν είναι διδιάστατα και εμφανίζουν ασυμμετρία. Αντίθετα, στις περιπτώσεις παλλόμενων δεσμών (2 ή 10 Hz) αυτή η ασυμμετρία δεν παρουσιάζεται ή παρουσιάζεται μόνο για τη μικρότερη κατάντη απόσταση από το σκαλοπάτι (10mm). Για μεγαλύτερες αποστάσεις, η ροή παρουσιάζει αξονοσυμμετρία και γίνεται διδιάστατη. Συνεπώς, μπορούμε να καταλήξουμε ότι η παλλόμενη διέγερση ελαχιστοποιεί τυχόν ατέλειες που μπορούν να επηρεάσουν το διδιάστατο χαρακτήρα της ροής.

Τέλος, η πτώση του φύλλου διάτμησης (και συνακόλουθα η μείωση του ύψους της περιοχής ανακυκλοφορίας) βρέθηκε να επηρεάζεται έντονα από τη διέγερση της ροής με δέσμες. Η διέγερση με παλλόμενες δέσμες βέλτιστης συχνότητας (10Hz) προκαλούν σημαντική μείωση του μέσου ύψους της περιοχής ανακυκλοφορίας, της τάξης του 15% σε σχέση με την ελεύθερη ροή, για κάθε κατάντη απόσταση. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρούμε και για τη διέγερση με τη χρήση συνεχών δεσμών. Αντίθετα, η διέγερση με παλλόμενες δέσμες μη βέλτιστης συχνότητας

(2Hz) έχει διαφορετική συμπεριφορά όσον αφορά το ύψος της περιοχής ανακυκλοφορίας: Ενώ για μικρές αποστάσεις (10mm, 20mm από το σκαλοπάτι) η επίδραση της είναι παρόμοια με τη βέλτιστη περίπτωση, για μεγαλύτερες αποστάσεις εξασθενεί και η ροή συμπεριφέρεται σαν μη-διεγερμένη.

Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της εργασίας.

- Αυξημένη διάχυση δεσμών λόγω εξαγωγής αέρα από διαμήκη σχισμή αντί για οπή.
- Ανομοιομορφία δεσμών πειράματος.
- Η παλλόμενη διέγερση συνεισφέρει στην αξονοσυμμετρία της ροής.
- Βέλτιστη μείωση του ύψους της περιοχής ανακυκλοφορίας για συχνότητα διέγερσης δεσμών 10Hz και συνεχή διέγερση. Μη βέλτιστη μείωση για συχνότητα διέγερσης 2Hz.

Βιβλιογραφία

- [1] I. Wygnasnsi, H. Fiedler (1969) Some measurements in the self-preserving jet. *J. Fluid Mech*, Vol. 38, pp 577-612.
- [2] A. Capone, A. Soldati, G. P. Romano (2012) Mixing and entrainment in the near field of turbulent round jets. *Exp Fluids* vol. 54, pp1434
- [3] S. C. Crow, F. H. Champagne (1971). "Orderly Structure in Jet Turbulence." *J. Fluid Mech* vol.48, pp.547-591
- [4] K. Bremhorst, P. G. Hollis, (1990) Velocity field of an axisymmetric pulsed, subsonic air jet. *AIAA J.* vol. 28 pp.2043–2049
- [5] I. Choutapalli, A. Krothapalli, J. H. Arakeri (2009). An experimental study of an axisymmetric turbulent pulsed air jet. *J. Fluid Mech.* vol. 631, pp. 23-63
- [6] X. Zhou, Z. Sun, F. Durst, G. Brenner, (1999) Numerical simulation of turbulent jet flow and combustion. *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 38, pp.179-191
- [7] H. E. Fiedler (1987) Coherent Structures in Turbulent Flows. *Pro Aerospace Sci.* vol. 25, pp 231-269
- [8] P. E. Dimotakis, R. C. Miake-Lye, D. A. Papantoniou (1982) Structure and dynamics of round turbulent jets. *GALCIT Report FM82 I.* California Institute of Technology.
- [9] J. Kostas, J. Soria, M.S. Chong (2002), Particle image velocimetry measurements of a backward-facing step flow. *Exp Fluids* vol. 33, pp.838-853
- [10] D. Greenblatt, I. J. Wygnanski (2000), The control of flow separation by periodic excitation. *Pro Aerospace Sci.* Vol.36, pp 487-545
- [11] J. Kitzhofer (2011) Volumetric Measurements of the Transitional Backward Facing Step Flow. *PhD Thesis* pp 151

