

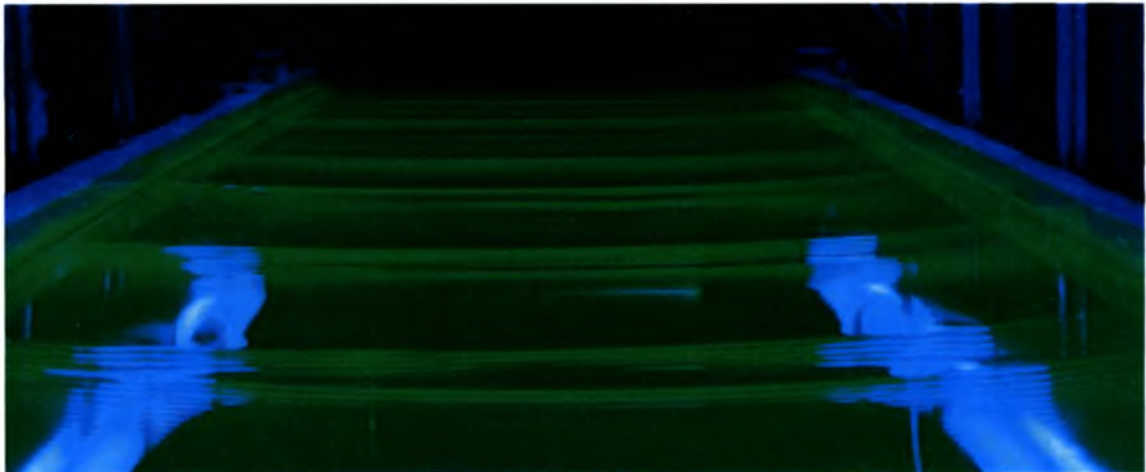
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΑΧΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ
ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ
ΤΟΙΧΩΜΑ**

υπό

ΙΩΑΝΝΗ ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2007



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6001/1
Ημερ. Εισ.: 02-11-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2007
ΒΑΣ

© 2007 Ιωάννης Βασιλειάδης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Μιχαήλ Βλαχογιάννης
(Επιβλέπων) Διδάσκων (Π.Δ. 407/80),
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου
Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
Επίκουρος Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας και καθηγητή μου, κ. Μιχάλη Βλαχογιάννη, που με εμπιστεύτηκε και μου ανέθεσε την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τον χρόνο που μου αφιέρωσε προσφέροντάς μου, πολύτιμη βοήθεια και καθοριστικές συμβουλές. Επίσης είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κ. Βασίλειο Μποντόζογλου και κ. Νικόλαο Ανδρίτσο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα, Βλάση Λεοντίδη για την βοήθεια που μου πρόσφερε για την λήψη και επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Επίσης ευχαριστώ όλα τα παιδιά του εργαστηρίου για την βοήθειά τους αλλά και το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας που υπήρχε στο εργαστήριο όλο αυτόν τον καιρό. Πάνω από όλους, θέλω να ευχαριστήσω τον μεταπτυχιακό φοιτητή και προπάντων φίλο, Πέτρο Δάλλα, που χωρίς την βοήθειά του και τις πολύτιμες καθοδηγίες του, η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους και τις φίλες μου εδώ στον Βόλο αλλά και σε αυτούς που ήταν μακριά, για τις στιγμές διασκέδασης που μου πρόσφεραν τα πέντε αυτά χρόνια, αλλά και για την στήριξή τους κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου, στους οποίους και αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία, για την ολόψυχη υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Γιάννης Βασιλειάδης

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΑΧΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ
ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ
ΤΟΙΧΩΜΑ**

ΙΩΑΝΝΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

Επιβλέπων Καθηγητής: Βλαχογιάννης Μιχαήλ, Διδάσκων (Π.Δ. 407/80),
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Καταρχάς, ως ροή λεπτού υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο επίπεδο, ορίζουμε την ροή κατά την οποία το πάχος του ρευστού είναι πολύ μικρό συγκριτικά με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της. Η ικανότητα αυτών των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση, τα καθιστά ευρέως διαδεδομένα στην χρησιμοποίησή τους ως μέσα μεταφοράς σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Αυτή η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την μελέτη, της δημιουργίας και της διάδοσης, λόγω βαρύτητας, δισδιάστατων μοναχικών κυμάτων πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Η μελέτη του υγρού υμένα πραγματοποιήθηκε σε κανάλι ροής μήκους 3 m και πλάτους 0,52 m, το οποίο βρίσκεται στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας. Για τον υπολογισμό του πάχους του υμένα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ψηφιακής απεικόνισης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσονται οι βασικοί μηχανισμοί που διέπουν τα φαινόμενα ροής σε υμένες υγρού, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεόμενα με τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Επίσης γίνεται αναφορά στην πειραματική διάταξη και την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Τέλος παρουσιάζονται και αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα που εξήχθησαν από τη ροή διαλύματος γλυκερίνης–νερού στο συγκεκριμένο κανάλι ροής.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	3
2.1	Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα	3
2.2	Θεωρία γραμμικής ευστάθειας για τη ροή υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο	8
2.3	Μη γραμμική εξέλιξη της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα	11
2.3.1.	Θεωρία	11
2.3.2.	Πειράματα	13
2.3.3.	Αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων	22
2.4	Παλαιότερες έρευνες στο μεγάλο κανάλι ροής	25
Κεφάλαιο 3	Πειραματική Μεθοδολογία	26
3.1	Πειραματική διάταξη ροής υγρού υμένα	26
3.1.1	Εισαγωγή	26
3.1.2	Μεταλλική κατασκευή	26
3.1.3	Σύστημα ρύθμισης κλίσης καναλιού	29
3.1.4	Το κανάλι ροής	32
3.1.5	Υδραυλικό κύκλωμα	35
3.1.6	Σύστημα φωτισμού	42
3.2	Ιδιότητες των ρευστών	43
3.3	Παράμετροι του πειράματος	45
3.4	Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό	46
3.4.1	Επεξεργασία δεδομένων	49
Κεφάλαιο 4	Πειραματικά Αποτελέσματα	55
4.1	Εισαγωγή	55
4.2	Επιλογή ψηφιακού φίλτρου	55
4.3	Ανάλυση Πειραμάτων	57
Κεφάλαιο 5	Συμπεράσματα	75
	Βιβλιογραφία	76
	Παράρτημα	77

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.	3
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του ρέοντος υμένα. Ορισμός του ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, του προφίλ ταχύτητας, της κατανομής των τάσεων και του ύψους του υμένα.	4
Σχήμα 2.3: Θεώρηση στοιχειώδους όγκου	4
Σχήμα 2.4: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re. () $Ka=3365$, (•) $Ka=1102$, (?) $Re=5/6\cot\phi$	10
Σχήμα 2.5: Απεικόνιση των τεσσάρων περιοχών του κύματος, κατά την εξέλιξή του, κατά την ροή ενός υγρού υμένα σε ένα κεκλιμένο επίπεδο. Η παράμετρος ω είναι η συχνότητα του κύματος.	12
Σχήμα 2.6: Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής	14
Σχήμα 2.7: Η ανάπτυξη μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής, όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα.	15
Σχήμα 2.8: Η εξάρτηση του μεγέθους των μοναχικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατάντη της ροής.	15
Σχήμα 2.9: Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη αποστάσεως.	16
Σχήμα 2.10: Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιορισμένα όρια των διαφόρων ασταθειών.	17
Σχήμα 2.11: Εμφάνιση μοναχικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 1,5 Hz	18
Σχήμα 2.12: Μορφή κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 3Hz.	18
Σχήμα 2.13: Εξέλιξη κυμάτων πολλαπλών κορυφών ανά περίοδο με συχνότητα διαταραχής 4,5 Hz.	19
Σχήμα 2.14: Εμφάνιση κορεσμένων περιοδικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 7Hz.	19
Σχήμα 2.15: Ο διαχωρισμός των τρισδιάστατων ασταθειών στο διάγραμμα συχνότητά τους συναρτήσει του αριθμού Reynolds.	20
Σχήμα 2.16: Το αποτέλεσμα επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία της δομής ψαροκόκαλο (herringbone pattern).	21
Σχήμα 2.17: Η δημιουργία δομών πλήρους αταξίας (disorder patterns) εξαιτίας της επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών.	21
Σχήμα 2.18: Η συγχώνευση μεταξύ δύο μοναχικών κυμάτων, με τη μορφή εικόνων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.	22

Σχήμα 2.19: Συγχώνευση (coalescence) δύο μοναχικών κυμάτων.	23
Σχήμα 2.20: Εξέλιξη ροής για αρχική διαταραχή συχνότητας 1Hz.....	24
Σχήμα 3.1: Μεταλλική βάση.....	27
Σχήμα 3.2: Το μεταλλικό ικρίωμα που αποτελεί τη βάση του καναλιού και της κάμερας.	28
Σχήμα 3.3: Ράγες τροχοδρόμησης και το «βαγονέτο» όπου στηρίζεται η ψηφιακή κάμερα	28
Σχήμα 3.4: Οι τρεις αρθρώσεις με τις οποίες συνδέεται το ικρίωμα με την μεταλλική βάση.....	29
Σχήμα 3.5: Σύστημα ανύψωσης του ικρίωματος.....	30
Σχήμα 3.6: Ηλεκτρικό αναβατόριο και η βάση στήριξής του	30
Σχήμα 3.7 : Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου υπολογισμού γωνίας κλίσης με το αλφαδολάστιχο.....	31
Σχήμα 3.8 : Το κανάλι ροής κατασκευασμένο από γυαλί.....	32
Σχήμα 3.9: Διαδικασία οριζοντίωσης του καναλιού.	33
Σχήμα 3.10: Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωσης	34
Σχήμα 3.11: Το υδραυλικό κύκλωμα.....	35
Σχήμα 3.12: Δοχείο απάντλησης	36
Σχήμα 3.13: Το δοχείο υπερχειλίσσης.....	37
Σχήμα 3.14: Ρυθμιστής στροφών των αντλιών.....	37
Σχήμα 3.15: Χαρακτηριστικά λειτουργίας εμβαπτιζόμενων αντλιών	38
Σχήμα 3.16: Χαρακτηριστικά λειτουργίας φυγοκεντρικής αντλία	38
Σχήμα 3.17: Η διάταξη ροόμετρων.....	39
Σχήμα 3.18: Οι μέγιστες επιτρεπόμενες παροχές των ροόμετρων	39
Σχήμα 3.19: Ο διανομέας, οι επτά εισαγωγές και το δοχείο κατανομής.....	40
Σχήμα 3.20: Ηλεκτροβαλβίδα.....	41
Σχήμα 3.21: Χρονιστής της ηλεκτροβαλβίδας σε λειτουργία, με $T_{on}=1,5sec$ $T_{off}=0,5sec$	41
Σχήμα 3.22 : Διάταξη των λαμπτήρων και το τοποθετημένο ριζόχαρτο.....	42
Σχήμα 3.23: Ιξωδόμετρο τριχοειδούς σωλήνα	44
Σχήμα 3.24: Ψηφιακή κάμερα CCD (Sony XC-77/77CE).....	47
Σχήμα 3.25: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.	47

Σχήμα 3.26: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο/pixel της εικόνας.....	48
Σχήμα 3.27: Φωτογραφία τρισδιάστατου κύματος.....	50
Σχήμα 3.28: (a) Εικόνα πριν την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης, (b) μετά την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης.....	51
Σχήμα 3.30: Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου.....	54
Σχήμα 4.1 Γραφική απεικόνιση κυμάτων σε $Re=25$, $f=0.1$ Hz ($T_{on}=0.5sec$).....	56
Σχήμα 4.2 Γραφική απεικόνιση κυμάτων σε $Re=19$, $f=0.1$ Hz ($T_{on}=0.25sec$).....	56
Σχήμα 4.3: Φωτογραφία τρισδιάστατης δομής (3-D) σε απόσταση 2470 mm, συχνότητα διαταραχής $f=0,167$ Hz ($T_{on}= 5$ sec) και $Re = 40$	60
Σχήμα 4.4: Χρονοσειρές σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5sec$) για αριθμούς Reynolds: a) $Re=15$, b) $Re=18$, c) $Re=20$	62
Σχήμα 4.5: Χρονοσειρές σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5sec$) για αριθμούς Reynolds: a) $Re=15$, b) $Re=18$, c) $Re=20$	63
Σχήμα 4.6: Χρονοσειρές διαχωρισμένες σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής για αριθμό Reynolds 18 και με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας: a) $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5sec$) και b) $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5sec$)	64
Σχήμα 4.7: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=15$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5sec$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm, b)1330mm έως 1590mm, c) 2330mm έως 2590mm	65
Σχήμα 4.8: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=15$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5sec$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm, b)2330mm έως 2590mm.....	66
Σχήμα 4.9: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=18$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5sec$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm, b)1330mm έως 1590mm, c) 2330mm έως 2590mm	67
Σχήμα 4.10: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=18$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5sec$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm, b)1330mm έως 1590mm, c) 2330mm έως 2590mm	68
Σχήμα 4.11: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5sec$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm, b)1330mm έως 1590mm, c) 2330mm έως 2590mm	69
Σχήμα 4.12: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5sec$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm, b)1330mm έως 1590mm, c) 2330mm έως 2590mm	70

Σχήμα 4.13: Χρονοσειρά σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5$ sec) για αριθμό Reynolds 25. 72

Σχήμα 4.14: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=25$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5$ sec) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 1330mm έως 1590mm, **c)** 2330mm έως 2590mm 73

Σχήμα 4.15: Χρονοσειρά σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5$ sec) για αριθμό Reynolds 30. 74

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη για την αδιαστατοποίηση 8

Πίνακας 4.1: Στοιχεία πρώτης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 330 cm έως 590 cm από την έναρξη της ροής..... 57

Πίνακας 4.2: Στοιχεία δεύτερης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 1330 cm έως 1590 cm από την έναρξη της ροής. 58

Πίνακας 4.3: Στοιχεία τρίτης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 2330 cm έως 2590 cm από την έναρξη της ροής..... 59

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά μοναχικών κυμάτων. Όπου **D** : η απόσταση από την είσοδο της ροής στο κανάλι, **f** : η συχνότητα διαταραχής, **h_f** : το ύψος του υμένα μπροστά από το κύμα, **h_{max}** : το ύψος του κύριου κύματος, **h_b** : το ύψος του υμένα πίσω από το κύμα, **c_{min}** : η ελάχιστη ταχύτητα, **c_{max}** : η μέγιστη ταχύτητα και **c_{av}** : η μέση ταχύτητα του κύματος σε εκείνη τις χρονική περίοδο. 71

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της εργασίας είναι η πειραματική μελέτη των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα και η κατανόηση των βασικών μηχανισμών που διέπουν αυτά τα φαινόμενα, τα οποία συνδέονται άμεσα με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας ή θερμότητας.

Ως ροή λεπτού υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο επίπεδο, ορίζουμε την ροή κατά την οποία το πάχος του ρευστού είναι πολύ μικρό συγκριτικά με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της. Η ικανότητα αυτών των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση, τα καθιστά ευρέως διαδεδομένα στην χρησιμοποίησή τους ως μέσα μεταφοράς σε βιομηχανικές εφαρμογές. Οι λεπτοί υμένες κατά τη ροή τους πάνω σε μια στερεή επιφάνεια αναπτύσσουν μια πολύπλοκη δομή επιφανειακών κυμάτων, που οφείλεται στις δυνάμεις βαρύτητας και υφίσταται ακόμα και στις περιπτώσεις όπου στη διεπιφάνεια υγρού – αερίου δεν υπάρχουν διεπιφανειακές τάσεις. Η μορφή και τα χαρακτηριστικά αυτών των δομών ποικίλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής, τα οποία χαρακτηριστικά επηρεάζουν έντονα τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας και μάζας, με συνέπεια να καθορίζουν τον βαθμό απόδοσής των συσκευών στις οποίες συναντώνται. Σε κάποιες εφαρμογές τους είναι επιθυμητή η εντατικοποίηση των φαινομένων αυτών ενώ σε άλλες η ελαχιστοποίησή τους.

Κάποιες από τις σημαντικότερες συσκευές μεταφοράς μάζας ή θερμότητας στις οποίες συναντάμε τη ροή λεπτού υγρού υμένα είναι οι συμπυκνωτές ατμού, οι εξατμιστήρες και οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις, όπως επίσης και οι συσκευές μεταφοράς μάζας όπου λαμβάνει χώρα απορρόφηση ελαφρά διαλυτού αερίου.

Η μελέτη των φαινομένων που δημιουργούνται στη ροή υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα έχει μελετηθεί διεξοδικά τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά – αναλυτικά. Στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας η πρώτη πειραματική μελέτη διενεργήθηκε από τον κ Μ.Βλαχογιάννη κατά την εκπόνηση της διδακτορικής του διατριβής (1996-2000). Για τον σκοπό κατασκευάστηκε κανάλι ροής μήκους 80 cm. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι κάποια φαινόμενα, όπως η αλληλεπίδραση των μοναχικών κυμάτων, λαμβάνουν χώρα σε μεγάλη απόσταση από την είσοδο της ροής. Αυτό είχε ως συνέπεια, να κριθεί απαραίτητη η κατασκευή ενός μεγαλύτερου μήκους καναλιού για την παρατήρηση αυτών των φαινομένων. Το νέο κανάλι ροής κατασκευάστηκε και ήδη έχουν γίνει περαιτέρω πειραματικές μελέτες σε αυτό.

Αναφορικά με τη διάρθρωση της εργασίας, αυτή αποτελείται από τέσσερα επιπλέον κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία προσπάθεια συνοπτικής περιγραφής της διεθνούς βιβλιογραφίας, με την

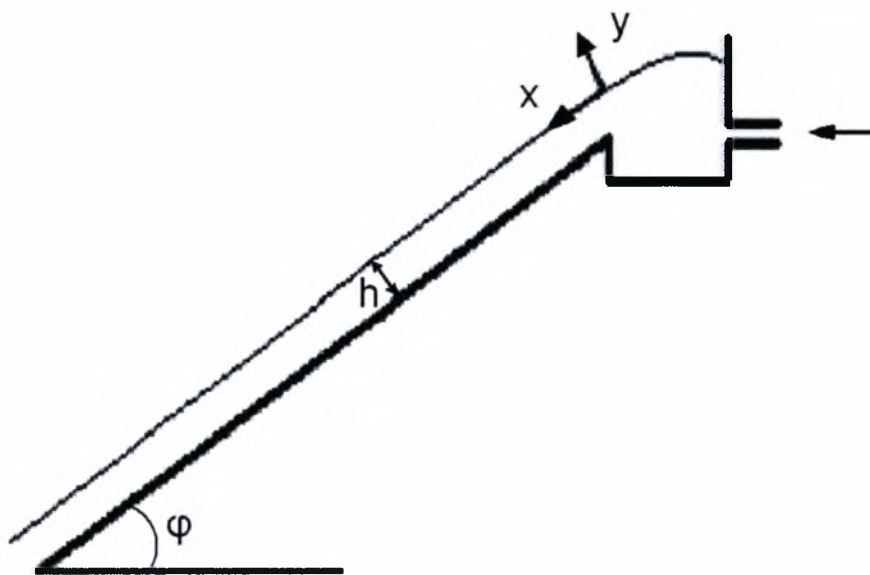
απαραίτητη εστίαση στα πιο παρεμφερή άρθρα. Στη συνέχεια, κεφάλαιο 3, περιγράφεται η πειραματική μέθοδος, η πειραματική διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων, ο έλεγχος της ακρίβειας της μεθόδου και η εφαρμογή της στο επίπεδο τοίχωμα. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής υγρού υμένα πάνω από επίπεδο τοίχωμα, υπό την επίδραση της βαρύτητας αλλά και της προαναφερόμενης εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο αναλύονται τα κυριότερα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

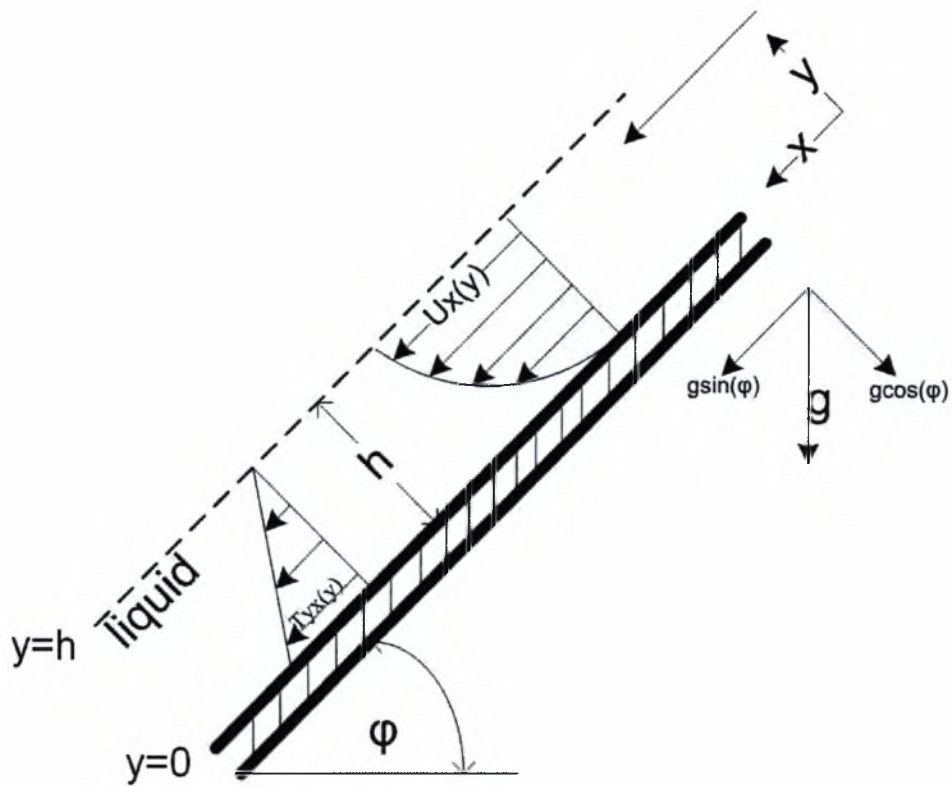
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση και αναφέρεται συνοπτικά η θεωρία και μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έως τώρα, που σχετίζονται με την ροή λεπτού υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Αρχικά καταστρώνονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα καθώς και οι λύσεις του προβλήματος της γραμμικής ευστάθειας. Στη συνέχεια περιγράφονται οι θεωρητικές, οι υπολογιστικές και οι πειραματικές μελέτες πάνω στη μη-γραμμική ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα.

2.1 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα

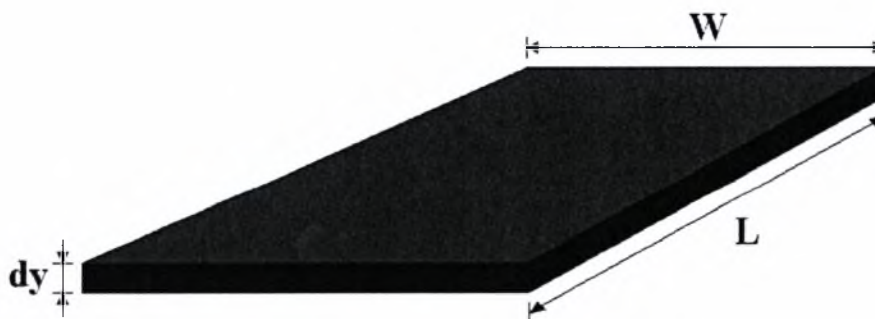
Η πιο απλή μορφή του προβλήματος της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο είναι αυτή της ροής Nusselt. Θεωρούμε δισδιάστατη ροή υγρού υμένα κατά μήκος μιας κεκλιμένης επίπεδης επιφάνειας μήκους L (σχήμα 2.1). Η περιοχή αυτή μήκους L βρίσκεται πολύ μακριά από τα άκρα στα οποία εισέρχεται και εξέρχεται ο υμένας ώστε να μην επηρεάζεται λόγω αυτών, δηλαδή η ταχύτητα κατά την x διεύθυνση δεν εξαρτάται από το μήκος x . Επίσης γίνεται η θεώρηση ότι το υγρό είναι σταθερής πυκνότητας και ιξώδους.



Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του ρέοντος υμένα. Ορισμός του ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, του προφίλ ταχύτητας, της κατανομής των τάσεων και του ύψους του υμένα.



Σχήμα 2.3: Θεώρηση στοιχειώδους όγκου

Θεωρούμε στοιχειώδη όγκο ελέγχου μήκους L , πλάτους W , και ύψους dy (σχήμα 2.3).

Οπότε το ισοζύγιο ορμής στην κατεύθυνση x είναι:

$$(\text{ΕΙΣΡΟΗ}) - (\text{ΕΚΡΟΗ}) + (\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}) + \left(\begin{array}{c} \leftarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \\ \text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ} \end{array} \right) = 0 \Rightarrow$$

$$\left(\tau_{xy}|_y - \tau_{xy}|_{y+dy} \right) \cdot L \cdot W + g_x \cdot \rho \cdot (W \cdot L \cdot dy) + 0 = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{d\tau_{yx}}{dy} = \rho \cdot g_x \Rightarrow \int d\tau_{yx} = \int \rho \cdot g_x \cdot dy \Rightarrow \tau_{yx} = \rho \cdot g_x \cdot y + C_1$$

όπου :

ρ : πυκνότητα υγρού

g : επίαχυνση βαρύτητας αναλυμένη στο Σ.Σ.

μ : ιξώδες υγρού

Από τη συνοριακή συνθήκη στη διεπιφάνεια $y=h$ (σχήμα 2.2), όπου η διατμητική τάση είναι ίση με μηδέν, για την μεταβλητή ολοκλήρωσης C_1 έχουμε:

$$\tau_{yx} = \rho \cdot g_x \cdot y + C_1 \xrightarrow{\tau_{yx}|_{y=h}=0} C_1 = -\rho \cdot g_x \cdot h \xrightarrow{\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy}} \rightarrow$$

$$\frac{du_x}{dy} = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot (h - y) \Rightarrow \int du_x = \int \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot (h - y) dx \Rightarrow$$

$$u_x(y) = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot y - \frac{\rho \cdot g_x}{\mu} \cdot \frac{y^2}{2} + C_2$$

Από τη δεύτερη συνοριακή συνθήκη στη διεπιφάνεια $y=0$ (σχήμα 2.2), όπου η ταχύτητα του ρευστού ισούται με μηδέν ($U_x=0$), για την μεταβλητή ολοκλήρωσης C_2 ισχύει:

$$U_x(y) = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{\mu} \cdot \left[\left(\frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right]$$

Από το προφίλ της ταχύτητας υπολογίζουμε τη μέγιστη ταχύτητα που εμφανίζεται στη διεπιφάνεια $y=h$ (σχήμα 2.2):

$$U_{x,\max} = U_x \Big|_{y=h} = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{\mu}$$

Ακόμη πρέπει να οριστεί η μέση τιμή της ταχύτητας, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της κινητικής κατάστασης του υγρού υμένα στους υπολογισμούς των αδιάστατων μεγεθών Re , Nu . Υποθέτοντας σταθερή ταχύτητα κατά το πλάτος του καναλιού W , η $\langle U_x \rangle$ εξαρτάται μόνο από τη μεταβολή της κατά τον y :

$$\langle U_x \rangle = \frac{\int_0^W \int_0^h U_x \cdot dy \cdot dz}{\int_0^W \int_0^h dy \cdot dz} = \frac{1}{h} \int_0^h U_x \cdot dy = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{3\mu} = \frac{2}{3} U_{\max}$$

Το ύψος του υμένα δίνεται, συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής ανά μονάδα πλάτους, από τη σχέση:

$$h_N = \sqrt[3]{\frac{3q\mu}{\rho g \sin \phi}}$$

Ενώ συναρτήσει της μέσης ταχύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$h_N = \sqrt{\frac{3\mu \cdot u_o}{\rho g \sin \phi}}$$

Η ροή περιγράφεται από τον αδιάστατο αριθμό Reynolds.

$$Re = \frac{\rho \cdot \langle U_x \rangle \cdot h_N}{\mu} = \frac{q}{\nu}$$

Όπου: μ το ιξώδες του υγρού, ρ η πυκνότητα του, $\langle U_x \rangle$ η ταχύτητα που κινείται το ρευστό πάνω από το επίπεδο, h το ύψος του υμένα, q η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους ($q = \langle U_x \rangle \cdot h$) και ν το κινηματικό ιξώδες ως $\nu = \mu / \rho$.

Σημειώνεται ότι το h_N είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος κατά Nusselt που στην προκειμένη περίπτωση παίρνει την τιμή $h_N = h$ με κρίσιμο αριθμό Reynolds, $Re_{cr} = 400$ πάνω από τον οποίο εμφανίζεται τυρβώδης ροή ή την τιμή $h_N = 4h$ με κρίσιμο αριθμό Reynolds, $Re_{cr} = 1600$.

Τέλος, σημαντικό ρόλο στην κίνηση του υμένα παίζει η κλίση του καναλιού από την οριζόντιο (γωνία ϕ), η οποία συσχετίζεται με τον Re_{cr} ως:

$$Re_{cr} = \frac{5}{6} \cot \phi$$

Η ροή περιγράφεται επίσης και από τον αδιάστατο αριθμό Kapitza, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από τον αριθμό Reynolds:

$$Ka = \gamma / (\rho \cdot \nu^{4/3} \cdot g^{1/3})$$

όπου, ρ η πυκνότητα του ρευστού, γ η επιφανειακή τάση και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ενώ στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται και ο αριθμός Weber, $We = \gamma / (\rho \cdot \langle U_x \rangle^2 \cdot h_N)$ αντί του αριθμού Kapitza. Ωστόσο ο αριθμός Kapitza επειδή είναι συνάρτηση μόνο των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού, πλεονεκτεί έναντι του αριθμού Weber που εξαρτάται και από την παροχή του ρευστού.

Η εξέλιξη των κυμάτων κατά την ροή ενός υγρού υμένα αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών. Όμως η μαθηματική ανάλυση της μόνιμης ροής μιας ελεύθερης επιφάνειας είναι αρκετά πολύπλοκη, εξαιτίας του γεγονότος ότι η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας δεν είναι γνωστή και αποτελεί μέρος της επίλυσης του προβλήματος. Έτσι το πρόβλημα γίνεται μη-γραμμικό, απαιτώντας περίπλοκες μαθηματικές μεθόδους.

2.2 Θεωρία γραμμικής ευστάθειας για τη ροή υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο

Η ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα μεταβαίνει στην ασταθή περιοχή όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή Re_c για δεδομένη κλίση του τοιχώματος. Με την επιβολή διαταραχής (μονοχρωματικής ή θορύβου) στη ροή, αυτή καθώς αναπτύσσεται εμφανίζει κύματα και άλλες τρισδιάστατες δομές. Οι δισδιάστατες διαταραχές (διαταραχές συγκεκριμένης συχνότητας) επειδή είναι πιο ασταθείς από τις τρισδιάστατες και τα δισδιάστατα κύματα είναι καθοριστικά για την εξέλιξη της ροής, η μελέτη της γραμμικής ευστάθειας στηρίζεται στη θεώρηση των δισδιάστατων διαταραχών.

Αδιαστατοποιώντας τις βασικές εξισώσεις της ροής με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πίνακα 2.1, η ταχύτητα, η ροϊκή συνάρτηση και η πίεση είναι αντίστοιχα:

$$U(y) = 3 \left(y - \frac{1}{2} y^2 \right) \text{ όπου } U = \frac{\hat{U}}{u_0} \text{ και } y = \frac{\hat{y}}{h_N} \quad (2.12)$$

$$\Psi_0(y) = 3 \left(\frac{1}{2} y^2 - \frac{1}{6} y^3 \right) = \frac{3}{2} y^2 - \frac{1}{2} y^3 \text{ όπου } \Psi = \frac{\hat{\Psi}}{(u_0 h_N)} \quad (2.13)$$

$$P(y) = \frac{1}{Fr^2} (1 - y) \cot \phi \text{ όπου } Fr^2 = \frac{Re}{3} \quad (2.14)$$

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη για την αδιαστατοποίηση

Χαρακτηριστικό Μέγεθος	Σχέση
μήκος	h_N
ταχύτητα	$u_0 = \frac{(g \sin \phi h_N^2)}{3\nu} = \langle \hat{U} \rangle$
χρόνος	$\frac{h_N}{u_0}$
πίεση	ρu_0^2

Επιβάλλουμε λοιπόν στη ροή δισδιάστατη διαταραχή της μορφής:

$$\Psi = \Psi_0 + f(y)e^{i\alpha(x-ct)} \quad (2.15)$$

$$n = h + Ae^{i\alpha(x-ct)} \quad (2.16)$$

όπου α ο αδιάστατος κυματαριθμός: $\alpha = \alpha \hat{h}_N = \frac{2\pi h_N}{L}$

και c η αδιάστατη ταχύτητα: $c = \frac{c}{u_0}$

Η εξίσωση N-S με σταυρωτή παραγωγήσι διώχνει την πίεση και μας δίνει την εξίσωση Orr - Sommerfeld για το εύρος $f(y)$:

$$f'''' - 2\alpha^2 f'' + \alpha^4 f = i \operatorname{Re} a [(u-c)(f'' - \alpha^2 f) - u''f] \quad (2.17)$$

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα είναι:

Σ.Σ.1: η ταχύτητα στο τοίχωμα είναι μηδενική προς όλες τις διευθύνσεις (συνθήκη μη ολίσθησης και μη διεϊσδυσης) άρα:

$$\text{στο } y=0 \text{ ισχύει } u = v = 0 = f(0) = f'(0) = 0 \quad (2.18)$$

Σ.Σ.2: στην ελεύθερη επιφάνεια ($y=1+n$) ο τανυστής τάσεων είναι μηδέν κατά την εφαπτομενική διεύθυνση και ίσος με την καμπυλότητα επί την επιφανειακή τάση κατά την κάθετη διεύθυνση:

$$\left. \frac{\sigma \cdot \mathbf{n}}{\rho} \cdot \mathbf{t} \right|_{y=1+n} = 0 \text{ και } \left. \frac{\sigma \cdot \mathbf{n}}{\rho} \cdot \mathbf{n} \right|_{y=1+n} = \gamma \kappa \quad (2.19)$$

Η διαφορική εξίσωση Orr-Sommerfeld και οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες ορίζουν το πρόβλημα ιδιοτιμών.

Η λύση για το παραπάνω πρόβλημα, για κύματα μεγάλου μήκους (όπου $\alpha = \frac{2\pi h_N}{L} \ll 1$) έχει δοθεί από τον Yih (1963) ως εξής:

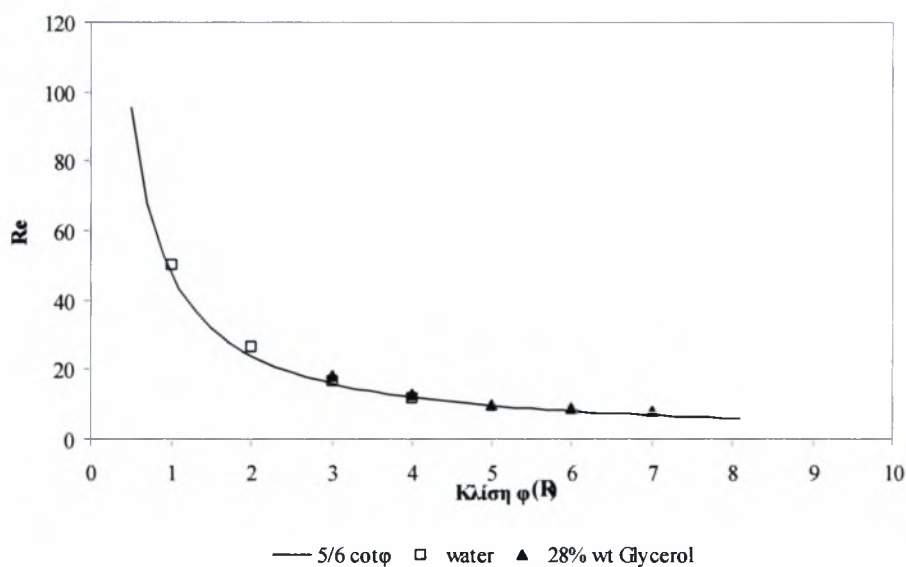
Θεωρούμε τους αγνώστους $f(y)$ και c ως αναπτύγματα Taylor ως προς α :

$$f(y) = f_0(y) + \alpha f_1(y) + \alpha^2 f_2(y) + \dots \quad (2.20)$$

Από τη λύση με τους όρους πρώτης τάξης παίρνουμε ότι η ροή γίνεται ασταθής όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή Re_c . Έτσι αστάθεια έχουμε για:

$$\frac{6}{5} Re - \cot \phi > 0 \Leftrightarrow Re_c = \frac{5}{6} \cot \phi \quad (2.23)$$

Η σχέση αυτή του κρίσιμου αριθμού Reynolds με την γωνία κλίσης της ροής επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους Liu et al (1993) και στη συνέχεια από τους Vlachogiannis & Bontozoglou (2001). Στο σχήμα 2.4 βλέπουμε τον κρίσιμο Re ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης για 2 διαφορετικά ρευστά. Στο ίδιο σχήμα, οι καμπύλες αυτές συγκρίνονται με την θεωρητική πρόβλεψη για επίπεδο τοίχωμα.



Σχήμα 2.4: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re. (□) $Ka=3365$, (●) $Ka=1102$, (—) $Re=5/6\cot\phi$.

