

ΕΡ&Σ



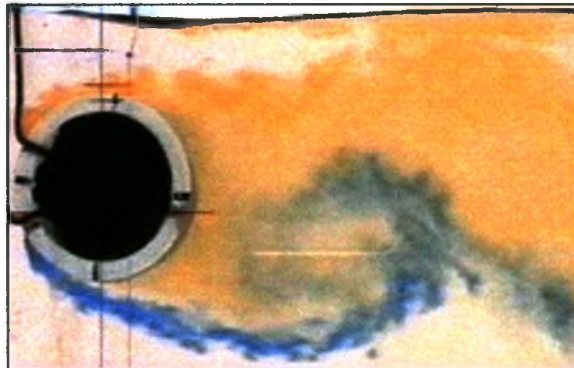
LFM&T

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΑΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Μεταπτυχιακή εργασία:

ΑΛΥΓΙΖΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Επιβλέπων :

Αναπληρωτής. Καθηγητής
ΣΤΑΠΟΥΝΤΖΗΣ ΕΡΡΙΚΟΣ

Βόλος, Ιανουάριος 2003



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 667/1
Ημερ. Εισ.: 23-06-2004
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
620.106 4
ΑΛΥ

004

Στην Οικογένεια μου

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000072599

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για τη συνεργασία και κυρίως για τη σωστή καθοδήγηση που μου έδωσε ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή, καθώς και για τη συνέπεια και το ενδιαφέρον το οποίο έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Να ευχαριστήσω επίσης για τη συμβολή τους, τους καθηγητές και μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Δρ. Ν. Βλάχο, Δρ. Β. Μποντόζογλου, Δρ. Ν. Πελεκάση και Δρ. Π. Παπανικολάου. Τον τελευταίο ευχαριστώ θερμά για την παραχώρηση σε μένα για μεγάλο χρονικό διάστημα του εργαστηρίου, του οποίου είναι υπεύθυνος.

Ακόμα, πρέπει να ευχαριστήσω το συνάδελφο και υποψήφιο διδάκτορα Κώστα Τσιγκλιφή για την πολύτιμη βοήθεια του στα υπολογιστικά ζητήματα και τη συμβολή του στα προγράμματα του Matlab.

Για την ηθική συμπαράσταση της καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής αυτής της εργασίας, εκφράζω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στην Ειρήνη Ραϊδη.

Τέλος, ευχαριστώ εκ βάθρων την οικογένεια μου για την υλική βοήθεια και την ψυχολογική συμπαράσταση καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1.ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΡΟΩΝ.....	4
2.2.ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ	12
2.3. ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΟΥ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ.....	14
2.3.1. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ‘ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗΣ’ ΡΟΗΣ	14
2.3.2. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ.....	16
2.3.3 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΡΟΗΣ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ.....	18
2.3.4 ΣΤΡΩΤΗ ΡΟΗ, L	18
2.3.5. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗΝ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ, TRW	22
2.3.6. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ, TRSL, Η ΥΠΟΚΡΙΣΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	23
2.3.7. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΑ ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ, TRBL, Η ΚΡΙΣΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	24
2.3.8. ΠΛΗΡΩΣ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ, T.....	26
2.3.9. ΔΥΝΑΜΗ ΤΩΝ ΔΙΝΩΝ	27
2.3.10. ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΝΩΝ ΣΤΟ ΑΠΟΡΕΥΜΑ	29
2.3.11. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	31
2.3.11.1. TRSL1	31
2.3.11.2. TRSL2	32
2.3.11.3. TRSL3	36
2.4. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΚΟΝΤΑ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΟΡΙΑ	40

2.5. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΚΟΝΤΑ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΝΕΡΟΥ – ΑΕΡΑ.....	42
2.6. ΔΙΑΧΥΣΗ ΒΑΘΜΩΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΠΙΣΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ.....	46
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	50
3.1. ΥΔΡΟΣΗΡΑΓΓΑ.....	50
3.1.1. ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΝΕΡΟΥ.....	50
3.1.2. ΑΝΤΛΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΡΟΟΜΕΤΡΟ.....	51
3.1.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	52
3.2. ΧΡΩΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	53
3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ (ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ).....	54
3.4. ΔΟΧΕΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΧΡΩΜΑΤΩΝ	55
3.5. ΣΩΛΗΝΑΚΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΧΡΩΜΑΤΩΝ	55
3.6 ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΜΕΡΑ ΚΑΙ ΦΩΤΙΣΜΟΣ	55
4.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	59
4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	59
4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	62
5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	70
5.1 ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΕΚΡΟΗΣ ΔΙΝΩΝ	72
5.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ D=50 mm, $R_e=10000$	72
5.1.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ D=30 mm, $R_e =6000$	88
5.1.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ D=13 mm, $R_e =2600$	102
5.2. ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΚΟΝΤΑ ΣΕ ΣΤΕΡΕΟ ΟΡΙΟ.....	108
5.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ D=50 mm, $R_e =10000$	108
ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ D=50 mm, $R_e = 10000$	143

5.2.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ $D=30\text{ mm}$, $Re = 6000$	147
ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ $D=30\text{ mm}$, $Re = 6000$	182
5.2.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΗΣ ΥΔΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ $D=30\text{mm}$ ΚΑΙ $Y/D=0$ (ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ).....	185
5.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ, ΣΤΗΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΣΤΕΡΕΟ ΟΡΙΟ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ $D=50\text{ mm}$ ΚΑΙ $Y/D=0$ (ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ).....	188
5.2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ, ΣΤΗΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΣΤΕΡΕΟ ΟΡΙΟ ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ $D=30\text{ mm}$ ΚΑΙ $Y/D=0$ (ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ).....	193
ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ 5.2.4 ΚΑΙ 5.2.5	198
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	199
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	201
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	206

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο γενικότερος σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η σύγκριση απορευμάτων που δημιουργούνται σε ελεύθερη παράλληλη ροή σε κανάλι νερού με εκείνα που δημιουργούνται κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια νερού – αέρα και νερού – στερεού τοιχώματος. Ειδικότερα η ανάπτυξη μεθοδολογίας ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, ώστε να διαλευκανθεί ο τρόπος με τον οποίο αναμιγνύεται ένα βαθμωτό μέγεθος στο απόρευμα μη αεροδυναμικού σώματος (π.χ. κύλινδρος) σε ελεύθερη ροή, σε ροή κοντά σε στερεό όριο και σε ροή κοντά σε διεπιφάνεια ήταν βασικός στόχος της εργασίας αυτής. Η βασική προσέγγιση ήταν με απεικόνιση της ροής μέσω, χρωστικών ουσιών σε νερό.

Για τη διεκπεραίωση των παραπάνω στόχων κατασκευάστηκαν κατάλληλα πειραματικά μοντέλα και αναπτύχθηκε υπολογιστική μέθοδος για την ψηφιακή ανάλυση εικόνας.

Αφού οι μετρήσεις καταγράφονταν από την βιντεοκάμερα, εισαγόταν με κατάλληλο πρόγραμμα επεξεργασίας βίντεο και εικόνας σε Η/Υ και με την βοήθεια της υπολογιστικής μεθόδου που αναπτύχθηκε παράγονταν τα τελικά αποτελέσματα.

Παρακολουθήθηκε η εξέλιξη του ροϊκού πεδίου πίσω από κυλίνδρους που ήταν τοποθετημένοι στο κέντρο ελεύθερης ροής, κοντά στην διεπιφάνεια νερού – αέρα και κοντά σε στερεό όριο (δάπεδο υδροσήραγγας). Επίσης έγινε μελέτη του αριθμού Strouhal, των μέσων τιμών έντασης ακτινοβολίας και τυπικής απόκλισης (rms) για δύο χρώματα (Μπλε, Κόκκινο), του συντελεστή ανάμειξης I_{mix} και του συντελεστή συσχέτισης A_{corr} για τις παραπάνω θέσεις. Από τις μετρήσεις και τον σχολιασμό των διαγραμμάτων των μεγεθών που μελετήθηκαν προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα που μας βοηθούν να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ανάμειξη κοντά σε διεπιφάνειες και στερεά όρια παρουσία μεγάλων στροβιλωδών δομών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η οπτικοποίηση της ροής αποσκοπεί στην κατανόηση της φυσικής της ροής σε ένα ικανό εύρος χώρου και χρόνου καθώς και στην ποσοτικοποίηση σημαντικών μεγεθών όπως η ταχύτητα, θερμοκρασία, συγκέντρωση κ.τ.λ. Η οπτικοποίηση μπορεί να γίνει είτε πειραματικά είτε με προσομοίωση (υπολογιστικά - θεωρητικά). Η οπτικοποίηση της ροής υπερέχει της σημειακής μέτρησης στο ότι ανακτώνται πληροφορίες σε όλο το πεδίο της ροής. Η ανάλυση του πεδίου ροής με οπτική μέθοδο μπορεί να είναι ποιοτική (παρατήρηση και καταγραφή) και ποσοτική (ψηφιακή ανάλυση εικόνας) κυρίως με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο γενικότερος σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η σύγκριση απορευμάτων που δημιουργούνται σε ελεύθερη παράλληλη ροή σε κανάλι νερού με εκείνα που δημιουργούνται κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια νερού – αέρα και νερού – στερεού τοιχώματος. Ειδικότερα η ανάπτυξη μεθοδολογίας ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, ώστε να διαλευκανθεί ο τρόπος με τον οποίο αναμειγνύεται ένα βαθμωτό μέγεθος στο απόρευμα μη αεροδυναμικού σώματος (π.χ. κύλινδρος) σε ελεύθερη ροή, σε ροή κοντά σε στερεό όριο και σε ροή κοντά σε διεπιφάνεια ήταν βασικός στόχος της εργασίας αυτής. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων κατασκευάστηκαν κατάλληλα πειραματικά μοντέλα και αναπτύχθηκε υπολογιστική μέθοδος για την ψηφιακή ανάλυση εικόνας.

Στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση ξεκινώντας με γενικές αρχές της οπτικοποίησης των ρευστών και ακολουθεί παρουσίαση θεωρίας για την ροή γύρω από κυλίνδρους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και γενικότερα όλες οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία των μετρήσεων (πειραματική μεθοδολογία) καθώς και η διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (υπολογιστική μεθοδολογία).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την ψηφιακή ανάλυση εικόνας για δύο αριθμούς Reynolds και επιλεγμένες θέσεις κοντά στην διεπιφάνεια και το δάπεδο της

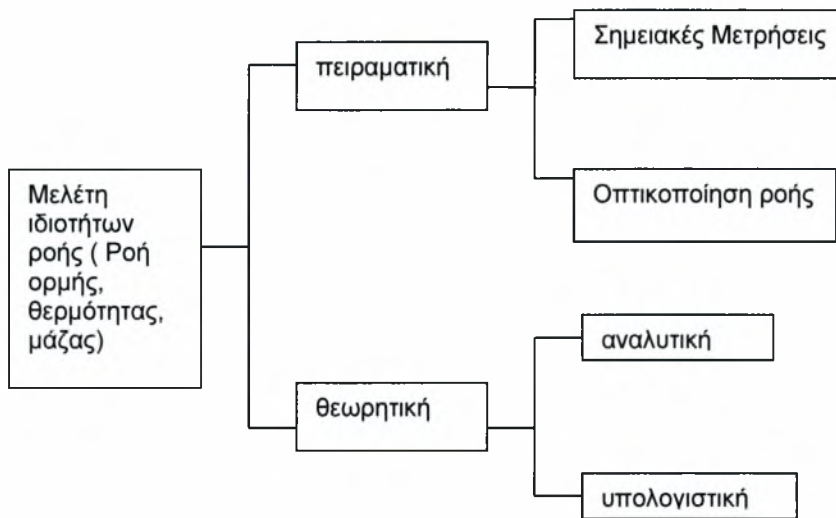
υδροσήραγγας. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Γενικές αρχές οπτικοποίησης ροών

Η ροή των ρευστών καθώς και η μεταφορά μάζας και θερμότητας πραγματεύονται με τη μεταφορά ροϊκών μεγεθών όπως ορμή, ενέργεια και μάζα. Τα φαινόμενα μεταφοράς μπορούν να εξεταστούν και θεωρητικά και πειραματικά.

Η πειραματική μελέτη της ροής μπορεί να γίνει με σημειακή μέτρησή της καθώς και με οπτικοποίηση της ενώ η θεωρητική προσέγγιση περιλαμβάνει ανάλυση και υπολογισμό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1. Μέθοδοι μελέτης ροϊκών φαινομένων [2]

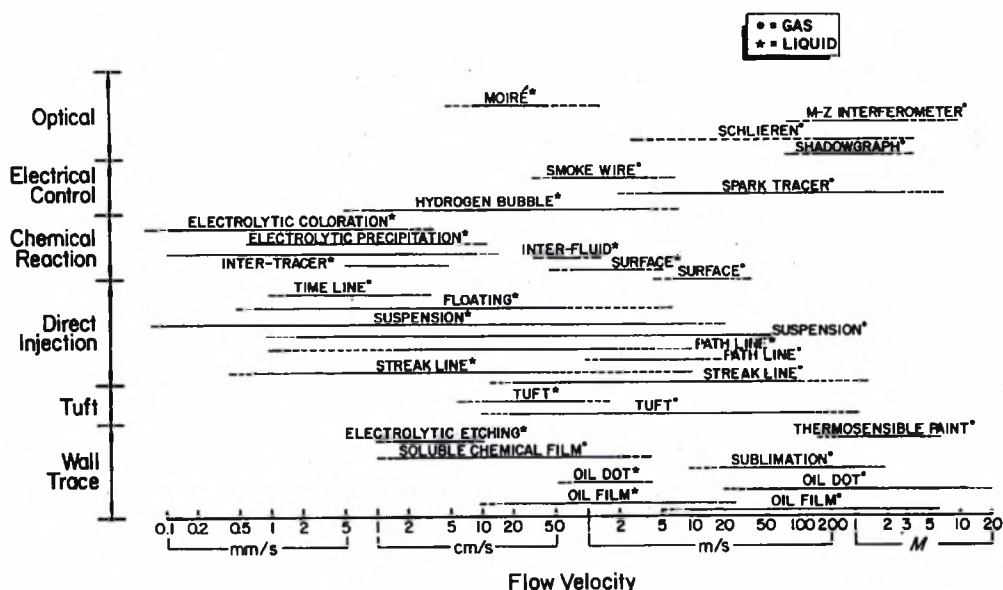
Η εργασία της οπτικοποίησης της ροής αποσκοπεί στο να κάνει ορατές τις διαδικασίες των φαινομένων μεταφοράς. Η οπτικοποίηση μπορεί να γίνει είτε πειραματικά είτε με προσομοίωση (θεωρητικά). Η οπτικοποίηση της ροής υπερέχει της μέτρησης στο ότι ανακτώνται πληροφορίες σε όλο το πεδίο της ροής. Το βασικό μειονέκτημα ήταν ότι οι πληροφορίες ήταν ποιοτικές αλλά σήμερα με την πρόοδο που έχει επιτευχθεί στον τομέα των υπολογιστών η οπτικοποίηση εισήλθε σε μια νέα εποχή ποσοτικοποίησης των πληροφοριών και έτσι το βασικό προαναφερθέν μειονέκτημα εξαλείφθηκε.

Για ευκολία οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην οπτικοποίηση της ροής ταξινομούνται σε συμβατικές και υποβοηθούμενες με υπολογιστή. Οι πρώτες αναφερόμενες ως πρώτης γενιάς μέθοδοι, περιλαμβάνουν όλες τις παραδοσιακές τεχνικές από την εποχή του Leonardo da Vinci (1452-1519). Αυτές ταξινομούνται σε τέσσερις ομάδες που φαίνονται στο σχήμα 2.2.

Method	Type
Wall tracing	Liquid film Sublimation Thermosensible paint Electrolytic etching Soluble chemical film
Tuft	Surface tuft Tuft grid Depth tuft
Tracer	
Direct injection	Solid particles Liquids Gases
Chemical reaction	Chemical Electrolytic Photochemical
Electrical	Hydrogen bubble Spark Smoke wire
Optical	Shadowgraphy Schlieren Interferometry Holography Stream birefringence Moiré Liquid crystal

Σχήμα 2.2. Συμβατικές μέθοδοι οπτικοποίησης ροών [2]

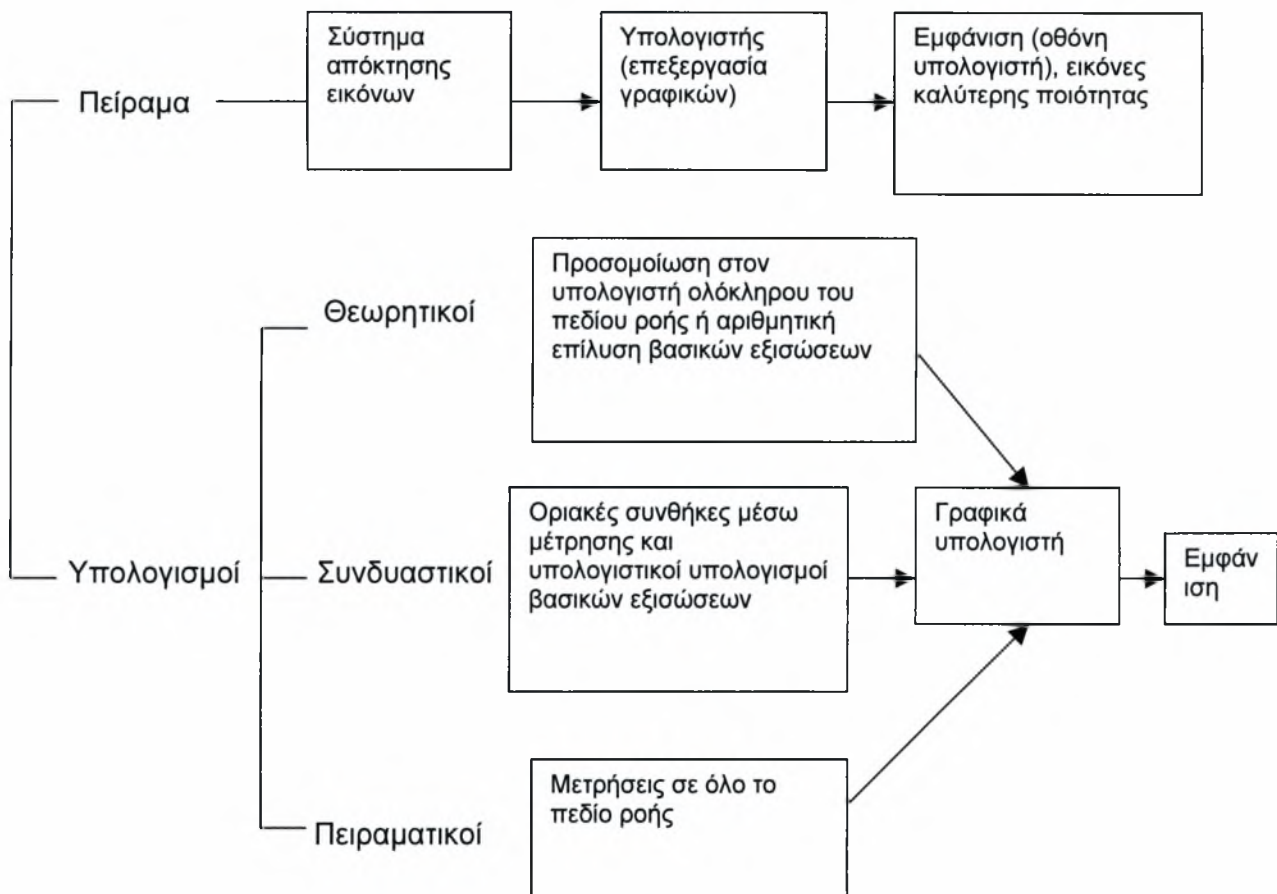
Η κατάλληλη περιοχή (εύρος ταχυτήτων) της ροής που εφαρμόζεται κάθε μέθοδος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (2.3).



Σχήμα 2.3. Κατάλληλες περιοχές ταχυτήτων για κάθε μέθοδο οπτικοποίησης [2]

Ένας βασικός σκοπός της έρευνας πάνω στην οπτικοποίηση είναι η επέκταση αυτής της περιοχής και σε χαμηλές και σε υψηλές ταχύτητες.

Σε γενικές γραμμές διάφορες ουσίες εισάγονται στο ροϊκό πεδίο ως ένα αντιπαραβάλον μέσο για να διακρίνουμε αυτό που θέλουμε να παρατηρήσουμε. Πολύ συχνά το ροϊκό πεδίο πρέπει να φωτιστεί ώστε να επιτύχουμε καλύτερη ευκρίνεια και αντίθεση. Στη συνέχεια η εικόνα εκθέτεται σε κατάλληλη μορφή. Αυτή η διαδικασία συνήθως ακολουθείται στις συμβατικές μεθόδους και η αποκτηθείσα εικόνα παρέχει μόνο ποιοτικές πληροφορίες για το ροϊκό πεδίο. Στην περίπτωση των μεθόδων υποβοηθούμενων με υπολογιστή η προαναφερθείσα διαδικασία ονομαζόμενη ως δημιουργία εικόνας (image formation) ακολουθείται από ψηφιακή επεξεργασία για ποιοτικότερη απεικόνιση της εικόνας. Πρόσφατες πρόοδοι στις υπολογιστικές τεχνικές και στα γραφικά έχουν δώσει νέα ώθηση στον τομέα της οπτικοποίησης. Αποτελέσματα που αποκτώνται βάσει θεωρίας και μετρήσεων μπορούν να παρουσιαστούν χρησιμοποιώντας τα χρώματα ως παραμετρικές μεταβλητές. Επίσης τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να αποθηκευτούν στον υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι υποβοηθούμενες με υπολογιστή μέθοδοι.



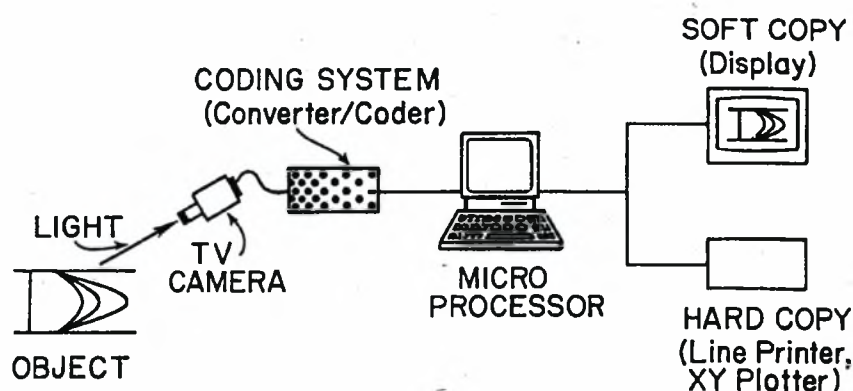
Σχήμα 2.4. Υποβοηθούμενες με υπολογιστή μέθοδοι οπτικοποίησης ροών [2]

Στον πίνακα (2.1) που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διαφορές στις μεθόδους οπτικοποίησης πρώτης και δεύτερης γενιάς.

Πρώτης Γενιάς	Δεύτερης Γενιάς
Παραδοσιακές τεχνικές	Υποβοηθούμενες με υπολογιστή
Ποιοτικές πληροφορίες	Ποσοτικές πληροφορίες
Αντιπαραβάλλοντα μέσα για οπτικοποίηση	Καταγραφή, έκθεση και αποθήκευση για περαιτέρω επεξεργασία
Καταγραφή και έκθεση	Χρώματα ως παραμετρικές μεταβλητές

Πίνακας 2.1. Μέθοδοι οπτικοποίησης πρώτης και δεύτερης γενιάς [2]

Στο παρακάτω σχήμα (2.5) παρουσιάζεται ένα σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας

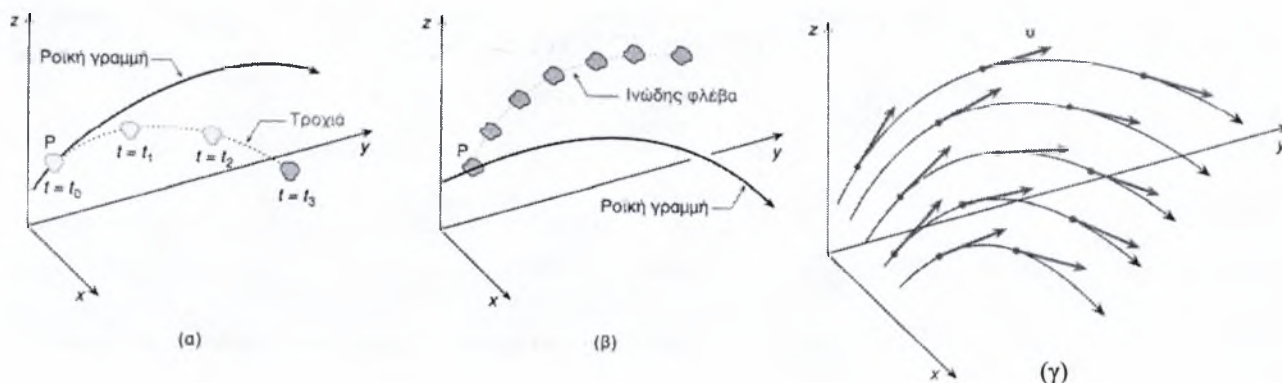


Σχήμα 2.5. Σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας [2]

Η μονάδα εισόδου αποτελείται από μια κάμερα και μια μονάδα κωδικοποίησης. Η μονάδα λειτουργεί έτσι ώστε να μετατρέπει την εικόνα ενός αντικειμένου σε σήμα. Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής αναγνωρίζει και αναλύει το σήμα (πληροφορία). Επίσης χρειάζεται και μια μονάδα εξόδου για να εξαχθούν και τα απαραίτητα συμπεράσματα μετά την επεξεργασία στον υπολογιστή.

Τρεις παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη στη διάρκεια της παρατήρησης μας στο πεδίο ροής : το κινούμενο σωματίδιο (tracer) P_i , η θέση του στο χώρο Q και ο χρόνος t_i . Από τη συμπεριφορά του κινούμενου στοιχείου μπορούμε να εξάγουμε τρεις φυσικές ποσότητες.

1. Τροχιά: είναι η διαδρομή την οποία ακολουθεί ένα συγκεκριμένο σωματίδιο του ρευστού καθώς αυτό κινείται μέσα στο πεδίο ροής, για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα Δt .
2. Ινώδης φλέβα: είναι η νοητή γραμμή πάνω στην οποία βρίσκεται το σύνολο των σωματιδίων του ρευστού τα οποία πέρασαν, πριν από μια δεδομένη χρονική στιγμή t , από ένα ορισμένο σημείο του πεδίου ροής.
3. Ροϊκή γραμμή: ονομάζεται κάθε γραμμή η οποία έχει την ιδιότητα η επαπτομένη σε κάθε σημείο της να συμπίπτει με τη διεύθυνση της ταχύτητας του ρευστού σε εκείνο το σημείο, μια δεδομένη χρονική στιγμή t .



Σχήμα 2.6. Γραφική απεικόνιση (α) τροχιάς, (β) ινώδους φλέβας και (γ) ροϊκών γραμμών [1]

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν δείκτες για οπτικοποίηση σε νερό ή άλλο υγρό είναι πολλοί και διαφορετικής φύσεως. Κατά την εφαρμογή αυτών των μεθόδων πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να μην υπάρχει ασυμφωνία στις τροχιές μεταξύ στοιχείων ρευστού και στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την οπτικοποίηση. Πρέπει δηλαδή οι δείκτες να αντιπροσωπεύουν στη συμπεριφορά τους μέσα στο πεδίο ροής τα στοιχεία του ρευστού. Αυτό κυρίως αφορά στοιχεία που έχουν διαφορετική πυκνότητα και ιξώδες από το ρευστό της ροής. Επίσης έχοντας διαφορετικές διαμέτρους υπόκεινται σε διάφορες επιδράσεις. Ακόμη δέχονται βαρυτικές και κεντρομόλες δυνάμεις.

Ενώ στη στρωτή περιοχή μιας χρονικά σταθερής ροής οι τροχιές και γραμμές εκπομπής των δεικτών συμπίπτουν με τις ινώδους φλέβες, αυτό δεν ισχύει σε μια ασταθή ροή ή στην τυρβώδη περιοχή μιας ροής. Αν όμως ληφθούν οι απαραίτητες προφυλάξεις οι δείκτες μπορούν να δώσουν μια σωστή εικόνα (στιγμιαία).

Οι βασικοί υγροί ανιχνευτές (tracers) που χρησιμοποιούνται στο νερό είναι οι ακόλουθοι:

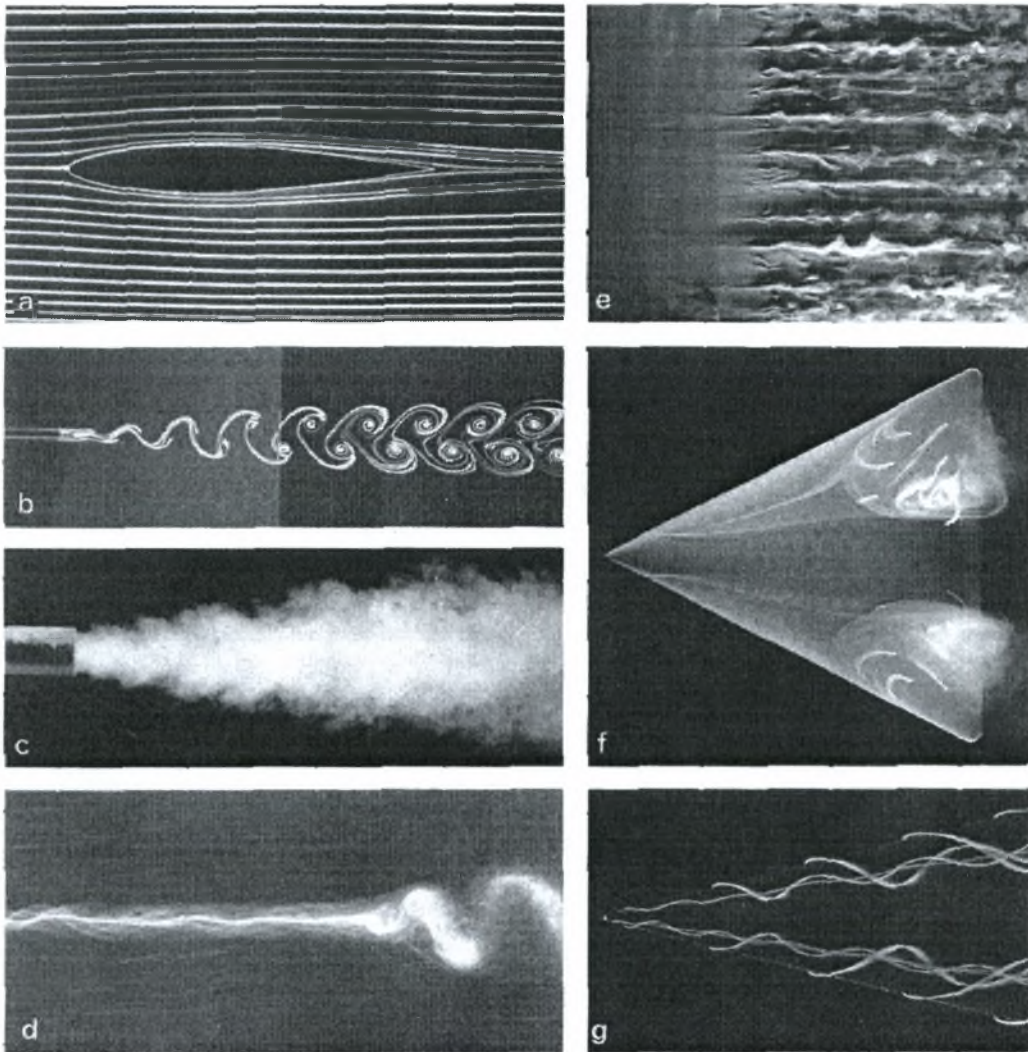
- διάλυμα γάλατος (μείγμα γάλατος, αλκοόλ και βαφής της οποίας η πυκνότητα και το ιξώδες είναι παρόμοια με αυτά του νερού).
- διαλυμένο rhodorsil (σταθερό λευκό μείγμα που αντικατέστησε το γάλα στα 1979)
- φθορίζουσες βαφές

•ουσίες όπως μελάνι, διαφημιστικές βαφές, βενζίνη, τετραχλωρίδιο του άνθρακα και υπερμαγγανικό κάλιο

Οι δέσμες βαφής εκπέμπονται από κάποιο κεκλιμένο επίπεδο αντίθετα προς τη ροή ή από τα ίδια τα μοντέλα σε συγκεκριμένα σημεία πάνω στην επιφάνειά τους.

Σε μια σταθερή ροή οι δέσμες βαφής μπορούν να αποκαλύψουν τις ινώδεις φλέβες της ροής, τον άξονα των στροβίλων και την δομή, την ροή στο τοίχωμα με τις ιδιομορφίες και τα χαρακτηριστικά της αποκόλλησης.

Στην τυρβώδη ροή αυτή η μέθοδος διατηρείται αποτελεσματική παρά τη γρήγορη διάχυση της βαφής. Όταν η ροή γίνεται μη σταθερή η βαφή σχηματίζει μόνο γραμμές εκπομπής οι οποίες παρόλα αυτά αποκαλύπτουν τη στιγμιαία μορφή της ροής, συγκεκριμένα τον ολκό, τα jet (τζετ) και τις δίνες. Για να διακρίνουμε πιο τυχαία (random) φαινόμενα όπως τον σχηματισμό περιοχών τύρβης κάτω από μεταβατικές συνθήκες συνήθως εκπέμπεται από μια σχισμή ένα συνεχές χρωματισμένο στρώμα ώστε να καλύπτει όλο το μοντέλο (σχήμα 2.7.e).



Σχήμα 2.7. Οπτικοποίηση ροών με εκπομπή μπογιάς [2], (α) Streamlines γύρω από αεροτομή, (β) Δίνες von Karman πίσω από επίπεδη πλάκα, (γ) Ροή μεμονωμένου jet, (δ) Ελικοειδής καταστροφή μεμονωμένης δίνης, (ε) Μετάβαση οριακού στρώματος σε επίπεδη πλάκα, (φ) Τρισδιάστατη ροή σε πτέρυγα δέλτα, (γ) Δομές δινών σε λεπτή πτέρυγα δέλτα

Ίσως η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος οπτικοποίησης στο νερό είναι αυτή με τις φθορίζουσες βαφές (και πιθανά οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες βαφές είναι η Ροδαμίνη – Β και η Φλουορεσίνη). Αυτές προτιμούνται επειδή παρέχουν εικόνες υψηλής αντίθεσης (high – contrast pictures). Ο χώρος όπου γίνεται η οπτικοποίηση φωτίζεται με κατάλληλες

πηγές φωτός (Laser, λάμπες φθορισμού) που διεγείρουν τις φθορίζουσες βαφές.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την επεξεργασία εικόνων που έχουν ληφθεί με αυτή τη μέθοδο ιδίως στην περίπτωση που συμβαίνει ανάμειξη. Στην περίπτωση αυτή η χρωματισμένη περιοχή δεν αντιπροσωπεύει την περιοχή του αρχικά χρωματισμένου ρευστού αλλά την περιοχή της ανάμιξης χρωματισμένου και περιβάλλοντος ρευστού.

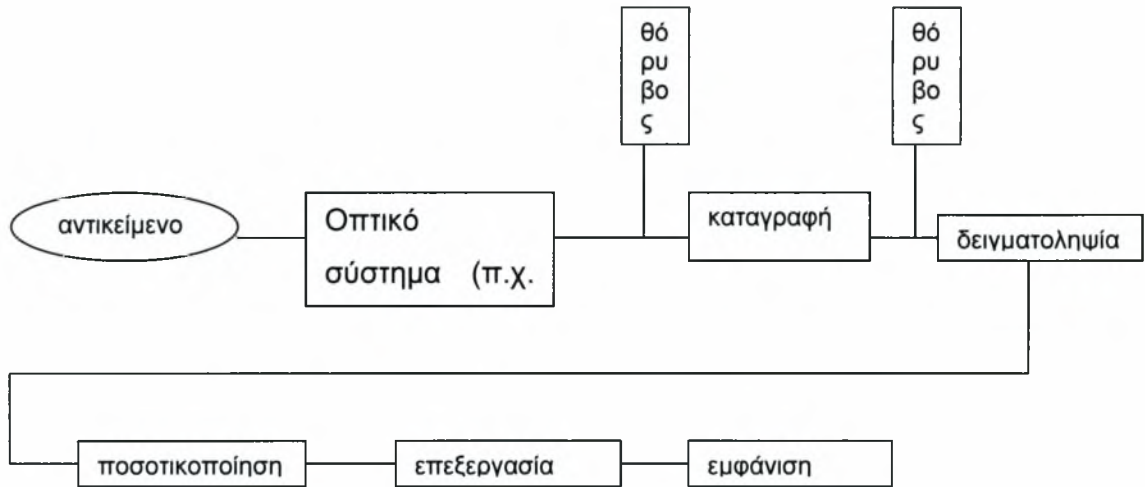
2.2. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας στην οπτικοποίηση ροής

Η οπτικοποίηση ροής βασίζεται στην αλληλεπίδραση του φωτός και των γεγονότων (πειραμάτων). Οι διάφορες μέθοδοι οπτικοποίησης αποσκοπούν στο να κάνουν ορατές τις μεταβολές που συμβαίνουν στην ταχύτητα, πυκνότητα, πίεση και θερμοκρασία (οι μεταβολές αυτές επιφέρουν μεταβολές σε χαρακτηριστικά μεγέθη του φωτός τα οποία τελικά με την κατάλληλη κατά περίπτωση ανάλυση που εξαρτάται από τη μέθοδο οπτικοποίησης μας δίνουν και τις τελικές πληροφορίες που χρειαζόμαστε).

Με τις κλασικές μεθόδους οπτικοποίησης μπορούμε να πάρουμε καλές πληροφορίες για διδιάστατες ροές εφόσον ο φωτισμός παρέχεται σε ένα λεπτού πάχους επίπεδο υπολογίζοντας τη διασπορά της ακτινοβολίας από μεταβολές που προέρχονται από π.χ. μεταβολές της πυκνότητας των στοιχείων. Στην περίπτωση της πλήρως τριδιάστατης ροής εάν η ροή προβάλλεται πάλι σε ένα επίπεδο η εικόνα που λαμβάνουμε δεν μπορεί να αποδώσει με σαφήνεια τις χωρικές δομές της ροής.

Η ποσοτική πληροφορία που παρέχει μια εικόνα εκφράζεται μέσω μιας τιμής που έχει κάθε pixel (pixel είναι το ελάχιστο στοιχείο της ψηφιακής εικόνας). Η τιμή αυτή λαμβάνει τιμές μεταξύ 0-256 όσα είναι και τα γκρι επίπεδα (gray levels) μιας μη εγχρωμης εικόνας και 0-256 (Red), 0-256 (Green), 0-256 (Blue) για έγχρωμη εικόνα (RGB). Οι συγκρίσεις κάποιου μεγέθους του πεδίου ροής (χωρικά) γίνονται βάσει των τιμών αυτών στα διάφορα pixel της εικόνας. Η χρονική επεξεργασία του πεδίου απαιτεί πλήθος διαδοχικών εικόνων και η χωροχρονική μελέτη του πεδίου απαιτεί στατιστική επεξεργασία των τιμών των διάφορων pixel.

Στο σχήμα 2.8 φαίνεται η διαδικασία απόκτησης δεδομένων μέσω της οπτικοποίησης.



Σχήμα 2.8. Διαδικασία απόκτησης δεδομένων μέσω της οπτικοποίησης. [8]

Όπως φαίνεται και από το σχήμα σε σημεία της διαδικασίας εισάγεται θόρυβος (ο οποίος είναι αποτέλεσμα των συσκευών που χρησιμοποιούνται, όπως η κάμερα, τα αποθηκευτικά μέσα κ.α. και δεν είναι δυνατόν να αποφευχθεί) ο οποίος δεν ακολουθεί πάντοτε γραμμικό νόμο (αν και στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται αυτή η υπόθεση). Επίσης πολλές φορές ο φωτισμός δεν είναι απόλυτα ομοιόμορφος, η ρύθμιση του λείζερ δεν είναι απόλυτα σωστή και τελικά έχουμε εισαγωγή και ενίσχυση σφαλμάτων (μέσω της ψηφιοποίησης) οπότε απαιτούνται κάποιες διορθωτικές κινήσεις στο στάδιο της επεξεργασίας των εικόνων. Πιο συγκεκριμένα στα προγράμματα επεξεργασίας εικόνων υπάρχουν κάποιες λειτουργίες (π.χ. edge enhancement, line detection, filtering αναφερόμενες συνολικά ως convolution operations) οι οποίες διορθώνουν τα παραπάνω προβλήματα. Η τελική στατιστική επεξεργασία πραγματοποιείται πάνω στις 'διορθωμένες' εικόνες.

2.3 Ροή ρευστού γύρω από κυλινδρικά σώματα

2.3.1. Περιοχές 'διαταραγμένης' ροής

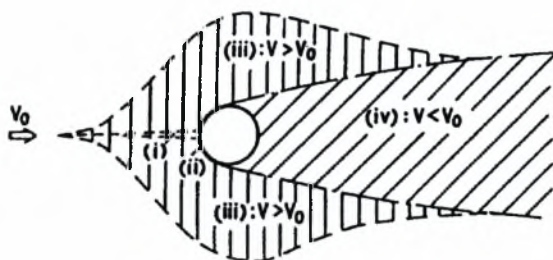
Όταν ένα ρευστό ρέει κατά μήκος (το ρευστό περιβάλλει ολόκληρο το σώμα) ενός σταθερού (στερεωμένο με κάποιο τρόπο ώστε να μην παρασύρεται από την κίνηση του ρευστού) σώματος ή αντίστοιχα όταν ένα σώμα κινείται μέσα σε ένα ηρεμούν ρευστό, μια περιοχή διαταραγμένης ροής σχηματίζεται σχεδόν πάντα γύρω από το σώμα. Η έκταση της περιοχής της διαταραγμένης ροής εξαρτάται από το σχήμα, τον προσανατολισμό και το μέγεθος του σώματος καθώς και της ταχύτητας και του ιξώδους του ρευστού και επηρεάζεται από μια μεγάλη ποικιλία μικρών διαταραχών.

Συνήθως μια μεγάλη και μη στρωτή αποκολλημένη ροή δημιουργείται από τα λεγόμενα μη αεροδυναμικά σώματα (bluff bodies). Αυτά τα σώματα μπορεί να έχουν οξείες ακμές στην περιφέρειά τους, όπως επίπεδες πλάκες, τριγωνικοί και ορθογωνικοί κύλινδροι ή μπορεί να έχουν στρογγυλεμένα άκρα όπως κυλινδρικοί και ελλειπτικοί κύλινδροι. Όταν οι κύλινδροι έχουν οξείες άκρες η αποκόλληση της ροής συμβαίνει στα δύο αυτά οξεία άκρα. Όταν όμως ο κύλινδρος είναι στρογγυλεμένος το σημείο αποκόλλησης μετατοπίζεται και προσαρμόζεται ανάλογα με τη δομή της ροής στην αποκολλημένη περιοχή.

Οι διαταραγμένες ροές γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες παρά τις διαφορές στο σχήμα και στο αν έχουν στρογγυλεμένα άκρα ή όχι. Το κοινό στοιχείο είναι η ανάπτυξη όμοιων δομών ροής στην περιοχή αποκόλλησης. Θα ήταν επιθυμητό η ροή γύρω από τέτοια σώματα να αντιμετωπίζεται γενικά με τα συγκεκριμένα σχήματα ως χαρακτηριστικά παραδείγματα, αλλά αυτό δεν είναι εφικτό μέχρι σήμερα γιατί οι περισσότερες μελέτες έχουν γίνει για κυκλικούς κυλίνδρους και επαρκείς πληροφορίες έχουμε μόνο για αυτούς.

Η 'διαταραγμένη' ροή χαρακτηρίζεται από μεταβολή της τοπικής ταχύτητας με την διεύθυνση και τον χρόνο. Η τοπική χρονική-μέση ταχύτητα μπορεί να είναι μεγαλύτερη, ίση ή και μικρότερη της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος. Το σχήμα (2.9) δείχνει την υποδιαίρεση του πεδίου ροής της διαταραγμένης ροής σε τέσσερις περιοχές:

- i) μια στενή περιοχή επιβράδυνσης της ροής
- ii) δύο οριακά στρώματα προσκολλημένα στην επιφάνεια του κυλίνδρου
- iii) την πλευρική ροή
- iv) μια πλατιά περιοχή (που συνήθως σχηματίζεται πίσω από τον κύλινδρο) αποκολλημένης ροής που ονομάζεται ολκός ή απόρευμα (wake).



Σχήμα 2.9. Μέσες περιοχές πεδίου διαταραγμένης ροής [3]

Η περιοχή (i) του σχήματος (2.9) έχει προσελκύσει λιγότερη έρευνα παρά τις μεγάλες διακυμάνσεις στην ταχύτητα που αυξάνουν σημαντικά, τοπικά την μεταφορά θερμότητας. Η ενυπάρχουσα ασταθής επιβραδυνόμενη (retarded) ροή μπορεί να σχηματίζει τρισδιάστατες ασταθείς ροϊκές δομές στη διεύθυνση της ροής.

Τα οριακά στρώματα γύρω από τον κύλινδρο υπόκεινται σε μια ευνοϊκή ($dP/dS < 0$) κλίση πίεσης ενώ ακολουθεί μια σχετικά μικρή περιοχή όπου έχουμε αναστροφή της κλίσης πίεσης ($dP/dS > 0$) πριν την αποκόλληση. Τα αποκολλημένα οριακά στρώματα συνεχίζουν να αναπτύσσονται στην κατεύθυνση του ρεύματος (downstream) ως ελεύθερα διατμητικά στρώματα και αρχίζουν να προσεγγίζουν την περιοχή του ολκού.

Η έκταση της μετατοπισμένης ροής (iii) εξαρτάται και από την αλληλεπίδραση με τα τοιχώματα του καναλιού της υδροσήραγγας ή αεροσήραγγας.

Η περισσότερη έρευνα για μη αεροδυναμικά σώματα έχει επικεντρωθεί στην περιοχή του ολκού. Μεγάλες δομές ροής σχηματίζονται κοντά στον ολκό και σταδιακά αποσβένονται καθώς απομακρυνόμαστε κατά μήκος του. Ο σχηματισμός και η απόσβεση των δομών της ροής στον ολκό εξαρτώνται από

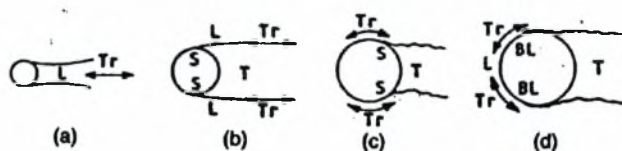
την κατάσταση της ροής η οποία μπορεί να είναι στρωτή, μεταβατική ή τυρβώδης.

2.3.2. Μετάβαση σε διαταραγμένες περιοχές

Ο Reynolds (1883) ανακάλυψε ότι η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή σε ένα λείο σωλήνα εξαρτάται από την πυκνότητα του ρευστού, το ιξώδες του, την ταχύτητα V και την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα d . Η αδιάστατη παράμετρος $\rho V d / \mu$ καλείται αριθμός Reynolds και εκφράζει την αναλογία των δυνάμεων αδρανείας προς τις δυνάμεις ιξώδους. Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη περιοχή λαμβάνει χώρα μέσα σε μια περιοχή αριθμών Reynolds. Ο μικρότερος και μεγαλύτερος αριθμός αυτής της μεταβατικής περιοχής καλούνται κρίσιμοι Re_{c1} και Re_{c2} .

Ο Rayleigh (1896) εφάρμοσε διαστατική ανάλυση και επέκτεινε τη χρήση του αριθμού Reynolds σε ροή γύρω από σφαίρες και κυλίνδρους. Η εξωτερική διάμετρος του κυλίνδρου ήταν το χαρακτηριστικό μήκος. Οι τιμές του αριθμού Reynolds ποικίλουν από μικρότερες της μονάδας μέχρι εκατό σε λεπτές ίνες σε υγρά, από μερικές εκατοντάδες σε χιλιάδες σε λεπτά σύρματα και καλώδια στον άνεμο και από μερικά εκατομμύρια σε καπνοδόχους μέχρι εκατοντάδες εκατομμύρια σε πύργους ψύξης.

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της ροής γύρω από όλα τα μη αεροδυναμικά σώματα αρχικά επισημάνθηκε από τον Dryden (1941) και αργότερα μελετήθηκε περαιτέρω από τους Roshko και Fiszdon (1969). Αυτό ήταν η αλληλουχία σε μεταβατικές καταστάσεις σε διάφορες περιοχές της διαταραγμένης ροής. Στο σχήμα (2.10) φαίνεται η ανάπτυξη αυτών των μεταβατικών περιοχών με τον Re σε τρεις διαταραγμένες περιοχές: α) ολκός (TrW), β) shear layers ($TrSL$) και γ) οριακά στρώματα ($TrBL$).



(a) TrW , (b) $TrSL$, (c), (d) $TrBL$ (BL=boundary layer, L=laminar, T=turbulent, Tr=transition S=separation)

Σχήμα 2.10. Μετάβαση σε διαταραγμένες περιοχές [3]

Κάθε μετάβαση είναι ευαίσθητη σε μικρές διαταραχές διαφόρων ειδών. Αυτές οι διαταραχές μπορούν να ξεκινήσουν μετάβαση σε μικρότερους Re_c και κάποιες φορές να διαμορφώσουν τις δομές ροής που προκύπτουν. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός Re είναι 'βασικός' παράγοντας μόνο όταν η ροή γύρω από τον κύλινδρο είναι ελεύθερη διαταραχών.

Η πρώτη μετάβαση TrW που φαίνεται στο σχήμα 2.10(a) πραγματοποιήθηκε στον ολκό σε μια περιοχή Re μιας τάξης μεγέθους μικρότερης από ότι στα πειράματα σε σωλήνες και ανακαλύφθηκε από τον Roshko (1954). Τύρβη αναπτύχθηκε και εξαπλώθηκε σε όλον τον ολκό, αλλά τα ελεύθερα διατμητικά στρώματα κοντά στον ολκό παρέμειναν στρωτά.

Η δεύτερη μετάβαση $TrSL$, σχήμα 2.10(b) συνέβη στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα. Για πρώτη φορά το φαινόμενο παρατηρήθηκε από τον Linke (1931) και εξετάστηκε σε λεπτομέρεια από τους Bloor (1964) και Gerrard (1965). Η ζώνη μετάβασης μετακινήθηκε αυξανόμενου αριθμού Re κατά μήκος των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων προς την αποκόλληση και επηρέασε το μήκος και πλάτος του ολκού.

Η τρίτη μετάβαση επεκτείνεται στα οριακά στρώματα σε αποκόλληση, σχήμα 2.10(c). Το $TrBL$ ιστορικά ανακαλύφθηκε πρώτο και από τότε έχει μελετηθεί εκτεταμένα. Μια απότομη μείωση της οπισθέλκουσας ανακαλύφθηκε σε πειράματα που έγιναν σε σφαίρες σε νερό από τον Costanzi (1912) και στον αέρα από τον Eiffel (1912) περίπου σε $Re = 120000$. Wieselberger (1914) και Prandtl (1961) έδειξαν ότι η 'κρίση' στην οπισθέλκουσα σχετίζεται με την μετάβαση στα οριακά στρώματα σε αποκόλληση. Ο Taylor (1916) ανακάλυψε μια δραστική αλλαγή στην κατανομή πίεσης γύρω από κυλινδρικό κύλινδρο για $Re = 150000$ και απέδωσε αίτια όμοια με αυτά των σφαιρών. Μεταγενέστεροι ερευνητές σταδιακά αποκάλυψαν μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ αποκόλλησης και μετάβασης που έχει σαν αποτέλεσμα διαφορετικές δομές ροής μέχρι που το οριακό στρώμα τελικά γίνεται πλήρως τυρβώδες πριν τη γραμμή αποκόλλησης.

Η μετάβαση στα οριακά στρώματα συνεχίζει να μετακινείται προς το σημείο ανακοπής με αυξανόμενο Re όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10(d). Στο επάνω τέλος (end) του $TrBL$, η μετάβαση φτάνει την περιοχή επιβράδυνσης (retarded) της ροής και αυτό είναι το τέλος της τρίτης και τελικής μετάβασης

επειδή όλες οι περιοχές της διαταραγμένης ροής είναι πλήρως τυρβώδης. Ανακεφαλαιώνοντας ίσως πρέπει να ξαναειπωθεί ότι οι στρωτές και πλήρως τυρβώδης καταστάσεις της ροής σε κυκλικούς κυλίνδρους διαχωρίζονται από τρεις διακριτές μεταβατικές καταστάσεις που λαμβάνουν χώρα διαδοχικά σε διαφορετικές περιοχές διαταραχής.

2.3.3 Περιοχές ροής χωρίς διαταραχές

Συσσωρευμένες πειραματικές παρατηρήσεις έχουν αποκαλύψει μια μεγάλη ποικιλία τακτικών και μη ροϊκών μοτίβων κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης και εξασθένησης των διαταραγμένων δομών ροής. Για να διακρίνουμε αυτά τα ροϊκά μοτίβα που προκύπτουν μέσα σε ένα εύρος αριθμών Re είναι απαραίτητη μια ταξινόμηση σε περιοχές ροής (flow regimes). Η αρχή και το τέλος των περιοχών αυτών καθορίζονται από τιμές του αριθμού Re όπως προτάθηκε από τον Morkovin (1964).

Η κατάσταση της ροής μπορεί να είναι πλήρως στρωτή, μία από τις τρεις μεταβατικές TrW , $TrSL$, $TrBL$ ή πλήρως τυρβώδης T . Κάθε κατάσταση μπορεί να περιγραφεί από όσες περιοχές είναι απαραίτητες για την παρατήρηση των διάφορων δομών ροής.

2.3.4 Στρωτή ροή, L

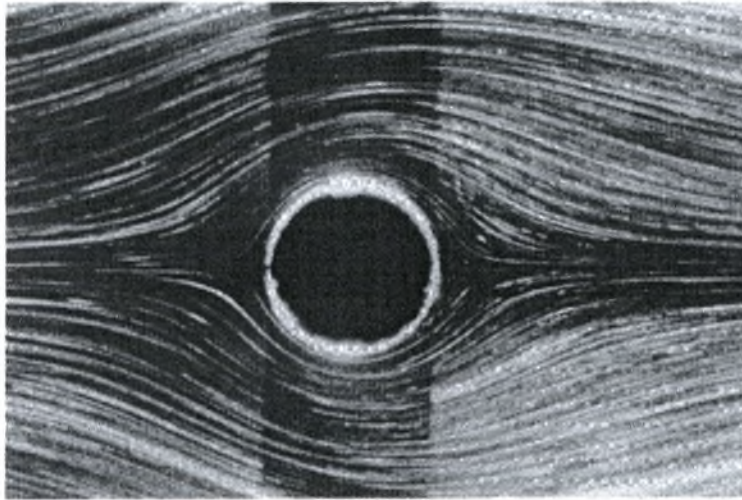
Η στρωτή ροή μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις βασικές περιοχές ροής:

$L1$: έρπουσα ροή ή non-separation regime $0 < Re < 4$ με 5

$L2$: σταθερής αποκόλλησης ή closed near wake 4 με $5 < Re < 30$ με 48

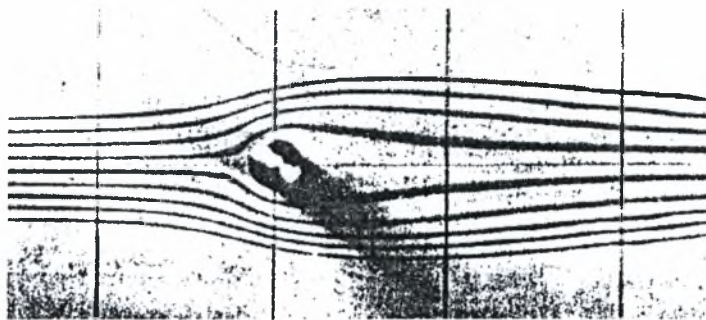
$L3$: περιοδική στρωτή περιοχή 30 με $48 < Re < 180$ με 200

Όπως φαίνεται και στο σχήμα (2.11) η έρπουσα ροή είναι σταθερά προσκολλημένη σε όλη τη περιφέρεια του κυλίνδρου.



Σχήμα 2.11. Έρπουσα ροή σε κύλινδρο, $Re=1$. [3]

Η αποκόλληση αρχίζει για $Re=4$ με 5 όπου ένα σταθερό συμμετρικό και διακριτό απόρρευμα σχηματίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα (2.12).



Σχήμα 2.12. Σταθερό συμμετρικό και διακριτό απόρρευμα, $Re=23$. [3]

Η ταχύτητα κατά μήκος του άξονα του κοντινού απορρεύματος συνήθως είναι μιας τάξης μεγέθους μικρότερη από αυτή του ελεύθερου ρεύματος. Η επιμηκυσμένη (elongated) περιοχή σταθερής αποκόλλησης (closed near wake) γίνεται ασταθής για $Re>30-48$ και μια ημιτονοειδής ταλάντωση των διατμητικών στρωμάτων αρχίζει στο σημείο σύγκλισης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13(α). Η αφ' εαυτής έναρξη της ταλάντωσης είναι ευαίσθητη σε διαταραχές και ο Re_{osc} εξαρτάται κατά περίπτωση από την πειραματική διάταξη. Το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνεται με αύξηση του Re και για

$Re > 45-65$ και τα διατμητικά στρώματα σχηματίζουν κορυφές (crests) και αυλάκια (troughs) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13(b). Ως τελικό αποτέλεσμα έχουμε μια διάταξη στρωτών δινών που εναλλάσσεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13(c).



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 2.13. Στρωτό περιοδικό απόρρευμα , (a) $Re=54$, (b) $Re=65$, (c) $Re=102$. [3]

Ο Benard (1908) ήταν ο πρώτος που σχεδίασε την προοδευτική εναλλαγή των δινών πίσω από ένα σταθερό κυλινδρικό κύλινδρο στο νερό, σχήμα 2.14(a) βασιζόμενος σε ορατούς λάκκους (dimples) στην επιφάνεια του νερού, σχήμα 2.14(b). Ο Karman (1911) μελέτησε τη σταθερότητα δυο σειρών δινών (vortices) θεωρητικά και από τότε δημιουργήθηκε μεγάλο ενδιαφέρον για το φαινόμενο. Η εναλλαγή αυτή των δινών στον στρωτό ολκό (laminar wake) ονομάζεται Karman - Benard street. Οι δίνες αυτές αναπτύσσονται σταδιακά κατά μήκος του στρωτού ολκού όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.15. Το φαινόμενο αυτό είναι μια αστάθεια του στρωτού ολκού όπως υπέδειξε ο Kónaszny (1949).



Σχήμα 2.14. Benard's test, (a) Σκίτσο περιοδικής εκπομπής δινών (b) Φωτογραφία των λάκκων (dimples). [3]

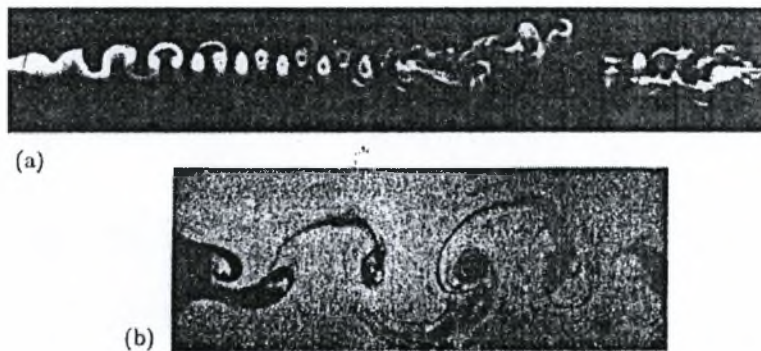


Σχήμα 2.15. Δίνες von Karman πίσω από κυκλικό κύλινδρο, $Re=140$. [3]

Οι Taneda (1956), Morkovin (1964) και Gerard (1978) πρότειναν μια υποδιαίρεση της περιοδικής στρωτής περιοχής (regime) σε δυο ξεχωριστές φάσεις: ταλαντούμενα ελεύθερα διατμητικά στρώματα χωρίς δίνες και ακολουθία Karman- Benard σχηματιζόμενη πίσω από την περιοχή σταθερής αποκόλλησης (closed near wake). Τα όρια μεταξύ αυτών των δύο φάσεων δεν έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια. Ο Wille (1966,1974) θεώρησε το περιοδικό απόρευμα ως μια αρχική σταθερή φάση της μετάβασης του σε τυρβώδες.

2.3.5. Μετάβαση στην δομή του απορεύματος, TrW

Το στρωτό περιοδικό απόρρευμα σε υψηλότερους αριθμούς Re γίνεται ασταθές καθώς προχωρούμε κατά μήκος του ολκού όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16(α). Σταδιακά με την αύξηση του Re η δίνη γίνεται τυρβώδης κατά τη διάρκεια του σχηματισμού της, σχήμα 2.16(β).



Σχήμα 2.16. Μετάβαση στον απόρρο, (α) $Re=190$, (β) $Re=340$ [3]

Η μετάβαση της κατάστασης της ροής στο απόρρευμα μπορεί να χωριστεί σε δυο περιοχές:

- TrW1: μετάβαση στρωτών δινών στον ολκό, $(180 - 200) < Re < (220 - 250)$
- TrW2: μετάβαση ακανόνιστης δίνης κατά τη διάρκεια του σχηματισμού της, $(220 - 250) < Re < (350 - 400)$

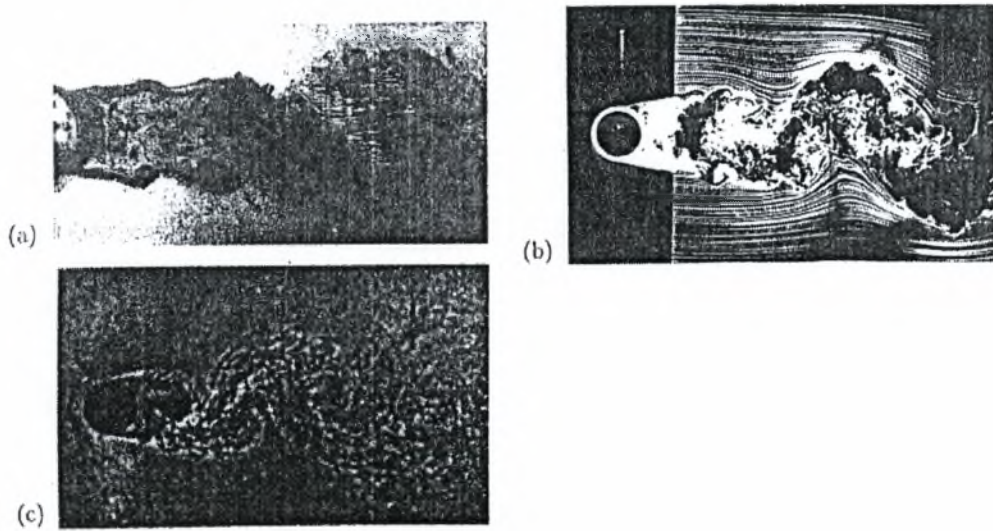
Ακόμη ένα σπουδαίο φαινόμενο λαμβάνει χώρα μεταξύ αυτών των δύο περιοχών. Ο σχηματισμός και απόσπαση δινών από στρωτά φαινόμενα μετατρέπονται σε τυρβώδη. Η αλλαγή αυτή στο μηχανισμό (φυσικό φαινόμενο) απόσπασης δινών αντανακλάται μέσω της διαφορετικής μεταβολής της συχνότητας απόσπασης δινών που εκφράζεται μέσω του αδιάστατου αριθμού Strouhal.

2.3.6. Μετάβαση στα διατμητικά στρώματα, TrSL, ή υποκρίσιμη κατάσταση

Η δεύτερη μετάβαση λαμβάνει χώρα κατά μήκος των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων ενώ παράλληλα τα οριακά στρώματα παραμένουν πλήρως στρωτά. Διακρίνουμε τρεις φάσεις μετάβασης κατά μήκος των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων :

- TrSL1: ανάπτυξη των μεταβατικών κυμάτων (transition waves), $(350 - 400) < Re < (1000 - 2000)$
- TrSL2: σχηματισμός των μεταβατικών δινών, $(1000 - 2000) < Re < (20000 - 40000)$
- TrSL3: 'ξέσπασμα' σε τύρβη, $(20000 - 40000) < Re < (100000 - 200000)$

Τα μεταβατικά κύματα στην αρχή εμφανίζονται ως κυματισμοί των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων σχήμα 2.17(α). Καθώς αυξάνεται ο Re τα μεταβατικά κύματα μετατρέπονται πρώτα σε ξεχωριστές δίνες κατά μήκος των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων πριν γίνουν τυρβώδη και μετά συσσωρευτούν σε εναλλασσόμενες δίνες, σχήμα 2.17(β). Τελικά έχουμε απότομη αλλαγή σε τύρβη που συμβαίνει στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα κοντά στην πλευρά του κυλίνδρου και ο σχηματισμός δινών λαμβάνει χώρα πολύ κοντά στο πίσω μέρος του κυλίνδρου, σχήμα 2.17(γ).



Σχήμα 2.17. Μετάβαση στα διατμητικά στρώματα, (a) $Re=2000$, (b) $Re=8000$, (c) $Re=110000$. [3]

2.3.7. Μετάβαση στα οριακά στρώματα, TrBL, ή κρίσιμη κατάσταση

Ο Wieselberg (1912) χρησιμοποίησε τους όρους υποκρίσιμος (subcritical) και υπερκρίσιμος (supercritical) για να περιγράψει τις καταστάσεις της ροής 'κάτω' και 'πάνω' από την 'κρίση' στην οπισθέλκουσα. Υπάρχουν διακριτές περιοχές που προηγούνται και έπονται του ελαχίστου συντελεστή οπισθέλκουσας (της περιοχής όπου συμβαίνει αυτό το φαινόμενο). Έχουν προταθεί οι παρακάτω περιοχές:

- TrBL0: υποκρίσιμη (precritical) περιοχή, $(100 \cdot 10^3 - 200 \cdot 10^3) < Re < (300 \cdot 10^3 - 340 \cdot 10^3)$
- TrBL1: one bubble regime, $(300 \cdot 10^3 - 340 \cdot 10^3) < Re < (380 \cdot 10^3 - 400 \cdot 10^3)$
- TrBL2: two bubble regime, $(380 \cdot 10^3 - 400 \cdot 10^3) < Re < (0.5 \cdot 10^6 - 10^6)$
- TrBL3: υπερκρίσιμη περιοχή, $(0.5 \cdot 10^6 - 10^6) < Re < (3.4 \cdot 10^6 - 6 \cdot 10^6)$
- TrBL4: post – critical regime, $(3.5 \cdot 10^6 - 6 \cdot 10^6) < Re < (\text{άγνωστο})$

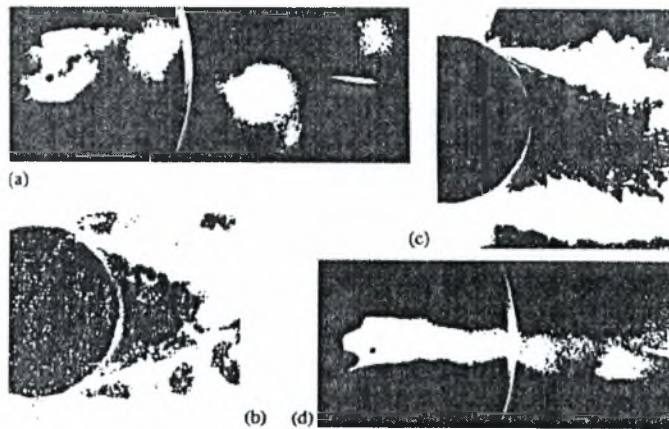
Η προκρίσιμη περιοχή χαρακτηρίζεται από την πρώτη μετάβαση στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα κατά μήκος των γραμμών αποκόλλησης. Το φαινόμενο (της πρώτης μετάβασης) έχοντας τρεις διαστάσεις διαταράσσει το κοντινό απόρρευμα και καθυστερεί το σχηματισμό δίνης όπως φαίνεται στο

σχήμα 2.18(α) σε αντίθεση με το σχήμα 2.17(β). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια αρχική πτώση του συντελεστή οπισθέλκουσας ενώ παράλληλα η απόσπαση της δίνης παραμένει 'κυρίαρχη', σχήμα 2.18(α).

Η προκρίσιμη περιοχή TrBL0 τελειώνει απότομα σε συγκεκριμένο αριθμό Re με μια ασυνεχή πτώση του συντελεστή οπισθέλκουσας και με ένα 'άλμα' στη συχνότητα απόσπασης δινών. Ο Eisner(1925) παρατήρησε την ασύμμετρη κατανομή πίεσης. Ο Bearman(1969) παρατήρησε ότι στη μια πλευρά του κυλίνδρου τα ελεύθερα διατμητικά στρώματα υπόκειντο σε επαρκή μετάβαση ώστε να μπορούν να 'επανακολληθούν' στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Η στενή, λεπτή αποκολλημένη περιοχή ονομάστηκε φουσαλίδα αποκόλλησης (separation bubble). Η επικείμενη τυρβώδης αποκόλληση καθυστερεί στο TrBL1 όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18(β).

Η ασύμμετρη περιοχή μίας φουσαλίδας TrBL1, τερματίζει σε υψηλότερους αριθμούς Re με μία ακόμη ασυνεχή πτώση στην οπισθέλκουσα κι ένα άλμα στη συχνότητα απόσπασης δινών όταν ακόμη μια δεύτερη φουσαλίδα σχηματίζεται στην άλλη πλευρά του κυλίνδρου, σχήμα 2.18(γ). Η συμμετρική περιοχή των δυο φουσαλίδων, TrBL2 αναπαριστά ένα πολύπλοκο συνδυασμό στρωτής αποκόλλησης, μετάβασης, επανακόλλησης και τυρβώδους αποκόλλησης των οριακών στρωμάτων και στις δυο πλευρές του κυλίνδρου. Και οι δυο περιοχές TrBL1 και TrBL2 είναι ευαίσθητες σε τυχούσες διαταραχές και μπορούν να εξαλειφθούν από μια επαρκώς τραχεία επιφάνεια ή ένα τυρβώδες ελεύθερο ρεύμα.

Περαιτέρω αύξηση του αριθμού Re προκαλεί μετάβαση της βασικής στρωτής γραμμής αποκόλλησης με άτακτο τρόπο. Αυτό οδηγεί σε διάσπαση των φουσαλίδων αποκόλλησης (separation bubbles), κατά μήκος του αναπτύγματος του κυλίνδρου. Οι άτακτα αποσπασμένες γραμμές αποκόλλησης εμποδίζουν την περιοδική απόσπαση των δινών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18(δ). Αυτό το τελευταίο είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα της υπερκρίσιμης περιοχής TrBL3. Μέχρι το 1961 υπήρχε η πεποίθηση ότι αυτή ήταν και η 'έσχατη' κατάσταση της ροής και για υψηλότερους Re.



Σχήμα 2.18. Μετάβαση στα οριακά στρώματα, (a) TrBL0, (b) TrBL1 (c) TrBL2 (d) TrBL3 [3]

Ο Roshko (1961) ανακάλυψε ότι τακτική διάχυση δινών ξαναεμφανίζεται σε υψηλότερους αριθμούς Re όταν τα οριακά στρώματα είναι τυρβώδη πριν την αποκόλληση κατά μήκος του αναπτύγματος. Η ονομασία αυτής της περιοχής αποδόθηκε ως υπερκρίσιμη (supercritical) από τον Farell (1981) ενώ μέχρι τότε είχαν δοθεί πολλές ονομασίες που δεν ευδοκίμησαν.

Ο Pearcey πρότεινε τον όρο postcritical που χρησιμοποιείται για την περιοχή TrBL4. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από μετάβαση στα οριακά στρώματα που βρίσκεται κάπου μεταξύ των γραμμών αποκόλλησης και γραμμών αποκοπής (stagnation lines). Καθώς ο αριθμός Re αυξάνεται η μεταβατική περιοχή μετακινείται ασυμπτωτικά προς τη γραμμή αποκοπής (stagnation line) και επομένως η τιμή του Re για το τέλος της περιοχής TrBL4 είναι δύσκολο να προσδιοριστεί.

2.3.8. Πλήρως τυρβώδης κατάσταση της ροής, T

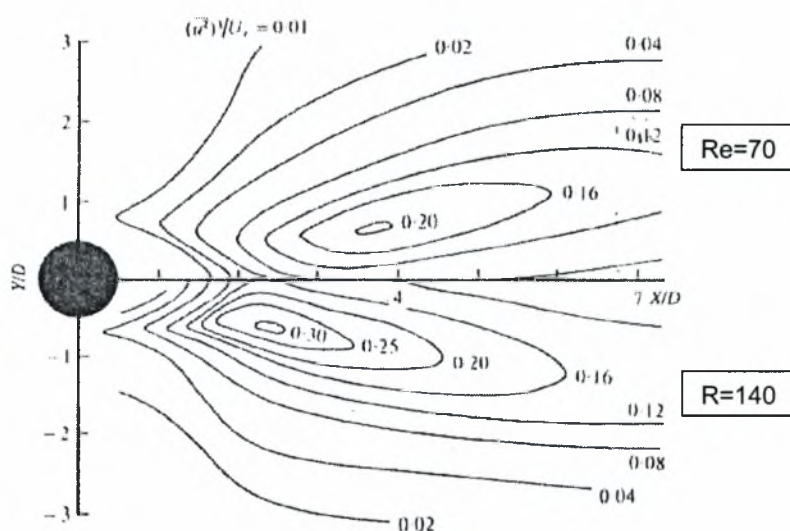
Τέτοια κατάσταση ροής υπάρχει όταν όλες οι διαταραγμένες περιοχές της ροής γύρω από τον κύλινδρο είναι τυρβώδεις. Δεν είναι γνωστό μέχρι σήμερα για ποια τιμή του αριθμού Re αρχίζει η κατάσταση T. Το τέλος αυτής της κατάστασης θεωρητικά είναι για $Re \rightarrow \infty$ και αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως η 'έσχατη' κατάσταση της ροής. Η ροή πίσω από τον κύλινδρο στην κατάσταση αυτή καθώς και η οπισθέλκουσα και η συχνότητα διάχυσης δινών υποτίθενται σταθερές με την προϋπόθεση ότι οι παράγοντες που επιδρούν

στη ροή διατηρούνται μικροί. Όμως αυτό είναι δύσκολο γιατί σε υψηλούς αριθμούς Re έχουμε φαινόμενα συμπίεστικότητας στον αέρα και δημιουργία κοιλοτήτων (cavitations) στο νερό τα οποία φαινόμενα γίνονται οι κυρίαρχες παράμετροι της ροής.

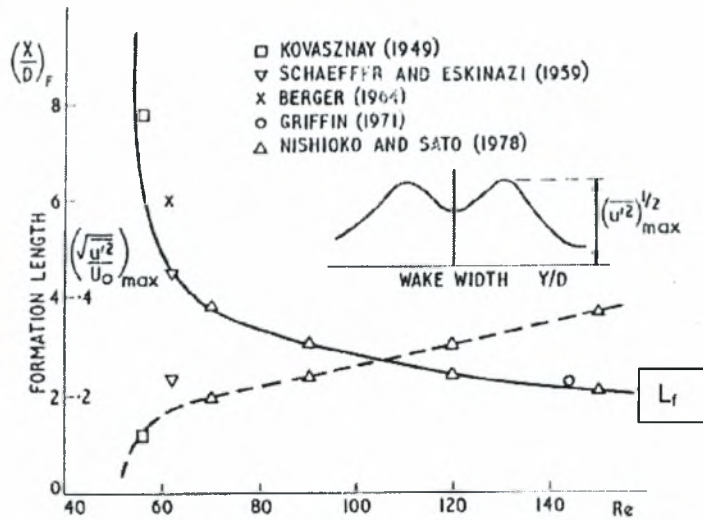
2.3.9. Δύναμη των δινών

Η απόκλιση της έντασης των διακυμάνσεων ταχύτητας κατά μήκος του ολκού αντικατοπτρίζει την απόσταση και δύναμη των δινών που περνούν από αυτόν. Ο Kovaszny (1949) βρήκε ότι για $Re=56$ η μέγιστη ταχύτητα u' ήταν $7D$ πίσω από τον κύλινδρο. Το σχήμα (2.19) δείχνει ισοϋψείς u' / V για $Re=70$ και 120. Η θέση της μέγιστης u' / V μετατοπίζεται από $X / D=3.8$ για $Re=70$ σε $X / D=2.4$ για $Re=120$.

Ο σχηματισμός δίνης ολοκληρώνεται όταν επιτυγχάνεται μια μέγιστη συγκέντρωση στροβιλότητας. Η απόσταση του σημείου όπου αυτό επιτυγχάνεται από τον κύλινδρο ονομάζεται μήκος περιοχής σχηματισμού δίνης L_f . Πέρα από το L_f η ιξώδης σκέδαση και διάχυση μειώνουν τη δύναμη των δινών. Το σχήμα (2.20) δείχνει μια συλλογή από L_f και $(u' / V)_{\max}$ για στρωτά περιοδικά απορρεύματα. Σχεδόν μια εκθετική μείωση του L_f συνοδεύεται από αύξηση στο $(u' / V)_{\max}$ για αυξανόμενους αριθμούς Re .



Σχήμα 2.19. Μεταβολή ταχύτητας στον απόρου για $Re=70$ & $Re=140$. [3]



Σχήμα 2.20. L_f και $(u' / V)_{\max}$ για στρωτά περιοδικά απορρεύματα. [3]

Η πραγματική δύναμη δίνης K (ο όρος χρησιμοποιείται αντί για τον όρο κυκλοφορία-circulation) δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας αλλά εκτιμάται από τα μετρημένα προφίλ ταχυτήτων στην δίνη. Η αδιάστατη δύναμη της δίνης μπορεί να παρουσιαστεί με δύο μορφές:

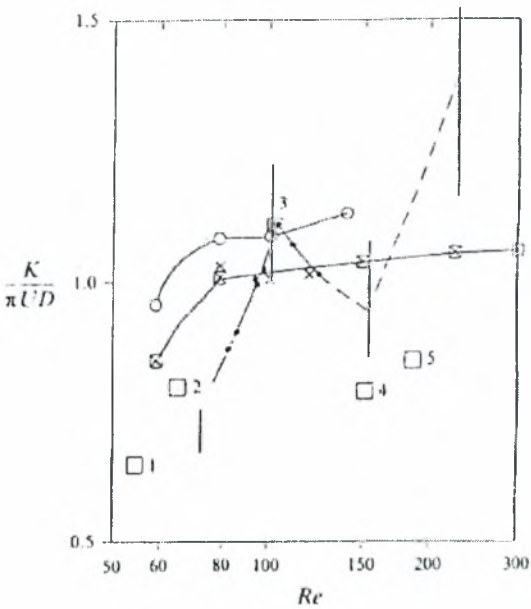
- $Kf/V_s^2 = \text{πραγματική δύναμη δίνης}/2 \cdot \text{ολική παραγόμενη στροβιλότητα}$ όπου V_s είναι η ταχύτητα κατά την αποκόλληση
&
- $K/\pi VD = \text{πραγματική δύναμη δίνης}/ \text{δύναμη ισοδύναμης δίνης}$

Όπου η ισοδύναμη δίνη επιφέρει ταχύτητα V σε απόσταση $D/2$ από το κέντρο της.

Ο Heisenberg έθεσε ως ανώτερη τιμή για τον λόγο Kf/V_s^2 το 0.5. Οι Fage και Johansen (1928) βρήκαν μικρότερες τιμές για το λόγο σε τυρβώδη απορρεύματα. Η τιμή του λόγου $K/\pi VD$ μπορεί να είναι μικρότερη ή και μεγαλύτερη της μονάδας. Στον πίνακα (2.2) φαίνονται κατάλληλες εκτιμήσεις ενώ στο σχήμα (2.21) φαίνεται η μεταβολή του $K/\pi VD$ με τον Re για το στρωτό περιοδικό απόρρευμα.

Author(s)	Re	Kf/V_s^2	$K/\pi VD$
Thom (1933J)	100	–	1.15
Birkhoff & Zarantonello (1957B)	–	0.40	–
Timme (1957J)	200	–	0.78
Schaefer & Eskinazi (1959J)	62	0.34	0.80
Berger (1964Ja)	150	0.39	(0.81)
Koopman (1967J)	200	0.32	–
Griffin (1974P)	144	0.45	1.1–1.3
Griffin & Ramberg (1975J)	144	–	0.81
Green & Gerrard (1991J)	80	–	0.86
Green & Gerrard (1993J)	100	–	1.15
	150	–	1.05
	300	–	1.05

Πίνακας 2.2. Δύναμη δίνης. [3]



Σχήμα 2.21. Μεταβολή του $K/\pi VD$ με τον Re για το στρωτό περιοδικό απόρευμα. [3]

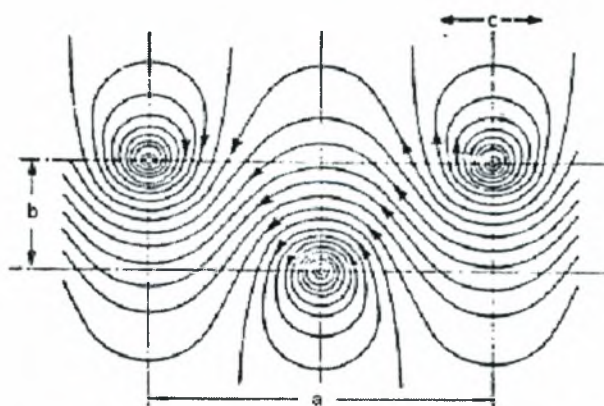
2.3.10. Διευθέτηση των δινών στο απόρευμα

Ο Karman (1911) εξήγαγε το πρώτο θεωρητικό μοντέλο θεωρώντας σταθερότητα των εναλλασσόμενων δινών σε δυο παράλληλες σειρές. Βρήκε αναλυτικά ότι για μια σταθερή διευθέτηση η χωρική αναλογία είναι $b/a = 0.359$ ή 0.281 (σχήμα 2.22), όπου b είναι το πλάτος μεταξύ των δυο σειρών και a είναι η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών δινών της ίδιας σειράς.

