

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΡΩΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΣΤΟ ΝΕΟ ΚΑΝΑΛΙ ΡΟΗΣ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΥΜΕΝΑ**

υπό
ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΟΡΦΕΑ

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βλαχογιάννης Μιχαήλ, Δρ Μηχανολόγος Μηχανικός ΠΘ
Διδάσκων (Π.Δ. 407/80) Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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.: 5542/1
Ημερ. Εισ.: 19-07-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2007
ΤΡΙ

© 2007 Ορφέας Τριανταφύλλου

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 (Επιβλέπων) Δρ. Μιχάλης Βλαχογιάννης
Διδάσκοντας (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
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Κατ' αρχήν θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Μιχάλη Βλαχογιάννη για την πολύτιμη βοήθεια και υπομονή που κατέβαλε για την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Κυρίως όμως τον ευχαριστώ διότι για μένα υπήρξε δάσκαλος σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου Φ.Χ.Δ. Λεοντίδη Βλάσση και Τζώτζη Χριστίνα που βοήθησαν στην διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς και τον Δάλλα Πέτρο, μεταπτυχιακό φοιτητή του Τμήματός για την ουσιαστική βοήθεια του στην επεξεργασία των μετρήσεων. Τέλος, να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Βασίλειο Μποντόζογλου και Νικόλαο Ανδρίτσο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ορφέας Τριανταφύλλου

ΠΡΩΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΝΕΟ ΚΑΝΑΛΙ ΡΟΗΣ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΥΜΕΝΑ

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΟΡΦΕΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Μιχάλης Βλαχογιάννης
Διδάσκοντας (Π.Δ. 407/80),
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Λεπτοί υμένες υγρού συναντώνται σε σημαντικές συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Λέγοντας ροή λεπτού υμένα υγρού, εννοούμε την ροή αυτή στην οποία το πάχος του ρευστού είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της. Η ικανότητα των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση είναι αυτή που έχει οδηγήσει στη ευρεία χρήση τους σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

Η ερευνητική προσπάθεια που πραγματοποιείται στο εργαστήριο στοχεύει στην κατανόηση των βασικών μηχανισμών που διέπουν τα φαινόμενα ροής σε υμένες υγρού, τα οποία συνδέονται άμεσα με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας ή θερμότητας.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του κ. Μ. Βλαχογιάννη κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η διάταξη απαρτιζόταν από ένα κανάλι ροής μήκους 0,8m και ενός συστήματος ψηφιακής απεικόνισης. Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων έδειξαν την ανάγκη παρατήρησης της δυναμικής εξέλιξής τους σε ένα μεγάλο μήκος ροή που υπερέβαινε κατά πολύ τις δυνατότητες της συγκεκριμένης συσκευής. Ξεκίνησε έτσι, μια προσπάθεια κατασκευής ενός καναλιού μήκους 3m στο ίδιο εργαστήριο. Ο τρόπος ψηφιακής απεικόνισης για τον υπολογισμό του πάχους του υμένα είναι ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο κανάλι.

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στα κατασκευαστικά μέρη του καναλιού καθώς και στο υδραυλικό κύκλωμα που το συνοδεύει. Επίσης παρουσιάζονται τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα και αναλύονται οι πρώτες μετρήσεις που εξήχθησαν από το νέο κανάλι ροής πίπτοντος υμένα.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	3
2.1	<i>Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα</i>	3
2.2	<i>Θεωρία γραμμικής ευστάθειας για τη ροή υμένα σε κεκλιμένο</i>	5
2.3	<i>Μη γραμμική εξέλιξη της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα</i>	8
2.3.1.	<i>Θεωρία</i>	8
2.3.2.	<i>Πειράματα</i>	10
2.3.3.	<i>Αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων</i>	15
Κεφάλαιο 3	Πειραματική Μεθοδολογία	18
3.1	<i>Ιδιότητες των ρευστών</i>	18
3.2	<i>Παράμετροι του πειράματος</i>	19
3.3	<i>Η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό</i>	20
3.3.1	<i>Βαθμονόμηση της μεθόδου φθορισμού</i>	24
3.3.2	<i>Επεξεργασία δεδομένων</i>	26
3.3.3	<i>Επεξεργασία εικόνων για την περίπτωση επίπεδου τοιχώματος</i>	29
3.4	<i>Αγωγιμομετρική τεχνική</i>	31
3.4.1	<i>Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής</i>	32
3.4.2	<i>Επεξεργασία δεδομένων</i>	33
Κεφάλαιο 4	Πειραματική Διάταξη	36
4.1	<i>Εισαγωγή</i>	36
4.2	<i>Η μεταλλική κατασκευή</i>	36
4.2.1	<i>Η μεταλλική βάση</i>	36
4.2.2	<i>Το ικρίωμα</i>	37
4.3	<i>Σύστημα ρύθμισης κλίσης</i>	38
4.4	<i>Το κανάλι ροής</i>	41
4.5	<i>Υδραυλικό κύκλωμα</i>	45
4.6	<i>Σύστημα Φωτισμού</i>	51
Κεφάλαιο 5	Πειραματικά Αποτελέσματα	53
5.1	<i>Επιλογή ψηφιακού φίλτρου</i>	54
5.2	<i>Ανάλυση Πειραμάτων</i>	55
5.3	<i>Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μεθόδου Φθορισμού και Αγωγιμομετρικής Τεχνικής</i>	70

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 1. 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη για την αδιαστατοποίηση.....</i>	<i>16</i>
---	-----------

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο

Σχήμα 2.2: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re. () $Ka=3365$, (●) $Ka=1102$, (—) $Re=5/6\cot\phi$

Σχήμα 2.3: Τέσσερις περιοχές του κύματος κατά την εξέλιξη του κατά Chang

Σχήμα 2.4: Ανάπτυξη μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής

Σχήμα 2.5: Εξάρτηση του μεγέθους των μοναχικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως της κατάντη ροής

Σχήμα 2.6: Διάγραμμα καθορισμού περιοχών ευστάθειας και αστάθειας

Σχήμα 2.7: Εμφάνιση μοναχικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 1,5Hz

Σχήμα 2.8: Μορφή κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 3Hz

Σχήμα 2.9: Εξέλιξη κυμάτων πολλαπλών κορυφών ανά περίοδο με συχνότητα διαταραχής 4,5Hz

Σχήμα 2.10: Εμφάνιση κορεσμένων περιοδικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 7Hz

Σχήμα 2.11: Η συγχώνευση (coalescence) 2 μοναχικών κυμάτων

Σχήμα 2.12: Εξέλιξη ροής για αρχική διαταραχή συχνότητας 1Hz

Σχήμα 3.1: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό

Σχήμα 3.2: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο-pixel της εικόνας

Σχήμα 3.3: Διάταξη μέτρησης του πάχους του υμένα με τη βοήθεια μικρομέτρου

Σχήμα 3.4: Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται

Σχήμα 3.5: (a) Εικόνα πριν την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης

(b) μετά την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης

Σχήμα 3.6: Χωρική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα

Σχήμα 3.7: Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου

Σχήμα 3.8 Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής

Σχήμα 3.9. Χαρακτηριστικές καμπύλες πειραματικών δεδομένων (α) βαθμονόμησης και (β) σε πειραματικές συνθήκες

Σχήμα 3.10. Απεικόνιση χρονικής μεταβολής του ύψους του υμένα για (α) τα «ακατέργαστα» δεδομένα, (β) με την εφαρμογή του 1^{ου} φίλτρου και του (γ) του 2^{ου} φίλτρου

Σχήμα 4.1: Η μεταλλική βάση

Σχήμα 4.2: Το μεταλλικό ικρίωμα που αποτελεί τη βάση του καναλιού και της κάμερας

Σχήμα 4.3 : Οι τρεις αρθρώσεις που περιστρέφουν το κανάλι

Σχήμα 4.4 : Σύστημα ανύψωσης του ικρίωματος

- Σχήμα 4.5 :** Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου υπολογισμού γωνίας κλίσης καναλιού
- Σχήμα 4.6 :** Το κανάλι ροής κατασκευασμένο από Plexiglass
- Σχήμα 4.7:** Διαδικασία οριζοντίωσης του καναλιού
- Σχήμα 4.8:** Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωση
- Σχήμα 4.9:** Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωση
- Σχήμα 4.10:** Το υδραυλικό κύκλωμα
- Σχήμα 4.11:** Το δοχείο υπερχειλήσης
- Σχήμα 4.12:** Χαρακτηριστικά λειτουργίας εμβαπτιζόμενων αντλιών
- Σχήμα 4.13:** Χαρακτηριστικά λειτουργίας φυγοκεντρικής αντλία
- Σχήμα 4.14:** Χαρακτηριστική καμπύλη φυγοκεντρικής αντλίας
- Σχήμα 4.15:** Η διάταξη ροομέτρων
- Σχήμα 4.16:** Οι μέγιστες επιτρεπόμενες παροχές των ροομέτρων
- Σχήμα 4.17:** Γραφική απεικόνιση βαθμονόμησης για το ροόμετρο 2A
- Σχήμα 4.18 :** Ο διανομές και το δοχείο κατανομής
- Σχήμα 4.19:** Ο χρονοστής της διαταραχή ο οποίος κατασκευάστηκε στο εργαστήριο ΦΧΔ
- Σχήμα 4.20 :** Η διάταξη των λαμπτήρων κατά μήκος του καναλιού ροής
- Σχήμα 5.1 :** Γραφική απεικόνιση κυμάτων σε $Re=25$, $f=0.1$ Hz ($T_{on}=0.5$ sec)
- Σχήμα 5.2 :** Γραφική απεικόνιση κυμάτων σε $Re=19$, $f=0.1$ Hz ($T_{on}=0.25$ sec)
- Σχήμα 5.3:** α) Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για όλους τους Re β) Χρονοσειρές διαχωρισμένες
- Σχήμα 5.4 :** Χρονοσειρές στους $Re=17$ και $Re=18$ για πέντε διαφορετικά σημεία.
- Σχήμα 5.5 :** Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=17$ και $Re=18$ για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές (0,1sec)
- Σχήμα 5.6 :** Χρονοσειρά σε $Re=19$ για πέντε διαφορετικά σημεία κατάντη της ροής
- Σχήμα 5.7:** Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=19, Re=23$ για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές
- Σχήμα 5.8:** Χρονοσειρές των τεσσάρων διαφορετικών Re
- Σχήμα 5.9:** Χρονοσειρά σε $Re=16$ για πέντε διαφορετικά σημεία κατάντη της ροής
- Σχήμα 5.10:** Χρονοσειρά σε $Re=19$ για πέντε διαφορετικά σημεία
- Σχήμα 5.11:** Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=19, Re=23$.
- Σχήμα 5.12:** Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για όλους τους Re .
- Σχήμα 5.13:** Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=17$ για πέντε διαφορετικά σημεία
- Σχήμα 5.14:** Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=22$ για πέντε διαφορετικά σημεία
- Σχήμα 5.15:** Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=17, Re=22$
- Σχήμα 5.16:** Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για όλους τους Re

Σχήμα 5.17: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για $Re=17$, $Re=19$

Σχήμα 5.18: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για όλους τους Re .

Σχήμα 5.19: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για $Re=18$, $Re=20$

Σχήμα 5.20: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=17, Re=22$ κατάντη της ροής

Σχήμα 5.21: Χρονοσειρά αγωγιμομετρικής τεχνικής σε $Re=14$

Σχήμα 5.21: Σύγκριση των Χρονοσειρών μεταξύ της αγωγιμομετρικής τεχνικής και της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό για $Re=14$ και $Re=15$, όπου ο υμένας είναι ευσταθής.

Σχήμα 5.22: Σύγκριση των Χρονοσειρών μεταξύ της αγωγιμομετρικής τεχνικής και της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό για $Re=19$, όπου ο υμένας είναι ασταθής.

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ως αντικείμενο είχε την κατασκευαστική ολοκλήρωση του νέου καναλιού ροής πίπτοντος υμένα, καθώς και την εξαγωγή των πρώτων μετρήσεων για έλεγχο της σωστής λειτουργίας του. Ευρύτερα η ερευνητική προσπάθεια που πραγματοποιείται στο εργαστήριο στοχεύει στην κατανόηση των βασικών μηχανισμών που διέπουν τα φαινόμενα ροής σε υμένες υγρού, τα οποία συνδέονται άμεσα με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας ή θερμότητας.

Λεπτοί υμένες υγρού συναντώνται σε σημαντικές συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Λέγοντας ροή λεπτού υμένα υγρού, εννοούμε την ροή αυτή στην οποία το πάχος του ρευστού είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της. Η ικανότητα των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση είναι αυτή που έχει οδηγήσει στη ευρεία χρήση τους σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

Ρέοντας πάνω σε μια στερεή επιφάνεια, οι λεπτοί υμένες αναπτύσσουν μια πολύπλοκη δομή επιφανειακών κυμάτων, η μορφή και τα χαρακτηριστικά των οποίων ποικίλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής. Η εμφάνιση αυτών των δομών οφείλεται στις δυνάμεις βαρύτητας και απαντάται ακόμα και στις περιπτώσεις όπου στη διεπιφάνεια υγρού – αερίου δεν υπάρχουν διεπιφανειακές τάσεις. Τα χαρακτηριστικά της ροής και των δομών αυτών που δημιουργούνται επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας και μάζας, με αποτέλεσμα να καθορίζουν τον βαθμό απόδοσης των συσκευών στις οποίες απαντώνται.

Υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες σκοπός μας είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης των φαινομένων μεταφοράς. Κάποιες από αυτές τις συσκευές είναι οι συμπυκνωτές, οι εξατμιστήρες, οι στήλες απορρόφησης και οι διασπαστικοί αντιδραστήρες. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις επιθυμητή είναι η ελαχιστοποίηση των φαινομένων αυτών. Έτσι για παράδειγμα, η παρουσία κυμάτων στην επιφάνεια επίστρωσης των film έχει ως αποτέλεσμα τον υποβιβασμό των ιδιοτήτων τους και δεν είναι καθόλου επιθυμητή.

Η μελέτη των φαινομένων που δημιουργούνται στη ροή υγρού υμένα πάνω στο επίπεδο τοίχωμα έχει γίνει αντικείμενο ενασχόλησης πολλών ερευνητών, τόσο με πειραματικές, όσο και με αναλυτικές μεθόδους. Η πρώτη πειραματική προσέγγιση

της ροής που έγινε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του ΠΘ ήταν η διδακτορική διατριβή του κ Μ. Βλαχογιάννη (1996-2000). Το αρχικό κομμάτι της εν λόγω διατριβής συνίσταται από την κατασκευή μίας πειραματικής συσκευής για τη μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Στη συνέχεια, αυτή η συσκευή προσαρμόστηκε για τη μελέτη ροής υμένα πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα.

Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων στην υφιστάμενη συσκευή παρατηρήθηκε ότι πολύ ενδιαφέροντα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα σε μεγάλη απόσταση από την αφετηρία της ροής. Κυριότερο αυτών είναι η αλληλεπίδραση των **σολιτονικών κυμάτων** που δημιουργούνται από κάποια διαταραχή. Η ανάγκη παρατήρησης των φαινομένων ήταν εμφανής, όμως το μικρό ενεργό μήκος του καναλιού δεν επέτρεπε κάτι τέτοιο. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην απόφαση για την κατασκευή μίας νέας πειραματικής διάταξης που θα προσφέρει ένα μεγαλύτερο μήκος ροής ώστε να επιτρέπεται η «παρακολούθηση» ενός κύματος από το σημείο δημιουργίας του έως την τελική εξέλιξή του. Είναι σαφές λοιπόν ότι μιλάμε για μία συσκευή που σε γενικές γραμμές θα έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με την προηγούμενη αλλά και μία μεγαλύτερη κλίμακα μεγέθους. Οι εργασίες για την κατασκευή της συσκευής ξεκίνησαν στην αρχή του ακαδημαϊκού έτους 2004-5 σε μία αίθουσα του εργαστηρίου Φυσικών και Χημικών Διεργασιών. Στο κεφάλαιο 4 που ακολουθεί, γίνεται εκτενής περιγραφή όλων των επιμέρους στοιχείων της διάταξης και αναφορά στη βασική χρήση της.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αναφέρονται συνοπτικά η θεωρία και οι μέχρι τώρα μελέτες που σχετίζονται με την ροή λεπτού υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο κανάλι. 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.

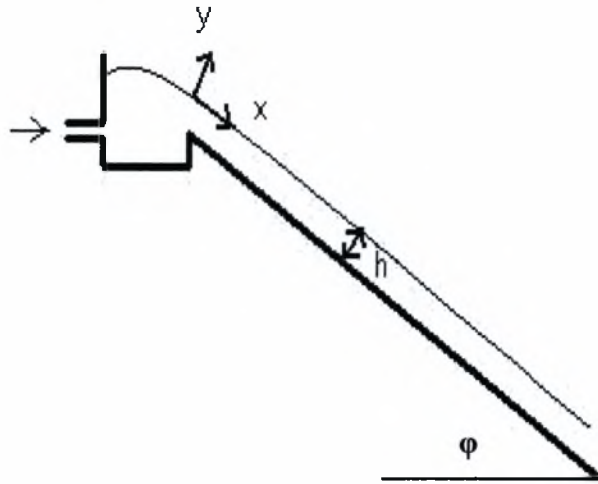
2.1 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα

Η πιο απλή μορφή του προβλήματος της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο είναι αυτή της ροής Nusselt. Θεωρούμε διδιάστατη 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 μπαίνει και βγαίνει ο υμένας ώστε να μην επηρεάζεται λόγω αυτών, δηλαδή η ταχύτητα κατά την x διεύθυνση δεν εξαρτάται από το μήκος x . Θεωρούμε επίσης ότι το υγρό είναι σταθερής πυκνότητας και ιξώδους.

$$\left(\begin{array}{c} \text{εισροή} \\ x\text{-ορμής} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{εκροή} \\ x\text{-ορμής} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{άθροισμα δυνάμεων} \\ \text{(παραγωγή } x\text{-ορμής)} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{συσσώρευση} \\ \text{ορμής} \end{array} \right)$$

Θεωρούμε στοιχειώδη όγκο ελέγχου. Η x -ορμή μπαίνει στον όγκο ελέγχου με τη ροή και λόγω της ιξώδους αλληλεπίδρασης. Το ισοζύγιο x -ορμής είναι το εξής:

$$[(Wdy_u_x)(\rho u_x)|_x - (Wdy_u_x)(\rho u_x)|_{x+L}] + [(WL\tau_{xy})|_y - (WL\tau_{xy})|_{y+dy}] + WLy\rho g \sin \phi = 0 \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.

Με απλοποιήσεις παίρνουμε:
$$-\frac{d(\tau_{yx})}{dy} + \rho g \sin \phi = 0 \quad (2.2)$$

με:
$$\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy} \quad (2.3)$$

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα είναι:

$$\text{στο } y=0 \quad u_x(0)=0 \quad (2.4)$$

$$\text{στο } y=h \quad \tau_{yx}=0 \quad (2.5)$$

Με βάση τα παραπάνω η κατανομή της ταχύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$u_x(y) = \left(\frac{\rho g \sin \phi}{2\mu} \right) y(2h - y) \quad \text{στο } y=h \quad (2.6)$$

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

$$h_N = \sqrt[3]{\frac{3q\mu}{\rho g \sin \phi}} \quad (2.7)$$

και συναρτήσει της μέσης ταχύτητας από τη σχέση:

$$h_N = \sqrt{\frac{3\mu \cdot u_o}{\rho g \sin \phi}} \quad (2.8)$$

Αδιαστατοποιώντας το πρόβλημα μπορούμε να πούμε ότι η ροή περιγράφεται από τους αριθμούς Reynolds και Weber ή από τους Reynolds και Kapitza, οι οποίοι δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Re} = \frac{u_o \cdot h_N}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad (2.9)$$

$$\text{We} = \frac{\gamma}{(\rho \cdot u_o^2 \cdot h_N)} \quad (2.10)$$

$$\text{Ka} = \frac{\gamma}{(\rho \cdot \nu^{4/3} \cdot g^{1/3})} \quad (2.11)$$

όπου: u_o είναι η μέση ταχύτητα, h_N το πάχος του επίπεδου υμένα κατά Nusselt, ρ η πυκνότητα του ρευστού, γ η επιφανειακή τάση και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Συνήθως χρησιμοποιείται ο αριθμός Kapitza αντί του αριθμού Weber διότι είναι συνάρτηση μόνο των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και ανεξάρτητος της παροχής.

Η μαθηματική ανάλυση του γενικού προβλήματος ροής με ελεύθερη επιφάνεια είναι αρκετά δύσκολη εξαιτίας του γεγονότος ότι η μορφή της επιφάνειας είναι άγνωστη και πρέπει να υπολογιστεί. Το πρόβλημα είναι μη-γραμμικό και για τη λύση του απαιτούνται πολύπλοκες μαθηματικές μέθοδοι.

2.2 Θεωρία γραμμικής ευστάθειας για τη ροή υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο

Το πρόβλημα της ροής υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο δίνει, πέρα από έναν αριθμό Re , ασταθείς λύσεις. Αν επιβάλλουμε στη ροή μια διαταραχή (μονοχρωματική ή απλώς θόρυβο) αυτή αναπτύσσεται κατά μήκος του πεδίου ροής και οδηγεί στην εμφάνιση κυμάτων και άλλων τρισδιάστατων δομών. Επειδή οι δισδιάστατες διαταραχές (διαταραχή συγκεκριμένης συχνότητας) είναι πιο ασταθείς από τις τρισδιάστατες και τα δημιουργούμενα δισδιάστατα κύματα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην 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 1, η ταχύτητα, η ροϊκή συνάρτηση και η πίεση είναι αντίστοιχα:

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

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

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

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

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη για την αδιαστατοποίηση

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: $\alpha = \hat{\alpha} h_N = \frac{2\pi h_N}{L}$

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

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

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

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα είναι:

1^{ov}: η ταχύτητα στο τοίχωμα είναι μηδενική προς όλες τις διευθύνσεις (συνθήκη μη ολίσθησης και μη διείδυσης) άρα:

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

2^{ov}: στην ελεύθερη επιφάνεια ($y = 1 + n$) ο ταυοστής τάσεων είναι μηδέν κατά την εφαπτομενική διεύθυνση και ίσος με την καμπυλότητα επί την επιφανειακή τάση κατά την κάθετη διεύθυνση:

$$\left. \underline{\sigma} \cdot \underline{n} \right|_{\underline{t}} = 0 \text{ και } \left. \underline{\sigma} \cdot \underline{n} \right|_{\underline{n}} = \gamma \kappa \quad (2.19)$$

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 :

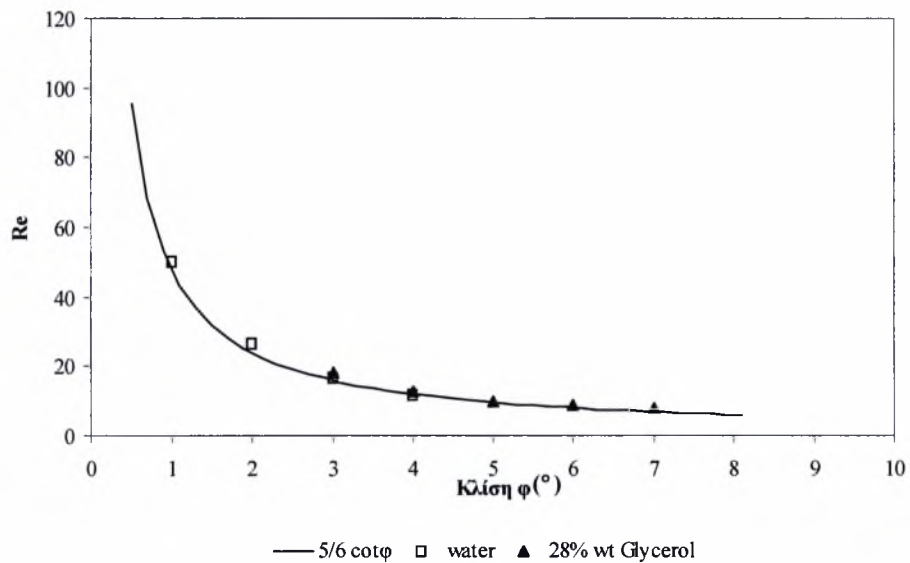
$$f(y) = f_0(y) + \alpha f_1(y) + \alpha^2 f_2(y) + \dots \quad (2.20)$$

$$c = c_0 + \alpha c_1 + a^2 c_2 + \dots \quad (2.21)$$

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:

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

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 (2002). Στο σχήμα 2.2 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 2.2: 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 2.2 έγιναν με νερό και διάλυμα νερού – γλυκερίνης 26% 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

Η εξέλιξη της ροής κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τον αριθμό Reynolds (Chang 1994). Έτσι, σε αρκετά μεγάλους αριθμούς Re ($Re > 1000$), τα κύματα που εμφανίζονται στον υμένα είναι κύματα τα οποία προκαλούνται από τις διατμητικές δυνάμεις και έχουν μήκη κύματος συγκρίσιμα ή μικρότερα από το πάχος του υμένα h_N . Κάτω από τέτοιες συνθήκες μεγάλης παροχής συνήθως έχουμε τυρβώδη ροή στην οποία επικρατούν εσωτερικές αστάθειες Tollmien-Schlichting. Η εσωτερική τύρβη υπερισχύει των επιφανειακών δυνάμεων. Σε λίγο μικρότερους αριθμούς Re ($1000 < Re < 300$) διαμήκη διεπιφανειακά κύματα αρχίζουν να εμφανίζονται εξαιτίας των δυνάμεων βαρύτητας και των διεπιφανειακών τάσεων. Παρόλα αυτά η δυναμική των κυμάτων είναι εξαιρετικά μη μόνιμη ειδικά για τα μικρά κύματα τα οποία φαίνεται να δημιουργούνται από μεγαλύτερα κύματα μέσω ενός μηχανισμού αποκόλλησης των δινών. Σε πολύ μικρές παροχές ($Re \ll 1$) ο υμένας γίνεται τόσο λεπτός ώστε οι ενδομοριακές δυνάμεις και η δυναμική της γραμμής επαφής επιφάνειας – τοιχώματος γίνονται τόσο ισχυρές που ο υμένας διασπάται σε κάποια σημεία. Αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή στην οποία ο Re είναι μεταξύ 1 και 300, κατά την οποία ο υμένας είναι ασταθής και αρχίζουν να εμφανίζονται στην επιφάνεια κύματα των οποίων τα χαρακτηριστικά αλλάζουν με το χρόνο.

Συγχρόνως, ο Chang (1994) περιέγραψε συστηματικά την εξέλιξη της ροής λεπτού υμένα υγρού κατά μήκος κεκλιμένης επίπεδης επιφάνειας. Τα διαφορετικά στάδια της εξέλιξης τα χώρισε σε τέσσερις περιοχές (σχήμα 2.3). Η πρώτη περιοχή (περιοχή I) αναφέρεται στα αρχικά στάδια της εξέλιξης του υμένα κοντά στην είσοδο. Κατά την είσοδο του υμένα στο κανάλι εισάγεται και μια διαταραχή. Η διαταραχή αυτή μεταφέρεται, και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός κύματος αρχικά μικρού πλάτους. Εάν η διαταραχή είναι μονοχρωματική (έχει μια μόνο συχνότητα), στην εμφανιζόμενη αστάθεια θα έχει μεταφερθεί η ίδια συχνότητα. Αν αντίθετα, η διαταραχή έχει πολλές συχνότητες (π.χ. φυσικός θόρυβος), τότε το κύμα που θα παραχθεί θα έχει την πλέον ασταθή συχνότητα του θορύβου. Επίσης, παρατηρούμε ότι στην περιοχή I το πλάτος του κύματος αυξάνεται εκθετικά, όπως σε όλα τα φαινόμενα γραμμικής διέγερσης ασταθών κυμάτων.

Το όριο το οποίο καθορίζει το τέλος της περιοχής I και την αρχή περιοχής II είναι το ότι σταματάει η εκθετική αύξηση του πλάτους του κύματος. Το πλάτος

παίρνει μια πεπερασμένη τιμή η οποία εξαρτάται από τους αριθμούς Re και Ka και το μήκος του διεγερμένου κύματος. Συγχρόνως το σχήμα του κύματος δεν είναι πλέον καθαρό ημίτονο (μια μόνο συχνότητα) αλλά παίρνει μια πιο σύνθετη μορφή (αρχίζουν να εμφανίζονται και οι αρμονικές της). Έχει παρατηρηθεί ότι αν οι επιβαλλόμενες εξωτερικές διαταραχές έχουν μεγάλο μέγεθος, τα κύματα που δημιουργούνται έχουν τη συχνότητα της διαταραχής. Αν αντίθετα είναι διαταραχές μικρού μεγέθους τα δημιουργούμενα κύματα είναι ανεξάρτητα των διαταραχών. Τα κύματα που εμφανίζονται στην περιοχή II διανύουν μια απόσταση περίπου 10 μήκη κύματος χωρίς να αλλάζει η μορφή και το μέγεθός τους έως ότου περάσουν στην περιοχή III.