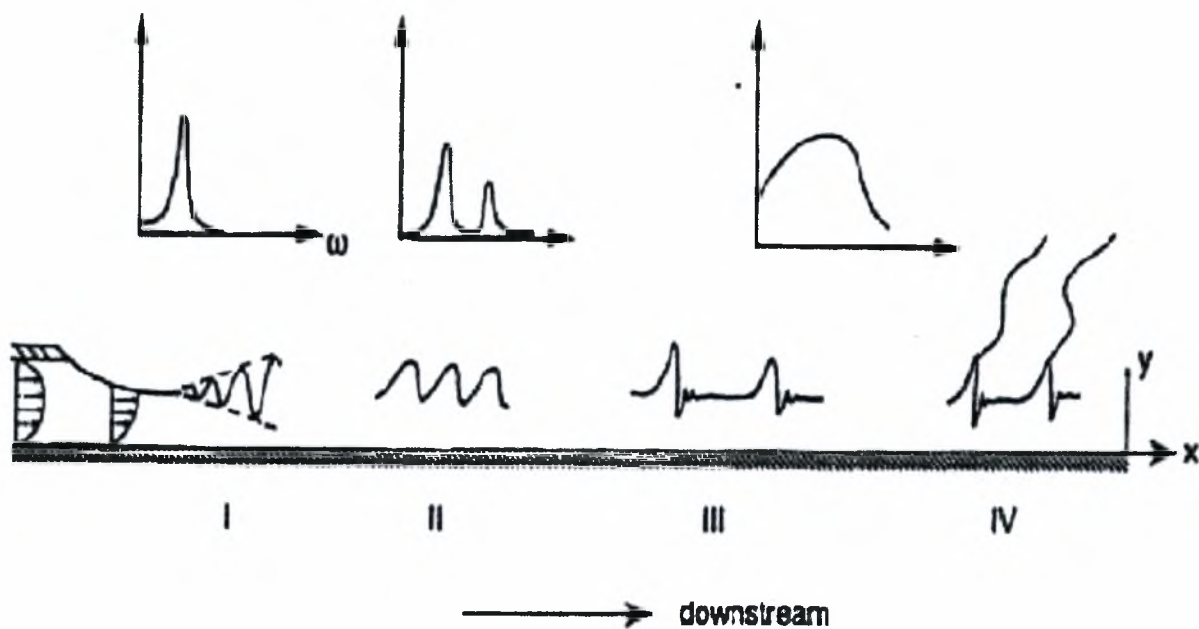
Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4 έγιναν με νερό και διάλυμα νερού – γλυκερίνης 28% κ.β. Οι δύο σειρές των πειραματικών αποτελεσμάτων συμπίπτουν, αποδεικνύοντας ότι η αστάθεια εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Re και όχι από το είδος του ρευστού.

2.3 Μη γραμμική εξέλιξη της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα

2.3.1. Θεωρία

Στην ανασκόπηση του Chang (1994) παρουσιάζεται η περιγραφή των φαινομένων που διέπουν την εξέλιξη των κυμάτων που εμφανίζονται σε ροή υγρού πάνω σε ένα επίπεδο τοίχωμα. Σύμφωνα με αυτήν την ανασκόπηση, σε υψηλούς αριθμούς Reynolds ($Re > 1000$) παρατηρούνται κύματα που οφείλονται στη διάτμηση (shear wave) με μήκος κύματος συγκρίσιμο (ή μικρότερο) με το πάχος του υμένα h . Συνεπώς, οι συνθήκες υψηλού ρυθμού ροής προκαλούν τυρβώδεις υμένες, όπου επικρατούν εσωτερικές διαταραχές κατά Tollmien-Schlichting. Σε μέσους αριθμούς Reynolds ($300 < Re < 1000$) αρχίζουν να εμφανίζονται διαμήκη διεπιφανειακά κύματα, χαρακτηριστικά των ασταθειών λόγω βαρύτητας μόνο ή και σε συνδυασμό της επιφανειακής τάσης (gravity-capillary instabilities). Ωστόσο, η δυναμική των κυμάτων είναι εξαιρετικά μη-μόνιμη (non-stationary), ειδικά για τα διατηρούμενα μικρά κύματα, τα οποία φαίνεται ότι παρήχθησαν από τα μεγαλύτερα κύματα, εξαιτίας μηχανισμών αποκόλλησης (shedding) των δινών. Σε εξαιρετικά χαμηλούς αριθμούς Reynolds ($Re \ll 1$) ο υμένας υγρού γίνεται πολύ λεπτός, που καθιστά σημαντικές τις ενδομοριακές δυνάμεις και την δυναμική της γραμμής επαφής υγρού-τοιχώματος (contact line dynamics), με αποτέλεσμα ο υμένας να αρχίζει να διασπάται κατά μήκος της ροής.

Η εξέλιξη των κυμάτων, εξαιτίας φυσικής διέγερσης, για αριθμούς Reynolds μεταξύ $1 < Re < 300$ διαχωρίζεται σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές, οι οποίες παριστάνονται στο σχήμα 2.5. Στην περιοχή I, απειροελάχιστες διαταραχές στην επιφάνεια του ρευστού επεκτείνονται κατά μήκος της ροής και προς το τέλος της περιοχής σχηματίζουν 'μονοχρωματικά' κύματα, αποδεικνύοντας ότι η προκαλούμενη αστάθεια είναι μεταφερόμενη (convective). Εάν η συχνότητα της διαταραχής είναι 'μονοχρωματική', το εμφανιζόμενο κύμα παραλαμβάνει την συχνότητα της διαταραχής. Εάν η διαταραχή έχει μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων, όπως συμβαίνει με τον φυσικό θόρυβο, μια διεργασία γραμμικού φιλτραρίσματος υψηλής επιλεκτικότητας (highly selective linear filtering process) παράγει ένα μοναδικό 'μονοχρωματικό' πεδίο κύματος, για όλο το εύρος των διαταραχών. Ειδικότερα οι εγκάρσιες διαταραχές αποσβένονται επιλεκτικά, στην περιοχή I. Σε αυτή την περιοχή, το μέγεθος του 'μονοχρωματικού' κύματος αυξάνει εκθετικά κατά μήκος της ροής, όπως σε όλα τα φαινόμενα γραμμικής διέγερσης ασταθών συστημάτων.



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση των τεσσάρων περιοχών του κύματος, κατά την εξέλιξή του, κατά την ροή ενός υγρού υμένα σε ένα κεκλιμένο επίπεδο. Η παράμετρος ω είναι η συχνότητα του κύματος.

Η περιοχή II ξεκινάει την στιγμή που η εκθετική αύξηση ανακόπτεται από ασθενή μη γραμμικά φαινόμενα, και το μέγεθος του ‘μονοχρωματικού’ κύματος προσεγγίζει μια πεπερασμένη τιμή, η οποία εξαρτάται από τους αριθμούς Reynolds, Kapitza και το μήκος του διεγερμένου κύματος. Εξαιτίας μιας ασθενούς μη γραμμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της ασταθούς βασικής συχνότητας και της $2^{\text{ης}}$ αρμονικής, το ‘μονοχρωματικό’ κύμα της περιοχής I αρχίζει και αποκτά μια περισσότερο πολύπλοκη μορφή καθώς η δημιουργούμενη ημιτονοειδής μορφή μεταδίδεται κατά μήκος της ροής.

Από τη σύνοψη διαφόρων πειραματικών αποτελεσμάτων έχει παρατηρηθεί ότι όταν οι επιβαλλόμενες εξωτερικές διαταραχές έχουν μεγάλο μέγεθος, τα δημιουργούμενα κύματα αποκτούν συχνότητα που πλησιάζει την συχνότητα της διαταραχής. Ενώ όταν εξωτερικές διαταραχές έχουν μικρό μέγεθος, τα κύματα (των περιοχών I & II) είναι ανεξάρτητα των διαταραχών. Τα ομοιόμορφα πεδία κύματος που εμφανίζονται στη περιοχή II, διανύουν μια μεγάλη απόσταση (περίπου 10 μήκη κύματος), χωρίς να αλλάζει η μορφή και το μέγεθός τους έως ότου περάσουν στην περιοχή III.

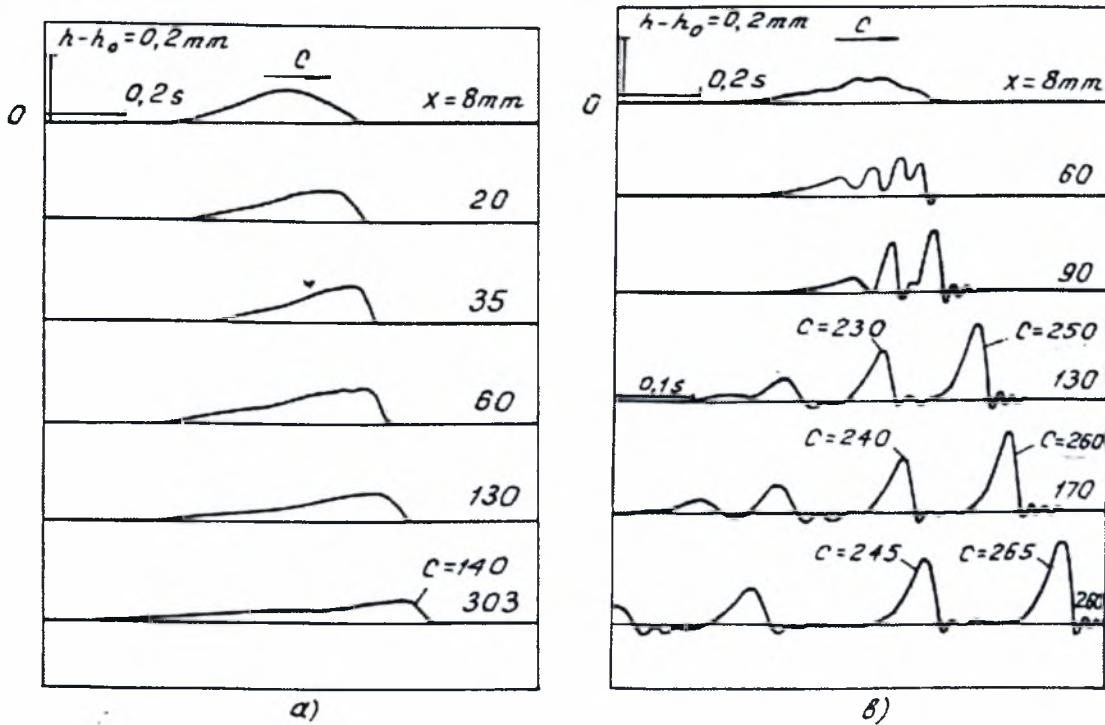
Στην περιοχή III παρατηρήθηκαν δύο κυρίαρχες μορφές αστάθειας των κυμάτων πεπερασμένου μεγέθους. Τα κύματα ενώνονται μεταξύ τους ανά διαστήματα εξαιτίας της ‘υποαρμονικής αστάθειας’ (sub-harmonic instability) (Prokopiou et al 1991) ή λόγω των πλευρικών ασταθειών (sideband instabilities) (Cheng & Chang 1992). Αυτές οι δύο αστάθειες δημιουργούν -στη κατά τα άλλα ομοιόμορφη ροή- ελαττωματικές περιοχές, κατά μήκος της ροής. Στο εσωτερικό των ελαττωματικών περιοχών τα παραμορφωμένα κύματα αυξάνονται σε μήκος κύματος, μέγεθος και ταχύτητα και αναπτύσσονται σ’ ένα περιορισμένο χώρο με την μορφή ‘εξογκωμάτων’. Αυτά τα

εξογκώματα έχουν ψηλές και απότομες κορυφές, των οποίων προηγούνται μικρά τριχοειδή κύματα (capillary ripples). Τα εξογκώματα αυτά είναι μεγάλα κύματα, που δημιουργούνται και επεκτείνονται ταχύτατα κατά μήκος της ροής, προσπερνούν τα χαμηλότερα και βραδυκίνητα κύματα που τελικά, εξαφανίζονται. Το δημιουργούμενο φάσμα συχνοτήτων και μηκών κύματος γίνεται όλο και πιο ευρύ, σε αντίθεση με αυτό των περιοχών I & II. Βέβαια αυτό δεν υποδηλώνει την επικράτηση των διασκορπισμένων κυμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα αυτοδύναμα αυτά μεγάλα κύματα έχουν ένα χαρακτηριστικό μήκος πολύ μικρότερο σε σχέση με την απόσταση μεταξύ δύο τέτοιων διαδοχικών κυμάτων. Αυτά τα κύματα ονομάζονται μοναχικά κύματα (solitary waves) και συνήθως παραμένουν αναλλοίωτα καθώς πλησιάζουν την περιοχή IV.

Τέλος στην περιοχή εξέλιξης IV, οι κορυφές των μεγάλων κυμάτων αρχίζουν να διαχωρίζονται εγκάρσια με αποτέλεσμα την δημιουργία τρισδιάστατης δομής. Η ανάπτυξη της τρισδιάστατης αυτής δομής είναι αποτέλεσμα της επίδρασης ανάλογων ασταθειών στην πλήρως αναπτυγμένη δισδιάστατη δομή. Η δομή που δημιουργείται σε αυτή την περίπτωση φαίνεται να μην αλλάζει με το χρόνο. Τα τρισδιάστατα κύματα εξακολουθούν να διατηρούν τη μορφή των μοναχικών κυμάτων, με απότομο μέτωπο και ομαλό σβήσιμο της ουράς.

2.3.2. Πειράματα

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει πολλές πειραματικές μελέτες για την μη-γραμμική εξέλιξη της ροής υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα. Μία πολύ σημαντική μελέτη, είναι αυτή των Alekseenko et al. (1985), που αποτελεί σημείο αναφοράς στη ροή υγρού υμένα και στις ιδιότητες των μοναχικών κυμάτων. Η χρησιμοποίηση ενός ξεχωριστού είδους διαταραχής στην είσοδο του καναλιού ροής, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ομάδας μοναχικών κυμάτων διαφορετικού μεγέθους. Στο σχήμα 2.6 απεικονίζεται η εξέλιξη της επιβαλλόμενης διαταραχής κατάντη της ροής. Το σημαντικότερο τμήμα της προαναφερθείσας εργασίας, αποτελεί η μέτρηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων, δηλαδή της ταχύτητας και του μήκους κύματός τους, συναρτήσει του μεγέθους αυτών. Η πειραματική διαπίστωση της εξάρτησης της ταχύτητας των παραγόμενων μοναχικών κυμάτων από το μέγεθός τους φαίνεται στο σχήμα 2.6. Το είδος της εισερχόμενης διαταραχής είναι τέτοιο, που έχει τη δυνατότητα δημιουργίας μοναχικών κυμάτων διαφορετικού ύψους, καθώς αυτά διαχωρίζονται μεταξύ τους κατάντη της ροής.



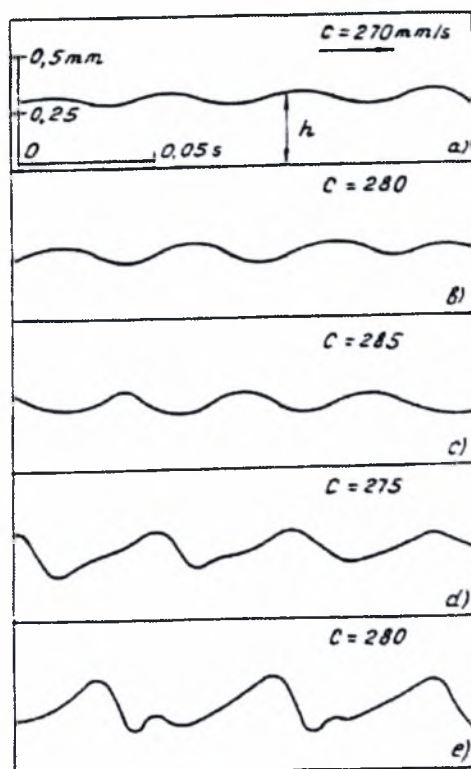
Σχήμα 2.6: Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής

Η εισαγωγή διαταραχής σε υψηλότερη συχνότητα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δισδιάστατων περιοδικών κυμάτων, η εξέλιξη των οποίων επιφέρει τη δημιουργία των μοναχικών κυμάτων, με βάση τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα. Αυτή η εξέλιξη απεικονίζεται στο σχήμα 2.7, σε διαδοχικές αποστάσεις κατάντη της ροής.

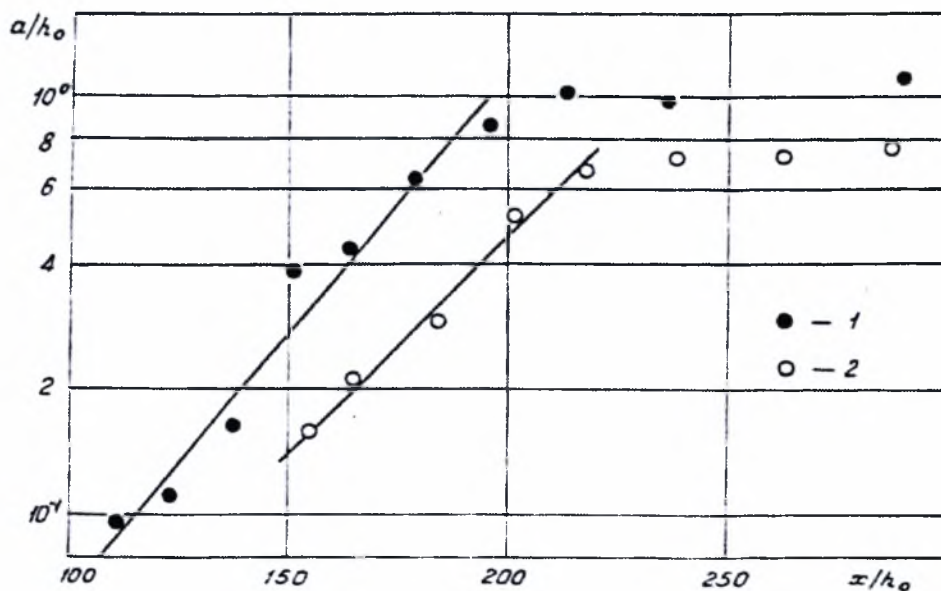
Ένας άλλος τομέας της εργασίας είναι η εύρεση της εξάρτησης του μεγέθους των παραγόμενων κυμάτων ως συνάρτηση της απόστασης κατάντη της ροής. Στο σχήμα 2.8 απεικονίζεται η εξάρτηση του αδιάστατου μεγέθους του κύματος:

$$a = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_N}$$

ως συνάρτηση της αδιάστατης κατάντη απόστασης x/h_N . Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, η αύξηση της κατάντη απόστασης έχει ως αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση του μεγέθους του κύματος. Ενώ το μέγεθος του μοναχικού κύματος δε μεταβάλλεται, από μία απόσταση και μετέπειτα, επιβεβαιώνοντας ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως. Αυτή η απόσταση, για ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο επίπεδο τοίχωμα, είναι $\sim 225h_N$

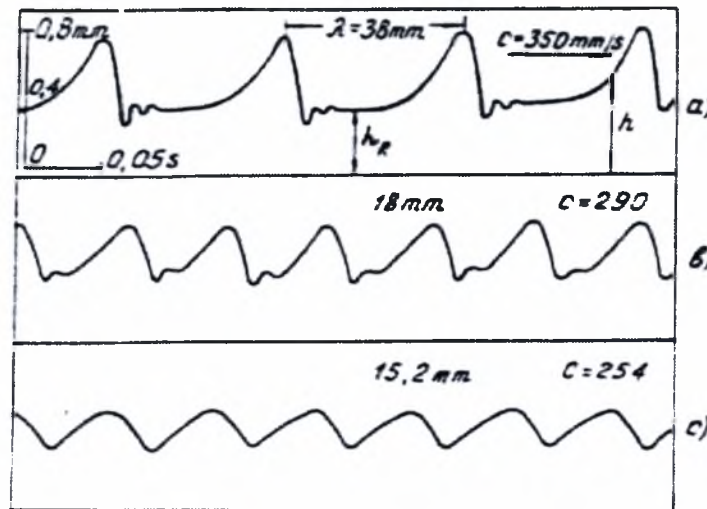


Σχήμα 2.7: Η ανάπτυξη μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής, όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα.



Σχήμα 2.8: Η εξάρτηση του μεγέθους των μοναχικών κυμάτων ως συνάρτηση της απόστασεως κατάντη της ροής.

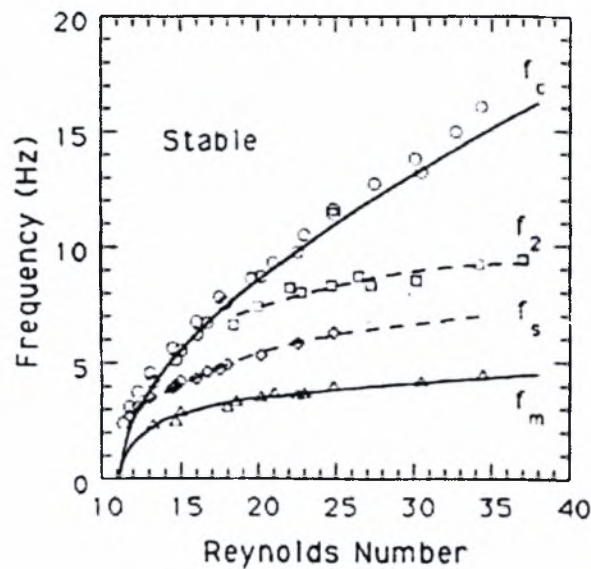
Στο σχήμα 2.9 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά των πλήρως αναπτυγμένων μοναχικών κυμάτων. Το μήκος κύματος των μοναχικών κυμάτων είναι περίπου 38mm, ενώ κάθε κύμα με μεγαλύτερο μήκος κύματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως μοναχικό. Η ταχύτητά τους είναι της τάξης των 350mm/sec και διαφέρει από τη ταχύτητα των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων (280mm/sec).



Σχήμα 2.9: Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη απόστασεως.

Μία άλλη σημαντική μελέτη είναι αυτή των Liu et all (1993, 1994). Σε αυτήν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό, η ίδια μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Αρχικά μελέτησαν πειραματικά τη πρωταρχική αστάθεια (primary instability) ενός λεπτού υγρού υμένα, ο οποίος ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Στα αποτελέσματα παρουσιάζεται η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ του κρίσιμου, για την εμφάνιση αστάθειας, αριθμού Re_c και της γωνίας κλίσης του καναλιού, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Η απεικόνιση του διαγράμματος ευστάθειας σχετίζεται με την εξάρτηση της συχνότητας των διαταραχών από τον αριθμό Reynolds. Επιβεβαιώθηκαν και προσδιορίστηκαν πειραματικά τα περισσότερα θεωρητικά προβλεπόμενα όρια της γραμμικής ευστάθειας, όπως αυτά περιγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα. Όταν ο αριθμός Reynolds βρίσκεται στην ασταθή περιοχή απέδειξαν πειραματικά ότι η αρχική αστάθεια μετακινείται στην κατεύθυνση της ροής και συνεχώς αυξάνεται (convective instability). Η συχνότητα της διαταραχής, είτε είναι αποτέλεσμα της φυσικής διέγερσης, είτε είναι τεχνητά επιβαλλόμενη, επηρεάζει τη μη γραμμική ανάπτυξη των κυμάτων. Έτσι, τα χαρακτηριστικά των κυμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την συχνότητα της διαταραχής, η οποία όταν είναι επιβαλλόμενη δημιουργεί περιοδικά κύματα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η επιβολή μιας εξωτερικής διαταραχής αποτέλεσε τη μέθοδο προσδιορισμού των περιοχών αστάθειας της ροής, αφού οδηγεί στην απευθείας

μετάβαση από τη γραμμική περιοχή ανάπτυξης (linear inception region) στη περιοχή των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων. Στη τελευταία περιοχή αναπτύσσονται οι ουσιαστικότερες αστάθειες της ροής υγρού υμένα.

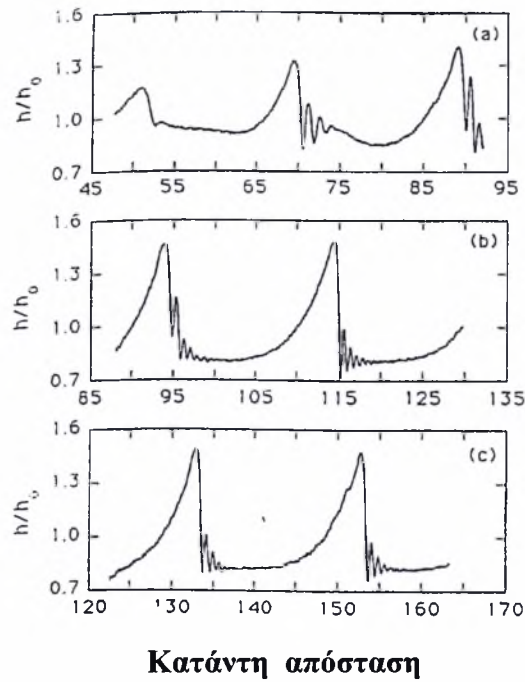


Σχήμα 2.10: Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιορισμένα όρια των διαφόρων ασταθειών.

Στο σχήμα 2.10 η καμπύλη που χαρακτηρίζεται ως f_c διαχωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή του υμένα (πρωταρχική αστάθεια). Μεταξύ αυτής και της καμπύλης f_2 παρατηρείται η πλευρική αστάθεια, ενώ η υποαρμονική αστάθεια είναι αυτή που χαρακτηρίζει την περιοχή μεταξύ των καμπύλων f_2 και f_s . Μεταξύ των ορίων f_s και f_m αρχίζουν να σχηματίζονται τα μοναχικά κύματα και κάτω από την καμπύλη f_m η δομή των κυμάτων οδηγεί τελικά σε χαοτική δομή (spatiotemporal chaos).

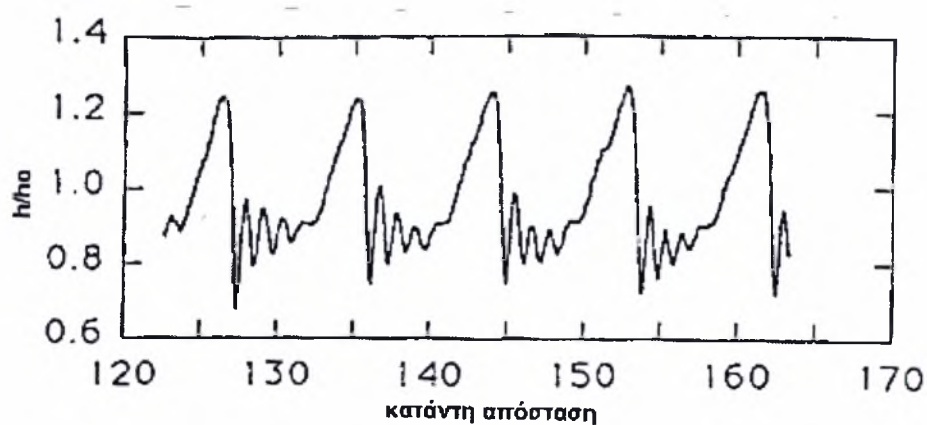
Οι Liu et al (1993 - 1994) δεν εξέτασαν λεπτομερώς την δημιουργία των μοναχικών κυμάτων και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασής τους. Όμως μελετήθηκε πειραματικά από τους Liu & Gollub (1994), η ανάπτυξη και εξέλιξη των μοναχικών κυμάτων, χρησιμοποιώντας υγρό μεγάλου ιξώδους (διάλυμα νερού γλυκερίνης 54% κ.β. γλυκερίνη). Η παράμετρος που μεταβαλλόταν στις διάφορες σειρές πειραμάτων τους, ήταν η συχνότητα επιβαλλόμενης διαταραχής. Παρατηρήθηκε ότι με την μεταβολή της, άλλαζε και η εξέλιξη των κυμάτων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι για επιβολή συχνότητας διαταραχής 1,5 Hz, στην είσοδο της διαταραχής εμφανίζεται ένα ημιτονοειδές κύμα το οποίο εξελίσσεται και η κάθε κορυφή παρουσιάζει απότομο μέτωπο και μακριά ουρά (σχήμα 2.11). Σταδιακά, τα κύματα αυτά παίρνουν τη μορφή των μοναχικών κυμάτων. Έτσι το μοναχικό κύμα

γίνεται κορεσμένο και καταλήγει σε μια στάσιμη κατάσταση όπου οι διαδοχικοί παλμοί είναι ταυτόσημοι.



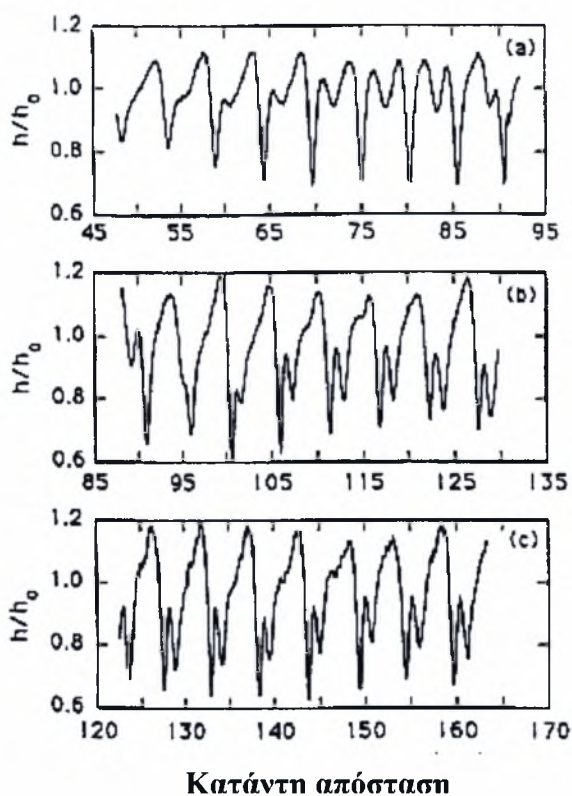
Σχήμα 2.11: Εμφάνιση μοναχικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 1,5 Hz

Με την αύξηση της συχνότητας της επιβαλλόμενης διαταραχής στα 3 Hz, τα μοναχικά αυτά κύματα φαίνεται να πλησιάζουν περισσότερο μεταξύ τους, μέχρι τη στιγμή που δεν μπορούν να διαχωριστούν καθαρά (σχήμα 2.12).



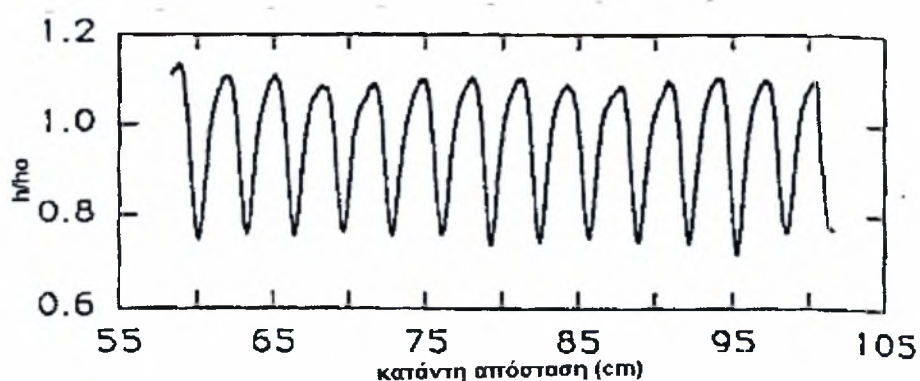
Σχήμα 2.12: Μορφή κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 3Hz.

Καθώς η συχνότητα αυξάνεται στα 4,5 Hz, δημιουργούνται κύματα με πολλαπλές κορυφές ανά περίοδο, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (σχήμα 2.13). Το ύψος τους μειώνεται με άμεσο αποτέλεσμα να ελαττώνεται και η ταχύτητά τους. Έτσι καταλήγουμε σε δομές οι οποίες έχουν περισσότερες από μια κορυφές ανά περίοδο και ενώ δεν έχουν χωρική περιοδικότητα έχουν χρονική.



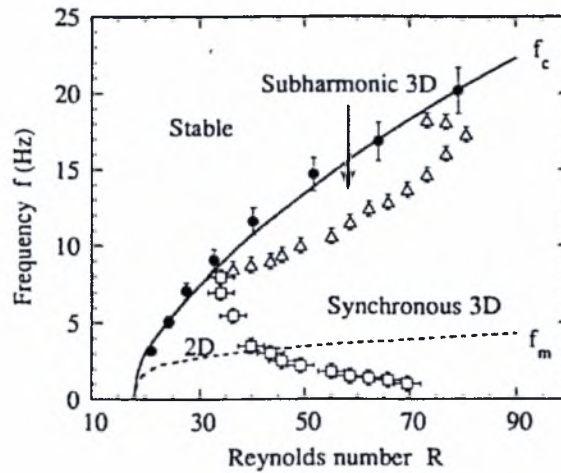
Σχήμα 2.13: Εξέλιξη κυμάτων πολλαπλών κορυφών ανά περίοδο με συχνότητα διαταραχής 4,5 Hz.

Τέλος, για συχνότητα διαταραχής 7 Hz, εμφανίζονται κύματα που είναι περιοδικά κορεσμένα με μία κορυφή ανά περίοδο (σχήμα 2.14).



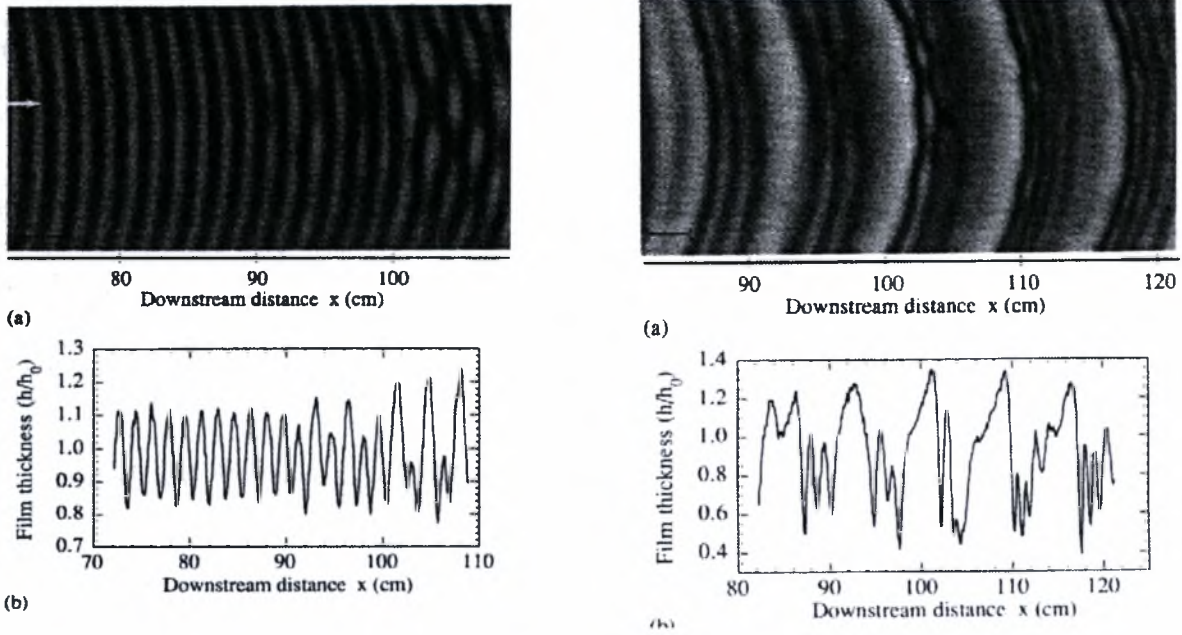
Σχήμα 2.14: Εμφάνιση κορεσμένων περιοδικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 7Hz.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι αστάθειες του υμένα μετατρέπονται από διδιάστατες σε τρισδιάστατες. Για παράδειγμα, η συγχρονισμένη αστάθεια (synchronous instability), η οποία εμφανίζεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, και η τρισδιάστατη υποαρμονική αστάθεια (3-D subharmonic instability) οδηγούν στην αλλαγή της δομής. Τα όρια δημιουργίας αυτών των ασταθειών απεικονίζονται στο σχήμα 2.15.

