

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΑΧΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ  
ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ ΜΗΚΟΥΣ 3 ΜΕΤΡΩΝ**  
υπό  
**ΤΟΛΗ ΗΛΙΑ**

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.: 5958/1  
Ημερ. Εισ.: 15-10-2007  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2007  
ΤΟΛ

© 2007 Τόλης Ηλίας

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. Σταπουτζής Ερρίκος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος  
Επίκουρος 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. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου Φ.Χ.Δ. Λεοντίδη Βλάση που βοήθησε 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. Σταπουτζή Ερρίκο και Ανδρίτσο Νικόλαο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επίσης δεν ξεχνώ να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου Αργυρίου Χάρη, Δημητρακόπουλο Νικόλα, Σαμαντά Θανάση, Δημητρίου Θέμη, Ζήση Γιώργο, Κατσαούνη Βαγγέλη για τις υπέροχες στιγμές που ζήσαμε στον Βόλο και θα μας μείνουν αξέχαστες για πάντα.

Αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία στους γονείς μου Θωμά και Ελένη καθώς και στην αδερφή μου Ευαγγελία που με στήριξαν και με στηρίζουν στα πέντε χρόνια των σπουδών μου, αλλά και σε κάθε μου επιλογή τόσο υλικά όσο και ψυχολογικά.

**ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΑΧΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ  
ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ ΜΗΚΟΥΣ 3 ΜΕΤΡΩΝ**

ΤΟΛΗ ΗΛΙΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας 2007

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βλαχογιάννης Μιχαήλ, Δρ Μηχανολόγος Μηχανικός ΠΘ  
Διδάσκων (Π.Δ. 407/80) 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. Έτσι, μια κατασκευάστηκε ένα κανάλι μήκους 3m στο ίδιο εργαστήριο.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την πειραματική μελέτη της δυναμικής της ροής υμένα πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ιδιοκατασκευή του εργαστηρίου. Η μέθοδος συλλογής των δεδομένων είναι η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό σύμφωνα με την οποία το τοπικό πάχος του υμένα είναι ανάλογο της έντασης της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο υμένας κάτω από την υπεριώδη ακτινοβολία και λόγω χρωστικής που περιέχει. Τα πειράματα έγιναν με νερό στο οποίο υπήρχε διαλυμένη η φθορίζουσα χρωστική ουσία *ουρανίνη* (Sodium Salt of Fluorescein-C<sub>20</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>Na<sub>2</sub>) σε ποσότητα 250 ppm πάνω από επίπεδο τοίχωμα με σταθερή γωνία κλίσης  $\varphi=3,16^\circ$ . Οι παράμετροι, η επίδραση των οποίων μελετήθηκε είναι η συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής και ο αριθμός  $Re$ .

Τα αποτελέσματα στο επίπεδο κανάλι αφορούν ροή κάτω από την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων, όπως επίσης και οι αλληλεπίδραση του ύψους των κυμάτων με τον χρόνο και με την κατάντη απόσταση του καναλιού. Τέλος βρέθηκε ο κρίσιμος αριθμός  $Re_{cr}$  για τον οποίο στις δυο διαταραχές που επιβλήθηκαν εμφανίζονται τρισδιάστατες δομές κυμάτων χωρίς όμως να η παρούσα εργασία να ασχολείται περαιτέρω με αυτές τις δομές.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή</b>	1
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b>	
2.1 Εισαγωγή	6
2.2 Θεμελιώδης Νόμοι και Μαθηματικοί Τύποι που διέπουν τη Ροή στο Κανάλι	6
2.3 Εξέλιξη των Κυμάτων και Αστάθεια	10
2.4 Μη γραμμική Ευστάθεια της Ροής υμένα σε Επίπεδο τοίχωμα	11
2.5 Μη γραμμική Εξέλιξη της Ροής Υμένα σε Επίπεδο τοίχωμα: Πειράματα	11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πειραματική Διάταξη-Μεθοδολογία</b>	
3.1 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης	20
3.2 Υδραυλικό Διάγραμμα	25
3.3 Βαθμονόμηση Ροομέτρων	27
3.4 Σύστημα Εξωτερικά Επιβαλλόμενης Διαταραχής	29
3.5 Η Μέθοδος Απεικόνισης με Φθορισμό	34
3.5.1 Βαθμονόμηση της Μεθόδου Φθορισμού	38
3.5.2 Επεξεργασία Δεδομένων	39
3.5.3 Επεξεργασία Εικόνων	43
3.6 Μεθοδολογία Μετρήσεων	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα</b>	
4.1 Πρωτογενή Δεδομένα	56
4.2 Ανάλυση Πειραμάτων	61
4.2.1 Διαχωρισμός δισδιάστατων από τα τρισδιάστατα κύματα	63
4.2.2 Μελέτη χρονοσειρών	65
4.2.3 Πλήρως αναπτυγμένα κύματα	69
4.2.4 Μελέτη διαγραμμάτων εξέλιξης της ροής κατάντη της απόστασης	69
4.2.5 Χαρακτηριστικά των κυμάτων	78
4.3 Τρισδιάστατα κύματα (3D waves)	79
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα</b>	
5.1 Συμπεράσματα	81
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	

## Κατάλογος Σχημάτων

**Σχήμα 2.1:** Σχηματική απεικόνιση του κεκλιμένου τοιχώματος και του ρέοντος υμένα. Ορισμός του ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, του προφίλ ταχύτητας του υμένα, της κατανομής των τάσεων σε αυτό και του ύψους του.

**Σχήμα 2.2 :** Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα ανάλογα με την γωνία κλίσης φ.

**Σχήμα 2.3:** Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής

**Σχήμα 2.4:** Η ανάπτυξη σολιτονικών κυμάτων κατάντη της ροής, όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα

**Σχήμα 2.5:** Η εξάρτηση του μεγέθους των σολιτονικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατάντη της ροής

**Σχήμα 2.6:** Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη αποστάσεως

**Σχήμα 2.7:** Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιορισμένα όρια των διαφόρων ασταθειών.

**Σχήμα 2.8:** Η συγχώνευση μεταξύ δύο σολιτονικών κυμάτων, με τη μορφή εικόνων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

**Σχήμα 2.9:** Η ανάπτυξη των δευτερευουσών ασταθειών (subharmonic-sideband) στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με αποτέλεσμα τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων

**Σχήμα 2.10:** Ο διαχωρισμός των τρισδιάστατων ασταθειών στο διάγραμμα συχνότητά τους συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

**Σχήμα 2.11:** Το αποτέλεσμα επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία της μορφής ψαροκόκκαλο(herringbone pattern).

**Σχήμα 2.12:** Η δημιουργία δομών πλήρους αταξίας (disorder patterns) εξαιτίας της επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών.

**Σχήμα 3.1:** Τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης α)Δοχείο συλλογής β)Δοχείο παροχής γ)Δοχείο υπερχείλισης δ)Κανάλι ροής ε)Ηλεκτροβάνες διαταραχής στ)Ροόμετρα

**Σχήμα 3.2:** α) Λάμπες φθορισμού β) Εμβαπτιζόμενες αντλίες γ) Κάμερα συλλογής δεδομένων

**Σχήμα 3.3:** Σχεδιαστική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

**Σχήμα 3.4** Υδραυλικό διάγραμμα πειραματικής διάταξη

**Σχήμα 3.5:** Η διάταξη ροόμετρων

**Σχήμα 3.6:** Οι μέγιστες επιτρεπόμενες παροχές των ροόμετρων

**Σχήμα 3.7:** Γραφική απεικόνιση βαθμονόμησης για το ροόμετρο 2A

**Σχήμα 3.8:** Ψηφιακός χρονιστής του συστήματος διαταραχής

**Σχήμα 3.9:** Οι ηλεκτροβαλβίδες ελεγχόμενες από το χρονιστή δημιουργούν το «υδραυλικό άλμα» στον υμένα

**Σχήμα 3.10:** Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

**Σχήμα 3.11:** Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο-pixel της εικόνας.



**Σχήμα 3.12:** Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται.

**Σχήμα 3.13:** (a) Εικόνα πριν την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης, (b) μετά την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης.

**Σχήμα 3.14:** Χωρική εξέλιξη του πάχους του υμένα

**Σχήμα 3.15:** Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου

**Σχήμα 3.16:**(a),(c),(e) διαδοχικές εικόνες( $\Delta t=0,1$ ) στις οποίες φαίνεται ποιοτικά να περνάει ένα κύμα. (b),(d),(f) οι αντίστοιχες κατανομές του πάχους του υμένα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής κάθε εικόνας.

**Σχήμα 3.17:** Εξάρτηση της γωνίας κλίσης  $\varphi$  από τις αποστάσεις  $X, Y$

**Σχήμα 3.18:** Χάρακας με τη βοήθεια του οποίου βρίσκουμε την κλίση  $\varphi$  του καναλιού ροής.

**Σχήμα 3.19:** Ποιοτική απεικόνιση ενός δισδιάστατου κύματος εντός των ορίων Black-White Level

**Σχήμα 3.20:** Δοχείο καθορισμού

**Σχήμα 4.1:** Πρωτογενή δεδομένα της μεθόδου φθορισμού

**Σχήμα 4.2:** Πρωτογενή δεδομένα a) χωρίς χρήση ψηφιακού φίλτρου και b) με χρήση του ψηφιακού φίλτρου Gaussian 7x7

**Σχήμα 4.3:** Σύγκριση μεταξύ διαφόρων φίλτρων

**Σχήμα 4.4:** Πρωταρχικά δεδομένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές

**Σχήμα 4.5:** Προφίλ υμένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές

**Σχήμα 4.6:** Χρονική μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας για δύο σταθερά σημεία

**Σχήμα 4.7:** Διαχωρισμός δισδιάστατων-τρισδιάστατων δομών Re 35 - διαταραχή 1 Hz a) δισδιάστατη δομή (θέση b), b) τρισδιάστατη δομή(θέση c)

**Σχήμα 4.8:** Χρονοσειρές σε απόσταση  $a=470$  mm,  $b=1470$  mm και  $c=2470$  mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας  $f = 0,5$  Hz ( $T_{on}=1$ sec  $T_{off}=1$ sec) για αριθμούς Reynolds: **a)** Re=30, **b)** Re=35, **c)** Re=40

**Σχήμα 4.9:** Χρονοσειρές σε απόσταση  $a=470$  mm,  $b=1470$  mm και  $c=2470$  mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας  $f = 0,167$  Hz ( $T_{on}=5$ sec  $T_{off}=1$ sec) για αριθμούς Reynolds: **a)** Re=30, **b)** Re=35, **c)** Re=40

**Σχήμα 4.10:** Χρονοσειρές σε απόσταση  $a=470$  mm,  $b=1470$  mm και  $c=2470$  mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας  $f = 0,167$  Hz ( $T_{on}=5$ sec  $T_{off}=1$ sec) για Reynolds: Re=30

**Σχήμα 4.11:** Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής Re=30-διαταραχή 0,5 Hz a)θέση a, b)θέση b, c)θέση c

**Σχήμα 4.12:** Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής Re=35-διαταραχή 0,5 Hz a)θέση a, b)θέση b

**Σχήμα 4.13:** Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής Re=40-διαταραχή 0,5 Hz a)θέση a

**Σχήμα 4.14:** Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής Re=30-διαταραχή 0,167 Hz a)θέση a, b)θέση b, c)θέση c

**Σχήμα 4.15:** Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής Re=35-διαταραχή 0,167 Hz a)θέση a, b)θέση b

**Σχήμα 4.16:** Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής Re=40-διαταραχή 0,167 Hz a)θέση a, b)θέση b

**Σχήμα 4.17:** Διάγραμμα κρίσιμου αριθμού  $Re_{cr}$  με την κατάντη απόσταση

**Σχήμα 4.18:** Φωτογραφίες και γραφική απεικόνιση του ύψους των κυμάτων κατάντη της ροής τρισδιάστατων δομών.

## Κατάλογος πινάκων

**Πίνακας 1:** Στοιχεία πρώτης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 330 cm έως 590 cm από την έναρξη της ροής.

**Πίνακας 2:** Στοιχεία δεύτερης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 1330 cm έως 1590 cm από την έναρξη της ροής.

**Πίνακας 3:** Στοιχεία τρίτης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 2330 cm έως 2590 cm από την έναρξη της ροής.

**Πίνακα 4:** Διαχωρισμός 2-D από 3-D για τα διάφορα  $Re$  σε κάθε θέση και για τις δύο διαταραχές

**Πίνακας 5:** Βασικά χαρακτηριστικά κυμάτων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της εργασίας είναι η πειραματική μελέτη των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα. Η ερευνητική προσπάθεια 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.

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 στην ευρεία χρήση τους σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι, λεπτοί υμένες υγρού απαντώνται σε σημαντικές συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Το πεδίο ροής στον υμένα συχνά επηρεάζει έντονα τους ρυθμούς μεταφοράς και κατά συνέπεια καθορίζει το βαθμό απόδοσης των συσκευών. Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα παραδείγματα αποτελούν οι συμπυκνωτές ατμού - όπου συνήθως η κύρια αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας προβάλλεται από τον υμένα του συμπυκνώματος. Το προς συμπύκνωση υγρό εισέρχεται κατόπιν προθέρμανσης στο σύστημα των σωλήνων από τη βάση του. Για μικρή απόσταση το υγρό συνεχώς θερμαινόμενο ρέει ακολουθώντας ανοδική πορεία υπό τη μορφή υμένα, που καλύπτει το εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα, έως ότου αρχίσει ο βρασμός του, οπότε οι δημιουργούμενες φυσαλίδες αυξάνουν την ταχύτητα του υγρού και τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας. Το υμένιο του ολοένα συμπυκνούμενου υγρού αναρριχάται ταχύτατα στο τοίχωμα των σωλήνων, το οποίο θερμαίνεται από τον συμπυκνούμενο ατμό που κυκλοφορεί από την εξωτερική πλευρά των σωλήνων. Το μίγμα του συμπυκνούμενου υγρού και του παραγόμενου ατμού εισέρχεται στο διαχωριστή, όπου και διαχωρίζεται. Ο τύπος αυτός ονομάζεται **συμπυκνωτής ανερχόμενης στιβάδας**(ascending-film evaporators).

Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και ο συμπυκνωτής κατερχόμενης στιβάδας (falling-film evaporators), με τη διαφορά ότι το προς συμπύκνωση υγρό εισέρχεται στους σωλήνες από την κορυφή τους και εξέρχεται από τη βάση τους ως μίγμα συμπυκνούμενου υγρού-ατμού, οπότε και εισέρχεται στον διαχωριστή που βρίσκεται συνδεδεμένος στη βάση του εναλλάκτη. Επιπλέον παραδείγματα είναι οι εξατμιστήρες και

οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις. Τα ίδια φαινόμενα ροής και ευστάθειας λεπτών υμένων καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και άλλων τεχνολογικών και περιβαλλοντικών συστημάτων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα τη συμπεριφορά πτερύγων αεροπλάνων κατά την πτήση υπό συνθήκες βροχόπτωσης. Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής υγρών υμένων είναι η ψύξη ενός πυρηνικού αντιδραστήρα που επιτυγχάνεται με διαβροχή του τοιχώματος με καθαρό νερό που θερμαίνεται εξατμίζεται. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι επιθυμητή η εντατικοποίηση των φαινομένων αυτών ενώ σε άλλες η ελαχιστοποίησή τους.

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(solitary waves)** που δημιουργούνται από κάποια διαταραχή. Η εξέλιξη της ροής ενός λεπτού υγρού υμένα αποτελείται από τέσσερα στάδια ανάπτυξης (Chang 1994). Αρχικά, απειροελάχιστες διαταραχές στην επιφάνεια του ρευστού επεκτείνονται κατά μήκος της ροής και σχηματίζουν 'μονοχρωματικά' κύματα το μέγεθος των οποίων αυξάνει εκθετικά κατά μήκος της ροής, όπως σε όλα τα φαινόμενα γραμμικής διέγερσης ασταθών συστημάτων. Στη συνέχεια, η εκθετική αύξηση ανακόπτεται από ασθενή μη γραμμικά φαινόμενα και εξαιτίας μιας ασθενούς μη γραμμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της ασταθούς βασικής συχνότητας και της 2ης αρμονικής, το 'μονοχρωματικό' κύμα αρχίζει και αποκτά μια περισσότερο πολύπλοκη μορφή. Έτσι, δημιουργούνται κορεσμένα-περιοδικά κύματα με μήκος κύματος διαφορετικό από αυτό του 'μονοχρωματικού' κύματος. Κατόπιν, παρατηρήθηκαν δύο κυρίαρχες μορφές αστάθειας των κυμάτων πεπερασμένου μεγέθους. Κοντινά κύματα ενώνονται ανά διαστήματα εξαιτίας της 'υποαρμονικής αστάθειας' (subharmonic instability) ή λόγω των πλευρικών ασταθειών (sideband instabilities). Αυτές οι δύο αστάθειες δημιουργούν ελαττωματικές περιοχές,

κατά μήκος της ροής. Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των ασταθειών έγκειται στη δημιουργία, κατάντη της ροής, των λεγόμενων σολιτονικών ή μοναχικών κυμάτων(solitary waves). Τελικά, η εξέλιξη του υμένα κατάντη της ροής οδηγεί στην ανάπτυξη εγκάρσιων μεταβολών στο μέτωπο των σολιτονικών κυμάτων και τη μετέπειτα δημιουργία μίας χαοτικής δομής (spatio-temporal chaos). Η παραπάνω εξέλιξη της ροής ενός υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα αναφέρεται σε φυσική διέγερση, δηλαδή ο υμένας δεν υφίσταται μία συστηματική εξωτερική διαταραχή αλλά ο φυσικός θόρυβος αποτελεί την αιτία δημιουργίας των παραπάνω φαινομένων.

Σε πολλές περιπτώσεις η εφαρμογή μίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής παρακάμπει κάποιες από τις προαναφερόμενες περιοχές φυσικής εξέλιξης του υμένα, ανάλογα με τη συχνότητα επιβολής. Έτσι, είναι δυνατή η επικέντρωση της μελέτης σε μία συγκεκριμένη περιοχή της ροής. Το είδος της επιβαλλόμενης διαταραχής στη περίπτωση που μελετάμε, αποτελεί ένα στοιχείο πρωτοτυπίας. Το αποτέλεσμα της επιβαλλόμενης διαταραχής έγκειται στη δημιουργία ενός ομίλου σολιτονικών κυμάτων σε κοντινές αποστάσεις από το σημείο σχηματισμού του υμένα.

Οι κύριες φυσικές και λειτουργικές παράμετροι που μεταβάλλονται στην παρούσα εργασία είναι η παροχή του υμένα, η συχνότητα εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών και η αλλαγή του σημείου μέτρησης κατάντη της φοράς των κυμάτων, ενώ η κλίση του τοιχώματος παραμένει σταθερή. Η επιλογή των τιμών των παραμέτρων υπαγορεύεται από τρεις αλληλοσυγκρουόμενους παράγοντες:

(1)Την αποκατάσταση συνθηκών που επιτρέπουν καλύτερη ταυτοποίηση και μελέτη των θεμελιωδών μηχανισμών που διέπουν τα εκάστοτε φαινόμενα ροής.

(2)Την κατά το δυνατόν προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν σε βιομηχανικές συσκευές.

(3)Τον περιορισμό του όγκου της πειραματικής εργασίας σε ρεαλιστικά μεγέθη.

Ειδικότερα, παρατηρούμε τα εξής: Όσον αφορά το ιξώδες, χρησιμοποιήθηκε νερό. Οι παροχές που επιλέχτηκαν για τα πειράματα εξασφάλιζαν αριθμούς  $Re$  στην περιοχή  $30 < Re < 80$ . Το εύρος αυτό αντιστοιχεί σε συνθήκες στρωτής ροής με έλεγχο της δυναμικής από τα επιφανειακά κύματα. Τέτοιες συνθήκες στρωτής ροής είναι συνηθισμένες σε πολλές συσκευές μεταφοράς μάζας και αρκετές μεταφοράς θερμότητας. Σε ορισμένες από τις τελευταίες, οι παροχές είναι ακόμη υψηλότερες ώστε δημιουργούνται σε ένα τμήμα του ενεργού μήκους συνθήκες τυρβώδους ροής. Κάτι τέτοιο δεν μελετήθηκε στην παρούσα εργασία.

Η επιλογή της κλίσης του τοιχώματος που μελετήθηκαν υπαγορεύεται κυρίως από τους πειραματικούς περιορισμούς. Πράγματι, οι μετρήσεις είναι σε μικρή κλίση( $\varphi=3,6^\circ$ ), ενώ οι βιομηχανικές εφαρμογές αφορούν εντονότερα κεκλιμένα και συχνά κατακόρυφα τοιχώματα. Όμως, η διεθνής βιβλιογραφία έχει δείξει ότι τα φαινόμενα είναι και στις δύο περιπτώσεις τα ίδια, απλά η διάρκεια τους σε μήκος ροής διαφέρει αισθητά. Έτσι, επιλέγοντας μικρές κλίσεις επιβραδύνουμε τη δυναμική και επιτρέπουμε βελτιωμένη καταγραφή και κατανόηση των φαινομένων.

Η εισαγωγή στο σύστημα διαταραχών καθορισμένης συχνότητας έχει θεμελιώδη αλλά και εφαρμοσμένη χρησιμότητα. Αφενός, αυξάνει την κανονικότητα της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας στα πειράματα και επιτρέπει ευχερέστερη μέτρηση των χαρακτηριστικών της. Αφετέρου, αποκαλύπτει το εύρος συχνοτήτων του θορύβου που επιδρά στη δυναμική της ροής.

Ο θόρυβος αυτός μπορεί να είναι είτε φυσικός -όπως είναι αναπόφευκτο σε βιομηχανικό περιβάλλον- είτε τεχνητός, προκαλούμενος ακριβώς για να διαφοροποιήσει τη ροή και να βελτιστοποιήσει τα φαινόμενα μεταφοράς.

Η ανάγκη παρατήρησης των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα και κυρίως η αλληλεπίδραση των **σολιτονικών κυμάτων(solitary waves)** που δημιουργούνται από κάποια διαταραχή, οδήγησε στην απόφαση για την κατασκευή μίας νέας πειραματικής διάταξης που θα προσφέρει ένα μεγαλύτερο μήκος ροής, αφού όπως προαναφέρθηκε το μικρό ενεργό μήκος του καναλιού που ήδη υπήρχε δεν επέτρεπε κάτι τέτοιο. Συνεπώς 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. Αυτή η συσκευή κατασκευάστηκε από τον φοιτητή Π. Σταθά σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Μ. Βλαχογιάννη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε στην προαναφερθείσα συσκευή και μελετά τη δημιουργία και εξέλιξη των κυμάτων σε σταθερή γωνία κλίσης  $\varphi=3,6^\circ$  σε τρεις διαφορετικές θέσεις a,b,c από την αρχή του καναλιού και ουσιαστικά αρχή εξέλιξης των κυμάτων  $a= 0,33\text{cm}$  , $b=1,33\text{ cm}$  , $c=2,33\text{ cm}$ . Οι παροχές που επιλέχθηκαν για τα πειράματα εξασφάλιζαν αριθμούς  $Re$  στην περιοχή  $30 < Re < 80$ . Τα πειράματα επαναλήφθηκαν δυο φορές με επιβολή εξωτερικής διαταραχής με συχνότητες  $f=0,17\text{ Hz}$  και  $f=0,084\text{ Hz}$

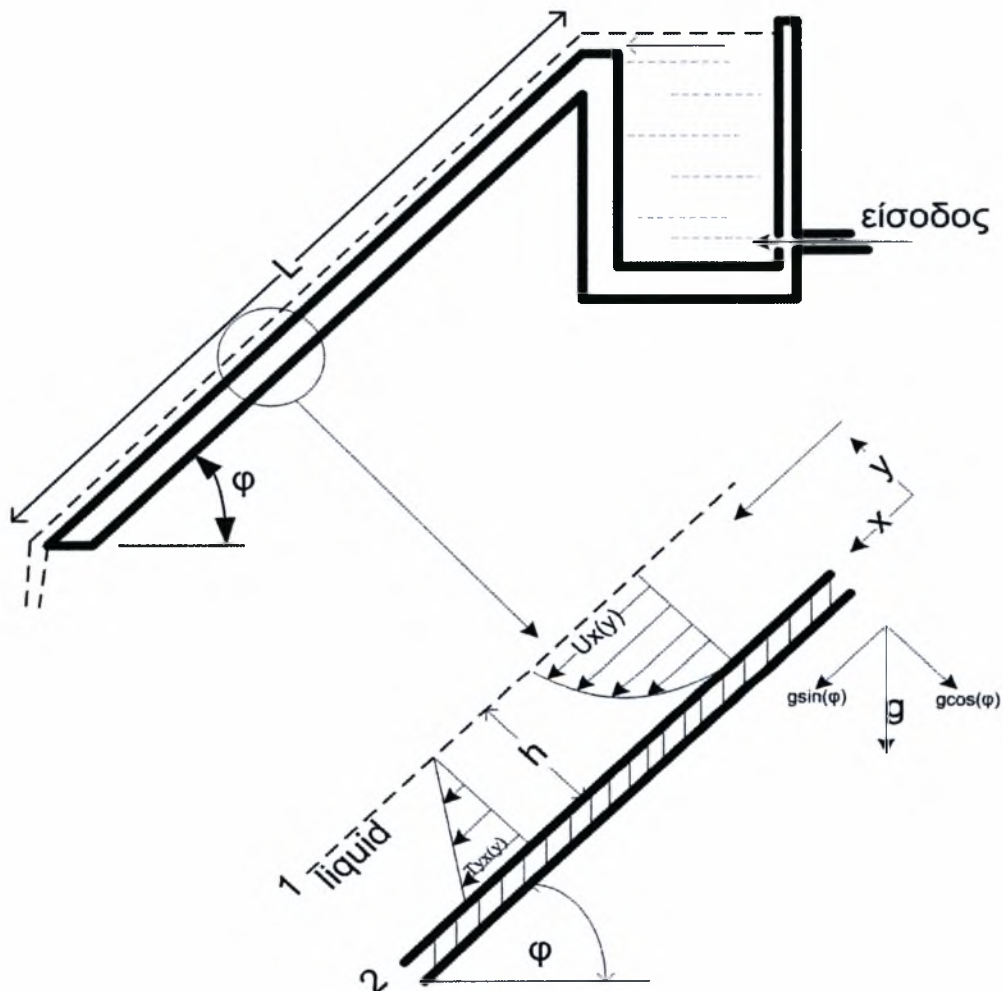
Τέλος, αναφορικά με τη διάρθρωση της εργασίας, αυτή αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία προσπάθεια συνοπτικής περιγραφής της διεθνούς βιβλιογραφίας, με την απαραίτητη εστίαση στα πιο παρεμφερή άρθρα. Στη συνέχεια, κεφάλαιο 3, περιγράφεται η πειραματική μέθοδος, η πειραματική διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων, ο έλεγχος της ακρίβειας της μεθόδου και η εφαρμογή της στο επίπεδο τοίχωμα. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής υγρού υμένα πάνω από επίπεδο τοίχωμα, υπό την επίδραση της βαρύτητας αλλά και της προαναφερόμενης εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο αναλύονται τα κυριότερα συμπεράσματα και δίδονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1. Εισαγωγή

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. Στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφονται οι θεωρητικές, οι υπολογιστικές και οι πειραματικές μελέτες πάνω στη μη-γραμμική ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα.

### 2.2. Θεμελιώδης νόμοι και μαθηματικοί τύποι που διέπουν τη ροή στο κανάλι



**Σχήμα 2.1:** Σχηματική απεικόνιση του κεκλιμένου τοιχώματος και του ρέοντος υμένα. Ορισμός του ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, του προφίλ ταχύτητας του υμένα, της κατανομής των τάσεων σε αυτό και του ύψους του.



Η ροή μέσα στο κανάλι ταυτίζεται με αυτή σε επίπεδη πλάκα, κεκλιμένη σε γωνία  $\phi$  από την οριζόντιο. Το υγρό φυσικά πέφτει με το μηχανισμό της διάχυσης λόγω βαρύτητας δημιουργώντας ένα παραβολικό προφίλ ταχύτητας γιατί δεν παρουσιάζει τη νευτώνεια ιδιότητα (γραμμική μεταβολή). Έχοντας το κανάλι ένα μήκος  $L$  και πλάτος  $W$  τέτοιο ώστε το ύψος  $h$  του υμένα να είναι σημαντικά μικρότερο του πλάτους ( $W \gg h$ ) καταστρώνεται το αρχικό **ισοζύγιο μάζας**:

$$\begin{aligned}
 & \left( \text{(ΕΙΣΡΟΗ)} - \text{(ΕΚΡΟΗ)} + \text{(ΠΑΡΑΓΩΓΗ)} + \left( \begin{array}{c} \blacktriangleleft \blacktriangleright \blacktriangleright \blacktriangleleft \blacktriangleright \blacktriangleright \blacktriangleright \\ \text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ} \end{array} \right) \right) = 0 \Rightarrow \\
 & \left( \tau_{xy}|_y - \tau_{xy}|_{y+dy} \right) \cdot L \cdot W + \overset{\blacktriangleleft \blacktriangleright \blacktriangleright \blacktriangleleft \blacktriangleright \blacktriangleright}{\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}} g_x \cdot \rho \cdot (W \cdot L \cdot dy) + 0 = 0 \Rightarrow
 \end{aligned}$$

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

όπου:

$\rho$  : πυκνότητα\_υγρά

-

$g$  : επιτάχυνση\_βαρύτητας\_αναλυμένη\_στο\_Σ.Σ.

$\mu$  : ιξώδες\_υγρά

Για την μεταβλητή ολοκλήρωσης  $C_1$  γίνεται χρήση της συνοριακής συνθήκης στη διεπιφάνεια **1** του υγρού και του περιβάλλοντος αέρα, όπου η διατμητική τάση είναι μηδενική και έτσι προκύπτει για  $y=h$ :

$$\begin{aligned}
 \tau_{yx} &= \rho \cdot g_x \cdot y + C_1 \xrightarrow{\tau_{yx}|_{y=h}=0} C_1 = -\rho \cdot g_x \cdot h \xrightarrow{\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy}} \\
 \frac{du_x}{dy} &= \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot (h - y) \Rightarrow \int du_x = \int \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot (h - y) dx \Rightarrow \\
 u_x(y) &= \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot y - \frac{\rho \cdot g_x}{\mu} \cdot \frac{y^2}{2} + C_2
 \end{aligned}$$

Στη δεύτερη διεπιφάνεια (**2**), όπου  $\mathbf{y}=\mathbf{0}$ , η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδενική  $\mathbf{U}_x=\mathbf{0}$  στο τοίχωμα, επομένως ορίζεται η μεταβλητή ολοκλήρωσης  $\mathbf{C}_2$  και προκύπτει η τελική συσχέτιση της συνιστώσας της ταχύτητας του ρευστού στον άξονα  $\mathbf{x}$  για τη μεταβολή της κατά τον άξονα  $\mathbf{y}$ :

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

Γνωρίζοντας πια το προφίλ της ταχύτητας μπορεί κάποιος να ορίσει τη **μέγιστη ταχύτητα** που εμφανίζεται στη διεπιφάνεια **1** ( $\mathbf{y}=\mathbf{h}$ ):

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

Άλλο ένα σημαντικό μέγεθος που πρέπει να οριστεί είναι η **μέση τιμή της ταχύτητας**, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της κινητικής κατάστασης του υγρού υμένα στους υπολογισμούς των αδιάστατων μεγεθών **Re**, **Nu**. Υποθέτοντας σταθερή ταχύτητα κατά το πλάτος του καναλιού **W** η  $\langle \mathbf{U}_x \rangle$  εξαρτάται μόνο από τη μεταβολή της κατά τον  $\mathbf{y}$ :

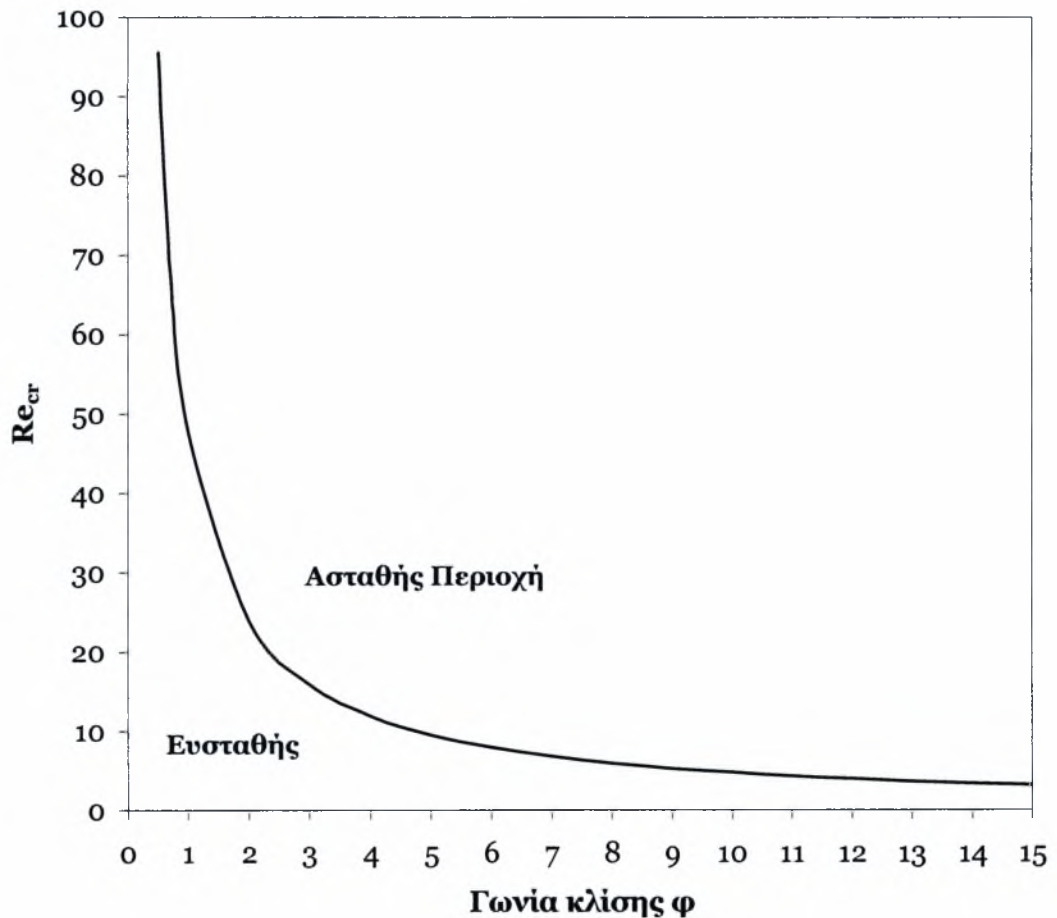
$$\langle U_x \rangle = \frac{\int_0^w \int_0^h U_x \cdot dy \cdot dz}{\int_0^w \int_0^h dy \cdot dz} = \frac{1}{h} \int_0^h U_x \cdot dy = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{3\mu} = \frac{2}{3} U_{\max}$$

Ο αδιάστατος αριθμός που περιγράφει τη «ροϊκή» κατάσταση του υμένα είναι ο **αριθμός Reynolds**. Για τον υπολογισμό του θεωρείται κίνηση του ρευστού, ιξώδους  $\mu$ , πυκνότητας  $\rho$ , πάνω σε επίπεδη πλάκα με σταθερή ταχύτητα  $\langle \mathbf{U}_x \rangle$ , δημιουργώντας υμένα ύψους  $\mathbf{h}$ . Επίσης,  $\mathbf{q}$  είναι η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους ( $\mathbf{q}=\langle \mathbf{U}_x \rangle \cdot \mathbf{h}$ ) και  $\mathbf{v}$  το κινηματικό ιξώδες ως  $\mathbf{v}=\mu/\rho$ . Συνεπώς:

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

Σημειώνεται πως το  $h_N$  είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος κατά Nusselt που στην προκειμένη περίπτωση παίρνει τις τιμές  $h_N=h$  ή  $h_N=4h$  με κρίσιμο αριθμό Reynolds, πάνω από τον οποίο εμφανίζεται **τυρβώδης ροή**,  $Re_{cr}=400$  ή  $Re_{cr}=1600$  για τις αντίστοιχες τιμές του  $h_N$ . Τέλος, σημαντικό ρόλο στην κίνηση του υμένα παίζει η κλίση του καναλιού από την οριζόντιο (γωνία  $\phi$ ), η οποία συσχετίζεται με τον  $Re_{cr}$  ως:

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



**Σχήμα 2.2 :** Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα ανάλογα με την γωνία κλίσης  $\phi$ .

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

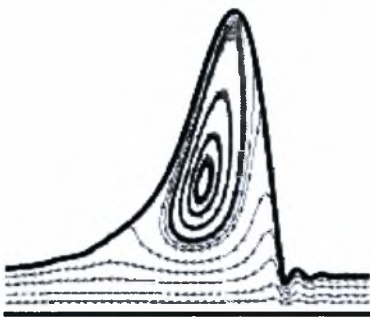
μαθηματικές μεθόδους. Η προαναφερθείσα ροή περιγράφεται και από τον αδιάστατο αριθμό **Kapitza** , ανεξάρτητο του Reynolds:

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

όπου,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $\gamma$  η επιφανειακή τάση και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας. Πολλές φορές στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο αριθμός Weber ,  $We = \gamma / (\rho \cdot \langle U_x \rangle^2 \cdot h_N)$  αντί του αριθμού Kapitza. Εν τούτοις ο αριθμός Kapitza έχει το πλεονέκτημα ότι είναι συνάρτηση μόνο των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και ανεξάρτητος της παροχής του ρευστού.