Προχωρώντας κατάντη της ροής η μέχρι τώρα μορφή χάνεται, και εμφανίζονται δύο άλλες μορφές αστάθειας των κυμάτων πεπερασμένου μεγέθους (περιοχή III). Το ποια από τις δύο θα εμφανιστεί εξαρτάται από τη συχνότητα της διαταραχής. Στην μία περίπτωση της υποαρμονικής αστάθειας (subharmonic instability), τα κύματα αρχίζουν να ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας έτσι μία καινούρια κυματομορφή η οποία έχει πολλαπλάσιο μήκος κύματος. Στην άλλη περίπτωση, της πλευρικής αστάθειας (sideband instability), η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας είναι πολύ πιο πολύπλοκη και παρουσιάζει πολλές κορυφές (έχει πολλές συχνότητες αυτή η μορφή). Και στις δύο περιπτώσεις, βλέπουμε τις νέες αυτές μορφές αστάθειας να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Μεγαλύτερα κύματα πλησιάζουν και προσπερνάνε μικρότερα τα οποία εξαφανίζονται. Συγχρόνως αυτά αποκτούν μια πολύ υπερυψωμένη και απότομη μπροστινή πλευρά της οποίας προηγούνται μικρά τριχοειδή κύματα (capillary ripples). Τα μεγάλα αυτά κύματα ονομάζονται μοναχικά (solitary waves) και συνήθως παραμένουν αναλλοίωτα για σημαντικό μήκος ροής.



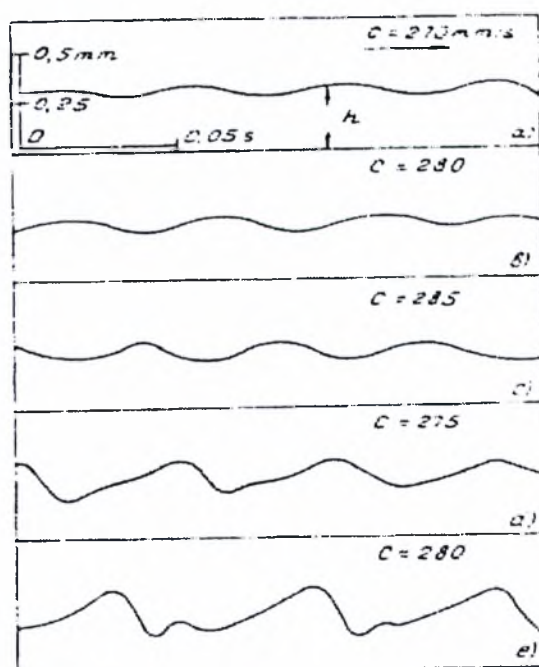
Σχήμα 2.3: Τέσσερις περιοχές του κύματος κατά την εξέλιξή του κατά Chang.

Η παράμετρος ω είναι η συχνότητα του κύματος.

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 στη 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 και όπως προείπαμε χαρακτηρίζονται από το απότομο μπροστινό τους μέρος και την πιο ομαλή «ουρά».

2.3.2. Πειράματα

Η μη – γραμμική εξέλιξη της ροής έχει διερευνηθεί πειραματικά από διάφορες ερευνητικές ομάδες. Μια από τις σημαντικότερες εργασίες η οποία αποτελεί σημείο αναφοράς στη ροή υγρού υμένα είναι αυτή των Alekseenko et al. (1985). Από αυτή τη μελέτη δόθηκαν στοιχεία για την εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα επιβολής διαταραχής το οποίο έδινε τη δυνατότητα αλλαγής των χαρακτηριστικών της διαταραχής. Η μέτρηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων, δηλαδή της ταχύτητας και του μήκους κύματος τους, συναρτήσει του μεγέθους αυτών αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της εργασίας. Παρατηρήθηκε εξάρτηση της ταχύτητας των παραγόμενων μοναχικών κυμάτων από το μέγεθός τους. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα.



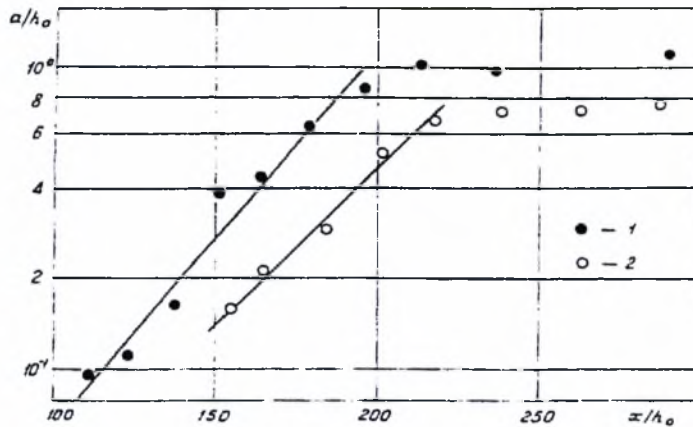
Σχήμα 2.4: Ανάπτυξη μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής.

Η εξάρτηση του μεγέθους των παραγόμενων κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατόντη της ροής παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5. Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα απεικονίζεται η εξάρτηση του αδιάστατου μεγέθους:

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

ως συνάρτηση της αδιάστατης κατόντη αποστάσεως:

$$\frac{x}{h_N}$$



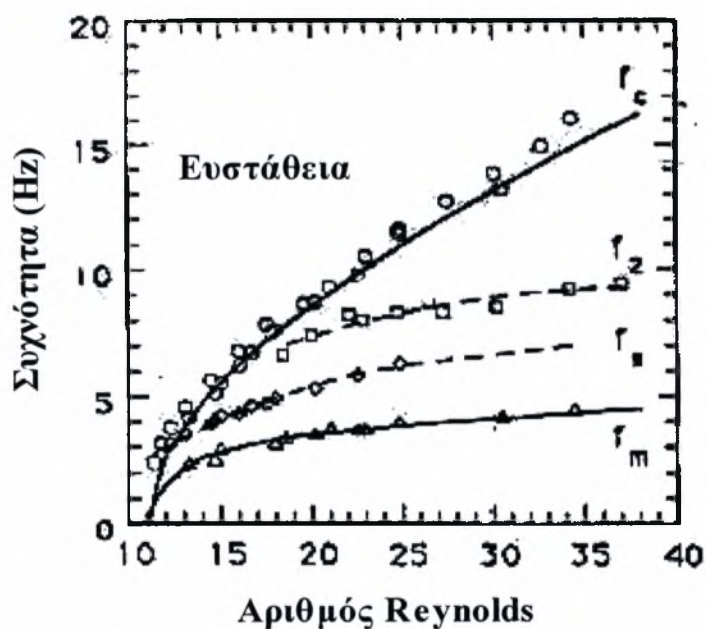
Σχήμα 2.5: Εξάρτηση του μεγέθους των μοναχικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως της κατόντη ροής.

Όπως φαίνεται στο σχήμα η αύξηση της κατόντη αποστάσεως έχει ως αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση του μεγέθους του κύματος. Από μια απόσταση και μετά, το μέγεθος του μοναχικού κύματος δεν μεταβάλλεται επιβεβαιώνοντας ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως.

Άλλη μια σημαντική εργασία είναι αυτή των Liu et all (1993, 1994). Στην περίπτωση αυτή για τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό. Αποδείχθηκε ότι η μη γραμμική ανάπτυξη των κυμάτων είναι συνάρτηση τόσο του αριθμού Reynolds όσο και των χαρακτηριστικών της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Στα αποτελέσματά τους παρουσιάζεται η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ του κρίσιμου, για την εμφάνιση αστάθειας, αριθμού Re και της γωνίας κλίσης του τοιχώματος όπως παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.2. Επιβεβαιώθηκαν τα περισσότερα θεωρητικά προβλεπόμενα όρια της γραμμικής ευστάθειας. Όταν ο αριθμός Re βρίσκεται στην ασταθή περιοχή, απέδειξαν πειραματικά ότι η αρχική αστάθεια μετακινείται στην κατεύθυνση της ροής και

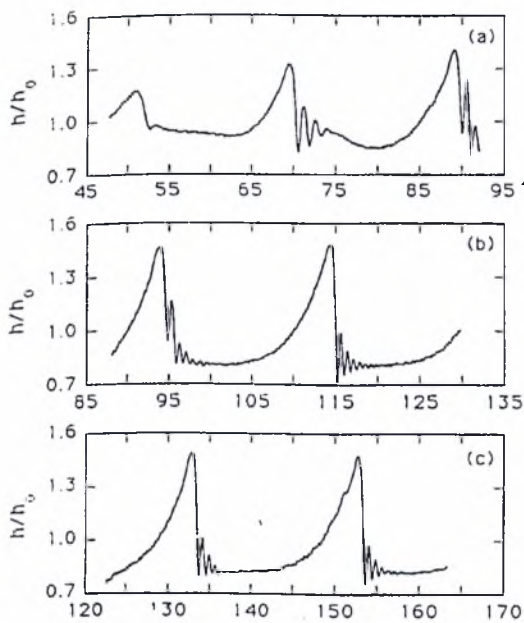
συνεχώς μεγαλώνει. Τα όρια τα οποία χωρίζουν τις διάφορες περιοχές ευστάθειας και αστάθειας βρίσκονται συγκεντρωμένα στο διάγραμμα του σχήματος 2.6.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ότι για μικρούς αριθμούς Re ο υμένας είναι ευσταθής. Επίσης για μεγάλες συχνότητες έχουμε ευστάθεια ανεξάρτητα τον Re . Η καμπύλη η οποία χαρακτηρίζεται ως f_c είναι αυτή η οποία χωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή. Μεταξύ αυτής της συχνότητας και της συχνότητας f_s έχουμε κορεσμένα πεπερασμένου εύρους κύματα, με μια κορυφή ανά περίοδο. Η συχνότητα f_2 είναι το όριο που χωρίζει 2 διαφορετικού τύπου μη-γραμμικές συμπεριφορές. Ανάμεσα από την f_c και την f_2 εμφανίζεται η πλευρική αστάθεια (sideband instability), ενώ για αμέσως μικρότερες συχνότητες εμφανίζεται η υποαρμονική αστάθεια (subharmonic instability) μέχρι και το όριο f_s . Μεταξύ των ορίων f_s και f_m αρχίζουν να εμφανίζονται κύματα με πολλαπλές κορυφές, όπως είναι και τα μοναχικά κύματα, ενώ κάτω από το τελευταίο όριο οδηγούμαστε στην τρισδιάστατη χαοτική δομή.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα καθορισμού περιοχών ευστάθειας και αστάθειας κατά Liu et al.

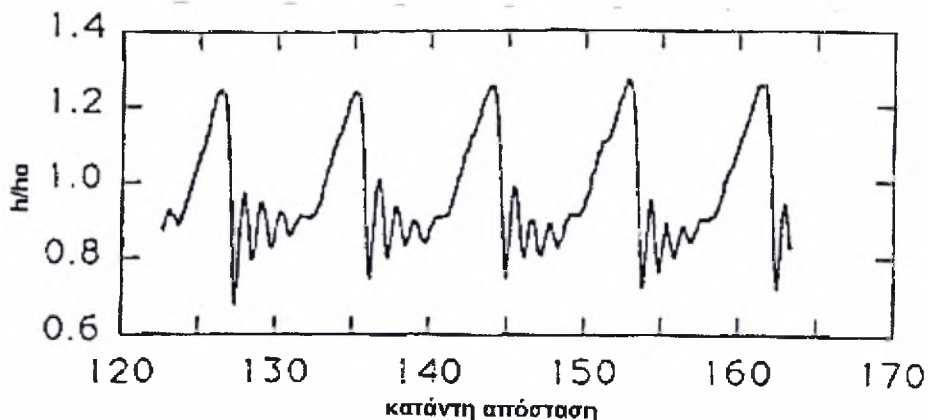
Η ανάπτυξη και εξέλιξη των μοναχικών κυμάτων έχει μελετηθεί πειραματικά από τους Liu & Gollub (1994) χρησιμοποιώντας υγρό μεγάλου ιξώδους (διάλυμα νερού γλυκερίνης 54% κ.β. γλυκερίνη). Για συχνότητα διαταραχής 1,5Hz παρατηρήθηκε ότι στην είσοδο της διαταραχής εμφανιζόταν ένα ημιτονοειδές κύμα το οποίο εξελίσσεται και η κάθε κορυφή παρουσιάζει απότομο μέτωπο και μακριά ουρά (σχήμα 2.7). Σταδιακά, τα κύματα αυτά εξελίσσονται και παίρνουν τη μορφή των μοναχικών κυμάτων. Έτσι το μοναχικό κύμα γίνεται κορεσμένο και φτάνει σε μια στάσιμη κατάσταση όπου οι διαδοχικοί παλμοί είναι ταυτόσημοι.



Σχήμα 2.7: Εμφάνιση μοναχικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 1,5Hz

Κατάντη απόσταση

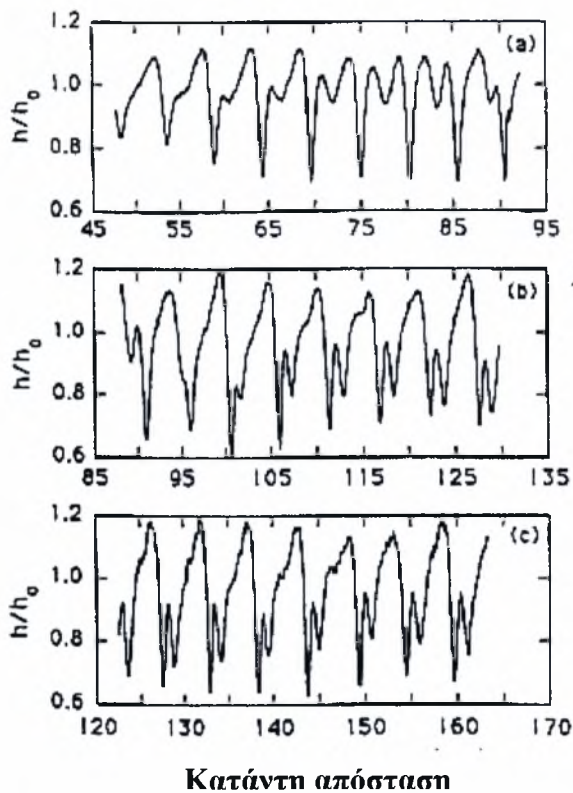
Αυξάνοντας περισσότερο την συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής (3Hz) τα μοναχικά αυτά κύματα φαίνεται να πλησιάζουν μεταξύ τους μέχρι τη στιγμή που δεν μπορούν να διαχωριστούν καθαρά (σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Μορφή κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 3Hz.

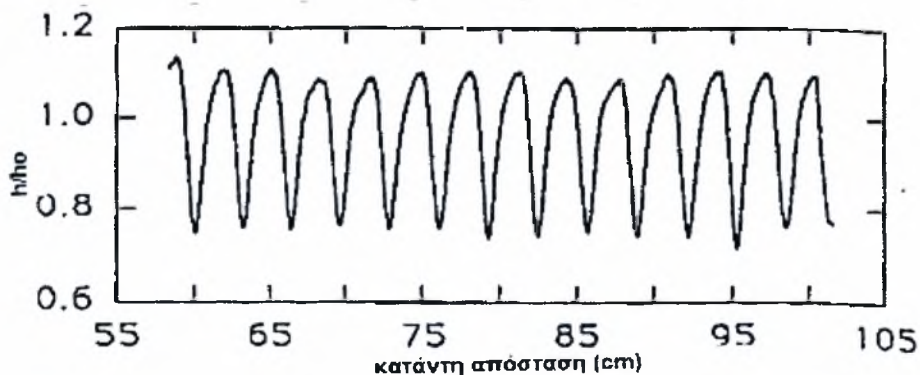


Καθώς η συχνότητα αυξάνει ακόμη περισσότερο τα κύματα με πολλαπλές κορυφές ανά περίοδο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η κορυφή τους μειώνεται με άμεσο αποτέλεσμα να μικραίνει και η ταχύτητά τους. Έτσι καταλήγουμε σε δομές οι οποίες έχουν περισσότερες από μια κορυφές ανά περίοδο και ενώ δεν έχουν χωρική περιοδικότητα έχουν χρονική περιοδικότητα. Τέτοια συμπεριφορά έχουμε στην περίπτωση όπου η συχνότητα διαταραχής είναι 4,5Hz και παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Εξέλιξη κυμάτων πολλαπλών κορυφών ανά περίοδο με συχνότητα διαταραχής 4,5Hz

Τέλος, σε πειράματα που έγιναν με συχνότητα διαταραχής στα 7Hz τα κύματα που εμφανίζονται είναι κορεσμένα περιοδικά κύματα με μία κορυφή ανά περίοδο (σχήμα 2.10).



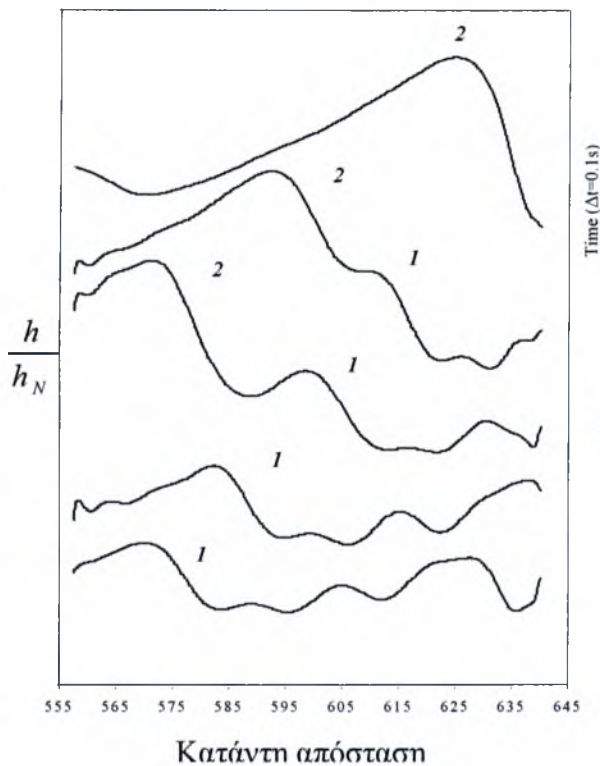
Σχήμα 2.10: Εμφάνιση κορεσμένων περιοδικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 7Hz.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι αστάθειες του υμένα μετατρέπονται από διδιάστατες σε τρισδιάστατες. Οι αστάθειες αυτές μπορεί να εμφανίζονται με τη μορφή τρισδιάστατων εγκάρσιων βαθουλωμάτων πάνω στα κύματα, ή με τη μορφή της δομής «ψαροκόκαλο» (herringbone patterns). 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.

2.3.3. Αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων

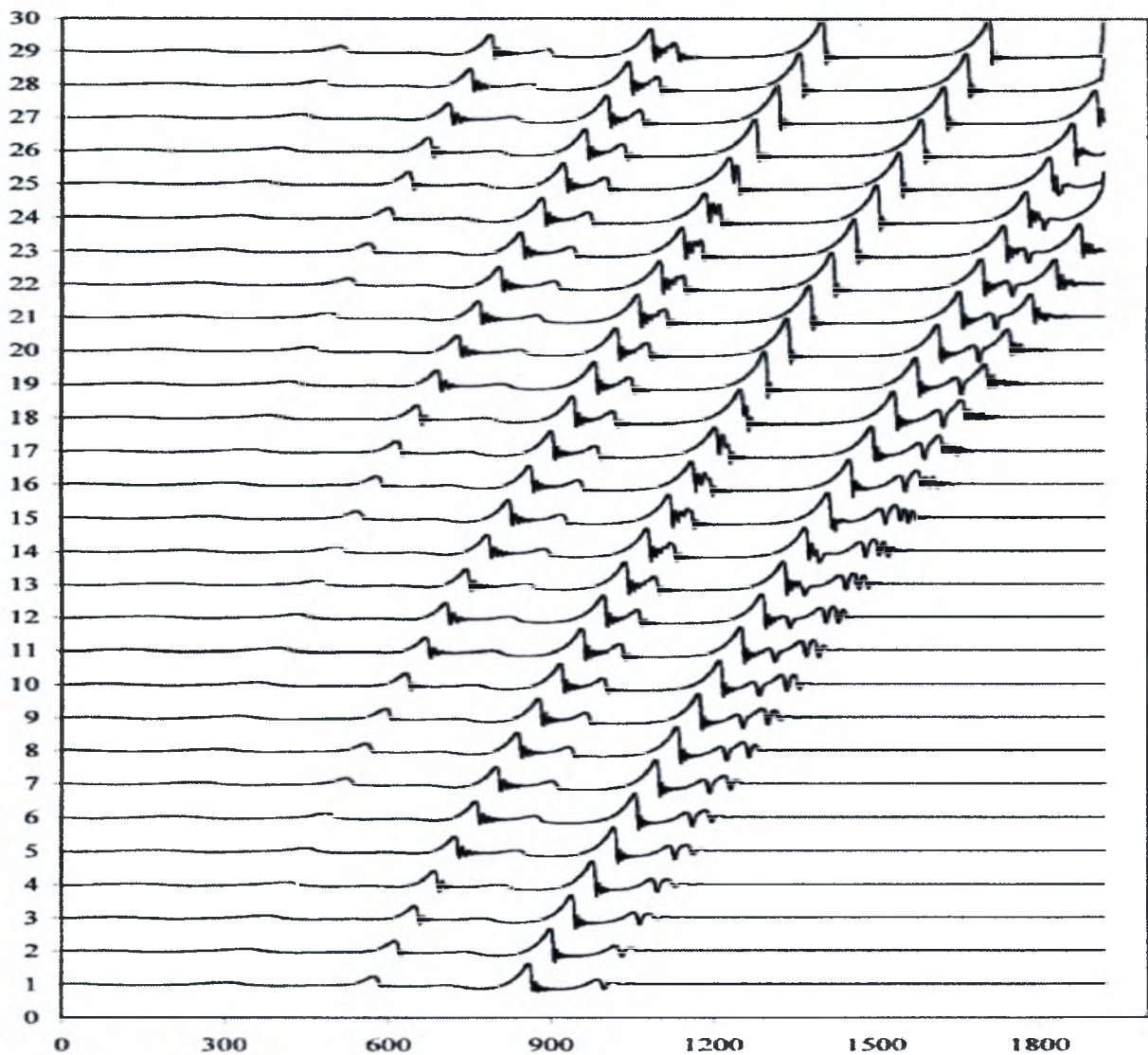
Η αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα τόσο για τη ροή υγρού υμένα όσο και για άλλους τομείς της φυσικής όπου παρατηρούνται λύσεις μοναχικών κυμάτων. Το γενικότερο ερώτημα αφορά την δυνατότητα περιγραφής πολύπλοκων συστημάτων μέσω των χαρακτηριστικών και της αλληλεπίδρασης λίγων συνεκτικών δομών.

Προβλέψεις για την αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων έχουν γίνει από τους Chang, Demekhin & Kalaidin (1995). Οι Liu et al (1994) παρατήρησαν πειραματικά τη συγχώνευση μεταξύ δύο κυμάτων εκ των οποίων το προπορευόμενο είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που ακολουθεί. Παρόλα αυτά, η δημιουργία μοναχικών κυμάτων και η αλληλεπίδρασή τους δεν μελετήθηκαν λεπτομερώς από τους προαναφερθέντες μελετητές. Στην εργασία των Vlachogiannis and Bontozoglou (2001) μελετήθηκε διεξοδικά η διαδικασία της συγχώνευσης των κυμάτων, 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 η διαφορά είναι μικρή, ο χρόνος που απαιτείται είναι μεγάλος. Η μέγιστη χρονική διάρκεια παρατήρησης της εξέλιξης των αλληλεπιδράσεων είναι της τάξης των 0,5 έως 0,6sec, 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.



Σχήμα 2.11: Η συγχώνευση (coalescence) 2 μοναχικών κυμάτων.

Ένα άλλο ενδιαφέρον μεταβατικό φαινόμενο που παρατηρείται στην πλάτη του μοναχικού κύματος μετά το τέλος της συγχώνευσης, είναι η εμφάνιση του υπερυψωμένου υποστρώματος. 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 2.12: Εξέλιξη ροής για αρχική διαταραχή συχνότητας 1Hz.

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 2.12. Οι παραπάνω προκαταρκτικές προβλέψεις των Malamataris et al (2002) εξετάστηκαν πειραματικά και επιβεβαιώθηκαν για πρώτη φορά στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Κεφάλαιο 3 Πειραματική Μεθοδολογία

3.1 Ιδιότητες των ρευστών

Καθαρό νερό καθώς και διαλύματα γλυκερίνης-νερού (20-35% κ.β. γλυκερίνη) χρησιμοποιήθηκαν στη πλειοψηφία των πειραμάτων, ώστε να είναι δυνατή η χρησιμοποίηση ρευστών διαφορετικού ιξώδους. Η αλλαγή του ιξώδους επιτυγχάνεται με την αλλαγή της συγκέντρωσης της γλυκερίνης στο νερό. Στη περίπτωση των διαλυμάτων νερού-γλυκερίνης είναι εφικτή η απόσβεση τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία διδιάστατης δομής σε υψηλούς αριθμούς Reynolds και γωνίες κλίσης. Ταυτόχρονα, δίδεται η δυνατότητα δημιουργίας μοναχικών κυμάτων σε μεγαλύτερο εύρος μεγεθών. Το χρησιμοποιούμενο ρευστό αλλάζει σε κάθε σειρά πειραμάτων για την αποφυγή προσμίξεων με το περιβάλλον. Η μέτρηση του ιξώδους του διαλύματος πραγματοποιείται μέσω της μέτρησης του συντελεστή διάθλασης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ειδικό διαθλασίμετρο υψηλής ακρίβειας (Abbe-refractometer, Krüss Optronic GmbH). Ο συντελεστής διάθλασης εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας (γλυκερίνη) στο διάλυμα (νερό). Έτσι, με τη χρήση κατάλληλου εγχειριδίου υπολογίζεται η συγκέντρωση του διαλύματος, άρα και οι φυσικές του ιδιότητες.

Οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος γλυκερίνης-νερού σε θερμοκρασία δωματίου ($25^{\circ}\text{C} \pm 1$) είναι: κινηματικό ιξώδες $\nu = 2.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, επιφανειακή τάση $\sigma = 70 \pm 1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ και πυκνότητα $\rho = 1066.4 \text{ Kg/m}^3$. Η επιφανειακή τάση του νερού, χωρίς προσμίξεις, είναι $\sigma = 72 \pm 1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$. Έτσι, ορίζεται ο αδιάστατος αριθμός Kapitza, $Ka = \sigma / \rho g^{1/3} \nu^{4/3}$, ο οποίος χαρακτηρίζει το χρησιμοποιούμενο ρευστό. Είναι $Ka=3365$ για νερό και $Ka=1102$ για διάλυμα γλυκερίνης-νερού (28% κ.β.). Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως εξής: $Re = q / \nu = \langle u \rangle h_N / \nu$, 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: $We = \sigma / \rho \langle u \rangle^2 h_N$.

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 (30-50 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.

Με την έναρξη του πειράματος, ο εγκλωβισμός του αέρα δημιουργεί ατέλειες στη ροή (φουσαλίδες κ.α.) με αποτέλεσμα να απαιτείται η πάροδος κάποιου χρονικού διαστήματος (περίπου 20-30 λεπτά) για την σταθεροποίηση της ροής. Το πρόβλημα της διάσπασης του υμένα λόγω κακής διαβροχής της επιφάνειας του τοιχώματος επιλύεται με την εξ ολοκλήρου επάλειψη του καναλιού με το κολλοειδές ρευστό Sodium Silicate. Το κολλοειδές ρευστό δεν επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες του διαλύματος αλλά ούτε και την διαφανή επιφάνεια μέτρησης του καναλιού (Plexiglas). Επιπρόσθετα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αλλαγή του διαλύματος προϋποθέτει όσο το δυνατόν καλύτερο καθαρισμό της συσκευής - χρησιμοποιείται υπεροξειδίο του υδρογόνου (Peridrol), το οποίο δεν επηρεάζει το υλικό κατασκευής (Plexiglas).

3.2 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. Επίσης, η ροή υγρού υμένα πάνω από κυματοειδές τοίχωμα απαιτεί τη διεξοδική μελέτη επιρροής των παραμέτρων της ροής, καθώς τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας είναι ελάχιστα έως αμελητέα.

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).

