

ID = 14237
2023 14 206



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ



Διδακτορική Διατριβή
με τίτλο:

**Ροή υγρού υμένα: Επίδραση
χαρακτηριστικών διαταραχής και
μορφολογίας τοιχώματος**

Αργυριάδη Αικατερίνη

ΒΟΛΟΣ 2005

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Λεπτοί υμένες υγρού συναντώνται σε σημαντικές συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Η ικανότητα των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση είναι αυτή που έχει οδηγήσει στη ευρεία χρήση τους στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά της ροής και των δομών που δημιουργούνται και επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας και μάζας, καθορίζουν τον βαθμό απόδοσης των συσκευών στις οποίες απαντώνται.

Για να δοθεί μια απάντηση στο ερώτημα πώς οι δημιουργούμενες δομές κατά τη ροή ενός λεπτού υμένα εντατικοποιούν τα φαινόμενα μεταφοράς είναι αναγκαίο να κατανοηθεί πλήρως οι δυναμική της ροής. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την πειραματική μελέτη της δυναμικής της ροής υμένα πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ιδιοκατασκευή του εργαστηρίου. Η μέθοδος συλλογής των δεδομένων είναι η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό σύμφωνα με την οποία το τοπικό πάχος του υμένα είναι ανάλογο της έντασης της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο υμένας κάτω από την υπερϊώδη ακτινοβολία και λόγω χρωστικής που περιέχει. Τα πειράματα έγιναν με νερό και διαλύματα νερού – γλυκερίνης πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με τρία διαφορετικά ύψη διαμόρφωσης. Άλλες παράμετροι, η επίδραση των οποίων μελετήθηκε είναι η συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, ο αριθμός Re και η γωνία κλίσης του καναλιού. Τέλος, κάποια πειράματα έγιναν και με την ηλεκτροχημική μέθοδο, για την μέτρηση της διατμητικής τάσης σε επίπεδο τοίχωμα.

Τα αποτελέσματα στο επίπεδο κανάλι αφορούν ροή κάτω από την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων, η εξέλιξη και οι αλληλεπιδράσεις τους και υπολογίστηκε η επίδρασή τους στη διατμητική τάση στο τοίχωμα. Μάλιστα, αποδείχθηκε τοπική αναστροφή της ροής μπροστά από την κύρια κορυφή του κύματος. Επίσης μελετήθηκε διεξοδικά το φαινόμενο της γένεσης νέων κορυφών σε χαμηλές συχνότητες διαταραχής (κάτω από μια κρίσιμη τιμή της συχνότητας) και διερευνήθηκε ο μηχανισμός του φαινομένου.

Στην περίπτωση της ροής πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα υπό την επίδραση του φυσικού θορύβου, μελετήθηκε η επίδραση της μορφολογίας του τοιχώματος στη μορφή και τις δομές της ροής. Επιβεβαιώθηκε, η εμφάνιση της στατικής δομής της ελεύθερης επιφάνειας. Επίσης, μελετήθηκε η ευστάθεια της ροής και διαπιστώθηκε η σταθεροποιητική δράση της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Επιβεβαιώθηκε και η εμφάνιση της τρισδιάστατης δομής δηλαδή των εγκάρσιων σειρών βαθουλωμάτων κατά μήκος των κοιλοτήτων του τοιχώματος. Συγχρόνως, αποδείχθηκε ότι παρουσία κυμάτων η στατική δομή δεν χάνεται, αλλά υπερτίθεται αυτών.

Η μελέτη της ροής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας απέδειξε ότι πέρα από έναν Re , η εισαγωγή διαταραχής μικρής συχνότητας έχει σαν αποτέλεσμα ασταθή ροή ενώ η εισαγωγή διαταραχής μεγαλύτερης συχνότητας ($f > f_{cr}$) σταθεροποιεί την ροή. Συγχρόνως, παρατηρήθηκε για ορισμένες συνθήκες ροής, μετάπτωση σε χαοτική συμπεριφορά. Μελετήθηκε η μορφή των δημιουργούμενων κυμάτων συναρτήσει της συχνότητας της διαταραχής. Επίσης παρατηρήθηκαν χαρακτηριστικά δομές και αλληλεπιδράσεις τους (π.χ συγχώνευση, αστάθεια

ουράς κ.α.) που είχαν παρατηρηθεί στο επίπεδο τοίχωμα. Τα παραπάνω αποτελέσματα συγκρίθηκαν για διαφορετικά ύψη της διαμόρφωσης του τοιχώματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους αισθάνομαι ότι με βοήθησαν στο δύσκολο αυτό έργο. Πρώτο μεταξύ όλων θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διδακτορικής μου διατριβής, καθηγητή κ. Βασίλη Μποντόζογλου. Αναμφίβολα, η βοήθεια που μου προσέφερε επιστημονικά όλα αυτά τα χρόνια έπαιξε καίριο ρόλο στην όλη πορεία μου και στην ολοκλήρωση της εργασίας. Θα ήθελα όμως να σταθώ και σε μια άλλη πολύ σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε. Μέσα σε αυτά τα πέντε χρόνια υπήρχαν στιγμές που δυσκολεύτηκα, απογοητεύτηκα και αισθάνθηκα ότι δεν μπορώ να συνεχίσω. Επίσης υπήρξαν στιγμές που έχασα το ενδιαφέρον μου και δεν είχα όρεξη να συνεχίσω να δουλεύω. Για αυτές τις στιγμές που με στήριξε, κουβέντιασε μαζί μου, με συμβούλεψε και προσπάθησε να με καταλάβει όχι μόνο ως φοιτήτρια αλλά και ως άνθρωπο, του χρωστάω άλλο ένα μεγάλο ευχαριστώ.

Συγχρόνως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μιχάλη Βλαχογιάννη για την σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε στα πλαίσια της εργασίας. Το βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι θέλει να μοιράζεται τις εμπειρίες του και να διαχέει την γνώση. Οποιαδήποτε ώρα της ημέρας και μέρα της εβδομάδας ήταν διαθέσιμος να με βοηθήσει. Μάλιστα, αυτή η συνεργασία μας κατέληγε πολλές φορές σε πολύωρες συζητήσεις για μη επιστημονικά θέματα, ώστε να μπορώ να πω ότι χάρη στο διδακτορικό μου κέρδισα και έναν καλό φίλο.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, καθηγητές κ. κ. Νικόλαο Βλάχο, Ερρίκο Σταπουντζή, Νικόλαο Ανδρίτσο, Αναστάσιο Σταματέλλο, Νικόλαο Πελεκάση και Παναγιώτη Παπανικολάου για το ενδιαφέρον που έδειξαν για την παρούσα διδακτορική διατριβή. Ιδιαίτερος, θα ήθελα να αναφερθώ στην βοήθεια που μου πρόσφερε ο κύριος Σταπουντζής στον σχεδιασμό του συστήματος διαταραχής.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Νίκο Χολέβα. Οι γνώσεις και η βοήθεια που μου πρόσφερε όσον αφορά τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και το λογισμικό τους αφενός με βοήθησαν στο να γλιτώσω πολύτιμο χρόνο στα πλαίσια της εργασίας, αφετέρου είναι γνώσεις που θα μου χρησιμεύουν σε ολόκληρη την περαιτέρω πορεία μου. Δεν μπορώ να ξεχάσω τους κ. κ. Θανάση Βέργο και Τάσο Δαφερέρα που ήταν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν σε οτιδήποτε και να τους ζητούσα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάω στην φίλη και συγκάτοικό μου Ελένη, η οποία ήταν πάντα δίπλα μου, με στήριζε και ήταν πρόθυμη να με βοηθήσει όπου ήθελα και μπορούσε. Ανάμεσα στα πολλά που έχω να θυμάμαι, θέλω να αναφερθώ στο πόσο σημαντικό ήταν για μένα που ήρθε μαζί μου και μου συμπαραστάθηκε στην πρώτη παρουσίαση που έκανα σε συνέδριο. Αισθάνομαι τυχερή που είναι φίλη και συνάδελφός μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους, συναδέλφους και μη, που γνώρισα και συναναστράφηκα μέσα στο πανεπιστήμιο. Ήταν πράγματι πολύ σημαντικό ότι το περιβάλλον μέσα στο τμήμα ήταν ευχάριστο και μου έδινε ένα ακόμα κίνητρο να είμαι στο εργαστήριο και να δουλεύω.

Τέλος, πάνω απ' όλους και με ξεχωριστή σημασία θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά μου ευγνωμοσύνη και ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και ιδιαίτερος στους γονείς μου. **Αφιερώνω τη διατριβή αυτή στους γονείς μου Δημήτρη και Θεονίτσα. Αυτή η νίκη δεν είναι μόνο δική μου, αλλά και δική τους.**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Σημασία της μελέτης και ενδεικτικές εφαρμογές	1
1.2 Βασικά περιεχόμενα της μελέτης	4
1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	8
2.1 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα	8
2.2 Θεωρία γραμμικής ευστάθειας για τη ροή υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο	9
2.3 Μη γραμμική εξέλιξη της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα	12
2.3.1. Θεωρία	12
2.3.2. Πειράματα	13
2.3.3. Αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων	18
2.4 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα	20
2.4.1. Θεωρία-Υπολογισμοί μόνιμης ροής	20
2.4.2. Γραμμική ευστάθεια	22
2.4.3. Πειράματα	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	28
3.1 Η πειραματική διάταξη	28
3.1.1 Το κανάλι ροής	28
3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής	31
3.2 Ιδιότητες των ρευστών	34
3.3 Η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό	36
3.3.1 Βαθμονόμηση της μεθόδου φθορισμού	38
3.3.2 Επεξεργασία δεδομένων	40
3.3.3 Επεξεργασία εικόνων για την περίπτωση επίπεδου τοιχώματος	43
3.3.4 Επεξεργασία εικόνων για την περίπτωση περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος	44
3.4 Σύστημα ταχείας δειγματοληψίας εικόνων	48

3.5 Περιγραφή διάταξης με εναλλακτικές μεθόδους μέτρησης	49
<i>3.5.1 Περιγραφή της πειραματικής συσκευής</i>	<i>49</i>
<i>3.5.2 Μέτρηση της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα με την μέθοδο της ηλεκτροχημικής τεχνικής</i>	<i>50</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ	54
4.1 Πλήρως ανεπτυγμένα μοναχικά κύματα: τα χαρακτηριστικά τους και η επίδρασή τους στην διατμητική τάση στο τοίχωμα	54
<i>4.1.1 Χαρακτηριστικά μοναχικών κυμάτων</i>	<i>55</i>
<i>4.1.2 Η διατμητική τάση του τοιχώματος κάτω από τα μοναχικά κύματα</i>	<i>59</i>
<i>4.1.3 Εξάρτηση των χαρακτηριστικών των μοναχικών κυμάτων από το ιξώδες και την γωνία κλίσης του καναλιού</i>	<i>62</i>
4.2 Μη γραμμική εξέλιξη της ροής	63
<i>4.2.1 Ροή με ένα κύμα ανά περίοδο</i>	<i>63</i>
<i>4.2.2 Ροή με περισσότερα του ενός κύματα ανά περίοδο</i>	<i>65</i>
<i>4.2.3 Παρατηρήσεις στην γένεση και την εξέλιξη των παρασιτικών κυμάτων</i>	<i>68</i>
<i>4.2.4 Παραμετρικός χάρτης δημιουργίας παρασιτικών κορυφών</i>	<i>72</i>
<i>4.2.5 Γενικές παρατηρήσεις</i>	<i>73</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ	75
5.1 Οι παράμετροι του πειράματος	75
5.2 Χαρακτηριστικά και ευστάθεια της στατικής δομής	76
<i>5.2.1 Χαρακτηριστικά της στατικής ελεύθερης επιφάνειας</i>	<i>76</i>
<i>5.2.2 Ευστάθεια της στατικής δομής σε οδεύουσες διαταραχές</i>	<i>80</i>
<i>5.2.3 Τρισδιάστατη μόνιμη ροή</i>	<i>83</i>
5.3 Πλήρως ανεπτυγμένη ροή με κύματα	85
<i>5.3.1 Μορφολογία οδευόντων κυμάτων</i>	<i>85</i>
<i>5.3.2 Επίδραση της μορφολογίας του τοιχώματος στην συχνότητα και στο μέγεθος των οδευόντων κυμάτων</i>	<i>87</i>
<i>5.3.3 Εξέλιξη της μορφολογίας της ελεύθερης επιφάνειας με αύξηση του Re</i>	<i>92</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ	97
6.1 Εξάρτηση της εξέλιξης της ροής από την συχνότητα διαταραχής	97
6.1.1 Καθορισμός ευσταθούς και ασταθούς περιοχής	97
6.1.2 Μετάβαση σε χαοτική δομή	102
6.2 Σύγκριση εξέλιξης σε επίπεδη και περιοδικά διαμορφωμένη επιφάνεια	105
6.3 Ιδιότητες οδοντών κυμάτων	108
6.3.1 Χαρακτηριστικά της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας	108
6.3.2 Εξάρτηση του μέγιστου ύψους των κυμάτων (τοπικό πάχος υμένα) από τον αριθμό Re	110
6.3.3 Χαρακτηριστικές δομές της ροής και αλληλεπιδράσεις τους	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	118
7.1 Βασικά συμπεράσματα ροής πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα	118
7.1.1 Πλήρως ανεπτυγμένα μοναχικά κύματα: τα χαρακτηριστικά τους και η επίδρασή τους στην διατμητική τάση στο τοίχωμα	118
7.1.2 Ροή υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής καθορισμένης συχνότητας	119
7.2 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα υπό την επίδραση φυσικού θορύβου	120
7.3 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα υπό την επίδραση εξωτερικής διαταραχής	121

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

<N>	μέσος ρυθμός μεταφοράς μάζας στον αισθητήρα
2b	πλάτος τοιχώματος
A_e	επιφάνεια του αισθητήρα ηλεκτροδιάχυσης
BL	μαύρο επίπεδο ψηφιοποίησης
c	αδιάστατη φασική ταχύτητα
C_b	συγκέντρωση μάζας στον κύριο όγκο του ρευστού
C_w	συγκέντρωση μάζας στο τοίχωμα
D	συντελεστής διαχυτότητας
d	πάχος τομέα αισθητήρα ηλεκτροδιάχυσης
f	συχνότητα εμφανιζόμενων κυμάτων
F	σταθερά Faraday
f_2	κρίσιμη συχνότητα εμφάνισης πλευρικής αστάθειας
f_c/f_{cr}	κρίσιμη συχνότητα - όριο ευστάθειας
f_m/f_p	κρίσιμη συχνότητα εμφάνισης κυμάτων με περισσότερες από μια κορυφές ανά περίοδο
f_s	κρίσιμη συχνότητα εμφάνισης υποαρμονικής αστάθειας
g	σταθερά της βαρύτητας
h	πάχος του υμένα - ύψος της ελεύθερης επιφάνειας
h_m/h_{max}	ύψος κύματος
h_N	πάχος υμένα κατά Nusselt
i	ένταση ρεύματος
Ka	αριθμός Karitsa
L	μήκος πλάκας
n	συντελεστής διάθλασης
n_e	η μεταβολή του σθένους κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση
P	πίεση
q	παροχή
Re	αριθμός Reynolds
Re_c	κρίσιμος αριθμός Re για την εμφάνιση αστάθειας
$Re_{c,f}$	κρίσιμος αριθμός Re για την εμφάνιση αστάθειας σε συγκεκριμένη γωνία κλίσης
S	κλίση της ταχύτητας στο τοίχωμα
T	περίοδος διαταραχής
T_w	θερμοκρασία στο τοίχωμα
U	ταχύτητα της ροής
u_0	ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια
u_x	ταχύτητα του υμένα στην διεύθυνση x
We	αριθμός Weber
WL	άσπρο επίπεδο ψηφιοποίησης
α	αδιάστατος κυματαριθμός
γ	επιφανειακή τάση
Θ	θερμοκρασία
I	ένταση εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
κ	καμπυλότητα
K	συντελεστής μεταφοράς μάζας
λ	κυματαριθμός
μ	δυναμικό ιξώδες
ν	κινηματικό ιξώδες
ρ	πυκνότητα

σ	τανυστής τάσεων
τ_w	διατμητική τάση στο τοίχωμα
τ_{xy}	διατμητική τάση στο επίπεδο x, y
φ	γωνία κλίσης καναλιού
Ψ	ροϊκή συνάρτηση
Ψ_0	η τιμή της ροϊκής συνάρτησης στην ελεύθερη επιφάνεια
ω	συχνότητα κύματος

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Σχηματική διάταξη μεταφοράς μάζας με ροή λεπτού υμένα.

Σχήμα 1.2: Εφαρμογή της ροής υγρού υμένα στη διαφασική ροή

Σχήμα 1.3: Συμπυκνωτής outside tubes, vertical downflow.

Σχήμα 1.4: Παραδείγματα μεταφοράς μάζας.

Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.

Σχήμα 2.2: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re **(a)** για επίπεδο τοίχωμα **(b)** για ορθογώνιο τοίχωμα. (\square) $Ka=3365$, (\bullet) $Ka=1102$, (—) $Re=5/6\cot\theta$.

Σχήμα 2.3: Τέσσερις περιοχές του κύματος κατά την εξέλιξή του κατά Chang. Η παράμετρος ω είναι η συχνότητα του κύματος.

Σχήμα 2.4: Ανάπτυξη μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής.

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

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

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

Σχήμα 2.8: Μορφή κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 3 Hz.

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

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

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

Σχήμα 2.12: Εξέλιξη ροής για αρχική διαταραχή συχνότητας 1 Hz.

Σχήμα 2.13: Πρόβλεψη του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας από τον Wang (1981).

Σχήμα 2.14: Σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων των θεωριών στρωτής και έρπουσας ροής για το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας. ($l=0,002$ m, $\varphi=60^\circ$).

Σχήμα 2.15: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. (\square) $Ka=3365$, (\bullet) $Ka=1102$, (—) $Re=5/6\cot\theta$.

Σχήμα 2.16: Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας σε 4 διαδοχικές χρονικές στιγμές ($\Delta t=0,1$ sec) **(a)** ημιτονοειδής μορφή και **(b)** μορφή με περισσότερες αρμονικές.

Σχήμα 2.17: **(a)** Το πέρασμα ενός πλήρους αναπτυγμένου μοναχικού κύματος πάνω από το διαμορφωμένο τοίχωμα. **(b)** το πέρασμα του ίδιου κύματος χωρίς την επίδραση του τοιχώματος

Σχήμα 2.18: Πεταλοειδή κύματα (horse – shoe waves).

Σχήμα 2.19: Η εμφάνιση των εγκάρσιων βαθουλωμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια.

Σχήμα 2.20: Οι διαφορετικές περιοχές ροής πάνω από τοίχωμα μεγάλου πλάτους διαμόρφωσης για χαμηλούς αριθμούς Re κατά Aksel et al.

Σχήμα 3.1: Πειραματική διάταξη.

Σχήμα 3.2: Τα κύρια τμήματα της πειραματικής διάταξης: **(a)** Το κανάλι ροής **(b)** Δοχείο υπερχειλίσης **(c)** Δοχείο συλλογής **(d)** Δοχείο κατανομής **(e)** Χειροκίνητη βάνα **(f)** Πλάκα προσαρμογής (κυματοειδές τοίχωμα).

Σχήμα 3.3: Σύστημα διαταραχής χρονοδιακόπτη – ηλεκτροβαλβίδας.

Σχήμα 3.4: Σύστημα διαταραχής με κινούμενο εμπόδιο.

Σχήμα 3.5: Συνδεσμολογία ηλεκτρικής κίνησης του συστήματος διαταραχής.

Σχήμα 3.6: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

Σχήμα 3.7: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο-pixel της εικόνας.

Σχήμα 3.8: Διάταξη μέτρησης του πάχους του υμένα με τη βοήθεια μικρομέτρου.

Σχήμα 3.9: Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται.

Σχήμα 3.10: **(a)** Εικόνα πριν την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης, **(b)** μετά την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης.

Σχήμα 3.11: Χωρική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα.

Σχήμα 3.12: Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου.

Σχήμα 3.13: **(a),(c),(e)** διαδοχικές εικόνες στις οποίες φαίνεται ποιοτικά να περνάει ένα κύμα **(b), (d)** και **(f)** οι αντίστοιχες κατανομές του πάχους του υμένα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της κάθε εικόνας.

Σχήμα 3.14: Το περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα (ορθογωνικό κύμα) και ο τρόπος προσδιορισμού της ελεύθερης επιφάνειας.

Σχήμα 3.15: Η εξάρτηση των συντελεστών $a(x,y)$ και $\beta_{\text{error}}(x,y)$ κατάντη της ροής για τη περίπτωση εφαρμογής της διαδικασίας αφαίρεσης ενός επιπέδου υμένα.

Σχήμα 3.16: Οπτικές παρατηρήσεις της ροής υγρού υμένα πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με τη μέθοδο ταχείας δειγματοληψίας (Redlake Imaging).

Σχήμα 3.17: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης μετρήσεων Πράγας.

Σχήμα 3.18: Πειραματική διάταξη μετρήσεων Πράγας.

Σχήμα 3.19: Περιγραφή του πεδίου ροής και μεταφοράς μάζας πάνω από ηλεκτροχημικό αισθητήρα.

Σχήμα 3.20: Αισθητήρας “sandwich”.

Σχήμα 3.21: Πόλωση του ηλεκτροδίου. A: ελεγχόμενη από την κινητική της αντίδρασης, B: ελεγχόμενη από τη μεταφορά μάζας, C: παράπλευρες αντιδράσεις και D: πάνω από τον κρίσιμο K_{limit} .

Σχήμα 4.1: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για ροή με $Re=35$ και συχνότητας διαταραχής (a) 1,2 Hz, (b) 1,5 Hz και (c) 1,8 Hz.

Σχήμα 4.2: Η εξάρτηση του μήκους κύματος των μοναχικών κυμάτων από τη συχνότητα διαταραχής. Σύγκριση πειραματικών (\blacktriangle) με υπολογιστικά αποτελέσματα (—).

Σχήμα 4.3: Μοναχικά κύματα για πειράματα με συχνότητα διαταραχής 1,2 Hz και (a) $Re=17$ (b) $Re=35$ και (c) $Re=50$.

Σχήμα 4.4: Η εξάρτηση του μήκους κύματος των μικρών κυματισμών μπροστά από την κύρια κορυφή του μοναχικού κύματος από τον αριθμό Re . Σύγκριση πειραματικών (\blacktriangle) με υπολογιστικά αποτελέσματα (—).

Σχήμα 4.5: Η εξάρτηση του αδιαστατοποιημένου μέγιστου ύψους των μοναχικών κυμάτων από τον αριθμό Reynolds.

Σχήμα 4.6: Η σχέση μεταξύ της φασικής ταχύτητας και του πάχους του υμένα. (a) με διαστατικά μεγέθη (b) αδιαστατοποιημένα με τη μέση ταχύτητα και το μέσο πάχος υμένα.

Σχήμα 4.7: Η σχέση μεταξύ της φασικής ταχύτητας και του πάχους του υμένα με χαρακτηριστικό πάχος το πάχος του υποστρώματος και χαρακτηριστική ταχύτητα την ταχύτητα του υποστρώματος.

Σχήμα 4.8: Η διατμητική τάση στο τοίχωμα όταν περνάει ένα μοναχικό κύμα.

Σχήμα 4.9: (a) Το μέγιστο και (b) το ελάχιστο της διατμητικής τάσης συναρτήσει του αριθμού Re .

Σχήμα 4.10: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων της κατανομής της διατμητικής τάσης με τα θεωρητικά προβλεπόμενα με την υπόθεση της παραβολικής κατανομής της ταχύτητας κάτω από το κύμα για την περίπτωση (a) ενός σχεδόν πλήρως ανεπτυγμένου κύματος (b) ενός κύματος στα πρώτα στάδια ανάπτυξης.

Σχήμα 4.11: (a) $c = f(H_{max})$ για ρευστά με διαφορετικό ιξώδες (b) $c = f(H_{max})$ για ροή νερού σε διαφορετικές γωνίες κλίσης.

Σχήμα 4.12: Μετάβαση από τα περιοδικά κύματα σε σχεδόν μοναχικά κύματα ανάλογα με την συχνότητα διαταραχής: (a) περιοδικά κύματα σε $Re=19$, $\varphi=7,6^\circ$, $f=5,5$ Hz, (b) μη μόνιμα κύματα σε $Re=19$, $\varphi=7,6^\circ$, $f=4,5$ Hz, (c) σχεδόν μοναχικά κύματα σε $Re=20$, $\varphi=5,5^\circ$, $f=2$ Hz, (d) σχεδόν μοναχικά σε $Re=19$, $\varphi=7,6^\circ$, $f=2,5$ Hz.

Σχήμα 4.13: Γένεση δευτερευόντων κυμάτων εξαιτίας της μείωσης της συχνότητας της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής: (a) $Re=20$, $\varphi=5,5^\circ$, $f=1,2$ Hz. (b) $Re=20$, $\varphi=5,5^\circ$, $f=0,8$ Hz. (c) $Re=20$, $\varphi=7,6^\circ$, $f=1$ Hz.

Σχήμα 4.14: Η ανάπτυξη μιας παρασιτικής κορυφής σε μοναχικό κύμα σε ροή με $Re=35$, $\varphi=3,4^\circ$ και $f=0,5$ Hz.

Σχήμα 4.15: Διαδοχική γένεση παρασιτικών κορυφών για ροή με $Re=33$, $\varphi=3,4^\circ$ και $f=0,25$ Hz **(a)** Τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας ανά 0,1 sec και **(b)** Τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας ανά 0,2 sec για δύο διαδοχικούς κύκλους επιβολής της διαταραχής.

Σχήμα 4.16: Τα αρχικά στάδια της δημιουργίας της παρασιτικής κορυφής: **(a)** η εμφάνιση του βαθουλώματος πίσω από την αναπτυσσόμενη κύρια κορυφή, όπως παρατηρήθηκε σε πειράματα με πολύ ασθενή διαταραχή και $Re=31$, $\varphi=3,4^\circ$, $f=0,5$ Hz. **(b)** Μεγέθυνση του σχήματος 4.13a ($Re=33$, $\varphi=3,4^\circ$, $f=0,25$ Hz) που δείχνει την ανάπτυξη της τελευταίας (πέμπτης) παρασιτικής κορυφής.

Σχήμα 4.17: Αλληλεπίδραση μεταξύ της παρασιτικής κορυφής και του κύματος που ακολουθεί σε $Re=26$, $\varphi=5,4^\circ$ και $f=1,3$ Hz.

Σχήμα 4.18: Μια παρασιτική κορυφή (μονό βέλος) αναπτύσσεται από ένα ύψωμα πίσω από το υπερυψωμένο υπόστρωμα που δημιουργείται από μια διαταραχή μεγάλου ύψους. Πάνω στο υπόστρωμα σχηματίζεται ένα δεύτερο παρασιτικό κύμα από ένα βαθούλωμα της ροής ($Re=19$, $\varphi=3,4^\circ$ και $f=0,375$ Hz).

Σχήμα 4.19: Η κρίσιμη συχνότητα f_p κάτω από την οποία εμφανίζονται τα παρασιτικά κύματα σαν συνάρτηση του Re και της γωνίας κλίσης. $Re_c=5/6\cot\varphi$, $\kappa=(Re We/3)^{1/3}$.

Σχήμα 4.20: Τα χαρακτηριστικά των αναπτυσσόμενων διαταραχών συγκρινόμενα με ένα μοναχικό στατικό κύμα.

Σχήμα 5.1: Μορφοποίηση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος.

Σχήμα 5.2: Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds και της γωνίας κλίσης του καναλιού **(a)** για $\varphi=5,4^\circ$, (—) $Re=375$, (x) $Re=327$, (■) $Re=227$, (Δ) $Re=153$, (—) $Re=117$ και **(b)** για $Re=375$, (\square) $\varphi=1,3^\circ$, (—) $\varphi=2,6^\circ$, (\circ) $\varphi=3,4^\circ$, (—) $\varphi=5,4^\circ$.

Σχήμα 5.3: Το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds για διαφορετικά ύψη τοιχώματος και γωνίες κλίσης. **(a)** $\varphi=1,3^\circ$, **(b)** $\varphi=2,6^\circ$, **(c)** $\varphi=3,4^\circ$, και **(d)** $\varphi=5,4^\circ$. Σε όλες τις περιπτώσεις τα δεδομένα παρουσιάζονται για ύψη τοιχώματος: (x) $2b=200$ μm , (\square) $2b=400$ μm και (\blacktriangle) $2b=800$ μm .

Σχήμα 5.4: **(a)** Η στατικά διαμορφωμένη ελεύθερη επιφάνεια σε αριθμό $Re=315$ και γωνία κλίσης $\varphi=2,6^\circ$ για ύψη τοιχώματος: (x) 200 μm , (\square) 400 μm , (\bullet) 800 μm . **(b)** Το μέγεθος της πρώτης ($-\square-$), δεύτερης ($-\bullet-$) και τρίτης ($-\blacktriangle-$) αρμονικής της ελεύθερης επιφάνειας ως συνάρτηση του Re για ύψος τοιχώματος ίσο με 400 μm . **(c)** Ομοίως όπως στο **(b)** για ύψος τοιχώματος ίσο με 800 μm .

Σχήμα 5.5: Ο ουδέτερος ευσταθής αριθμός Re ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης για διαφορετικά ύψη τοιχώματος. Εδώ για (\square) $2b=800$ μm , (\blacksquare) $2b=400$ μm , (x) $2b=200$ μm , (—) επίπεδο τοίχωμα.

Σχήμα 5.6: Η αναλογία μεταξύ του κρίσιμου Re για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα και του κρίσιμου Re για επίπεδο τοίχωμα στην ίδια γωνία φ , ως συνάρτηση του ύψους του τοιχώματος: (x) $\varphi=1,3^\circ$, (\blacktriangle) $\varphi=2,6^\circ$, (Δ) $\varphi=3,4^\circ$, (\blacksquare) $\varphi=5,4^\circ$, (\square) $\varphi=7,4^\circ$.

Σχήμα 5.7: Διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών του πάχους του υμένα για **(a)** $\varphi=1,3^\circ$, $Re=370$ και **(b)** $\varphi=3,4^\circ$, $Re=201$.

Σχήμα 5.8: Ο κρίσιμος αριθμός Re για την εμφάνιση των βαθουλωμάτων ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης για: (x) $2b=800 \mu\text{m}$, (\square) $2b=400 \mu\text{m}$ και (Δ) $2b=200 \mu\text{m}$.

Σχήμα 5.9: Η αναλογία του βάθους (b_d) προς το μήκος κύματος (λ_d) των βαθουλωμάτων, ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης, για διαφορετικά ύψη τοιχώματος: (x) $2b=800 \mu\text{m}$, (\square) $2b=400 \mu\text{m}$ και (\blacktriangle) $2b=200 \mu\text{m}$.

Σχήμα 5.10: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατάντη της ροής σε 5 διαδοχικές χρονικές στιγμές, για ροή σε γωνία κλίσης $\varphi=5,4^\circ$. Η χρονική απόσταση μεταξύ των προφίλ είναι $\Delta t=0,1 \text{ sec}$. (a) $Re=76$ (b) $Re=113$.

Σχήμα 5.11: Το φάσμα συχνοτήτων των χρονοσειρών, $h(x_o, y_o, t)$, σε διαφορετικές κατάντη αποστάσεις (x_o, y_o). (a) $Re=90$, $\varphi=5,4^\circ$ (b) $Re=250$, $\varphi=5,4^\circ$.

Σχήμα 5.12: Χρονική μεταβολή του πάχους του υμένα, $h(x_o, y_o, t)$, σε $Re=200$, $\varphi=3,4^\circ$ για: (—) επίπεδο υμένα, (—) περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης $2b=800 \mu\text{m}$.

Σχήμα 5.13: Σύγκριση του χρονικού μετασχηματισμού Fourier του τοπικού πάχους του υμένα για επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα: (a) επίπεδο τοίχωμα, (b) $2b=200 \mu\text{m}$, (c) $2b=400 \mu\text{m}$, (d) $2b=800 \mu\text{m}$. Σε όλες τις περιπτώσεις η κατάντη απόσταση είναι $x/L=45$, $Re=175$ και $\varphi=3,4^\circ$.

Σχήμα 5.14: Η επικρατούσα συχνότητα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier, ως συνάρτηση του Re , για $\varphi=5,4^\circ$ και: (\blacksquare) επίπεδο τοίχωμα, (\square) $2b=200 \mu\text{m}$, (\blacktriangle) $2b=400 \mu\text{m}$, (Δ) $2b=800 \mu\text{m}$.

Σχήμα 5.15: Χρονική μεταβολή του πάχους του υμένα ως συνάρτηση του $Re=300$, για $\varphi=3,4^\circ$ και διαφορετικά ύψη διαμόρφωσης τοιχώματος: (\bullet —) $2b=200 \mu\text{m}$, (—) $2b=400 \mu\text{m}$, (—) $2b=800 \mu\text{m}$.

Σχήμα 5.16: Το μέγεθος της επικρατούσας αρμονικής ως συνάρτηση του αριθμού Re για $\varphi=5,4^\circ$: (\square) επίπεδο τοίχωμα, (\blacksquare) $2b=200 \mu\text{m}$, (x) $2b=400 \mu\text{m}$, (\blacktriangle) $2b=800 \mu\text{m}$.

Σχήμα 5.17: Διαδοχικά προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε γωνία κλίσης $\varphi=5,4^\circ$: (a) $Re=51$, (b) $Re=6,2$ (c) $Re=91$, (d) $Re=251$.

Σχήμα 5.18: Η διαστατική φασική ταχύτητα των διαδοχικών κυμάτων κατά μήκος περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος με ύψος διαμόρφωσης $2b=800 \mu\text{m}$, ως συνάρτηση του αριθμού Re . Τα δεδομένα αντιστοιχούν σε γωνίες κλίσης $\varphi=1,3^\circ$ (Δ), $2,6^\circ$ (\blacktriangle), $3,4^\circ$ (\square) και $5,4^\circ$ (\blacksquare).

Σχήμα 5.19: Οπτική παρατήρηση μοναχικών κυμάτων κατά μήκος περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος με ύψος διαμόρφωσης $800 \mu\text{m}$ για: (a) $\varphi=3,4^\circ$, $Re=310$ και (b) $\varphi=5,4^\circ$, $Re=300$.

Σχήμα 5.20: Διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=200$ και $\varphi=5,4^\circ$, στο οποίο φαίνεται η κίνηση ενός κύματος σε 3 διαδοχικές στιγμές οι οποίες απέχουν χρονικά $\Delta t=0,1 \text{ sec}$.

Σχήμα 6.1: Μορφολογία τοιχώματος με δύο περιοχές μέτρησης διαφορετικής μορφολογίας.

Σχήμα 6.2: Χρονική μεταβολή του υμένα για ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα κλίσης $3,4^\circ$ σε $Re=75$ και 5 διαφορετικές περιπτώσεις εξωτερικής διαταραχής.

Σχήμα 6.3: Χρονικός μετασχηματισμός Fourier στο σημείο εισαγωγής του υμένα στο κανάλι καθώς και στο σημείο πριν το υγρό περάσει στο περιοδικά διαμορφωμένο μέρος του καναλιού, για τις διαφορετικές συχνότητες διαταραχής. • μέγιστο σημείο στη μέτρηση κοντά στην είσοδο του υγρού, □ μέγιστο σημείο στη μέτρηση πριν το κυματοειδές τοίχωμα.

Σχήμα 6.4: Διάγραμμα καθορισμού περιοχής ευστάθειας και αστάθειας για ροή νερού πάνω από επίπεδο τοίχωμα, σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$.

Σχήμα 6.5: Χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο και σε ένα σημείο κοντά στην έξοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού. Ροή νερού για γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=40$ και συχνότητα διαταραχής $0,167$ Hz.

Σχήμα 6.6: Χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο και σε ένα σημείο κοντά στην έξοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού για ροή νερού με γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=53$ και συχνότητα διαταραχής **(a)** $0,167$ Hz και **(b)** $0,5$ Hz.

Σχήμα 6.7: Χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο και σε ένα σημείο κοντά στην έξοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού για ροή νερού με γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=75$ και συχνότητα διαταραχής **(a)** $0,5$ Hz και **(b)** $0,8$ Hz.

Σχήμα 6.8: Χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο και σε ένα σημείο κοντά στην έξοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού για ροή νερού με γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=100$ και συχνότητα διαταραχής **(a)** $0,5$ Hz και **(b)** 1 Hz.

Σχήμα 6.9: Διάγραμμα καθορισμού περιοχής ευστάθειας και αστάθειας για ροή νερού πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=800$ μm), σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$.

Σχήμα 6.10: Χρονική μεταβολή του υμένα για ροή πάνω από κυματοειδές τοίχωμα κλίσης $3,4^\circ$ σε $f=2$ Hz και 8 διαφορετικούς αριθμούς Re .

Σχήμα 6.11: Χρονικός μετασχηματισμός Fourier για ροή πάνω από τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης 800 μm , κλίση $3,4^\circ$ σε $f=2$ Hz και 4 διαφορετικούς αριθμούς Re .

Σχήμα 6.12: Χρονικός μετασχηματισμός Fourier για ροή πάνω από τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης 800 μm , κλίση $3,4^\circ$ σε $Re=125$ και $f=1$ Hz και 4 Hz αντίστοιχα.

Σχήμα 6.13: Διάγραμμα διαχωρισμού μονοχρωματικής και χαοτικής περιοχής για ροή νερού πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=800$ μm), σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$.

Σχήμα 6.14: Η ελεύθερη επιφάνεια κατάντη της ροής σε 10 διαδοχικές χρονικές στιγμές, για ροή σε γωνία κλίσης $\varphi=3,4^\circ$, $Re=30$ και $f=1$ Hz για επίπεδο και κυματοειδές τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης $2b=400$ και 800 μm . Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec.

Σχήμα 6.15: Η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού σε ένα τμήμα του καναλιού για δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι συνθήκες ροής είναι γωνία κλίσης $\varphi=3,4^\circ$, $Re=30$ και $f=1$ Hz για **(a)** επίπεδο και **(b)** κυματοειδές τοίχωμα με $2b=400$ μm .

Σχήμα 6.16: Σύγκριση χρονικής μεταβολής του υμένα για ροή πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=400$ και 800 μm). Κλίση $3,4^\circ$ σε $f=0,9$ Hz, $Ka=1102$ και $Re=30$.

Σχήμα 6.17: Σύγκριση χρονικού μετασχηματισμού Fourier για ροή πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=400$ και $800 \mu\text{m}$). Κλίση $3,4^\circ$ σε $f=0,9 \text{ Hz}$, $Ka=1102$ και $Re=30$.

Σχήμα 6.18: Η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού για ροή σε διάφορες συχνότητες διαταραχής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με $2b=400$ και $800 \mu\text{m}$.

Σχήμα 6.19: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατάντη της ροής σε 5 διαδοχικές χρονικές στιγμές, για ροή σε τοίχωμα με $2b=800 \mu\text{m}$ και γωνία κλίσης $\varphi=3,4^\circ$, $f=0,167 \text{ Hz}$ και $Re=50, 75$ και 100 . Η χρονική απόσταση των προφίλ είναι $\Delta t=0,1 \text{ sec}$.

Σχήμα 6.20: Εξάρτηση του **(α)** ύψους και **(β)**αδιάστατου ύψους του κύματος από τον αριθμό Re για διαφορετικές γωνίες κλίσης και συχνότητες διαταραχής κοντά στην είσοδο του ρευστού στο κανάλι. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης $1,3^\circ$, το μαύρο σε γωνία $2,6^\circ$, το μπλε σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$ και το πράσινο σε γωνία $5,4^\circ$. Οι διαφορετικοί δείκτες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες εξωτερικής διαταραχής.

Σχήμα 6.21: Εξάρτηση του **(α)** ύψους και **(β)**αδιάστατου ύψους του κύματος από τον αριθμό Re για διαφορετικές γωνίες κλίσης και συχνότητες διαταραχής κοντά στην έξοδο του ρευστού από το κανάλι. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης $1,3^\circ$, το μαύρο σε γωνία $2,6^\circ$, το μπλε σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$, το πράσινο σε γωνία $5,4^\circ$ και το ροζ σε γωνία $7,4^\circ$. Οι διαφορετικοί δείκτες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες εξωτερικής διαταραχής.

Σχήμα 6.22: Εξάρτηση του **(α)** ύψους και **(β)**αδιάστατου ύψους του κύματος από τον αριθμό Re για διαφορετικές γωνίες κλίσης και συχνότητες διαταραχής κοντά στην έξοδο του ρευστού από το κανάλι. Το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης $2,6^\circ$, το μπλε σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$, το πράσινο σε γωνία $5,4^\circ$ και το ροζ σε γωνία $7,4^\circ$. Οι διαφορετικοί δείκτες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες εξωτερικής διαταραχής. Το ρευστό είναι διάλυμα νερού-γλυκερίνης 28% .

Σχήμα 6.23: Το φαινόμενο της συγχώνευσης για την περίπτωση **(α)** των δύο κορυφών ($\varphi=3,4^\circ$, $f=2 \text{ Hz}$, $Re=64$, $Ka=1102$) **(β)** των πολλαπλών κορυφών ($\varphi=3,4^\circ$, $f=1 \text{ Hz}$, $Re=56$, $Ka=1102$). Η χρονική απόσταση των διαδοχικών απεικονίσεων της ελεύθερης επιφάνειας είναι $\Delta t=0,1 \text{ sec}$.

Σχήμα 6.24: Ροή κυμάτων με **(α)**δύο ($\varphi=5,4^\circ$, $f=0,8 \text{ Hz}$, $Re=55$, $Ka=3365$) ή και **(β)** περισσότερες κορυφές ($\varphi=3,4^\circ$, $f=1 \text{ Hz}$, $Re=75$, $Ka=3365$).

Σχήμα 6.25: Υπερυψωμένο υπόστρωμα πίσω από την κύρια κορυφή του κύματος για ροή νερού με συχνότητα εξωτερικής διαταραχής $f=1 \text{ Hz}$ και **(α)** $\varphi=1,3^\circ$ και $Re=148$, **(β)** $\varphi=2,6^\circ$ και $Re=145$ και **(c)** $\varphi=3,4^\circ$ και $Re=75$.

Σχήμα 6.26: Το φαινόμενο της αστάθειας της ουράς ($\varphi=2,6^\circ$, $f=2 \text{ Hz}$, $Re=77$, $Ka=3365$).

Σχήμα 6.27: Το φαινόμενο του υπερυψωμένου υποστρώματος μπροστά από την κύρια κορυφή του κύματος ($\varphi=5,4^\circ$, $f=0,167 \text{ Hz}$, $Re=30$, $Ka=3365$).

Σχήμα 6.28: Το φαινόμενο της γένεσης των παρασιτικών κορυφών για ροή νερού με συχνότητα εξωτερικής διαταραχής $f=0,167 \text{ Hz}$, $Re=75$, $\varphi=3,4^\circ$ και **(α)** $2b=400 \mu\text{m}$ και **(β)** $2b=800 \mu\text{m}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

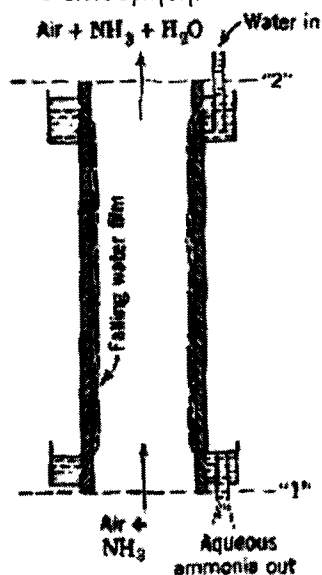
1.1 Σημασία της μελέτης και ενδεικτικές εφαρμογές

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της διατριβής είναι η πειραματική μελέτη των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο ή περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Η ερευνητική προσπάθεια στοχεύει στην κατανόηση των βασικών μηχανισμών που διέπουν τα φαινόμενα ροής σε υμένες υγρού, τα οποία συνδέονται άμεσα με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας ή θερμότητας.

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

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

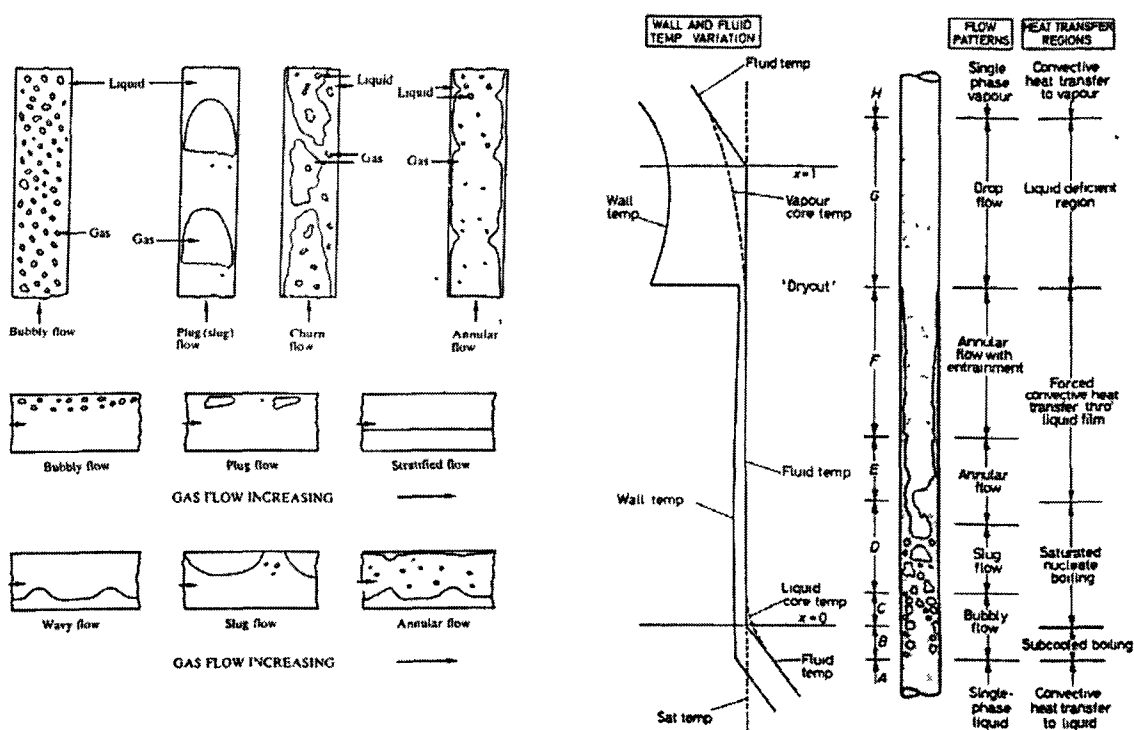
Υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες σκοπός μας είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης των φαινομένων μεταφοράς. Κάποιες από αυτές τις συσκευές είναι οι συμπυκνωτές, οι εξατμιστήρες, οι στήλες απορρόφησης και οι διφασικοί αντιδραστήρες. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις επιθυμητή είναι η ελαχιστοποίηση των φαινομένων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



Σχήμα 1.1: Σχηματική διάταξη μεταφοράς μάζας με ροή λεπτού υμένα.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής υγρών υμένων είναι η ψύξη ενός πυρηνικού αντιδραστήρα που επιτυγχάνεται με διαβροχή του τοιχώματος με καθαρό νερό που θερμαινόμενο εξατμίζεται. Σε ένα άλλο παράδειγμα, στο σχήμα 1.1, παρουσιάζεται μια διάταξη μεταφοράς μάζας με ροή λεπτού υμένα. Αμμωνία και αέρας εισέρχονται στο σύστημα και καθώς υπάρχει ροή νερού με μορφή λεπτού υμένα στον οποίο η συγκέντρωση της αμμωνίας είναι μηδενική, η αμμωνία μεταφέρεται από την αέρια μάζα στον υγρό υμένα και συλλέγεται (μεταφορά μάζας).

Επίσης, στις ατμοπαραγωγικές μονάδες η μετατροπή της υγρής φάσης σε αέρια πραγματοποιείται μέσα σε αυλούς. Οι διάφορες περιοχές ροής κατά τη μετατροπή του νερού σε ατμό απεικονίζονται στο σχήμα 1.2α,β,γ. Η δακτυλιοειδής ροή θα μπορούσε να προσομοιωθεί με τη ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο επίπεδο. Οι αυλοί εναλλαγής θερμότητας είναι είτε κατακόρυφοι (1.2α), είτε οριζόντιοι (1.2β), ανάλογα με το είδος του εναλλάκτη. Και στις δύο περιπτώσεις διάφορες περιοχές ροής (κυματοειδής, δακτυλιοειδής, στρωματωμένη) περιγράφονται από την ανάλυση της ροής υγρού υμένα.

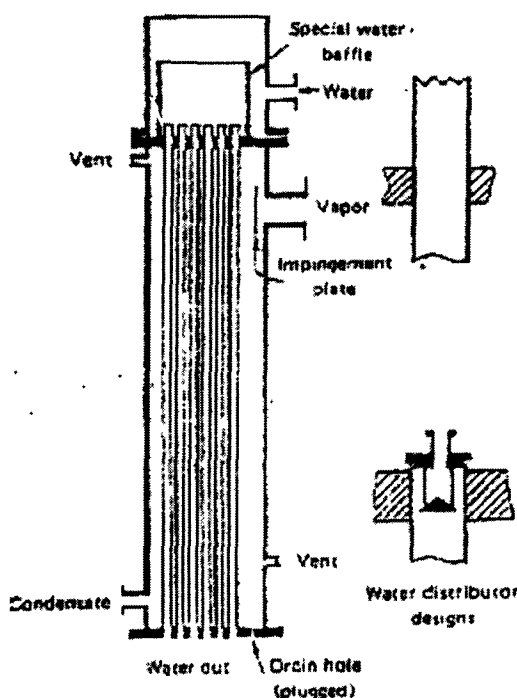


Σχήμα 1.2: Εφαρμογή της ροής υγρού υμένα στη διαφασική ροή

Στις συσκευές ψύξης με απορρόφηση έχει επιτευχθεί υψηλή αποτελεσματικότητα λόγω της λεπτότητας της ροής του διαλύτη, η οποία μεγιστοποιεί το λόγο της επιφάνειας προς τη ροή μάζας και μειώνει το βάθος διείσδυσης, βοηθώντας με αυτό τον τρόπο τη διαδικασία της απαγωγής θερμότητας και της μεταφοράς μάζας με την απορρόφηση των ατμών του ψυκτικού στο διαλύτη. Σε στήλες με πληρωτικά υλικά και υπό συνθήκες έλλειψης πλημμυρισμού, συναντάμε επίσης ροή λεπτού υγρού υμένα σε κεκλιμένο τοίχωμα με μεταφορά θερμότητας. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, η διεπιφάνεια αναπτύσσει κυματισμούς που έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι αυξάνουν τους ρυθμούς μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

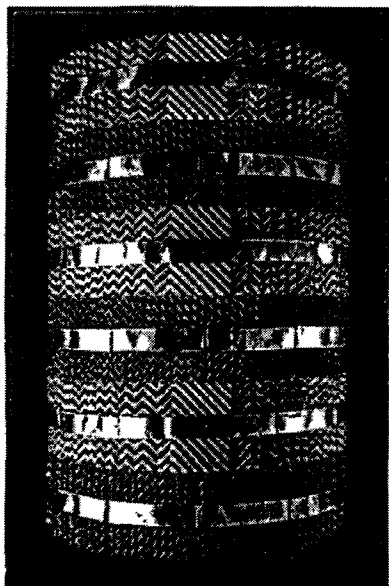
Μια εκδοχή του ίδιου προβλήματος, που όμως έχει μελετηθεί πολύ λιγότερο, είναι η ροή κατά μήκος ενός περιοδικού κυματοειδούς τοιχώματος. Το πρακτικό ενδιαφέρον για την μελέτη ροής σε τέτοιο τοίχωμα είναι οι υποψίες εντατικοποίησης των συντελεστών μεταφοράς. Τυπικά

παραδείγματα αποτελούν οι συμπυκνωτές και οι εξατμιστήρες, καθώς και τα κατάλληλα δομημένα πληρωτικά υλικά (κυματοειδείς πτυχές, μεταλλικά ελάσματα) που χρησιμοποιούνται σε στήλες απορρόφησης και στην απόσταξη με δίσκους. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται σχηματικά ένας συμπυκνωτής και στο σχήμα 1.4 παραδείγματα κυματοειδών πλακών όπου συναντάμε ροή λεπτών υμένων.



Σχήμα 1.3: Συμπυκνωτής outside tubes, vertical downflow.

Ενώ το ότι η ενίσχυση των συντελεστών μεταφοράς μάζας και θερμότητας από τα επιφανειακά κύματα είναι επιβεβαιωμένο από πειράματα, ο λόγος και ο τρόπος που συμβαίνει αυτό δεν είναι ξεκάθαρος. Είχε υποθεθεί ότι η αύξηση των συντελεστών μεταφοράς οφείλεται στην αύξηση της διεπιφάνειας με την δημιουργία κυματισμών, αλλά αυτή η πιθανότητα αποκλείστηκε πειραματικά. Κάποιες άλλες ιδέες που μελετώνται είναι το ότι η αύξηση της περιοχής ανάμειξης λόγω των κυμάτων και η μείωση του πάχους του υμένα μετά την έλευση ενός κύματος συντελούν στο υπό μελέτη φαινόμενο. Έτσι παρατηρήθηκε ότι η μεταφορά μάζας μπορεί να είναι αποτέλεσμα ενός λεπτότερου πάχους υμένα που μειώνει το οριακό στρώμα και αυξάνει το διεπιφανειακό ρυθμό ροής. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να υποθεθεί ότι το μικρό πάχος υμένα πίσω από ένα κύμα, εντατικοποιεί τη διάχυση κατά μήκος της επιφάνειας. Επίσης, σύμφωνα με άλλη μελέτη, φαίνεται ότι τα τρισδιάστατα κύματα ενισχύουν την αύξηση των συντελεστών μεταφοράς. Τα τρισδιάστατα κύματα έχουν ανοιχτές ροϊκές γραμμές και δίνες και όλα αυτά επιτρέπουν την ανακυκλοφορία των συγκεντρωμένων σωματιδίων της διεπιφάνειας. Αν και οι συνεχείς περιοχές ανακυκλοφορίας δεν επηρεάζουν άμεσα τη διεργασία μεταφοράς μάζας όπως οι περιοχές που έχουν τύρβη, η παρουσία τους έχει ισχυρή επίδραση στη δημιουργία νέων οριακών στρωμάτων που μεγαλώνουν στο χώρο μετά την έλευση ενός κύματος.



Σχήμα 1.4: Παραδείγματα μεταφοράς μάζας

1.2 Βασικά περιεχόμενα της μελέτης

Για να δοθεί μια απάντηση στο ερώτημα πως οι δημιουργούμενες δομές κατά τη ροή ενός λεπτού υμένα εντατικοποιούν τα φαινόμενα μεταφοράς είναι αναγκαίο να κατανοηθεί πλήρως οι δυναμική της ροής. Μ' άλλα λόγια μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των κυμάτων και του τρόπου δημιουργίας και ανάπτυξής τους και των παραμέτρων που τα επηρεάζουν.

Διάφορες μελέτες έχουν γίνει μέχρι τώρα κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο άλλα και σε υπολογιστικό και πειραματικό. Πρώτος ασχολήθηκε με το φαινόμενο ο Nusselt ο οποίος μελέτησε τη ροή υγρού σταθερής πυκνότητας και σταθερού ιξώδους το οποίο κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας, σε κεκλιμένο επίπεδο μήκους L με τη θεώρηση της αμελητέας επίδρασης των άκρων. Πολλά ερωτήματα πάνω στη ροή λεπτού υμένα υγρού, όπως η ανάλυση της ευστάθειας της ροής, τα είδη και οι περιοχές αστάθειας, οι μηχανισμοί δημιουργίας κυμάτων και περιοχές εξέλιξης της ροής, έχουν μελετηθεί και απαντηθεί από πολλούς ερευνητές τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.

Σύμφωνα με ένα ευρύ φάσμα πειραματικών μελετών (Alekseenko et al. 1985, Liu & Gollub 1993, 1994, Vlachogiannis & Bontozoglou 2001, Yoshimura et al. 1996) καθώς και θεωρητικών/υπολογιστικών (Chang et al. 1986, 1994, 1995, 2002, Malamataris et al. 2002, Pumir et al. 1983 κ.α.) η δυναμική της ροής λεπτού υμένα υγρού σε χαμηλούς και μέσους αριθμούς Re καθορίζεται από την εμφάνιση μοναχικών κυμάτων, δηλαδή μιας σειράς κυμάτων τα οποία απέχουν αρκετά μεταξύ τους. Τα μοναχικά κύματα χαρακτηρίζονται από μια ασύμμετρη κορυφή με απότομο μπροστινό μέρος και ομαλό πίσω (ουρά) η οποία ακολουθεί μια σειρά μικρών, τόσο σε ύψος όσο και σε μήκος κύματος, κυματισμών. Τα κύματα αυτά, είτε κάτω από την επίδραση του φυσικού θορύβου ή μιας συστηματικά επιβαλλόμενης διαταραχής (Kapitza & Kapitza 1965), αναπτύσσονται εξελίσσονται και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Ένα χαρακτηριστικό αυτών των κυμάτων είναι η γραμμική εξάρτηση της φασικής τους ταχύτητας από το ύψος τους Έτσι οι μεγαλύτερες κορυφές κινούνται πιο γρήγορα από τις

μικρότερες και συνήθως αλληλεπιδρούν μαζί τους. Το ύψος των κυμάτων επίσης σχετίζεται με το μήκος κύματος και επομένως με τη συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής. Αυτές και άλλες ιδιότητες των μοναχικών κυμάτων έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, αλλά μια συστηματική παραμετρική μελέτη δεν φαίνεται να έχει γίνει. Ένα άλλο θέμα το οποίο δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά στη βιβλιογραφία είναι η επίδραση των κυμάτων στη διατμητική τάση στο τοίχωμα, στην δημιουργία και ανάπτυξη των παραπάνω κυμάτων σε ροή υγρού υμένα. Έτσι λοιπόν, το πρώτο μέρος της εργασίας έχει αφιερωθεί στη συστηματική πειραματική μελέτη των παραπάνω ιδιοτήτων.-

Όπως προαναφέρθηκε, η γένεση των κυμάτων οφείλεται σε διαταραχές στη ροή, τόσο τυχαίες, όσο και τις συστηματικά επιβαλλόμενες. Στην πρώτη περίπτωση, δημιουργείται και αναπτύσσεται μια ακανόνιστη σειρά κυμάτων λόγω της πρωταρχικής αστάθειας κατά μήκος της διεύθυνσης ροής. Στην δεύτερη περίπτωση, η μορφή των κυμάτων ποικίλει ανάλογα με το είδος της επιβαλλόμενης διαταραχής. Πιο συγκεκριμένα, μεγάλες συχνότητες διαταραχής οδηγούν σε κορεσμένα περιοδικά κύματα, ενώ μικρές συχνότητες διαταραχής σε μοναχικά κύματα (Liu & Gollub 1993). Η γενική ιδέα για την δημιουργία των κυμάτων είναι ότι εμφανίζονται με συχνότητα ίδια με την συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής. Το εύρος των συχνοτήτων εξωτερικής διαταραχής που δημιουργούν κύματα με την ίδια συχνότητα εμφάνισης περιορίζεται από ένα μέγιστο πέρα από το οποίο οι διαταραχές γίνονται γραμμικώς ευσταθείς. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει και μια ελάχιστη συχνότητα στην οποία παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο. Κάτω από αυτό το όριο φαίνεται από τη βιβλιογραφία ότι η κανονική σειρά των κυμάτων χαλαίει από την εμφάνιση νέων κυμάτων οι οποίες ακολουθούν την κύρια κορυφή των μοναχικών κυμάτων. Το φαινόμενο αυτό έχει αναφερθεί (Alekseenko et al. 1985, Yoshimura et al. 1996), αλλά δεν έχει μελετηθεί συστηματικά πειραματικά. Για το λόγο αυτό, μέρος του διδακτορικού ερευνά πειραματικά τον τρόπο δημιουργίας και ανάπτυξης των νέων αυτών κορυφών σε χαμηλές συχνότητες διαταραχής, προσπαθώντας να ανακαλύψει το φυσικό μηχανισμό γένεσής τους.

Η περίπτωση της ροής πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, παρά τις πολυάριθμες εφαρμογές της, έχει μελετηθεί πολύ λιγότερο από ότι αυτή του επίπεδου τοιχώματος. Μεταξύ των πρώτων, ο Wang (1981) επικεντρώνεται στη θεωρητική μελέτη της ροής ενός λεπτού υμένα σε κυματοειδές τοίχωμα, θεωρώντας μικρούς αριθμούς Re και μικρό πλάτος τοιχώματος. Παρατήρησε λοιπόν ο Wang, ότι στην ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζεται μια στατική περιοδική δομή η οποία έχει μήκος κύματος ίδιο με αυτό του τοιχώματος. Σε μεγαλύτερους Re , έχει αναφερθεί (Bontozoglou & Paparolymerou, 1997) ότι το κυματοειδές τοίχωμα έρχεται σε συντονισμό με την ελεύθερη επιφάνεια δημιουργώντας μεγάλες στατικές διαταραχές. Αντίστοιχες μελέτες, υπολογιστικές και πειραματικές, έχουν γίνει κυρίως για την περίπτωση της έρπουσας ροής. Για ροή σε πεπερασμένους αριθμούς Re , τα μόνα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από τους Vlachogiannis & Bontozoglou (2002). Συνεπώς, είναι ακόμη σχετικά άγνωστος ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η ροή από την ύπαρξη της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Ειδικότερα, ενδιαφέρουν οι διαφοροποιήσεις τόσο της μόνιμης ροής όσο και της ασταθούς με οδεύοντα κύματα. Απάντηση σε ένα τμήμα των σύνθετων αυτών ερωτημάτων προσπαθήσαμε να δώσουμε σε ένα ακόμα τμήμα της παρούσας διδακτορικής εργασίας.

Η ροή πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας ήταν ένα θέμα το οποίο δεν έχει μελετηθεί καθόλου μέχρι τώρα στην βιβλιογραφία. Ποια είναι η μορφή και οι αλληλεπιδράσεις

των δομών και των κυμάτων που δημιουργούνται; Πιο συγκεκριμένα, πώς επηρεάζει η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής την μορφή και την συχνότητα εμφάνισης των δημιουργούμενων κυμάτων; Ποιες οι ομοιότητες και ποιες οι διαφορές με την ροή σε επίπεδο τοίχωμα κάτω από τις ίδιες συνθήκες; Απάντηση σε αυτά τα ερωτήματα δόθηκε στο τέταρτο και τελευταίο μέρος της εργασίας.

1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων

Οι κύριες φυσικές και λειτουργικές παράμετροι που μεταβάλλονται στην παρούσα εργασία είναι ο ιξώδες του υγρού, η παροχή του υμένα, η κλίση του τοιχώματος, η ύπαρξη και η μορφή εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών και το ύψος της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Η επιλογή των τιμών των παραμέτρων υπαγορεύεται από τρεις αλληλοσυγκρουόμενους παράγοντες:

- (1) Την αποκατάσταση συνθηκών που επιτρέπουν καλύτερη ταυτοποίηση και μελέτη των θεμελιωδών μηχανισμών που διέπουν τα εκάστοτε φαινόμενα ροής.
- (2) Την κατά το δυνατόν προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν σε βιομηχανικές συσκευές.
- (3) Τον περιορισμό του όγκου της πειραματικής εργασίας σε ρεαλιστικά μεγέθη.

Ειδικότερα, παρατηρούμε τα εξής: Όσον αφορά το ιξώδες, χρησιμοποιούνται νερό και διαλύματα νερού-γλυκερίνης. Αν και δεν έχει γίνει συστηματική μελέτη της επίδρασης του, οι τιμές που προκύπτουν είναι συνηθισμένες σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αντίστοιχα, οι παροχές υγρού εξασφαλίζουν τιμές του αριθμού Re στην περιοχή $10 < Re < 500$. Το εύρος αυτό αντιστοιχεί σε συνθήκες στρωτής ροής με έλεγχο της δυναμικής από τα επιφανειακά κύματα. Η δυναμική της ελεύθερης επιφάνειας αποτελεί εξάλλου το κύριο αντικείμενο της μελέτης. Τέτοιες συνθήκες στρωτής ροής είναι συνηθισμένες σε πολλές συσκευές μεταφοράς μάζας και αρκετές μεταφοράς θερμότητας. Σε ορισμένες από τις τελευταίες, οι παροχές είναι ακόμη υψηλότερες ώστε δημιουργούνται σε ένα τμήμα του ενεργού μήκους συνθήκες τυρβώδους ροής. Η περιοχή αυτή είναι εκτός των ορίων της παρούσας μελέτης. Επίσης, δεν μελετήθηκε η περιοχή των πολύ μικρών αριθμών Re , η οποία παρουσιάζει ενδιαφέρον σε διεργασίες επικάλυψης καθώς και σε φαινόμενα διακοπής της συνέχειας πολύ λεπτών υμένων και σχηματισμού «στεγνών κηλίδων».

Η επιλογή των κλίσεων τοιχώματος που μελετήθηκαν υπαγορεύεται κυρίως από τους πειραματικούς περιορισμούς. Πράγματι, οι περισσότερες μετρήσεις είναι σε μικρές κλίσεις, ενώ οι βιομηχανικές εφαρμογές αφορούν εντονότερα κεκλιμένα και συχνά κατακόρυφα τοιχώματα. Όμως, η διεθνής βιβλιογραφία έχει δείξει ότι τα φαινόμενα είναι και στις δύο περιπτώσεις τα ίδια, απλά η διάρκεια τους σε μήκος ροής διαφέρει αισθητά. Έτσι, επιλέγοντας μικρές κλίσεις επιβραδύνουμε τη δυναμική και επιτρέπουμε βελτιωμένη καταγραφή και κατανόηση των φαινομένων.

Η εισαγωγή στο σύστημα διαταραχών καθορισμένης συχνότητας έχει θεμελιώδη αλλά και εφαρμοσμένη χρησιμότητα. Αφενός, αυξάνει την κανονικότητα της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας στα πειράματα και επιτρέπει ευχερέστερη μέτρηση των χαρακτηριστικών της. Αφετέρου, αποκαλύπτει το εύρος συχνοτήτων του θορύβου που επιδρά στη δυναμική της ροής. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να είναι είτε φυσικός -όπως είναι αναπόφευκτο σε βιομηχανικό περιβάλλον- είτε τεχνητός, προκαλούμενος ακριβώς για να διαφοροποιήσει τη ροή και να βελτιστοποιήσει τα φαινόμενα μεταφοράς.

Τέλος, η διαμόρφωση του τοιχώματος επιλέχθηκε για να προσομοιώσει την συμπεριφορά εκτεταμένων επιφανειών μεταφοράς θερμότητας και μάζας (πετύγια, πληρωτικά υλικά), όπως αναφέρθηκε στις εφαρμογές του κεφαλαίου 1.1. Αν και οι βιομηχανικές επιφάνειες είναι συχνά πολύπλοκες με δύο ή περισσότερες χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους, η επιλογή τους βασίζεται σε εμπειρικές δοκιμές και ελάχιστα είναι σήμερα γνωστά για τη θεμελιώδη δυναμική των φαινομένων. Στην παρούσα εργασία γίνεται η πρώτη συστηματική προσπάθεια προσδιορισμού της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διαμόρφωσης του τοιχώματος, και έτσι μελετάται ένα μήκος κύματος και τρία ύψη. Επίσης, η ορθογωνική μορφή της διαμόρφωσης, αν και ρεαλιστική για πρακτικές εφαρμογές, υπαγορεύεται επίσης από την ευκολία με την οποία επιτρέπει εφαρμογή της πειραματικής τεχνικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αναφέρονται συνοπτικά η θεωρία και οι μέχρι τώρα μελέτες που σχετίζονται με την ροή λεπτού υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο κανάλι. Αρχικά καταστρώνονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα καθώς και οι λύσεις του προβλήματος της γραμμικής ευστάθειας. Το υπόλοιπο κεφάλαιο έχει χωριστεί σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος περιγράφονται οι θεωρητικές, οι υπολογιστικές και οι πειραματικές μελέτες πάνω στη μη-γραμμική ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μελέτες για περιοδικά διαμορφωμένο κεκλιμένο τοίχωμα.

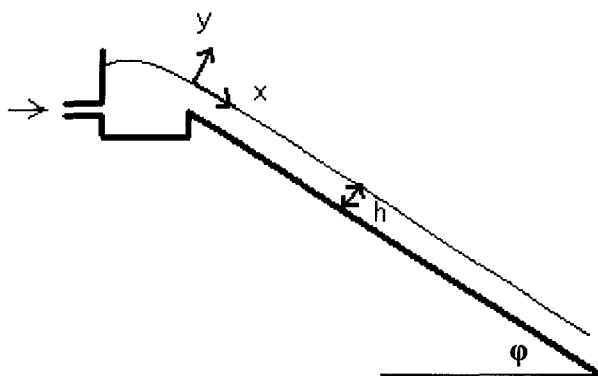
2.1 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα

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

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

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

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



Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.

Με απλοποιήσεις παίρνουμε:

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

με:

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

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα είναι:

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

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

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

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

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

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

και συναρτήσει της μέσης ταχύτητας από τη σχέση:

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

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

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

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

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

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

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

2.2 Θεωρία γραμμικής ευστάθειας για τη ροή υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο

Το πρόβλημα της ροής υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο δίνει, πέρα από έναν αριθμό Re , ασταθείς λύσεις. Αν επιβάλλουμε στη ροή μια διαταραχή (μονοχρωματική ή απλώς θόρυβο) αυτή αναπτύσσεται κατά μήκος του πεδίου ροής και οδηγεί στην εμφάνιση κυμάτων και άλλων

τριδιάστατων δομών. Επειδή οι διδιάστατες διαταραχές (διαταραχή συγκεκριμένης συχνότητας) είναι πιο ασταθείς από τις τριδιάστατες και τα δημιουργούμενα διδιάστατα κύματα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της ροής, η μελέτη της γραμμικής ευστάθειας στηρίζεται στη θεώρηση των διδιάστατων διαταραχών.

Αδιαστατοποιώντας τις βασικές εξισώσεις της ροής με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πίνακα 1, η ταχύτητα, η ροϊκή συνάρτηση και η πίεση είναι αντίστοιχα:

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

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

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

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

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη για την αδιαστατοποίηση

Επιβάλλουμε λοιπόν στη ροή διδιάστατη διαταραχή της μορφής:

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

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

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

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

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

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

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα είναι:

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

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

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

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

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

Η λύση για το παραπάνω πρόβλημα, για κύματα μεγάλου μήκους (όπου $\alpha = \frac{2\pi h_N}{L} \ll 1$)

έχει δοθεί από τον Yih (1963) ως εξής:

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

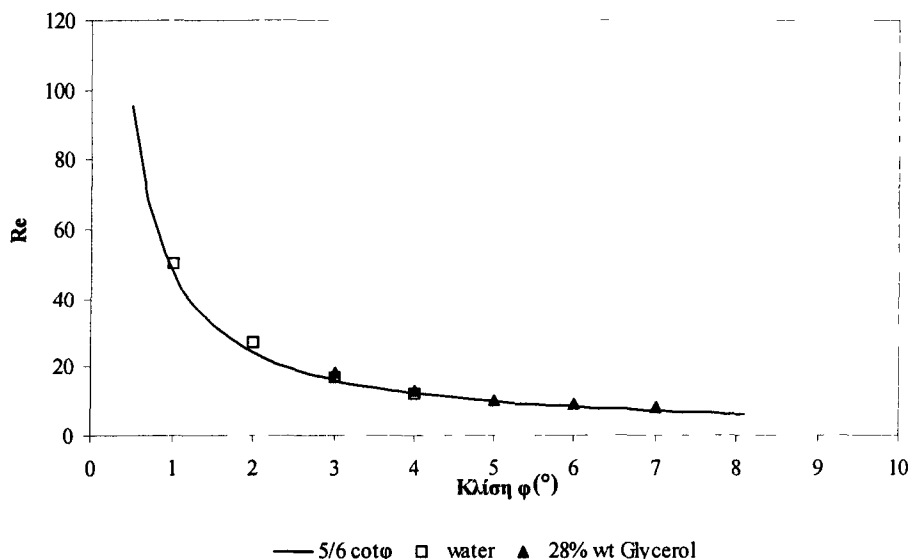
$$f(y) = f_0(y) + \alpha f_1(y) + \alpha^2 f_2(y) + \dots \quad (2.20)$$

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

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

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

Η σχέση αυτή του κρίσιμου αριθμού Reynolds με την γωνία κλίσης της ροής επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους Liu et al (1993) και στη συνέχεια από τους Vlachogiannis & Bontozoglou (2002). Στο σχήμα 2.2 βλέπουμε τον κρίσιμο Re ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης για 2 διαφορετικά ρευστά. Στο ίδιο σχήμα, οι καμπύλες αυτές συγκρίνονται με την θεωρητική πρόβλεψη για επίπεδο τοίχωμα.



