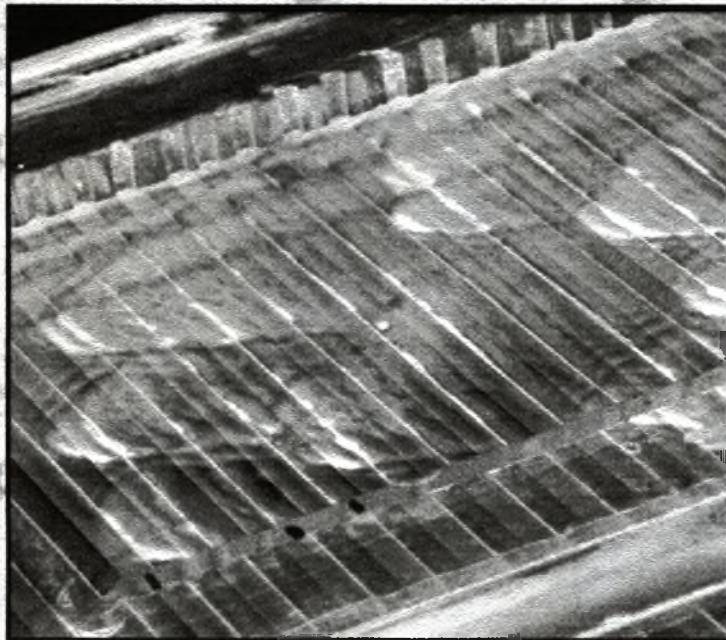




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών

Διπλωματική εργασία με θέμα:
**Πειραματική Μελέτη Ροής Υγρού Υμένα
πάνω από Κεκλιμένο Περιοδικό Τοίχωμα**




Φωτόπουλος Δημήτριος
Βόλος, Οκτώβριος 2000



αρ. εισ 223/2000

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

Αριθ. Εισ.: 1861/1
Ημερ. Εισ.: 06-10-2000
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2000
ΦΩΤ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

004000062134

Ευχαριστίες

Υπάρχουν δύο άνθρωποι οι οποίοι έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας και για αυτό το λόγο αισθάνομαι την ανάγκη να τους ευχαριστήσω. Ο πρώτος είναι ο καθηγητής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, Δρ Βασίλειος Μποντόζογλου, ο οποίος μου έκανε την τιμή να δεχτεί να επιβλέψει την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Ο δεύτερος είναι ο υποψήφιος διδάκτορας του τμήματος, Μιχάλης Βλαχογιάννης, ο οποίος, ανιδιοτελώς, μου αφιέρωσε τμήματα του πολύτιμου χρόνου του, δίνοντας λύση σε οποιοδήποτε πιθανό ή απίθανο, θεωρητικό ή πρακτικό πρόβλημα μου προέκυψε, όπως επίσης με βοήθησε και στην βαθύτερη κατανόηση των θεωρητικών ζητημάτων που σχετίζονται με αυτή την εργασία. Τους ευχαριστώ θερμά και τους δύο.

Εκτός συναγωνισμού φυσικά, "παίζουν" οι γονείς μου που με στήριξαν καθ'όλους τους τρόπους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου

Περίληψη

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο περιοδικό τοίχωμα. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται ποιοτικά η επίδραση του περιοδικού τοιχώματος στην διαμόρφωση της ελεύθερης επιφανείας του υμένα. Ο σχηματισμός του υμένα γίνεται με την βοήθεια πειραματικής συσκευής, ανάλογης αυτής του Liu [5] και η παρατήρησή του με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό (fluorescence imaging method).

Για την επίτευξη αυτού του στόχου έγιναν σειρές πειραμάτων σε κλίσεις 1.3, 2.6, 3.4, 5.4 και 7.4 μοιρών. Ως ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό και διάλυμα νερού - γλυκερίνης 26% κ.β. Οι εικόνες που προέκυψαν, υπέστησαν ψηφιακοποίηση και επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου MATLAB.

Παρατηρήθηκαν τρεις χαρακτηριστικές περιοχές ροής. Η περιοχή με στατική διαμόρφωση της ελεύθερης επιφανείας του υμένα, η ασταθής περιοχή και η περιοχή τρισδιάστατης αστάθειας. Η πρώτη εμφανίζεται πάνω από τα πρώτα μήκη κύματος του τοιχώματος. Στη δεύτερη ξεχωρίζουν δυο υποπεριοχές. Η μεταβατική περιοχή και η περιοχή όπου εμφανίζονται φυσικά σολιτονικά κύματα (solitary waves). Τέλος, για μεγάλους αριθμούς Re εμφανίζεται η περιοχή της τρισδιάστατης αστάθειας. Η μετάβαση από την μια περιοχή ροής στην άλλη γίνεται κατάντη της ροής και είναι αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού Reynolds. Το σημείο μετάβασης είναι συνάρτηση του αριθμού Re και της γωνίας κλίσης του τοιχώματος.

Πίνακας Περιεχομένων

	Σελίδα
Εισαγωγή.....	7
Κεφ. 1^ο Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	9
1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	9
1.2 Θεωρητική Ανάλυση.....	24
Κεφ. 2^ο Πειραματική Διάταξη-Διαδικασία μετρήσεων.....	27
2.1 Πειραματική Διάταξη.....	27
2.1.1 Το Κανάλι Ροής	29
2.1.2 Το Περιοδικό Τοίχωμα.....	30
2.1.3 Το Δοχείο Συλλογής	32
2.1.4 Το Πρωτεύον Δοχείο Υπερχείλισης	33
2.1.5 Το Δευτερεύον Δοχείο Υπερχείλισης	34
2.1.6 Η Ρυθμιστική Βάνα	35
2.1.7 Η Πηγή φθορισμού.....	35
2.1.8 Το Σύστημα Λήψης και Αποθήκευσης Δεδομένων.....	36
2.2 Διαδικασία Μετρήσεων.....	37
2.3 Μέθοδος Απεικόνισης με Φθορισμό.....	39
2.4 Επιλογή Χρωστικής Ουσίας	40
Κεφ. 3^ο Επεξεργασία Αποτελεσμάτων.....	43
3.1 Διαδικασία Βαθμονόμησης της Ροής του Υμένα	43
3.2 Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων	46
3.2.1 Λήψη και Αποθήκευση Εικόνων	46
3.2.2 Επεξεργασία Εικόνων	48
Κεφ. 4^ο Ανάλυση Αποτελεσμάτων	52
4.1 Ευστάθεια στο Κυματοειδές Τοίχωμα	52
4.2 Περιοχές Ροής	54
4.2.1 Ελεύθερη Επιφάνεια με Στατική Διαμόρφωση	55

4.2.2 Ασταθής Περιοχή	67
4.2.3 Τρισδιάστατη Αστάθεια	75
Συμπεράσματα	81
Βιβλιογραφία	83
Παράρτημα	85

Εισαγωγή

Η ροή υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο περιοδικό τοίχωμα είναι μία παραλλαγή του θεμελιώδους προβλήματος της ρευστομηχανικής, της οδηγούμενης από τη βαρύτητα, ροής υγρού υμένα. Πρόκειται για ένα θέμα που έχει πολλές θεωρητικές προεκτάσεις και βρίσκει αρκετές πρακτικές εφαρμογές. Τα κίνητρα για την θεωρητική μελέτη τέτοιου είδους ροής έδωσε το πλήθος των πρακτικών εφαρμογών της. Ροή υγρού υμένα σε επιφάνειες με κάποιου είδους διαμόρφωση απαντάται σε συσκευές εναλλαγής θερμότητας όπως εξατμιστήρες και συμπυκνωτές (falling film evaporators) και σε συσκευές εναλλαγής μάζας όπως στήλες απορρόφησης με πληρωτικά υλικά [8]. Απαντάται επίσης και σε άλλες πιο σύγχρονες τεχνολογικές διεργασίες όπως είναι οι ηλεκτροχημικές επιμεταλλώσεις και οι χημικές μετατροπές σε καταλυτικούς αντιδραστήρες [2, 8, 10, 11].

Όπως υπονοείται και από το πλήθος των εφαρμογών, έχει πρακτικά διαπιστωθεί, ότι κατά την ροή υγρού υμένα πάνω σε επιφάνειες με κάποιου είδους διαμόρφωση, εντατικοποιούνται οι συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Εξ' αιτίας της πολυπλοκότητάς του όμως, το πρόβλημα δεν είναι εκτενώς μελετημένο, ιδιαίτερα σε πειραματικό επίπεδο.

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της επίδρασης του περιοδικού ορθογωνικού τοιχώματος στην διαμόρφωση της ελεύθερης επιφανείας του υμένα. Ο σχηματισμός του υμένα γίνεται με την βοήθεια πειραματικής συσκευής, ανάλογης αυτής του Liu [5] και η παρατήρησή του με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό (fluorescence imaging method) της οποίας η ορθή λειτουργία έχει πιστοποιηθεί στο εργαστήριο φυσικών και χημικών διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας [22].

Στο πρώτο κεφάλαιο επιχειρείται να παρουσιαστεί η μέχρι σήμερα επιστημονική ερευνητική δραστηριότητα σε παγκόσμιο επίπεδο. Γίνεται επίσης μία θεωρητική ανάλυση σε πρώτο επίπεδο.

Στο δεύτερο παρουσιάζεται λεπτομερώς η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης αναλύεται η διαδικασία των μετρήσεων ενώ παρουσιάζεται η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιαιτερότητες της διαδικασίας βαθμονόμησης του υμένα που ρέει πάνω σε περιοδικό τοίχωμα και περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν από τις σειρές των πειραμάτων.

Το τέταρτο κεφάλαιο ξεκινά με αναφορά στην θεωρία της ευστάθειας σε συνδυασμό με τα πειραματικά αποτελέσματα ενώ συνεχίζει και ολοκληρώνεται με την ανάλυση των διαφόρων περιοχών ροής που εμφανίστηκαν κατά την εκτέλεση του πειραματικού σκέλους αυτής της διπλωματικής.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 1^ο

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση – Θεωρητική Ανάλυση

1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

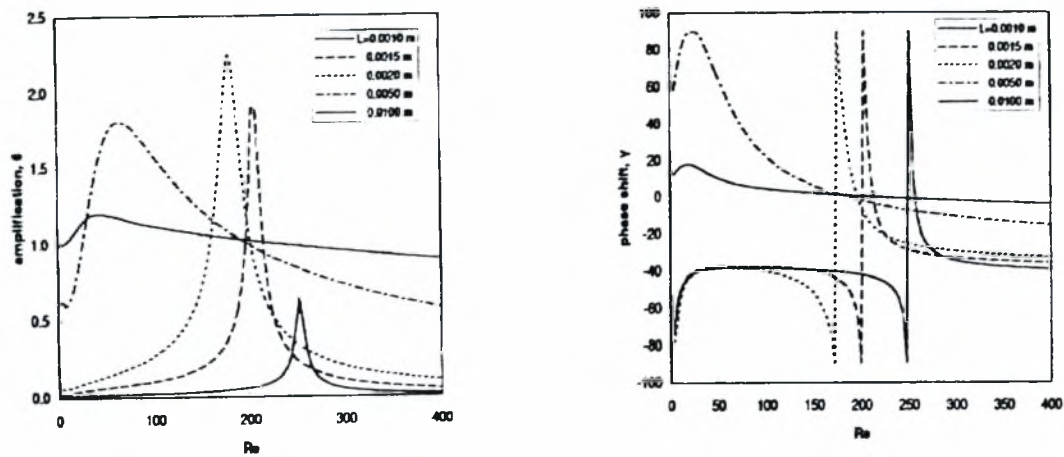
Η ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο τοίχωμα είναι ένα θέμα που έχει θεωρητικές προεκτάσεις και παρουσιάζει αρκετές χρήσιμες πρακτικές εφαρμογές. Το συγκεκριμένο θέμα έχει μελετηθεί διεξοδικά από πολλούς ερευνητές. Τα χαρακτηριστικά της γραμμικής ευσταθείας αυτού του είδους της ροής έχουν καθοριστεί σε διάφορες έρευνες όπως των Benjamin [6] το 1957, Yih [9] το 1963 και Benney [7] το 1966. Πρόσφατες προσπάθειες έχουν εστιασθεί στην κατανόηση της δυναμικής των μη γραμμικών φαινομένων που παρουσιάζονται σε ροή υγρού υμένα. Ροή τέτοιου είδους συναντάται σε συσκευές εναλλαγής θερμότητας όπως εξατμιστήρες και συμπυκνωτές (falling film evaporators). Απαντάται επίσης και σε συσκευές εναλλαγής μάζας όπως στήλες απορρόφησης με πληρωτικά υλικά, ειδικά σε συνθήκες μακριά από πλημμυρισμό όπου η διάτμηση που επιβάλλεται από την αντιρροή του αερίου μπορεί να αγνοηθεί, όπως στη δουλειά των Fair και Bravo [8] το 1990. Αξίζει να αναφερθεί ότι ροή υγρού υμένα συναντάται και σε άλλες πιο σύγχρονες τεχνολογικές διεργασίες όπως είναι οι ηλεκτροχημικές επιμεταλλώσεις και οι χημικές μετατροπές σε καταλυτικούς αντιδραστήρες [2, 8, 10, 11].

Όπως φαίνεται, η ροή υγρού υμένα σε τοιχώματα με διαμόρφωση είναι το σύννηθες φαινόμενο στις περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές. Το πρόβλημα της ροής υγρού υμένα σε περιοδικό, κυματοειδές τοίχωμα φαίνεται ότι δεν έχει μελετηθεί εκτεταμένα, κυρίως πειραματικά. Το κίνητρο για τέτοιου είδους μελέτη έδωσε η εκτεταμένη εφαρμογή τροποποιημένων επιφανειών σε συσκευές διεργασιών με στόχο την εντατικοποίηση των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Τυπικά παραδείγματα είναι κυματοειδείς επιφάνειες που συναντώνται σε συμπυκνωτές και εξατμιστήρες, και στα δομημένα πληρωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις στήλες απορρόφησης και στους αποστακτικούς δίσκους [8].

Πρόσφατες μελέτες της ροής υγρού υμένα πάνω σε κυματοειδές τοίχωμα περιλαμβάνουν θεωρητικές κυρίως προσπάθειες όπως ασυμπτωτικές και αριθμητικές αναλύσεις στο όριο της έρπουσας ροής [Wang (1981), Pozrikidis (1988), Shetty and Cerro (1993), Kang and Chen (1995)], γραμμική ανάλυση ροής πεπερασμένου αριθμού Reynolds στο όριο κυματισμών αποσβαινόμενου πλάτους [Bontozoglou and Papapolymerou (1997)]

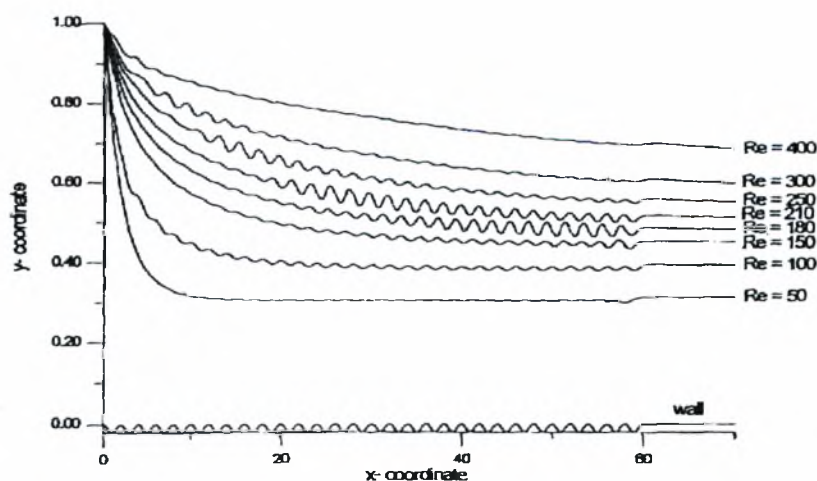
και μόνο δύο αριθμητικοί υπολογισμοί ροής πεπερασμένου αριθμού Reynolds κατά μήκος μεγάλων κυματισμών [Malamataris and Bontozoglou (1999), Trifonov (1998)]. Πειραματικά αποτελέσματα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα υπάρχουν μόνο δύο, από τους Zhao και Cerro [13] το 1992 και από τους Shetty και Cerro [12] το 1993. Οι μελέτες τους αναφέρονται σε ροή ρευστού με μεγάλο ιξώδες, σε κάθετη περιοδική επιφάνεια πέντε διαφορετικών γεωμετριών. Τα αποτελέσματά τους καλύπτουν μια περιοχή πολύ χαμηλών αριθμών Reynolds και περιγράφουν την τοπολογία της ελεύθερης επιφάνειας σε μόνιμες συνθήκες. Σημαντικό εύρημα της έρευνάς τους είναι ότι οι διαταραχές της επιφάνειας έχουν την ίδια περίοδο με τις διαταραχές του τοιχώματος, αλλά το πλάτος και η διαφορά φάσης τους ποικίλουν ανάλογα με τις παραμέτρους της ροής.

Από τις παραπάνω μελέτες προκύπτουν ενδείξεις ότι όταν οι αδρανειακές δυνάμεις γίνονται σημαντικές, λαμβάνουν χώρα μη τετριμμένες μετατροπές της ροής. Οι Μποντόζογλου και Παπαπολυμέρου [2] το (1996) προέβλεψαν θεωρητικά μια λογική αλληλεπίδραση μεταξύ του κεκλιμένου περιοδικού τοιχώματος και της ελεύθερης επιφάνειας, όταν οι διακυμάνσεις της επιφάνειας του τοιχώματος είναι ημιτονοειδείς και ελαττούμενου πλάτους. Η γραμμική ανάλυση οδήγησε σε μια πρόβλεψη για τη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας, από την οποία προέκυψε ότι οι διαταραχές στην ελεύθερη επιφάνεια έχουν το ίδιο μήκος κύματος με αυτές του τοιχώματος, διαφορετικό όμως πλάτος και φάση. Τα παραπάνω αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία και με τα συμπεράσματα των Zhao και Cerro [13]. Υπολογίζεται ότι υπάρχει σημαντική ενίσχυση του πλάτους της διαμόρφωσης του τοιχώματος όταν ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 150-200, ενώ μια διαφορά φάσης 180 μοιρών υποδηλώνει συντονισμό. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι καμπύλες που περιγράφουν το πλάτος των διαταραχών της ελεύθερης επιφάνειας, καθώς επίσης και τη διαφορά φάσης, σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds, για πέντε διαφορετικά μήκη κύματος του τοιχώματος.



Σχήμα 1.1.1 : α) Το πλάτος των διαταραχών της ελεύθερης επιφάνειας σαν συνάρτηση του αριθμού Re.
β) Η διαφορά φάσης της ελεύθερης επιφάνειας σαν συνάρτηση του αριθμού Re.

Στην πιο πρόσφατη εργασία που έγινε για το συγκεκριμένο θέμα το 1999 από τους Μαλαματάρη και Μποντόζογλου [3], μελετήθηκε η μόνιμη στρωτή ροή ενός νευτώνειου ρευστού σε κεκλιμένο κυματοειδές τοίχωμα. Πρόκειται για αριθμητικό πείραμα βασισμένο σε μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκαν προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας, γραμμές ροής και κατανομές ταχυτήτων και πιέσεων, μελετήθηκε η επίδραση των αδιάστατων αριθμών στη ροή και ερευνήθηκε το φαινόμενο του συντονισμού σε μεγάλους αριθμούς Reynolds. Στο σχήμα 1.1.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος. Φαίνεται η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds, όταν ο υμένας ρέει πάνω από κυματοειδές τοίχωμα με διακυμάνσεις πολύ μικρού πλάτους.



Σχήμα 1.1.2 : Η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας πάνω από κεκλιμένο κυματοειδές τοίχωμα

Τα τελευταία 15 χρόνια, παράλληλα με τις παραπάνω εργασίες, έχουν πραγματοποιηθεί και κάποιες πειραματικές μελέτες, οι οποίες αφορούν σε ροή υμένα πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Τα αποτελέσματα που αυτές παρουσιάζουν, περιγράφουν τη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα, υπό την επιβολή εξωτερικών, τεχνητών ή φυσικών διαταραχών. Αποτέλεσμα των διαταραχών είναι η δημιουργία κυμάτων στην επιφάνεια του υμένα, τα οποία παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση ανάλογα με το μηχανισμό δημιουργίας τους. Έτσι, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, για ροή με αριθμούς Re μεταξύ των τιμών 1 και 300, υπάρχουν τέσσερις περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από κύματα με εντελώς διαφορετική μορφή και συμπεριφορά [14].

Η πρώτη περιοχή ονομάζεται περιοχή σύλληψης (inception region) και χαρακτηρίζεται από προοδευτική ενίσχυση των διαταραχών. Διαταραχές απειροστού μεγέθους στην είσοδο ενισχύονται κατάντη της ροής και πλησιάζοντας στο τέλος της περιοχής αυτής, σχηματίζουν ένα μονοχρωματικό κύμα του οποίου το πλάτος αυξάνεται εκθετικά κατάντη της ροής, όπως άλλωστε συμβαίνει και σε άλλα ασταθή συστήματα όταν διεγείρονται γραμμικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επιβράδυνσή του. Πρόκειται για μια μεταφερόμενη (convective) και όχι απόλυτη αστάθεια. Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό της περιοχής αυτής είναι ότι οι εγκάρσιες διαταραχές στη κατεύθυνση της ροής αποσβένονται.

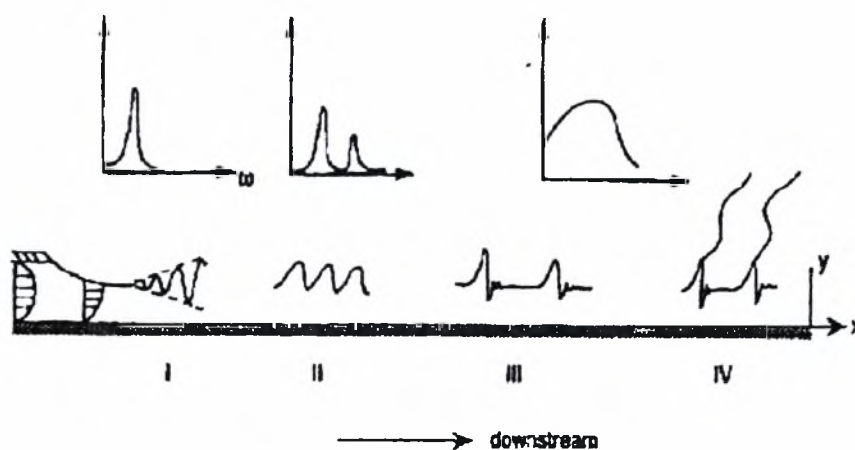
Περνώντας στη δεύτερη περιοχή, η εκθετική αύξηση του πλάτους του μονοχρωματικού κύματος σταματάει, καθώς ασθενή μη-γραμμικά φαινόμενα το σταθεροποιούν σε μια πεπερασμένη τιμή, η οποία εξαρτάται από τον κυματαριθμό, τον αριθμό Reynolds (Re) και τον αριθμό Kapitza (γ). Ο κυματαριθμός των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων της δεύτερης περιοχής διαφέρει από αυτόν των μονοχρωματικών κυμάτων της πρώτης περιοχής, εξαιτίας του μη-γραμμικού μηχανισμού επιλογής.

Γενικά όλα τα κύματα πεπερασμένου πλάτους, τόσο αυτά που προέρχονται από εξωτερικά επιβαλλόμενη περιοδική διέγερση, όσο και τα φυσικά διεγειρόμενα πεδία κυμάτων που προκύπτουν από τη δεύτερη περιοχή, μετακινούνται για μια αρκετά μεγάλη απόσταση, περίπου ίση με δέκα μήκη κύματος, με στατικό τρόπο.

Στην τρίτη περιοχή παρατηρούνται δύο κυρίαρχες αστάθειες, οι οποίες επηρεάζουν τα κύματα πεπερασμένου πλάτους. Η υποαρμονική αστάθεια, γνωστή ως ‘subharmonic instability’ η οποία προκαλεί συνένωση δύο γειτονικών κυμάτων σε κάποια ενδιάμεση θέση και η πλευρική αστάθεια, γνωστή ως ‘sideband instability’, που δημιουργεί σχηματισμούς κυμάτων μεγάλου μήκους. Οι δύο αυτές αστάθειες δημιουργούν μεταξύ των κυμάτων ατέλειες με άτακτο και τυχαίο τρόπο. Τα διαταραγμένα κύματα που βρίσκονται

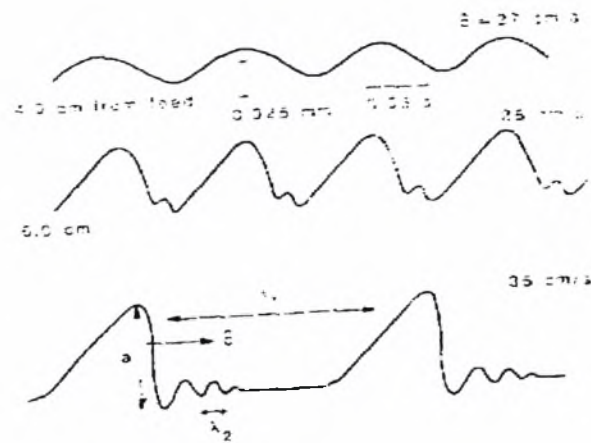
μεταξύ των ατελειών εξελίσσονται και αυξάνονται τόσο κατά το πλάτος τους, όσο και κατά το μήκος κύματός τους και επομένως και κατά την ταχύτητά τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλα μοναχικά κύματα, τοπικά στην ελεύθερη επιφάνεια. Τα κύματα αυτά έχουν απότομο μέτωπο το οποίο ακολουθεί πίσω από μια σειρά μικρότερων κυμάτων, τα οποία είναι γνωστά σαν 'bow waves'. Τα κύματα αυτά έχουν μορφή ρυτιδώσεων και το μήκος κύματός τους είναι ανάλογο με αυτό των μονοχρωματικών κυμάτων της πρώτης περιοχής.

Η τέταρτη και τελευταία περιοχή χαρακτηρίζεται από μεταβολές των κυμάτων στην εγκάρσια κατεύθυνση. Οι κορυφές των μοναχικών κυμάτων αρχίζουν να παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις, οι οποίες αυξάνονται σημαντικά σε πλάτος, στην κάθετη στη ροή όμως διεύθυνση και όχι σε ύψος. Στο σχήμα (1.1.3) φαίνονται οι τέσσερις περιοχές που περιγράφονται στις προηγούμενες παραγράφους, καθώς επίσης και η χαρακτηριστική μορφή του κύματος που αντιστοιχεί σε κάθε μία από αυτές.



Σχήμα 1.1.3 : Η μορφή των κυμάτων στις τέσσερις περιοχές.

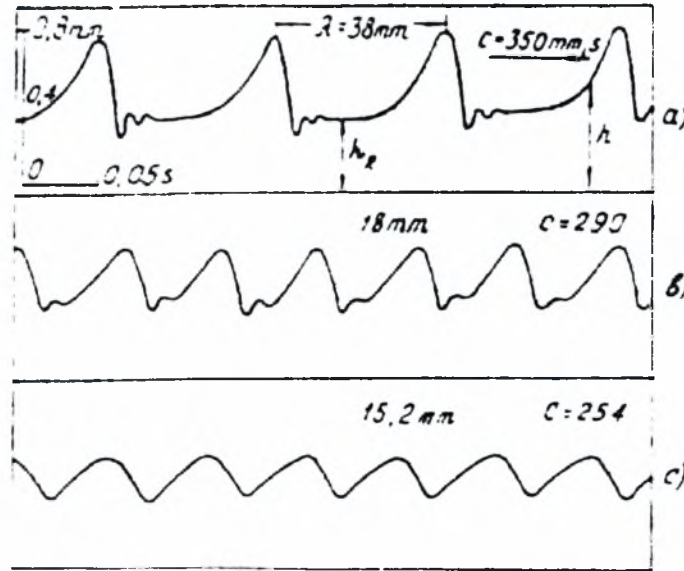
Τα προηγούμενα είναι κοινά αποτελέσματα και συμπεράσματα πολλών ερευνητών. Αντίστοιχες αναφορές υπάρχουν σε πολλές μελέτες, όπως για παράδειγμα στα πειραματικά αποτελέσματα του Nakogyakon [15], στα οποία αναφέρεται και το σχήμα 1.1.4 της επόμενης σελίδας όπου φαίνεται καθαρά η διαδοχική μετάβαση από τη μια περιοχή στην άλλη.



Σχήμα 1.1.4 : Τυπικές μορφές κύματος σε διαφορετικές αποστάσεις από την είσοδο, από το πείραμα του Nakoryakov.

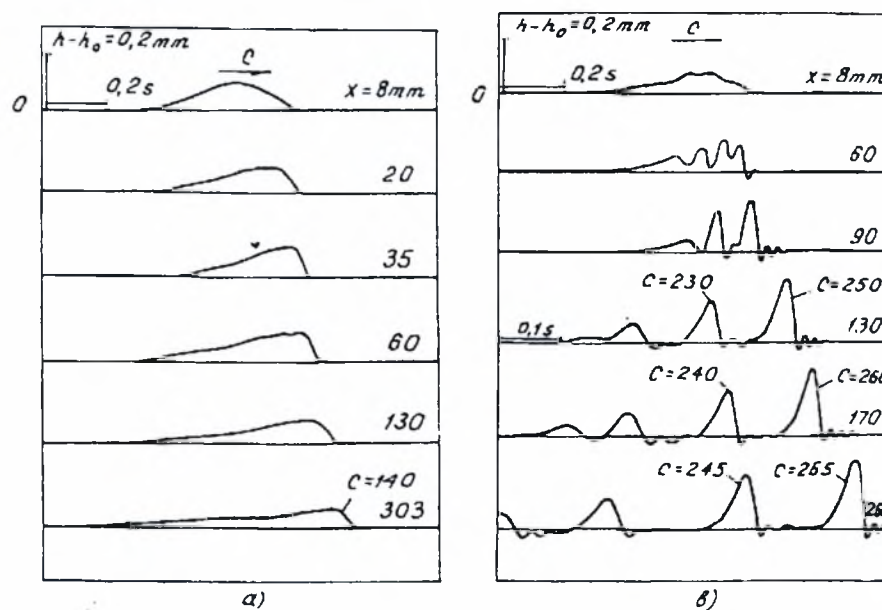
Όταν πρόκειται για ροή υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα με φυσική διαταραχή, οι παραπάνω περιοχές εμφανίζονται η μια διαδοχικά πίσω από την άλλη. Όταν όμως υπάρχει επιβαλλόμενη διαταραχή, είτε εξωτερικά, είτε εξαιτίας της διαμόρφωσης του τοιχώματος, υπάρχει η δυνατότητα να παραληφθούν η μια ή οι δύο πρώτες περιοχές. Έτσι γίνεται δυνατό να ελεγχθεί η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα, καθορίζοντας το πλάτος και το μήκος κύματος των διαταραχών, καθώς επίσης και τη μορφή τους, αφού αυτά εξαρτώνται από την περιοχή στην οποία βρισκόμαστε. Επιβάλλοντας λοιπόν την κατάλληλη διαταραχή είναι δυνατόν να οριστεί η πορεία της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει την πορεία του συστήματος είναι η συχνότητα της διαταραχής.

Στο σχήμα 1.1.5 φαίνεται η επίδραση της συχνότητας στον καθορισμό της μορφής των κυμάτων. Στην πρώτη περιοχή η χαμηλή συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής δημιουργεί μοναχικά κύματα [16]. Όσο αυξάνει η συχνότητα, η ταχύτητα, το πλάτος και το μήκος κύματος μικραίνουν. Στην τρίτη περιοχή έχουμε τη μεγαλύτερη συχνότητα. Τα κύματα έχουν μικρό πλάτος, είναι περιοδικά και η μορφή τους είναι περίπου ημιτονοειδής.



Σχήμα 1.1.5 : Η επίδραση της συχνότητας στη δημιουργία των κυμάτων.

Ο σχηματισμός των κυμάτων στην επιφάνεια κατακόρυφου υμένα απασχόλησε θεωρητικά και πειραματικά την ερευνητική ομάδα του Alekseenko [16]. Το 1985 παρουσίασαν τα αποτελέσματα της θεωρητικής τους έρευνας, από την οποία προέκυψε μια μη-γραμμική ‘two-wave’ εξίσωση για μεγάλα κύματα. Η εξίσωση αυτή ισχύει για ένα περιορισμένο εύρος αριθμών Reynolds, ενώ σε μερικές περιπτώσεις παίρνει τη μορφή άλλων γνωστών εξισώσεων. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε γραμμική ανάλυση ευστάθειας, από την οποία προέκυψαν αναλυτικές εκφράσεις που περιγράφουν τις ουδέτερες διαταραχές, τα γρήγορα αναπτυσσόμενα κύματα και τις ρυτιδώσεις που παρατηρούνται μπροστά από το μέτωπο των μεγάλων μοναχικών κυμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν την ύπαρξη μη-γραμμικών στατικών περιοδικών κυμάτων, και δίνουν την περιγραφή της εξέλιξης των μοναχικών κυμάτων που προκύπτουν από εξωτερικά επιβαλλόμενες διαταραχές, πράγμα που απεικονίζεται στο σχήμα 1.1.6.