Η γωνία κλίσης του καναλιού ρυθμίζει την ταχύτητα εξέλιξης των φαινομένων και το εύρος της, τόσο για ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα όσο και για ροή πάνω από κυματοειδές τοίχωμα, κυμαίνεται από 1 έως 15°.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη ρευστών, καθαρό νερό και διάλυμα γλυκερίνης-νερού με συγκεντρώσεις έως και 35% κ.β σε γλυκερίνη. Το είδος του διαλύματος χαρακτηρίζεται από τον αριθμό Karitza, ο οποίος υπολογίζεται άμεσα, αφού πρώτα

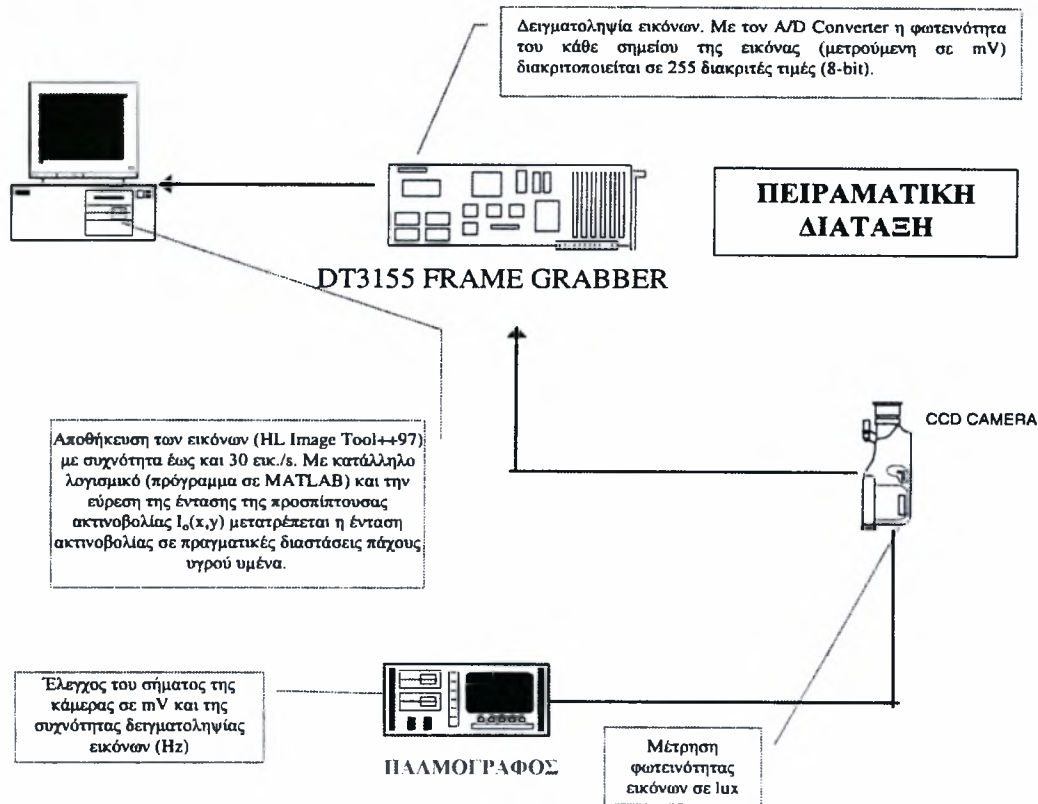
μετρηθούν οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος. Η θερμοκρασία λειτουργίας συμπίπτει με αυτή του περιβάλλοντος χώρου, η οποία παραμένει σταθερή και ίση με 22 έως 25°C. Μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας λειτουργίας του πειράματος δεν επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου ρευστού, κάτι το οποίο ελέγχθηκε συστηματικά κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου 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. Συνήθως κυμαίνεται από 0.1 έως 1Hz και όποτε είναι αναγκαίο θα αναφέρεται στη ροή του κειμένου. Εκτός από τη συχνότητα της διαταραχής, το χρονικό διάστημα εισαγωγής επιπλέον ρευστού στο κανάλι αποτελεί μία επιπρόσθετη παράμετρο. Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με το είδος των δημιουργούμενων μοναχικών κυμάτων και συμβολίζεται με t_1 ($t_1=0.2-1\text{sec}$). Ο προσδιορισμός όλων των παραμέτρων πραγματοποιείται σε κάθε σειρά πειραμάτων και αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επεξεργασία τους.

3.3 Η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή δεδομένων είναι η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό όπως αναπτύχθηκε από τον Βλαχογιάννη (2001) σε παλαιότερη διδακτορική μελέτη. Με την χρήση αυτής της μεθόδου είναι δυνατό να πάρουμε αναλυτικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της ροής και των κυμάτων στο χώρο και στο χρόνο (π.χ. πάχος του υμένα και επομένως των δημιουργούμενων κυμάτων, ταχύτητα της ροής, μήκος κύματος, συχνότητα κυμάτων).

Σύμφωνα με την μέθοδο απεικόνισης φθορισμού, προσθήκη στο υγρό ουσίας που φθορίζει κατά την προσβολή με UV ακτινοβολία, δίνει υψηλή ένταση ορατού φωτός σε καθορισμένο μήκος κύματος. Ο φθορισμός καταγράφεται με ακρίβεια σε CCD κάμερα, χρησιμοποιώντας κατάλληλα φίλτρα, και η ένταση του σε κάθε θέση της φωτογραφίας είναι ανάλογη του τοπικού πάχους του υγρού υμένα. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που περιγράφει τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό καθώς και τα διάφορα όργανα μέτρησης.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

Πιο συγκεκριμένα, το ρευστό χρωματίζεται από μια μικρή ποσότητα (100-300ppm) της χρωστικής *ουρανίνη* (Sodium Salt of Fluorescein- $C_{20}H_{10}O_5Na_2$) η οποία έχει την ιδιότητα να φθορίζει κάτω από την επίδραση υπεριώδους φωτός εκπέμποντας ορατό πράσινο – κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 525-580nm. Η προσθήκη της ουσίας αυτής δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του ρευστού.

Πάνω από την περιοχή των μετρήσεων τοποθετήθηκε η πηγή υπεριώδους φωτός (σχήμα 3.1) που είναι 2 λαμπτήρες υψηλής έντασης (Philips, TL20/05), με εξαρτήματα τροφοδοσίας (ballast, starter) για την ελάττωση των ταλαντώσεων του υπεριώδους φωτός. Οι λαμπτήρες είναι τοποθετημένοι σε σταθερή απόσταση από την πλάκα μέτρησης και συμμετρικά ως προς τις άκρες του καναλιού με σκοπό την πιο ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας τους.

Κάτω από το κανάλι ροής είναι τοποθετημένη ψηφιακή κάμερα για την συλλογή εικόνων. 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.

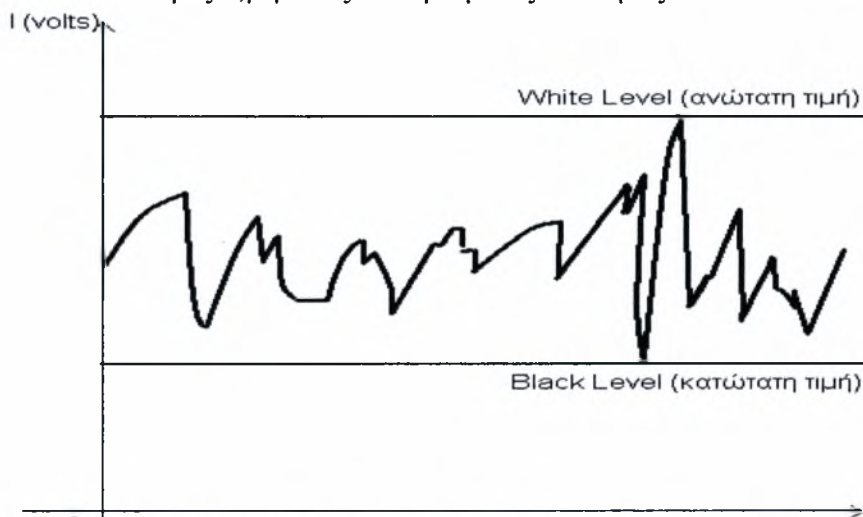
Όπως προαναφέρθηκε, η κάθε εικόνα μας δίνει πληροφορίες για την ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον υμένα. Πιο αναλυτικά, στο κάθε pixel της εικόνας αντιστοιχεί μια διακριτή τιμή η οποία αποτελεί το μέγεθος μέτρησης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του υμένα. Δεδομένου ότι ο αναλογικός/ψηφιακός 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 κλίμακας μας (0) και την πιο υψηλή τιμή, αυτή που αντιστοιχεί στο πιο φωτεινό σημείο της εικόνας, ως το μέγιστο της κλίμακας μας (255), μπορούμε να πετύχουμε την πιο λεπτομερή ανάλυση του σήματος. Με άλλα λόγια ο άξονας y του διαγράμματος του σχήματος 3.7 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).

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 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.



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο-pixel της εικόνας

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι σκοπός μας είναι η συλλογή, από την κάμερα, της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο υμένας. Όμως 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

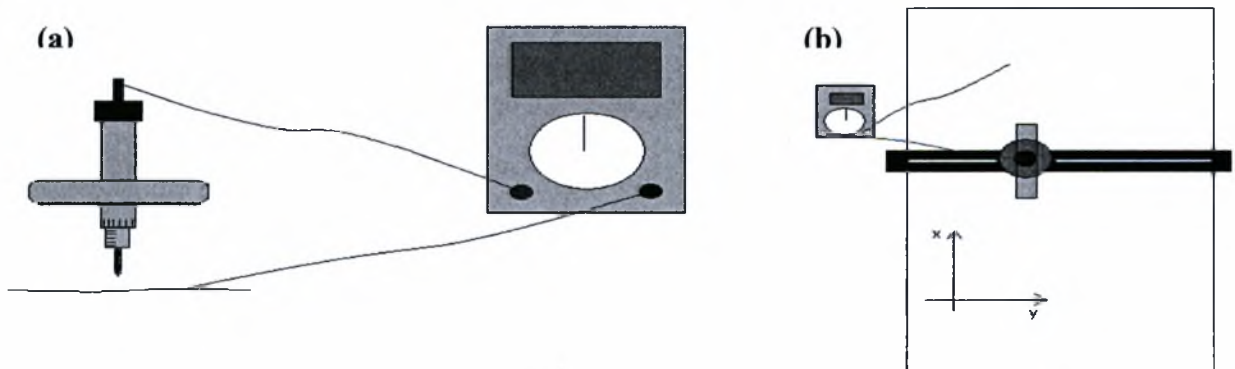
προσαρμοσθεί πάνω στον φακό της κάμερας συνδυασμός δύο οπτικών φίλτρων (yellow subtractive – green corrector της Edmund Scientific). Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν να περάσει στην κάμερα ακτινοβολία ορατού φωτός σε εύρος μήκους κύματος μεταξύ 500 και 580nm, στην περιοχή δηλαδή που εκπέμπει ο χρωματισμένος υμένας κάτω από την επίδραση του υπεριώδους φωτός.

3.3.1 Βαθμονόμηση της μεθόδου φθορισμού

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών της σχέσης της έντασης ακτινοβολίας με το τοπικό πάχος του υμένα, είναι αναγκαίο να γίνουν κάποια πειράματα σε συνθήκες τέτοιες που να είναι γνωστό το πάχος του υμένα. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης της γραμμικής ευστάθειας, η οποία ελέγχθηκε πειραματικά τόσο από τους Liu et. al. (1993) όσο και από τον Βλαχογιάννη (2001), υπάρχει ένα εύρος αριθμών Reynolds, ανάλογα με την γωνία κλίσης, όπου ο υμένας είναι ευσταθής και το πάχος του ίσο με την θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt. Επομένως η συλλογή εικόνων σε συνθήκες που παρέχουν ευσταθή υμένα μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τους συντελεστές α, β .

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας έγινε πειραματικός έλεγχος της επιπεδότητας του υμένα και της ταύτισης του πάχους του με το αντίστοιχο θεωρητικό. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια με αυτή που χρησιμοποίησε ο Βλαχογιάννης στη διδακτορική του διατριβή και έγινε τόσο για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων όσο και για την επιβεβαίωση της σωστής γεωμετρίας του καναλιού.

Το πάχος του υμένα μετρήθηκε με τη βοήθεια ενός μικρομέτρου μετατόπισης (Depth Micrometer series 229, MITUTOYO).



Σχήμα 3.3: Διάταξη μέτρησης του πάχους του υμένα με τη βοήθεια μικρομέτρου.

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8 και περιγράφεται ως εξής: αρχικά στερεώθηκε το μικρόμετρο πάνω σε έναν

κανόνα σε σταθερή απόσταση από την πλάκα, και μετρήθηκε η απόσταση αυτή ενώ το κανάλι ήταν άδειο (πυθμένας πλάκας). Στη συνέχεια δόθηκε παροχή υγρού που αντιστοιχεί σε ευσταθή ροή. Συνδέσαμε το μικρόμετρο με ένα βολτόμετρο όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8a. Κατεβάζοντας το μικρόμετρο, μόλις αυτό ακουμπήσει στο νερό θα κλείσει κύκλωμα και θα δείξει ένδειξη το βολτόμετρο. Η διαφορά της πρώτης και δεύτερης τιμής θα μας δώσει το πάχος του υμένα. Μετακινώντας το μικρόμετρο κατά μήκος και κατά πλάτος του καναλιού μπορούμε να δούμε αν αυτή η τιμή είναι σταθερή και αν αντιστοιχεί στο θεωρητικά προβλεπόμενο πάχος του υμένα. Η κίνηση αυτή επιτυγχάνεται λόγω του ότι ο κανόνας στον οποίο είναι στηριγμένο το μικρόμετρο μπορεί να μετακινείται κατά μήκος του καναλιού (σχήμα 3.8b). Επίσης το μικρόμετρο έχει την δυνατότητα να μετακινείται κατά μήκος του κανόνα.

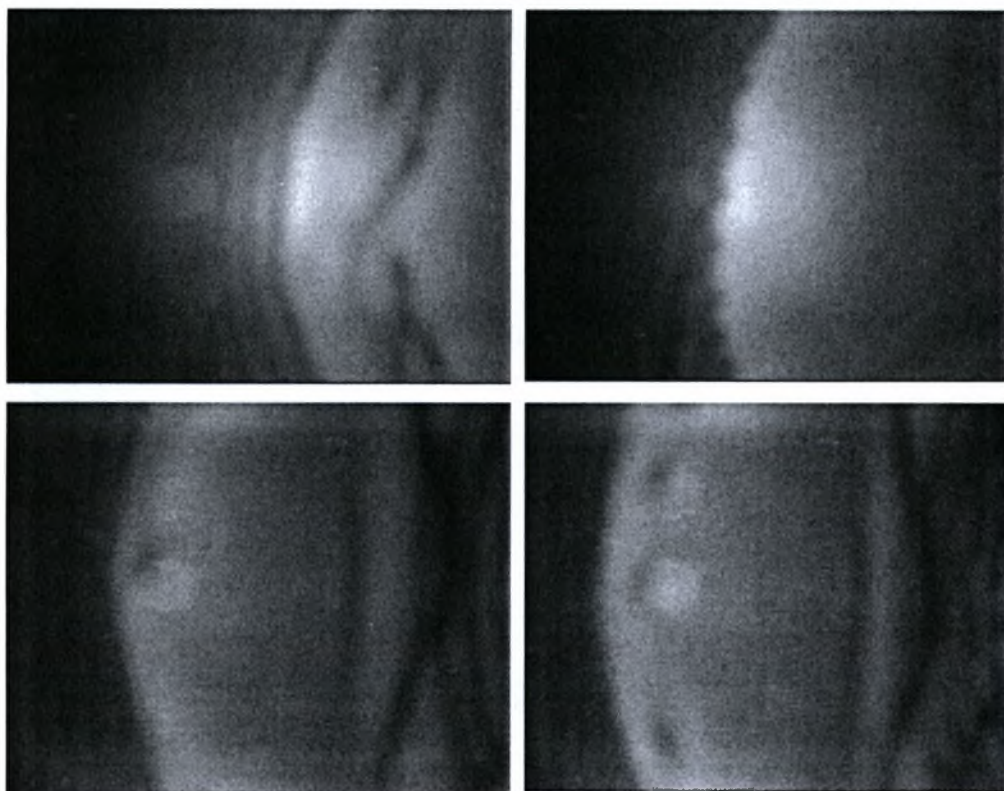
Αφού λοιπόν πιστοποιηθεί η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της θεωρητικής πρόβλεψης κατά Nusselt είναι δυνατή η βαθμονόμηση της πειραματικής μεθόδου χρησιμοποιώντας την σχέση (3.1). Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής: αρχικά μετράμε την παροχή στο κανάλι και από την σχέση Nusselt βρίσκουμε το πάχος του υμένα. Για αυτό το πάχος παίρνουμε δεδομένα (εικόνες) με την κάμερα που αντιστοιχούν σε κάποιες τιμές της ακτινοβολίας I . Οι εικόνες αυτές αποθηκεύονται στον υπολογιστή μέσω του προγράμματος HL Image++98. Για πιο σωστά αποτελέσματα παίρνουμε αρκετές εικόνες και υπολογίζουμε τον μέσο όρο της ακτινοβολίας σε κάθε pixel. Με γνώστη την ακτινοβολία και το πάχος του υμένα είναι δυνατός και ο υπολογισμός των γραμμικών συντελεστών α και β της σχέσης (3.1). Επειδή η σχέση είναι γραμμική απαιτούνται τα α και β της σχέσης (3.1). Επειδή η σχέση είναι γραμμική απαιτούνται τα α και β της σχέσης (3.1). Επειδή η σχέση είναι γραμμική απαιτούνται τα α και β της σχέσης (3.1). Επειδή η σχέση είναι γραμμική απαιτούνται τα α και β της σχέσης (3.1). Ωστόσο, για να αυξηθεί η ακρίβεια της βαθμονόμησης, λαμβάνουμε τιμές σε τέσσερις τουλάχιστον αριθμούς Re και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων βρίσκουμε τα α και β που αντιστοιχούν σε κάθε pixel. Εφόσον υπολογιστούν οι πίνακες των $\alpha(x,y)$ και $\beta(x,y)$, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.1) για την εύρεση του πάχους του υμένα σε οποιοδήποτε αριθμό Re .

Στην περίπτωση που οι συνθήκες στις οποίες γίνεται το πείραμα είναι τέτοιες που δεν μας επιτρέπουν να επιτύχουμε ευσταθή περιοχή ροής (π.χ. σε υψηλές γωνίες κλίσης) η διαδικασία που ακολουθείται είναι διαφορετική. Στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα για την βαθμονόμηση λαμβάνονται σε συνθήκες όσο πιο κοντά στην ευσταθή περιοχή. Παίρνουμε έναν μεγάλο αριθμό φωτογραφιών και υπολογίζουμε το μέσο όρο της ακτινοβολίας σε κάθε pixel. Επειδή οι συνθήκες μέτρησης είναι κοντά στην ευσταθή περιοχή το μέσο πάχος του υμένα είναι ίσο με το πάχος κατά Nusselt.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο προσδιορισμός της επίδρασης του φωτισμού σε κάθε pixel της εικόνας. Ένας εναλλακτικός τρόπος βαθμονόμησης αυτών των πειραμάτων είναι η χρησιμοποίηση της βαθμονόμησης για μικρότερες κλίσεις.

3.3.2 Επεξεργασία δεδομένων

Όπως λοιπόν προαναφέρθηκε, με τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό συλλέγονται δεδομένα για την ένταση της ακτινοβολίας του υμένα, και επομένως για το πάχος του, με τη μορφή εικόνων (σχήμα 3.9).



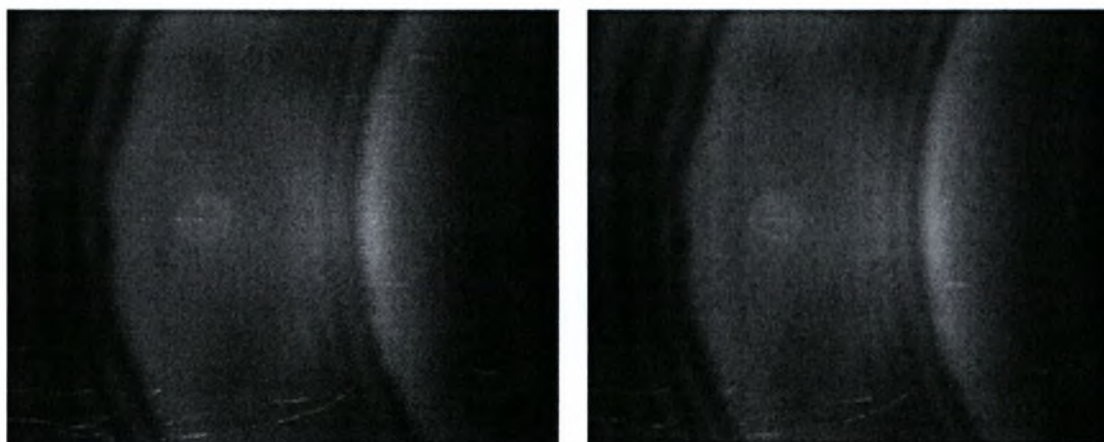
Σχήμα 3.4: Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται

Έτσι στο σχήμα 3.9, στις περιοχές που οι αποχρώσεις του γκρι πλησιάζουν περισσότερο προς το λευκό έχουμε μεγαλύτερο πάχος υμένα (ύπαρξη κύματος) σε σχέση με τις περιοχές με αποχρώσεις κοντά στο μαύρο. Συμπερασματικά, στο σχήμα 3.9 μπορούμε να παρατηρήσουμε την κίνηση ενός δισδιάστατου μοναχικού κύματος κατάντη της ροής. Η καμπυλότητα που εμφανίζεται στο μέτωπο του κύματος οφείλεται στην επιβράδυνση της ροής κοντά στα πλευρικά τοιχώματα του καναλιού. Από τις πειραματικές μετρήσεις αποδεικνύεται ότι αυτή η καμπυλότητα δεν επηρεάζει την εξέλιξη των κυμάτων. Από τις εικόνες αυτές μπορούμε να πάρουμε μόνο ποιοτικές πληροφορίες για τη ροή και τις δομές που δημιουργούνται. Για να μπορέσουμε να πάρουμε ποσοτικά δεδομένα από τις εικόνες είναι αναγκαίο να τις

επεξεργαστούμε υπολογιστικά. Αυτό γίνεται με τη χρήση του MATLAB και κάποιων προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας (Image Tool, HL Image++98).

Ψηφιακό φιλτράρισμα

Το πρώτο στάδιο στην επεξεργασία των εικόνων είναι η εφαρμογή κατάλληλου φίλτρου σε κάθε εικόνα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση κάποιων ανεπιθύμητων παραγόντων στα δεδομένα της έντασης (π.χ η παρουσία εγκλωβισμένου αέρα με μορφή φυσαλίδων στη ροή έχει ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της ακτινοβολίας χωρίς να υπάρχει αύξηση του πάχους του υμένα). Με την βοήθεια υπολογιστικών φίλτρων συσχετίζουμε την τιμή σε κάθε pixel της εικόνας με αυτή των γύρω του ώστε να απαλειφθούν οι πολύ απότομες μεταβολές στην τιμή λίγων pixel. Ένα παράδειγμα χρήσης φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 3.10. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση αυτή είναι το Image Tool και φίλτρα όπως το Gaussian 15x15 ή 7x7. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στον αριθμό των σημείων που θα χρησιμοποιούνται στη συσχέτιση διότι μπορεί να φτάσουμε στο ανεπιθύμητο αποτέλεσμα να απαλείψουμε κάποια δεδομένα (π.χ κύματα με μικρό μήκος). Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10 αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου είναι η ομαλοποίηση της εικόνας αλλά παράλληλα και το θόλωμά της. Το φίλτρο πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να μην επηρεάζει ποσοτικά την εικόνα.



Σχήμα 3.5: (a) Εικόνα πριν την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης, (b) μετά την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης.

Επειδή ο αριθμός των εικόνων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια κάθε πειράματος είναι τέτοιος που καθιστά απαγορευτική την χειροκίνητη επεξεργασία της κάθε εικόνας, χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα σε Visual Basic το οποίο αυτοματοποιεί την διαδικασία του φιλτραρίσματος.

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:

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

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 $\text{Noise}(I, j)$ είναι το επίπεδο του θερμικού θορύβου σε mVolts το οποίο ορίζεται ως

$$\text{Noise}(i, j) = I_{0i}(i, j) \times \frac{WL_{\text{max}} - BL_{\text{min}}}{255} + BL_{\text{min}}(i, j), \quad i = 1, 576 \ \& \ j = 1, 768 \quad (3.3)$$

όπου $I_{0i}(i, j)$ είναι η διακριτή τιμή (0 ως 255) του κάθε στοιχείου του πίνακα της εικόνας που έχουμε λάβει με καλυμμένο το φακό της κάμερας και $WL_{\text{max}}=351,1$, $BL_{\text{min}}=1,275$ 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 4 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.

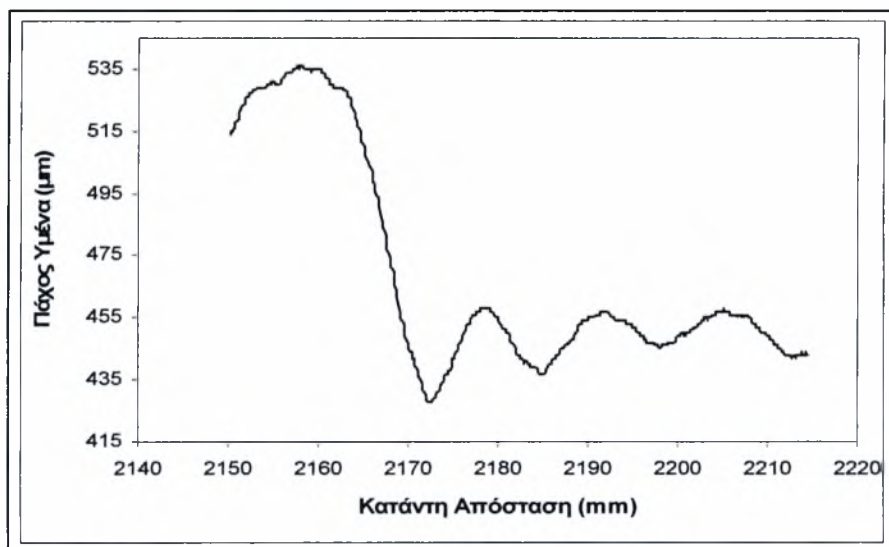
Έχοντας υπολογίσει τον πίνακα, για κάθε αριθμό Re , ο οποίος δίνει τη μέση ένταση ακτινοβολίας του κάθε pixel σε mVolts, μπορούμε να συσχετίσουμε γραμμικά τη μέση ένταση ακτινοβολίας του κάθε pixel σε mVolts με το θεωρητικά υπολογισμένο πάχος του υμένα κατά Nusselt h_N , το οποίο είναι σταθερό σε κάθε 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.

3.3.3 Επεξεργασία εικόνων για την περίπτωση επίπεδου τοιχώματος

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 0,1εικόνες/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 576×768 , όπου το κάθε στοιχείο έχει μια διακριτή τιμή (0 ως 255). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε mVolts μέσω των σχέσεων που δόθηκαν στην παράγραφο 3.6.2 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 (σχ.3.11).

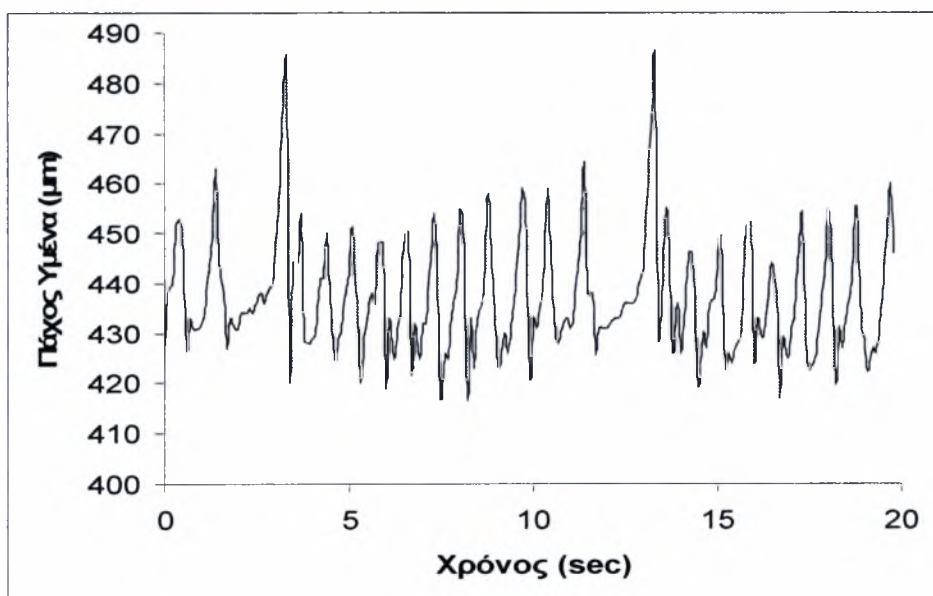
Από τις τιμές του πίνακα που δίνει το πάχος του υμένα σε κάθε σημείο μπορούμε να πάρουμε πληθώρα άλλων πληροφοριών. Έτσι, για παράδειγμα, μπορούμε να έχουμε την χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου (σχ.3.12). Η απεικόνιση του πάχους του υμένα σε διάφορα σημεία 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.