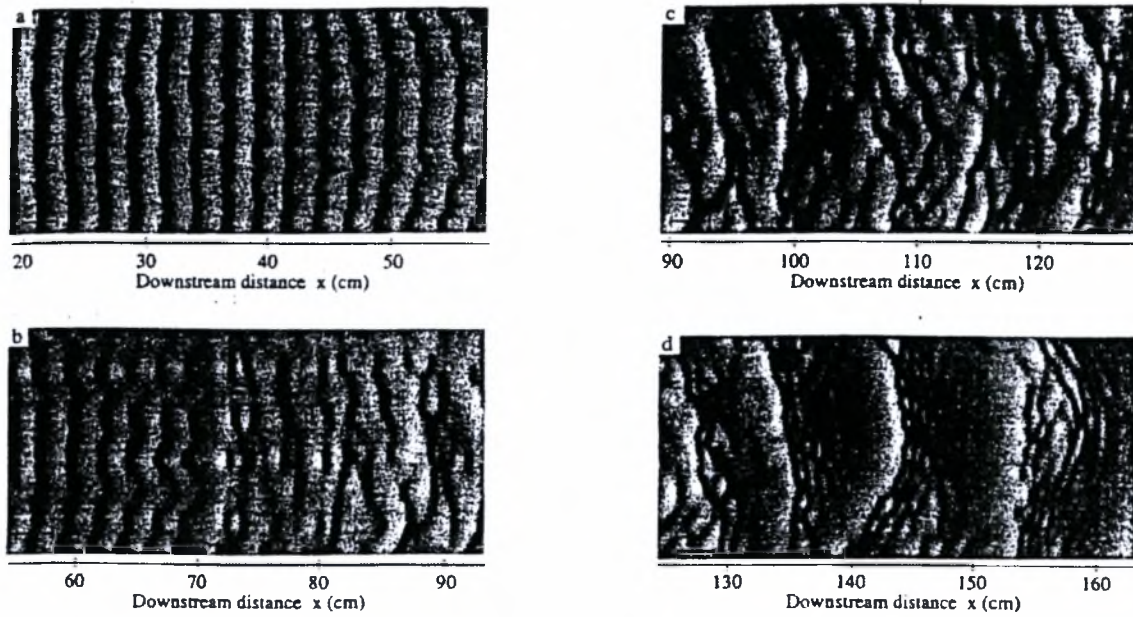


Σχήμα 2.15: Ο διαχωρισμός των τρισδιάστατων ασταθειών στο διάγραμμα συχνότητά τους συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

Όταν αυτές οι αστάθειες εφαρμόζονται σε μοναχικά ή σε κύματα που τείνουν να γίνουν μοναχικά, έχουν ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό των μετώπων του κύματος και τη δημιουργία εγκάρσιων τρισδιάστατων βαθουλωμάτων σε αυτά, ενώ όταν εφαρμόζονται σε κορεσμένα περιοδικά κύματα δημιουργείται η δομή «ψαροκόκαλο» (herringbone patterns) (σχήμα 2.16). Ενώ η σύζευξη των διαφόρων ασταθειών οδηγεί σε πλήρως τρισδιάστατες δομές, με κύρια χαρακτηριστικά τις αλλαγές κατεύθυνσης του μετώπου του κύματος, το διαχωρισμό του σε περισσότερα μέτωπα και τη δημιουργία μιας χαοτικής δομής. Στο σχήμα 2.17 απεικονίζεται η μετάβαση στην τρισδιάστατη δομή.



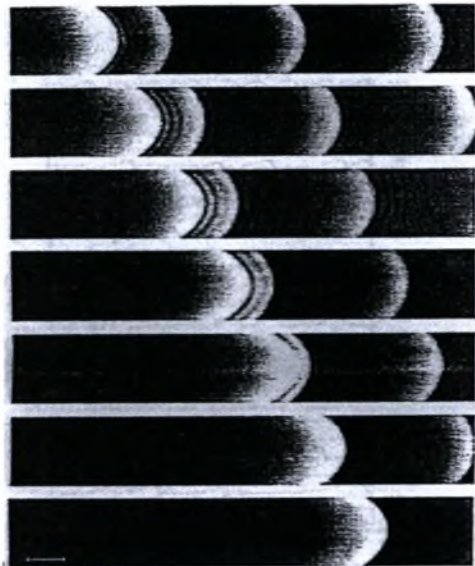
Σχήμα 2.16: Το αποτέλεσμα επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία της δομής ψαροκόκαλο (herringbone pattern).



Σχήμα 2.17: Η δημιουργία δομών πλήρους αταξίας (disorder patterns) εξαιτίας της επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών.

2.3.3. Αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων

Η αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο για τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Η δημιουργία του είναι αποτέλεσμα συνδυασμού διάφορων παραγόντων που χαρακτηρίζουν τη ροή. Η αλληλεπίδραση των κυμάτων μελετήθηκε από τους Chang, Demekhin & Kalaidin (1995), αλλά πρώτοι οι Liu et al (1994) παρατήρησαν πειραματικά την συγχώνευση μεταξύ δύο μοναχικών κυμάτων. Συγκεκριμένα στα πειράματά τους διαπίστωσαν ότι στη συγχώνευση, το κύμα που ακολουθεί έχει πολύ μεγαλύτερο μέγεθος από το προπορευόμενο. Το μεγαλύτερο κύμα, εξαιτίας του μεγέθους του, κινείται γρηγορότερα από το μικρότερο, λόγω της βαρυτικής επιτάχυνσης και απορροφά το μικρότερο, που βρίσκεται μπροστά του (σχήμα 2.18).



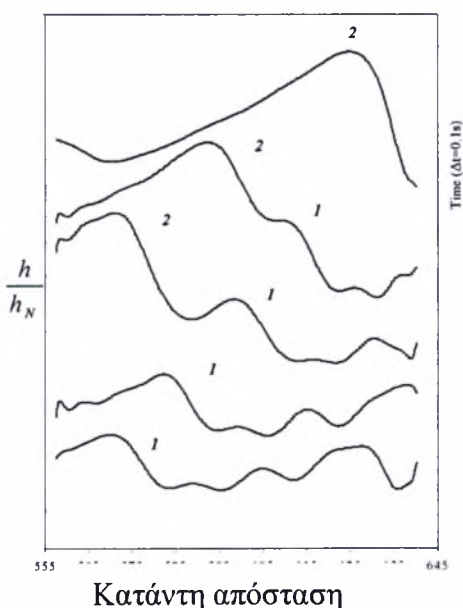
Σχήμα 2.18: Η συγχώνευση μεταξύ δύο μοναχικών κυμάτων, με τη μορφή εικόνων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

Παρόλα αυτά, η αλληλεπίδρασή τους δεν μελετήθηκε λεπτομερώς από τους προαναφερθέντες μελετητές. Η διαδικασία της συγχώνευσης των κυμάτων μελετήθηκε διεξοδικά στην εργασία των Vlachogiannis and Bontozoglou (2001), και παρατηρήθηκε ότι η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο κυμάτων αποτελεί τον βασικό παράγοντα που καθορίζει την χρονική διάρκεια της συγχώνευσης καθώς και τη χρονική διάρκεια της διαδικασίας απόκτησης της τελικής μορφής του νέου κύματος.

Όταν αυτή η διαφορά είναι μικρή, ο χρόνος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η συγχώνευση είναι μεγάλος. Η μέγιστη χρονική διάρκεια παρατήρησης της εξέλιξης των αλληλεπιδράσεων είναι της τάξης των 0,5 έως 0,6 sec, ανάλογα με το μέγεθος, άρα και την ταχύτητα

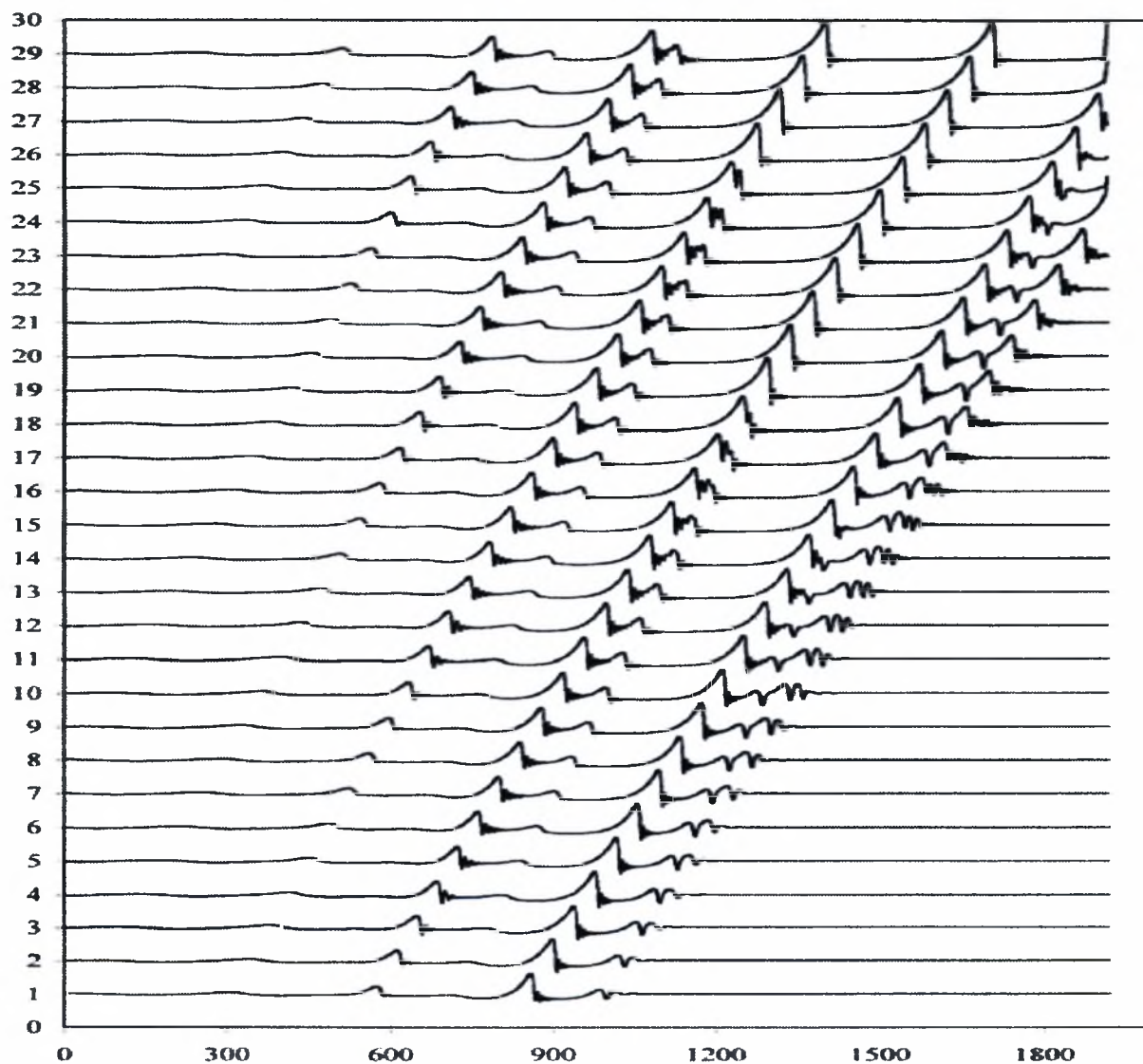
των κυμάτων. Επίσης παρατηρήθηκε ότι αν η διαφορά ύψους είναι μικρότερη από $0,1 h_N$ τα κύματα πλησιάζουν αρκετά, χωρίς ωστόσο να συγχωνεύονται. Αντίθετα δημιουργείται μια δομή δύο κορυφών οι οποίες κινούνται μαζί κατά μήκος του πεδίου ροής, και οι οποίες αργότερα πιθανόν να καταλήξουν στη δημιουργία δύο ανεξάρτητων μοναχικών κυμάτων.

Ένα άλλο ενδιαφέρον μεταβατικό φαινόμενο που παρατηρείται, είναι ότι η πλάτη του μοναχικού κύματος μετά το τέλος της συγχώνευσης έχει υπερυψωμένο υπόστρωμα. Το υπερυψωμένο υπόστρωμα χαρακτηρίζεται από ένα ύψος h_b , το οποίο εξαρτάται από το ύψος του κύματος και μειώνεται εκθετικά με το χρόνο. Το υπερυψωμένο υπόστρωμα στην πλάτη του κύματος που προαναφέρθηκε είναι πιο εύκολο να παρατηρηθεί όταν έχουμε ρευστό με μεγάλο σχετικά ιξώδες. Στα πειράματα με νερό εμφανίζεται στιγμιαία, αλλά επειδή είναι εξαιρετικά ασταθές οδηγεί στη διαμόρφωση μιας κυματοειδούς μορφής στην ουρά του δημιουργούμενου κύματος. Η μορφή αυτή ονομάζεται αστάθεια της ουράς και παρατηρείται σε διαλύματα χαμηλού ιξώδους. Το μήκος κύματος της αστάθειας της ουράς είναι αντίστοιχο με το μήκος κύματος των μπροστινών ρυτιδώσεων, και η εμφάνισή της γίνεται ταυτόχρονα με την επανεμφάνιση των ρυτιδώσεων. Η περαιτέρω εξέλιξη της αστάθειας της ουράς εξαρτάται κυρίως από τη δομή της ελεύθερης επιφάνειας και από το είδος των κυμάτων που ακολουθούν. Στην περίπτωση όπου πίσω από το διεγερμένο κύμα δεν υπάρχει άλλο κύμα, τότε η αστάθεια της ουράς αποσβένεται. Αν πάλι κάποιο μοναχικό κύμα βρίσκεται σε κοντινή απόσταση σε σχέση με την διαμορφωμένη ουρά του μπροστινού κύματος, τότε η αστάθεια της ουράς εγκλωβίζεται μεταξύ των δυο κυμάτων. Το αποτέλεσμα από τον εγκλωβισμό της ουράς είναι η δημιουργία ενός νέου κύματος.



Σχήμα 2.19: Συγχώνευση (coalescence) δύο μοναχικών κυμάτων.

Στην εργασία των Malamataris, Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) έγιναν εκτεταμένες προσομοιώσεις της αλληλεπίδρασης μοναχικών κυμάτων και προβλέφθηκε η ύπαρξη τριών διαφορετικών σεναρίων: μονοτονικής έλξης με συνέπεια τη συγχώνευση, μονοτονικής άπωσης με δημιουργία ζεύγους κορυφών και περιοδικής έλξης-άπωσης. Επίσης, εξετάστηκε η εξέλιξη διαταραχών πολύ μικρής συχνότητας και διατυπώθηκε η πρόβλεψη ανάπτυξης δευτερευουσών κορυφών μεταξύ των κύριων κυμάτων. Το σενάριο δημιουργίας των δευτερευουσών κορυφών και αλληλεπίδρασής τους με τις κύριες φαίνεται στο σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.20: Εξέλιξη ροής για αρχική διαταραχή συχνότητας 1Hz.

2.4 Παλαιότερες έρευνες στο μεγάλο κανάλι ροής

Μία πειραματική μελέτη που έχει κεντρική σπουδαιότητα για την παρούσα εργασία, είναι η διπλωματική διατριβή του Τριανταφύλου Ορφέα. Η οποία επίσης υλοποιήθηκε στο νέο μεγάλο κανάλι ροής που υπάρχει στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με χρησιμοποιούμενο ρευστό, καθαρό νερό, σε σταθερή κλίση καναλιού στις $3,4^\circ$ και οι μετρήσεις έγιναν σε συγκεκριμένη περιοχή του υμένα, σε μήκος από 209 έως 211 cm από το σημείο έναρξης της ροής. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν η παρακολούθηση της μετάβασης της ροής του υγρού υμένα από την περιοχή ευστάθειας στην περιοχή αστάθειας. Πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι πειραμάτων στους οποίους η συχνότητα επιβαλλόμενης διαταραχής (f) διατηρήθηκε σταθερή στα 0,1 Hz. Στον πρώτο κύκλο έγιναν τρία πειράματα, όπου το ύψος της διαταραχής μεταβαλλόταν κατ'εκτίμηση, ενώ ο χρόνος επιβολής της διαταραχής παρέμενε σταθερός στην τιμή $T_{on} = 0,25$ sec. Στον δεύτερο κύκλο έγιναν δύο πειράματα, όπου και πάλι το ύψος διαταραχής μεταβαλλόταν κατ'εκτίμηση, ενώ ο χρόνος επιβολής της διαταραχής παρέμενε σταθερός στην τιμή $T_{on} = 0,5$ sec αυτή τη φορά.

Συγκεκριμένα στην πρώτη σειρά πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι για τρία διαφορετικά ύψη διαταραχών (20, 40 και 90 μm) ο κρίσιμος αριθμός Reynolds (Re_{cr}), ο οποίος όπως έχουμε ήδη αναφέρει διαχωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή, ήταν πάντα ο $Re_{cr} = 19$, για τον δεδομένο χρόνο επιβολής $T_{on} = 0,25$ sec. Επίσης παρατηρήθηκε ότι το πλάτος του κύματος στην ευσταθή περιοχή παρέμενε σταθερό για το εκάστοτε ύψος διαταραχής ανεξάρτητα από την μεταβολή του Re . Το μόνο μέγεθος που άλλαζε με την μεταβολή του Re στην ευσταθή περιοχή ήταν το πάχος του υποστρώματος. Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων ($T_{on} = 0,5$ sec) για δύο διαφορετικά ύψη διαταραχών (15 και 35 μm) διαπιστώθηκε ότι η συμπεριφορά των κυματομορφών δεν επηρεάζεται από το χρόνο επιβολής της διαταραχής (και πάλι $Re_{cr} = 19$). Επίσης επαληθεύθηκε ξανά ότι το πλάτος του κύματος είναι ανεξάρτητο του αριθμού Re στην ευσταθή περιοχή για τα δύο ύψη διαταραχών. Τέλος παρατηρήθηκε σε $Re = 20$ ο σχηματισμός δύο κορυφών στην κορυφή του κύριου κύματος, το οποίο δείχνει ότι η ροή είναι ακόμη υπό ανάπτυξη, σε αντίθεση με αυτή που ο χρόνος επιβολής της διαταραχής ήταν μικρότερος. Δηλαδή απαιτείται περισσότερο μήκος για την πλήρη ανάπτυξη της ροής.

Κεφάλαιο 3 Πειραματική Μεθοδολογία

3.1 Πειραματική διάταξη ροής υγρού υμένα

3.1.1 Εισαγωγή

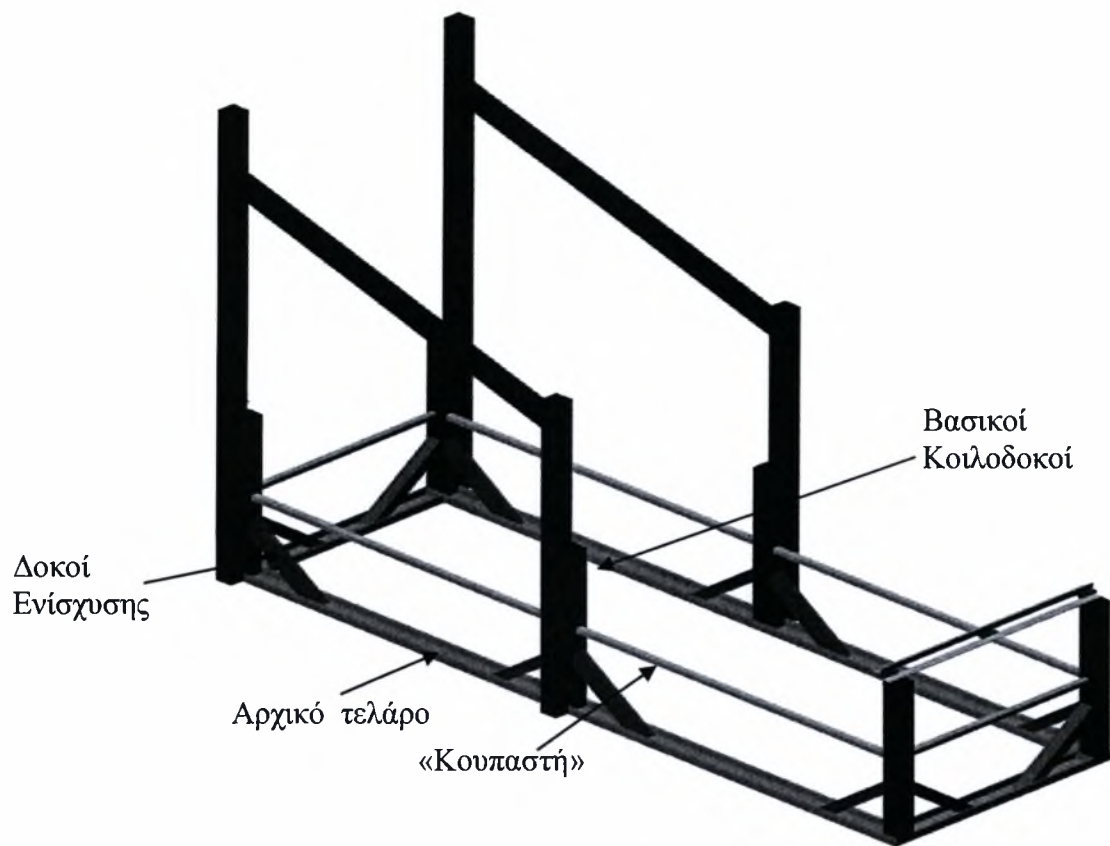
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η πειραματική διάταξη του καναλιού ροής και οι διαδικασίες που πρέπει να τηρηθούν για την εκκίνηση της λειτουργίας του. Επίσης θα αναφερθεί ο τρόπος λειτουργίας του και η μεθοδολογία συλλογής και επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων, με στόχο τον προσδιορισμό των παραμέτρων του προβλήματος.

3.1.2 Μεταλλική κατασκευή

Η μεταλλική βάση (σχήμα 3.1) αποτελεί τον σκελετό της κατασκευής, διότι πάνω της στηρίζεται το ικρίωμα. Οπότε για να αντεπεξέλθει στην παραλαβή του φορτίου του ικριώματος, έγινε μια πολύ στιβαρή κατασκευή με πολύ καλή μηχανική σταθερότητα. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε σε ακόμη ένα βασικό κατασκευαστικό χαρακτηριστικό του σκελετού, το οποίο ήταν η μικρή παρέκκλιση των δοκών από την οριζόντιο, την κατακόρυφο και τη μεταξύ τους παραλληλία, γιατί αν υπήρχαν παρεκκλίσεις θα ήταν δυσκολότερο οι διορθώσεις να γίνουν στην τελική επιφάνεια, από ότι στον σκελετό.

Τα βασικά μέρη της μεταλλικής βάσης είναι (σχήμα 3.1):

- Το συγκολλητό πλαίσιο (τελάρο) από UPN 100×50×5mm, πάνω στο οποίο εδράζονται οι κατακόρυφοι κοίλοδοκοί, τελικών διαστάσεων 3480×1130mm.
- Οι 6 βασικοί κοίλοδοκοί SHS 80×4mm, ύψους 1000mm
- Οι πλάγιες ενισχυτικές δοκοί πάνω στις υφιστάμενες, διατομής SHS 80×4mm
- Η κουπαστή περιμετρικά, αποτελούμενη από στραντζαριστό τετραγωνικής διατομής 30×2mm.



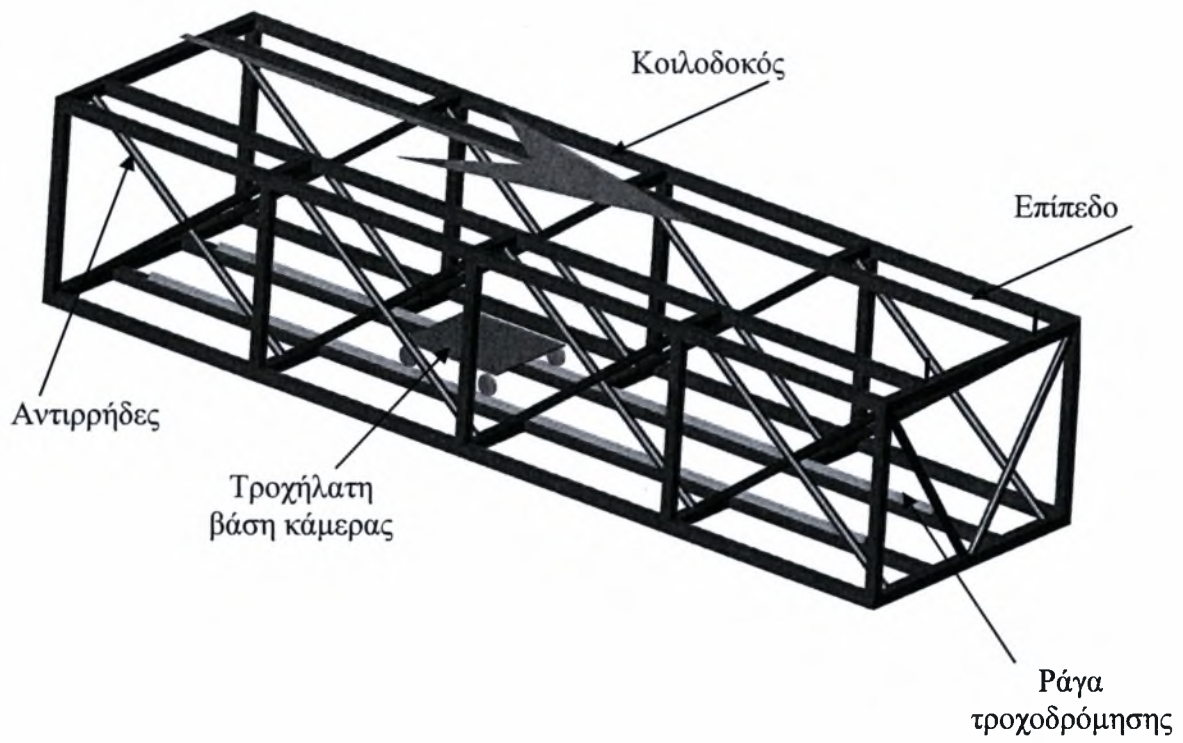
Σχήμα 3.1: Μεταλλική βάση

Το ικρίωμα

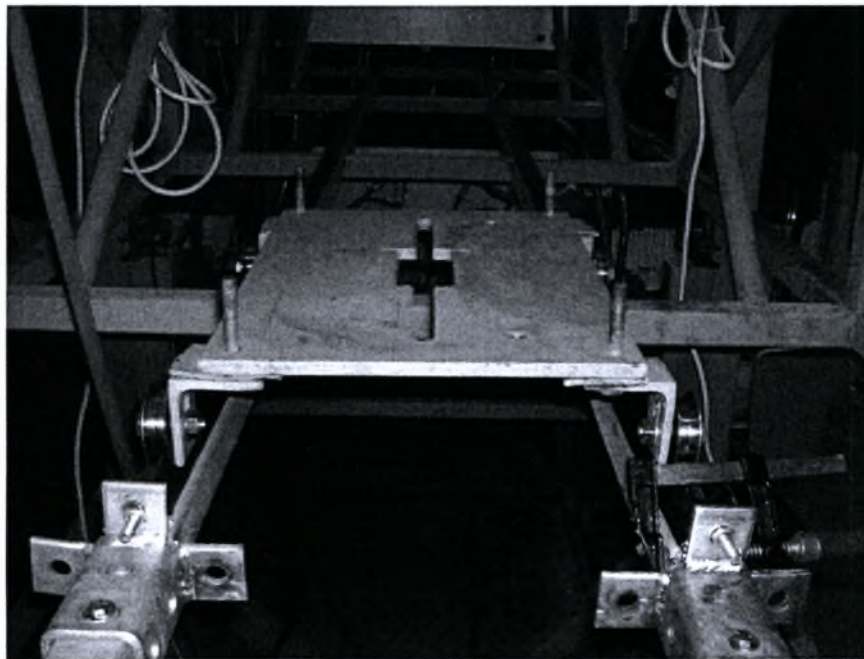
Το ικρίωμα είναι τοποθετημένο πάνω στη μεταλλική βάση. Σε αυτό υπάρχουν οι ράγες τροχοδρόμησης του «βαγονέτου» της ψηφιακής κάμερας και πάνω από αυτές στερεώνεται το κανάλι ροής. Επίσης στο μπροστινό του μέρος υπάρχουν μεντεσέδες που δίνουν την δυνατότητα αλλαγής της κλίσης του από την οριζόντιο. Για την καλή λειτουργία του καναλιού η κατασκευή του ικριώματος αποτελείται από δύο επίπεδα απολύτως παράλληλα. Το ικρίωμα είναι ένα συγκολλητό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο τελικών διαστάσεων 3480×1040×680mm. Το σχέδιο του ικριώματος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.

Τα βασικά μέρη του ικριώματος είναι:

- Οι ακμές από μονοκόμματες κοιλοδοκούς SHS 40×4
- Τέσσερις ζώνες ενίσχυσης από κοιλοδοκούς ίδιας διατομής
- Αντηρίδες συμμετρικά της ροής, διατομής RD 33,7×2,6 για την ενίσχυση της ακαμψίας.
- Οι ράγες τροχοδρόμησης του «βαγονέτου» της κάμερας (σχήμα 3.3)
- Οι μεντεσέδες στο μπροστινό μέρος που σε συνδυασμό με το αναβατόριο στο πίσω θα δημιουργούν την επιθυμητή κλίση της ροής.



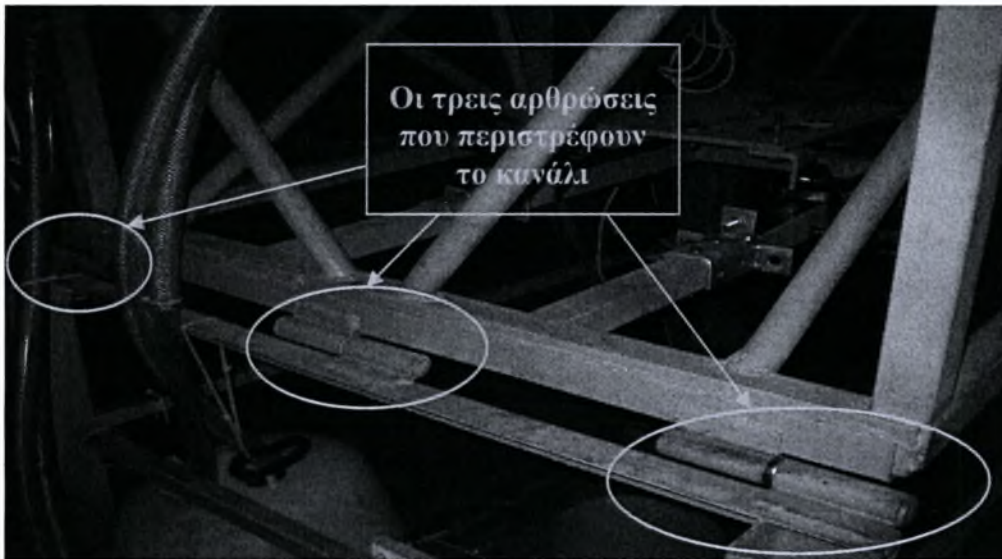
Σχήμα 3.2: Το μεταλλικό κριώμα που αποτελεί τη βάση του καναλιού και της κάμερας.



Σχήμα 3.3: Ράγες τροχοδρόμησης και το «βαγονέτο» όπου στηρίζεται η ψηφιακή κάμερα

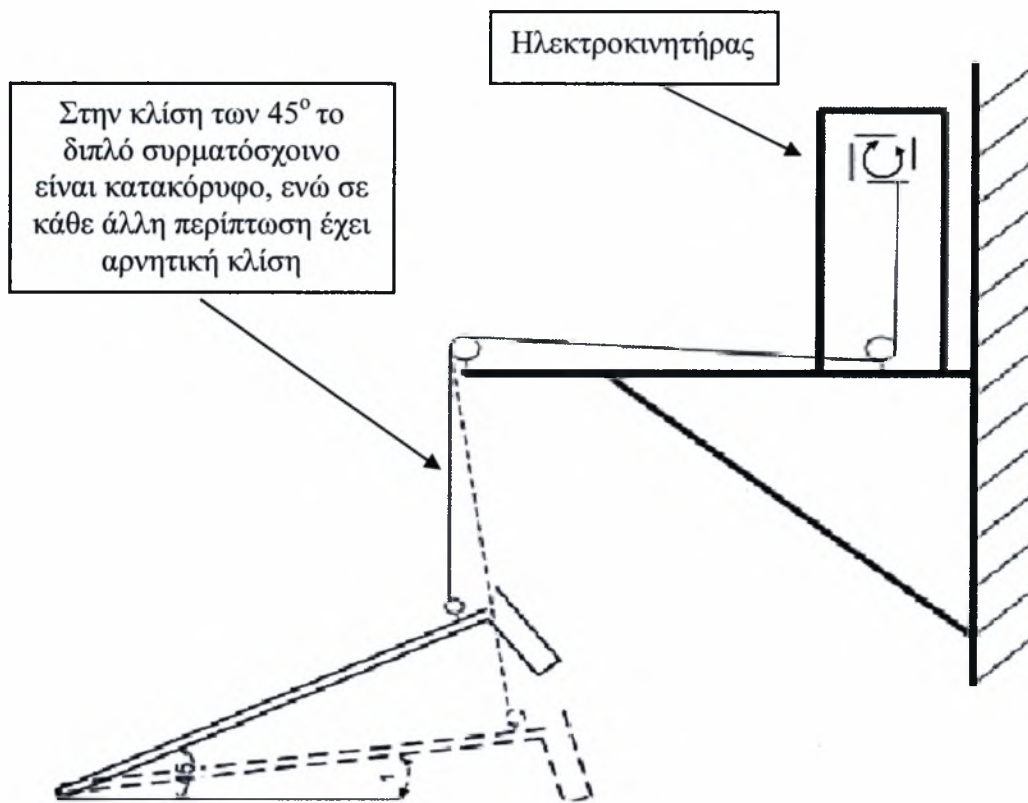
3.1.3 Σύστημα ρύθμισης κλίσης καναλιού

Το ικρίωμα λόγω της σύνδεσής του με την μεταλλική βάση μόνο με τρεις αρθρωτικούς συνδέσμους (μεντεσέδες) στο μπροστινό μέρος (σχήμα 3.4), έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά τους. Το κανάλι είναι σταθερά και παράλληλα τοποθετημένο στο μεταλλικό ικρίωμα, οπότε περιστρέφεται και αυτό μαζί με το ικρίωμα. Η κλίση του καναλιού μπορεί να ρυθμιστεί από 0° έως 45°.

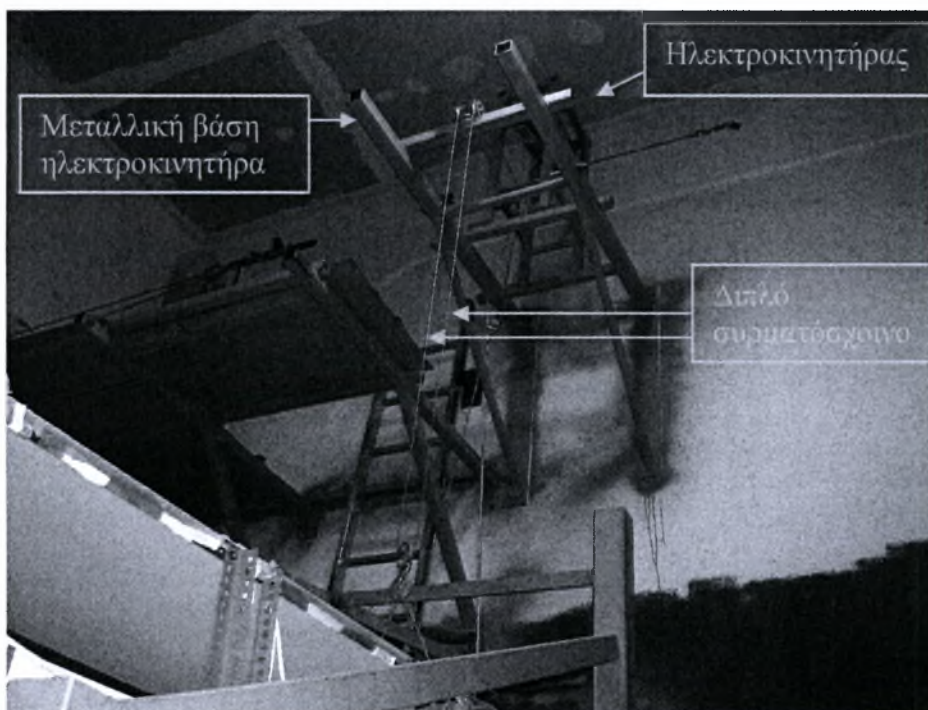


Σχήμα 3.4: Οι τρεις αρθρώσεις με τις οποίες συνδέεται το ικρίωμα με την μεταλλική βάση

Για την αλλαγή της κλίσης του συστήματος ικρίωμα - κανάλι, λόγω αυξημένου βάρους επιλέχθηκε ηλεκτρικό αναβατόριο με τη βοήθεια ενός συστήματος τροχαλιών και ενός συρματόσχοινου. Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ανυψωτική ικανότητα 1000 Kg. Βρίσκεται τοποθετημένος στη μεταλλική βάση (σχήμα 3.5 - 3.6) έτσι ώστε το συρματόσχοινο έλξης να είναι κατακόρυφο στο σημείο της μέγιστης κλίσης του καναλιού, ενώ σε οποιοδήποτε άλλο κατώτερο σημείο να αποκτά μία αρνητική κλίση ως προς την κατακόρυφο. Έτσι ασκείται μια επιπλέον τάση προς την εμπρόσθια πλευρά της κατασκευής που της προσδίδει σταθερότητα, ελαχιστοποιώντας το φορτίο των τάσεων στο συρματόσχοινο (σχήμα 3.5).



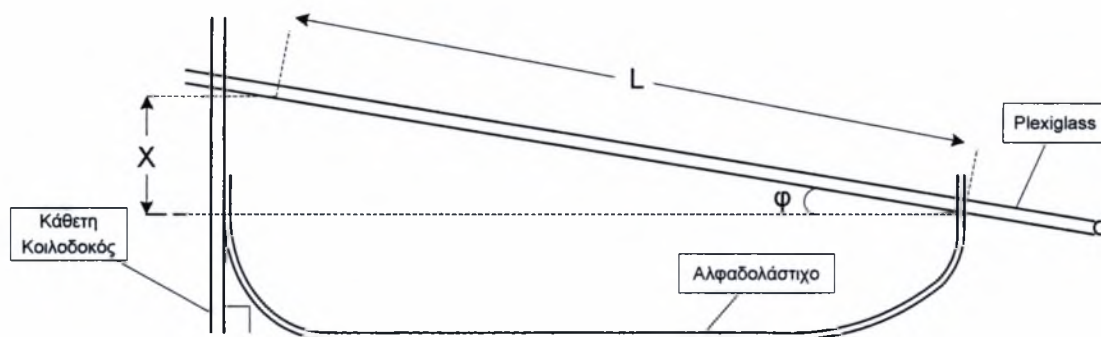
Σχήμα 3.5: Σύστημα ανύψωσης του ικριώματος



Σχήμα 3.6: Ηλεκτρικό αναβατόριο και η βάση στήριξής του

Υπολογισμός της γωνίας κλίσης

Ο υπολογισμός της γωνίας κλίσης γίνεται με την παραδοσιακή μέθοδο του αλφαδολάστιχου η οποία μας δίνει εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα τις τάξης του ενός εκατοστού της μοίρας. Ο τρόπος μέτρησης με αυτή την μέθοδο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.7 : Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου υπολογισμού γωνίας κλίσης με το αλφαδολάστιχο.

