

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ
ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ**

ΥΠΟ

ΝΙΚΟΛΑΟ ΚΑΝΕΛΛΗ

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

2008



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

Αριθ. Εισ.: 6154/1
Ημερ. Εισ.: 24-03-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2008
ΚΑΝ

© 2008 Νικόλαος Κανελλής

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

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

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

Ευχαριστίες

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

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα, Βλάση Λεοντίδη για την βοήθεια που μου πρόσφερε για την λήψη και επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων καθώς και τη Μάχη με τη συνεργασία της οποίας πραγματοποιήθηκε η πρώτη σειρά πειραμάτων. Επίσης ευχαριστώ όλα τα παιδιά του εργαστηρίου για την βοήθειά τους αλλά και το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας που υπήρχε στο εργαστήριο όλο αυτόν τον καιρό.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους συναγωνιστές και φίλους με τους οποίους περάσαμε μαζί αυτά τα χρόνια και «αποφοιτήσαμε» μαζί από το «πανεπιστήμιο» του μαζικού φοιτητικού κινήματος.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που άντεξαν και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και τον αδερφό μου που έδωσε τη ίδια μάχη. Στους γονείς μου και τον αδερφό μου αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Νίκος Κανελλής

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΝΕΛΛΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

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

Περίληψη

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

Αυτή η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την μελέτη της επίδρασης του παράγοντας «πλάτος καναλιού» στην εξέλιξη των μοναχικών-σολιτινικών κυμάτων. Η μελέτη του υγρού υμένα πραγματοποιήθηκε στο κανάλι ροής μήκους 3 m το οποίο βρίσκεται στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας. Τα πειράματα διεξήχθησαν για δυο διαφορετικά πλάτη καναλιού ($w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$) αλλά αξιοποιήθηκαν και κάποια αποτελέσματα από την μεταπτυχιακή εργασία του Πέτρου Δάλλα (Δάλλας 2007) όπου το πλάτος είναι $w=470\text{mm}$. Για τον υπολογισμό του πάχους του υμένα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ψηφιακής απεικόνισης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μετά από μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση και την περιγραφή της πειραματικής διάταξης, παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα για ροή υγρού υμένα καθαρού νερού στο οποίο διαλύσαμε χρωστική ουσία ουρανίνη (Sodium Salt of Fluorescein- $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$) σε ποσότητα 250ppm).

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Εφαρμογές.....	1
1.3 Σύντομη αναφορά στην ιστορική αναδρομή.....	2
1.4 Στοιχεία για τα σολιτονικά και μοναχικά κύματα.....	3
1.5 Οι παράμετροι του πειράματος και η διάρθρωση της Εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Θεμελιώδης νόμοι και μαθηματικοί τύποι που διέπουν τη ροή στο κανάλι.....	5
2.3 Εξέλιξη των κυμάτων και αστάθεια.....	9
2.4 Η γραμμική αστάθεια ροής σε υμένα σε επίπεδο τοίχωμα.....	9
2.5 Μη γραμμική εξέλιξη της ροής υμένα σε επίπεδο τοίχωμα: πειράματα.....	10
Κεφάλαιο 3 Πειραματική Μεθοδολογία.....	18
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	18
3.2 Το υδραυλικό διάγραμμα.....	23
3.3 Δυο βασικές δυσκολίες στην προετοιμασία της πειραματικής διάταξης.....	25
3.4 Βαθμονόμηση ροόμετρων.....	25
3.5 Σύστημα εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.....	26
3.6 Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό.....	26
3.7 Βαθμονόμηση της μεθόδου φθορισμού.....	30
3.8 Επεξεργασία δεδομένων.....	31
3.9 Ψηφιακό φιλτράρισμα.....	32
3.10 Υπολογισμός της σχέσης ακτινοβολίας – πάχους υμένα.....	33

3.11 Επεξεργασία εικόνων.....	34
3.12 Μεθοδολογία μετρήσεων.....	36
Κεφάλαιο 4 Πειραματικά αποτελέσματα.....	44
4.1 Παράμετροι των πειραμάτων & Πρωτογενή δεδομένα	44
4.2 Παρουσίαση και συγκρίσεις της χρονικής εξέλιξης του ύψους του υμένα της ροής.....	49
4.2.1 Παρουσίαση και συγκρίσεις της χρονικής εξέλιξης του ύψους του υμένα της ροής για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής.....	49
4.2.2 Παρουσίαση και συγκρίσεις των χρονοσειρών για δύο διαφορετικές πλάτη του καναλιού ροής, $w=240\text{mm}$ και $w=120\text{mm}$	52
4.3 Παρουσίαση και συγκρίσεις του προφίλ του ύψους του υμένα για πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$ σε δυο αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$).....	59
4.4 Παρουσίαση των γραφημάτων του προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$).....	65
4.5 Σχόλια πάνω στις συγκρίσεις των προφίλ του ύψους του υμένα για τα τρία διαφορετικά πλάτη καναλιού ($w=470$, 240 120mm).....	77
4.6 Ο κρίσιμος Re για την μετάβαση από την περιοχή ευστάθειας στην περιοχή αστάθειας.....	79

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.....	5
Σχήμα 2.2: Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα ανάλογα με την γωνία κλίσης ϕ	8
Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής.....	11
Σχήμα 2.4: Η ανάπτυξη σολιτονικών κυμάτων κατάντη της ροής, όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα.....	11
Σχήμα 2.5: Η εξάρτηση του μεγέθους των σολιτονικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατάντη της ροής.....	12
Σχήμα 2.6: Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη αποστάσεως.....	12
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.....	13
Σχήμα 2.8: Η συγχώνευση μεταξύ δύο σολιτονικών κυμάτων, με τη μορφή εικόνων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.....	14
Σχήμα 2.9: Η ανάπτυξη των δευτερευουσών ασταθειών (subharmonic-sideband) στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με αποτέλεσμα τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων.....	15
Σχήμα 2.10: Ο διαχωρισμός των τρισδιάστατων ασταθειών στο διάγραμμα συχνότητά τους συναρτήσει του αριθμού Reynolds.....	16
Σχήμα 2.11: Το αποτέλεσμα επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία της μορφής ψαροκόκαλο(herringbone pattern).....	16
Σχήμα 2.12: Η δημιουργία δομών πλήρους αταξίας (disorder patterns) εξαιτίας της επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών.....	17
Σχήμα 3.1: Το κανάλι (αρχικά από Plexiglas τώρα από γυαλί).....	19
Σχήμα 3.2: Το δοχείο παροχής υγρού στο κανάλι.....	19
Σχήμα 3.3: Το δοχείο υπερχειλίσης στην αρχή του καναλιού.....	20
Σχήμα 3.4: Τα έξι παράλληλα ροόμετρα πριν το δοχείο υπερχειλίσης.....	20
Σχήμα 3.5: Τα φώτα υπεριώδους ακτινοβολίας.....	21
Σχήμα 3.6: Η κάμερα.....	21
Σχήμα 3.7: Το δοχείο υπερχειλίσης στην «έξοδο» του καναλιού.....	22

Σχήμα 3.8: Εμβαπτιζόμενη αντλία.....	22
Σχήμα 3.9: Το σύστημα ηλεκτροβαλβίδων.....	23
Σχήμα 3.10: Ο ηλεκτρονικός χρονιστής.....	23
Σχήμα 3.11: Το υδραυλικό διάγραμμα.....	24
Σχήμα 3.12: Η διάταξη των ροόμετρων.....	24
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.....	27
Σχήμα 3.14: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο-ρίxel της εικόνας.....	29
Σχήμα 3.16: Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται.....	31
Σχήμα 3.17: (a) Εικόνα πριν την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης, (b) μετά την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης.....	32
Σχήμα 3.18: Χωρική εξέλιξη του πάχους του υμένα.....	35
Σχήμα 3.19: Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου.....	35
Σχήμα 3.20: Όπου φωτογραφίες a-c: διαδοχικές εικόνες ($\Delta t=0,1$) στις οποίες φαίνεται ποιοτικά να περνάει ένα κύμα και όπου σχήματα d- f: οι αντίστοιχες κατανομές του πάχους του υμένα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής κάθε εικόνας.....	36
Σχήμα 3.21: Εξάρτηση της γωνίας κλίσης φ από τις αποστάσεις X,Y.....	37
Σχήμα 3.22: Αλφαδολάστιχο και χάρακας για τον ορισμό του οριζόντιου επιπέδου.....	38
Σχήμα 3.22: Δοχείο καθορισμού.....	41
Σχήμα 4.1: Πρωτογενή δεδομένα της μεθόδου φθορισμού.....	45
Σχήμα 4.2 Η χρονική εξέλιξη του κύματος για 5 διαδοχικές χρονικές στιγμές από 2.1 sec ως 2,5sec. Οι φωτογραφίες a ως e και τα αντίστοιχα γραφήματα f ως j.....	46
Σχήμα 4.3 Το γράφημα του προφίλ του ύψους του κύματος με χρήση του Matlab (a) και του Excel (b) για τις συγκεκριμένες 5 χρονικές στιγμές.....	47
Σχήμα 4.4 Η χρονική εξέλιξη του ύψους του κύματος μέσω επεξεργασίας με MatLab (a) και Excel (b) για τα rixel 285 και 318, δηλαδή για αποστάσεις 426.48mm και 437.66mm από την αρχή του καναλιού.....	48
Σχήμα 4.13: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=240\text{mm}$	49
Σχήμα 4.14: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=240\text{mm}$	49

καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.....	55
Σχήμα4.28: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.....	56
Σχήμα4.29: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $b=1330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.....	56
Σχήμα4.30: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $b=1330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.....	57
Σχήμα4.31: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $b=1330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.....	57
Σχήμα4.32: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$	59
Σχήμα4.33: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$	60
Σχήμα4.34: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$	61
Σχήμα4.35: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$	62
Σχήμα4.36: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$	63
Σχήμα4.37: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$	64
Σχήμα4.38: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$	65
Σχήμα4.39: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού	

ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$	66
Σχήμα4.40: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$	67
Σχήμα4.41: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$	68
Σχήμα4.42: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$	69
Σχήμα4.43: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$	70
Σχήμα4.44: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$	71
Σχήμα4.45: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$	72
Σχήμα4.46: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$	73
Σχήμα4.47: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$	74
Σχήμα4.48: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$	75
Σχήμα4.49: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$	76
Σχήμα 4.50: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167$ Hz ($T_{on}=5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm , b) 1330mm έως 1590mm , c) 2330mm έως 2590mm	79
Σχήμα 4.51: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm ,	

b)1330mm έως 1590mm, c) 2330mm έως 2590mm.....	80
Σχήμα 4.52: Τρισδιάστατη δομή για $w=240\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, για συχνότητα $f=0.5\text{HZ}$ και για $Re45$	81
Σχήμα 4.53: Τρισδιάστατη δομή για $w=240\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, για συχνότητα $f=0.167\text{HZ}$ και για $Re45$	81
Σχήμα 4.54: Διδιάστατη δομή για $w=120\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, για συχνότητα $f=0.167\text{HZ}$ και για $Re48$	82
Σχήμα 4.55: Τρισδιάστατη δομή για $w=120\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, για συχνότητα $f=0.5\text{HZ}$ και για $Re49$	82

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 4.1 Συνοπτική εικόνα πειραμάτων.....	44
Πίνακας 4.2 Τα χαρακτηριστικά του κύματος του σχήματος 4.3	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της επίδρασης της παραμέτρου του πλάτους ροής στην εξέλιξη των οδευόντων κυμάτων (κυρίως των μοναχικών) σε ροή υγρού υμένα που προκύπτουν από επιβολή μη γραμμικής περιοδικής διέγερσης, σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα.

Προηγούμενες εργασίες (διπλωματικές, μεταπτυχιακές, διδακτορικές) που έγιναν στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών διεργασιών μελέτησαν το γενικότερο φαινόμενο της εξέλιξης των μοναχικών κυμάτων σε ροή υγρού υμένα. Η συγκεκριμένη επικεντρώνει το ενδιαφέρον της στην παράμετρο «πλάτος καναλιού» για αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω, τα πειράματα διεξήχθησαν για δυο διαφορετικά πλάτη από ότι οι εργασίες προηγούμενων συναδέλφων. Μελετάται η εξέλιξη των μοναχικών κυμάτων υπό ίδιες συνθήκες ροής και επιβαλλόμενης εξωτερικής διαταραχής και ελέγχεται το «όριο» της παροχής (αριθμός Re) μετά το οποίο ο υμένας γίνεται ασταθής καθώς και το «όριο» της παροχής (αριθμός Re) μετά το οποίο εμφανίζονται τρισδιάστατες δομές.

Με τον όρο «μοναχικά» ή «σολιτονικά» χαρακτηρίζονται τα κύματα που έχουν ασύμμετρη κύρτωση, απότομο μέτωπο, ομαλή ουρά και έπονται και έπονται των τριχοειδών ρυτιδώσεων. Τα κύματα αυτά εμφανίζονται κυρίως κατά τη μη γραμμική συμπεριφορά υγρών υμένων, που ρέουν σε κεκλιμένο ή κατακόρυφο επίπεδο. Με τον όρο ροή υγρού υμένα αναφερόμαστε στη ροή της οποίας το πάχος είναι πολύ μικρότερο εν συγκρίσει των υπολοίπων χαρακτηριστικών της μεγεθών. Οι υγροί υμένες απαντώνται σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών καθώς έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα σε χαμηλή υδραυλική αντίσταση.

1.2 Εφαρμογές

Το ενδιαφέρον για τη μελέτη του φαινομένου της ροής υγρού υμένα και των μοναχικών κυμάτων, όπως είναι αναμενόμενο, γεννάται από την πληθώρα των βιομηχανικών εφαρμογών. Η προσπάθεια για βελτιστοποίηση των εφαρμογών αυτών με απώτερο στόχο την βελτίωση των βιομηχανικών διαδικασιών και τελικά μια παραγωγικότερη λειτουργία είναι η βάση αυτών των μελετών.

Χωρίς καμία πρόθεση να περιγράψουμε αναλυτικά τις εφαρμογές όπου απαντάται το φαινόμενο, απλά παραθέτουμε κάποια από τα πιο σημαντικά παραδείγματα:

- Σε αυλούς ατμοπαραγωγικών μονάδων όπου εμφανίζεται διφασική ροή νερού.
- Στις μηχανές των πυραύλων όπου η ροή υγρού υμένα χρησιμοποιείται για θερμική προστασία των θαλάμων καύσης.
- Στην ψύξη των πυρηνικών αντιδραστήρων.
- Σε εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται κατά κόρον ως συμπυκνωτές ψυκτικών μέσων στην κρυογενή τεχνολογία (πχ συμπυκνωτές ατμού).
- Στους εξατμιστήρες που αποτελούν βασικά μέρη στη διαδικασία απόσταξης θαλασσινού νερού.
- Στη ψύξη θειικού οξέως που χρησιμοποιείται στη γαλακτοβιομηχανία.
- Στις ροές με δέσμη που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία πλαστικών και μεταλλικών επιφανειών (πχ ανόπτηση μετάλλου).
- Σε συσκευές μεταφοράς μάζας όπως είναι οι απορροφητές, τα κελιά ηλεκτρόλυσης και οι κρυσταλλωτές.

1.3 Σύντομη αναφορά στην ιστορική αναδρομή

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. Για πρώτη φορά ασχολήθηκε με το θέμα ο Σκοτσέζος μηχανικός John Scott Russell το 1834. Η πρώτη παρατήρηση της δημιουργίας και εξέλιξης ενός μοναχικού κύματος σε ένα λεπτό υγρό υμένα έγινε λίγο τυχαία, καθώς ο John Scott Russell διεξήγαγε πειράματα με στόχο τη μέτρηση της σχέσης μεταξύ της ταχύτητας ενός πλεούμενου και της ωθούσας δύναμης. Το απρόσμενο γεγονός της παρατήρησης δημιουργίας και εξέλιξης ενός μοναχικού κύματος του κίνησε την περιέργεια και έτσι ξεκίνησε πιο συστηματικά πειράματα στο αντικείμενο αυτό. Τον John Scott Russell ακολούθησαν πολλοί άλλοι ερευνητές, εκ των οποίων ο καθένας συνέβαλε στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου.

Το 1895, οι Korteweg και de Vries δημοσίευσαν, το 1939 οι Frenkel και Kontorova, στα τέλη του 1940 οι Fermi και Ulam, το 1965 οι Zabusky και Kruskal και αρκετοί ακόμη ως τον Chang τη 10ετία του 1990.

Στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του ΠΘ η πρώτη πειραματική προσέγγιση της ροής που έγινε ήταν η διδακτορική διατριβή του κ. Μ. Βλαχογιάννη (1996-2000). Το αρχικό κομμάτι της εργασίας αυτής περιλάμβανε 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 συσκευή αυτή παρατηρήθηκε ότι πολύ ενδιαφέροντα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα σε μεγάλη απόσταση από την αφετηρία της ροής. Το κυριότερο είναι η αλληλεπίδραση των **σολιτονικών κυμάτων(solitary waves)** που δημιουργούνται από κάποια διαταραχή.

1.4 Στοιχεία για τα σολιτονικά και μοναχικά κύματα

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 παρακάμπτει 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.

1.5 Οι παράμετροι του πειράματος και η διάρθρωση της Εργασίας

Οι φυσικές και λειτουργικές παράμετροι που μεταβάλλονται στην παρούσα εργασία είναι η παροχή του υμένα, η συχνότητα εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών, η αλλαγή του σημείου μέτρησης κατόπιν της φοράς των κυμάτων και η αλλαγή του πλάτους του καναλιού ενώ η κλίση του τοιχώματος παραμένει σταθερή. Η αλλαγή του πλάτους του καναλιού και η εξαγωγή συμπερασμάτων για το πώς αυτή επιδρά στα μοναχικά κύματα ήταν η κεντρική επιδίωξη της εργασίας.

Μια συνοπτική εικόνα για το εύρος των παραμέτρων που επιλέχθηκαν είναι η εξής:

- Η κλίση του καναλιού παρέμεινε σταθερή στις $3,16^\circ$.
- Οι παροχές που επιλέχθηκαν μας έδωσαν αριθμούς $30 < Re < 60$, όμως οι συγκρίσεις επικεντρώθηκαν στο εύρος $Re=30,35,40$.
- Οι λήψεις έγιναν από δυο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ($a=330\text{mm}$ και $b=1330\text{mm}$).
- Δύο ήταν οι διαφορετικές συχνότητες διαταραχής που επιβλήθηκαν εξωτερικά οι: $f=0.5\text{Hz}$ (on1.5sec & off0.5sec) και $f=0.167\text{Hz}$ (on5sec & off1sec).
- Δύο ήταν και τα διαφορετικά πλάτη του καναλιού στα οποία διεξήχθη το πείραμα: $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$.
- Τέλος για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς το ρόλο του πλάτους καναλιού στα φαινόμενα που μελετάμε χρησιμοποιήθηκαν και αποτελέσματα από την μεταπτυχιακή εργασία του Πέτρου Δάλλα.

Η εργασία, αυτή αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία προσπάθεια συνοπτικής περιγραφής της βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια, κεφάλαιο 3, περιγράφεται η πειραματική μέθοδος και η πειραματική διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Στο τελευταίο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα υπό τη μορφή γραφημάτων της χρονικής εξέλιξης της ροής καθώς και του προφίλ του ύψους του υμένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

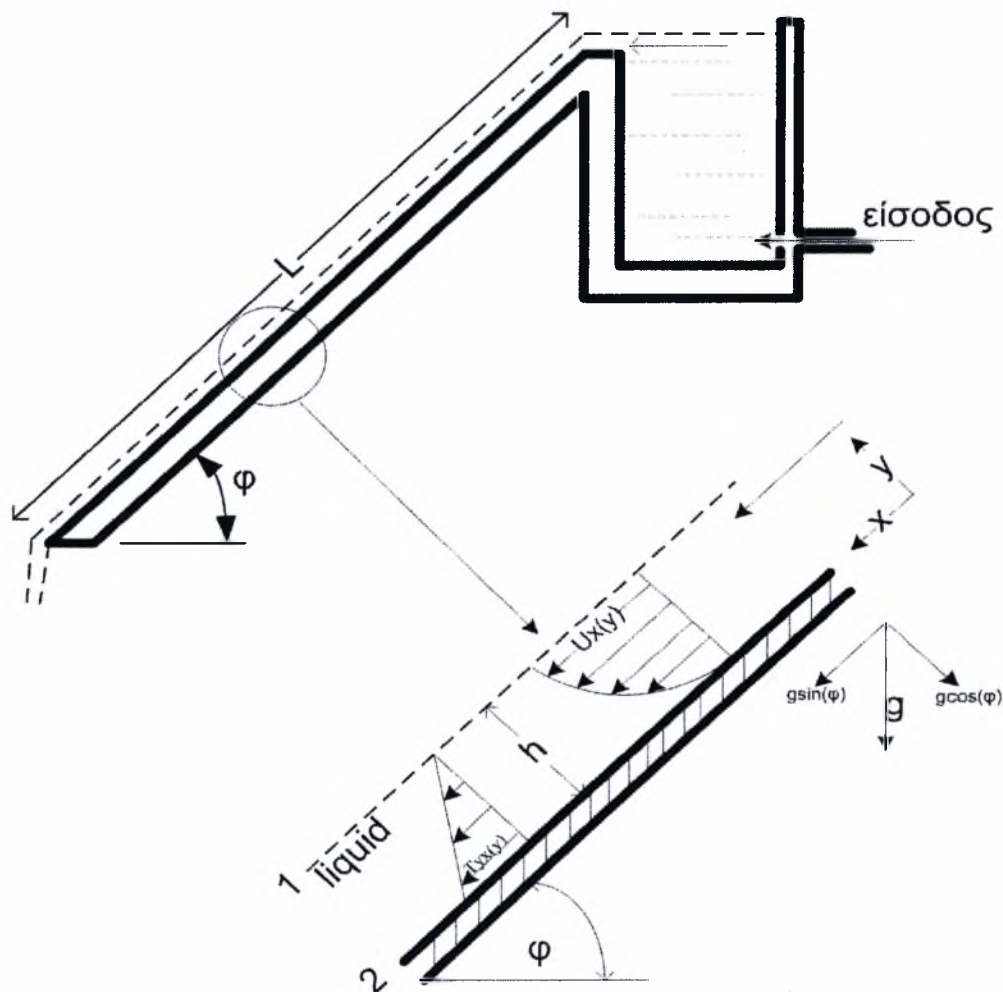
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

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. Η θεωρία αυτή έχει παρουσιαστεί αναλυτική στην διδακτορική εργασία του Μιχάλη Βλαχογιάννη, τη μεταπτυχιακή εργασία του Πέτρου Δάλλα καθώς και σε άλλες διπλωματικές εργασίες. Το παρόν κεφάλαιο της αυτής της εργασίας έχει αξιοποιήσει πολλά στοιχεία από τις παραπάνω εργασίες.

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 φ 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**:

$$(\text{ΕΙΣΡΟΗ}) - (\text{ΕΚΡΟΗ}) + (\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}) + \left(\overbrace{\text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}}^{=0} \right) = 0 \Rightarrow$$

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

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

όπου :

ρ : πυκνότητα υγρού

-

g : επιτάχυνση βαρύτητας αναλυμένη στο $\Sigma\Sigma$.

μ : ιξώδες υγρού

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 $y=h$:

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

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

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

Στη δεύτερη διεπιφάνεια (2), όπου $y=0$, η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδενική $U_x=0$ στο τοίχωμα, επομένως ορίζεται η μεταβλητή ολοκλήρωσης C_2 και προκύπτει η τελική συσχέτιση της συνιστώσας της ταχύτητας του ρευστού στον άξονα x για τη μεταβολή της κατά τον άξονα 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 ($y=h$):

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

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 $\langle U_x \rangle$ εξαρτάται μόνο από τη μεταβολή της κατά τον y :

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

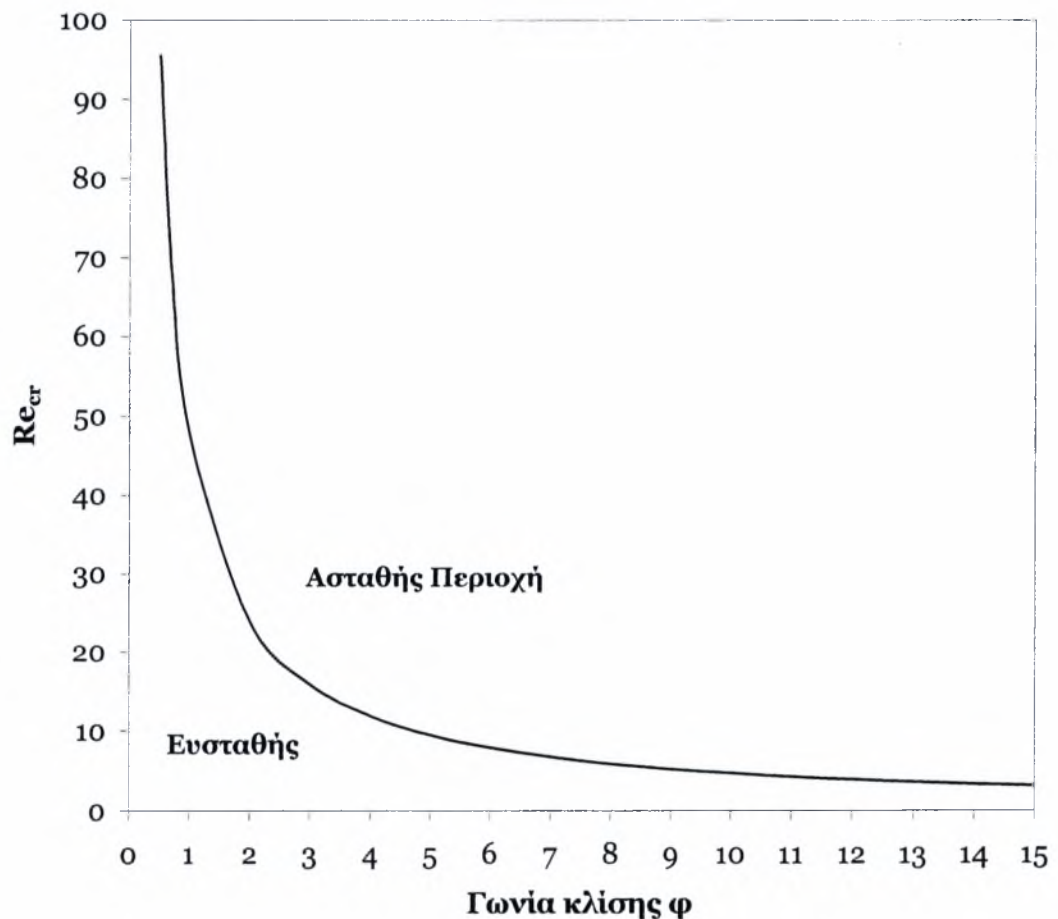
Ο αδιάστατος αριθμός που περιγράφει τη «ροϊκή» κατάσταση του υμένα είναι ο **αριθμός Reynolds**. Για τον υπολογισμό του θεωρείται κίνηση του ρευστού, ιξώδους μ , πυκνότητας ρ , πάνω σε επίπεδη πλάκα με σταθερή ταχύτητα $\langle U_x \rangle$, δημιουργώντας υμένα ύψους h . Επίσης, q είναι η ογκομετρική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

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

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 ϕ), 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 ϕ .

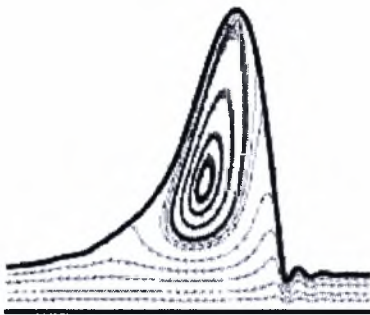
Η εξέλιξη των κυμάτων κατά την ροή ενός υγρού υμένα (falling film) αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών. Η μαθηματική ανάλυση της μόνιμης ροής μιας ελεύθερης επιφάνειας είναι αρκετά πολύπλοκη, εξαιτίας του γεγονότος ότι η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας δεν είναι γνωστή και αποτελεί μέρος της 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:

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

όπου, ρ η πυκνότητα του ρευστού, γ 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 επιπέδου 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 πιο 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 εξέλιξή της κατόπιν της ροής είναι εφικτό να διαχωριστεί η ευστάθεια του υμένα. Αν η διαταραχή αποσβένεται κατόπιν της ροής ο υμένας είναι ευσταθής. Σε πολλές περιπτώσεις το μήκος κατόπιν 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 $\alpha < \alpha_c(Re)$, 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.

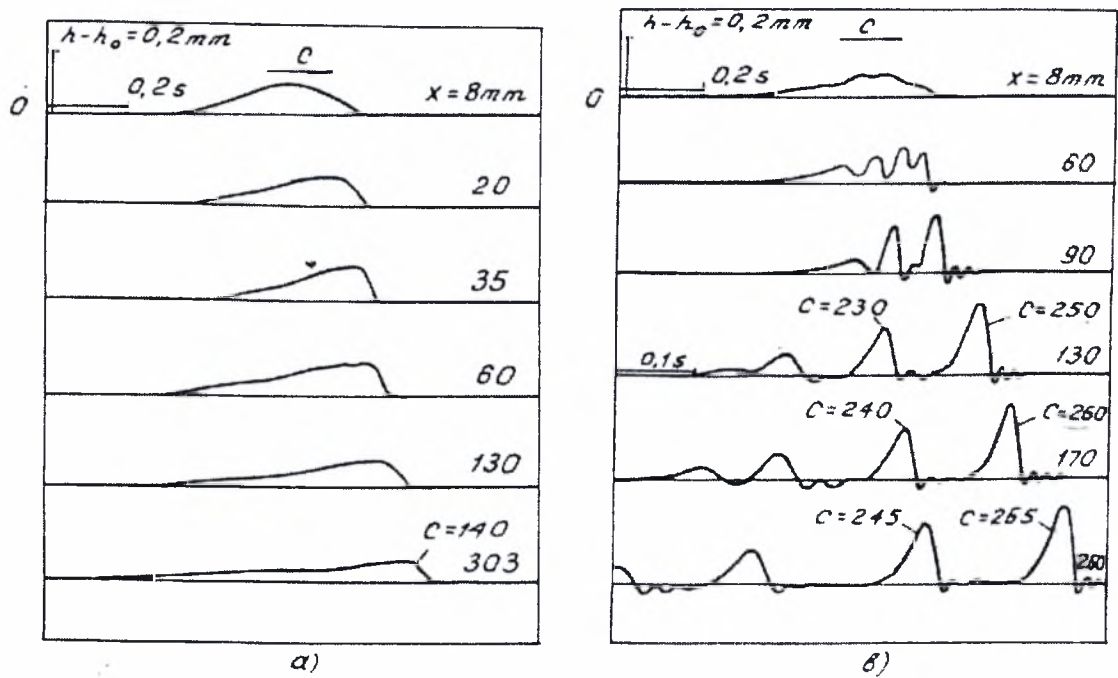
Ο ρυθμός αύξησης (growth rate) και η φασική ταχύτητα (phase velocity) των απειροστών κυμάτων μπορεί να βρεθούν υπολογιστικά ως συνάρτηση του κυματάριθμου για πεπερασμένες τιμές των Re , We και φ . Για πολύ μικρούς κυματάριθμους, η φασική ταχύτητα c , είναι $c = 2U_0$.

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

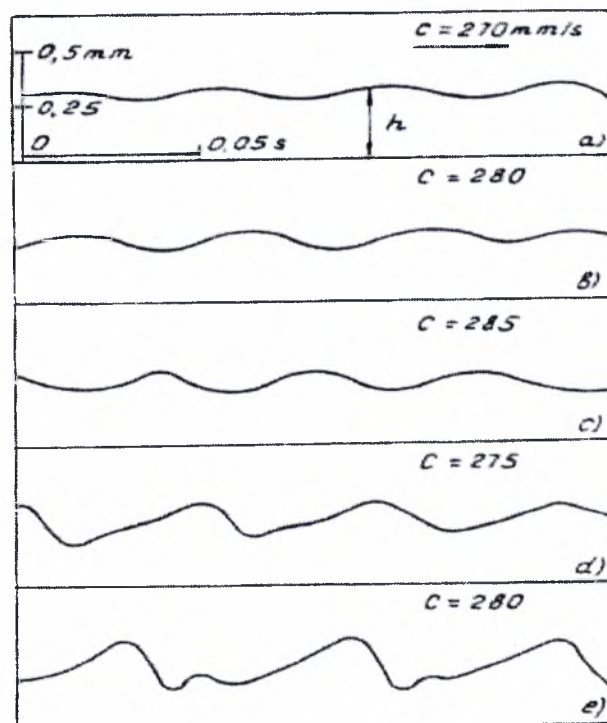
Η μη-γραμμική εξέλιξη της ροής υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα έχει διερευνηθεί πειραματικά από πολλές ερευνητικές ομάδες. Από τις πολυάριθμες εργασίες διακρίνονται δύο κλασσικές μελέτες, που έχουν κεντρική σπουδαιότητα για τη παρούσα εργασία και για το λόγο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά. Μία από τις 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. 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

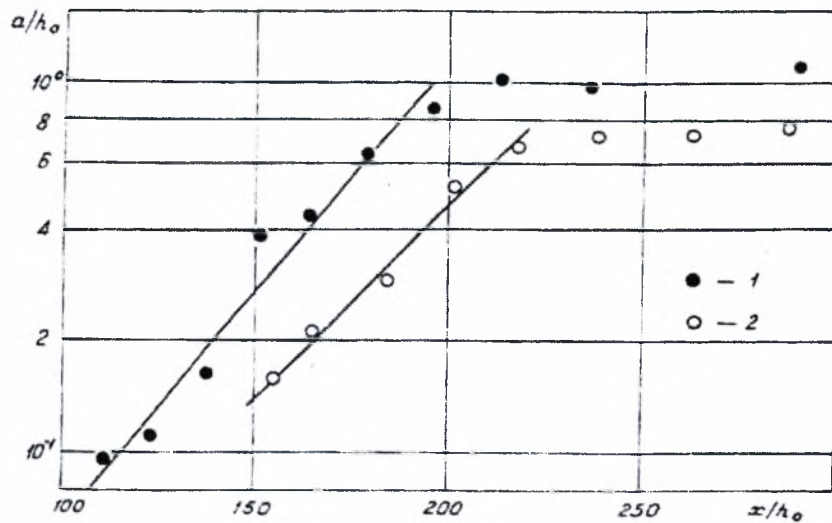
φαίνεται στο Σχήμα 2.5, η αύξηση της κατάντη αποστάσεως έχει ως αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση του μεγέθους του κύματος. Από μία απόσταση και μετέπειτα, το μέγεθος του σολιτονικού κύματος δε μεταβάλλεται, επιβεβαιώνοντας ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως. Αυτή η απόσταση, για ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο επίπεδο τοίχωμα, είναι $\sim 225h_N$.



Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής

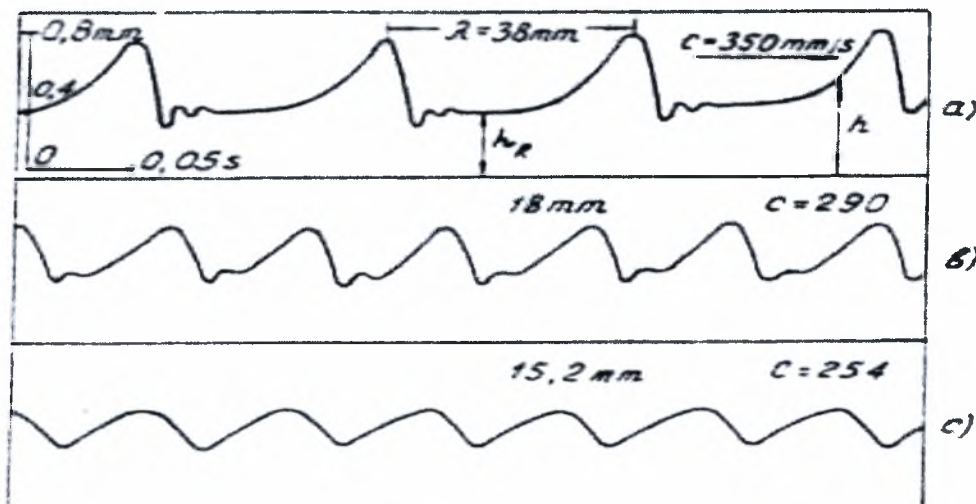


Σχήμα 2.4: Η ανάπτυξη σολιτονικών κυμάτων κατάντη της ροής, όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα



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

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).

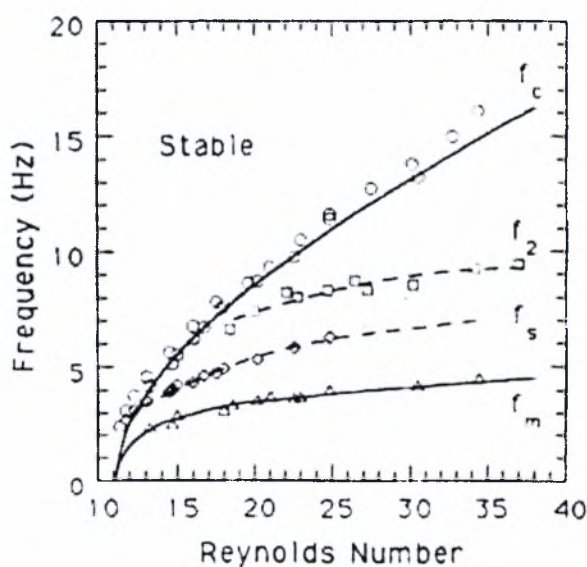


Σχήμα 2.6: Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη αποστάσεως

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 την 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.

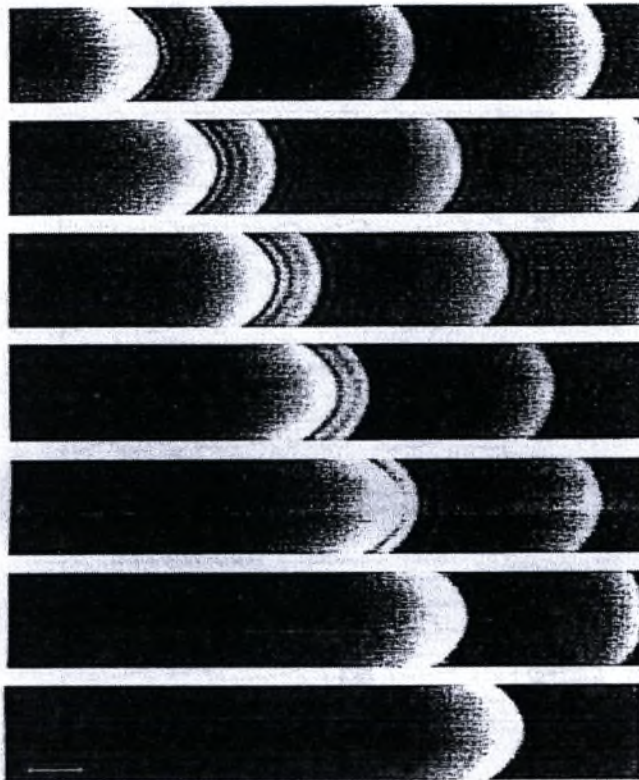


Σχήμα 2.7: Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιορισμένα όρια των διαφόρων ασταθειών.

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

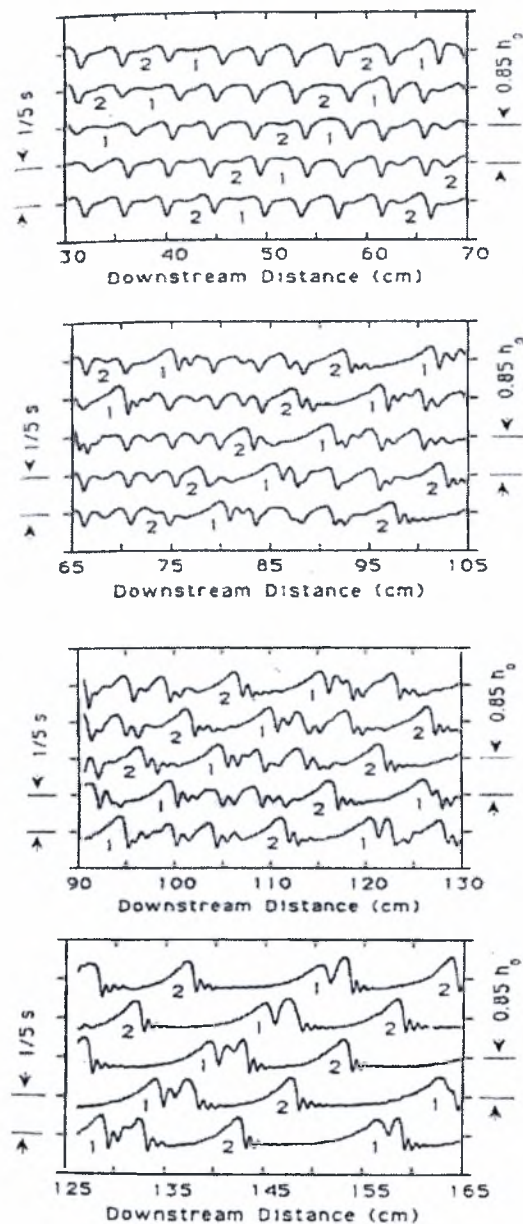
των καμπύλων f_2 και f_s . Μεταξύ των ορίων f_s και f_m αρχίζουν να σχηματίζονται τα μοναχικά κύματα και κάτω από την καμπύλη f_m η δομή των κυμάτων οδηγεί τελικά σε χαοτική δομή (spatiotemporal chaos).

Η δημιουργία των σολιτονικών κυμάτων και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασής τους δεν εξετάσθηκαν 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.



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

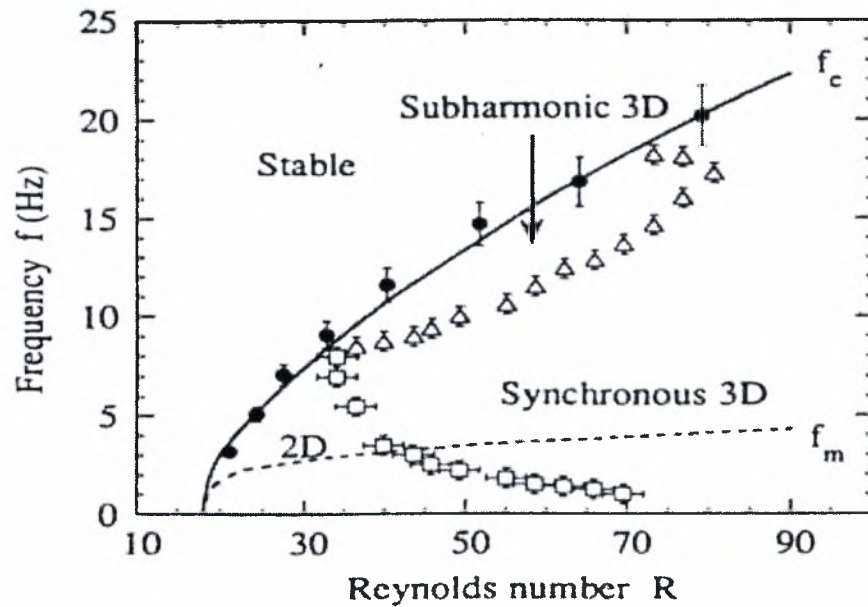
Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται η εξέλιξη του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα, με την δημιουργία των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων και την μετατροπή τους σε μοναχικά σολιτονικά κύματα. Η επίδραση των δευτερευόντων ασταθειών (subharmonic & sideband) έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της μορφής των κορεσμένων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



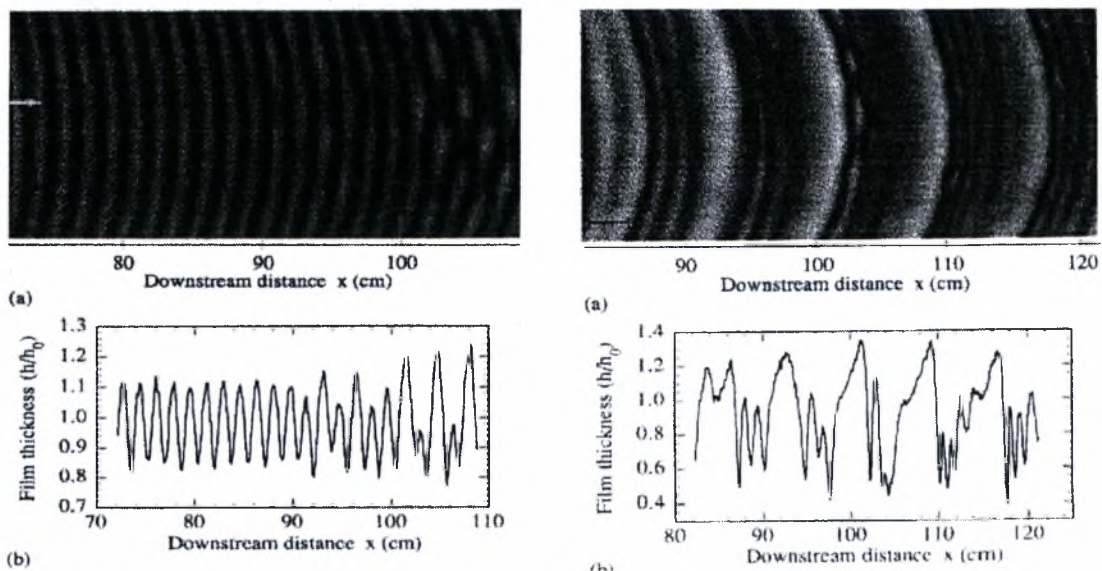
Σχήμα 2.9: Η ανάπτυξη των δευτερευουσών ασταθειών (subharmonic-sideband) στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με αποτέλεσμα τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων.

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 φαροκόκαλο (herringbone patterns). Αντιθέτως, όταν εφαρμόζονται σε σολιτονικά κύματα, ή σε

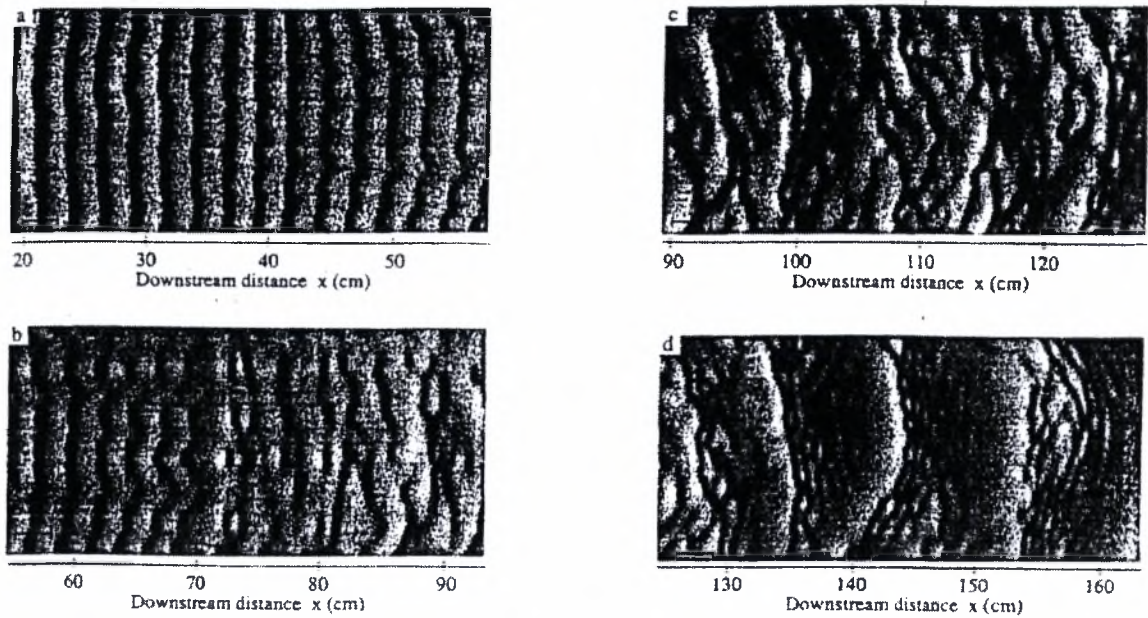
κύματα που τείνουν να γίνουν σολιτονικά, έχουν ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό των μετώπων του κύματος και τη δημιουργία εγκάρσιων τρισδιάστατων βαθουλωμάτων σε αυτά. Αναφορικά με τη δομή φαροκόκαλο, οι συγχρονισμένοι εγκάρσιοι σχηματισμοί, με τη μορφή βαθουλωμάτων, διατηρούν την περιοδικότητα που έχουν 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 2.10: 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

Σε αυτό το 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, παρουσιάζεται το υδραυλικό της διάγραμμα και το σύστημα εισαγωγής διαταραχών που κατασκευάστηκε. Επιπλέον περιγράφεται η μέθοδος μείωσης του αρχικού πλάτους του καναλιού από $w=470\text{mm}$, στο οποίο διεξήχθησαν οι πειραματικές εργασίες των Π. Δάλλα, Η. Τόλη, Γ. Βασιλειάδη, σε $w=240\text{mm}$ και $w=120\text{mm}$. Τέλος, 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. Όπως στο Κεφάλαιο 2, έτσι και στο παρόν κεφάλαιο έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά στοιχεία από τις προαναφερθείσες εργασίες των Τόλη, Βασιλειάδη, Δάλλα, καθώς η πειραματική διάταξη, η πειραματική μέθοδος με απεικόνιση φθορισμού καθώς και η μέθοδος επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ουσιαστικά κοινές για όλες τις προηγούμενες και την παρούσα εργασίες.

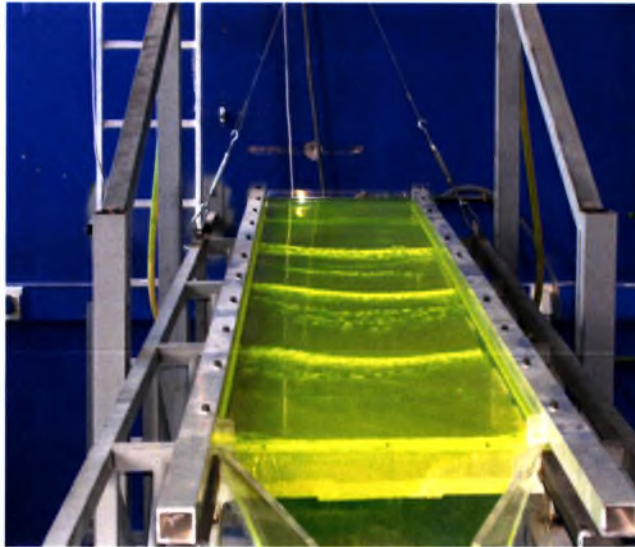
3.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών του ΤΜΜΒ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, από τον φοιτητή Π. Σταθά, στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας, σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Μ. Βλαχογιάννη.

Στόχος της συσκευής είναι να τροφοδοτηθεί μια κεκλιμένη λεία επιφάνεια με ρευστό, το οποίο να πάρει τη μορφή λεπτού υμένα ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς της ροής του υμένα αυτού. Παράλληλα η συσκευή επιτρέπει τον έλεγχο και τη μεταβολή μιας σειράς παραμέτρων (κλίση επίπεδης επιφάνειας, παροχή ρευστού, επιβαλλόμενη διαταραχή, απόσταση λήψης φωτογραφιών από την αρχή του καναλιού, χρησιμοποίησης εναλλακτικής μεθόδου απεικόνισης της ροής). Επιπλέον εύκολα μπορούν να χρησιμοποιηθούν υγρά με διαφορετικά ιξώδη (νερό, μείγμα νερού- γλυκερίνης κλπ).

Στα Σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα κύρια στοιχεία της πειραματικής διάταξης. Στο Σχήμα 3.1 βλέπουμε το κυρίως μέρος της διάταξης, το κανάλι. Το κανάλι, πλάτους 52 cm και μήκους 300 cm, πάνω στο οποίο ρέει το υγρό το οποίο εδράζεται σε ένα μεταλλικό πλαίσιο. Αρχικά το κανάλι ήταν κατασκευασμένο από Plexiglas, 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.



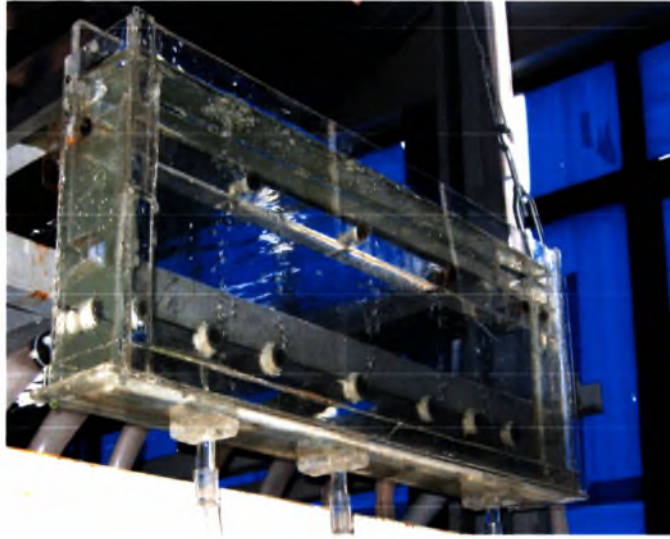
Σχήμα 3.1: Το κανάλι (αρχικά από Plexiglas τώρα από γυαλί)

Το κανάλι είναι σταθερά τοποθετημένο πάνω στο μεταλλικό ικρίωμα (που φαίνεται και στο Σχήμα 3.1). 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° έως 45° . Για την αλλαγή της κλίσης το κανάλι πρέπει να «τραβηχτεί» προς τα πάνω. Το βάρος όμως του ικριώματος 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 κανάλι τροφοδοτείται με νερό από ένα δοχείο παροχής 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. Στο Σχήμα 3.2 βλέπουμε το δοχείο παροχής.



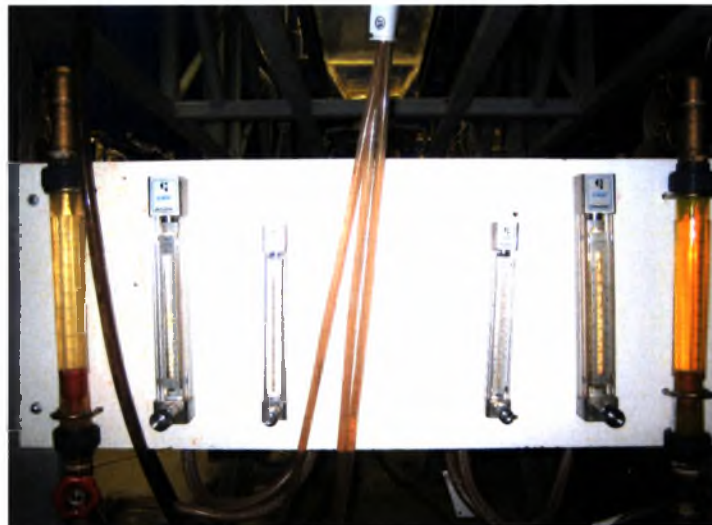
Σχήμα 3.2: Το δοχείο παροχής υγρού στο κανάλι

Η είσοδος του υγρού από το δοχείο παροχής στο κανάλι γίνεται από το σύστημα υπερχειλίσσης που βρίσκεται στην είσοδο του καναλιού. Στο Σχήμα 3.3 βλέπουμε το σύστημα υπερχειλίσσης.



Σχήμα 3.3: Το δοχείο υπερχειλίσσης στην αρχή του καναλιού

Ανάμεσα στο δοχείο παροχής και το σύστημα υπερχειλίσσης παρεμβάλλεται η διάταξη των ροόμετρων. Πρόκειται για έξι ροόμετρα με τα οποία γίνεται η μέτρηση της παροχής. Τα ροόμετρα είναι συνδεδεμένα παράλληλα έτσι ώστε η συνολική παροχή που τελικά θα καταλήξει στο κανάλι να είναι το άθροισμα των παροχών όλων των ροόμετρων. Στο Σχήμα 3.4 βλέπουμε τα 6 ροόμετρα.

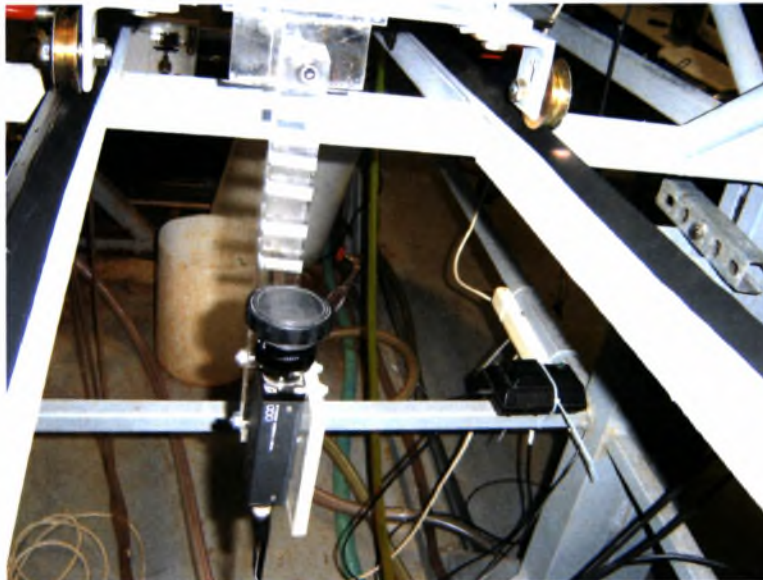


Σχήμα 3.4: Τα έξι παράλληλα ροόμετρα πριν το δοχείο υπερχειλίσσης

Πάνω από την πλάκα μετρήσεων του καναλιού είναι τοποθετημένο ένα σύστημα φωτισμού υπεριώδους ακτινοβολίας. 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. Στα Σχήματα 3,5 & 3,6 φαίνονται οι συστοιχίες των λαμπτήρων υπεριώδους και η κάμερα αντίστοιχα.



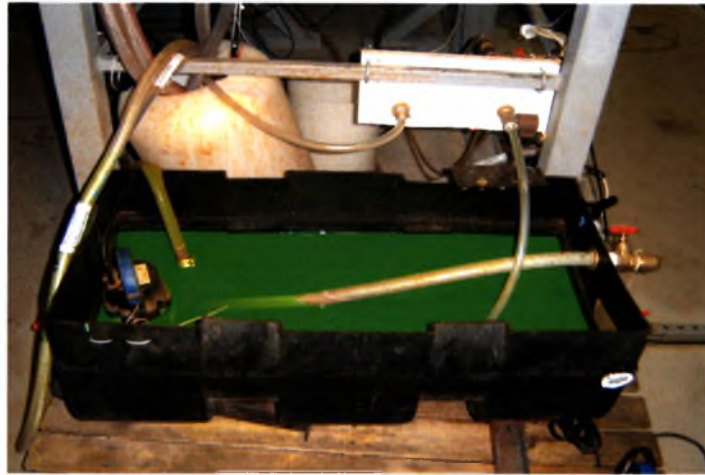
Σχήμα 3.5: Τα φώτα υπεριώδους ακτινοβολίας



Σχήμα 3.6: Η κάμερα

Η εκροή του υγρού από το κανάλι γίνεται σε ένα δοχείο υπερχείλισης (Σχήμα 3.7) μέσα στο οποίο είναι τοποθετημένες 2 εμβαπτιζόμενες αντλίες (Σχήμα 3.8). Οι δυο αυτές αντλίες στέλνουν το

ρευστό επάνω στο δοχείο παροχής. Στο δοχείο υπερχείλισης καταλήγουν και σωλήνες από την υπερχείλιση του δοχείου παροχής.



Σχήμα 3.7: Το δοχείο υπερχείλισης στην «έξοδο» του καναλιού

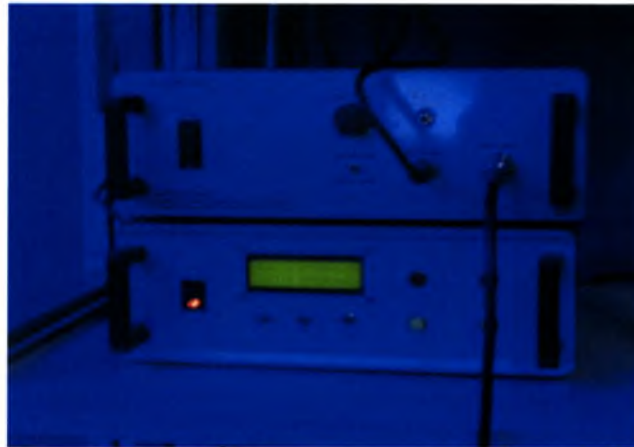


Σχήμα 3.8: Εμβαπτιζόμενη αντλία

Για την πρόκληση της διαταραχής χρησιμοποιείται σύστημα ηλεκτροβαλβίδων το οποίο ανοιγοκλείνει 3 σωλήνες, οι οποίοι συνδέονται στο δοχείο υπερχείλισης στην είσοδο του καναλιού. Οι ηλεκτροβαλβίδες είναι τοποθετημένες στο δοχείο υπερχείλισης στην έξοδο του καναλιού (Σχήμα 3.9). Οι ηλεκτροβαλβίδες ελέγχονται από έναν ηλεκτρονικό χρονιστή Σχήμα 3.10. Οι βαλβίδες είναι ανοικτές και περιοδικά κλείνουν δημιουργείται ακαριαία αύξηση της παροχής στο κανάλι που μεταφράζεται σε δημιουργία κυματισμού.



Σχήμα 3.9: Το σύστημα ηλεκτροβαλβίδων



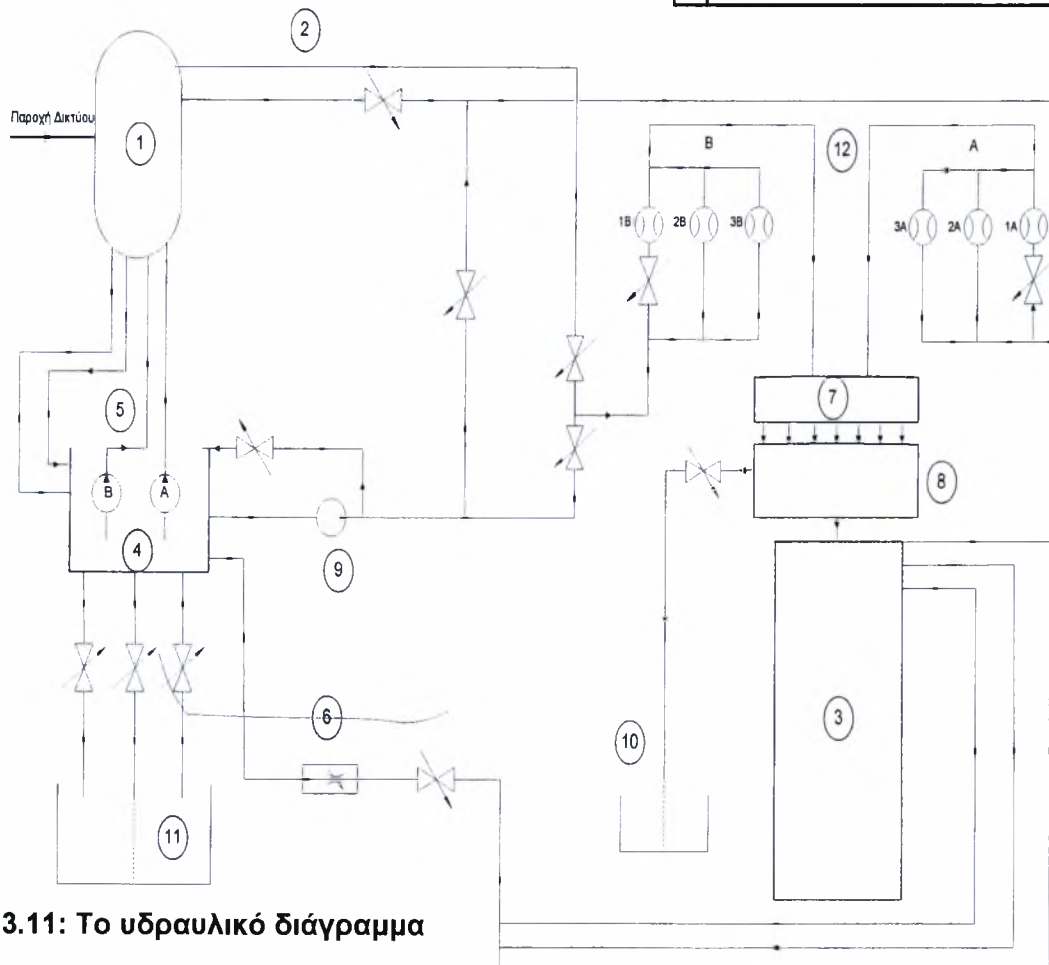
Σχήμα 3.10: Ο ηλεκτρονικός χρονιστής

3.2 Το υδραυλικό διάγραμμα

Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζεται το υδραυλικό διάγραμμα της πειραματικής μας διάταξης μαζί με το υπόμνημα όπου σημειώνονται τα διάφορα στοιχεία της πειραματικής διάταξης. Η λειτουργία της συσκευής περιγράφεται ως εξής με βάση το υδραυλικό διάγραμμα (Σχήμα 3.11): 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 διάφορα 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 υπερχειίλισης (8). Το δοχείο υπερχειίλισης 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 υπερχείλισης 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 εμβυσιζόμενη 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	Εμβυσιζόμενες Αντλίες Α, Β
6	Ηλεκτροβάννα που αποτελεί το Σύστημα Διαταροχής
7	Συλλέκτης και καταμεμητής της παροχής στο Κανάλι
8	Δοχείο Υπερχείλισης για τη δημιουργία λεπτού υδατινού υμένα στην κατεύθυνση της ροής
9	Εξωτερική Αντλία για την επίτευξη μεγαλύτερων παροχών
10	Φρεάτιο Αποχέτευσης μικρό
11	Φρεάτιο Αποχέτευσης μεγάλο
12	Ροόμετρα



Σχήμα 3.11: Το υδραυλικό διάγραμμα

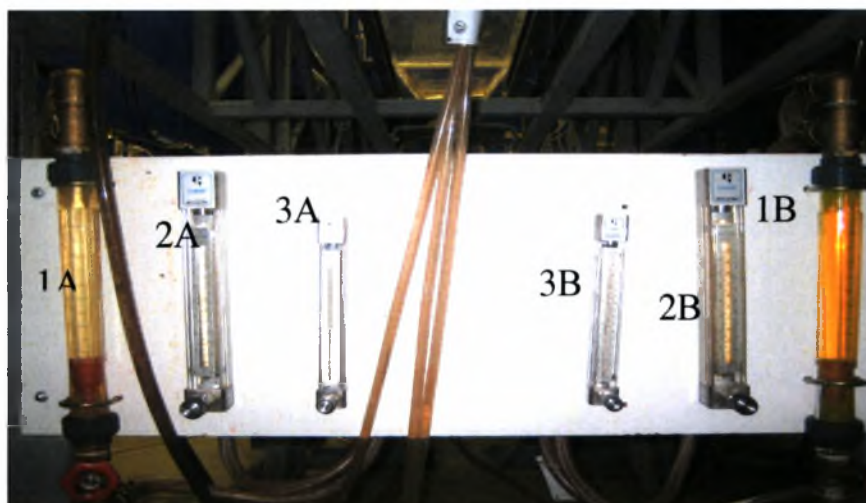
3.3 Δυο βασικές δυσκολίες στην προετοιμασία της πειραματικής διάταξης

Τα πιο δύσκολα σημεία κατά την προετοιμασία της πειραματικής διάταξης για την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων αυτής της εργασίας ήταν δυο. Καταρχήν η ευθυγράμμιση του καναλιού. Ο έλεγχος της ευθυγράμμισης επιτυγχάνεται με δυο σειρά από κοχλίες πάνω στους οποίους «πατά» το κανάλι. Η δεύτερη «δυσκολία» ήταν η ανάγκη για μη μόνιμη μείωση του πλάτους του καναλιού, από το αρχικό πλάτος ροής ($w=470\text{mm}$) στα επιθυμητά πλάτη ($w=240\text{mm}$ και $w=120\text{mm}$). Για να χωρίσουμε λοιπόν το κανάλι χρησιμοποιήσαμε μια ράβδο Plexiglas ορθογωνικής διατομής και μήκους 3m, πάνω από την οποία είχαμε τοποθετήσει μια αντίστοιχη ράβδο από σίδηρο. Η δυσκολία ήταν ότι από τη μια θα έπρεπε να σταματήσουμε οποιαδήποτε διαρροή ρευστού κάτω από τη ράβδο Plexiglas προς το «αποκλεισμένο» μέρος του καναλιού αλλά ταυτόχρονα δεν θα έπρεπε να «τραυματίσουμε» τη λεία επιφάνεια του καναλιού πάνω στην οποία ρέει το ρευστό. Ο ρόλος της σιδερένιας ράβδου ήταν ακριβώς αυτός, το να πιέζει αρκετά τη ράβδο Plexiglas ώστε να είναι στεγανή.