Σχήμα 3.6: Χωρική εξέλιξη του τοπικού πάχους του 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.



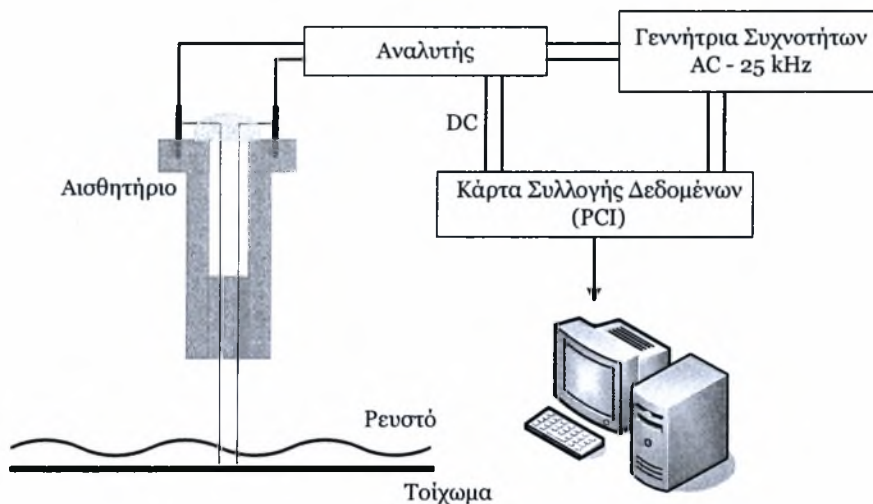
Σχήμα 3.7: Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου.

3.4 Αγωγιμομετρική τεχνική

Η αγωγιμομετρική τεχνική [Andritsos, 1986] χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας και των διακυμάνσεων της. Η τεχνική στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δύο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσα τους. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται το μετρητικό που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της τεχνικής. Το μετρητικό τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή και στη συνέχεια με τη βοήθεια κατάλληλης κάρτας συλλογής δεδομένων (Advantech PCI-1710HG, 16-bit) και προγράμματος που δημιουργήθηκε στο Εργαστήριο σε LabView αποθηκεύεται το εξερχόμενο από το μετρητικό σήμα (τάση DC ως προς χρόνο). Το αισθητήριο είναι κατασκευασμένο από Ertalon, ένα υλικό που επεξεργάζεται εύκολα και παρουσιάζει ικανοποιητική θερμική αντοχή, ενώ το σύρμα ήταν από χρωμονικέλιο διαμέτρου 0.4-0.5 mm. Για την τοποθέτηση των μετρητικών κατασκευάστηκαν κατάλληλες γέφυρες, οι οποίες τοποθετήθηκαν πάνω από το τοίχωμα σε 3 διαφορετικές θέσεις (στην αρχή, στη μέση και στο τέλος). Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα της κατακόρυφης μετακίνησης του μετρητικού ώστε να τοποθετείται πολύ κοντά στο τοίχωμα.

Για την ταυτόχρονη λήψη και από τις τρεις θέσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο αναλυτές (κάθε αναλυτής έχει δύο κανάλια εισόδου). Από ξεχωριστά πειράματα που έγιναν χρησιμοποιώντας ένα, δύο και τρία μετρητικά βρέθηκε ότι η ταυτόχρονη λειτουργία τους δεν επηρεάζει τις ενδείξεις που λαμβάνονται.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, βρέθηκε από πειράματα ότι η μέθοδος αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά για τις περιπτώσεις όπου η αγωγιμότητα του ρευστού κυμαινόταν μεταξύ 300-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Από την αγωγιμότητα αυτή και πάνω υπήρχαν προβλήματα που είχαν να κάνουν με τον αναλυτή και είχαν ως αποτέλεσμα παραμόρφωση του σήματος.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής.

3.4.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σήμα που αποθηκεύεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι η μεταβολή της τάσης ως προς το χρόνο. Προκειμένου να μετατραπεί η τάση σε πάχος υμένα είναι απαραίτητο να γίνουν κάποια πειράματα σε τέτοιες συνθήκες όπου το πάχος του υμένα είναι γνωστό. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt, η οποία προβλέπει το πάχος του υμένα για την περίπτωση που ο υμένας είναι ευσταθής.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ήταν η εξής: Βάσει της γωνίας κλίσης του τοιχώματος υπολογιζόταν ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για επίπεδο τοίχωμα. Για διάφορες (3-5) παροχές του ρευστού (Q_0 , kg/s) καταγραφόταν το σήμα (Volt) για περίπου 20 s με ρυθμό δειγματοληψίας 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Η επιλογή των παροχών καθοριζόταν από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds και το είδος του τοιχώματος. Γενικά, γινόταν προσπάθεια οι παροχές που θα γινόταν η βαθμονόμηση να ήταν όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κρίσιμο αριθμό Reynolds για το τοίχωμα που εξεταζόταν κάθε φορά. Από την παροχή υπολογιζόταν ο αριθμός Reynolds και το πάχος υμένα κατά Nusselt από τις εξισώσεις:

$$Re = \frac{Q_0}{W \cdot \rho \cdot v} \quad (0.0-1)$$

$$h_N = 10^6 \cdot \left(\frac{3 \cdot Re \cdot v^2}{g \cdot \sin \varphi} \right)^{1/3} \quad (0.0-2)$$

όπου W το πλάτος του καναλιού και h_N το πάχος του υμένα σε μm . Από τις τιμές τάσεις και το πάχος υμένα με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι γραμμικές σχέσεις που δίνουν την εξάρτηση του πάχους από την τάση και είναι της μορφής:

$$h_i = A \cdot V_i + B \quad (0.0-3)$$

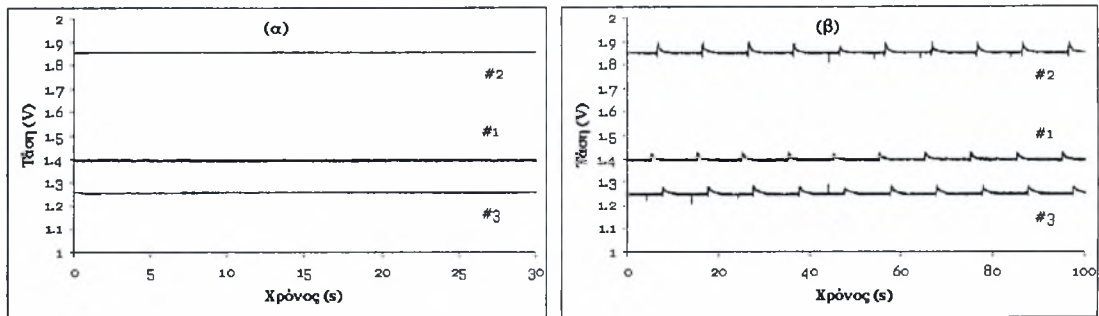
όπου A και B σταθερές και ο δείκτης i αντιστοιχεί στα μετρητικά. Με τη βοήθεια της εξίσωσης αυτής οποιαδήποτε τάση μπορεί να μεταφραστεί σε πάχος υμένα.

Η διαδικασία βαθμονόμησης γινόταν στην αρχή κάθε πειράματος και ορισμένες φορές στο τέλος του πειράματος. Με τον τρόπο αυτό ενδεχόμενα προβλήματα που μπορούσαν να προκύψουν από μεταβολή της αγωγιμότητας και από αλλαγή της ηλεκτρολογικής συνδεσμολογίας λαμβανόντουσαν υπόψη και δεν επηρέαζαν τις μετρήσεις.

3.4.2 Επεξεργασία δεδομένων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δεδομένα που αποθηκεύονται είναι χρονοσειρές τάσης. Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζονται γραφικά οι μεταβολές της τάσης στα τρία μετρητικά για δυο διαφορετικές μετρήσεις. Η πρώτη αντιστοιχεί σε βαθμονόμηση και η δεύτερη σε συνθήκες πειράματος.

Προκειμένου τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τα πειραματικά δεδομένα να είναι ορθά, πρέπει να επεξεργαστούν κατάλληλα. Πρώτο βήμα είναι να εφαρμοστούν κατάλληλα ψηφιακά φίλτρα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση κάποιων ανεπιθύμητων παραγόντων, όπως αυτών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Με τη βοήθεια υπολογιστικών φίλτρων συσχετίζεται η τιμή κάθε τάσης με τις αμέσως προηγούμενες και επόμενες τιμές. Τα φίλτρα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν είτε κατευθείαν στα πειραματικά δεδομένα με την μορφή της τάσης είτε σε αυτά που θα προκύψουν μετά την εφαρμογή των εξισώσεων βαθμονόμησης ύψους-τάσης. Επιλέγεται να γίνει φιλτράρισμα των δεδομένων με τη μορφή ύψους υμένα.

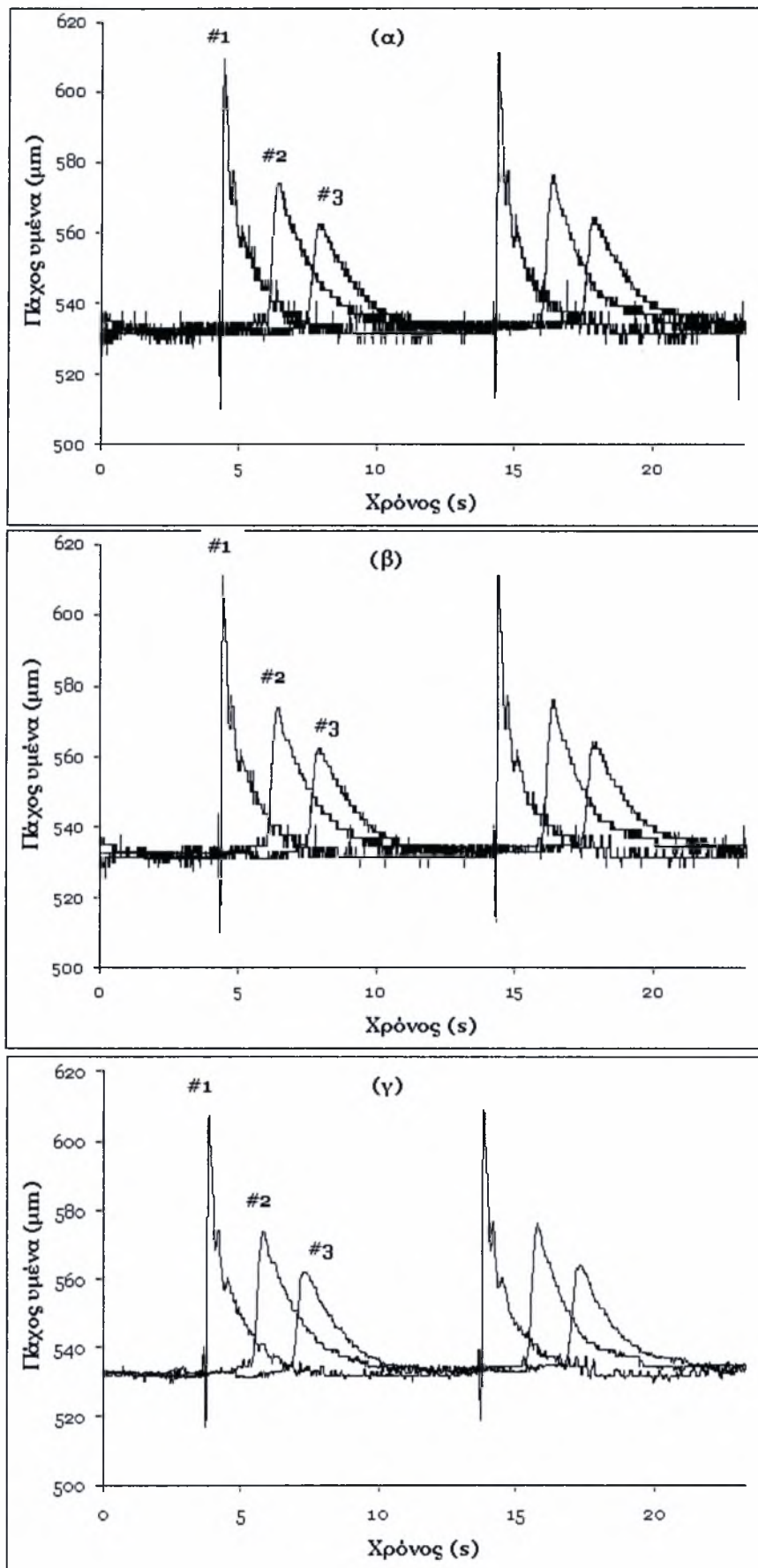


Σχήμα 3.9. Χαρακτηριστικές καμπύλες πειραματικών δεδομένων (α) βαθμονόμησης και (β) σε πειραματικές συνθήκες.

Συνεπώς, πρώτα πρέπει να βρεθούν οι καμπύλες βαθμονόμησης για κάθε μετρητικό. Στα δεδομένα βαθμονόμησης δεν εφαρμόζεται κάποιο φίλτρο, γιατί η τιμή της τάσης διατηρείται σταθερή σε ικανοποιητικό βαθμό. Για κάθε μέτρηση βρίσκεται το ύψος του υμένα από τη λύση Nusselt, και ο μέσος όρος όλων των τιμών τάσης που έχουν αποθηκευτεί για κάθε μετρητικό. Οι δύο αυτές τιμές συσχετίζονται για κάθε μετρητικό και σε κάθε μέτρηση βαθμονόμησης. Από τα ζεύγη τιμών που προκύπτουν και με τη χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζονται οι γραμμικές εξισώσεις ύψους-τάσης.

Στη συνέχεια οι εξισώσεις αυτές εφαρμόζονται σε όλα τα πειραματικά σημεία, οπότε προκύπτει η μεταβολή του ύψους του υμένα συναρτήσει του χρόνου. Ένα παράδειγμα τέτοιας μεταβολής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7α. Στα σημεία αυτά στη συνέχεια θα εφαρμοστούν δύο φίλτρα. Το πρώτο φίλτρο συγκρίνει μια τιμή με την αμέσως προηγούμενη και την αμέσως επόμενη. Αν η εξεταζόμενη τιμή δεν διαφέρει από τις δύο άλλες τιμές ή αν διαφέρει μέσα σε ένα όριο που κυμαίνεται μεταξύ 1-5 μm τότε διατηρείται η αρχική τιμή. Σε αντίθετη περίπτωση αντικαθίσταται από την προηγούμενη. Εφαρμογή του φίλτρου αυτού στα σημεία του Σχήματος 3.7α δίνει τα σημεία του Σχήματος 3.7β. Με την εφαρμογή του συγκεκριμένου φίλτρου, όπως φαίνεται και από το σχήμα, επιτυγχάνεται η μείωση και ορισμένες φορές η εξάλειψη κορυφών (peaks) που οφείλονται σε αστάθμητους παράγοντες. Το δεύτερο φίλτρο που χρησιμοποιείται είναι ο κινούμενος μέσος όρος πέντε τιμών. Συγκεκριμένα, κάθε τιμή αντικαθίσταται από το μέσο όρο των πέντε γειτονικών τιμών. Με τον τρόπο αυτό, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8γ, μειώνεται η επίδραση του φυσικού θορύβου.

Όπως γίνεται φανερό, ο αριθμός των πειραματικών σημείων είναι πολύ μεγάλος (περίπου 13,000,000) οπότε κρίνεται αναγκαίο η αυτοματοποίηση της διαδικασίας επεξεργασίας τους.



Σχήμα 3.10. Απεικόνιση χρονικής μεταβολής του ύψους του υμένα για (α) τα «ακατέργαστα δεδομένα, (β) με την εφαρμογή του 1^{ου} φίλτρου και του (γ) του 2^{ου} φίλτρου.

Κεφάλαιο 4 Πειραματική Διάταξη

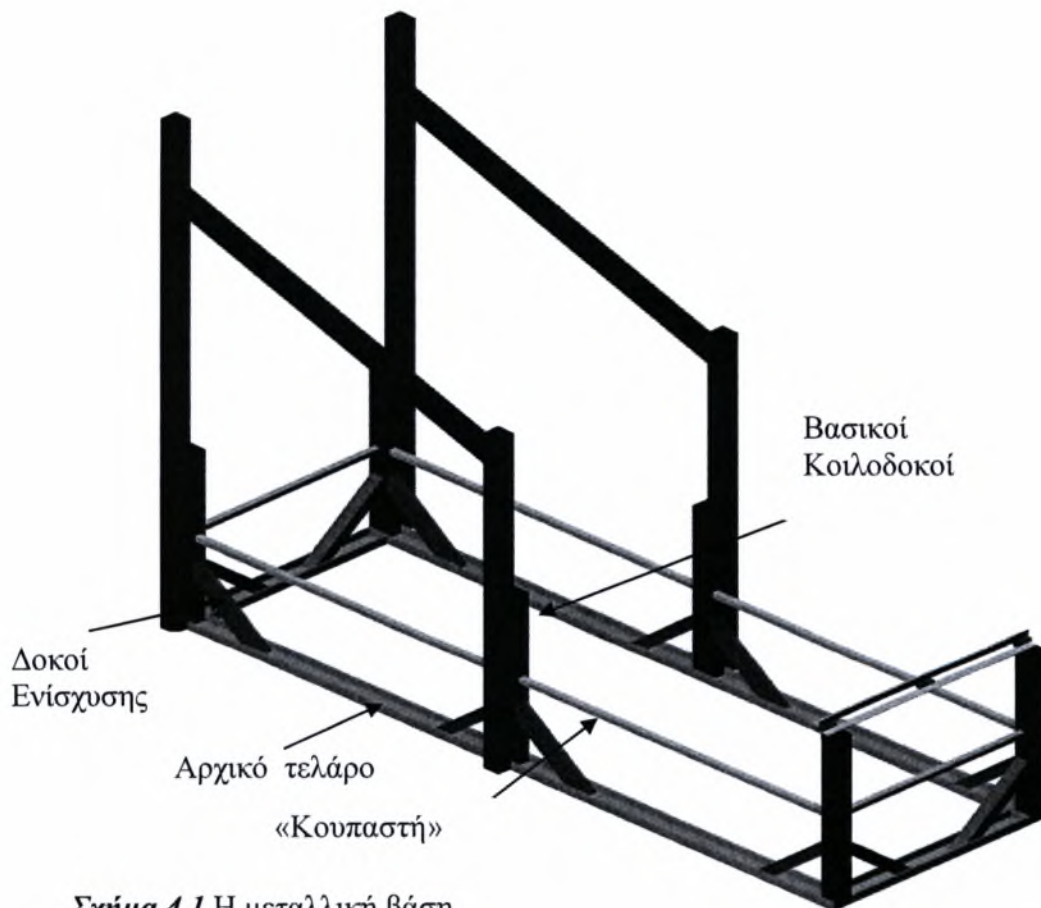
4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται συνοπτικά όλα τα βασικά μέρη της κατασκευής ενώ παράλληλα δίνονται αναλυτικά όλες οι απαιτούμενες ενέργειες που πρέπει να κάνει ο χρήστης-ερευνητής για να θέσει σε ορθή λειτουργία τη συσκευή και να καθορίσει τις απαιτούμενες παραμέτρους για την διενέργεια των πειραμάτων.

4.2 Η μεταλλική κατασκευή

4.2.1 Η μεταλλική βάση

Η μεταλλική βάση είναι ο σκελετός της κατασκευής, ο ρόλος της οποίας είναι να παραλάβει το βάρος του ικριώματος. Η στιβαρότητα και η διαστασιολογική ακρίβεια είναι τα βασικά χαρακτηριστικά της μεταλλικής βάσης.



Σχήμα 4.1 Η μεταλλική βάση

Τα βασικά μέρη της μεταλλικής βάσης είναι:

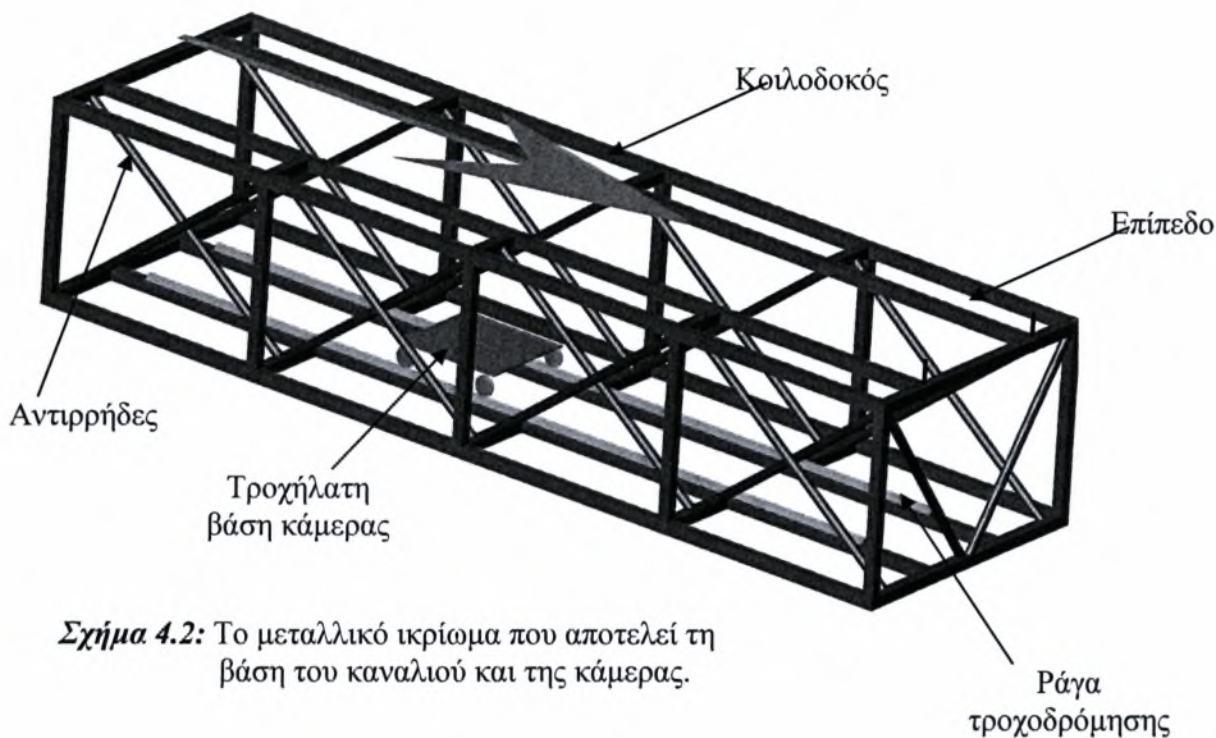
1. Το συγκολλητό πλαίσιο (τελάρο) από UPN 100×50×5mm, πάνω στο οποίο εδράζονται οι κατακόρυφοι κοιλοδοκοί, τελικών διαστάσεων 3480×1130mm.
2. Οι 6 βασικοί κοιλοδοκοί SHS 80×4mm, ύψους 1000mm
3. Οι πλάγιες ενισχυτικές δοκοί πάνω στις υφιστάμενες, διατομής SHS 80×4mm
4. Η μικρή «κουπαστή» περιμετρικά,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

4.2.2 Το ικρίωμα

Ο ρόλος που επιτελεί το ικρίωμα είναι να λειτουργεί ως βάση του καναλιού και ως χώρος κίνησης της ψηφιακής κάμερας κάτω απ' αυτό. Για να επιτευχθεί αυτό η κατασκευή αποτελείται από δύο επίπεδα **απολύτως παράλληλα**. Το ικρίωμα είναι ένα συγκολλητό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο τελικών διαστάσεων 3480×1040×680mm.

Τα βασικά μέρη του ικριώματος είναι:

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



Σχήμα 4.2: Το μεταλλικό ικρίωμα που αποτελεί τη βάση του καναλιού και της κάμερας.

4.3 Σύστημα ρύθμισης κλίσης

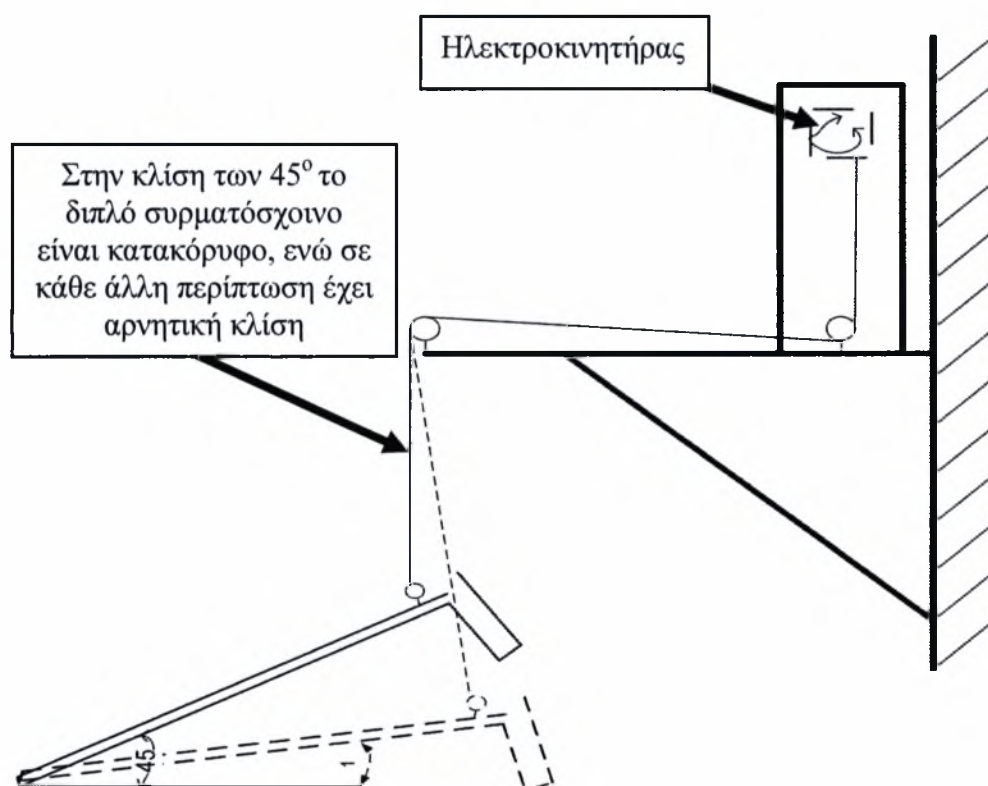
Το κανάλι είναι σταθερά τοποθετημένο πάνω στο μεταλλικό ικρίωμα. Τα δυο κομμάτια αποτελούν ένα σύστημα όπου αρθρώνεται με τρεις συνδέσμους (μεντεσέδες βλ. *Σχήμα 4.3.*) στο μπροστινό μέρος της μεταλλικής βάσης. Εξαιτίας αυτής της άρθρωσης το κανάλι μπορεί να περιστραφεί ως προς τη μεταλλική βάση και να ρυθμιστεί σε κλίση ως προς την οριζόντιο, με γωνία από 0° έως 45° .



Σχήμα 4.3 Οι τρεις αρθρώσεις που περιστρέφουν το κανάλι.

Για την αλλαγή της κλίσης, το κανάλι πρέπει να «τραβηχτεί» προς τα πάνω. Το βάρος, όμως, του ικρίωματος είναι τέτοιο που δεν επιτρέπει τη

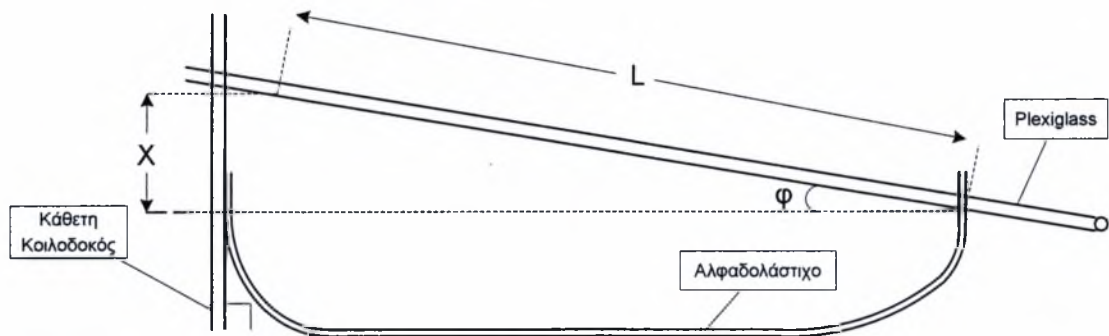
χειροκίνητη μετακίνησή του. Αυτό το έργο, επομένως, εκτελείται από το ηλεκτρικό αναβατόριο με τη βοήθεια ενός συστήματος τροχαλιών και ενός συρματόσχοινο. Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ανυψωτική ικανότητα 1000 Kg. Βρίσκεται τοποθετημένος στη μεταλλική βάση έτσι ώστε το συρματόσχοινο έλξης να είναι κατακόρυφο 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 (βλ. Σχήμα 3.20).