- [12] B.F. Armaly , F. Durst , J.C.F. Pereira , B. Schönung (1983), Experimental and theoretical investigation of backward facing step flow, *J Fluid Mech* vol.127 pp. 473-496
- [13] F. Durst, C. Tropea (1981) Turbulent Backward-Facing Step Flows in two-dimensional ducts and channels. 3rd Symposium on turbulent Shear Flows, Davis CA
- [14] G. Biswas , M. Breuer , F. Durst (2004) Backward-Facing Step Flows for Various Expansion Ratios at Low and Moderate Reynolds Numbers. *J. Fluids Eng.* vol.126, pp.362-374
- [15] T.P. Chiang, T.W.H. Sheu (1999) A numerical revisit of backward-facing step flow problem. *Phys. Fluids* vol.11, pp.862-874
- [16] P.G. Kapiris, D.S. Mathioulakis (2011) Experimental study of vortical structures in a periodically perturbed flow over a backward-facing step, submitted
- [17] H.T. Huang , H. Fiedler (1997) A DPIV study of a starting flow downstream of a backward-facing step. *Experiments in Fluids* vol.23, pp.395-404
- [18] H. Le, P. Moin, J. Kim (1997) Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step. Technical Report TF-58, Stanford Univ, Dept of Mech Eng, Thermosciences Div
- [19] D. Schanz, A. Schröder, B. Heine, U. Dierksheide (2012) Flow structure identification in a high resolution tomographic PIV data set of the flow behind a backward facing step. 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 09-12 July, 2012
- [20] P. Holmes, J. L. Lumley, G. Berkooz (1996) *Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry*. Cambridge University Press
- [21] G. Berkooz, P. Holmes, J. Lumley (1993) The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. *Annu Rev Fluid Mech* vol.25 pp 539–75
- [22] M. N. Glauser, S. J. Leib, and W. K. George (1987) Coherent structures in the axisymmetric turbulent jet mixing layer. *Turbulent Shear Flows* vol. 5, pp 134-45.

- [23] L. Sirovich, M. Kirby, M. Winter, (1990) An eigenfunction approach to large scale transitional structures in jet flow. *Phys. Fluids*, Vol. 2, p 127
- [24] J. H. Tu, C. W. Rowley, J. Griffin, L. Cattafesta, A. Hart, L. S. Ukeiley (2012) Integration of non-time-resolved PIV and time-resolved velocity point sensors for dynamic estimation of time-resolved velocity fields. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 9–12 January 2012, Nashville, Tennessee
- [25] J. P. Bonnet, J. Delville (2001) Review of Coherent Structures in Turbulent Free Shear Flows and Their Possible Influence on Computational Methods. *Flow, Turbulence and Combustion* vol. 66 pp 333-353
- [26] R. J. Adrian (1994) Stochastic Estimation of Conditional Structure: a Review. *Applied Scientific Research* 53:291-303
- [27] M. Legrand, J. Nogueira, A. Lecuona, (2011) “Flow temporal reconstruction from non-time-resolved data part I: mathematic fundamentals, *Exp. Fluids* vol. 51 pp1047-1055
- [28] M. Legrand, J. Nogueira, S. Tachibana, A. Lecuona, S. Nauri, (2011) “Flow temporal reconstruction from non time-resolved data part II: practical implementation, methodology validation, and applications,” *Exp. Fluids* vol.51 pp 861-870
- [29] T. Regert, P. Rambaud M. L. Riethmuller (2005) Investigation of the link between physics and POD modes. RTO-MP-AVT-124
- [30] T. P. Chiang, T. W. H. Sheu (1997) Vortical flow over a 3-D backward facing step. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, vol.31 pp 167-192
- [31] H. Wngle, A. Huppertz, G. Barwolff, G. Janke (2001) The manipulated transitional backward facing step flow: an experimental and direct numerical simulation investigation. *Eur. J. Mech. B-Fluids* vol. 20 (2001) pp25–46
- [32] K. B. Chun, H. J. Sung (1996) Control of tubulent separated flow over a backward facing step by local forcing. *Exp. Fluids* vol.21, pp 417-426