### 2.3. Εξέλιξη των κυμάτων και αστάθεια

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε μια ανάλυση για την κίνηση ενός **επίπεδου και αδιατάρακτου υμένα**. Η θεώρηση αυτή όμως δεν ανταποκρίνεται στο πραγματικό πρόβλημα της ροής υγρού υμένα, έτσι όπως παρουσιάζεται κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Ο λεπτός υμένας που κινείται με τη βαρύτητα είναι ευαίσθητος σε παλμικές διαταραχές του υπερκείμενου αέρα. Αυτές προκαλούνται από τη μετάδοση του ήχου,



συνεπώς, είναι κατανοητό ότι οποιοσδήποτε **εξωτερικός θόρυβος** (θόρυβος από το δρόμο, ομιλίες, ρεύματα αέρα από το άνοιγμα των θυρών, κλπ) μπορεί να δημιουργήσει διαταραχή στην κίνηση του υγρού και να προκαλέσει κυματισμούς στην ελεύθερη επιφάνεια. Η δυναμική εξέλιξη αυτών κυμάτων και η μεταξύ τους συμπεριφορά είναι δύσκολο

να μελετηθεί γιατί είναι ένα φαινόμενο μη περιοδικό που για την πλήρη εξέλιξή του σε στρωτή ροή απαιτεί πολύ μεγάλο μήκος καναλιού. Τη λύση στο πρόβλημα έρχεται να δώσει η δημιουργία ενός συστήματος «**εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών**» εντονότερων των φυσικών για να έχουν γρηγορότερη εξέλιξη και να είναι ορατές στο ενεργό μήκος του καναλιού. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει προκαλώντας μια στιγμιαία διακοπή της παροχής υγρού προς το κανάλι, η οποία με τη σειρά της θα υποχρεώσει σε μείωση ή αύξηση της στάθμης του υμένα. Ο έλεγχος της συχνότητας και της έντασης της διαταραχής γίνεται από τη ρύθμιση της λειτουργίας των ηλεκτροβανών.

Δημιουργώντας πια εντονότερες διαταραχές από το φυσικό θόρυβο θα περίμενε κάποιος να διαπιστώσει πότε ο υμένας είναι ευσταθής ή ασταθής.. Με την εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή να είναι, τουλάχιστον αρχικά, πολύ μικρή σε μέγεθος και

παρακολουθώντας την εξέλιξη της κατάντη της ροής είναι εφικτό να διαχωριστεί η ευστάθεια του υμένα. Αν η διαταραχή αποσβένεται κατάντη της ροής ο υμένας είναι ευσταθής. Σε πολλές περιπτώσεις το μήκος κατάντη της ροής δεν είναι αρκετό για την πλήρη απόσβεση της διαταραχής. Σε αυτές τις περιπτώσεις μας αρκεί η ένδειξη της μείωσης του μεγέθους του σήματος. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή το κύμα ενισχύεται, ο υμένας χαρακτηρίζεται ασταθής.

## 2.4. Η Γραμμική ευστάθεια της ροής υμένα σε επίπεδο τοίχωμα

Η αστάθεια λαμβάνει χώρα για εξαιρετικά μεγάλου μήκους κύματα  $a < a_c(Re)$ , όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή  $Re_c$ . Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για την έναρξη της αστάθειας, σύμφωνα με τους Benjamin και Yih, είναι:

$$Re_c = \frac{5}{6} \cot \varphi \quad \text{ή} \quad Re_c = \frac{5}{4} \cot \varphi \quad (2.1)$$

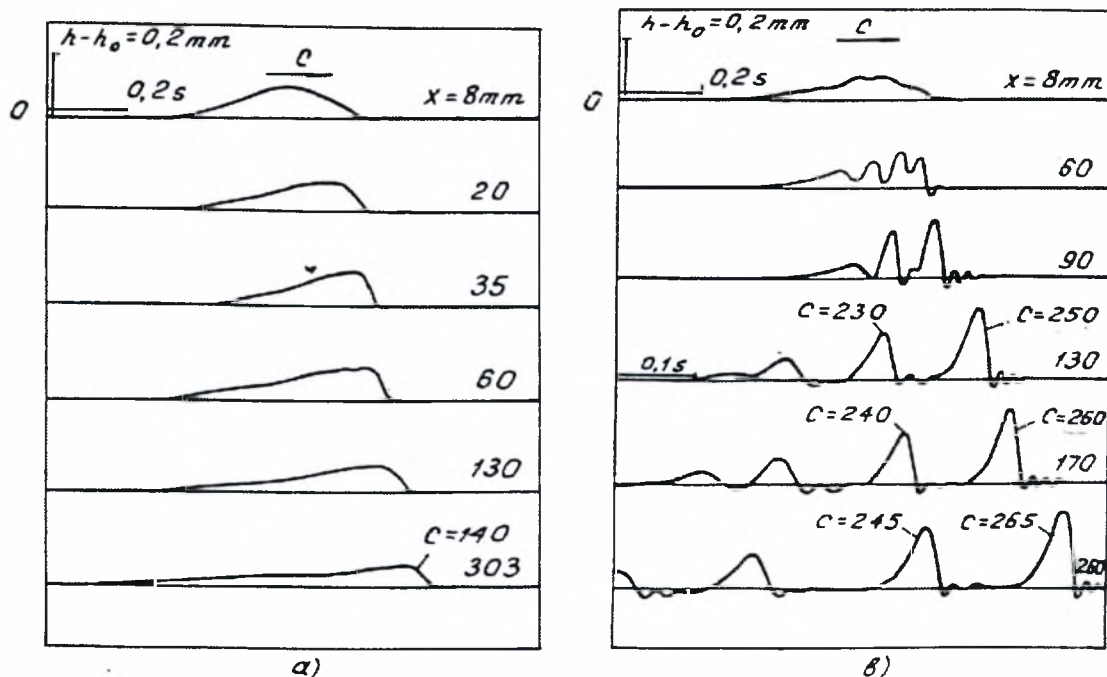
ανάλογα με τον ορισμό του αριθμού Reynolds.

Ο ρυθμός αύξησης (growth rate) και η φασική ταχύτητα (phase velocity) των απειροστών κυμάτων μπορεί να βρεθούν υπολογιστικά ως συνάρτηση του κυματαριθμού για πεπερασμένες τιμές των  $Re$ ,  $We$  και  $\varphi$ . Για πολύ μικρούς κυματαριθμούς, η φασική ταχύτητα  $c$ , είναι  $c = 2U_o$ .

## 2.5. Μη γραμμική εξέλιξη της ροής υμένα σε επίπεδο τοίχωμα: Πειράματα

Η μη-γραμμική εξέλιξη της ροής υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα έχει διερευνηθεί πειραματικά από πολλές ερευνητικές ομάδες. Από τις πολυάριθμες εργασίες διακρίνονται δύο κλασσικές μελέτες, που έχουν κεντρική σπουδαιότητα για τη παρούσα εργασία και για το λόγο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά. Μία από τις εργασίες, που αποτελεί σημείο αναφοράς στη ροή υγρού υμένα και στις ιδιότητες των σολιτονικών κυμάτων, είναι αυτή των Alekseenko et al. (1985). Η χρησιμοποίηση ενός ξεχωριστού είδους διαταραχής στην είσοδο του καναλιού ροής, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ομάδας σολιτονικών κυμάτων διαφορετικού μεγέθους. Στο *σχήμα 2.3* απεικονίζεται η εξέλιξη της

επιβαλλόμενης διαταραχής κατάντη της ροής. Η μέτρηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων, δηλαδή της ταχύτητας και του μήκους κύματός τους, συναρτήσει του μεγέθους αυτών αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της προαναφερθείσας εργασίας. Η πειραματική διαπίστωση της εξάρτησης της ταχύτητας των παραγόμενων σολιτονικών κυμάτων από το μέγεθός τους φαίνεται στο *σχήμα 2.3*. Το είδος της εισερχόμενης διαταραχής είναι τέτοιο που δίδει τη δυνατότητα δημιουργίας σολιτονικών κυμάτων διαφορετικού ύψους, καθώς αυτά διαχωρίζονται μεταξύ τους κατάντη της ροής.



**Σχήμα 2.3:** Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής

Επιπρόσθετα, η εισαγωγή διαταραχής σε υψηλότερη συχνότητα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διδιάστατων περιοδικών κυμάτων, η εξέλιξη των οποίων επιφέρει τη δημιουργία των σολιτονικών κυμάτων, με βάση τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα. Αυτή η εξέλιξη απεικονίζεται στο *σχήμα 2.4*, σε διαδοχικές αποστάσεις κατάντη της ροής.

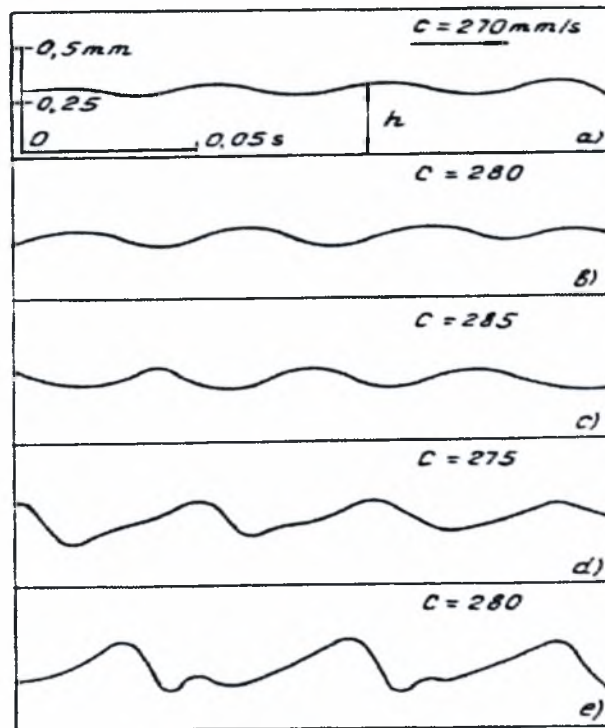
Η εύρεση της εξάρτησης του μεγέθους των παραγόμενων κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατάντη της ροής, αποτελεί το επόμενο βήμα της παρούσας εργασίας. Στο *σχήμα 2.5* απεικονίζεται η εξάρτηση του αδιάστατου μεγέθους του κύματος

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

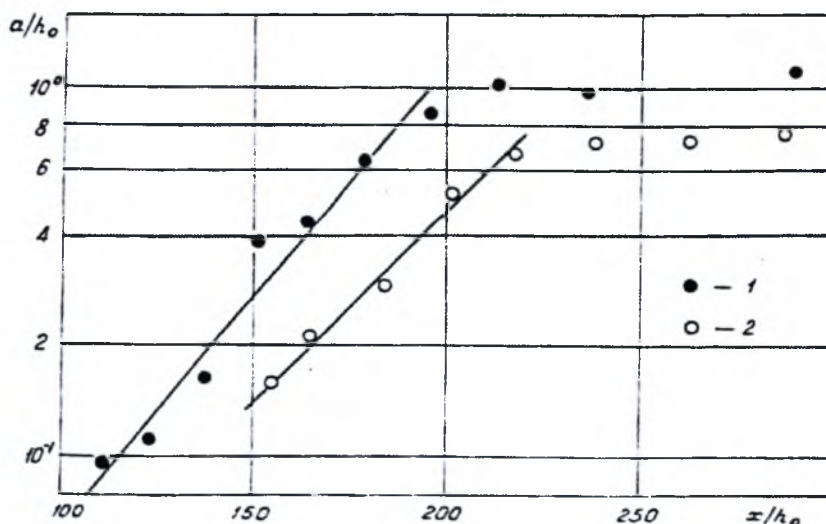
ως συνάρτηση της αδιάστατης κατάντη αποστάσεως  $x/h_N$ . Όπως φαίνεται

στο *σχήμα 2.5*, η αύξηση της κατάντη αποστάσεως έχει ως αποτέλεσμα την ανάλογη

αύξηση του μεγέθους του κύματος. Από μία απόσταση και μετέπειτα, το μέγεθος του σολιτονικού κύματος δε μεταβάλλεται, επιβεβαιώνοντας ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως. Αυτή η απόσταση, για ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο επίπεδο τοίχωμα, είναι  $\sim 225h_N$



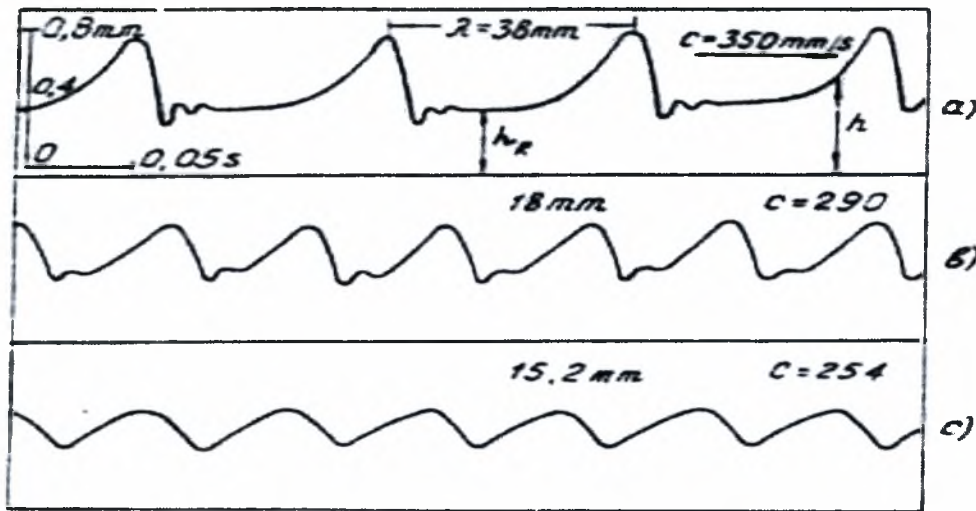
**Σχήμα 2.4:** Η ανάπτυξη σολιτονικών κυμάτων κατόπτη της ροής, όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα



**Σχήμα 2.5:** Η εξάρτηση του μεγέθους των σολιτονικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατόπτη της ροής

Στο σχήμα 2.6 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά των πλήρως αναπτυγμένων σολιτονικών κυμάτων. Το μήκος κύματος των σολιτονικών κυμάτων είναι περίπου 38mm,

ενώ κάθε κύμα με μεγαλύτερο μήκος κύματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως σολιτονικό. Η ταχύτητά τους είναι της τάξης των 350mm/sec και διαφέρει από τη ταχύτητα των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων (280mm/sec).

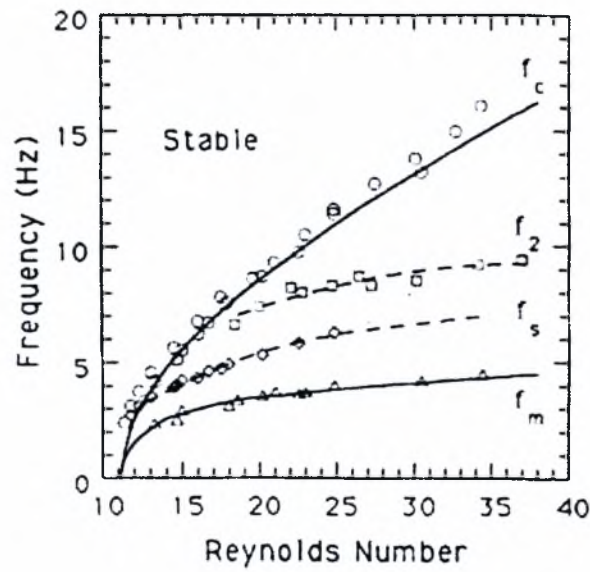


**Σχήμα 2.6:** Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη απόστασεως

Η δεύτερη αντιπροσωπευτική πειραματική εργασία, η οποία αποτέλεσε τη βάση της διδακτορικής διατριβής, είναι αυτή των Liu et al (1993, 1994). Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό και τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνητών αποτέλεσαν το σημαντικότερο σημείο αναφοράς. Αρχικά μελέτησαν πειραματικά τη πρωταρχική αστάθεια (primary instability) ενός λεπτού υγρού υμένα, ο οποίος ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Στα αποτελέσματα παρουσιάζεται η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ του κρίσιμου, για την εμφάνιση αστάθειας, αριθμού  $Re_c$  και της γωνίας κλίσης του καναλιού, όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.7*. Η απεικόνιση του διαγράμματος ευστάθειας σχετίζεται με την εξάρτηση της συχνότητας των διαταραχών από τον αριθμό Reynolds. Επιβεβαιώθηκαν και προσδιορίστηκαν πειραματικά τα περισσότερα θεωρητικά προβλεπόμενα όρια της γραμμικής ευστάθειας, όπως αυτά περιγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα. Όταν ο αριθμός Reynolds βρίσκεται στην ασταθή περιοχή απέδειξαν πειραματικά ότι η αρχική αστάθεια μετακινείται στην κατεύθυνση της ροής και συνεχώς μεγαλώνει (convective instability). Η συχνότητα της διαταραχής, ή ισοδύναμα το μήκος κύματός της, είτε είναι αποτέλεσμα της φυσικής διέγερσης ή τεχνητά επιβαλλόμενη, επηρεάζει τη μη γραμμική ανάπτυξη των κυμάτων. Έτσι, τα χαρακτηριστικά των κυμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την συχνότητα της



διαταραχής, η οποία όταν είναι επιβαλλόμενη δημιουργεί περιοδικά κύματα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η επιβολή μιας εξωτερικής διαταραχής αποτέλεσε τη μέθοδο προσδιορισμού των περιοχών αστάθειας της ροής, αφού οδηγεί στην απευθείας μετάβαση από τη γραμμική περιοχή ανάπτυξης (linear inception region) στη περιοχή των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων. Στη τελευταία περιοχή αναπτύσσονται οι ουσιαστικότερες αστάθειες της ροής υγρού υμένα.



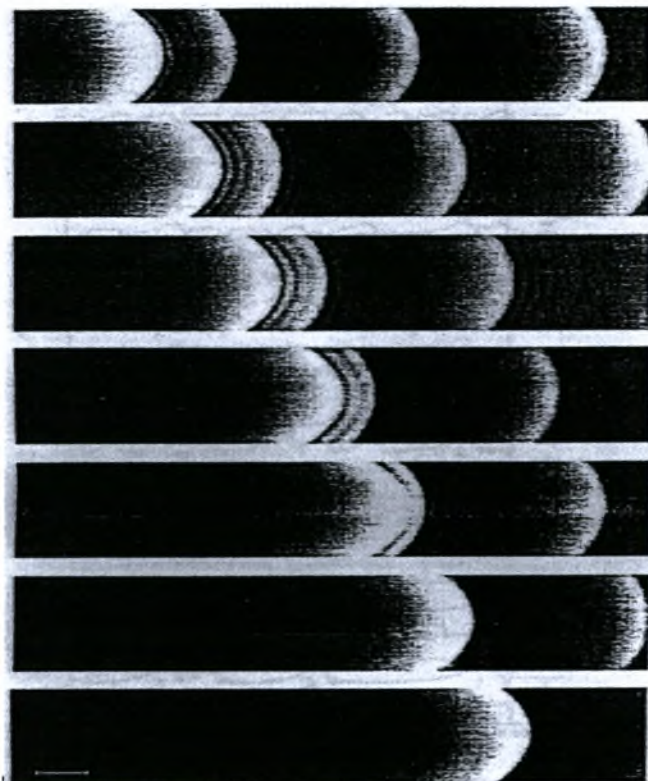
**Σχήμα 2.7:** Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιορισμένα όρια των διαφόρων ασταθειών.

Στο σχήμα 2.7 η καμπύλη που χαρακτηρίζεται ως  $f_c$  διαχωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή του υμένα (πρωταρχική αστάθεια). Μεταξύ αυτής και της καμπύλης  $f_2$  παρατηρείται η πλευρική αστάθεια, ενώ η υποαρμονική αστάθεια είναι αυτή που χαρακτηρίζει την περιοχή μεταξύ των καμπύλων  $f_2$  και  $f_s$ . Μεταξύ των ορίων  $f_s$  και  $f_m$  αρχίζουν να σχηματίζονται τα μοναχικά κύματα και κάτω από την καμπύλη  $f_m$  η δομή των κυμάτων οδηγεί τελικά σε χαοτική δομή (spatiotemporal chaos).

Η δημιουργία των σολιτονικών κυμάτων και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασής τους δεν εξετάστηκαν λεπτομερώς από τους προαναφερθέντες ερευνητές. Ωστόσο, διαπίστωσαν πειραματικά τη συγχώνευση μεταξύ δύο σολιτονικών κυμάτων, με το κύμα που ακολουθεί να έχει πολύ μεγαλύτερο μέγεθος από το προπορευόμενο. Το μεγαλύτερο κύμα, εξαιτίας του μεγέθους του, κινείται γρήγορα και απορροφά το μικρότερο, που

βρίσκεται μπροστά του. Στο *σχήμα 2.8* απεικονίζεται ένα παράδειγμα συγχώνευσης, της παραπάνω μορφής.

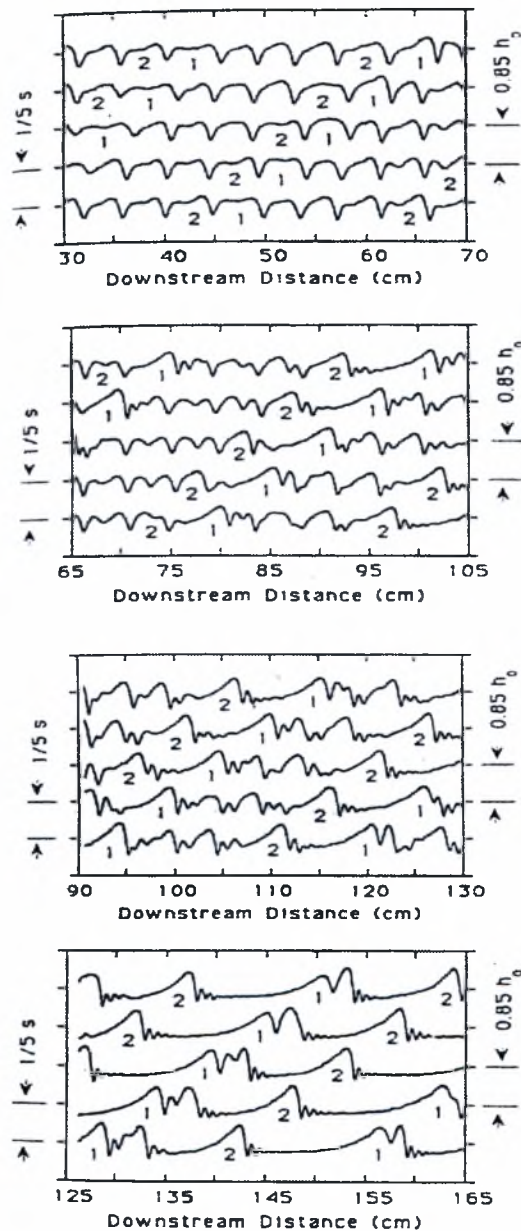
Στο *σχήμα 2.9* απεικονίζεται η εξέλιξη του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα, με την δημιουργία των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων και την μετατροπή τους σε μοναχικά σολιτονικά κύματα. Η επίδραση των δευτερευόντων ασταθειών (subharmonic & sideband) έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της μορφής των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων και τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων κατάντη της ροής.



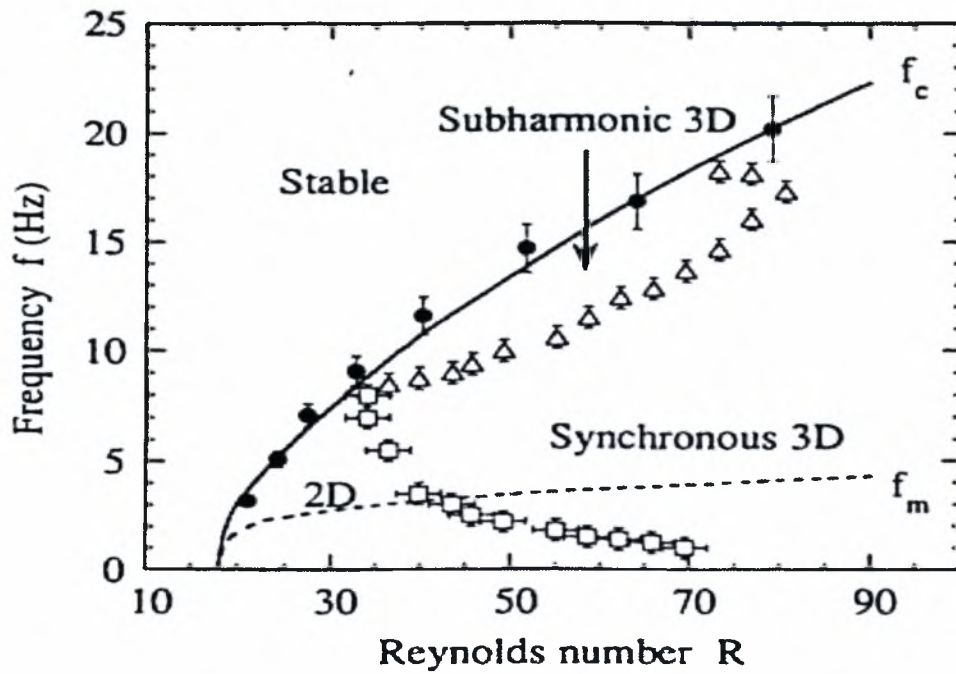
**Σχήμα 2.8:** Η συγχώνευση μεταξύ δύο σολιτονικών κυμάτων, με τη μορφή εικόνων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι αστάθειες του υμένα μετατρέπονται από διδιάστατες σε τρισδιάστατες. Για παράδειγμα, η συγχρονισμένη αστάθεια (synchronous instability), η οποία εμφανίζεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, και η τρισδιάστατη υποαρμονική αστάθεια (3-D subharmonic instability) οδηγούν στην αλλαγή της δομής. Τα όρια δημιουργίας αυτών των ασταθειών απεικονίζονται στο *σχήμα 2.10*. Τα αποτελέσματα εφαρμογής αυτών των ασταθειών φαίνονται στο *σχήμα 2.11*, όπου η εμφάνισή τους σε κορεσμένα περιοδικά κύματα οδηγεί στη δομή ψαροκόκαλο (herringbone patterns). Αντιθέτως, όταν εφαρμόζονται σε σολιτονικά κύματα, ή σε κύματα που τείνουν να γίνουν

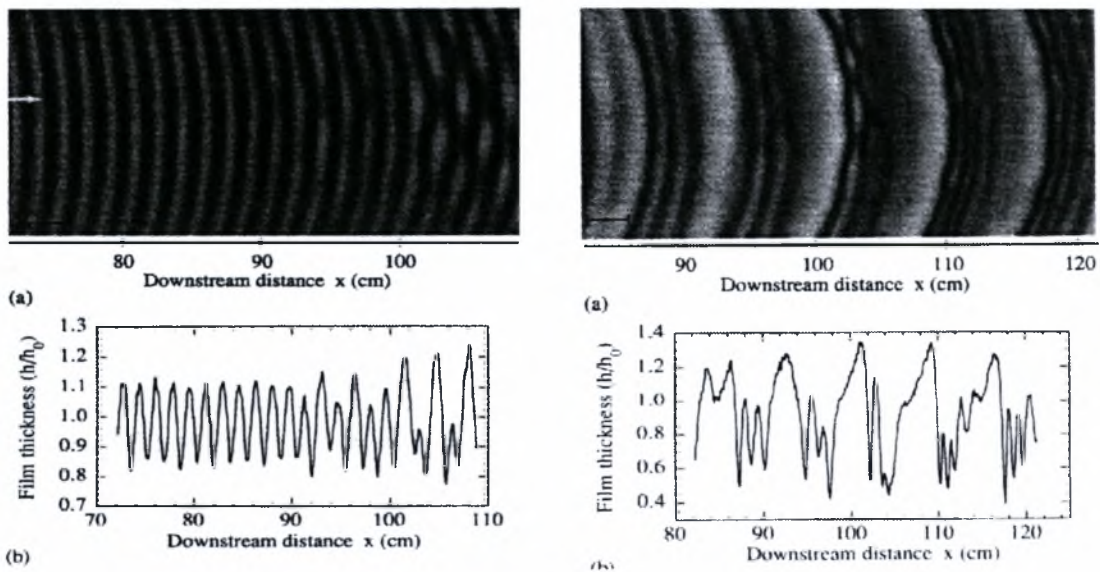
σολιτονικά, έχουν ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό των μετώπων του κύματος και τη δημιουργία εγκάρσιων τρισδιάστατων βαθουλωμάτων σε αυτά. Αναφορικά με τη δομή φαροκόκαλο, οι συγχρονισμένοι εγκάρσιοι σχηματισμοί, με τη μορφή βαθουλωμάτων, διατηρούν την περιοδικότητα που έχουν τα διδιάστατα κύματα στην κατεύθυνση της ροής. Το μήκος κύματος των βαθουλωμάτων κάθετα στην κατεύθυνση ροής είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πάχος του υμένα.



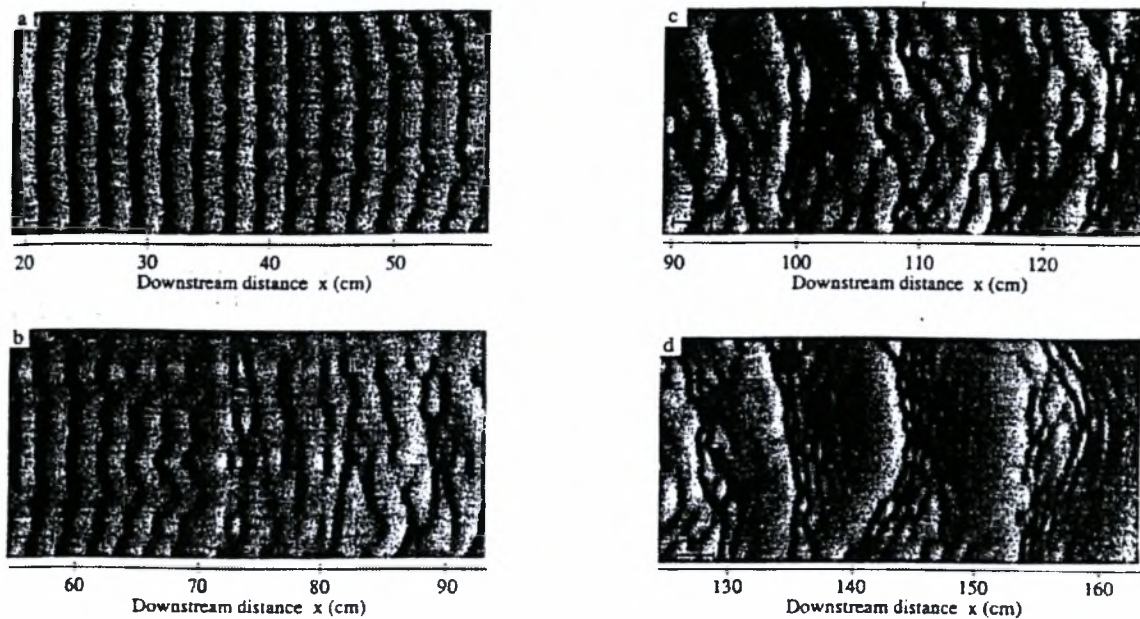
**Σχήμα 2.9:** Η ανάπτυξη των δευτερευουσών ασταθειών (*subharmonic-sideband*) στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με αποτέλεσμα τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων.



**Σχήμα 2.10:** Ο διαχωρισμός των τρισδιάστατων ασταθειών στο διάγραμμα συχνότητά τους συναρτήσει του αριθμού Reynolds.



**Σχήμα 2.11:** Το αποτέλεσμα επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία της μορφής φαροκόκαλο (herringbone pattern).



**Σχήμα 2.12:** Η δημιουργία δομών πλήρους αταξίας (*disorder patterns*) εξαιτίας της επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών.

