



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

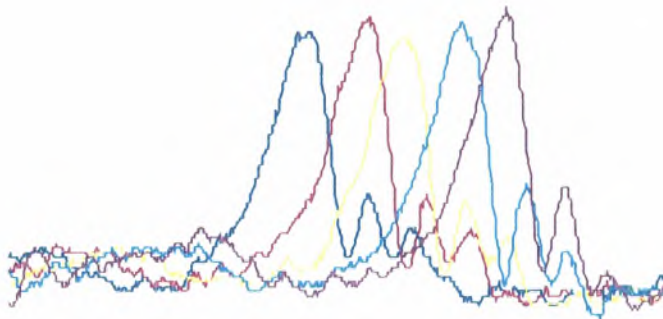
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ & ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Χαρακτηριστικά Μοναχικών Κυμάτων σε Ροή Υγρού Υμένα:
Η Επίδραση της Κλίσης

ΑΝΔΡΟΜΑΧΗ ΜΠΟΚΑΡΗ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2008



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

Αριθ. Εισ.: 2858/1
Ημερ. Εισ.: 24-03-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
532.059 3
ΜΠΟ

© 2008 ΑΝΔΡΟΜΑΧΗ ΜΠΟΚΑΡΗ

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

Πενταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου

(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Μιχαήλ Βλαχογιάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Τεχνολογικών
Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας ΤΕΙ Λάρισας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τέταρτος Εξεταστής Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πέμπτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόριος Χαιδεμενόπουλος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Φτάνοντας, πλέον, στο τέλος αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, όντας ένα βήμα πριν την απόκτηση του ΜΔΕ, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους με βοήθησαν να φτάσω μέχρι εδώ. Δε θα μπορούσα παρά να ξεκινήσω από τους καθηγητές μου κυρίους Β. Μποντόζογλου και Μ. Βλαχογιάννη γιατί με εμπιστεύτηκαν με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής, για τη μεγάλη βοήθεια που μου προσέφεραν για να την ολοκληρώσω αλλά κυρίως για την κατανόηση που επέδειξαν σε ότι μου συνέβη αυτό το διάστημα.

Συνεχίζοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα του εργαστηρίου μου που από την πρώτη στιγμή με έκανε νιώσω μέλος της και συγκεκριμένα τους υποψήφιους διδάκτορες Βλάση Λεοντίδη και Χριστίνα Τζώτζη, τους μεταπτυχιακούς φοιτητές Πέτρο Δάλλα και Σάββα Λαζαρίδη και τους προπτυχιακούς φοιτητές Ορφέα Τριανταφύλλου και Ηλία Τόλη, ελπίζοντας ότι δεν τους κούρασα με τις ερωτήσεις μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Παναγιώτη Καψάλη και Σεραφείμ Μισδανίτη και το μεταπτυχιακό φοιτητή Θωμά Δήλμα για τη βοήθεια που ποτέ δεν μου αρνήθηκαν αλλά κυρίως γιατί με ανέχθηκαν αυτόν τον ενάμισι χρόνο. Υπάρχουν ώρες που πιστεύω ότι χρωστάω αυτό το δίπλωμα σε κάθε έναν από όλους τους παραπάνω ξεχωριστά.

Τελειώνοντας, δε θα μπορούσα να ξεχάσω να ευχαριστήσω τη Λίλια μου, που μου στάθηκε σα μητέρα όλα τα χρόνια των σπουδών μου, το Γιάννη για την αγάπη και την ανοχή που μου έδειξε όλο αυτό το διάστημα, καθώς και την οικογένεια του, Ιωάννη και Επιστήμη Σίμου, που στήριξαν όλη την προσπάθεια μου και εμένα την ίδια με κάθε τρόπο και μέσο. Αυτή η νίκη δεν είναι μόνο δική μου, αλλά και δική τους.

Αφιερώνω αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία

στη μνήμη της μητέρας μου, που ήθελε τόσο πολύ να σπουδάσω αλλά και

στη μνήμη του πατέρα μου που έκανε τα πάντα για να με εμποδίσει να το κάνω...

Χαρακτηριστικά Μοναχικών Κυμάτων σε Ροή Υγρού Υμένα:

Η Επίδραση της Κλίσης

ΑΝΔΡΟΜΑΧΗ ΜΠΟΚΑΡΗ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2008

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου, Καθηγητής Φαινομένων
Μεταφοράς - Συσκευών Φυσικών Διεργασιών

Περίληψη

Η ροή υγρού υμένα είναι σημείο αναφοράς για τη μηχανική των ρευστών καθώς αποτελεί αντικείμενο έρευνας για πλήθος επιστημόνων ανά τον κόσμο και πάνω της στηρίζονται πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Με τον όρο ροή υγρού υμένα εννοείται η ροή σε στοιβάδα πάχους πολύ μικρότερου σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της μήκη. Η ευρεία χρήση της ροής υγρού υμένα οφείλεται στην ικανότητα της να μεταφέρει θερμότητα και μάζα σε χαμηλή υδραυλική αντίσταση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα του πεδίου εφαρμογής της αποτελούν οι εξατμιστήρες/συμπυκνωτές και οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις.

Η παρούσα εργασία μελετά τα χαρακτηριστικά των μοναχικών κυμάτων που εμφανίζονται κατά τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα δίνοντας έμφαση στην επίδραση της κλίσης. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ιδιοκατασκευή του εργαστηρίου και το ρευστό ήταν νερό. Η μέθοδος συλλογής των δεδομένων είναι απεικόνιση με φθορισμό, κατά την οποία το υγρό

εμπλουτίζεται με χρωστική και υπό την επίδραση υπεριώδους ακτινοβολίας εκπέμπει σε καθορισμένο ορατό μήκος κύματος. Η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι ανάλογη του τοπικού πάχους του υμένα. Οι κυριότερες παράμετροι του προβλήματος είναι ο αριθμός Re , η κλίση του καναλιού και η συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται κυρίως τα χαρακτηριστικά των διδιάστατων πλήρως ανεπτυγμένων μοναχικών κυμάτων. Παρατηρήθηκε ότι σε χαμηλές συχνότητες διαταραχής εμφανίζονται παρασιτικά κύματα. Επίσης, σε χαμηλές τιμές του αριθμού Re τα κύματα είναι διδιάστατα, ενώ σε υψηλότερες τιμές μεταβαίνουν σε τρισδιάστατες δομές. Αποδείχθηκε ότι το μήκος, το ύψος και η φασική ταχύτητα των διδιάστατων κυμάτων αυξάνονται με αύξηση του αριθμού Re και επαληθεύτηκε η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των διαστατικών τιμών της φασικής ταχύτητας και του μέγιστου ύψους του κύματος. Τέλος, εξετάστηκε η αδιαστατοποίηση των αποτελεσμάτων, τόσο με το πάχος του υμένα και τη μέση ταχύτητα κατά Nusselt, όσο και με τα αντίστοιχα μεγέθη του υποστρώματος της ροής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	15
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	22
2.1 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα.....	22
2.2 Η γραμμική ευστάθεια της ροής σε επίπεδο τοίχωμα.....	26
2.3 Η μη γραμμική εξέλιξη σε επίπεδο τοίχωμα.....	30
2.4 Αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων.....	33
2.5 Χαρακτηριστικά της ροής υγρού υμένα υπό διαφορετικές συνθήκες.....	36
2.5.1 Εξάρτηση μήκους κύματος από τον αριθμό Re και το μέγεθος της επιβαλλόμενης διαταραχής.....	37
2.5.2 Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από το μέγιστο πάχος του υμένα.....	38
2.5.3 Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα με δύο τρόπους αδιαστατοποίησης.....	39
2.5.4 Εξάρτηση των βασικών αδιαστατοποιημένων μεγεθών του κύματος συναρτήσει του αριθμού Re_{sub}	41
2.5.5 Εξάρτηση των βασικών αδιαστατοποιημένων μεγεθών του κύματος συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} * Ka_{water} / Ka_{EmkaroxHV45}$	44
Κεφάλαιο 3 Πειραματική μεθοδολογία.....	46
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	46
3.2 Σύστημα Ρύθμισης της κλίσης.....	51

3.3 Σύστημα εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.....	52
3.4 Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό.....	53
3.5 Επεξεργασία δεδομένων.....	56
3.6 Επεξεργασία εικόνων.....	58
Κεφαλαίο 4 Πειραματικά αποτελέσματα.....	59
4.1 Πρωτογενή δεδομένα.....	60
4.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη μοναχικού κύματος.....	66
4.3 Διαχωρισμός μεταξύ διδιάστατων και τρισδιάστατων δομών.....	71
4.4 Εμφάνιση παρασιτικών κυμάτων.....	75
4.4.1 Μοναχικά Κύματα.....	75
4.4.2 Παρασιτικά Κύματα.....	78
4.5 Επίδραση του πλάτους της διαταραχής.....	80
4.6 Πλήρως Ανεπτυγμένο Μοναχικό Κύμα.....	85
4.7 Συγχώνευση Κυμάτων.....	88
4.8 Παγωμένες τρισδιάστατες δομές.....	90
4.9 Σύνθεση αποτελεσμάτων.....	93
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα & προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	102
5.1 Συμπεράσματα.....	102
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	104
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.....	23
Σχήμα 2.2: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re . (\square) $Ka=3365$, (\bullet) $Ka=1102$, ($—$) $Re=5/6\cos\phi$	28
Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατόπιν της ροής.....	31
Σχήμα 2.4: Ανάπτυξη μοναχικών κυμάτων κατόπιν της ροής.....	31
Σχήμα 2.5: Εξάρτηση του μεγέθους των μοναχικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως της κατόπιν ροής.....	32
Σχήμα 2.6: Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατόπιν αποστάσεως.....	33
Σχήμα 2.7: Η συγχώνευση (coalescence) 2 μοναχικών κυμάτων.....	34
Σχήμα 2.8: Εξάρτηση του μήκους κύματος από τον αριθμό Re	37
Σχήμα 2.9: Εξάρτηση του μήκους κύματος από το μέγεθος της επιβαλλόμενης διαταραχής.....	38
Σχήμα 2.10: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από το μέγιστο πάχος του υμένα.....	39
Σχήμα 2.11: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα αδιαστατοποιημένα με τα αντίστοιχα μεγέθη κατά Nusselt.....	40
Σχήμα 2.12: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα αδιαστατοποιημένα με τα αντίστοιχα μεγέθη του υποστρώματος.....	41
Σχήμα 2.13: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού Re_{sub} .	42
Σχήμα 2.14: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού Re_{sub}	43
Σχήμα 2.15: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} * Ka_{water} / Ka_{EmkaroxHV45}$	44

Σχήμα 2.16: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} * Ka_{water} / Ka_{EmkaroxHV45}$	45
Σχήμα 3.1: α) Δοχείο παροχής β) Ροόμετρα.....	48
Σχήμα 3.2: α) Δοχείο υπερχείλισης β) Κανάλι ροής.....	48
Σχήμα 3.3 α) Δοχείο συλλογής β) Εμβαπτιζόμενη αντλία.....	48
Σχήμα 3.4: α) Λάμπες φθορισμού β) Κάμερα συλλογής δεδομένων.....	49
Σχήμα 3.5: Σχεδιαστική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.....	50
Σχήμα 3.6: Μέθοδος αλφαδολάστιχου για υπολογισμό της γωνίας κλίσης.....	51
Σχήμα 3.7: Ψηφιακός χρονιστής του συστήματος διαταραχής.....	53
Σχήμα 3.8: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο-pixel της εικόνας.....	55
Σχήμα 3.9: Πρωταρχικά δεδομένα που δείχνουν ένα κύμα που κινείται.....	57
Σχήμα 4.1: Πρωτογενή δεδομένα της μεθόδου φθορισμού α) Διδιάστατες δομές β) Τρισδιάστατες δομές.....	61
Σχήμα 4.2: Πρωτογενή δεδομένα α) χωρίς χρήση ψηφιακού φίλτρου και β) με χρήση του ψηφιακού φίλτρου Gaussian 15x15.....	62
Σχήμα 4.3α): Πρωταρχικά δεδομένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές τρισδιάστατης δομής.....	63
Σχήμα 4.3β): Πρωταρχικά δεδομένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές διδιάστατης δομής.....	64
Σχήμα 4.4α): Προφίλ υμένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές τρισδιάστατης δομής.....	64

Σχήμα 4.4β): Προφίλ υμένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές διδιάστατης δομής.....	64
Σχήμα 4.5α): Χρονική μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας για δύο σταθερά σημεία τρισδιάστατης δομής.....	65
Σχήμα 4.5β): Χρονική μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας για δύο σταθερά σημεία διδιάστατης δομής.....	66
Σχήμα 4.6: h_{max} μέγιστο ύψος υμένα, h_f πάχος υμένα στο μέτωπο του κύματος, h_b πάχος υμένα στην ουρά του κύματος, λ_f μήκος τριχοειδών, h_N πάχος υμένα κατά Nusselt, $\langle h \rangle$ μέσο πάχος του υμένα	67
Σχήμα 4.7: Χωρική μεταβολή του υμένα για διαδοχικές χρονικές στιγμές.....	68
Σχήμα 4.8: Χρονική μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας για σταθερό σημείο.....	69
Σχήμα 4.9: Χρονική εξέλιξη της ροής σε σταθερό σημείο για διάφορους Re	69
Σχήμα 4.10: Διαχωρισμένη χρονική εξέλιξη της ροής σε σταθερό σημείο για διάφορους Re	70
Σχήμα 4.11: Χρονική εξέλιξη της ροής σε διάφορα σημεία για ίδιο Re	70
Σχήμα 4.12: Διαχωρισμένη χρονική εξέλιξη της ροής σε διάφορα σημεία για ίδιο Re	71
Σχήμα 4.13: Διδιάστατες δομές Re 16 - διαταραχή 1 Hz (a)-(c) θέση a.....	72
Σχήμα 4.14: Τρισδιάστατες δομές Re 50 - διαταραχή 0,5 Hz (a)-(c) θέση b...	73
Σχήμα 4.15 Σύγκριση διδιάστατων και τρισδιάστατων δομών.....	74
Σχήμα 4.16: Χωρική εξέλιξη μοναχικού κύματος για Re 22 διαταραχή 0,667 Hz a) θέση a, b) θέση b, c) θέση.....	76

Σχήμα 4.17: Χρονική εξέλιξη της ροής Re 22, διαταραχή 0,667Hz, θέσεις a-b-c.....	76
Σχήμα 4.18: Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής Re 22-διαταραχή 0,667 Hz α)θέση α, b) θέση b, c)θέση.....	77
Σχήμα 4.19:Χρονική εξέλιξη της ροής Re18, διαταραχή 0,167Hz θέσεις abc.	78
Σχήμα 4.20: Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής Re 18-διαταραχή 0,167 Hz α)θέση α, b)θέση b, c)θέση c.....	79
Σχήμα 4.21: Σύγκριση χωρικής και χρονικής εξέλιξης του υμένα στην αρχή του καναλιού για διαταραχές 0.5 Hz α) ηλεκροβαλβίδα on:1.5 sec - off:0.5 sec και b) ηλεκροβαλβίδα on:1 sec - off:1 sec.....	81
Σχήμα 4.22: Χρονική εξέλιξη της ροής Re 16, διαταραχή 0.5 Hz (on:1.5sec- off:0.5sec), θέσεις a-b-c.....	81
Σχήμα 4.23: Χρονική εξέλιξη της ροής Re 16, διαταραχή 0.5 Hz (on:1sec- off:1sec), θέσεις a-b-c.....	82
Σχήμα 4.24: Σύγκριση της χρονικής εξέλιξης της ροής για Re 16 - διαταραχές 0.5Hz:(on:1.5 sec - off:0.5 sec) -(on:1 sec - off:1 sec), α) θέση α, b) θέση b, c) θέση c.....	83
Σχήμα 4.25: Χωρική και χρονική εξέλιξη της ροής για Re 16 - διαταραχές 0.5Hz:(on:1.5 sec - off:0.5 sec) -(on:1 sec - off:1 sec), α) θέση α, b) θέση b, c) θέση c.....	84
Σχήμα 4.26: Χρονική εξέλιξη της ροής Re 20, διαταραχή 1 Hz, θέσεις abc....	85
Σχήμα 4.27: Σύγκριση προφίλ υμένα Re 20 διαταραχή 1Hz - α)θέση α, b) θέση b, c) θέση c.....	86

Σχήμα 4.28: Χωρική και χρονική εξέλιξη της ροής για $Re = 20$ - διαταραχή 1Hz α) θέση a, b) θέση b, c) θέση c.....	87
Σχήμα 4.29: Κύματα που προέκυψαν από αλληλεπίδραση $Re=18$, διαταραχή 0,167 Hz θέση c.....	88
Σχήμα 4.30: Συγχώνευση μεταξύ δύο κυμάτων $Re=25$, διαταραχή 0,5 Hz (1-1), θέση a.....	89
Σχήμα 4.31: Δημιουργία δομής δύο κορυφών (two hump structure), $Re=23$, διαταραχή 0.5 Hz, (1-1) θέση b.....	90
Σχήμα 4.32: Εξέλιξη τρισδιάστατων δομών στο μέτωπο κύματος $Re = 50$ διαταραχή 0,667 Hz θέση b.....	91
Σχήμα 4.33: Τρισδιάστατες παγωμένες δομές για $Re = 50$, διαταραχή 1 Hz, θέση b, $\Delta t=0.1sec$	92
Σχήμα 4.34: Χρονική και χωρική εξέλιξη τρισδιάστατων παγωμένων δομών.....	93
Σχήμα 4.35: Εξάρτηση μήκους κύματος από τον αριθμό Re	94
Σχήμα 4.36: Εξάρτηση του αδιαστατοποιημένου μέγιστου ύψους των μοναχικών κυμάτων από τον Re	95
Σχήμα 4.37: Εξάρτηση της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από τον Re	95
Σχήμα 4.38: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από το μέγιστο ύψος τους.....	96
Σχήμα 4.39: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα αδιαστατοποιημένα με τα αντίστοιχα μεγέθη κατά Nusselt.....	97

Σχήμα 4.40: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα αδιαστατοποιημένα με τα αντίστοιχα μεγέθη του υποστρώματος.....	97
Σχήμα 4.41: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού Re_{sub} ..	98
Σχήμα 4.42: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού Re_{sub}	98
Σχήμα 4.43: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} * K_{a_{water}} / K_{a_{EmkaroxHV45}}$	99
Σχήμα 4.44: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} * K_{a_{water}} / K_{a_{EmkaroxHV45}}$	100
Σχήμα 4.45: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} / Re_{cr} * (K_{a_{water}} / K_{a_{EmkaroxHV45}})^{1,6}$	101
Σχήμα 4.46: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} / Re_{cr} * (K_{a_{water}} / K_{a_{EmkaroxHV45}})^{1,7}$	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της εργασίας είναι η πειραματική μελέτη των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα. Η ερευνητική προσπάθεια στοχεύει στην κατανόηση των βασικών μηχανισμών που διέπουν τα φαινόμενα ροής με υμένες υγρού, τα οποία συνδέονται άμεσα με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας ή θερμότητας. Συγκεκριμένα, αναλύονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των οδοντών κυμάτων, όπως το ύψος, η ταχύτητα, το μήκος κύματος, το μήκος των τριχοειδών καθώς επίσης το ύψος του υμένα στο μέτωπο και στην πλάτη τους κατά την εξέλιξη της ροής. Παράλληλα, γίνεται έλεγχος για το αν τα κύματα αυτά αναπτύσσονται ή έχουν πλήρως αναπτυχθεί και εξετάζονται φαινόμενα όπως η συγχώνευση μεταξύ κυμάτων και η γένεση παρασιτικών. Τέλος, γίνεται σύγκριση με προηγούμενες εργασίες με σκοπό την εξαγωγή χρησιμων συμπερασμάτων αλλά και την προτροπή για υποδείξεις που θα οδηγήσουν σε βελτίωση της πειραματικής διαδικασίας και της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να έχει ως επακόλουθο την καθολική σύγκλιση των αποτελεσμάτων και άρα τη γενικότερη αποδοχή.

Με τον όρο ροή λεπτού υγρού υμένα, εννοείται η ροή στην οποία το πάχος του ρευστού είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της. Η ικανότητά των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση είναι αυτή που έχει οδηγήσει στην ευρεία

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

Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και ο εξατμιστήρας κατερχόμενης στιβάδας (*falling-film evaporator*), με τη διαφορά ότι το προς εξάτμιση υγρό εισέρχεται στους σωλήνες από την κορυφή τους και εξέρχεται από τη βάση τους ως μίγμα υγρού-ατμού, οπότε και εισέρχεται στο διαχωριστή που βρίσκεται συνδεδεμένος στη βάση του εναλλάκτη. Επιπλέον, παραδείγματα είναι οι συμπυκνωτές και οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις. Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής υγρών υμένων είναι η ψύξη ενός πυρηνικού αντιδραστήρα που επιτυγχάνεται με διαβροχή του τοιχώματος με καθαρό νερό που θερμαινόμενο εξατμίζεται. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι επιθυμητή η εντατικοποίηση των φαινομένων αυτών ενώ σε άλλες η ελαχιστοποίησή

τους. Ακόμη, οι υγροί υμένες παρατηρούνται και κατά την απομάκρυνση υγρής τέφρας από τους κλιβάνους. Τα προβλήματα που υπάρχουν κατά τη συλλογή και την εκμετάλλευση των αποβλήτων αυτών, αποτελούν σημαντική προτεραιότητα λόγω των αυξημένων περιβαλλοντικών περιορισμών. Επιπροσθέτως, η χρήση των υμένων για καθαρισμό των αερίων και των υγρών από προσμίξεις είναι ολοένα και περισσότερο αυξανόμενη, γεγονός που οφείλεται στις αυστηρές οικολογικές απαιτήσεις. Τέλος, τα φαινόμενα ροής και ευστάθειας λεπτών υμένων καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και άλλων τεχνολογικών και περιβαλλοντικών συστημάτων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα τη συμπεριφορά πτερύγων αεροπλάνων κατά την πτήση υπό συνθήκες βροχόπτωσης (Pelekasis & Tsamopoulos, 2001).

Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων στην υφιστάμενη συσκευή του εργαστηρίου Φυσικών & Χημικών Διεργασιών παρατηρήθηκε ότι λαμβάνουν χώρα ενδιαφέροντα φαινόμενα σε μεγάλη απόσταση από την αφετηρία της ροής. Κυριότερο αυτών είναι η αλληλεπίδραση των σολιτονικών κυμάτων (solitary waves). Μοναχικά ή σολιτονικά χαρακτηρίζονται τα κύματα που έχουν ασύμμετρη κύρτωση, απότομο μέτωπο, ομαλή ουρά και έπονται τριχοειδών ρυτιδώσεων. Τα κύματα αυτά εμφανίζονται κυρίως κατά τη μη γραμμική συμπεριφορά υγρών υμένων, που ρέουν σε κεκλιμένο ή κατακόρυφο επίπεδο και δημιουργούνται από κάποια διαταραχή.

Η εξέλιξη της ροής ενός λεπτού υγρού υμένα αποτελείται από τέσσερα στάδια ανάπτυξης (Chang 1994). Αρχικά, απειροελάχιστες διαταραχές στην επιφάνεια του ρευστού επεκτείνονται κατά μήκος της ροής και σχηματίζουν 'μονοχρωματικά' κύματα, το μέγεθος των οποίων αυξάνει εκθετικά κατά μήκος της ροής, όπως σε όλα τα φαινόμενα γραμμικής διέγερσης ασταθών συστημάτων. Στη συνέχεια, η εκθετική αύξηση ανακόπτεται από ασθενή μη γραμμικά φαινόμενα και εξαιτίας μιας ασθενούς μη γραμμικής αλληλεπίδρασης

μεταξύ της ασταθούς βασικής συχνότητας και της 2ης αρμονικής, το 'μονοχρωματικό' κύμα αρχίζει και αποκτά μια περισσότερο πολύπλοκη μορφή. Έτσι, δημιουργούνται κορεσμένα-περιοδικά κύματα με μήκος κύματος διαφορετικό από αυτό του 'μονοχρωματικού' κύματος. Κατόπιν, παρατηρούνται δύο κυρίαρχες μορφές αστάθειας των κυμάτων πεπερασμένου μεγέθους. Κοντινά κύματα ενώνονται ανά διαστήματα εξαιτίας της 'υποαρμονικής αστάθειας' (subharmonic instability) ή λόγω των πλευρικών ασταθειών (sideband instabilities). Αυτές οι δύο αστάθειες δημιουργούν ελαττωματικές περιοχές, κατά μήκος της ροής. Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των ασταθειών έγκειται στη δημιουργία, κατάντη της ροής, των σολιτονικών ή μοναχικών κυμάτων. Τελικά, η εξέλιξη του υμένα κατάντη της ροής οδηγεί στην ανάπτυξη εγκάρσιων μεταβολών στο μέτωπο των σολιτονικών κυμάτων και τη μετέπειτα δημιουργία μίας χαοτικής δομής (spatio-temporal chaos). Η παραπάνω εξέλιξη της ροής ενός υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα αναφέρεται σε φυσική διέγερση, δηλαδή ο υμένας δεν υφίσταται μία συστηματική εξωτερική διαταραχή αλλά ο φυσικός θόρυβος αποτελεί την αιτία δημιουργίας των παραπάνω φαινομένων.

Σε πολλές περιπτώσεις η εφαρμογή μίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής παρακάμπει κάποιες από τις προαναφερόμενες περιοχές φυσικής εξέλιξης του υμένα, ανάλογα με τη συχνότητα επιβολής (Alekseenko et al. 1985, Liu & Gollub, 1994). Έτσι, είναι δυνατή η επικέντρωση της μελέτης σε μία συγκεκριμένη περιοχή της ροής. Το είδος της επιβαλλόμενης διαταραχής στην περίπτωση που μελετάται, αποτελεί ένα στοιχείο πρωτοτυπίας. Το αποτέλεσμα της επιβαλλόμενης διαταραχής έγκειται στη δημιουργία ενός ομίλου σολιτονικών κυμάτων σε κοντινές αποστάσεις από το σημείο σχηματισμού του υμένα.

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

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

Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν τα εξής: Για τη μελέτη της επίδρασης του ιξώδους χρησιμοποιήθηκε νερό. Οι παροχές που επιλέχθηκαν για τα πειράματα εξασφάλιζαν αριθμούς Re στην περιοχή $15 < Re < 50$. Το εύρος αυτό αντιστοιχεί σε συνθήκες στρωτής ροής και έλεγχο της δυναμικής από τα επιφανειακά κύματα. Τέτοιες συνθήκες στρωτής ροής είναι συνηθισμένες σε πολλές συσκευές μεταφοράς μάζας και σε αρκετές μεταφορές θερμότητας. Σε ορισμένες από τις τελευταίες, οι παροχές είναι ακόμη υψηλότερες ώστε να δημιουργούνται σε ένα τμήμα του ενεργού μήκους συνθήκες τυρβώδους ροής φαινόμενο που δεν αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας.

Η επιλογή της κλίσης του τοιχώματος υπαγορεύεται κυρίως από τους πειραματικούς περιορισμούς. Πράγματι, οι μετρήσεις είναι σε μικρή κλίση ($\varphi=5,2$), 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 ίδια, ωστόσο η διάρκεια τους

σε μήκος ροής διαφέρει αισθητά. Έτσι, επιλέγοντας μικρές κλίσεις επιβραδύνεται η δυναμική με αποτέλεσμα τη βελτιωμένη καταγραφή και κατανόηση των φαινομένων.

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

Η ανάγκη παρατήρησης των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα και κυρίως η αλληλεπίδραση των σολιτονικών κυμάτων που δημιουργούνται από κάποια διαταραχή, οδήγησε στην απόφαση για την κατασκευή μίας πειραματικής διάταξης που θα προσφέρει ένα μεγαλύτερο μήκος ροής. Συνεπώς, επιτρέπεται η «παρακολούθηση» ενός κύματος από το σημείο δημιουργίας του έως την τελική εξέλιξή του.

Αυτή η μεταπτυχιακή εργασία χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες που καταλαμβάνουν τα κεφάλαιο 2 - 5, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία προσπάθεια συνοπτικής περιγραφής της διεθνούς βιβλιογραφίας, με την απαραίτητη εστίαση στα πιο παρεμφερή άρθρα και αναλύεται το πρόβλημα που αφορά τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο. Παρουσιάζονται οι ορισμοί, οι παραδοχές, οι εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα και γίνεται αναφορά σε πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του φαινομένου. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αρχικά η πειραματική διάταξη που

χρησιμοποιήθηκε, αναλύεται η διαδικασία λήψης των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό και περιγράφεται η εφαρμογή της στο επίπεδο τοίχωμα. Στο κεφάλαιο 4 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη ροή υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο τοίχωμα, για τις διάφορες παραμέτρους που επιλέχθηκαν και γίνεται σύγκριση με προηγούμενες εργασίες. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 αναλύονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

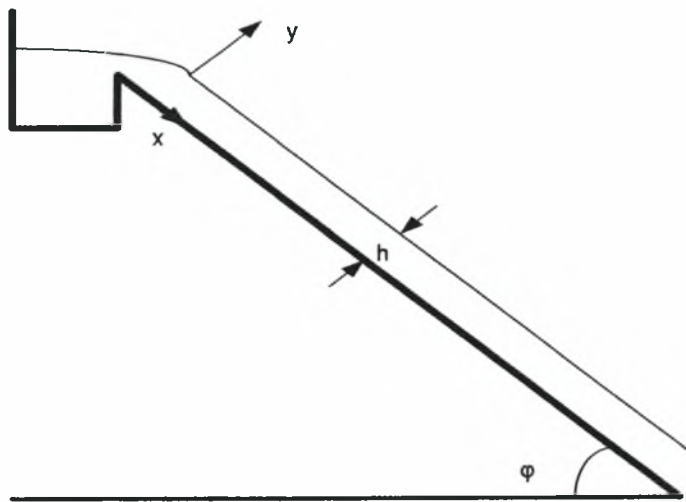
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται συνοπτικά η βιβλιογραφία που σχετίζεται με τη ροή υγρού υμένα, υπό την επίδραση της βαρύτητας πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Στην αρχή δίδονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του υμένα. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στη δημιουργία και εξέλιξη των κυμάτων που προκύπτουν λόγω των διαφόρων ασταθειών. Ακολουθεί περιγραφή της αλληλεπίδρασης των μοναχικών κυμάτων. Τέλος, γίνεται μια εκτενέστερη αναφορά και σύγκριση των εργασιών των Tihon et al. (2006) και Π. Δάλλα (2007) τα αποτελέσματα των οποίων οδηγούν σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα αλλά και αποτελούν έναυσμα για περαιτέρω έρευνα, γεγονός που αποτέλεσε αφορμή για την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

2.1 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα

Η απλούστερη μορφή του προβλήματος της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο είναι αυτή της ροής Nusselt κάνοντας τις εξής παραδοχές: η ροή είναι ασυμπίεστη και στρωτή και το πάχος του υμένα είναι ομοιόμορφο κατά μήκος κεκλιμένης επίπεδης επιφάνειας μήκους L , η οποία βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τα άκρα που εισέρχεται και εξέρχεται ο υμένας. Έτσι ο υμένας δεν επηρεάζεται λόγω των συνθηκών που επικρατούν στα άκρα και άρα η ταχύτητα του κατά τη διεύθυνση x είναι ανεξάρτητη του μήκους x .



Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο

Οι παραγόμενες εξισώσεις για τη διδιάστατη ροή λεπτού υγρού υμένα κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου, είναι οι εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes για ασυμπίεστο ρευστό.

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + (\underline{u} \cdot \nabla) \underline{u} \right) = -\nabla p + \rho \underline{g} + \mu \nabla^2 \underline{u} \quad (2.2)$$

Ο όρος ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, μ το ιξώδες, p η πίεση, \underline{g} η επιτάχυνση της βαρύτητας και $\underline{u} = (u_x, u_y, u_z)$ το διάνυσμα της ταχύτητας. Επειδή το ρευστό κινείται μόνο στην κατεύθυνση x οι όροι $u_y = u_z = 0$. Συνεπώς,

η εξίσωση συνέχειας γίνεται:
$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

Επίσης, θεωρώντας τη ροή μόνιμη προκύπτει $\frac{\partial \underline{u}}{\partial t} = 0$ και οι εξισώσεις Navier

Stokes παίρνουν τη μορφή:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = 0 \quad (2.4)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g_y = 0 \quad (2.5)$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (2.5) προκύπτει: $P(y) = \rho \cdot g_y \cdot y + C$ (2.6)

Στη διεπιφάνεια υγρού-αέρα η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική, δηλαδή:

$$P(x, h_N) = -P_{atm} \quad (2.7)$$

δηλαδή η πίεση στη διεπιφάνεια δεν εξαρτάται από το x $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$ (2.8)

Έτσι η σχέση (2.6) με χρήση της (2.7) δίνει:

$$-P_{atm} = \rho \cdot g_y \cdot h_N + C \Rightarrow C = -P_{atm} - \rho \cdot g_y \cdot h_N \quad (2.9)$$

Άρα $P(y) = \rho \cdot g_y \cdot y - P_{atm} - \rho \cdot g_y \cdot h_N$ (2.10)

οπότε τη σχέση (2.4) προκύπτει:

$$\mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial^2 y} = -\rho \cdot g_x \Rightarrow u_x = -\frac{g_x}{\nu} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 \cdot y + C_2 \quad (2.11)$$

Συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα:

- Συνθήκη μη ολίσθησης στη διεπιφάνεια μεταξύ τοιχώματος και ρευστού ($y=0$)

$$\text{➤ } u_x(y=0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \quad (2.12)$$

- Η διατμητική τάση είναι ίση με μηδέν στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού ($y=h_N$)

$$\tau_{yx} = -\mu \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=h_N} = 0 \Rightarrow \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=h_N} = 0 \Rightarrow C_1 = \frac{g_x}{\nu} h_N \quad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στη σχέση (2.11) προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για την ταχύτητα:

$$u_x(y) = \frac{g_x}{\nu} \cdot \left(y \cdot h_N - \frac{y^2}{2} \right) \quad (2.14)$$

Η μέση τιμή της ταχύτητας εξάγεται από ολοκλήρωση της σχέσης (2.14):

$$\bar{u}_x = \frac{\int_0^{h_N} u_x(y) dy}{h_N} = \frac{g_x \cdot h_N^2}{3 \cdot \nu} = \frac{g \cdot h_N^2 \cdot \sin \phi}{3 \cdot \nu} \quad (2.15)$$

Θέτοντας $y=h_N$ προκύπτει η μέγιστη τιμή της ταχύτητας:

$$u_{\max} = u_x(h_N) = \frac{g_x \cdot h_N^2}{2 \cdot \nu} = \frac{g \cdot h_N^2 \cdot \sin \phi}{2 \cdot \nu} \quad (2.16)$$

Συνεπώς το ύψος του υμένα συναρτήσει της μέσης ταχύτητας δίνεται από:

$$h_N = \sqrt{\frac{3\nu \cdot \bar{u}}{g \cdot \sin \phi}} \quad (2.17)$$

και συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής από:

$$h_N = \sqrt[3]{\frac{3\nu \cdot q}{g \cdot \sin \phi}} \quad (2.18)$$

Η ροή περιγράφεται από τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds, Weber και Karitza, που δίνονται από τις σχέσεις:

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot h_N}{\nu} \quad (2.19)$$

$$We = \frac{\gamma}{(\rho \cdot \bar{u}^2 \cdot h_N)} \quad (2.20)$$

$$Ka = \frac{\gamma}{\rho \cdot \nu^{4/3} \cdot g^{1/3}} \quad (2.21)$$

Στις πιο πάνω σχέσεις \bar{u} είναι η μέση ταχύτητα, h_N το πάχος του επιπέδου υμένα κατά Nusselt, ρ η πυκνότητα του ρευστού, γ η επιφανειακή τάση και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Πιο συχνά χρησιμοποιείται ο αριθμός Karitza έναντι του αριθμού Weber, καθώς είναι συνάρτηση των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και ανεξάρτητος της παροχής.

Η παραδοχή της αδιατάρακτης ελεύθερης επιφάνειας είναι μη ρεαλιστική πέρα από μία (συνήθως μικρή) τιμή του αριθμού Re. Η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι άγνωστη, γεγονός που αποτελεί το ζητούμενο του προβλήματος. Στη γενική περίπτωση, το πρόβλημα είναι μη γραμμικό και για την επίλυση του απαιτούνται πολύπλοκες μαθηματικές μέθοδοι.

2.2 Η γραμμική ευστάθεια της ροής σε επίπεδο τοίχωμα

Πέρα από κάποιο αριθμό Re , προκύπτουν ασταθείς λύσεις στο πρόβλημα της αδιατάρακτης ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο. Επιβάλλοντας στη ροή μια διαταραχή, αυτή αναπτύσσεται κατά μήκος του πεδίου ροής και οδηγεί στην εμφάνιση κυμάτων και άλλων τρισδιάστατων δομών. Οι διδιάστατες διαταραχές είναι πιο ασταθείς από τις τρισδιάστατες, συνεπώς τα κύματα που δημιουργούνται από τις πρώτες παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ροής. Για το λόγο αυτό η μελέτη της γραμμικής ευστάθειας στηρίζεται στη θεώρηση των διδιάστατων διαταραχών.

Με αδιαστατοποίηση των βασικών εξισώσεων της ροής με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη:

➤ Χαρακτηριστικό μήκος: h_N

➤ Χαρακτηριστική ταχύτητα: $\bar{u} = \frac{g \cdot h_N^2 \cdot \sin \phi}{3 \cdot \nu}$

➤ Χαρακτηριστικός χρόνος: h_N / \bar{u}

➤ Χαρακτηριστική πίεση: $\rho \bar{u}^2$

προκύπτουν οι παρακάτω εκφράσεις για την ταχύτητα, τη ροϊκή συνάρτηση και την πίεση αντίστοιχα:

$$\text{➤ } u(y) = 3 \left(y - \frac{1}{2} y^2 \right) \quad (2.22)$$

$$\text{➤ } \Psi_0(y) = 3 \left(\frac{1}{2} y^2 - \frac{1}{6} y^3 \right) = \frac{3}{2} y^2 - \frac{1}{2} y^3 \quad (2.23)$$

$$\text{➤ } P(y) = \frac{1}{Fr^2} (1-y) \cot \phi \quad \text{όπου } Fr^2 = \frac{Re}{3} \quad (2.24)$$

Επιβάλλοντας στη ροή διδιάστατη διαταραχή της μορφής:

$$\Psi = \Psi_0 + f(y) e^{i\alpha(x-ct)} \quad (2.25)$$

$$n = h + A e^{i\alpha(x-ct)}$$

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

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

Από την εξίσωση Navier-Stokes με σταυρωτή παραγωγή, απαλείφεται ο όρος της πίεσης και προκύπτει η εξίσωση Orr-Sommerfeld για τα εύρος του $f(y)$:

$$f'''' - 2\alpha^2 f'' + \alpha^4 f = i \operatorname{Re} \alpha [(u - c)(f'' - \alpha^2 f) - u'' f] \quad (2.27)$$

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος είναι:

- Συνθήκη μη ολίσθησης και μη διείδυσης στο τοίχωμα, δηλαδή μηδενική ταχύτητα σε όλες τις διευθύνσεις του τοιχώματος:

$$y = 0: u = v = 0 \Rightarrow f(0) = f'(0) = 0 \quad (2.28)$$

- Στην ελεύθερη επιφάνεια ο τανυστής τάσεων είναι μηδέν κατά την εφαπτομενική διεύθυνση και ίσος με την καμπυλότητα επί την επιφανειακή

$$\text{τάση κατά την κάθετη διεύθυνση: } y = 1 + n: \begin{cases} \sigma \cdot n \cdot t = 0 \\ \sigma \cdot n \cdot n = \gamma \kappa \end{cases} \quad (2.29)$$

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: Θεωρεί τους αγνώστους

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

$$f(y) = f_0(y) + \alpha f_1(y) + \alpha^2 f_2(y) + \dots \quad (2.30)$$

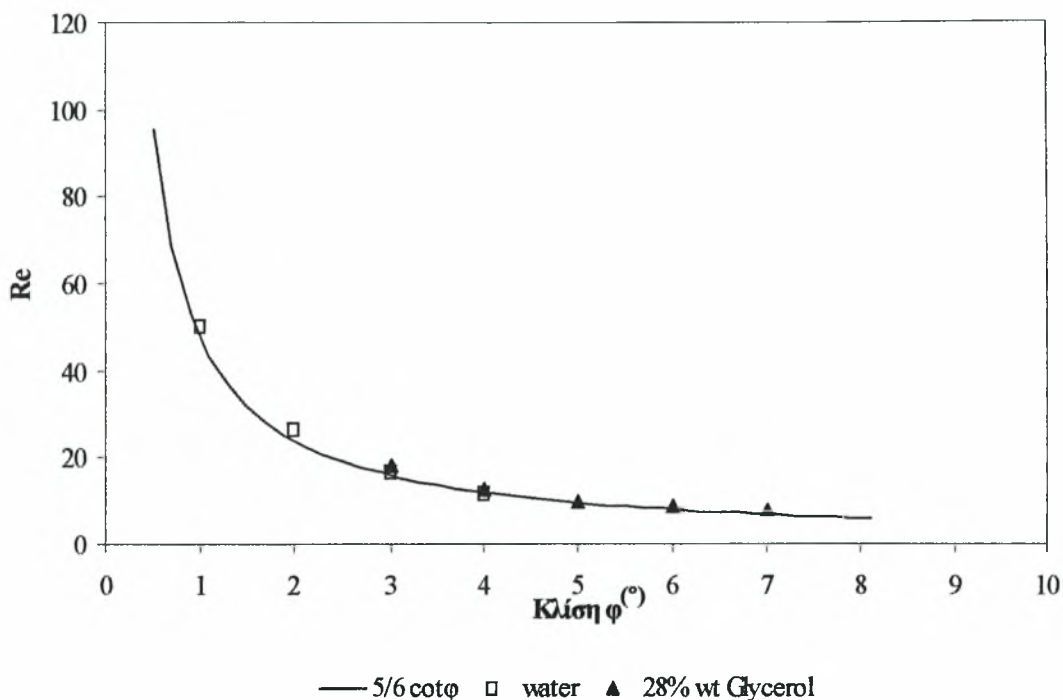
$$c = c_0 + \alpha c_1 + \alpha^2 c_2 + \dots \quad (2.31)$$

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

$$\text{υπάρχει για: } \frac{6}{5} Re - \cot \phi > 0 \Leftrightarrow Re_c = \frac{5}{6} \cot \phi \quad (2.32)$$

Η σχέση αυτή του κρίσιμου αριθμού Reynolds με τη γωνία κλίσης της ροής επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους Liu et al. (1993) και στη συνέχεια

από τους Vlachogiannis & Bontozoglou (2001). Στο σχήμα 2.2 παρατηρείται ο κρίσιμος Re ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης για δύο διαφορετικά ρευστά. Στο ίδιο σχήμα, οι καμπύλες αυτές συγκρίνονται με τη 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.