Σχήμα 1.1.6 : Η εξέλιξη των αρχικών σολιτονικών διαταραχών.

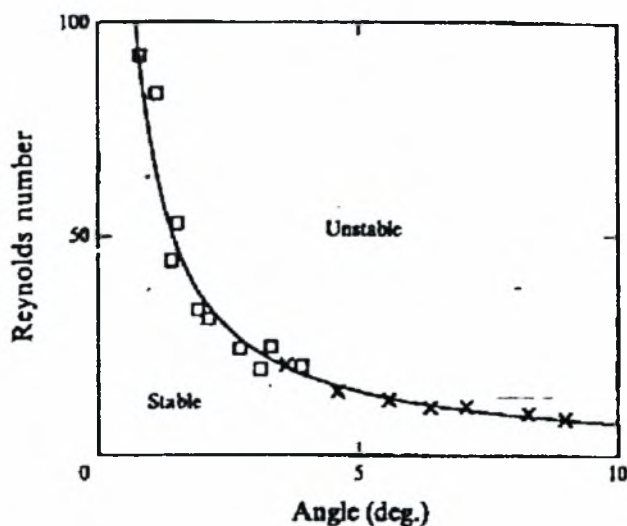
Η εμφάνιση και εξέλιξη διαταραχών στη ροή του υμένα είναι αναπόφευκτη, αφού πάντα υπάρχουν φυσικές αιτίες, όπως ακουστικός θόρυβος, ταλαντώσεις και άλλες, ή διαταραχές που δημιουργούνται εξαιτίας της ίδιας της ροής. Κάθε διαταραχή χαρακτηρίζεται από μια συχνότητα, ένα μήκος κύματος και ενδεχομένως μια περιοδικότητα. Μια ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ευσταθής όταν οι διαταραχές που

εμφανίζονται, ανεξάρτητα από το λόγο εμφάνισής τους, αποσβένονται. Αντιθέτως η ροή χαρακτηρίζεται ασταθής όταν έστω και μια από τις προκύπτουσες διαταραχές ενισχύεται.

Από μια άλλη ερευνητική ομάδα, με επικεφαλή τον Gollub, προέκυψαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα και συμπεράσματα σχετικά με τη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα, τις διδιάστατες και τρισδιάστατες αστάθειες που παρουσιάζονται στη ροή καθώς επίσης και με την επίδρασή τους στην εξέλιξη των κυμάτων. Αρχικά οι μετρήσεις τους είχαν σαν στόχο τον προσδιορισμό των κριτηρίων που ορίζουν την ευσταθή περιοχή του υμένα [5]. Οι πειραματικές μετρήσεις είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δύο καμπυλών ευστάθειας, στις οποίες παρουσιάζεται ο κρίσιμος αριθμός Re (το όριο της ευσταθούς περιοχής) σαν συνάρτηση της γωνίας κλίσης (β) και της συχνότητας (f). Στο σχήμα 1.1.7 φαίνεται η καμπύλη ευστάθειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης β και του αριθμού Re . Τα τετραγωνάκια αντιστοιχούν σε πειραματικά αποτελέσματα από ροή νερού, ενώ οι σταυροί σε αποτελέσματα από ροή διαλύματος νερού-γλυκερίνης. Η καμπύλη παριστάνει την εξίσωση:

$$R_c = \frac{5}{4} \cot \beta \quad (1.1)$$

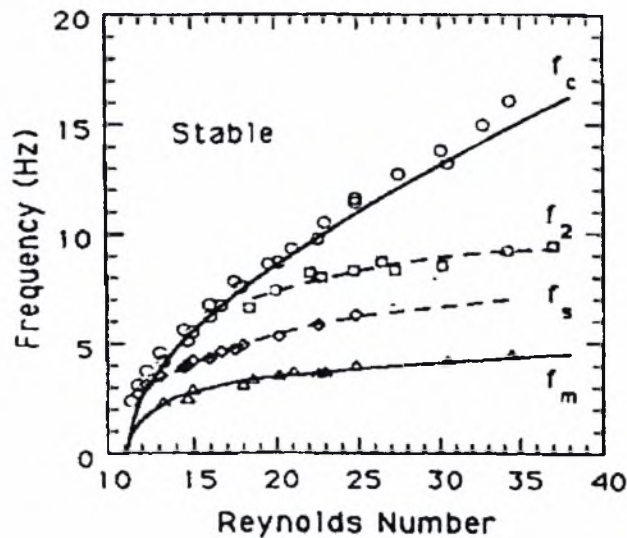
η οποία προκύπτει από την ανάλυση της γραμμικής ευστάθειας.



Σχήμα 1.1.7 : Ο κρίσιμος αριθμός Re σαν συνάρτηση της γωνίας κλίσης β

Στο σχήμα 1.1.8 φαίνεται η καμπύλη ευστάθειας συναρτήσει της συχνότητας f και του

αριθμού Re , για σταθερή γωνία κλίσης $\beta=6,4$. Στο διάγραμμα αυτό εκτός από την περιοχή ευστάθειας διακρίνονται και άλλες επιμέρους περιοχές στις οποίες βρίσκονται συγκεντρωμένες όλες οι πληροφορίες από τη θεωρία και τα πρώτα πειράματα των ερευνητών. Ειδικότερα γίνεται σαφής η μεγάλη επίδραση της συχνότητας της διαταραχής στην εξέλιξη των κυμάτων.



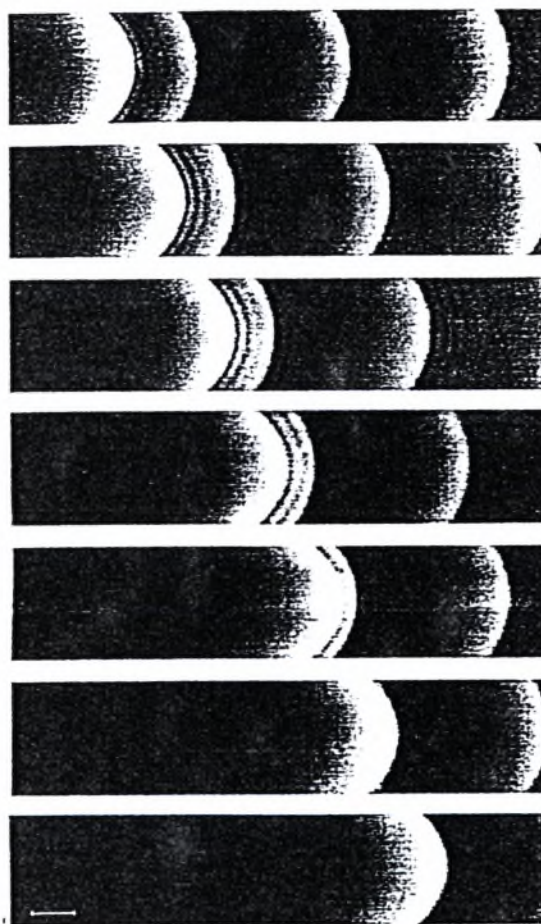
Σχήμα 1.1.8 : Ο κρίσιμος αριθμός Re σαν συνάρτηση της συχνότητας f .

Οι κύκλοι παριστάνουν τις πειραματικές μετρήσεις για την καμπύλη ευστάθειας και η συνεχής γραμμή f_c την πρόβλεψη από τη θεωρία γραμμικής ευστάθειας. Τα τρίγωνα παριστάνουν τα πειραματικά αποτελέσματα για τη συχνότητα μέγιστου πλάτους και η συνεχής γραμμή f_m είναι επίσης η πρόβλεψη από τη θεωρία γραμμικής ευστάθειας. Από το παραπάνω διάγραμμα καθίσταται προφανές ότι η γραμμική θεωρία ευστάθειας δίνει αρκετά σωστές προβλέψεις. Η γραμμή f_s είναι το όριο μεταξύ δύο περιοχών μη-γραμμικής εξέλιξης, ενώ οι ρόμβοι αντιστοιχούν σε ανάλογες πειραματικές μετρήσεις. Στην περιοχή μεταξύ των γραμμών f_s και f_c υπάρχουν κορεσμένα, πεπερασμένου πλάτους κύματα, με μόνο ένα μέγιστο ανά περίοδο. Κάτω από την γραμμή f_s τα κύματα εξελίσσονται σε σχηματισμούς με πολλές κορυφές και σε μοναχικά κύματα, μέσω ισχυρών μη-γραμμικών μηχανισμών. Τέλος η γραμμή f_2 είναι το διαχωριστικό όριο για τα δύο είδη δευτερευόντων ασταθειών. Πάνω από την f_2 κυριαρχεί η πλευρική αστάθεια, ενώ κάτω από αυτή η υποαρμονική.

Στην ίδια μελέτη προέκυψε ότι οι δευτερεύουσες αστάθειες είναι μεταφερόμενες και ιδιαίτερα ευαίσθητες στον εξωτερικό θόρυβο. Ο ρόλος τους είναι να μετατρέπουν τα

περιοδικά κύματα σε ακατάστατες δομές.

Σε μεταγενέστερη έρευνά της, η ίδια ομάδα μελέτησε τη δυναμική των μοναχικών κυμάτων (solitary waves) [17]. Τα αποτελέσματα της έρευνας αναφέρονται σε περιπτώσεις αλληλεπίδρασής τους. Όταν υπάρχει ένα μεγάλο μοναχικό κύμα και ακολουθεί μια σειρά από μικρότερα, μοναχικά επίσης κύματα, παρατηρείται το φαινόμενο της απορρόφησης, κατά το οποίο το μεγάλο κύμα επειδή κινείται γρηγορότερα πλησιάζει το προπορευόμενο του και το απορροφάει. Τελικά τα δύο κύματα συγχωνεύονται σε ένα, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το μεγάλο αρχικό. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται στην παρακάτω ακολουθία εικόνων του σχήματος 1.1.9, οι οποίες έχουν μεταξύ τους χρονική διαφορά 0,2s.



Σχήμα 1.1.9 : Το φαινόμενο της απορρόφησης. Το μεγαλύτερο σολιτονικό κύμα απορροφά το μικρότερό του που προπορεύεται

Ένα άλλο είδος αλληλεπίδρασης που αναφέρεται βιβλιογραφικά είναι η περίπτωση συνένωσης δύο ίδιου μεγέθους μοναχικών κυμάτων. Όταν μια ακολουθία μοναχικών περιοδικών κυμάτων διαταράσσεται, πραγματοποιείται μια σειρά αλληλεπιδράσεων για μεγάλο μήκος στο πεδίο εξέλιξής τους. Τα γειτονικά κύματα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους

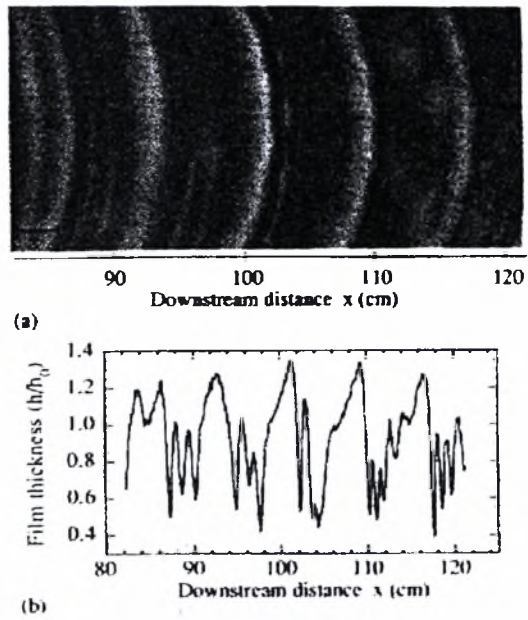
και τελικά προκύπτουν άτακτες ακολουθίες κυμάτων.

Στα πλαίσια της μελέτης της δυναμικής των μοναχικών κυμάτων αναφέρονται και οι πιθανοί τρόποι δημιουργίας τους. Τα μοναχικά κύματα υπάρχει περίπτωση να δημιουργηθούν εξαιτίας κάποιας αλληλεπίδρασης. Σε μεγάλη απόσταση από την είσοδο, σχηματίζονται ακολουθίες μοναχικών κυμάτων ανεξάρτητα από την αρχική διαταραχή. Η διαδικασία δημιουργίας τους είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Σε περίπτωση επιβαλλόμενης διαταραχής με μικρή συχνότητα τα μοναχικά κύματα προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των επιβαλλόμενων κυμάτων και των αρμονικών τους. Αντίθετα, όταν η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής είναι μεγάλη, η διαδικασία δημιουργίας των μοναχικών κυμάτων σχετίζεται με τις δευτερεύουσες υποαρμονικές και πλευρικές αστάθειες.

Δημιουργία μοναχικών κυμάτων είναι επίσης δυνατό να επιτευχθεί τεχνητά, επιβάλλοντας εξωτερικές διαταραχές διαφόρων συχνοτήτων. Τέλος, μοναχικά κύματα μπορούν να εμφανιστούν και από τη μη-γραμμική εξέλιξη των φυσικών κυμάτων, όπου οι μεταβολές στο μήκος κύματός τους οφείλονται σε ακουστικό θόρυβο.

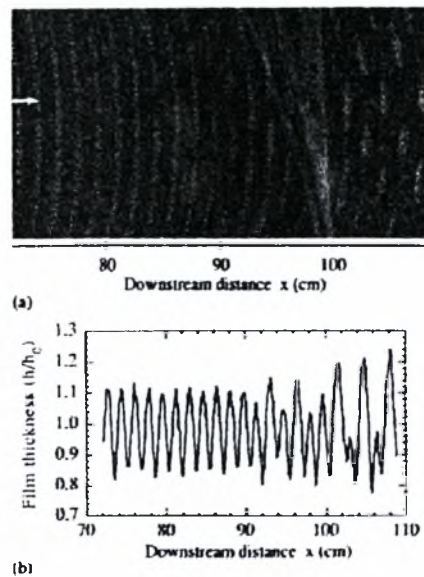
Η ίδια ερευνητική ομάδα μελέτησε επίσης τις τρισδιάστατες αστάθειες που παρατηρούνται στη ροή του υμένα [18]. Ο μηχανισμός δημιουργίας τους εξαρτάται από τη μη-γραμμική δομή των αρχικών διδιάστατων κυμάτων. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αναγνωρίστηκαν δύο βασικοί μηχανισμοί δημιουργίας τρισδιάστατων ασταθειών.

Οι ταυτόχρονοι εγκάρσιοι σχηματισμοί εμφανίζονται όταν τα διδιάστατα κύματα αποκτήσουν πολύ μεγάλο μέγεθος. Οι σχηματισμοί αυτοί παρατηρούνται σε περιοχές με έντονη καμπυλότητα, επομένως σχηματίζονται, ή πάνω στην κορυφή του διδιάστατου κύματος, ή στην κοιλότητα αμέσως μετά το μέτωπό του. Το μήκος κύματος των εγκάρσιων σχηματισμών είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του υμένα, είναι όμως συγκρίσιμο με το μήκος κύματος των διδιάστατων κυμάτων στη κατεύθυνση της ροής. Καθώς το διδιάστατο κύμα μετακινείται, το μέτωπό του σπάει και κάθε κοιλότητα δίνει τη θέση της σε μια σειρά ανεξάρτητων βαθουλωμάτων. Η δομή αυτή εντατικοποιείται κατάντη της ροής. Μετά την πλήρη ανάπτυξή της γίνεται εντελώς ακατάστατη. Στο σχήμα 1.1.10 παρατηρούνται οι εγκάρσιοι σχηματισμοί κατά τη δημιουργία τους από τα διδιάστατα κύματα.



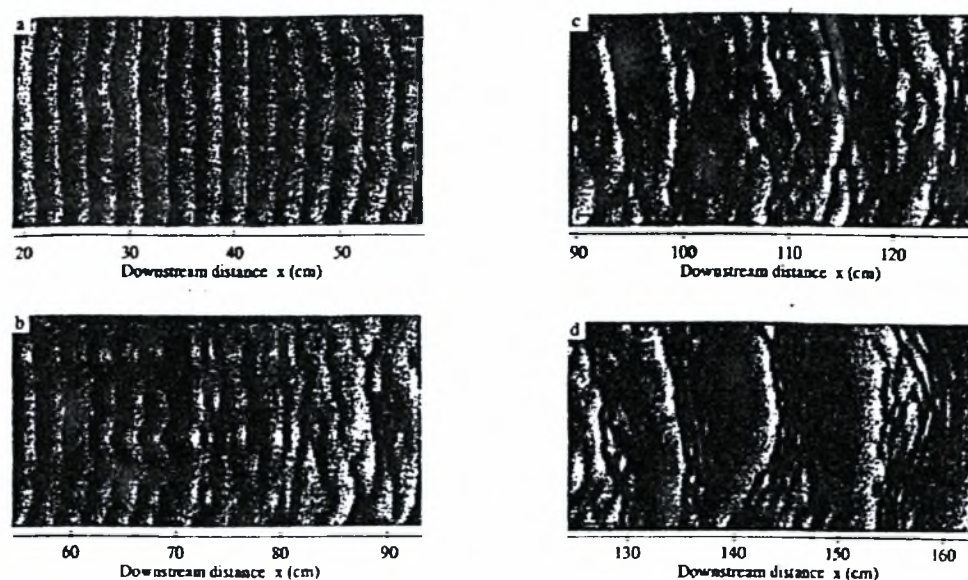
Σχήμα 1.1.10 : Ο σχηματισμός της εγκάρσιας αστάθειας για συχνότητα $f=3\text{Hz}$, κλίση $\beta=4^\circ$, και αριθμό $Re=62$
α) Εικόνα με τη μέθοδο φθορισμού, β) Το προφίλ του κύματος στην κεντρική γραμμή της εικόνας α

Ο δεύτερος τρόπος δημιουργίας της τρισδιάστατης αστάθειας οδηγεί στο σχηματισμό δομής ψαροκόκαλου. Η δομή αυτή εμφανίζεται όταν η συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη. Τότε τα αρχικά διδιάστατα κύματα είναι περίπου ημιτονοειδή. Η τρισδιάστατη υποαρμονική αστάθεια οδηγεί σε εγκάρσιους σχηματισμούς των οποίων η περίοδος στην κατεύθυνση της ροής διπλασιάζεται σε σχέση με τα αρχικά κύματα, ενώ δύο διαδοχικά κύματα έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης π . Το σχήμα 1.1.11 απεικονίζει το σχηματισμό της δομής ψαροκόκαλου.



Σχήμα 1.1.11 : Η τρισδιάστατη υποαρμονική αστάθεια οδηγεί σε δομή ψαροκόκαλο. α) Εικόνα με τη μέθοδο φθορισμού, β) Το προφίλ του κύματος σε γραμμή με μέγιστα της εικόνας α

Τα τρισδιάστατα κύματα συνεχίζουν να εξελίσσονται μετά τη δημιουργία τους. Ενώ η δομή είναι βασικά τρισδιάστατη, τα διδιάστατα μοναχικά κύματα κυριαρχούν. Αυτά σπάνε και χωρίζονται σε ανεξάρτητα βαθουλώματα αποδιοργανώνοντας ταυτόχρονα τη δομή. Ο διδιάστατος χαρακτήρας εξασθενεί, ενώ αντίθετα ενισχύεται ο τρισδιάστατος. Σύντομα όμως μια καινούρια ακατάστατη δομή μοναχικών κυμάτων ξαναδημιουργείται μέσα στην τρισδιάστατη κίνηση. Αυτό συμβαίνει πάντα, ανεξάρτητα από την αιτία δημιουργίας του τρισδιάστατου πεδίου. Τα μικρά κύματα που ακολουθούν πίσω από κάθε μοναχικό μέτωπο εξαφανίζονται απορροφούμενα από το μεγάλο. Στο σχήμα 1.1.12 βλέπουμε την απεικόνιση της εξέλιξης των τρισδιάστατων κυμάτων, μετά τη δημιουργία τους εξαιτίας σύγχρονης τρισδιάστατης αστάθειας.



Σχήμα 1.1.12 : Η εξέλιξη των τρισδιάστατων κυμάτων. Οι τέσσερις εικόνες αντιστοιχούν σε τέσσερις διαδοχικές θέσεις του πεδίου ροής.

1.2 Θεωρητική Ανάλυση

Για την επίλυση του προβλήματος της ροής λεπτού υγρού υμένα σε κεκλιμένο κυματοειδές τοίχωμα είναι θεμιτό αρχικά να γίνει μια πρώτη προσέγγιση για τη μελέτη της διδιάστατης (2-D) ροής ομοιόμορφου λεπτού υγρού υμένα σε κεκλιμένο, επίπεδο τοίχωμα [19].

Θεωρώντας ότι η ροή είναι μόνιμη, ασυμπιεστή και στρωτή, το πάχος του υμένα ομοιόμορφο και το τοίχωμα επίπεδο, οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

1. Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (1.2.1)$$

το ρευστό όμως κινείται μόνο κατά την διεύθυνση x , επομένως:

$$U_x = U_z = 0 \quad (1.2.2)$$

οπότε η εξίσωση της συνέχειας γίνεται:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} = 0 \quad (1.2.3)$$

2. Εξισώσεις Navier-Stokes (κατά τις διευθύνσεις x, y)

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \quad (1.2.4)$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g_y \quad (1.2.5)$$

Οι εξισώσεις Navier-Stokes μπορούν να εφαρμοστούν όταν το ρευστό είναι νευτώνικό και έχει σταθερό ιξώδες.

Από την εξίσωση (1.2.5) προκύπτει ότι η δυναμική πίεση είναι ανεξάρτητη του y , επομένως ισχύει ότι $P = P(x)$. Με την παραδοχή ότι η υδροστατική πίεση είναι αμελητέα, αφού το πάχος του υμένα είναι πολύ μικρό και ότι η πίεση στην επιφάνεια του υμένα είναι σταθερή και ίση με την πίεση του περιβάλλοντος ($\frac{\partial P}{\partial x} = 0$), έχουμε:

$$\begin{aligned} \mu \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} &= -\rho \cdot g_x \Rightarrow \\ \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} &= -\frac{g_x}{\nu} \Rightarrow \\ \frac{\partial U_x}{\partial y} &= -\frac{g_x}{\nu} \cdot y + C_1 \Rightarrow \end{aligned} \quad (1.2.6)$$

$$U_x(y) = -\frac{g_x}{\nu} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 \cdot y + C_2 \quad (1.2.7)$$

3. Οριακές συνθήκες

- Για $y = h$: $\frac{\partial U_x}{\partial y} = 0 \Rightarrow C_1 = \frac{g_x}{\nu}$ (1.2.8)

- Για $y = 0$: $U_x(y=0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0$ (1.2.9)

Οπότε τελικά προκύπτει η κατανομή της ταχύτητας κατά την διεύθυνση του άξονα y :

$$U_x(y) = \frac{g_x}{\nu} \cdot \left(y \cdot h - \frac{y^2}{2} \right) \quad (1.2.10)$$

Από την σχέση (1.2.10) με ολοκλήρωση προκύπτει η μέση τιμή της ταχύτητας, ενώ για $y = h$ προκύπτει η μέγιστη τιμή της. Έτσι έχουμε:

$$\bar{U} = \frac{g_x \cdot h^2}{3 \cdot \nu} \quad (1.2.11)$$

$$U_o = \frac{g_x \cdot h^2}{2 \cdot \nu} \quad (1.2.12)$$

Η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού υμένα απασχόλησε πολλούς ερευνητές. Η μαθηματική ανάλυσή της σε μόνιμη ροή είναι δυσεπίλυτο πρόβλημα, αφού η

διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας μας είναι άγνωστη και ουσιαστικά αποτελεί το ζητούμενο του προβλήματος. Για το λόγο αυτό το πρόβλημα γίνεται μη-γραμμικό και η επίλυσή του απαιτεί περίπλοκες μαθηματικές μεθόδους.

Για την περιγραφή της ροής του υμένα απαιτούνται βασικά δύο ανεξάρτητοι αδιάστατοι αριθμοί:

$$\text{Ο αριθμός Reynolds} \quad \text{Re} = \frac{\bar{U} \cdot h}{\nu} \quad (1.2.13)$$

$$\text{Ο αριθμός Kapitza} \quad \gamma = \frac{T}{\rho \nu^4} g^3 \quad (1.2.14)$$

όπου \bar{U} : η μέση ταχύτητα,

h : το πάχος του επίπεδου υμένα κατά Nusselt,

ρ : η πυκνότητα του ρευστού,

T : η επιφανειακή τάση,

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας και

$\bar{U} \cdot h$: η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι πολλές φορές στη βιβλιογραφία συναντάται ο αριθμός Weber, [$W = T/\rho \cdot \bar{U}^2 \cdot h$ (1.2.15)] στη θέση του αριθμού Kapitza. Το πλεονέκτημα του αριθμού Kapitza όμως είναι ότι έχει σχέση μόνο με τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού και είναι ανεξάρτητος του ρυθμού ροής.

Κεφάλαιο 2^ο

Πειραματική διάταξη - Διαδικασία Μετρήσεων

2.1 Πειραματική Διάταξη

Η σύλληψη και πραγματοποίηση της πειραματικής μεθοδολογίας στηρίχτηκε σε αυτή που χρησιμοποιήθηκε από την ομάδα του Gollub [5] το 1993 και αποτελείται από το ορθογώνιο κανάλι ροής, το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο τοίχωμα, το δοχείο συλλογής, το πρωτεύον και το δευτερεύον δοχείο υπερχειλίσης, τη ρυθμιστική βάννα, την πηγή φθορισμού και το σύστημα λήψης και αποθήκευσης δεδομένων.

Η συγκεκριμένη πειραματική συσκευή δεν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η οπτική τεχνική έχει αναλυθεί σε σημαντικό βαθμό σε διάφορες διπλωματικές εργασίες που εκπονήθηκαν στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών όπως από τον Καραγιάννη Κ. [22] το 1999 και η πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο περιοδικό τοίχωμα έχει μελετηθεί από τον Σπήλιο Δ. [21] το 1999 και την Εδιπίδη Χ. [20] το 2000.

Στο σχήμα (2.1) της επόμενης σελίδας φαίνεται μία σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης.

2.1.1 Το κανάλι ροής

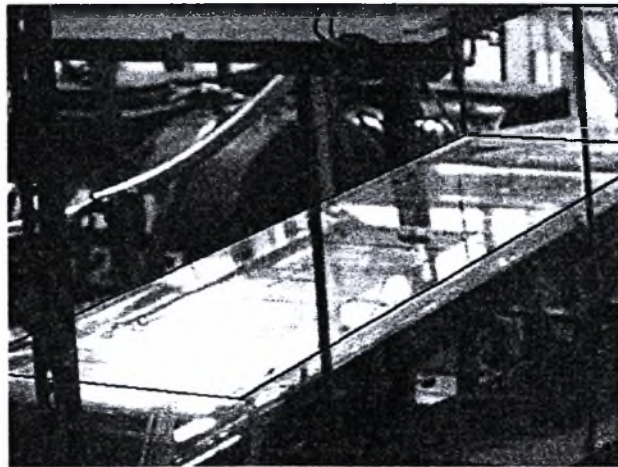
Δεδομένης της πρωταρχικής απαίτησης για την ύπαρξη δυνατότητας οπτικής παρακολούθησης της ροής του υμένα επελέγη ως υλικό κατασκευής του καναλιού το Plexiglas (σχήμα 2.2). Παράλληλα το υλικό αυτό απορροφά την ελάχιστη δυνατή ποσότητα ορατού φωτός.

Το σχήμα του καναλιού επελέγη ορθογώνιο γιατί σύμφωνα με την βιβλιογραφία ευνοεί την δημιουργία υμένα με ομοιόμορφο πάχος, ενώ ταυτόχρονα συντελεί στην επίτευξη ενός ομοιόμορφου ρυθμού ανάπτυξης της ροής, περιορίζοντας την ένταση των αλληλεπιδράσεων που εμφανίζονται μεταξύ των κυμάτων.

Οι διαστάσεις του καναλιού που προέκυψαν από εμπειρικούς κανόνες είναι 1 μέτρο (m) μήκος, 0,25 μέτρα (m) πλάτος και 0,03 μέτρα (m) ύψος.

Επιπροσθέτως η κλίση του καναλιού ως προς το οριζόντιο επίπεδο ρυθμίζεται με έναν κοχλία, εξήμισι (6,5) σπείρες του οποίου αντιστοιχούν σε μια (1) μοίρα μεταβολή της κλίσης. Με αυτή τη διάταξη επιτυγχάνονται κλίσεις μέχρι και εξήντα επτά (67^ο) μοίρες.

Η όλη κατασκευή –το κανάλι και οι συνοδευτικές διατάξεις- στηρίζεται σε μεταλλική κατασκευή η οποία έχει ελαστικά πέλματα ώστε να περιορίζονται κατά το δυνατό οι εξωτερικές ταλαντώσεις.



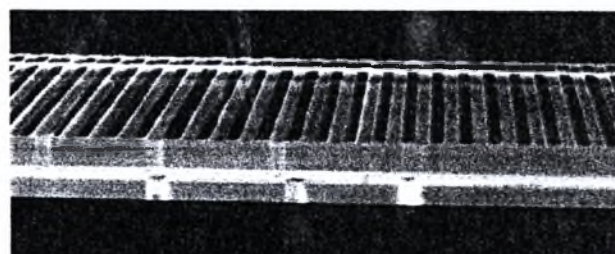
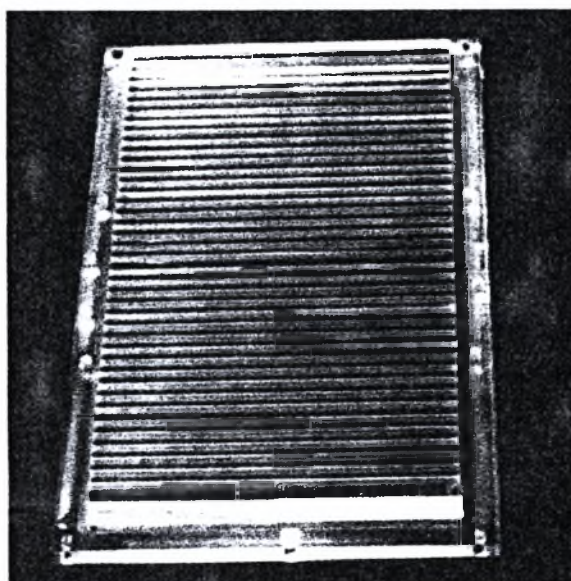
Σχήμα 2.2: το κανάλι ροής

2.1.2 Το περιοδικό τοίχωμα

Η επιλογή της ορθογωνικής διαμόρφωσης του περιοδικού τοιχώματος καθορίστηκε για δυο κυρίως λόγους. Ένα ορθογώνιο κύμα (περιοδική συνάρτηση) αναπτύσσεται σε μια εκθετική σειρά Fourier, δηλαδή σε μια σειρά από ημίτονα και συνημίτονα. Κάθε αρμονική έχει έναν μεγαλύτερο κυματαριθμό από την προηγούμενη αρμονική και όλες οι συχνότητες είναι πολλαπλάσια μιας θεμελιώδους συχνότητας που έχει τον ίδιο κυματαριθμό με το ορθογώνιο τοίχωμα. Με την παρουσία ενός ορθογωνίου τοιχώματος διεγείρεται ένα ευρύ φάσμα αρμονικών του τοιχώματος ενώ ο ρόλος κάθε αρμονικής στη ροή του υμένα δεν έχει καθοριστεί. Συνεπώς χρησιμοποιώντας το ορθογώνιο τοίχωμα παρουσιάζεται η δυνατότητα να εξεταστούν ο ρόλος και η επίδραση της κάθε αρμονικής (διαφορετικό μήκος κύματος) του τοιχώματος στη ροή του υμένα.

Επιπροσθέτως, το ορθογώνιο τοίχωμα δεν επηρεάζει την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό, σε αντίθεση με το τοίχωμα ημιτονοειδούς διαμόρφωσης. Στην περίπτωση της ημιτονοειδούς διαμορφώσεως του τοιχώματος, το φως το οποίο εκπέμπεται από τον φθορισμό του διαλύματος διαθλάται από το τοίχωμα προς όλες τις δυνατές διευθύνσεις. Έτσι η ένταση φωτός που μετράται από την οπτική μέθοδο η οποία είναι γραμμική συνάρτηση του ύψους του υμένα, για έναν επίπεδο υμένα δεν είναι ακριβές αντίγραφο της μορφολογίας του ημιτονοειδούς τοιχώματος όπως θα περιμέναμε. Για αυτό προτιμήθηκε η χρήση τοιχώματος ορθογωνικής διαμόρφωσης ώστε να αποφευχθούν διάφορων ειδών προβλήματα διάθλασης και περαιτέρω προγραμματισμού για την διόρθωση του εξαγόμενου λάθους.

