



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Δωρόθεου Αθαν. Φλαμουρίδη

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΟΝΤΑ ΣΕ
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΑ ΟΡΙΑ**

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ερρίκος Σταπουντζής

Αν. Καθηγητής Τ.Μ.Μ.Β. Π.Θ.

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Ερρίκος Σταπουντζής

Αν. Καθηγητής Τ.Μ.Μ.Β. Π.Θ.

Νικόλαος Πελεκάσης

Επ. Καθηγητής Τ.Μ.Μ.Β. Π.Θ.

Νικόλαος Ανδρίτσος

Επ. Καθηγητής Τ.Μ.Μ.Β. Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ, Σεπτέμβριος 2004



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

Αριθ. Εισ.: 4047/1
Ημερ. Εισ.: 26-10-2004
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2004
ΦΛΑ

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στα πλαίσια της διαδικασίας απόκτησης του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και διεξάγεται στο τελευταίο έτος σπουδών.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην ομαλή εκπόνηση αυτής της εργασίας. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπον καθηγητή μου κύριο Ε. Σταπουντζή, Αναπληρωτή Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τη συνεχή υποστήριξη που μου παρείχε τόσο σε επίπεδο γνώσεων όσο και σε υλικό εξοπλισμό. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους κυρίους Ν. Πελεκάση και Ν. Ανδρίτσο, Επίκουρους Καθηγητές του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τις χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες που μου έδωσαν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής μου.

Πολύτιμη ήταν η συμβολή του υποψήφιου διδάκτορα Ε. Αλυγιζάκη που με τις γνώσεις του και την εργαστηριακή του εμπειρία βοήθησε στην αποτελεσματικότερη και ακριβέστερη διεξαγωγή των μετρήσεων. Επίσης, μεγάλη ήταν η βοήθεια του Ε. Αλαξανδρόγλου στην κατασκευή και τοποθέτηση πολλών από τα εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης με αποτέλεσμα την επίσπευση της κατασκευαστικής διαδικασίας και της έναρξης των μετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ψυχική και οικονομική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου, χωρίς την οποία δε θα είχα καταφέρει να βρίσκομαι στη θέση αυτή.

Περιεχόμενα	Σελίδα
1.Εισαγωγή – Σκοπός της Εργασίας	
Εισαγωγή – Σκοπός της Εργασίας	1
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	
2.1 Τυρβώδης Δέσμη σε Ελεύθερη Ροή	3
2.2. Τυρβώδης Δέσμη Κοντά σε Σταθερό Όριο (wall jet)	4
2.2.1.Διδιάστατη Επίπεδη Δέσμη σε Στερεό Σύνορο (two dimensional plane wall jet)	4
2.2.2. Κυκλική Δέσμη Κοντά σε Στερεό Σύνορο (radial wall jet)	5
2.2.3. Τρισδιάστατη Δέσμη Κοντά σε Στερεό Σύνορο (three dimensional wall jet)	6
2.3. Τυρβώδης Δέσμη Κοντά σε Ελεύθερη Επιφάνεια	7
2.4. Γενικές Αρχές Οπτικοποίησης Ροών	10
2.5. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας	16
3. Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης	
3.1. Δεξαμενή Νερού	17
3.2. Διάταξη Τροφοδοσίας Ρευστού	19
3.2.1. Δοχείο Αποθήκευσης Νερού – Χρωστικής	19
3.2.2. Διπλό Δοχείο Υπερχείλισης – Τροφοδοσίας	20
3.2.3. Υποβρύχιες Αντλίες	21
3.2.4. Ηλεκτρομαγνητική Βαλβίδα	22
3.2.5. Ροόμετρο	22
3.2.6. Σωλήνες Σύνδεσης	23

3.2.7. Σωλήνας Σχηματισμού της Δέσμης Ρευστού	23
3.2.8. Κατακόρυφο Φορείο Μετακίνησης του Σωλήνα της Δέσμης	23
3.3. Διάταξη Μετακίνησης Μετρητικού	24
3.3.1. Μεταλλικές Ράβδοι	25
3.3.2. Τράπεζα Μεταφοράς	26
3.3.3. Τροχαλίες	27
3.3.4. Βαρούλκο	27
3.3.5. Ηλεκτρικός Κινητήρας με Μειωτήρα Στροφών	27
3.3.6. Μετατροπέας της Συχνότητας του Ρεύματος (Inverter)	28
3.3.7. Πετονιά Ενισχυμένη με Kevlar	29
3.3.8. Προεντατήρες	29
3.4. Μετρητικά Όργανα και Συσκευές	29
3.4.1. Μετρήσεις Ταχυτήτων	29
3.4.1.1.1. Ανεμόμετρο Θερμού Σύρματος	30
3.4.1.1.2. Αρχή Λειτουργίας του Hot – Film	31
3.4.1.2. Σύστημα Λήψης και Αποθήκευσης Μετρήσεων [Ηλεκτρονικός Υπολογιστής και Κάρτα A/D (analog/ digital)]	32
3.4.1.3. Παλμογράφος	33
3.4.1.4. Γεννήτρια Συχνοτήτων	34
3.4.1.5. Μετασηματιστές – Μετατροπείς Ηλεκτρικού Ρεύματος AC σε DC	34
3.4.2. Οπτικοποίηση της Ροής	34
3.4.2.1. Χρώμα Οπτικοποίησης	34
3.4.2.2. Ψηφιακή Κάμερα και Φωτισμός	35
4. Πειραματική & Υπολογιστική Μεθοδολογία	
4.1. Επιλογή Ταχύτητας Ροής	36

4.2. Στήριξη στο Χώρο Δοκιμών	36
4.3. Επιλογή των Αξόνων και Μεθοδολογία Μετρήσεων	37
4.4. Μέθοδος Μετρήσεων με το Hot – Film	38
4.4.1. Μέτρηση Αντίστασης C.T.A.	39
4.4.2. Βαθμονόμηση Hot – Film	39
4.4.3. Πειραματική Μεθοδολογία	40
4.4.4. Υπολογιστική Μεθοδολογία – Διαδικασία Εξαγωγής Αποτελεσμάτων	40
4.4.5. Χρόνος και Συχνότητα Δειγματοληψίας	41
4.4.6. Ακρίβεια των Μετρήσεων και Μέθοδοι Περιορισμού Σφαλμάτων	41
4.5. Μέθοδος Οπτικοποίησης της Ροής	42
4.5.1. Πειραματική Μεθοδολογία	42
4.5.2. Υπολογιστική Μεθοδολογία – Διαδικασία Εξαγωγής Αποτελεσμάτων	43
4.5.2.1. Πρόγραμμα VirtualDub	43
4.5.2.2. Πρόγραμμα Irfan View 32	45
4.5.2.3. Επεξεργασία με τα προγράμματα του MATLAB 6.1.	47
4.5.2.3.1. Πρόγραμμα Convrgray	47
4.5.2.3.2. Πρόγραμμα Meanfot	48
5. Διερεύνηση των φαινομένων ανάμειξης κοντά σε διεπιφάνεια και στερεά όρια	
5.1. Ελεύθερη Δέσμη	50
5.1.1. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=24$ (free jet)	50
5.2. Αλληλεπίδραση τυρβώδους δέσμης με την ελεύθερη επιφάνεια	56
5.2.1. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=1$	56
5.2.2. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=1,5$	61
5.2.3. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=2,5$	66

5.2.4. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=3,5$	71
5.2.5. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	76
5.3. Αλληλεπίδραση τυρβώδους δέσμης με στερεό σύνορο	80
5.3.1. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=1,5$	80
5.3.2. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=2,5$	85
5.3.3. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=3,5$	90
5.3.4. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	95
6. Οπτικοποίηση της ροής κοντά σε διεπιφάνεια και στερεά όρια	
6.1. Οπτικοποίηση της ελεύθερης δέσμης	99
6.1.1. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=24$ (free jet)	99
6.2. Οπτικοποίηση της ροής κοντά στη διεπιφάνεια	101
6.2.1. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1$	101
6.2.2. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1,5$	103
6.2.3. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2$	105
6.2.4. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2,5$	107
6.2.5. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=3,5$	109
6.2.6. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=7$	111
6.3. Οπτικοποίηση της ροής κοντά στο στερεό σύνορο	113
6.3.1. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1,5$	113
6.3.2. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2,5$	115
6.3.3. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=3,5$	117
6.3.4. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=7$	119
6.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων	121

7. Συμπεράσματα	
7.1. Συμπεράσματα – Σχολιασμός	122
7.2. Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες	123
Βιβλιογραφία	124
Παράρτημα	127

1. Εισαγωγή – Σκοπός της Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εντάσσεται στην επιστημονική περιοχή της μηχανικής των ρευστών και πιο συγκεκριμένα στην αλληλεπίδραση της ανάμειξης τυρβώδους δέσμης ρευστού και της απόστασής της από την ελεύθερη επιφάνεια ή το σταθερό σύνορο (τοίχωμα).

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι πειραματική. Τα πειράματα έγιναν σε δεξαμενή νερού. Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με γνώμονα την κάλυψη ορισμένων περιορισμών όπως το μέγεθος της δεξαμενής και ο μέγιστος επιθυμητός αριθμός Reynolds. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων η οποία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων της ροής σε διάφορες θέσεις στο χώρο καθώς και την οπτικοποίηση του φαινομένου που μελετάται.

Η ανεμομετρία θερμού νήματος (Hot Wire Anemometry, HWA), ήταν η κύρια τεχνική μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση δεδομένων που αφορούσαν το ρευστό και το πεδίο ταχύτητάς του μέσα στη δεξαμενή, μετρώντας πεδία ταχυτήτων σε επιλεγμένες θέσεις.

Η οπτικοποίηση του φαινομένου έγινε με σκοπό την κατανόηση της ροής σε έναν ευρύ χώρο καθώς και στον προσδιορισμό της ποσότητας σημαντικών μεγεθών της. Τα στοιχεία που συλλέχτηκαν έκαναν δυνατή τη λήψη πληροφοριών σχετικών με βασικά χαρακτηριστικά της ροής όπως το σχήμα της δέσμης και η κατανομή της συγκέντρωσης σε ελεύθερη ροή, σε ροή κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια και σε ροή κοντά σε σταθερό σύνορο.

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων μέτρησης και περιγραφής μας παρουσίασε τον τρόπο με τον οποίο σχετίζονται οι μεταβολές των παραμέτρων και των χαρακτηριστικών μεγεθών που μελετούνται.

Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια γενικότερη βιβλιογραφική ανασκόπηση σε ότι αφορά τα είδη των δεσμών και τη αλληλεπίδρασή τους με διεπιφάνειες και στερεά σύνορα όπως παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων.

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 τις μετρήσεις σχετικά με τις διανομές της ορμής και της έντασης της τύρβης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσπάθεια οπτικοποίησης της ροής.

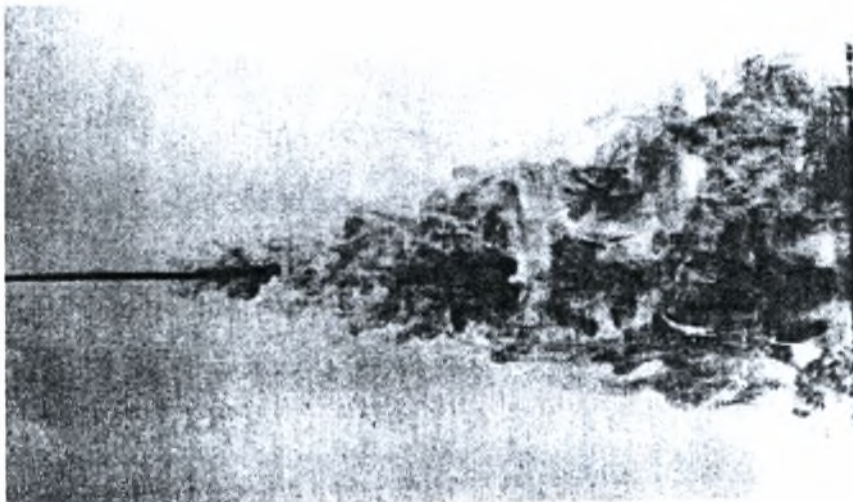
Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη μελέτη της αλληλεπίδρασης δέσμης ρευστού και διεπιφάνειας υγρού – αερίου ή στερεού συνόρου (τοιχώματος). Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί παρουσιάζεται η γνώση που έχει μέχρι σήμερα αποκτηθεί σχετικά με τη ροή δέσμης κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια και στερεά σύνορα. Τέλος γίνεται αναφορά σε θέματα σχετικά με την οπτικοποίηση της ροής και την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.

2.1 Τυρβώδης Δέσμη σε Ελεύθερη Ροή

Πέρα από την αλληλεπίδραση της δέσμης με τοιχώματα ή επιφάνειες, ενδιαφέρον προκάλεσε στους ερευνητές η μελέτη των χαρακτηριστικών τη ροής ελεύθερων δεσμών, μακριά από αυτά, Εικόνα 2.1. Οι μέσες τιμές ταχυτήτων και εντάσεως τύρβης μετρήθηκαν από τους Wygnanski & Fielder, (1969) και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως σε αποστάσεις μακρινές από τη έξοδο της δέσμης η μέση ταχύτητα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής φθίνει με ρυθμό $1/x$. Επίσης παρατηρήθηκε συνεχής μείωση της διακύμανσης της ορμής κατά μήκος της κεντρικής γραμμής εξαιτίας του παραπάνω φαινομένου, (Kotsovinos, 1998, Schneider, 1985). Η ροή αυτού του είδους δέσμης είναι αζονοσυμμετρική με μέση γωνία διάχυσης τις 17° .



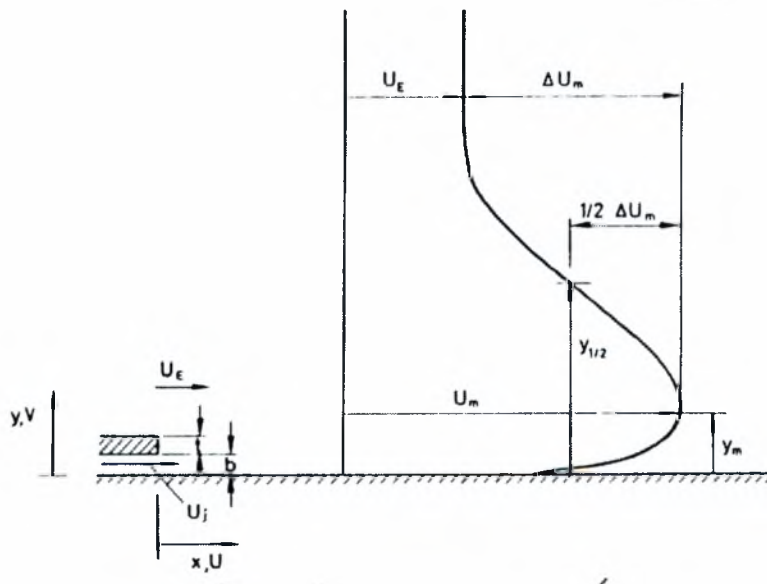
Εικόνα 2.1. Τυρβώδης δέσμη σε ελεύθερη ροή

2.2. Τυρβώδης Δέσμη Κοντά σε Σταθερό Όριο (wall jet)

Οι δέσμες ρευστού κοντά σε σταθερό όριο παρουσιάζουν μεγάλο και ποικίλο μηχανολογικό ενδιαφέρον. Δύο από τις σπουδαιότερες εφαρμογές τους είναι η ψύξη και επένδυση του θαλάμου καύσης αεροστροβίλων με υμένιο ρευστού καθώς και των καθοδηγητικών πτερυγίων του στροβίλου. Και στις δύο περιπτώσεις σκοπός είναι να εισαχθεί ένα στρώμα ψυκτικού ρευστού πάνω σε μια στερεή επιφάνεια προκειμένου να την προστατεύσουμε από ισχυρά θερμικά φορτία. Άλλες εφαρμογές των δεσμών ρευστού συναντούμε στα ψυγεία των αυτοκινήτων καθώς, σε θαλάμους καύσης κινητήρων με άμεση έγχυση καυσίμου και στα πτερόγια των συστημάτων κλιματισμού (βιομηχανικού ή οικιακού προορισμού).

2.2.1. Διδιάστατη Επίπεδη Δέσμη σε Στερεό Σύνορο (two dimensional plane wall jet)

Στο Σχήμα 2.1. φαίνεται μια τυπική διανομή ταχύτητας κάθετα στη δέσμη που βοηθά στην κατανόηση της ονοματολογίας.



Σχήμα 2.1. Τυπική διανομή ταχύτητας κάθετα στη δέσμη

Ουσιαστικά μπορούμε να θεωρήσουμε πως η δέσμη αποτελείται από δύο περιοχές. Από μια εσωτερική περιοχή που εκτείνεται από το τοίχωμα μέχρι το y_m και παρουσιάζει χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του τυρβώδους οριακού στρώματος και μια

εξωτερική περιοχή που εκτείνεται με τη σειρά της από το y_m το επάνω μέρος της ροής που μοιάζει περισσότερο με μια ελεύθερη ροή παρά με ροή κοντά σε τοίχωμα.

Συγκεκριμένα, έχει υπολογιστεί πως ο ρυθμός αύξησης του εξωτερικού επιπέδου δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial y_{1/2}}{\partial x} = 0.073 \pm 0.002$$

Ο ρυθμός αύξησης αυτός παρουσιάζεται, στη συγκεκριμένη περίπτωση, κατά 30% μειωμένος σε σχέση με αυτόν της ελεύθερης και πλήρους ανεπτυγμένης δέσμης. Αυτή η διαφορά λέγεται πως οφείλεται στην απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης της διακύμανσης της ταχύτητας στη διεύθυνση κάθετα στο τοίχωμα εξαιτίας αντανάκλασης της ορμής από το ίδιο το τοίχωμα, (Launder & Rodi, 1983).

Η πιο συχνά αναφερόμενη επίδραση του εξωτερικού επιπέδου στο εσωτερικό είναι η μετατόπιση του σημείου στο οποίο παρουσιάζεται η μέγιστη ταχύτητα κατά $2/3 y_m$ σε σχέση με τη στρωτή ροή δέσμης, (Mathieu, 1959). Η ισχυρή αυτή επίδραση μεταξύ των δύο επιπέδων φαίνεται και στις διανομές της κινητικής ενέργειας της τύρβης μιας και αυτή μειώνεται ομαλά καθώς πλησιάζουμε στο τοίχωμα και δεν παρουσιάζεται καμία απότομη αύξηση όπως συμβαίνει στο οριακό στρώμα.

2.2.2. Κυκλική Δέσμη Κοντά σε Στερεό Σύνορο (radial wall jet)

Μιας κυλινδρικής μορφής δέσμη μπορεί να δημιουργηθεί από ρευστό που εξέρχεται κυλινδρικού ακροφύσιου τοποθετημένου πάνω σε τοίχωμα ή μιας κυλινδρικής δέσμης που εξέρχεται από μια οπή σε επιφάνεια. Η ροή σε αυτή την περίπτωση είναι αξονοσυμμετρική, Εικόνα 2.2. Εφαρμογές αυτού του είδους δέσμης θα βρούμε στη θέρμανση, ψύξη, αφύγρανση και ως πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, στην κάθετη απογείωση αεροσκαφών.



Εικόνα 2.2. Κυκλική δέσμη κοντά σε στερεό σύνορο

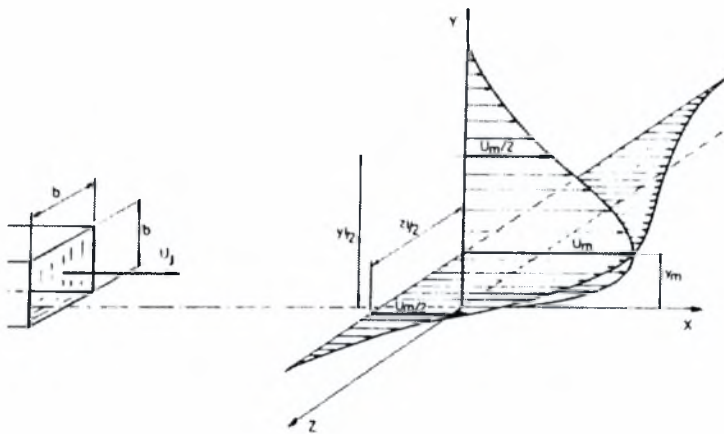
Ο ρυθμός αύξησης της ακτίνας της δέσμης φαίνεται πως δεν επηρεάζεται από τη διεύθυνση στην οποία αυτή δημιουργείται (κατακόρυφα ή οριζόντια) και ισούται με :

$$\frac{\partial y_{1/2}}{\partial x} = 0.09 \pm 0.005$$

Επίσης παρατηρήθηκε πως η αύξηση των διαστάσεων της δέσμης κατά την παράλληλη προς το τοίχωμα διεύθυνση ήταν πολύ πιο έντονη από αυτήν στην κάθετη, (Newman et al., 1972). Οι μετρήσεις αυτές έδειξαν πως η ανάμειξη της τύρβης στην παράλληλη διεύθυνση υπερέχει αυτής στην κάθετη και πως η αλληλεπίδραση της δέσμης με το τοίχωμα περιλαμβάνει συναφή ροή μάζας μεταξύ των δύο διευθύνσεων (ροή μάζας από το τοίχωμα προς το κέντρο της δέσης και παράλληλα προς αυτήν). Τα σχήματα των διανομών ταχύτητας και έντασης τύρβης είναι παρόμοια με αυτά της επίπεδης δέσμης ενώ η επίδραση της αλλαγής της γεωμετρίας εντοπίζεται μόνο στο σχηματισμό του εξωτερικού επιπέδου της δέσμης, (Lauder & Rodi, 1983). Τέλος παρατηρήθηκε πως σε σχέση με την δημιουργία δέσμης με ακροφύσιο, η δέσμη που εξέρχεται από μια κυκλική οπή χρειάζεται λιγότερο μήκος για να αναπτυχθεί πλήρως.

2.2.3. Τρισδιάστατη Δέσμη Κοντά σε Στερεό Σύνορο (three dimensional wall jet)

Η τρισδιάστατη δέσμη αποτελεί την πλέον πολύπλοκη μορφή και παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω. Στο Σχήμα 2.2. φαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά μιας δέσμης αυτής της κατηγορίας.



Σχήμα 2.2. Η τρισδιάστατη δέσμη

Η διαφορά από την δισδιάστατη επίπεδη δέσμη εντοπίζεται στην εμφάνιση του μεγέθους του πλάτους. Στην περίπτωση αυτή δεν παρουσιάζεται συμμετρία μεταξύ κάθετης και παράλληλης προς το τοίχωμα διεύθυνσης, (Launder & Rodi, 1983).

2.3. Τυρβώδης Δέσμη Κοντά σε Ελεύθερη Επιφάνεια

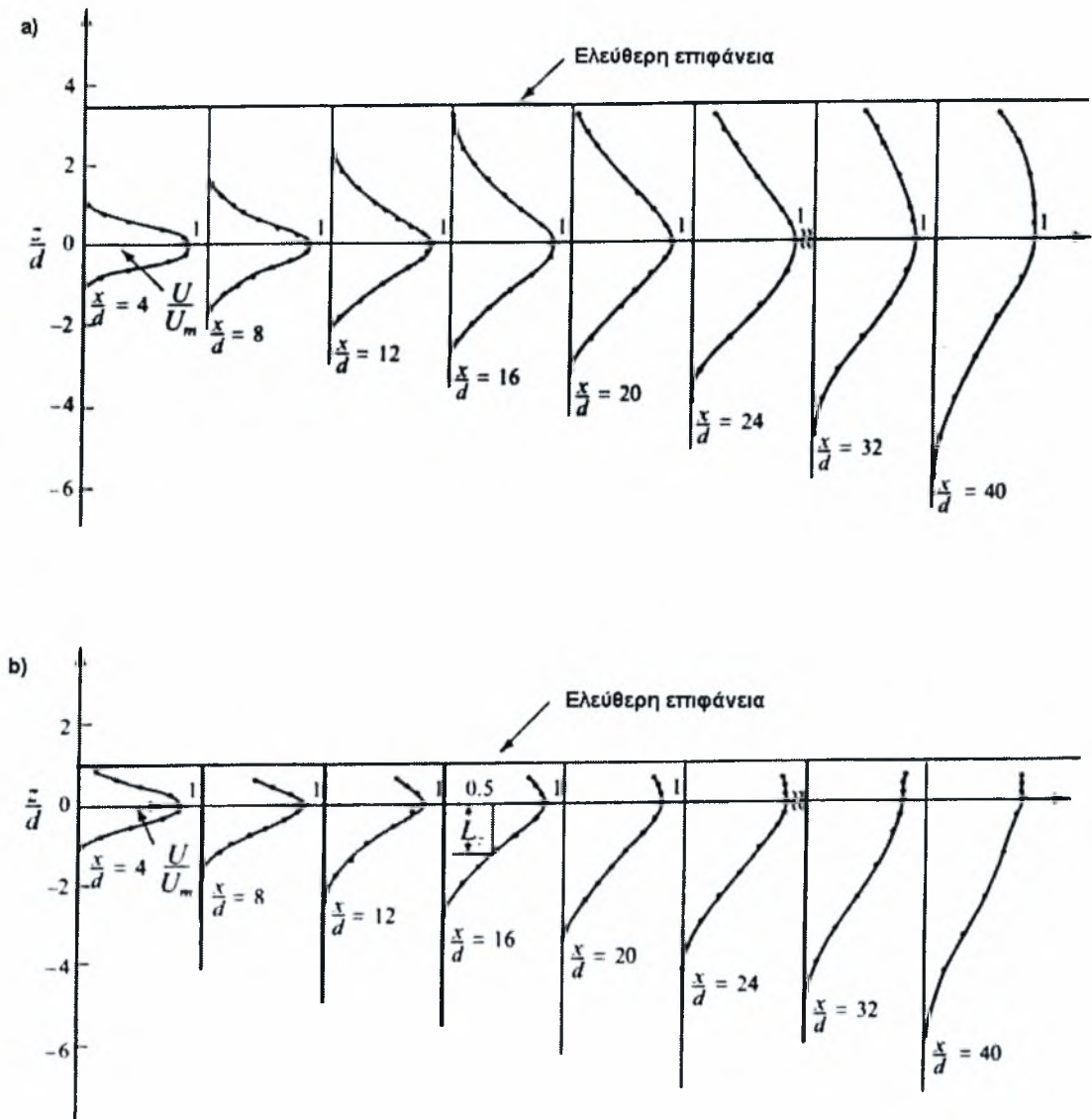
Η συμπεριφορά τυρβωδών ροών κοντά σε ελεύθερες επιφάνειες παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον στον εντοπισμό ίχνων πλοίων, στην ανάμειξη λυμάτων που διοχετεύονται με αγωγούς κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας και άλλων συναφών εφαρμογών. Φωτογραφίες των ωκεανών από δορυφόρους δείχνουν χαρακτηριστικές γραμμές μήκους χιλιομέτρων που αποτελούν τα ίχνη των πλοίων που πέρασαν από την περιοχή. Τα ίχνη αυτά δημιουργήθηκαν από τα σκαριά των πλοίων καθώς και από τα συστήματα προώθησής των, (A. Reed & J. Milgram, 2002), Εικόνα 2.3. Έτσι, μελετώντας τη συμπεριφορά μιας δέσμης κοντά σε διεπιφάνεια, μπορούμε να κατανοήσουμε τους υδροδυναμικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ μιας τυρβώδους ροής, των επιφανειακών κυμάτων και των επιφανειακών ρευμάτων και να οδηγηθούμε σε συμπεράσματα που αφορούν ένα παρόμοιο φαινόμενο, σύμφωνα με τους μελετητές, όπως αυτό του απόρου των πλοίων, (A. Reed & J. Milgram, 2002).



Εικόνα 2.3. Χαρακτηριστικά ίχνη πλοίων, όπως φωτογραφίστηκαν από δορυφόρο

Έρευνες που έγιναν σε επίπεδες δισδιάστατες τυρβώδεις δέσμες κοντά σε διεπιφάνειες υγρού – αερίου έδειξαν πως οι διανομές των ταχυτήτων και της έντασης της τύρβης συμπεριφέρονται αντίστοιχα με την επίπεδη δισδιάστατη δέσμη σε στερεό σύνορο, (Rajaratnam & Humphries, 1984).

Στο ίδιο ακριβώς συμπέρασμα οδηγήθηκαν και οι Bernal & Madnia, (1988) όταν σύγκριναν τη συμπεριφορά της κυλινδρικής δέσμης κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια με αυτή κοντά σε στερεό σύνορο με σταθερό αριθμό Reynolds. Τα δύο είδη δεσμών, λειτουργούν και συμπεριφέρονται παρόμοια έχοντας την ίδια γεωμετρία και με μόνη διαφορά την συνοριακή συνθήκη που επικρατεί κάθε φορά (στο τοίχωμα ή τη διεπιφάνεια). Στο Σχήμα 2.3. φαίνεται ένα τυπικό πεδίο ταχυτήτων κατά μήκος μιας δέσμης κοντά σε διεπιφάνεια.



Σχήμα 2.3. Τυπική διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της δέσμης σε βάθος α) $H/D=3,5$ β) $H/D=1$

Ωστόσο, όσο παρόμοια κι αν φαίνεται πως συμπεριφέρονται τα δύο είδη δεσμών παρουσιάζουν διαφορές που κάνουν τη σύγκριση μεταξύ τους όχι και τόσο εύκολη. Η κύρια ομοιότητα ανάμεσά τους εντοπίζεται στο ότι η επιφάνεια με την οποία έρχονται σε επαφή, είτε αυτή είναι η ελεύθερη επιφάνεια ενός ρευστού είτε στερεό σύνορο, έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση της ροής προς το μέρος της επιφάνειας. Κατά την ύπαρξη όμως ελεύθερης επιφάνειας υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας και διάδοσης κυματισμών, φαινόμενο που απουσιάζει από το στερεό τοίχωμα. Επίσης κατά την ύπαρξη τοιχώματος η συνοριακή συνθήκη της μη ολίσθησης απαιτεί η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια του τοιχώματος να είναι μηδέν. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει με την ελεύθερη επιφάνεια όπου η ταχύτητα μπορεί να διαφέρει του μηδενός και το αντίστοιχο

οριακό στρώμα δημιουργείται έτσι ώστε να ικανοποιεί αυτήν τη συνθήκη, Batchelor, (1967).

2.4. Γενικές Αρχές Οπτικοποίησης Ροών

Τα φαινόμενα μεταφοράς καθώς και η ροή των ρευστών μπορούν να μελετηθούν και θεωρητικά και πειραματικά ώστε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα σχετικά με τη μεταφορά του μεγέθους με το οποίο σχετίζονται (μάζα για τη μεταφορά μάζας, ενέργειας για τη μεταφορά θερμότητας και ορμής για τη ροή ενός ρευστού), (Yang Wen-Jei, 1989).

Στο φαινόμενο με το οποίο εμείς ασχοληθήκαμε, η πειραματική μελέτη της ροής μπορεί να γίνει με σημειακές μετρήσεις ταχυτήτων ή συγκέντρωσης, καθώς και με οπτικοποίηση ενώ η θεωρητική προσέγγισή του περιλαμβάνει ανάλυση και υπολογισμό, Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4. Μέθοδοι μελέτης ροϊκών φαινομένων

Με την οπτικοποίηση προσπαθούμε να κάνουμε ορατές τις διαδικασίες των φαινομένων μεταφοράς. Το παραπάνω μπορεί να γίνει είτε πειραματικά είτε θεωρητικά (προσομοίωση). Η οπτικοποίηση της ροής υπερέχει της μέτρησης στο ότι ανακτώνται πληροφορίες σε όλο το πεδίο της ροής. Το βασικό μειονέκτημα της ήταν ότι οι πληροφορίες είναι ποιοτικές αλλά σήμερα με την πρόοδο που έχει επιτευχθεί στον τομέα των υπολογιστών κάτι τέτοιο δε συμβαίνει πια.

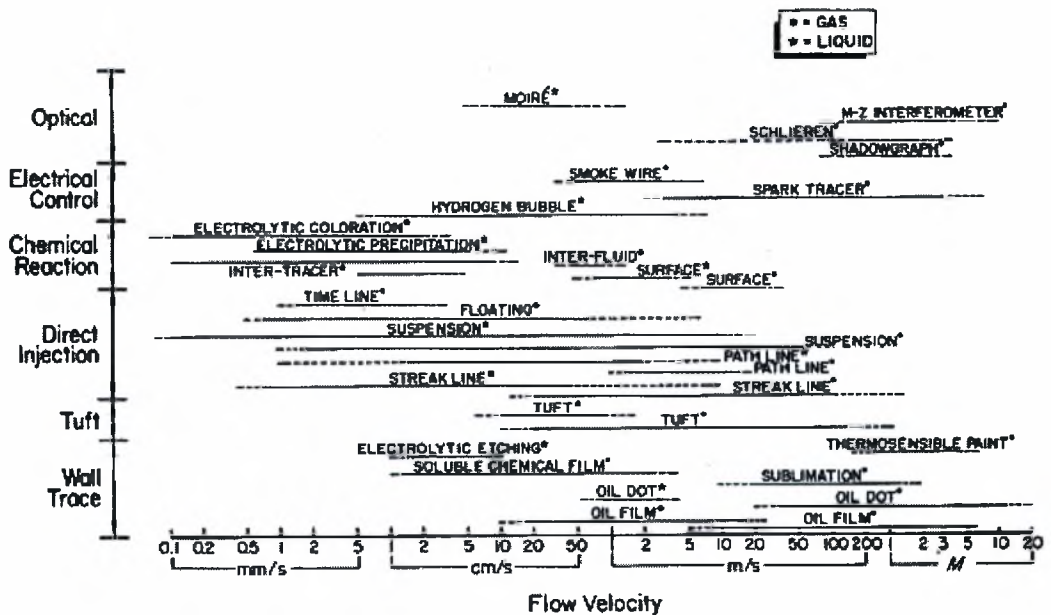
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην οπτικοποίηση της ροής ταξινομούνται σε συμβατικές και υποβοηθούμενες με υπολογιστή. Οι πρώτες αναφερόμενες ως πρώτης

γενιάς μέθοδοι, περιλαμβάνουν όλες τις παραδοσιακές τεχνικές. Αυτές ταξινομούνται σε τέσσερις ομάδες που φαίνονται στο Σχήμα 2.5.

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

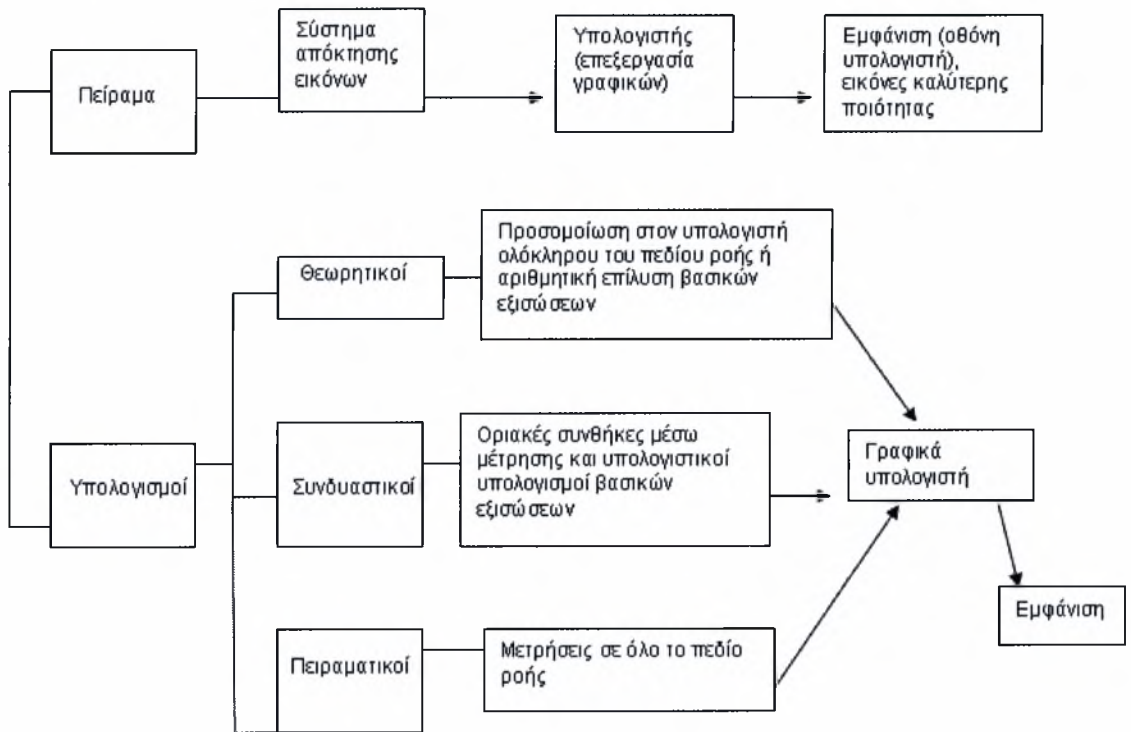
Σχήμα 2.5. Συμβατικές μέθοδοι οπτικοποίησης ροών

Η κατάλληλη περιοχή (εύρος ταχυτήτων) της ροής που εφαρμόζεται κάθε μέθοδος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6.



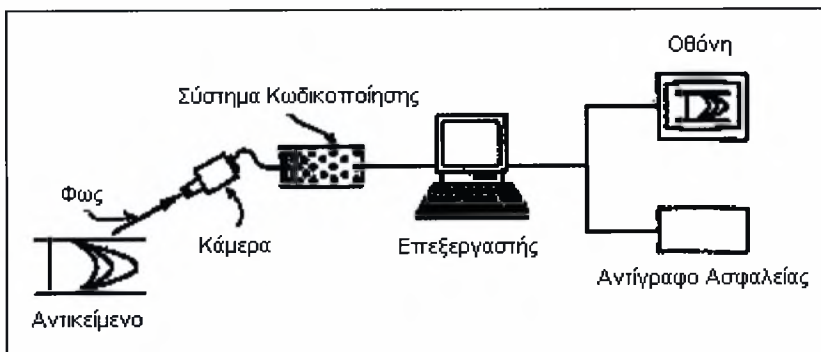
Σχήμα 2.6. Κατάλληλες περιοχές ταχυτήτων για κάθε μέθοδο οπτικοποίησης

Ο τρόπος με τον οποίο πετυχαίνουμε την οπτικοποίηση μιας ροής σε γενικές γραμμές είναι ο παρακάτω. Στο ροϊκό πεδίο εισάγονται διάφορες ουσίες ως ένα αντιπαραβάλλον μέσο για να διακρίνουμε το χαρακτηριστικό που θέλουμε να παρατηρήσουμε. Στις περισσότερες περιπτώσεις το ροϊκό πεδίο πρέπει να φωτιστεί κατάλληλα (Laser, λάμπες φθορισμού) ώστε να δημιουργηθεί ευκρίνεια και αντίθεση. Στη συνέχεια η εικόνα εκθέτεται σε κατάλληλη μορφή. Αυτή η διαδικασία συνήθως ακολουθείται στις συμβατικές μεθόδους και δίνει μόνο ποιοτική πληροφόρηση. Στις υποβοηθούμενες με Η/Υ μεθόδους η παραπάνω διαδικασία (δημιουργία εικόνας – image formation) ακολουθείται από ψηφιακή επεξεργασία. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη θεωρία και τις μετρήσεις παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας διαφορετικά χρώματα για συγκεκριμένες περιοχές της μεταβλητής. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων και περαιτέρω επεξεργασίας τους. Στο Σχήμα 2.7. φαίνονται οι υποβοηθούμενες με υπολογιστή μέθοδοι.



Σχήμα 2.7.Υποβοηθούμενες με υπολογιστή μέθοδοι οπτικοποίησης ροών

Στο Σχήμα 2.8. παρουσιάζεται μια σχηματική διάταξη ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.



Σχήμα 2.8. Σχηματική διάταξη ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας

Η μονάδα εισόδου που αποτελείται από μια κάμερα και ένα σύστημα κωδικοποίησης λειτουργεί ώστε να μετατρέπει την εικόνα ενός αντικειμένου σε σήμα και έπειτα ο Η/Υ το αναγνωρίζει και αναλύει την πληροφορία. Τέλος, μια μονάδα εξόδου είναι απαραίτητη ώστε να εξαχθούν και να αποθηκευθούν τα αποτελέσματα μετά την επεξεργασία.

Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια της παρατήρησης μας στο πεδίο είναι το κινούμενο σωματίδιο - ανιχνευτής (tracer), η θέση του στο χώρο και ο χρόνος. Από τη συμπεριφορά του ανιχνευτή εξάγουμε τρεις φυσικές ποσότητες που αναλύονται παρακάτω.

- Τροχιά: είναι η διαδρομή που διένυσε ένα σωματίδιο μέσα στο πεδίο ροής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- Ινώδης φλέβα: είναι η νοητή γραμμή πάνω στην οποία βρίσκεται το σύνολο των σωματιδίων τα οποία πέρασαν, πριν από μια δεδομένη χρονική στιγμή, από συγκεκριμένο σημείο του πεδίου ροής.
- Ροϊκή γραμμή: είναι κάθε γραμμή που έχει την ιδιότητα η εφαπτομένη σε κάθε της σημείο να συμπίπτει με τη διεύθυνση της ταχύτητας του ρευστού σε εκείνο το σημείο, μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Κατά την εφαρμογή μεθόδων που χρησιμοποιούν ανιχνευτές για την οπτικοποίηση της ροής θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην υπάρχει ασυμφωνία στις τροχιές μεταξύ στοιχείων ρευστού και δείκτη. Αυτό αφορά κυρίως δείκτες που έχουν διαφορετική πυκνότητα και ιξώδες από το προς μελέτη ρευστό.

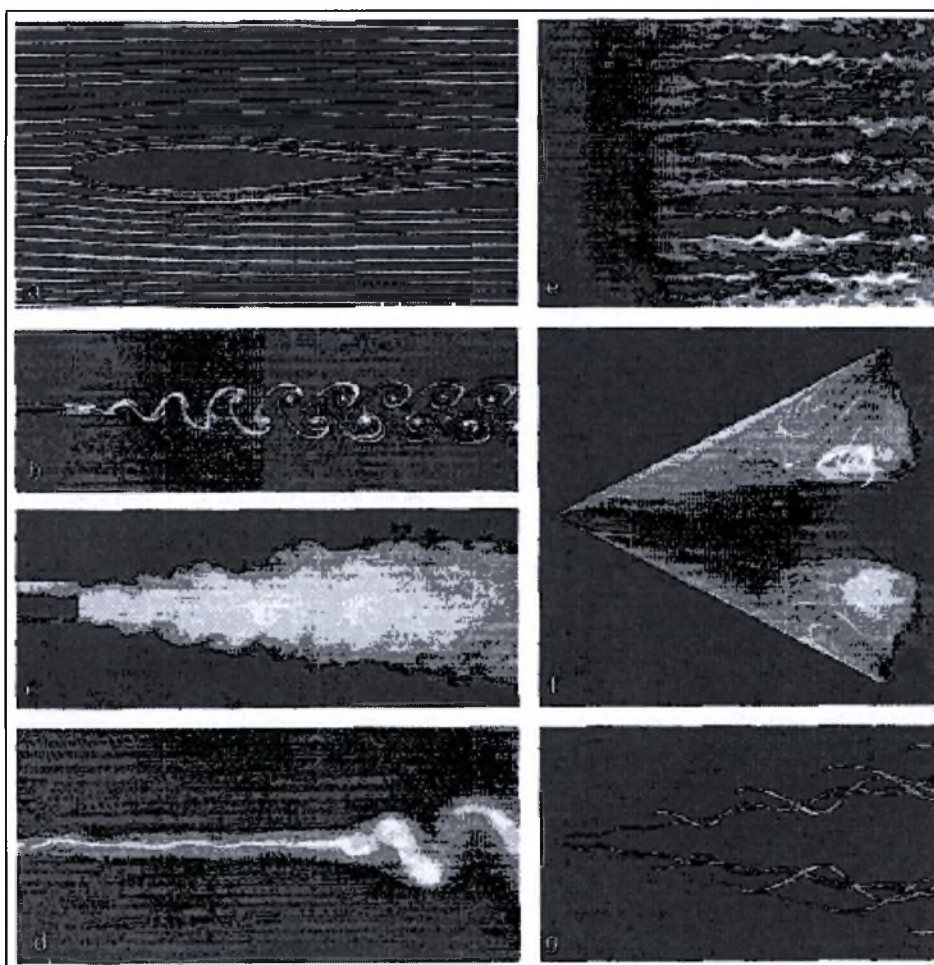
Οι βασικοί υγροί ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στο νερό είναι:

Διάλυμα γάλακτος (μείγμα γάλακτος, αλκοόλης και βαφής του οποίου η πυκνότητα και το ιξώδες είναι παρόμοια με του νερού).

- Διάλυμα rhodorsil (σταθερό λευκό χρώμα που αντικατέστησε το γάλα το 1979)
- Φθορίζουσες βαφές
- Ουσίες όπως μελάνι, διαφημιστικές βαφές, βενζίνη, τετραχλωρίδιο του άνθρακα και υπερμαγγανικό κάλιο

Οι δέσμες βαφής κατά τη στρωτή ροή μπορούν να αποκαλύψουν τις ινώδεις φλέβες, τον άξονα των στροβίλων καθώς και τα χαρακτηριστικά της αποκόλλησης κατά τη ροή σε τοίχωμα με ιδιομορφίες.

Στην τυρβώδη ροή, οι δέσμες βαφής παραμένουν αποτελεσματικές παρά τη γρήγορη διάχυση που παρατηρείται. Σχηματίζονται γραμμές εκπομπής που αποκαλύπτουν τη στιγμιαία μορφή της ροής, όπως ο ολκός, τα jet και οι δίνες. Στην Εικόνα 2.4. φαίνονται διάφορα είδη οπτικοποίησης ροών.



Εικόνα 2.4. Οπτικοποίηση ροών με εκπομπή μπογιάς, (α) Ροϊκές γραμμές γύρω από αεροτομή, (b) Δίνες von Karman πίσω από επίπεδη πλάκα, (c) Ροή μεμονωμένου jet, (d) Ελικοειδής καταστροφή μεμονωμένης δίνης, (e) Μετάβαση οριακού στρώματος σε επίπεδη πλάκα, (f) Τρισδιάστατη ροή σε πτέρυγα δέλτα, (g) Δομές δινών σε λεπτή πτέρυγα δέλτα

2.5. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

Όλες οι μέθοδοι οπτικοποίησης έχουν ως σκοπό τους να κάνουν ορατές τις μεταβολές των εκάστοτε μεγεθών που μας ενδιαφέρουν, αρκεί η μεταβολή αυτών να επηρεάζει χαρακτηριστικές ιδιότητες του φωτός των οποίων η ανάλυση θα μας οδηγήσει στην ανάκτηση των πληροφοριών που χρειαζόμαστε.

Μπορούμε να πάρουμε πολύ καλές πληροφορίες για δισδιάστατες ροές εφόσον ο φωτισμός παρέχεται σε ένα λεπτού πάχους επίπεδο. Παρακολουθώντας λοιπόν, τις μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας οδηγούμαστε σε συμπεράσματα σχετικά με την ιδιότητα του ρευστού που την προκάλεσε, όπως για παράδειγμα η μεταβολή της πυκνότητας των στοιχείων του. Έτσι, σε τρισδιάστατες ροές, εάν η προβολή γίνεται πάλι σε ένα επίπεδο, η εικόνα δεν μπορεί να αποδώσει με σαφήνεια τις χωρικές δομές της ροής.

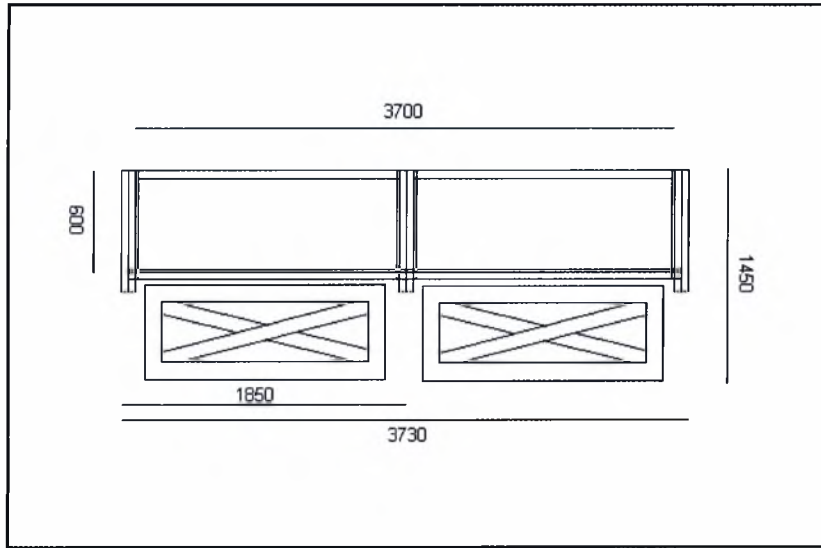
Ωστόσο σε πολλά σημεία της διαδικασίας οπτικοποίησης εισάγεται θόρυβος εξαιτίας των συσκευών που χρησιμοποιούνται. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και η ανομοιομορφία του φωτισμού. Τα παραπάνω μας αναγκάζουν να χρησιμοποιούμε ειδικά φίλτρα και ειδικές λειτουργίες των προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνων (convolution operations) προκειμένου να διορθώσουμε τα προβλήματα που δημιουργούνται.

3. Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

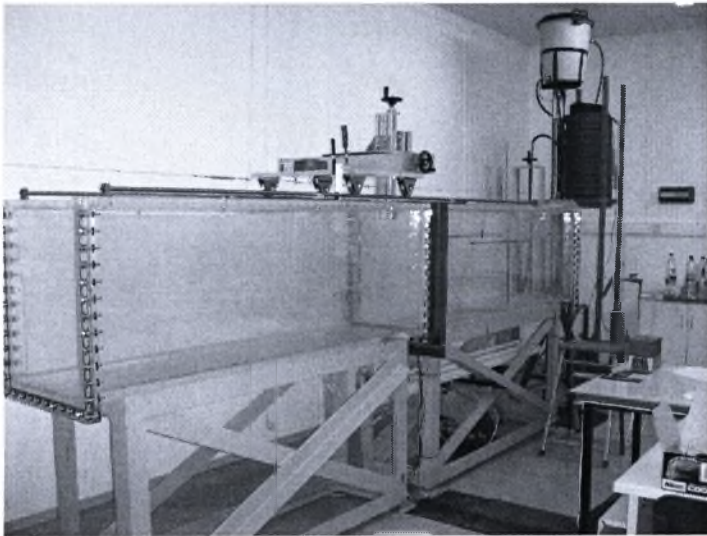
Για να επιτευχθούν οι στόχοι της εργασίας ήταν αναγκαίο να σχεδιαστεί και κατασκευαστεί το μεγαλύτερο μέρος της πειραματικής διάταξης όπως οι βάσεις στήριξης της δεξαμενής, οι σωληνώσεις για την παροχή της με νερό καθώς και η αποχέτευση, η διάταξη τροφοδοσίας της δέσμης με ρευστό και τέλος η διάταξη μετακίνησης του μετρητικού οργάνου πάνω στη δεξαμενή. Όλα τα παραπάνω σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με τρόπο που να πληρούνται οι εκάστοτε πειραματικοί περιορισμοί και οι κανόνες ασφαλείας.

3.1. Δεξαμενή Νερού

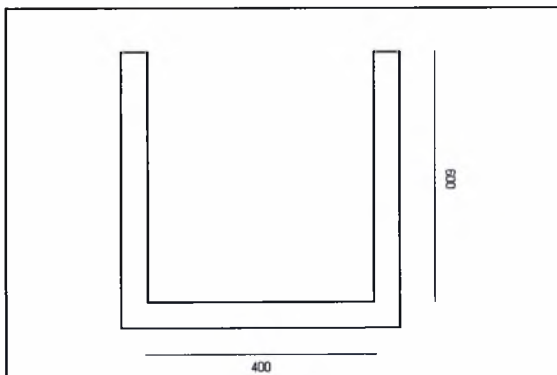
Η δεξαμενή νερού αποτελείται από τέσσερα (4) συνολικά τμήματα, δύο από αυτά συνθέτουν το κύριο τμήμα της δεξαμενής (τμήμα δοκιμών) ενώ τα άλλα δύο αποτελούν τα πλαϊνά καπάκια της. Το σχήμα τους και οι διαστάσεις τους φαίνονται στο Σχήμα 3.1. Το υλικό κατασκευής της είναι Plexiglas και το πάχος των τοιχωμάτων της 20mm. Τα επιμέρους τμήματά της συνδέονται μεταξύ τους με συνολικά 105 κοχλίες M8×70 mm (35 κοχλίες σε κάθε μία από τις τρεις ενώσεις). Προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη στεγανοποίηση στις ενώσεις μεταξύ των τμημάτων, τοποθετήθηκε, σε ειδικά κατεργασμένη εσοχή στις προς ένωση επιφάνειες, στεγανοποιητικό παρέμβυσμα (O'ring) διαμέτρου 6 mm. Στον πυθμένα και στο ένα πλαϊνό καπάκι της δεξαμενής έχουν προσαρμοστεί σύνδεσμοι που φέρουν σφαιρικούς κρουνοί και επιτρέπουν το άδειασμα και γέμισμα της αντίστοιχα με νερό. Η δεξαμενή στηρίχθηκε σε δύο μεταλλικές κατασκευές που αποτελούνται από χαλύβδινες γωνίες 80×80×8 mm. Καθεμία από τις βάσεις φέρει στο κάτω μέρος της ρυθμιζόμενα ποδαρικά προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης οριζοντιοποίηση της δεξαμενής. Στην Εικόνα 3.1. φαίνονται όλα τα παραπάνω τμήματα συναρμολογημένα. Το κυρίως τμήμα της δεξαμενής, μέσα στο οποίο γίνονται οι δοκιμές έχει διαστάσεις 400×600×3700 mm, Σχήμα 3.2. Πάνω στο τμήμα δοκιμών στηρίζεται το σύστημα μετακίνησης των αισθητήρων το οποίο δίνει την δυνατότητα μετακίνησης του μετρητικού και ως προς τις τρεις κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.1. Σκαρίφημα δεξαμενής νερού και βάσεων στήριξης



Εικόνα 3.1. Η δεξαμενή νερού



Σχήμα 3.2. Σκαρίφημα χώρου δοκιμών

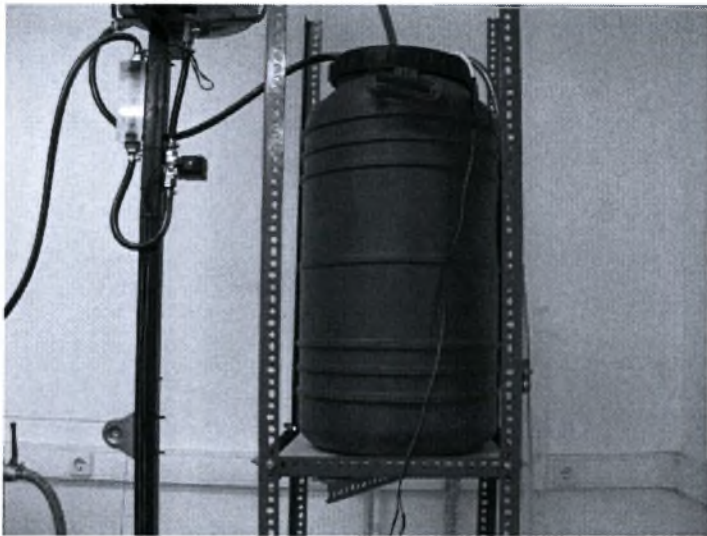
3.2. Διάταξη Τροφοδοσίας Ρευστού

Η διάταξη παροχής νερού στη δέσμη καθώς και της χρωστικής κατά την οπτικοποίηση της ροής αποτελείται από :

- Το δοχείο αποθήκευσης του νερού και την μεταλλική βάση στήριξής του
- Το διπλό δοχείο τροφοδοσίας - υπερχείλισης της δέσμης
- Τις δύο υποβρύχιες αντλίες
- Την ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα
- Το ροόμετρο
- Τους σωλήνες σύνδεσης
- Τον σωλήνα σχηματισμού της δέσμης
- Το κατακόρυφο φορείο μετακίνησης του σωλήνα της δέσμης

3.2.1. Δοχείο Αποθήκευσης Νερού - Χρωστικής

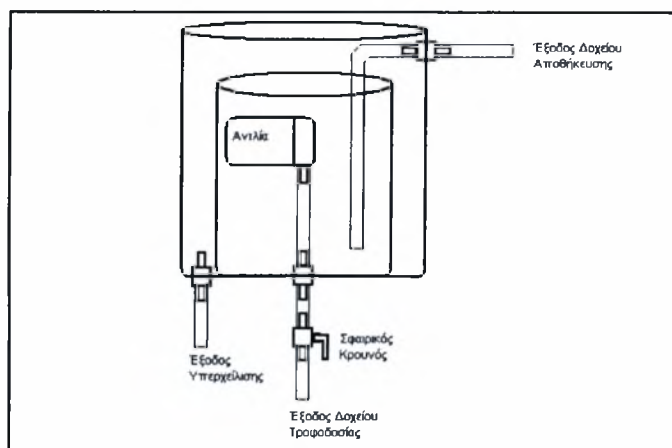
Το δοχείο στο οποίο αποθηκεύεται το νερό ή το διάλυμα της χρωστικής ουσίας. Έχει χωρητικότητα περί τα 60 λίτρα, Εικόνα 3.2. Εσωτερικά του τοποθετείται υποβρύχια αντλία που μέσω ελαστικών σωλήνων τροφοδοτεί το διπλό δοχείο τροφοδοσίας της δέσμης. Στο στόμιό του βιδώνεται καπάκι το οποίο φέρει τέσσερις οπές μέσα από τις οποίες περνούν οι τρεις ελαστικοί σωλήνες (της εξόδου της υποβρύχιας αντλίας που οδηγεί το ρευστό στο διπλό δοχείο τροφοδοσίας, της παροχής του με νερό από το δίκτυο ύδρευσης και του σωλήνα υπερχείλισης του διπλού δοχείου τροφοδοσίας της δέσμης) καθώς και το καλώδιο τροφοδοσίας της υποβρύχιας αντλίας με ρεύμα. Το δοχείο διατηρείται τοποθετημένο σε ύψος 1.5 m , ώστε να διευκολύνεται το έργο της αντλίας προκειμένου να ανεβάσει το νερό στο ύψος που βρίσκεται το δοχείο τροφοδοσίας, με τη χρήση μεταλλικής κατασκευής από τμήματα Ντέξιον.



Εικόνα 3.2. Το δοχείο αποθήκευσης νερού – διαλύματος χρωστικής

3.2.2. Διπλό Δοχείο Υπερχείλισης – Τροφοδοσίας

Αποτελείται από δύο δοχεία, το ένα μικρότερο του άλλου (10 και 20 λίτρα αντίστοιχα) και ομόκεντρα τοποθετημένα το ένα εντός του άλλου, Εικόνα 3.3. Στο κέντρο των πυθμένων των δύο δοχείων, που είναι μεταξύ τους κολλημένοι με ειδική κόλλα, υπάρχει σύνδεσμος που επιτρέπει την προσαρμογή σφαιρικού κρουνού στην εξωτερική του πλευρά και της δεύτερης υποβρύχιας αντλίας στην εσωτερική. Άλλοι δύο όμοιοι με τον παραπάνω σύνδεσμοι υπάρχουν στον πυθμένα και ανάμεσα στα τοιχώματα των δύο δοχείων καθώς και στο άνω μέρος του εξωτερικού δοχείου. Προσαρμόζοντας σε αυτούς ελαστικούς σωλήνες πετυχαίνουμε αφενός την τροφοδοσία του εσωτερικού δοχείου με ρευστό από την αντλία που βρίσκεται στο δοχείο αποθήκευσης καθώς και την ανακυκλοφορία της ποσότητας που υπερχειλίζει όταν αυτό γεμίσει. Ρυθμίζοντας μέσω του σφαιρικού κρουνού την παροχή προς τη δέσμη έτσι ώστε στο εσωτερικό δοχείο να εισέρχεται μεγαλύτερη ποσότητα ρευστού από αυτήν που εξέρχεται στη μονάδα του χρόνου, πετυχαίνουμε την διαρκή υπερχείλισή του. Έτσι διατηρούμε σταθερή την παροχή στην τροφοδοσία της δέσμης μιας και η στάθμη του ρευστού από την οποία τροφοδοτείται παραμένει πάντοτε σταθερή. Η ποσότητα του ρευστού που υπερχειλίζει από το εσωτερικό δοχείο επιστρέφει στο δοχείο αποθήκευσης. Στο Σχήμα 3.3. βλέπουμε το σχέδιο της παραπάνω διάταξης.



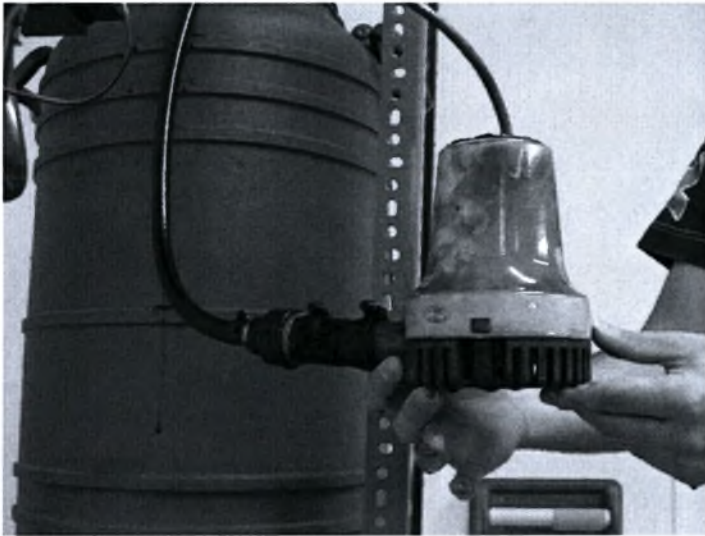
Σχήμα 3.3. Το διπλό δοχείο υπερχείλισης – τροφοδοσίας



Εικόνα 3.3. Το διπλό δοχείο υπερχείλισης – τροφοδοσίας

3.2.3. Υποβρύχιες Αντλίες

Η διάταξη παροχής της χρωστικής ουσίας χρησιμοποιεί δύο όμοιες υποβρύχιες αντλίες που λειτουργούν με ρεύμα 12 V, 8 A και έχουν μέγιστη παροχή 89 L/min, Εικόνα 3.4. Η πρώτη από τις δύο αυτές αντλίες βρίσκεται βυθισμένη μέσα στο δοχείο αποθήκευσης νερού – χρωστικής και η δεύτερη στο εσωτερικό δοχείο του διπλού δοχείου τροφοδοσίας της δέσμης.



Εικόνα 3.4. Η υποβρύχια αντλία

3.2.4. Ηλεκτρομαγνητική Βαλβίδα

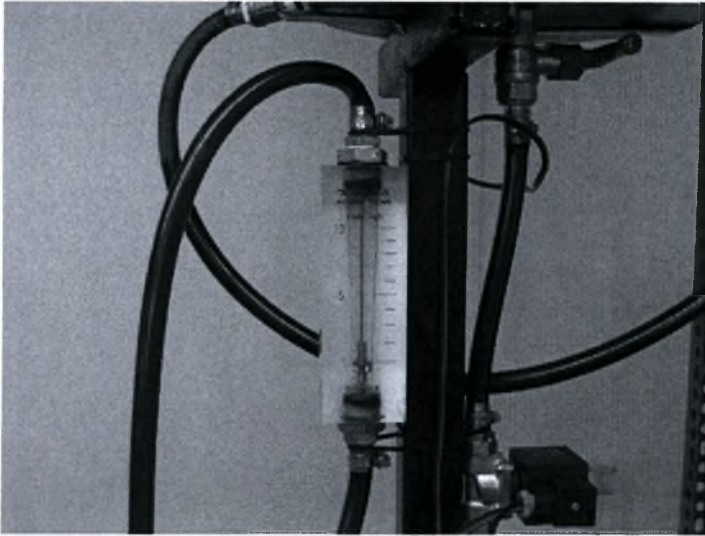
Μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα τύπου SIRAI Z110A 12V 8A , Εικόνα 3.5. χρησιμοποιείται για την έναρξη και το τέλος της τροφοδοσίας της δέσμης με ρευστό. Η ενεργοποίηση/ απενεργοποίησή της γίνεται με διακόπτη που ελέγχεται χειροκίνητα.



Εικόνα 3.5. Η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα

3.2.5. Ροόμετρο

Για τον ανά πάση στιγμή έλεγχο της παροχής του ρευστού της δέσμης χρησιμοποιείται ροόμετρο τύπου βαριδίου της KYTOLA INSTRUMENTS, Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6. Το ροόμετρο

3.2.6. Σωλήνες Σύνδεσης

Για την σύνδεση των διαφόρων εξαρτημάτων χρησιμοποιήθηκε διαφανής ελαστικός σωλήνας (αλφαδολάστιχο) εσωτερικής διαμέτρου 12 mm ο οποίος προσαρμόστηκε στα εκάστοτε εξαρτήματα χρησιμοποιώντας τις ανάλογες κάθε φορά συστολές ή διαστολές και εξασφαλίζοντας τη στεγανοποίηση των ενώσεων με ειδικούς σφικτήρες.

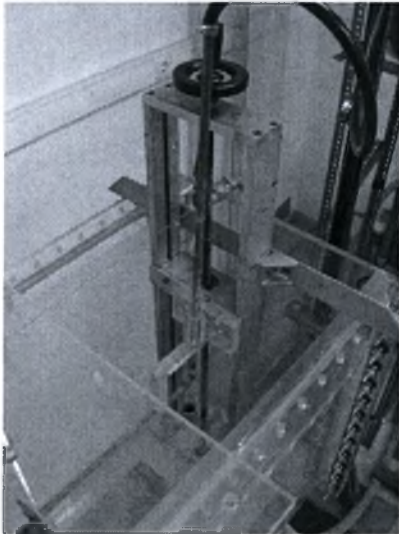
3.2.7. Σωλήνας Σχηματισμού της Δέσμης Ρευστού

Ο σωλήνας που δημιουργεί τη δέσμη του ρευστού αποτελείται από χαλκοσωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 8.5 mm σε σχήμα ανάποδου «Γ», Εικόνα 3.7. Εσωτερικά του, κατάντη της ροής και σε απόσταση 5 χαρακτηριστικές διαμέτρους μετά τη γωνία που σχηματίζει, τοποθετήθηκε ειδικό κεραμικό πλέγμα ώστε να περιορίζονται οι διαταραχές που προκαλούνται από την ύπαρξη της γωνίας.

3.2.8. Κατακόρυφο Φορείο Μετακίνησης του Σωλήνα της Δέσμης

Προκειμένου να μελετηθεί η αλληλεπίδραση της δέσμης με την απόστασή της από την επιφάνεια, ο σωλήνας μετακινείται σε διάφορες θέσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση μέσω φορείου πάνω στο οποίο εδράζεται χρησιμοποιώντας κατασκευή από Plexiglas που αποτρέπει την μετατόπιση του προς οποιαδήποτε κατεύθυνση Εικόνα 3.7.

Σε αντίθετη περίπτωση η παραμικρή μετακίνηση του σωλήνα δεν θα κάλυπτε τους πειραματικούς περιορισμούς και θα οδηγούσε σε λανθασμένα αποτελέσματα.



Εικόνα 3.7. Ο σωλήνας της δέσμης και η στήριξή του πάνω στο φορείο

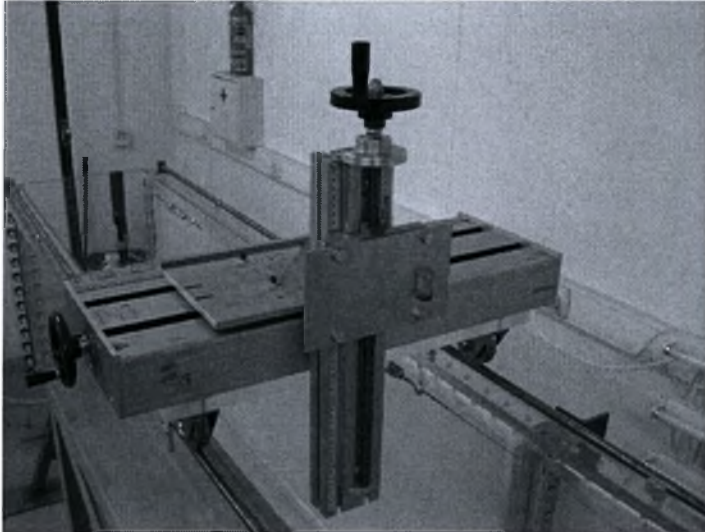
3.3. Διάταξη Μετακίνησης Μετρητικού

Το σύστημα μετακίνησης του μετρητικού οργάνου σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με τρόπο που να μην έρχεται σε αντίθεση με τους πειραματικούς περιορισμούς. Σκοπός ήταν η ακριβής μετακίνηση των αισθητήρων αλλά και η μελλοντική χρήση της δεξαμενής ως δεξαμενή με μεταφερόμενη τράπεζα. Για την κατακόρυφη και εγκάρσια μετακίνηση του αισθητήρα σε σχέση με τη δεξαμενή χρησιμοποιούνται δύο φορεία με κοχλίες κίνησης, κάθετα μεταξύ τους, Εικόνα 3.8.

Για την μετακίνηση κατά μήκος της δεξαμενής σχεδιάστηκε διάταξη που αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- 2 μεταλλικές ράβδους
- Τράπεζα μεταφοράς
- 6 τροχαλίες
- Βαρούλκο
- Ηλεκτρικός κινητήρας με μειωτήρα στροφών

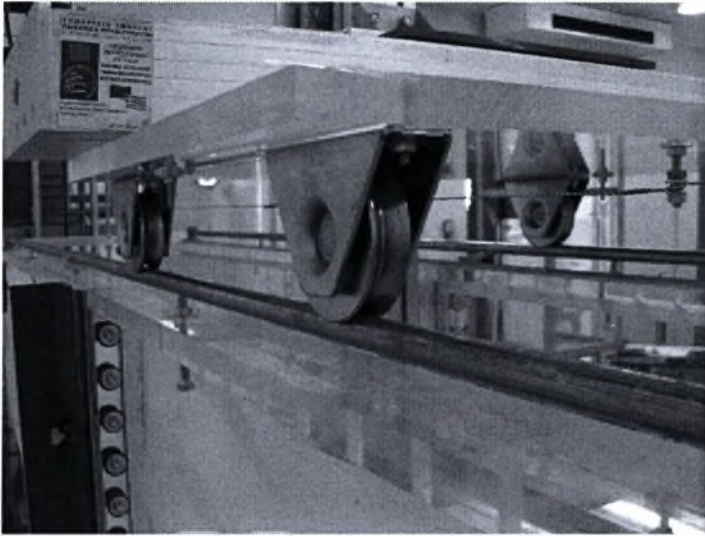
- Μετατροπέας της συχνότητας του ρεύματος (Inverter)
- Πετονιά ενισχυμένη με Kevlar
- 2 προεντατήρες



Εικόνα 3.8. Η διάταξη μετακίνησης του μετρητικού

3.3.1. Μεταλλικές Ράβδοι

Αρχικά τοποθετήθηκαν κατά μήκος της δεξαμενής, στο επάνω μέρος της, οι δύο μεταλλικές ράβδοι μήκους 3 m και διαμέτρου 16 mm οι οποίες χρησιμεύουν ως «ράγες» πάνω στις οποίες κυλά η τράπεζα που μεταφέρει το μετρητικό, Εικόνα 3.9. Οι ράβδοι στηρίζονται στα άκρα τους και ανά 1 m ,σε χειροποίητα, ρυθμιζόμενα καθ' ύψος έδρανα ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα λυγισμού και να είναι δυνατή η πλήρης ευθυγράμμιση και οριζοντιοποίησή τους.



Εικόνα 3.9. Οι μεταλλικές ράβδοι

3.3.2. Τράπεζα Μεταφοράς

Η τράπεζα μεταφοράς αποτελείται από μια πλάκα από Plexiglas που στις τέσσερις γωνίες της φέρει τοποθετημένες τροχαλίες τριγωνικού προφίλ που λειτουργούν ως «ρόδες» πάνω στις ράβδους – οδηγούς, Εικόνα 3.10. Σε σημείο κοντά στο κέντρο της πλάκας υπάρχει τοποθετημένος κοχλίας, σε σημείο που να μην ενοχλεί την λειτουργία του μετρητικού, στον οποίο με ένα συνδυασμό ροδελών και περικοχλίων προσαρμόζεται η πετονιά που με την κίνησή της θα μετακινεί την τράπεζα.



Εικόνα 3.10. Η τράπεζα μεταφοράς του μετρητικού

3.3.3. Τροχαλίες

Εκατέρωθεν της δεξαμενής τοποθετήθηκαν δύο μεταλλικοί στύλοι από κοιλοδοκό διαστάσεως 40×40×4 mm, πάνω στους οποίους προσαρμόστηκαν οι τροχαλίες που συνθέτουν το «κύκλωμα» της πετονιάς, Εικόνα 3.11. Επίσης στον έναν εκ των δύο στύλων στηρίζεται και το διπλό δοχείο τροφοδοσίας της δέσμης.



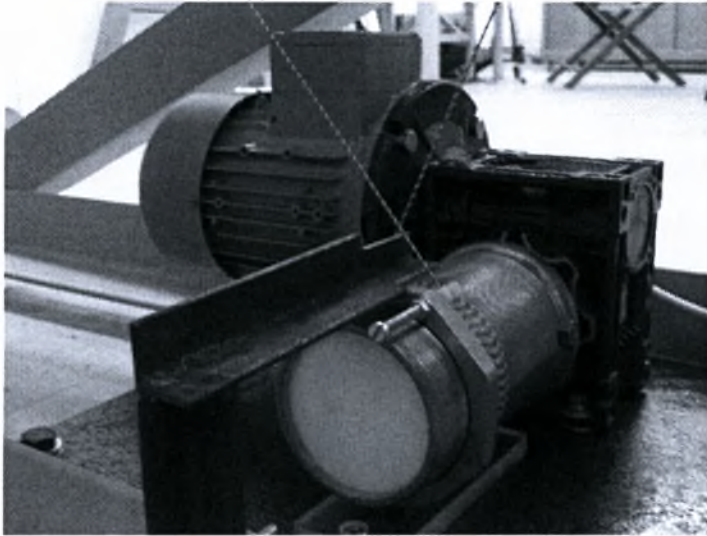
Εικόνα 3.11. Οι μεταλλικές κατασκευές και οι τροχαλίες

3.3.4. Βαρούλκο

Για το τύλιγμα και το ξετύλιγμα της πετονιάς, χρησιμοποιείται ως βαρούλκο ένας εξωτερικά σπειρωτομημένος κύλινδρος μήκους 150 mm και διαμέτρου 90 mm, Εικόνα 3.12. Προκειμένου να εξασφαλιστεί το σωστό τύλιγμα και ξετύλιγμα της πετονιάς, στην ελεύθερη άκρη του παραπάνω κυλίνδρου, τοποθετήθηκε ένα περικόχλιο – οδηγός, το οποίο ανάλογα με τη φορά περιστροφής του κυλίνδρου, βιδώνει ή ξεβιδώνει και μέσω δύο ράβδων που έχουν προσαρμοστεί πάνω του οδηγεί την πετονιά στο σωστό σπείρωμα.

3.3.5. Ηλεκτρικός Κινητήρας με Μειωτήρα Στροφών

Για την δεξιόστροφη και αριστερόστροφη περιστροφή του βαρούλκο χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρικός κινητήρας τύπου SIEMENS D-91056, 0.4 KW με μειωτήρα ατέρμωνα κοχλία, Εικόνα 3.12.



Εικόνα 3.12. Ο σπειρωτομημένος κύλινδρος, ο ηλεκτρικός κινητήρας και ο μειωτήρας στροφών

3.3.6. Μετατροπέας της Συχνότητας του Ρεύματος (Inverter)

Για τον ακριβή έλεγχο των στροφών του κινητήρα χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας της συχνότητας του ρεύματος (Inverter) τύπου N2-2P5-M TAIAN ELECTRIC Co, Ltd, Εικόνα 3.13. Έτσι, ανάλογα με τις στροφές που δίνουμε στον κινητήρα μπορούμε να ελέγχουμε την ταχύτητα μετακίνησης της τράπεζας πάνω στη δεξαμενή.



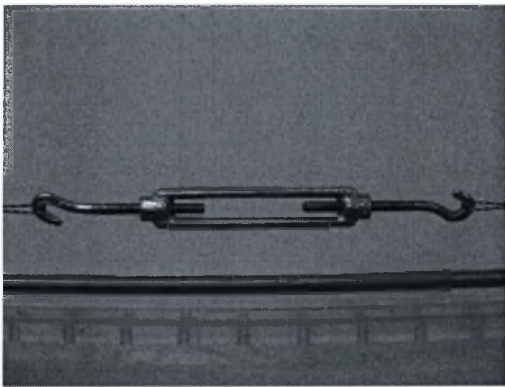
Εικόνα 3.13. Ο μετατροπέας της συχνότητας του ρεύματος (Inverter)

3.3.7. Πετονιά Ενισχυμένη με Kevlar

Η σύνδεση της τράπεζας με το βαρούλκο γίνεται μέσω πετονιάς ενισχυμένης με Kevlar διαμέτρου 2 mm.

3.3.8. Προεντατήρες

Προκειμένου να αποφύγουμε ταλαντώσεις κατά την μετακίνηση της τράπεζας αλλά και για να εξασφαλίσουμε ευκολότερη μετάβαση σε σταθερή ταχύτητα όταν η τράπεζα επιταχύνεται ή επιβραδύνεται, χρησιμοποιήσαμε δύο προεντατήρες ώστε να πετύχουμε το επιθυμητό τέντωμα της πετονιάς, Εικόνα 3.14.



Εικόνα 3.14. Ο προεντατήρας της πετονιάς

3.4. Μετρητικά Όργανα και Συσκευές

3.4.1. Μετρήσεις Ταχυτήτων

Τα μετρητικά όργανα και οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις ταχυτήτων είναι:

- Ανεμόμετρο θερμού σύρματος
- Σύστημα λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων [Ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D (analog/ digital)]
- Παλμογράφος
- Γεννήτρια συχνοτήτων

- Μετασχηματιστές – Μετατροπείς ηλεκτρικού ρεύματος AC σε DC

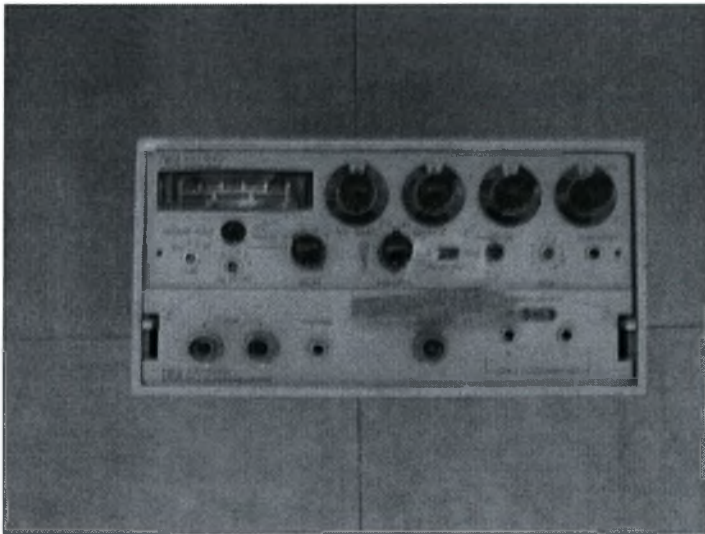
3.4.1.1.1. Ανεμόμετρο Θερμού Σύρματος

Ο τύπος του ανεμομέτρου που χρησιμοποιήθηκε είναι DISA, TYPE 55M01 MAIN UNIT & TYPE 55M10 CTA STANDARD BRIDGE, Εικόνα 3.15. Ο αισθητήρας είναι της DANTEC τύπος R11 (Hot – Film), η μεταβολή της αντίστασής του είναι περίπου 0,36% °C. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του έχει οριστεί από τον κατασκευαστή μικρότερη από 150 °C. Η αντίσταση του στους 20 °C είναι 6.4 Ω. Το υλικό κατασκευής του αισθητήρα είναι τανγκστένιο επικαλυμμένο με quartz.

Η ψηφιοποίηση του σήματος γινόταν με τον αναλογικό/ ψηφιακό μετατροπέα National Instrument PCI-MIO 16E-1.

Ο αισθητήρας του ανεμομέτρου αποτελείται από δύο ευθύγραμμες μεταλλικές ακίδες σε σχήμα V. Οι ακίδες αυτές ξεκινούν μέσα από ένα λευκό μονωτικό περίβλημα. Στο τέλος των ακίδων και κάθετα σε αυτές υπάρχει κολλημένο ένα πολύ λεπτό σύρμα (θερμό σύρμα) με διάμετρο 5 μm.

Η αντίσταση του σύρματος εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση. Τα ανεμόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων, από μικρές (0,03 m/s) έως υπερηχητικές. Η μεγάλη τους ευαισθησία τα κάνει να υπερτερούν των σωλήνων Pitot παρά το μεγαλύτερο κόστος τους. Είναι σε θέση να μετρήσουν ασταθείς ροές καθώς και να ανιχνεύσουν τη συχνότητα των διακυμάνσεων της εκάστοτε ροής.



Εικόνα 3.15. Το ανεμόμετρο

3.4.1.1.2. Αρχή Λειτουργίας του Hot – Film

Το ανεμόμετρο αποτελείται από ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone όπου το Hot-Film αποτελεί την μια από τις τέσσερις αντιστάσεις. Η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στο ότι αν γύρω από ένα θερμό σώμα ρέει υγρό το θερμό σώμα θα ψυχθεί και επομένως ο ρυθμός ψύξης του σχετίζεται με την ταχύτητα του υγρού. Η συσκευή του ανεμομέτρου ρυθμίζει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στα άκρα της αντίστασης του σύρματος, ώστε να διατηρείται πάντοτε σταθερή η θερμοκρασία του. Συνεπώς όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα της ροής τόσο πιο έντονη αποβολή θερμότητας πραγματοποιείται με συναγωγή, άρα τείνει η θερμοκρασία του σύρματος να ελαττωθεί λόγω της ψύξης. Επομένως προκαλείται αλλαγή της έντασης I του ρεύματος στα άκρα της αντίστασης του hot-film καθώς η γέφυρα Wheatstone τείνει να επαναφέρει το σύρμα στη θερμοκρασία λειτουργίας του. Έτσι υπάρχει μια συσχέτιση της έντασης του ρεύματος με την ταχύτητα του αέρα.

Όταν η γέφυρα ηρεμεί, το θερμό σύρμα έχει την αντίσταση που ο κατασκευαστής του έχει ορίσει ως αντίσταση λειτουργίας. Γι' αυτό και τα ανεμόμετρα αυτά ονομάζονται Ανεμόμετρα Σταθερής Θερμοκρασίας [C.T.A. (Constant Temperature Anemometer)].

Από την μεταβολή της έντασης του ρεύματος παράγεται μια διαφορά δυναμικού η οποία διαβάζεται από τον Η/Υ και αντιστοιχείται στην ταχύτητα με ένα ειδικό λογισμικό σε περιβάλλον Labview το οποίο στην προκειμένη περίπτωση υπολόγιζε την

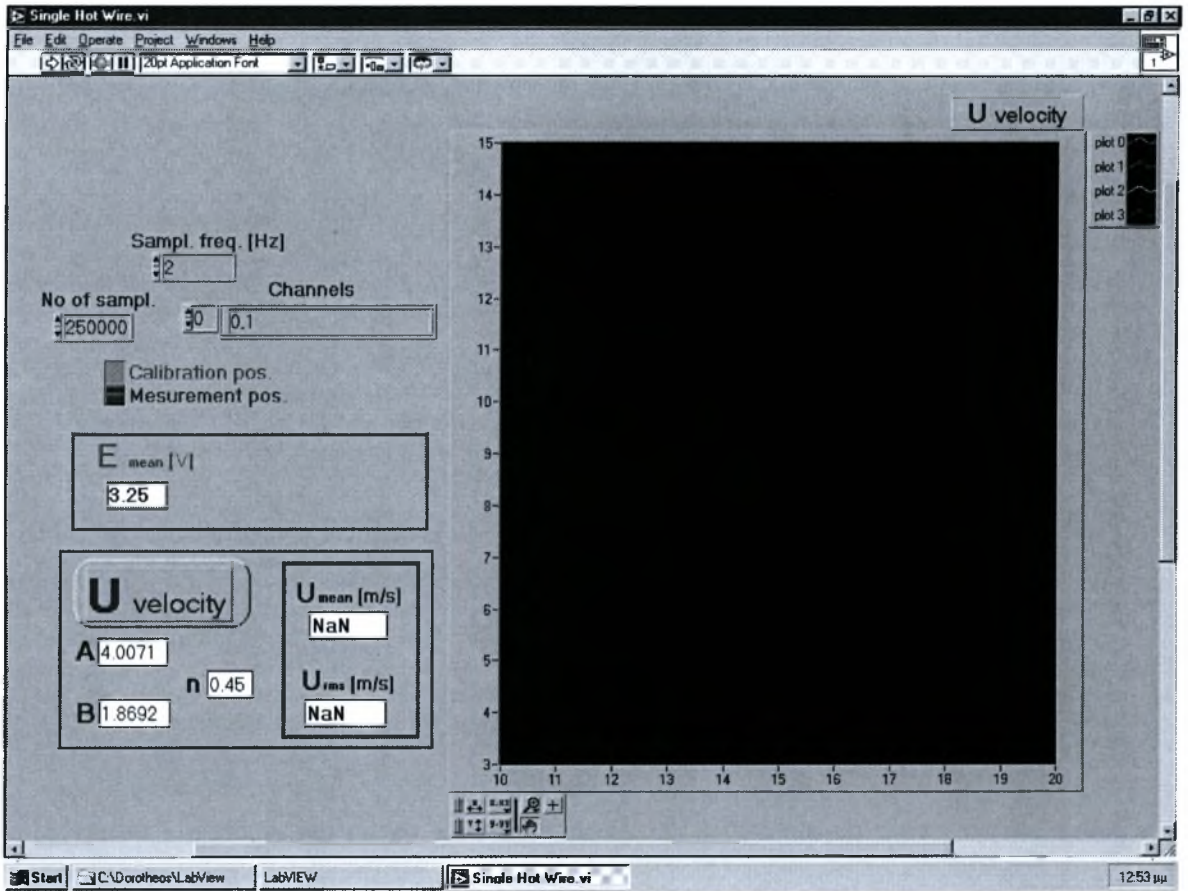
μέση τιμή ταχύτητας και τύρβης από την λήψη των δεδομένων από το ανεμόμετρο, η οποία γινόταν με PC μέσω κάρτας Analog-Digital.

3.4.1.2. Σύστημα Λήψης και Αποθήκευσης Μετρήσεων [Ηλεκτρονικός Υπολογιστής και Κάρτα A/D (analog/ digital)]

Για τις μετρήσεις των ταχυτήτων με το Hot – Film η δειγματοληψία και η αποθήκευση έγινε με την χρήση ειδικής ηλεκτρονικής κάρτας της National Instruments. Ο τύπος της είναι NI-DAQ CCA, AT-M 10 16XE-50, με δυνατότητα λήψης 8 καναλιών ταυτόχρονα στο εύρος των ± 10 V. Η κάρτα αυτή τοποθετήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που διαθέτε επεξεργαστή Pentium Pro 200MHz και 128MB μνήμης RAM, Εικόνα 3.16. Το λογισμικό επικοινωνίας αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Labview. Η επιφάνεια εργασίας του προγράμματος φαίνεται στην Εικόνα 3.17.



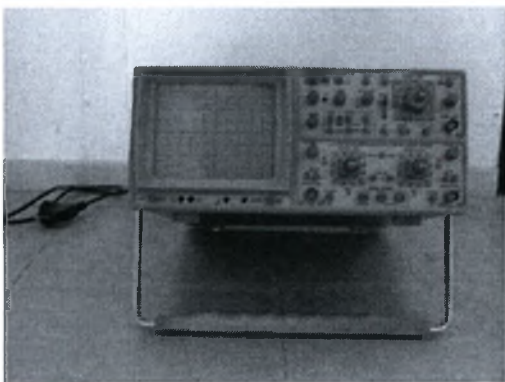
Εικόνα 3.16. Ο Η/Υ με την ειδική ηλεκτρονική κάρτα



Εικόνα 3.17. Η επιφάνεια εργασίας του προγράμματος σε περιβάλλον Labview

3.4.1.3. Παλμογράφος

Προκειμένου να έχουμε μια εποπτική εικόνα του σήματος που λαμβάνουμε στις διάφορες θέσεις χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος της Εικόνας 3.18.



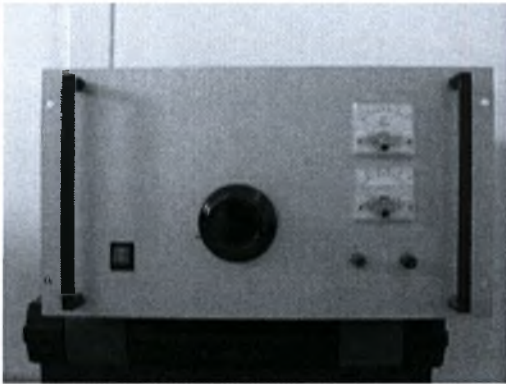
Εικόνα 3.18. Ο παλμογράφος

3.4.1.4. Γεννήτρια Συχνοτήτων

Για τον έλεγχο του συστήματος κατά το δοκιμαστικό στάδιο πριν τη ρύθμιση της τιμής της αντίστασης του Hot – Film και την έναρξη των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ακρίβειας του ανεμομέτρου με ελεγχόμενα σήματα που παράγαγε η γεννήτρια συχνοτήτων τύπου HAMEG Function Generator HM 8030.

3.4.1.5. Μετασχηματιστές – Μετατροπείς Ηλεκτρικού Ρεύματος AC σε DC

Προκειμένου να τροφοδοτηθούν οι αντλίες και η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα με ρεύμα χρησιμοποιήθηκαν 3 μετασχηματιστές – μετατροπείς του ηλεκτρικού ρεύματος από εναλλασσόμενο σε συνεχές, Εικόνα 3.19.

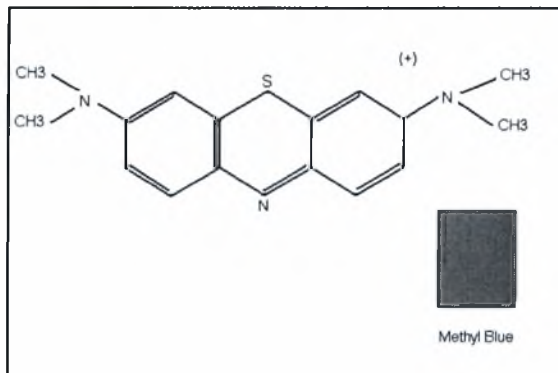


Εικόνα 3.19. Ο μετασχηματιστής ηλεκτρικού ρεύματος από AC σε DC

3.4.2. Οπτικοποίηση της Ροής

3.4.2.1. Χρώμα Οπτικοποίησης

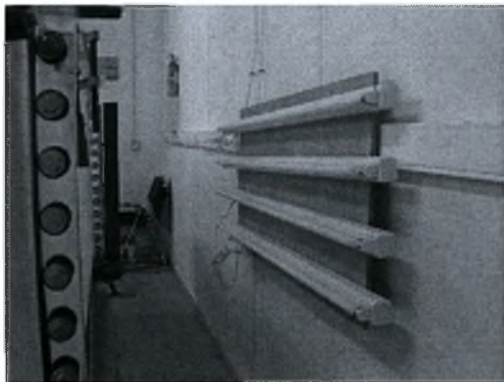
Η μέθοδος οπτικοποίησης που χρησιμοποιήθηκε είναι η οπτικοποίηση με συνεχή έγχυση χρωματικής βαφής (dye injection). Ως χρώμα χρησιμοποιήθηκε υδατικό διάλυμα Methyl Blue (μπλε χρώματος), Σχήμα 3.4., με χημικό τύπο $C_{16}H_{18}ClN_3S$ και M.B. 319,85 περιεκτικότητας 2% κατά βάρος.



Σχήμα 3.4. Το Methyl Blue

3.4.2.2. Ψηφιακή Κάμερα και Φωτισμός

Η μαγνητοσκόπηση των πειραμάτων έγινε με έγχρωμη βιντεοκάμερα 25 πλαισίων/sec. Πίσω από το χώρο δοκιμών και σε απόσταση 0,5 m τοποθετήθηκε ξύλινη επίπεδη πλάκα που πάνω της έφερε 4 λάμπες φθορισμού, Εικόνα 3.20. Άλλες 2 όμοιες λάμπες τοποθετήθηκαν κάτω από τον πυθμένα της δεξαμενής. Προκειμένου να έχουμε ομαλή διάχυση του φωτός, τα τοιχώματα της δεξαμενής πίσω από τα οποία υπήρχε φωτισμός, καλύφθηκαν με ριζόχαρτο.



Εικόνα 3.20. Ο λάμπες φθορισμού

4. Πειραματική & Υπολογιστική Μεθοδολογία

Οι μετρήσεις έγιναν σε δεξαμενή νερού. Μας ενδιέφερε κυρίως η επίδραση του τοιχώματος (πυθμένα) της δεξαμενής αλλά και της ελεύθερης επιφάνειας στην εκροή και ανάμειξη της δέσμης.

Ακολουθώντας τη βιβλιογραφία, επιλέχθηκε ένας αριθμός Reynolds της τάξης των 12000. Λόγω της μορφής τη δεξαμενής, η οπτικοποίηση της ροής μπορούσε να γίνει μόνο σε μήκος μικρότερου του 1 m, ενώ γνωρίζαμε ότι το φαινόμενο παρουσιάζει ενδιαφέρον για ανάπτυξη της ροής σε μήκος περίπου ίσο με 60 χαρακτηριστικές διαμέτρους. Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε ως διάμετρος του σωλήνα σχηματισμού της δέσμης τα 8,5 mm και ως μέγιστη μετρούμενη απόσταση οι 64 διάμετροι (54,5 mm).

Οι μετρήσεις που έγιναν χωρίζονται σε δύο στάδια. Το πρώτο περιλαμβάνει μετρήσεις ταχυτήτων με το Hot –Film και το δεύτερο οπτικοποίηση της ροής με τη βοήθεια ψηφιακής κάμερας.

4.1. Επιλογή Ταχύτητας Ροής

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η παροχή ρευστού της δέσμης επελέγη ίση με 5 L/min, δίνοντας έτσι μια ταχύτητα εκροής ίση με 1,47 m/s και αριθμό Reynolds ίσο με 12495.

4.2. Στήριξη στο Χώρο Δοκιμών

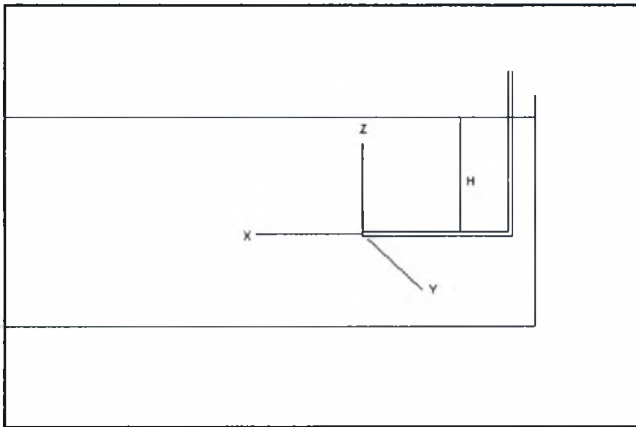
Ο χάλκινος σωλήνας από τον οποίο εκρέει η δέσμη τοποθετήθηκε όσο το δυνατόν κοντύτερα στο άκρο της δεξαμενής ώστε να μείνει εκμεταλλεύσιμο κατά την οπτικοποίηση όσο το δυνατό μεγαλύτερο μήκος του χώρου δοκιμών. Η στήριξή του έγινε με ιδιοκατασκευή από Plexiglas ώστε να μένει ακλόνητος μιας και η παραμικρή του μετακίνηση ήταν ανεπιθύμητη. Μέσω φορείου ατέρμονα κοχλία ήταν δυνατή η μετακίνηση του σωλήνα της δέσμης στα επιθυμητά ύψη και βάθη προκειμένου να μελετηθεί η αλληλεπίδρασή της με την ελεύθερη επιφάνεια και το στερεό όριο το πυθμένα.

4.3. Επιλογή των Αξόνων και Μεθοδολογία Μετρήσεων

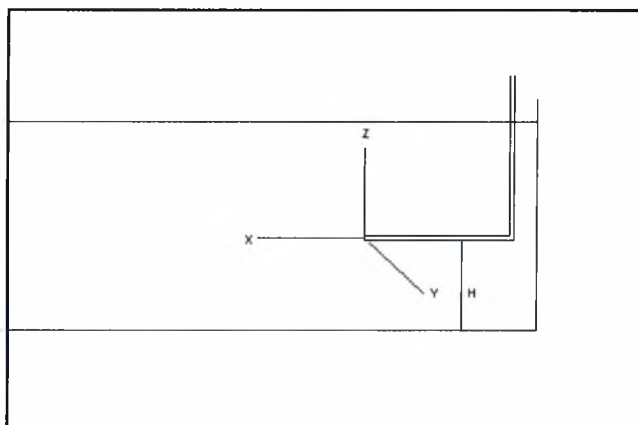
Σαν αρχή των αξόνων $(0,0)$ ορίστηκε το κέντρο της διατομής εκροής του σωλήνα σχηματισμού της δέσμης. Το σύστημα συντεταγμένων έχει τους εξής άξονες:

- X : άξονας κατά μήκος της δεξαμενής
- Y : άξονας κατά πλάτος της δεξαμενής
- Z : άξονας καθ' ύψος της δεξαμενής

Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στο Σχήμα 4.1. και Σχήμα 4.2. που περιγράφουν την τοποθέτηση των αξόνων κατά τη μελέτη της επίδρασης της ελεύθερης επιφάνειας και του στερεού ορίου του πυθμένα αντίστοιχα. Η αρχή της δέσμης τοποθετήθηκε στο μέσο του πλάτους του χώρου δοκιμών ώστε να εξασφαλιστεί συμμετρία της ροής κατά το επίπεδο ZOΧ. Η δέσμη μετακινούνταν κατά τον άξονα Z, ενώ διατηρούνταν κάθε φορά σταθερά τα X, Y.



Σχήμα 4.1. Σύστημα αξόνων κατά την μελέτη αλληλεπίδρασης της δέσμης με την ελεύθερη επιφάνεια



Σχήμα 4.2. Σύστημα αξόνων κατά την μελέτη αλληλεπίδρασης της δέσμης με το στερεό όριο του πυθμένα

4.4. Μέθοδος Μετρήσεων με το Hot – Film

Πριν πάρουμε μέτρηση με το Hot – Film γινόταν μέτρηση της αντίστασης του C.T.A. (Constant Temperature Anemometer) και (Calibration). Αυτά έχουν ως εξής:

4.4.1. Μέτρηση Αντίστασης C.T.A.

Η αντίσταση του Hot – Film υπολογίζεται από:

$$R_{\theta} = R_{20^{\circ}C} \cdot [1 + \alpha \cdot (\Theta - 20^{\circ}C)]$$

όπου :

R_{θ} : η αντίσταση του Hot – Film στη θερμοκρασία Θ

α : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Για τανγκστένιο $\alpha = 0,36\% / ^{\circ}C$

Η ένδειξη που μας δείχνει η συσκευή κατά τη βαθμονόμηση είναι η αντίσταση του Hot – Film και του καλωδίου μαζί. Εύκολα υπολογίζουμε πως για μήκος καλωδίου 5 m η αντίστασή του είναι ίση με 1Ω. Η αντίσταση του Hot – Film που προκύπτει είναι για θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για να την ανάγουμε στη θερμοκρασία λειτουργίας του αισθητήρα χρησιμοποιούμε τη σχέση που αναφέρουμε παραπάνω.