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

(1961), πρώτος διαπίστωσε τη μεταφερόμενη φύση (convective character) της αστάθειας για τη ροή υγρών υμένων. Έδειξε θεωρητικά και πειραματικά ότι μία τοπική, γραμμική διαταραχή αναπτύσσεται κατάντη της ροής. Οι Liu et al. (1993) χρησιμοποίησαν την εξίσωση του Benney (1966) (long wave expansion equation), για τη μελέτη της έναρξης της αστάθειας. Με τη παραδοχή ότι οι διδιάστατες διαταραχές έχουν μήκος κύματος πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του υμένα ($\lambda \gg h_L$), η εξίσωση 1^{ης} τάξης ως προς a γίνεται:

$$h_t + 2h^2 h_x + \frac{2}{3} \left[\frac{4}{5} \text{Re} h^6 h_x - h^3 h_x \cot \varphi + \text{We} h^3 h_{xxx} \right]_x = 0 \quad (2.33)$$

Η παραπάνω εξίσωση έχει ισχύ μόνο όταν $\text{Re} \sim \text{Re}_c$ και η επιφανειακή τάση να είναι μη μηδενική. Οι υπολογισμοί της παραπάνω εξίσωσης έδειξαν ότι το σύστημα γίνεται μεταφορικά ασταθές όταν $\text{Re} = \text{Re}_c$, εάν $\gamma \neq 0$. Η ίδια ανάλυση προβλέπει ότι η μετάβαση από μεταφερόμενη σε απόλυτη (convective to absolute) διαταραχή λαμβάνει χώρα για: $\text{Re}_{c/a} = \text{Re}_c + (6.7\text{We})^{1/3}$. Ωστόσο, το παραπάνω όριο δεν είναι ακριβές, εξαιτίας των παραδοχών επίλυσης των εξισώσεων. Οι Joo & Davis (1992) και οι Deissler, Oron & Lee (1991) χρησιμοποίησαν τη παραπάνω εξίσωση (long wave expansion equation) για παρόμοιους υπολογισμούς σε ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, οι Chang et al. (1994), με την υπολογιστική επίλυση των ολοκληρωτικών εξισώσεων του οριακού στρώματος (integral-boundary layer), έδειξαν ότι για ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο επίπεδο τοίχωμα η αστάθεια γίνεται μεταφερόμενη για $\text{Re} \sim 500$.

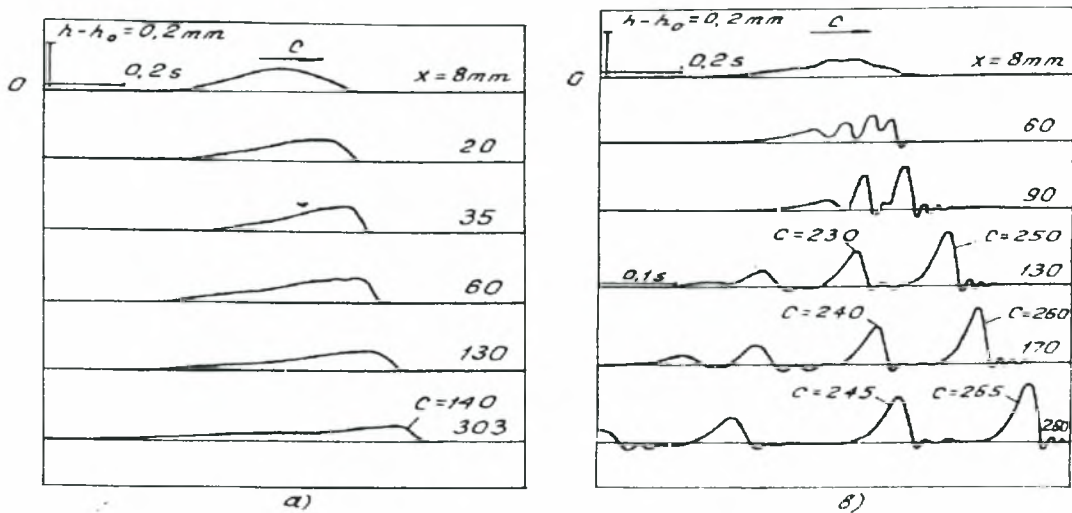
Μετά την έναρξη της αστάθειας, ο ρυθμός αύξησης του πλάτους της εξαρτάται από τις αδρανειακές δυνάμεις (inertial effects) του συστήματος. Εξαιτίας της αδράνειας, η απόκριση της μεταβολής της ταχύτητας στην παραμορφωμένη επιφάνεια είναι αργή. Αυτή η καθυστέρηση (phase lag) οδηγεί

στη δημιουργία μίας αδρανειακής πίεσης (*inertial pressure*), η οποία τείνει να οδηγήσει ποσότητες του ρευστού από την κοιλότητα στην κορυφή της παραμορφωμένης επιφάνειας και έτσι να αποσταθεροποιήσει τη ροή. Από την άλλη μεριά, η τριχοειδής πίεση και η υδροστατική πίεση εξαιτίας της συνιστώσας της βαρύτητας, αποτελούν τους παράγοντες σταθεροποίησης. Για παράδειγμα, η τριχοειδής πίεση αποσβένει τα μικρού μήκους κύματα.

2.3 Η μη γραμμική εξέλιξη σε επίπεδο τοίχωμα

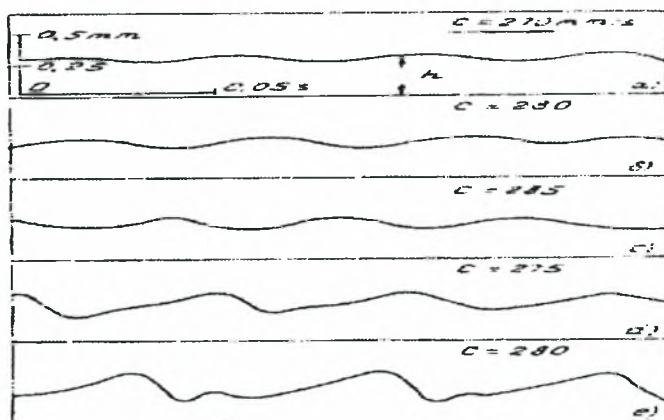
Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές θεωρητικές και πειραματικές μελέτες που αφορούν τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών περιγράφουν τη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα υπό την επιβολή εξωτερικών διαταραχών, τεχνητών ή φυσικών. Το αποτέλεσμα των διαταραχών αυτών είναι η δημιουργία κυμάτων στην επιφάνεια του υμένα, τα οποία παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση ανάλογα με το μηχανισμό δημιουργίας τους.

Η περιγραφή των φαινομένων που διέπουν την εξέλιξη των κυμάτων σε ένα επίπεδο τοίχωμα παρουσιάζεται σε μια από τις σημαντικότερες εργασίες, η οποία αποτελεί σημείο αναφοράς στη ροή υγρού υμένα, των *Alekseenko et al.* (1985). Στη μελέτη αυτή, δόθηκαν στοιχεία για την εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατόπιν της ροής. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα επιβολής διαταραχής το οποίο έδινε τη δυνατότητα αλλαγής των χαρακτηριστικών της διαταραχής. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται η εξέλιξη της επιβαλλόμενης διαταραχής κατόπιν της ροής.



Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής

Η μέτρηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων, δηλαδή της ταχύτητας και του μήκους κύματος τους, συναρτήσει του μεγέθους αυτών αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της εργασίας. Παρατηρήθηκε εξάρτηση της ταχύτητας των παραγόμενων μοναχικών κυμάτων από το μέγεθός τους. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα.

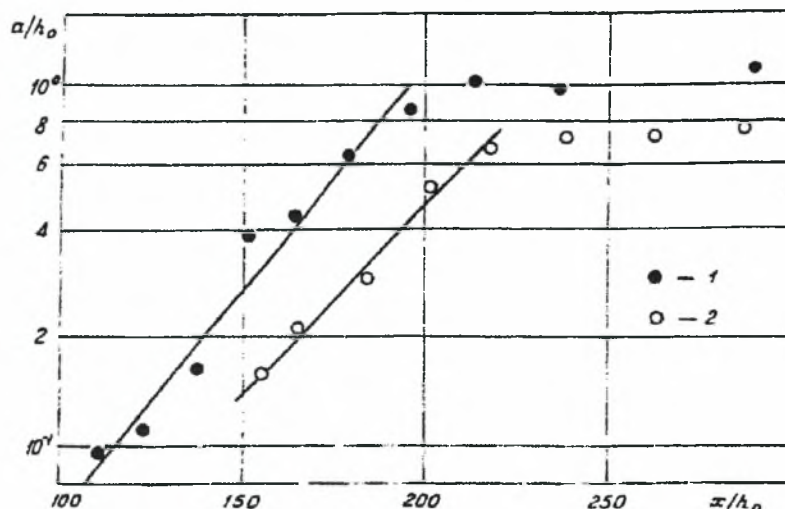


Σχήμα 2.4: Ανάπτυξη μοναχικών κυμάτων κατάντη της ροής.

Η εξάρτηση του μεγέθους των παραγόμενων κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως 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

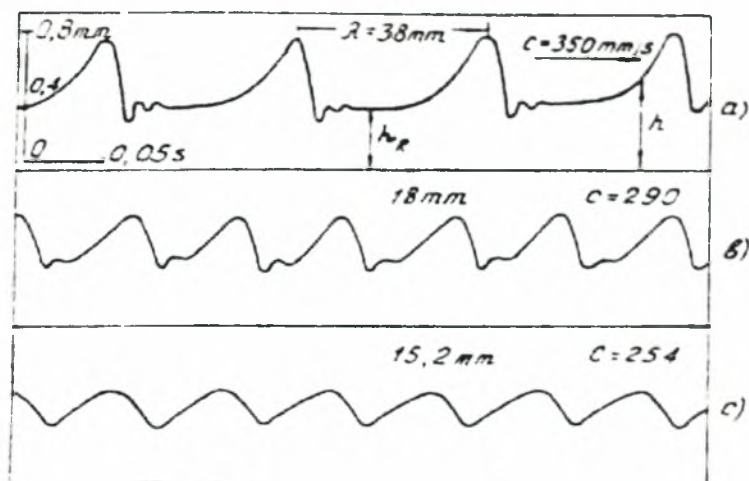
συνάρτηση της αδιάστατης κατάντη αποστάσεως: $\frac{x}{h_N}$.



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.

Στο σχήμα 2.6 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά των πλήρως αναπτυγμένων σολιτονικών κυμάτων. Το μήκος κύματος των σολιτονικών κυμάτων είναι περίπου 38mm, ενώ κάθε κύμα με μεγαλύτερο μήκος κύματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως σολιτονικό. Η ταχύτητά τους είναι της τάξης των 350mm/sec και διαφέρει από τη ταχύτητα των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων (280mm/sec).

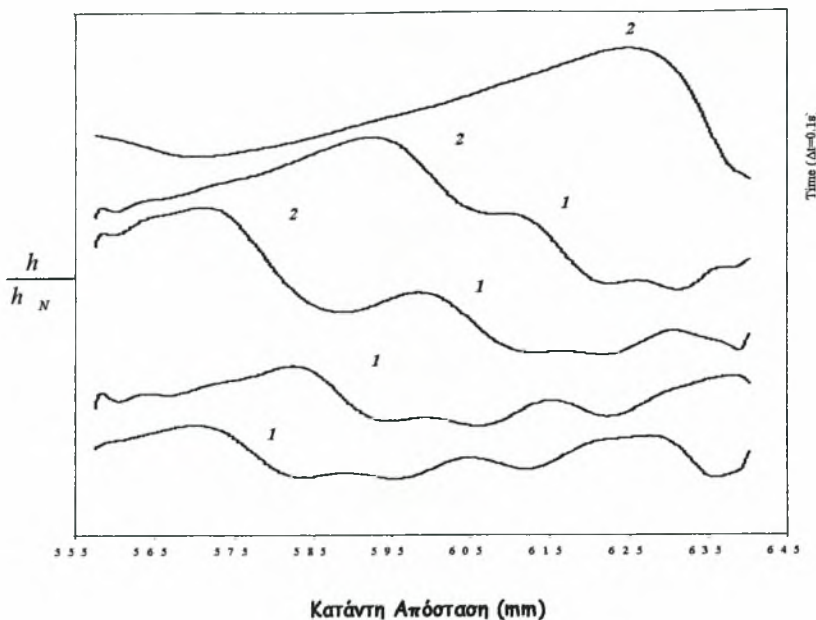


Σχήμα 2.6: Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη απόστασεως

2.4 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 τη δυνατότητα περιγραφής πολύπλοκων συστημάτων μέσω των χαρακτηριστικών και της αλληλεπίδρασης λίγων συνεκτικών δομών.

Προβλέψεις για την αλληλεπίδραση μοναχικών κυμάτων έχουν γίνει από τους Vlachogiannis and Bontozoglou (2001) όπου μελετήθηκε διεξοδικά η διαδικασία της συγχώνευσης των κυμάτων, και παρατηρήθηκε ότι η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο κυμάτων αποτελεί τον βασικό παράγοντα που καθορίζει τη χρονική διάρκεια της συγχώνευσης καθώς και τη χρονική διάρκεια της διαδικασίας απόκτησης της τελικής μορφής του νέου κύματος.



Σχήμα 2.7: Η συγχώνευση (coalescence) 2 μοναχικών κυμάτων

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 (Σχήμα 2.7). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι αν η διαφορά ύψους είναι μικρότερη από $0,1h_N$ 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.

Στην ίδια εργασία αναφέρεται ότι στο μπροστινό στρώμα του νέου κύματος παρατηρείται η προσωρινή εξαφάνιση των ρυτιδώσεων. Κατά τη διάρκεια της συγχώνευσης, οι ρυτιδώσεις χάνονται και επανεμφανίζονται όταν το νέο κύμα πάρει την τελική του μορφή. Οι ρυτιδώσεις δημιουργούν αρνητική πίεση προκειμένου το ρευστό να ρέει προς την πλευρά τους. Με τον τρόπο αυτό το μοναχικό κύμα αντιστέκεται σε περαιτέρω αύξηση της οξύτητας του, η

οποία προκαλείται λόγω βαρύτητας. Συνεπώς, μετά τη συγχώνευση του, η προσωρινή εξαφάνιση των ρυτιδώσεων του οφείλεται στο χρόνο που απαιτείται ώστε το δημιουργούμενο κύμα να φτάσει στο τελικό του ύψος. Ο χρόνος που απαιτείται για την επανεμφάνιση των ρυτιδώσεων είναι ανάλογος με το χρόνο απόκτησης της τελικής μορφής του μοναχικού κύματος.

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 το ρευστό έχει 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 τη 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.

2.5 Χαρακτηριστικά της ροής υγρού υμένα υπό διαφορετικές συνθήκες

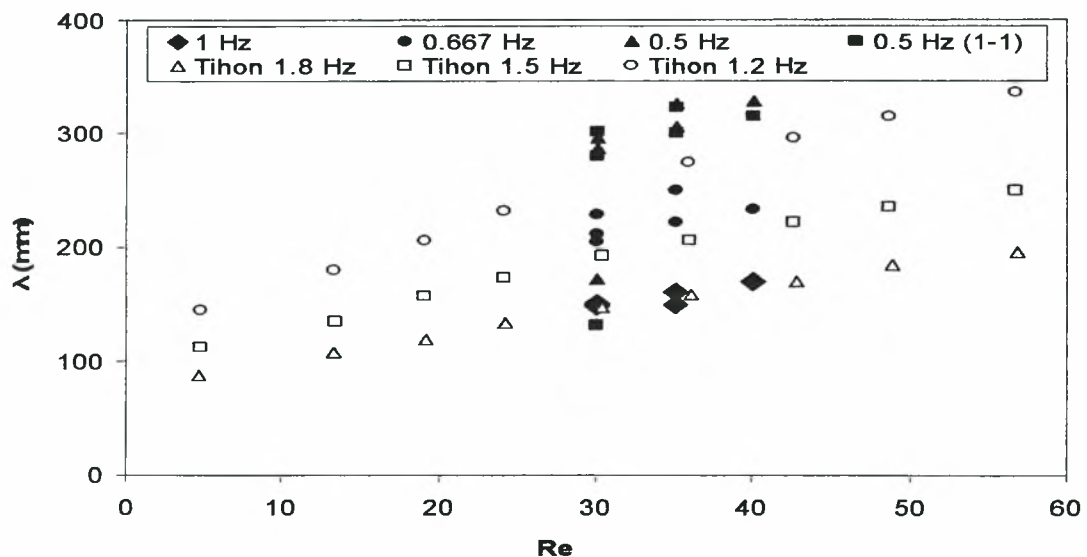
Από την εργασία των Tihon et al καθώς και του Π. Δάλλα, τα αποτελέσματα των οποίων θα συγκριθούν στη συνέχεια με αυτά της παρούσας, προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα όσον αφορά τη μορφή των κυμάτων, τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους και τη γενικότερη εξέλιξη της ροής. Συγκεκριμένα, στην πρώτη εργασία, διενεργήθηκαν πειράματα σε κανάλι με κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα (μήκος 2m, πλάτος 0,22m) κλίσης 5° και οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 1,5m από την αρχή του καναλιού. Το μέγεθος της διαταραχής ήταν μέχρι 10% της μέσης παροχής και η συχνότητα της διαταραχής κυμάνθηκε από 0,5 ως 2,5Hz. Το εύρος των αριθμών Re που αντιστοιχούσε στη ροή ήταν μεταξύ 10 ως 100 και το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν υδατικό διάλυμα Emkarox HV45, 5%κ.β. Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία $22^\circ C$ και οι ιδιότητες του ρευστού που αντιστοιχούν στη θερμοκρασία αυτή είναι: πυκνότητα $\rho = 1007 \text{ kg m}^{-3}$, κινηματικό ιξώδες: $\nu = 3,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ και επιφανειακή τάση $\sigma = 0,06 \text{ Nm}^{-1}$. Ο αδιάστατος αριθμός Ka που αντιστοιχεί στις φυσικές ιδιότητες του ρευστού είναι 1022,6.

Στη δεύτερη εργασία διενεργήθηκαν πειράματα σε κεκλιμένο επίπεδο με επιβολή εξωτερικής διαταραχής. Επιλέχθηκαν 5 διαφορετικές συχνότητες εξωτερικής διαταραχής με σταθερή παροχή. Οι συχνότητες των επιβαλλόμενων διαταραχών ήταν: 1Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:0.5 sec-off:0.5 sec), 0.667Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:1 sec-off:0.5 sec), 0.5Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:1 sec-off:1 sec), 0.5Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:1.5 sec-off:0.5 sec), 0.167Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:5 sec-off:1 sec). Ομοίως, χρησιμοποιήθηκε νερό με μικρή

ποσότητα ουρανίνης. Η κλίση του καναλιού ήταν στις $3,16^\circ$ μοίρες και οι θέσεις στις οποίες έγινε η λήψη των δεδομένων κατάντη του καναλιού ήταν α) 33cm ως 59cm, b) 133cm ως 159cm και c) 233cm ως 259cm. Οι πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν σε αριθμούς Re 30, 35 και 40.