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

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2 έγιναν με νερό και διάλυμα νερού – γλυκερίνης 26% κ.β. Οι δύο σειρές των πειραματικών αποτελεσμάτων συμπίπτουν, αποδεικνύοντας ότι η αστάθεια εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Re και όχι από το είδος του ρευστού.

2.3 Μη γραμμική εξέλιξη της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα

2.3.1. Θεωρία

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

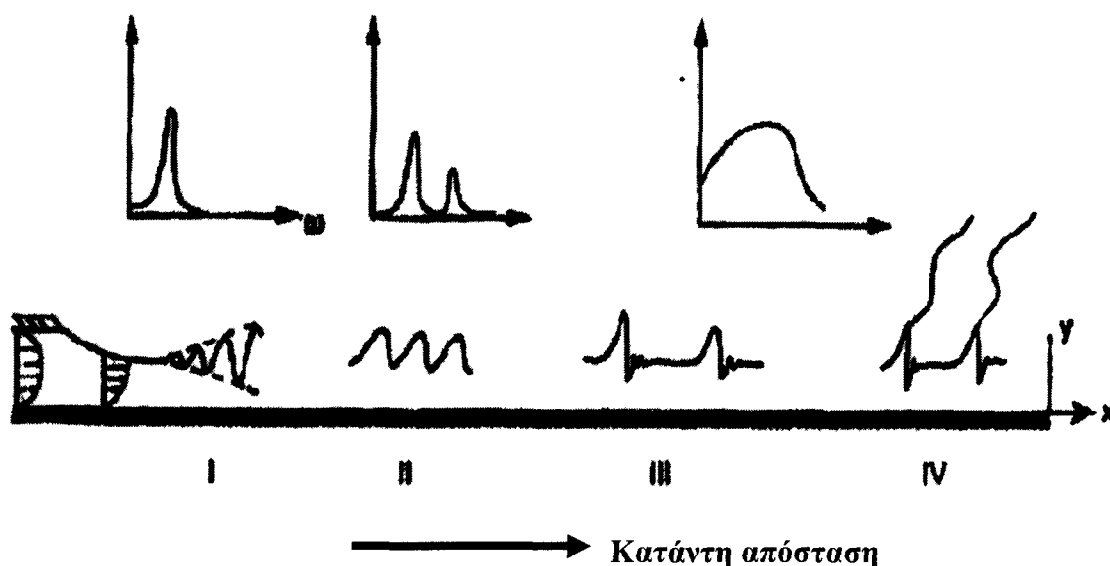
Συγχρόνως, ο Chang (1994) περιέγραψε συστηματικά την εξέλιξη της ροής λεπτού υμένα υγρού κατά μήκος κεκλιμένης επίπεδης επιφάνειας. Τα διαφορετικά στάδια της εξέλιξης τα χώρισε σε τέσσερις περιοχές (σχήμα 2.3). Η πρώτη περιοχή (περιοχή I) αναφέρεται στα αρχικά στάδια της εξέλιξης του υμένα κοντά στην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

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

Προχωρώντας κατάντη της ροής η μέχρι τώρα μορφή χάνεται, και εμφανίζονται δύο άλλες μορφές αστάθειας των κυμάτων πεπερασμένου μεγέθους (περιοχή III). Το ποια από τις δύο θα εμφανιστεί εξαρτάται από τη συχνότητα της διαταραχής. Στην μία περίπτωση της υποαρμονικής αστάθειας (subharmonic instability), τα κύματα αρχίζουν να ενώνονται μεταξύ



τους δημιουργώντας έτσι μία καινούρια κυματομορφή η οποία έχει πολλαπλάσιο μήκος κύματος. Στην άλλη περίπτωση, της πλευρικής αστάθειας (sideband instability), η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας είναι πολύ πιο πολύπλοκη και παρουσιάζει πολλές κορυφές (έχει πολλές συχνότητες αυτή η μορφή). Και στις δύο περιπτώσεις, βλέπουμε τις νέες αυτές μορφές αστάθειας να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Μεγαλύτερα κύματα πλησιάζουν και προσπερνάνε μικρότερα τα οποία εξαφανίζονται. Συγχρόνως αυτά αποκτούν μια πολύ υπερυψωμένη και απότομη μπροστινή πλευρά της οποίας προηγούνται μικρά τριχοειδή κύματα (capillary ripples). Τα μεγάλα αυτά κύματα ονομάζονται μοναχικά (solitary waves) και συνήθως παραμένουν αναλλοίωτα για σημαντικό μήκος ροής.



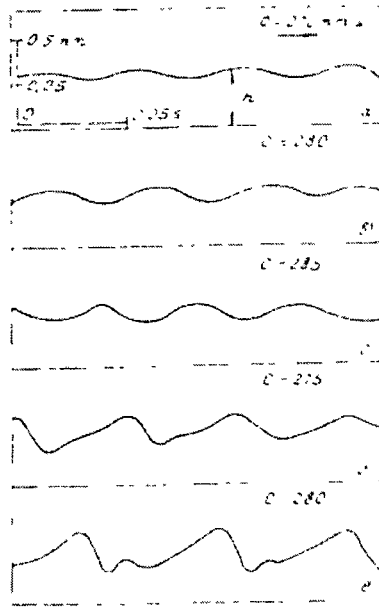
Σχήμα 2.3: Τέσσερις περιοχές του κύματος κατά την εξέλιξή του κατά Chang.
 Η παράμετρος ω είναι η συχνότητα του κύματος.

Στην περιοχή εξέλιξης IV, οι κορυφές των μεγάλων κυμάτων αρχίζουν να διαχωρίζονται εγκάρσια με αποτέλεσμα την δημιουργία τρισδιάστατης δομής. Η ανάπτυξη της τρισδιάστατης αυτής δομής είναι αποτέλεσμα της επίδρασης ανάλογων ασταθειών στη πλήρως αναπτυγμένη διδιάστατη δομή. Η δομή που δημιουργείται σε αυτή την περίπτωση φαίνεται να μην αλλάζει με το χρόνο. Τα τρισδιάστατα κύματα εξακολουθούν να διατηρούν τη μορφή των μοναχικών κυμάτων και όπως προείπαμε χαρακτηρίζονται από το απότομο μπροστινό τους μέρος και την πιο ομαλή «ουρά».

2.3.2. Πειράματα

Η μη – γραμμική εξέλιξη της ροής έχει διερευνηθεί πειραματικά από διάφορες ερευνητικές ομάδες. Μια από τις σημαντικότερες εργασίες η οποία αποτελεί σημείο αναφοράς στη ροή υγρού υμένα είναι αυτή των Alekseenko et al. (1985). Από αυτή τη μελέτη δόθηκαν στοιχεία για την εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα επιβολής διαταραχής το οποίο έδινε τη δυνατότητα αλλαγής των χαρακτηριστικών της διαταραχής. Η μέτρηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων, δηλαδή της ταχύτητας και του μήκους κύματος τους, συναρτήσε του μεγέθους αυτών αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της

εργασίας. Παρατηρήθηκε εξάρτηση της ταχύτητας των παραγόμενων μοναχικών κυμάτων από το μέγεθός τους. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα.



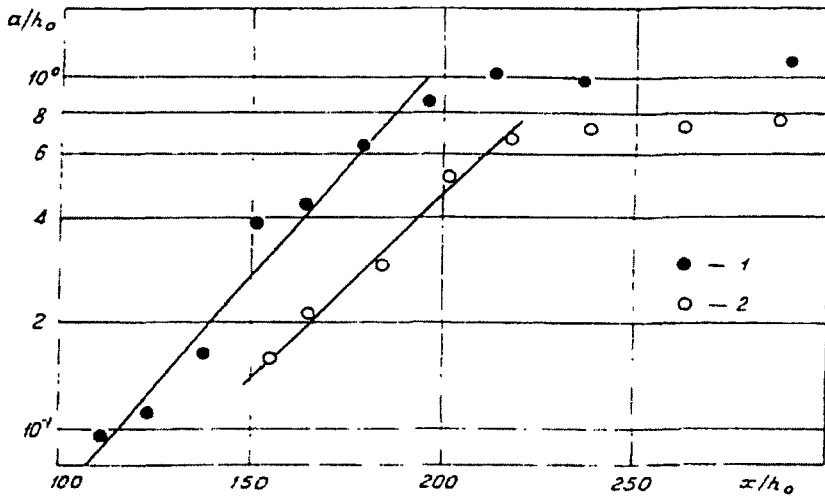
Σχήμα 2.4: Ανάπτυξη μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής.

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

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

ως συνάρτηση της αδιάστατης κατάντη αποστάσεως:

$$\frac{x}{h_0}$$

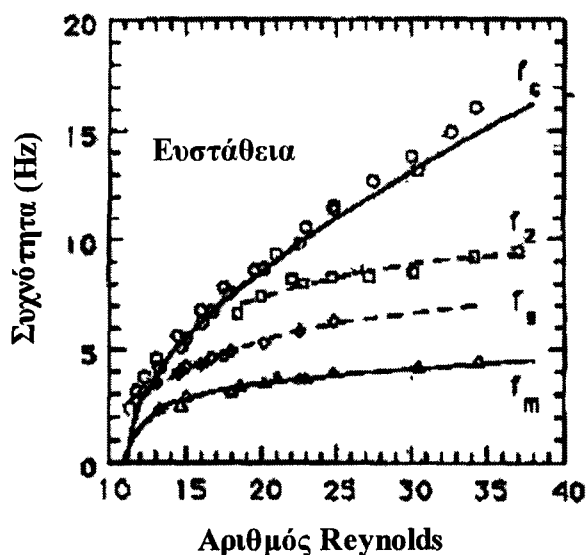


Σχήμα 2.5: Εξάρτηση του μεγέθους των μοναχικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως της κατάντη ροής.

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

Άλλη μια σημαντική εργασία είναι αυτή των Liu et all (1993, 1994). Στην περίπτωση αυτή για τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό. Αποδείχθηκε ότι η μη γραμμική ανάπτυξη των κυμάτων είναι συνάρτηση τόσο του αριθμού Reynolds όσο και των χαρακτηριστικών της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Στα αποτελέσματά τους παρουσιάζεται η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ του κρίσιμου, για την εμφάνιση αστάθειας, αριθμού Re και της γωνίας κλίσης του τοιχώματος όπως παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.2. Επιβεβαιώθηκαν τα περισσότερα θεωρητικά προβλεπόμενα όρια της γραμμικής ευστάθειας. Όταν ο αριθμός Re βρίσκεται στην ασταθή περιοχή, απέδειξαν πειραματικά ότι η αρχική αστάθεια μετακινείται στην κατεύθυνση της ροής και συνεχώς μεγαλώνει. Τα όρια τα οποία χωρίζουν τις διάφορες περιοχές ευστάθειας και αστάθειας βρίσκονται συγκεντρωμένα στο διάγραμμα του σχήματος 2.6.

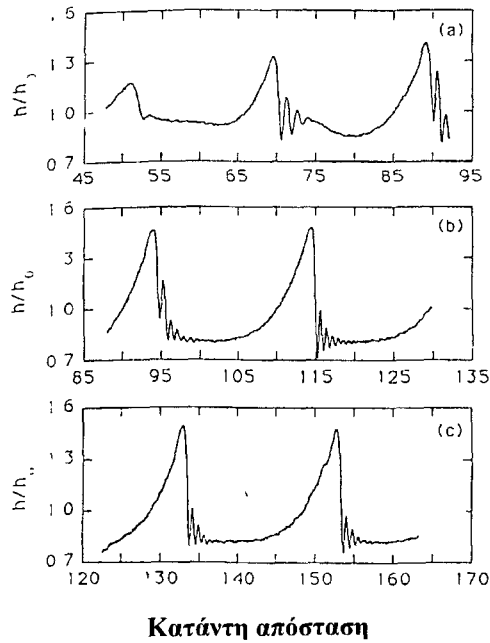
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ότι για μικρούς αριθμούς Re ο υμένας είναι ευσταθής. Επίσης για μεγάλες συχνότητες έχουμε ευστάθεια ανεξάρτητα τον Re. Η καμπύλη η οποία χαρακτηρίζεται ως f_c είναι αυτή η οποία χωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή. Μεταξύ αυτής της συχνότητας και της συχνότητας f_s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



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

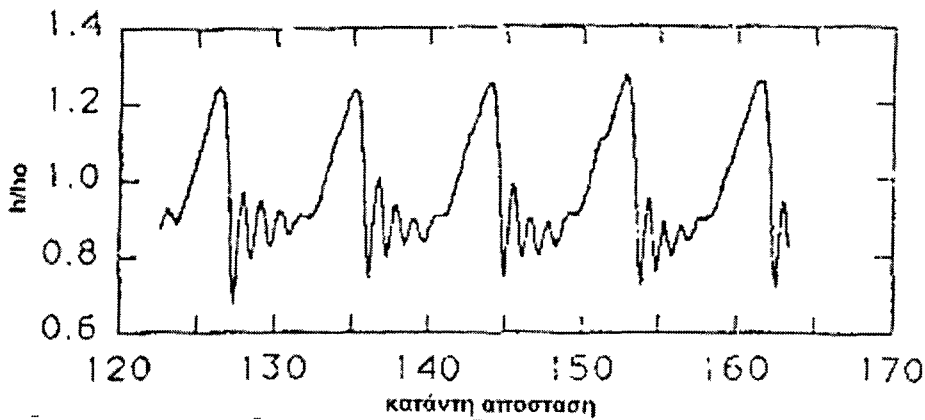
Η ανάπτυξη και εξέλιξη των μοναχικών κυμάτων έχει μελετηθεί πειραματικά από τους Liu & Gollub (1994) χρησιμοποιώντας υγρό μεγάλου ιξώδους (διάλυμα νερού γλυκερίνης 54% κ.β. γλυκερίνη). Για συχνότητα διαταραχής 1,5 Hz παρατηρήθηκε ότι στην είσοδο της

διαταραχής εμφανιζόταν ένα ημιτονοειδές κύμα το οποίο εξελίσσεται και η κάθε κορυφή παρουσιάζει απότομο μέτωπο και μακριά ουρά (σχήμα 2.7). Σταδιακά, τα κύματα αυτά εξελίσσονται και παίρνουν τη μορφή των μοναχικών κυμάτων. Έτσι το μοναχικό κύμα γίνεται κορεσμένο και φτάνει σε μια στάσιμη κατάσταση όπου οι διαδοχικοί παλμοί είναι ταυτόσημοι.



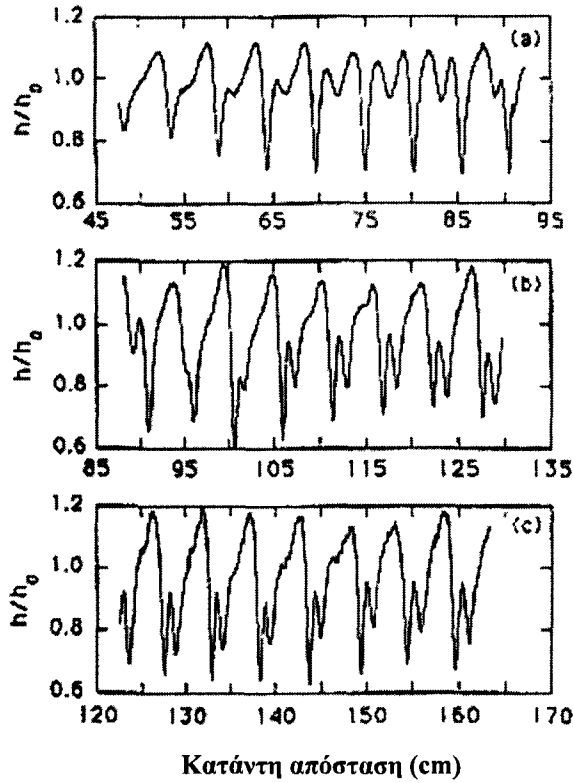
Σχήμα 2.7: Εμφάνιση μοναχικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 1,5 Hz.

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



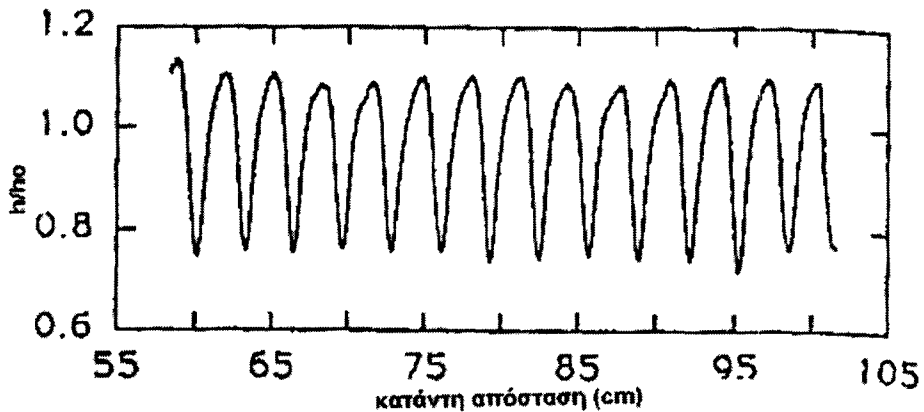
Σχήμα 2.8: Μορφή κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 3 Hz.

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



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

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



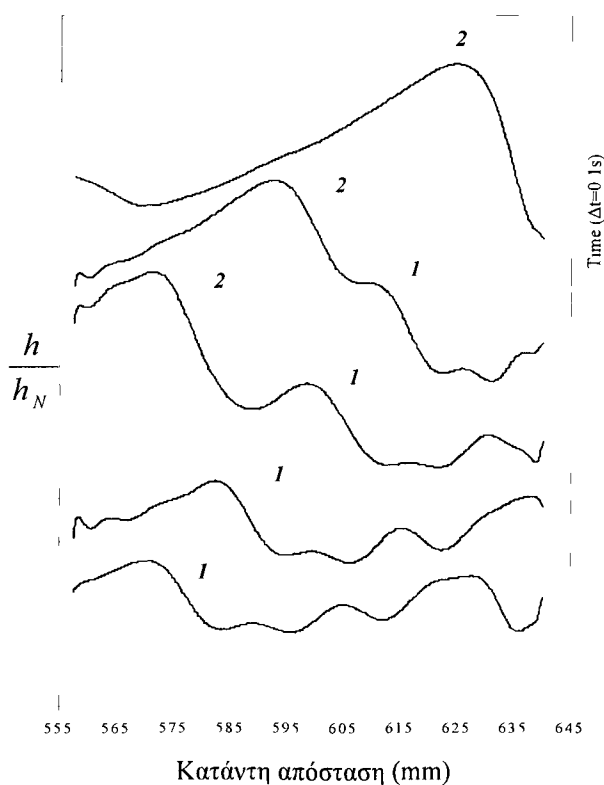
Σχήμα 2.10: Εμφάνιση κορεσμένων περιοδικών κυμάτων για συχνότητα διαταραχής 7 Hz.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι αστάθειες του υμένα μετατρέπονται από διδιάστατες σε τρισδιάστατες. Οι αστάθειες αυτές μπορεί να εμφανίζονται με τη μορφή τρισδιάστατων εγκάρσιων βαθουλωμάτων πάνω στα κύματα, ή με τη μορφή της δομής «ψαροκόκαλο» (herringbone patterns). Η σύζευξη των διαφόρων ασταθειών οδηγεί σε πλήρως τρισδιάστατες δομές, με κύρια χαρακτηριστικά τις αλλαγές κατεύθυνσης του μετώπου του κύματος, το διαχωρισμό του σε περισσότερα μέτωπα και τη δημιουργία μιας χαοτικής δομής.

2.3.3. Αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων

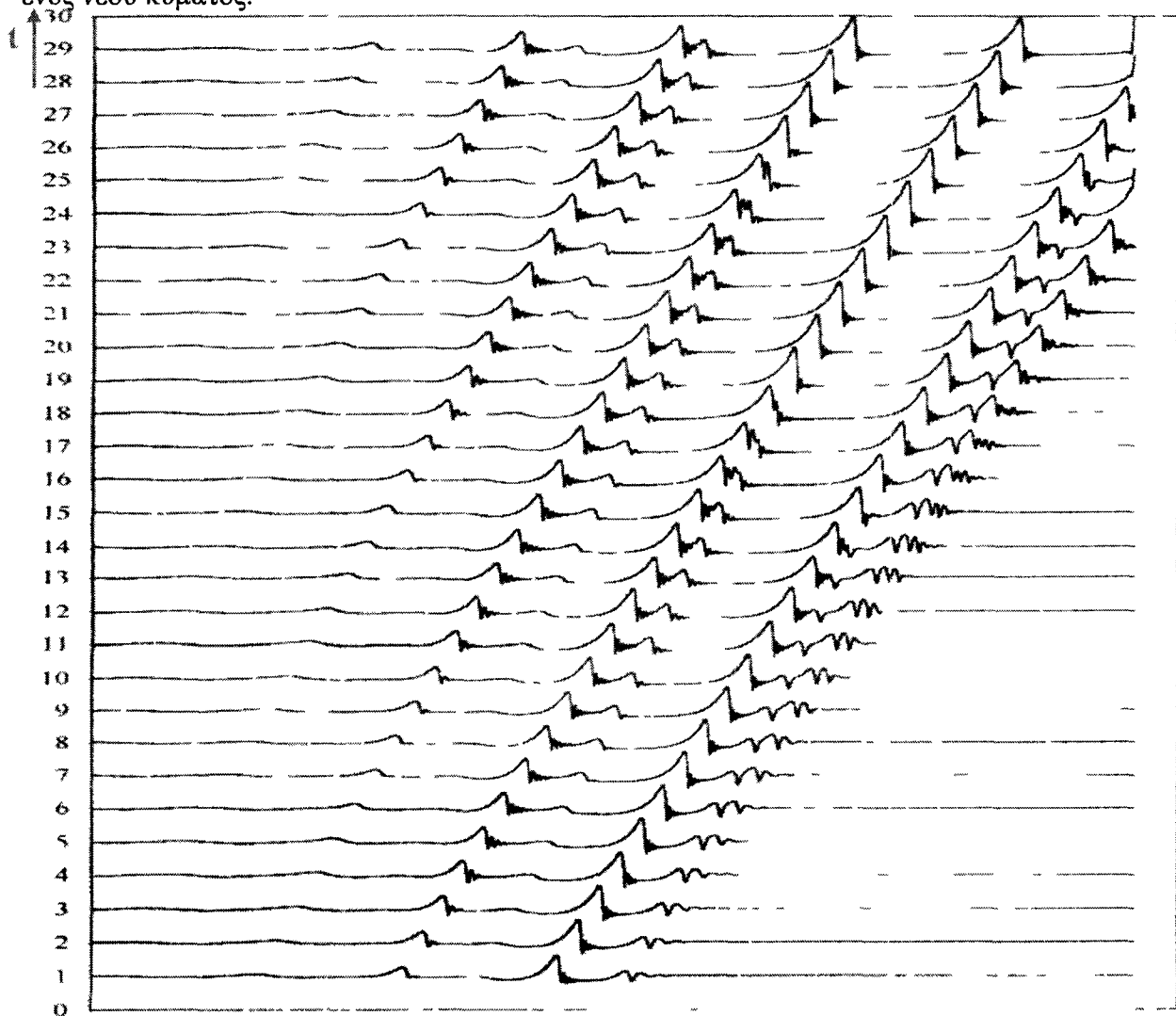
Η αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα τόσο για τη ροή υγρού υμένα όσο και για άλλους τομείς της φυσικής όπου παρατηρούνται λύσεις μοναχικών κυμάτων. Το γενικότερο ερώτημα αφορά την δυνατότητα περιγραφής πολύπλοκων συστημάτων μέσω των χαρακτηριστικών και της αλληλεπίδρασης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

Προβλέψεις για την αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων έχουν γίνει από τους Chang, Demekhin & Kalaidin (1995). Οι Liu et al (1994) παρατήρησαν πειραματικά τη συγχώνευση μεταξύ δύο κυμάτων εκ των οποίων το προπορευόμενο είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που ακολουθεί. Παρόλα αυτά, η δημιουργία μοναχικών κυμάτων και η αλληλεπίδρασή τους δεν μελετήθηκαν λεπτομερώς από τους προαναφερθέντες μελετητές. Στην εργασία των Vlachogiannis and Bontozoglou (2001) μελετήθηκε διεξοδικά η διαδικασία της συγχώνευσης των κυμάτων, και παρατηρήθηκε ότι η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο κυμάτων αποτελεί τον βασικό παράγοντα που καθορίζει την χρονική διάρκεια της συγχώνευσης καθώς και τη χρονική διάρκεια της διαδικασίας απόκτησης της τελικής μορφής του νέου κύματος. Όταν η διαφορά είναι μικρή, ο χρόνος που απαιτείται είναι μεγάλος. Η μέγιστη χρονική διάρκεια παρατήρησης της εξέλιξης των αλληλεπιδράσεων είναι της τάξης των 0,5 έως 0,6 sec, ανάλογα με το μέγεθος, άρα και την ταχύτητα των κυμάτων. Επίσης παρατηρήθηκε ότι αν η διαφορά ύψους είναι μικρότερη από $0,1 h_N$ τα κύματα πλησιάζουν αρκετά, χωρίς ωστόσο να συγχωνεύονται. Αντίθετα δημιουργείται μια δομή δύο κορυφών οι οποίες κινούνται μαζί κατά μήκος του πεδίου ροής, και οι οποίες αργότερα πιθανόν να καταλήξουν στη δημιουργία δύο ανεξάρτητων μοναχικών κυμάτων.



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

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



Σχήμα 2.12 Εξέλιξη ροής για αρχική διαταράχνη συχνότητας 1 Hz

Στην εργασία των Malamataris, Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) έγιναν εκτεταμένες προσομοιώσεις της αλληλεπίδρασης μοναχικών κυμάτων και προβλέφθηκε η ύπαρξη τριών διαφορετικών σεναρίων: μονοτονικής έλξης με συνέπεια τη συγχώνευση, μονοτονικής άπωσης με δημιουργία ζεύγους κορυφών και περιοδικής έλξης-άπωσης. Επίσης, εξετάστηκε η εξέλιξη διαταραχών πολύ μικρής συχνότητας και διατυπώθηκε η πρόβλεψη ανάπτυξης δευτερευουσών κορυφών μεταξύ των κύριων κυμάτων. Το σενάριο δημιουργίας των δευτερευουσών κορυφών και αλληλεπίδρασής τους με τις κύριες φαίνεται στο σχήμα 2.12. Οι παραπάνω προκαταρκτικές προβλέψεις των Malamataris et al (2002) εξετάστηκαν πειραματικά και επιβεβαιώθηκαν για πρώτη φορά στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

2.4 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα

2.4.1. Θεωρία-Υπολογισμοί μόνιμης ροής

Η περίπτωση της ροής πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, παρά τις πολυάριθμες εφαρμογές της, έχει μελετηθεί πολύ λιγότερο από ότι αυτή του επίπεδου τοιχώματος. Τα περισσότερα από τα διαθέσιμα αποτελέσματα αφορούν την μόνιμη ροή, δηλαδή το ισοδύναμο της λύσης Nusselt για το επίπεδο τοίχωμα. Πρώτος ο Wang (1981) επικεντρώνεται στη θεωρητική μελέτη της ροής ενός λεπτού υμένα σε κυματοειδές τοίχωμα, θεωρώντας μικρούς αριθμούς Re και μικρό πλάτος τοιχώματος (συγκρινόμενο με το πάχος του υμένα). Παρατήρησε λοιπόν ο Wang ότι στην ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζεται μια στατική περιοδική δομή η οποία έχει μήκος κύματος ίδιο με αυτό του τοιχώματος. Σε μεγαλύτερους Re οι κυματοειδείς γραμμές του τοιχώματος προκαλούν ασταθή κύματα με μήκος κύματος παραπλήσιο με αυτό του τοιχώματος. Τα αποτελέσματα της επίδρασης του τοιχώματος στην ελεύθερη επιφάνεια συνοψίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 2.13. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας A εξαρτάται από τον λόγο λ του μέσου πάχους του υμένα (h) προς το μήκος κύματος του τοιχώματος (l) καθώς και από την παράμετρο D. Η παράμετρος D εκφράζει την επίδραση της διατμητικής τάσης και της γωνίας κλίσης του τοιχώματος σύμφωνα με την σχέση:

$$D = \cot \alpha \cdot \sec \beta_0 + \frac{1}{3} \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 T}{\rho \cdot \nu \cdot Q} \cdot \frac{h^3}{l^2} \quad (2.23)$$

όπου,

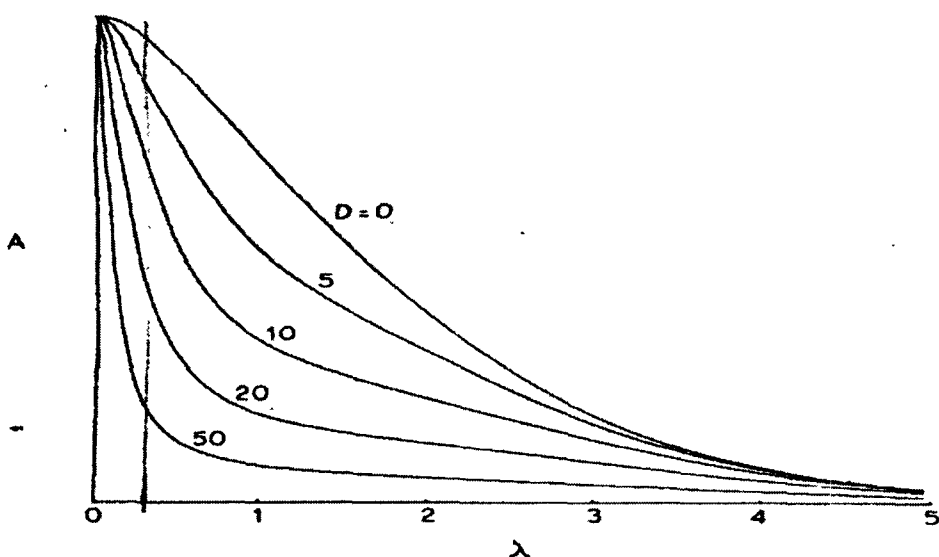
α : η μέση γωνία κλίσης του επιπέδου,

β_0 : γωνία των κυματοειδών γραμμών (wavy striations),

T: η επιφανειακή τάση και

Q: ο ρυθμός ροής (παροχή)

Από το σχήμα 2.13 φαίνεται ότι το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας αυξάνεται όσο μειώνεται το λ, δηλαδή όσο αυξάνεται το μήκος κύματος της διαμόρφωσης του κυματοειδούς τοιχώματος. Επίσης, το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας αυξάνεται με την μείωση του D δηλαδή με την αύξηση της γωνίας του τοιχώματος με την οριζόντιο ή την μείωση της επιφανειακής τάσης.



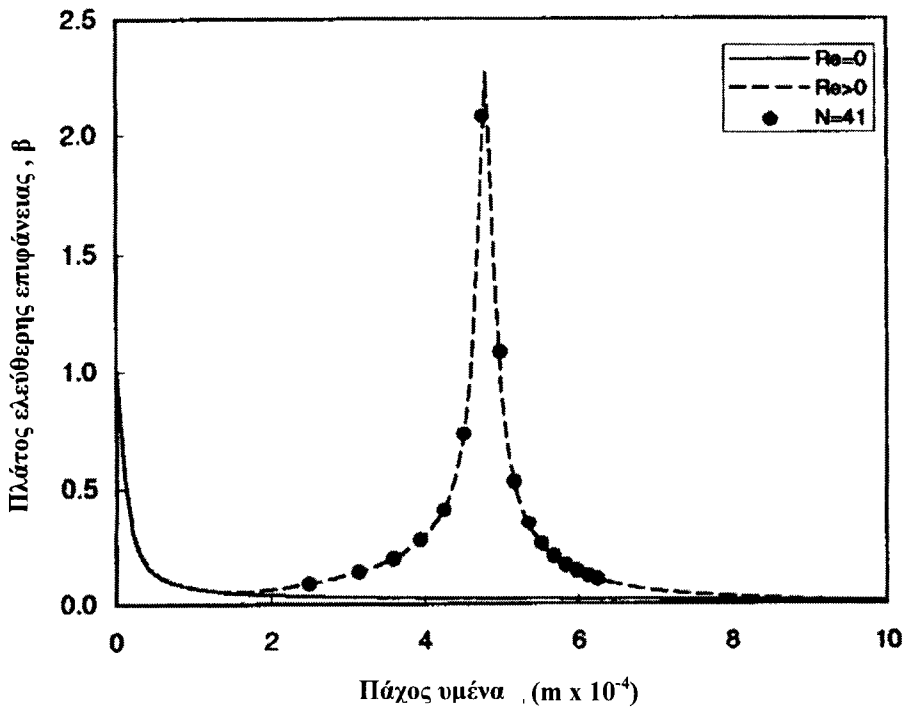
Σχήμα 2.13: Πρόβλεψη του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας από τον Wang (1981).

Επίσης, ο Rozrikidis (1988) υπολόγισε αριθμητικά την έρπουσα ροή πάνω από τοιχώματα με τυχαίο πλάτος και μορφή. Ενδιαφέροντα αποτελέσματα στην εργασία αυτή δόθηκαν για την περίπτωση του ημιτονοειδούς τοιχώματος. Έτσι, για σταθερό λόγο του πλάτους του τοιχώματος προς το μήκος κύματός του έχουμε μείωση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας όσο μεγαλώνει ο Re . Επίσης, αν κρατήσουμε σταθερό το μήκος κύματος του τοιχώματος και την παροχή τότε αυξάνοντας το πλάτος του ημιτονοειδούς τοιχώματος το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας (A) αυξάνεται. Τέλος, αν θεωρήσουμε σταθερό το πλάτος του τοιχώματος και διατηρήσουμε σταθερή την παροχή, αυξάνοντας το μήκος κύματος l , αυξάνει το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας (A). Οι Dassori, Deiber & Cassano (1984) και οι Kang & Chen (1995) επέκτειναν την μελέτη σε διαχωρισμένη ροή μεταξύ δύο υγρών. Οι Shetty & Cerro (1994) απέδειξαν με ασυμπτωτική ανάλυση ότι με την παραδοχή αμελητέας αδράνειας και τριχοειδών φαινομένων η ροή ενός ιξώδους ρευστού κατάντη κυματοειδούς επιφάνειας υπακούει σε μια τοπική λύση Nusselt. Οι προηγούμενες μελέτες αφορούν ροή με αριθμό Re πολύ κοντά στο μηδέν (έρπουσα ροή). Επίσης κάποιες από τις παραπάνω εργασίες αφορούν ροή σε κατακόρυφο τοίχωμα με διαμορφώσεις μεγάλου πλάτους στην επιφάνεια.

Οι Aksel et al (2003, 2004) παρατήρησαν τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά ότι στην περίπτωση που το πάχος του υμένα υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, δημιουργούνται και αναπτύσσονται δίνες στη ροή. Και στην περίπτωση αυτή η ροή είναι έρπουσα πάνω από τοίχωμα μεγάλου πλάτους διαμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, για συγκριτικά μικρά πλάτη τοιχώματος και μεγάλο πάχος υμένα, οι ροϊκές γραμμές ακολουθούν τη διαμόρφωση του τοιχώματος κοντά σε αυτό ενώ η ελεύθερη επιφάνεια είναι σχεδόν επίπεδη. Αυξάνοντας το πλάτος του κύματος έχουμε διαχωρισμό της ροής και εμφάνιση μιας περιοχής ανακυκλοφορίας. Οι δίνες αυτές εντοπίζονται στις κοιλότητες του τοιχώματος. Αυξάνοντας το πλάτος του τοιχώματος ακόμα περισσότερο εμφανίζεται και δεύτερη ή και περισσότερες περιοχές ανακυκλοφορίας. Συγχρόνως, η εμφάνιση των δινών εξαρτάται και από το πάχος του υμένα. Κρατώντας το ύψος κύματος σταθερό και μειώνοντας το πάχος του υμένα οι δίνες εξασθενούν σε ένταση και μέγεθος, μέχρι που εξαφανίζονται για αρκετά μικρά πάχη υμένα. Η επίδραση της

γωνίας κλίσης στις δίνες είναι αμελητέα τη στιγμή που το πάχος του υμένα είναι συγκριτικά μεγάλο.

Οι Bontozoglou & Papapolymerou (1997) μελέτησαν τη μόνιμη ροή υμένα σε ημιτονοειδές τοίχωμα σε πεπερασμένους αριθμούς Re , μέσα στα όρια της στρωτής ροής. Για μηδενικό αριθμό Reynolds ($Re=0$), τα αποτελέσματα συμπίπτουν με αυτά του Wang (1981), ενώ για μη μηδενικούς αριθμούς Reynolds παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά. Ο υπολογισμός του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσει του πάχους του υμένα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων των θεωριών στρωτής και έρπουσας ροής για το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας ($l=0,002\text{ m}$, $\phi=60^\circ$).

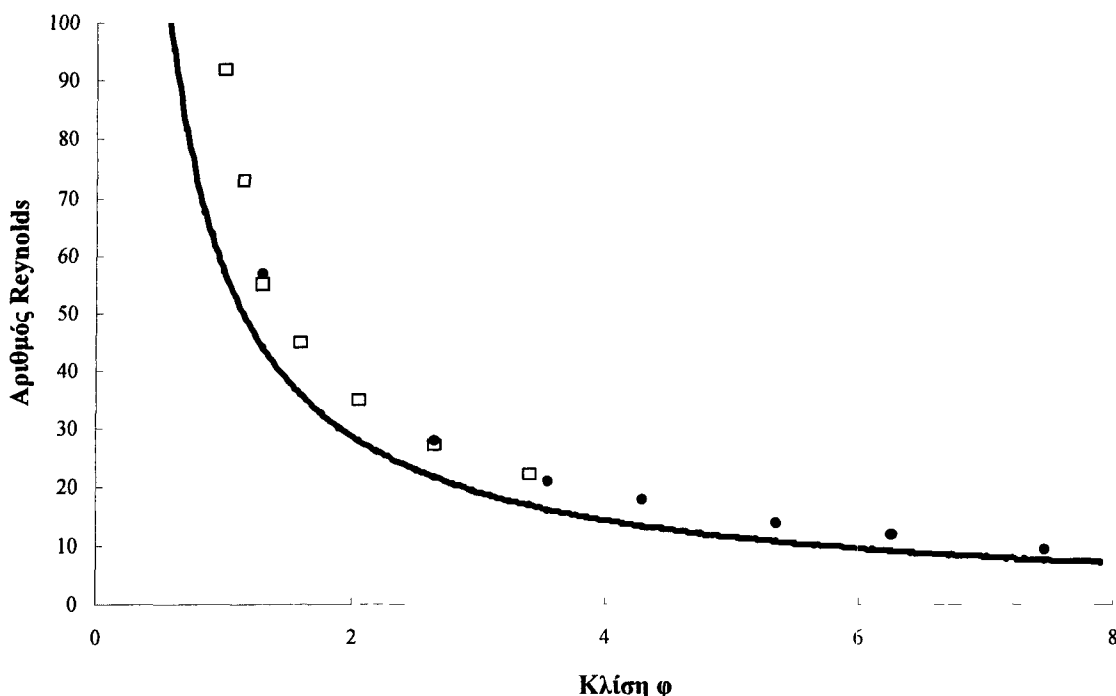
Τα αποτελέσματα για $Re=0$ και $Re>0$ συμπίπτουν καθώς το $h_N \rightarrow 0$. Τα παραπάνω αποτελέσματα αλλάζουν δραστικά όταν αυξηθεί το πάχος του υμένα (δηλ. με αύξηση του αριθμού Re), και προβλέπεται η ύπαρξη συντονισμού μεταξύ ελεύθερης επιφάνειας και τοιχώματος. Υπολογιστικές προσομοιώσεις για διδιάστατη μόνιμη ροή κατά μήκος επιφάνειας με μεγάλο πλάτους διαμορφώσης, έγιναν από τους Trifonov (1998), Malamataris & Bontozoglou (1999) και Bontozoglou (2000). Και σε αυτή την περίπτωση επαληθεύτηκε η εμφάνιση της στατικής μορφής της ελεύθερης επιφάνειας.

2.4.2. Γραμμική ευστάθεια

Η γραμμική ευστάθεια της μόνιμης ροής πάνω από κυματοειδές τοίχωμα είναι ένα σημαντικό θέμα που δεν έχει διερευνηθεί συστηματικά. Ο Trifonov (1998) πρόβλεψε υπολογιστικά ότι η ροή υγρού υμένα κατά μήκος ενός κατακόρυφου περιοδικού τοιχώματος γίνεται γραμμικά ασταθής πάνω από έναν πεπερασμένο (αλλά μικρό) αριθμό Re . Υπενθυμίζουμε ότι από την εξίσωση (2.23) το όριο αστάθειας κατακόρυφου επίπεδου

τοιχώματος είναι $Re=0$, συνεπώς η παραπάνω υπολογιστική πρόβλεψη αντιστοιχεί σε (μικρή) αύξηση της ευσταθούς περιοχής.

Η μόνη πειραματική παρατήρηση δόθηκε από τους Bontozoglou & Vlachogiannis (2002) και αφορά ένα μόνον τοίχωμα με ορθογωνική περιοδικότητα ύψους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.15 και δείχνουν ότι η περιοδικότητα του τοιχώματος επιδρά σταθεροποιητικά στη ροή και αυξάνει τον κρίσιμο αριθμό Re σε σχέση με αυτόν του επίπεδου τοιχώματος.



Σχήμα 2.15: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. (□) $Ka=3365$, (●) $Ka=1102$, (—) $Re=5/6\cot\theta$.

Οι Aksel et al. (2003) ανέλυσαν γραμμικά την ψευδομόνιμη προσέγγιση της μόνιμης ροής σε ημιτονοειδές τοίχωμα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η σταθεροποίηση της ροής είναι ισχυρή συνάρτηση του πλάτους των κυματισμών. Παράλληλα, διαπίστωσαν ότι σε κάποιες συνθήκες μπορεί να εμφανιστεί τοπική αστάθεια στη ροή σε αριθμό Re ακόμα και μικρότερο από τον κρίσιμο για επίπεδο τοίχωμα. Στην περίπτωση αυτή αναπτύσσονται προσωρινά επιφανειακά κύματα τα οποία είναι μικρά συγκρινόμενα με το μήκος της διαμόρφωσης του τοιχώματος αλλά μεγάλα σε σχέση με το πάχος του υμένα.

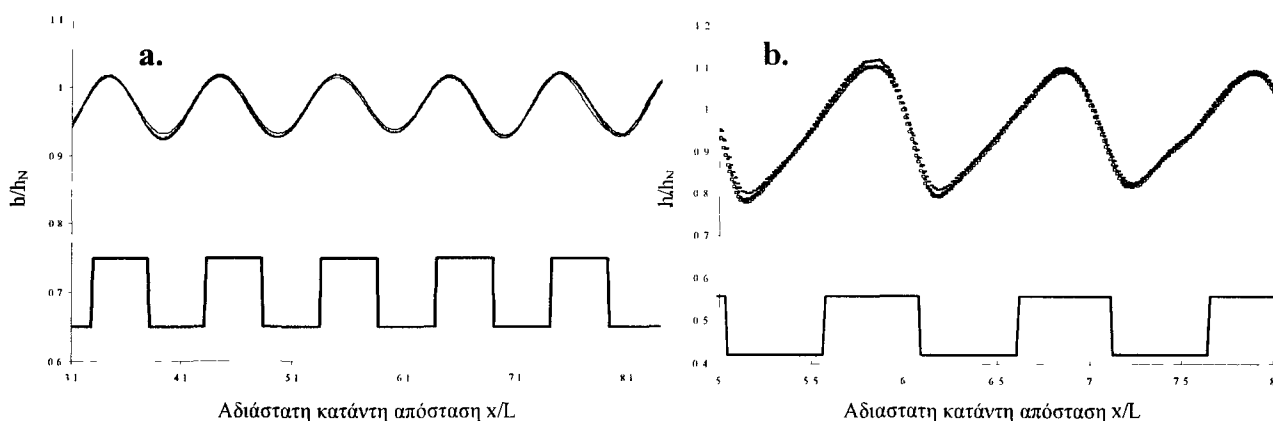
2.4.3. Πειράματα

Οι πειραματικές μελέτες πάνω στο πρόβλημα της ροής σε διαμορφωμένο τοίχωμα είναι περιορισμένες. Οι Zhao & Cerro (1992) και Shetty & Cerro (1993) μελέτησαν τέτοιου είδους ροή πάνω από κυματοειδές τοίχωμα σε πολύ χαμηλούς Re . Πιο πρόσφατα, οι Aksel et al. (2003) πιστοποίησαν πειραματικά την εμφάνιση δινών στις κοιλότητες της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος, για έρπουσα ροή. Όπως προαναφέρθηκε, πάνω από έναν κρίσιμο αριθμό Re εμφανίζεται μια περιοχή ανακυκλοφορίας. Το μέγεθος της δίνης αυτής αυξάνεται με την αύξηση του πάχους του υμένα μέχρι να πάρει ασυμπτωτικά μια μέγιστη τιμή για αρκετά μεγάλα πάχη. Συγχρόνως, και η ταχύτητα ανακυκλοφορίας των δινών είναι ανάλογη του πάχους του υμένα. Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος υμένα για την εμφάνισή τους αυξάνεται με την γωνία κλίσης και

μειώνεται με την αύξηση της επιφανειακής τάσης. Παρόλα αυτά η μέγιστη τιμή του μεγέθους της δίνης είναι ανεξάρτητη από τις δύο παραπάνω παραμέτρους. Επίσης, υπάρχει ένα ελάχιστο πλάτος διαμόρφωσης του τοιχώματος του καναλιού κάτω από το οποίο δεν μπορούν να δημιουργηθούν οι δίνες. Το κρίσιμο πάχος υμένα για την εμφάνισή τους μειώνεται όσο αυξάνεται το πλάτος της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος μέχρι που φτάνει την τιμή μηδέν (εμφάνιση περιοχών ανακυκλοφορίας ανεξάρτητα του πάχους του υμένα). Περαιτέρω αύξηση του πλάτους, έχει ως αποτέλεσμα την γένεση μιας δεύτερης δίνης η εμφάνιση της οποίας και πάλι εξαρτάται από το πάχος του υμένα. Η ταχύτητα της δεύτερης δίνης είναι αρκετά μικρότερη από αυτή της πρώτης. Όσον αφορά την ταχύτητα της ροής, είναι αρκετά μικρότερη πάνω από κυματοειδές τοίχωμα από την ταχύτητα της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα για λεπτά πάχη υμένα. Όσο το πάχος του υμένα αυξάνεται η διαφορά αυτή τείνει να μηδενιστεί. Για αρκετά μεγάλα πάχη υμένα ο λόγος των δύο ταχυτήτων είναι μονάδα.

Πειράματα σε δύο υγρά διαφορετικού ιξώδους έδειξαν ότι η εμφάνιση των δινών είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό Re. Με άλλα λόγια, έχουν το ίδιο μέγεθος για το ίδιο πάχος υμένα ακόμα και αν ο αριθμός Re διαφέρει κατά δύο τάξεις μεγέθους. Ο λόγος της ανεξαρτησίας από τον Re βρίσκεται στο γεγονός ότι οι ταχύτητες στο τοίχωμα μέσα στις κοιλότητες είναι αρκετά μικρότερες από την ταχύτητα στην επιφάνεια. Έτσι, ενώ η μέση ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας είναι ίδια με αυτή που έχει η ροή πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα στις περιοχές ανακυκλοφορίας ο ταχύτητες δεν αλλάζουν αισθητά.

Για ροή σε πεπερασμένους αριθμούς Re, τα μόνα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από τους Vlachogiannis and Bontozoglou (2002) για ένα τοίχωμα ορθογωνικής διατομής μήκους κύματος 12 mm, και πρόσφατα από τους Wienschel & Aksel (2004) για ημιτονοειδές τοίχωμα μήκους κύματος 300 mm.

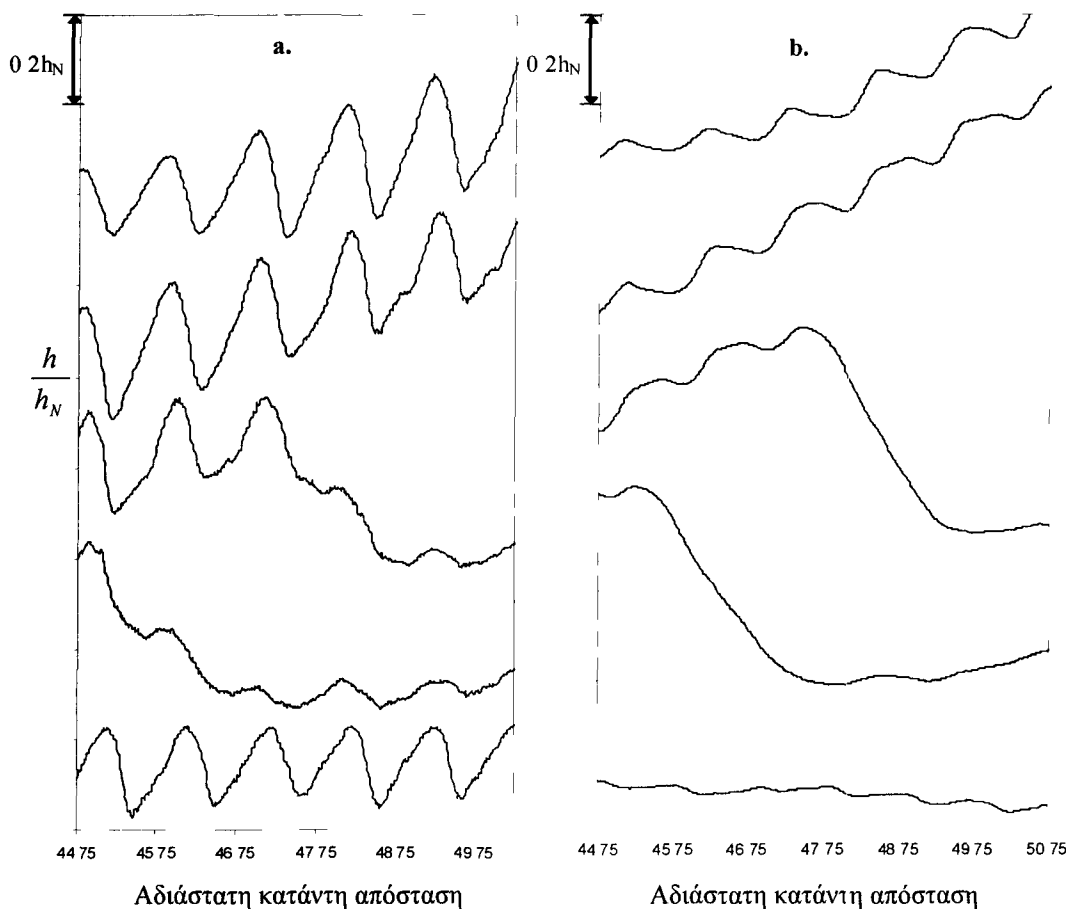


Σχήμα 2.16: Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας σε 4 διαδοχικές χρονικές στιγμές ($\Delta t=0,1$ sec) (a) ημιτονοειδής μορφή και (b) μορφή με περισσότερες αρμονικές.

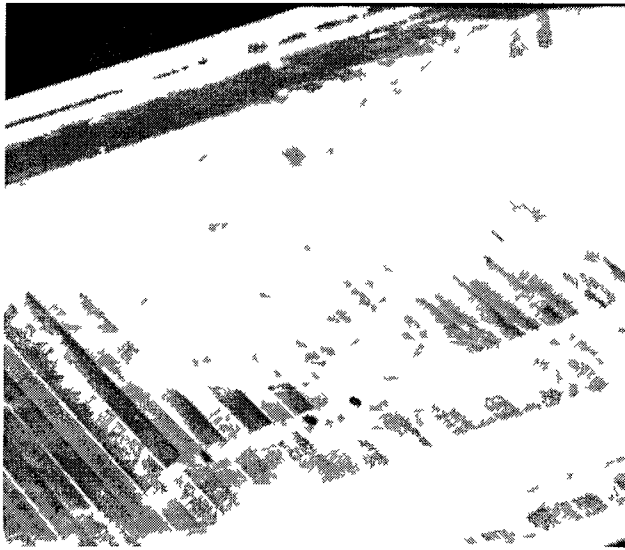
Σύμφωνα με τους Vlachogiannis and Bontozoglou (2002), η εξέλιξη της ροής σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικές περιοχές ανάλογα με τον αριθμό Re. Όπως προαναφέρθηκε στο διάγραμμα της ευστάθειας, για $Re \sim O(10^0-10^1)$ η ελεύθερη επιφάνεια είναι επίπεδη. Σε αριθμούς Reynolds $Re \sim O(10^2)$, το πάχος του υμένα αποκλίνει από τη θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt και αναπτύσσεται μια στατική παραμόρφωση στην ελεύθερη επιφάνεια (σχήμα 2.16). Το φαινόμενο αυτό έχει προβλεφθεί θεωρητικά από τους Bontozoglou & Papapolymerou (1997), Trifonov (1998) και Bontozoglou (2000). Η μορφή της

ελεύθερης επιφάνειας στη στατική περιοχή είναι πάντοτε περιοδική, με μήκος κύματος ίσο με αυτό της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Το πλάτος της διαμόρφωσης αυτής και η διαφορά φάσης μεταξύ τοιχώματος και ελεύθερης επιφάνειας εξαρτώνται από τον αριθμό Re , τη γωνία κλίσης του καναλιού και το ιξώδες του ρευστού.

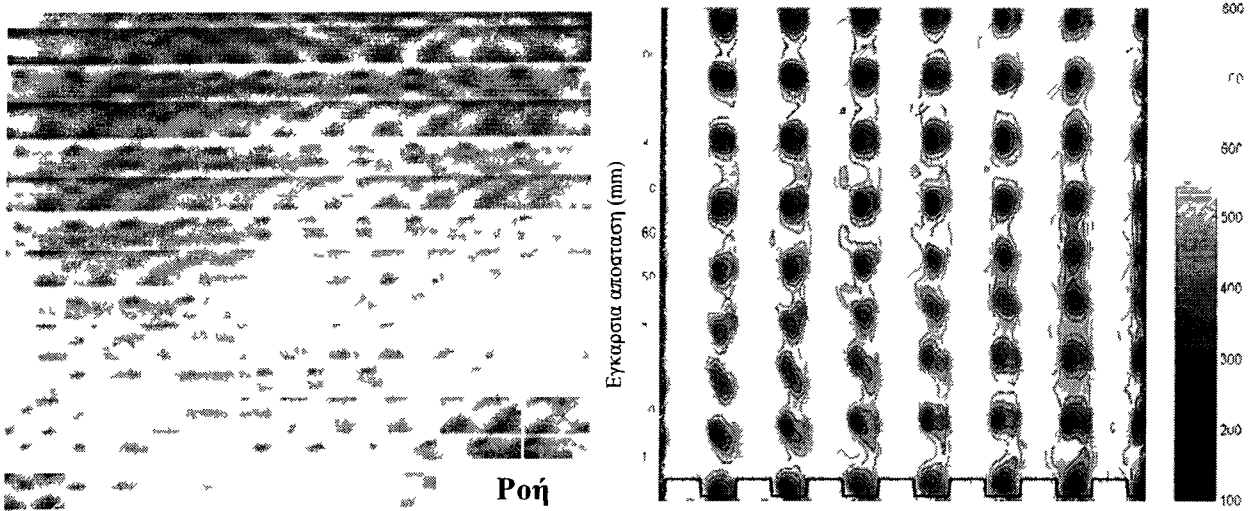
Σε μεγαλύτερους Re , οι Vlachogiannis and Bontozoglou (2002), παρατηρούν ότι η έντονη διέγερση του φυσικού θορύβου αλλά και η αλληλεπίδραση τοιχώματος – ελεύθερης επιφάνειας, επιδρά καταλυτικά στη δημιουργία μοναχικών κυμάτων σε κοντινές αποστάσεις από το σημείο δημιουργίας του υμένα. Τα μοναχικά κύματα υπερθέτονται της βασικής μορφής της επιφάνειας του υμένα (σχήμα 2.17). Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι εμφανίζονται με σχετικά σταθερή συχνότητα, κάτι το οποίο είναι αποτέλεσμα της επίδρασης του τοιχώματος αφού στις ίδιες συνθήκες αλλά για ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα δεν παρατηρείται κάτι ανάλογο. Με περαιτέρω αύξηση του Re , η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας μετατρέπεται από διδιάστατη σε τρισδιάστατη με τη δημιουργία πεταλοειδών κυμάτων (horse shoe waves – σχήμα 2.18).



Σχήμα 2.17: (α) Το πέρασμα ενός πλήρους αναπτυσσόμενου μοναχικού κύματος πάνω από το διαμορφωμένο τοίχωμα. (β) το πέρασμα του ίδιου κύματος χωρίς την επίδραση του τοιχώματος



Σχήμα 2.18 Πεταλοειδή κύματα (horse – shoe waves)

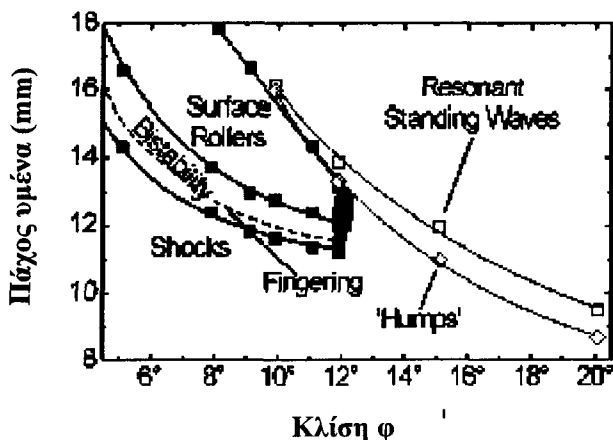


Σχήμα 2.19 Η εμφάνιση των εγκάρσιων βαθουλωμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια

Τέλος, οι Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) παρατήρησαν ότι η μετάβαση σε χαοτική δομή -όπως θα ήταν αναμενομενο απο τα αποτελεσματα της ροής πάνω απο επίπεδο τοίχωμα- αναβάλλεται εξαιτίας της εμφάνισης μιας τρισδιαστατης δομής η οποία συνίσταται από εγκάρσιες σειρές από υψώματα και βαθουλωματα (σχήμα 2.19α,β) Η διαμόρφωση των εγκάρσιων αυτών δομών οδηγεί στην σταθεροποίηση της ροής, όπως καταδεικνύεται από (α) τη μείωση του μέσου πάχους του υμένα, το οποίο πλέον αποκλίνει από την θεωρητική κατά Nusselt λύση, και (β) τη μείωση της έντασης ή ακόμα και την εξάλειψη των οδοντών κυμάτων

Οι Wienschem & Aksel (2004) μελέτησαν τη ροή για αριθμούς Re τάξης 10-100 πάνω από ημιτονοειδές τοίχωμα μεγάλου μήκους κύματος ($L=30$ cm) Οι ερευνητές παρατήρησαν δύο διαφορετικά φαινόμενα, τη δημιουργία υδραυλικου άλματος με απότομο μπροστινό μέρος και την εμφάνιση κυμάτων με δίνες (rolling waves) Μάλιστα, υπάρχει μια περιοχή, η οποία εξαρτάται από τη γωνία κλίσης και την επιφανειακή τάση, όπου εμφανίζονται και οι δύο παραπάνω δομές Σε πιο μεγάλα πάχη υμένα τα κύματα με δίνες εξαφανίζονται και εμφανίζεται

η στατική δομή συντονισμού, αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης του υμένα με την επιφάνεια. Στην περιοχή μετάβασης από τη μια δομή στην άλλη παρουσιάζεται και το φαινόμενο την περιοδικής εμφάνισης των δύο δομών. Στο σχήμα 2.20 παρουσιάζεται ένας παραμετρικός χάρτης εμφάνισης των δομών συναρτήσει της γωνίας κλίση και του πάχους του υμένα. Για μικρές γωνίες κλίσης αυξάνοντας το πάχος του υμένα εμφανίζονται υδραυλικά άλματα. Αυξάνοντας ακόμα περισσότερο το πάχος του υμένα, οι δομές αυτές χάνουν την ευστάθειά τους και εμφανίζονται τα κύματα με τις δίνες. Παρατηρούμε στο σχήμα και την περιοχή όπου έχουμε συνύπαρξη των δύο δομών.



Σχήμα 2.20: Οι διαφορετικές περιοχές ροής πάνω από τοίχωμα μεγάλου πλάτους διαμόρφωσης για χαμηλούς αριθμούς Re κατά Aksel et al.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω εργασιών αποτέλεσαν το έναυσμα για διάφορα ερωτήματα, με κυριότερο την επίδραση του πλάτους της γεωμετρικής διαμόρφωσης στα φαινόμενα που παρατηρούνται. Τονίζεται ότι τα συμπεράσματα των Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) και Wienschel & Aksel (2004) βασίζονται σε ένα μόνον τοίχωμα. Επίσης, η μελέτη των χαρακτηριστικών των οδοντών κυμάτων αναμένεται να διευκολυνθεί με την εισαγωγή οργανωμένων διαταραχών σταθερής συχνότητας, κάτι που δεν έχει πραγματοποιηθεί ως τώρα. Οι απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα αποτέλεσαν μέρος της παρούσας διδακτορικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την μελέτη της ροής λεπτού υμένα υγρού πάνω από κεκλιμένο επίπεδο. Αρχικά, περιγράφεται η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων και το σύστημα εισαγωγής διαταραχών που κατασκευάστηκε. Στη συνέχεια αναφέρονται τα είδη των διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, και ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίστηκαν οι φυσικές τους ιδιότητες. Ακολουθεί η παρουσίαση της μεθόδου συλλογής δεδομένων με απεικόνιση φθορισμού και η διαδικασία επεξεργασίας τους από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή τόσο για την περίπτωση της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα όσο και για την περίπτωση της ροής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Τέλος θα γίνει σύντομη περιγραφή της πειραματικής διάταξης υγρού υμένα στο Institute of Chemical Process Fundamentals στην Πράγα, καθώς και των τεχνικών χωρητικότητας και ηλεκτροδιάχυσης που χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα για τοπικές μετρήσεις ύψους υγρού υμένα και διατμητικής τάσης στο τοίχωμα.

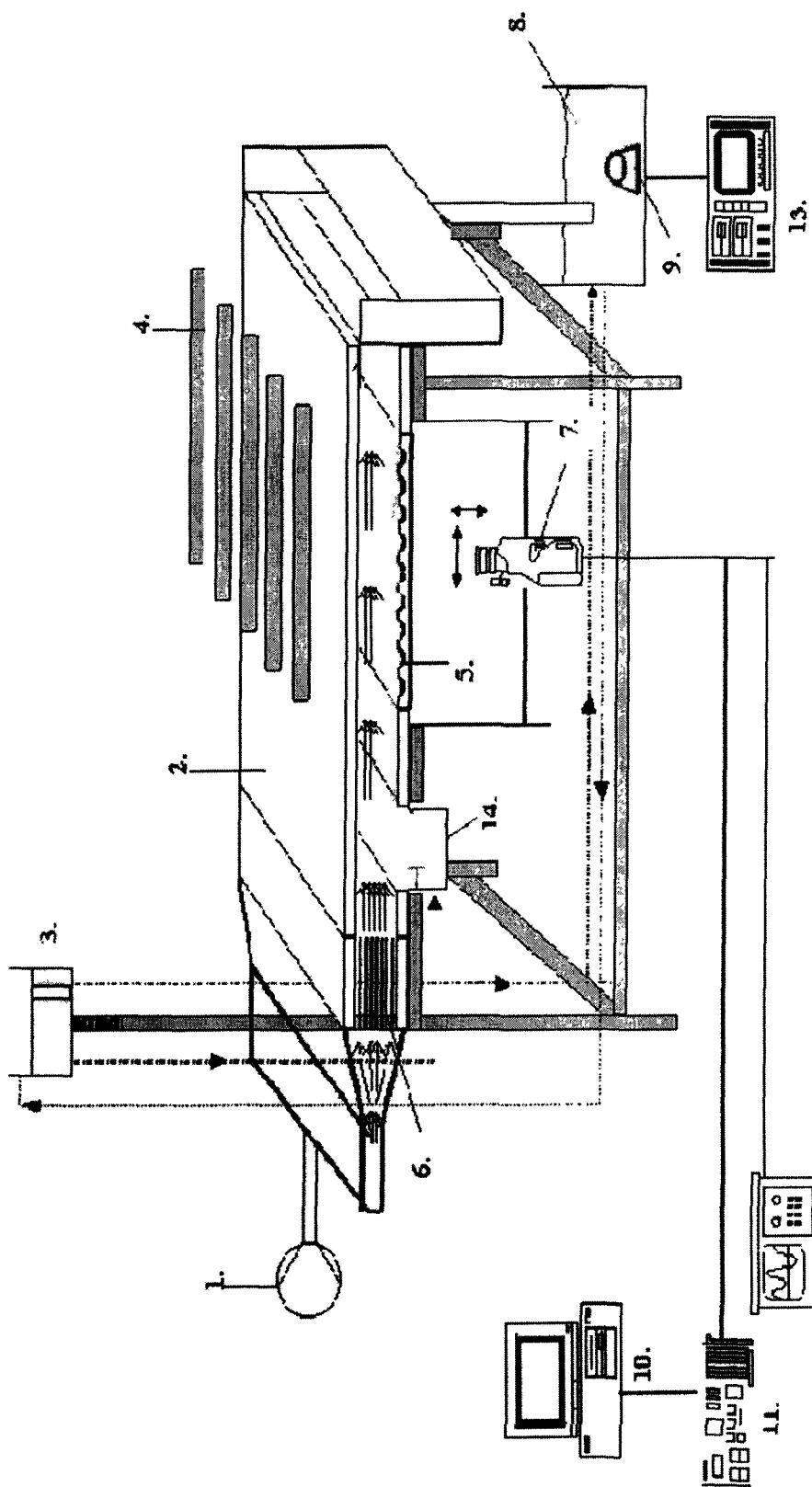
3.1 Η πειραματική διάταξη

3.1.1 Το κανάλι ροής

Η χρησιμοποιούμενη πειραματική συσκευή έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο από τον Βλαχογιάννη (2001) στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής, και απεικονίζεται στο σχήμα 3.1 και στις φωτογραφίες του σχήματος 3.2. Στόχος της συσκευής είναι να τροφοδοτηθεί ρευστό σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς της ροής. Το βασικό μέρος της συσκευής είναι ένα κανάλι, πλάτους 25 cm και μήκους 80 cm, πάνω στο οποίο ρέει το υγρό. Το κομμάτι αυτό της συσκευής είναι κατασκευασμένο από Plexiglas ώστε να είναι ορατή η ροή από όλες τις πλευρές. Εξάλλου, τα περισσότερα μέρη της συσκευής είναι κατασκευασμένα από Plexiglas ώστε να είναι δυνατός ο οπτικός έλεγχος των τμημάτων αυτών. Μέρος της βάσης του καναλιού είναι αποσπώμενο, αποτελούμενο από πλάκα πλάτους 25 cm και μήκους 50 cm. Πάνω σε αυτή την πλάκα γίνονται οι μετρήσεις. Κατά την μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας του τοιχώματος, η πλάκα αυτή αντικαθίσταται από άλλες με την επιθυμητή μορφολογία επιφάνειας (π.χ. περιοδικό τοίχωμα).

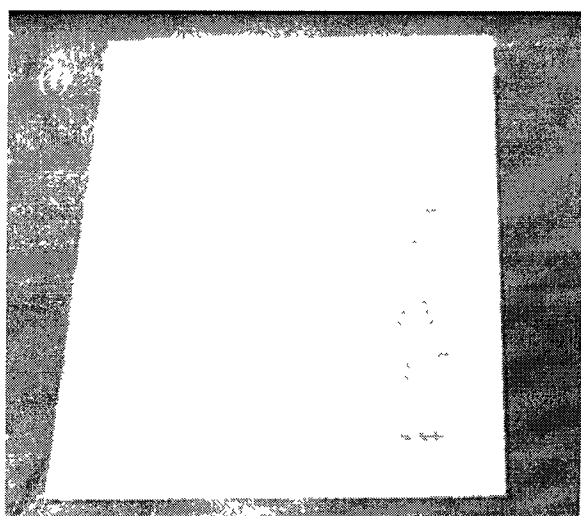
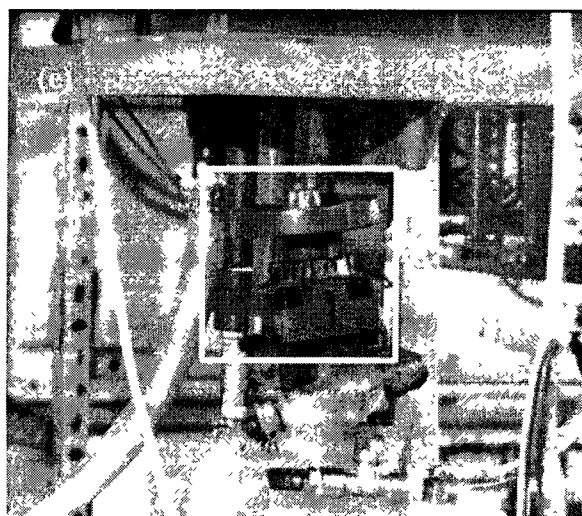
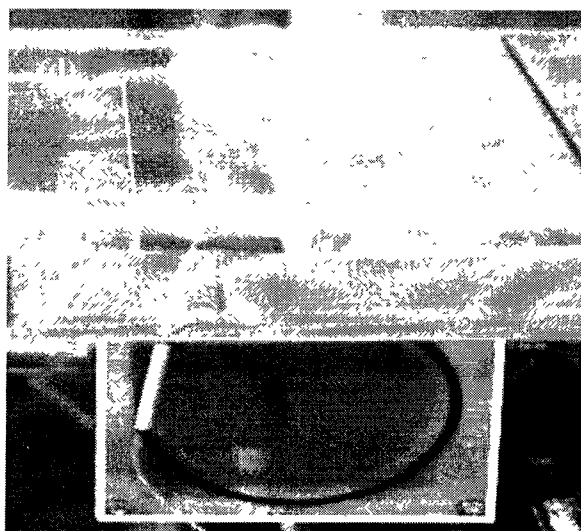
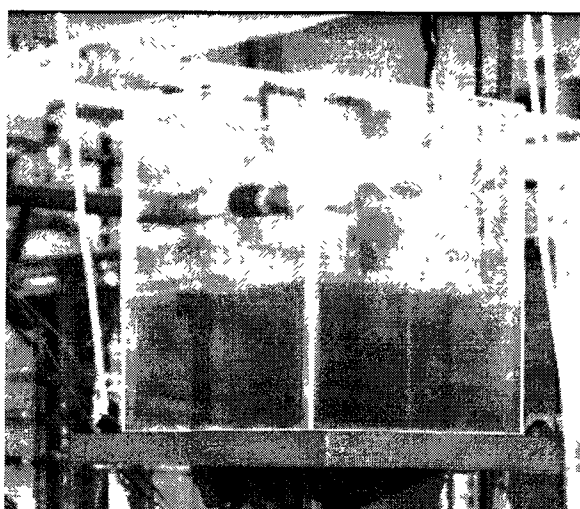
Η κλίση του καναλιού ρυθμίζεται με την βοήθεια ενός ατέρμονα κοχλία. Έτσι η γωνία που σχηματίζει το κανάλι με το οριζόντιο επίπεδο μπορεί να μεταβληθεί από 0° έως 67°. Στα πειράματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η κλίση κυμάνθηκε από 1°-15°.