Ο Benard βρήκε ότι η θεωρία του Karman δεν ευσταθούσε για όλες τις περιπτώσεις. Μέτρησε το λόγο b/a σε τρία ξεχωριστά πειράματα και πήρε τις ακόλουθες τιμές κατά μήκος του απορεύματος: $0.09 < b/a < 0.21$, $0.17 < b/a < 0.41$ και $0.38 < b/a < 0.49$. Οι Fage και Johansen(1928) βρήκαν παρόμοιες 'ανωμαλίες' στις τιμές σε τυρβώδη ακολουθία δινών καθώς και ο Johansen παρατήρησε το ίδιο όταν ένα μεγάλο εμπόδιο ήταν παρών στο πείραμα. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των στρωτών (laminar wakes) οδών Karman-Benard είναι η πολύ μικρή μεταβολή της απόστασης a κατά μήκος της οδού συγκριτικά με το πλάτος b . Αυτό συνεπάγεται ότι η παρατηρούμενη αύξηση του λόγου b/a οφείλεται κυρίως σε αύξηση του b . Υπάρχουν τρία στάδια στην ανάπτυξη της οδού κατά μήκος του ολκού :

- A) αμέσως μετά τον κύλινδρο η οδός είναι στενή
- B) ακολουθεί μια βίαιη διαπλάτυνση
- Γ) μακριά στο απόρευμα οι πυρήνες των δινών επικαλύπτονται και η διαπλάτυνση μειώνεται.

Το 'στένεμα' αυτό προκαλείται από τις δίνες που 'λείπουν' μπροστά από τον κύλινδρο οι οποίες έχουν να αντισταθμίσουν την εγκάρσια ταχύτητα που προκαλείται από τις δίνες που βρίσκονται πίσω από τον κύλινδρο. Η βίαιη διαπλάτυνση προκαλείται από το αμοιβαίο εκτόπισμα δυνατών δινών η οποία μειώνεται καθώς οι δίνες εξασθενίζουν λόγω ιξώδους διάχυσης (viscous diffusion) και σκέδασης (dissipation) κατά μήκος του απορεύματος.



Σχήμα 2.22. Οδός von Karman (Διάγραμμα). [4]

2.3.11. Μετάβαση στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα

Το απόρευμα (κοντά στον κύλινδρο) στην κατάσταση TrSL περιβάλλεται αρχικά από στρωτά ελεύθερα διατμητικά στρώματα. Αυτά στη συνέχεια γίνονται τυρβώδη και τελικά μετατρέπονται σε τυρβώδεις δίνες (turbulent eddies). Η μετάβαση σε τύρβη στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα αναπτύσσεται μέσω τριών διακριτών φάσεων καθώς ο αριθμός Re αυξάνεται :

TrSL1: Κύματα μετάβασης (transition waves) εμφανίζονται κατά μήκος των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων και σταθεροποιούν το απόρευμα (κοντά στον κύλινδρο)

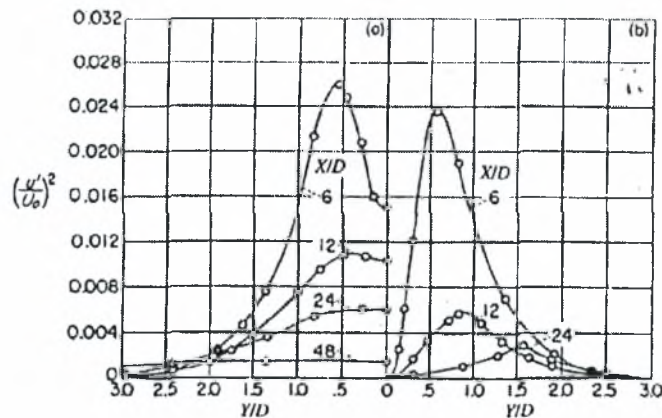
TrSL2: Δίνες μετάβασης σχηματίζονται σαν μια αλυσίδα κατά μήκος των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων και προηγούνται της μετάβασης σε τύρβη. Υπάρχει μια προοδευτική κίνηση της μετάβασης προς τα σημεία αποκόλλησης αυξανόμενου του αριθμού Re .

TrSL3: Παρατηρείται μια άμεση μετάβαση σε τύρβη κοντά στον κύλινδρο συνοδευόμενη από μικρό (σε μήκος) απόρευμα (near wake). Ο σχηματισμός δινών κοντά στον κύλινδρο αυξάνει το C_D και το C_L συγκριτικά με τις δύο άλλες περιοχές.

2.3.11.1. TrSL1

Ο Tyler (1930) παρέθεσε πειραματικά στοιχεία που αποδείκνυαν ότι τυρβώδεις δίνες σχηματίζονταν τακτικά, περιοδικά διασκορπιζόταν και γρήγορα κατακερματιζόταν κατά μήκος του απορεύματος. Ενίσχυσε σήματα θερμαινόμενου σύρματος (hot wire signals) και τα έκανε ακουστά χρησιμοποιώντας ένα μεγάφωνο. Ανακάλυψε ότι ένα μέγιστο ηχητικό σήμα S_{max} παραγότανε όταν η απόσταση μεταξύ των δύο θερμαινόμενων συρμάτων συνέπιπτε με την απόσταση δύο διαδοχικών δινών της ίδιας σειράς. Ο ακουστός ήχος μειωνόταν καθώς αυξάνεται ο αριθμός Re σε μια περιοχή $500 < Re < 1160$. Η ένταση του ήχου μειωνόταν γρήγορα καθώς τα θερμαινόμενα σύρματα μετατοπιζόταν κατά μήκος του απορεύματος. Για παράδειγμα για $Re = 560$, $S = 1/3 S_{max}$ για $X/D = 14$ ενώ για $Re = 1160$, $S = 1/4 S_{max}$ για $X/D = 9$. Αυτό απέδειξε ότι η δύναμη των τυρβωδών δινών μειωνόταν γρήγορα κατά μήκος του απορεύματος.

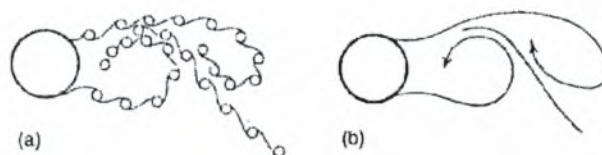
Ο Timme (1957) παρατήρησε άλλο ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των τυρβωδών δινών. Υπολόγισε προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος των τυρβωδών δινών από τις τροχιές που σχημάτιζαν σωματίδια αλουμινίου στην επιφάνεια του νερού. Το σχήμα (2.23) δείχνει δύο κατανομές κινητικής ενέργειας της ίδιας δίνης: α) αρχικά και β) 1.5 δευτερόλεπτα αργότερα. Ο Timme δήλωσε ότι η ανάπτυξη 'ανωμαλιών' στη γειτνιάζουσα περιοχή όπου εμφανίζεται το μέγιστο είναι ένα τυπικό γνώρισμα 'εξασθενουσμένων' δινών.



Σχήμα 2.23. Κατανομές κινητικής ενέργειας στον απόρρο για $X/D=6,12,24$ & 48: (a) $Re=150$, (b) $Re=500$. [3]

2.3.11.2. TrSL2

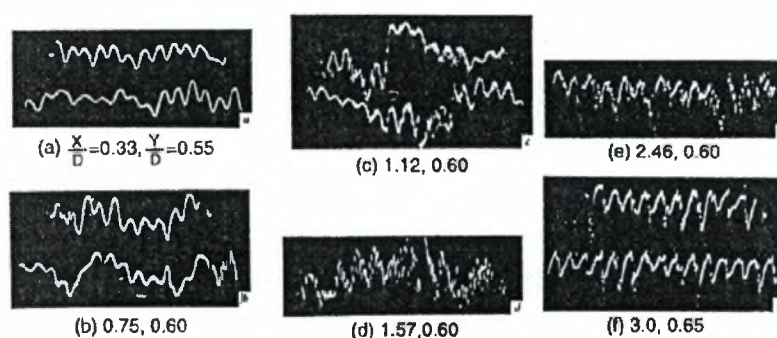
Ο Couregelongue (1929) διεξήγαγε πειράματα στον ποταμό Leyre (Gironde). Σφήνωσε κυλίνδρους στον αμμώδη βυθό και οι ακτίνες του ήλιου διαθλώμενες μέσω της επιφάνειας του νερού, παρήγαγαν 'σκιές' δύο 'αλυσίδων' μικρών δινών συνδεδεμένων μεταξύ τους κατά μήκος των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα(2.24).



Σχήμα 2.24. Μετάβαση δινών στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα. [3]

Στο σχήμα (2.24) φαίνονται οι μικρές δίνες της κάτω αλυσίδας που αρχίζουν να κινούνται αντίθετα και να κλίνουν προς τον κύλινδρο ενώ οι δίνες της πάνω αλυσίδας τις προσπερνούν πριν αρχίσουν να κάνουν την ίδια κίνηση. Ο Couregelongue υπολόγισε τον αριθμό Strouhal ίσο με 0.2 για αριθμό $Re=25000$ και μέτρησε 30 μεταβατικές δίνες κατά μήκος του ελεύθερου διατμητικού στρώματος. Σημείωσε ότι ο μικρότερος αριθμός Re στον οποίο οι μεταβατικές δίνες μπορούν να παρατηρηθούν είναι $Re=1250$. Σε αυτόν τον αριθμό έχουμε έναρξη της περιοχής TrSL2.

Ο Bloor (1964) εντόπισε μεταβατικές δίνες κατά μήκος των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων χρησιμοποιώντας ένα hot wire probe. Στο σχήμα (2.25) φαίνονται σήματα hot wire κατά μήκος του ελεύθερου διατμητικού στρώματος για $Re=5200$. Στο σχήμα (2.25)-b,c φαίνονται οι χαμηλών συχνοτήτων αντικανονικότητες. 'Ξεσπάσματα' κυμάτων σε μια ξεχωριστή συχνότητα εμφανίζονται αρχικά περιοδικά στο σχήμα (2.25)-c και συνεχόμενα στο σχήμα (2.25)-d,e. Μακριά από τον κύλινδρο οι χαμηλών συχνοτήτων αντικανονικότητες αλλά και οι υψηλές συχνοτήτες εξαφανίζονται γεγονός που φανερώνει το τέλος της περιοχής σχηματισμού και περάσματος πλήρως σχηματισμένων δινών, σχήμα (2.25)-f.



Σχήμα 2.25. Εξέλιξη της μετάβασης σε ελεύθερα διατμητικά στρώματα για $Re=5200$. [3]

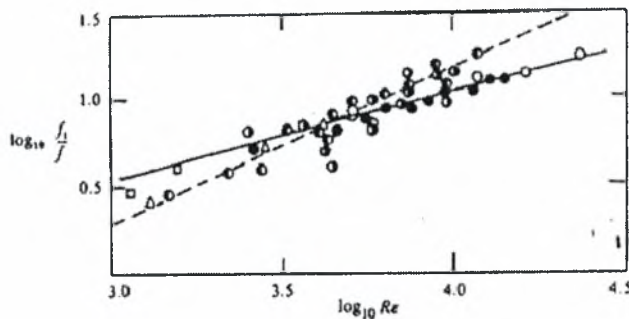
Συχνότητα των μεταβατικών δινών

Ο Bloor (1964) σημείωσε μετά από μετρήσεις με hot wire ότι η πρώτη εμφάνιση μεταβατικών δινών συμβαίνει για αριθμό $Re=1300$ που είναι σε συμφωνία με τις οπτικές παρατηρήσεις του Couregelongue. Ο Bloor υπέθεσε η συχνότητα των μεταβατικών δινών θα έπρεπε να είναι ανάλογη της

ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος και αντιστρόφως ανάλογη του πάχους του οριακού στρώματος δ στο σημείο αποκόλλησης. Το πάχος δ είναι ανάλογο του X μετρημένο από το σημείο αποκόλλησης, οπότε

$$f_{\text{Tr}} \propto \text{Re}^{0.5}$$

Το σχήμα (2.26) δείχνει ότι λίγα από τα σημεία του Bloor πέφτουν πάνω στη γραμμή $\text{Re}^{0.5}$. Τα σημεία που απέκτησαν οι Wei και Smith κατόπιν οπτικοποιήσεως με φυσαλίδες υδρογόνου (hydrogen bubble visualization) ακολουθούσαν την γραμμή $\text{Re}^{0.9}$. Παραταύτα τα δεδομένα που πήραν με μετρήσεις hot wire προσεγγίζονται καλύτερα από την γραμμή $\text{Re}^{0.77}$. Μεταγενέστερες μετρήσεις σε αέρα από τον Kourta έδειχναν να επιβεβαιώνουν τις μετρήσεις του Bloor. Η τύρβη στην αεροσήραγγα του Bloor (1964) και του Kourta (1987) ήταν 0.9% και 0.1% αντίστοιχα. Οι φυσαλίδες υδρογόνου μπορεί να διατάραξαν τα ελεύθερα διατμητικά στρώματα και με αυτόν τον τρόπο να προκάλεσαν αύξηση της κλίσης της ευθείας όπως φαίνεται στο σχήμα (2.26).

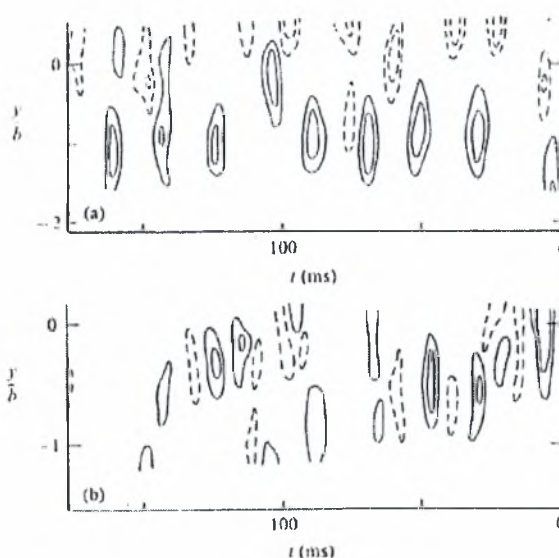


Σχήμα 2.26. Αναλογία συχνότητων με αριθμό Re. [3]

Άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του TrSL2

Παρατηρείται μείωση του L_f (έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο), αυξανόμενου αριθμού Re . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μετατόπιση των σχηματιζόμενων δινών πολύ κοντά στον κύλινδρο, και αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του C_L' . Η μείωση του L_f (ισοδύναμα μείωση του κοντινού απορεύματος) συνδυάζεται με διαπλάτυνση των τυρβωδών διατμητικών στρωμάτων. Οι Bloor και Gerrard υπέθεσαν ότι αυτοί οι δύο αντικρουόμενοι παράγοντες καθιστούν τα μεγέθη, δύναμη δινών και αριθμό Strouhal σταθερά σε όλη την περιοχή TrSL2. Οι τυρβώδεις δίνες

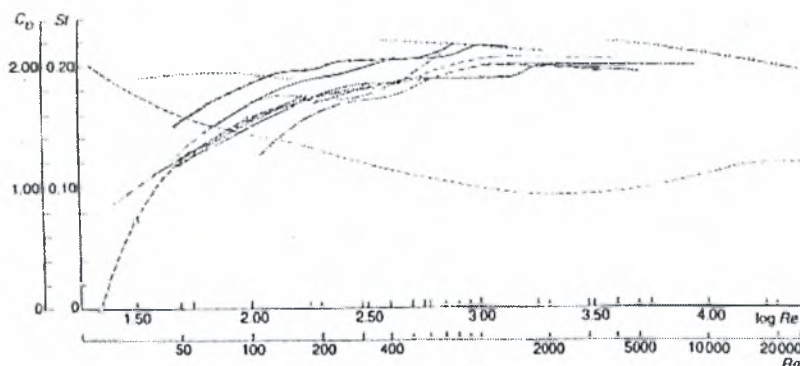
εξασθενίζουν ανομοιόμορφα κατά μήκος του απορεύματος. Αυτό σημαίνει ότι δύο γειτονικές δίνες μπορεί να είναι ίδιες (περίπου ίδιες στη μορφή) αλλά να διαφέρουν πολύ στη δύναμη. Οι Hussain και Hayakama (1987) υπολόγισαν το πεδίο ταχυτήτων χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα οχτώ hot wires. Στο σχήμα (2.27) φαίνονται τα αποτελέσματά τους για $X/D=20$ και $X/D=40$ για $Re=13000$.



Σχήμα 2.27. Οδός δινών για $Re=13000$: (a) $X/D=20$, (b) $X/D=40$. [3]

Αριθμός Strouhal

Αν και συχνότητα απόσπασης δινών αλλάζει γραμμικά με την ταχύτητα του ελευθέρου ρεύματος ο αριθμός Strouhal παραμένει σταθερός. Αυτό συμβαίνει και στην περιοχή TrSL1 που έχουμε αύξηση του L_f και στην περιοχή TrSL2 που έχουμε μείωση του L_f . Στο σχήμα (2.28) παρουσιάζεται μια από τις πρώτες συλλογές δεδομένων αριθμών Strouhal που συγκέντρωσε ο Lehnerf στα 1937. Η μεγάλη διασκόρπιση των τιμών πιθανά οφείλεται στην πολυπλοκότητα του φαινομένου και στις μεθόδους μετρήσεων (ακουστικές, οπτικές και ανεμομετρία θερμαινόμενου σύρματος). Αξιοσημείωτο είναι ότι όλες οι τιμές κυμαίνονται σε ένα εύρος $0.18 < St < 0.22$.



Σχήμα 2.28. Αριθμός Strouhal με αριθμό Re σε TrSL1 & TrSL2. [3]

Ο Gerrard (1966) πρότεινε ότι καθοριστικός παράγοντας για την τιμή του αριθμού Strouhal είναι η απόσταση μεταξύ των δύο ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων. Η τελευταία παραμένει σχεδόν σταθερή κατά την επιμήκυνση και βράχυνση του L_f στις αντίστοιχες περιοχές που συμβαίνει αυτό.

2.3.11.3. TrSL3

Η ολοκλήρωση της βράχυνσης του L_f στο τέλος της περιοχής TrSL2 συνοδεύεται από εξαφάνιση μεταβατικών δινών στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα. Τα δύο αυτά φαινόμενα σημειώνουν την έναρξη της περιοχής TrSL3 που συμβαίνει για $Re \approx 20000$ σε πειράματα του Linke (1931) γεγονός που επιβεβαιώνουν και οι Bloor και Gerrard (1966) για $Re \approx 50000$ και $Ti = 0.1\%$. Πέρα αυτών των τιμών Re η περιοχή σχηματισμού δινών δεν μετατοπίζεται πιο κοντά στον σταθερό κύλινδρο (ο ταλαντούμενος κύλινδρος δύναται να μειώσει ακόμη περισσότερο το L_f) και το L_f παραμένει σταθερό.

Η μετάβαση σε τύρβη περιορίζεται σε ένα σημείο βίαιου ξεσπάσματος στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα κοντά στον κύλινδρο. Η περιοχή μετάβασης εμφανίζεται απρόθυμη να αναπτυχθεί αντίθετα προς το ρεύμα (upstream) αυξανόμενου αριθμού Re στην περιοχή TrSL3. Το κοντινό απόρευμα είναι ισχυρά τρισδιάστατο κατόπιν εξαφάνισης των διδιάστατων μεταβατικών δινών.

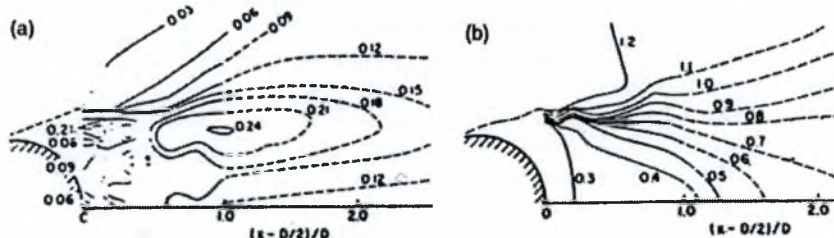
Η βράχυνση της περιοχής σχηματισμού των δινών αυτόματα σημαίνει διαπλάτυνση (widening) του κοντινού απορεύματος. Αυτό με την σειρά του

εκτοπίζει τα ελεύθερα διατμητικά στρώματα στην περιοχή του ελεύθερου ρεύματος. Το τελευταίο ενδέχεται να σταθεροποιεί τη μετάβαση στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή των αριθμών Re που καλύπτεται από το TrSL3 συναντάται συχνά στις εφαρμογές των χημικών, μηχανολόγων αλλά και πυρηνικών μηχανικών (nuclear engineering). Έντονη ερευνητική δραστηριότητα έχει γίνει στην περιοχή αυτή η οποία μπορεί να επεκταθεί σε χαμηλότερους Re (TrSL1 και TrSL2) αλλά και σε υψηλότερους Re (TrBL).

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του TrSL3

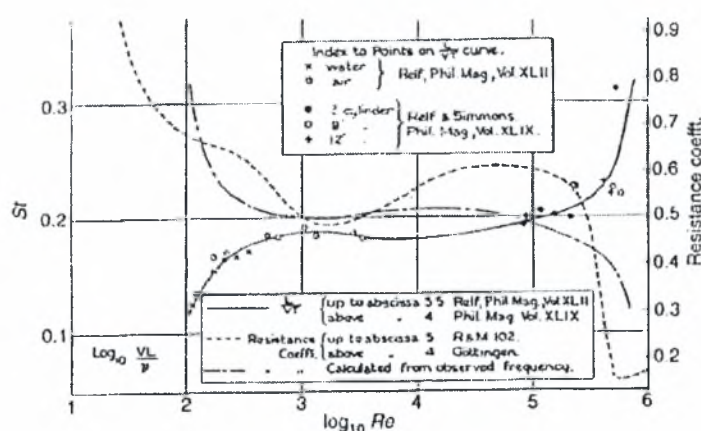
Μεταβατικές δίνες σε υψηλή συχνότητα έχουν βρεθεί και στο τέλος της περιοχής TrSL2. Ο Bloor εξερεύνησε τη μετάβαση σε τύρβη στα ελεύθερα διατμητικά στρώματα στην περιοχή TrSL2 για $Re=19500$. Η μετάβαση λαμβάνει χώρα για $0.2 < X/D < 0.45$ μετρημένη από το κέντρο του κυλίνδρου. Στην περιοχή TrSL3 για $Re=29500$ και 45000 η μετάβαση τοποθετείται σε $0.02 < X/D < 0.29$ και παραμένει η ίδια και για τους δύο Re .

Οι Hanson και Richardson (1968) εξέτασαν τη μεταβολή στη μέση ταχύτητα αλλά και στις διακυμάνσεις της (fluctuating velocity) στο απόρρευμα. Το σχήμα (2.29) δείχνει τις ισοϋψείς της μέσης και rms ταχύτητας για $Re=53000$. Η μέγιστη τιμή της V_{rms} είναι για $X/D = 0.5-1.5$, $y/D=0.6$ και αντιστοιχεί σε σημείο που η δίνη είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Το σχήμα (2.29)-α δείχνει ότι οι μέσες τιμές δεν δίνουν 'ενόραση' για τους ασταθείς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα μέσα στο κοντινό απόρρευμα.



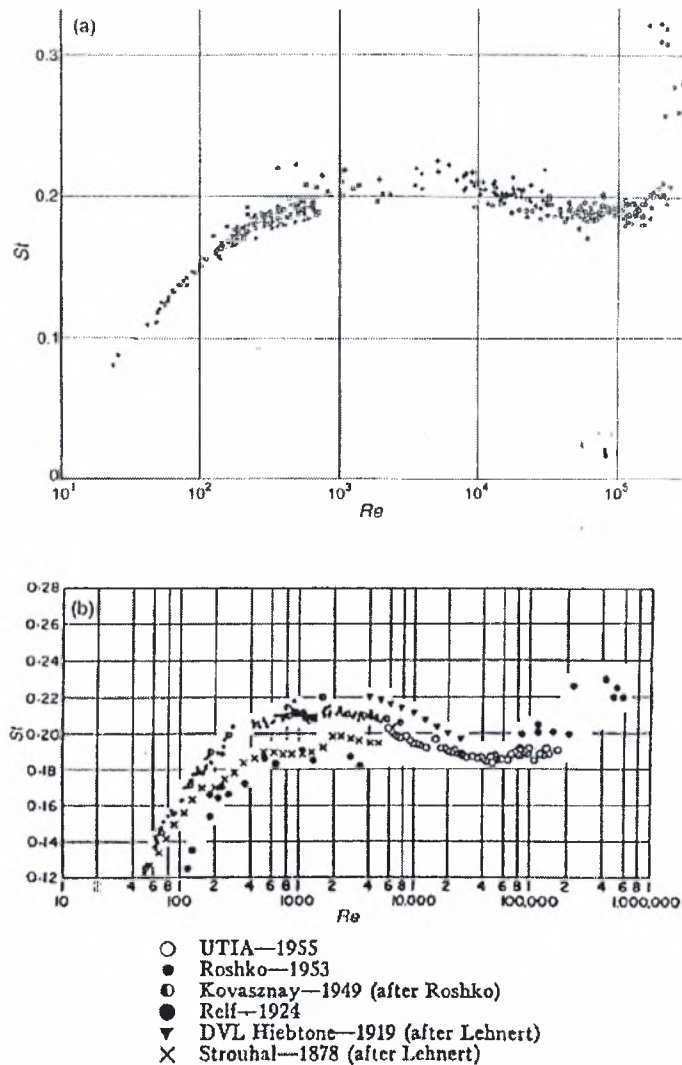
Σχήμα 2.29. Πεδίο ταχυτήτων για $Re=53000$: (α) μέσες τιμές, (β) διακυμάνσεις. [3]

Δύο παράμετροι (που έχουν εφαρμογή σε πρακτικές εφαρμογές) είναι πρωτεύουσας σημασίας και σε αυτή την περιοχή. Ο αριθμός Strouhal και ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_D . Στο σχήμα (2.30) παρουσιάζονται τα δεδομένα που συγκέντρωσε ο Lock (1925) για ένα μεγάλο εύρος τιμών Re (100 – 1000000).



Σχήμα 2.30. Σχέση ανάμεσα στον αριθμό St και τον συντελεστή οπισθέλκουσας. [3]

Ο Drescher (1956) συγκέντρωσε μετρήσεις των Camichel (1927), Tyler και άλλων (μαζί με τις δικές του σε πειράματα σε νερό) που φαίνονται στο σχήμα (2.31.α) που δείχνει ότι αν και τα δεδομένα αποχτήθηκαν χρησιμοποιώντας ίδιες μεθόδους παρουσιάζουν μια διασκόρπιση $\pm 6\%$ στο $TrSL3$. Μια άλλη συλλογή του Etkin, σχήμα (2.31.β) παρουσιάζει δεδομένα των Strouhal (1878), Kovasznay (1949), Roshko (1953) και δικά του. Και οι δύο συλλογές βρίσκονται σε συμφωνία ειδικότερα στην περιοχή $TrSL3$. Itaya και Yasuda επανέλαβαν μετρήσεις του αριθμού Strouhal σε εύρος $100 < Re < 500000$ και βρήκαν παρόμοια μεταβολή και διασκόρπιση στις τιμές τους στο $TrSL3$. Ο Gerrard (1966) μέτρησε 22 τιμές αριθμού Strouhal για $Re = 11000$ και απέδειξε ότι η διασκόρπιση αυτή είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα του $TrSL3$. Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι η μέση τιμή του αριθμού St είναι σταθερή στο $TrSL3$ αλλά η στιγμιαία τιμή του μπορεί να διαφέρει κατά $\pm 10\%$ για οποιονδήποτε αριθμό Re .



Σχήμα 2.31. Σχέση ανάμεσα στον αριθμό St και τον αριθμό Re. [3]

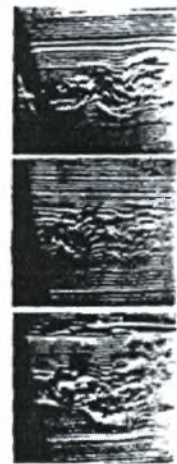
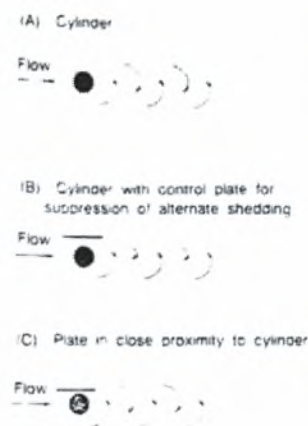
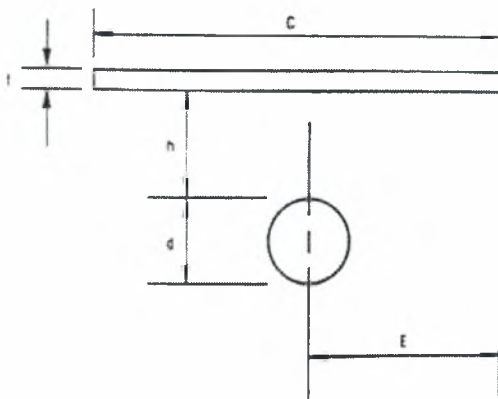
Η μελέτη της ροής στον απόρου κυκλικών κυλίνδρων που είναι τοποθετημένοι στο κέντρο παράλληλων ροών όπως φαίνεται και από τις προηγούμενες σελίδες έχει απασχολήσει για πολλά χρόνια τους επιστήμονες.

Η ανάγκη που δημιουργήθηκε σε τομείς της θαλάσσιας τεχνολογίας όπως στην ανάμειξη και διασπορά πετρελαιοκηλίδων και στρωματοποιημένων στιβάδων αλατότητας, στις μεθόδους εντοπισμού πλοίων ή υποβρυχίων λόγω των απορευμάτων που δημιουργούνται καθώς επίσης και στην αλληλεπίδραση απορευμάτων και κυμάτων από εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου (ενδιαφέρει η φόρτιση που δέχονται και η αντοχή τους)

οδήγησε την έρευνα στην μελέτη ροών πίσω από κυκλικούς κυλίνδρους που είναι τοποθετημένοι κοντά σε στερεό όριο και κοντά σε διεπιφάνεια νερού – αέρα.

2.4. Μελέτη των φαινομένων ανάμειξης κοντά σε στερεά όρια

Η επίδραση στερεού τοιχώματος πάνω από κύλινδρο (Σχήμα 2.32) και η αλλαγή στην εκροή (μορφή) δινών von-Karman που επιφέρει η παρουσία του (Σχήμα 2.33), εξετάσθηκε πειραματικά από τον W. L. Goodman [19].

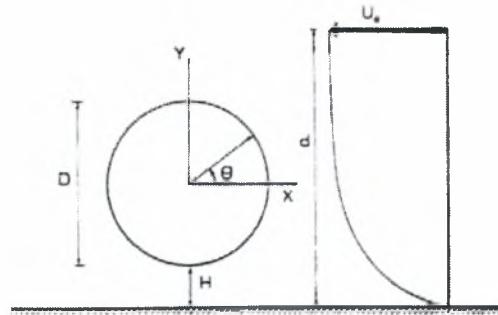


Σχήμα 2.32. Γεωμετρία της ροής. [19].

Σχήμα 2.33. Αλληλεπίδραση κυλίνδρου – πλάκας. [19].

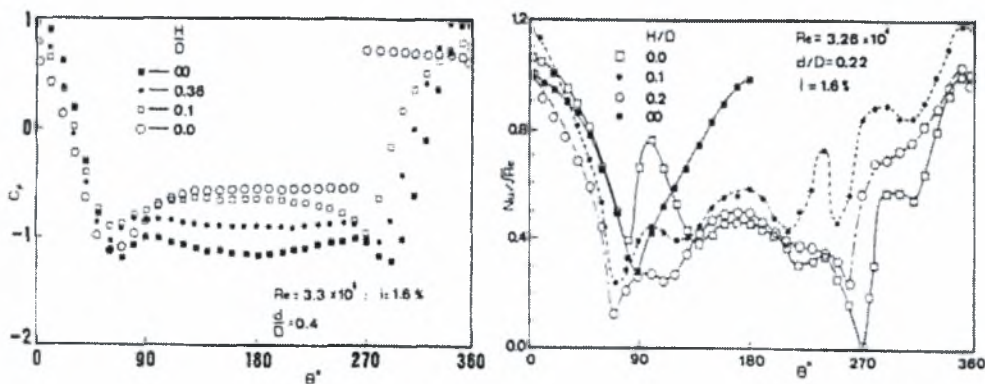
Στο πείραμα αυτό έγινε οπτικοποίηση της ροής με καπνό και όπως φαίνεται και στο σχήμα (2.33) η παρουσία στερεού τοιχώματος αλλάζει την μορφή στο απόρρευμα του κυλίνδρου και αναστέλλεται η εκροή δινών von-Karman.

Πειράματα με κύλινδρο κοντά σε επίπεδο όριο έγιναν και από τους A. R. Figueiredo και D. X. Viegas [20] που έκαναν μετρήσεις σε θερμαινόμενο κύλινδρο κοντά σε πλάκα, μέσα σε κανάλι με $Re=1,4 \cdot 10^4 \sim 4 \cdot 10^4$. (Σχήμα 2.34).



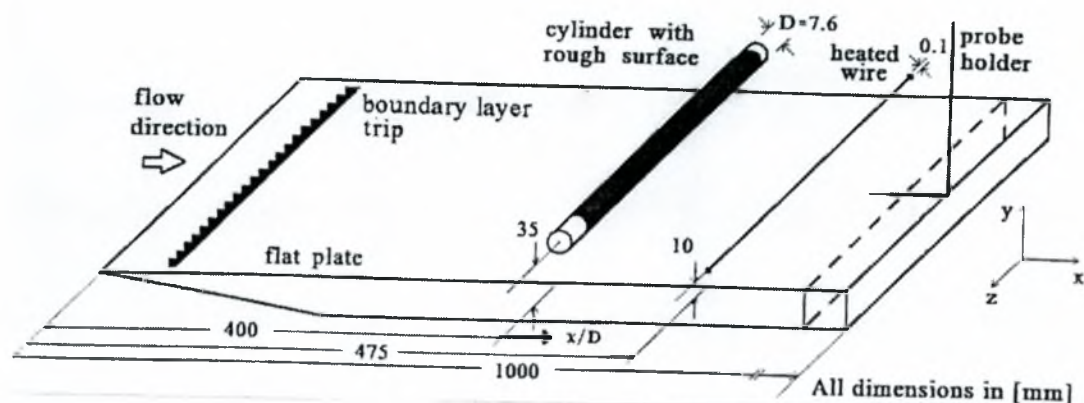
Σχήμα 2.34. Γεωμετρία της ροής. [20].

Μετρήθηκαν πιέσεις (με μικρομανόμετρα) και θερμοκρασίες (με θερμοστοιχεία) πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Η παρουσία του επίπεδου εισάγει ασυμμετρία στην πίεση και στην τοπική διανομή μεταφοράς θερμότητας γύρω από τον κύλινδρο. Ο αριθμός Nusselt (Nu) ελαττώνεται όταν $H/D < 0.4$. Για αποστάσεις $0 < H/D < 0.3$ η εκροή δινών αναστέλλεται. Στο σχήμα (2.35) φαίνεται κατανομή του συντελεστή πίεσης και ο αριθμός Nusselt γύρω από τον κύλινδρο για διαφορετικά H/D .



Σχήμα 2.35. Συντελεστής πίεσης και αριθμός Nusselt. [20].

Πειραματικά μελετήθηκε από τους G. A. Sideridis, E. G. Kastrinakis και S. G. Nychas [21] η αλληλεπίδραση οριακού στρώματος και απορεύματος θερμού κυλίνδρου. Η γεωμετρία της ροής φαίνεται στο σχήμα (2.36).



Σχήμα 2.36. Γεωμετρία της ροής. [21].

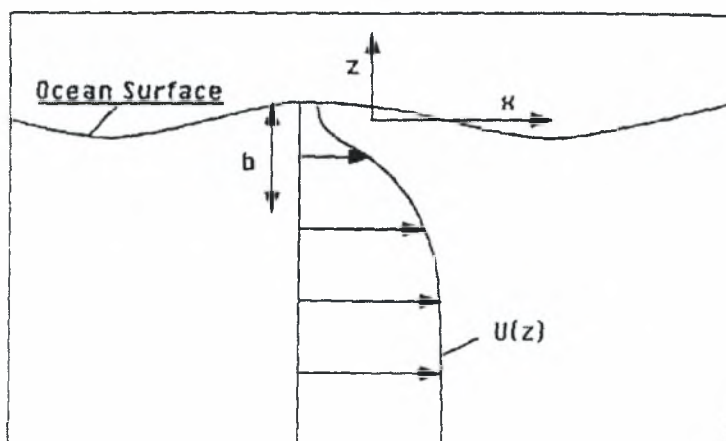
Το πάχος του οριακού στρώματος ήταν $\delta_o \sim 3D$ και ο κύλινδρος είχε τοποθετηθεί $5D$ πάνω από την επίπεδη πλάκα ($h_c = 5D$). Μετρήθηκαν προφίλ ταχυτήτων και θερμοκρασιών πίσω από τον κύλινδρο στις θέσεις $X/D = 20, 25, 30, 35$ με αριθμό $Re = 1820$. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας, γίνεται μεταφορά θερμού ρευστού από την περιοχή του οριακού στρώματος προς την περιοχή του απορεύματος και μεταφορά ψυχρού ρευστού από το απόρευμα προς το οριακό στρώμα.

2.5. Μελέτη των φαινομένων ανάμειξης κοντά σε διεπιφάνεια νερού – αέρα

Φαινόμενα ανάμειξης κοντά σε διεπιφάνεια νερού – αέρα έχουν μελετηθεί κυρίως υπολογιστικά από τους Α. Α. Dimas και Γ. S. Triantafyllou στις δημοσιεύσεις [10], [11], [12], [13].

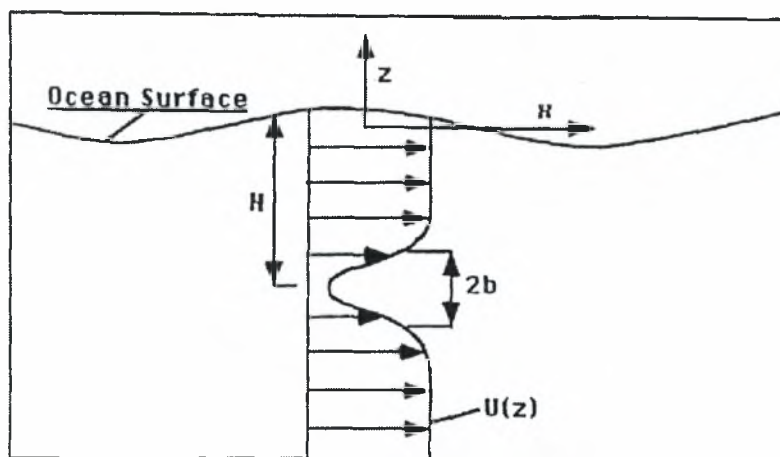
Οι ερευνητές αυτοί περιόρισαν την μελέτη τους σε ανάμειξη ορμής, δηλαδή υπολόγισαν πεδία ταχυτήτων. Οι περιπτώσεις που εξέτασαν ήταν :

- α) Απλή διάτμηση κοντά σε διεπιφάνεια (Σχήμα 2.37)



Σχήμα 2.37. Απλή διάτμηση κοντά σε διεπιφάνεια. [12].

β) Διάτμηση τύπου απορεύματος κοντά σε διεπιφάνεια (Σχήμα 2.38)

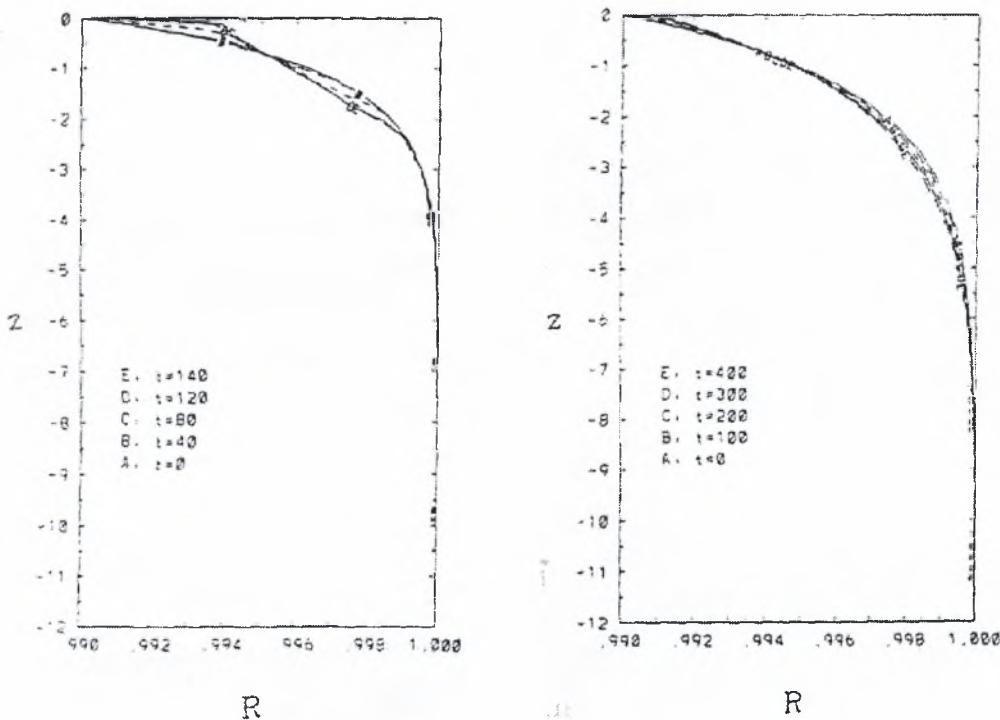


Σχήμα 2.38. Διάτμηση τύπου απορεύματος κοντά σε διεπιφάνεια. [13].

Η δεύτερη αυτή περίπτωση (β) μοιάζει με το απόρρευμα ενός μη αεροδυναμικού σώματος (π.χ κύλινδρος) εγκάρσια τοποθετημένου σε ροή, κοντά σε διεπιφάνεια ή βυθισμένο.

Τα αποτελέσματα της πρώτης περίπτωσης έδειξαν ότι σε χαμηλούς αριθμούς Froude ($Fr=0,5$) δημιουργούνται ισχυρά πεδία στροβιλωδών κινήσεων (δίνες), η ανάμειξη είναι ισχυρή και γίνεται αναδιανομή στο πεδίο πυκνότητας στην ελεύθερη επιφάνεια. Σε υψηλούς αριθμούς Froude ($Fr=1,5$) δεν εμφανίζονται ισχυρά πεδία στροβιλωδών κινήσεων και η ανάμειξη δεν είναι ισχυρή (Σχήμα 2.39). Βέβαια η μέση διανομή της πυκνότητας δείχνει ότι υπάρχει δίκτυο μεταφοράς νερού υψηλής πυκνότητας στην επιφάνεια. Στην

επιφάνεια ενός κυματισμού ενώ στην κορυφή είναι ρευστό χαμηλής πυκνότητας στην κοιλάδα βρίσκεται ρευστό υψηλής πυκνότητας, αν και κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια η διανομή είναι εντελώς διαφορετική. Ο αριθμός Fr (Froude) ορίζεται $Fr = U_{\infty}/(gb)^{1/2}$ (σχ2.37).

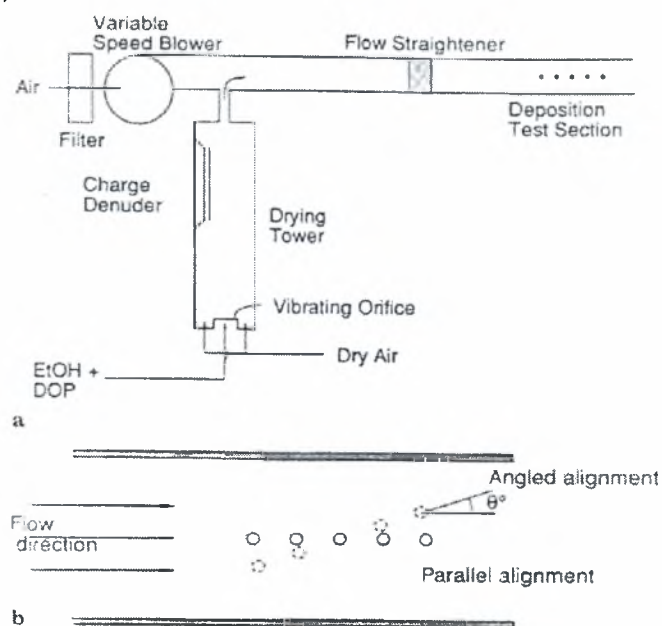


Σχήμα 2.39. Διανομή πυκνότητας για α) $Fr=0,5$ και β) $Fr=1,5$. [12].

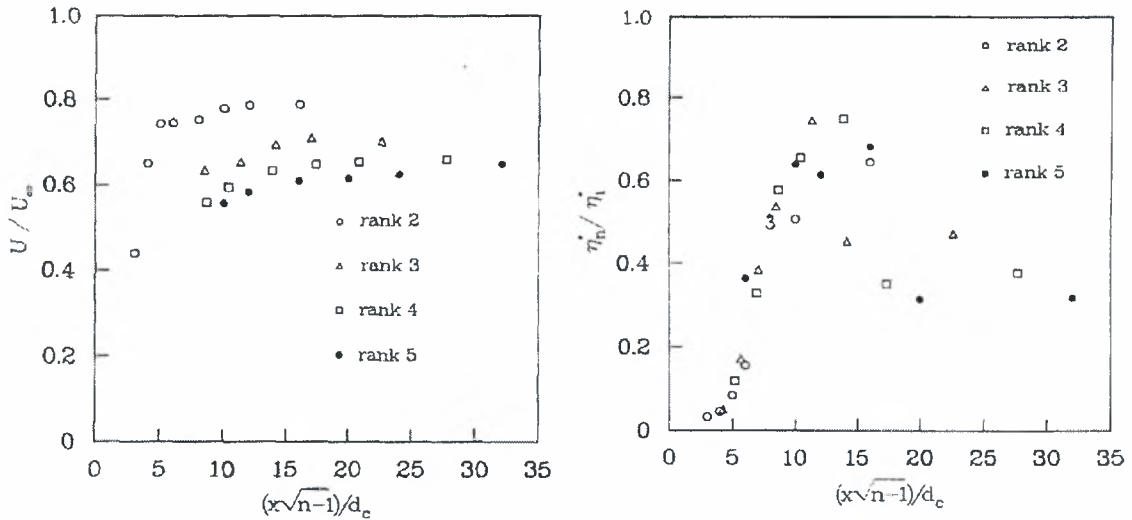
Στην περίπτωση της διάτμησης τύπου απορεύματος τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η συμπεριφορά της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας επηρεάζεται από δύο παράγοντες : α) τον αριθμό Froude ($Fr = U_{\infty}/(gb)^{1/2}$) (σχ2.38) και β) το βάθος (H) που εμφανίζεται αρχικά η διαταραχή. Έτσι σε μεγάλο βάθος εμφάνισης της διαταραχής και μικρό αριθμό Froude έχουμε παραγωγή και διάδοση κύματος αλλά σε μικρό πλάτος στην ελεύθερη επιφάνεια. Για μεγάλο βάθος αρχικής διαταραχής αλλά με αυξημένο αριθμό Froude προκαλείται απότομη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και έχουμε κατακρήμνιση των κυμάτων. Σε υψηλούς αριθμούς Froude υπάρχουν αστάθειες και συμβαίνει κατακρήμνιση κυμάτων. Η μελέτη έγινε για αριθμούς $Fr=0,5, 5, 10, 100$, και $H=5, 10$.

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν πειράματα ώστε να καλυφθεί το κενό που όπως διαπιστώθηκε από την μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας υπάρχει σε αυτά τα θέματα και ειδικά σε πειραματικό επίπεδο.

Στα πειράματα που έκαναν J. K. Helgesen και M. J. Matteson [15] μελέτησαν την ανάμειξη και την διάχυση που είχαν σωματίδια σε ροή μέσα σε αγωγό παρουσία συστοιχίας κυλίνδρων σε σειρά και υπό γωνία για $1300 < Re < 5100$. Στο σχήμα (2.40) φαίνεται η πειραματική διάταξη. Μετρήθηκαν ταχύτητες και συγκεντρώσεις πίσω από κυλίνδρους καθώς και η ένταση της τύρβης. Σύμφωνα με την εργασία αυτή υπάρχει διαφορά ανάμεσα στα προφίλ ταχύτητας και συγκεντρώσεως των σωματιδίων όπως φαίνεται και στο σχήμα (2.41).

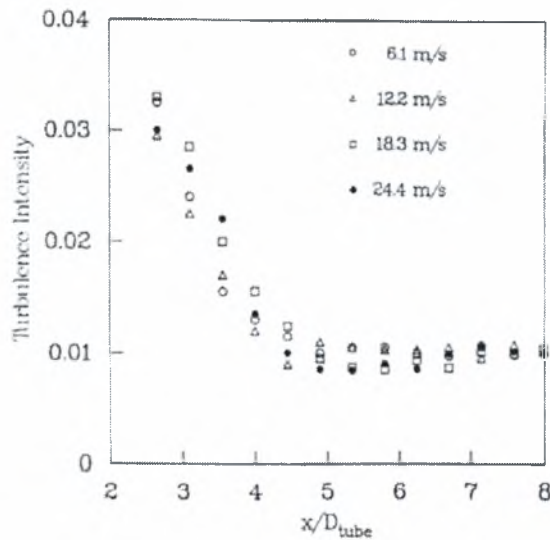


Σχήμα 2.40. Πειραματική διάταξη. [15]



Σχήμα 2.41. Προφίλ ταχύτητας και συγκέντρωσης σωματιδίων. [15]

Στο σχήμα (2.42) φαίνεται το διάγραμμα έντασης της τύρβης για διαφορετικές ταχύτητες όπου φαίνεται η σταδιακή μείωση της κινητικής ενέργειας.

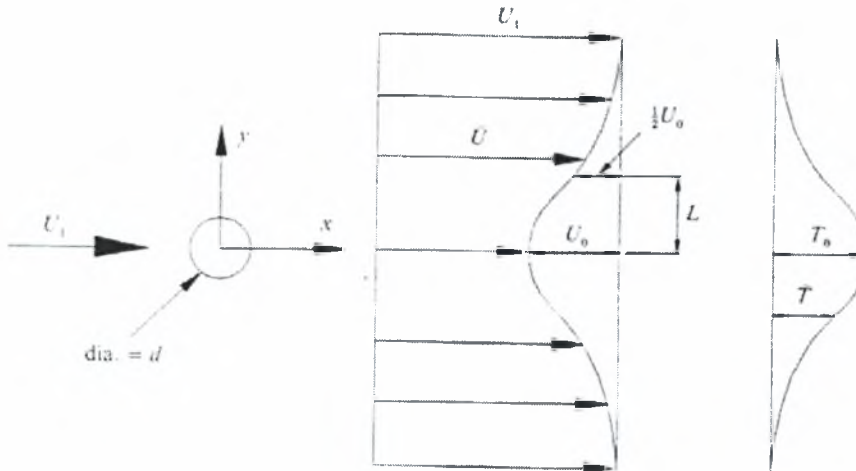


Σχήμα 2.42. Διάγραμμα έντασης της τύρβης. [15]

2.6. Διάχυση βαθμωτού μεγέθους πίσω από κύλινδρο

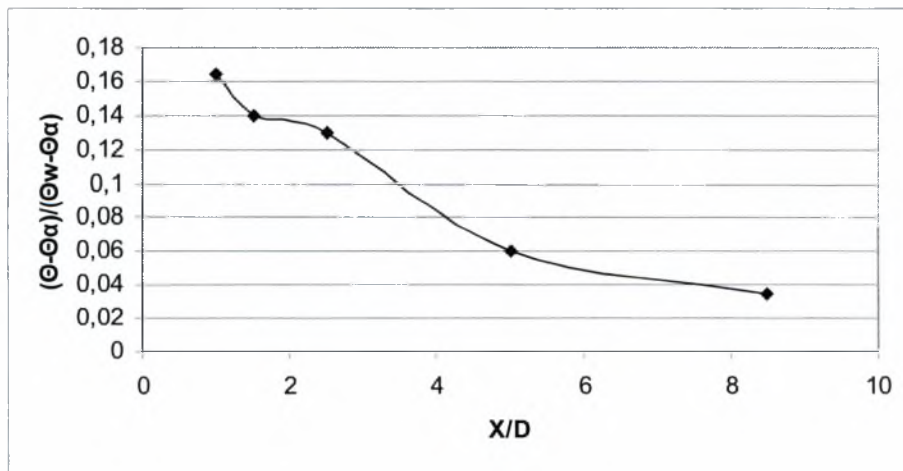
Στην εργασία των M. Matsumura και R. A. Antonia [18] έγιναν μετρήσεις με θερμικό ανεμόμετρο (Hot – wire anemometry) για το πεδίο ταχυτήτων πίσω από θερμαινόμενο κυκλικό κύλινδρο. Μετρήθηκε επίσης το θερμοκρασιακό πεδίο πίσω από τον κύλινδρο. Τα αποτελέσματα της έρευνας

αυτής έδειξαν ότι οι περιδινήσεις μεταφέρουν θερμότητα και ορμή, αλλά γίνεται πιο γρήγορα η ανάμειξη της θερμότητας, ειδικά όταν $x/d = 10 \sim 20$. Στο σχήμα (2.43) φαίνεται η γεωμετρία της ροής. ($Re=5830$)



Σχήμα 2.43. Γεωμετρία της ροής. [18]

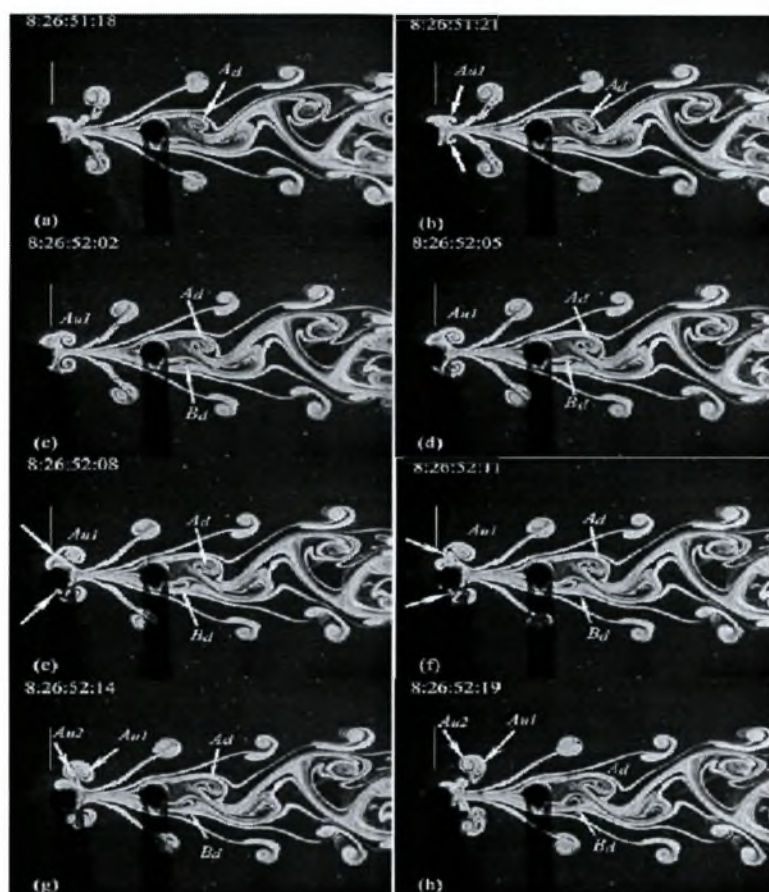
Η πειραματική μελέτη των G. Xenopoulos, H. Stapountzis, C. Salpistis, A. Goulas, [22] με περιστροφικά ταλαντούμενο θερμαινόμενο κυκλικό κύλινδρο, έδειξε ότι σε υψηλές τιμές της συχνότητας ταλάντωσης δεν γίνεται καλή ανάμειξη. Από την έρευνα αυτή προκύπτει επίσης και η πτώση θερμοκρασίας στην κεντρική γραμμή πίσω από τον μη ταλαντούμενο κύλινδρο (σχήμα 2.44).



Σχήμα 2.44. Πτώση θερμοκρασίας στην κεντρική γραμμή θερμαινόμενου κυλίνδρου. [22]

Οι S. J. Xu και Y. Zhou* [23] μελέτησαν την επίδραση στο απόρρευμα σταθερού κυλίνδρου προερχόμενο από ταλαντούμενο κύλινδρο που τοποθετήθηκε μπροστά από τον σταθερό. Μελετάται (πειραματικά) η επίδραση στο απόρευμα ενός ταλαντούμενου (κατά τη διεύθυνση της ροής) κυλίνδρου αλλά και στο απόρευμα ενός σταθερά τοποθετημένου κυλίνδρου που βρίσκεται πίσω από τον ταλαντούμενο. Και οι δύο κύλινδροι είναι ίδιας διαμέτρου d . Η μέθοδος οπτικοποίησης είναι με φθορισμό λέιζερ (laser induced fluorescence technique). Οι μετρήσεις με τη μέθοδο LIF διεξήχθησαν σε τετραγωνικής μορφής υδροσήραγγα ($0.15\text{m} \times 0.15\text{m}$) μήκους 0.5m . Το υλικό του καναλιού είναι οπτικό γυαλί (perspex panels) και τα τοιχώματά του έχουν πάχος 0.02 m . Η ταχύτητα της ροής ελέγχεται με ρυθμιστική βαλβίδα και μέγιστη τιμή αυτής ισούται με 0.32m/s . Για την οπτικοποίηση χρησιμοποιήθηκε Ροδαμίνη 6G 99% η οποία έχει ανοιχτό κόκκινο χρώμα και το οποίο φαίνεται μεταλλικό πράσινο όταν 'διεγείρεται' από το λέιζερ. Η εισαγωγή της Ροδαμίνης γινόταν μέσω μιας οπής στο κέντρο του κυλίνδρου και σε γωνία 90 μοιρών αναφορικά με το σημείο ανακοπής. Ένα λεπτό στρώμα λέιζερ παραγόμενο από σαρωτή λέιζερ (laser beam sweeping) παρείχε φωτισμό κάθετα στο μέσο επίπεδο του καναλιού για $0 \leq x/d \leq 10$. Η ακτίνα λέιζερ παραγόταν από ένα Argon Ion Laser με μέγιστη ισχύ εξόδου 4 watt . Η καταγραφή των πειραμάτων έγινε με επαγγελματική ψηφιακή κάμερα (JVC GY-DV500E) και ρυθμό καρέ (frame rate) ίσο με 25 καρέ το δευτερόλεπτο.

Η απόσπαση των δινών του δευτέρου κυλίνδρου είναι εναλλασσόμενη ενώ του πρώτου συμμετρική. Αυτό φαίνεται καθαρά στις πράγματι εντυπωσιακές φωτογραφίες μέσω της μεθόδου LIF στην υδροσήραγγα ($f_e/f_s=1.8$, $A/d=0.5$ και $Re=300$), σχήμα (2.45).



Σχήμα 2.45. Φωτογραφία απόσπασης δινών (μέθοδος LIF). [23]

Σύμφωνα με την έρευνα που έχει γίνει στην διεθνή βιβλιογραφία δεν βρέθηκε μελέτη που να έχουν γίνει πειράματα στα οποία ο κυκλικός κύλινδρος να είναι τοποθετημένος κοντά στην διεπιφάνεια νερού – αέρα ούτε οπτικοποίηση της ροής που προκύπτει από την αλληλεπίδραση κυλίνδρου και ελεύθερης επιφάνειας.

Πειράματα για να καλυφθεί αυτό το κενό και οπτικοποίηση της ροής έγιναν στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο. Επίσης για την μελέτη και διερεύνηση των παραπάνω φαινομένων αναπτύχθηκε μεθοδολογία ψηφιακής ανάλυσης εικόνας.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στην υδροσήραγγα του Εργαστηρίου Υδραυλικής και Περιβαλλοντικής Τεχνικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σκαρίφημα της οποίας δίνεται στο τέλος του κεφαλαίου (σχήμα 3.1).

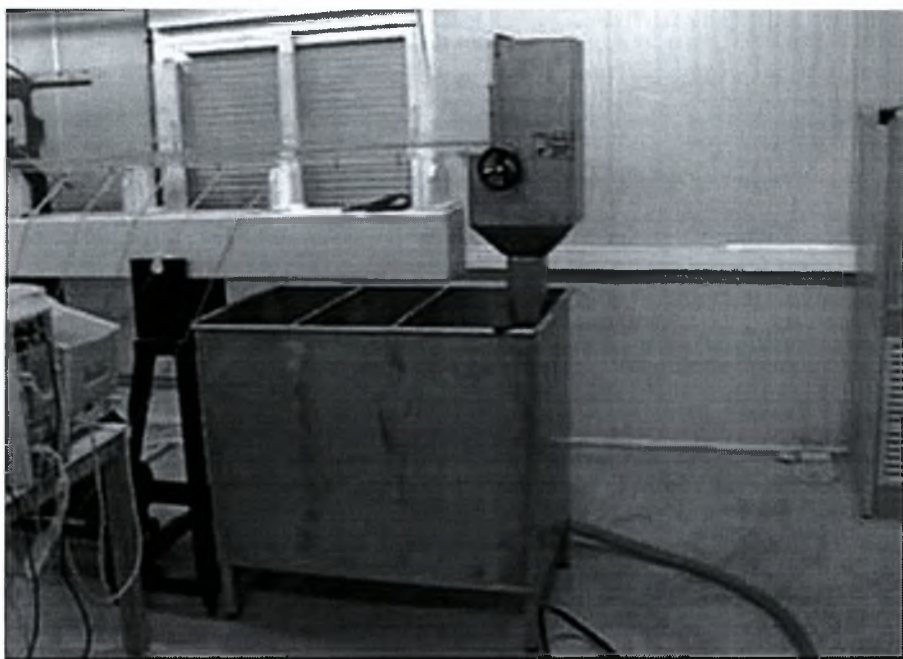
Η πειραματική διάταξη αποτελείται από:

- Την υδροσήραγγα
- Πειραματικά μοντέλα (3 κυκλικοί κύλινδροι)
- Δύο δοχεία με στρόφιγγα (από όπου γινόταν η παροχή των χρωμάτων)
- Σωληνάκια με τα οποία πραγματοποιούνταν η σύνδεση μεταξύ δοχείων και δοκιμίων
- Δύο υγρά με χρωστικές (Blue, Red)
- Ψηφιακή κάμερα
- Λάμπες αλογόνου για τον φωτισμό του χώρου διεξαγωγής των πειραμάτων

3.1. Υδροσήραγγα

3.1.1. Δεξαμενή νερού

Η δεξαμενή νερού έχει διαστάσεις $1 \times 0.6 \times 0.75$ m. Το υλικό κατασκευής της δεξαμενής είναι ανοξείδωτος χάλυβας και το πάχος είναι 1.5 mm. Η δεξαμενή βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον υπερχειλιστή στο τέλος του καναλιού για την συλλογή του νερού. Στη βάση της υπάρχει μια βάνα εξόδου του νερού που καθιστούσε την αλλαγή του νερού πολύ εύκολη όποτε αυτό ήταν επιθυμητό. Η διάρκεια αλλαγής του νερού ήταν περίπου τριάντα λεπτά. Βέβαια καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων γινόταν ανανέωση του νερού με ρυθμό 15 lt/min έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή και η θερμοκρασία και η διαύγεια του νερού. Μετά από κάποιο αριθμό πειραμάτων, η αλλαγή του νερού στην δεξαμενή ήταν αναπόφευκτη καθώς με την πάροδο του χρόνου το νερό γινόταν μη διαυγές επειδή η συγκέντρωση του χρώματος στο νερό ήταν αθροιστική. Στην εικόνα (3.1) φαίνεται ο υπερχειλιστής και η δεξαμενή νερού.



Εικόνα 3.1. Η δεξαμενή νερού.

3.1.2. Αντλία νερού και ροόμετρο

Η φυγοκεντρική αντλία ανακυκλοφορίας νερού είναι ισχύος 1.5 HP. Μεταξύ αντλίας νερού και εισόδου στο κανάλι παρεμβάλλεται ένα κλασικό ροόμετρο οικιακού τύπου προσαρμοσμένο στον σωλήνα μετά την αντλία που μας επιτρέπει να έχουμε συνεχή ένδειξη της παροχής του νερού στο κανάλι. Στην εικόνα (3.2) φαίνεται η αντλία νερού και το ροόμετρο.



Εικόνα 3.2. Η αντλία νερού και το ροόμετρο

3.1.3. Περιγραφή του καναλιού

Οι διαστάσεις του καναλιού είναι: πλάτος=0,1 m, βάθος=0,275 m και με συνολικό μήκος 5 μέτρα. Είναι κατασκευασμένο από Plexiglas και το πάχος των τοιχωμάτων είναι 15 mm. Φέρει δε πιεζόμετρα κατά μήκος του πυθμένα. Το κανάλι στηρίζεται σε δύο μεταλλικές βάσεις. Το τμήμα εισόδου έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε να μην συμβαίνει αποκόλληση της ροής. Η κλίση πυθμένα μεταβάλλεται από 0% έως 2%. Το ανάντι τμήμα μήκους 1 m, μπορεί μετακινούμενο κατακόρυφα να δημιουργήσει αναβαθμό ύψους 25 mm έως 100 mm. Αμέσως μετά το σωλήνα εισαγωγής νερού από την αντλία υπάρχει μεταλλική χοάνη που οδηγεί το νερό στο κανάλι. Εκεί βρίσκεται και το πρώτο φίλτρο (honeycomb) για ομαλοποίηση της ροής. Στη συνέχεια μετά από τις συνδέσεις μεταξύ της χοάνης εισαγωγής νερού και αρχής του καναλιού υπάρχει ένα ακόμα φίλτρο (εικόνα 3.3). Αμέσως μετά είναι τοποθετημένη συσκευή που αποτελείται από επίπεδα κανάλια ομαλοποίησης ροής, ο ρόλος της οποίας είναι να κάνει την ροή στο κανάλι επίπεδη. Στη συνέχεια υπάρχει και το τελικό φίλτρο (honeycomb) που φέρει και συρμάτινο πλέγμα (εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3. Κανάλια και φίλτρα ομαλοποίησης ροής

Η σημασία των φίλτρων που παρεμβάλλονται σε διάφορα σημεία της συνολικής διάταξης είναι καθοριστική εφόσον διορθώνουν τις ανομοιομορφίες της ροής χωρίς όμως τα κελιά αυτά να επηρεάζουν την διεύθυνση του ρευστού.

Το νερό στο χώρο δοκιμών θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καθαρότερο, το παραμικρό ξένο σωματίδιο μπορεί να προκαλέσει ανωμαλία στη ροή τοπικά, πράγμα ανεπιθύμητο και αυτό επιτυγχάνεται με το συρμάτινο πλέγμα.

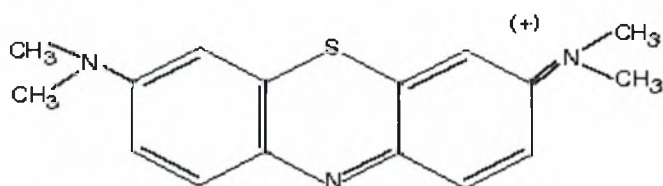
Από το τελευταίο φίλτρο και μετά και μεταξύ δύο συνδέσεων του καναλιού είναι ο χώρος όπου πραγματοποιούνται τα πειράματα και οι μετρήσεις το μήκος του οποίου είναι 2.5m , (εικόνα 3.4). Στο τέλος του καναλιού βρίσκεται ο υπερχειλιστής που οδηγεί το νερό ξανά στην δεξαμενή. Ο υπερχειλιστής φέρει θυροφράγμα για να καθορίζεται το ύψος της στάθμης του νερού στο κανάλι.



Εικόνα 3.4. Χώρος διεξαγωγής πειραμάτων

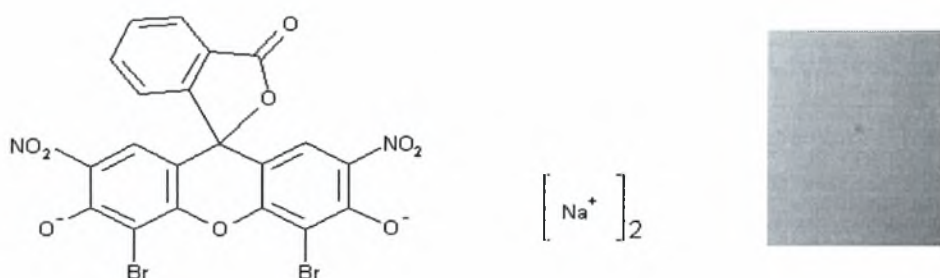
3.2. Χρώματα οπτικοποίησης

Η μέθοδος οπτικοποίησης που εφαρμόστηκε ήταν οπτικοποίηση με συνεχή έγχυση χρωματικής βαφής (dye injection). Ως χρώματα χρησιμοποιήθηκαν δύο υδατικά διαλύματα: (α) Methyl Blue (μπλε χρώμα) με χημικό τύπο $C_{16}H_{18}ClN_3S$ και μοριακό βάρος 319.85, (β) Eosin (πορτοκαλί χρώμα) με χημικό τύπο $C_{20}H_6Br_4Na_2O_5$ και μοριακό βάρος 691,91, περιεκτικότητας 2% κατά βάρος και τα δύο, εικόνα (3.5).



Εικόνα 3.5.α. Methyl Blue

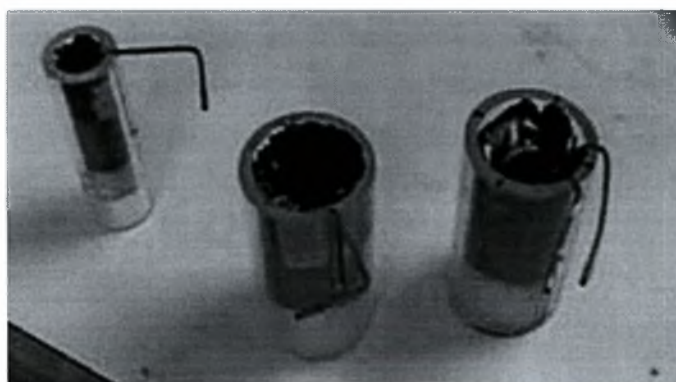




Εικόνα 3.5.β. Eosin

3.3. Πειραματικά μοντέλα (κυκλικοί κύλινδροι)

Για την οπτικοποίηση χρησιμοποιήθηκαν τρεις κυκλικοί κύλινδροι διαμέτρων 13, 30 και 50 mm. Το μήκος των κυλίνδρων είναι 100 mm, είναι κατασκευασμένοι από plexiglass και είναι κοίλοι εσωτερικά (εικόνα 3.6). Στους κυλίνδρους έχουν διανοιχτεί δύο οπές διαμέτρου 2 mm υπό γωνία 20 και -20 μοίρες ως προς το σημείο ηρεμίας (σημείο ανακοπής) και στο μέσο του μήκους των. Στις οπές αυτές έχουν προσαρμοστεί χάλκινα σωληνάκια (τέτοια που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ψύξης) από την έξοδο τους εισάγονται τα χρώματα στο πεδίο ροής πίσω από τον κύλινδρο. Οι κύλινδροι εσωτερικά φέρουν δύο στεγανοποιητικές τάπες στα πλευρικά άκρα των οποίων έχουν τοποθετηθεί ελατήρια ώστε να ασκούν μια ικανοποιητική προένταση για την ασφαλή και σταθερή τοποθέτηση των κυλίνδρων στα τοιχώματα του καναλιού.



Εικόνα 3.6. Πειραματικά μοντέλα (κύλινδροι 13, 30, 50 mm)

3.4. Δοχεία παροχής χρωμάτων

Η παροχή των χρωμάτων γινόταν από δυο πλαστικά δοχεία χωρητικότητας 4 και 10 lt για το μπλε και πορτοκαλί χρώμα αντίστοιχα. Στη βάση των δοχείων υπάρχει στρόφιγγα για το άνοιγμα και κλείσιμο της παροχής των χρωμάτων. Τα δοχεία ήταν τοποθετημένα πάνω σε μεταλλική βάση. Το ύψος τοποθέτησης των δοχείων ήταν 1,1 m πάνω από το κανάλι της ροής και η ροή των χρωμάτων επιτυγχανόταν λόγω βαρύτητας.

3.5. Σωληνάκια μεταφοράς χρωμάτων

Μεταξύ στρόφιγγας δοχείων και κυλίνδρων χρησιμοποιήθηκαν πλαστικά σωληνάκια διαφόρων διαμέτρων ώστε να επιτευχθεί σύνδεση μεταξύ δοχείων αποθήκευσης και κυλινδρικών δοκιμίων, το συνολικό μήκος των οποίων ήταν 1m. Σε κάποιο σημείο της συνολικής σύνδεσης χρησιμοποιήθηκαν σωληνάκια με ρυθμιστικό παροχής (τέτοια χρησιμοποιούνται στους ορούς των ασθενών). Αυτό αποδείχθηκε πολύ εύχρηστο στην πράξη επειδή το άνοιγμα και κλείσιμο της παροχής επιτυγχανόταν μέσω αυτών των ρυθμιστικών παροχής χωρίς να χρειάζεται να ανοιγοκλείνουμε τη στρόφιγγα των δοχείων τα οποία ήταν τοποθετημένα σχετικά ψηλά κάθε φορά που γινόταν μετακίνηση των δοκιμίων κατά μήκος του βάθους του καναλιού (επειδή οι μετακινήσεις αυτές ήταν συχνές και γινόταν με το χέρι έπρεπε να μηδενίζεται η παροχή των χρωμάτων για να μετακινούνται οι κύλινδροι πιο εύκολα αλλά και για να γίνεται οικονομία στη χρήση των χρωμάτων το οποίο οδήγησε και σε λιγότερες αλλαγές του νερού της δεξαμενής).

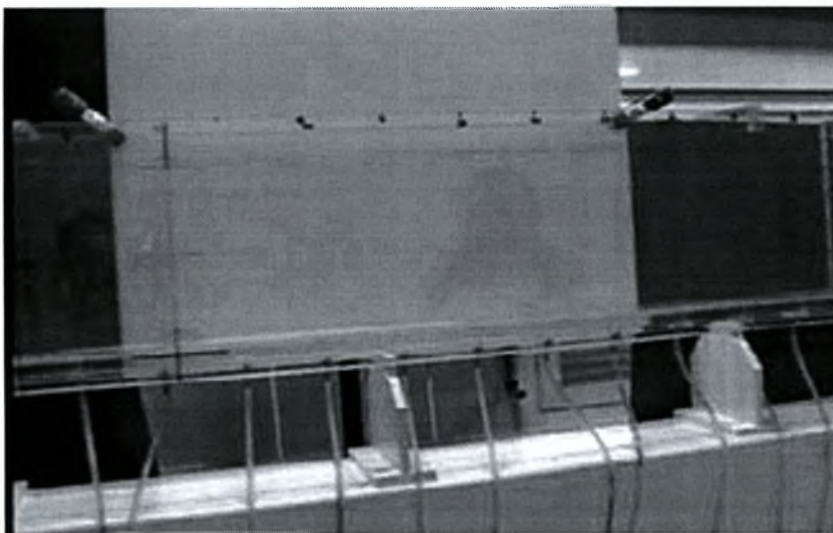
3.6 Ψηφιακή κάμερα και φωτισμός

Η μαγνητοσκόπηση των πειραμάτων έγινε με ψηφιακή κάμερα JVC. Η κάμερα ήταν τοποθετημένη σε σταθερή θέση και σε απόσταση 1m απέναντι από τον χώρο δοκιμών μπροστά από το κανάλι. Πίσω από το κανάλι και σε απόσταση 0,8 m και ύψος 1.6 m από το έδαφος ήταν τοποθετημένες η

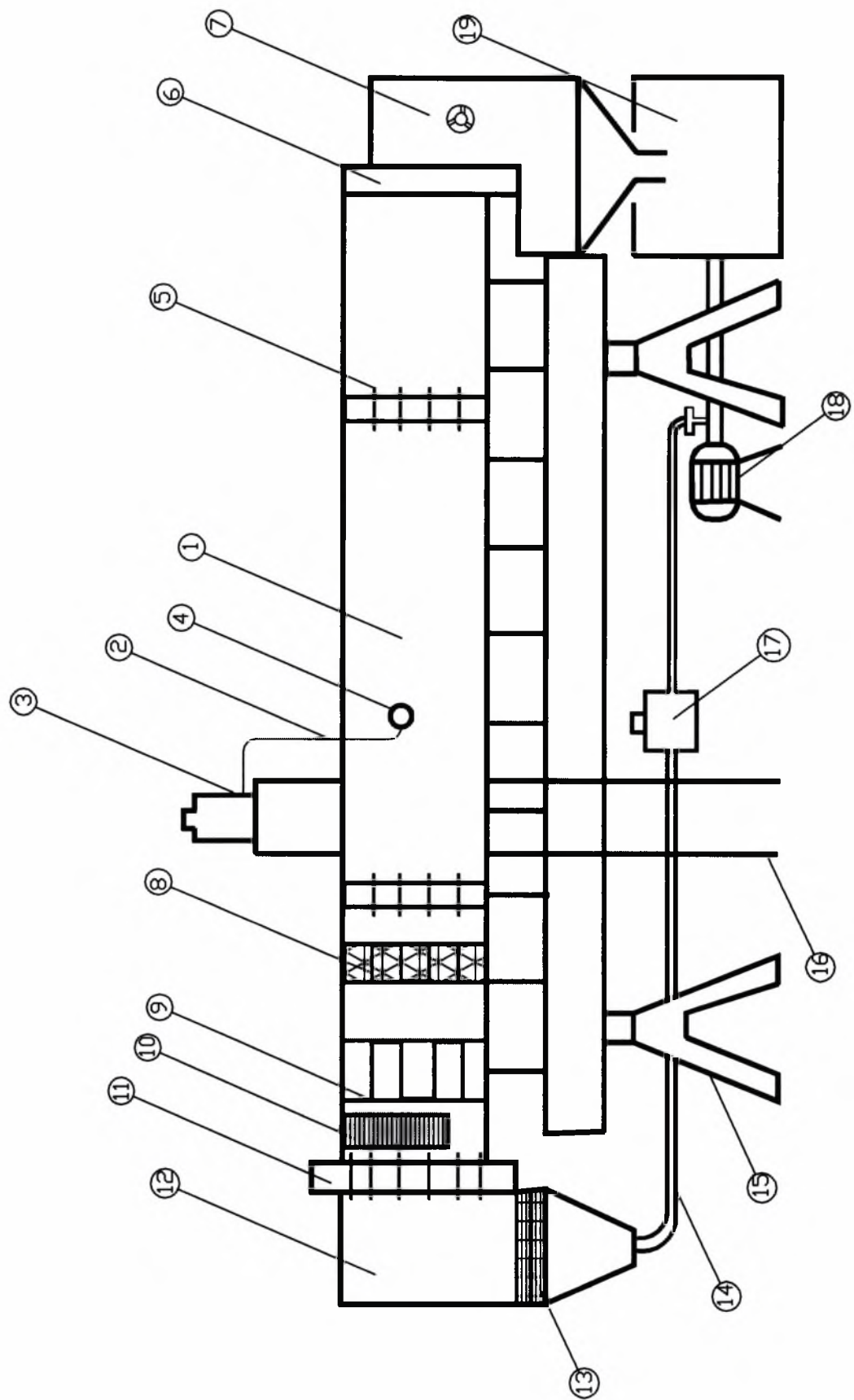
λάμπες αλογόνου (εικόνα 3.7) για το φωτισμό του χώρου των πειραμάτων ενώ κατά τη διάρκεια της μαγνητοσκόπησης τα φώτα του εργαστηρίου παρέμεναν κλειστά. Στο πίσω τοίχωμα του καναλιού τοποθετήθηκε ένα ορθογώνιο πλαστικό άσπρο Plexiglas (εικόνα 3.8) που παράλληλα με την τοποθέτηση μαύρων ορθογώνιων χαρτονιών σε σημεία γύρω από το κανάλι προσέφεραν στην επίτευξη ομοιόμορφου φωτισμού αποκλειστικά στο χώρο των πειραμάτων.



Εικόνα 3.7. Λάμπες αλογόνου



Εικόνα 3.8. Λευκό Plexiglas και μαύρα χαρτόνια για την επίτευξη ομοιόμορφου φωτισμού



Σχήμα 3.1. Σκαρίφωμα πειραματικής διατάξης

1. Χώρος δοκιμών
2. Σωληνάκια μεταφοράς χρωμάτων
3. Δοχεία παροχής χρωμάτων
4. Πειραματικό μοντέλο
5. Σύνδεση υδροσήραγγας
6. Θυρόφραγμα
7. Υπερχειλιστής
8. Φίλτρο ομαλοποίησης με συρμάτινο πλέγμα
9. Κανάλια ομαλοποίησης της ροής
10. Φίλτρο ομαλοποίησης ροής (honeycombs)
11. Σύνδεση υδροσήραγγας
12. Χοάνη εισαγωγής υδροσήραγγας
13. Φίλτρο ομαλοποίησης ροής (honeycombs)
14. Σωλήνας εισαγωγής υδροσήραγγας
15. Βάση στήριξης υδροσήραγγας
16. Βάση τοποθέτησης δοχείων
17. Ροόμετρο
18. Αντλία νερού
19. Δεξαμενή νερού

4.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εξαγωγή και ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε βάσει της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (digital image analysis). Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι παράμετροι (συνθήκες) των πειραμάτων καθώς και η υπολογιστική διαδικασία (προγράμματα).

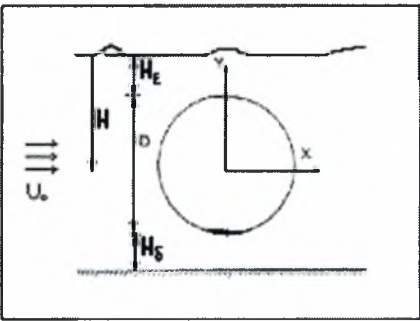
4.1. Πειραματική μεθοδολογία

Η βασικότερη παράμετρος που χαρακτηρίζει το είδος (στρωτή ή τυρβώδης) μιας ροής είναι ο αδιάστατος αριθμός Reynolds που από φυσική άποψη παριστάνει το λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις ιξώδεις δυνάμεις που δρουν στο ρευστό. Για την περίπτωση της ροής πίσω από κύλινδρο ο αριθμός Reynolds ισούται με $Re=U_0D/\nu$ όπου U_0 είναι η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος της ροής πριν από τον κύλινδρο, D η εξωτερική διάμετρος του κυλίνδρου και ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος μετρήθηκε με hot – film και βρέθηκε ίση με 0,2 m/sec. Οι διαμέτροι των κυλίνδρων ήταν 13, 30 και 50 mm αντίστοιχα για τα τρία δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Η θερμοκρασία του ρευστού (νερό) ήταν 20° C και μετρήθηκε με θερμοστοιχείο. Τελικά η τιμή του κινηματικού ιξώδους που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του αριθμού Reynolds είναι $1,004 \times 10^{-6}$ [Α. Θ. Παπαϊωάννου, τόμος II] και ανταποκρίνεται στις συνθήκες των πειραμάτων δηλαδή 20° C και 1 atm. Οπότε για τους αριθμούς Re έχουμε:

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ (mm)	ΑΡΙΘΜΟΣ $Re= U_0D/\nu$
13	2600
30	6000
50	10000

Οι αποστάσεις της κάμερας καθώς και της λάμπας φωτισμού διατηρήθηκαν σταθερές καθόλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Το τελευταίο είναι πολύ σημαντικό γιατί η τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel (pixel intensity) εξαρτάται από την απόσταση που είναι τοποθετημένος ο φακός της ψηφιακής κάμερας (βάθος χρώματος-color depth) και για να διατηρηθούν οι πειραματικές παράμετροι σταθερές πρέπει να διατηρηθούν και οι προαναφερθείσες αποστάσεις σταθερές.