3.4 Βαθμονόμηση ροόμετρων

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 3.12: Η διάταξη των ροόμετρων

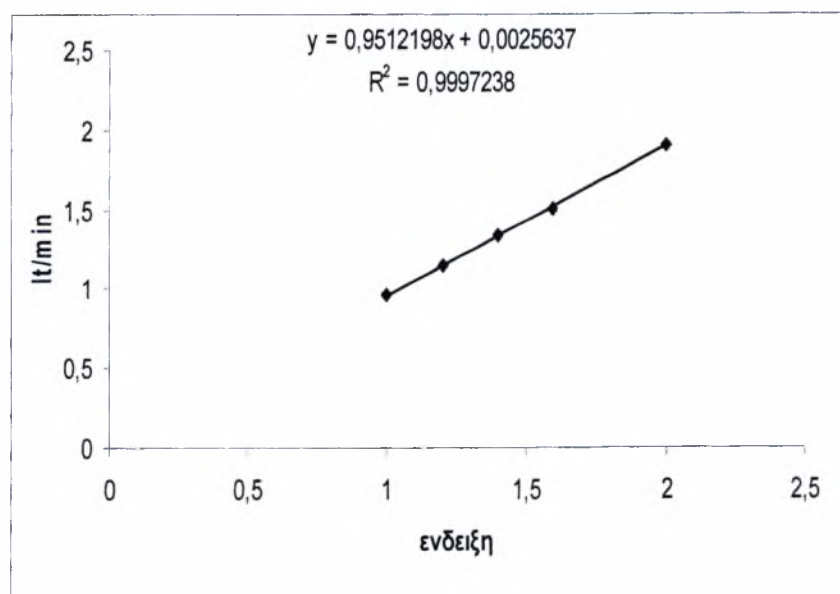
Ροόμετρα A	Δυναμικότητα
1 A	5 Lt/min
2 A	2.1 Lt/min
3 A	0.72 Lt/min

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

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 ρευστά.

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



ροόμετρο 2A

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

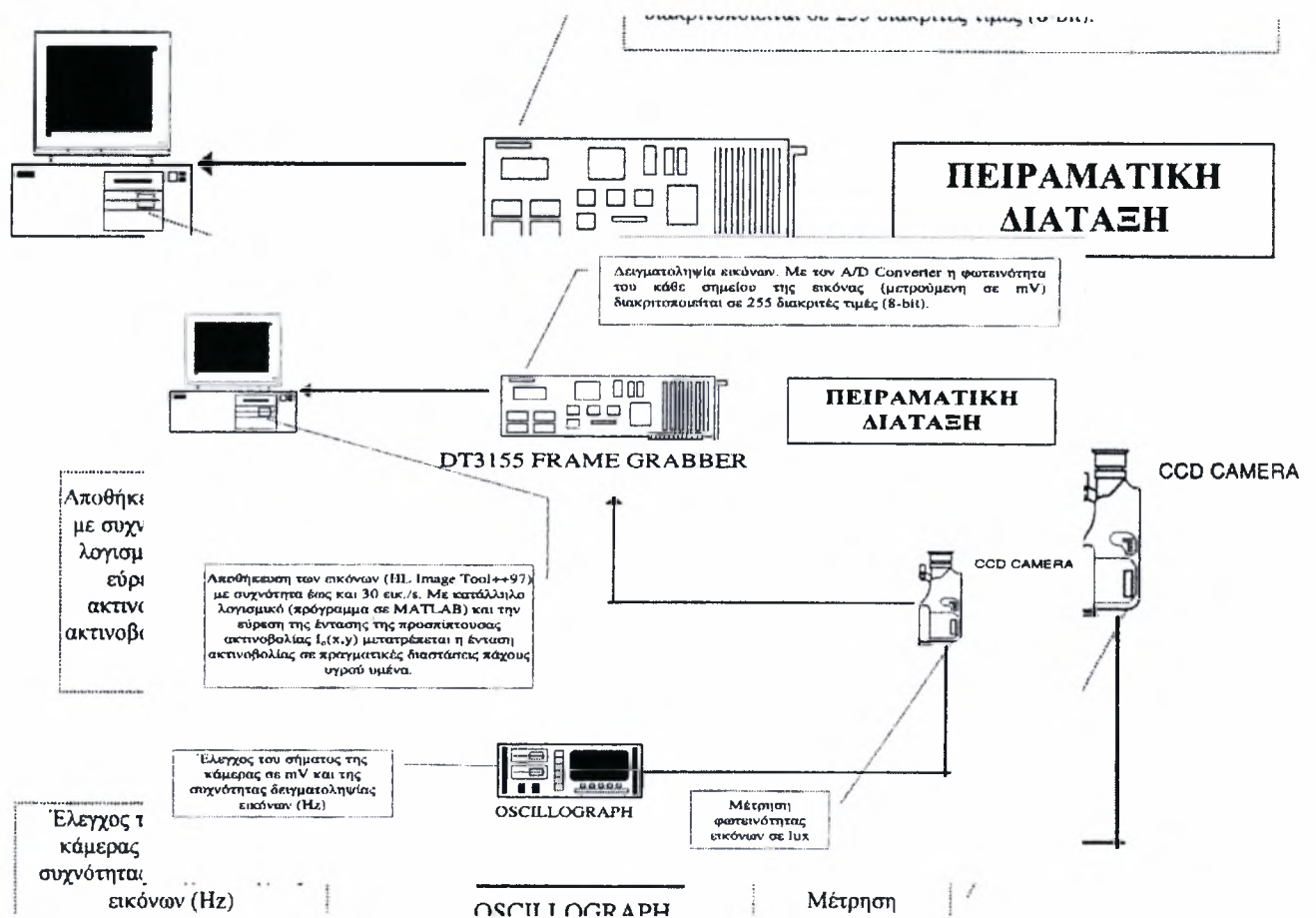
3.5 Σύστημα εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Η αρχή λειτουργίας του και ο λόγος ύπαρξής του αναλύθηκε διεξοδικά στο 2^ο 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 υπερχειλίσης ενώνονται σε μια και οδηγούνται σε μια ηλεκτροβαλβίδα ON/OFF που καταλήγει απ' ευθείας στη δεξαμενή απορροής. Η ηλεκτροβαλβίδα (Σχήμα 3.9) είναι παράλληλα συνδεδεμένη σε έναν ψηφιακό ηλεκτρονικό χρονιστή (Σχήμα 3.10) 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 υπερχειλίσης 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»

3.6 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



Σχήμα 3.13: 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- $C_{20}H_{10}O_5Na_2$) η οποία έχει την ιδιότητα να φθορίζει κάτω από την επίδραση υπεριώδους φωτός εκπέμποντας ορατό πράσινο – κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 525-580nm. Η προσθήκη της ουσίας αυτής δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του ρευστού. Πάνω από την περιοχή των μετρήσεων τοποθετήθηκε η πηγή υπεριώδους φωτός (Σχήμα 3.5) που είναι 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

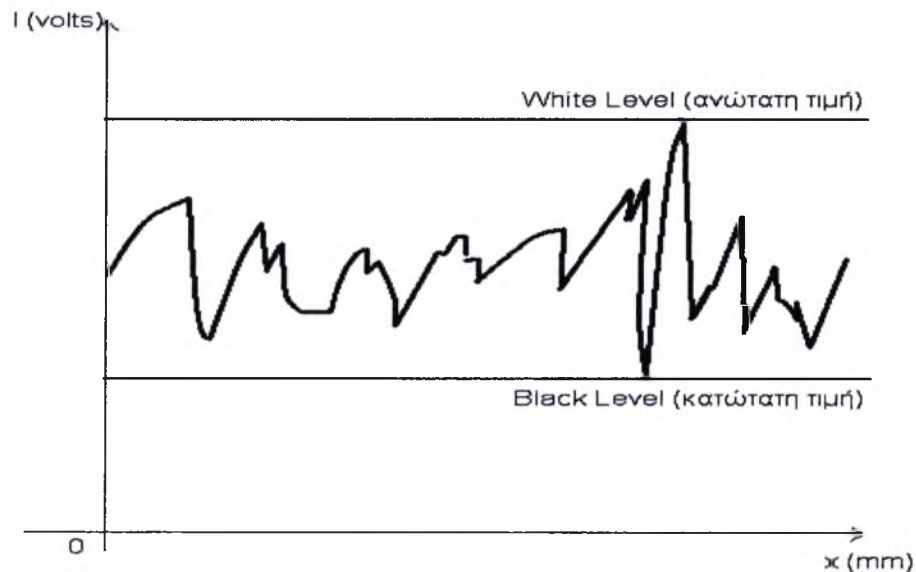
768x576 pixels με ανάλυση 8 bits. Οι δυνατότητες αποθήκευσης της κάρτας συλλογής εικόνων, ανάλογα με τη διαθέσιμη μνήμη του υπολογιστή, είναι 75 εικόνες – 24 MB – 640x480 pixels ή 50 εικόνες – 24 MB – 768x576 pixels. Η περιοχή η οποία αποτυπώνεται στην εικόνα μπορεί να αλλάξει μεταφέροντας την κάμερα 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 3.14 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 5μm. Βέβαια, την τιμή της έντασης που παίρνουμε για την εικόνα έχει επηρεάσει και ο θερμικός θόρυβος η παρουσία του οποίου είναι αναπόφευκτη σε κάθε ψηφιακό σήμα. Η τιμή του σ' αυτή την περίπτωση είναι εύκολο να μετρηθεί υπολογίζοντας τα mV που φαίνεται να ακτινοβολούνται όταν ο φακός της κάμερας είναι καλυμμένος (ακτινοβολία από τον υμένα μηδενική). Σύμφωνα με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, το τοπικό πάχος υμένα $h(x,y,t)$ είναι γραμμικά ανάλογο με την ένταση του φωτός $I(x,y,t)$ που εκπέμπεται από τον φθορίζοντα υμένα. Ο Βλαχογιάννης (2001) επαλήθευσε τη γραμμικότητα μεταξύ του θεωρητικά προβλέψιμου πάχους και της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, με ελέγχους σε διάφορα σημεία του οπτικού πεδίου. Έτσι η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές παραμέτρους είναι:

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

όπου α, β οι συντελεστές της γραμμικής σχέσης. Οι δυο αυτοί συντελεστές εξαρτώνται από το είδος του ρευστού, την απόσταση των λαμπτήρων από το τοίχωμα, τη συγκέντρωση της

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



Σχήμα 3.14: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο-pixel της εικόνας.

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

3.7 Βαθμονόμηση της μεθόδου φθορισμού

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

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

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η 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. 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. Επίσης το μικρόμετρο έχει την δυνατότητα να μετακινείται κατά μήκος του κανόνα.

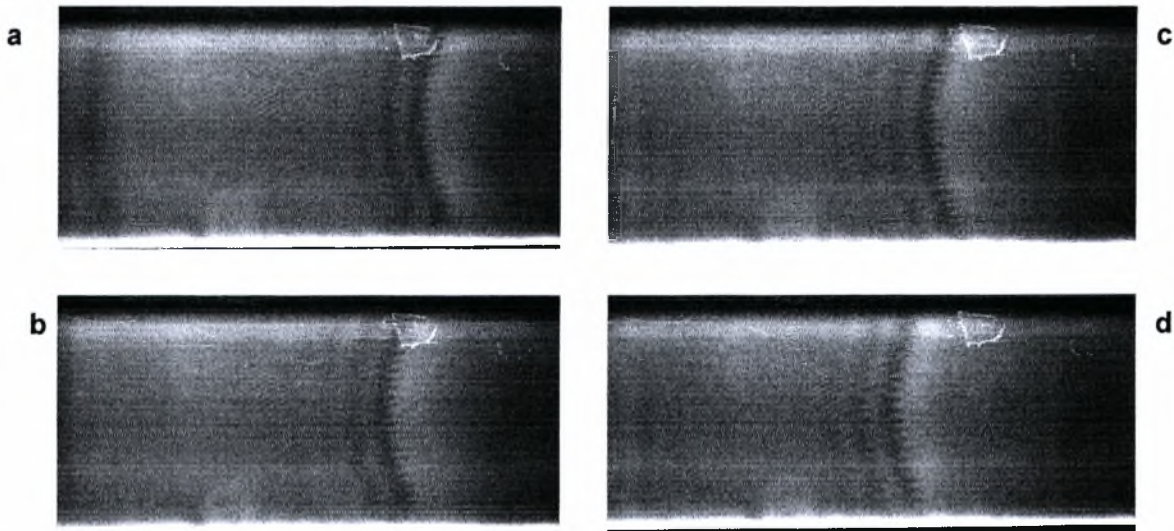
Αφού λοιπόν πιστοποιηθεί η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της θεωρητικής πρόβλεψης κατά Nusselt είναι δυνατή η βαθμονόμηση της πειραματικής μεθόδου χρησιμοποιώντας την σχέση (3.1). Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής: αρχικά μετράμε την παροχή στο κανάλι και από την σχέση Nusselt 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 γνωστή την ακτινοβολία και το πάχος του υμένα είναι δυνατός και ο υπολογισμός των γραμμικών συντελεστών α και β της σχέσης (3.1). Επειδή η

σχέση είναι γραμμική απαιτούνται τα 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 α και β που αντιστοιχούν σε κάθε Re . 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 Re . 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 Re της εικόνας. Ένας εναλλακτικός τρόπος βαθμονόμησης αυτών των πειραμάτων είναι η χρησιμοποίηση της βαθμονόμησης για μικρότερες κλίσεις.

3.8 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.

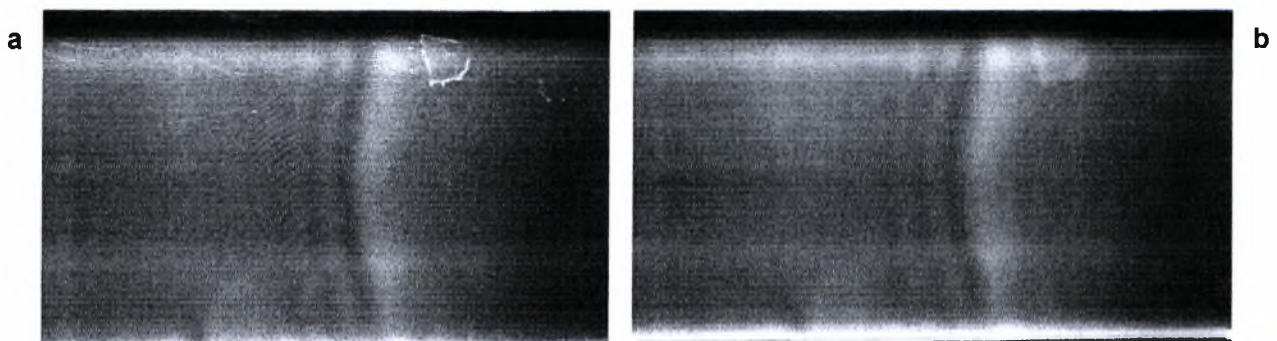


Σχήμα 3.16: Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται.

Έτσι στο Σχήμα 3.16, 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 3.16 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).

3.9 Ψηφιακό φιλτράρισμα

Το πρώτο στάδιο στην επεξεργασία των εικόνων είναι η εφαρμογή κατάλληλου φίλτρου σε κάθε εικόνα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση κάποιων ανεπιθύμητων παραγόντων στα δεδομένα της έντασης (π.χ η παρουσία εγκλωβισμένου αέρα με μορφή φυσαλίδων στη ροή έχει ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της ακτινοβολίας χωρίς να υπάρχει αύξηση του πάχους του υμένα). Με την βοήθεια υπολογιστικών φίλτρων συσχετίζουμε την τιμή σε κάθε pixel της εικόνας με αυτή των γύρω του ώστε να απαλειφθούν οι πολύ απότομες μεταβολές στην τιμή λίγων pixel. Ένα παράδειγμα χρήσης φίλτρου φαίνεται στο Σχήμα 3.17. 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 3.17 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 3.17: (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.

3.10 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 α και β . Αρχικά αντιστοιχίζουμε τις διακριτές τιμές του κάθε στοιχείου του κάθε πίνακα σε mVolts μέσω της σχέσης:

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

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

$$q = \frac{WL - BL}{255} \quad \text{Σχέση 3.3} \quad \text{Σχέση 3.3}$$

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

$$\text{Noise}(i, j) = I_{0l}(i, j) \times \frac{WL_{\max} - BL_{\min}}{255} + BL_{\min}(i, j), \quad i = 1, 576 \ \& \ j = 1, 768 \quad \text{Σχέση 3.4}$$

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.

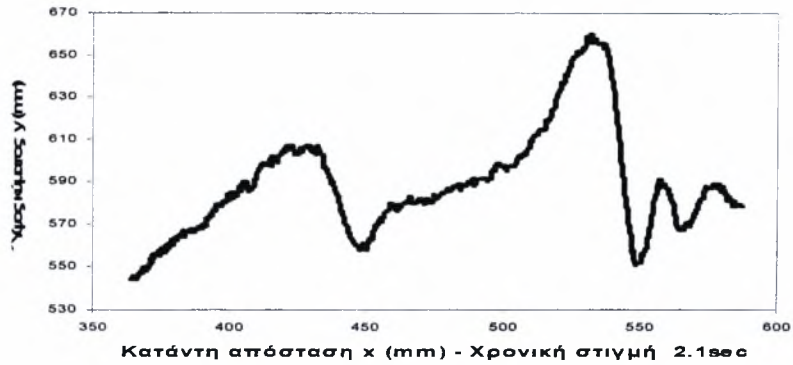
Όπως είπαμε για την βαθμονόμηση παίρνουμε 20 εικόνες σε τουλάχιστον 4 διαφορετικούς αριθμούς Re. Οι πίνακες που δίνουν τις τιμές σε διαφορετικές εικόνες για τον ίδιο Re προστίθενται, και τα στοιχεία του συνολικού πίνακα που προκύπτει διαιρούνται με το συνολικό αριθμό των εικόνων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε 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 α, β γίνεται γνωστή η μορφή της σχέσης έντασης ακτινοβολίας – τοπικού πάχους υμένα και άρα είναι δυνατός ο υπολογισμός του πάχους του υμένα σε οποιοδήποτε αριθμό Re εκτός της ευσταθούς περιοχής.

3.11 Επεξεργασία εικόνων

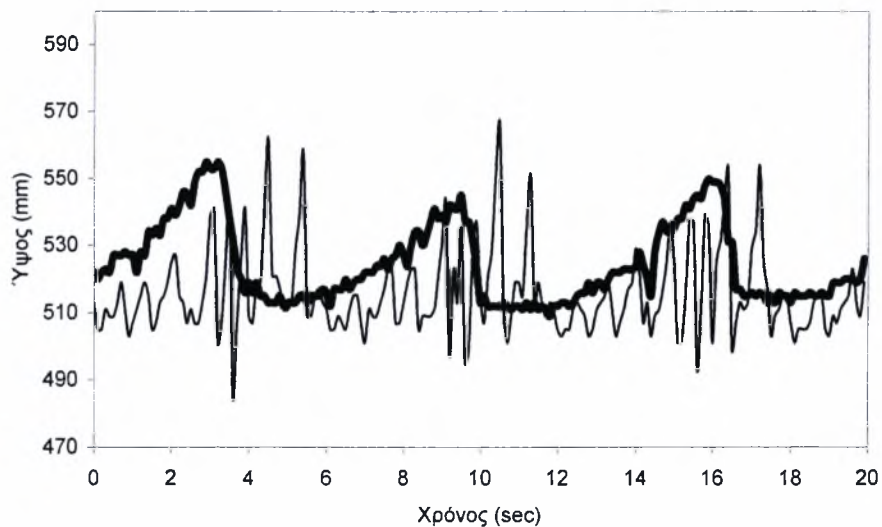
Στη συνέχεια περνάμε στην επεξεργασία των δεδομένων που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ανάλυση. Ο αριθμός των εικόνων προς επεξεργασία σε αυτή την περίπτωση, για κάθε αριθμό Re , είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που λαμβάνονται στην ευσταθή περιοχή και εξαρτάται από το χρονικό διάστημα για το οποίο έγινε η δειγματοληψία. Συνήθως ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 0,1εικόνες/sec. Η διαδικασία που ακολουθείται και σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτή της επεξεργασίας των δεδομένων της ευσταθούς περιοχής. Έτσι λοιπόν, κάθε εικόνα μετατρέπεται σε ένα πίνακα 576x768, όπου το κάθε στοιχείο έχει μια διακριτή τιμή (0 ως 255). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε mVolts μέσω των σχέσεων που δόθηκαν στην παράγραφο 3.8 χρησιμοποιώντας σαν WL και BL τιμές οι οποίες ορίστηκαν σαν χαμηλότερη και υψηλότερη τιμή της έντασης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Έπειτα, η σχέση που έχει υπολογιστεί ότι συνδέει την ακτινοβολία με το μέσο πάχος του υμένα μπορεί να μας δώσει το πάχος του υμένα σε κάθε pixel της εικόνας Σχήμα 3.18.

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 Σχήμα 3.19. Η απεικόνιση του πάχους του υμένα σε διάφορα σημεία κατά μήκος του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου ($h(x_0, y_0, t)$), μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη βασική αρμονική της συχνότητας ταλάντωσης των σημείων. Επίσης, μπορεί να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με το μέσο ύψος των κυμάτων και το μέσο πάχος υμένα.



Σχήμα 3.18: Χωρική εξέλιξη του πάχους του υμένα

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

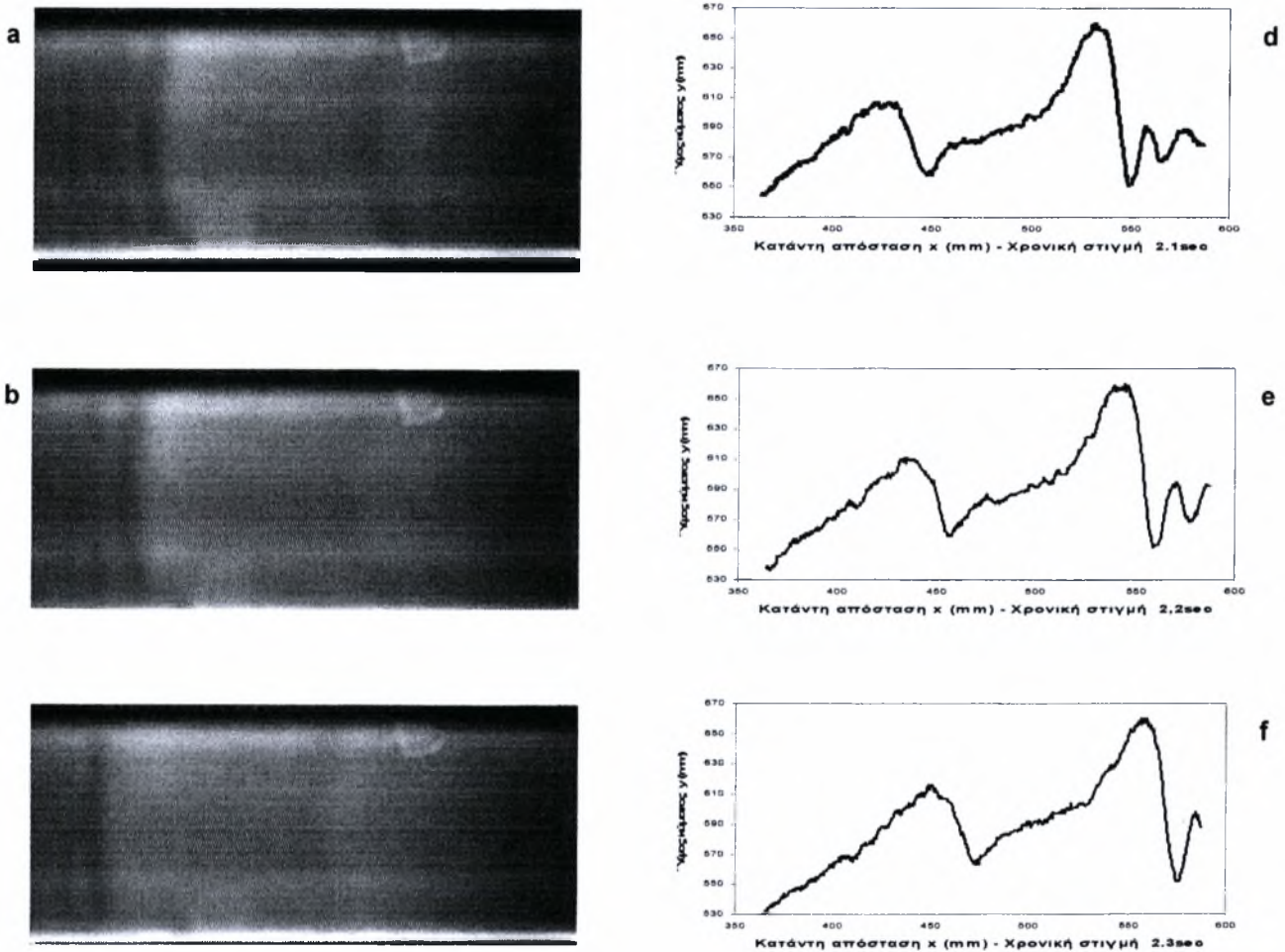


Σχήμα 3.19: Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου

Στο Σχήμα 3.20 a, b και c παρουσιάζονται τρεις διαδοχικές εικόνες στις οποίες φαίνεται ποιοτικά να περνάει ένα κύμα. Στο Σχήμα 3.20 d, e 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 3.20: Όπου φωτογραφίες a-c: διαδοχικές εικόνες ($\Delta t=0,1$) στις οποίες φαίνεται ποιοτικά να περνάει ένα κύμα και όπου σχήματα d- f: οι αντίστοιχες κατανομές του πάχους του υμένα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής κάθε εικόνας.

3.12 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 μm) 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, για 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 έτσι ώστε να μην «σπάει» 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.

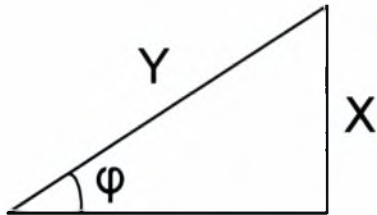
Πριν βάλουμε σε λειτουργία την πειραματική διάταξη πρέπει να κάνουμε κάποιους ελέγχους. Αρχικά γίνεται ένας οπτικός έλεγχος της πειραματικής διάταξης για να διαπιστωθούν τυχόν αστοχίες που μπορούν να επηρεάσουν την καλή λειτουργία της συσκευής. Έπειτα κλείνουμε τις βάνες των ροομέτρων A,B ώστε από τη 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 ϕ , 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 $3,16^\circ$. 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 ϕ = η γωνία κλίσης του καναλιού.



Σχήμα 3.21: Εξάρτηση της γωνίας κλίσης ϕ από τις αποστάσεις X, Y

Πιο συγκεκριμένα καθορίζοντας την γωνία ϕ , στην περίπτωση μας $\phi=3,16^\circ$ 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 3.22. Συνεπώς ανεβάζοντας το κανάλι με τη βοήθεια το ηλεκτρικού αναβατορίου κατά την απόσταση X έχουμε την επιθυμητή γωνία κλίσης ϕ του καναλιού.



Σχήμα 3.22: Αλφαδολάστιχο και χάρακας για τον ορισμό του οριζόντιου επιπέδου

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 $30 < Re < 40$. Έτσι λοιπόν και οι παροχές κινήθηκαν $0,215 < q < 0.285 \text{ kg/sec}$. 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 $30 < Re < 40$ επαναλήφθηκαν για κάθε ένα από τα δυο πλάτη ($w=240\text{mm}$ και $w=120\text{mm}$) δυο φορές για δυο διαφορετικές διαταραχές. Η πρώτη για $T_{\text{off}}=1 \text{ sec}$ και $T_{\text{on}}=5 \text{ sec}$ και η δεύτερη για $T_{\text{off}}=0,5 \text{ sec}$ και $T_{\text{on}}=1,5 \text{ sec}$. 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 $0,1 < T < 20 \text{ sec}$ και εύρος συχνοτήτων $0,05 < f < 10 \text{ Hz}$.

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 3.7 πρέπει να κάνουμε βαθμονόμηση, δηλαδή να προσδιορίσουμε τους συντελεστές α, β 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 3.14. 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 α, β 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 $Re \cdot 20$ 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 $30 < Re < 40$. 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 $T_{on}=1,5$ sec). Το πείραμα λήγει όταν επαναλάβουμε την παραπάνω διαδικασία και λάβουμε τόσες φωτογραφίες όσοι και οι αριθμοί $Re \cdot 200$ φωτογραφίες στον κάθε αριθμό.

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 3.22 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, παρακάμτωντας έτσι το δοχείο συλλογής όπου έχουμε μαζέψει όλο το διάλυμα (χρωστικής και νερού) και το επαναχρησιμοποιούμε την επόμενη που θα πραγματοποιήσουμε πείραμα.



Σχήμα 3.22: Δοχείο καθαρισμού

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 α, β 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 α, β 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

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Παράμετροι των πειραμάτων & πρωτογενή δεδομένα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας. Διενεργήθηκαν τέσσερις σειρές πειραμάτων, μέσα σε 3 ημέρες. Έγιναν λήψεις σε δύο διαφορετικά μήκη από τη αρχή του καναλιού ($a=330\text{mm}$ και $b=1330\text{mm}$) για κάθε ένα από τα δυο διαφορετικά πλάτη καναλιού που επιλέξαμε ($w=240\text{mm}$ και $w=120\text{mm}$). Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε καθαρό νερό στο οποίο διαλύσαμε χρωστική ουσία ουρανίνη (Sodium Salt of Fluorescein- $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$) σε ποσότητα 250ppm). Η κλίση του καναλιού διατηρήθηκε σταθερή στις 3,16 μοίρες. Η συχνότητα διαταραχής πήρε δύο τιμές ($f=0,5\text{Hz}$ και $f=0,167\text{Hz}$), ενώ η παροχή της διαταραχής παρέμενε σταθερή για όλα τα πειράματα, $dm/dt=1\text{kg/min}$. Ο αριθμός Re πήρε τις παρακάτω τιμές: 30, 35, 40, 45, 50, 60. Όμως οι συγκρίσεις επικεντρώθηκαν στους Re 30, 35, 40.