Η λειτουργία της συσκευής περιγράφεται ως εξής: Αρχικά γεμίζουμε το δοχείο συλλογής (8) με το κατάλληλο ρευστό. Το ρευστό αυτό, με τη βοήθεια μιας αντλίας (9) εμβαπτισμένης στο δοχείο συλλογής, οδηγείται στο δοχείο υπερχειλίσης (3). Εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς και λόγω του βάρους του, το ρευστό ρέει μέσω ενός συστήματος ελαστικών σωλήνων προς το δοχείο κατανομής, από το οποίο κατανέμεται ομοιόμορφα στο τμήμα μετρήσεων του καναλιού. Στη συνέχεια, το ρευστό επιστρέφει στο δοχείο συλλογής για να ακολουθήσει την ίδια διαδρομή.



1. Ηλεκτροβολίδα 2. Κωνάλι Ηεξάγλσ, 3. Δσχείο Υπερχελελιση 4. 1ηηή Υπερίωσφσ Φωτό 5. Κωμωτοειδέσ Τσίχσμσ 6. Ομωλοπωηηήσ ηησ Ροήσ ηησ αέριωσ φώσησ 7. Ψηφιωκή Κάμωρσ CCD, 8. Δσχείο Σύλλογησ και ανώμειξησ με ηην Χρωστική ουσία 9. Ανάλια, 10. DT3155 Κάρηω Σύλλογησ Εκτύπωη (Fitac Digital Board), 11. Συμπωη 16ΜΜκ, 12. Πόλωμωρλώμωσ, 13. Τηροφθόηακή μεηεσβαλλήμωηησ, 14. Δσχείο Καηακωμής

Σημα 3.1: Πειραματική διάταξη.



Σχήμα 3.2: Τα κύρια τμήματα της πειραματικής διάταξης: (a) Το κανάλι ροής (b) Δοχείο υπερχείλισης (c) Δοχείο συλλογής (d) Δοχείο κατανομής (e) Χειροκίνητη βάννα (f) Πλάκα προσαρμογής (κυματοειδές τοίχωμα).

Η παροχή του ρευστού ελέγχεται από μια ρυθμιστική βαλβίδα η οποία παρεμβάλλεται ανάμεσα στο δοχείο υπερχειλίσσης και το δοχείο κατανομής. Πιο συγκεκριμένα, ρυθμίζουμε τη βαλβίδα σε μια ορισμένη θέση και προσδιορίζουμε την παροχή υγρού στην έξοδο του καναλιού (είσοδο του δοχείου συλλογής) με ζύγιση. Με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή παροχή. Επειδή η όλη κίνηση οφείλεται στην υψομετρική διαφορά του υγρού, σταθερή στάθμη στο δοχείο υπερχειλίσσης εξασφαλίζει και σταθερή παροχή.

Επειδή πιθανές ταλαντώσεις του συστήματος επηρεάζουν καθοριστικά τα χαρακτηριστικά της ροής, η συσκευή είναι τοποθετημένη πάνω σε ελαστική βάση (καουτσούκ). Συγχρόνως τα διάφορα μέρη της συσκευής είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με ελαστικούς σωλήνες μεγάλης παραμορφωσιμότητας. Σε καμία περίπτωση δεν αφήνεται το νερό να πέφτει από ύψος σε κάποιο από τα δοχεία αλλά μέσω π.χ. ελαστικών σωλήνων εκρέει ομαλά κάτω από την επιφάνεια του υγρού στα δοχεία. Τέλος η αντλία που χρησιμοποιούμε είναι εμβαπτιζόμενη ώστε ο όγκος του νερού να απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό των κραδασμών.

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

3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Το διαθέσιμο μήκος του καναλιού περιορίζει τη μελέτη της εξέλιξης των φυσικά δημιουργούμενων διαταραχών. Η επιβολή εξωτερικής διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου. Για τον παραπάνω λόγο, στόχος μέρους των πειραμάτων ήταν η μελέτη της επίδρασης της συχνότητας διαταραχής σε ένα μεγάλο εύρος τιμών της. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά συστήματα διαταραχής.

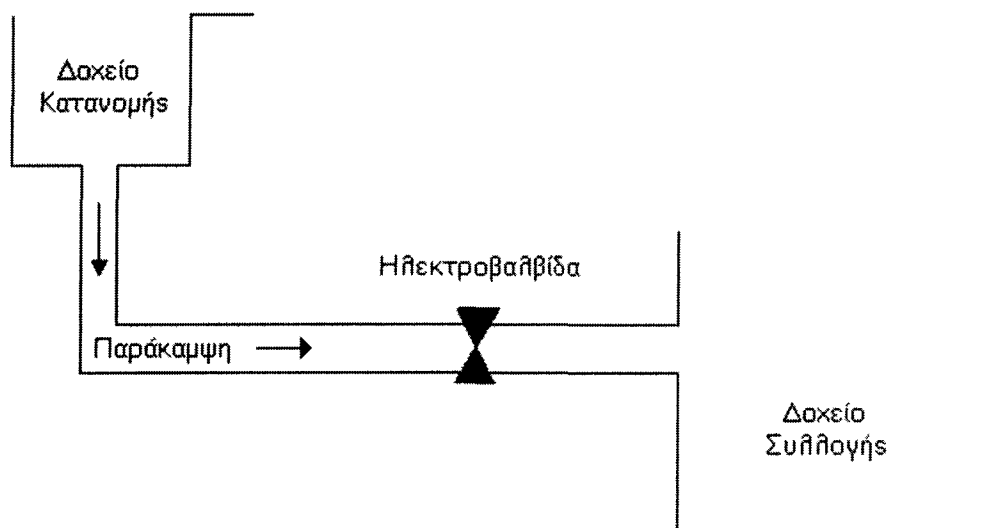
α. Σύστημα διαταραχής με ηλεκτροβαλβίδα.

Στην περίπτωση αυτή η διαταραχή δημιουργείται με τη βοήθεια μιας χρονιζόμενης ηλεκτροβαλβίδας (ON/OFF). Για το σκοπό αυτό ενώθηκε το δοχείο συλλογής, μέσω ενός ελαστικού σωλήνα, με το δοχείο κατανομής (σχήμα 3.3). Μέσω της παράκαμψης αυτής ένα μέρος από το υγρό που βρίσκεται στο δοχείο κατανομής οδηγείται στο δοχείο συλλογής χωρίς να περάσει από την κεκλιμένη πλάκα του καναλιού. Στην παράκαμψη αυτή παρεμβάλλεται η ηλεκτροβαλβίδα. Ένας χρονοδιακόπτης ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας. Όταν η ηλεκτροβαλβίδα είναι ανοιχτή μια ποσότητα υγρού περνάει άμεσα προς το δοχείο συλλογής. Όταν όμως είναι κλειστή, η ποσότητα αυτή του υγρού οδηγείται μέσω της κεκλιμένης πλάκας στο δοχείο συλλογής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εξωτερικά επιβαλλόμενη αυξομείωση του πάχους του υμένα με το χρόνο (κύμα στην αρχή του καναλιού). Δηλαδή, το περιοδικό φράξιμο της παράκαμψης αυτής προκαλεί διαταραχή στην είσοδο του καναλιού με μορφή υδραυλικού άλματος. Το υδραυλικό αυτό άλμα διαχωρίζεται κατάντη της

ροής εξαιτίας των μη – γραμμικών αλληλεπιδράσεων και δημιουργεί μια σειρά μοναχικών κυμάτων.

Το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής μπορεί να ρυθμιστεί και εξαρτάται από τον λόγο των χρονικών διαστημάτων που η δίοδος μένει ανοιχτή και κλειστή. Επίσης ρυθμίζοντας τον συνολικό χρόνο του φαινομένου, μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα της διαταραχής.

Το σύστημα διαταραχής που περιγράψαμε μπορεί να μας δώσει συχνότητες διαταραχής από 0,1 Hz έως και 1 Hz. Για μεγαλύτερες συχνότητες κατασκευάστηκε ένα άλλο σύστημα διαταραχής το οποίο περιγράφεται παρακάτω.

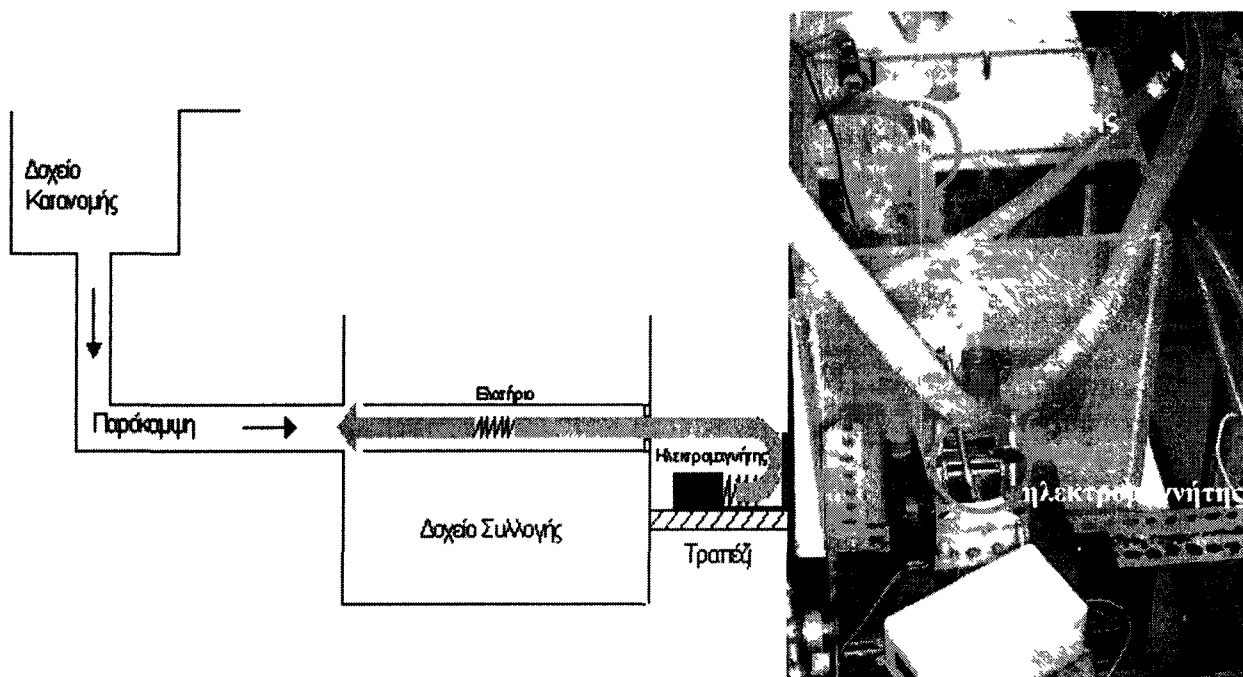


Σχήμα 3.3: Σύστημα διαταραχής χρονοδιακόπτη – ηλεκτροβαλβίδας.

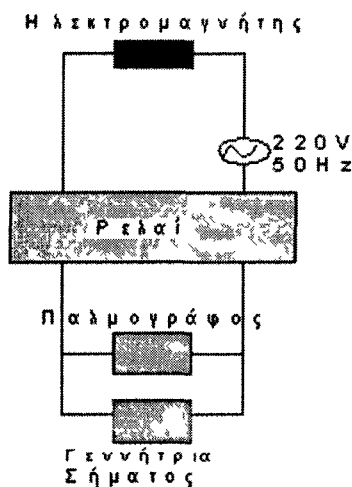
β. Σύστημα διαταραχής με κινούμενο εμπόδιο

Και στην περίπτωση αυτή, η αρχή λειτουργίας του συστήματος είναι η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της παράκαμψης, που προκαλεί χρονική αυξομείωση του πάχους του υμένα και δημιουργία διαταραχής στην είσοδο του καναλιού με μορφή υδραυλικού άλματος. Η διαφορά εδώ είναι ότι το περιοδικό φράξιμο της παράκαμψης γίνεται με την χρήση ενός κινούμενου εμποδίου στο δοχείο συλλογής (σχήμα 3.4).

Για να επιτύχουμε την περιοδική κίνηση του εμποδίου χρησιμοποιούμε έναν ηλεκτρομαγνήτη και ένα ψηφιακό ρελέ. Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4. Το εμπόδιο συνδέεται με τον ηλεκτρομαγνήτη με ένα ελατήριο. Όταν το κύκλωμα του ηλεκτρομαγνήτη είναι κλειστό, αυτός έλκει το εμπόδιο και με αυτό τον τρόπο ελευθερώνεται η δίοδος και επιτρέπεται η διέλευση ποσότητας υγρού, αλλιώς το εμπόδιο την φράζει.



Σχήμα 3.4. Σύστημα διαταραχής με κινούμενο εμπόδιο



Σχήμα 3.5: Συνδεσμολογία ηλεκτρικής κίνησης του συστήματος διαταραχής

Το ρελέ που χρησιμοποιείται για να πετύχουμε το περιοδικό κλείσιμο του κυκλώματος του μαγνήτη οδηγείται από μια γεννήτρια σήματος. Αν η τάση που δίνει η γεννήτρια στα άκρα του ρελέ είναι πάνω από 3 V τότε το κύκλωμα κλείνει. Και στην περίπτωση αυτή μπορούμε να ελέγξουμε το πλάτος της διαταραχής. Όταν το σήμα της γεννήτριας έχει μορφή περιοδική με μέση τιμή 3 V, τότε επιτυγχάνουμε η δίοδος να είναι ίσα διαστήματα ανοιχτή και κλειστή. Μετακινώντας τη μέση τιμή της καμπύλης μπορούμε να ελέγξουμε τα χρονικά διαστήματα που η δίοδος θα είναι ανοιχτή ή κλειστή, αλλάζοντας μ' αυτό τον τρόπο την ένταση της δημιουργούμενης διαταραχής. Η ακρίβεια των παραπάνω ρυθμίσεων ελέγχεται με παλμογράφο, συνδεδεμένο παράλληλα στο κύκλωμα.

3.2 Ιδιότητες των ρευστών

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου πειράματα έγιναν τόσο στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, στο ΤΜΜΒ, στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών, όσο και στο Institute of Chemical Process Fundamentals, στην Πράγα. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές πειραματικές μέθοδοι (μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό, ηλεκτροχημική μέθοδος, μέθοδος συλλογής δεδομένων με αισθητήρες χωρητικότητας), για την μελέτη της ροής λεπτών υγρών υμένων πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με σκοπό την πιστοποίηση της ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων από την πειραματική τεχνική. Οι μέθοδοι αυτές, θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια. Και στις τρεις περιπτώσεις έγιναν πειράματα τόσο με νερό όσο και με διαλύματα υψηλότερου ιξώδους. Ως διαλύματα υψηλότερου ιξώδους χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα νερού - γλυκερίνης και διάλυμα νερού με EmkaroxHV40. Στα πειράματα με νερό τα φαινόμενα εξελίσσονται αρκετά γρήγορα. Έτσι, για την περίπτωση όπου θέλουμε να μελετήσουμε πλήρως ανεπτυγμένες δομές σε χαμηλές γωνίες κλίσης και αριθμούς Re ή και την τρισδιάστατη ροή ιδανικό ρευστό για τα πειράματα είναι το νερό. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες γωνίες κλίσης και αριθμούς Re , η χρήση νερού έχει ως αποτέλεσμα αφενός την πολύ γρήγορη εξέλιξη των φαινομένων πολύ κοντά στην αρχή του καναλιού και αφετέρου την εμφάνιση τρισδιάστατων ασταθειών οι οποίες επηρεάζουν την ροή. Αντίθετα, η αύξηση του ιξώδους του ρευστού έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ανάπτυξης των δομών και της εξαφάνισης των τρισδιάστατων ασταθειών ακόμα και σε σχετικά μεγάλες γωνίες και αριθμούς Re . Βέβαια η προσθήκη μεγάλου ποσοστού γλυκερίνης ή EmkaroxHV40 θα είχε ως αποτέλεσμα την πολύ αργή εξέλιξη των φαινομένων και σ' αυτή την περίπτωση το μήκος του καναλιού δεν θα ήταν αρκετό για να αναπτυχθούν πλήρως. Συνεπακόλουθα, ανάλογα με το φαινόμενα το οποίο θέλουμε να μελετήσουμε επιλέγουμε και το κατάλληλο ρευστό.

Έτσι, ως ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό, διαλύματα νερού – γλυκερίνης με διάφορες συγκεντρώσεις (π.χ. 21%, 28%, 48%, 54%, 65% και 80% κ.β. γλυκερίνη) και ένα διάλυμα νερού με EmkaroxHV40 (5% κ.β.) που έχει το ίδιο ιξώδες με το διάλυμα νερού γλυκερίνης 48% κ.β. Μάλιστα, στα πειράματα στα οποία η συλλογή δεδομένων βασίστηκε στην ηλεκτροχημική μέθοδο, για να πραγματοποιηθεί η ηλεκτροχημική αντίδραση, προστέθηκαν στο νερό ή στο διάλυμα EmkaroxHV40 οι ουσίες δισθενής/τριθενής κυανειούχος σίδηρος (0,025M) και θειϊκό κάλιο (0,05M).

Ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων του διαλύματος έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με μέτρηση του συντελεστή διάθλασης. Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση ενός ειδικού διαθλασιμέτρου υψηλής ακρίβειας (Abbe – refractometer, Krüss Optronic GmbH) προσδιορίζεται ο συντελεστής διάθλασης. Από την σχέση:

$$\rho = \frac{1}{0,5682} \left(\frac{n^2 - 1}{n + 0.4} \right)^{0,7069},$$

η οποία είναι μια παραλλαγή της εμπειρικής σχέσης του Eykman η οποία συνδέει τον συντελεστή διάθλασης (n) και την πυκνότητα (ρ), υπολογίζουμε την πυκνότητα του ρευστού. Από την τιμή της πυκνότητας και ανάλογα την θερμοκρασία στην οποία διεξάγεται το πείραμα, μπορούμε να βρούμε την κατά βάρος περιεκτικότητα της γλυκερίνης από τον πίνακα 1 του παραρτήματος. Με επαναληπτική διαδικασία μπορούμε να επιτύχουμε διάλυμα επιθυμητής περιεκτικότητας σε γλυκερίνη.

Στην δεύτερη περίπτωση, το ιξώδες του ρευστού μετρήθηκε απευθείας με τη χρήση ενός ιξωδομέτρου τριχοειδούς σωλήνα. Στην περίπτωση αυτή προσδιοριζόταν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού μετρώντας τον χρόνο που χρειάζεται συγκεκριμένη ποσότητα υγρού για να περάσει μέσα από έναν τριχοειδή σωλήνα.

Οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος νερού – γλυκερίνης στη θερμοκρασία που έγιναν τα πειράματα, είναι:

Ρευστό	Κιν. ιξώδες ν (mm ² /sec)	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	Θερμοκρασία Θ (°C)
νερό	1,000	1000	
γλυκερίνη 21%	1,716	1048	23
γλυκερίνη 28%	2,130	1066	23
γλυκερίνη 48%	4,833	1120	19
γλυκερίνη 54%	6,603	1136	23
γλυκερίνη 65%	11,730	1164	25
γλυκερίνη 80%	49,570	1208	20
EmkaroxHV40 5%	4,590		

Για την περίπτωση των πειραμάτων με διάλυμα γλυκερίνης, σημαντικό είναι το γεγονός ότι επειδή η τάση ατμών του νερού είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της γλυκερίνης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος το νερό εξατμίζεται γρηγορότερα με αποτέλεσμα να αλλάζει η περιεκτικότητα σε γλυκερίνη. Αναγκαίος λοιπόν ήταν ο συχνός έλεγχος του ποσοστού της γλυκερίνης και η διόρθωσή του ώστε να μένει στα ίδια επίπεδα και να είναι σταθερές οι φυσικές ιδιότητες. Μετά από κάθε προσθήκη νερού ή γλυκερίνης είναι αναγκαία η διέλευση ενός χρονικού διαστήματος ανάμειξης των δύο συστατικών μέχρι να ομογενοποιηθεί το διάλυμα.

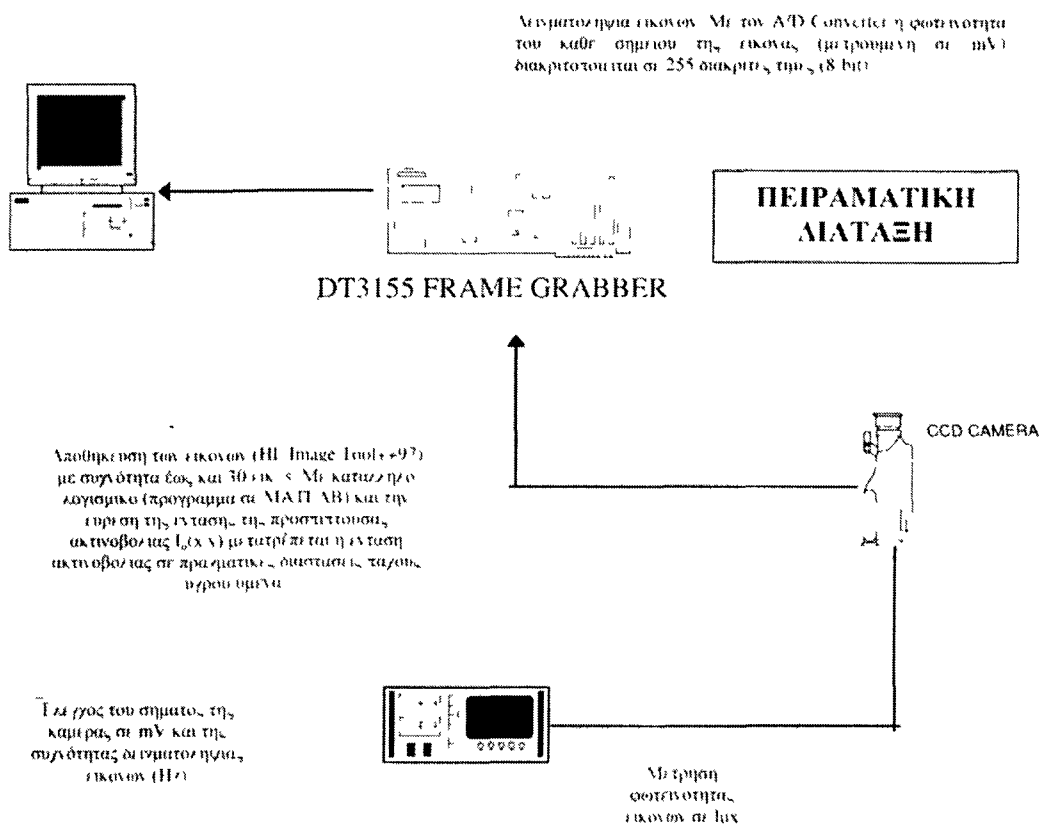
Ένα άλλο πρόβλημα το οποίο παρουσιάζεται από την χρήση της γλυκερίνης είναι ο εγκλωβισμός αέρα μέσα στο διάλυμα και η δημιουργία φυσαλίδων οι οποίες επηρεάζουν τη ροή. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται τόσο κατά την ανάμειξη των δυο συστατικών όσο και κατά τη διάρκεια του πειράματος, στα σημεία της συσκευής που υπάρχει έντονη τυρβώδη ροή. Στην πρώτη περίπτωση οι φυσαλίδες εξαφανίζονται με την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος (20 με 30 λεπτά) από την ανάμειξη των συστατικών, όπου η ροή σταθεροποιείται. Την δεύτερη περίπτωση την αντιμετωπίζουμε φροντίζοντας να είναι όσο πιο ομαλή γίνεται η ροή σε όλα τα σημεία της συσκευής, π.χ. κατά την άντληση του ρευστού από το δοχείο συλλογής στο δοχείο υπερχειλίσης, να μην πέφτει το ρευστό από ύψος στην ελεύθερη επιφάνεια.

Το πρόβλημα της μη καλής διαβροχής της επιφάνειας του καναλιού από το υγρό, το οποίο είναι δυνατό να παρουσιαστεί σε μεγάλες κλίσεις και μικρούς αριθμούς Re, αντιμετωπίζεται με την επάλειψη του καναλιού με το κολλώδες υλικό Sodium Silicate το οποίο δεν επηρεάζει ούτε τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού ούτε την διάφανη επιφάνεια από Plexiglas. Τέλος για τον σχολαστικό καθαρισμό της συσκευής από την γλυκερίνη χρησιμοποιείται υπεροξείδιο του υδρογόνου (Peridrol), που ούτε αυτό επηρεάζει το υλικό κατασκευής του καναλιού.

3.3 Η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό

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

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



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό

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

Πάνω από την περιοχή των μετρήσεων τοποθετήθηκε η πηγή υπεριώδους φωτός (σχήμα 3.1) που είναι 2 λαμπτήρες υψηλής έντασης (Philips, TL20/05), με εξαρτήματα τροφοδοσίας (ballast, starter) για την ελάττωση των ταλαντώσεων του υπεριώδους φωτός. Οι λαμπτήρες είναι

τοποθετημένοι σε σταθερή απόσταση από την πλάκα μέτρησης και συμμετρικά ως προς τις άκρες του καναλιού με σκοπό την πιο ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας τους.

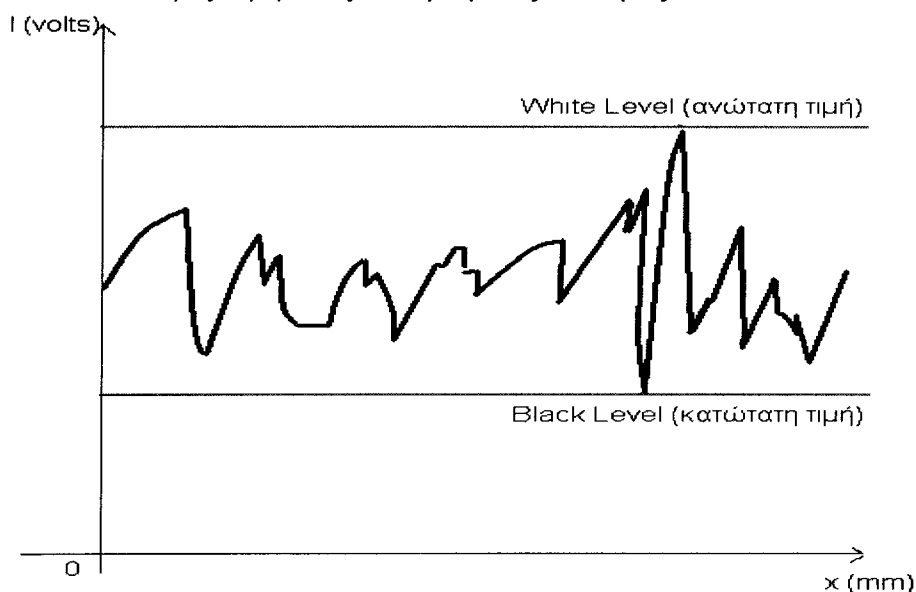
Κάτω από το κανάλι ροής είναι τοποθετημένη ψηφιακή κάμερα για την συλλογή εικόνων. Ο τύπος της κάμερας είναι CCD (Sony XC-77/77CE). Η συγκεκριμένη κάμερα η οποία είναι ασπρόμαυρη, έχει πολύ καλή ευαισθησία στο φως (0,5 lux) και αναλογία σήματος θορύβου (50 dB), με ταχύτητα δειγματοληψίας 50 εικόνες/sec. Για την συλλογή και την αποθήκευση των εικόνων χρησιμοποιείται κάρτα συλλογής δεδομένων (DT3155 Frame Grabber Board – Data Translation) και κατάλληλο λογισμικό. Η κάρτα έχει δυνατότητα για μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας 30 εικόνες/sec για συχνότητα 60 Hz ή 25 εικόνες/sec για συχνότητα 50 Hz. Η ικανότητα αποθήκευσης εικόνων είναι συνάρτηση της διαθέσιμης μνήμης του υπολογιστή και της ταχύτητας του σκληρού δίσκου. Οι εισερχόμενες εικόνες ψηφιοποιούνται σε 640x480 pixels ή 768x576 pixels με ανάλυση 8 bits. Οι δυνατότητες αποθήκευσης της κάρτας συλλογής εικόνων, ανάλογα με τη διαθέσιμη μνήμη του υπολογιστή, είναι 75 εικόνες – 24 MB – 640x480 pixels ή 50 εικόνες – 24 MB – 768x576 pixels. Η περιοχή η οποία αποτυπώνεται στην εικόνα μπορεί να αλλάξει μεταφέροντας την κάμερα πιο κοντά ή πιο μακριά από το κανάλι. Για μικρότερες μεταβολές χρησιμοποιείται κατάλληλος φακός εστίασης. Έτσι μπορούμε να πάρουμε εικόνες σε μικρή περιοχή με πολύ μεγάλη ακρίβεια ή σε μεγαλύτερη χωρίς όμως την ίδια ψηφιοποίηση.

Όπως προαναφέρθηκε, η κάθε εικόνα μας δίνει πληροφορίες για την ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον υμένα. Πιο αναλυτικά, στο κάθε pixel της εικόνας αντιστοιχεί μια διακριτή τιμή η οποία αποτελεί το μέγεθος μέτρησης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του υμένα. Δεδομένου ότι ο αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας (A/D Converter) είναι διακριτής ικανότητας 8-bit, κάθε σήμα χωρίζεται σε 256 διακριτές τιμές. Το 0 αντιστοιχεί στο μαύρο και το 255 στο λευκό. Θεωρώντας την πιο χαμηλή τιμή έντασης, δηλαδή αυτή που αντιστοιχεί στο πιο σκούρο pixel της εικόνας, ως χαμηλότερη τιμή της κλίμακάς μας (0) και την πιο υψηλή τιμή, αυτή που αντιστοιχεί στο πιο φωτεινό σημείο της εικόνας, ως το μέγιστο της κλίμακάς μας (255), μπορούμε να πετύχουμε την πιο λεπτομερή ανάλυση του σήματος. Με άλλα λόγια ο άξονας y του διαγράμματος του σχήματος 3.7 μπορεί να χωριστεί σε 256 σημεία. Αν θεωρήσουμε ότι το πρώτο δεν αντιστοιχεί στην τιμή 0 αλλά στην κάτω γραμμή, και το ανώτερο στην πάνω γραμμή, η ανάλυση του σήματος θα είναι πολύ λεπτομερέστερη. Περιορίζοντας, λοιπόν, τα επίπεδα λευκού και μαύρου (White – Black Level) η ακρίβεια της μέτρησης του πάχους του υμένα μπορεί να είναι της τάξης των 5 μm. Βέβαια, την τιμή της έντασης που παίρνουμε για την εικόνα έχει επηρεάσει και ο θερμικός θόρυβος η παρουσία του οποίου είναι αναπόφευκτη σε κάθε ψηφιακό σήμα. Η τιμή του σ' αυτή την περίπτωση είναι εύκολο να μετρηθεί υπολογίζοντας τα mV που φαίνεται να ακτινοβολούνται όταν ο φακός της κάμερας είναι καλυμμένος (ακτινοβολία από τον υμένα μηδενική).

Σύμφωνα με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, το τοπικό πάχος υμένα $h(x,y,t)$ είναι γραμμικά ανάλογο με την ένταση του φωτός $I(x,y,t)$ που εκπέμπεται από τον φθορίζοντα υμένα. Ο Βλαχογιάννης (2001) επαλήθευσε τη γραμμικότητα μεταξύ του θεωρητικά προβλέψιμου πάχους και της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, με ελέγχους σε διάφορα σημεία του οπτικού πεδίου. Έτσι η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές παραμέτρους είναι:

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

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



Σχήμα 3.7: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο-pixel της εικόνας.

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

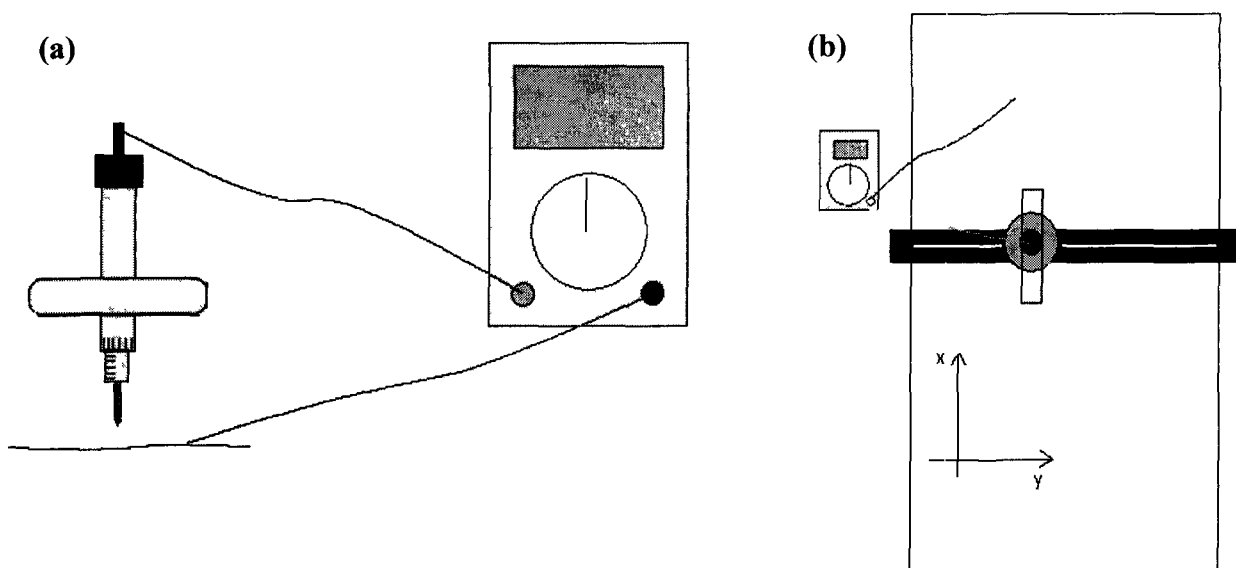
3.3.1 Βαθμονόμηση της μεθόδου φθορισμού

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών της σχέσης της έντασης ακτινοβολίας με το τοπικό πάχος του υμένα, είναι αναγκαίο να γίνουν κάποια πειράματα σε συνθήκες τέτοιες που να είναι γνωστό το πάχος του υμένα. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης της γραμμικής

ευστάθειας, η οποία ελέγχθηκε πειραματικά τόσο από τους Liu et. al. (1993) όσο και από τον Βλαχογιάννη (2001), υπάρχει ένα εύρος αριθμών Reynolds, ανάλογα με την γωνία κλίσης, όπου ο υμένας είναι ευσταθής και το πάχος του ίσο με την θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt. Επομένως η συλλογή εικόνων σε συνθήκες που παρέχουν ευσταθή υμένα μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τους συντελεστές α, β .

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

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



Σχήμα 3.8: Διάταξη μέτρησης του πάχους του υμένα με τη βοήθεια μικρομέτρου.

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

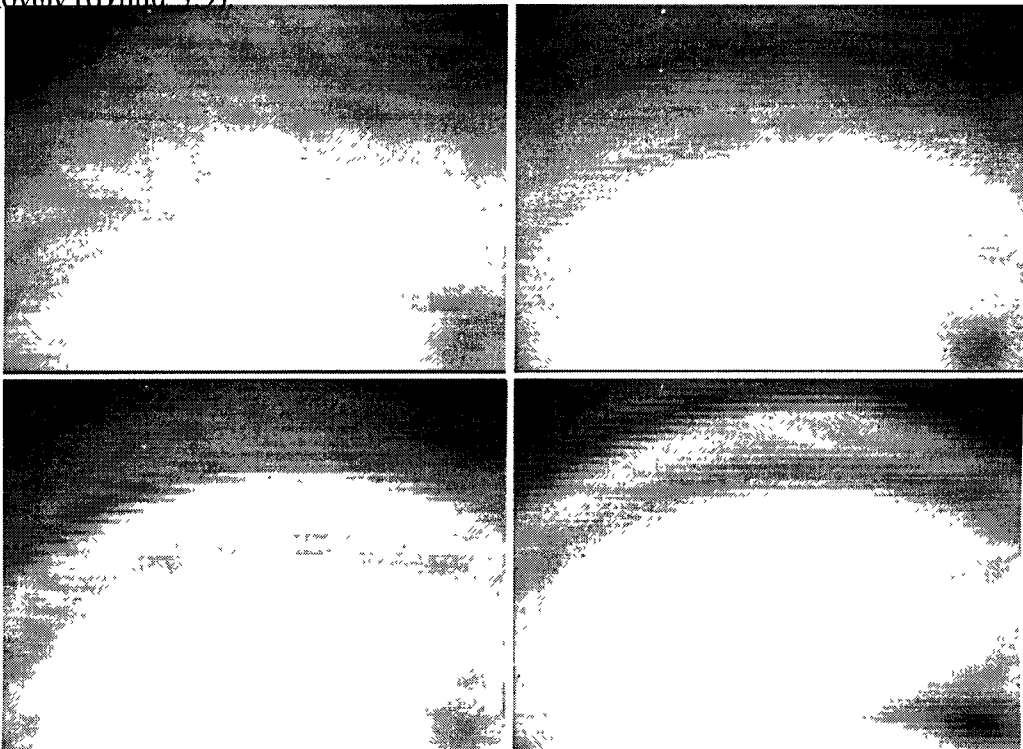
Αφού λοιπόν πιστοποιηθεί η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της θεωρητικής πρόβλεψης κατά Nusselt είναι δυνατή η βαθμονόμηση της πειραματικής μεθόδου χρησιμοποιώντας την σχέση (3.1). Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής: αρχικά μετράμε την παροχή στο κανάλι και από την σχέση Nusselt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

πάχος παίρνουμε δεδομένα (εικόνες) με την κάμερα που αντιστοιχούν σε κάποιες τιμές της ακτινοβολίας I . Οι εικόνες αυτές αποθηκεύονται στον υπολογιστή μέσω του προγράμματος HL Image++98. Για πιο σωστά αποτελέσματα παίρνουμε αρκετές εικόνες και υπολογίζουμε τον μέσο όρο της ακτινοβολίας σε κάθε pixel. Με γνώστη την ακτινοβολία και το πάχος του υμένα είναι δυνατός και ο υπολογισμός των γραμμικών συντελεστών α και β της σχέσης (3.1). Επειδή η σχέση είναι γραμμική απαιτούνται τα πάχη και οι ακτινοβολίες σε τουλάχιστον δυο αριθμούς Re , ώστε να υπολογιστούν τα $\alpha(x,y)$ και $\beta(x,y)$. Ωστόσο, για να αυξηθεί η ακρίβεια της βαθμονόμησης, λαμβάνουμε τιμές σε τέσσερις τουλάχιστον αριθμούς Re και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων βρίσκουμε τα α και β που αντιστοιχούν σε κάθε pixel. Εφόσον υπολογιστούν οι πίνακες των $\alpha(x,y)$ και $\beta(x,y)$, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.1) για την εύρεση του πάχους του υμένα σε οποιοδήποτε αριθμό Re .

Στην περίπτωση που οι συνθήκες στις οποίες γίνεται το πείραμα είναι τέτοιες που δεν μας επιτρέπουν να επιτύχουμε ευσταθή περιοχή ροής (π.χ. σε υψηλές γωνίες κλίσης) η διαδικασία που ακολουθείται είναι διαφορετική. Στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα για την βαθμονόμηση λαμβάνονται σε συνθήκες όσο πιο κοντά στην ευσταθή περιοχή. Παίρνουμε έναν μεγάλο αριθμό φωτογραφιών και υπολογίζουμε το μέσο όρο της ακτινοβολίας σε κάθε pixel. Επειδή οι συνθήκες μέτρησης είναι κοντά στην ευσταθή περιοχή το μέσο πάχος του υμένα είναι ίσο με το πάχος κατά Nusselt. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο προσδιορισμός της επίδρασης του φωτισμού σε κάθε pixel της εικόνας. Ένας εναλλακτικός τρόπος βαθμονόμησης αυτών των πειραμάτων είναι η χρησιμοποίηση της βαθμονόμησης για μικρότερες κλίσεις.

3.3.2 Επεξεργασία δεδομένων

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

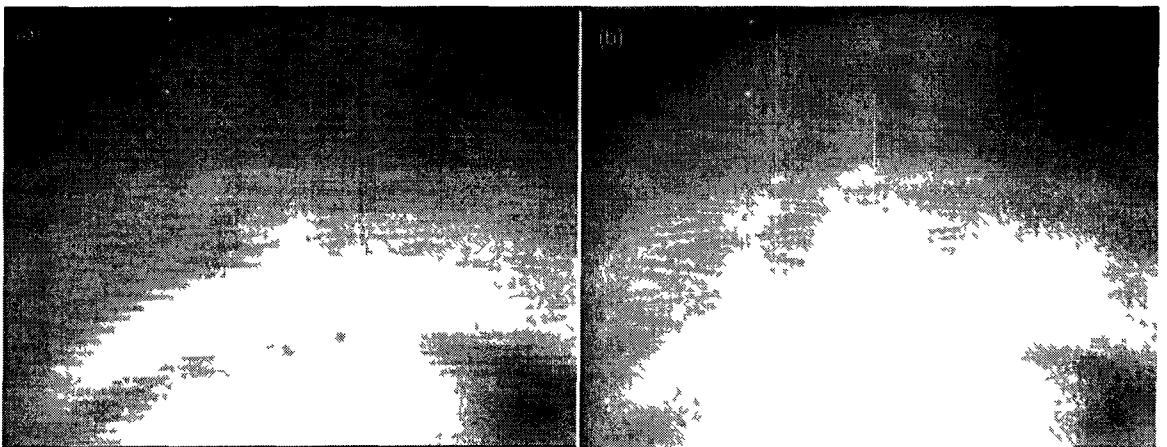


Σχήμα 3.9: Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται.

Έτσι στο σχήμα 3.9, στις περιοχές που οι αποχρώσεις του γκρι πλησιάζουν περισσότερο προς το λευκό έχουμε μεγαλύτερο πάχος υμένα (ύπαρξη κύματος) σε σχέση με τις περιοχές με αποχρώσεις κοντά στο μαύρο. Συμπερασματικά, στο σχήμα 3.9 μπορούμε να παρατηρήσουμε την κίνηση ενός δισδιάστατου μοναχικού κύματος κατάντη της ροής. Η καμπυλότητα που εμφανίζεται στο μέτωπο του κύματος οφείλεται στην επιβράδυνση της ροής κοντά στα πλευρικά τοιχώματα του καναλιού. Από τις πειραματικές μετρήσεις αποδεικνύεται ότι αυτή η καμπυλότητα δεν επηρεάζει την εξέλιξη των κυμάτων. Από τις εικόνες αυτές μπορούμε να πάρουμε μόνο ποιοτικές πληροφορίες για τη ροή και τις δομές που δημιουργούνται. Για να μπορέσουμε να πάρουμε ποσοτικά δεδομένα από τις εικόνες είναι αναγκαίο να τις επεξεργαστούμε υπολογιστικά. Αυτό γίνεται με τη χρήση του MATLAB και κάποιων προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας (Image Tool, HL Image++98)

Ψηφιακό φίλτράρισμα

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



Σχήμα 3.10 (a) Εικόνα πριν την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης, (b) μετά την εφαρμογή του φίλτρου συνέλιξης

Επειδή ο αριθμός των εικόνων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια κάθε πειράματος είναι τέτοιος που καθιστά απαγορευτική την χειροκίνητη επεξεργασία της κάθε εικόνας,

χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα σε Visual Basic το οποίο αυτοματοποιεί την διαδικασία του φιλτραρίσματος.

Υπολογισμός της σχέσης ακτινοβολίας – πάχους υμένα

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

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

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

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

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

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

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

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

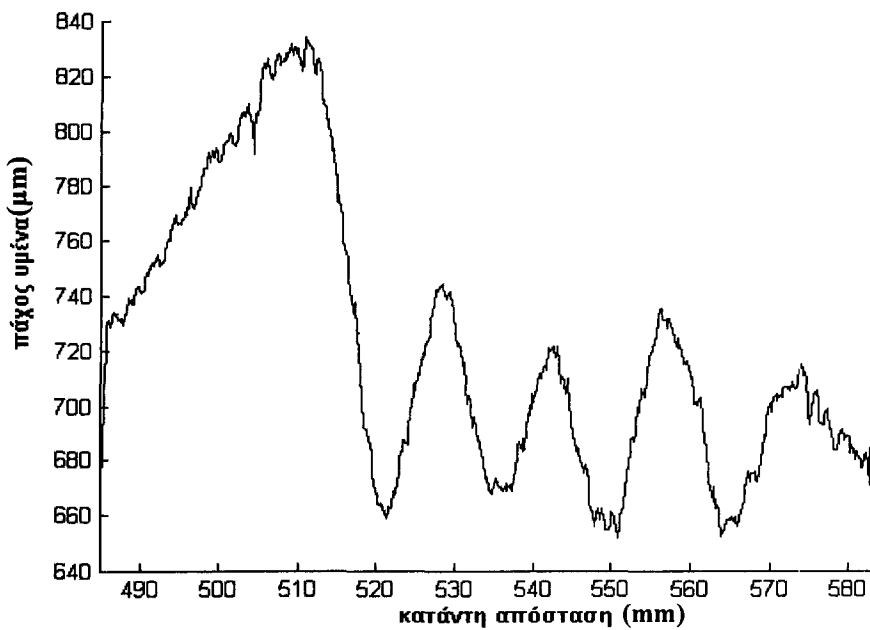
Όπως είπαμε για την βαθμονόμηση παίρνουμε 20 εικόνες σε τουλάχιστον 4 διαφορετικούς αριθμούς Re. Οι πίνακες που δίνουν τις τιμές σε διαφορετικές εικόνες για τον ίδιο Re προστίθενται, και τα στοιχεία του συνολικού πίνακα που προκύπτει διαιρούνται με το συνολικό αριθμό των εικόνων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε στατιστικά πιο σίγουρα αποτελέσματα για την τιμή της έντασης σε κάθε σημείο.

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

3.3.3 Επεξεργασία εικόνων για την περίπτωση επίπεδου τοιχώματος

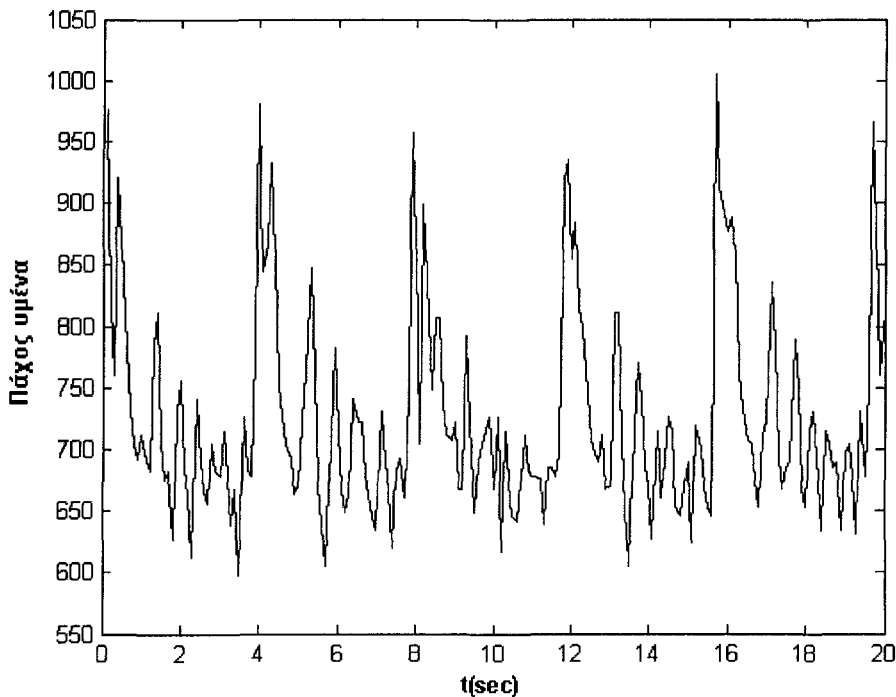
Στη συνέχεια περνάμε στην επεξεργασία των δεδομένων που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ανάλυση. Ο αριθμός των εικόνων προς επεξεργασία σε αυτή την περίπτωση, για κάθε αριθμό Re , είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που λαμβάνονται στην ευσταθή περιοχή και εξαρτάται από το χρονικό διάστημα για το οποίο έγινε η δειγματοληψία. Συνήθως ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 0,1 εικόνες/sec. Η διαδικασία που ακολουθείται και σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτή της επεξεργασίας των δεδομένων της ευσταθούς περιοχής. Έτσι λοιπόν, κάθε εικόνα μετατρέπεται σε ένα πίνακα 576×768 , όπου το κάθε στοιχείο έχει μια διακριτή τιμή (0 ως 255). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε mVolts μέσω των σχέσεων που δόθηκαν στην παράγραφο 3.6.2 χρησιμοποιώντας σαν WL και BL τιμές οι οποίες ορίστηκαν σαν χαμηλότερη και υψηλότερη τιμή της έντασης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Έπειτα, η σχέση που έχει υπολογιστεί ότι συνδέει την ακτινοβολία με το μέσο πάχος του υμένα μπορεί να μας δώσει το πάχος του υμένα σε κάθε pixel της εικόνας (σχ.3.11).

Από τις τιμές του πίνακα που δίνει το πάχος του υμένα σε κάθε σημείο μπορούμε να πάρουμε πληθώρα άλλων πληροφοριών. Έτσι, για παράδειγμα, μπορούμε να έχουμε την χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου (σχ.3.12). Η απεικόνιση του πάχους του υμένα σε διάφορα σημεία κατά μήκος του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου ($h(x_0, y_0, t)$), μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη βασική αρμονική της συχνότητας ταλάντωσης των σημείων. Επίσης, μπορεί να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με το μέσο ύψος των κυμάτων και το μέσο πάχος υμένα.



Σχήμα 3.11: Χωρική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα.

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



Σχήμα 3.12: Χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου.

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

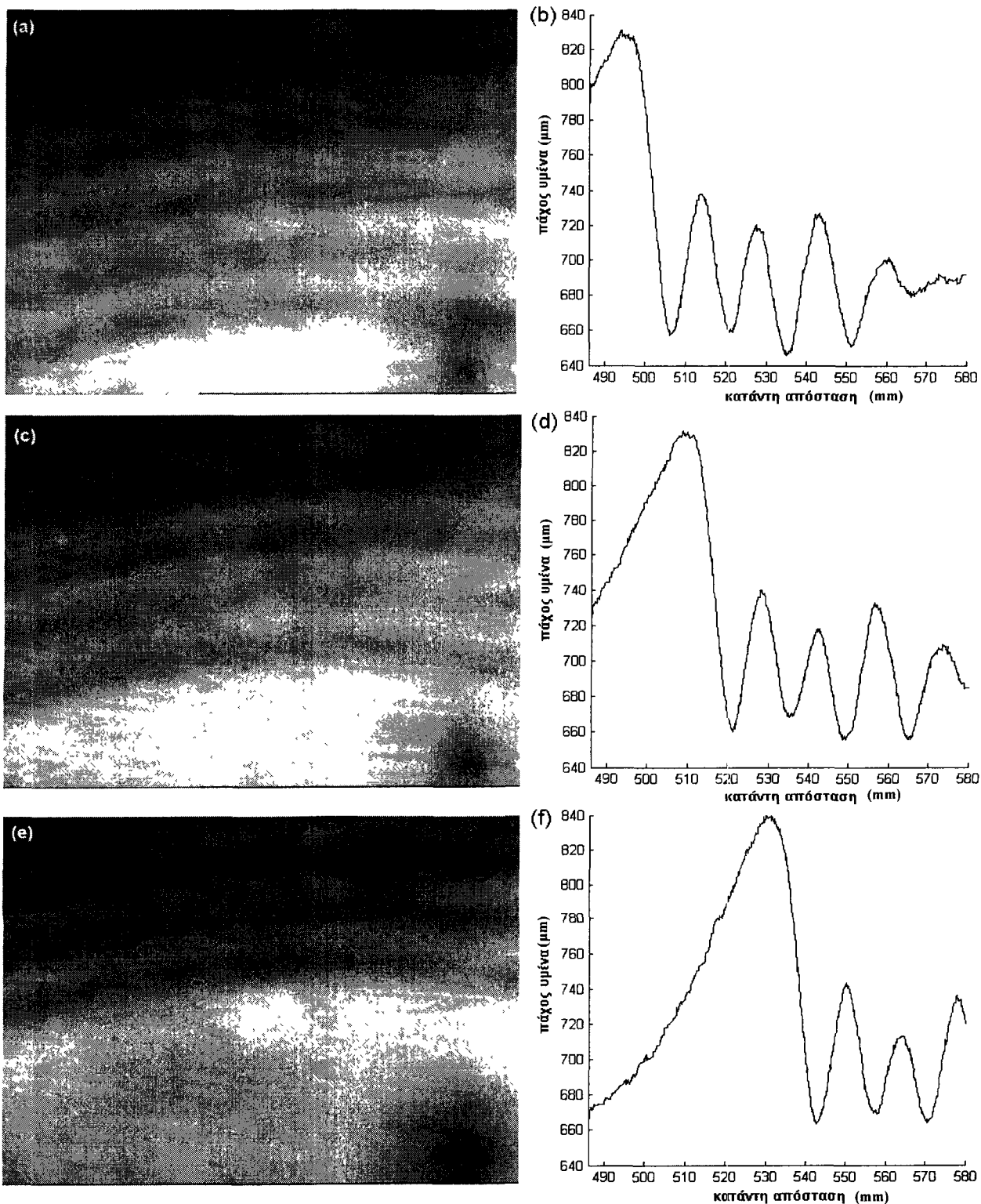
Σημειώνουμε ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναγκαία η ποσοτική ανάλυση ολόκληρης της εικόνας και όχι μόνο μίας μεμονωμένης γραμμής. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η κατάσταση ροής με τρισδιάστατες δομές στην ελεύθερη επιφάνεια. Τότε, η υπολογιστική διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε pixel της εικόνας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

3.3.4 Επεξεργασία εικόνων για την περίπτωση περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος

Η προαναφερόμενη πειραματική διαδικασία εφαρμόζεται με μεγάλη ακρίβεια στη ροή υγρού υμένα πάνω από επίπεδο τοίχωμα. Ωστόσο, στην διδακτορική διατριβή έγιναν και πειράματα πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, και πιο συγκεκριμένα σε τοίχωμα ορθογωνικής διαμόρφωσης με μήκος περιόδου 12 mm και ύψος σκαλοπατιού 200 μm, 400 μm και 800 μm. Η επεξεργασία αυτών των δεδομένων με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης της ελεύθερης επιφάνειας, είναι ιδιαίτερη και περιγράφεται στο παρών υποκεφάλαιο.

Η ορθογωνική μορφή του τοιχώματος επιλέχθηκε αφενός για να ελαχιστοποιηθούν προβλήματα διάθλασης της μετρούμενης ακτινοβολίας και αφετέρου για να μελετηθεί η επίδραση αρμονικών ανώτερης τάξης. Η άμεση εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε πάνω από επίπεδο τοίχωμα δεν είναι εφικτή επειδή στις κοιλότητες του τοιχώματος εγκλωβίζεται ποσότητα υγρού. Από την περιγραφή της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό γνωρίζουμε ότι η ένταση της ακτινοβολίας του υμένα είναι ανάλογη με την ποσότητα

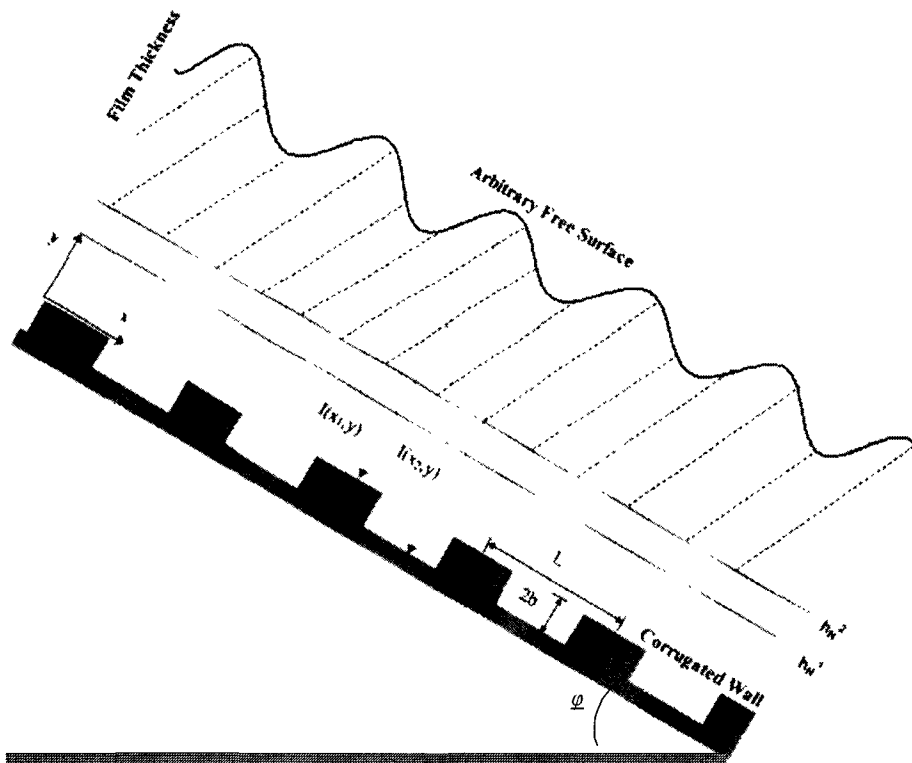
του υγρού. Συνεπώς, στην τιμή της ακτινοβολίας στα σημεία που βρίσκονται σε κοιλότητα του τοιχώματος προστίθεται και το ποσό που ακτινοβολεί το εγκλωβισμένο υγρό με αποτέλεσμα να εμφανίζεται τοπικά μεγαλύτερο πάχος από το πραγματικό.



Σχήμα 3.13: (a),(c),(e) Διαδοχικές εικόνες ($\Delta t=0,1 \text{ sec}$) στις οποίες φαίνεται ποιοτικά να περνάει ένα κύμα (b), (d) και (f) οι αντίστοιχες κατανομές του πάχους του υμένα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της κάθε εικόνας.

Ταυτόχρονα, ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι σε μεγάλους Re (μεγάλα πάχη υμένα), απευθείας εφαρμογή της παραπάνω μετρητικής διαδικασίας οδηγεί σε μειωμένη ευαισθησία. Αυτό συμβαίνει επειδή η ακτινοβολία λόγω του μέσου πάχους του υμένα είναι μεγάλη και η επίδραση των χωροχρονικών μεταβολών γίνεται συγκριτικά μικρή. Επίσης, η γραμμική σχέση έντασης φωτός και πάχους υμένα (όπως εκφράζεται από την εξίσωση 3.1) αρχίζει σταδιακά να είναι λιγότερο ικανοποιητική για πάχη υμένα μεγαλύτερα από 2 mm. Τα παραπάνω προβλήματα επιδεινώνονται στην περίπτωση του τοιχώματος ύψους 800 μm .

Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί αν αφαιρεθεί το ποσό της ακτινοβολίας που είναι εγκλωβισμένο στις κοιλότητες του τοιχώματος και είναι σταθερό νόυμερο. Και επειδή είναι δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια η τιμή αυτή, Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται παρακάτω (σχήμα 3.14), και αντιστοιχεί ουσιαστικά στην αφαίρεση από τις μετρήσεις του ποσού της ακτινοβολίας που οφείλεται στο υγρό το εγκλωβισμένο στις κοιλότητες του τοιχώματος.



Σχήμα 3.14: Το περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα (ορθογωνικό κύμα) και ο τρόπος προσδιορισμού της ελεύθερης επιφάνειας.

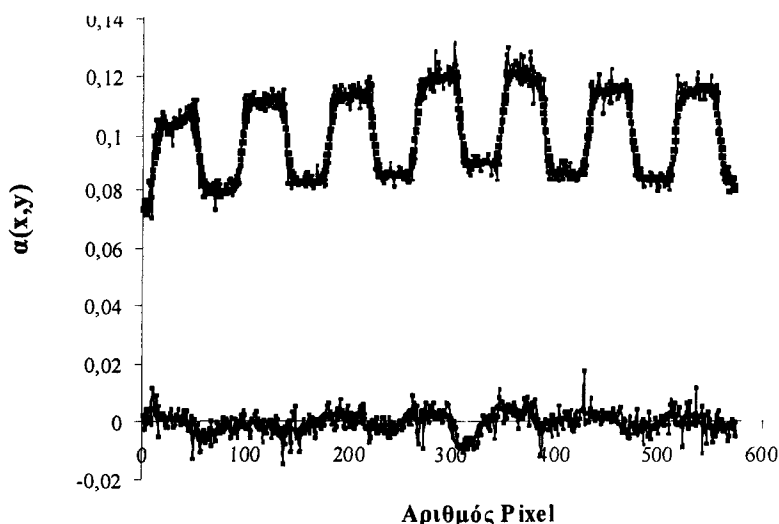
Όταν γίνονται μετρήσεις σε χαμηλό αριθμό Re στην ευσταθή περιοχή, η ελεύθερη επιφάνεια του υμένα είναι επίπεδη (h_N^1) και το πάχος το μετρούμενο από ένα ύψωμα του τοιχώματος έως της ελεύθερη επιφάνεια έχει τιμή ίση με τη θεωρητική κατά Nusselt. Μπορούμε λοιπόν, να αφαιρέσουμε από όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις το ποσό της ακτινοβολίας που μας δίνουν τα δεδομένα σε αυτόν τον πολύ χαμηλό Re , και να προσθέσουμε στο αποτέλεσμα τη θεωρητική τιμή του πάχους υμένα. Με τον τρόπο αυτό έχει αφαιρεθεί το ποσό της ακτινοβολίας του υγρού που είναι εγκλωβισμένο στις κοιλότητες του τοιχώματος. Η τροποποιημένη σχέση εξάρτησης της έντασης ακτινοβολίας από το πάχος του υμένα είναι:

$$h(x,y,z) = \frac{(I(x,y,t) - I_0(x,y)) - \beta(x,y)}{\alpha(x,y)} + h_N \quad (3.4)$$

όπου I_0 είναι τιμή της ακτινοβολίας στον χαμηλότερο Re και h_N το θεωρητικό κατά Nusselt πάχος του υμένα για τον συγκεκριμένο Re.

Ο έλεγχος της προτεινόμενης επεξεργασίας των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σε τρία διαφορετικά στάδια. Αρχικά επεξεργασθήκαμε αποτελέσματα τα οποία πήραμε για ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα, αφενός με τον κλασσικό τρόπο επεξεργασίας τους και αφετέρου αφαιρώντας την τιμή της έντασης στον χαμηλότερο Re και προσθέτοντας το κατά Nusselt πάχος. Τα αποτελέσματα για τις δυο διαφορετικές επεξεργασίες ήταν ίδια. Επόμενη κίνηση ήταν η εφαρμογή της προτεινόμενης διαδικασίας σε αποτελέσματα πάνω σε περιοδικό τοίχωμα, για Re μεγαλύτερο από αυτόν που αφαιρούμε αλλά πάλι στην ευσταθή περιοχή. (Το πάχος του υμένα και σε αυτή την περίπτωση είναι γνωστό και ίσο με την θεωρητική κατά Nusselt τιμή για τον συγκεκριμένο Re.) Και πάλι τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα. Τελευταία κίνηση ήταν η εφαρμογή της μεθόδου αφαιρώντας την τιμή της έντασης του φωτός που εκπέμπει ο υμένας για διαφορετικούς αριθμούς Re. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα ήταν ίδια. Ο τελευταίος αυτός έλεγχος έγινε σε περισσότερες από μία ομάδες μετρήσεων, αλλάζοντας είτε τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση είτε τα δεδομένα σε κάποιους από τους Re που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συντελεστών α , β με σκοπό να εμφανιστούν τυχόν πειραματικά σφάλματα τα οποία θα άλλαζαν τα τελικά αποτελέσματα.

Με την αφαίρεση των εικόνων που αντιστοιχούν σε επίπεδο υμένα ελαχίστου πάχους και τον υπολογισμό των συντελεστών $\alpha(x,y)$ και $\beta(x,y)$, αναμένεται η ομαλοποίηση του συντελεστή $\alpha(x,y)$ και ο μηδενισμός της μέσης τιμής του συντελεστή λάθους $\beta(x,y)$. Τα παραπάνω συμπεράσματα απεικονίζονται στο σχήμα 3.15 απ' όπου είναι εμφανής η επιρροή της διαδικασίας αφαίρεσης αλλά και της ομαλοποίησης των εικόνων στους γραμμικούς συντελεστές $\alpha(x,y)$ και $\beta(x,y)$.



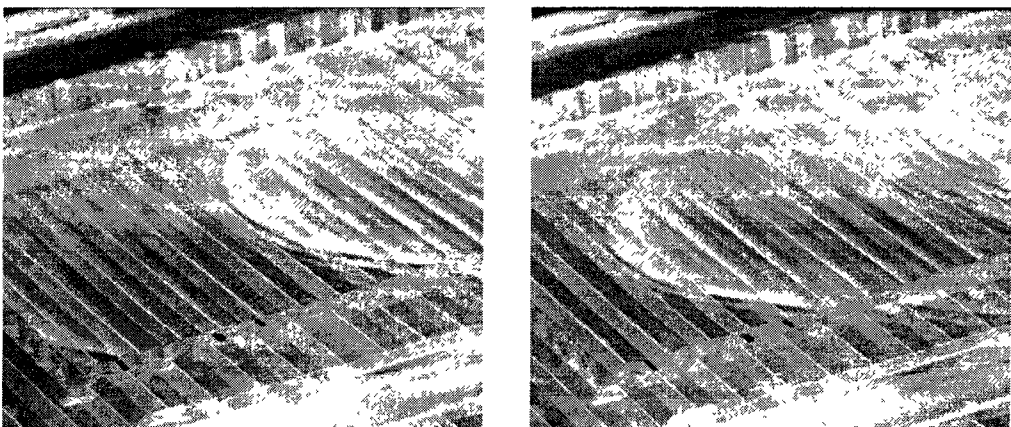
Σχήμα 3.15: Η εξάρτηση των συντελεστών $\alpha(x,y)$ και $\beta(x,y)$ κατάντη της ροής για τη περίπτωση εφαρμογής της διαδικασίας αφαίρεσης ενός επιπέδου υμένα.

Περαιτέρω ομαλοποίηση των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της διαδικασίας φιλτραρίσματος (convolution filters) των πρωτογενών εικόνων φθορισμού. Προσοχή πρέπει να δοθεί σε αυτή την περίπτωση ώστε η εφαρμογή του φίλτρου να μην αλλοιώνει τα τελικά αποτελέσματα. Αν στα πρωταρχικά δεδομένα το προφίλ πάχους του υμένα δε συνίσταται από κυματισμούς, με μήκος κύματος μικρότερο από τη διάσταση του φίλτρου συνέλιξης (convolution filter – Gaussian 15x15 ή 7x7), τότε η εφαρμογή του φίλτρου είναι ενδεδειγμένη. Στην αντίθετη περίπτωση, κάθε είδος εφαρμογής φίλτρου συνέλιξης (convolution filter) θα αλλοιώσει τα τελικά αποτελέσματα και κατά συνέπεια τη φυσική ερμηνεία του φαινομένου.

Το πρόβλημα της διάθλασης του φωτός το οποίο εντοπίζεται στις ακμές του τοιχώματος, εμφανίζεται και στη περίπτωση του ορθογωνικού τοιχώματος αλλά σε εξαιρετικά μικρότερο βαθμό οπότε δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

3.4 Σύστημα ταχείας δειγματοληψίας εικόνων

Πολλές φορές ήταν αναγκαία η συλλογή μετρήσεων με μεγάλη ταχύτητα δειγματοληψίας. Τέτοιες περιπτώσεις αφορούν την περιγραφή της ροής υγρού υμένα σε υψηλές γωνίες κλίσεις, όπου η χρονική εξέλιξη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα είναι ταχύτατη. Παρόλα αυτά, η CCD κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή μετρήσεων με την μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, μπορεί να πάρει μέχρι 50 εικόνες/sec και η κάρτα συλλογής δεδομένων έχει δυνατότητα για μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας 30 εικόνες/sec στην καλύτερη περίπτωση. Για το σκοπό αυτό προσαρμόστηκε κατάλληλη κάμερα υψηλής ταχύτητας, η οποία λαμβάνει έως και 1000 εικόνες ανά δευτερόλεπτο. Το σύστημα δειγματοληψίας περιλαμβάνει την κάμερα, την κάρτα συλλογής εικόνων και το αντίστοιχο λογισμικό της εταιρίας REDLAKE IMAGING (MotionScope).



Σχήμα 3.16: Οπτικές παρατηρήσεις της ροής υγρού υμένα πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με τη μέθοδο ταχείας δειγματοληψίας (Redlake Imaging).

Με τη χρήση του παραπάνω συστήματος δίδεται η δυνατότητα συλλογής ποιοτικών μετρήσεων - αλλά και ποσοτικών κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις - μέσω των οπτικών παρατηρήσεων, οι οποίες λαμβάνονται από τη συλλογή εικόνων σε μορφή bitmap ή ανι. Τέτοιου είδους εικόνες παρουσιάζονται στο σχήμα 3.16, όπου φαίνεται το πέρασμα ενός μοναχικού

κύματος κατά μήκος του καναλιού. Επίσης, η παρακολούθηση του φαινομένου με ταχύτατο σύστημα δειγματοληψίας βοηθά στο χαρακτηρισμό τρισδιάστατων δομών, που δημιουργούνται στην ελεύθερη επιφάνεια του υμένα.

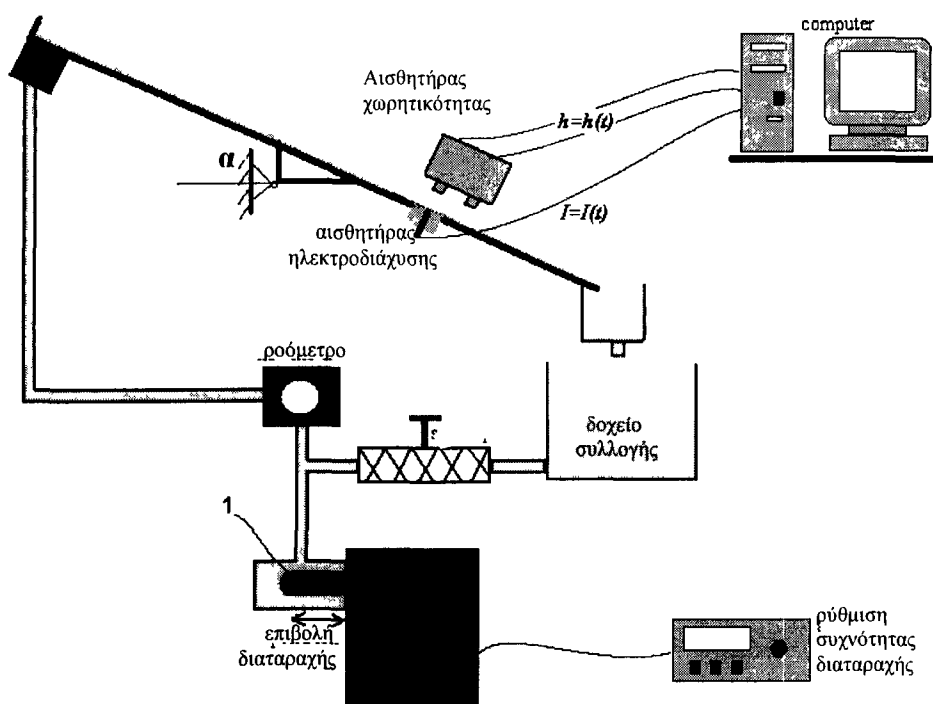
Τέλος λήψη video έγινε και με μια ψηφιακή video camera (SONY DCR-TRV255E) με σκοπό την καταγραφή των ταχέως εξελισσόμενων φαινομένων και την ποιοτική μόνο ανάλυσή τους.