Τελικά, η σύζευξη όλων των παραπάνω 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 μίας χαοτικής δομής. Στο *σχήμα 2.12* απεικονίζεται η μετάβαση από διδιάστατη σε τρισδιάστατη δομή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την μελέτη της ροής λεπτού υμένα υγρού πάνω από κεκλιμένο επίπεδο. Αρχικά, περιγράφεται η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων το υδραυλικό της διάγραμμα και το σύστημα εισαγωγής διαταραχών που κατασκευάστηκε. Ακολουθεί η παρουσίαση της μεθόδου συλλογής δεδομένων με απεικόνιση φθορισμού και η διαδικασία επεξεργασίας τους από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περίπτωση της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα.

### 3.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η χρησιμοποιούμενη πειραματική συσκευή έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο από τον φοιτητή Π. Σταθά σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Μ. Βλαχογιάννη., και απεικονίζεται στις φωτογραφίες του σχήματος 3.1 και στο σχήμα 3.3. Στόχος της συσκευής είναι να τροφοδοτηθεί ρευστό σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς της ροής. Το βασικό μέρος της συσκευής είναι ένα κανάλι, πλάτους 52 cm και μήκους 300 cm, πάνω στο οποίο ρέει το υγρό το οποίο εδράζεται σε ένα μεταλλικό πλαίσιο. Το κομμάτι αυτό της συσκευής ήταν κατασκευασμένο από Plexiglas κατά την δημιουργία της, ώστε να είναι ορατή η ροή από όλες τις πλευρές. Όμως κάποιους μήνες μετά την πρώτη λειτουργία της συσκευής παρατηρήθηκε κύρτωση του Plexiglas και τοποθετήθηκε πάνω από αυτό κομμάτι γυαλιού ίδιων διαστάσεων μιας και το γυαλί έχει μεγαλύτερη ακαμψία. Τα περισσότερα μέρη της συσκευής είναι κατασκευασμένα από Plexiglas ώστε να είναι δυνατός ο οπτικός έλεγχος των τμημάτων αυτών. Το κανάλι είναι σταθερά τοποθετημένο πάνω στο μεταλλικό ικρίωμα. Τα δυο κομμάτια αποτελούν ένα σύστημα που αναρτάται με τρεις συνδέσμους άρθρωσης στο μπροστινό μέρος της μεταλλικής βάσης.

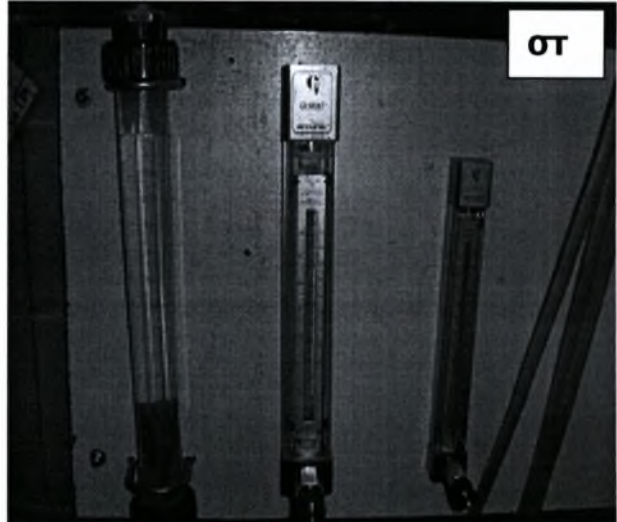
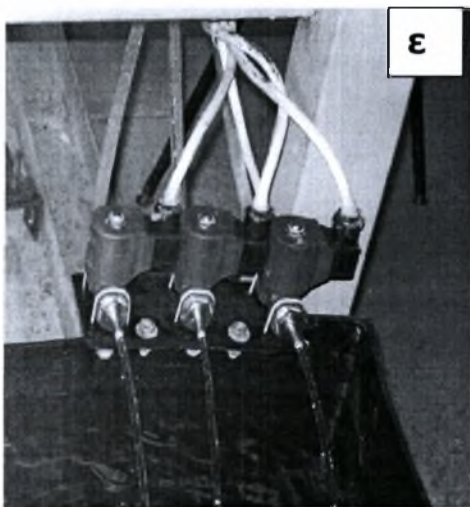
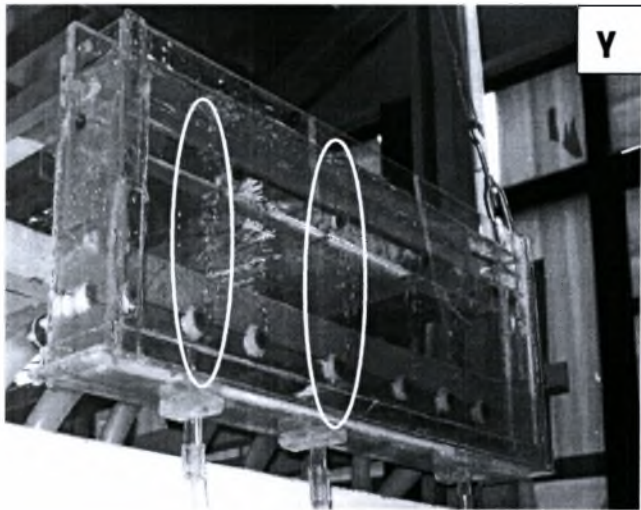
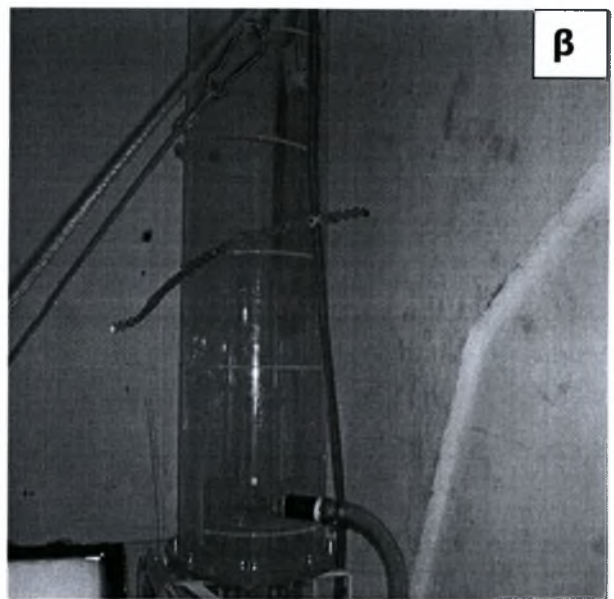
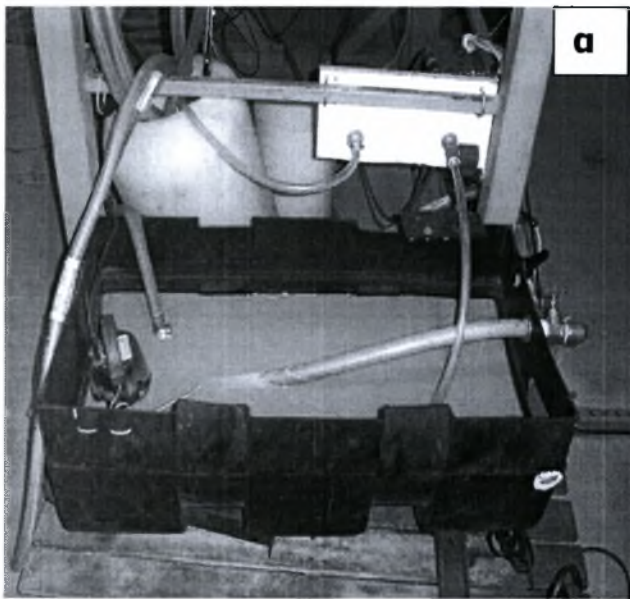
Εξαιτίας αυτής της άρθρωσης το κανάλι μπορεί να έρθει σε κλίση ως προς την οριζόντιο με γωνία από  $0^\circ$  έως  $45^\circ$ . Για την αλλαγή της κλίσης το κανάλι πρέπει να «τραβηχτεί» προς τα πάνω. Το βάρος όμως του ικρίωματος είναι τέτοιο που δεν επέτρεπε τη χειροκίνητη μετακίνησή του. Αυτό το έργο εκτελείται από το ηλεκτρικό αναβατόριο με

τη βοήθεια ενός συστήματος τροχαλιών και ενός συρματόσχοινου. Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ανυψωτική ικανότητα 1000 Kg.

Το βασικό κομμάτι της όλης πειραματικής διάταξης είναι το κανάλι πάνω στο οποίο ρέει ο υμένας που μελετάμε. Το κανάλι τροφοδοτείται με νερό από ένα δοχείο παροχής (σχήμα 3.1β) το οποίο βρίσκεται περίπου 4 μέτρα πιο ψηλά από την βάση στήριξης του καναλιού ύψος το οποίο εξασφαλίζει την απαραίτητη υψομετρική διαφορά ώστε να πετυχαίνουμε τις παροχές των πειραμάτων. Η μέτρηση της παροχής γίνεται από έξι ροόμετρα παράλληλα συνδεδεμένα (σχήμα 3.1στ) έτσι ώστε η συνολική παροχή που τελικά θα καταλήξει στο κανάλι να είναι το άθροισμα των παροχών όλων των ροόμετρων. Πριν το νερό μπει στο κανάλι γεμίζει το δοχείο υπερχειλίσης (σχήμα 3.1γ). Από εκεί το νερό ρέει στο κανάλι (σχήμα 3.1δ). Έπειτα συλλέγεται στο δοχείο συλλογής (σχήμα 3.1α) και από εκεί με δυο εμβαπτιζόμενες αντλίες (σχήμα 3.2β) επιστρέφει στο δοχείο παροχής από όπου επαναλαμβάνεται ο ίδιος κύκλος λειτουργίας.

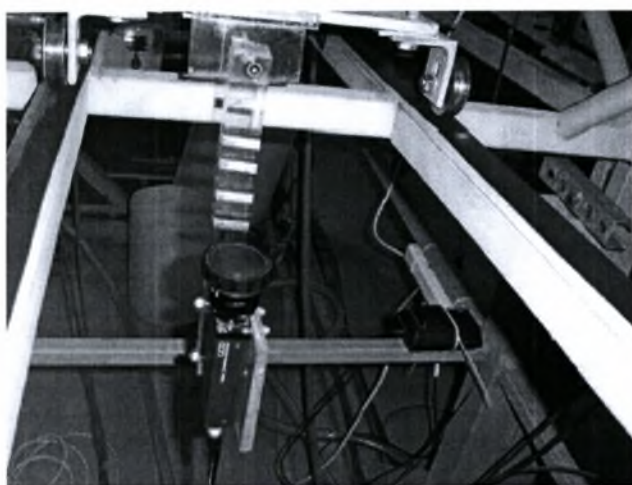
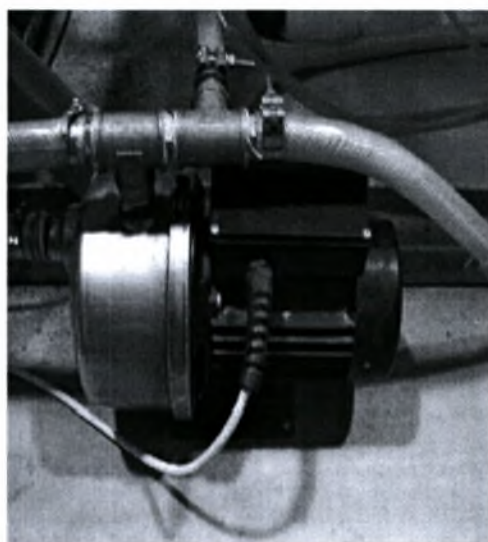
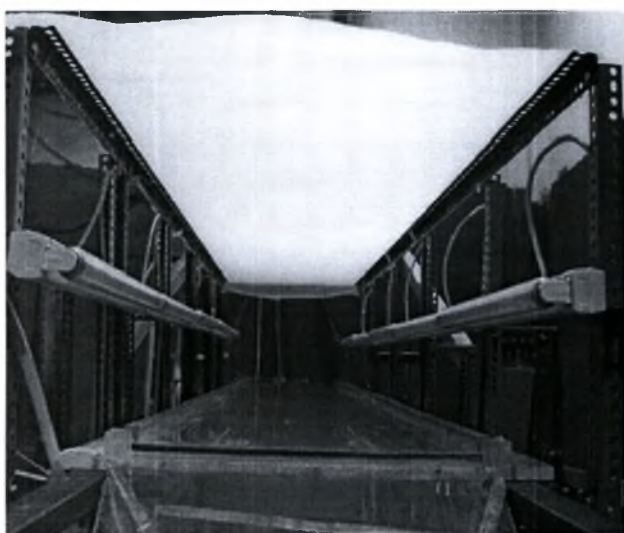
Πάνω από την πλάκα μετρήσεων του καναλιού είναι τοποθετημένο ένα σύστημα φωτισμού υπεριώδους (σχήμα 3.2α), ενώ κάτω και παράλληλα με αυτή ένας οδηγός στον οποίο στηρίζεται και μετακινείται η κάμερα συλλογής δεδομένων (σχήμα 3.2γ). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η διενέργεια μετρήσεων σε όλο το μήκος του καναλιού. Τέλος, σε διάφορα σημεία της διάταξης έχουν τοποθετηθεί φίλτρα νερού, ώστε να κατακρατείται σκόνη και διάφορες άλλες ακαθαρσίες του ρευστού οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τις πειραματικές μετρήσεις ή τη λειτουργία των αντλιών.





**Σχήμα 3.1:** Τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης α)Δοχείο συλλογής β)Δοχείο παροχής γ)Δοχείο υπερχειλίσης δ)Κανάλι ροής ε)Ηλεκτροβάνες διαταραχής στ)Ροόμετρα



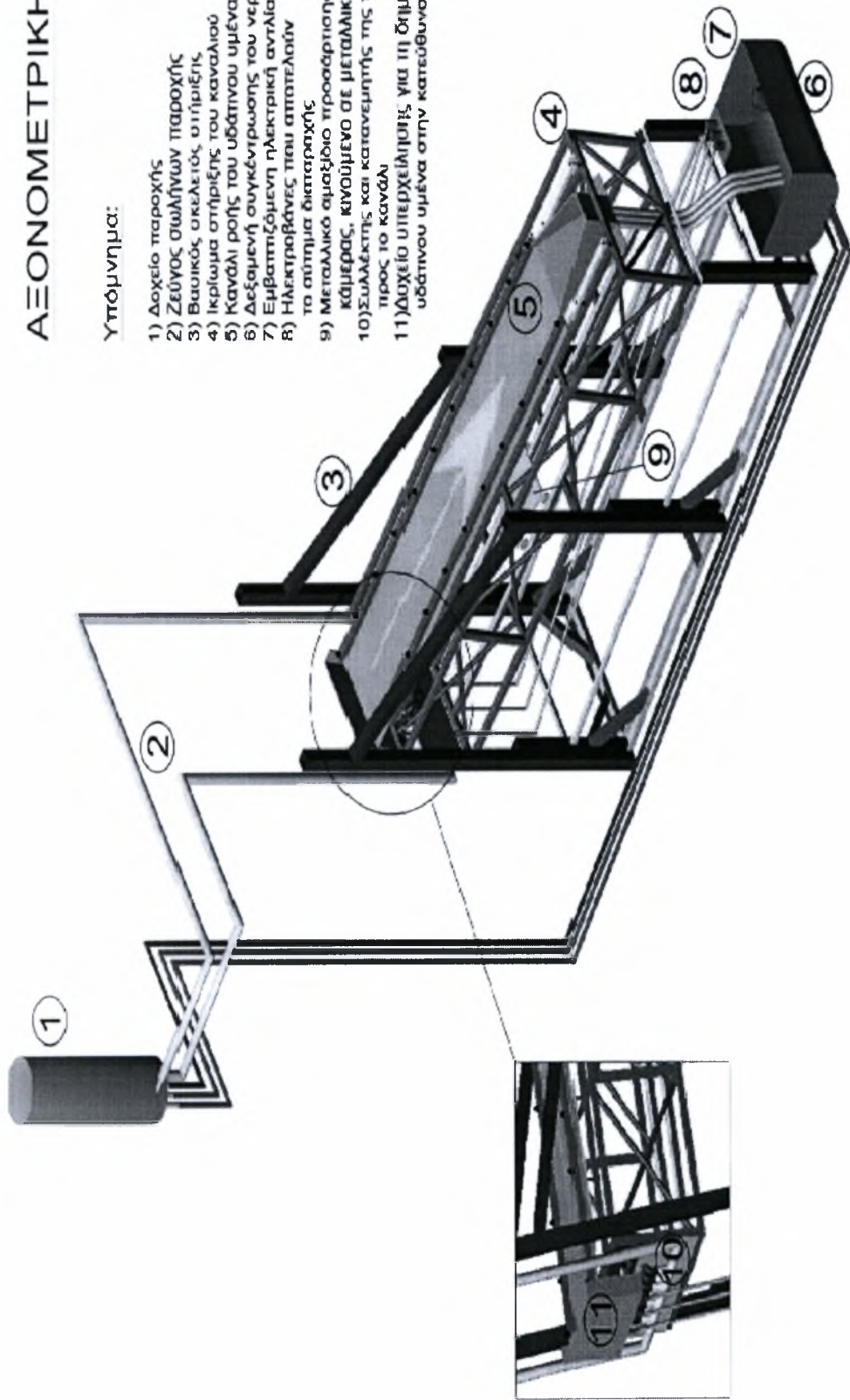


*Σχήμα 3.2: α) Λάμπες φόρτισμού β) Εμβραπτιζόμενες αντλίες γ) Κάμερα συλλογής δεδομένων*

# ΑΞΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΟΨΗ

## Υπόμνημα:

- 1) Δοχείο παροχής
- 2) Ζεύγος σωλήνων παροχής
- 3) Βασικός σκελετός υτήριξης
- 4) Ικρίωμα στήριξης του καναλιού
- 5) Κανάλι ροής του υδάτινου υμένα
- 6) Δεξαμενή συγκέντρωσης του νερού
- 7) Εμβυθιζόμενη ηλεκτρική αντλία ανακύκλωσης
- 8) Ηλεκτροβάνες που απαιτούν το σύστημα διατρηχής
- 9) Μεταλλικό αμαξίδιο προσαρτησης της ψηφιακής κάμερας, κινούμενο σε μεταλλικές ράγες
- 10) Συναρμολογημένη και κατασκευασμένη της παροχής προς το κανάλι
- 11) Δοχείο υπερχείλισης για τη δημιουργία του λειτού υδάτινου υμένα στην κατεύθυνση της ροής



**Σχήμα 3.3:** Σχεδιαστική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

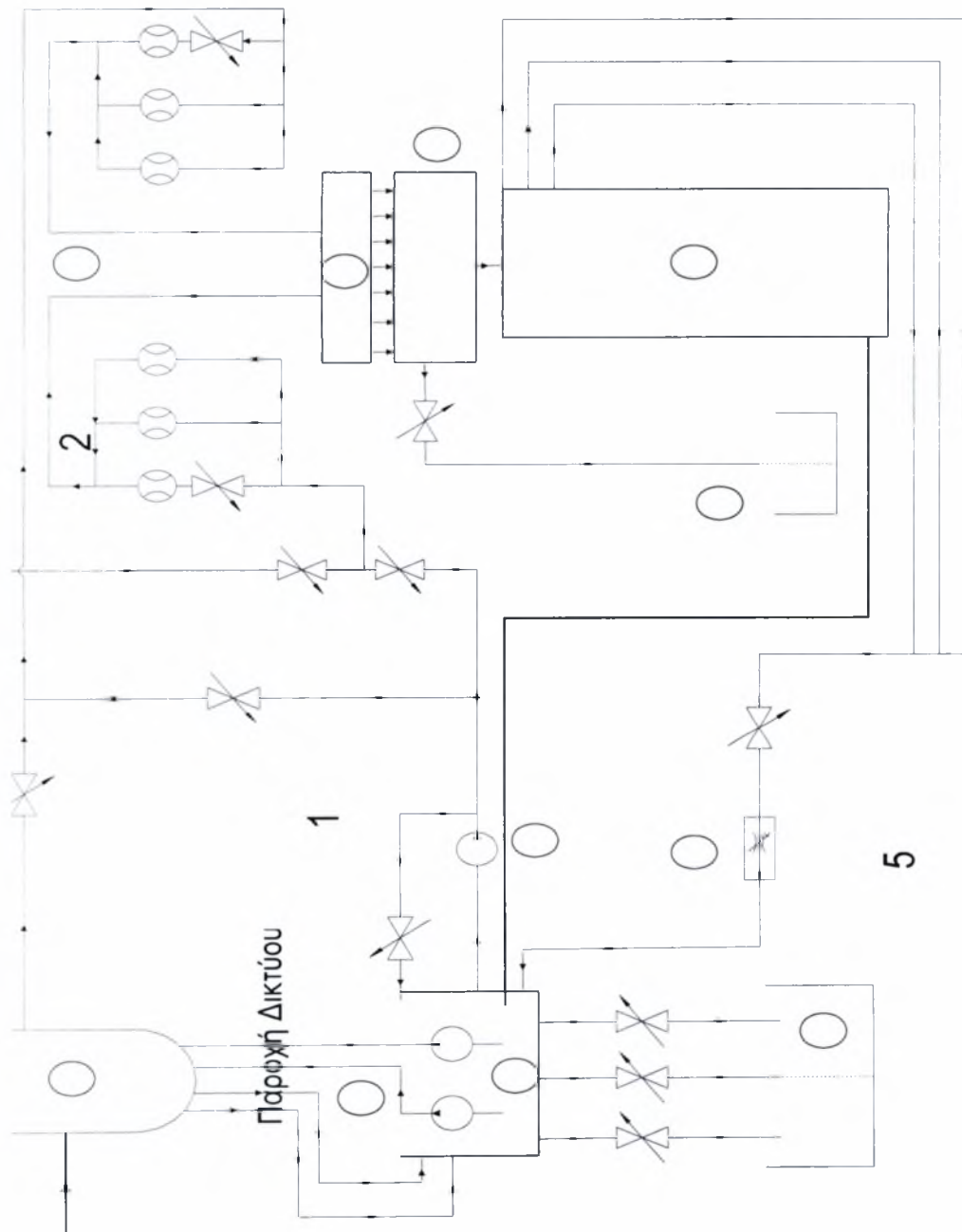
### 3.2. Υδραυλικό διάγραμμα

Η λειτουργία της συσκευής περιγράφεται ως εξής με βάση το υδραυλικό διάγραμμα (σχήμα 3.4): Αρχικά γεμίζουμε το δοχείο παροχής (1) με νερό δικτύου. Το νερό, κατεβαίνει από το ζεύγος σωλήνων παροχής (2) με μόνη ωθούσα δύναμη το βάρος του και την υψομετρική διαφορά που υπάρχει από το δοχείο παροχής μέχρι τα ροόμετρα (12). Από εκεί οδηγείται στο συλλέκτη (7) ο οποίος κατανέμει τη ροή και τροφοδοτεί το δοχείο υπερχειλίσης (8). Το δοχείο υπερχειλίσης όταν γεμίσει υπερχειλίζει και στέλνει το νερό στο κανάλι (3) όπου εκεί δημιουργείται ο λεπτός υδάτινος υμένας που ρέει κατάντη της ροής του νερού. Το νερό καταλήγει στη δεξαμενή συγκέντρωσης του νερού (4). Τέλος ο κύκλος ολοκληρώνεται αφού δυο εμβαπτιζόμενες αντλίες (5) που βρίσκονται μέσα στο δοχείο συλλογής του νερού στέλνουν το νερό πάλι στο δοχείο παροχής για να ακολουθήσει την ίδια διαδρομή.

Η παροχή του ρευστού ελέγχεται από τα ροόμετρα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν έξι ροόμετρα ανά τρία συμμετρικά μεταξύ τους τα οποία είναι παράλληλα συνδεδεμένα και η συνολική παροχή τους είναι το άθροισμα της παροχής κάθε ροόμετρου. Ρυθμίζουμε τα ροόμετρα σε μια ορισμένη θέση και προσδιορίζουμε την παροχή υγρού στην έξοδο του καναλιού (είσοδο της δεξαμενής συγκέντρωσης νερού) με ζύγιση. Με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή παροχή. Αν η επιθυμητή παροχή είναι πολύ μεγάλη και δεν μπορούμε να την πετύχουμε τότε βάζουμε σε λειτουργία την εξωτερική αντλία (9) η οποία παίρνει ρευστό από το δοχείο συγκέντρωσης και το προωθεί στα ροόμετρα. Επειδή η όλη κίνηση οφείλεται στην υψομετρική διαφορά του υγρού, η σταθερή στάθμη στο δοχείο υπερχειλίσης εξασφαλίζει και σταθερή παροχή. Σε καμία περίπτωση δεν αφήνεται το νερό να πέφτει από ύψος σε κάποιο από τα δοχεία αλλά μέσω π.χ. ελαστικών σωλήνων εκρέει ομαλά κάτω από την επιφάνεια του υγρού στα δοχεία. Τέλος η αντλία που χρησιμοποιούμε είναι εμβαπτιζόμενη ώστε ο όγκος του νερού να απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό των κραδασμών.

## Υπόμνημα

1. Δοχείο Παροχής
2. Ζεύγος σωλήνων παροχής
3. Κανάλι Ροής Υδάτινου Υμένα
4. Δεξαμενή Συγκέντρωσης του Νερού
5. Εμβραπτιζόμενες Αντλίες Α, Β
6. Ηλεκτροβάννα που αποτελεί το Σύστημα Διαταραχής
7. Συλλέκτης και κατανεμητής της παροχής στο Κανάλι 3B
8. Δοχείο Υπερχείλισης για τη δημιουργία λεπτού υδάτινου υμένα στην κατεύθυνση της ροής
9. Εξωτερική Αντλία για την επίτευξη μεγαλύτερων παροχών
10. Φρεάτιο Αποχέτευσης μικρό
11. Φρεάτιο Αποχέτευσης μεγάλο
12. Ροόμετρα



**Σχήμα 3.4** Υδραυλικό διάγραμμα πειραματικής διάταξη

B A

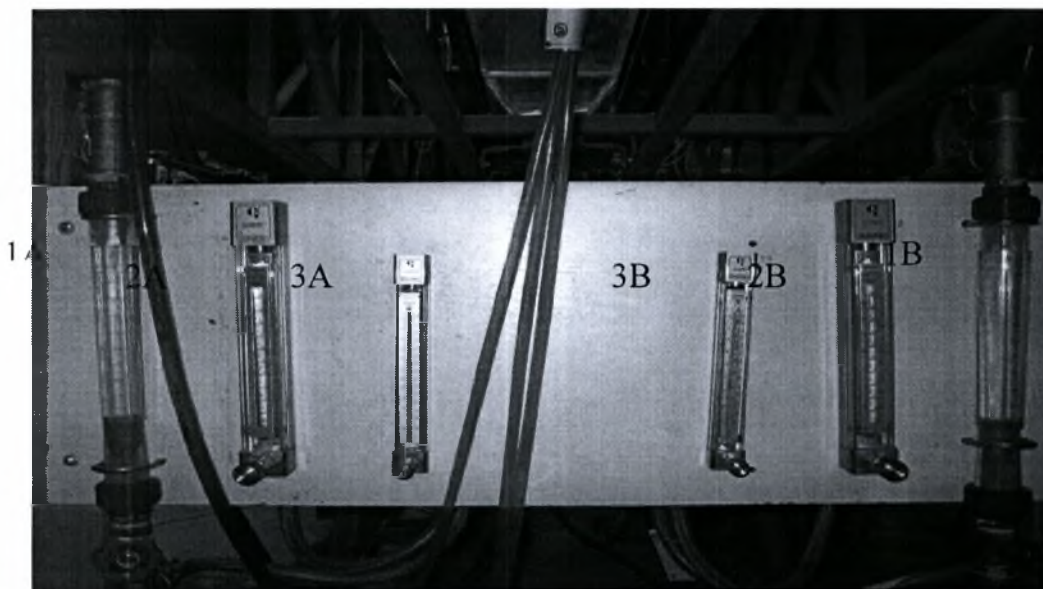
4

### 3.3. Βαθμονόμηση ροόμετρων

#### 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 3.5: Η διάταξη ροόμετρων*

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

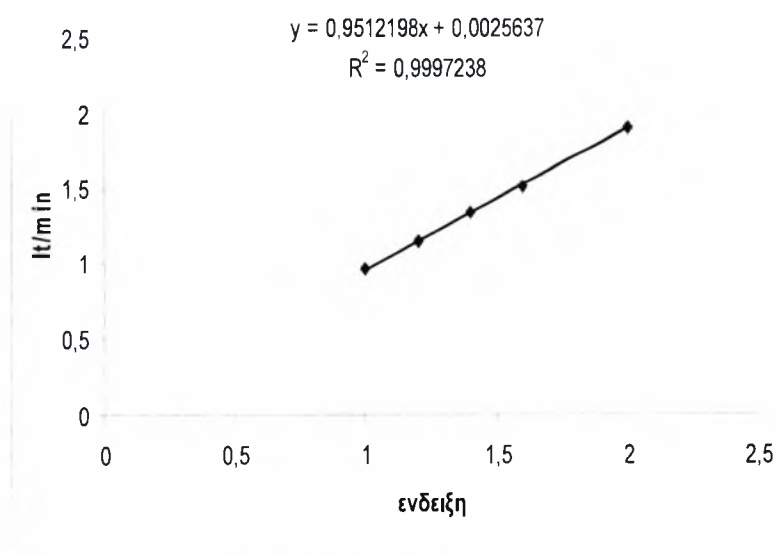
Ροόμετρα B	Δυναμικότητα
1 B	2,35 Lt/min
2 B	4,75 Lt/min
3 B	1,4 Lt/min

**Σχήμα 3.6:** 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.

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

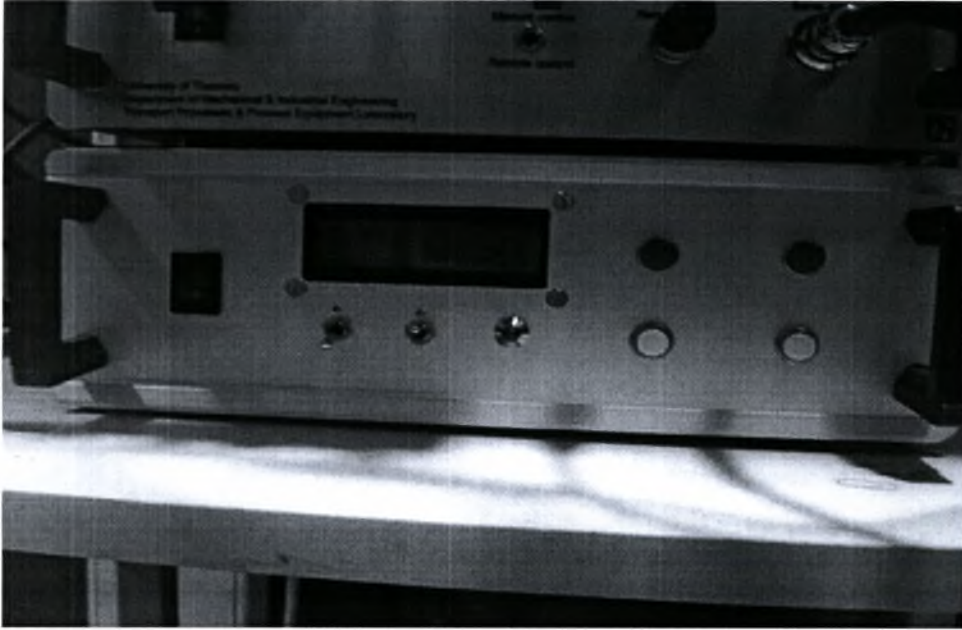


**Σχήμα 3.7:** Γραφική απεικόνιση βαθμονόμησης για το ροόμετρο 2A

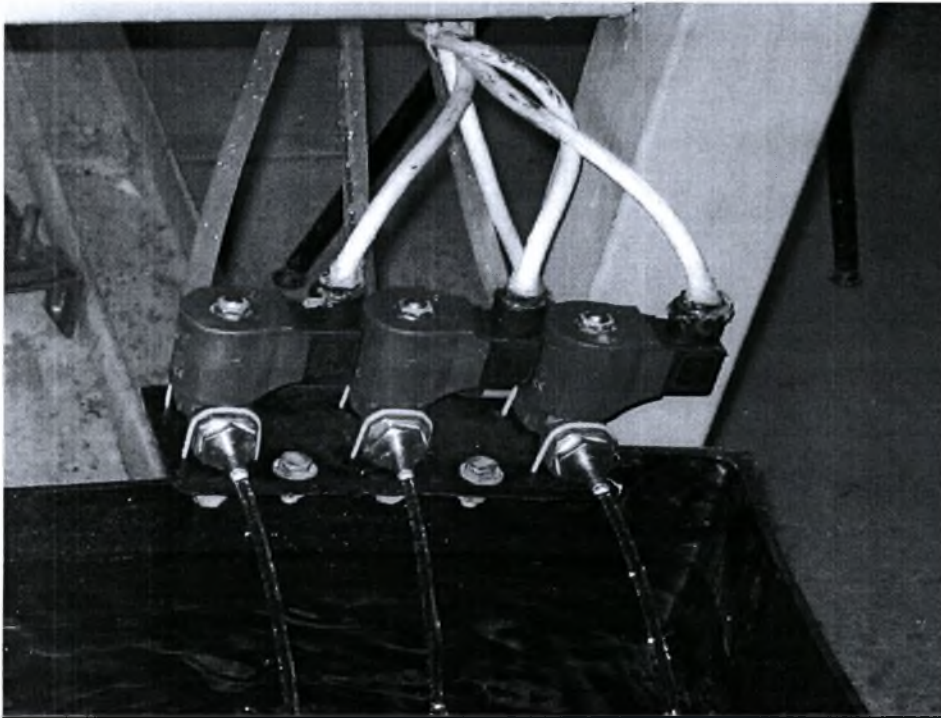
Η ευθεία που προσεγγίζει την συνάρτηση όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7 βρίσκεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μέση τετραγωνική απόκλιση  $R^2$  πρέπει πάντα να προσεγγίζει τ μονάδα, σε περίπτωση που αποκλίνει σημαντικά οι μετρήσεις είναι λάθος και η βαθμονόμηση πρέπει να επαναληφθεί.