- [33] A. Dejoan, M. A. Leschziner (2004) Large eddy simulation of periodically perturbed separated flow over a backward-facing step. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol.25,pp. 581-592
- [34] K. D. Hinch (1995) Three-dimensional particle image velocimetry. *Meas. Sci. Tech.* vol.6 pp742-753
- [35] R. J. Adrian (1991) Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech*, Vol.23 pp. 261-304
- [36] Καπελλάκης Γ. Ζ. (2011) Στατιστική ανάλυση ροής τυρβώδους φύλλου διάτμησης στην περιοχή της αποκόλλησης και επανακόλλησης υπό συνθήκες διέγερσης. *Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ*, pp 237
- [37] Δ. Σ. Μαθιουλάκης (2006) Τεχνικές Μετρήσεις Ρευστομηχανικών Μεγεθών. *Πανεπιστημιακές σημειώσεις*
- [38] A.K. Prasad (2000) Stereoscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* vol.29 pp103-116
- [39] M. Raffel, J. Westerweel, C. Willer, M. Gharib, J. Kompenhas (1996) Analytical and experimental investigations of dual-plane particle image velocimetry. *Opt. Eng.* vol.35, pp 2067-2074
- [40] Willert C (1997) Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows. *Meas. Sci. Tech.* vol.8 pp 1465
- [41] Φιλιόπουλος Γ. (2010). Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας παλλόμενων δεσμών αέρα στον έλεγχο της ροής απότομης διερεύνησης. *Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ*
- [42] http://www.piv.de/piv/measurement_principle/page_1.php
- [43] D. Miller, E. Comings, (1957) Static pressure distribution in the free turbulent jet. *J. Fluid Mech.* vol.3, pp 1-16
- [44] A. K. M. F. Hussain, A. R. Clark, 1977 Upstream influence on the near field of a plane turbulent jet. *Phys. Fluids* vol. 20, pp 1416-1427.
- [45] L.W. Sigurdson. (1995) The structure and control of a turbulent reattaching flow. *J. Fluid Mech.*, vol. 298 pp 139-165
- [46] M. A. Z. Hasan (1992) The flow over a backward-facing step under controlled perturbation: laminar separation *J. of Fluid Mech.* Vol. 238, pp 73-96

- [47] P. Bradshaw, F. Y. F. Wong (1972) The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer J.Fluid Mech. Volume 52, pp 113-135
- [48] K. Eaton, J.P. Johnston (1981). A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. AIAA J., vol. 19 pp 1093-1100.
- [49] K. Eaton, J.P. Johnston (1980) Turbulent flow reattachment: an experimental study of the flow and structure behind a backward facing step. Report MD-39 Thermoscience Division, Dept. of Mechanical Eng., Stanford University.
- [50] KBMQ Zaman, A.K.M.F. Hussain (1980) Vortex pairing on a circular jet under controlled excitation. Part 1. General jet response. J Fluid Mech vol. 101 pp 449-491.
- [51] S. Bhattacharjee, B. Sheelke, T.R. Troutt (1986) Modifications of vortex interactions in a reattaching separated flow. AIAA J vol. 24 pp 623-629.
- [52] I. Kim, S.J. Kline, J.P. Johnston (1980) Investigation of a reattaching turbulent shear layer: Flow over a backward-facing step. J Fluids Eng vol. 102 pp 302-308.
- [53] M. Kiya, M. Shimizu, O. Mochizuki, Y. Ido, H. Tezuka (1993) Active forcing of an axisymmetric leading-edge turbulent separation bubble. AIAA paper 93-3245.
- [54] Σ. Τσαγγάρης (2005) Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Συμμεών pp 640
- [55] L. Sirovich (1987) Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part1: Coherent structures. Q Appl Math vol. 45 pp 561-571.
- [56] <http://www.tsi.com/powerview-plus-4mp-camera/>

Κώδικες MATLAB®

Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια από τα προγράμματα MATLAB® που χρησιμοποιήθηκαν.

Οι υπορουτίνες *rinexr* και *v3dload* χρησιμοποιήθηκαν για το άνοιγμα των *raw data* από το INSIGHT® τη μετατροπή των δεδομένων σε μορφή που να αξιοποιείται από τη MATLAB®.