Επίσης σημαντικό ρόλο στην οπτικοποίηση έπαιξαν και οι θέσεις τοποθέτησης των μοντέλων μέσα στην υδροσήραγγα. Κάθε κύλινδρος βυθιζόταν με βήμα 0,1 D από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι το κέντρο της σήραγγας και ανέβαινε με βήμα 0,1 D από το δάπεδο της σήραγγας μέχρι το κέντρο της. Στο σχήμα (4.1) φαίνεται η γεωμετρία της ροής.



Σχήμα 4.1. Γεωμετρία της ροής

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι θέσεις στις οποίες έγινε οπτικοποίηση της ροής για κάθε κύλινδρο.

D=13mm	U=0,2m/s	D=30mm	U=0,2m/s	D=50mm	U=0,2m/s
H/D- Ελεύθερη επιφάνεια		H/D-Ελεύθερη επιφάνεια		H/D-Ελεύθερη επιφάνεια	
0		-1/2		-1/2	
0,1		0		0	
0,2		0,1		0,1	
0,3		0,2		0,2	
0,4		0,3		0,3	

0,5	0,4	0,4
0,6	0,5	0,5
0,7	0,6	0,6
0,8	0,7	0,7
0,9	0,8	0,8
1	0,9	0,9
1,2	1	1
1,5	1,2	1,2
2	1,5	Κ
3	2	Η/Δ- Δάπεδο
Κ	3	0
Η/Δ- Δάπεδο	Κ	0,1
0	Η/Δ- Δάπεδο	0,2
0,1	0	0,3
0,2	0,1	0,4
0,3	0,2	0,5
0,4	0,3	0,6
0,5	0,4	0,7
0,6	0,5	0,8
0,7	0,6	0,9
0,8	0,7	1
0,9	0,8	1,2
1	0,9	
1,2	1	
1,5	1,2	
2	1,5	
3	2	
	3	

Κατά την διαδικασία μαγνητοσκόπησης η κάμερα άνοιγε 10sec πριν να μπει χρώμα και η διάρκεια μαγνητοσκόπησης ήταν 60sec για κάθε θέση. Ο χρόνος καταγραφής επιλέχτηκε 60 sec γιατί η σήραγγα είναι μικρή το νερό ανακυκλοφορεί και αν το χρώμα αφηνόταν για περισσότερο χρόνο το νερό θα

μολυνόταν σε μεγάλο βαθμό και από τα δύο χρώματα επειδή η συγκέντρωση του χρώματος σ' αυτό ήταν αθροιστική.

4.2. Υπολογιστική μεθοδολογία

Η αποθήκευση των πειραμάτων γινόταν σε κασέτες από τις οποίες στη συνέχεια γινόταν η μεταφορά των βιντεοσκοπήσεων με frame grabber σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (δεν υπήρχε δυνατότητα άμεσης μεταφοράς των βιντεοσκοπήσεων απευθείας στον υπολογιστή με τον υπάρχοντα εξοπλισμό του εργαστηρίου) σε μορφή αρχείων avi. Η ανάλυση των αρχείων αυτών καθώς και των εικόνων που προέκυψαν από αυτά ήταν 352 x 288. Ο ρυθμός δειγματοληψίας (frame rate) ήταν 15 καρέ το δευτερόλεπτο (15 fps), δηλαδή ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών ήταν ίσος με 0,067 sec (1/15). Η διάρκεια κινηματογράφησης για κάθε θέση των κυλίνδρων ήταν ίση με 60 sec ώστε να υπάρχουν αρκετές περίοδοι του φαινομένου για να παρατηρηθεί η επαναληψιμότητά του.

Στη συνέχεια για το 'κόψιμο' των εικόνων από τα αρχεία avi χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα virtual dub το οποίο μετατρέπει κάθε καρέ του αρχείου avi σε μια φωτογραφία-αρχείο τύπου bmp ή jpg ή οποιουδήποτε άλλου τύπου επιλεχθεί. Η ανάλυση των εικόνων είναι ίδια με αυτή των αρχείων avi. Αρχικά οι φωτογραφίες αποθηκεύτηκαν σαν αρχεία bmp. Επειδή τα avi ήταν έγχρωμα (βάθος ανάλυσης 24 RGB) χρειαζόταν να γίνει η μετατροπή των έγχρωμων εικόνων (RGB) σε γκρι(gray scale). Γι αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας IRFAN VIEW 32 με την εντολή convert to grey scale του οποίου έγινε μετατροπή των αρχείων των έγχρωμων εικόνων bmp (24 RGB) σε γκρι jpg (8 bit). Αυτό σημαίνει η τιμή του κάθε pixel της γκρι jpg εικόνας λαμβάνει μια τιμή μεταξύ 0 και 255 (συνολικά 2^8 διακριτές τιμές). Η τιμή 0 αντιστοιχεί στο μαύρο και η τιμή 255 στο λευκό. Ενδιάμεσες τιμές αντιστοιχούν σε διάφορα επίπεδα του γκρι.

Γνωρίζοντας τις πραγματικές διαστάσεις της πειραματικής διάταξης (π.χ. διάμετροι των κυλίνδρων καθώς και εισαγωγή ενός βαθμονομημένου κανόνα με χαρακτηριστικά μήκη) βρέθηκε η αντιστοιχία μεταξύ mm

(πραγματικό μήκος) και pixel η οποία έχει ενσωματωθεί στα προγράμματα. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξης μεγέθους των διαστάσεων του pixel. Δεν μπορούμε να μιλήσουμε για πολύ μικρές κλίμακες, μικρότερες δηλαδή κάθε φορά από τις διαστάσεις των pixels. Για την εύρεση μεγεθών σε μια περιοχή που η διάσταση της είναι μεγαλύτερη του ενός pixel μπορούμε να ολοκληρώσουμε τις τιμές που προκύπτουν από τα pixels που αποτελούν την εκάστοτε περιοχή. Ας σημειωθεί ότι όλες οι αποστάσεις στο πεδίο ροής είναι αδιαστατοποιημένες με τις διαμέτρους των κυλίνδρων. Δηλαδή κατά τον άξονα X (διεύθυνση της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος της ροής) όλες οι αποστάσεις μετρώνται σε X/D μετρημένα από το κέντρο του κυλίνδρου (π.χ. $X/D=4$ σημαίνει απόσταση ίση με 4 διαμέτρους του κυλίνδρου κατά τον άξονα X). Τα ίδια ισχύουν και για τον άξονα Y (κάθετα στον άξονα X). Δηλαδή το σύστημα συντεταγμένων είναι προσαρμοσμένο στο κέντρο του κυλίνδρου (το 0,0 βρίσκεται στο κέντρο του κυλίνδρου). Τέλος αδιαστατοποιημένη είναι και η μετατόπιση του κυλίνδρου ως προς το βάθος του καναλιού με βάση αναφοράς την ελεύθερη επιφάνεια. Δηλαδή $H_e/D=2$ σημαίνει ότι ο κύλινδρος βρίσκεται σε βάθος ίσο με 2 διαμέτρους από την ελεύθερη επιφάνεια. Με την ίδια λογική έχουμε και από το δάπεδο της σήραγγας H_b/D . Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η αντιστοιχία των συντεταγμένων του pixel σε X/D και Y/D για κάθε H_e/D και H_b/D .

Χρήση Matlab για την υπολογιστική μέθοδο ψηφιακής ανάλυσης εικόνας

Για την εξαγωγή και ανάλυση των συχνοτήτων των περιοδικοτήτων της ροής (πιο συγκεκριμένα της συχνότητας απόσπασης δινών της ακολουθίας VON KARMAN) καθώς και μεγεθών όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, ο συντελεστής ανάμειξης I_{mix} και ο συντελεστής συσχέτισης A_{corr} χρησιμοποιήθηκαν προγράμματα σε περιβάλλον MATLAB (MATLAB 6.1).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CONVGRAY

Η χρησιμοποίηση αυτού του προγράμματος έγινε για να αφαιρεθεί ο ηλεκτρονικός θόρυβος από τις φωτογραφίες. Χρησιμοποιεί ένα φίλτρο

συνέλιξης (convolution filter) Gaussian 15x15 το οποίο 'επεμβαίνει' στις gray scale (jpg 8 bit) εικόνες με σκοπό την ομαλοποίηση της (smoothing). Το υπολογιστικό πακέτο MATLAB 6.1 περιέχει στις βιβλιοθήκες του περίπου 100 ηλεκτρονικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται για ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CONV

Η χρησιμοποίηση αυτού του προγράμματος έγινε για να αφαιρεθεί ο ηλεκτρονικός θόρυβος από τις έγχρωμες φωτογραφίες (RGB). Χρησιμοποιεί ένα φίλτρο συνέλιξης (convolution filter) Gaussian 15x15 το οποίο 'επεμβαίνει' στις RGB (bmp 24 bit) εικόνες με σκοπό την ομαλοποίηση της (smoothing).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GRAY

Η εντολή `readim` 'διαβάζει' την εικόνα (τη φιλτραρισμένη) και δημιουργεί ένα πίνακα δύο διαστάσεων (δηλαδή η ανάλυση σε pixel) του οποίου η κάθε τιμή είναι ένας ακέραιος αριθμός μεταξύ 0-255. Τα χρωματικά υγρά που χρησιμοποιούνται για οπτικοποίηση 'αντικατοπτρίζουν' χωροχρονικά τις τροχιές του πραγματικού ρευστού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα χρωματικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν κάνουν ορατό τον σχηματισμό των δινών στο πεδίο ροής. Κάθε δομικό στοιχείο της δίνης (χρωματισμένο pixel) έχει κάποια τιμή (0-255) ανάλογα με τη χωρική θέση που αντιπροσωπεύει το pixel αυτό του πεδίου ροής και ανάλογα με τη χρονική στιγμή του φαινομένου (αριθμός φωτογραφίας). Η πραγματική κίνηση του ρευστού μετατοπίζει τα μόρια του χρωματισμένου διαλύματος σε συγκεκριμένες θέσεις που παράλληλα με τη συνεχή διάχυση με το νερό σε κάθε διακριτό σημείο (pixel της εικόνας) υπάρχει διαφορετική συγκέντρωση χρώματος που επιφέρει αλλαγή στην τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel (pixel intensity). Επειδή το φαινόμενο είναι έντονα περιοδικό οι περιοδικές αυτές μεταβολές στην τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel φέρουν στο φως και τις συχνότητες του φαινομένου όπως θα εξηγηθεί και μαθηματικά παρακάτω. Επίσης στο πρόγραμμα αυτό πραγματοποιούνταν και αποκοπή της φωτογραφίας στην περιοχή ενδιαφέροντος (σε δεδομένη περιοχή pixel που θα γινόταν η ανάλυση συχνοτήτων). Αυτό ήταν αναπόφευκτο δεδομένου

του μεγάλου αριθμού πράξεων και της υπολογιστικής δυναμικότητας του υπολογιστή. Το 'τρέξιμο' των προγραμμάτων πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που είχε επεξεργαστή 1.7 GHz και RAM 512 MB. Ο προηγούμενος περιορισμός έδρασε και στον αριθμό των εικόνων που χρησιμοποιούνταν για την ανάλυση σε κάθε θέση του κυλίνδρου. Διαπιστώθηκε ότι όταν χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες από 600 εικόνες το πρόγραμμα δεν αποκρινόταν και σε αριθμό εικόνων μεταξύ 400-600 το πρόγραμμα χρειαζόταν αρκετό χρόνο για την τελική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των πειραμάτων αποφασίστηκε ο αριθμός των εικόνων που θα χρησιμοποιούνταν σε κάθε θέση και για κάθε κύλινδρο να είναι ίσος με 400 ο οποίος αριθμός καλύπτει αρκετές περιόδους του φαινομένου και παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FFTGRAY

Τελικά οι τιμές των συχνοτήτων προκύπτουν μέσω ανάλυσης Fourier. Πιο συγκεκριμένα για την ανάλυση ενός σήματος (στη συγκεκριμένη περίπτωση σήμα αποτελεί η τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel) χρησιμοποιείται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DISCRETE FOURIER TRANSFORM-DFT) ο οποίος βρίσκει τις συχνότητες του σήματος καθώς και το φάσμα ισχύος του. Βασίζεται στο μετασχηματισμό Fourier και χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα του σήματος λαμβάνουν διακριτές τιμές. Το MATLAB 6.1 έχει στη διάθεση του το γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FAST FOURIER TRANSFORM-FFT) ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος που έγινε γνωστός μετά από μία εργασία των Cooley και Tuckey (1965) και απαιτεί $N \log N$ αριθμητικές πράξεις για τον υπολογισμό του DFT ενώ ο παραδοσιακός τρόπος που εφαρμόζονταν μέχρι τότε απαιτούσε N^2 πράξεις.

Κάθε περιοδική συνάρτηση $f(t)$ με περίοδο T , αναλύεται με σειρές Fourier στη μορφή [8]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) + b_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) \right] \quad (1)$$

όπου:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n \frac{2\pi}{T} t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n \frac{2\pi}{T} t) dt, \text{ όπου } n=1,2,3,\dots\infty$$

Κάθε όρος της σχέσης (1) ονομάζεται αρμονική και η συχνότητά του είναι πολλαπλάσιο της βασικής αρμονικής, η οποία προκύπτει για $n=1$. Η σχέση (1) γράφεται και στη μορφή:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n \frac{2\pi}{T} t - \phi_n) \text{ με } c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \text{ και } \phi_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n}, \text{ όπου}$$

$n=1,2,3,\dots\infty$ (2). Ο συντελεστής c_n ονομάζεται και πλάτος του φάσματος, ενώ η ισχύς του φάσματος ισούται με $\frac{c_n^2}{2}$.

Κάθε μη περιοδική συνάρτηση $f(t)$, μπορεί να αναπαρασταθεί με το μετασχηματισμό Fourier (αντίστροφο και ευθύ αντιστοίχως) ως εξής:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\nu) e^{i2\pi\nu t} d\nu \quad (3) \text{ όπου } f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\nu) e^{-i2\pi\nu t} d\nu \quad (4)$$

με $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$. Είναι ακόμα $F(\nu) = a(\nu) - ib(\nu)$ και το πλάτος του φάσματος

ορίζεται ως : $c(\nu) = \sqrt{a(\nu)^2 + b(\nu)^2}$, ενώ η ισχύς του φάσματος με $\frac{c(\nu)^2}{2}$.

Έστω N η διάσταση του διανύσματος x , οι τιμές του οποίου αντιπροσωπεύουν μια σειρά δεδομένων ενός σήματος. Τότε, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) του διανύσματος x , θα είναι ένα διάνυσμα X διάστασης N και θα δίνεται από τη σχέση:

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n)e^{\frac{-i2\pi}{N}(n-1)(k-1)} \quad \text{με } 1 \leq k \leq N \quad (5), \text{ ενώ ο αντίστροφος διακριτός}$$

μετασχηματισμός Fourier θα δίνεται από τη σχέση:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k)e^{\frac{i2\pi}{N}(n-1)(k-1)} \quad \text{με } 1 \leq n \leq N \quad (6). \text{ Επίσης είναι } X(k) = a(k) - ib(k)$$

και το πλάτος του φάσματος ορίζεται ως: $c(k) = \sqrt{a(k)^2 + b(k)^2}$, ενώ η ισχύς

του φάσματος ισούται με $\frac{c(k)^2}{2}$ με $1 \leq k \leq N$.

Με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την εύρεση όλων των αρμονικών που επιδρούν στη μορφή μιας συνάρτησης, κυρίως μέσα από την ισχύ του φάσματος της συχνότητας.

Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή για την εφαρμογή του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT). Σύμφωνα με το θεώρημα του Nyquist [8], αν f_s είναι η συχνότητα της δειγματοληψίας, τότε η μέγιστη συχνότητα του αναλογικού σήματος που μπορούμε να μετρήσουμε σωστά είναι η $f_m < \frac{f_s}{2}$.

Η διαθέσιμη εντολή του προγράμματος είναι η `fft`. Οι τελικές τιμές που χρησιμοποιούνται και στον τύπο του STROUHAL προκύπτουν σε αυτό το στάδιο.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GRAPHFFTGRAY

Σε αυτό το πρόγραμμα ορίζονται τα σημεία εκείνα του πεδίου ροής (διάφορα X/D και Y/D) στα οποία θα εμφανιστούν τα διαγράμματα συχνοτήτων μετά την ανάλυση που προηγήθηκε στο προηγούμενο πρόγραμμα. Οι κώδικες των προγραμμάτων καθώς και λεπτομερής ανάλυση του FFT παρουσιάζονται στο παράρτημα της εργασίας.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COLOUR

Στο πρόγραμμα αυτό η εντολή `readim` 'διαβάζει' την έγχρωμη εικόνα (αφού υποστεί φιλτράρισμα) και δημιουργεί δυο δισδιάστατους πίνακες (δηλαδή η

ανάλυση σε pixel) στους οποίους η κάθε τιμή είναι ένας αριθμός μεταξύ 0-255 για το Red, 0-255 και 0-255 για το Blue. Επίσης στο πρόγραμμα αυτό πραγματοποιούνταν και 'κόψιμο' της φωτογραφίας στην περιοχή ενδιαφέροντος (σε δεδομένη περιοχή pixel που θα γινόταν η επεξεργασία). Αυτό ήταν αναπόφευκτο δεδομένου του μεγάλου αριθμού πράξεων και της υπολογιστικής δυνατότητας του υπολογιστή.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ m-s-colour

Το πρόγραμμα αυτό επεξεργαζόταν το αρχείο που προέκυπτε από το προηγούμενο πρόγραμμα (colour) και μας έδινε τις μέσες τιμές της έντασης της ακτινοβολίας για το μπλε και το κόκκινο χρώμα αντίστοιχα.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ Graph_m_s_x και Graph_m_s_y

Σ' αυτά τα προγράμματα ορίζονται τα σημεία εκείνα του πεδίου ροής (διάφορα X/D και Y/D) στα οποία θα εμφανιστούν τα διαγράμματα για την μέση τιμή του μπλε και κόκκινου χρώματος, του συντελεστής ανάμειξης I_{mix}

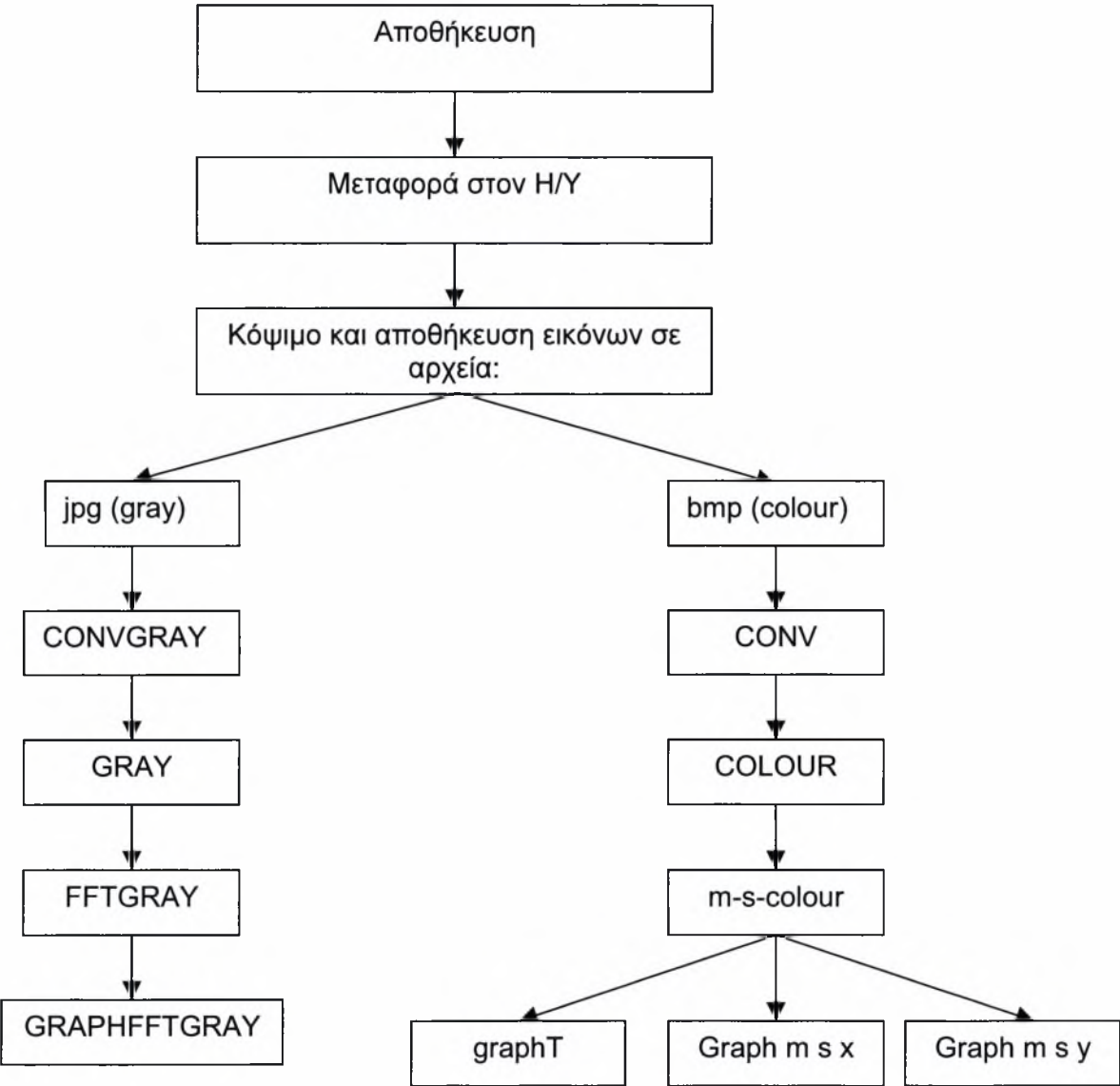
$$= \frac{\overline{I_R \cdot I_B}}{\overline{I_B \cdot I_R}}, \text{ του συντελεστή συσχέτισης } A_{corr} = \frac{\overline{I_R \cdot I_B}}{\overline{I_{B(rms)} \cdot I_{R(rms)}}} \text{ και τη τυπικής}$$

απόκλισης μετά την ανάλυση που προηγήθηκε στο προηγούμενο πρόγραμμα.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ graphT

Το πρόγραμμα αυτό δίνει την μεταβολή με τον χρόνο του μπλε και του κόκκινου χρώματος αντίστοιχα σε ένα σημείο που επιλέγουμε μέσα στο πεδίο ροής. Οι κώδικες των προγραμμάτων καθώς και λεπτομερής ανάλυση του FFT παρουσιάζονται στο παράρτημα της εργασίας.

Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η σειρά με την οποία χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω προγράμματα.



Σχήμα 4.2. Διάγραμμα υπολογιστικής διαδικασίας

5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα μεγέθη που προκύπτουν από την επεξεργασία των πειραμάτων και θα αναλυθούν είναι:

- Συχνότητες εκροής δινών και για τους τρεις κυλίνδρους σε θέσεις κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, στο κέντρο και κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας.

- Η μεταβολή της μέσης τιμής της έντασης ακτινοβολίας για το μπλε και το κόκκινο χρώμα αντίστοιχα (Mean I_b , Mean I_r) στην διεύθυνση X και

Y, για τις παραπάνω θέσεις. $MeanI_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{Bi}$, $MeanI_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{Ri}$,

όπου I_{Bi} και I_{Ri} οι στιγμιαίες τιμές του μπλε και του κόκκινου χρώματος.

- Η μέση τιμή του λόγου (I_r/I_b)
- Η τυπική απόκλιση (RMS) για το μπλε και το κόκκινο χρώμα (Std I_b ,

Std I_r). $StdI_b = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{Bi} - \overline{I_B})^2 \right]^{1/2}$, $StdI_r = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{Ri} - \overline{I_R})^2 \right]^{1/2}$

- Ο συντελεστής ανάμειξης $I_{mix} = \frac{\overline{I'_R \cdot I'_B}}{\overline{I_B} \cdot \overline{I_R}}$

- Ο συντελεστής συσχέτισης $A_{corr} = \frac{\overline{I'_R \cdot I'_B}}{\overline{I_{B(rms)}} \cdot \overline{I_{R(rms)}}}$

Στους πίνακες 1, 2, 3 φαίνονται οι θέσεις που εξετάζονται για κάθε κύλινδρο.

D	50mm		
U _o	0,2 m/sec		
X/D	4	8	
Y/D	-0,5	0	0,5
H _e /D	0,2	0,3	0,4
H _δ /D	0,2	0,3	0,4
H/D	K (center)	K (center)	

Πίνακας 5.1. Κύλινδρος D= 50mm

D		30mm	
U _o		0,2 m/sec	
X/D	4	8	
Y/D	-0,5	0	0,5
H _ε /D	0,2	0,3	0,4
H _δ /D	0,2	0,3	0,4
H/D	K (center)	K (center)	

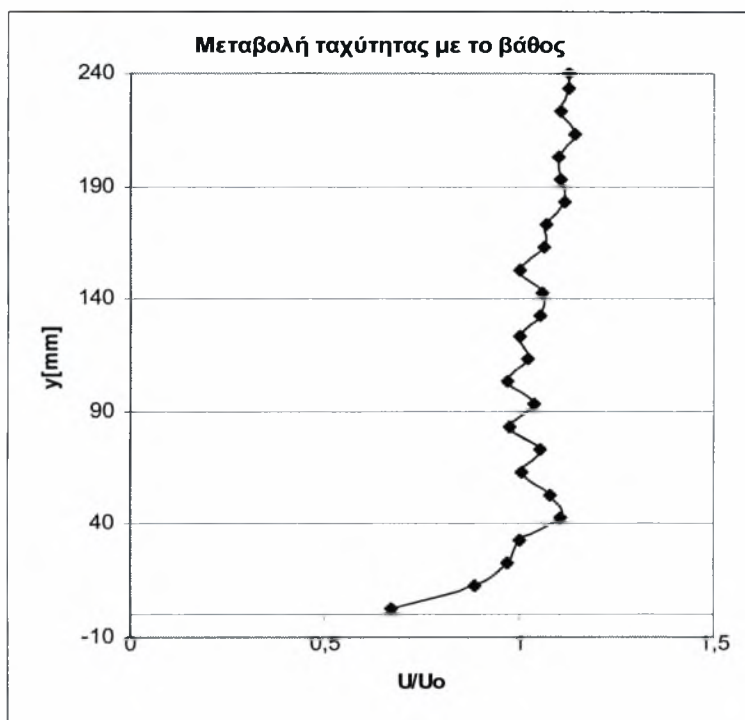
Πίνακας 5.2. Κύλινδρος D= 30mm

D	13mm		
U _o	0,2 m/sec		
X/D	4	8	
Y/D	-0,5	0	0,5
H _ε /D	0,2	0,3	0,4
H _δ /D	0,2	0,3	0,4
H/D	K (center)	K (center)	

Πίνακας 5.3. Κύλινδρος D= 13mm

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται το πάχος του οριακού στρώματος της υδροσήραγγας στην θέση τοποθέτησης των δοκιμών.

Οι τιμές μέσης έντασης ακτινοβολίας για το μπλε και το κόκκινο χρώμα αντίστοιχα (Mean I_b, Mean I_r) στην διεύθυνση X και Y και η τυπική απόκλιση για τις παραπάνω θέσεις είναι διαιρεμένες με μια τιμή αναφοράς έντασης ακτινοβολίας. Η τιμή αναφοράς είναι η ένταση ακτινοβολίας Blue και Red που προκύπτει στην θέση X/D=4, Y/D=0 όταν κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της υδροσήραγγας.



Σχήμα 5.1

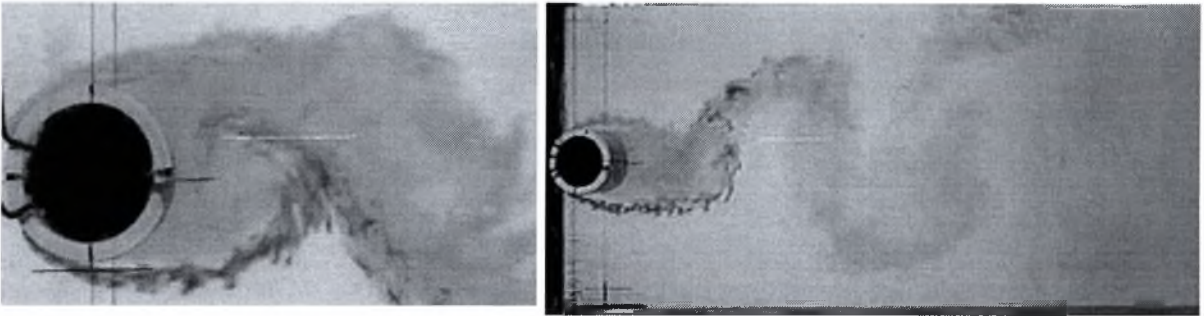
5.1 Συχνότητες εκροής δινών.

5.1.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων για κύλινδρο $D=50$ mm, $Re=10000$

Για τον κύλινδρο διαμέτρου $D=50$ mm είναι ο αριθμός $Re=10000$ και ταχύτητα ελευθέρου ρεύματος $U_0=0,2$ m/sec. Θα ακολουθήσει ανάλυση όπου ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο του καναλιού και στη συνέχεια γίνει σύγκριση με τις υπόλοιπες θέσεις του κυλίνδρου.

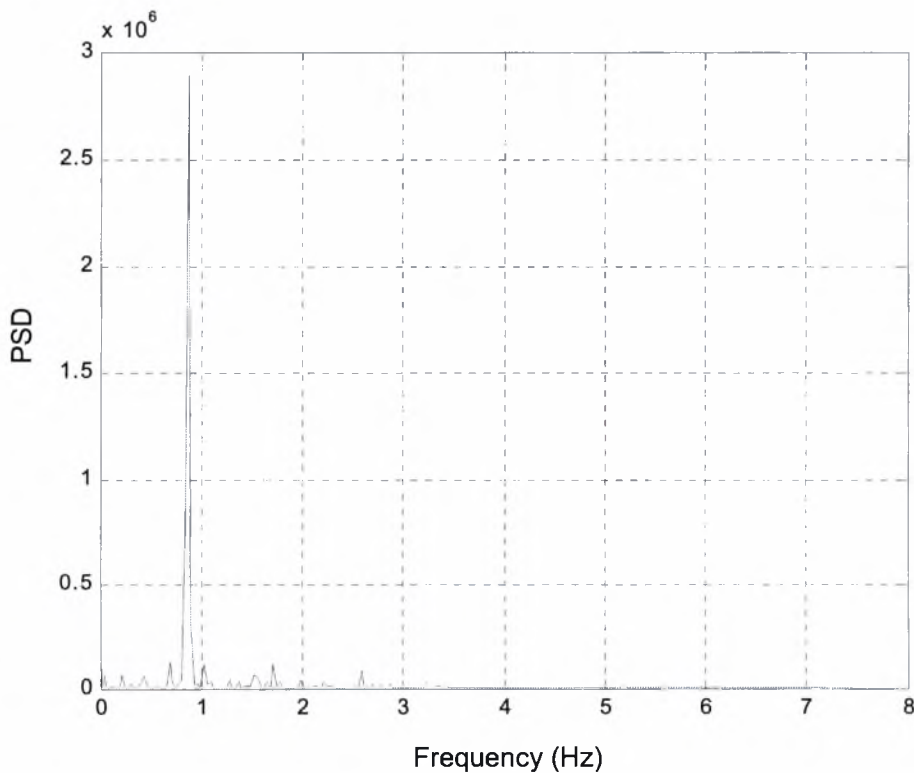
- **$H/D= 1,9$ (Κέντρο)**

Στην εικόνα (5.1) φαίνεται η ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.



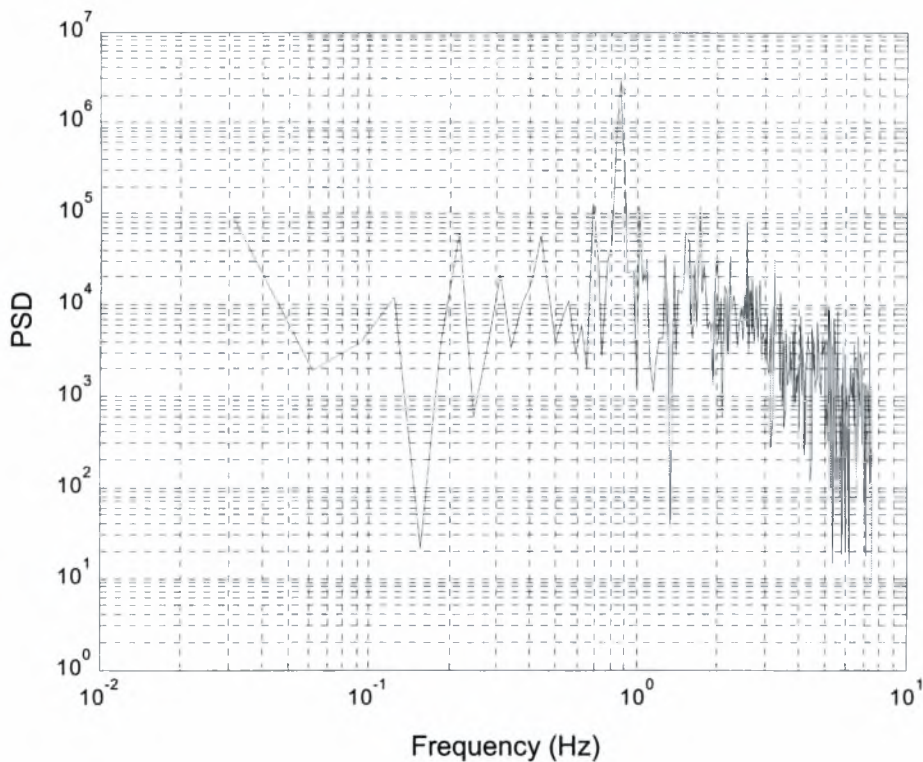
Εικόνα .5.1. Ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.

Στο διάγραμμα 5.1 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων που έχει προκύψει εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στην σε προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-1$ σε κανονικό (5.1.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.1.β).



Διάγραμμα 5.1.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-1$

Το αντίστοιχο λογαριθμικό για το ίδιο σημείο φαίνεται στο διάγραμμα 5.1.β.



Διάγραμμα 5.1.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-1$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η συχνότητα εκροής δινών είναι ίση με 0,87 Hz και ο αριθμός Strouhal που προκύπτει είναι ίσος με $St=f D/U_0=0,217$.

Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε για πολλές άλλες θέσεις στο απόρευμα, τα δε αποτελέσματα που προκύπτουν για τον αριθμό St φαίνονται στον πίνακα 5.4

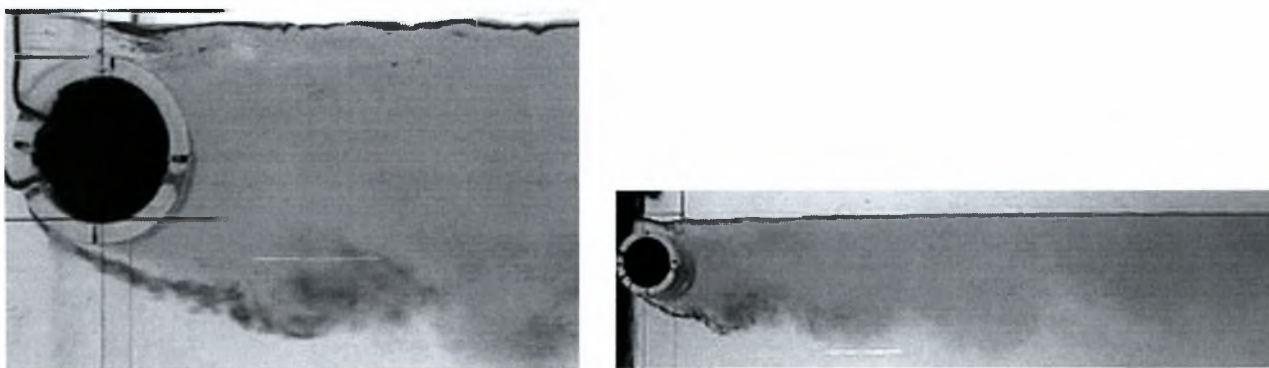
X/D	Y/D=-1	Y/D=-0,5	Y/D=0	Y/D=0,5	Y/D=1
2	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217
4	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217
6	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217
8	0,207	0,217	0,217	0,217	0,217

Πίνακας 5.4. Τιμές του αριθμού Strouhal για διάφορες θέσεις στο απόρευμα του κυλίνδρου.

Παρατηρείται ότι ο αριθμός Strouhal παραμένει σταθερός στα διάφορα X/D και Y/D . Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα εκροής δινών στα διάφορα X/D κατά μήκος του απορεύματος παραμένει σταθερή τουλάχιστον μέχρι $X/D=8$ που υπάρχουν μετρήσεις.

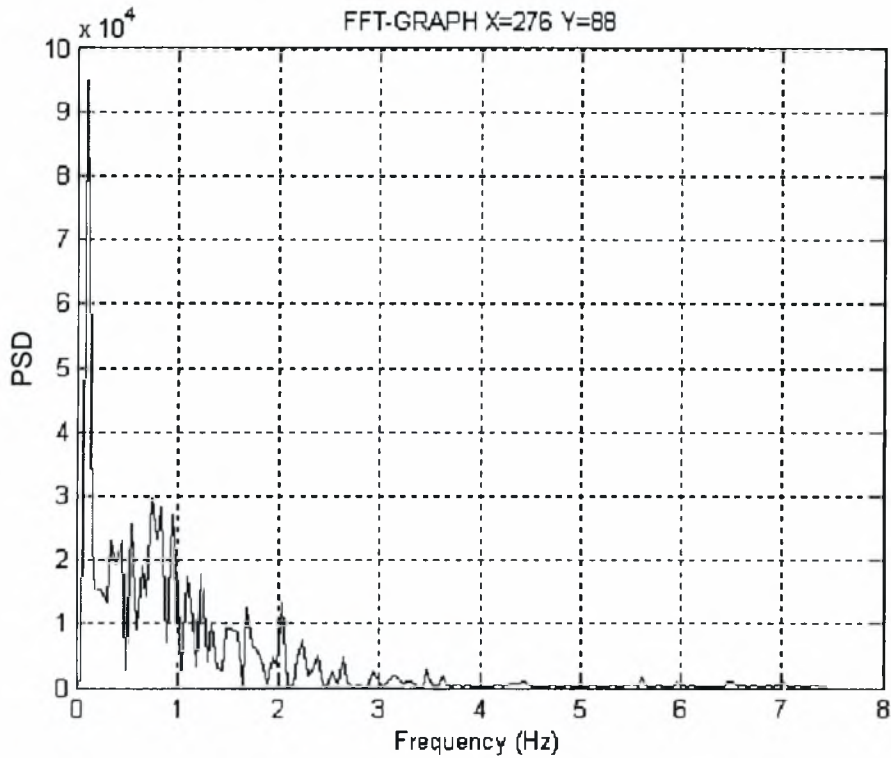
- $H_e/D=0,2$ (διεπιφάνεια)

Στην εικόνα 5.2 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,2$.

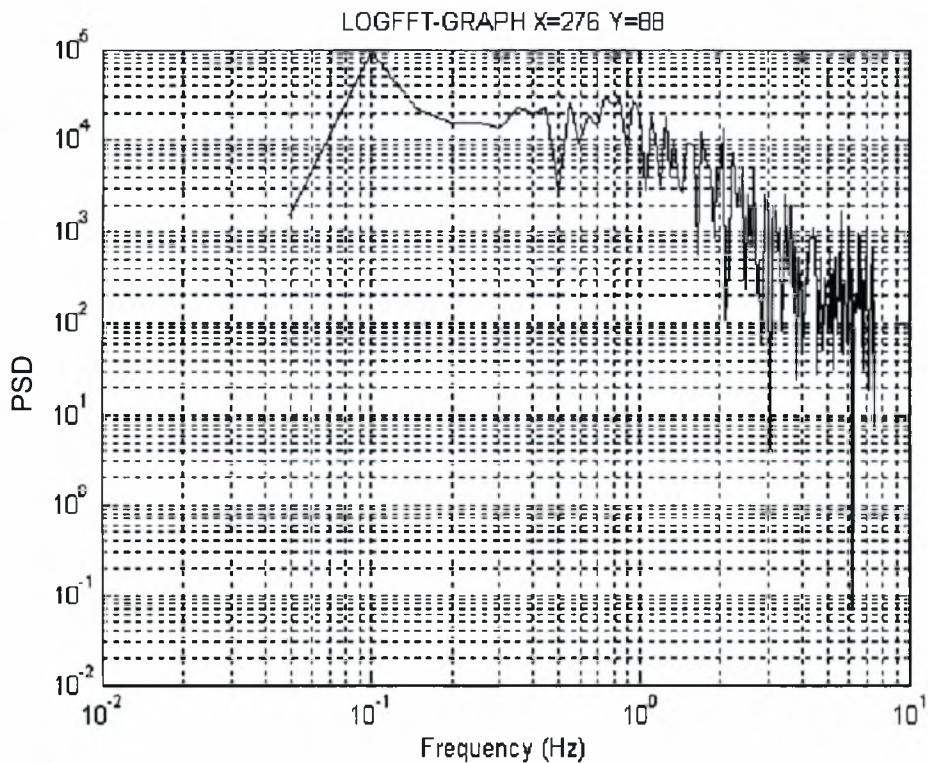


Εικόνα 5.2. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,2$.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα σε αυτή τη θέση δε συμβαίνει σχηματισμός δινών τύπου von Karman. Αυτό είναι λογικό εφόσον δεν υπάρχει χώρος στην πάνω επιφάνεια του κυλίνδρου για την αλληλεπίδραση των ελεύθερων διατμητικών στρωμάτων. Δηλαδή, η διεπιφάνεια ασκεί τέτοια επίδραση ώστε να εμποδίζει το σχηματισμό δινών και στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου. Στο διάγραμμα 5.2 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$ σε κανονικό (5.2.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.2.β).



Διάγραμμα 5.2.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$

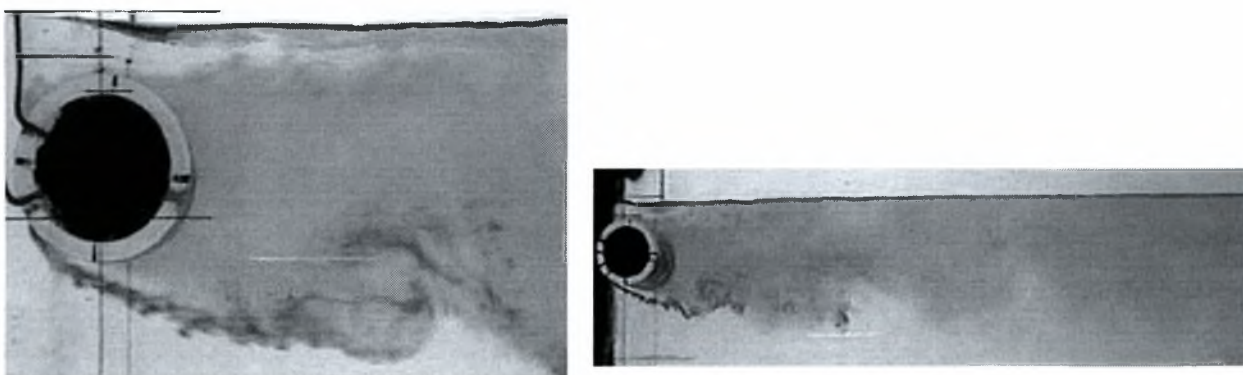


Διάγραμμα 5.2.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 5.2 με τα διαγράμματα 5.1 παρατηρούμε ότι είναι τελείως διαφορετικά. Στα διαγράμματα 5.1 εμφανίζεται μόνο η βασική αρμονική (κύρια συχνότητα) η οποία εμφανίζεται 'καθαρά' σε όλα τα X/D και Y/D . Αυτό συμβαίνει γιατί η οδός Von Karman αναπτύσσεται κανονικά και 'διακρίνεται' εύκολα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία. Τα διαγράμματα (5.2) συχνοτήτων ανταποκρίνονται σε σημεία του πεδίου ροής που δεν συμβαίνει σχηματισμός δινών και η ροή είναι τυρβώδης και ακανόνιστη.

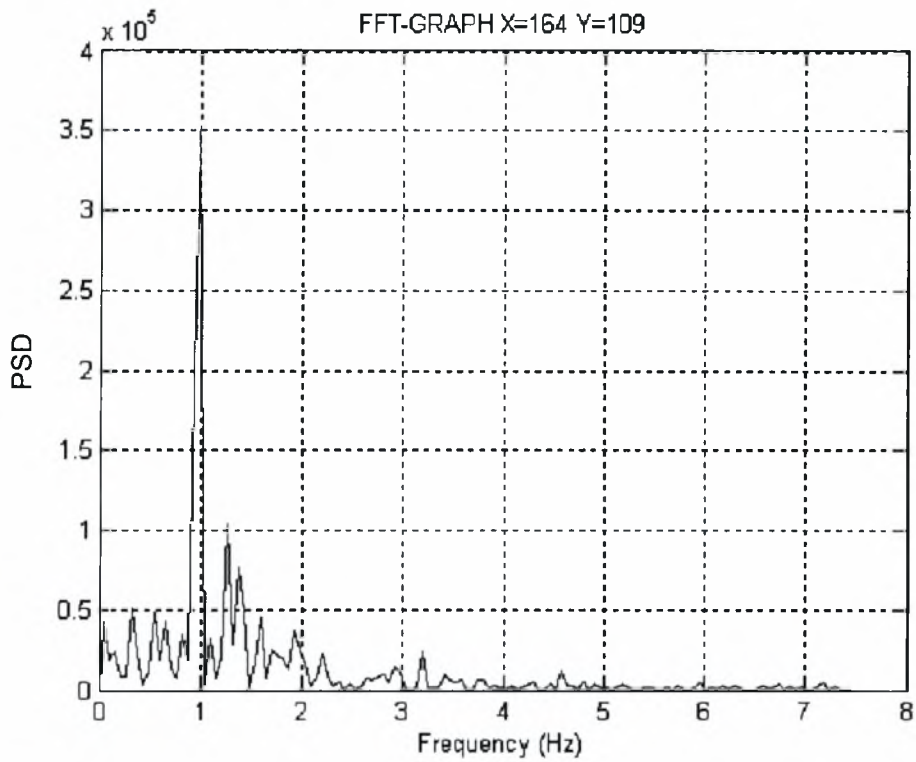
- $H_e/D=0,3$ (διεπιφάνεια)

Στην εικόνα 5.3 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,3$.

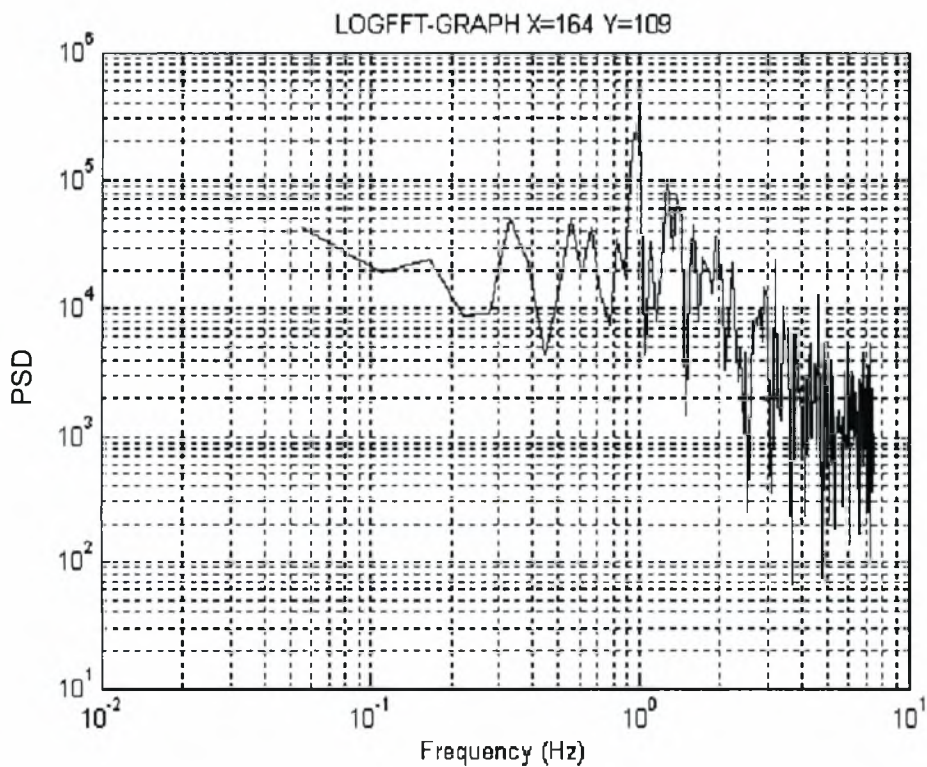


Εικόνα 5.3. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,3$.

Στη θέση $H_e/D=0,3$ η τάση δημιουργίας δινών γίνεται αισθητή. Είναι εμφανής και από την εικόνα 5.3 ότι υπάρχει οργανωμένη δομή στην θέση $Y/D=-0,5$ που εκρέει με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Βέβαια η επίδραση της διεπιφάνειας δεν αφήνει να δημιουργηθεί ολοκληρωμένη δίνη και στην πάνω πλευρά του κυλίνδρου. Στο διάγραμμα 5.3 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-1$ σε κανονικό (5.3.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.3.β).



Διάγραμμα 5.3.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-1$

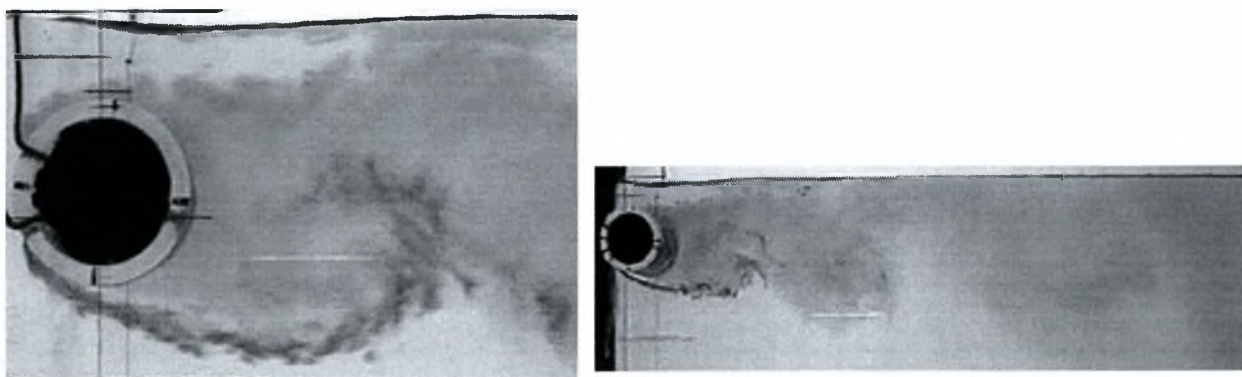


Διάγραμμα 5.3.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-1$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η συχνότητα εκροής της οργανωμένης δομής που εμφανίζεται στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου είναι ίση με 0,99 Hz και ο αριθμός Strouhal που προκύπτει είναι ίσος με $St=f D/U_0=0,247$, πιθανόν λόγω του περιορισμένου χώρου (πλευρά διεπιφάνειας) κίνησης των ελευθέρων διατμητικών στρωμάτων η αλληλεπίδραση με τα κάτω διατμητικά στρώματα γίνεται σε συντομότερο χρόνο, άρα η τιμή της συχνότητας αυτής είναι μεγαλύτερη από την τιμή της συχνότητας εκροής δινών όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της υδροσήραγγας που είναι 0,87 Hz. Η ένταση όμως του φάσματος είναι μια τάξη χαμηλότερη εκείνης για ομοιόμορφη παράλληλη ροή, πράγμα που σημαίνει ότι ο σχηματισμός ισχυρής οργανωμένης οδού von karman δεν είναι ακόμα εφικτός.

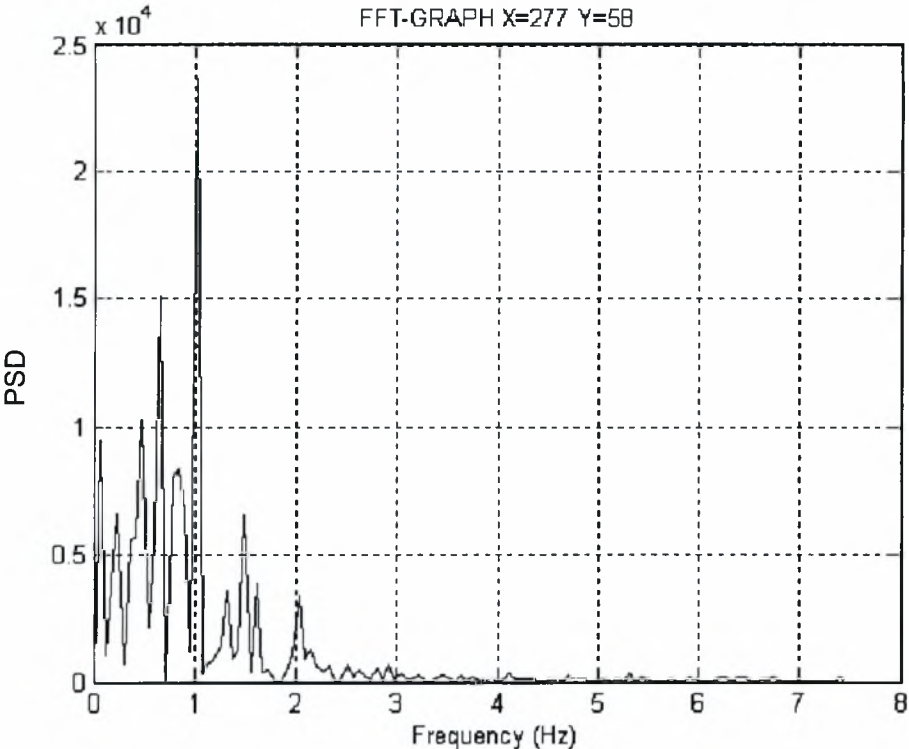
- $H_e/D= 0,4$ (διεπιφάνεια)

Στην εικόνα 5.4 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,4$.

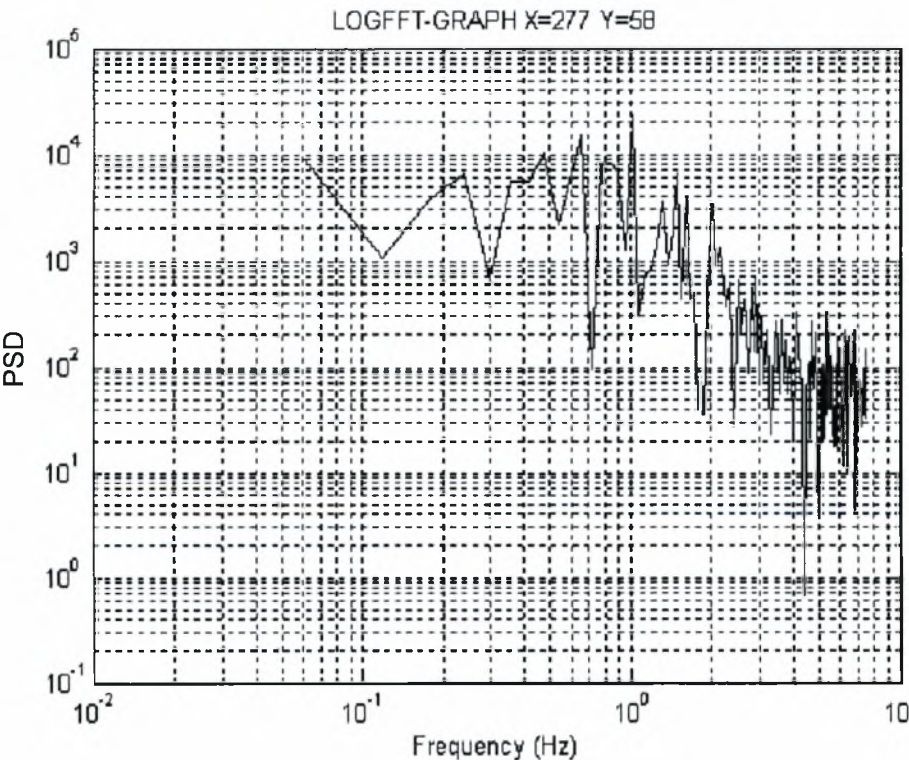


Εικόνα 5.4. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,4$.

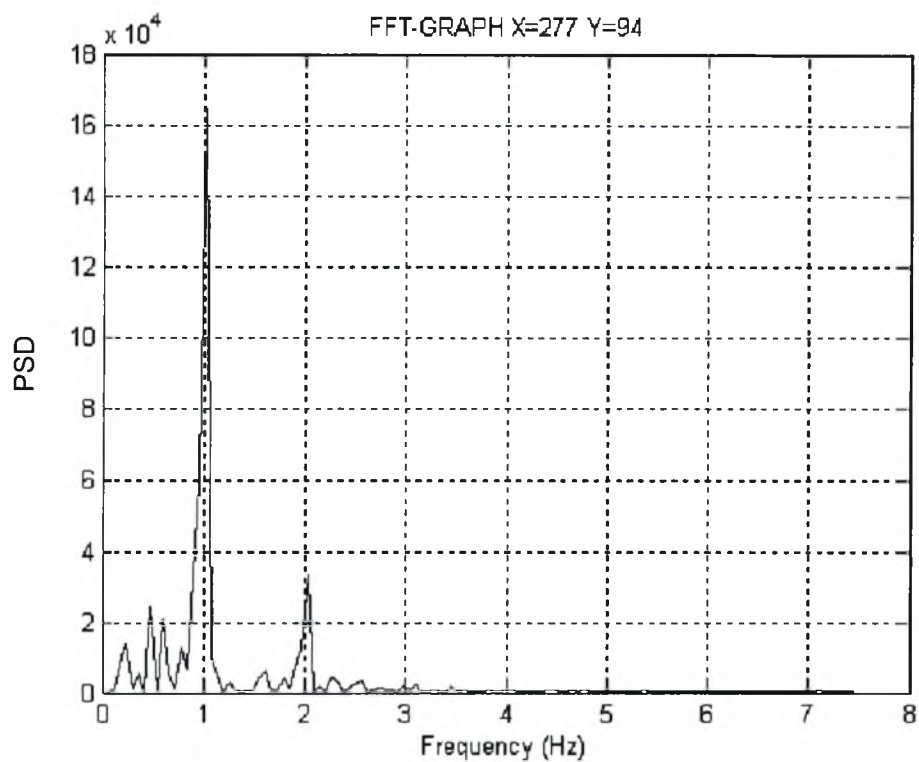
Η κρίσιμη θέση όπου τελικά συμβαίνει σχηματισμός δινών και στην πάνω αλλά και στην κάτω επιφάνεια του κυλίνδρου είναι η $H_e/D=0,4$. Στα διαγράμματα 5.4 και 5.5 φαίνονται τα φάσματα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=0,5$ σε κανονικό (5.4.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.4.β) & $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$ σε κανονικό (5.5.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.5.β) αντίστοιχα.



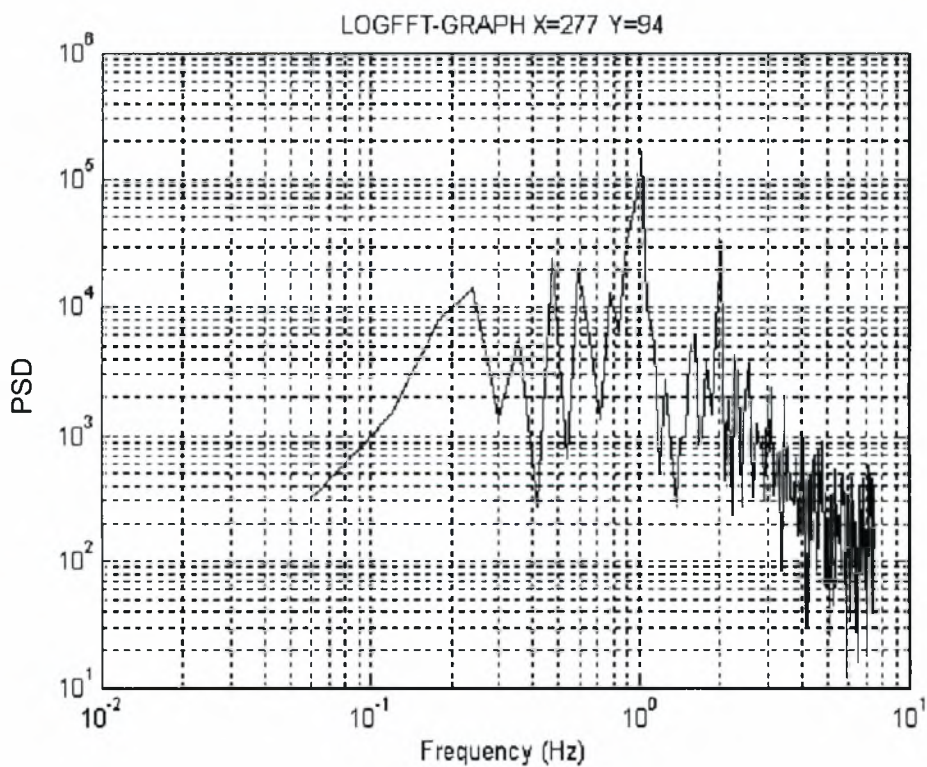
Διάγραμμα 5.4.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=0,5$



Διάγραμμα 5.4.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=0,5$



Διάγραμμα 5.5.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$

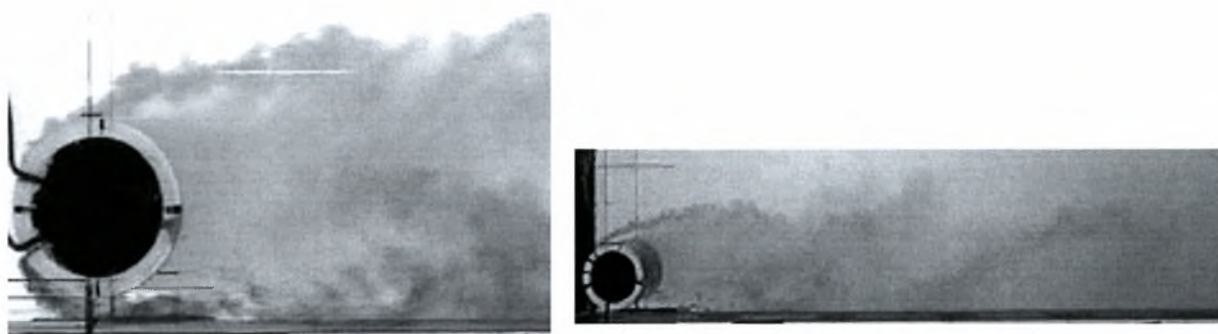


Διάγραμμα 5.5.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα η συχνότητα απόσπασης δινών f είναι ίση με 1,01 και ο αριθμός Strouhal που προκύπτει είναι ίσος με $St=f D/U_0=0,253$. Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρείται αυξημένη τιμή της συχνότητας f συγκριτικά με την τιμή της στη θέση $H/D=1,9$ που είναι ίση με 0,87. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια επικρατούν τέτοιες ροϊκές συνθήκες ώστε η περιοδική απόσπαση και διάχυση των δινών να είναι ταχύτερη από αυτή που συμβαίνει στο κέντρο.

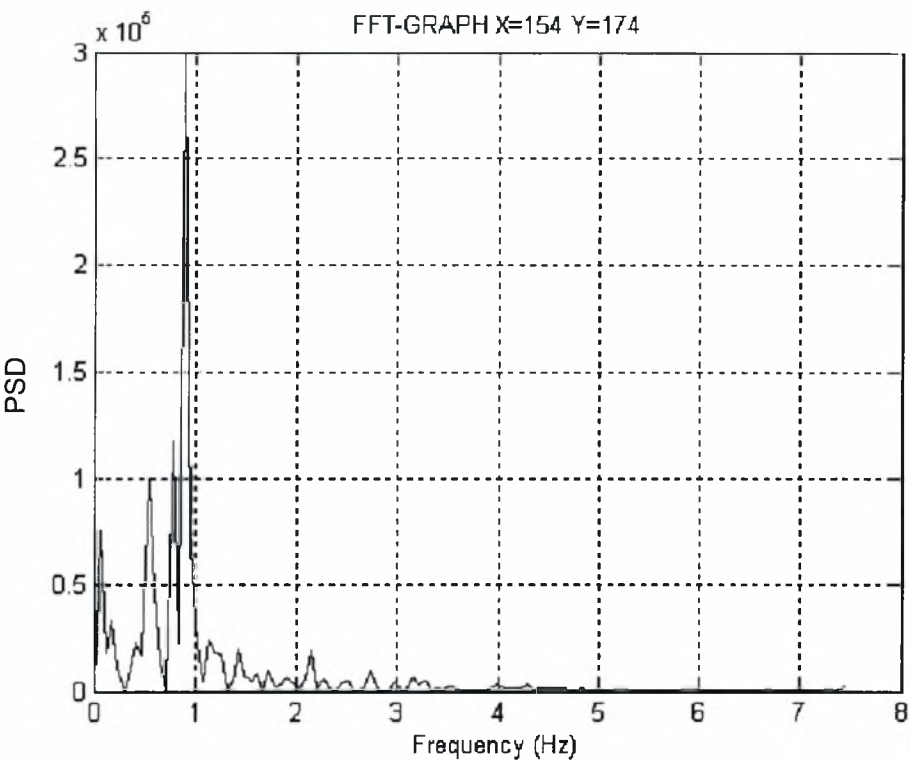
- **$H_δ/D= 0,2$ (δάπεδο)**

Στην εικόνα 5.5 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_δ/D=0,2$.

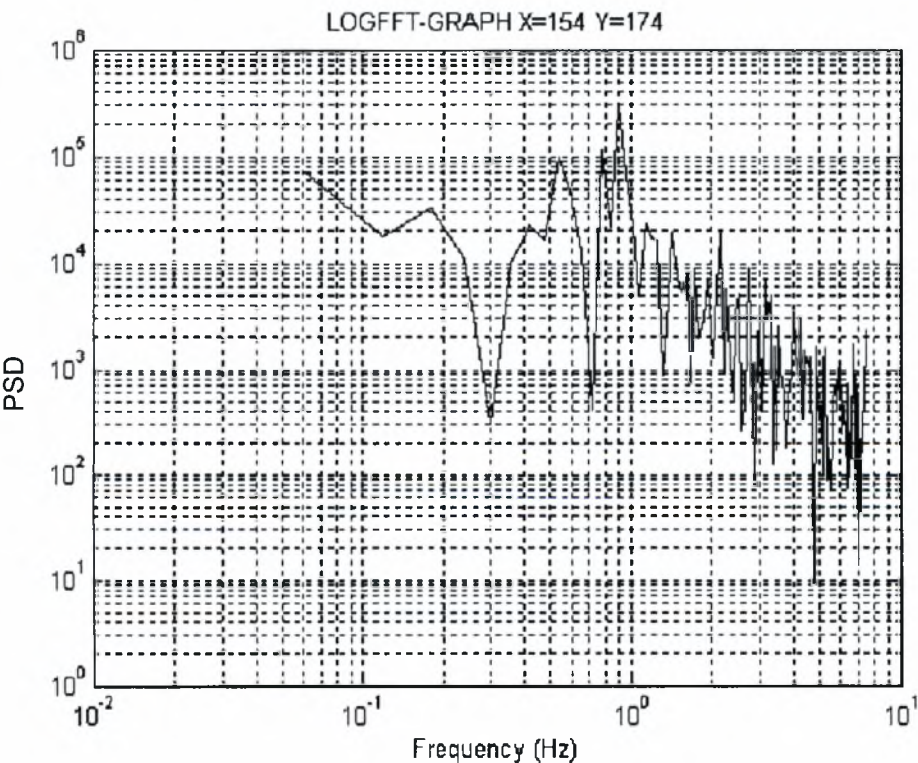


Εικόνα 5.5. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_δ/D=0,2$.

Στην περίπτωση της διεπιφάνειας βρέθηκε ότι η ολοκλήρωση του σχηματισμού δινών συνέβη για $H_ε/D=0,4$. Είναι εμφανές και από την εικόνα 5.5 ότι υπάρχει οργανωμένη δομή στην θέση $Y/D=0,5$ που εκρέει με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Βέβαια η επίδραση του δαπέδου της υδροσήραγγας δεν αφήνει να δημιουργηθεί δίνη και στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου. Στο διάγραμμα 5.6 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$ σε κανονικό (5.6.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.6.β).



Διάγραμμα 5.6.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$

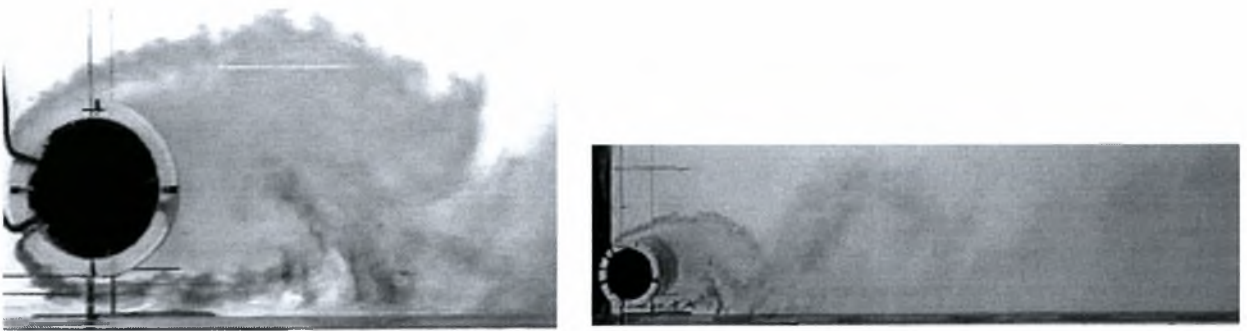


Διάγραμμα 5.6.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η συχνότητα εκροής της οργανωμένης δομής που εμφανίζεται στην πάνω πλευρά του κυλίνδρου είναι ίση με 0,89 Hz. Η τιμή της συχνότητας αυτής είναι σχεδόν ίδια με την τιμή της συχνότητας εκροής δινών όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της υδροσήραγγας που είναι 0,87 Hz.

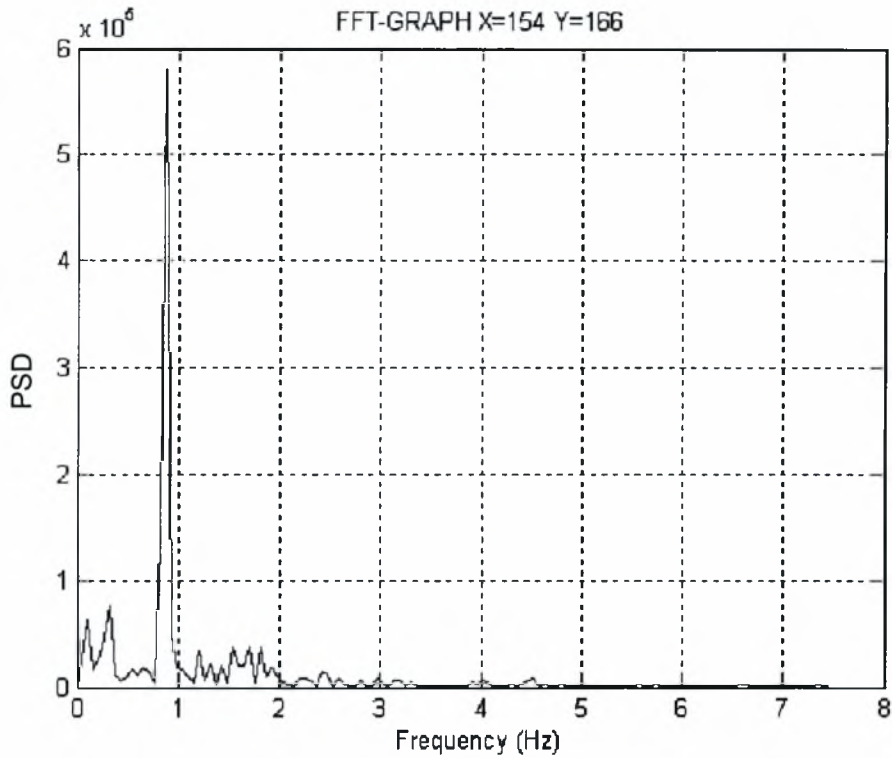
- $H_\delta/D = 0,3$ (δάπεδο)

Στην εικόνα 5.6 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_\delta/D=0,3$.

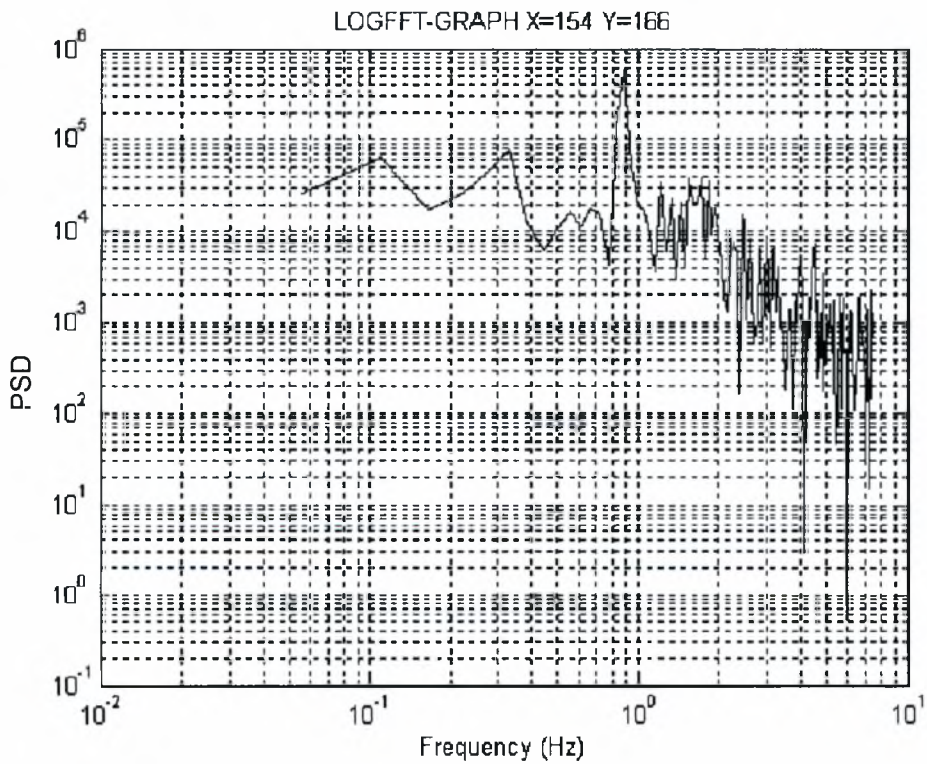


Εικόνα 5.6. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_\delta/D=0,3$.

Η κρίσιμη θέση όπου τελικά συμβαίνει σχηματισμός δινών και στην πάνω αλλά και στην κάτω επιφάνεια του κυλίνδρου είναι $H_\delta/D=0,3$. Στο διάγραμμα 5.7 φαίνονται τα φάσματα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$ σε κανονικό (5.7.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.7.β).



Διάγραμμα 5.7.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$



Διάγραμμα 5.7.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα η συχνότητα απόσπασης δινών f είναι ίση με 0,88 και ο αριθμός Strouhal που προκύπτει είναι ίσος με $St=f D/U_0=0,22$. Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρείται σχεδόν ίδια τιμή της συχνότητας f συγκριτικά με την τιμή της στη θέση $H/D=1,9$ (κέντρο) που είναι ίση με 0,87. Αυτό σημαίνει κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας επικρατούν τέτοιες ροϊκές συνθήκες ώστε η περιοδική απόσπαση και διάχυση των δινών να είναι σχεδόν ίδια με αυτή του κέντρου.

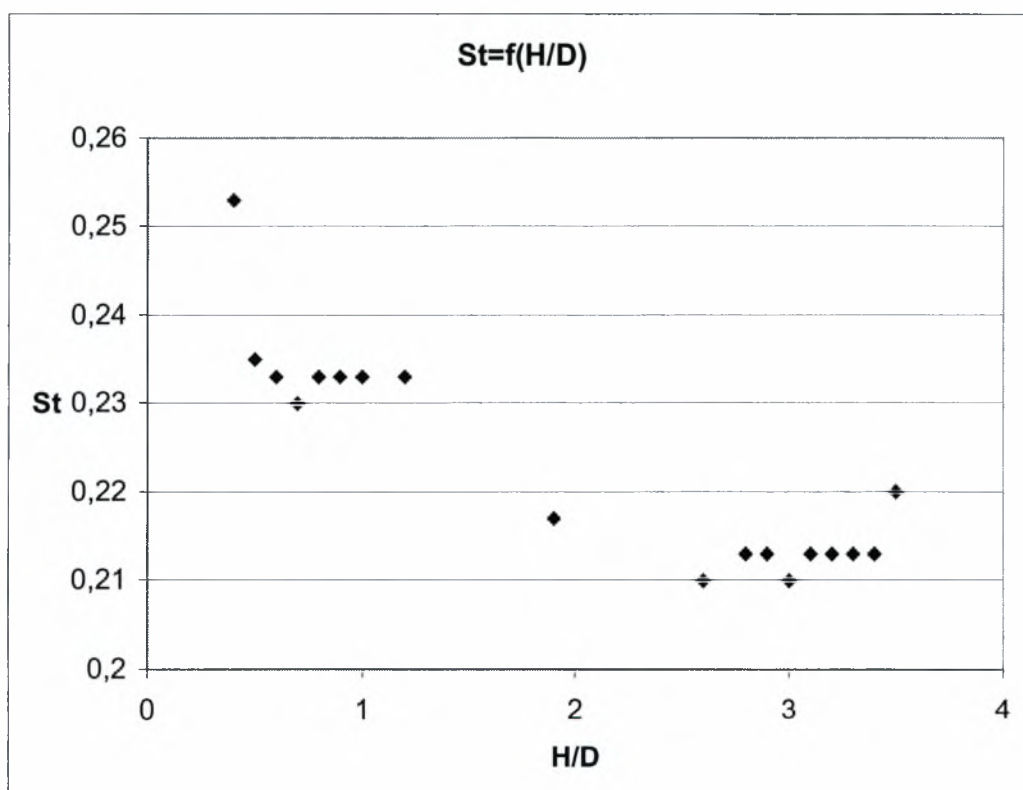
Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία εξαγωγής συχνοτήτων και για τις εναπομείναντες θέσεις προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 5.5.

H/D	F (Hz)	St
0,4	1,01	0,253
0,5	0,94	0,235
0,6	0,93	0,233
0,7	0,92	0,23
0,8	0,93	0,233
0,9	0,93	0,233
1	0,93	0,233
1,2	0,93	0,233
1,9 (Κέντρο)	0,87	0,217
2,6	0,84	0,21
2,8	0,85	0,213
2,9	0,85	0,213
3	0,84	0,21
3,1	0,85	0,213
3,2	0,85	0,213
3,3	0,85	0,213
3,4	0,85	0,213
3,5	0,88	0,22

Πίνακας 5.5. Τιμές της συχνότητας απόσπασης δινών f και του αριθμού Strouhal για όλα τα H/D .

Η θέση $H/D=1,9$ είναι αυτή όπου ο άξονας του κυλίνδρου συμπίπτει με το μέσο του καναλιού και η θέση $H/D=3,5$ είναι αυτή που η κάτω πλευρά του κυλίνδρου απέχει $H/D=0,3$ από τον πυθμένα του καναλιού. Η αδιαστατοποίηση στην πρώτη στήλη του πίνακα έγινε βάσει της θέσης $H/D=0$ (η πάνω πλευρά του κυλίνδρου εφάπτεται στην διεπιφάνεια) και καθώς ο κύλινδρος μετατοπίζεται προς τα κάτω αυξάνεται ο λόγος H/D . Οι θέσεις $H/D=0, 0.1, 0.2, 0.3, 3.6, 3.7$ και 3.8 δεν υπεισέρχονται στον πίνακα καθώς δεν συμβαίνει σχηματισμός δινών.

Στο διάγραμμα 5.8 παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών του αριθμού Strouhal με την μετατόπιση του κυλίνδρου κατά μήκος του βάθους του καναλιού.



Διάγραμμα 5.8. Διακύμανση των τιμών του αριθμού Strouhal με την μετατόπιση του κυλίνδρου από την διεπιφάνεια προς το δάπεδο της σήραγγας

Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι για τον κύλινδρο $D=50\text{mm}$ η εκροή δινών κοντά στην διεπιφάνεια αρχίζει στην θέση $H_e/D=0,4$ με συχνότητα απόσπασης δινών από την πάνω και από την κάτω πλευρά του κυλίνδρου να

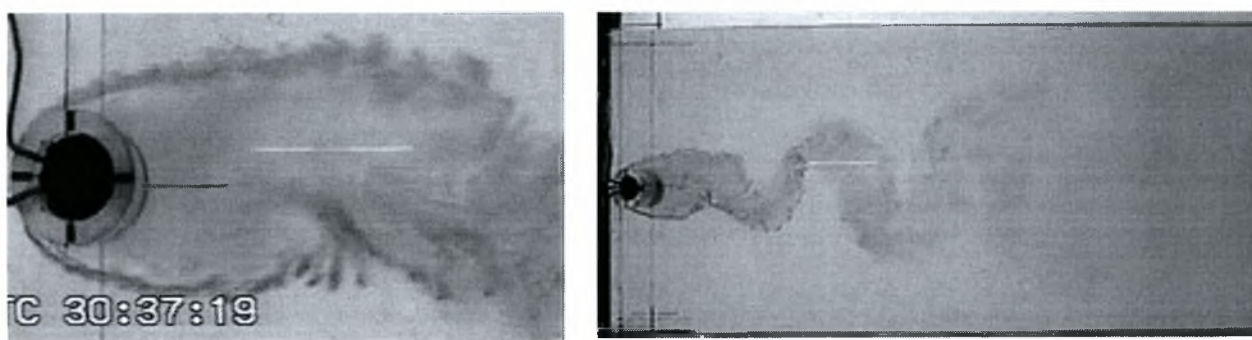
είναι 1,01 Hz, ενώ η εκροή των δινών κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας αρχίζει στην θέση $H_8/D=0,3$ με συχνότητα απόσπασης δινών από την πάνω και από την κάτω πλευρά του κυλίνδρου να είναι 0,88 Hz. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στην διεπιφάνεια επικρατούν τέτοιες ροϊκές συνθήκες ώστε η περιοδική απόσπαση και διάχυση των δινών να είναι ταχύτερη από αυτή που συμβαίνει στο κέντρο και το δάπεδο της υδροσήραγγας.