Σχήμα 4.4 Σύστημα ανύψωσης του ικριώματος

Υπολογισμός της γωνίας κλίσης

Ο υπολογισμός της γωνίας κλίσης απαιτεί υψηλή ακρίβεια, της τάξης του ενός δέκατου της μοίρας. Αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί με κάποιο μετρητικό όργανο (π.χ. Αλφάδι ακριβείας) έτσι γίνεται με την παραδοσιακή μέθοδο του αλφαδολάστιχου που αποδεικνύεται εξαιρετικά ακριβής. Η μέθοδος βασίζεται σε απλές αρχές της τριγωνομετρίας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.5 : Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου.

Το αλφαδολάστιχο, επί της ουσίας, χρησιμεύει για την προβολή του οριζόντιου επιπέδου στην κάθετη κοιλοδοκό, ώστε με χρήση κλίμακας να υπολογιστεί η απόσταση X .

Τέλος η τριγωνική σχέση που υπολογίζει την γωνία Φ είναι:

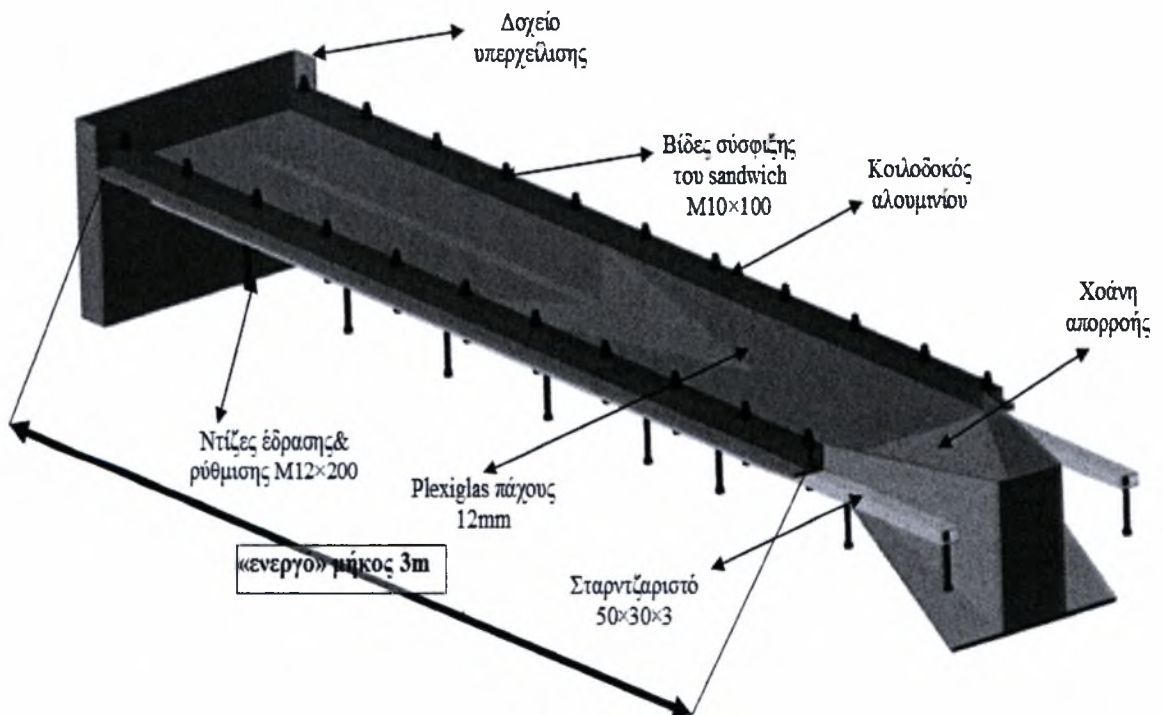
$$\phi = \sin^{-1} \frac{x}{L}$$

Αφού επιτευχθεί η επιθυμητή γωνία κλίσης χρησιμοποιούμε το πέλμα σταθεροποίησης που πακτώνεται στη κάθετη κοιλοδοκό και εφαρμόζει στο κρύωμα. Έτσι, αποφεύγουμε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις που μπορεί να μεταφερθούν στο κανάλι ή μικρομεταβολές στη γωνία κλίσης.

4.4 Το κανάλι ροής

Το κανάλι ροής, που είναι και η «Καρδιά» της κατασκευής, δημιουργήθηκε από υλικό Plexiglass. Η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού έγινε γιατί συγκεντρώνει όλες τις ιδιότητες που απαιτούνται:

- Διαύγεια – (ο δείκτης διάθλασης είναι παρόμοιος με του γυαλιού).
- Μηχανική αντοχή σε κρουστικά φορτία σε αντίθεση με την ψαθυρότητα του γυαλιού.
- Ελαστικότητα (εξαρτώμενη από το πάχος του κομματιού).
- Ποικιλία διαστάσεων.
- Ευκολία στην εφαρμογή (κοπή, διάτρηση, σπειροτόμηση, φρεζάρισμα, συγκόλληση) χωρίς την απαίτηση ειδικών εργαλείων ή εξειδικευμένων τεχνικών.
- Η επιφάνεια επαφής του με το νερό είναι λεία και στιλπνή όσο και αυτή του γυαλιού.



Σχήμα 4.6 : Το κανάλι ροής κατασκευασμένο από Plexiglass

Η ευθυγράμμιση του καναλιού

Η ροή του υμένα επάνω στο κανάλι παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στις μεταβολές της κλίσης του επιπέδου, γεγονός που αποτελεί σοβαρό πρόβλημα για την ορθότητα του πειράματος. Κανένα μετρητικό όργανο δεν μπορεί να εντοπίσει αυτές τις μεταβολές, έτσι, η πλέον αξιόπιστη μέθοδος είναι η **οπτική** η οποία αναλύεται παρακάτω.

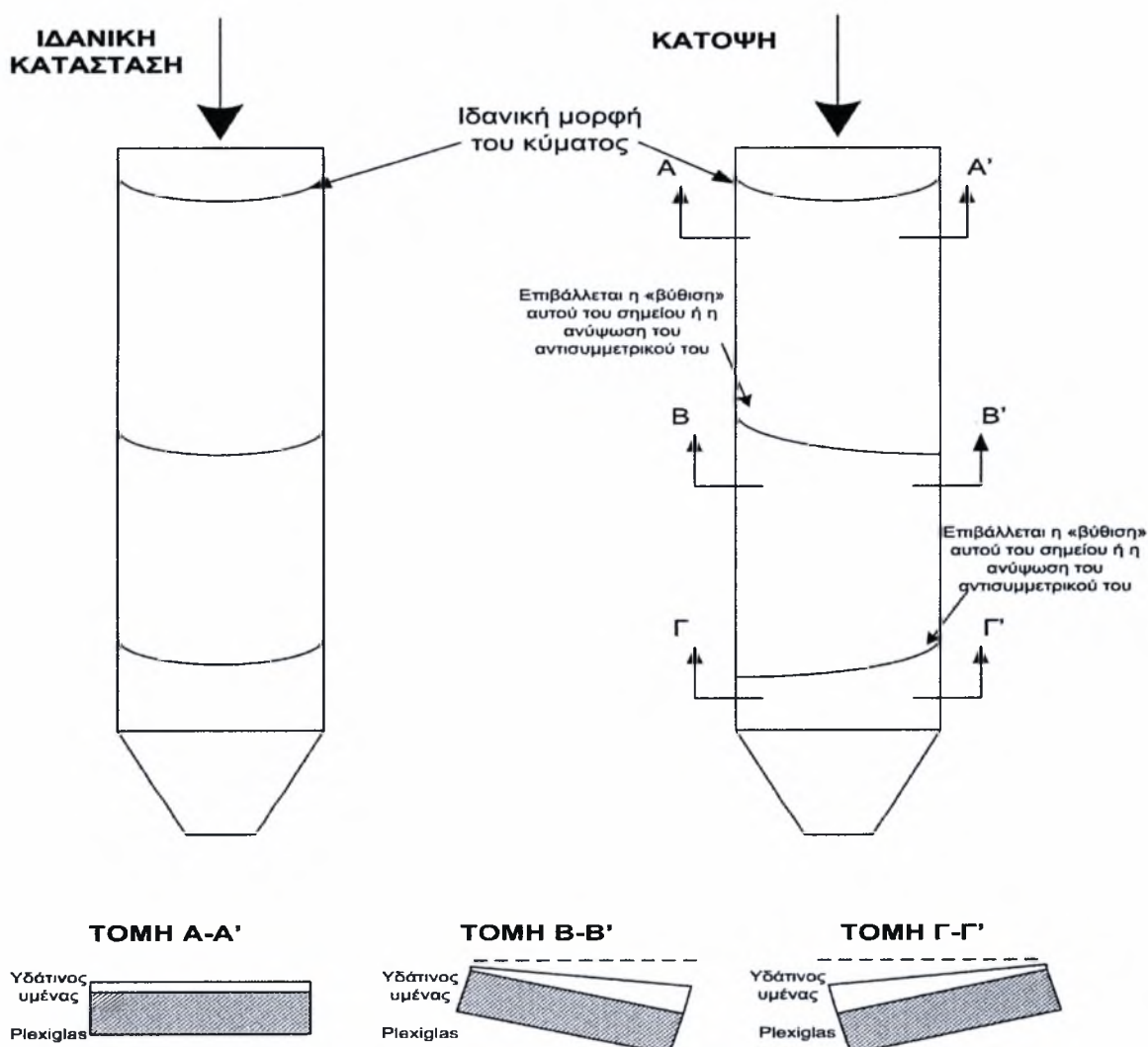
Το κανάλι (plexiglass) πρέπει να είναι ένα επίπεδο που δε θα στρεβλώνεται καθόλου και παντού θα έχει την κλίση που ορίζεται εξ' αρχής. Ο έλεγχος αυτός διεξάγεται στην έναρξη του κάθε πειράματος με την ακόλουθη διαδικασία. Κατ' αρχήν ρυθμίζεται η ροή στα 12lt/min περίπου, ώστε η ροή να είναι στρωτή αλλά να μην είναι τόσο αργή που να κινδυνεύει να σπάσει ο υμένας. Θέτοντας μία σχετικά έντονη αλλά με μικρή συχνότητα διαταραχή (1 sec NC – 5 sec NO) δημιουργείται ένας εμφανής κυματισμός (σολιτονικό κύμα) στην επιφάνεια του υμένα, εμφανιζόμενος κάθε 5 sec. Κατά τη ροή, ο κυματισμός ακολουθεί ακριβώς τη ροή του υμένα.

Όταν ο υμένας δεν είναι οριζοντιωμένος κατά τον άξονα του πλάτους, περισσότερο υγρό συγκεντρώνεται στη χαμηλότερη πλευρά του καναλιού (**Σχήμα 3.23-TOMH B-B' & Γ-Γ'**) με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του παραβολικού σχήματος του κυματισμού (**Σχήμα 3.23-ΚΑΤΟΨΗ**) από την ιδανική του μορφή. Το αποτέλεσμα της ροής φυσικά δεν είναι αποδεκτό γιατί το πάχος του υμένα επηρεάζεται από την παρέκκλιση του καναλιού από την οριζόντιο.



Φώτο: Ο ερευνητής κατά τη διαδικασία ευθυγράμμισης

Έχει προβλεφθεί από τον σχεδιασμό η δυνατότητα «τοπικής» ρύθμισης της σχετικής θέσης του καναλιού από το ικρίωμα. Δεδομένου ότι το κανάλι ‘ακουμπάει’ στις δώδεκα ντίζες που είναι βιδωμένες στο ικρίωμα, γυρνώντας με την κατάλληλη φορά την κατάλληλη ντίζα πετυχαίνουμε την τοπική ρύθμιση. (Σχήμα 3.6). Από την άλλη πλευρά, η τοπική διόρθωση σε ένα σημείο του καναλιού επηρεάζει και τα γειτονικά του με συνέπεια η διαδικασία να απαιτεί πληθώρα επαναληπτικών διορθώσεων και δοκιμών. Έτσι, κατά την διαδικασία της ευθυγράμμισης πρέπει να ρυθμίζουμε τις ντίζες με την σειρά που έχουνε κατάντη της ροής, κάνοντας μικρές κινήσεις σε κάθε επανάληψη. Τέλος, πρέπει να βεβαιωθούμε ότι το κανάλι ακουμπάει σε όλες της ντίζες ώστε να αποφύγουμε το κίνδυνο να δημιουργηθούν στρεβλώσεις και μόνιμες παραμορφώσεις στο Plexiglas.

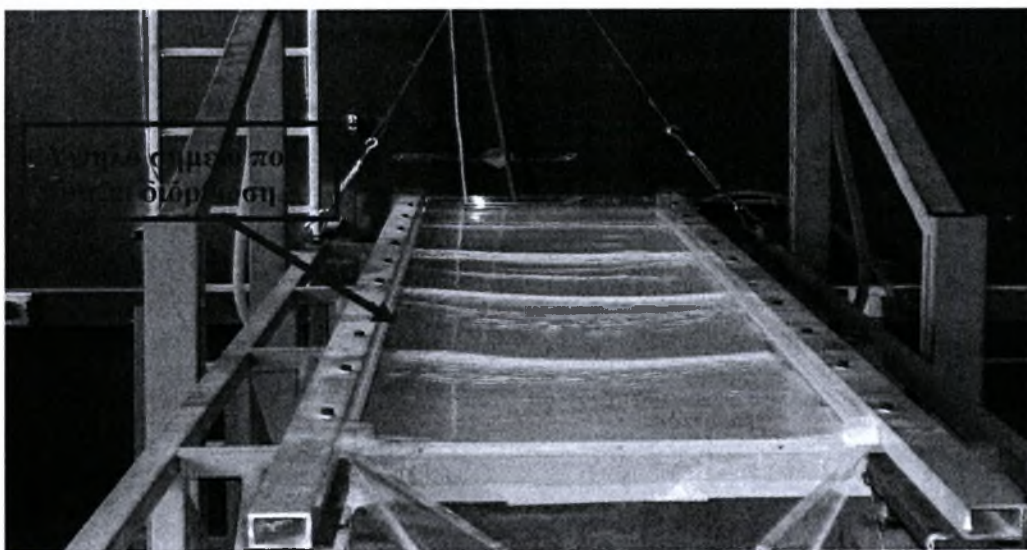


Σχήμα 4.7: Λειτουργία οριζόντιωσης του καναλιού

Ακολουθούν φωτογραφίες από τη διαδικασία οριζοντίωσης. Το υγρό που χρησιμοποιήθηκε ήταν καθαρό νερό με χρωστική.



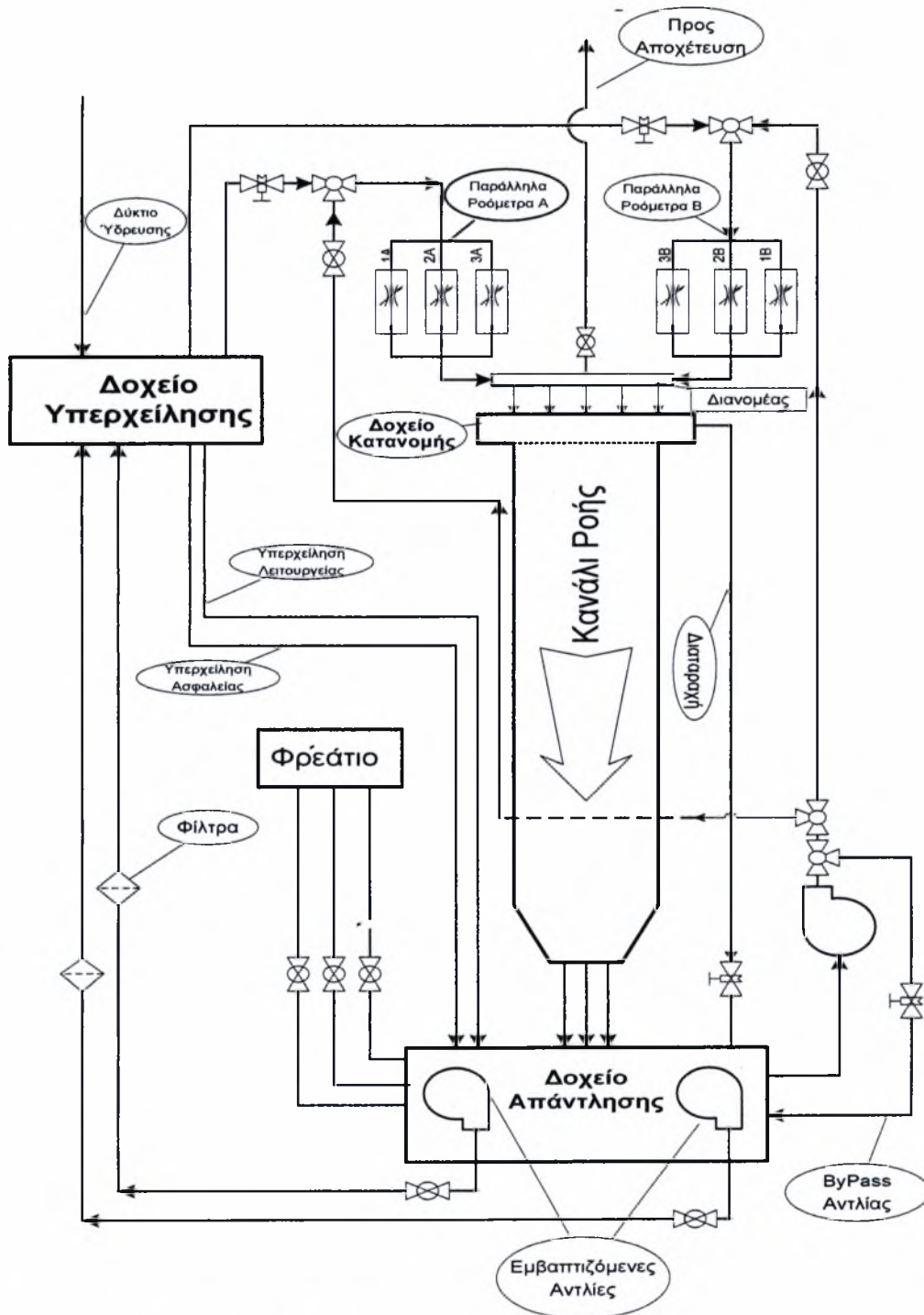
Σχήμα 4.8: Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωση



Σχήμα 4.9: Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωση

4.5 Υδραυλικό κύκλωμα

Το κανάλι ροής πίπτοντος υμένα συνοδεύεται από ένα πολύπλοκο υδραυλικό κύκλωμα. Σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας είναι ένα κλειστό κύκλωμα όπου το ρευστό ανακυκλοφορεί με την ισχύ που του προσδίδουν οι αντλίες. Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το υδραυλικό σχέδιο ενώ στην συνέχεια αναλύεται λεπτομερώς το κύκλωμα.



Σχήμα 4.10: Το υδραυλικό κύκλωμα

Έναρξη

Κατά την έναρξη της λειτουργίας γεμίζουμε το δοχείο απάντλησης με 80 lt νερού όπου είναι η απαιτούμενη ποσότητα για να λειτουργήσει το κύκλωμα. Κατόπιν προσθέτουμε 20 gr χρωστικής ουσίας ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή αναλογία των 250 ppm όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η καθαρότητα της επιφάνειας (από σκόνες, άλατα κλπ) είναι απαραίτητη. Πέρα, όμως, από τον απλό καθαρισμό της, πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να επαλείφεται με ένα σιλικονούχο υγρό (Sodium Silicate). Αυτό το υγρό έχει την ιδιότητα να δημιουργεί ένα προστατευτικό φιλμ σε όλη την επιφάνεια της ροής που εξομαλύνει την τραχύτητα επιφάνειας του Plexiglas και των αλουμινένιων κοιλοδοκών, ελαχιστοποιώντας έτσι την υδραυλική τους αντίσταση.

Τέλος, καθώς ο εγκλωβισμός του αέρα στις σωληνώσεις δημιουργεί ατέλειες στη ροή (φουσαλίδες κ.α.), απαιτείται η πάροδος κάποιου χρονικού διαστήματος (περίπου 20-30 λεπτά) για την σταθεροποίηση της ροής. Εναλλακτικά, για χρονική επίσπευση μπορεί να απεγκλωβιστεί ο αέρας με ακαριαίες αυξομειώσεις της παροχής.

Παροχή ρευστού στο κανάλι - Αντλίες

Για πειράματα με ρευστά χαμηλής πυκνότητας όπως το νερό, το κανάλι τροφοδοτείται από το δοχείο υπερχειλίσης. Το δοχείο υπερχειλίσης 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 ροομέτρων.



Σχήμα 4.11: Το δοχείο υπερχειλίσης

Το δοχείο υπερχειλίσης επί της ουσίας παρεμβάλλεται των αντλιών και του δοχείου κατανομής διότι έτσι μπορούμε να έχουμε την επιθυμητή παροχή στο κανάλι χωρίς να έχουμε αντλία μεταβλητών στροφών. Παράλληλα, όμως, πετυχαίνουμε σταθερή παροχή ρευστού στο κανάλι χωρίς τις διακυμάνσεις που δημιουργεί η αντλία.

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 επιστρέφουμε το πλεονάζον ρευστό στο δοχείο απάντλησης.

Οι εμβαπτιζόμενες αντλίες βρίσκονται βυθισμένες στο δοχείο απάντλησης, τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στο σχήμα 4.11.

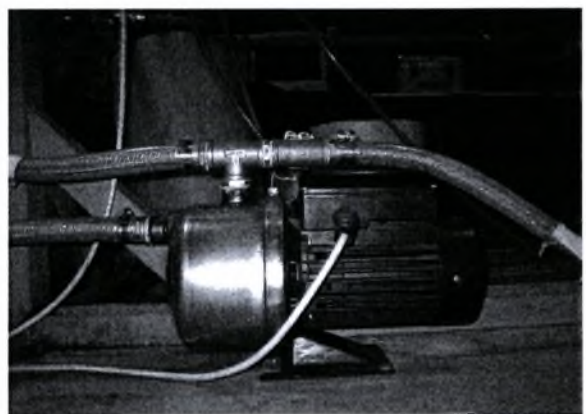
Ονομαστική Ισχύς	550 W
Μέγιστη Παροχή	10000 lt/h
Μέγιστο Μανομετρικό Ύψος	8,5 μ



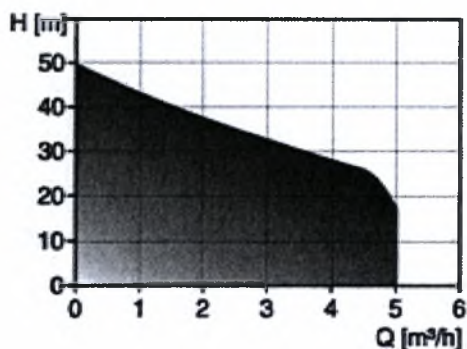
Σχήμα 4.12: Χαρακτηριστικά λειτουργίας εμβαπτιζόμενων αντλιών

Για ρευστά υψηλής πυκνότητας όπως η γλυκερίνη, οι εμβαπτιζόμενες αντλίες αδυνατούν να προσφέρουν την απαιτούμενη ισχύ στο ρευστό. Οπότε, εναλλακτικά, χρησιμοποιούμε την εξωτερική φυγοκεντρική αντλία μεγάλης ισχύος. Η αντλία τροφοδοτεί απευθείας το κανάλι χωρίς να παρεμβάλλεται το δοχείο υπερχειλίσεις. Για να ρυθμιστεί η παροχή σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούμε τη βάνα 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 4.13: Χαρακτηριστικά λειτουργίας φυγοκεντρικής αντλία

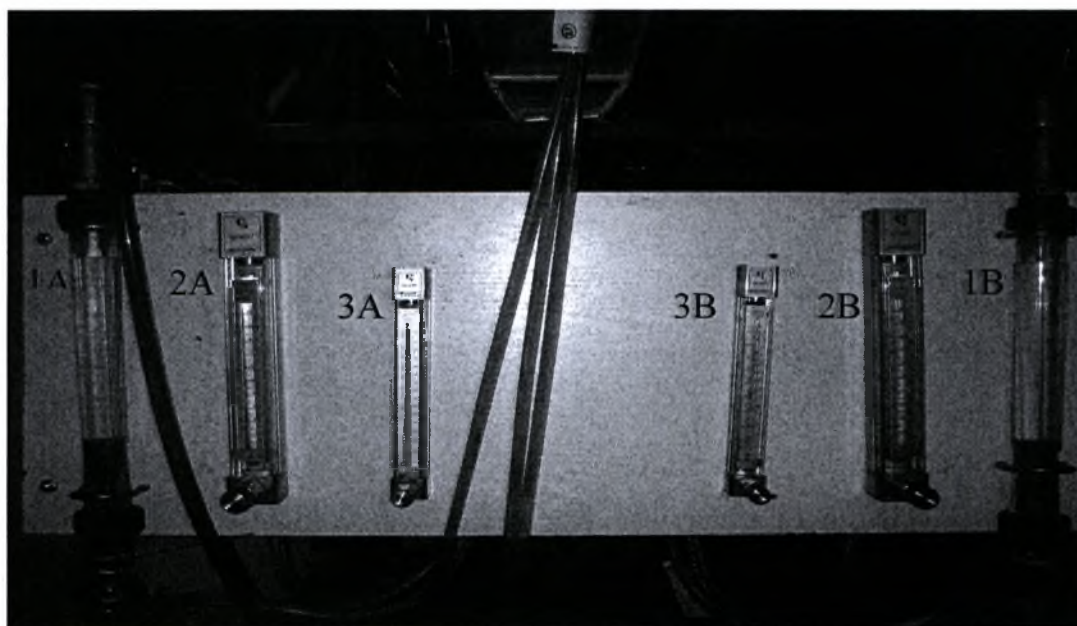


Σχήμα 4.14: Χαρακτηριστική καμπύλη φυγοκεντρικής αντλίας

Μέτρηση Παροχής - Ροόμετρα

Η μέτρηση της παροχής κατά την διάρκεια των πειραμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί υψηλή ακρίβεια καθώς η παροχή καθορίζει τον αριθμό Reynolds. Τα συμβατικά ροόμετρα αδυνατούν να παρέχουν την απαιτούμενη ακρίβεια. Η μέτρηση στη πράξη γίνεται με συλλογή μιας ποσότητας νερού σε φορητό δοχείο για ένα δεδομένο εύλογο χρονικό διάστημα (συνήθως μεγαλύτερο των τεσσάρων λεπτών), ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα του χρήστη. Στη συνέχεια, ζυγίζεται αυτή η ποσότητα και με την παραδοχή ότι η πυκνότητα του υγρού διαλύματος πλησιάζει αυτή του καθαρού νερού, αντιστοιχίζεται σε μια παροχή με μονάδες lt/min.

Παρόλα αυτά στο κύκλωμα πριν τον διανομέα έχουν συνδεθεί δυο διατάξεις από παράλληλα ροόμετρα για να δίνουν ενδεικτικά στον χρήστη την τιμή της παροχής και να ρυθμίζει προσεγγιστικά την επιθυμητή.



Σχήμα 4.15: Η διάταξη ροόμετρων

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

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

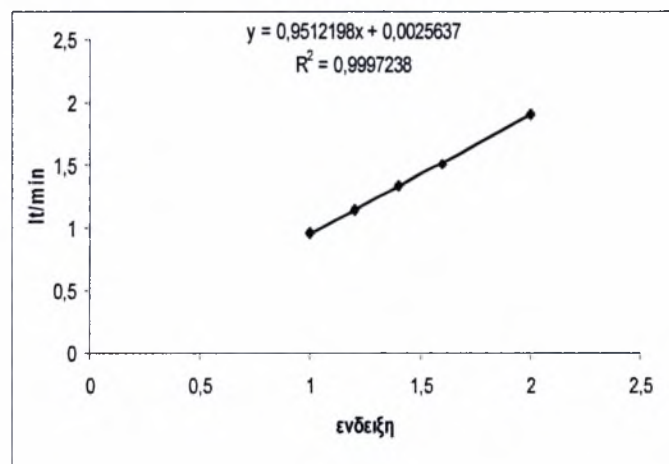
Σχήμα 4.16: Οι μέγιστες επιτρεπόμενες παροχές των ροόμετρων

Η παροχή κατά προσέγγιση πρέπει να διαμοιράζεται ομοιόμορφα και στις δυο παράλληλες διατάξεις ροόμετρων. Τα ροόμετρα δημιουργούν υψηλή υδραυλική αντίσταση στο κύκλωμα (πτώση πίεσης), έτσι για μεγάλες παροχές χρησιμοποιούμε τα ροόμετρα 1A και 1B που δημιουργούν την ελάχιστη πτώση πίεσης στα ρευστό.

Βαθμονόμηση Ροόμετρων

Για ακριβέστερη μέτρηση έγινε αρχικά νέα βαθμονόμηση στα ροόμετρα. Δημιουργήθηκε, δηλαδή, μια νέα συνάρτηση που θα διορθώνει την ένδειξη των ροόμετρων. Η μεθοδολογία έχει ως εξής: μετράμε την πραγματική παροχή με την μέθοδο της κανάτας, και την αντιστοιχούμε με την ένδειξη του ροόμετρου. Αυτό επαναλαμβάνεται για πέντε διαφορετικά σημεία, ώστε η συνάρτηση που θα προκύψει να έχει ικανοποιητική ακρίβεια(θεωρητικά μπορεί να γίνει και με δύο σημεία).