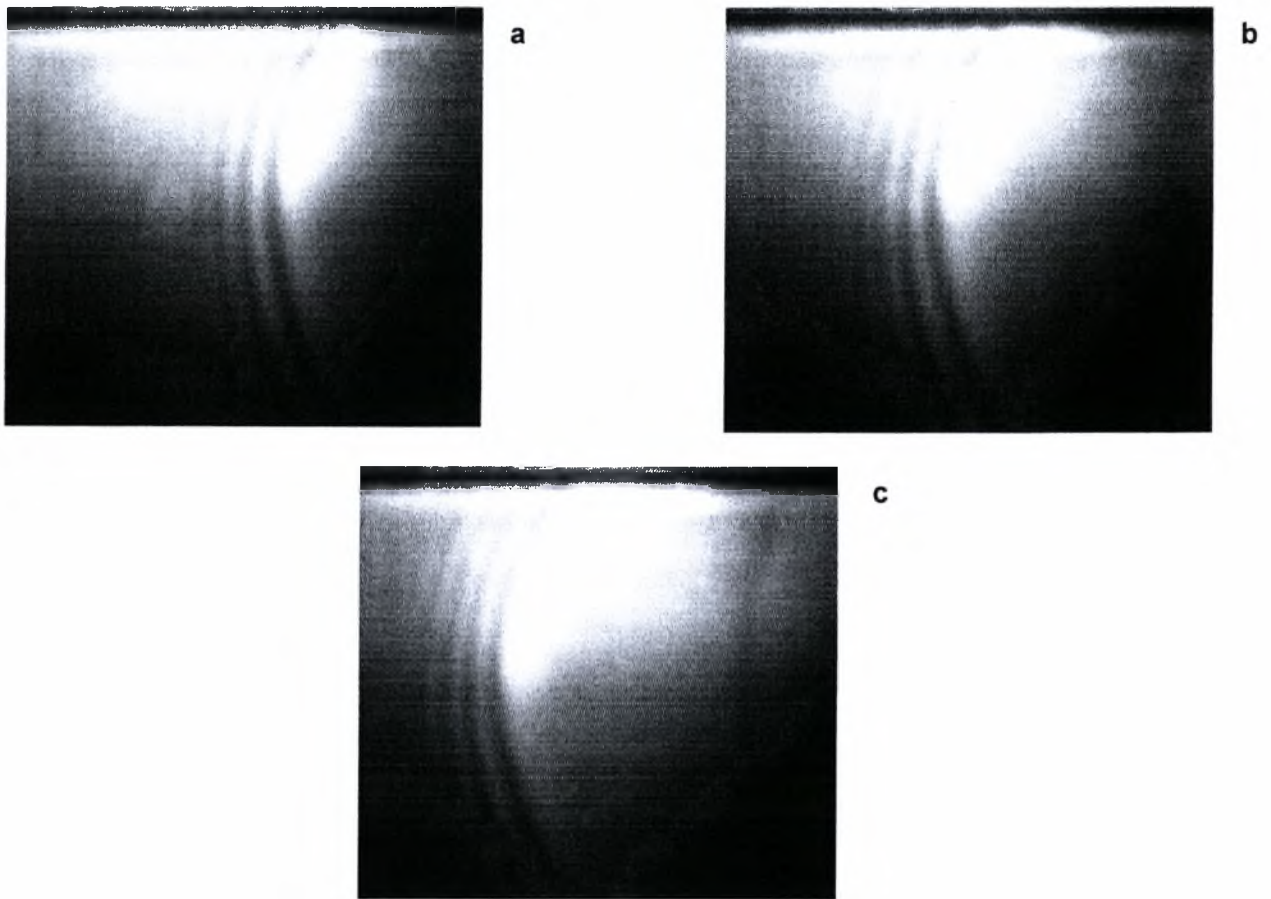
Ο πίνακας 4.1 μας δίνει μια συνοπτική εικόνα των πειραμάτων που διεξήχθησαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και των μεταβαλλόμενων παραμέτρων. Σε ότι αφορά τον αριθμό Re έγιναν μετρήσεις για περισσότερες τιμές από όσες καταγράφονται στον πίνακα (30,35,40). Όμως για αυτές τις τρεις παρουσιάζουμε συγκριτικά αποτελέσματα παρακάτω.

Ημερομηνία Πειράματος	Διαταραχή	Συχνότητα f (Hz)	Θέση	Πλάτος Καναλιού w (mm)	Re
11/7/2007	0,5 - 1,5	0.5	b	240	30, 35, 40
	1 - 5	0.167	b	240	30, 35, 40
11/9/2007	0,5 - 1,5	0.5	a	240	30, 35, 40
	1 - 5	0.167	a	240	30, 35, 40
12/9/2007	0,5 - 1,5	0.5	a	120	30, 35, 40
	1 - 5	0.167	a	120	30, 35, 40
	0,5 - 1,5	0.5	b	120	30, 35, 40
	1 - 5	0.167	b	120	30, 35, 40

όπου $a=330\text{mm}$ $b=1330\text{mm}$

Πίνακας 4.1 Συνοπτική εικόνα πειραμάτων

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 εξάγουμε μόνο ποιοτικά συμπεράσματα, συνεπώς είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία τους.



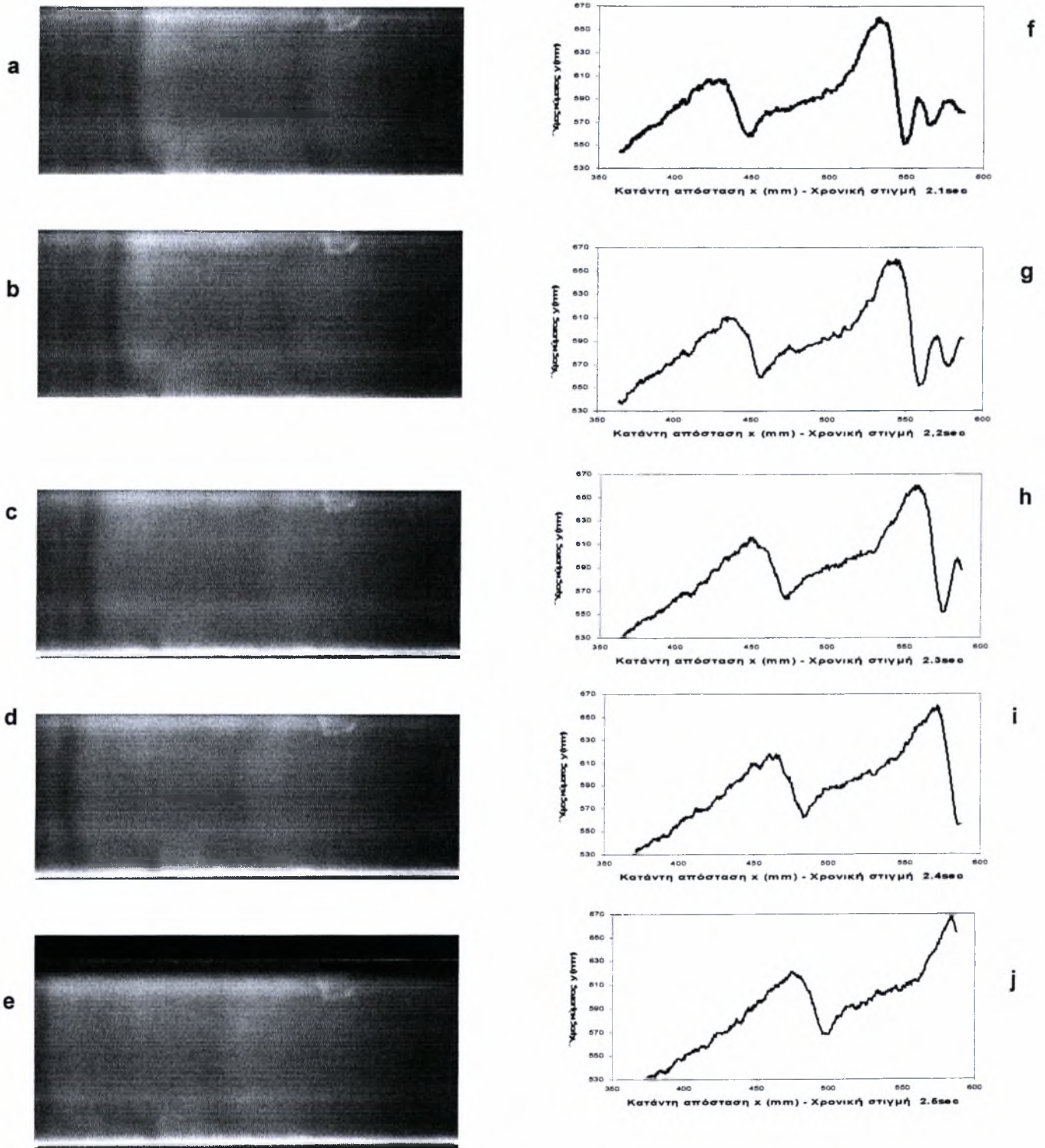
Σχήμα 4.1: Πρωτογενή δεδομένα της μεθόδου φθορισμού

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.

Σύμφωνα με την Μεταπτυχιακή Εργασία του Πέτρου Δάλλα το καταλληλότερο φίλτρο είναι το Gaussian 7x7 καθώς δεν απαλείφει σημαντικά δεδομένα. Για αυτό χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο φίλτρο στην παρούσα εργασία. Μετά το ψηφιακό φιλτράρισμα επεξεργαστήκαμε τις φωτογραφίες χρησιμοποιώντας το MatLab. Κατά την επεξεργασία αυτή κάθε σημείο (pixel) της φωτογραφίας αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος τιμών, το οποίο μας δείχνει την ένταση του φωτός στο αντίστοιχο pixel, όπως άλλωστε αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.

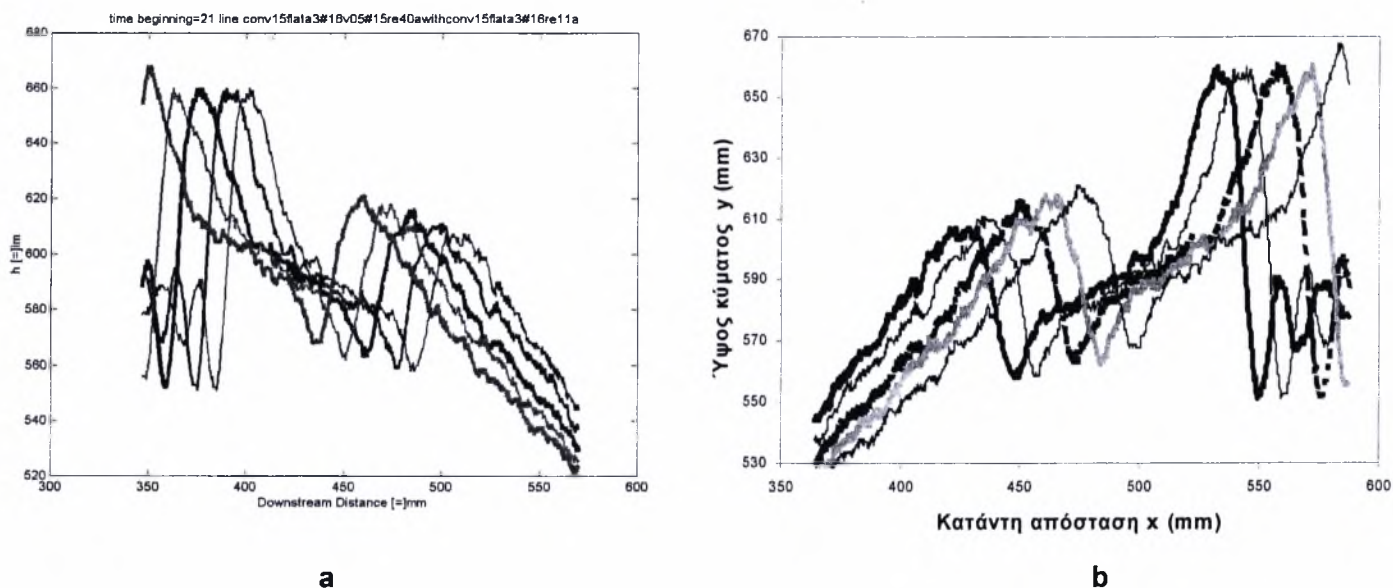
Την επεξεργασία του MatLab ακολουθεί η εισαγωγή των δεδομένων σε φύλλα Excel και η παραπέρα επεξεργασία αυτών των δεδομένων με στόχο τη γραφική απεικόνιση του κύματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δυο ειδών γραφήματα. Πρώτον στα γραφήματα του προφίλ του ύψους του υμένα του κύματος για δεδομένη χρονική στιγμή ή για πλήθος χρονικών στιγμών (τα λεγόμενα και *lineprofiles*). Δεύτερον στα γραφήματα της χρονικής εξέλιξης του ύψους

του υμένα για δεδομένη απόσταση από την αρχή του καναλιού (τα λεγόμενα και timeprofiles ή χρονοσειρές). Από αυτές τις γραφικές απεικονίσεις προκύπτουν τα όποια συμπεράσματα για τα κύματα που μελετάμε. Οι 5 εικόνες που ακολουθούν είναι 5 διαδοχικές φωτογραφίες (με χρονική διαφορά $t=0.1\text{sec}$) που τραβήχτηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Πρόκειται για τη θέση $a=330\text{mm}$, Re_{40} , διαταραχή $f=0.5\text{Hz}$ και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$. Οι φωτογραφίες συνοδεύονται από τα αντίστοιχα προφίλ του ύψους του υμένα, που είναι αποτελέσματα της επεξεργασίας με Matlab και Excel.



Σχήμα 4.2 Η χρονική εξέλιξη του κύματος για 5 διαδοχικές χρονικές στιγμές από 2.1 sec ως 2,5sec. Οι φωτογραφίες a ως e και τα αντίστοιχα γραφήματα f ως j.

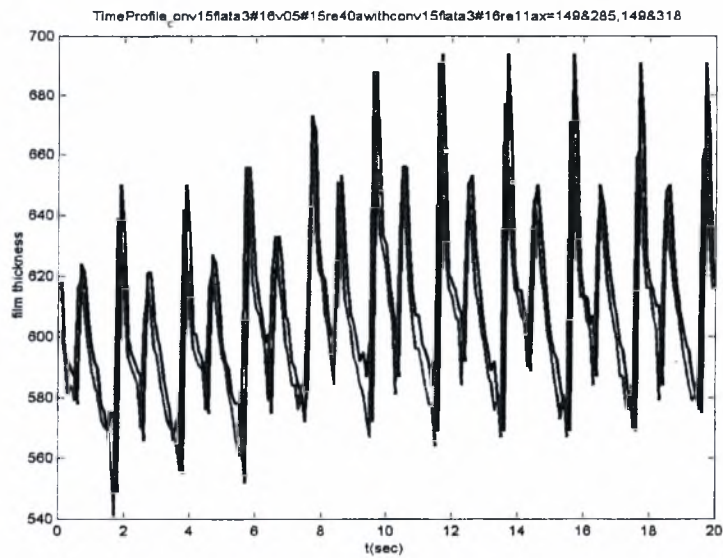
Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται τα γραφήματα του Matlab και του Excel για το προφίλ του ύψους του υμένα για τις 5 διαδοχικές χρονικές στιγμές που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου κύματος. Ενώ στο Σχήμα 4.4 βλέπουμε τα αντίστοιχα γραφήματα για τη χρονική εξέλιξη του κύματος.



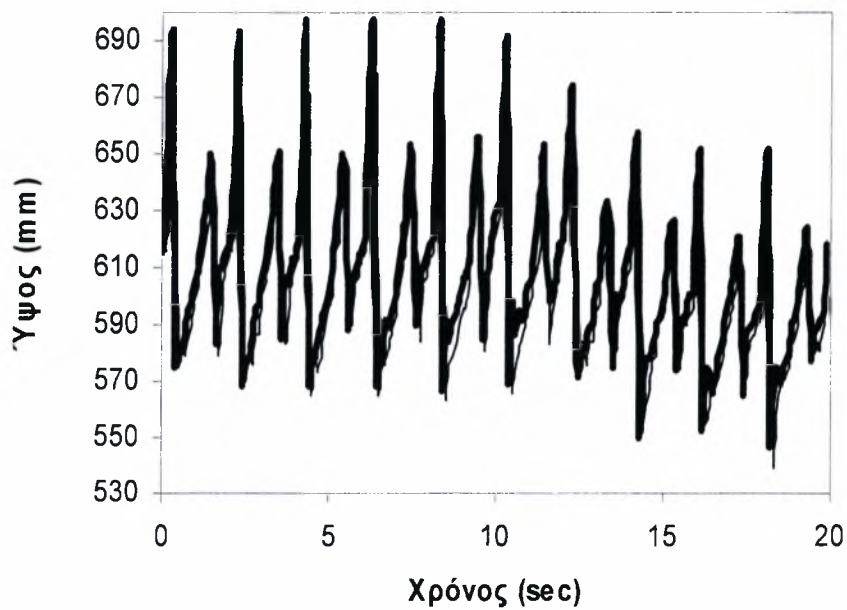
Σχήμα 4.3 Το γράφημα του προφίλ του ύψους του κύματος με χρήση του Matlab (a) και του Excel (b) για τις συγκεκριμένες 5 χρονικές στιγμές

Όνομα Αρχείου	flata3#16v05#15re40a
Θέση (mm)	a=330
Διαταραχή (sec)	on:1,5-off:0,5
Συχνότητα (Hz)	0.5
Re	40
W (mm)	120
Μήκος Πεδίου (mm)	260
Ύψος Κύματος H(μm)	659
Πάχος Υποστρώματος μπροστά hb1(μm)	564
Πάχος Υποστρώματος πίσω hb2(μm)	570
Ταχύτητα Κύματος (mm/s)	135
Μήκος Κύματος (mm)	102
Μήκος Κύματος Τριχοειδών (mm)	15

Πίνακας 4.2 Τα χαρακτηριστικά του κύματος του σχήματος 4.3



a



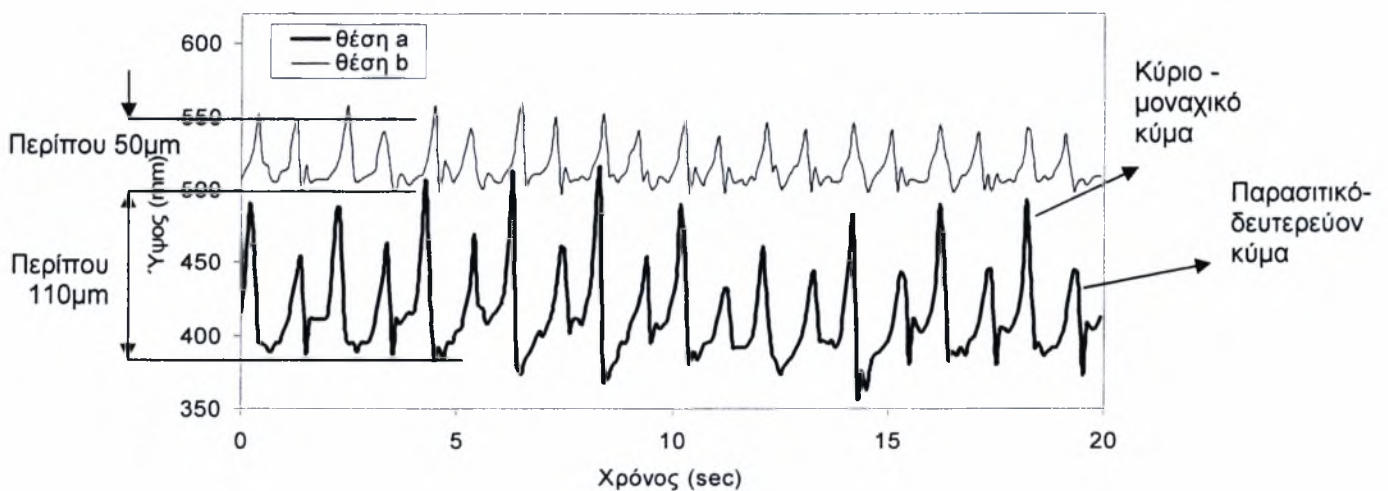
b

Σχήμα 4.4 Η χρονική εξέλιξη του ύψους του κύματος μέσω επεξεργασίας με MatLab (a) και Excel (b) για τα pixel 285 και 318, δηλαδή για αποστάσεις 426.48mm και 437.66mm από την αρχή του καναλιού.

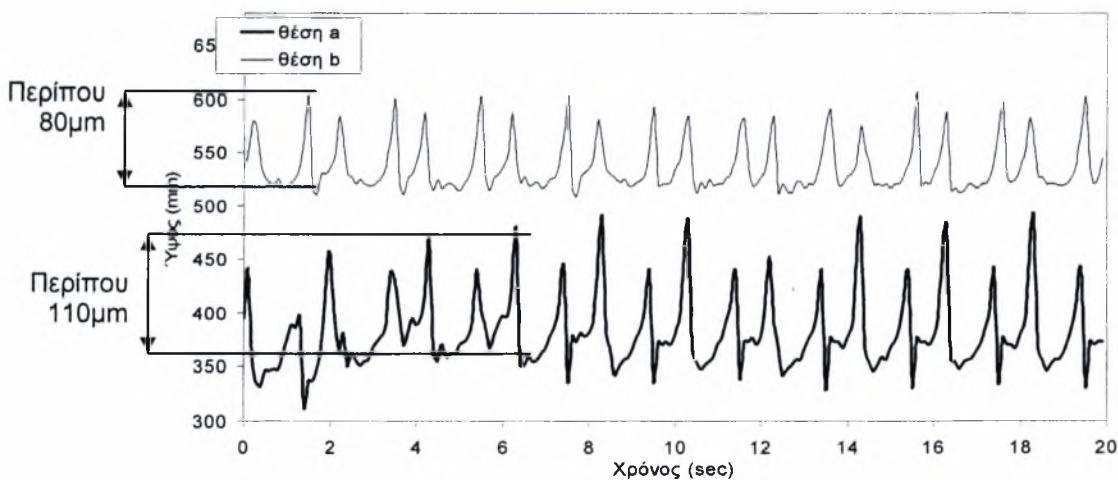
4.2 Παρουσίαση και συγκρίσεις της χρονικής εξέλιξης του ύψους του υμένα της ροής

4.2.1 Παρουσίαση και συγκρίσεις της χρονικής εξέλιξης του ύψους του υμένα της ροής για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής

Κάθε ένα από τα παρακάτω γραφήματα μας δίνει μια σύγκριση της χρονικής εξέλιξης του ύψους του υμένα (χρονοσειρά - timerprofile) για δυο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$) σε συνθήκες σταθερού Re και διαταραχής. Η πρώτη σειρά των συγκρίσεων έχει γίνει για πλάτος καναλιού $w=240\text{mm}$. Τα τρία πρώτα γραφήματα είναι για διαταραχή $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5).

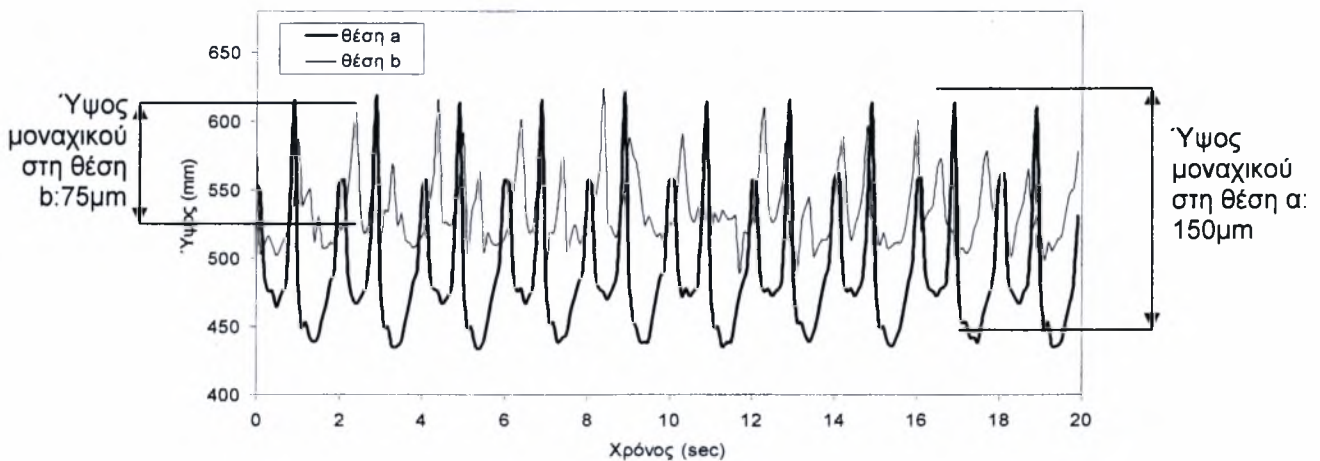


Σχήμα 4.13: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=240\text{mm}$.



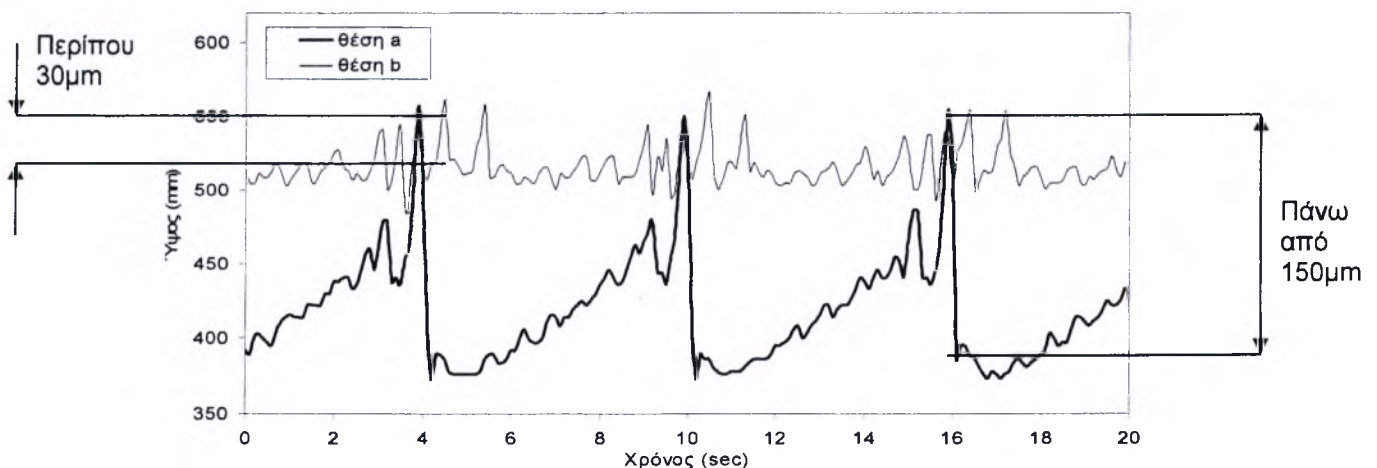
Σχήμα 4.14: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=240\text{mm}$.

Στο Σχήμα 4.13 ($Re=30$ & $w=240mm$) παρατηρούμε ότι για τη θέση $a=330mm$ τα μοναχικά κύματα είναι πιο μεγάλα από ότι στη θέση $b=1330mm$. Το ίδιο ισχύει και για τη σύγκριση των παρασιτικών κυμάτων. Το ύψος του κύματος στη θέση b είναι σχεδόν $50\mu m$ ενώ στη θέση a είναι σχεδόν $110\mu m$, δηλαδή το κύμα μειώνεται σχεδόν στο μισό από τη θέση a στη θέση b . Το ίδιο παρατηρείται και στο Σχήμα 4.14 ($Re=35$ & $w=240mm$) αφού από $110\mu m$ στη θέση $a=330mm$ το ύψος γίνεται $50\mu m$ στη θέση $b=1330mm$. Το ίδιο και στο Σχήμα 4.15 ($Re=40$ & $w=240mm$). Το κύμα ξεκινά με ύψος περίπου $150-175\mu m$ στη θέση $a=330mm$ και καταλήγει σε ύψος περίπου $75\mu m$ στη θέση $b=1330mm$. Με δυο λόγια για $w=240mm$ και διαταραχή $f=0.5Hz$ σε κάθε έναν από τους τρεις Re το κύμα «σβήνει» από τη θέση a στη θέση b . Σε όλες τις περιπτώσεις ο υμένας φαίνεται να είναι ευσταθής καθώς το κύμα «σβήνει» από τη θέση $a=330mm$ στη θέση $b=1330mm$.



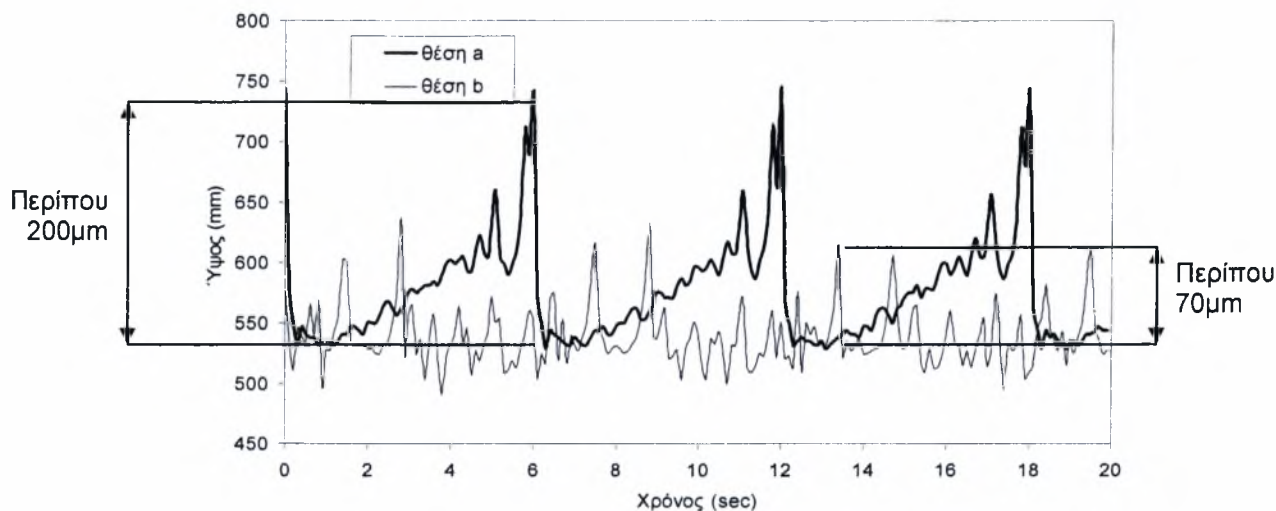
Σχήμα 4.15: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330mm$ & $b=1330mm$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=240mm$.

Στα τρία επόμενα γραφήματα αλλάζει η διαταραχή από $f=0.5$ σε $f=0.167$ (on 5 - off 1).

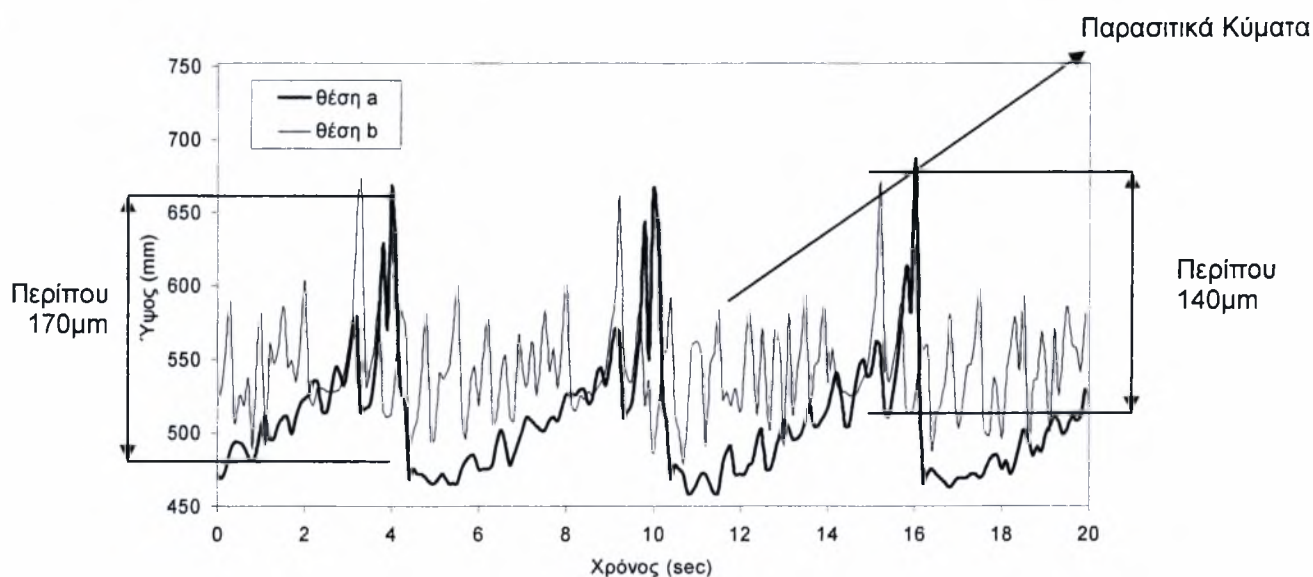


Σχήμα 4.16: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330mm$ & $b=1330mm$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=240mm$.

Στο Σχήμα 4.16 ($Re=30$, $f=0.167$ & $w=240mm$) ο υμένας είναι ιδιαίτερα ευσταθής καθώς παρατηρούμε ότι το κύμα που ξεκινά με ύψος πάνω από $150\mu m$, στη θέση $a=330mm$, γίνεται $30\mu m$ στη θέση $b=1330mm$.