Το κυρίως πρόγραμμα *main* χρησιμοποιήθηκε ώστε να καλεί μέσα σε ένα βρόχο όλα τα πακέτα δεδομένων (σύνολο 48 περιπτώσεις) και να καλεί διαφορετικές υπορουτίνες για την επεξεργασία των δεδομένων (POD, υπολογισμός μέσω πεδίων κτλ.). Να σημειώσουμε ότι τα δεδομένα είναι χωρισμένα σε δύο ομάδες, 25 Φεβρουαρίου και 26 Φεβρουαρίου που αντιστοιχούν στις δύο μέρες πειραμάτων.

Οι υπορουτίνες *PODmain3*, *pod1* και *inropod13* εκτελούν τη μεθοδολογία POD στα δεδομένα όπως αυτή περιγράφεται στην ενότητα 3.4.4 και ανακατασκευάζουν το πεδίο ταχυτήτων.

Η υπορουτίνα *PODgrammi* υπολογίζει τις κατανομές των γραμμών μηδενικής ταχύτητας, ενώ η υπορουτίνα *plotr* δημιουργεί τα διαγράμματα.

Οι υπορουτίνες *DistPeaks* και *mesa* υπολογίζουν τις μέγιστα των αξονικών ταχυτήτων των δεσμών και τις θέσεις που εμφανίζονται αυτές, ενώ δημιουργούν τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και τα ραβδογράμματα που παρουσιάζονται στην ενότητα 3.4.5. Η υπορουτίνα *ReynoldsStress* υπολογίζει τις τάσεις Reynolds για κάθε περίπτωση και την τυρβώδη κινητική ενέργεια k .

```

1 function [x,y,z,u,v,w,ch, re]=pivexp
2 files=ls('C:\Users\User\Desktop\diplom\mfiles\CONT20\
    contjet20x??????.*.v3d');
3
4 h = waitbar(0, 'start loading ...');
5 N=length(files(:,1));
6
7 for k=1:N;
8 [x(:,:,k),y(:,:,k),z(:,:,k),u(:,:,k),v(:,:,k),w(:,:,k)
    ,ch(:,:,k),re(:,:,k)]=v3dload(files(k,:));
9 waitbar(k/N,h,files(k,:));
10 end
11 end

1 function [x,y,z,u,v,w,ch, re]=v3dload(fname)
2 fid=fopen(fname);
3 c=textscan(fid, '%f,%f,%f,%f,%f,%f,%d,%f', 'headerLines'
    ,1);
4 x(:,:,)=reshape(c{1},71,53);
5 y(:,:,)=reshape(c{2},71,53);
6 z(:,:,)=reshape(c{3},71,53);
7 u(:,:,)=reshape(c{4},71,53);
8 v(:,:,)=reshape(c{5},71,53);
9 w(:,:,)=reshape(c{6},71,53);
10 ch(:,:,)=reshape(c{7},71,53);
11 re(:,:,)=reshape(c{8},71,53);
12 fclose(fid);
13
14 x=x(:,end:-1:1)';
15 y=y(:,end:-1:1)';
16 z=z(:,end:-1:1)';
17 u=u(:,end:-1:1)';
18 v=-v(:,end:-1:1)';
19 w=-w(:,end:-1:1)';
20 ch=ch(:,end:-1:1)';
21 re=re(:,end:-1:1)';
22 end

```

```

1 %-----
2 %----  MAIN  -----
3 %-----
4
5 clear ; clc
6 %25 Feb Uoo=4.1 m/sec
7 %26 Feb Uoo=3.75 m/sec
8
9 I=71;Uoo=4.1; %25 Feb
10 %I=67;Uoo=3.75; %26 Feb
11
12 J=53;
13 h=41;
14 M=[];AUP=[];ADO=[];StanD=[];PODenergy=[];
15 meso=0;
16 YI=[];
17 myFolder = 'C:\Users\User\Desktop\diplom\25Febmat';
18
19 filePattern = fullfile(myFolder, '*.mat');
20 matFiles = dir(filePattern);
21 for k =1:length(matFiles)
22     baseFileName = matFiles(k).name;
23     fullFileName = fullfile(myFolder, baseFileName);
24     fprintf(1, 'Now reading %s\n', fullFileName);
25     load(fullFileName);
26     [pathstr, name, ext] = fileparts( fullFileName);
27 %-----0 sthn akmh toy step-----
28 y=y+8;
29 %-----
30 %----ADIASTATOPOIHS-----
31 x=x/h;y=y/h;z=z/h;
32 u=u/Uoo;v=v/Uoo;w=w/Uoo;
33 %-----
34 %----mesa pedia taxythton-----
35 [x,y,z,um,vm,wm]=getmean(x,y,z,u,v,w);
36 %-----
37 %-----diorthosi sfalmaton-----
38 %wm = ErrorCorrect(wm,I,k);
39 %-----
40 %-----REYNOLDS STRESSES-----
41 [RSuu,RSvv,RSww,RSuv,RSuw,RSvw,tke]= ReynoldsStress(u,