2.5.1 Εξάρτηση μήκους κύματος από τον αριθμό Re και το μέγεθος της επιβαλλόμενης διαταραχής

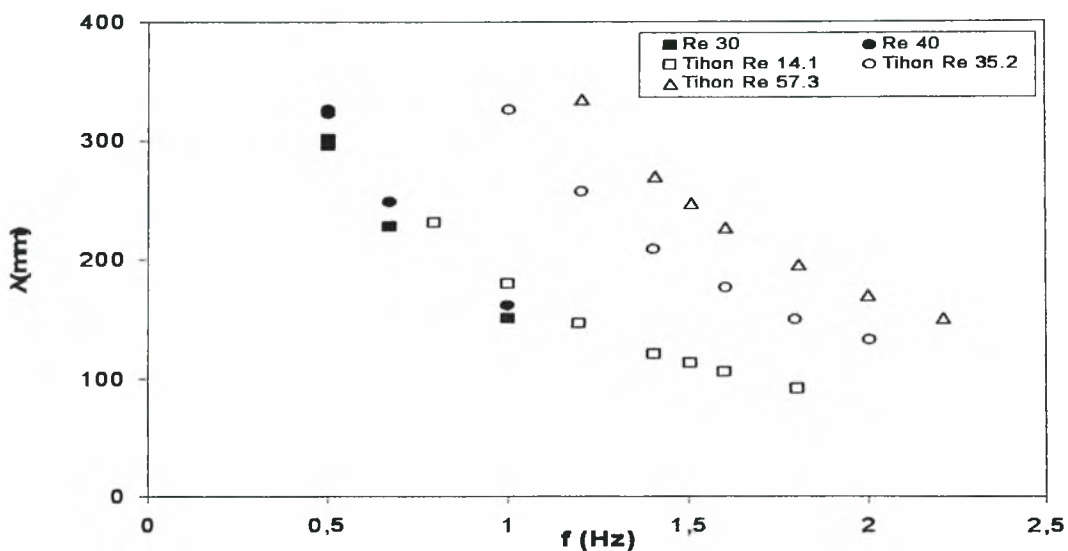
Όσον αφορά το μήκος κύματος των μοναχικών κυμάτων λ , που ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών πλήρως ανεπτυγμένων κυμάτων, παρατηρείται ότι αυξάνεται όσο αυξάνει ο αριθμός Re . Τα αποτελέσματα των δύο εργασιών βρίσκονται σε μεγάλη συμφωνία. (Σχήμα 2.8)



Σχήμα 2.8: Εξάρτηση του μήκους κύματος από τον αριθμό Re

Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η επίδραση της επιβαλλόμενης διαταραχής στο μήκος κύματος των μοναχικών κυμάτων. Με αύξηση της επιβαλλόμενης

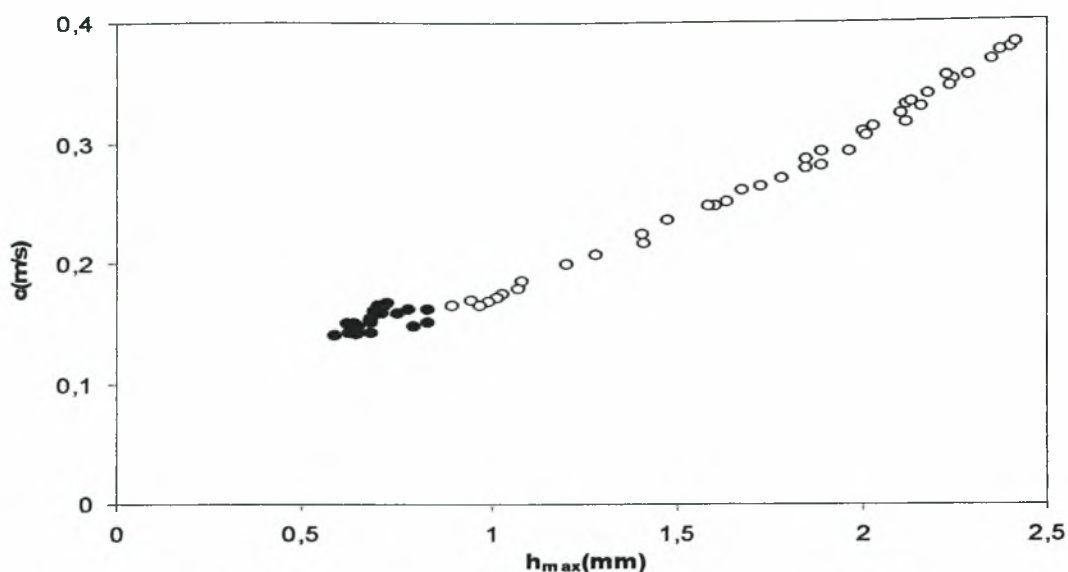
διαταραχής παρατηρείται μείωση του μήκους κύματος, γεγονός που πιστοποιείται από τα αποτελέσματα και των δύο εργασιών. Αυτό είναι λογικό καθώς αυξάνοντας τη συχνότητα η χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών κυμάτων μειώνεται και ως φυσικό ακόλουθο μειώνεται και η απόσταση μεταξύ των κορυφών τους.



Σχήμα 2.9: Εξάρτηση του μήκους κύματος από το μέγεθος της επιβαλλόμενης διαταραχής

2.5.2 Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από το μέγιστο πάχος του υμένα

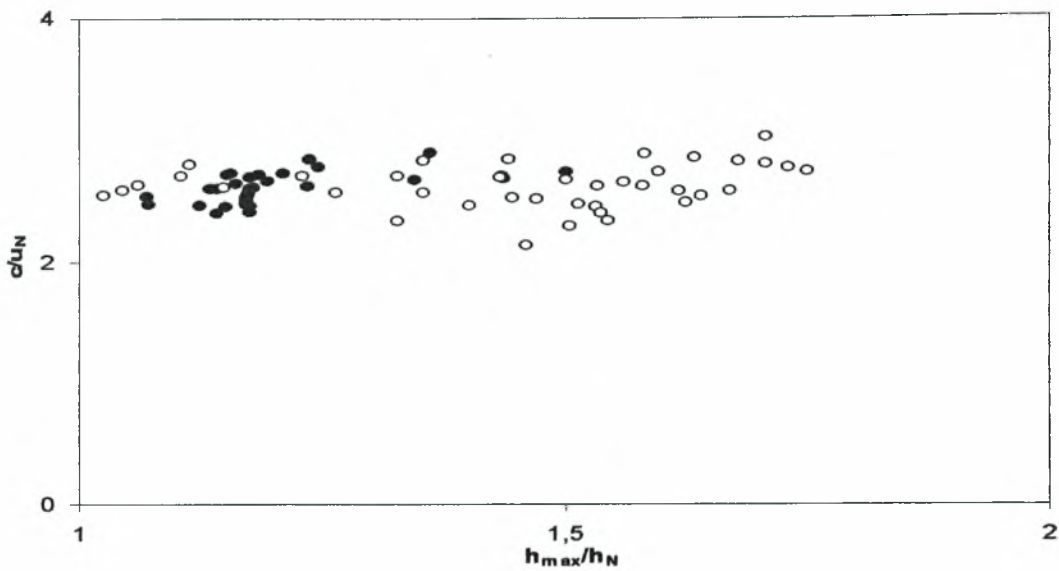
Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το μέγιστο πάχος του υμένα σε διαστατικά μεγέθη. Από το σχήμα αυτό είναι εμφανής η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο προαναφερθέντων ποσοτήτων για όλο το εύρος των αριθμών Re και των συχνοτήτων των επιβαλλόμενων διαταραχών των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα των δύο εργασιών βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία καθώς συμπίπτουν στην ίδια καμπύλη.



Σχήμα 2.10: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από το μέγιστο πάχος του υμένα

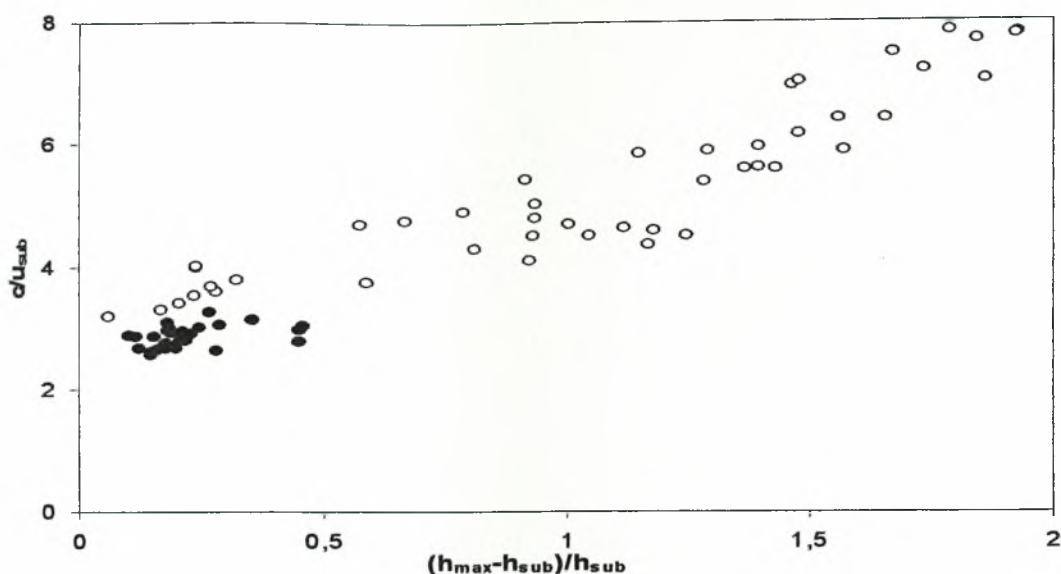
2.5.3 Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα με δύο τρόπους αδιαστατοποίησης

Η γραμμική σχέση μεταξύ της φασικής ταχύτητας και του ύψους του μοναχικού κύματος εμφανίζεται και στα αποτελέσματα των *Alekseenko et al.* (1985), για κατακόρυφους υμένες και σε αυτά των *Liu & Gollub* (1994) για κεκλιμένο επίπεδο. Αυτή η σχεδόν τέλεια συσχέτιση μεταξύ των διαστατικών μεγεθών του σχήματος 2.10 εξαλείφεται όταν το πάχος του υμένα και η φασική ταχύτητα αδιαστατοποιούνται με τις αντίστοιχες ποσότητες κατά *Nusselt* (Σχήμα 2.11). Η αδιαστατοποίηση δεν είναι επιτυχής καθώς το διάγραμμα παρουσιάζει μεγάλη διασπορά, γεγονός που εμφανίζεται στα αποτελέσματα και των δύο εργασιών.



Σχήμα 2.11: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα αδιαστατοποιημένα με τα αντίστοιχα μεγέθη κατά Nusselt

Αντιθέτως, σε περίπτωση που το πάχος του υποστρώματος h_{sub} και η μέση ταχύτητα του υποστρώματος u_{sub} (δηλαδή η μέση ταχύτητα κατά Nusselt που αντιστοιχεί στο υπόστρωμα ως χαρακτηριστική ταχύτητα), χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα ως παράμετροι για αδιαστατοποίηση του ύψους του κύματος και της φασικής του ταχύτητας παρατηρείται καλύτερη συσχέτιση των μεγεθών (Σχήμα 2.12). Το αποτέλεσμα αυτό στηρίζει την υπόθεση ότι τα σολιτονικά κύματα θα πρέπει να εξετάζονται ως ανεξάρτητα σώματα που κινούνται επάνω στο υπόστρωμα του υμένα και ότι η σύγκριση τους θα πρέπει να γίνεται με βάση όχι το προβλεπόμενο πάχος υμένα κατά Nusselt αλλά με το πάχος του υποστρώματος.



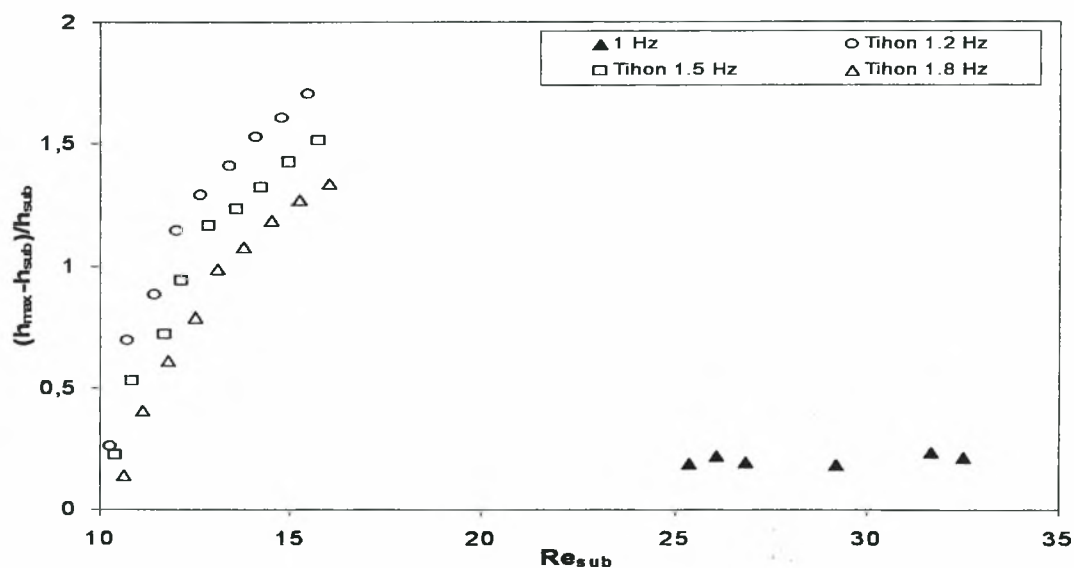
Σχήμα 2.12: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα αδιαστατοποιημένα με τα αντίστοιχα μεγέθη του υποστρώματος

Η εξάρτηση αυτή συμφωνεί ποσοτικά με τις θεωρητικές προβλέψεις των Chang & Demekhin (2002), για κατακόρυφο υμένα. Τα αποτελέσματα των δύο εργασιών και στο σημείο αυτό έχουν πολύ καλή συμφωνία.

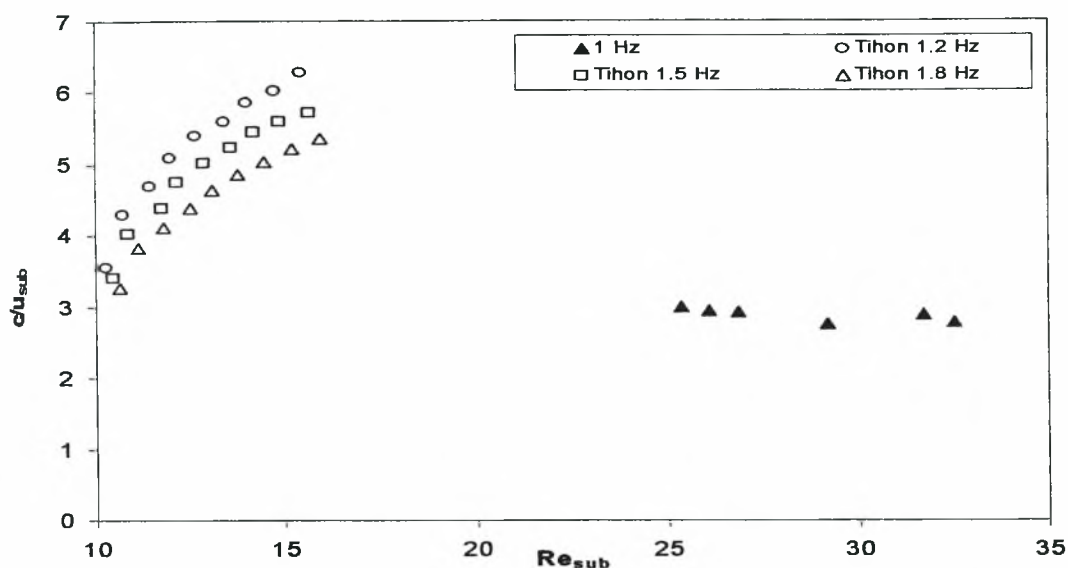
2.5.4 Εξάρτηση των βασικών αδιαστατοποιημένων μεγεθών του κύματος συναρτήσει του αριθμού Re_{sub}

Η θεωρία των Chang & Demekhin (2002), προβλέπει ότι υπάρχει κορεσμός των ποσοτήτων c/u_{sub} και $(h_{max}-h_{sub})/h_{sub}$ όσο αυξάνεται ο αριθμός Re_{sub} . Η συμπεριφορά αυτή φαίνεται στα σχήματα 2.13 και 2.14 όπου η παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας των Tihon et al. για τρεις διαφορετικές συχνότητες επιβαλλόμενης διαταραχής 1.2, 1.5, 1.8 Hz και του Π. Δάλλα για μία συχνότητα 1 Hz. Ενώ, όμως, διαπιστώνεται και στα δύο πειράματα ο κορεσμός της ταχύτητας και του ύψους κύματος, τα ασυμπτωτικά

όρια διαφέρουν κατά πολύ. Ειδικότερα, όταν η συχνότητα της διαταραχής μειώνεται και τα κύματα τείνουν να γίνουν μοναχικά, οι παρατηρούμενες πειραματικές τιμές των Tihon et al. φαίνεται να προσεγγίζουν τα θεωρητικά όρια των $c/u_{sub} \sim 7.5$ και $(h_{max}-h_{sub})/h_{sub} \sim 2.5$ που προβλέφθηκαν για κατακόρυφο υμένα από τους Chang & Demekhin (2002), ενώ οι τιμές του Π. Δάλλα είναι κατά μία τάξη μεγέθους χαμηλότερες. Θεωρητικές προβλέψεις για τη μεταβλητότητα των ποσοτήτων c/u_{sub} και $(h_{max}-h_{sub})/h_{sub}$ ως συνάρτηση του Re_{sub} δίνουν καμπύλες τύπου S, οι οποίες δεν μπορούν να κατασκευαστούν αξιόπιστα από τα πειραματικά αποτελέσματα. Στα ακόλουθα σχήματα φαίνεται η μεγάλη απόκλιση ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα των δύο εργασιών, γεγονός αρκετά ενδιαφέρον καθώς η αδιαστατοποίηση χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά μεγέθη του υποστρώματος (πάχος υποστρώματος h_{sub} και ταχύτητα υποστρώματος u_{sub}) θεωρείται καθολική.



Σχήμα 2.13: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού Re_{sub}



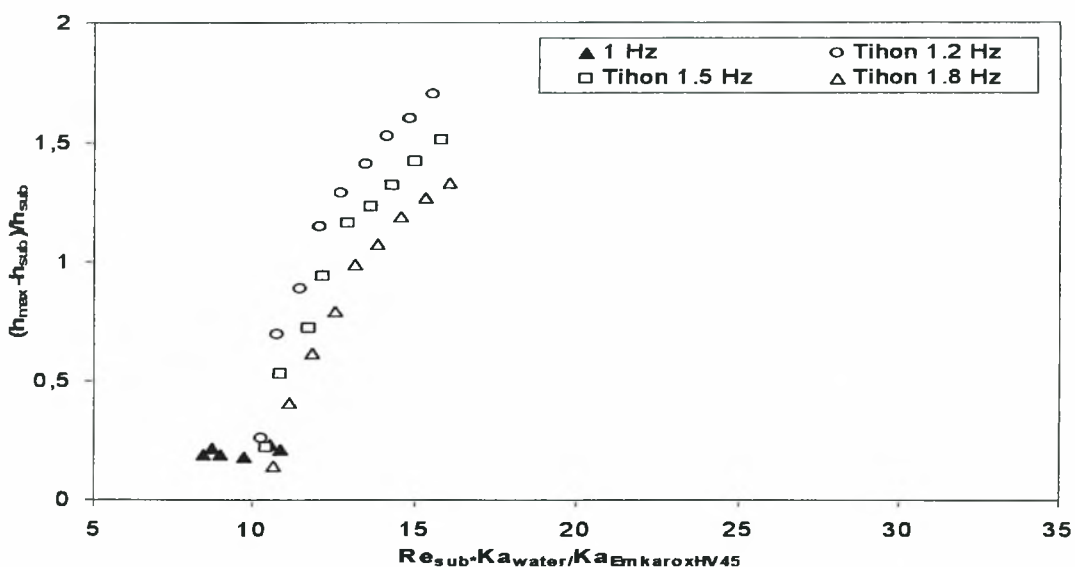
Σχήμα 2.14: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού Re_{sub}

Η απόκλιση των καμπυλών μπορεί να οφείλεται στο ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο ιξώδες των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν ($\nu_{water} = 1,004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ - $\nu_{EmkaroxHV45} = 3,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Η μεγάλη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων θα μπορούσε αποδοθεί και στη διαφορά της γωνίας κλίσης των δύο πειραματικών διατάξεων. Όπως έχει αναφερθεί τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας των Tihon et al. ελήφθησαν για γωνία κλίσης 5° ενώ τα αποτελέσματα της εργασίας του Π. Δάλλα είναι για γωνία κλίσης $3,16^\circ$. Η διαφορά τόσο στο ιξώδες των δύο ρευστών όσο και της γωνίας κλίσης των πειραματικών διατάξεων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κυμάτων, τα χαρακτηριστικά των οποίων είναι ανάμοια π.χ μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα ύψη των δημιουργούμενων κυμάτων. Σε κάθε περίπτωση, η διαφωνία υποδεικνύει ότι η κλιμάκωση με βάση το πάχος και την ταχύτητα του υποστρώματος δεν έχει καθολική ισχύ αλλά πρέπει να διορθωθεί με την προσθήκη της εξάρτησης από τη γωνία κλίσης του καναλιού.

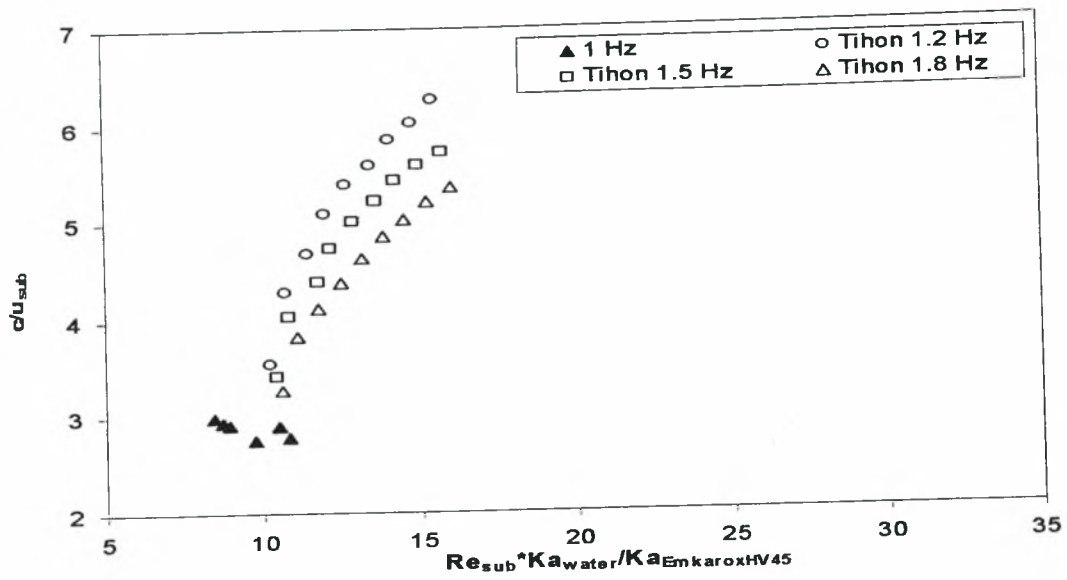
2.5.5 Εξάρτηση των βασικών αδιαστατοποιημένων μεγεθών του κύματος

συναρτήσε του αριθμού $Re_{sub} * Ka_{water} / Ka_{EmkaroxHV45}$

Λόγω της μεγάλης απόκλισης των παραπάνω διαγραμμάτων, στην εργασία του Π. Δάλλα εξετάζεται ένας εναλλακτικός τρόπος αδιαστατοποίησης που εισάγει τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε ρευστού. Χρησιμοποιείται για το κάθε ρευστό ο αδιάστατος αριθμός Ka που του αντιστοιχεί και ο οποίος λαμβάνει υπόψη το ιξώδες του ρευστού. Πολλαπλασιάζοντας το Re_{sub} με το λόγο $Ka_{water} / Ka_{EmkaroxHV45}$ φαίνεται πως από τα διαγράμματα να εξαλείφεται μερικώς η μεγάλη απόκλιση (Σχήματα 2.15 - 2.16).