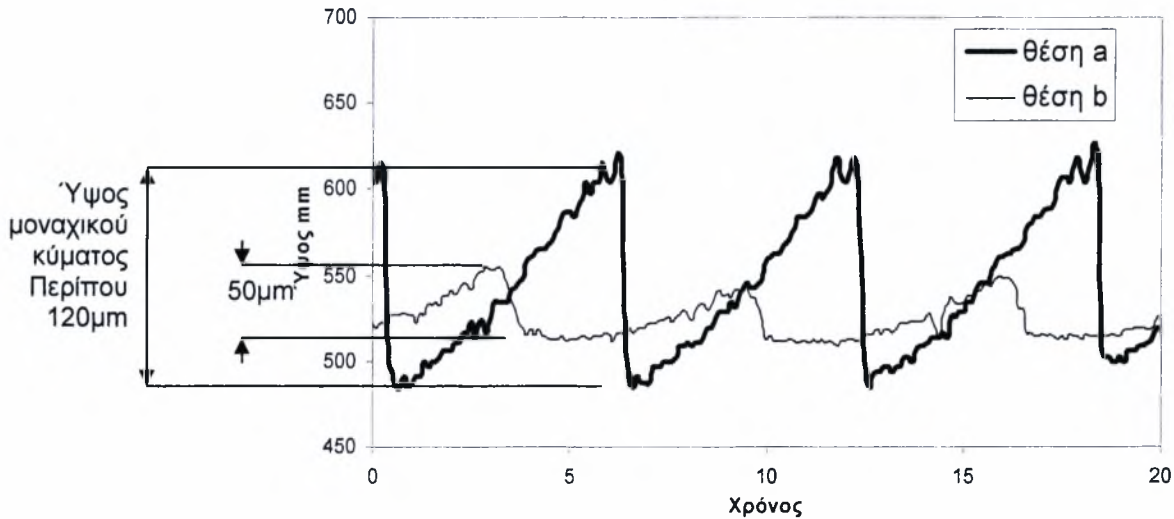
Σχήμα 4.17: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330mm$ & $b=1330mm$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=240mm$.



Σχήμα 4.18: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330mm$ & $b=1330mm$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=240mm$.

Στο Σχήμα 4.17 ($Re=35$, $f=0.167$ & $w=240mm$) ο υμένας φαίνεται επίσης ευσταθής καθώς το ύψος του μοναχικού κύματος είναι στη θέση $a=330mm$ είναι περίπου $200\mu m$ και στη θέση $b=1330mm$ γίνεται περίπου $70\mu m$. Όμως στο Σχήμα 4.18 ($Re=40$, $f=0.167$ & $w=240mm$) ο υμένας γίνεται ασταθής καθώς το μοναχικό κύμα διατηρεί το ύψος του από τη μια θέση στην άλλη και επιπλέον παρατηρούμε ότι τα παρασιτικά κύματα αναπτύσσονται, αυξάνουν το ύψος και το πλήθος των κορυφών τους από τη μία θέση στην άλλη. Φαίνεται δηλαδή ότι ο $Re=40$ είναι όριο ευστάθειας.

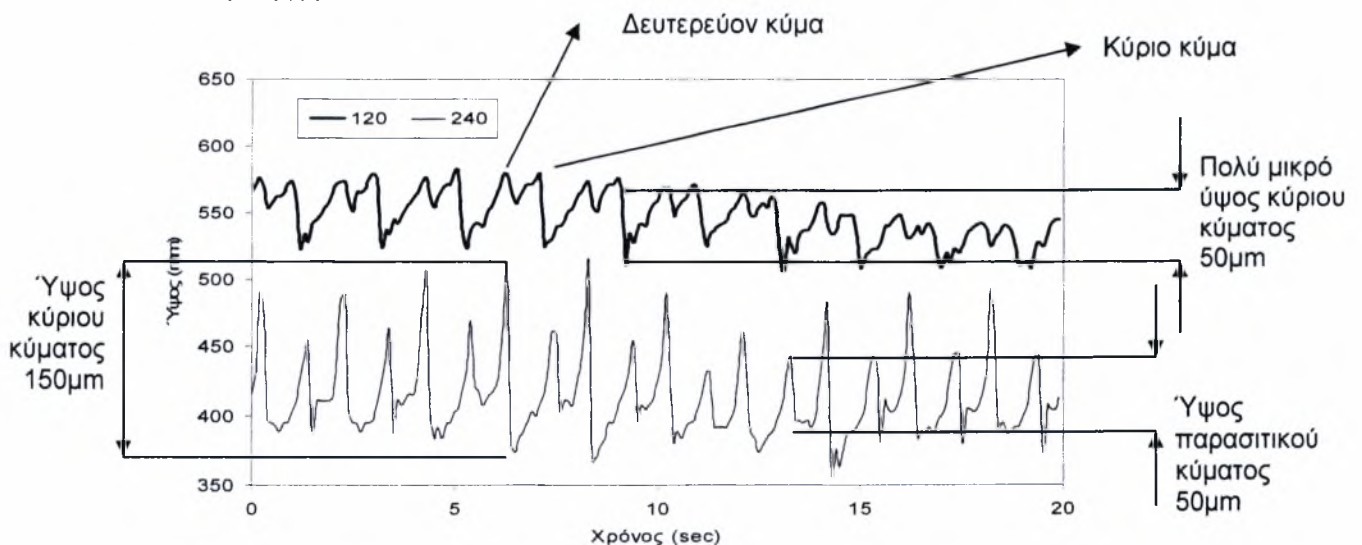
Στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζεται η σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.19 με το Σχήμα 4.16 παρατηρούμε ότι για $f=0.5$ & 0.167 και $w=120\text{mm}$ το κύμα αποσβένεται καθώς κινείται από τη θέση $a=330\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$.



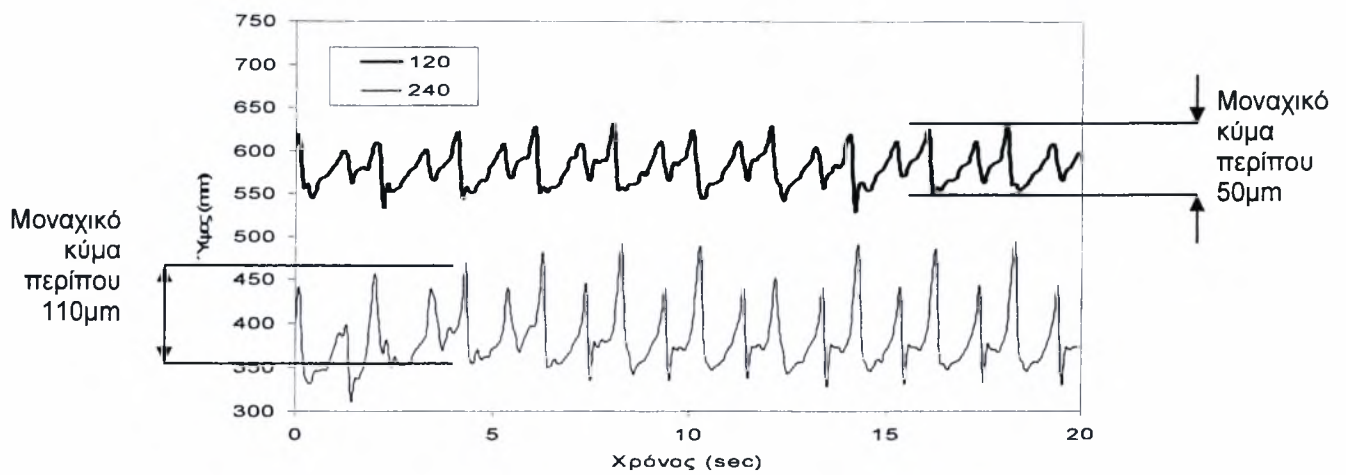
Σχήμα 4.19: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$.

4.2.2 Παρουσίαση και συγκρίσεις των χρονοσειρών για δύο διαφορετικές πλάτη του καναλιού ροής, $w=240\text{mm}$ και $w=120\text{mm}$.

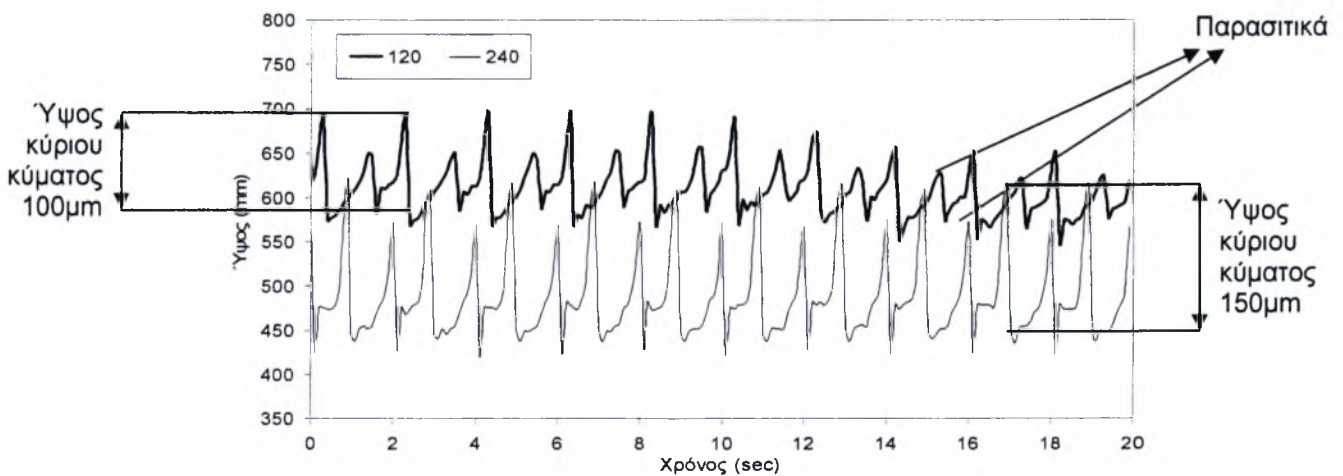
Η παρακάτω σειρά γραφημάτων συγκρίνει τις χρονοσειρές του ύψους του υμένα του κύματος για ίδιο Re , διαταραχή, απόσταση από την αρχή του καναλιού και διαφορετικό πλάτος καναλιού. Στα τρία πρώτα γραφήματα έχουμε διαταραχή συχνότητας $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.



Σχήμα 4.20: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.



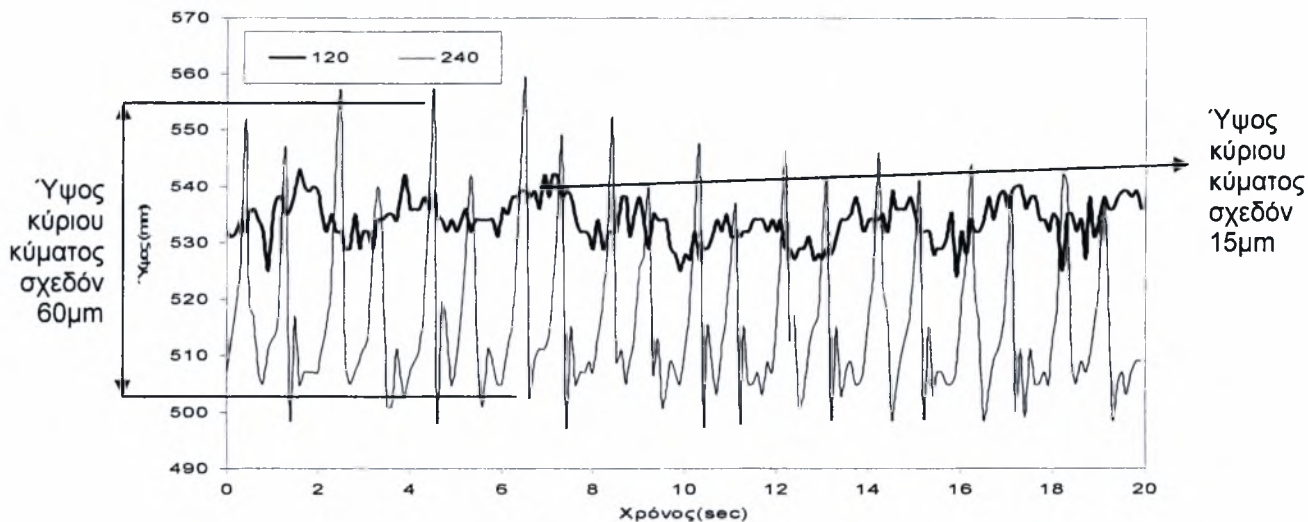
Σχήμα4.21: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 – off 0.5) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.



Σχήμα4.22: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 – off 0.5) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.

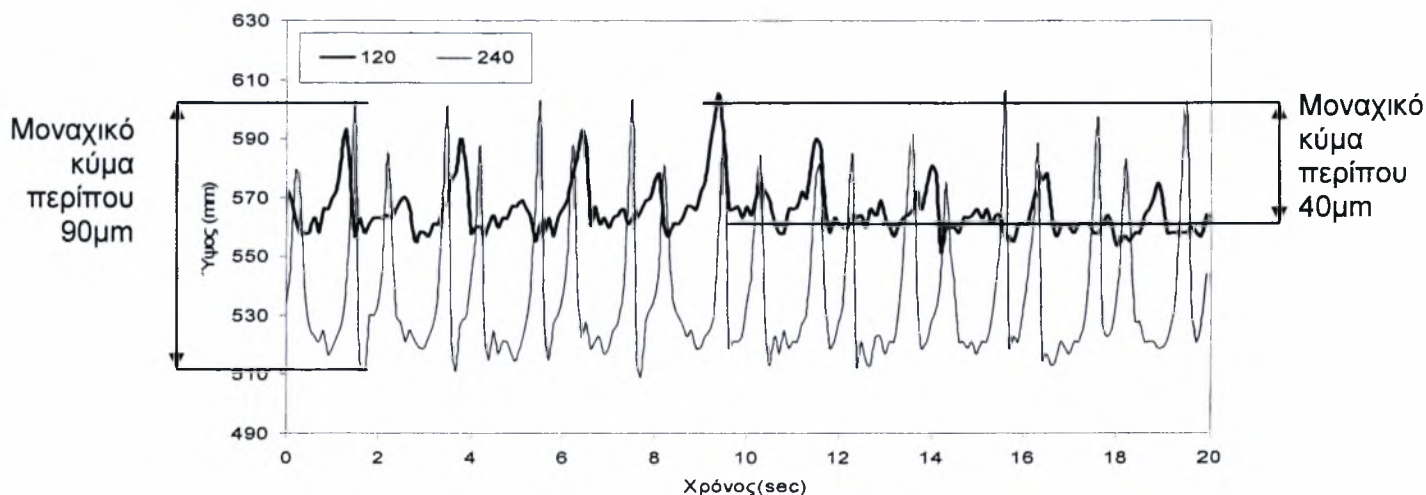
Στα παρακάτω Σχήματα γίνονται οι ίδιες συγκρίσεις με μόνη διαφορά ότι εδώ η θέση της κάμερας είναι η $b=1330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.23 ($Re=30$, $f=0.5$, $b=1330\text{mm}$) με το Σχήμα 4.20 ($Re=30$, $f=0.5$, $a=330\text{mm}$) παρατηρούμε ότι για $w=240\text{mm}$ το ύψος του κύματος μειώνεται από τη θέση $a=330\text{mm}$ ως τη θέση $b=1330\text{mm}$. Βλέπουμε ότι στην πρώτη περίπτωση έχει ύψος περίπου $150\mu\text{m}$, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το ύψος του είναι περίπου $50\mu\text{m}$. Επιπλέον στη θέση $a=330\text{mm}$ υπάρχει ένα παρασιτικό κύμα ανάμεσα σε δυο κύρια, ενώ στη θέση $b=1330\text{mm}$ έχουν εμφανιστεί και άλλα παρασιτικά κύματα που φαίνεται να αναπτύσσονται και αυτά από τη μια θέση στην άλλη. Το ίδιο συμβαίνει και για $w=120\text{mm}$. Το κύμα και πάλι σβήνει. Χαρακτηριστικά το ύψος του κυματισμού στη θέση $a=330\text{mm}$ είναι περίπου $50\mu\text{m}$ ενώ στη θέση $b=1330\mu\text{m}$ είναι μόλις $15\mu\text{m}$. Τις ίδιες παρατηρήσεις κάνουμε και για $Re=35$ & $Re=40$.

Στο Σχήμα 4.23 ($Re=30$) παρατηρούμε ότι το ύψος τόσο του μοναχικού όσο και του παρασιτικού κύματος είναι μεγαλύτερο για $w=240\text{mm}$ (περίπου $50\mu\text{m}$) από ότι για $w=120\text{mm}$ (περίπου $10-15\mu\text{m}$).

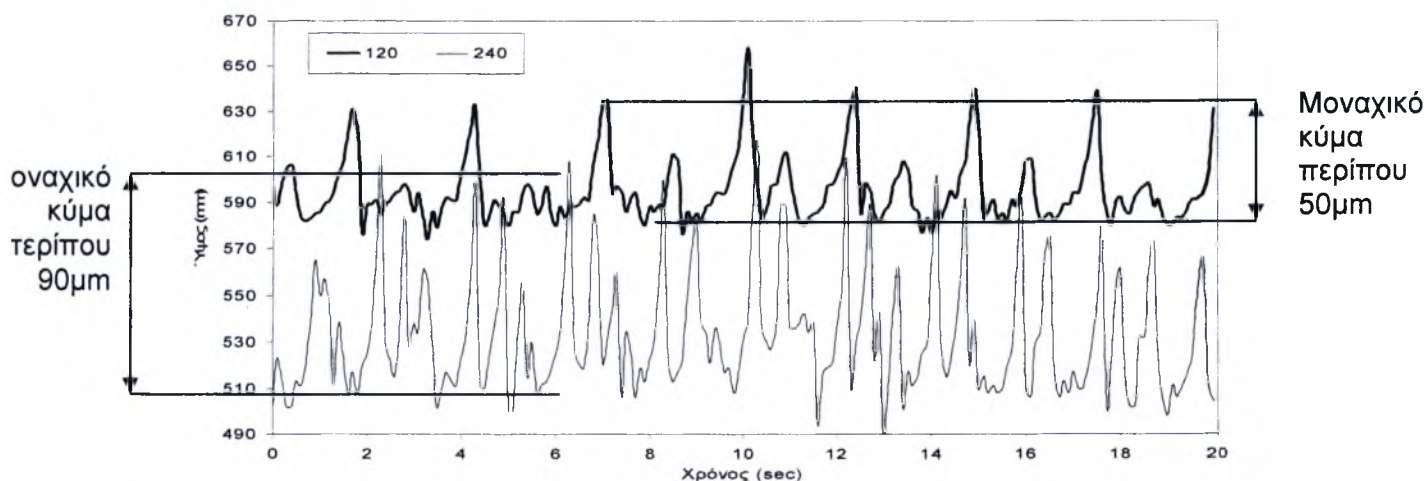


Σχήμα4.23: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 – off 0.5) και απόσταση $b=1330\text{mm}$ από την αογή του καναλιού.

Το ίδιο παρατηρούμε και στο Σχήμα 4.24 για $Re=35$, όμως εδώ το μοναχικό κύμα για $w=120\text{mm}$ είναι πλέον πολύ πιο ψηλό από ότι για $Re=30$.



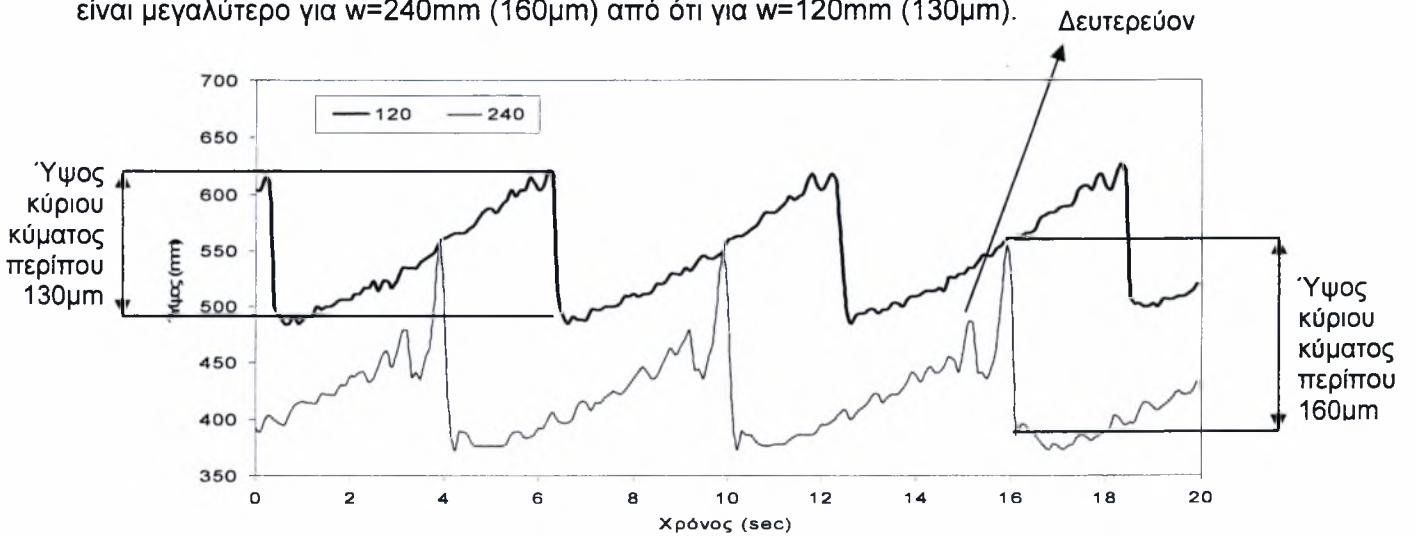
Σχήμα4.24: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 – off 0.5) και απόσταση $b=1330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.



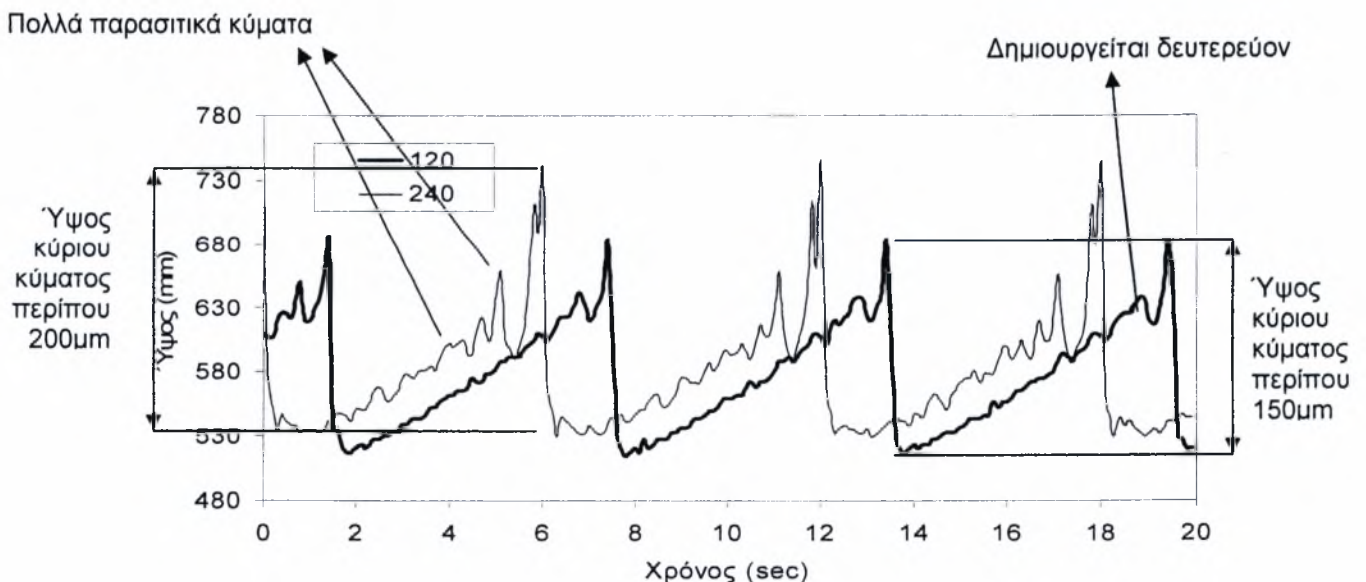
Σχήμα4.25: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 – off 0.5) και απόσταση $b=1330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.

Στο Σχήμα 4.25 ($Re=40$) βλέπουμε ότι τα κύματα είναι πιο ψηλά από ότι πριν αλλά και ότι για $w=240\text{mm}$ εμφανίζονται δυο παρασιτικά κύματα ανάμεσα σε δυο κύρια – μοναχικά, κάτι που δεν ίσχυε για τους δυο πιο μικρούς Re .

Τα τρία επόμενα γραφήματα είναι για διαταραχή $f=0.167$ (on5 - off1) στη θέση $a=330\text{mm}$. Στο Σχήμα 4.25 ($Re=30$) παρατηρούμε ότι σε πλάτος $w=120\text{mm}$ εμφανίζεται ένα μοναχικό κύμα χωρίς να ακολουθείται από κάποιο δευτερεύον. Το ύψος του μοναχικού είναι περίπου $130\mu\text{m}$. Αντίθετα για $w=240\text{mm}$ έχει ξεκινήσει να εμφανίζεται και δευτερεύον κύμα. Και εδώ το ύψος του μοναχικού είναι μεγαλύτερο για $w=240\text{mm}$ ($160\mu\text{m}$) από ότι για $w=120\text{mm}$ ($130\mu\text{m}$).



Σχήμα 4.26 Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.



Σχήμα 4.27: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.

Στο Σχήμα 4.25 (Re35) το ύψος του μοναχικού κύματος είναι επίσης μεγαλύτερο για $w=240\text{mm}$ (200 μm) από ότι για $w=120\text{mm}$ (150 μm). Για $w=240\text{mm}$ το παρασιτικό κύμα γίνεται μεγαλύτερο από ότι προηγουμένως. Επιπλέον για $w=120\text{mm}$ αρχίζει και εμφανίζεται παρασιτικό ενώ πριν δεν υπήρχε.



Σχήμα 4.28: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $a=330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.

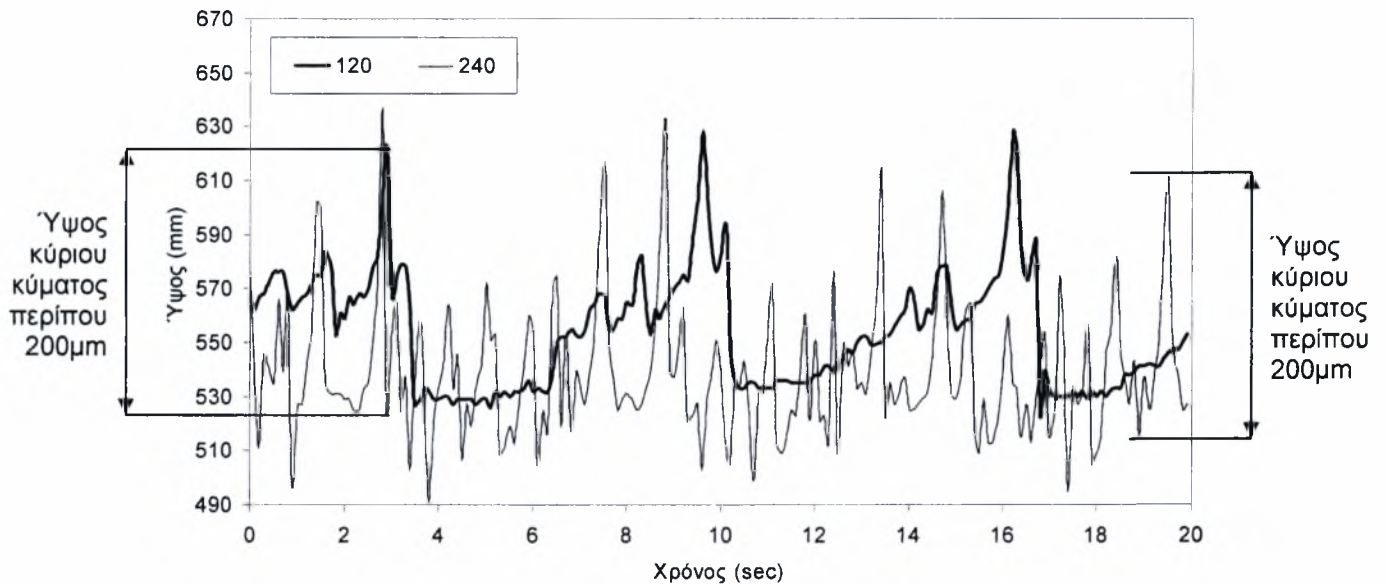
Στο Σχήμα 4.26 παρατηρούμε κάτι πολύ ενδιαφέρον. Εδώ το μοναχικό κύματα γίνεται υψηλότερο για $w=120\text{mm}$ (200 μm) αντί για $w=240\text{mm}$ (150 μm), όπως ίσχυε για $Re30$ & $Re35$.

Τα τρία επόμενα γραφήματα είναι για διαταραχή $f=0.167$ (on 5 - off 1) στη θέση b.



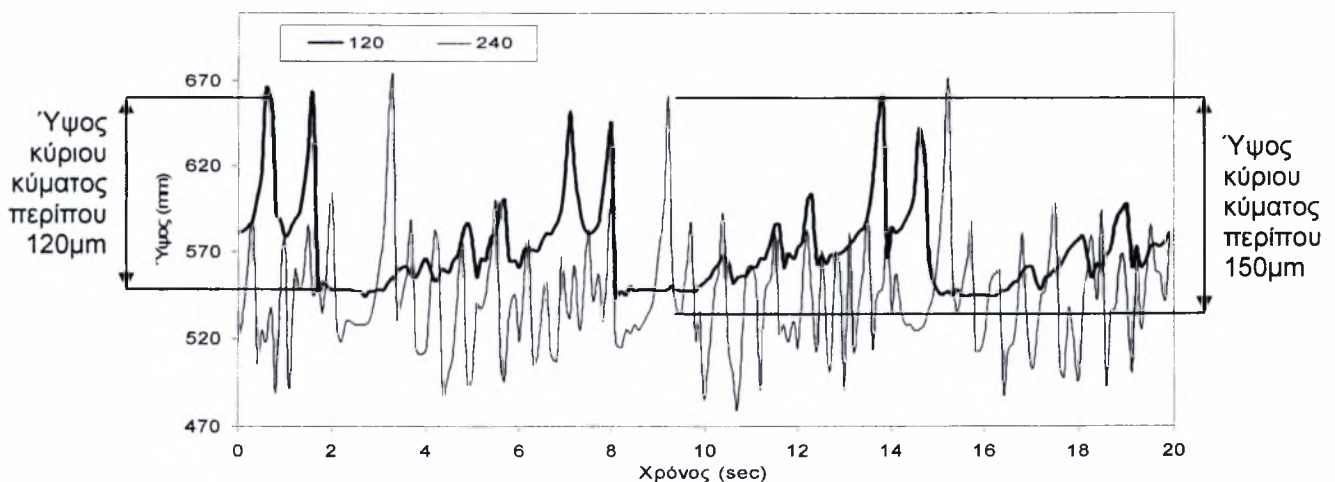
Σχήμα 4.29: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120\text{mm}$ & $w=240\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $b=1330\text{mm}$ από την αρχή του καναλιού.

Συγκρίνοντας το Σχήμα4.29 ($Re=30$, $f=0.167$, $b=1330mm$) με το Σχήμα4.26 ($Re=30$, $f=0.167$, $a=330mm$) παρατηρούμε τα εξής. Για $w=120mm$ το ύψος του μοναχικού κύματος από τα $130\mu m$, στη θέση $a=330mm$ μειώνεται στα $40\mu m$, στη θέση $b=1330mm$. Ενώ για $w=240mm$ το ύψος του μοναχικού κύματος από τα $160\mu m$, στη θέση $a=330mm$ μειώνεται στα $100\mu m$, στη θέση $b=1330mm$.



Σχήμα4.30: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120mm$ & $w=240mm$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $b=1330mm$ από την αρχή του καναλιού.

Τώρα συγκρίνουμε το Σχήμα4.30 ($Re=35$, $f=0.167$, $b=1330mm$) με το Σχήμα4.27 ($Re=35$, $f=0.167$, $a=330mm$) και παρατηρούμε τα εξής. Για $w=120mm$ το ύψος του μοναχικού κύματος από τα $150\mu m$, στη θέση $a=330mm$ αυξάνεται στα $200\mu m$, στη θέση $b=1330mm$. Ενώ, για $w=240mm$ το ύψος του μοναχικού κύματος παραμένει σταθερό γύρω στα $200\mu m$.