```

```

v,w,x,y,z);contourf(x(20:J-21,3:I-2,1),y(20:J-21,3:
I-2,1),sqrt(RSw(20:J-21,3:I-2)));colorbar
42 %-----surface of axial velocity
-----
43 surf(x(1:J-21,3:I-2,1),y(1:J-21,3:I-2,1),wm(1:J-21,3:I
-2));view(7,32);%colorbar;set(gcf,'renderer','
zbuffer');%hold;m=surf(x(1:4:J-19,3:4:I-2,1),y(1:4:
J-19,3:4:I-2,1),zeros(size(wm(1:4:J-19,3:4:I-2))));
set(m,'facecolor','none');
44 %-----2D Contours
-----
45 [Ca,ha]=contourf(x(20:J-21,3:I-2,1),y(20:J-21,3:I-2,1)
,wm(20:J-21,3:I-2));colorbar;set(ha,'ShowText','on'
,'TextStep',get(ha,'LevelStep')*2);ylim([-0.8 0]);
xlim([-0.8 0.8]);
46 %-----Zero velocity Line
-----
47 [M,AUP,ADO,Stand]=ZeroLine(x,y,wm,k,I,J,M,AUP,ADO,
Stand);
48 %-----vector fields
-----
49 quiver(x(24:J-19,3:I-2,1),y(24:J-19,3:I-2,1),um(24:J
-19,3:I-2),vm(24:J-19,3:I-2),3);hold on;contour(x
(25:J-21,3:I-2,1),y(25:J-21,3:I-2,1),wm(25:J-21,3:I
-2,1));hold off
50 %-----vorticity -----
51 [curlz,cav]=curl(x(1:J-19,3:I-2,1),y(1:J-19,3:I-2,1),
um(1:J-19,3:I-2,1),vm(1:J-19,3:I-2,1));colorbar;
surf(x(1:J-19,3:I-2,1),y(1:J-19,3:I-2,1),curlz);
colorbar;set(gcf,'renderer','zbuffer');
52 %-----POD reconstruction -----
53 [uf,vf,wf,x,y,z,psix,psiy,psiz,eV]=PODmain3(x(1:J
-10,3:I-2,:),y(1:J-10,3:I-2,:),z(1:J-10,3:I-2,:),u
(1:J-10,3:I-2,:),v(1:J-10,3:I-2,:),w(1:J-10,3:I
-2,:),k,I,J);
54 %-----zero line -----
55 PODgrammi(x,y,wf,u,k,I,J)
56 %-----negative W -----
57 negativeW(w,I,J,k)
58 %-----SAVE FIGURES IN FOLDER -----
59 %saveas(gcf,fullfile('C:\Users\User\Desktop\diplom\25

```

```

        Febfig\2Dcont',name),'fig');
60 %saveas(gcf,fullfile('C:\Users\User\Documents\Latex
    ergasies\diplomatikh',name),'epsc')
61 %-----
62 %set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0
    7.4 1.66])
63 %set(gcf,'Units','inches','Position',[2 2 7.4 1.66])
64 %axis equal
65 pause
66 %clf
67 %close all
68 end

1 function [uf,vf,wf,x,y,z,psix,psiy,psiz,eV]=PODmain3(x
    ,y,z,u,v,w,k,I,J)
2 h=41;
3 [x,y,z,um,vm,wm]=getmean(x,y,z,u,v,w);
4
5 NL=size(u,3);
6
7 for i=1:NL
8     wp(:,:,i)=w(:,:,i)-wm(:,:,);
9     up(:,:,i)=u(:,:,i)-um(:,:,);
10    vp(:,:,i)=v(:,:,i)-vm(:,:,);
11 end
12
13 [eV,ac,psi]=podi3(up,vp,wp);
14 [ur,vr,wr]=invpodi3(ac,psi,size(up),[1:50]);
15
16 for i=1:NL
17 uf(:,:,i)=ur(:,:,i)+um; vf(:,:,i)=vr(:,:,i)+vm; wf
    (:,:,i)=wr(:,:,i)+wm;
18 end
19
20 for i=1:NL
21 psix(:,:,i)=reshape(psi(1:end/3,i),size(up,1),size(up
    ,2));
22 psiy(:,:,i)=reshape(psi(end/3+1:2*end/3,i),size(up,1),
    size(up,2));
23 psiz(:,:,i)=reshape(psi(2*end/3+1:end,i),size(up,1),
    size(up,2));
24 end