Σχήμα 2.15: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσε του αριθμού $Re_{sub} * Ka_{water} / Ka_{EmkaroxHV45}$



Σχήμα 2.16: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} * Ka_{water} / Ka_{Emka_{roxHV45}}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

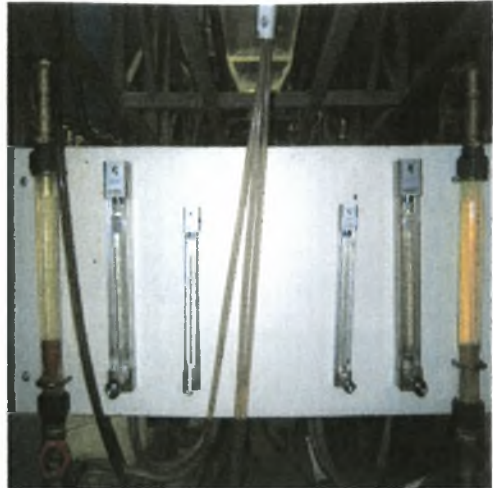
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται όσο το δυνατόν συνοπτικότερα η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη της ροής λεπτού υμένα πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι τόσο η πειραματική διαδικασία όσο και η πειραματική διάταξη έχουν περιγράψει ιδιαίτερα αναλυτικά σε προγενέστερες εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών. Αρχικά, παρουσιάζεται η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Έπειτα, περιγράφεται το σύστημα ρύθμισης της κλίσης και το σύστημα εισαγωγής διαταραχών που κατασκευάστηκε. Τέλος, ακολουθεί η μέθοδος συλλογής δεδομένων με απεικόνιση φθορισμού και η διαδικασία επεξεργασίας τους με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περίπτωση της ροής πάνω σε επίπεδο τοίχωμα.

3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

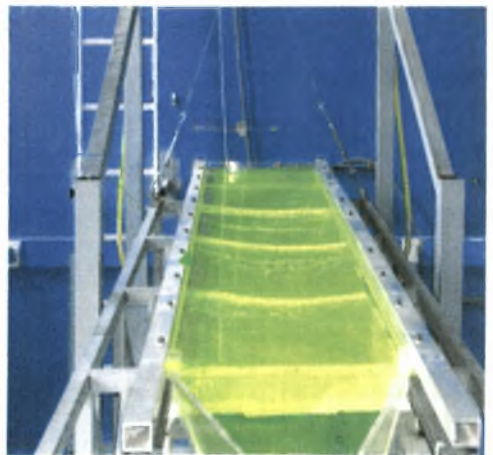
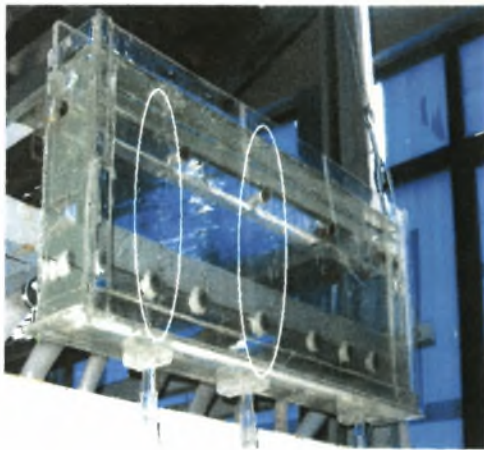
Η χρησιμοποιούμενη πειραματική διάταξη έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών στα πλαίσια της εργασίας του Π. Σταθά (2007) σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Μ. Βλαχογιάννη και απεικονίζεται στις παρακάτω φωτογραφίες (Σχήματα 3.1-3.4). Στόχος της είναι να τροφοδοτηθεί ρευστό σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς της ροής. Το βασικό μέρος της

συσκευής είναι ένα κανάλι, πλάτους 52cm και μήκους 300cm, πάνω στο οποίο ρέει υγρό το οποίο εδράζεται σε ένα μεταλλικό πλαίσιο. Το κομμάτι αυτό της συσκευής, αποτελείται από γυαλί γιατί έχει μεγάλη ακαμψία και είναι ορατή η ροή από όλες τις πλευρές. Τα περισσότερα μέρη της συσκευής είναι κατασκευασμένα από Plexiglas ώστε να είναι δυνατός ο οπτικός έλεγχος των τμημάτων αυτών.

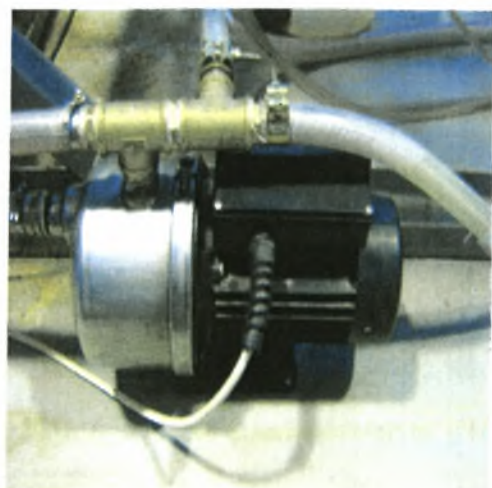
Το κανάλι είναι σταθερά τοποθετημένο πάνω σε μεταλλικό ικρίωμα. Τα δυο κομμάτια αποτελούν ένα σύστημα που αναρτάται με τρεις συνδέσμους άρθρωσης στο μπροστινό μέρος της μεταλλικής βάσης. Εξαιτίας αυτής της άρθρωσης το κανάλι μπορεί να έρθει σε κλίση ως προς την οριζόντιο με γωνία από 0° έως 45°. Το βάρος όμως του ικριώματος είναι τέτοιο που δεν επιτρέπει τη χειροκίνητη μετακίνησή του. Αυτό το έργο εκτελείται από ηλεκτρικό αναβατόριο με τη βοήθεια ενός συστήματος τροχαλιών και ενός συρματόσχοινου. Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ανυψωτική ικανότητα 1000 Kg. Το βασικό κομμάτι της όλης πειραματικής διάταξης είναι το κανάλι πάνω στο οποίο ρέει ο υμένας. Το κανάλι τροφοδοτείται με νερό από ένα δοχείο παροχής (Σχήμα 3.1α) το οποίο βρίσκεται περίπου 4m πιο ψηλά από τη βάση στήριξης του καναλιού, ύψος το οποίο εξασφαλίζει την απαραίτητη υψομετρική διαφορά ώστε να πετυχαίνονται οι επιθυμητές παροχές των πειραμάτων (αριθμοί Re). Η μέτρηση της παροχής γίνεται από έξι ροόμετρα παράλληλα συνδεδεμένα (Σχήμα 3.1β) έτσι ώστε η συνολική παροχή που τελικά θα καταλήξει στο κανάλι να είναι το άθροισμα των παροχών όλων των ροόμετρων. Πριν το νερό μπει στο κανάλι γεμίζει το δοχείο υπερχειλίσης (Σχήμα 3.2α) και από εκεί το νερό ρέει στο κανάλι (Σχήμα 3.2β). Έπειτα συλλέγεται στο δοχείο συλλογής (Σχήμα 3.3α) και από εκεί με δυο εμβαπτιζόμενες αντλίες (Σχήμα 3.3β) επιστρέφει στο δοχείο παροχής από όπου επαναλαμβάνεται ο ίδιος κύκλος λειτουργίας.



Σχήμα 3.1:α) Δοχείο παροχής β) Ροόμετρα

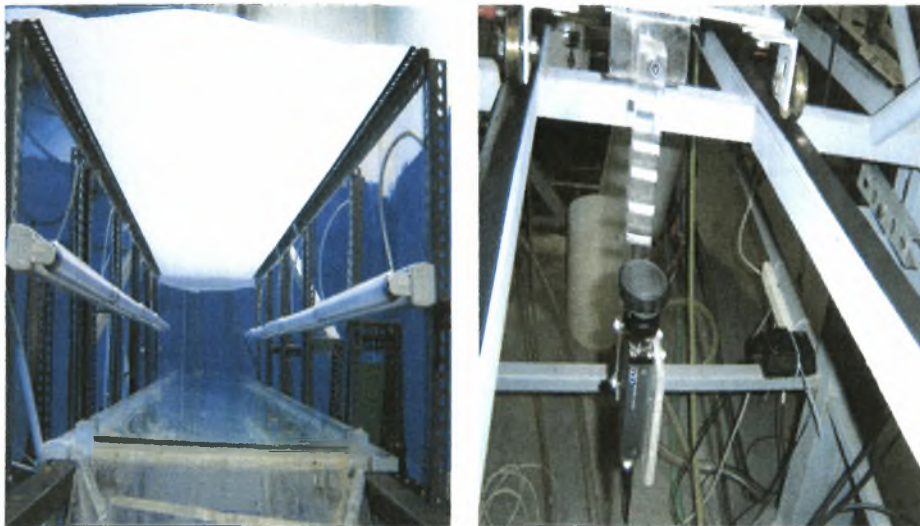


Σχήμα 3.2:α) Δοχείο υπερχείλισης β) Κανάλι ροής



Σχήμα 3.3:α) Δοχείο συλλογής β) Εμβραπτιζόμενη αντλία

Πάνω από την πλάκα μετρήσεων του καναλιού είναι τοποθετημένο ένα σύστημα φωτισμού υπεριώδους (Σχήμα 3.4α), ενώ κάτω και παράλληλα με αυτή ένας οδηγός στον οποίο στηρίζεται και μετακινείται η κάμερα συλλογής δεδομένων (Σχήμα 3.4β).



Σχήμα 3.4:α) Λάμπες φθορισμού β) 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 των αντλιών.

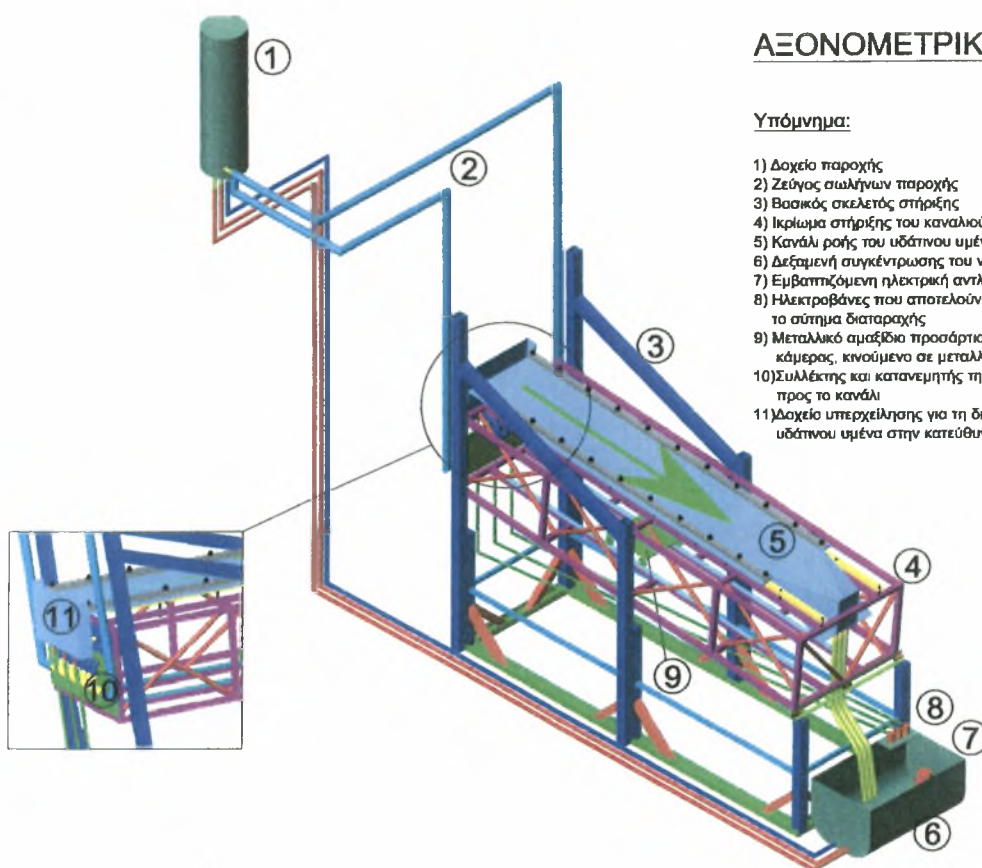
Η λειτουργία της συσκευής περιγράφεται ως εξής: Αρχικά γεμίζει το δοχείο παροχής με νερό δικτύου. Το νερό, κατεβαίνει από το ζεύγος σωλήνων παροχής με μόνη ιθυσιακή δύναμη το βάρος του και την υψομετρική διάφορα που υπάρχει από το δοχείο παροχής μέχρι τα ροόμετρα. Από εκεί οδηγείται στο συλλέκτη ο οποίος κατανέμει τη ροή και τροφοδοτεί το δοχείο υπερχειλίσσης. Το δοχείο υπερχειλίσσης όταν γεμίσει υπερχειλίζει και στέλνει το νερό στο κανάλι όπου εκεί δημιουργείται ο λεπτός υδάτινος υμένας που ρέει κατάντη της ροής

του νερού. Το νερό καταλήγει στη δεξαμενή συγκέντρωσης του νερού. Τέλος, ο κύκλος ολοκληρώνεται αφού δυο εμβυπτιζόμενες αντλίες που βρίσκονται μέσα στο δοχείο συλλογής του νερού στέλνουν το νερό πάλι στο δοχείο παροχής για να ακολουθήσει την ίδια διαδρομή.

ΑΞΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΟΨΗ

Υπόμνημα:

- 1) Δοχείο παροχής
- 2) Ζεύγος σωλήνων παροχής
- 3) Βασικός σκελετός στήριξης
- 4) Ικρίωμα στήριξης του καναλιού
- 5) Κανάλι ροής του υδάτινου υμένα
- 6) Δεξαμενή συγκέντρωσης του νερού
- 7) Εμβυπτιζόμενη ηλεκτρική αντλία ανακύκλωσης
- 8) Ηλεκτροβάνες που αποτελούν το σύστημα διαταραχής
- 9) Μεταλλικό αμαξίδιο προσάρτησης της ψηφιακής κάμερας, κινούμενο σε μεταλλικές ράγες
- 10) Συλλέκτης και κατανεμητής της παροχής προς το κανάλι
- 11) Δοχείο υπερχείλισης για τη δημιουργία του λεπτού υδάτινου υμένα στην κατεύθυνση της ροής



Σχήμα 3.5: Σχεδιαστική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

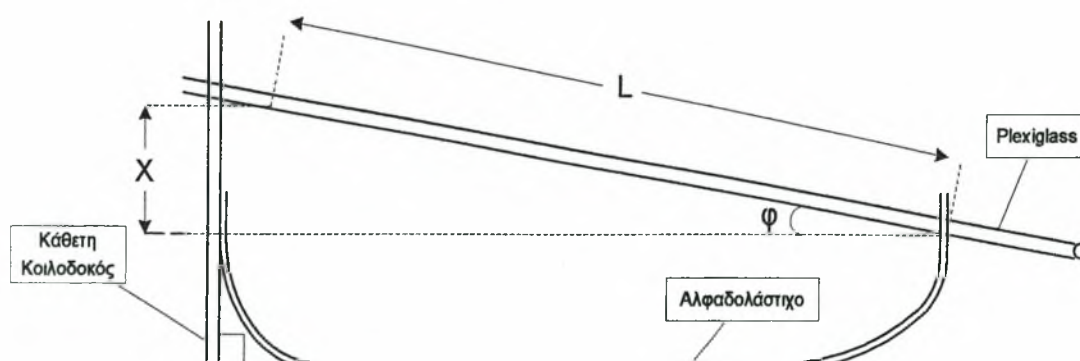
Η παροχή του ρευστού ελέγχεται από τα ροόμετρα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν (όπως δείχθηκε) έξι ροόμετρα ανά τρία συμμετρικά μεταξύ τους τα οποία είναι παράλληλα συνδεδεμένα και η συνολική παροχή τους είναι το άθροισμα της παροχής κάθε ροόμετρου. Η μέτρηση της παροχής κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί υψηλή ακρίβεια καθώς η παροχή καθορίζει τον αριθμό Reynolds. Τα συμβατικά ροόμετρα αδυνατούν να παρέχουν την απαιτούμενη ακρίβεια. Η μέτρηση στην πράξη

γίνεται με συλλογή μιας ποσότητας νερού σε φορητό δοχείο για ένα δεδομένο εύλογο χρονικό διάστημα (συνήθως μεγαλύτερο των τεσσάρων λεπτών), ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα του χρήστη. Στη συνέχεια, ζυγίζεται αυτή η ποσότητα και με την παραδοχή ότι η πυκνότητα του υγρού διαλύματος πλησιάζει αυτή του καθαρού νερού και αντιστοιχίζεται σε μια παροχή με μονάδες lt/min. Παρόλα αυτά στο κύκλωμα πριν τον διανομέα έχουν συνδεθεί δυο διατάξεις από παράλληλα ροόμετρα για να δίνουν ενδεικτικά στο χρήστη την τιμή της παροχής και να ρυθμίζει προσεγγιστικά την επιθυμητή.

3.2 Σύστημα ρύθμισης της κλίσης

Ο υπολογισμός της γωνίας κλίσης απαιτεί μεγάλη ακρίβεια -της τάξης του ενός δέκατου της μοίρας- γεγονός που δεν μπορεί να επιτευχθεί με κάποιο μετρητικό όργανο. Συνεπώς, χρησιμοποιείται η μέθοδος του αλφαδολάστιχου, που βασίζεται σε απλές εφαρμογές της τριγωνομετρίας και αποδεικνύεται εξαιρετικά ακριβής. Έτσι, το αλφαδολάστιχο χρησιμεύει για την προβολή του οριζόντιου επιπέδου στην κάθετη κοιλοδοκό, ώστε με χρήση κλίμακας να υπολογιστεί η απόσταση x . Η τριγωνομετρική σχέση που μας δίνει τη γωνία ϕ

$$\text{είναι: } \phi = \sin^{-1} \frac{x}{L} \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.6: Μέθοδος αλφαδολάστιχου για υπολογισμό της γωνίας κλίσης

Έχοντας επιτευχθεί η επιθυμητή γωνία κλίσης χρησιμοποιείται το πέλμα σταθεροποίησης που πακτώνεται στην κάθετη κοιλοδοκό και εφαρμόζει στο ικρίωμα. Έτσι, αποφεύγονται ανεπιθύμητες ταλαντώσεις που μπορεί να μεταφερθούν στο κανάλι ή μικρές μεταβολές στη γωνία κλίσης.

3.3 Σύστημα εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Σκοπός της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής είναι να δημιουργήσει ένα «υδραυλικό άλμα» στην αφετηρία της ροής του υμένα ώστε να μελετηθεί η δυναμική εξέλιξή του κατάντη της ροής. Τρεις σωλήνες διαμέτρου $\varnothing 10\text{mm}$ τοποθετημένες στο κάτω μέρος του δοχείου υπερχειλίσης ενώνονται σε μια και οδηγούνται σε μια ηλεκτροβαλβίδα ON/OFF που καταλήγει απ' ευθείας στη δεξαμενή απορροής. Η ηλεκτροβαλβίδα είναι παράλληλα συνδεδεμένη σε έναν ψηφιακό ηλεκτρονικό χρονοστή που ελέγχει το ρυθμό που ανοίγουν και κλείνουν οι σωλήνες. Υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου που η βαλβίδα θα είναι κλειστή και χωριστά του χρόνου που θα είναι ανοιχτή. Έχοντας τη δυνατότητα να προκληθεί μία, στιγμιαία ή μη, αύξηση της παροχής του ρευστού στο κανάλι μπορεί να δημιουργηθεί μία διαταραχή στη ροή του επίπεδου υμένα που θα οδηγήσει στη γένεση ενός «σολιτονικού» κύματος ή μιας οικογένειας τέτοιων κυμάτων που η συχνότητα εμφάνισής τους θα ελέγχεται άμεσα από το χειριστή της συσκευής. Σημειώνεται πως η ελάχιστη υψομετρική διαφορά του δοχείου υπερχειλίσης από τη δεξαμενή συγκέντρωσης ρευστού είναι 1m, ενώ αυξάνοντας την κλίση του καναλιού αυξάνεται και αυτή με συνέπεια την εντατικοποίηση του φαινομένου του «υδραυλικού άλματος».



Σχήμα 3.7: Ψηφιακός χρονιστής του συστήματος διαταραχής

3.4 Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό

Με τη χρήση της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό είναι δυνατό να ληφθούν 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 τη μέθοδο αυτή, η προσθήκη στο υγρό μιας 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.

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.