Το κυματοειδές τοίχωμα που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της ροής του υμένα είναι και αυτό κατασκευασμένο από Plexiglas και έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή του στο κανάλι. Το μήκος του τοιχώματος είναι 0,5 μέτρα (m) και έχει μήκος κύματος $l = 0,012$ μέτρα (m) και ύψος αυλακιού $b = 0,0008$ μέτρα (m). Παρενθετικά πρέπει να αναφερθεί ότι στο κανάλι προσαρμόζεται και επίπεδο τοίχωμα για την μελέτη της ροής υμένα πάνω του. Στο σχήμα (2.3) φαίνονται δυο διαφορετικές όψεις του τοιχώματος στις οποίες τα αυλακιά είναι οι πιο ανοιχτόχρωμες γραμμές.



Σχήμα 2.3: το κυματοειδές τοίχωμα

2.1.3 Το δοχείο συλλογής

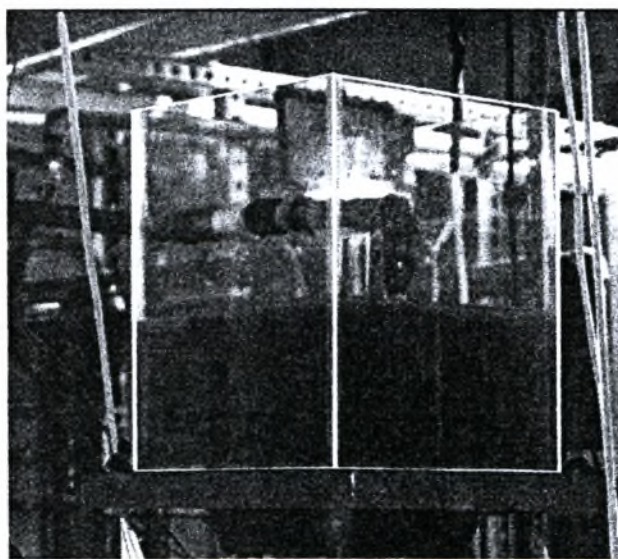
Το δοχείο συλλογής του ρευστού είναι κατασκευασμένο και αυτό από plexiglas. Σκοπός του είναι να συλλέγει το ρευστό που εκρέει από το κανάλι και από εκεί μέσω αντλίας να το διοχετεύει προς το πρωτεύον δοχείο υπερχειλίσης. Στο δοχείο συλλογής καταλήγουν και οι διάφορες απορροές υπερχειλίσης που βρίσκονται σε επιλεγμένα "ευαίσθητα" σημεία της συσκευής με σκοπό την προστασία του χορού του εργαστηρίου από τυχόν υπερχειλίσεις. Στο σχήμα (2.4) φαίνεται μια άποψη του δοχείου συλλογής.



Σχήμα 2.4: το δοχείο συλλογής

2.1.4 Το πρωτεύον δοχείο υπερχείλισης

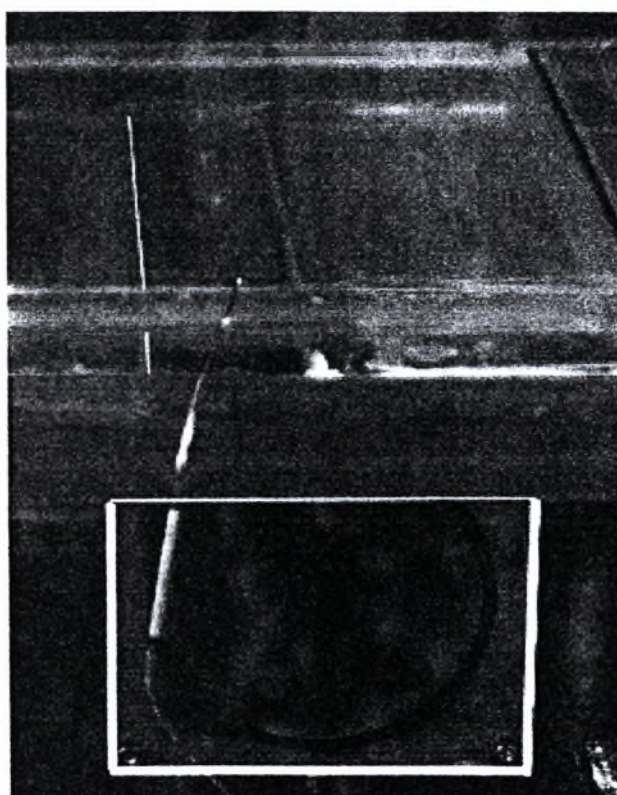
Στο πρωτεύον δοχείο υπερχείλισης οδηγείται το ρευστό με τη βοήθεια αντλίας από το δοχείο συλλογής. Αυτό βρίσκεται σε ικανό ύψος σε σχέση με το κανάλι ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη υψομετρική διάφορα για την ροή του ρευστού. Η αντλία που το εξυπηρετεί είναι ηλεκτρική και τροφοδοτείται με τροφοδοτικό μεταβαλλόμενης έντασης και τάσης. Έτσι ελέγχεται η παροχή του ρευστού προς το δοχείο στα επιθυμητά επίπεδα. Το πρωτεύον δοχείο υπερχείλισης είναι εξοπλισμένο με δυο απορροές υπερχείλισης αφ' ενός για λόγους ασφάλειας και αφ' έτερου για να διευκολύνεται η διατήρηση της στάθμης του σταθερή, πράγμα που είναι απαραίτητο ώστε να μην μεταβάλλεται η ωθούσα δύναμη της ροής του ρευστού προς το κανάλι κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το πρωτεύον δοχείο υπερχείλισης είναι και αυτό κατασκευασμένο από plexiglas και άποψή του φαίνεται στο σχήμα (2.5)



Σχήμα 2.5: το πρωτεύον δοχείο υπερχείλισης

2.1.5 Το δευτερεύον δοχείο υπερχείλισης

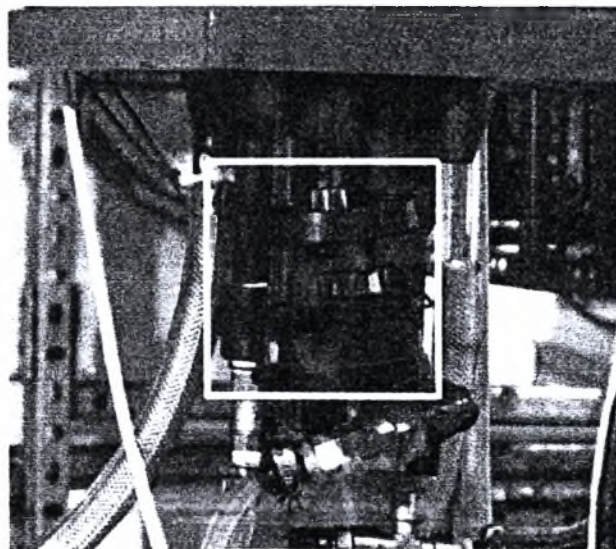
Το δευτερεύον δοχείο υπερχείλισης είναι και αυτό κατασκευασμένο από plexiglass και σκοπός του είναι η δημιουργία του υμένα. Σε αυτό οδηγείται το ρευστό από το πρωτεύον δοχείο υπερχείλισης λόγω υψομετρικής διαφοράς και με την υπερχείλισή του δημιουργείται ο υμένας που στη συνέχεια ρέει πάνω στο τοίχωμα το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο ως προέκταση του. Στο σχήμα (2.6) φαίνεται μια άποψή του. Η λεπτή άσπρη γραμμή σημειώνει το σημείο όπου υπερχειλίζει το δοχείο και αρχίζει να ρέει ο υμένας.



Σχήμα 2.6: το πρωτεύον δοχείο υπερχείλισης

2.1.6 Η ρυθμιστική βάννα

Μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος δοχείου υπερχειλήσης βρίσκεται τοποθετημένη η ρυθμιστική βάννα που φαίνεται στο σχήμα (2.7). Σκοπός της είναι η ρύθμιση της παροχής του ρευστού προς το δευτερευον δοχείο υπερχειλήσης και κατά συνέπεια ο καθορισμός της παροχής του ρευστού που ρέει πάνω από το κυματοειδές τοίχωμα.



Σχήμα 2.7: η ρυθμιστική βάννα

2.1.7 Η πηγή φθορισμού

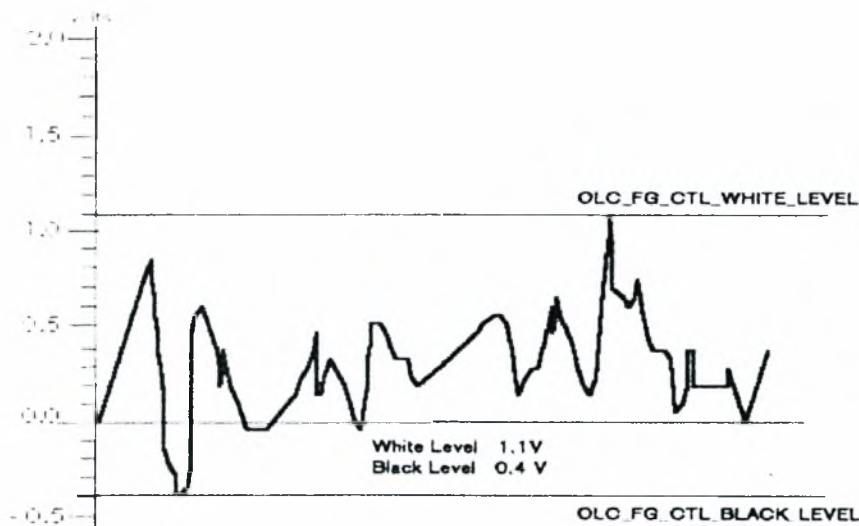
Πάνω από το κανάλι είναι στερεωμένη η πηγή φθορισμού. Αποτελείται από δυο (2) λαμπτήρες μαύρου φωτός τοποθετημένους παράλληλα στη διεύθυνση της ροής και συμμετρικά ώστε η προσπίπτουσα στο διάλυμα ακτινοβολία να είναι κατά το δυνατόν η ίδια σε όλο το πεδίο παρατήρησης. Για τον συγκεκριμένο σκοπό έχουν επιλεγεί οι λαμπτήρες TLK 40W της Philips με εξαρτήματα τροφοδοσίας (ballast, starter) για την ελάττωση των ταλαντώσεων της έντασης της υπεριώδους ακτινοβολίας. Ο συγκεκριμένος τύπος λαμπτήρων επιλέχτηκε γιατί εκπέμπει ακτινοβολία μεγάλης έντασης, με αποτέλεσμα τον ικανοποιητικό φθορισμό του διαλύματος για τις συνθήκες στις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα.

2.1.8 Το σύστημα λήψης και αποθήκευσης δεδομένων

Για την λήψη των εικόνων κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μια ψηφιακή κάμερα CCD, συγκεκριμένα η Sony ACT-77/77CE. Η συγκεκριμένη κάμερα έχει πολύ καλή ευαισθησία στο φως (0.5 lux) και πολύ καλή αναλογία σήματος-θορύβου (50 dB), ενώ λαμβάνει 50 εικόνες ανά δευτερόλεπτο.

Η συλλογή και αποθήκευση των εικόνων πραγματοποιείται μέσω μιας κάρτας συλλογής εικόνων (DT3155 Frame Grabber Board – Data Translation) και του κατάλληλου λογισμικού. Η κάρτα έχει τη δυνατότητα μεταφοράς 30 εικονων/δευτ. για συχνότητα 60 Hz ή 25 εικονων/δευτ. για συχνότητα 50 Hz. Οι εικόνες που λαμβάνονται είναι μεγέθους 454 kb και ψηφιοποιούνται σε 576 x 768 pixels με ανάλυση 8 bits.

Τέλος για την επεξεργασία και την αποθήκευση των εικόνων χρησιμοποιείται το HImage Tool++98. Με τη βοήθεια του συγκεκριμένου λογισμικού πακέτου καθορίζονται τα BLACK και WHITE LEVELS της ψηφιακοποίησης (σχήμα 2.8), δηλαδή επιλέγονται τα επίπεδα λευκού και μαύρου φωτός περιορίζοντας έτσι την περιοχή της διακριτοποίησης. Όλα αυτά γίνονται με σκοπό την μετατροπή των εικόνων σε πίνακες διακριτών τιμών και την επεξεργασία τους με κατάλληλο λογισμικό, στην προκειμένη περίπτωση το MATLAB.



Σχήμα 2.8: Καθορισμός μαύρου και λευκού επιπέδου.

2.2 Διαδικασία Μετρήσεων

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο αναπτύσσεται λεπτομερώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διεξαγωγή του πειραματικού μέρους αυτής της διπλωματικής εργασίας. Σκοπός της σειράς των πειραμάτων που διεξήχθησαν ήταν η συλλογή εικόνων υγρού υμένα που ρέει πάνω από κυματοειδές τοίχωμα.

Για κάθε ενότητα πειραμάτων εκτελούνται τα παρακάτω βήματα:

- Προετοιμασία διαλύματος και πειραματικής διάταξης:
 1. Λαμβάνει χώρα η προετοιμασία του διαλύματος του πειράματος. Αυτό είναι είτε νερό με την προσθήκη της απαραίτητης για τον φθορισμό του διαλύματος, χρωστικής ουσίας, είτε διάλυμα νερού – γλυκερίνης σε 28% κατά βάρος αναλογία.
 2. Ρυθμίζεται η κλίση του καναλιού από τον κοχλία έλεγχου κλίσης.
 3. Τροφοδοτείται ηλεκτρικά η πειραματική συσκευή με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της ψηφιακής κάμερας, του τροφοδοτικού έλεγχου της αντλίας και της πηγής φθορισμού.
- Κύκλος ροής του διαλύματος:
 1. Το διάλυμα τοποθετείται στο δοχείο συλλογής.
 2. Προωθείται μέσω της αντλίας στο πρωτεύον δοχείο υπερχειλίσης.
 3. Λόγω υψομετρικής διαφοράς ρέει διάμεσου της ρυθμιστικής βάνας προς το δευτερεύον δοχείο υπερχειλίσης
 4. Λόγω πλήρωσης του δευτερεύοντος δοχείου υπερχειλίσης δημιουργείται υγρός υμένας πάνω στο κυματοειδές τοίχωμα.
 5. Το ρευστό καταλήγει στο δοχείο συλλογής για να επαναλάβει τον κύκλο ροής του.
- Κυρίως πείραμα:
 1. Ρυθμίζεται η βανα σε θέση τέτοιας παροχής (μικρής) ώστε στην επιφάνεια του υμένα να μην σχηματίζονται κυματισμοί.
 2. Ογκομετράται η παροχή με χρονομετρημένη συλλογή ποσότητας του ρευστού και ζύγισή της.
 3. Υπολογίζονται ο αριθμός Reynolds και το θεωρητικό πάχος του υμένα $h_{Nusselt}$
 4. Λαμβάνονται με την βοήθεια του λογισμικού HLImage Tool++98 λίγες εικόνες (20 έως 50) με σκοπό να χρησιμεύουν στον καθορισμό της γραμμής βάσης (baseline).

5. Τα προηγούμενα τέσσερα βήματα επαναλαμβάνονται για διαφορετικές παροχές άρα και διαφορετικούς αριθμούς Reynolds όπου ο υμένας παραμένει επίπεδος.
6. Κατόπιν αυξάνεται η παροχή σε περιοχές όπου δημιουργούνται κυματισμοί στην επιφάνεια του υμένα και λαμβάνονται ικανοί αριθμοί εικόνων (100 έως 200) για διάφορους αριθμούς Reynolds ώσπου να εξαντληθεί η διαδρομή της ρυθμιστικής βάνας.

2.3 Μέθοδος Απεικόνισης με Φθορισμό

Η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό (fluorescence imaging method) αποτελεί μια μέθοδο μέτρησης του πάχους του υμένα με ακρίβεια μικρομέτρου (μm). Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση πηγής υπεριώδους ακτινοβολίας, χάρη στην οποία υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης της έντασης του ορατού φωτός που εκπέμπεται εξ' αιτίας του φθορισμού του υμένα. Προφανώς για τον φθορισμό του υμένα είναι απαραίτητη η προσθήκη στο διάλυμα της κατάλληλης χρωστικής ουσίας.

Η επιλογή της πηγής υπεριώδους ακτινοβολίας (λαμπτήρες φθορισμού) εξαρτάται από την εκλογή της χρωστικής ουσίας. Κάθε χρωστική ουσία απορροφά υπεριώδες φως και εκπέμπει ορατό φως σε ένα συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος. Έτσι επιλέγοντας χρωστική ουσία καθορίζουμε τις απαιτήσεις μας όσον αφορά την πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας.

Όταν η υπεριώδης ακτινοβολία διαπεράσει τον υμένα, ποσοστό της απορροφάται από το διάλυμα, δηλαδή το νερό και την χρωστική. Η σχέση που εκφράζει την ένταση του φωτός που απορροφάται όταν αυτό διανύει μια απόσταση είναι:

$$I(l) = I_0 \exp(-k_v l) \quad (2.1)$$

όπου:

I_0 : εξαρτάται από τον τοπικό φωτισμό και υπολογίζεται από την βαθμονόμηση της διαταξης

l : η διανυόμενη απόσταση στο εσωτερικό του υμένα.

K_v : ο συντελεστής απορρόφησης (είναι εξαιρετικά χαμηλός για το νερό)

Η ένταση του φωτός $I(x,y,t)$ έχει βρεθεί ότι μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει του τοπικού πάχους υμένα $h(x,y,t)$ (για υμένες σχετικής λεπτότητας) σύμφωνα με τη σχέση:

$$I(x, y, t) = a(x, y)h(x, y, t) + b(x, y) \quad (2.2)$$

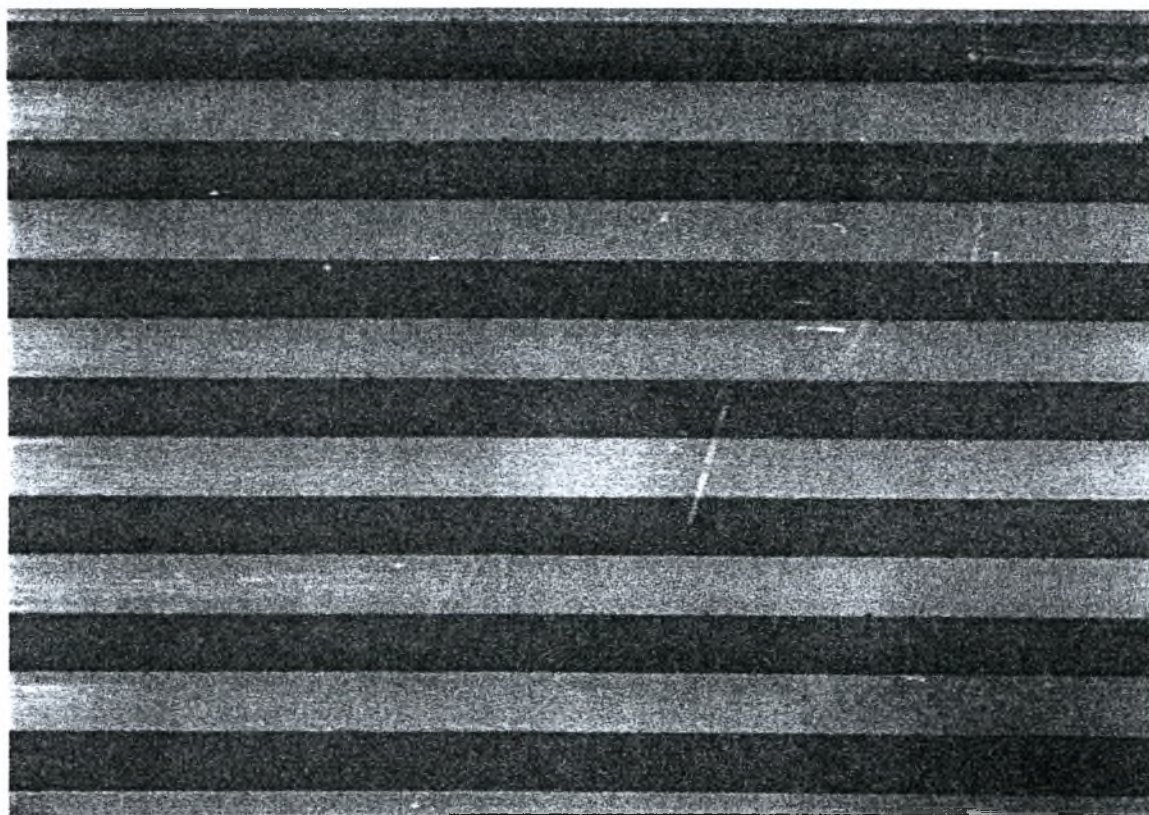
Όπου $a(x,y)$ και $b(x,y)$ είναι δυο γραμμικοί συντελεστές εξαρτώμενοι από την χρωστική, την συγκέντρωσή της, το είδος του διαλύματος, την πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας και την απόστασή της από τον υμένα.

Καθώς το διάλυμα φθορίζει εκπέμπει ορατό φως το οποίο λαμβάνει η ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης (CCD) που βρίσκεται τοποθετημένη κάτω από το επίπεδο τοιχώμα. Οι εικόνες που λαμβάνονται ψηφιακοποιούνται και με την χρήση της κατάλληλης κάρτας συλλογής εικόνων (frame grabber board) και του κατάλληλου λογισμικού καθίσταται δυνατός

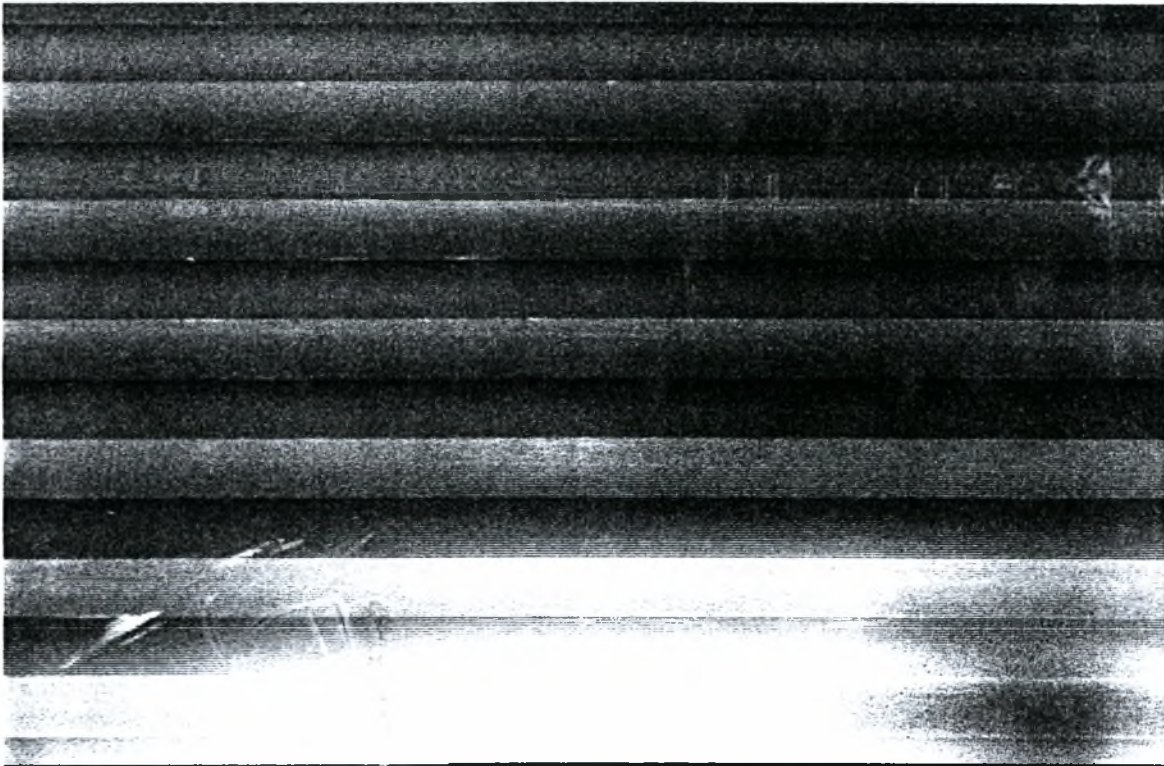
ο υπολογισμός του τοπικού πάχους του υμένα. Στα σχήματα (2.9), (2.10) και (2.11) φαίνονται τυπικές εικόνες που λαμβάνονται με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό. Το σχήμα (2.9) απεικονίζει εικόνα με επίπεδη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα ενώ οι εικόνες (2.10) και (2.11) αντιστοιχούν σε διαδοχικές χρονικές στιγμές και απεικονίζουν κυματισμό.

2.4 Επιλογή Χρωστικής Ουσίας

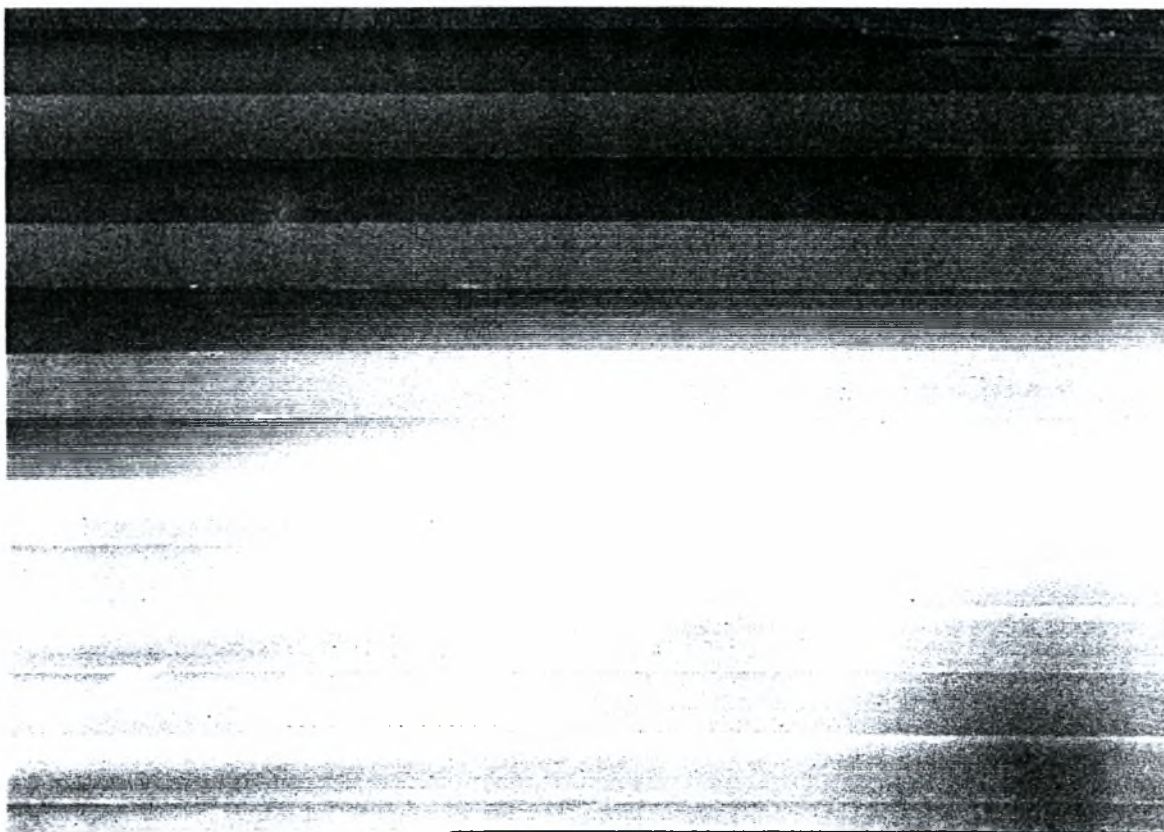
Μικρή συγκέντρωση χρωστικής ουσίας στο διάλυμα είναι αρκετή για τον πλήρη φθορισμό του, πράγμα το οποίο έχει αποδειχτεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία του εργαστηρίου [16]. Η επιλεγθείσα χρωστική ουσία είναι η ουρανίνη ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$), η οποία όταν απορροφά υπεριώδη ακτινοβολία εκπέμπει πρασινοκίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 515-550 nm. Στην εργασία του Καραγιάννη Κ. [16] το 1999, υπολογίστηκε πειραματικά πως για συγκεντρώσεις χρωστικής μεγαλύτερες από 350 ppm υφίσταται κορεσμός του φθορίζοντος φωτός.



Σχήμα 2.9



Σχήμα 2.10



Σχήμα 2.11

Σε αυτό το σημείο κρίνεται χρήσιμος ένας σύντομος σχολιασμός των εικόνων που φαίνονται στα σχήματα (2.9), (2.10) και (2.11). Τα φωτεινά σημεία του ορθογωνικού τοιχώματος είναι οι αυλακώσεις του, οι οποίες περιέχοντας περισσότερο υγρό από τα υψώματα εκπέμπουν και μεγαλύτερη ένταση ορατού φωτός. Στο σχήμα (2.9) φαίνεται μια περίπτωση με επίπεδη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα. Πρόκειται για υμένα επίπεδο και ευσταθή. Το κύμα που εξελίσσεται στις εικόνες (2.10) και (2.11) είναι αποτέλεσμα εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής του υμένα. Το μέτωπό του είναι η ιδιαίτερα φωτεινή περιοχή στο κάτω μέρος της εικόνας (2.10). Εκπέμπει μεγαλύτερη ένταση ορατού φωτός γιατί το πάχος του είναι μεγαλύτερο από αυτό των περιοχών επιπέδου υμένα που βρίσκονται εμπρός του. Επειδή η κάμερα που έχει πάρει τις συγκεκριμένες εικόνες βρίσκεται ακίνητη κάτω από το κυματοειδές τοίχωμα έχουμε την δυνατότητα να παρακολουθήσουμε την διέλευση του κύματος από το συγκεκριμένο πεδίο παρατήρησης. Έτσι στην εικόνα (2.11) φαίνεται η επόμενη χρονική στιγμή με το μέτωπο του κύματος να βρίσκεται στη μέση του παρατηρούμενου πεδίου.

Κεφάλαιο 3^ο

Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη της διαδικασίας επεξεργασίας των δεδομένων και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την διεξαγωγή του πειραματικού σκέλους της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η επεξεργασία έγινε στο μεγαλύτερο μέρος της με την χρήση λογισμικών πακέτων, του HImage Tool++98 και του MAT LAB ενώ ο σημαντικός όγκος των διαγραμμάτων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του MS Excel.

3.1 Διαδικασία Βαθμονόμησης της Ροής του Υμένα

Η ένταση του φωτός $I(x,y,t)$ που εκπέμπει ο υμένας υπό υπεριώδη ακτινοβολία έχει βρεθεί ότι μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει του τοπικού του πάχους $h(x,y,t)$ (για υμένες σχετικής λεπτότητας) σύμφωνα με τη σχέση:

$$I(x,y,t) = a(x,y)h(x,y,t) + b(x,y) \quad (3.1)$$

Όπου $a(x,y)$ και $b(x,y)$ είναι δυο γραμμικοί συντελεστές εξαρτώμενοι από την χρωστική, την συγκέντρωσή της, το είδος του διαλύματος, την πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας και την απόστασή της από τον υμένα. Εξ'αιτίας της μη ομοιομορφίας του πεδίου του υπεριώδους φωτός, ανεξάρτητες τιμές των συντελεστών a και b υπολογίζονται για κάθε pixel των ψηφιακοποιημένων εικόνων.

Η διαδικασία βαθμονόμησης της ροής του υμένα πάνω σε περιοδικό τοίχωμα με αυλακώσεις ορθογωνικής διατομής διαφέρει από την ανάλογη διαδικασία που εφαρμόζεται για ροή πάνω σε επίπεδο τοίχωμα. Λεπτομερείς μελέτες έδειξαν ότι οι δυο γραμμικοί συντελεστές εξαρτώνται από το πάχος του υμένα. Το επιπλέον υγρό που βρίσκεται στις αυλακώσεις του περιοδικού τοιχώματος αυξάνει την ένταση φθορισμού του υμένα στις συγκεκριμένες θέσεις (των αυλακώσεων). Κατά συνέπεια οι συντελεστές $a(x,y)$ και $b(x,y)$ αλλάζουν από τα υψώματα στις αυλακώσεις βάσει της γραμμικής έκφρασης (3.1) η οποία ισχύει για ολόκληρο το μήκος κύματος του τοιχώματος. Επί προσθέτως η προσπάθεια απ'ευθείας υπολογισμού της γραμμής κατατομής (line profile) στην διεύθυνση κατάντη της ροής καταλήγει σε

αποτελέσματα που δεν αποδίδουν την πραγματική διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα, εξ' αιτίας του επιπλέον υγρού στις αυλακώσεις του τοιχώματος.