5.1.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων για κύλινδρο $D=30$ mm, $Re=6000$

Για τον κύλινδρο διαμέτρου $D=30$ mm είναι αριθμός $Re=6000$ και ταχύτητα ελευθέρου ρεύματος $U_0=0,2$ m/sec. Θα ακολουθήσει ανάλυση όπου ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο του καναλιού και στη συνέχεια γίνει σύγκριση με τις υπόλοιπες θέσεις του κυλίνδρου.

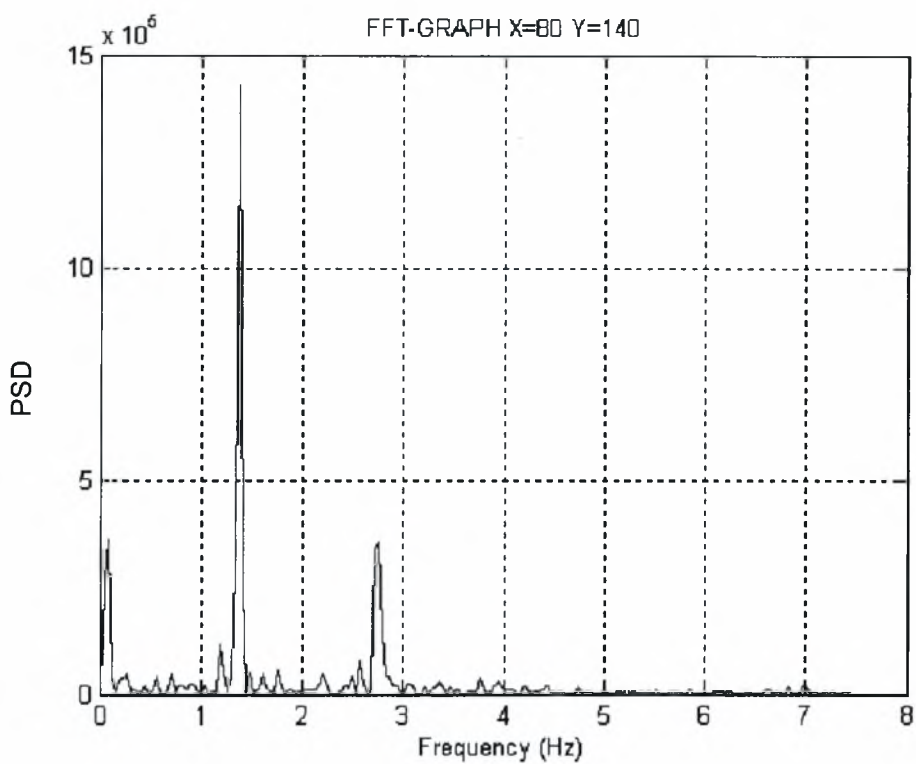
- $H/D= 3,5$ (Κέντρο)

Στην εικόνα (5.7) φαίνεται η ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.

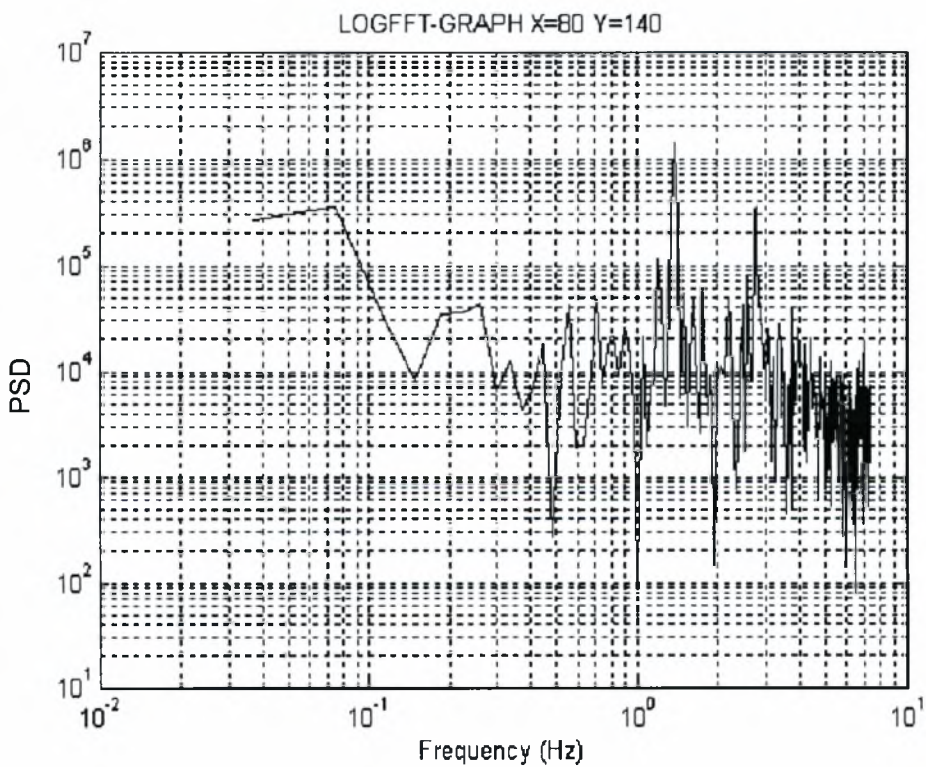


Εικόνα 5.7. Ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.

Στο διάγραμμα 5.9 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-0,5$ σε κανονικό (5.9.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.9.β).



Διάγραμμα 5.9.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-0,5$

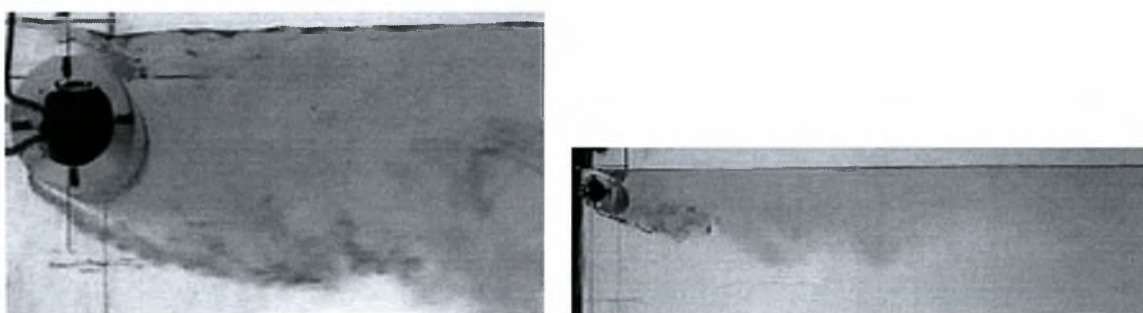


Διάγραμμα 5.9.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-0,5$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η συχνότητα εκροής δινών είναι ίση με 1,38 Hz και ο αριθμός Strouhal που προκύπτει είναι ίσος με $St=f D/U_0=0,207$.

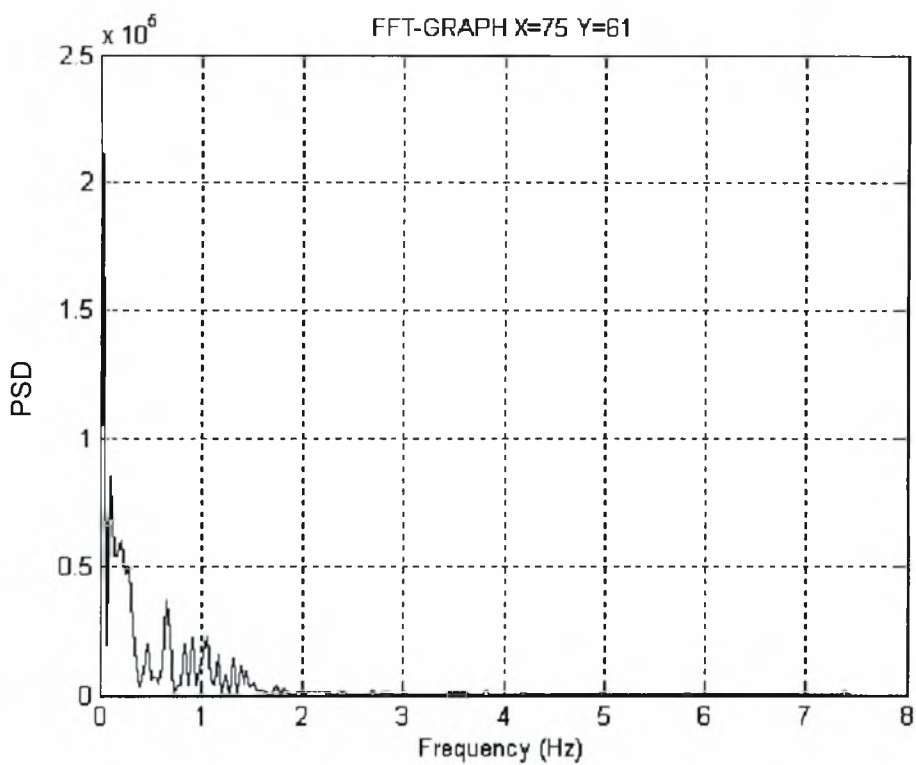
- $H_e/D= 0,2$ (διεπιφάνεια)

Στην εικόνα 5.8 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,2$.

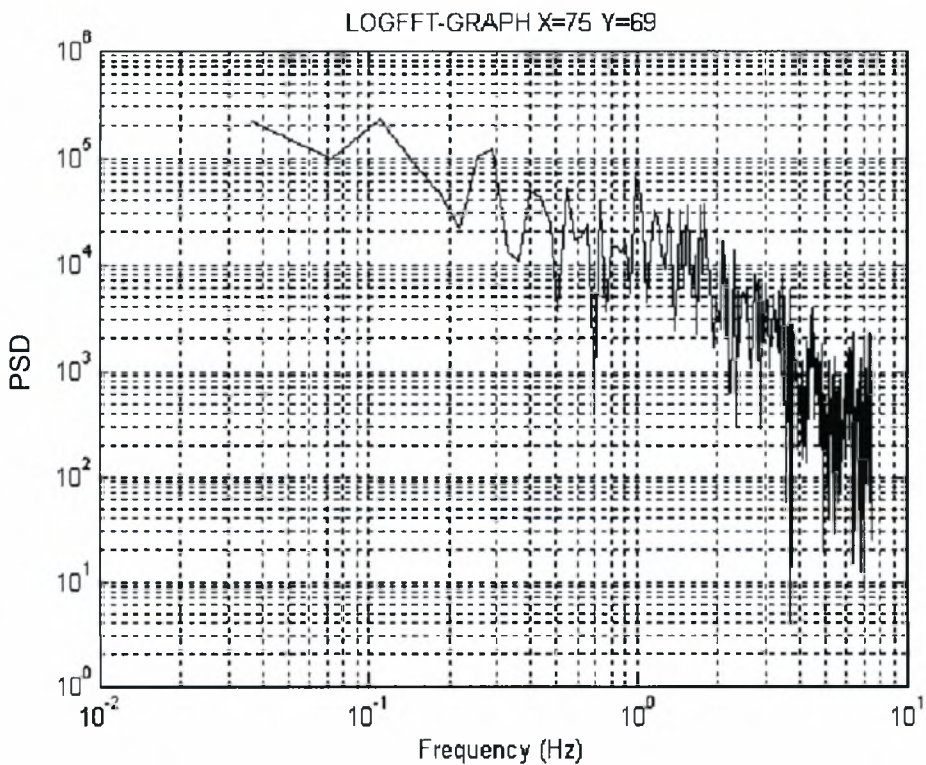


Εικόνα 5.8. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,2$.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα σε αυτή τη θέση δε συμβαίνει σχηματισμός δινών. Αυτό είναι λογικό εφόσον δεν υπάρχει χώρος στην πάνω επιφάνεια του κυλίνδρου για το σχηματισμό των. Επιπλέον η διεπιφάνεια ασκεί τέτοια επίδραση ώστε να εμποδίζει το σχηματισμό δινών και στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου. Στο διάγραμμα 5.10 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-0,5$ σε κανονικό (5.10.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.10.β).



Διάγραμμα 5.10.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-0,5$

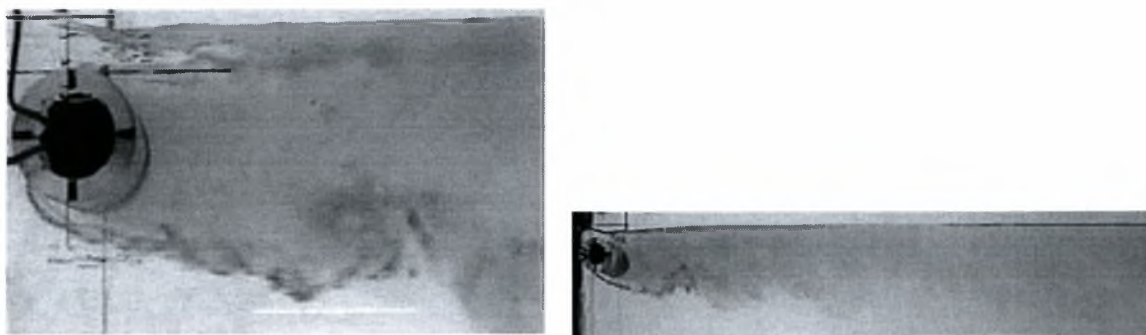


Διάγραμμα 5.10.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=-0,5$

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 5.9 με τα διαγράμματα 5.10 παρατηρούμε ότι είναι τελείως διαφορετικά. Στα διαγράμματα 5.9 εμφανίζεται μόνο η βασική αρμονική (κύρια συχνότητα) η οποία εμφανίζεται 'καθαρά' σε όλα τα X/D και Y/D . Αυτό συμβαίνει γιατί η οδός Von Karman αναπτύσσεται κανονικά και 'διακρίνεται' εύκολα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία. Τα διαγράμματα (5.10) συχνότητων ανταποκρίνονται σε σημεία του πεδίου ροής που δεν συμβαίνει σχηματισμός δινών και η ροή είναι τυρβώδης και τελείως ακανόνιστη.

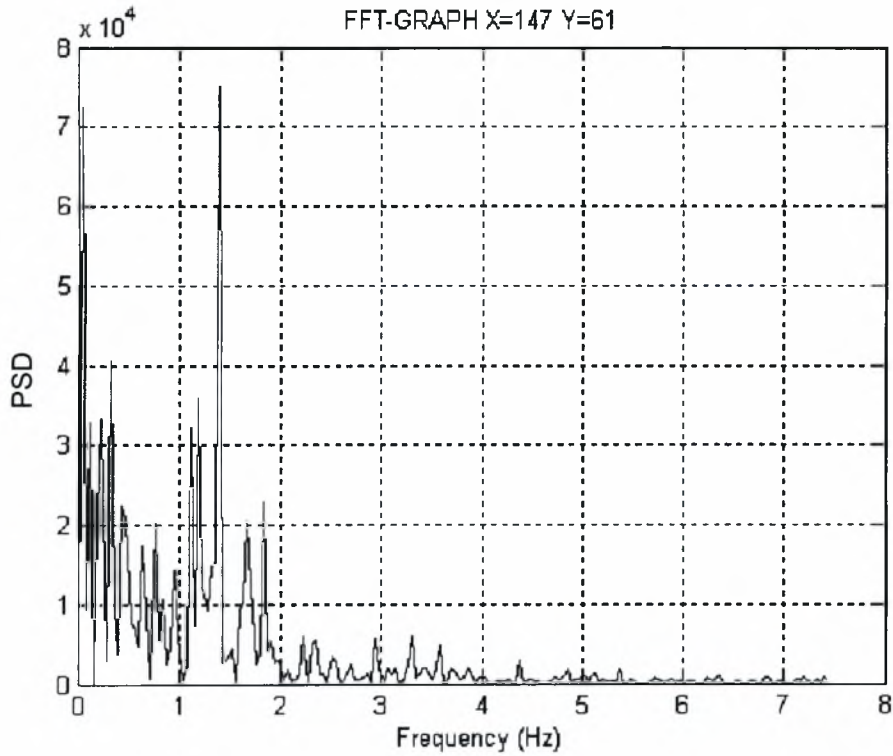
- $H_e/D = 0,3$ (διεπιφάνεια)

Στην εικόνα 5.9 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,3$.

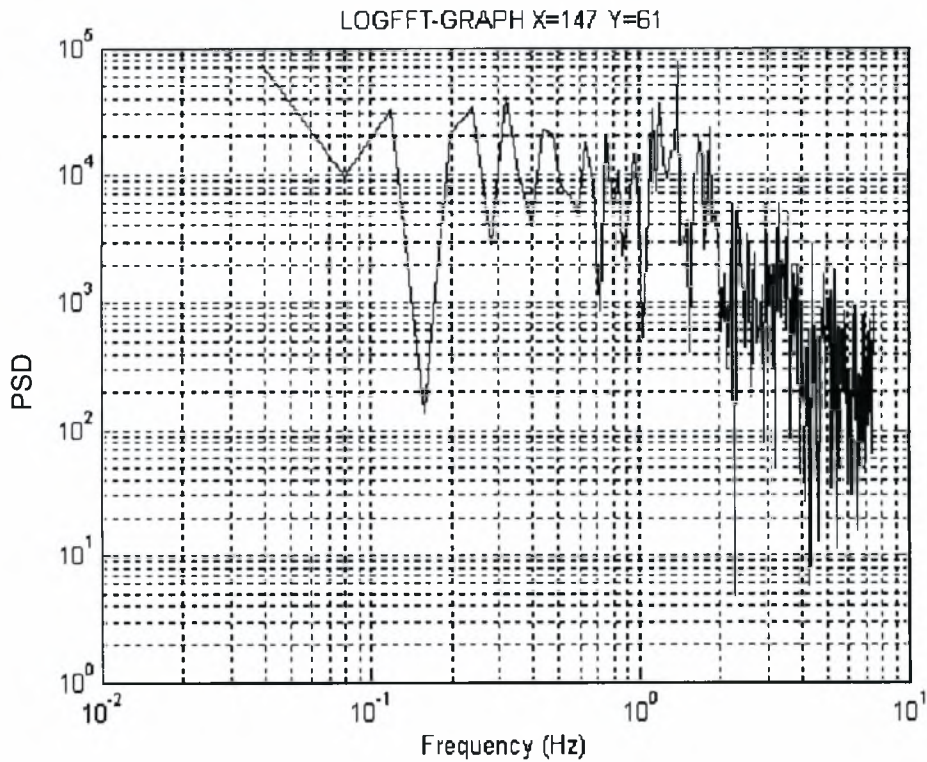


Εικόνα 5.9. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,3$.

Στη θέση $H_e/D=0,3$ η τάση δημιουργίας δινών ισχυροποιείται. Είναι εμφανής και από εικόνα 5.9 ότι υπάρχει οργανωμένη δομή στην θέση $Y/D = -0,5$ που εκρέει με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Βέβαια η επίδραση της διεπιφάνειας δεν αφήνει να δημιουργηθεί δίνη και στην πάνω πλευρά του κυλίνδρου. Στο διάγραμμα 5.11 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνότητων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$ σε κανονικό (5.11.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.11.β).



Διάγραμμα 5.11.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$

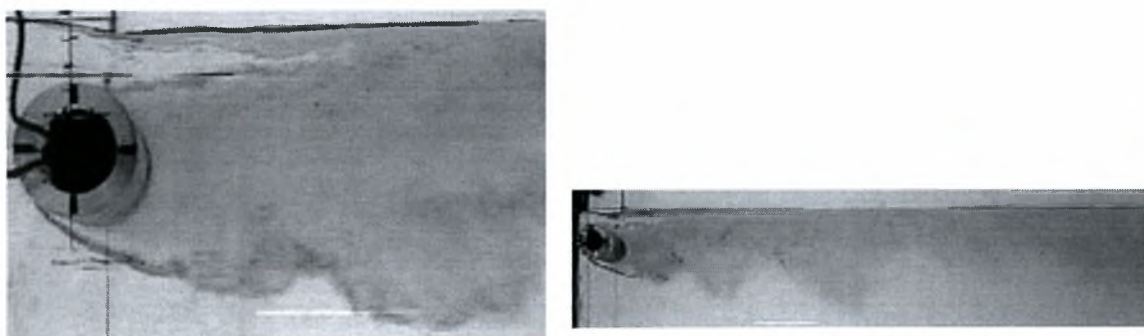


Διάγραμμα 5.11.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η συχνότητα εκροής της οργανωμένης δομής που εμφανίζεται στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου είναι ίση με 1,39 Hz. Η τιμή της συχνότητας αυτής είναι σχεδόν ίδια με την τιμή της συχνότητας εκροής δινών όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της υδροσήραγγας που είναι 1,38 Hz.

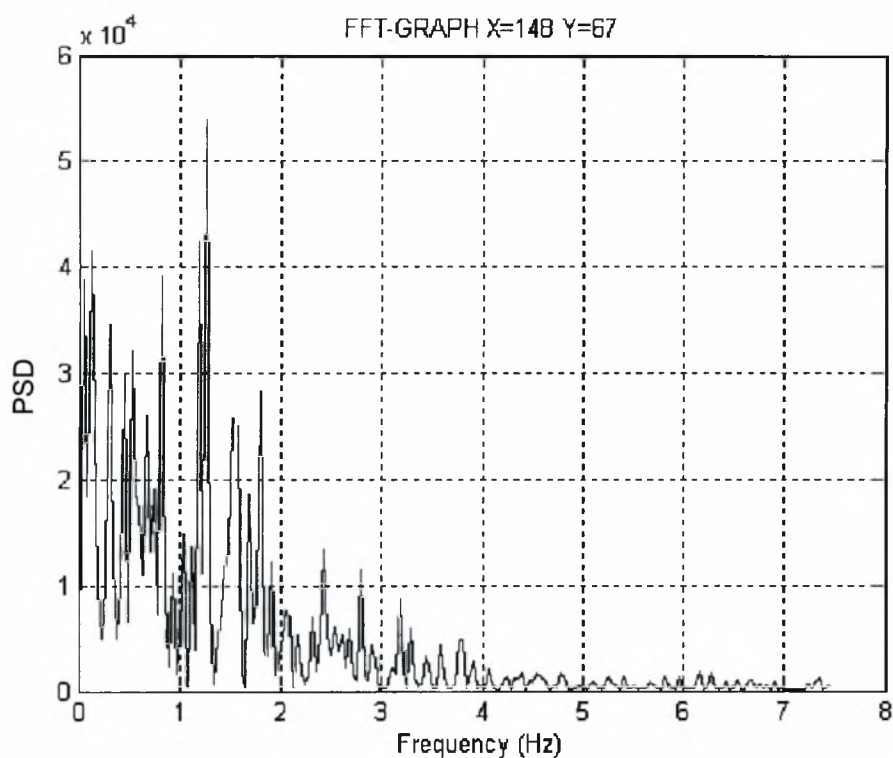
- **$H_e/D = 0,4$ (διεπιφάνεια)**

Στην εικόνα 5.10 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D = 0,4$.

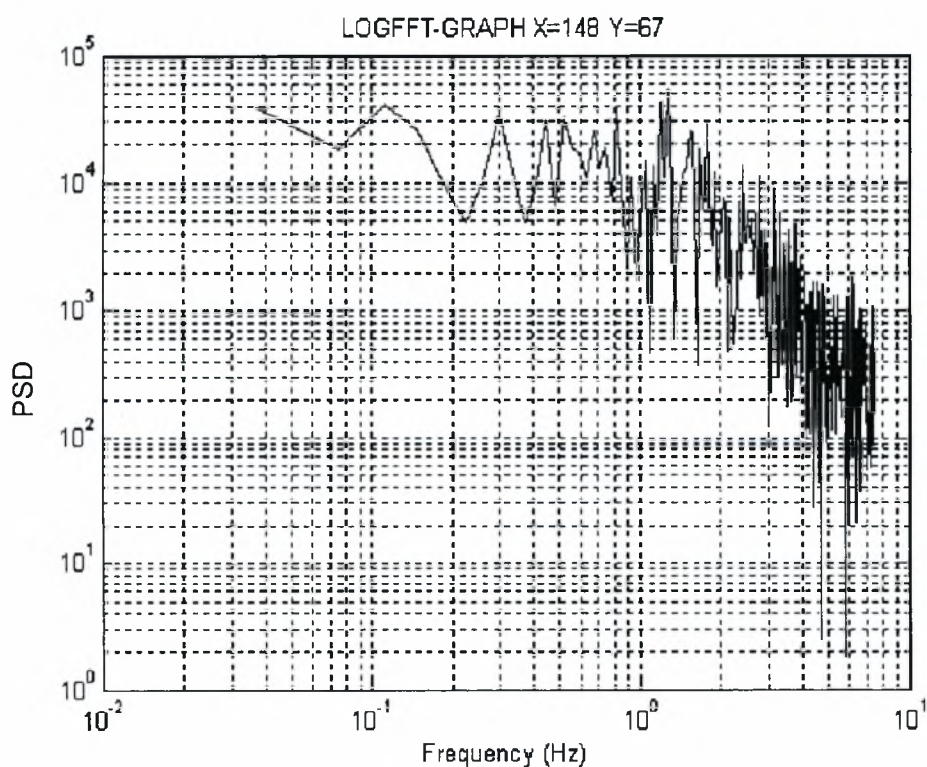


Εικόνα 5.10. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D = 0,4$.

Στην θέση αυτή έχουμε σχηματισμό δινών στην πάνω αλλά και στην κάτω επιφάνεια του κυλίνδρου. Στο διάγραμμα 5.12 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D = 8$ και $Y/D = -0,5$ σε κανονικό (5.12.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.12.β)



Διάγραμμα 5.12.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$

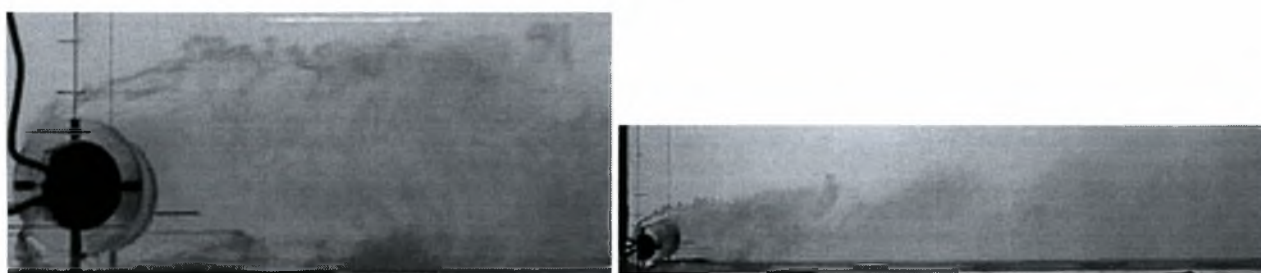


Διάγραμμα 5.12.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=-0,5$

Στην θέση αυτή για τον κύλινδρο $D=30\text{mm}$ όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα έχουμε συχνότητα εκροής $1,27\text{ Hz}$, μικρότερη από την συχνότητα εκροής στο κέντρο της σήραγγας ($1,38\text{ Hz}$)

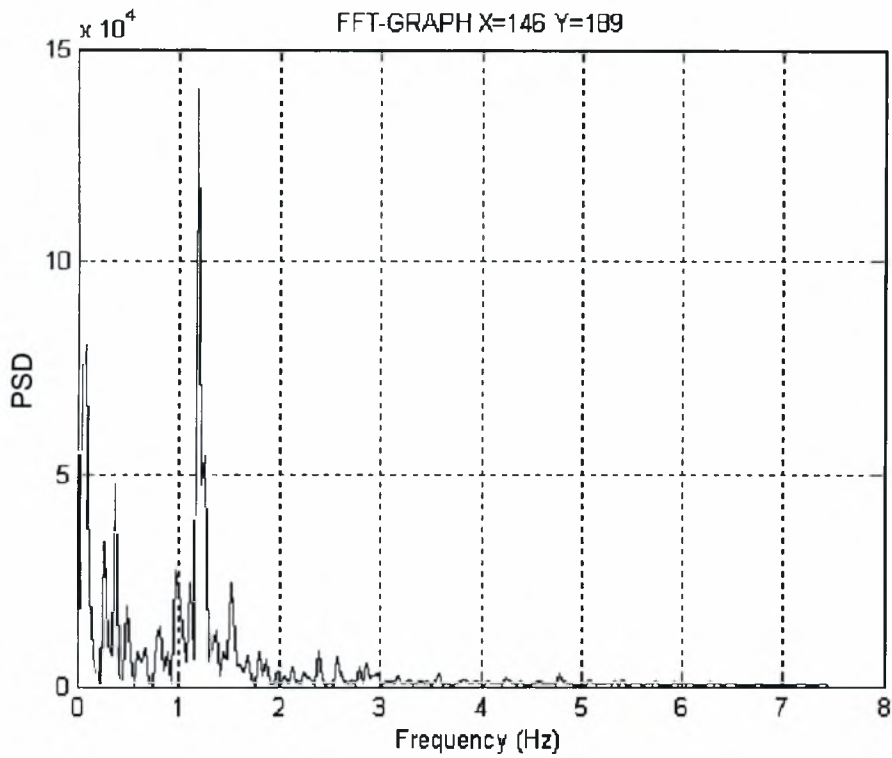
- $H_0/D=0,2$ (δάπεδο)

Στην εικόνα 5.11 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_0/D=0,2$.

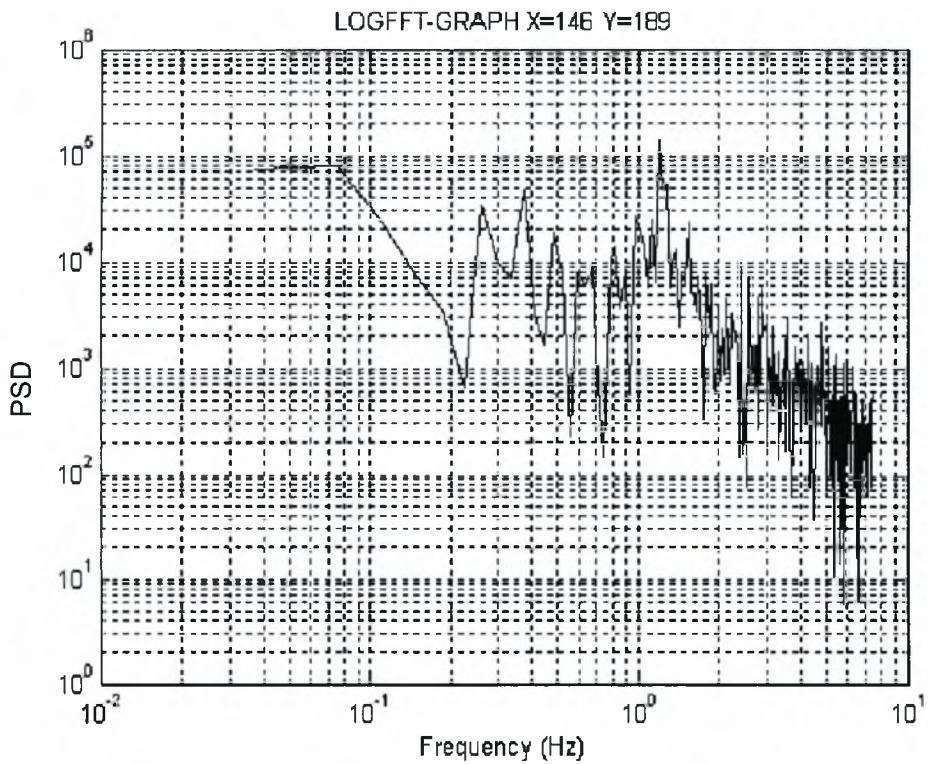


Εικόνα 5.11. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_0/D=0,2$.

Όταν ο κύλινδρος τοποθετείται κοντά στον πυθμένα του καναλιού το απόρευμα παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή όταν ο κύλινδρος βρίσκεται κοντά στη διεπιφάνεια. Στην περίπτωση της διεπιφάνειας βρέθηκε ότι η ολοκλήρωση του σχηματισμού δινών συνέβη για $H_0/D=0,4$. Είναι εμφανής και από εικόνα 5.11 ότι υπάρχει οργανωμένη δομή στην θέση $Y/D=0,5$ που εκρέει με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Βέβαια η επίδραση του δαπέδου της υδροσήραγγας δεν αφήνει να δημιουργηθεί δίνη και στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου. Στο διάγραμμα 5.13 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=0,5$ σε κανονικό (5.13.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.13.β).



Διάγραμμα 5.13.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=0,5$

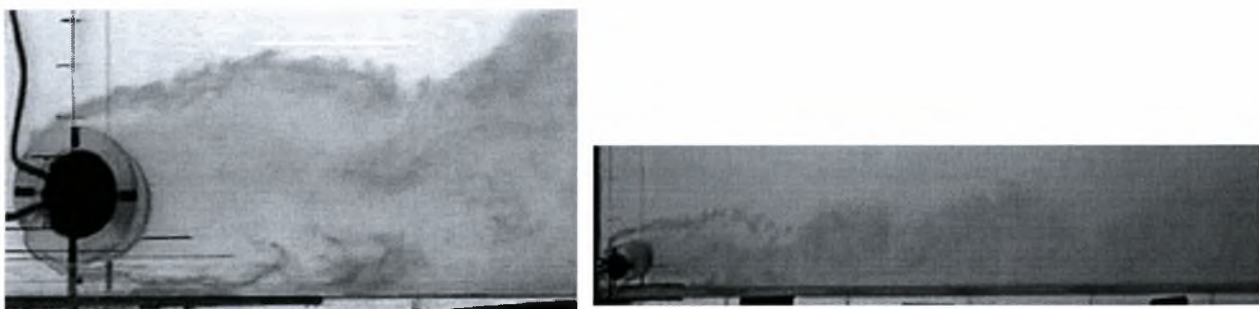


Διάγραμμα 5.13.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=0,5$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η συχνότητα εκροής της οργανωμένης δομής που εμφανίζεται στην πάνω πλευρά του κυλίνδρου είναι ίση με 1,19 Hz. Η τιμή της συχνότητας αυτής είναι μικρότερη από την τιμή της συχνότητας εκροής δινών όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της υδροσήραγγας που είναι 1,38 Hz.

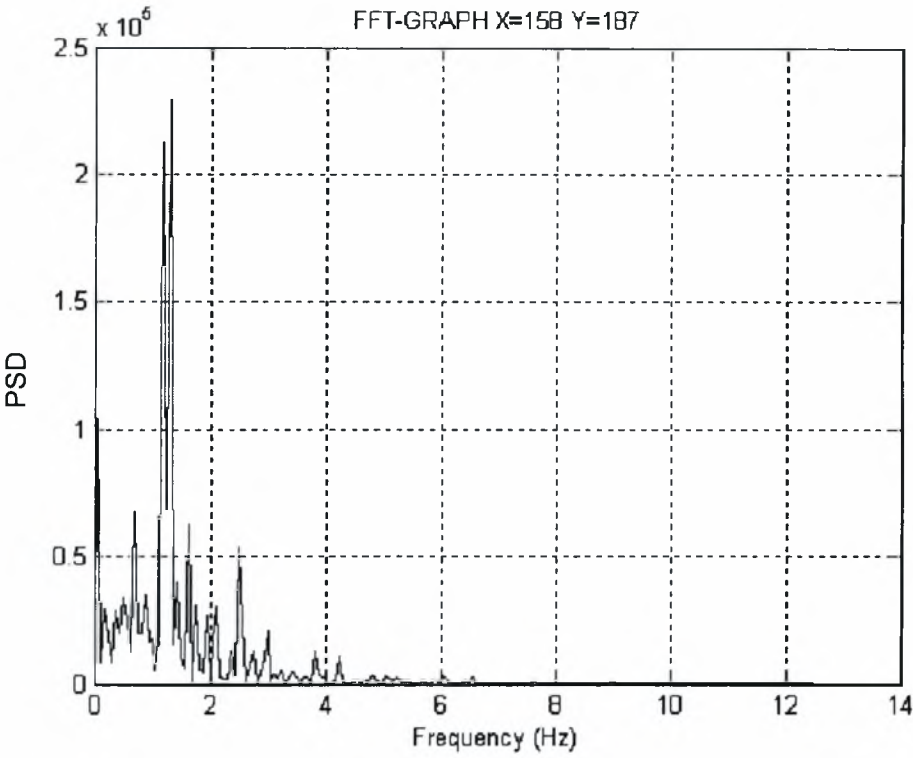
- $H_\delta/D = 0,3$ (δάπεδο)

Στην εικόνα 5.12 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_\delta/D=0,3$.

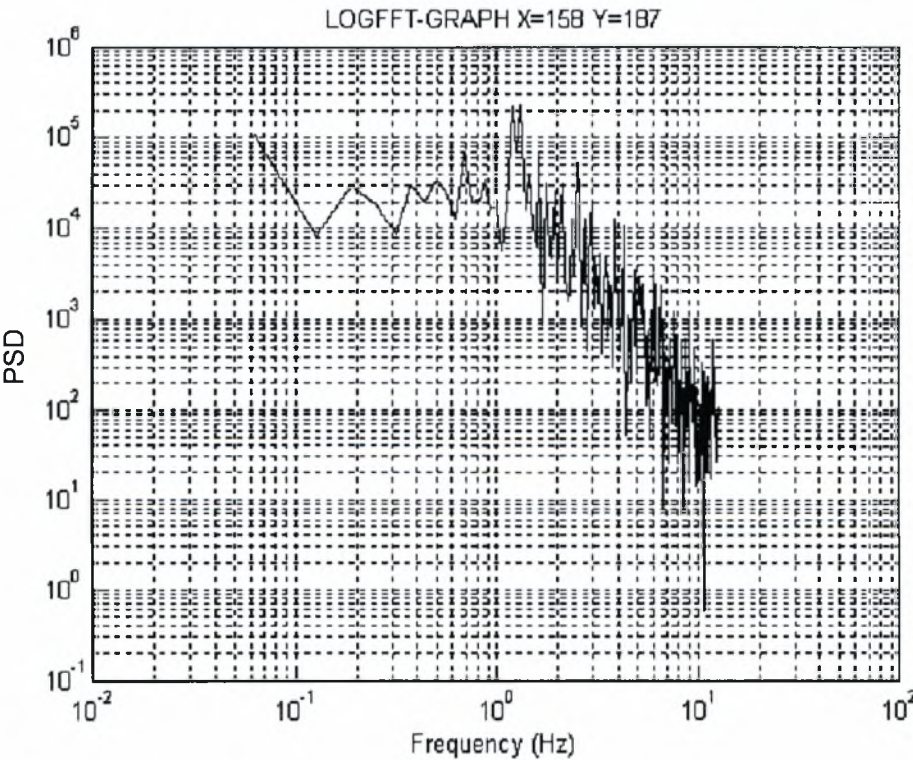


Εικόνα 5.12. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_\delta/D=0,3$.

Η κρίσιμη θέση όπου τελικά συμβαίνει σχηματισμός δινών και στην πάνω αλλά και στην κάτω επιφάνεια του κυλίνδρου είναι $H_\delta/D=0,3$. Στο διάγραμμα 5.14 φαίνονται τα φάσματα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=8$ και $Y/D=0,5$ σε κανονικό (5.14.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.14.β).



Διάγραμμα 5.14.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για X/D=8 και Y/D=0,5



Διάγραμμα 5.14.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για X/D=8 και Y/D=0,5

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα η συχνότητα απόσπασης δινών f είναι ίση με 1,31 και ο αριθμός Strouhal που προκύπτει είναι ίσος με $St=f D/U_0=0,196$. Στη συγκεκριμένη θέση η τιμή της συχνότητας f συγκριτικά με την τιμή της στη θέση $H/D=3,5$ (κέντρο) που είναι ίση με 1,38 είναι μικρότερη. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας επικρατούν τέτοιες ροϊκές συνθήκες ώστε η περιοδική απόσπαση και διάχυση των δινών να είναι πιο αργή από αυτή του κέντρου.

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία εξαγωγής συχνοτήτων και για τις εναπομείναντες θέσεις προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 5.6.

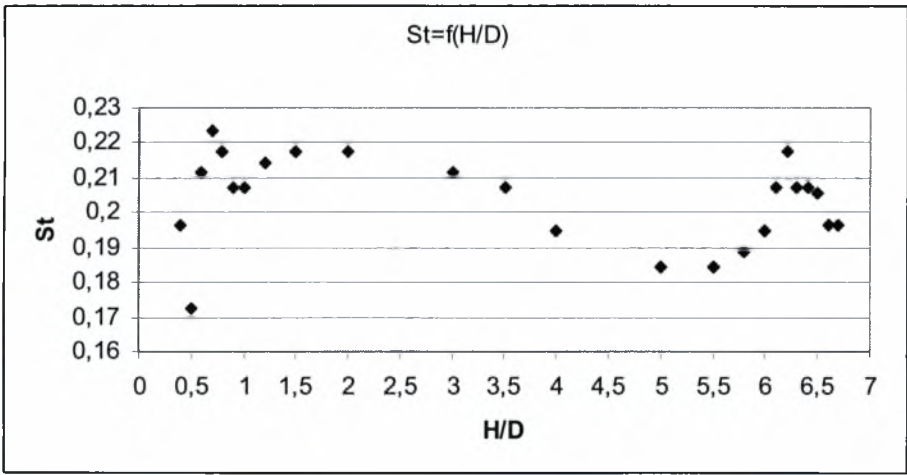
H/D	Fr(Hz)	St
0,4	1,31	0,196
0,5	1,15	0,172
0,6	1,41	0,211
0,7	1,49	0,223
0,8	1,45	0,217
0,9	1,38	0,207
1	1,38	0,207
1,2	1,43	0,214
1,5	1,45	0,217
2	1,45	0,217
3	1,41	0,211
3,5(Κέντρο)	1,38	0,207
4	1,3	0,195
5	1,23	0,184
5,5	1,23	0,184
5,8	1,26	0,189
6	1,3	0,195
6,1	1,38	0,207
6,2	1,45	0,217
6,3	1,38	0,207
6,4	1,38	0,207

6,5	1,37	0,205
6,6	1,31	0,196
6,7	1,31	0,196

Πίνακας 5.6. Τιμές της συχνότητας απόσπασης δινών f και του αριθμού Strouhal για όλα τα H/D .

Η θέση $H/D=3,5$ είναι αυτή όπου ο άξονας του κυλίνδρου συμπίπτει με το μέσο του καναλιού και η θέση $H/D=6,7$ είναι αυτή που η κάτω πλευρά του κυλίνδρου απέχει $H/D=0,3$ από τον πυθμένα του καναλιού. Η αδιαστατοποίηση στην πρώτη στήλη του πίνακα έγινε βάσει της θέσης $H/D=0$ (η πάνω πλευρά του κυλίνδρου εφάπτεται στην διεπιφάνεια) και καθώς ο κύλινδρος μετατοπίζεται προς τα κάτω αυξάνεται ο λόγος H/D .

Στο διάγραμμα 5.15 παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών του αριθμού Strouhal με την μετατόπιση του κυλίνδρου κατά μήκος του βάθους του καναλιού .



Διάγραμμα 5.15. Διακύμανση των τιμών του αριθμού Strouhal με την μετατόπιση του κυλίνδρου από την διεπιφάνεια προς το δάπεδο της σήραγγας

Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι για τον κύλινδρο $D=30\text{mm}$ η εκροή δινών κοντά στην διεπιφάνεια αρχίζει στην θέση $H_e/D=0,4$ με συχνότητα απόσπασης δινών από την πάνω και από την κάτω πλευρά του κυλίνδρου να είναι $1,31\text{ Hz}$, ενώ η εκροή των δινών κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας

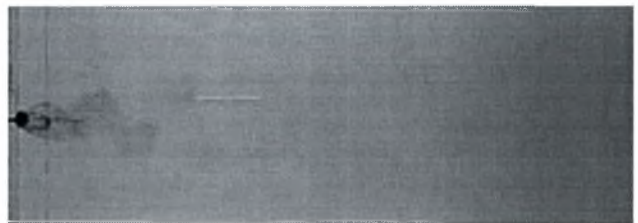
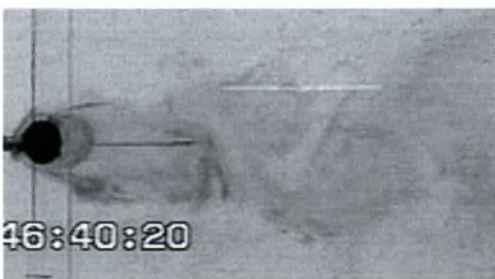
αρχίζει στην θέση $H_0/D=0,3$ με συχνότητα απόσπασης δινών από την πάνω και από την κάτω πλευρά του κυλίνδρου να είναι $1,31$ Hz. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στην διεπιφάνεια επικρατούν τέτοιες ροϊκές συνθήκες ώστε η περιοδική απόσπαση και διάχυση των δινών να είναι πιο αργή από αυτή του κέντρου και ίδια με αυτή του δαπέδου της υδροσήραγγας.

5.1.3. Ανάλυση αποτελεσμάτων για κύλινδρο $D=13$ mm, $Re=2600$

Για τον κύλινδρο διαμέτρου $D=13$ mm είναι αριθμός $Re=2600$ και ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος $U_0=0,2$ m/sec. Θα ακολουθήσει ανάλυση όπου ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο του καναλιού και στη συνέχεια θα γίνει σχολιασμός για τις υπόλοιπες θέσεις του κυλίνδρου γιατί η εκροή χρώματος μόνο από ένα σημείο στον κύλινδρο (σημείο αποκοπής) δεν επιτρέπει να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα αφού τα γραφήματα συχνοτήτων που προκύπτουν δεν δίνουν ευδιάκριτες τιμές.

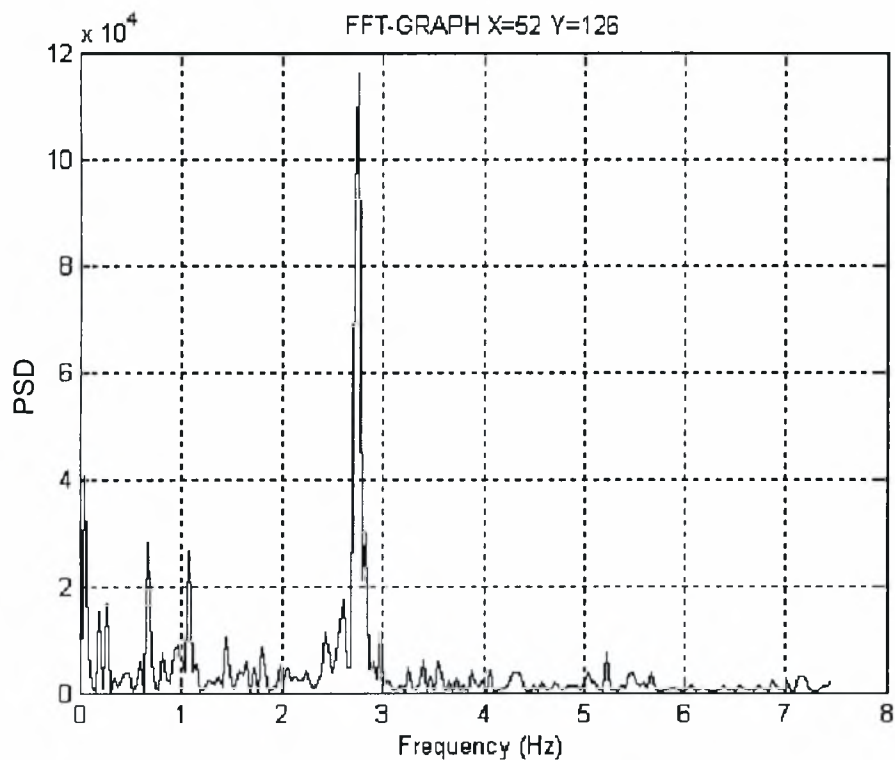
- $H/D= 8,37$ (Κέντρο)

Στην εικόνα (5.13) φαίνεται η ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.

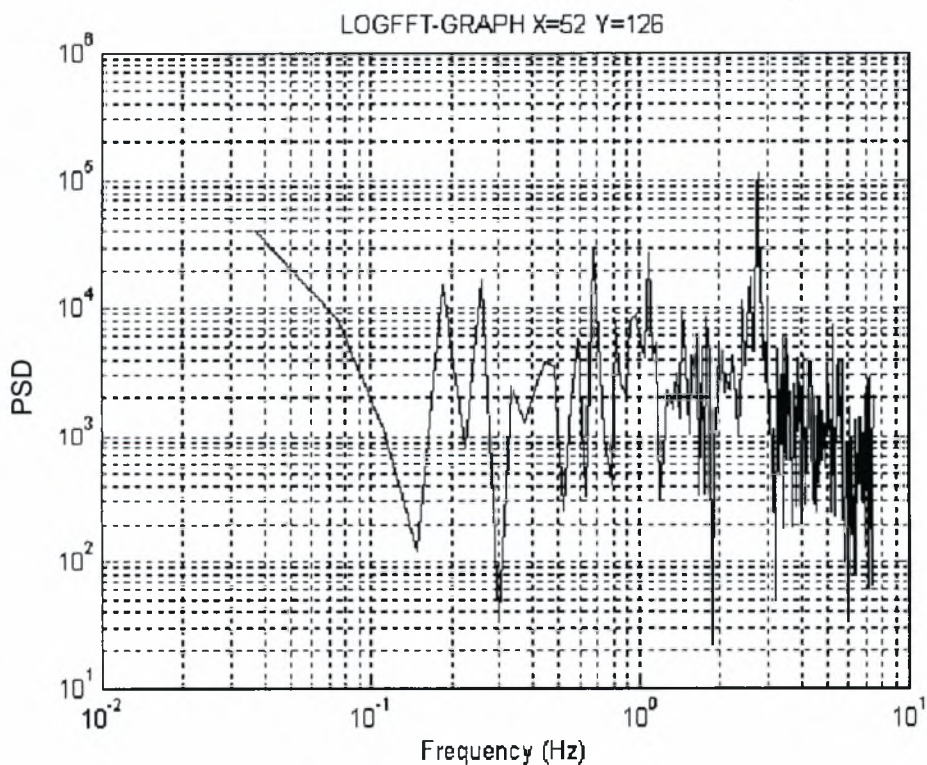


Εικόνα .5.13. Ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος

Στο διάγραμμα 5.16 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$ σε κανονικό (5.16.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.16.β).



Διάγραμμα 5.16.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$



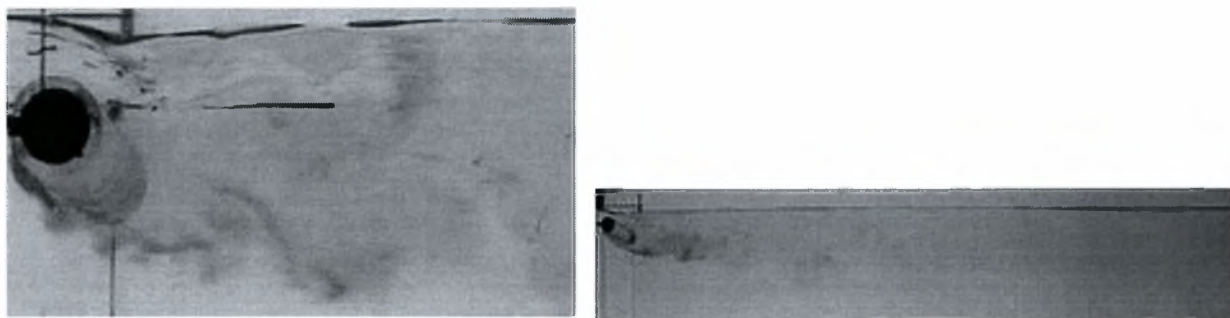
Διάγραμμα 5.16.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η συχνότητα εκροής δινών είναι ίση με 2,76 Hz και ο αριθμός Strouhal που προκύπτει είναι ίσος με $St=f D/U_0=0,18$. Η τιμή αυτή δεν συμφωνεί απόλυτα με την θεωρία και αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι το χρώμα διαλύεται γρήγορα αφού εκρέει μόνο από ένα σημείο πάνω στον κύλινδρο (σημείο ανακοπής). Επίσης όσο μικραίνει η εικόνα, αυξάνεται ο θόρυβος (noise) για την ψηφιακή ανάλυση και τους υπολογισμούς.

Τα διαγράμματα συχνότητων για τις θέσεις από $H_e/D=0 \sim H_e/D=0,7$ κοντά στην διεπιφάνεια και $H_\delta/D=0 \sim H_\delta/D=0,7$ κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας δεν δίνουν κάποια ευδιάκριτη τιμή συχνότητας εκροής δινών. Αυτό δεν επιτρέπει περαιτέρω ανάλυση για τον κύλινδρο $D=13\text{mm}$. Παρακάτω θα παρουσιαστούν η μορφή και τα διαγράμματα συχνότητων για μια θέση κοντά στην διεπιφάνεια $H_e/D=0,4$ και μια κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας $H_\delta/D=0,3$.

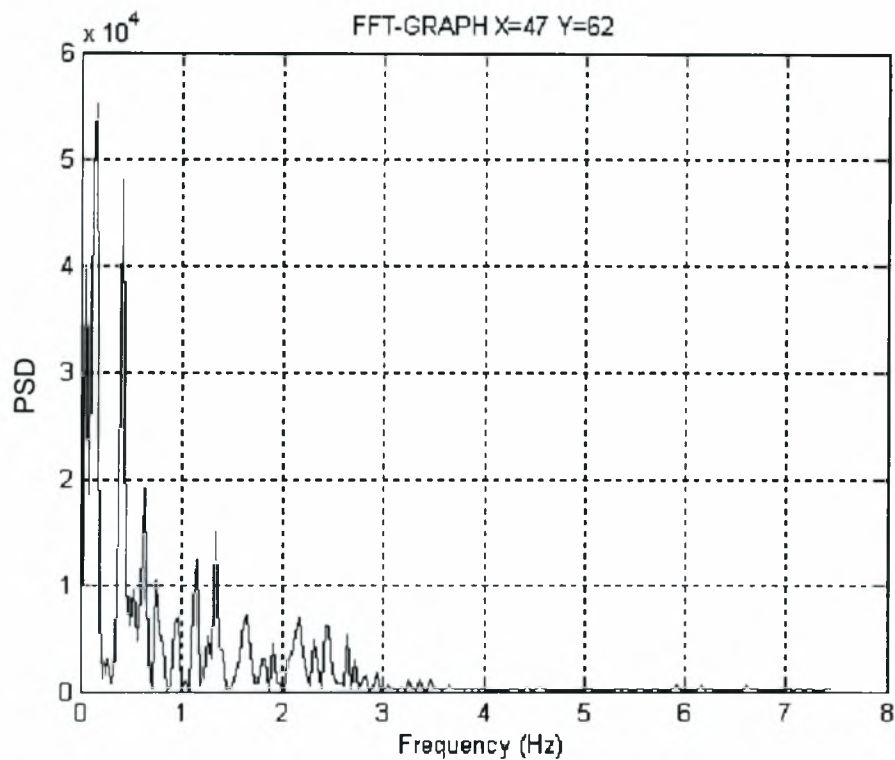
- **$H_e/D=0,4$ (διεπιφάνεια)**

Στην εικόνα 5.14 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,4$.

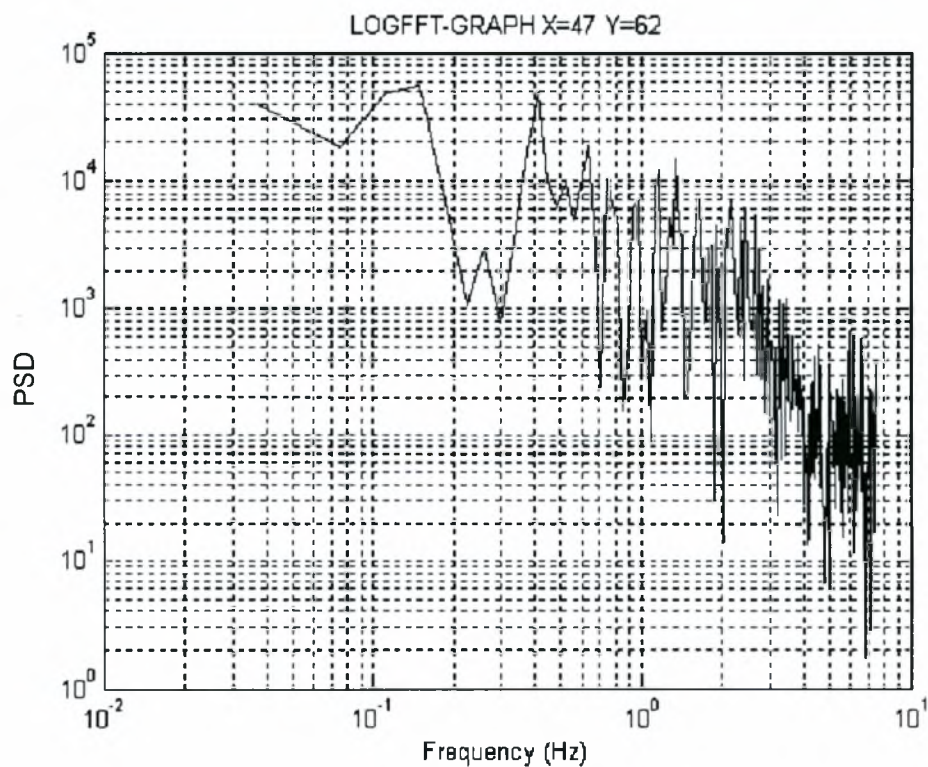


Εικόνα 5.14. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,4$.

Στο διάγραμμα 5.17 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνότητων για $X/D=4$ και $Y/D=-0,5$ σε κανονικό (5.17.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.17.β).



Διάγραμμα 5.17.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για X/D=4 και Y/D=-0,5

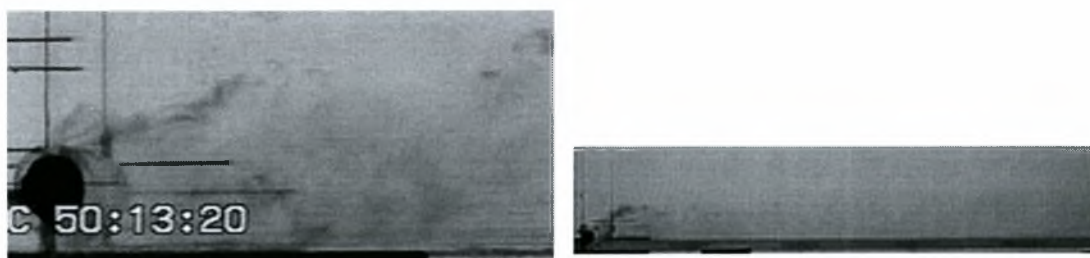


Διάγραμμα 5.17.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για X/D=4 και Y/D=-0,5

Όπως φαίνεται τα παραπάνω διαγράμματα δεν δίνουν κάποια ευδιάκριτη τιμή συχνότητας εκροής δινών παρόλο που η οπτική παρατήρηση του φαινομένου μας επιτρέπει να δούμε κάποιες δίνες στην θέση αυτή.

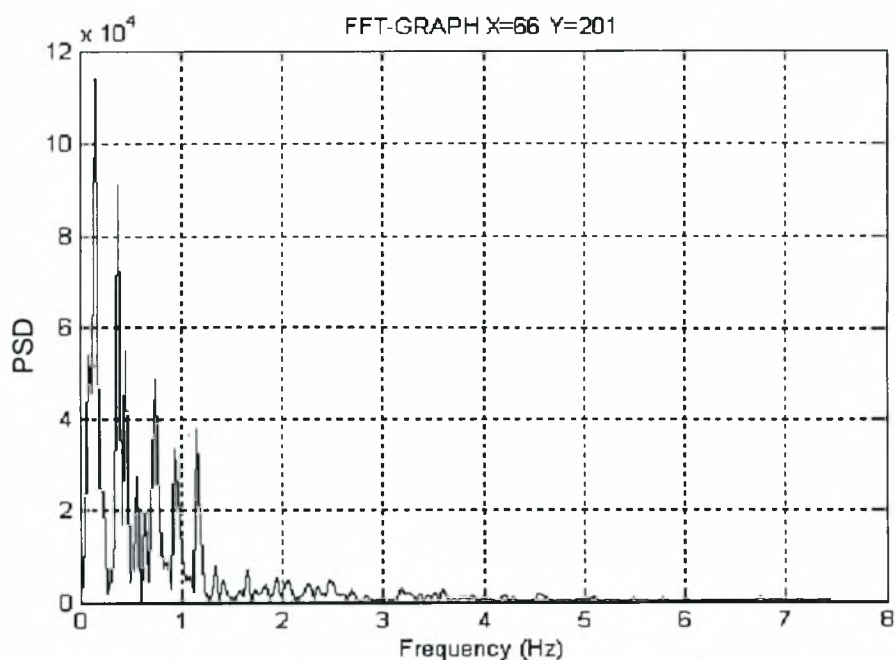
- $H_0/D = 0,3$ (δάπεδο)

Στην εικόνα 5.15 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_0/D=0,3$.

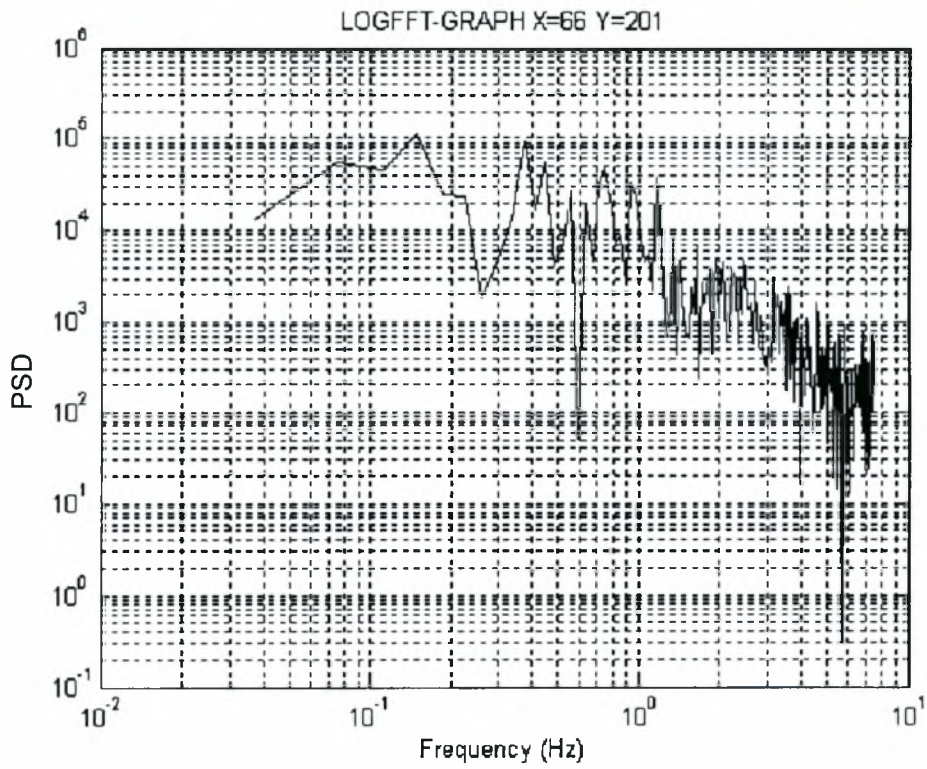


Εικόνα 5.15. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_0/D=0,3$.

Στο διάγραμμα 5.18 φαίνεται το φάσμα ισχύος των συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$ σε κανονικό (5.18.α) και λογαριθμικό διάγραμμα (5.18.β).



Διάγραμμα 5.18.α. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$



Διάγραμμα 5.18.β. Φάσμα ισχύος συχνοτήτων για $X/D=4$ και $Y/D=0,5$

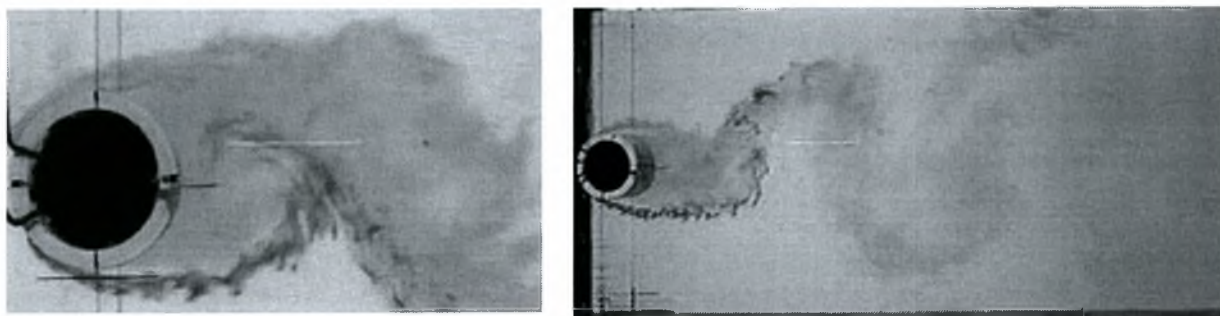
5.2. Μεταβολές μεγεθών κοντά στην διεπιφάνεια και κοντά σε στερεό όριο.

5.2.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων για κύλινδρο $D=50$ mm, $Re=10000$

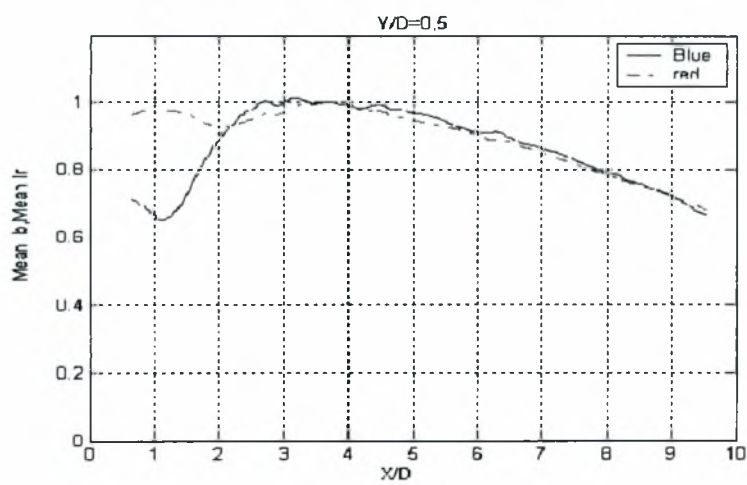
Για τον κύλινδρο διαμέτρου $D=50$ mm είναι αριθμός $Re=10000$ και ταχύτητα ελευθέρου ρεύματος $U_0=0,2$ m/sec. Θα ακολουθήσει ανάλυση όπου ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο του καναλιού και στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση με τις υπόλοιπες θέσεις του κυλίνδρου.

- $H/D= 1,9$ (Κέντρο)

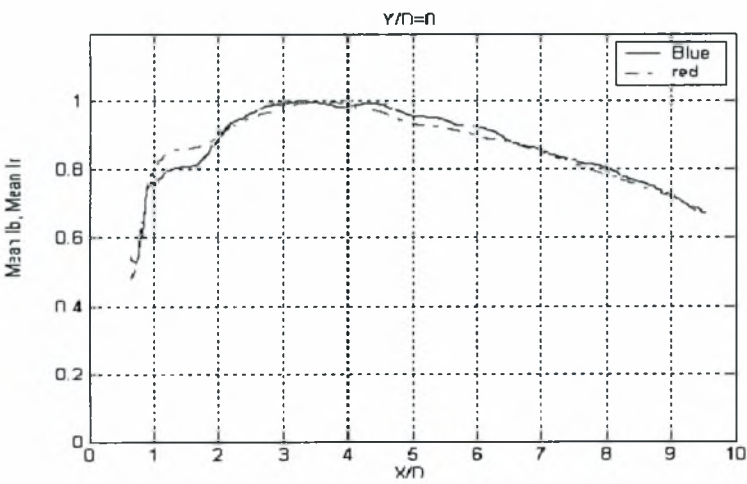
Στην εικόνα (5.16) φαίνεται η ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.



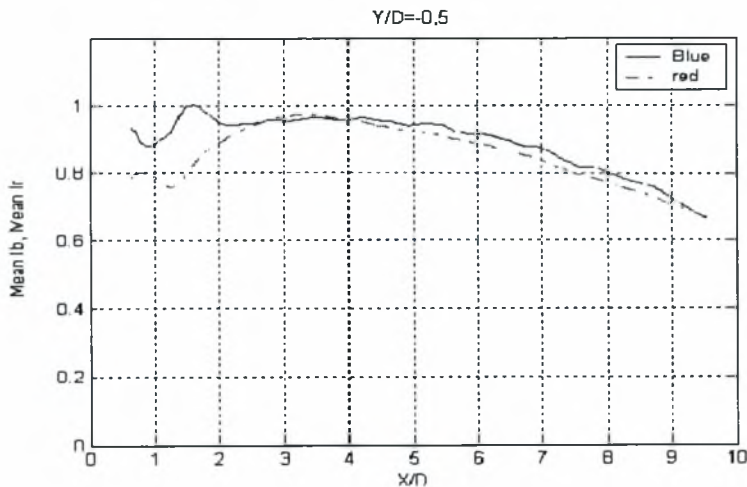
Εικόνα .5.16. Ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.



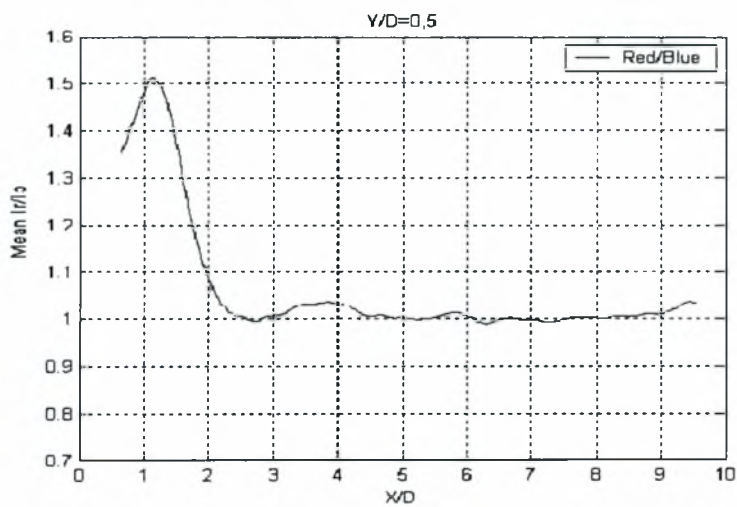
Διάγραμμα 5.19. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0,5$



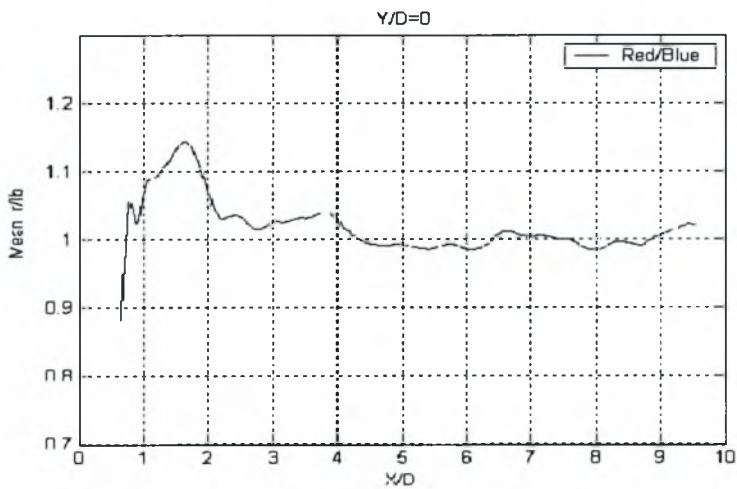
Διάγραμμα 5.20. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



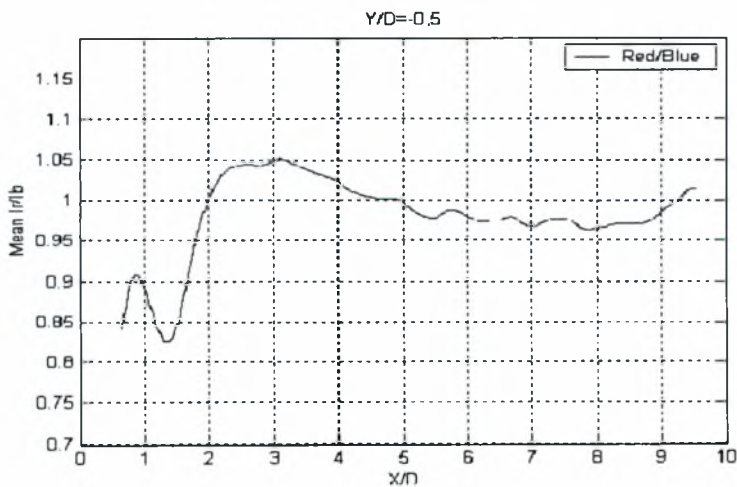
Διάγραμμα 5.21. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=-0,5$



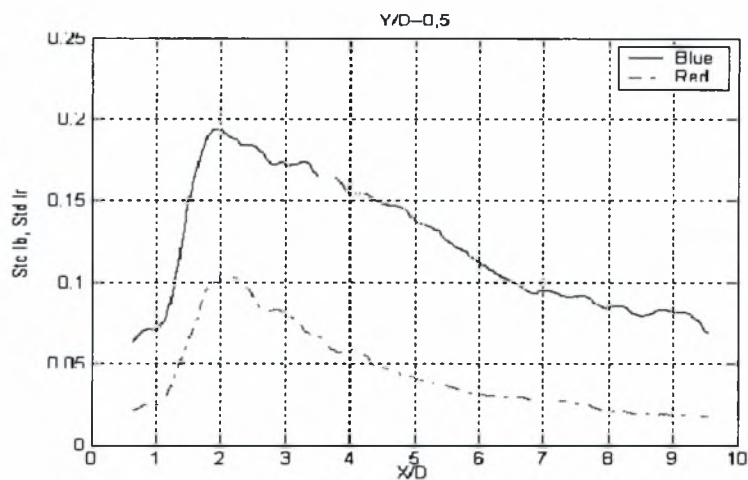
Διάγραμμα 5.22. Κατανομή (I_r/I_b) για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0,5$



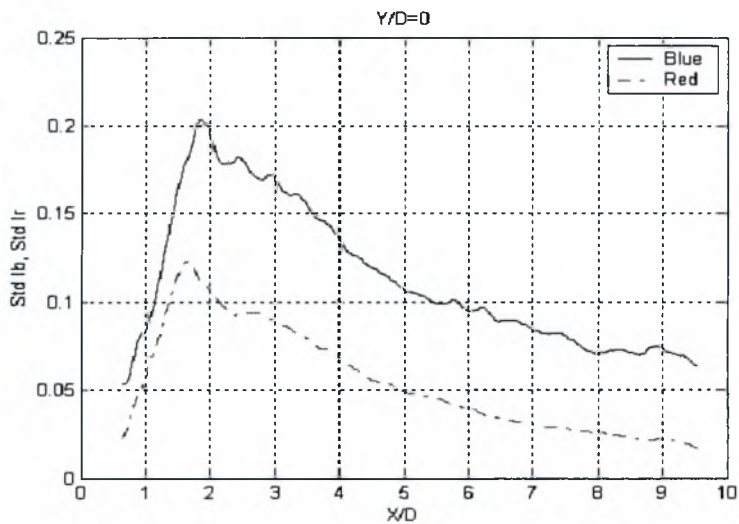
Διάγραμμα 5.23. Κατανομή (I_r/I_b) για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



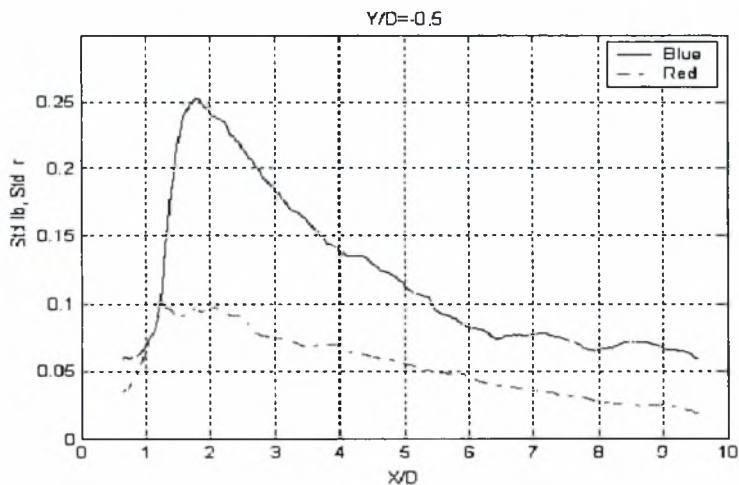
Διάγραμμα 5.24. Κατανομή (I_r/I_b) για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=-0,5$



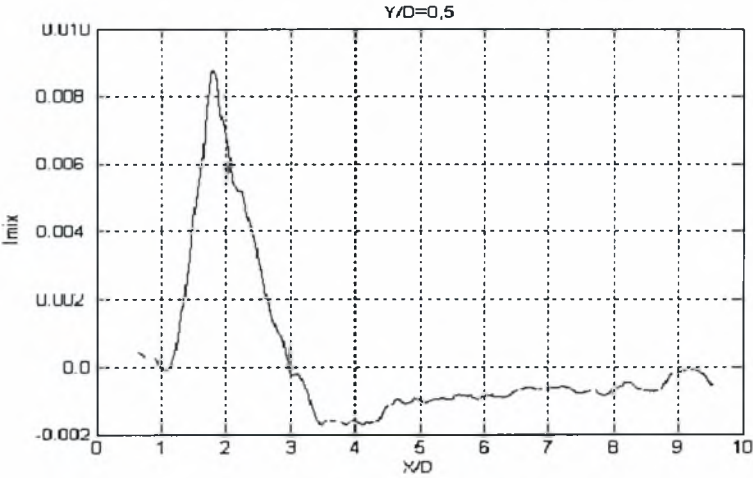
Διάγραμμα 5.25. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για H/D=1,9 (Κέντρο) και Y/D=0,5



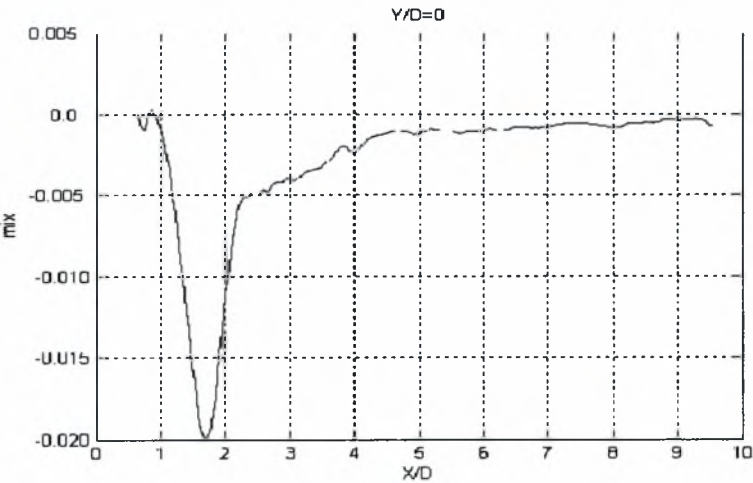
Διάγραμμα 5.26. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για H/D=1,9 (Κέντρο) και Y/D=0



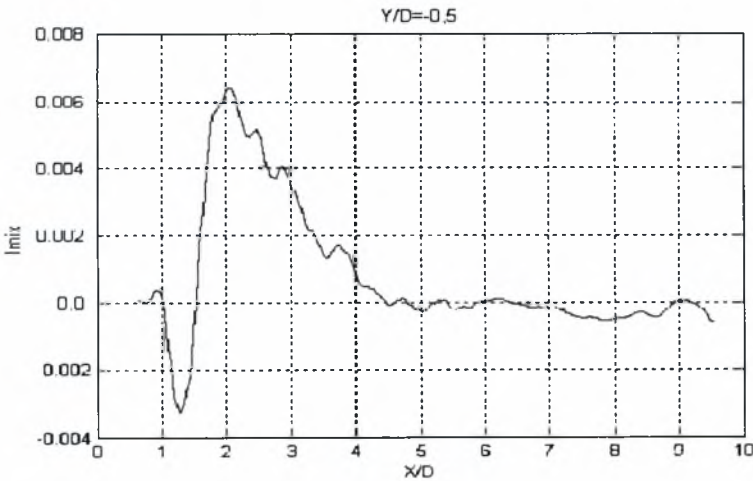
Διάγραμμα 5.27. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για H/D=1,9 (Κέντρο) και Y/D=-0,5



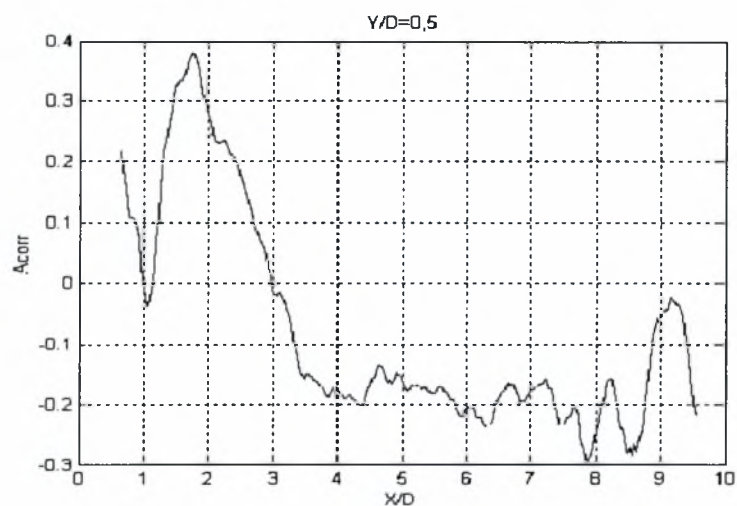
Διάγραμμα 5.28. Μεταβολή I_{mix} για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0,5$



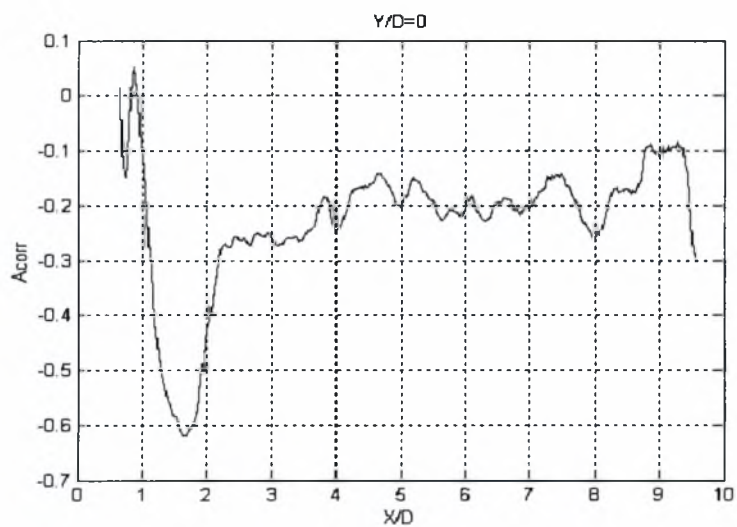
Διάγραμμα 5.29. Μεταβολή I_{mix} για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



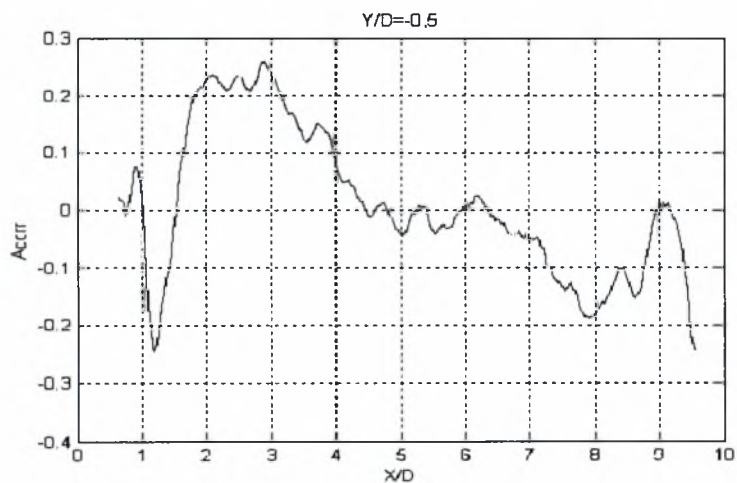
Διάγραμμα 5.30. Μεταβολή I_{mix} για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=-0,5$



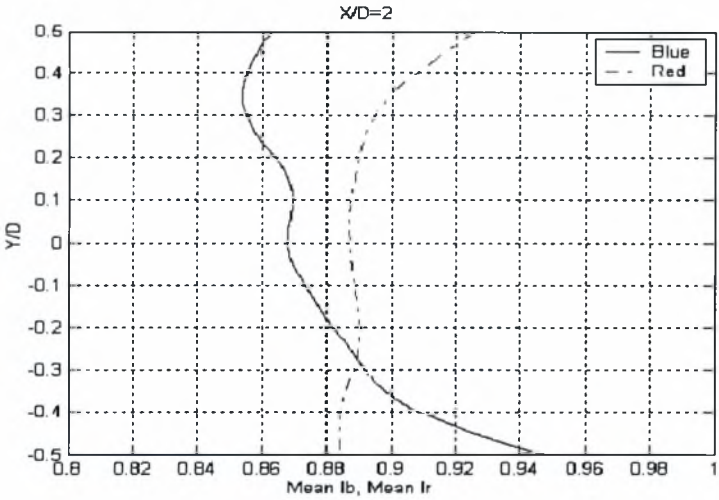
Διάγραμμα 5.31. Μεταβολή A_{corr} για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0,5$



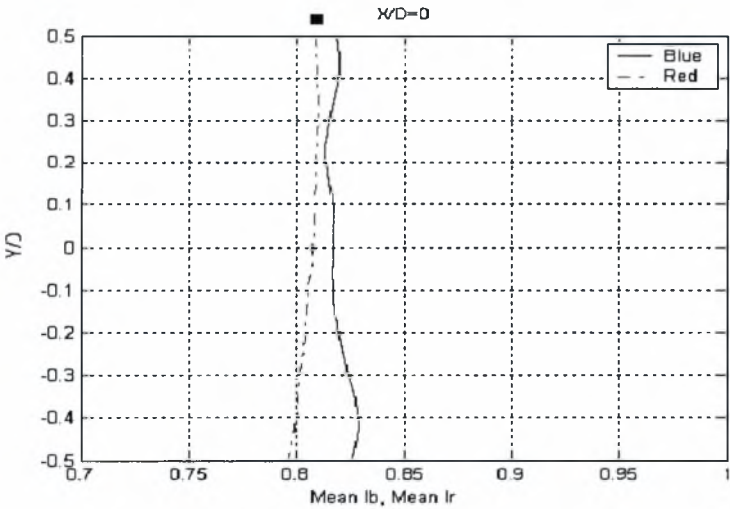
Διάγραμμα 5.32. Μεταβολή A_{corr} για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.33. Μεταβολή A_{corr} για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=-0,5$



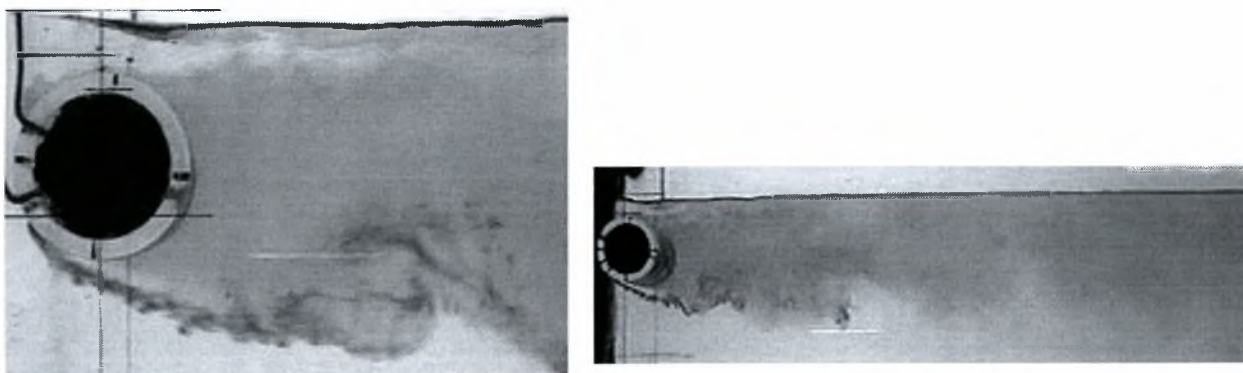
Διάγραμμα 5.34. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $X/D=2$



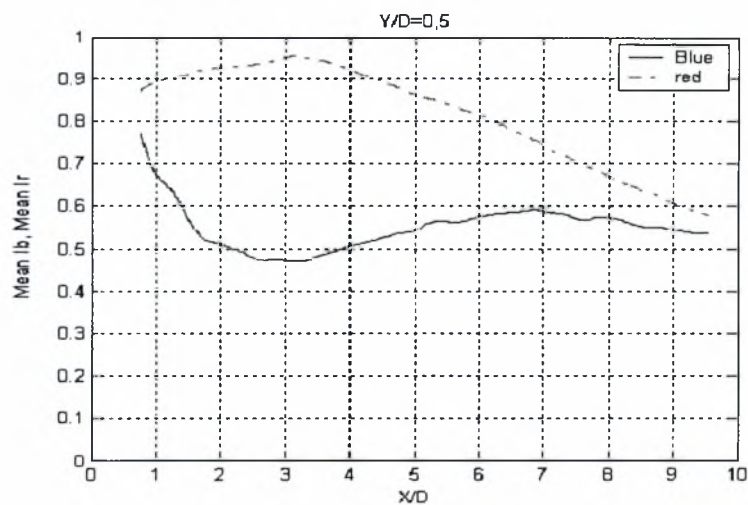
Διάγραμμα 5.35. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $X/D=8$

- $H_e/D = 0,3$ (διεπιφάνεια)

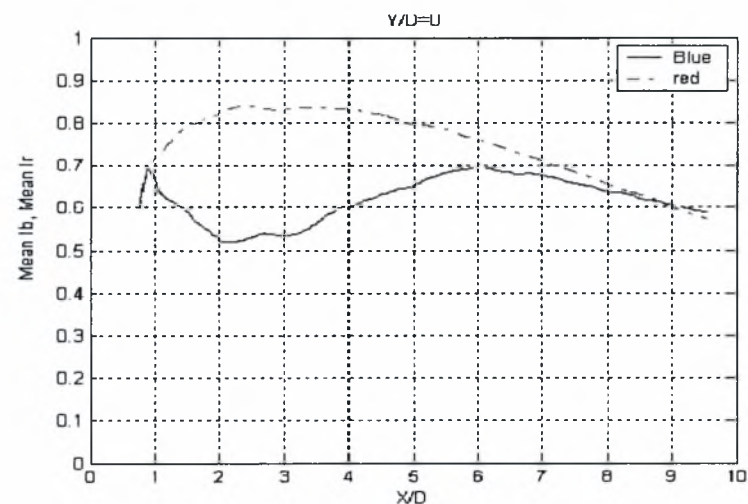
Στην εικόνα 5.17 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D = 0,3$.