Με την χρήση του αλφαδολάστιχου βρίσκουμε την προβολή του τελικού σημείου του καναλιού ροής πάνω στην κάθετη κοιλοδοκό. Έπειτα σημειώνουμε και το αντίστοιχο σημείο έναρξης του καναλιού πάνω σε αυτήν, οπότε έχουμε υπολογίσει το X. Το μήκος L του καναλιού είναι γνωστό και είναι: $L = 3 \text{ m}$. Από απλή εφαρμογή της παρακάτω τριγωνικής σχέσης υπολογίζουμε την γωνία ϕ .

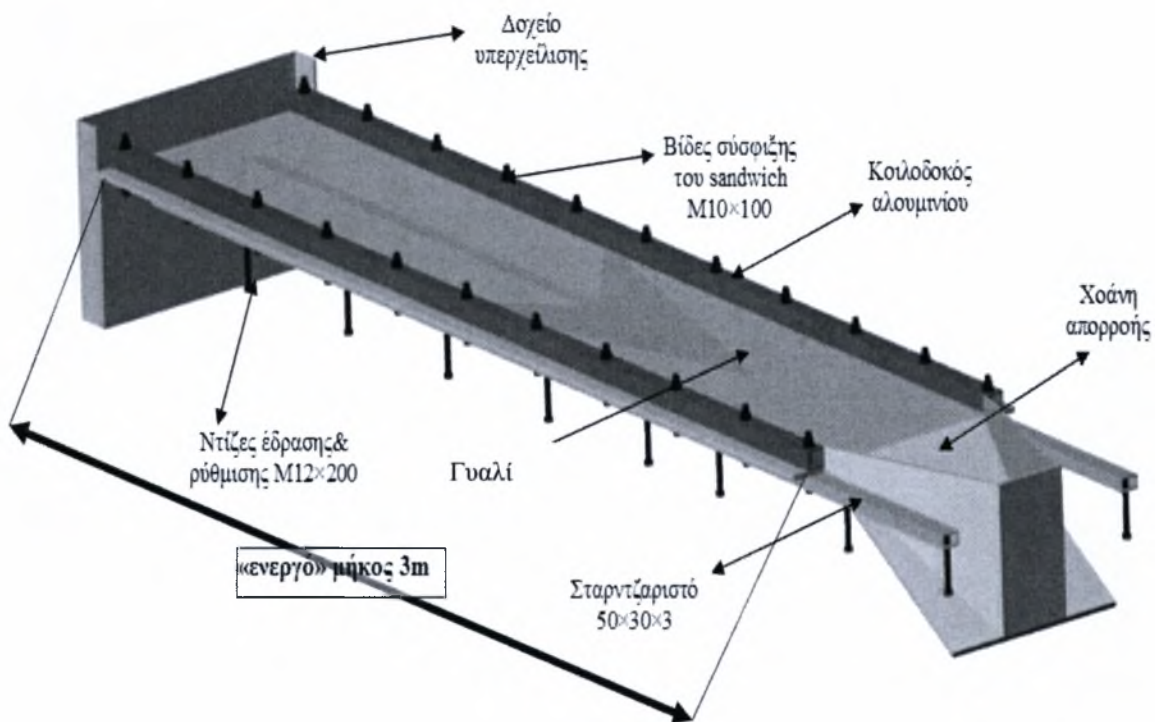
$$\phi = \sin^{-1} \frac{x}{L}$$

Αφού επιτευχθεί η επιθυμητή γωνία κλίσης σταθεροποιούμε το κρύωμα με ένα πέλμα που πακτώνετε μεταξύ αυτού και της κάθετης κοιλοδοκού. Έτσι, αποφεύγουμε μεταβολές στη γωνία κλίσης.

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία έγιναν υπό γωνία κλίσης του καναλιού στις $3,16^\circ$.

3.1.4 Το κανάλι ροής

Το κανάλι ροής αρχικά κατασκευάστηκε από υλικό Plexiglas. Όμως λόγω του βάρους του και της ελαστικότητάς του, με τον χρόνο άρχισε να αποκτά μόνιμες παραμορφώσεις και στρεβλώσεις, οι οποίες δεν μπορούσαν να διορθωθούν από τις ντίζες έδρασης και ρύθμισης (σχήμα 3.8). Έτσι κρίθηκε αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ένα σκληρότερο υλικό, που θα ήταν τελείως άκαμπτο. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το γυαλί, το οποίο τοποθετήθηκε πάνω από το Plexiglas που προϋπήρχε. Η επιλογή των συγκεκριμένων υλικών έγινε γιατί έχουν την απαιτούμενη διαύγεια που χρειαζόμασταν (ο δείκτης διάθλασης του Plexiglas είναι παρόμοιος με αυτόν του γυαλιού), οπότε δεν θα είχαμε πρόβλημα στις μετρήσεις μας, ακόμη και όταν θα είχαμε και τα δύο υλικά μαζί. Η ενεργή επιφάνεια ροής είναι μήκους 3000mm και πλάτους 520mm.

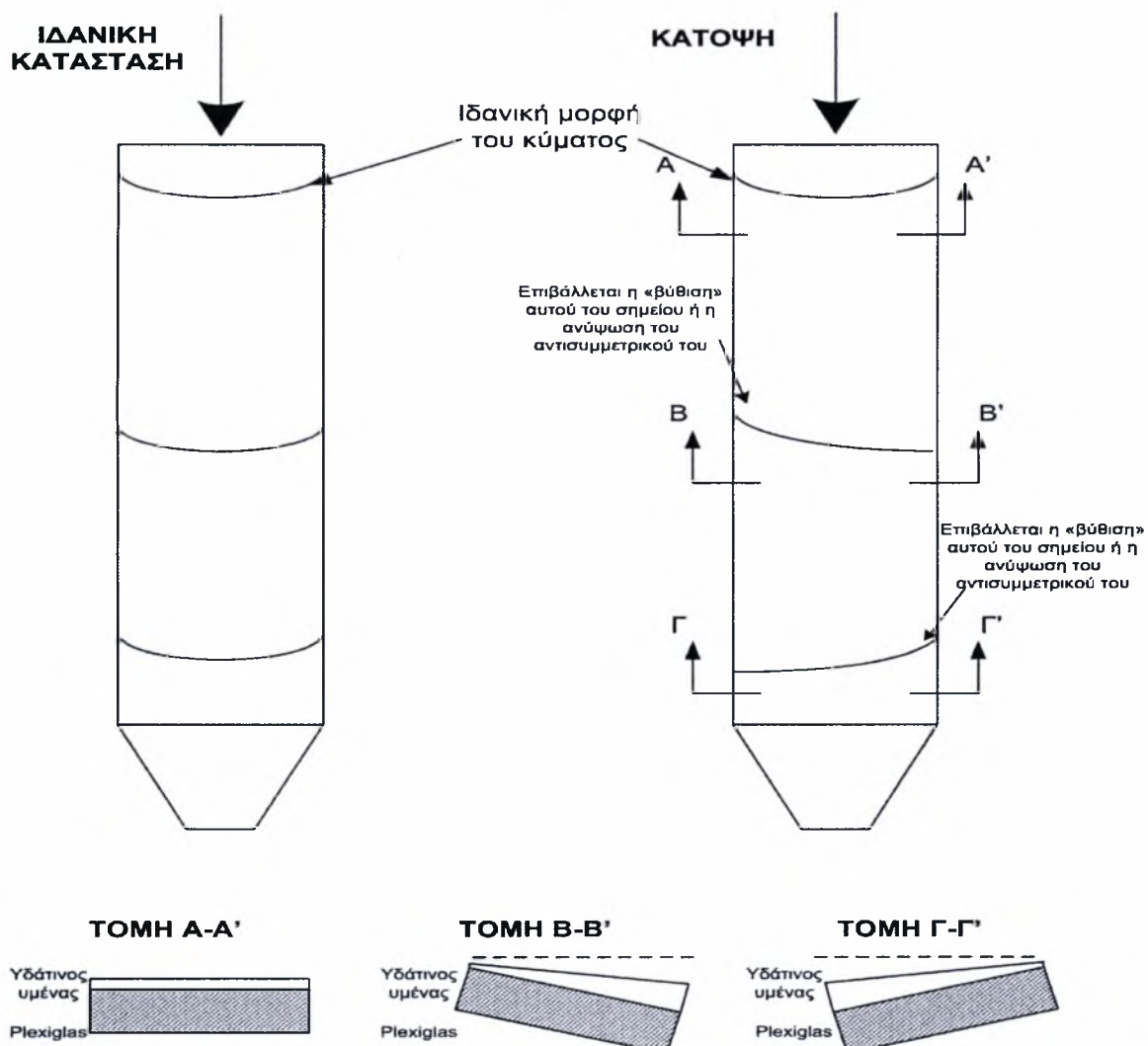


Σχήμα 3.8 : Το κανάλι ροής κατασκευασμένο από γυαλί

Η ευθυγράμμιση του καναλιού

Η ευθυγράμμιση του καναλιού απαιτεί εξαιρετική ακρίβεια, διότι η ροή του υγρού υμένα πάνω στο κανάλι είναι υπερβολικά ευαίσθητη. Η ακρίβεια αυτή δεν επιτυγχάνεται με κάποιο μετρητικό όργανο αλλά οπτικά. Για να γίνει η ευθυγράμμιση με την οπτική μέθοδο, πρέπει να ξεκινήσουμε την ροή υγρού πάνω στο κανάλι και να λειτουργήσουμε και την διαταραχή (προτεινόμενη διαταραχή $T_{on}=5sec$, $T_{off}=1sec$), ώστε να έχουμε κύματα που θα είναι διακριτά μεταξύ τους. Η παροχή θα πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα για να είναι η ροή στρωτή, αλλά και να μην σπάει ο υμένας.

Όταν το κανάλι είναι ευθυγραμμισμένο, τα κύματα πρέπει να είναι συμμετρικά ως προς τον κεντρικό άξονα παράλληλα της διεύθυνσης της ροής, δηλαδή έχοντας παραβολική μορφή (σχήμα 3.9 – Ιδανική κατάσταση & τομή A-A'). Όταν τα κύματα δεν είναι συμμετρικά, τότε περισσότερο υγρό συγκεντρώνεται στη χαμηλότερη πλευρά του καναλιού (σχήμα 3.9 - Τομή B-B' & Γ-Γ') με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του παραβολικού σχήματος του κυματισμού (σχήμα 3.9 – Κάτοψη & σχήμα 3.10). Αυτή κλίση του καναλιού κάθετα της διεύθυνσης της ροής απαιτεί διόρθωση για να έχουμε ορθά πειραματικά αποτελέσματα. Η διόρθωση επιτυγχάνεται με την περιστροφή των ντιζων προς την κατάλληλη φορά, ανάλογα με την κλίση. Όταν χρειάζεται ανύψωση του καναλιού σε κάποιο σημείο, τότε απαιτείται και βίδωμα της ντίζας που βρίσκεται από κάτω, ενώ αντίθετα όταν χρειάζεται κατέβασμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάνοντας τοπική διόρθωση σε ένα σημείο του καναλιού επηρεάζει και τα γειτονικά του με συνέπεια η διαδικασία να απαιτεί πληθώρα επαναληπτικών διορθώσεων και δοκιμών. Τέλος, πρέπει να βεβαιωθούμε ότι το κανάλι ακουμπάει σε όλες της ντίζες ώστε να αποφύγουμε το κίνδυνο να δημιουργηθούν στρεβλώσεις ή παραμορφώσεις.



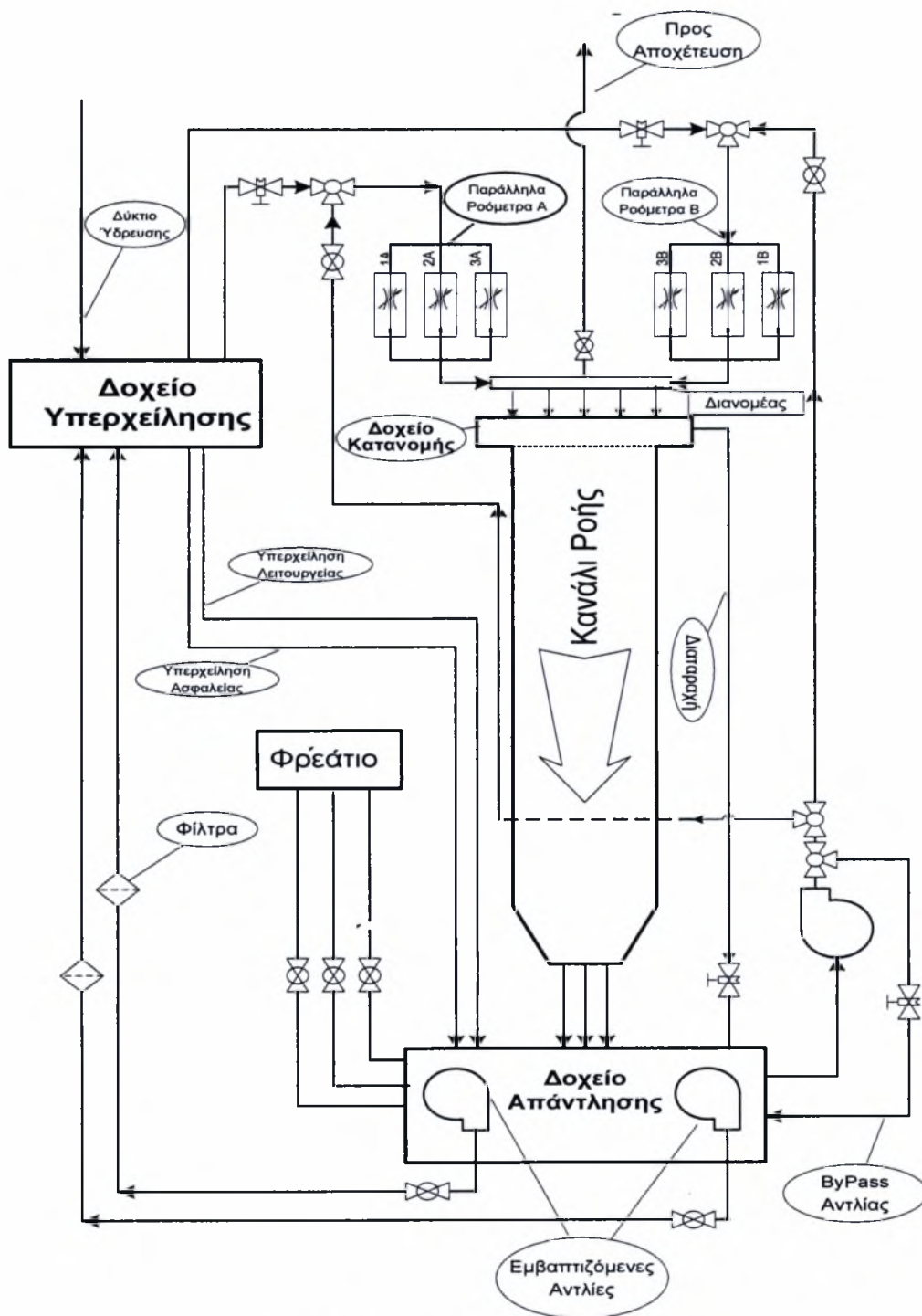
Σχήμα 3.9: Διαδικασία οριζοντίωσης του καναλιού.



Σχήμα 3.10: Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωσης

3.1.5 Υδραυλικό κύκλωμα

Το κανάλι ροής λειτουργεί μέσω ενός πολύπλοκου υδραυλικού κυκλώματος. Σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας είναι ένα κλειστό κύκλωμα όπου το ρευστό ανακυκλοφορεί με την βοήθεια αντλιών. Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται το σχέδιο του υδραυλικού κυκλώματος του οποίου η λειτουργία αναλύεται παρακάτω.



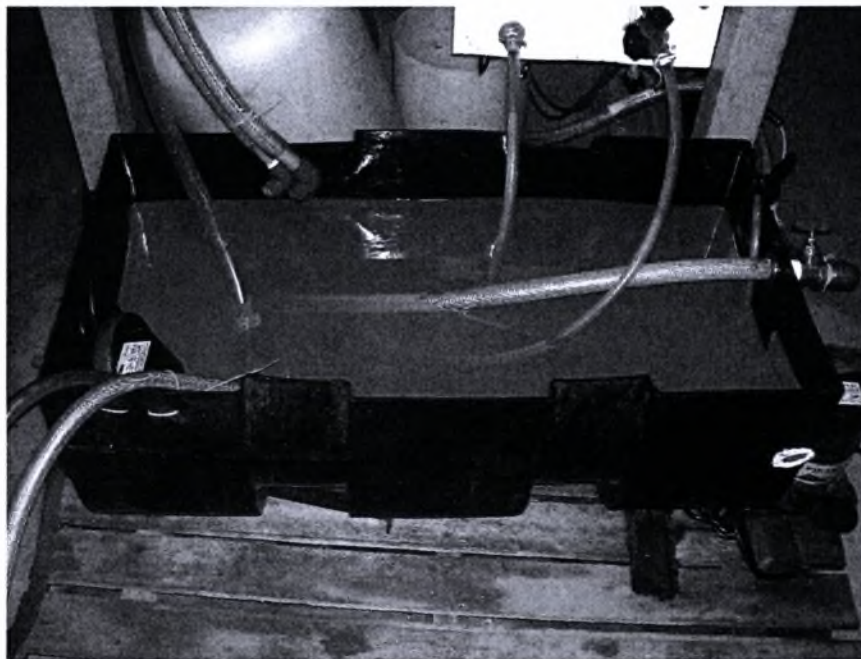
Σχήμα 3.11: Το υδραυλικό κύκλωμα

Έναρξη

Πριν ξεκινήσουμε οποιαδήποτε διαδικασία θα πρέπει να βεβαιωθούμε ότι τα δοχεία απάντλησης, υπερχειλίσης και κατανομής είναι απολύτως καθαρά. Επίσης θα πρέπει να καθαρίσουμε την επιφάνεια ροής, δηλαδή την επιφάνεια του γυαλιού από τυχόν επικαθίσεις αλάτων ή σκονών, για το λόγο αυτό αρχικά θέτουμε σε λειτουργία το όλο σύστημα με χρήση καθαρού νερού, μέχρις ότου αυτό καθαρίσει. Έπειτα αδειάζουμε το νερό στο φρεάτιο και την αποχέτευση και σκουπίζουμε την επιφάνεια ροής για να στεγνώσει. Αφού είμαστε πλέον έτοιμοι για την εκτέλεση του πειράματος, επαλείφουμε την επιφάνεια ροής με ένα σιλικονούχο υγρό (Sodium Silicate), που έχει την ιδιότητα να δημιουργεί ένα προστατευτικό φιλμ σε όλη την επιφάνεια της ροής που εξομαλύνει την τραχύτητα επιφάνειας του γυαλιού, ελαχιστοποιώντας έτσι την υδραυλική του αντίσταση.

Για την έναρξη της λειτουργίας πρέπει να γεμίσουμε το δοχείο απάντλησης περίπου με 80 lt ρευστού, που είναι η απαιτούμενη ποσότητα για να λειτουργήσει το κύκλωμα (σχήμα 3.12). Στο παρών πείραμα θέλαμε διάλυμα 25% γλυκερίνης, οπότε βάλαμε περίπου 20kg γλυκερίνης και 60kg νερού (περισσότερες λεπτομέρειες στο κεφάλαιο 3.2). Κατόπιν προσθέτουμε 20 gr χρωστικής ουσίας, ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή αναλογία των 250 ppm όπως έχει υπολογιστεί από τον Μ.Βλαχογιάννη.

Τέλος, για να αναμειχθεί το διάλυμα νερού – γλυκερίνης με την χρωστική ουσία, αλλά και για να απεγκλωβιστεί ο αέρας από τις σωληνώσεις, ο οποίος δημιουργεί ατέλειες στη ροή (φουσαλίδες κ.α.), απαιτείται η λειτουργία του πειράματος για κάποιο χρονικό διάστημα (περίπου 30 λεπτά) για την ομοιογένεια του διαλύματος και την σταθεροποίηση της ροής.



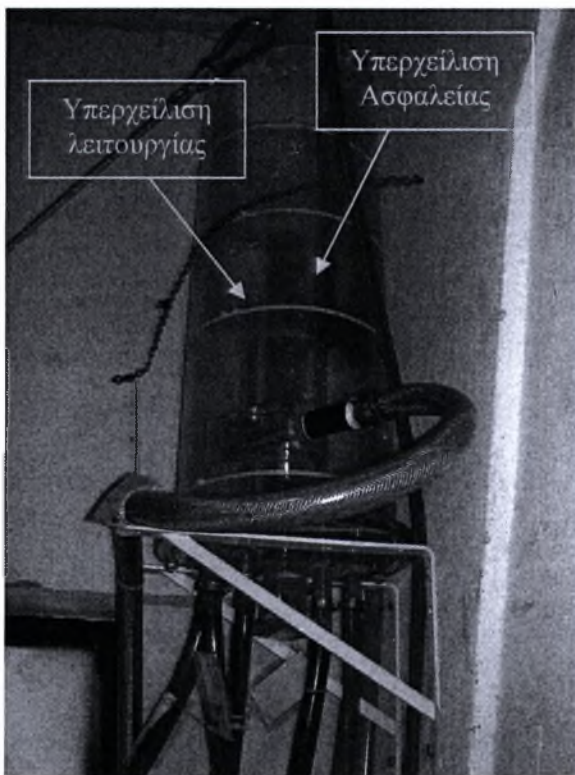
Σχήμα 3.12: Δοχείο απάντλησης

Παροχή ρευστού στο κανάλι - Αντλίες

Το κανάλι τροφοδοτείται από το δοχείο υπερχειλίσης (σχήμα 3.12), το οποίο βρίσκεται σε ύψος τριών μέτρων από την ελεύθερη επιφάνεια του δοχείου κατανομής ώστε να δημιουργείται η απαιτούμενη μανομετρική πίεση που θα υπερνικήσει την πτώση πίεσης των σωληνώσεων και των ροόμετρων.

Το δοχείο υπερχειλίσης επί της ουσίας παρεμβάλλεται των αντλιών και του δοχείου κατανομής, με στόχο να έχουμε σταθερή παροχή ρευστού στο κανάλι χωρίς τις διακυμάνσεις που δημιουργεί η αντλία μεταβλητών στροφών.

Για να πετύχουμε όμως αυτή τη σταθερότητα στην παροχή πρέπει το μανομετρικό ύψος να παραμένει σταθερό, άρα και η στάθμη του δοχείου να μένει σταθερή. Οπότε, υπερτροφοδοτούμε από τις αντλίες, και μέσω της υπερχειλίσης λειτουργίας (σχήμα 3.12) επιστρέφουμε το πλεονάζον ρευστό στο δοχείο απάντλησης. Για αποτελεσματικότερη σταθερότητα χρησιμοποιούμε και τον ρυθμιστή στροφών των αντλιών (σχήμα 3.13), με τον οποίο μπορούμε να ρυθμίσουμε την παροχή των αντλιών στο δοχείο υπερχειλίσης και να διατηρήσουμε σταθερό το μανομετρικό ύψος.



Σχήμα 3.13: Το δοχείο υπερχειλίσης



Σχήμα 3.14: Ρυθμιστής στροφών των αντλιών

Οι δύο εμβαπτιζόμενες αντλίες βρίσκονται βυθισμένες στο δοχείο απάντλησης, τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στο σχήμα 3.14. Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκε μόνο η μία από τις δύο αντλίες, διότι η μέγιστη παροχή που θέλαμε να πετύχουμε ήταν μόλις 2,44 kg/min, οπότε μία αντλία κάλυπτε τις απαιτήσεις μας.

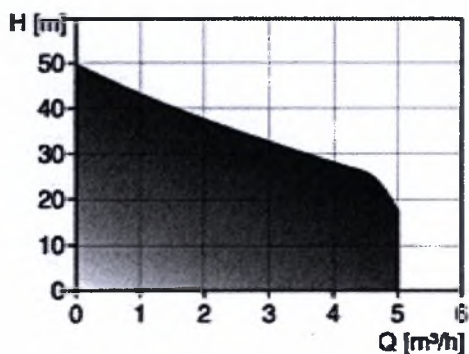
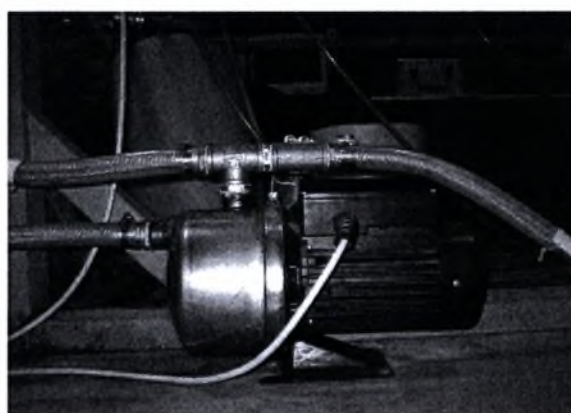
Ονομαστική Ισχύς	550 W
Μέγιστη Παροχή	1000 lt/h
Μέγιστο Μανομετρικό Ύψος	8,5 μ



Σχήμα 3.15: Χαρακτηριστικά λειτουργίας εμβαπτιζόμενων αντλιών

Για ρευστά υψηλής πυκνότητας όπως η καθαρή γλυκερίνη, οι εμβαπτιζόμενες αντλίες αδυνατούν να προσφέρουν την απαιτούμενη ισχύ στο ρευστό. Οπότε, εναλλακτικά, χρησιμοποιούμε την εξωτερική φυγοκεντρική αντλία μεγάλης ισχύος (σχήμα 3.15). Η αντλία τροφοδοτεί απευθείας το κανάλι χωρίς να παρεμβάλλεται το δοχείο υπερχειλίσης. Για να ρυθμιστεί η παροχή σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούμε τη βάννα που βρίσκεται στον κλάδο του ByPass.

Μέγιστη Παροχή	5000 lt/min
Μέγιστο Μανομετρικό Ύψος	48 μ
Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας	6 bar
Ονομαστική Ισχύς	1400 W

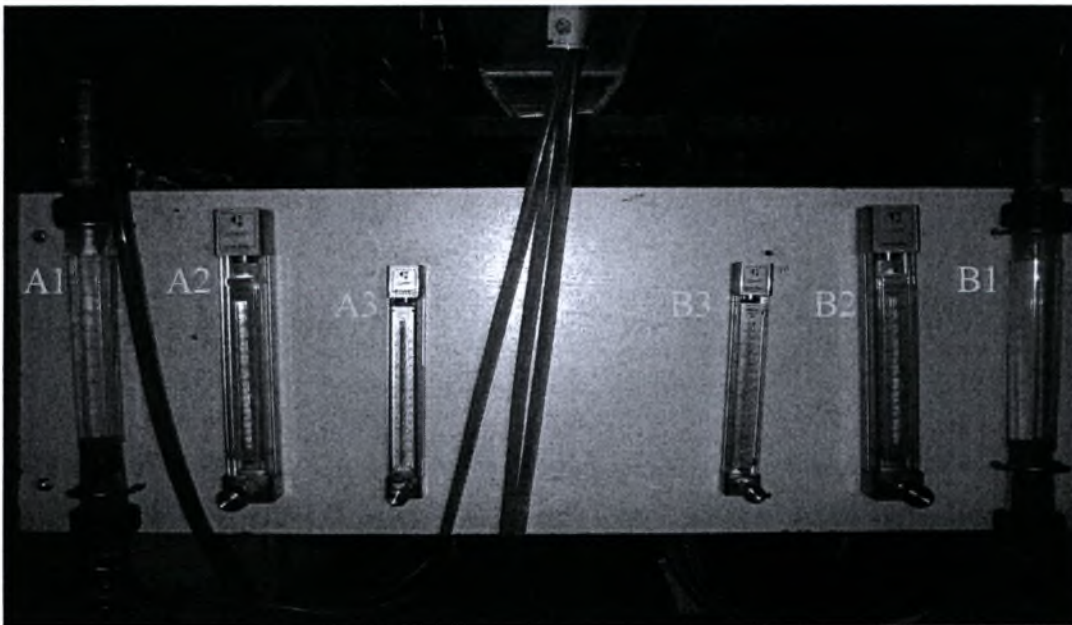


Σχήμα 3.16: Χαρακτηριστικά λειτουργίας φυγοκεντρικής αντλία

Μέτρηση Παροχής – Ροόμετρα

Ένα από τα σημαντικότερα σημεία των πειραμάτων είναι η επίτευξη που απαιτούμενου αριθμού Reynolds. Τον αριθμό αυτόν στα πειράματά μας τον καθορίζει η παροχή. Οπότε η μέτρηση της παροχής είναι μια διαδικασία που απαιτεί υψηλή ακρίβεια, την οποία δεν παρέχουν τα συμβατικά ροόμετρα που διαθέτουμε. Επομένως καταλήγουμε την μέτρηση να την κάνουμε με την συλλογή μιας ποσότητας διαλύματος σε φορητό δοχείο, για ένα δεδομένο εύλογο χρονικό διάστημα (συνήθως μεγαλύτερο των τεσσάρων λεπτών), ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα του χρήστη. Η συλλογή γίνεται στο σημείο που απορρέει το ρευστό από το κανάλι ροής στο δοχείο απάντλησης. Στη συνέχεια, ζυγίζεται αυτή η ποσότητα και σύμφωνα με την περιεκτικότητά της σε γλυκερίνη (24% διάλυματος γλυκερίνης) μετατρέπεται σε παροχή, με μονάδες lt/min.

Παρόλα αυτά στο κύκλωμα πριν τον διανομέα έχουν συνδεθεί δυο διατάξεις από παράλληλα ροόμετρα που δίνουν ενδεικτικά την τιμή της παροχής και μπορεί να ρυθμιστεί προσεγγιστικά η επιθυμητή (σχήμα 3.16).



Σχήμα 3.17: Η διάταξη ροόμετρων

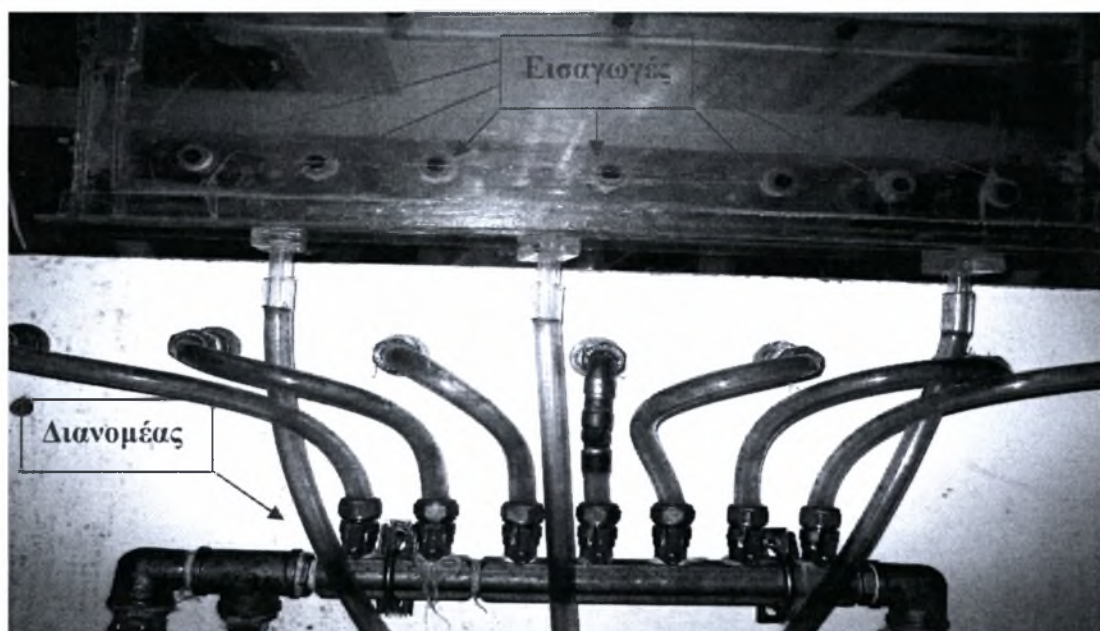
Ροόμετρα A	Δυναμικότητα
A 1	5 Lt/min
A 2	2.1 Lt/min
A 3	0.72 Lt/min

Ροόμετρα B	Δυναμικότητα
B 1	2,35 Lt/min
B 2	4,75 Lt/min
B 3	1,4 Lt/min

Σχήμα 3.18: Οι μέγιστες επιτρεπόμενες παροχές των ροόμετρων

Διανομέας – Δοχείο Κατανομής

Ο ρόλος του διανομέα είναι να διαχωρίζει την εισαγωγή του ρευστού στο πυθμένα του δοχείου κατανομής, σε επτά ισόποσες παροχές. Έτσι, πετυχαίνουμε ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού χωρίς τη δημιουργία δινών που θα διαταράσσανε την ηρεμία της ελεύθερης επιφάνειας. Κατανομή της ροής υπάρχει και στις δύο διατάξεις των ροομέτρων, όπου η παροχή χωρίζεται σε δύο όμοιες από το δοχείο υπερχειλίσης.



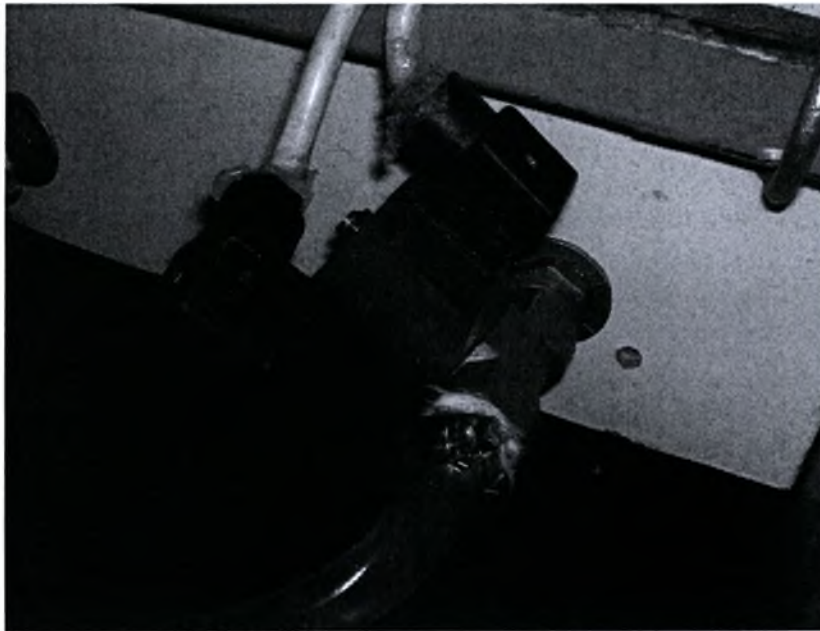
Σχήμα 3.19: Ο διανομέας, οι επτά εισαγωγές και το δοχείο κατανομής

Διαταραχή

Ο στόχος της διαταραχής είναι η δημιουργία «υδραυλικού άλματος» (τεχνητό κύμα) στην έναρξη της ροής, γιατί το ενεργό μήκος του καναλιού δεν είναι αρκετό για τη φυσική εξέλιξη των κυμάτων. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα να μελετηθεί η δυναμική εξέλιξη των κυμάτων κατάντη της ροής.

Το υδραυλικό άλμα επιτυγχάνεται με μία χρονιζόμενη ηλεκτροβαλβίδα ON/OFF (σχήμα 3.19), η οποία είναι συνδεδεμένη με το κάτω μέρος του δοχείου κατανομής διαμέσου τριών σωλήνων $\varnothing 10\text{mm}$ και έπειτα καταλήγει στο δοχείο απάντλησης. Ουσιαστικά, όταν είναι ανοιχτή η ηλεκτροβαλβίδα, παρακάμπτεται η ποσότητα που ρέει μέσω των τριών σωλήνων απ'ευθείας στο δοχείο απάντλησης και μόλις κλείσει η ηλεκτροβαλβίδα αυτή η ποσότητα ακαριαία αυξάνει την ποσότητα στο δοχείο κατανομής και επομένως στιγμιαία την παροχή στο κανάλι (υδραυλικό άλμα). Το ύψος της διαταραχής ρυθμίζεται από μία βάννα που υπάρχει πριν την ηλεκτροβαλβίδα. Ενώ ο χρόνος επιβολής της διαταραχής ρυθμίζεται από έναν ηλεκτρονικό χρονιστή (σχήμα 3.20), στον οποίο

είναι συνδεδεμένη η ηλεκτροβαλβίδα. Με το χρονιστή μπορούμε να ρυθμίσουμε τον χρόνο που θα παραμένει ανοιχτή ή κλειστή η ηλεκτροβαλβίδα.