```



```

25 end
26
27 function [eValue , acoef , psi]=podi3 (Uf, Vf, Wf)
28 [ni , nj , ns]=size (Uf);
29
30 % create matrix with all fluctuating velocity
    components for each snapshot in a column
31 %Uall=[reshape (Uf, ni*nj , ns); reshape (Vf, ni*nj , ns)];
32 Uall=[reshape (Uf, ni*nj , ns); reshape (Vf, ni*nj , ns);
    reshape (Wf, ni*nj , ns)];
33
34 % Do POD analysis
35 R=Uall ' * Uall; % Autocovariance matrix
36 [eV , D]=eig (R); % solve: eV is eigenvectors , D is
    eigenvalues in diagonal matrix
37 [L , I]=sort (diag (D)); % sort eigenvalues in ascending
    order - I is sorted index vector
38 for i=1:length (D)
39     eValue (length (D)+1-i)=L(i); % Eigenvalues sorted
    in descending order
40     eVec (: , length (D)+1-i)=eV (: , I(i)); % Eigenvectors
    sorted in the same order
41 end;
42 eValue (length (eValue))=0; % last eigenvalue should be
    zero
43 menergy=eValue/sum (eValue); % relative energy
    associated with mode m
44 % calculate the first 10 modes
45 for i=1:ns
46     tmp=Uall * eVec (: , i); % find mode
47     psi (: , i)=tmp/norm (tmp); % normalize mode
48 end;
49 acoef=psi ' * Uall;
50 end
51
52 function [u , v , w]=invpodi3 (acoef , psi , sz , modes)
53 um=psi (: , modes) * acoef (modes , :);
54 u=zeros (sz);
55 v=zeros (sz);
56 w=zeros (sz);
57

```

```

58 for s=1:sz(3)
59     u(:, :, s)=reshape(um(1:end/3, s), sz(1), sz(2));
60     v(:, :, s)=reshape(um(end/3+1:2*end/3, s), sz(1), sz(2));
61     w(:, :, s)=reshape(um(2*end/3+1:end, s), sz(1), sz(2));
62 end
63
64 end

1 function PODgrammi(x, y, wf, u, k, I, J)
2
3     count1=0;
4     count2=0;
5     for i=1:size(u,3)
6         figure(3)
7         [Ca, ha]=contourf(x(:, :), y(:, :), wf(:, :, i), [ 0.0
8             0.1]);
9
10        [Med, apokUp, apokDo, SD, xa, ya]=Help1(Ca, k, I);
11
12        for temp1=1:size(xa,2)-1
13            if xa(temp1+1)>=xa(temp1)
14                xa(temp1+1)=xa(temp1)-0.00001;
15            end
16        end
17
18        if size(find(ya<-0.76))~=0
19            count1=count1+1;
20            continue
21        end
22
23        count2=count2+1;
24        xa(:)=xa(end:-1:1); ya(:)=ya(end:-1:1);
25
26        XI=linspace(-0.8,0.8,75);
27        YI(:, count2)=interp1(xa, ya, XI);
28
29        figure(2)
30        plot(XI, YI(:, count2))
31        %pause
32        clf
33    end
34    YI=YI';
35    plotp(XI, YI)
36    count1