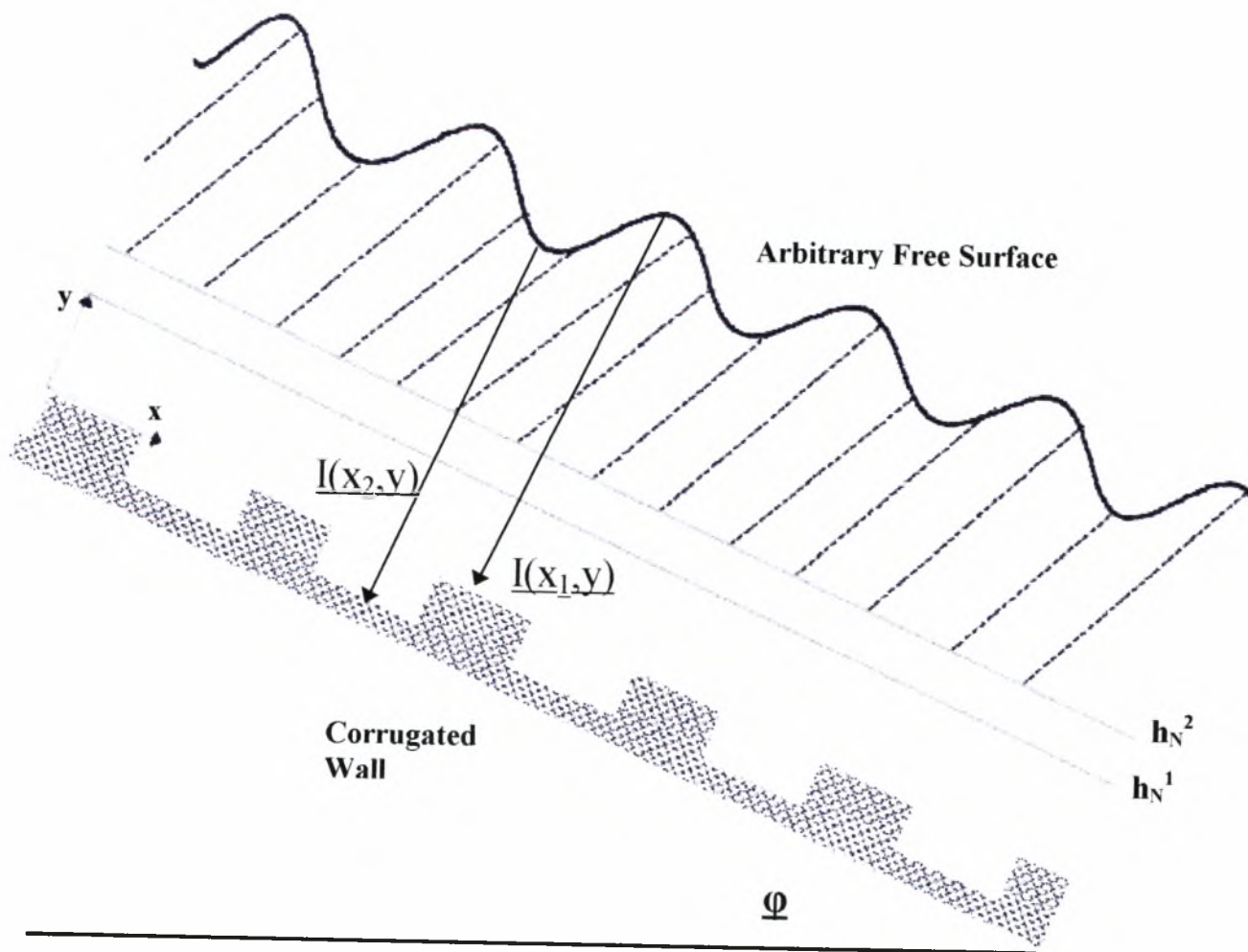
Μια καινούρια διαδικασία, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα (3.1), εφαρμόζεται προκειμένου να αντιμετωπιστούν/αποφευχθούν τα προαναφερθέντα προβλήματα. Βάσει της υπόθεσης της θεωρίας γραμμικής ευσταθείας, (long wave approximation) ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για την ανάπτυξη της πλέον ασταθούς διαταραχής είναι $Re_c = 5/6 \cot\phi$, όπου ϕ είναι η γωνία κλίσης του επιπέδου τοιχώματος. Για την περίπτωση του περιοδικού τοιχώματος, ο κρίσιμος αριθμός Reynolds Re_c είναι επίσης συνάρτηση της γωνίας κλίσης ϕ . Συνεπώς στις περιοχές αριθμών Reynolds και κλίσεων όπου ο υμένας είναι ευσταθής, το πάχος του ισούται με το πάχος υμένα κατά Nusselt, το οποίο μετράται από το ύψωμα του τοιχώματος έως την ελεύθερη επιφάνεια του υμένα. Αυτή η δήλωση/ισχυρισμός έχει παράλληλα επιβεβαιωθεί με ανεξάρτητες μετρήσεις του πάχους του υμένα με μια ακίδα επαφής και ένα μικρόμετρο μετάθεσης.

Το ότι το πραγματικό πάχος του υμένα ισούται με το πάχος υμένα κατά Nusselt εκμεταλλεύεται αυτή η νέα μεθοδολογία για μπορέσει να εξάγει μια γραμμή αναφοράς, βάσει της οποίας θα υπολογίσει την διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα. Χρησιμοποιεί εικόνες που έχουν ληφθεί από περιοχές αριθμών Reynolds και κλίσεων όπου ο υμένας είναι επίπεδος και ευσταθής. Αφαιρεί από την εικόνα με τον μικρότερο αριθμό Reynolds διαδοχικά τις επόμενες. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι οι εικόνες είναι αποθηκευμένες στον υπολογιστή σαν πίνακες διαστάσεων 576 x 768. Σε κάθε σημείο αυτών των πινάκων είναι αποθηκευμένη η ένταση ορατού φωτός που εκπέμπει ο υμένας και που μέτρα η κάμερα για το αντίστοιχο pixel. Άρα σε αυτή τη διαδικασία αφαιρούνται πίνακας από πίνακα. Επειδή η ένταση του φωτός για το pixel x,y είναι $I(x,y,t) = a(x,y)h(x,y,t) + b(x,y)$ δημιουργούνται διάφορες ΔI οι οποίες ισούνται με:

$$\Delta I(x,y,t) = a(x,y)\Delta h(x,y,t) \quad (3.2)$$

Τα Δh προκύπτουν από τα αντίστοιχα πάχη υμένα κατά Nusselt. Επιδιώκεται σε κάθε πείραμα να λαμβάνονται εικόνες σε τέσσερις διαφορετικούς αριθμούς Reynolds των οποίων ο υμένας να είναι ευσταθής και επίπεδος. Έτσι εξάγονται τρία σημεία που δίνουν καλή προσέγγιση της κλίσης της γραμμικής σχέσης (3.2), δηλαδή του ζητούμενου συντελεστή $a(x,y)$ για το κάθε pixel. Στην σχέση (3.2) προστίθεται και ένας συντελεστής $b(x,y)$ που αντιστοιχεί στην συνάρτηση λάθους και η τελική σχέση είναι:

$$\Delta I(x,y,t) = a(x,y)\Delta h(x,y,t) + b(x,y) \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.1

3.2 Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Επειδή, όπως έχει αναφερθεί και σε άλλα σημεία αυτής της εργασίας, το αντικείμενό της, δηλαδή η ροή υγρού υμένα πάνω σε κεκλιμένο τοίχωμα, δεν εξετάζεται για πρώτη φορά από στελέχη του εργαστηρίου φυσικών και χημικών διεργασιών, υπήρχαν σε σημαντικό βαθμό έτοιμοι κώδικες του MATLAB για εφαρμογή σε διάφορα σημεία της επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων. Γενικότερα δε, η όλη διαδικασία λήψης εικόνων από ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο τοίχωμα για διάφορες κλίσεις, διαλύματα, θέσεις της κάμερας κάτω από το κανάλι και είδη τοιχωμάτων, έχει μορφοποιηθεί σε κάποιο βαθμό τα τελευταία χρόνια που βρίσκεται σε χρήση η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη. Αντίστοιχα μορφοποιημένος είναι και ο τρόπος επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των πειραμάτων για την εξαγωγή της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα,

Στις επόμενες παραγράφους παρατίθεται και επεξηγείται η διαδικασία που ακολουθούσαμε με την χρήση των λογισμικών πακέτων HImage Tool++98 και MATLAB προκειμένου να εξάγουμε την διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα που ρέει πάνω σε κεκλιμένο, περιοδικό, κυματοειδές τοίχωμα.

3.2.1 Λήψη και Αποθήκευση Εικόνων

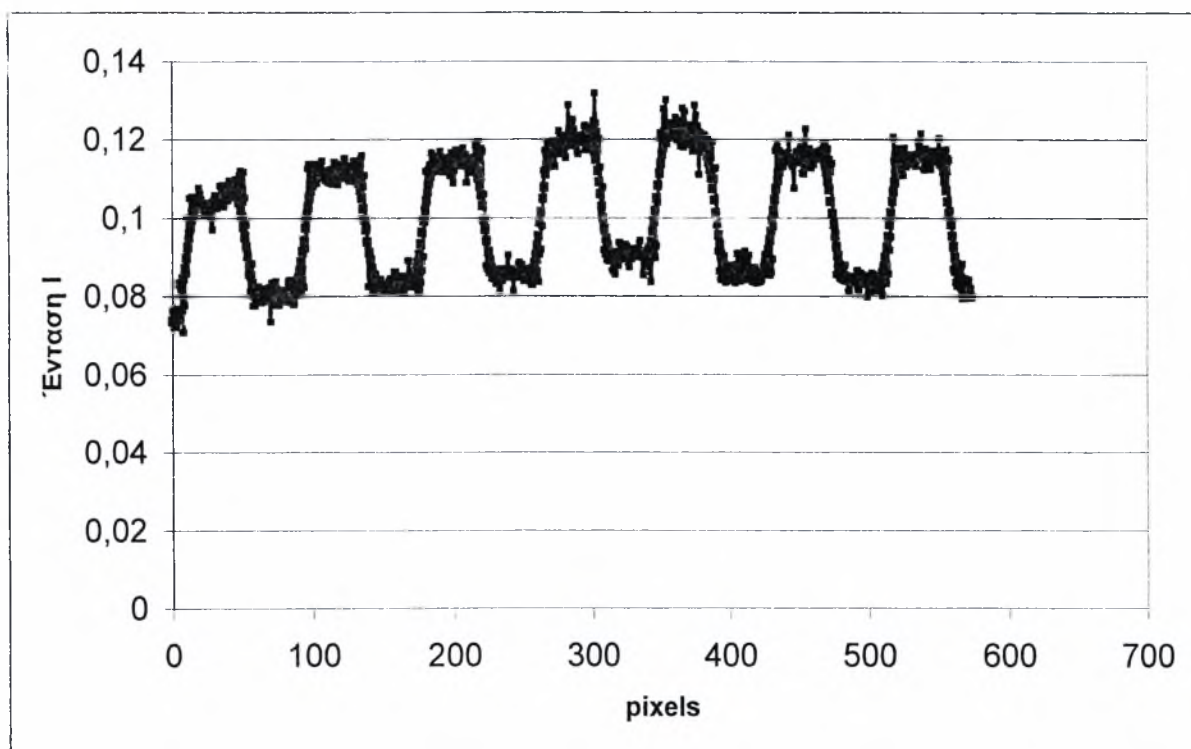
Στα πειράματα τα οποία συμπεριλήφθησαν στην παρούσα εργασία η κάμερα ήταν τοποθετημένη κάτω από τα πρώτα μήκη κύματος του τοιχώματος. Αυτή η θέση ονομάζεται θέση A σε όλη τη διαδικασία του πειράματος και απέχει 154 χιλιοστά (mm) από την αρχή του καναλιού.

Οι εικόνες όπως έχει προαναφερθεί λαμβάνονταν μέσω μιας ψηφιακής κάμερας (CCD) και αποθηκεύονταν μέσω μιας κάρτας συλλογής εικόνων (DT3155 Frame Grabber Board) σαν οχτάμπιτες (8 bits) εικόνες των 576 x 768 pixels με ρυθμό 10 εικόνων το δευτερόλεπτο. Με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου HImage Tool++98 καθορίζονταν τα επίπεδα λευκού και μαύρου φωτός (Black and White levels) ώστε να περιοριστεί η περιοχή της διακριτοποίησης και εν συνεχεία αποθηκεύονταν οι εικόνες στην μνήμη του υπολογιστή με την κατάλληλη ονοματολογία στην οποία είχαν κωδικοποιηθεί το είδος του διαλύματος, η γωνία κλίσης του τοιχώματος, ο αριθμός Reynolds για την συγκεκριμένη παροχή και η θέση της κάμερας.

Συνήθης πρακτική ήταν να λαμβάνονται μικροί αριθμοί εικόνων (20 έως 50 frames) σε μικρές παροχές - άρα και αριθμούς Reynolds - όπου η ελεύθερη επιφάνεια του υμένα ήταν επίπεδη. Κατόπιν, και για μεγαλύτερες παροχές όπου παρατηρούνταν κυματισμοί στην ελεύθερη επιφάνεια του υμένα, λαμβάνονταν περισσότερες εικόνες με όριο τις διακόσιες (200) αφού μέχρι τότε μπορεί να αποθηκεύσει η προσωρινή μνήμη του HLIimage Tool κάθε φορά που λαμβάνει εικόνες. Η διαδικασία λήψης εικόνων συνεχιζόταν μέχρι εξαντλήσεως του εύρους των παροχών που μπορούσε να δώσει η ρυθμιστική βάννα.

3.2.2 Επεξεργασία Εικόνων

Πριν την κυρίως επεξεργασία, εφαρμόζουμε στις εικόνες μια σχετικά χρονοβόρα διαδικασία με την βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, το φιλτράρισμα των εικόνων (convolution), το οποίο αποσκοπεί στη μείωση της επίδρασης τυχαίων εξωτερικών παραγόντων όπως θόρυβος κ.α. στην κάθε εικόνα και δεν αλλοιώνει την πληροφορία που μεταφέρει κάθε εικόνα. Ως φίλτρο χρησιμοποιήθηκε η κατανομή GAUSS 15 x 15 ή 7 x 7. Στο σχήμα (3.2) φαίνεται ένα γράφημα όπου απεικονίζει την ίδια γραμμή της ίδιας εικόνας πριν την διαδικασία του convolution (λεπτή μαύρη γραμμή) και μετά (παχιά μοβ γραμμή). Πρόκειται για εικόνα με επίπεδη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με τα υψώματα να αντιστοιχούν στις αυλακώσεις του τοιχώματος, όπου είναι συγκεντρωμένη περισσότερη ποσότητα υγρού και κατά τα αναμενόμενα εκπέμπει περισσότερο ορατό φως.



Σχήμα 3.2

Οι εικόνες, όπως έχει προαναφερθεί, λαμβάνονται μέσω μιας ψηφιακής κάμερας (CCD) και αποθηκεύονται μέσω μιας κάρτας συλλογής εικόνων (DT3155 Frame Grabber Board) σαν οχτάμπιτες (8 bits) εικόνες των 576 x 768 pixels, δηλαδή παράγεται ένας πίνακας διαστάσεων

576 x 768, κάθε στοιχείο του οποίου, αντιστοιχεί στην ένταση ορατού φωτός που εκπέμπει ο υμένας υπό την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας και που λαμβάνει/μετρά η κάμερα για το αντίστοιχο pixel. Η κύρια επεξεργασία των εικόνων ή ορθότερα των πινάκων διαστάσεων 576 x 768 γίνεται με το λογισμικό πακέτο MATLAB το οποίο είναι ιδιαίτερα εύχρηστο και αποτελεσματικό στην διαχείριση πινάκων. Τα βήματα που ακολουθούμε αναλύονται στις αμέσως επόμενες παραγράφους ενώ οι κώδικες, των οποίων η χρήση αναφέρεται, παρατίθενται στο παράρτημα.

Ο πρώτος κώδικας που χρησιμοποιείται ονομάζεται **calcwavynew**. Διαβάζει πίνακες που αντιστοιχούν σε εικόνες με επίπεδη ελεύθερη επιφάνεια υμένα. Χρησιμοποιεί ως γραμμή βάσης (baseline) την εικόνα με τον μικρότερο αριθμό Reynolds (άρα και το μικρότερο ύψος υμένα κατά Nusselt) και σχηματίζει διαφορές υψών Δh αφαιρώντας το ύψος h που μέτρα από την πρώτη εικόνα από τα ύψη των υπολοίπων εικόνων του κάθε πειράματος που έχουν επίπεδη ελεύθερη επιφάνεια υμένα.

Ο κώδικας **calcwavynew** χρησιμοποιεί σαν είσοδο ένα txt αρχείο του Notepad των Windows που ονομάζεται **input.txt** στο οποίο αναφέρονται με συγκεκριμένη διάρθρωση (format) τα ονόματα των αρχείων με επίπεδη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα που θέλουμε να χρησιμοποιήσει, τα **black** και **white levels** της κάθε ομάδας εικόνων (ιδίου αριθμού Reynolds), ο αριθμός των εικόνων (frames) της κάθε ομάδας εικόνων και η απόσταση της κάμερας από την αρχή του καναλιού. Ο κώδικας παράγει workspaces του MATLAB όπου αποθηκεύει τις διαφορές Δh που έχει υπολογίσει.

Ο κώδικας που χρησιμοποιείται στη συνέχεια ονομάζεται **wwcalibIoAll**. Χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τους γραμμικούς συντελεστές $a(x,y)$ και $b(x,y)$ της σχέσης (3.1) για κάθε pixel της κάθε εικόνας. Απαιτεί από τον χρήστη να του τροφοδοτεί μέσω του Editor του MATLAB τα ύψη κατά Nusselt h_N που αντιστοιχούν στα αρχεία που επεξεργάζεται. Χρησιμοποιεί σαν είσοδο ένα txt αρχείο του Notepad των Windows που ονομάζεται **inputdisp.txt** στο οποίο αναφέρονται κατά αύξοντα αριθμό Reynolds τα workspaces που προκύπτουν από τον προηγούμενο κώδικα, δηλαδή τον **calcwavynew**. Ο κώδικας παράγει workspaces του MATLAB όπου αποθηκεύει τους συντελεστές που έχει υπολογίσει.

Κατόπιν, χρησιμοποιείται ο κώδικας που ονομάζεται **wwcalibIo**. Χρησιμοποιείται και αυτός για να υπολογίσει τους γραμμικούς συντελεστές $a(x,y)$ και $b(x,y)$ της σχέσης (3.1) αλλά μόνο κατά μήκος μιας γραμμής κατάντη της ροής στο μέσο της εικόνας, δηλαδή από το σημείο (1,384) ως το (576,384) γιατί τα εξαγόμενά του χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των line profiles των εικόνων. Απαιτεί και αυτός από τον χρήστη να του τροφοδοτεί μέσω του Editor του MATLAB τα ύψη κατά Nusselt h_N που αντιστοιχούν στα αρχεία που επεξεργάζεται.

Χρησιμοποιεί σαν είσοδο το ίδιο txt αρχείο του Notepad των Windows που χρησιμοποιείται και από τον `wwcalibIoAll` και ονομάζεται `inputdisp.txt`. Ο κώδικας παράγει workspaces του MATLAB όπου αποθηκεύει τους συντελεστές που έχει υπολογίσει.

Εν συνεχεία χρησιμοποιείται ο κώδικας `wwnewcalcold`. Πρόκειται για τον κώδικα που παράγει τις γραμμές κατατομής (line profiles) κατά μήκος της μεσαίας γραμμής κατάντη της ροής. Έχει σαν είσοδο το txt αρχείο `inputdisp` όπου αναφέρεται το workspace με τους συντελεστές που προκύπτει από τον προηγούμενο κώδικα και το txt αρχείο `input` όπου αναφέρονται με συγκεκριμένη διαμόρφωση (format) τα αρχεία που περιέχουν εικόνες που εμφανίζουν κυματισμούς στην ελεύθερη επιφάνεια του υμένα και μας ενδιαφέρει να εξάγουμε τα line profiles τους.

Τέλος έχουμε της δυνατότητα να τρέξουμε τους κώδικες `bontdownstream` και `bonttransverse`. Αυτοί χρησιμοποιούν όλους τους χώρους εργασίας (workspaces) που προκύπτουν από την εκτέλεση του προηγούμενου κώδικα, δηλαδή του `wwnewcalcold` και σχεδιάζουν τις γραμμές κατατομής (line profiles) είτε κατάντη της ροής (`bontdownstream`) είτε εγκάρσια (`bonttransverse`). Και οι δυο κώδικες έχουν σαν είσοδο το txt αρχείο `inputdisp` στο οποίο αναφέρονται τα ονόματα των workspaces με τα line profiles που έχουν προκύψει από την εκτέλεση του `wwnewcalcold`.

Μια τυπική μορφή του αρχείου `input.txt` φαίνεται παρακάτω:

```

ROW1   COLU1   ROW2   COLU2   SELECTED_ROW   STEPTROW   STEPDISTANCEROW   SELECTED_COLUMN
STEPTCOLUMN   STEPDISTANCECOLUMN
50   384   500   384   288   5   8   384   0.5   8

//Io (X,Y) FOR FRAME AVERAGING//
wwgr3#4Re23A   351.100   145.870   20   0.1   154
wwgr3#4Re36A   351.100   155.430   20   0.1   154
wwgr3#4Re78A   387.220   168.575   20   0.1   154
wwgr3#4Re105A   397.540   200.840   20   0.1   154
wwgr3#4Re147A   400.120   218.765   100   0.1   154
wwgr3#4Re202A   397.540   234.300   200   0.1   154
wwgr3#4Re247A   410.440   246.250   200   0.1   154
wwgr3#4Re279A   410.440   242.665   200   0.1   154
wwgr3#4Re305A   410.440   248.640   200   0.1   154
wwgr3#4Re327A   397.540   259.395   200   0.1   154
wwgr3#4Re355A   402.700   267.760   200   0.1   154
wwgr3#4Re415A   410.440   286.880   200   0.1   154

```

Στην πρώτη στήλη αναφέρονται τα ονόματα των ομάδων των εικόνων καταταγμένα κατά αύξοντα αριθμό Reynolds. Στην δεύτερη και την τρίτη στήλη αναφέρονται το λευκό (white) και μαύρο (black) επίπεδο της κάθε εικόνας αντίστοιχα. Οι τρεις (3) τελευταίες στήλες

αναφέρουν κατά σειρά τον αριθμό των εικόνων (frames) που έχουν ληφθεί για κάθε ομάδα εικόνων, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της λήψης δυο διαδοχικών εικόνων (time delay) και τη απόσταση της κάμερας από την αρχή του καναλιού σε χιλιοστά (mm) του μέτρου.

” Ευαίσθητα σημεία”

Σε όλη την παραπάνω διαδικασία επεξεργασίας των εικόνων υπάρχουν μερικά ευαίσθητα σημεία όπου αν δεν δοθεί η δέουσα προσοχή είναι εύκολο να γίνει σημαντικό λάθος.

Μετά την διαδικασία του φιλτραρίσματος (convolution) υπάρχουν διαθέσιμες δυο ομάδες εικόνων για κάθε πείραμα που έχει εκτελεστεί, αυτές προ και αυτές μετά convolution. Τις ξεχωρίζει μόνο το πρόθεμα con στην ονοματολογία τους. Επίσης όλοι οι παραπάνω κώδικες υπάρχουν και με το πρόθεμα con π.χ. **convwnewcalcold**. Αυτοί είναι οι ίδιοι κώδικες με τους προηγούμενους με την προσθήκη των κατάλληλων τροποποιήσεων για να αναγνωρίζουν σαν είσοδο και έξοδο τις con εικόνες. Έτσι κάθε φορά πρέπει να εκτελούνται οι κατάλληλοι κώδικες για τις κατάλληλες εικόνες.

Το αρχείο **input.txt** αλλάζει κάθε φορά πριν εκτελεστεί κάποιος κώδικας. Έτσι εκτός του ότι πρέπει κάποιος να βάζει στο αρχείο τα ονόματα των εικόνων που σκοπεύει να επεξεργαστεί, πρέπει σε περίπτωση που αυτές έχουν υποστεί φιλτράρισμα, να προσθέτει στο κάθε όνομα το πρόθεμα con. Σημαντικό είναι επίσης οι εικόνες να αναφέρονται κατά αύξοντα αριθμό Reynolds.

Υπάρχουν κώδικες όπως οι **wwcalibIo** και **wwcalibIoAll** (και οι αντίστοιχοι con) που περιέχουν τα τοπικά ύψη υμένα κατά Nusselt και τα χρησιμοποιούν στους υπολογισμούς τους. Έτσι κάθε φορά που σκοπεύουμε να επεξεργαστούμε εικόνες από άλλο πείραμα, δηλαδή με διαφορετική κλίση του καναλιού, πρέπει μέσω του editor του MATLAB να τους τροποποιούμε κατάλληλα με τα καινούρια ύψη υμένων.

Προσοχή πρέπει να δίνεται και κατά τη τροποποίηση του αρχείου **inputdisp.txt**. Οι χώροι εργασίας (work spaces) που αναφέρονται σε αυτό πρέπει να γράφονται κατά αύξοντα αριθμό Reynolds και φυσικά να επιβεβαιώνεται ότι έχουν το πρόθεμα con αν πρόκειται για φιλτραρισμένες εικόνες. Μία τυπική μορφή του αρχείου inputdisp φαίνεται παρακάτω.

```
//Io (X,Y) FOR FRAME AVERAGING//  
wvg5#4GLRe7Cwwg5#4GLRe24C23#5#00g5#4n
```

Στην προκειμένη περίπτωση αναφέρεται μόνο ένα workspace. Αν ο χρηστής ενδιαφερόταν να εκτελέσει κώδικα που απαιτεί περισσότερα από ένα workspaces, αυτά πρέπει να αναφερθούν κατά αύξοντα αριθμό Reynolds.

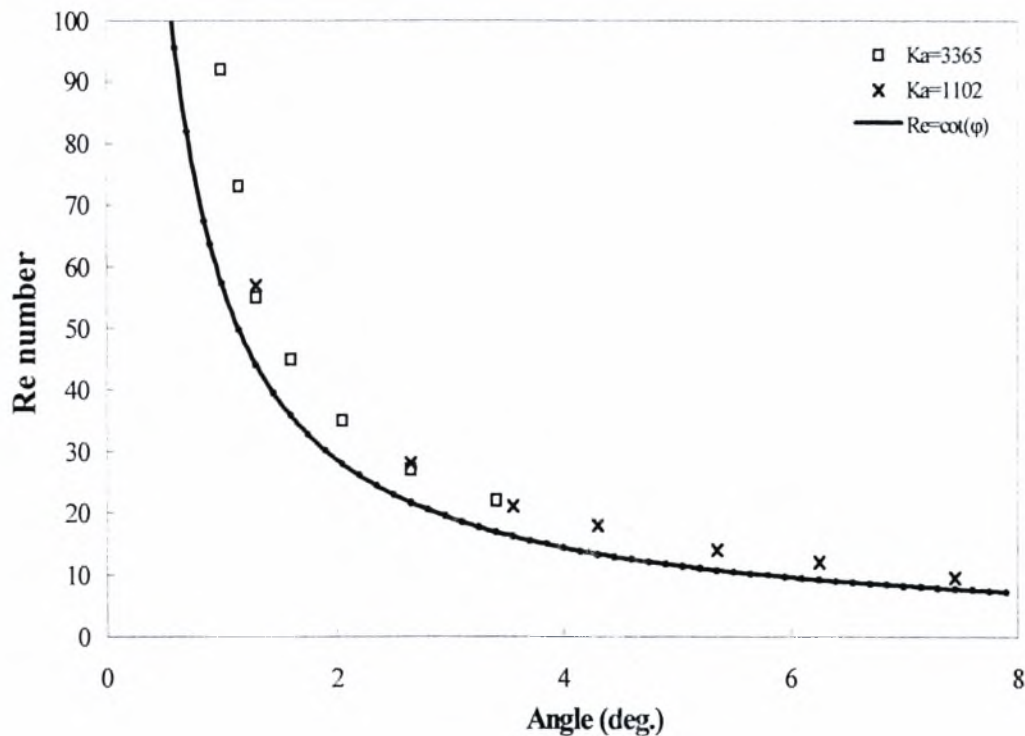
Κεφάλαιο 4^ο

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

4.1 Ευστάθεια στο κυματοειδές τοίχωμα

Σύμφωνα με την θεωρία γραμμικής ευσταθείας, η ασταθής περιοχή εμφανίζεται για μακριά κύματα σε ικανό βαθμό, όταν ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος από την κρίσιμη τιμή του Re_c . Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για την έναρξη των ασταθειών προβλέπεται από την θεωρία γραμμικής ευσταθείας να είναι $Re_c = 5/6 \cot\phi$. Ο συγκεκριμένος ισχυρισμός έχει ελεγχθεί ποσοτικά για την περίπτωση του επιπέδου τοιχώματος από την ομάδα του Liu [5] το 1993 (σχήμα 1.1.7 κεφ. 1). Στα πειράματα που συμπεριελήφθησαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο κρίσιμος αριθμός Reynolds καθοριζόταν ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης του καναλιού με την ακόλουθη διαδικασία. Μια ισχυρή εξωτερική διαταραχή, η οποία είναι συγκρίσιμη με ένα σολιτονικό κύμα μεγάλου πλάτους, επιβαλλόταν στην είσοδο του επιπέδου ροής. Παράλληλα λαμβάνονταν δεδομένα τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος του κυματοειδούς τοιχώματος με σκοπό την εξαγωγή της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφανείας του υμένα. Κατόπιν συγκρινόταν η δομή της διαταραχής στην αρχή του τοιχώματος με αυτή στο τέλος του. Το βασικό κριτήριο σχετικά με το αν ο υμένας ήταν ευσταθής ή όχι ήταν η πλήρης εξασθένηση της επιβληθείσας διαταραχής ως το τέλος του τοιχώματος, χωρίς την περαιτέρω δημιουργία άλλων διαταραχών, οποιουδήποτε είδους, στην ροή.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για τον κρίσιμο αριθμό Reynolds που αφορούν την ροή νερού και την ροή διαλύματος νερού – γλυκερίνης φαίνονται στο σχήμα (4.1.1) της επόμενης σελίδας.



Σχήμα 4.1.1: Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds (Re_c) συναρτήσει της γωνίας κλίσης

Με την συνεχή γραμμή απεικονίζεται η θεωρητική πρόβλεψη, με τετραγωνάκια τα πειραματικά δεδομένα για νερό ενώ με τους σταυρούς αυτά για το διάλυμα νερού-γλυκερίνης (26% κ.β.). Η διαφορά σε σχέση με τη θεωρητική πρόβλεψη της θεωρίας γραμμικής ευστάθειας έχει να κάνει με την επίδραση του περιοδικού τοιχώματος στα χαρακτηριστικά της ροής. Αυτό φαίνεται να έχει κάποιο σταθεροποιητικό ρόλο στη ροή έτσι ώστε να υπάρχουν περιοχές όπου η θεωρία προβλέπει ασταθή υμένα αλλά αυτό να μην ισχύει για το περιοδικό τοίχωμα.

4.2 Περιοχές Ροής

Κατά την μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε περιοδικό ορθογωνικό τοίχωμα εξετάστηκε ποιοτικά ο ρόλος των χαρακτηριστικών του τοιχώματος στη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα. Εξετάστηκε δηλαδή τί επίδραση έχουν στη ροή το πλάτος του τοιχώματος ($2b=0.4\text{mm}$) το μήκος κύματός του ($L=12\text{mm}$).

Παρατηρήθηκε η τάση να διαμορφώνονται τρεις βασικές περιοχές ροής. Η περιοχή όπου η ελεύθερη επιφάνεια του υμένα είχε στατική διαμόρφωση, η ασταθής περιοχή και η περιοχή όπου παρουσιάζονταν τρισδιάστατες αστάθειες. Η ροπή της ροής για κάθε μια περιοχή διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα είναι συνάρτηση της κλίσης του τοιχώματος και του αριθμού Reynolds.

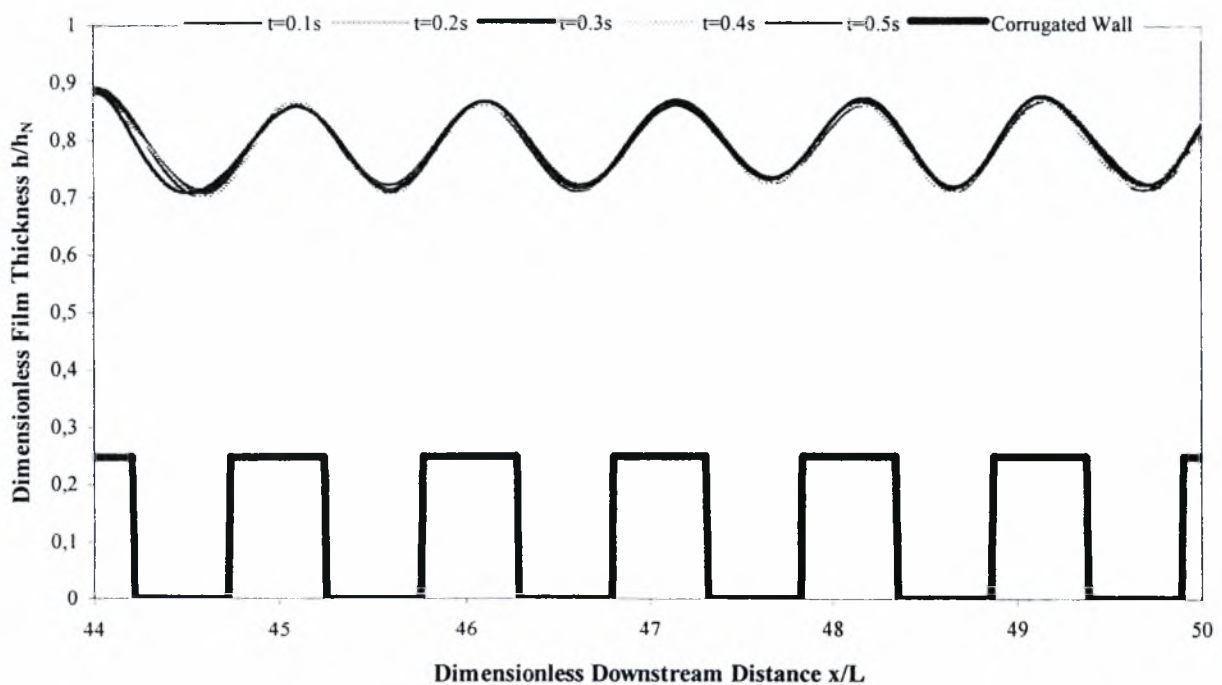
Η περιοχή με στατική διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα παρατηρείται στα πρώτα 5 με 7 μήκη κύματος του τοιχώματος και για μέτριους αριθμούς Reynolds στο φάσμα μεταξύ 10 και 450. Η επιφάνεια του υμένα έχει τη μορφή της θεμελιώδους αρμονικής του τοιχώματος, δηλαδή ημιτονοειδή με μήκος κύματος αυτό του τοιχώματος αλλά με άλλη φάση και με πλάτος εξαρτώμενο από τον αριθμό Reynolds.