### **3.4. Σύστημα εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής**

Η αρχή λειτουργίας του και ο λόγος ύπαρξής του αναλύθηκε διεξοδικά στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Ομοίως με την πρώτη διάταξη, έτσι και εδώ σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα «υδραυλικό άλμα» στην αφετηρία της ροής του υμένα ώστε να μελετηθεί η δυναμική εξέλιξή του κατάντη της ροής. Τρεις σωλήνες διαμέτρου  $\varnothing 10\text{mm}$  τοποθετημένες στο κάτω μέρος του δοχείου υπερχειλίσσης ενώνονται σε μια και οδηγούνται σε μια ηλεκτροβαλβίδα ON/OFF που καταλήγει απ' ευθείας στη δεξαμενή απορροής. Η ηλεκτροβαλβίδα είναι παράλληλα συνδεδεμένη σε έναν ψηφιακό ηλεκτρονικό χρονιστή που ελέγχει το ρυθμό που ανοίγουν και κλείνουν. Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου που η βαλβίδα θα είναι κλειστή και χωριστά του χρόνου που θα είναι ανοιχτή. Συνολικά η διαταραχή που προκαλείται μπορεί να φτάσει τη συχνότητα των 10 Hz (0.05sec ON-0.05sec OFF). Τροφοδοτείται με τάση 220 Volt και δίνει στην ηλεκτροβαλβίδα επίσης 220 Volt, οι οποίες όταν δεν έχουν τάση είναι κλειστές. 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. Σημειώνεται πως η ελάχιστη υψομετρική διαφορά του δοχείου υπερχειλίσσης από τη δεξαμενή συγκέντρωσης ρευστού είναι 1m, ενώ αυξάνοντας την κλίση του καναλιού αυξάνεται και αυτή με συνέπεια την εντατικοποίηση του φαινομένου του «υδραυλικού άλματος»



**Σχήμα 3.8:** Ψηφιακός χρονιστής του συστήματος διαταραχής



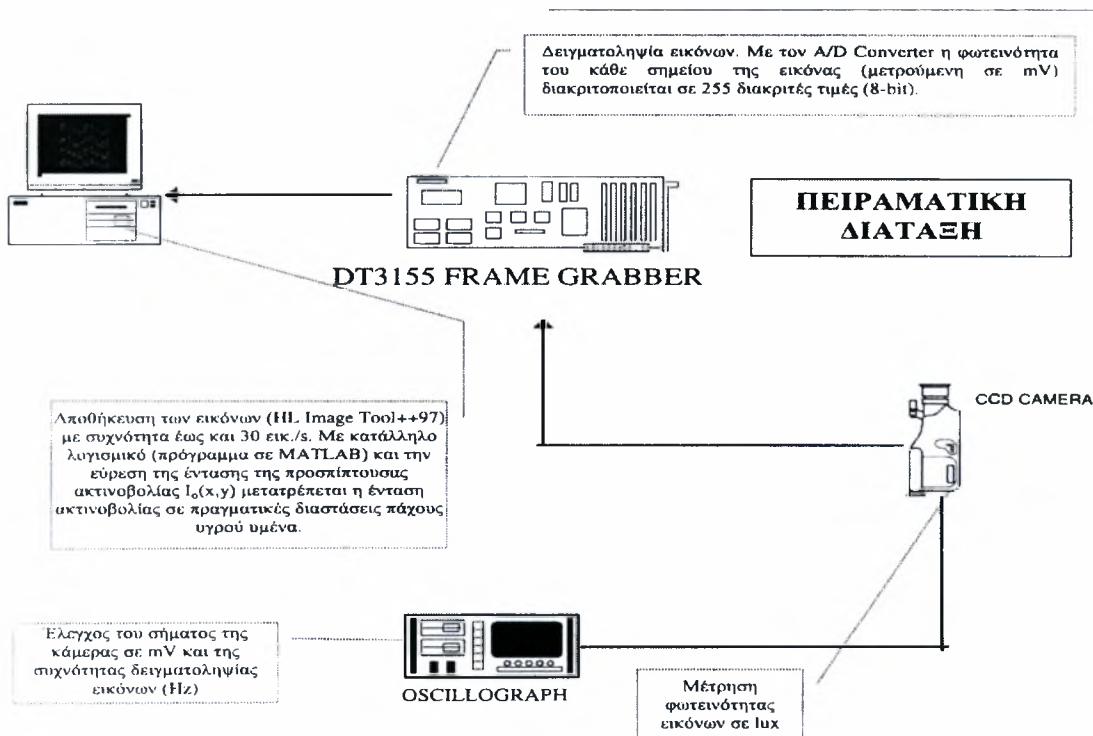
**Σχήμα 3.9:** Οι ηλεκτροβαλβίδες ελεγχόμενες από το χρονιστή δημιουργούν το «υδραυλικό άλμα» στον υμένα



### 3.5. 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 διατριβή. 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 3.10: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

Πιο συγκεκριμένα, το ρευστό χρωματίζεται από μια μικρή ποσότητα (100-300 ppm) της χρωστικής *ουρανίνη* (Sodium Salt of Fluorescein-C<sub>20</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>Na<sub>2</sub>) η οποία έχει την ιδιότητα να φθορίζει κάτω από την επίδραση υπεριώδους φωτός εκπέμποντας ορατό πράσινο – κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 525-580 nm. 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 (0,5 lux) και αναλογία σήματος θορύβου (50 dB), με ταχύτητα δειγματοληψίας 50 εικόνες/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 30 εικόνες/sec για συχνότητα 60 Hz ή 25 εικόνες/sec για συχνότητα 50 Hz. 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 768x576 pixels με ανάλυση 8 bits. Οι δυνατότητες αποθήκευσης της κάρτας συλλογής εικόνων, ανάλογα με τη διαθέσιμη μνήμη του υπολογιστή, είναι 75 εικόνες – 24 MB – 640x480 pixels ή 50 εικόνες – 24 MB – 768x576 pixels. 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 3.11 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  $\mu\text{m}$ . 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  $\sigma'$  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).

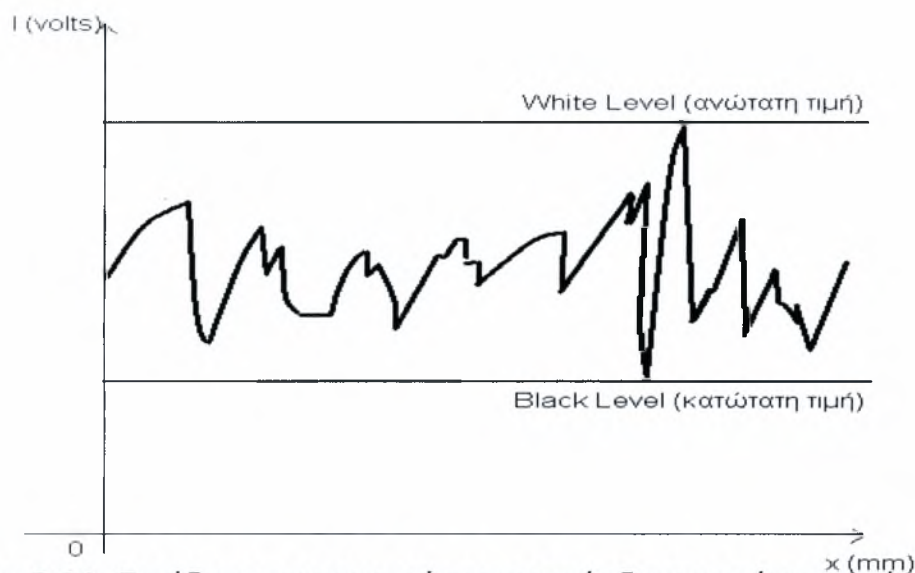
Σύμφωνα με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, το τοπικό πάχος υμένα  $h(x,y,t)$  είναι γραμμικά ανάλογο με την ένταση του φωτός  $I(x,y,t)$  που εκπέμπεται από τον φθορίζοντα υμένα.

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  $\alpha, \beta$  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  $\alpha, \beta$  για τις καθορισμένες συνθήκες.



**Σχήμα 3.11:** 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  $\alpha$  και  $\beta$ . 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.

### **3.5.1. 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  $\alpha, \beta$ .

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.

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.

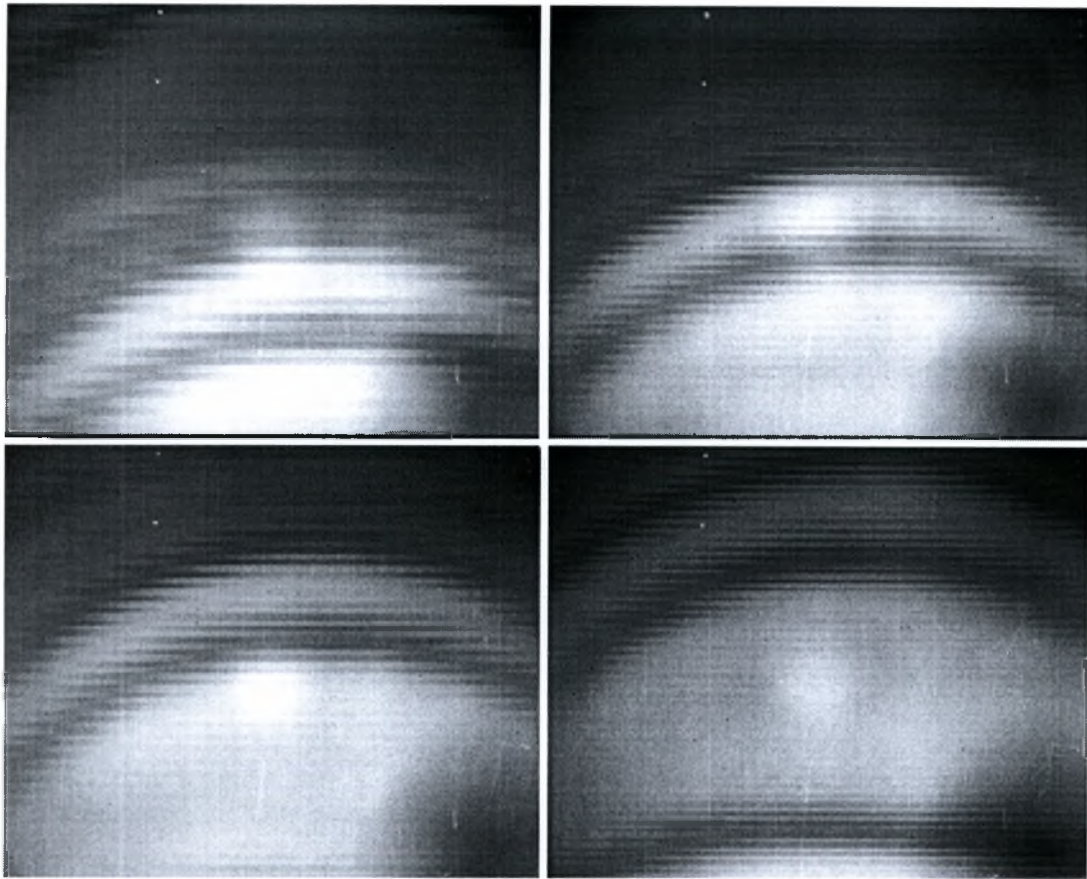
Αφού λοιπόν πιστοποιηθεί η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της θεωρητικής πρόβλεψης κατά Nusselt είναι δυνατή η βαθμονόμηση της πειραματικής μεθόδου χρησιμοποιώντας την σχέση (3.1). Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής: αρχικά μετράμε την παροχή στο κανάλι και από την σχέση Nusselt

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  $\alpha$  και  $\beta$  της σχέσης (3.1). Επειδή η σχέση είναι γραμμική απαιτούνται τα πάχη και οι ακτινοβολίες σε τουλάχιστον δυο αριθμούς  $Re$ , ώστε να υπολογιστούν τα  $\alpha(x,y)$  και  $\beta(x,y)$ . Ωστόσο, για να αυξηθεί η ακρίβεια της βαθμονόμησης, λαμβάνουμε τιμές σε τέσσερις τουλάχιστον αριθμούς  $Re$  και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων βρίσκουμε τα  $\alpha$  και  $\beta$  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.

### ***3.5.2 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).

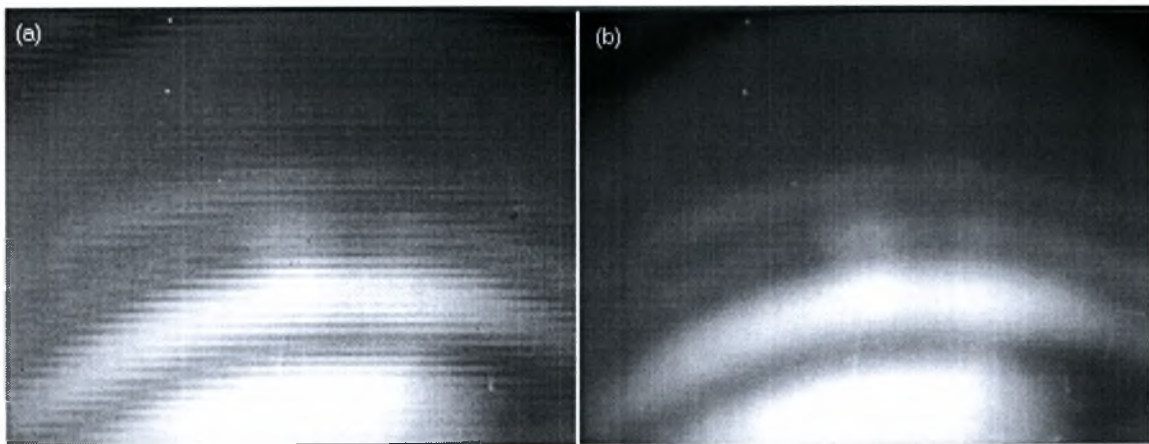


*Σχήμα 3.12: Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται.*

Έτσι στο σχήμα 3.12, 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 φίλτραρίσμα

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 ρικελ της εικόνας με αυτή των γύρω του ώστε να απαλειφθούν οι πολύ απότομες μεταβολές στην τιμή λίγων ρικελ. Ένα παράδειγμα χρήσης φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 3.13. 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 μικρόμήκος). 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 3.13:** (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.



## Υπολογισμός της σχέσης ακτινοβολίας – πάχους υμένα

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  $\alpha$  και  $\beta$ . Αρχικά αντιστοιχίζουμε τις διακριτές τιμές του κάθε στοιχείου του κάθε πίνακα σε mVolts μέσω της σχέσης:

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

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 Noise(I,j) είναι το επίπεδο του θερμικού θορύβου σε mVolts το οποίο ορίζεται ως

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

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

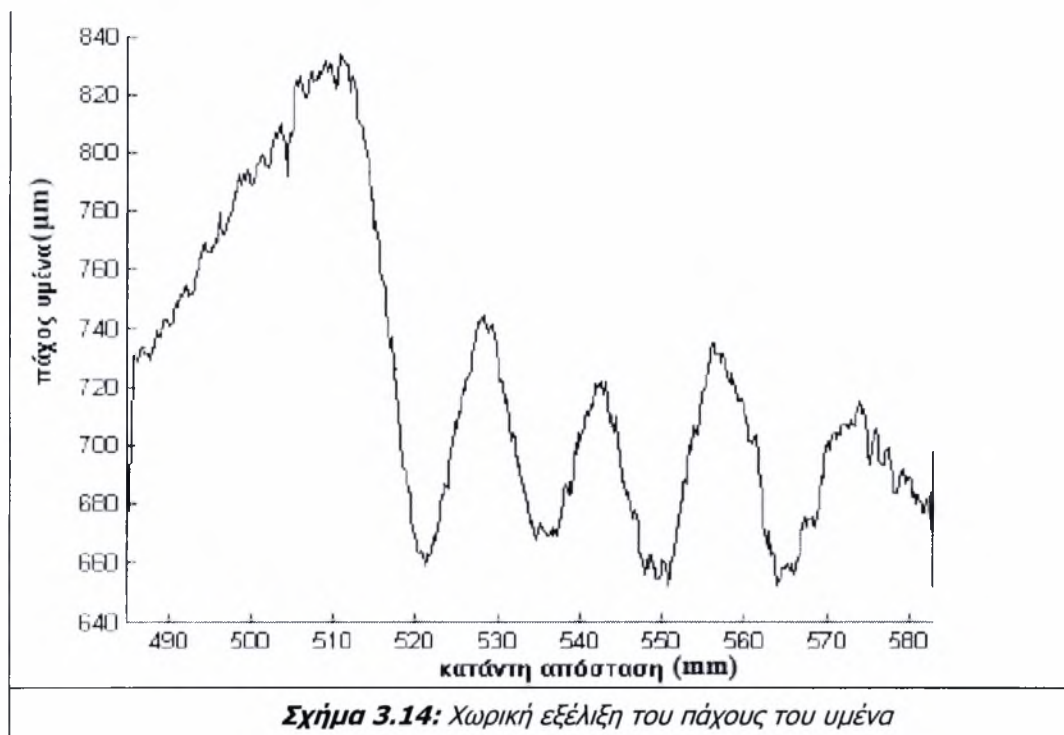
Έχοντας υπολογίσει τον πίνακα, για κάθε αριθμό  $Re$ , ο οποίος δίνει τη μέση ένταση ακτινοβολίας του κάθε pixel σε mVolts, μπορούμε να συσχετίσουμε γραμμικά τη μέση ένταση ακτινοβολίας του κάθε pixel σε mVolts με το θεωρητικά υπολογισμένο πάχος του υμένα κατά Nusselt  $h_N$ , το οποίο είναι σταθερό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

### **3.5.3. Επεξεργασία εικόνων**

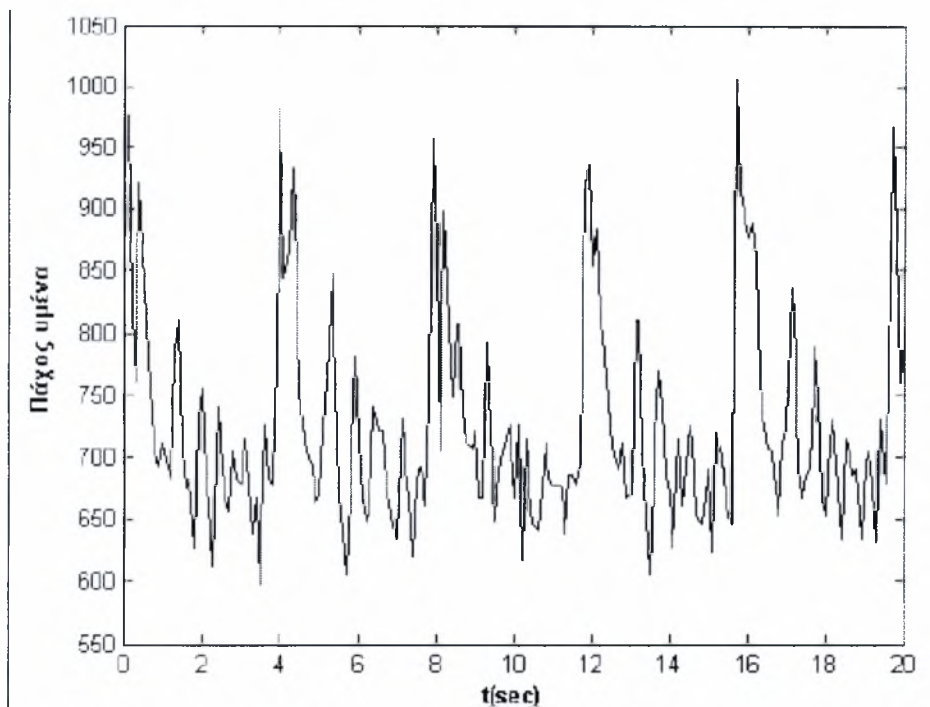
Στη συνέχεια περνάμε στην επεξεργασία των δεδομένων που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ανάλυση. Ο αριθμός των εικόνων προς επεξεργασία σε αυτή την περίπτωση, για κάθε αριθμό  $Re$ , είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που λαμβάνονται στην ευσταθή περιοχή και εξαρτάται από το χρονικό διάστημα για το οποίο έγινε η δειγματοληψία. Συνήθως ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 0,1 εικόνες/sec. Η διαδικασία που ακολουθείται και σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτή της επεξεργασίας των δεδομένων της ευσταθούς περιοχής. Έτσι λοιπόν, κάθε εικόνα μετατρέπεται σε ένα πίνακα  $576 \times 768$ , 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.3.14).

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.3.15). Η απεικόνιση του πάχους του υμένα σε διάφορα σημεία κατά μήκος του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου ( $h(x_0, y_0, t)$ ), μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη βασική αρμονική της συχνότητας ταλάντωσης των σημείων. Επίσης, μπορεί να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με το μέσο ύψος των κυμάτων και το μέσο πάχος υμένα.



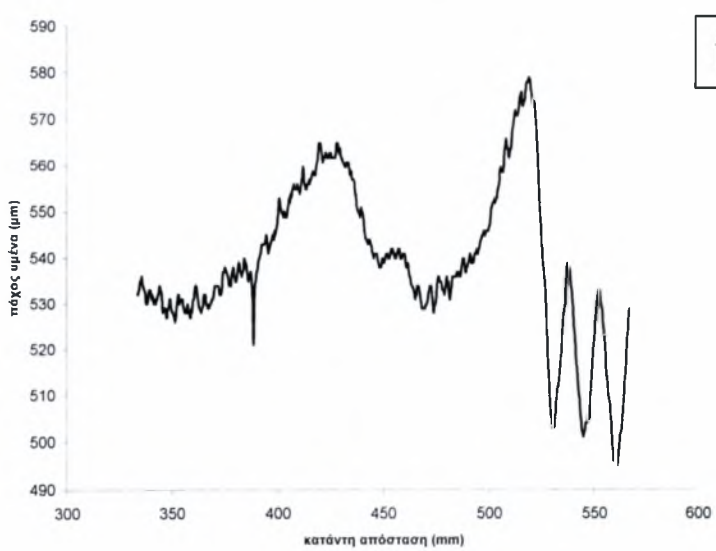
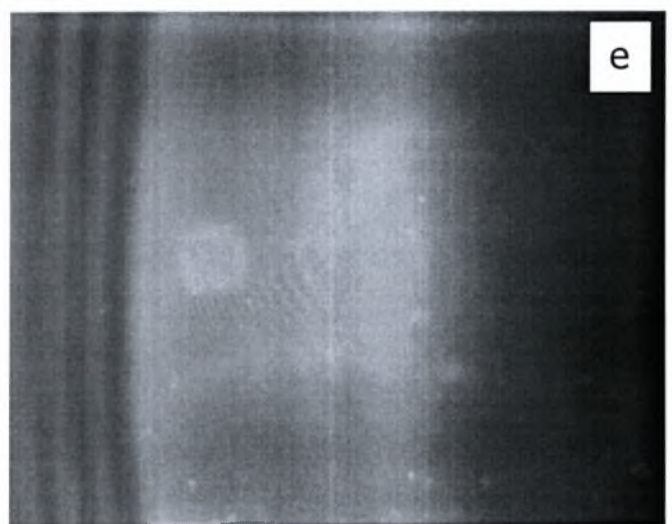
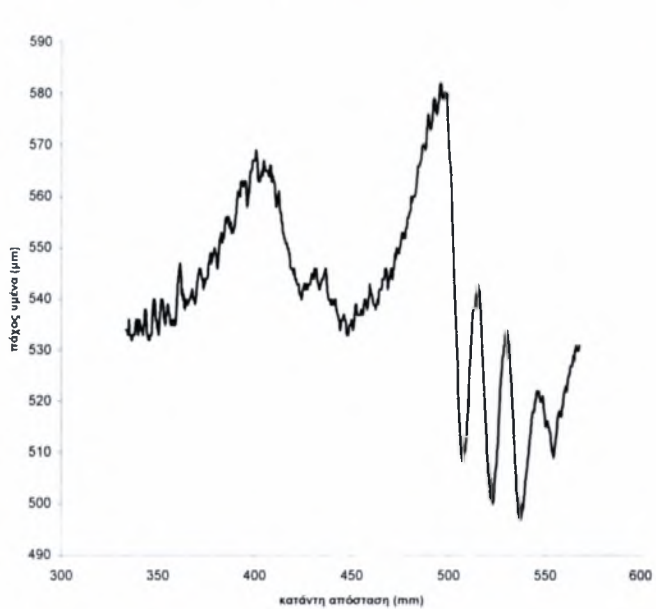
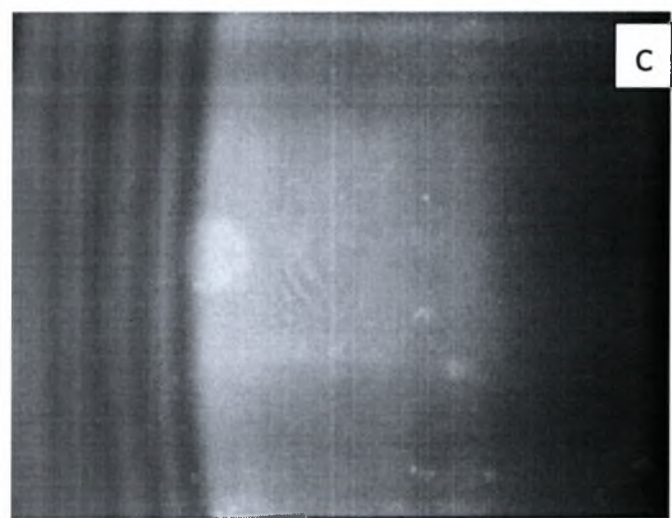
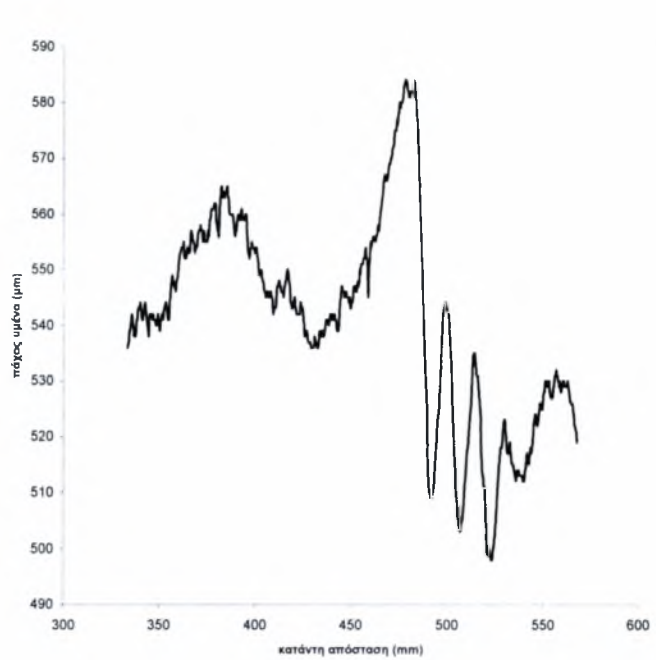
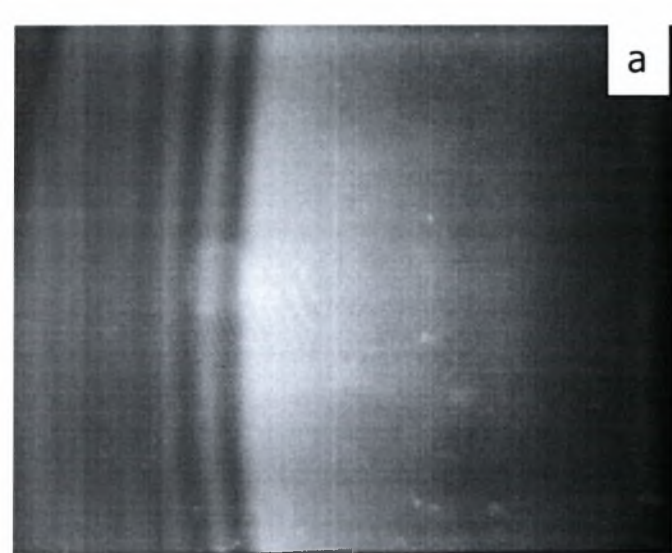
Συγχρόνως, μπορούμε να έχουμε την χωρική κατανομή της ελεύθερης επιφάνειας, είτε στη κατεύθυνση της ροής είτε εγκάρσια ( $h(x, y_0, t)$  ή  $h(x_0, y, t)$ ). Η απεικόνιση των κατανομών του πάχους του υμένα σε διαδοχικές χρονικές στιγμές έχει μεγάλη πρακτική αξία, γιατί μας δίνει σημαντικές πληροφορίες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



**Σχήμα 3.15:** Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του ΟΠΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Στο σχήμα 3.16 a, c και e παρουσιάζονται τρεις διαδοχικές εικόνες στις οποίες φαίνεται ποιοτικά να περνάει ένα κύμα. Στο σχήμα 3.13 b, d και f φαίνονται οι αντίστοιχες κατανομές του πάχους του υμένα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της κάθε εικόνας.

Σημειώνουμε ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναγκαία η ποσοτική ανάλυση ολόκληρης της εικόνας και όχι μόνο μίας μεμονωμένης γραμμής. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η κατάσταση ροής με τρισδιάστατες δομές στην ελεύθερη επιφάνεια. Τότε, η υπολογιστική διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε pixel της εικόνας και τα αποτελέσματα του πάχους υμένα παρουσιάζονται με τη μορφή ισοϋψών καμπυλών. Βέβαια, επειδή μια τέτοιου είδους ανάλυση είναι αρκετά χρονοβόρα υπολογιστικά, καλό είναι να γίνεται μόνο όπου είναι αναγκαίο και όπου δεν μπορούν να βγουν αλλιώς συμπεράσματα για τη ροή.



**Σχήμα 3.16:**(a),(c),(e) διαδοχικές εικόνες( $\Delta t=0,1$ ) στις οποίες φαίνεται ποιοτικά να περνάει ένα κύμα. (b),(d),(f) οι αντίστοιχες κατανομές του πάχους του υμένα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής κάθε εικόνας.

### **3.6. Μεθοδολογία μετρήσεων**

Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την σειρά πειραμάτων ήταν νερό. Μέσα στο νερό υπάρχει διαλυμένη η χρωστική ουσία ουρανίνη (Sodium Salt of Fluorescein- $C_{20}H_{10}O_5Na_2$ ) που δίνει στο νερό ένα πράσινο χρώμα ώστε να είναι μέσα στα όρια του φάσματος που καλύπτει η κάμερα( 525-580  $\mu m$ ) με το ειδικό φίλτρο. Για να είναι δυνατή η παρατήρηση των κυμάτων από την κάμερα χρειάζονται περίπου 250 ppm ουρανίνης διαλυμένα στο νερό. Στην περίπτωση μας για σε 80 lit νερού διαλύσαμε 20 gr ουρανίνης. Το διάλυμά μας τοποθετήθηκε στο δοχείο συλλογής.

Η επιφάνεια του καναλιού ροής, βασικού τμήματος της διάταξης μας πρέπει να είναι απόλυτα λεία και καθαρή πριν ξεκινήσουμε κάποιο πείραμα, γι αυτό το λόγο το γυαλί που βρίσκεται πάνω στο κανάλι ροής καθαρίστηκε με silicate sodium. Το υγρό αυτό καθαρίζει την επιφάνεια του γυαλιού και ταυτόχρονα δημιουργεί ένα φιλμ που βοηθάει στην καλύτερη ροή του νερού, ώστε να μην "σπάσει" ο υμένας. Είναι πολύ σημαντικό στην εξέλιξη των πειραμάτων να έχουμε σταθερή παροχή και να υπάρχει ρευστό σε όλη την επιφάνεια του γυαλιού. Αν σε κάποιο τμήμα δεν υπάρχει ρευστό τότε λέμε ότι ο υμένας έχει "σπάσει". Τότε με ένα πινέλο πρέπει να στρώσουμε την ροή σε εκείνο το σημείο ώστε το ρευστό να ρέει ομοιόμορφα σε όλο το κανάλι.

Πριν βάλουμε σε λειτουργία την πειραματική διάταξη πρέπει να κάνουμε κάποιους έλεγχους. Αρχικά γίνεται ένας οπτικός έλεγχος της πειραματικής διάταξης για να διαπιστωθούν τυχόν αστοχίες που μπορούν να επηρεάσουν την καλή λειτουργία της συσκευής . Έπειτα κλείνουμε τις βάνες των ροομέτρων A,B ώστε από τη μια να ανέβει αρκετά η στάθμη του δοχείου παροχής μόλις θέσουμε σε λειτουργία το πείραμα και από την άλλη να αποφύγουμε να εισέλθει στην πειραματική διάταξη αέρας. Ο αέρας μέσα στις σωληνώσεις μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στο πείραμα και πτώση πίεσης με αποτέλεσμα να μην πετυχαίνουμε τις επιθυμητές παροχές στα ροόμετρα. Αφού βεβαιωθούμε ότι όλα είναι εντάξει θέτουμε σε λειτουργία τις εμβαπτιζόμενες αντλίες που βρίσκονται μέσα στο δοχείο συλλογής νερού. Το δοχείο αυτό όπως έχουμε προαναφέρει περιέχει διάλυμα νερού και ουρανίνης. Το διάλυμα στέλνεται ψηλά στο δοχείο παροχής. Περιμένουμε λίγη ώρα μέχρι να γεμίσει το δοχείο παροχής και να φύγει ο αέρας από τις σωληνώσεις. Μόλις σταματήσουν να κυκλοφορούν φυσαλίδες στο σύστημα των

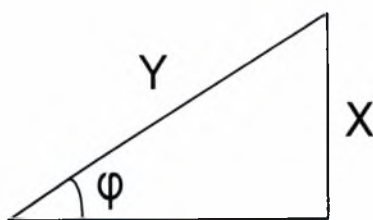
σωληνώσεων ανοίγουμε τις βάνες των ροομέτρων. Ρυθμίζοντας τα ροόμετρα σε μεγάλες παροχές πετυχαίνουμε να γεμίσει το δοχείο υπερχειλίσης πιο γρήγορα. Όταν γεμίσει το δοχείο υπερχειλίσης πλέον το διάλυμα φτάνει στο κανάλι ροής και από εκεί καταλήγει πάλι στο δοχείο συλλογής, από όπου με την βοήθεια των εμβαπτιζόμενων αντλιών επιστρέφει στο δοχείο παροχής και επαναλαμβάνει τον ίδιο κύκλο. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η πειραματική διάταξη λειτουργεί με το ίδιο διάλυμα κατά την διάρκεια των πειραμάτων το οποίο επαναλαμβάνει συνεχώς τον παραπάνω κύκλο και σε καμία περίπτωση δεν έχουμε εισροή στην όλη διάταξη νερού εξωτερικής παροχής.

Πλέον το διάλυμα ρέει στο κανάλι. Ελέγχουμε οπτικά αν ο υμένας έχει "σπάσει" σε κάποιο σημείο και αν αυτό έχει συμβεί τότε με ένα πινέλο στρώνουμε τη ροή στο συγκεκριμένο σημείο. Έχοντας ροή ρευστού στο κανάλι είμαστε έτοιμοι να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του πειράματος. Αυτές είναι η γωνία κλίσης του καναλιού  $\phi$ , ο αριθμός Re που ρυθμίζεται μέσω της σχέσης :

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

από την παροχή (q) του

ρευστού, η θέση της κάμερας και το μέγεθος της εξωτερικής διαταραχής. Η κάμερα μπορεί να τοποθετηθεί σε τρεις προκαθορισμένες θέσεις a,b,c που απέχουν 0,33/1,33/2,33 cm από την αρχή του καναλιού. Η κάμερα βρίσκεται τοποθετημένη σε ένα ειδικό σύστημα με ράγες πάνω στις οποίες μετακινείται χειροκίνητα. Η γωνία κλίσης του καναλιού ρυθμίστηκε στις 3,6°. Αυτό έγινε με την βοήθεια της σχέσης  $\cos \phi = \frac{X}{Y}$  (σχήμα 3.14) όπου X= η κάθετη απόσταση του κεκλιμένου επιπέδου από το οριζόντιο, Y= το μήκος καναλιού (272 cm) και  $\phi$ = η γωνία κλίσης του καναλιού.