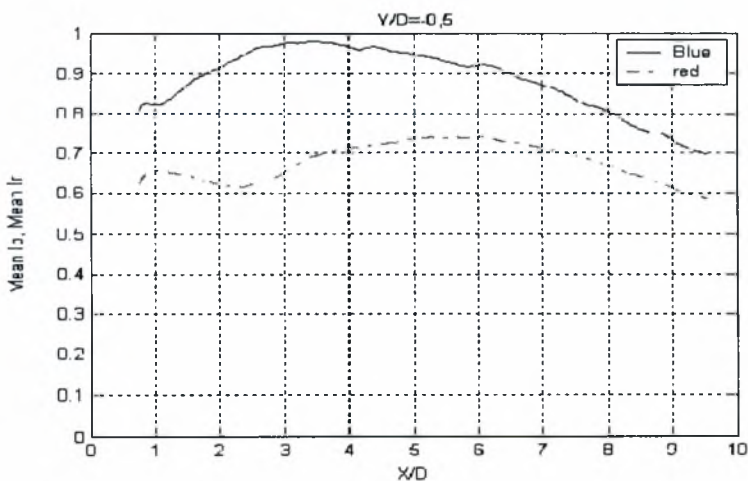
Εικόνα 5.17. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D = 0,3$.



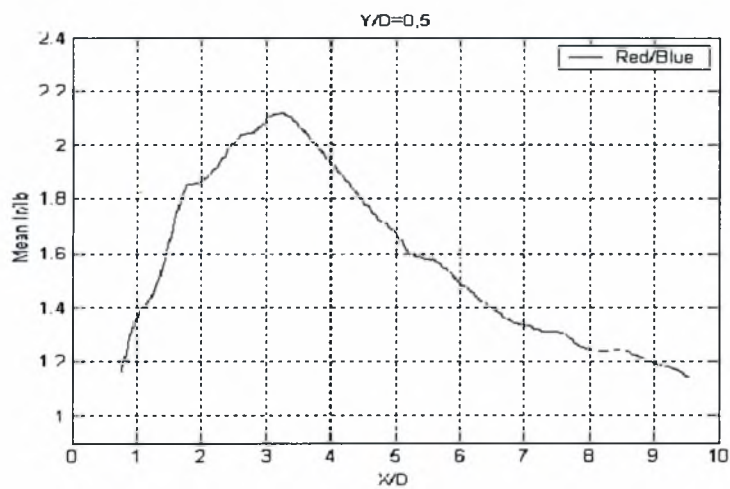
Διάγραμμα 5.36. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



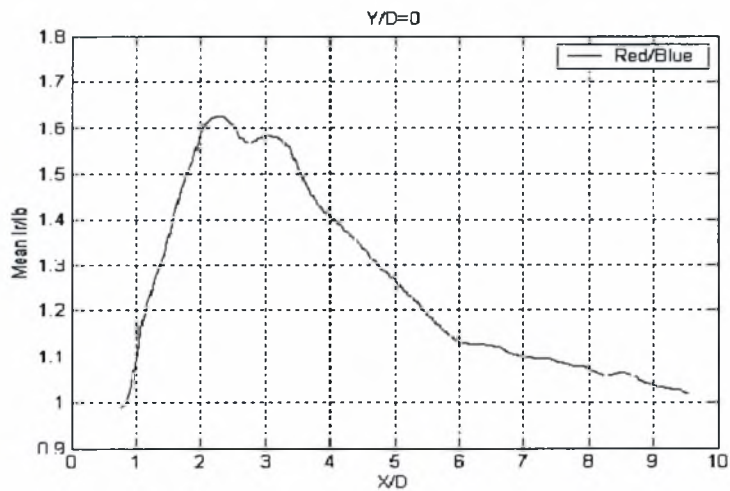
Διάγραμμα 5.37. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0$



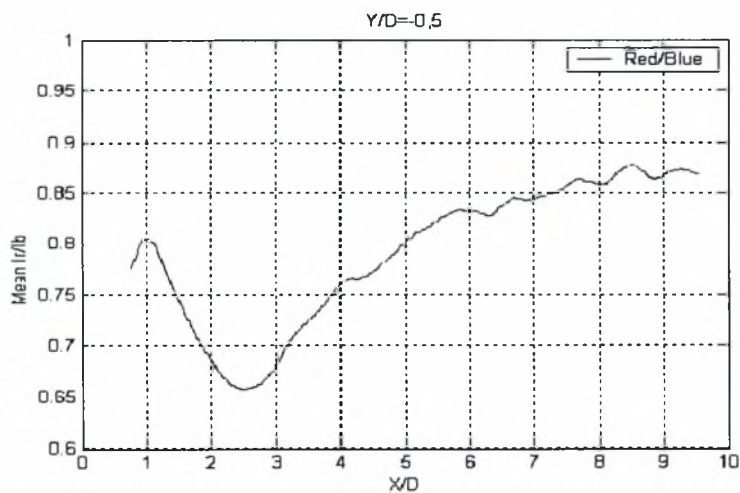
Διάγραμμα 5.38. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



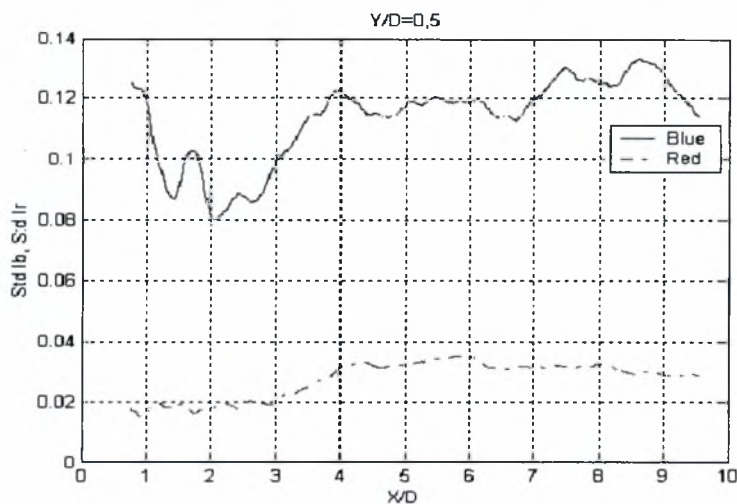
Διάγραμμα 5.39. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_c/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



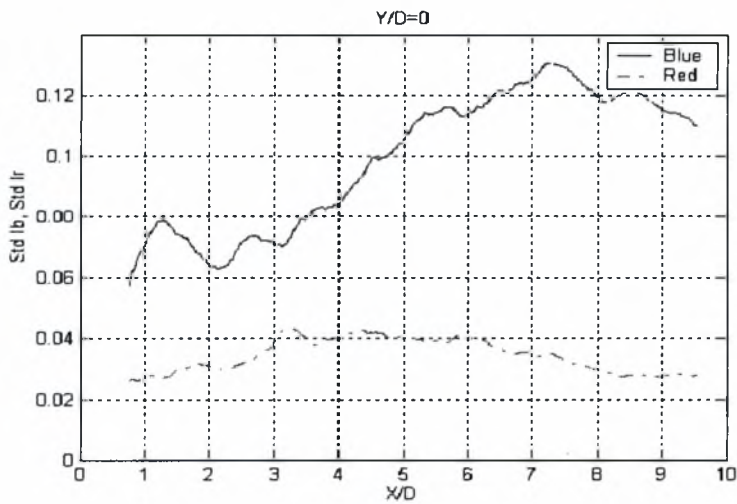
Διάγραμμα 5.40. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_c/D=0,3$ και $Y/D=0$



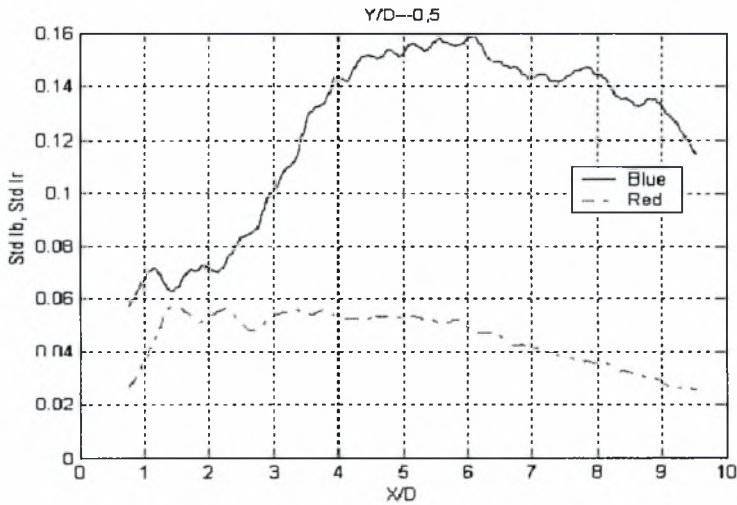
Διάγραμμα 5.41. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_c/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



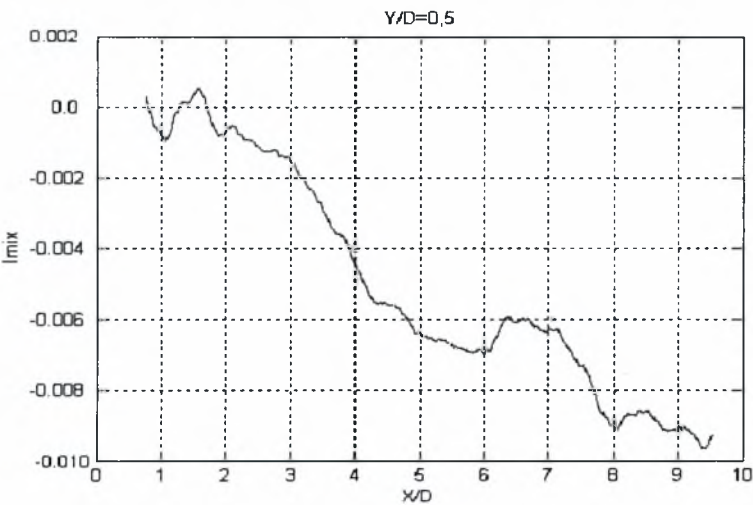
Διάγραμμα 5.42. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



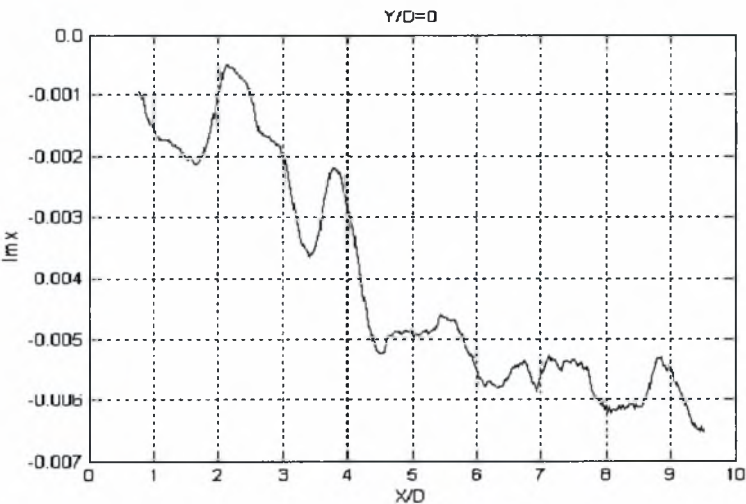
Διάγραμμα 5.43. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0$



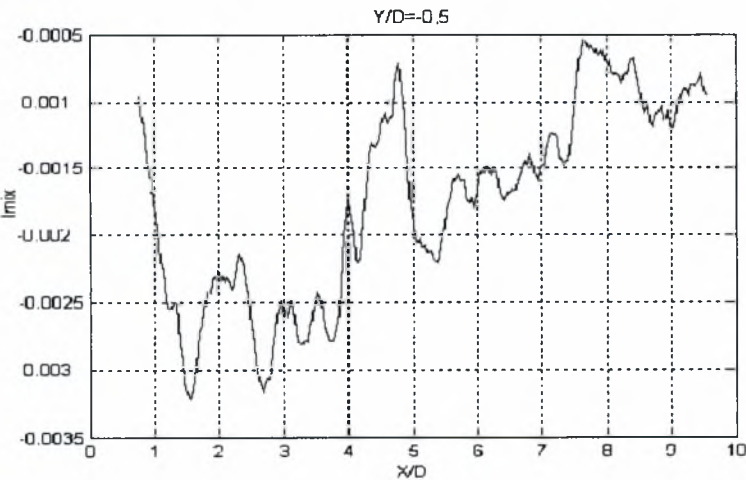
Διάγραμμα 5.44. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



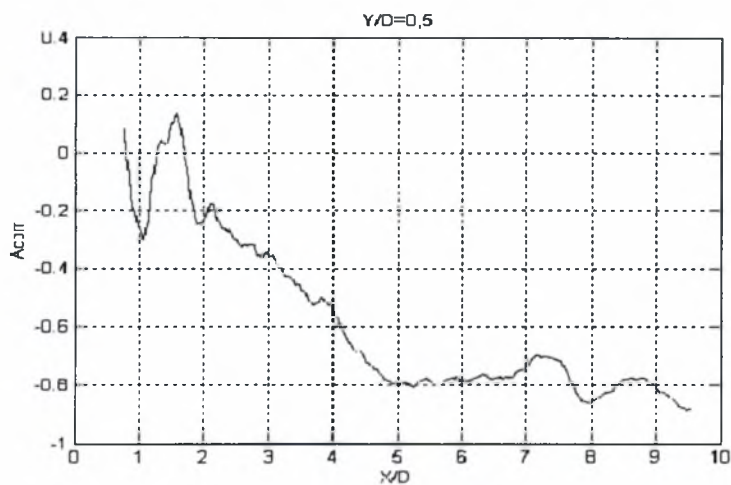
Διάγραμμα 5.45. Μεταβολή I_{mix} για $H_c/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



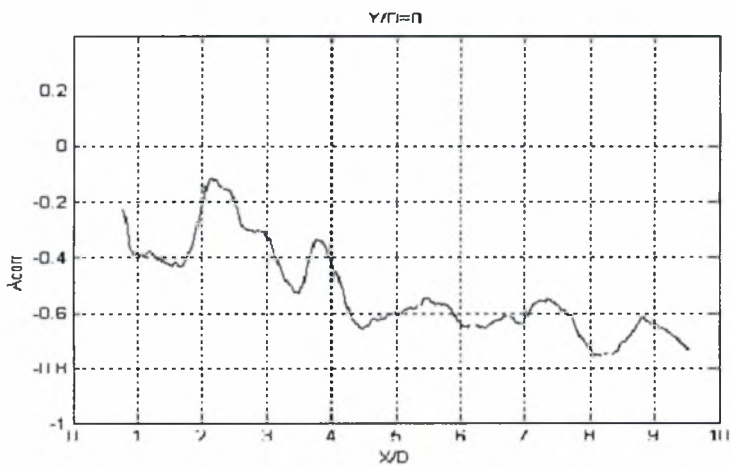
Διάγραμμα 5.46. Μεταβολή I_{mix} για $H_c/D=0,3$ και $Y/D=0$



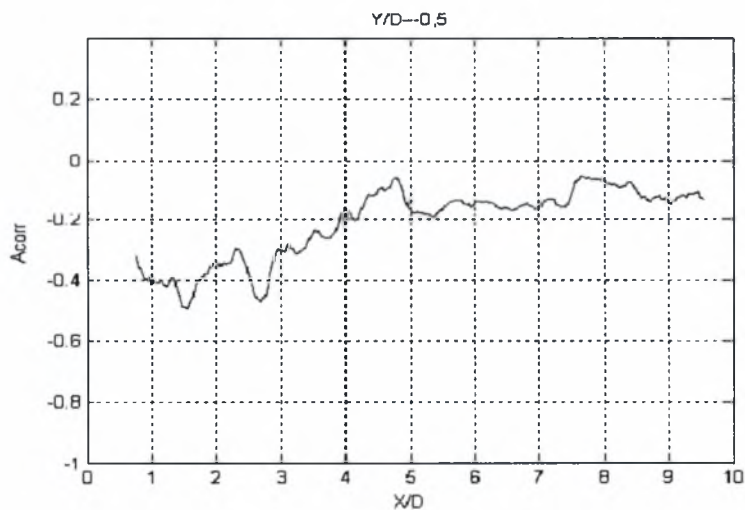
Διάγραμμα 5.47. Μεταβολή I_{mix} για $H_c/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



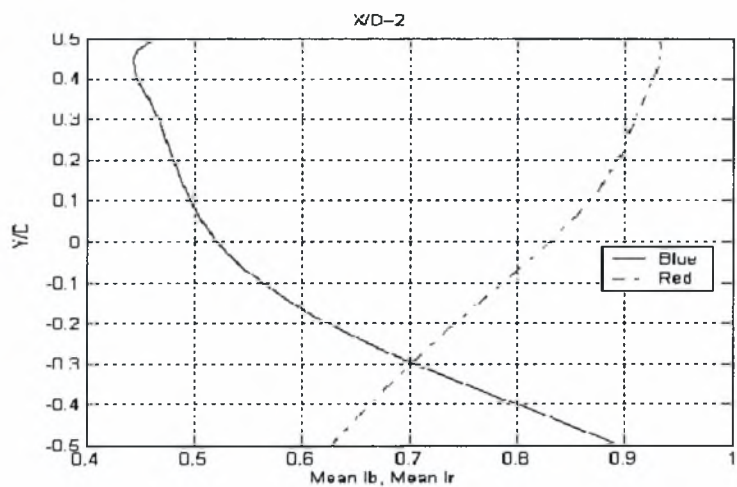
Διάγραμμα 5.48. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



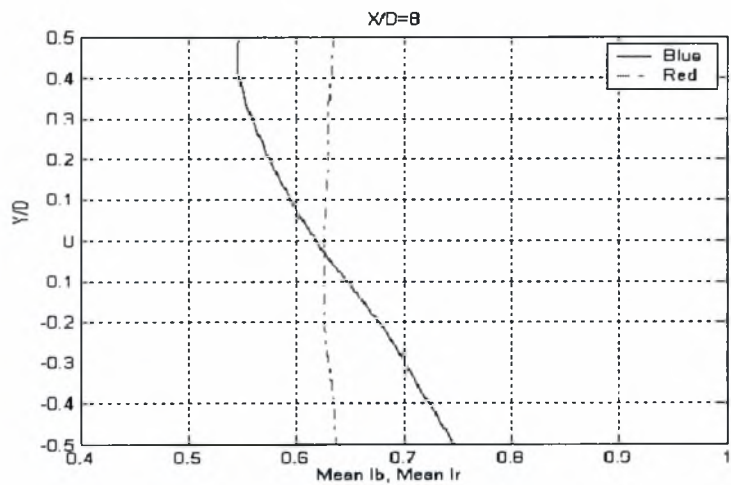
Διάγραμμα 5.49. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.50. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



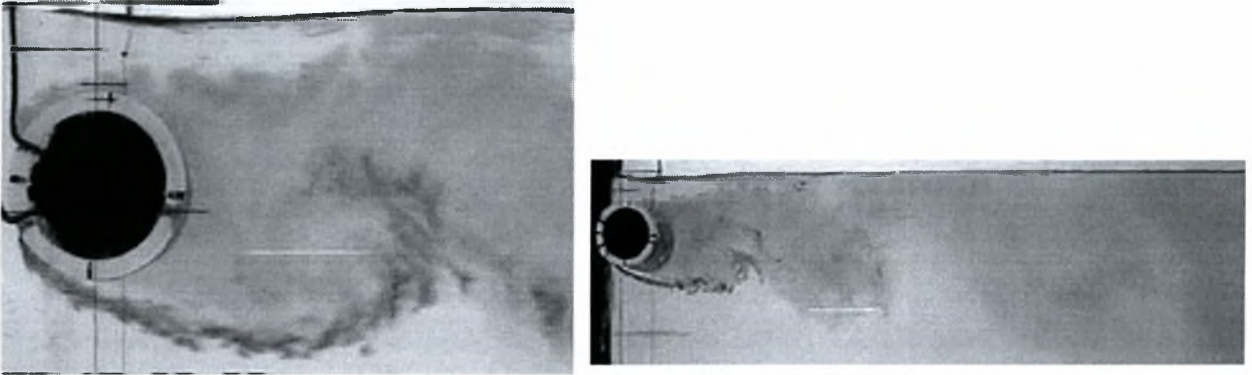
Διάγραμμα 5.51. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0.3$ και $X/D=2$



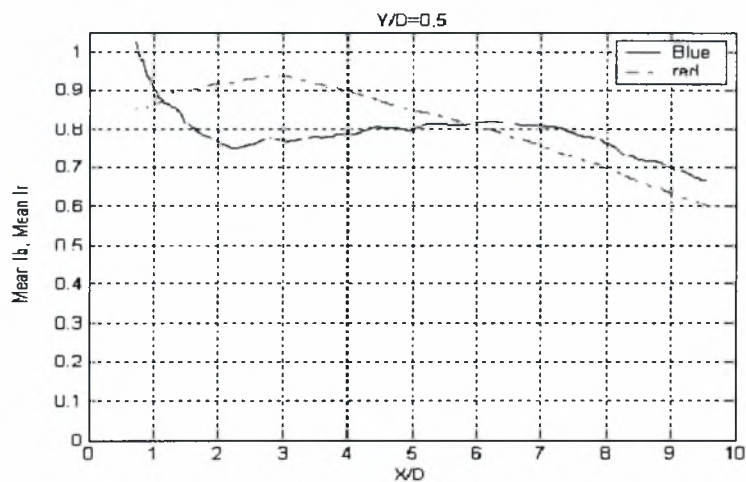
Διάγραμμα 5.52. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0.3$ και $X/D=8$

- $H_e/D = 0,4$ (διεπιφάνεια)

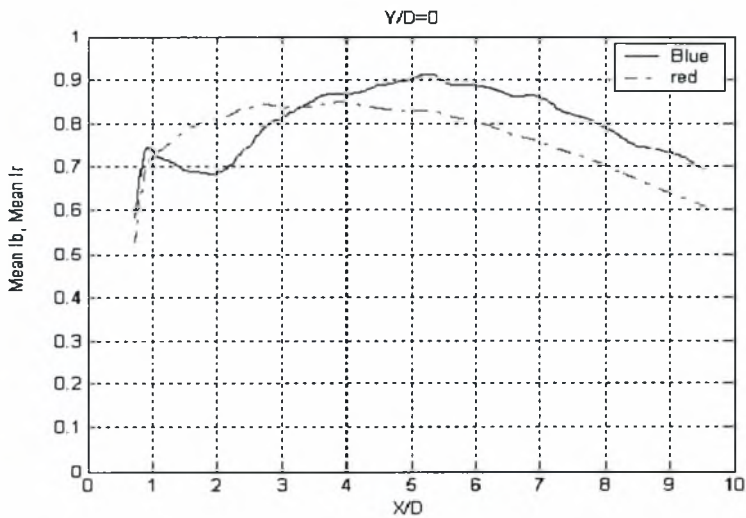
Στην εικόνα 5.18 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,4$.



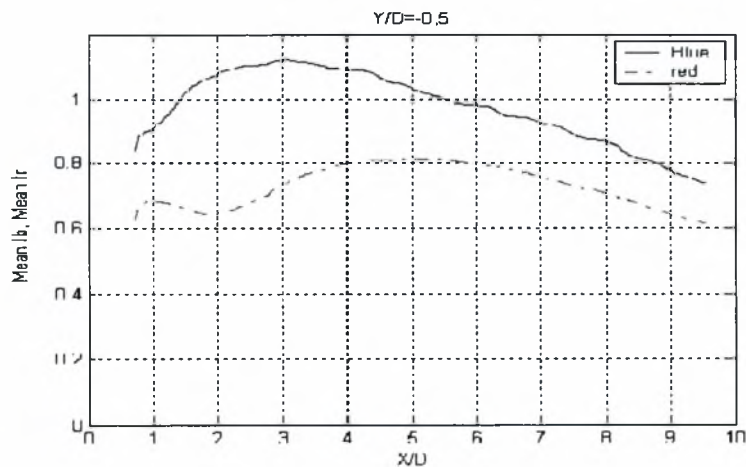
Εικόνα 5.18. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,4$.



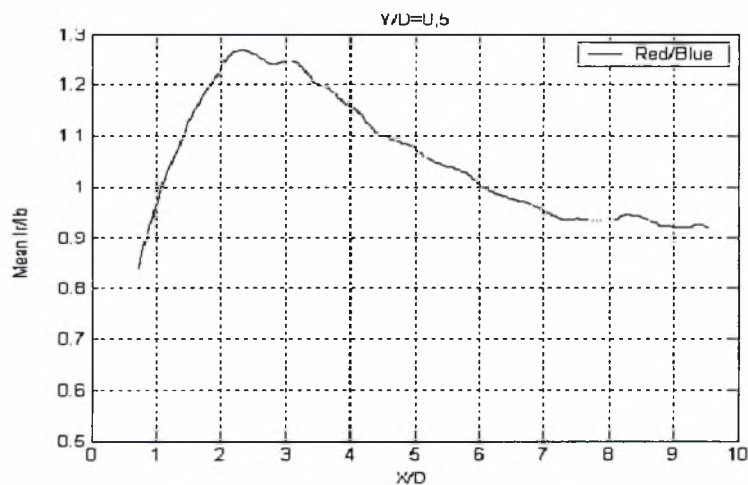
Διάγραμμα 5.53. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



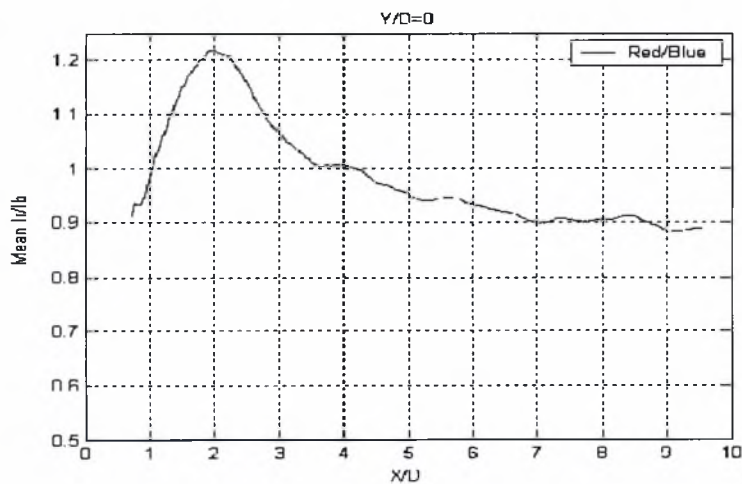
Διάγραμμα 5.54. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=0$



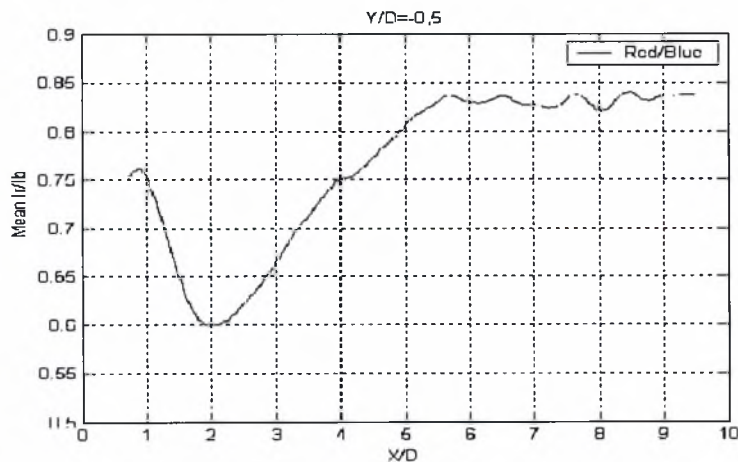
Διάγραμμα 5.55. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



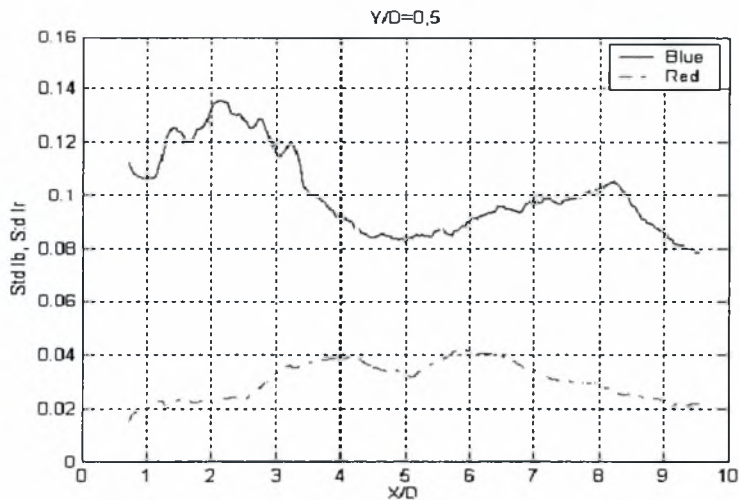
Διάγραμμα 5.56. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_c/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



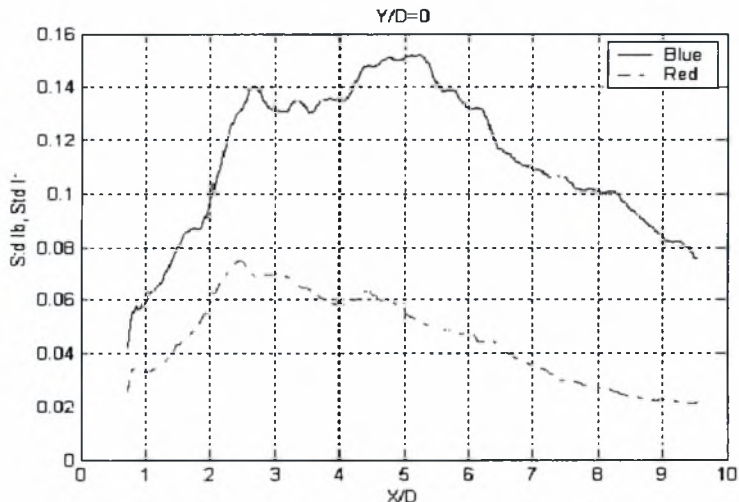
Διάγραμμα 5.57. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_c/D=0,4$ και $Y/D=0$



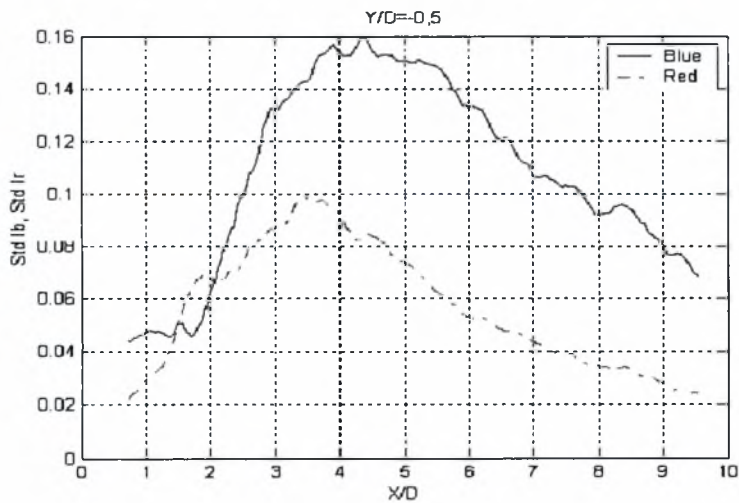
Διάγραμμα 5.58. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_c/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



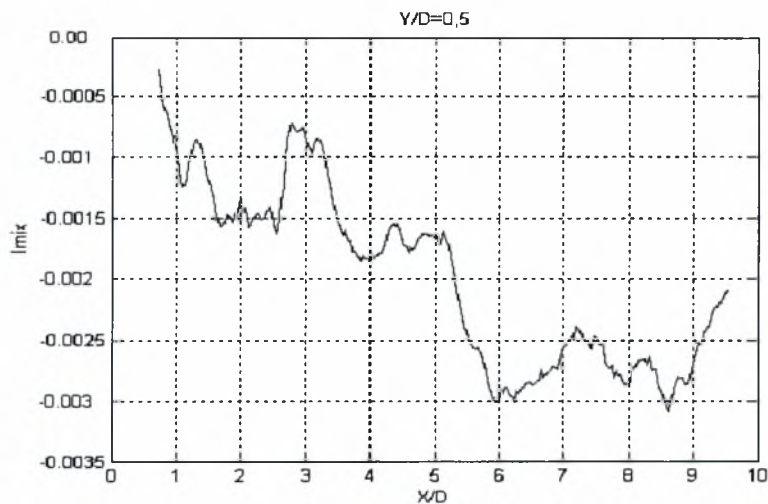
Διάγραμμα 5.59. Κατανομές $Std I_b$, $Std I_r$ για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



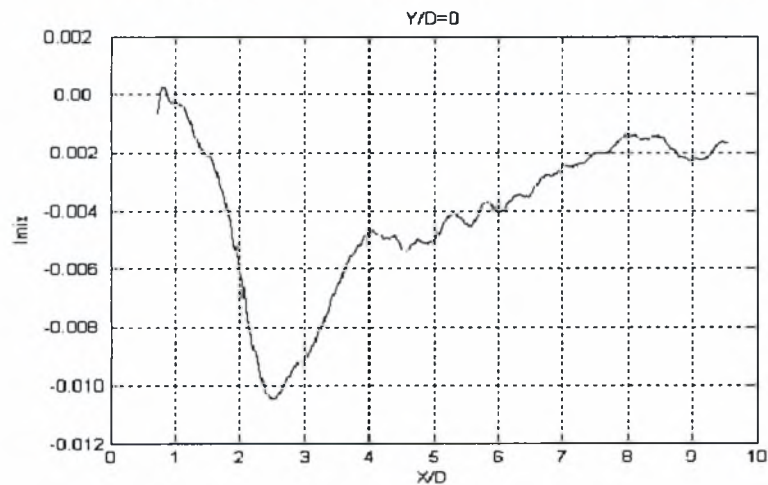
Διάγραμμα 5.60. Κατανομές $Std I_b$, $Std I_r$ για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=0$



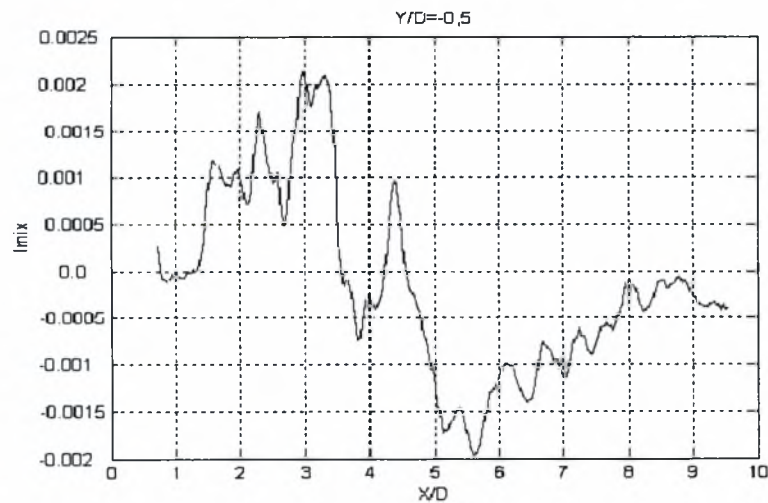
Διάγραμμα 5.61. Κατανομές $Std I_b$, $Std I_r$ για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



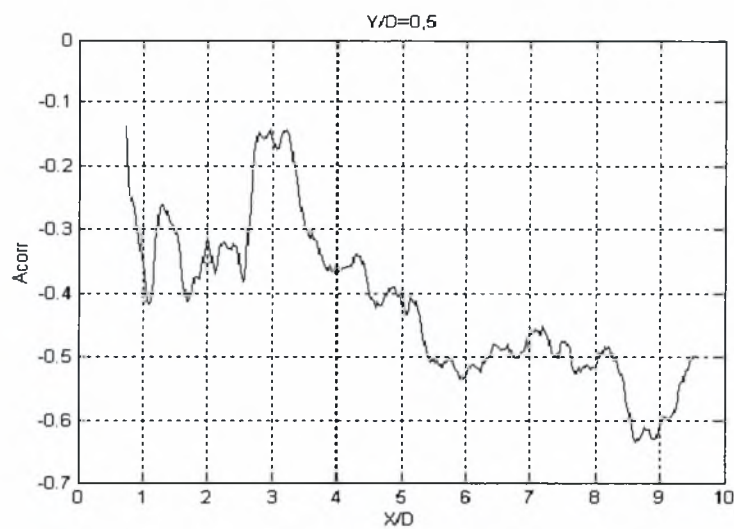
Διάγραμμα 5.62. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



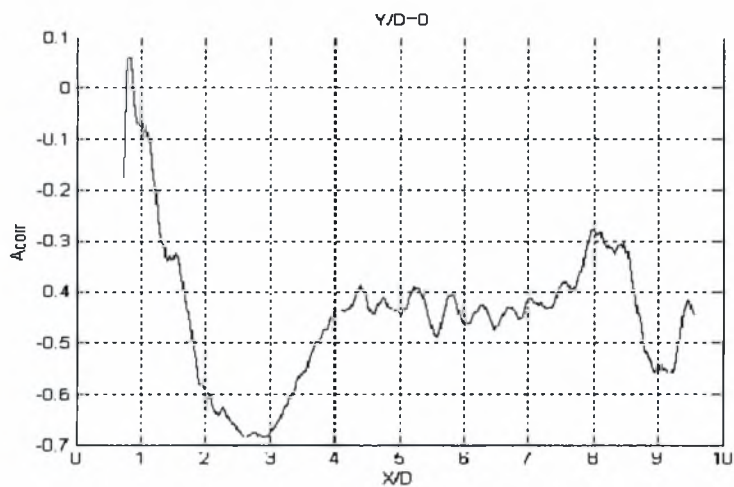
Διάγραμμα 5.63. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0$



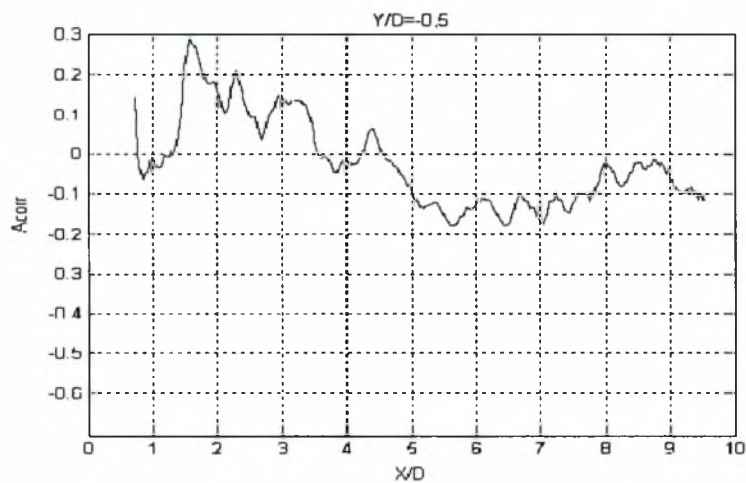
Διάγραμμα 5.64. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



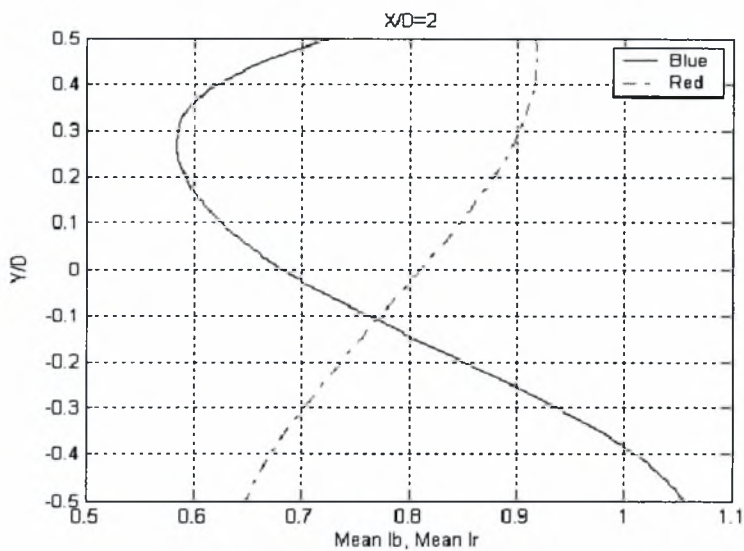
Διάγραμμα 5.65. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



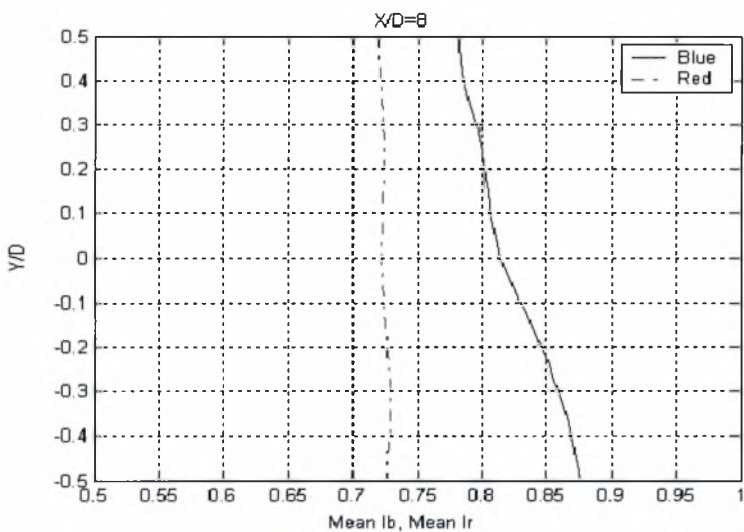
Διάγραμμα 5.66. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.67. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



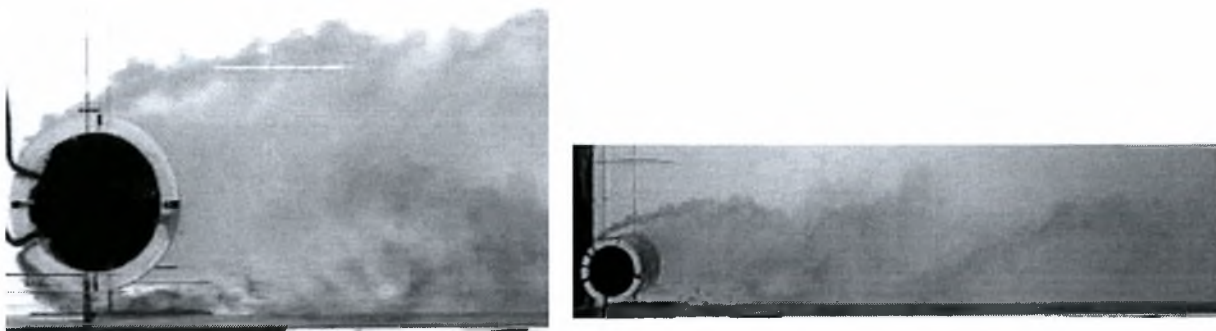
Διάγραμμα 5.68. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0.4$ και $X/D=2$



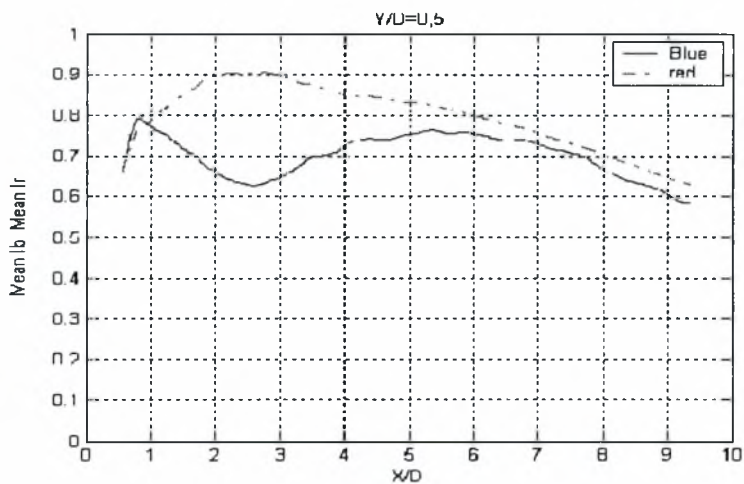
Διάγραμμα 5.69. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0.4$ και $X/D=8$

- $H_0/D = 0,2$ (δάπεδο)

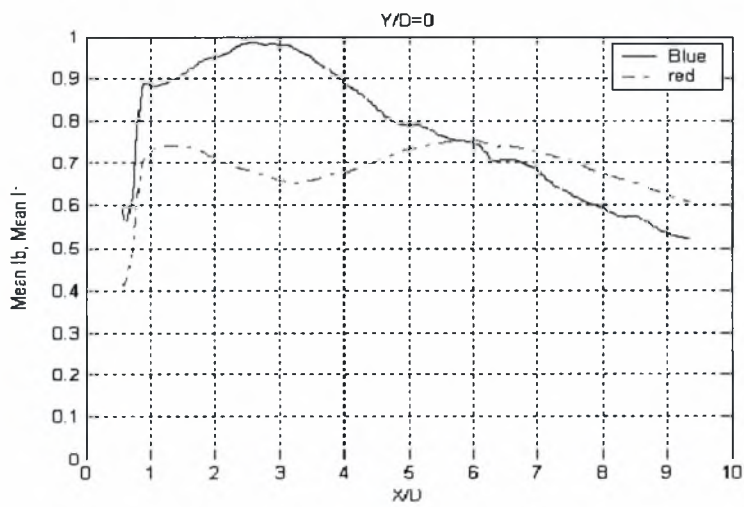
Στην εικόνα 5.19 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_0/D=0,2$.



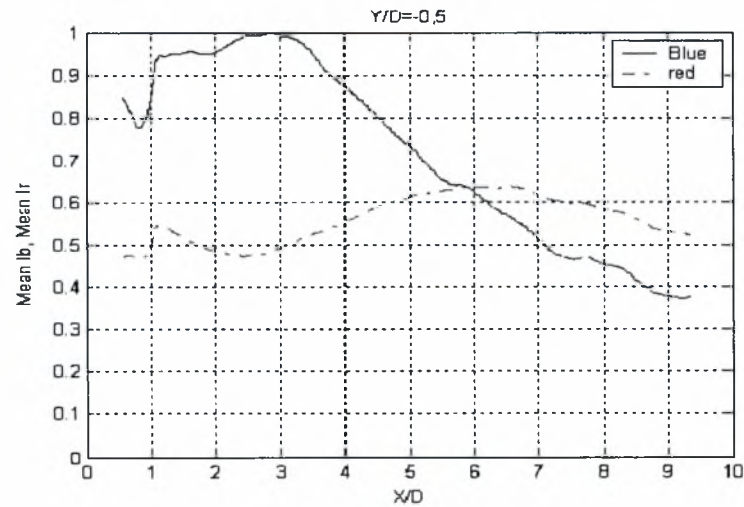
Εικόνα 5.19. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_0/D=0,2$.



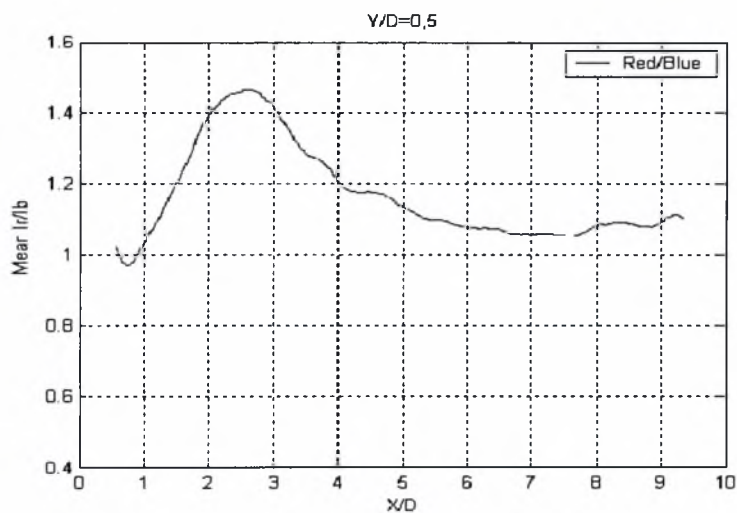
Διάγραμμα 5.70. Κατανομές I_b, I_r για H_δ/D=0,2 και Y/D=0,5



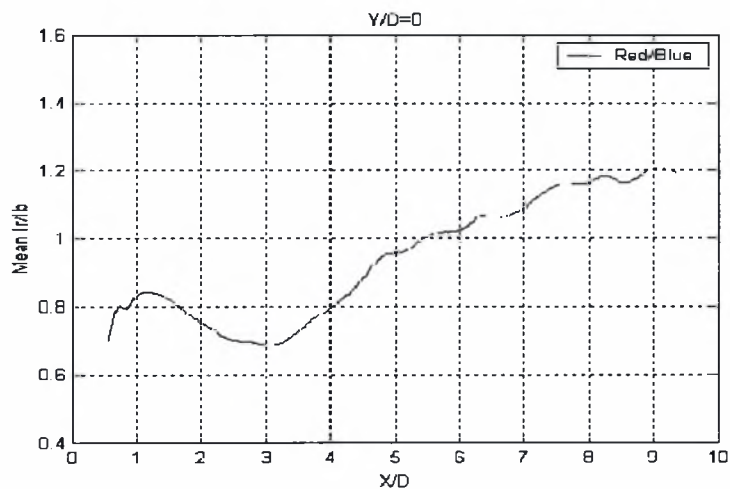
Διάγραμμα 5.71. Κατανομές I_b, I_r για H_δ/D=0,2 και Y/D=0



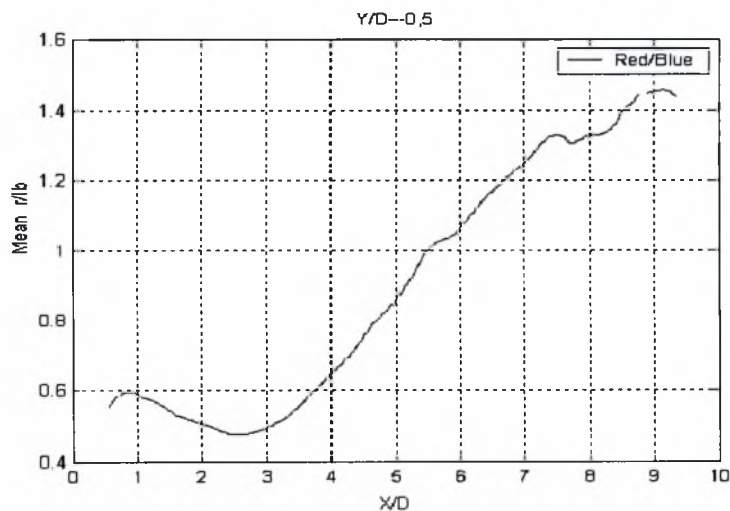
Διάγραμμα 5.72. Κατανομές I_b, I_r για H_δ/D=0,2 και Y/D=-0,5



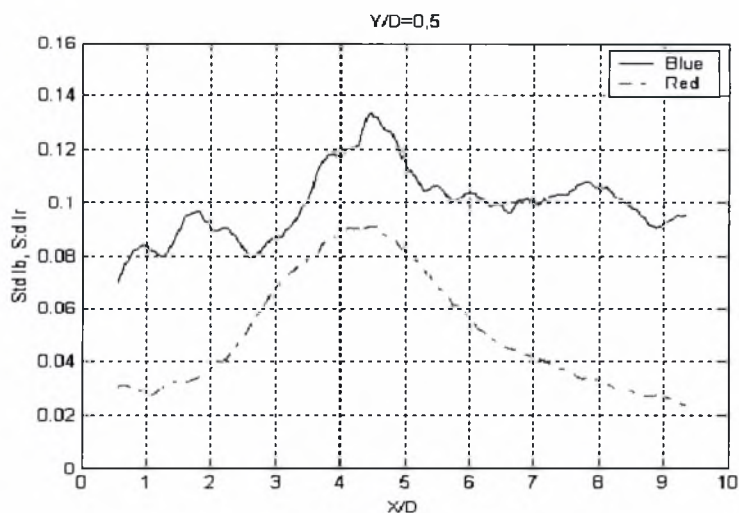
Διάγραμμα 5.73. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0,5$



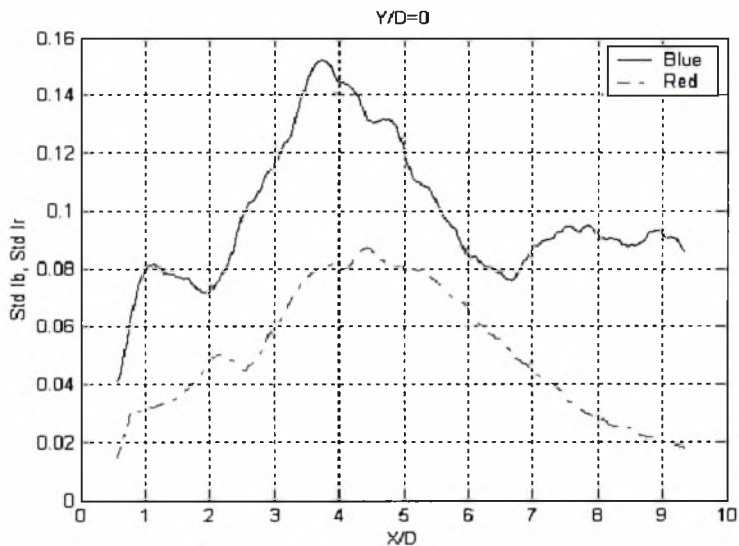
Διάγραμμα 5.74. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0$



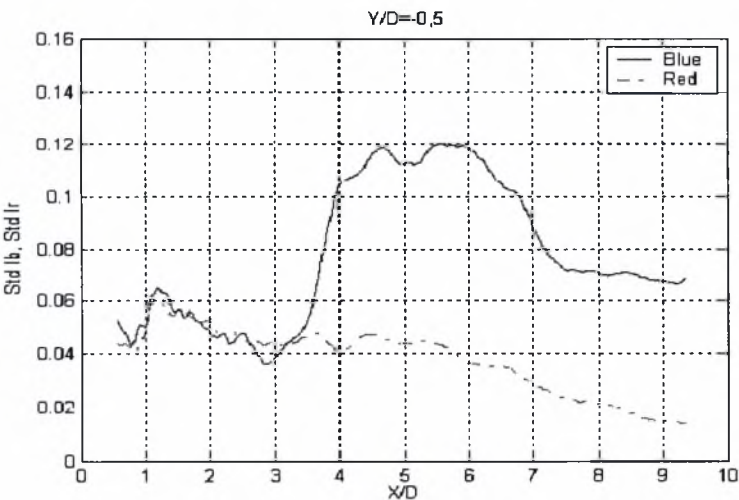
Διάγραμμα 5.75. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=-0,5$



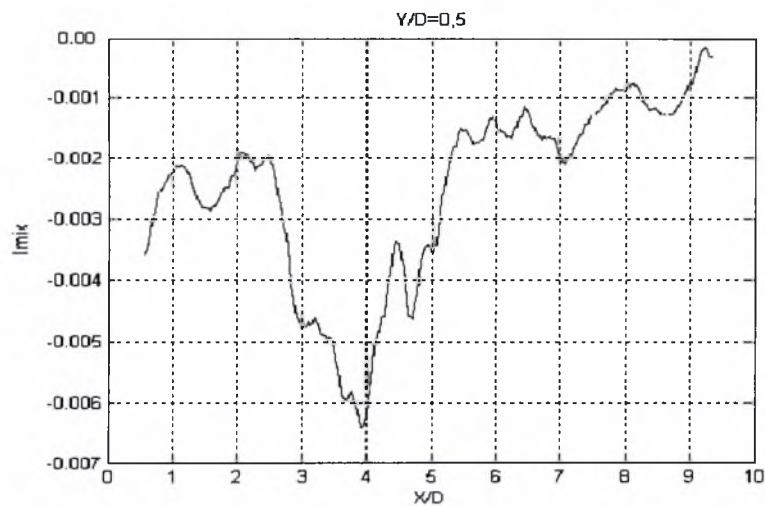
Διάγραμμα 5.76. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_d/D=0,2$ και $Y/D=0,5$



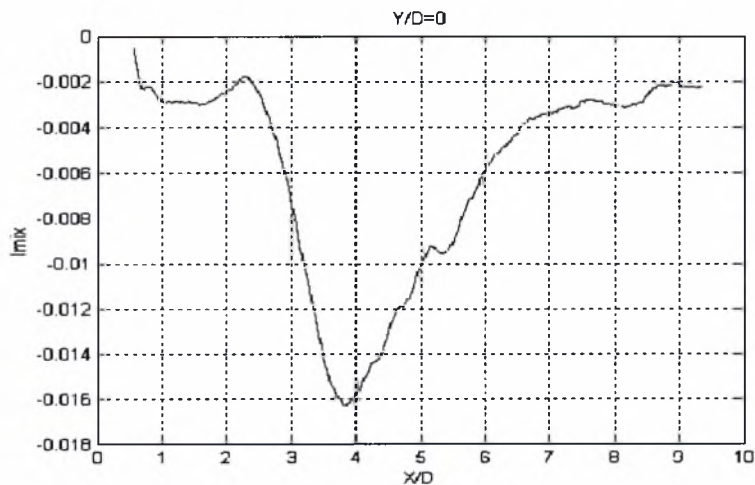
Διάγραμμα 5.77. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_d/D=0,2$ και $Y/D=0$



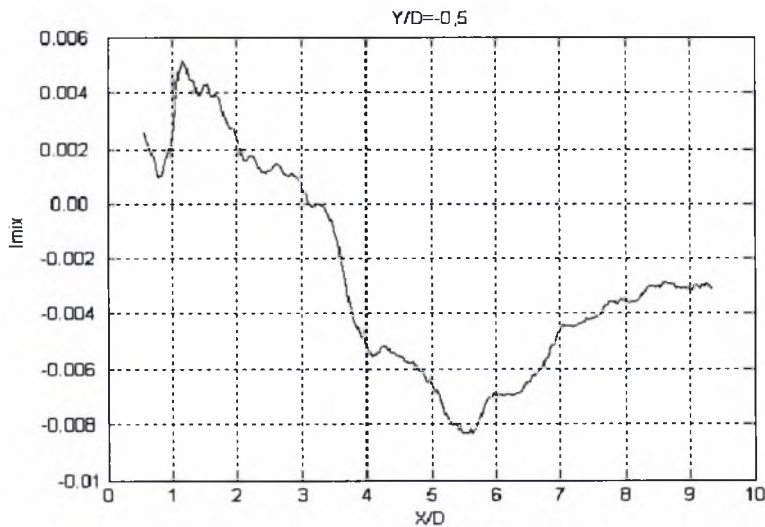
Διάγραμμα 5.78. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_d/D=0,2$ και $Y/D=-0,5$



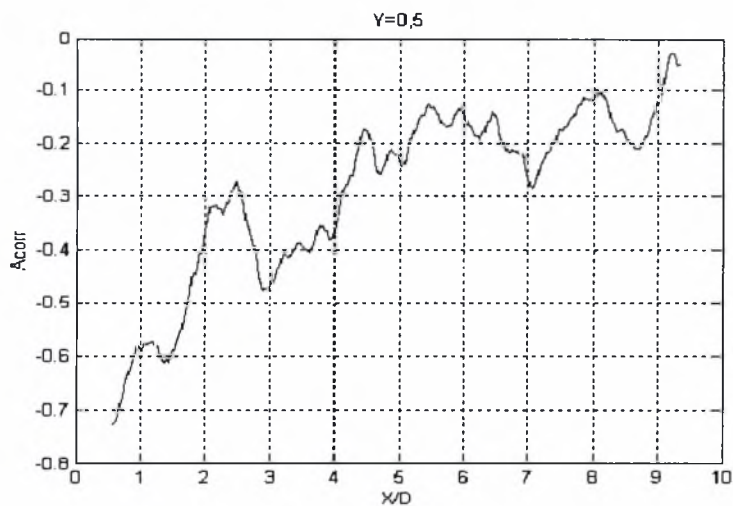
Διάγραμμα 5.79. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0,5$



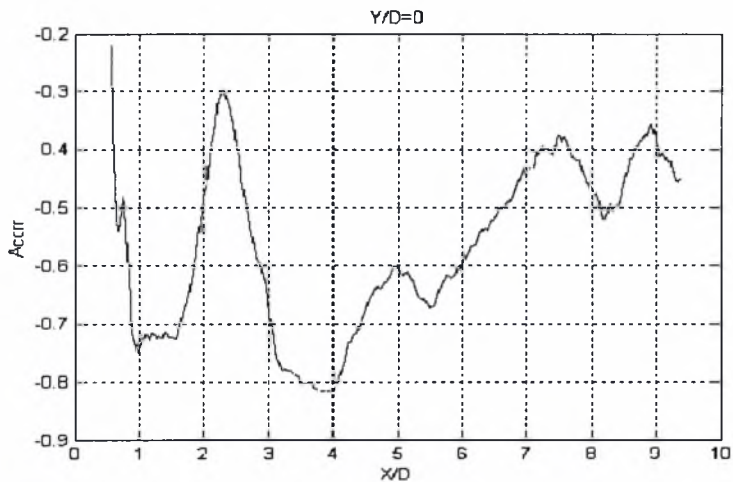
Διάγραμμα 5.80. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0$



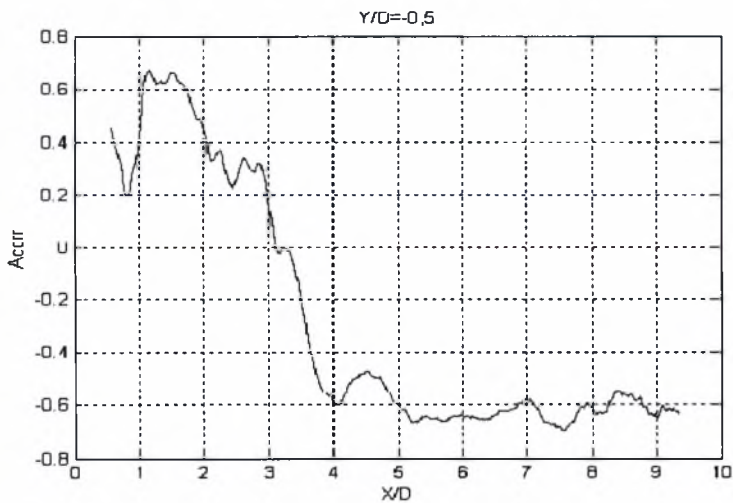
Διάγραμμα 5.81. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=-0,5$



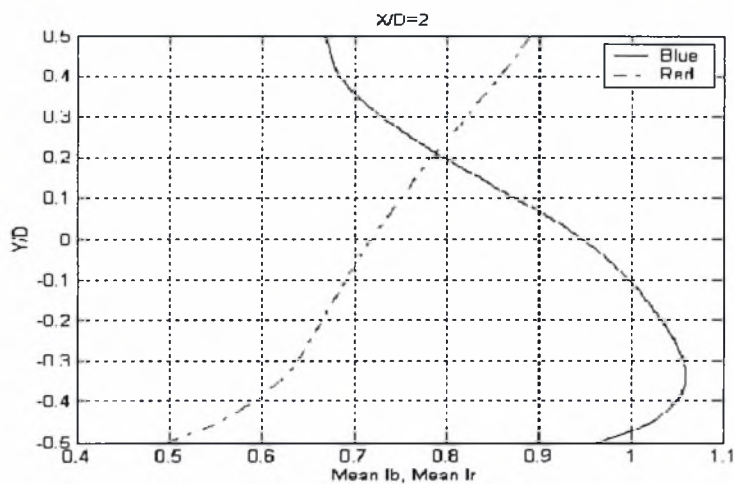
Διάγραμμα 5.82. Μεταβολή A_{corr} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0,5$



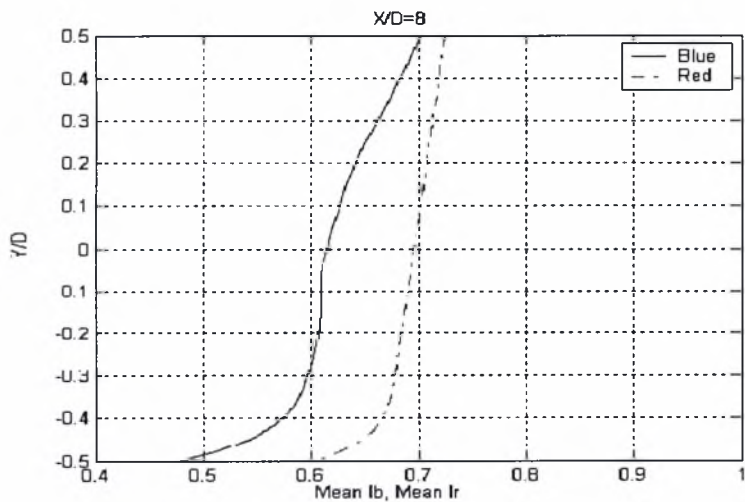
Διάγραμμα 5.83. Μεταβολή A_{corr} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.84. Μεταβολή A_{corr} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=-0,5$



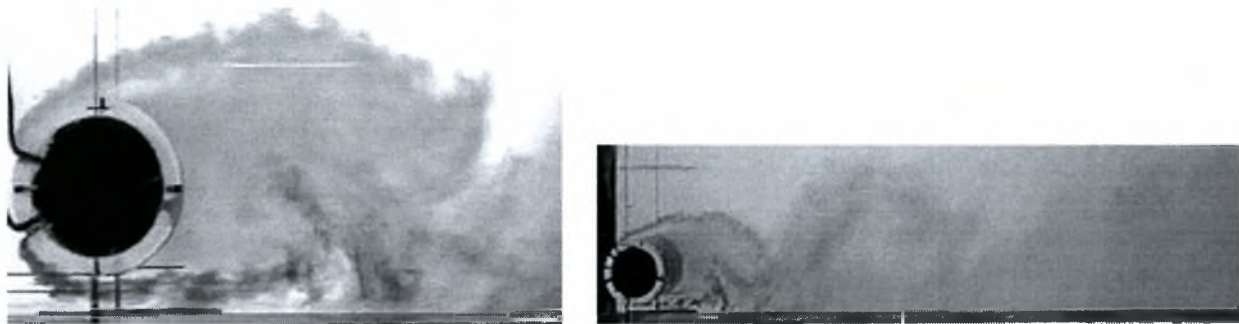
Διάγραμμα 5.85. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,2$ και $X/D=2$



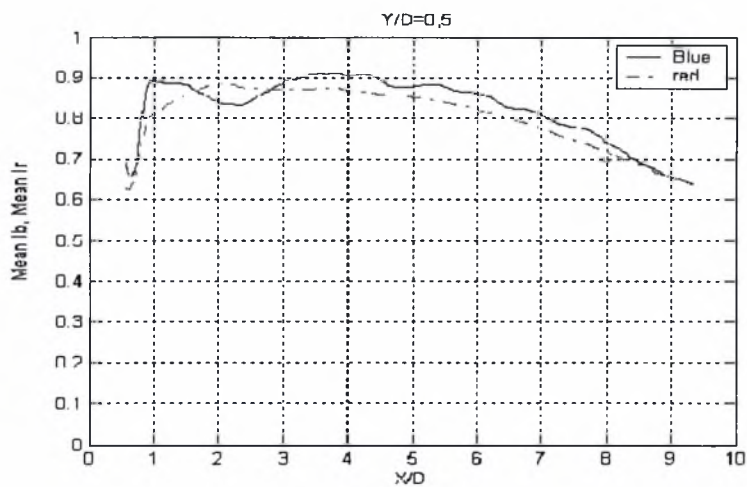
Διάγραμμα 5.86. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,2$ και $X/D=8$

- $H_0/D = 0,3$ (δάπεδο)

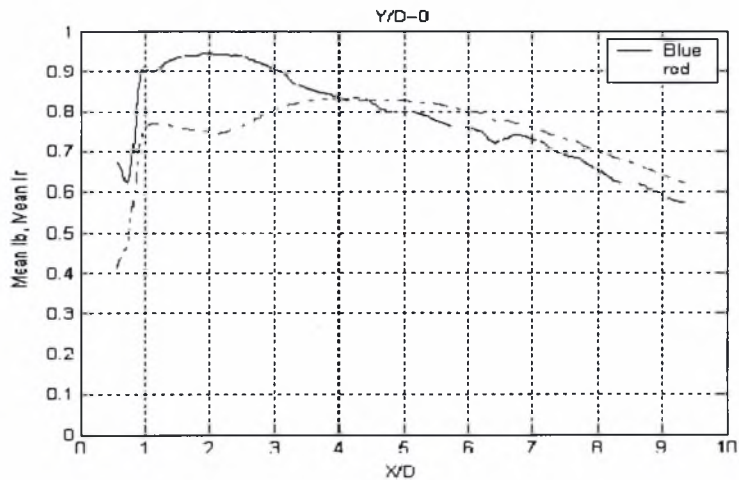
Στην εικόνα 5.20 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_0/D=0,3$.



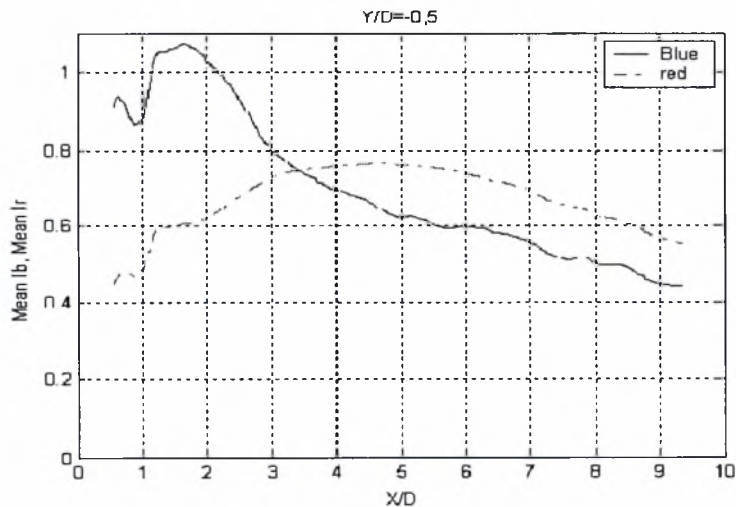
Εικόνα 5.20. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_0/D=0,3$.