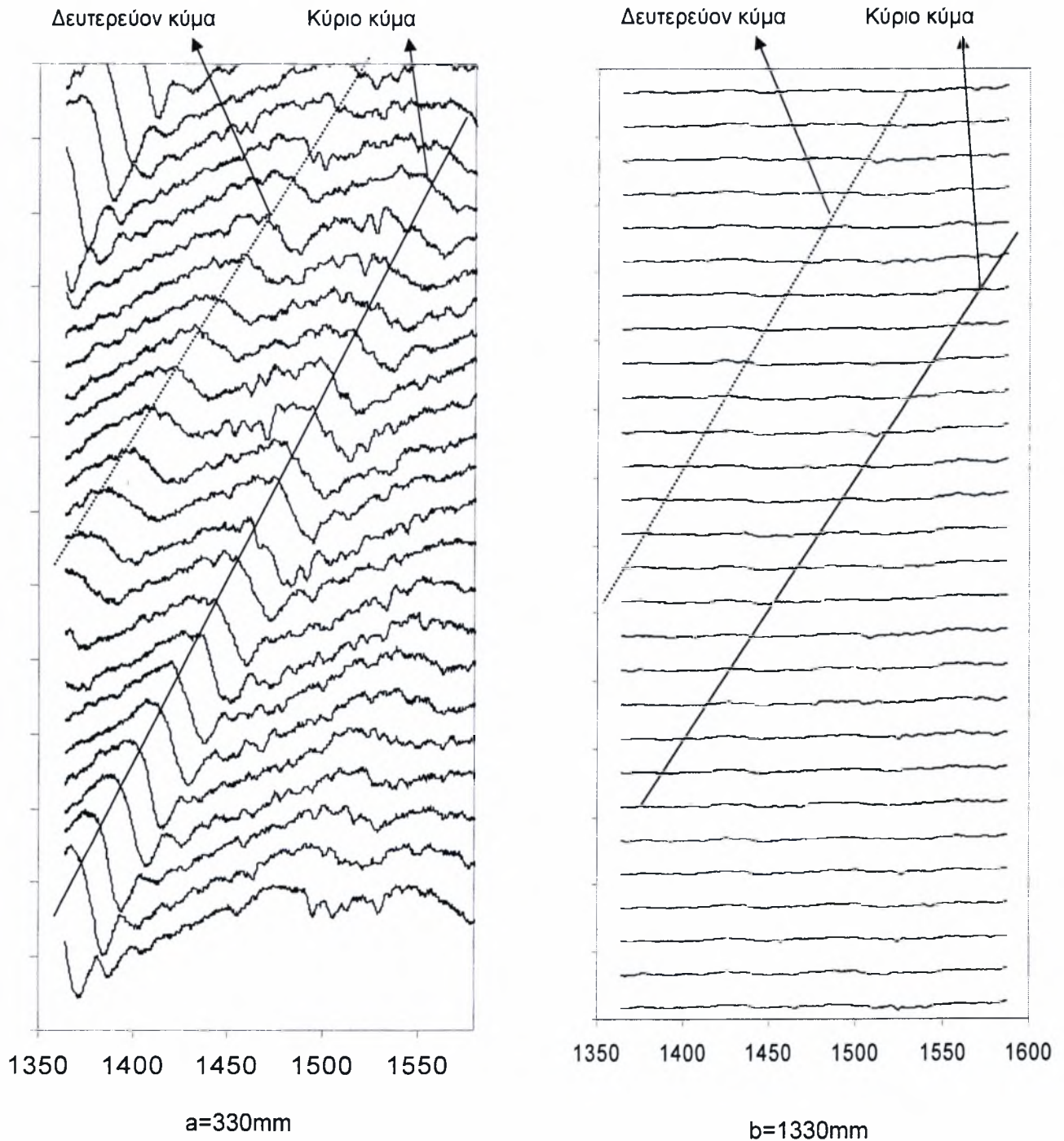


Σχήμα4.31: Σύγκριση των χρονοσειρών του πάχους του υμένα για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=120mm$ & $w=240mm$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 – off 1) και απόσταση $b=1330mm$ από την αρχή του καναλιού.

Τέλος συγκρίνουμε το Σχήμα4.31 (Re_{35} , $f=0.167$, $b=1330mm$) με το Σχήμα4.28 (Re_{35} , $f=0.167$, $a=330mm$) και παρατηρούμε τα εξής. Για $w=120mm$ το ύψος του μοναχικού κύματος από τα $200\mu m$, στη θέση $a=330mm$ αυξάνεται στα $120\mu m$, στη θέση $b=1330mm$. Ενώ, για $w=240mm$ το ύψος του μοναχικού κύματος παραμένει σταθερό γύρω στα τα $150\mu m$.

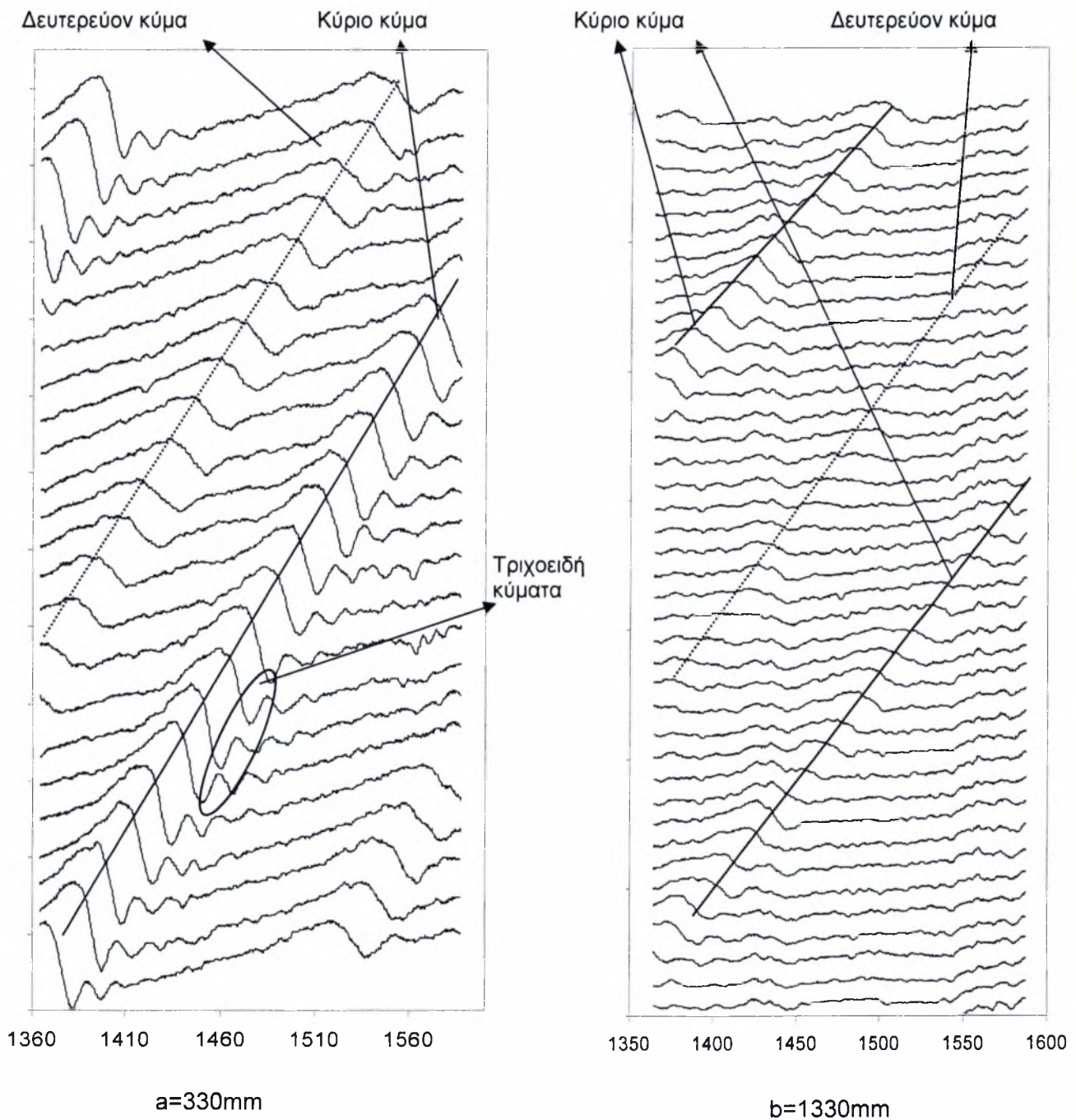
4.3 Παρουσίαση και συγκρίσεις του προφίλ του ύψους του υμένα για πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$ σε δυο αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$).

Στα παρακάτω σχήματα συγκρίνουμε τα προφίλ του ύψους του υμένα για πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$ σε δυο αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$). Κάθε γραμμή απεικονίζει το προφίλ του υμένα με χρονική διαφορά $0,1\text{sec}$ αλλά έχει τεχνητά μετακινηθεί προς τα πάνω ώστε να έχουμε μια πιο καθαρή εικόνα.



Σχήμα 4.32: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$.

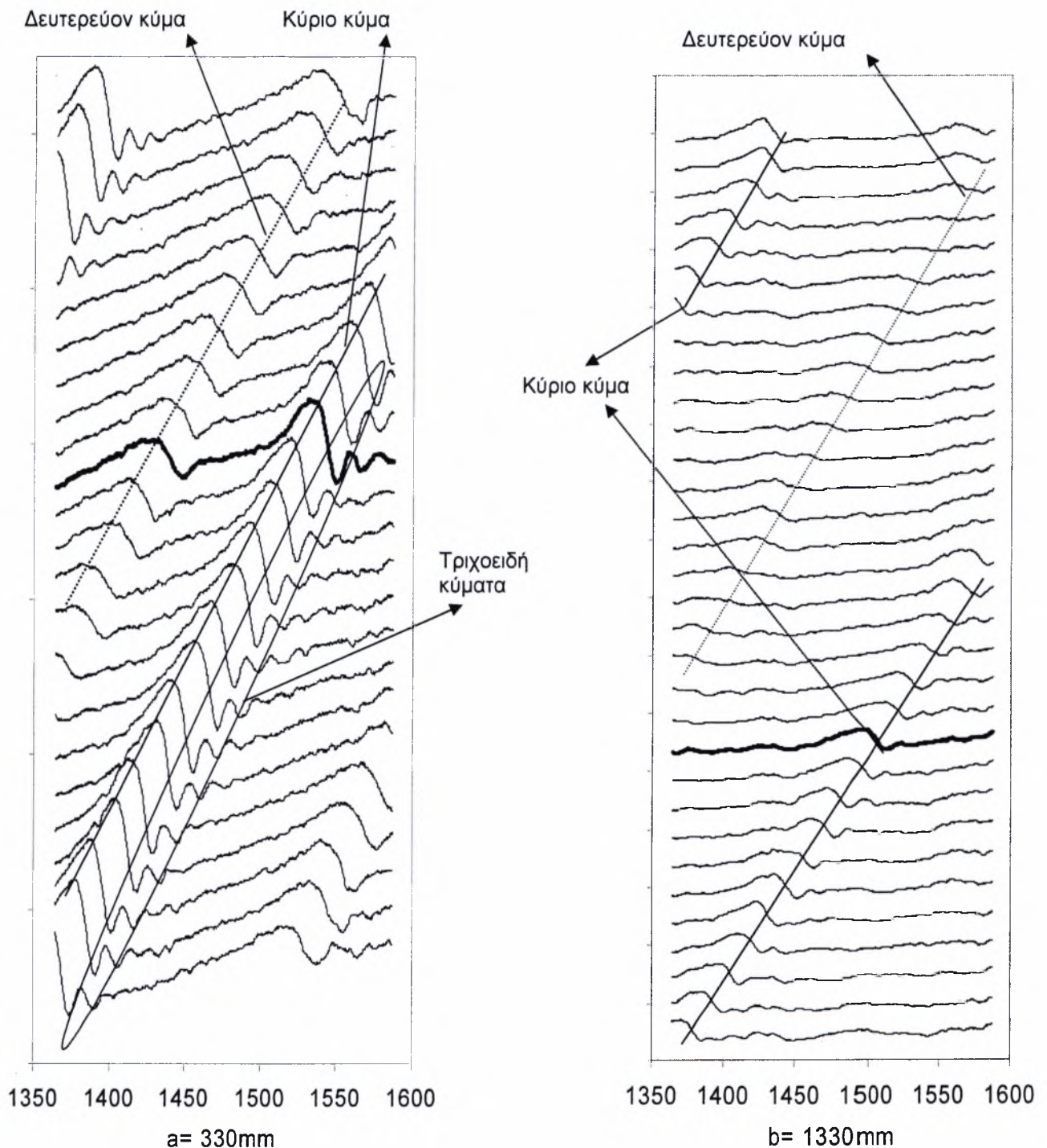
Στο Σχήμα 4.32 ($Re=30$, $f=0.5$) στη θέση $a=330\text{mm}$ φαίνεται καθαρά τόσο το κύριο – μοναχικό κύμα, όσο και το δευτερεύον – παρασιτικό. Παρατηρούμε ότι τα κύματα αυτά «σβήνουν» στη θέση $b=1330\text{mm}$, όπως φαίνεται στο δεύτερο γράφημα. Δηλαδή ο υμένας είναι ευσταθής.



Σχήμα 4.33: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$.

Και στο Σχήμα 4.33 ($Re=35$, $f=0.5$) κάνουμε την ίδια παρατήρηση όπως στο Σχήμα 4.32, ότι δηλαδή το ύψος των μοναχικών και των παρασιτικών κυμάτων που εμφανίζονται στη θέση $a=330\text{mm}$, μειώνεται στη θέση $b=1330\text{mm}$. Σε αυτή την περίπτωση όμως τα κύματα είναι περισσότερο εμφανή λόγω της αύξησης του Re . Επιπλέον στο Σχήμα 4.33 στη θέση $a=330\text{mm}$

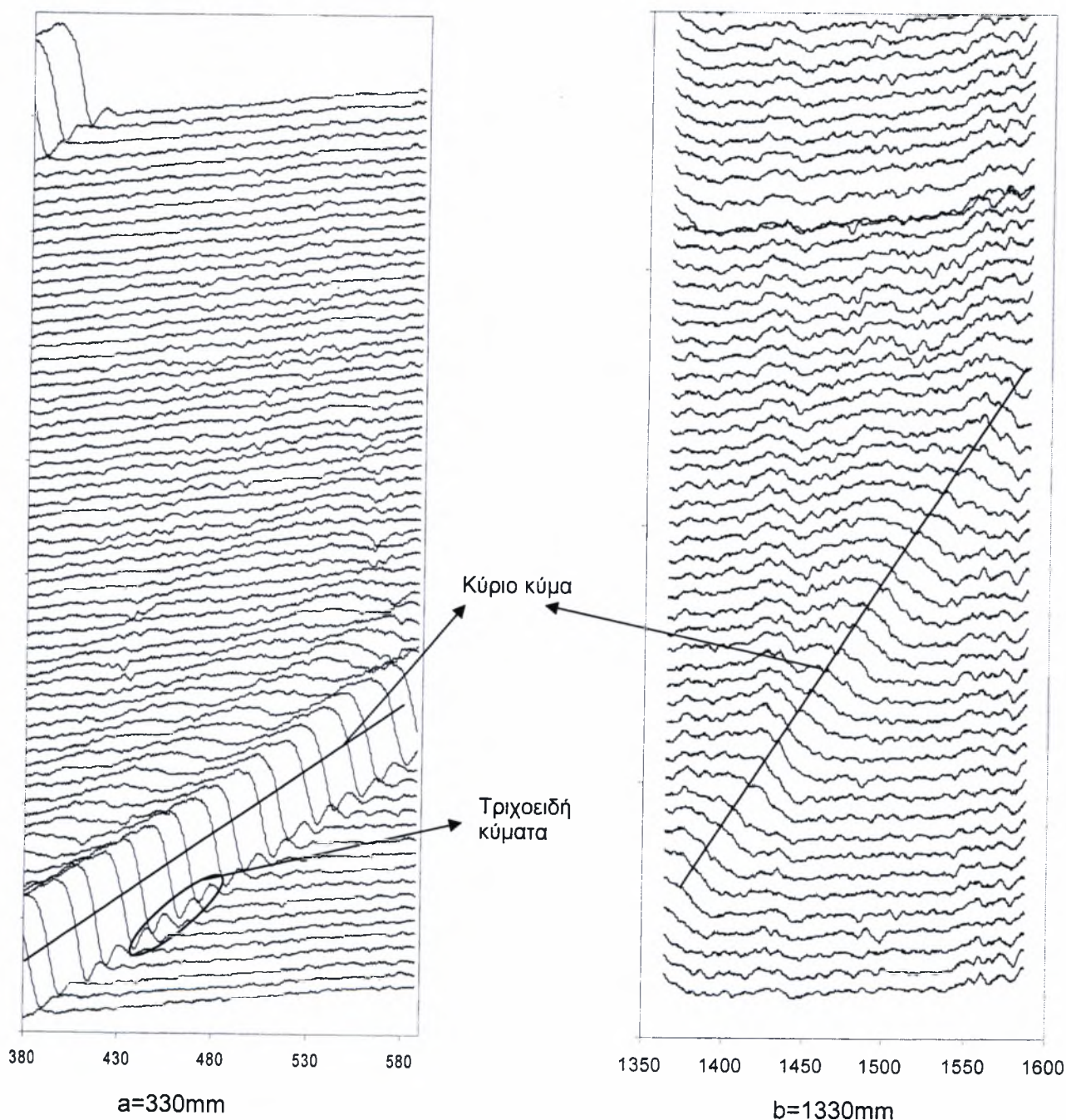
εμφανίζονται τριχοειδή κύματα, μπροστά από το κύριο κύμα, κάτι που δεν ίσχυε στο Σχήμα 4.32. Τα τριχοειδή όμως έχουν σχεδόν «σβήσει» στη θέση $b=1330\text{mm}$.



Σχήμα4.34: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$.

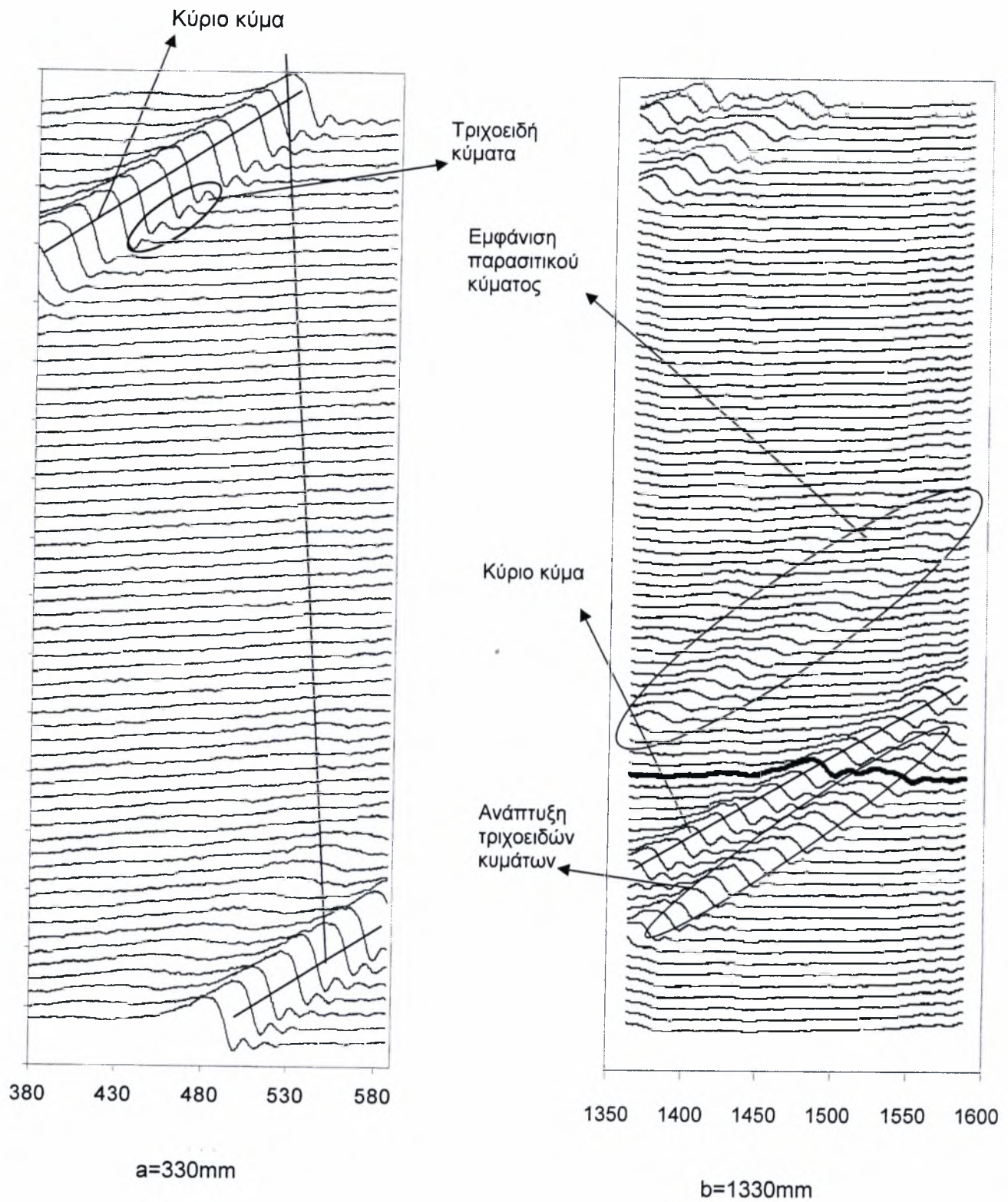
Στα Σχήμα4.34 ($Re=40$, $f=0.5$), έχοντας ανεβάσει τον αριθμό Re , παρατηρούμε αύξηση του ύψους του κύματος. Και εδώ, στη θέση $a=330\text{mm}$ εμφανίζονται τριχοειδή κύματα. Όπως και προηγουμένως όμως, στη θέση $b=1330\text{mm}$ το ύψος των κυμάτων έχει μειωθεί αισθητά. Δηλαδή ο υμένας συνεχίζει και είναι ευσταθής.

Στα επόμενα Σχήματα αλλάζουμε τη συχνότητα διαταραχής από $f=0.5$ σε $f=0.167$ και προχωράμε σε παρόμοιες συγκρίσεις με τα προηγούμενα.



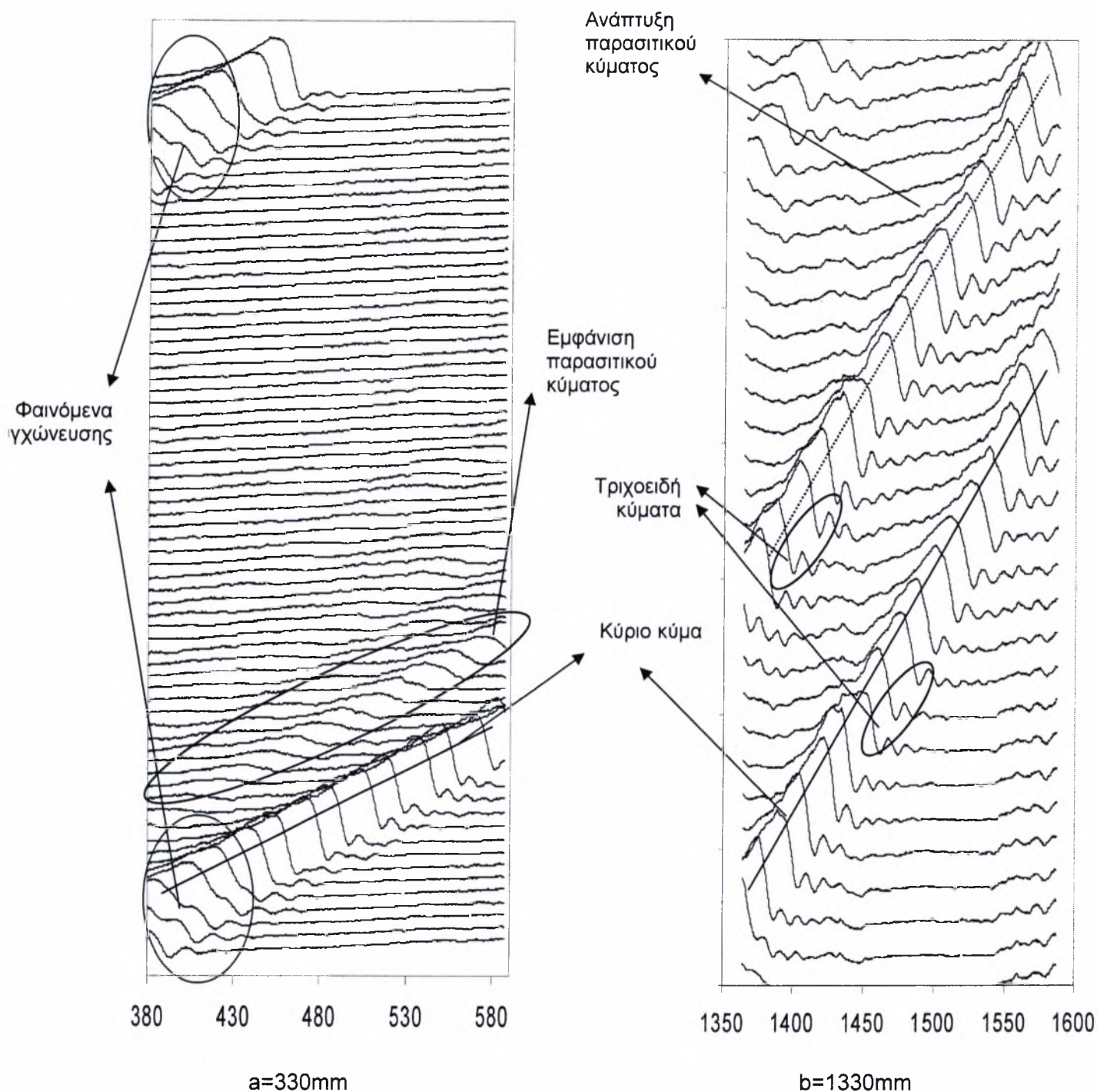
Σχήμα 4.35: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$.

Στο Σχήμα 4.35 ($Re=30$, $f=0.167$) παρατηρούμε για τη θέση $a=330\text{mm}$ έχουμε μεγαλύτερο ύψος κύματος από ότι προηγουμένως. Ο υμένας παραμένει ευσταθής καθώς το ύψος του κύματος μειώνεται μέχρι να φτάσει στη θέση $b=1330\text{mm}$. Επιπλέον εδώ δεν έχουμε παρασιτικά κύματα, αλλά εμφανίζονται τριχοειδή στη θέση $a=330\text{mm}$.



Σχήμα 4.36: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$.

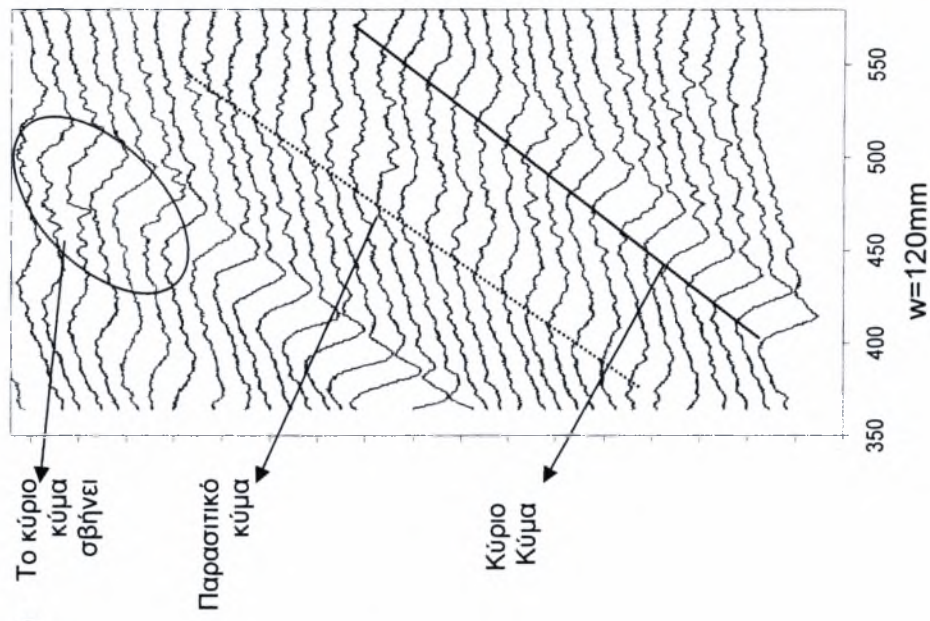
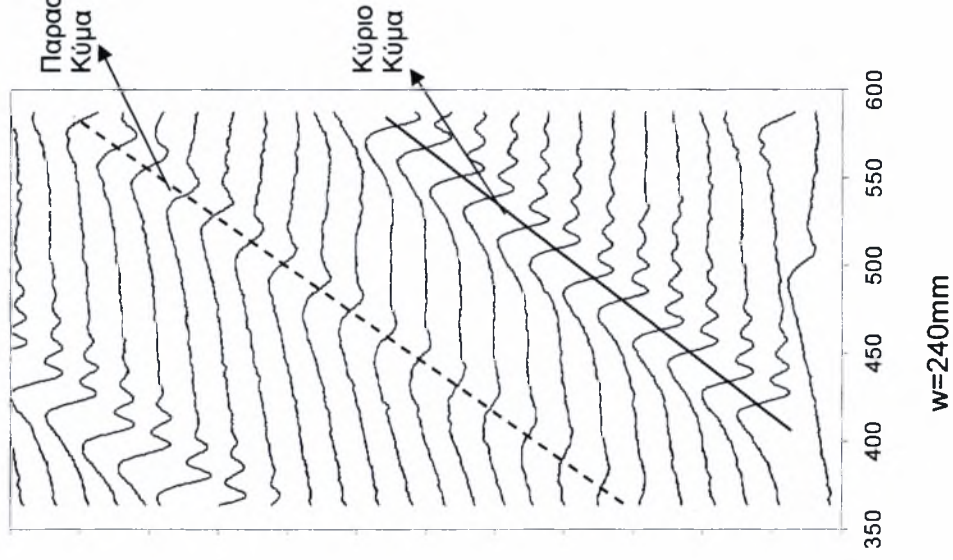
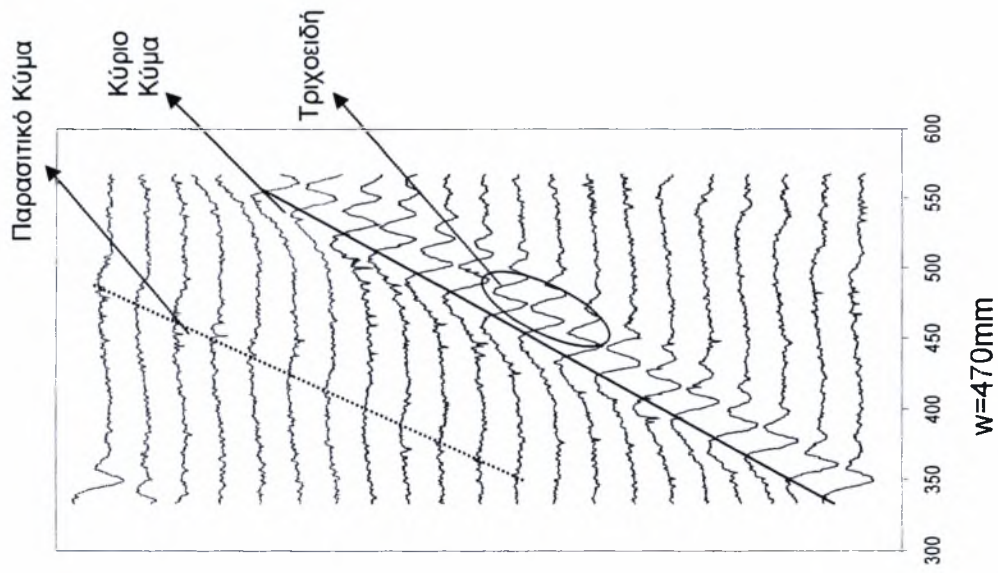
Στο Σχήμα 4.36 ($Re=35$, $f=0.167$) στη θέση $a=330\text{mm}$ δεν έχουμε παρασιτικό κύμα, ενώ υπάρχουν τριχοειδή. Στη θέση $b=1330\text{mm}$ έχουμε την εμφάνιση παρασιτικού κύματος ενώ τα τριχοειδή έχουν αναπτυχθεί και το ύψος τους έχει μεγαλώσει. Δηλαδή ο υμένας γίνεται ασταθής.