Ένδειξη Ροομέτρου	Πραγματική Ογκ.παρ. (lt/min)
1	0,96
1,2	1,14
1,4	1,34
1,6	1,52
2	1,91

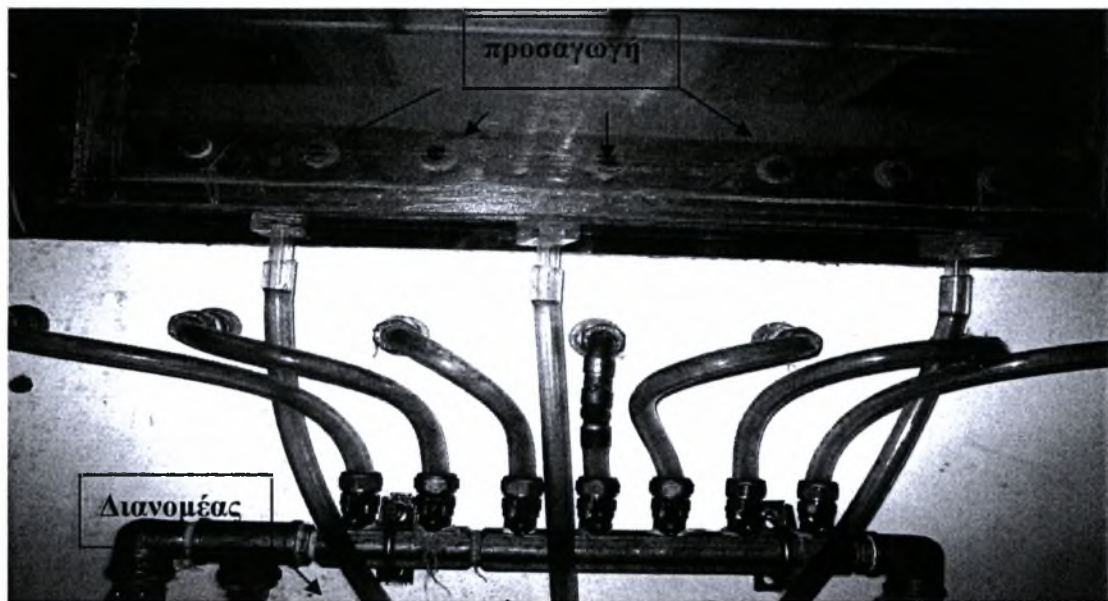


Σχήμα 4.17: Γραφική απεικόνιση βαθμονόμησης για το ροόμετρο 2A

Η ευθεία που προσεγγίζει την συνάρτηση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15 βρίσκεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μέση τετραγωνική απόκλιση R^2 πρέπει πάντα να προσεγγίζει τη μονάδα, σε περίπτωση που αποκλίνει σημαντικά οι μετρήσεις είναι λάθος και η βαθμονόμηση πρέπει να επαναληφθεί.

Διανομέας – Δοχείο Κατανομής

Ο ρόλος του διανομέα είναι να κάνει πολλαπλή προσαγωγή του ρευστού στο πυθμένα του δοχείου κατανομής. Έτσι, πετυχαίνουμε ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού χωρίς τη δημιουργία δινών που θα διαταράσσανε την ηρεμία της ελεύθερης επιφάνειας.



Σχήμα 4.18: Ο διανομέας και το δοχείο κατανομής

Διαταραχή

Ο σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα «υδραυλικό άλμα» στην αφετηρία της ροής του υμένα ώστε να μελετηθεί η δυναμική εξέλιξη του κατάντη της ροής. Τρεις σωλήνες διαμέτρου $\text{Ø}10\text{mm}$ τοποθετημένες στο κάτω μέρος του δοχείου υπερχειλίστη οδηγούνται σε μια ηλεκτροβαλβίδα ON/OFF και καταλήγει απ' ευθείας στη δεξαμενή απορροής. Το ύψος της διαταραχής ρυθμίζεται από μια βάνα που έχει τοποθετηθεί πριν τη ηλεκτροβαλβίδα. Έτσι, με τη βαλβίδα τέρμα ανοιχτή δημιουργούμε μεγάλα κύματα και αντίστροφα. Επί της ουσίας, όσο η ηλεκτροβαλβίδα είναι ανοιχτή αφαιρούμε διαρκώς ποσότητα ρευστού από το δοχείο κατανομής, όταν η ηλεκτροβαλβίδα κλείσει δημιουργείται ακαριαία αύξηση της παροχής στο κανάλι που μεταφράζεται σε δημιουργία κυματισμού. Η ηλεκτροβαλβίδα είναι παράλληλα συνδεδεμένη σε έναν ηλεκτρονικό χρονιστή που

ελέγχει το ρυθμό που ανοίγει και κλείνει. Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου που η βαλβίδα θα είναι κλειστή και χωριστά του χρόνου που θα είναι ανοιχτή.

Έχοντας πια τη δυνατότητα να προκληθεί μία, στιγμιαία ή μη, αύξηση της παροχής του ρευστού στο κανάλι μπορεί να δημιουργηθεί μία διαταραχή στη ροή του επίπεδου υμένα που θα οδηγήσει στη γένεση ενός «σολιτονικού» κύματος ή μιας οικογένειας τέτοιων κυμάτων που η συχνότητα εμφάνισής τους θα ελέγχεται άμεσα από το χειριστή της συσκευής.

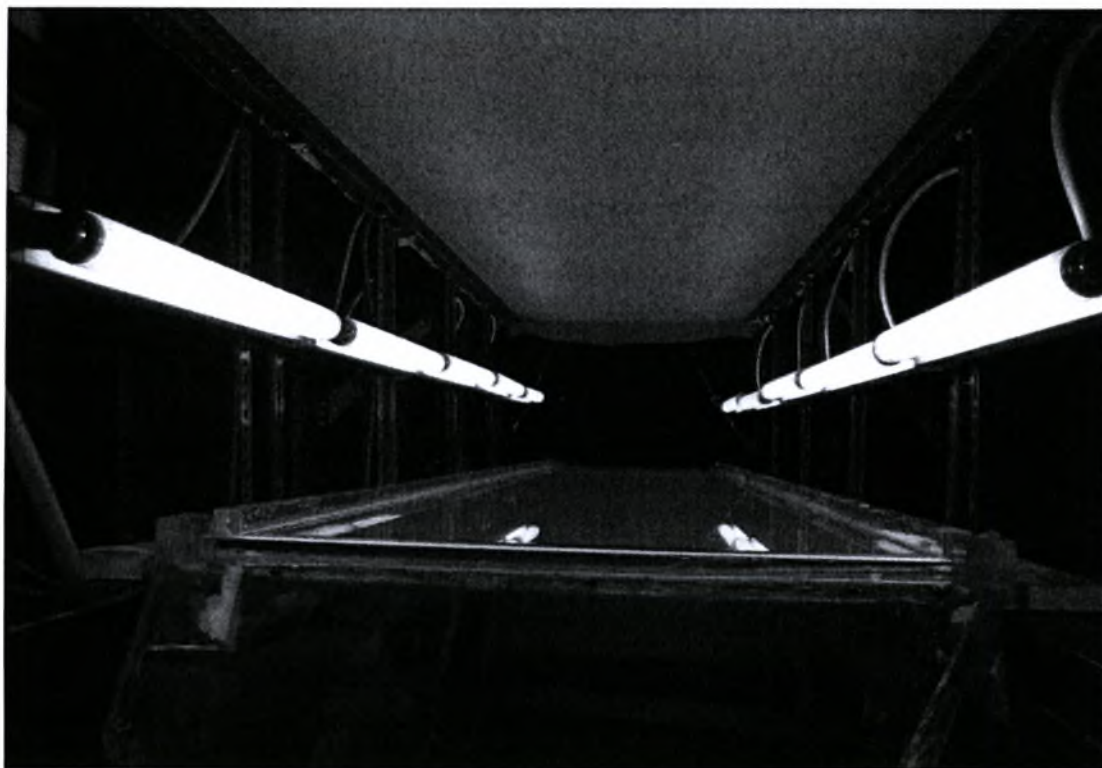


Σχήμα 4.19:

Ο χρονιστής της διαταραχή ο οποίος κατασκευάστηκε στο εργαστήριο ΦΧΔ

4.6 Σύστημα Φωτισμού

Πάνω από την περιοχή των μετρήσεων (το κανάλι ροής), τοποθετήθηκε η πηγή υπεριώδους φωτός, που είναι 10 λαμπτήρες υψηλής έντασης (Philips, TL20/05), με εξαρτήματα τροφοδοσίας (ballast, starter) για την ελάττωση των ταλαντώσεων του υπεριώδους φωτός. Οι λαμπτήρες είναι τοποθετημένοι σε σταθερή απόσταση 20 cm από την πλάκα μέτρησης και συμμετρικά ως προς τις άκρες του καναλιού με σκοπό την πιο ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας τους. 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 .



Σχήμα 4.20 : Η διάταξη των λαμπτήρων κατά μήκος του καναλιού ροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

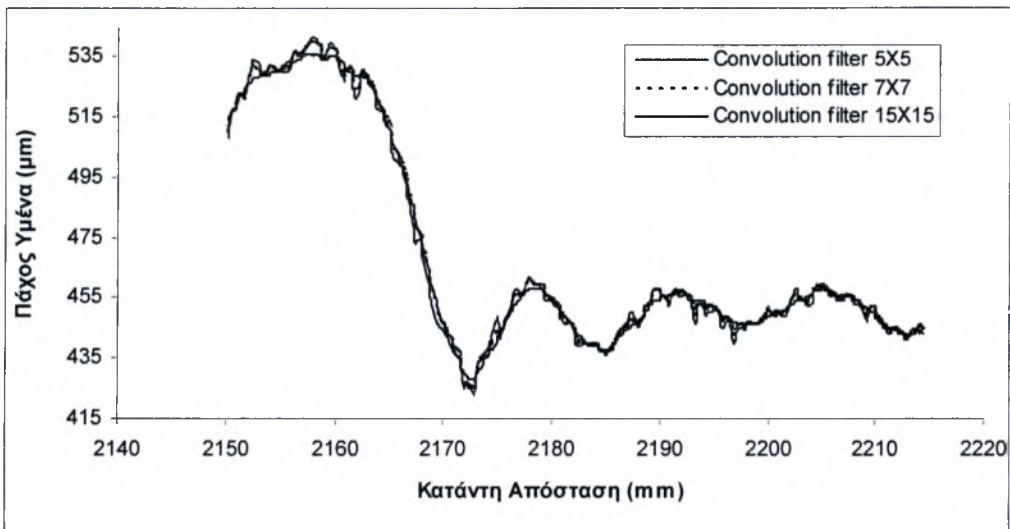
Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα ροής λεπτού υγρού υμένα στο νέο κανάλι ροής. Διενεργήθηκαν πέντε σειρές πειραμάτων, όπου σε όλα χρησιμοποιήθηκε καθαρό νερό. Οι μετρήσεις έγιναν σε συγκεκριμένη περιοχή του υμένα, σε μήκος από 209 έως 211 cm από το σημείο έναρξης ροής στην αρχή του καναλιού. Η κλίση του καναλιού διατηρήθηκε σταθερή στις 3.4 μοίρες. Η συχνότητα διαταραχής (f) διατηρήθηκε σταθερή στην τιμή του 0,1 Hz σε όλα τα πειράματα ενώ μεταβλήθηκαν το ύψος και ο χρόνος επιβολής (T_{on}) της διαταραχής ως εξής:

- Για τον πρώτο κύκλο πειραμάτων (3 πρώτα) το ύψος διαταραχής μεταβαλλόταν κατ'εκτίμηση ενώ ο χρόνος επιβολής της διαταραχής παρέμενε σταθερός στην τιμή $T_{on}= 0,25$ sec.
- Για τον δεύτερο κύκλο πειραμάτων (2 επόμενα) το ύψος διαταραχής μεταβαλλόταν κατ'εκτίμηση ενώ ο χρόνος επιβολής της διαταραχής παρέμενε σταθερός στην τιμή $T_{on}= 0,5$ sec αυτή τη φορά.

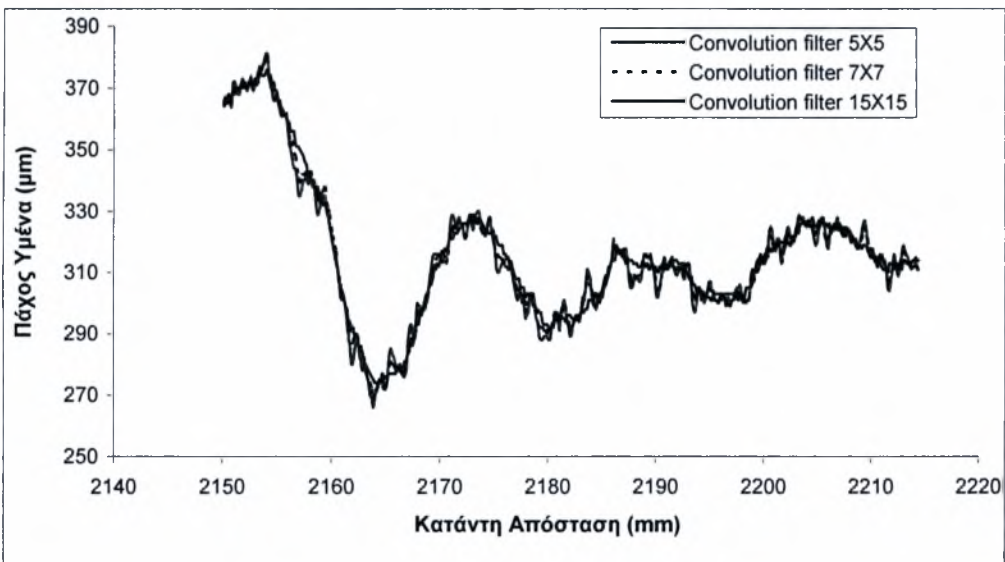
Στόχος των πειραμάτων ήταν η παρακολούθηση της μετάβασης της ροής του υγρού υμένα από την περιοχή ευστάθειας στην περιοχή αστάθειας. Αυτό συνεπάγεται αριθμούς από $Re=10$ έως $Re=30$ όπου στη συγκεκριμένη γωνία κλίσης λαμβάνει χώρα η μετάβαση.

5.1 Επιλογή ψηφιακού φίλτρου

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, το πρώτο στάδιο στην επεξεργασία των εικόνων είναι η εφαρμογή κατάλληλου φίλτρου σε κάθε εικόνα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση κάποιων ανεπιθύμητων παραγόντων στα δεδομένα της έντασης. Η διαδικασία όμως αυτή εμπεριέχει τον κίνδυνο να απαλείψουμε κάποια δεδομένα όπως κύματα με μικρό μήκος κύματος. Για να καταλήξουμε στο επιθυμητό φίλτρο επεξεργαστήκαμε εικόνες που πήραμε σε κάποια από τα παραπάνω πειράματα με τα ακόλουθα φίλτρα: Gaussian filter 15x15, 5x5 και 7x7. Μερικά από τα αποτελέσματα που εξαγάγαμε φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 5.1 Γραφική απεικόνιση κυμάτων σε $Re=25$, $f=0.1$ Hz ($T_{on}=0.5$ sec)



Σχήμα 5.2 Γραφική απεικόνιση κυμάτων σε $Re=19$, $f=0.1$ Hz ($T_{on}=0.25$ sec)

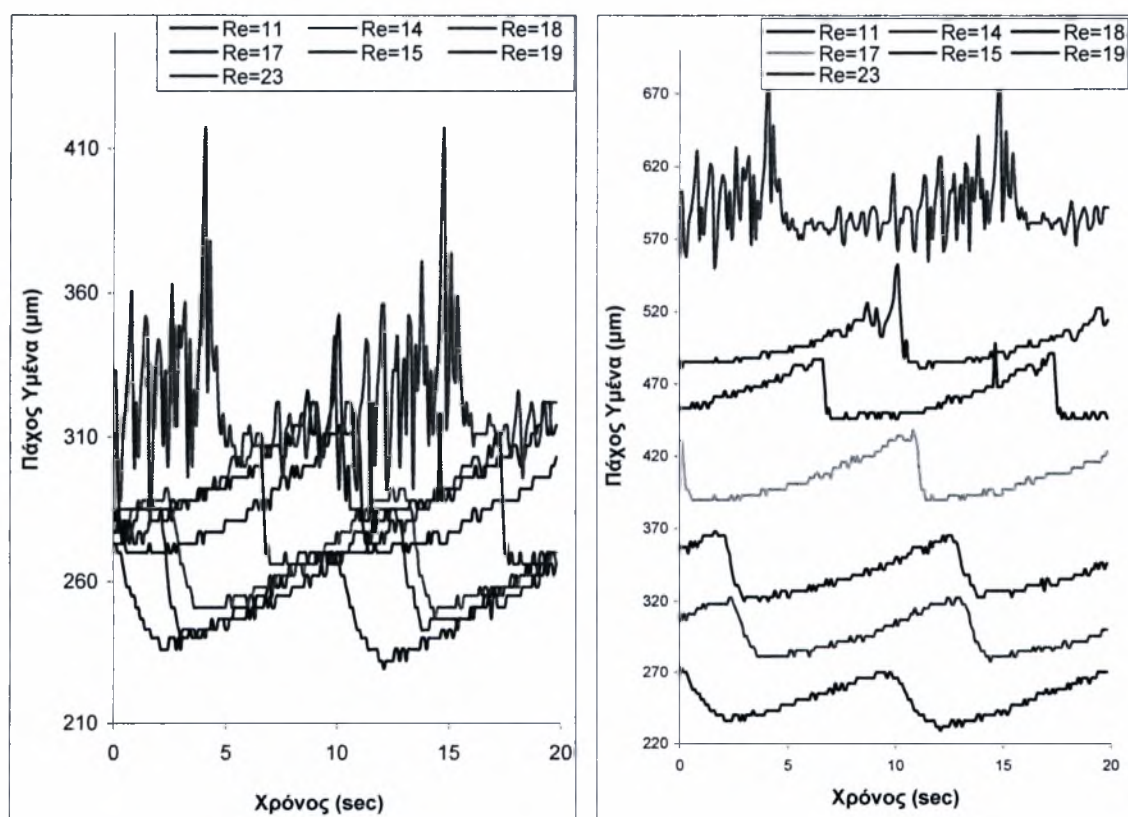
Είναι εμφανές ότι το Gaussian filter 15x15 εξομαλύνει ικανοποιητικά τις μετρήσεις και αφαιρεί ατέλειες και θόρυβο ενώ ταυτόχρονα δεν αλλοιώνει στο παραμικρό την δομή των κυμάτων κατάντη της ροής. Έτσι, κρίθηκε ως το πλέον κατάλληλο και εφαρμόστηκε στο σύνολο των εικόνων.

5.2 Ανάλυση Πειραμάτων

- 1^{ος} κύκλος πειραμάτων

Κατά τη πρώτη σειρά πειραμάτων επιβλήθηκε διαταραχή $f=0.1\text{Hz}$ ($T_{op}=0.25$) σε αριθμούς $Re=11, Re=14, Re=15, Re=17, Re=18, Re=19, Re=23$.

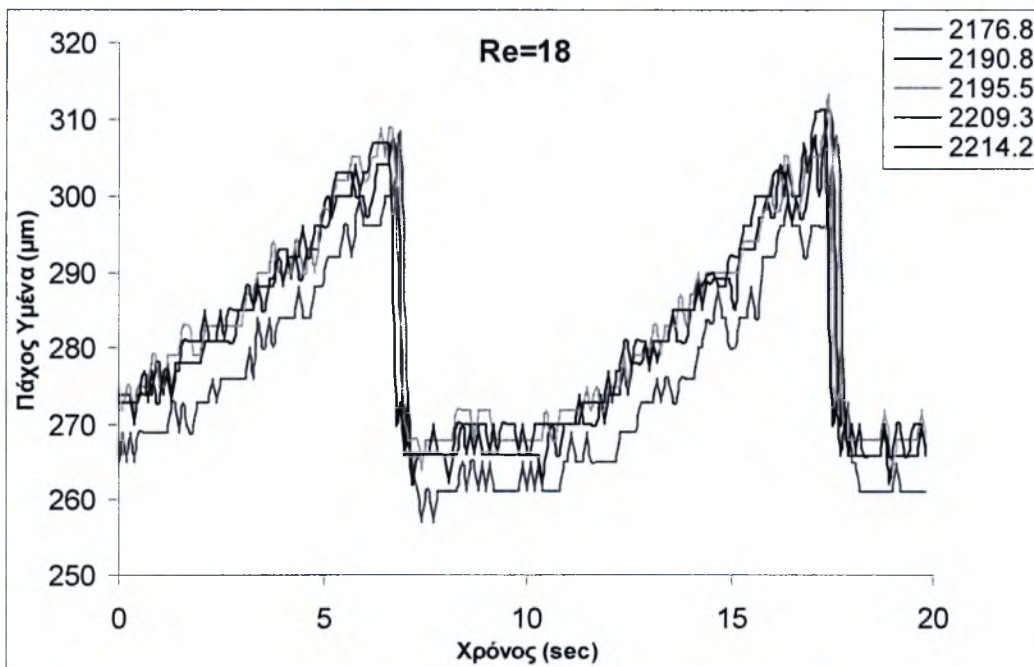
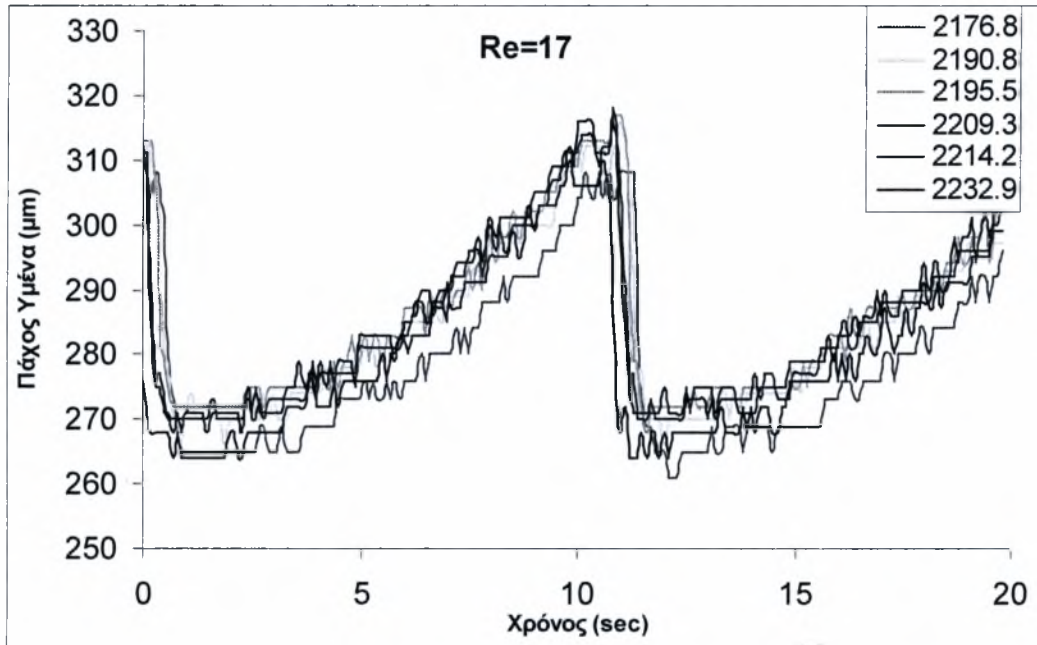
Στο σχήμα 5.1.α. απεικονίζεται η χρονοσειρά της ελεύθερης επιφάνειας για τους διάφορους αριθμούς Re στη θέση 2209 mm. Εφεξής οι χρονοσειρές θα παρουσιάζονται διαχωρισμένες όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.β. Εκεί, μπορούμε να παρατηρούμε την ευσταθή περιοχή σε $Re=11, Re=14, Re=15, Re=17$. Σε $Re=18$ εμφανίζονται τα πρώτα δείγματα αστάθειας. Σε $Re=19$, τα κύματα πλέον εμφανίζουν όλα τα χαρακτηριστικά των μοναχικών κυμάτων, δηλαδή μία κύρια κορυφή της οποίας προηγούνται μικρά τριχοειδή κύματα. Σε $Re=23$ παρατηρούμε καθαρά την εμφάνιση των παρασιτικών κυμάτων τα οποία ακολουθούν το κύριο κύμα.



Σχήμα 5.3: α) Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για όλους τους Re

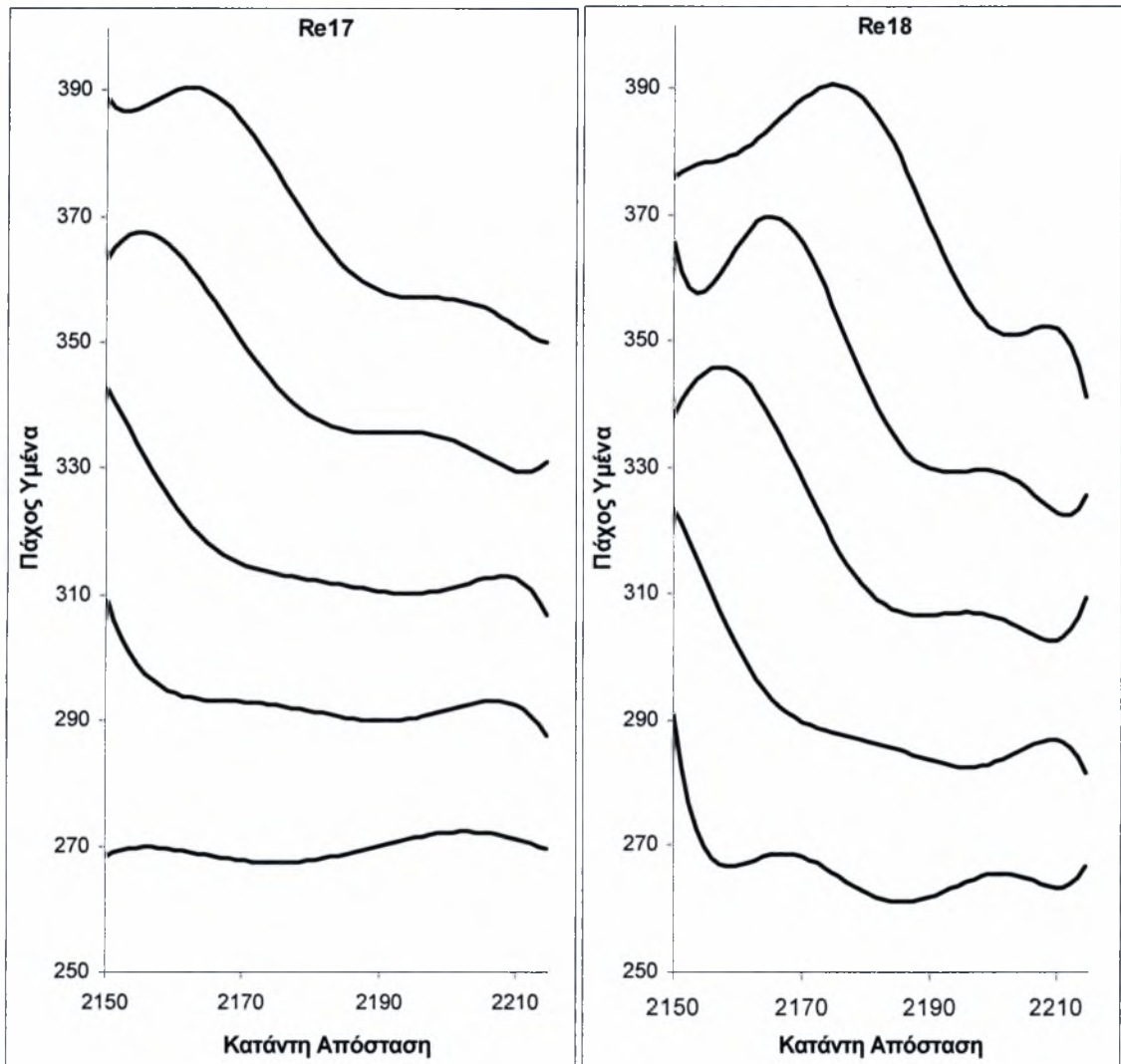
β) Χρονοσειρές διαχωρισμένες

Στην ευσταθή περιοχή το πλάτος των κυμάτων είναι 40 μm και είναι εμφανές ότι είναι ανεξάρτητο του αριθμού Re . Δηλαδή η μεταβολή του Re , προκαλεί μεταβολή στο πάχος του υποστρώματος αλλά όχι στο ύψος της διαταραχής.