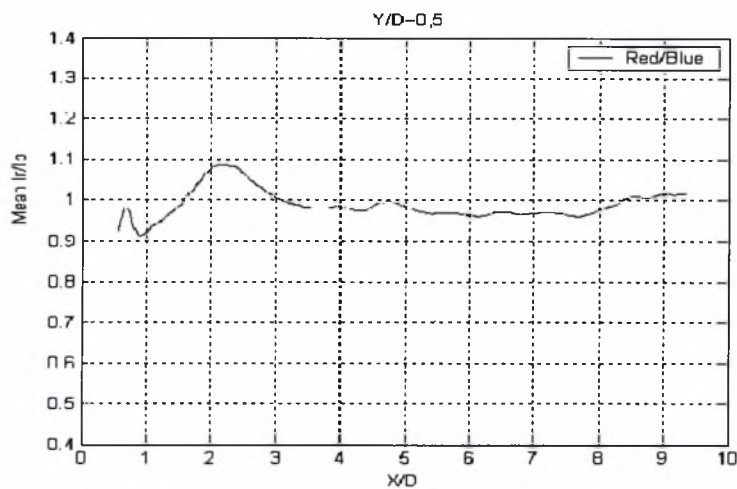
Διάγραμμα 5.87. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



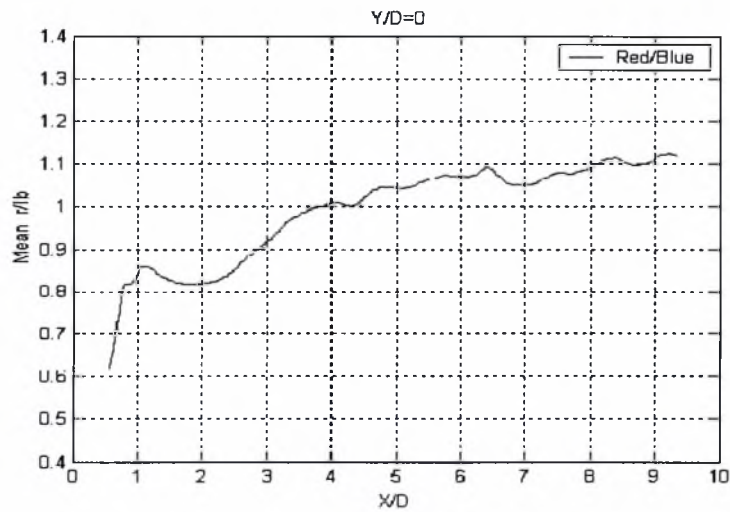
Διάγραμμα 5.88. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=0$



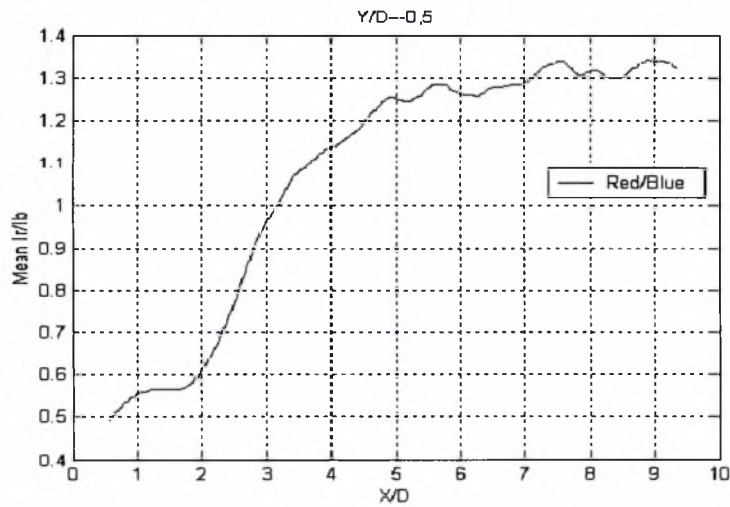
Διάγραμμα 5.89. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



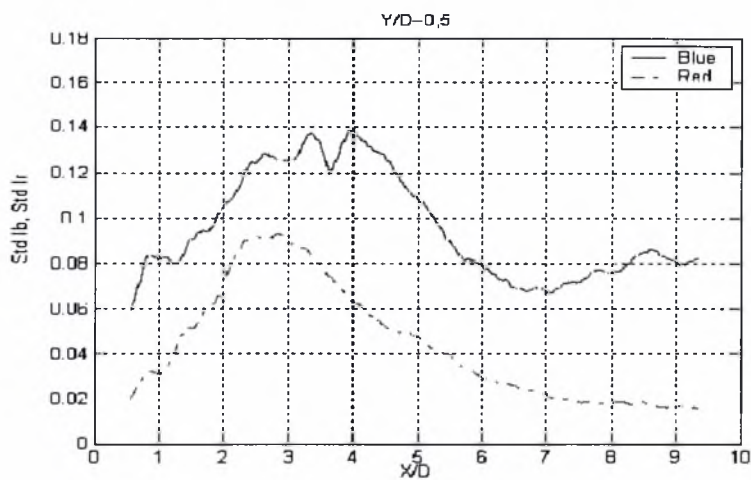
Διάγραμμα 5.90. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



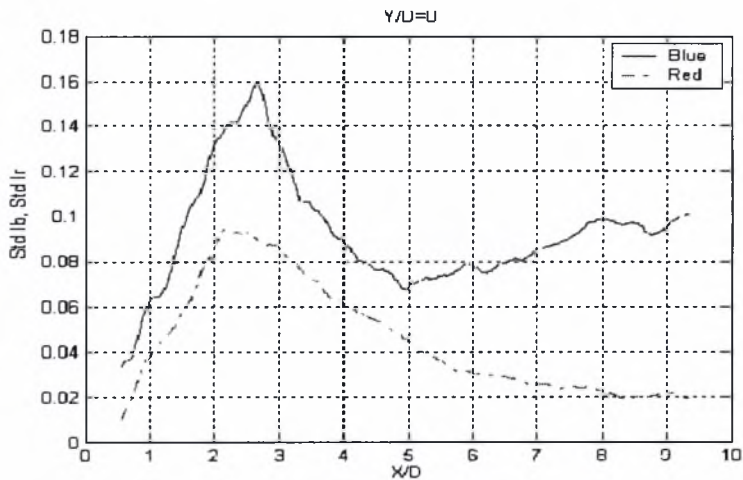
Διάγραμμα 5.91. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=0$



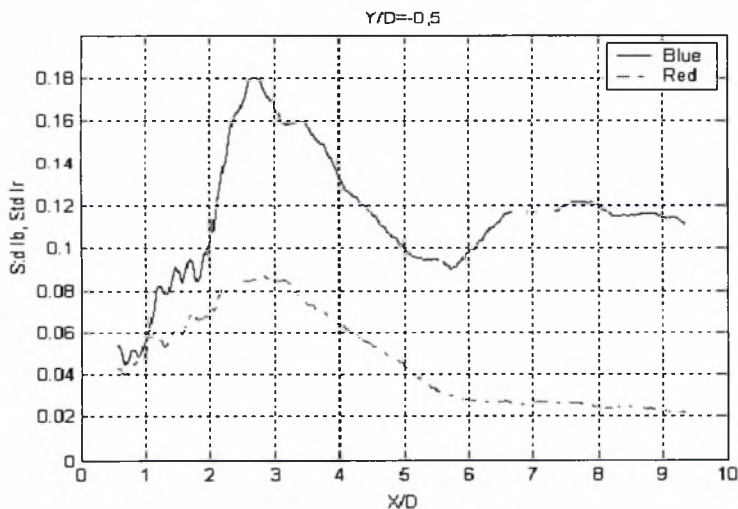
Διάγραμμα 5.92. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



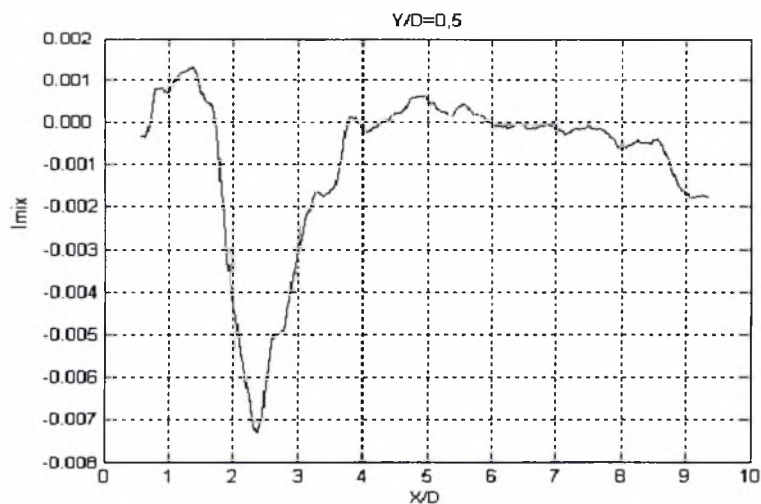
Διάγραμμα 5.93. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



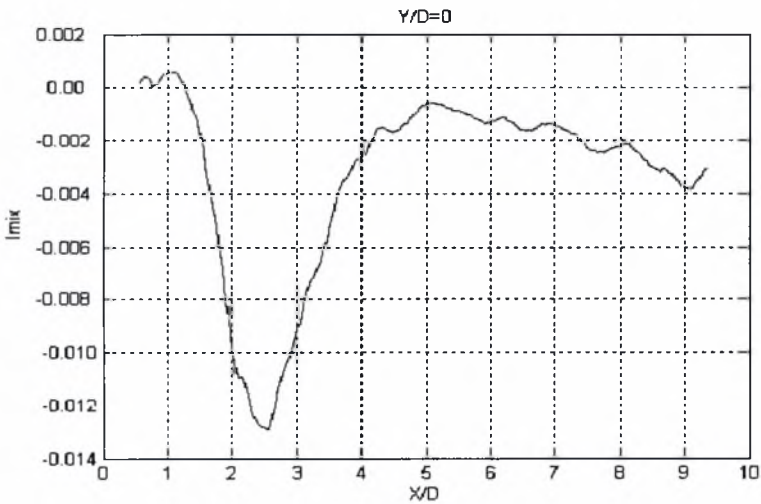
Διάγραμμα 5.94. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=0$



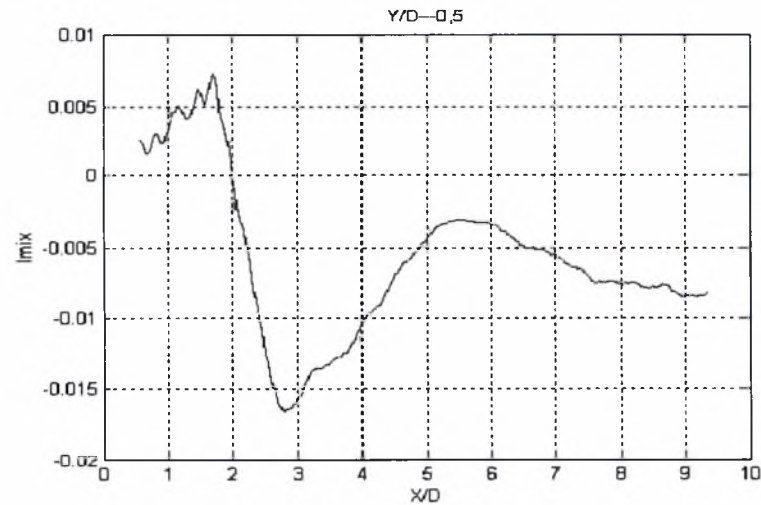
Διάγραμμα 5.95. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



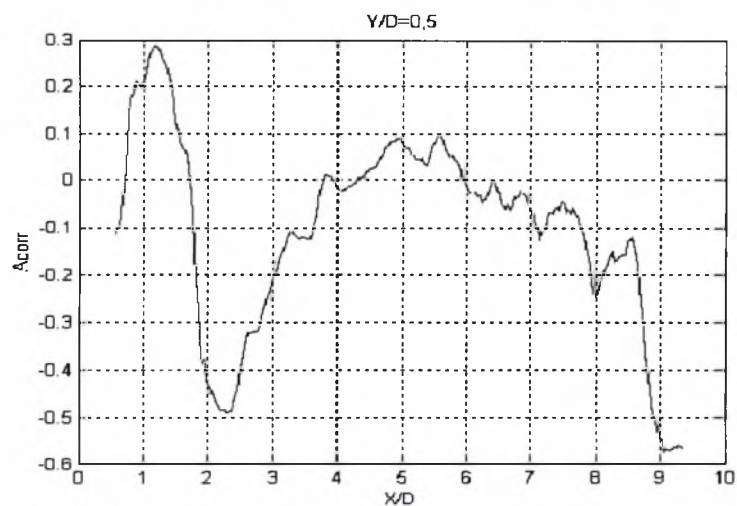
Διάγραμμα 5.96. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



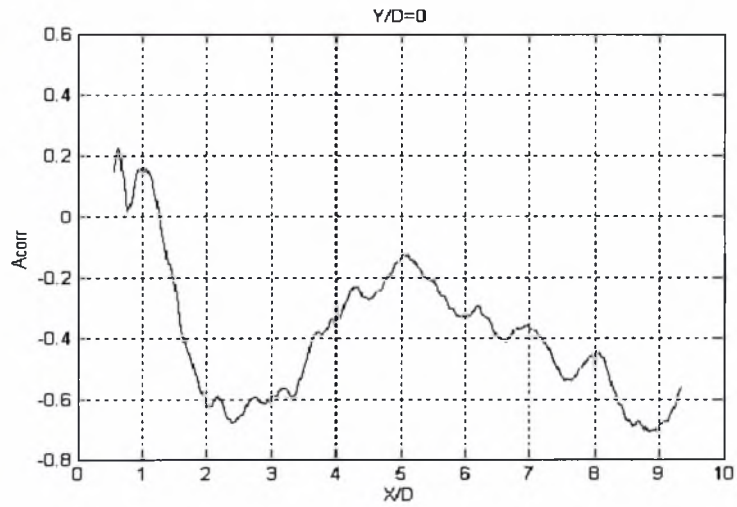
Διάγραμμα 5.97. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=0$



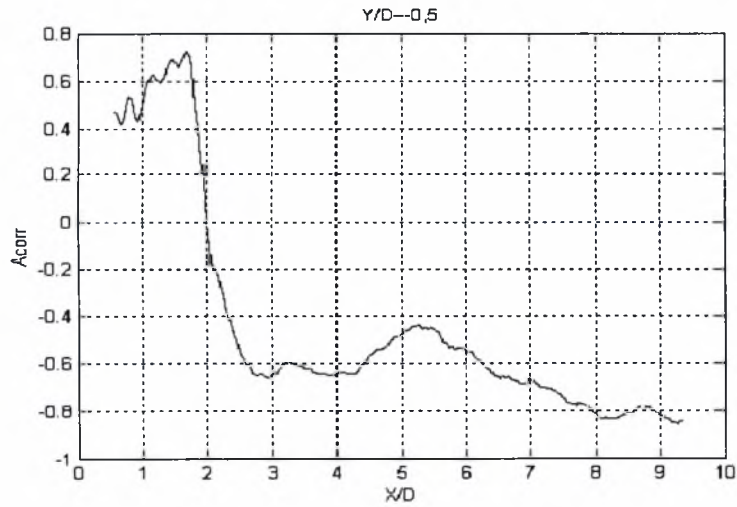
Διάγραμμα 5.98. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



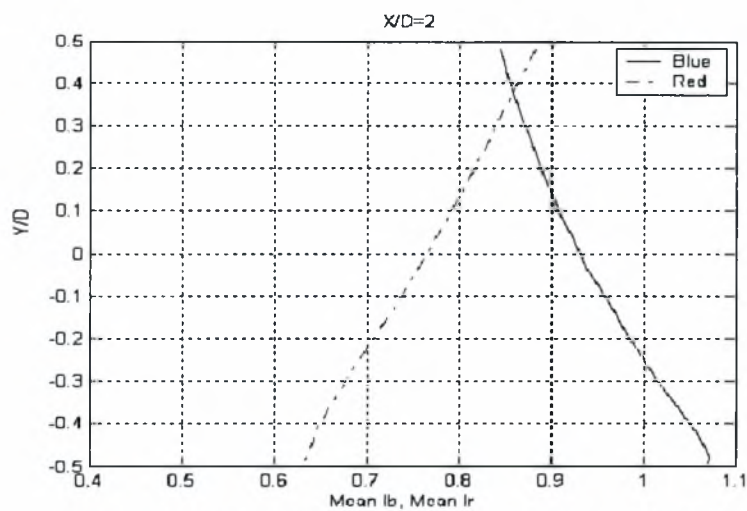
Διάγραμμα 5.99. Μεταβολή A_{corr} για H_δ/D=0,3 και Y/D=0,5



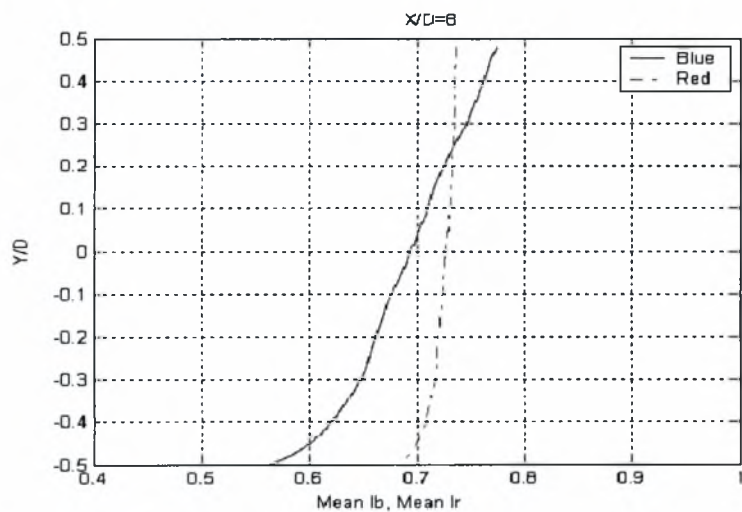
Διάγραμμα 5.100. Μεταβολή A_{corr} για H_δ/D=0,3 και Y/D=0



Διάγραμμα 5.101. Μεταβολή A_{corr} για H_δ/D=0,3 και Y/D=-0,5



Διάγραμμα 5.102. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,3$ και $X/D=2$



Διάγραμμα 5.103. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,3$ και $X/D=8$

Σχολιασμός διαγραμμάτων για κύλινδρο $D=50\text{ mm}$, $Re=10000$

- $H/D=1.9$ (Κέντρο)

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 5.19, 5.20, 5.21 η μεταβολή του μπλε και του κόκκινου χρώματος είναι όμοια. Έτσι στην θέση $Y/D = 0,5$ το κόκκινο χρώμα είναι 30% περισσότερο από το μπλε στις πρώτες δύο διαμέτρους πίσω από τον κύλινδρο. Ανάλογη συμπεριφορά έχει και η μεταβολή του μπλε χρώματος σε σχέση με το κόκκινο για την θέση $Y/D = -0,5$ όπου είναι 20% πιο πολύ από το κόκκινο μέχρι την θέση $X/D=2$. Μετά τις δύο πρώτες διαμέτρους μεταβάλλονται και τα δύο χρώματα με τον ίδιο ρυθμό και από την θέση $X/D=4$ ελαττώνονται και ο ρυθμός πτώσης είναι ίδιος και για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0,5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0,5$). Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα 5.22, 5.23, 5.24 όπου παρουσιάζεται ο λόγος του κόκκινου χρώματος ως προς το μπλε για τις παραπάνω θέσεις.

Τα διαγράμματα 5.25, 5.26, 5.27 μας δίνουν την τυπική απόκλιση του μπλε και του κόκκινου χρώματος στον απόρο του κυλίνδρου. Όπως δείχνουν τα γραφήματα: α) ο ρυθμός πτώσης είναι ίδιος και για τα δύο χρώματα και για τις τρεις θέσεις, β) το κόκκινο χρώμα έχει συντελεστή διάχυσης μεγαλύτερο από το μπλε γι αυτό το λόγο η διακύμανση είναι μικρότερη.

Στα διαγράμματα 5.28, 5.29, 5.30 φαίνεται ο συντελεστής ανάμειξης για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0,5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0,5$) πίσω από τον κύλινδρο. Όπως δείχνουν τα γραφήματα μετά από τέσσερις διαμέτρους ($X/D=4$) ο συντελεστής ανάμειξης τείνει στο μηδέν.

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.31, 5.32, 5.33 ο συντελεστής συσχέτισης διατηρεί αρνητικές τιμές και στα τρία Y/D και την ίδια συμπεριφορά, που σημαίνει ότι οι δίνες είναι εμφανείς σε όλο το μήκος του απορρεύματος και η τύρβη δεν έχει προλάβει στα $8D$ πίσω από τον κύλινδρο να ομογενοποιήσει τα δύο συστατικά.

Τα διαγράμματα 5.34 και 5.35 δίνουν την κατανομή του μπλε και του κόκκινου χρώματος στο $X/D=2$ και $X/D=8$. Όπως είναι φανερό το προφίλ των δύο χρωμάτων έχει γίνει επίπεδο $8D$ πίσω από τον κύλινδρο.

- $H_f/D = 0.3$ (διεπιφάνεια)

Στις θέσεις $Y/D = 0,5$ και $Y/D=0$ το κόκκινο χρώμα είναι 50% και 30% περισσότερο από το μπλε μέχρι και τέσσερις διαμέτρους πίσω από τον κύλινδρο. Ανάλογη συμπεριφορά έχει και η μεταβολή του μπλε χρώματος σε σχέση με το κόκκινο για την θέση $Y/D = -0,5$ όπου είναι 30% πιο πολύ από το κόκκινο μέχρι την θέση $X/D=4$ (διαγράμματα 5.36, 5.37, 5.38). Μετά τις πέντε πρώτες διαμέτρους μεταβάλλονται και τα δυο χρώματα με τον ίδιο ρυθμό και από την θέση $X/D=6$ ελαττώνονται και ο ρυθμός πτώσης είναι ίδιος και για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0,5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0,5$). Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα 5.39, 5.40, 5.41 όπου παρουσιάζεται το κλάσμα του κόκκινου χρώματος ως προς το μπλε για τις παραπάνω θέσεις.

Τα διαγράμματα 5.42, 5.43, 5.44 μας δίνουν την τυπική απόκλιση του μπλε και του κόκκινου χρώματος στον απόρο του κυλίνδρου. Όπως δείχνουν τα γραφήματα: α) ο ρυθμός μεταβολής δεν είναι ίδιος για τα δύο χρώματα στις θέσεις $Y/D=0$ και $Y/D=-0,5$, β) το κόκκινο χρώμα έχει συντελεστή διάχυσης μεγαλύτερο από το μπλε γι' αυτό το λόγο η διακύμανση είναι μικρότερη.

Στα διαγράμματα 5.45, 5.46, 5.47 φαίνεται ο συντελεστής ανάμειξης για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0,5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0,5$) πίσω από τον κύλινδρο. Όπως δείχνουν τα γραφήματα ο συντελεστής ανάμειξης διατηρείται αρνητικός που σημαίνει ότι οι διακυμάνσεις του μπλε και του κόκκινου χρώματος διατηρούν αντίθετο πρόσημο κατά μήκος του απόρο.

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.48, 5.49, 5.50 ο συντελεστής συσχέτισης διατηρεί αρνητικές τιμές και στα τρία Y/D και την ίδια συμπεριφορά, που σημαίνει ότι οι δίνες είναι εμφανείς σε όλο το μήκος του απορεύματος και η τύρβη δεν έχει προλάβει στα 8D πίσω από τον κύλινδρο να ομογενοποιήσει τα δύο συστατικά.

Από τα προφίλ των δυο χρωμάτων στις θέσεις $X/D=2$ και $X/D=8$ είναι φανερό ότι μετά από 8D οι κατανομές των δυο χρωμάτων είναι σχεδόν επίπεδες (διαγράμματα 5.51, 5.52).

- $H_f/D = 0.4$ (διεπιφάνεια)

Στην θέση αυτή η διαφορά μεταξύ κόκκινου και μπλε χρώματος μικραίνει. Έτσι για $Y/D=0.5$ το κόκκινο χρώμα είναι 20% πιο πολύ από το μπλε στις πρώτες τέσσερις διαμέτρους πίσω από τον κύλινδρο. Ανάλογη συμπεριφορά έχει και η μεταβολή του μπλε χρώματος σε σχέση με το κόκκινο για την θέση $Y/D = -0.5$ όπου είναι 25% πιο πολύ από το κόκκινο μέχρι την θέση $X/D=4$ (διαγράμματα 5.53, 5.54, 5.55). Μετά τις πέντε πρώτες διαμέτρους μεταβάλλονται και τα δυο χρώματα με τον ίδιο τρόπο, ελαττώνονται και ο ρυθμός πτώσης είναι ίδιος και για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0.5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0.5$). Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα 5.56, 5.57, 5.58 όπου παρουσιάζεται το κλάσμα του κόκκινου χρώματος ως προς το μπλε για τις παραπάνω θέσεις.

Τα διαγράμματα της τυπικής απόκλισης (5.59, 5.60, 5.61) έχουν παρόμοια μορφή με τα διαγράμματα της τυπικής απόκλισης για την θέση $H/D=1.9$ (κέντρο). Την ίδια μορφή έχουν και τα γραφήματα του συντελεστή ανάμειξης και συσχέτισης (5.62 ~ 5.67) με αυτά που προκύπτουν όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της σήραγγας.

Από τα διαγράμματα 5.68 και 5.69 φαίνεται ότι το προφίλ και σ' αυτή την θέση γίνεται επίπεδο μετά από οκτώ διαμέτρους.

- $H_d/D = 0.2$ (δάπεδο)

Στη θέση $Y/D = 0.5$ (διάγραμμα 5.70) το κόκκινο χρώμα είναι 25% περισσότερο από το μπλε στη θέση $X/D=2.5$. Ανάλογη συμπεριφορά έχει και η μεταβολή του μπλε χρώματος σε σχέση με το κόκκινο για την θέση $Y/D = -0.5$ όπου είναι 50% πιο πολύ από το κόκκινο στην θέση $X/D=2.5$ (διάγραμμα 5.72). Στη θέση $Y/D=0$ το μπλε χρώμα είναι 30% πιο πολύ από το κόκκινο στο $X/D=2.5$. Μετά τις πέντε πρώτες διαμέτρους μεταβάλλονται και τα δυο χρώματα με τον ίδιο ρυθμό και από την θέση $X/D=6$ ελαττώνονται και ο ρυθμός πτώσης είναι ίδιος και για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0.5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0.5$). Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα 5.73, 5.74, 5.75 όπου παρουσιάζεται

το κλάσμα του κόκκινου χρώματος ως προς το μπλε για τις παραπάνω θέσεις όπου στις θέσεις που υπάρχει πολύ μπλε οι τιμές του κλάσματος μικραίνουν.

Ο συντελεστής ανάμειξης (διαγράμματα 5.79, 5.80, 5.81) διατηρεί αρνητικές τιμές και μεταβάλλεται όμοια με την περίπτωση που ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της σήραγγας ($H/D=1,9$) στην θέση $Y/D=0$ (διάγραμμα 5.29).

Από την μορφή που έχουν τα διαγράμματα 5.85 & 5.86 παρατηρούμε ότι το προφίλ και των δυο χρωμάτων γίνεται επίπεδο στο $X/D=8$.

- $H_0/D=0.3$ (δάπεδο)

Στην θέση $Y/D=0.5$ τα δυο χρώματα μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο, αυξάνουν μέχρι το $X/D=4$ και μετά φθίνουν με τον ίδιο ρυθμό. Στις θέσεις $Y/D=0$ και $Y/D=-0.5$ το μπλε χρώμα είναι αυξημένο σε σχέση με το κόκκινο, στην πρώτη περίπτωση το μπλε είναι 20% πιο πολύ στην θέση $X/D=2$ και στην θέση $Y/D=-0.5$ το μπλε χρώμα είναι 50% αυξημένο σε σχέση με το κόκκινο δυο διαμέτρους πίσω από τον κύλινδρο. Μετά από τέσσερις διαμέτρους πίσω και τα δυο χρώματα φθίνουν με τον ίδιο ρυθμό και για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0.5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0.5$) (Διαγράμματα 5.87, 5.88, 5.89).

Ο συντελεστής ανάμειξης (διαγράμματα 5.96, 5.97, 5.98) διατηρεί αρνητικές τιμές και μεταβάλλεται όμοια με την περίπτωση που ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της σήραγγας ($H/D=1,9$) στην θέση $Y/D=0$ (διάγραμμα 5.29).

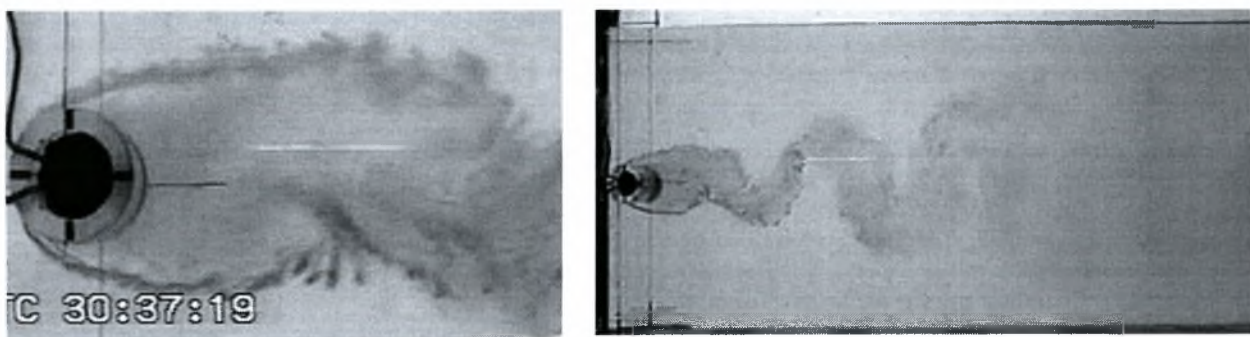
Από την μορφή που έχουν τα διαγράμματα 5.102 & 5.103 παρατηρούμε ότι το προφίλ και των δυο χρωμάτων γίνεται επίπεδο στο $X/D=8$.

5.2.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων για κύλινδρο $D=30$ mm, $Re=6000$

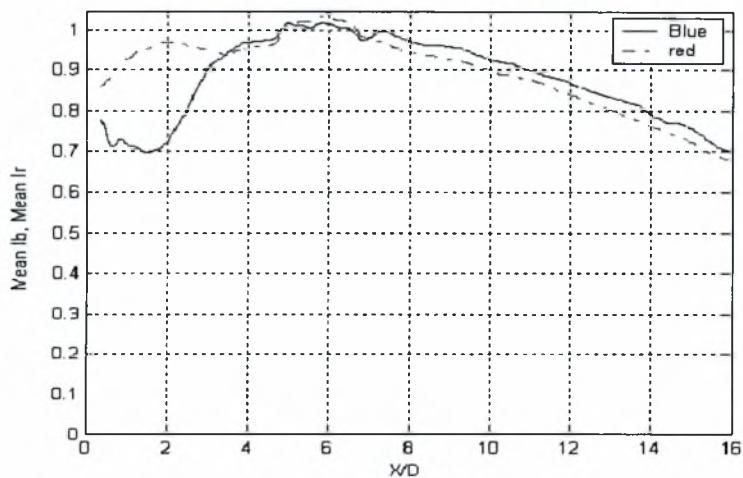
Για τον κύλινδρο διαμέτρου $D=30$ mm είναι αριθμός $Re=6000$ και ταχύτητα ελευθέρου ρεύματος $U_0=0,2$ m/sec. Θα ακολουθήσει ανάλυση όπου ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο κέντρο του καναλιού και στη συνέχεια γίνει σύγκριση με τις υπόλοιπες θέσεις του κυλίνδρου.

- $H/D= 3,5$ (Κέντρο)

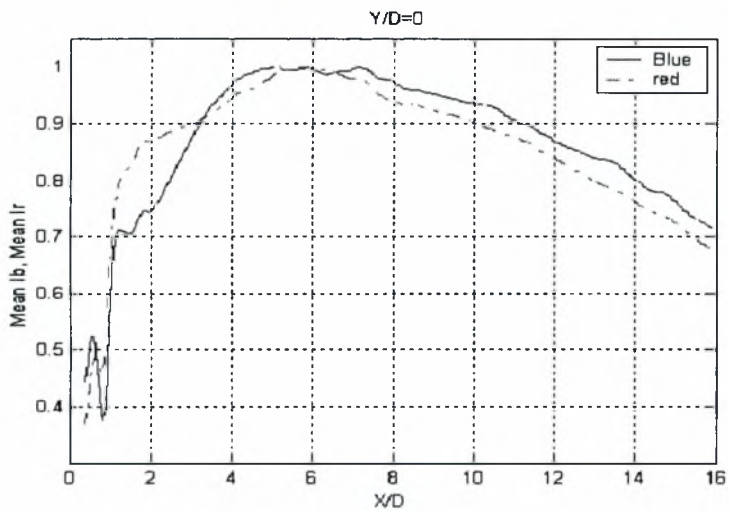
Στην εικόνα (5.20) φαίνεται η ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.



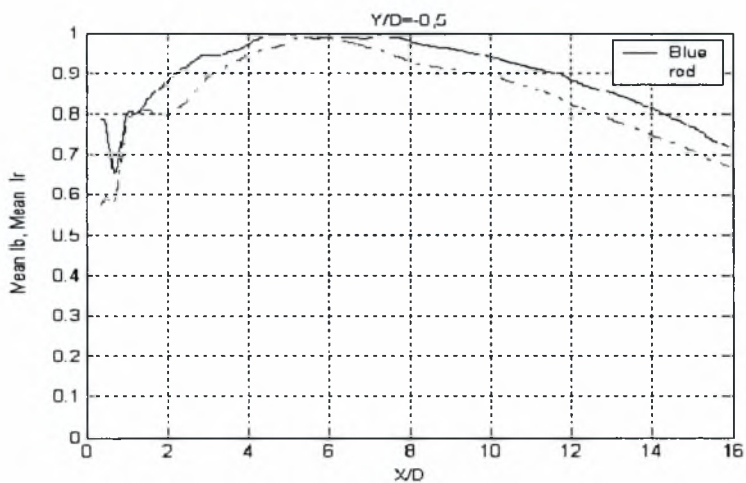
Εικόνα .5.20. Ανάπτυξη (σχηματισμός) και διάχυση των δινών της οδού Von Karman κατά μήκος του απορεύματος.



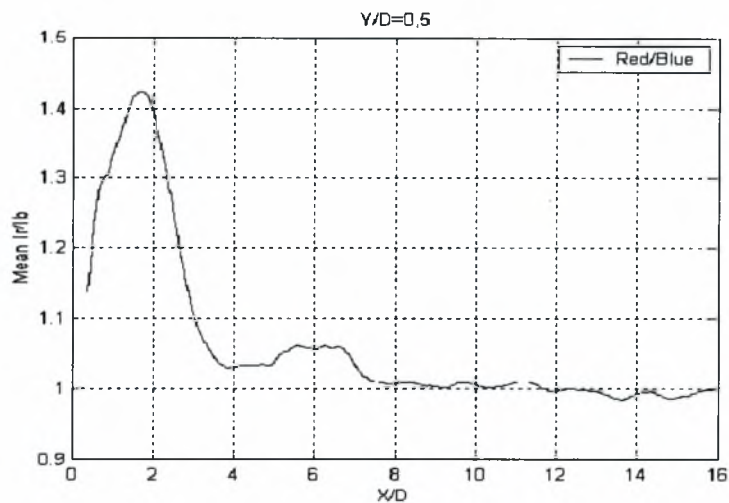
Διάγραμμα 5.104. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=3.5$ (Κέντρο) και $Y/D=0,5$



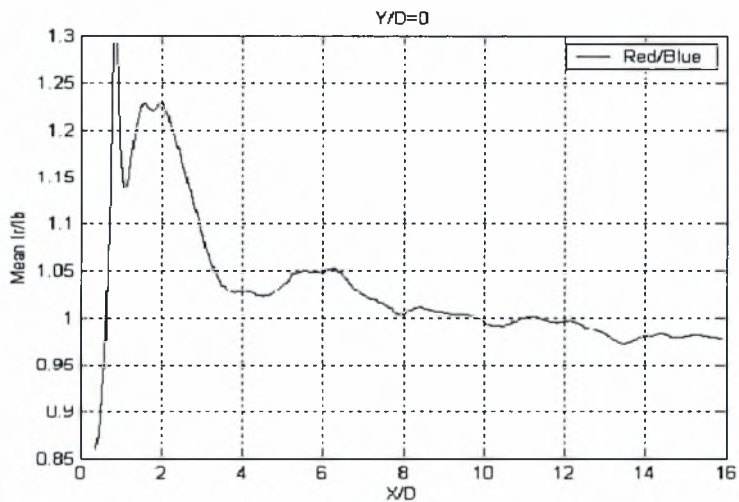
Διάγραμμα 5.105. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=3.5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



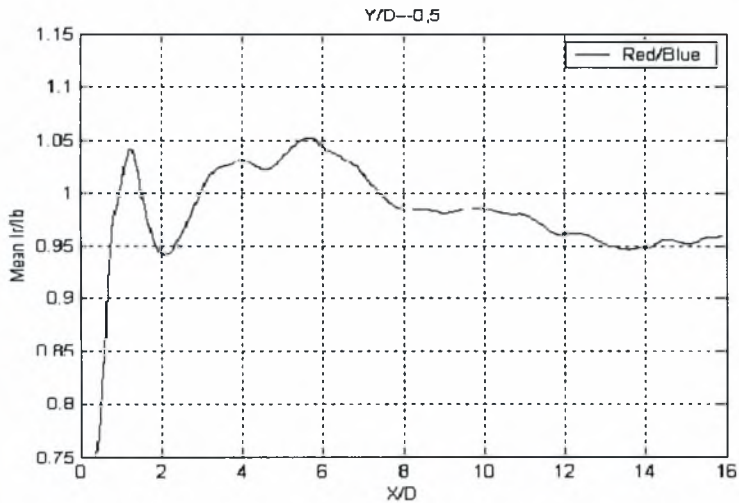
Διάγραμμα 5.106. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=3.5$ (Κέντρο) και $Y/D=-0,5$



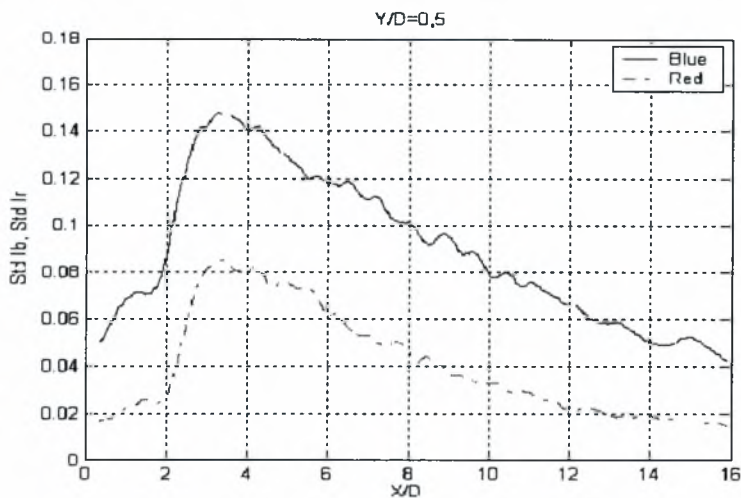
Διάγραμμα 5.107. Κατανομή (Ir/Ib) για H/D=3.5 (Κέντρο) και Y/D=0,5



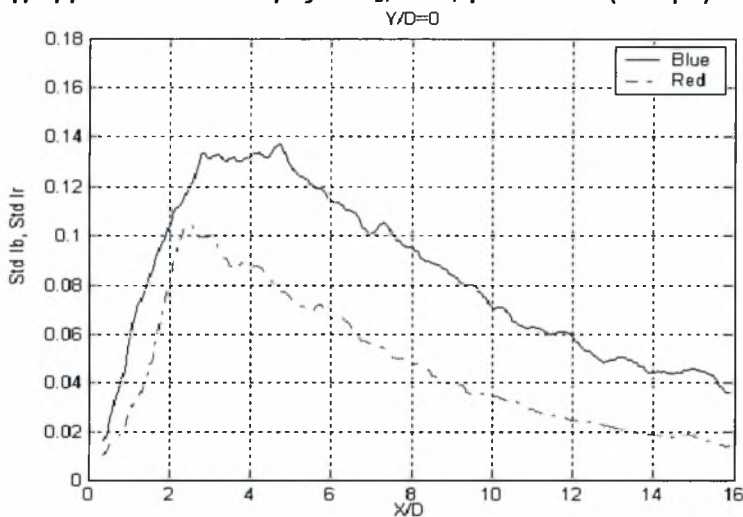
Διάγραμμα 5.108. Κατανομή (Ir/Ib) για H/D=3.5 (Κέντρο) και Y/D=0



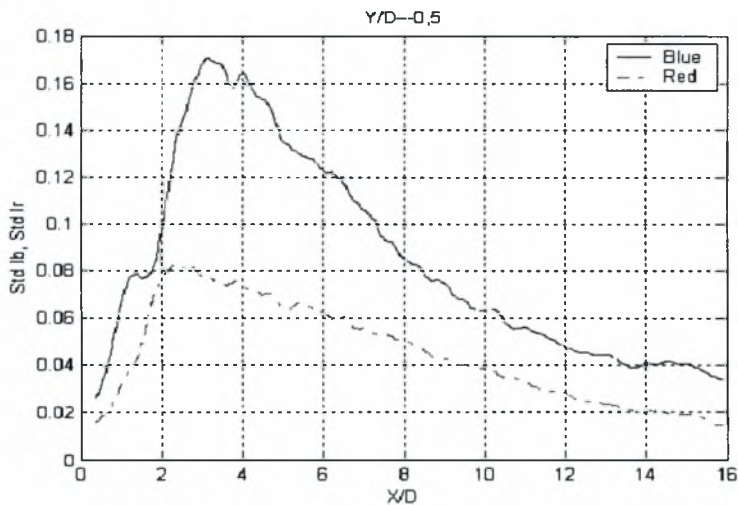
Διάγραμμα 5.109. Κατανομή (Ir/Ib) για H/D=3.5 (Κέντρο) και Y/D=-0,5



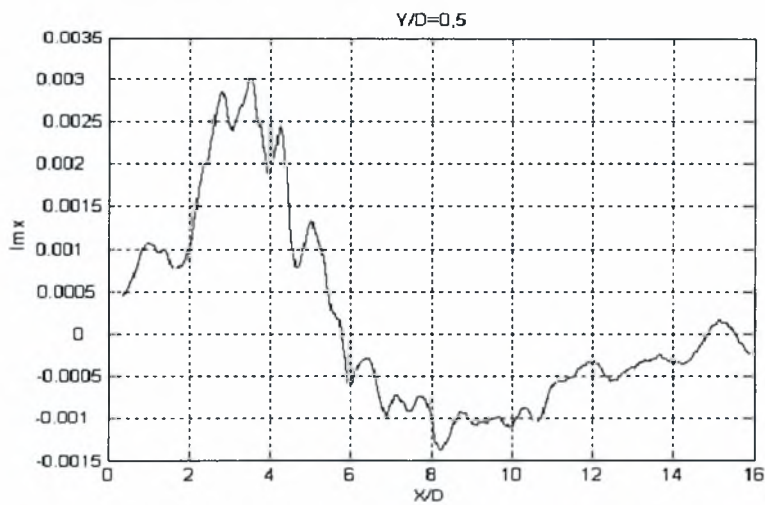
Διάγραμμα 5.110. Κατανομές Std Ib, Std Ir για H/D=3.5 (Κέντρο) και Y/D=0,5



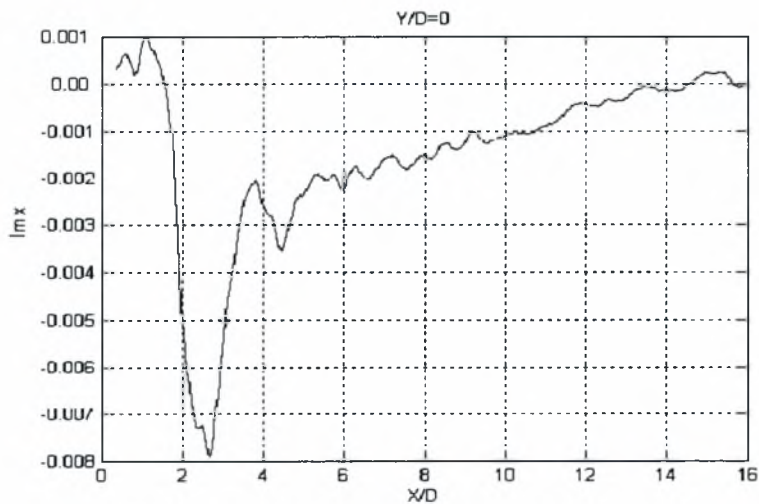
Διάγραμμα 5.111. Κατανομές Std Ib, Std Ir για H/D=3.5 (Κέντρο) και Y/D=0



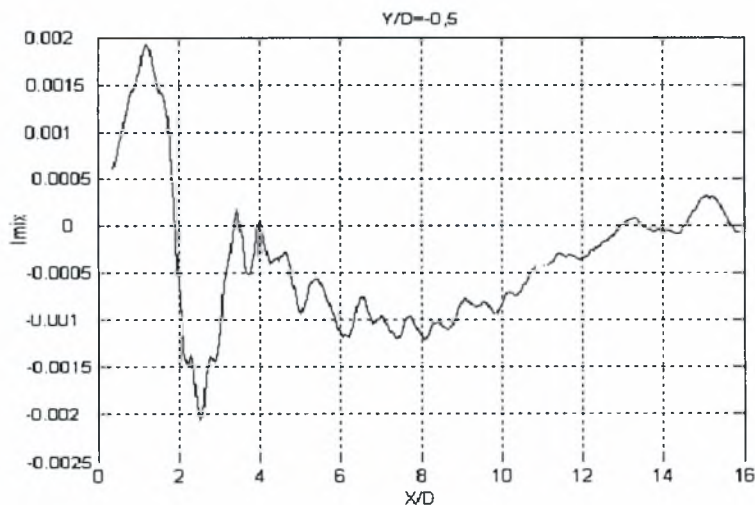
Διάγραμμα 5.112. Κατανομές Std Ib, Std Ir για H/D=3.5 (Κέντρο) και Y/D=-0,5



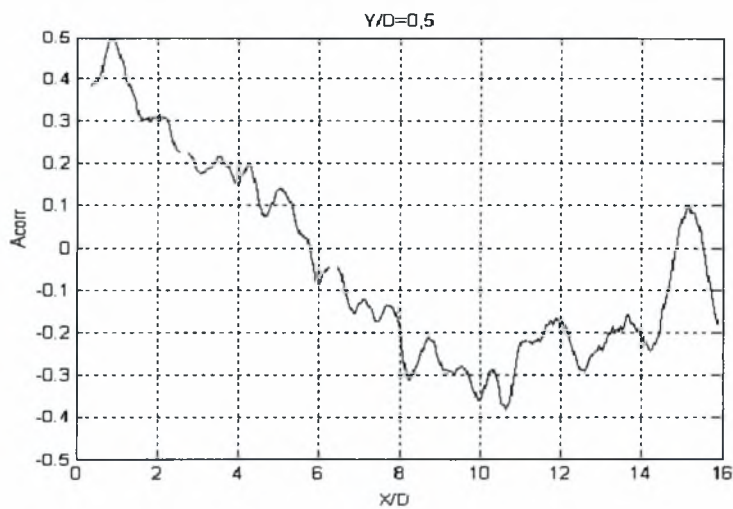
Διάγραμμα 5.113. Μεταβολή I_{mix} για $H/D=3.5$ (Κέντρο) και $Y/D=0,5$



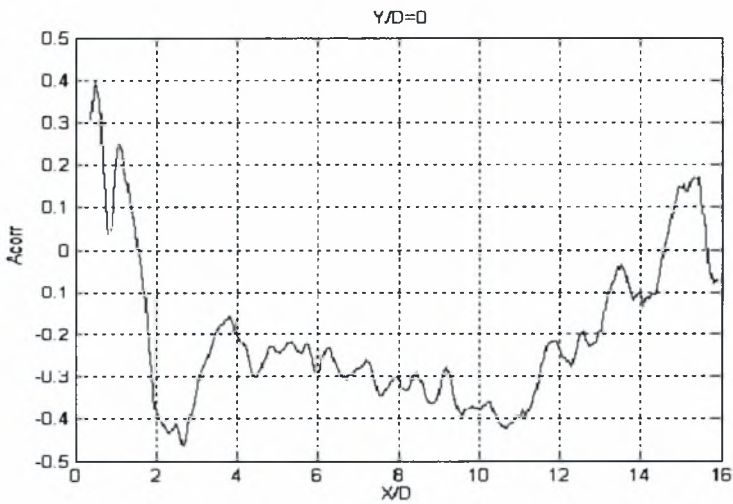
Διάγραμμα 5.114. Μεταβολή I_{mix} για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



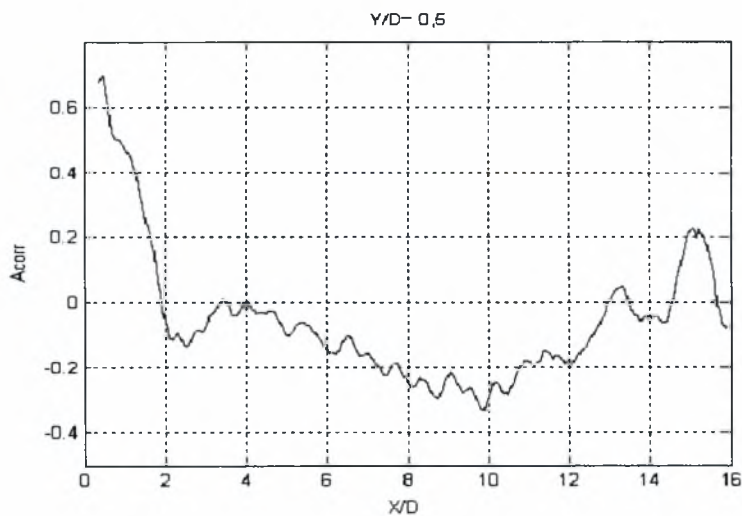
Διάγραμμα 5.115. Μεταβολή I_{mix} για $H/D=3.5$ (Κέντρο) και $Y/D=-0,5$



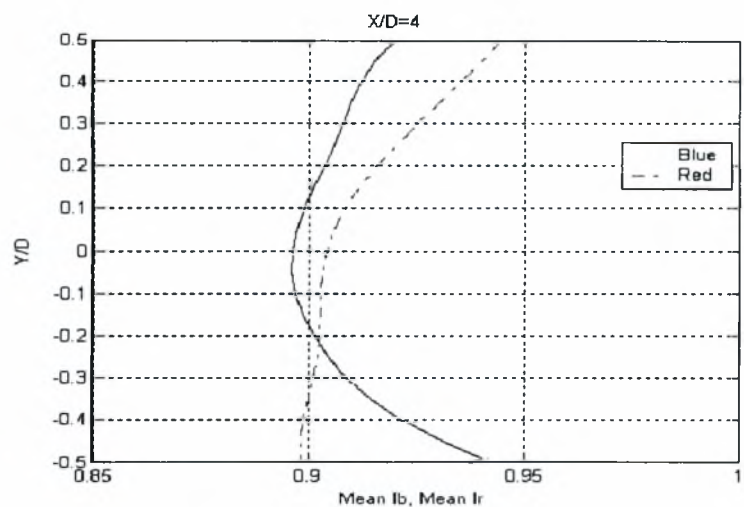
Διάγραμμα 5.116. Μεταβολή A_{corr} για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $Y/D=0,5$



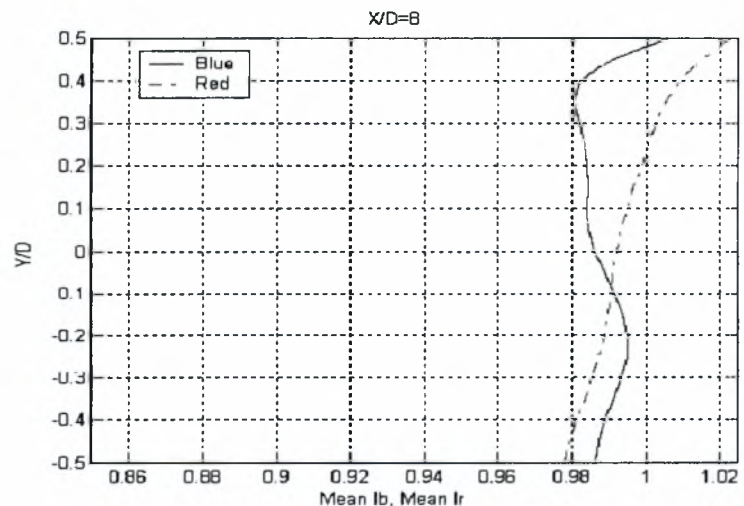
Διάγραμμα 5.117. Μεταβολή A_{corr} για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



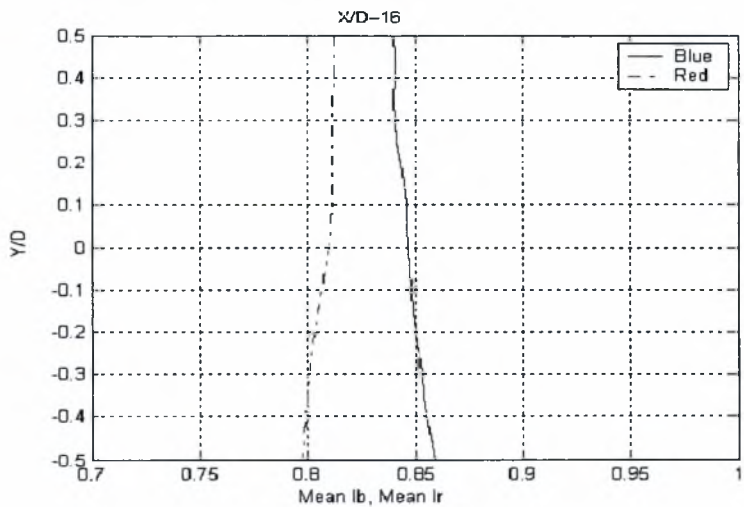
Διάγραμμα 5.118. Μεταβολή A_{corr} για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $Y/D=-0,5$



Διάγραμμα 5.119. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $X/D=4$



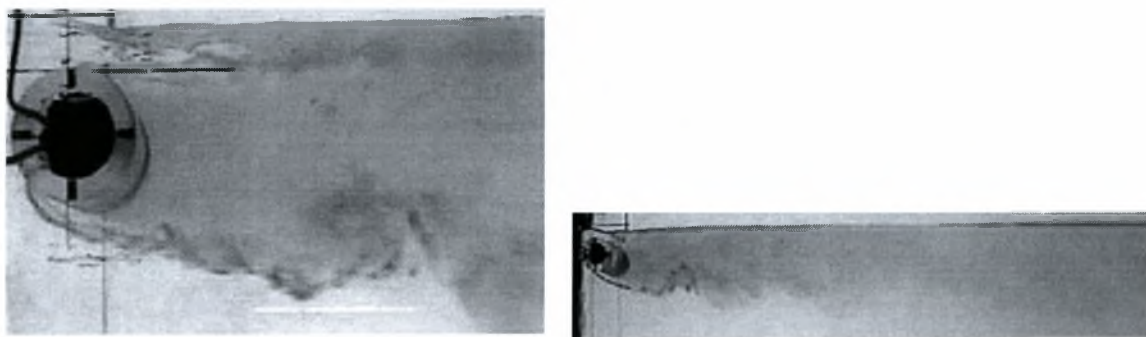
Διάγραμμα 5.120. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $X/D=8$



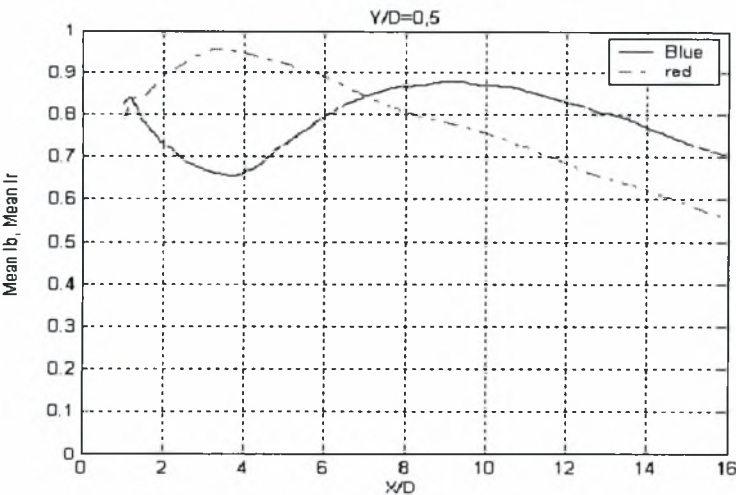
Διάγραμμα 5.121. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $X/D=16$

- $H_e/D = 0,3$ (διεπιφάνεια)

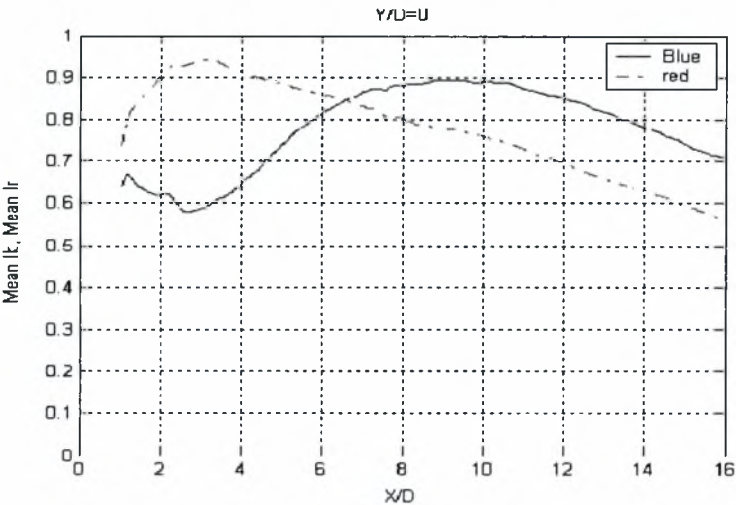
Στην εικόνα 5.22 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,3$.



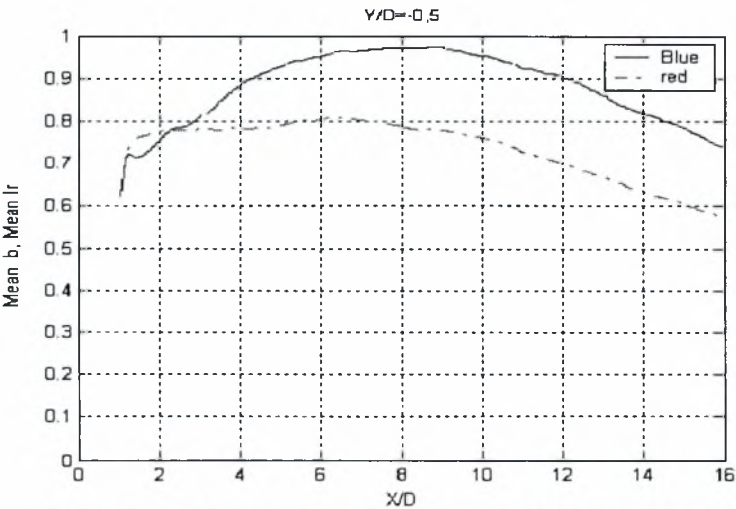
Εικόνα 5.22. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,3$.



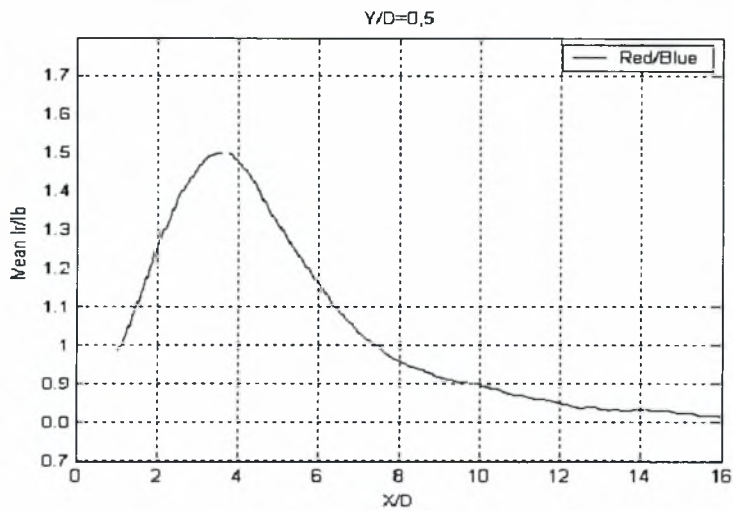
Διάγραμμα 5.122. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



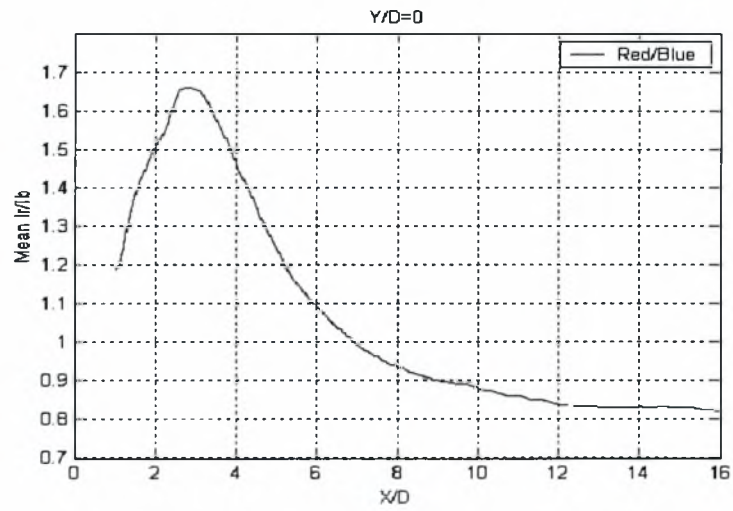
Διάγραμμα 5.123. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0$



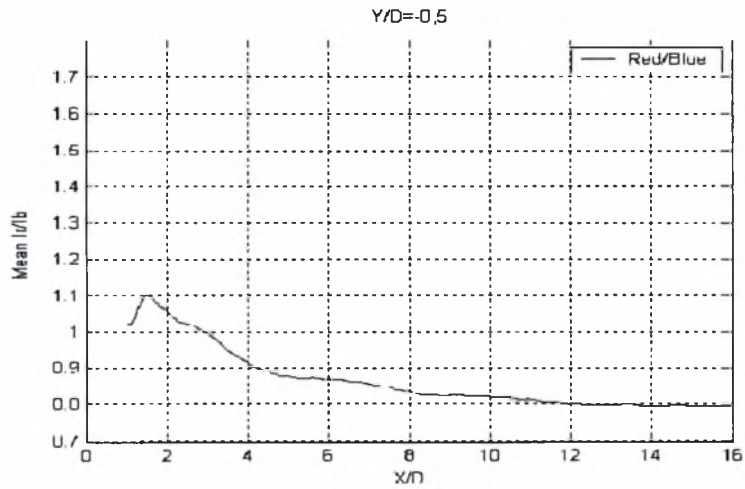
Διάγραμμα 5.124. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



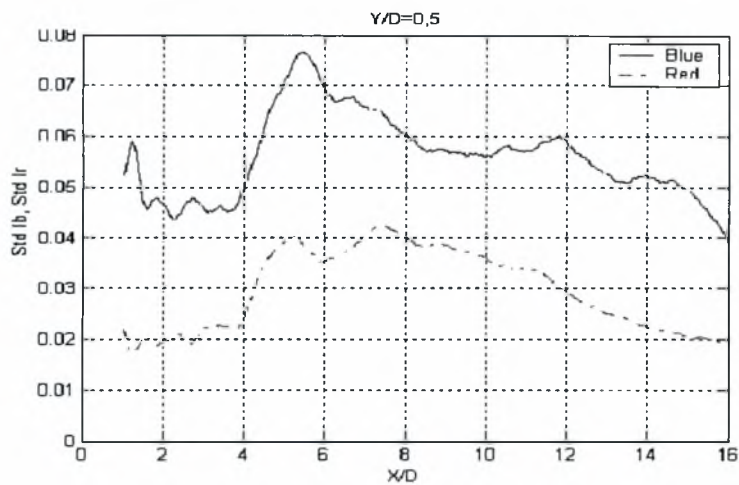
Διάγραμμα 5.125. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



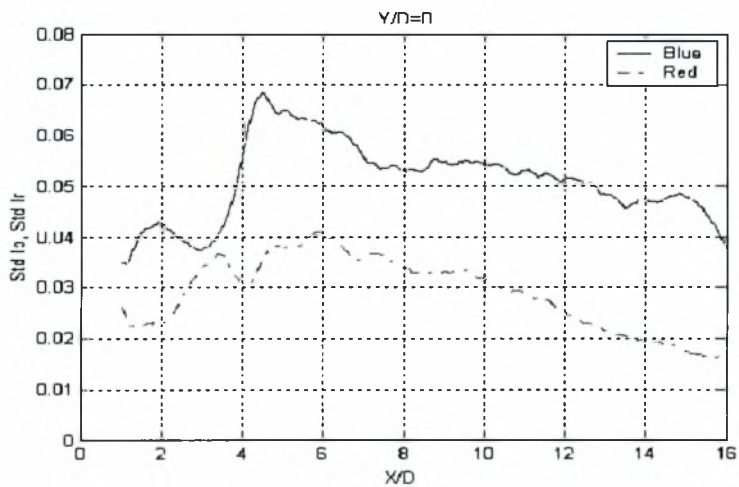
Διάγραμμα 5.126. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



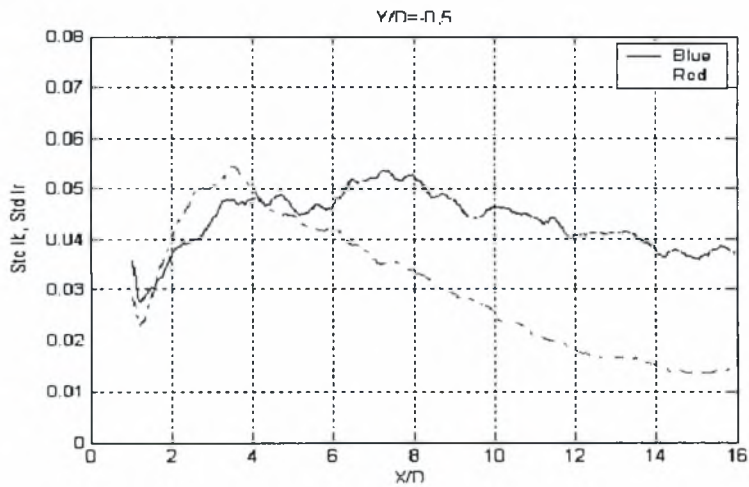
Διάγραμμα 5.127. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



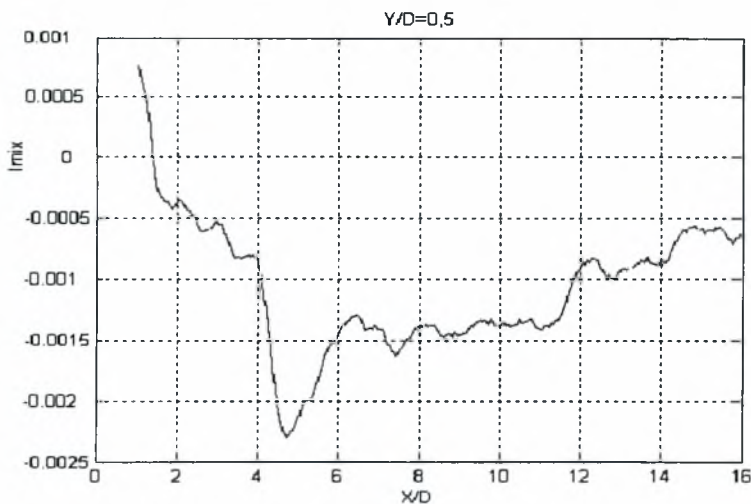
Διάγραμμα 5.128. Κατανομές Std I_b, Std I_r για H_t/D=0,3 και Y/D=0,5



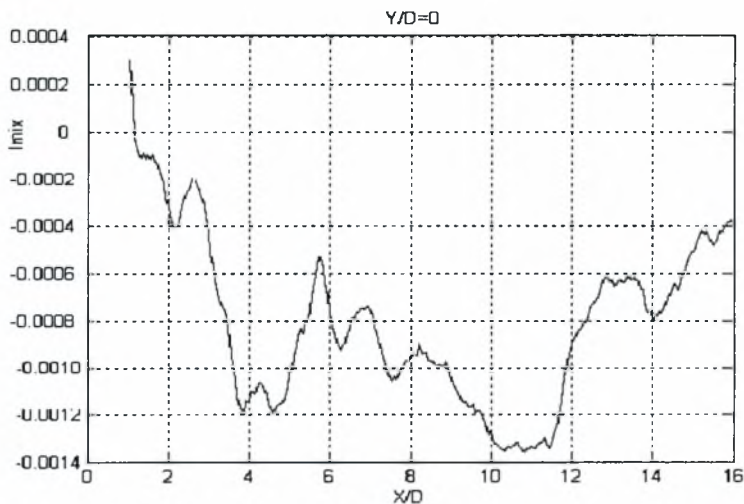
Διάγραμμα 5.129. Κατανομές Std I_b, Std I_r για H_t/D=0,3 και Y/D=0



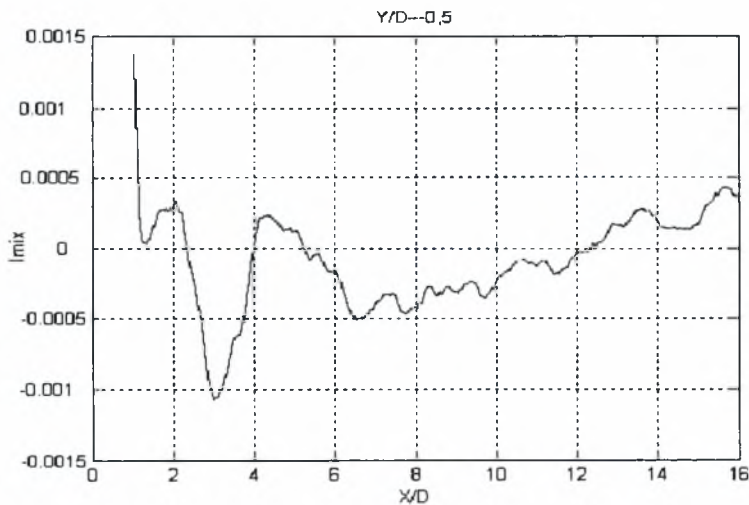
Διάγραμμα 5.130. Κατανομές Std I_b, Std I_r για H_t/D=0,3 και Y/D=-0,5



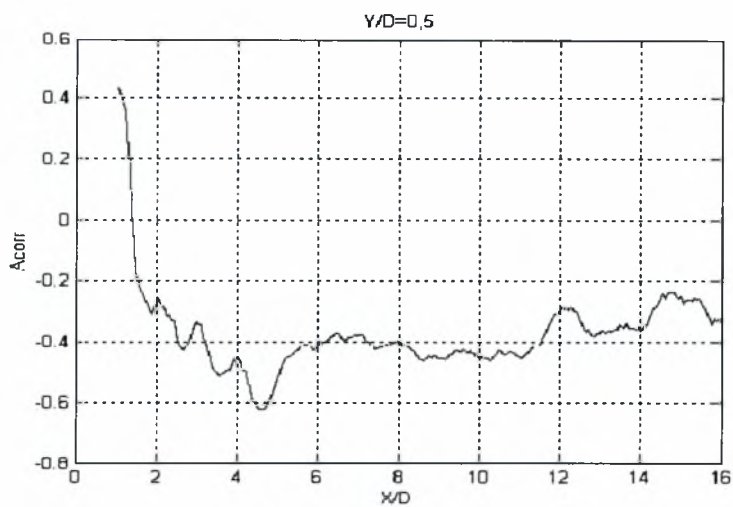
Διάγραμμα 5.131. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



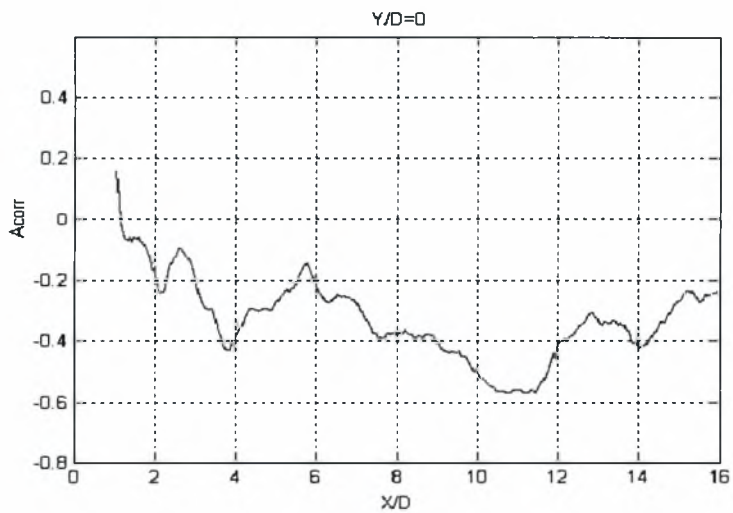
Διάγραμμα 5.132. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



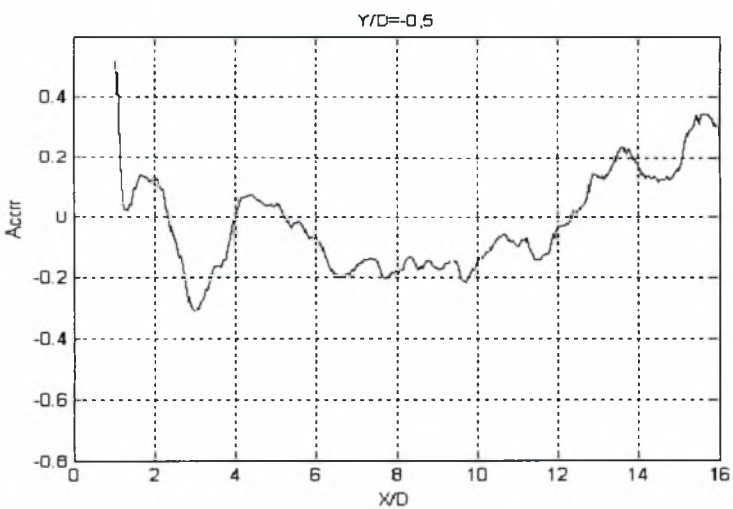
Διάγραμμα 5.133. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



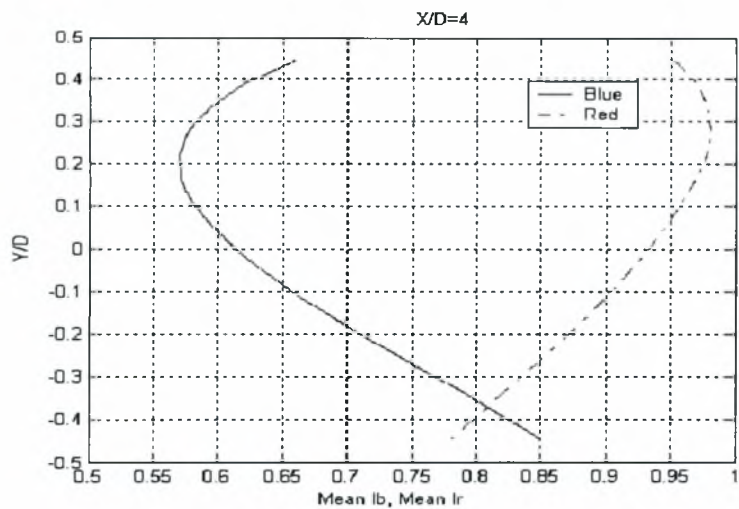
Διάγραμμα 5.134. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



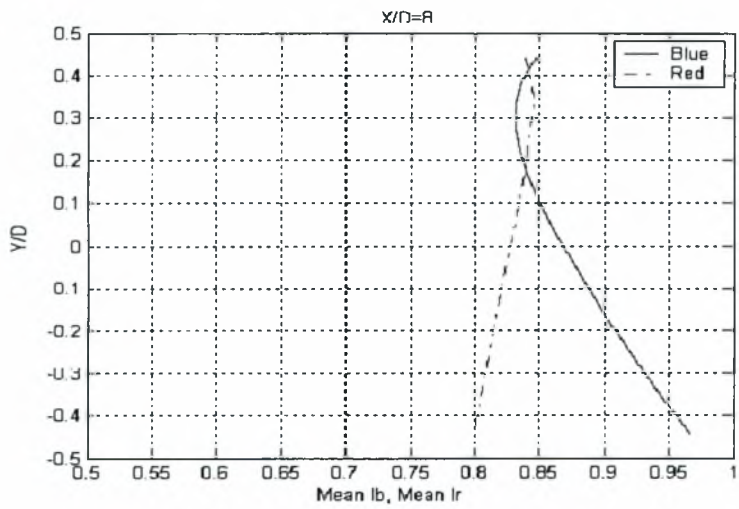
Διάγραμμα 5.135. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0$



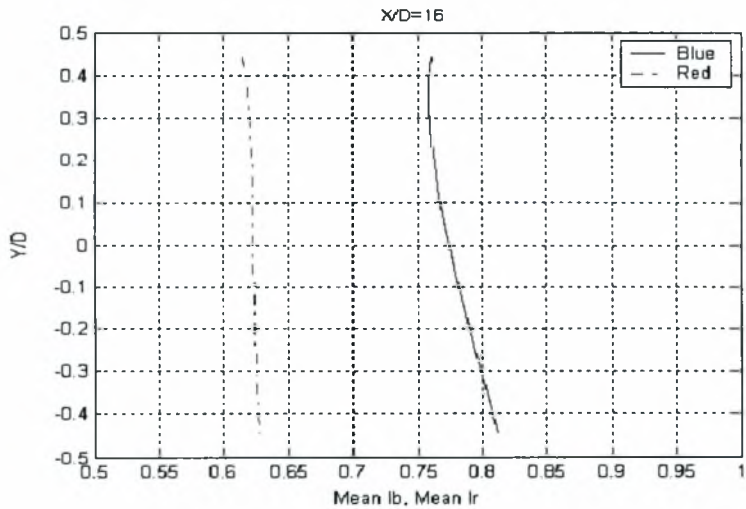
Διάγραμμα 5.136. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



Διάγραμμα 5.137. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $X/D=4$



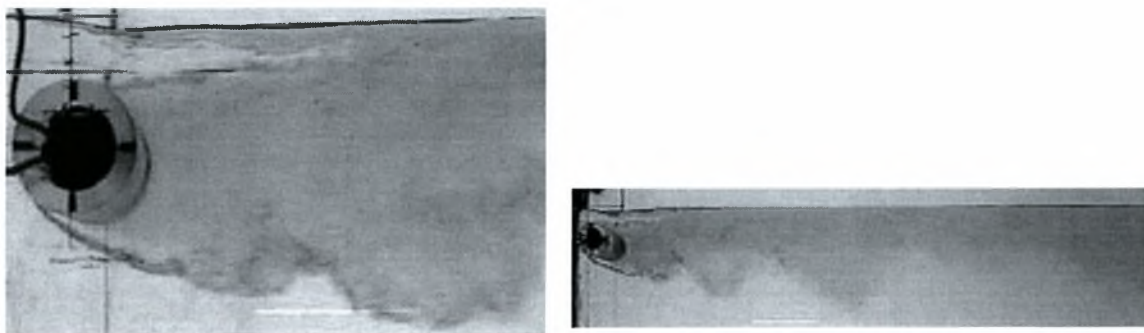
Διάγραμμα 5.138. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $X/D=8$



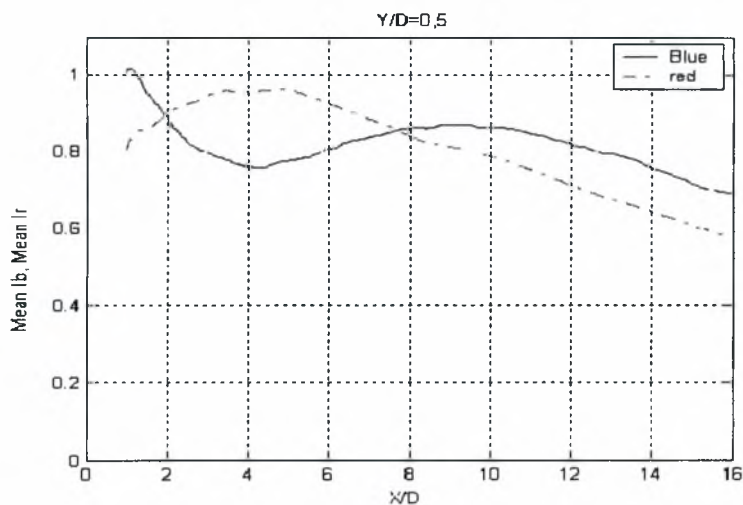
Διάγραμμα 5.139. Κατανομές I_b , I_r για $H_t/D=0,3$ και $X/D=16$

- $H_e/D = 0,4$ (διεπιφάνεια)

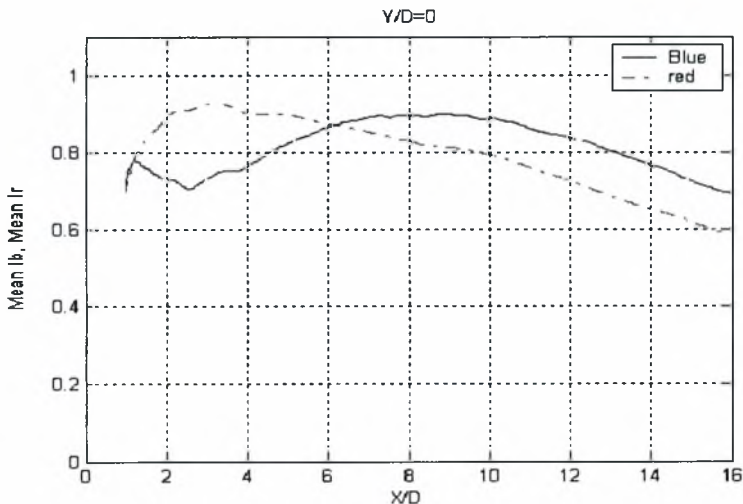
Στην εικόνα 5.23 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,4$.



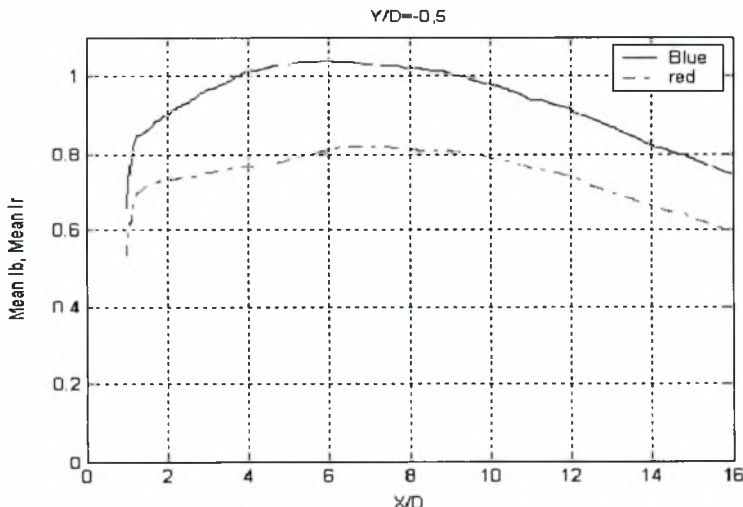
Εικόνα 5.23. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_e/D=0,4$.