3.5 Περιγραφή εναλλακτικών μεθόδων μέτρησης και συσκευής που εφαρμόστηκαν

3.5.1 Περιγραφή της πειραματικής συσκευής

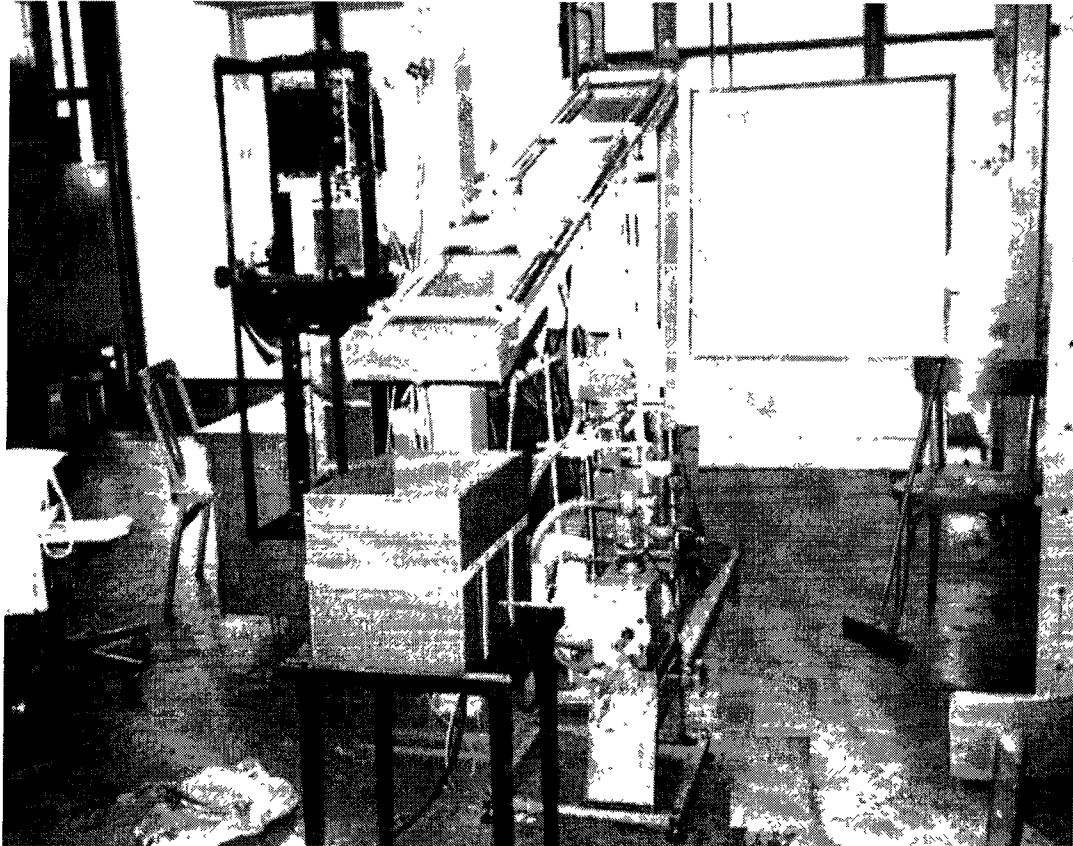
Ορισμένα συμπληρωματικά πειράματα της παρούσας εργασίας έγιναν στο Institute of Chemical Process Fundamentals στην Πράγα, στα πλαίσια διεθνούς συνεργασίας. Στα πειράματα μετράται το στιγμιαίο ύψος υγρού υμένα χρησιμοποιώντας αισθητήρες χωρητικότητας. Μετράται επίσης η διατμητική τάση στο τοίχωμα με την τεχνική της ηλεκτροδιάχυσης.

Η πειραματική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 3.17 και στη φωτογραφία του σχήματος 3.18, και είναι παρόμοια με αυτήν όπου έγιναν και τα υπόλοιπα πειράματα. Η συσκευή αποτελείται από χαλύβδινη πλάκα με μεταβλητή κλίση, μια αντλία, μια συσκευή επιβολής διαταραχών, ένα ροόμετρο και τους αισθητήρες συγκέντρωσης και ηλεκτροδιάχυσης ανάλογα με το πείραμα. Η αντλία οδηγεί και σε αυτή την περίπτωση το ρευστό από το δοχείο συλλογής στο δοχείο υπερχειλίσης. Το ρευστό ρέει κατά μήκος της πλάκας και επιστρέφει στο δοχείο συλλογής για να ακολουθήσει την ίδια πορεία.



Σχήμα 3.17: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης μετρήσεων Πράγας.

Η παροχή ρυθμίζεται από την αντλία και μετρείται με το ροόμετρο. Για να επιβάλλουμε διαταραχή χρησιμοποιούμε την διάταξη που φαίνεται στο σχήμα. Ο μαύρος κύλινδρος (που δηλώνεται με το νούμερο 1) κινείται περιοδικά και δημιουργεί μια διαταραχή στο υγρό. Η διαταραχή αυτή περνάει μέσω των σωλήνων στο σημείο υπερχειλίσης, όπου μετατρέπεται σε κύμα. Το μέγεθος της διαταραχής και η συχνότητά της μπορούν να μεταβληθούν. Ο αισθητήρας χωρητικότητας τοποθετείται επάνω από το κανάλι ροής. Αντίστοιχα, οι αισθητήρες ηλεκτροδιάχυσης τοποθετούνται σε ειδικά ανοίγματα τα οποία έχει η πλάκα και είναι σε ευθεία με αυτήν, ώστε να μην δημιουργούν εμπόδιο ή ασυνέχεια στην ροή.



Σχήμα 3.18: Πειραματική διάταξη μετρήσεων Πράγας.

Ο αισθητήρας χωρητικότητας μετράει το κενό του αέρα που υπάρχει μεταξύ του άκρου του και της ελεύθερης επιφάνειας. Προκειμένου να είναι υπολογίσιμες και πολύ μικρές μεταβολές του πάχους του υμένα, ο αισθητήρας πρέπει να είναι αρκετά κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια αλλά σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με το υγρό. Από τα δεδομένα που παίρνουμε, μπορούμε να υπολογίσουμε το ύψος των κυμάτων, την συχνότητά τους και το μήκος τους. Από την υστέρηση μεταξύ των μετρήσεων δύο αισθητήρων μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα των κυμάτων. Στην περίπτωση αυτή οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 1,5 m από την αρχή του καναλιού.

3.5.2 Μέτρηση της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα με την μέθοδο της ηλεκτροχημικής τεχνικής

Η ηλεκτροχημική τεχνική χρησιμοποιεί αισθητήρες οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι στο τοίχωμα, και επιτυγχάνει μέτρηση της διατμητικής τάσης αξιοποιώντας φαινόμενα μεταφοράς

μάζας. Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες έχουν πολλά πλεονεκτήματα διότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, δεν παρεμποδίζουν την ροή και προσφέρουν την δυνατότητα μέτρησης χρόνο-εξαρτώμενων φαινομένων. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω έχουν βασιστεί στην ανασκόπηση των Hanratty & Campbell (1996).

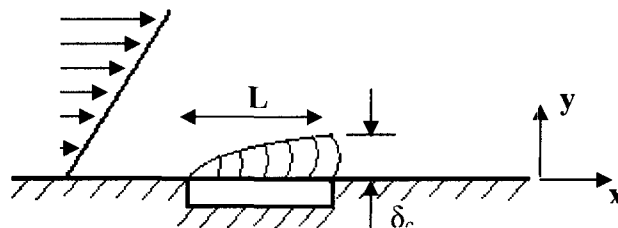
Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.19 για την περίπτωση αισθητήρα μορφής ορθογώνιου παραλληλογράμμου, με την μακριά πλευρά του να είναι κάθετη στην διεύθυνση της ροής. Το υγρό στην επιφάνεια του αισθητήρα διατηρεί συγκέντρωση του ελεγχόμενου συστατικού ίση με C_w (συνήθως $C_w=0$), η οποία διαφέρει από την C_b της κύριας μάζας του υγρού. Ως αποτέλεσμα της διαφοράς συγκέντρωσης και του πεδίου ροής, λαμβάνει χώρα μεταφορά μάζας με συναγωγή μεταξύ υγρού και επιφάνειας του αισθητήρα. Ο μέσος ρυθμός μεταφοράς μάζας στον αισθητήρα, $\langle N \rangle$, μετράται άμεσα και με κατάλληλη ανάλυση υπολογίζεται η διατμητική τάση στο τοίχωμα.

Συγκεκριμένα, αν το στοιχείο είναι αρκετά μικρό στην διεύθυνση ροής, το οριακό στρώμα συγκέντρωσης πάνω από τον αισθητήρα θα είναι τόσο λεπτό, ώστε η ταχύτητα ροής στο εσωτερικό του να δίνεται από τον τύπο:

$$U = S \cdot y \quad (3.5)$$

όπου y είναι η απόσταση κάθετα στο τοίχωμα και S η κλίση της ταχύτητας στο τοίχωμα. Αν το ιξώδες του υγρού είναι γνωστό, η διατμητική τάση στο τοίχωμα μπορεί να υπολογισθεί από την κλίση της ταχύτητας αφού:

$$\tau_w = \mu \cdot S \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.19: Περιγραφή του πεδίου ροής και μεταφοράς μάζας πάνω από ηλεκτροχημικό αισθητήρα.

Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας εκφράζεται από τον αντίστοιχο συντελεστή, K , που ορίζεται ως

$$K = \frac{\langle N \rangle}{C_b - C_w} \quad (3.7)$$

Η συσχέτιση της κλίσης, S , με τον συντελεστή μεταφοράς μάζας επιτυγχάνεται από το ισοζύγιο του ελεγχόμενου συστατικού. Θεωρώντας μονοδιάστατη ροή και διδιάστατη μεταφορά μάζας, και αγνοώντας τη διάχυση στη διεύθυνση ροής, προκύπτει ότι η συγκέντρωση του συστατικού ικανοποιεί τη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + S \cdot y \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (3.8)$$

Θεωρώντας ότι η ροή είναι μόνιμη ή ότι αλλάζει με τόσο αργούς ρυθμούς ώστε το πεδίο συγκέντρωσης να περιγράφεται από την μόνιμη λύση της σχέσης 3.8, προκύπτει ότι:

$$S \cdot y \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (3.9)$$

Η εξίσωση 3.9 λύνεται χρησιμοποιώντας τις ως συνοριακός συνθήκες $C=C_w$ στο τοίχωμα και $C=C_b$ στο υγρό, και ο μέσος ρυθμός μεταφοράς μάζας υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα:

$$\langle N \rangle = \frac{1}{d} \int_0^d D \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=0} dx \quad (3.10)$$

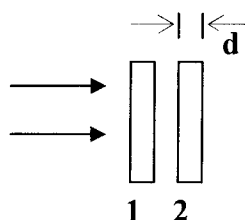
Με βάση τα παραπάνω, οι Mitchell & Hanratty έδωσαν την επόμενη συσχέτιση μεταξύ K και S :

$$\frac{K \cdot d}{D} = 0,807 \cdot Z^{\frac{1}{3}} \quad (3.11\alpha)$$

όπου

$$Z = \left(\frac{S \cdot L^2}{D} \right) = d^{+2} \cdot Sc \quad (3.11\beta)$$

Στην πειραματική συσκευή της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας με δύο τομείς (σχήμα 3.20) όπως είχε προταθεί από τους Son & Hanratty, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί και η φορά της ροής. Ο αισθητήρας αυτός ονομάζεται “sandwich probe” και είναι κατασκευασμένος από δύο φύλλα λευκόχρυσου, κολλημένα με μονωτικό υλικό στο εσωτερικό χαλύβδινου σωλήνα που τα περιβάλλει. Τα φύλλα λευκόχρυσου, είναι με τέτοιο τρόπο τοποθετημένα ώστε να χωρίζονται, κατά την διεύθυνση της ροής, από ένα κενό πάχους 10 μm. Αν η ροή έχει φορά αυτή που φαίνεται στο σχήμα, η επιφάνεια 2 του αισθητήρα θα δώσει μικρότερη τιμή του συντελεστή μεταφοράς μάζας K σε σχέση με την επιφάνεια 1 καθώς θα βρίσκεται υπό τον έλεγχο παχύτερου οριακού στρώματος συγκέντρωσης.



Σχήμα 3.20: Αισθητήρας “sandwich”.

Κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση, τα δύο φύλλα λευκόχρυσου λειτουργούν ως δύο κάθοδοι και ο σωλήνας ως άνοδος. Η ένταση του μετρούμενου ρεύματος είναι πάντοτε ανάλογη του ρυθμού αντίδρασης, αλλά η χρήσιμη περιοχή λειτουργίας του αισθητήρα αφορά συνθήκες όπου η αντίδραση ελέγχεται από μεταφορά μάζας. Σε αυτή την περίπτωση, η μετρούμενη ένταση ρεύματος συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό μεταφοράς μάζας σύμφωνα με τη σχέση:

$$i = n_e \cdot F \cdot A_e \cdot \langle N \rangle \quad (3.12)$$

όπου F = η σταθερά του Faraday

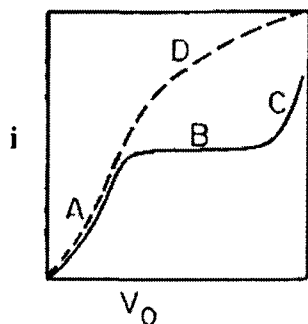
A_e = η επιφάνεια του αισθητήρα

n_e = η μεταβολή σθένους κατά την αντίδραση

Συνδυασμός των εξισώσεων (3.11) και (3.12) δίνει το τελικό αποτέλεσμα

$$i = 0,807 \frac{D \cdot n_e \cdot F \cdot A_e \cdot C_B}{L} \cdot Z^{\frac{1}{3}} \quad (3.13)$$

Αναφορικά με την χρήσιμη περιοχή λειτουργίας του αισθητήρα, υπενθυμίζεται η συμπεριφορά του σχήματος 3.21, που παριστάνει την εξάρτηση της έντασης ρεύματος (δηλαδή της αντίδρασης) από την διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων. Η περιοχή Α, όπου αύξηση της τάσης οδηγεί σε αύξηση και της έντασης ρεύματος, αντιστοιχεί σε έλεγχο του φαινομένου από την κινητική της αντίδρασης. Πέρα από μία τάση, η ένταση ρεύματος παραμένει σταθερή και σχηματίζεται το πλατό Β. Στην περιοχή αυτή, η ένταση του ρεύματος ελέγχεται από τη μεταφορά μάζας.



Σχήμα 3.21: Πόλωση του ηλεκτροδίου. Α: ελεγχόμενη από την κινητική της αντίδρασης, Β: ελεγχόμενη από τη μεταφορά μάζας, C: παράπλευρες αντιδράσεις και D: πάνω από τον κρίσιμο K_{limit} .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής λεπτού υμένα υγρού πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Στόχος των πειραμάτων είναι η συστηματική καταγραφή των χαρακτηριστικών των κυμάτων (κυρίως των μοναχικών), καθώς και η λεπτομερής εξέταση της επίδρασης της συχνότητας διαταραχής στην εξέλιξη της ροής. Η συλλογή των δεδομένων έγινε σε διαφορετικές πειραματικές συσκευές, με διαφορετικές μεθόδους συλλογής δεδομένων και με διαφορετικούς τρόπους επιβολής της διαταραχής. Αρχικά μελετήθηκαν αναπτυσσόμενα και πλήρως ανεπτυγμένα μοναχικά κύματα με σκοπό να μετρηθούν συστηματικά τα χαρακτηριστικά τους και να μελετηθεί η κατανομή της διατμητικής τάσης που επιβάλλεται από αυτά στο τοίχωμα. Η εισαγωγή μιας διαταραχής σταθερής συχνότητας στην είσοδο του καναλιού οδηγεί κατάντη της ροής στην ανάπτυξη μιας σειράς ομοιόμορφων, πλήρως ανεπτυγμένων μοναχικών κυμάτων.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των μοναχικών κυμάτων έχουν ήδη διερευνηθεί στη βιβλιογραφία τόσο θεωρητικά/υπολογιστικά όσο και πειραματικά. Παρόλα αυτά, ποσοτική σύγκριση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δεν φαίνεται να έχει γίνει εκτενώς. Ένα από τα θέματα που έχουν ελάχιστα αναλυθεί στην βιβλιογραφία είναι η επίδραση των μοναχικών κυμάτων στην διατμητική τάση στο τοίχωμα. Στην παρούσα εργασία μετρήθηκαν συστηματικά τα χαρακτηριστικά των μοναχικών κυμάτων και μελετήθηκε η κατανομή της διατμητικής τάσης που επιβάλλεται από αυτά, και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχες υπολογιστικές προβλέψεις.

Η επίδραση της συχνότητας διαταραχής στην είσοδο εξετάστηκε συστηματικά. Διαπιστώθηκε, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία, ότι για μεγάλο εύρος τιμών παράγεται μία κανονική κυματοσειρά που η συχνότητά της ταυτίζεται με την τιμή της διαταραχής εισόδου. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της μελέτης αφορά την συμπεριφορά σε πολύ χαμηλές συχνότητες διέγερσης. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι, στις συχνότητες αυτές η κανονική αλληλουχία κυμάτων καταστρέφεται από την εμφάνιση παρασιτικών κορυφών. Το φαινόμενο μελετήθηκε πειραματικά για πρώτη φορά και ταυτοποιήθηκε ο μηχανισμός δημιουργίας και η πορεία εξέλιξης των παρασιτικών κορυφών.

4.1 Πλήρως ανεπτυγμένα μοναχικά κύματα: τα χαρακτηριστικά τους και η επίδρασή τους στην διατμητική τάση στο τοίχωμα

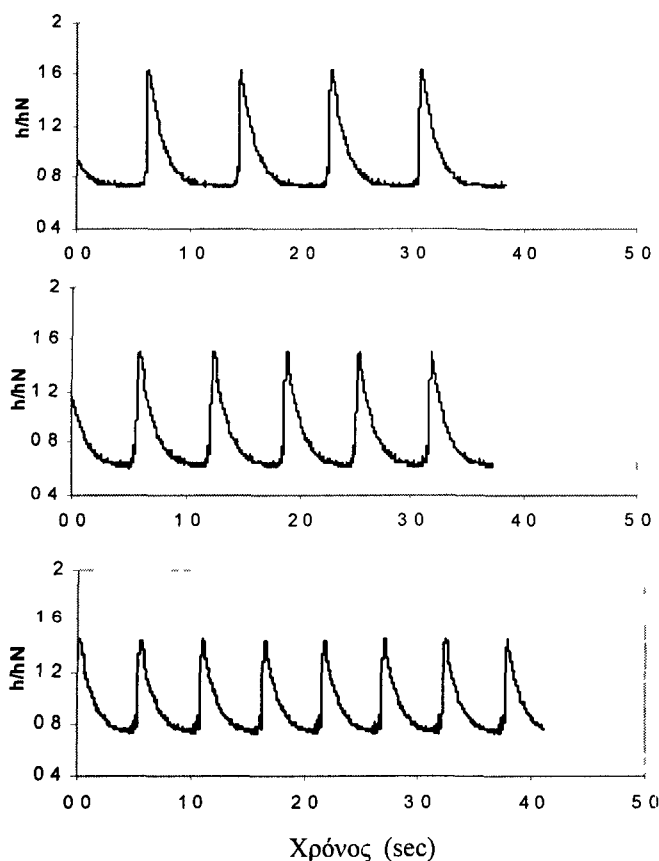
Ανακεφαλαιώνοντας προηγούμενες παρατηρήσεις της βιβλιογραφίας, μπορούμε να χωρίσουμε την μορφή των αναπτυσσόμενων κυμάτων σε τρεις περιοχές ανάλογα με την συχνότητα της διαταραχής που επιβάλλεται. Στις πολύ υψηλές συχνότητες διαταραχής εμφανίζονται περιοδικά κύματα με μια μόνο κορυφή ανά περίοδο. Στην ενδιάμεση περιοχή των μεσαίων προς μικρών συχνοτήτων, σχηματίζονται κύματα με περισσότερες από μια κορυφές ανά περίοδο (μοναχικά κύματα), που αποτελούνται από μια κύρια κορυφή της οποίας προηγούνται μικρά τριχοειδή κύματα (capillary ripples). Μειώνοντας ακόμη περισσότερο την συχνότητα της διαταραχής στην είσοδο, τα κύματα που δημιουργούνται απομακρύνονται ακόμη

περισσότερο και σχηματίζονται νέα παρασιτικά κύματα ανάμεσά τους. Στο συγκεκριμένο σημείο μελετήθηκε η μεσαία περίπτωση του ενός μοναχικού κύματος ανά περίοδο. Τα πειράματα έγιναν για υγρά διαφορετικού ιξώδους για γωνίες κλίσης από $2,5^\circ$ έως 15° .

4.1.1 Χαρακτηριστικά μοναχικών κυμάτων

Πειράματα έγιναν αρχικά για γωνία κλίσης 5° και επιβολή διαταραχής μεταβαλλόμενης συχνότητας στην είσοδο. Η μικρή γωνία κλίσης του καναλιού επιλέχτηκε για να είναι πιο αργή η ανάπτυξη των διδιάστατων κυμάτων και η αποφυγή εμφάνισης τρισδιάστατων δομών. Μελετήθηκαν τόσο τα στάδια ανάπτυξης των μοναχικών κυμάτων όσο και τα πλήρως ανεπτυγμένα κύματα.

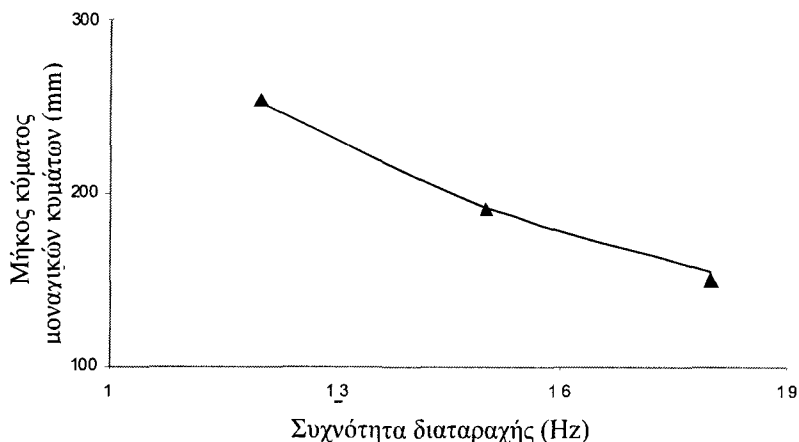
Η επίδραση της συχνότητας διαταραχής εισόδου στο ύψος των κυμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1, όπου φαίνεται ότι αύξηση της συχνότητας επιφέρει μείωση του ύψους. Επιπρόσθετα, αυξάνοντας την συχνότητα η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών κυμάτων μειώνεται, και ως φυσικό ακόλουθο μειώνεται και η απόσταση μεταξύ κορυφών (μήκος κύματος).



Σχήμα 4.1: Χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας για ροή με $Re=35$ και συχνότητας διαταραχής (a) 1,2 Hz, (b) 1,5 Hz και (c) 1,8 Hz.

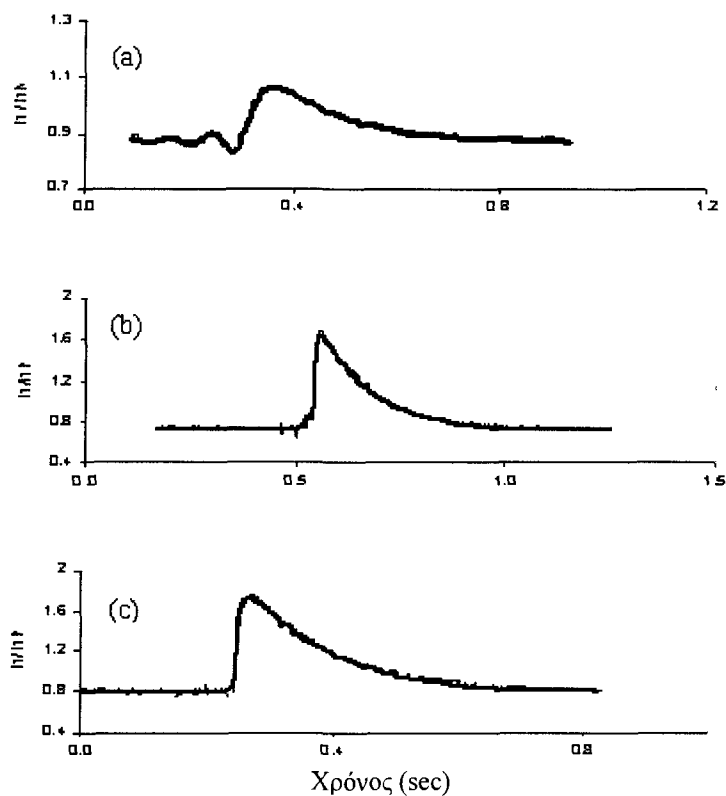
Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του μήκους κύματος των μοναχικών κυμάτων συναρτήσει της συχνότητας της επιβαλλόμενης διαταραχής. Είναι φανερό ότι τα πειραματικά

δεδομένα έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με αντίστοιχα υπολογιστικά αποτελέσματα (Σερίφη, 2006).



Σχήμα 4.2: Η εξάρτηση του μήκους κύματος των μοναχικών κυμάτων από τη συχνότητα διαταραχής. Σύγκριση πειραματικών (\blacktriangle) με υπολογιστικά αποτελέσματα (—).

Επιθυμητό ήταν οι μετρήσεις να γίνουν όταν τα κύματα είναι πλήρως ανεπτυγμένα, όπου το σχήμα και η φασική τους ταχύτητα παραμένουν σταθερά. Παρόλα αυτά η λεπτομερής πειραματική καταγραφή της πλήρως ανεπτυγμένης μορφής των κυμάτων δεν είναι εύκολη καθώς σε μικρές αποστάσεις από την είσοδο του υγρού στο κανάλι τα κύματα είναι υπό ανάπτυξη, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις εμφανίζονται τρισδιάστατες διαταραχές. Η υπόθεση της πλήρους ανάπτυξης (stationarity) ισχύει σε κάποια, αλλά όχι σε όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

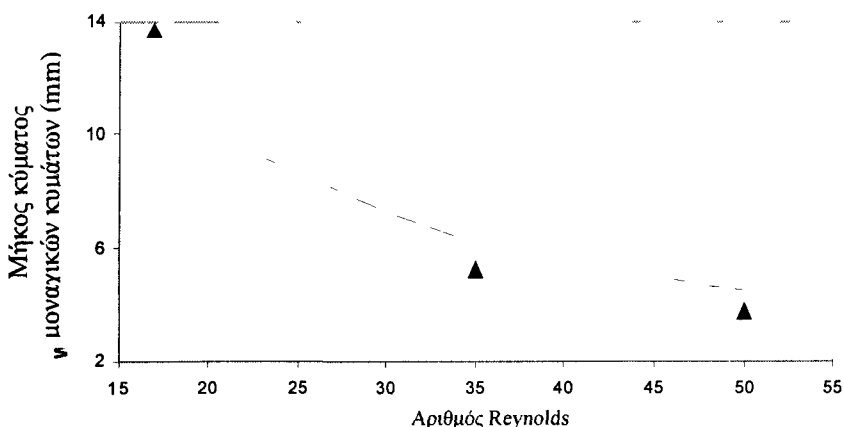


Σχήμα 4.3: Μοναχικά κύματα για πειράματα με συχνότητα διαταραχής 1,2 Hz και (a) $Re=17$ (b) $Re=35$ και (c) $Re=50$.

Στην εικόνα 4.3 γίνεται μια σύγκριση τριών περιπτώσεων ανάπτυξης κυμάτων σε τρεις διαφορετικούς αριθμούς Re (a. $Re=17$, b. $Re=35$, c. $Re=50$). Σε όλες της περιπτώσεις η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής είναι 1,2 Hz και η απόσταση μέτρησης από την αρχή του καναλιού είναι η ίδια. Στην δεύτερη και τρίτη περίπτωση τα μοναχικά κύματα που έχουν δημιουργηθεί σε αυτή την απόσταση από την αρχή του καναλιού είναι πολύ κοντά στο μόνιμο σταθερό προφίλ της πλήρως αναπτυγμένης μορφής. Αντίθετα, στην πρώτη περίπτωση το κύμα βρίσκεται στα πρώτα στάδια της ανάπτυξής του.

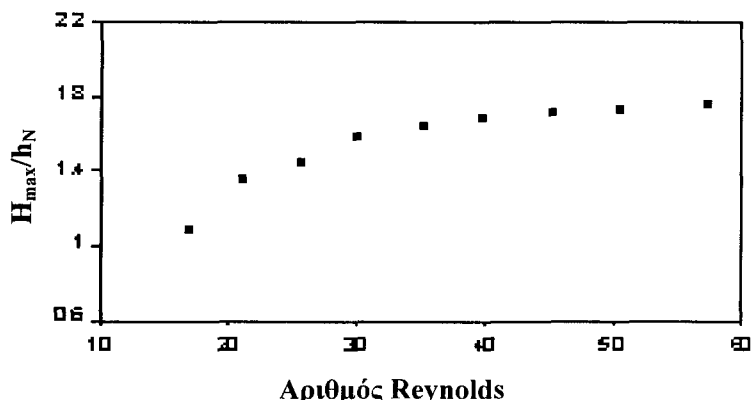
Αν και τα κύματα που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 4.3 είναι μοναχικά, δεν φαίνεται να παρουσιάζουν ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τους, τους μικρούς κυματισμούς που προηγούνται της κύριας κορυφής. Αυτό όμως είναι ένα ήδη γνωστό μειονέκτημα της πειραματικής τεχνικής που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί το ύψος του υμένα. Οι αισθητήρες χωρητικότητας έχουν περιορισμένο πλάτος και χάνουν την ευαισθησία τους αν το κενό αέρα που παρεμβάλλεται αυξάνει. Έτσι οι διακυμάνσεις του πάχους του υμένα που παρουσιάζουν μεγάλη συχνότητα δεν μετρούνται με ακρίβεια (αποσβένονται) και το προφίλ των κυματισμών προκύπτει πιο ομαλό. Επισημαίνεται όμως ότι η ηλεκτροχημική μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε για να μετρηθεί ο ρυθμός διάτμησης στο τοίχωμα, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις έντονες αλλαγές της συχνότητας και έτσι υπάρχει ένας έμμεσος προσδιορισμός των ιδιοτήτων των μικρών παρασιτικών κυματισμών.

Το πειραματικά μετρούμενο μήκος κύματος των μικρών κυματισμών μπροστά από την κύρια κορυφή του μοναχικού κύματος (όπως προσδιορίζεται από τις μετρήσεις διατμητικής τάσης στο τοίχωμα) δίνεται συναρτήσει του αριθμού Re στο σχήμα 4.4. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με αντίστοιχες υπολογιστικές προβλέψεις (Σερίφη, 2006). Υπάρχει ποσοτική απόκλιση, ειδικά σε χαμηλούς αριθμούς Re, αλλά η γενική τάση είναι η ίδια. Πειράματα και προσομοιώσεις δείχνουν ότι με την αύξηση του αριθμού Re οι κυματισμοί μικραίνουν σε ύψος και γίνονται πιο απότομοι. Αυτή η συμπεριφορά γίνεται κατανοητή αν ληφθεί υπόψη η αρνητική τριχοειδής πίεση που ασκούν τα μικρά κύματα μπροστά από την κύρια κορυφή του μοναχικού κύματος με σκοπό να σταματήσουν την ανάπτυξή της. Είναι αναμενόμενο ότι σε ακόμα μεγαλύτερους αριθμούς Re θα οδηγηθούμε σταδιακά στην ανάπτυξη υδραυλικού άλματος, όπου θα συγχωνευθούν οι μικροί κυματισμοί.

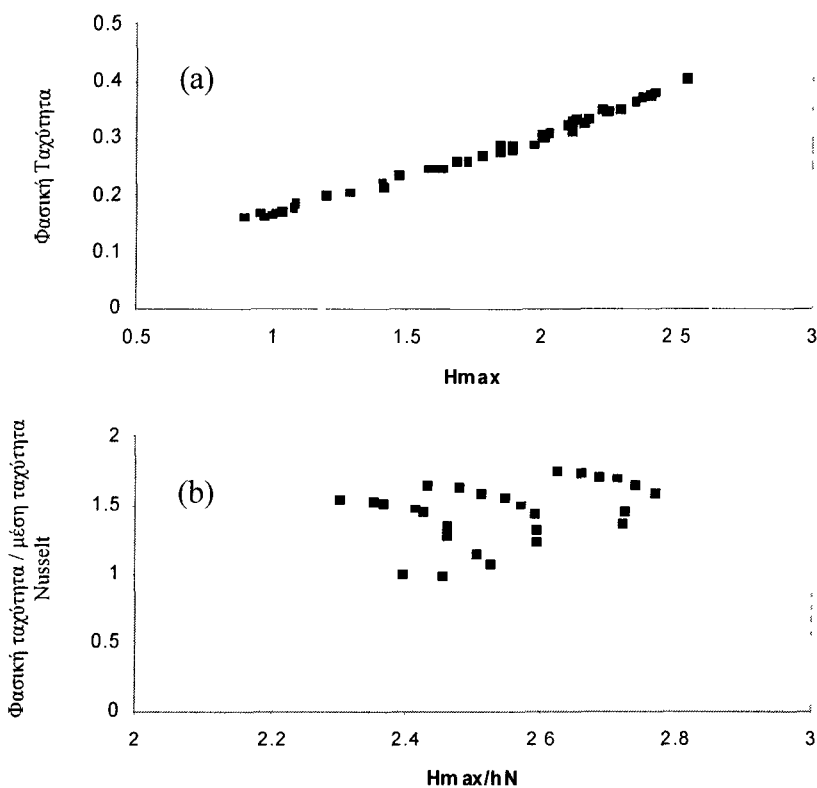


Σχήμα 4.4: Η εξάρτηση του μήκους κύματος των μικρών κυματισμών μπροστά από την κύρια κορυφή του μοναχικού κύματος από τον αριθμό Re. Σύγκριση πειραματικών (▲) με υπολογιστικά αποτελέσματα (—).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των μοναχικών κυμάτων είναι η εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το ύψος (μέγιστο πάχος υμένα). Και οι δύο παράμετροι εξαρτώνται από τον αριθμό Re , αλλά με διαφορετικό τρόπο. Το σχήμα 4.5 παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα για την εξάρτηση του μέγιστου πάχους του υμένα (αδιαστατοποιημένου με το κατά Nusselt πάχος υμένα) από τον αριθμό Re σε μια συγκεκριμένη θέση κατά μήκος της ροής. Στο διάγραμμα φαίνεται ασυμπτωτική συμπεριφορά του ύψους του κύματος. Σε χαμηλούς Re , το ύψος των κυμάτων μεγαλώνει ταχύτερα από ότι το μέσο πάχος υμένα, ενώ σε υψηλούς Re τα δύο μεγέθη αυξάνονται με τον ίδιο ρυθμό.



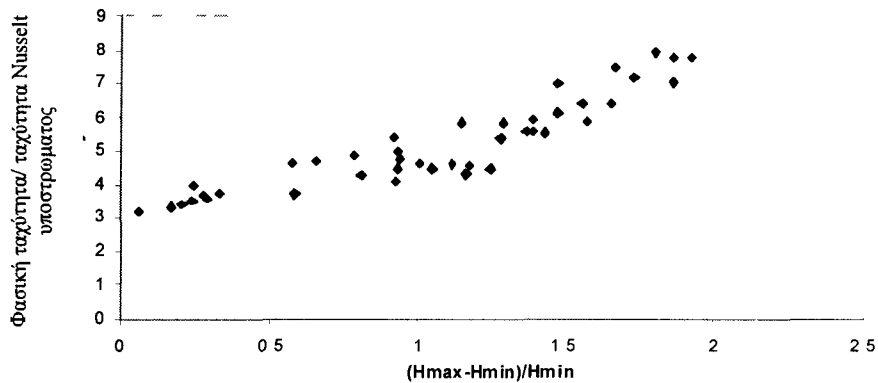
Σχήμα 4.5: Η εξάρτηση του αδιαστατοποιημένου μέγιστου ύψους των μοναχικών κυμάτων από τον αριθμό Reynolds.



Σχήμα 4.6: Η σχέση μεταξύ της φασικής ταχύτητας και του πάχους του υμένα. (α) με διαστατικά μεγέθη (β) αδιαστατοποιημένα με τη μέση ταχύτητα και το μέσο πάχος υμένα.

Στο σχήμα 4.6α παρουσιάζεται η εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το μέγιστο πάχος υμένα σε διαστατικά μεγέθη και είναι εμφανής η ισχυρή συσχέτιση των δύο αυτών παραμέτρων

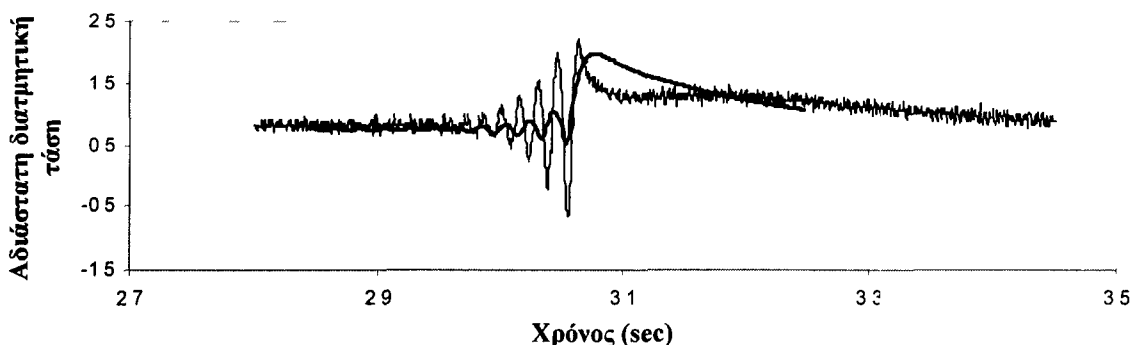
σε όλο το εύρος των αριθμών Re και σε όλες τις συχνότητες διαταραχής για τις οποίες έχουν διεξαχθεί πειράματα. Αντίστοιχα στο σχήμα 4.6b έχουμε το ίδιο διάγραμμα αλλά για μεγέθη αδιαστατοποιημένα με το πάχος υμένα και την μέση ταχύτητα κατά Nusselt. Είναι εμφανές ότι η αδιαστατοποίηση δεν είναι επιτυχής, καθώς το διάγραμμα εμφανίζει μεγάλη διασπορά. Καλύτερη συσχέτιση μεταξύ αδιάστατης ταχύτητας και αδιάστατου ύψους επιτυγχάνεται όταν τα μεγέθη με τα οποία αδιαστατοποιούμε είναι το πάχος του υποστρώματος ως χαρακτηριστικό μήκος και η μέση ταχύτητα κατά Nusselt που αντιστοιχεί στο υπόστρωμα ως χαρακτηριστική ταχύτητα (σχήμα 4.7). Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει τη σημασία του υποστρώματος ως της πραγματικής βασικής ροής πάνω στην οποία κινούνται τα μοναχικά κύματα.



Σχήμα 4.7: Η σχέση μεταξύ της φασικής ταχύτητας και του πάχους του υμένα με χαρακτηριστικό πάχος το πάχος του υποστρώματος και χαρακτηριστική ταχύτητα την ταχύτητα του υποστρώματος.

4.1.2 Η διατμητική τάση του τοιχώματος κάτω από τα μοναχικά κύματα.

Η διατμητική τάση στο τοίχωμα επηρεάζεται έντονα από το πέρασμα ενός μοναχικού κύματος. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων για τον ρυθμό διάτμησης στο τοίχωμα με τη μορφή χρονοσειράς. Ο αριθμός Re στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 35 ενώ η συχνότητα διαταραχής πάλι 1,2 Hz. Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται και το πλήρως διαμορφωμένο μοναχικό κύμα που προκαλεί τη μεταβολή στο ρυθμό διάτμησης. Τα δεδομένα έχουν αδιαστατοποιηθεί με την μέση τιμή του ρυθμού διάτμησης κατά μήκος του τοιχώματος.



Σχήμα 4.8: Η διατμητική τάση στο τοίχωμα όταν περνάει ένα μοναχικό κύμα

Χαρακτηριστικό του σχήματος 4.8 είναι η εμφάνιση ενός ισχυρού μεγίστου. Το μέγιστο αυτό δεν εντοπίζεται κάτω από την κύρια κορυφή του κύματος, αλλά εμφανίζεται αμέσως πριν

από αυτήν. Η ακριβής θέση και το ύψος του μέγιστου συμφωνούν ποσοτικά με προβλέψεις προσομοιώσεων σε αντίστοιχες συνθήκες.

Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι η αλλαγή στο πρόσημο του ρυθμού διάτμησης σε μια μικρή περιοχή γύρω από το πρώτο βύθισμα μπροστά από την κύρια κορυφή του μοναχικού κύματος. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί ένδειξη τοπικής αντιστροφής της ροής. Έρχεται δε να επιβεβαιώσει προηγούμενες υπολογιστικές παρατηρήσεις (Malamataris, Vlachogiannis & Bontozoglou 2002), και είναι σε συμφωνία με πρόσφατες άμεσες παρατηρήσεις με χρήση σωματιδίων ιχνηθετών (Tihon 2003). Ποσοτική διαφορά μεταξύ μετρήσεων και υπολογισμών είναι αναμενόμενη στο σημείο αυτό λόγω της πολύ μικρής χρονικής διάρκειας του φαινομένου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ηλεκτροχημική μέθοδος χρησιμοποιείται εδώ στο όριο της αξιοπιστίας της.

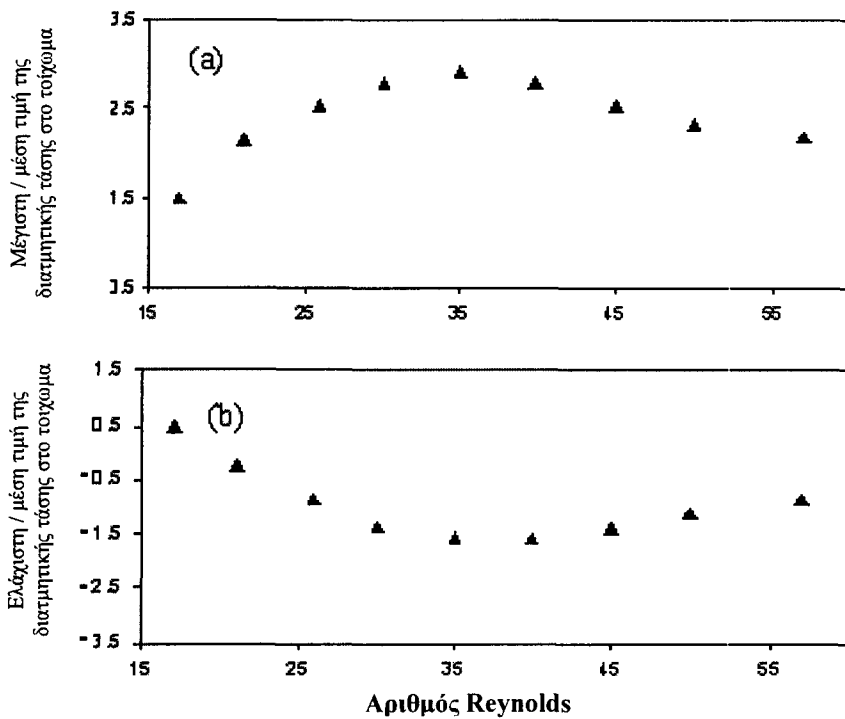
Επιπλέον χαρακτηριστικά της διατμητικής τάσης που εμφανίζονται στο σχήμα 4.8 είναι: 1) Η έντονη διακύμανση της διατμητικής τάσης που ακολουθεί το πέρασμα των παρασιτικών κυματισμών και η οποία είναι εμφανώς δυσανάλογη με το μέγεθος τους. Είναι ενδεικτικό ότι το τοπικό μέγιστο που αντιστοιχεί στο πρώτο παρασιτικό κύμα είναι στο ίδιο περίπου μέγεθος με το απόλυτο μέγιστο που αντιστοιχεί στην κορυφή του κύματος. 2) Η απότομη πτώση του ρυθμού διάτμησης πίσω από την κύρια κορυφή και η διατήρηση στη συνέχεια μίας σταθερής τιμής (πλατά) σε όλο το μήκος της ουράς του κύματος.

Στα διαγράμματα του σχήματος 4.9 παρουσιάζονται, ως συνάρτηση του αριθμού Re , οι διακυμάνσεις της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του ρυθμού διάτμησης, αδιαστατοποιημένες με τις μέσες. Σύμφωνα με το διάγραμμα 4.9a η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης αυξάνει γρηγορότερα από την μέση τιμή μέχρι τον αριθμό $Re = 35$. Για υψηλότερους αριθμούς Re ο ρυθμός ανάπτυξης της κορυφής του κύματος σταματάει (σχήμα 4.5) ενώ η μέση τιμή της διατμητικής τάσης συνεχίζει να αυξάνει λόγω αύξησης του μέσου πάχους υμένα. Έτσι, δικαιολογείται ότι η αδιαστατοποιημένη τιμή του μέγιστου μειώνεται. Αντίστοιχα στο διάγραμμα 4.9b παρουσιάζεται η εξάρτηση του ελάχιστου της διατμητικής τάσης -που εμφανίζεται στο απότομο βούλιαγμα μπροστά από την κορυφή του κύματος- από τον αριθμό Reynolds. Φαίνεται ότι για αριθμό $Re = 35$ και γύρω από αυτόν λαμβάνει χώρα η πλέον έντονη αναστροφή με το πέρασμα της κύριας κορυφής του μοναχικού κύματος.

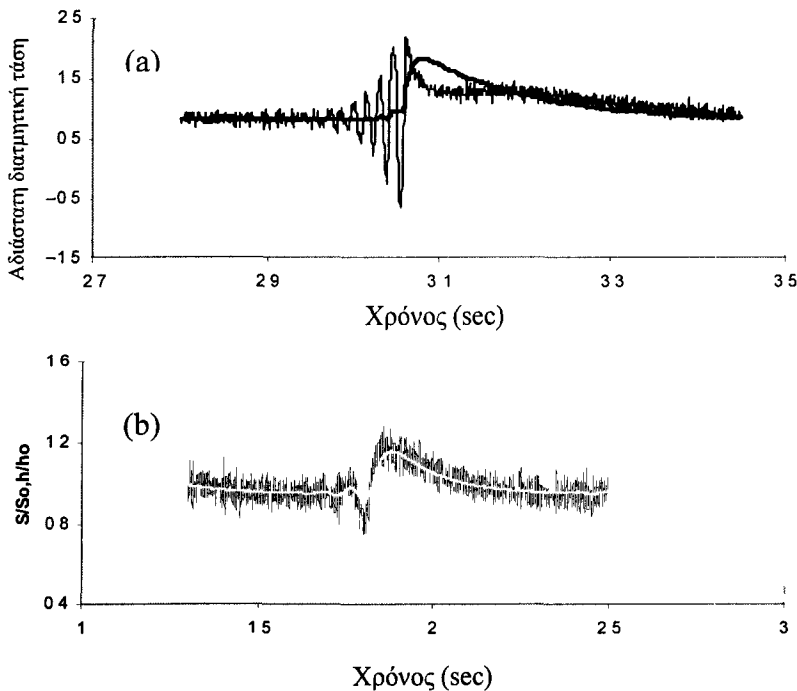
Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν στην εξής γενικότερη διαπίστωση για τη σημασία των μοναχικών κυμάτων στη δυναμική της ροής κοντά στο τοίχωμα: σε χαμηλούς Re , τα μοναχικά κύματα είναι ακόμη μικρά (αναπτυσσόμενα) και η επίδρασή τους αντίστοιχα ασθενική. Αυξάνοντας τον αριθμό Re , τα μοναχικά κύματα αναπτύσσονται γρηγορότερα και συνεπώς με το πέρασμά τους διαφοροποιούν ισχυρά τη ροή κοντά στο τοίχωμα. Αποτέλεσμα αυτής της ενίσχυσης είναι τα ακρότατα των σχημάτων 4.9a,b. Περαιτέρω αύξηση του αριθμού Re οδηγεί σε συνεχώς αυξανόμενο μέσο πάχος υμένα, ενώ ο ρυθμός αύξησης του ύψους των κυμάτων μειώνεται ασυμπτωτικά. Ως αποτέλεσμα, η επίδραση των μοναχικών κυμάτων γίνεται σε μεγάλους Re σταδιακά ασθενέστερη. Στις συνθήκες των παρόντων πειραμάτων, φαίνεται ότι η κρίσιμη περιοχή μέγιστης επίδρασης είναι $Re=30-40$.

Ένα σημαντικό εργαλείο για τη θεωρητική μελέτη των μοναχικών κυμάτων για αριθμούς $Re=O(10^1-10^2)$ είναι η υπόθεση της παραβολικής κατανομής (Lee & Mei 1996). Με βάση την υπόθεση αυτή, η κατανομή ταχυτήτων σε κάθε σημείο κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια ταυτίζεται με την κατανομή Nusselt επίπεδου υμένα, πάχους ίσου με το τοπικό του σημείου που εξετάζεται. Ένας απαιτητικός έλεγχος της υπόθεσης παραβολικής κατανομής προκύπτει από τη

σύγκριση της διατμητικής τάσης του τοιχώματος που μετράται με την τιμή που εύκολα προβλέπεται με βάση την υπόθεση.



Σχήμα 4.9: (a) Το μέγιστο και (b) το ελάχιστο της διατμητικής τάσης συναρτήσει του αριθμού Re .



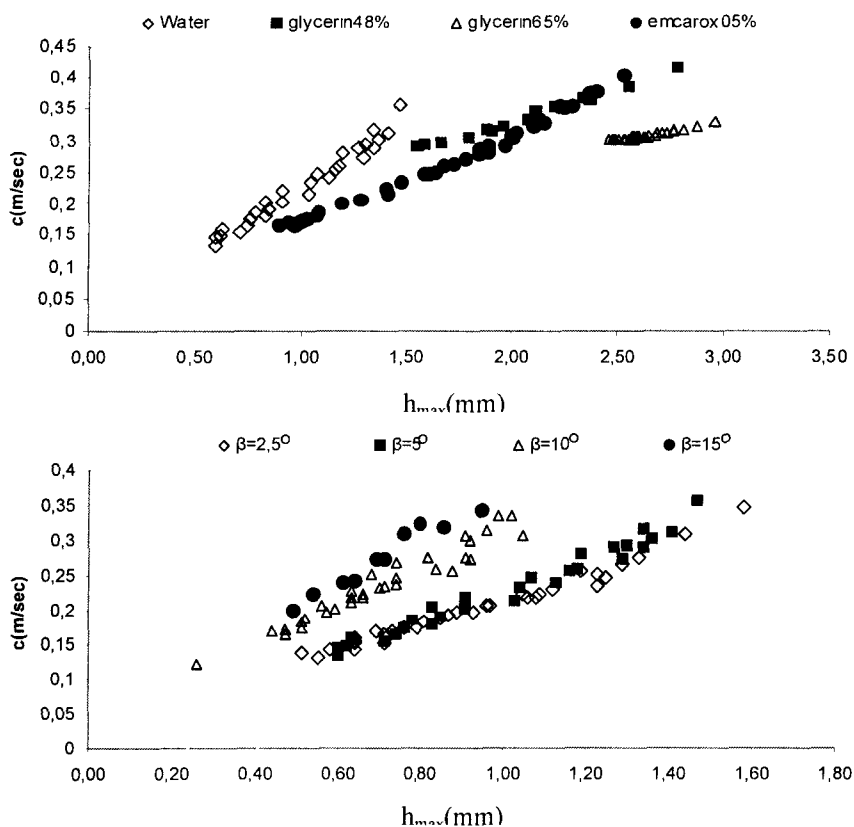
Σχήμα 4.10: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων της κατανομής της διατμητικής τάσης με τα θεωρητικά προβλεπόμενα με την υπόθεση της παραβολικής κατανομής της ταχύτητας κάτω από το κύμα για την περίπτωση (a) ενός σχεδόν πλήρως ανεπτυγμένου κύματος (b) ενός κύματος στα πρώτα στάδια ανάπτυξης.

Η κατανομή της διατμητικής τάσης όπως δίνεται από τις μετρήσεις συγκρίνεται για τον ίδιο Re ($Re = 35$) με τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τη διατμητική τάση αν η κατανομή ταχύτητας θεωρηθεί παραβολική (σχήμα 4.10a). Σημαντικές διαφορές παρατηρούνται όχι μόνο στο απότομο βύθισμα μπροστά από την κύρια κορυφή του κύματος (όπου εμφανίζονται αρνητικές τιμές) αλλά σχεδόν σε όλο το μήκος του κύματος. Ειδικότερα, οι μικροί κυματισμοί μπροστά από την κύρια κορυφή και η περιοχή της ουράς, όπου έχουμε την ομαλή μείωση του πάχους του υμένα, είναι οι δύο περιοχές όπου απέχουν περισσότερο ποσοτικά οι δύο λύσεις.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, στο διάγραμμα 4.10b παρουσιάζονται αποτελέσματα της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα όταν έχουμε το πέρασμα ενός μικρού κύματος στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης του. Είναι ενδιαφέρον ότι σε αυτή την περίπτωση η υπόθεση της παραβολικής κατανομής φαίνεται να είναι ακριβής. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η υπόθεση της παραβολικής κατανομής ισχύει για μικρά κύματα αλλά είναι ανακριβής για την περίπτωση των μεγαλύτερων κυμάτων τα οποία είναι κοντά στη μόνιμη πλήρως ανεπτυγμένη μορφή τους.

4.1.3 Εξάρτηση των χαρακτηριστικών των μοναχικών κυμάτων από το ιξώδες και την γωνία κλίσης του καναλιού

Τα πειράματα έγιναν για υγρά διαφορετικού ιξώδους (αντιστοιχίες ιξώδους-συγκέντρωσης γλυκερίνης όπως αναφέρθηκαν στον πίνακα του κεφαλαίου 3) για γωνίες κλίσης από $2,5^\circ$ έως 15° . Βρέθηκε ότι η σχέση που συνδέει την ταχύτητα c με το μέγιστο πάχος του υμένα h_{max} είναι γραμμική.



Σχήμα 4.11: (a) $c = f(H_{max})$ για ρευστά με διαφορετικό ιξώδες (b) $c = f(h_{max})$ για ροή νερού σε διαφορετικές γωνίες κλίσης.

Οι σταθερές της γραμμικής εξίσωσης της σχέσης που συνδέει την ταχύτητα c με το μέγιστο πάχος του υμένα h_{\max} , εξαρτώνται από τη γωνία κλίσης και το ιξώδες του υγρού. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τη σχέση που προτάθηκε μεταξύ της ταχύτητας και του μέγιστου πάχους του υμένα από τους Nakoryakov, Pokusaev και Alekseenko (1976). Στην δική τους περίπτωση τα πειράματα έγιναν σε κάθετη πλάκα. Ένα παράδειγμα της εξάρτησης της ταχύτητας των κυμάτων από το μέγιστο πάχος υμένα φαίνεται στα διαγράμματα του σχήματος 4.11. Στο σχήμα 4.11a παρουσιάζονται δεδομένα από πείραμα σε κλίση 5° για 4 διαφορετικά διαλύματα. Η γραμμική εξάρτηση μεταξύ των 2 αυτών παραμέτρων είναι φανερή. Η κλίση της γραμμής μειώνεται όσο το ιξώδες αυξάνει. Στο σχήμα 4.11b παρουσιάζονται δεδομένα για πείραμα με νερό σε 4 διαφορετικές κλίσεις της πλάκας. Μπορούμε να δούμε ότι η κλίση της ευθείας μεγαλώνει καθώς η γωνία της πλάκας μεγαλώνει.

4.2 Μη γραμμική εξέλιξη της ροής

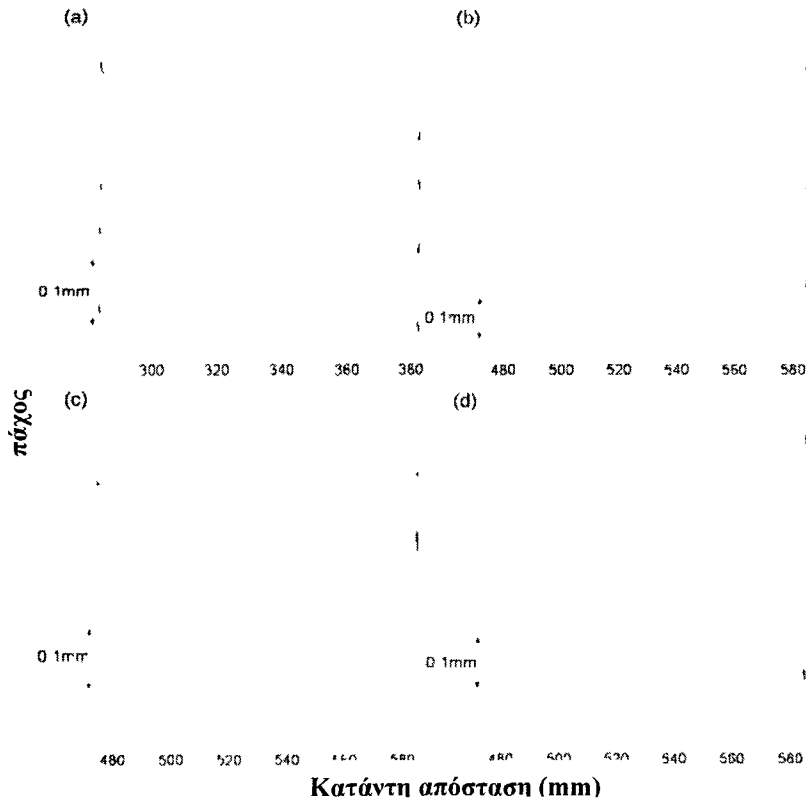
4.2.1 Ροή με ένα κύμα ανά περίοδο

Στην περίπτωση αυτή έγιναν πειράματα με διάλυμα νερού – γλυκερίνης σε δύο διαφορετικά ιξώδη (21% κ.β. γλυκερίνη και 54% κ.β. γλυκερίνη). Η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής μεταβλήθηκε από 0,25 Hz έως 6,0 Hz. Τα πειράματα με διάλυμα μεγαλύτερου ιξώδους (54% κ.β. γλυκερίνη) είχαν σκοπό τη διερεύνηση της ροής με ένα κύμα ανά περίοδο και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτό του Gollub σε παρόμοιες συνθήκες (γλυκερίνη 52% κ.β. γωνία κλίσης 6.4° , αριθμός Re 19,5). Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα της εξωτερικής διαταραχής ήταν 1,5 Hz, 3 Hz και 4,5 Hz. Η σύγκριση που επιτεύχθηκε ήταν μόνον ποιοτική, γιατί λόγω του μεγάλου ιξώδους και του μικρού μήκους του καναλιού μας, δεν κατέστη δυνατόν να παρατηρηθούν επαρκώς ανεπτυγμένα κύματα.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι σε κάθε περίπτωση η βασική συχνότητα ταλάντωσης των σημείων ίδια με την συχνότητα της διαταραχής που επιβάλλουμε στην αρχή του καναλιού. Παρόλα αυτά, τα κύματα που αναπτύσσονται σε κάθε περίπτωση έχουν διαφορετική μορφή. Στην περίπτωση της διαταραχής στα 1,5 Hz τα κύματα που εμφανίζονται έχουν ρυτιδώσεις μπροστά, γεγονός το οποίο είναι ενδεικτικό μοναχικών κυμάτων. Αυτό δεν ισχύει και για τις υψηλότερες συχνότητες. Στην περίπτωση των 3 Hz τα κύματα είναι σχεδόν περιοδικά με μια κορυφή ανά περίοδο. Αντίθετα, στα 4,5 Hz σημαντικό ρόλο παίζουν και συχνότητες ανάμεσα στο 2-2,5 Hz. Έτσι, δημιουργούνται κύματα με περισσότερες κορυφές και τα οποία μπορεί να μην είναι περιοδικά στο χώρο, όμως στο χρόνο είναι. Η εμφάνιση των παραπάνω συχνοτήτων είναι το αποτέλεσμα της λεγόμενης υποαρμονικής αστάθειας, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη συνένωση δύο κοντινών κυμάτων.

Το μέσο πάχος υμένα μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής στην είσοδο. Ομοίως, και το ύψος των κυμάτων είναι συγκριτικά μικρότερο με την αύξηση της συχνότητας. Για διαταραχή 1,5 Hz η στατιστική ανάλυση και η χρήση της λοξότητας μας έδειξε ότι τα κύματα τείνουν να γίνουν πιο ασύμμετρα κατάντη της ροής, δηλαδή τείνουν να αποκτήσουν τη μορφή των μοναχικών κυμάτων. Εμφανίζεται επίσης το φαινόμενο της αστάθειας της ουράς, η οποία όμως αποσβένεται πίσω από το κύμα χωρίς να δημιουργεί περαιτέρω ατέλειες στον υμένα. Ομοίως και στα 3 Hz.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η μη-γραμμική εξέλιξη των κυμάτων δεν είναι ίδια σε όλα τα πειράματα αλλά εξαρτάται από την συχνότητα της επιβαλλόμενης εξωτερικής διαταραχής. Άλλωστε, οι Alekseenko et al (1085) και Liu & Gollub (1994) ανέφεραν την ύπαρξη κάποιας συχνότητας διαταραχής η οποία χωρίζει δυο διαφορετικούς τρόπους εξέλιξης της ροής. Πιο λεπτομερής μελέτη για τον καθορισμό των δύο αυτών τρόπων εξέλιξης της ροής αλλά και της κρίσιμης συχνότητας που τους χωρίζει έγινε στα πειράματα με διάλυμα νερού – γλυκερίνης 21% κ.β. Αποδείχθηκε η ύπαρξη συχνότητας πάνω από οποία η διαταραχή εξελίσσεται σε κορεσμένα περιοδικά κύματα με μια κορυφή ανά περίοδο (σχήμα 4.12a). Κάτω από αυτή τη συχνότητα τα κύματα που αναπτύσσονται έχουν περισσότερες από μια κορυφές ανά περίοδο (σχήμα 4.12 b,c,d), όπως π.χ. τα μοναχικά κύματα. Το σημείο αυτό ονομάστηκε f_s (σχήμα 2.6) από τους Liu & Gollub και εξαρτάται από τον αριθμό Re και την γωνία κλίσης του καναλιού. Για τιμές της συχνότητας κοντά στην f_s αλλά μικρότερες παρατηρούνται μη μόνιμα κύματα με πολλές κορυφές. Αυτό το μη στατικό φαινόμενο έχει μελετηθεί υπολογιστικά από τους Ramaswamy et al. (1996). Μειώνοντας την συχνότητα ακόμα περισσότερο, τα παραπάνω κύματα πλησιάζουν σταδιακά τη μορφή των μοναχικών κυμάτων, με μια κορυφή ανά περίοδο της οποίας προηγείται μια σειρά τριχοειδών ρυτιδώσεων.



Σχήμα 4.12: Μετάβαση από τα περιοδικά κύματα σε σχεδόν μοναχικά κύματα ανάλογα με την συχνότητα διαταραχής. (a) περιοδικά κύματα σε $Re=19$, $\varphi=7,6^\circ$, $f=5,5$ Hz, (b) μη μόνιμα κύματα σε $Re=19$, $\varphi=7,6^\circ$, $f=4,5$ Hz, (c) σχεδόν μοναχικά κύματα σε $Re=20$, $\varphi=5,5^\circ$, $f=2$ Hz, (d) σχεδόν μοναχικά σε $Re=19$, $\varphi=7,6^\circ$, $f=2,5$ Hz Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec

Οι διαφορετικές μορφές της εξέλιξης της ροής που περιγράφονται παραπάνω εμφανίζονται στο σχήμα 4.12. Στο σχήμα απεικονίζονται διαδοχικά προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε συνεχόμενες χρονικές στιγμές (0,1 sec ανά προφίλ). Έτσι στο σχήμα 4.12a παρουσιάζεται ροή σε $Re=19$, γωνία κλίσης $\varphi=7,6^\circ$, και συχνότητα εξωτερικής διαταραχής

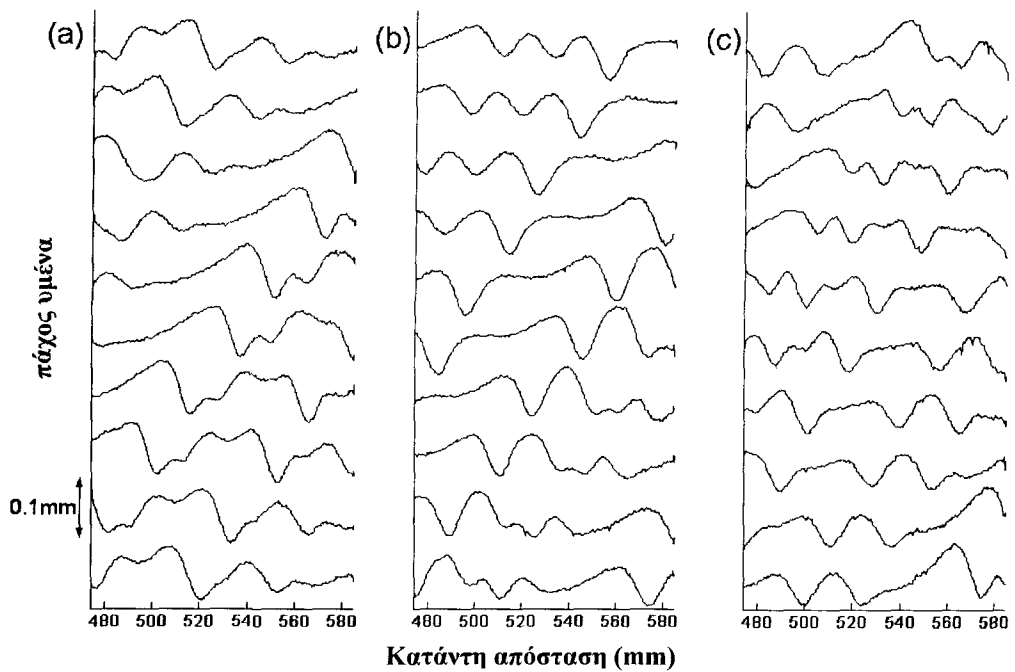
$f=5,5\text{Hz}$. Παρατηρούμε ότι τα κύματα που εμφανίζονται είναι περιοδικά με μια κορυφή ανά περίοδο και συχνότητα ίδια με αυτή της διαταραχής, δηλαδή $5,5\text{Hz}$. Αντιθέτως στα επόμενα σχήματα έχουμε περισσότερες από μια κορυφές ανά περίοδο. Στα 4.12c και 4.12d όπου οι συνθήκες ροής είναι παρόμοιες με αυτές του προηγούμενου σχήματος (εκτός από το ότι η συχνότητα διαταραχής έχει πέσει στα 2 Hz και $2,5\text{ Hz}$ αντίστοιχα) έχουμε κύματα σχεδόν μοναχικά, με μια κύρια κορυφή ανά περίοδο και ρυτιδώσεις μπροστά από αυτή. Τέλος στο σχήμα 4.12b έχουμε μια ενδιάμεση κατάσταση για τις ίδιες συνθήκες αλλά συχνότητα $4,5\text{ Hz}$, όπου τα περιοδικά κύματα που σχήματος 4.12a φαίνονται να σπάνε και να δημιουργούνται περισσότερες κορυφές ανά περίοδο.

4.2.2 Ροή με περισσότερα του ενός κύματα ανά περίοδο

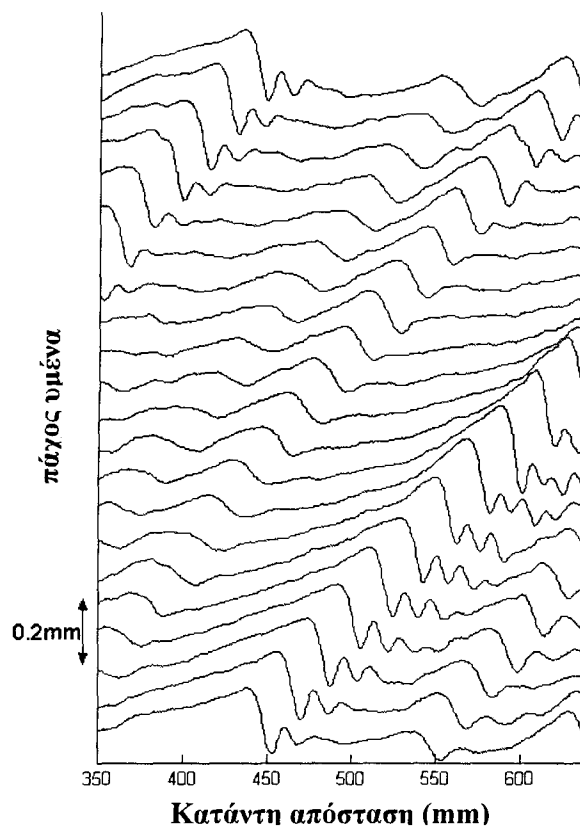
Πειράματα έγιναν για συχνότητες διαταραχής $f \rightarrow 0$. Μειώνοντας την συχνότητα διαταραχής κάτω από το όριο f_s παρατηρούμε ότι δεν οδηγούμαστε π.χ. σε ένα σημείο όπου θα έχουμε μια σειρά από μοναχικά κύματα (ένα ανά περίοδο) τα οποία θα απέχουν πολύ μεταξύ τους, αλλά υπάρχει και ένα άλλο όριο f_p κάτω από το οποίο έχουμε τη δημιουργία μιας σειράς από παρασιτικά κύματα τα οποία ακολουθούν το κύριο κύμα. Ο αριθμός και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των κυμάτων εξαρτώνται από τις παραμέτρους της ροής όπως θα δούμε παρακάτω. Ο τρόπος δημιουργίας των παρασιτικών αυτών κυμάτων εξηγείται στο σχήμα 4.13. Στο σχήμα 4.13a έχουμε ροή σε $Re=20$ και $\varphi=5,5^\circ$, συνθήκες δηλαδή ίδιες με αυτές του σχήματος 4.12c, με τη μόνη διαφορά ότι η συχνότητα έχει τώρα πέσει από 2 Hz σε $1,8\text{ Hz}$. Όπως φαίνεται, η αλλαγή αυτή στην συχνότητα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας διακριτής δευτερεύουσας δομής ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κύριες κορυφές, η μορφή της οποίας θυμίζει τα μη-μόνιμα περιοδικά κύματα στις μεγαλύτερες συχνότητες. Σύγκριση μεταξύ των σχημάτων 4.12c και 4.13a υποδεικνύει ότι οι διαστάσεις του μοναχικού κύματος (ύψος και μήκος) δεν διαφέρουν, και η παρασιτική δομή που δημιουργήθηκε βρίσκεται στο υπόστρωμα μεταξύ των κυμάτων που είναι περισσότερο εκτεταμένο στη χαμηλότερη συχνότητα.