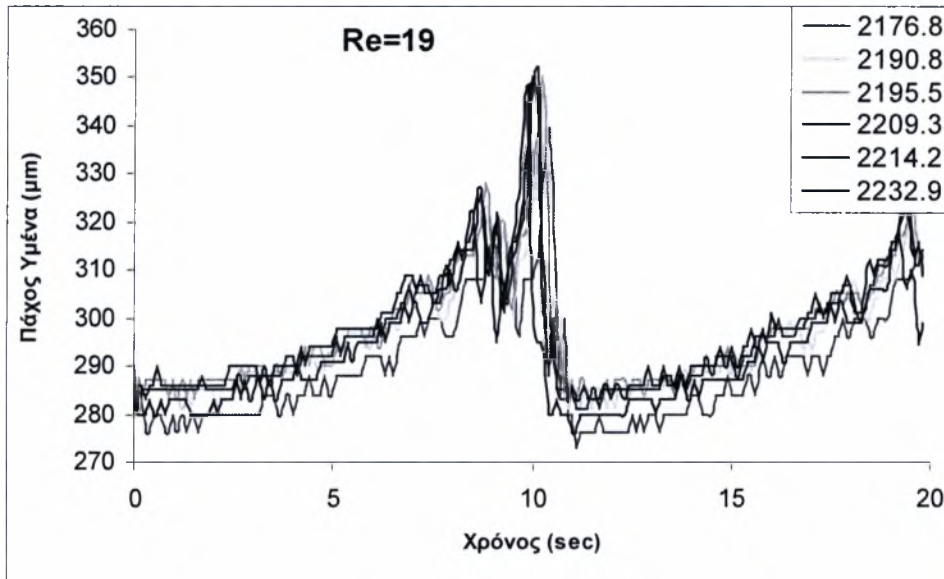
Σχήμα 5.4 : Χρονοσειρές στους $Re=17$ και $Re=18$ για πέντε διαφορετικά σημεία

Στο σχήμα 5.3 φαίνεται καθαρά ότι σε $Re=17$ βρισκόμαστε σε ευσταθή περιοχή όπου τα κύματα σβήνουν ομαλά χωρίς εμφάνιση ρυτιδώσεων. Στον $Re=18$ εμφανίζονται αμυδρά οι πρώτες ρυτιδώσεις που έπονται του κύματος και φανερώνουν ότι βρισκόμαστε κοντά στη περιοχή μετάβασης.



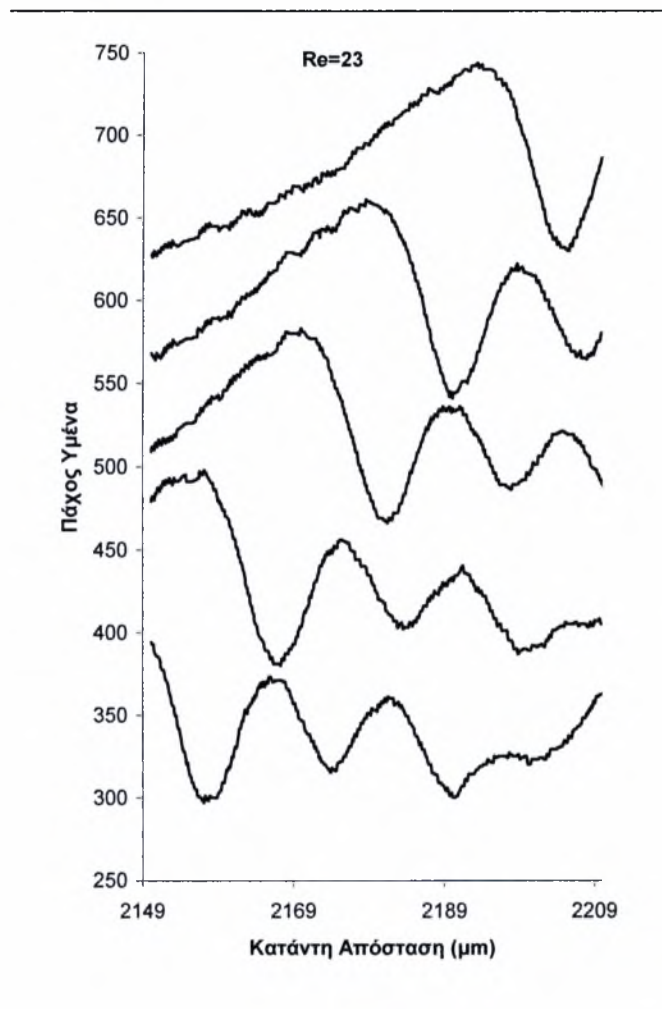
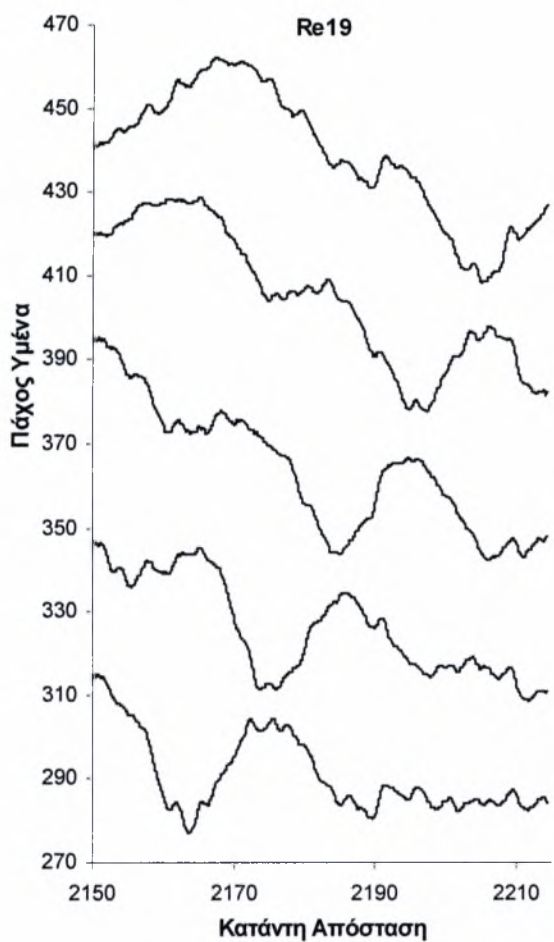
Σχήμα 5.5 : Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=17$ και $Re=18$ για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές (0,1sec)

Η ασταθής περιοχή φαίνεται καθαρά πλέον στον $Re=19$ όπου παρατηρούμε την απότομη κλίση που έχει πάρει το μέτωπο του κύματος με το παρασιτικό κύμα να ακολουθεί.



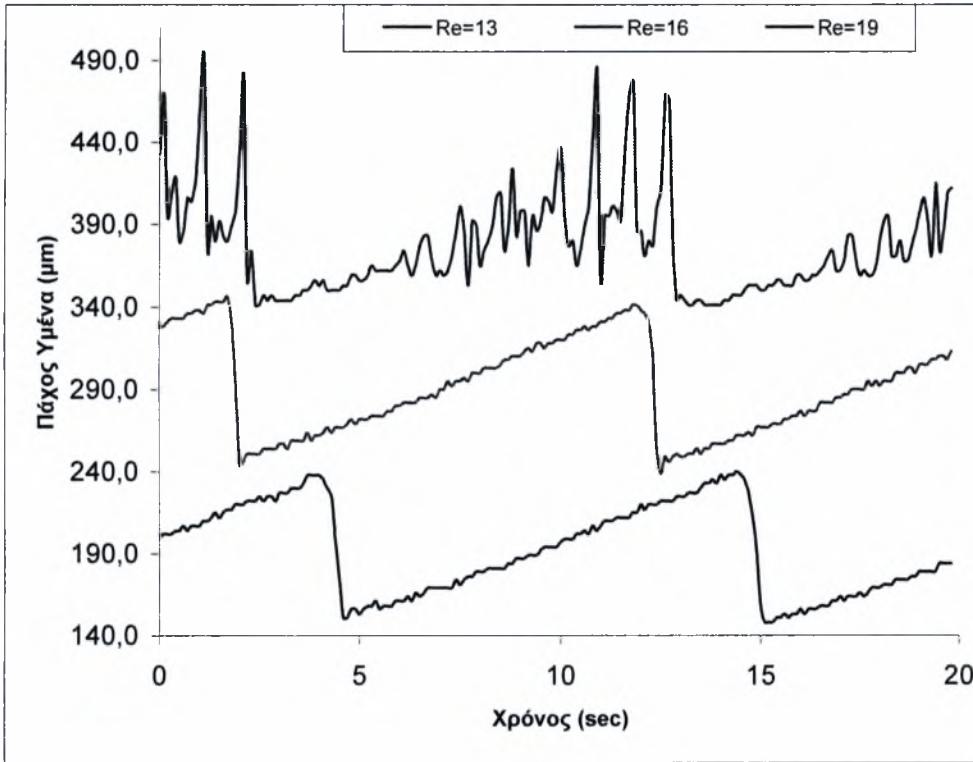
Σχήμα 5.6 : Χρονοσειρά σε $Re=19$ για πέντε διαφορετικά σημεία κατάντη της ροής

Το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας στον $Re=19$ δείχνει εμφανώς τα τριχοειδή κύματα που έπονται του κύριου κύματος. Παράλληλα, παρατηρούμε τη συγχώνευση που πραγματοποιείται καθώς το μικρότερο κύμα που προπορεύεται καπελώνεται από το μεγαλύτερο που έπεται. Σε $Re=23$ έχουμε πλήρως ανεπτυγμένη ροή των μοναχικών κυμάτων.

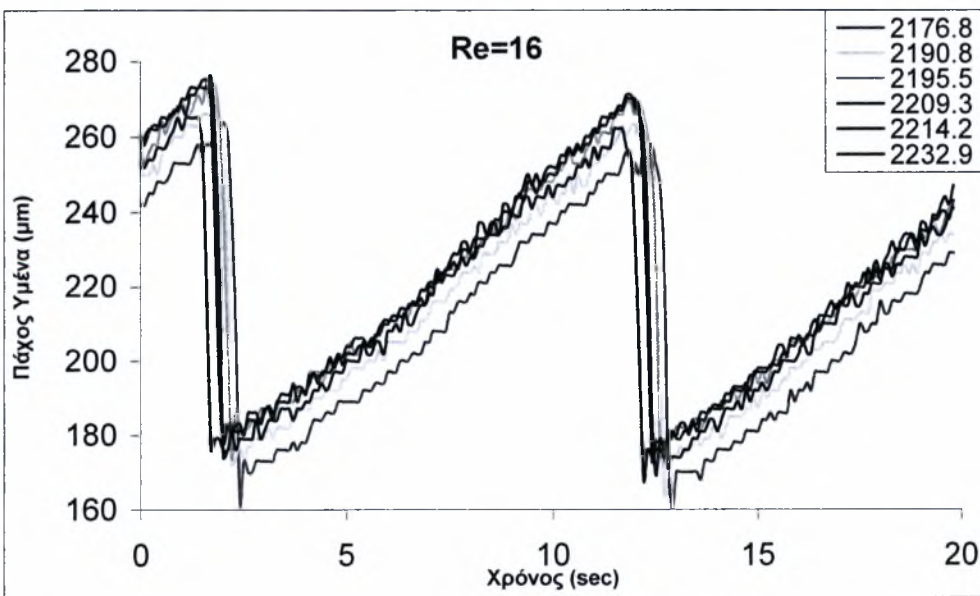


Σχήμα 5.7: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=19, Re=23$ για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές

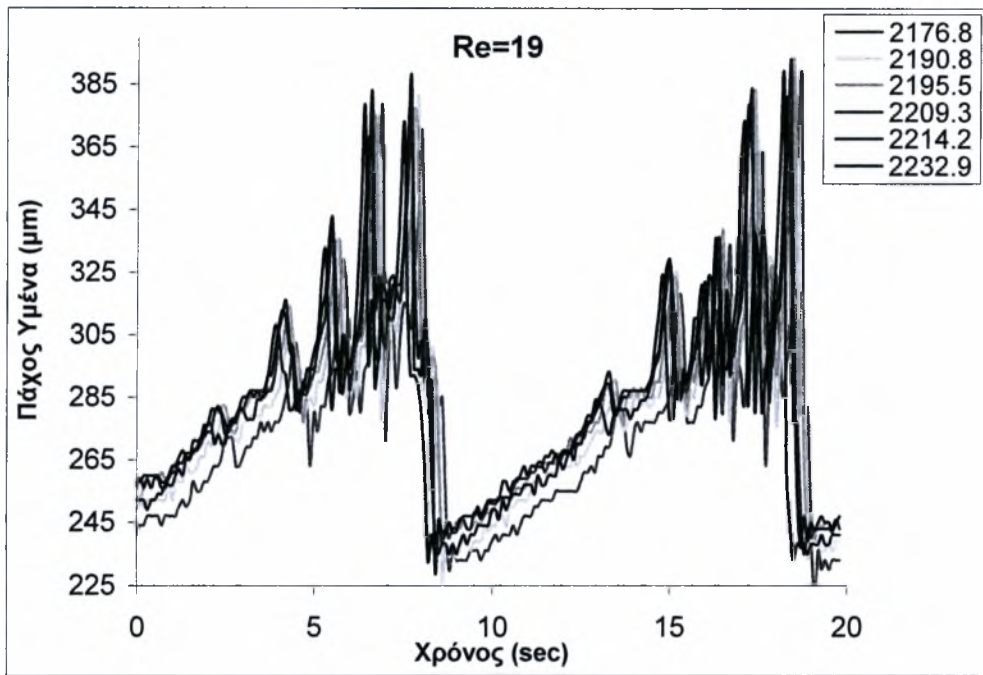
Ακολουθώς, αυξήσαμε το ύψος της διαταραχής και πήραμε μετρήσεις σε $Re=13$, $Re=16$, και $Re=19$. Το πλάτος των κυμάτων αυξήθηκε στα 90 μm . Το συμπέρασμα ότι το πλάτος του κύματος παραμένει αμετάβλητο για όλους τους Re στην ευσταθή περιοχή επιβεβαιώνεται.



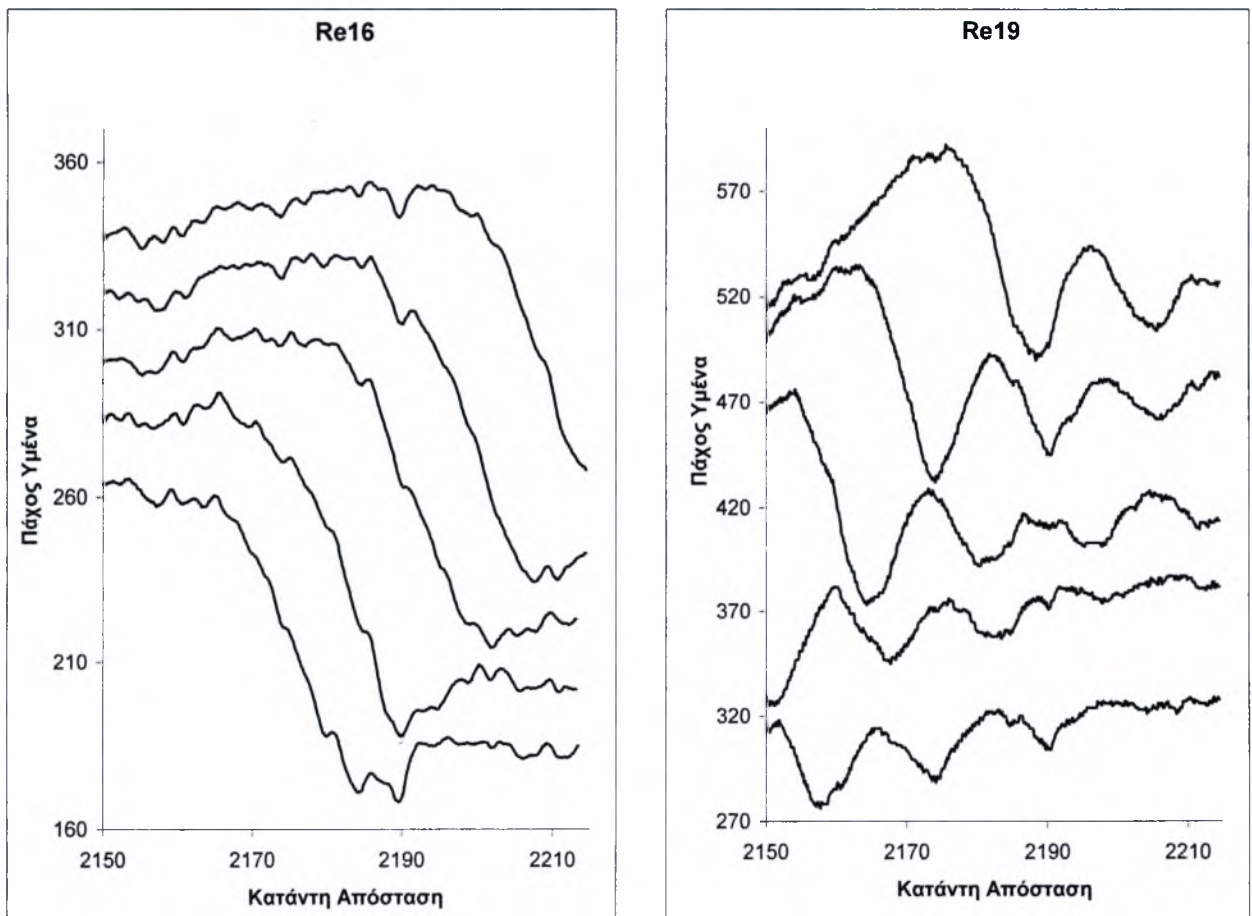
Σχήμα 5.8: Χρονοσειρές των τεσσάρων διαφορετικών Re



Σχήμα 5.9: Χρονοσειρά σε $Re=16$ για πέντε διαφορετικά σημεία κατάντη της ροής

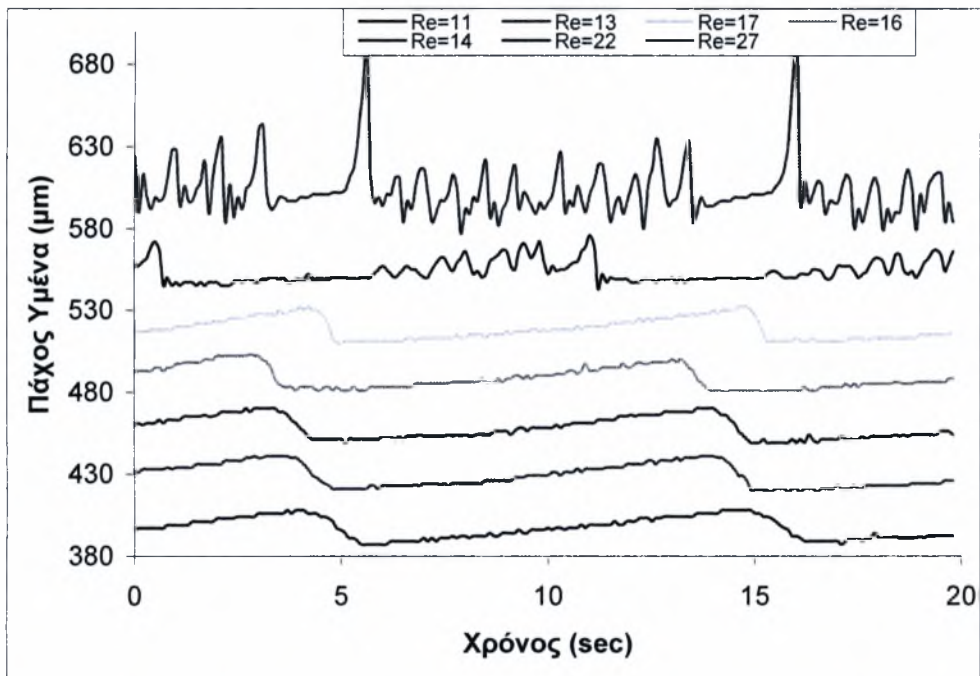


Σχήμα 5.10: Χρονοσειρά σε $Re=19$ για πέντε διαφορετικά σημεία κατόντη της ροής

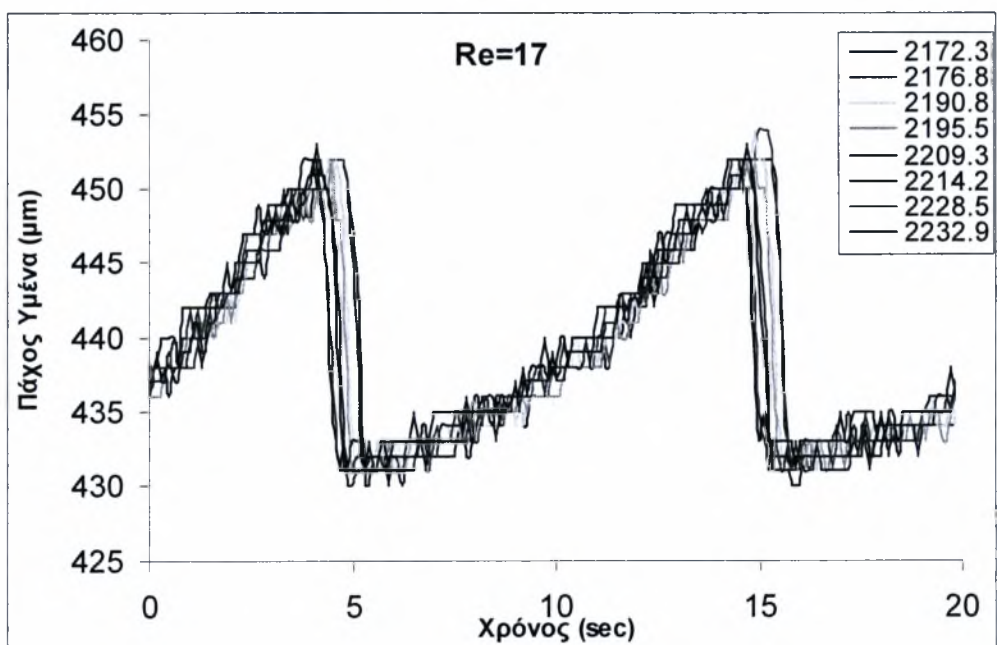


Σχήμα 5.11: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=19, Re=23$

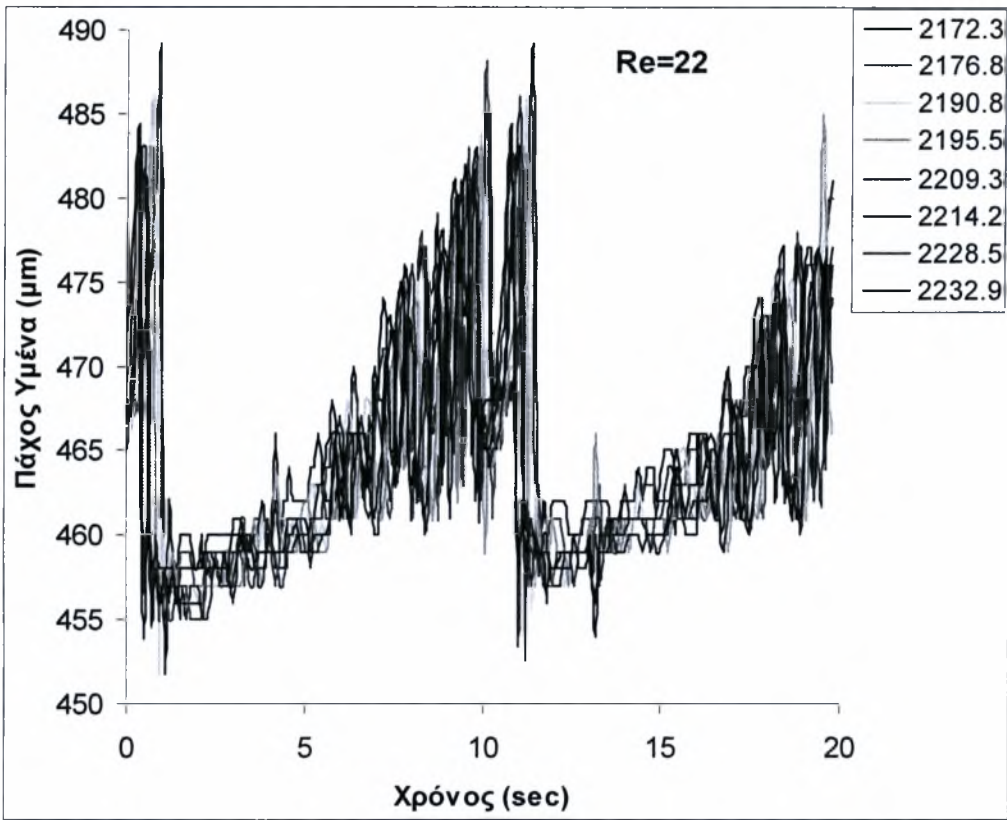
Για να διαπιστώσουμε την επαναληψιμότητα των φαινομένων εκτελέσαμε μια νέα σειρά πειραμάτων στις ίδιες συνθήκες ($f=0.1$, $T_{op}=0.25$) με νέο ύψος διαταραχής στα $20\mu\text{m}$ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 στην ευσταθή περιοχή. Πήραμε μετρήσεις σε αριθμούς $Re=11$, $Re=13$, $Re=14$, $Re=16$, $Re=17$, $Re=22$ και $Re=27$.



Σχήμα 5.12: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για όλους τους Re

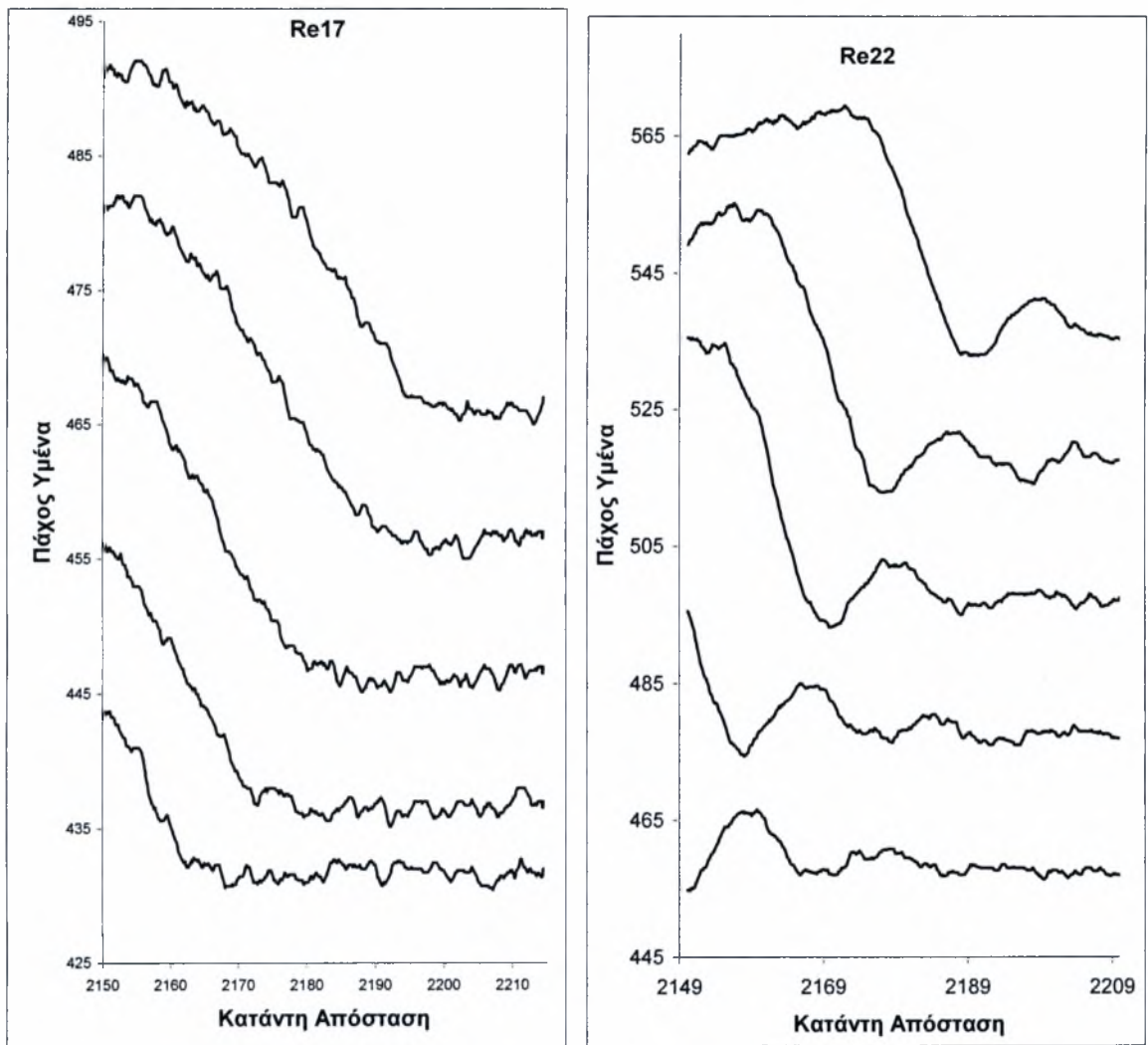


Σχήμα 5.13: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=17$ για πέντε διαφορετικά σημεία



Σχήμα 5.14: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=22$ για πέντε διαφορετικά σημεία

Τα παραπάνω διαγράμματα μας αποδεικνύουν ότι η συμπεριφορά των κυματομορφών είναι ανεξάρτητη του ύψους της διαταραχής. Συγκρίνοντας τα με τα αντίστοιχα διαγράμματα στα προηγούμενα πειράματα διαπιστώνουμε ότι ο $Re_{critical}$ είναι πάντα ο 19 με το ύψος της διαταραχής στην ευσταθή περιοχή να παραμένει σταθερό.