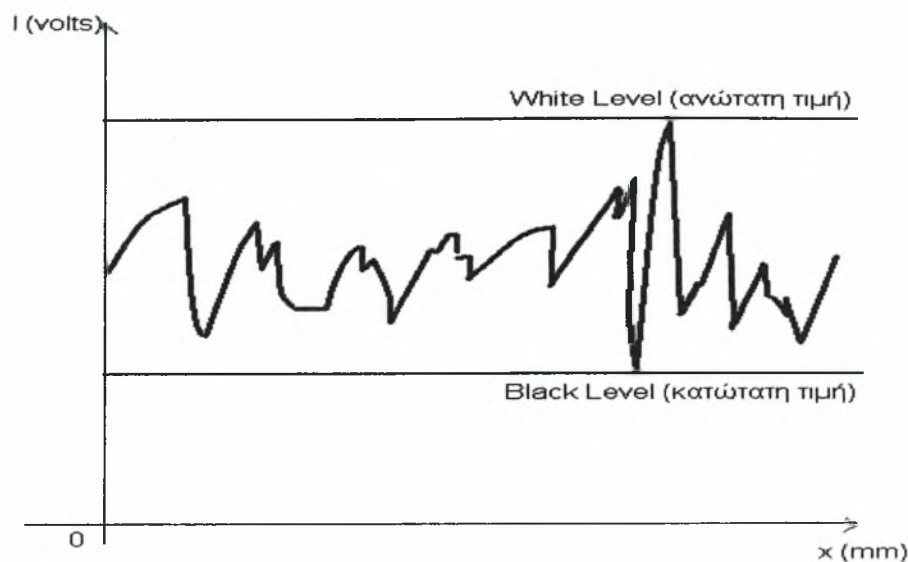
Κάτω από το κανάλι ροής είναι τοποθετημένη ψηφιακή κάμερα για τη συλλογή εικόνων. Ο τύπος της είναι CCD (Sony XC-77/77CE). Η συγκεκριμένη κάμερα η οποία είναι ασπρόμαυρη, έχει πολύ καλή ευαισθησία στο φως (0,5 lux) και αναλογία σήματος θορύβου (50 dB), με ταχύτητα δειγματοληψίας 50 εικόνες/sec. Για τη συλλογή και την αποθήκευση των εικόνων χρησιμοποιείται κάρτα συλλογής δεδομένων (DT3155 Frame Grabber Board - Data Translation) και κατάλληλο λογισμικό. Οι εισερχόμενες εικόνες ψηφιοποιούνται σε 640x480 pixels ή 768x576 pixels με ανάλυση 8 bits.

Σύμφωνα με τη 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. Στην εργασία του Μ. Βλαχογιάννη (2001) επαληθεύεται η 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:

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

όπου a, 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 τη

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.



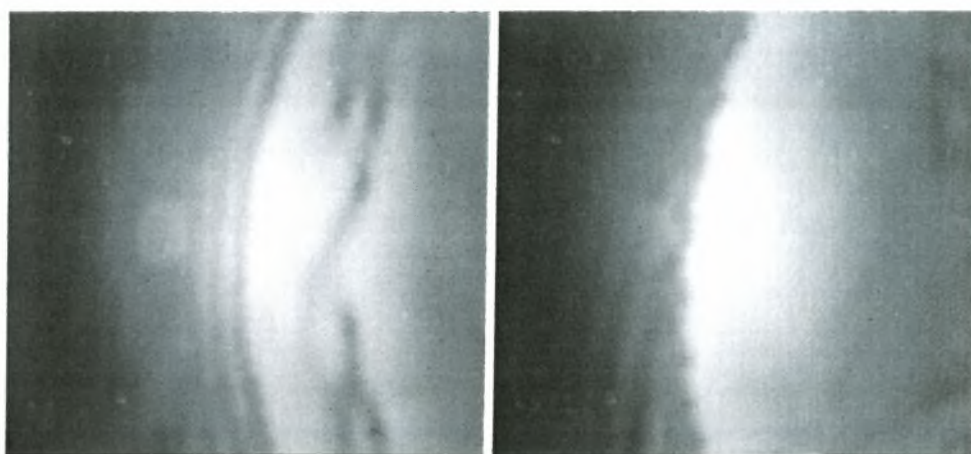
Σχήμα 3.8: Παράδειγμα περιορισμού της περιοχής διακριτοποίησης για ένα σημείο pixel της εικόνας.

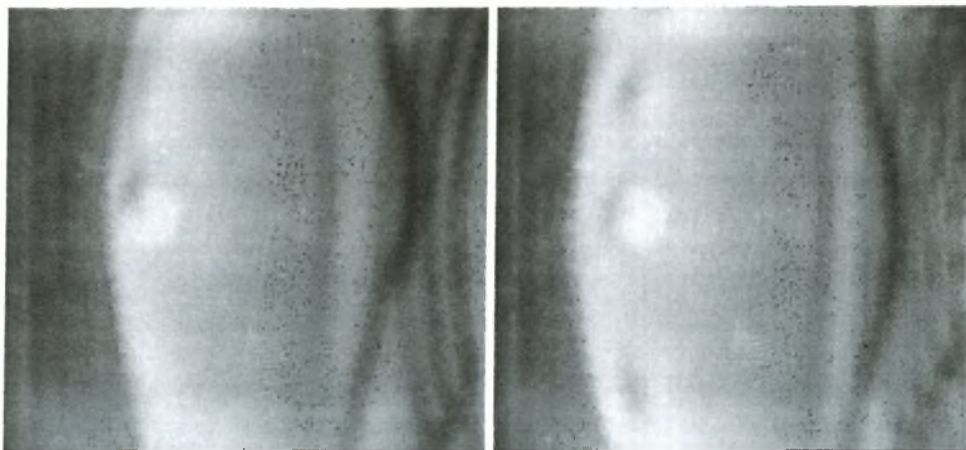
Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι ο στόχος είναι η συλλογή της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο υμένας από την κάμερα. Όμως στην περιοχή του πειράματος υπάρχουν και άλλες πηγές φωτός, όπως αυτή του φυσικού φωτός ή του φωτισμού του εργαστηρίου. Αυτές οι πηγές είναι πιθανό να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του πειράματος και να αλλάζουν και την τιμή των συντελεστών α και β . Για να αποφευχθεί η επίδραση άλλων πηγών φωτός έχει προσαρμοσθεί πάνω στο 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.

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών της σχέσης της έντασης ακτινοβολίας με το τοπικό πάχος του υμένα, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν 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 Μ Βλαχογιάννη (2001), υπάρχει ένα εύρος αριθμών Reynolds, ανάλογα με τη γωνία κλίσης, όπου ο υμένας είναι ευσταθής και το πάχος του ίσο με τη θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt. Επομένως, η συλλογή εικόνων σε συνθήκες που παρέχουν ευσταθή υμένα μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τους συντελεστές α , β .

3.5 Επεξεργασία δεδομένων

Όπως 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.

Στο σχήμα 3.9, στις περιοχές που οι αποχρώσεις του γκρι πλησιάζουν περισσότερο προς το λευκό το πάχος υμένα είναι μεγαλύτερο (ύπαρξη κύματος) σε σχέση με τις περιοχές με αποχρώσεις κοντά στο μαύρο. Συμπερασματικά, παρατηρείται κίνηση ενός διδιάστατου 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 λαμβάνονται μόνο ποιοτικές πληροφορίες για τη ροή και τις δομές που δημιουργούνται. Για τη λήψη ποσοτικών δεδομένων από τις εικόνες είναι αναγκαία η επεξεργασία τους υπολογιστικά. Αυτό γίνεται με τη χρήση του MATLAB και κάποιων προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας (Image Tool, HL Image++98).

3.6 Επεξεργασία εικόνων

Στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία των εικόνων 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. 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 σχέσεων 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 δώσει το πάχος του υμένα σε κάθε pixel της εικόνας.

Σημειώνεται 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 ισούψων καμπυλών. Βέβαια, επειδή μια τέτοιου είδους ανάλυση είναι αρκετά χρονοβόρα υπολογιστικά, καλό είναι να γίνεται μόνο όπου είναι αναγκαίο και όπου δεν μπορούν να προκύψουν αλλιώς συμπεράσματα για τη ροή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

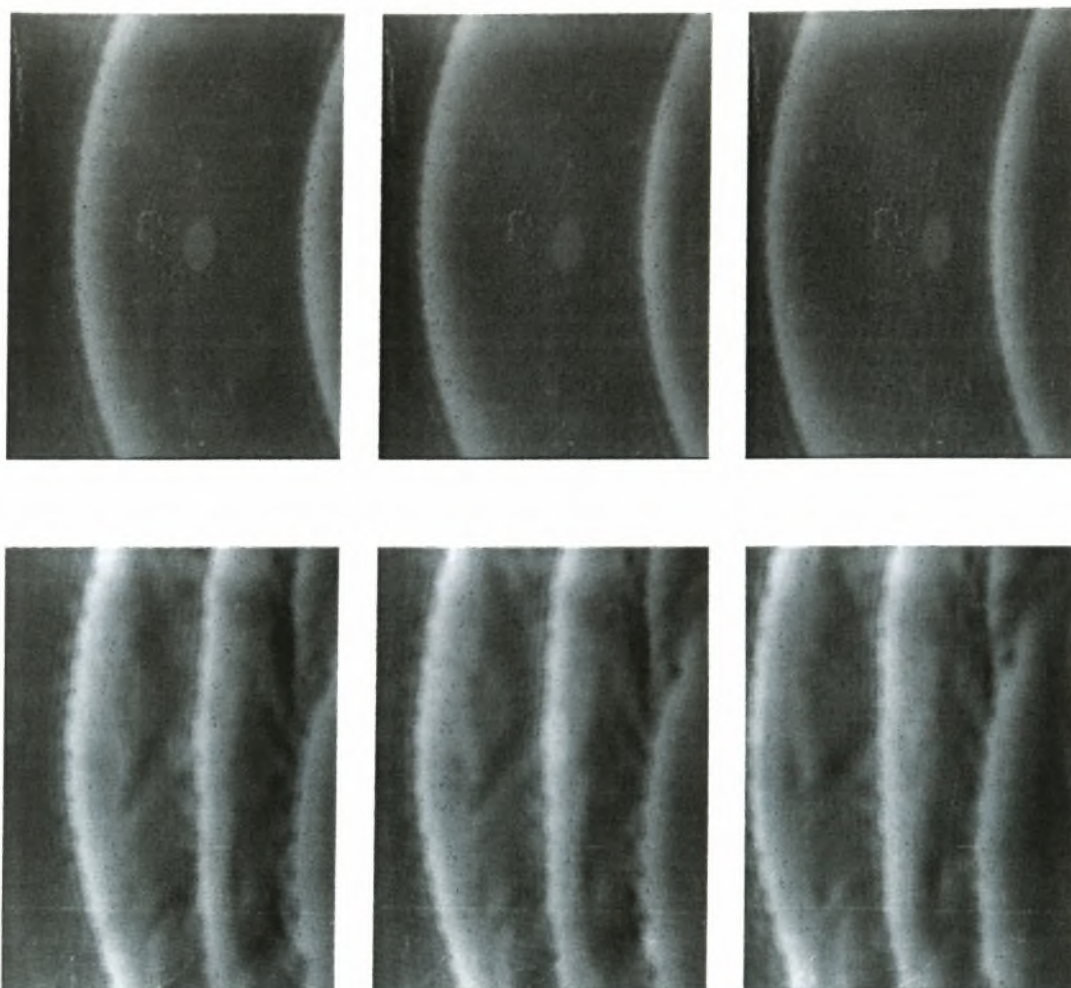
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής υγρού υμένα στο κεκλιμένο επίπεδο (κανάλι) με επιβολή εξωτερικής διαταραχής. Η κλίση του καναλιού διατηρείται σταθερή στις $5,2^{\circ}$ μοίρες. Μικρές γωνίες κλίσης επιλέγονται για να αναπτυχθούν πιο αργά τα διδιάστατα κύματα με αποτέλεσμα να καθυστερεί η εμφάνιση των τρισδιάστατων δομών. Χρησιμοποιήθηκε νερό δικτύου και μικρή ποσότητα της χρωστικής ουσίας ουρανίνη. Οι θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κατόπιν του καναλιού ήταν α) 33cm ως 59cm, b) 133cm ως 159cm και c) 233cm ως 259cm, γεγονός που συνηγορεί στην παρατήρηση της εξέλιξης των κυμάτων σε μεγάλο εύρος και στον έλεγχο των αλληλεπιδράσεων τους. Ακολουθώντας την πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 επιλέχθηκαν οι ακόλουθες συχνότητες επιβαλλόμενων διαταραχών: 1Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:0.5 sec-off:0.5 sec), 0.667Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:1 sec-off:0.5 sec), 0.5Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:1 sec-off:1 sec), 0.5Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:1.5 sec-off:0.5 sec), 0.167Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:5 sec-off:1 sec). Σημειώνεται ότι η εξωτερική διαταραχή επιβάλλεται με σταθερή παροχή. Οι πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν σε αριθμούς Re 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 43, 45 και 50. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα για αριθμούς Re 16 έως 43, γιατί για μεγαλύτερους Re διαπιστώνεται εμφάνιση τρισδιάστατων δομών. Αρχικά, αναφέρεται ο τρόπος επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων που λαμβάνεται από τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των

μοναχικών κυμάτων. Επιπροσθέτως, διαχωρίζονται οι διδιάστατες από τις τρισδιάστατες δομές που εμφανίζονται κατά τη ροή του υγρού υμένα. Κατά την εμφάνιση των τρισδιάστατων δομών παρατηρούνται χρονικά αμετάβλητες δομές στη ροή, φαινόμενο που ονομάζεται «πάγωμα». Έπειτα, μελετάται η επίδραση της διαταραχής στην εμφάνιση παρασιτικών κυμάτων και ο τρόπος που επηρεάζεται η ροή από την επιβολή ίδιας διαταραχής αλλά διαφορετικού πλάτους. Στη συνέχεια, αναλύονται τα κριτήρια με τα οποία ένα κύμα χαρακτηρίζεται ως πλήρως ανεπτυγμένο και αναφέρεται η συμβολή του υποστρώματος στο μέγεθος του κύματος. Επίσης, γίνεται λόγος για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαδοχικών κυμάτων και για τους τρόπους με τους οποίους συντελείται η συγχώνευση τους. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα, με αυτά που παρουσιάζονται στην εργασία των Τίηον et al (2006) και με αυτά που παρουσιάζονται στην εργασία του κ. Πέτρου Δάλλα (2007).

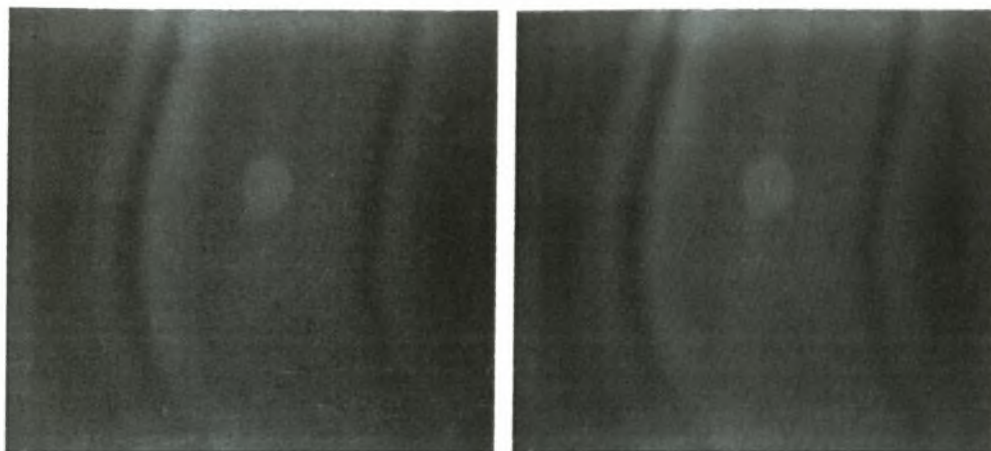
4.1 Πρωτογενή δεδομένα

Από τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό συλλέγονται δεδομένα για την ένταση της ακτινοβολίας του υμένα και επομένως για το πάχος του, με τη μορφή εικόνων (Σχήμα 4.1). Τα πειραματικά αποτελέσματα που συλλέχθηκαν επιτρέπουν την εξαγωγή μόνο ποιοτικών συμπερασμάτων, επομένως οδηγούνται σε περαιτέρω επεξεργασία.



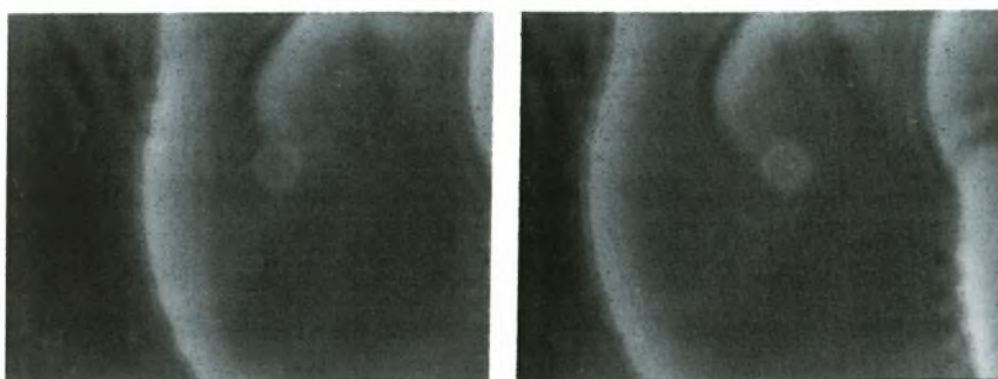
**Σχήμα 4.1: Πρωτογενή δεδομένα της μεθόδου φθορισμού α) Διδιάστατες δομές
β) Τρισδιάστατες δομές**

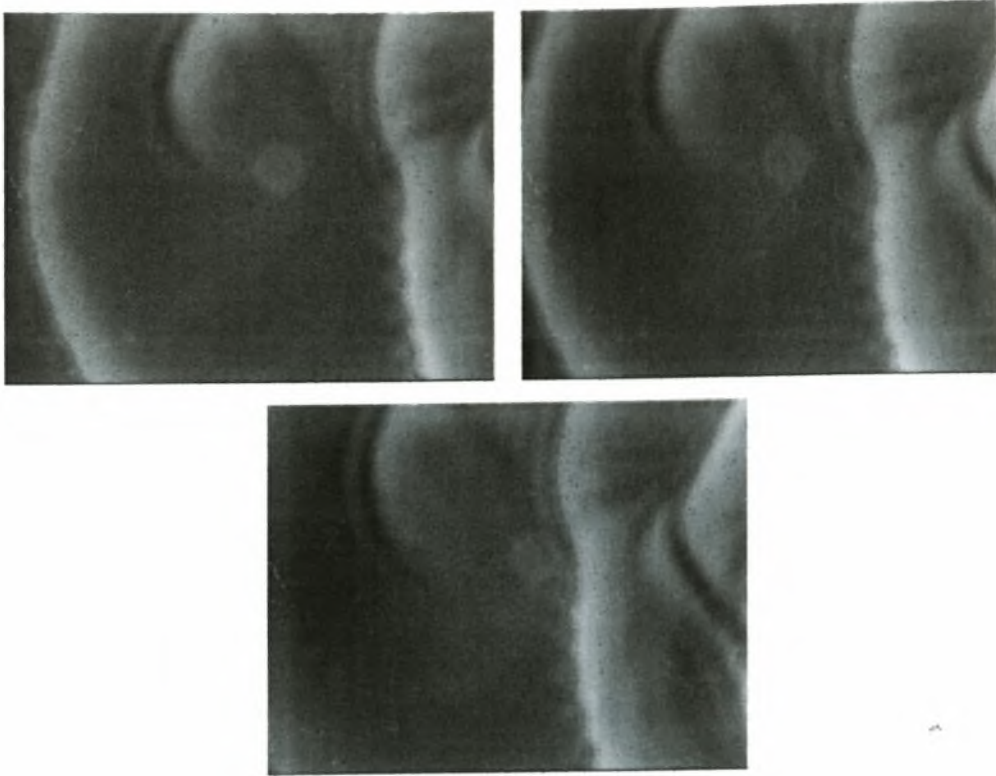
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο το πρώτο στάδιο για την επεξεργασία των εικόνων αποτελεί το ψηφιακό φιλτράρισμα. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται προκειμένου να εξομαλυνθούν οι μετρήσεις, δηλαδή να απαλειφθεί ο εξωτερικός θόρυβος, αλλά και να αποφευχθούν πιθανές ατέλειες χωρίς να αλλοιωθεί η δομή των κυμάτων. Συνήθως, χρησιμοποιούνται φίλτρα Gaussian 5x5, 7x7 και 15x15. Στην παρούσα εργασία διαπιστώθηκε ότι καλύτερη επεξεργασία γίνεται με φίλτρο 15x15. Ένα παράδειγμα της επιβολής ψηφιακού φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 4.2.