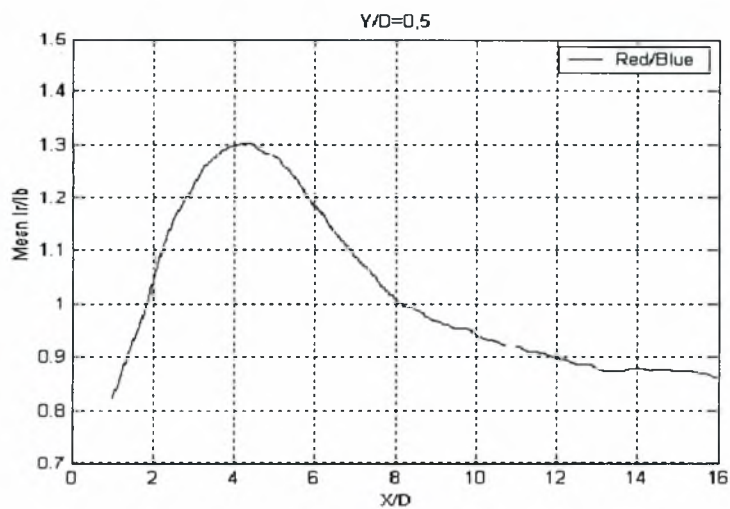
Διάγραμμα 5.140. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



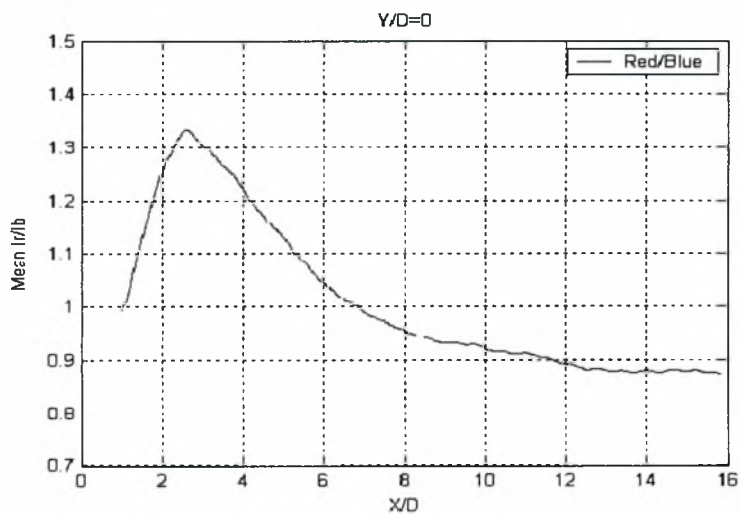
Διάγραμμα 5.141. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0$



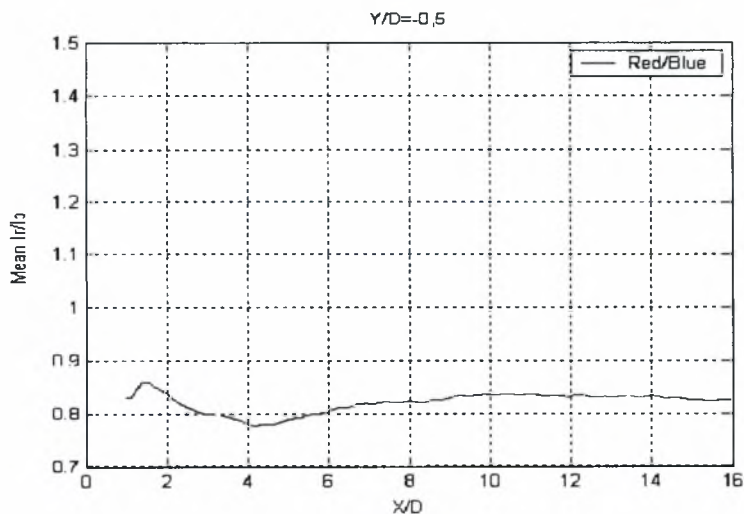
Διάγραμμα 5.142. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



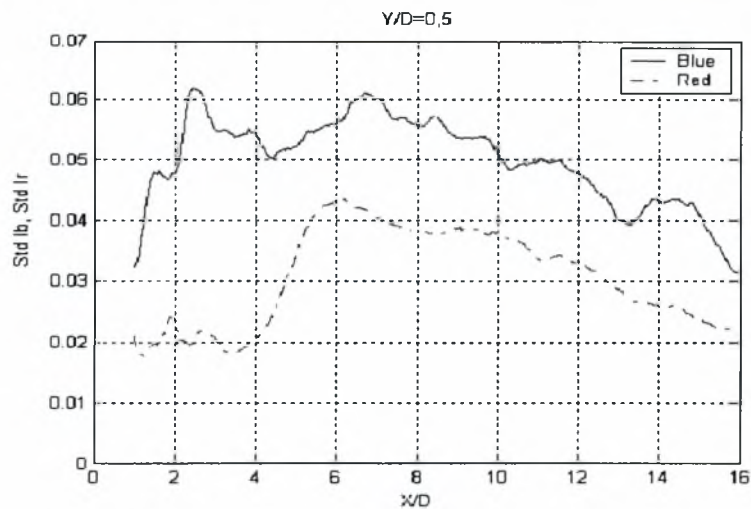
Διάγραμμα 5.143. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



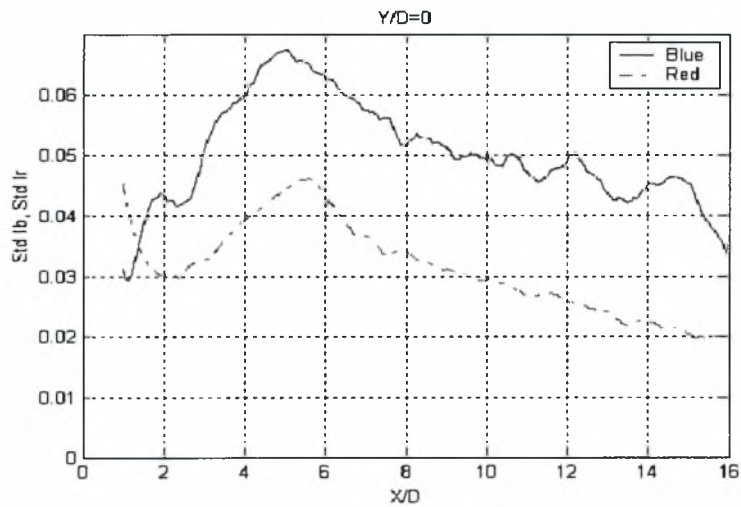
Διάγραμμα 5.144. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0$



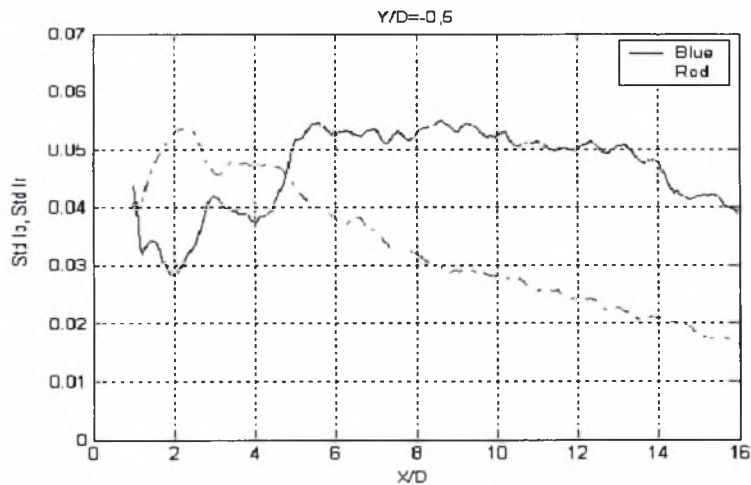
Διάγραμμα 5.145. Κατανομή (Ir/Ib) για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



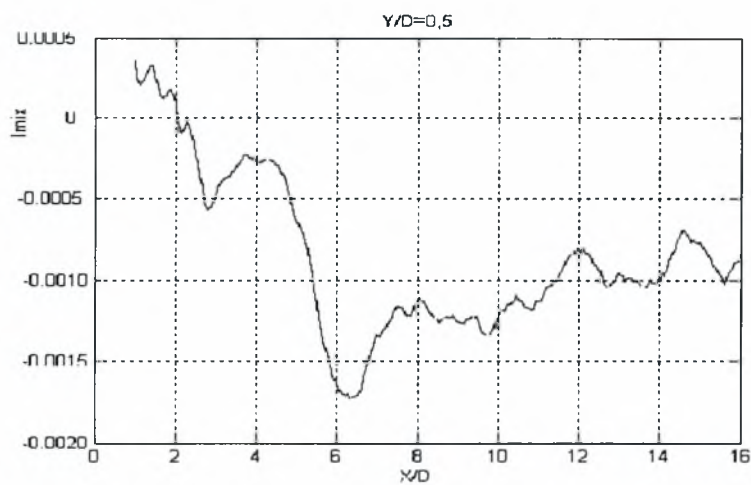
Διάγραμμα 5.146. Κατανομές Std Ib, Std Ir για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



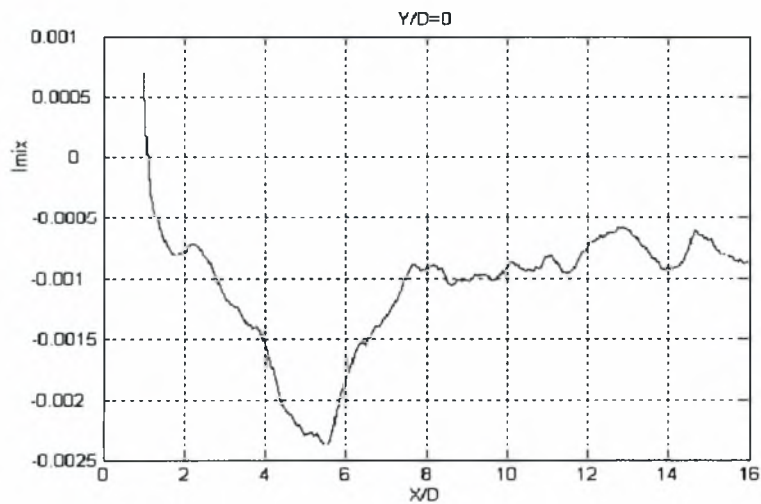
Διάγραμμα 5.147. Κατανομές Std Ib, Std Ir για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=0$



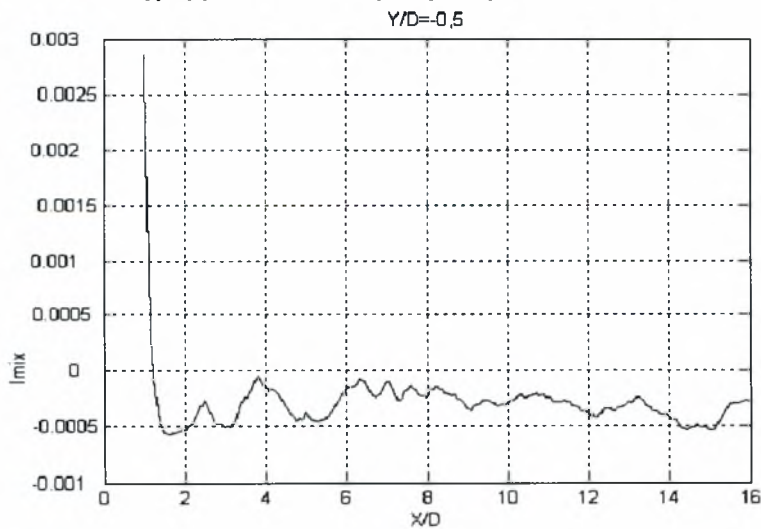
Διάγραμμα 5.148. Κατανομές Std Ib, Std Ir για $H_t/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



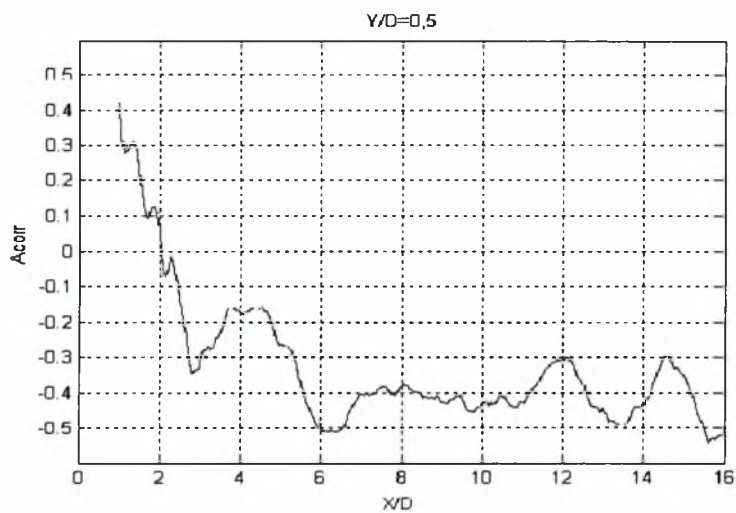
Διάγραμμα 5.149. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



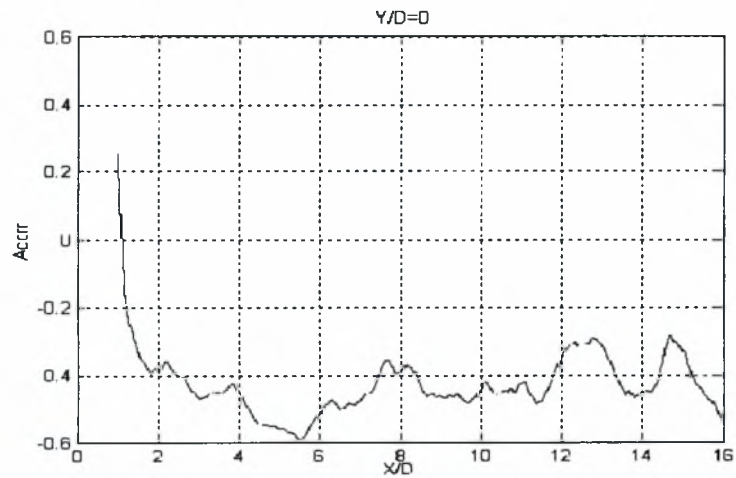
Διάγραμμα 5.150. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0$



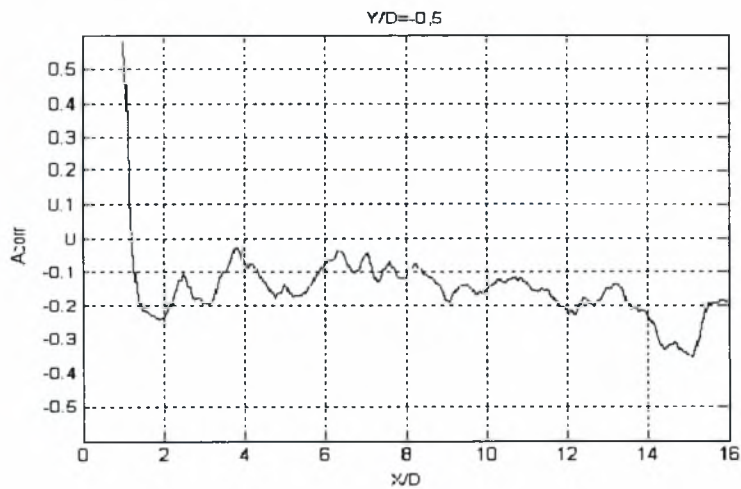
Διάγραμμα 5.151. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



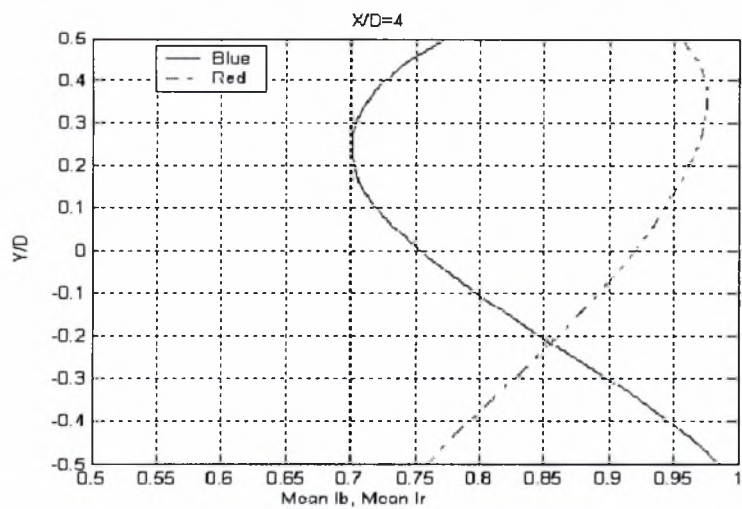
Διάγραμμα 5.152. Μεταβολή A_{corr} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0,5$



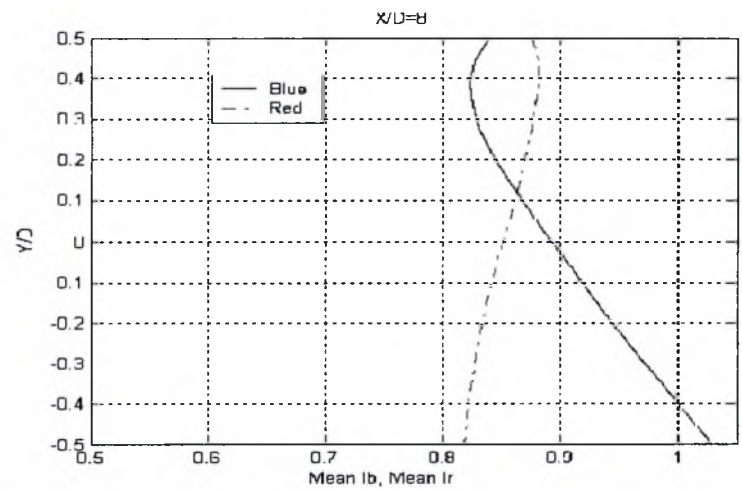
Διάγραμμα 5.153. Μεταβολή A_{corr} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=0$



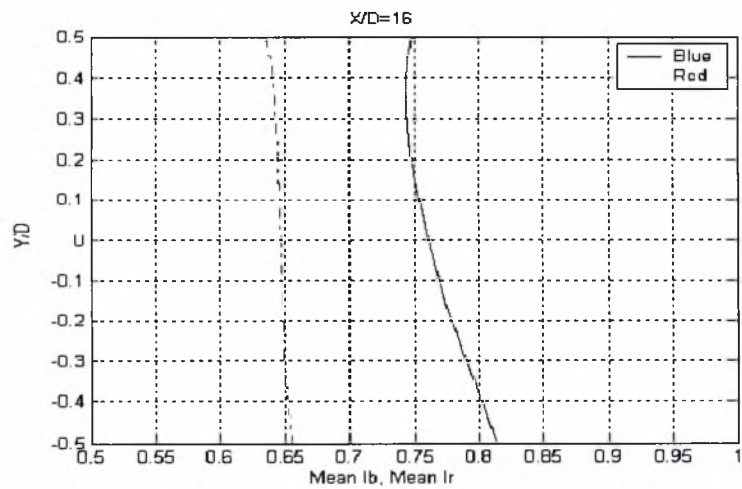
Διάγραμμα 5.154. Μεταβολή A_{corr} για $H_e/D=0,4$ και $Y/D=-0,5$



Διάγραμμα 5.155. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0.4$ και $X/D=4$



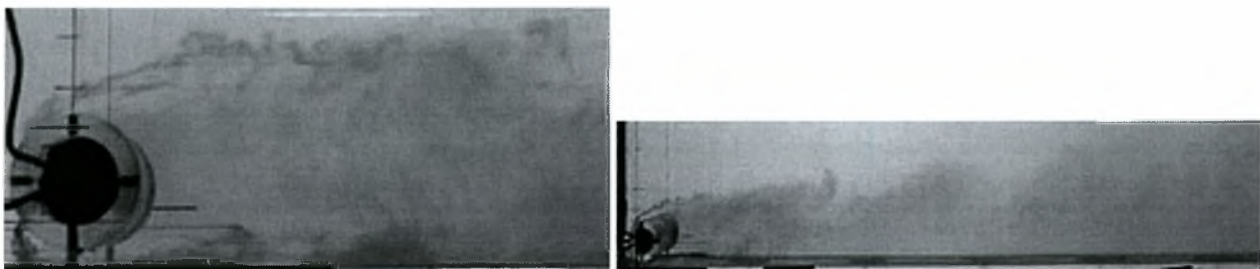
Διάγραμμα 5.156. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0.4$ και $X/D=8$



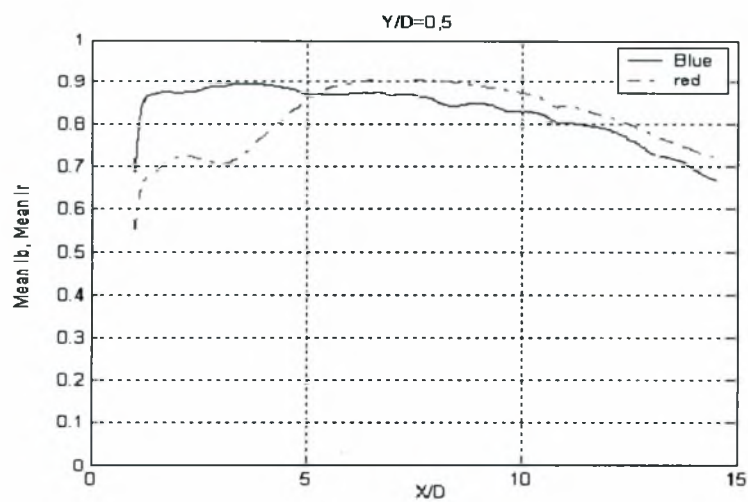
Διάγραμμα 5.157. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0.4$ και $X/D=16$

- $H_{\delta}/D=0,2$ (δάπεδο)

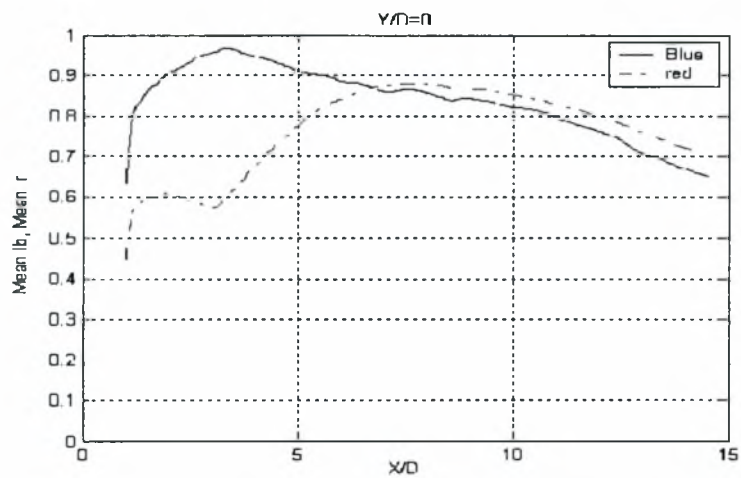
Στην εικόνα 5.25 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_{\delta}/D=0,2$.



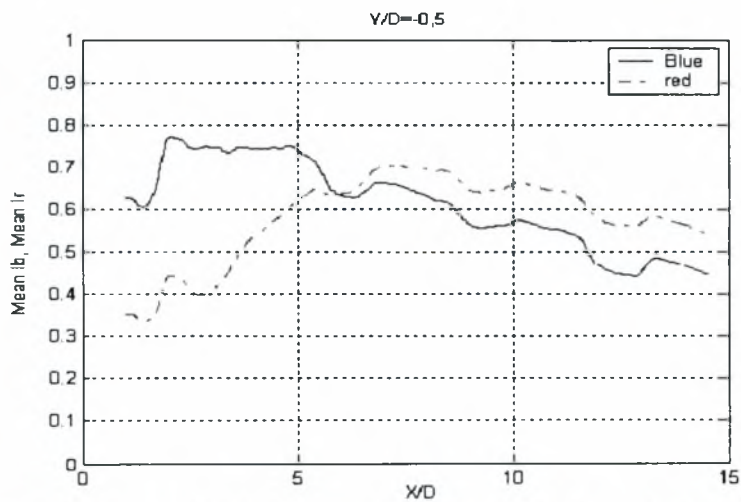
Εικόνα 5.25. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_{\delta}/D=0,2$.



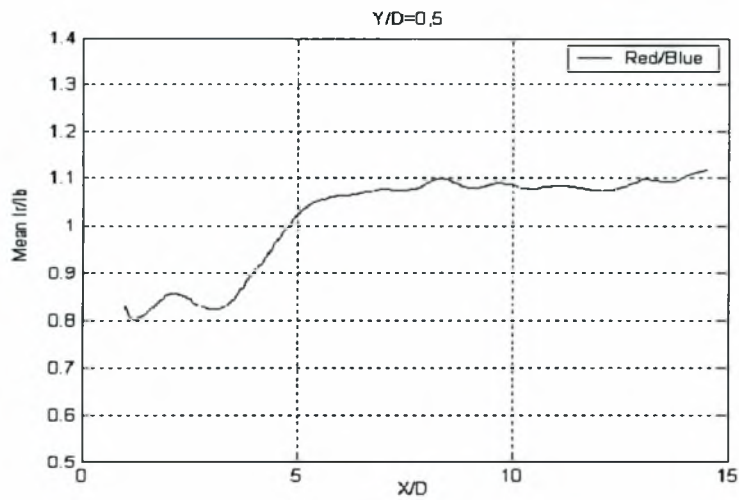
Διάγραμμα 5.158. Κατανομές I_b, I_r για H_δ/D=0,2 και Y/D=0,5



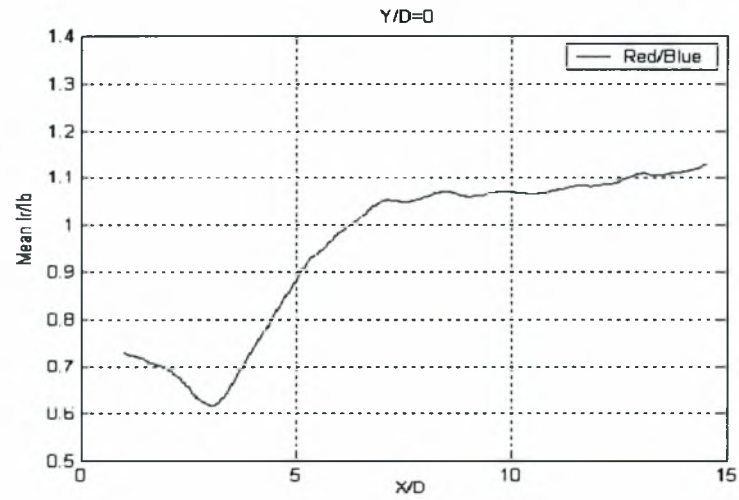
Διάγραμμα 5.159. Κατανομές I_b, I_r για H_δ/D=0,2 και Y/D=0



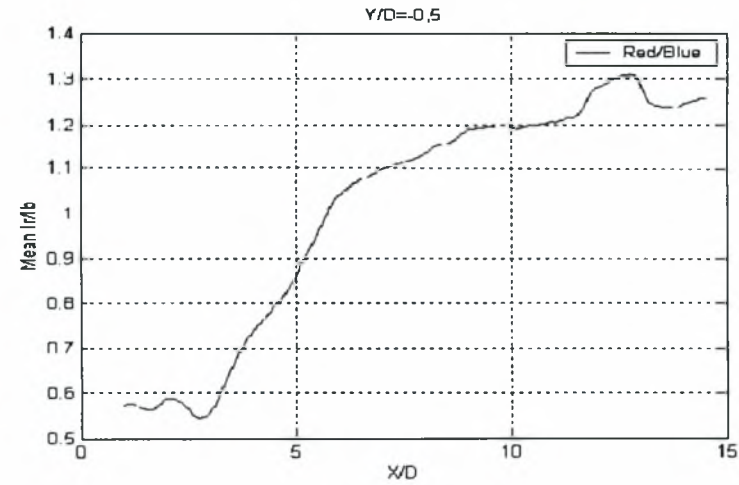
Διάγραμμα 5.160. Κατανομές I_b, I_r για H_δ/D=0,2 και Y/D=-0,5



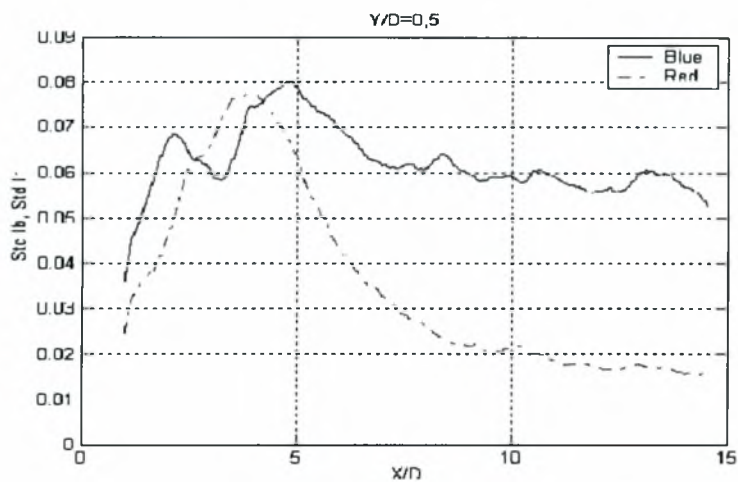
Διάγραμμα 5.161. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0,5$



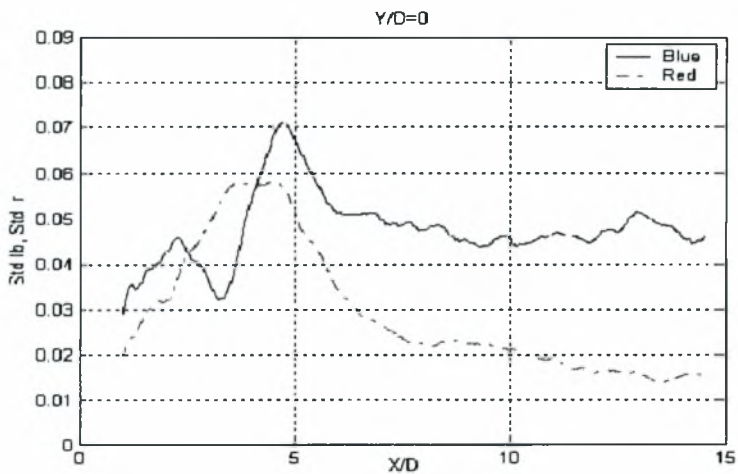
Διάγραμμα 5.162. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0$



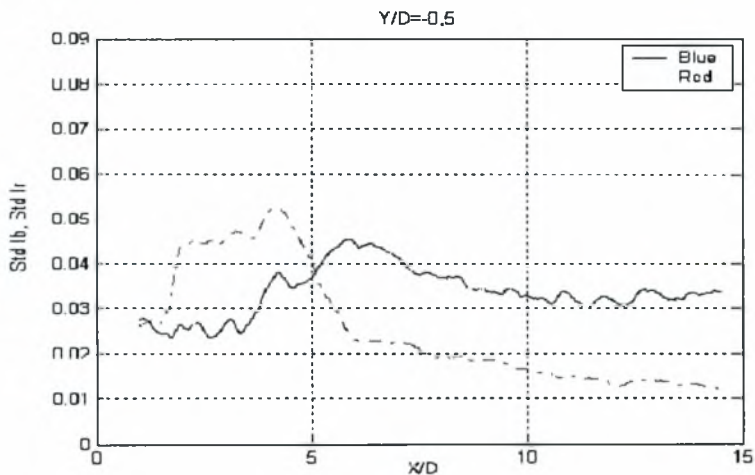
Διάγραμμα 5.163. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=-0,5$



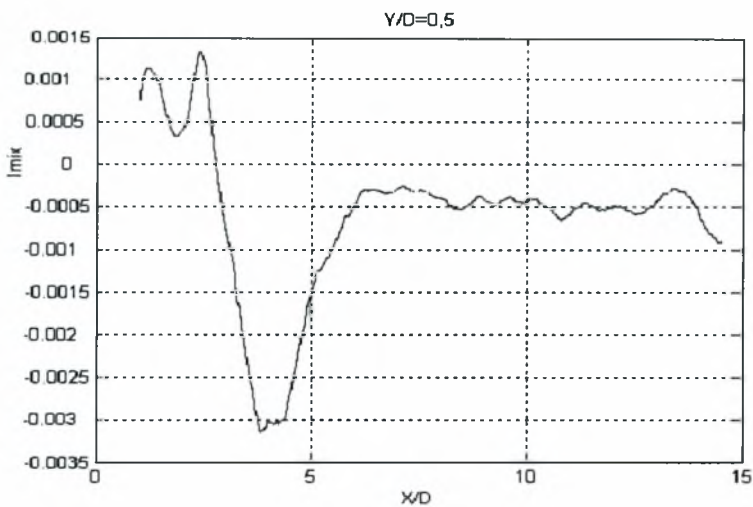
Διάγραμμα 5.164. Κατανομές Std I_b, Std I_r για H_d/D=0,2 και Y/D=0,5



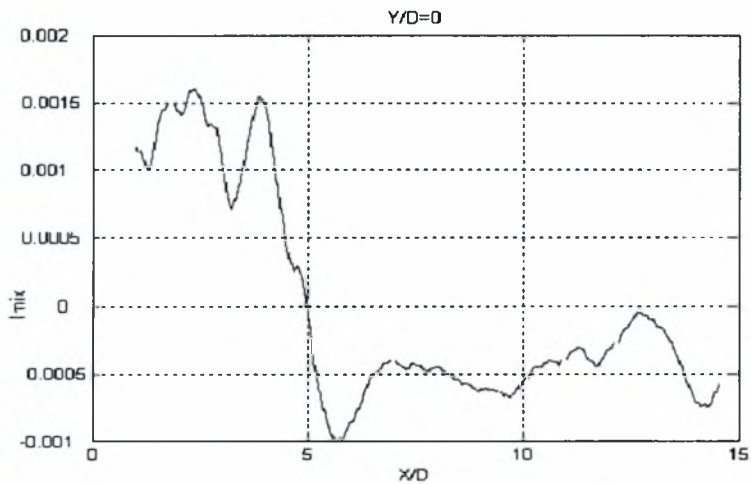
Διάγραμμα 5.165. Κατανομές Std I_b, Std I_r για H_d/D=0,2 και Y/D=0



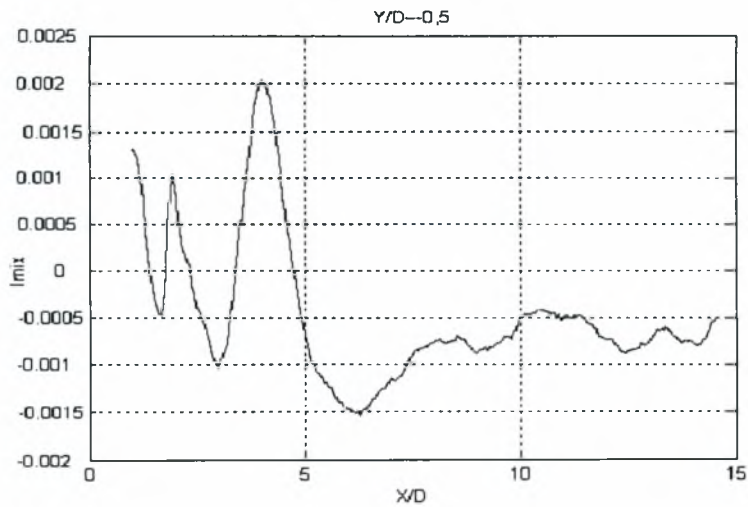
Διάγραμμα 5.166. Κατανομές Std I_b, Std I_r για H_d/D=0,2 και Y/D=-0,5



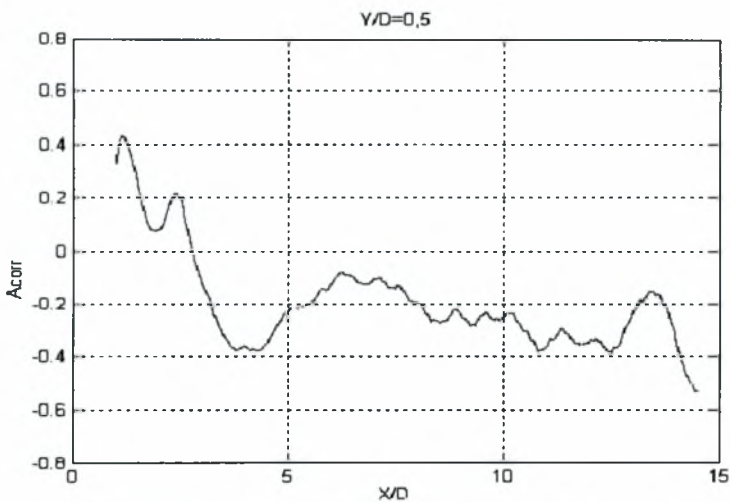
Διάγραμμα 5.167. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0,5$



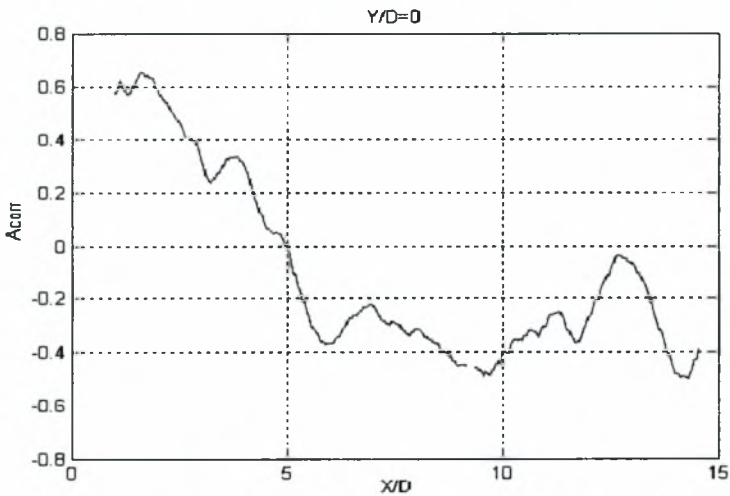
Διάγραμμα 5.168. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=0$



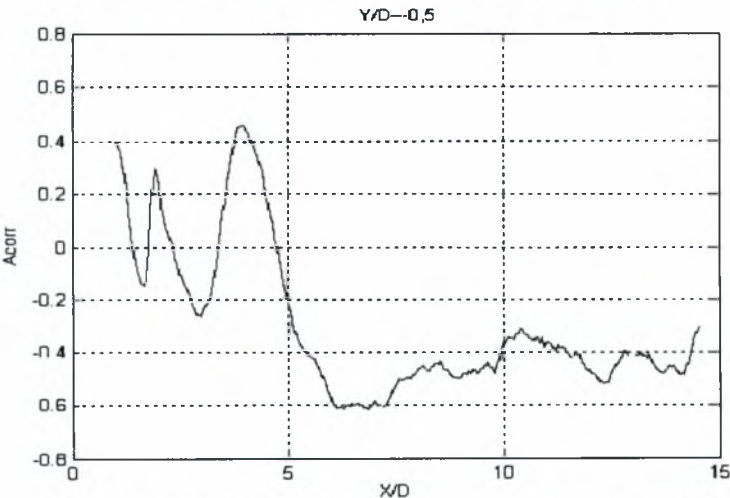
Διάγραμμα 5.169. Μεταβολή I_{mix} για $H_\delta/D=0,2$ και $Y/D=-0,5$



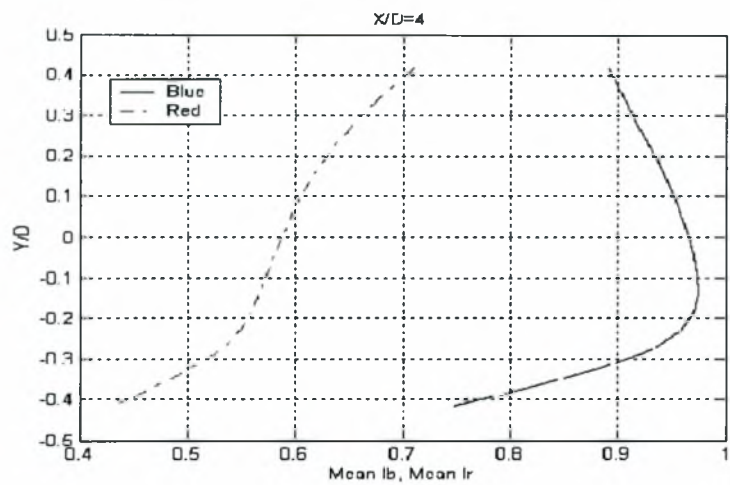
Διάγραμμα 5.170. Μεταβολή A_{corr} για $H_0/D=0,2$ και $Y/D=0,5$



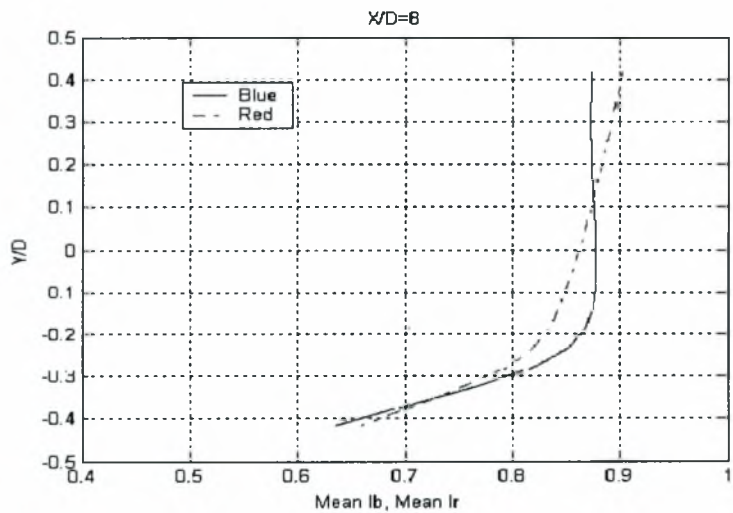
Διάγραμμα 5.171. Μεταβολή A_{corr} για $H_0/D=0,2$ και $Y/D=0$



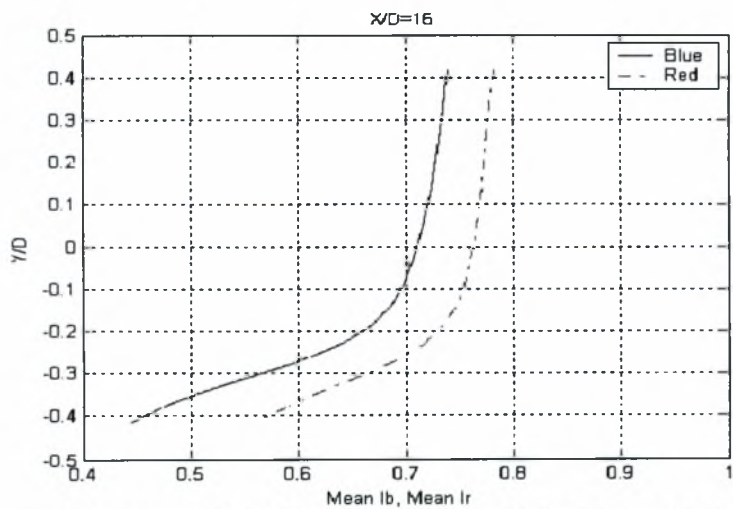
Διάγραμμα 5.172. Μεταβολή A_{corr} για $H_0/D=0,2$ και $Y/D=-0,5$



Διάγραμμα 5.173. Κατανομές I_b , I_r για $H_d/D=0.2$ και $X/D=4$



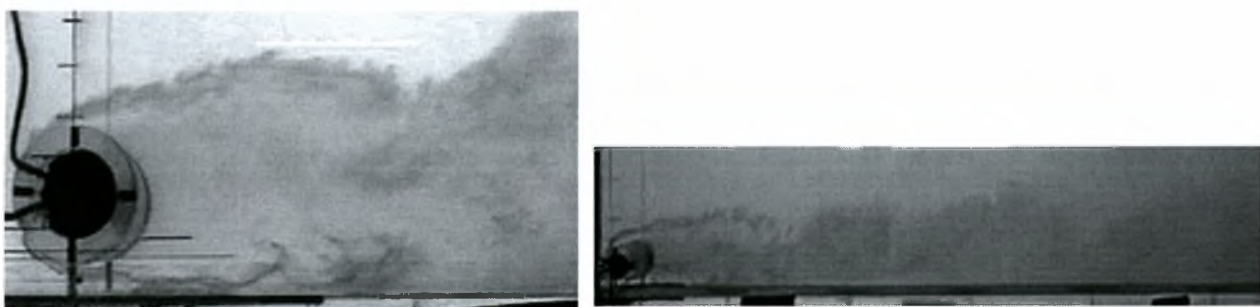
Διάγραμμα 5.174. Κατανομές I_b , I_r για $H_d/D=0.2$ και $X/D=8$



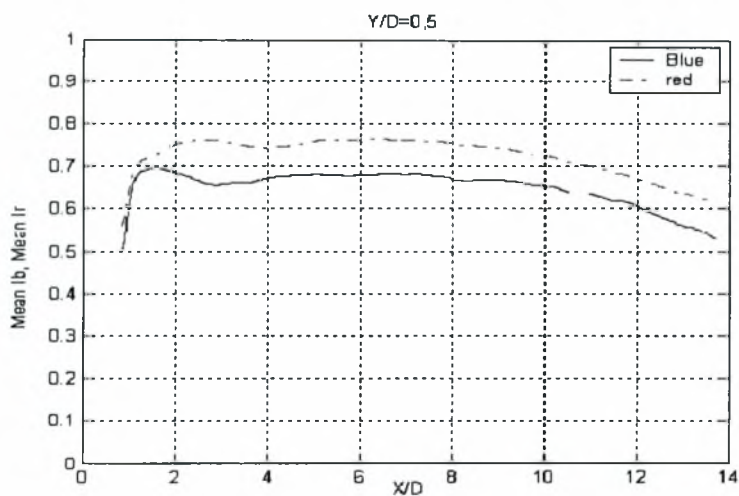
Διάγραμμα 5.175. Κατανομές I_b , I_r για $H_d/D=0.2$ και $X/D=16$

- $H_δ/D = 0,3$ (δάπεδο)

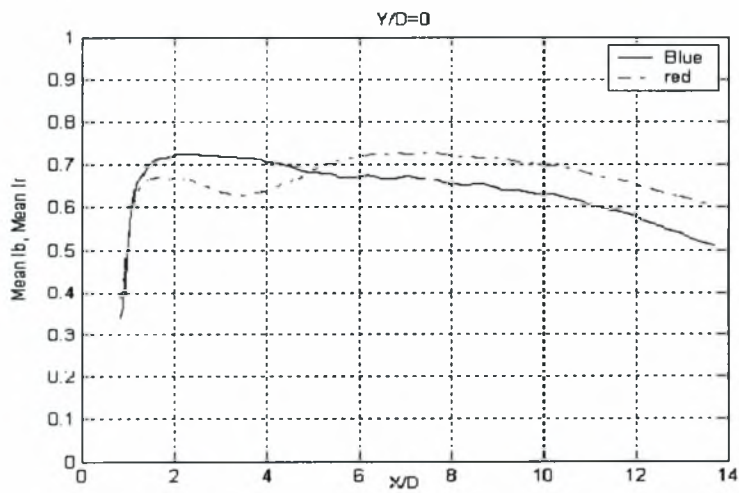
Στην εικόνα 5.26 φαίνεται η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_δ/D=0,3$.



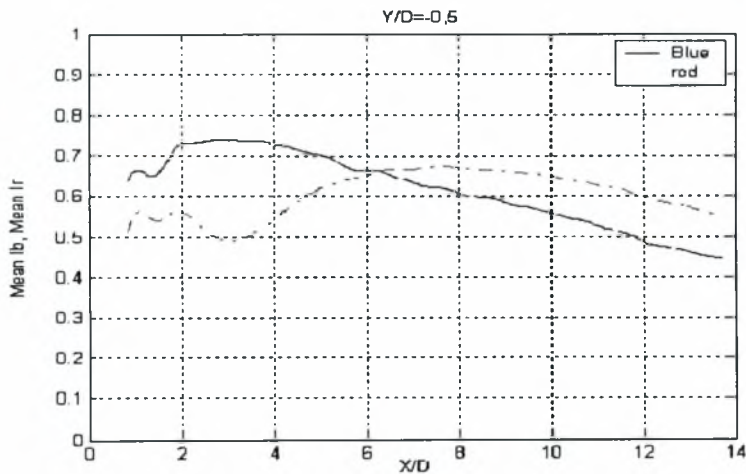
Εικόνα 5.26. Η μορφή του απορεύματος όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στη θέση $H_δ/D=0,3$.



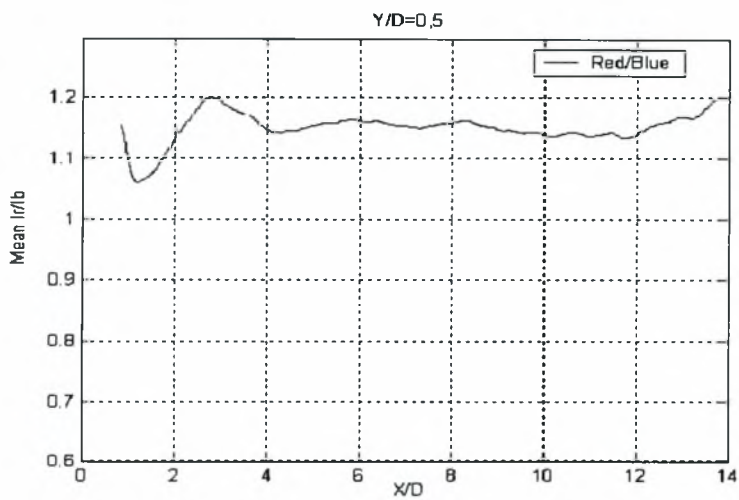
Διάγραμμα 5.176. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



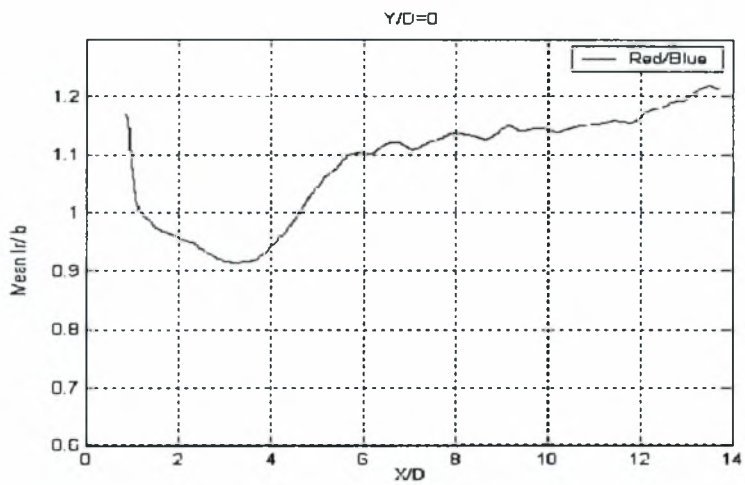
Διάγραμμα 5.177. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=0$



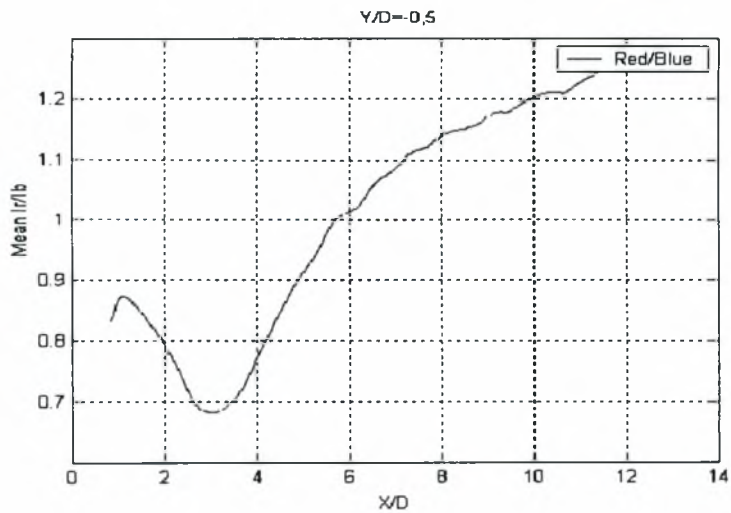
Διάγραμμα 5.178. Κατανομές I_b , I_r για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



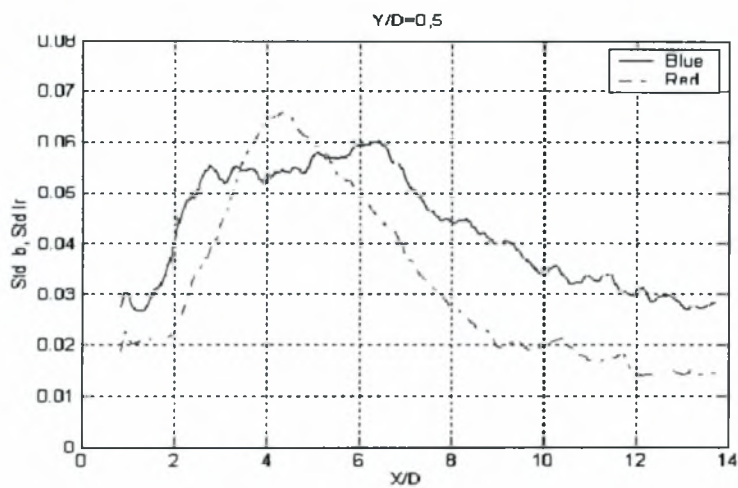
Διάγραμμα 5.179. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



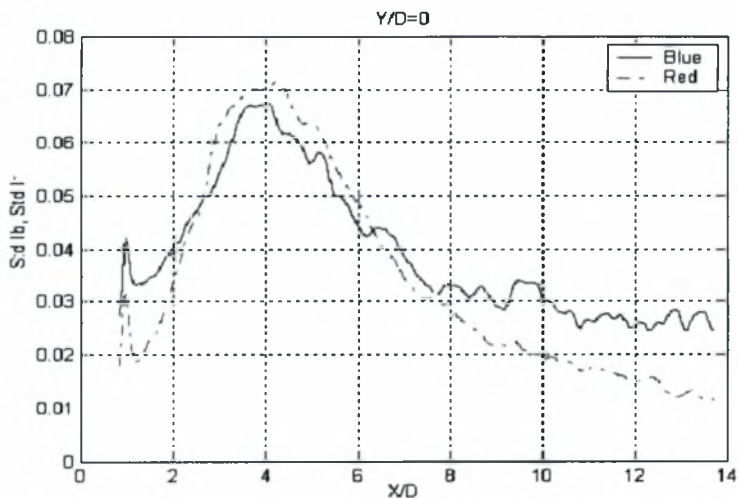
Διάγραμμα 5.180. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=0$



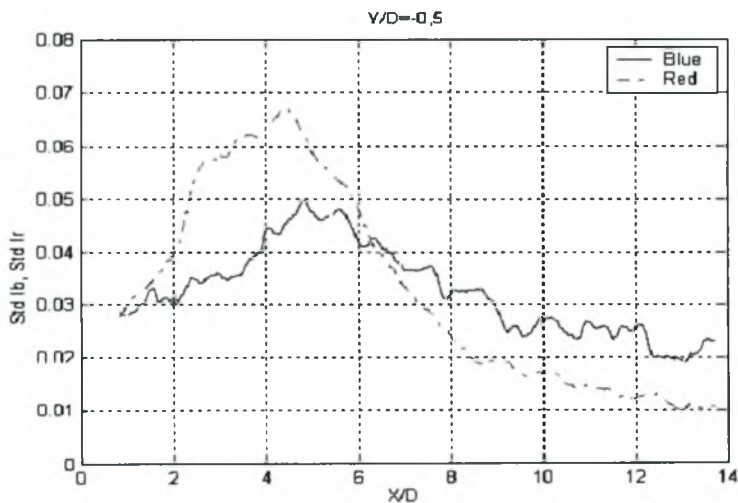
Διάγραμμα 5.181. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_0/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



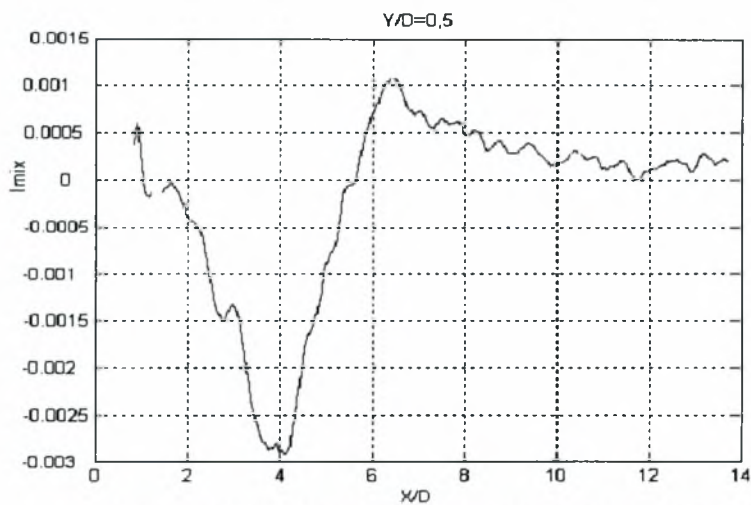
Διάγραμμα 5.182. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_b/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



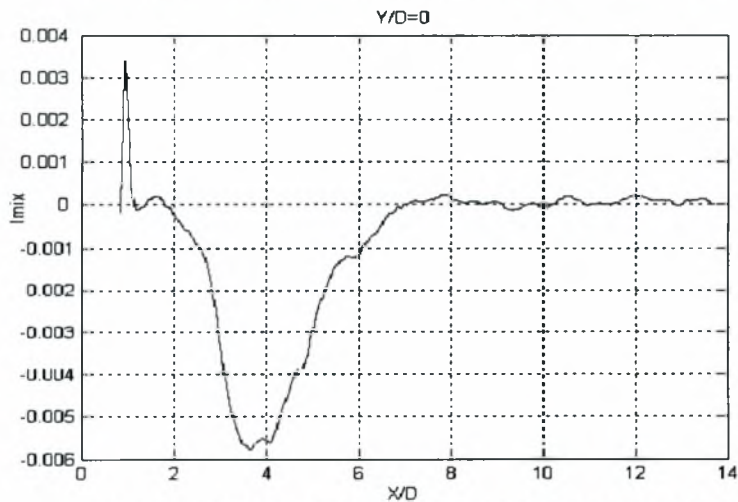
Διάγραμμα 5.183. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_b/D=0,3$ και $Y/D=0$



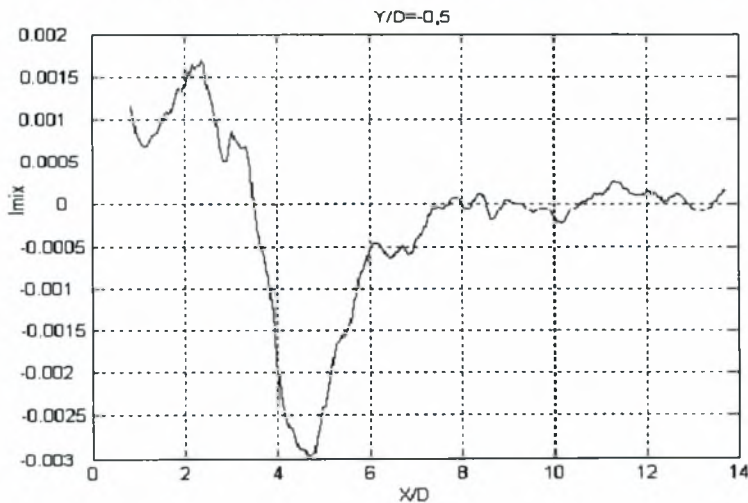
Διάγραμμα 5.184. Κατανομές Std Ib, Std Ir, για $H_b/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



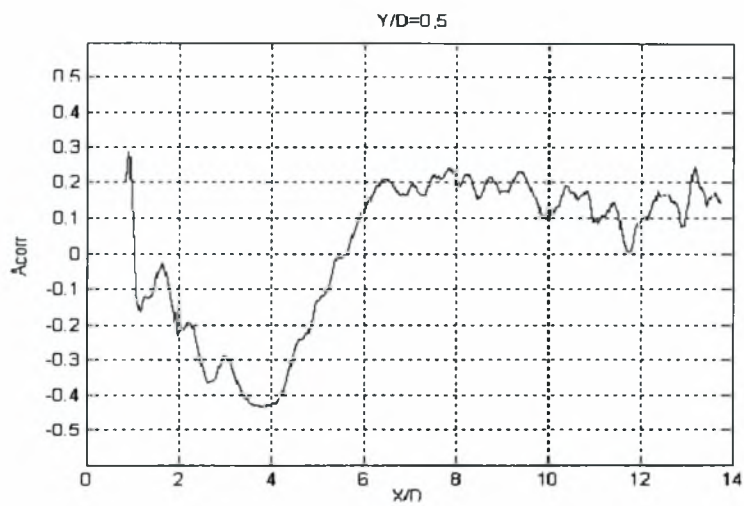
Διάγραμμα 5.185. Μεταβολή I_{mix} για $H_g/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



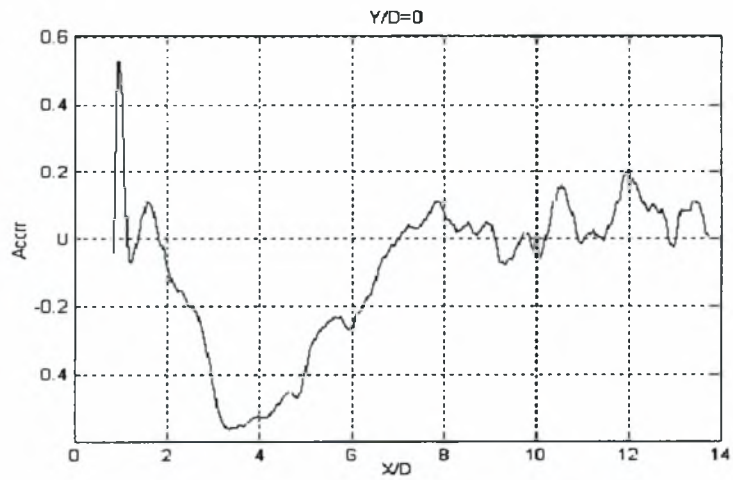
Διάγραμμα 5.186. Μεταβολή I_{mix} για $H_g/D=0,3$ και $Y/D=0$



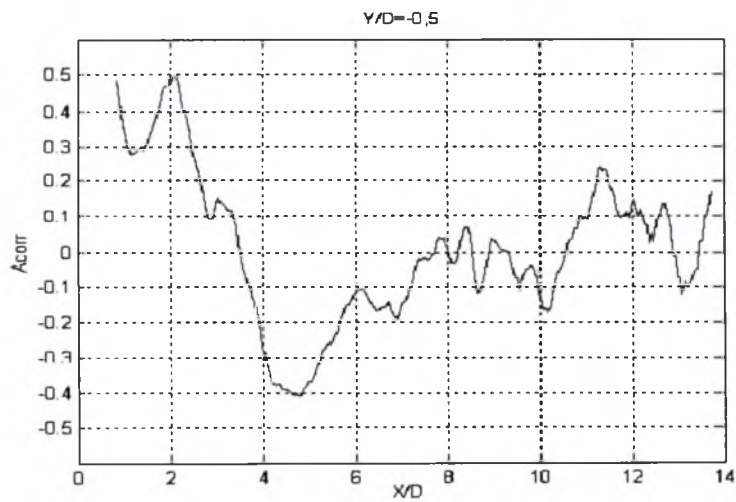
Διάγραμμα 5.187. Μεταβολή I_{mix} για $H_g/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



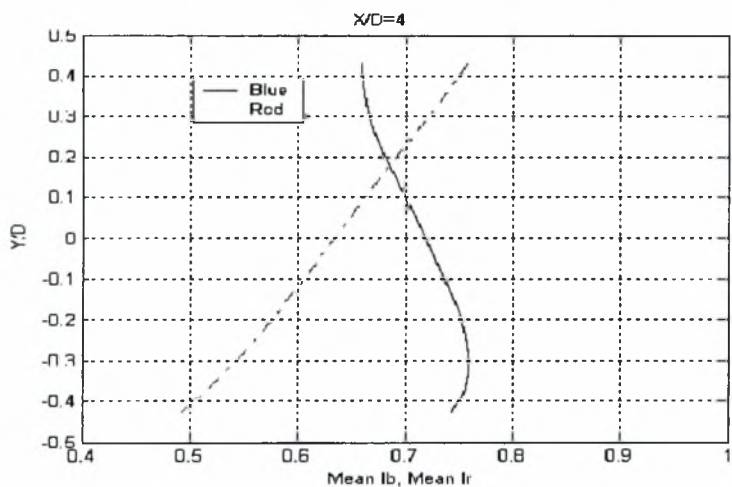
Διάγραμμα 5.188. Μεταβολή A_{corr} για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=0,5$



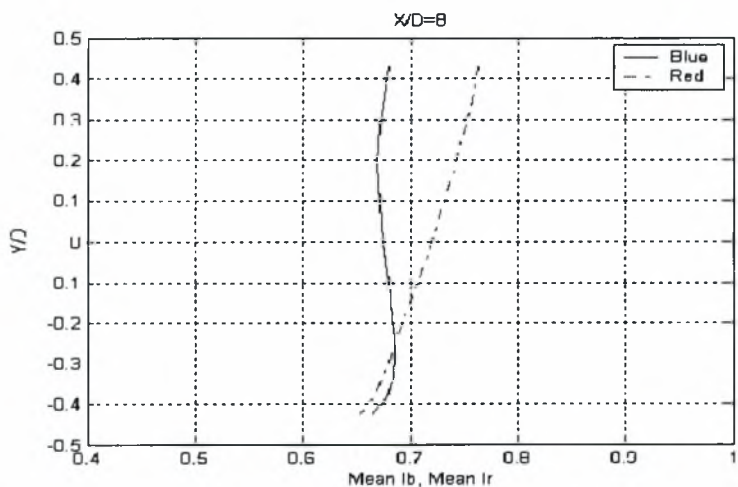
Διάγραμμα 5.189. Μεταβολή A_{corr} για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=0$



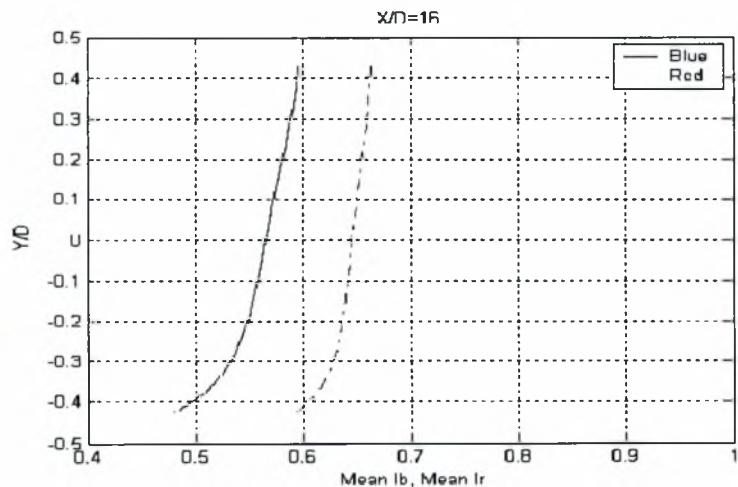
Διάγραμμα 5.190. Μεταβολή A_{corr} για $H_\delta/D=0,3$ και $Y/D=-0,5$



Διάγραμμα 5.191. Κατανομές I_b , I_r για $H_d/D=0.3$ και $X/D=4$



Διάγραμμα 5.192. Κατανομές I_b , I_r για $H_d/D=0.3$ και $X/D=8$



Διάγραμμα 5.193. Κατανομές I_b , I_r για $H_d/D=0.3$ και $X/D=16$

Σχολιασμός διαγραμμάτων για κύλινδρο $D=30$ mm, $Re= 6000$

- $H/D=3.5$ (Κέντρο)

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 5.104, 5.105, 5.106 η μεταβολή του μπλε και του κόκκινου χρώματος είναι όμοια. Στην θέση $Y/D = 0,5$ το κόκκινο χρώμα είναι 35% περισσότερο από το μπλε στις πρώτες δύο διαμέτρους πίσω από τον κύλινδρο. Μετά τις δυο πρώτες διαμέτρους μεταβάλλονται και τα δυο χρώματα με τον ίδιο ρυθμό και από την θέση $X/D=6$ ελαττώνονται και ο ρυθμός πτώσης είναι σχεδόν ίδιος και για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0,5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0,5$). Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα 5.107, 5.108, 5.109 όπου παρουσιάζεται ο λόγος του κόκκινου χρώματος ως προς το μπλε για τις παραπάνω θέσεις.

Τα διαγράμματα 5.110, 5.111, 5.112 μας δίνουν την τυπική απόκλιση του μπλε και του κόκκινου χρώματος στον απόρο του κυλίνδρου. Όπως δείχνουν τα γραφήματα: α) ο ρυθμός πτώσης είναι ίδιος και για τα δύο χρώματα και στις τρεις θέσεις, β) το κόκκινο χρώμα έχει συντελεστή διάχυσης μεγαλύτερο από το μπλε γι αυτό το λόγο η διακύμανση είναι μικρότερη.

Στα διαγράμματα 5.113, 5.114, 5.115 φαίνεται ο συντελεστής ανάμειξης για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0.5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0.5$) πίσω από τον κύλινδρο. Όπως δείχνουν τα γραφήματα μετά από τέσσερις διαμέτρους ($X/D=8$) ο συντελεστής ανάμειξης τείνει στο μηδέν.

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.116, 5.117, 5.118 ο συντελεστής συσχέτισης φθίνει και στα τρία Y/D μέχρι την θέση $X/D=10$, μετά παρουσιάζει ανοδικές τάσεις που σημαίνει ότι οι δίνες δεν είναι εμφανείς σε όλο το μήκος του απορεύματος και η τύρβη έχει προλάβει μετά τα 10D πίσω από τον κύλινδρο να ομογενοποιήσει τα δύο συστατικά.

Τα διαγράμματα 5.119, 5.120 και 5.121 δίνουν την κατανομή του μπλε και του κόκκινου χρώματος στο $X/D=4$, $X/D=8$ και $X/D=16$. Όπως είναι φανερό το προφίλ των δυο χρωμάτων έχει γίνει επίπεδο 16D πίσω από τον κύλινδρο.

- $H_f/D = 0.3$ (διεπιφάνεια)

Στις θέσεις $Y/D = 0,5$ και $Y/D=0$ το κόκκινο χρώμα είναι 30% και 40% περισσότερο από το μπλε στην θέση $X/D=3$ πίσω από τον κύλινδρο. Ανάλογη συμπεριφορά έχει και η μεταβολή του μπλε χρώματος σε σχέση με το κόκκινο για την θέση $Y/D = - 0,5$ όπου είναι 17% πιο πολύ από το κόκκινο στην θέση $X/D=8$ (διαγράμματα 5.122, 5.123, 5.124). Μετά τις οκτώ πρώτες διαμέτρους μεταβάλλονται και τα δυο χρώματα με τον ίδιο ρυθμό και από την θέση $X/D=9$ ελαττώνονται και ο ρυθμός πτώσης είναι ίδιος και για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0,5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0,5$).

Στα διαγράμματα 5.131, 5.132, 5.133 φαίνεται ο συντελεστής ανάμειξης για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0.5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0.5$) πίσω από τον κύλινδρο. Όπως δείχνουν τα γραφήματα 5.131 & 5.132 ο συντελεστής ανάμειξης διατηρείται αρνητικός που σημαίνει ότι οι διακυμάνσεις του μπλε και του κόκκινου χρώματος διατηρούν αντίθετο πρόσημο κατά μήκος του απόρου πράγμα που δεν συμβαίνει στην θέση $Y/D=-0.5$ που μετά από δώδεκα διαμέτρους ο συντελεστής ανάμειξης παίρνει θετικές τιμές.

Από τα προφίλ των δυο χρωμάτων στις θέσεις $X/D=4$, $X/D=8$ και $X/D=16$ είναι φανερό ότι μετά από 16D οι κατανομές των δυο χρωμάτων είναι σχεδόν επίπεδες (διαγράμματα 5.137, 5.138, 5.139).

- $H_f/D = 0.4$ (διεπιφάνεια)

Στην θέση αυτή η διαφορά μεταξύ κόκκινου και μπλε χρώματος μικραίνει. Έτσι για $Y/D=0.5$ το κόκκινο χρώμα είναι 20% πιο πολύ απ το μπλε στην θέση $X=4D$ πίσω από τον κύλινδρο. Ανάλογη συμπεριφορά έχει και η μεταβολή του μπλε χρώματος σε σχέση με το κόκκινο για την θέση $Y/D = - 0,5$ όπου είναι 25% πιο πολύ από το κόκκινο μέχρι την θέση $X/D=6$ (διαγράμματα 5.140, 5.142). Στην θέση $Y/D=0$ (διάγραμμα 5.141 το κόκκινο χρώμα είναι 25% πιο πολύ από το μπλε στο $X/D=3$. Μετά τις εννέα πρώτες διαμέτρους μεταβάλλονται και τα δυο χρώματα με τον ίδιο τρόπο, ελαττώνονται και ο ρυθμός πτώσης είναι ίδιος και για τις τρεις θέσεις ($Y/D=0,5$, $Y/D=0$, $Y/D=-0,5$).

). Και σε αυτή την θέση το προφίλ των δυο χρωμάτων γίνεται επίπεδο στις δεκαέξι διαμέτρους ($X/D=16$) (διαγράμματα 5.155, 5.156, 5.157).

- $H_0/D=0.2$ (δάπεδο)

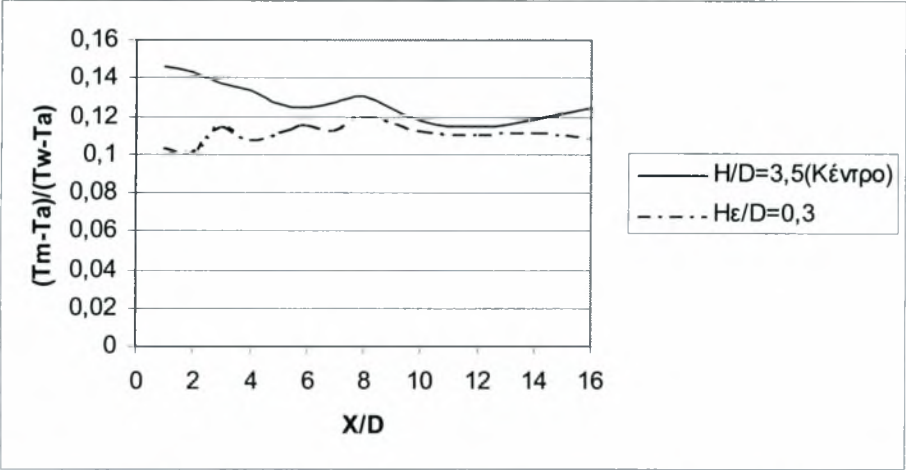
Στην θέση αυτή παρατηρούμε από τα διαγράμματα 5.158, 5.159 και 5.160 ότι το μπλε χρώμα είναι περισσότερο από το κόκκινο μέχρι και $X/D=6$. Μετά από τις έξι διαμέτρους και τα δύο χρώματα φθίνουν.

Από τα διαγράμματα 5.173, 5.174 και 5.175 βλέπουμε ότι μετά από 8D πίσω από τον κύλινδρο η κατανομή των δυο χρωμάτων ομαλοποιείται.

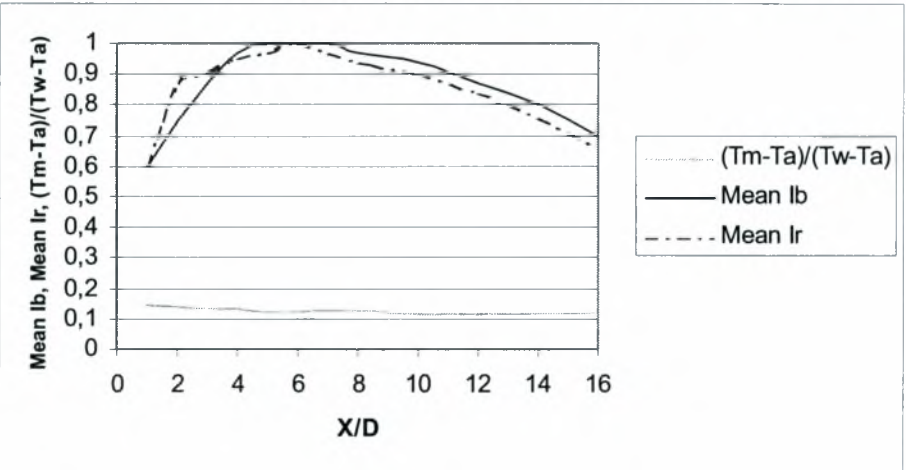
- $H_0/D=0.3$ (δάπεδο)

Το διάγραμμα 5.176 δείχνει ότι στην θέση $Y/D=0.5$ το κόκκινο χρώμα είναι 10% πιο πολύ από το μπλε σε όλο το μήκος του απορεύματος. Στην θέση $Y/D=0$ (διάγραμμα 5.177) το μπλε χρώμα είναι 5% περισσότερο από το κόκκινο μέχρι τις πέντε πρώτες διαμέτρους και στην θέση $Y/D=-0.5$ (διάγραμμα 5.178) το μπλε χρώμα είναι 25% περισσότερο από το κόκκινο στο $X/D=3$. Μετά από το $X/D=6$ και οι δυο ουσίες φθίνουν .

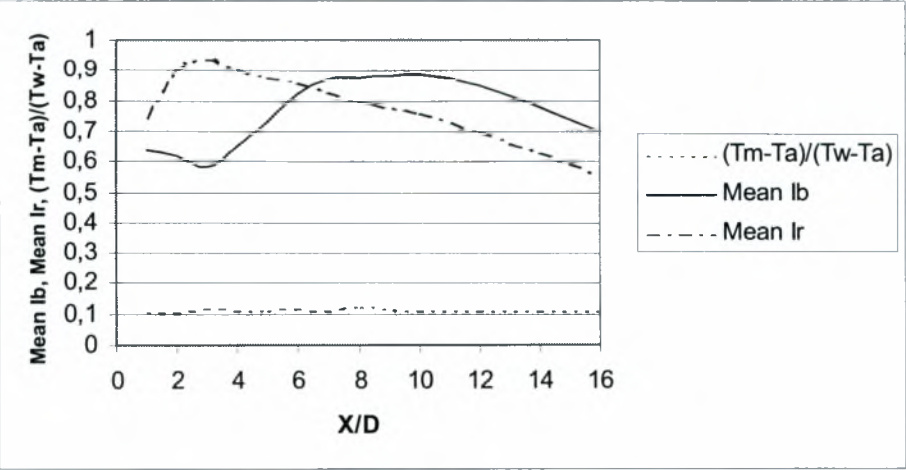
5.2.3 Μεταβολή μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της θερμοκρασίας κοντά στην διεπιφάνεια και στο κέντρο της υδροσήραγγας για κύλινδρο D=30mm και Y/D=0 (Κεντρική γραμμή).



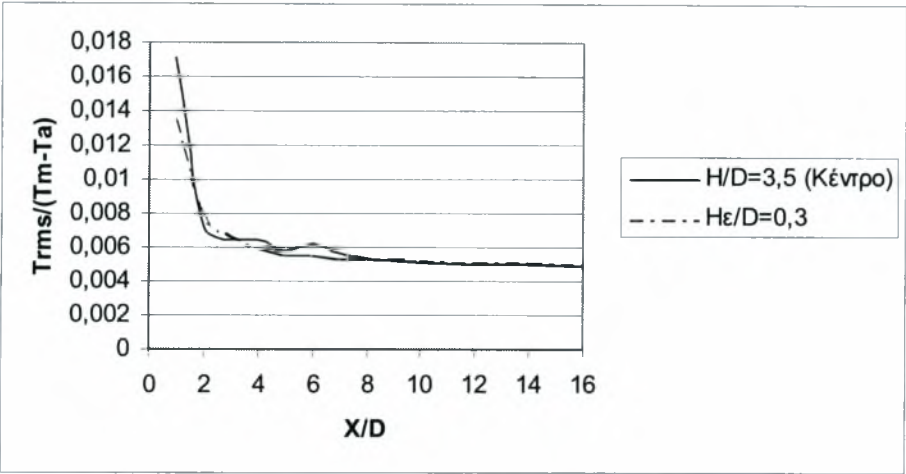
Διάγραμμα 5.194. Κατανομές θερμοκρασιών για $H/D=3,5$ (Κέντρο), $H_\epsilon/D=0,3$ και $Y/D=0$



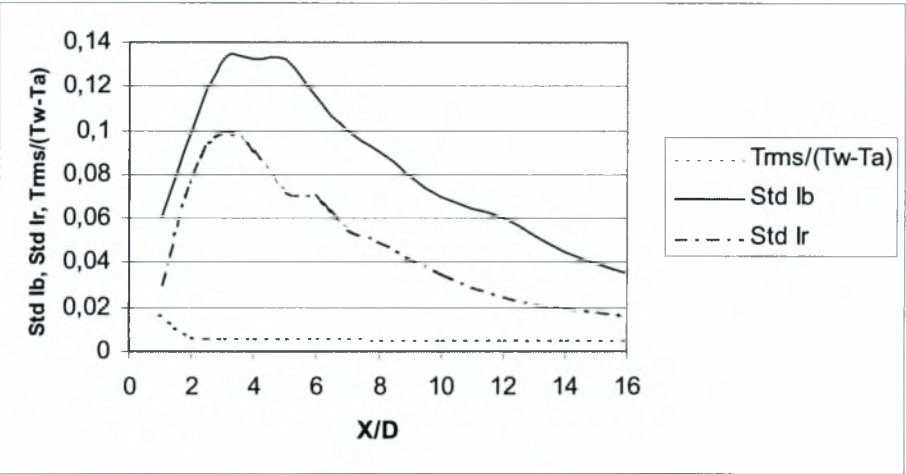
Διάγραμμα 5.195. Κατανομές I_b , I_r και T_m για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



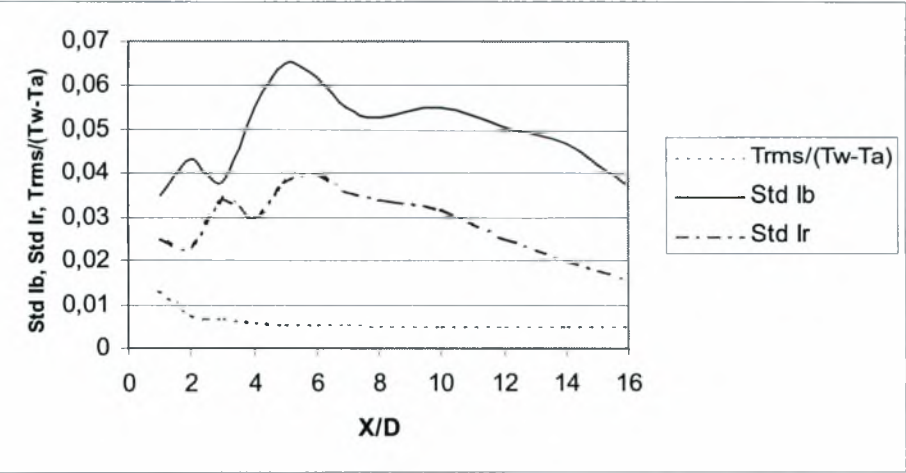
Διάγραμμα 5.196. Κατανομές I_b , I_r και T_m για $H_\epsilon/D=0,3$ και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.197. Κατανομές T_{rms} για $H/D=3,5$ (Κέντρο), $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.198. Κατανομές $Std Ib$, $Std Ir$ και T_{rms} για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



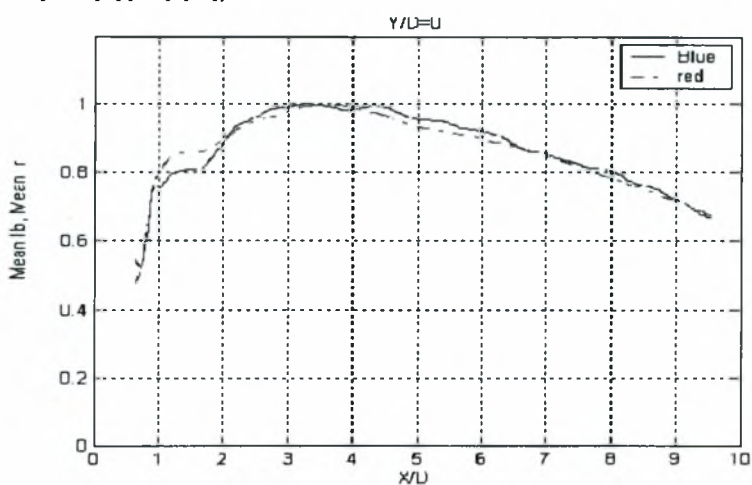
Διάγραμμα 5.199. Κατανομές $Std Ib$, $Std Ir$ και T_{rms} για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται διαγράμματα μεταβολής μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της θερμοκρασίας κοντά στην διεπιφάνεια και στο κέντρο της υδροσήραγγας.