**Σχήμα 3.17:** Εξάρτηση της γωνίας κλίσης  $\phi$  από τις αποστάσεις X,Y

Πιο συγκεκριμένα καθορίζοντας την γωνία  $\phi$ , στην περίπτωση μας  $\phi=3,6^\circ$  και γνωρίζοντας την απόσταση Y που είναι το μήκος του καναλιού=272 cm βρίσκουμε το X=..

Έπειτα με ένα αλφαδολάστιχο που η μια του άκρη είναι στερεωμένη στο τέλος και η άλλη στην αρχή του καναλιού ορίζουμε το οριζόντιο επίπεδο. Εκεί, και σε σταθερό σημείο της κατασκευής, ώστε να μην μετακινείται με την αλλαγή της κλίσης του καναλιού τοποθετούμε ένα χάρακα σταθερό με την ένδειξη μηδέν του χάρακα να μας ορίζει το οριζόντιο επίπεδο (σχήμα 3.18). Συνεπώς ανεβάζοντας το κανάλι με τη βοήθεια το ηλεκτρικού αναβατορίου κατά την απόσταση  $X$  έχουμε την επιθυμητή γωνία κλίσης  $\varphi$  του καναλιού.



**Σχήμα 3.18:** Χάρακας με τη βοήθεια του οποίου βρίσκουμε την κλίση  $\varphi$  του καναλιού ροής.

Τώρα πρέπει να ρυθμίσουμε την παροχή ώστε να πετύχουμε τους αριθμούς  $Re$  που θα κάνουμε τα πειράματα. Στην συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ένα εύρος  $30 < Re < 80$ . Έτσι λοιπόν και οι παροχές κινήθηκαν  $0,700 < q < 2,400$  kg/sec. Παρόλο που στη διάταξη έχουν τοποθετηθεί ροόμετρα αυτά δεν μας δίνουν στο κανάλι ροής ακριβώς την παροχή που αναγράφουν. Έτσι για περισσότερη ακρίβεια στη μέτρηση της παροχής χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τρόπο. Στο τέλος του καναλιού ροής και πριν το διάλυμα καταλήξει στο δοχείο συλλογής περνάει από τρία λάστιχα. Βάζουμε σε



μια κανάτα χωρητικότητας 4 kg τα τρία λάστιχα και με ένα χρονόμετρο μετράμε το χρόνο μέχρι να αφαιρέσουμε τα λάστιχα. Συνήθως μια μέτρηση της τάξεως του ενός λεπτού μας δίνει ενδεικτικά αποτελέσματα. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι όσο μεγαλώνει η διάρκεια της μέτρησης τόσο καλύτερη ακρίβεια πετυχαίνουμε. Η κανάτα ζυγίζεται και βλέπουμε αν η παροχή που θέλουμε είναι ίδια με αυτή της μέτρησης. Αν δεν είναι, τότε αυξομειώνουμε ανάλογα την παροχή από τα ροόμετρα και επαναλαμβάνουμε τη παραπάνω διαδικασία μέχρι να πάρουμε την επιθυμητή μέτρηση. Το διάλυμα που περιέχει η κανάτα μετά την ζύγισή του επανατοποθετείται στο δοχείο συλλογής ώστε να μην αλλάξει η ποσότητα του διαλύματος που ανακυκλοφορεί στην πειραματική διάταξη.

Τέλος πρέπει να ρυθμίσουμε την εξωτερική διαταραχή. Η εξωτερική διαταραχή εξαρτάται από δυο παράγοντες. Ο ένας είναι η παροχή της και ο άλλος ο χρόνος που θα παραμείνει ανοιχτή και κλειστή αντίστοιχα. Η παροχή της ρυθμίζεται με μια βάνα που είναι τοποθετημένη πριν από αυτή και ο καθορισμός της παροχής γίνεται με την μέθοδο της ζύγισης που περιγράφηκε παραπάνω. Στην περίπτωση μας η παροχή της εξωτερικής διαταραχής ορίστηκε στο 1 kg/min. Οι σειρές μετρήσεων για εύρος  $30 < Re < 80$  επαναλήφθηκαν δυο φορές για διαφορετικές διαταραχές. Η πρώτη για  $T_{off}=1$  sec και  $T_{on}=5$  sec και η δεύτερη για  $T_{off}=0,5$  sec και  $T_{on}=5,5$  sec. Με τους όρους  $T_{off}$  και  $T_{on}$  εννοούμε πόση χρόνο είναι κλειστή και πόσο ανοιχτή η διαταραχή. Η ρύθμιση των χρόνων  $T_{off}$  και  $T_{on}$  γίνεται με την βοήθεια μιας συσκευής ρύθμισης που κατασκευάστηκε ειδικά για αυτό το λόγο στο εργαστήριο από τον Α. Δαφερέρα. Αυτή η συσκευή έχει εύρος περιόδου  $0,1 < T < 20$  sec και εύρος συχνοτήτων  $0,05 < f < 10$  Hz.

Εφόσον έχουμε ρυθμίσει όλες τις παραμέτρους του πειράματος πρέπει να κάνουμε μια τελευταία ενέργεια πριν ξεκινήσουμε την πειραματική διαδικασία. Πάνω από την πειραματική διάταξη, σαν συνέχεια αυτής τοποθετήθηκαν λάμπες φθορισμού που εκπέμπουν υπεριώδες φως. Τοποθετήθηκαν δυο σειρές δεξιά και αριστερά του καναλιού ροής κάθε μια από τις οποίες έχει πέντε λάμπες έτσι ώστε να καλύπτουν όλο το εύρος του καναλιού. Το υπεριώδες φως που εκπέμπουν οι λάμπες σε συνδυασμό με την ουρανίνη που βρίσκεται διαλυμένη στο νερό μας δίνουν μεγαλύτερη ένταση φωτός με αποτέλεσμα να βλέπουμε καλύτερα τα κύματα τόσο οπτικά όσο και μετά την καταγραφή τους από την κάμερα. Ανάβουμε λοιπόν τις συστοιχίες των λαμπτήρων και τώρα είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε την πειραματική διαδικασία. Είναι πολύ σημαντικό μέσα στον χώρο των πειραμάτων να μην έχουμε μεταβολές στην ένταση του φωτός από εξωτερικούς παράγοντες για αυτό τον λόγο στα παράθυρα της αίθουσας των πειραμάτων

τοποθετήθηκαν μεμβράνες ώστε να μπαίνει όσο το δυνατόν λιγότερη ακτινοβολία από τον ήλιο.

Η κάμερα είναι συνδεδεμένη με τον υπολογιστή μέσω ειδικής κάρτας συλλογής δεδομένων που συνοδεύεται από κατάλληλο λογισμικό. Στην κάμερα για την συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων προσαρμόστηκε ευρυγώνιος φακός 1:18 25mm για την κάλυψη μεγαλύτερου οπτικού πεδίου. Του φακού της κάμερας προηγείται ειδικό γυάλινο φίλτρο που επιτρέπει να περάσει στην κάμερα φως με μήκος κύματος 535-580 nm(πράσινο-κίτρινο), όμοια δηλαδή με αυτό που εκπέμπει ο υμένας. Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν σαν λογισμικό είναι το Image Tool και το HL Image +++98. Αρχικά λοιπόν όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 3.5 πρέπει να κάνουμε βαθμονόμηση, δηλαδή να προσδιορίσουμε τους συντελεστές  $\alpha, \beta$  της σχέσης:  $I(x,y,t) = \alpha(x,y) * h(x,y,t) + \beta(x,y)$ , όπου  $h(x,y,t)$  το τοπικό πάχος υμένα και  $I(x,y,t)$  η ένταση του φωτός που εκπέμπεται από τον φθορίζοντα υμένα. Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει ο υμένας να είναι ευσταθής άρα ο αριθμός  $Re$  να είναι κάτω από το  $Re_{cr}=20$ . Έτσι χαμηλώνουμε αρκετά την παροχή ώστε να επιτύχουμε ως πούμε  $Re=19$  και ταυτόχρονα κλείνουμε την εξωτερική διαταραχή γιατί η βαθμονόμηση γίνεται σε ευσταθή υμένα. Με τη βοήθεια του προγράμματος HL Image +++98 παίρνουμε μια φωτογραφία και την αποθηκεύουμε. Ανοίγουμε την φωτογραφία αυτή με το Image Tool και μέσω της επιλογής που μας δίνει για τη δημιουργία του line profile μιας φωτογραφίας βλέπουμε ένα διάγραμμα που ουσιαστικά δίνει σε κάθε pixel της φωτογραφίας μια διακριτή τιμή από 0-255 ,όπου 0=μαύρο pixel και όπου 255=άσπρο pixel. Ταυτόχρονα δείχνει τα όρια του πιο λευκού pixel με τιμή 255(White level) και του πιο μαύρου pixel με τιμή 0(Black level). Μια καλή φωτογραφία είναι μέσα στα όρια του Black- White level και όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτά(σχήμα 3.19). Αν η φωτογραφία που πήραμε δεν τηρεί τις παραπάνω προδιαγραφές τότε πάμε πίσω στο HL Image +++98 και αλλάζουμε τις τιμές των Black- White level. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία που μας δίνει το line profile της φωτογραφίας και μόλις βρεθούμε στα αποδεκτά όρια γυρίζουμε στο HL Image +++98. Εκεί θα προχωρήσουμε στη λήψη 20 φωτογραφιών με χρονική απόσταση μεταξύ τους 0,1 sec τις οποίες και θα αποθηκεύσουμε σε προκαθορισμένο από εμάς φάκελο και με όνομα που θα δείχνει τον αριθμό  $Re$ , την κλίση στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και το είδος του τοιχώματος που χρησιμοποιήθηκε (π.χ επίπεδο). Πριν προχωρήσουμε στη λήψη των φωτογραφιών θα πρέπει να ενεργοποιήσουμε από τα options του προγράμματος το φίλτρο των 50 Hz. Αφού αποθηκεύσουμε τις φωτογραφίες κατεβάζουμε την παροχή ώστε να

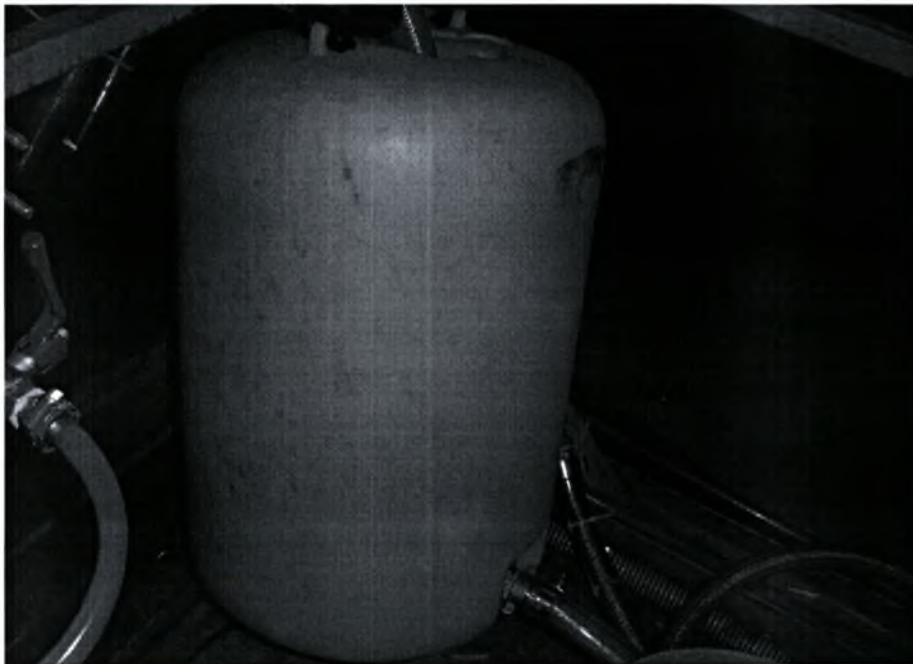
πάρουμε π.χ αριθμό  $Re=18$  και επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία χωρίς όμως να αλλάξουμε τα Black- White level μέχρι το τέλος της βαθμονόμησης. Κρίνεται σκόπιμο να πάρουμε μετρήσεις σε τουλάχιστον πέντε αριθμούς  $Re$  κάτω από τον  $Re_{cr}$  ώστε να προσεγγίσουμε τους συντελεστές  $\alpha, \beta$  με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έχοντας τελειώσει την διαδικασία της βαθμονόμησης, στο φάκελο που αποθηκεύσαμε τις φωτογραφίες της βαθμονόμησης θα πρέπει να έχουμε τόσες φωτογραφίες όσοι και οι αριθμοί  $Re$  επί τον αριθμό των φωτογραφιών που πήραμε για κάθε  $Re$  (π.χ 5 αριθμοί  $Re*20$  φωτογραφίες για κάθε αριθμό=100 φωτογραφίες). Έπειτα ανοίγουμε την εξωτερική διαταραχή, στην οποία είχαμε ρυθμίσει την απαιτούμενη για τα πειράματα συχνότητα διαταραχής όμως την κλείσαμε για να κάνουμε την βαθμονόμηση προχωράμε στα κυρίως πειράματα.

Με ενεργή πλέον την διαταραχή βλέπουμε στον υμένα να δημιουργούνται κυματισμοί. Ανεβάζουμε την παροχή από τα ροόμετρα και με τη μέθοδο της ζύγισης που περιγράφεται παραπάνω πετυχαίνουμε την παροχή που μας δίνει τον επιθυμητό αριθμό  $Re$ . Στην συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων ο  $Re$  είχε εύρος τιμών  $30 < Re < 80$ . Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία που ακολουθήσαμε και στη βαθμονόμηση με τη χρήση των προγραμμάτων Image Tool και το HL Image ++98, όμως εδώ τα Black- White level αλλάζουν σε κάθε αλλαγή του αριθμού  $Re$ . Επίσης λαμβάνονται 200 φωτογραφίες σε κάθε αριθμό  $Re$  με την ίδια χρονική απόσταση μεταξύ τους 0,1 sec. Το τελευταίο που πρέπει να αλλαχτεί πριν γίνει η λήψη των φωτογραφιών είναι το όνομα των φωτογραφιών ώστε να δηλώνει τη διαταραχή που χρησιμοποιούμε κάθε φορά (στην περίπτωση μας η πρώτη διαταραχή  $T_{off}=1$  sec και  $T_{on}=5$  sec και η δεύτερη για  $T_{off}=0,5$  sec και  $T_{on}=5,5$  sec). Το πείραμα λήγει όταν επαναλάβουμε την παραπάνω διαδικασία και λάβουμε τόσες φωτογραφίες όσοι και οι αριθμοί  $Re*200$  φωτογραφίες στον κάθε αριθμό (στην περίπτωση μας  $9*200=1800$  φωτογραφίες).

Για τη σωστή λειτουργία του καναλιού και όλων των περιφερειακών μερών του (αντλίες, ροόμετρα κτλ.) μετά το τέλος κάθε σειράς πειραμάτων η πειραματική διάταξη θα πρέπει να καθαρίζεται με καθαρό νερό εξωτερικής παροχής απαλλαγμένο από χρωστική ουσία. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ένα δοχείο καθαρισμού (σχήμα 3.20) το οποίο έχει σαν είσοδο την έξοδο του καναλιού και ουσιαστικά δέχεται το καθαρό νερό που περνάει από το κανάλι ροής και το διοχετεύει κατευθείαν στο φρεάτιο, παρακάμπτοντας έτσι το δοχείο συλλογής όπου έχουμε μαζέψει όλο το διάλυμα (χρωστικής και νερού) και το επαναχρησιμοποιούμε την επόμενη που θα πραγματοποιήσουμε πείραμα.



**Σχήμα 3.19:** Ποιοτική απεικόνιση ενός διασπασμένου κύματος εντός των ορίων Black-White Level



**Σχήμα 3.20:** Δοχείο καθορισμού

Στη συνέχεια και αφού έχουμε λάβει τις φωτογραφίες περνάμε στην επεξεργασία των δεδομένων. Κατά αρχάς πρέπει να κάνουμε ψηφιακό φιλτράρισμα των φωτογραφιών ώστε να εξαλείψουμε κάποιους ανεπιθύμητους παράγοντες που μπορούν να αλλάξουν την ένταση του φωτός σε κάποιο σημείο της φωτογραφίας (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). Το φιλτράρισμα γίνεται με την βοήθεια του προγράμματος Image Tool και φίλτρων όπως Gaussian 7x7 ή Gaussian 15x15 (στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε Gaussian 7x7). Λόγω του μεγάλου αριθμού των φωτογραφιών το παραπάνω πρόγραμμα τρέχει μέσω ενός άλλου που είναι σε Visual Basic και φιλτράρει τα δεδομένα αυτόματα. Οι φιλτραρισμένες φωτογραφίες της βαθμονόμησης περνιούνται στο πρόγραμμα MatLab όπου εκεί το κάθε pixel της εικόνας μετατρέπεται σε ένα νούμερο από 0-255 ανάλογα με την ένταση του φωτός  $I(x,y,t)$  σε mVolts. Με την χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και της εντολής polyfit του MatLab προσδιορίζονται οι συντελεστές  $\alpha, \beta$  της σχέσης 3.1:  $I(x,y,t) = \alpha(x,y) * h(x,y,t) + \beta(x,y)$  σε πίνακες  $\alpha(576,768)$ ,  $\beta(576,768)$  για την ευσταθή περιοχή. Συνεπώς για κάθε  $I(x,y,t)$  εκτός ευσταθούς περιοχής μπορούμε να υπολογίσουμε το αντίστοιχο πάχος υμένα  $h(x,y,t)$  από τη σχέση 3.1. Έπειτα γνωρίζοντας πλέον τα  $\alpha, \beta$  εισάγουμε στο MatLab τις φωτογραφίες για όλους τους αριθμούς Re καθώς και τα αρχεία που μας έδωσε η επεξεργασία των δεδομένων της βαθμονόμησης και με κώδικες που έχουν γραφτεί σε Fortran, το κάθε pixel της εικόνας μετατρέπεται σε ένα νούμερο από 0-255 ανάλογα με την ένταση του φωτός  $I(x,y)$  σε mVolts. Έτσι έχουμε την δημιουργία πινάκων 576x768 για το  $I(x,y,t)$  που με τη σχέση 3.1 με μετατρέπονται σε πίνακες 576x768 για το  $h(x,y,t)$ .

Από τις τιμές του πίνακα που δίνει το πάχος του υμένα σε κάθε σημείο μπορούμε να πάρουμε πληθώρα άλλων πληροφοριών. Η απεικόνιση του πάχους του υμένα σε διάφορα σημεία κατά μήκος του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου ( $h(x_0, y_0, t)$ ), μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη βασική αρμονική της συχνότητας ταλάντωσης των σημείων. Επίσης, μπορεί να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με το μέσο ύψος των κυμάτων και το μέσο πάχος υμένα. Συγχρόνως, μπορούμε να έχουμε την χωρική κατανομή της ελεύθερης επιφάνειας, είτε στη κατεύθυνση της ροής είτε εγκάρσια ( $h(x, y_0, t)$  ή  $h(x_0, y, t)$ ). Η απεικόνιση των κατανομών του πάχους του υμένα σε διαδοχικές χρονικές στιγμές έχει μεγάλη πρακτική αξία, γιατί μας δίνει σημαντικές πληροφορίες για το μήκος του κύματος και την ταχύτητα του και για τις εξελίξεις αυτών

των μεγεθών κατάντη της ροής. Ακόμα, μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για το είδος των κυμάτων και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, κυρίως μέσω της μορφής τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα πειραματικά αποτελέσματα ροής λεπτού υγρού υμένα στο κανάλι ροής. Διενεργήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων, όπου σε όλα χρησιμοποιήθηκε καθαρό νερό στο οποίο διαλύσαμε χρωστική ουσία ουρανίνη (Sodium Salt of Fluorescein- $C_{20}H_{10}O_5Na_2$ ) σε ποσότητα 250ppm). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις περιοχές του υμένα. Η κλίση του καναλιού διατηρήθηκε σταθερή στις 3,16 μοίρες. Η συχνότητα διαταραχής ( $f$ ) μεταβαλλόταν σε δύο τιμές, ενώ η παροχή της παρέμενε σταθερή για όλα τα πειράματα. Τα πειράματα που διενεργήθηκαν είναι τα εξής:

- Στην πρώτη σειρά πειραμάτων οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 33 cm έως 59 cm από το σημείο έναρξης της ροής στο κεκλιμένο επίπεδο, ενώ η συχνότητα διαταραχής μεταβαλλόταν από 0,167Hz ( $T_{off}=1$  sec και  $T_{on}=5$  sec) σε 0,5Hz ( $T_{off}=1$  sec και  $T_{on}=1$  sec).
- Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 133 cm έως 159 cm από το σημείο έναρξης της ροής στο κεκλιμένο επίπεδο, ενώ η συχνότητα διαταραχής μεταβαλλόταν από 0,167Hz ( $T_{off}=1$  sec και  $T_{on}=5$  sec) σε 0,5Hz ( $T_{off}=1$  sec και  $T_{on}=1$  sec).
- Στην τρίτη και τελευταία σειρά πειραμάτων οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 233 cm έως 259 cm από το σημείο έναρξης της ροής στο κεκλιμένο επίπεδο ενώ η συχνότητα διαταραχής μεταβαλλόταν από 0,167Hz ( $T_{off}=1$  sec και  $T_{on}=5$  sec) σε 0,5Hz ( $T_{off}=1$  sec και  $T_{on}=1$  sec).

Στόχος των πειραμάτων ήταν η παρατήρηση των μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής του υγρού υμένα και η παρατήρηση κάποιων βασικών χαρακτηριστικών τους όπως το ύψος, η ταχύτητα ή το μήκος κύματος. Οι πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν σε αριθμούς  $Re$  30, 35 και 40.

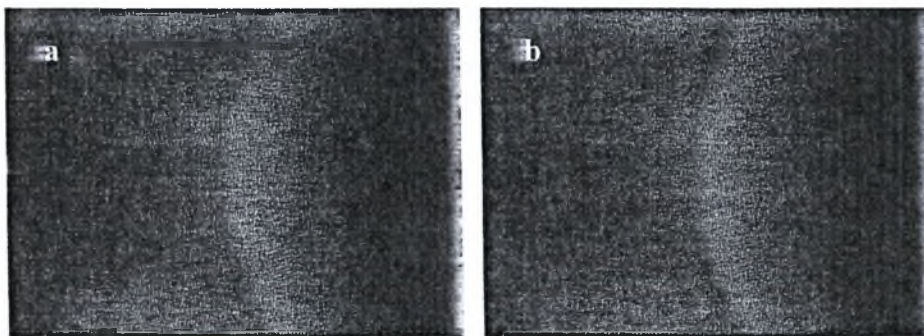
### 4.1 Πρωτογενή Δεδομένα

Από 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 4.1). Τα πειραματικά αποτελέσματα που συλλέξαμε μας επιτρέπουν να εξαγάγουμε μόνο ποιοτικά συμπεράσματα, συνεπώς είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία τους.



**Σχήμα 4.1:** Πρωτογενή δεδομένα της μεθόδου φθορισμού

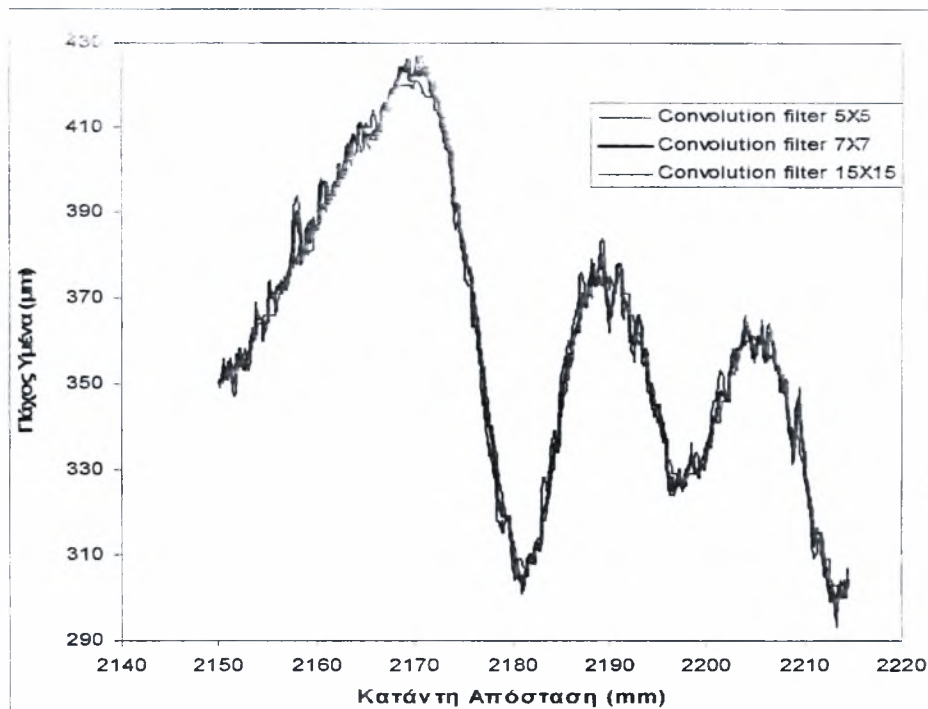
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο το πρώτο στάδιο για την επεξεργασία των εικόνων αποτελεί το ψηφιακό φιλτράρισμα. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν ανεπιθύμητοι παράγοντες. Για να εξομαλύνουμε τις μετρήσεις μας, δηλαδή να αφαιρέσουμε τον εξωτερικό θόρυβο αλλά και για να αποφύγουμε πιθανές ατέλειες χωρίς να αλλοιώσουμε τη δομή των κυμάτων, χρησιμοποιήσαμε στο σύνολο των εικόνων το ψηφιακό φίλτρο Gaussian 7x7. Ένα παράδειγμα της επιβολής ψηφιακού φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 4.2.



**Σχήμα 4.2:** Πρωτογενή δεδομένα *a)* χωρίς χρήση ψηφιακού φίλτρου και *b)* με χρήση του ψηφιακού φίλτρου Gaussian 7x7

Στο παρακάτω σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων φίλτρων. Η επιλογή του ψηφιακού φίλτρου Gaussian 7x7 κρίθηκε η πλέον κατάλληλη καθώς δεν απαλείφει σημαντικά δεδομένα, όπως τα μικρά μήκους κύματα.

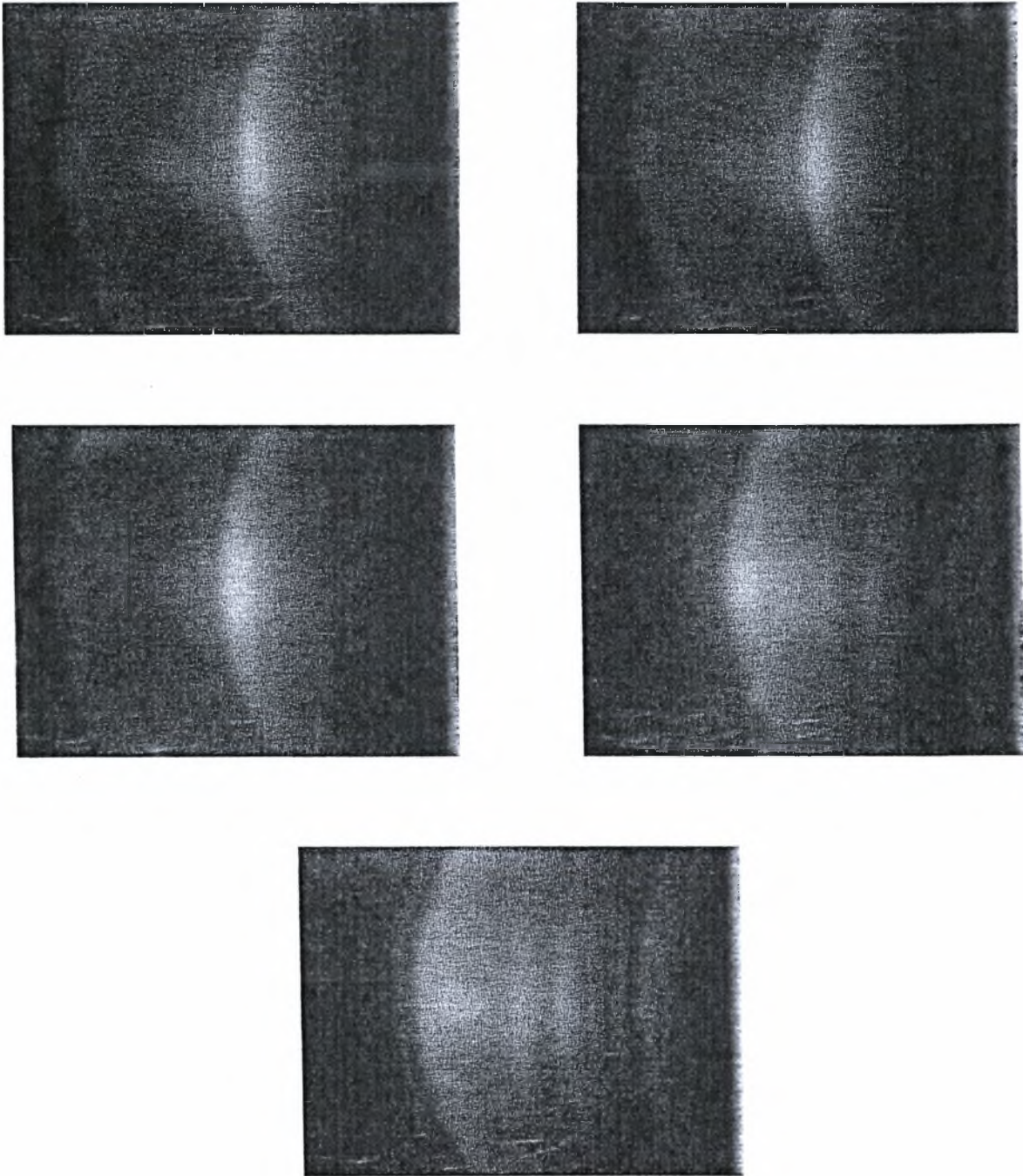




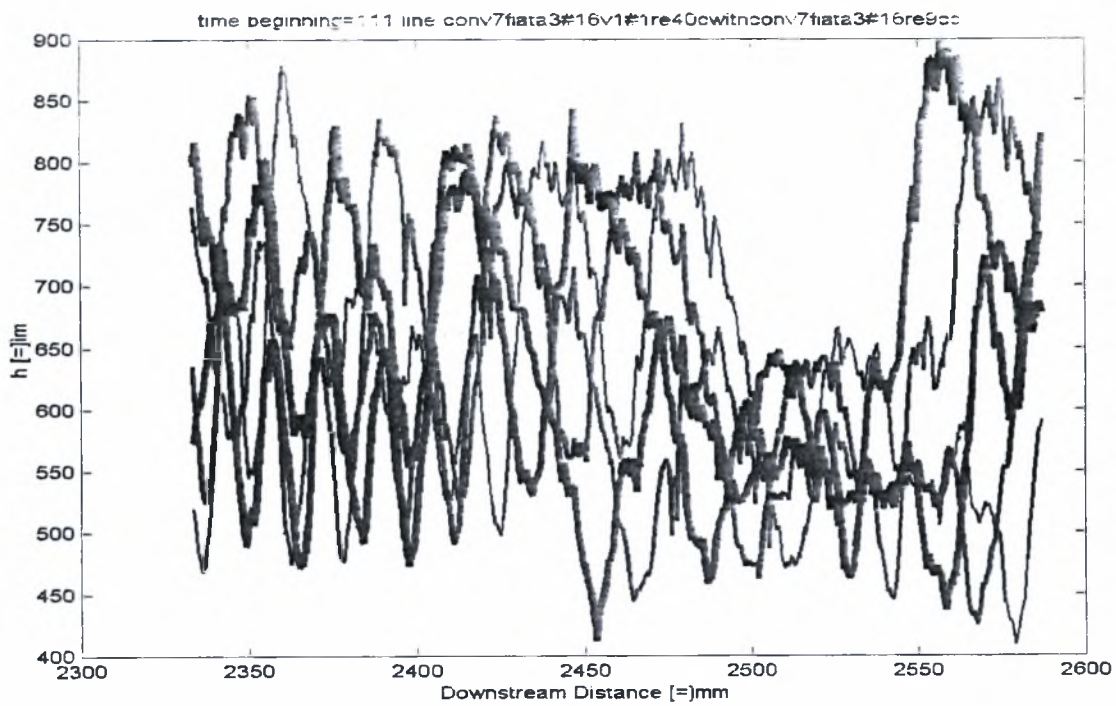
**Σχήμα 4.3: Σύγκριση μεταξύ διαφόρων φίλτρων**

Μετά το ψηφιακό φιλτράρισμα ακολουθεί επεξεργασία των φωτογραφιών από το MatLab, όπου κάθε σημείο(pixel) της φωτογραφίας αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος τιμών που δείχνει την ένταση του φωτός στο αντίστοιχο pixel όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3. Από την επεξεργασία του MatLab προκύπτουν πολλά αποτελέσματα, η περαιτέρω επεξεργασία των οποίων μας δίνει πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για τα κύματα που μελετάμε. Ακολουθούν τα διαγράμματα των time profiles και line profiles.