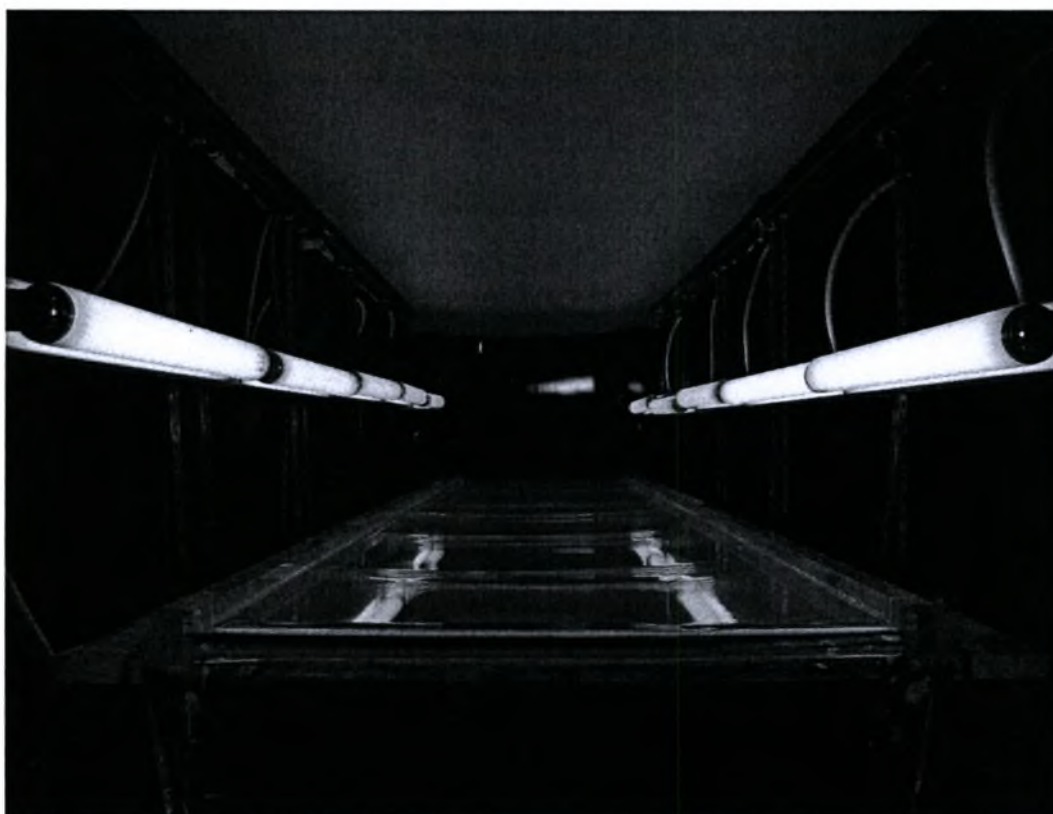
Σχήμα 3.20: Ηλεκτροβαλβίδα



Σχήμα 3.21: Χρονιστής της ηλεκτροβαλβίδας σε λειτουργία, με $T_{on}=1,5\text{sec}$ $T_{off}=0,5\text{sec}$.

3.1.6 Σύστημα φωτισμού

Πάνω από το κανάλι ροής, τοποθετήθηκε η πηγή υπεριώδους φωτός, που είναι απαραίτητη για την εκτέλεση πειραμάτων με την μέθοδο του φθορισμού. Χρησιμοποιήθηκαν δέκα λαμπτήρες υψηλής έντασης (Philips, TL20/05), με εξαρτήματα τροφοδοσίας (ballast, starter) για την ελάττωση των ταλαντώσεων του υπεριώδους φωτός. Οι λαμπτήρες είναι τοποθετημένοι κατά μήκος του καναλιού ροής, σε σταθερή απόσταση 20 cm από το επίπεδο μέτρησης και συμμετρικά ως προς τις άκρες του καναλιού με σκοπό την πιο ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας τους (σχήμα 3.21). Η στήριξη των λαμπτήρων έγινε σε βάσεις από Dexion που βιδώθηκαν στο επάνω μέρος του ικριώματος. Η επιλογή να φτιαχτεί η βάση από Dexion έγινε ώστε να δύναται η ρύθμιση της απόστασης σε ένα εύρος 0-45 cm. Επάνω από τους λαμπτήρες τοποθετήθηκε ριζόχαρτο για να έχουμε ομοιόμορφο επίπεδο πάνω από τη ροή και να μην υπάρχουν παρεμβολές στις φωτογραφίες από άλλα αντικείμενα που υπάρχουν πάνω από αυτό (λήψη φωτογραφιών κάτω από το κανάλι).



Σχήμα 3.22 : Διάταξη των λαμπτήρων και το τοποθετημένο ριζόχαρτο

3.2 Ιδιότητες των ρευστών

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού – γλυκερίνης (24% κ.β. γλυκερίνη). Με την χρησιμοποίηση διαλυμάτων νερού – γλυκερίνης, λόγω μεγαλύτερου ιξώδους είναι εφικτή η απόσβεση τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία δισδιάστατης δομής σε υψηλούς αριθμούς Reynolds και γωνίες κλίσης. Ταυτόχρονα, δίδεται η δυνατότητα δημιουργίας μοναχικών κυμάτων σε μεγαλύτερο εύρος μεγεθών.

Συγκεκριμένα, στοχεύαμε σε διάλυμα 25% κ.β. γλυκερίνης, οπότε αρχικά τοποθετήσαμε 60kg νερού και 20kg γλυκερίνης στο δοχείο απάντλησης (συνολική επιθυμητή ποσότητα 80kg). Θέσαμε σε λειτουργία τη συσκευή για περίπου 30 λεπτά, για να ανακατευτεί το διάλυμα και να γίνει ομοιογενές. Έπειτα πήραμε δείγμα του και γεμίσαμε το ιξωδόμετρο τριχοειδούς σωλήνα μέχρι το ενδεικνυόμενο σημείο. Κατόπιν πιέζοντας την αντλία αναρρόφησης εξάγουμε τον αέρα που υπάρχει στο ιξωδόμετρο, μέχρις ότου το υγρό ξεπεράσει την γραμμή εκκίνησης της χρονομέτρησης. Τέλος αφήνουμε ελεύθερη την αντλία και το υγρό αρχίζει την κάθοδο, μετρούμε τον χρόνο, t (sec) που χρειάζεται το υγρό να διανύσει την απόσταση μεταξύ των γραμμών εκκίνησης και λήξης χρονομέτρησης (σχήμα 3.23). Υπολογίζουμε το κινηματικό ιξώδες, ν από την εξίσωση του κατασκευαστή (Analis):

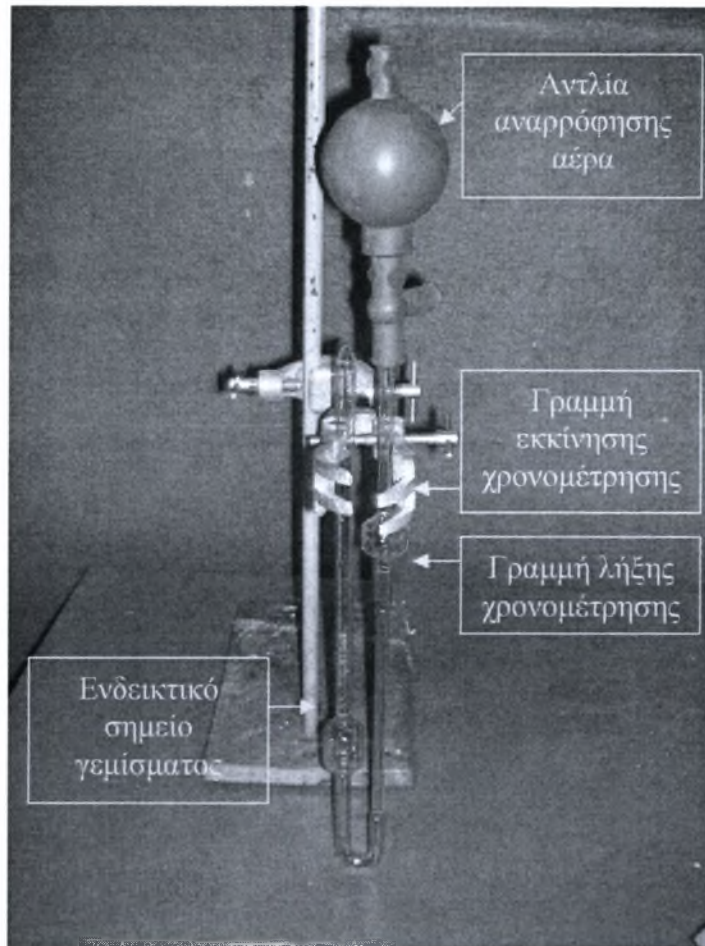
$$\nu = 0,03111 \cdot t$$

Στη συνέχεια βάσει του ιξώδους και από κατάλληλο πίνακα της βιβλιογραφίας [Weast, 1975] (Παράρτημα) προσδιορίζοταν η πυκνότητα και η συγκέντρωση του διαλύματος.

Μετά από πολλαπλές μετρήσεις στην αρχική αναλογία γλυκερίνης – νερού δεν είχαμε το επιθυμητό ποσοστό, έτσι προσθέσαμε και άλλη γλυκερίνη. Έπειτα από πολλές επαναλήψεις των προαναφερθέντων διαδικασιών και αφού σταθεροποιήθηκε τελικά ο χρόνος, t στα 58,5 sec, καταλήξαμε να έχουμε διάλυμα γλυκερίνης 23,91 %.

Η μέτρηση του ιξώδους πραγματοποιείται σε συχνή βάση και πάντοτε στην αρχή και στο τέλος κάθε σειράς μετρήσεων, για δύο λόγους. Ο προσδιορισμός της ακριβούς συγκέντρωσης διαλυμάτων μεγάλης ποσότητας (50-80 liters) απαιτεί τη σωστή ανάμειξη των διαφόρων συστατικών. Επιπλέον, η τάση ατμών του νερού είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από αυτή της γλυκερίνης με αποτέλεσμα ο ρυθμός εξάτμισης του νερού να είναι υψηλότερος (η γλυκερίνη είναι υγροσκοπική). Έτσι, μετά τη πάροδο μεγάλου χρονικού διαστήματος, η σύσταση του διαλύματος αλλάζει καθώς η ροή υγρού υμένα συνίσταται από εξαιρετικά μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το σιλικονούχο υγρό (Sodium Silicate), που επαλείφουμε την επιφάνεια ροής και η χρωστική ουσία που προσθέτουμε στο ρευστό (κεφάλαιο 3.1.5) δεν επηρεάζουν καθόλου τις ιδιότητες του διαλύματος.



Σχήμα 3.23: Ίξωδόμετρο τριχοειδούς σωλήνα

Οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος (23,91% κ.β. γλυκερίνη) σε θερμοκρασία ($25^{\circ}\text{C}\pm 1$) είναι:

- Κινηματικό ιξώδες: $\nu = 1,82 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Πυκνότητα: $\rho = 1055,9 \text{ Kg/m}^3$
- Επιφανειακή τάση: $\sigma = 70\pm 1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$

Ενώ η ροή ορίζεται από τον αριθμό Reynolds ο οποίος ορίζεται ως: $Re = q/\nu = \langle u \rangle h_N / \nu$, όπου q είναι η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους, h_N είναι το πάχος του υμένα κατά Nusselt και $\langle u \rangle$ είναι η μέση ταχύτητα. Η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί επίσης από τον αριθμό Weber, ο οποίος ορίζεται ως εξής: $We = \sigma / \rho \langle u \rangle^2 h_N$.

3.3 Παράμετροι του πειράματος

Η μελέτη γραμμικών και μη-γραμμικών κυμάτων καθώς και η διαδικασία μη-γραμμικής μετάβασης σε τρισδιάστατες δομές προϋποθέτει τη συλλογή μετρήσεων στο χώρο και στο χρόνο.

Ο αριθμός Reynolds, ο οποίος χαρακτηρίζει τη ροή και εκφράζει το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους, υπολογίζεται με βάση τη μέτρηση της ογκομετρικής παροχής ανά μονάδα πλάτους του τοιχώματος. Στις περισσότερες πειραματικές μετρήσεις, το χρησιμοποιούμενο εύρος των αριθμών Re κυμαίνεται από 5 έως 450 (ανάλογα με το είδος ρευστού). Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής αριθμοί Reynolds: 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40 και 45.

Η γωνία κλίσης του καναλιού ρυθμίζει την ταχύτητα εξέλιξης των φαινομένων και το εύρος της, για τη ροή υγρού υμένα πάνω από επίπεδο τοίχωμα και σε στην παρούσα περίπτωση ρυθμίστηκε στις $3,16^\circ$.

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα γλυκερίνης - νερού με συγκέντρωση 24% κ.β σε γλυκερίνη. Το είδος του διαλύματος χαρακτηρίζεται από τον αριθμό Kapitza, ο οποίος υπολογίζεται άμεσα, αφού πρώτα μετρηθούν οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος. Η θερμοκρασία λειτουργίας συμπίπτει με αυτή του περιβάλλοντος χώρου, η οποία παραμένει σταθερή στους 25°C . Μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας λειτουργίας του πειράματος δεν επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου ρευστού, κάτι το οποίο ελέγχθηκε συστηματικά κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Στη περίπτωση της ροής λεπτού υγρού υμένα κάτω από την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, η συχνότητα της διαταραχής αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικά της ροής. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν οι συχνότητες που χρησιμοποιήσαμε ήταν 0,167 και 0,5 Hz. Εκτός από τη συχνότητα της διαταραχής, το χρονικό διάστημα εισαγωγής επιπλέον ρευστού στο κανάλι αποτελεί μία επιπρόσθετη παράμετρο, δηλαδή η χρονική διάρκεια που είναι κλειστή η ηλεκτροβαλβίδα (T_{off}). Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με το είδος των δημιουργούμενων μοναχικών κυμάτων και ήταν $T_{\text{off}} = 1\text{sec}$ για την επιβαλλόμενη συχνότητα διαταραχής $f_1 = 0,167\text{ Hz}$ και $T_{\text{off}} = 0,5\text{sec}$ για την $f_2 = 0,5\text{ Hz}$. Ο προσδιορισμός όλων των παραμέτρων πραγματοποιείται σε κάθε σειρά πειραμάτων και αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επεξεργασία τους.

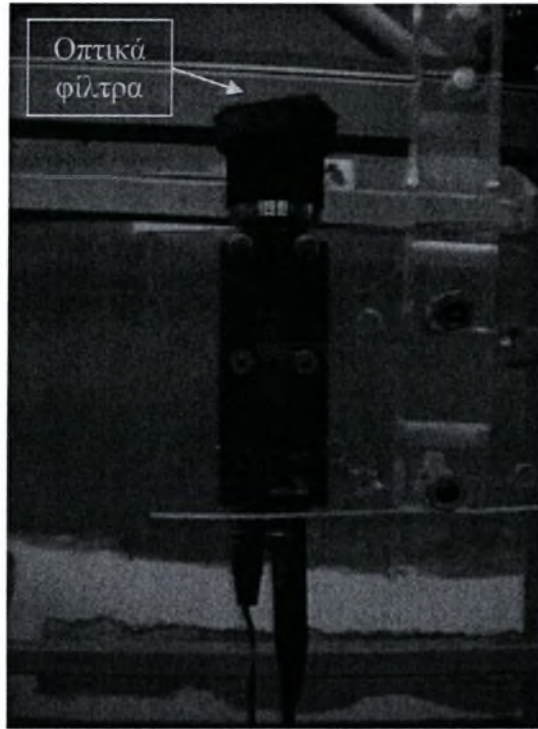
3.4 Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή των πειραματικών δεδομένων είναι η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό, όπως αναπτύχθηκε από τον Βλαχογιάννη (2001) σε παλαιότερη διδακτορική μελέτη. Με την χρήση αυτής της μεθόδου και ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία έχουμε την δυνατότητα να προσδιορίσουμε το πάχος του υμένα, άρα και των κυμάτων, χωρο-χρονικά.

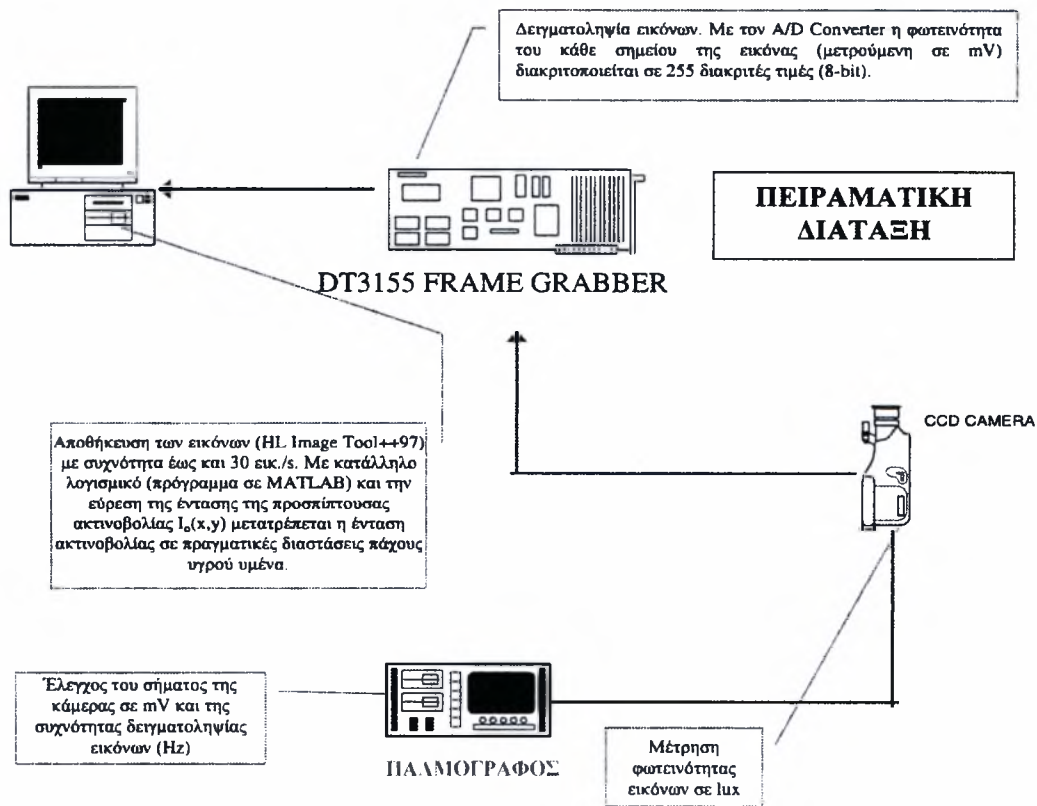
Σύμφωνα με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, η προσθήκη μικρής ποσότητας (250ppm) κατάλληλης χρωστικής ουσίας στο διάλυμα, έχει ως αποτέλεσμα τον φθορισμό του διαλύματος κατά την προσβολή του με υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Η χρωστική ουσία που χρησιμοποιείται είναι η ουρανίνη (Sodium Salt of Fluorescein-C₂₀H₁₀O₅Na₂), η οποία όταν απορροφά υπεριώδες φως φθορίζει και εκπέμπει ορατό πράσινο-κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 525 – 580 nm. Ενώ όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η προσθήκη της χρωστικής ουσίας δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του διαλύματος.

Πάνω από την περιοχή των μετρήσεων τοποθετήθηκε η πηγή υπεριώδους φωτός, που είναι, όπως ήδη έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 3.1.6, δέκα λαμπτήρες υψηλής έντασης τοποθετημένοι κατά μήκος του καναλιού ροής (σχήμα 3.22).

Κάτω από το κανάλι ροής είναι τοποθετημένη ψηφιακή κάμερα για την συλλογή εικόνων (σχήμα 3.24). Ο τύπος της κάμερας είναι CCD (Sony XC-77/77CE). Η συγκεκριμένη κάμερα η οποία είναι ασπρόμαυρη, έχει πολύ καλή ευαισθησία στο φως (0,5lux) και αναλογία σήματος θορύβου (50dB), με ταχύτητα δειγματοληψίας 50εικόνες/sec. Για την συλλογή και την αποθήκευση των εικόνων χρησιμοποιείται κάρτα συλλογής δεδομένων (DT3155 Frame Grabber Board – Data Translation) και κατάλληλο λογισμικό. Η κάρτα έχει δυνατότητα για μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας 30εικόνες/sec για συχνότητα 60Hz ή 25εικόνες/sec για συχνότητα 50Hz. Η ικανότητα αποθήκευσης εικόνων είναι συνάρτηση της διαθέσιμης μνήμης του υπολογιστή και της ταχύτητας του σκληρού δίσκου. Οι εισερχόμενες εικόνες ψηφιοποιούνται σε 640x480 pixels ή 768x576pixels με ανάλυση 8bits. Οι δυνατότητες αποθήκευσης της κάρτας συλλογής εικόνων, ανάλογα με τη διαθέσιμη μνήμη του υπολογιστή, είναι 75εικόνες – 24MB – 640x480pixels ή 50εικόνες – 24MB – 768x576pixels. Η περιοχή η οποία αποτυπώνεται στην εικόνα μπορεί να αλλάξει μεταφέροντας την κάμερα πιο κοντά ή πιο μακριά από το κανάλι. Για μικρότερες μεταβολές χρησιμοποιείται κατάλληλος φακός εστίασης. Έτσι μπορούμε να πάρουμε εικόνες σε μικρή περιοχή με πολύ μεγάλη ακρίβεια ή σε μεγαλύτερη χωρίς όμως την ίδια ψηφιοποίηση. Παρακάτω στο σχήμα 3.25 παρουσιάζεται το διάγραμμα συλλογής δεδομένων με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό.

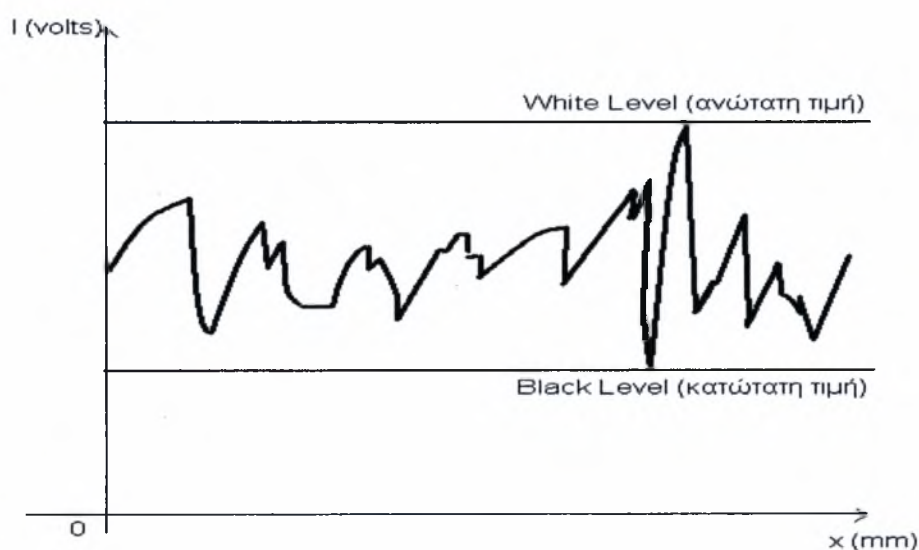


Σχήμα 3.24: Ψηφιακή κάμερα CCD (Sony XC-77/77CE)



Σχήμα 3.25: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

Όπως προαναφέρθηκε, η κάθε εικόνα μας δίνει πληροφορίες για την ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον υμένα. Πιο αναλυτικά, στο κάθε pixel της εικόνας αντιστοιχεί μια διακριτή τιμή η οποία αποτελεί το μέγεθος μέτρησης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του υμένα. Δεδομένου ότι ο αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας (A/D Converter) είναι διακριτής ικανότητας 8-bit, κάθε σήμα χωρίζεται σε 256 διακριτές τιμές. Το 0 αντιστοιχεί στο μαύρο και το 255 στο λευκό. Θεωρώντας την πιο χαμηλή τιμή έντασης, δηλαδή αυτή που αντιστοιχεί στο πιο σκούρο pixel της εικόνας, ως χαμηλότερη τιμή της κλίμακάς μας (0) και την πιο υψηλή τιμή, αυτή που αντιστοιχεί στο πιο φωτεινό σημείο της εικόνας, ως το μέγιστο της κλίμακάς μας (255), μπορούμε να πετύχουμε την πιο λεπτομερή ανάλυση του σήματος. Με άλλα λόγια ο άξονας y του διαγράμματος του σχήματος 3.26 μπορεί να χωριστεί σε 256 σημεία. Αν θεωρήσουμε ότι το πρώτο δεν αντιστοιχεί στην τιμή 0 αλλά στην κάτω γραμμή, και το ανώτερο στην πάνω γραμμή, η ανάλυση του σήματός θα είναι πολύ λεπτομερέστερη. Περιορίζοντας, λοιπόν, τα επίπεδα «λευκού» και «μαύρου» (White – Black Level) η ακρίβεια της μέτρησης του πάχους του υμένα μπορεί να είναι της τάξης των 5 μ m. Βέβαια, την τιμή της έντασης που παίρνουμε για την εικόνα έχει επηρεάσει και ο θερμικός θόρυβος η παρουσία του οποίου είναι αναπόφευκτη σε κάθε ψηφιακό σήμα. Η τιμή του σ' αυτή την περίπτωση είναι εύκολο να μετρηθεί υπολογίζοντας τα mV που φαίνεται να ακτινοβολούνται όταν ο φακός της κάμερας είναι καλυμμένος (ακτινοβολία από τον υμένα μηδενική).



Σχήμα 3.26: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο/pixel της εικόνας

Σύμφωνα με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, το τοπικό πάχος υμένα $h(x,y,t)$ είναι γραμμικά ανάλογο με την ένταση του φωτός $I(x,y,t)$ που εκπέμπεται από τον φθορίζοντα υμένα. Ο Μ.Βλαχογιάννης (2001) επαλήθευσε τη γραμμικότητα μεταξύ του θεωρητικά προβλέψιμου πάχους

και της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, με ελέγχους σε διάφορα σημεία του οπτικού πεδίου. Έτσι η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές παραμέτρους είναι:

$$I(x,y,t) = \alpha(x,y) * h(x,y,t) + \beta(x,y) \quad (3.1)$$

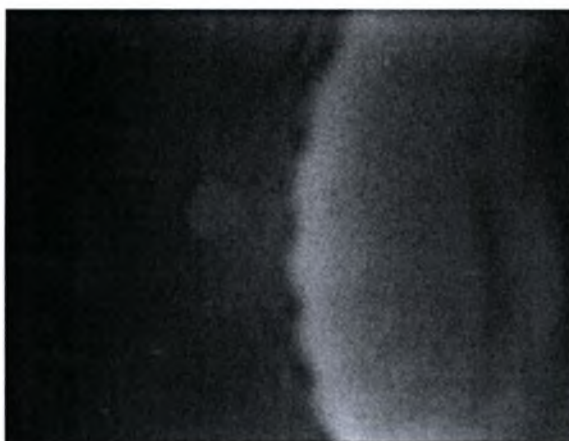
όπου α, β οι συντελεστές της γραμμικής σχέσης. Οι δυο αυτοί συντελεστές εξαρτώνται από το είδος του ρευστού, την απόσταση των λαμπτήρων από το τοίχωμα, τη συγκέντρωση της χρωστικής ουσίας στο διάλυμα, το είδος της χρωστικής ουσίας και το είδος των λαμπτήρων φθορισμού. Επίσης οι συντελεστές αυτοί είναι συνάρτηση της θέσης μέτρησης διότι η κατανομή της υπεριώδους ακτινοβολίας και επομένως και της εκπεμπόμενης από τον υμένα ακτινοβολίας δεν είναι ομοιόμορφη. Συνεπώς, οποιαδήποτε μεταβολή σε κάποια από τις παραπάνω παραμέτρους του πειράματος θα είχε ως αποτέλεσμα την μεταβολή της παραπάνω σχέσης. Για το λόγο αυτό οι παράμετροι αυτοί καθορίζονται στην αρχή κάθε σειράς πειραμάτων και υπολογίζονται οι σταθερές α, β για τις καθορισμένες συνθήκες.

Επειδή ο στόχος μας είναι η συλλογή εικόνων που δίνουν πληροφορίες σχετικά με την ένταση του φωτός που εκπέμπει ο υμένας, πιθανές παρεμβολές εξωτερικού φωτός είναι ανεπιθύμητες. Αλλά στην περιοχή του πειράματος υπάρχουν και άλλες πηγές φωτός, όπως αυτή του φυσικού φωτός ή του φωτισμού του εργαστηρίου. Αυτές οι πηγές είναι πιθανό να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του πειράματός μας και να αλλάζουν και την τιμή των συντελεστών α και β . Αλλά ακόμα και στην περίπτωση που θα μένουν σταθερές, η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας που θα λαμβάνει η κάμερα θα μειώνει την ακρίβεια μέτρησης του πάχους του υμένα. Για να αποφύγουμε την επίδραση άλλων πηγών φωτός έχει προσαρμοσθεί πάνω στον φακό της κάμερας συνδυασμός δύο οπτικών φίλτρων (yellow subtractive – green corrector της Edmund Scientific). Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν να περάσει στην κάμερα ακτινοβολία ορατού φωτός σε εύρος μήκους κύματος μεταξύ 500 και 580nm, στην περιοχή δηλαδή που εκπέμπει ο χρωματισμένος υμένας κάτω από την επίδραση του υπεριώδους φωτός (σχήμα 3.24).

3.4.1 Επεξεργασία δεδομένων

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει ο σκοπός της μεθόδου είναι η συλλογή εικόνων, οι οποίες μας δίνουν πληροφορίες για την ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον υμένα και συνεπώς για το πάχος του υμένα σε εκείνο το σημείο. Αν η ένταση του φωτός σε κάποιο σημείο είναι μικρή, δηλαδή το χρώμα του είναι σχεδόν μαύρο, τότε εκείνο το σημείο έχει πολύ μικρό πάχος υμένα. Αντίθετα αν το χρώμα του πλησιάζει το άσπρο εκείνο το σημείο έχει μεγάλο πάχος υμένα. Για καλύτερη κατανόηση παρουσιάζουμε παρακάτω στο σχήμα 3.28 μία τέτοια εικόνα, όπου υπάρχει ένα τρισδιάστατο κύμα παραβολικής μορφής με φορά προς τα αριστερά. Παρατηρούμε το ανοιχτό γκρι

χρώμα που έχει το κύμα, λόγω του μεγάλου πάχους και μπροστά από αυτό σκούρη περιοχή λόγω μικρότερου πάχους. Στην κορυφή του κύματος βλέπουμε πέντε βαθουλώματα που προδίδουν την τρισδιάστατη μορφή. Ενώ η μορφή του κύματος είναι παραβολική, διότι όπως έχουμε εξηγήσει και στο κεφάλαιο 2 στα τοιχώματα ισχύει η συνθήκη μη-ολίσθησης. Όμως οι πληροφορίες που λαμβάνουμε με την οπτική παρατήρηση είναι μόνο ποιοτικές. Για να έχουμε ποσοτικές πληροφορίες θα πρέπει να επεξεργαστούμε τις εικόνες με κάποια υπολογιστικά προγράμματα. Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι το «Image Tool», το «HL Image++98» και το «MATLAB».



Σχήμα 3.27: Φωτογραφία τρισδιάστατου κύματος

Συλλογή εικόνων

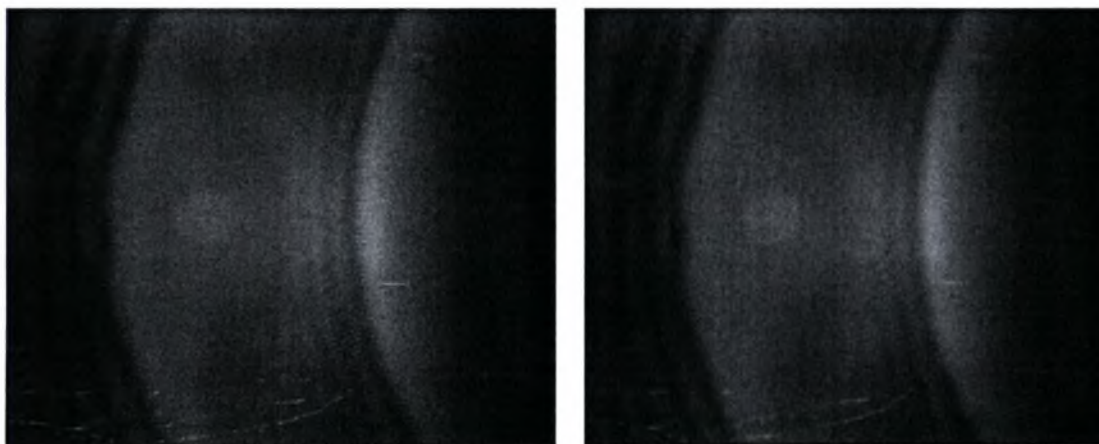
Αρχικά πριν ξεκινήσουμε σε κάθε πείραμα την λήψη εικόνων του υμένα με διαταραχή, θα πρέπει να βαθμονομήσουμε την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό για τις ανάλογες συνθήκες. Η βαθμονόμηση γίνεται λαμβάνοντας είκοσι φωτογραφίες για τουλάχιστον πέντε διαφορετικούς αριθμούς Reynolds χωρίς την επιβολή εξωτερικής διαταραχής. Κάθε φορά πριν πάρουμε τις εικόνες θα πρέπει να ρυθμίζουμε κατάλληλα τα επίπεδα «λευκού» και «μαύρου» (White – Black Level). Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιλογή των αριθμών είναι να μην έχουμε καθόλου κυματισμούς στη ροή. Με αυτόν τον τρόπο μετά από κατάλληλη ψηφιακή επεξεργασία, υπολογίζονται οι συντελεστές της εξίσωσης 3.1. Έπειτα είμαστε έτοιμοι για την λήψη εικόνων με κυματισμούς. Κάθε φορά παίρνουμε 200 συνεχόμενες φωτογραφίες με χρονική διαφορά 0,1sec, ώστε να πετύχουμε αρκετές διαταραχές στις εικόνες μας. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα επιλογής στην περίπτωση που έχουμε σφάλμα κάποια χρονική στιγμή (π.χ. προσωρινή δυσλειτουργία της ηλεκτροβαλβίδας).

Ψηφιακό φιλτράρισμα

Μετά την λήψη των εικόνων, το επόμενο στάδιο είναι η επεξεργασία τους, για την διόρθωση των πιθανών μόνιμων σφαλμάτων που εμφανίζονται σε αυτές. Η διόρθωση γίνεται με την χρήση του υπολογιστικού προγράμματος επεξεργασίας εικόνων «Image Tool». Το οποίο χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ψηφιακό φίλτρο, εξομαλύνει τις εικόνες. Το ψηφιακό φίλτρο έχει την δυνατότητα να

συγκρίνει κάθε pixel με τα γειτονικά του και αν κάποιο έχει μεγάλη διαφορά φωτεινότητας από τα άλλα, τότε συσχετίζει την τιμή του με αυτή των γειτονικών, με αποτέλεσμα η διαφορά να μειώνεται. Για την επεξεργασία των εικόνων του πειράματος χρησιμοποιήσαμε το φίλτρο Gaussian 7x7. Ένα παράδειγμα εξομάλυνσης εικόνας με χρήση φίλτρου, φαίνεται στο σχήμα 3.29. Πρέπει να δοθεί προσοχή στην επιλογή του φίλτρου, διότι υπάρχει η περίπτωση να απαλείψουμε κάποια χρήσιμα δεδομένα, όπως κύματα μικρού μήκους.

Επειδή ο αριθμός των εικόνων είναι πολύ μεγάλος σε κάθε σειρά πειραμάτων η διαδικασία φιλτραρίσματος με το πρόγραμμα «Image Tool» ήταν αδύνατον να πραγματοποιηθεί χειροκίνητα, οπότε χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα σε Visual Basic, το οποίο αυτοματοποιεί την διαδικασία του φιλτραρίσματος.



Σχήμα 3.28: (a) Εικόνα πριν την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης, (b) μετά την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης.

Υπολογισμός της σχέσης ακτινοβολίας – πάχους υμένα (βαθμονόμηση)

Στη συνέχεια της επεξεργασίας μας, με τη βοήθεια του προγραμματισμού MATLAB, είναι δυνατή η μετατροπή της κάθε εικόνας σε πίνακα, όπου η τιμή της έντασης του κάθε pixel της εικόνας θα αντιστοιχεί στην τιμή ενός στοιχείου του πίνακα. Έτσι κάθε εικόνα με 576x768 pixels μετατρέπεται σε πίνακα διαστάσεων 576x768, όπου το κάθε στοιχείο του πίνακα θα παίρνει τιμή από 0 ως 255, ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας στο συγκεκριμένο pixel.

Το πρώτο μέρος της επεξεργασίας των εικόνων αφορά τα δεδομένα τα οποία πήραμε για την βαθμονόμηση της πειραματικής μεθόδου και την εξαγωγή των συντελεστών α και β . Αρχικά αντιστοιχίζουμε τις διακριτές τιμές του κάθε στοιχείου του κάθε πίνακα σε mVolts μέσω της σχέσης:

$$I_{0_{\text{new}}}(\mathbf{i}, \mathbf{j}) = I_0(\mathbf{i}, \mathbf{j}) \times \mathbf{q} + \mathbf{BL}(\mathbf{i}, \mathbf{j}) - \mathbf{Noise}(\mathbf{i}, \mathbf{j}), \quad \mathbf{i} = 1, 576 \ \& \ \mathbf{j} = 1, 768 \quad (3.2)$$

Στην παραπάνω σχέση, q είναι η αντιστοιχία μεταξύ διακριτής τιμής και mVolts με:

$$q = \frac{WL - BL}{255}$$

όπου WL και BL οι τιμές του άσπρου και μαύρου επιπέδου ψηφιοποίησης αντίστοιχα σε mVolts που επιλέγουμε κατά τη λήψη των εικόνων με το πρόγραμμα HLImage++98, και το Noise(I,j) είναι το επίπεδο του θερμικού θορύβου σε mVolts το οποίο ορίζεται ως

$$\text{Noise}(i, j) = I_{oi}(i, j) \times \frac{WL_{\max} - BL_{\min}}{255} + BL_{\min}(i, j), \quad i = 1, 576 \ \& \ j = 1, 768 \quad (3.3)$$

όπου $I_{oi}(i, j)$ είναι η διακριτή τιμή (0 ως 255) του κάθε στοιχείου του πίνακα της εικόνας που έχουμε λάβει με καλυμμένο το φακό της κάμερας και $WL_{\max}=351,1$, $BL_{\min}=1,275$ είναι οι ακραίες τιμές του άσπρου και μαύρου επιπέδου ψηφιοποίησης αντίστοιχα σε mVolts, που μας επιτρέπει το πρόγραμμα HLImage++98 να επιλέξουμε.