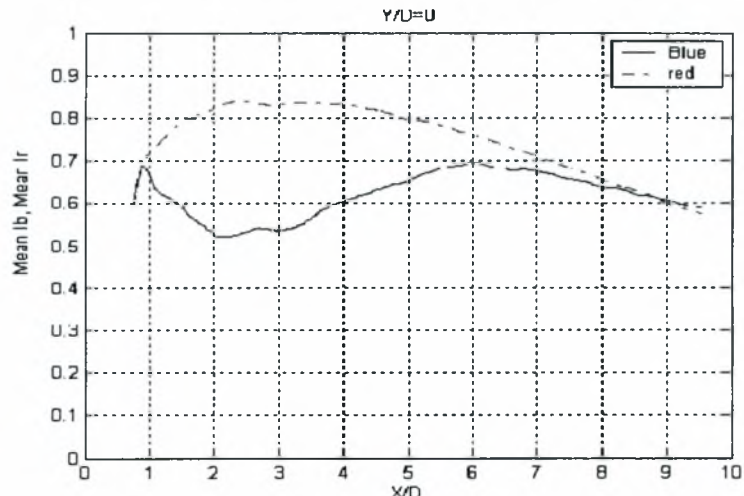
Συγκρίνοντας το διάγραμμα 5.194 με τα διαγράμματα 5.195 και 5.196 παρατηρούμε ότι η κατανομή της μέσης τιμής της θερμοκρασίας δεν είναι όμοια με την κατανομή της μέσης τιμής έντασης ακτινοβολίας των δύο χρωμάτων για τις δύο θέσεις $H_e/D=0,3$ και $H/D=3,5$ (Κέντρο), ειδικότερα μετά την θέση $X/D=6$. Αυτό ίσως συμβαίνει γιατί στην περίπτωση του θερμαινόμενου κυλίνδρου έχουμε εκροή θερμότητας από όλη την έκταση της επιφάνειας του, ενώ όταν ο κύλινδρος είναι μη θερμαινόμενος οι ουσίες εκρέουν μόνο από δύο σημεία πάνω στην επιφάνεια.

Από τα διαγράμματα 5.197, 5.198 και 5.199 παρατηρούμε ότι η τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας ελαττώνεται με ρυθμό μικρότερο από αυτόν που ελαττώνεται η τυπική απόκλιση των δύο χρωμάτων.

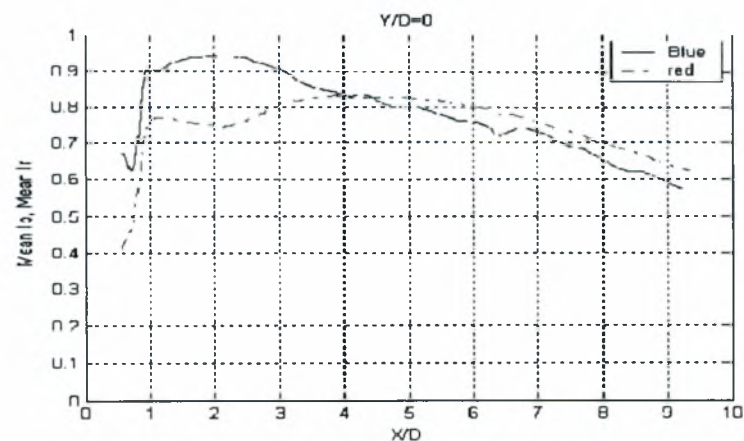
5.2.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται στο κέντρο, στην διεπιφάνεια και το στερεό όριο για κύλινδρο $D=50\text{mm}$ και $Y/D=0$ (Κεντρική γραμμή).



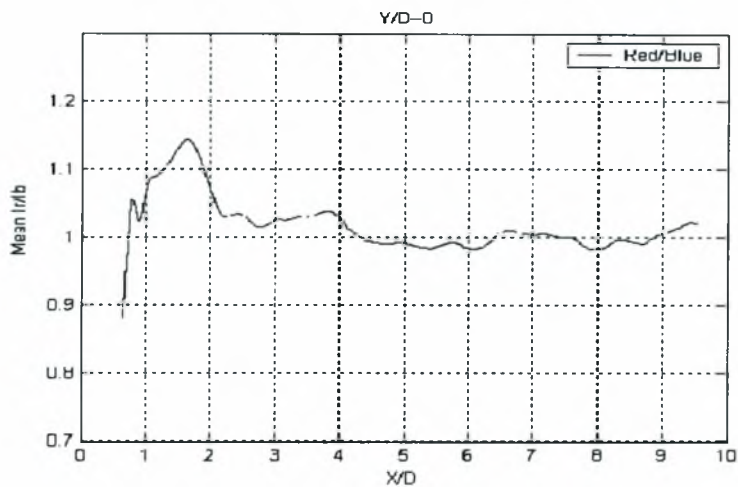
Διάγραμμα 5.200. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



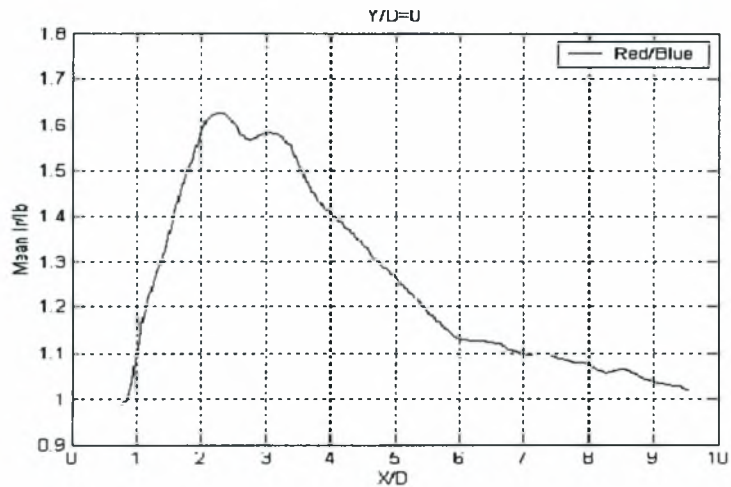
Διάγραμμα 5.201. Κατανομές I_b , I_r για $H_c/D=0,3$ και $Y/D=0$



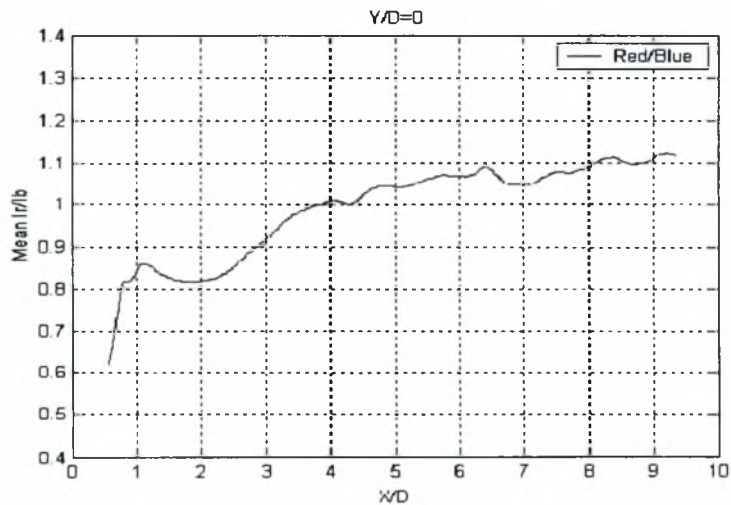
Διάγραμμα 5.202. Κατανομές I_b , I_r για $H_b/D=0,3$ και $Y/D=0$



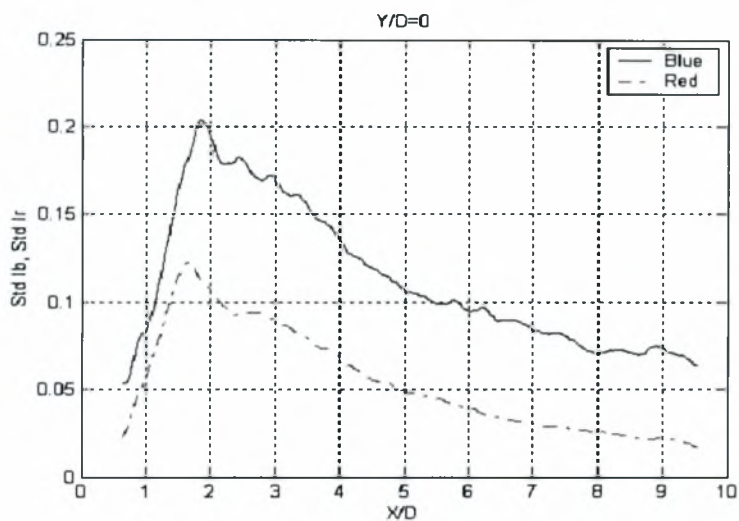
Διάγραμμα 5.203. Κατανομή (Irl/Ib) για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



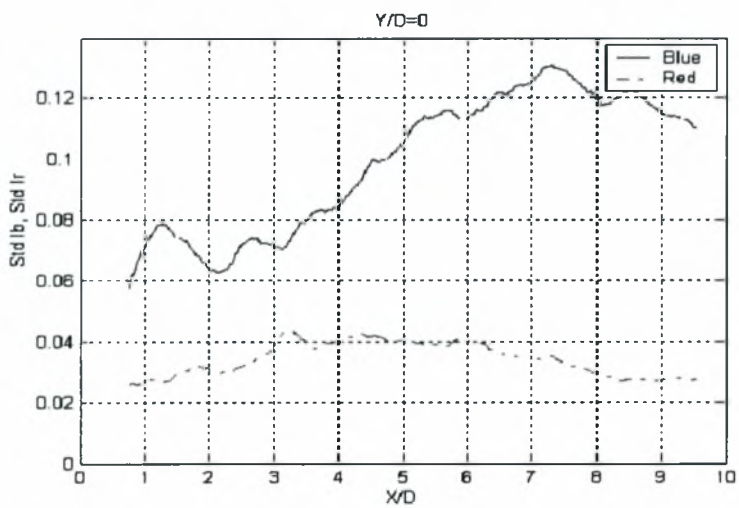
Διάγραμμα 5.204. Κατανομή (Irl/Ib) για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



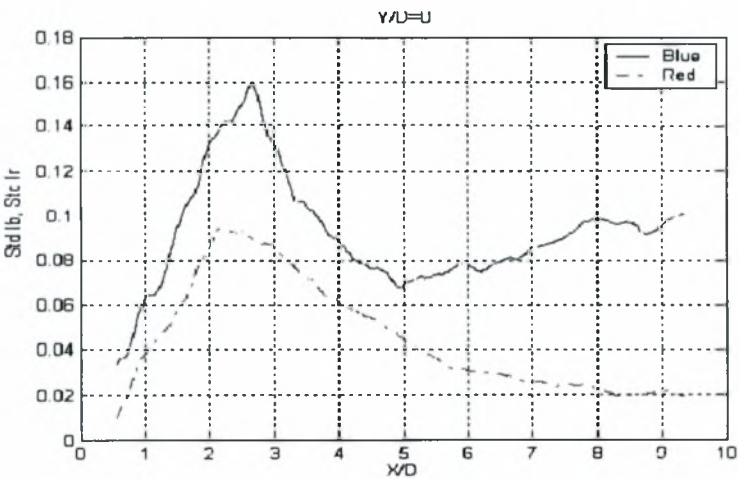
Διάγραμμα 5.205. Κατανομή (Irl/Ib) για $H_g/D=0,3$ και $Y/D=0$



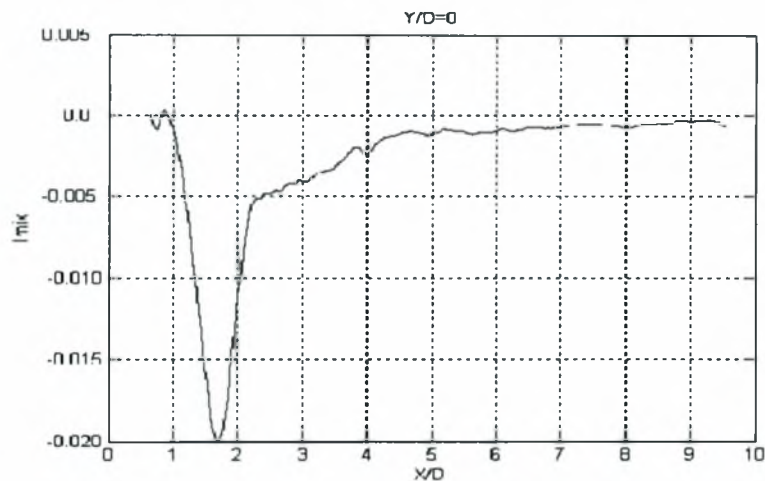
Διάγραμμα 5.206. Κατανομές Std Ib, Std Ir για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



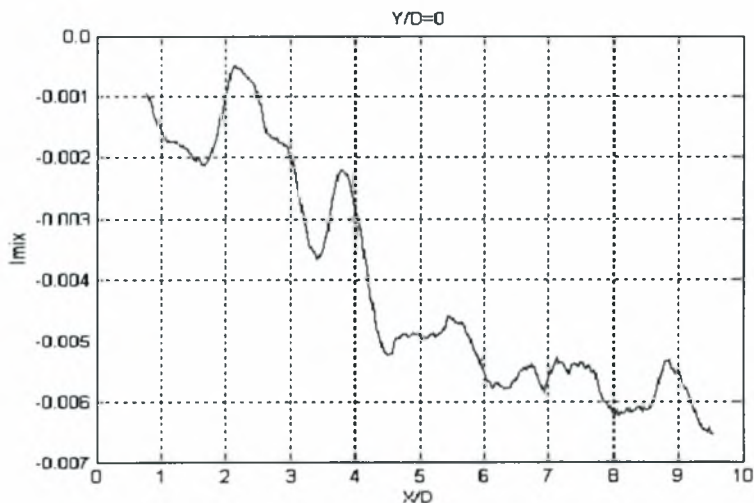
Διάγραμμα 5.207. Κατανομές Std Ib, Std Ir για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0$



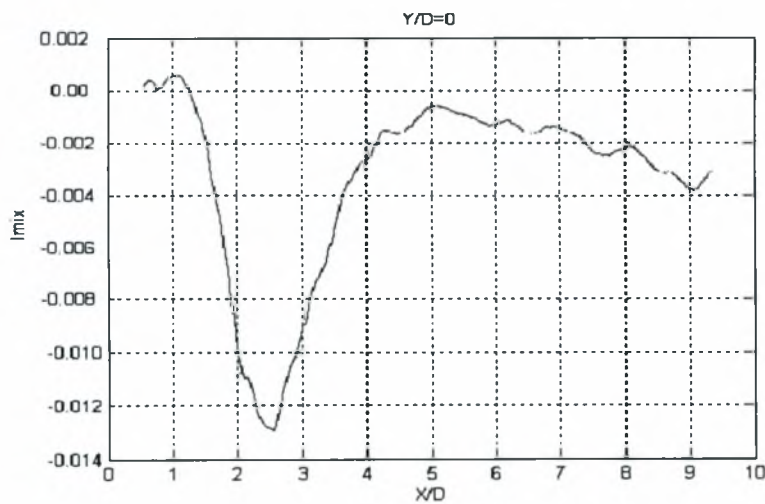
Διάγραμμα 5.208. Κατανομές Std Ib, Std Ir για $H_b/D=0,3$ και $Y/D=0$



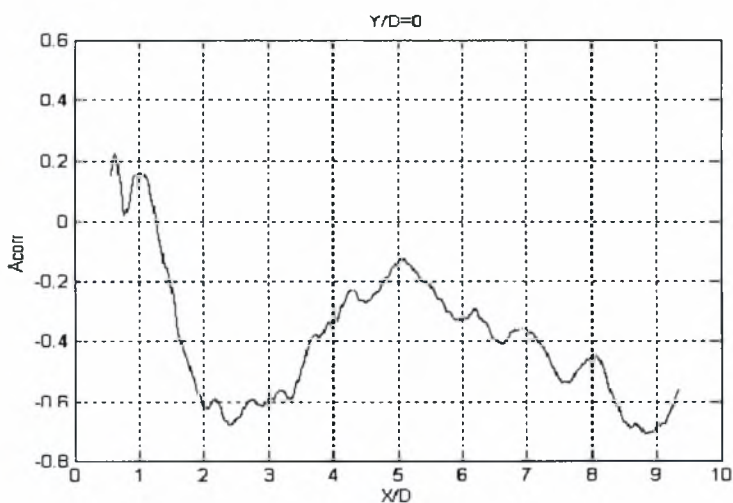
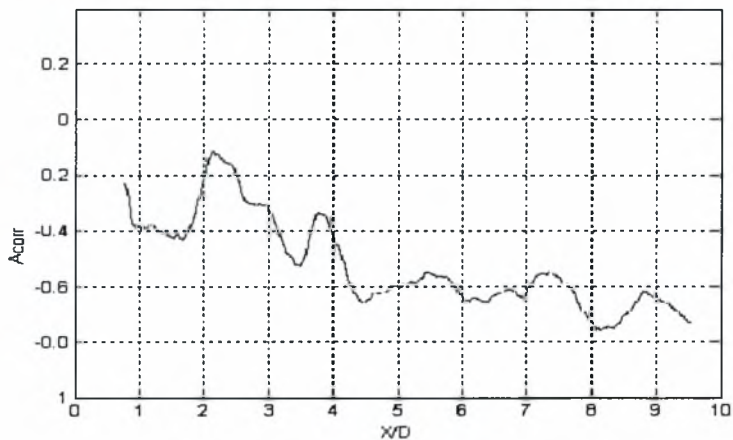
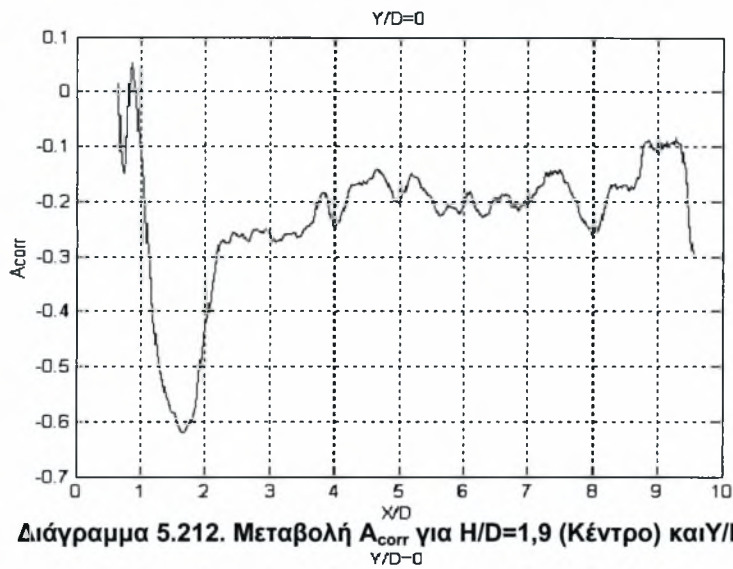
Διάγραμμα 5.209. Μεταβολή I_{mix} για $H/D=1,9$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



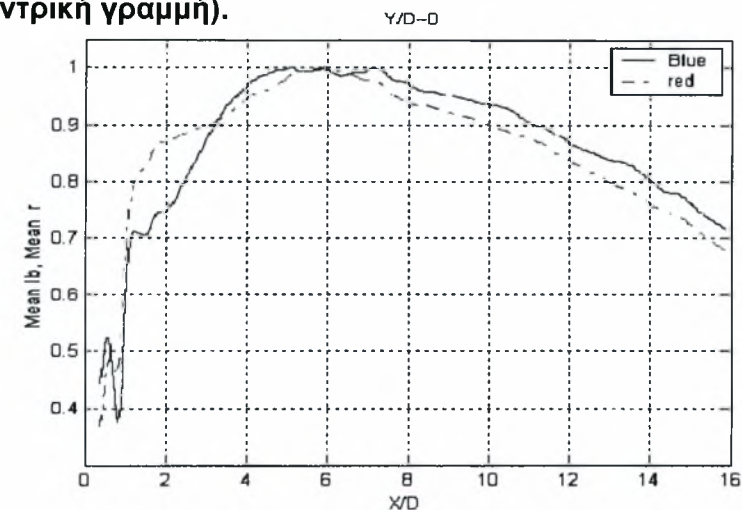
Διάγραμμα 5.210. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



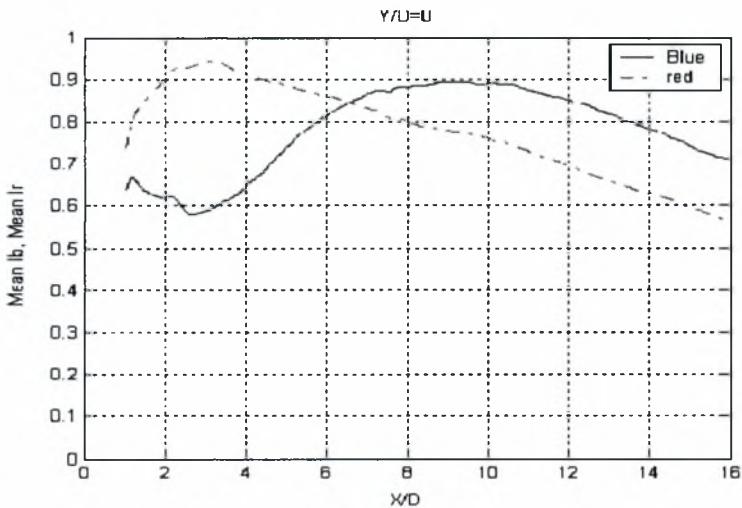
Διάγραμμα 5.211. Μεταβολή I_{mix} για $H_g/D=0,3$ και $Y/D=0$



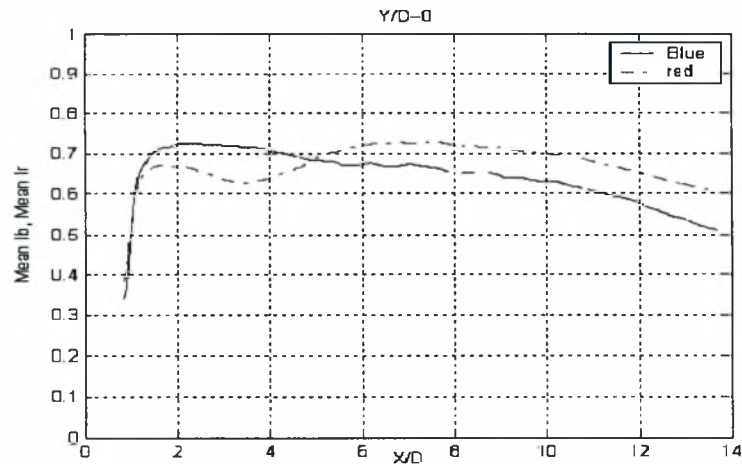
5.2.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται στο κέντρο, στην διεπιφάνεια και το στερεό όριο για κύλινδρο D=30mm και Y/D=0 (Κεντρική γραμμή).



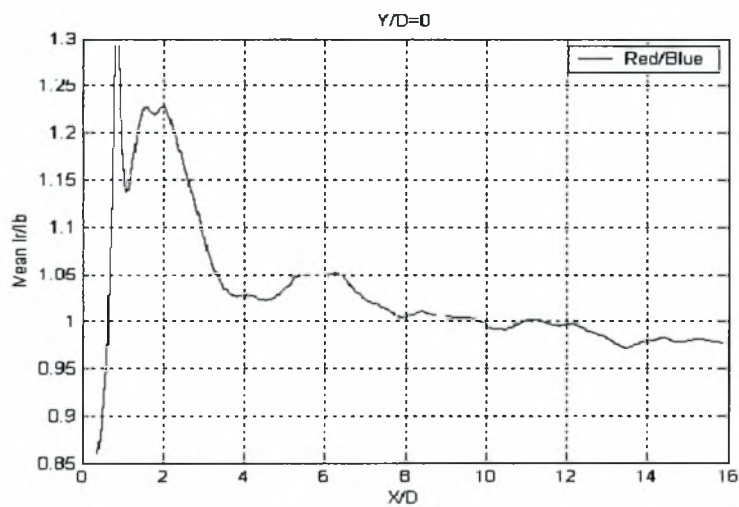
Διάγραμμα 5.215. Κατανομές I_b , I_r για $H/D=3.5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



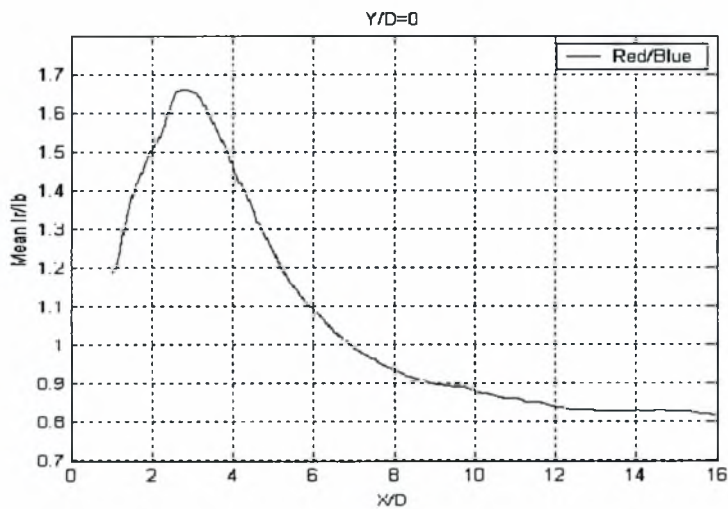
Διάγραμμα 5.216. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



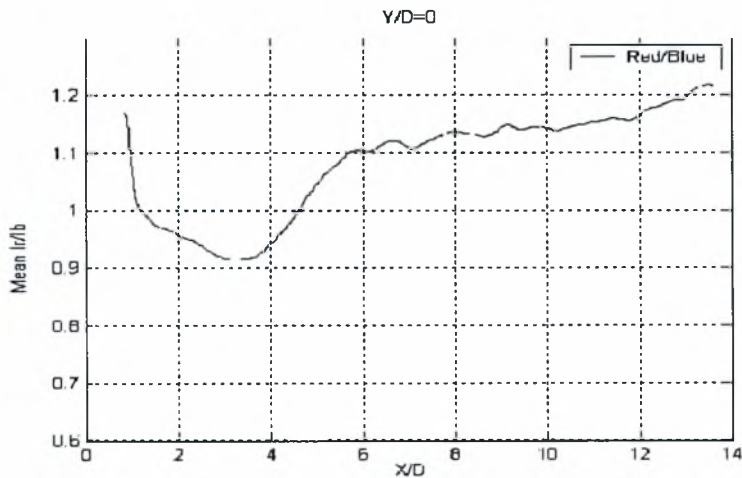
Διάγραμμα 5.217. Κατανομές I_b , I_r για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



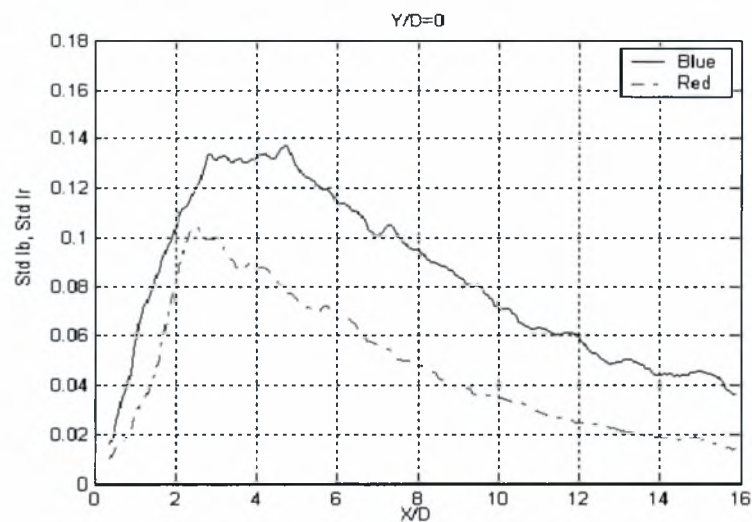
Διάγραμμα 5.218. Κατανομή (I_r/I_b) για $H/D=3.5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



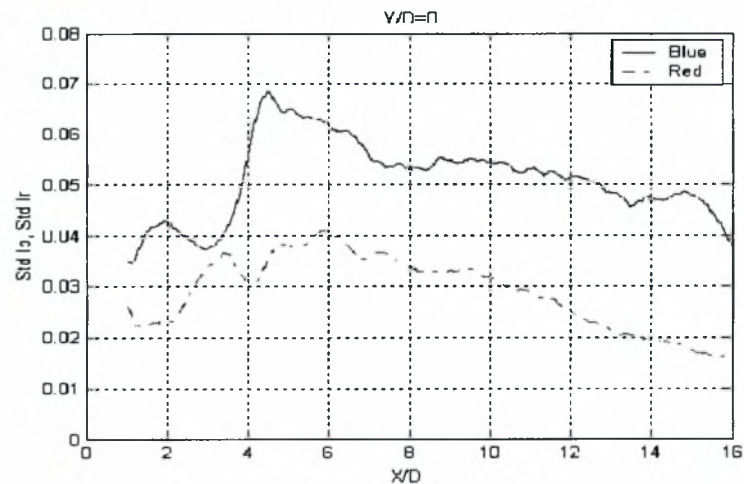
Διάγραμμα 5.219. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



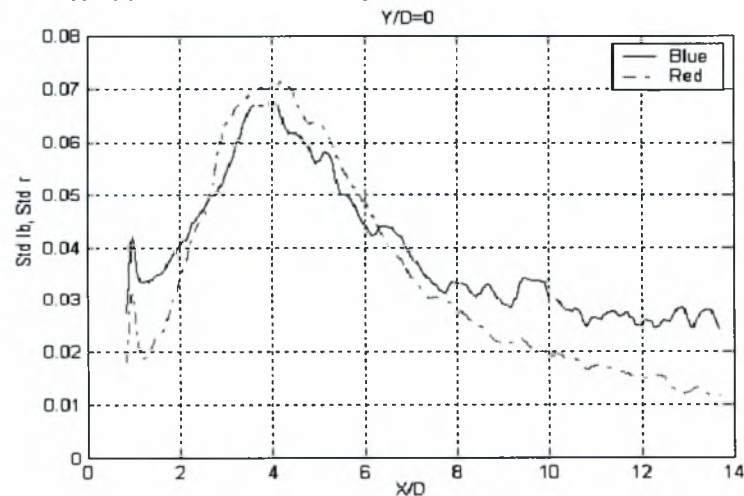
Διάγραμμα 5.220. Κατανομή (I_r/I_b) για $H_b/D=0,3$ και $Y/D=0$



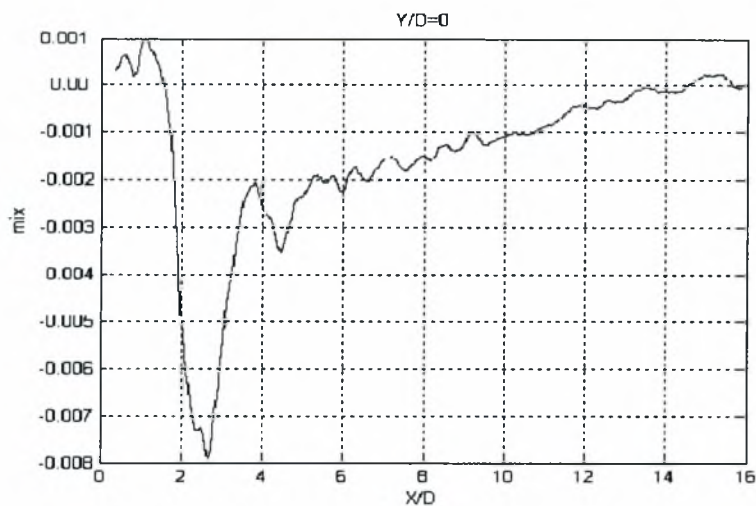
Διάγραμμα 5.221. Κατανομές Std Ib, Std Ir για H/D=3.5 (Κέντρο) και Y/D=0



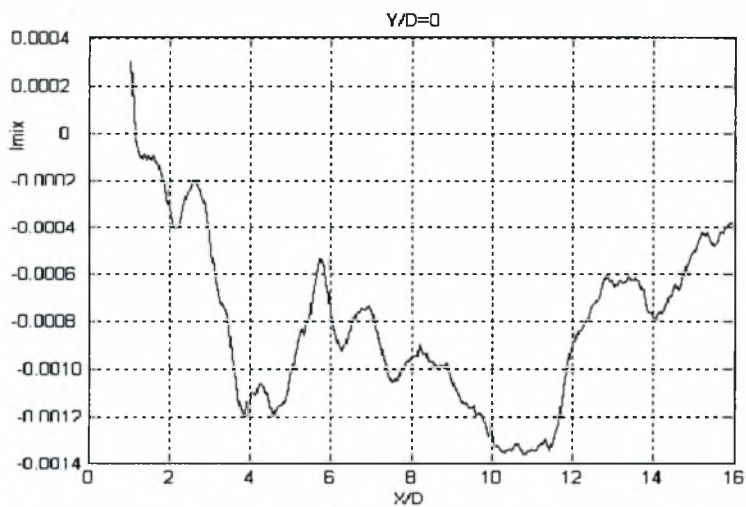
Διάγραμμα 5.222. Κατανομές Std Ib, Std Ir για Hc/D=0.3 και Y/D=0



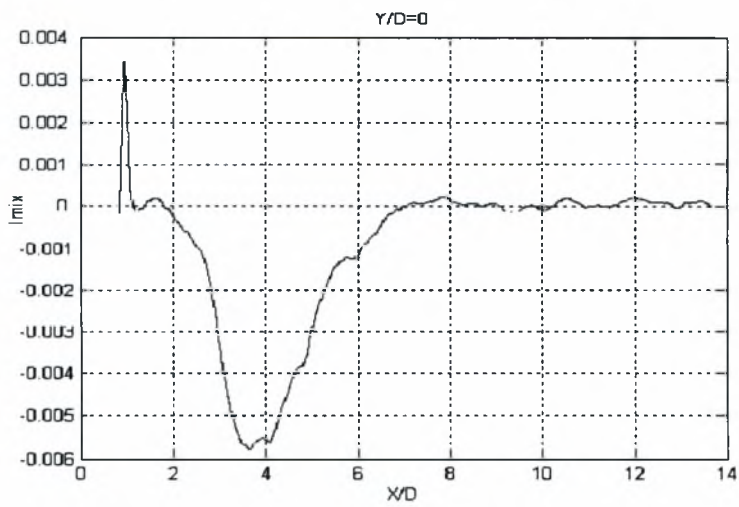
Διάγραμμα 5.223. Κατανομές Std Ib, Std Ir για Hd/D=0.3 και Y/D=0



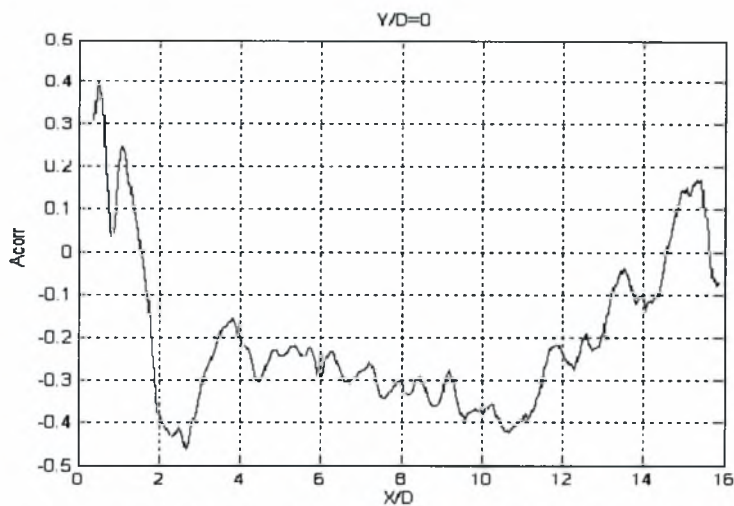
Διάγραμμα 5.224. Μεταβολή I_{mix} για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



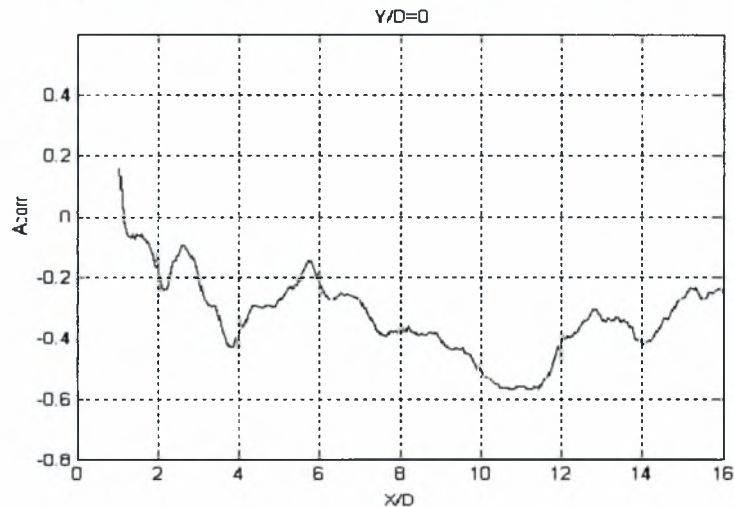
Διάγραμμα 5.225. Μεταβολή I_{mix} για $H_e/D=0,3$ και $Y/D=0$



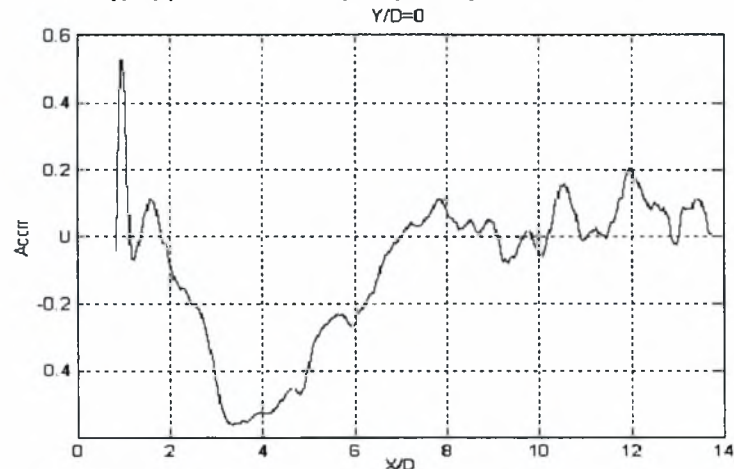
Διάγραμμα 5.226. Μεταβολή I_{mix} για $H_g/D=0,3$ και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.227. Μεταβολή A_{corr} για $H/D=3,5$ (Κέντρο) και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.228. Μεταβολή A_{corr} για $H_t/D=0,3$ και $Y/D=0$



Διάγραμμα 5.229. Μεταβολή A_{corr} για $H_b/D=0,3$ και $Y/D=0$

Σχολιασμός διαγραμμάτων των κεφαλαίων 5.2.4 και 5.2.5

Στο διάγραμμα 5.200 (κέντρο υδροσήραγγας) φαίνεται ότι τα δυο χρώματα έχουν την ίδια συμπεριφορά και σχεδόν ίδιες τιμές. Από την σύγκριση των διαγραμμάτων 5.201 και 5.202 προκύπτει ότι κοντά στην διεπιφάνεια ($H_e/D=0,3$) η συγκέντρωση του κόκκινου χρώματος (I_R) διατηρεί υψηλότερες τιμές από το μπλε ενώ κοντά στο στερεό όριο ($H_b/D=0,3$) το μπλε χρώμα αρχικά και για τέσσερις διαμέτρους πίσω από τον κύλινδρο έχει υψηλότερες τιμές από το κόκκινο. Όμοια συμπεριφορά έχουμε και όταν $D=30$ mm (διαγράμματα 5.215, 5.216, 5.217). Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 5.202 και 5.217 παρατηρείτε ότι ενώ και για τους δυο κυλίνδρους οι τιμές της συγκέντρωσης για το μπλε και το κόκκινο χρώμα στον απόρου είναι όμοιες, ο κύλινδρος $D=30$ mm παρουσιάζει μικρότερες τιμές από αυτές που παίρνει ο $D=50$ mm. Μπορούμε να πούμε λοιπόν ότι όσο μικρότερος είναι ο κύλινδρος δηλαδή όσο μικρότερος είναι ο λόγος D/δ (δ είναι το πάχος του οριακού στρώματος) τόσο πιο γρήγορα γίνεται η διάλυση των δύο χρωμάτων.

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων 5.203, 5.204, 5.205, 5.218, 5.219 και 5.220 προκύπτει ότι η διεπιφάνεια οδηγεί σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις λόγω του ότι δεν υπάρχει τόσο μεγάλη στροβιλότητα όπως κοντά στο στερεό όριο (οριακό στρώμα στο δάπεδο) ώστε να γίνει γρήγορη διάλυση των δύο ουσιών. Επίσης συγκρίνοντας τα διαγράμματα 5.204 και 5.219 παρατηρούμε ότι η εξομάλυνση στον απόρου είναι πιο αργή για τον μεγάλο κύλινδρο ($D=50$ mm).

Στα διαγράμματα 5.206 (κέντρο) και 5.208 (δάπεδο) οι τιμές της τυπικής απόκλισης του μπλε χρώματος φθίνουν μετά από 2 - 3 διαμέτρους πίσω από τον κύλινδρο σε αντίθεση με την διεπιφάνεια που έχουμε αύξηση (διάγραμμα 5.207).

Ο συντελεστής ανάμειξης (I_{mix}) παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά και στους δύο κυλίνδρους. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.210 και 5.225 στην διεπιφάνεια ($H_e/D=0,3$) ο I_{mix} διατηρεί αρνητικές τιμές πράγμα που σημαίνει ότι έχουμε περίσσεια ή έλλειμμα ενός εκ των δύο ουσιών σχεδόν πάντα. Η σύγκριση των διαγραμμάτων 5.209 με 5.211 και 5.224 με 5.226 δείχνει ότι κοντά στο στερεό όριο το μήκος της περιοχής σχηματισμού δίνης L_f (formation region) γίνεται μεγαλύτερο σε σχέση με την ελεύθερη ροή.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Επιβεβαιώθηκε η σημαντική επίδραση των τοιχωμάτων και της διεπιφάνειας στον σχηματισμό οργανωμένων δινών και στην ανάμειξη συγκέντρωσης.
- Έγινε αντιληπτή η τροποποίηση στην επίτευξη αυτοδιατήρησης (self preservation) (κάτι ανάλογο σαν την πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή σε σωλήνα ή σε τυρβώδη δέσμη) του απορεύματος που προκαλείται από τοίχωμα και από διεπιφάνεια.
- Για τον κύλινδρο $D=50\text{mm}$ ($Re=10000$) η εκροή δινών κοντά στην διεπιφάνεια αρχίζει στην θέση $H_e/D=0,4$ με συχνότητα απόσπασης δινών από την πάνω και από την κάτω πλευρά του κυλίνδρου να είναι $1,01\text{ Hz}$, ενώ η εκροή των δινών κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας αρχίζει στην θέση $H_b/D=0,3$ με συχνότητα απόσπασης δινών από την πάνω και από την κάτω πλευρά του κυλίνδρου να είναι $0,88\text{ Hz}$. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στην διεπιφάνεια επικρατούν τέτοιες ροϊκές συνθήκες ώστε η περιοδική απόσπαση και διάχυση των δινών να είναι ταχύτερη από αυτή που συμβαίνει στο κέντρο και το δάπεδο της υδροσήραγγας.
- Για τον κύλινδρο $D=30\text{mm}$ ($Re=6000$) η εκροή δινών κοντά στην διεπιφάνεια αρχίζει στην θέση $H_e/D=0,4$ με συχνότητα απόσπασης δινών από την πάνω και από την κάτω πλευρά του κυλίνδρου να είναι $1,31\text{ Hz}$, ενώ η εκροή των δινών κοντά στο δάπεδο της υδροσήραγγας αρχίζει στην θέση $H_b/D=0,3$ με συχνότητα απόσπασης δινών από την πάνω και από την κάτω πλευρά του κυλίνδρου να είναι $1,31\text{ Hz}$. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στην διεπιφάνεια επικρατούν τέτοιες ροϊκές συνθήκες ώστε η περιοδική απόσπαση και διάχυση των δινών να είναι πιο αργή από αυτή του κέντρου και ίδια με αυτή του δαπέδου της υδροσήραγγας.
- Πιστοποιήθηκε ότι το πάχος του οριακού στρώματος δ σχετικά με το D είναι ένας κρίσιμος παράγοντας, επειδή αλλάζει η συχνότητα εκροής των οργανωμένων δομών.

- Η διεπιφάνεια οδηγεί σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις λόγω του ότι η ένταση των οργανωμένων δομών είναι πιο αδύνατη από ότι στο κέντρο. Επίσης δεν υπάρχει τόσο μεγάλη στροβιλότητα όπως κοντά στο στερεό όριο (οριακό στρώμα στο δάπεδο) ώστε να γίνει γρήγορη διάλυση των δύο ουσιών.
- Κοντά στο στερεό όριο το μήκος της περιοχής σχηματισμού δίνης L_f (formation region) γίνεται μεγαλύτερο σε σχέση με την ελεύθερη ροή, κάτι αντίστοιχο προκαλεί και η μείωση του αριθμού Re (σχ. 2.20 σελ. 25).
- Οι ευρείες μεταβολές που προκαλούνται στο πεδίο ροής και συγκέντρωσης οφείλονται κατά ένα μέρος και στο γεγονός ότι στην διεπιφάνεια τα σημεία αποκόλλησης στα κυλινδρικά σώματα αλλάζουν θέση, σχετικά με την θέση τους στην ομοιόμορφη συμμετρική ροή στο κέντρο της υδροσήραγγας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παπαιωάννου Α.Θ., “Μηχανική των Ρευστών”, Τόμος Ι & ΙΙ
- [2] Yang Wen – Jei, “Handbook of Flow Visualization”
- [3] Zdravkovich M. M., “Flow Around Circular Cylinders”
- [4] Chang K. P., “Separation of flow”
- [5] Σταπουντζής Ε., “Σημειώσεις Μηχανικής Ρευστών ΙΙ”, ΠΘ, ΤΜΜΒ, 2000
- [6] Σταπουντζής Ε., “Σημειώσεις Κλασικής και Βιομηχανικής Αεροδυναμικής”, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1995.
- [7] Kieft René, “Mixed convection behind a heated cylinder”, PhD Thesis, 2000.
- [8] Figliola R. S. και Beasley D. E., “Theory and Design for Mechanical Measurements”, 2000.
- [9] Shlien J. D., “Instantaneous concentration field measurement technique from flow visualization photographs”, Experiments in Fluids, Τομ. 10, σελ. 541 – 546, 1988.
- [10] Dimas A. Athanassios., “Free – surface waves generation by a fully submerged wake”, Wave Motion, Τομ. 27, σελ. 43 – 54, 1998.
- [11] Dimas A. A. και Triantafyllou S. G., “Nonlinear interaction of shear flow with a free surface”, Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 260, σελ. 211 – 246, 1994.
- [12] Dimas A. A. και Triantafyllou S. G., “Shear – Flow / Free – Surface Interaction in a Density – Stratified Fluid”, πρακτικά του International Offshore and Polar Engineering Conference, Τομ. ΙΙΙ, σελ. 479 – 486, 1993.

- [13] Dimas A. A. και Triantafyllou S. G, "Free – Surface signature of submerged shear flow", πρακτικά του International Offshore and Polar Engineering Conference, Τομ. III, σελ. 253 – 261, 1992.
- [14] Madnia K. C και Bernal P. L., "Interaction of a turbulent round jet with the free surface", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 261, σελ. 305 – 332, 1994.
- [15] Helgesen K. J και Matteson J. M., "Particle mixing and diffusion in the turbulent wake of cylinder arrays", Experiments in Fluids, Τομ. 10, σελ. 333 – 340, 1991.
- [16] Komori S., Nagaosa R. και Murakami Y., "Turbulence structure and mass transfer across a sheared air – water interface in wind – driven turbulence", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 249, σελ. 161 – 183, 1993.
- [17] Komori S., "Surface – renewal motions and mass transfer across gas – liquid interfaces in open – channel flows", Phase – Interface Phenomena in Multiphase Flow (ed. G. F. Hewitt, F. Mayinger & J. R. Riznic), σελ. 31 – 40, 1991.
- [18] Matsumura M. και Antonia A. R., "Momentum and heat transport in the turbulent intermediate wake of a circular cylinder", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 250, σελ. 651 – 668, 1993.
- [19] Goodman L. Wesley, "Modification of the Karman – Vortex Street in the Freestream", AIAA Journal, Τομ. 24, Ap. 9, σελ. 1556 – 1557, 1986.
- [20] Figueiredo R. A. και Viegas X. D., "External forced convection around a circular cylinder near a plane boundary", International Journal of Heat and Mass Transfer, Τομ. 31, Ap. 1, σελ. 47 – 53, 1988.
- [21] Sideridis A. G, Kastrinakis G. E. και Nychas G. S., "Contitional Analysis of Turbulent Heat Transport in a quasi two – dimensional Wake

- Interacting with a Boundary Layer“, International Journal of Heat and Mass Transfer, Τομ. 42, σελ. 3481 – 3494, 1999.
- [22] Xenopoulos G., Stapountzis H., Salpistis C., και Goulas A., “ The wake of a heated circular cylinder in pitching oscillations “, Turbulence, Heat and Mass Transfer, (K. Hanjalic, Ed.), Begell House Publ. ISBN 1-56700-040-1, σελ. 83 – 90, 1995.
- [23] Xu J. S., Zhou Y., “Effect of a streamwise oscillating cylinder on a downstream cylinder wake“.
- [24] M. Gad-el-HaK, “The water towing tank as an experimental facility “, Experiments in Fluids 5, σελ 289 – 297, 1987.
- [25] Hesselink L., “Digital image processing in flow visualization“, Ann. Rev. Fluid Mech. 20, σελ 421 – 485, 1988.
- [26] Merzirch W., “Flow visualization and digital image processing“, von karman Institute for fluid dynamics, 1986.
- [27] Lee T. J., Call L. D., Lawson E. R., Clements E. W. και Hord E. D. “A video image analysis system for concentration measurements and flow visualization in building wakes“, Atmospheric Environment, Τομ. 25A, No. 7, σελ 1211 – 1225, 1991.
- [28] Tokumaru T. P και Dimotakis E. P., “Rotary oscillation control of a cylinder wake“, Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 224, σελ. 77 – 90, 1991.
- [29] Stapountzis H., Westerweel J., Bessem M. J., Westendorp A., και Nieuwstadt M. T. F., “Measurement of product concentration of tow parallel reactive jets using digital image processing“, Applied Scientific Research 49, σελ. 245 – 259, 1992.
- [30] Ezersky B. A., Lecordier C. J., Paranthoen P. και Soustov L. P., “Structure of vortices in a Karman street benind a heated cylinder“, Physical review, Τομ 61, σελ. 2107 – 2110, 2000.

-
- [31] Nakamura I., Sakai Y., Miyata M., "Diffusion of matter by a non – buoyant plume in grid – generated turbulence", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 178, σελ. 379 – 403, 1987.
- [32] Bearman W. P., "On vortex street wakes", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 28, σελ. 625 – 641, 1967.
- [33] Gerrard H. J., "The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 25, σελ. 401 – 413, 1966.
- [34] Sumer M., και Fredsoe J., Hydrodynamics around cylindrical structures, World Scientific, σελ 18 – 35, 1997
- [35] Jacobsen V., Hansen N.-E.O., και Petersen M.J., " Dynamic Response of Mono – Tower Platform to Waves and Currents ", Offshore Technology Conference, 1985.
- [36] Breidenthal E. R., Buonadonna R. V. και Weisbach F., M., " Molecular mixing via jets in confined volumes ", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 219, σελ. 531 – 544, 1990.
- [37] Taylor J. J. και Hoyt W. J., " Water jet Photography – Techniques and Methods ", Experiments in Fluids 1, σελ 113 – 120, 1983.
- [38] Uhl W. V. και Gray B. J., Mixing Theory and Practice, Volume I, Chapter 1&2, Academic Press.Inc.,1966
- [39] Oldshue Y. J., Fluid Mixing Technology, Chapter 1.
- [40] Tang L., Wen F., Yang Y., Crowe T. C., Chung N. J., και Troutt R. T., " Self – organizing particle dispersion mechanism in a plane wake ", Physics of Fluids, Τομ 4, σελ 2244 – 2251, 1992.
- [41] Sarpkaya T., " Vorticity, Free Surface, And Surfactants ", Annual Review Fluid Mechanics, Τομ 28, σελ 83 - 128

-
- [42] Yu D. και Tryggvason G., " The free – surface signature of unsteady, tow dimensional vortex flows ", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 218, σελ. 547 – 572, 1990.
- [43] Tsai T – W., και Yue P. K. D., " Interactions between a free surface and a vortex sheet shed in the wake of a surface – piercing plate ", Journal of Fluid Mechanics, Τομ. 257, σελ. 691 – 721, 1993.
- [44] Blevins R., "Applied Fluid Dynamics Handbook ", Chapter 9, pp.229-278.
- [45] Dahm A. J. W., και Dimotakis E. P., " Measurements of Entrainment and Mixing in Turbulent Jets ", AIAA Journal, Τομ. 25, Αρ. 9, σελ. 1216 – 1223, 1987.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Πίνακας συμβόλων

2. Προγράμματα Matlab

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

H	η απόσταση του κυλίνδρου από την διεπιφάνεια
X	η διεύθυνση κατά μήκος της ροής
Y	η κάθετη διεύθυνση στην διεύθυνση της ροής
H_ε	η απόσταση της πάνω πλευράς του κυλίνδρου από την διεπιφάνεια
H_δ	η απόσταση της κάτω πλευράς του κυλίνδρου από το στερεό όριο
f	η συχνότητα απόσπασης των δινών
St	ο αριθμός Strouhal
PSD	η πυκνότητα φάσματος ισχύος
Fr	ο αριθμός Froude
Re	ο αριθμός Reynolds
Nu	ο αριθμός Nusselt
U_ο	η ταχύτητα της ελεύθερης ροής
D	η διάμετρος του κυλίνδρου
L_f	μήκος περιοχής σχηματισμού δίνης
δ	το πάχος οριακού στρώματος
ν	το κινηματικό ιξώδες
T_m	η μετρούμενη θερμοκρασία

T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος

T_w η θερμοκρασία της επιφάνειας του κυλίνδρου

T_{rms} η τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας

Mean I_b Μέση τιμή έντασης ακτινοβολίας μπλε χρώματος

Mean I_r Μέση τιμή έντασης ακτινοβολίας κόκκινου χρώματος

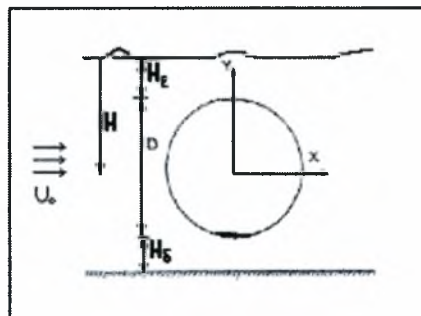
Std I_b Τυπική απόκλιση μπλε χρώματος

Std I_r Τυπική απόκλιση κόκκινου χρώματος

I_{mix} συντελεστής ανάμειξης

A_{corr} συντελεστής συσχέτισης

- Η γεωμετρία της ροής και τα σύμβολα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα



convgray.m

```
% This is an .m file for image processing
% This .m file calculate the mean radiation intense of each pixel for each Re
number in flat area
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Nimages,s,n]=textread('Input_convgray.txt','%s%f%f%f','headerlines',2);
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    first1=char(firstV);
    for num=1:Nimages(j)
        pinakas=double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'.jpg'));
        c = fspecial('gaussian',n(j),s(j));
        convpinakas=conv2(pinakas,c,'same');
        eikona=uint8(convpinakas);
        imwrite(eikona,strcat('conv',first1,int2str(num),'.jpg'))
        clear pinakas convpinakas c eikona
    end
    clear firstV first1 num
end
toc
```

gray.m

```
% This is an .m file for image processing
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Nimages,time,distance,x,y,xs,xe,ys,ye,xo,yo,xf,yf]...
    =textread('Input_gray.txt','%s%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
bath=double(imread('convACG','jpg'))';
[k,m]=find(bath(xo:xf,yo:yf)==min(min(bath(xo:xf,yo:yf))));
xmin=xo+k(1)-1;
ymin=yo+m(1)-1;
clear k m
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    firstI=char(firstV);
    for num=1:Nimages(j)
        pinakas=double(imread(strcat(firstI,int2str(num)),'jpg'))';
        [k,m]=find(pinakas(xo:xf,yo:yf)==min(min(pinakas(xo:xf,yo:yf))));
        xpinakasmin=xo+k(1)-1;
        ypinakasmin=yo+m(1)-1;
        dx=xpinakasmin-xmin;
        dy=ypinakasmin-ymin;
        clear k m xpinakasmin ypinakasmin
        if dx>0 & dy>0
            for k=1:352-dx
                for m=1:288-dy
                    pinakasnew(k,m)=pinakas(k+dx,m+dy);
                end
            end
            pinakasnew(352-dx+1:352,288-dy+1:288)=0;
        end
        if dx<0 & dy<0
            for k=1:352+dx
                for m=1:288+dy
                    pinakasnew(k-dx,m-dy)=pinakas(k,m);
                end
            end
            pinakasnew(1:-dx,1:-dy)=0;
        end
        if dx>0 & dy<0
            for k=1:352-dx
                for m=1:288+dy
                    pinakasnew(k,m-dy)=pinakas(k+dx,m);
                end
            end
            pinakasnew(352-dx+1:352,1:-dy)=0;
        end
        if dx<0 & dy>0
            for k=1:352+dx
                for m=1:288-dy
                    pinakasnew(k-dx,m)=pinakas(k,m+dy);
                end
            end
            pinakasnew(1:-dx,288-dy+1:288)=0;
        end
        if dx>0 & dy==0
            for k=1:352-dx
                for m=1:288
                    pinakasnew(k,m)=pinakas(k+dx,m);
                end
            end
            pinakasnew(352-dx+1:352,288)=0;
        end
        if dx<0 & dy==0
```

gray.m

```
for k=1:352+dx
for m=1:288
pinakasnew(k-dx,m)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(1:-dx,288)=0;
end
if dx==0 & dy>0
for k=1:352
for m=1:288-dy
pinakasnew(k,m)=pinakas(k,m+dy);
end
end
pinakasnew(352,288-dy+1:288)=0;
end
if dx==0 & dy<0
for k=1:352
for m=1:288+dy
pinakasnew(k,m-dy)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(352,1:-dy)=0;
end
if dx==0 & dy==0
pinakasnew=pinakas;
end
clear pinakas
tempinakas=bath(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j))-pinakasnew(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j));
newpinakas(:,:,num)=tempinakas;
clear pinakasnew tempinakas k m dx dy
end
%-----The Ratio Between Pixel And mm-----
analogx=x(j)/352.;
analogy=y(j)/288.;
for i=1:352
xvector(i)=i*analogx+distance(j);
end
clear i
for i=1:288
yvector(i)=i*analogy;
end
%-----The Vector Of Time In Sec-----
tvector=(time(j):time(j):Nimages(j)*time(j));
%-----Save-----
%-----
save(strcat('c:\MAN\',strcat('gray_',first1)), 'time', 'distance'...
, 'xvector', 'yvector', 'tvector', 'newpinakas', 'xs', 'xe', 'ys', 'ye', 'Nimages')
clear num first1 firstV xvector yvector tvector i analogx analogy newpinakas
end
clear
toc
```

Production_of_FFT_gray.m

```
%This is an .m file for image processing
%This .m file calculate the FFT of h(xo,yo,t) in each xo
%-----
tic
clear
%-----Data Reading-----
%-----
[names,xinitial,xfinal,yinitial,yfinal,numberofphotos,timedelay]=textread('Input
_of_FFT_gray.txt','%s%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(names);
namesV=names(i);
namSV=char(namesV);
load(namSV);
f1=1;
for m=xinitial(i)-xs(1)+1:xfinal(i)-xs(1)+1
    f2=1;
    for n=yinitial(i)-ys(1)+1:yfinal(i)-ys(1)+1
        for j=1:numberofphotos(i);
newpinakasxoyo(j)=newpinakas(m,n,j);
        end
        fftnewpinakasxoyot=fft(newpinakasxoyo');
        Powerfftnewpinakasxoyot(:,f1,f2)=(fftnewpinakasxoyot.*
        conj(fftnewpinakasxoyot))/2;
        clear j fftnewpinakasxoyot newpinakasxoyo
        f2=f2+1;
    end
    f1=f1+1;
end
frequent=(0:numberofphotos(i))/(numberofphotos(i)*timedelay(i));
frequencyt=frequent';
Powerfftnewpinakasxoyot(1, :, :)=0.;
%-----Save-----
save(strcat('c:\MAN\'',strcat('fft_',namSV)),...

'Powerfftnewpinakasxoyot','frequencyt','xinitial','yinitial','xfinal','yfinal','
Nimages');
clear j newpinakas fftnewpinakasxoyot newpinakasxoyo frequencyt namSV namesV
frequent Powerfftnewpinakasxoyot m n f1 f2
end
clear
toc
```

GraphFFTgray.m

```

tic
clear
echo off
[nameimage,xstart,xend,pacex,ystart,yend,pacey]...
=textread('Input_graphFFTgray.txt','%s%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(nameimage)
nameimageV=nameimage(i);
nameim=char(nameimageV);
load(nameim)
for x=xstart(i)-xinitial(1)+1:pacex(i):xend(i)-xinitial(1)+1
    for y=ystart(i)-yinitial(1)+1:pacey(i):yend(i)-yinitial(1)+1
        figure(y)
        for t=1:Nimages(1)
            Powerfftnewpinakasxoyotpoint(t)=Powerfftnewpinakasxoyot(t,x,y);
        end
        grid on

plot(frequencyt(1:(fix(t/2)+1)),Powerfftnewpinakasxoyotpoint(1:(fix(t/2)+1)),'b'
)
        grid on
        %legend('Blue',1);
        %axis([tvector(1) tvector(end) 0. 1.])
        xlabel('Frequency (Hz)')
        ylabel('PS')
        title(strcat('FFT-GRAPH X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'
Y=',int2str(y+yinitial(1)-1)))

saveas(y,strcat('GRAPH_FFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'_Y=',int2str
(y+yinitial(1)-1),'.','fig'))

saveas(y,strcat('GRAPH_FFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'_Y=',int2str
(y+yinitial(1)-1)), 'bmp')
        close
        figure(y)
        grid on

loglog(frequencyt(1:(fix(t/2)+1)),Powerfftnewpinakasxoyotpoint(1:(fix(t/2)+1)),'
b')
        grid on
        %legend('Blue',1);
        %axis([tvector(1) tvector(end) 0. 1.])
        xlabel('Frequency (Hz)')
        ylabel('P.S')
        title(strcat('LOGFFT-GRAPH X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'
Y=',int2str(y+yinitial(1)-1)))

saveas(y,strcat('GRAPH_LOGFFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'_Y=',int2
str(y+yinitial(1)-1),'.','fig'))

saveas(y,strcat('GRAPH_LOGFFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'_Y=',int2
str(y+yinitial(1)-1)), 'bmp')
        close
        clear Powerfftnewpinakasxoyotpoint
    end
end
clear nameimageV nameim x y t xinitial yinitial xfinal yfinal frequencyt
Powerfftnewpinakasxoyot
end
clear
toc

```


conv.m

```
% This is an .m file for image processing
% This .m file calculate the mean radiation intense of each pixel for each Re
number in flat area
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Nimages,s,n]=textread('Input_conv.txt','%s%f%f%f','headerlines',2);
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    first1=char(firstV);
    for num=1:Nimages(j)
        pinakas=double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'bmp'));
        r=pinakas(:,:,1);
        g=pinakas(:,:,2);
        b=pinakas(:,:,3);
        c = fspecial('gaussian',n(j),s(j));
        convr=conv2(r,c,'same');
        clear r
        convg=conv2(g,c,'same');
        clear g
        convb=conv2(b,c,'same');
        clear b
        pinakasnew(:,:,1)=convr;
        clear convr
        pinakasnew(:,:,2)=convg;
        clear convg
        pinakasnew(:,:,3)=convb;
        clear convb
        eikona=uint8(pinakasnew);
        imwrite(eikona,strcat('conv',first1,int2str(num),'.bmp'))
        clear r g b pinakas pinakasnew c eikona
    end
    clear firstV first1 num
end
toc
```

colour.m

```
% This is an .m file for image processing
% This .m file calculate the mean radiation intense of each pixel for each Re
number in flat area
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Namegray,Nimages,time,D,ysurf,x,y,xs,xe,ys,ye,xo,yo,xf,yf,pace]...

=textread('Input_colour.txt','%s%s%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f', 'headerlines',
2);
bath2=double(imread('convABG','jpg'))';
[k,m]=find(bath2(xo:xf,yo:yf)==min(min(bath2(xo:xf,yo:yf))));
xmin=xo+k(1)-1;
ymin=yo+m(1)-1;
clear k m bath2
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    firstV2=Namegray(j);
    first1=char(firstV);
    first2=char(firstV2);
    metr=0;
    for num=1:pace(j):Nimages(j)
metr=metr+1;
        pinakas=double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'bmp'));
        for i=1:3
            pinakasan(:, :, i)=pinakas(:, :, i)';
        end
        clear pinakas
        pinakas=pinakasan;
        clear pinakasan
        pinakas2=double(imread(strcat(first2,int2str(num)),'jpg'))';
        [k,m]=find(pinakas2(xo:xf,yo:yf)==min(min(pinakas2(xo:xf,yo:yf))));
        xpinakasmin=xo+k(1)-1;
        ypinakasmin=yo+m(1)-1;
        dx=xpinakasmin-xmin;
        dy=ypinakasmin-ymin;
        clear k m xpinakasmin ypinakasmin i
        if dx>0 & dy>0
            for k=1:384-dx
                for m=1:288-dy
                    pinakasnew(k,m,:)=pinakas(k+dx,m+dy,:);
                end
            end
            pinakasnew(384-dx+1:384,288-dy+1:288,:)=0;
        end
        if dx<0 & dy<0
            for k=1:384+dx
                for m=1:288+dy
                    pinakasnew(k-dx,m-dy,:)=pinakas(k,m,:);
                end
            end
            pinakasnew(1:-dx,1:-dy,:)=0;
        end
        if dx>0 & dy<0
            for k=1:384-dx
                for m=1:288+dy
                    pinakasnew(k,m-dy,:)=pinakas(k+dx,m,:);
                end
            end
            pinakasnew(384-dx+1:384,1:-dy,:)=0;
        end
        if dx<0 & dy>0
            for k=1:384+dx
```

```

colour.m
for m=1:288-dy
pinakasnew(k-dx,m,:)=pinakas(k,m+dy,:);
end
end
pinakasnew(1:-dx,288-dy+1:288,:)=0;
end
if dx>0 & dy==0
for k=1:384-dx
for m=1:288
pinakasnew(k,m,:)=pinakas(k+dx,m,:);
end
end
pinakasnew(384-dx+1:384,288,:)=0;
end
if dx<0 & dy==0
for k=1:384+dx
for m=1:288
pinakasnew(k-dx,m,:)=pinakas(k,m,:);
end
end
pinakasnew(1:-dx,288,:)=0;
end
if dx==0 & dy>0
for k=1:384
for m=1:288-dy
pinakasnew(k,m,:)=pinakas(k,m+dy,:);
end
end
pinakasnew(384,288-dy+1:288,:)=0;
end
if dx==0 & dy<0
for k=1:384
for m=1:288+dy
pinakasnew(k,m-dy,:)=pinakas(k,m,:);
end
end
pinakasnew(384,1:-dy,:)=0;
end
if dx==0 & dy==0
pinakasnew=pinakas;
end
clear pinakas k m dx dy pinakas2
tempinakasred=pinakasnew(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j),1);
tempinakasblue=pinakasnew(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j),3);
pinakasred(:,:,metr)=tempinakasred;
pinakasblue(:,:,metr)=tempinakasblue;
c=find(tempinakasblue==0.);
tempinakasblue(c)=1.;
pinakast=tempinakasred./tempinakasblue;
pinakasredblue(:,:,metr)=pinakast;
clear pinakasnew tempinakasred tempinakasblue pinakast c
end
%-----The Ratio Between Pixel And mm-----
analogx=x(j)/384.;
analogy=y(j)/288.;
for i=1:xe(j)-xs(j)+1
xvector(i)=(i-1)*analogx./D(j);
end
clear i
for i=1:ye(j)-ys(j)+1
yvector(i)=((i-1)+ys(j)-ysurf(j)).*analogy./D(j);
end
yvector(1:1:end)=yvector(end:-1:1);
%-----The Vector Of Time In Sec-----
tvector=(time(j):time(j).*pace(j):Nimages(j)*time(j));
%-----Save-----
%-----
save(strcat('c:\TEL.GRAF\'',strcat('colourman_',first1)),'time'...
```

```

                                colour.m
,'xvector','yvector','tvector','pinakasredblue','pinakasred','pinakasblue','xs',
,'xe','ys','ye','Nimages','pace','D','ysurf')
clear num first1 firstv first2 firstv2 xvector yvector tvector i analogx
analogy...
metr pinakasredblue pinakasred pinakasblue
end
clear
toc

```

m_s_colour.m

```
%This is an .m file for image processing
%-----
tic
clear
%-----Data Reading-----
[names]=textread('Input_m_s_colour.txt','%s','headerlines',2);
for m=1:length(names);
    namesV=names(m);
    namSV=char(namesV);
    load(namSV);
    C=pinakasred.*pinakasblue;
    for i=1:xe(1)-xs(1)+1
        for j=1:ye(1)-ys(1)+1
            meanposored(i,j)=mean(pinakasred(i,j,:));
            meanposobblue(i,j)=mean(pinakasblue(i,j,:));
            meanposoredblue(i,j)=mean(pinakasredblue(i,j,:));
            meanC(i,j)=mean(C(i,j,:));
            clear sumposored sumposobblue sumposoredblue k
            for k=1:ceil(Nimages(1)/pace(1))
                sumposored(k)=pinakasred(i,j,k)-meanposored(i,j);
                sumposobblue(k)=pinakasblue(i,j,k)-meanposobblue(i,j);
                sumposoredblue(k)=pinakasredblue(i,j,k)-meanposoredblue(i,j);
            end
            m2posored(i,j)=sum(sumposored.^2)/ceil(Nimages(1)/pace(1));
            m2posobblue(i,j)=sum(sumposobblue.^2)/ceil(Nimages(1)/pace(1));
            m2posoredblue(i,j)=sum(sumposoredblue.^2)/ceil(Nimages(1)/pace(1));
            stdposored(i,j)=sqrt(m2posored(i,j));
            stdposobblue(i,j)=sqrt(m2posobblue(i,j));
            stdposoredblue(i,j)=sqrt(m2posoredblue(i,j));
            Acorrarith(i,j)=mean((sumposored.*sumposobblue));
        end
    end
    Imix=Acorrarith./(meanposored.*meanposobblue+0.0000001);
    Acorr=Acorrarith./(stdposored.*stdposobblue+0.0000001);
%-----Save-----
%-----
save(strcat('c:\TEL.GRAF\',strcat('m_s_colour_',namSV)),...
    'meanposored','meanposobblue','meanposoredblue','stdposored','stdposobblue','stdpo
soredblue','Imix','Acorr','xs','xe','ys','ye','xvector','yvector','D','ysurf');
clear i j namSV namesV meanposored meanposobblue stdposored stdposobblue m2posored
m2posobblue...
C meanC Imix Acorr xs xe ys ye meanposoredblue stdposoredblue m2posoredblue
Acorrarith
end
clear
toc
```

Graph_m_s_x.m

```

tic
clear
echo off
[nameimage,xstart,xend,pacex,ystart,yend,pacey,number1,number2,number3]...
=textread('Input_graph_m_s_x.txt','%s%f%f%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(nameimage)
    nameimageV=nameimage(i);
    nameim=char(nameimageV);
    load(nameim)
    metr=1;
    for y=ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1
        for x=xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1
            meanposoblue(x)=meanposoblue(x,y);
            meanposored(x)=meanposored(x,y);
            stdposoblue(x)=stdposoblue(x,y);
            stdposored(x)=stdposored(x,y);
            meanposoredblue(x)=meanposoredblue(x,y);
            stdposoredblue(x)=stdposoredblue(x,y);
            Imix(x)=Imix(x,y);
            Acorr(x)=Acorr(x,y);
        end
        figure(metr)

        plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),meanposoblue(xstart(i)-
        xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number2,'b')
            hold on

        plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),meanposored(xstart(i)-
        xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number1,'r')
            legend('Blue','red',1);
            %ylim([ 0 1.2])
            grid on
            xlabel('X/D')
            ylabel('Mean Ib, Mean Ir')
            title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

        saveas(metr,strcat('GRAPH_X_MeanIblue_Ired',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','
        'fig'))

        saveas(metr,strcat('GRAPH_X_MeanIblue_Ired',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bm
        p')
            close
            figure(metr)

        plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),stdposoblue(xstart(i)-
        xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number2,'b')
            hold on

        plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),stdposored(xstart(i)-x
        s(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number1,'r')
            legend('Blue','Red',1);
            %ylim([ 0. 1.])
            grid on
            xlabel('X/D')
            ylabel('Std Ib, Std Ir')
            title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

        saveas(metr,strcat('GRAPH_X_stdIblue_Ired',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','
        fig'))

        saveas(metr,strcat('GRAPH_X_stdIblue_red',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp'
        )
            close
            figure(metr)

        plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),meanposoblue(xstart(i)

```

$\Sigma \epsilon \lambda_i \delta \alpha = 1$

Graph_m_s_x.m

```

-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number2,'b')
maxblue=max(meanposobluex(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1))
legend('Blue',1);
%ylim([ 0 1.2])
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('Mean Ib')
title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_MeanIblue',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','fig'
))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_MeanIblue',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),meanposoredx(xstart(i)-
xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number1,'r')
maxred=max(meanposoredx(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1))
legend('Red',1);
%ylim([ 0. 1.2])
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('Mean Ir')
title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_MeanIred',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','fig'
))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_MeanIred',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),stdposobluex(xstart(i)-
xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number2,'b')
legend('Blue',1);
%ylim([ 0. 1.])
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('Std Ib')
title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_stdIblue',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','fig'
))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_stdIblue',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),stdposoredx(xstart(i)-x
s(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number1,'r')
legend('Red',1);
%ylim([ 0. 1.])
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('Std Ir')
title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_stdIred',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','fig'))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_stdIred',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),meanposoredbluex(xstart
(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number3,'b')
legend('Red/Blue',1);
%ylim([ 0. 1.])
grid on

```

Σελίδα 2

Graph_m_s_x.m

```

xlabel('X/D')
ylabel('Mean Ir/Ib')
title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_MeanIr_Ib',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','fig'
))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_MeanIr_Ib',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),stdposoredbluex(xstart(
i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1)./number3,'b')
legend('Red/Blue',1);
%ylim([ 0. 1.])
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('Std Ir/Ib')
title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_StdIr_Ib',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','fig')
)

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_StdIr_Ib',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)
plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),
Imixx(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),'b')
legend('Red/Blue',1);
%ylim([ 0. 1.])
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('Imix')
title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_Imix',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','fig'))
saveas(metr,strcat('GRAPH_X_Imix',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(xvector(xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),Acorrx(xstart(i)-xs(1)+
1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1),'b')
legend('Red/Blue',1);
%ylim([ 0. 1.])
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('Acorr')
title(strcat('GRAPH Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_X_Acorr',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1),'.','fig'))
saveas(metr,strcat('GRAPH_X_Acorr',nameim,'_Y=',int2str(y+ys(1)-1)), 'bmp')
close
clear meanposoblue meanposoredx stdposoblue stdposoredx meanposoredbluex
stdposoredbluex Imixx Acorrx
end
clear nameimagev nameim x y xs ys meanposoblue meanposored stdposoblue
stdposored meanposoredblue stdposoredblue Imix Acorr
end
clear
toc

```

Graph_m_s_y.m

```

tic
clear
echo off
[nameimage,xstart,xend,pacex,ystart,yend,pacey,number1,number2,number3]...
=textread('Input_graph_m_s_y.txt','%s%f%f%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(nameimage)
    nameimageV=nameimage(i);
    nameim=char(nameimageV);
    load(nameim)
    metr=1;
    for x=xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1
        for y=ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1
            meanposobluey(y)=meanposoblue(x,y);
            meanposoredy(y)=meanposored(x,y);
            stdposobluey(y)=stdposoblue(x,y);
            stdposoredy(y)=stdposored(x,y);
            meanposoredbluey(y)=meanposoredblue(x,y);
            stdposoredbluey(y)=stdposoredblue(x,y);
            Imixy(y)=Imix(x,y);
            Acorry(y)=Acorr(x,y);
        end
        figure(metr)

    plot(meanposobluey(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number2,yvector(
        ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'b')
        hold on

    plot(meanposoredy(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number1,yvector(y
        start(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'r')
        legend('Blue','Red',1);
    %     ylim([ 0. 0.5])
        grid on
        xlabel('MeanIb_Ir')
        ylabel('Y/D')
        title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

    saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_MeanIblue_Ired',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig'))

    saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_MeanIblue_Ired',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bm
    p')
        close
        figure(metr)

    plot(meanposobluey(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number2,yvector(
        ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'b')
        maxblue=max(meanposobluey(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1))
        legend('Blue',1);
    %     ylim([ 0. 0.5])
        grid on
        xlabel('MeanIb')
        ylabel('Y/D')
        title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

    saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_MeanIblue',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig'
    ))

    saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_MeanIblue',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp')
        close
        figure(metr)

    plot(meanposoredy(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number1,yvector(y
        start(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'r')
        maxred=max(meanposoredy(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1))
        legend('Red',1);
    %     ylim([ 0. 0.5])

```

Graph_m_s_y.m

```

grid on
xlabel('MeanIr')
ylabel('Y/D')
title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_MeanIred',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig'))
)

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_MeanIred',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(stdposobluey(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number2,yvector(y
start(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'b')
hold on

plot(stdposoredy(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number1,yvector(ys
tart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'r')
legend('Blue','Red',1);
% ylim([ 0. 0.5])
grid on
xlabel('StdIb_Ir')
ylabel('Y/D')
title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_stdIblue_Ired',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','
fig'))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_stdIblue_Ired',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp
')
close
figure(metr)

plot(stdposobluey(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number2,yvector(y
start(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'b')
legend('Blue',1);
% ylim([ 0. 0.5])
grid on
xlabel('StdIb')
ylabel('Y/D')
title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_stdIblue',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig')
)

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_stdIblue',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(stdposoredy(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number1,yvector(ys
tart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'r')
legend('Red',1);
% ylim([ 0. 0.5])
grid on
xlabel('StdIr')
ylabel('y/D')
title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_stdIred',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig'))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_stdIred',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(meanposoredbluey(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number3,yvect
or(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'b')
legend('Red/Blue',1);
% ylim([ 0. 0.5])
grid on

```

Graph_m_s_y.m

```

xlabel('MeanIr/Ib')
ylabel('Y/D')
title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_MeanIr_Ib',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig'
))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_MeanIr_Ib',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(stdposoredbluey(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1)./number3,yvector
r(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'b')
    legend('Red/Blue',1);
%    ylim([ 0. 0.5])
    grid on
    xlabel('StdIr/Ib')
    ylabel('Y/D')
    title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_StdIr_Ib',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig')
)

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_StdIr_Ib',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(Imixy(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),yvector(ystart(i)-ys(1)+1
:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'b')
    legend('Red/Blue',1);
%    ylim([ 0. 0.5])
    grid on
    xlabel('Imix')
    ylabel('Y/D')
    title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_Imix',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig'))
saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_Imix',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp')
close
figure(metr)

plot(Acorry(ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),yvector(ystart(i)-ys(1)+
1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1),'b')
    legend('Red/Blue',1);
%    ylim([ 0. 0.5])
    grid on
    xlabel('Acorr')
    ylabel('Y/D')
    title(strcat('GRAPH X=',int2str(x+xs(1)-1)))

saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_Acorr',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'.','fig'))
saveas(metr,strcat('GRAPH_Y_Acorr',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1)), 'bmp')
close
clear meanposobluey meanposoredy stdposobluey stdposoredy meanposoredbluey
stdposoredbluey Imixy Acorry
end
clear nameimagev nameim x y xs ys meanposoblue meanposored stdposoblue
stdposored meanposoredblue stdposoredblue Imix Acorr
end
clear
toc

```

graphT.m

```

tic
clear
echo off
[nameimage,xstart,xend,pacex,ystart,yend,pacey]...
=textread('Input_graphT.txt','%s%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(nameimage)
nameimageV=nameimage(i);
nameim=char(nameimageV);
load(nameim)
m=1
for x=xstart(i)-xs(1)+1:pacex(i):xend(i)-xs(1)+1
    for y=ystart(i)-ys(1)+1:pacey(i):yend(i)-ys(1)+1
        for t=1:ceil(Nimages(1)/pace(1))
            posobbluepoint(t)=pinakasblue(x,y,t);
            posoredpoint(t)=pinakasred(x,y,t);
            posoredbluepoint(t)=pinakasredblue(x,y,t);
        end
        figure(m)
        plot(tvector,posobbluepoint,'b')
        grid on
        legend('Blue',1);
        axis([tvector(1) tvector(end) 0. 255.])
        xlabel('t (sec)')
        ylabel('Ib')
        title(strcat('T-GRAPH BLUE X=',int2str(x+xs(1)-1),'
Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

        saveas(m,strcat('GRAPH_T_B',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'_Y=',int2str(y+ys(1)
)-1),'.','fig'))

        saveas(m,strcat('GRAPH_T_B',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'_Y=',int2str(y+ys(1)
)-1)), 'bmp')
        close
        figure(m)
        plot(tvector,posoredpoint,'r')
        grid on
        legend('Red',1);
        axis([tvector(1) tvector(end) 0. 255.])
        xlabel('t (sec)')
        ylabel('Ir')
        title(strcat('T-GRAPH RED X=',int2str(x+xs(1)-1),'
Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

        saveas(m,strcat('GRAPH_T_R',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'_Y=',int2str(y+ys(1)
)-1),'.','fig'))

        saveas(m,strcat('GRAPH_T_R',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'_Y=',int2str(y+ys(1)
)-1)), 'bmp')
        close
        figure(m)
        plot(tvector,posoredbluepoint,'b')
        grid on
        legend('Red/Blue',1);
        axis([tvector(1) tvector(end) 0. 10.])
        xlabel('t (sec)')
        ylabel('Ir/Ib')
        title(strcat('T-GRAPH R/B X=',int2str(x+xs(1)-1),'
Y=',int2str(y+ys(1)-1)))

        saveas(m,strcat('GRAPH_T_R_B',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'_Y=',int2str(y+ys
(1)-1),'.','fig'))

        saveas(m,strcat('GRAPH_T_R_B',nameim,'_X=',int2str(x+xs(1)-1),'_Y=',int2str(y+ys
(1)-1)), 'bmp')
        close
        clear posobbluepoint posoredpoint posoredbluepoint

```

Σελίδα 1

graphT.m

```
end
clear nameimagev nameim x y t xs ys xe ye xvector tvector yvector pinakasred
pinakasblue pinakasredblue
end
clear
toc
```