4.4.2. Βαθμονόμηση Hot – Film

Με την διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μετατροπή των Volts που έχουμε σαν έξοδο στο ανεμόμετρο σε ταχύτητα αέρα. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για την μετατροπή αυτή είναι η εξής:

$$E^2 = A + B * U^{0.45}, \text{ γνωστή και ως Νόμος του King.}$$

Όπου:

U : η ταχύτητα της ροής

E : η τάση που έχει σαν έξοδο το ανεμόμετρο

Προκειμένου να υπολογιστούν οι σταθερές A και B της παραπάνω εξίσωσης ακολουθήσαμε την εξής διαδικασία:

- Στο περιβάλλον εργασίας του Labview θέτουμε A=1 και B=0 (στο αρχείο Single Hot Wire.vi) μετατρέποντας έτσι τον αισθητήρα σε ένα απλό βολτόμετρο
- Τοποθετούμε τον αισθητήρα σε απόσταση X=2D από την αρχή των αξόνων ώστε η ταχύτητα της ροής εκεί να μπορεί να θεωρηθεί ίση με την μέση ταχύτητα του ρευστού στην έξοδο του σωλήνα
- Θέτουμε, μέσω του σφαιρικού κρουνού που υπάρχει μετά την έξοδο του δοχείου τροφοδοσίας, την παροχή του ρευστού στη δέσμη σε μια δεδομένη τιμή που διαβάζουμε από την ένδειξη του ροόμετρου.
- Παίρνουμε και αποθηκεύουμε την μέτρηση
- Επαναλαμβάνουμε τα δύο προηγούμενα βήματα για διάφορες παροχές ρευστού στη δέσμη
- Γνωρίζοντας την διάμετρο του σωλήνα σχηματισμού της δέσμης και την εκάστοτε παροχή, μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε τη μέση ταχύτητα στην έξοδο του σωλήνα. Έτσι φτιάχνουμε έναν πίνακα τάσης (E) και ταχύτητας (U).
- Υπολογίζουμε από το γράφημα των E^2 , $U^{0.45}$ τις σταθερές A και B.

4.4.3. Πειραματική Μεθοδολογία

Η αντίσταση του ανεμομέτρου του Hot – Film ρυθμίστηκε μια φορά πριν αρχίσουν οι μετρήσεις. Λόγω όμως του ότι είναι επιρρεπής στις μεταβολές των συνθηκών μέτρησης κάθε φορά που επρόκειτο να γίνουν μετρήσεις ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία.

Στην αρχή κάθε μέτρησης γινόταν βαθμονόμηση στο μετρητικό όργανο σύμφωνα με τα παραπάνω. Λόγω του ότι με την πάροδο του χρόνου η θερμοκρασία του νερού της δέσμης μεταβαλλόταν (κυρίως λόγω τριβών στις αντλίες) και μαζί της και η θερμοκρασία του στάσιμου νερού της δεξαμενής, στο τέλος μιας σειράς μετρήσεων επαναλαμβανόταν η διαδικασία της βαθμονόμησης. Αυτό μπορεί να συνέβαινε και δύο ή τρεις φορές τη μέρα, ανάλογα με τη μεταβολή των θερμοκρασιών.

Στο περιβάλλον του Labview οι σταθερές A και B παρέμεναν 1 και 0 αντίστοιχα και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Ουσιαστικά το πρόγραμμα είχε ως έξοδό του τάση και όχι ταχύτητα. Το γιατί ακριβώς συνέβαινε αυτό θα γίνει κατανοητό κατά την ανάλυση της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που θα γίνει αμέσως μετά.

Για τις διανομές των ταχυτήτων έγιναν μετρήσεις στις θέσεις $X/D = 4, 8, 12, 16, 20, 24, 32, 48, 64$ και $H/D = 1, 1.5, 2.5, 3.5, 24$ από την ελεύθερη επιφάνεια και $H/D = 1.5, 2.5, 3.5$ από τον πυθμένα. Το $H/D = 24$ αντιστοιχεί στο κέντρο της δεξαμενής.

4.4.4 Υπολογιστική Μεθοδολογία – Διαδικασία Εξαγωγής Αποτελεσμάτων

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν τιμές τάσης και της μέσης τετραγωνικής της απόκλισης. Προκειμένου να οδηγηθούμε σε τιμές ταχυτήτων ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία.

Από την αρχική και τελική βαθμονόμηση που πραγματοποιούνταν για κάθε σειρά μετρήσεων (ουσιαστικά για κάθε H/D), υπολογίζουμε τα δύο ζευγάρια των σταθερών A και B του νόμου του King καθώς και τις δύο τιμές που αντιστοιχούν στη μέση ταχύτητα στην έξοδο της δέσμης για την ταχύτητα διεξαγωγής των πειραμάτων ($U_{\text{αναφοράς}}$).

Με βάση τις τιμές αυτές υπολογίζουμε τις μέσες τιμές των A, B και $U_{\text{αναφοράς}}$. Η $U_{\text{αναφοράς}}$ θα χρησιμοποιηθεί για να αδιαστατοποιήσουμε τη διανομή των ταχυτήτων με βάση την μέγιστη ταχύτητα που εμφανίζεται στην αρχή των αξόνων. Με τα παραπάνω

μετατρέπουμε όλες τις τάσεις σε ταχύτητες και οδηγούμαστε στον υπολογισμό των τιμών $U_i/U_{\text{αναφοράς}}$ για κάθε θέση i .

Τα γραφήματα δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια των προγραμμάτων Microsoft Excel, Golden Software Surfer 8, Matlab 6.1.

4.4.5. Χρόνος και Συχνότητα Δειγματοληψίας

Το υπό εξέταση πρόβλημα είναι περιοδικό και αμέσως καταλαβαίνει κανείς πως για τη σωστή μελέτη του χρειάζεται ικανοποιητική χρονική κάλυψη των φαινομένων που παρουσιάζονται. Έτσι οι μετρήσεις που έγιναν έπρεπε να καλύπτουν ικανοποιητικό αριθμό περιόδων για να έχουμε μια σαφή εικόνα της μέσης ταχύτητας που επικρατεί σε κάθε θέση μετρήσεως.

Ωστόσο πολύ μεγάλος αριθμός περιόδων δημιουργεί προβλήματα αποθήκευσης και διαχείρισης των αρχείων που προκύπτουν.

Για το θέμα με το οποίο αυτή η εργασία ασχολείται κρίθηκε σκόπιμο η δειγματοληψία να περιέχει 25000 μετρήσεις με συχνότητα 500Hz. Η κάθε μέτρηση λοιπόν διαρκούσε 50 sec.

4.4.6. Ακρίβεια των Μετρήσεων και Μέθοδοι Περιορισμού Σφαλμάτων

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με το Hot – Film ελήφθησαν μέτρα για την αποφυγή σφαλμάτων. Ο σωλήνας συγκράτησης του αισθητήρα δεν ακουμπούσε πουθενά αλλού εκτός από το βερνιέρο όπου στηριζόταν. Αυτό γινόταν για την αποφυγή εισαγωγής σφάλματος εξαιτίας δονήσεων.

Επίσης έγιναν προσπάθειες το καλώδιο των 5 m μεταφοράς του σήματος από τον αισθητήρα στον Η/Υ μέσω του ανεμομέτρου να μην αγγίζει σε μεταλλικές επιφάνειες.

Όσες συσκευές εξέπεμπαν ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά σήματα και ιδίως ο inverter και ο μετασχηματιστής του ρεύματος να τοποθετηθούν κατά το δυνατόν μακρύτερα από το καλώδιο λήψης δεδομένων του αισθητήρα. Λόγω της αναγκαστικής ύπαρξης τέτοιων συσκευών υπήρξε κάποιος «θόρυβος» στο σήμα που λαμβάνουμε από το καλώδιο του αισθητήρα. Ωστόσο η απόκλιση που εμφανίστηκε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Οι συχνές βαθμονομήσεις μας επέτρεψαν να έχουμε μια σαφή εικόνα των μεταβολών των ιδιοτήτων του μετρητικού οργάνου που επηρεάζονται από τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Έτσι καταφέραμε να έχουμε όσο το δυνατόν ακριβέστερα αποτελέσματα και κυρίως ικανά να συγκριθούν μεταξύ τους.

4.5. Μέθοδος Οπτικοποίησης της Ροής

Η εξαγωγή και ανάλυση των πραγματοποιήθηκε με ψηφιακή επεξεργασία εικόνας (digital image analysis). Παρακάτω ακολουθεί ανάλυση των παραμέτρων (συνθήκες) των πειραμάτων καθώς και η υπολογιστική διαδικασία (προγράμματα).

4.5.1. Πειραματική Μεθοδολογία

Κατά την προσπάθεια οπτικοποίησης της ροής οι αποστάσεις της κάμερας και των λαμπτήρων φωτισμού διατηρήθηκαν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό μιας και η τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel (pixel intensity) είναι ανάλογη της απόστασης στην οποία βρίσκεται τοποθετημένος ο φακός της ψηφιακής κάμερας (βάθος χρώματος – color depth). Διατηρώντας λοιπόν σταθερές αυτές τις αποστάσεις εξασφαλίσαμε την σταθερότητα των πειραματικών μας παραμέτρων.

Επίσης σημαντικό ρόλο στην όλη διαδικασία έπαιξαν οι θέσεις στις οποίες τοποθετούνταν η δέσμη. Τα H/D που μελετήθηκαν είναι H/D = 1, 1.5, 2, 2.5, 3.5, 7, 24 από την ελεύθερη επιφάνεια και H/D = 1.5, 2.5, 3.5, 7 από τον πυθμένα. Το H/D = 24 αντιστοιχεί στο κέντρο της δεξαμενής.

Κατά τη διαδικασία της μαγνητοσκόπησης η κάμερα άνοιγε 5 sec πριν μπει χρώμα και η διάρκεια της μαγνητοσκόπησης ήταν 15 sec για κάθε θέση. Ο χρόνος αυτός επιλέχθηκε τόσο μικρός γιατί αν το χρώμα αφηνόταν να ρέει για περισσότερο παρουσιάζονταν φαινόμενα ανακυκλοφορίας που επηρέαζαν αρνητικά το πείραμα.

4.5.2. Υπολογιστική Μεθοδολογία – Διαδικασία Εξαγωγής Αποτελεσμάτων

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων βασίστηκε στην επεξεργασία εικόνας από λογισμικό που διέθετε το πανεπιστήμιο (MATLAB 6.1.) καθώς και από freeware λογισμικό που αποκτήθηκε μέσω internet (VirtualDub, Irfan View 32).

Η αποθήκευση των videos των πειραμάτων γινόταν σε κασέτες από τις οποίες μεταφερόταν αργότερα στον Η/Υ μέσω frame grabber. Η ανάλυση των αρχείων αυτών ήταν 352X288. Ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν 15 frames/ sec, δηλαδή το χρονικό διάστημα που μεσολαβούσε μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών ήταν 0,067 sec (1/15).

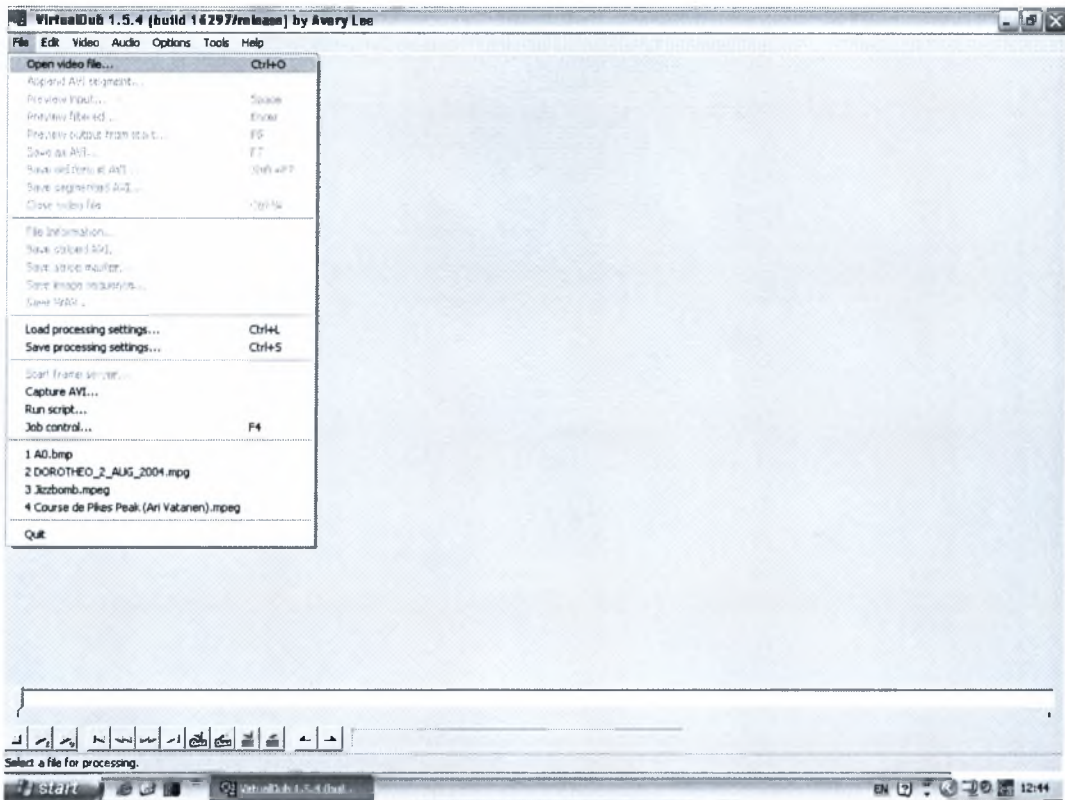
Το «κόψιμο» των προς επεξεργασία φωτογραφιών από τα videos των πειραμάτων έγινε με το πρόγραμμα VirtualDub.

4.5.2.1. Πρόγραμμα VirtualDub

Το πρόγραμμα αυτό μετατρέπει κάθε καρέ του αρχείου avi σε φωτογραφία – αρχείο οποιουδήποτε τύπου επιλεχθεί (bmp, jpg ή άλλο)

Για να γίνει αυτό:

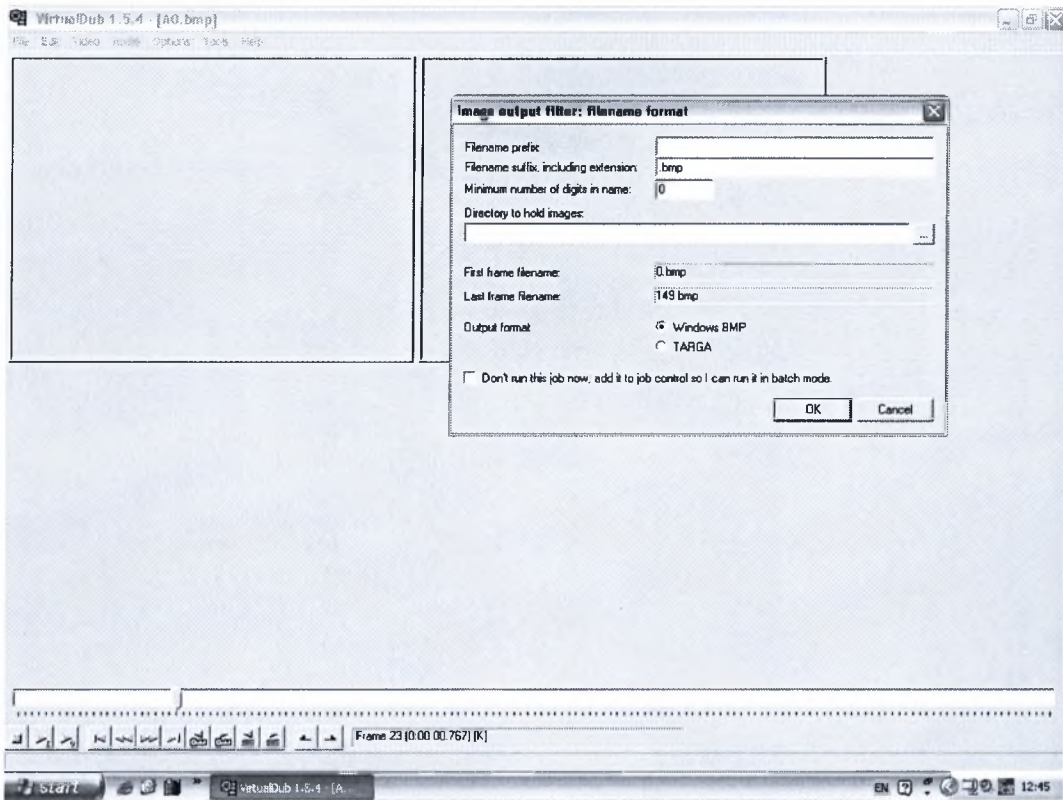
File → Open video file... και βρίσκουμε το video που επιθυμούμε



Αφού επιλεγθεί το προς επεξεργασία video ξεκινά η διαδικασία «κοψίματος» των φωτογραφιών. Μετακινώντας την μπάρα μπορούμε να πλοηγηθούμε μέσα στο video και να ορίσουμε το καρέ εκείνο από το οποίο θα ξεκινήσει το «κόψιμο». Η επιλογή του καρέ από το οποίο θα ξεκινήσει η διαδικασία γίνεται με το πλήκτρο «Home». Έπειτα γίνεται η επιλογή του καρέ στο οποίο θα τελειώσει η διαδικασία με το πλήκτρο «End».

Έπειτα επιλέγουμε:

File → Save image sequence όπου εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο διαλόγου:



Στο «filename prefix» δίνεται το όνομα των εικόνων, στο «minimum number of digits» η τιμή 3, ενώ στο «directory to hold images» ο φάκελος προορισμού.

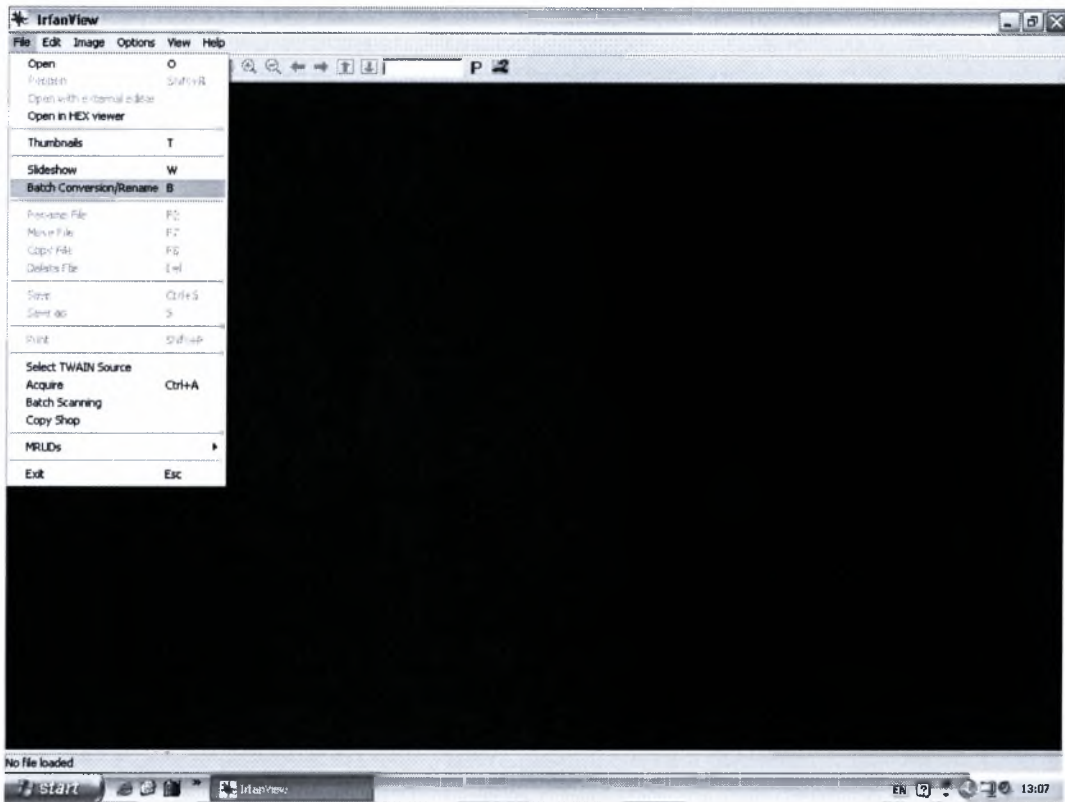
Η ανάλυση των εικόνων που προκύπτουν είναι ίδια με αυτή των αρχείων avi. Αρχικά οι φωτογραφίες αποθηκεύτηκαν ως bmp. Επειδή τα αρχεία avi ήταν έγχρωμα (βάθος ανάλυσης 24 RGB) χρειάστηκε η μετατροπή των έγχρωμων εικόνων σε γκρι (gray scale). Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας Irfan View 32.

4.5.2.2. Πρόγραμμα Irfan View 32

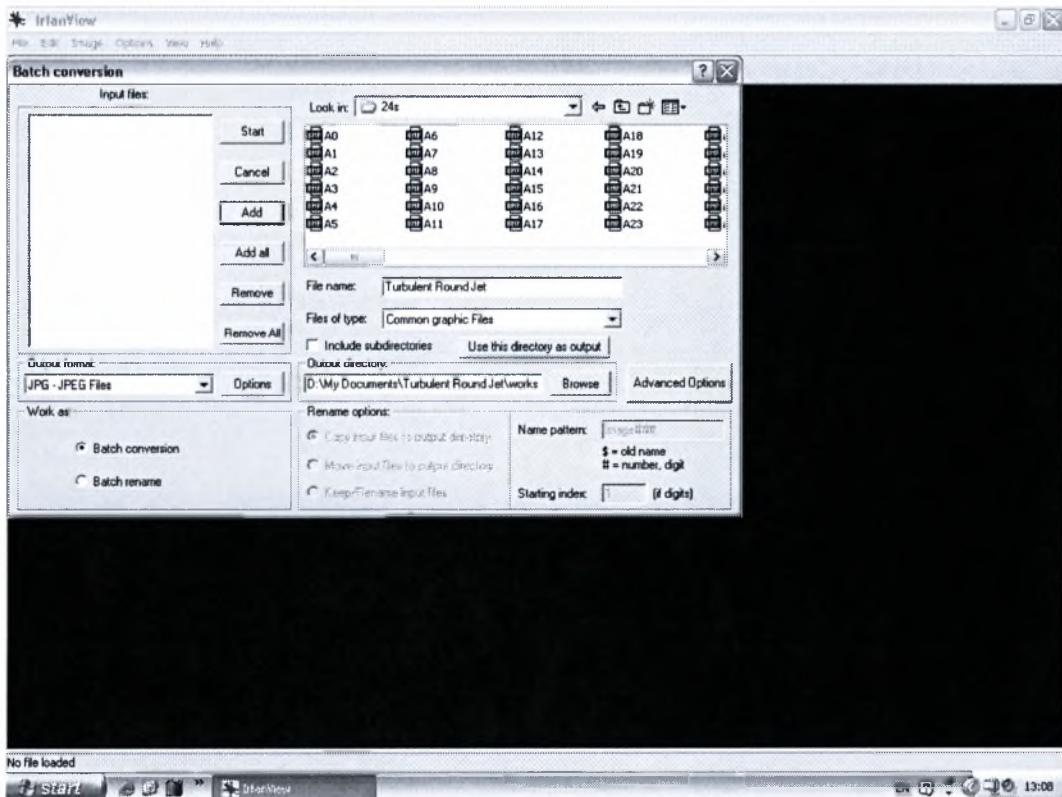
Με το πρόγραμμα αυτό μετατρέπουμε τις έγχρωμες φωτογραφίες που παίρνουμε από την επεξεργασία των videos με το VirtualDub σε γκρι. Αυτό γίνεται ως εξής:

Επιλέγουμε:

File → Batch conversion/ rename



Εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο διαλόγου:



Αφού επιλεγθεί ο φάκελος στον οποίο βρίσκονται οι φωτογραφίες του video στο «Look in» και ο φάκελος προορισμού τους στο «Output directory» συνεχίζουμε με «Add all» → «Start» και γίνεται μετατροπή των έγχρωμων εικόνων bmp (24 RGB) σε γκρι jpg (8 bit). Αυτό σημαίνει πως κάθε pixel της γκρι jpg εικόνας λαμβάνει μια τιμή μεταξύ του 0 και 255 (συνολικά 2^8 διακριτές τιμές). Η τιμή 0 αντιστοιχεί σε μαύρο και η τιμή 255 στο λευκό. Οι ενδιάμεσες τιμές αντιστοιχούν σε διάφορα επίπεδα του γκρι.

4.5.2.3. Επεξεργασία με τα προγράμματα του MATLAB 6.1.

Γνωρίζοντας τις πραγματικές της πειραματικής διάταξης (όπως χαρακτηριστικά μεγέθη σαν τη διάμετρο του σωλήνα της δέσμης ή τα μήκη κανόνων που εμφανίζονται στις εικόνες) υπολογίζεται μια αναλογία μεταξύ mm (πραγματικό μήκος) και pixel, η οποία έχει εισαχθεί στα προγράμματα. Εύκολα κατανοούμε πως η ακρίβεια της μεθόδου αυτής είναι της τάξης μεγέθους των διαστάσεων των pixel. Έτσι δεν μπορούμε να μιλήσουμε για διαστάσεις μικρότερες από αυτές που αντιστοιχούν σε ένα pixel. Εδώ αξίζει να αναφερθεί πως όλες οι διαστάσεις και αποστάσεις στο πεδίο ροής είναι αδιαστατοποιημένες με τη διάμετρο της δέσμης. Έτσι κατά τον άξονα X, δηλαδή κατά τη διεύθυνση κατά μήκος της ροής της δέσμης, οι αποστάσεις μετρούνται σε X/D από την αρχή των αξόνων. Ανάλογα ισχύουν και για τους άξονες Y και Z. Τέλος αδιαστατοποιημένη ως H/D είναι και η κατακόρυφη μετατόπιση της δέσμης από την ελεύθερη επιφάνεια και τον πυθμένα. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η αντιστοιχία των συντεταγμένων του pixel σε X/D και Y/D για κάθε H/D.

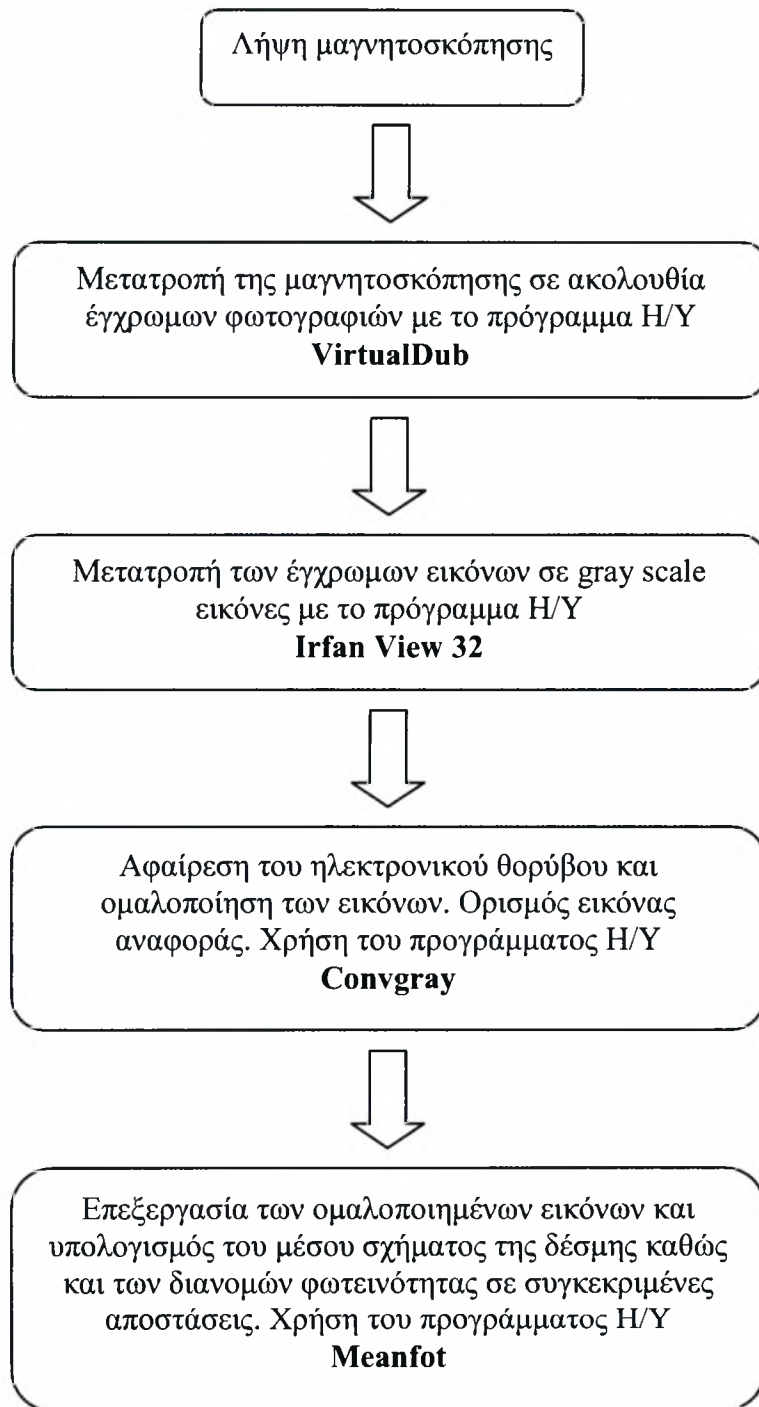
4.5.2.3.1. Πρόγραμμα Convgray

Η χρήση αυτού του προγράμματος έγινε για να αφαιρεθεί ο ηλεκτρονικός θόρυβος από τις φωτογραφίες, (Αλυγιζάκης, 2004). Το υπολογιστικό πακέτο MATLAB 6.1. περιέχει στις βιβλιοθήκες του περίπου 100 ηλεκτρονικά φίλτρα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί ένα φίλτρο συνέλιξης (convolution filter) Gaussian 15X15 το οποίο επεμβαίνει στις gray scale (jpg 8 bit) εικόνες με σκοπό την ομαλοποίησή τους (smoothing).

4.5.2.3.2. Πρόγραμμα Meanfot

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί το μέσο σχήμα της δέσμης και οι διανομές φωτεινότητας σε διάφορες θέσεις, (Αλύγιζάκης, 2003). Η πρώτη από τις 150 gray scale (jpg 8 bit) εικόνες που επεξεργάζεται το πρόγραμμα για κάθε H/D της δέσμης περιέχει το χώρο δοκιμών πριν ακόμα αρχίσει να ρέει η χρωστική ουσία. Η εικόνα αυτή ορίζεται ως εικόνα αναφοράς. Από την εικόνα αυτή το πρόγραμμα δημιουργεί έναν δισδιάστατο πίνακα του οποίου τα στοιχεία είναι η φωτεινότητα που αντιστοιχεί σε κάθε pixel της ανάλυσης (από 0 έως 255). Στη συνέχεια το πρόγραμμα δημιουργεί άλλους 149 τέτοιους πίνακες για τις υπόλοιπες φωτογραφίες που περιέχουν τη δέσμη στην πλήρη της ανάπτυξη στο ίδιο με παραπάνω H/D. Οι τιμές του πίνακα αναφοράς αφαιρούνται από τους υπόλοιπους πίνακες και από αυτούς βρίσκεται η μέση φωτεινότητα που αντιστοιχεί σε κάθε pixel της ανάλυσης. Η τιμές αυτές αδιαστασιοποιούνται με τη μέγιστη κάθε φορά εμφανιζόμενη συγκέντρωση ώστε τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Τέλος δημιουργούνται οι διανομές μέσης φωτεινότητας για συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο δοκιμών.

Στο Σχήμα 4.3. Φαίνεται η διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των μετρήσεων καθώς και η σειρά με την οποία χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω προγράμματα



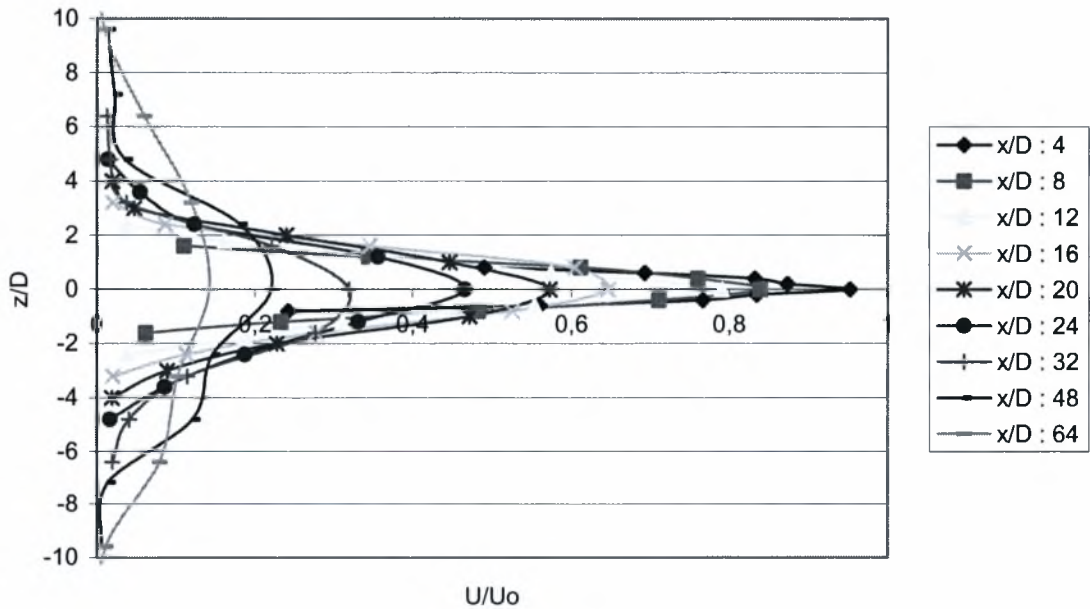
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα υπολογιστικής διαδικασίας για την εύρεση του μέσου σχήματος της δέσμης καθώς και των διανομών φωτεινότητας

5. Διερεύνηση των φαινομένων ανάμειξης κοντά σε διεπιφάνεια και στερεά όρια

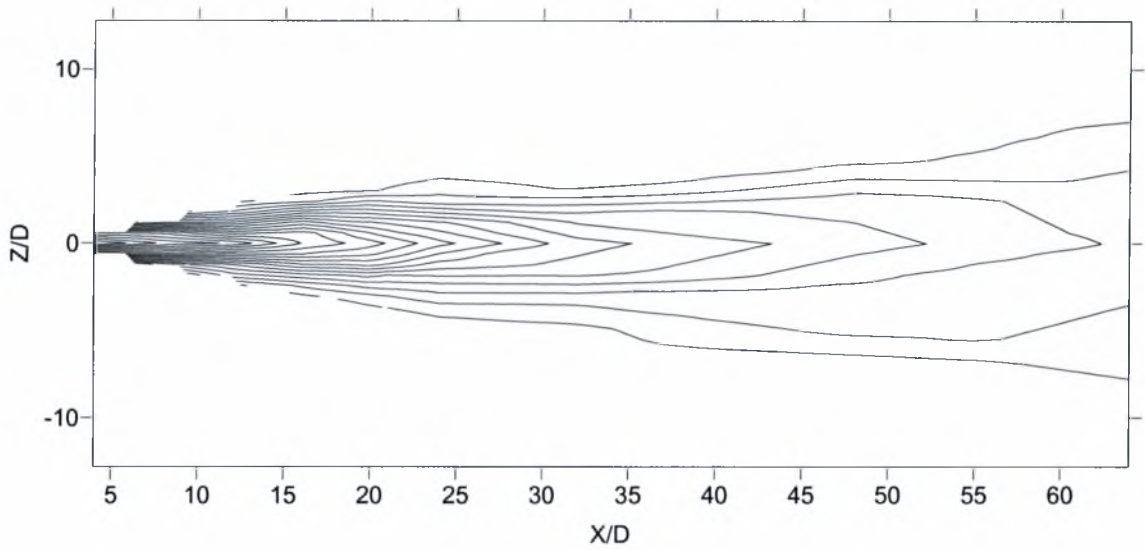
Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα από την πειραματική μελέτη του προβλήματος σχετικά με τις διανομές ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Σε αυτά που αφορούν την αλληλεπίδραση της δέσμης με την ελεύθερη επιφάνεια και σε αυτά που αφορούν την αλληλεπίδραση της δέσμης με το στερεό τοίχωμα.

5.1. Ελεύθερη Δέσμη

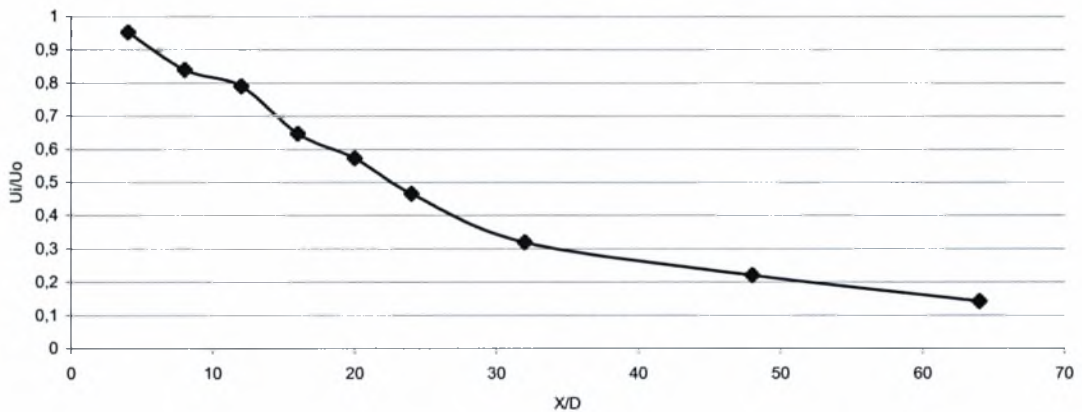
5.1.1. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=24$ (free jet)



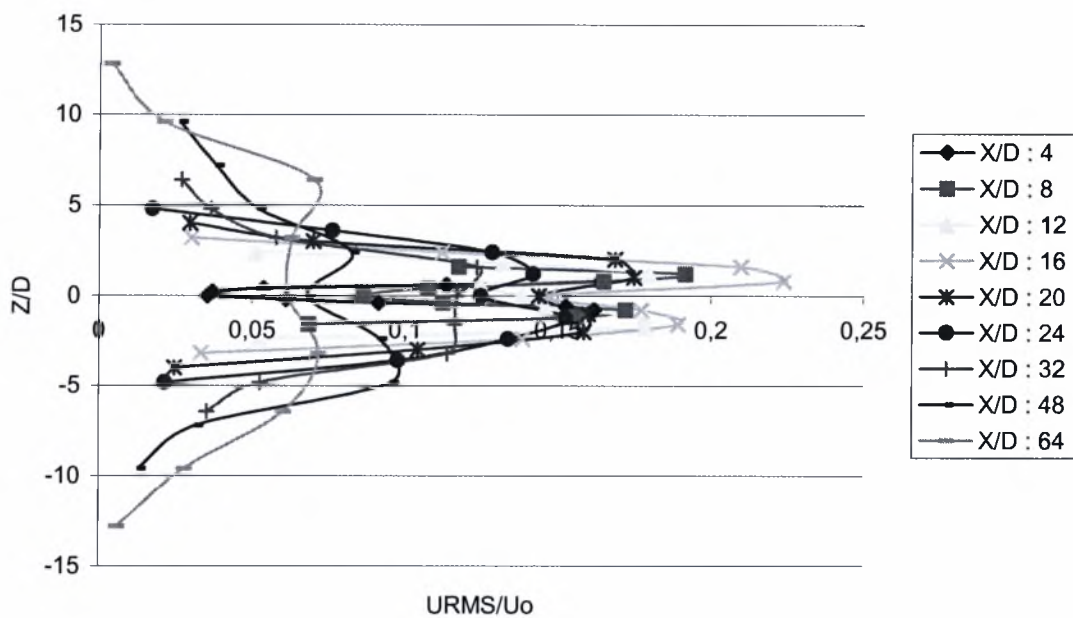
Διάγραμμα 5.1. Διανομή μέσης ταχύτητας για $H/D=24$



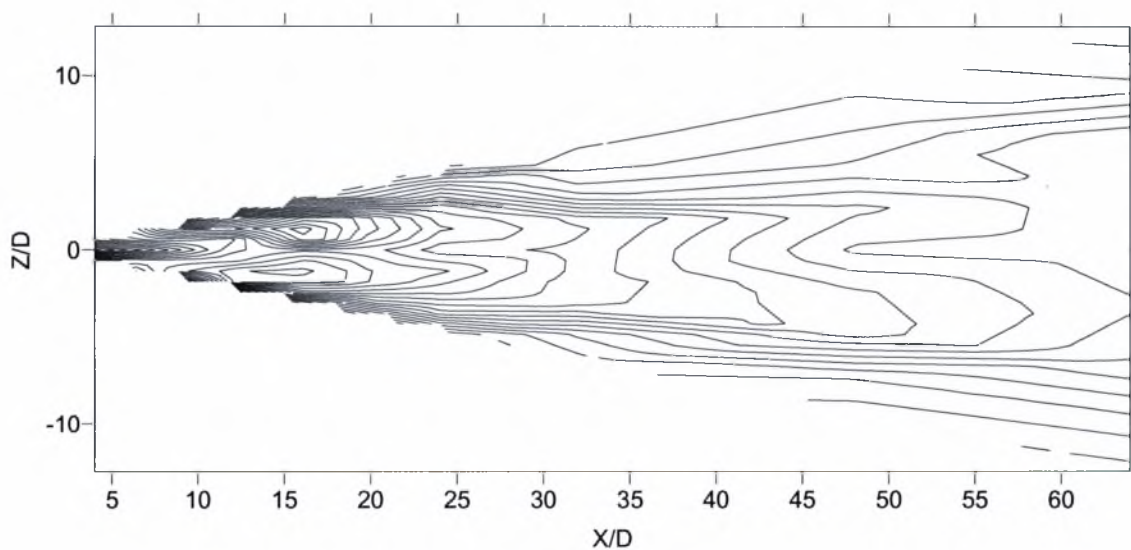
Διάγραμμα 5.2. Ισοψείς καμπύλες μέσων ταχυτήτων για $H/D=24$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U/U_0 = 1$.



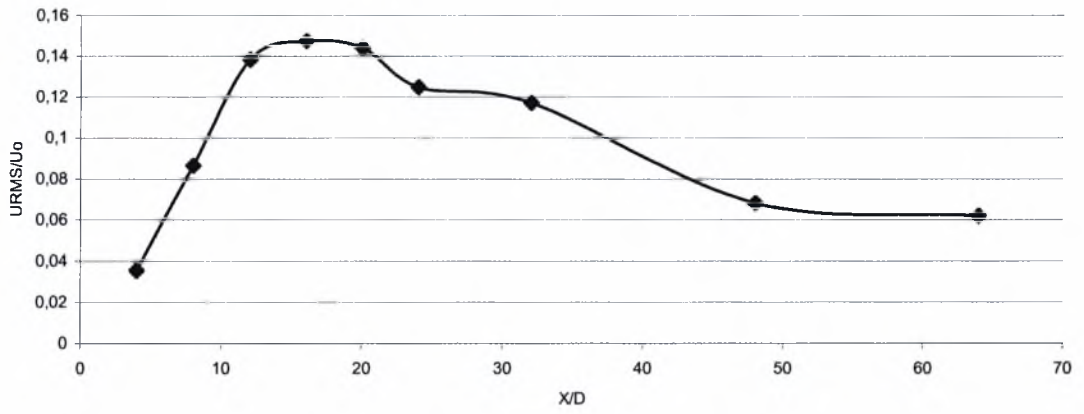
Διάγραμμα 5.3. Διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=24$



Διάγραμμα 5.4. Διανομή έντασης τύρβης για $H/D=24$.



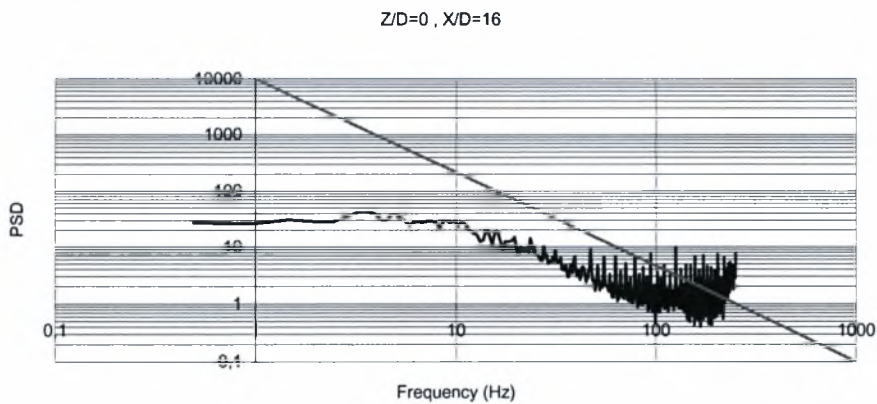
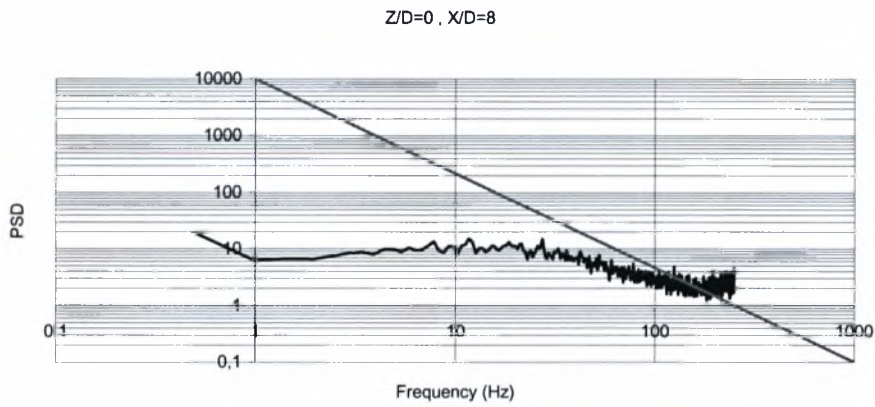
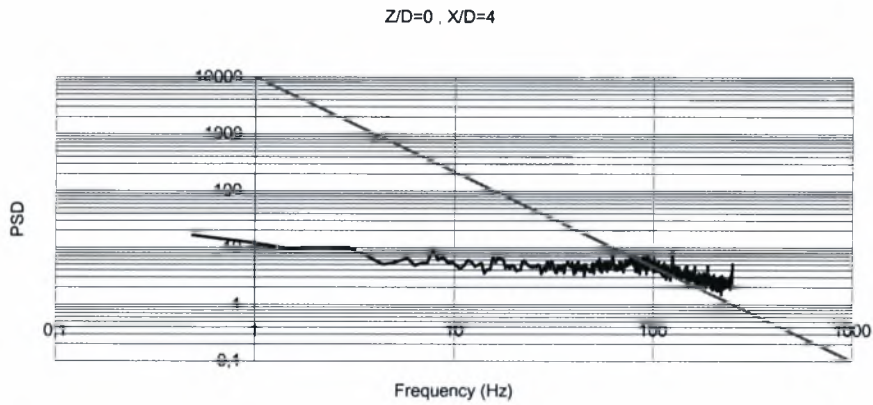
Διάγραμμα 5.5. Ισοϋψείς καμπύλες έντασης τύρβης για $H/D=24$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U_{RMS}/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U_{RMS}/U_0 = 0,22$.

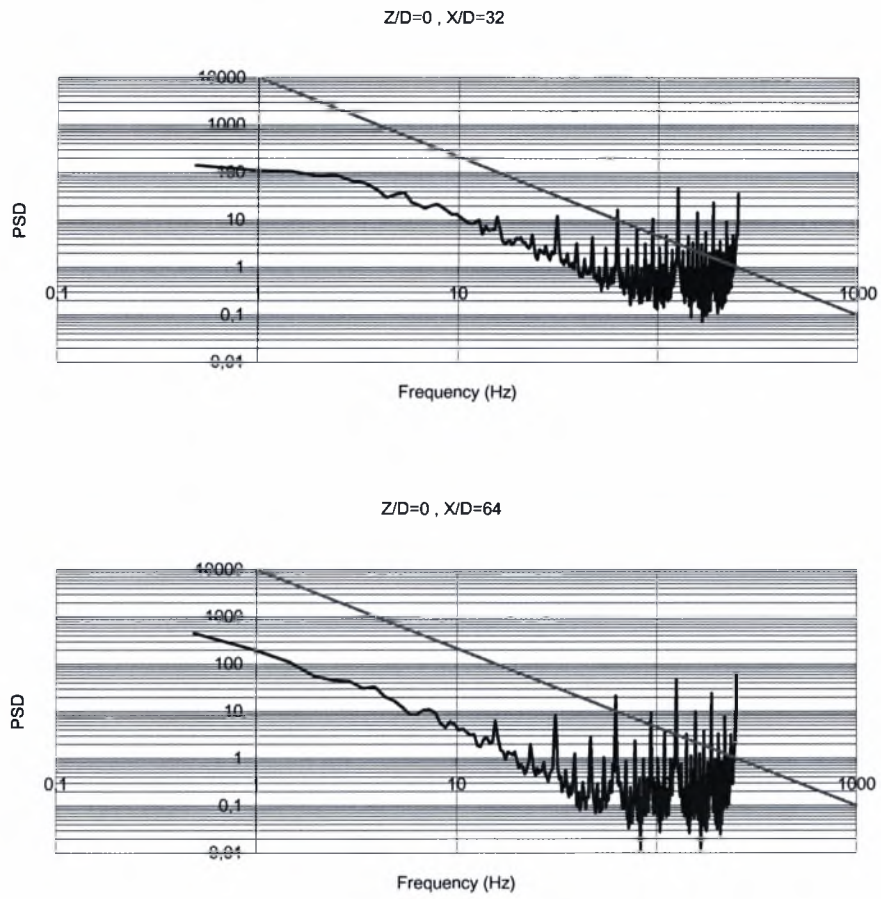


Διάγραμμα 5.6. Διανομή έντασης τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=24$

Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD).