Μια διακύμανση της διαφοράς φάσης του υμένα με το τοίχωμα υποδηλώνει την έναρξη της μετάβασης από την περιοχή στατικής διαμόρφωσης στις περιοχές αστάθειας. Αυξανόμενου του αριθμού Reynolds εμφανίζονται κύματα πάνω από τη στατική διαμόρφωση όπως και τρισδιάστατες αστάθειες. Αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση εγκάρσιων κοιλωμάτων και την σταθεροποίηση του συστήματος σε αυτή την κατάσταση συνοδευόμενη και από μια μείωση του μέσου πάχους του υμένα.

Στα ακόλουθα υποκεφάλαια θα εξεταστούν διεξοδικά και οι τρεις περιοχές διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα.

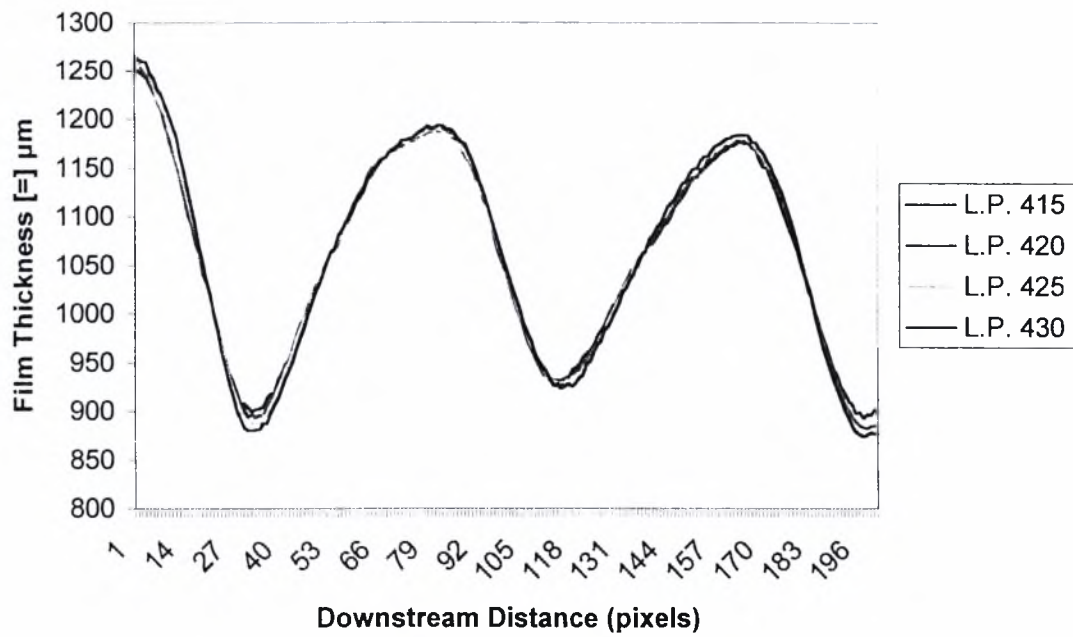
4.2.1 Ελεύθερη επιφάνεια με στατική διαμόρφωση.

Όπως αναφέρεται παραπάνω, πάνω από τα πρώτα μήκη κύματος του τοιχώματος η ελεύθερη επιφάνεια του υμένα διαμορφώνεται στατικά. Η ονομασία της συγκεκριμένης παρατηρούμενης διαμόρφωσης ως "στατική διαμόρφωση" έχει να κάνει με το γεγονός ότι η διδιάστατη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Το συγκεκριμένο φαινόμενο επιβεβαιώνεται από διαγράμματα προφίλ της ροής (line profiles), όπως αυτό του σχήματος (4.2.1). Σε αυτό εξετάζονται διαδοχικές χρονικές στιγμές του ίδιου line profile. Πιο συγκεκριμένα ο υμένας παίρνει την μορφή της πρώτης, της θεμελιώδους αρμονικής του τοιχώματος, της ημιτονοειδούς. Επιπροσθέτως στα σχήματα (4.2.2) και (4.2.3) εξετάζονται παράλληλα ως προς τη διεύθυνση της ροής προφίλ (Line Profiles). Επειδή αυτά συμπίπτουν επιβεβαιώνεται η διδιάστατη διαμόρφωση της επιφάνειας του υμένα.



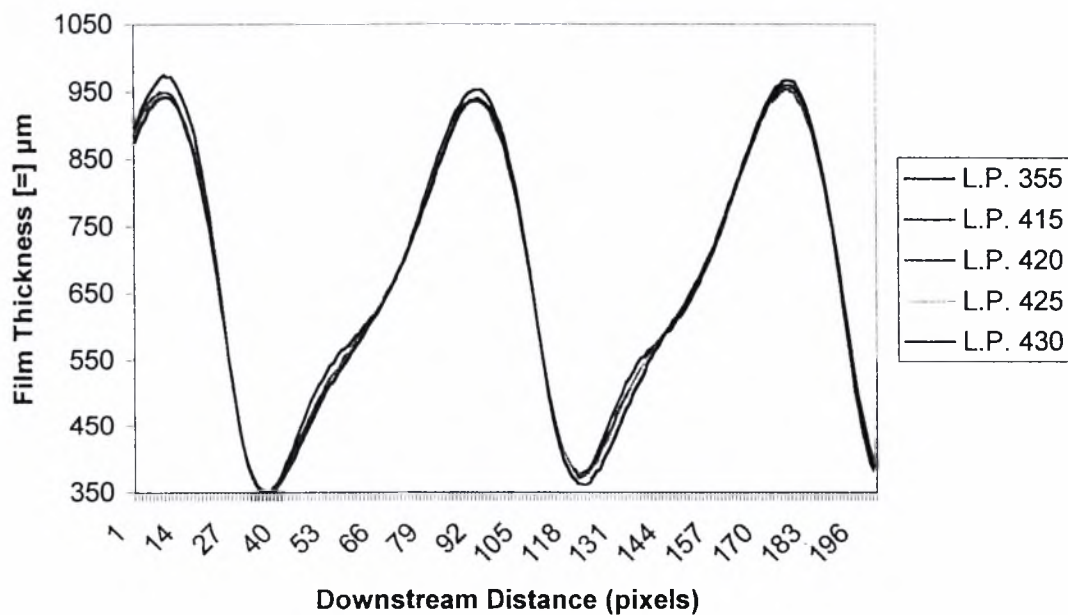
Σχήμα 4.2.1: Στατική διαμόρφωση

Επιφάνεια συναρτήσει απόστασης και χρόνου



Σχήμα 4.2.2: Διδιάστατη στατική διαμόρφωση

Εγκάρσια προφίλ του πάχους του υμένα, παράλληλα ως προς τη διεύθυνση της ροής, σε κλίση $1,3^\circ$ και $Re=400$

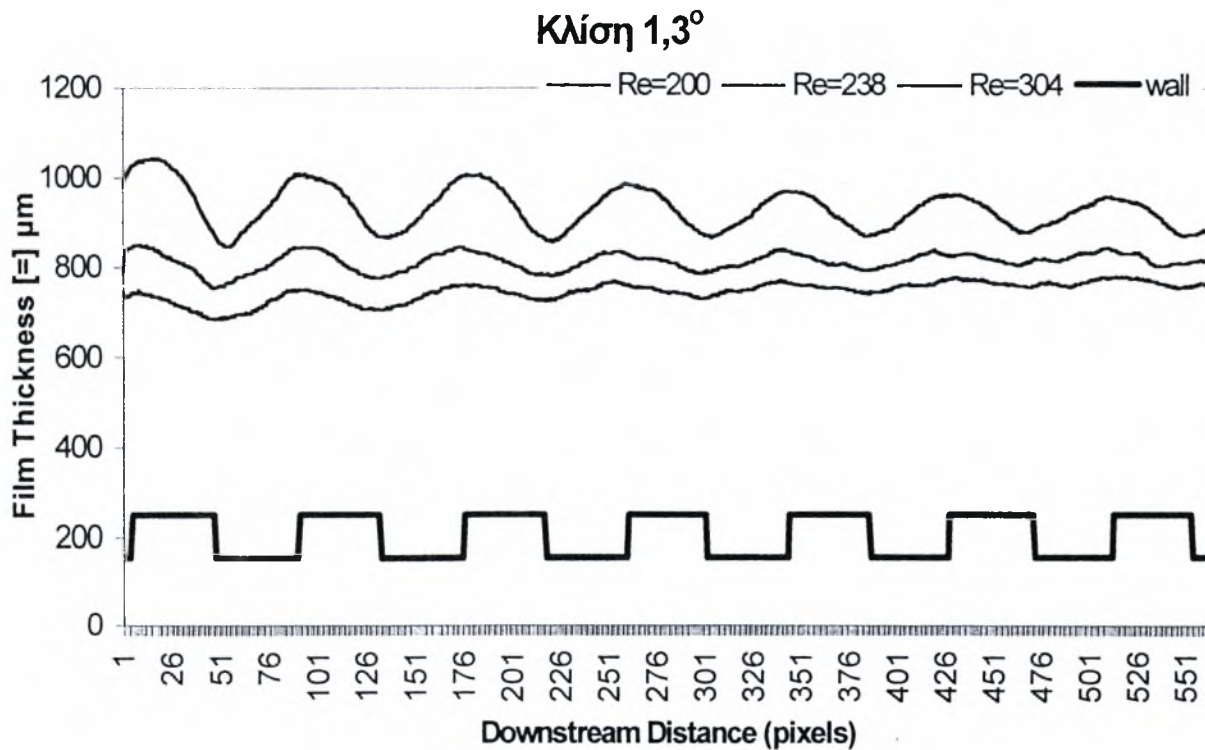


Σχήμα 4.2.3: Διδιάστατη στατική διαμόρφωση.

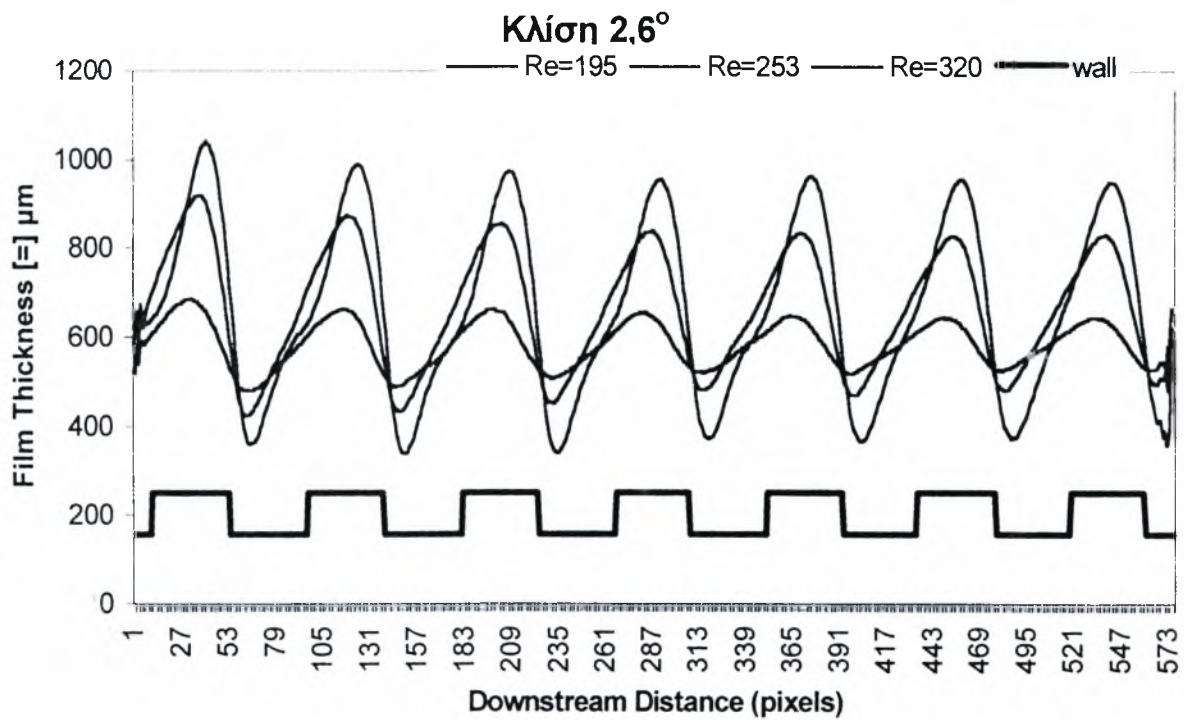
Εγκάρσια προφίλ του πάχους του υμένα, παράλληλα ως προς τη διεύθυνση της ροής, σε κλίση $2,6^\circ$ και $Re=320$

Η περιοχή στατικής διαμόρφωσης του υμένα εμφανίζεται σε όλα τα πειράματα που εκτελέστηκαν κατά το πειραματικό μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας και για τα πρώτα πέντε (5) με επτά (7) μήκη κύματος του περιοδικού τοιχώματος, στην περιοχή έναρξης (inception region) όπως απαντάται στην βιβλιογραφία [14]. Σε αυτή τη μικρή περιοχή ο υμένας λαμβάνει μια σχεδόν ημιτονοειδή διαμόρφωση με μήκος κύματος αυτό του τοιχώματος. Όσον αφορά στο πλάτος της διαμόρφωσής του αυτό αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds και της γωνίας κλίσης του καναλιού.

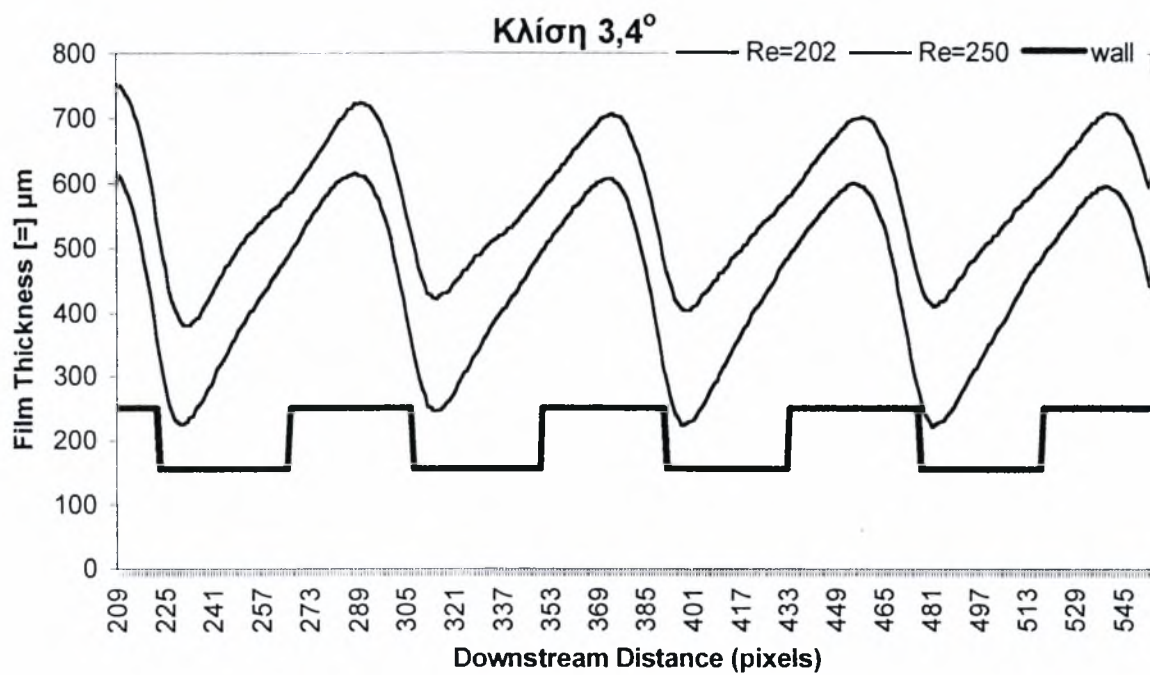
Πιο αναλυτικά, για διαφορετικές κλίσεις του καναλιού και παραπλήσιους αριθμούς Reynolds τα επόμενα σχήματα (4.2.4), (4.2.5) και (4.2.6) δείχνουν ποιοτικά ότι το πλάτος της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα μεταβάλλεται συναρτήσει της γωνίας κλίσης και του αριθμού Reynolds της ροής. Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα σχήματα έχουν ληφθεί στην θέση 'Α', δηλαδή κάτω από τα πρώτα μήκη κύματος του καναλιού.



Σχήμα 4.2.4: Το πλάτος λ μεταβάλλεται με την γωνία κλίσης του τοιχώματος

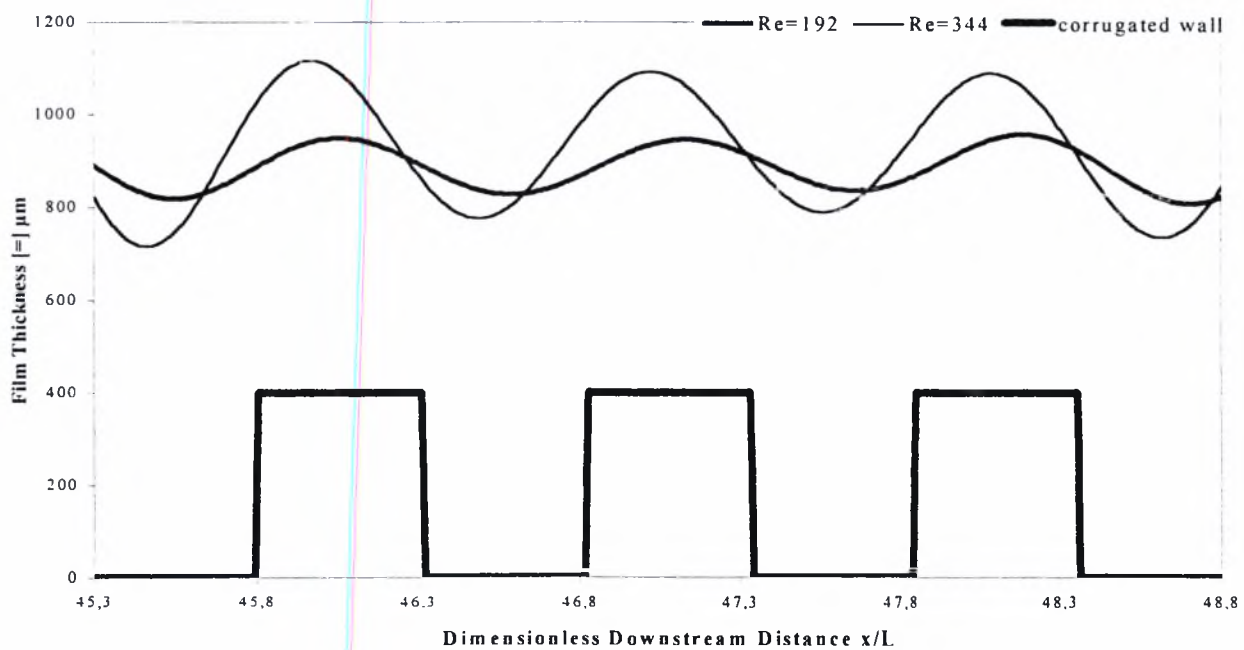


Σχήμα 4.2.5: Το πλάτος λ μεταβάλλεται με την γωνία κλίσης του τοιχώματος

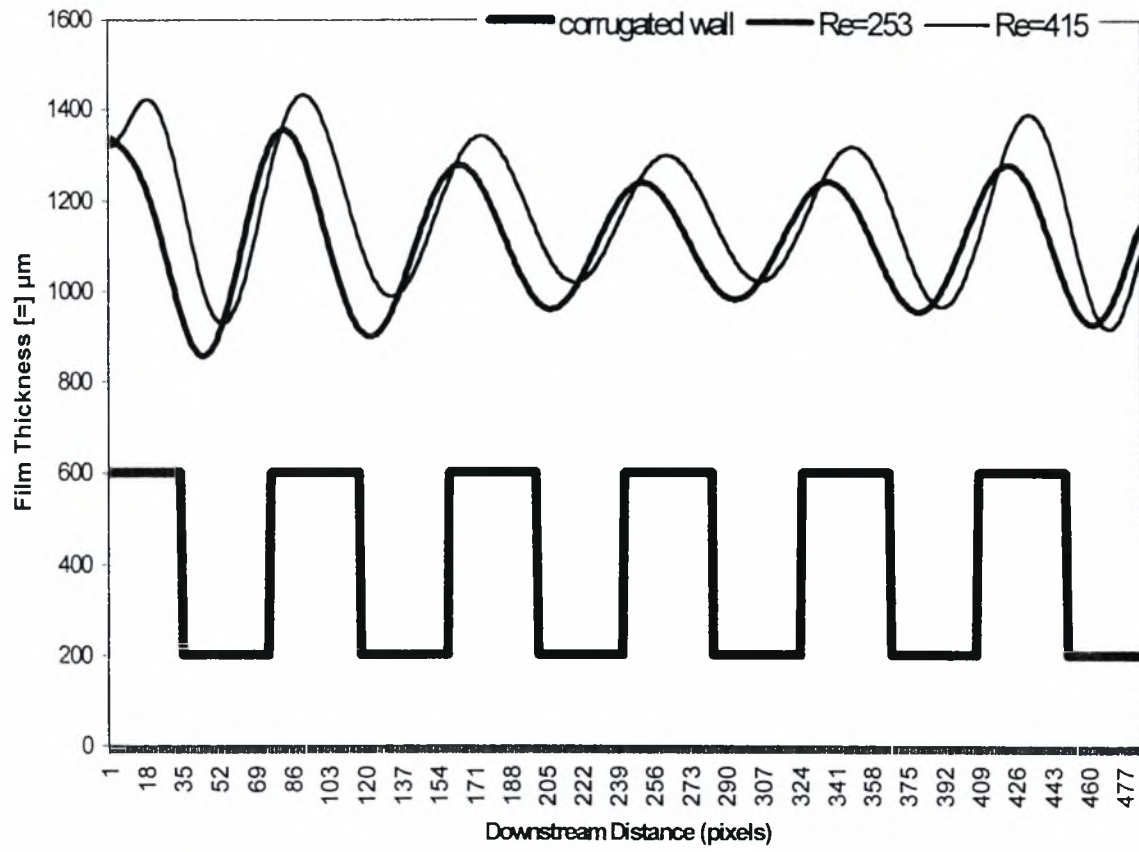


Σχήμα 4.2.6: Το πλάτος λ μεταβάλλεται με την γωνία κλίσης του τοιχώματος

Στην περιοχή έναρξης (inception region) [14], η ελεύθερη επιφάνεια του υμένα λαμβάνει τη μορφή της θεμελιώδους αρμονικής του περιοδικού τοιχώματος. Στην προκειμένη περίπτωση αυτή είναι η ημιτονοειδής. Επιπροσθέτως, όπως έχει προαναφερθεί, αυτή η διαμόρφωση είναι στατική για τα πρώτα μήκη κύματος του τοιχώματος και δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Σε όλο το φάσμα των πειραμάτων που διεξήχθησαν, παρατηρείται μεταβολή στην διάφορα φάσης μεταξύ της επιφανείας του υμένα και του περιοδικού τοιχώματος, συνοδευόμενη από αύξηση του πλάτους ταλάντωσης του υμένα. Τα δύο αυτά φαινόμενα είχαν δύο κυρίως αίτια. Πρώτον την αύξηση της παροχής της ροής και κατά συνέπεια του αριθμού Reynolds, και δεύτερον την μεταβολή της γωνίας κλίσης του τοιχώματος. Αυτή την διαπίστωση επιχειρούν να τεκμηριώσουν ποιοτικά τα σχήματα (4.2.7) και (4.2.8) που ακολουθούν.



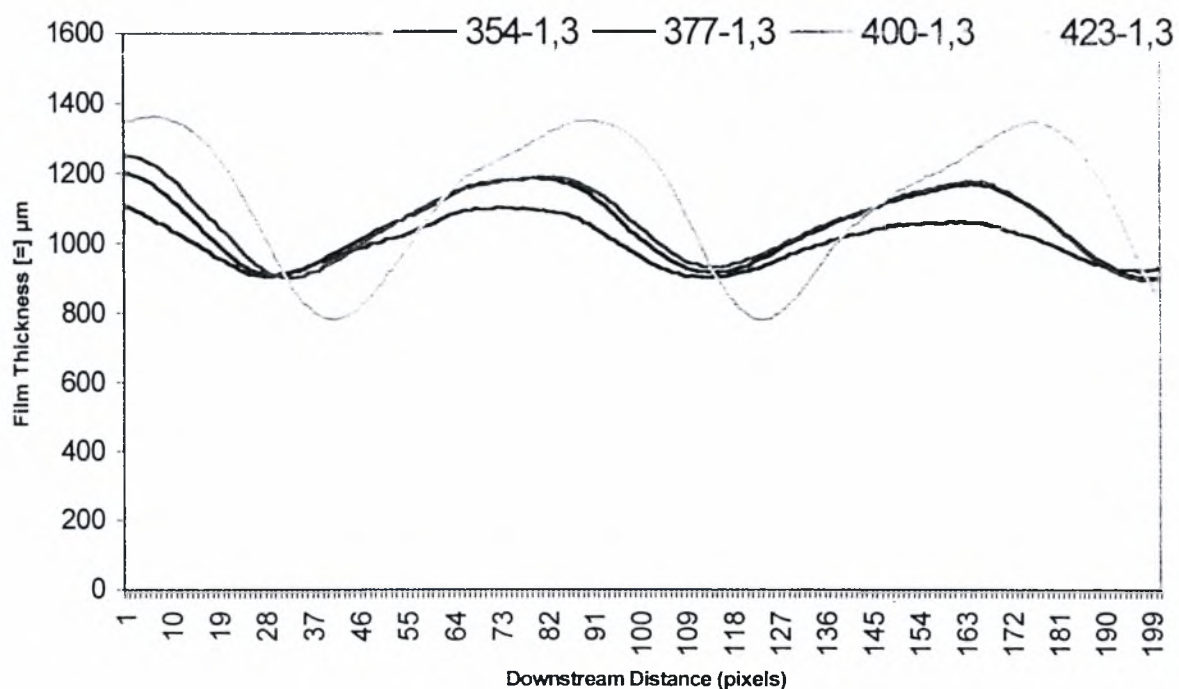
Σχήμα 4.2.7: Μεταβολή της διαφοράς φάσης και αύξηση του πλάτους $2a$ με την αύξηση του αριθμού Reynolds σε κλίση $1,3^\circ$



Σχήμα 4.2.8: Μεταβολή της διαφοράς φάσης με την αύξηση του αριθμού Reynolds σε κλίση $2,6^\circ$

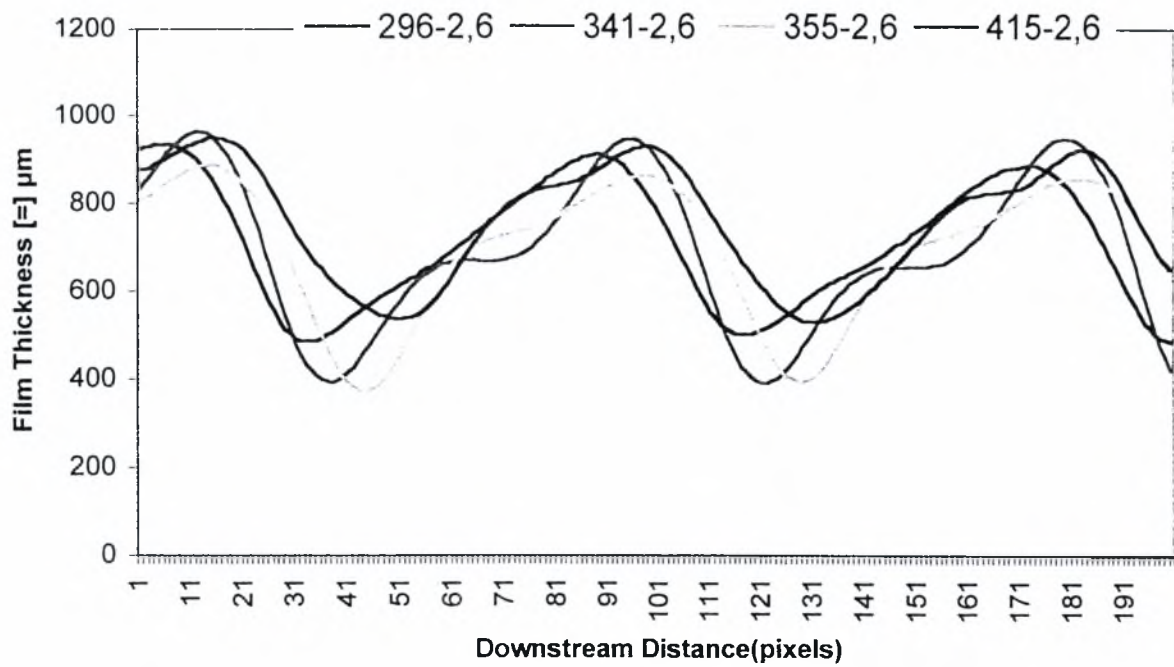
Σε κάθε κλίση όπου εκτελέστηκαν πειράματα, κάθε φορά που άλλαζε ο αριθμός Re της ροής, μεταβαλλόταν η διάφορα φάσης της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με το τοίχωμα στην περιοχή της στατικής διαμόρφωσης. Παράλληλα γινόταν σημαντικότερος ο ρόλος των αρμονικών υψηλότερας τάξεως του τοιχώματος στην διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα. Στα τρία σχήματα που ακολουθούν, (4.2.9), (4.2.10) και (4.2.11), επιχειρείται να δοθεί μια ποιοτική διάσταση στη διάφορα φάσης που επέρχεται στην στατική διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Γίνεται επίσης εμφανής και η μεταβολή της διαμορφώσεως της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα από καθαρά ημιτονοειδή σε πιο πολύπλοκη υπό την επίρεια αρμονικών υψηλότερας τάξεως του τοιχώματος. Τα διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί για κλίσεις 1.3, 2.6 και 3.4 μοιρών και για τους τελευταίους αριθμούς Reynolds του κάθε πειράματος.

Παρατηρείται ότι αν και η διαμόρφωση της επιφάνειας του υμένα επηρεάζεται από τις αρμονικές ανωτέρας τάξεως του τοιχώματος, το βασικό μήκος κύματος παραμένει αμετάβλητο και ίσο με αυτό του τοιχώματος, δηλαδή στα 12 mm.