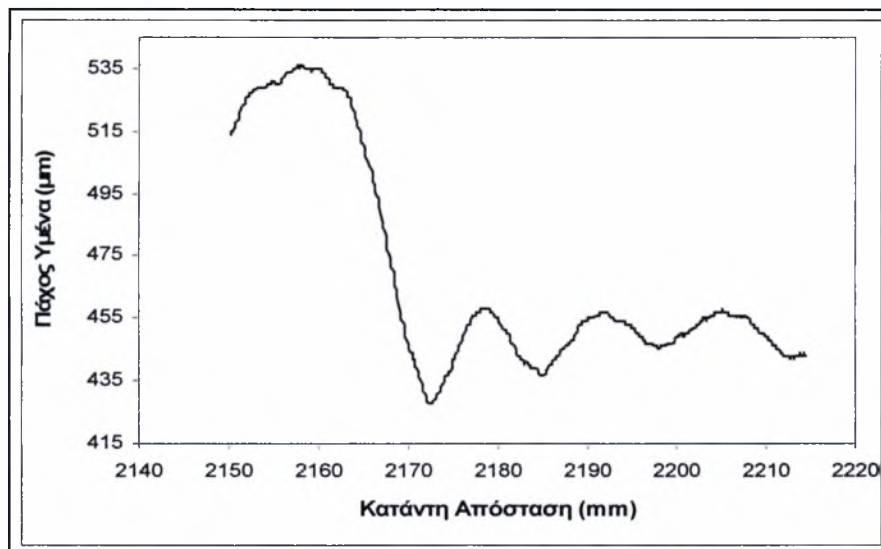
Όπως είπαμε για την βαθμονόμηση παίρνουμε 20 εικόνες σε τουλάχιστον 5 διαφορετικούς αριθμούς Re. Οι πίνακες που δίνουν τις τιμές σε διαφορετικές εικόνες για τον ίδιο Re προστίθενται, και τα στοιχεία του συνολικού πίνακα που προκύπτει διαιρούνται με το συνολικό αριθμό των εικόνων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε στατιστικά πιο σίγουρα αποτελέσματα για την τιμή της έντασης σε κάθε σημείο.

Έχοντας υπολογίσει τον πίνακα, για κάθε αριθμό Re, ο οποίος δίνει τη μέση ένταση ακτινοβολίας του κάθε pixel σε mVolts, μπορούμε να συσχετίσουμε γραμμικά τη μέση ένταση ακτινοβολίας του κάθε pixel σε mVolts με το θεωρητικά υπολογισμένο πάχος του υμένα κατά Nusselt h_N , το οποίο είναι σταθερό σε κάθε pixel, για κάθε αριθμό Re της ευσταθούς περιοχής, με βάση τη σχέση (3.1). Η γραμμική συσχέτιση γίνεται με πολυωνυμική προσέγγιση πρώτου βαθμού με την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων. Το MatLab μας παρέχει έτοιμη συνάρτηση για την εφαρμογή της μεθόδου (εντολή Polyfit). Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι ο υπολογισμός των πινάκων των συντελεστών $\alpha(576, 768)$ και $\beta(576,768)$ για κάθε pixel. Επομένως, με τον υπολογισμό των γραμμικών συντελεστών α , β γίνεται γνωστή η μορφή της σχέσης έντασης ακτινοβολίας – τοπικού πάχους υμένα και άρα είναι δυνατός ο υπολογισμός του πάχους του υμένα σε οποιονδήποτε αριθμό Re εκτός της ευσταθούς περιοχής.

Επεξεργασία εικόνων με επιβαλλόμενη διαταραχή

Στη συνέχεια περνάμε στην επεξεργασία των δεδομένων που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ανάλυση. Ο αριθμός των εικόνων προς επεξεργασία σε αυτή την περίπτωση, για κάθε αριθμό Re, είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που λαμβάνονται στην ευσταθή περιοχή και εξαρτάται από το χρονικό διάστημα για το οποίο έγινε η δειγματοληψία. Συνήθως ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 0,1 εικόνες/sec. Η διαδικασία που ακολουθείται και σε αυτή την περίπτωση είναι

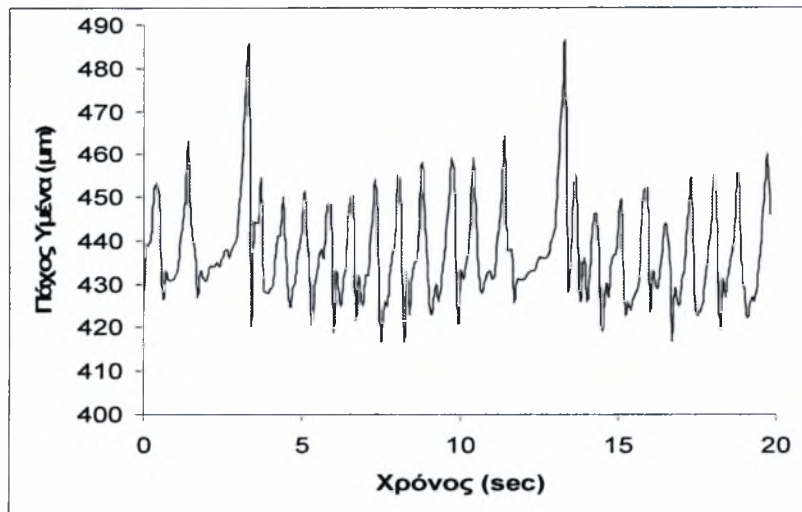
παρόμοια με αυτή της επεξεργασίας των δεδομένων της ευσταθούς περιοχής. Έτσι λοιπόν, κάθε εικόνα μετατρέπεται σε ένα πίνακα 576x768, όπου το κάθε στοιχείο έχει μια διακριτή τιμή (0 ως 255). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε mVolts μέσω των σχέσεων που δόθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο χρησιμοποιώντας σαν WL και BL τιμές οι οποίες ορίστηκαν σαν χαμηλότερη και υψηλότερη τιμή της έντασης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Έπειτα, η σχέση που έχει υπολογιστεί ότι συνδέει την ακτινοβολία με το μέσο πάχος του υμένα μπορεί να μας δώσει το πάχος του υμένα σε κάθε pixel της εικόνας (σχήμα 3.30).



Σχήμα 3.29: Χωρική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα

Από τις τιμές του πίνακα που δίνει το πάχος του υμένα σε κάθε σημείο μπορούμε να πάρουμε πληθώρα άλλων πληροφοριών. Έτσι, για παράδειγμα, μπορούμε να έχουμε την χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου (σχ.3.31). Η απεικόνιση του πάχους του υμένα σε διάφορα σημεία κατά μήκος του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου ($h(x_0, y_0, t)$), μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη βασική αρμονική της συχνότητας ταλάντωσης των σημείων. Επίσης, μπορεί να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με το μέσο ύψος των κυμάτων και το μέσο πάχος υμένα.

Συγχρόνως, μπορούμε να έχουμε την χωρική κατανομή της ελεύθερης επιφάνειας, είτε στη κατεύθυνση της ροής είτε εγκάρσια ($h(x, y_0, t)$ ή $h(x_0, y, t)$). Η απεικόνιση των κατανομών του πάχους του υμένα σε διαδοχικές χρονικές στιγμές έχει μεγάλη πρακτική αξία, γιατί μας δίνει σημαντικές πληροφορίες για το μήκος του κύματος και την ταχύτητα του και για τις εξελίξεις αυτών των μεγεθών κατάντη της ροής. Ακόμα, μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για το είδος των κυμάτων και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, κυρίως μέσω της μορφής τους.



Σχήμα 3.30: Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου.

Κεφάλαιο 4 Πειραματικά Αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα πειραματικά αποτελέσματα ροής λεπτού υγρού υμένα διαλύματος νερού - γλυκερίνης στο μεγάλο κανάλι ροής. Διενεργήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων, όπου σε όλα χρησιμοποιήθηκε διάλυμα γλυκερίνης 24% ($\nu=1,82 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho=1055,9 \text{ Kg/m}^3$). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις περιοχές του υμένα. Η κλίση του καναλιού διατηρήθηκε σταθερή στις 3,16 μοίρες. Η συχνότητα διαταραχής (f) μεταβαλλόταν σε δύο τιμές, ενώ η παροχή της παρέμενε σταθερή για όλα τα πειράματα. Τα πειράματα που διενεργήθηκαν είναι τα εξής:

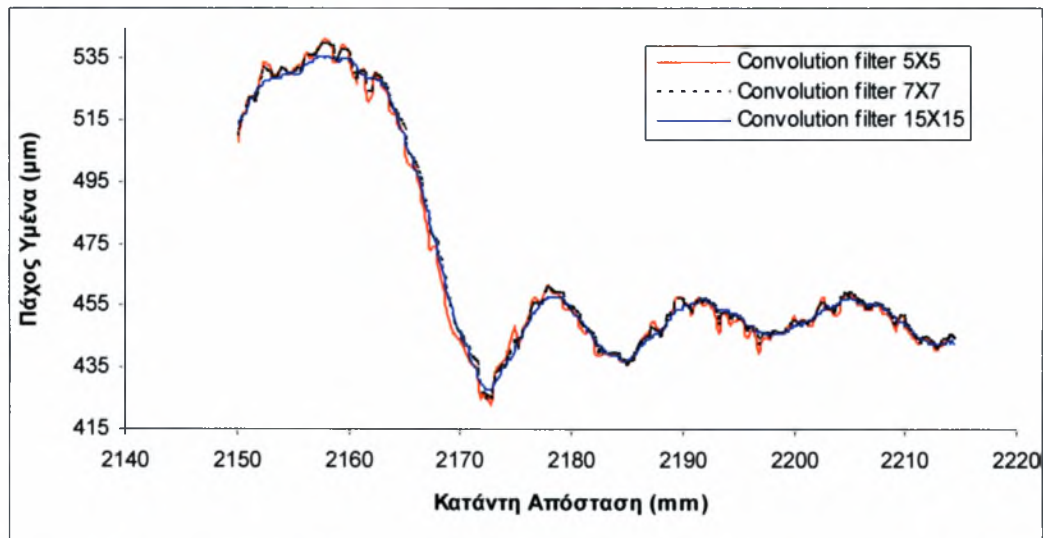
- Στην πρώτη σειρά πειραμάτων οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 330 mm έως 590 mm από το σημείο έναρξης της ροής στο κεκλιμένο επίπεδο, ενώ η συχνότητα διαταραχής μεταβαλλόταν από 0,167Hz σε 0,5Hz και ο χρόνος επιβολής της ήταν $T_{on}= 5 \text{ sec}$ και $T_{on}= 1,5 \text{ sec}$ αντίστοιχα.
- Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 1330 mm έως 1590 mm από το σημείο έναρξης της ροής στο κεκλιμένο επίπεδο, ενώ η συχνότητα διαταραχής μεταβαλλόταν επίσης από 0,167Hz σε 0,5Hz και ο χρόνος επιβολής της ήταν $T_{on}= 5 \text{ sec}$ και $T_{on}= 1,5 \text{ sec}$ αντίστοιχα.
- Στην τρίτη και τελευταία σειρά πειραμάτων οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 2330 mm έως 2590 mm από το σημείο έναρξης της ροής στο κεκλιμένο επίπεδο, με τις ίδιες συχνότητες διαταραχής και τους ίδιους αντίστοιχους χρόνους επιβολής.

Στόχος των πειραμάτων ήταν η παρατήρηση της μετάβασης της ροής του υγρού υμένα από την περιοχή της ευστάθειας στην περιοχή της αστάθειας. Η μετάβαση αυτή για τη συγκεκριμένη γωνία κλίσης του επιπέδου, λαμβάνει χώρα σε αριθμούς από $Re=15$ έως $Re=45$.

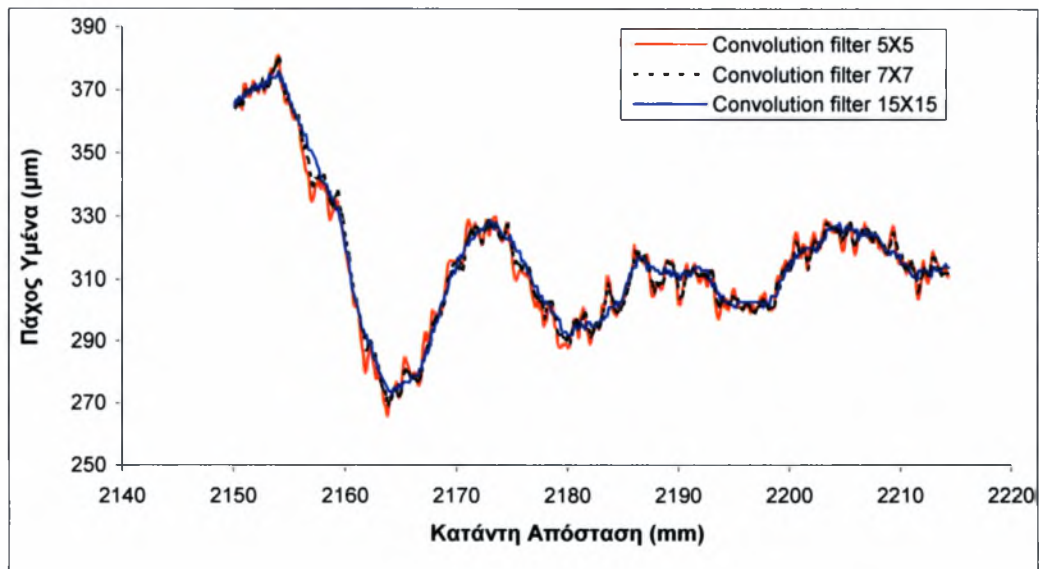
4.2 Επιλογή ψηφιακού φίλτρου

Κατά την επεξεργασία των εικόνων, πρώτος στόχος μας είναι να ελαχιστοποιήσουμε την επίδραση κάποιων ανεπιθύμητων παραγόντων στα δεδομένα της έντασης. Αυτή η διαδικασία όμως εμπεριέχει τον κίνδυνο να απαλειφθούν κάποια δεδομένα, όπως κύματα με μικρό μήκος κύματος. Για

την κατάλληλη επιλογή φίλτρου επεξεργαστήκαμε κάποιες εικόνες από τα πειράματα με τα ακόλουθα φίλτρα: Gaussian filter 5x5, 7x7 και 15x15. Παρακάτω στα σχήματα 4.1 και 4.2, παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα με τα αποτελέσματα από αυτή την επεξεργασία.



Σχήμα 4.1 Γραφική απεικόνιση κυμάτων σε $Re=25$, $f=0.1$ Hz ($Ton=0.5$ sec)



Σχήμα 4.2 Γραφική απεικόνιση κυμάτων σε $Re=19$, $f=0.1$ Hz ($Ton=0.25$ sec)

Ως κατάλληλο για την εφαρμογή του στην επεξεργασία των εικόνων, κρίθηκε το φίλτρο Gaussian filter 7x7, το οποίο εξομαλύνει ικανοποιητικά τις μετρήσεις μας και αφαιρεί τις ατέλειες και τον θόρυβο ενώ ταυτόχρονα δεν αλλοιώνει καθόλου την δομή των κυμάτων κατάντη της ροής.

4.3 Ανάλυση Πειραμάτων

- Πρώτη σειρά πειραμάτων

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων, σε απόσταση 33 cm έως 59 cm από το σημείο έναρξης της ροής (Θέση α) επιβλήθηκαν δύο συχνότητες διαταραχών $f_1=0,167$ Hz ($T_{on}=5$ sec) και $f_2=0,5$ Hz ($T_{on}=1,5$ sec) για τους εξής αριθμούς Reynolds: 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των πειραματικών μετρήσεων σε αυτή την θέση:

Πίνακας 4.1: Στοιχεία πρώτης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 330 cm έως 590 cm από την έναρξη της ροής.

W=0.47m - Θέση κάμερας: a - Μήκος Πεδίου: 260mm											
Διάλυμα Γλυκερίνης: 23.91% - $\nu=1.82 \cdot 10^{-6}$ m ² /s - $\rho=1055.9$ Kg/m ³											
α/α	Q (Kg/min)	Re	Frame Name	White Level	Black Level	Number Of Frame	Κλίση	D (m)	Time Delay (ms)	h_k (μ m)	Σχόλια
Βαθμονόμηση											
1	0.985	18.19	flata3#16gl24re18a	374320	279710	20	3.16	0.33	100	693.93	
2	0.92	16.99	flata3#16gl24re17a	374320	277320	20	3.16	0.33	100	678.32	
3	0.85	15.69	flata3#16gl24re16a	374320	274930	20	3.16	0.33	100	660.66	
4	0.76	14.03	flata3#16gl24re14a	374320	271345	20	3.16	0.33	100	636.47	
5	0.65	12	flata3#16gl24re12a	374320	266565	20	3.16	0.33	100	604.15	
6	0.54	9.97	flata3#16gl24re10a	374320	259395	20	3.16	0.33	100	567.94	
Διαταραχή: 5 sec ON - 1 sec OFF											
7	0.81	14.95	flata3#16gl24v1#5re15a	358840	268955	200	3.16	0.33	100	650.13	
8	0.96	17.72	flata3#16gl24v1#5re18a	364000	273735	200	3.16	0.33	100	688.01	
9	1.1	20.31	flata3#16gl24v1#5re20a	366580	278515	200	3.16	0.33	100	719.95	
10	1.35	24.92	flata3#16gl24v1#5re25a	376900	286880	200	3.16	0.33	100	770.81	
11	1.63	30.09	flata3#16gl24v1#5re30a	384640	291660	200	3.16	0.33	100	820.79	
12	1.9	35.08	flata3#16gl24v1#5re35a	387220	292855	200	3.16	0.33	100	863.82	
13	2.16	39.88	flata3#16gl24v1#5re40a	402700	301220	200	3.16	0.33	100	901.55	
14	2.43	44.86	flata3#16gl24v1#5re45a	405280	306000	200	3.16	0.33	100	937.65	
Διαταραχή: 1.5 sec ON - 0.5 sec OFF											
15	0.81	14.95	flata3#16gl24v05#15re15a	351100	270150	200	3.16	0.33	100	650.13	
15	0.98	18.09	flata3#16gl24v05#15re18a	358840	274930	200	3.16	0.33	100	692.75	
16	1.09	20.12	flata3#16gl24v05#15re20a	364000	278515	200	3.16	0.33	100	717.76	
17	1.36	25.11	flata3#16gl24v05#15re25a	374320	284490	200	3.16	0.33	100	772.71	
18	1.63	30.09	flata3#16gl24v05#15re30a	384640	289270	200	3.16	0.33	100	820.79	
19	1.9	35.08	flata3#16gl24v05#15re35a	397540	294050	200	3.16	0.33	100	863.82	
20	2.17	40.06	flata3#16gl24v05#15re40a	402700	298830	200	3.16	0.33	100	902.94	
21	2.43	44.86	flata3#16gl24v05#15re45a	405280	298830	200	3.16	0.33	100	937.65	

- Δεύτερη σειρά πειραμάτων

Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων, η οποία πραγματοποιήθηκε σε απόσταση 133 cm έως 159 cm από το σημείο έναρξης της ροής (Θέση b) επιβλήθηκαν επίσης οι δύο παραπάνω συχνότητες διαταραχών. Η διαταραχή $f_1=0,167$ Hz ($T_{on}=5$ sec) επιβλήθηκε στους αριθμούς Reynolds: 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45. Ενώ η διαταραχή $f_2=0,5$ Hz ($T_{on}=1,5$ sec) στους αριθμούς Reynolds: 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των πειραματικών μετρήσεων σε αυτή την θέση:

Πίνακας 4.2: Στοιχεία δεύτερης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 1330 cm έως 1590 cm από την έναρξη της ροής.

W=0.47m - Θέση κάμερας: b - Μήκος Πεδίου: 260mm											
Διάλυμα Γλυκερίνης: 23.91% - $\nu=1.82 \cdot 10^{-6}$ m ² /s - $\rho=1055.9$ Kg/m ³											
α/α	Q (Kg/min)	Re	Frame Name	White Level	Black Level	Number Of Frame	Κλίση	D (m)	Time Delay (ms)	h_N (μ m)	Σχόλια
Βαθμονόμηση											
1	0.98	18.09	flata3#16gl24re18b	410440	274930	20	3.16	1.33	100	692.75	
2	0.93	17.17	flata3#16gl24re17b	410440	273735	20	3.16	1.33	100	680.77	
3	0.84	15.51	flata3#16gl24re16b	410440	265370	20	3.16	1.33	100	658.06	
4	0.74	13.66	flata3#16gl24re14b	410440	261785	20	3.16	1.33	100	630.83	
5	0.68	12.55	flata3#16gl24re13b	410440	258200	20	3.16	1.33	100	613.3	
6	0.59	10.89	flata3#16gl24re11b	410440	253420	20	3.16	1.33	100	584.95	
Διαταραχή: 5 sec ON - 1 sec OFF											
7	0.8	14.77	flata3#16gl24v1#5re15b	382060	277320	200	3.16	1.33	100	647.44	
8	0.99	18.28	flata3#16gl24v1#5re18b	358840	285685	200	3.16	1.33	100	695.1	
9	1.1	20.31	flata3#16gl24v1#5re20b	361420	285685	200	3.16	1.33	100	719.95	
10	1.36	25.11	flata3#16gl24v1#5re25b	376900	289270	200	3.16	1.33	100	772.71	
11	1.63	30.09	flata3#16gl24v1#5re30b	405280	280905	200	3.16	1.33	100	820.79	
12	1.9	35.08	flata3#16gl24v1#5re35b	407860	274930	200	3.16	1.33	100	863.82	3-D Δομή
13	2.18	40.25	flata3#16gl24v1#5re40b	415600	279710	200	3.16	1.33	100	904.32	3-D Δομή
14	2.44	45.05	flata3#16gl24v1#5re45b	418180	277320	200	3.16	1.33	100	938.93	3-D Δομή
Διαταραχή: 1.5 sec ON - 0.5 sec OFF											
15	1	18.46	flata3#16gl24v05#15re15b	361420	282100	200	3.16	1.33	100	697.43	αντί για 18→15
16	1.11	20.49	flata3#16gl24v05#15re20b	356260	276125	200	3.16	1.33	100	722.12	
17	1.35	24.92	flata3#16gl24v05#15re25b	366580	276125	200	3.16	1.33	100	770.81	
18	1.64	30.28	flata3#16gl24v05#15re30b	374320	283295	200	3.16	1.33	100	822.47	
19	1.9	35.08	flata3#16gl24v05#15re35b	389800	279710	200	3.16	1.33	100	863.82	3-D Δομή
20	2.16	39.88	flata3#16gl24v05#15re40b	389800	276125	200	3.16	1.33	100	901.55	3-D Δομή
21	2.44	45.05	flata3#16gl24v05#15re45b	389800	282100	200	3.16	1.33	100	938.93	3-D Δομή

- Τρίτη σειρά πειραμάτων

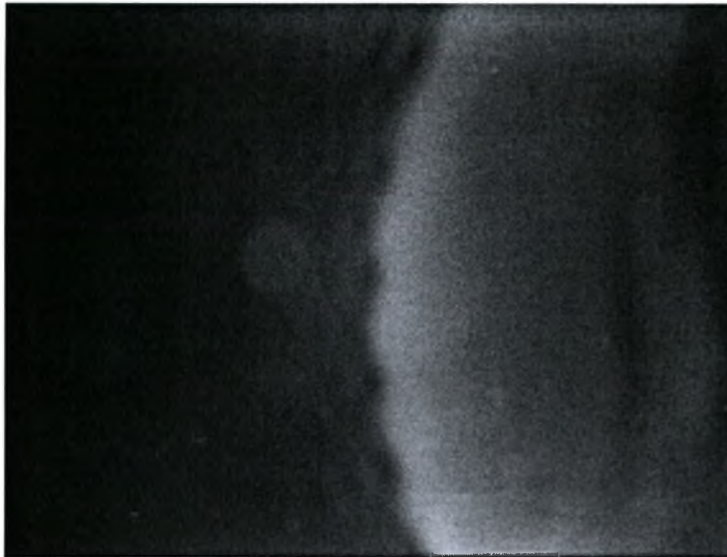
Κατά την τρίτη σειρά πειραμάτων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε απόσταση 233 cm έως 259 cm από το σημείο έναρξης της ροής στο κεκλιμένο επίπεδο (Θέση c) ενώ επιβλήθηκαν επίσης οι δύο ίδιες συχνότητες διαταραχών όπως και στις δύο προηγούμενες σειρές πειραμάτων. Τα πειράματα έγιναν για τους εξής αριθμούς Reynolds: 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των πειραματικών μετρήσεων σε αυτή την θέση:

Πίνακας 4.3: Στοιχεία τρίτης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 2330 cm έως 2590 cm από την έναρξη της ροής.

W=0.47m - Θέση κάμερας: c - Μήκος Πεδίου: 260mm											
Διάλυμα Γλυκερίνης: 23.91% - $\nu=1.82 \cdot 10^{-6}$ m ² /s - $\rho=1055.9$ Kg/m ³											
a/a	Q (Kg/min)	Re	Frame Name	White Level	Black Level	Number Of Frame	Κλίση	D (m)	Time Delay (ms)	hN (μ m)	Σχόλια
Βαθμονόμηση											
1	0.93	17.17	flata3#16gl24re17c	402700	270150	20	3.16	2.33	100	680.77	
2	0.865	15.97	flata3#16gl24re16c	402700	267760	20	3.16	2.33	100	664.52	
3	0.815	15.05	flata3#16gl24re15c	402700	265370	20	3.16	2.33	100	651.46	
4	0.75	13.85	flata3#16gl24re14c	402700	264175	20	3.16	2.33	100	633.66	
5	0.69	12.74	flata3#16gl24re13c	402700	258200	20	3.16	2.33	100	616.29	
6	0.565	10.43	flata3#16gl24re11c	402700	251030	20	3.16	2.33	100	576.57	
Διαταραχή: 5 sec ON - 1 sec OFF											
7	0.81	14.95	flata3#16gl24v1#5re15c	356260	268955	200	3.16	2.33	100	650.13	
8	0.97	17.91	flata3#16gl24v1#5re18c	353680	274930	200	3.16	2.33	100	690.39	
9	1.1	20.31	flata3#16gl24v1#5re20c	358840	276125	200	3.16	2.33	100	719.95	
10	1.36	25.11	flata3#16gl24v1#5re25c	376900	279710	200	3.16	2.33	100	772.71	
11	1.62	29.91	flata3#16gl24v1#5re30c	376900	280905	200	3.16	2.33	100	819.11	
12	1.91	35.26	flata3#16gl24v1#5re35c	413020	272540	200	3.16	2.33	100	865.33	3-D Δομή
13	2.17	40.06	flata3#16gl24v1#5re40c	413020	274930	200	3.16	2.33	100	902.94	3-D Δομή
Διαταραχή: 1.5 sec ON - 0.5 sec OFF											
14	0.81	14.95	flata3#16gl24v05#15re15c	351100	266565	200	3.16	2.33	100	650.13	
15	0.98	18.09	flata3#16gl24v05#15re18c	358840	280905	200	3.16	2.33	100	692.75	
16	1.09	20.12	flata3#16gl24v05#15re20c	356260	278515	200	3.16	2.33	100	717.76	
17	1.36	25.11	flata3#16gl24v05#15re25c	374320	284490	200	3.16	2.33	100	772.71	
18	1.62	29.91	flata3#16gl24v05#15re30c	387220	285685	200	3.16	2.33	100	819.11	
19	1.9	35.08	flata3#16gl24v05#15re35c	405280	286880	200	3.16	2.33	100	863.82	3-D Δομή
20	2.17	40.06	flata3#16gl24v05#15re40c	405280	288075	200	3.16	2.33	100	902.94	3-D Δομή

Σε αριθμούς Reynolds μεγαλύτερους από 30, δηλαδή $Re = 35, 40, 45$, παρατηρούμε οπτικά ότι η δομή των κυμάτων στις αποστάσεις 1330 mm και 2330 mm από την είσοδο της ροής στο κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα είναι τρισδιάστατη και για τις δύο διαταραχές $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on} = 5 \text{ sec}$) και $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on} = 1,5 \text{ sec}$). Ενώ σε απόσταση 330 mm η δομή των κυμάτων δεν μεταβαίνει σε τρισδιάστατη στους συγκεκριμένους αριθμούς Reynolds. Όπως φαίνεται και στη φωτογραφία (σχήμα 4.1), στην τρισδιάστατη δομή εμφανίζονται βαθουλώματα στην κορυφή του κύριου κύματος και ανομοιομορφα τριχοειδή κύματα μπροστά από αυτό.



Σχήμα 4.3: Φωτογραφία τρισδιάστατης δομής (3-D) σε απόσταση 2470 mm, συχνότητα διαταραχής $f=0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}= 5 \text{ sec}$) και $Re = 40$.

Στα σχήματα 4.4.a-b-c παρουσιάζονται οι χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού υμένα στις τρεις θέσεις του καναλιού, με επιβολή διαταραχής, συχνότητας $f=0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}= 5 \text{ sec}$), για τους αριθμούς Reynolds 15, 18, 20, όπου η ροή μεταβαίνει από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή.

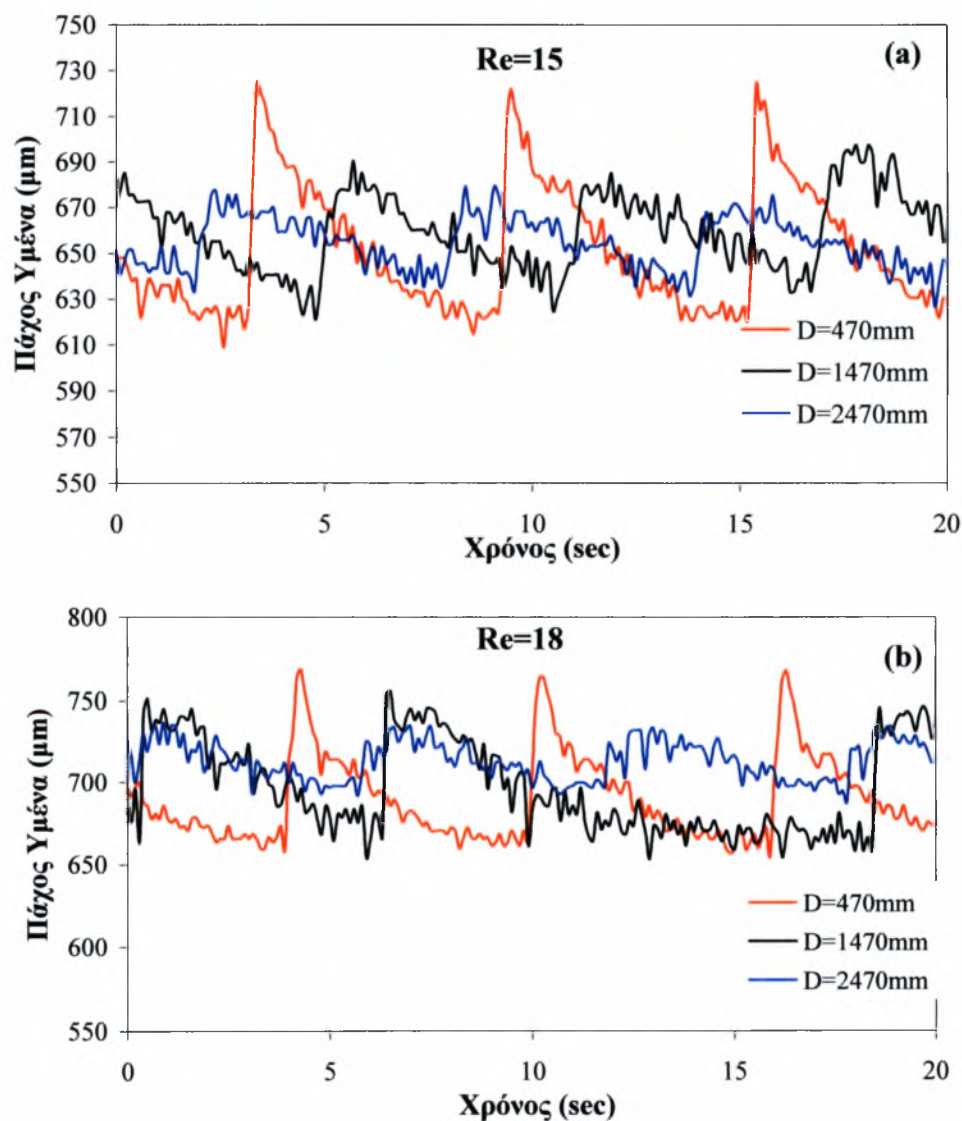
Συγκεκριμένα στο σχήμα 4.4.a παρατηρούμε ότι η ροή για αριθμό Reynolds 15 βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή, καθώς τα κύματα που υπάρχουν σε απόσταση 470 mm από την αρχή του καναλιού, αρχίζουν να αποσβένουν και σε απόσταση 1470 mm το ύψος τους να μειώνεται από 110 μm σε 70 μm και έπειτα σε απόσταση 2470 mm να μειώνεται ακόμη περισσότερο σε 40 μm .

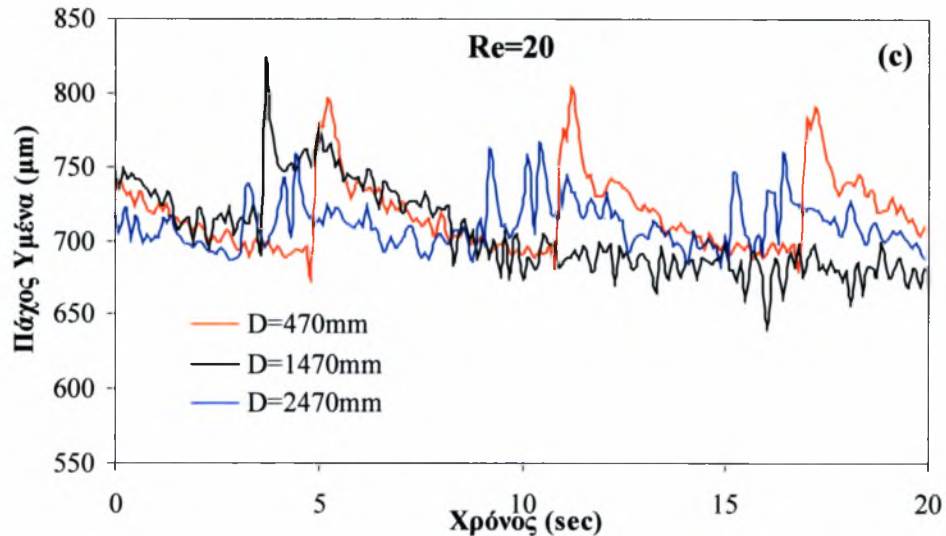
Στο σχήμα 4.4.b για αριθμό Reynolds 18, επίσης παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά ευστάθειας, με τα κύματα να έχουν μέγιστο ύψος ίσο με 110 μm σε απόσταση 470 mm και αυτό να μειώνεται σταδιακά σε 85 μm στα 1470 mm και να γίνεται 40 μm στα 2470 mm από την αρχή του καναλιού.

Στο σχήμα 4.4.c για αριθμό Reynolds 20, βλέπουμε ότι εμφανίζονται δείγματα αστάθειας. Σε απόσταση 470 mm από την αρχή της ροής έχουμε κύματα, ύψους 120 μm . Σε απόσταση 1470 mm αυξάνεται το ύψος τους σε 130 μm , με τα κύματα να εμφανίζουν χαρακτηριστικά μοναχικών

κυμάτων, δηλαδή μία κύρια κορυφή της οποίας προηγούνται μικρά τριχοειδή κύματα. Στο σχήμα υπάρχει μόνο ένα κύμα (μαύρη γραμμή), λόγω προβλήματος της ηλεκτροβάνας, η οποία ανταποκρίθηκε μόνο μία φορά στην εντολή κλεισίματος του χρονιστή διαταραχής, με αποτέλεσμα να έχουμε καταγράψει μόνο ένα κύμα. Το πρόβλημα δεν έγινε αντιληπτό κατά την διάρκεια του πειράματος, με αποτέλεσμα να μην μπορούσε έπειτα να γίνει διόρθωση. Σε απόσταση 2470 mm το ύψος των κυμάτων μειώνεται λόγω διάσπασης των κυρίως κυμάτων σε μικρότερα κύματα ύψους 65 μm (διατήρηση μάζας).

Σύμφωνα με τα παραπάνω παρατηρούμε ότι στην ευσταθή περιοχή το ύψος των κυμάτων είναι ανεξάρτητο του αριθμού Reynolds ($Re=15$ και $Re=18$) και έχει την τιμή 110 μm σε απόσταση 470mm και 40 μm σε απόσταση 2470 mm. Το ίδιο φαινόμενο είχε παρατηρηθεί και σε παλαιότερη έρευνα που είχε χρησιμοποιηθεί μόνο νερό (Τριανταφύλλου Ορφέας, 2007).