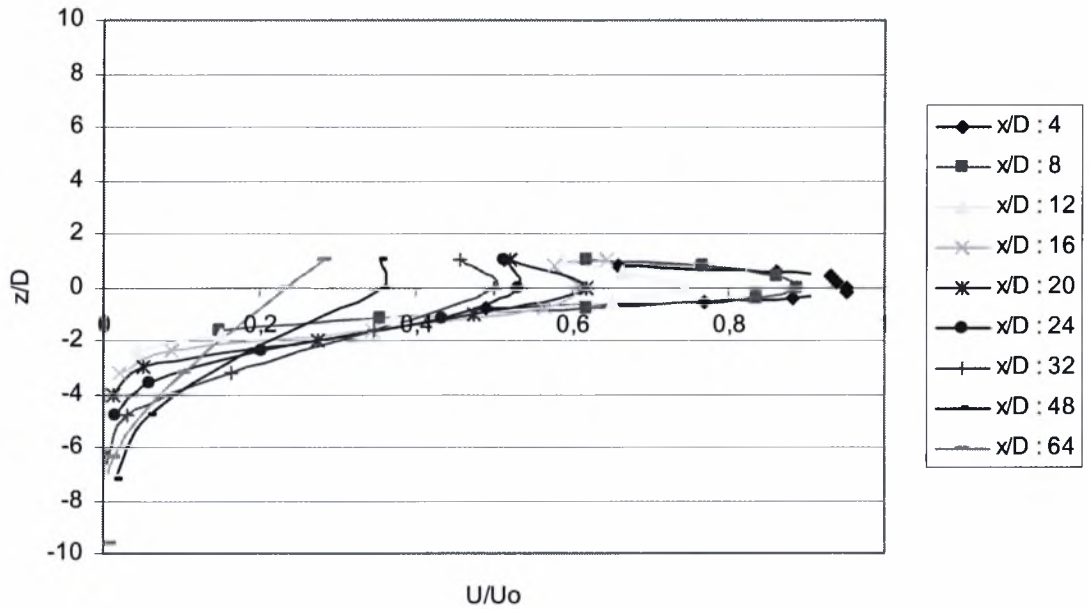
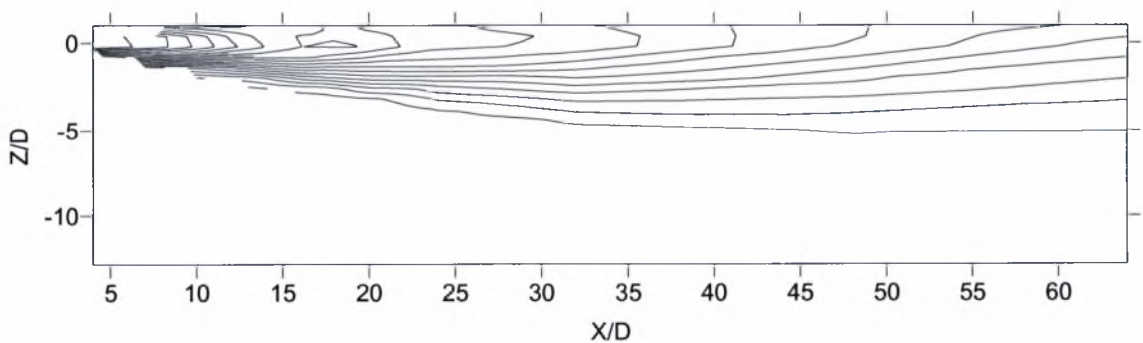
Ως τίτλος του κάθε γραφήματος εμφανίζεται η θέση στην οποία αντιστοιχεί ενώ η ευθεία γραμμή που εμφανίζεται έχει κλίση $-5/3$ και χρησιμοποιείται για το σχολιασμό των γραφημάτων που γίνεται παρακάτω.



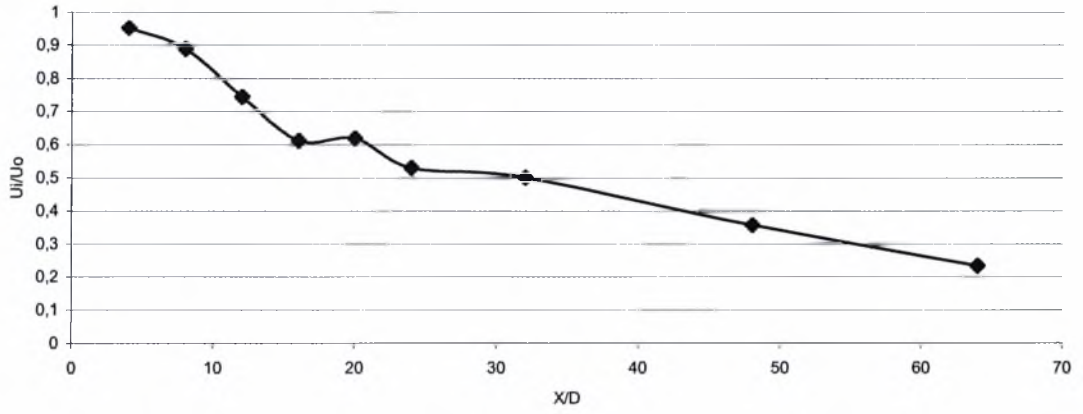


Διάγραμμα 5.7. Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος για $H/D=24$

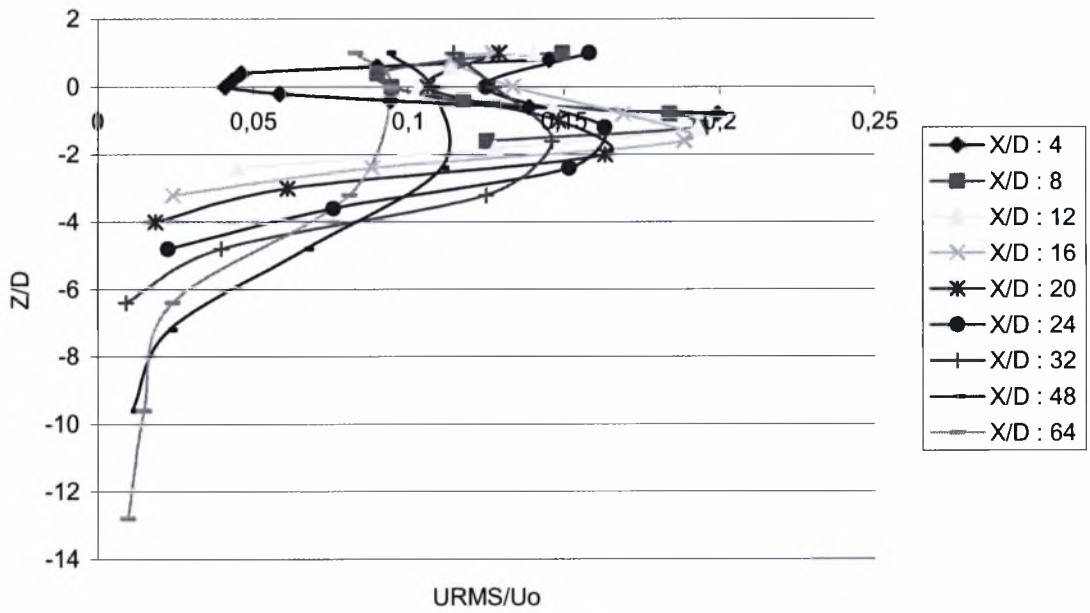
5.2. Αλληλεπίδραση τυρβώδους δέσμης με την ελεύθερη επιφάνεια

5.2.1. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=1$ Διάγραμμα 5.8. Διανομή μέσης ταχύτητας για $H/D=1$ 

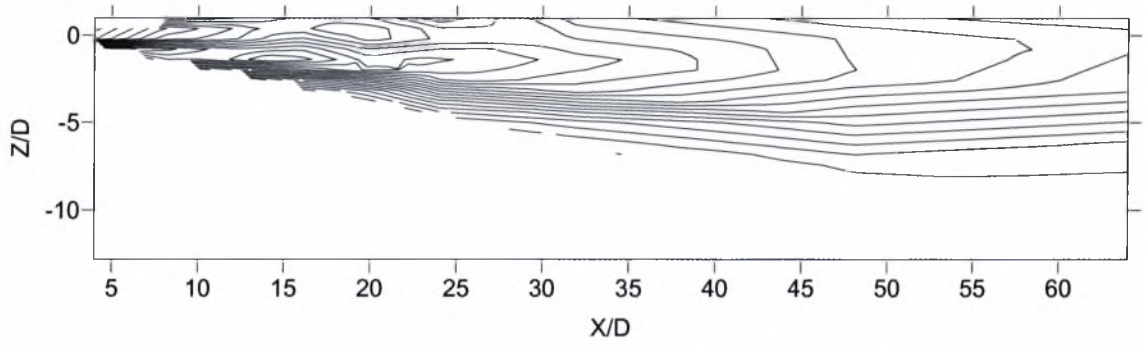
Διάγραμμα 5.9. Ισοϋψείς καμπύλες μέσων ταχυτήτων για $H/D=1$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U/U_0 = 1$.



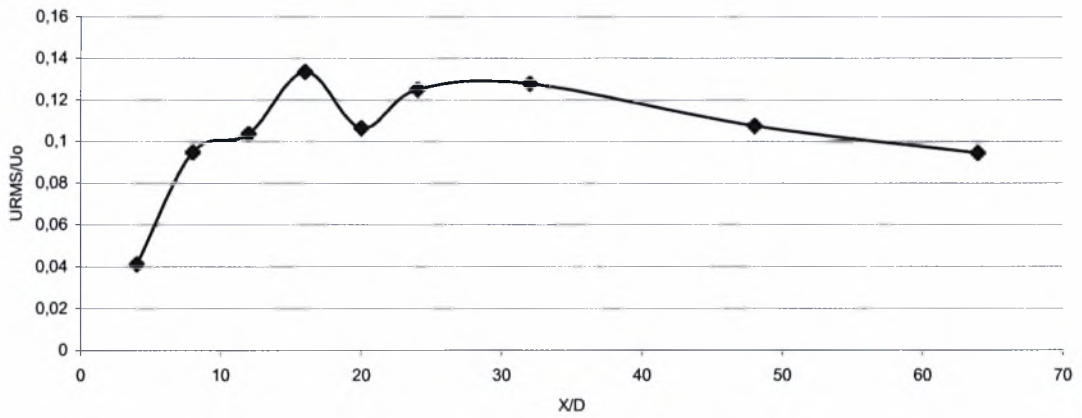
Διάγραμμα 5.10. Διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για H/D=1



Διάγραμμα 5.11. Διανομή έντασης τύρβης για H/D=1



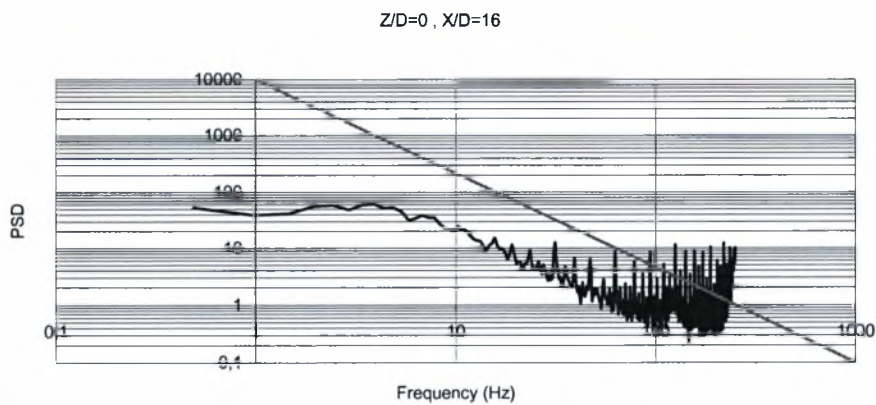
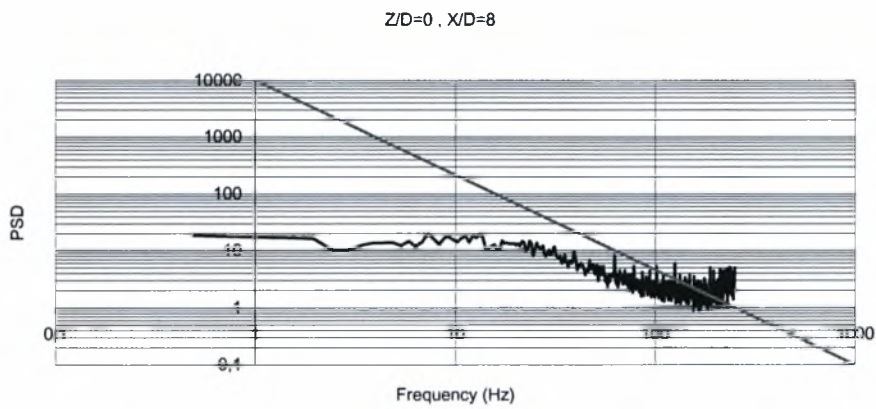
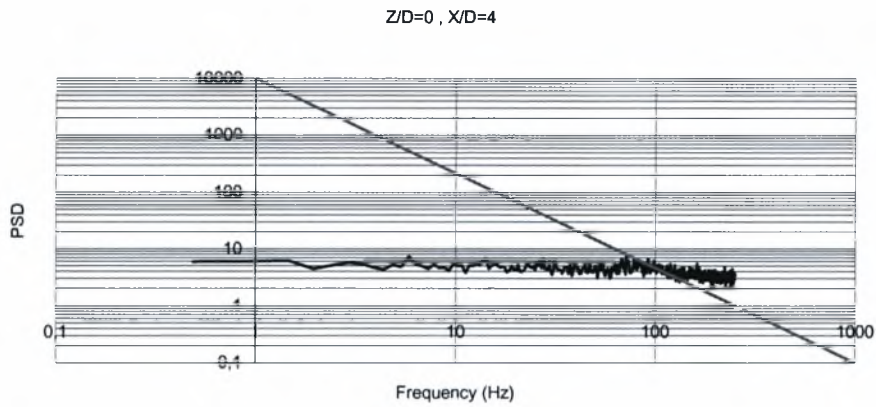
Διάγραμμα 5.12. Ισοϋψείς καμπύλες έντασης τύρβης για $H/D=1$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U_{RMS}/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U_{RMS}/U_0 = 0,22$.

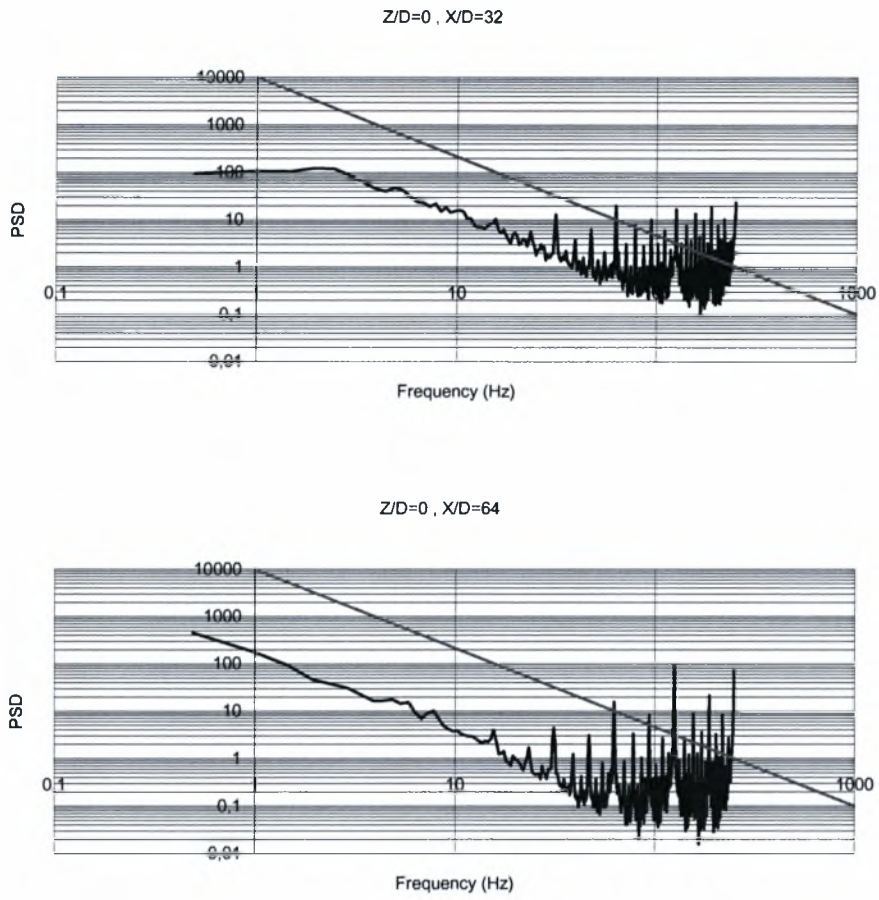


Διάγραμμα 5.13. Διανομή έντασης τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=1$

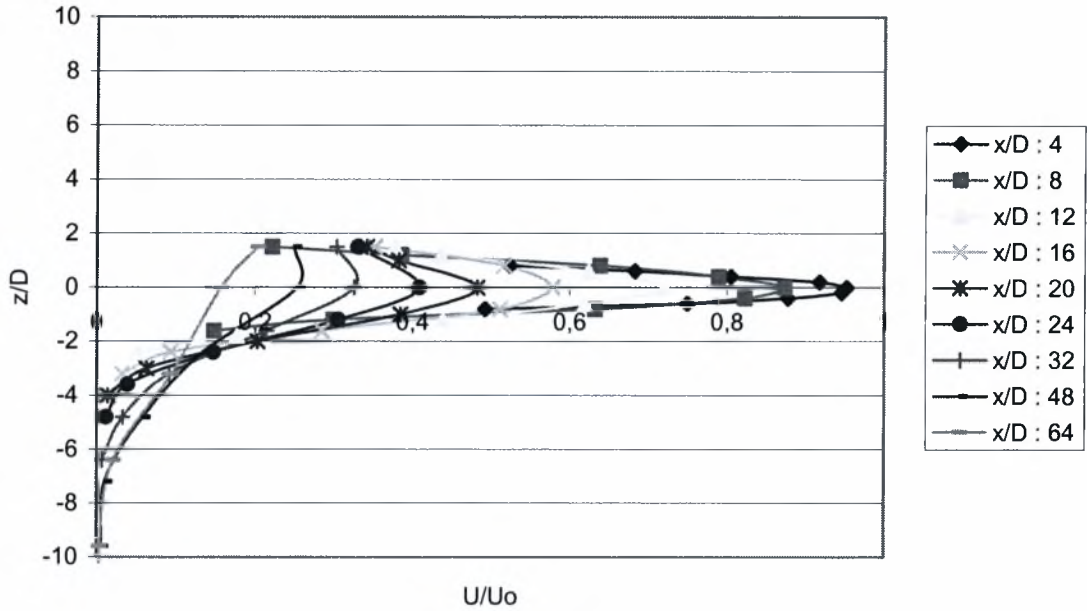
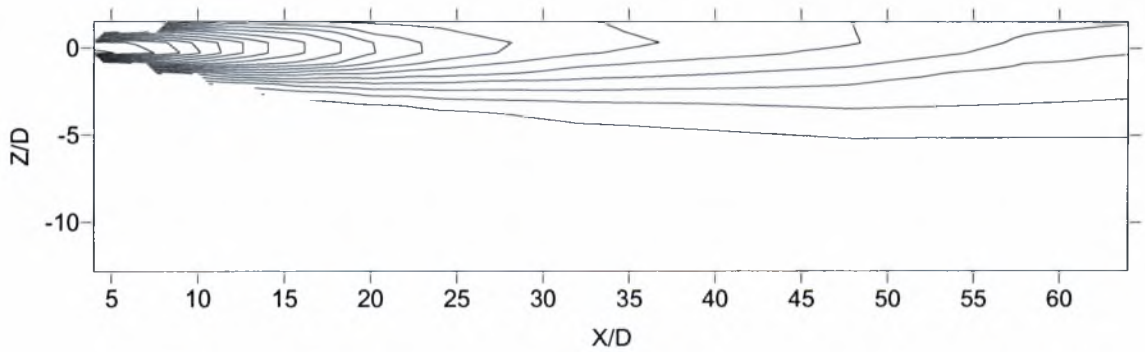
Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD).

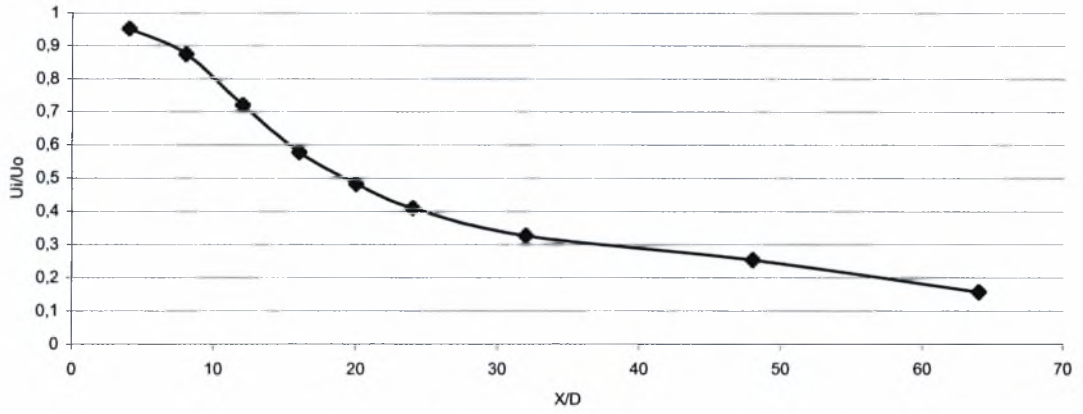
Ως τίτλος του κάθε γραφήματος εμφανίζεται η θέση στην οποία αντιστοιχεί ενώ η ευθεία γραμμή που εμφανίζεται έχει κλίση $-5/3$ και χρησιμοποιείται για το σχολιασμό των γραφημάτων που γίνεται παρακάτω.



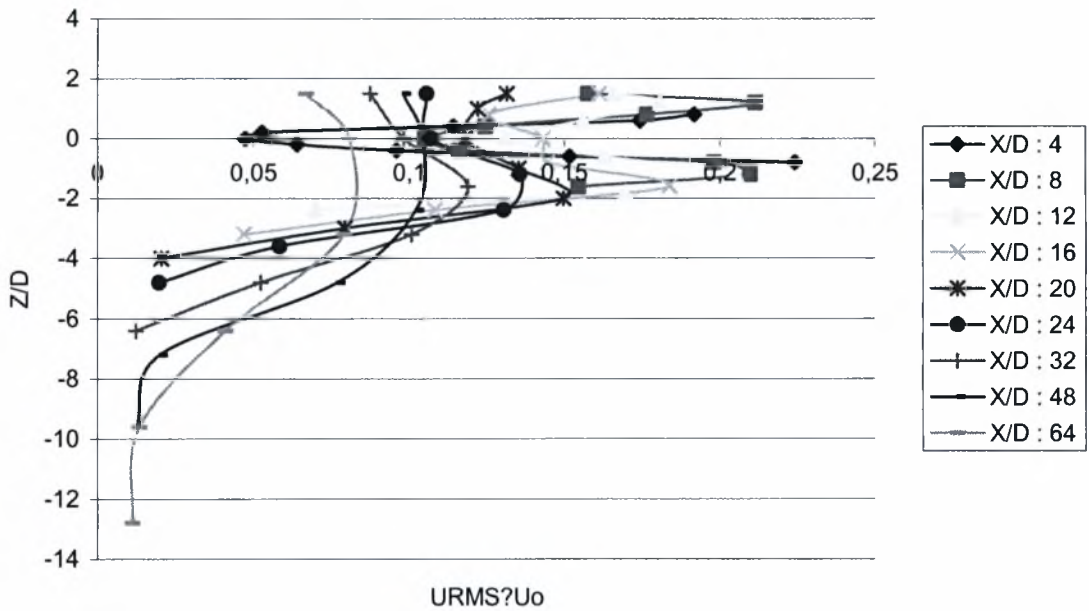


Διάγραμμα 5.14. Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος για $H/D=1$

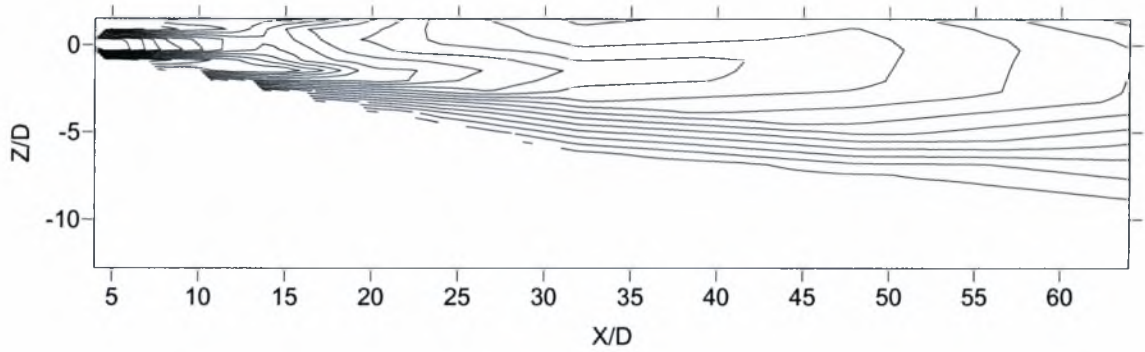
5.2.2. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=1,5$ Διάγραμμα 5.15. Διανομή μέσης ταχύτητας για $H/D=1,5$ Διάγραμμα 5.16. Ισοϋψείς καμπύλες μέσων ταχυτήτων για $H/D=1,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U/U_0 = 1$.



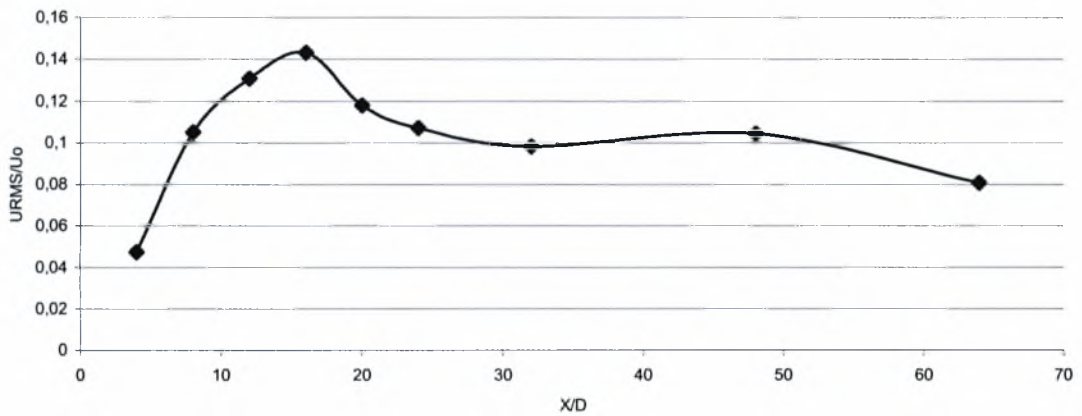
Διάγραμμα 5.17. Διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=1,5$



Διάγραμμα 5.18. Διανομή έντασης τύρβης για $H/D=1,5$



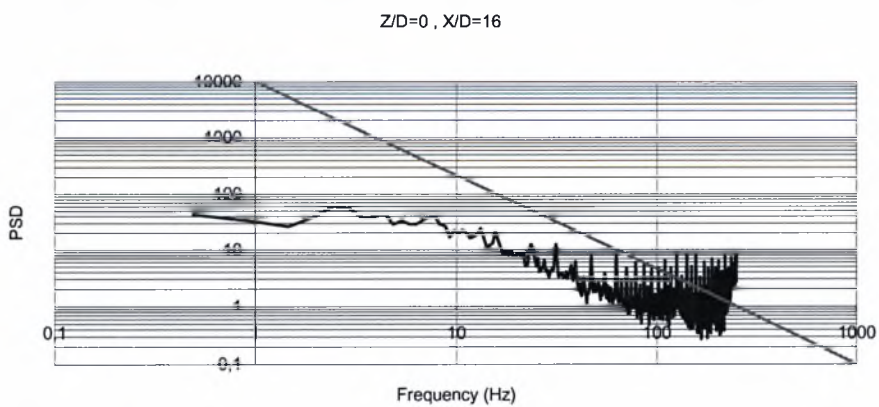
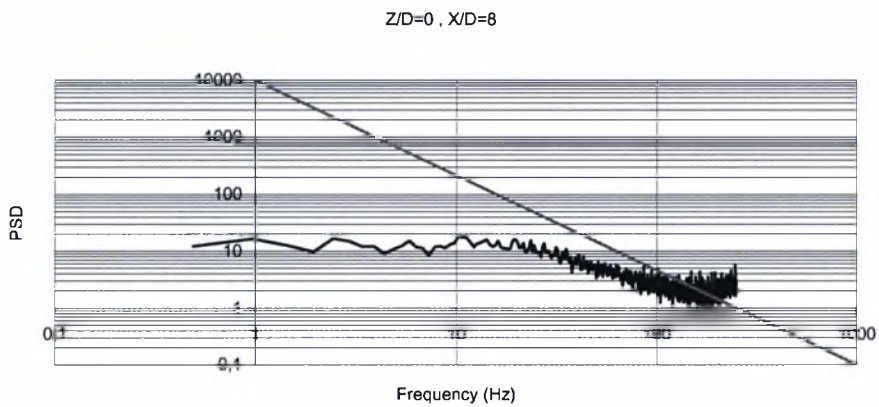
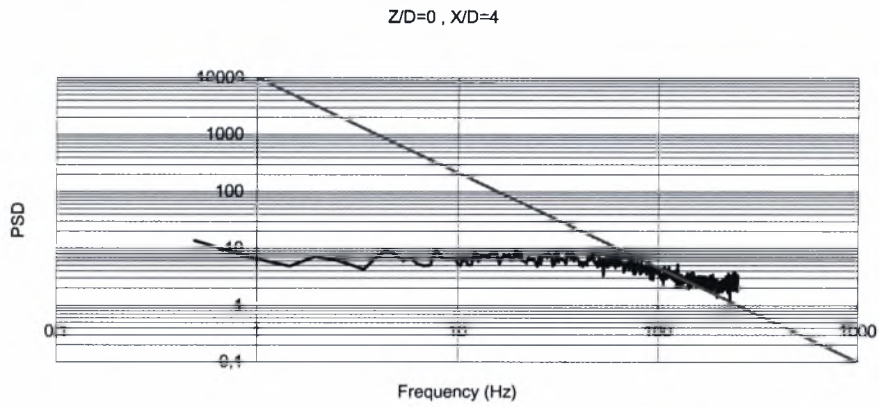
Διάγραμμα 5.19. Ισοψείς καμπύλες έντασης τύρβης για $H/D=1,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U_{RMS}/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U_{RMS}/U_0 = 0,22$.

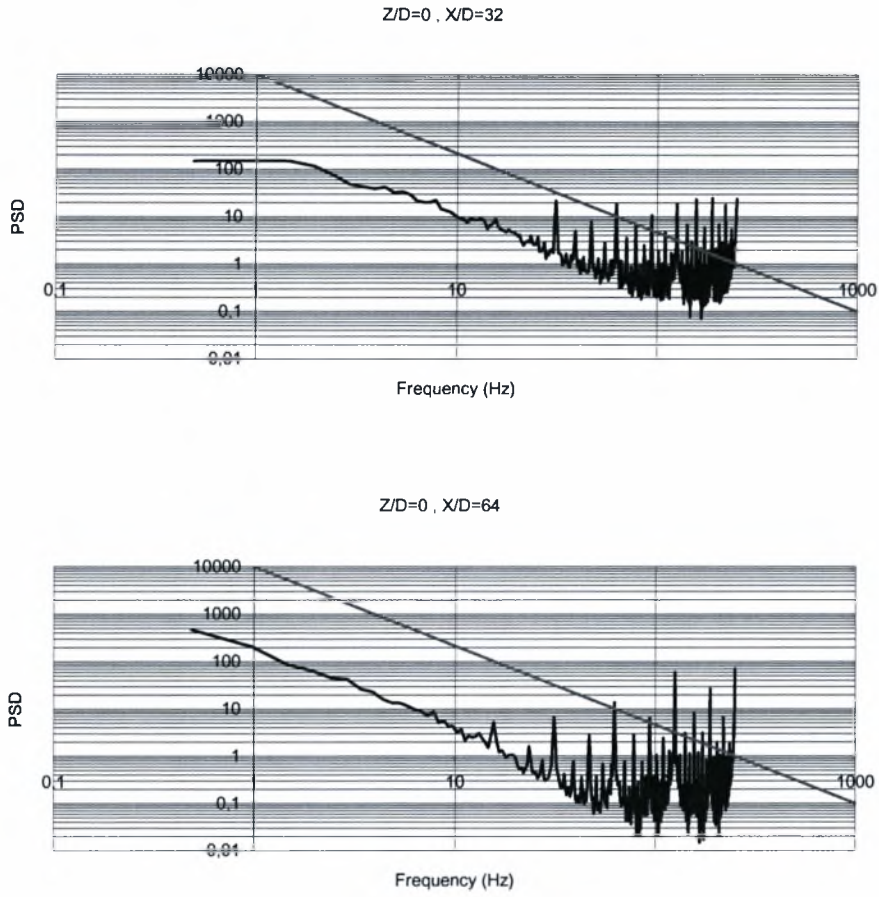


Διάγραμμα 5.20. Διανομή έντασης τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=1,5$

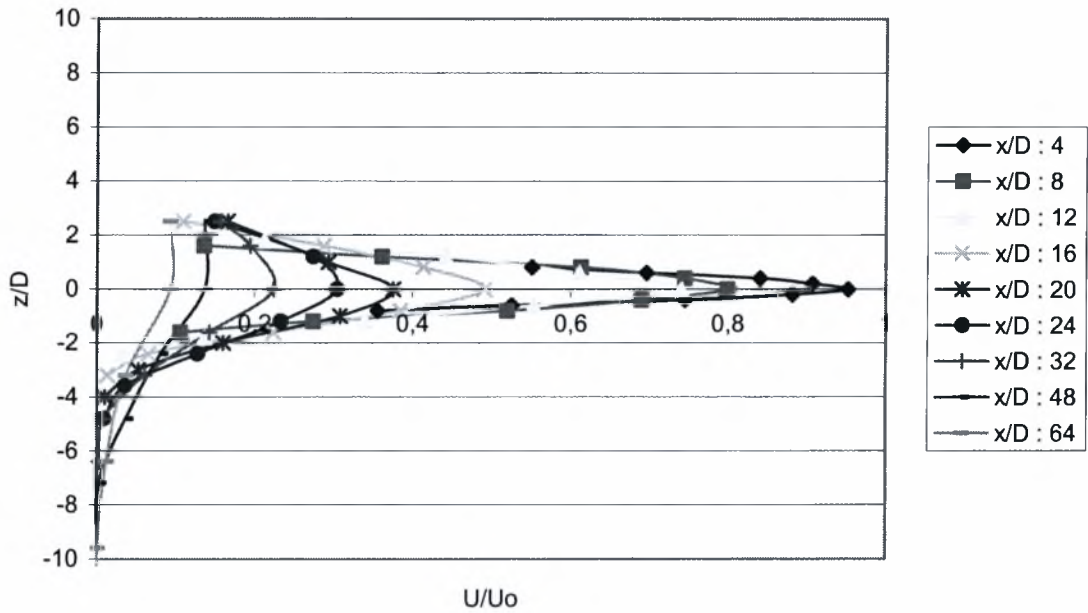
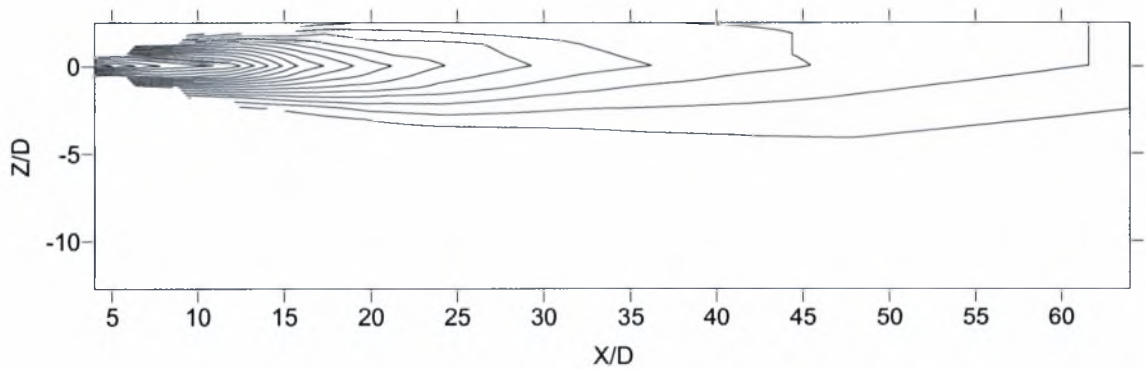
Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD).

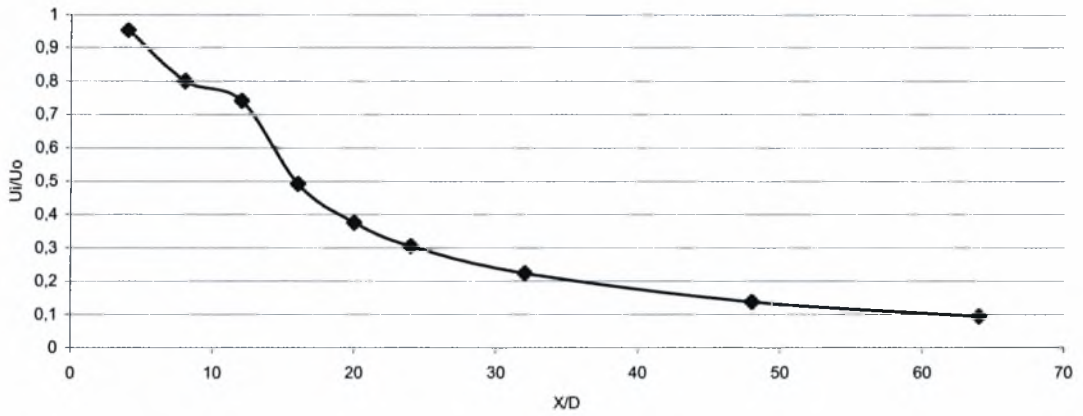
Ως τίτλος του κάθε γραφήματος εμφανίζεται η θέση στην οποία αντιστοιχεί ενώ η ευθεία γραμμή που εμφανίζεται έχει κλίση $-5/3$ και χρησιμοποιείται για το σχολιασμό των γραφημάτων που γίνεται παρακάτω.



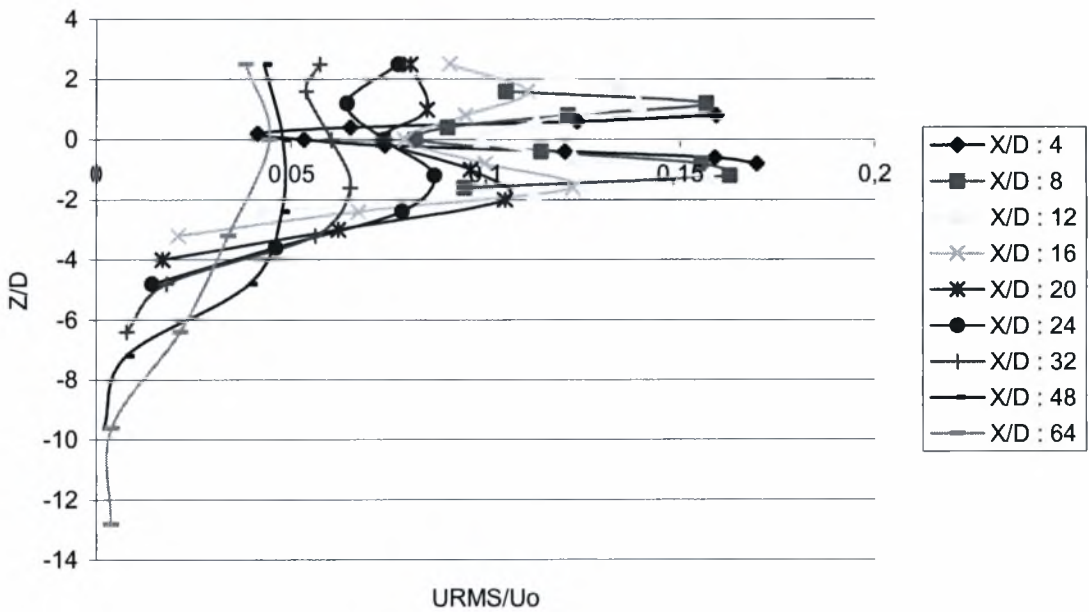


Διάγραμμα 5.21. Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος για $H/D=1,5$

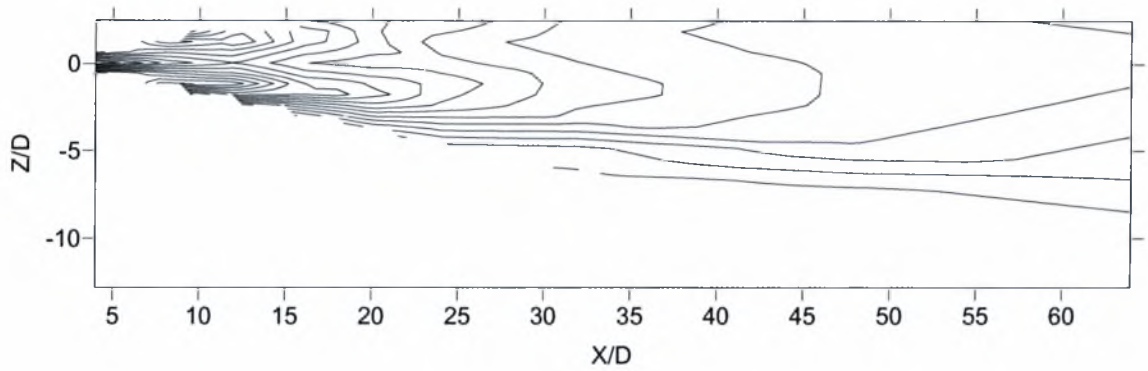
5.2.3. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=2,5$ Διάγραμμα 5.22. Διανομή μέσης ταχύτητας για $H/D=2,5$ Διάγραμμα 5.23. Ισοϋψείς καμπύλες μέσων ταχυτήτων για $H/D=2,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U/U_0 = 1$.



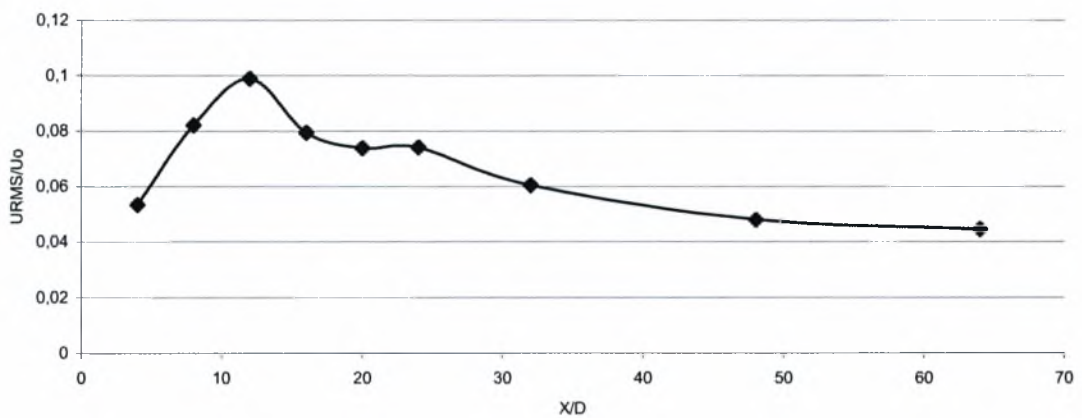
Διάγραμμα 5.24. Διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για H/D=2,5



Διάγραμμα 5.25. Διανομή έντασης τóρβης για H/D=2,5



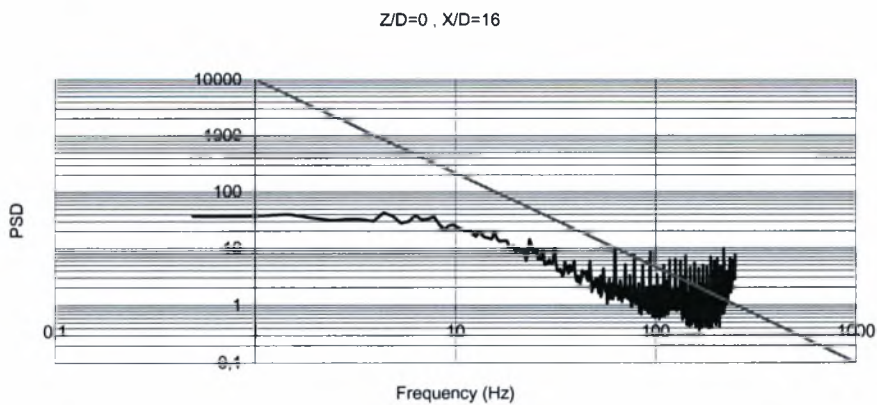
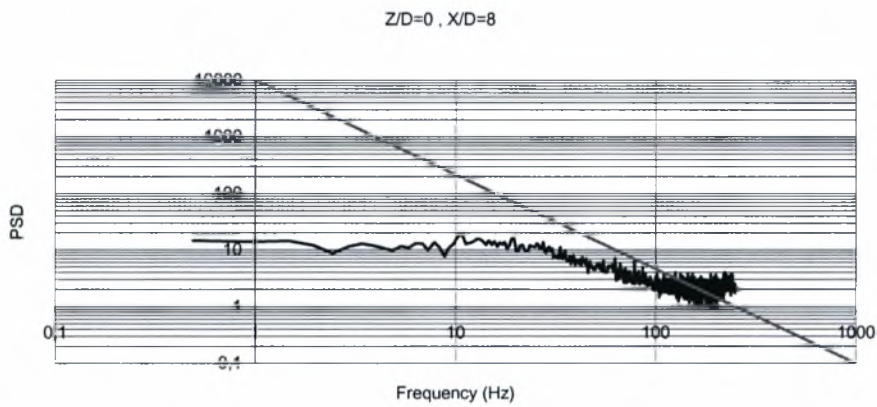
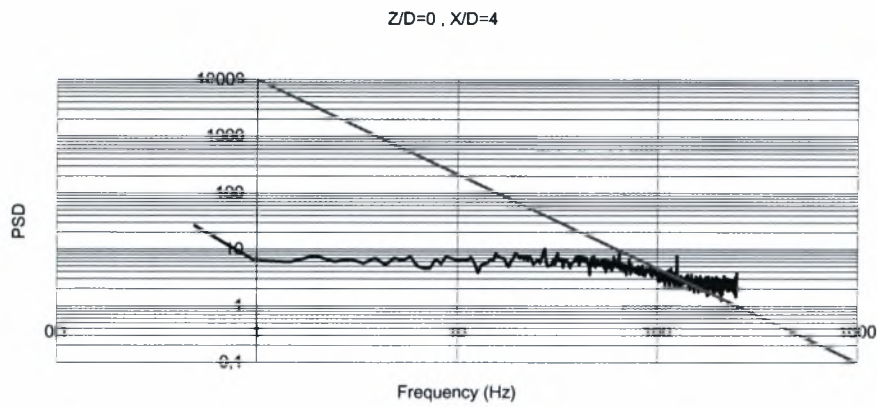
Διάγραμμα 5.26. Ισοϋψείς καμπύλες έντασης τύρβης για $H/D=2,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U_{RMS}/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U_{RMS}/U_0 = 0,22$.

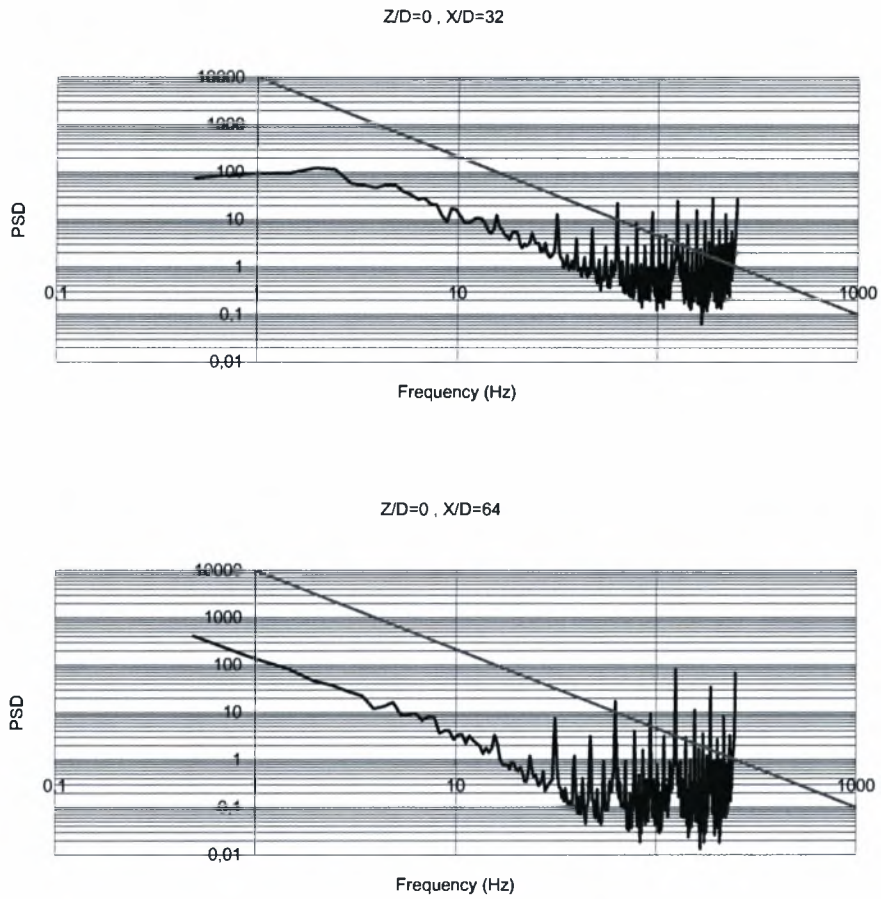


Διάγραμμα 5.27. Διανομή έντασης τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=2,5$

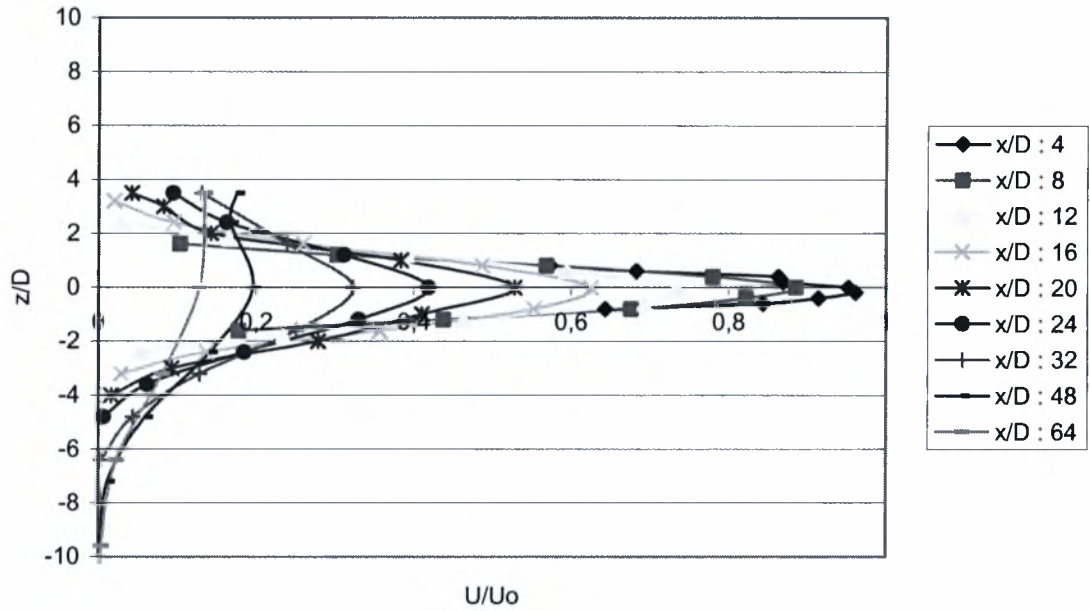
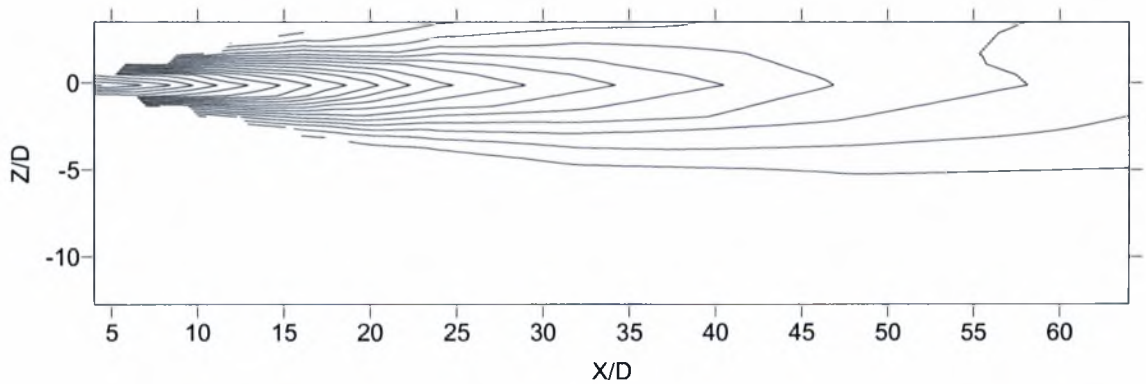
Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD).