Μειώνοντας τη συχνότητα διαταραχής ακόμα περισσότερο στα $0,8\text{ Hz}$ έχουμε τη ροή που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13b όπου είναι δύσκολο ακόμα και να ξεχωρίσουμε μια κύρια καμπύλη. Πιο συγκεκριμένα, η μορφή των κυμάτων θυμίζει την περιοχή μετάβασης από ροή με μια κορυφή σε ροή με πολλές κορυφές ανά περίοδο. Ανάμεσα από τις δύο αυτές περιπτώσεις (4.13a και 4.13b) είναι αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 4.13c και αφορά ροή με συχνότητα διαταραχής 1Hz . Το σχήμα 4.13c μπορεί να συγκριθεί με το 4.12a που αφορά ροή στον ίδιο Re και στην ίδια γωνία κλίσης αλλά σε συχνότητα πάνω από το όριο f_s .

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε όλες τις παραπάνω ροές οι παρασιτικές δομές παρουσιάζουν χρονική περιοδικότητα και είναι σε συμφωνία με την συχνότητα διαταραχής. Για παράδειγμα, στο σχήμα 4.13a φαίνεται μια δεύτερη κορυφή να περνάει από ένα σημείο και μετά από $0,8-0,9\text{ sec}$ (η περίοδος της διαταραχής είναι $T=0,83\text{ sec}$). Αντιθέτως, δεν υπάρχει χωρική περιοδικότητα αφού οι επιφανειακές δομές δεν παραμένουν ίδιες κατά μήκος του καναλιού. Κάτι τέτοιο μπορούμε να δούμε στο παρασιτικό κύμα του σχήματος 4.13a κατά τη διάρκεια των 5 πρώτων χρονικών στιγμών που φαίνονται.



Σχήμα 4.13: Γένεση δευτερευόντων κυμάτων εξαιτίας της μείωσης της συχνότητας της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής: **(a)** $Re=20$, $\varphi=5,5^\circ$, $f=1,2$ Hz. **(b)** $Re=20$, $\varphi=5,5^\circ$, $f=0,8$ Hz. **(c)** $Re=20$, $\varphi=7,6^\circ$, $f=1$ Hz. Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec.

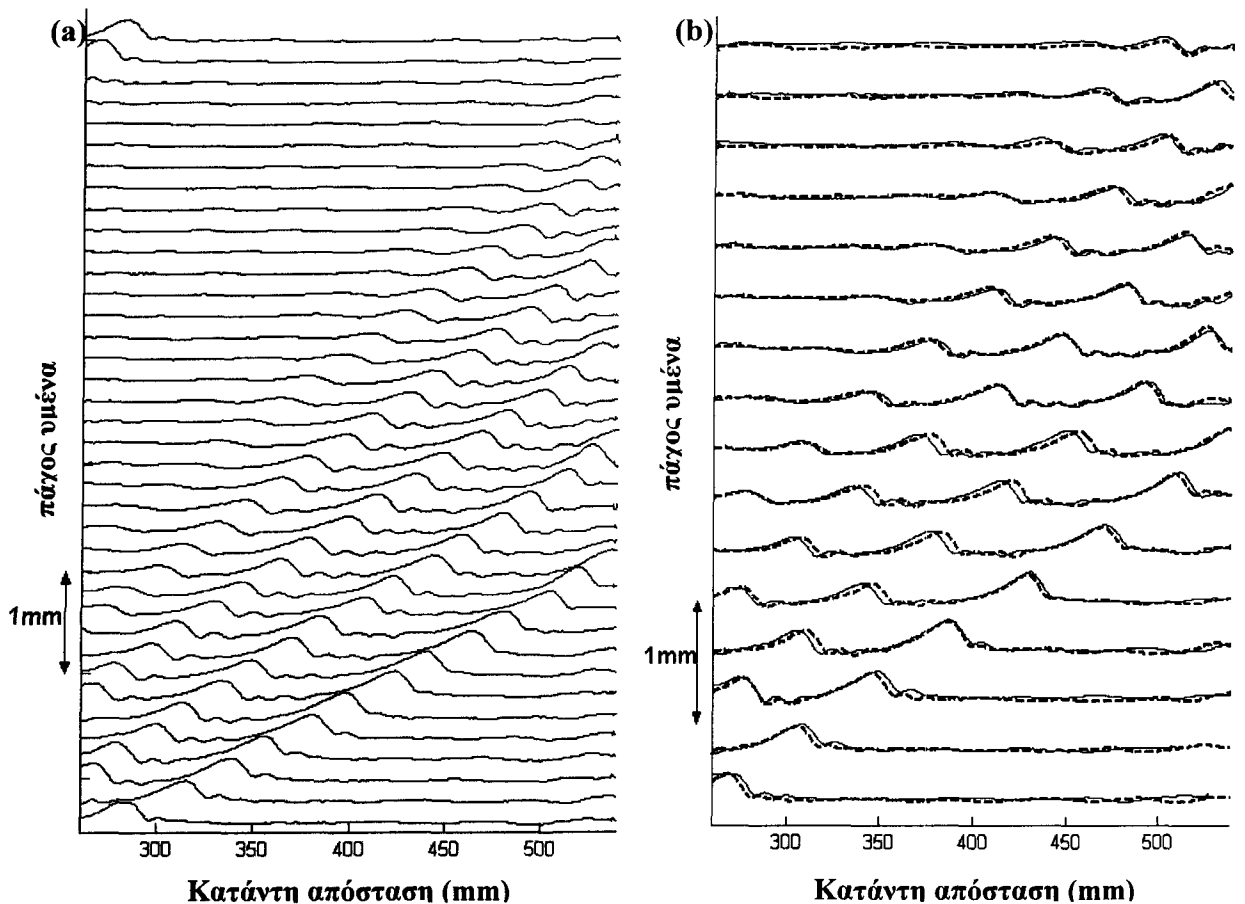


Σχήμα 4.14: Η ανάπτυξη μιας παρασιτικής κορυφής σε μοναχικό κύμα σε ροή με $Re=35$, $\varphi=3,4^\circ$ και $f=0,5$ Hz. Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα ανάπτυξης παρασιτικών κορυφών παρατηρούνται σε πειράματα με ακόμα χαμηλότερη συχνότητα διαταραχής, όπου το κάθε μοναχικό κύμα χωρίζεται

από το επόμενο από ένα μεγάλο μήκος υπόστρωμα. Κάτω από τέτοιες συνθήκες τα παρασιτικά κύματα έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσονται και να τείνουν να γίνουν και αυτά μοναχικά κύματα. Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται ροή σε $Re=35$, γωνία κλίσης $\varphi=3,4^\circ$ και συχνότητα διαταραχής $f=0,5$ Hz. Οι διαδοχικές μορφές της ροής απέχουν χρονικά μεταξύ τους κατά $0,2$ sec.

Στο παραπάνω σχήμα, η πρώτη και η τελευταία γραμμή απεικονίζουν δύο διαδοχικά κύρια κύματα τα οποία δημιουργούνται εξαιτίας της διαταραχής. Τα κύματα τα οποία εμφανίζονται στις ενδιάμεσες γραμμές αναπτύσσονται από τη ροή. Παρατήρηση του φαινομένου μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πίσω από την ουρά κάθε κύριας κορυφής, η οποία αναπτύσσεται παίρνοντας τη μορφή μοναχικού κύματος, δημιουργείται ένα νέο κύμα το οποίο με τη σειρά του αναπτύσσεται σε ύψος και σχηματίζει μικρούς κυματισμούς μπροστά. Παρόλα αυτά, καθώς συνεχίζει να είναι μικρότερη από το κύριο μοναχικό κύμα, η παρασιτική αυτή κορυφή έχει μικρότερη ταχύτητα και απομακρύνεται από αυτό. Στην ουρά του δεύτερου κύματος γεννιέται μια νέα κορυφή και επαναλαμβάνεται το ίδιο φαινόμενο. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, έχουμε μια σειρά από διαδοχικές αναπτυσσόμενες κορυφές όπου η κάθε μία είναι περισσότερο αναπτυγμένη από την προηγούμενη.



Σχήμα 4.15: Διαδοχική γένεση παρασιτικών κορυφών για ροή με $Re=33$, $\varphi=3,4^\circ$ και $f=0,25$ Hz
(a) Τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας ανά $0,1$ sec και **(b)** Τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας ανά $0,2$ sec για δύο διαδοχικούς κύκλους επιβολής της διαταραχής.

Πειράματα σε ένα εύρος ακόμα μικρότερων συχνοτήτων δείχνουν ότι ο αριθμός των δευτερευόντων αυτών κυμάτων αλλά και το μέγεθός τους εξαρτάται από τη συχνότητα

διαταραχής. Έτσι, όσο μεγαλώνει η συχνότητα διαταραχής (παραμένοντας κάτω από το όριο που περνάμε σε ένα κύμα ανά περίοδο) μειώνεται ο αριθμός των δευτερευόντων κυμάτων. Αυτό οφείλεται στο ότι το μήκος του υποστρώματος μεταξύ των δύο κύριων κορυφών μειώνεται όσο μεγαλώνει η συχνότητα και δεν προλαβαίνουν να αναπτυχθούν τόσα κύματα όσα αναπτύσσονται στις μικρότερες συχνότητες. Το μέγεθος της διαταραχής, δεν επηρεάζει τον αριθμό των παρασιτικών κυμάτων, αλλά επηρεάζει μόνο το μέγεθός τους, και αυτό σε μικρό βαθμό. Στο σχήμα 4.15a και πάλι τα κύματα τα οποία προκαλούνται από την εξωτερική διαταραχή είναι αυτά της πρώτης και της τελευταίας γραμμής. Καθώς το πρώτο κύμα αναπτύσσεται προς την τελική του μορφή, έχει ήδη δημιουργηθεί πίσω του ένα νέο. Αυτό με τη σειρά του αναπτύσσεται και στο υπόστρωμά του δημιουργείται ένα τρίτο. Έτσι, στο σχήμα εμφανίζονται τρεις ανεπτυγμένες παρασιτικές κορυφές και η ανάπτυξη της τέταρτης και ακόμα και μίας πέμπτης.

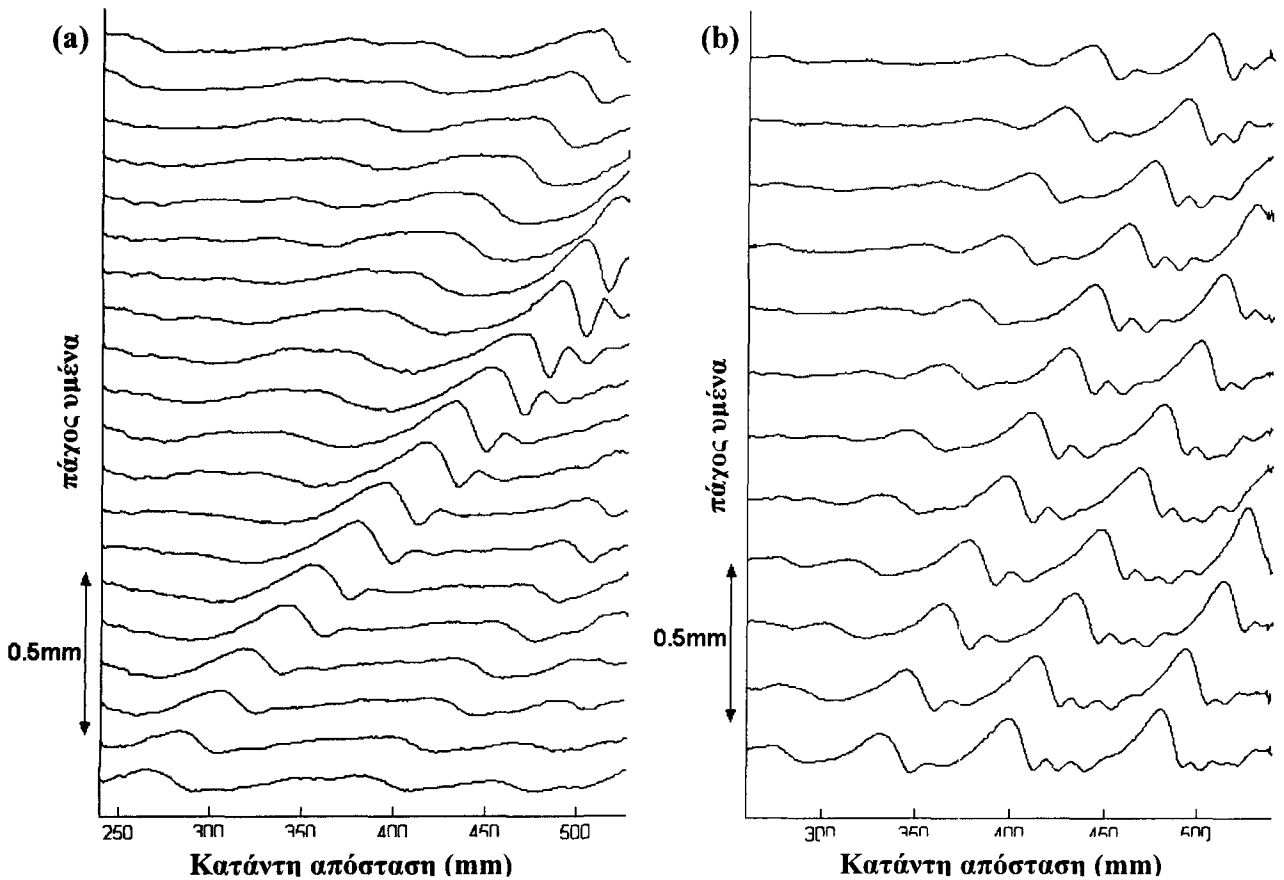
Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η διαδοχή των γεγονότων που βλέπουμε στο σχήμα 4.15a δεν είναι τυχαία. Αντιθέτως, η δημιουργία των παρασιτικών κορυφών ακολουθεί μια διαδικασία η οποία παραμένει ίδια σε κάθε περίοδο επιβολής της εξωτερικής διαταραχής. Στο σχήμα 4.15b φαίνεται αυτή ακριβώς η επαναληψιμότητα των γεγονότων. Οι συνεχείς και οι διακοπτόμενες γραμμές είναι δύο διαδοχικοί κύκλοι επιβολής της διαταραχής. Βλέπουμε ότι παρά το μεγάλο σχετικά υπόστρωμα μεταξύ των δύο κυμάτων, οι νέες κορυφές εμφανίζονται ακριβώς στο ίδιο σημείο. Η παρατήρηση αυτή διαψεύδει την υπόθεση ότι οι παρασιτικές κορυφές δημιουργούνται λόγω πρωταρχικής αστάθειας στο υπόστρωμα, διότι στην περίπτωση αυτή θα είχαμε τις νέες κορυφές τυχαία τοποθετημένες πίσω από την κύρια.

4.2.3 Παρατηρήσεις στην γένεση και την εξέλιξη των παρασιτικών κυμάτων

Έχει ήδη αναφερθεί ότι με την εμφάνιση των παρασιτικών κορυφών αναβάλλεται η αποκατάσταση μόνιμων συνθηκών. Δύο είναι τα κύρια χαρακτηριστικά της εξέλιξης του φαινομένου με το οποίο ασχολούμαστε: η διαδικασία της γένεσης των δευτερευόντων κυμάτων και η αλληλεπίδρασή τους με το κύριο κύμα που ακολουθεί. Το φαινόμενο της δημιουργίας των παρασιτικών κορυφών εμφανίζεται σε κάθε συχνότητα κάτω από το όριο f_p . Παρόλα αυτά, είναι πιο εμφανές σε συχνότητες αρκετά μικρότερες από αυτό το όριο, διότι σε συχνότητες κοντά στο f_p έχουμε φαινόμενα αλληλεπίδρασης που επηρεάζουν τη δυναμική της ροής.

Με σκοπό να παρατηρήσουμε τα αρχικά στάδια της δημιουργίας των δευτερευόντων κυμάτων, έγιναν πειράματα με διαταραχή πολύ μικρής συχνότητας και έντασης. Αποτελέσματα από τέτοιου είδους πειράματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.16a για ροή σε $Re=31$, γωνία κλίσης $\phi=3,4^\circ$ και $f=0,50$ Hz. Σε ένα συγκεκριμένο σημείο ανάπτυξης της κύριας κορυφής, ένα βαθούλωμα εμφανίζεται πίσω από την ουρά της. Μετά το βαθούλωμα, το πάχος του υμένα εμφανίζει μια μικρή καμπούρα και μετά αποκτά την τιμή του αδιατάραχτου υμένα. Είναι εμφανές ότι το κύριο κύμα δεν έχει πάρει ακόμα την τελική μόνιμη μορφή του μοναχικού κύματος, γεγονός το οποίο φαίνεται από την έλλειψη των ρυτιδώσεων στο μπροστά μέρος του κύματος. Τα διαδοχικά προφίλ του σχήματος 4.16a δείχνουν ότι το βαθούλωμα επιμηκύνεται και γίνεται πιο επίπεδο όσο προχωράει κατάντη της ροής, ενώ συγχρόνως το τελείωμά του ανυψώνεται και γίνεται πιο απότομο. Από το απότομο αυτό τελείωμα θα δημιουργηθεί η νέα κορυφή.

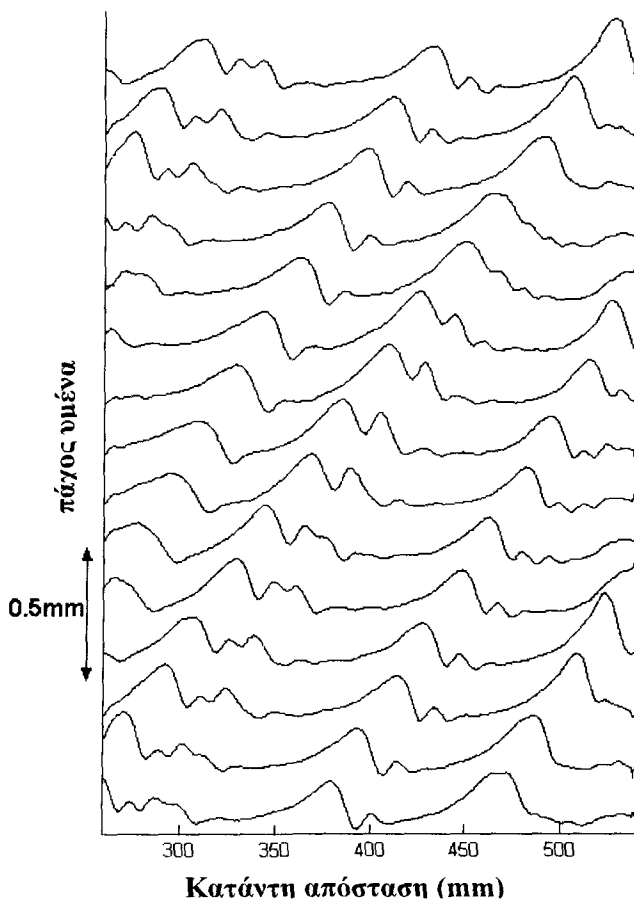
Το σχήμα 4.16b είναι μεγέθυνση του σχήματος 4.15a και περιγράφει την δημιουργία νέων παρασιτικών κορυφών με πολύ χαμηλή συχνότητα κύριας διαταραχής 0,25 Hz. Και σε αυτή την περίπτωση η ανάπτυξη της τελευταίας παρασιτικής κορυφής συμπίπτει με την παραπάνω περιγραφή. Η γένεση των παρασιτικών κορυφών από ένα τέτοιο βαθούλωμα είναι το κύριο μεταβατικό στάδιο που επαναλαμβάνεται σε όλα τα πειράματα.



Σχήμα 4.16: Τα αρχικά στάδια της δημιουργίας της παρασιτικής κορυφής: **(a)** η εμφάνιση του βαθουλώματος πίσω από την αναπτυσσόμενη κύρια κορυφή, όπως παρατηρήθηκε σε πειράματα με πολύ ασθενή διαταραχή και $Re=31$, $\varphi=3,4^\circ$, $f=0,5$ Hz. **(b)** Μεγέθυνση του σχήματος 4.13a ($Re=33$, $\varphi=3,4^\circ$, $\nu=0,25$ Hz) που δείχνει την ανάπτυξη της τελευταίας (πέμπτης) παρασιτικής κορυφής. Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec

Για ροή με επιβολή διαταραχής συχνότητας πολύ χαμηλής, η παρασιτική κορυφή είναι αρκετά μακριά από την κύρια κορυφή που ακολουθεί και έτσι μπορεί να αναπτυχθεί ανεξάρτητα. Αντιθέτως αν η f πλησιάζει την f_p η παρασιτική κορυφή αρχίζει να αλληλεπιδρά με την επόμενη κύρια. Πιο συγκεκριμένα, όταν $f \cong f_p$ η παρασιτική κορυφή θα δημιουργηθεί πολύ κοντά στο επόμενο κύμα και επειδή είναι μικρότερη από αυτό, το κύριο κύμα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα και την πλησιάζει. Σε όλα τα πειράματα η αλληλεπίδραση αυτή είχε ως αποτέλεσμα την συγχώνευση των δύο κυμάτων και την εξαφάνιση του δευτερεύοντος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της συμπεριφοράς αυτής δίνονται στο σχήμα 4.17 και αφορούν ροή με συνθήκες ροής $Re=26$ και $\varphi=5,4^\circ$ και $f=1,3$ Hz. Η πρώτη κύρια κορυφή είναι αυτή που σχεδόν έχει φύγει από το οπτικό πεδίο στο πρώτο προφίλ. Ακολουθείται από δύο παρασιτικές κορυφές. Η πρώτη αναπτύσσεται κανονικά σε μοναχικό κύμα. Η δεύτερη είναι κοντά στην επόμενη κύρια κορυφή και κατάντη της ροής αλληλεπιδρά με αυτή και εξαφανίζεται.

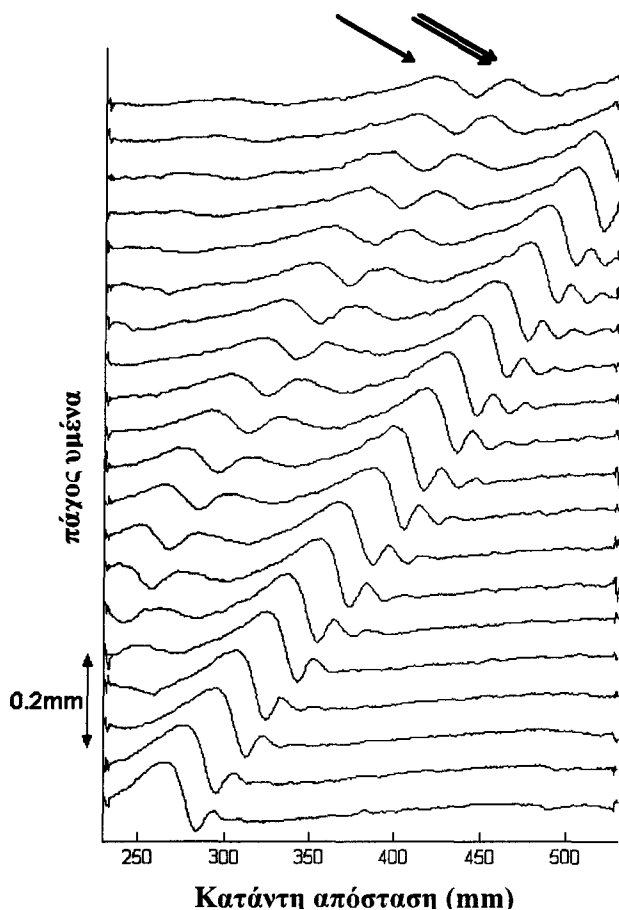
Ένα διαφορετικό σενάριο αλληλεπίδρασης κυμάτων παρατηρείται σε πολύ μικρές συχνότητες διέγερσης. Στην περίπτωση αυτή, όπως έχει προαναφερθεί, πίσω από την παρασιτική κορυφή δημιουργείται και δεύτερη ή και περισσότερες κορυφές. Κατά τον χρόνο που χρειάζεται για την αλληλεπίδραση του κύριου με το τελευταίο παρασιτικό κύμα, το πρώτο μπορεί να αναπτυχθεί τόσο ώστε να έχει το ύψος και την ταχύτητα που του επιτρέπουν να αποφύγει την συγχώνευση. Στην περίπτωση αυτή οδηγούμαστε σε δομές όπου έχουμε την κίνηση δύο κορυφών χωρίς συγχώνευση όπως έχει παρατηρηθεί και αλλού, τόσο υπολογιστικά (Malamataris, Vlachogiannis & Bontozoglou 2002) όσο και πειραματικά (Vlachogiannis & Bontozoglou 2001).



Σχήμα 4.17: Αλληλεπίδραση μεταξύ της παρασιτικής κορυφής και του κύματος που ακολουθεί σε $Re=26$, $\varphi=5,4^\circ$ και $f=1,3$ Hz. Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία γένεσης των παρασιτικών κυμάτων διαφέρει από αυτή που έχει ήδη αναλυθεί από τους Chang et al (1995,1999). Στην παρούσα μελέτη, τα παρασιτικά κύματα εμφανίζονται σαν αρνητικές (αντί για θετικές κατά Chang) καμπούρες. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον είδος της εισερχόμενης διαταραχής. Στην περίπτωση του Chang η διαταραχή είχε τη μορφή κύματος ύψους μεγαλύτερου από το ύψος του μοναχικού. Έτσι το κύμα έχοντας την τάση να πάρει τη μορφή του μοναχικού, μειώνει το ύψος του «αφήνοντας» μάζα πίσω και δημιουργώντας την υπερυψωμένο υπόστρωμα. Από αυτό το ύψωμα δημιουργείται το παρασιτικό κύμα. Αντίθετα στα πειράματα που έγιναν εδώ, η διαταραχή είχε πολύ μικρότερο μέγεθος από αυτό του μοναχικού. Έχοντας λοιπόν την τάση να κερδίσουν ύψος «ρουφάνε» μάζα από το υπόστρωμα πίσω και έτσι δημιουργούν την κοιλότητα από την οποία γεννάται το παρασιτικό κύμα. Αρνητικά παρασιτικά κύματα έχουν διαπιστωθεί και σε άλλες

περιπτώσεις όπως στο πρόβλημα της δημιουργίας σταγόνας σε ροή σε κάθετη κλωστή, αλλά δεν έχει ξαναεμφανιστεί σε ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα.



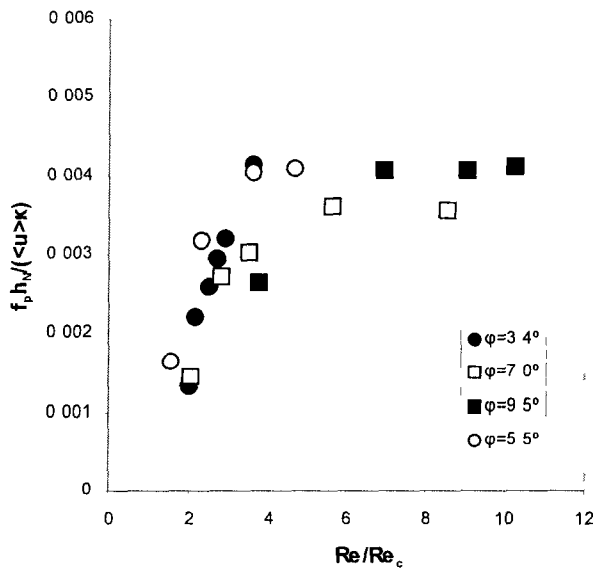
Σχήμα 4.18: Μια παρασιτική κορυφή (μονό βέλος) αναπτύσσεται από ένα ύψωμα πίσω από το υπερυψωμένο υπόστρωμα που δημιουργείται από μια διαταραχή μεγάλου ύψους. Πάνω στο υπόστρωμα σχηματίζεται ένα δεύτερο παρασιτικό κύμα από ένα βαθούλωμα της ροής ($Re=19$, $\varphi=3,4^\circ$ και $f=0,375$ Hz). Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec.

Ο μηχανισμός δημιουργίας των κυμάτων στην περίπτωση όπου η εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή είναι πιο σύνθετη, είναι ένα ενδιαφέρον ερώτημα το οποίο αξίζει να διερευνηθεί. Παρόλα αυτά, από τα δεδομένα των πειραμάτων που έγιναν παρατηρήθηκε ότι ο μηχανισμός του βαθουλώματος πίσω από αναπτυσσόμενη κορυφή εμφανίζεται και πάλι.. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.18 και αφορά ροή σε $Re=19$, $\varphi=3,4^\circ$ και $f=0,375$ Hz. Έτσι, σε συμφωνία με προηγούμενες θεωρίες και υπολογισμούς (Chang et al 1995, Malamataris, Vlachogiannis & Bontozoglou 2002), ο κυματισμός της διαταραχής έχει μεγάλο ύψος με αποτέλεσμα την εμφάνιση του υπερυψωμένου υποστρώματος. Πίσω από το υπερυψωμένο υπόστρωμα, δημιουργείται ένα ύψωμα στον υμένα από το οποίο θα σχηματιστεί ένα νέο κύμα (στο σχήμα 4.18 είναι το κύμα το οποίο υποδεικνύεται με το μονό βέλος). Λίγο αργότερα, δημιουργείται πίσω από την κύρια κορυφή και πάνω στο υπερυψωμένο υπόστρωμα ένα βαθούλωμα από το οποίο σχηματίζεται μια δεύτερη παρασιτική κορυφή (υποδεικνύεται με το διπλό βέλος). Εξήγηση για τον σχηματισμό του πρώτου παρασιτικού κύματος δόθηκε παραπάνω. Στην περίπτωση που η κύρια κορυφή μειώνει μονοτονικά το ύψος της με σκοπό να πάρει την μορφή του μοναχικού κύματος, αναμενόμενο θα ήταν να μην δημιουργηθεί το

βαθούλωμα που προκάλεσε το δεύτερο παρασιτικό κύμα. Ο ακριβής μηχανισμός δημιουργίας των κυμάτων σε αυτή την περίπτωση δεν έχει διευκρινιστεί.

4.2.4 Παραμετρικός χάρτης δημιουργίας παρασιτικών κορυφών

Η κρίσιμη συχνότητα f_p που αναφέρθηκε προηγουμένως, κάτω από την οποία έχουμε την ανάπτυξη παρασιτικών κορυφών, εξαρτάται από τον αριθμό Re και τη γωνία κλίσης του καναλιού. Οι γωνίες κλίσης που μελετήθηκαν ήταν μέχρι 10° διότι σε μεγαλύτερες γωνίες τα μοναχικά κύματα γρήγορα γίνονται τρισδιάστατα. Σε αυτή την περίπτωση, η πολύπλοκη μορφή των κυματοσειρών κάνει την αναγνώριση των παρασιτικών κορυφών πολύ πιο δύσκολη. Σύμφωνα με τις μετρήσεις μας, η τιμή της κρίσιμης συχνότητας f_p αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας κλίσης ή του αριθμού Re και να τείνει ασυμπτωτικά σε μια σταθερή τιμή για μεγάλους Re .



Σχήμα 4.19: Η κρίσιμη συχνότητα f_p κάτω από την οποία εμφανίζονται τα παρασιτικά κύματα σαν συνάρτηση του Re και της γωνίας κλίσης. $Re_c = 5/6 \cot \phi$, $\kappa = (Re \cdot We/3)^{1/3}$.

Αδιαστατοποίηση του αριθμού Reynolds για διαφορετικές γωνίες κλίσης γίνεται χρησιμοποιώντας τον κρίσιμο Re της γραμμικής ευστάθειας (σχέση 2.23) $Re_c = 5/6 \cot \phi$. Αντίθετα η αδιαστατοποίηση της συχνότητας είναι πιο δύσκολη. Ικανοποιητικά αποτελέσματα έχουμε χρησιμοποιώντας για χαρακτηριστικό χρόνο αυτόν που προτάθηκε από τους Chang et al (1995) και δίνεται από τη σχέση:

$$t_0 = \frac{h_N \kappa}{u}, \text{ όπου } \kappa = \left(\frac{Re \cdot We}{3} \right)^{1/3}$$

Ο χάρτης ροής που παίρνουμε με αυτήν την αδιαστατοποίηση παρουσιάζεται στο σχήμα 4.19. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η κρίσιμη συχνότητα f_p είναι ευθέως ανάλογη του αριθμού Re μέχρι $Re \approx 5Re_c$ και μετά αποκτά μια σταθερή τιμή περίπου 0,036 – 0,041.

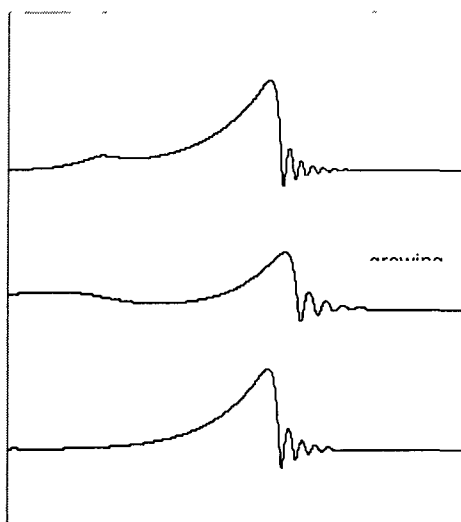
Όπως έχει αποδειχθεί από τις πειραματικές παρατηρήσεις, η εμφάνιση των παρασιτικών κυμάτων όταν η συχνότητα διαταραχής είναι λίγο μικρότερη από την κρίσιμη συχνότητα f_p είναι ένα χωρικά περιορισμένο γεγονός. Ειδικότερα, πίσω από το κύριο κύμα αναπτύσσεται μια δευτερεύουσα κορυφή η οποία αλληλεπιδρά με το επόμενο κύριο κύμα και συγχωνεύεται. Μια αρκετά πιθανή υπόθεση είναι ότι μετά την συγχώνευση τα κύματα θα έχουν και πάλι συχνότητα

ίδια με αυτή της επιβαλλόμενης διαταραχής. Παρόλα αυτά, το μήκος του καναλιού δεν είναι αρκετό για την απόδειξη μιας τέτοιας θεώρησης.

4.2.5 Γενικές παρατηρήσεις

Όπως έχει προαναφερθεί, στη βιβλιογραφία επικρατεί η τάση να εξηγηθεί ο μηχανισμός δημιουργίας παρασιτικών κορυφών μεταξύ δύο σχεδόν μοναχικών κυμάτων που απέχουν αρκετά μεταξύ τους με βάση την υπόθεση ότι η γένεση των παρασιτικών κορυφών είναι αποτέλεσμα εμφάνισης πρωταρχικής αστάθειας στο επίπεδο κομμάτι μεταξύ των δύο διαδοχικών κυμάτων. Παρόλα αυτά, τα πειράματα που έγιναν έδειξαν ότι η παραπάνω υπόθεση είναι λανθασμένη. Για συχνότητα διαταραχής μικρότερη από f_p , τα σχεδόν μοναχικά κύματα, που προκαλούνται από τη διαταραχή, αυξάνουν σε ύψος κατάντη της ροής και το πάχος του υποστρώματος μειώνεται (Alekseenko et al. 1985, Liu & Gollub 1994). Αν λάβουμε υπόψη ότι ο τοπικός αριθμός Re είναι ανάλογος της τρίτης δύναμης του τοπικού πάχους υμένα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το επίπεδο κομμάτι μεταξύ δύο διαδοχικών κυμάτων γίνεται λιγότερο ασταθές. Επιπρόσθετα, οι Vlachogiannis and Bontozoglou (2002) παρατήρησαν διαφορά στην ανάπτυξη κορυφών στο υπόστρωμα μεταξύ δύο σχεδόν μοναχικών κυμάτων που απέχουν πολύ μεταξύ τους και προκαλούνται από επιβολή ισχυρής εξωτερικής διαταραχής και την ανάπτυξη κυμάτων χωρίς την επιβολή διαταραχής. Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά του ασταθούς υποστρώματος επηρεάζεται έντονα από την παρουσία γειτονικών μοναχικών κυμάτων.

Ο μηχανισμός δημιουργίας των παρασιτικών κυμάτων εξαρτάται από τη μορφή του προπορευόμενου κύματος. Στην πραγματικότητα, η εμφάνιση του δευτερεύοντος κύματος οφείλεται σε ανταλλαγή μάζας μεταξύ του κυρίου κύματος και του υποστρώματος. Έτσι, η μορφή της διαταραχής μπορεί να είναι μια από τις τρεις περιπτώσεις που φαίνονται στο σχήμα 4.20: κύμα με ύψος μεγαλύτερο από το μοναχικό, κύμα που τείνει να πάρει τη μορφή του μοναχικού και μοναχικό κύμα.



Σχήμα 4.20: Τα χαρακτηριστικά των αναπτυσσόμενων διαταραχών συγκρινόμενα με ένα μοναχικό στατικό κύμα.

Στην πρώτη περίπτωση, το κύμα έχει μεγαλύτερο ύψος από το μοναχικό και τείνοντας να πάρει τη μορφή του μοναχικού απελευθερώνει μάζα προς το υπόστρωμα. Έτσι, το υπόστρωμα υπερυψώνεται και από εκεί δημιουργείται η νέα κορυφή. Οι Chang et al (1995, 1996, 1998, 1999) έχουν παρατηρήσει αυτή την διαδικασία ανάπτυξης νέων κυμάτων από κορυφές οι οποίες έχουν περισσότερη μάζα από αυτή των μοναχικών, βασισμένοι στα μοντέλα των Kawahara και Shkadov. Παρόλα αυτά, η θεωρία τους μπορεί να προσαρμοστεί και στην αντίθετη περίπτωση που η κορυφή έχει μικρότερο ύψος από αυτό του μοναχικού. Επομένως, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.20, το κύμα της δεύτερης περίπτωσης, για να αυξήσει το ύψος του, ελκύει μάζα από το υπόστρωμα δημιουργώντας ένα βαθούλωμα πίσω του. Στην περίπτωση αυτή από το βαθούλωμα εμφανίζεται το νέο κύμα.

Ανακεφαλαιώνοντας, αναφέρουμε ότι κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των κυμάτων που προκαλούνται από εξωτερική διαταραχή υπάρχει πάντα η τάση δημιουργίας μιας τουλάχιστον παρασιτικής κορυφής πίσω από το κύριο κύμα. Για συχνότητες πάνω από το όριο f_p το κύριο κύμα που ακολουθεί απορροφά την ενέργεια που εκπέμπεται πριν αναπτυχθεί το παρασιτικό κύμα. Για συχνότητες λίγο μικρότερες από το όριο f_p δημιουργείται η παρασιτική κορυφή αλλά αλληλεπιδρά με το κύριο κύμα και έτσι κατάντη της ροής πιθανότατα έχουμε και πάλι μια σειρά μοναχικών κυμάτων συχνότητας ίδιας με αυτήν της διαταραχής. Αντίθετα, για συχνότητες πολύ κάτω από το όριο f_p , η κανονική σειρά των μοναχικών κυμάτων καταστρέφεται από την εμφάνιση περισσότερων παρασιτικών κορυφών οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και οδηγούν σε μια πολύπλοκη δομή της ροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

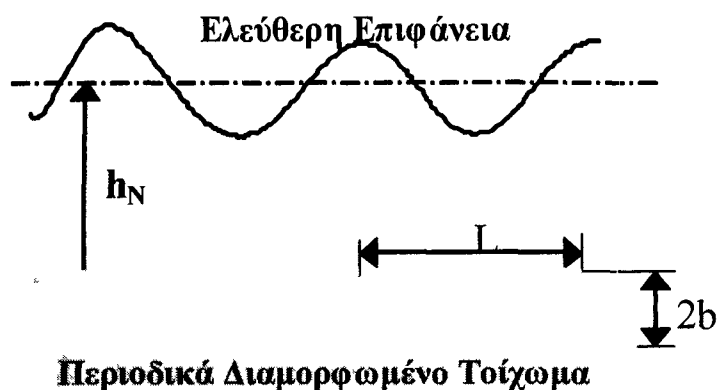
ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής λεπτού υμένα υγρού πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο κεκλιμένο τοίχωμα. Κύριος στόχος είναι η μελέτη της επίδρασης της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος τόσο στη μόνιμη ροή (το ισοδύναμο της λύσης Nusselt για το επίπεδο τοίχωμα) όσο και στη δημιουργία και ανάπτυξη των μοναχικών κυμάτων τα οποία προκαλούνται από τον φυσικό θόρυβο. Η τεχνική μέτρησης της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας, χωρικά και χρονικά, είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Τα χαρακτηριστικά της ροής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με ορθογωνική διαμόρφωση έχουν διερευνηθεί και παλιότερα στη βιβλιογραφία, αν και όχι εκτενώς. Ένα από τα θέματα στα οποία δεν έχει δοθεί ακόμα απάντηση είναι το αν και με ποιον τρόπο επηρεάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοιχώματος τη ροή. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετήθηκε η επίδραση του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Αρχικά παρουσιάζεται η επίδρασή του ύψους στα χαρακτηριστικά της στατικής ελεύθερης επιφάνειας καθώς και στην ευστάθεια της ροής. Στη συνέχεια αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της τρισδιάστατης ροής που δημιουργείται σε υψηλότερους αριθμούς Re . Καταδεικνύεται ότι, υπό την επίδραση μόνον του φυσικού θορύβου, η εντατικοποίηση και η αύξηση των διαταραχών οδηγεί στη δημιουργία μοναχικών κυμάτων με χαρακτηριστικά αισθητά διαφορετικά από αυτά του επίπεδου τοιχώματος.

5.1 Οι παράμετροι του πειράματος

Τα πειράματα έγιναν με τη χρήση νερού με κινηματικό ιξώδες και πυκνότητα $\nu=1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ και $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ αντίστοιχα. Η γωνία κλίσης μεταβλήθηκε από $1,3^\circ$ έως 15° ενώ ο αριθμός Reynolds κυμάνθηκε από 10 έως 450. Η γεωμετρία του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος (ορθογωνικό κύμα) παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Μορφοποίηση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος.

Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά τοιχώματα στα οποία η περιοδική διαμόρφωση είχε κοινό μήκος κύματος ($L=12$ mm), και μεταβλητό ύψος $2b=0,2$ mm, $2b=0,4$ mm και $2b=0,8$ mm αντίστοιχα. Η επιλογή της συγκεκριμένης γεωμετρίας του τοιχώματος έχει σχέση με την εφαρμογή της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό και έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Λόγω του ότι τα πειράματα έγιναν με νερό και το μέγιστο πάχος υμένα (σε $Re \cong 450$) ήταν περίπου 2,00 mm η συγκέντρωση της χρωστικής στο ρευστό ήταν 400 ppm με στόχο την καλύτερη οπτικοποίηση της ροής.

5.2 Χαρακτηριστικά και ευστάθεια της στατικής δομής

Η ευσταθής ροή χαρακτηρίζεται από μια χρονικά αμετάβλητη (στατική) μορφή της ελεύθερης επιφάνειας. Για πολύ χαμηλούς αριθμούς $Re \sim 10^{-1}-10^0$ η ελεύθερη επιφάνεια -για ροή πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα- είναι πρακτικά επίπεδη (Pozrikidis 1988, Aksel et al. 2003). Αυξάνοντας τον αριθμό $Re \sim 10^1-10^2$, παρατηρήθηκε ότι η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού αποκτά μια περιοδική διαμόρφωση η οποία έχει μήκος κύματος ίδιο με αυτό του τοιχώματος (Vlachogiannis & Bontozoglou 2002). Το ύψος της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας και η διαφορά φάσης της από το τοίχωμα εξαρτάται από τον αριθμό Re και την κλίση του καναλιού (Bontozoglou & Paparopolymerou 1997, Bontozoglou 2000).

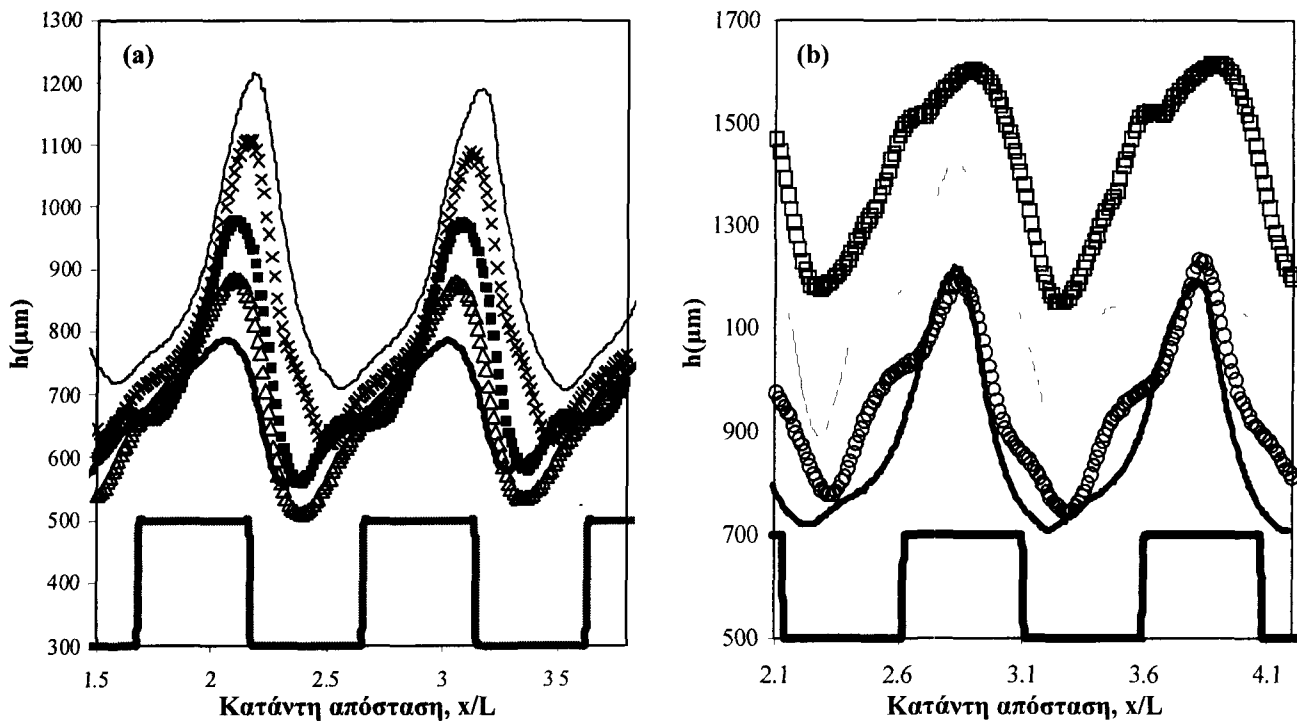
Πάνω από έναν κρίσιμο αριθμό Re , η ευσταθής ροή γίνεται ασταθής με την εμφάνιση οδενουσών διαταραχών οι οποίες αναπτύσσονται σε μη-γραμμικά κύματα. Τα χαρακτηριστικά της μόνιμης ροής μπορούν να παρατηρηθούν κυρίως στα πρώτα μήκη κύματος του καναλιού όπου οι διαταραχές είναι ακόμα μικρές. Η μελέτη της στατικής δομής είναι σημαντική ακόμα και για την ανάλυση σε ασταθείς συνθήκες ροής διότι –όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια– η μη-γραμμική δυναμική καθορίζεται από την αλληλεπίδραση των κυμάτων με το στατικό υπόστρωμα.

Στις επόμενες παραγράφους, αναλύεται η επίδραση του ύψους της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος στην περιοχή όπου παρουσιάζεται στατική ροή. Αρχικά αναφέρεται η επίδραση του ύψους στα χαρακτηριστικά της ελεύθερης επιφάνειας και ερευνάται η ευστάθεια της ροής η οποία συγκρίνεται με την ευστάθεια της ροής πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα. Τέλος περιγράφεται η τρισδιάστατη στατική δομή η οποία παρατηρείται σε μεγαλύτερους αριθμούς Re .

5.2.1 Χαρακτηριστικά της στατικής ελεύθερης επιφάνειας

Η στατικά διαμορφωμένη ελεύθερη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από την απόσταση μιας κορυφής με το βαθύλωμα που ακολουθεί (ύψος της ελεύθερης επιφάνειας). Όπως προαναφέρθηκε, το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας εξαρτάται από τον αριθμό Re και την γωνία κλίσης του καναλιού. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται δύο παραδείγματα που αποδεικνύουν την παραπάνω αναφορά και αφορούν ροή πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης 200 μm . Έτσι, στο σχήμα 5.2a παρουσιάζεται η μεταβολή της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας σε διαφορετικούς αριθμούς Re και σταθερή κλίση τοιχώματος φ . Παρατηρούμε ότι το ύψος της διαμόρφωσης αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Re . Αντίστοιχα στο σχήμα 5.2b (για σταθερό Re και μεταβλητή γωνία φ) η ελεύθερη επιφάνεια

γίνεται πιο απότομη όσο μεγαλώνει η γωνία κλίσης. Και στα δύο διαγράμματα 5.2a,b τόσο η ελεύθερη επιφάνεια όσο και το τοίχωμα απεικονίζονται στο πραγματικό τους μέγεθος, αλλά το τοίχωμα έχει μεταφερθεί πιο πάνω από την πραγματική του θέση (-100 μm , 100 μm) με σκοπό την καλύτερη απεικόνιση της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας.

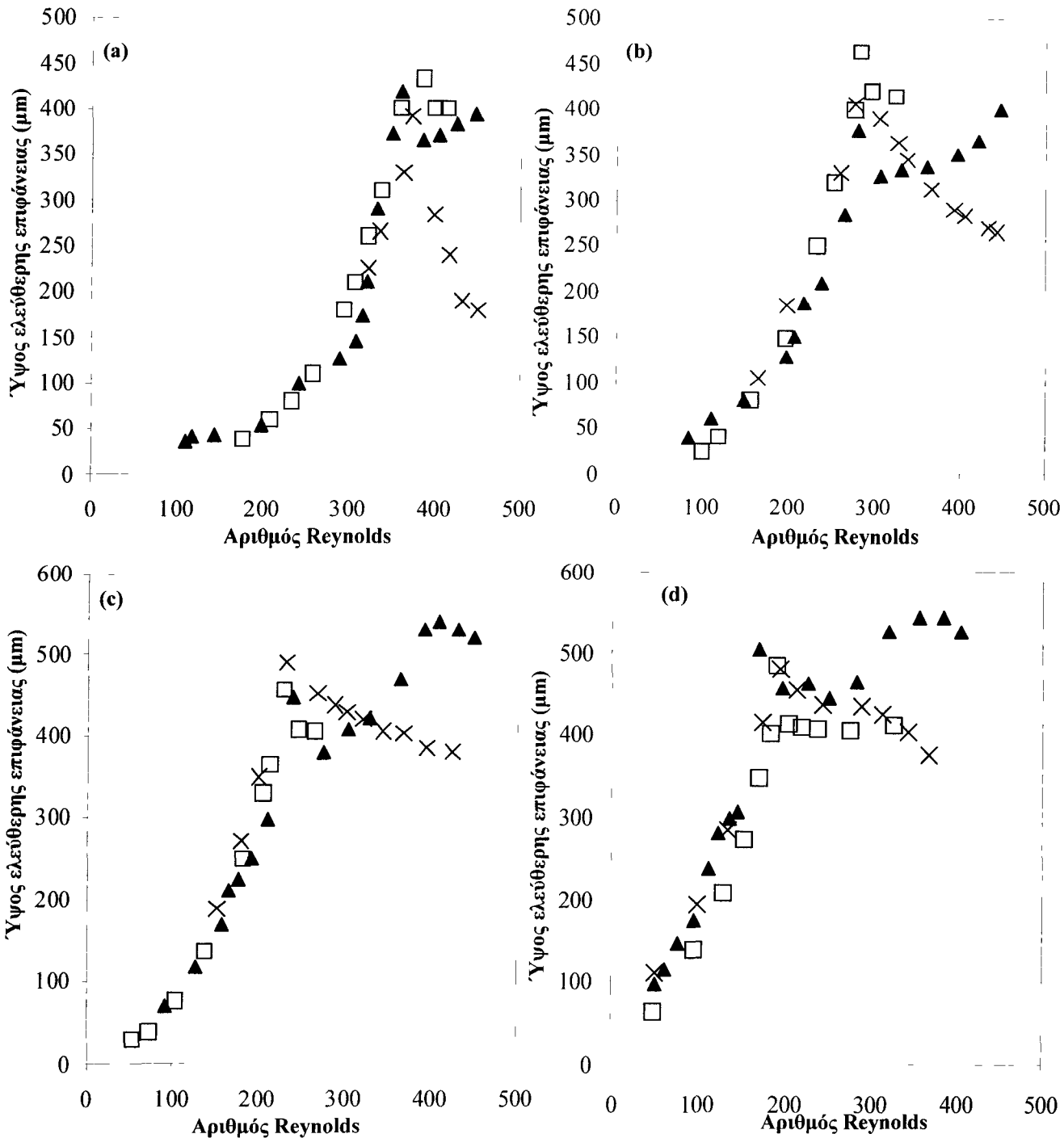


Σχήμα 5.2: Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds και της γωνίας κλίσης του καναλιού (a) για $\varphi=5,4^\circ$, (—) $Re=375$, (x) $Re=327$, (■) $Re=227$, (Δ) $Re=153$, (—) $Re=117$ και (b) για $Re=375$, (\square) $\varphi=1,3^\circ$, (—) $\varphi=2,6^\circ$, (\circ) $\varphi=3,4^\circ$, (—) $\varphi=5,4^\circ$.

Ποσοτική πληροφορία για τη σχέση μεταξύ του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας και του αριθμού Re παρουσιάζεται στα διαγράμματα του σχήματος 5.3. Το καθένα αντιστοιχεί σε διαφορετική γωνία κλίσης, και δίνει τη συσχέτιση των δύο μεγεθών για τα τρία τοιχώματα με διαφορετικό ύψος περιοδικής διαμόρφωσης στα οποία έγιναν τα πειράματα (200, 400 και 800 μm). Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση η μεταβολή του ύψους σε σχέση με τον Re μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικές περιοχές. Στην πρώτη, σε χαμηλότερες παροχές, φαίνεται μια ισχυρή εξάρτηση του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας από τον Re , που αυξάνεται εκθετικά μέχρι μια μέγιστη τιμή. Στη δεύτερη περιοχή, αμέσως μετά το μέγιστο, το ύψος πέφτει και η συμπεριφορά του σε ακόμα μεγαλύτερους Re εξαρτάται από τις υπόλοιπες παραμέτρους του πειράματος.

Δύο σημαντικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν στα σχήματα 5.3a,b,c,d για το πρώτο μέρος των καμπυλών πριν το μέγιστο είναι οι εξής: (1) Η μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας με τον Re είναι (αν λάβουμε υπόψη και το πειραματικό σφάλμα) ανεξάρτητη του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος. (2) Ο αριθμός Re στο οποίο εμφανίζεται το μέγιστο είναι επίσης ανεξάρτητος του τοιχώματος. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, το μέγιστο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας που παρατηρείται είναι το ίδιο σε κάθε τοίχωμα που ελέγχθηκε. Επιπρόσθετα, σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων διαγραμμάτων αποδεικνύει ότι ενώ ο Re στον οποίον εμφανίζεται το μέγιστο μεταβάλλεται με τη γωνία φ , το

μέγιστο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας παραμένει σταθερό (στο πλαίσιο των γωνιών φ που ελέγχθηκαν). Μάλιστα το μέγιστο ύψος είναι σε όλες τις περιπτώσεις $A=450-500 \mu\text{m}$, και αντιστοιχεί σε μέση κλίση της ελεύθερης επιφάνειας $2\pi A/L=0,24-0,26$.



Σχήμα 5.3: Το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds για διαφορετικά ύψη τοιχώματος και γωνίες κλίσης. (a) $\varphi=1,3^\circ$, (b) $\varphi=2,6^\circ$, (c) $\varphi=3,4^\circ$, και (d) $\varphi=5,4^\circ$. Σε όλες τις περιπτώσεις τα δεδομένα παρουσιάζονται για ύψη τοιχώματος: (x) $2b=200 \mu\text{m}$, (□) $2b=400 \mu\text{m}$ και (▲) $2b=800 \mu\text{m}$.

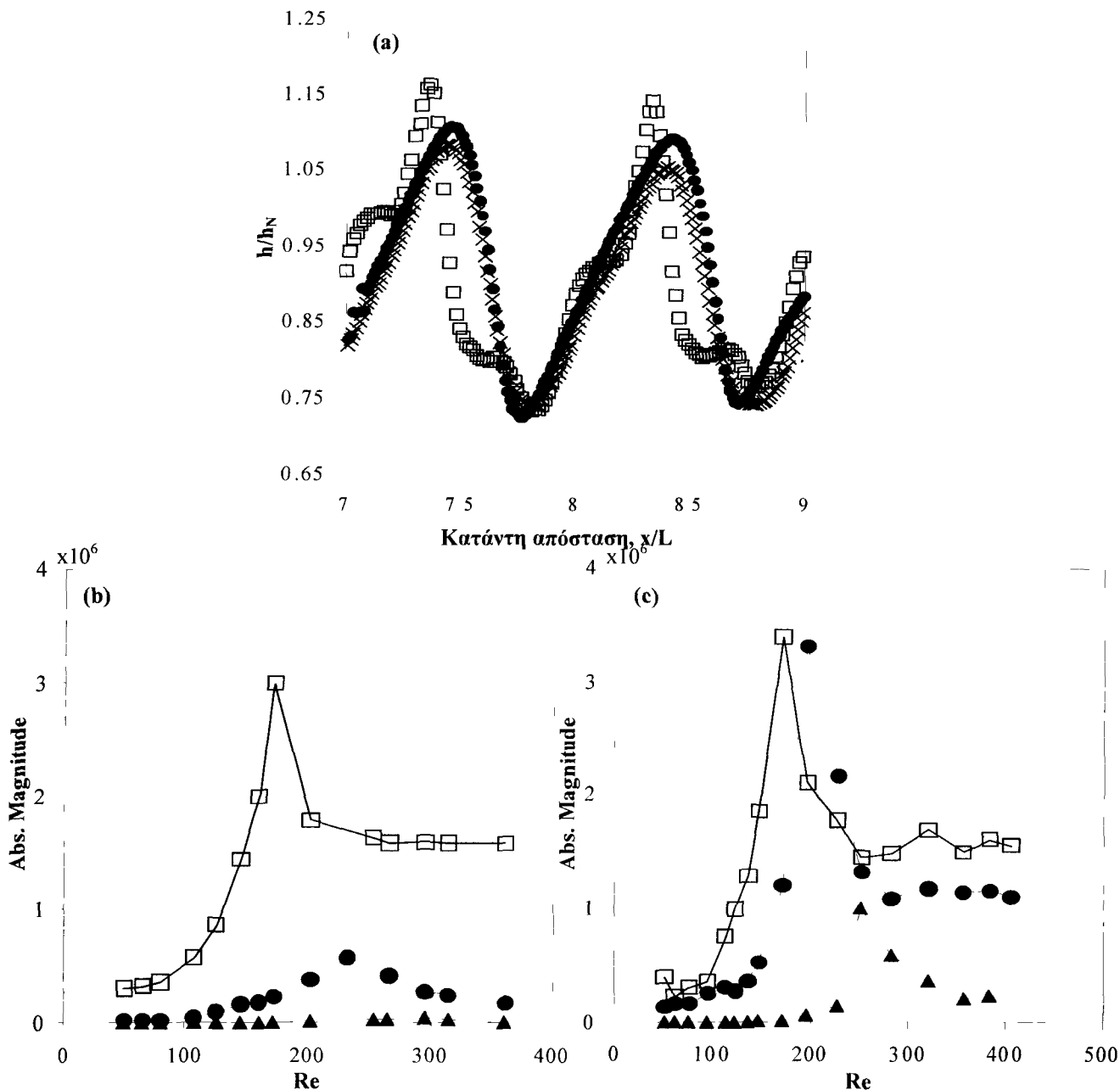
Η παρατηρούμενη εκθετική μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσει του αριθμού Reynolds ενισχύει τη θεωρία περί συντονισμού του τοιχώματος και της ελεύθερης

επιφάνειας. Η παρατήρηση ότι το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας αποκτά ως μέγιστη τιμή τα 400 έως 500 μm , για όλα τα τοιχώματα τα οποία εξετάστηκαν, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέροντα. Το ύψος του τοιχώματος τετραπλασιάζεται αλλά το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας παραμένει το ίδιο για τις ίδιες συνθήκες του πειράματος (Re , ϕ). Αυτό αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη ότι η συμπεριφορά είναι μη-γραμμική αφού η γραμμική ανάλυση για πολύ μικρό ύψος τοιχώματος προβλέπει παραμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας ανάλογη με αυτή του τοιχώματος (Wang 1981, Bontozoglou & Papapolymerou 1997).

Όπως προαναφέρθηκε, το δεύτερο μέρος της καμπύλης έχει πιο πολύπλοκη συμπεριφορά. Στην περίπτωση των μικρών γωνιών κλίσης και μικρού ύψους διαμόρφωσης τοιχώματος (σχήμα 5.3a, 200 μm) έχουμε απότομη πτώση του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας με τον Re . Σε υψηλότερες γωνίες κλίσης, η μείωση του ύψους είναι πιο αργή έως ότου φτάσει ασυμπτωτικά σε μια σχεδόν σταθερή τιμή. Σε ακόμα μεγαλύτερα ύψη διαμόρφωσης του τοιχώματος παρατηρείται ένα νέο μέγιστο του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας (διαγράμματα 5.3c,d, 800 μm). Αξίζει να σημειωθεί ότι αυξάνοντας τον αριθμό Re πέρα από την τιμή για την οποία έχουμε την μέγιστη τιμή, αναπτύσσεται κατάντη της ροής μια νέα τρισδιάστατη δομή η οποία αποτελείται από σειρές από περιοδικά διαμήκη βαθουλώματα και υψώματα κατά μήκος των διαμορφώσεων του τοιχώματος. Η δημιουργία και ανάπτυξη αυτών των δομών θα αναλυθούν αργότερα. Στο σημείο αυτό μπορούμε να αποδώσουμε την συμπεριφορά που παρατηρείται στο δεύτερο μέρος της καμπύλης συσχέτισης του ύψους με τον Re στην ανάπτυξη μιας δευτερεύουσας αστάθειας η οποία οδηγεί στην τρισδιάστατη δομή.

Η στατικά διαμορφωμένη ελεύθερη επιφάνεια χαρακτηρίζεται και από το αρμονικό περιεχόμενο των περιοδικών διαμορφώσεων που παρουσιάζει. Όπως έχει αποδειχθεί από τους Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας είναι συνάρτηση του αριθμού Re , με υψηλότερες αρμονικές να παίζουν όλο και σημαντικότερο ρόλο όσο αυξάνει ο Re . Αυτή η τάση φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.2a. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος στο αρμονικό περιεχόμενο της ελεύθερης επιφάνειας. Η εξάρτηση αυτή απεικονίζεται στα διαγράμματα του σχήματος 5.4. Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα 5.4a παρουσιάζεται η στατική ελεύθερη επιφάνεια σε παρόμοιες συνθήκες αριθμού Re and γωνίας ϕ για τα διαφορετικά τοιχώματα που δοκιμάστηκαν. Μια πρώτη ματιά δείχνει ότι αυξάνοντας το ύψος της διαμόρφωσης του τοιχώματος έχουμε μεγαλύτερη απόκλιση του σχήματος της ελεύθερης επιφάνειας από την ημιτονοειδή μορφή.

Η τάση αυτή αποδεικνύεται ποσοτικά στα διαγράμματα του σχήματος 5.4b,c, όπου το μέγεθος των πρώτων αρμονικών του χωρικού μετασχηματισμού Fourier απεικονίζεται ως συνάρτηση του αριθμού Re . Το διάγραμμα 5.4b αναφέρεται σε τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης 400 μm ενώ το σχήμα 5.4c σε τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης 800 μm . Παρατηρείται ότι το μέγεθος της πρώτης αρμονικής -το οποίο κυρίως υποδεικνύει το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας- είναι σχεδόν ταυτόσημο και για τα δύο τοιχώματα. Αντιθέτως, η δεύτερη αρμονική διαφέρει μεταξύ των δύο τοιχωμάτων σχεδόν μια τάξη μεγέθους σε όλο το εύρος των αριθμών Re που απεικονίζονται. Αξίζει να επισημανθεί άλλωστε ότι, στο τοίχωμα των 800 μm , το μέγεθος της δεύτερης αρμονικής είναι σχεδόν ίδιο με της πρώτης.



Σχήμα 5.4: (a) Η στατικά διαμορφωμένη ελεύθερη επιφάνεια σε αριθμό $Re=315$ και γωνία κλίσης $\phi=2,6^\circ$ για ύψη τοιχώματος: (x) $200 \mu m$, (\square) $400 \mu m$, (\bullet) $800 \mu m$. (b) Το μέγεθος της πρώτης (- \square -), δεύτερης (- \bullet -) και τρίτης (- \blacktriangle -) αρμονικής της ελεύθερης επιφάνειας ως συνάρτηση του Re για ύψος τοιχώματος ίσο με $400 \mu m$. (c) Ομοίως όπως στο (b) για ύψος τοιχώματος ίσο με $800 \mu m$.

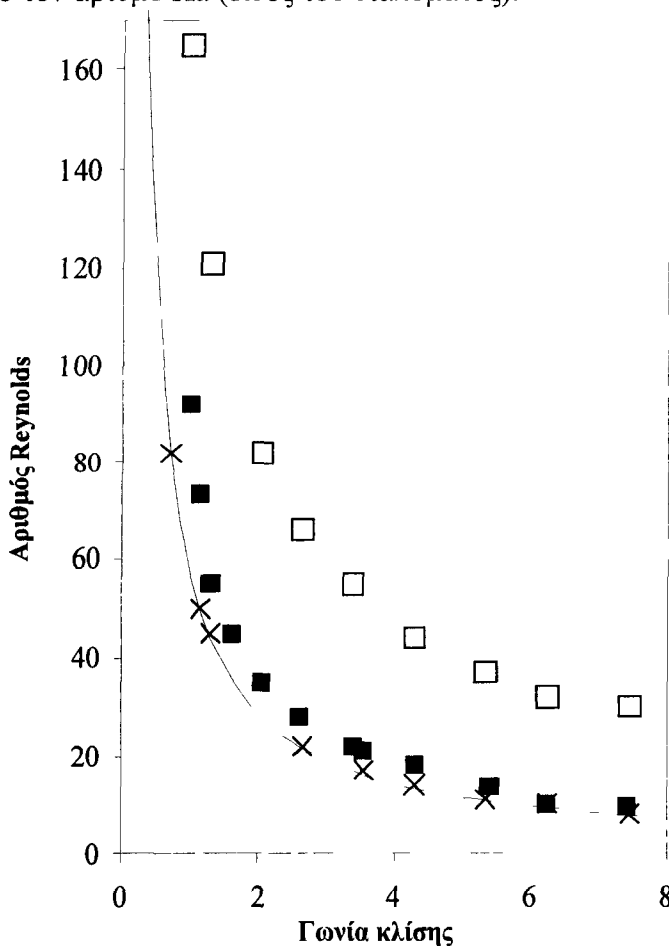
5.2.2 Ευστάθεια της στατικής δομής σε οδεύουσες διαταραχές

Είναι γνωστό ότι η ροή υμένα κατά μήκος ενός κεκλιμένου επίπεδου τοιχώματος είναι γραμμικά ασταθής πάνω από τον κρίσιμο αριθμό $Re_c=(5/6)cot\phi$, και ότι το ουδέτερο ευσταθές μήκος κύματος για την οριακή αστάθεια προσεγγίζει το άπειρο (Yih 1963). Προφανώς είναι ενδιαφέρον να διερευνηθεί εάν η εισαγωγή περιοδικής διαμόρφωσης στο τοίχωμα έχει σταθεροποιητική ή αποσταθεροποιητική επίδραση στον υμένα, και ιδιαίτερα να δοθεί απάντηση στο ερώτημα πώς επηρεάζεται η ευστάθεια από το ύψος της διαμόρφωσης.

Υπολογιστικές προβλέψεις για ροή σε κάθετο ημιτονοειδές τοίχωμα (Trifonov 1998) υποδεικνύουν ότι η ροή γίνεται ασταθής πάνω από έναν πεπερασμένο (αλλά γενικά μικρό) αριθμό Re , αντίθετα με τη ροή σε κάθετο επίπεδο τοίχωμα όπου ο κρίσιμος αριθμός Re είναι $Re_c=0$. Πρόσφατα, προέκυψε ένα σημαντικό θεωρητικό αποτέλεσμα για ροή σε κεκλιμένο τοίχωμα με περιοδική διαμόρφωση με βάση την παραδοχή της οιονεί μόνιμης βασικής ροής (τα χαρακτηριστικά της ροής αντιστοιχούν σε αυτά της ροής Nusselt για την τοπική γωνία κλίσης) σε υμένα με μονότονη ροή (γωνία κλίσης παντού θετική): Οι Wierschem & Aksel (2003) προέβλεψαν ότι η περιοδική διαμόρφωση έχει σταθεροποιητική επίδραση στη ροή, και το μέγεθος του κρίσιμου αριθμού Re αυξάνεται απότομα με αύξηση του ύψους του τοιχώματος.

Στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε ότι η ροή πάνω από τοίχωμα με περιοδική ορθογωνική διαμόρφωση γίνεται ασταθής πάνω από έναν κρίσιμο αριθμό Re όπου η στατική δομή χαλαρεί και εμφανίζονται οδεύουσες διαταραχές. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να επιβεβαιωθεί το όριο από την ευστάθεια στην αστάθεια συνίσταται στην εισαγωγή μιας τοπικής διαταραχής η οποία περιέχει ευρύ φάσμα συχνοτήτων και στην παρακολούθηση της εξέλιξής της κατάντη της ροής.

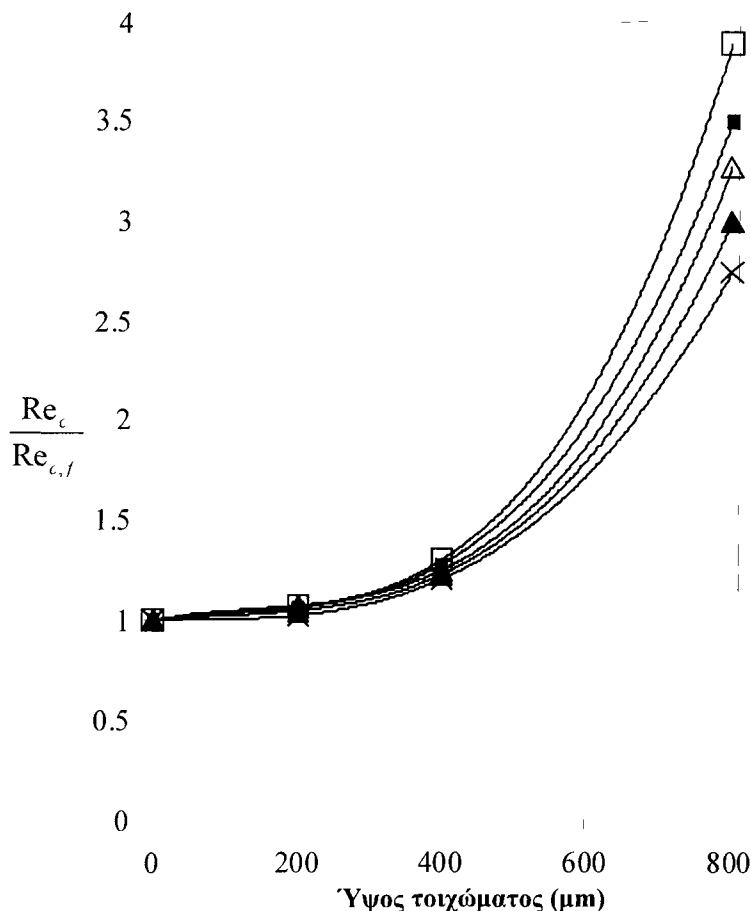
Προηγούμενες μετρήσεις για τον καθορισμό του κρίσιμου αριθμού Re σε τοίχωμα με περιοδική διαμόρφωση ύψους 400 μm από τους Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) απέδειξε συμφωνία της κρίσιμης τιμής στα πειράματα με νερό και διάλυμα νερού – γλυκερίνης 28%. Η παραπάνω ταύτιση οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το όριο αστάθειας χαρακτηρίζεται από τον αριθμό Re και όχι από τον αριθμό Ka (είδος του διαλύματος).