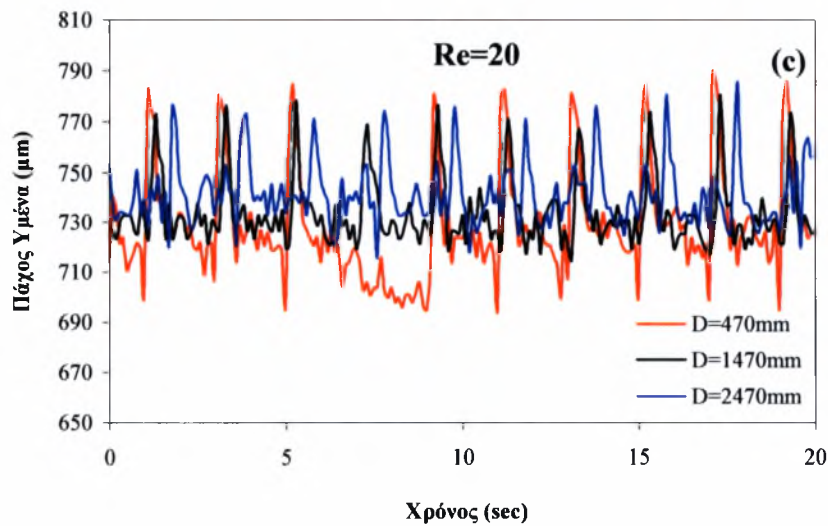
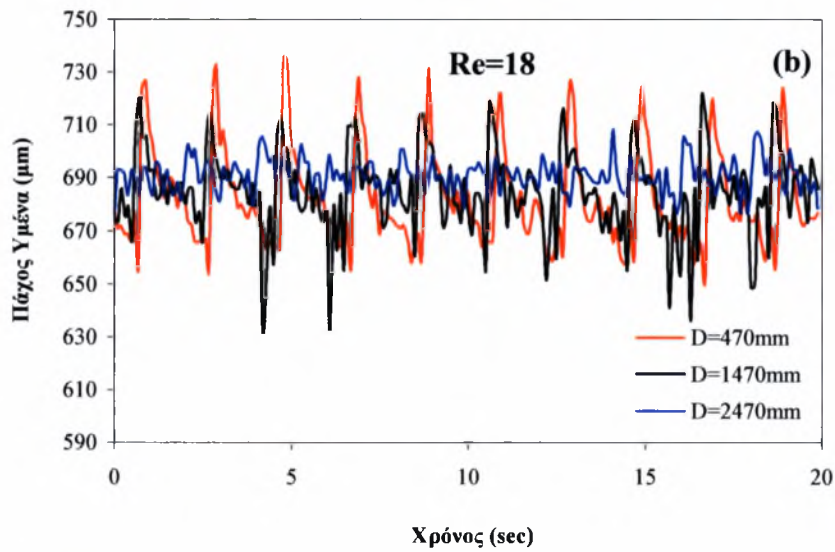
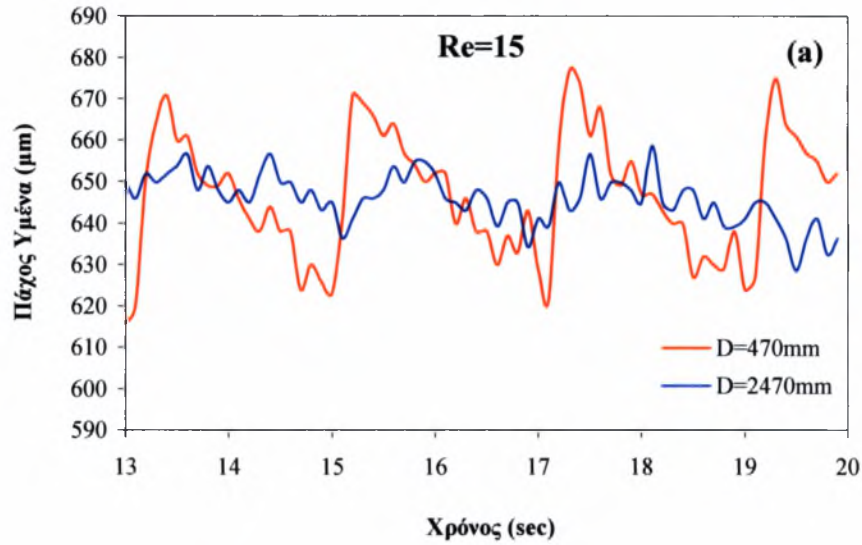
Σχήμα 4.4: Χρονοσειρές σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5$ sec) για αριθμούς Reynolds: **a)** $Re=15$, **b)** $Re=18$, **c)** $Re=20$

Παρακάτω στα σχήματα 4.5.a-b-c παρουσιάζονται επίσης οι χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού υμένα στις τρεις θέσεις του καναλιού, αλλά αυτή την φορά με επιβολή διαταραχής, συχνότητας $f=0,5$ Hz ($T_{on}= 1,5$ sec), για αριθμούς Reynolds 15, 18, 20, όπου η ροή σε αυτή την περιοχή μεταβαίνει από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή.

Συγκεκριμένα στο σχήμα 4.5.a παρατηρούμε ότι η ροή για αριθμό Reynolds 15 βρίσκεται καθαρά στην ευσταθή περιοχή, καθώς τα κύματα ενώ υπάρχουν σε απόσταση 470 mm από την αρχή του καναλιού και έχουν ύψος 50 μm , σε απόσταση 2470 mm, έχουν σβήσει τελείως.

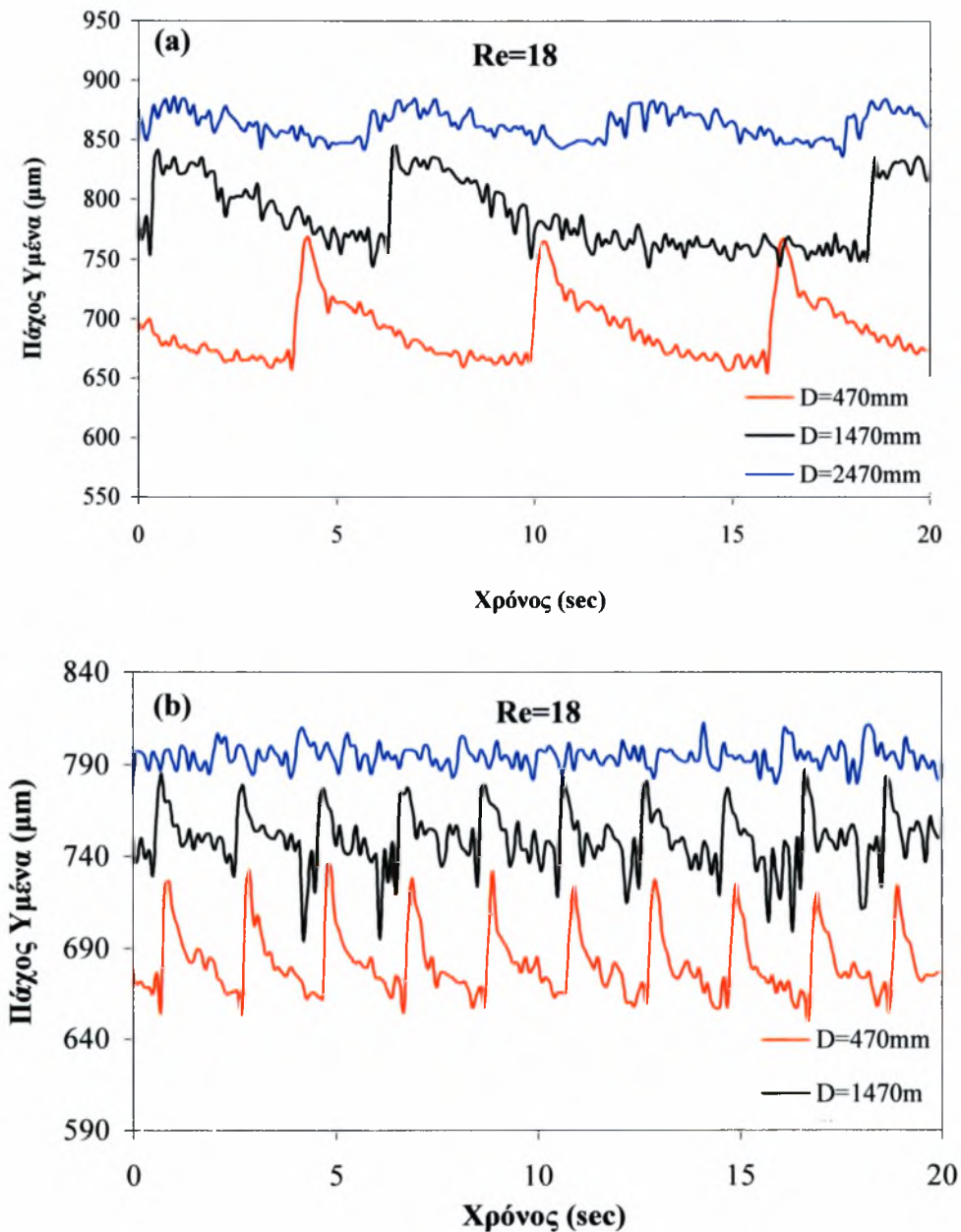
Στο σχήμα 4.5.b για αριθμό Reynolds 18, επίσης παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά ευστάθειας, με τα κύματα να έχουν μέγιστο ύψος ίσο με 70 μm σε απόσταση 470 mm και αυτό να μειώνεται σταδιακά σε 55 μm στα 1470 mm και να γίνεται 30 μm στα 2470 mm από την αρχή του καναλιού.

Στο σχήμα 4.5.c για αριθμό Reynolds 20, βλέπουμε ότι εμφανίζονται δείγματα αστάθειας. Συγκεκριμένα σε απόσταση 470 mm από την αρχή της ροής έχουμε κύματα, ύψους 85 μm , με τα κύματα να εμφανίζουν χαρακτηριστικά μοναχικών κυμάτων, δηλαδή μία κύρια κορυφή της οποίας προηγούνται μικρά τριχοειδή κύματα. Σε απόσταση 1470 mm μειώνεται το ύψος των κύριων κυμάτων σε 50 μm , επειδή αυξάνει το ύψος των κυμάτων που προηγούνται. Αυτή η μείωση προκαλείται λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας. Σε απόσταση 2470 mm το ύψος των κυμάτων μειώνεται ελάχιστα από την προηγούμενη απόσταση, και γίνεται 45 μm , λόγω περαιτέρω αύξησης του ύψους των κυμάτων που προηγούνται.



Σχήμα 4.5: Χρονοσειρές σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για αριθμούς Reynolds: **a)** $Re=15$, **b)** $Re=18$, **c)** $Re=20$

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.6.a-b) παρουσιάζονται οι χρονοσειρές διαχωρισμένες στις τρεις θέσεις για αριθμό Reynolds 18 και διαταραχή συχνότητας: $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}=5\text{sec}$) - Σχήμα 4.6.a, και $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$) - Σχήμα 4.6.b. Η παρουσίαση αυτή γίνεται για να προβληθεί ξεκάθαρα ότι δεν υπάρχει υπόνοια μετάβασης της ροής στην ασταθή περιοχή από τον Reynolds 18, παρά μόνο στον Reynolds 20.

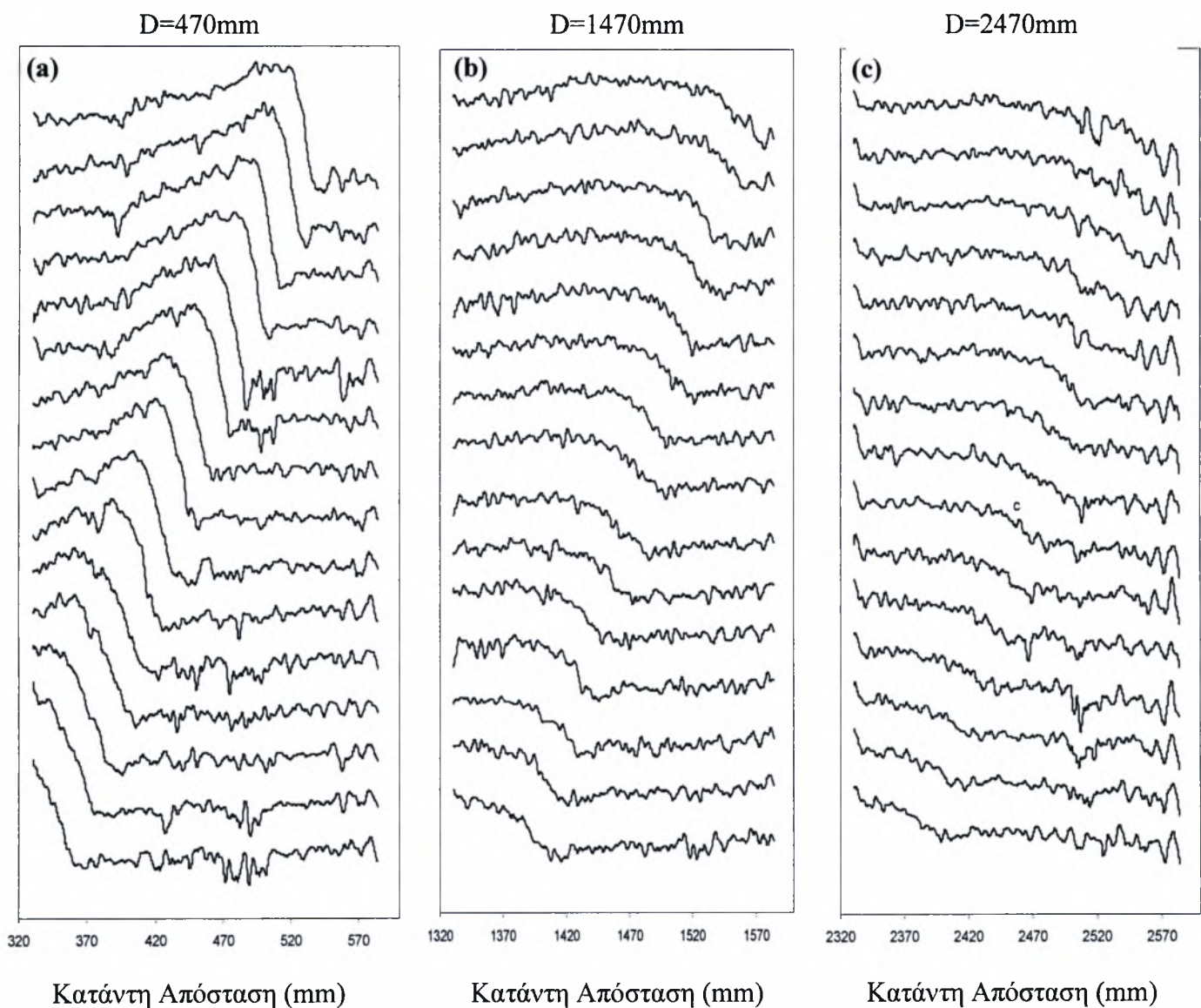


Σχήμα 4.6: Χρονοσειρές διαχωρισμένες σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής για αριθμό Reynolds 18 και με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας: **a)** $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}=5\text{sec}$) και **b)** $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$)

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα προφίλ ελεύθερης επιφάνειας κατάντη της ροής για τις τρεις θέσεις και για τους αριθμούς Reynolds όπου συμβαίνει η μετάβαση, δηλαδή σε $Re = 15, 18$ και

20. Ο σκοπός αυτής της παρουσίασης είναι να δειχθεί η δομή και η εξέλιξη των κυμάτων στο μήκος του κεκλιμένου επιπέδου, καθώς και να ξεκαθαριστεί η περιοχή μετάβασης της ροής από την περιοχή της ευστάθειας σε αυτή της αστάθειας.

Παρακάτω στο σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=15$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}=5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές στις τρεις θέσεις μετρήσεων. Φαίνεται ξεκάθαρα στο σχήμα 4.7.a ότι ενώ το μέτωπο του κύματος σε απόσταση 330 mm έως 590 mm από την έναρξη της ροής γίνεται σχεδόν κάθετο μετά από κάποιες χρονικές στιγμές, έπειτα σε απόσταση 1330 mm έως 1590 mm (σχήμα 4.7.b) έχει αρχίσει ήδη να αποσβένει, μειώνεται το ύψος του και το μέτωπο μετατρέπεται σε καμπύλο. Τέλος στο σχήμα 4.7.c σε απόσταση 2330 mm έως 2590 mm το κύμα έχει εξαφανιστεί σχεδόν τελείως.



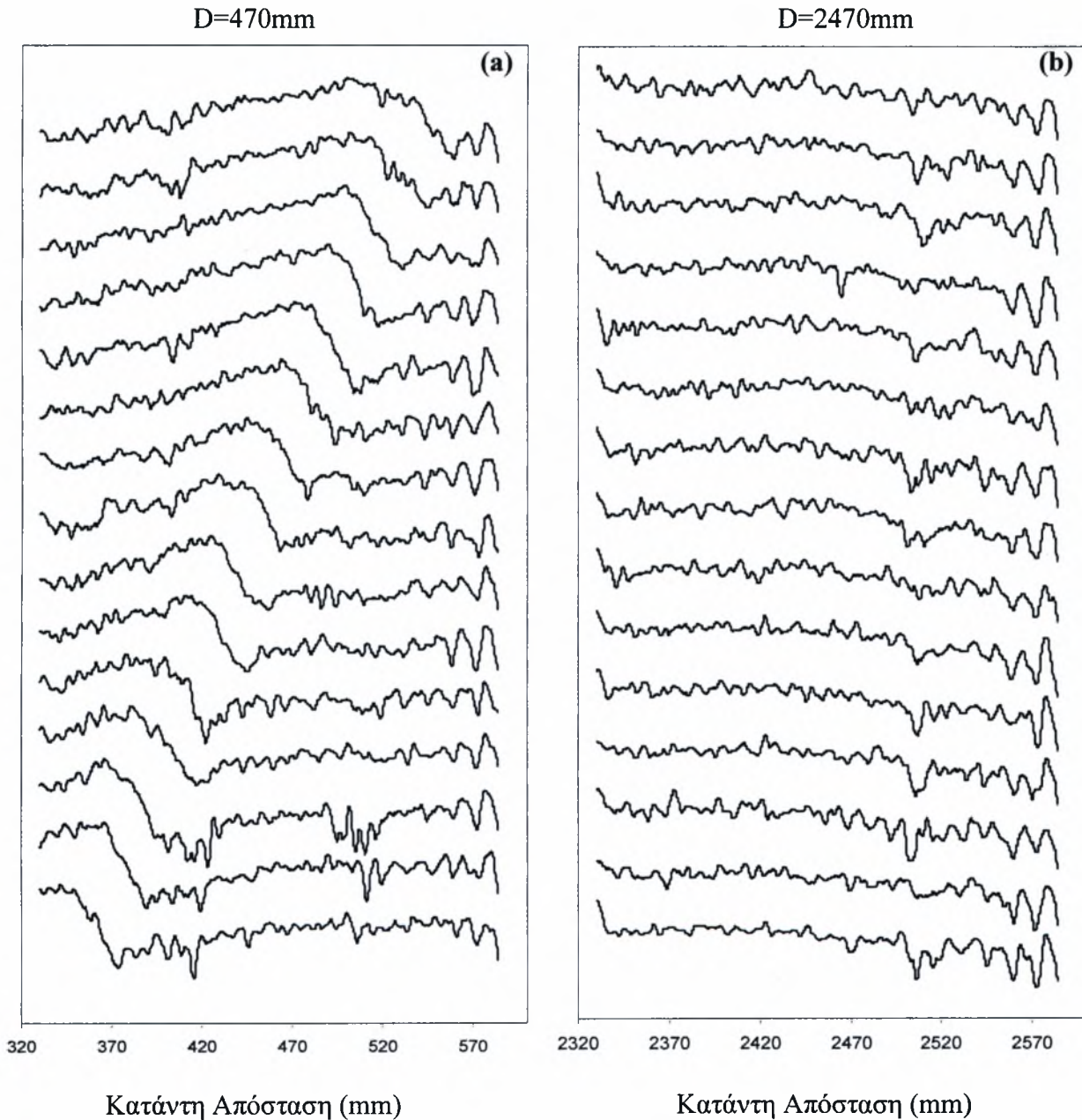
Κατάντη Απόσταση (mm)

Κατάντη Απόσταση (mm)

Κατάντη Απόσταση (mm)

Σχήμα 4.7: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=15$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}=5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 1330mm έως 1590mm, **c)** 2330mm έως 2590mm

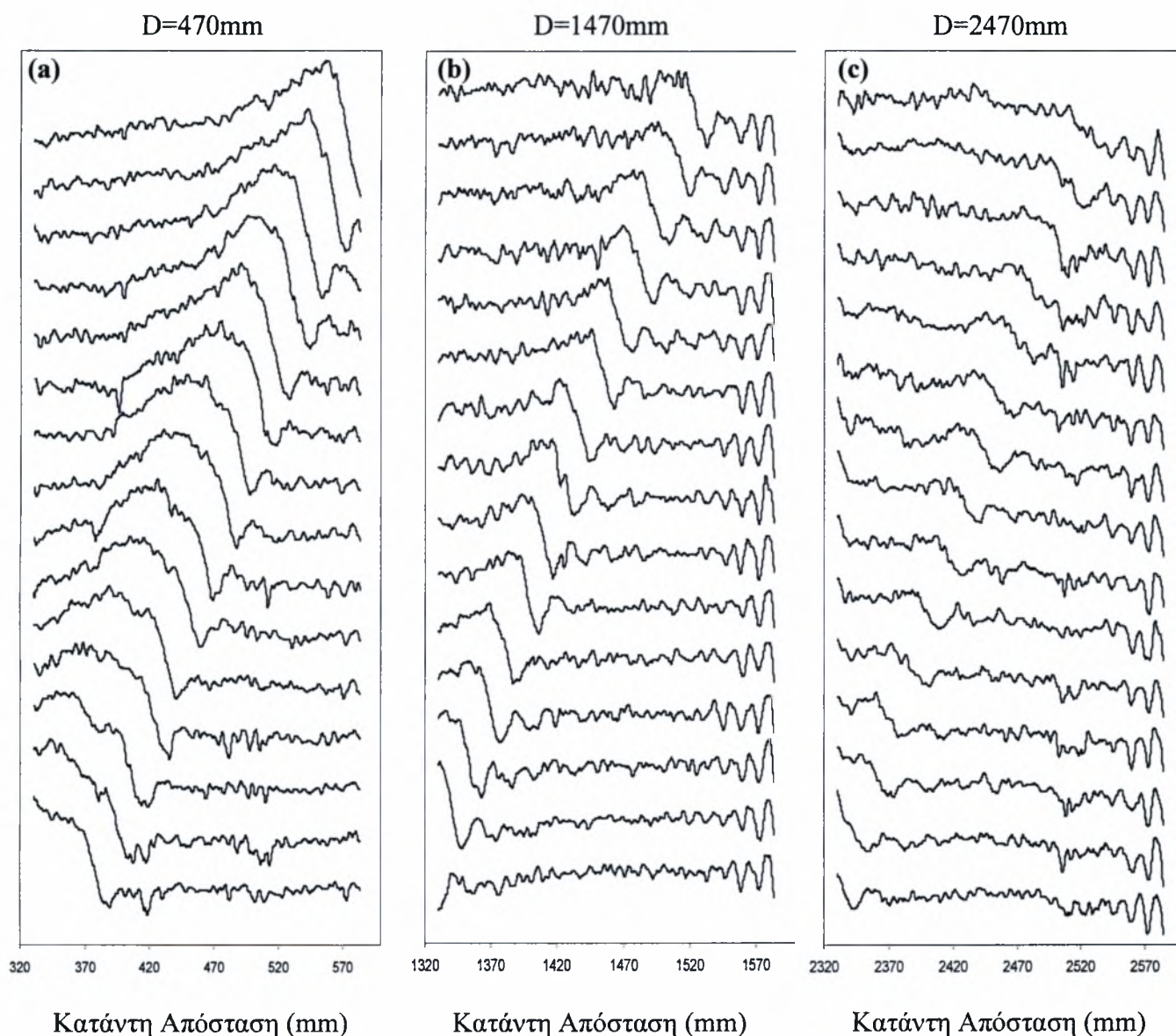
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=15$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε δύο θέσεις μετρήσεων. Παρατηρούμε στο σχήμα 4.8.a σε απόσταση 330 mm έως 590 mm από την αρχή του καναλιού, ότι κύμα δεν μπορεί να αναπτυχθεί και προς το τέλος των χρονικών στιγμών αρχίζει να σβήνει ομαλά. Ενώ στο σχήμα 4.8.b σε απόσταση 2330 mm έως 2590 mm δεν εμφανίζεται καθόλου κύμα, καθώς έχει σβήσει τελείως.



Σχήμα 4.8: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=15$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 2330mm έως 2590mm

Στο σχήμα 4.9 βλέπουμε τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=18$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}=5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές στις τρεις θέσεις

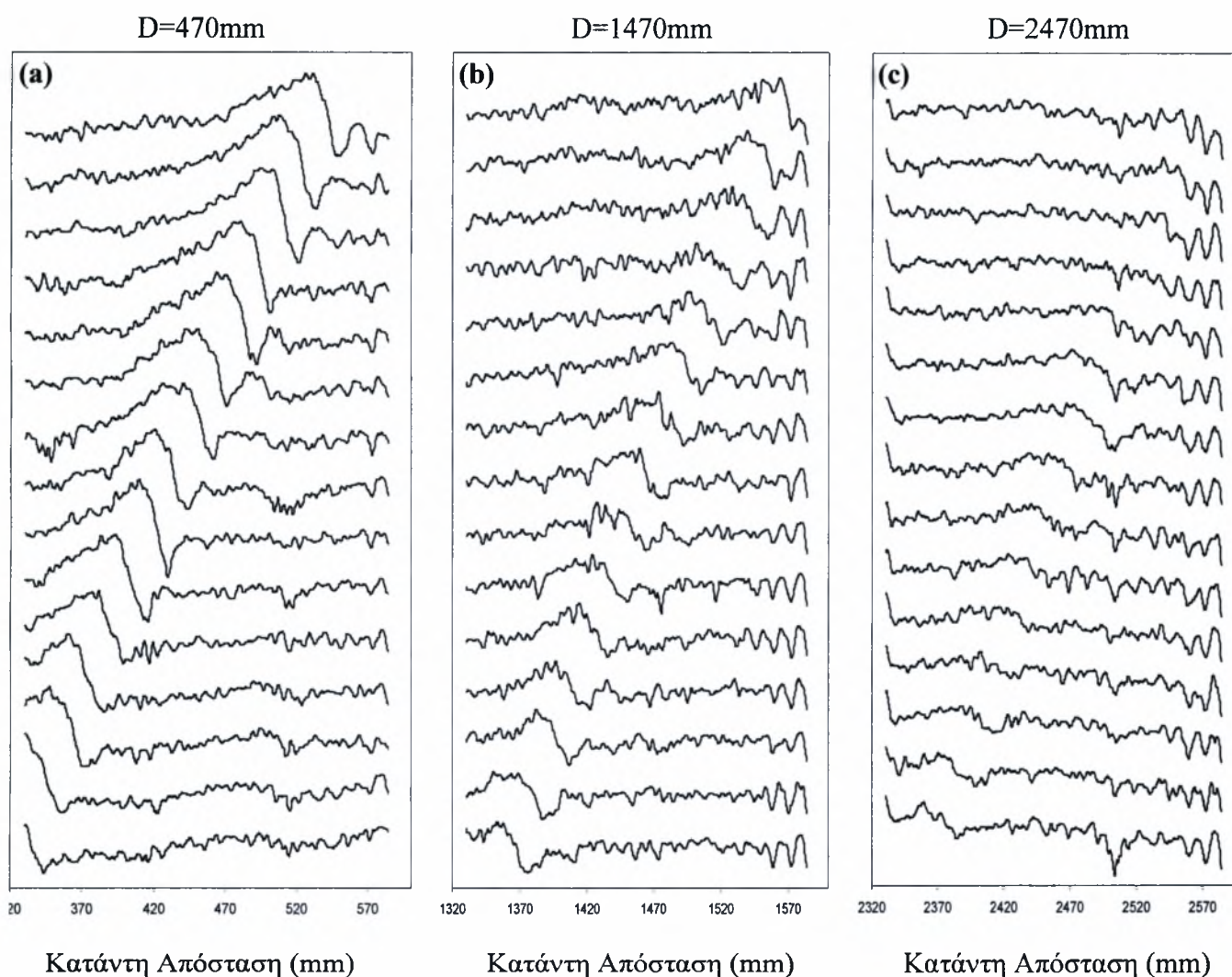
μετρήσεων. Είναι φανερό ότι στο σχήμα 4.9.a σε απόσταση 330 mm έως 590 mm από την έναρξη της ροής ότι το κύμα αναπτύσσεται ακόμη και το ύψος του αυξάνει, ενώ στις τελευταίες χρονικές στιγμές το μέτωπό του γίνεται σχεδόν κάθετο. Αντιθέτως σε απόσταση 1330 mm έως 1590 mm (σχήμα 4.9.b) μειώνεται σημαντικά το ύψος του και αποσβένει. Στο σχήμα 4.9.c σε απόσταση 2330 mm έως 2590 mm το μέτωπο του κύματος έχει εξομαλυνθεί και έχει γίνει καμπύλο, ενώ το ύψος του είναι αισθητά μειωμένο.



Σχήμα 4.9: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=18$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5$ sec) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 1330mm έως 1590mm, **c)** 2330mm έως 2590mm

Στο σχήμα 4.10 υπάρχουν τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας πάλι σε $Re=18$, αλλά συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5$ sec) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές στις τρεις θέσεις μετρήσεων. Παρατηρούμε στο σχήμα 4.10.a σε απόσταση 330 mm έως 590 mm από την

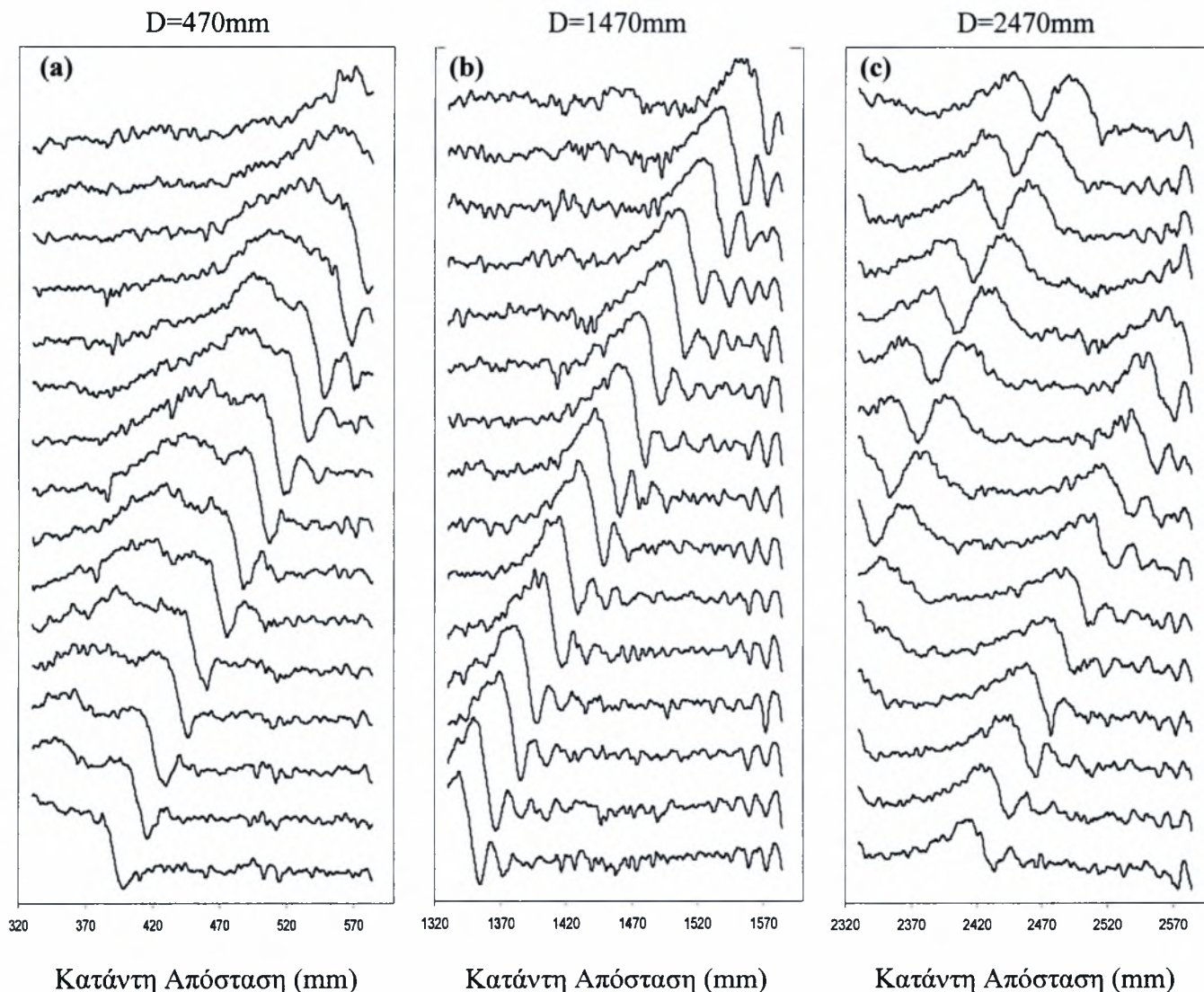
έναρξη της ροής ότι το κύμα αναπτύσσεται και τείνει στις τελευταίες χρονικές στιγμές να πάρει τη μορφή μοναχικού, με μικρά τριχοειδή κύματα να προηγούνται. Στο σχήμα 4.10.b σε απόσταση 1330 mm έως 1590 mm βλέπουμε ότι τελικά δεν καταλήγει σε μοναχικό, αντιθέτως σβήνει όπως επίσης έχουν εξαλειφθεί και τα τριχοειδή κύματα που προηγούνταν, ενώ το ύψος του μειώνεται σημαντικά. Στο σχήμα 4.10.c σε απόσταση 2330 mm έως 2590 mm το κύμα έχει σβήσει αρκετά και φαίνεται ανεπαίσθητα.



Σχήμα 4.10: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=18$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 1330mm έως 1590mm, **c)** 2330mm έως 2590mm

Στο σχήμα 4.11 υπάρχουν τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$, με συχνότητα διαταραχής $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}=5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές στις τρεις θέσεις μετρήσεων. Για αυτόν τον αριθμό Reynolds και για αυτή την συχνότητα διαταραχής είναι ξεκάθαρο ότι η ροή είναι στην ασταθή περιοχή καθώς στο σχήμα 4.11.a σε απόσταση 330 mm έως 590 mm από την έναρξη της ροής βλέπουμε το κύμα στις τελευταίες χρονικές στιγμές να έχει πάρει τη μορφή

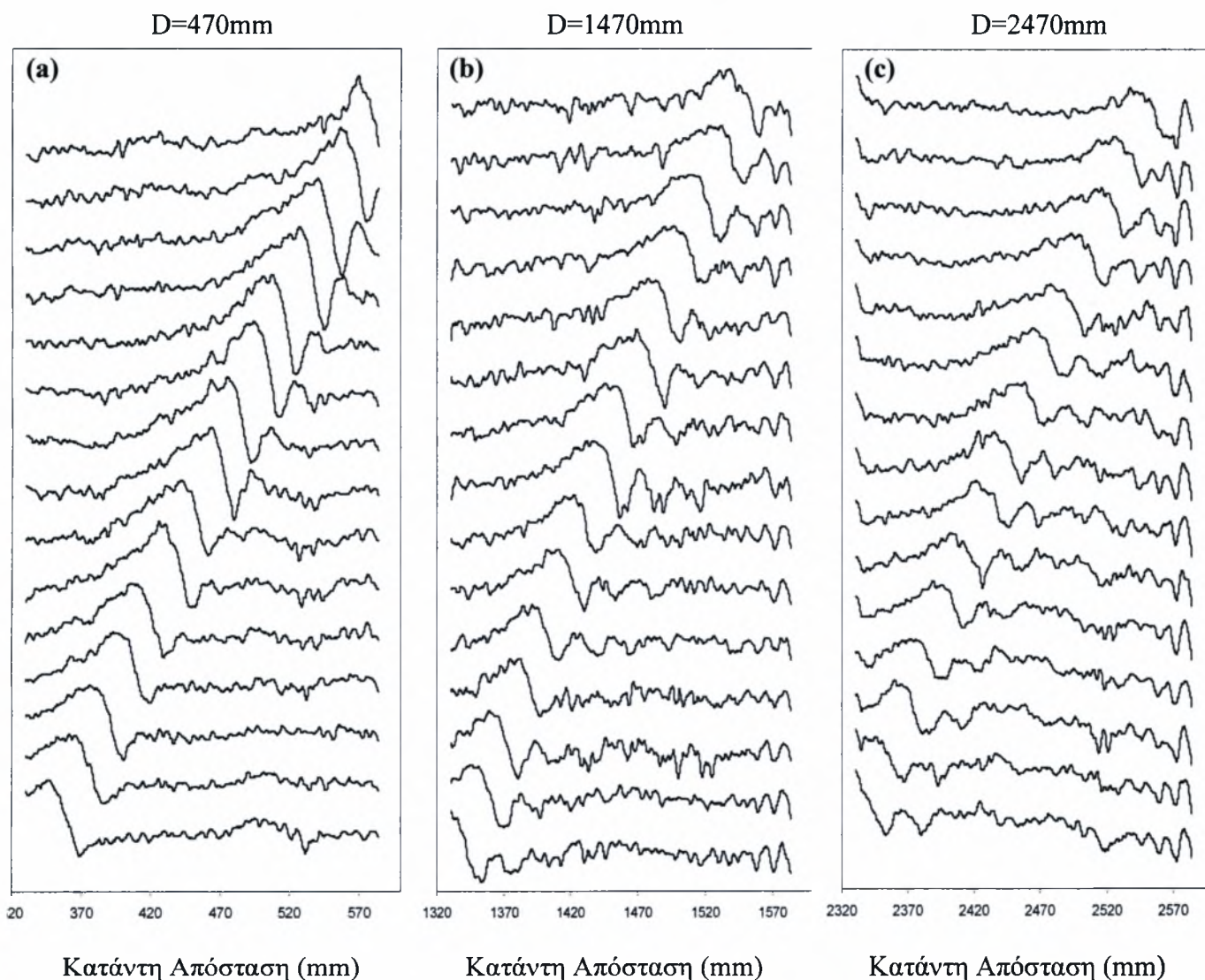
μοναχικού κύματος, καθώς αποτελείται από ένα κύριο κύμα και μικρά τριχοειδή κύματα να προηγούνται. Στο σχήμα 4.11.b σε απόσταση 1330 mm έως 1590 mm παρατηρούμε πλέον το κύμα να έχει αναπτυχθεί πλήρως σε μοναχικό, με το μέτωπό του να έχει γίνει σχεδόν κάθετο και το ύψος του να αυξάνεται. Στο σχήμα 4.11.c σε απόσταση 2330 mm έως 2590 mm το κύμα διασπάται σε δύο σχεδόν ισοϋψή κύματα, σαφώς με μικρότερο ύψος από αυτού της προηγούμενης θέσης (το μισό σχεδόν), καθώς έχουμε διατήρηση της μάζας.