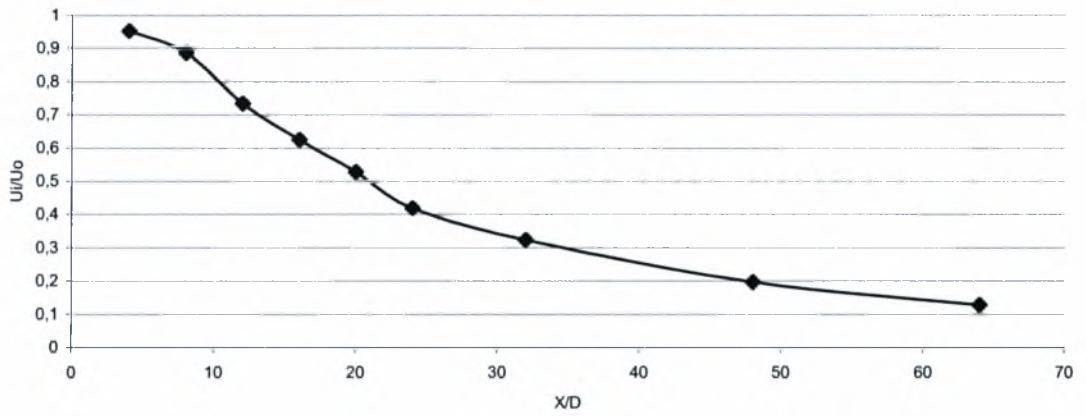
Ως τίτλος του κάθε γραφήματος εμφανίζεται η θέση στην οποία αντιστοιχεί ενώ η ευθεία γραμμή που εμφανίζεται έχει κλίση $-5/3$ και χρησιμοποιείται για το σχολιασμό των γραφημάτων που γίνεται παρακάτω.



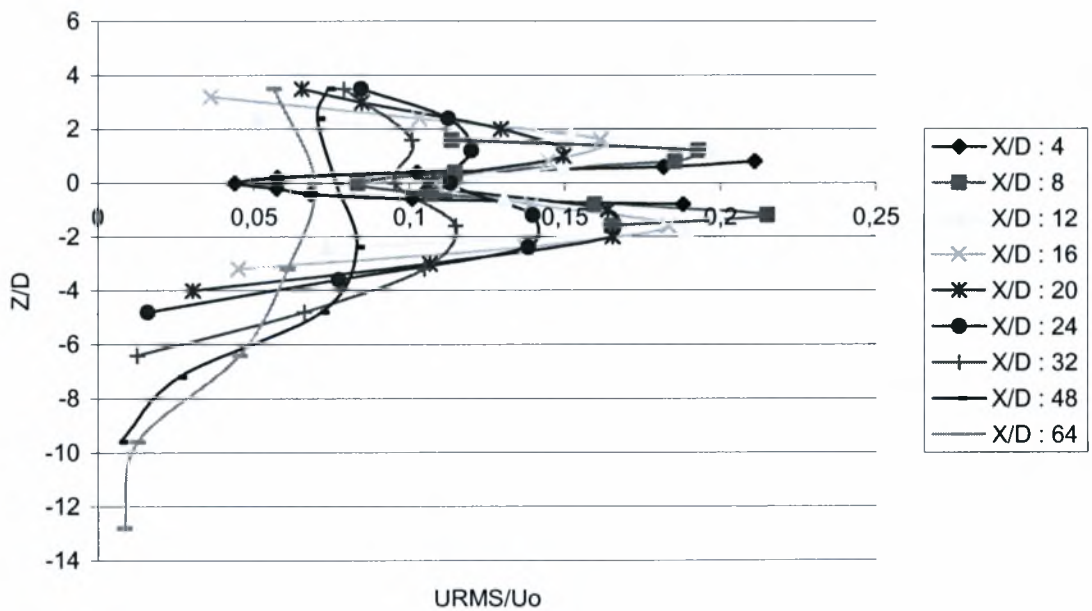


Διάγραμμα 5.28. Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος για $H/D=2,5$

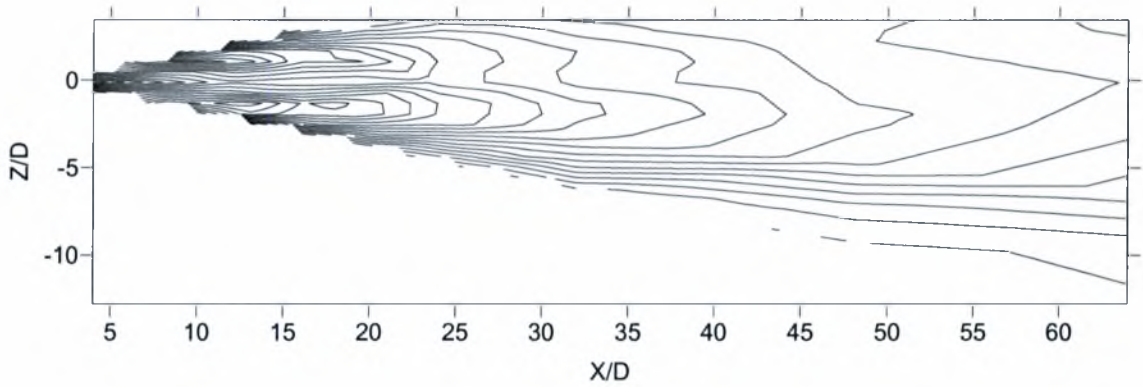
5.2.4. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=3,5$ Διάγραμμα 5.29. Διανομή μέσης ταχύτητας για $H/D=3,5$ Διάγραμμα 5.30. Ισοϋψείς καμπύλες μέσων ταχυτήτων για $H/D=3,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U/U_0 = 1$.



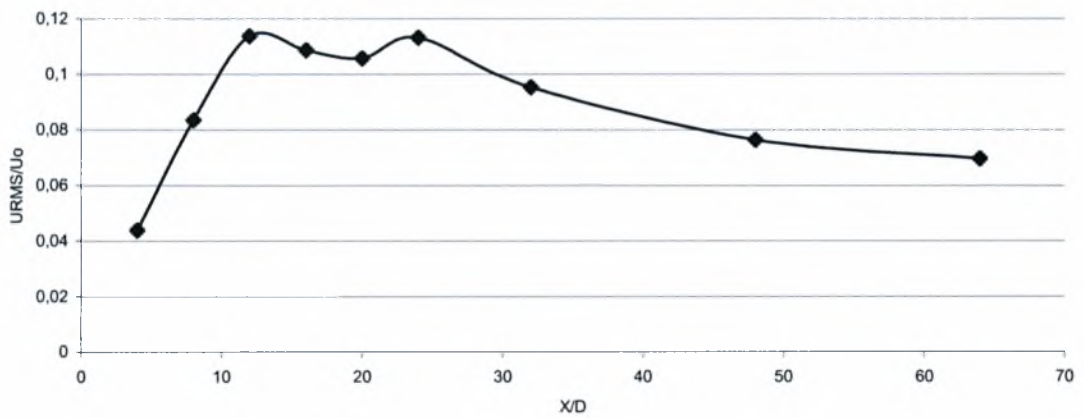
Διάγραμμα 5.31. Διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=3,5$



Διάγραμμα 5.32. Διανομή έντασης τύρβης για $H/D=3,5$



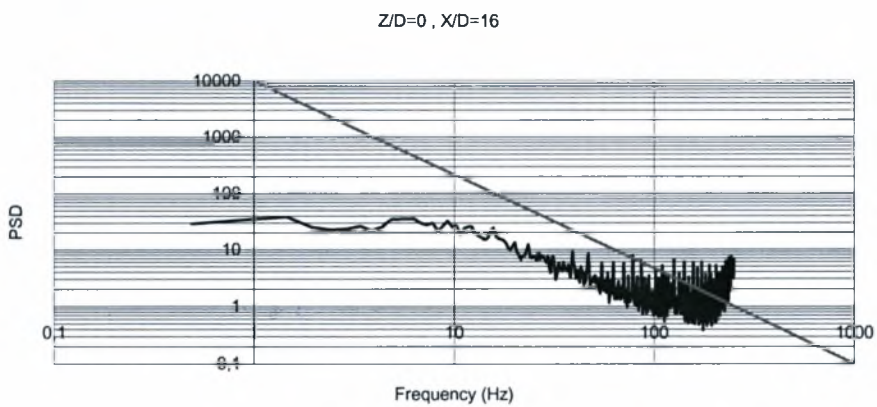
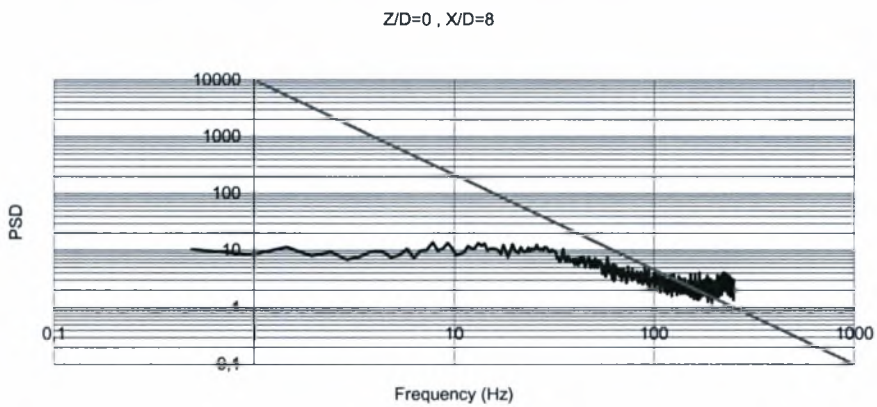
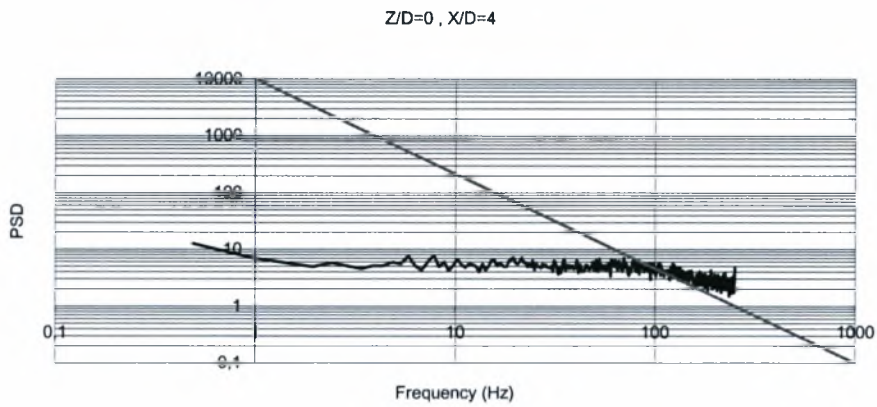
Διάγραμμα 5.33. Ισοϋψείς καμπύλες έντασης τύρβης για $H/D=3,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U_{RMS}/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U_{RMS}/U_0 = 0,22$.

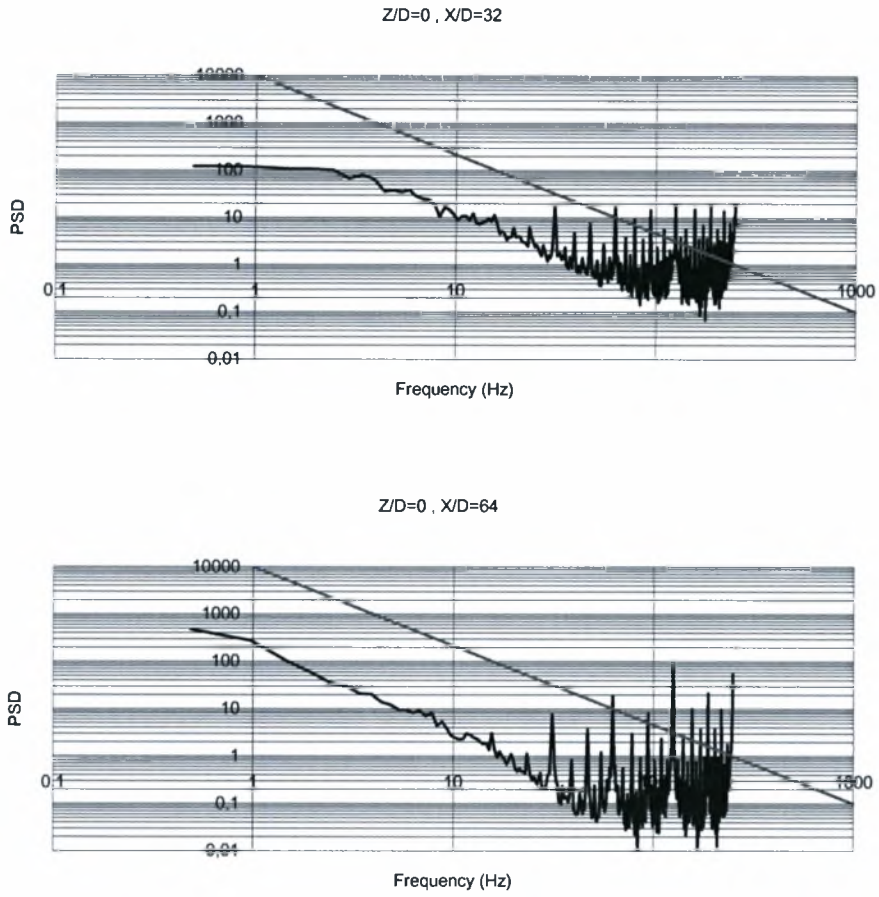


Διάγραμμα 5.34. Διανομή έντασης τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=3,5$

Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD).

Ως τίτλος του κάθε γραφήματος εμφανίζεται η θέση στην οποία αντιστοιχεί ενώ η ευθεία γραμμή που εμφανίζεται έχει κλίση $-5/3$ και χρησιμοποιείται για το σχολιασμό των γραφημάτων που γίνεται παρακάτω.

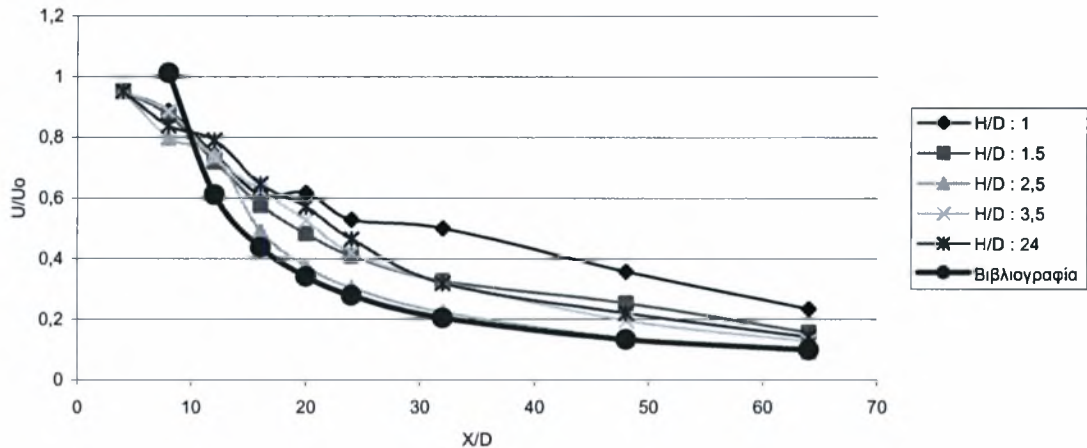




Διάγραμμα 5.35. Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος για $H/D=3,5$

5.2.5. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

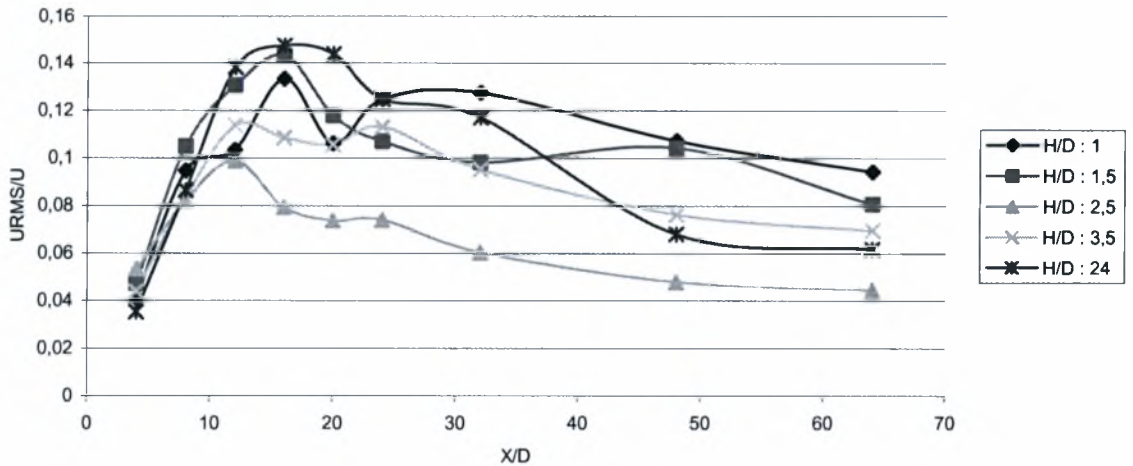
Παρατηρώντας τις διανομές ταχυτήτων κατά μήκος της ροής στα διάφορα βάθη μπορούμε να σχηματίσουμε το παρακάτω γράφημα χρησιμοποιώντας και την πληροφορία που παίρνουμε από τη βιβλιογραφία.



Διάγραμμα 5.36. Διανομές ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για τα διάφορα H/D

Από το γράφημα αυτό παρατηρούμε πως η μέση ταχύτητα φθίνει κατά μήκος της ροής με έναν έντονο ρυθμό έως μια απόσταση περίπου ίση 24 διαμέτρους και με έναν πιο ομαλό τρόπο από εκεί και έπειτα., πράγμα που συμβαίνει για όλα τα βάθη. Η συμφωνία με τη βιβλιογραφία που αναφέρει πως η ταχύτητα στην κεντρική γραμμή ακολουθεί τη συνάρτηση $U/U_0=1/0.162(X/D-1.9)$ είναι προφανής.

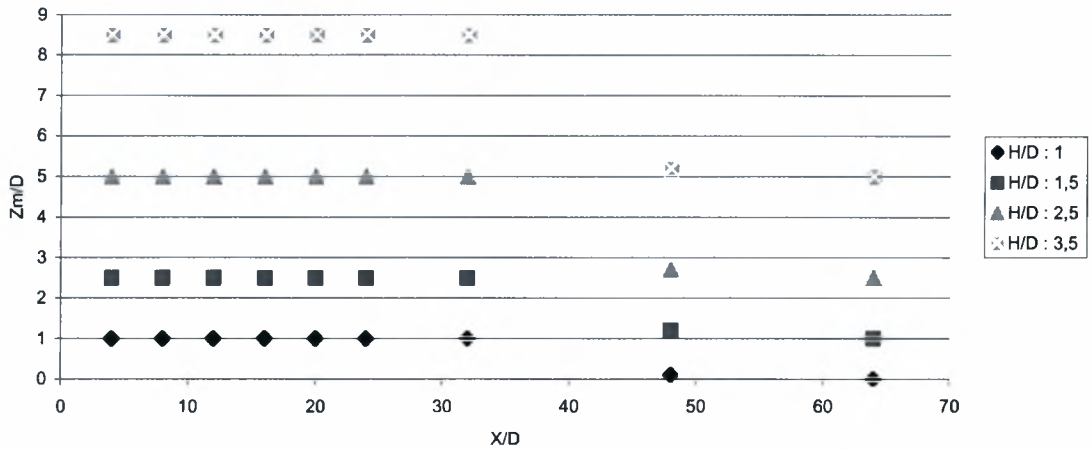
Ακολουθώντας τη φιλοσοφία του παραπάνω διαγράμματος μπορούμε να δημιουργήσουμε ακόμα ένα, έχοντας αυτή τη φορά σαν μεταβαλλόμενο μέγεθος την ένταση της τύρβης.



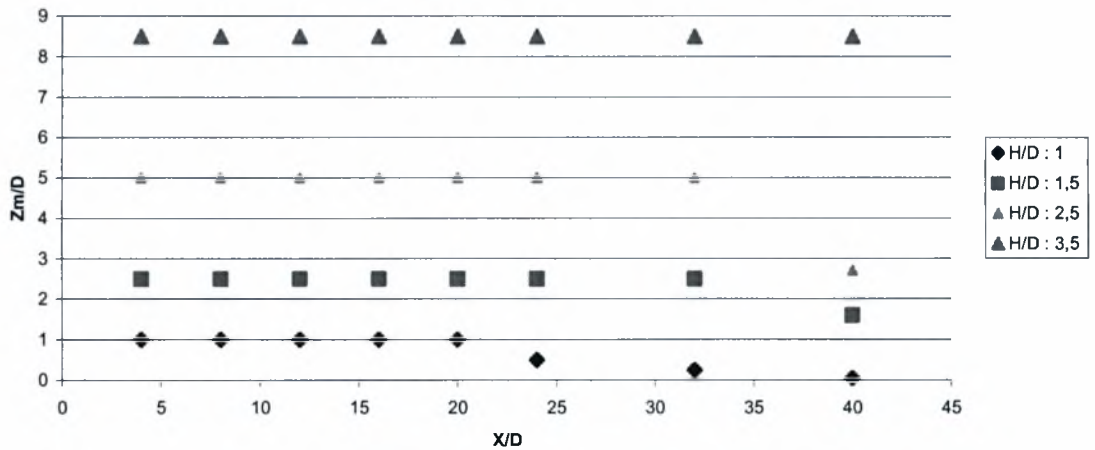
Διάγραμμα 5.37. Διανομές εντάσεως τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για τα διάφορα H/D

Παρατηρούμε πως σημειώνεται μια αύξηση της έντασης της τύρβης έως μια απόσταση ίση με 16 περίπου διαμέτρους όπου και κορυφώνεται ενώ από κει και έπειτα φθίνει με ομαλό τρόπο. Η διαπίστωση αυτή επαληθεύεται και από το σχολιασμό των διαγραμμάτων πυκνότητας φάσματος που γίνεται παρακάτω και δείχνουν πως μετά από αυτή την απόσταση (16 D) η τύρβη έχει αναπτυχθεί πλήρως και περνά στη φάση αυτοσυντήρησης.

Βλέποντας τα διαγράμματα διανομών μέσης ταχύτητας παρατηρείται μια μετατόπιση του σημείου στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη μέση ταχύτητα προς το μέρος της ελεύθερης επιφάνειας. Αυτό διακρίνεται ευκολότερα αν δημιουργήσουμε το γράφημα που δείχνει τη μεταβολή του σημείου της μέγιστης ταχύτητας συναρτήσει των X/D και H/D, (Διάγραμμα 5.38.α).



Διάγραμμα 5.38.α. Μεταβολή σημείου εμφάνισης μέγιστης μέσης ταχύτητας σε σχέση με τα X/D και H/D

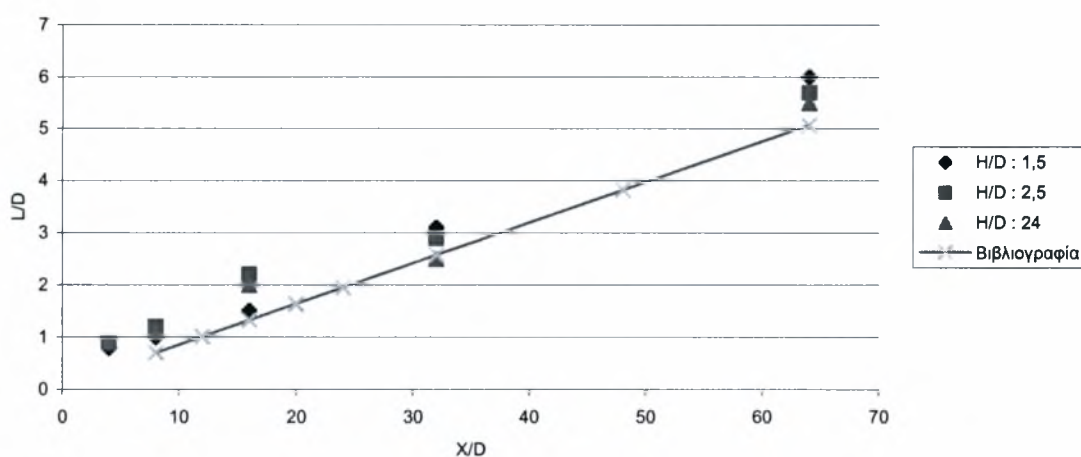


Διάγραμμα 5.38.β. Μεταβολή σημείου εμφάνισης μέγιστης μέσης ταχύτητας σε σχέση με τα X/D και H/D σύμφωνα με τη βιβλιογραφία

Το παραπάνω σχόλιο έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τη βιβλιογραφία όπως δείχνει το Διάγραμμα 5.38.β. και θα ήταν ακόμη πιο ξεκάθαρο αν μπορούσαν να γίνουν περισσότερες μετρήσεις κοντά στην επιφάνεια. Αυτό στην προκειμένη περίπτωση δεν ήταν δυνατό γιατί σε μετρήσεις κοντά στη διεπιφάνεια, όπου η στάθμη μεταβαλλόταν για λίγα χιλιοστά, υπήρχε κίνδυνος έκθεσης του αισθητήρα στον αέρα, πράγμα επικίνδυνο για τη μετέπειτα λειτουργικότητά του.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα πυκνότητας φάσματος στα διάφορα βάθη με αυτά της ελεύθερης ροής δεν εντοπίζουμε αξιοσημείωτες διαφορές. Παρατηρούμε πως η πλήρης ανάπτυξη της τύρβης και η μετάβαση στη φάση αυτοσυντήρησής της συμβαίνει μεταξύ 16D και 32D από την αρχή των αξόνων, όπου και η συχνότητα αποκτά κλίση ίση με $-5/3$, σύμφωνα με το νόμο του Kolmogorov.

Τέλος, αξίζει να παρατηρήσουμε τη μεταβολή του πλάτους διασποράς L/D της δέσμης συναρτήσει του βάθους H/D . Το παρακάτω διάγραμμα εμφανίζει αυτήν την πληροφορία.

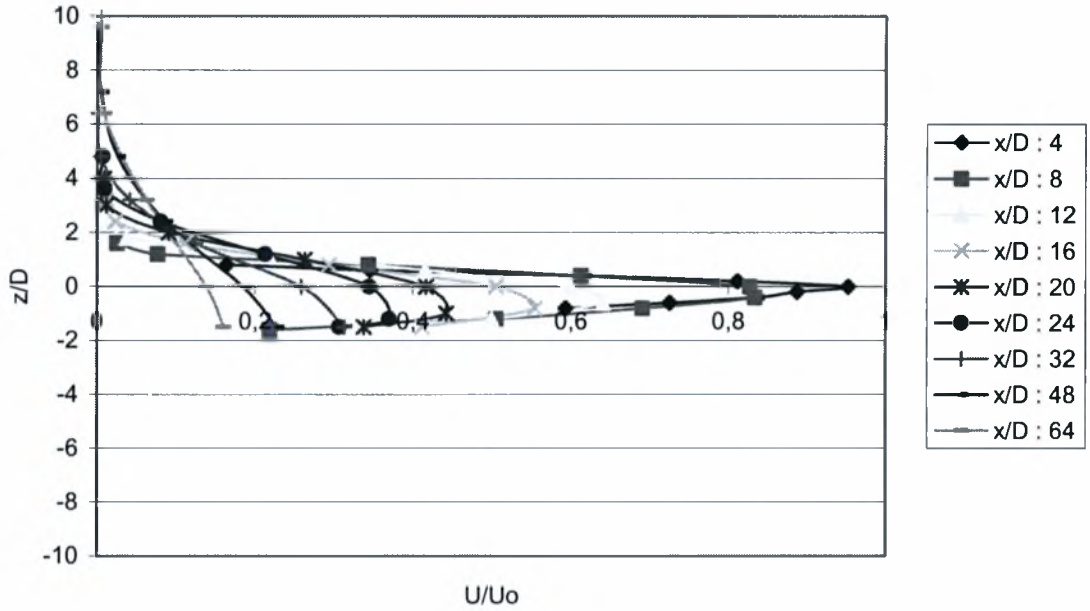
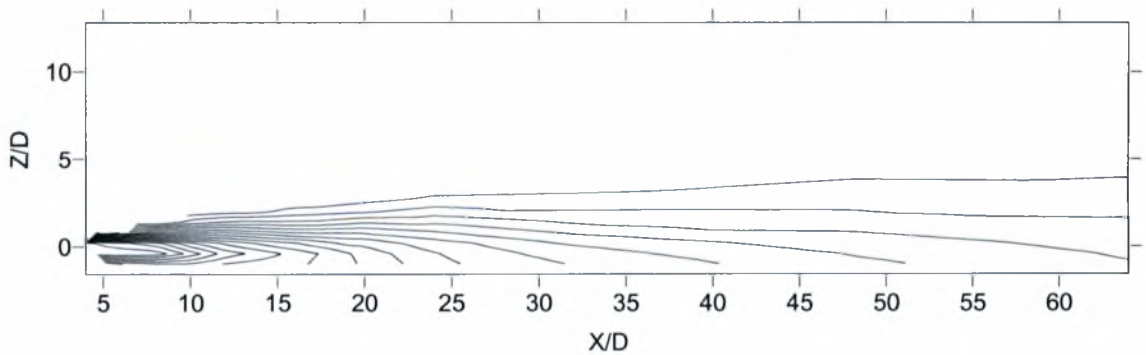


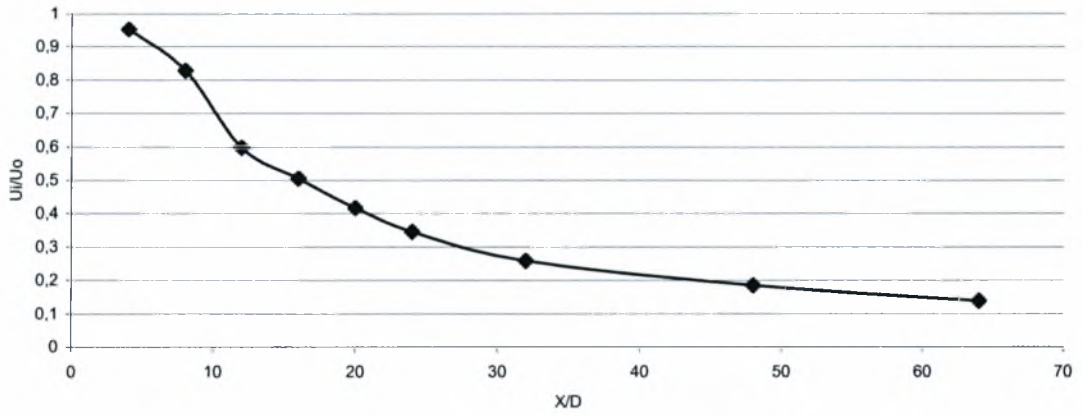
Διάγραμμα 5.39. Μεταβολή του πλάτους διάχυσης Z/D της δέσμης συναρτήσει του H/D

Παρατηρείται μια γραμμική εξάρτηση του πλάτους διασποράς της δέσμης συναρτήσει της απόστασης. Η παρατήρηση αυτή επαληθεύει τα όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία κατά την οποία το πλάτος διασποράς της δέσμης ακολουθεί το νόμο:

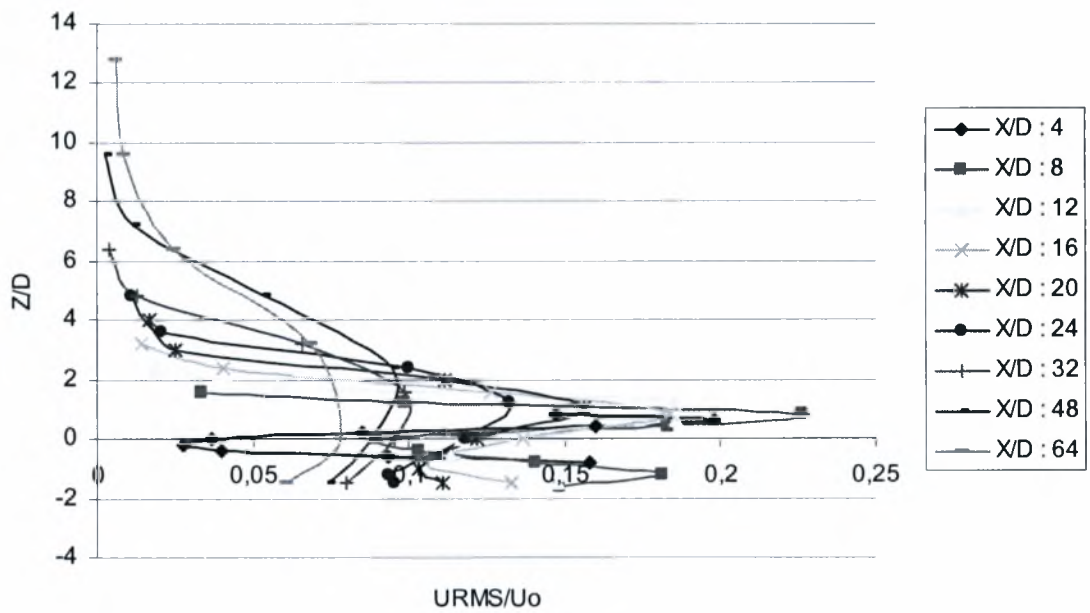
$$L/D = 0.078(X/D + 0.97)$$

5.3. Αλληλεπίδραση τυρβώδους δέσμης με στερεό σύνορο

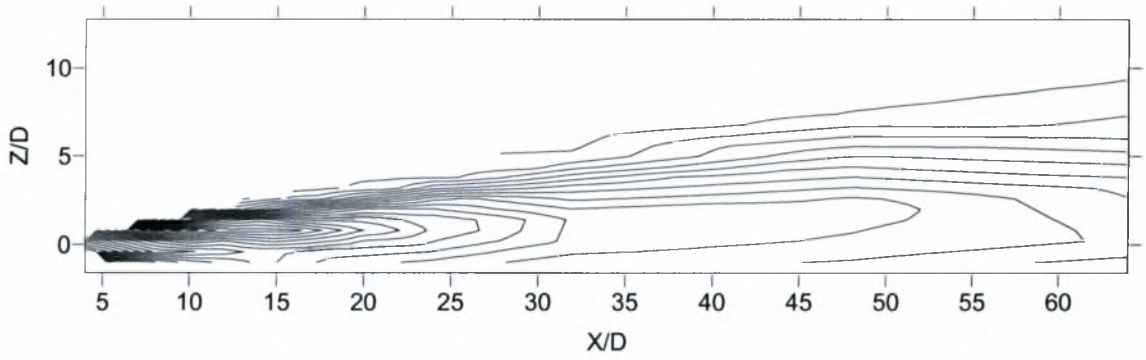
5.3.1. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=1,5$ Διάγραμμα 5.40. Διανομή μέσης ταχύτητας για $H/D=1,5$ Διάγραμμα 5.41. Ισοϋψείς καμπύλες μέσων ταχυτήτων για $H/D=1,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U/U_0 = 1$.



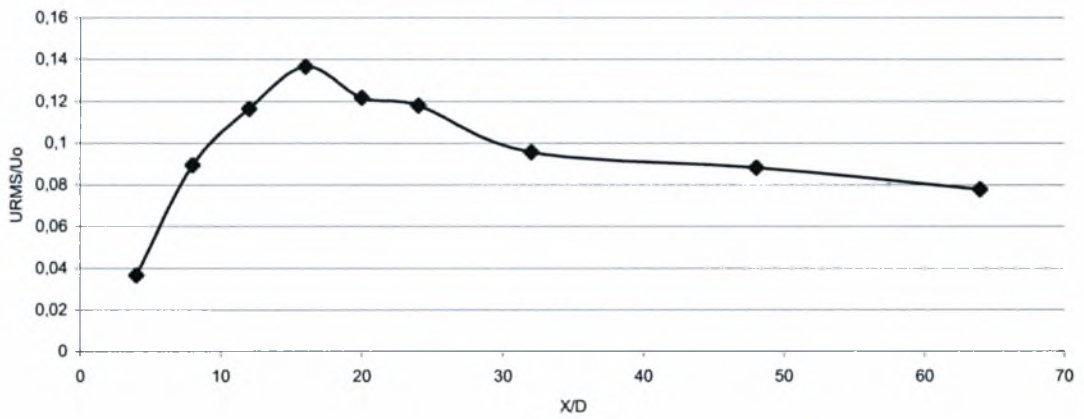
Διάγραμμα 5.42. Διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=1,5$



Διάγραμμα 5.43. Διανομή έντασης τύρβης για $H/D=1,5$



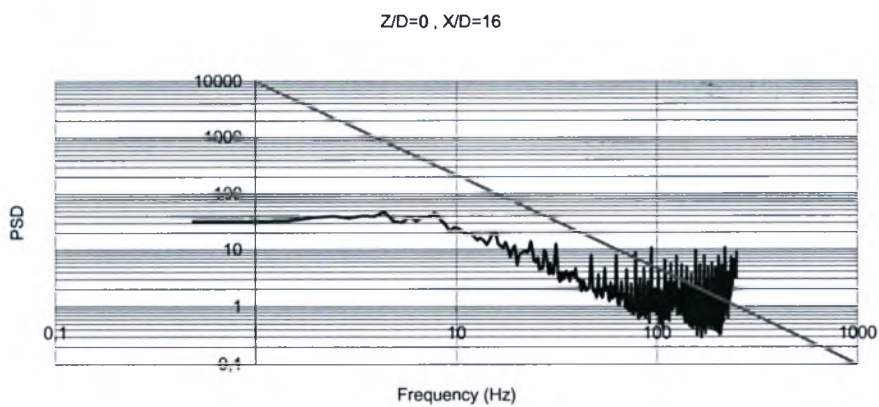
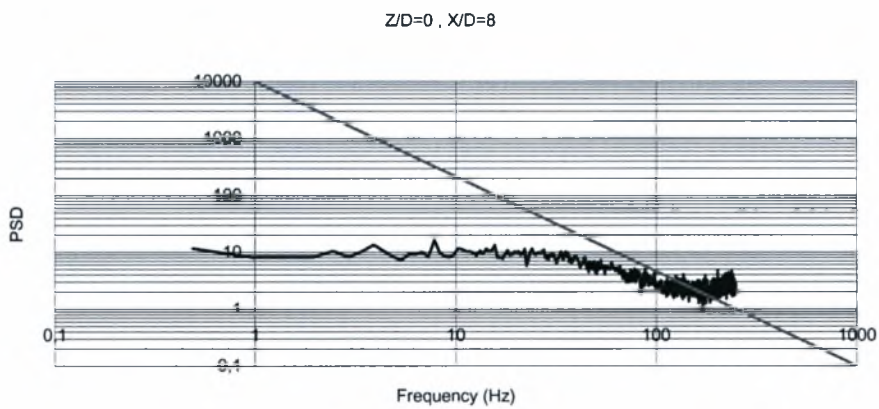
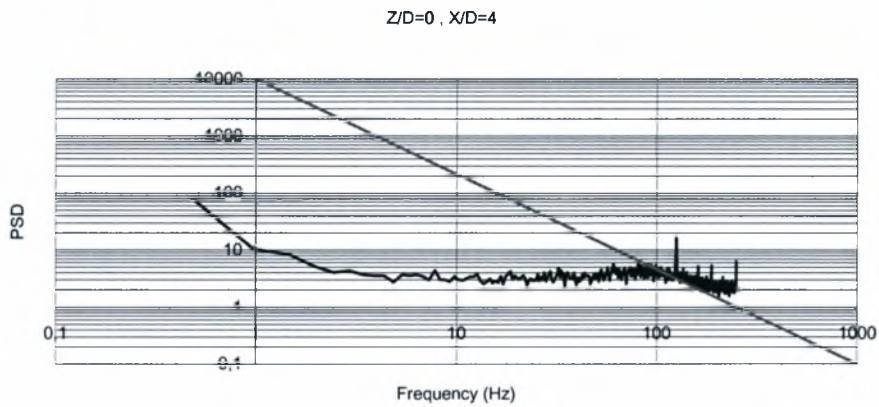
Διάγραμμα 5.44. Ισοϋψείς καμπύλες έντασης τύρβης για $H/D=1,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U_{RMS}/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U_{RMS}/U_0 = 0,22$.

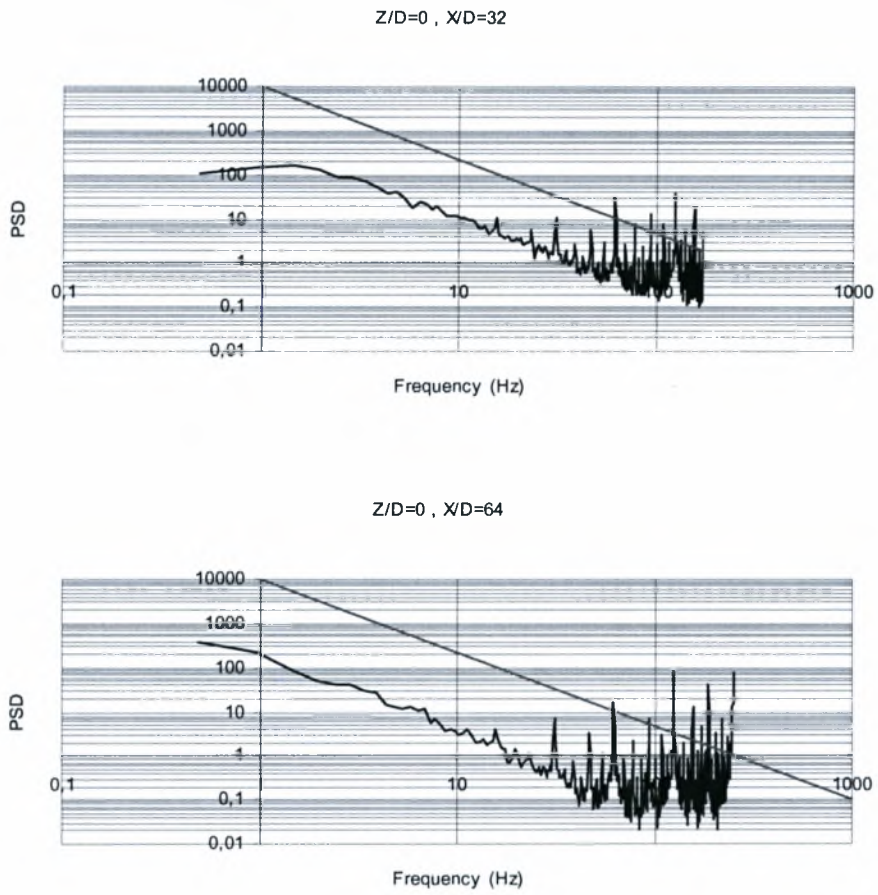


Διάγραμμα 5.45. Διανομή έντασης τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=1,5$

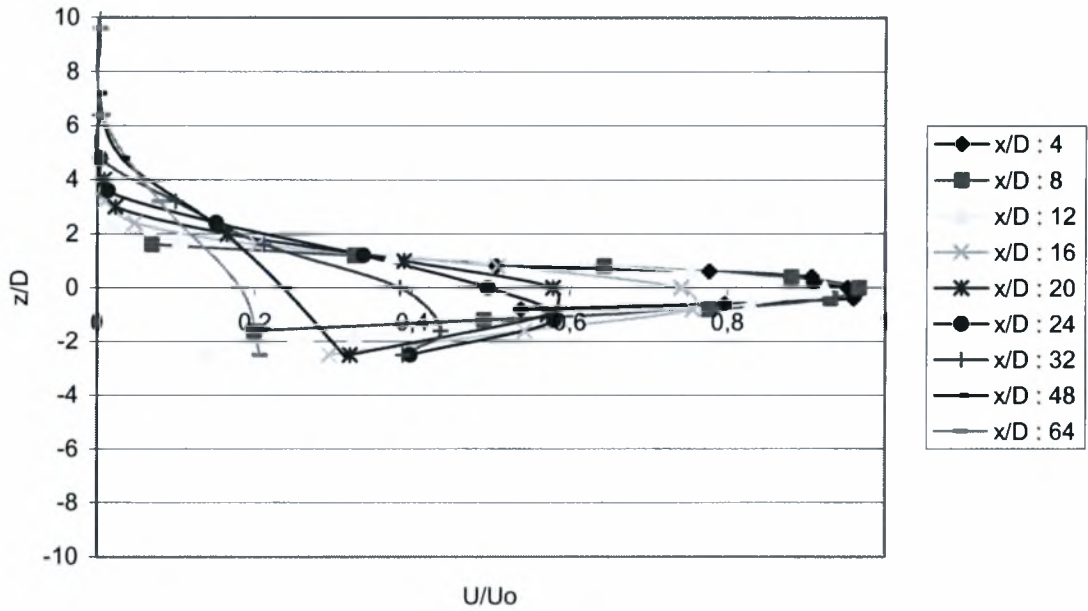
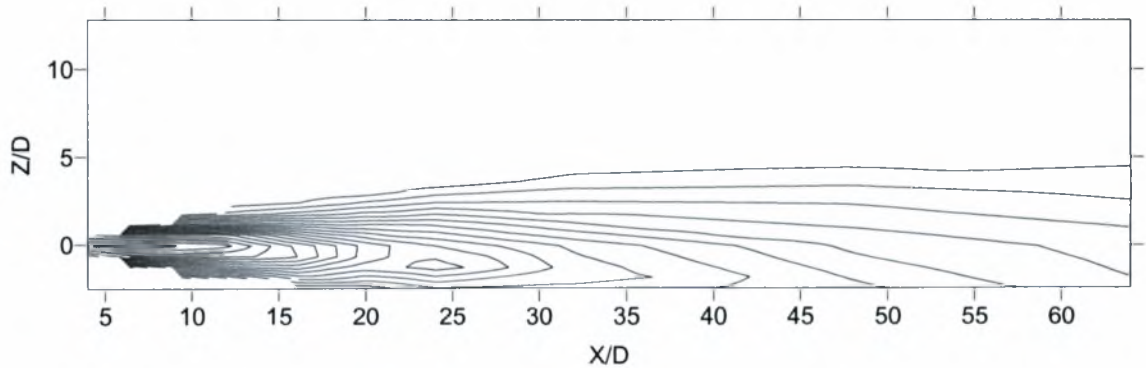
Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD).

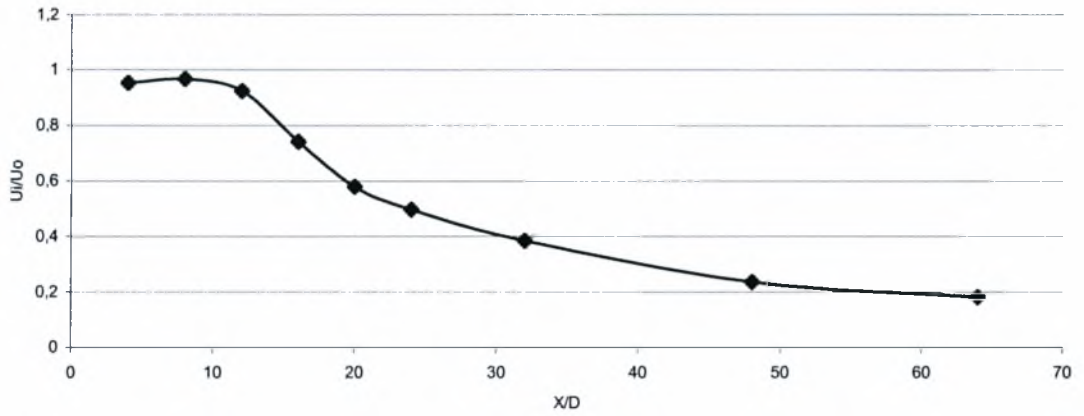
Ως τίτλος του κάθε γραφήματος εμφανίζεται η θέση στην οποία αντιστοιχεί ενώ η ευθεία γραμμή που εμφανίζεται έχει κλίση $-5/3$ και χρησιμοποιείται για το σχολιασμό των γραφημάτων που γίνεται παρακάτω.