Σχήμα 5.5: Ο ουδέτερος ευσταθής αριθμός Re ως συνάρτηση της γωνιάς κλίσης για διαφορετικά ύψη τοιχώματος. Εδώ για (□) $2b=800 \mu\text{m}$, (■) $2b=400 \mu\text{m}$, (x) $2b=200 \mu\text{m}$, (—) επίπεδο τοίχωμα.

Η επίδραση του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος στην γραμμική ευστάθεια παρουσιάζεται στο σχήμα 5.5, όπου ο κρίσιμος Re παρουσιάζεται ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης φ για τα τοιχώματα με ορθογωνική διαμόρφωση και για το επίπεδο τοίχωμα. Παρατηρούμε ότι για την πλάκα με ύψος διαταραχής 200 μm το όριο ευστάθειας ουσιαστικά συμπίπτει με αυτό του επίπεδου τοιχώματος. Στην περίπτωση του τοιχώματος με ύψος 400 μm , το αντίστοιχο όριο παρεκκλίνει σημαντικά (20-30% αύξηση στον Re_c). Ακόμα μεγαλύτερη απόκλιση έχουν οι κρίσιμες τιμές για τοίχωμα με 800 μm ύψος διαταραχής (μεγαλύτερη από 200% αύξηση στον Re_c), γεγονός που αποδεικνύει την ισχυρά σταθεροποιητική επίδραση της αύξησης του ύψους της διαμόρφωσης.

Η εξάρτηση του Re_c από το ύψος της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος γίνεται πιο κατανοητή από το διάγραμμα του σχήματος 5.6. Ο οριζόντιος άξονας είναι το ύψος του τοιχώματος και κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε διαφορετική γωνία κλίσης. Ως $Re_{c,f}$ χαρακτηρίζουμε τον κρίσιμο αριθμό Re για επίπεδο τοίχωμα σε συγκεκριμένη γωνία κλίσης φ . Έτσι, όταν το ύψος της διαμόρφωσης του τοιχώματος τείνει στο μηδέν ($2b \rightarrow 0$) έχουμε $Re_c/Re_{c,f} = 1$. Οι γραμμές οι οποίες προσομοιάζουν τη συμπεριφορά σε διάφορες γωνίες κλίσης καταδεικνύουν την απότομη αύξηση της τιμής του Re_c με αύξηση του ύψους της διαμόρφωσης. Επίσης παρατηρούμε ότι η παραπάνω μεταβολή γίνεται πιο έντονη με αύξηση της γωνίας κλίσης.

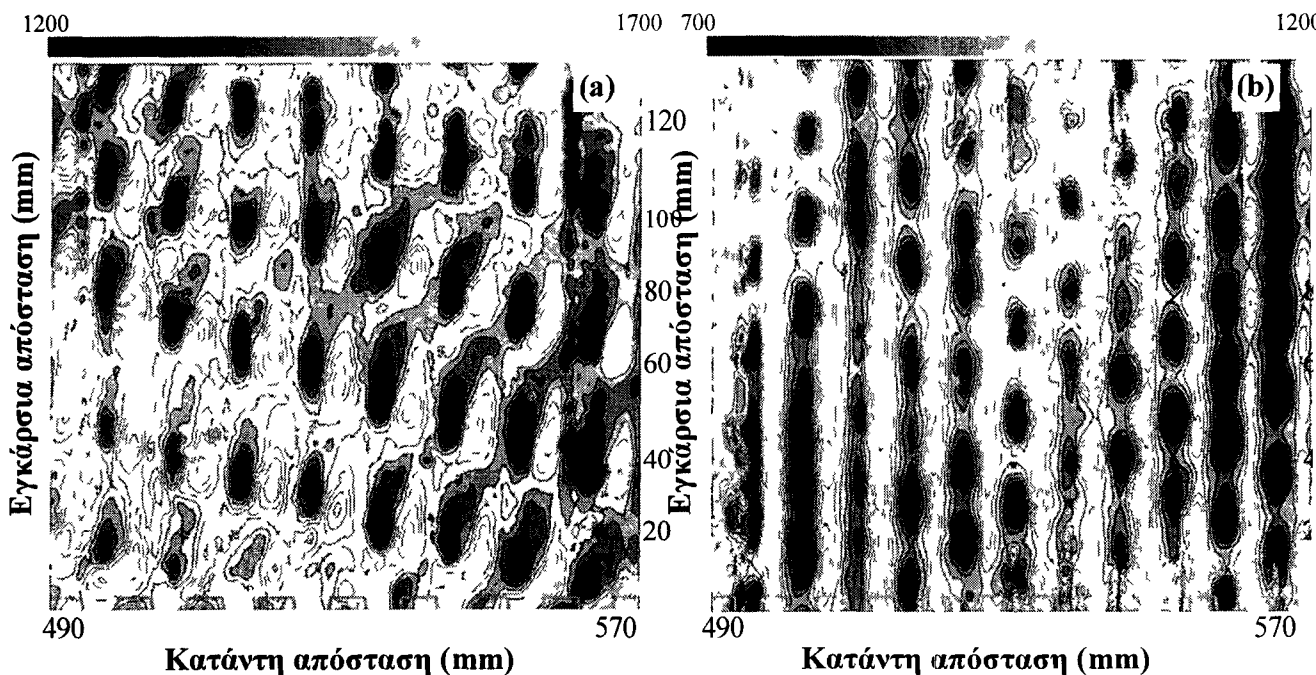


Σχήμα 5.6: Η αναλογία μεταξύ του κρίσιμου Re για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα και του κρίσιμου Re για επίπεδο τοίχωμα στην ίδια γωνία φ , ως συνάρτηση του ύψους του τοιχώματος: (x) $\varphi=1,3^\circ$, (▲) $\varphi=2,6^\circ$, (Δ) $\varphi=3,4^\circ$, (■) $\varphi=5,4^\circ$, (□) $\varphi=7,4^\circ$.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε ποιοτική συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις των Wierschem and Aksel (2003). Ποσοτική σύγκριση δεν είναι δυνατή, καθώς η μορφή της διαμόρφωσης του τοιχώματος διαφέρει κατά πολύ στις δύο περιπτώσεις και οι πειραματικές συνθήκες δεν ικανοποιούν τις υποθέσεις στις οποίες βασίζεται η αναλυτική μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα αναφέρονται σε μικρές γωνίες κλίσης ϕ και το ορθογωνικό σχήμα της διαμόρφωσης του τοιχώματος εισάγει περιοχές αρνητικής τοπικής γωνίας κλίσης για κάθε ϕ . Με δεδομένα τα παραπάνω, πειράματα και θεωρία πρέπει να θεωρούνται ως συμπληρωματικά, και το κοινό συμπέρασμα για στον σταθεροποιητικό ρόλο του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος να θεωρηθεί ότι ισχύει γενικά για κάθε γωνία κλίσης και σχήμα της περιοδικής διαμόρφωσης.

5.2.3 Τρισδιάστατη μόνιμη ροή

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το ύψος της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας μεγαλώνει εκθετικά μέχρι μια μέγιστη τιμή πέρα από την οποία ξαναμειώνεται. Το πέρασμα από τη μέγιστη αυτή τιμή ταυτίζεται με την εμφάνιση και ανάπτυξη κατόντη της ροής τρισδιάστατης δομής (3-D) η οποία αποτελείται από σειρές εγκάρσιων βαθουλωμάτων και υψωμάτων κατά μήκος της περιοδικής διαμόρφωσης του καναλιού. Οι δομές αυτές εμφανίζονται αρχικά στα τελευταία μήκη κύματος του καναλιού και με μια μικρή αύξηση του Re εξαπλώνονται σε όλο το μήκος του.



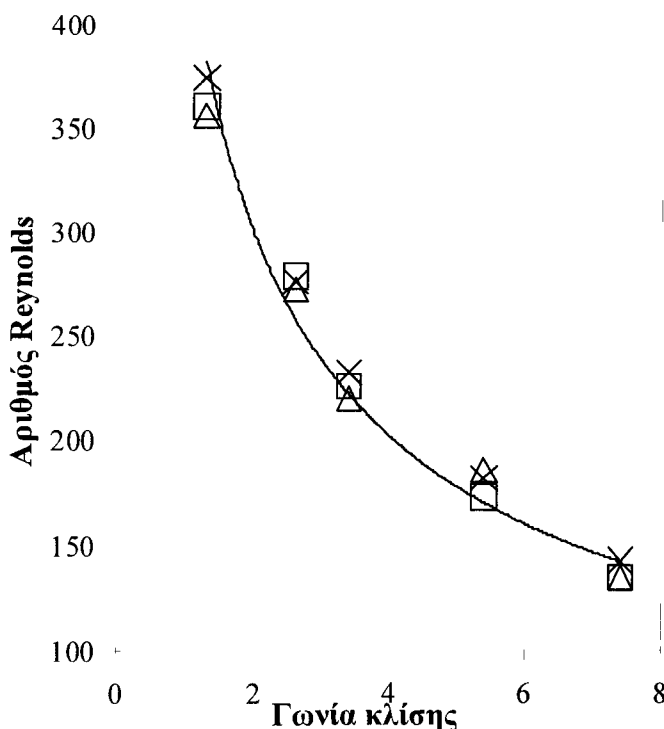
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα ισοψών καμπυλών του πάχους του υμένα για (a) $\phi=1,3^\circ$, $Re=370$ και (b) $\phi=3,4^\circ$, $Re=201$

Η χωρική μεταβολή της τρισδιάστατης αυτής δομής παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7a,b με μορφή διαγραμμάτων ισοψών καμπυλών της ελεύθερης επιφάνειας, όπου οι πιο σκούρες περιοχές αντιστοιχούν σε βαθουλώματα ενώ οι πιο ανοιχτές σε υψώματα. Οι δύο περιπτώσεις που απεικονίζονται αντιστοιχούν σε ύψος τοιχώματος $2b=800 \mu\text{m}$, και $\phi=1,3^\circ$, $Re=370$ και $\phi=3,4^\circ$, $Re=201$ αντίστοιχα. Η θέση του κυματοειδούς τοιχώματος φαίνεται στο κάτω μέρος

κάθε διαγράμματος και βοηθάει να γίνει αντιληπτή η θέση των βαθουλωμάτων μέσα στις κοιλότητες και των υψωμάτων πάνω από τις κορυφές του τοιχώματος.

Χρήση τοιχωμάτων με διαφορετικό ύψος κυματοειδούς διαμόρφωσης βοηθάει να διερευνηθεί το κατά πόσο το ύψος της διαμόρφωσης επιδρά στην ανάπτυξη των τρισδιάστατων δομών και επηρεάζει τα χαρακτηριστικά τους. Απάντηση στην πρώτη ερώτηση δίνεται στο σχήμα 5.8, στο οποίο αναπαριστάται ο κρίσιμος για την εμφάνιση των βαθουλωμάτων αριθμός Re ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης του καναλιού. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τα τρία διαφορετικά τοιχώματα είναι φανερό ότι η δημιουργία των τρισδιάστατων ασταθειών είναι ανεξάρτητη του ύψους του τοιχώματος.

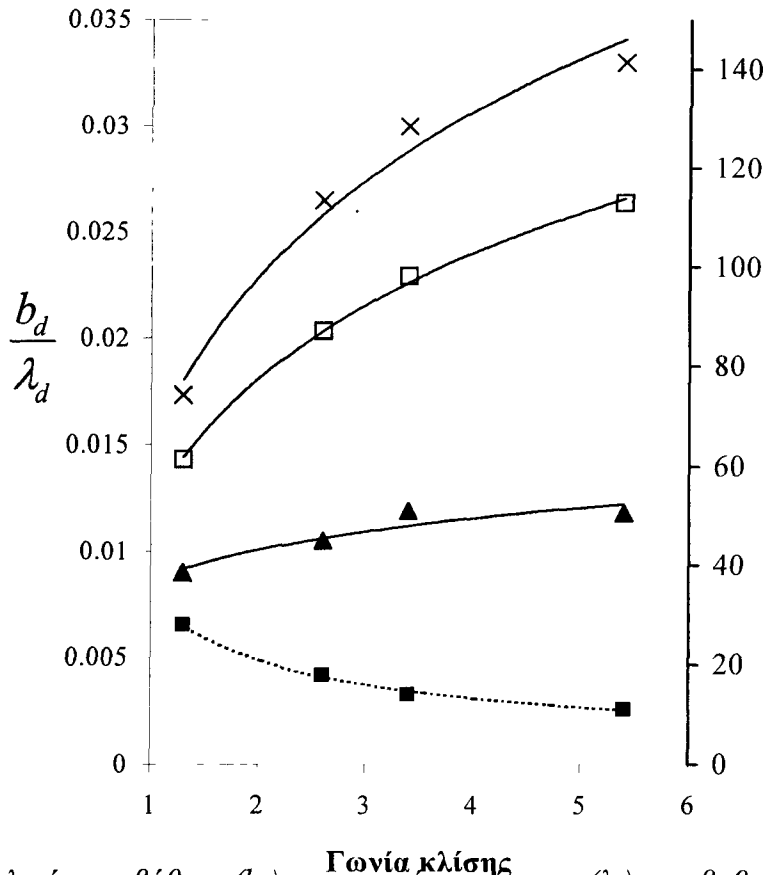
Ένα βασικό χαρακτηριστικό της τρισδιάστατης δομής είναι η καμπυλότητα των βαθουλωμάτων που δημιουργούνται. Στην παρούσα εργασία αυτός ο όρος χαρακτηρίζεται από τον λόγο b_d/λ_d , του βάθους του βαθουλώματος προς την απόσταση μεταξύ δύο εγκάρσια διαδοχικών βαθουλωμάτων. Τέτοια δεδομένα υπολογίζονται από τα δεδομένα της ελεύθερης επιφάνειας και η παραμετρική τους εξάρτηση παρουσιάζεται στο σχήμα 5.9. Παρατηρούμε καταρχάς ότι το μήκος κύματος, λ_d , μεταβάλλεται αντίστροφα με την γωνία κλίσης αλλά δεν εξαρτάται από το ύψος του τοιχώματος. Το βάθος των βαθουλωμάτων φαίνεται να αυξάνει με την αύξηση του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος και της γωνίας κλίσης. Η αύξηση αυτή είναι περισσότερο απότομη αν το ύψος αυξηθεί από 200 σε 400 μm παρά από 400 σε 800 μm , γεγονός αυτό αποδεικνύει τάση προς κορεσμό. Είναι επίσης ενδιαφέρον να επισημανθεί ότι η αλλαγή στην γωνία κλίσης ϕ επιδρά στην καμπυλότητα κυρίως στα τοιχώματα με μεγαλύτερο βάθος διαμόρφωσης.



Σχήμα 5.8: Ο κρίσιμος αριθμός Re για την εμφάνιση των βαθουλωμάτων ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης για: (x) $2b=800 \mu\text{m}$, (\square) $2b=400 \mu\text{m}$ και (Δ) $2b=200 \mu\text{m}$.

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων, μπορεί να γίνει μια προσπάθεια ώστε να εξηγηθεί ο μηχανισμός που δίνει έναυσμα στη δημιουργία και ανάπτυξη των τρισδιάστατων

δομών. Όπως αναφέρθηκε να σε προηγούμενη παράγραφο, το μέγιστο ύψος των διδιάστατων στατικών σχηματισμών της ελεύθερης επιφάνειας της ροής είναι το ίδιο ανεξαρτήτως τη μορφολογία του τοιχώματος και της γωνίας κλίσης. Η παρατήρηση αυτή, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι 3-D δομές εμφανίζονται όταν ο Re ξεπεράσει την τιμή η οποία αντιστοιχεί στο παραπάνω μέγιστο, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η νέα μορφή της ροής είναι αποτέλεσμα μιας δευτερεύουσας αστάθειας που αναπτύσσεται όταν το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας της πρωταρχικής ροής ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή και καμπυλότητα. Ο πιθανότερος μηχανισμός που είναι συμβατός με τις παραπάνω παρατηρήσεις είναι η τριχοειδής αστάθειας της καμπυλωμένης ελεύθερης επιφάνειας.



Σχήμα 5.9: Η αναλογία του βάθους (b_d) προς το μήκος κύματος (λ_d) των βαθουλωμάτων, ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης, για διαφορετικά ύψη τοιχώματος: (x) $2b=800 \mu m$, (□) $2b=400 \mu m$ και (▲) $2b=200 \mu m$.

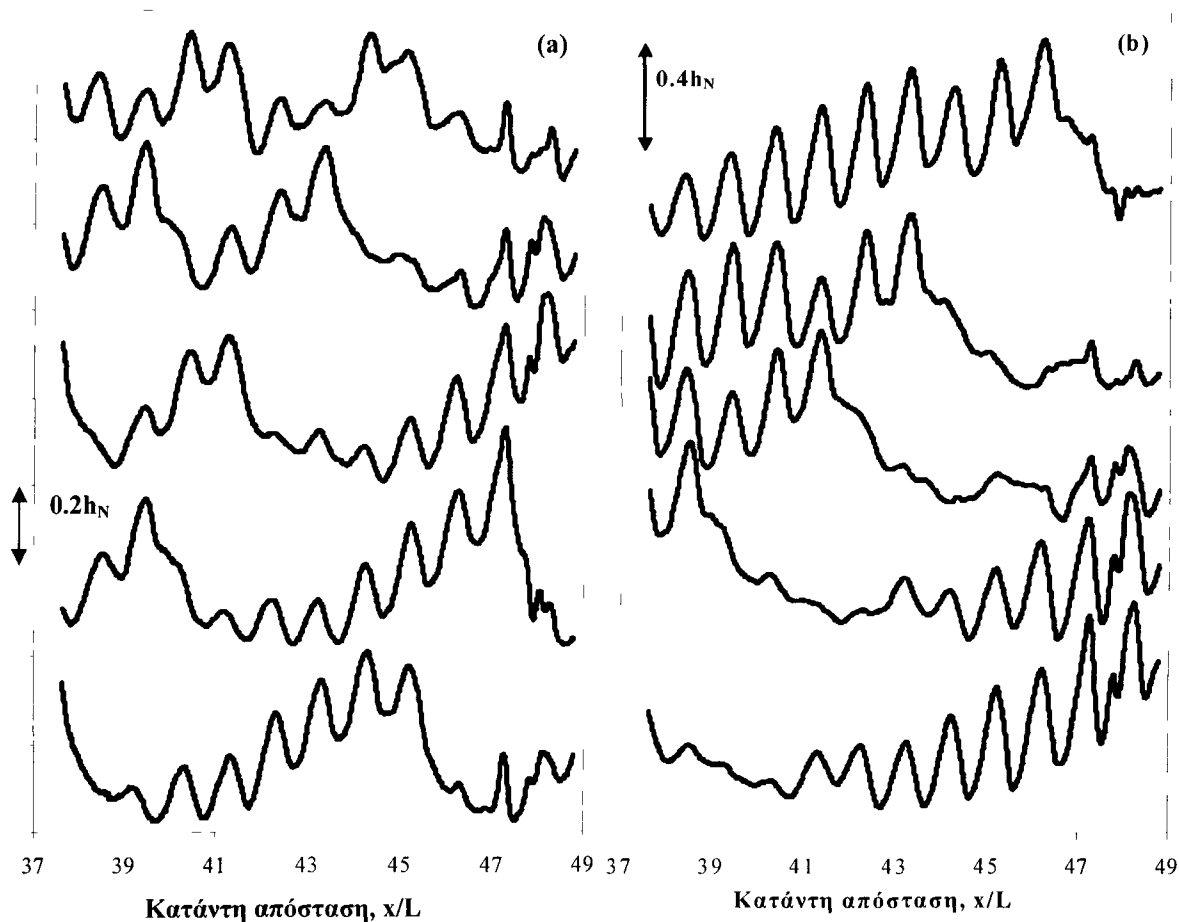
5.3 Πλήρως ανεπτυγμένη ροή με κύματα

5.3.1 Μορφολογία οδεδόντων κυμάτων

Όπως είναι γνωστό (Chang 1994), η ροή κατά μήκος ενός επιπέδου κεκλιμένου τοιχώματος είναι συναγωγικά ασταθής πέρα από έναν κρίσιμο αριθμό Re. Λόγω της αστάθειας δημιουργούνται και αναπτύσσονται κύματα με ένα ευρύ φάσμα μηκών, το οποίο είναι από πολύ μικρό μέχρι και άπειρο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η πρωταρχική αστάθεια της γραμμικής θεωρίας εξελίσσεται σε μοναχικά κύματα μέσω μιας μη – γραμμικής διαδικασίας γένεσης και κλειδώματος των φάσεων των πλευρικών ιδιομορφών (Liu et al. 1993 Chang et al. 1995).

Διαδοχικές κορυφές αλληλεπιδρούν (κυρίως μέσω φαινομένων συγχώνευσης τα οποία προκαλούνται από τη γραμμική εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το ύψος (Vlachogiannis & Bontozoglou 2001, Chang et al. 1995, Liu et al. 1994)) με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί κατάντη της ροής μια ψευδο – στατική σειρά από χωρικά ακανόνιστα σχεδόν μοναχικά κύματα τα οποία χαρακτηρίζονται από μια μέση συχνότητα εμφάνισης (Chang et al 2002).

Στα πειράματα τα οποία έγιναν στην παρούσα εργασία για ροή πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, η μη-γραμμική ανάπτυξη των κυμάτων επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση των οδουσών διαταραχών με τη στατική ροή. Επίσης, η πλήρως ανεπτυγμένη ροή αποτελείται από μια σειρά κυμάτων τα χαρακτηριστικά των οποίων διαφέρουν κατά πολύ από τα αντίστοιχα που αναπτύσσονται σε επίπεδο τοίχωμα. Η μορφή των κυμάτων κατάντη του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος καθορίζεται από την αλληλεπίδρασή τους με τη στατική βασική ροή. Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω στο σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η ελεύθερη επιφάνεια κατάντη της ροής. Οι διαδοχικές γραμμές απέχουν χρονικά 0,1 sec. Η μορφή των κορυφών αυτών πλησιάζει τη μορφή των μοναχικών κυμάτων με απότομο μπροστινό μέρος και πιο ομαλή ουρά κύματος η οποία χάνει ύψος αργά. Συγχρόνως, η μικρής κλίμακας διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας, λόγω του συντονισμού της με το τοίχωμα, υπερτίθεται στο μεγαλύτερο μέρος του μήκους του μοναχικού κύματος και ιδιαίτερα στο πίσω τμήμα (ουρά κύματος).



Σχήμα 5.10: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατάντη της ροής σε 5 διαδοχικές χρονικές στιγμές, για ροή σε γωνία κλίσης $\varphi=5,4^\circ$. Η χρονική απόσταση μεταξύ των προφίλ είναι $\Delta t=0,1$ sec (a) $Re=76$ (b) $Re=113$.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η θέση των κορυφών και των κοιλιοτήτων που εμφανίζονται στην ουρά του κύματος λόγω της αλληλεπίδρασης με τη στατική δομή, παραμένει σταθερή στον χώρο καθώς τα κύματα φαίνεται να περνάνε από πάνω τους (σύγκριση των γραμμών για διαδοχικές χρονικές στιγμές). Αυτό αποτελεί απόδειξη ότι οι διακυμάνσεις πράγματι δημιουργούνται λόγω της στατικής δομής. Συγχρόνως, παρατηρούμε ότι το ύψος των διακυμάνσεων ποικίλει κατά μήκος της ουράς και πιο συγκεκριμένα, είναι μεγαλύτερο πίσω από την κορυφή και μειώνεται σταδιακά όσο πλησιάζει το υπόστρωμα. Το παραπάνω αποτέλεσμα μπορεί να εξηγηθεί με βάση το γεγονός ότι ο τοπικός αριθμός Re μειώνεται από την κορυφή στην ουρά. Τη στιγμή, λοιπόν, που το ύψος της στατικής κυματοειδούς διαμόρφωσης είναι ανάλογο του αριθμού Re , είναι αναμενόμενη αυτή η εξάρτηση.

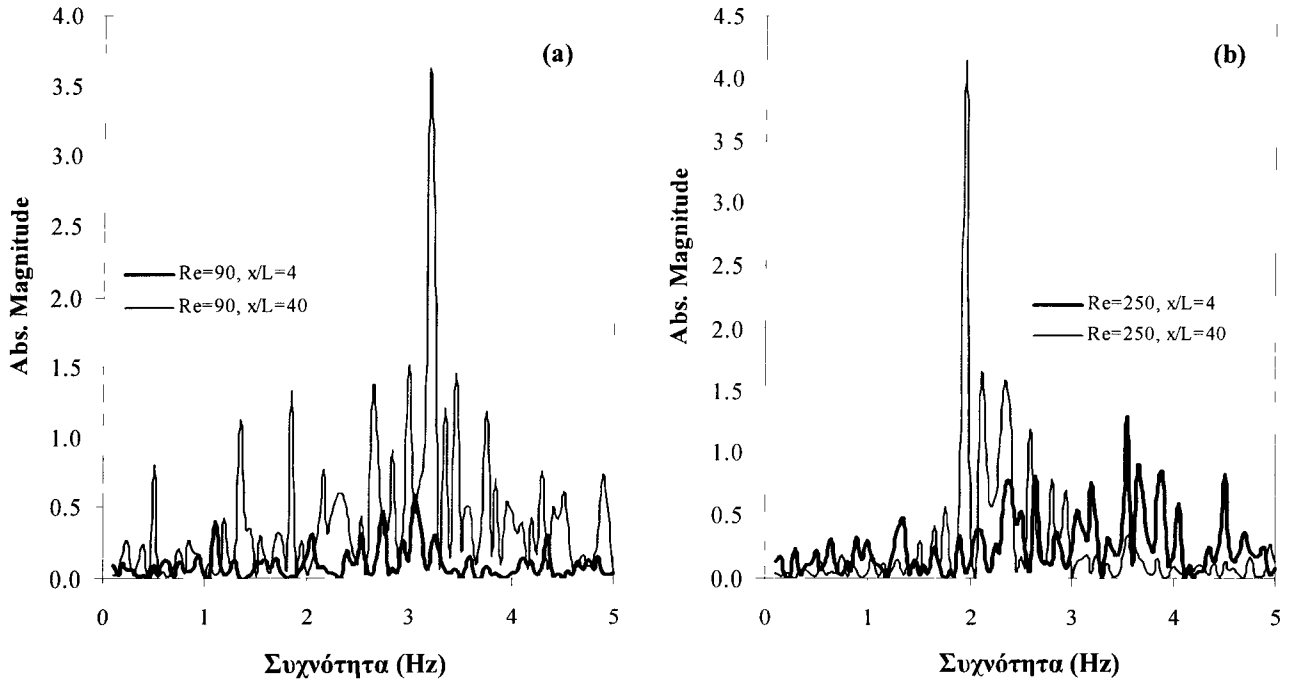
Οι κορυφές των κυμάτων, καθώς προχωρούν κατάντη του καναλιού αλληλεπιδρούν με τη στατικά διαμορφωμένη ελεύθερη επιφάνεια μπροστά τους. Αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης αυτής, είναι η απουσία των χαρακτηριστικών μικρών κυματισμών στο μπροστινό μέρος των μοναχικών κυμάτων. Η αλληλεπίδραση των κυμάτων με την στατική δομή η οποία παρατηρείται και στα δύο σχήματα 5.10a,b, αποτελείται από επαναλαμβανόμενες συγχωνεύσεις μικρού μεγέθους, κατά τη διάρκεια των οποίων οι οδεύουσες κορυφές υπερτίθενται της βασικής στατικής ροής. Αυτή η φαινομενικά ασήμαντη λεπτομέρεια φαίνεται να επηρεάζει έντονα τόσο το μέγεθος όσο και τη συχνότητα των διαταραχών, όπως θα φανεί στην επόμενη παράγραφο. Μια άμεση συνέπεια της παραπάνω αλληλουχίας συγχωνεύσεων είναι η έλλειψη μόνιμων λύσεων. Έτσι, τα πλήρως ανεπτυγμένα κύματα που παρατηρούνται εδώ δεν αντιμετωπίζονται θεωρητικά από τον μετασχηματισμό $\partial/\partial t = -C\partial/\partial x$ των εξισώσεων που τα διέπουν, ο οποίος αποδείχθηκε πολύ χρήσιμος στην μελέτη κυμάτων πάνω σε επίπεδο τοίχωμα (Trifonov & Tsvetodub 1991).

5.3.2 Επίδραση της μορφολογίας του τοιχώματος στην συχνότητα και στο μέγεθος των οδευόντων κυμάτων

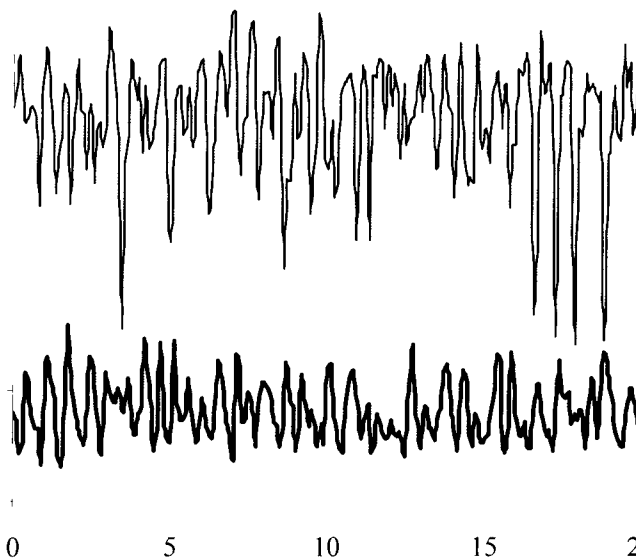
Ένα εντυπωσιακό αποτέλεσμα της χρήσης του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος είναι η επίδραση που έχει στη συχνότητα των εμφανιζόμενων κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα κύματα τα οποία δημιουργούνται από τον φυσικό θόρυβο εμφανίζονται με μια κανονικότητα ως προς το χρόνο. Το αποτέλεσμα αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό με τη μελέτη του φάσματος συχνοτήτων της ελεύθερης επιφάνειας σε διάφορες κατά μήκος αποστάσεις. Το προαναφερόμενο φάσμα απεικονίζεται στα διαγράμματα 5.11a,b για γωνία κλίσης $\varphi=5,4^\circ$ και $Re=90$ και 250 αντίστοιχα, και δείχνει την αλλαγή μεταξύ $x=4L$ (πρώτα μήκη κύματος του καναλιού) and $x=40L$ (τελευταία μήκη κύματος). Είναι εμφανές ότι στα τελευταία μήκη κύματος υπάρχει μια επικρατούσα συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τον αριθμό Re . Η συμπεριφορά αυτή απέχει πολύ από το ευρύ φάσμα συχνοτήτων που εμφανίζεται λόγω των χωρικά ακανόνιστων μοναχικών κυμάτων στη ροή σε επίπεδο τοίχωμα, η οποία δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από μια συχνότητα. Διευκρινιστικά, αναφέρεται σε αυτό το σημείο ότι τόσο στα πειράματα πάνω από επίπεδο τοίχωμα όσο και σε αυτά πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο έχουμε την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου και καμίας άλλης διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας.

Μάλιστα, η προσθήκη της διαμόρφωσης στο τοίχωμα όχι μόνον κανονικοποιεί τη ροή, αλλά συγχρόνως αυξάνει το μέγεθος των κυμάτων. Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζεται αυτή η

παρατήρηση σε διαγράμματα της χρονοσειράς της ελεύθερης επιφάνειας πάνω από επίπεδο και πάνω από περιοδικό τοίχωμα με ύψος ορθογωνικής διαμόρφωσης 800 μm . Και οι δύο χρονοσειρές πάρθηκαν στην ίδια απόσταση από την αρχή του καναλιού για τις ίδιες συνθήκες ροής ($\varphi=3,4^\circ$, $Re=200$). Είναι προφανές ότι η προσθήκη της περιοδικής διαμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα δραματική αύξηση του ύψους των κυμάτων. Το παραπάνω γεγονός φαίνεται να έχει σχέση με τις συνεχείς αλληλεπιδράσεις των κυμάτων με τη στατική βασική ροή.



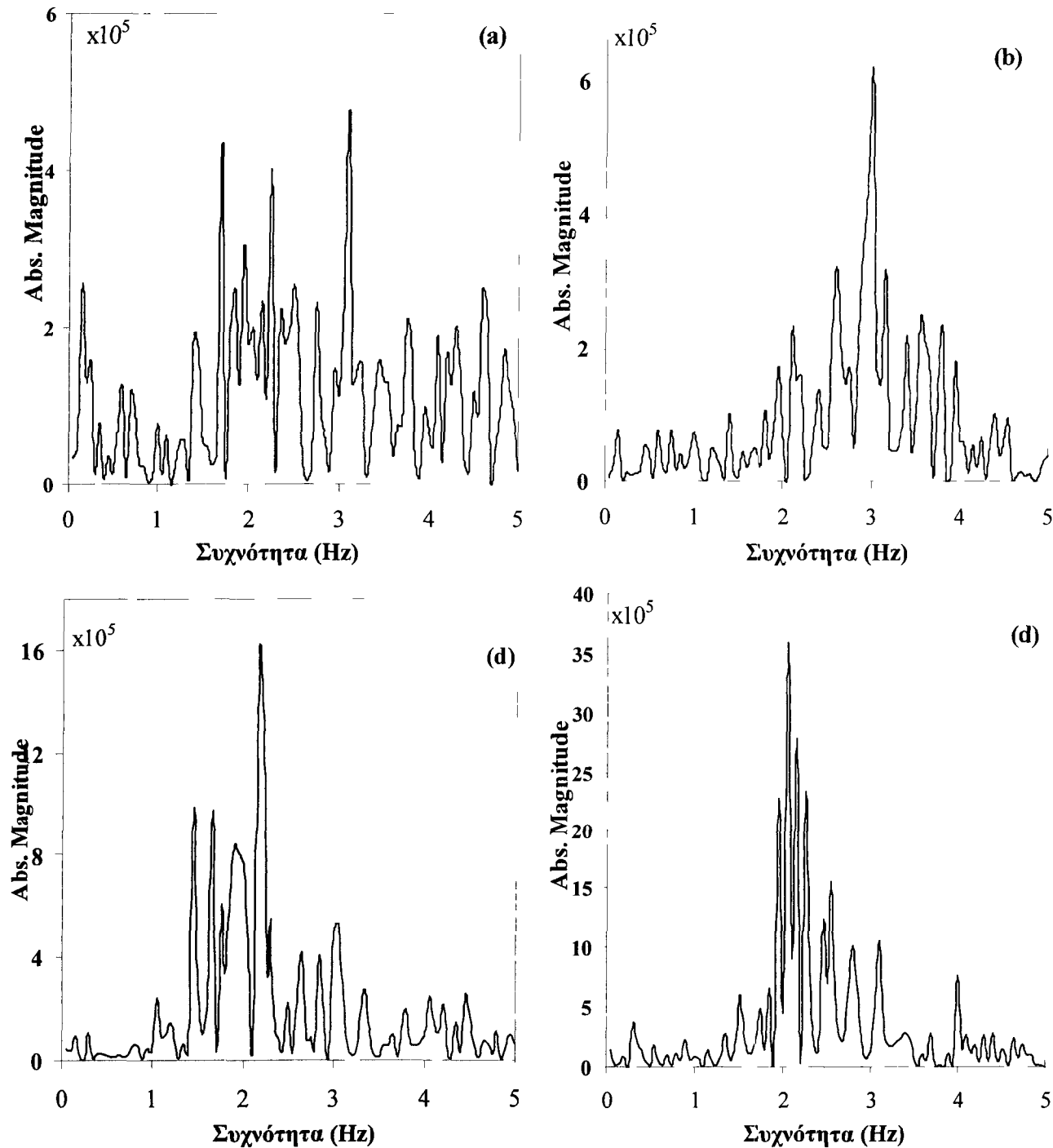
Σχήμα 5.11: Το φάσμα συχνοτήτων των χρονοσειρών, $h(x_o, y_o, t)$, σε διαφορετικές κατόντη αποστάσεις (x_o, y_o) . (a) $Re=90$, $\varphi=5,4^\circ$ (b) $Re=250$, $\varphi=5,4^\circ$.



Σχήμα 5.12: Χρονική μεταβολή του πάχους του υμένα, $h(x_o, y_o, t)$, σε $Re=200$, $\varphi=3,4^\circ$ για: (—) επίπεδο υμένα, (---) περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης $2b=800 \mu\text{m}$.

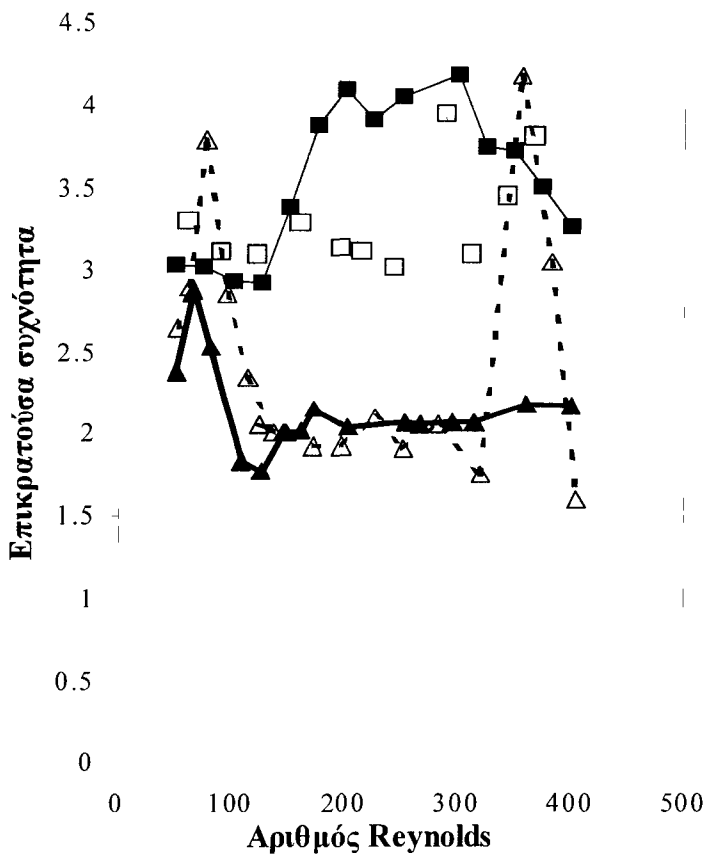
Έχοντας αναλύσει την επίδραση του περιοδικού τοιχώματος στην κανονικότητα και το μέγεθος των κυμάτων, επικεντρωθήκαμε σε πιο λεπτομερή εξέταση της επίδρασης του ύψους

της διαμόρφωσης. Τα σχήματα 5.13a,b,c,d παρουσιάζουν το φάσμα συχνοτήτων για ροή σε επίπεδο και στα τρία περιοδικά διαμορφωμένα τοιχώματα αντίστοιχα. Και τα τέσσερα διαγράμματα αντιστοιχούν σε ίδιες συνθήκες ροής. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει επικρατούσα συχνότητα εμφάνισης κυμάτων στην περίπτωση του επίπεδου τοιχώματος, ενώ αντίθετα για τα περιοδικά διαμορφωμένα εμφανίζεται σταδιακά με την αύξηση του ύψους διαμόρφωσης του τοιχώματος (στα σχήματα 5.13a έως d, να ληφθεί υπόψη η διαφορά στην κλίμακα του y άξονα).



Σχήμα 5.13: Σύγκριση του χρονικού μετασχηματισμού Fourier του τοπικού πάχους του υμένα για επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα (a) επίπεδο τοίχωμα, (b) $2b=200 \mu\text{m}$, (c) $2b=400 \mu\text{m}$, (d) $2b=800 \mu\text{m}$. Σε όλες τις περιπτώσεις η κατάντη απόσταση είναι $x/L=45$, $Re=175$ και $\varphi=3,4^\circ$

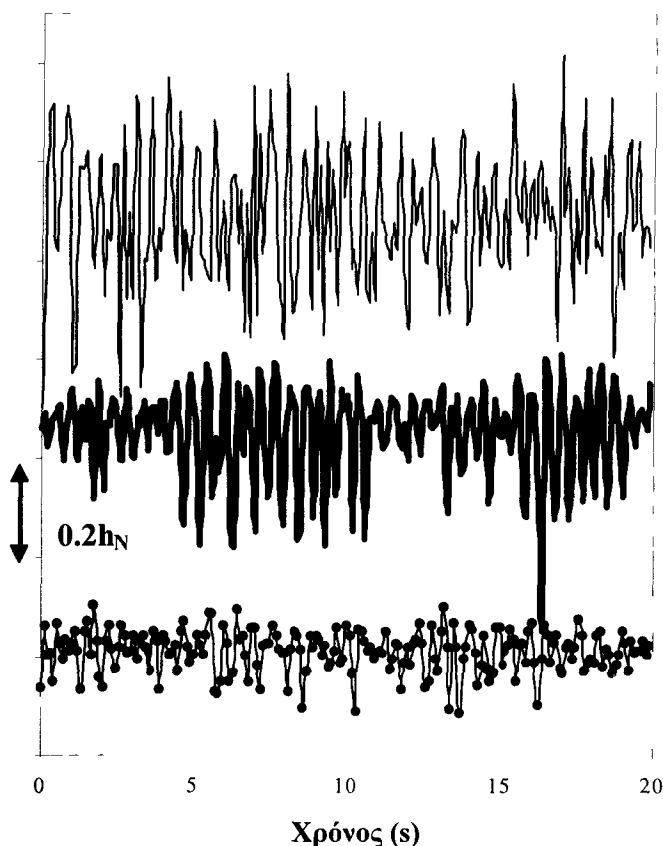
Η τιμή της επικρατούσας συχνότητας εμφάνισης κυμάτων είναι συνάρτηση του αριθμού Re , όπως γίνεται εμφανές από το σχήμα 5.14. Το επίπεδο τοίχωμα χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση συχνότητας στα 3-4 Hz, της οποίας η ένταση είναι μόνο ελαφρώς υψηλότερη από την ένταση των υπόλοιπων αρμονικών (απουσία επικρατούσας συχνότητας). Το τοίχωμα με το χαμηλότερο ύψος διαμόρφωσης παρουσιάζει μια συστηματική μείωση της (ελαφρά επικρατούσας) συχνότητας σχεδόν για όλο το εύρος των αριθμών Re . Αυξάνοντας το ύψος της διαμόρφωσης του τοιχώματος στα 400 και 800 μm , έχουμε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας ισχυρώς επικρατούσας συχνότητας κυμάτων, η οποία για ένα μεγάλο εύρος αριθμών Re είναι σταθερή, γύρω στα 1,5-2 Hz. Επομένως, φαίνεται ότι η πλήρης κανονικοποίηση της συχνότητας εμφάνισης των μοναχικών κυμάτων απαιτεί ένα ελάχιστο ύψος διαμόρφωσης τοιχώματος περίπου 400 μm .



Σχήμα 5.14: Η επικρατούσα συχνότητα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier, ως συνάρτηση του Re , για $\phi=5,4^\circ$ και: (■) επίπεδο τοίχωμα, (□) $2b=200 \mu\text{m}$, (▲) $2b=400 \mu\text{m}$, (Δ) $2b=800 \mu\text{m}$.

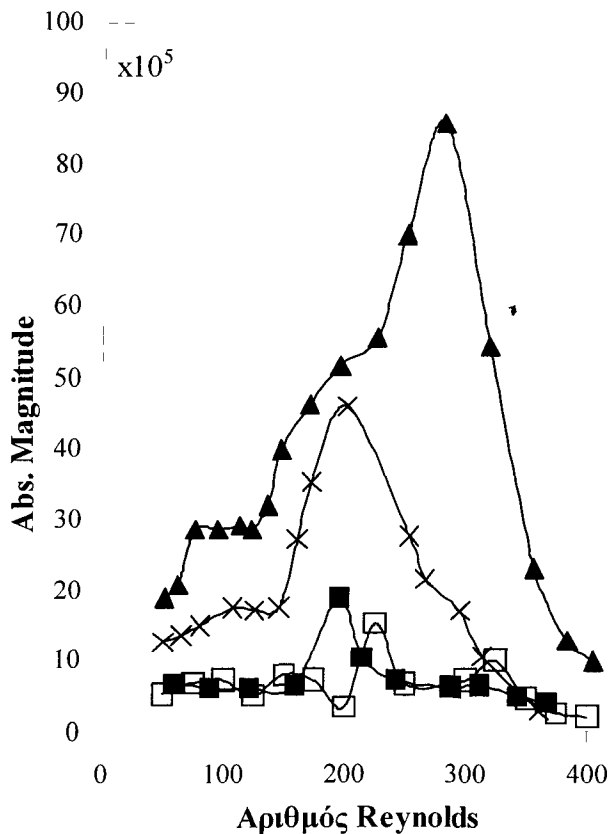
Το ύψος της διαμόρφωσης έχει επίσης άμεση επίδραση στο μέγεθος των κορυφών όπως αποδεικνύεται και από το σχήμα 5.15. Στην περίπτωση αυτή, συγκρίνονται οι χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας κάτω από τις ίδιες συνθήκες ροής αλλά για διαφορετικά ύψη κύματος. Είναι εμφανές ότι το μέσο ύψος των οδοντών διαταραχών αυξάνεται κατά πολύ με την αύξηση του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Ποσοτική σύγκριση είναι δυνατόν να επιτευχθεί υπολογίζοντας το φάσμα συχνότητων των παραπάνω χρονοσειρών, θεωρώντας το απόλυτο μέγεθος της επικρατούσας αρμονικής ως έναν καλό δείκτη του μέσου ύψους του κύματος. Σχετικά δεδομένα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.16, και αποδεικνύουν ότι το μέγεθος των κυμάτων κατάντη του καναλιού είναι ανάλογο του ύψους των διακυμάνσεων του τοιχώματος για όλο το φάσμα των Re που εξετάστηκαν. Για ένα συγκεκριμένο ύψος

διαμόρφωσης, το μέγεθος των κυμάτων αρχικά αυξάνεται συναρτήσει του Re και μετά σταδιακά μειώνεται όσο ο $Re \rightarrow O(10^3)$, όπου δομές υψηλής συχνότητας (πρόδρομη τύρβη) αρχίζουν να καθορίζουν τη δυναμική της ελεύθερης επιφάνειας. Προσεκτική παρατήρηση του σχήματος 5.16 κάνει εμφανή την ύπαρξη τριών κορυφών στο διάγραμμα, σε αριθμούς Re περίπου 100, 200 και 300. Η θέση αυτών των μεγίστων είναι κοινή και για τις τρεις καμπύλες, αλλά η έντασή τους διαφέρει κατά πολύ. Για παράδειγμα, το μέγιστο σε $Re \sim 300$ είναι ελάχιστα εμφανές για $2b = 400$ μm και γίνεται πολύ πιο ισχυρό για $2b = 800$ μm .



Σχήμα 5.15: Χρονική μεταβολή του πάχους του υμένα ως συνάρτηση του $Re=300$, για $\varphi=3,4^\circ$ και διαφορετικά ύψη διαμόρφωσης τοιχώματος: (—●—) $2b=200$ μm , (—) $2b=400$ μm , (---) $2b=800$ μm .

Μια πλήρης εξήγηση δεν μπορεί να δοθεί για την παρατηρούμενη ισχυρή εξάρτηση του μεγέθους των κυμάτων από το ύψος του τοιχώματος. Απλά υποθέτουμε ότι η συμπεριφορά αυτή συνδέεται με τις συνεχείς αλληλεπιδράσεις των κυμάτων με την παραμορφωμένη βασική ροή. Πιο συγκεκριμένα, προσπαθώντας να δώσουμε μια εξήγηση για την διαφορά στις καμπύλες του διαγράμματος 5.16 μεταξύ των 400 και 800 μm (ιδιαίτερα στους υψηλούς Re), αναφέρουμε την πιθανότητα να παίζουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά αυτή οι υψηλότερες αρμονικές της ελεύθερης επιφάνειας της βασικής ροής. Άλλωστε, όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, η αύξηση της 2^{ns} και 3^{ns} αρμονικής κατά μια τάξη μεγέθους, είναι η βασική διαφορά μεταξύ των στατικών μορφών της ελεύθερης επιφάνειας για τοιχώματα ύψους 400 και 800 μm . Επομένως, φαίνεται βάσιμη η υπόθεση ότι οι υψηλότερες αρμονικές δίνουν ενέργεια στα κύματα, με αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους τους.

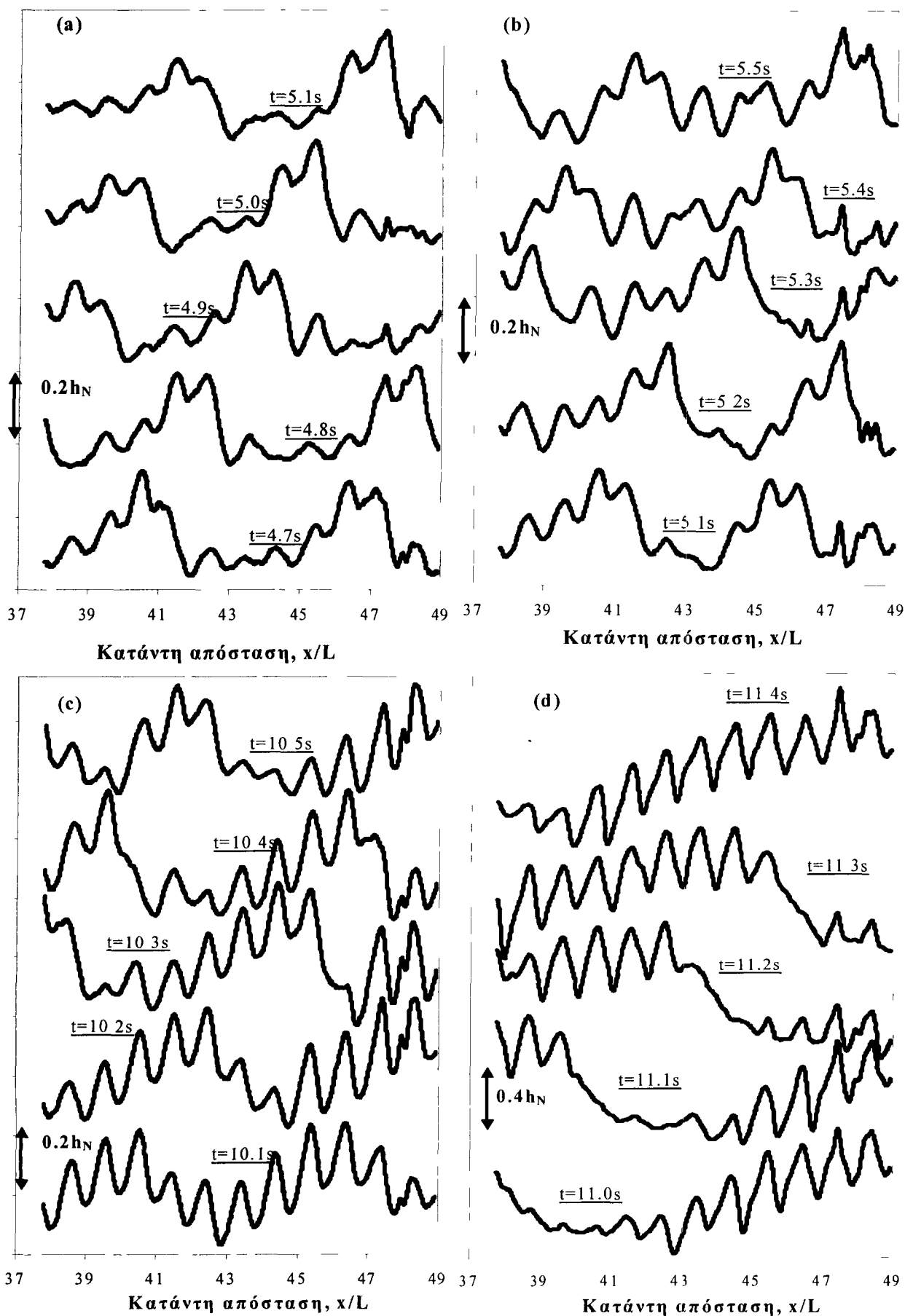


Σχήμα 5.16: Το μέγεθος της επικρατούσας αρμονικής ως συνάρτηση του αριθμού Re για $\varphi=5,4^\circ$: (□) επίπεδο τοίχωμα, (■) $2b=200 \mu\text{m}$, (x) $2b=400 \mu\text{m}$, (▲) $2b=800 \mu\text{m}$.

5.3.3 Εξέλιξη της μορφολογίας της ελεύθερης επιφάνειας με αύξηση του Re

Η δομή των διαδοχικών κυμάτων που προκύπτει από τον φυσικό θόρυβο αλλάζει συστηματικά με τον αριθμό Re . Αυτή η αλλαγή, **(a)** συνδέεται τις αλλαγές που υφίσταται η βασική ροή με τον Re , και **(b)** σχετίζεται με το φαινόμενο της κανονικοποίησης και αύξησης του μεγέθους των κυμάτων που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Όσον αφορά το **(a)**, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, αυξάνοντας τον Re το ύψος της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας αυξάνεται εκθετικά μέχρι μια μέγιστη τιμή όπου εμφανίζεται η τρισδιάστατη δομή με τα εγκάρσια βαθουλώματα και υψώματα. Όσον αφορά το **(b)**, παρατηρούμε ότι τα φαινόμενα τα οποία παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο απαιτείται να συμπληρωθούν με μια πληρέστερη κατανόηση της πραγματικής δομής της κυματοσειράς που δημιουργείται.

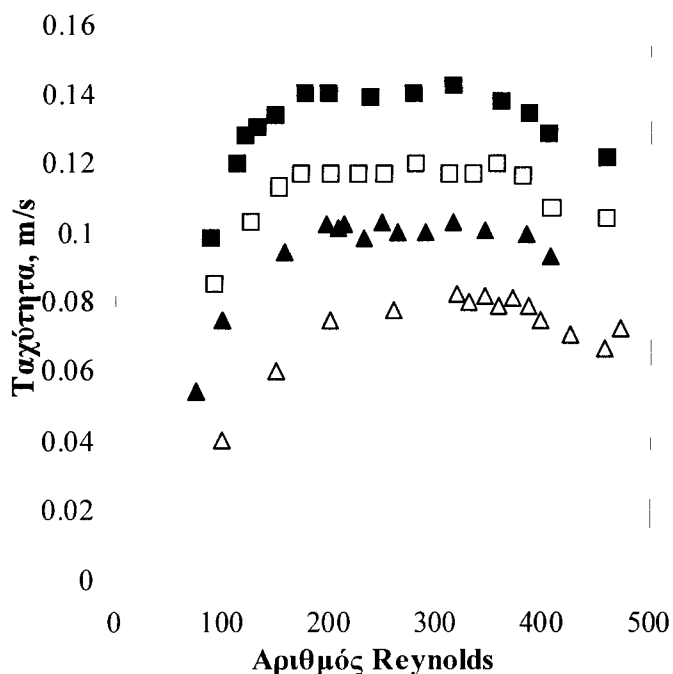
Τα σχήματα 5.17a έως d μας δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τα παραπάνω. Η πληροφορία αυτή δίνεται μέσω των διαδοχικών μορφών της ελεύθερης επιφάνειας σε ροή νερού με γωνία κλίσης $\varphi=5,4^\circ$. Σε σχετικά χαμηλό $Re=51$, τα διαδοχικά κύματα είναι μικρά και απομονωμένα μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να θεωρηθούν ως σχεδόν μοναχικά κύματα τα οποία υπερτίθενται μιας σχετικά ελαφρώς διαμορφωμένης επιφάνειας της βασικής ροής. Αυξάνοντας τον Re , τα κύματα σταδιακά αναπτύσσονται σε ύψος και μήκος, όπως αποδεικνύεται από τα διαγράμματα 5.17b,c ($Re=62, 91$).



Σχήμα 5.17: Διαδοχικά προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε γωνία κλίσης $\varphi=5,4^\circ$. (a) $Re=51$, (b) $Re=62$ (c) $Re=91$, (d) $Re=251$.

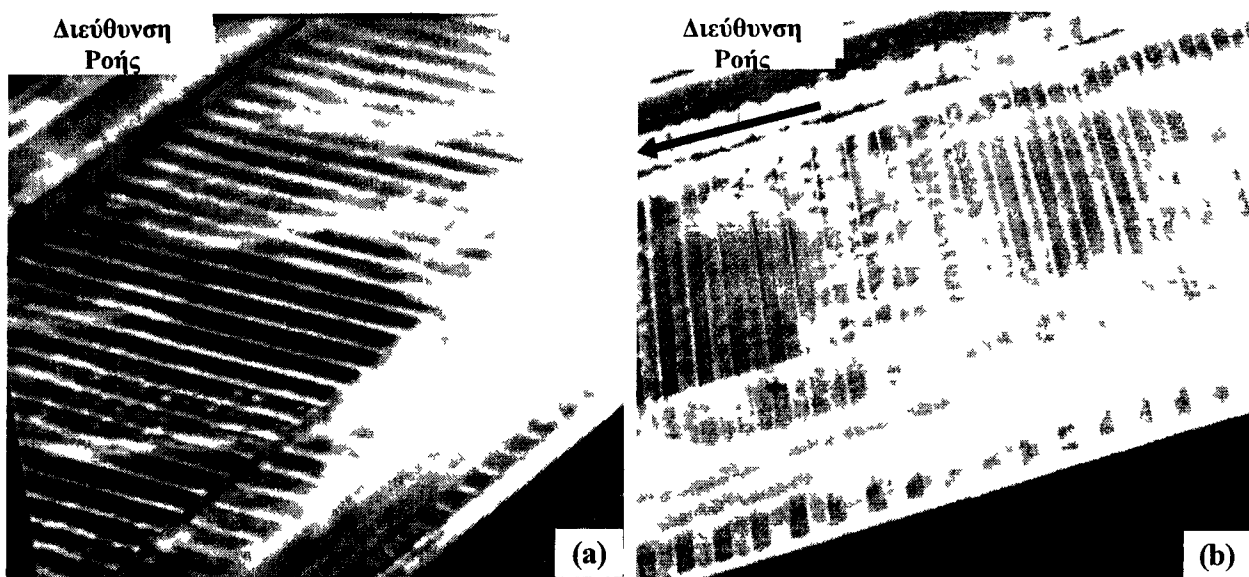
Η αλλαγή με αύξηση του Re αποδίδεται στην αλληλεπίδραση με την εντονότερα διαμορφωμένη ελεύθερη επιφάνεια της ροής. Τα μικρού μεγέθους φαινόμενα συγχώνευσης ενισχύουν τόσο το ύψος όσο και το μήκος των κυμάτων, γεγονός το οποίο εμφανίζεται ακόμα εντονότερα σε μεγαλύτερους αριθμούς Re (σχήμα 5.10b αναφερόμενο σε $Re=113$). Με την αύξηση του μήκους τους, τα διαδοχικά κύματα πλησιάζουν μεταξύ τους, και σε κάποιες περιπτώσεις κύματα εμφανίζεται να υπάρχουν στην υπερυψωμένη ουρά του προηγούμενου. Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν στην έναρξη της κανονικοποίησης της σειράς των διαδοχικών κυμάτων που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Μια επιπλέον παρατήρηση για την περιοχή αυτή (η οποία συμβάλει στην ερμηνεία της κανονικοποίησης της σειράς των κυμάτων που προκαλούνται από τον τυχαίο θόρυβο) είναι η ανεξαρτησία της φασικής ταχύτητας των κυμάτων από τον αριθμό Re . Η παρατήρηση αυτή προκύπτει και από το διάγραμμα 5.18, όπου η φασική ταχύτητα των διαδοχικών κυμάτων πάνω από κανάλι με ύψος διαμόρφωσης $800 \mu\text{m}$ δίνεται ως συνάρτηση του αριθμού Re για διάφορες γωνίες κλίσης. Ένα εκτενές πλατό είναι εμφανές, το οποίο ξεκινάει σε $Re=150-200$ και εκτείνεται μέχρι $Re=350-400$. Αυτό το πλατό μπορεί να εξηγηθεί ως συμβιβασμός δύο αντιτιθέμενων τάσεων. Από τη μία πλευρά, αυξάνοντας τον Re τα κύματα τείνουν να κινηθούν γρηγορότερα. Από τη άλλη, η στατική ελεύθερη επιφάνεια αποκτά μεγαλύτερο ύψος με την αύξηση του Re , και επομένως αλληλεπιδρά ισχυρά με τα κινούμενα κύματα με αποτέλεσμα να τα επιβραδύνει. Επομένως, φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι η κανονική συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων ($1,5-2 \text{ Hz}$), που παρατηρήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι αποτέλεσμα της δημιουργίας σειράς διαδοχικών κυμάτων μεγάλου μήκους, τα οποία κινούνται με σταθερή φασική ταχύτητα λόγω της αλληλεπίδρασή τους με το στατικά διαμορφωμένο υπόστρωμα.



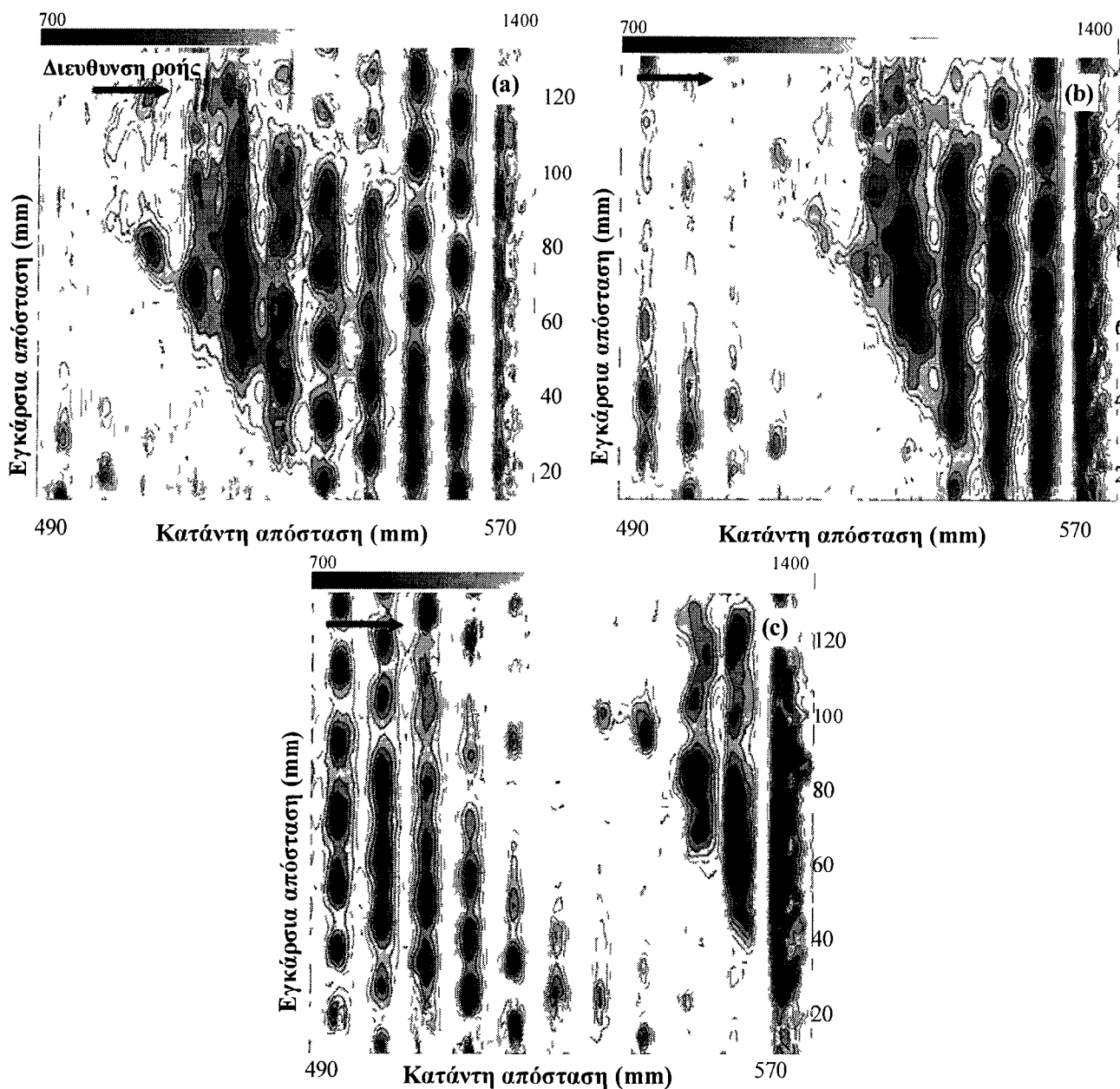
Σχήμα 5.18: Η διαστατική φασική ταχύτητα των διαδοχικών κυμάτων κατά μήκος περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος με ύψος διαμόρφωσης $2b=800 \mu\text{m}$, ως συνάρτηση του αριθμού Re . Τα δεδομένα αντιστοιχούν σε γωνίες κλίσης $\phi=1,3^\circ$ (Δ), $2,6^\circ$ (\blacktriangle), $3,4^\circ$ (\square) και $5,4^\circ$ (\blacksquare).

Στους υψηλότερους αριθμούς Re που εξετάστηκαν, η βασική ροή αποκτά μικρού – μεγέθους τρισδιάστατες δομές με την εμφάνιση εγκάρσιων βαθουλωμάτων. Αρχικά, τα βαθουλώματα εμφανίζονται μόνο πίσω από την κορυφή των διαδοχικών κυμάτων (σχήμα 5.19a), όπου ο τοπικός αριθμός Re είναι υψηλότερος. Περαιτέρω αύξηση της παροχής έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη κάλυψη της ελεύθερης επιφάνειας με τις τρισδιάστατες δομές (σχήμα 5.19b). Μετά και από αυτό το σημείο, τα ίδια τα κύματα γίνονται τρισδιάστατα, με κάθε μέτωπο να αποτελείται από μια συνένωση στενότερων πεταλοειδών κυμάτων (horse-shoe waves) (σχήμα 5.19b). Παρόλα αυτά, τα διαδοχικά μέτωπα συνεχίζουν να διατηρούν έναν κατά μέσο όρο διδιάστατο χαρακτήρα. Έτσι, η κανονικοποίηση της συχνότητας εμφάνισής τους ισχύει και σε αυτή την περίπτωση. Άλλωστε, η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=251$ (σχήμα 5.17d) είναι παρόμοια με αυτή σε αρκετά χαμηλότερους αριθμούς Re (σύγκριση σχημάτων 5.17d and 5.11b). Η μόνη εμφανής (και αναμενόμενη) διαφορά είναι στις διακυμάνσεις της ουράς οι οποίες προκαλούνται από τη βασική ροή, όπου σε υψηλότερους Re αποκλίνουν περισσότερο από την ημιτονοειδή μορφή.



Σχήμα 5.19 Οπτική παρατήρηση μοναχικών κυμάτων κατά μήκος περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος με ύψος διαμόρφωσης $800 \mu\text{m}$ για (a) $\varphi=3,4^\circ$, $Re=310$ και (b) $\varphi=5,4^\circ$, $Re=300$

Μία απεικόνιση της διέλευσης των κυμάτων και της δημιουργίας της τρισδιάστατης βασικής ροής με τα βαθουλώματα παρουσιάζεται με τη μορφή διαγραμμάτων ισουψών στο σχήμα 5.20a,b,c (οι λευκές περιοχές αντιστοιχούν σε μεγαλύτερο πάχος υμένα). Σε συμφωνία με σχετικές παρατηρήσεις για διδιάστατη ροή, τα κύματα εξαλείφουν σε μεγάλο βαθμό τις δομές της βασικής ροής μπροστά από αυτά, μέσω φαινομένων συγχώνευσης μικρής κλίμακας. Έτσι, τα βαθουλώματα εμφανίζονται μόνο στο υπόστρωμα μεταξύ των κυμάτων και στην ουρά των κυμάτων.



Σχήμα 5.20 Διάγραμμα ισοψιών καμπυλών της ελεύθερης επιφάνειας σε $Re=200$ και $\varphi=5,4^\circ$, στο οποίο φαίνεται η κίνηση ενός κύματος σε 3 διαδοχικές στιγμές οι οποίες απέχουν χρονικά $\Delta t=0,1 \text{ sec}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής λεπτού υμένα υγρού πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο κεκλιμένο τοίχωμα κάτω από την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Κύριος στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν η μελέτη της γραμμικής και μη-γραμμικής εξέλιξης της διαταραχής που επιβάλλεται στην είσοδο του υμένα στο πεδίο μετρήσεων. Για την ευκολότερη ερμηνεία την επίδρασης της διαταραχής μελετήθηκαν περιπτώσεις στις οποίες η διαταραχή ήταν συγκεκριμένης, σταθερής συχνότητας. Για τον σκοπό αυτό έγιναν πειράματα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων (0,167 Hz-5 Hz).

Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης διερευνήθηκε η εξάρτηση της εξέλιξης της ροής νερού και διαλύματος νερού – γλυκερίνης 28% κ.β., από την συχνότητα διαταραχής, πάνω από κεκλιμένο κανάλι μεταβαλλόμενης γωνίας κλίσης από 1,3° έως 7,4° για δύο τοιχώματα ορθογωνικής διατομής με διαφορετικό πλάτος περιοδικής διαμόρφωσης. Παρατηρήθηκε ότι και σε κάθε περίπτωση, τα κύματα αρχικά εμφανίζονται με συχνότητα η οποία ταυτίζεται με αυτή της επιβαλλόμενης διαταραχής. Η περαιτέρω εξέλιξή τους εξαρτάται τόσο από την συχνότητα διαταραχής, όσο και από τον Re . Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα και επιβεβαιώθηκε η σταθεροποιητική επίδραση της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Τέλος, επισημάνθηκαν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων συναρτήσει της συχνότητας διαταραχής και παρατηρήθηκαν συμβάντα τα οποία εμφανίζονται και στη ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα, όπως είναι φαινόμενα συγχώνευσης, γένεση δευτερευόντων κορυφών κ.α.