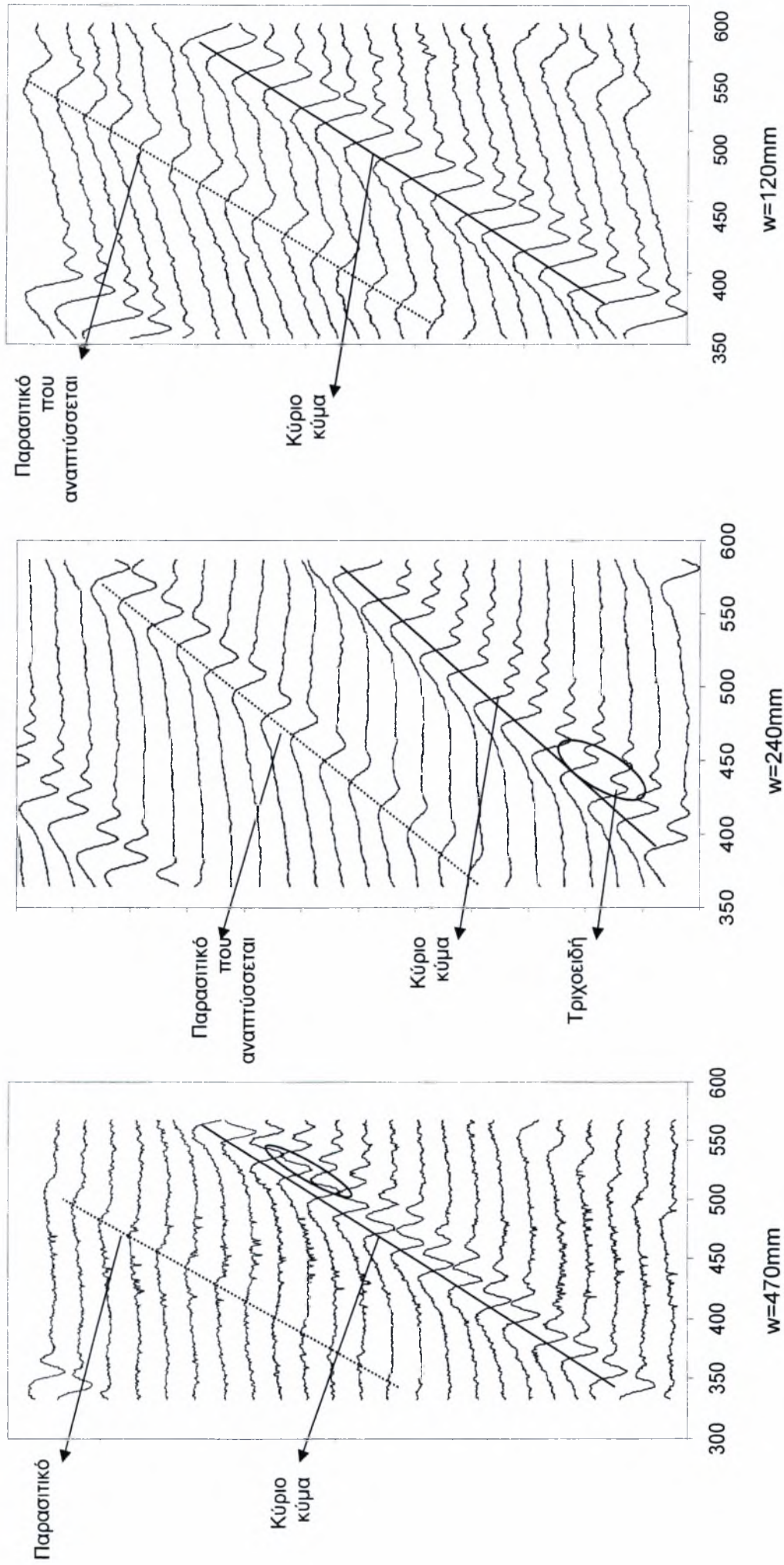
Σχήμα 4.37: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για δύο διαφορετικές αποστάσεις από την αρχή του καναλιού ροής ($a=330\text{mm}$ & $b=1330\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$.

Στο Σχήμα 4.37 ($Re=40$, $f=0.167$) παρατηρούμε ότι το ύψος του μοναχικού κύματος που εμφανίζεται στη θέση $a=330\text{mm}$ μεγαλώνει μέχρι τη θέση $b=1330\text{mm}$. Το ίδιο συμβαίνει και με το παρασιτικό κύμα το οποίο εμφανίζεται στη θέση $a=330\text{mm}$ και μέχρι τη θέση $b=1330\text{mm}$ έχει αναπτυχθεί σημαντικά. Τέλος, στη θέση $a=330\text{mm}$, παρατηρούμε και φαινόμενα συγχώνευσης κατά την ανάπτυξη του μοναχικού κύματος.

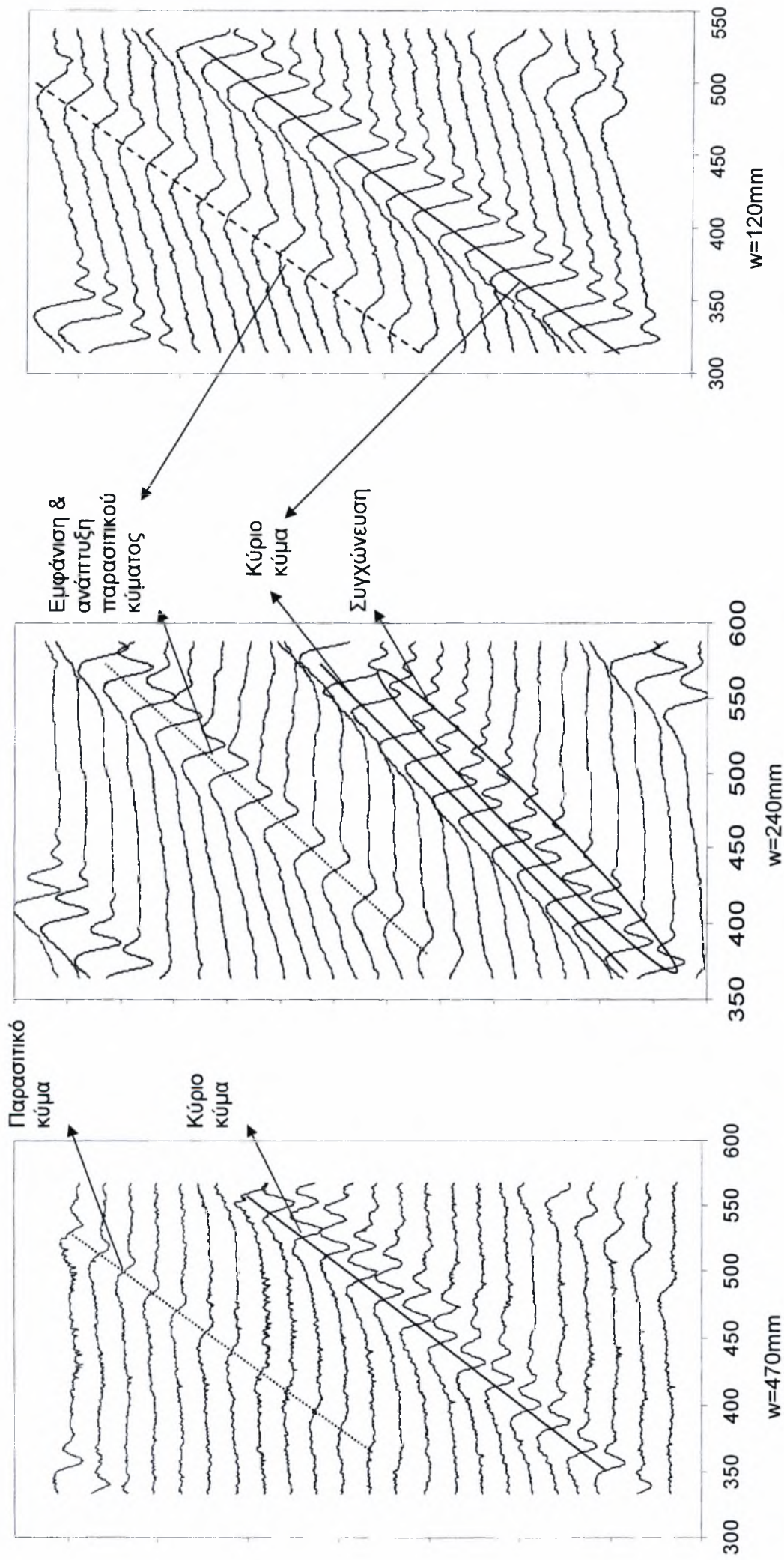
4.4 Παρουσίαση των γραφημάτων του προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$).



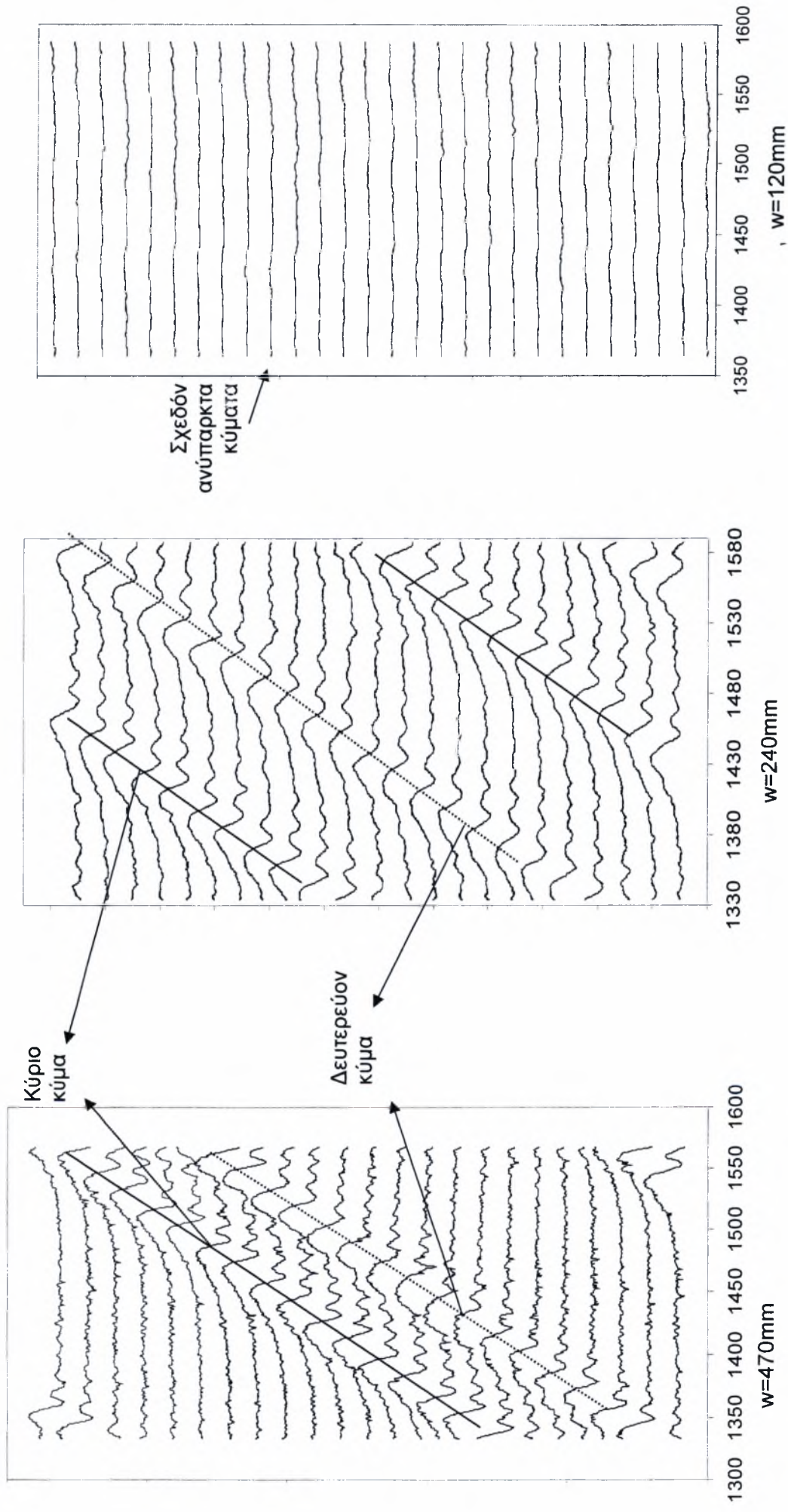
Σχήμα 4.38: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$.



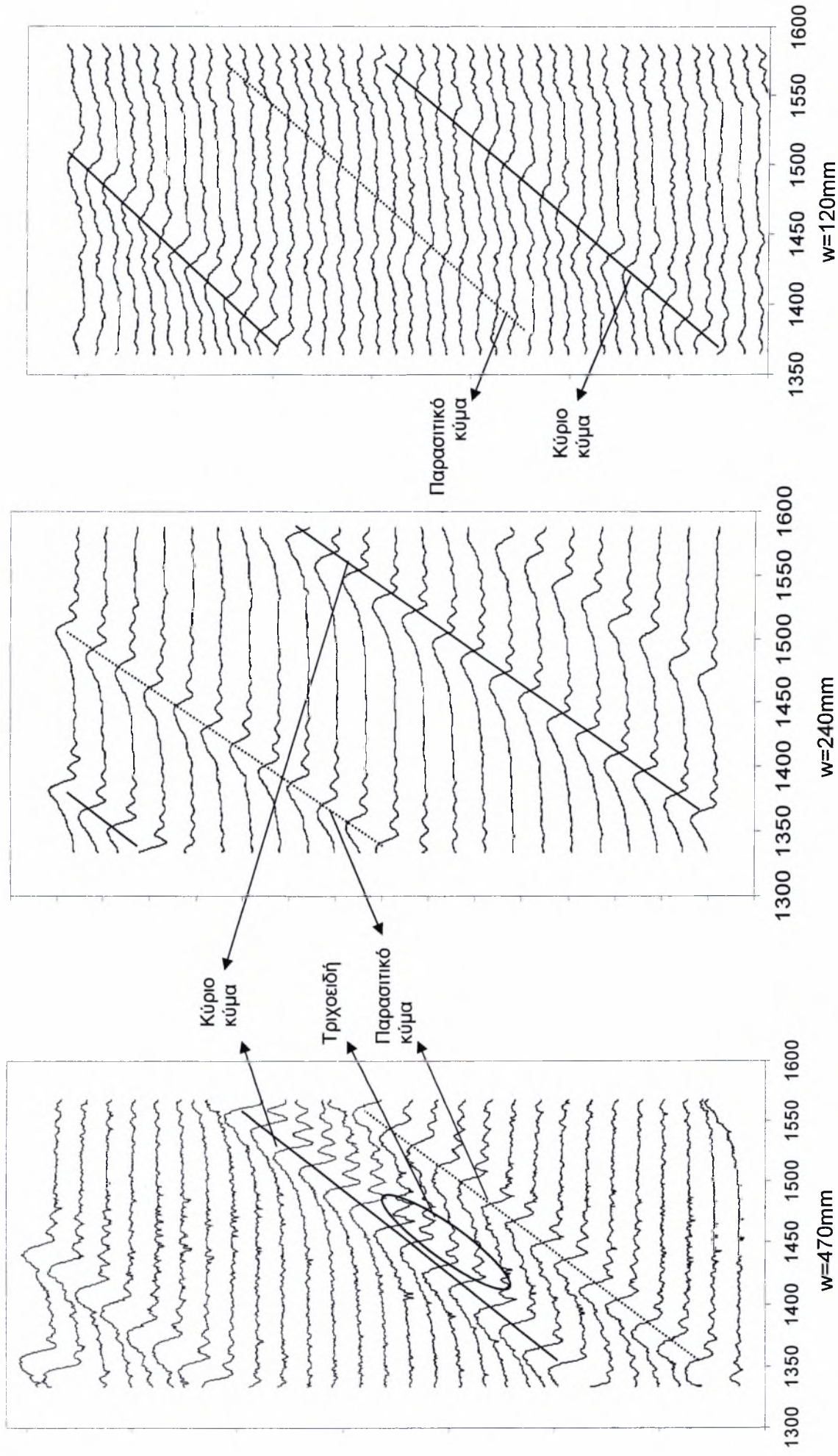
Σχήμα 4.39: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$.



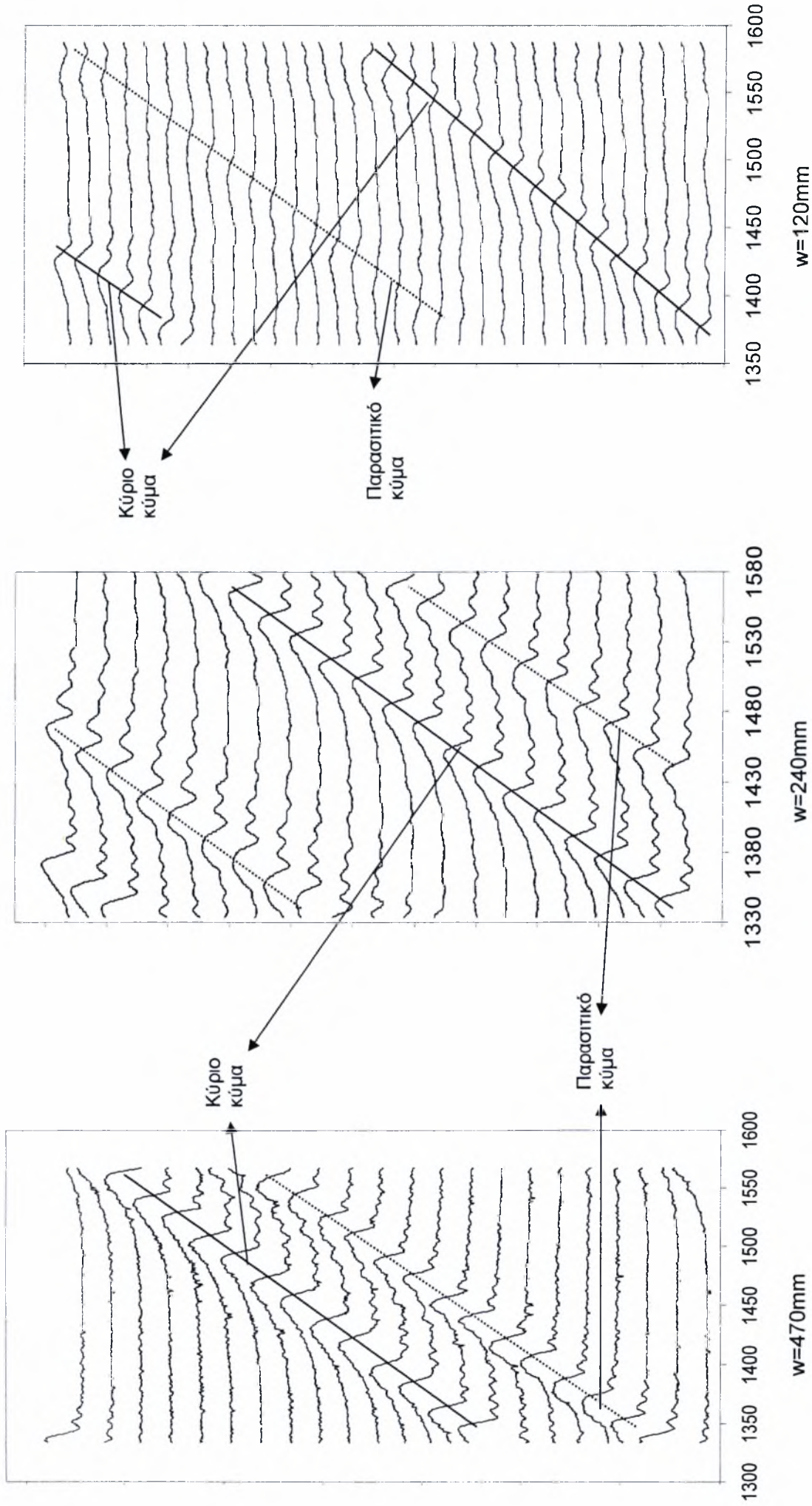
Σχήμα 4.40: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$.



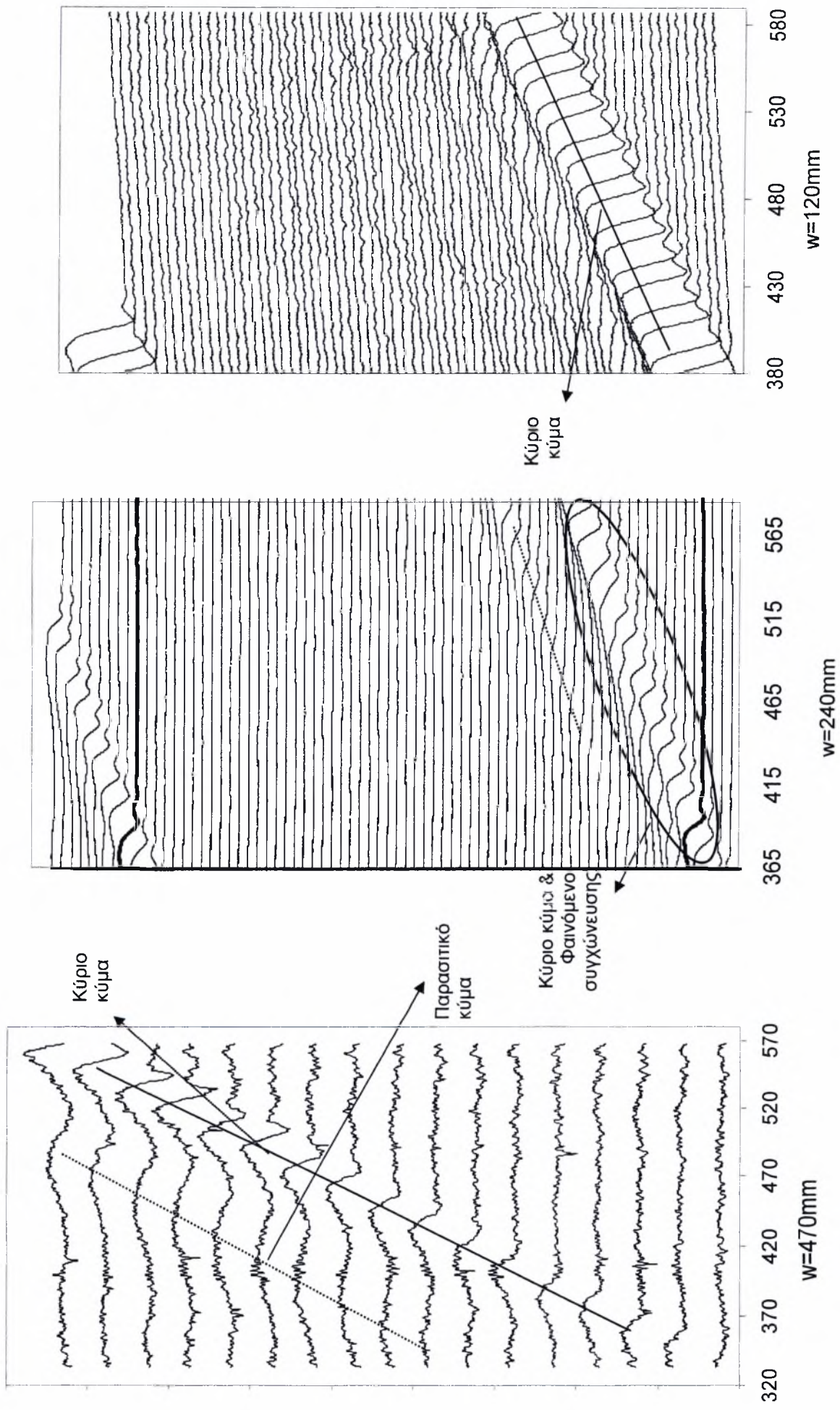
Σχήμα 4.41: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$.



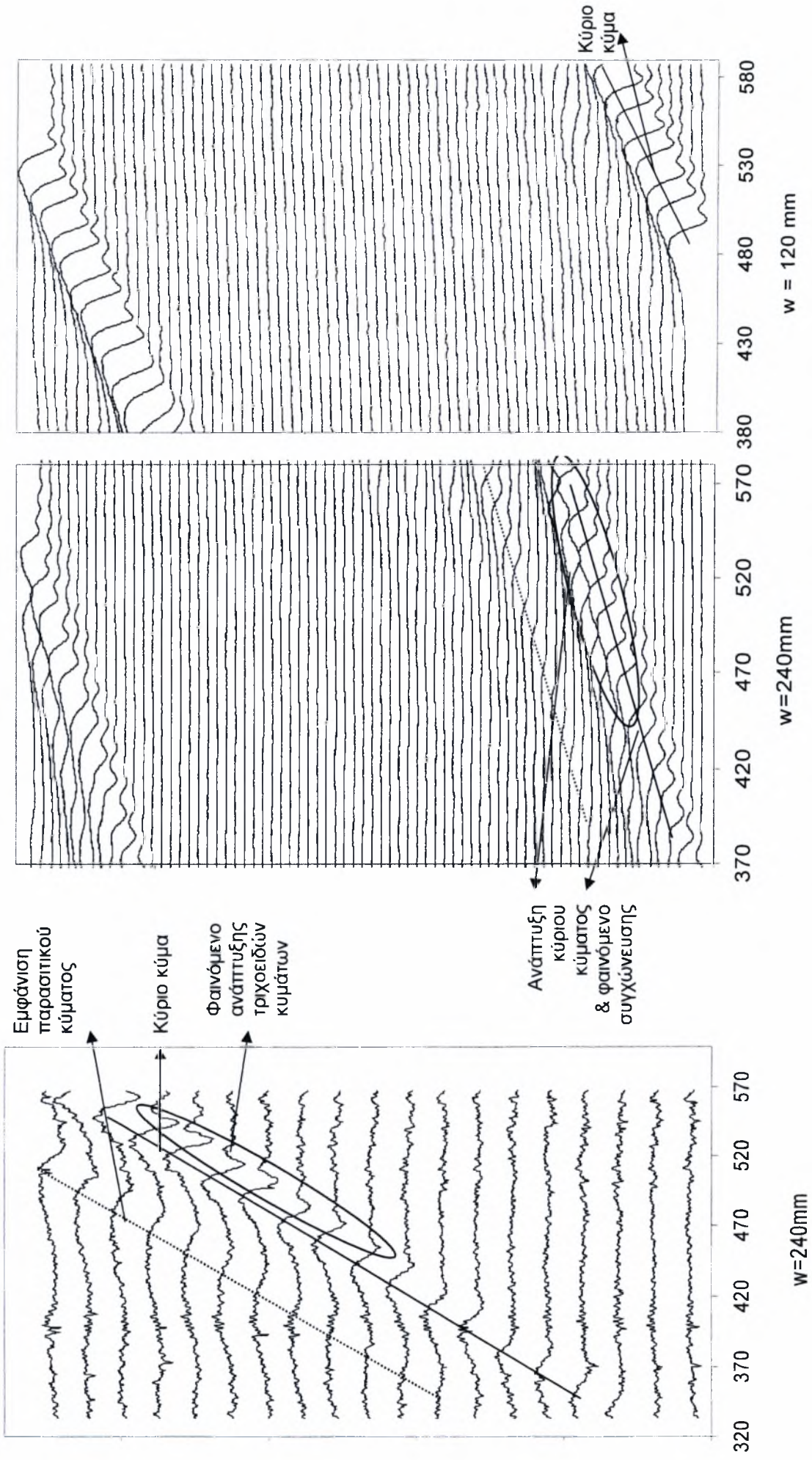
Σχήμα 4.42: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$.



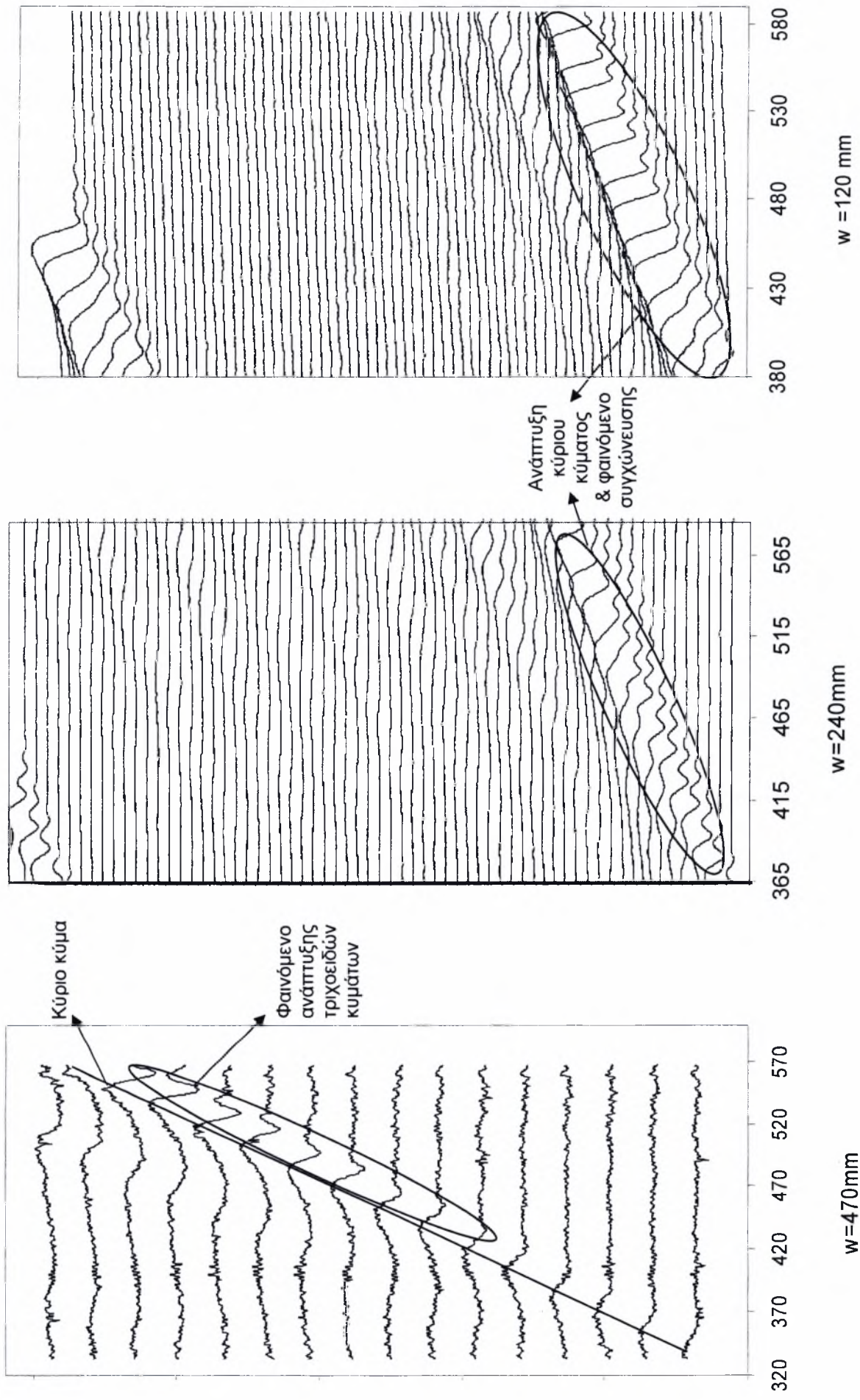
Σχήμα 4.43: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.5$ (on 1.5 - off 0.5) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$.



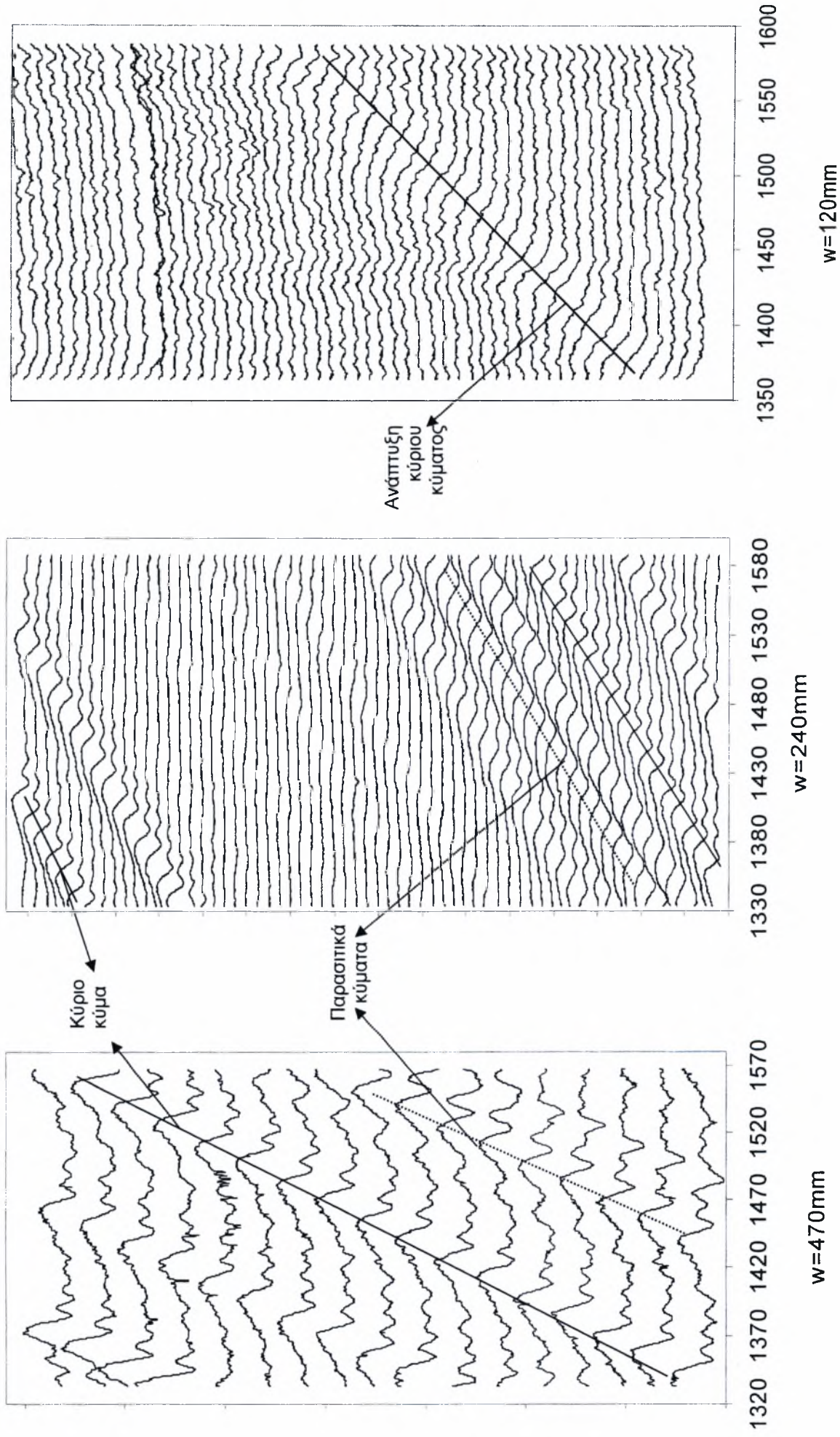
Σχήμα 4.44: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$.