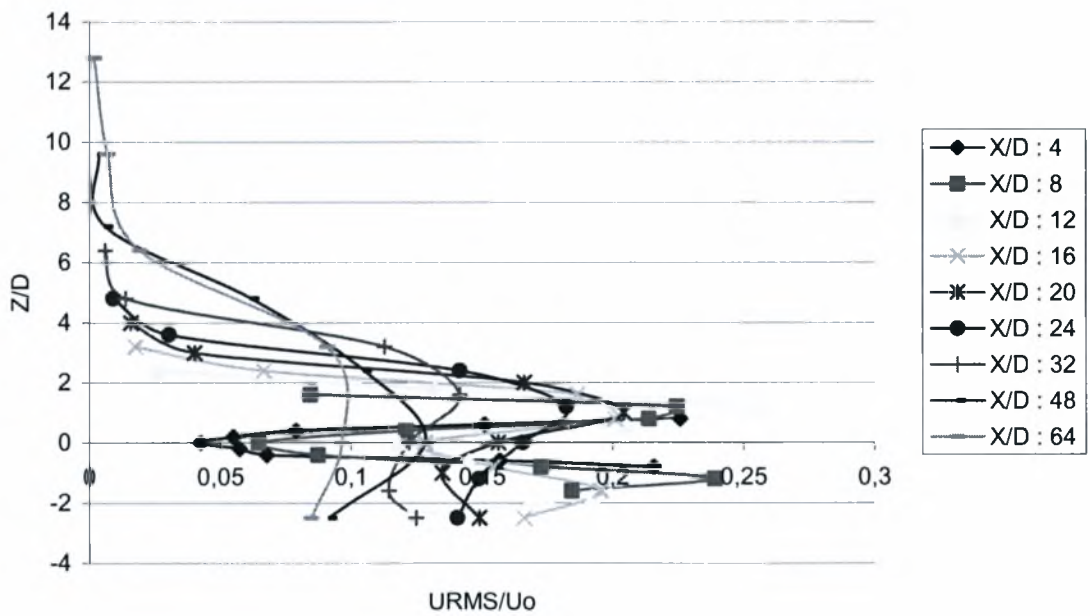


Διάγραμμα 5.46. Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος για $H/D=1,5$

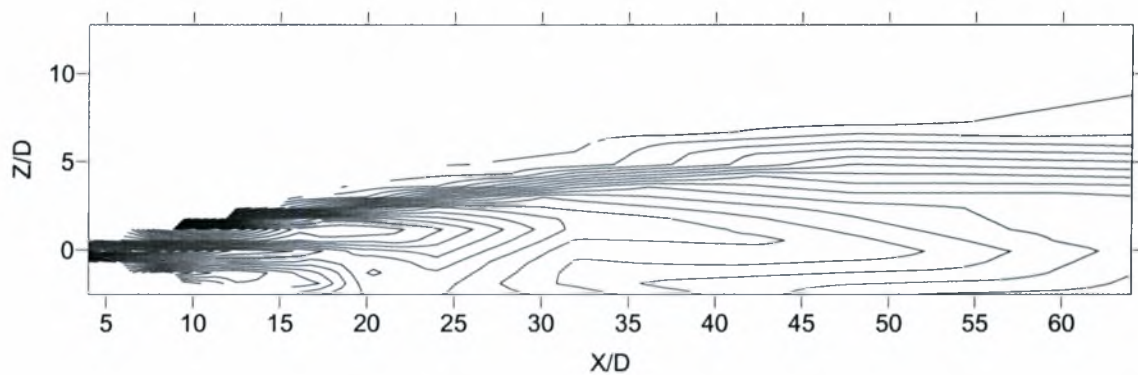
5.3.2. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=2,5$ Διάγραμμα 5.47. Διανομή μέσης ταχύτητας για $H/D=2,5$ Διάγραμμα 5.48. Ισοϋψείς καμπύλες μέσων ταχυτήτων για $H/D=2,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U/U_0 = 1$.



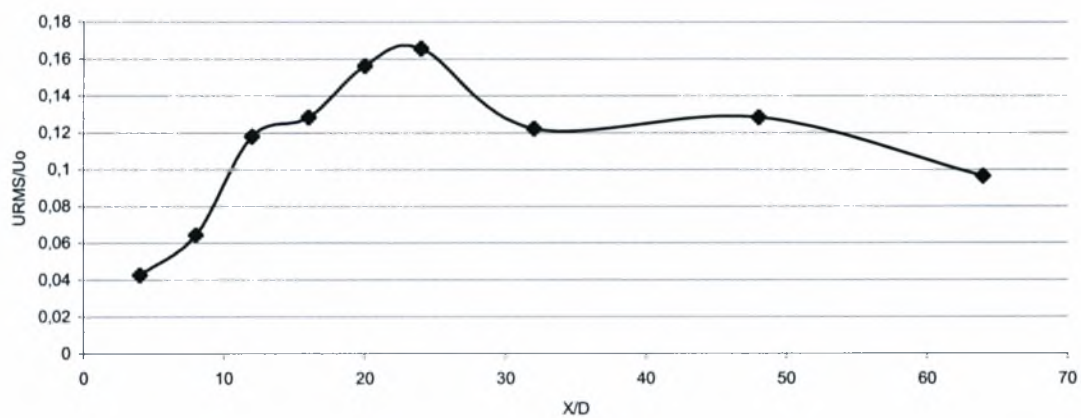
Διάγραμμα 5.49. Διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για H/D=2,5



Διάγραμμα 5.50. Διανομή έντασης τύρβης για H/D=2,5



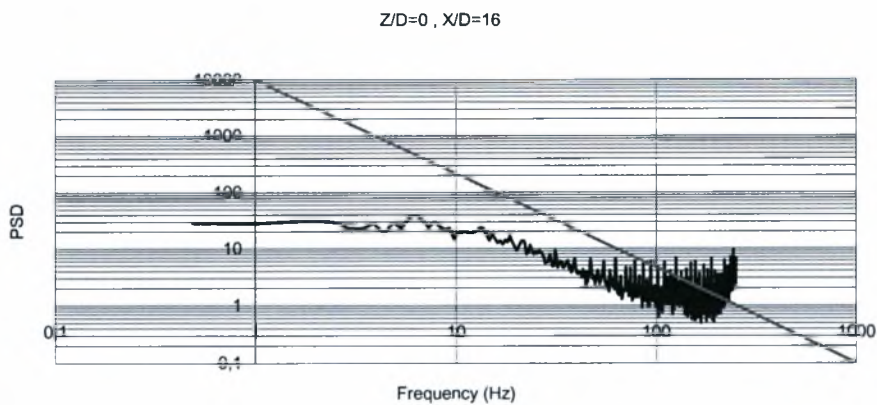
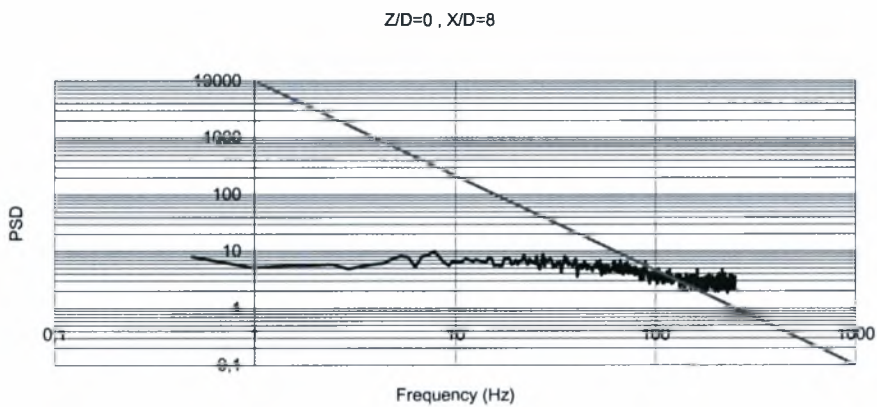
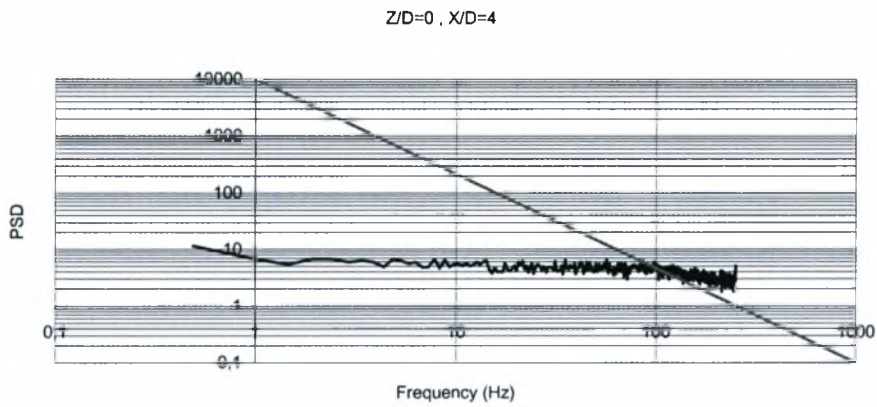
Διάγραμμα 5.51. Ισοϋψείς καμπύλες έντασης τύρβης για $H/D=2,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U_{RMS}/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U_{RMS}/U_0 = 0,22$.

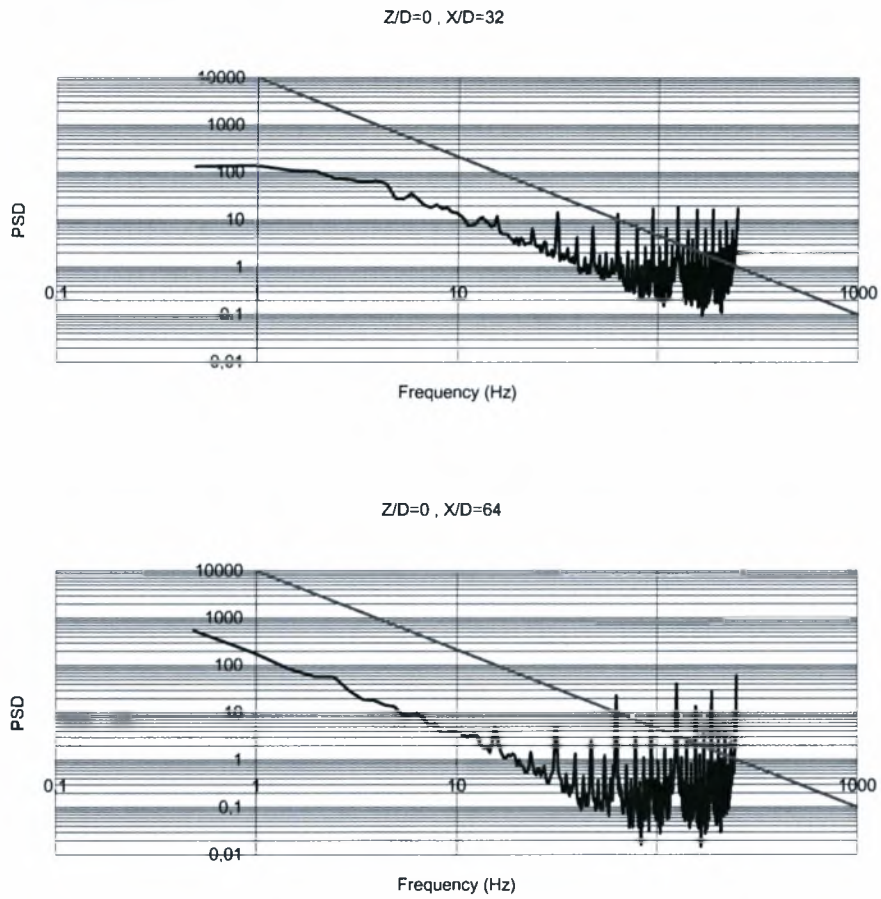


Διάγραμμα 5.52. Διανομή έντασης τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=2,5$

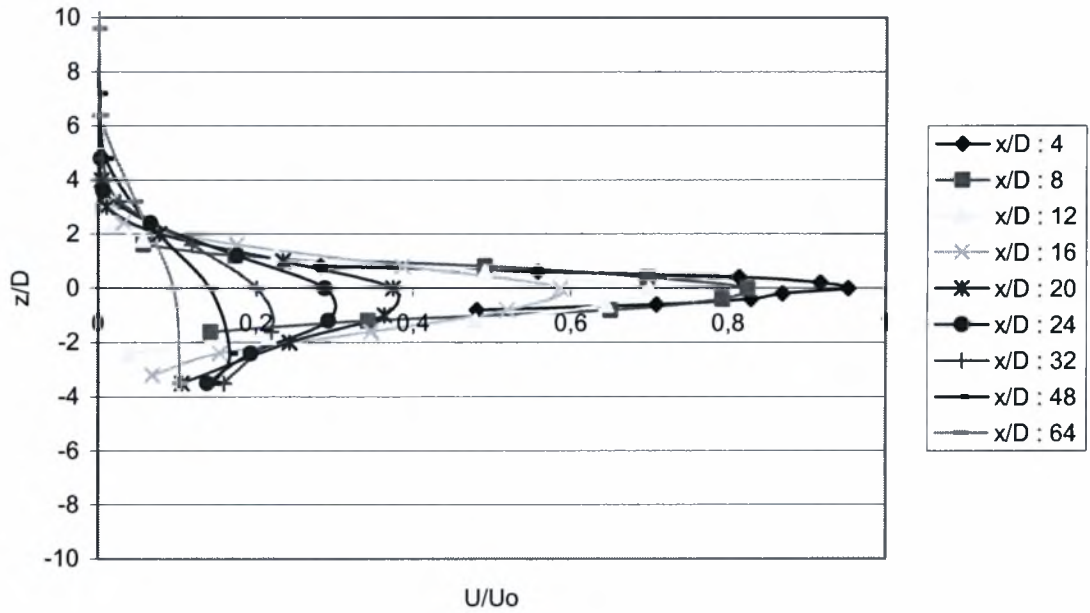
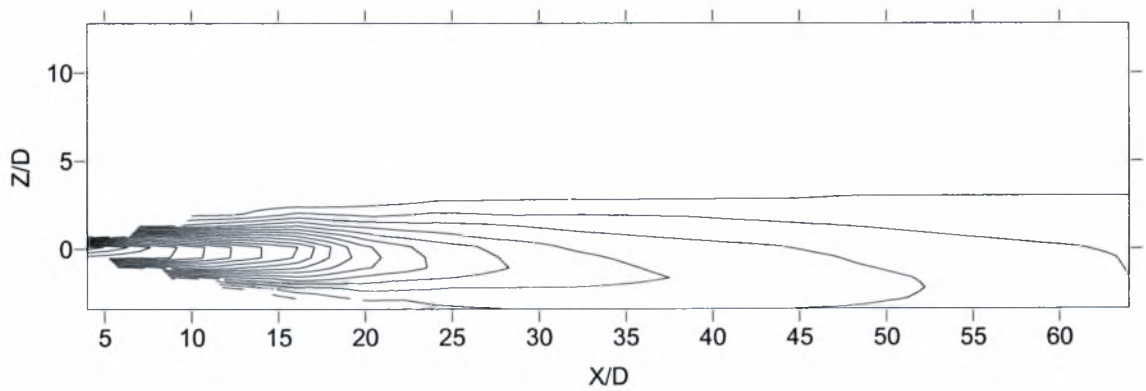
Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD).

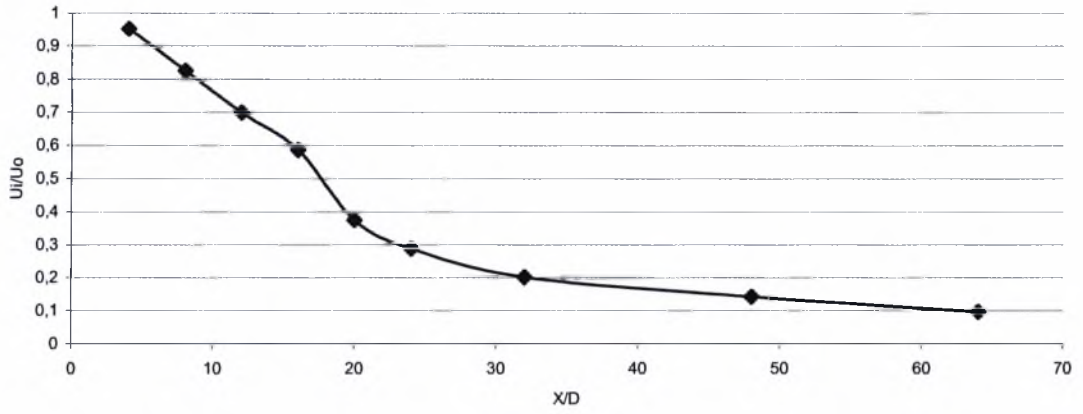
Ως τίτλος του κάθε γραφήματος εμφανίζεται η θέση στην οποία αντιστοιχεί ενώ η ευθεία γραμμή που εμφανίζεται έχει κλίση $-5/3$ και χρησιμοποιείται για το σχολιασμό των γραφημάτων που γίνεται παρακάτω.



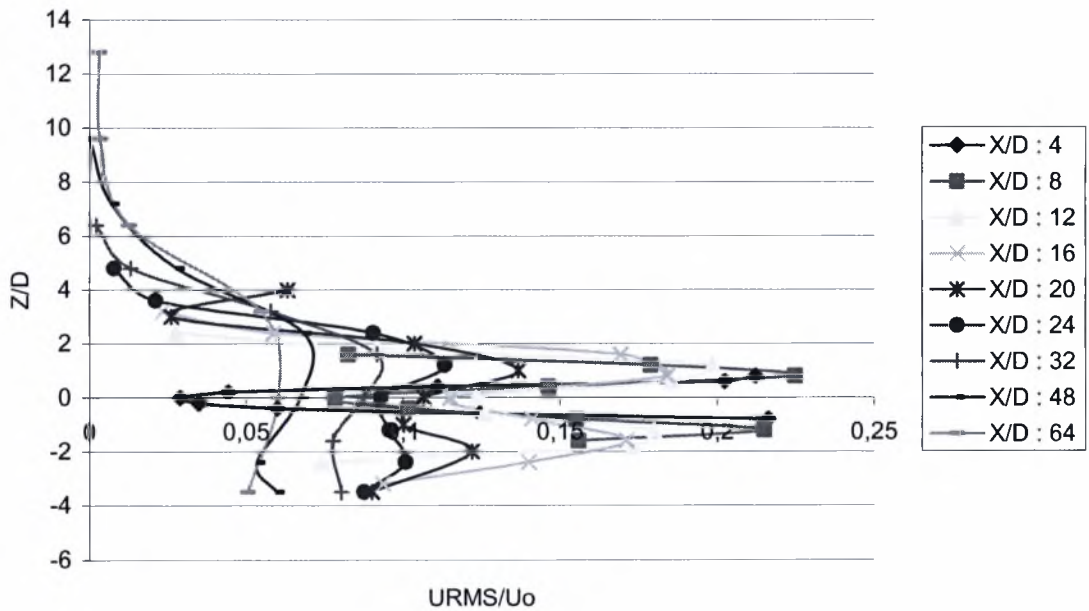


Διάγραμμα 5.53. Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος για $H/D=2,5$

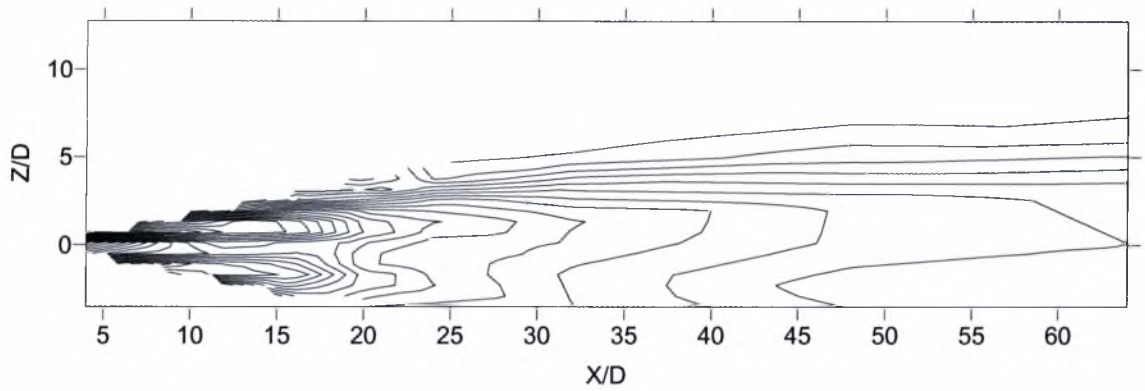
5.3.3. Μέσες διανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης για $H/D=3,5$ Διάγραμμα 5.54. Διανομή μέσης ταχύτητας για $H/D=3,5$ Διάγραμμα 5.55. Ισοϋψείς καμπύλες μέσων ταχυτήτων για $H/D=3,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U/U_0 = 1$.



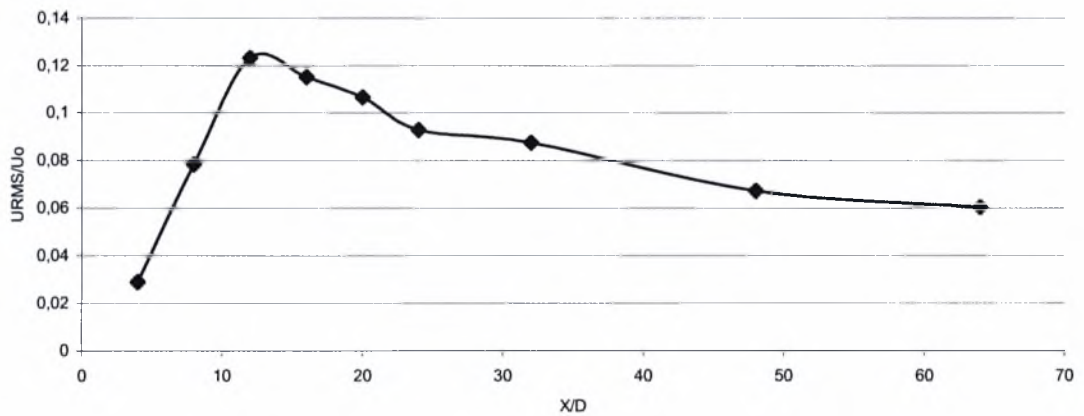
Διάγραμμα 5.56. Διανομή ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για H/D=3,5



Διάγραμμα 5.57. Διανομή έντασης τύρβης για H/D=3,5



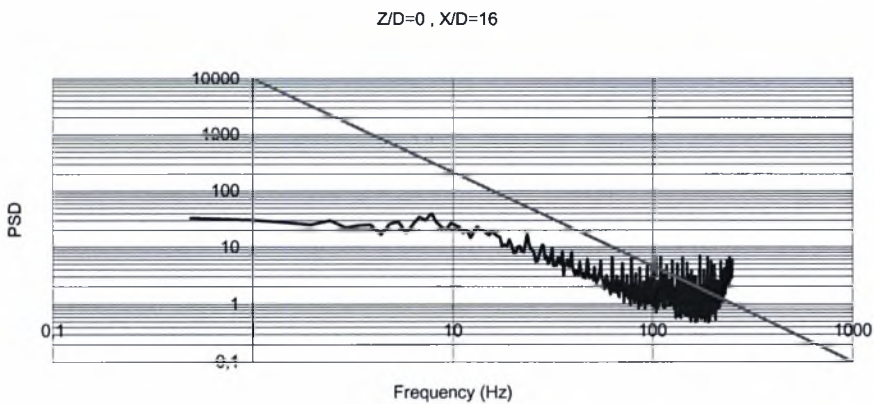
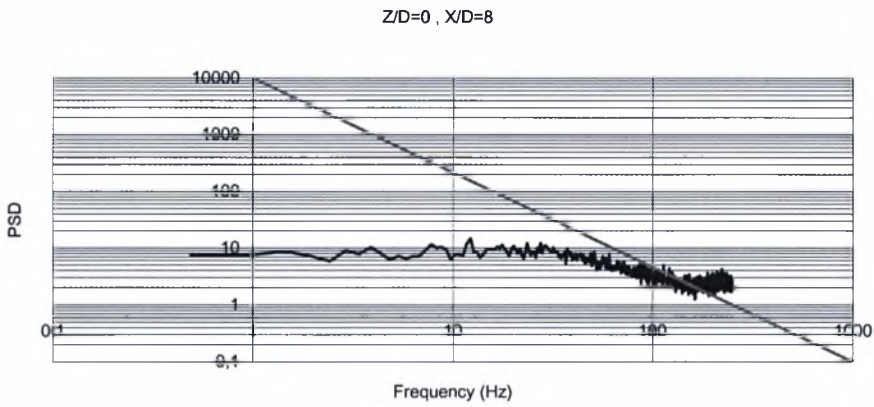
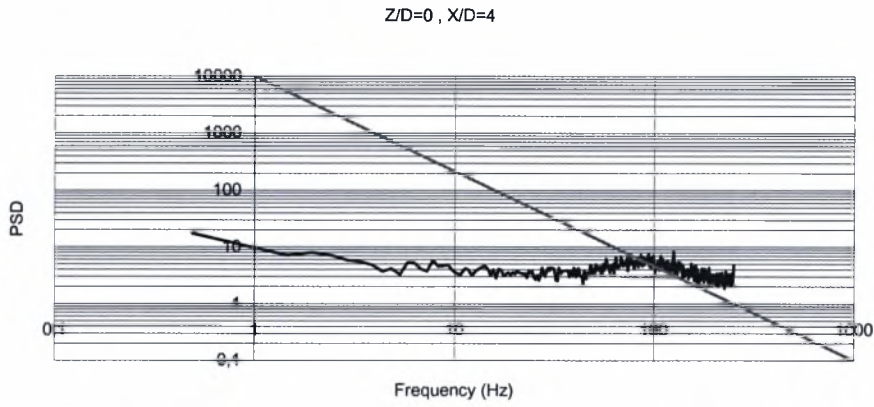
Διάγραμμα 5.58. Ισοϋψείς καμπύλες έντασης τύρβης για $H/D=3,5$. Η 1^η εξωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε $U_{RMS}/U_0 = 0,1$ και οι υπόλοιπες ακολουθούν με βήμα 0,05 έως το $U_{RMS}/U_0 = 0,22$.

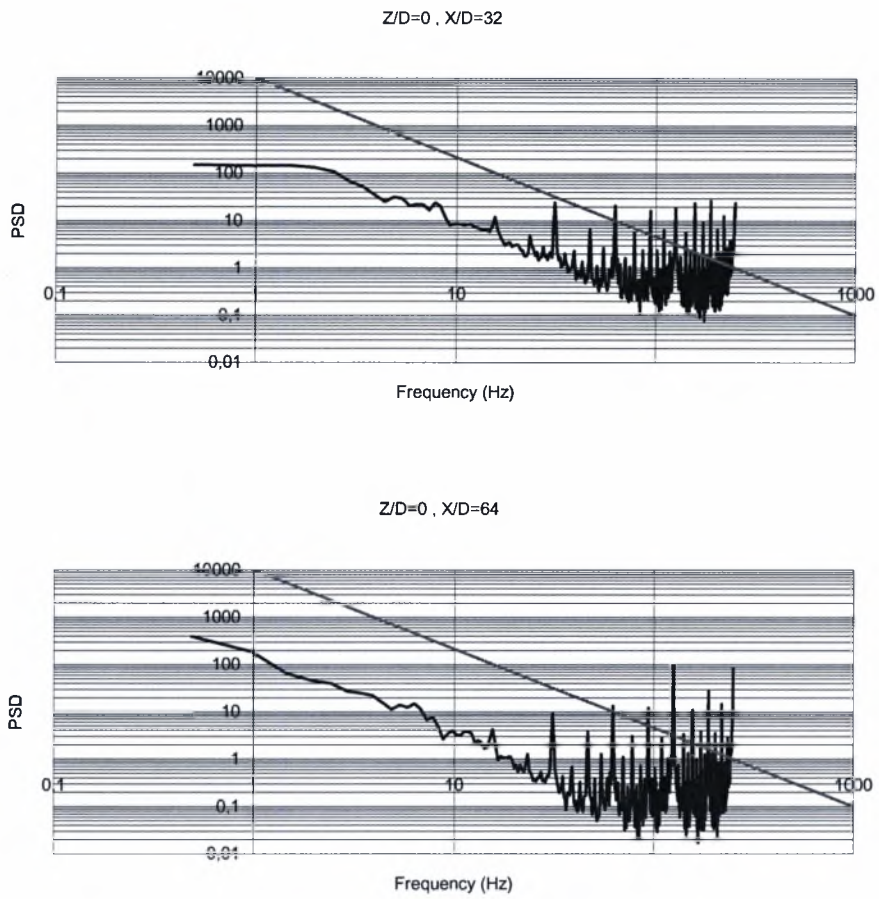


Διάγραμμα 5.59. Διανομή έντασης τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=3,5$

Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD).

Ως τίτλος του κάθε γραφήματος εμφανίζεται η θέση στην οποία αντιστοιχεί ενώ η ευθεία γραμμή που εμφανίζεται έχει κλίση $-5/3$ και χρησιμοποιείται για το σχολιασμό των γραφημάτων που γίνεται παρακάτω.



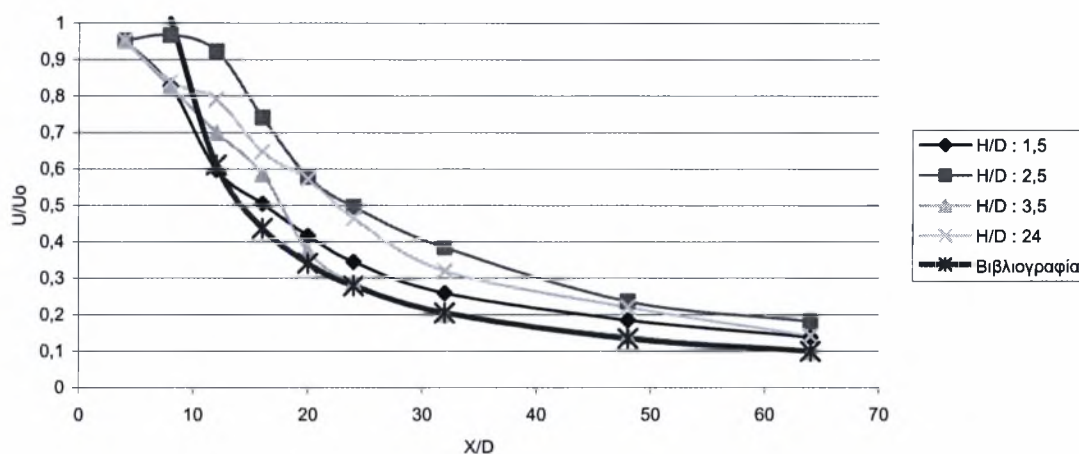


Διάγραμμα 5.60. Διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος για $H/D=3,5$

5.3.4. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Όπως και στη παράγραφο 5.2.5. έτσι και εδώ θα προσπαθήσουμε με τον ίδιο ποιοτικό τρόπο να αναλύσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

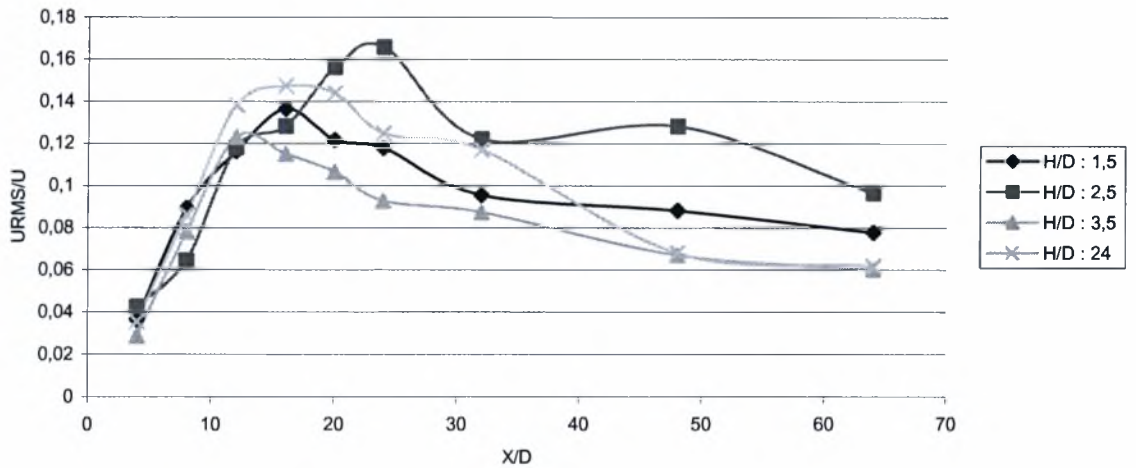
Δημιουργώντας ξανά το γράφημα 5.36. αλλά με τα νέα δεδομένα οδηγούμαστε στο παρακάτω:



Διάγραμμα 5.61. Διανομές ταχυτήτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για τα διάφορα H/D

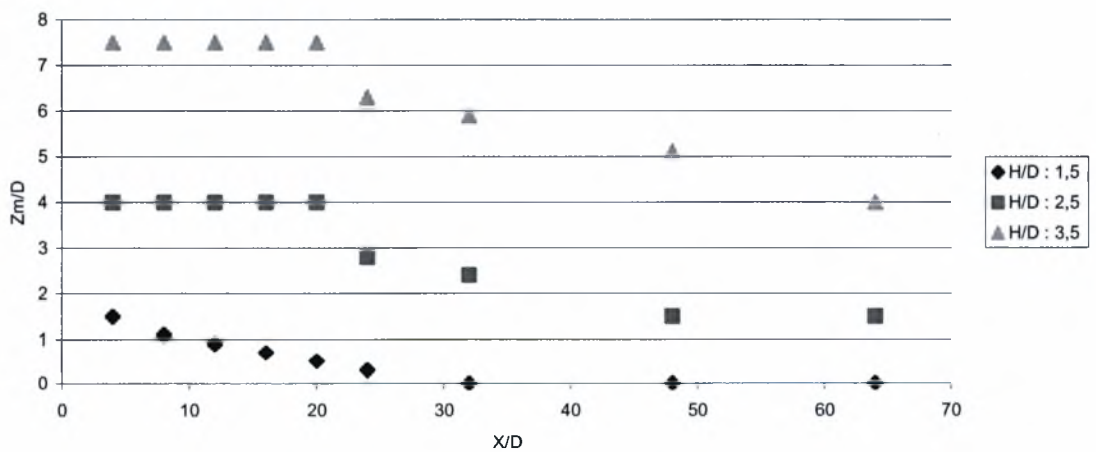
Η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων (5.36. και 5.61.) επιβεβαιώνει τη βιβλιογραφία που αναφέρει παρόμοια επίδραση της διεπιφάνειας στη δέσμη σε ό,τι αφορά τις διανομές των ταχυτήτων με αυτή του τοιχώματος.

Προχωρώντας στο αντίστοιχο διάγραμμα για την ένταση της τύρβης παρατηρούμε πως δεν παρουσιάζεται κάποια αλλαγή σε ό,τι αφορά το σχήμα των καμπυλών παρά μόνο στην μέγιστη τιμή που αυτές εμφανίζουν, με αυτές του στερεού ορίου να είναι αυξημένες. Τα όσα σχολιάστηκαν για το αντίστοιχο διάγραμμα της ελεύθερης επιφάνειας βλέπουμε να ισχύουν κι εδώ. Μετά τις 16 διαμέτρους η τύρβη έχει αναπτυχθεί πλήρως και περνά στη φάση αυτοσυντήρησης. Εξάλλου και ο η παρατήρηση των διαγραμμάτων πυκνότητας φάσματος μας οδηγεί στο ίδιο ακριβώς συμπέρασμα.

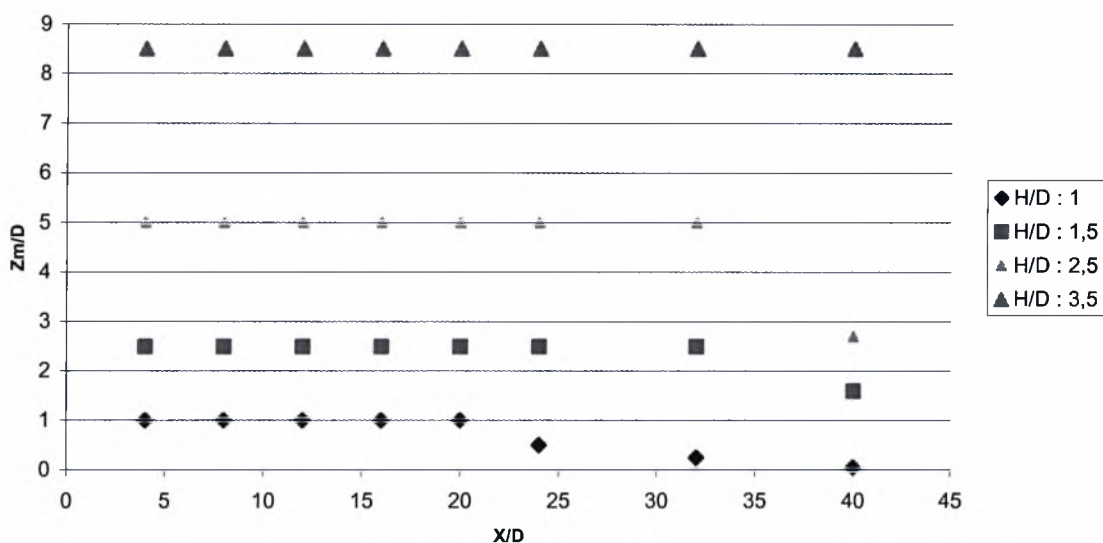


Διάγραμμα 5.62. Διανομές εντάσεως τύρβης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για τα διάφορα H/D

Ελέγχοντας την μετατόπιση του σημείου στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τοπική ταχύτητα παρατηρούμε πλήρη επαλήθευση των όσων αναφέρονται στη βιβλιογραφία.



Διάγραμμα 5.63.α. Μεταβολή σημείου εμφάνισης μέγιστης μέσης ταχύτητας σε σχέση με τα X/D και H/D

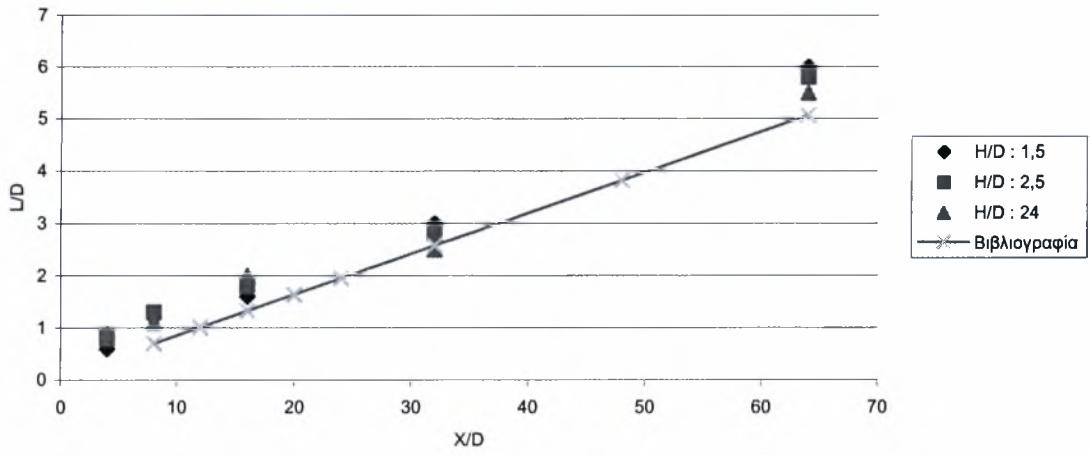


Διάγραμμα 5.63.β. Μεταβολή σημείου εμφάνισης μέγιστης μέσης ταχύτητας σε σχέση με τα X/D και H/D σύμφωνα με τη βιβλιογραφία για την ελεύθερη επιφάνεια

Έτσι παρατηρούμε πλέον καθαρά τη συμπίεση της ροής και την παραμόρφωσή της προς τη μεριά του τοιχώματος. Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο όσο πλησιάζουμε προς το τοίχωμα. Στο Διάγραμμα 5.63.β. παρατηρούμε τα όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία για την επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας. Είναι προφανής η εντονότερη επίδραση του τοιχώματος. Σε αντίθεση με τις μετρήσεις στην επιφάνεια, εδώ είχαμε τη δυνατότητα να πάρουμε ακριβείς μετρήσεις πολύ κοντά στον πυθμένα με αποτέλεσμα να φαίνεται ξεκάθαρα η μετατόπιση της ροής προς τα κάτω.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα πυκνότητας φάσματος στα διάφορα βάθη με αυτά της ελεύθερης ροής δεν εντοπίζουμε αξιοσημείωτες διαφορές, όπως ακριβώς συνέβη και με την ελεύθερη επιφάνεια. Παρατηρούμε πως η πλήρης ανάπτυξη της τύρβης και η μετάβαση στη φάση αυτοσυντήρησής της συμβαίνει μεταξύ 16D και 32D από την αρχή των αξόνων, όπου και η συχνότητα αποκτά κλίση ίση με $-5/3$, σύμφωνα με το νόμο του Kolmogorov.

Τέλος παρουσιάζοντας τη μεταβολή του πλάτους διασποράς L/D της δέσμης συναρτήσει του H/D στο Διάγραμμα 5.64. παρατηρούμε και εδώ διατηρεί την ίδια γραμμική εξάρτηση που αναφέρει η βιβλιογραφία, όπως ακριβώς συνέβη και με την ελεύθερη επιφάνεια.



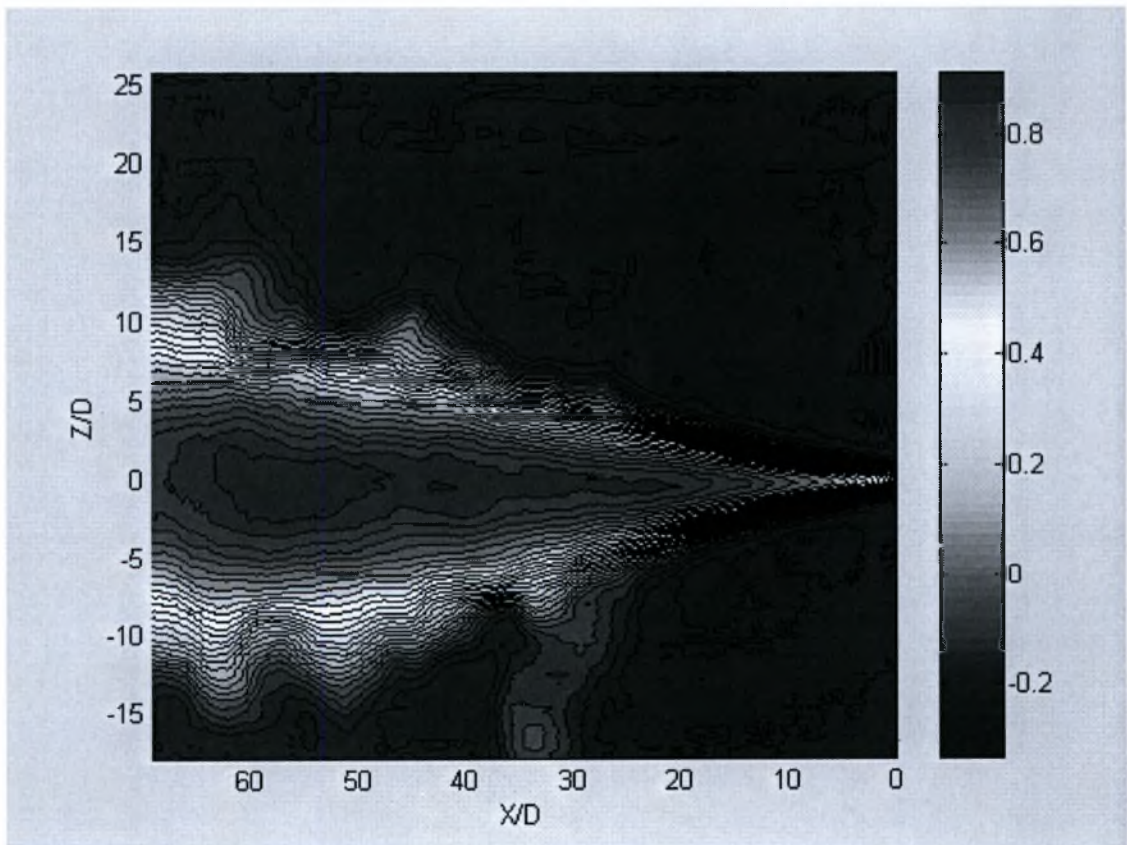
Διάγραμμα 5.64. Μεταβολή του πλάτους διάχυσης Z/D της δέσμης συναρτήσει του H/D

6. Οπτικοποίηση της ροής κοντά σε διεπιφάνεια και στερεά όρια

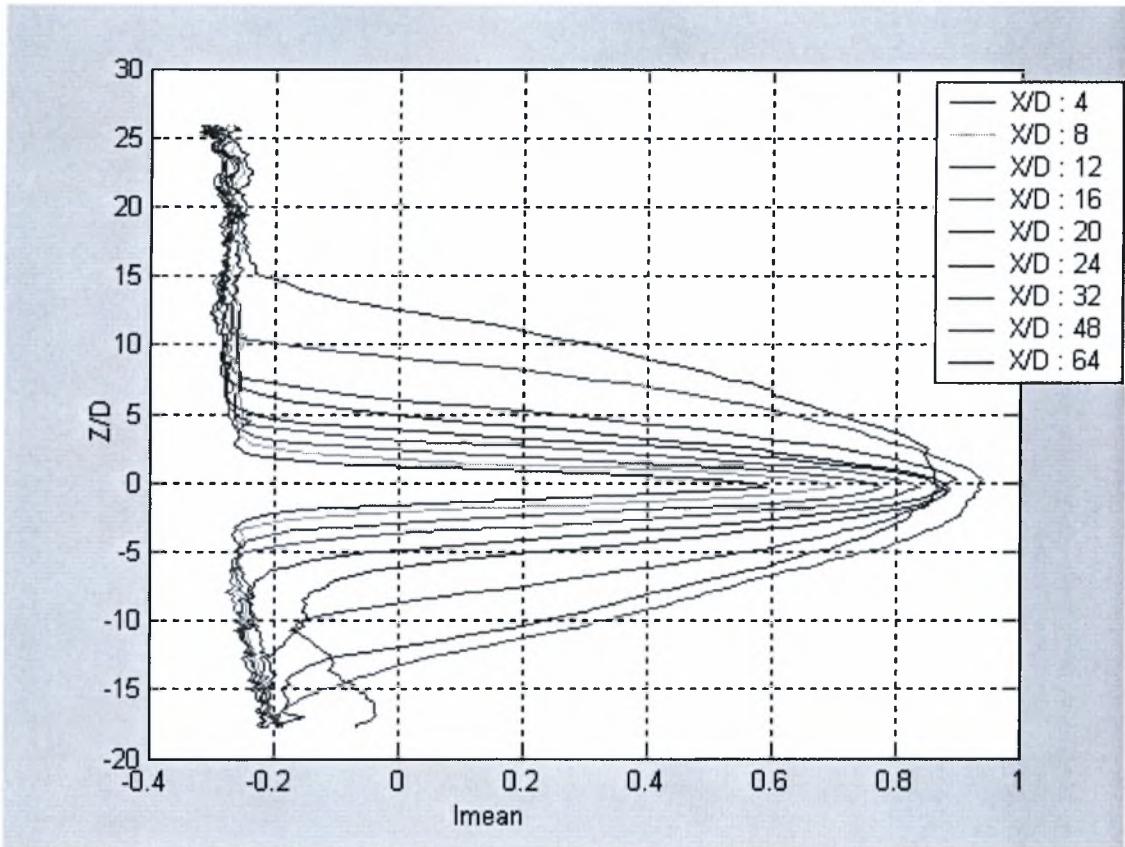
Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα από την οπτικοποίηση του φαινομένου. Τα αποτελέσματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Σε αυτά που αφορούν την αλληλεπίδραση της δέσμης με την ελεύθερη επιφάνεια και σε αυτά που αφορούν την αλληλεπίδραση της δέσμης με το στερεό τοίχωμα.