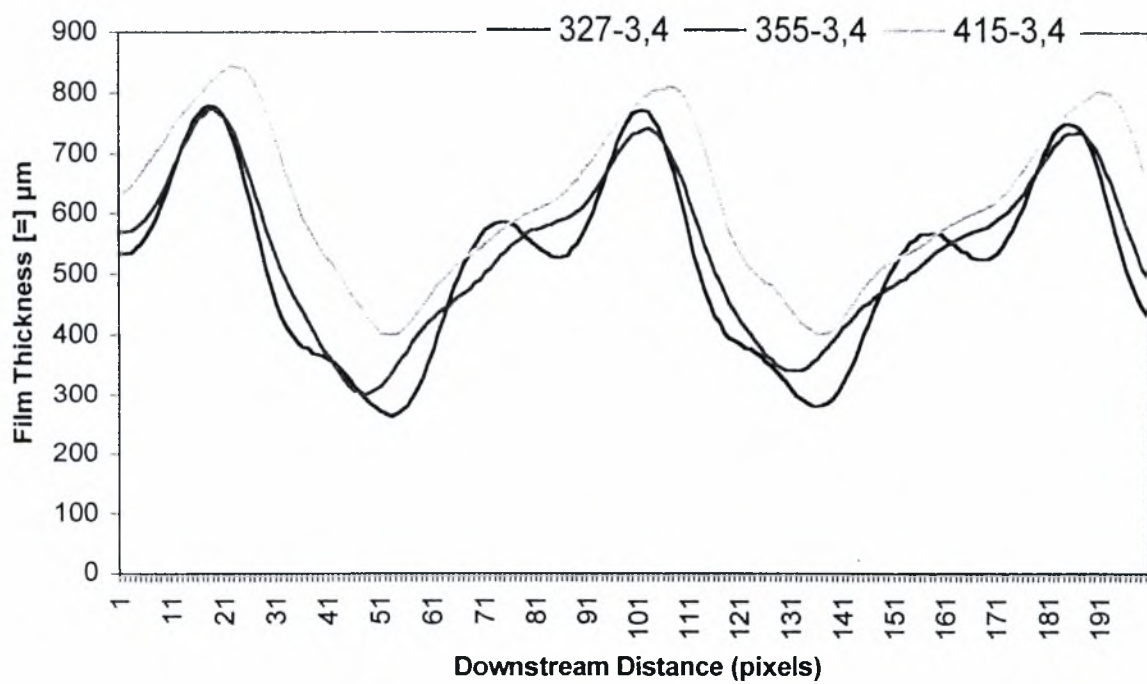


Σχήμα 4.2.9: Διαφορά φάσης στην στατική διαμόρφωση του υμένα

Κλίση 1,3°

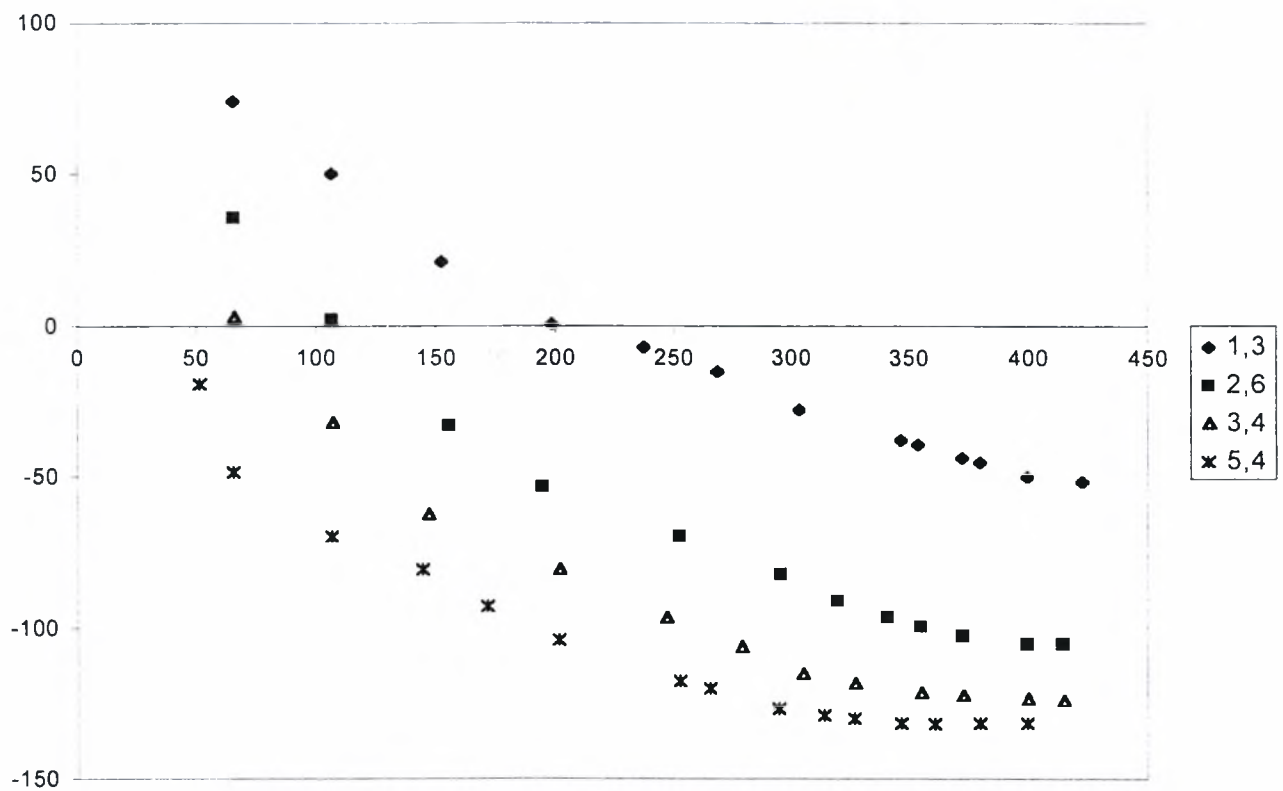


Σχήμα 4.2.10: Διαφορά φάσης στην στατική διαμόρφωση του υμένα
Κλίση $2,6^\circ$



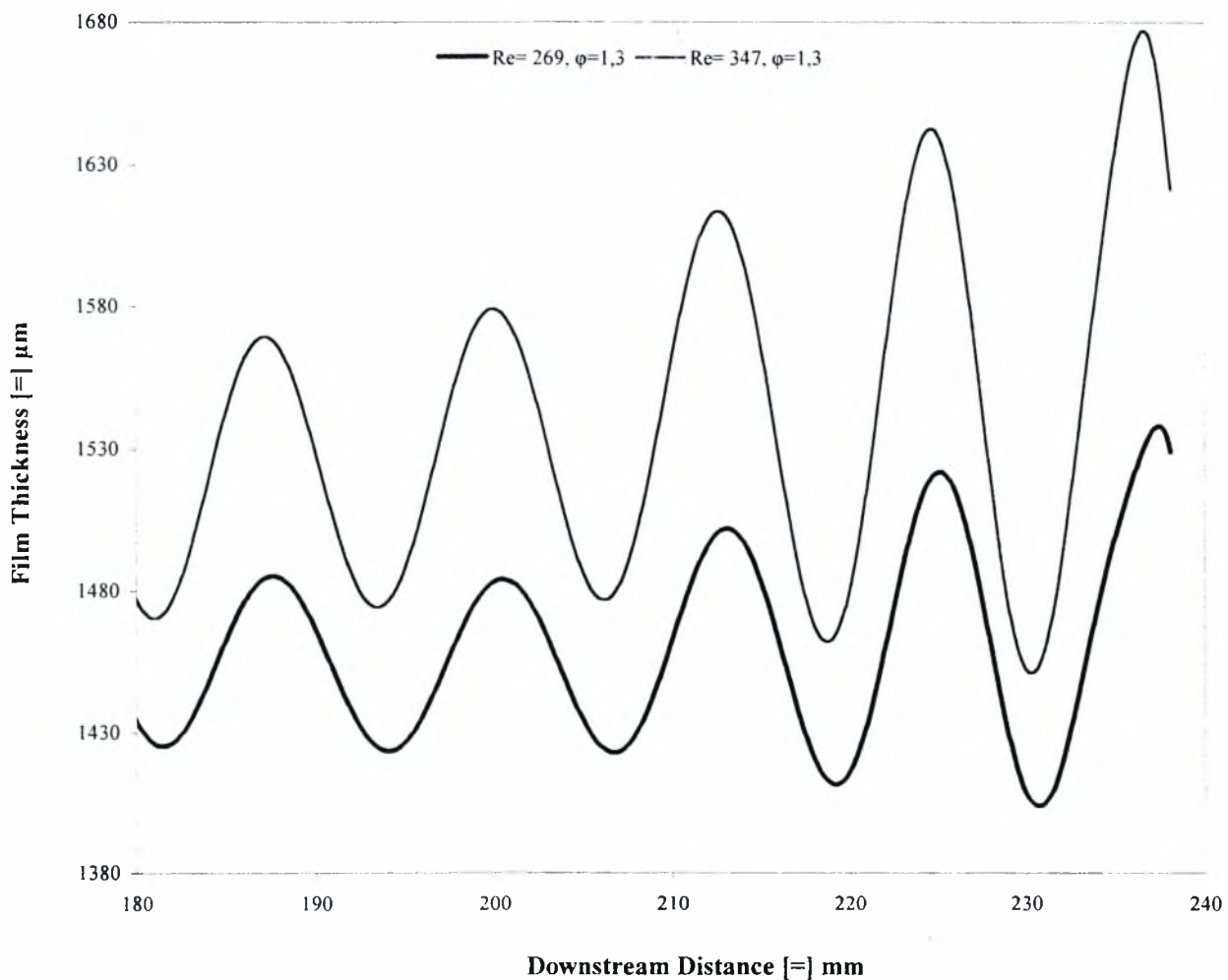
Σχήμα 4.2.11: Διαφορά φάσης στην στατική διαμόρφωση του υμένα
Κλίση $3,4^\circ$

Συγκεντρωτικά το επόμενο γράφημα παρουσιάζει την μεταβολή της διαφοράς φάσης της ελεύθερης επιφανείας του υμένα με το τοίχωμα, σε μοίρες, συναρτήσει του αριθμού Re, για όλες τις κλίσεις που έχουμε πειραματικά δεδομένα.



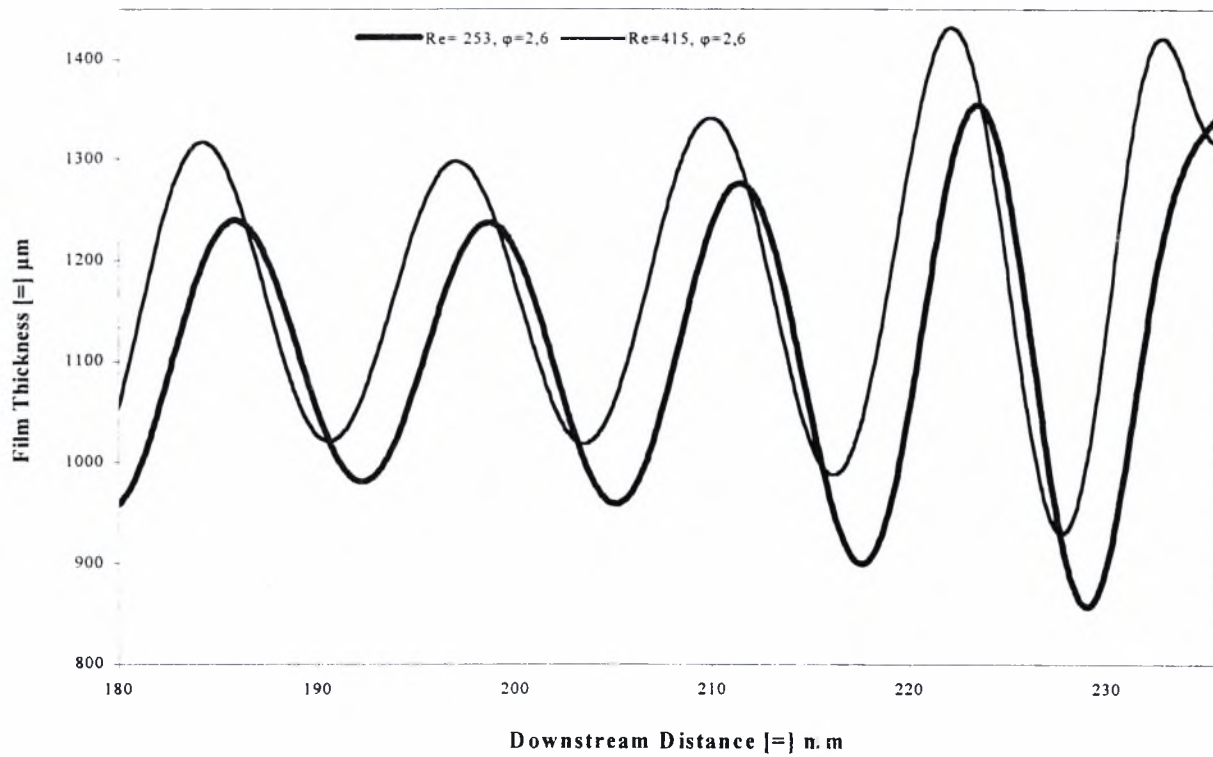
Σχήμα 4.2.12: Μεταβολή της διαφοράς φάσης στην θέση 'Α'

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι η διάφορα φάσης του υμένα σε σχέση με το τοίχωμα και το πλάτος των κυμάτων της ελεύθερης επιφάνειάς του μεταβάλλονται. Τα δύο αυτά φαινόμενα εξετάστηκαν ποιοτικά για τις περιοχές πάνω από τα πρώτα μήκη κύματος του τοιχώματος στις προηγούμενες σελίδες. Πάνω από τα αμέσως επόμενα μήκη κύματος, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στις εικόνες που λαμβάνει η κάμερα στην θέση 'Α', παρατηρείται εκτός από αύξηση του πλάτους με την αύξηση του αριθμού Re και αύξηση του πλάτους $2a$ κατάντη της ροής. Αυτό επιχειρούν να δείξουν τα σχήματα (4.2.13), (4.2.14) και (4.2.15) που ακολουθούν. Σε αυτή τη περιοχή ο υμένας συνεχίζει να έχει μια σχεδόν ημιτονοειδή διαμόρφωση με μήκος κύματος αυτό του τοιχώματος.

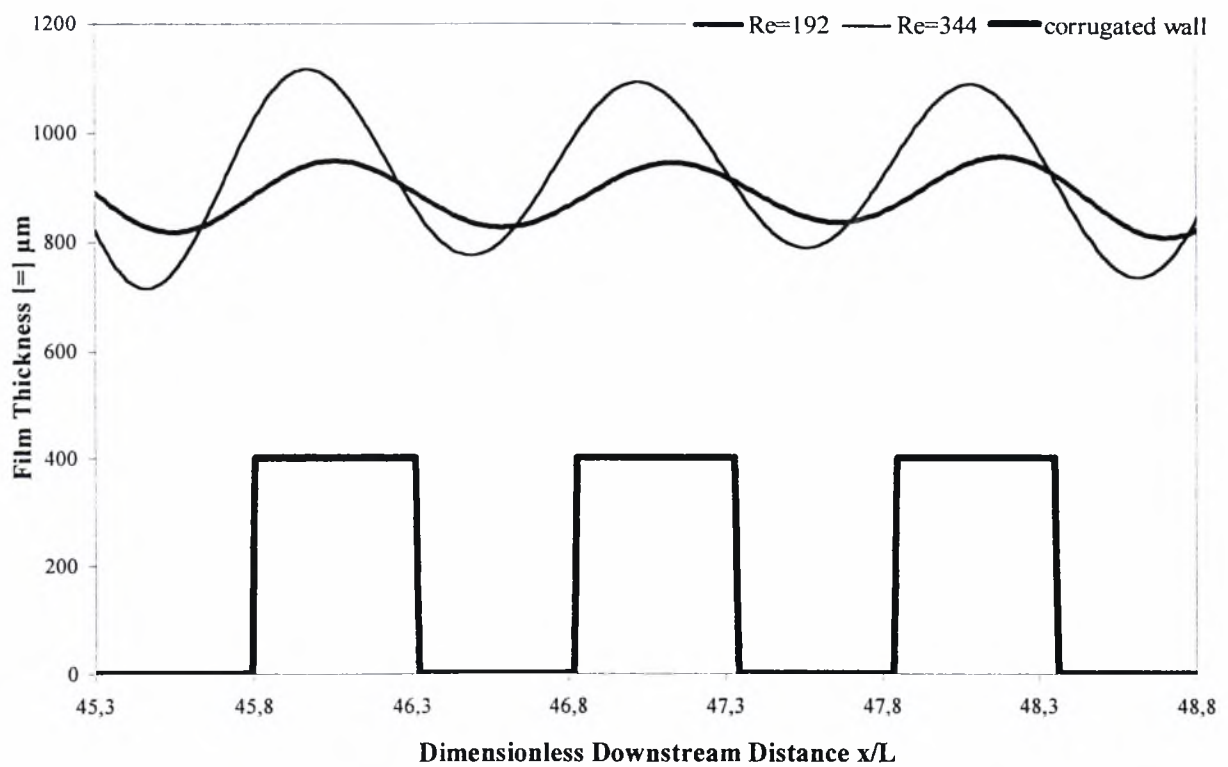


Σχήμα 4.2.13: Το πλάτος $2a$ αυξάνει, αυξανόμενου του αριθμού Re

Κλίση $1,3^\circ$



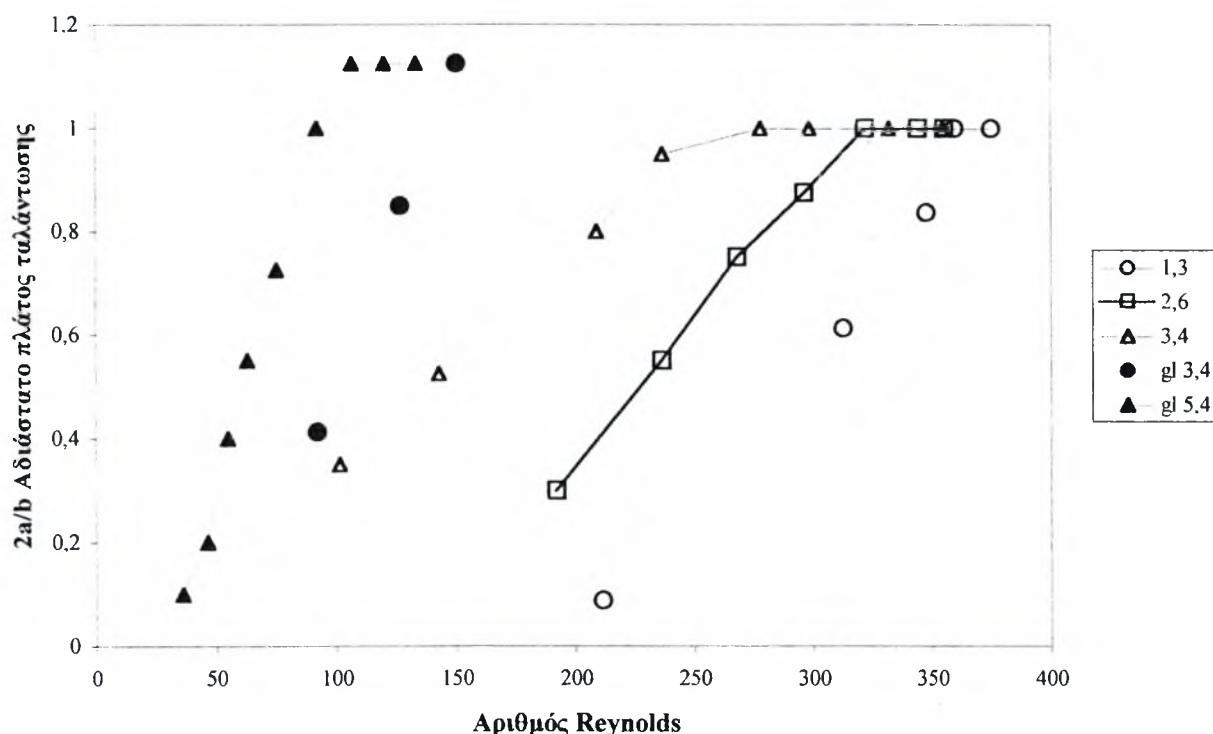
Σχήμα 4.2.14: Το πλάτος 2α αυξάνει, αυξανόμενου του αριθμού Re
Κλίση 2,6°



Σχήμα 4.2.15: Το πλάτος 2α αυξάνει, αυξανόμενου του αριθμού Re

Το φαινόμενο της αύξησης του πλάτους κατάντη της ροής υποδηλώνει την περιοχή όπου αρχίζει η μετάβαση από την περιοχή στατικής διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα στην περιοχή της αστάθειας.

Τέλος, συγκεντρωτικά, στο επόμενο σχήμα (4.2.16) φαίνεται η επίδραση της αύξησης του αριθμού Reynolds στο πλάτος της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα για διάφορες κλίσεις του καναλιού και για τα δυο διαφορετικά υγρά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, δηλαδή το νερό και το διάλυμα νερού – γλυκερίνης 26% κ.β.



Σχήμα 4.2.16: Μεταβολή του πλάτους $2a$ με την αύξηση του αριθμού Reynolds

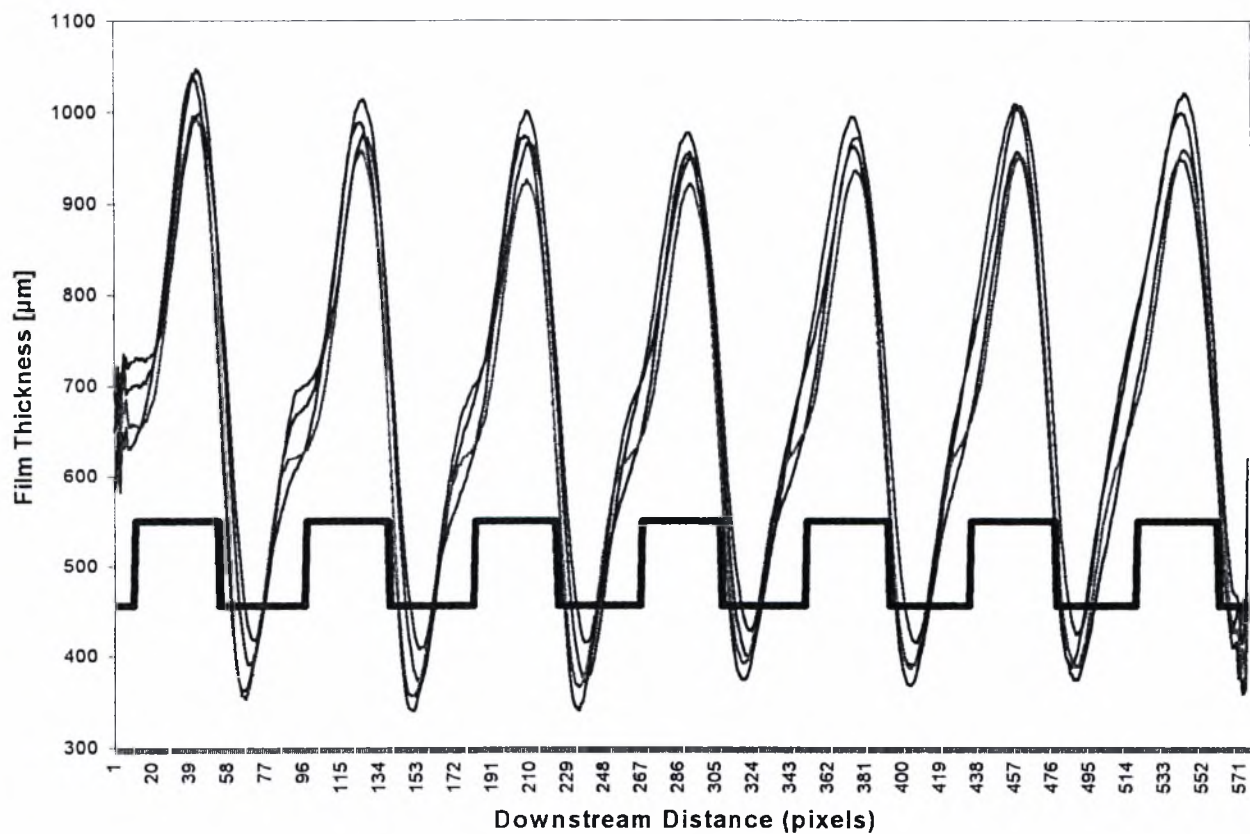
Είναι εμφανές και για το νερό και για το διάλυμα νερού – γλυκερίνης ότι το πλάτος της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα αυξάνει γραμμικά με την αύξηση του αριθμού Reynolds της ροής. Παρ' όλα αυτά παρατηρούμε ότι για όλες τις κλίσεις υπάρχει ένα μέγιστο πλάτος το οποίο η ροή δεν μπορεί να υπερβεί όσο και αν αυξάνει ο αριθμός Re. Το συγκεκριμένο φαινόμενο συμβαίνει εξ' αιτίας της εμφάνισης εγκάρσιων τρισδιάστατων διαταραχών, δηλαδή εγκάρσιων κοιλωμάτων. Από αυτό το σημείο και μετά η ροή σταθεροποιείται στην συγκεκριμένη κατάσταση.

4.2.2 Ασταθής Περιοχή

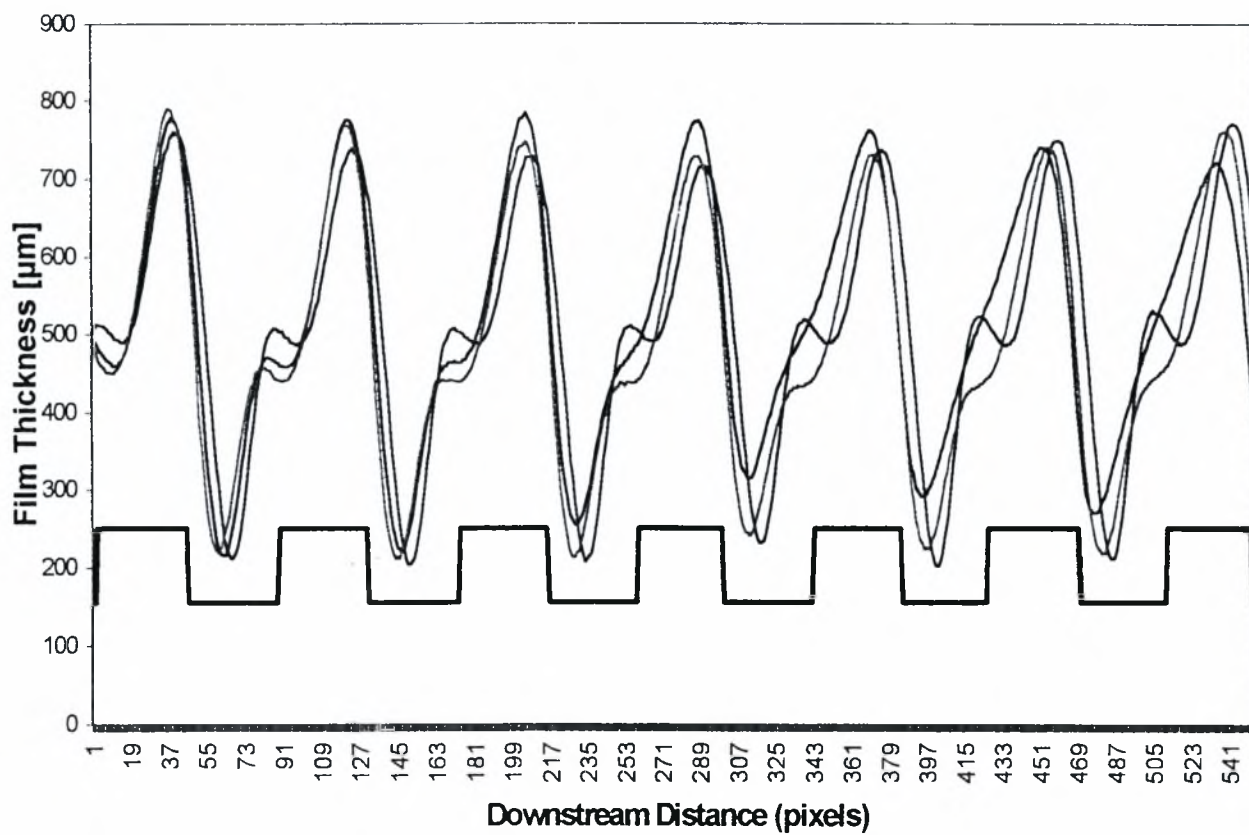
Η προηγούμενη ενότητα ήταν αφιερωμένη στην στατική διαμόρφωση της ελεύθερης επιφανείας υγρού υμένα που ρέει πάνω σε κυματοειδές τοίχωμα. Η παρούσα ενότητα αναφέρεται στις περιοχές ροής όπου ο υμένας είναι ασταθής στη διαμόρφωσή του σε σχέση με το χρόνο.

Η μετάβαση από την πρώτη στη δεύτερη περιοχή πραγματοποιείται σταδιακά. Αρχικά η διαφορά φάσης της διαμόρφωσης της επιφανείας με το τοίχωμα μεταβάλλεται με το χρόνο. Παρατηρείται επίσης και μεταβολή του πλάτους της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφανείας του υμένα. Στη συνέχεια, καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνεται, εμφανίζονται σολιτονικά κύματα τα οποία υπερτίθενται της ροής με στατική διαμόρφωση επιφάνειας.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταβολής του πλάτους και της διαφοράς φάσης παρουσιάσουν τα σχήματα (4.2.17) και (4.2.18) που ακολουθούν. Πρόκειται για προφίλ του υμένα σε τέσσερις διαδοχικές χρονικές στιγμές

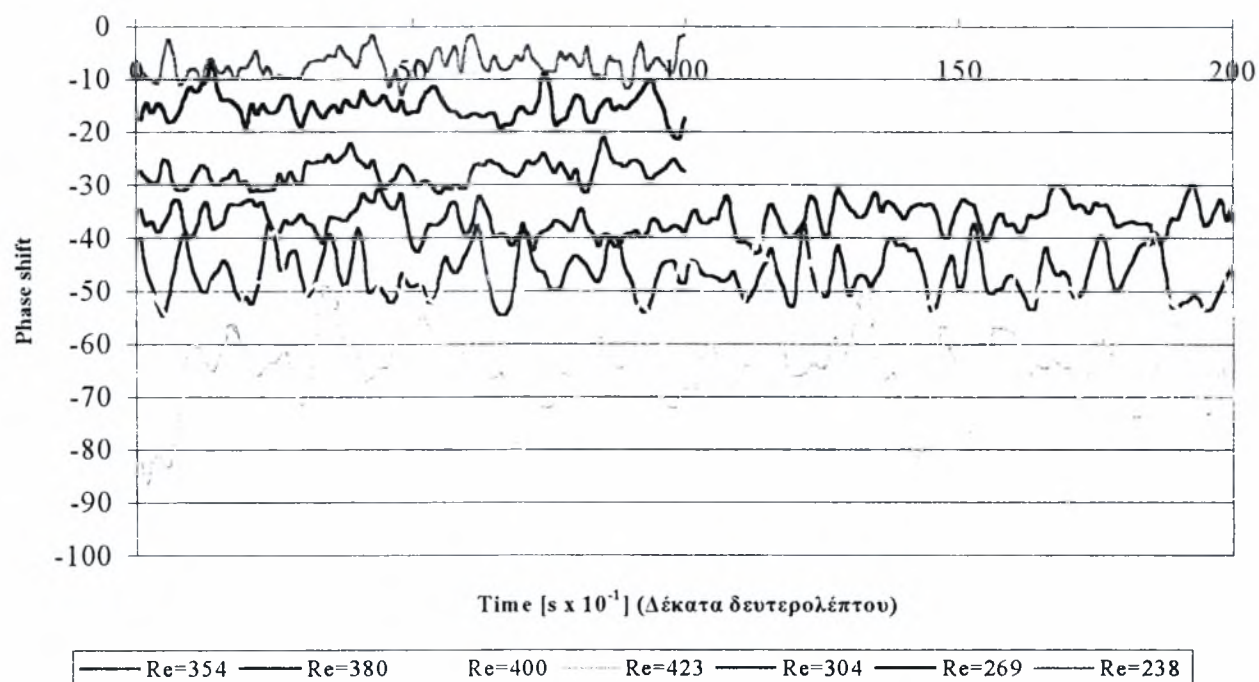


Σχήμα (4.2.17): Μεταβολή πλάτους και φάσης για κλίση $2,6^\circ$ και Re 320 στη θέση 'A'

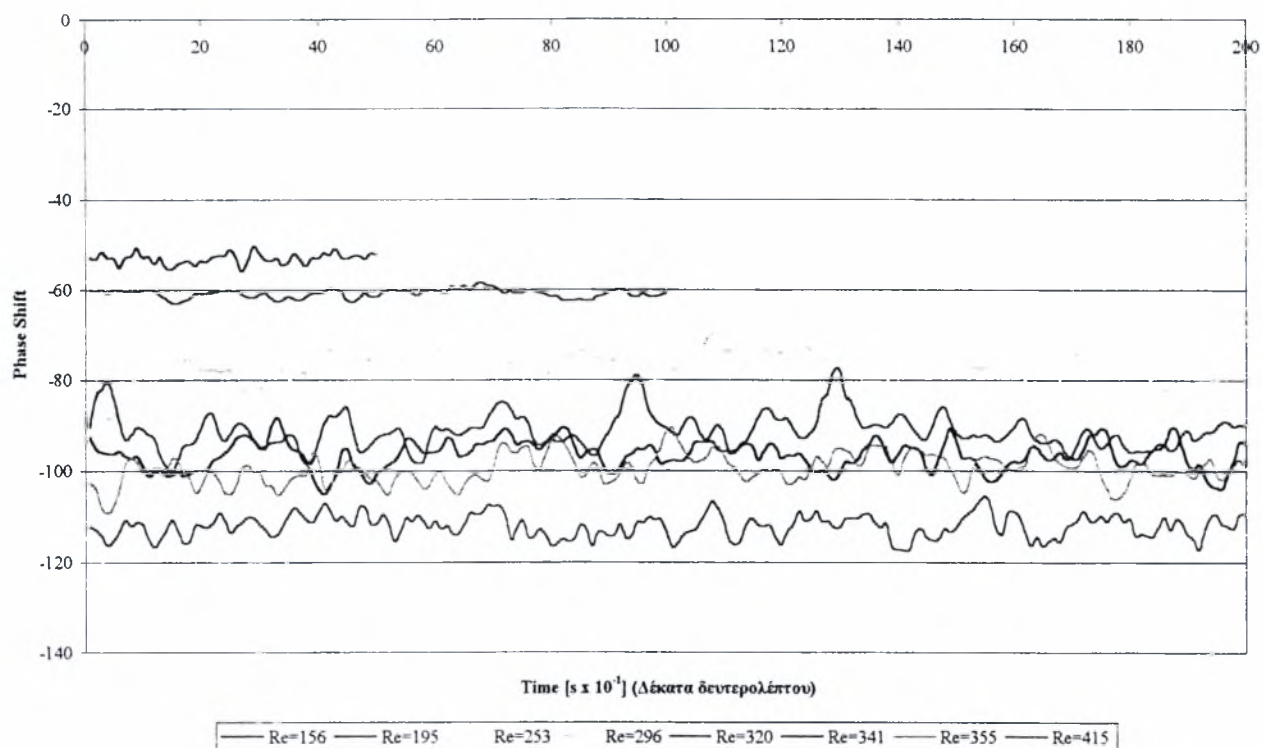


Σχήμα (4.2.18): Μεταβολή πλάτους και φάσης για κλίση $3,4^\circ$ και $Re\ 279$ στη θέση 'A'

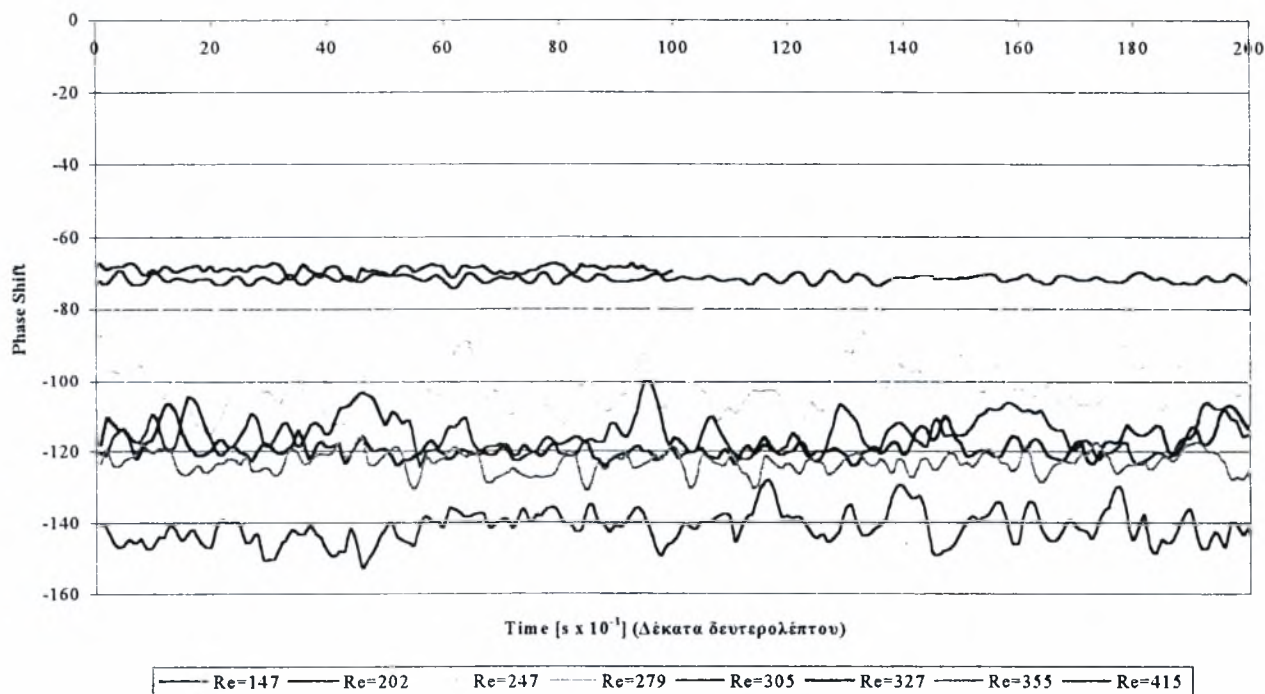
Στην παρακάτω ακολουθία σχημάτων απεικονίζεται συγκεντρωτικά η μεταβολή της διαφοράς φάσης της ελεύθερης επιφανείας του υμένα σε σχέση με το περιοδικό τοίχωμα για κάθε αριθμό Reynolds για τον οποίο έχουμε πειραματικά δεδομένα. Τα γραφήματα είναι ομαδοποιημένα κατά κλίση του καναλιού. Οι εικόνες έχουν ληφθεί σε απόσταση 154 χιλιοστά (mm) από την αρχή του καναλιού, στην λεγόμενη 'θέση Α'. Όπως έχει προαναφερθεί πάνω από τα πρώτα μήκη κύματος του τοιχώματος ο υμένας λαμβάνει στατική διαμόρφωση, για αυτό τα συγκεκριμένα γραφήματα απεικονίζουν τις επόμενες περιοχές όπου φαίνεται η μετάβαση στην ασταθή περιοχή. Έτσι έχουν προκύψει τα σχήματα (4.2.19), (4.2.20), (4.2.21) και (4.2.22).