Σχήμα 4.11: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5$ sec) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 1330mm έως 1590mm, **c)** 2330mm έως 2590mm

Στο σχήμα 4.12 υπάρχουν τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$, με συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5$ sec) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές στις τρεις θέσεις μετρήσεων. Επίσης για τον ίδιο αριθμό Reynolds και αυτή την διαταραχή η ροή βρίσκεται στην ασταθή περιοχή. Παρατηρούμε στο σχήμα 4.12.a σε απόσταση 330 mm έως 590 mm από την έναρξη

της ροής, ότι το κύμα αναπτύσσεται και παίρνει τη μορφή μοναχικού κύματος. Στο σχήμα 4.12.b σε απόσταση 1330 mm έως 1590 mm βλέπουμε όμως ότι ελαττώνεται το ύψος του κύριου κύματος, καθώς έχουν αναπτυχθεί τα τριχοειδή κύματα που προηγούνται. Στο σχήμα 4.12.c σε απόσταση 2330 mm έως 2590 mm το ύψος του κύματος έχει μειωθεί ελάχιστα από πριν, καθώς συνεχίζεται η αύξηση του ύψους των κυμάτων που προηγούνται.



Σχήμα 4.12: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 1330mm έως 1590mm, **c)** 2330mm έως 2590mm

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν από την ανάλυση των προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας για τους συγκεκριμένους αριθμούς Reynolds και τις συγκεκριμένες επιβολές διαταραχών σε γωνία κλίσης $3,16^\circ$ του κεκλιμένου τοιχώματος, επιβεβαιώνονται πλήρως όλα όσα είχαν αναφερθεί προηγουμένως στην ανάλυση των χρονοσειρών για την στιγμή της μετάβασης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή. Συνοψίζοντας, η μετάβαση υπό αυτές τις συνθήκες λαμβάνει χώρα σε αριθμό Reynolds 20.

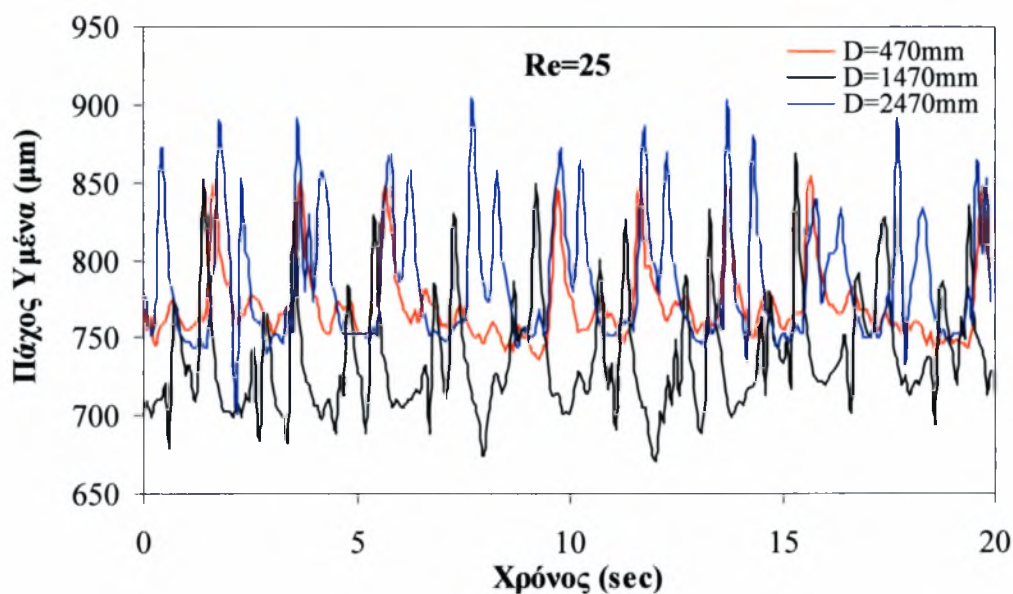
Στη συνέχεια στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των μοναχικών κυμάτων στις τρεις θέσεις του καναλιού για τους αριθμούς Reynolds 20, 25, 30, 35, 40, 45 και τις δύο συχνότητες διαταραχών.

α/α -	Re -	D (mm)	f (Hz)	h_f (μm)	h_{\max} (μm)	h_b (μm)	c_{\min} (mm/s)	c_{\max} (mm/s)	c_{av} (mm/s)
1	20	470	0.167	690	810	750	120	210	153
2	20	1470	0.167	710	810	750	110	200	158
3	20	2470	0.167	710	780	735	110	210	159
4	20	470	0.5	730	820	740	120	210	159
5	20	1470	0.5	700	750	700	90	220	146
6	20	2470	0.5	730	785	740	110	200	148
7	25	470	0.167	745	860	785	110	230	168
8	25	1470	0.167	755	925	760	140	230	186
9	25	2470	0.167	735	930	755	140	230	188
10	25	470	0.5	750	850	760	120	210	168
11	25	1470	0.5	700	830	710	130	220	172
12	25	2470	0.5	750	900	755	130	230	183
13	30	470	0.167	790	920	820	130	230	180
14	30	1470	0.167	840	1080	850	150	270	213
15	30	2470	0.167	740	980	745	170	250	208
16	30	470	0.5	760	880	770	140	220	180
17	30	1470	0.5	720	940	730	150	240	195
18	30	2470	0.5	735	970	750	150	240	195
19	35	470	0.167	840	975	860	140	240	191
20	35	1470	0.167	Δομή 3-D					
21	35	2470	0.167	Δομή 3-D					
22	35	470	0.5	820	960	825	150	240	196
23	35	1470	0.5	Δομή 3-D					
24	35	2470	0.5	Δομή 3-D					
25	40	470	0.167	860	1000	890	160	250	208
26	40	1470	0.167	Δομή 3-D					
27	40	2470	0.167	Δομή 3-D					
28	40	470	0.5	825	980	830	150	260	202
29	40	1470	0.5	Δομή 3-D					
30	40	2470	0.5	Δομή 3-D					
31	45	470	0.167	870	1000	880	170	270	215
32	45	1470	0.167	Δομή 3-D					
33	45	2470	0.167	Δομή 3-D					
34	45	470	0.5	850	990	860	170	270	210
35	45	1470	0.5	Δομή 3-D					
36	45	2470	0.5	Δομή 3-D					

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά μοναχικών κυμάτων. Όπου D : η απόσταση από την είσοδο της ροής στο κανάλι, f : η συχνότητα διαταραχής, h_f : το ύψος του υμένα μπροστά από το κύμα, h_{\max} : το ύψος του κύριου κύματος, h_b : το ύψος του υμένα πίσω από το κύμα, c_{\min} : η ελάχιστη ταχύτητα, c_{\max} : η μέγιστη ταχύτητα και c_{av} : η μέση ταχύτητα του κύματος σε εκείνη τις χρονική περίοδο.

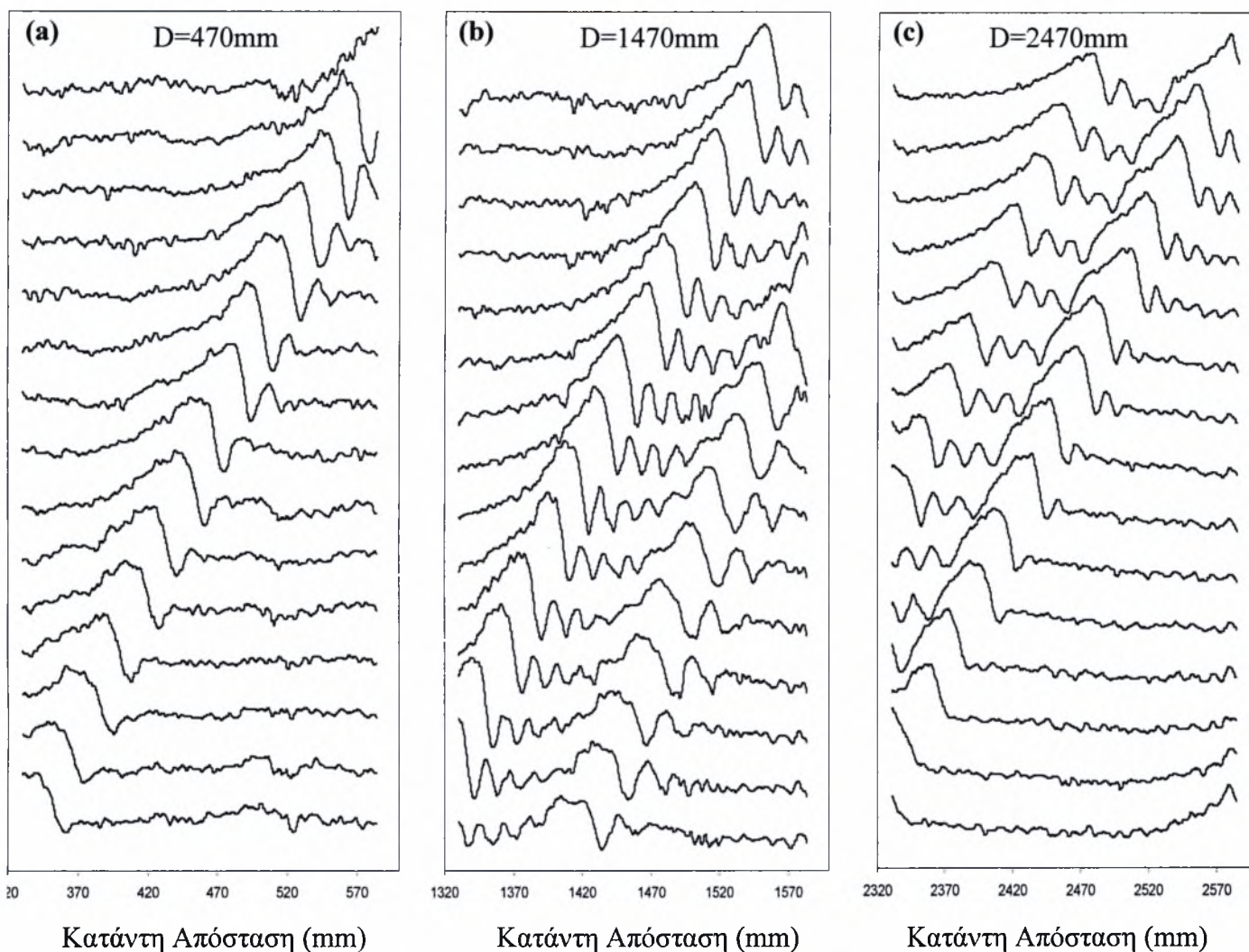
Στον πίνακα 4.4 παρατηρούμε ότι σε $Re = 20, 25$ και για συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz σημειώνεται μείωση του ύψους του κύματος (h_{max}) σε απόσταση 1470 mm σε σύγκριση με αυτό της προηγούμενης θέσης (470 mm). Ενώ σε $Re = 30$ και για συχνότητα διαταραχής $f = 0,167$ Hz, η μείωση του ύψους του κύματος γίνεται στην απόσταση 2470 mm σε σχέση με τις προηγούμενες θέσεις.

Το φαινόμενο αυτό για τον αριθμό Reynolds 20 σχολιάστηκε προηγουμένως στην ανάλυση του σχήματος 4.3.c. Όσον αφορά τη μείωση του ύψους του κύματος σε $Re=25$ (σχήμα 4.13) συντελούν οι ίδιοι παράγοντες με αυτούς που προκαλούσαν τη μείωση σε $Re=20$, δηλαδή σε απόσταση 1470 mm υπάρχει διάσπαση του κύριου κύματος σε δύο μικρότερα, που έχει ως φυσικό επακόλουθο την ελάττωση του ύψους τους, λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας. Η απεικόνιση του φαινομένου είναι καλύτερη στα σχήματα 4.14.a και 4.14.b, όπου παρουσιάζονται τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε αυτές τις θέσεις κατάντη της ροής.



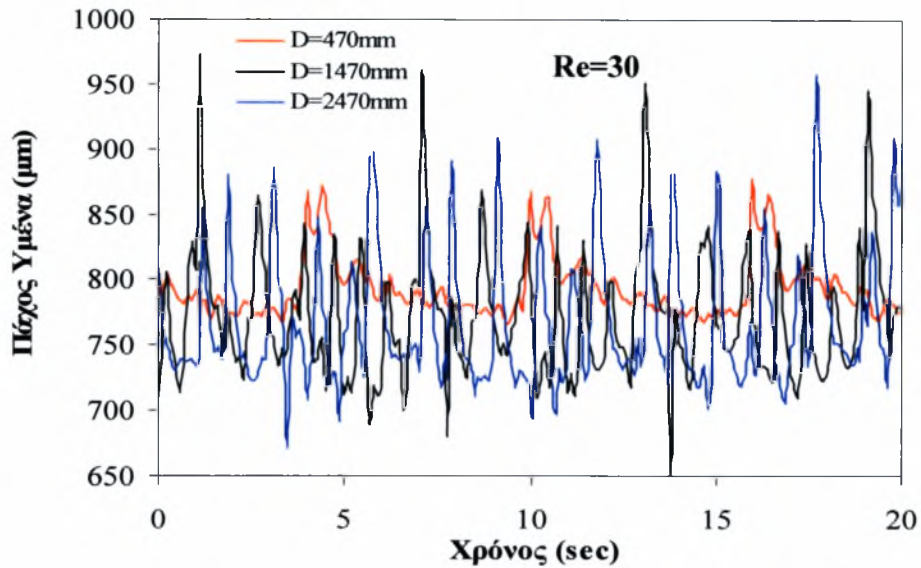
Σχήμα 4.13: Χρονοσειρά σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για αριθμό Reynolds 25.

Στο σχήμα 4.14.b γίνεται αντιληπτό ότι το κύριο κύμα στη θέση 1470 mm έχει διασπαστεί σε δύο κύρια κύματα, με το κύμα που προηγείται να έχει σαφώς μικρότερο ύψος από το άλλο. Ενώ στη θέση 2470 mm (σχήμα 4.14.c) παρατηρείται ανάπτυξη του κύματος που προηγείται με συνέπεια τώρα αυτό να γίνει το κύριο κύμα και το άλλο να μετατραπεί σε δευτερεύον που ακολουθεί. Αυτό πιθανόν να οφείλεται μετά από συγχώνευση των κυμάτων.

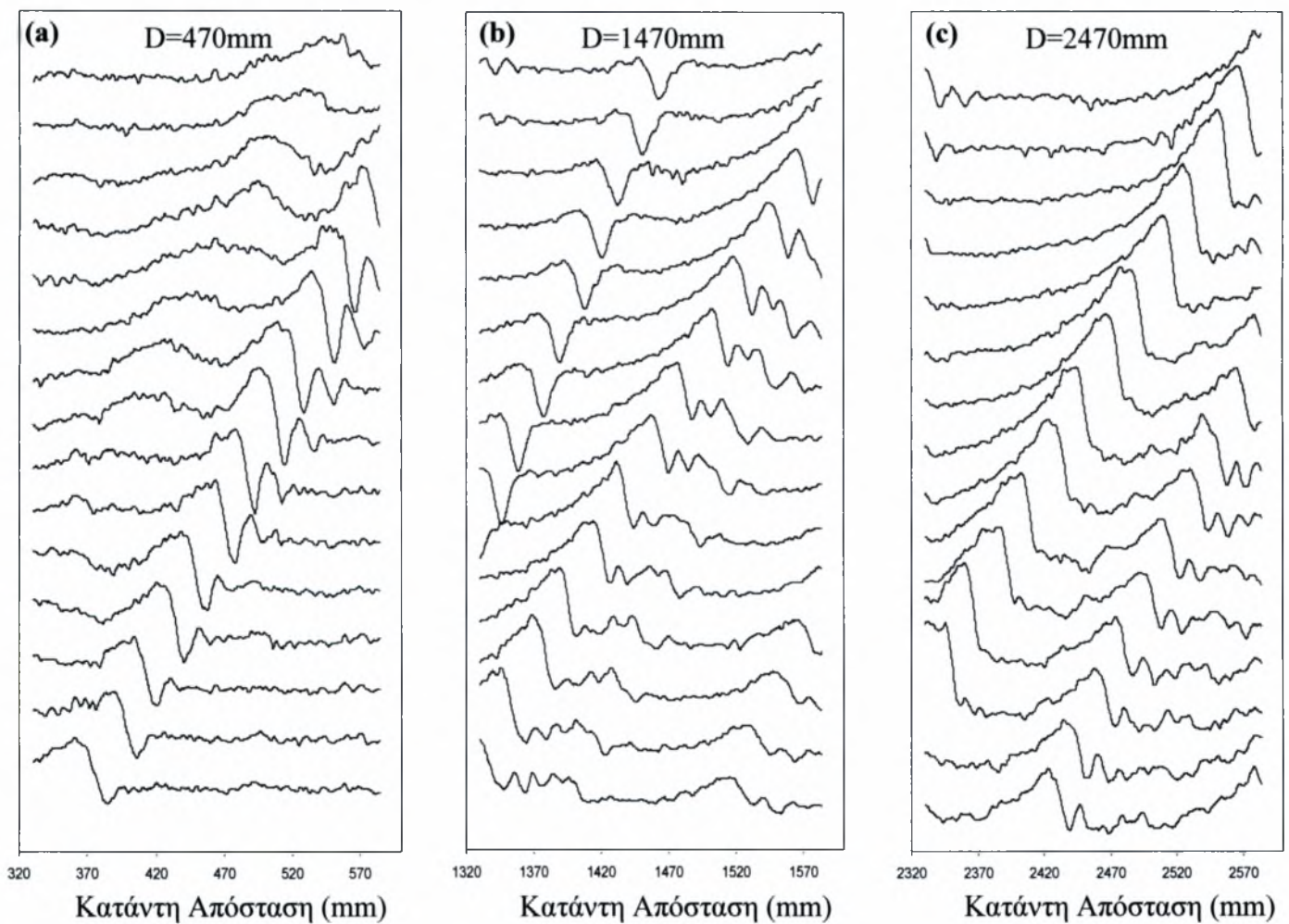


Σχήμα 4.14: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=25$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 1330mm έως 1590mm, **c)** 2330mm έως 2590mm

Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις γίνεται και η μείωση του ύψους του κύματος σε $Re=30$ και σε απόσταση 2470 mm από την είσοδο της ροής στο κανάλι (σχήμα 4.15). Με την διαφορά, ότι το ύψος του κύματος αυτή τη φορά αγγίζει το μέγιστο ύψος στην θέση 1470 mm και έπειτα στη θέση 2470 mm διαχωρίζεται σε μικρότερα, όπου παρατηρείται και η μείωση του ύψους του κύριου κύματος (σχήμα 4.16.a-b-c).



Σχήμα 4.15: Χρονοσειρά σε απόσταση 470 mm, 1470 mm και 2470 mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας $f = 0,5 \text{ Hz}$ ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για αριθμό Reynolds 30.



Σχήμα 4.16: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=30$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}=5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: **a)** 330mm έως 590mm, **b)** 1330mm έως 1590mm, **c)** 2330mm έως 2590mm

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ως θέμα είχε την πειραματική μελέτη δισδιάστατων μοναχικών κυμάτων στη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα, υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, με τελικό στόχο τη μελέτη του κρίσιμου αριθμού Re για τη μετάβαση από τη ευσταθή στην ασταθή περιοχή. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού – γλυκερίνης (24% κ.β. γλυκερίνη). Η λήψη των πειραματικών δεδομένων έγινε σε αποστάσεις 330 mm έως 590 mm, 1330 mm έως 1590 mm και 2330 mm έως 2590 mm από την είσοδο της ροής στο κανάλι, ενώ χρησιμοποιήθηκαν δύο συχνότητες εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, $f_1=0,167$ Hz ($T_{on}=5$ sec) και $f_2=0,5$ Hz ($T_{on}=1,5$ sec) για τους εξής αριθμούς Reynolds: 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45.

Το κύριο συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε είναι ότι η ροή μεταβαίνει στην ασταθή περιοχή στον αριθμό $Re=20$ και για τις δύο διαταραχές που επιβλήθηκαν, το οποίο δεν συμφωνεί με την βιβλιογραφία, η οποία ως κρίσιμο αριθμό Reynolds για την δεδομένη γωνία κλίσης ($3,16^\circ$), θεωρεί τον $Re_{crit}=15$. Παρόμοιο συμπέρασμα είχε εξαχθεί και σε παλαιότερη διπλωματική εργασία (Τριανταφύλλου Ορφέας, 2007), στην οποία η ροή γινόταν ασταθής σε $Re=19$ για γωνία κλίσης $3,4^\circ$, ενώ ο κρίσιμος αριθμός Reynolds της βιβλιογραφίας ήταν $Re_{crit}=14$.

Βιβλιογραφία

1. Alekseenko, S .V., Nakoryakov, V. Y. & Pokusaev, B. G. 1985. “Wave formation on a vertical falling liquid film”. *AICHE J.* **31**, 1446-1460.
2. Αργυριάδη, Α. 2005. «Ροή υγρού υμένα: Επίδραση χαρακτηριστικών διαταραχής και μορφολογίας τοιχώματος», *Διδακτορική Διατριβή, Παν/μιο Θεσσαλίας*.
3. Βλαχογιάννης, Μ. 2001. «Πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο και σε κυματοειδές τοίχωμα», *Διδακτορική Διατριβή, Παν/μιο Θεσσαλίας*.
4. Chang, H.-C., 1994. “Wave evolution on a falling film”. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **26**, 103-136.
5. Chang, H.-C., Cheng , M., Demekhin, E. A. & Kopelevich, D.I. 1994. “Secondary and tertiary excitation of three-dimensional patterns on a falling film”. *J. Fluid Mech.* **270**, 451-275.
6. Cheng, M. & Chang, H.-C. 1992. “Subharmonics instabilities of finite-amplitude monochromatic waves”. *Phys. Fluids A* **4**, 505-523.
7. Δάλλας, Π. 2007. «Μελέτη οδευόντων κυμάτων», *Μεταπτυχιακή Εργασία, Παν/μιο Θεσσαλίας*.
8. Liu, J., Paul, J. D., & Gollub, J.P. 1993. “Measurements of the primary instabilities of film flow”. *J. Fluid Mech.* **250**, 69-101.
9. Liu, J. & Gollub, J. P. 1994. “Solitary wave dynamics of film flows”. *Phys. Fluids* **6**, 1702-1712.
10. Malamataris, N., Vlachogiannis, M. & Bontozoglou, V. 2002. “Solitary waves on inclined films: Flow structure and binary interactions”. *Phys. Fluids* **14**, 1082
11. Prokopiou, T., Cheng, M. & Chang, H.-C. 1991. “Long waves on inclined on inclined films at high Reynolds number”. *J. Fluid Mech.* **222**, 665-691.
12. Τριανταφύλλου, Ο. 2007. «Πρώτα πειραματικά αποτελέσματα στο νέο κανάλι ροής πίπτοντος υμένα», *Διπλωματική Εργασία, Παν/μιο Θεσσαλίας*.
13. Vlachogiannis, M. & Bontozoglou, V. 2001. “Observations of solitary wave dynamics of film flows”. *J. Fluid Mech.* **435**, 191.
14. Weast, R.C. 1975. “Handbook of Chemistry and Physics”. *CRC Press*.

Παράρτημα

20 GLYCEROL, CH₂OHCHOHCH₂OH

A % by wt.	μ D ₂₀ ²⁰	D ₂₀ ²⁰	C _s g/l	M g-mol/l	C _a g/l	(C _a - C _s) g/l	(n - n _a) × 10 ⁴	n	Δ °C	O Os/kg	S g-mol/l	η/η_a	η/ρ cS	ϕ rHe
5.00	1.0097	1.0115	50.5	0.548	959.2	39.0	58	1.3388	1.078	0.580	0.315	1.125	1.116	88.71
6.00	1.0120	1.0138	60.7	0.659	951.3	46.9	70	1.3400	1.316	0.708	0.385	1.155	1.143	86.44
7.00	1.0144	1.0162	71.0	0.771	943.4	54.9	82	1.3412	1.561	0.839	0.457	1.186	1.171	84.17
8.00	1.0167	1.0185	81.3	0.883	935.4	62.9	94	1.3424	1.811	0.974	0.530	1.218	1.201	81.90
9.00	1.0191	1.0209	91.7	0.996	927.4	70.9	106	1.3436	2.064	1.110	0.603	1.253	1.232	79.67
10.00	1.0215	1.0233	102.1	1.109	919.3	78.9	118	1.3448	2.323	1.249	0.678	1.288	1.263	77.48
12.00	1.0262	1.0281	123.1	1.337	903.1	95.1	142	1.3472	2.880	1.548	0.837	1.362	1.330	73.28
14.00	1.0311	1.0329	144.4	1.568	886.7	111.5	167	1.3496	3.469	1.865	1.004	1.442	1.401	69.22
16.00	1.0360	1.0378	165.8	1.800	870.2	128.0	191	1.3521	4.094	2.201	1.177	1.530	1.480	65.22
18.00	1.0409	1.0428	187.4	2.035	853.6	144.7	217	1.3547	4.756	2.557	1.359	1.627	1.566	61.34
20.00	1.0459	1.0478	209.2	2.272	836.8	161.5	242	1.3572	5.46	2.93	1.546	1.734	1.661	57.56
24.00	1.0561	1.0580	253.5	2.752	802.6	195.6	294	1.3624	7.01	3.77	1.944	1.984	1.882	50.31
28.00	1.0664	1.0683	298.6	3.243	767.8	230.4	347	1.3676	8.77	4.71	2.370	2.274	2.136	43.89
32.00	1.0770	1.0789	344.6	3.742	732.3	265.9	400	1.3730	10.74	5.78	2.814	2.632	2.449	37.91
36.00	1.0876	1.0896	391.5	4.252	696.1	302.2	455	1.3785	12.96	6.97	3.276	3.082	2.839	32.38
40.00	1.0984	1.1003	439.4	4.771	659.0	339.2	511	1.3841	15.50	8.33	3.757	3.646	3.326	27.37
44.00	1.1092	1.1112	488.1	5.300	621.2	377.1	567	1.3897			4.434	4.434	4.005	22.51
48.00	1.1200	1.1220	537.6	5.838	582.4	415.8	624	1.3954			5.402	5.402	4.833	18.47
52.00	1.1308	1.1328	588.0	6.385	542.8	455.4	681	1.4011			6.653	6.653	5.895	15.00
56.00	1.1419	1.1439	639.4	6.944	502.4	495.8	739	1.4069			8.332	8.332	7.311	11.98
60.00	1.1530	1.1551	691.8	7.513	461.2	537.0	799	1.4129			10.66	10.66	9.264	9.36
64.00	1.1643	1.1663	745.1	8.091	419.1	579.1	859	1.4189			13.63	13.63	11.73	7.32
68.00	1.1755	1.1775	799.3	8.680	376.1	622.1	919	1.4249			18.42	18.42	15.70	5.42
72.00	1.1866	1.1887	854.3	9.277	332.2	666.0	980	1.4310			27.57	27.57	23.28	3.62
76.00	1.1976	1.1997	910.2	9.883	287.4	710.8	1040	1.4370			40.49	40.49	33.88	2.46
80.00	1.2085	1.2106	966.8	10.498	241.7	756.5	1101	1.4431			59.78	59.78	49.57	1.67
84.00	1.2192	1.2214	1024.2	11.121	195.1	803.2	1162	1.4492			84.17	84.17	69.18	1.19
88.00	1.2299	1.2320	1082.3	11.752	147.6	850.7	1223	1.4553			147.2	147.2	119.9	0.68
92.00	1.2404	1.2426	1141.1	12.392	99.2	899.0	1284	1.4613			383.7	383.7	310.0	0.26
96.00	1.2508	1.2530	1200.7	13.039	50.0	948.2	1344	1.4674			778.9	778.9	624.0	0.13
100.00	1.2611	1.2633	1261.1	13.694	0.0	998.2	1405	1.4735			1759.6	1759.6	1398.1	0.06

Προγράμματα Matlab

1. Πρόγραμμα υπολογισμού των συντελεστών συσχέτισης $\alpha(x,y)$ και $\beta(x,y)$

```
% This is an .m file for image processing
tic
echo off
%-----DATA READING-----
[first,WLo,BLo,number_of_images_steady,time_delay,distance_overflow,x,z,hn]=textread(
'Input_Production_of_convIo.txt',...
's%f%f%f%f%f%f%f', 'headerlines', 2);
addition(1:576,1:768)=1.275;
analogx=x(1)/576.;
analogz=z(1)/768.;
for i=1:576
    xvector(i)=i*analogx;
end
for i=1:768
    zvector(i)=i*analogz+distance_overflow(1);
    i
end
%-----PRODUCE THE NOISE MATRIX-----
convvIo=double(imread('conv7Io', 'bmp'));
Ionew=(convvIo*((351.1-1.275)/255)+addition);
clear convvIo
%-----FRAME AVERAGING for Iomin-----
firstV=first(1);
firstlho=char(firstV);
qo=(WLo(1)-BLo(1))/255;
BLo_matrix(1:576,1:768)=BLo(1);
total=zeros(576,768);
    for num=1:number_of_images_steady(1)

temporary_matrix=(double(imread(strcat(firstlho,int2str(num),'.bmp')))*qo)+BLo_matrix
-Ionew;

        total=total+temporary_matrix;
    end
Io_totalmin=(total./number_of_images_steady(1));
%-----FRAME AVERAGING For Difference-----
for j=2:length(first)
    firstV=first(j);
    firstl=char(firstV);
    qo=(WLo(j)-BLo(j))/255;
    BLo_matrix(1:576,1:768)=BLo(j);
    total=zeros(576,768);
        for num=1:number_of_images_steady(j)

temporary_matrix=(double(imread(strcat(firstl,int2str(num),'.bmp')))*qo)+BLo_matri
x-Ionew;

            total=total+temporary_matrix;
        end
        Io_totalmax=(total./number_of_images_steady(j));
        kkl=round(j-1);
        Io(:, :, kkl)=Io_totalmax-Io_totalmin;
        Iomax(:, :, kkl)=Io_totalmax;
end
clear qo WLo BLo temporary_matrix num Io_totalmax total firstl firstV time_delay
```

```

clear distance_overflow BLo_matrix number_of_images_steady analogx analogz
acoef=zeros(576,768);
bcoef=zeros(576,768);
kk2=round(length(first)-1);
for i=2:length(first)
    dhn(i-1)=hn(i)-hn(1)
end
for k=1:576
    k
    for i=1:kk2
        temp(i,:)=Io(k,:,i);
    end
    xxcal=dhn;
    vvcac=temp';
    for j=1:768
        yyycal(j,:)=polyfit(xxcal,vvcac(j,:),1);
    end
    for j=1:768
        acoef(k,j)=yyycal(j,1);
        bcoef(k,j)=yyycal(j,2);
    end
end
ho=hn(1);
clear temp xxcal vvcac yyycal kk2 kk1 i j k x z
save(strcat('C:\3_07_07\workspaces\',strcat(strcat(first1ho))))
clear
toc

```

2. Πρόγραμμα μετατροπής των εικόνων σε πίνακες

```

%This is an .m file for image processing

[namesV,nameimage,WL,BL,number_of_images,hnusselt]...
=textread('Input_Production_of_convHeight.txt','%s%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(namesV)
    nummm=char(namesV(i));
    load(nummm)
    clear Io first addition Iomax dhn
    time_delay=0.1;
    tvector=(time_delay:time_delay:number_of_images*time_delay);
    nameimageV=nameimage(i);
    nameim=char(nameimageV);
    q=(WL(i)-BL(i))/255;
    BL_matrix(1:576,1:768)=BL(i);
    for num=1:number_of_images
        k=round(576*(num-1)+1);
        kk=round(576*num)
        nameim
        Iof=double(imread(strcat(nameim,int2str(num),'.bmp')));
        Iof_temporary=Iof*q+BL_matrix-Ionew-Io_totalmin;
        clear Iof
        height=(Iof_temporary-bcoef)./(acoef))+ho;
        clear Iof_temporary
        hall(k:kk,1:768)=int16(height(1:576,1:768));
        clear height
    end
end

```

```

%-----Save-----
save(strcat('C:\3_07_07\workspaces\',strcat(strcat(nameim,'with',nummm))), 'hall', 'xvector', 'zvector', 'tvector', 'number_of_images', 'nummm')
clear hall
end
clear

```

3. Πρόγραμμα δημιουργίας διαγραμμάτων χωρικής μεταβολής του πάγους του υμένα

```

% Visualization of image processing results
[st,lin]=textread('graph.txt','%s %f','headerline',1);
names=textread('inputdisp.txt','%s','headerline',1);
for kkk=1:length(names)
    kkk
    namer=names(kkk);
    nammm=char(namer)
    load (nammm)
    nammm
    x1=10;
    x2=570;
    z1=10;
    z2=760;
    zv=zvector(z1:z2-1);
    xv=xvector(x1:x2-1);
    xz=round(x2-x1);
    xposition=round(384);

    for i=1:number_of_images
        limit1=round((i-1)*576+1);
        limit2=round(i*576);
        TDA=(hall(limit1:limit2,1:768));
        TDAnew=double(TDA(x1:x2-1,z1:z2-1));
        height(i,:)=TDAnew(xposition,:);
        clear TDA TDAnew
    end
    clear hall
    ln=round(5);
    sel=round((number_of_images/ln));
    for i=1:sel
        k2=round(i*ln);
        k1=round((i-1)*ln+1);
        hnew=height(k1:k2,:);
        for ii=1:ln
            styl=char(st(ii));
            li=lin(ii);
            plot(zv,hnew(ii,:),styl,'linewidth',li)
            hold on
        end
        xlabel('Downstream Distance [=]mm')
        ylabel('h [=]μm')
        title(['time beginning=',num2str(k1),' line ',char(nammm)])
        hold off
        h1=gcf;
        set(h1,'PaperOrientation','portrait')
        saveas(h1,strcat('C:\3_07_07\workspaces\lineprofiles\',
strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'LineProfileDown'),' .tif'))
        qqqq=hnew';

```

```

        save
        (strcat('C:\3_07_07\workspaces\lineprofiles\',strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'LineProfileDownold'),'.dat')), 'qqqq', '-ascii')
    end
end

```

4. Πρόγραμμα δημιουργίας διαγραμμάτων χρονικής μεταβολής ενός σημείου της ροής

```

[names, aax1, aay1, bbx1, bby1, aax2, aay2, bbx2, bby2, aax3, aay3, bbx3, bby3, aax4, aay4, bbx4, bby4]...
=textread('Input_TimeProfile.txt', '%s%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f', 'headerlines', 2);
tvect=(0.1:0.1:20);
for i=1:length(names)
    namer=names(i);
    nammm=char(namer);
    load(nammm);
    aax(1)=aax1(i);
    aay(1)=aay1(i);
    bbx(1)=bbx1(i);
    bby(1)=bby1(i);
    aax(2)=aax2(i);
    aay(2)=aay2(i);
    bbx(2)=bbx2(i);
    bby(2)=bby2(i);
    aax(3)=aax3(i);
    aay(3)=aay3(i);
    bbx(3)=bbx3(i);
    bby(3)=bby3(i);
    aax(4)=aax4(i);
    aay(4)=aay4(i);
    bbx(4)=bbx4(i);
    bby(4)=bby4(i);
    for j=1:4
        for num=1:200
            k=round(576*(num-1)+1);
            kk=k+aax(j);
            kkk=k+bbx(j);
            hdownup(num,1)=double(hall(kk,aay(j)));
            hdownup(num,2)=double(hall(kkk,bby(j)));

        end
        plot(tvect,hdownup(:,1),'Color','k','LineWidth',2);
        hold on
        plot(tvect,hdownup(:,2),'Color','r','LineWidth',2);
        xlabel('t(sec)');
        ylabel('film thickness');
        title(strcat('TimeProfile_',
, nammm, 'x=', num2str(aax(j)), '&', num2str(aay(j)), ', ', num2str(bbx(j)), '&', num2str(bby(j))));
    end
    hold off
    hl=gcf;
    set(hl,'PaperOrientation','portrait')

```

```
        saveas(h1, strcat('D:\3_07_07\workspaces\timeprofiles\',
strcat(strcat(nammm, 'x=', num2str(aax(j)), '_ ', num2str(aay(j))), ', ', num2str(bbx(j)), '_ ',
num2str(bby(j)), '_TimeProf'), '.tif'))
        save
        (strcat('D:\3_07_07\workspaces\timeprofiles\', strcat(strcat(nammm, 'x=', num2str(aax(j)
), '_ ', num2str(aay(j))), ', ', num2str(bbx(j)), '_ ', num2str(bby(j)), '_TimeProf'), '.dat')), '
hdownup', '-ascii')
        end
        clear namer nammm hall hdownup
end
```



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085996