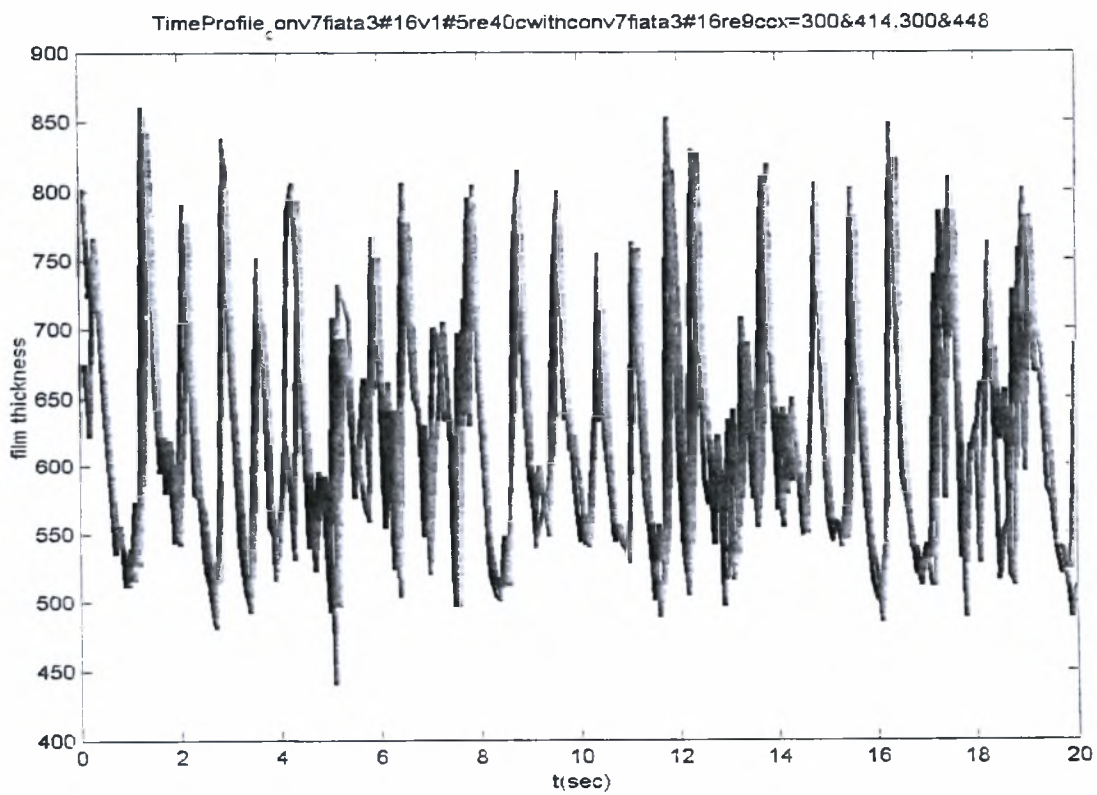
Τα time profiles μας δείχνουν την εξέλιξη του ύψους του κύματος σε σχέση με τον χρόνο σχήμα 4.5, ενώ τα line profiles μας δείχνουν το προφίλ του ύψους του κύματος σε διαδοχικές χρονικές στιγμές κατάντη της απόστασης σχήμα 4.6 .



*Σχήμα 4.4: Πρωταρχικά δεδομένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές*



**Σχήμα 4.5:** Προφίλ υμένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές



**Σχήμα 4.6:** Χρονική μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας για δύο σταθερά σημεία

## 4.2 Ανάλυση Πειραμάτων

- Πρώτη σειρά πειραμάτων

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων, σε απόσταση 33 cm έως 59 cm από το σημείο έναρξης της ροής (θέση a) επιβλήθηκαν δύο συχνότητες διαταραχών  $f_1=0,167$  Hz ( $T_{on}=5sec$   $T_{off}=1sec$ ) και  $f_2=0,5$  Hz ( $T_{on}=1sec$   $T_{off}=1sec$ ) για τους εξής αριθμούς Reynolds 30, 35, 40,50.

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

Πλάτος Καναλιού W=0.47m			Θέση Κάμερας a=0.33m				Μήκος Πεδίου 260mm				
α/α	Q(kg/min)	Re	Frame name	White Level	Black Level	Number of Frames	Κλίση	D(m)	Time Delay(ms)	$h_N$ (mm)	Σχόλια
Βαθμονόμηση											
1	0.403	14.29	fiata3#16re14a	418180	222350	20	3.16	0.33	100	429.59	
2	0.506	17.94	fiata3#16re18a	436240	231910	20	3.16	0.33	100	463.45	
3	0.487	17.27	fiata3#16re17a	436240	231910	20	3.16	0.33	100	457.58	
4	0.451	15.99	fiata3#16re16a	428500	231910	20	3.16	0.33	100	446.01	
5	0.37	13.12	fiata3#16re13a	418180	222350	20	3.16	0.33	100	417.53	
6	0.325	11.52	fiata3#16re12a	418180	222350	20	3.16	0.33	100	399.67	
Διαταραχή $T_{on}=5s$ $T_{off}=1s$											
7	0.853	30.25	fiata3#16v1#5re30a	387220	251030	200	3.16	0.33	100	551.57	
8	0.985	34.93	fiata3#16v1#5re35a	379480	254615	200	3.16	0.33	100	578.67	
9	1.12	39.72	fiata3#16v1#5re40a	394960	253420	200	3.16	0.33	100	603.98	
10	1.41	50	fiata3#16v1#5re50a	394960	257005	200	3.16	0.33	100	652.17	
Διαταραχή $T_{on}=1s$ $T_{off}=1s$											
11	0.853	30.6	fiata3#16v1#1re30b	374320	245055	200	3.16	0.33	100	553.72	
12	0.995	35.28	fiata3#16v1#1re35b	387220	249835	200	3.16	0.33	100	580.62	
13	1.12	39.72	fiata3#16v1#1re40b	374320	239080	200	3.16	0.33	100	604.34	
14	1.403	49.75	fiata3#16v1#1re50b	382060	239080	200	3.16	0.33	100	651.09	

**Πίνακας 1:** Στοιχεία πρώτης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 330 cm έως 590 cm από την έναρξη της ροής.

- Δεύτερη σειρά πειραμάτων

Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων, η οποία πραγματοποιήθηκε σε απόσταση 133 cm έως 159 cm από το σημείο έναρξης της ροής (θέση b) επιβλήθηκαν επίσης οι δύο παραπάνω συχνότητες διαταραχών. Η διαταραχή  $f_1=0,167$  Hz ( $T_{on}=5sec$   $T_{off}=1sec$ ) όπως και η διαταραχή  $f_2=0,5$  Hz ( $T_{on}=5sec$   $T_{off}=1sec$ ) επιβλήθηκαν στους αριθμούς Reynolds: 30, 35, 40. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των πειραματικών μετρήσεων σε αυτή την θέση:

Πλάτος Καναλιού W=0.47m				Θέση Κάμερας b=1.33m				Μήκος Πεδίου 260mm			
α/α	Q(kg/min)	Re	Frame name	White Level	Black Level	Number of Frames	Κλίση	D(m)	Time Delay(ms)	h <sub>N</sub> (mm)	Σχόλια
Βαθμονόμηση											
1	0.49	17.38	fiata3#16re17b	394960	248335	20	3.16	1.33	100	458.51	
2	0.464	16.45	fiata3#16re16b	394960	248640	20	3.16	1.33	100	450.51	
3	0.437	15.5	fiata3#16re15b	394960	246250	20	3.16	1.33	100	441.35	
4	0.397	14.08	fiata3#16re14b	394960	245055	20	3.16	1.33	100	427.45	
5	0.333	11.81	fiata3#16re12b	394960	241470	20	3.16	1.33	100	403.12	
6	0.284	10.07	fiata3#16re10b	394960	240275	20	3.16	1.33	100	382.29	
Διαταραχή Ton=5s Toff=1s											
7	0.848	30.07	fiata3#16v1#5re30b	402700	253420	200	3.16	1.33	100	550.49	
8	0.995	35.28	fiata3#16v1#5re35b	402700	261785	200	3.16	1.33	100	580.62	
9	1.114	39.5	fiata3#16v1#5re40b	389800	262980	200	3.16	1.33	100	602.9	
Διαταραχή Ton=1s Toff=1s											
10	0.852	30.21	fiata3#16v1#1re30b	400120	249835	200	3.16	1.33	100	551.36	
11	0.98	34.75	fiata3#16v1#1re35b	420760	252225	200	3.16	1.33	100	577.69	
12	1.14	40.43	fiata3#16v1#1re40b	420760	252225	200	3.16	1.33	100	607.56	

**Πίνακας 2:** Στοιχεία δεύτερης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 1330 cm έως 1590 cm από την έναρξη της ροής.

- Τρίτη σειρά πειραμάτων

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

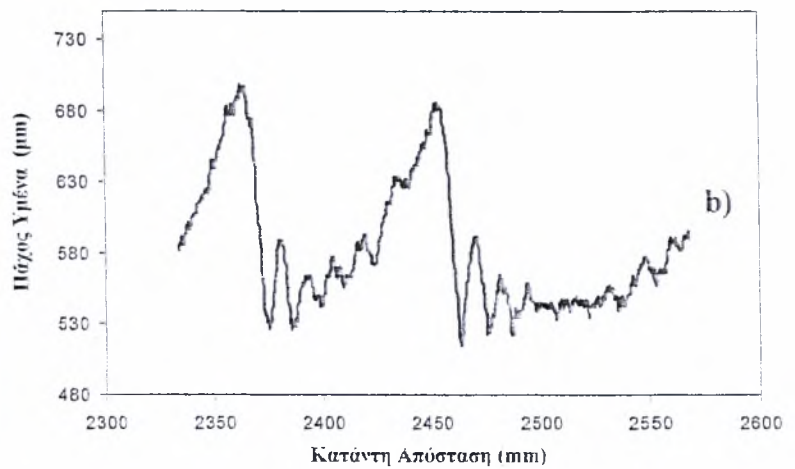
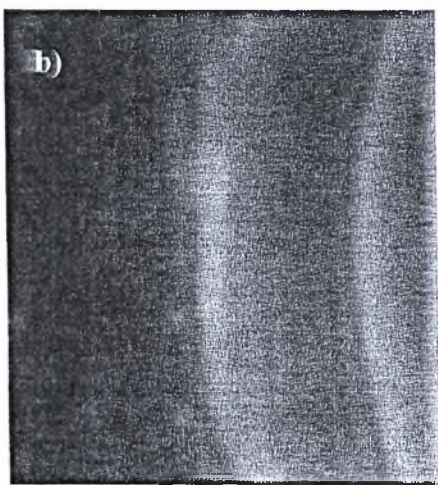
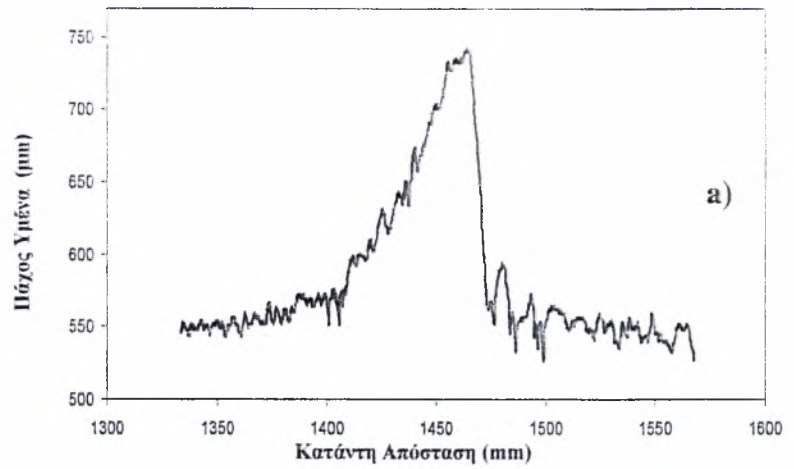
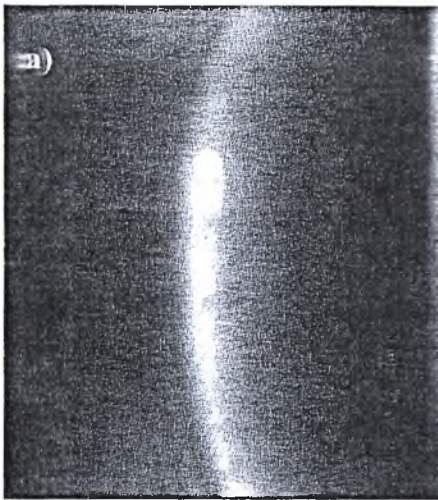
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των πειραματικών μετρήσεων σε αυτή την θέση:

Πλάτος Καναλιού W=0.47m				Θέση Κάμερας c=2.33m				Μήκος Πεδίου 260mm			
α/α	Q(kg/min)	Re	Frame name	White Level	Black Level	Number of Frames	Κλίση	D(m)	Time Delay(ms)	h <sub>N</sub> (mm)	Σχόλια
Βαθμονόμηση											
1	0.46	16.31	fiata3#16re16c	361420	234300	20	3.16	2.33	100	448.96	
2	0.43	15.25	fiata3#16re15c	361420	231910	20	3.16	2.33	100	438.98	
3	0.39	13.83	fiata3#16re14c	361420	229520	20	3.16	2.33	100	424.92	
4	0.355	12.59	fiata3#16re13c	361420	228325	20	3.16	2.33	100	411.81	
5	0.29	10.28	fiata3#16re10c	361420	224740	20	3.16	2.33	100	384.96	
6	0.265	9.4	fiata3#16re9c	361420	223545	20	3.16	2.33	100	373.57	
Διαταραχή Ton=5s Toff=1s											
7	0.86	30.5	fiata3#16v1#5re30c	361420	237885	200	3.16	2.33	100	553.08	
8	1	35.46	fiata3#16v1#5re35c	366580	241470	200	3.16	2.33	100	581.59	
9	1.14	40.43	fiata3#16v1#5re40c	366580	242665	200	3.16	2.33	100	607.56	
Διαταραχή Ton=1s Toff=1s											
10	0.85	30.14	fiata3#16v1#1re30b	364000	243860	200	3.16	2.33	100	550.93	
11	0.99	35.11	fiata3#16v1#1re35b	364000	240275	200	3.16	2.33	100	579.65	
12	1.145	40.6	fiata3#16v1#1re40b	361420	237885	200	3.16	2.33	100	608.45	

**Πίνακας 3:** Στοιχεία τρίτης σειράς πειραμάτων σε απόσταση 2330 cm έως 2590 cm από την έναρξη της ροής.

#### 4.2.1 Διαχωρισμός δισδιάστατων από τα τρισδιάστατα κύματα

Αρχικά όμως θα πρέπει να δούμε ποια από τα αποτελέσματα είναι χρήσιμα για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται μόνο με την μελέτη Δισδιάστατων(2-D Waves) κυμάτων και όχι με Τρισδιάστατα κύματα(3-D Waves) για αυτό πρέπει πρώτα να γίνει ο διαχωρισμός των Δισδιάστατων από τα Τρισδιάστατα κύματα. Ο διαχωρισμός γίνεται οπτικά, καθώς όπως φαίνεται παρακάτω ( σχήμα 4.7 a,b) είναι εύκολο να διαχωρίσουμε τα κύματα σε 2-D και 3-D. Στο σχήμα 4.1 a) βλέπουμε το μέτωπο του κύματος να εξελίσσεται ομαλά. Φαίνονται καθαρά πριν το μοναχικό κύμα τα εμπρόσθια τριχοειδή (front ripples). Η εξέλιξη της δομής αυτής είναι προβλέψιμη και από την επεξεργασία εικόνων σαν και αυτής προκύπτουν διαγράμματα όπως time profiles και line profiles. Αυτή η δομή ονομάζεται Δισδιάστατη (2-D). Αντίθετα στο σχήμα 4.7 b) βλέπουμε μια δομή η εξέλιξη της οποίας δεν μπορεί να προβλεφθεί, μιας και δεν υπάρχει καμία αρμονικότητα. Παρατηρούμε στο μέτωπο των κυμάτων τις ρυτιδώσεις που εμφανίζονται, όπως επίσης και κάποια βαθουλώματα σε διάφορα σημεία της εικόνας. Επίσης εδώ δεν έχουμε τριχοειδή να ακολουθούν το κυρίως κύμα. Αυτή η δομή ονομάζεται Τρισδιάστατη (3-D) και δεν θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία.



**Σχήμα 4.7:** Διαχωρισμός δισδιάστατων-τρισδιάστατων δομών  $Re\ 35$  - διαταραχή  $1\ Hz$  a) δισδιάστατη δομή (θέση b), b) τρισδιάστατη δομή (θέση c)

Όπως παρατηρούμε στο Πίνακα 4 τα 3-D κύματα εμφανίζονται στη θέση b για  $Re=40$  και  $f=0.5\ Hz$ , στη θέση c για  $Re=35$  και  $Re=40$  με  $f=0.5\ Hz$ , στη θέση b για  $Re=40$  και  $f=0.167\ Hz$  και τέλος στη θέση c για  $Re=35$  και  $Re=40$  με  $f=0.167\ Hz$ .

Θέση (m)	Διαταραχή	Re	Μορφή Κυμάτων
a=0.33	on:1sec-off:1sec	30	2-D
a=0.33	on:1sec-off:1sec	35	2-D
a=0.33	on:1sec-off:1sec	40	2-D
b=1.33	on:1sec-off:1sec	30	2-D
b=1.33	on:1sec-off:1sec	35	2-D
b=1.33	on:1sec-off:1sec	40	3-D
c=2.33	on:1sec-off:1sec	30	2-D
c=2.33	on:1sec-off:1sec	35	3-D
c=2.33	on:1sec-off:1sec	40	3-D
a=0.33	on:5sec-off:1sec	30	2-D
a=0.33	on:5sec-off:1sec	35	2-D
a=0.33	on:5sec-off:1sec	40	2-D
b=1.33	on:5sec-off:1sec	30	2-D
b=1.33	on:5sec-off:1sec	35	2-D
b=1.33	on:5sec-off:1sec	40	3-D
c=2.33	on:5sec-off:1sec	30	2-D
c=2.33	on:5sec-off:1sec	35	3-D
c=2.33	on:5sec-off:1sec	40	3-D

**Πίνακα 4 :** Διαχωρισμός 2-D από 3-D για τα διάφορα Re σε κάθε θέση και για τις δύο διαταραχές

#### 4.2.2 Μελέτη χρονοσειρών

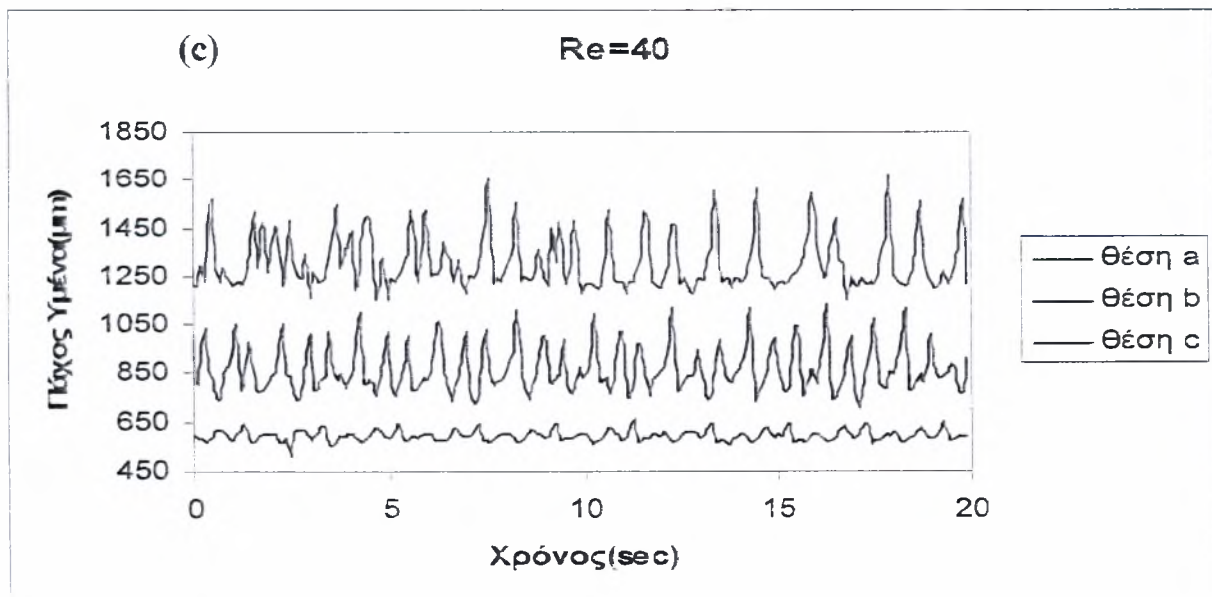
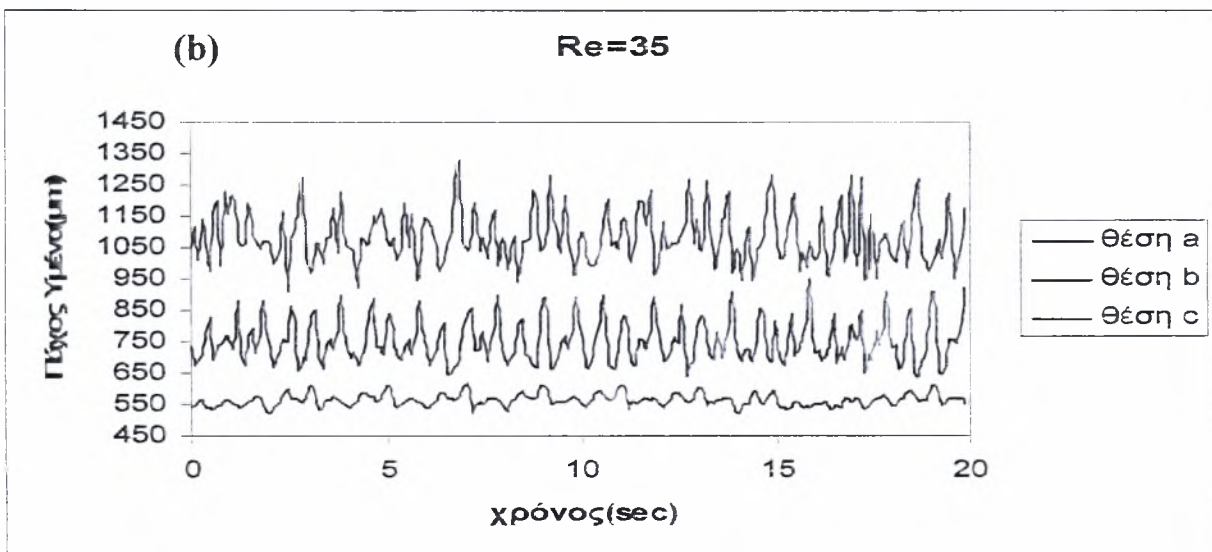
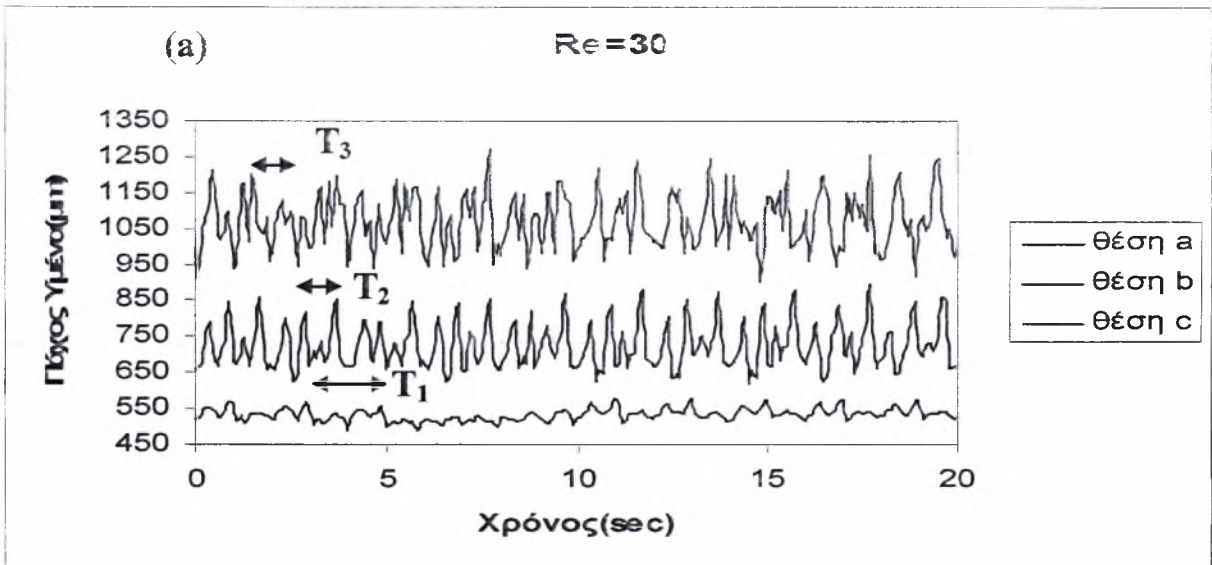
Από τη μελέτη των παρακάτω χρονοσειρών προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Γνωρίζουμε ότι για  $f=0,5$  Hz η περίοδος είναι  $T=2$  sec, άρα σε 20sec περιμένουμε 10 κορυφές. Για  $Re=30$  και  $f=0,5$  Hz (σχήμα 4.8 a)) στη θέση a) παρατηρούμε ότι η περίοδος  $T_1$  είναι ίδια με την επιβαλλόμενη περίοδο  $T$ , δηλαδή  $T_1 = T = 2$  sec. Στις θέσεις b) , c) όμως η περίοδοι  $T_2=0,7$  και  $T_3=0,5$  είναι μικρότερες της αρχικής γεγονός που οφείλεται στη δημιουργία παρασιτικών κυμάτων ενδιάμεσα των μοναχικών κυμάτων. Επίσης στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρούμε στη θέση a) 8 κορυφές αντί για 10 γεγονός που οφείλεται στην μη καλή λειτουργία της ηλεκτροβάνας.

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγουμε και από τη μελέτη του σχήματος 4.8 b) που αναφέρεται σε αριθμό  $Re=35$  και  $f=0,5$  Hz.

Κατά τη μελέτη του σχήματος 4.8 c) παρατηρούμε ότι η ηλεκτροβάνα άνοιξε κανονικά δίνοντας μας στη θέση a) 10 κύματα. Η διάφορα σε αυτό το σχήμα, που αναφέρεται σε αριθμό  $Re=40$  και  $f=0,5$  Hz είναι ότι ενώ η περίοδος  $T_2$  στη θέση b) είναι περίπου ίση με αυτή στην αντίστοιχη θέση για  $Re=30$ ,  $Re=35$ , η περίοδος  $T_2=0,8$  στη θέση c) γίνεται ίση με την  $T_2$  στη θέση b).





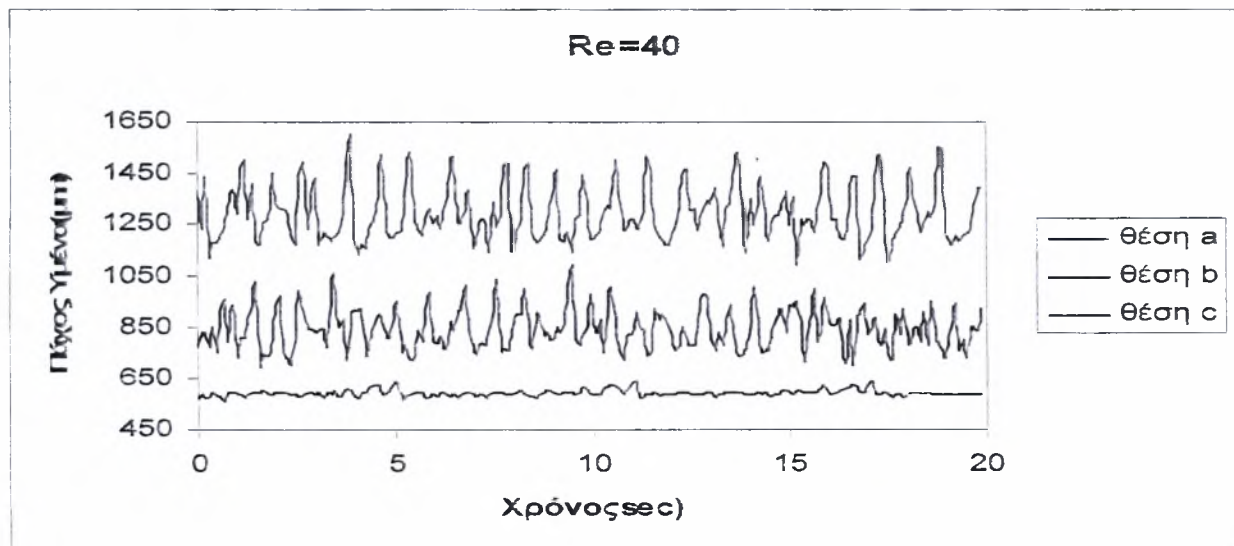
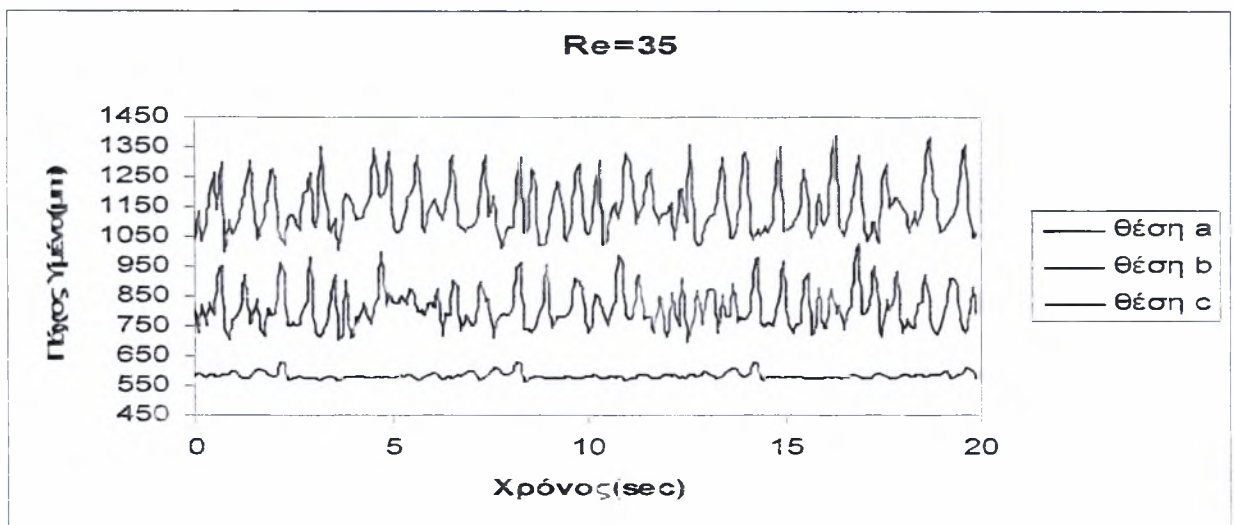
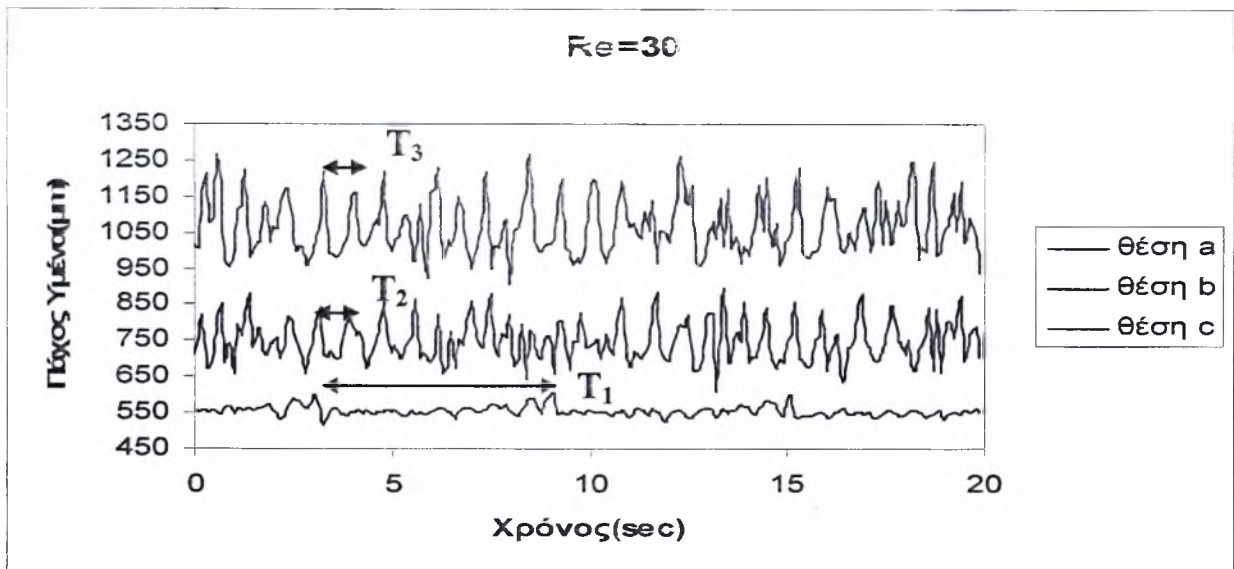
**Σχήμα 4.8:** Χρονοσειρές σε απόσταση  $a=470$  mm,  $b=1470$  mm και  $c=2470$  mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη δισταραχή συχνότητας  $f = 0,5$  Hz ( $T_{or}=1sec$   $T_{or}=1sec$ ) για αριθμούς Reynolds: **a)**  $Re=30$ , **b)**  $Re=35$ , **c)**  $Re=40$

Από τη μελέτη των παρακάτω χρονοσειρών προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Γνωρίζουμε ότι για  $f=0,167$  Hz η περίοδος είναι  $T=6$  sec, άρα σε 20sec περιμένουμε 3 κορυφές. Για  $Re=30$  και  $f=0,167$  Hz(σχήμα 4.9 a)) στη θέση a) παρατηρούμε ότι η περίοδος  $T_1$  είναι ίδια με την επιβαλλόμενη περίοδο  $T$ , δηλαδή  $T_1= T=6$  sec. Στις θέσεις b), c) όμως η περίοδοι  $T_2=0,8$  sec και  $T_3=0,7$  sec είναι μικρότερες της αρχικής γεγονός που οφείλεται στη δημιουργία παρασιτικών κυμάτων ενδιάμεσα των μοναχικών κυμάτων. Επίσης στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρούμε στη θέση a) 3 κορυφές κάτι που μας δείχνει ότι ηλεκτροβάνα ανταποκρίθηκε κανονικά στη συγκεκριμένη συχνότητα.

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγουμε και από τη μελέτη του σχήματος 4.9 b) που αναφέρεται σε αριθμό  $Re=35$  και  $f=0,167$  Hz όπως επίσης και από το σχήμα 4.9 c) αναφέρεται σε αριθμό  $Re=40$  και  $f=0,167$  Hz, όπου εξακολουθούμε να βλέπουμε  $T_2=0,8$  sec και  $T_3=0,7$  sec με το  $T_1= T=6$  sec.