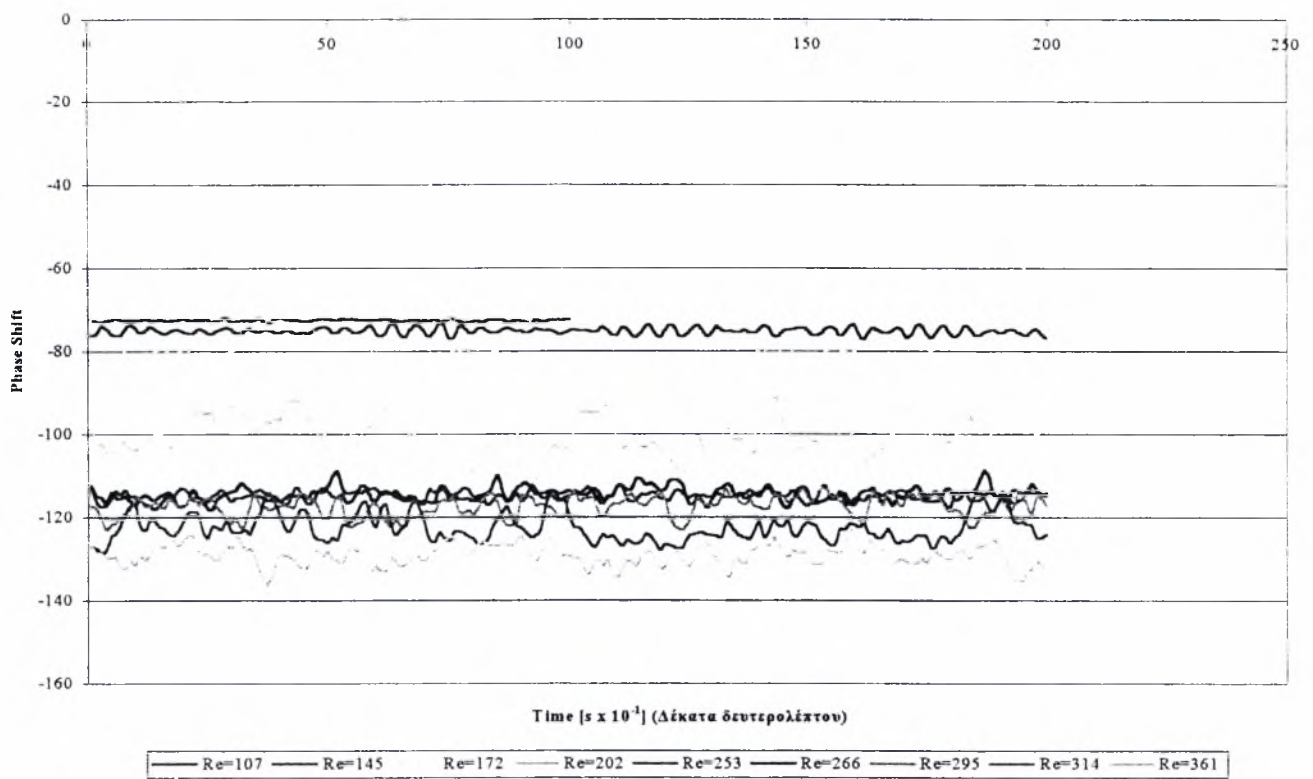
Σχήμα 4.2.19: Κλίση 1,3°. Μεταβολή της διαφοράς φάσης υμένα - τοιχώματος



Σχήμα 4.2.20: Κλίση 2,6°. Μεταβολή της διαφοράς φάσης υμένα – τοιχώματος

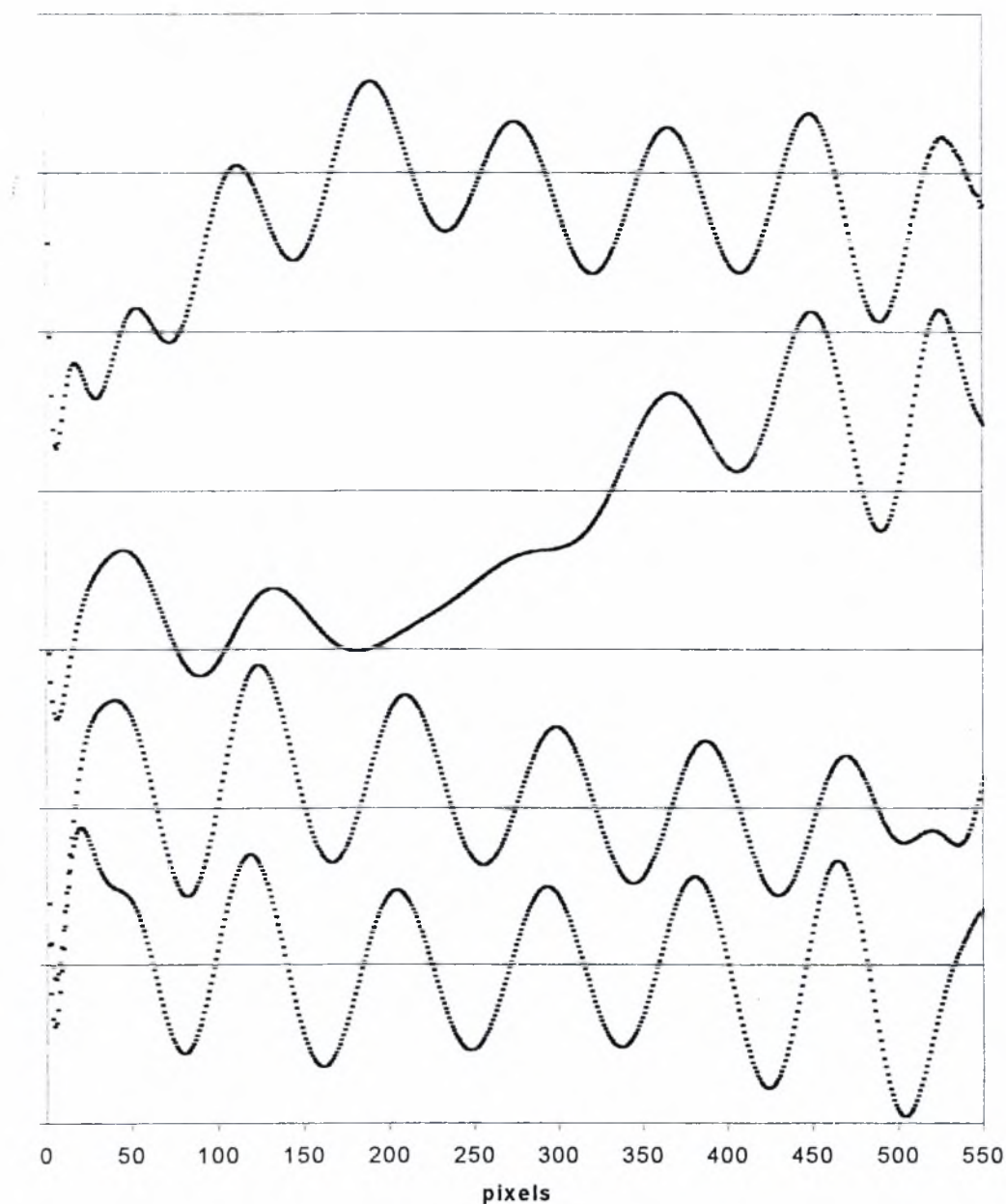


Σχήμα 4.2.21: Κλίση 3,4°. Μεταβολή της διαφοράς φάσης υμένα - τοιχώματος



Σχήμα 4.2.22: Κλίση $5,4^\circ$. Μεταβολή της διαφοράς φάσης υμένα - τοιχώματος

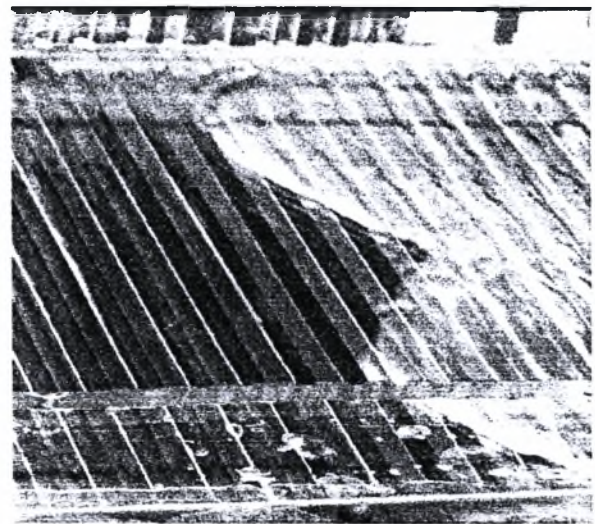
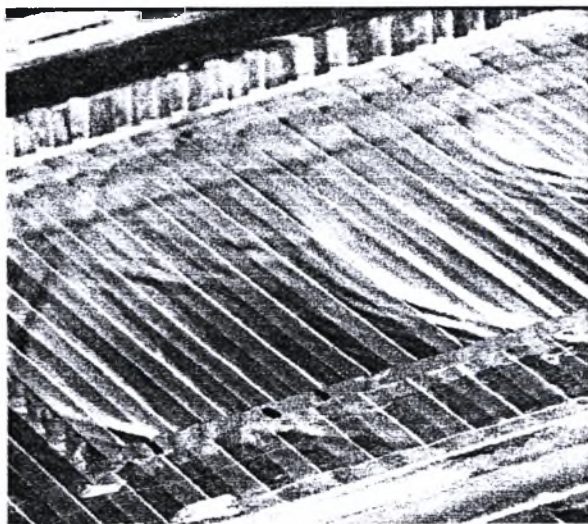
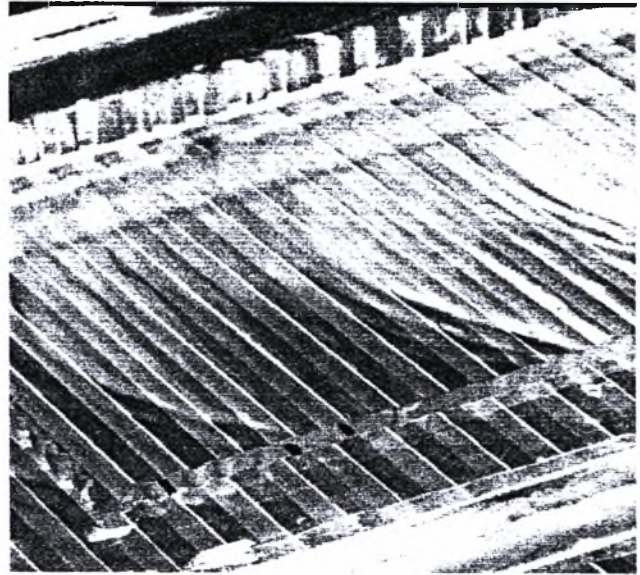
Στη συνέχεια και με την σταδιακή αύξηση του αριθμού Re , κατάντη της ροής, κάνουν την εμφάνισή του σολιτονικά κύματα. Στην παρακάτω ακολουθία σχημάτων φαίνονται διαγράμματα γραμμών κατατομής (Line Profiles) που απεικονίζουν διαδοχικές χρονικές στιγμές της ελεύθερης επιφανείας του υμένα κατά τη διέλευση σολιτονικού κύματος (natural solitary wave). Οι γραμμές έχουν τοποθετηθεί η μια πάνω από την άλλη για ευκολότερη παρατήρηση, σε καμία περίπτωση δεν υπονοείται ότι αυξάνεται το μέσο πάχος υμένα από τη μία στην άλλη.



Σχήμα 4.2.23: Χρονική εξέλιξη σολιτονικού κύματος

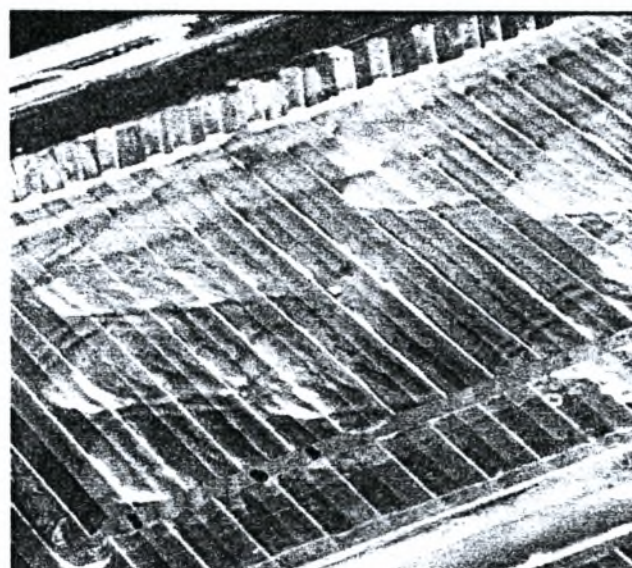
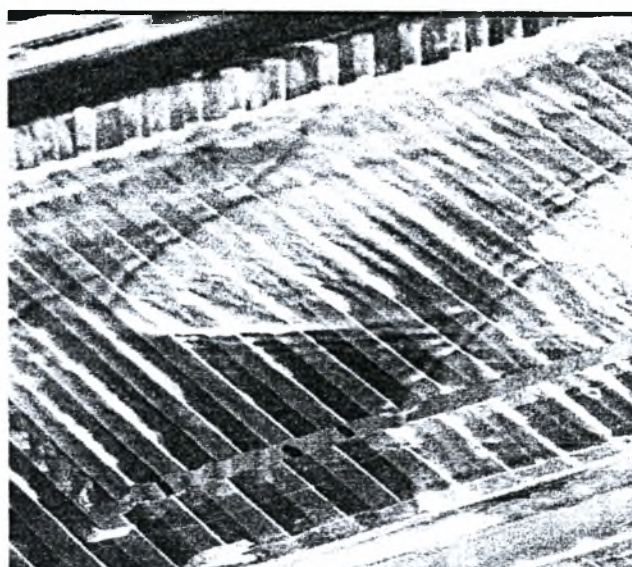
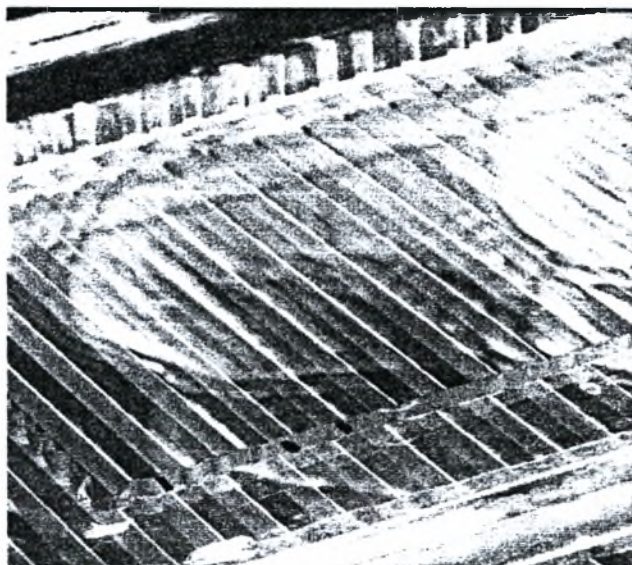
Ακολουθούν εικόνες σολιτονικών κυμάτων που έχουν ληφθεί με μία κάμερα υψηλής ταχύτητας, τη MotionScope της Redlake Imaging, με δυνατότητα λήψης χιλίων εικόνων το δευτερόλεπτο (1000 fr/s). Αυτή βρισκόταν τοποθετημένη δίπλα στο κανάλι, σε τέτοια θέση ώστε να λαμβάνει εικόνες υπό διαφορετικές γωνίες ως προς τη ροή. Πρόκειται για εικόνες οι οποίες έχουν ληφθεί κοντά στο τέλος του περιοδικού τοιχώματος.

Στην πρώτη εικόνα φαίνεται η διέλευση τριών σολιτονικών κυμάτων, ένα στο τέλος του καναλιού και δύο ακόμα να το ακολουθούν. Είναι επίσης ευδιάκριτα τα λεγόμενα 'bow waves' [14], μικρά κύματα δηλαδή με τη μορφή ρυτιδώσεων μπροστά από κάθε σολιτονικό. Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση τα κύματα έχουν σχεδόν διδιάστατη μορφή εκτεινόμενα σε όλο το εύρος του καναλιού.



Στη δεύτερη εικόνα και εμφανέστερα στην τρίτη, το μέτωπο του σολιτονικού κύματος έχει διαχωριστεί σε δυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το κύμα να έχει σπάσει σε δυο κύρια κύματα τα οποία κινούνται παράλληλα κατάντη της ροής.

Στις φωτογραφίες αυτής της σελίδας η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα είναι πιο ακαθόριστη λόγω της σταδιακής αύξησης του αριθμού Re . Διακρίνεται η εξέλιξη διαφόρων σολιτονικών κυμάτων τα οποία όμως έχουν πάρει πλέον τρισδιάστατη διαμόρφωση και πιο ακανόνιστο σχήμα από το κλασικό. Ιδιαίτερα στις δύο τελευταίες παρατηρείται η εξέλιξη κυματισμών με την μορφή 'horse shoe'.



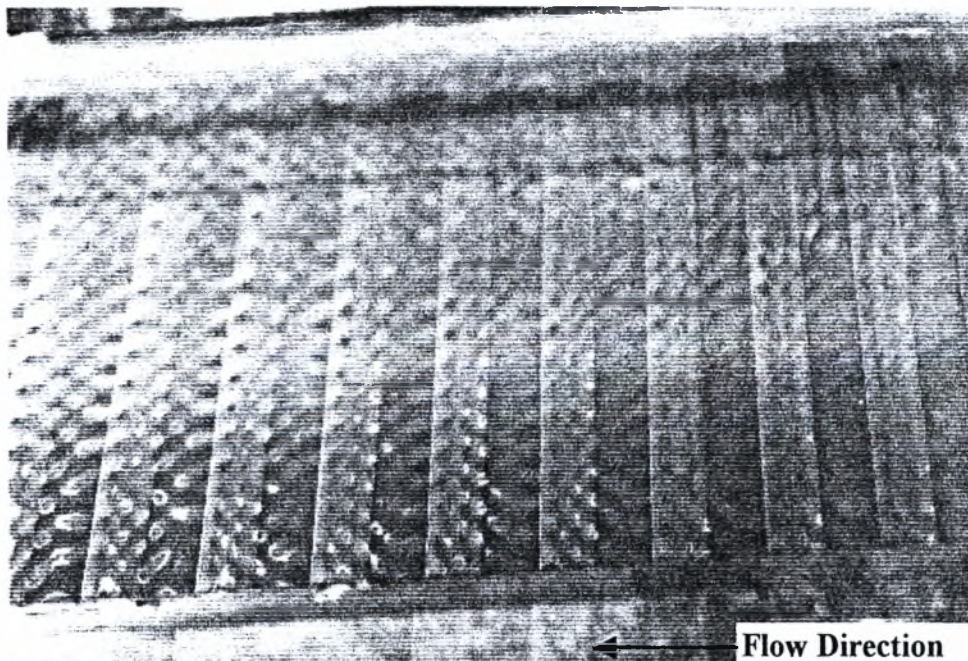
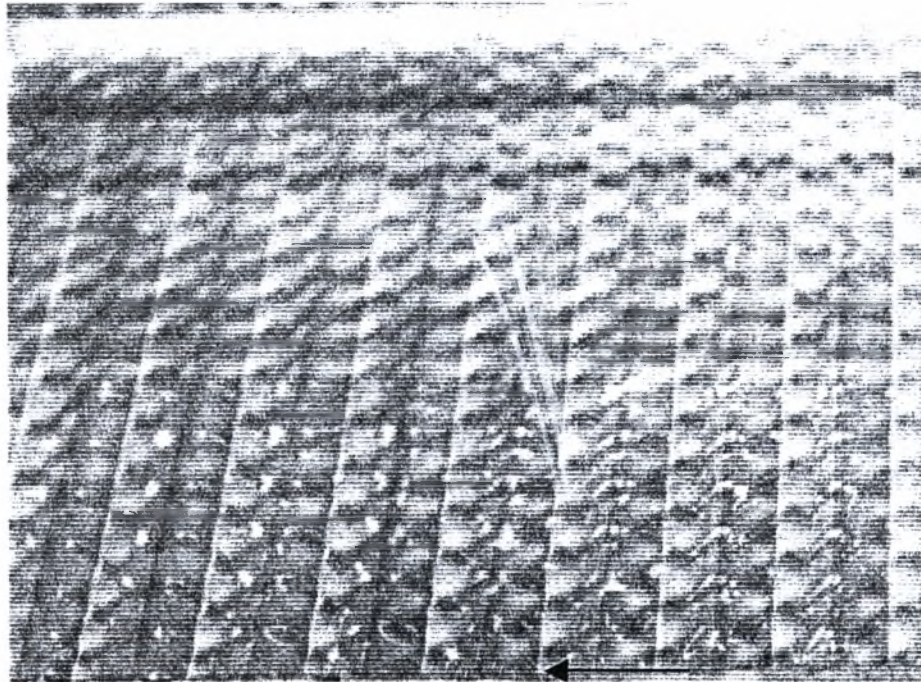
4.2.3 Τρισδιάστατη Αστάθεια

Τα δύο προηγούμενα υποκεφάλαια πραγματεύονταν δυο διαδοχικές διαμορφώσεις της ροής υγρού υμένα πάνω σε περιοδικό τοίχωμα. Την περιοχή όπου η ελεύθερη επιφάνεια λαμβάνει στατική διαμόρφωση και την ασταθή περιοχή η οποία χαρακτηρίζεται από δυο υποπεριοχές:

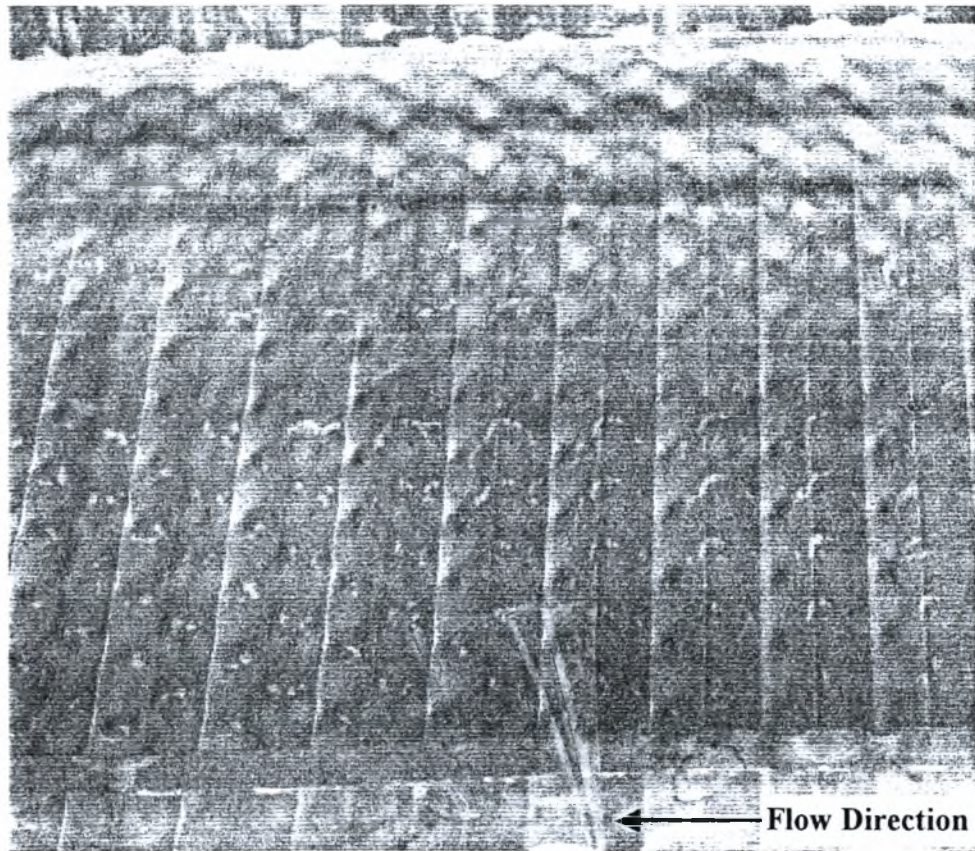
1. Την περιοχή στην οποία για συγκεκριμένο εύρος Re και γωνίας κλίσης ϕ η διάφορα φάσης της ελεύθερης επιφανείας με το τοίχωμα και το πλάτος ταλάντωσης $2a$ του υμένα εξαρτώνται από το χρόνο κατά τυχαίο τρόπο.
2. Την περιοχή όπου κατάντη της ροής έχουμε τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων.

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να επαναληφθεί ότι το κύριο αίτιο για την μετάβαση από την μια περιοχή ροής στην επόμενη είναι η σταδιακή αύξηση του αριθμού Reynolds της ροής. Παράλληλα σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η εκάστοτε κλίση του περιοδικού τοιχώματος. Η αναμενόμενη εξέλιξη του υμένα έγκειται στη δημιουργία χαοτικής δομής. Αντ' αυτού, στην περίπτωση του περιοδικού τοιχώματος, ένα είδος τρισδιάστατης αστάθειας φαίνεται να επηρεάζει τη ροή του υγρού υμένα. Αυτή χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση βαθουλωμάτων (depressions). Αυτά δείχνουν την τάση να τοποθετούνται πάνω από τις αυλακώσεις και τα υψώματα του τοιχώματος και φαίνεται να μετακινούνται μόνο κατά την εγκάρσια κατεύθυνση σε μια κίνηση ταλάντωσης. Τα βαθουλώματα αυτά είναι πιο ευδιάκριτα σε διαγράμματα ισοϋψών καμπυλών, σχήματα (4.2.28) και (4.2.29), που παράγονται από τις εικόνες (4.2.23-25) παρά σε αυτές καθ'αυτές τις εικόνες της αστάθειας. Η περιοχή τρισδιάστατης αστάθειας παρατηρείται για μεγάλους αριθμούς Re . Μετά την εμφάνισή της, η ροή σταθεροποιείται, μέχρι εξαντλήσεως του εύρους των αριθμών Re που εξετάζονταν σε κάθε πείραμα. Συνεπακόλουθο της εμφάνισης των τρισδιάστατων αυτών διαταραχών είναι και μια σχετική μείωση του μέσου πάχους του υμένα.

Τα σχήματα που ακολουθούν, (4.2.23), (4.2.24) και (4.2.25), παρουσιάζουν εικόνες που έχουν ληφθεί με την κάμερα υψηλής ταχύτητας MotionScope της Redlake Imaging, η οποία βρισκόταν τοποθετημένη δίπλα στο κανάλι, σε τέτοια θέση ώστε να λαμβάνει εικόνες υπό διαφορετικές γωνίες ως προς τη ροή. Σε αυτές τις εικόνες φαίνεται ευκρινώς η τρισδιάστατη αστάθεια που εμφανίζεται στο μεγαλύτερο μέρος του καναλιού όταν η ροή ξεπεράσει κάποιον αριθμό Re .