6.1. Οπτικοποίηση της ελεύθερης δέσμης

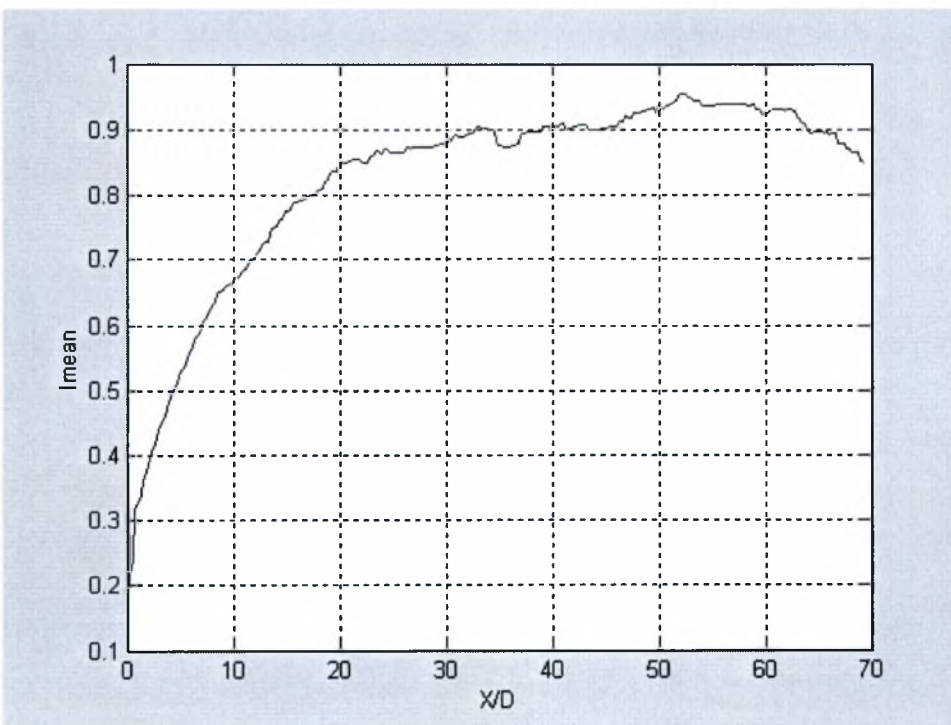
6.1.1. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=24$ (free jet)



Διάγραμμα 6.1. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=24$



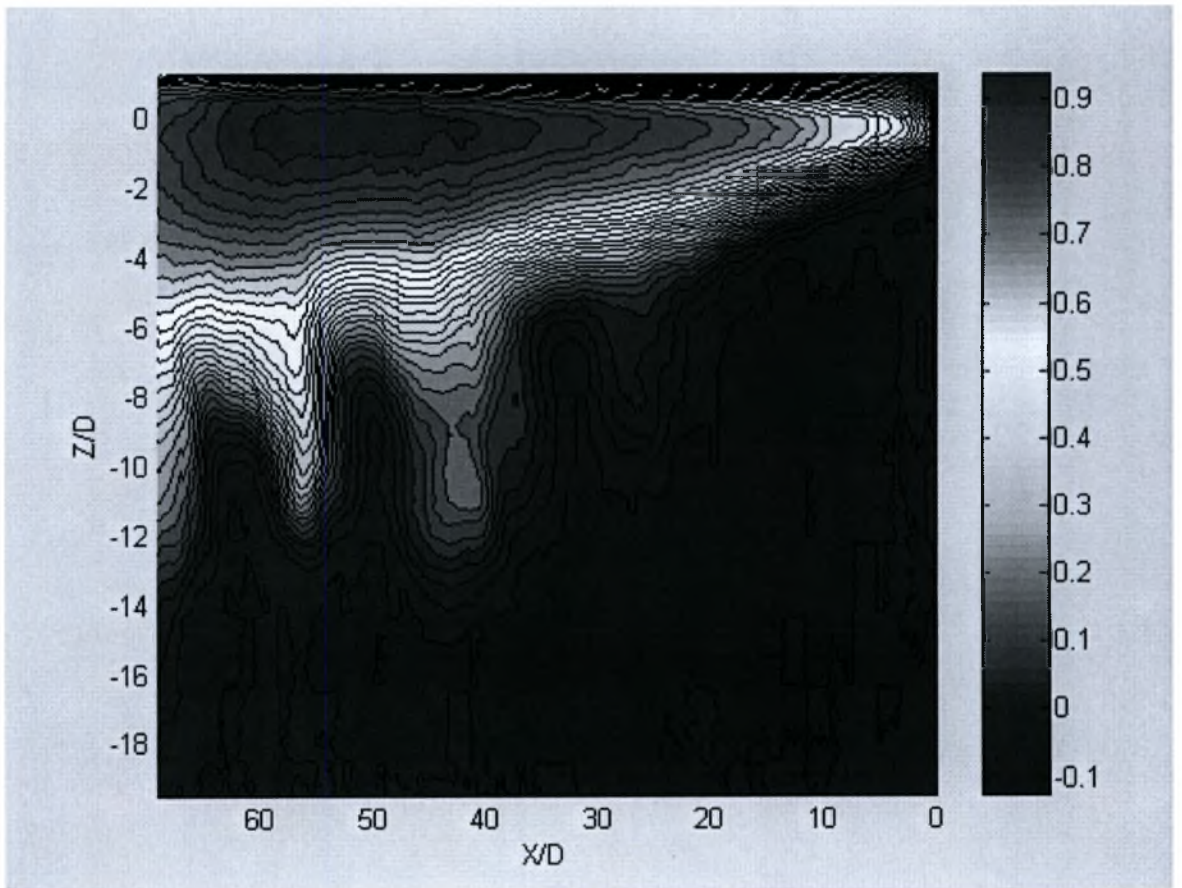
Διάγραμμα 6.2. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=24$



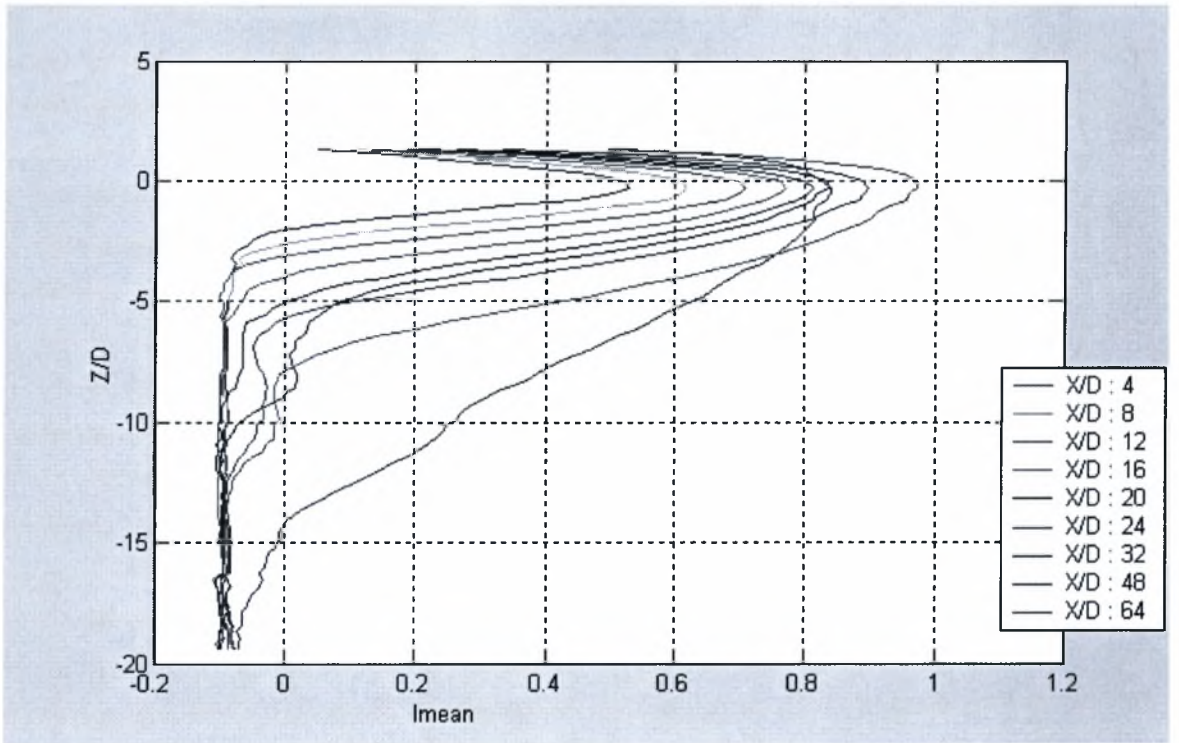
Διάγραμμα 6.3. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=24$

6.2. Οπτικοποίηση της ροής κοντά στη διεπιφάνεια

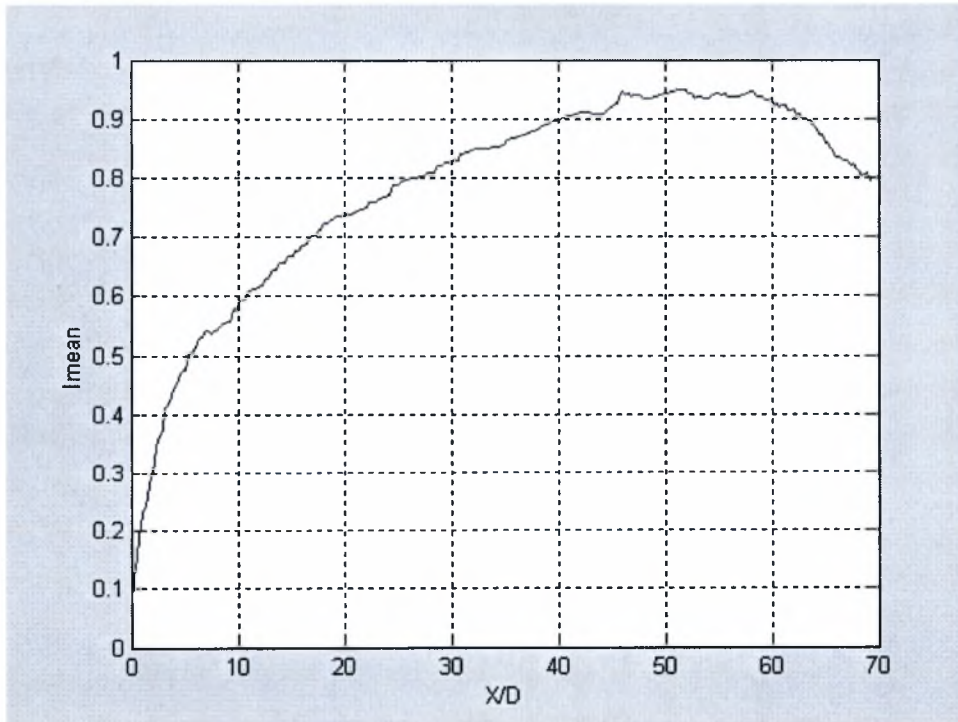
6.2.1. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1$



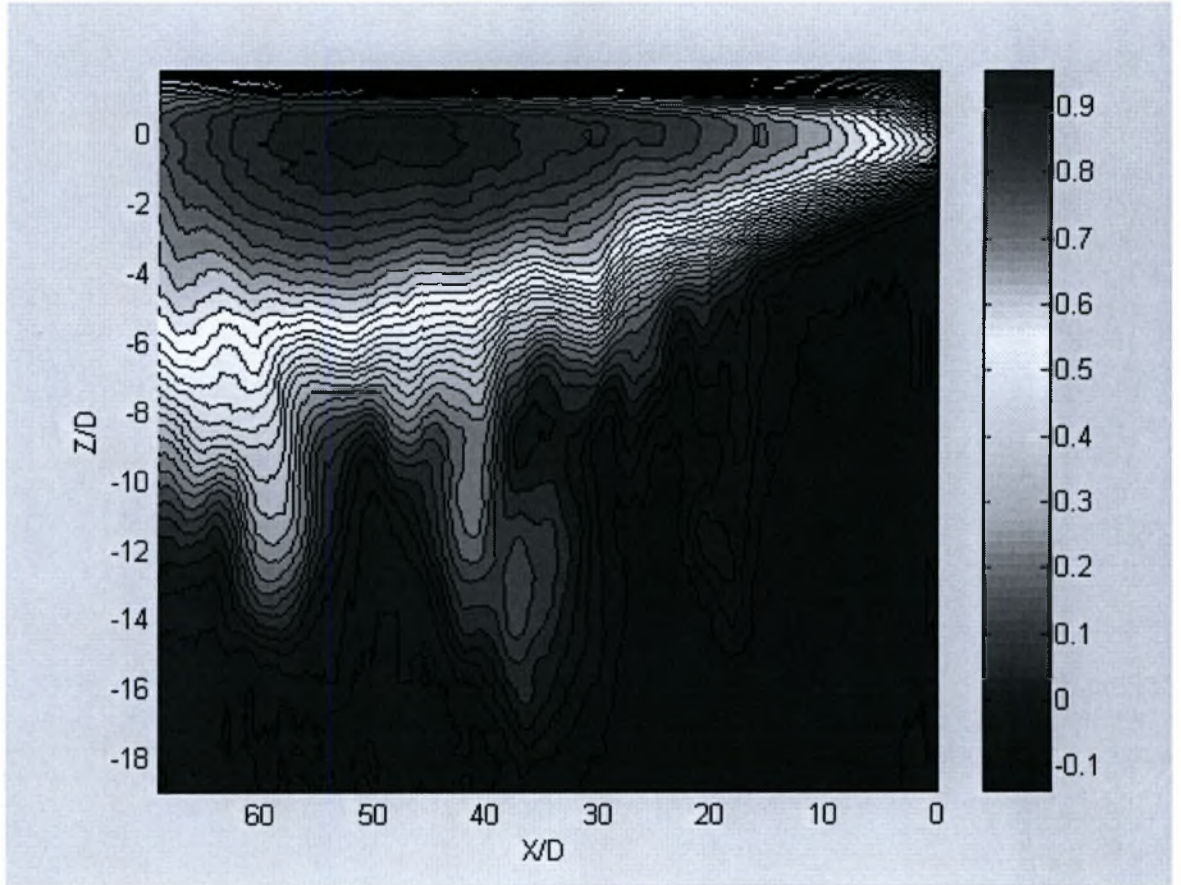
Διάγραμμα 6.4. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=1$

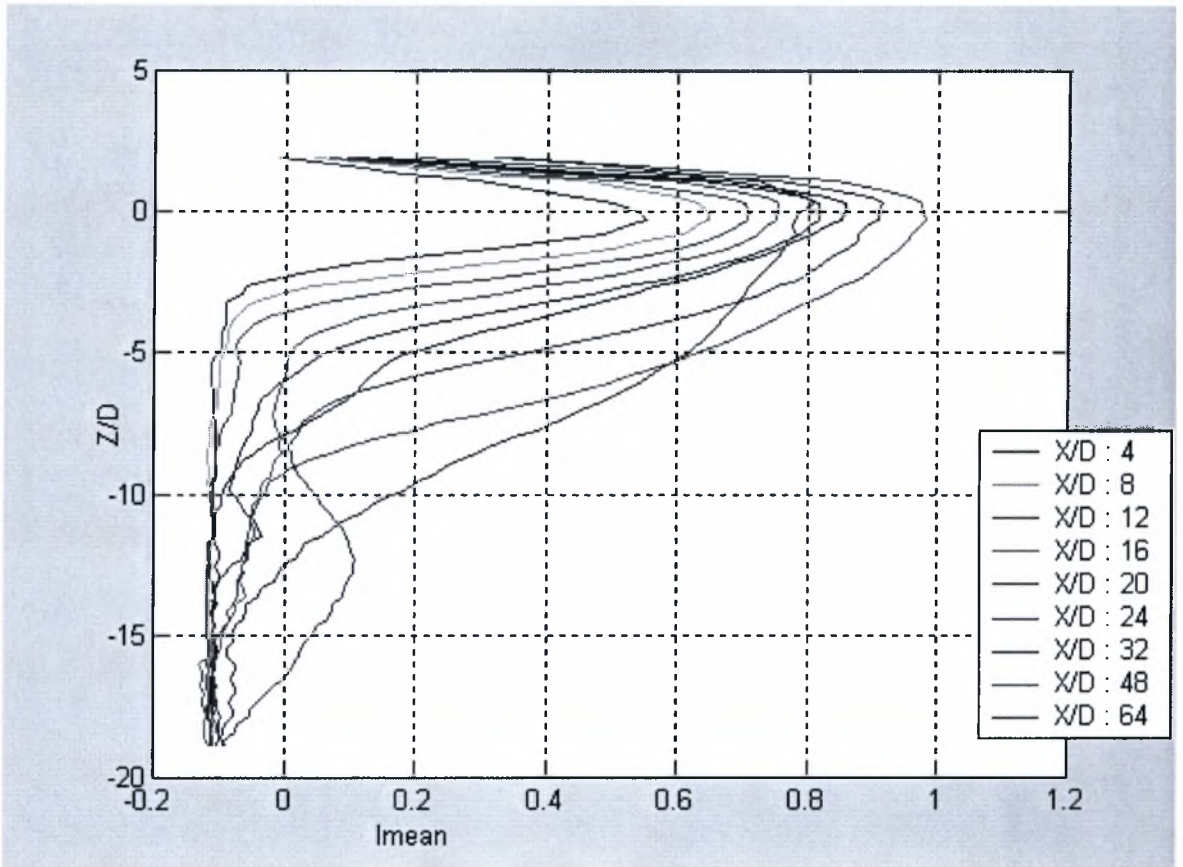


Διάγραμμα 6.5. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1$

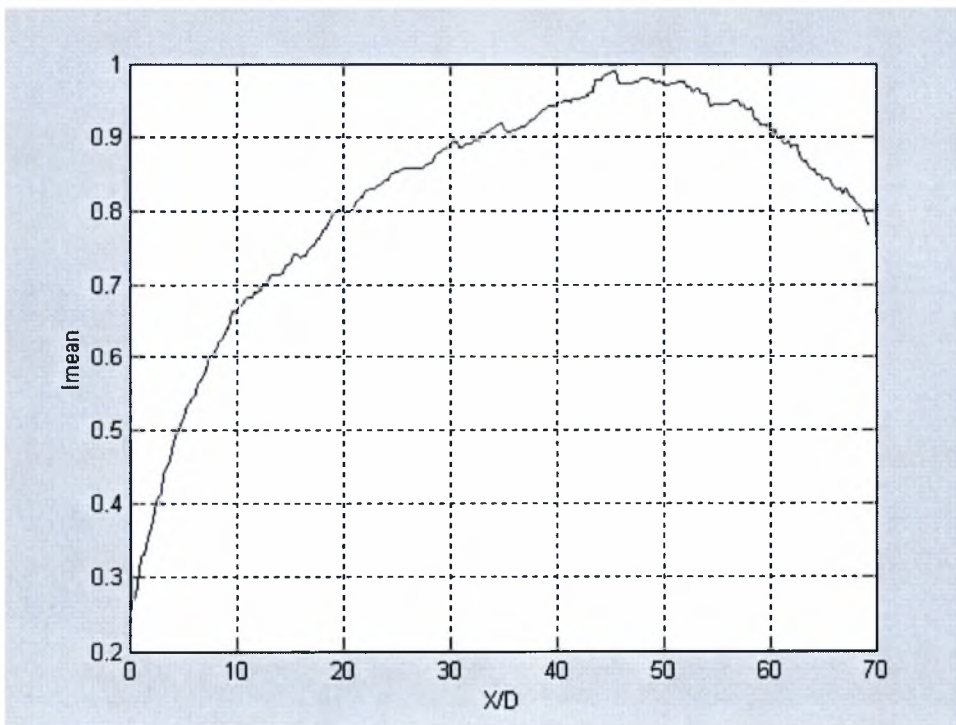


Διάγραμμα 6.6. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=1$

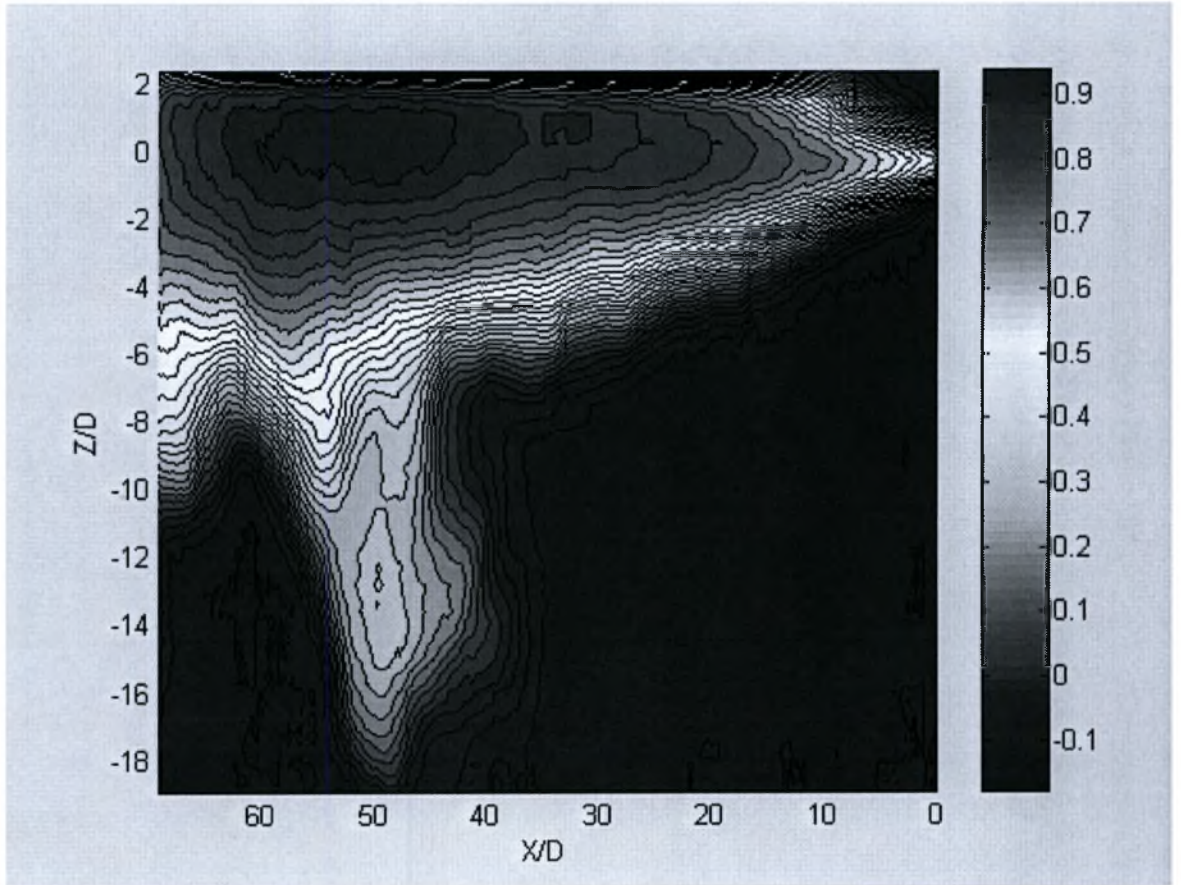
6.2.2. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1,5$ Διάγραμμα 6.7. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=1,5$

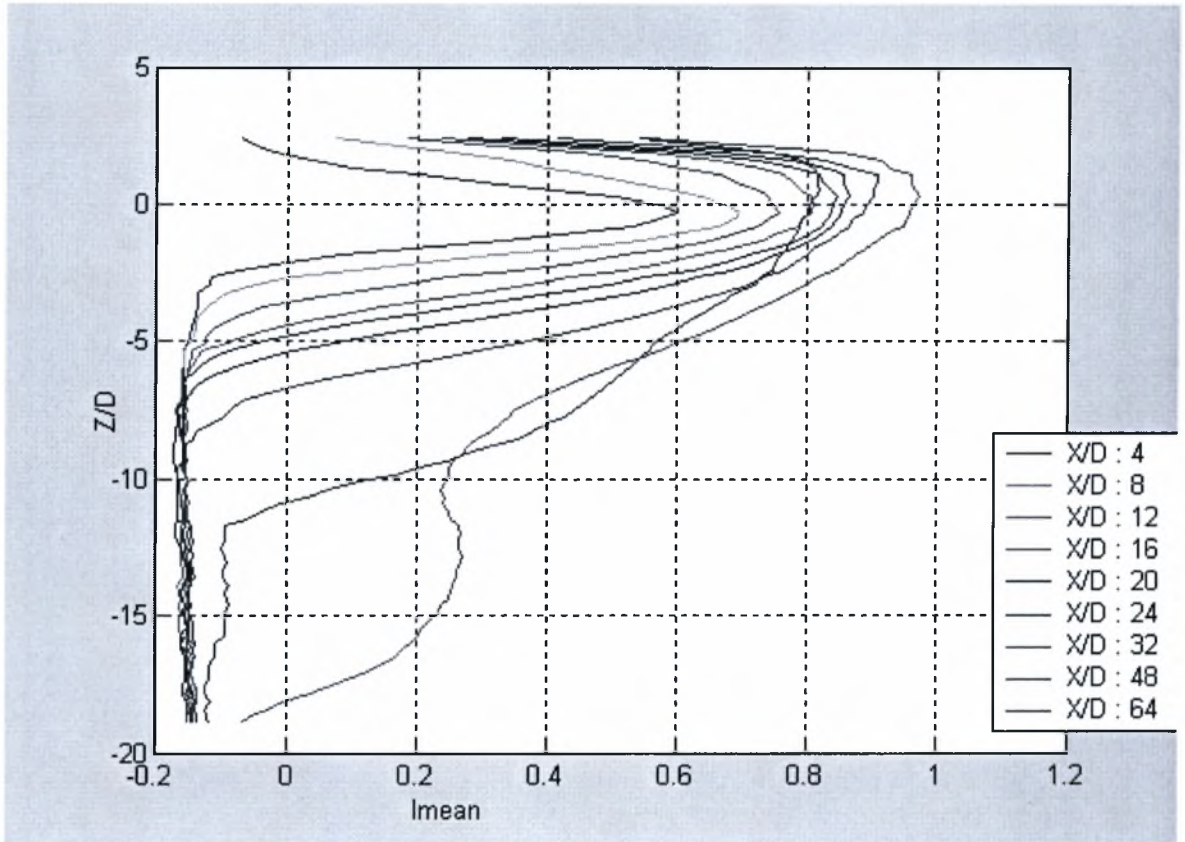


Διάγραμμα 6.8. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1,5$

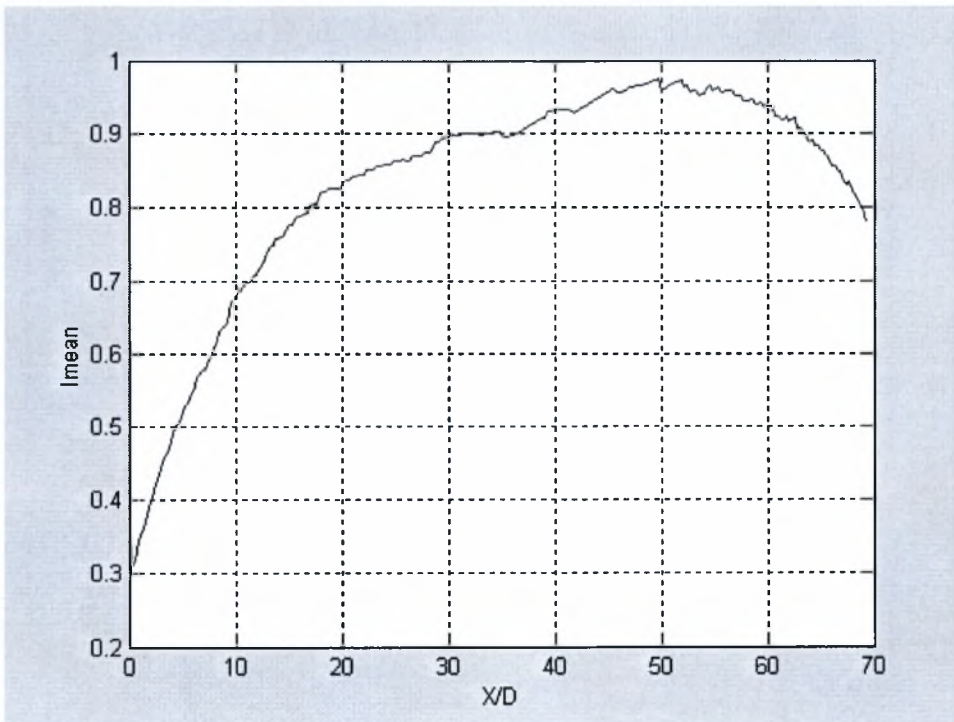


Διάγραμμα 6.9. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=1,5$

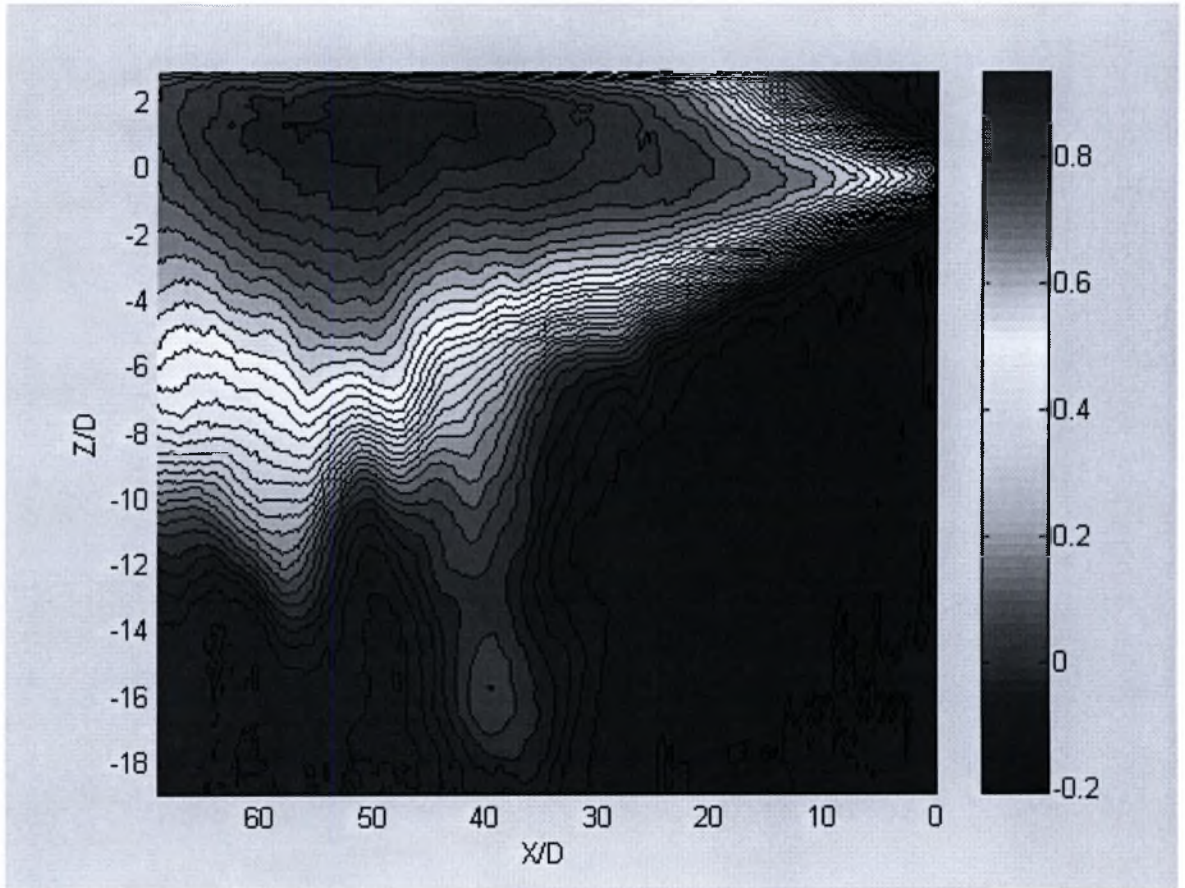
6.2.3. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2$ Διάγραμμα 6.10. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=2$

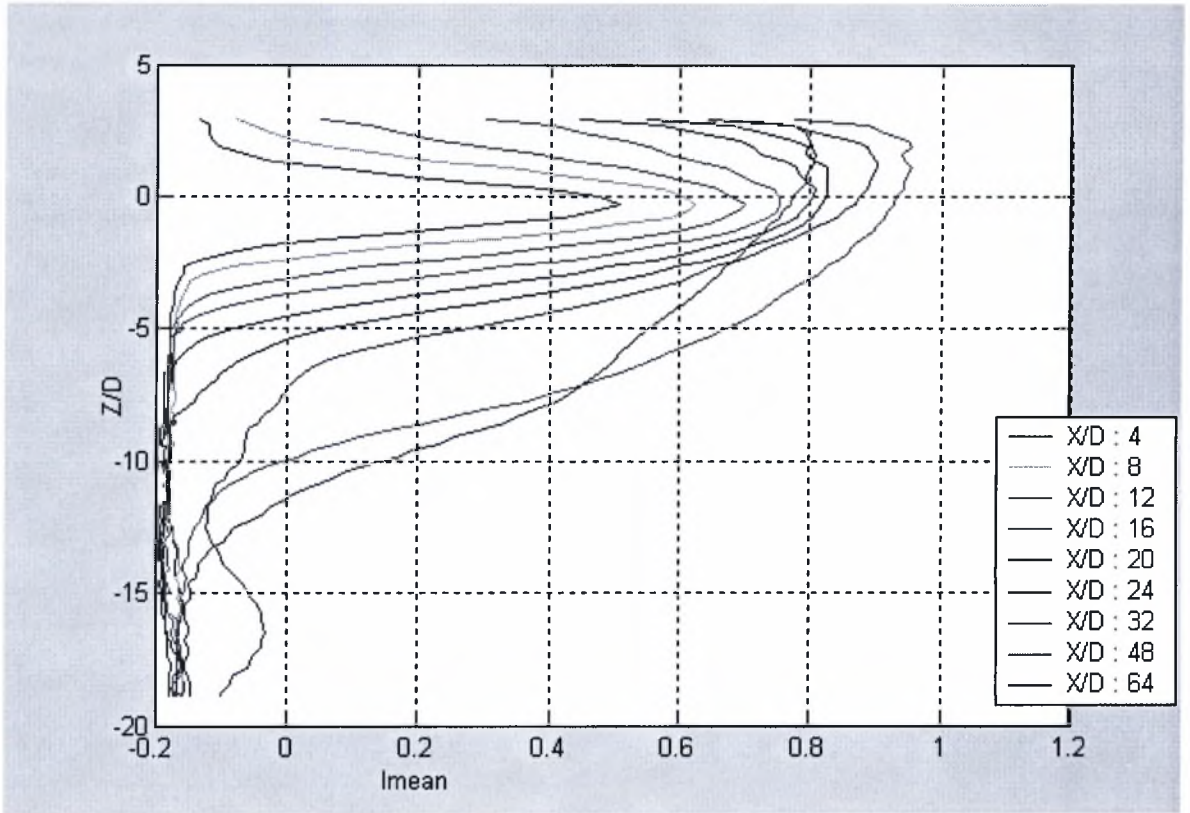


Διάγραμμα 6.11. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2$

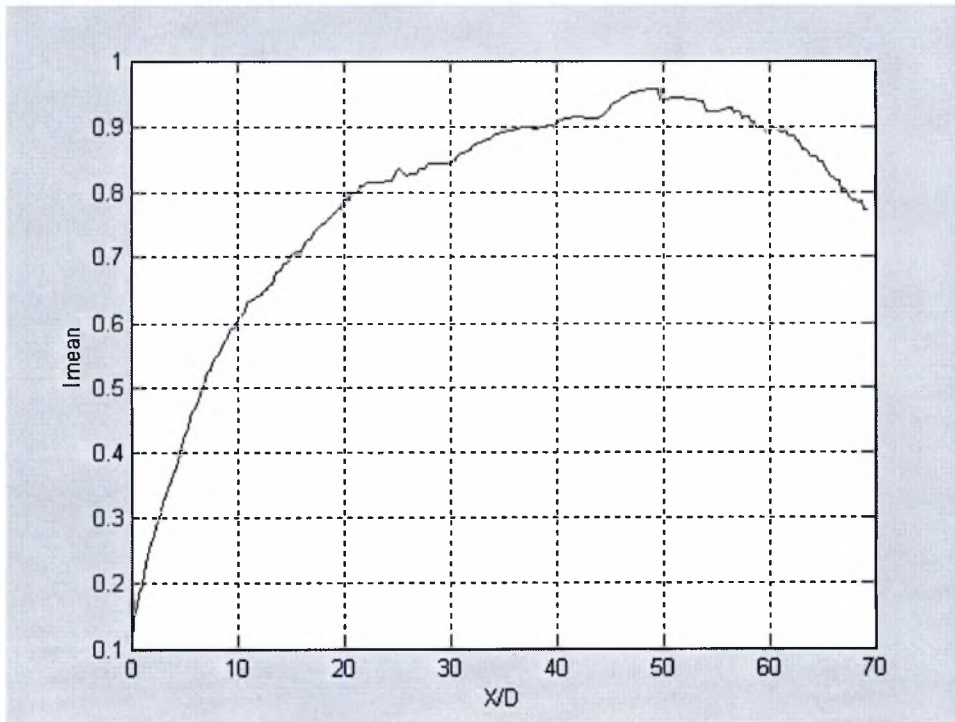


Διάγραμμα 6.12. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=2$

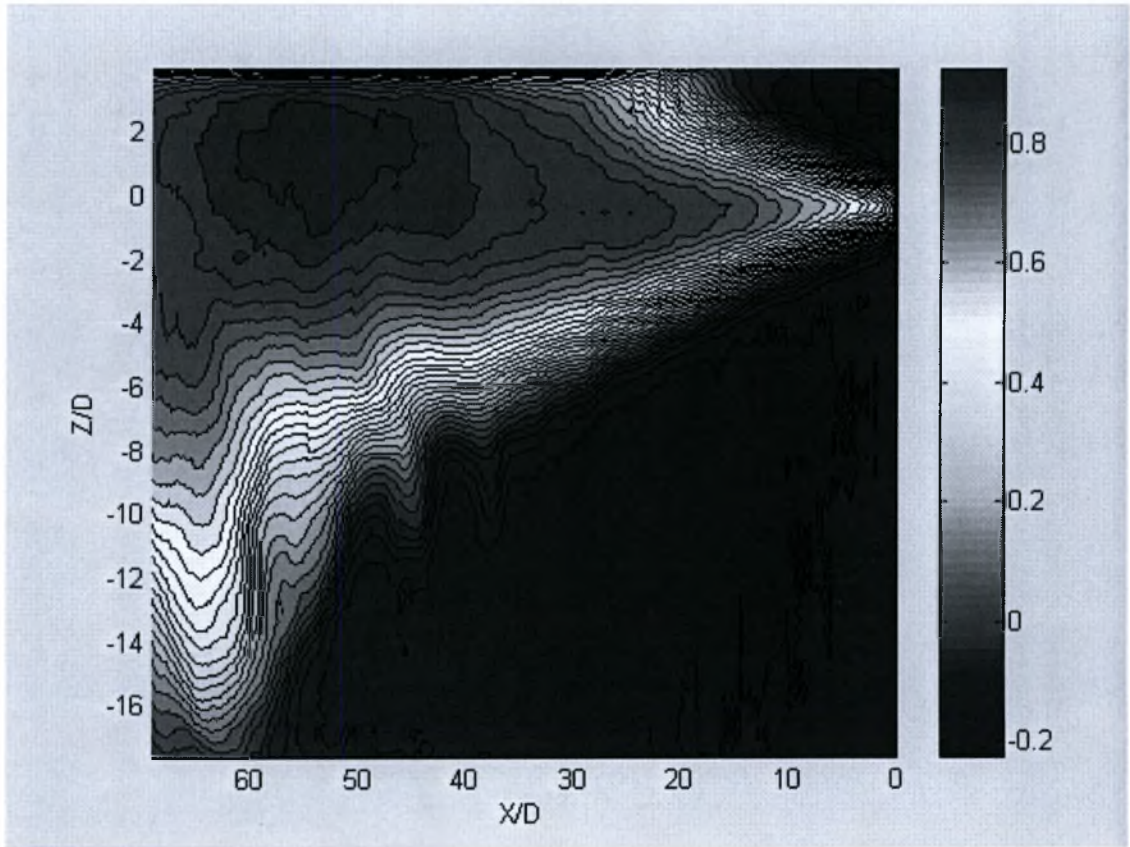
6.2.4. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2,5$ Διάγραμμα 6.13. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=2,5$

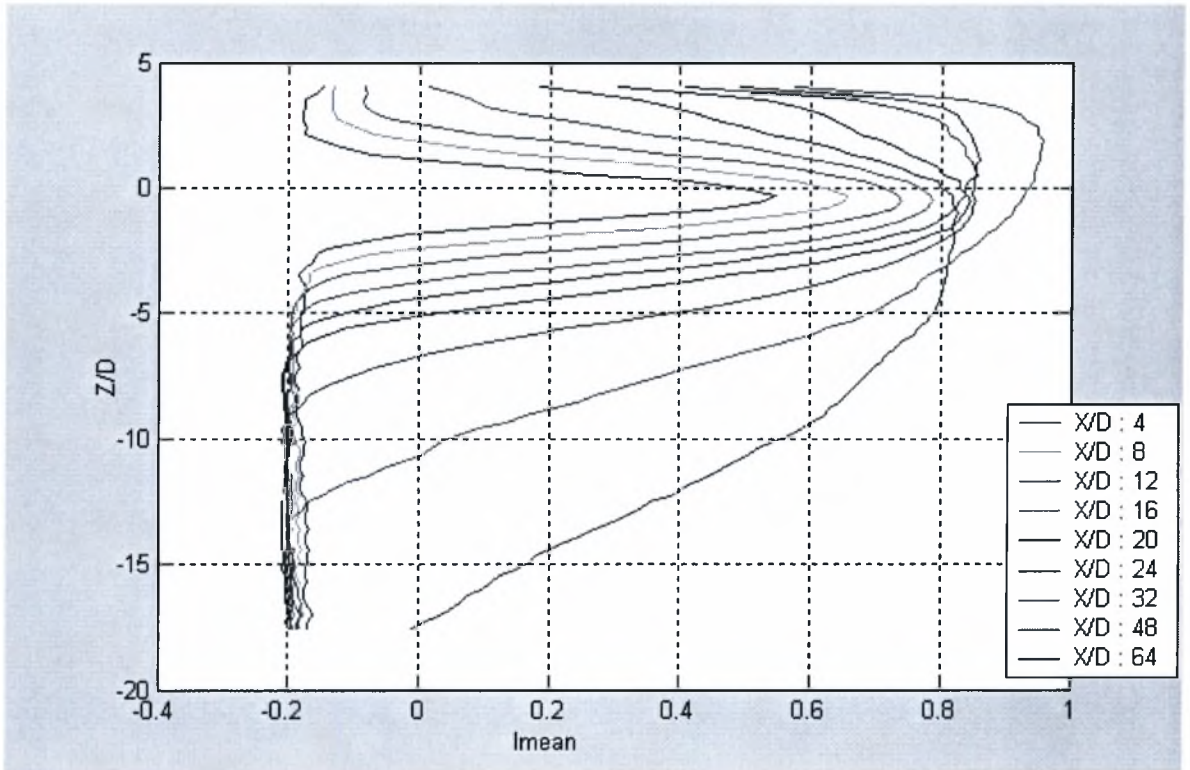


Διάγραμμα 6.14. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2.5$

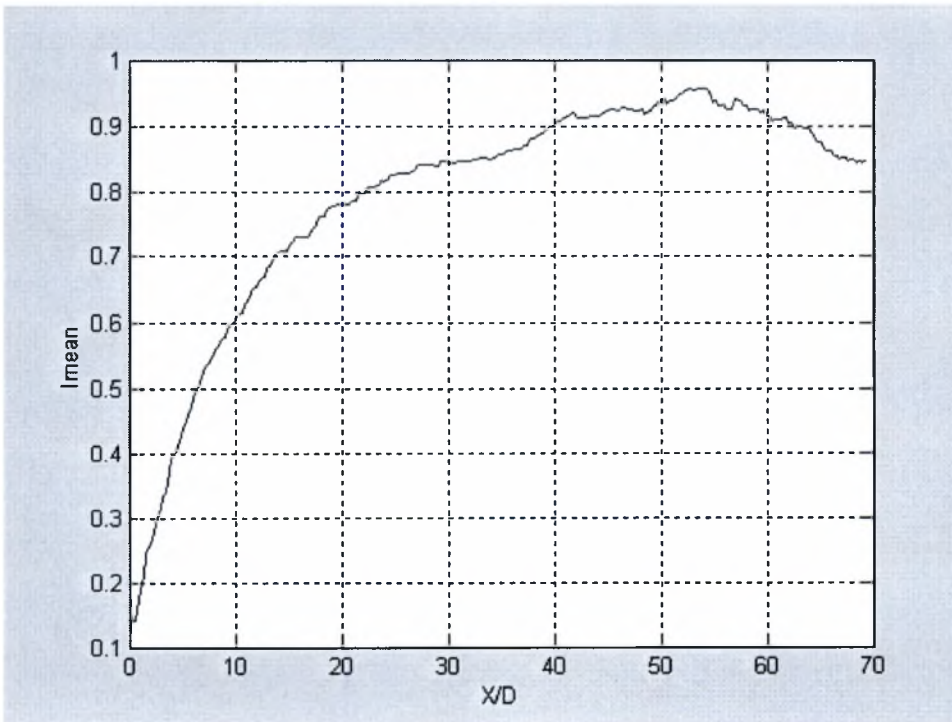


Διάγραμμα 6.15. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=2.5$

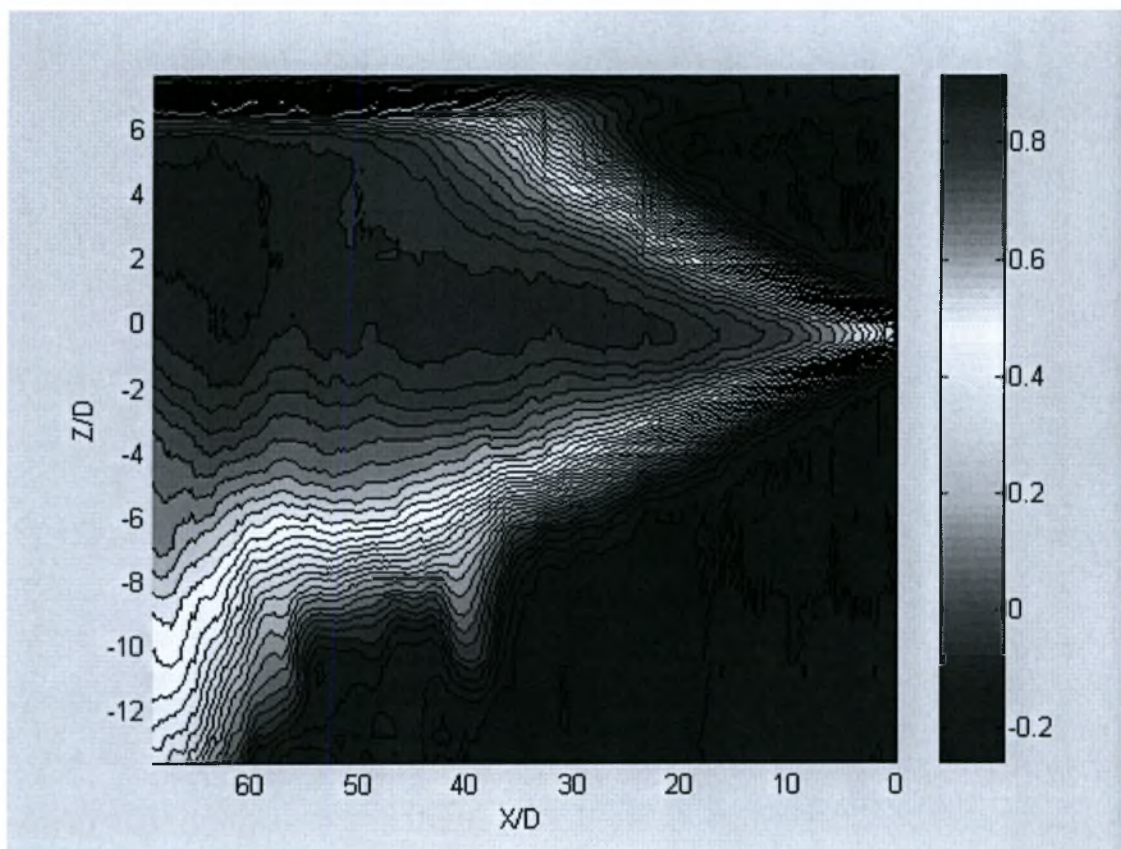
6.2.5. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=3,5$ Διάγραμμα 6.16. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=3.5$

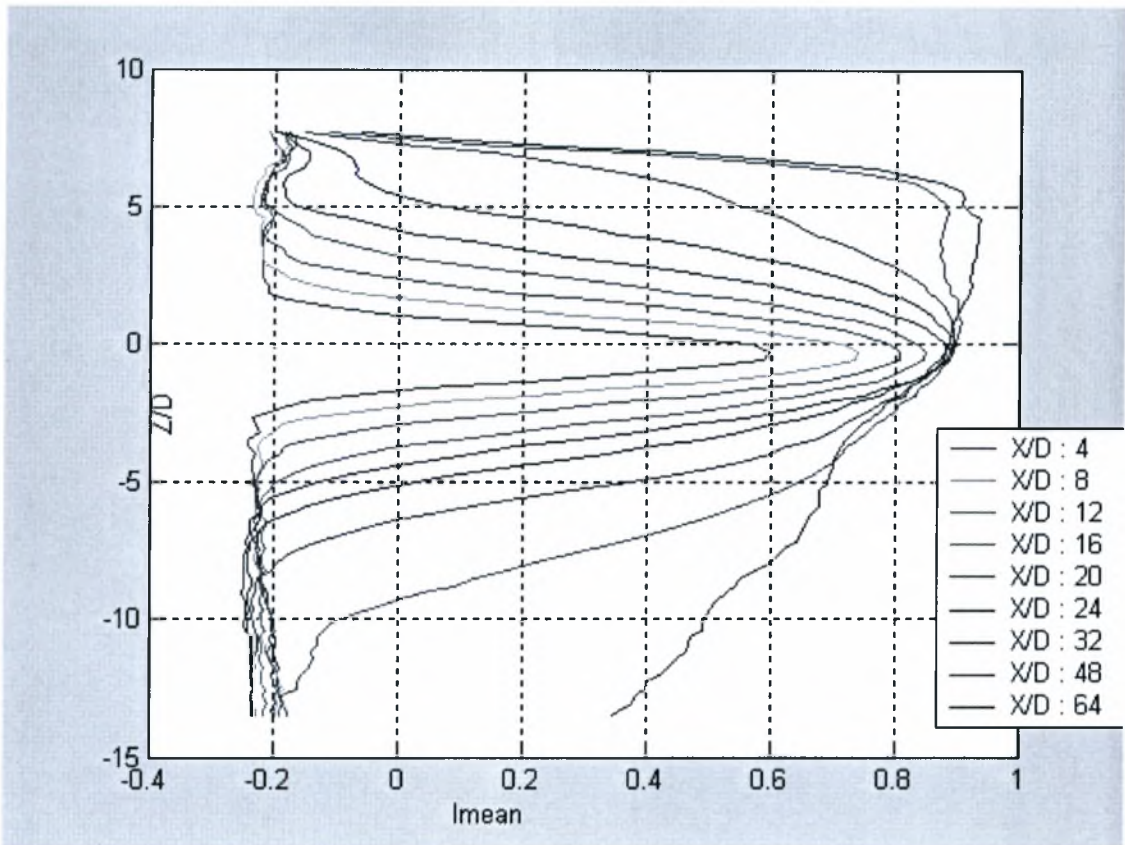


Διάγραμμα 6.17. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=3.5$

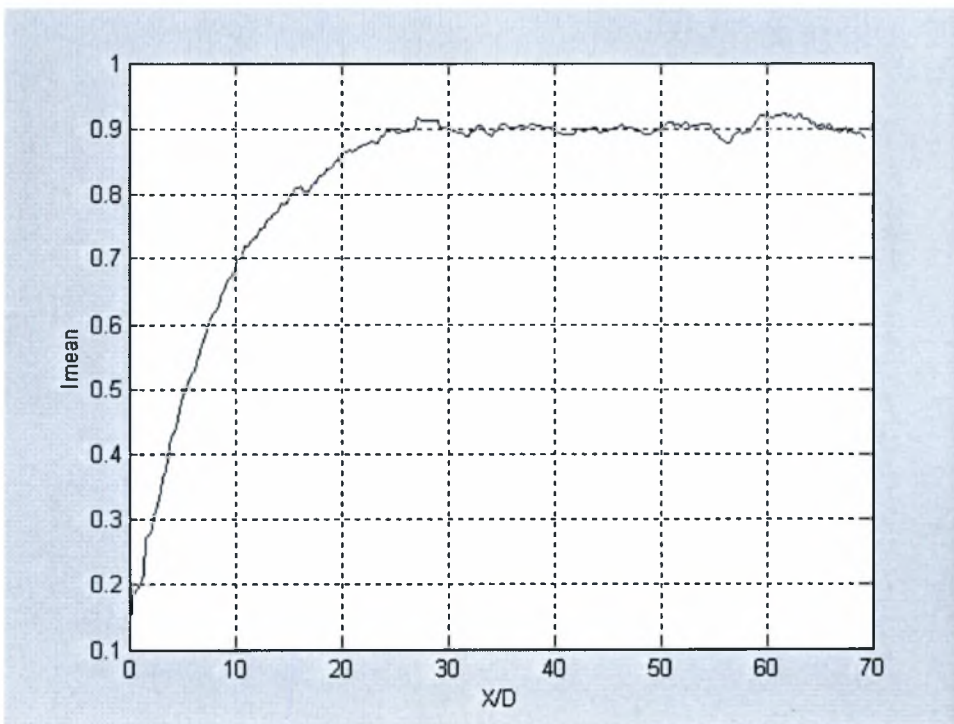


Διάγραμμα 6.18. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=3.5$

6.2.6. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=7$ Διάγραμμα 6.19. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=7$