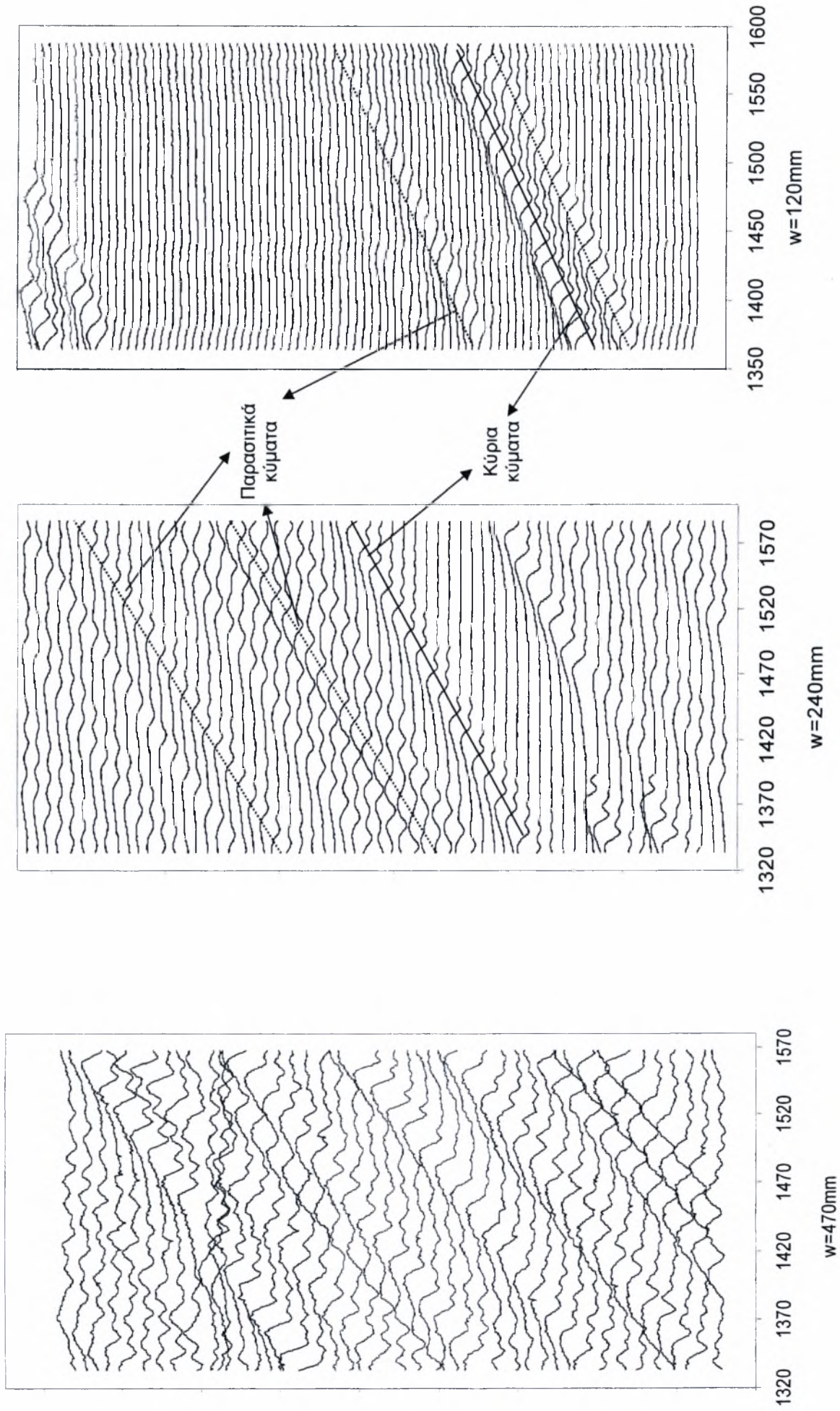
Σχήμα 4.45: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$.



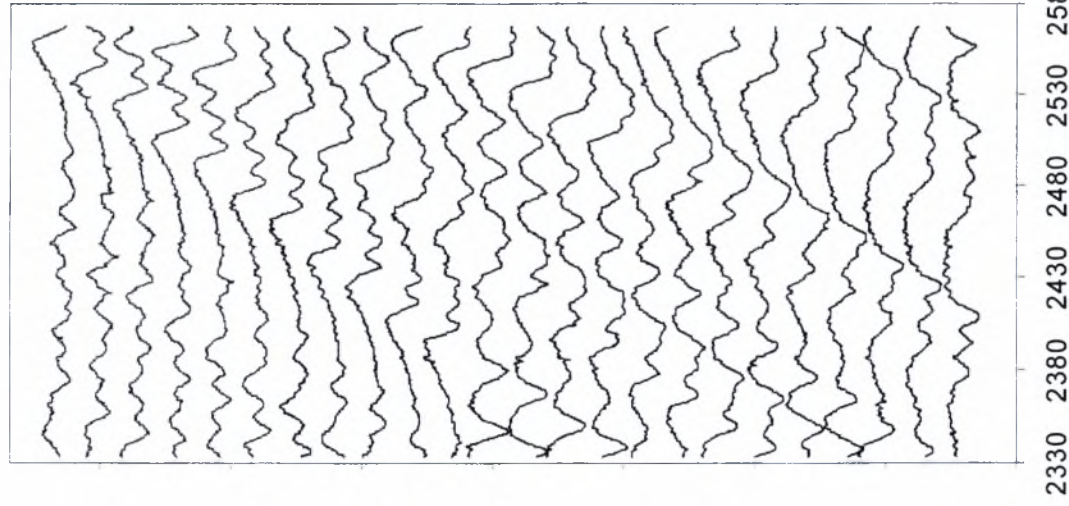
Σχήμα 4.46: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=40$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $a=330\text{mm}$.



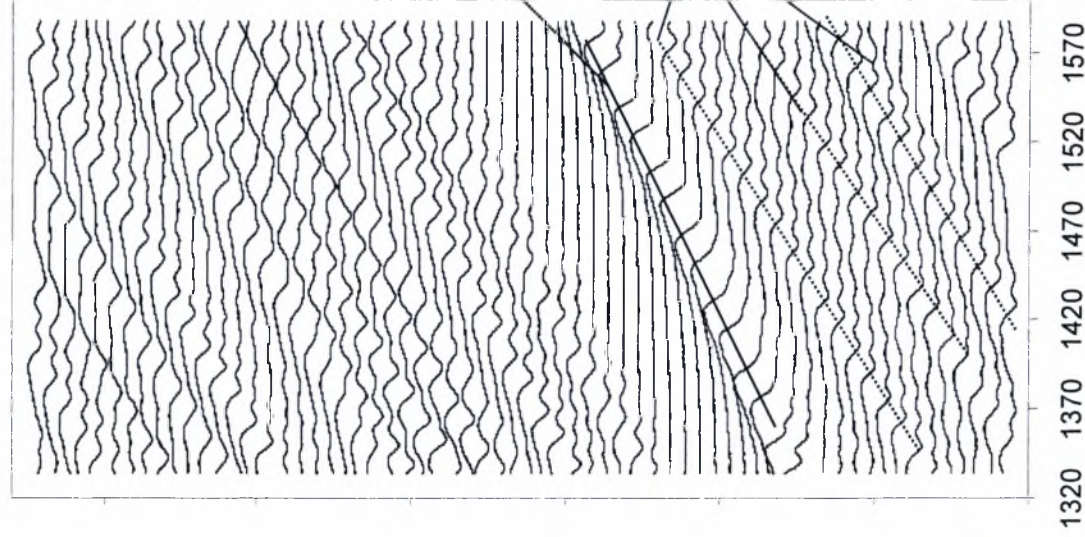
Σχήμα 4.47: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=30$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$.



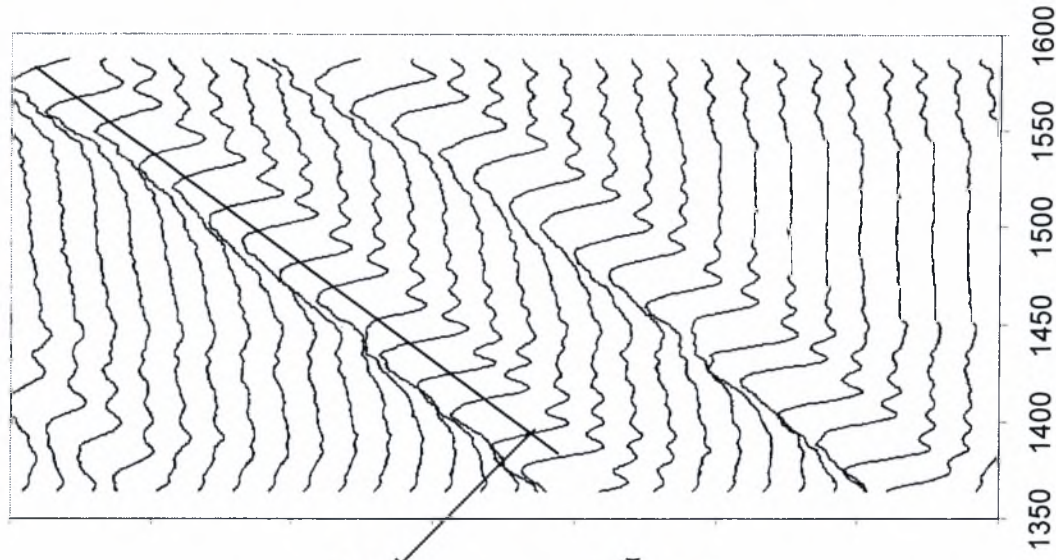
Σχήμα 4.48: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$), για αριθμό $Re=35$, συχνότητα διαταραχής $f=0.167$ (on 5 - off 1) και θέση κάμερας $b=1330\text{mm}$.



w=470mm



w=240mm



w=120mm

Σχήμα 4.49: Σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη του καναλιού ροής (w=470mm, w=240mm & w=120mm), για αριθμό Re=40, συχνότητα διαταραχής f=0.167 (on 5 - off 1) και θέση κάμερας b=1330mm.

4.5 Σχόλια πάνω στις συγκρίσεις των προφίλ του ύψους του υμένα για τα τρία διαφορετικά πλάτη καναλιού ($w=470, 240, 120\text{mm}$).

Στα Σχήματα 4.38 – 4.49 προχωράμε στην παρουσίαση και σύγκριση των προφίλ του ύψους του υμένα για τρία διαφορετικά πλάτη καναλιού ($w=470\text{mm}$, $w=240\text{mm}$ & $w=120\text{mm}$). Για το σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί και αποτελέσματα από τη μεταπτυχιακή εργασία του Πέτρου Δάλλα. Σε κάθε τριάδα προφίλ έχουμε κοινό αριθμό Re , διαταραχή f και απόσταση από την αρχή του καναλιού, πρώτα $a=330\text{mm}$ και έπειτα $b=1330\text{mm}$.

Στο Σχήμα 4.38 ($Re=30$, $f=0.5$, $a=330\text{mm}$) παρατηρούμε τα εξής. Για $w=470\text{mm}$ έχουμε κύριο κύμα το οποίο ακολουθείται από παρασιτικό, ενώ εμφανίζονται και τριχοειδή κύματα. Για $w=240\text{mm}$, το παρασιτικό κύμα είναι πιο ανεπτυγμένο από ότι για $w=470\text{mm}$, ενώ και εδώ έχουμε τριχοειδή. Για $w=120\text{mm}$ βλέπουμε επίσης το κύριο κύμα να ακολουθείται από παρασιτικό. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.38 ($Re=30$, $f=0.5$, $a=330\text{mm}$) με το Σχήμα 4.41 ($Re=30$, $f=0.5$, $b=1330\text{mm}$) παρατηρούμε ότι ενώ για $w=470\text{mm}$ και για $w=240\text{mm}$ τα κύρια και παρασιτικά κύματα αναπτύσσονται, δηλαδή το ύψος τους αυξάνεται, δεν ισχύει το ίδιο και για $w=120\text{mm}$. Σε αυτή την περίπτωση το ύψος του μοναχικού και του παρασιτικού κύματος μειώνεται. Δηλαδή για $w=470\text{mm}$ και για $w=240\text{mm}$ ο υμένας είναι ασταθής για $w=120\text{mm}$ ο υμένας είναι ευσταθής.

Στο Σχήμα 4.39 ($Re=35$, $f=0.5$, $a=330\text{mm}$) για $w=470\text{mm}$ έχουμε κύριο κύμα το οποίο ακολουθείται από παρασιτικό, ενώ εμφανίζονται και αρκετά τριχοειδή κύματα μικρού μήκους κύματος. Λόγω της αύξησης του Re το ύψος των κυμάτων εδώ είναι μεγαλύτερο από το Σχήμα 4.38 ($Re=30$, $f=0.5$, $a=330\text{mm}$). Γίνεται ακόμη φανερό ότι και τα δυο τα κύματα αναπτύσσονται. Επιπλέον εμφανίζονται και τριχοειδή. Τις ίδιες ακριβώς παρατηρήσεις κάνουμε και για $w=240\text{mm}$. Και στην τρίτη περίπτωση για $w=120\text{mm}$ έχουμε κύριο και παρασιτικό κύμα όμως τα κύματα αυτά δεν αναπτύσσονται αλλά αποσβένονται. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.39 ($Re=35$, $f=0.5$, $a=330\text{mm}$) με το Σχήμα 4.42 ($Re=35$, $f=0.5$, $b=1330\text{mm}$) φαίνεται πιο καθαρά ότι ενώ για $w=470\text{mm}$ και για $w=240\text{mm}$ τα κύματα (μοναχικά και παρασιτικά) αναπτύσσονται από τη θέση $a=330\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$, δεν ισχύει το ίδιο και για $w=120\text{mm}$. Για $w=120\text{mm}$ έχουμε απόσβεση από τη μια θέση στην άλλη.

Στο Σχήμα 4.40 ($Re=40$, $f=0.5$, $a=330\text{mm}$) παρατηρούμε τα εξής. Για $w=470\text{mm}$ έχουμε εμφάνιση και ανάπτυξη παρασιτικού κύματος και το ίδιο ισχύει και για $w=240\text{mm}$. Επιπλέον για $w=240\text{mm}$ παρατηρούμε και φαινόμενα συγχώνευσης στα τριχοειδή κύματα που προπορεύονται των κυρίων. Τέλος, για $w=120\text{mm}$ έχουμε επίσης τόσο παρασιτικά όσο και τριχοειδή κύματα. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.40 ($Re=40$, $f=0.5$, $a=330\text{mm}$) με το Σχήμα 4.43 ($Re=40$, $f=0.5$, $b=1330\text{mm}$) παρατηρούμε τα εξής. Για $w=470\text{mm}$ και για $w=240\text{mm}$ τα κύρια και παρασιτικά κύματα έχουν αναπτυχθεί σε

σχέση με τη θέση $a=330\text{mm}$. Όμως και πάλι για $w=120\text{mm}$ παρατηρούμε απόσβεση των κυμάτων από τη θέση $a=330\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$.

Στα σχήματα 4.44 - 4.49 έχουμε αλλάξει τη συχνότητα της διαταραχής από $f=0.5\text{Hz}$ σε $f=0.167\text{Hz}$.

Στο Σχήμα 4.44 ($Re=30$, $f=0.167$, $a=330\text{mm}$) παρατηρούμε τα εξής. Για $w=470\text{mm}$ έχουμε εμφάνιση και ανάπτυξη παρασιτικού κύματος. Για $w=240\text{mm}$ έχουμε την εμφάνιση και ανάπτυξη του κύριου κύματος μέσα από φαινόμενα συγχώνευσης. Επιπλέον έχουμε την εμφάνιση και ανάπτυξη παρασιτικών κυμάτων. Για $w=120\text{mm}$ βλέπουμε ένα υψηλό κύριο – μοναχικό κύμα χωρίς την ύπαρξη παρασιτικών. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.44 ($Re=30$, $f=0.167$, $a=330\text{mm}$) με το Σχήμα 4.47 ($Re=30$, $f=0.167$, $b=1330\text{mm}$) παρατηρούμε τα εξής. Για $w=470\text{mm}$ τα κύματα αναπτύσσονται από τη θέση $a=330\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$. Το ίδιο ισχύει και για $w=240\text{mm}$, όπου μάλιστα τα παρασιτικά κύματα έχουν πληθύνει. Τέλος, για $w=120\text{mm}$ βλέπουμε την απόσβεση του κύριου κύματος από τη θέση $a=330\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$.

Στο Σχήμα 4.45 ($Re=35$, $f=0.167$, $a=330\text{mm}$) παρατηρούμε τα ίδια φαινόμενα με την προηγούμενη περίπτωση για όλα τα πλάτη του καναλιού. Δηλαδή για $w=470\text{mm}$ έχουμε εμφάνιση και ανάπτυξη παρασιτικού κύματος, πίσω από το μοναχικό – κύριο κύμα. Παράλληλα έχουμε εμφάνιση και ανάπτυξη τριχοειδών κυμάτων μπροστά από το μοναχικό – κύριο κύμα. Για $w=240\text{mm}$ δεν έχουμε παρασιτικά κύματα. Επιπλέον το κύριο κύμα αναπτύσσεται μέσα από φαινόμενα συγχώνευσης. Τέλος για $w=120\text{mm}$ δεν έχουμε παρασιτικά κύματα ενώ το κύριο είναι υψηλό κύριο κύμα. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.45 ($Re=35$, $f=0.167$, $a=330\text{mm}$) με το Σχήμα 4.48 ($Re=35$, $f=0.167$, $b=1330\text{mm}$) παρατηρούμε ότι για $w=470\text{mm}$ ο υμένας γίνεται εντελώς ασταθής από τη θέση $a=330\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$. Ενώ για $w=240\text{mm}$ έχουμε σημαντική αύξηση των παρασιτικών κυμάτων από τη θέση $a=330\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$. Τέλος, για $w=120\text{mm}$ βλέπουμε την ανάπτυξη παρασιτικού κύματος στη θέση $b=1330\text{mm}$ ενώ στη θέση $a=330\text{mm}$ δεν υπάρχει παρασιτικό.

Τέλος έχουμε το Σχήμα 4.46 ($Re=40$, $f=0.167$, $a=330\text{mm}$). Εδώ παρατηρούμε τα εξής. Για $w=470\text{mm}$ βλέπουμε την εμφάνιση και ανάπτυξη παρασιτικού κύματος πίσω από το κύριο κύμα. Παράλληλα βλέπουμε την εμφάνιση και ανάπτυξη τριχοειδών κυμάτων μπροστά από το μοναχικό. Για $w=240\text{mm}$ βλέπουμε φαινόμενα συγχώνευσης κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του κύριου κύματος. Επιπλέον παρατηρούμε την εμφάνιση παρασιτικών κυμάτων ανάμεσα σε δυο διαδοχικά μοναχικά, κάτι που δεν ίσχυε στις ίδιες συνθήκες για μικρότερους Re . Για $w=120\text{mm}$ βλέπουμε ένα ανεπτυγμένο και υψηλό μοναχικό κύμα ενώ εμφανίζεται και αναπτύσσεται και παρασιτικό κύμα. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.46 ($Re=40$, $f=0.167$, $a=330\text{mm}$) με το Σχήμα 4.49 ($Re=40$, $f=0.167$, $b=1330\text{mm}$) παρατηρούμε τα εξής. Για $w=470\text{mm}$ έχουμε ανάπτυξη τόσο του κύριου όσο και των παρασιτικών κυμάτων ανάμεσα στη θέση $a=330\text{mm}$ και τη θέση $b=1330\text{mm}$. Μάλιστα πληθαίνει

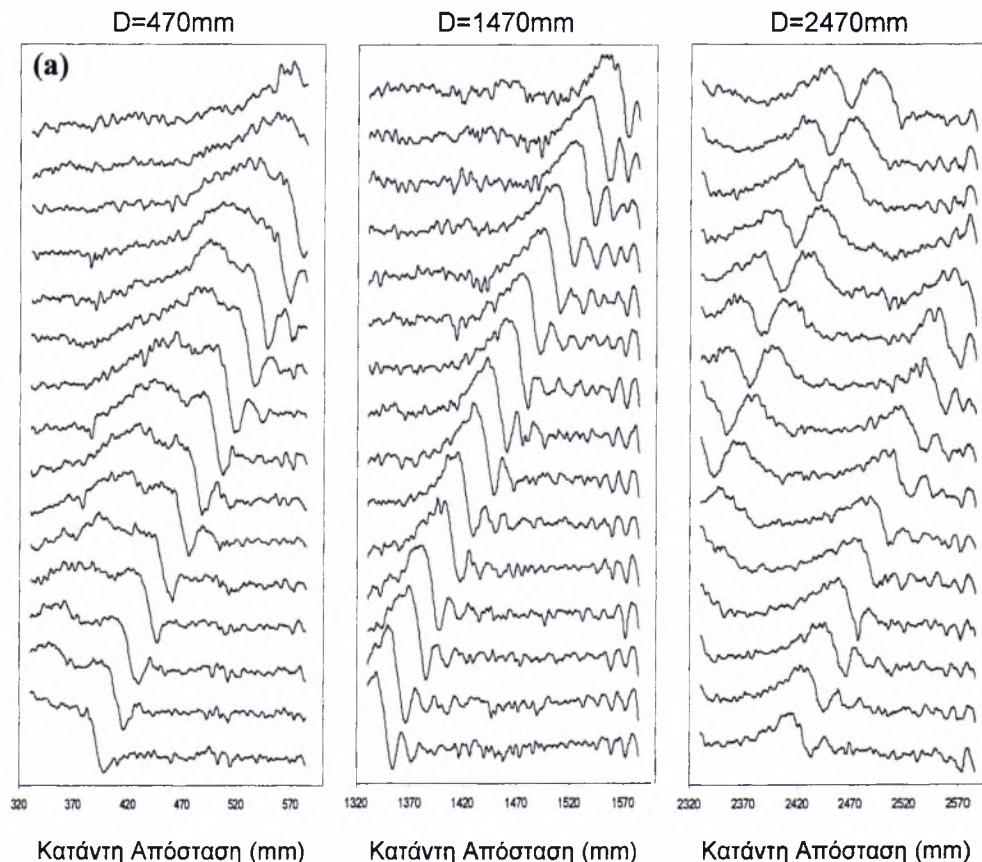
και ο αριθμός των παρασιτικών κυμάτων ανάμεσα σε δυο διαδοχικά κύρια, Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για $w=240\text{mm}$. Στη θέση $b=1330\text{mm}$ παρατηρούμε περισσότερα και πιο ανεπτυγμένα παρασιτικά κύματα. Τέλος για $w=120\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, έχουμε την ανάπτυξη του παρασιτικού που εμφανίζεται στη θέση $a=330\text{mm}$

4.6 Ο κρίσιμος Re για την μετάβαση από την περιοχή ευστάθειας στην περιοχή αστάθειας

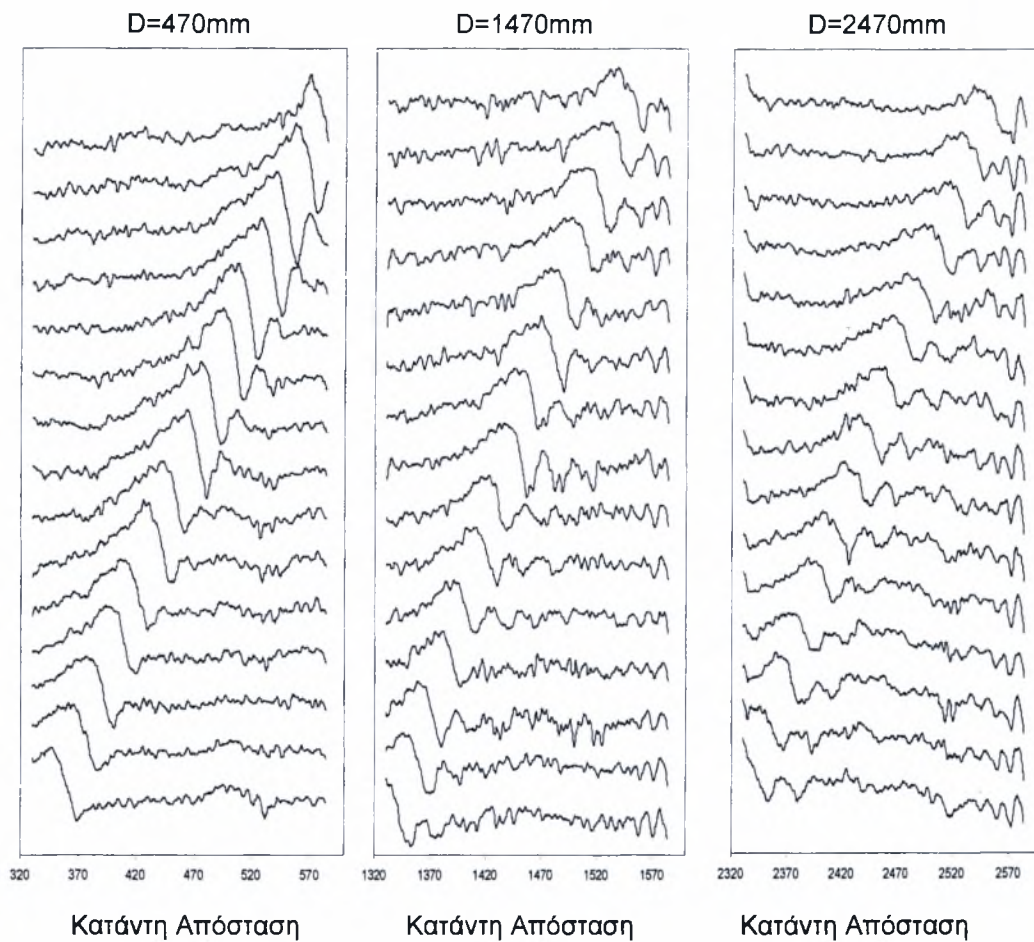
Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο πειραματικός έλεγχος του κρίσιμου ορίου του αριθμού Re πάνω από το οποίο ο υμένας από ευσταθής γίνεται ασταθής. Σύμφωνα με τη θεωρία ο κρίσιμος Re_{cr} δίνεται από τη σχέση:

$$Re_{cr}=(5/6)*cot\varphi \quad \text{Σχέση 4.1}$$

όπου φ η γωνία κλίσης του επιπέδου πάνω στο οποίο ρέει ο υγρός υμένας. Στην εργασία του Γ. Βασιλειάδη(2007) η γωνία κλίσης του επιπέδου ήταν $\varphi=3.16^\circ$, ενώ το υγρό ροής ήταν διάλυμα γλυκερίνης 24% ($\nu=1,82 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho=1055,9 \text{ Kg/m}^3$). Σύμφωνα λοιπόν με τη Σχέση 4.1 ο Re_{cr} θα έπρεπε να είναι $Re_{cr}=(5/6)*cot\varphi=(5/6)*cot3.16=15$. Η πειραματική μελέτη όμως έδειξε ότι ο κρίσιμος Reynolds είναι τελικά ο $Re_{cr}=20$. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στα Σχήματα 4.50-4.51 από τη διπλωματική εργασία του Γ. Βασιλειάδη.



Σχήμα 4.50: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,167 \text{ Hz}$ ($T_{on}=5\text{sec}$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm, b)1330mm έως 1590mm, c) 2330mm έως 2590mm



Σχήμα 4.51: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=20$ και συχνότητα διαταραχής $f = 0,5$ Hz ($T_{on}=1,5sec$) για δεκαπέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές σε απόσταση: a) 330mm έως 590mm, b) 1330mm έως 1590mm, c) 2330mm έως 2590mm

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

Στην παρούσα εργασία η κλίση έχει διατηρηθεί στις $3,16^\circ$ και το υγρό που χρησιμοποιήθηκε ήταν νερό και μικρή ποσότητα χρωστικής ουσίας ουρανίνη (Sodium Salt of Fluorescein – $C_{20}H_{10}O_5Na_2$), η προσθήκη της οποίας δεν επηρέασε τις ιδιότητες του ρευστού. Και πάλι σύμφωνα με τη Σχέση 4.1 ο κρίσιμος Re_{cr} θα έπρεπε να είναι 15 ανεξάρτητα από το πλάτος καναλιού w . Όμως όπως παρατηρείται από τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας, για πλάτος καναλιού $w=120mm$, ο Re_{cr} είναι 30. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στα **Σχήματα 4.38-4.49** όπου τουλάχιστον μέχρι και για $Re=30$ ο υμένας είναι ευσταθής αφού τα μοναχικά και τα παρασιτικά

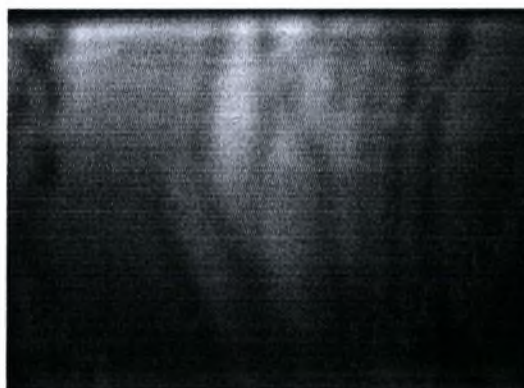
κύματα αποσβένονται. Ακόμη και πιθανά κατασκευαστικά ή πειραματικά σφάλματα δεν δικαιολογούν τόσο μεγάλη απόκλιση ανάμεσα στον πειραματικό και τον θεωρητικό Re_{cr} (ο πειραματικός είναι τουλάχιστον διπλάσιος του θεωρητικού). Το συμπέρασμα αυτής της παρατήρησης είναι ότι το πλάτος του καναλιού φαίνεται να επηρεάζει τον κρίσιμο Re_{cr} , και αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη θεωρία. Το φαινόμενο αυτό χρειάζεται περαιτέρω μελέτη ώστε να μπορούν να βγουν ασφαλή συμπεράσματα.

4.7 Εμφάνιση τρισδιάστατων δομών

Παρακάτω παραθέτουμε τις περιπτώσεις εμφάνισης τρισδιάστατων δομών κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Να διευκρινίσουμε πως τα πειράματα διεξήχθησαν για $Re > 40$ όμως για $30 < Re < 40$ παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα. Ξεκινάμε από το πλάτος καναλιού $w=240\text{mm}$ και τη θέση $b=1330\text{mm}$ (δεν εξετάζουμε τη θέση $a=330\text{mm}$). Στα Σχήματα 4.52 & 4.53 παρατηρούμε ότι για $Re=45$ εμφανίζονται τρισδιάστατες δομές.



Σχήμα 4.52: Τρισδιάστατη δομή για $w=240\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, για συχνότητα $f=0.5\text{Hz}$ και για $Re=45$

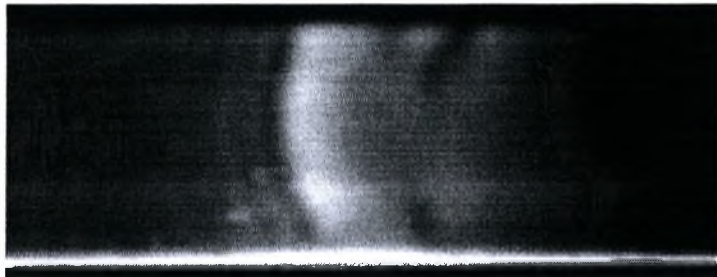


Σχήμα 4.53: Τρισδιάστατη δομή για $w=240\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, για συχνότητα $f=0.167\text{Hz}$ και για $Re=45$

Για πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$ και για $f=0.167$ παρατηρούμε ότι μέχρι και για αριθμό $Re=48$ δεν εμφανίζονται τρισδιάστατες δομές. Σχήματα 4.54. Όμως για πλάτος καναλιού $w=120\text{mm}$ στη θέση $b=1330\text{mm}$ και για $f=0,5$ έχουμε την εμφάνιση τρισδιάστατων δομών στον αριθμό $Re=49$.



Σχήμα 4.54: Διδιάστατη δομή για $w=120\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, για συχνότητα $f=0.167\text{HZ}$ και για $Re48$



Σχήμα 4.55: Τρισδιάστατη δομή για $w=120\text{mm}$, στη θέση $b=1330\text{mm}$, για συχνότητα $f=0.5\text{HZ}$ και για $Re49$

Βιβλιογραφία

1. Βασιλειάδης Γιάννης, 2007 «Πειραματική Μελέτη δισδιάστατων μοναχικών κυμάτων στη ροή υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
2. Δάλλας Πέτρος 2007 " Μελέτη οδευόντων κυμάτων σε κεκλιμένο κανάλι ροής", Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
3. Τόλης Ηλίας 2007 «Μελέτη μοναχικών κυμάτων κατά τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα μήκους 3 μέτρων», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
4. Τριανταφύλλου Ορφέας 2007 "Πρώτα πειραματικά αποτελέσματα στο νέο κανάλι ροής πίπτοντος υμένα", Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
5. Σταθάς Παναγιώτης 2007 "Κατασκευή πειραματικής διάταξης μελέτης ροής υγρού υμένα", Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091449