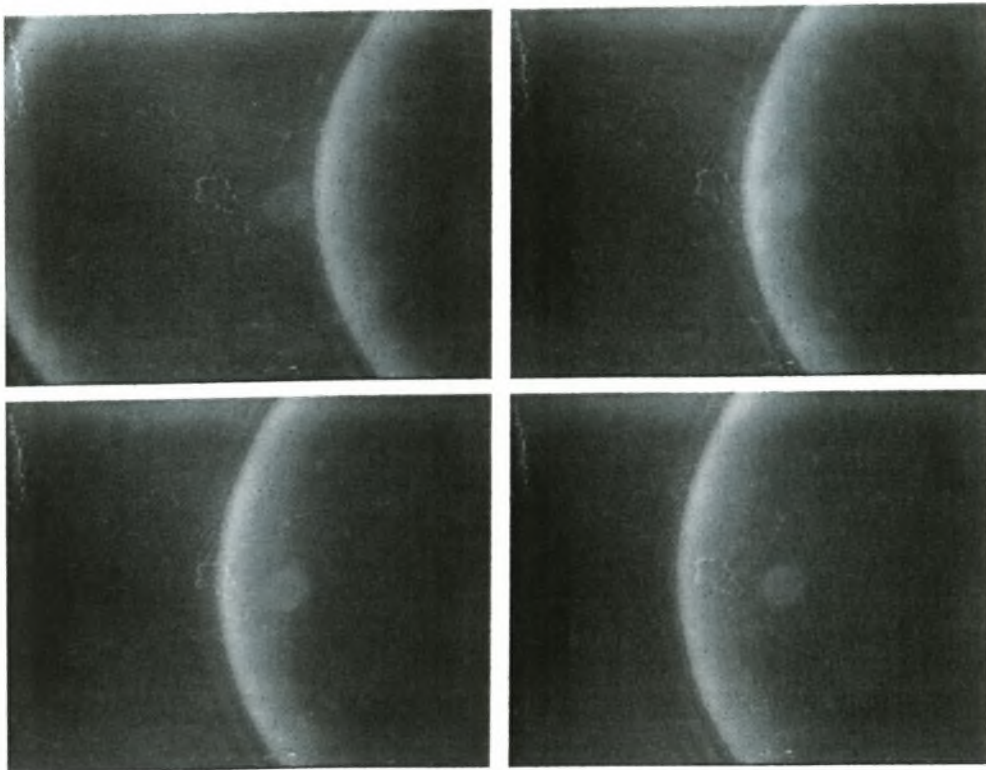
Σχήμα 4.2: Πρωτογενή δεδομένα α) χωρίς χρήση ψηφιακού φίλτρου και β) με χρήση του ψηφιακού φίλτρου Gaussian 15x15

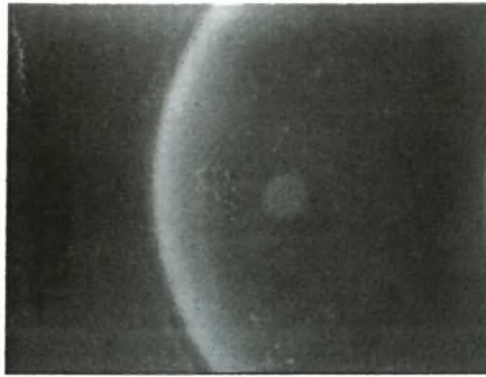
Για τη λήψη ποσοτικών συμπερασμάτων, επεξεργάζονται τα πρωτογενή δεδομένα με το πρόγραμμα Matlab, το οποίο δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης του πάχους του υμένα για κάθε pixel της εικόνας. Σε αυτή την περίπτωση κάθε γράφημα που προκύπτει από το Matlab εμφανίζει πέντε συνεχόμενες χρονικές στιγμές, που δείχνουν τη χρονική εξέλιξη του υμένα. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται η εξέλιξη του υμένα για πέντε διαδοχικές χρονικές και το αντίστοιχο γράφημα από την επεξεργασία τους.



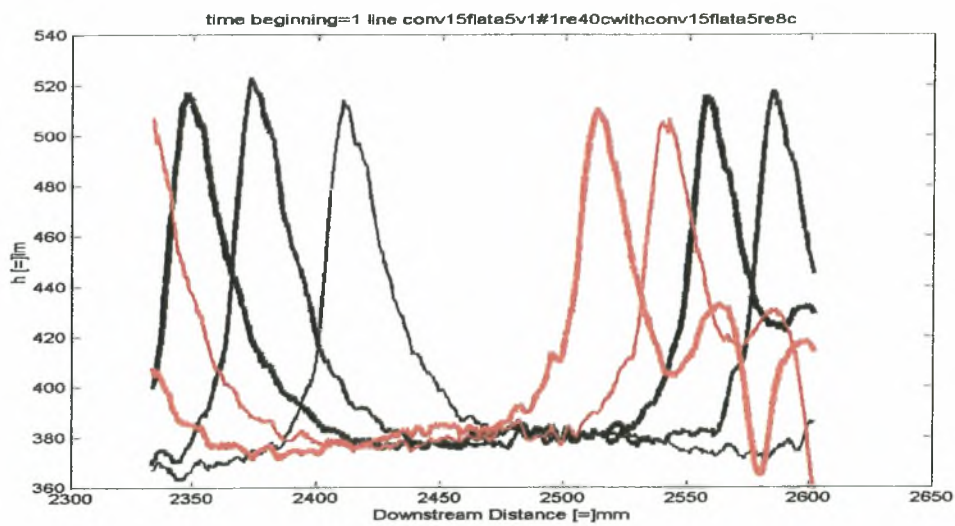


Σχήμα 4.3α): Πρωταρχικά δεδομένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές τρισδιάστατης δομής

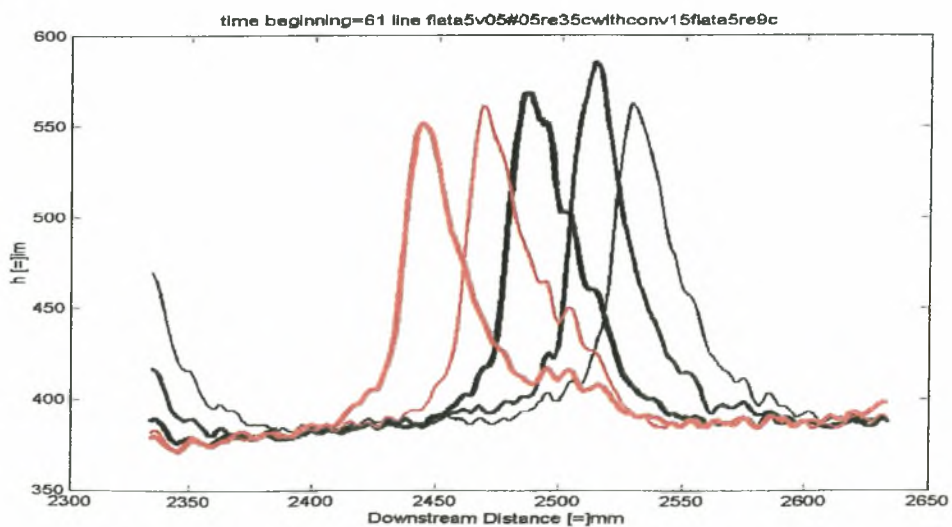




Σχήμα 4.3β): Πρωταρχικά δεδομένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές διδιάστατης δομής

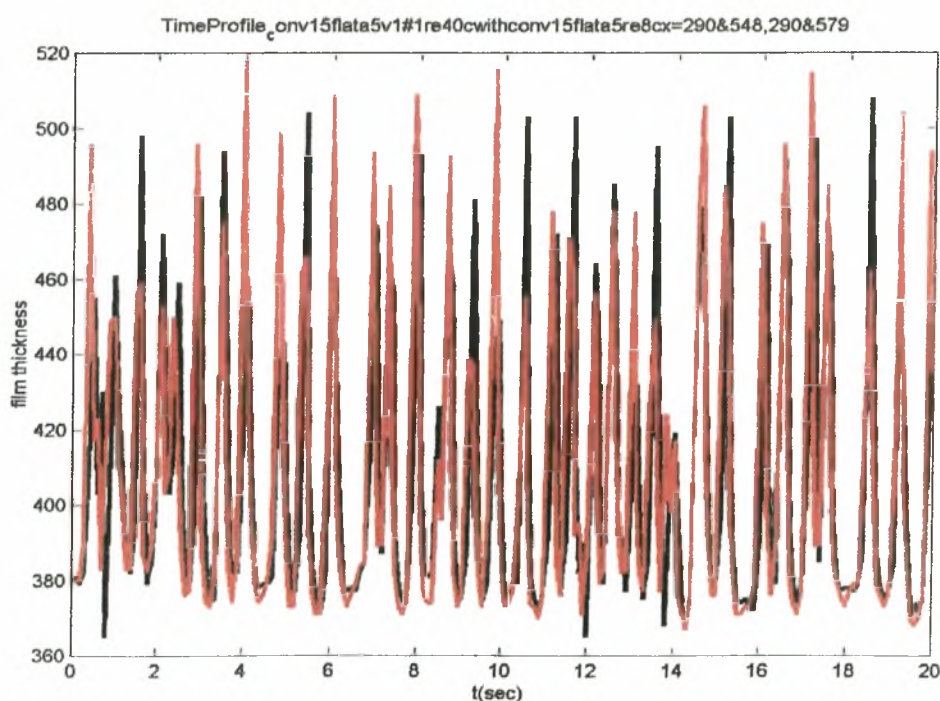


Σχήμα 4.4α): Προφίλ υμένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές τρισδιάστατης δομής

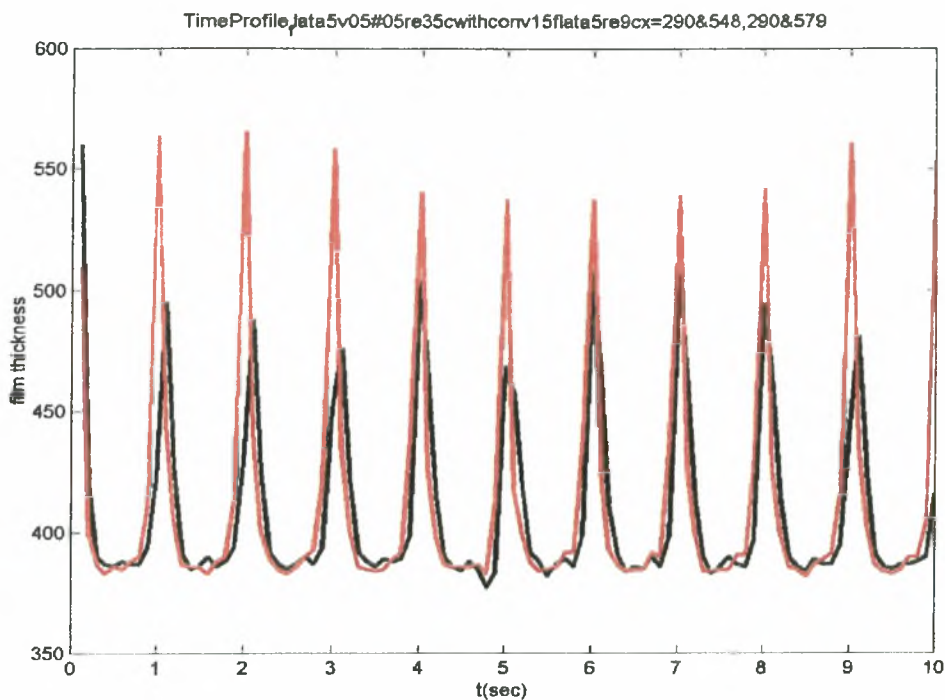


Σχήμα 4.4β): Προφίλ υμένα για πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές διδιάστατης δομής

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, από τα πειραματικά αποτελέσματα, λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με τη χρονική εξέλιξη του τοπικού πάχους του υμένα σε ένα σημείο του οπτικού πεδίου. Κατά τη διαδικασία αυτή θεωρούνται σταθερά σημεία του οπτικού πεδίου και παρατηρείται το πως αναπτύσσεται η ροή περνώντας από αυτά. Οι μετρήσεις ελήφθησαν στα εξής ζεύγη σημείων του οπτικού πεδίου α) 515.05mm - 526.02mm, β) 1515.52mm-1526.02mm και γ) 2515.52mm-2526.02mm. Έπειτα από επεξεργασία με χρήση του Matlab τα εξαγόμενα αποτελέσματα έχουν τη μορφή των σχημάτων 4.5 α,β.



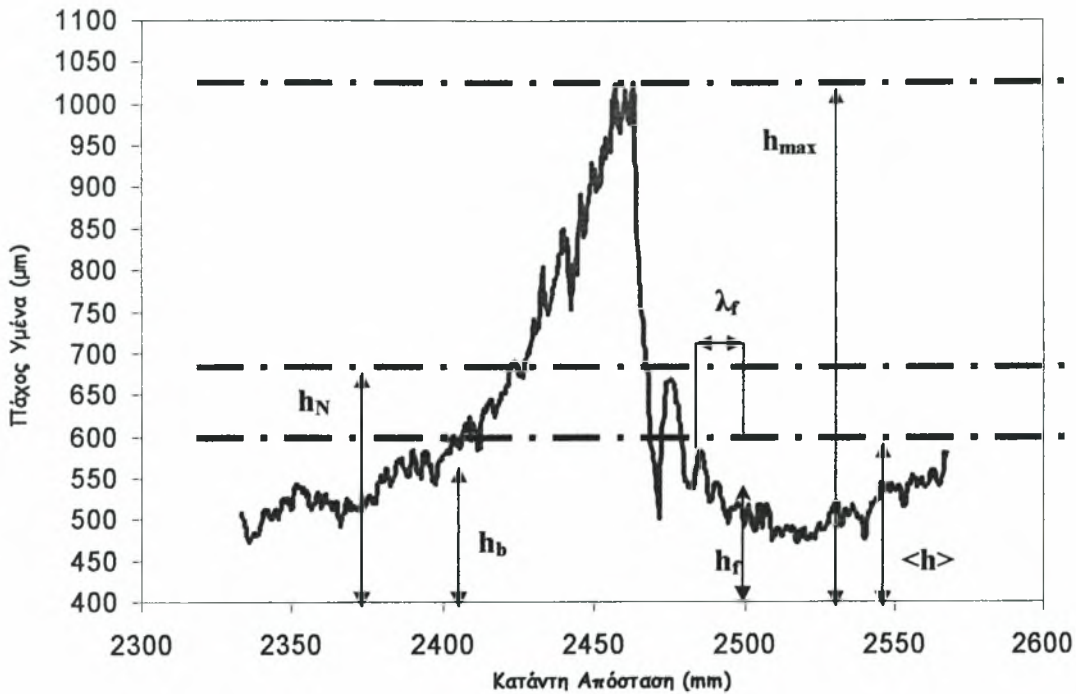
Σχήμα 4.5α): Χρονική μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας για δύο σταθερά σημεία τρισδιάστατης δομής



Σχήμα 4.5β): Χρονική μεταβολή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας για δύο σταθερά σημεία διδιάστατης δομής

4.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη μοναχικού κύματος

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Matlab μεταφέρονται στο Excel, όπου δίδεται η δυνατότητα καλύτερης επεξεργασίας γιατί εμφανίζεται μόνο μια χρονική στιγμή σε κάθε γράφημα. Το σχήμα 4.6 παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός μοναχικού κύματος.

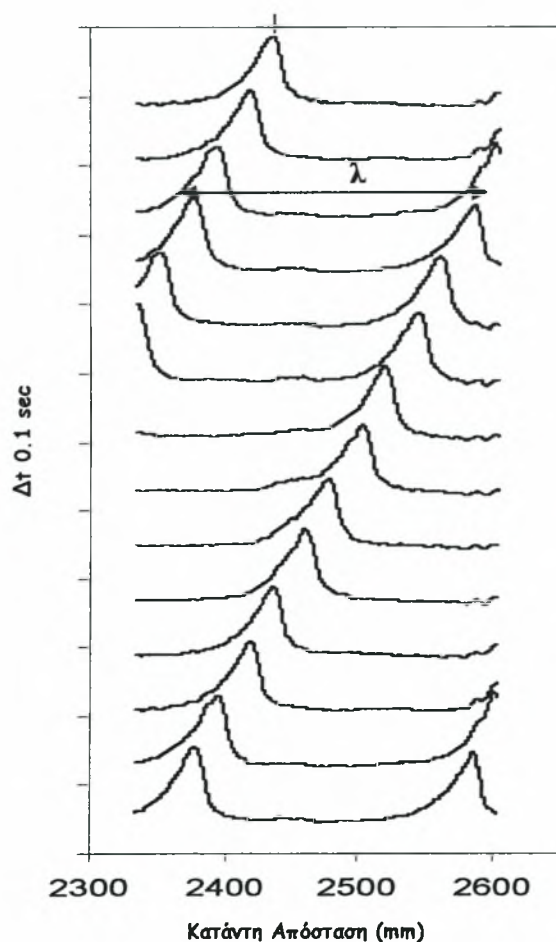


Σχήμα 4.6 h_{max} μέγιστο ύψος υμένα, h_f πάχος υμένα στο μέτωπο του κύματος
 h_b πάχος υμένα στην ουρά του κύματος, λ_f μήκος τριχοειδών
 h_N πάχος υμένα κατά Nusselt, $\langle h \rangle$ μέσο πάχος του υμένα

Για να μελετηθεί η εξέλιξη της ροής χρονικά δημιουργούνται γραφήματα που περιέχουν πολλές διαδοχικές χρονικές στιγμές. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας ένα σταθερό αριθμό σε κάθε προφίλ υμένα, γεγονός που οδηγεί στο διαχωρισμό μεταξύ τους και άρα στην καλύτερη απεικόνισή τους. Το σχήμα 4.7 απεικονίζει τη χωρική μεταβολή του υμένα όπου η κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μια χρονική στιγμή η οποία διαφέρει από την επόμενη κατά $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$. Συνεπώς, παρατηρείται η εξέλιξη του υμένα τόσο χρονικά όσο και χωρικά και ελέγχεται η περιοδικότητα των φαινομένων. Επίσης, εκτιμάται με μεγάλη ακρίβεια η φασική ταχύτητα των κυμάτων, θεωρώντας ένα σταθερό σημείο του υμένα και γνωρίζοντας το χρονικό βήμα μεταξύ των καμπυλών. Επιπλέον, μετρείται το μήκος κύματος λ , δηλαδή η απόσταση δύο διαδοχικών

κορυφών μεταξύ δύο αναπτυσσόμενων κυμάτων. Από την εύρεση του μήκους κύματος υπολογίζεται ο κυματαριθμός από την ακόλουθη σχέση: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (4-1).

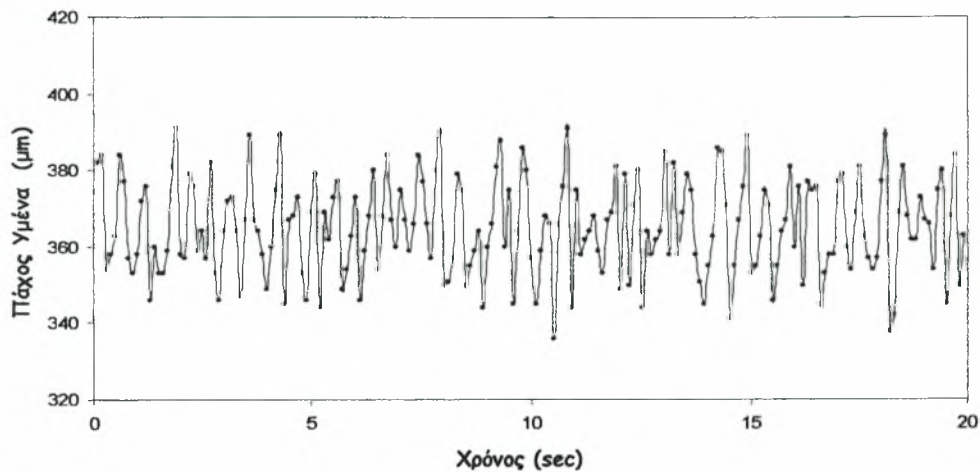
Τέλος λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με το είδος των κυμάτων αλλά και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους (π.χ. περιοδικά ή μοναχικά κύματα, συγχώνευση μεταξύ κυμάτων κλπ).