6.1 Εξάρτηση της εξέλιξης της ροής από την συχνότητα διαταραχής

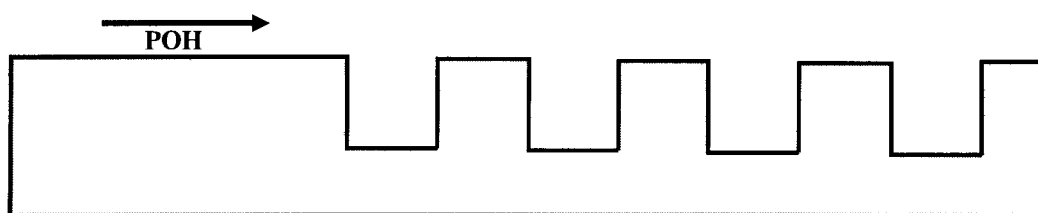
6.1.1 Καθορισμός ευσταθούς και ασταθούς περιοχής

Γνωρίζουμε ότι για την περίπτωση της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα η μη γραμμική ανάπτυξη των κυμάτων είναι συνάρτηση τόσο του αριθμού Reynolds όσο και των χαρακτηριστικών της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Ειδικότερα, σύμφωνα με τους Liu & Gollub (1992) για μικρούς αριθμούς Re ο υμένας είναι ευσταθής ανεξάρτητα της συχνότητας της επιβαλλόμενης διαταραχής. Πέρα από έναν κρίσιμο αριθμό, Re_{cr} , η ροή μεταπίπτει σε ασταθή για χαμηλής συχνότητας διαταραχές, δηλαδή για μεγάλα μήκη κύματος (long wave instability). Αντίστοιχα, για μεγάλες συχνότητες έχουμε ευστάθεια έως υψηλότερους Re . Συνεπώς, πέρα από τον Re_{cr} , η εισαγωγή διαταραχής μικρής συχνότητας έχει σαν αποτέλεσμα ασταθή ροή ενώ η εισαγωγή διαταραχής μεγαλύτερης συχνότητας ($f > f_{cr}$) σταθεροποιεί την ροή. Το παραπάνω γεγονός παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.6. Μάλιστα, σύμφωνα με τους Liu & Gollub (1992) η κρίσιμη συχνότητα f_{cr} που διαχωρίζει την ευσταθή από την ασταθή απόκριση μεταβάλλεται με τον Re σύμφωνα με την σχέση:

$$f_{cr} = \alpha(Re - Re_{cr})^{1/2} \quad (6.1)$$

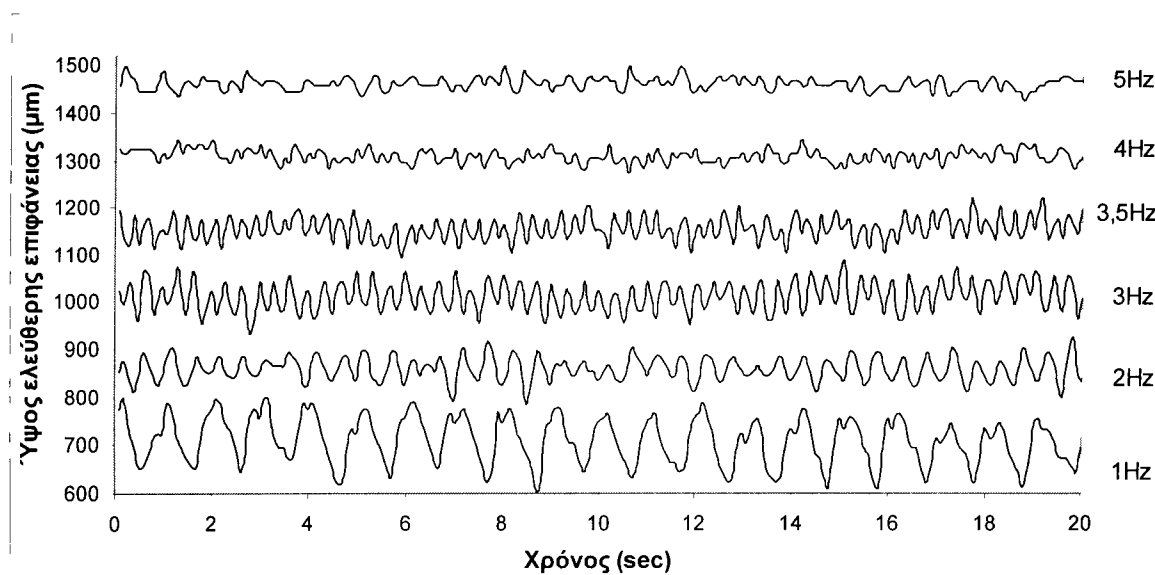
όπου ο συντελεστής α εξαρτάται από τις συνθήκες του πειράματος.

Μέσα στα πλαίσια της προηγούμενης παρατήρησης για το επίπεδο τοίχωμα, έγινε μια προσπάθεια να διερευνηθεί η επίδραση της διαμόρφωσης του τοιχώματος και να καθοριστούν οι αντίστοιχες περιοχές ευστάθειας και αστάθειας. Για να συγκριθούν τα αποτελέσματα του περιοδικού τοιχώματος με αυτά του επίπεδου, έγιναν παράλληλα μετρήσεις ώστε να καθοριστεί το διάγραμμα της κρίσιμης συχνότητας στο επίπεδο τοίχωμα για συνθήκες ίδιες με αυτές που των πειραμάτων στο περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Πιο συγκεκριμένα, η πλάκα πάνω στην οποία έγιναν οι μετρήσεις είχε τη μορφή του σχήματος 6.1, με επίπεδο το κομμάτι στην είσοδο του καναλιού και μετά περιοδική διαμόρφωση. Έτσι λοιπόν πήραμε μετρήσεις της ροής τόσο πάνω από επίπεδο όσο και πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα στις ίδιες συνθήκες ροής.



Σχήμα 6.1: Μορφολογία τοιχώματος με δύο περιοχές μέτρησης διαφορετικής μορφολογίας.

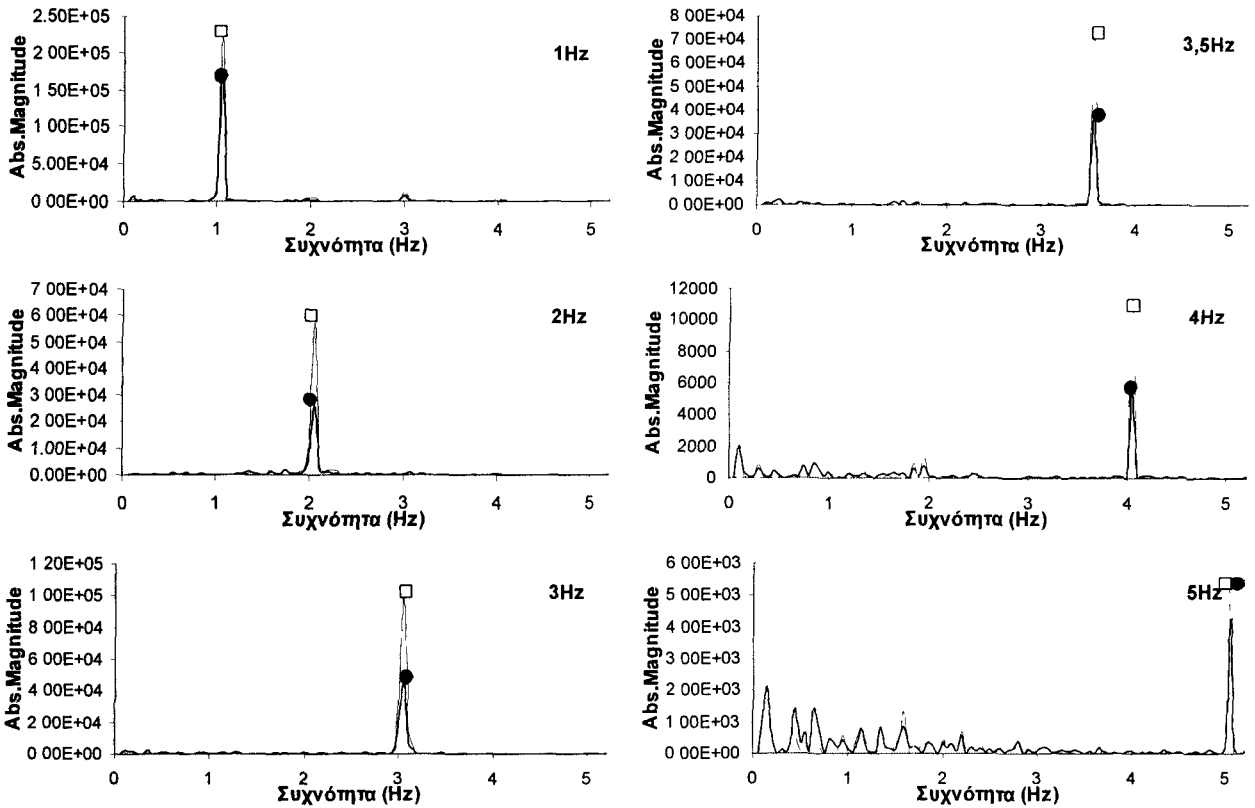
Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του πάχους του υμένα σε ορισμένη θέση, για ροή νερού πάνω από επίπεδο τοίχωμα σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=75$ και 5 διαφορετικές περιπτώσεις εξωτερικής διαταραχής. Το διάγραμμα αυτό μας δίνει τη μορφή της διαταραχής πολύ κοντά στο σημείο εισαγωγής του υμένα στο κανάλι.



Σχήμα 6.2: Χρονική μεταβολή του υμένα για ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα κλίσης $3,4^\circ$ σε $Re=75$ και 5 διαφορετικές περιπτώσεις εξωτερικής διαταραχής.

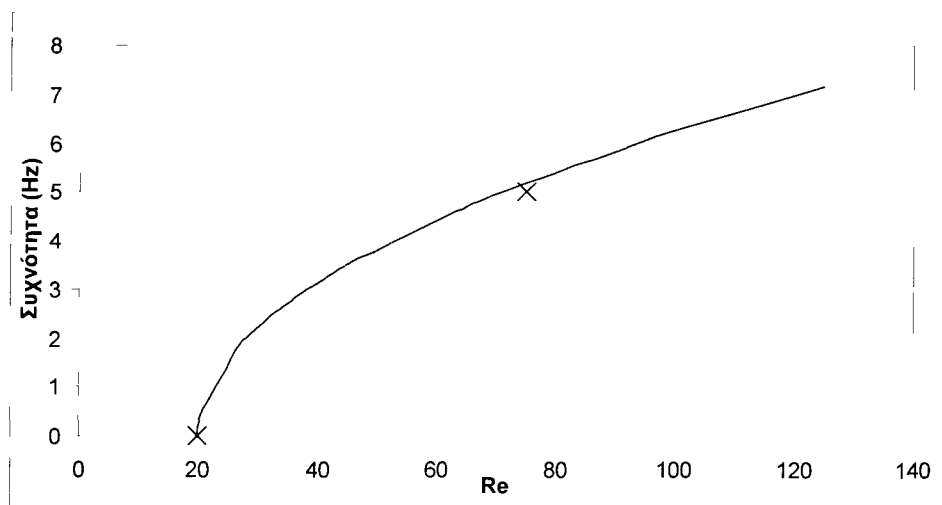
Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται ο χρονικός μετασχηματισμός Fourier στο σημείο εισαγωγής του υμένα στο κανάλι καθώς και σε ένα σημείο πριν το υγρό περάσει στο περιοδικά διαμορφωμένο μέρος του καναλιού, για τις διαφορετικές συχνότητες διαταραχής. Και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται δεδομένα για ροή νερού σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας $3,4^\circ$ και

σε $Re=74$. Επειδή, η συχνότητα διαταραχής των δημιουργούμενων κυμάτων είναι ίδια και στα δύο σημεία, η μέγιστη τιμή της φασματικής ισχύος στη μέτρηση κοντά στην είσοδο του υγρού είναι σημειωμένη με ένα μαύρο κύκλο ενώ το μέγιστο σημείο στη μέτρηση πριν το κυματοειδές τοίχωμα είναι σημειωμένο με ένα άσπρο τετράγωνο, ώστε να γίνει καλύτερα αντιληπτή η ένταση της διαταραχής.



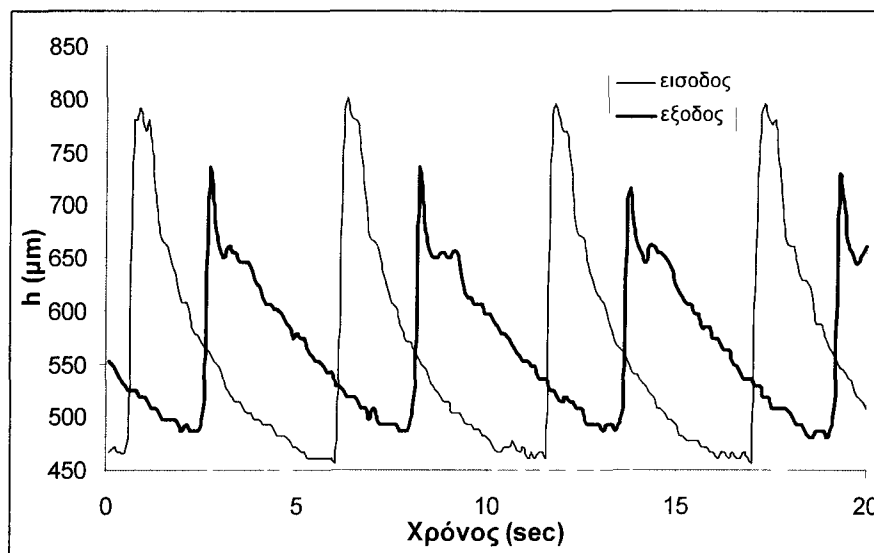
Σχήμα 6.3: Χρονικός μετασχηματισμός Fourier στο σημείο εισαγωγής του υμένα στο κανάλι καθώς και στο σημείο πριν το υγρό περάσει στο περιοδικά διαμορφωμένο μέρος του καναλιού, για τις διαφορετικές συχνότητες διαταραχής. ● μέγιστο σημείο στη μέτρηση κοντά στην είσοδο του υγρού, □ μέγιστο σημείο στη μέτρηση πριν το κυματοειδές τοίχωμα.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.3, για ροή σε συχνότητες από 1 έως 4 η ένταση της βασικής διαταραχής αυξάνεται από την αρχή μέχρι το τέλος του πεδίου μετρήσεων. Η τιμή της μεταβολής της έντασης της διαταραχής μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας, γεγονός το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πλησιάζει η συχνότητα την κρίσιμη τιμή της. Στο τελευταίο διάγραμμα μετασχηματισμού Fourier το οποίο αντιστοιχεί σε 5 Hz οι δύο τιμές είναι σχεδόν ίδιες. Αυτό αποδεικνύει ότι η ζητούμενη συχνότητα για την οποία περνάμε στην ευσταθή περιοχή βρίσκεται λίγο πάνω από τα 5 Hz. Επίσης γνωρίζουμε ότι για ροή νερού σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας $\alpha=3,4^\circ$, ο κρίσιμος Re που χωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή είναι περίπου 20 (εξίσωση 2.23). Έτσι, με δεδομένα 2 σημεία και την μορφή της (σχέση 6.1), μπορεί να προβλεφθεί η κρίσιμη καμπύλη που διαχωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή συναρτήσει του αριθμού Re και της συχνότητας της διαταραχής (αντίστοιχο με αυτό των Liu & Gollub). Η προαναφερόμενη καμπύλη παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 6.4.



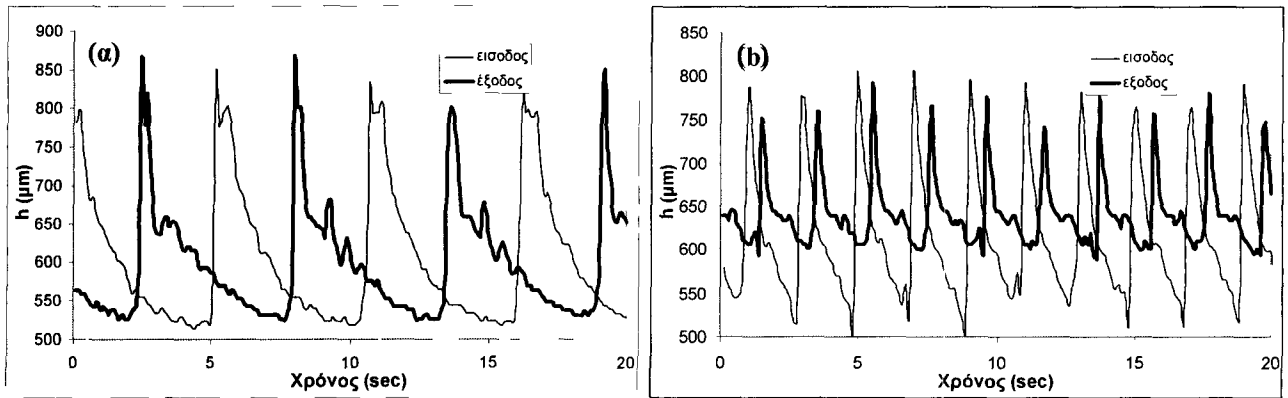
Σχήμα 6.4: Διάγραμμα καθορισμού περιοχής ευστάθειας και αστάθειας για ροή νερού πάνω από επίπεδο τοίχωμα, σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$

Στην περίπτωση ροής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο κανάλι με ύψος διαμόρφωσης 800 μm , ο κρίσιμος αριθμός Re που χωρίζει την ασταθή από την ευσταθή ροή, έχει αποδειχθεί ότι είναι σχεδόν 55 (βλ. διάγραμμα 5.5). Μετρήσεις έγιναν για Re μικρότερο από τον κρίσιμο, περίπου ίσο με 40. Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού και σε ένα σημείο κατάντη της ροής, κοντά στην έξοδο του υμένα από το κανάλι. Οι μετρήσεις έγιναν για γωνία κλίσης $3,4^\circ$ και συχνότητα διαταραχής 0.167 Hz. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, το ύψος της διαταραχής μειώνεται συνεπώς η ροή θεωρείται ευσταθής (αυστηρή αξιολόγηση της γραμμικής ευστάθειας απαιτεί την εισαγωγή διαταραχών απειροστού ύψους, αλλά η εξέλιξη πεπερασμένων διαταραχών θα θεωρηθεί επαρκής ένδειξη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας). Παρόμοιες μετρήσεις σε μεγαλύτερους συχνότητες απέδειξαν ότι η ροή σε αυτόν τον Re είναι ευσταθής ανεξάρτητα της συχνότητας της εξωτερικής διαταραχής.

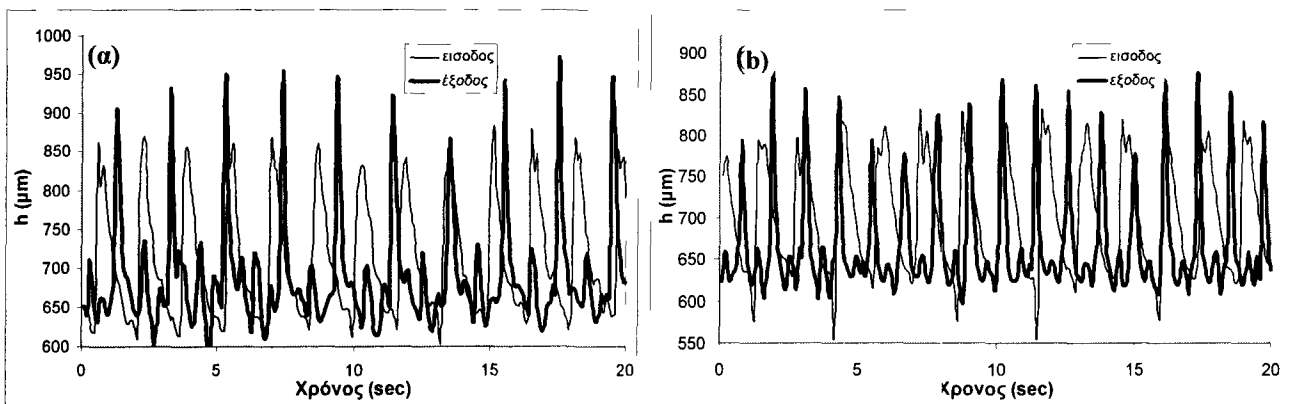


Σχήμα 6.5: Χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο και σε ένα σημείο κοντά στην έξοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού Ροή νερού για γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=40$ και συχνότητα διαταραχής 0,167 Hz

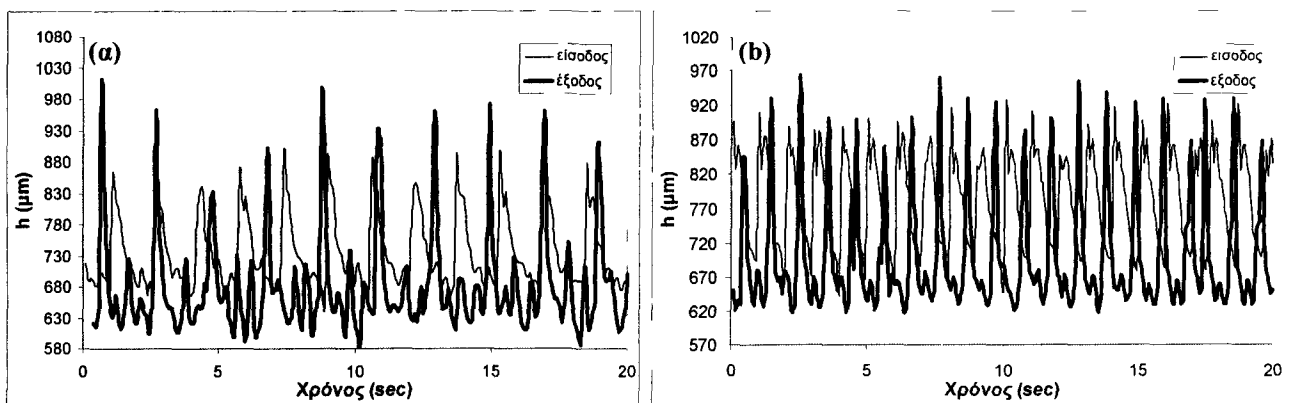
Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για μεγαλύτερους αριθμούς Re . Τα αποτελέσματα για αριθμούς Re 53, 74 και 100 παρουσιάζονται αντίστοιχα στα σχήματα 6.6α και β, 6.7α και β και 6.8α και β.



Σχήμα 6.6: Χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο και σε ένα σημείο κοντά στην έξοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού για ροή νερού με γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=53$ και συχνότητα διαταραχής (α) $0,167$ Hz και (β) $0,5$ Hz



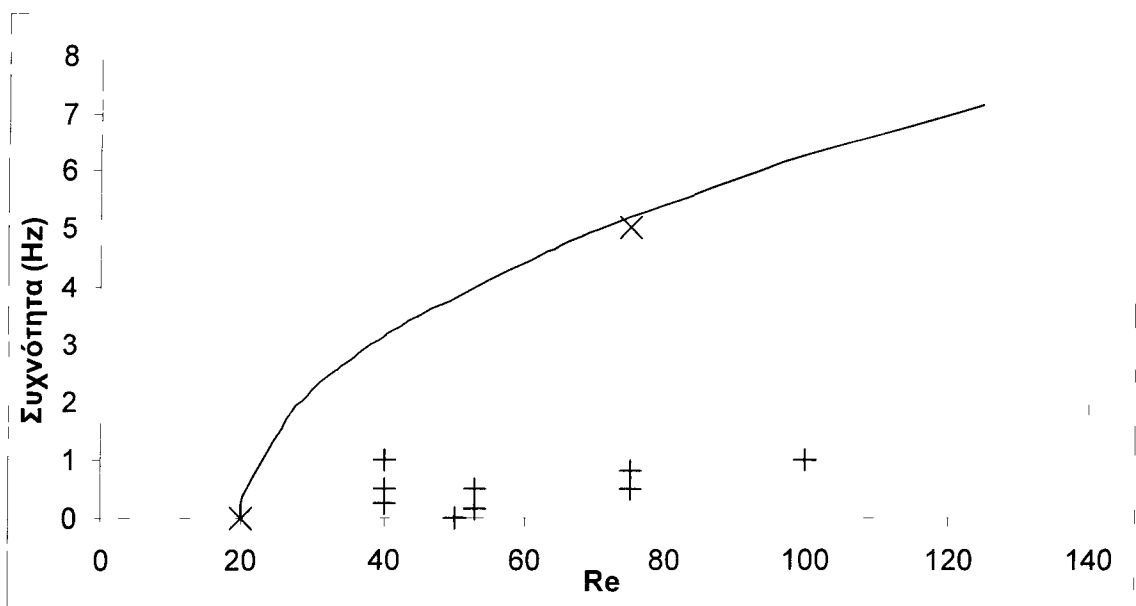
Σχήμα 6.7: Χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο και σε ένα σημείο κοντά στην έξοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού για ροή νερού με γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=75$ και συχνότητα διαταραχής (α) $0,5$ Hz και (β) $0,8$ Hz



Σχήμα 6.8: Χρονική μεταβολή του ύψους του υμένα σε ένα σημείο κοντά στην είσοδο και σε ένα σημείο κοντά στην έξοδο του υμένα στην περιοδική επιφάνεια του καναλιού για ροή νερού με γωνία κλίσης $3,4^\circ$, $Re=100$ και συχνότητα διαταραχής (α) $0,5$ Hz και (β) 1 Hz

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι για αριθμό Re 53 και συχνότητα διαταραχής 0,167 Hz το ύψος του υμένα μένει σχεδόν σταθερό. Με άλλα λόγια η συχνότητα 0,167 Hz είναι πολύ κοντά στο όριο που η ροή γίνεται από ασταθής ευσταθής. Μάλιστα, μειώνοντας τον αριθμό Re για τις ίδιες συνθήκες η ροή γίνεται φανερά ευσταθής. Η παραπάνω παρατήρηση δείχνει ότι ο κρίσιμος Re για την μετάπτωση από ευσταθή ροή σε ασταθή είναι λίγο κάτω από $Re=53$. Αυξάνοντας περισσότερο τον Re παρατηρούμε ότι η κρίσιμη συχνότητα αυξάνεται. Έτσι για $Re=75$ σε συχνότητα 0,5 Hz η ροή είναι εμφανώς ασταθής, ενώ αντίθετα η συχνότητα 0,8 Hz είναι πολύ κοντά στο όριο ευστάθειας. Ομοίως για $Re=100$. Στην περίπτωση αυτή η κρίσιμη συχνότητα είναι πιο κοντά στο 1 Hz. Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα σε ένα διάγραμμα μπορούμε να βρούμε την τάση που έχει η καμπύλη οριακής ευστάθειας συναρτήσει του Re και της συχνότητας.

Το διάγραμμα 6.9 παρουσιάζει τα παραπάνω αποτελέσματα, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα για επίπεδο τοίχωμα (Σχήμα 6.4). Οι καμπύλες είναι προσαρμογές της εξίσωσης 6.1, και γίνεται εμφανές ότι τα πειραματικά αποτελέσματα ακολουθούν την προβλεπόμενη παραβολική εξάρτηση. Το Σχήμα 6.9 αποδεικνύει την εντυπωσιακή συρρίκνωση της περιοχής αστάθειας της ροής που παρατηρείται με την υποκατάσταση του επίπεδου τοιχώματος από το περιοδικά διαμορφωμένο.



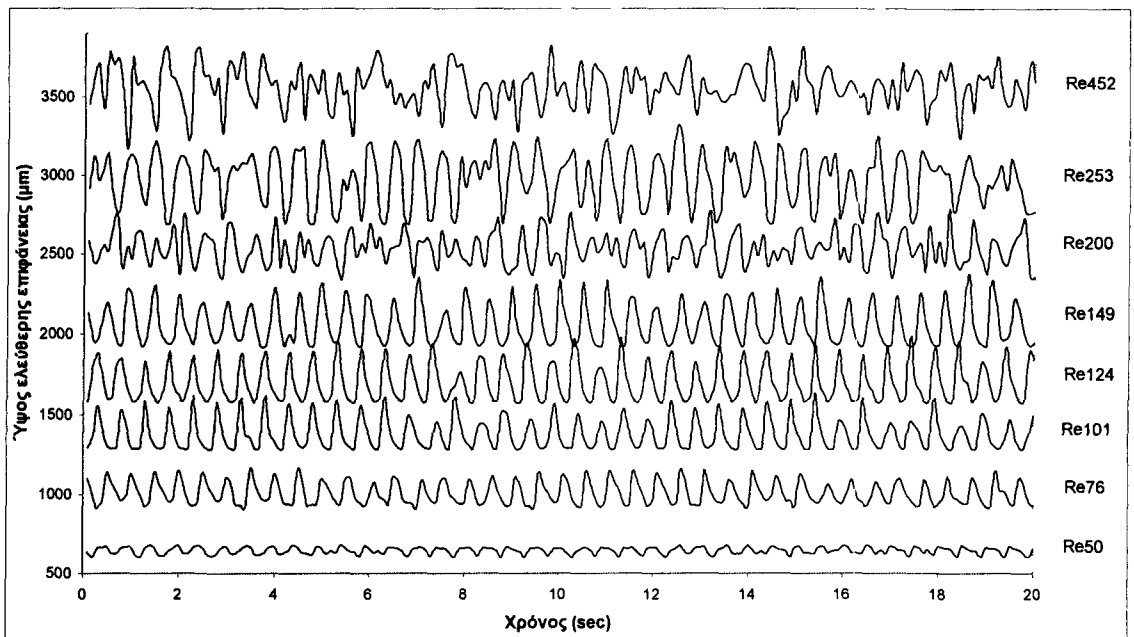
Σχήμα 6.9: Διάγραμμα καθορισμού περιοχής ευστάθειας και αστάθειας για ροή νερού πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=800 \mu m$), σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$

6.1.2 Μετάβαση σε χαοτική δομή

Χαρακτηριστικό της ροής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με ταυτόχρονη επιβολή εξωτερικής διαταραχής είναι ότι (όπως και στην περίπτωση της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα) για σχετικά χαμηλούς αριθμούς Re και συχνότητες διαταραχής η βασική συχνότητα των κυμάτων που εμφανίζονται είναι ίδια με αυτή της διαταραχής που επιβάλλουμε. Σε πολύ χαμηλές συχνότητες διαταραχής και επίπεδο τοίχωμα, τεκμηριώθηκε στο κεφ. 4 η γένεση παρασιτικών κορυφών. Ανάλογο φαινόμενο παρατηρείται για το διαμορφωμένο τοίχωμα όπως

θα σχολιαστεί σε επόμενη παράγραφο. Όμως στις περιπτώσεις αυτές η κυρίαρχη συχνότητα μίας τοπικής μέτρησης παραμένει η συχνότητα της διαταραχής στην είσοδο.

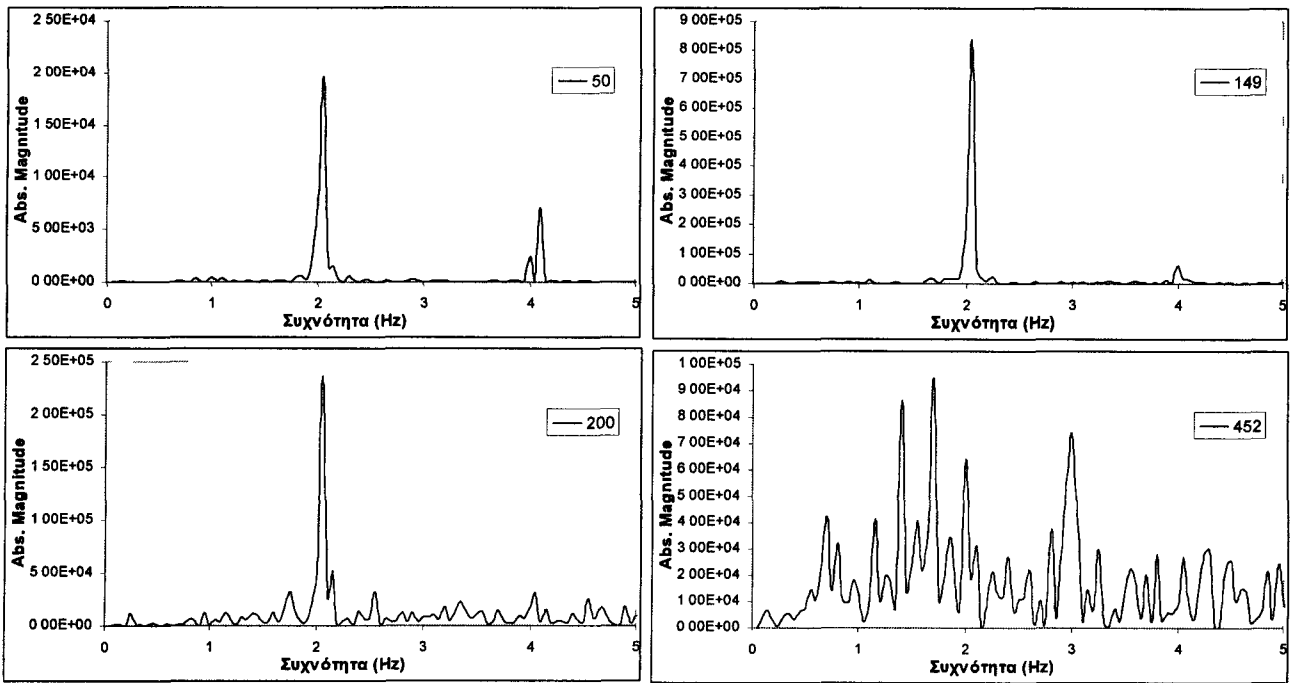
Στην παρούσα παράγραφο θα μας απασχολήσει μία ισχυρή απώλεια συσχέτισης της συχνότητας της ελεύθερης επιφάνειας με τη συχνότητα της διαταραχής εισόδου, που παραπέμπει σε μετάπτωση σε χαοτική συμπεριφορά. Η μετάπτωση προκαλείται από αύξηση είτε του αριθμού Re είτε της συχνότητας διαταραχής. Έτσι, για παράδειγμα, στο σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα για ροή νερού πάνω από τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης 800 μm και συχνότητα εξωτερικής διαταραχής 2 Hz. Παρατηρούμε ότι για τους χαμηλότερους Re (έως $Re=149$) η συχνότητα διέλευσης των κυμάτων είναι η ίδια με αυτήν της εξωτερικής διαταραχής. Σε μεγαλύτερους Re , η δομή που εμφανίζεται γίνεται σταδιακά περισσότερο πολύπλοκη ($Re=200, 253$) και τέλος ($Re=452$) χάνει κάθε σχέση με την αρχική διαταραχή.



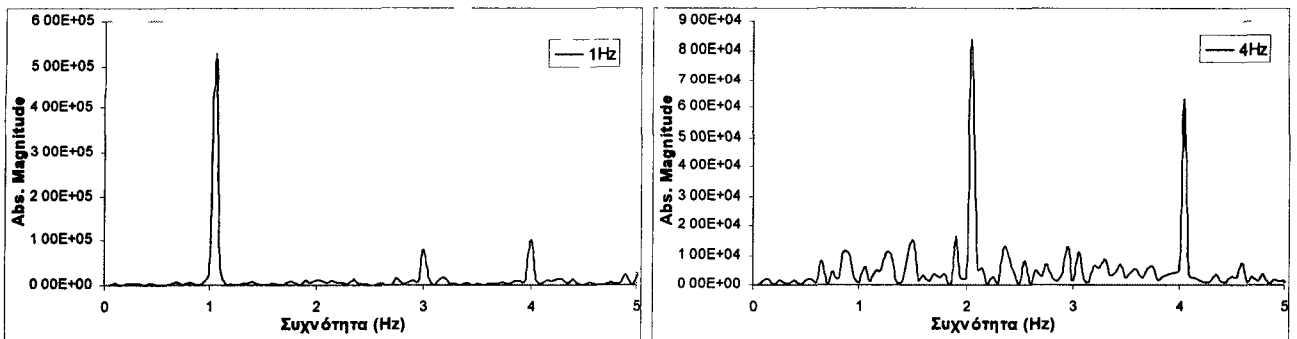
Σχήμα 6.10: Χρονική μεταβολή του υμένα για ροή πάνω από κυματοειδές τοίχωμα κλίσης $3,4^\circ$ σε $f=2$ Hz και 8 διαφορετικούς αριθμούς Re .

Η τάση που έχει η ροή να γίνει χαοτική πάνω από κάποιο αριθμό Re αποδεικνύεται και από τη φασματική ανάλυση της χρονοσειράς του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας, που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.11. Για $Re=50$ και 149 εμφανίζεται κυρίως η βασική συχνότητα (2 Hz). Αυξάνοντας τον Re σε 200 αρχίζουν να εμφανίζονται και άλλες αρμονικές της ροής. Και πάλι όμως η επικρατούσα συχνότητα είναι αυτή της εξωτερικής διαταραχής. Τέλος, αν αυξήσουμε και άλλο τον αριθμό Re στο 452 παρατηρούμε ότι στο φάσμα εμφανίζονται πολλές συχνότητες. Μάλιστα, σε αυτή την περίπτωση η συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής δεν είναι η επικρατέστερη.

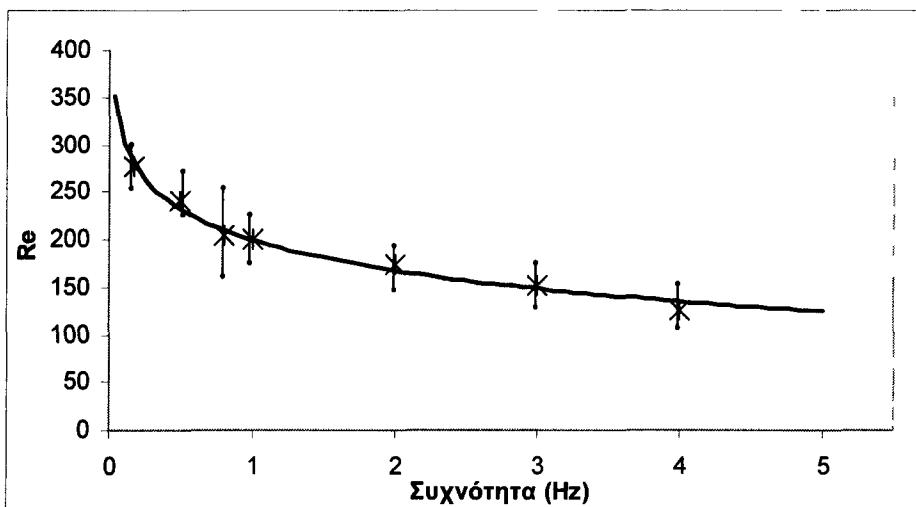
Την ίδια μετάπτωση σε χαοτική δομή έχουμε και στην περίπτωση όπου, σε ροή με χαμηλό αριθμό Re , αυξάνουμε σταδιακά τη συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής. Όπως παρατηρούμε λοιπόν στο σχήμα 6.12, για ροή σε $Re=125$ και συχνότητα εξωτερικής διαταραχής 1 Hz τα εμφανιζόμενα κύματα έχουν συχνότητα 1 Hz. Αντίθετα για τις ίδιες συνθήκες και συχνότητα 4 Hz, το φάσμα συχνοτήτων είναι αρκετά πιο πολύπλοκο με την εμφάνιση ισχυρών υποαρμονικών συχνοτήτων.



Σχήμα 6.11: Χρονικός μετασχηματισμός Fourier για ροή πάνω από τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης 800 μm , κλίση 3,4° σε $f=2$ Hz και 4 διαφορετικούς αριθμούς Re



Σχήμα 6.12: Χρονικός μετασχηματισμός Fourier για ροή πάνω από τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης 800 μm , κλίση 3,4° σε $Re=125$ και $f=1$ Hz και 4 Hz αντίστοιχα.

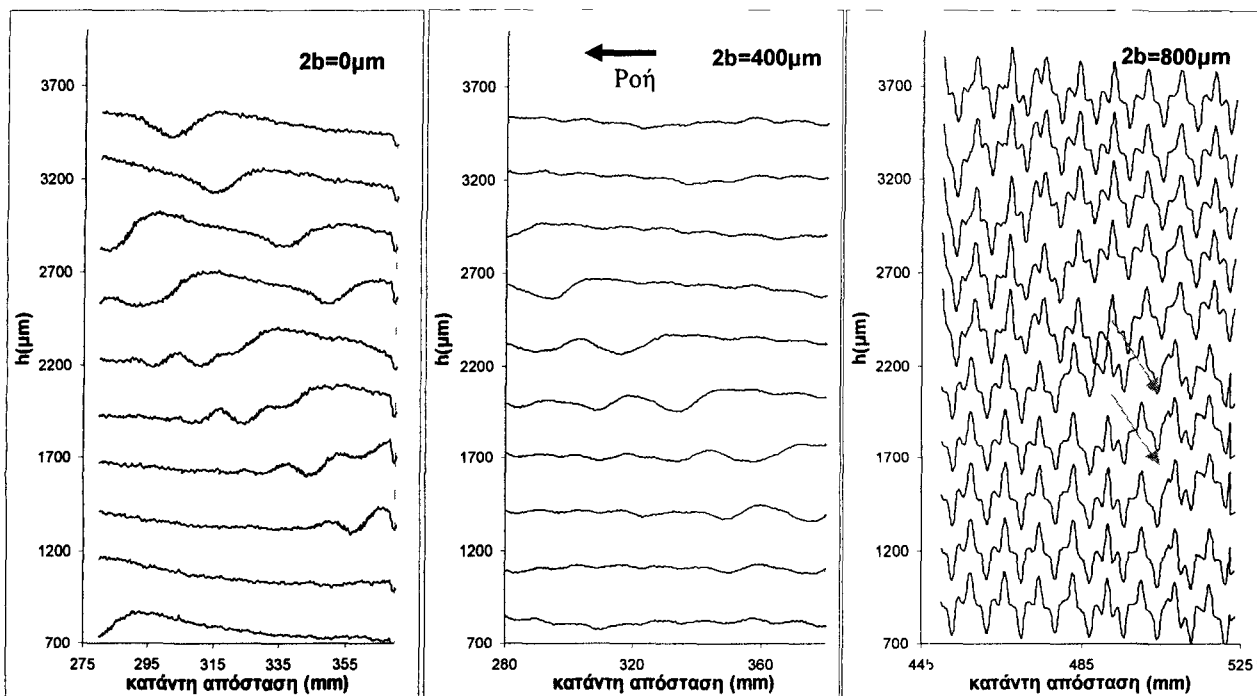


Σχήμα 6.13: Διάγραμμα διαχωρισμού μονοχρωματικής και χαοτικής περιοχής για ροή νερού πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=800$ μm), σε γωνία κλίσης 3,4°

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι συνθήκες μετάπτωσης σε χαοτική συμπεριφορά μπορούν να συνοψιστούν σε ένα διάγραμμα συχνότητας - Re . Για να δημιουργηθεί αυτό το διάγραμμα διαχωρισμού των δύο διαφορετικών περιοχών ροής χρειάζονται μεθοδικές μετρήσεις για κάθε συχνότητα και με πολύ μικρό βήμα αριθμού Re . Έτσι, από τα δεδομένα των πειραμάτων που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας αυτής δημιουργήθηκε το διάγραμμα του σχήματος 6.13. Επειδή οι αριθμοί Re στους οποίους έγιναν οι μετρήσεις απείχαν αρκετά μεταξύ τους, σημειώνονται στο σχήμα τα όρια αξιοπιστίας της πρόβλεψης της μετάβασης. Παρά την αναμενόμενη διασπορά, η συσχέτιση κρίσιμου Re και συχνότητας είναι σαφής, και παριστάνεται ικανοποιητικά από την καμπύλη του σχήματος που προκύπτει ως εμπειρική προσαρμογή των μετρήσεων.

6.2 Σύγκριση εξέλιξης σε επίπεδη και περιοδικά διαμορφωμένη επιφάνεια

Όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα επηρεάζει τη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας. Επίσης μελετώντας την ευστάθεια αποδείχθηκε ότι όσο πιο έντονη είναι η διαμόρφωση του τοιχώματος τόσο πιο σταθεροποιητική επίδραση έχει στην ροή. Η επιβολή εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής επιβεβαίωσε τις δύο παραπάνω παρατηρήσεις. Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζεται το πέρασμα ενός κύματος από το πεδίο μετρήσεων για ροή διαλύματος νερού-γλυκερίνης 28% σε κανάλι με κλίση $3,4^\circ$ και αριθμό $Re=30$, για επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=400 \mu\text{m}$ & $2b=800 \mu\text{m}$).

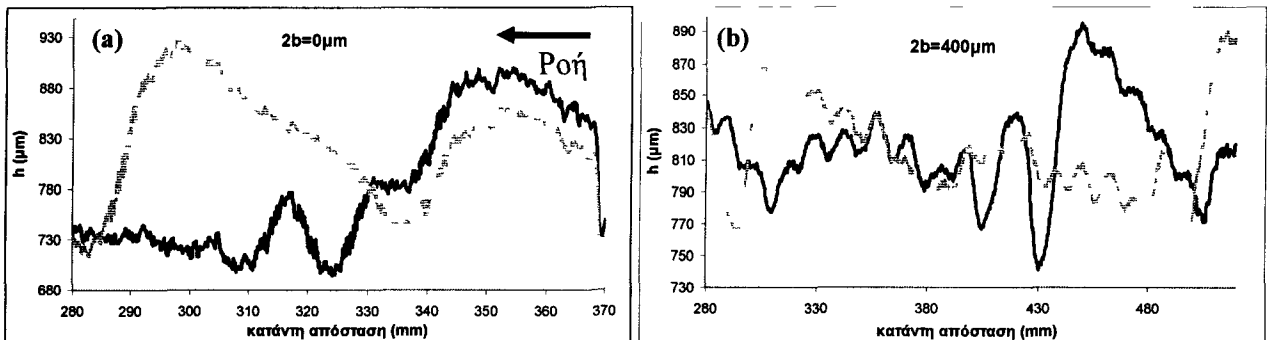


Σχήμα 6.14: Η ελεύθερη επιφάνεια κατάντη της ροής σε 10 διαδοχικές χρονικές στιγμές, για ροή σε γωνία κλίσης $\varphi=3,4^\circ$, $Re=30$ και $f=1 \text{ Hz}$ για επίπεδο και κυματοειδές τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης $2b=400$ και $800 \mu\text{m}$. Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1 \text{ sec}$.

Και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάσαμε στο παραπάνω σχήμα, έχουμε τις ίδιες συνθήκες και επιβάλλουμε στην αρχή του καναλιού την ίδια διαταραχή με την μορφή μικρού κύματος. Στην περίπτωση του επίπεδου τοιχώματος εμφανίζεται στην ελεύθερη επιφάνεια ένα

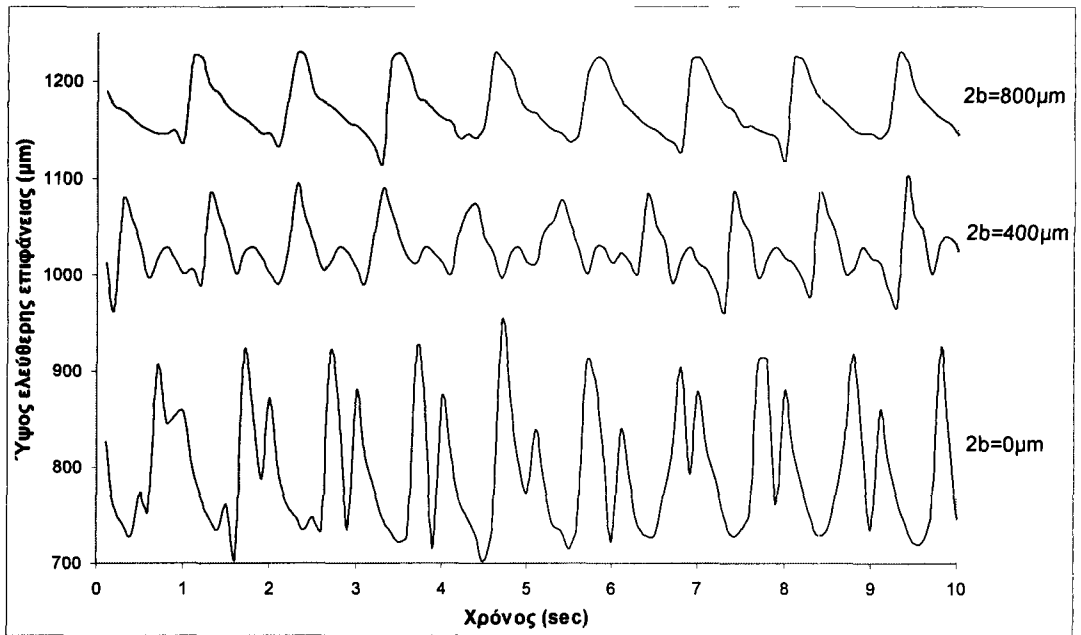
καλά σχηματισμένο μοναχικό κύμα. Για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης $2b=400\ \mu\text{m}$, πάνω στο σχηματιζόμενο κύμα εμφανίζεται μια διαταραχή η οποία έχει μήκος κύματος ίδιο με αυτό της διαμόρφωσης του τοιχώματος, δηλαδή έχουμε υπέρθεση των κυμάτων στην ελαφρά διαμορφωμένη στατική επιφάνεια. Η ένταση της στατικής διαμόρφωσης είναι πολύ μικρή και σχεδόν δεν διακρίνεται στο σχήμα. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αριθμός Re είναι αρκετά χαμηλός και δεν είναι έντονη η αλληλεπίδραση του τοιχώματος με την ελεύθερη επιφάνεια. Αντίθετα στην περίπτωση της ροής σε τοίχωμα με ύψος διαμόρφωσης $800\ \mu\text{m}$, η στατική διαμόρφωση είναι ισχυρά μη-γραμμική (απαρτίζεται από πολλές αρμονικές) και τόσο έντονη ώστε σχεδόν να υπερκαλύπτεται το δημιουργούμενο κύμα το οποίο είναι ούτως ή άλλως μικρό σε ένταση.

Η αύξηση της ευσταθούς περιοχής με την διαμόρφωση γίνεται καλύτερα αντιληπτή με τα διαγράμματα του σχήματος 6.15, όπου παρουσιάζεται η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας πάνω από ένα τμήμα του καναλιού σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι συνθήκες είναι ίδιες με του προηγούμενου σχήματος και το κύμα είναι την πρώτη χρονική στιγμή στην είσοδο και την δεύτερη στην έξοδο του οπτικού πεδίου. Στην περίπτωση του επίπεδου τοιχώματος το κύμα έχει σαφώς μικρότερο ύψος στην είσοδό του στο οπτικό πεδίο (συνεχόμενη γραμμή) σε σχέση με την έξοδό του (διακεκομμένη γραμμή), γεγονός το οποίο αποδεικνύει την τάση περαιτέρω αύξησης του ύψους του. Αντιθέτως, για ροή πάνω από διαμορφωμένο τοίχωμα στις ίδιες συνθήκες, το μέγεθος του κύματος μειώνεται ευκρινώς.

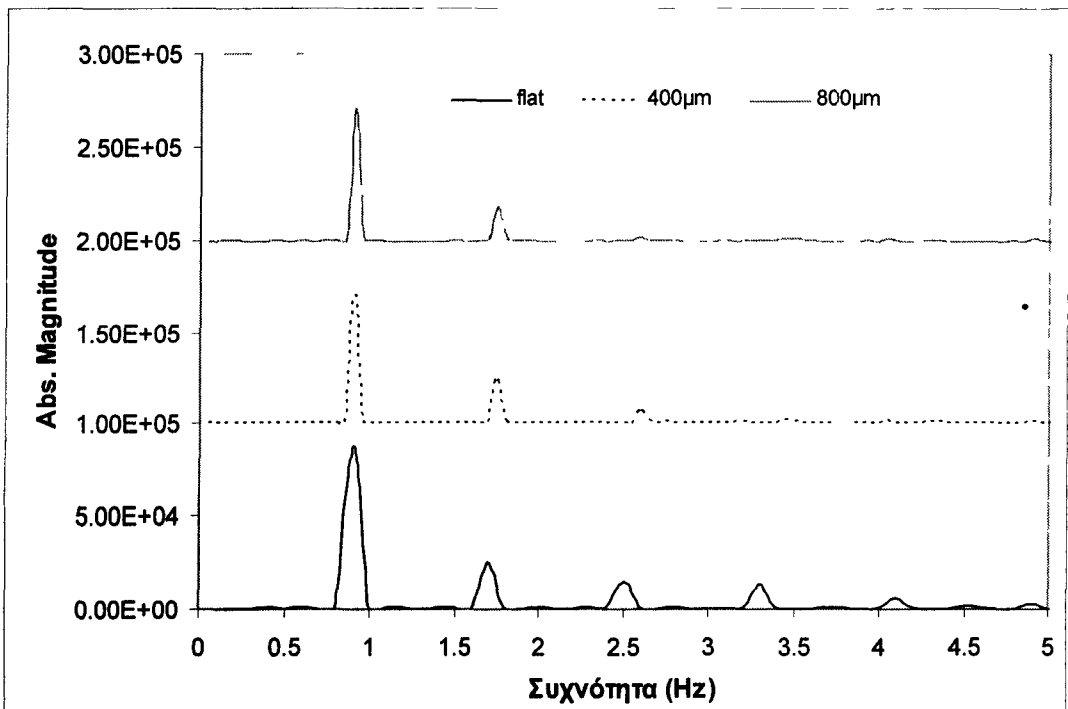


Σχήμα 6.15: Η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού σε ένα τμήμα του καναλιού για δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι συνθήκες ροής είναι γωνία κλίσης $\varphi=3,4^\circ$, $Re=30$ και $f=1\ \text{Hz}$ για (a) επίπεδο και (b) κυματοειδές τοίχωμα με $2b=400\ \mu\text{m}$.

Όπως προαναφέρθηκε η βασική συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων για ροή τόσο πάνω από επίπεδο όσο και πάνω από κυματοειδές τοίχωμα είναι η ίδια με την συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Ωστόσο, ανάλογα με την συχνότητα της διαταραχής μπορεί να δημιουργούνται και άλλα μικρότερης έντασης κύματα. Στο σχήμα 6.16 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή ενός σημείου της ελεύθερης επιφάνειας για τις τρεις γνωστές περιπτώσεις τοιχώματος και για ροή με διάλυμα γλυκερίνης 28%, σε $Re=30$, συχνότητα εξωτερικής διαταραχής 1 Hz και γωνία κλίσης $3,4^\circ$.



Σχήμα 6.16: Σύγκριση χρονικής μεταβολής του υμένα για ροή πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=400$ και $800 \mu\text{m}$). Κλίση $3,4^\circ$ σε $f=0,9 \text{ Hz}$, $Ka=1102$ και $Re=30$.



Σχήμα 6.17: Σύγκριση χρονικού μετασχηματισμού Fourier για ροή πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα ($2b=400$ και $800 \mu\text{m}$). Κλίση $3,4^\circ$ σε $f=0,9 \text{ Hz}$, $Ka=1102$ και $Re=30$.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι εκτός από το ύψος, διαφέρει και το αρμονικό περιεχόμενο της ροής σε κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση του επίπεδου τοιχώματος παρατηρούμε πίσω από το κύριο κύμα να ακολουθεί και ένα δεύτερο μεγέθους μικρότερου αλλά συγκρίσιμου με του κύριου. Επίσης και στη ροή πάνω από τοίχωμα με $2b=400 \mu\text{m}$ εμφανίζεται

το δεύτερο κύμα, αλλά σε αυτή την περίπτωση το μέγεθός του είναι πολύ μικρότερο του βασικού. Τέλος για ροή σε τοίχωμα με $2b=800$ μm φαίνεται να έχουμε ένα μόνο κύμα ανά περίοδο. Η φασματική ανάλυση των παραπάνω δεδομένων δίνει μια καθαρότερη απεικόνιση τόσο της μεταβολή της έντασης της διαταραχής όσο και των αρμονικών της ροής. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 6.17. Είναι εμφανής τόσο η μείωση της έντασης της κύριας διαταραχής όσο και η μείωση του αριθμού και της έντασης των μεγαλύτερων αρμονικών της ροής.

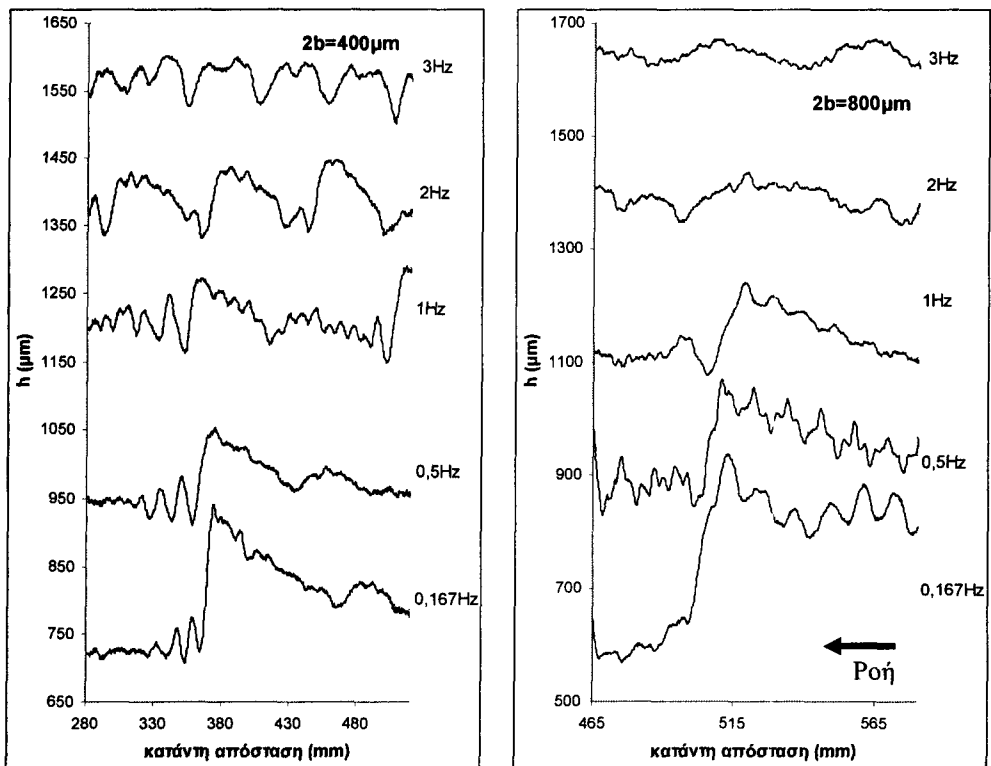
6.3 Ιδιότητες οδοντών κυμάτων

6.3.1 Χαρακτηριστικά της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας

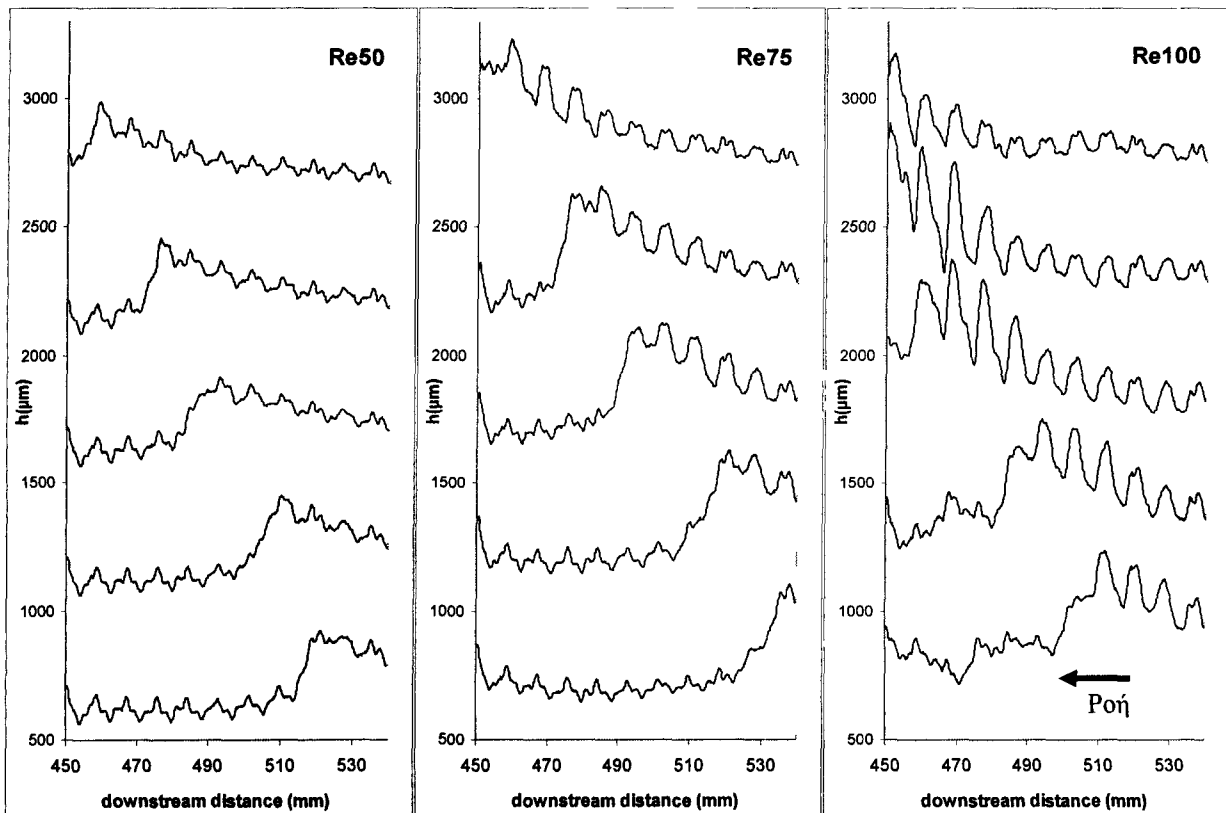
Όπως είδαμε στο κεφ. 5, η περιοδική διαμόρφωση επηρεάζει την μορφή της ελεύθερης επιφάνειας. Μάλιστα, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δημιουργούμενα κύματα δεν εξαφανίζουν την στατική διαμόρφωση που δημιουργείται λόγω της αλληλεπίδρασης του τοιχώματος με την ελεύθερη επιφάνεια, αλλά υπερτίθενται αυτής. Το είδος των δημιουργούμενων κυμάτων εξαρτάται στην περίπτωση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος, όπως άλλωστε και στο επίπεδο, από τη συχνότητα της δημιουργούμενης διαταραχής.

Στην παρούσα παράγραφο μας ενδιαφέρει η παρουσίαση της μορφής των πλήρως ανεπτυγμένων οδοντών κυμάτων πάνω από περιοδικό τοίχωμα. Ειδικότερα, τεκμηριώνεται η σταδιακή μετάβαση από περιοδικά σε μοναχικά κύματα με τη μείωση της συχνότητας διαταραχής εισόδου, και εξετάζονται τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των μοναχικών κυμάτων και η εξάρτησή τους από τον αριθμό Re της ροής.

Το είδος και η μορφή των δημιουργούμενων κυμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 6.18 για διάφορες συχνότητες εξωτερικής διαταραχής. Παρατηρούμε ότι για ροή πάνω από πλάκα περιοδικής διαμόρφωσης 400 μm και χαμηλές συχνότητες διαταραχής δημιουργούνται κύματα μοναχικά. Μάλιστα, η επίδραση της στατικής δομής της ελεύθερης επιφάνειας είναι τόσο μικρή που σχεδόν δεν γίνεται αντιληπτή. Τα μοναχικά κύματα φαίνεται να ακολουθούνται από ένα δεύτερο μικρού μεγέθους κύμα. Ανεβάζοντας την συχνότητα διαταραχής στο 1 Hz τα μοναχικά κύματα πλησιάζουν πολύ και φαίνεται σαν να εγκλωβίζουν ανάμεσά τους τη δεύτερη, μικρότερου ύψους κορυφή που έχει δημιουργηθεί. Για ακόμα μεγαλύτερη συχνότητα (2 Hz) τα κύματα έχουν πλησιάσει τόσο κοντά μεταξύ τους ώστε να μην δημιουργείται η δευτερεύουσα κορυφή. Παρόλα αυτά, η μορφή τους συνεχίζει να θυμίζει την μορφή του μοναχικού κύματος με το απότομο μπροστινό μέρος και την ομαλότερη ουρά. Μάλιστα, μπροστά από κάθε δημιουργούμενο κύμα εμφανίζεται ένας τριχοειδής κυματισμός. Τέλος, για $f=3\text{Hz}$ τα κύματα γίνονται περιοδικά ημιτονοειδή όπου συνεχίζουν να υπερτίθενται στην στατική ελεύθερη επιφάνεια, η ένταση της οποίας είναι πλέον πολύ μικρότερη. Την ίδια μορφή έχουν τα κύματα και στην περίπτωση του τοιχώματος με $2b=800$ μm , με τη διαφορά ότι αφενός η στατική διαμόρφωση πάνω στο κύμα είναι πολύ πιο έντονη, αφετέρου η ένταση των κυμάτων – ιδιαίτερα στις μεγαλύτερες συχνότητες – είναι πολύ μικρότερη λόγω της σταθεροποίησης της ροής με την αύξηση του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος.



Σχήμα 6.18: Η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού για ροή σε διάφορες συχνότητες διαταραχής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με $2b=400$ και $800 \mu\text{m}$. Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1 \text{ sec}$.

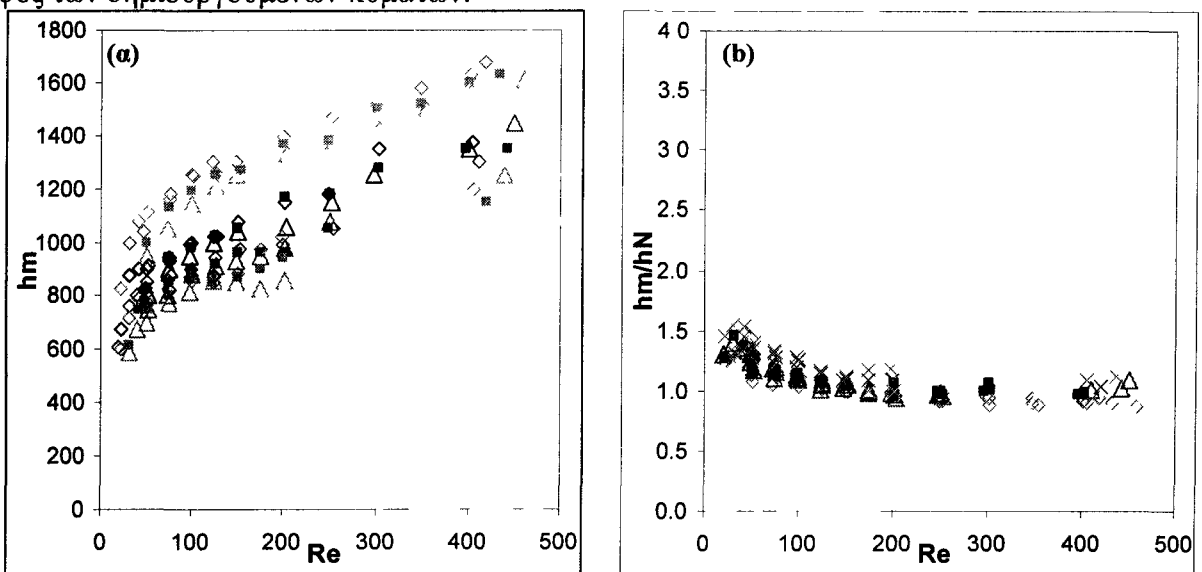


Σχήμα 6.19: Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατόπιν της ροής σε 5 διαδοχικές χρονικές στιγμές, για ροή σε τοίχωμα με $2b=800 \mu\text{m}$ και γωνία κλίσης $\varphi=3,4^\circ$, $f=0,167 \text{ Hz}$ και $Re=50, 75$ και 100 . Η χρονική απόσταση των προφίλ είναι $\Delta t=0,1 \text{ sec}$.

Η επίδραση της στατικής δομής της ελεύθερης επιφάνειας πάνω στα κύματα επηρεάζεται, εκτός από το ύψος της διαμόρφωσης του τοιχώματος, και από τον αριθμό Re της ροής. Στο σχήμα 6.19 παρουσιάζεται το πέρασμα ενός μοναχικού κύματος για ροή σε τρεις διαφορετικούς Re . Και στις τρεις περιπτώσεις έχουμε ροή νερού σε κανάλι με κλίση $3,4^\circ$ και $2b=800 \mu\text{m}$, με συχνότητα διαταραχής $0,167 \text{ Hz}$ και σε $Re=50, 75$ και 100 . Είναι φανερό ότι αύξηση του Re αυξάνει και το μέγεθος της στατικής διαμόρφωσης πάνω στο κύμα. Μία βασική παρατήρηση είναι ότι διατηρούνται και πάνω από το διαμορφωμένο τοίχωμα τα χαρακτηριστικά του μοναχικού κύματος με την απότομη μπροστινή όψη και την εκτεταμένη πίσω ουρά.

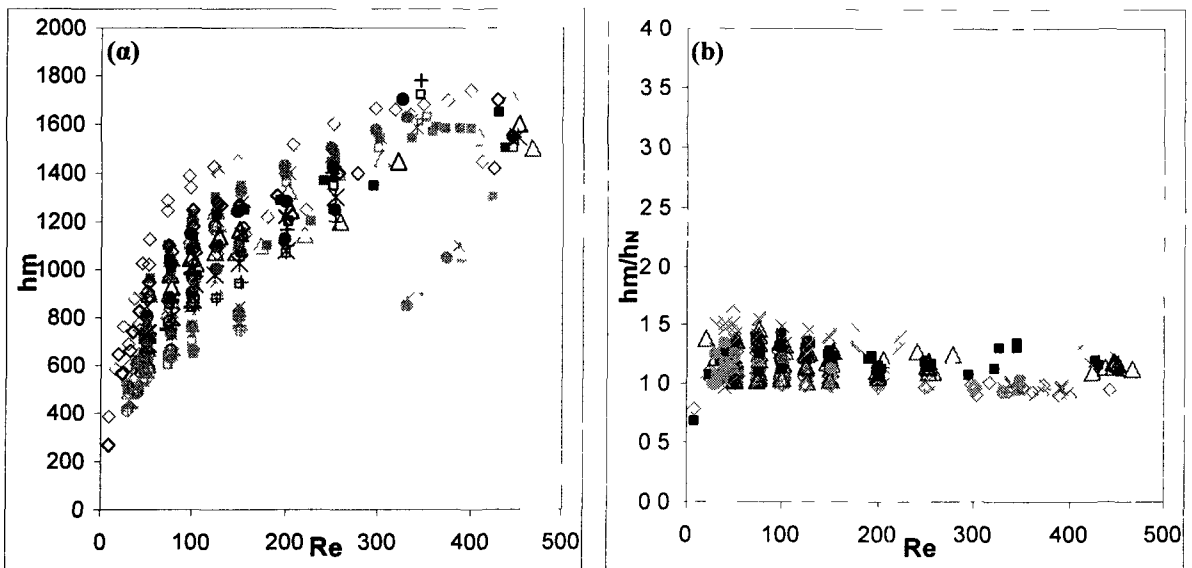
6.3.2 Εξάρτηση του μέγιστου ύψους των κυμάτων (τοπικό πάχος υμένα) από τον αριθμό Re

Το ύψος των δημιουργούμενων κυμάτων στη ροή είναι γνωστό ότι επηρεάζεται από τις διάφορες παραμέτρους της ροής όπως είναι το ιξώδες του ρευστού, η γωνία κλίσης και ο αριθμός Re . Λέγοντας ύψος κύματος εννοούμε το μέγιστο πάχος του υμένα το οποίο αντιστοιχεί στην κορυφή του κύματος. Στα πλαίσια των πειραμάτων που έγιναν στην παρούσα εργασία, διερευνήθηκε η εξάρτηση των κυμάτων από την συχνότητα των δημιουργούμενων κυμάτων. Στο σχήμα 6.20α παρουσιάζεται η εξάρτηση του ύψους του κύματος συναρτήσει του αριθμού Re για τις διαφορετικές γωνίες κλίσης και συχνότητες επιβαλλόμενης διαταραχής. Οι μετρήσεις στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορούν ροή νερού και έχουν ληφθεί σε σημείο πολύ κοντά στην είσοδο του ρευστού στο κυματοειδές τοίχωμα. Σε κάθε περίπτωση, το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης $1,3^\circ$, το μαύρο σε γωνία $2,6^\circ$, το μπλε σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$ και τέλος το πράσινο σε γωνία $5,4^\circ$. Οι διαφορετικοί δείκτες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες εξωτερικής διαταραχής. Παρατηρούμε, ότι για σταθερή γωνία κλίσης, το ύψος των δημιουργούμενων κυμάτων παραμένει σχεδόν σταθερό, ανεξάρτητα της συχνότητας της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Αντίθετα, αυξάνοντας την γωνία κλίσης μειώνεται και το ύψος των δημιουργούμενων κυμάτων.



Σχήμα 6.20: Εξάρτηση του (α) ύψους και (β) αδιάστατου ύψους του κύματος από τον αριθμό Re για διαφορετικές γωνίες κλίσης και συχνότητες διαταραχής κοντά στην είσοδο του ρευστού στο κανάλι. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης $1,3^\circ$, το μαύρο σε γωνία $2,6^\circ$, το μπλε σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$ και το πράσινο σε γωνία $5,4^\circ$. Οι διαφορετικοί δείκτες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες εξωτερικής διαταραχής.