```

```

34 count2
35 xlabel('x/h');
36 ylabel('y/h');
37 ylim([-0.8 0]);xlim([-0.8 0.8]);
38 set(0,'DefaultAxesFontSize',12)
39 set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 3.5
2.4])
40 set(gcf,'Units','inches','Position',[2 2 3.5 2.4])
41 end

1 function H = plotp(varargin)
2
3 switch nargin
4     case{1}
5         signal = varargin{1};
6         time = 1:size(signal,2);
7         prop = 'r-';
8         new_figure = true;
9     case{2}
10        time = varargin{1};
11        signal = varargin{2};
12        prop = 'r-';
13        new_figure = true;
14    case{3}
15        time = varargin{1};
16        signal = varargin{2};
17        prop = varargin{3};
18        new_figure = true;
19    case{4}
20        time = varargin{1};
21        signal = varargin{2};
22        prop = varargin{3};
23        new_figure = varargin{4};
24 end
25
26 if ischar(new_figure)
27     temp7 = regexpi(new_figure,'true');
28     if isempty(temp7)
29         new_figure = false;
30         H = get(0,'CurrentFigure');
31     else
32         new_figure = true;

```

```

33     end
34 elseif isnumeric(new_figure)
35     H = new_figure;
36     new_figure = false;
37 end
38
39 % prepare vectors for plotting
40 time2 = [time fliplr(time)];
41
42 sigm = nanmean(signal);
43 sigs = nanstd(signal);
44 sigms = [sigm-sigs fliplr(sigm+sigs)];
45
46 sigmin = nanmin(signal);
47 sigmax = nanmax(signal);
48 sigmm = [sigmin fliplr(sigmax)];
49
50 % check color
51 if strcmpi(prop(1), 'r')
52     c1 = [1 0 0];
53 elseif strcmpi(prop(1), 'g')
54     c1 = [0 1 0];
55 elseif strcmpi(prop(1), 'b')
56     c1 = [0 0 1];
57 else
58     c1 = [1 1 1];
59 end
60
61 color1 = c1 + .7*(1-c1);
62 color2 = c1 + .8*(1-c1);
63
64 %
65 if length(prop) == 1
66     prop(2) = '-';
67 end
68 if new_figure
69     H = figure;
70 else
71     figure(H);
72 end
73

```

```

74 whole_screen = get(0, 'ScreenSize');
75 % max figure size - add
76 fig_size = whole_screen + [-4 -4+2*32 +4+4 4+4-2*32];
77 set(H, 'OuterPosition', fig_size);
78
79 plot(time, sigm, prop, 'LineWidth', 1.5)
80 hold all
81 fill(time2(~isnan(sigms)), sigms(~isnan(sigms)), color1
    , 'EdgeColor', color1, 'FaceAlpha', 0.4);
82 %fill(time2(~isnan(sigmm)), sigmm(~isnan(sigmm)),
    color2, 'EdgeColor', color2, 'FaceAlpha', 0.3);
83 %legend(['Mean' {'\pm Stddev'}], 'Location', 'Best')

1 function [RSuu, RSvv, RSww, RSuv, RSuw, RSvw, tke] =
    ReynoldsStress(u, v, w, x, y, z)
2
3 [x, y, z, um, vm, wm] = getmean(x, y, z, u, v, w);
4 N = size(u, 3);
5 for i = 1:N
6     udot(:, :, i) = u(:, :, i) - um(:, :);
7     vdot(:, :, i) = v(:, :, i) - vm(:, :);
8     wdot(:, :, i) = w(:, :, i) - wm(:, :);
9 end
10 RSuu = zeros(size(um)); RSvv = zeros(size(vm)); RSww = zeros(
    size(wm));
11 RSuv = zeros(size(um)); RSuw = zeros(size(um)); RSvw = zeros(
    size(um));
12 for i = 1:N
13     RSuu = RSuu + udot(:, :, i).^2;
14     RSvv = RSvv + vdot(:, :, i).^2;
15     RSww = RSww + wdot(:, :, i).^2;
16
17     RSuv = RSuv + udot(:, :, i).*vdot(:, :, i);
18     RSuw = RSuw + udot(:, :, i).*wdot(:, :, i);
19     RSvw = RSvw + vdot(:, :, i).*wdot(:, :, i);
20 end
21 RSuu = RSuu/N; RSvv = RSvv/N; RSww = RSww/N;
22 RSuv = RSuv/N; RSuw = RSuw/N; RSvw = RSvw/N;
23 tke = 1/2*(RSuu+RSvv+RSww);
24 end

```