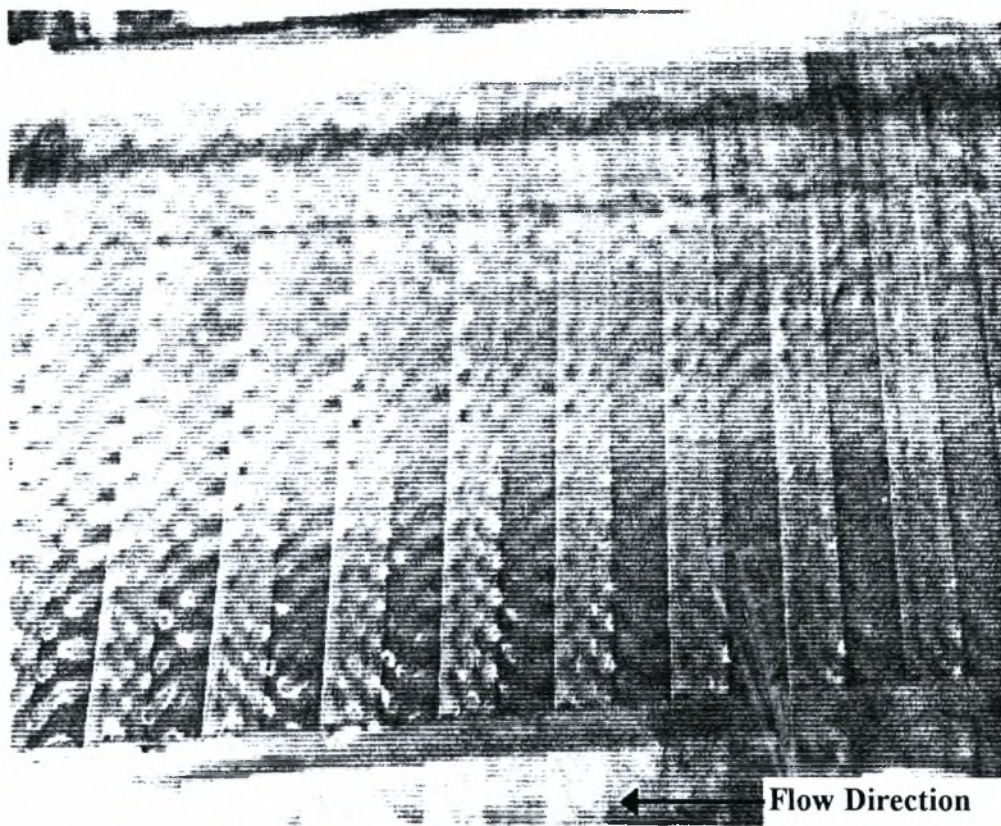


Σχήματα 4.2.23 και 4.2.24: Τρισδιάστατη αστάθεια

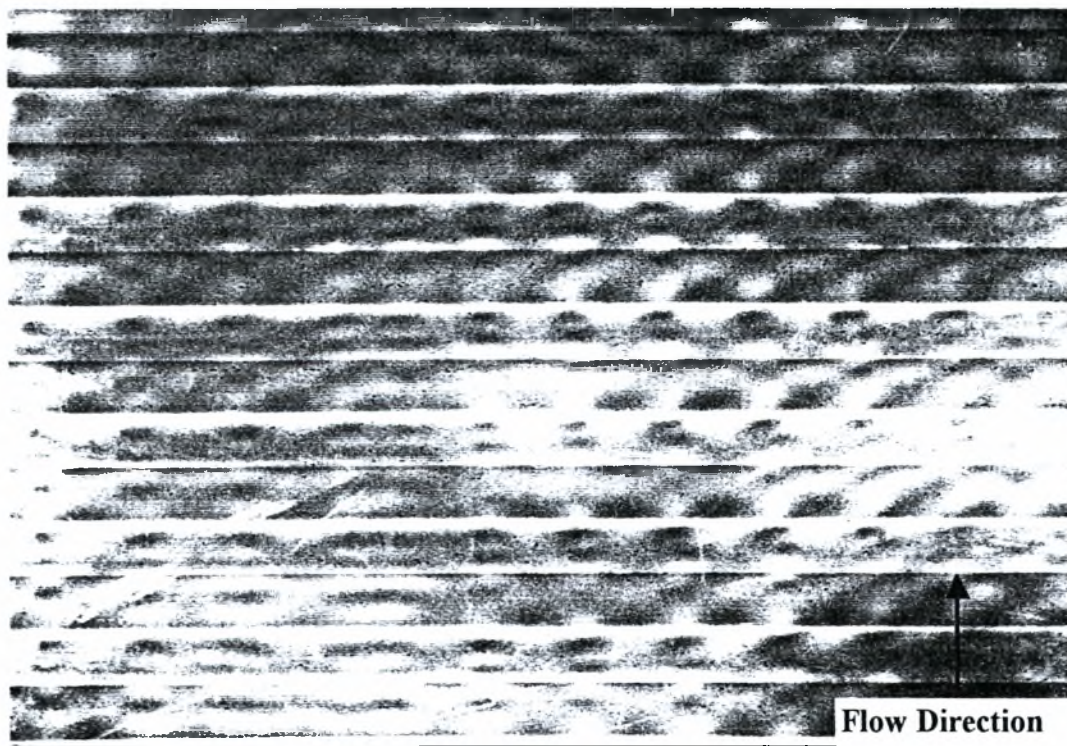


Σχήμα 4.2.25: Τρισδιάστατη αστάθεια

Τέλος, στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται δυο διαφορετικές απόψεις της τρισδιάστατης αστάθειας. Η πρώτη, σχήμα (4.2.26), προέρχεται από την κάμερα MotionScope της Redlake Imaging και έχει ληφθεί υπό γωνία ως προς τη ροή. Η δεύτερη, σχήμα (4.2.27), προέρχεται από τη ψηφιακή Sony ACT-77/77CE που βρισκόταν τοποθετημένη κατακόρυφα κάτω από τη ροή. Πρόκειται για την κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό κατά λήψη όλων των εικόνων του πειραματικού σκέλους αυτής της διπλωματικής εργασίας και περιγράφεται πιο εκτεταμένα στο 2^ο και το 3^ο κεφάλαιο.

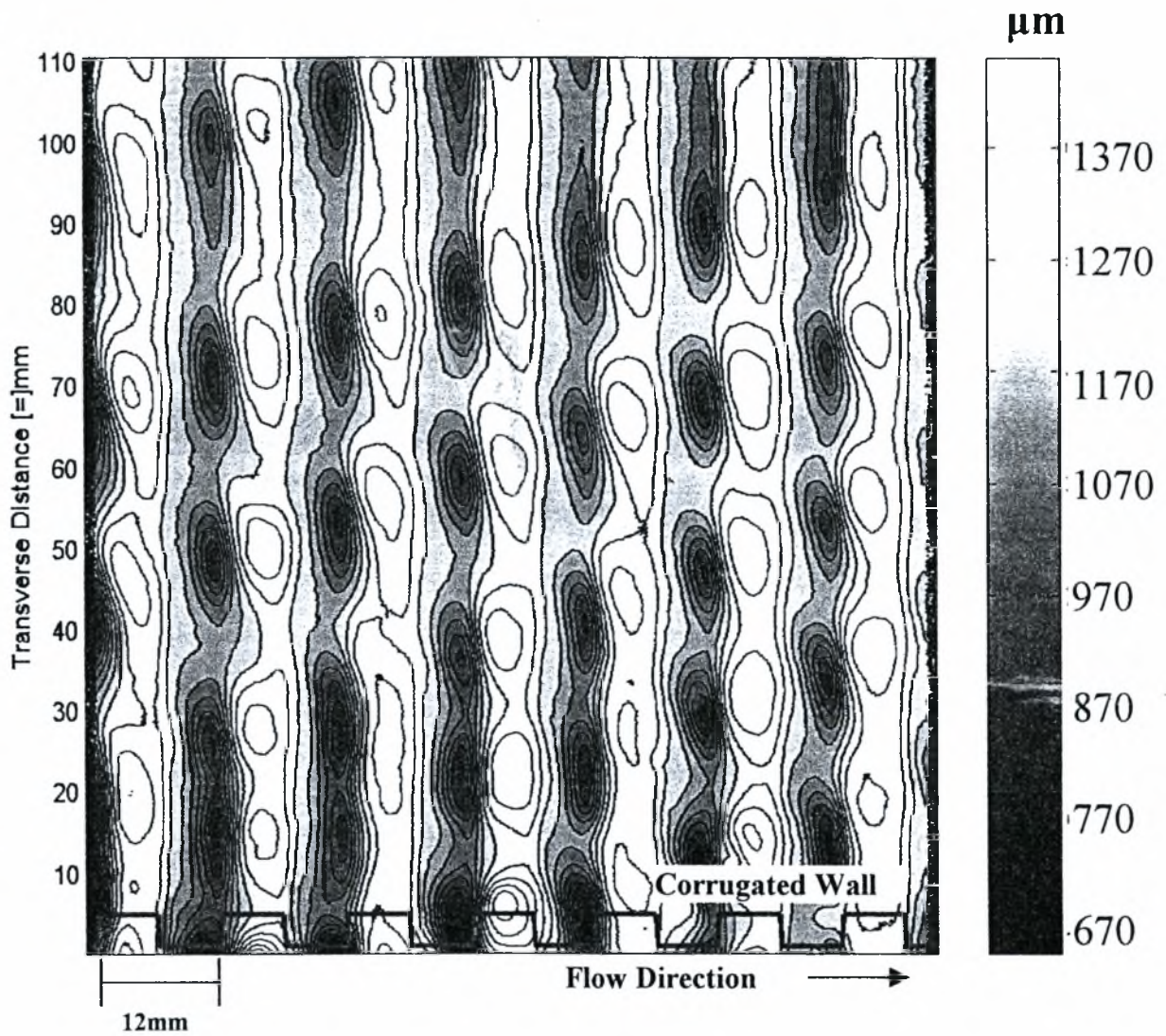


Σχήμα 4.2.26: Τρισδιάστατη αστάθεια υπό γωνία

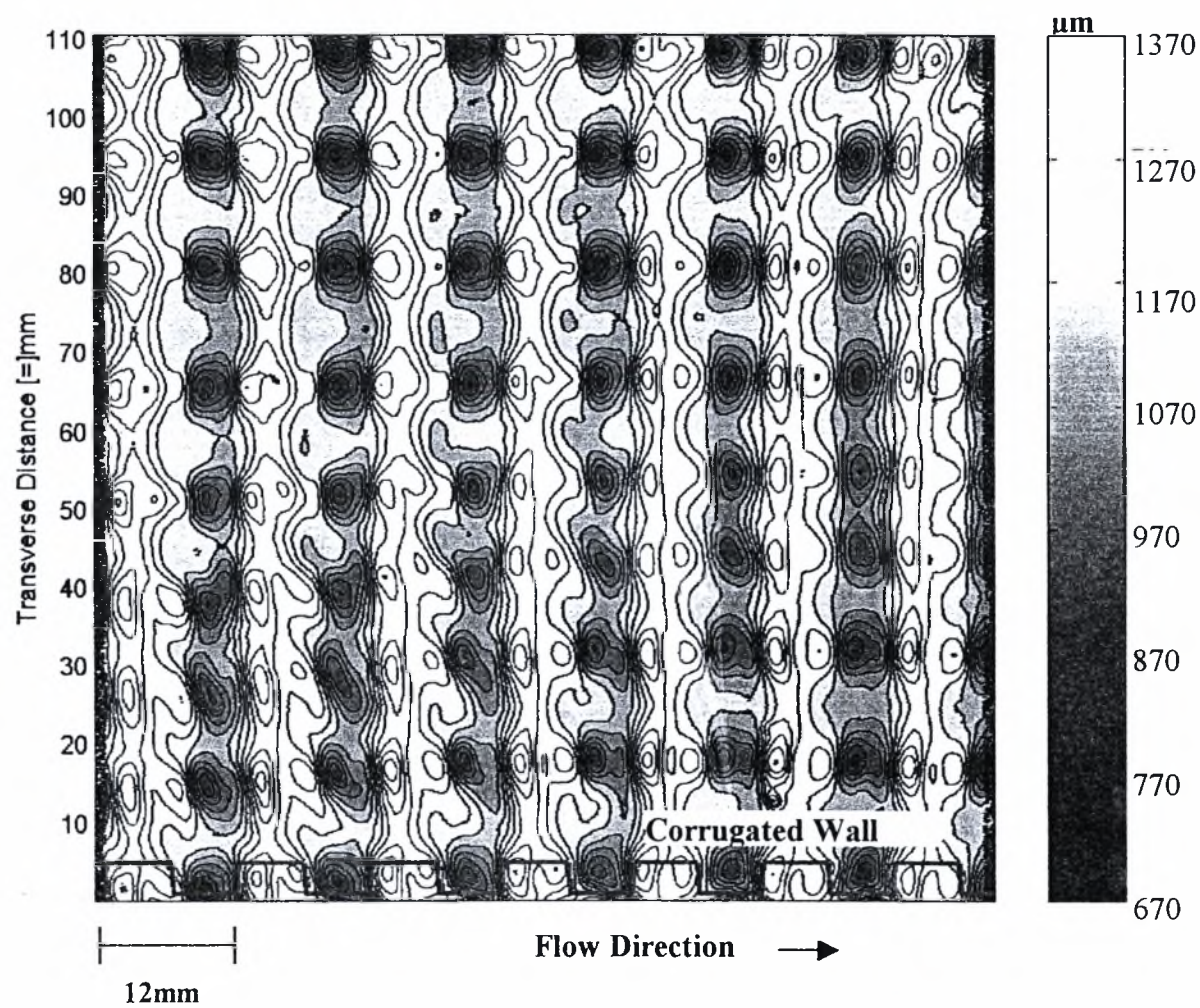


Σχήμα 4.2.27: Τρισδιάστατη αστάθεια κατακόρυφα από κάτω

Με την βοήθεια της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό και με την διαδικασία που έχει περιγραφεί εκτενώς στο τρίτο (3^ο) κεφαλαίο αυτής της εργασίας, έχουν παραχθεί και οι ισοϋψείς καμπύλες (isocontours) των σχημάτων (4.2.28) και (4.2.29). Αυτές απεικονίζουν τις τρισδιάστατες αστάθειες (depressions) των προηγούμενων φωτογραφιών.



Σχήμα 4.2.28: Ισοϋψείς καμπύλες (isocontours) σε τρισδιάστατη αστάθεια



Σχήμα 4.2.29: Ισοϋψείς καμπύλες (isocountours) σε τρισδιάστατη αστάθεια

Συμπεράσματα

Από την πειραματική μελέτη της διαμορφώσεως της ελεύθερης επιφανείας υγρού υμένα που ρέει πάνω από περιοδικό τοίχωμα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Πάνω από τα πρώτα πέντε με επτά (5 – 7) μήκη κύματος του τοιχώματος, στην αποκαλούμενη περιοχή έναρξης (inception region) [14], η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφανείας του υμένα είναι στατική, δηλαδή δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Ο υμένας παίρνει την μορφή της πρώτης, της θεμελιώδους αρμονικής του περιοδικού ορθογωνικού τοιχώματος, δηλαδή της ημιτονοειδούς καμπύλης. Το μήκος κύματος της ημιτονοειδούς διαμορφώσεως της ελεύθερης επιφανείας του υμένα είναι ίδιο με αυτό του τοιχώματος ενώ εμφανίζεται διαφορά φάσης εξαρτώμενη από τον αριθμό Reynolds και τη γωνία κλίσης του τοιχώματος. Το πλάτος της διαμόρφωσης του υμένα $2a$ εξαρτάται και αυτό από τον αριθμό Re και την γωνία κλίσης του τοιχώματος. Όσο αυξάνει ο αριθμός Reynolds της ροής, ο ρόλος των αρμονικών υψηλότερας τάξεως του τοιχώματος γίνεται σημαντικότερος, με αποτέλεσμα την ανάλογη διαμόρφωση του υμένα.

Αυξανόμενου του αριθμού Reynolds της ροής και για όλες τις κλίσεις στις οποίες εκτελέστηκαν πειράματα, φάνηκε ότι σε μεγαλύτερες αποστάσεις κατάντη της ροής, λαμβάνουν χώρα φαινόμενα που υποδηλώνουν την μετάβαση από την περιοχή στατικής διαμορφώσεως της ελεύθερης επιφανείας του υμένα στην ασταθή περιοχή. Η διάφορα φάσης του υμένα με το τοίχωμα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τον χρόνο, πράγμα που παρατηρείται και για το πλάτος της διαμόρφωσής του.

Κατόπιν, και ενώ συνεχίζεται η αύξηση του αριθμού Re, κατάντη της ροής, κάνουν την φυσική εμφάνισή τους σολιτονικά κύματα (solitary waves) τα οποία υπερτίθενται της περιοδικής διαμορφώσεως του υμένα. Αρχικά τα σολιτονικά κύματα είναι διδιάστατα ενώ στη συνέχεια τα μέτωπά τους διαχωρίζονται, η ροή γίνεται πιο χαοτική και εμφανίζονται κύματα με την μορφή “horse shoe”.

Σε αντίθεση με ότι αναφέρεται πως συμβαίνει για ροή πάνω σε επίπεδο τοίχωμα, σύμφωνα πάντα με την βιβλιογραφία [6,7] αλλά και παλιότερα πειραματικά αποτελέσματα, η ροή στη συνέχεια δεν γίνεται χαοτική. Αντιθέτως παρατηρήθηκε μία τρισδιάστατη διαμόρφωση που χαρακτηρίζεται από βαθουλώματα (depressions) που τοποθετούνται πάνω από τις αυλακώσεις

και τα υψώματα του περιοδικού τοιχώματος. Μετά την μετάβαση στην περιοχή της τρισδιάστατης αστάθειας, η ροή σταθεροποιείται.

Βιβλιογραφία

1. **Bontozoglou, V.** (2000): Laminar Film Flow along a Periodic Wall. *CMES*, **1**, 129-138
2. **Bontozoglou, V. and Papapolymerou, G.** (1996): Laminar Film Flow down a Wavy Incline. *Int. J. Multiphase Flow*, **23**, 69-79
3. **Malamataris, N. A. and Bontozoglou, V.** (1999): Computer Aided Analysis of Viscous Film Flow along an Inclined Wavy Wall. *Journal of Computational Physics*, **154**, 372-392
4. **Trifonov, Yu. Ya.** (1998): Viscous Liquid Film Flows over a Periodic Surface. *International Journal of Multiphase Flow*, **24**, 1139-1161
5. **Liu, J., Paul, J.D., Gollub, J.P.** (1993): Three-Dimensional Instabilities of Film Flows. *J. Fluid Mechanics*, **250**, 69-101
6. **Benjamin, T. B.** (1957): Wave Formation in Laminar Flow down an Inclined Plane. *J. Fluid Mech.*, **2**, 554-574.
7. **Benney, D. J.** (1966): Long Waves on Liquid Films. *J. Math. And Phys.*, **45**, 150-155
8. **Fair, J. R. and Bravo, J. L.** (1990): Distillation Columns Containing Structured Packing. *Chem. Eng. Prog.*, **86**, 19-29
9. **Yih, C. S.** (1963): Stability of Liquid Flow down an Inclined Plane. *Phys. Fluids*, **6**, 321-334
10. **Shetty, L. and Cerro, R. L.** (1992): Flow of a Thin Film over a Periodic Surface. *Int. J. Multiphase Flow*. **18**, 495-516
11. **Pozrikidis, C.** (1988): The Flow of a Liquid Film along a Periodic Wall. *J. Fluid Mech.* **188**, 275-300
12. **Shetty, L. and Cerro, R. L.** (1993): Flow of a Thin Film over a Periodic Surface. *Int. J. Multiphase Flow*. **19**, 1013-1027
13. **Zhao, L. and Cerro, R. L.** (1993): Experimental Characterization of Viscous Film Flows over Complex Surfaces. *Int. J. Multiphase Flow*. **18**, 495-516
14. **Chang, H. C.** (1994) : Wave Evolution on a Falling Film. *Ann. Rev. Fluid Mech.* **26**, 103-136
15. **Nakoryakov, V. Ye., Pokusaev, B. G. and Alekseenko, S. V.** (1976): Stationary Two-Dimensional Rolling Waves on a Vertical Film of Fluid. *Inzh. Fiz.* **30**, 780-785

16. **Alekseenko, S. V., Nakoryakov, V. Ye. and Pokusaev, B. G.** (1985): Wave Formation on a Vertical Falling Liquid Film. *AIChE Journal*. **31**, No. 9, 1446-1460
17. **Liu, J., Gollub, J.P.** (1994): Solitary Waves Dynamics of Film Flows. *Phys. Fluids*. **6**, No. 5, 1702-1711
18. **Liu, J., Schneider, J. B. and Gollub, J.P.** (1994): Three-Dimensional Instabilities of Film Flows. *Phys. Fluids*, **7**, No. 1, 55-67
19. **Παπαϊωάννου, Α.** (1993): Μηχανική των Ρευστών. *Τόμος Α & Β*,
20. **Εδιπίδη, Χ. Θ.** (2000): Πειραματική Μελέτη της Ροής Υγρού Υμένα σε Κεκλιμένο Τοίχωμα. *Μεταπτυχιακή Εργασία Π.Θ.*
21. **Σπήλιος, Δ.** (1999): Παρατηρήσεις Μη Γραμμικών Φαινομένων και Τρισδιάστατων Ασταθειών Υγρού Υμένα. *Μεταπτυχιακή Εργασία Π.Θ.*
22. **Καραγιάννης, Κ.** (1999): Ανάπτυξη Οπτικής Τεχνικής για τη Μελέτη της Ροής Λεπού Υγρού Υμένα. *Διπλωματική Εργασία Π.Θ.*

Παράρτημα

Στον συγκεκριμένο χώρο θα μπορούσαν να παρουσιαστούν δείγματα από το πλήθος των εικόνων, ψηφιακοποιημένων και μη, που προέκυψαν κατά το πειραματικό μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας. Κρίνεται σκοπιμότερο να παρατεθούν οι κώδικες του MATLAB των οποίων η χρήση περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Κώδικας calcwavnew :

```
% This is an .m file for image processing
tic
echo off
%-----DATA READING-----
[row1,colu1,row2,colu2,selected_row,stepTRow,stepDistanceRow,selected_column,...
    stepTColumn,stepDistanceColumn]=textread('input.txt',...
    '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f',1,'headerlines',1);
[first1,WLo1,BLo1,number_of_images_steady1,time_delay1,distance_overflow1]=textread('input.txt',...
    '%s %f %f %f %f %f %f',1,'headerlines',4);
[first2,WLo2,BLo2,number_of_images_steady2,time_delay2,distance_overflow2]=textread('input.txt',...
    '%s %f %f %f %f %f %f',1,'headerlines',7);
%-----big loop-----
%[a,b,c,d,e,f]=textread('input.txt',...
% '%s %f %f %f %f %f',10,'commentstyle','c++')

    first1=char(first1)
    first2=char(first2)
    addition(1:576,1:768)=1.275;
% -----PRODUCE THE NOISE MATRIX-----
    Io1=double(imread('Io2','bmp'));
    Io1new=(Io1*((351.1-1.275)/255)+addition);
%----- FRAME AVERAGING -----
    qo1=(WLo1-BLo1)/255;
    BLo_matrix(1:576,1:768)=BLo1;
    total=zeros(576,768);
    for num=1:number_of_images_steady1
        temporary_matrix1=(double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'bmp'))*qo1)+BLo_matrix-
Io1new;
        first_elements(num)=temporary_matrix1(1:1);
        total=total+temporary_matrix1;
        Iomin=(total./number_of_images_steady1);
    end
    qo2=(WLo2-BLo2)/255;
    BLo_matrix(1:576,1:768)=BLo2;
    total=zeros(576,768);
    for num=1:number_of_images_steady2
        temporary_matrix1=(double(imread(strcat(first2,int2str(num)),'bmp'))*qo2)+BLo_matrix-Io1new;
        first_elements(num)=temporary_matrix1(1:1);
        total=total+temporary_matrix1;
        Iomax=(total./number_of_images_steady2);
```

```

end
Io=Iomax-Iomin;
%save (strcat('D:\matlabfigures\',strcat(strcat(figname,'timebegin',num2str(n1),'LP'),'LP'),'LP'),'LP'),'LP')
save(strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2))))

toc

```

Κώδικας wwcalibIoAll :

```

% This is an .m file for image processing
tic
namesV=textread('inputdisp.txt','%s','headerline',1);
K1=round(285);
K2=round(375);
hnusselt(1,1)=419.2-360.6
hnusselt(1,2)=466.15-360.6
hnusselt(1,3)=521.6-360.6
%hnusselt(1,4)=1076.95-360.6
ykk=round(0);
for k=K1:K2
    ykk=round(ykk+1)
    %ykk=round(1+(k-K1)*(K2-K1-1)/(K2-K1));
        for i=1:length(namesV)

                nameV=namesV(i);
                nam=char(nameV);
                load (nam)
                temp2(i,:)=Io(k,:);
                    calibcol=temp2;
                    %clear temp2
        end
            xxcal=hnusselt;
            vvc=calibcol';
    for j=1:768
            yyycal(j,:)=polyfit(xxcal,vvc(j,:),1);
    end
        for j=1:768
            acoef(ykk,j)=yyycal(j,1);
            bcoef(ykk,j)=yyycal(j,2);
        end
end
clear yyycal temp2
for i=1:length(namesV)
    nameV=namesV(i);
    nam=char(nameV);
    load (nam)
    nam
        temp(:,i)=Io(:,selected_column);
        calibrow=temp';
            for j=1:768
                temp2(i,j)=Io(selected_row,j);
            end
        calibcol=temp2;
end
xxcal=hnusselt;
vvc=calibrow';
            for j=1:576
                yyycal(j,:)=polyfit(xxcal,vvc(j,:),1);

```

```
        end
vocal=calibcol';
    for j=1:768
        yyycal(j,:)=polyfit(xxcal,vvcal(j,:),1);
    end
%clear second
clear BL row1 colu1 row2 colu2 selected_row stepTRow stepDistanceRow selected_column
clear stepTColumn stepDistanceColumn number_images_experiment distance_overflow q num
clear BL_matrix addition i j k Io1 Io1new total temporary_matrix1 temp temp2
temp=acoeff;
save (strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'acoeffg5#4#90pix3f','.dat')), 'temp','-ascii')
temp=bcoeff;
save (strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'bcoeffg5#4#90pix3f','.dat')), 'temp','-ascii')
temp=yyycal;
save (strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'yyycalg5#4#90pix3f','.dat')), 'temp','-ascii')
temp=yyycal;
save (strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'yyycalg5#4#90pix3f','.dat')), 'temp','-ascii')
clear temp
save(strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'g5#4#90pix3f'))
clear
toc
```

Κώδικας wwcalibIo :

```
% This is an .m file for image processing

namesV=textread('inputdisp.txt','%s',headerline',1);

for i=1:length(namesV)
    i
    nameV=namesV(i);
    nam=char(nameV);
    load (nam)
    nam
        temp(:,i)=Io(:,selected_column);
        calibrow=temp';
            for j=1:768
                temp2(i,j)=Io(selected_row,j);
            end
        calibcol=temp2;
    end
    hnusselt(1,1)=523.-478.
    hnusselt(1,2)=548.-478.
    hnusselt(1,3)=605.-478.
    %hnusselt(1,4)=1592-1117.4

    xxcal=hnusselt;
    vvcal=calibrow';
        for k=1:576
            yyca(k,:)=polyfit(xxcal.vvcal(k,:),1);
        end
    vvcal=calibcol';
        for k=1:768
            yyycal(k,:)=polyfit(xxcal.vvcal(k,:),1);
        end
    %clear second

clear BL row1 colu1 row2 colu2 selected_row stepTRow stepDistanceRow selected_column
clear stepTColumn stepDistanceColumn
clear number_images_experiment
clear time_delay
clear distance_overflow
clear q num
clear BL_matrix
clear addition i j k
clear Io l
clear Io l new
clear total
clear temporary_matrix l
clear temp
clear temp2
temp=calibrow';
save (strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'.dat')), 'temp','-ascii')
temp=calibcol';
save (strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'.dat')), 'temp','-ascii')
temp=yyca;
save (strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'yycalg3#4#water','.dat')), 'temp','-ascii')
temp=yyycal;
save (strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'yyycalg3#4#water','.dat')), 'temp','-ascii')
save(strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(first1,first2),'g3#4#water')))
clear
toc
```


Κώδικας wnewcalcd :

```

% This is an .m file for image processing
tic
echo off
name=textread('inputdisp.txt','%s','headerline',1);
nam=char(name)
load (nam)
clear temp distance_overflow1 distance_overflow2 second WLo1 WLo2 BLo1 BLo2 first2
clear nameV namesV number_of_images_steady1 number_of_images_steady1
clear number_of_images_steady2 qo1 qo2 first_elements hnusselt
clear time_delay1 time_delay2 Iomax calibcol calibrow K1 K2 BLo_matrix KK1 KK2 KK Io row1 row2
clear distance_overflow1 distance_overflow2 colu1 colu2
%----- DATA READING -----
[row1,colu1,row2,colu2,selected_row,stepTRow,stepDistanceRow,selected_column,...
  stepTColumn,stepDistanceColumn]=textread('input.txt',...
  '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f',1,'headerlines',1);
%[first,WLo,BLo,number_of_images_steady,time_delay,distance_overflow]=textread('input.txt',...
% '%s %f %f %f %f %f',1,'headerlines',4);
[a,b,c,d,e,f]=textread('input.txt',...
  '%s %f %f %f %f %f','headerline',4,'commentstyle','c++');
%----- PRODUCE THE NOISE MATRIX -----
addition(1:576,1:768)=1.275;
  Io1=double(imread('Io2','bmp'));
  Io1new=(Io1*((351.1-1.275)/255)+addition);
analogx=576/85
analogz=768/113.3;
clear addition Io1 stepTRow stepDistanceRow stepTColumn stepDistanceColumn
%----- big loop -----
for i=1:length(c)
    second=a(i)
    WL=b(i);
    BL=c(i);
    number_images_experiment=d(i);
    time_delay=e(i);
    distance_overflow=f(i);
    second=char(second)
    q=(WL-BL)/255;
    BL_matrix(1:576,1:768)=BL;
    xvector=zeros(1,576);
    zvector=zeros(1,768);
    for i=1:576
        xvector(i)=i/analogx+distance_overflow;
    end
    for i=1:768
        zvector(i)=i/analogz;
    end
    tvector=zeros(1,number_images_experiment);
    tvector=(time_delay:time_delay:number_images_experiment*time_delay);
V1all=zeros(13,number_images_experiment);
row(1,1)=38;
row(1,2)=80;
row(1,3)=125;
row(1,4)=165;
row(1,5)=210;
row(1,6)=250;
row(1,7)=290;
row(1,8)=330;
row(1,9)=375;
row(1,10)=418;

```

```

row(1,11)=458;
row(1,12)=498;
row(1,13)=538;
for i=1:number_images_experiment
    Temp_matrix_2=double(imread(strcat(second,int2str(i),'bmp')));
    Temp_matrix_3=(((Temp_matrix_2*q)+(BL_matrix))-IoInew)-Iomin);
    clear Temp_matrix_2
    for k=1:13
        rowindex=round(row(1,k));
        V1all(k,i)=((Temp_matrix_3(rowindex,coln)-yyical(rowindex,2))./yyical(rowindex,1));
        end
    for j=1:768
        Three_DRow(i,j)=((Temp_matrix_3(selected_row,j)-yyical(j,2))./yyical(j,1));
    end
    for j=1:576
        Three_DColumn(i,j)=((Temp_matrix_3(j,selected_column)-yyical(j,2))./yyical(j,1));
    end
end
clear Temp_matrix_3
save(strcat('E:\datfiles\',strcat(strcat(second,first1,'LPpoint4'))))
clear Three_DRow Three_DColumn V1all
%clear xvector zvector tvector TDxvector TDArea
second
end
clear
toc

```

Κώδικας bontdownstream :

```
[st,ln]=textread('graph.txt','%s %f','headerline',1);
names=textread('inputdisp.txt','%s','headerline',1);
```

```
for i=1:length(names)
    i
    name=names(i);
    namm=char(name)
    load (namm)
    xx=1:1:570;

    ln=5
    ln=round(ln);
    sel=(number_images_experiment/ln)-1
    round(sel);
    nn=1
    n=round(nn);

    for i=1:sel

        dde=n+(i-1)*ln
        dde=round(dde);

        for i=1:ln
            dd1=i+dde;
            round(dd1);
            t(i)=tvector(dd1);

            for j=1:570
                mike(i,j)=Three_DCcolumn(dd1,j);
            end

            vvd=mike(i,:);
            yyd=polyfit(xx,vvd,22);

            for k=1:570
                %c
                yyyd(i,k)=polyval(yyd,k);
                yyyy(i,k)=yyy(i,k)+0.01*i;
            end

        end

        len=length(xvector);
        disp('X length is:')
        disp(len)

        for i=1:560
            x(i)=xvector(560+1-i);
        end

        figname=namm
        hold off
        for i=1:560
            yyydnew(:,i)=yyyd(:,i+9);

        end
    end
end
```

```

for i=1:n
    styl=char(st(i));
    li=lin(i);
    tt=t(i)*ones(560,1);
%   [t,x]=meshgrid(tt,x);
    plot3(tt,x,yydnew(i,:),styl,'linewidth',li)

    hold on
end

xlabel('Time [=] sec')
ylabel('h[=]μm')
n1=dde/10
title(['time beginning [=] ', num2str(n1), '      figure name = ', char(namm),'DOWNSTREAM'])

view([90 0])

%%%%h=legend('t1','t2','t3','t4','t5','t6','t7','t8','t1>t2>t3>t4>t5>t6>t7>t8',-1);
%%5%%set(h,'box','off','xcolor',[1 1 1],'ycolor',[1 1 1]);
h1=gcf;
set(h1,'PaperOrientation','portrait')
saveas(h1, strcat('E:\matlabfigures\', strcat(strcat(figname,'tb',num2str(n1),'DOWNSTREAM'),'.tif'))

temppppp=yyd';
%   save d:\PhD\experiments\datfiles\LineProfile.dat temp -ascii

    save    (strcat('E:\matlabfigures\',strcat(strcat(figname,'tb',num2str(n1),'DOWNSTREAM'),'.dat')), 'temppppp', '-
ascii')
        tempp3=mike';
    save    (strcat('E:\matlabfigures\',strcat(strcat(figname,'tb',num2str(n1),'DOWNSTREAMnofit'),'.dat')), 'tempp3', '-
ascii')
        end

end
clear

```

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
21.5.02	ΤΣΙΓΚΛΙΦΗΣ
4-6-02	895
25-6-07	895

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
 Τηλ.: 74.760 -61