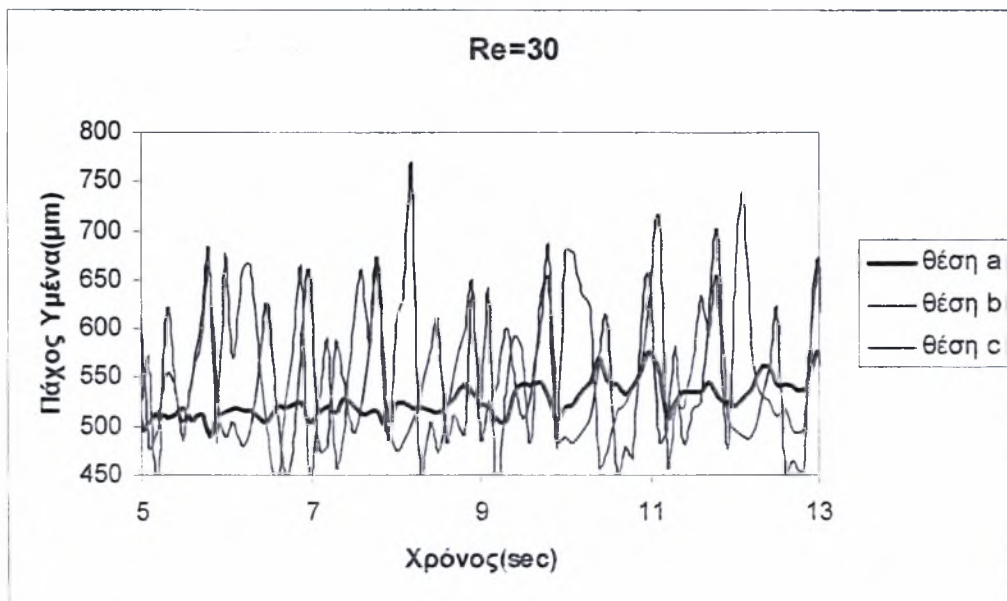
Κατά τη μελέτη του σχήματος 4.9 c) παρατηρούμε ότι η ηλεκτροβάνα άνοιξε κανονικά δίνοντας μας στη θέση a) 10 κύματα. Η διάφορα σε αυτό το σχήμα, που αναφέρεται σε αριθμό  $Re=40$  και  $f=0,5$  Hz είναι ότι ενώ η περίοδος  $T_2$  στη θέση b) είναι περίπου ίση με αυτή στην αντίστοιχη θέση για  $Re=30$ ,  $Re=35$ , η περίοδος  $T_3=0,8$  στη θέση c) γίνεται ίση με την  $T_2$  στη θέση b).



**Σχήμα 4.9:** Χρονοσειρές σε απόσταση  $a=470$  mm,  $b=1470$  mm και  $c=2470$  mm από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας  $f = 0,167$  Hz ( $T_{or}=5$ sec  $T_{or}=1$ sec) για αριθμούς Reynolds: **a)**  $Re=30$ , **b)**  $Re=35$ , **c)**  $Re=40$

### 4.2.3 Πλήρως αναπτυγμένα κύματα

Από το παρακάτω σχήμα που απεικονίζει χρονοσειρές για τρεις θέσεις a,b,c κατάντη της ροής συμπεραίνουμε ότι κύμα είναι πλήρως ανεπτυγμένο. Βλέπουμε ότι στη θέση b αποκτά σταθερό ύψος 760  $\mu\text{m}$  το οποίο το διατηρεί και στη αμέσως επόμενη θέση c.



**Σχήμα 4.10:** Χρονοσειρές σε απόσταση  $a=470\text{ mm}$ ,  $b=1470\text{ mm}$  και  $c=2470\text{ mm}$  από την έναρξη της ροής με επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας  $f = 0,167\text{ Hz}$  ( $T_{on}=5\text{ sec}$   $T_{off}=1\text{ sec}$ ) για Reynolds:  $Re=30$

### 4.2.4 Μελέτη διαγραμμάτων εξέλιξης της ροής κατάντη της απόστασης

Όλα τα διαγράμματα line profiles που ακολουθούν δείχνουν τη εξέλιξη των κυμάτων κατάντη της απόστασης(άξονας x) και κάθε κύμα έχει χρονική διαφορά  $\Delta t=0,1\text{ sec}$ , κάτι που φαίνεται στον άξονα y.

Από τη μελέτη των παρακάτω των παρακάτω διαγραμμάτων(line profiles) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

$Re=30$  και  $f=0,5\text{ Hz}$

Στο σχήμα 4.11 α) παρατηρούμε ένα μοναχικό κύμα να μπαίνει στο πεδίο παρατηρήσεων μας και να εξελίσσεται κατάντη της απόστασης. Πίσω από το κύμα βλέπουμε να ακολουθεί μια ελαφριά καμπούρα η οποία κερδίζει συνεχώς μάζα από το υπόστρωμα και θα εξελιχθεί σε ένα νέο κύμα.

Στην επόμενη θέση b) και στο σχήμα 4.11 b) παρατηρούμε ότι η καμπούρα που ακολουθούσε το κύμα έγινε μοναχικό κύμα το οποίο απέχει από το πρώτο κυρίως κύμα μήκος κύματος  $\lambda$ . Το μήκος κύματος υπολογίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο μοναχικών κυμάτων χωρίς να λαβαίνουμε υπ όψιν μας τα ενδιάμεσα παρασιτικά κύματα, που όπως φαίνεται έχουν δημιουργηθεί μεταξύ των μοναχικών.

Στην τελευταία θέση c) στο σχήμα 4.14 c) διαπιστώνουμε ότι το μοναχικό κύμα εξελίσσεται ομαλά ενώ έχουν δημιουργηθεί πολλά παρασιτικά κύματα των οποίων το ύψος ποικίλει.

$Re=35$  και  $f=0.5\text{Hz}$

Όπως και αναφέραμε και παραπάνω στη θέση a) ( σχήμα 4.12 a)) για  $Re=35$  βλέπουμε να δημιουργείται ένα μοναχικό κύμα που προκαλείται από τη διαταραχή που επιβάλλουμε. Αυτό το κύμα εξελίσσεται και πίσω του δημιουργείται ένα παρασιτικό κύμα.

Στη συνέχεια στη θέση b) ( σχήμα 4.12 b)) το μοναχικό κύμα να εξελίσσεται και πολλά παρασιτικά κύματα που έχουν αναπτυχθεί. Εδώ παρατηρούμε και ένα φαινόμενο συγχώνευσης δύο κυμάτων, αφού όπως φαίνεται το μοναχικό κύμα πλησιάζει το παρασιτικό που βρίσκεται μπροστά του και ενσωματώνεται μαζί του. Η συγχώνευση συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς ύψους μεταξύ των δύο κυμάτων(μοναχικού-παρασιτικού).

$Re=40$  και  $f=0.5\text{Hz}$

Σε αυτή την περίπτωση δεν στάθηκε δυνατή η σύγκριση μεταξύ των θέσεων a), b), c) καθώς η δομή στις θέσεις b), c) είναι τρισδιάστατη και δεν μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Όπως και για  $Re=30$ ,  $Re=35$  έτσι και για  $Re=40$  στη θέση a) ( σχήμα 4.13 ) δημιουργείται ένα κύμα σύμφωνα με την επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας  $f=0,5\text{Hz}$ .

### Re=30 και f=0.167Hz

Όπως και για τη διαταραχή  $f=0,5$  Hz στον ίδιο αριθμό  $Re=30$  έτσι και εδώ  $f=0,167$  Hz (σχήμα 4.14 a)) παρατηρούμε ένα μοναχικό κύμα να μπαίνει στο πεδίο παρατηρήσεων μας και να εξελίσσεται κατάντη της απόστασης. Πίσω από το κύμα βλέπουμε να ακολουθεί μια ελαφριά καμπούρα η οποία κερδίζει συνεχώς μάζα από το υπόστρωμα και θα εξελιχθεί σε ένα νέο κύμα.

Στην επόμενη θέση b) και στο σχήμα 4.14 b) παρατηρούμε ότι η καμπούρα που ακολουθούσε το κύμα εξελίχθηκε σε παρασιτικό κύμα το οποίο όμως αποκτά μεγάλο ύψος. Σε αυτή τη θέση στο πεδίο παρατηρήσεων μας βλέπουμε και άλλα παρασιτικά κύματα μικρότερου μεγέθους.

Στην τελευταία θέση c) στο σχήμα 4.14 c) διαπιστώνουμε ότι το μοναχικό κύμα εξελίσσεται ομαλά ενώ έχουν δημιουργηθεί πολλά παρασιτικά κύματα των οποίων το ύψος ποικίλει.

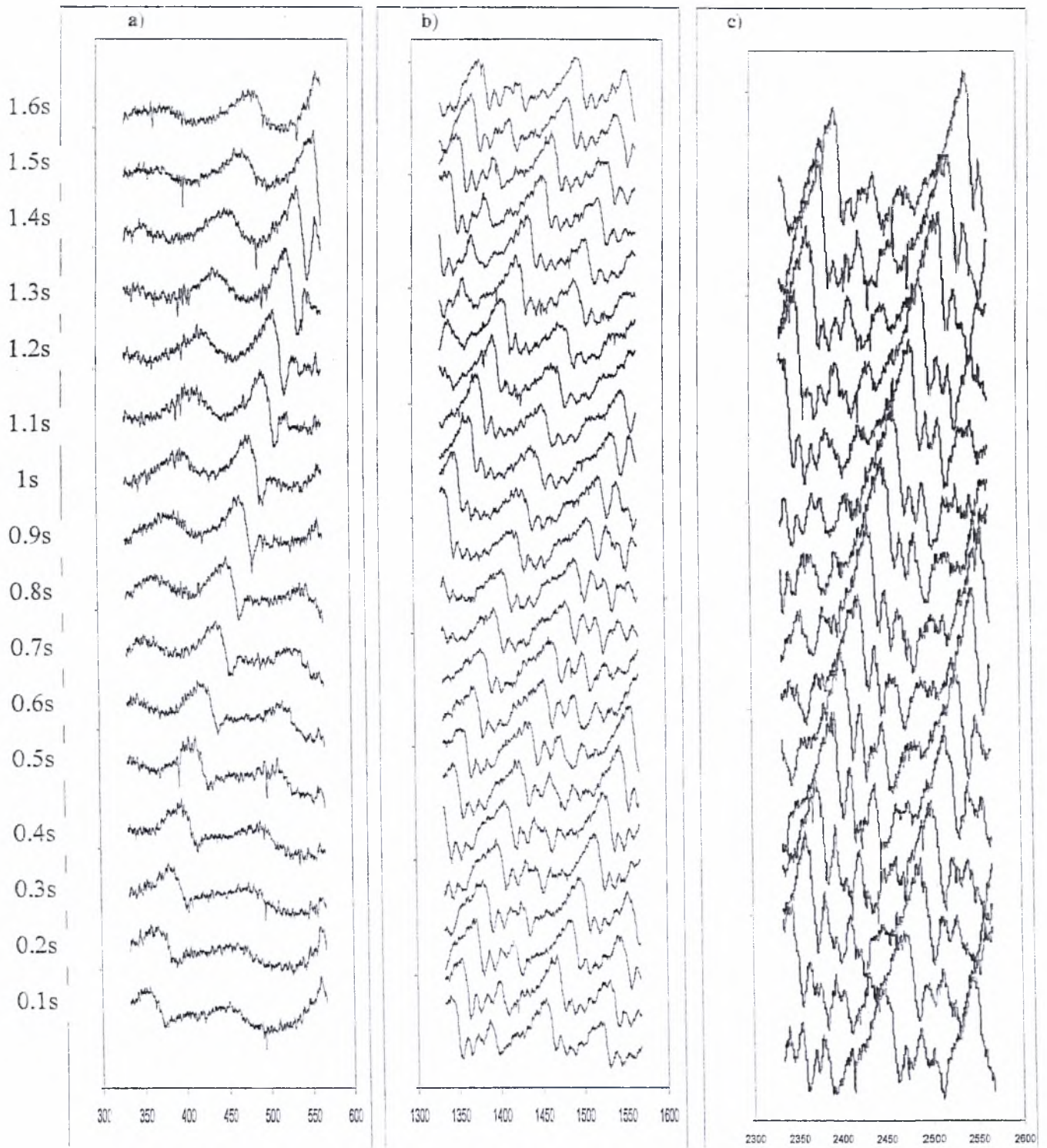
### Re=35 και f=0.167Hz

Όπως και αναφέραμε και παραπάνω στη θέση a) ( σχήμα 4.15 a)) για  $Re=35$  βλέπουμε να δημιουργείται ένα μοναχικό κύμα που προκαλείται από τη διαταραχή που επιβάλλουμε. Αυτό το κύμα εξελίσσεται και πίσω του δημιουργείται ένα νέο κύμα.

Στην επόμενη θέση b) το μοναχικό κύμα συνεχίζει την εξέλιξη του κατάντη της απόστασης του καναλιού. Αυτό όμως ακολουθείται από ένα άλλο κύμα το οποίο είναι και αυτό μοναχικό. Η μεταξύ τους απόσταση είναι  $\lambda$  και είναι ίση με το μήκος κύματος.

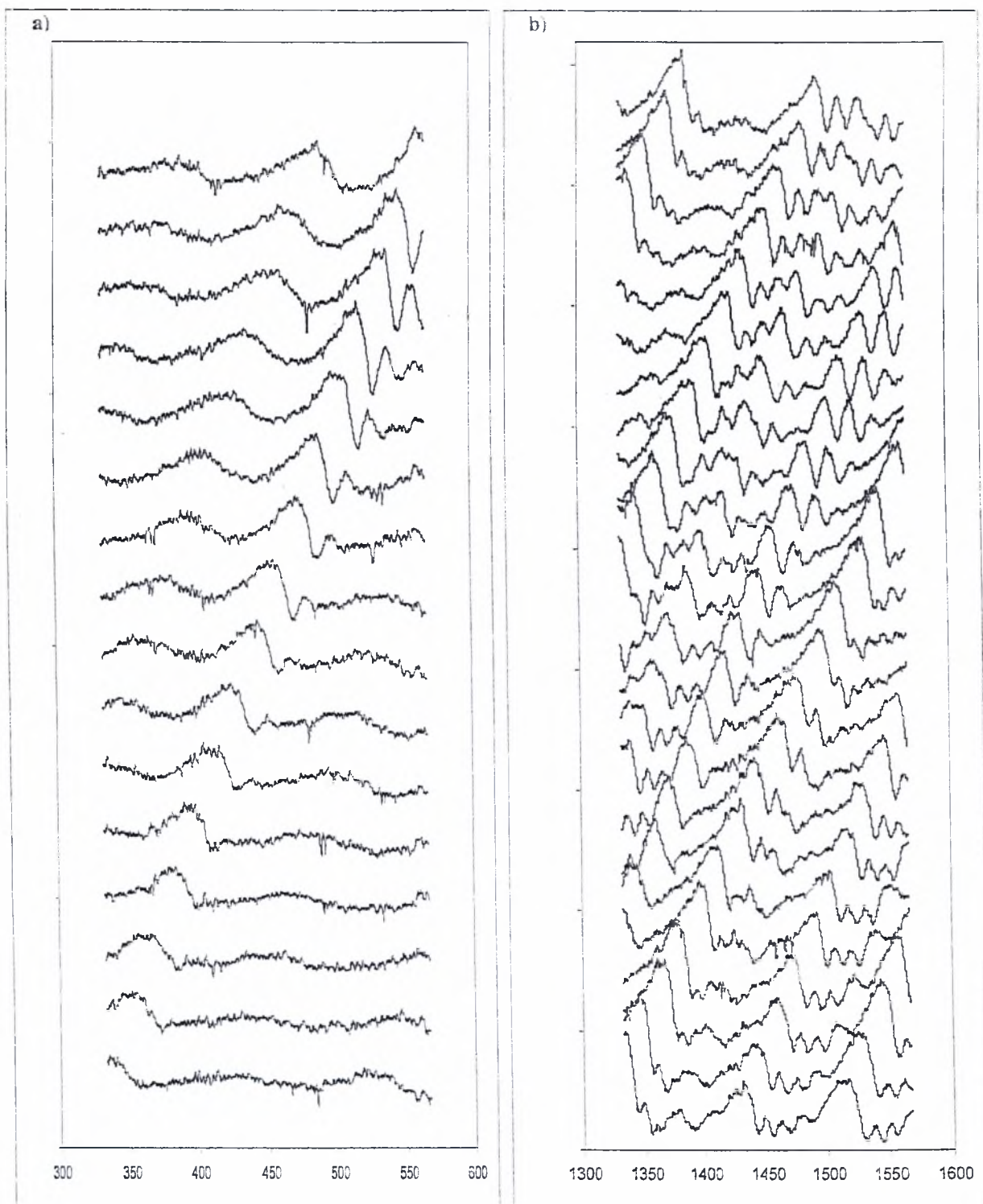
### Re=40 και f=0.167Hz

Σε αυτή την περίπτωση δεν στάθηκε δυνατή η σύγκριση μεταξύ των θέσεων a), b), c) καθώς η δομή στις θέσεις b), c) είναι τρισδιάστατη και δεν μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Όπως και για  $Re=30$ ,  $Re=35$  έτσι και για  $Re=40$  στη θέση a) ( σχήμα 4.16) δημιουργείται ένα κύμα σύμφωνα με την επιβαλλόμενη διαταραχή συχνότητας  $f=0,167$ Hz.



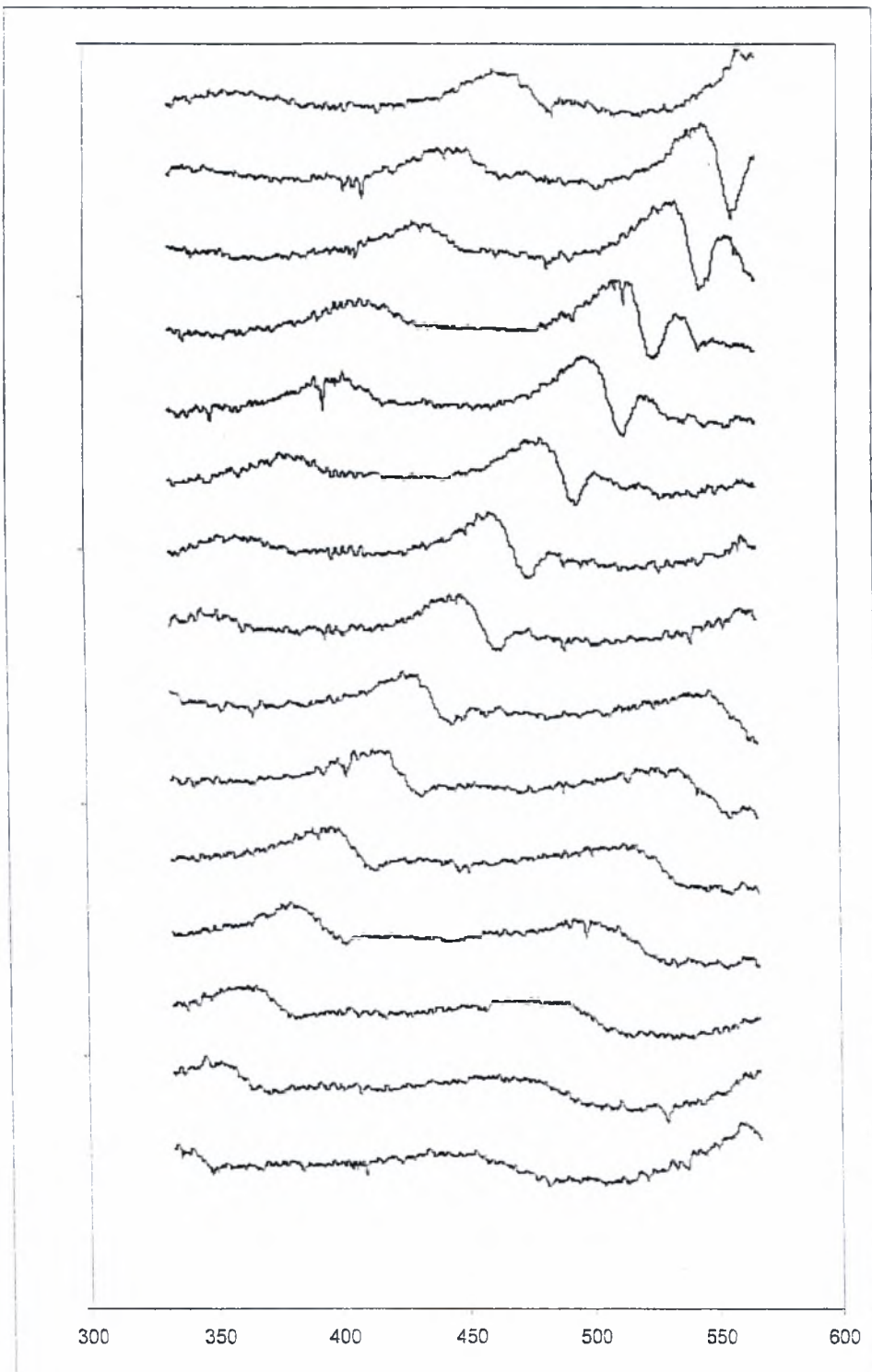
Κατάντη Απόσταση(cm)

Σχήμα 4.11: : Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής  $Re=30$ -διαταραχή  $0,5 \text{ Hz}$  a)θέση a, b)θέση b, c)θέση c

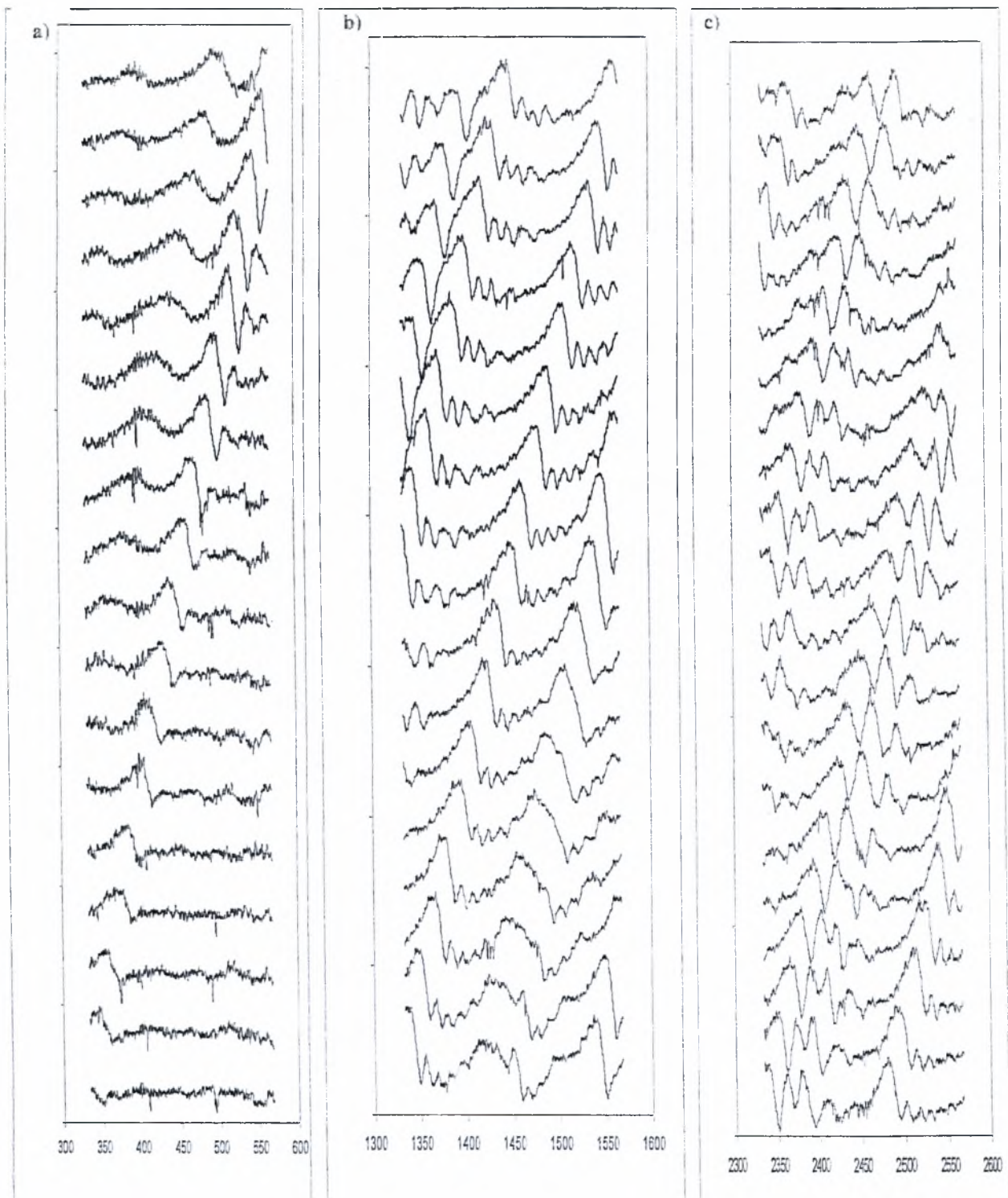


Σχήμα 4.12: Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής  $Re=35$ -δισταραχή  $0,5 \text{ Hz}$  a)θέση a, b)θέση b

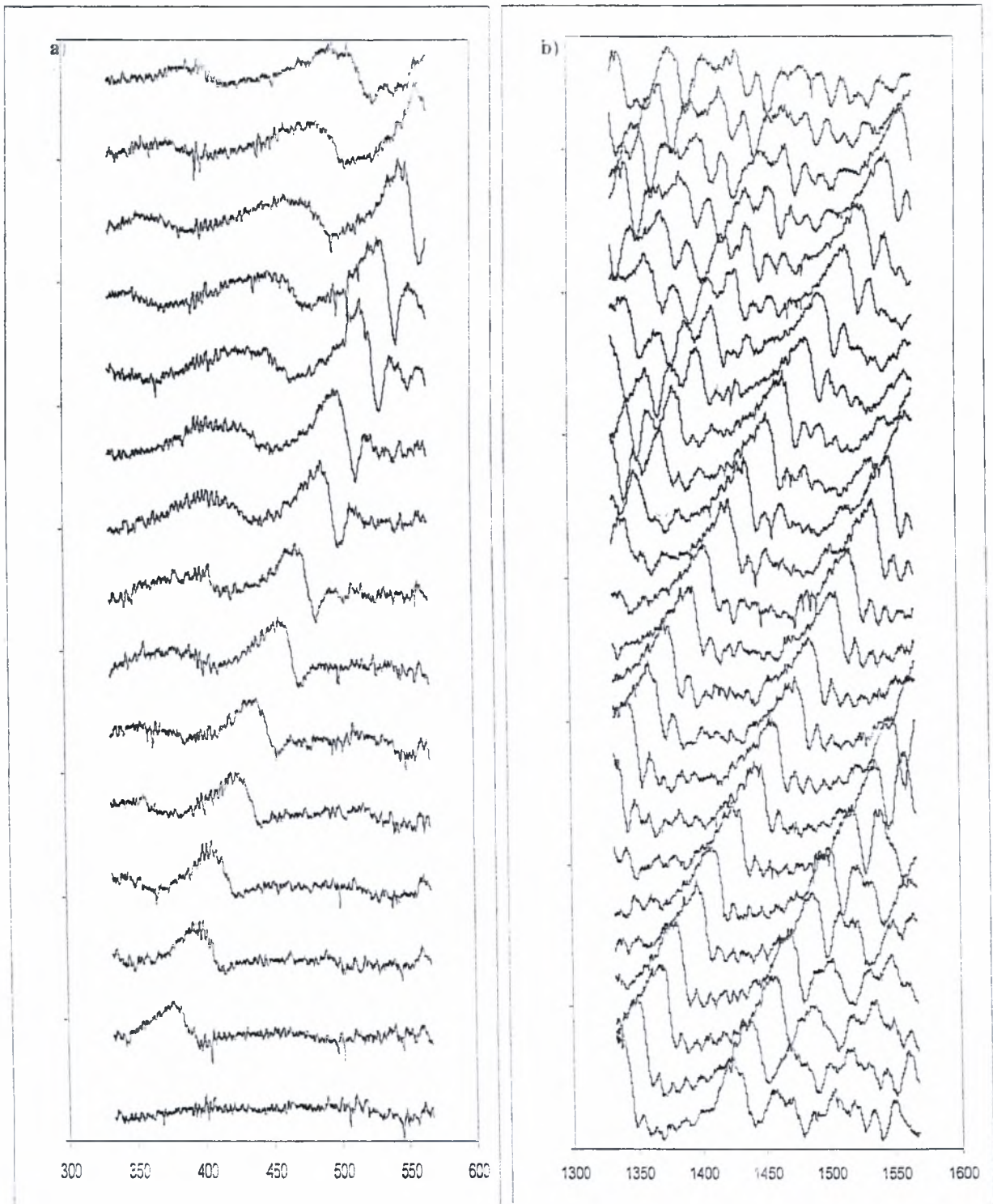




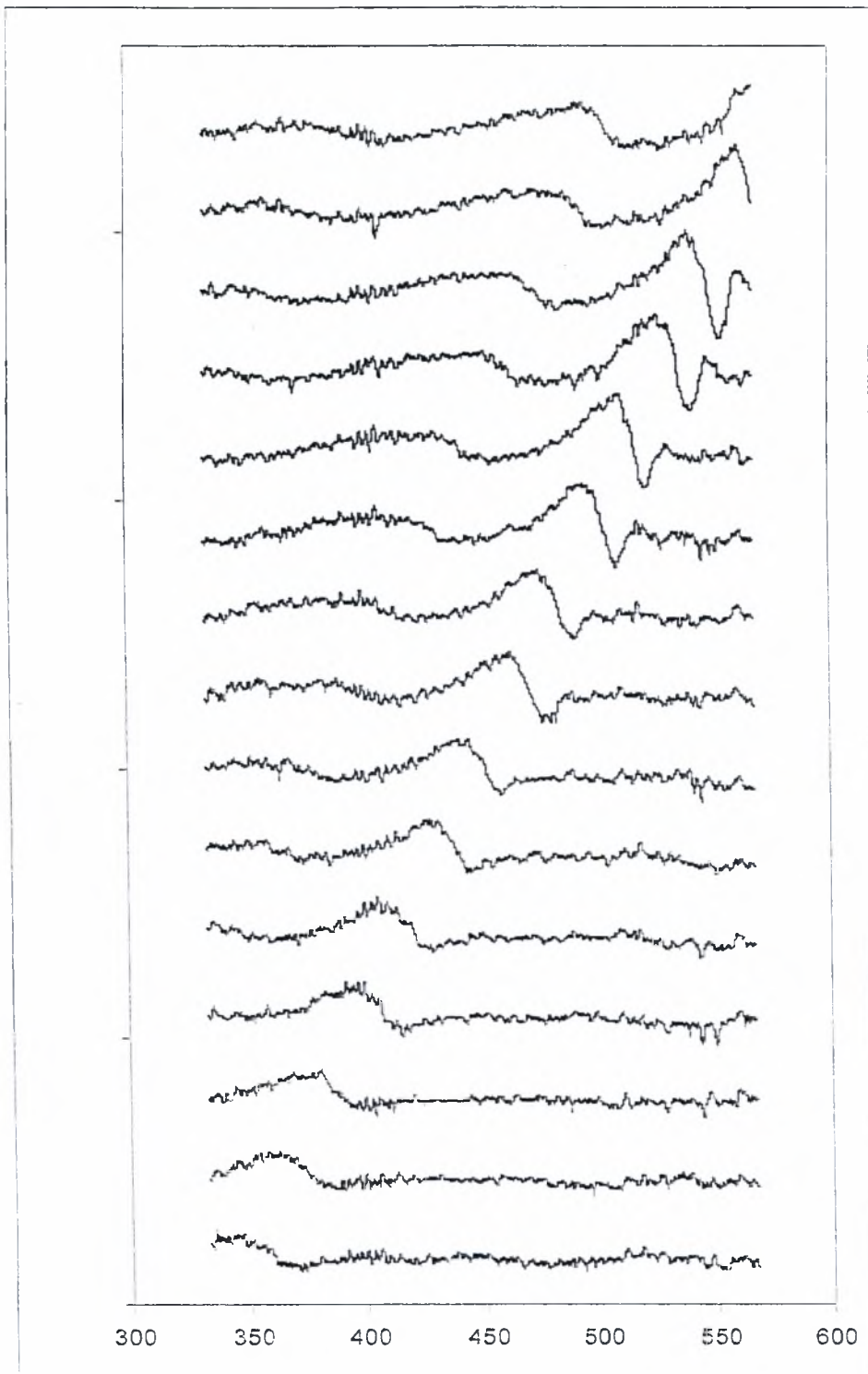
*Σχήμα 4.13: Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής  $Re=40$ -διαταραχή  $0,5 \text{ Hz}$  α) θέση α*



Σχήμα 4.14: Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής  $Re=30$ -διαταραχή  $0,167$  Hz α)θέση α, β)θέση β, γ)θέση γ



**Σχήμα 4.15:** Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής  $Re=35$ -διαταραχή  $0,167$  Hz a)θέση a, b)θέση b



Σχήμα 4.16: Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής  $Re=40$ -διαταραχή  $0,167\text{ Hz}$  a) θέση a, b) θέση b

#### 4.2.5 Χαρακτηριστικά των κυμάτων

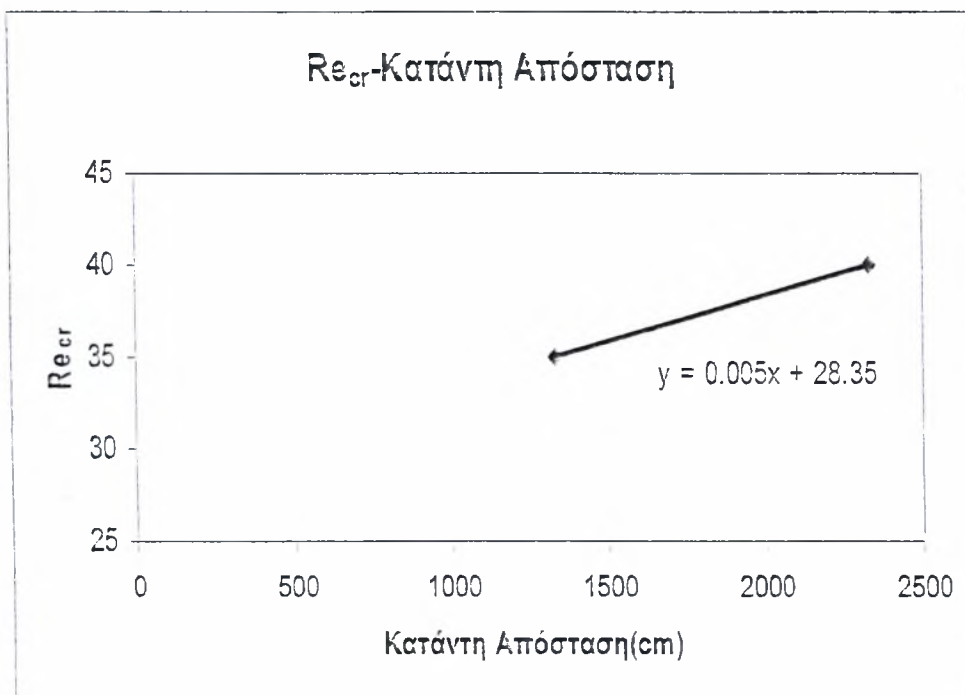
Στον πίνακα 1 που ακολουθεί φαίνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά των κυμάτων. Παρατηρούμε ότι καθώς ο αριθμός Re αυξάνεται, αυξάνεται και το ύψος του κύματος  $h_{max}$  και για τις δύο συχνότητες  $f=0.5$  και  $f=0.167$  κάτι που είναι λογικό αφού ο αριθμός Re είναι ανάλογος του ύψους κύματος. Βλέπουμε επίσης ότι το πάχος του υποστρώματος μπροστά  $h_f$  ( $\mu\text{m}$ ) με το πάχος του υποστρώματος πίσω  $h_b$  ( $\mu\text{m}$ ) από το κύμα είναι περίπου ίσο κάτι που μας επιβεβαιώνει ότι πράγματι μιλάμε για μοναχικά κύματα.