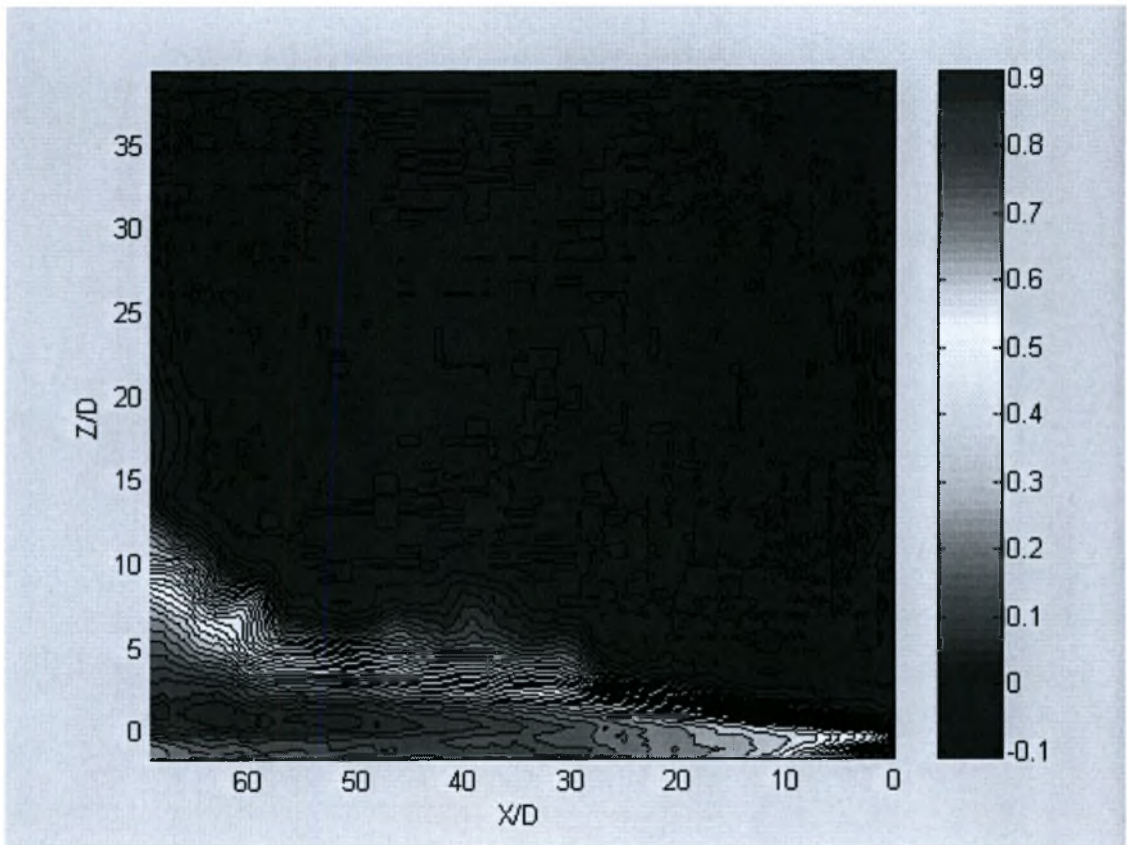
Διάγραμμα 6.20. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=7$



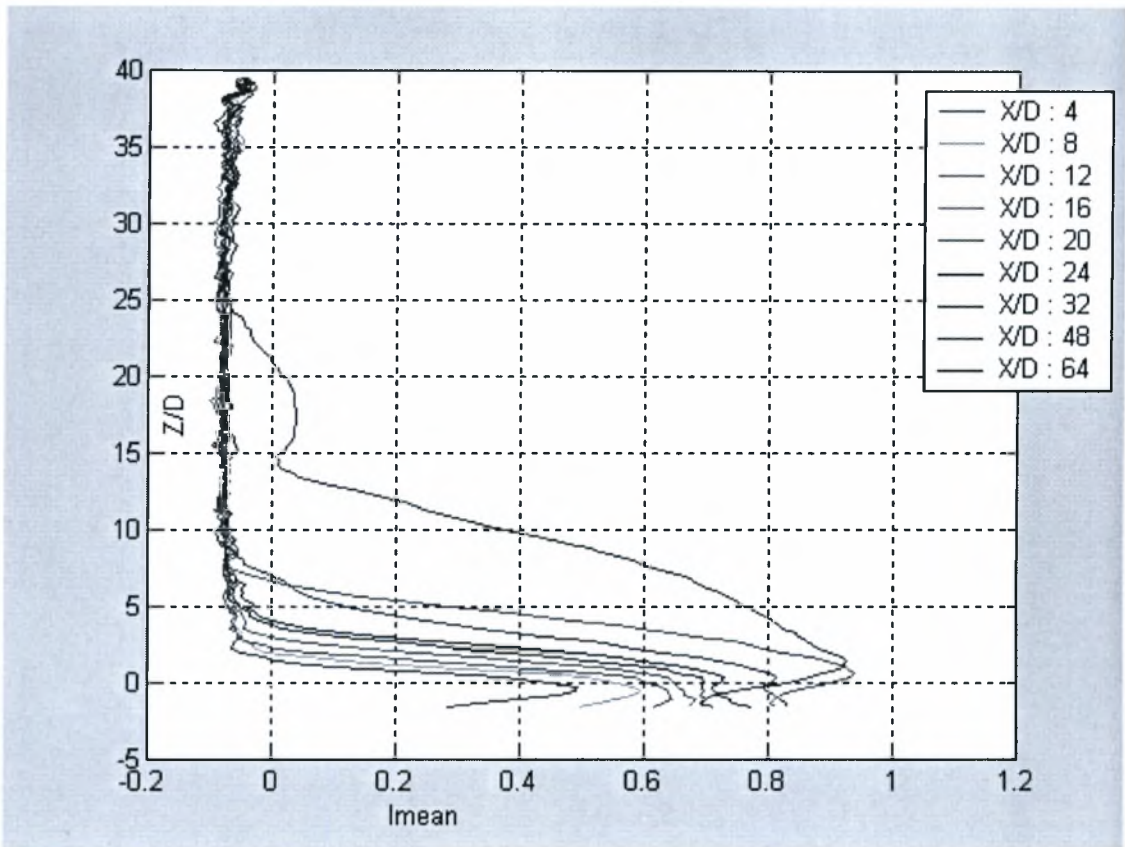
Διάγραμμα 6.21. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=7$

6.3. Οπτικοποίηση της ροής κοντά στο στερεό σύνορο

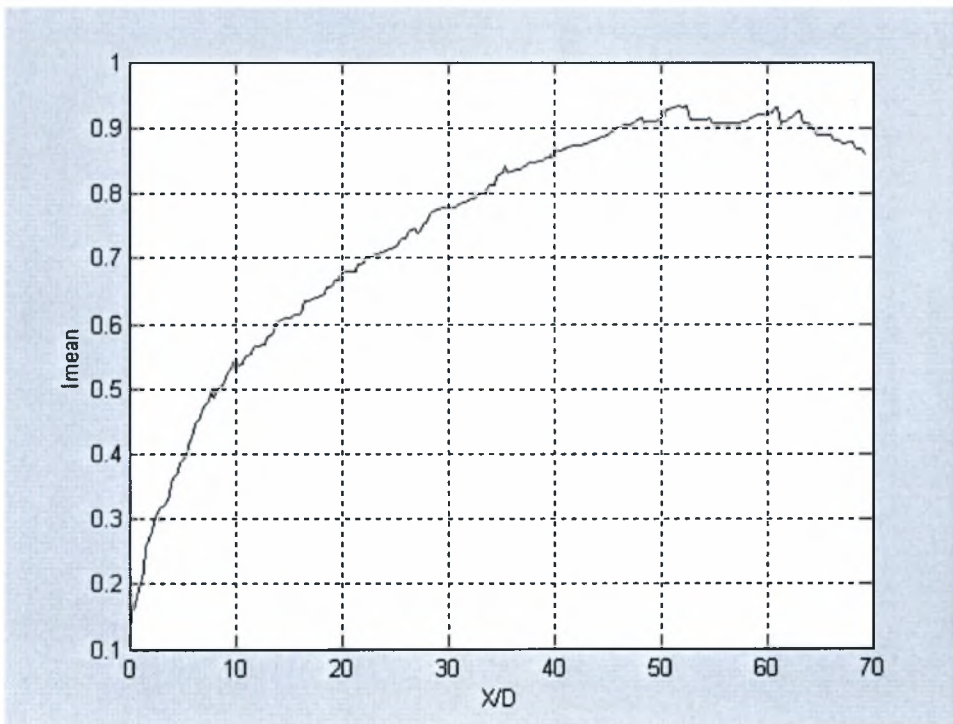
6.3.1. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1,5$



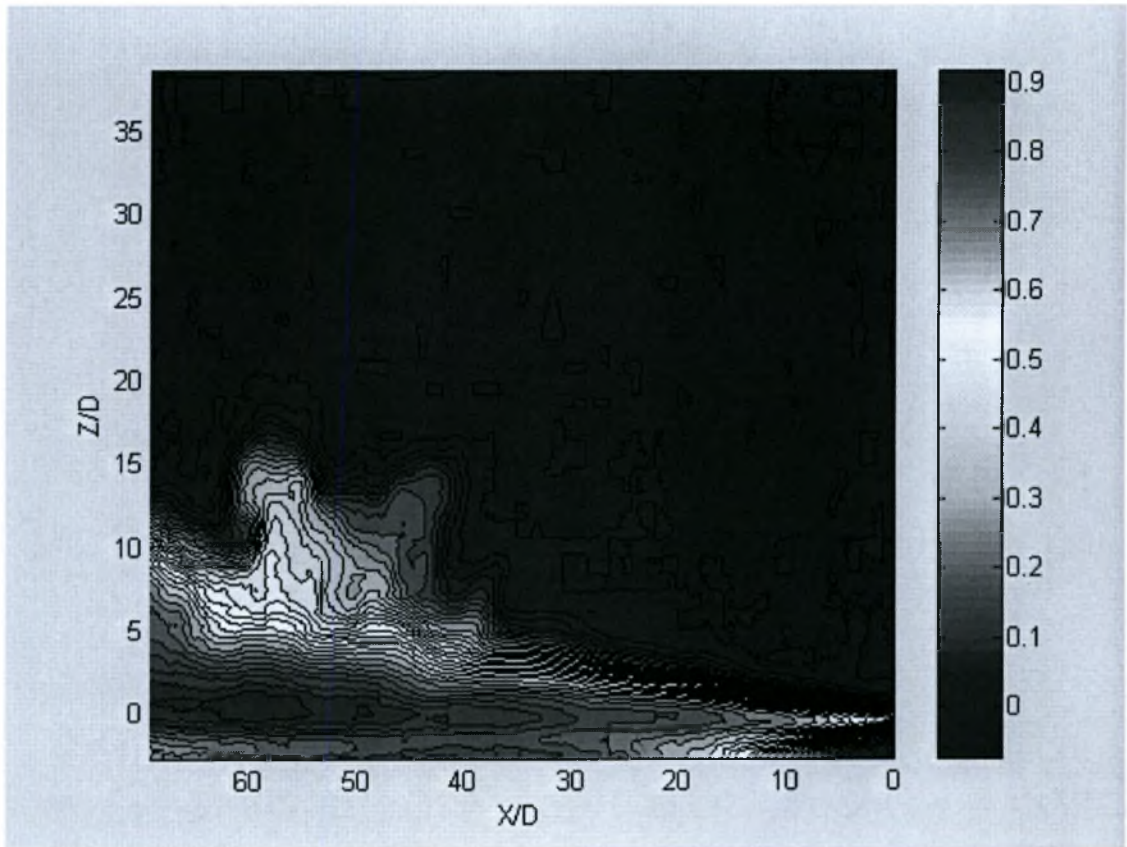
Διάγραμμα 6.22. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=1,5$

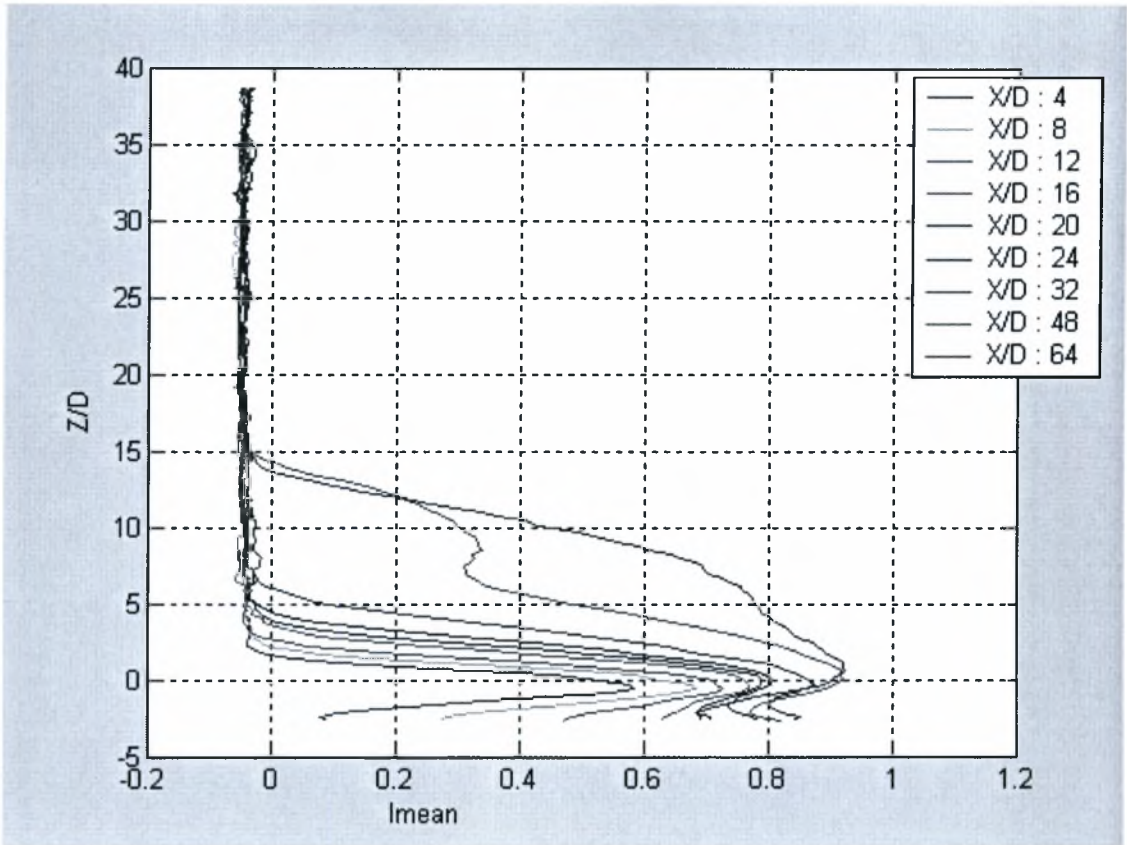


Διάγραμμα 6.23. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=1,5$

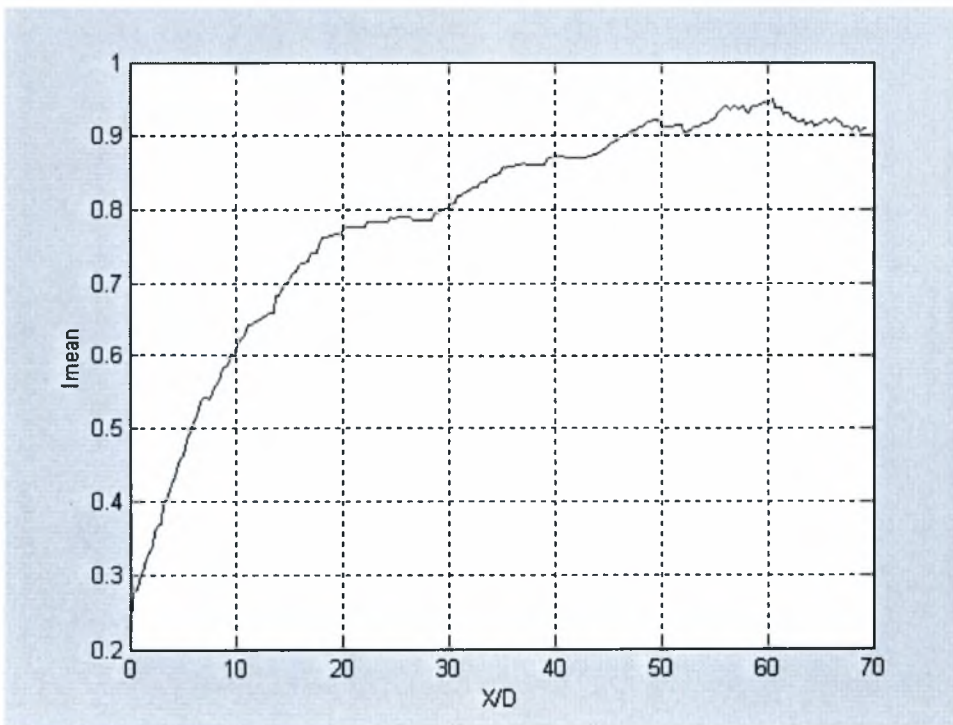


Διάγραμμα 6.24. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=1,5$

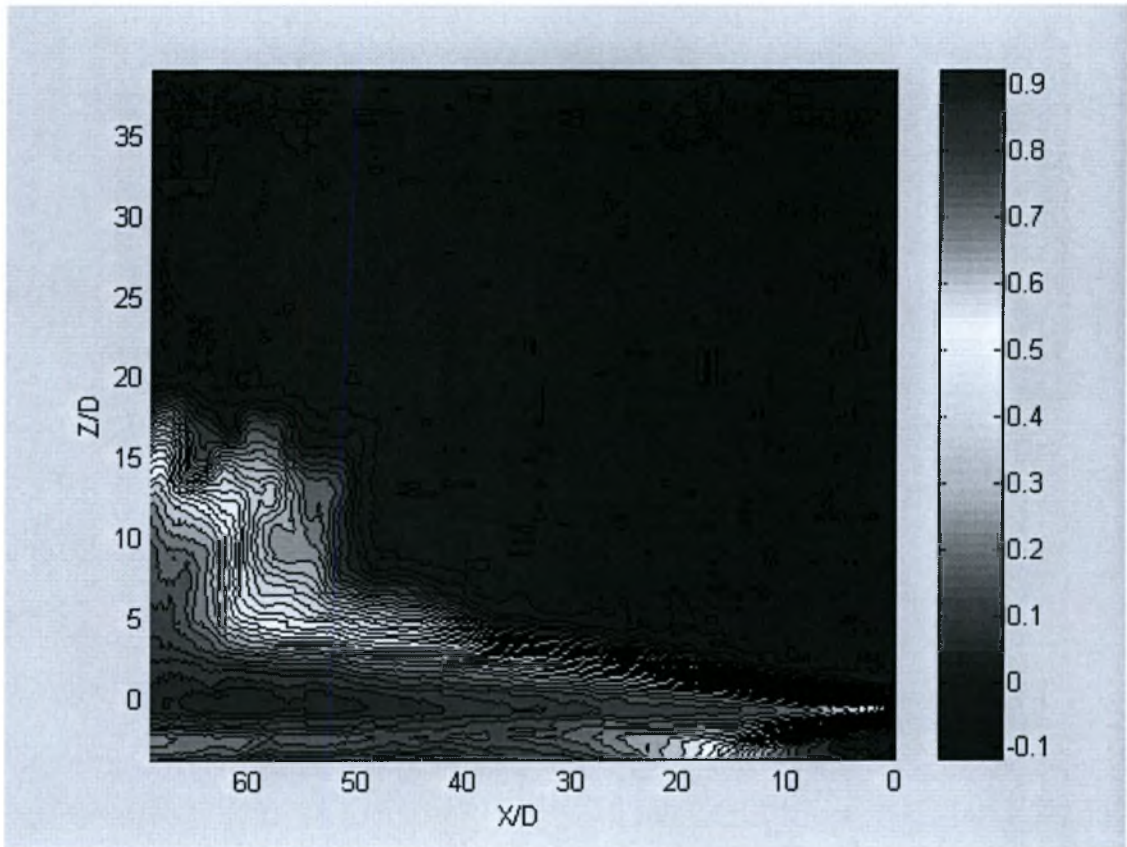
6.3.2. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2,5$ Διάγραμμα 6.25. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=2,5$

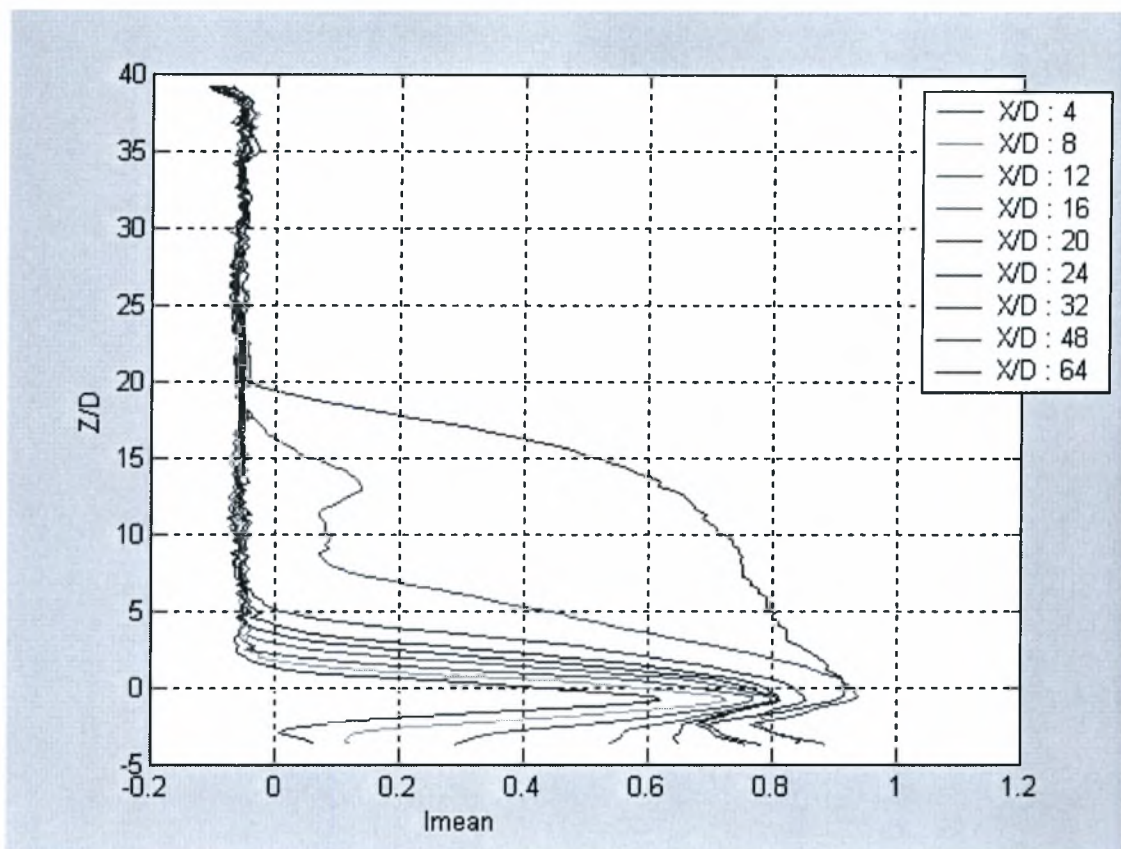


Διάγραμμα 6.26. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=2,5$

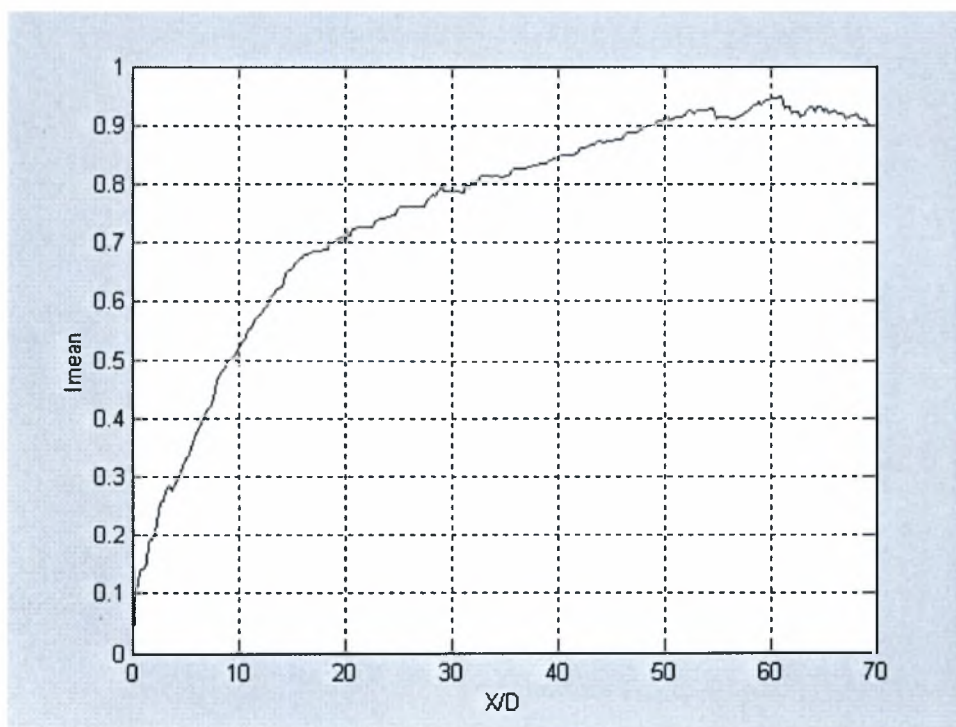


Διάγραμμα 6.27. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=2,5$

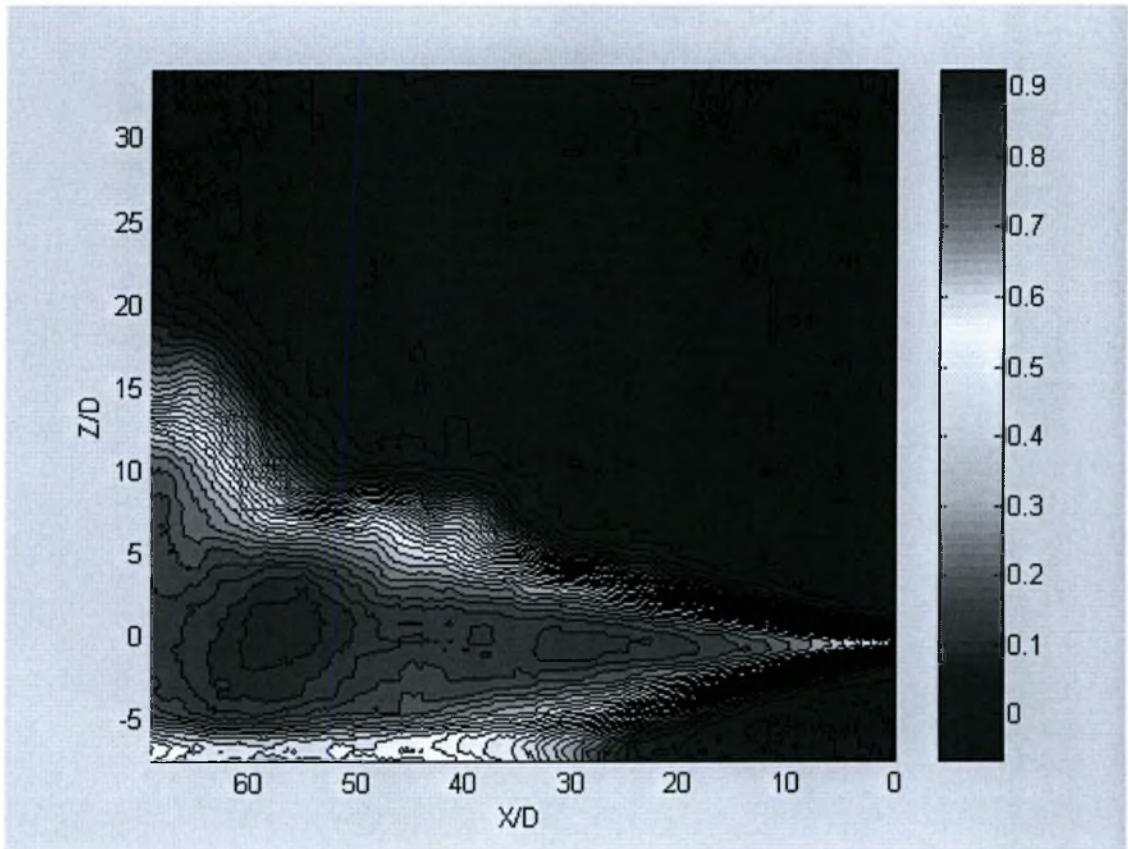
6.3.3. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=3,5$ Διάγραμμα 6.28. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=3,5$

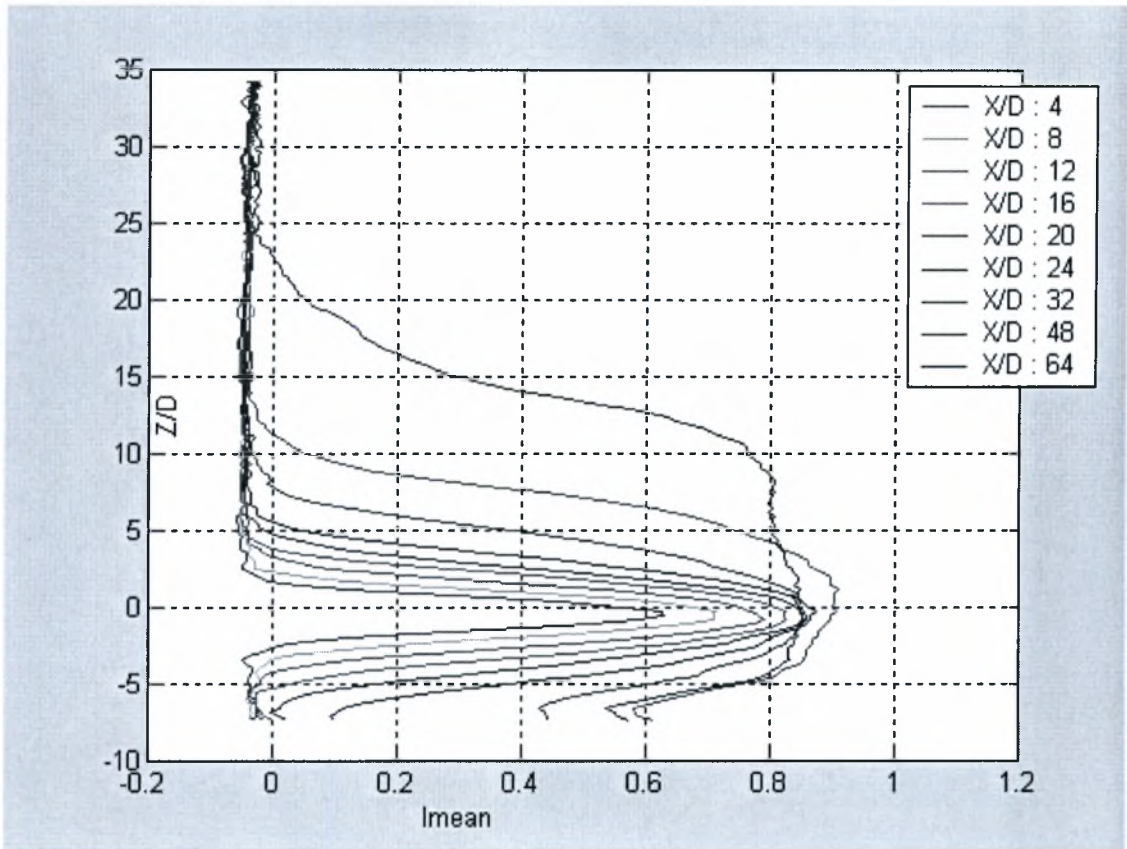


Διάγραμμα 6.29. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=3,5$

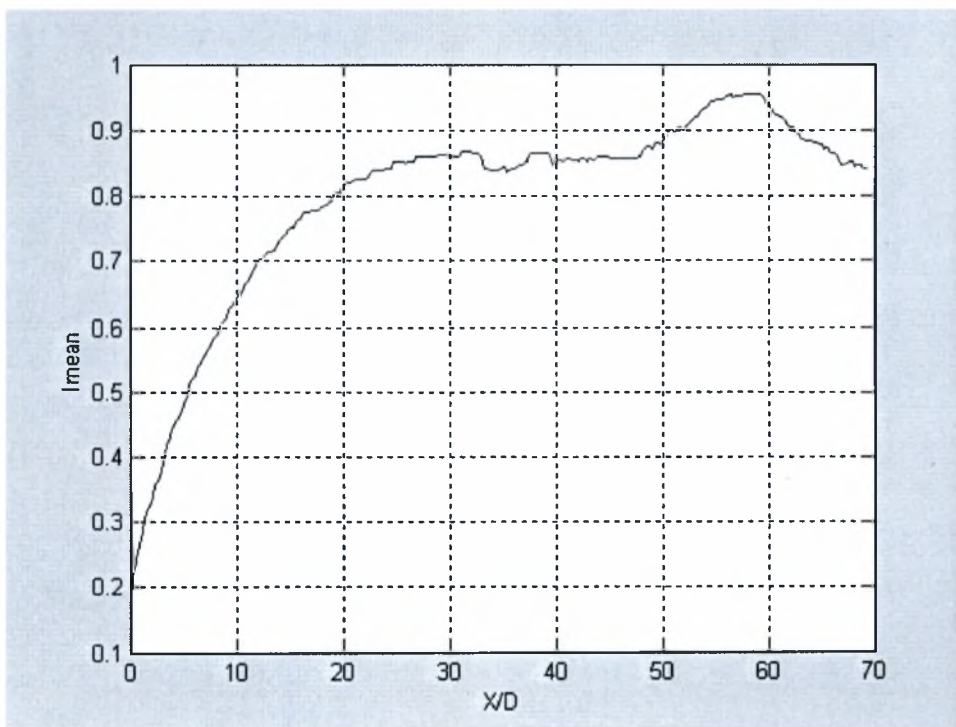


Διάγραμμα 6.30. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=3,5$

6.3.4. Μέσο σχήμα δέσμης και διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=7$ Διάγραμμα 6.31. Μέσο σχήμα και φωτεινότητα δέσμης για $H/D=7$



Διάγραμμα 6.32. Διανομές μέσης φωτεινότητας για $H/D=7$



Διάγραμμα 6.33. Διανομή μέσης φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για $H/D=7$

6.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο αυτής της εργασίας η οπτικοποίηση αποσκοπεί στο να εξαχθούν ποιοτικά συμπεράσματα για το σύνολο της ροής και να γίνουν διαπιστώσεις σχετικά με βασικά μεγέθη της. Ιδιαίτερο βάρος στην προκειμένη περίπτωση δόθηκε στη συλλογή πληροφοριών σχετικά με την αλλαγή του σχήματος της δέσμης σε συνάρτηση με την απόστασή της από την επιφάνεια ή το τοίχωμα αλλά και με την κατανομή της φωτεινότητας στο ροϊκό πεδίο.

Το πρώτο που μπορεί λοιπόν να παρατηρήσει κανείς είναι πως σε σύγκριση με το τοίχωμα η αλληλεπίδραση της επιφάνειας έχει ως συνέπεια τον μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης της ροής κατά την ακτινική διεύθυνση. Παρατηρούμε λοιπόν πως για $H/D=3.5$ και για απόσταση $X/D=40$ η δέσμη έχει πλάτος περίπου $10D$. Για την ίδια ακριβώς απόσταση ($X/D=40$) η ελεύθερη δέσμη έχει πλάτος περίπου ίση με $16D$. Αντιθέτως το αντίστοιχο εύρος για τη δέσμη στο τοίχωμα σε $H/D=3.5$ είναι μόλις $5D$.

Το παραπάνω έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τη θεωρία που θέλει το στερεό σύνορο να αντανακλά τις ακτινικές συνιστώσες της ορμής που κατευθύνονται προς αυτό και να ενισχύει της ανάπτυξη της δέσμης κατά της παράλληλη διεύθυνση.

Τέλος παρατηρώντας τη διανομή της φωτεινότητας κατά μήκος της κεντρικής γραμμής βλέπουμε μια συνεχή αύξηση που δείχνει να έρχεται σε αντίθεση με όσα περιμέναμε. Αυτό οφείλεται στον φωτισμό που χρησιμοποιήθηκε κατά διεξαγωγή των πειραμάτων. Ο οπίσθιος φωτισμός (background lighting) σε τρισδιάστατες ροές, όπως σε αυτή την περίπτωση, έχει ως συνέπεια να απορροφάται περισσότερο φως κατά μήκος της ανεπτυγμένης ροής μιας και διέρχεται μέσα από ένα κώνο (μιας και έχουμε συνεχή αύξηση της ακτινικής διάστασης της δέσμης κατά μήκος της). Μπορεί λοιπόν η συγκέντρωση να μειώνεται σημειακά και άρα και η απορρόφηση του φωτός, εμείς όμως παίρνουμε ως αποτέλεσμα το ολοκλήρωμά της στον όγκο αναφοράς. Αυτό δικαιολογεί την αντίθεση που θέλει τη μέγιστη συγκέντρωση να εμφανίζεται σε απόσταση περίπου ίση με $60D$ και όχι στην αρχή της δέσμης.

Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να ξεπεραστεί με τη χρήση ως φωτισμού ενός πέπλου φωτός που θα παρήγαγε μια δέσμη Laser (Laser sheat).

7. Συμπεράσματα

7.1. Συμπεράσματα - Σχολιασμός

Τα συμπεράσματα στα οποία οδηγηθήκαμε μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

- Η ελεύθερη επιφάνεια επιδρά στο σχήμα και την ανάμειξη της δέσμης με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που επιδρά και το στερεό όριο. Ωστόσο, η επίδραση του τοιχώματος είναι σε κάθε περίπτωση εντονότερη. Αυτό ίσως εξηγείται από το γεγονός ότι κατά την επαφή με την επιφάνεια υπάρχει η δυνατότητα σχηματισμού και διάδοσης κυματισμών, πράγμα που λείπει από το τοίχωμα το οποίο ουσιαστικά αντανακλά τη συνιστώσα της ορμής που είναι κάθετη σε αυτό.
- Και τα δύο είδη οριακών συνθηκών έχουν σαν συνέπεια τη μικρότερη ανάπτυξη της δέσμης κατά την ακτινική διεύθυνση και την ενίσχυση του ρυθμού ανάπτυξής της κατά τη διεύθυνση που είναι παράλληλη στη ροή. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο όσο περισσότερο πλησιάζουμε στα δύο όρια.
- Παρατηρήθηκε μια μετατόπιση του σημείου στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη κάθε φορά τοπική ταχύτητα καθώς και μια γενικότερη «συμπίεση» της ροής προς τη μεριά των ορίων (επιφάνειας – τοιχώματος). Αυτό σχετίζεται με τους διαφορετικούς μηχανισμούς μεταφοράς ορμής που συναντάμε στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις του τοιχώματος και της επιφάνειας.
- Τέλος, παρατηρούμε μια σημαντική ελάττωση του πλάτους διασποράς της δέσμης σε σχέση με την ελεύθερη ροή της. Αυτό εξηγείται με την επίδραση των ορίων στον ακτινικό ρυθμό ανάπτυξης και ανάλογα με το αν αναφερόμαστε σε διεπιφάνεια ή στερεό όριο, η ελάττωση αυτή είναι αντίστοιχα λιγότερο ή περισσότερο έντονη.

7.2. Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες

Ωστόσο υπάρχουν και άλλα στοιχεία που δεν συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εργασία και που μπορούν να αποτελέσουν το αντικείμενο επόμενων εργασιών με πολύ μεγάλο ενδιαφέρον. Στη πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε μπορεί να μελετηθεί με τις μετρητικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και με άλλες, όπως τη μέτρηση συγκέντρωσης με οπτρωνικό σύστημα, η αλληλεπίδραση τρισδιάστατων δεσμών με διεπιφάνειες ή στερεά όρια.

Τέλος, κατά το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης, θελήσαμε να εξασφαλίσουμε τη δυνατότητα της μελλοντικής λειτουργίας της δεξαμενής ως στατική δεξαμενή με μηχανικά συρόμενη τράπεζα. Οι μεταβλητές ταχύτητες των μοντέλων αλλά και η έλλειψη οριακού στρώματος μπορούν να αποτελέσουν την αρχή για την μελέτη μιας σειράς προβλημάτων μεγάλου μηχανολογικού ενδιαφέροντος.

Διεθνής Βιβλιογραφία :

1. Antony, D. G. & Willarth, W. W. 1992 Turbulent measurements in a round jet beneath a free surface. *J. Fluid Mech.* 243, 699 – 720.
2. Asavanant, J. & Vanden-Broeck, J. M. 1994 Free – surface flows past a surface – piercing object of finite length. *J. Fluid Mech.* 273, 109 – 124.
3. Batchelor, G. K. 1967 *An introduction to Fluid Mechanics.* Cambridge University Press.
4. Bernal, L. P. & Madnia, C. K. 1988 Interaction of a turbulent round jet with the free surface. In *Proc. 17th Symp. on Naval Hydrodynamics.* pp. 79 – 87.
5. Calmet, I. & Magnaudet, J. 2003 Statistical structure of high – Reynolds – number turbulence close to the free surface of an open – channel flow. *J. Fluid Mech.* 474, 355 – 378.
6. Gad-el-Hak, M. 1987 The water towing tank as an experimental facility. *Experiments in Fluids.* 5, 289 – 297.
7. Hartnett, J. P. & Irvine T. F. 1977 *Advances in heat transfer.* vol. 13. Academic Press.
8. Jahne, B. & Haußecker, H. 1998 Air – water gas exchange. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 30, 443 – 468.

9. Kotsovinos N. E. 1978 A note on the conservation of the axial momentum of a turbulent jet. *J. Fluid Mech.* 87, 55 – 63.
10. Launder, B. E. & Rodi, W. 1983 The turbulent wall jet – measurements and modeling. *Ann. Rev. Fluid Mech* 15, 429 – 459.
11. Madnia, C. K. & Bernal, L. P. 1994 Interaction of a turbulent round jet with the free surface. *J. Fluid Mech.* 264, 305 – 332.
12. Mathieu, J. 1959 Contribution a l'étude aerothermique d' un jet plane évoluant en presence d' une paroi. These de Docteur es Sciences. Univ. Grenoble.
13. Newman, B. G., Patel, R. P., Savage, S. B. & Tjio, H. K. 1972 Three dimensional wall jet originating from a circular orifice. *Aero. Q.* 23, 188-200.
14. Rajaratnam, N. & Humphries, J. A. 1984 Turbulent non – buoyant surface jets. *J. Hydraul. Res.* 22, 103 – 115.
15. Reed, A. M., Milgram, J. H. 2002 Ship wakes and their radar images. *Ann. Rev. Fluid Mech* 34, 469 – 502.
16. Stapountzis, H., Westerweel, J., Bessem, J. M., Westendorp, A. & Nieuwstadt, F. T. M. 1992 Measurement of product concentration of two parallel reactive jets using digital image processing. *Applied Scientific Research.* 49, 245 – 259.
17. Streeter, V. & Wylie, E. B. Μηχανική ρευστών. Εκδόσεις Φούντας.

18. Weigand, A. 1996 Simultaneous mapping of the velocity and deformation field at a free surface. *Experiments in Fluids*. 20, 358 – 364.
19. Wygnanski, I. & Fielder, H. E. 1969 Some measurements in the self – preserving jet. *J. Fluid Mech.* 38, 577 – 612.
20. Yang Wen, J. 1989 *Handbook of Flow Visualization*.

Ελληνόφωνη Βιβλιογραφία :

1. Αλυγιάκης, Ε. Κ. 2004 Έρευνα φαινομένων φνάμειξης μέσω μεγάλων ροϊκών δομών και τύρβης σε διεπιφάνειες υγρού-αερίου. Βόλος. Έκθεση Πενταμελούς Επιτροπής της Διδακτορικής Διατριβής του Υποψήφιου Διδάκτορα.
2. Αλυγιάκης, Ε. Κ. 2003 Ανάπτυξη ψηφιακής μεθοδολογίας διερεύνησης του ασταθούς απορεύματος σε διεπιφάνεια με οπτικοποίηση της ροής. Βόλος. Μεταπτυχιακή εργασία.
3. Σταπουντζής, Ε. 2000 Σημειώσεις μηχανικής των ρευστών ΙΙ. Π.Θ. Τ.Μ.Μ.Β.
4. Τσαγγάρης Σ. 1995 Μηχανική των ρευστών. Εκδόσεις Συμεών.

Παράρτημα

Στο Παράρτημα της εργασίας αυτής περιέχονται ο Πίνακας Συμβόλων και τα προγράμματα του Matlab που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Πίνακας Συμβόλων

H	η απόσταση του κέντρου του σωλήνα της δέσμης από τη διεπιφάνεια ή τον πυθμένα
X	η διεύθυνση κατά μήκος της ροής
Z	η κάθετη διεύθυνση στη διεύθυνση της ροής
Re	ο αριθμός Reynolds
U	η μετρούμενη ταχύτητα
U_{RMS}	η τυπική απόκλιση της ταχύτητας
U₀	η ταχύτητα του ρευστού στην έξοδο του σωλήνα σχηματισμού της δέσμης
D	η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα σχηματισμού της δέσμης
E	η μετρούμενη τάση
E_{RMS}	η τυπική απόκλιση της τάσης
I_{MEAN}	η μέση φωτεινότητα
L	το πλάτος διασποράς της δέσμης
Z_m	το Z στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τοπική ταχύτητα
f	η συχνότητα
PSD	η πυκνότητα φάσματος ισχύος

Πρόγραμμα Convgray

```

% 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);
    firstl=char(firstV);
    for num=1:Nimages(j)
pinakas=double(imread(strcat(firstl,int2str(num)),'jpg'));
c = fspecial('gaussian',n(j),s(j));
convpinakas=conv2(pinakas,c,'same');
eikona=uint8(convpinakas);
imwrite(eikona,strcat('conv',firstl,int2str(num),'jpg'))
clear pinakas convpinakas c eikona
end
clear firstV firstl num
end
toc

```



```
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
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
tempinakas=bath(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j))-pinakasnew(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j));
%-----SYGENTROSH-----
%newpinakas(:,num)=tempinakas;
megisto=max(max(tempinakas));
adiastfot(:,num)=tempinakas/megisto;
clear pinakasnew tempinakas k m dx dy
end
%-----The Ratio Between Pixel And mm-----
meanadiastfot=mean(adiastfot,3);
analogx=x(j)/384.;
analogy=y(j)/288.;
k=1;
for i=xs(j):xe(j)
xvector(k)=-((k-1)*analogx+(xaxis(j)-xs(j))*analogx)/diam(j);
k=k+1;
end
clear i k
k=1;
for i=ys(j):ye(j)
yvector(k)=((yaxis(j)-ys(j))*analogy-(k-1)*analogy)/diam(j);
k=k+1;

```

```

end
%-----The Vector Of Time In Sec-----
tvector=(time(j):time(j):Nimages(j)*time(j));
%-----Save-----
%-----
for i=ypixels(j)-ys(j)+1:pacey(j):ypixele(j)-ys(j)+1
figure(i)
plot(xvector,meanadiastfot(:,i));
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('Imean')
title(strcat('GRAPH_MEANFOT_Y=',num2str(i+ys(j))))
saveas(i,strcat('GRAPH_MEANFOT_Y=',num2str(i+ys(j)),','fig'))
close
end
clear i
for i=ypixels(j)-xs(j)+1:pacex(j):xpixele(j)-xs(j)+1
figure(i)
plot(meanadiastfot(i,:),yvector);
grid on
xlabel('Imean')
ylabel('Y/D')
title(strcat('GRAPH_MEANFOT_X=',num2str(i+xs(j))))
saveas(i,strcat('GRAPH_MEANFOT_X=',num2str(i+xs(j)),','fig'))
close
end
figure(1)
contourf(xvector,yvector,meanadiastfot',30);
xlabel('X/D')
ylabel('Y/D')
colorbar
saveas(1,strcat('ContourMeanfot','fig'))
close
save(strcat('D:\My Documents\Turbulent Round Jet\Workspace\Flow
Visualization\SaveStrcat',strcat('meanfot_',first1)), 'time','diam'...
,'axis','yaxis','xvector','yvector','tvector','meanadiastfot','megisto','adiastfot','xs','xe','ys','ye','Nimages')
clear num first1 firstV i k newpinakas
end
toc
clear

```



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074161