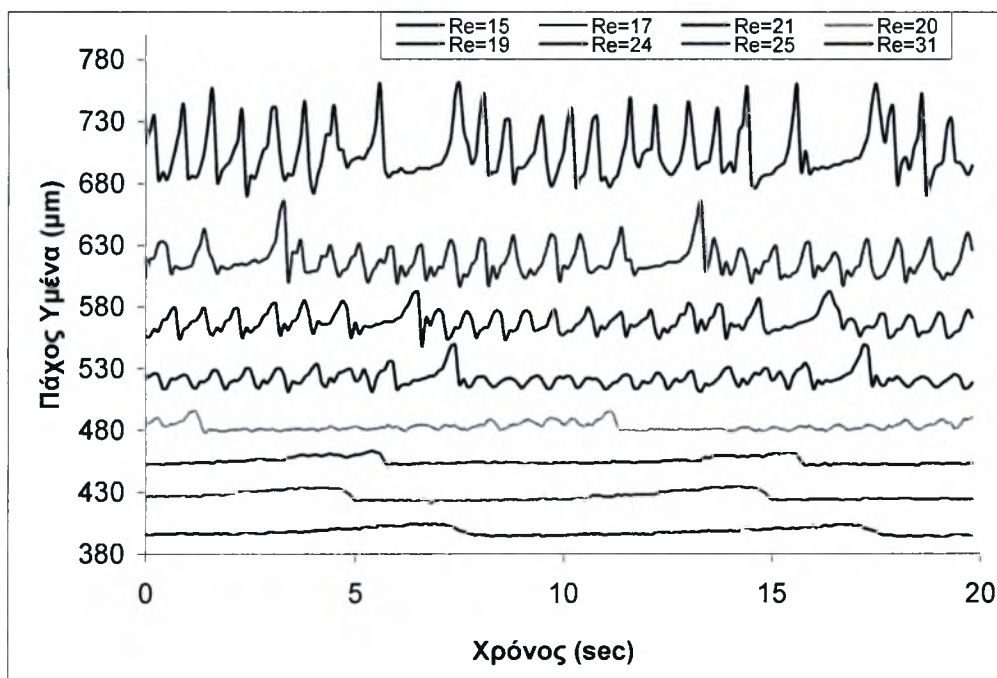


Σχήμα 5.15: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=17, Re=22$

- 2ος κύκλος πειραμάτων

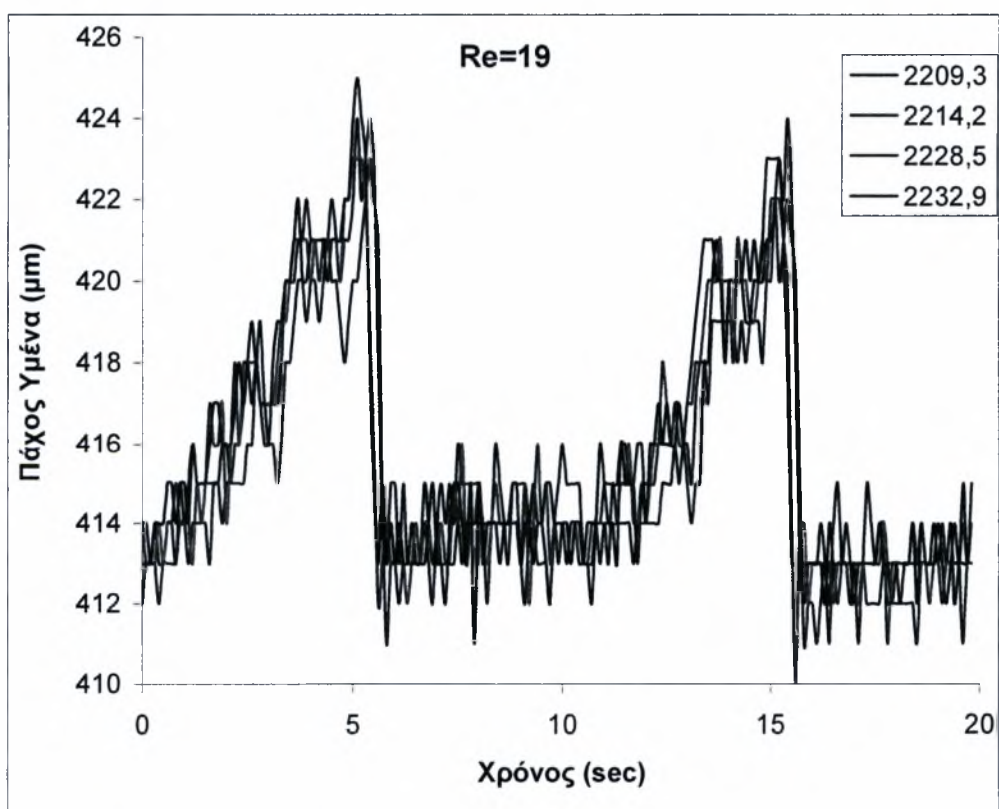
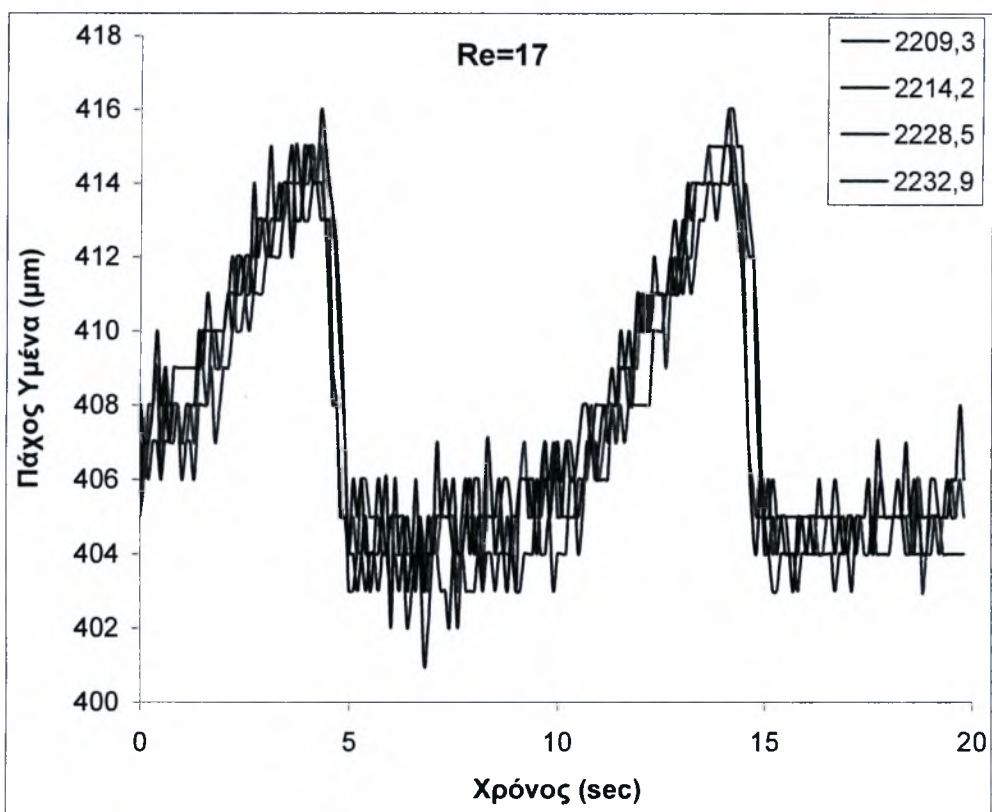
Σκοπός του 2ου κύκλου πειραμάτων είναι να μελετήσουμε την εξάρτηση των κυμάτων σε σχέση με τον χρόνο επιβολής της διαταραχής. Οι μετρήσεις έγιναν στην ίδια συχνότητα με τα προηγούμενα, δηλαδή $f=0.1$ Hz, αλλά ο χρόνος που εφαρμόστηκε η διαταραχή (άνοιγμα ηλεκτροβαλβίδας) αυξήθηκε σε $T_{on}=0.5$ sec.

Αρχικά έγιναν μετρήσεις στους ακόλουθους αριθμούς Reynolds: $Re=15$, $Re=17$, $Re=19$, $Re=20$, $Re=21$, $Re=24$, $Re=25$, $Re=31$. Το ύψος της διαταραχής ρυθμίστηκε να είναι χαμηλό, με μέγεθος 15 μm στην ευσταθή περιοχή.



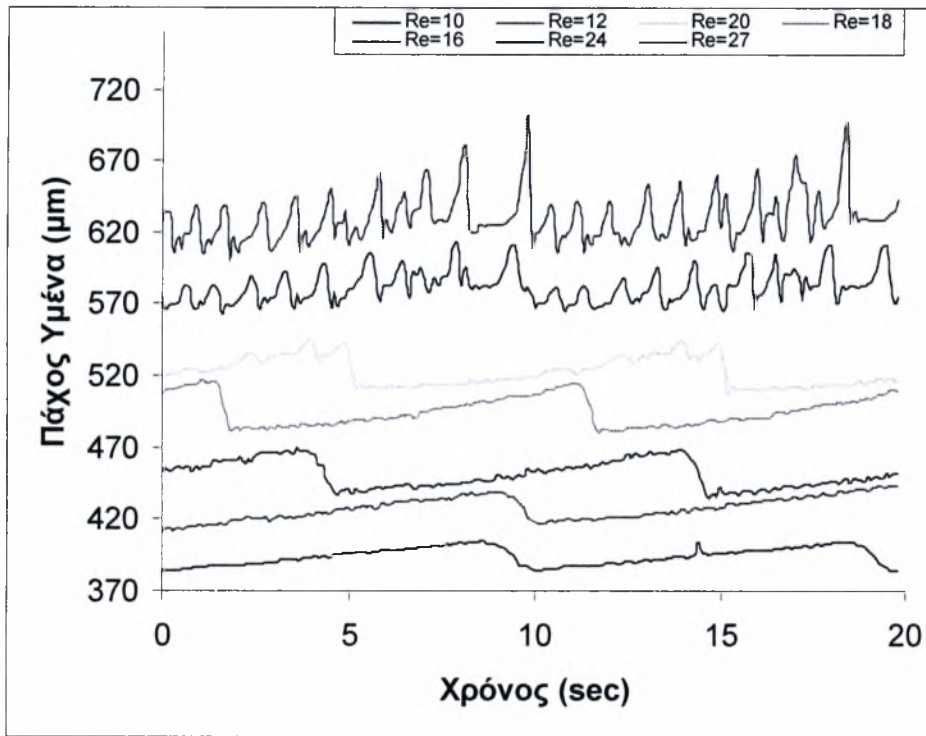
Σχήμα 5.16: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για όλους τους Re

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα η συμπεριφορά των κυματομορφών δεν δείχνει να επηρεάζεται από το χρόνο επιβολής της διαταραχής. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τον προηγούμενο κύκλο πειραμάτων παραμένουν.



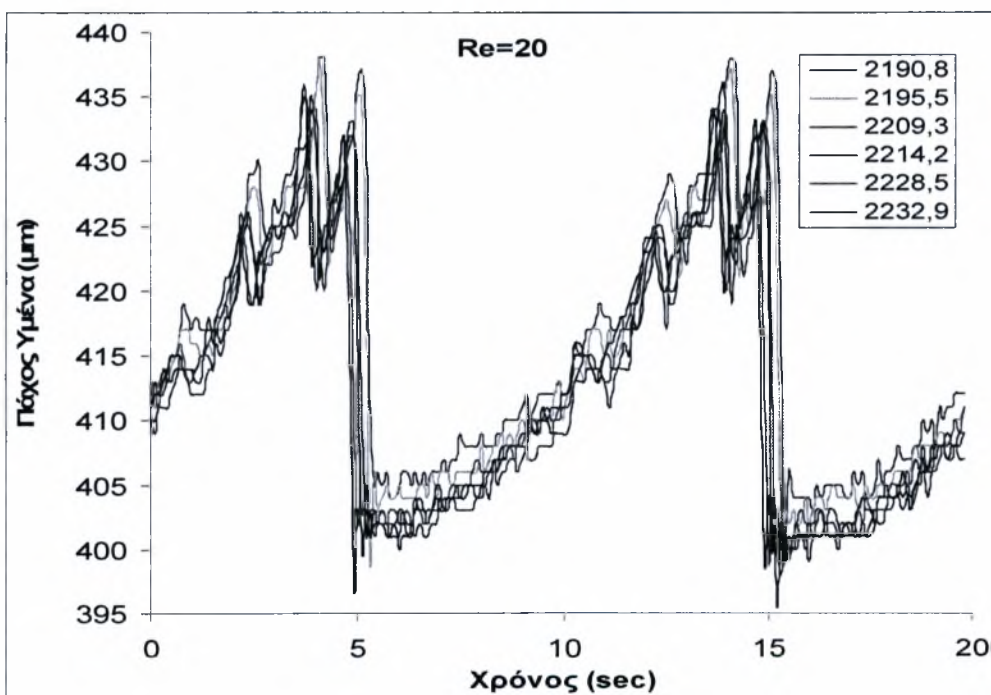
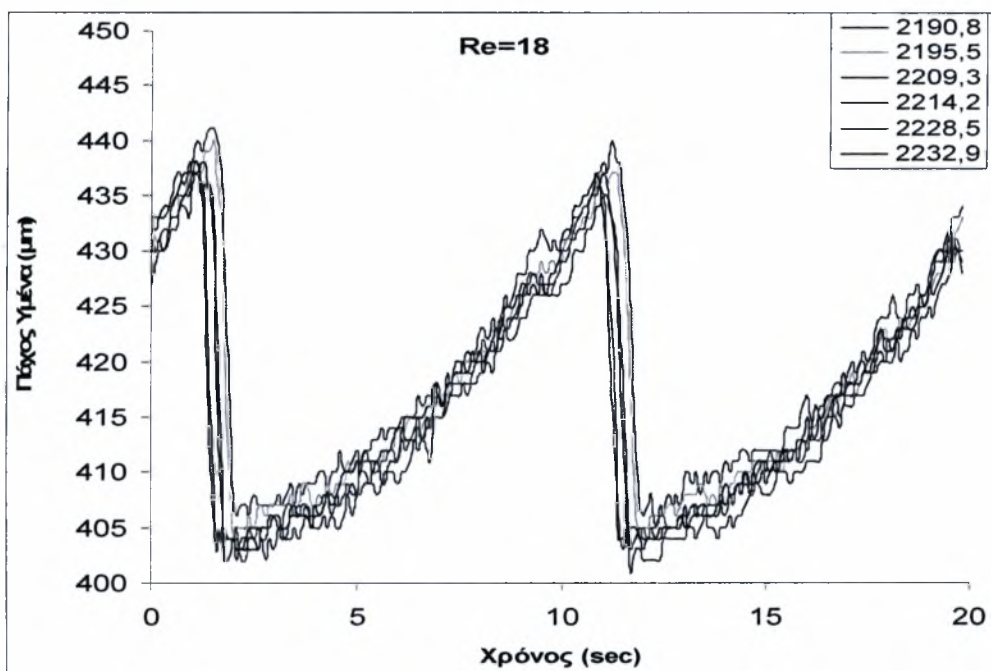
Σχήμα 5.17: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για $Re=17$, $Re=19$

Ακολουθώς αυξήσαμε το ύψος της διαταραχής και έγιναν μετρήσεις στους εξής Re: Re=10, Re=12, Re=16, Re=18, Re=20, Re=24, Re=27. Το ύψος της διαταραχής μετρήθηκε στα 35 μ m.

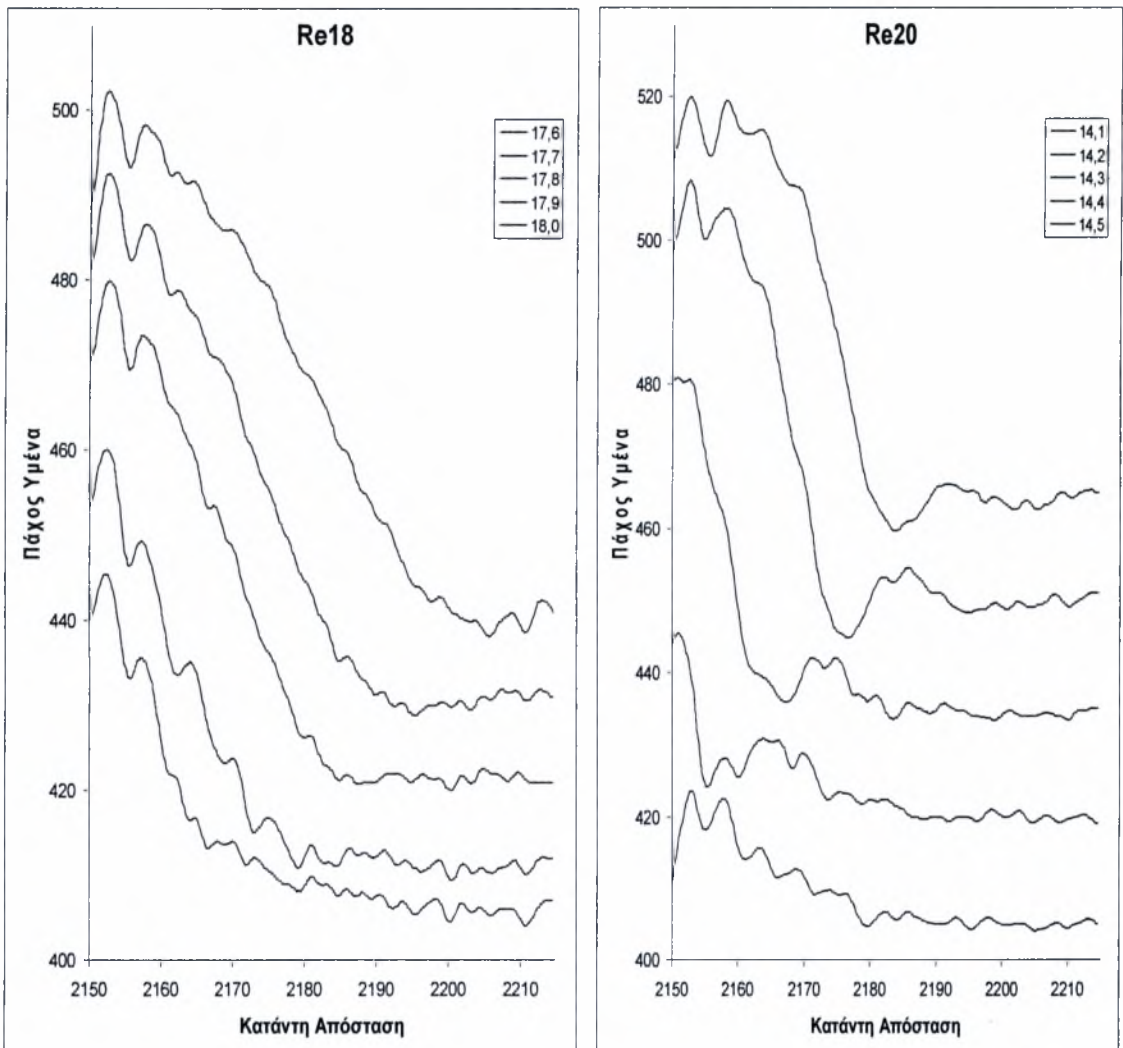


Σχήμα 5.18: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για όλους τους Re

Παρατηρώντας το σχήμα 5.13 μπορούμε να διακρίνουμε τις δυο κορυφές που έχουν σχηματιστεί στη κορυφή του κύριου κύματος. Το γεγονός υποδηλώνει ότι η ροή είναι ακόμα υπό ανάπτυξη, σε αντίθεση με τη ροή βλέπαμε όταν ο χρόνος επιβολής της διαταραχής ήταν μικρότερος. Δηλαδή πλέον η ροή θέλει περισσότερο μήκος για να αναπτυχθεί.



Σχήμα 5.19: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για $Re=18$, $Re=20$



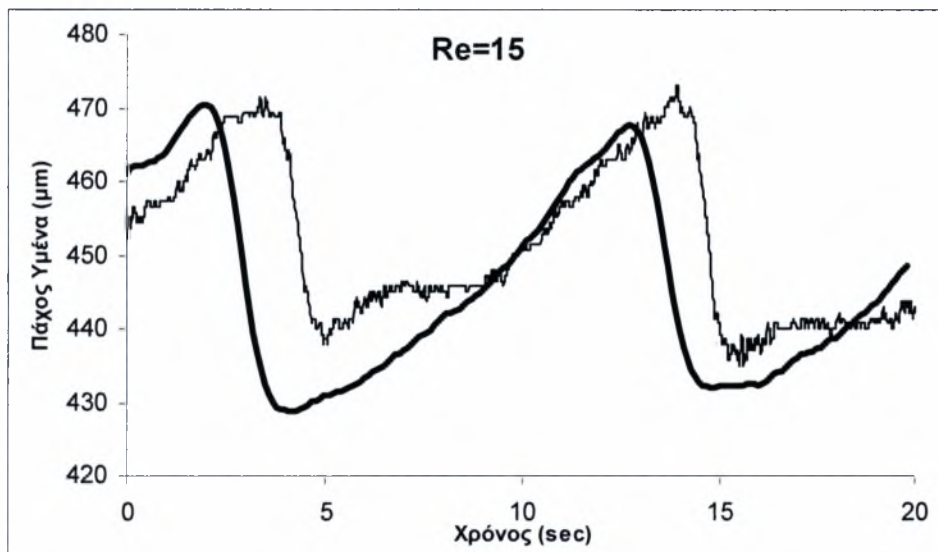
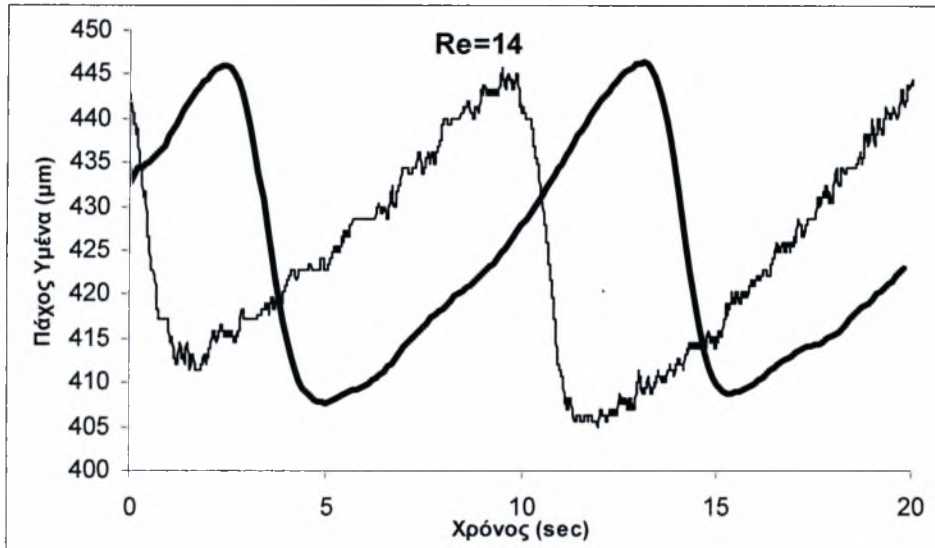
Σχήμα 5.20: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=17, Re=22$

5.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μεθόδου Φθορισμού και Αγωγιμομετρικής Τεχνικής.

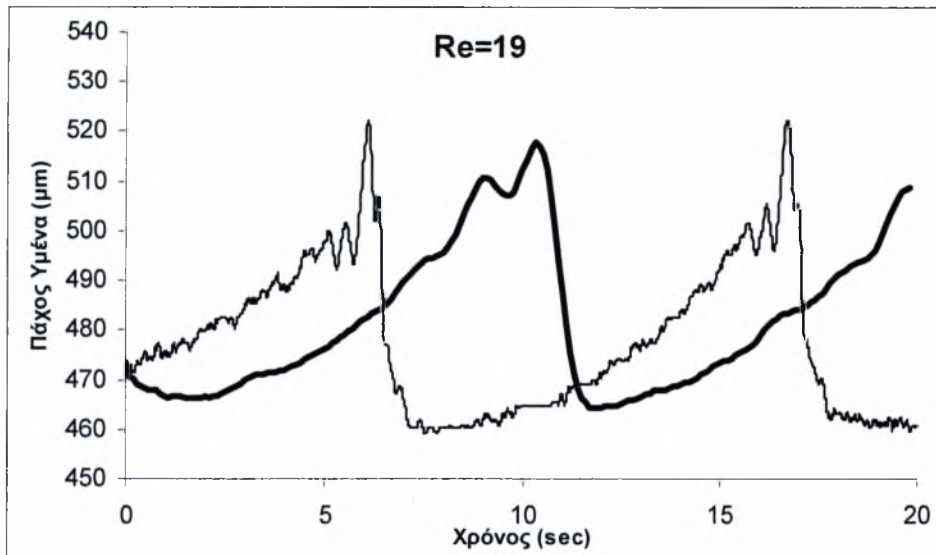
Στην παρούσα υποενότητα θα γίνει μια ποιοτική σύγκριση των μετρήσεων που διεξήχθησαν με την μέθοδο φθορισμού και με την αγωγιμομετρική τεχνική. Οι μετρήσεις με την αγωγιμομετρική τεχνική έγιναν μέσω δύο αισθητηρίων (συρματάκια) που τοποθετήθηκαν σε μήκος 200cm και 230cm από το σημείο έναρξης της ροής. Για πρακτικούς λόγους θα ήταν ανέφικτο να λαμβάναμε μετρήσεις στο ίδιο σημείο της ροής καθώς η τοποθέτηση των αισθητηρίων στο οπτικό πεδίο της κάμερας θα παρεμπόδιζε τη διαδικασία μέτρησης. Έτσι οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν πριν και μετά το οπτικό πεδίο της κάμερας κατά μήκος της ροής. Αυτό συνεπάγεται ότι ποσοτική ανάλυση θα μας οδηγούσε πιθανών σε εσφαλμένα συμπεράσματα και για αυτό το λόγο θα την αποφύγουμε.

Οι αγωγιμομετρική τεχνική δίνει μετρήσεις σε μορφή χρονοσειρών, έτσι η σύγκριση θα γίνει με τα αντίστοιχα διαγράμματα της μεθόδου φθορισμού. Οι συνθήκες του πειράματος ήταν με συχνότητα διαταραχής $f=0.1$ Hz και χρόνο επιβολής διαταραχής $T_{on}=0.25$ sec. Μετρήσεις ελήφθησαν σε αριθμούς $Re=14$, $Re=15$, και $Re=19$. Οι μετρήσεις με την αγωγιμομετρική τεχνική έγιναν με ρυθμό 0,01 sec ενώ αντίστοιχα με τη μέθοδο φθορισμού έγιναν με ρυθμό 0,1 sec.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών της κάθε μεθόδου για κάθε αριθμό Re . Με έντονη γραμμή απεικονίζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα οι μέθοδοι είναι συγκρίσιμες και το ύψος του δημιουργούμενου κύματος είναι το ίδιο.



Σχήμα 5.21: Σύγκριση των Χρονοσειρών μεταξύ της αγωγιμομετρικής τεχνικής και της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό για $Re=14$ και $Re=15$, όπου ο υμένας είναι ευσταθής.



Σχήμα 5.22: Σύγκριση των Χρονοσειρών μεταξύ της αγωγιμομετρικής τεχνικής και της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό για $Re=19$, όπου ο υμένας είναι ασταθής.

Βιβλιογραφία

- [1] N. Malamataris, M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou 2002 *Solitary waves on inclined films: Flow structure and binary interactions*. Phys. Fluids, 14, 1082-1094.
- [2] Μ. Βλαχογιάννης 2001 Διδακτορική Διατριβή, «Πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο και σε κυματοειδές τοίχωμα»
- [3] M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou 2001 *Observations of solitary wave dynamics of film flows*. J. Fluid Mech., 435, 191-215
- [4] Μ. Βλαχογιάννης & Β. Μποντόζογλου, Πειραματική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μοναχικών κυμάτων σε ροή υγρού υμένα. 3ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Αθήνα, Μάιος 2001
- [5] Μ. Βλαχογιάννης & Β. Μποντόζογλου, Πειραματική μελέτη των αλληλεπιδράσεων σολιτονικών κυμάτων σε ιζώδη ροή υγρού υμένα. "Ημερίδα: Ερευνητικές δραστηριότητες στα φαινόμενα ροής ρευστών στην Ελλάδα", Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μάιος 2000



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085876