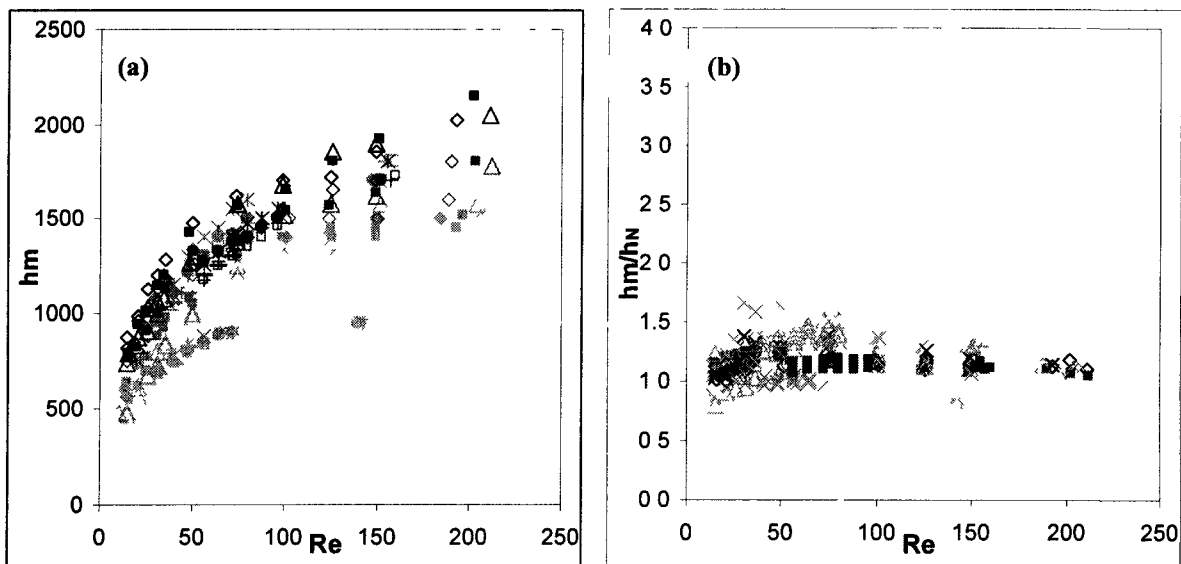
Στο σχήμα 6.20b παρουσιάζεται η εξάρτηση του αδιάστατου (με το πάχος του υμένα κατά Nusselt) ύψους του υμένα συναρτήσει του αριθμού Re για τις ίδιες γωνίες κλίσης και συχνότητες εξωτερικής διαταραχής. Από το σχήμα φαίνεται ότι, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση του πειραματικού σφάλματος, μπορούμε να πούμε ότι το πάχος κατά Nusselt αδιαστατοποιεί επιτυχώς τα αποτελέσματα. Δηλαδή, τα σημεία πέφτουν στην ίδια καμπύλη, ανεξάρτητα της γωνία κλίσης, του αριθμού Re της ροής και της συχνότητας της εξωτερικής διαταραχής.



Σχήμα 6.21: Εξάρτηση του (α) ύψους και (β) αδιάστατου ύψους του κύματος από τον αριθμό Re για διαφορετικές γωνίες κλίσης και συχνότητες διαταραχής κοντά στην έξοδο του ρευστού από το κανάλι. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης $1,3^\circ$, το μαύρο σε γωνία $2,6^\circ$, το μπλε σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$, το πράσινο σε γωνία $5,4^\circ$ και το ροζ σε γωνία $7,4^\circ$. Οι διαφορετικοί δείκτες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες εξωτερικής διαταραχής.

Επαναλαμβάνοντας τις ίδιες μετρήσεις σε σημείο το οποίο είναι κοντά στην έξοδο του υμένα από το κανάλι έχουμε τα διαγράμματα του σχήματος 6.21. Παρατηρούμε και σε αυτή την περίπτωση την ίδια τάση με προηγουμένως. Εδώ βέβαια τα δεδομένα έχουν πολύ μεγαλύτερη διασπορά ιδιαίτερα στις μεγάλες γωνίες κλίσης. Επίσης από το διάγραμμα 6.21b παρατηρούμε ότι το ύψος των κυμάτων είναι πλέον περίπου 20% μεγαλύτερο από αυτό του πάχους του υμένα κατά Nusselt.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με αυτά για αντίστοιχες μετρήσεις στο ίδιο σημείο και με τις ίδιες συνθήκες πειράματός αλλά ρευστό μεγαλύτερου ιξώδους (διάλυμα νερού-γλυκερίνης 28% κ.β.), παρατηρούμε ότι η τάση των καμπυλών του διαγράμματος είναι η ίδια (σχήμα 6.22). Όπως ήταν αναμενόμενο το ύψος των κυμάτων αυξάνεται με την χρήση του ρευστού μεγαλύτερου ιξώδους. Παρόλα αυτά και πάλι το αδιάστατο ύψος του κυμαίνεται περίπου στο 1,2. Η διασπορά των δεδομένων στην περίπτωση του διαλύματος γλυκερίνης είναι πολύ μικρότερη για τις διαφορετικές συχνότητες μέτρησης και ειδικά στις μικρές γωνίες κλίσης βλέπουμε πλήρη ταύτιση των μετρήσεων για διαφορετικές συχνότητες διαταραχής σε ροή στην ίδια γωνία κλίσης και αριθμό Re .



Σχήμα 6.22: Εξάρτηση του (α) ύψους και (β) αδιάστατου ύψους του κύματος από τον αριθμό Re για διαφορετικές γωνίες κλίσης και συχνότητες διαταραχής κοντά στην έξοδο του ρευστού από το κανάλι. Το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης $2,6^\circ$, το μπλε σε γωνία κλίσης $3,4^\circ$, το πράσινο σε γωνία $5,4^\circ$ και το ροζ σε γωνία $7,4^\circ$. Οι διαφορετικοί δείκτες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες εξωτερικής διαταραχής. Το ρευστό είναι διάλυμα νερού-γλυκερίνης 28%.

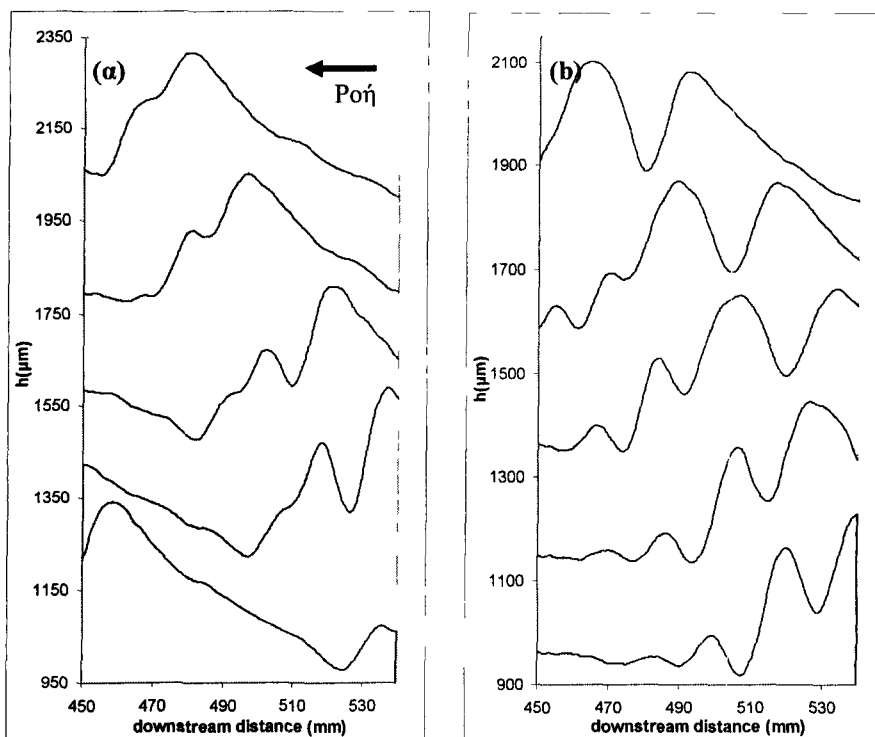
6.3.3 Χαρακτηριστικές δομές της ροής και αλληλεπιδράσεις τους

Στη ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα με επιβολή εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής παρατηρήθηκε, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, το φαινόμενο της συγχώνευσης δύο κυμάτων τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους αρκετά σε ύψος. Επίσης, παρατηρήθηκαν διάφορες άλλες δομές, όπως είναι η εμφάνιση κύματος διπλής και πολλαπλής κορυφής, η δημιουργία υπερυψωμένου υποστρώματος και αστάθειας της ουράς στο πίσω μέρος μοναχικών κυμάτων (Vlachogiannis & Bontozoglou 2001). Τα φαινόμενα αυτά τεκμηριώνονται στη συνέχεια και για ροή υμένα πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα.

Βέβαια, όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας πάνω από περιοδικό τοίχωμα επικαλύπτεται από την κυρίαρχη στατική διαμόρφωση η οποία επιβάλλεται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της ελεύθερης επιφάνειας με το τοίχωμα. Έτσι, σε αρκετές περιπτώσεις και εξαιτίας της αλληλεπίδρασης αυτής, τα παραπάνω φαινόμενα δεν είναι εμφανή. Για να γίνουν λοιπόν καλύτερα αντιληπτές οι δομές που δημιουργούνται, κρίνεται σκόπιμη η τεχνητή απομάκρυνση της στατικής διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση των πρωτογενών δεδομένων ύψους της ελεύθερης επιφάνειας από μία κινούμενη μέση τιμή, η οποία προκύπτει σταθμίζοντας τα δεδομένα που καλύπτουν μήκος ίσο με το μήκος κύματος της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Στο σχήμα 2.17 γίνεται καλύτερα αντιληπτή η παραπάνω διαδικασία και τα αποτελέσματά της. Στα σχήματα που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια, θα απεικονίζεται η ελεύθερη επιφάνεια από την οποία έχει αφαιρεθεί η επίδραση της στατικής δομής, ώστε να γίνεται εμφανέστερο το κάθε φαινόμενο.

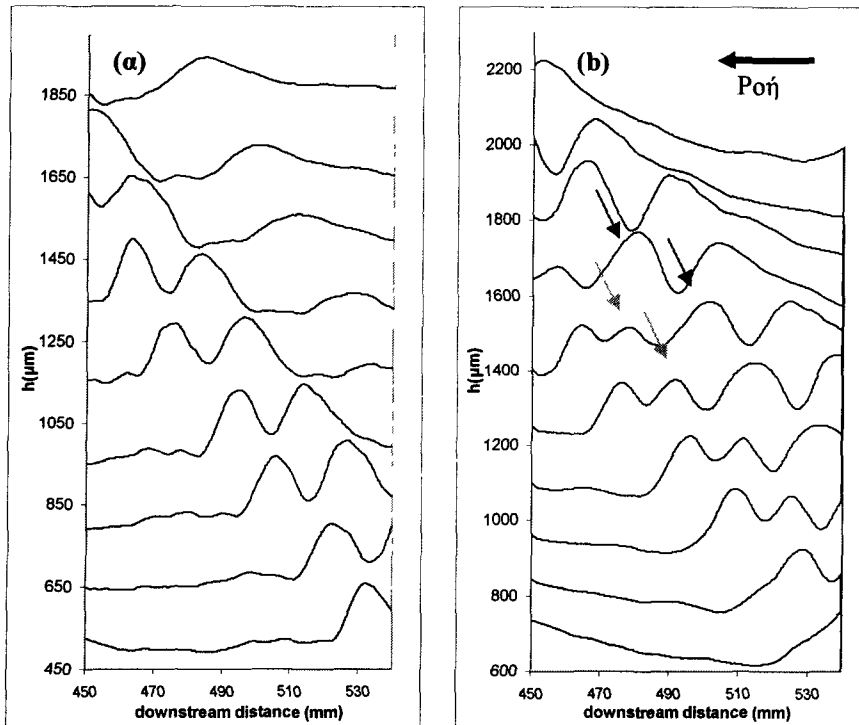
Το γνωστό τόσο από την θεωρία (Chang et al 1995) όσο και από τα πειράματα (Liu & Gollub 1994, Vlachogiannis & Bontozoglou 2001) φαινόμενο της συγχώνευσης δύο κυμάτων εμφανίζεται και στην ροή πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα και παρουσιάζεται στο

σχήμα 6.23. Στο 6.23α παρατηρούμε την δεύτερη και μεγαλύτερη σε ύψος κορυφή να πλησιάζει την προπορευόμενη και να αλληλεπιδρά με αυτή. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας μόνο κορυφής. Η διαφορά με το σχήμα 6.23b είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση έχουμε ένα κύμα με τρεις κορυφές. Η πρώτη κορυφή είναι αρκετά μικρότερη σε μέγεθος σε σχέση με τις άλλες δύο που ακολουθούν. Επομένως, οι πίσω κορυφές έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα, πλησιάζουν την μικρότερη και αλληλεπιδρούν με αυτή. Παρατηρούμε στην πάνω καμπύλη του διαγράμματος ότι η μπροστά κορυφή έχει μεγαλύτερο ύψος από αυτή που ακολουθεί, ενώ στις προηγούμενες το ύψος τους ήταν όμοιο. Η αύξηση αυτή του ύψους της δημιουργούμενης από την αλληλεπίδραση κορυφής, αποτελεί επακόλουθο της διαδικασίας της συγχώνευσης.



Σχήμα 6.23: Το φαινόμενο της συγχώνευσης για την περίπτωση (α) των δύο κορυφών ($\phi=3,4^\circ$, $f=2\text{ Hz}$, $Re=64$, $Ka=1102$) (b) των πολλαπλών κορυφών ($\phi=3,4^\circ$, $f=1\text{ Hz}$, $Re=56$, $Ka=1102$). Η χρονική απόσταση των διαδοχικών απεικονίσεων της ελεύθερης επιφάνειας είναι $\Delta t=0,1\text{ sec}$.

Η περίπτωση που είδαμε στο σχήμα 6.23b της ροής με περισσότερες από μια κορυφές είναι ένα κοινό φαινόμενο και στην περίπτωση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος. Οι δομές αυτές δημιουργούνται λόγω του ότι οι κορυφές έχουν μικρή διαφορά στο ύψος και ενώ πλησιάζουν δεν αλληλεπιδρούν αλλά κινούνται κατάντη της ροής σαν ένα σώμα. Η πιο κοινή περίπτωση είναι αυτή των δύο κορυφών (2-hump waves) όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.24a. Πολλές φορές εμφανίζεται και η δομή με πολλαπλές κορυφές (σχήμα 6.24b). Συνήθως σε αυτή την περίπτωση κάποιες από τις κορυφές έχουν μικρότερο ύψος και είναι πιθανό να αλληλεπιδράσουν με τις μεγαλύτερες που ακολουθούν κατάντη της ροής. Μάλιστα, στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.24b, παρατηρούμε ότι μεταξύ της 5^{ης} και της 6^{ης} καμπύλης το ύψος του δεύτερου μικρού κυματισμού (κόκκινο βέλος) μειώνεται ενώ αντίθετα το ύψος του πρώτου μεγάλου κύματος μεγαλώνει (μπλε βέλος). Το φαινόμενο αυτό είναι ένδειξη ότι τα κύματα αυτά θα αλληλεπιδράσουν και θα συγχωνευθούν.

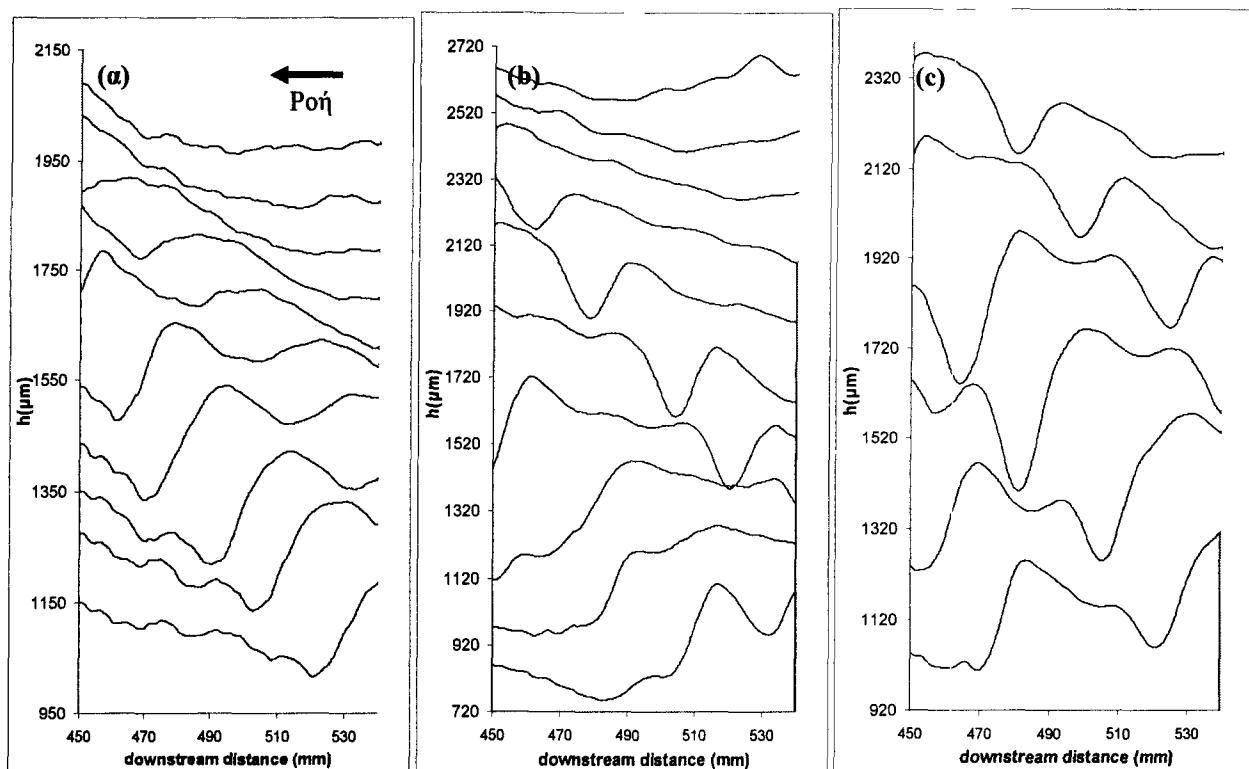


Σχήμα 6.24: Ροή κυμάτων με (α) δύο ($\varphi=5,4^\circ, f=0,8 \text{ Hz}, Re=55, Ka=3365$) ή και (β) περισσότερες κορυφές ($\varphi=3,4^\circ, f=1 \text{ Hz}, Re=75, Ka=3365$). Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1 \text{ sec}$.

Για την περίπτωση του επίπεδου τοιχώματος γνωρίζουμε ότι μετά την συγχώνευση δύο κυμάτων το καινούριο που δημιουργείται έχει ύψος μεγαλύτερο από αυτό των δύο προηγούμενων κυμάτων. Η αύξηση του ύψους είναι ένα μεταβατικό φαινόμενο. Με άλλα λόγια το νεοδημιουργημένο κύμα αρχίζει να χάνει και πάλι ύψος, και η επιπλέον μάζα του κύματος μένει πίσω δημιουργώντας ένα υπερυψωμένο υποστρώμα στην ουρά του. Το υποστρώμα αυτό είναι ασταθές για ροή με νερό, εμφανίζεται στιγμιαία και στη συνέχεια φαίνεται σαν να σπάει και να δημιουργεί μια κυματοειδή ουρά (αστάθεια ουράς). Αντίθετα το δημιουργούμενο υπερυψωμένο υποστρώμα είναι σταθερό στην περίπτωση όπου έχουμε ροή με μεγαλύτερο ιξώδες. Το φαινόμενο του υπερυψωμένου υποστρώματος εμφανίζεται και στην περίπτωση της ροής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα και μάλιστα σχηματίζεται ακόμα και για ροή με νερό.

Η μορφή του δημιουργούμενου υποστρώματος επηρεάζεται από τις παραμέτρους της ροής και πιο συγκεκριμένα από την γωνία κλίσης και τον αριθμό Re . Στο σχήμα 6.25 παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις υπερυψωμένου υποστρώματος. Είναι εμφανές ότι πίσω από την κύρια κορυφή υπάρχει ένα βαθούλωμα και στη συνέχεια ξανά αυξάνεται το πάχος του υμένα. Το «παίξιμο» αυτό του ύψους του υποστρώματος μπορεί να αποτελεί ένδειξη της αστάθειας της ουράς, όπου στην περίπτωση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος ισχύει σε πολύ μικρότερο βαθμό (έχει ήδη αποδειχθεί η σταθεροποιητική δράση της περιοδικής διαμόρφωσης). Στα τρία διαγράμματα (α, β, γ) έχουμε ροή σε διαδοχικά αυξανόμενη γωνία κλίσης, με σταθερή συχνότητα εξωτερικής διαταραχής (1 Hz). Στα δύο πρώτα διαγράμματα ($1,3^\circ$ & $2,6^\circ$) ο αριθμός Re είναι παρόμοιος και περίπου ίσος με 150 ενώ στο τρίτο διάγραμμα ($3,4^\circ$) είναι $Re=75$. Παρατηρούμε ότι, στην χαμηλότερη γωνία κλίσης, αμέσως μετά το

υπερυψωμένο υπόστρωμα το πάχος του υμένα μειώνεται με την τάση να πάρει και πάλι την τιμή που είχε μπροστά από την κύρια κορυφή. Αντιθέτως στις δύο επόμενες περιπτώσεις πίσω από το υπερυψωμένο υπόστρωμα φαίνεται να εμφανίζεται μια άλλη κορυφή. Επίσης για ροή στον ίδιο αριθμό Re το υπερυψωμένο υπόστρωμα φαίνεται να έχει το ίδιο μήκος ανεξάρτητα της γωνίας κλίσης (α, β). Αντίθετα, αν μειωθεί ο Re μειώνεται και το μήκος του υπερυψωμένου υποστρώματος (c).

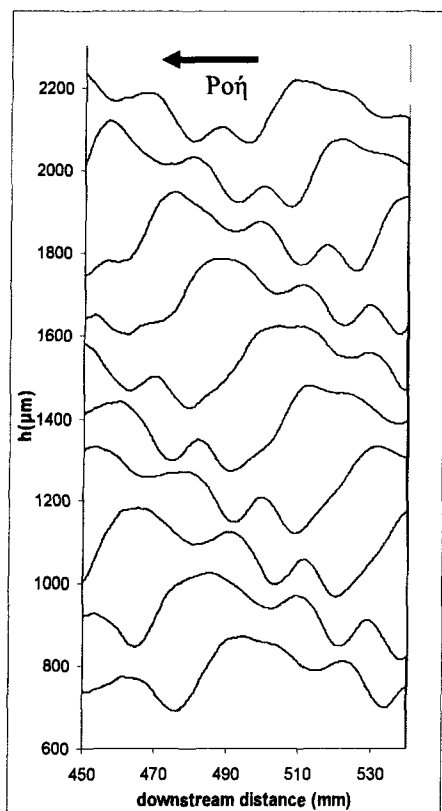


Σχήμα 6.25: Υπερυψωμένο υπόστρωμα πίσω από την κύρια κορυφή του κύματος για ροή νερού με συχνότητα εξωτερικής διαταραχής $f=1$ Hz και (α) $\phi=1,3^\circ$ και $Re=148$, (β) $\phi=2,6^\circ$ και $Re=145$ και (c) $\phi=3,4^\circ$ και $Re=75$. Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec.

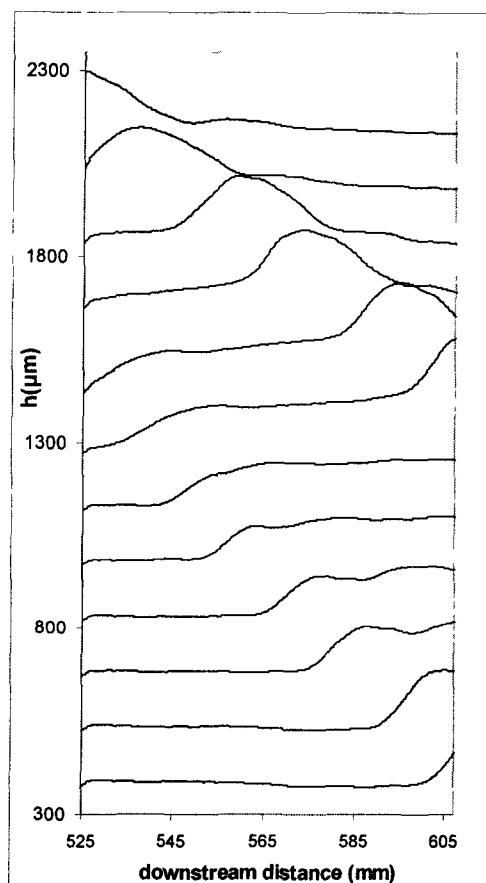
Παρά την σταθεροποιητική δράση της διαμόρφωσης του τοιχώματος, και σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται ένα φαινόμενο το οποίο μπορεί να παραλληλιστεί με το φαινόμενο της αστάθειας της ουράς που έχει παρατηρηθεί στη ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα. Στο σχήμα 6.26 έχουμε ροή νερού σε γωνία κλίσης $2,6^\circ$ και $Re=77$. Η συχνότητα διαταραχής έχει αυξηθεί σε $f=2$ Hz. Παρατηρούμε ότι στην ουρά του κύματος εμφανίζονται διακυμάνσεις σαν οι τριχοειδείς κυματισμοί του επόμενου κύματος να προσπαθούν να «σκαρφαλώσουν» στην ουρά αυτού που προηγείται. Επομένως αύξηση της συχνότητας διαταραχής οδηγεί σε αστάθεια του δημιουργούμενου υπερυψωμένου υποστρώματος με αποτέλεσμα την εμφάνιση κυματοειδούς ουράς.

Ένα άλλο φαινόμενο το οποίο έχει παρατηρηθεί σε ροή πάνω από ημιτονοειδές τοίχωμα μεγάλου μήκους κύματος ($L=30$ cm) και αριθμούς Re τάξης 10-100 είναι η εμφάνιση ενός υδραυλικού άλματος (Wienschem & Aksel 2004). Ένα παρόμοιο φαινόμενο παρατηρήθηκε για ροή νερού πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα με $2b=800$ μm και μήκος κύματος 12 mm, για χαμηλή συχνότητα εξωτερικής διαταραχής και αριθμό Re (≈ 30). Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές μόνο στην μεγαλύτερη γωνία κλίσης για την οποία πάρθηκαν μετρήσεις σε αυτές

τις συνθήκες ($\varphi=5,4^\circ$) και παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 6.27. Η χρονική απόσταση μεταξύ των διαδοχικών προφίλ είναι $\Delta t=0,1$ sec. Όπως λοιπόν παρατηρούμε από το σχήμα, στην περίπτωση αυτή έχουμε την εμφάνιση υπερυψωμένου υποστρώματος στο μπροστινό μέρος του κύματος. Το υπόστρωμα έχει ένα απότομο μπροστινό μέρος και θυμίζει υδραυλικό άλμα. Για να αποκλειστεί το γεγονός το φαινόμενο αυτό να οφείλεται σε ιδιαιτερότητα της διαταραχής, το πείραμα επαναλήφθηκε για δύο διαφορετικές διαταραχές ίδιας συχνότητας και τα αποτελέσματα ήταν τα ίδια.

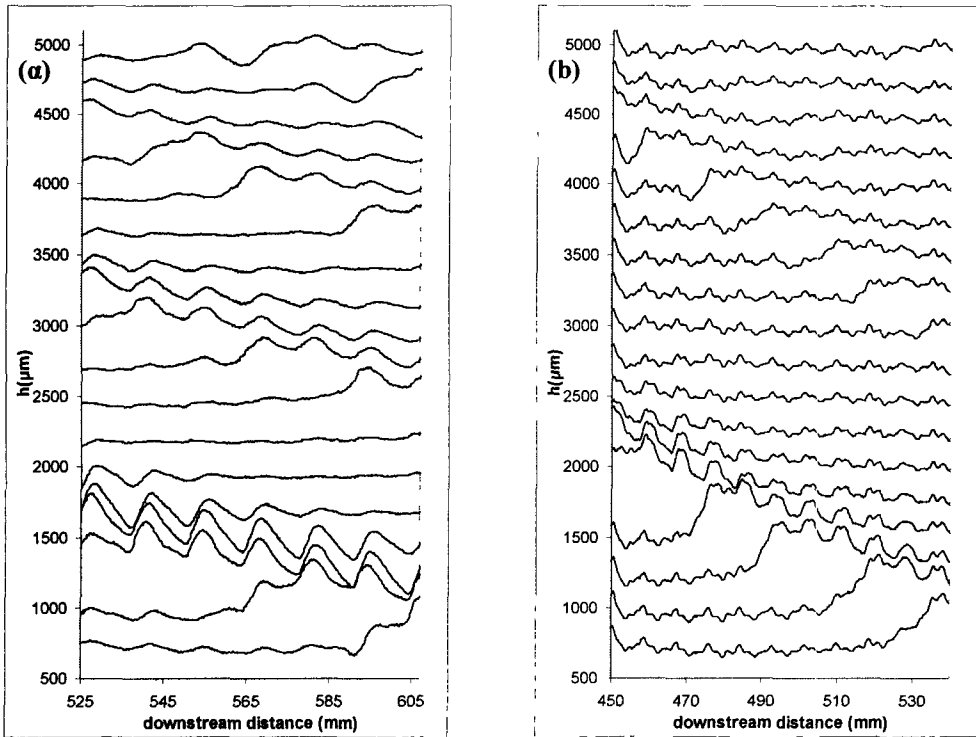


Σχήμα 6.26: Το φαινόμενο της αστάθειας της ουράς ($\varphi=2,6^\circ$, $f=2$ Hz, $Re=77$, $Ka=3365$).



Σχήμα 6.27: Το φαινόμενο του υπερυψωμένου υποστρώματος μπροστά από την κύρια κορυφή του κύματος ($\varphi=5,4^\circ$, $f=0,167$ Hz, $Re=30$, $Ka=3365$).

Τέλος, το φαινόμενο της γένεσης των δευτερευόντων παρασιτικών κορυφών πίσω από την κύρια κορυφή είναι κάτι το οποίο παρουσιάζεται και στην περίπτωση της ροής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα (σχήμα 6.28). Είναι φανερό ότι και στην περίπτωση (a) για ροή πάνω από τοίχωμα με $2b=400$ μm και στην περίπτωση (b) για ροή πάνω από τοίχωμα με $2b=800$ μm δημιουργείται η δευτερεύουσα παρασιτική κορυφή πίσω από το κύριο κύμα. Βέβαια, η σταθεροποιητική δράση της διαμόρφωσης επηρεάζει και το φαινόμενο αυτό. Παρατηρούμε ότι για μικρότερο ύψος διαμόρφωσης το δημιουργούμενο κύμα έχει μεγαλύτερο ύψος και επίσης εμφανίζονται και άλλα παρασιτικά κύματα πίσω από αυτό, σε αντίθεση με την περίπτωση του $2b=800$ μm όπου παρατηρούμε την εμφάνιση ενός μόνο κύματος πίσω από την κύρια κορυφή.



Σχήμα 6.28: Το φαινόμενο της γένεσης των παρασιτικών κορυφών για ροή νερού με συχνότητα εξωτερικής διαταραχής $f=0,167$ Hz, $Re=75$, $\varphi=3,4^\circ$ και **(a)** $2b=400$ μm και **(b)** $2b=800$ μm . Η χρονική απόσταση είναι $\Delta t=0,1$ sec.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια σημεία και τα συμπεράσματα της εργασίας. Η μελέτη που έγινε μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη. Τα πειράματα με ροή πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα και αυτά πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά των πλήρως ανεπτυγμένων μοναχικών κυμάτων και η επίδρασή τους στην διατμητική τάση στο τοίχωμα αλλά και η επίδραση της διαταραχής καθορισμένης συχνότητας στη ροή. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες από μια μέθοδοι συλλογής δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης τρία διαφορετικά είδη εισαγωγής διαταραχών ώστε να εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το είδος της διαταραχής. Στη δεύτερη περίπτωση μελετήθηκε η ροή πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα και πιο συγκεκριμένα η επίδραση του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος στα χαρακτηριστικά της ροής και στα μοναχικά κύματα. Η μελέτη βασίστηκε στην σύγκριση της ροής πάνω από τρία διαφορετικά τοιχώματα ορθογωνικής διαμόρφωσης ύψους $2b=200, 400$ και $800 \mu\text{m}$. Επίσης, για την περίπτωση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος, μελετήθηκε και η ροή κάτω από την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας, και τεκμηριώθηκαν τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και των δημιουργούμενων δομών.

7.1 Βασικά συμπεράσματα ροής πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα

7.1.1 Πλήρως ανεπτυγμένα μοναχικά κύματα: τα χαρακτηριστικά τους και η επίδρασή τους στην διατμητική τάση στο τοίχωμα.

Για την ανάλυση των χαρακτηριστικών των μοναχικών κυμάτων μελετήθηκε η περίπτωση ροής με ένα μοναχικό κύμα ανά περίοδο φόρτισης. Μάλιστα, αναλύθηκαν τόσο τα στάδια ανάπτυξης των μοναχικών κυμάτων όσο και τα πλήρως ανεπτυγμένα κύματα.

Η συχνότητα της διαταραχής επηρεάζει το ύψος των κυμάτων και πιο συγκεκριμένα, αύξηση της συχνότητας επιφέρει μείωση του ύψους τους αλλά και της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών. Επιπρόσθετα, ο αριθμός Re επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των κυμάτων. Πειράματα και προσομοιώσεις δείχνουν ότι τόσο η φασική ταχύτητα όσο και ύψος των κυμάτων εξαρτώνται από τον αριθμό Re , αλλά με διαφορετικό τρόπο. Σε χαμηλούς Re , το ύψος των κυμάτων μεγαλώνει ταχύτερα από ότι το μέσο πάχος υμένα (Nusselt), ενώ σε υψηλούς Re τα δύο μεγέθη αυξάνονται με τον ίδιο ρυθμό (ασυμπτωτική συμπεριφορά του ύψους του κύματος). Επίσης, με την αύξηση του αριθμού Re επηρεάζονται και οι τριχοειδείς κυματισμοί που προηγούνται της κύριας κορυφής του κύματος. Πιο συγκεκριμένα, οι κυματισμοί αυτοί μικραίνουν σε ύψος και γίνονται περισσότερο απότομοι.

Όσον αφορά τη συσχέτιση της ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από το ύψος τους, βρέθηκε ότι η σχέση που συνδέει την φασική ταχύτητα c με το μέγιστο πάχος του υμένα h_m είναι γραμμική. Αποδείχθηκε επίσης ότι η κατάλληλη αδιαστατοποίηση επιτυγχάνεται με το πάχος και την μέση ταχύτητα του υποστρώματος ως χαρακτηριστικού μήκους και ταχύτητας

αντίστοιχα. Η διαπίστωση αυτή υποδηλώνει τη σημασία του υποστρώματος ως της πραγματικής βασικής ροής πάνω στην οποία κινούνται τα μοναχικά κύματα.

Η διατμητική τάση στο τοίχωμα επηρεάζεται έντονα από το πέρασμα ενός μοναχικού κύματος. Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι αλλάζει το πρόσημο του ρυθμού διάτμησης σε μια μικρή περιοχή γύρω από το πρώτο βύθισμα μπροστά από την κύρια κορυφή του μοναχικού κύματος. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί απόδειξη τοπικής αναστροφής της ροής. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της διατμητικής τάσης είναι η έντονη διακύμανση της που ακολουθεί το πέρασμα των τριχοειδών κυματισμών και η οποία είναι εμφανώς δυσανάλογη με το μέγεθος τους. Είναι ενδεικτικό ότι το τοπικό μέγιστο που αντιστοιχεί στο πρώτο παρασιτικό κύμα είναι στο ίδιο περίπου μέγεθος με το απόλυτο μέγιστο που αντιστοιχεί στην κορυφή του κύματος. Επίσης, είναι χαρακτηριστική η απότομη πτώση του ρυθμού διάτμησης πίσω από την κύρια κορυφή που αντιστοιχεί στην «ουρά» που ακολουθεί το μοναχικό κύμα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης οδηγούν στην εξής γενικότερη διαπίστωση για τη σημασία των μοναχικών κυμάτων στη δυναμική της ροής κοντά στο τοίχωμα: Σε χαμηλούς Re , τα μοναχικά κύματα είναι ακόμη μικρά (αναπτυσσόμενα) και η επίδρασή τους αντίστοιχα ασθενική. Αυξάνοντας τον αριθμό Re , τα μοναχικά κύματα αναπτύσσονται γρηγορότερα και συνεπώς με το πέρασμά τους διαφοροποιούν ισχυρά τη ροή κοντά στο τοίχωμα. Περαιτέρω αύξηση του αριθμού Re οδηγεί σε συνεχώς αυξανόμενο μέσο πάχος υμένα, ενώ ο ρυθμός αύξησης του ύψους των κυμάτων μειώνεται ασυμπτωτικά. Ως αποτέλεσμα, η επίδραση των μοναχικών κυμάτων γίνεται σε μεγάλους Re σταδιακά ασθενέστερη. Στις συνθήκες των παρόντων πειραμάτων, φαίνεται ότι η κρίσιμη περιοχή μέγιστης επίδρασης είναι $Re=30-40$.

7.1.2 Ροή υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής καθορισμένης συχνότητας

Η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής μεταβλήθηκε από 0,25 Hz έως 6,0 Hz. Η μη-γραμμική εξέλιξη των κυμάτων δεν είναι ίδια σε όλα τα πειράματα αλλά εξαρτάται από την συχνότητα της επιβαλλόμενης εξωτερικής διαταραχής. Έτσι, μπορούμε να χωρίσουμε την ροή σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, αφενός την ροή στην οποία έχουμε ένα κύμα ανά περίοδο φόρτισης και αφετέρου τη ροή με περισσότερα του ενός κύματα ανά κύκλο φόρτισης της εξωτερικής διαταραχής. Η μορφή των κυμάτων στην περίπτωση που έχουμε ένα κύμα ανά περίοδο έχει ήδη μελετηθεί στη βιβλιογραφία. Με την παρούσα εργασία, επιβεβαιώθηκε η δημιουργία περιοδικών κυμάτων με διαταραχές υψηλής συχνότητας και μοναχικών κυμάτων με διαταραχές χαμηλής συχνότητας.

Εξετάστηκε για πρώτη φορά συστηματικά η επίδραση διαταραχών πολύ χαμηλής συχνότητας ($f \rightarrow 0$), και τεκμηριώθηκε η δημιουργία μιας σειράς από παρασιτικά κύματα τα οποία ακολουθούν το κύριο κύμα. Διαπιστώθηκε ότι η διαδικασία εμφάνισης των παρασιτικών κορυφών παραμένει ίδια σε κάθε περίοδο επιβολής της εξωτερικής διαταραχής. Η παρατήρηση αυτή διαψεύδει την διαδεδομένη υπόθεση ότι οι παρασιτικές κορυφές δημιουργούνται λόγω πρωτογενούς αστάθειας του υποστρώματος.

Μελετήθηκαν οι συνθήκες εμφάνισης των παρασιτικών κορυφών και διαπιστώθηκε η ύπαρξη μίας κρίσιμης συχνότητας, f_p , πάνω από την οποία αυτές δεν παρατηρούνται. Η τιμή της κρίσιμης συχνότητας f_p αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας κλίσης ή του αριθμού Re και τείνει ασυμπτωτικά σε μια σταθερή τιμή για μεγάλους Re . Η εξέλιξη των παρασιτικών κορυφών εξαρτάται από τη συχνότητα διαταραχής, f . Σε συχνότητες λίγο μικρότερες από την κρίσιμη

($f-f_p$) παρατηρούμε ότι η παρασιτική κορυφή που δημιουργείται συγχωνεύεται με την κύρια κορυφή που ακολουθεί. Αντίθετα, όταν $f \ll f_p$ δημιουργούνται περισσότερες της μίας παρασιτικές κορυφές που προλαβαίνουν να αναπτυχθούν σε μεγάλα κύματα και αποφεύγουν τη συγχώνευση. Με τον τρόπο αυτό καταστρέφεται μόνιμα η κανονικότητα της κυματοσειράς.

Διερευνήθηκε ο μηχανισμός του φαινομένου και τεκμηριώθηκε ότι τα παρασιτικά κύματα δημιουργούνται σε ένα συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης της κύριας κορυφής, πριν αυτή πάρει τη μορφή μοναχικού κύματος, από ένα βαθούλωμα το οποίο εμφανίζεται στην ουρά της. Ειδικότερα, το κύμα αυξάνει σε μέγεθος έλκοντας μάζα από το υπόστρωμα πίσω του, και με τον τρόπο αυτό δημιουργεί το βαθούλωμα που γεννά την παρασιτική κορυφή. Αντίστροφη συμπεριφορά έχει ένα κύμα μεγαλύτερο από το πλήρως ανεπτυγμένο (πχ. το αποτέλεσμα μίας διαδικασίας συγχώνευσης). Στην περίπτωση αυτή, το κύμα τείνει να μειωθεί στο κανονικό μέγεθος απελευθερώνοντας μάζα προς το υπόστρωμα, και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται το υπερυψωμένο υπόστρωμα και η αστάθεια της ουράς.

7.2 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα υπό την επίδραση φυσικού θορύβου.

Βασικά ερωτήματα που επιχειρήθηκε να απαντηθούν από την παρούσα εργασία όσον αφορά τη ροή πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα είναι: (1) Ποια είναι η μορφολογία και οι δομές της στατικής ροής; (2) Κάτω από ποιες συνθήκες είναι η στατική ροή ευσταθής; (3) Ποια τα χαρακτηριστικά της κυματοειδούς, πλήρως ανεπτυγμένης ροής κάτω από ασταθείς συνθήκες; Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης του τοιχώματος είναι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη ροή ενώ η ροή σε επίπεδο τοίχωμα αποτελεί σημείο αναφοράς για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Δείχθηκε ότι η μόνιμη ροή εμφανίζει μια στατική παραμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας, ίδιου μήκους κύματος με το τοίχωμα, που έχει τα χαρακτηριστικά συντονισμού. Το ύψος της παραμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας εξαρτάται από τον αριθμό Re και φτάνει έως μια μέγιστη τιμή. Επίσης, είναι ανεξάρτητο του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος, αλλά, το αρμονικό περιεχόμενό της εξαρτάται από αυτό. Διαπιστώθηκε ότι η μετάβαση στην τρισδιάστατη δομή (η οποία αποτελείται από εγκάρσιες σειρές βαθουλωμάτων κατά μήκος των κοιλοτήτων του τοιχώματος) συμβαίνει πάνω από έναν αριθμό Re , για τον οποίο η διδιάστατη δομή αποκτά μέγιστο ύψος κυματισμών ελεύθερης επιφάνειας, και το οποίο είναι ίδιο για όλα τα τοιχώματα και όλες τις γωνίες κλίσης που ελέγχθηκαν.

Τεκμηριώθηκε ότι, με αύξηση του Re , η στατική διδιάστατη ροή μεταπίπτει από ευσταθής σε ασταθή με την εμφάνιση διαταραχών κατάντη της ροής οι οποίες εξελίσσονται σε οδεύοντα κύματα. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι ο κρίσιμος για την ευστάθεια αριθμός Re αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό με την αύξηση του ύψους της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Αυτό το αποτέλεσμα, το οποίο είχε προβλεφθεί θεωρητικά (Wierschem & Aksel 2003), αποδεικνύει ότι το μεγάλο ύψος τοιχώματος έχει αξιοσημείωτη σταθεροποιητική επίδραση στη στατική ροή.

Όσον αφορά την πλήρως ανεπτυγμένη ροή κάτω από ασταθείς συνθήκες, παρατηρήθηκε ότι η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας καθορίζεται από την παρουσία σχεδόν μοναχικών κυμάτων (απότομο μπροστινό μέρος/ομαλή ουρά) τα οποία υπερτίθενται στην ακίνητη

κυματοειδή διαμόρφωση της στατικής ροής. Ροή πάνω από τοίχωμα με μεγάλο πλάτος κανονικοποιεί τη συχνότητα εμφάνισης οδοντών κυμάτων και αυξάνει το μέγεθος τους σε σχέση με τα αντίστοιχα κύματα που παρατηρούνται σε ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα. Η διαφορά αποδίδεται στις συνεχείς αλληλεπιδράσεις των κυμάτων με το στατικά διαμορφωμένο υπόστρωμα.

7.3 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα υπό την επίδραση εξωτερικής διαταραχής.

Σε ροή πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα επιβλήθηκε εξωτερική διαταραχή συγκεκριμένης συχνότητας με σκοπό την εμφάνιση μιας κανονικής σειράς μοναχικών κυμάτων από την είσοδο του καναλιού. Στόχος ήταν η μελέτη της εξέλιξης των κυμάτων και των υπόλοιπων δομών που δημιουργούνται.

Αποδείχθηκε ότι, όπως και στην περίπτωση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος, για μικρούς αριθμούς Re ο υμένας είναι ευσταθής ανεξάρτητα της συχνότητας της επιβαλλόμενης διαταραχής. Πέρα από έναν Re_{cr} , η εισαγωγή διαταραχής μικρής συχνότητας έχει σαν αποτέλεσμα ασταθή ροή ενώ η εισαγωγή διαταραχής μεγαλύτερης συχνότητας ($f > f_{cr}$) σταθεροποιεί την ροή. Παρατηρήθηκε ότι η υποκατάσταση του επίπεδου τοιχώματος από το περιοδικά διαμορφωμένο έχει ως αποτέλεσμα την εντυπωσιακή συρρίκνωση της περιοχής αστάθειας της ροής.

Συγχρόνως, παρατηρήθηκε για ορισμένες συνθήκες ροής, μία ισχυρή απώλεια συσχέτισης της συχνότητας της ελεύθερης επιφάνειας με τη συχνότητα της διαταραχής εισόδου, που παραπέμπει σε μετάπτωση σε χαοτική συμπεριφορά. Η μετάπτωση προκαλείται από αύξηση είτε του αριθμού Re είτε της συχνότητας διαταραχής.

Συγκρίνοντας, τη ροή πάνω από επίπεδο και δύο περιοδικά διαμορφωμένα τοιχώματα επιβεβαιώθηκε η σταθεροποιητική επίδραση της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος στη ροή. Ειδικότερα, για τους χαμηλούς αριθμούς Re εξακριβώθηκε μείωση του ύψους των κυμάτων, καθώς και της ισχύος των υψηλότερων αρμονικών κάθε κύματος (οι υψηλότερες αρμονικές αποτελούν ένδειξη της μη-γραμμικότητας της δομής). Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της διαμόρφωσης τόσο μεγαλώνει και η περιοχή ευστάθειας της ροής.

Μελετήθηκε η μορφή των δημιουργούμενων κυμάτων συναρτήσει της συχνότητας της διαταραχής. Έτσι, παρατηρήθηκε μετάβαση από πλήρως ανεπτυγμένα μοναχικά κύματα για χαμηλές συχνότητες διαταραχής, σε μια ακολουθία από κύματα τα οποία έχουν την μορφή του μοναχικού για μεγαλύτερες συχνότητες, για να καταλήξουμε σε περιοδικά ημιτονοειδή κύματα για ακόμα μεγαλύτερες συχνότητες εξωτερική διαταραχής.

Όσον αφορά τη μορφή της στατικής δομής που υπερτίθεται των κυμάτων, αποδείχθηκε ότι είναι ανάλογη του τοπικού πάχους του υμένα. Με άλλα λόγια, για μεγαλύτερο Re η στατική δομή έχει μεγαλύτερο πλάτος αλλά και για σταθερό Re στην κορυφή του κύματος, που το τοπικό πάχος του υμένα είναι μεγαλύτερο, το πλάτος της στατικής διαμόρφωσης είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στο υπόστρωμα.

Επίσης, μελετήθηκε το ύψος των δημιουργούμενων κυμάτων συναρτήσει της γωνίας κλίσης, του αριθμού Re και της συχνότητας της εξωτερικής διαταραχής. Παρατηρήθηκε ότι για

σταθερή γωνία κλήσης το ύψος των κυμάτων παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από την συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής.

Τέλος, παρατηρήθηκαν στο περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα δομές και αλληλεπιδράσεις τους, που έχουν εμφανιστεί και στο επίπεδο. Έτσι, είδαμε το φαινόμενο της συγχώνευσης δύο κυμάτων την δημιουργία διπλής ή και πολλαπλής κορυφής στην ροή, την εμφάνιση του υπερυψωμένου υποστρώματος και την αστάθειας της ουράς. Συγχρόνως, παρατηρήθηκε για μικρές συχνότητες διαταραχής, το φαινόμενο της γένεσης νέων παρασιτικών κορυφών πίσω από την κύρια κορυφή του κύματος.

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. ALEKSEENKO, S .V., NAKORYAKOV, V. Y. & POKUSAEV, B. G. 1985 “Wave formation on a vertical falling liquid film”. *AIChE J.* **31**, 1446-1460.
2. ΒΛΑΧΟΓΙΑΝΝΗΣ, Μ., 2001 «Πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο και σε κυματοειδές τοίχωμα», Διδακτορική Διατριβή, Παν/μιο Θεσσαλίας
3. BONTOZOGLOU, V., 2000 “Laminar film flow along a periodic wall”. *CMES* **1**, 129-138.
4. BONTOZOGLOU, V. & PAPAPOLYMEROU, G. 1997 “Laminar flow down a wavy incline”. *Int. J. Multiphase Flow* **23**, 69-79.
5. CHANG, H.-C., DEMEKHIN, E. A. & KOPELEVICH, D. I. 1996 “Local stability theory of solitary pulses in an active medium”. *Physica D* **97**, 353.
6. CHANG, H.-C., 1994 “Wave evolution on a falling film”. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **26**, 103-136.
7. CHANG, H.-C., DEMEKHIN, E. A. & KAL Aidin, E. 1995 “Interaction dynamics of solitary waves on a falling film”. *J. Fluid Mech.* **294**, 123-154.
8. CHANG, H.-C., DEMEKHIN, E. A. & KAL Aidin, E. 1998 “Generation and suppression of radiation by solitary pulses”. *SIAM J. Appl. Math.* **58**, 1246.
9. CHANG, H.-C., DEMEKHIN, E. A. & SAPRIKIN, S. S. 2002 “Noise-driven wave transitions on a vertically falling film”. *J. Fluid Mech.* **294**, 123.
10. CHANG, H.-C., DEMEKHIN, E. A. 1999 “Mechanism for drop formation on a coated vertical fibre”. *J. Fluid Mech.* **380**, 233.
11. DASSORI, C. G., DEIBER, J. A. & CASSANO, A. E. 1984 “Slow two-phase flow through a sinusoidal channel”. *Int. J. Multiphase Flow* **10**, 181-193.
12. HANRATTY T. J. & CAMPBELL, T. J. 1996 “Measurement of wall shear stress”. *Fluid Mechanics Measurements 2nd edn*, ed R J Goldstein (Washington, DC: Taylor And Francis) 575-648.
13. KANG, F. & CHEN, K., 1995 “Gravity-driven two-layer flow down a slightly wavy periodic incline at low Reynolds numbers”. *Int. J. Multiphase Flow* **21**, 501-513.

14. KAPITZA, P. L., KAPITZA, S. P. 1949 "Wave flow of thin fluid layers of liquid". *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **19**: 105-20; also in *Collected Works of L. P. Kapitza*, ed. D. Ter Haar. Oxford: Pergamon (1965).
15. LEE, J.-J. & MEI, C. C. 1996 "Stationary waves on an inclined sheet of viscous fluid at high Reynolds and moderate Weber numbers". *J. Fluid Mech.* **307**, 191-229.
16. LIU, J., PAUL J. D., & GOLLUB, J. P. 1993 "Measurements of the primary instabilities of film flow". *J. Fluid Mech.* **250**, 69-101.
17. LIU, J. & GOLLUB, J. P. 1994 "Solitary wave dynamics of film flows". *Phys. Fluids* **6**, 1702-1712.
18. MALAMATARIS, N. T. & BONTOZOGLU, V. 1999 "Computer aided analysis of viscous film flow along an inclined wavy wall". *J. Comp. Physics.* **154**, 372-392.
19. MALAMATARIS, N., VLACHOGIANNIS M. & BONTOZOGLU, V. 2002 "Solitary waves on inclined films: Flow structure and binary interactions". *Phys. Fluids* **14**, 1082.
20. NAKORYAKOV, V. E., POKUSAEV, B. G. & ALEKSEENKO, S. V. 1976 "Two-dimensional roll waves on vertical falling liquid films". *Soviet J. Engng. Phys.* **30**, 780.
21. NEGNY, S., MEYER, M. & PREVOST, M. 2001 "Study of laminar falling film flowing over a wavy wall column: Part I. Numerical investigation of the flow pattern and the coupled heat and mass transfer". *Int. J. Heat and Mass Transfer* **44**, 2137-2146.
22. NEGNY, S., MEYER, M. & PREVOST, M. 2001 "Study of laminar falling film flowing over a wavy wall column: Part II. Experimental validation of hydrodynamic model". *Int. J. Heat and Mass Transfer* **44**, 2147-2154.
23. POZRIKIDIS, C. 1988 "The flow of a liquid film along a periodic wall". *J. Fluid Mech.* **188**, 275-300.
24. PUMIR, A., MANNEVILLE, P. & POMEAU, Y. 1983 "On solitary waves running down an inclined plane". *J. Fluid Mech.* **135**, 27.
25. RAMASWAMY, B., CHIPPADA S. & JOO, S. W. 1996 "A full-scale numerical study of interfacial instabilities in thin-film flows". *J. Fluid Mech.* **325**, 163.
26. SCHOLLE, M., WIERSCHEM, A. & AKSEL, N. 2004 "Creeping films with vortices over strongly undulated bottoms". *Acta Mechanica* **168**, 167-193.

27. ΣΕΡΙΦΗ Κ., 2006 «Προσομοίωση της ροής υμένα πάνω από επίπεδο και περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα», Διδακτορική Διατριβή, Παν/μιο Θεσσαλίας
28. SHETTY, L. & CERRO, R. L. 1993 “Flow of a thin film over a periodic surface”. *Int. J. Multiphase Flow* **18**, 495-516.
29. SHKADOV, V. Ya 1967 “Wave conditions in the flow of thin layer of a viscous liquid under the action of gravity”. *Inz. Akad. Nauk. SSSR, Mekh. Zhidk i Gaza* **1**, 43-50.
30. TIHON, J., TOVCHIGRECHKO, V., SOBOLIC, V. & WEIN, O. 2003 “Electrodiffusion detection of the near-wall flow reversal in liquid films at the regime of solitary waves”. *J. Appl. Electrochemistry* **33**, 577.
31. TRIFONOV, YU. YA. 1998a “Viscous liquid film flows over a periodic surface”. *Int. J. Multiphase Flow* **24**, 1139-1161.
32. TRIFONOV, YU. YA. 1998b “Viscous liquid film flows over a vertical corrugated surface and waves formation on the film free surface”. In *3rd Intl. Conf. on Multiphase Flow* Lyon, France.
33. TRIFONOV, YU. YA. & TSVELODUB, O. YU. 1991 “Nonlinear waves on the surface of a falling liquid film. Part 1. Waves of the first family and their stability”. *J. Fluid Mech.* **229**, 531-554.
34. VLACHOGIANNIS, M. & BONTOZOGLOU, V. 2001 “Observations of solitary wave dynamics of film flows”. *J. Fluid Mech.* **435**, 191.
35. VLACHOGIANNIS, M. & BONTOZOGLOU, V. 2002 “Experiments on laminar film flow along a periodic wall”. *J. Fluid Mech.* **457**, 133.
36. WANG, C.-Y. 1981 “Liquid film flowing slowly down a wavy inclined”. *AIChE J.* **27**, 207-212.
37. WIERSCHEM, A., SCHOLLE, M. & AKSEL, N. 2002 “Comparison of different theoretical approaches to experiments on film flow down an inclined wavy channel”. *Exp. Fluids* **33**, 429-442.
38. WIERSCHEM, A., SCHOLLE, M. & AKSEL, N. 2003 “Vortices in film flow over strongly undulated bottom profiles at low Reynolds numbers”. *Phys. Fluids* **15**, 426-435.
39. WIERSCHEM, A. & AKSEL, N. 2003 “Instability of a liquid film flowing down an inclined wavy wall”. *Physica D* **186**, 221-237.

40. WIERSCHEM, A. & AKSEL, N. 2004 “Hydraulic jumps and standing waves in gravity-driven flows of viscous liquids in wavy open channels”. *Phys. Fluids* **16**, 3868-3877.
41. WIERSCHEM, A. & AKSEL, N. 2004 “Influence of inertia on eddies created in films creeping over strongly undulated substrates”. *Phys. Fluids* **16**, 4566-4574.
42. YIH, C.-S. 1963 “Stability of liquid flow down an inclined plane”. *Phys. Fluids* **6**, 321-334.
43. ZHAO L. & CERRO R.L. 1992 “Experimental Characterization of Viscous Film Flows over Complex Surfaces”. *Int. J. Multiphase Flow* **18**, 495-516.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΠΟΣΟΣΤΟΥ Κ.Β. ΓΛΥΚΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Glycerol, %	Density					Glycerol, %	Density				
	15°C.	15.5°C.	20°C.	25°C.	30°C.		15°C.	15.5°C.	20°C.	25°C.	30°C.
65	1.17030	1.17000	1.16750	1.16475	1.16195	30	1.07455	1.07435	1.07270	1.07070	1.06855
64	1.16755	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	29	1.07195	1.07175	1.07010	1.06815	1.06605
63	1.16480	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	28	1.06935	1.06915	1.06755	1.06560	1.06355
62	1.16200	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	27	1.06670	1.06655	1.06495	1.06305	1.06105
61	1.15925	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	26	1.06410	1.06390	1.06240	1.06055	1.05855
60	1.15650	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	25	1.06150	1.06130	1.05980	1.05800	1.05605
59	1.15370	1.15340	1.15105	1.14835	1.14555	24	1.05885	1.05870	1.05720	1.05545	1.05350
58	1.15095	1.15065	1.14830	1.14560	1.14285	23	1.05625	1.05610	1.05465	1.05290	1.05100
57	1.14815	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	22	1.05365	1.05350	1.05205	1.05035	1.04850
56	1.14535	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	21	1.05100	1.05090	1.04950	1.04780	1.04600
55	1.14260	1.14230	1.14005	1.13740	1.13470	20	1.04840	1.04825	1.04690	1.04525	1.04350
54	1.13980	1.13955	1.13730	1.13465	1.13195	19	1.04590	1.04575	1.04440	1.04280	1.04105
53	1.13705	1.13680	1.13455	1.13195	1.12925	18	1.04335	1.04325	1.04195	1.04035	1.03860
52	1.13425	1.13400	1.13180	1.12920	1.12650	17	1.04085	1.04075	1.03945	1.03790	1.03615
51	1.13150	1.13125	1.12905	1.12650	1.12380	16	1.03835	1.03825	1.03695	1.03545	1.03370
50	1.12870	1.12845	1.12630	1.12375	1.12110	15	1.03580	1.03570	1.03450	1.03300	1.03130
49	1.12600	1.12575	1.12360	1.12110	1.11845	14	1.03330	1.03320	1.03200	1.03055	1.02885
48	1.12325	1.12305	1.12090	1.11840	1.11580	13	1.03080	1.03070	1.02955	1.02805	1.02640
47	1.12055	1.12030	1.11820	1.11575	1.11320	12	1.02830	1.02820	1.02705	1.02560	1.02395
46	1.11780	1.11760	1.11550	1.11310	1.11055	11	1.02575	1.02565	1.02455	1.02315	1.02150
45	1.11510	1.11490	1.11280	1.11040	1.10795	10	1.02325	1.02315	1.02210	1.02070	1.01905
44	1.11235	1.11215	1.11010	1.10775	1.10530	9	1.02085	1.02075	1.01970	1.01835	1.01670
43	1.10960	1.10945	1.10740	1.10510	1.10265	8	1.01840	1.01835	1.01730	1.01600	1.01440
42	1.10690	1.10670	1.10470	1.10240	1.10005	7	1.01600	1.01590	1.01495	1.01360	1.01205
41	1.10415	1.10400	1.10200	1.09975	1.09740	6	1.01360	1.01350	1.01255	1.01125	1.00970
40	1.10145	1.10130	1.09930	1.09710	1.09475	5	1.01120	1.01110	1.01015	1.00890	1.00735
39	1.09875	1.09860	1.09665	1.09445	1.09215	4	1.00875	1.00870	1.00780	1.00655	1.00505
38	1.09605	1.09590	1.09400	1.09180	1.08955	3	1.00635	1.00630	1.00540	1.00415	1.00270
37	1.09340	1.09320	1.09135	1.08915	1.08690	2	1.00395	1.00385	1.00300	1.00180	1.00035
36	1.09070	1.09050	1.08865	1.08655	1.08430	1	1.00155	1.00145	1.00060	0.99945	0.99800
35	1.08800	1.08780	1.08600	1.08390	1.08165	0	0.99913	0.99905	0.99823	0.99708	0.99568
34	1.08530	1.08515	1.08335	1.08125	1.07905						
33	1.08265	1.08245	1.08070	1.07860	1.07645						
32	1.07995	1.07975	1.07800	1.07600	1.07380						
31	1.07725	1.07705	1.07535	1.07335	1.07120						

ΜΑΤΛΑΒ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

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

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

```

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

```

2. Πρόγραμμα μετατροπής των εικόνων σε πίνακες

```

%This is an m file for image processing
[namesV,nameimage,WL,BL,number_of_images,hnusselt]...
=textread('Input_Production_of_conv1height.txt','%s%s%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(namesV)
nummm=char(namesV(i));
load(nummm)
clear Io first addition Iomax dhn
time_delay=0.1;
tvector=(time_delay:time_delay:number_of_images*time_delay);
nameimageV=nameimage(i);
nameim=char(nameimageV);
q=(WL(i)-BL(i))/255;
BL_matrix(1:576,1:768)=BL(i);
for num=1:200
k=round(576*(num-1)+1);
kk=round(576*num)
nameim
Iof=double(imread(strcat(nameim,int2str(num),'.bmp')));
Iof_temporary=Iof*q+BL_matrix-Ionew-Io_totalmin;
clear Iof
height=(Iof_temporary-bcoef)/(acoef)+ho;
clear Iof_temporary
hall(k:kk,1:768)=int16(height(1:576,1:768));
clear height
end
%-----save-----
save(strcat('d:\matlab\apotelesmata ',strcat(strcat(nameim,'with',nummm))), 'hall','xvector','zvector','tvector','number of images',nummm)
clear hall
end
clear

```

3. Πρόγραμμα δημιουργίας διαγραμμάτων χωρικής μεταβολής του πάχους του υμένα

```

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

```

```

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

```

4. Πρόγραμμα δημιουργίας διαγραμμάτων χρονικής μεταβολής ενός σημείου της ροής

```

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

```



```

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

```

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

```

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

```

```

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

```

6. Πρόγραμμα υπολογισμού φάσματος συχνότητας

```

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

```

```

TDAnew=double(TDA(x1:x2-1,z1:z2-1));
height(i,:)=TDAnew(xposition,:);
clear TDA TDAnew
end
clear hall
meanh=mean(height);
for j=1:number_images(kkk)
    heightmeion(j,:)=height(j,:)-meanh(j);
end
for jj=1:number_images(kkk)
    heightdia(jj,:)=height(jj,:)/meanh(jj);
end
hheight=height';
hheightmeion=heightmeion';
hheightdia=heightdia';
Y=fft(hheightmeion);
Pyy=Y.* conj(Y) / 650;
save(strcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat('fft (x0 y 1) (288 y 1) ',char(nammm))),Pyy,'y','hheight','heightmeion','heightdia','x1','/1','x2','/2')
clear heightmeion heightdia height Y meanh tvector xvector zvector xv zv hheight
harmonics=1:1:40;
ln=round(5);
sel=round((number_images(kkk)/ln));
for i=1:sel
    i
    k2=round(i*ln);
    k1=round((i-1)*ln+1);
    Pyynew=Pyy(:,k1:k2);
    for ii=1:ln
        styl=char(st(ii));
        li=lin(ii);
        plot(harmonics,Pyynew(2:41,ii),styl,'linewidth',li)
        hold on
    end
    xlabel('harmonics')
    ylabel('Abs. Magnitude')
    title(['Frequency spectrum. tb ',num2str(k1),' ',char(nammm)])
    hold off
    h1=gcf;
    set(h1,'PaperOrientation','portrait')
    saveas(h1,strcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'Frequency spectrum'),'tif')))
    save (strcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat(nammm,'tb',num2str(k1),'Frequency spectrum'),'dat')),Pyynew,'-ascii')
    Pyy1=Pyy(2:51,:);
    Pyy2=Pyy1';
    PyyT1=mean(Pyy2);
    PyyT(kkk,:)=PyyT1;
end
clear Pyynew Pyy Pyy1 Pyy2
end
PyyTT=PyyT';
save (strcat('e:\matlab\apotelesmata\',strcat(strcat('fft(x0,ymean,t)','water','3#4C\dist'),'dat')),PyyTT,'-ascii')
clear

```

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ Δ. ΑΡΓΥΡΙΑΔΗ

Ημερομηνία γέννησης: 15 Μαρτίου 1978
Τόπος γέννησης: Λάρισα
Διεύθυνση: Νιρβάνα 19, 41221, Λάρισα
Τηλέφωνο: 2410 257541(Σπίτι) 6972 805046(Κινητό)
E-mail: argyriad@uth.gr, k.argyriadi@ebetam.gr

ΣΠΟΥΔΕΣ

- **Διδακτορικό Δίπλωμα**, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας. (Οκτώβριος 2005).
Τίτλος διατριβής: " Ροή υγρού υμένα: επίδραση χαρακτηριστικών διαταραχής και μορφολογίας τοιχώματος".
Επιβλέπων: καθηγητής Β. Μποντόζογλου
- **Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης**, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας. (Μάρτιος 2004)
Μεταπτυχιακή εργασία: "Επίδραση συχνότητας διαταραχής στη δυναμική υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο".
Επιβλέπων: καθηγητής Β. Μποντόζογλου
- **Δίπλωμα Μηχανολόγου Μηχανικού**, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα (Δεκέμβριος 2000)
Διπλωματική εργασία: "Ρευστοδυναμική ανάλυση δικτύου Φυσικού Αερίου".
Επιβλέπων: καθηγητής Δ. Μάργαρης

ΕΡΓΑΣΙΑΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

Ιούνιος 2005 – σήμερα EBETAM Α.Ε. Τμήμα Ερευνητικών Προγραμμάτων.

ΥΠΟΤΡΟΦΙΕΣ

- NATO Advanced Study Institute (ASI) fellowship, Cesme, Izmir, Turkey, July 18-30, 2004.
- Euromech fellowship, Toulouse, August 24-28, 2003.
- Marie Curie Fellowship, Institute of Chemical Process Fundamentals, Academy Of Sciences of the Czech Republic (Μάρτιος 2003-Μάιος 2003).
- Υποτροφία από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας για το ακαδημαϊκό έτος 2000-2001.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΑ

- Εμβάθυνση στα φαινόμενα μεταφοράς
- Θεωρία ευστάθειας θερμοϋδραυλικών συστημάτων
- Δυναμική Συστημάτων
- Ρευστομηχανική (εμβάθυνση)
- Μηχανική χημικών διεργασιών
- Τεχνικές μετρήσεων στις θερμικές επιστήμες

ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

Υποβοήθηση διδασκαλίας στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας:

- Φαινόμενα μεταφοράς (εαρινό εξάμηνο 2000-2001)
- Φυσικές διεργασίες (χειμερινό εξάμηνο 2001-2002)
- Μετάδοση θερμότητας I (χειμερινό εξάμηνο 2001-2002)
- Φυσικές διεργασίες (χειμερινό εξάμηνο 2002-2003)
- Μετάδοση θερμότητας I (χειμερινό εξάμηνο 2003-2004)
- Θεωρία ευστάθειας θερμοϋδραυλικών συστημάτων (εαρινό εξάμηνο 2003-2004)
- Φαινόμενα μεταφοράς (εαρινό εξάμηνο 2003-2004)
- Μετάδοση θερμότητας I (χειμερινό εξάμηνο 2004-2005)
- Ενεργειακή οικονομία (χειμερινό εξάμηνο 2004-2005)
- Φαινόμενα μεταφοράς (εαρινό εξάμηνο 2004-2005)

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

- J. Tihon, K. Serifi, K. Argyriadi and V. Bontozoglou, "Solitary waves on inclined films: their characteristics and the effect on wall shear stress", in preparation
- K. Argyriadi, M. Vlachogiannis and V. Bontozoglou, "Experimental study of inclined film flow quid film along periodic corrugations: The effect of wall height", To appear in Physics of fluids
- K. Argyriadi, K. Serifi and V. Bontozoglou, 2004, "Nonlinear dynamics of inclined films under low-frequency forcing", Physics of fluids, July 2004, Vol 16, No 7

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

- Βλαχογιάννης Μ., Αργυριάδη Κ., Σερίφη Κ., Μαλαματάρης Ν., Μποντόζογλου Β, "Πρόσφατες συνεισφορές του Εργαστηρίου Φυσικών και Χημικών Διεργασιών στην κατανόηση της μη γραμμικής δυναμικής υγρών υμένων." ΡΟΗ2004: Ερευνητικές δραστηριότητες στα φαινόμενα ροής ρευστών στην Ελλάδα, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, Νοέμβριος 2004.
- Μ. Βλαχογιάννης, Κ. Αργυριάδη και Β. Μποντόζογλου, 2004, "Solitary waves on a liquid film flowing along a periodic wall" 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM), Βαρσοβία, 15-21 Αυγούστου 2004.
- K. Argyriadi, K. Serifi and V. Bontozoglou, 2002, "Nonlinear dynamics of inclined films under low-frequency disturbance", 5th Euromech Fluid Mechanics Conference, Τουλούζη, 24-28 Αυγούστου 2003.
- Κ. Αργυριάδη, Μ. Βλαχογιάννης και Β. Μποντόζογλου, 2002, "Μη γραμμική εξέλιξη υγρών υμένων: η επίδραση της συχνότητας διαταραχής" Ροή 2002, Πάτρα, 2-3 Οκτωβρίου 2002.

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΕΜΙΝΑΡΙΩΝ

- "Microscale Heat Transfer with Applications in Biological and Microelectromechanical Systems" (18-30 Ιουλίου 2004), Διοργάνωση: NATO Advanced Study Institute (ASI).
- "Φαινόμενα διάχυσης" (8-18 Ιουλίου 2003), Διοργάνωση: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- "Ενεργειακοί Επιθεωρητές" (26 Μαρτίου 2002 – 05 Απριλίου 2002) Διοργάνωση: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

- “Ανάπτυξη, Πιλοτική Παραγωγή & Δοκιμαστική Εφαρμογή Συνθέτου υλικού υπερυψηλής Αντοχής, για τη βελτίωση της αντισεισμικής Συμπεριφοράς Κατασκευών”, ΕΠΙΑΝ/ ΔΠ 12, ΓΓΕΤ, Οκτώβριος 2005 - σήμερα
- “Ελαφρύτερα Μεγάλα Οχήματα”, ΕΠΙΑΝ/ ΜΕΤ 9, ΓΓΕΤ, Ιούνιος – Δεκέμβριος 2005
- “Ενεργειακή βελτιστοποίηση διαφασικών ροών στην πετρελαϊκή και χημική βιομηχανία”, ΠΕΝΕΔ / ΓΓΕΤ, 2003-2005
- “Κλίβανος βιομάζας για παραγωγή ξυλάνθρακα”, ΠΑΒΕΤ / ΓΓΕΤ, 2002-2003
- “Ανάπτυξη φυσαλίδων από υπέρκορο υγρό σε συνθήκες μικροβαρύτητας”, Επιτροπή Ερευνών / MEGA TV, Αύγουστος – Δεκέμβριος 2001.

ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

- Αγγλικά – First certificate in English
- Γαλλικά - Certificat

ΓΝΩΣΕΙΣ Η/Υ

- Operation Systems: MS-DOS, Windows 95/98/2000/NT
 - Programming Languages: Matlab R11/R12
 - Image Processing Software: HL Image, Uthscsa Image Tool , Photoshop
 - Office Applications: Word, Excel, PowerPoint, Access, Publisher
- Κάτοχος διπλώματος ECDL, 2004

ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΑΛΛΟΥΣ ΣΥΛΛΟΓΟΥΣ

- Μέλος Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Α.Μ. 87179), 2000