Θέση (m)	Συχνότητα Διαταραχής (Hz)	Διαταραχή	Re	Ύψος Κύματος $h_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	Πάχος Υποστρώματος μπροστά $h_f$ ( $\mu\text{m}$ )	Πάχος Υποστρώματος πίσω $h_b$ ( $\mu\text{m}$ )	Ταχύτητα Κύματος (mm/s)	$U_{min}$ (mm/s)	$U_{max}$ (mm/s)	Μήκος Κύματος Τριχοειδών (mm)	Μήκος Κύματος (mm)	$h_N$	$\langle h \rangle$	$h_{max}-h_f$ ( $\mu\text{m}$ )
a=0.33	0.5	on:1sec-off:1sec	30	590	520	535	140	110	170	19	280	551.6	524.4	70
a=0.33	0.5	on:1sec-off:1sec	35	620	540	555	150	110	180	17	300	578.7	547.5	80
a=0.33	0.5	on:1sec-off:1sec	40	690	580	600	157.5	120	200	17	315	604	592.3	110
b=1.33	0.5	on:1sec-off:1sec	30	750	530	550	158.3	120	210	11	301	551.4	549.5	220
b=1.33	0.5	on:1sec-off:1sec	35	830	550	570	161.3	130	190	9	322.5	577.7	584.7	280
b=1.33	0.5	on:1sec-off:1sec	40											
c=2.33	0.5	on:1sec-off:1sec	30	830	550	570	151	110	180	11	132	553.1	581.8	280
c=2.33	0.5	on:1sec-off:1sec	35											
c=2.33	0.5	on:1sec-off:1sec	40											
a=0.33	0.167	on:5sec-off:1sec	30	630	545	560	142.5	100	180	18	-	551.5 7	551.4	85
a=0.33	0.167	on:5sec-off:1sec	35	680	570	585	154.4	110	190	18	-	578.6 7	577.8	110
a=0.33	0.167	on:5sec-off:1sec	40	695	590	605	161.1	130	210	16	-	603.9 8	586.3	105
b=1.33	0.167	on:5sec-off:1sec	30	680	510	525	142.7	110	180	14	-	550.4 9	533.9	170
b=1.33	0.167	on:5sec-off:1sec	35	780	585	605	162.0	130	210	12.5	-	580.6 2	603.4	195
b=1.33	0.167	on:5sec-off:1sec	40											
c=2.33	0.167	on:5sec-off:1sec	30	790	520	540	147.7	110	190	12	-	550.9	576.1	270
c=2.33	0.167	on:5sec-off:1sec	35											
c=2.33	0.167	on:5sec-off:1sec	40											

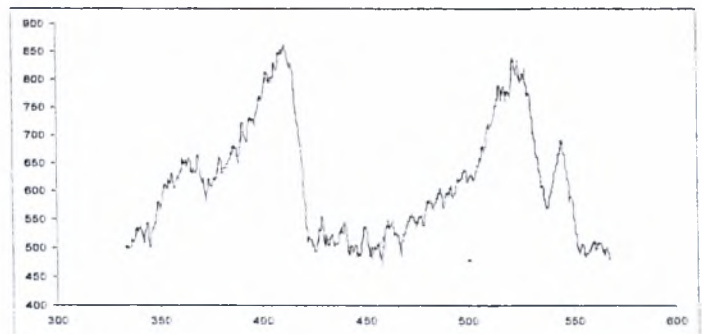
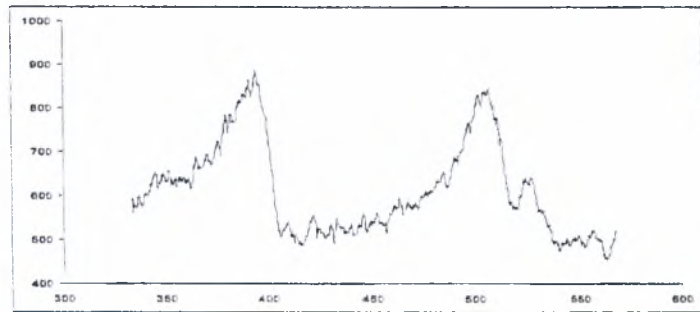
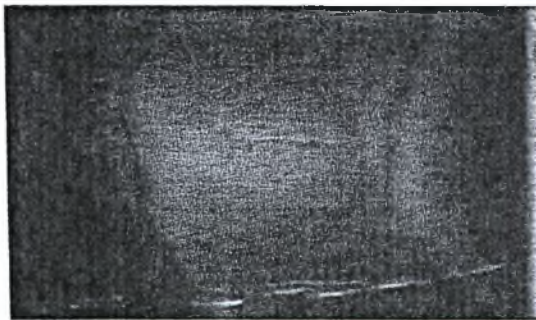
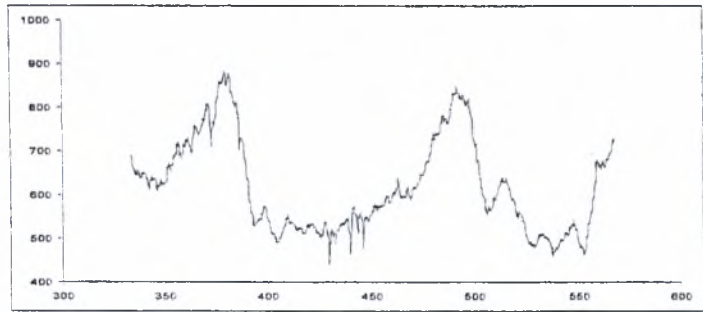
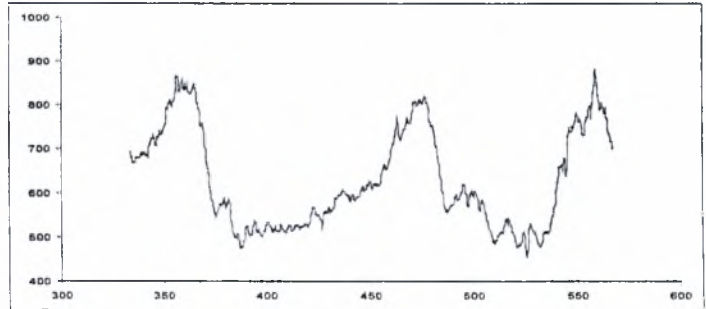
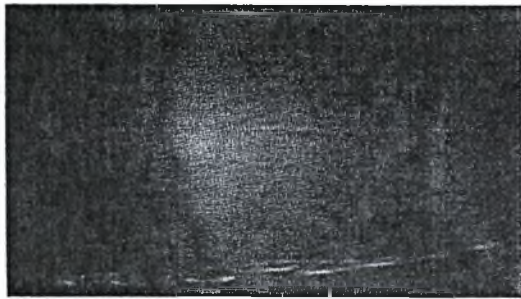
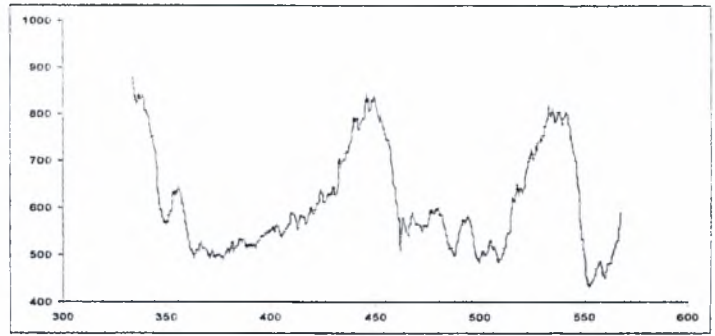
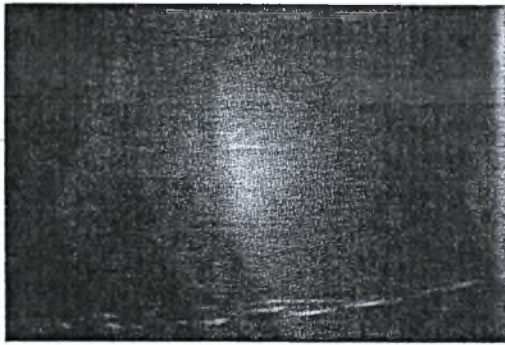
Πίνακας 5: Βασικά χαρακτηριστικά κυμάτων

### 4.3 Τρισδιάστατα κύματα ( 3D waves)

Σε αυτή την διπλωματική εργασία και όπως αναφέρθηκε παραπάνω μελετήθηκαν μόνο δισδιάστατα κύματα (2D waves) και προσδιορίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως ταχύτητα, μήκος κύματος κτλ. Στις θέσεις b), c) παρουσιάστηκαν τρισδιάστατα κύματα για αριθμούς  $Re=35$  και για  $Re=35,40$  αντίστοιχα. Σε αυτές τις θέσεις και για τους συγκεκριμένους  $Re$  δεν μπορέσαμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Στο σχήμα 4.21 παρατίθεται σειρά φωτογραφιών και τα αντίστοιχα διαγράμματα εξέλιξης του κύματος κατάντη της ροής για να γίνει αντιληπτή η μορφή των τρισδιάστατων κυμάτων τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Για την καλύτερη εποπτεία των αριθμών  $Re$  που εμφανίζονται τρισδιάστατες δομές ακολουθεί το σχήμα 4.20 το οποίο δείχνει ότι για τις σειρές πειραμάτων που έγιναν στη θέση a) δεν υπήρχε  $Re_{cr}$ , στη θέση b)  $Re_{cr}=35$  ενώ στη θέση c)  $Re_{cr}=40$ .



*Σχήμα 4.17: Διάγραμμα κρίσιμου αριθμού  $Re_{cr}$  με την κατάντη απόσταση*



Σχήμα 4.20: Φωτογραφίες και γραφική απεικόνιση του ύψους των κυμάτων κατόντη της ροής τρισδιάστατων δομών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4 έγιναν τρεις σειρές πειραμάτων σε τρεις διαφορετικές θέσεις a,b,c που απέχουν 330cm, 1330cm, 2330cm από την αρχή δημιουργίας των κυμάτων με την επιβολή δύο διαταραχών συχνότητας  $f=0,167\text{Hz}$  και  $f=0,5\text{Hz}$  και υπό σταθερή γωνία κλίσης του καναλιού  $\varphi=3,16^\circ$ . Σαν ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό αναμεμιγμένο με φθορίζουσα ουσία, η οποία με τη μέθοδο του φθορισμού που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 και περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών (κεφάλαιο 4), μας έδωσε κάποια διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Από τη μια έχουμε τα διαγράμματα των χρονοσειρών που περιγράφουν την εξέλιξη του ύψους των κυμάτων σε σχέση με τον χρόνο και από τη άλλη τα διαγράμματα που περιγράφουν την εξέλιξη του ύψους των κυμάτων κατάντη της απόστασης του καναλιού. Οι αριθμοί Re στους οποίους ελήφθησαν οι παραπάνω μετρήσεις ήταν  $Re=30$ ,  $Re=35$ ,  $Re=40$ .

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων προέκυψαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα που αφενός μας βοηθούν να καταλάβουμε το φαινόμενο της δημιουργίας των μοναχικών κυμάτων, αφετέρου να προχωρήσουμε στο μέλλον σε νέες σειρές πειραμάτων σε πιο περιορισμένο πεδίο.

Αρχικά παρατηρώντας τις χρονοσειρές βλέπουμε ότι σε κάποιους αριθμούς Re τα κύματα είναι πλήρως ανεπτυγμένα. Πλήρως ανεπτυγμένα είναι τα κύματα που αφού προέκυψαν από την εκάστοτε επιβαλλόμενη διαταραχή, το ύψος τους αρχίζει να αυξάνεται κερδίζοντας μάζα από το υπόστρωμα, μέχρι που σε κάποιο σημείο καθώς εξελίσσονται κατάντη της ροής αποκτούν σταθερό ύψος. Το ύψος αυτό το διατηρούν μέχρι το τέλος το πεδίου των παρατηρήσεων μας. Για αριθμό  $Re=30$  με συχνότητα διαταραχής  $f=0,5\text{Hz}$  και στη θέση a) που απέχει 330cm από την αρχή της εξέλιξης της ροής των κυμάτων, το ύψος των κυμάτων συνεχώς αυξάνεται, ενώ στις θέσεις b), c) που απέχουν 1330cm και 2330cm αντίστοιχα από την αρχή της εξέλιξης της ροής των κυμάτων το ύψος των κυμάτων παρέμεινε σταθερό σε σχέση με τον χρόνο.

Τα μοναχικά κύματα προκύπτουν όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο από συγκεκριμένη επιβαλλόμενη διαταραχή, την συχνότητα της οποίας επιλέγουμε εμείς. Είναι εύκολα αντιληπτό λοιπόν ότι με αυτόν τον τρόπο καθορίζουμε και την συχνότητα των αντίστοιχων δημιουργούμενων κυμάτων, όπως και την αντίστοιχη



περίοδο. Αν δηλαδή έχουμε ένα πεδίο παρατηρήσεων της τάξης των 20sec στην εκτέλεση των προαναφερθέντων πειραμάτων, τότε για συχνότητα κυμάτων  $f=0,5\text{Hz}$  και περιόδου  $T=2\text{ sec}$  πρέπει να πάρουμε 10 κύματα. Αντίστοιχα για συχνότητα κυμάτων  $f=0,167\text{Hz}$  και περιόδου  $T=6\text{ sec}$  πρέπει να πάρουμε 3 κύματα. Στην περίπτωση επιβολής διαταραχής με συχνότητα κυμάτων  $f=0,5\text{Hz}$  και περιόδου  $T=2\text{ sec}$  βλέπουμε στη θέση a) να δημιουργούνται όντως όντως 10 κύματα τα οποία είναι μοναχικά. Αυτά εξελίσσονται κατάντη της ροής του υμένα, και στη θέση b) παρουσιάζονται και παρασιτικά κύματα ενδιάμεσα τους, κάτι που οδηγεί σε μείωση της περιόδου  $T$  σε σχέση με την αρχική περίοδο. Στη θέση c) η περίοδος  $T$  μικραίνει ακόμα πιο πολύ εξαιτίας της δημιουργίας κι άλλων παρασιτικών κυμάτων. Στην περίπτωση τώρα της επιβολής διαταραχής με συχνότητα  $f=0,167\text{Hz}$  με περίοδο  $T=6\text{sec}$ , στη θέση a) παίρνουμε όντως τρία κύματα κάτι που δεν συμβαίνει στις επόμενες θέσεις b), c). Σε αυτές τις θέσεις η περίοδος  $T$  μειώνεται λόγω της δημιουργίας παρασιτικών κυμάτων. Στη συγκεκριμένη διαταραχή μάλιστα είναι πιο έντονη η δημιουργία παρασιτικών κυμάτων με αποτέλεσμα να παρατηρούνται περισσότερα από αυτά καθώς η ροή η ροή εξελίσσεται κατάντη της απόστασης. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι όσο πιο μικρή συχνότητα έχει η επιβαλλόμενη διαταραχή τόσο πιο πολλά παρασιτικά κύματα δημιουργούνται. Και από τις δυο διαταραχές προέκυψε ότι η αρχική επιβαλλόμενη συχνότητα διατηρείται μόνο στη θέση a) δηλαδή πολύ κοντά σε σχέση με την απαρχή τους, ενώ με την περαιτέρω εξέλιξη τους κατάντη της ροής δηλαδή θέσεις b), c), η αρχική συχνότητα μεγαλώνει. Τέλος για την επιβολή διαταραχής με συχνότητα  $f=0,167\text{Hz}$  διαπιστώνουμε ότι ενώ στις θέσεις b), c) η συχνότητα εμφάνισης κυμάτων μεγαλώνει σε σχέση με την αρχική συχνότητα. Η συχνότητα μεταξύ των μοναχικών κυμάτων είναι απροσδιόριστη μιας και πρόκειται τη δημιουργία μοναχικών κυμάτων τυχαίας συχνότητας.

Επιπροσθέτως κατά την επεξεργασία των διαγραμμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα παρατηρήθηκαν αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων όπως αυτό της συγχώνευσης. Η συγχώνευση μεταξύ δυο κυμάτων επιτελείται όταν υπάρχει μεγάλη υψομετρική διάφορα μεταξύ δυο κυμάτων τα οποία κινούνται το ένα πίσω από το άλλο. Πιο συγκεκριμένα αν ένα κύμα με μικρό ύψος προπορεύεται σε μικρή απόσταση από ένα κύμα με μεγαλύτερο ύψος αυτό αφομοιώνεται στο μεγαλύτερο κύμα κατά την εξέλιξη ροής κατάντη του υμένα. Τέτοια φαινόμενα παρατηρήθηκαν για αριθμό  $Re=35$  και συχνότητα επιβαλλόμενης διαταραχής  $f=0,5\text{ Hz}$  στη θέση b).

Μια πολύ σημαντική παρατήρηση η οποία έγινε καθοριστικής σημασίας για την συμπεριφορά των μοναχικών κυμάτων είναι η εύρεση των κρίσιμων αριθμών  $Re_{cr}$  μετά των οποίων αποκτούν τρισδιάστατη δομή ( 3D). Τα δισδιάστατα ( 2D) κύματα εμφανίζουν παραβολικό μέτωπο στο οποίο εξελίσσεται ομαλά χωρίς να εμφανίζονται σε αυτό ρυτιδώσεις. Αντίθετα στα τρισδιάστατα κύματα το μέτωπο του κύματος είναι σχεδόν παραβολικό, εμφανίζοντας όμως έντονες ρυτιδώσεις. Όσο αναφορά τώρα τα μοναχικά κύματα στην δισδιάστατη δομή έχουν παραβολικό μέτωπο ενώ των κυμάτων προηγούνται τα εμπρόσθια τριχοειδή και πίσω ακολουθούν τα πίσω τριχοειδή. Μάλιστα το ύψος κύματος των εμπρόσθιων τριχοειδών με των αυτών που ακολουθούν το μοναχικό κύμα πίσω είναι περίπου ίσο. Από την άλλη στη τρισδιάστατη δομή δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα εξαιτίας της άναρχης δομής που εμφανίζουν τα δημιουργούμενα κύματα, μια δομή που δεν έχει κάποια προβλέψιμη μορφή. Έτσι στη τρισδιάστατη δομή δεν μπορούμε να μιλάμε για μοναχικά κύματα. Συμπερασματικά μοναχικά κύματα εμφανίζονται μόνο σε δισδιάστατη δομή. Το κριτήριο για τον διαχωρισμό της τρισδιάστατης από την δισδιάστατη δομή είναι κρίσιμος αριθμός  $Re_{cr}$  δηλαδή ο αριθμός  $Re$  από τον οποίο και μετά εμφανίζεται τρισδιάστατη δομή. Στις τρεις σειρές πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στη θέση b) του πεδίου των παρατηρήσεων μας που απέχει απόσταση 1330cm από την αρχή δημιουργίας των κυμάτων ο  $Re_{cr}$  βρέθηκε ίσος με 40 και για της δυο επιβαλλόμενες διαταραχές, συχνότητας  $f=0,5\text{Hz}$  και  $f=0,167\text{Hz}$  αντίστοιχα. Ενώ στη θέση c) που απέχει απόσταση 2330cm από την αρχή δημιουργίας των κυμάτων ο  $Re_{cr}$  βρέθηκε ίσος με 35 και για της δυο επιβαλλόμενες διαταραχές, συχνότητας  $f=0,5\text{Hz}$  και  $f=0,167\text{Hz}$  αντίστοιχα. Τέλος στη θέση a) που απέχει απόσταση 330cm από την αρχή δημιουργίας των κυμάτων δεν παρατηρήθηκε τρισδιάστατη δομή για καμία από τις δυο επιβαλλόμενες διαταραχές. Συμπεραίνουμε Έτσι ότι η εμφάνιση της τρισδιάστατης δομής εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό  $Re$ . Έτσι όσο μεγαλύτερο αριθμό  $Re$  έχουμε, τόσο πιο γρήγορα εμφανίζεται η τρισδιάστατη δομή. Έχουμε δηλαδή δημιουργία τρισδιάστατης δομής σε μικρότερη απόσταση από την αρχή δημιουργίας των επιβαλλόμενων κυμάτων.

## 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 ιξώδη ροή υγρού υμένα. "Ημερίδα: Ερευνητικές δραστηριότητες στα φαινόμενα ροής ρευστών στην Ελλάδα, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μάιος 2000
- [6] **Alekseenko, S.V., Nakoryakov, V.Y. & Pokuraev, B.G** 1985 "Wave formation on a vertical falling liquid film" AIChE J.31, 1446-1460.
- [7] **Liu, J.D., & Gollub, J.P.** 1993 "Measurements of primary instabilities of film flow" J. Fluid Mech. 250, 69-101
- [8] **Liu, J. & Gollub, J.P.** 1994 "Solitary wave dynamics of film flows" .Phys. Fluids 6, 1702-1712.
- [9] **Σταθάς Παναγιώτης** 2007 "Κατασκευή πειραματικής διάταξης μελέτης ροής υγρού υμένα", Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- [10] **Τριανταφύλλου Ορφέας** 2007 "Πρώτα πειραματικά αποτελέσματα στο νέο κανάλι ροής πίπτοντος υμένα", Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- [11] **Δάλλας Πέτρος** 2007 "Μελέτη οδευόντων κυμάτων σε κεκλιμένο κανάλι ροής", Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

# Παράρτημα

## ΜΑΤΛΑΒ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

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

```
% This is an .m file for image processing
tic
echo off
%-----DATA READING-----
[first,WLo,BLo,number_of_images_steady,time_delay,distance_overflow,x,z,hn]=...
textread('Input_Production_of_convIo.txt','%s%f%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
addition(1:576,1:768)=1.275;
analogx=x(1)/576.;
analogz=z(1)/768.;
for i=1:576
    xvector(i)=i*analogx;
end
for i=1:768
    zvector(i)=i*analogz+distance_overflow(1);
end
%-----PRODUCE THE NOISE MATRIX-----
convvIo=double(imread('convIo','bmp'));
Ionew=(convvIo*((351.1-1.275)/255)+addition);
clear convvIo
%-----FRAME AVERAGING for Iomin-----
firstV=first(1);
firstIho=char(firstV);
qo=(WLo(1)-BLo(1))/255;
BLo_matrix(1:576,1:768)=BLo(1);
total=zeros(576,768);
for num=1:number_of_images_steady(1)
    temporary_matrix=(double(imread(strcat(firstIho,int2str(num),'.bmp'))))*qo)+BLo_matrix-Ionew;
    total=total+temporary_matrix;
end
Io_totalmin=(total./number_of_images_steady(1));
%-----FRAME AVERAGING For Difference-----
for j=2:length(first)
    firstV=first(j);
    firstI=char(firstV);
    qo=(WLo(j)-BLo(j))/255;
    BLo_matrix(1:576,1:768)=BLo(j);
    total=zeros(576,768);
    for num=1:number_of_images_steady(j)
        temporary_matrix=(double(imread(strcat(firstI,int2str(num),'.bmp'))))*qo)+BLo_matrix-Ionew;
        total=total+temporary_matrix;
    end
    Io_totalmax=(total./number_of_images_steady(j));
    kk1=round(j-1);
    Io(:,:,kk1)=Io_totalmax-Io_totalmin;
    Iomax(:,:,kk1)=Io_totalmax;
end
clear qo WLo BLo temporary_matrix num Io_totalmax total firstI firstV time_delay
clear distance_overflow BLo_matrix number_of_images_steady analogx analogz
acoef=zeros(576,768);
bcoef=zeros(576,768);
kk2=round(length(first)-1);
for i=2:length(first)
    dhn(i-1)=hn(i)-hn(1)
end
for k=1:576
    k
    for i=1:kk2
```

```

        temp(i,:)=Io(k,,:);
    end
    xxcal=dhn;
    vvcal=temp';
    for j=1:768
        yyycal(j,:)=polyfit(xxcal,vvcal(j,:),1);
    end
    for j=1:768
        acoef(k,j)=yyycal(j,1);
        bcoef(k,j)=yyycal(j,2);
    end
end
ho=hn(1);
clear temp xxcal vvcal yyycal kk2 kk1 i j k x z
save(strcat('d:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(first I ho))))
clear
toc

```

## 2. Πρόγραμμα μετατροπής των εικόνων σε πίνακες

```

%This is an .m file for image processing
[namesV,nameimage,WL,BL,number_of_images,hnusselt]...
=textread('Input_Production_of_convHeight.txt','%s%s%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(namesV)
    nummm=char(namesV(i));
    load(nummm)
    clear Io first addition lomax dhn
    time_delay=0.1;
    tvector=(time_delay:time_delay:number_of_images*time_delay);
    nameimageV=nameimage(i);
    nameim=char(nameimageV);
    q=(WL(i)-BL(i))/255;
    BL_matrix(1:576,1:768)=BL(i);
    for num=1:200
        k=round(576*(num-1)+1);
        kk=round(576*num)
        nameim
        Iof=double(imread(strcat(nameim,int2str(num),'.bmp')));
        Iof_temporary=Iof*q+BL_matrix-Ionew-Io_totalmin;
        clear Iof
        height=((Iof_temporary-bcoef)./(acoef))+ho;
        clear Iof_temporary
        hall(k:kk,1:768)=int16(height(1:576,1:768));
        clear height
    end
end
%-----Save-----
save(strcat('d:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nameim,'with',nummm))), 'hall','xvector','zvector','tvector','number_of_images',nummm')
clear hall
end
clear

```

### 3. Πρόγραμμα δημιουργίας διαγραμμάτων χωρικής μεταβολής του πάχους του υμένα

```
% Visualization of image processing results
[st,lin]=textread('graph.txt','%s %f','headerline',1);
names=textread('inputdisp.txt','%s','headerline',1);
for kkk=1:length(names)
    kkk
    namer=names(kkk);
    nammm=char(namer)
    load (nammm)

    nammm
    x1=8;
    x2=567;
    z1=8;
    z2=759;
    zv=zvector(z1:z2-1);
    xv=xvector(x1:x2-1);
    xz=round(x2-x1);
    xposition=round(280);
    number_of_images=round(200);
    for i=1:number_of_images
        limit1=round((i-1)*576+1);
        limit2=round(i*576);
        TDA=(hall(limit1:limit2,1:768));
        TDAnew=double(TDA(x1:x2-1,z1:z2-1));
        height(i,:)=TDAnew(xposition,:);
        clear TDA TDAnew
    end
    clear hall
    ln=round(5);
    sel=round((number_of_images/ln));
    for i=1:sel
        i
        k2=round(i*ln);
        k1=round((i-1)*ln+1);
        hnew=height(k1:k2,:);
        for ii=1:ln
            styl=char(st(ii));
            li=lin(ii);
            plot(zv,hnew(ii,:),styl,'linewidth',li)
            hold on
        end
        xlabel('Downstream Distance [=]mm')
        ylabel('h [=]μm')
        title(['time beginning=',num2str(k1),' line ',char(nammm)])
        hold off
        h1=gcf;
        set(h1,'PaperOrientation','portrait')
        saveas(h1,strcat('d:\matlab\apotelesmata\', strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'LineProfileDown'),''.tif'))
        qqqq=hnew';
        save trcat('d:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'LineProfileDownold'),''.dat'),'qqqq','-
        ascii')
    end
end
```

#### 4. Πρόγραμμα δημιουργίας διαγραμμάτων χρονικής μεταβολής ενός σημείου της ροής

```
[names,aax1,aay1,bbx1,bby1,aax2,aay2,bbx2,bby2,aax3,aay3,bbx3,bby3,aax4,aay4,bbx4,bby4]...
=textread('input_TimeProfile.txt','%s%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
tvect=(0.1:0.1:20);
for i=1:length(names)
    namer=names(i);
    nammm=char(namer);
    load(nammm);
    aax(1)=aax1(i);
    aay(1)=aay1(i);
    bbx(1)=bbx1(i);
    bby(1)=bby1(i);
    aax(2)=aax2(i);
    aay(2)=aay2(i);
    bbx(2)=bbx2(i);

    bby(2)=bby2(i);
    aax(3)=aax3(i);
    aay(3)=aay3(i);
    bbx(3)=bbx3(i);
    bby(3)=bby3(i);
    aax(4)=aax4(i);
    aay(4)=aay4(i);
    bbx(4)=bbx4(i);
    bby(4)=bby4(i);
    for j=1:4
        for num=1:200
            k=round(576*(num-1)+1);
            kk=k+aax(j);
            kkk=k+bbx(j);
            hdownup(num,1)=double(hall(kk,aay(j)));
            hdownup(num,2)=double(hall(kkk,bby(j)));
        end
        plot(tvect,hdownup(:,1),'Color','k','LineWidth',2);
        hold on
        plot(tvect,hdownup(:,2),'Color','r','LineWidth',2);
        xlabel('t(sec)');
        ylabel('film thickness');
        title(strcat('TimeProfile_',nammm,'x=',num2str(aax(j)),'&',num2str(aay(j)),'_',num2str(bbx(j)),'&',num2str(bby(j))));
        hold off
        h1=gcf;
        set(h1,'PaperOrientation','portrait')
        saveas(h1,strcat('D:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nammm,'x=',num2str(aax(j)),'_',num2str(aay(j)),'_',num2str(bbx(j)),'_',num2str(bby(j)),'_TimeProf'),'tif'))
        save(strcat('D:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nammm,'x=',num2str(aax(j)),'_',num2str(aay(j)),'_',num2str(bbx(j)),'_',num2str(bby(j)),'_TimeProf'),'dat'),'hdownup','-ascii')
    end
    clear namer nammm hall hdownu
end
```

## 5. Πρόγραμμα δημιουργίας διαγραμμάτων χωρικής μεταβολής του υμένα με την μέθοδο του κυλιόμενου μέσου

```

% Visualization of image processing results
[st,lin]=textread('graph.txt','%s %f','headerline',1);
names=textread('inputdisp.txt','%s','headerline',1);
for kkk=1:length(names)
    kkk
    namer=names(kkk);
    nammm=char(namer)
    load (nammm)
    nammm
    x1=8;
    x2=567;
    z1=8;
    z2=759;
    zv=zvector(z1:z2-1);
    xv=xvector(x1:x2-1);
    xz=round(x2-x1);
    xposition=round(280);
    cc=round(65);
    zvn=zvector(z1:z2-1-cc);
    number_of_images=round(200);
    for i=1:number_of_images
        limit1=round((i-1)*576+1);
        limit2=round(i*576);

        TDA=(hall(limit1:limit2,1:768));
        TDAnew=double(TDA(x1:x2-1,z1:z2-1));
        height(i,:)=TDAnew(xposition,:);
        clear TDA TDAnew
    end
    clear hall
    ind=round(z2-z1-cc);
    for i=1:number_of_images
        for j=1:ind
            MovAv(i,j)=mean(height(i,j:j+cc));
        end
    end
    ln=round(5);
    sel=round((number_of_images/ln));
    for i=1:sel i
        k2=round(i*ln);
        k1=round((i-1)*ln+1);
        hnew=MovAv(k1:k2,:);
        for ii=1:ln
            styl=char(st(ii));
            li=lin(ii);
            plot(zvn,hnew(ii,:),styl,'linewidth',li)
            hold on
        end
        xlabel('Downstream Distance [=]mm')
        ylabel('h [=]μm')
        title(['time beginning=',num2str(k1),' line ',char(nammm)])
        hold off
        h1=gcf;
        set(h1,'PaperOrientation','portrait')
        saveas(h1, strcat('e:\matlab\apotelesmata\', strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'LineProfileDown'),' .tif')))
        qqqq=hnew';
        savestrcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'LineProfileDownold'),' .dat'),'qqqq','-
        ascii')
    end
end

```



end

## 6. Πρόγραμμα υπολογισμού φάσματος συχνοτήτων

```
% Visualization of image processing results
[st,ln]=textread('graph.txt','%s %f','headerline',1);
[names, number_images]=textread('inputfft.txt','%s %f','headerline',1);
for kkk=1:length(names)
    kkk
    namer=names(kkk);
    nammm=char(namer)
    load (nammm) nammm
    x1=36;
    x2=540;
    z1=59;
    z2=709;
    zv=zvector(z1:z2-1);
    xv=xvector(x1:x2-1);
    xz=round(x2-x1);
    xposition=round(288);
    for i=1:200
        limit1=round((i-1)*576+1);
        limit2=round(i*576);
        TDA=(hall(limit1:limit2,1:768));

end
clear hall
meanh=mean(height);
for j=1:number_images(kkk)
    heightmeion(j,:)=height(j,:)-meanh(j);
end
for jj=1:number_images(kkk)
    heightdia(jj,:)=height(jj,:)/meanh(jj);
end
hheight=height';
hheightmeion=hheightmeion';
hheightdia=hheightdia';
Y=fft(hheightmeion);
Pyy=Y.* conj(Y) / 650;
save(strcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat('fft_(xo_y_t)=(288,y,t)',char(nammm))), 'Pyy','Y','hheight','heightmeion','heightdia','x1','z1','x2','z2')
clear heightmeion heightdia height Y meanh tvector xvector zvector xv zv hheight
harmonics=1:1:40;
ln=round(5);
sel=round((number_images(kkk)/ln));
for i=1:sel
    k2=round(i*ln);
    k1=round((i-1)*ln+1);
    Pyynew=Pyy(:,k1:k2);
    for ii=1:ln
        styl=char(st(ii));
        li=lin(ii);
        plot(harmonics,Pyynew(2:41,ii),styl,'linewidth',li)
        hold on
    end
    xlabel('harmonics')
    ylabel('Abs. Magnitude')
    title(['Frequency spectrum: tb=',num2str(k1),' ',char(nammm)])
    hold off
    h1=gcf;
    set(h1,'PaperOrientation','portrait')
    saveas(h1,strcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'Frequency spectrum'),' .tif')))
    save (strcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'Frequency spectrum'),' .dat')), 'Pyynew','-ascii')
```

```
Pyy1=Pyy(2:51,:);
Pyy2=Pyy1';
PyyT1=mean(Pyy2);
PyyT(kkk,:)=PyyT1;
end
clear Pyynew Pyy Pyy1 Pyy2
end
PyyTT=PyyT';
save (strcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat('fft(xo,ymean,t)','water','3#4Cdist'),''.dat')), 'PyyTT','-ascii')
clear
```



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091067