Σχήμα 4.7: Χωρική μεταβολή του υμένα για διαδοχικές χρονικές στιγμές

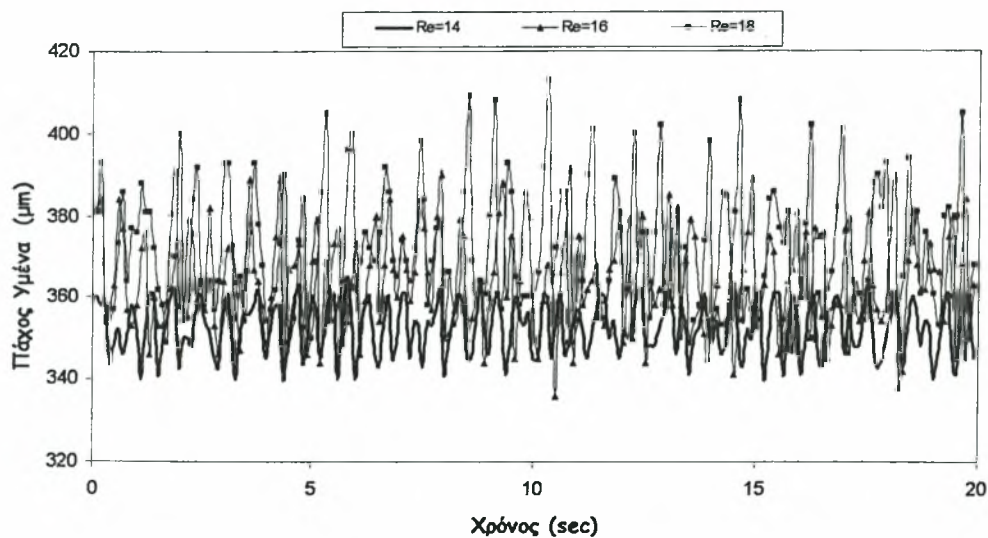
Από σχήματα αντίστοιχα του 4.8 παρατηρείται η χρονική εξέλιξη της ροής, το πάχος του υμένα αλλά και το ύψος του κύματος και γίνεται έλεγχος για την εμφάνιση παρασιτικών κυμάτων. Από περαιτέρω επεξεργασία των

αποτελεσμάτων καταρτίζεται το ακόλουθο διάγραμμα όπου απεικονίζεται η χρονική μεταβολή του υμένα για σταθερό σημείο του οπτικού πεδίου:

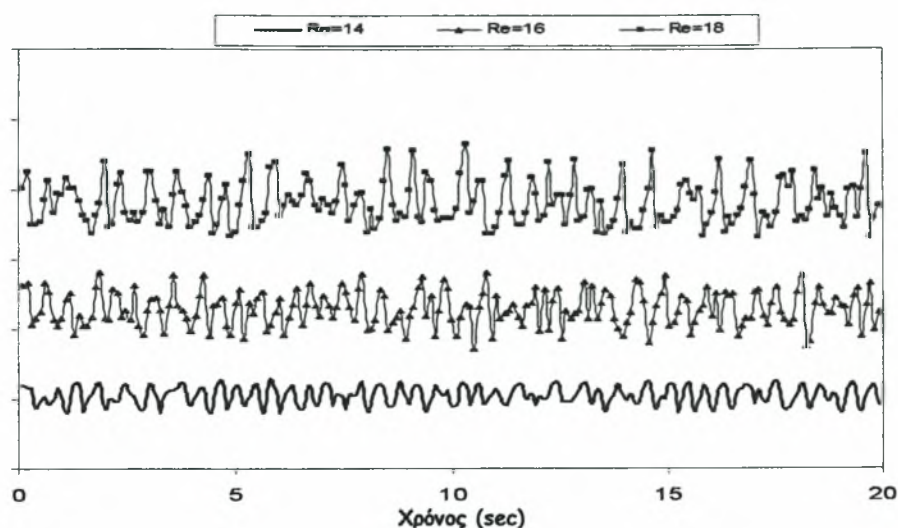


Σχήμα 4.8: Χρονική μεταβολή του ύρους της ελεύθερης επιφάνειας για σταθερό σημείο

Στο σχήμα 4.9 εμφανίζεται η χρονική εξέλιξη της ροής σε ένα σημείο για διάφορους αριθμούς Re . Λόγω του ότι δεν είναι ευδιάκριτη η καμπύλη της κάθε χρονοσειράς, μετατοπίζεται προσθέτοντας της ένα σταθερό αριθμό (Σχήμα 4.10).

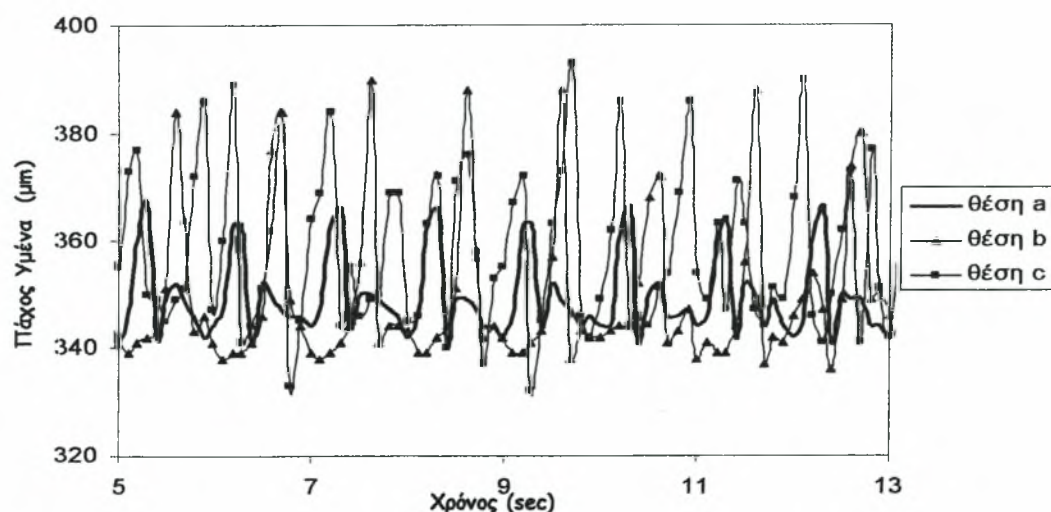


Σχήμα 4.9: Χρονική εξέλιξη της ροής σε σταθερό σημείο για διάφορους Re



Σχήμα 4.10: Διαχωρισμένη χρονική εξέλιξη της ροής σε σταθερό σημείο για διάφορους Re

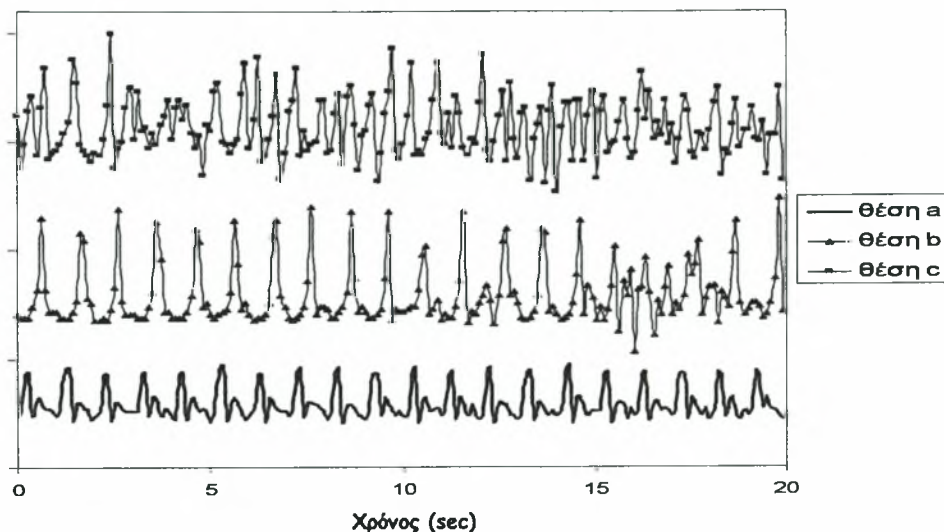
Τα γραφήματα στα οποία απεικονίζεται η εξέλιξη της ροής σε διάφορες θέσεις του οπτικού πεδίου είναι της μορφής:



Σχήμα 4.11: Χρονική εξέλιξη της ροής σε διάφορα σημεία για ίδιο Re

Αντίστοιχα με τα παραπάνω δημιουργούνται γραφήματα στα οποία απεικονίζεται η εξέλιξη της ροής για έναν αριθμό Re στις τρεις θέσεις του καναλιού (σχήμα 4.12) και δίνουν πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη του ύψους των κυμάτων, γεγονός που αποτελεί κριτήριο για τον έλεγχο της

ανάπτυξης τους. Επίσης, παρατηρείται ο σχηματισμός και η αλληλεπίδραση πιθανών παρασιτικών κυμάτων.

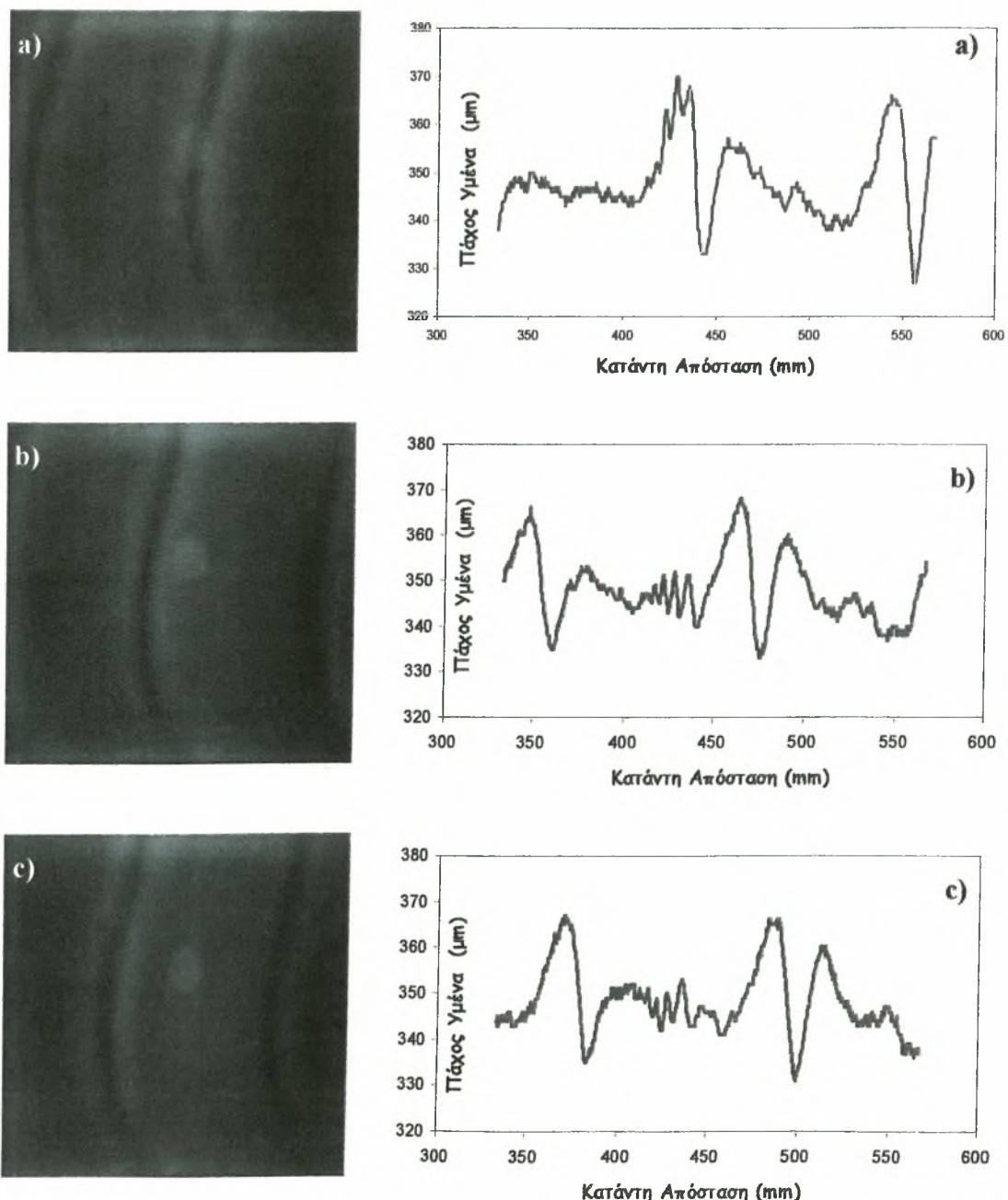


Σχήμα 4.12: Διαχωρισμένη χρονική εξέλιξη της ροής σε διάφορα σημεία για ίδιο Re

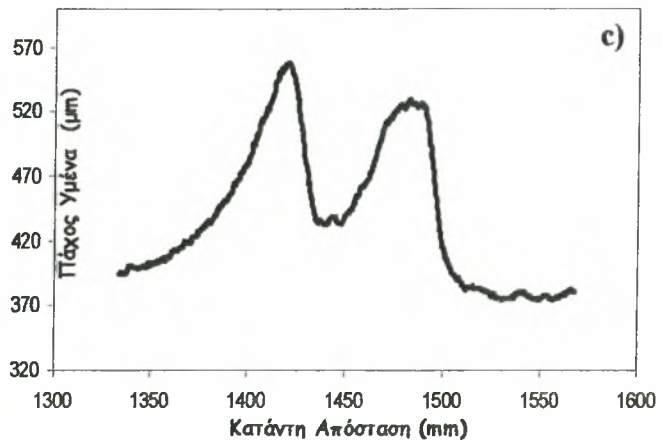
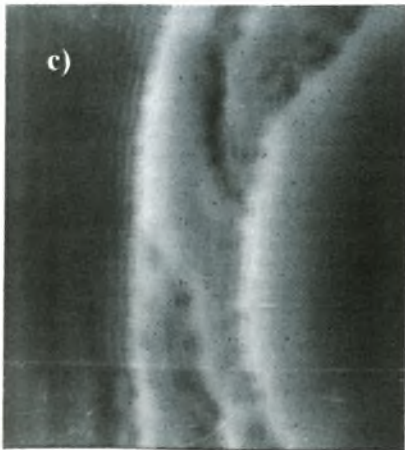
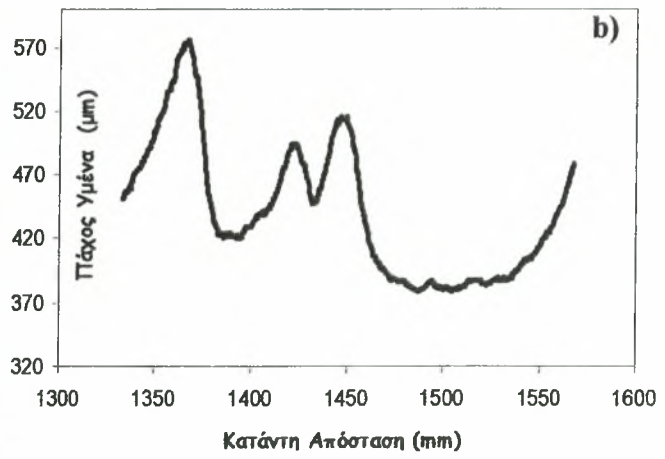
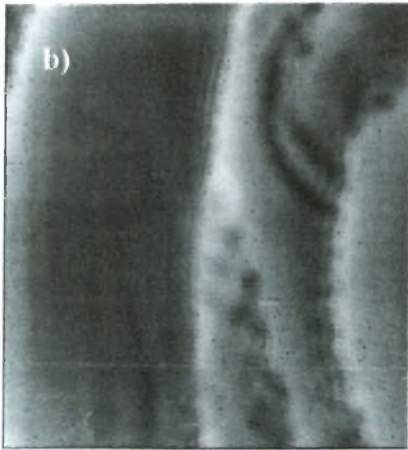
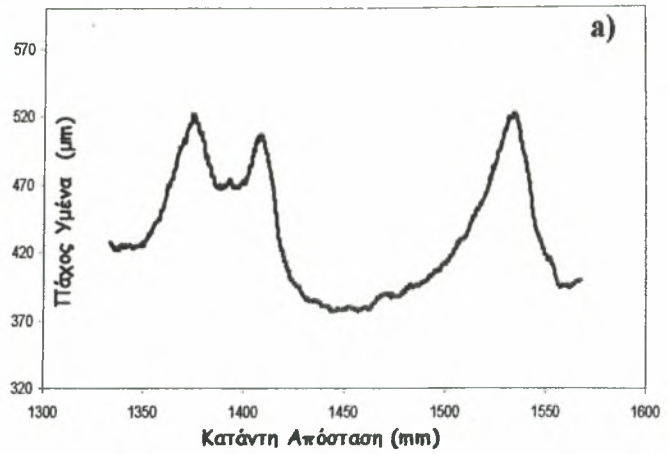
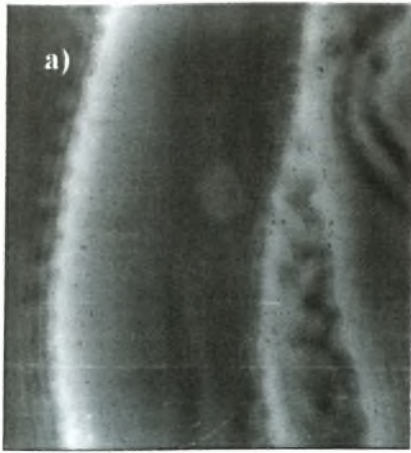
4.3 Διαχωρισμός μεταξύ διδιάστατων και τρισδιάστατων δομών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη των χαρακτηριστικών των διδιάστατων κυμάτων. Έτσι, σε περίπτωση εμφάνισης τρισδιάστατων δομών δεν γίνεται περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία των χαρακτηριστικών τους. Ο όρος τρισδιάστατες δομές αναφέρεται σε ακανόνιστους σχηματισμούς στο μέτωπο αλλά και γενικότερα σε όλο το εύρος του υμένα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούνται εγκάρσιοι διαχωρισμοί στις κορυφές των ψηλότερων κυμάτων γεγονός που οφείλεται σε αστάθειες ανάλογες με αυτές των πλήρως ανεπτυγμένων διδιάστατων δομών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διαχωρισμού διδιάστατης και τρισδιάστατης δομής εμφανίζεται στα σχήματα (4.13, 4.14) όπου η κάθε εικόνα διαφέρει από την επόμενη κατά $\Delta t=0.2 \text{ sec}$. Ο διαχωρισμός γίνεται οπτικά. Στα σχήματα 4.13 (a)-(c) απεικονίζονται διδιάστατες δομές, όπου φαίνεται το μέτωπο του

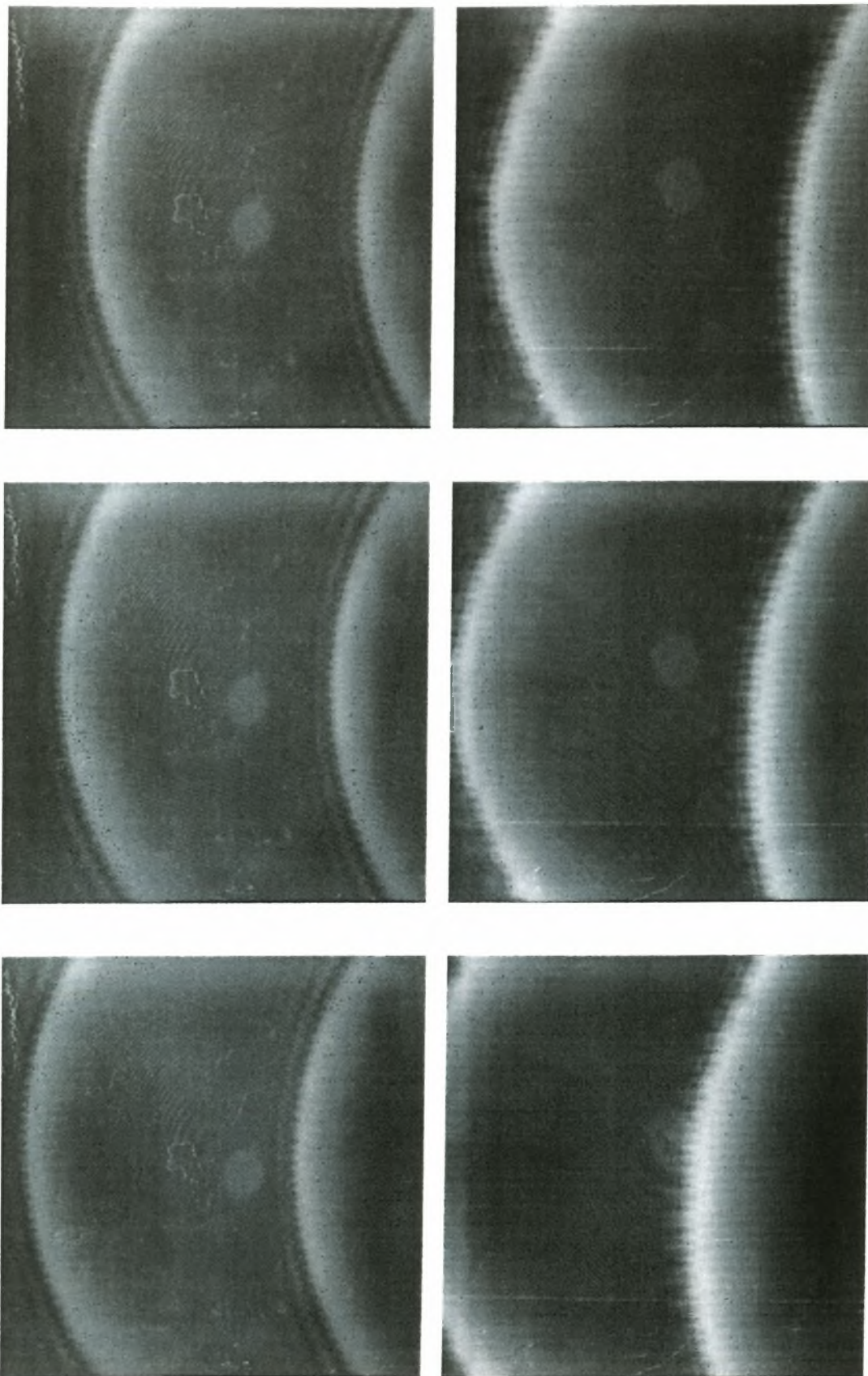
κύματος να εξελίσσεται ομαλά και η εξέλιξη της δομής αυτής είναι προβλέψιμη και από την επεξεργασία των εικόνων. Αντίστοιχα στα σχήματα 4.14 (a)-(c) παρατηρείται μία δομή η εξέλιξη της οποίας δεν μπορεί να προβλεφθεί αφού δεν υπάρχει καμιά αρμονικότητα. Επίσης, εμφανίζονται στο μέτωπο των κυμάτων ρυτιδώσεις και κάποια βαθουλώματα σε διάφορα σημεία της εικόνας, ενώ δεν υπάρχουν τριχοειδή που να ακολουθούν το κυρίως κύμα.



Σχήμα 4.13: Διδιάστατες δομές Re 16 - διαταραχή 1 Hz (a)-(c) Θέση α



Σχήμα 4.14: Τρισδιάστατες δομές Re 50 - διαταραχή 0,5 Hz (a)-(c) θέση b

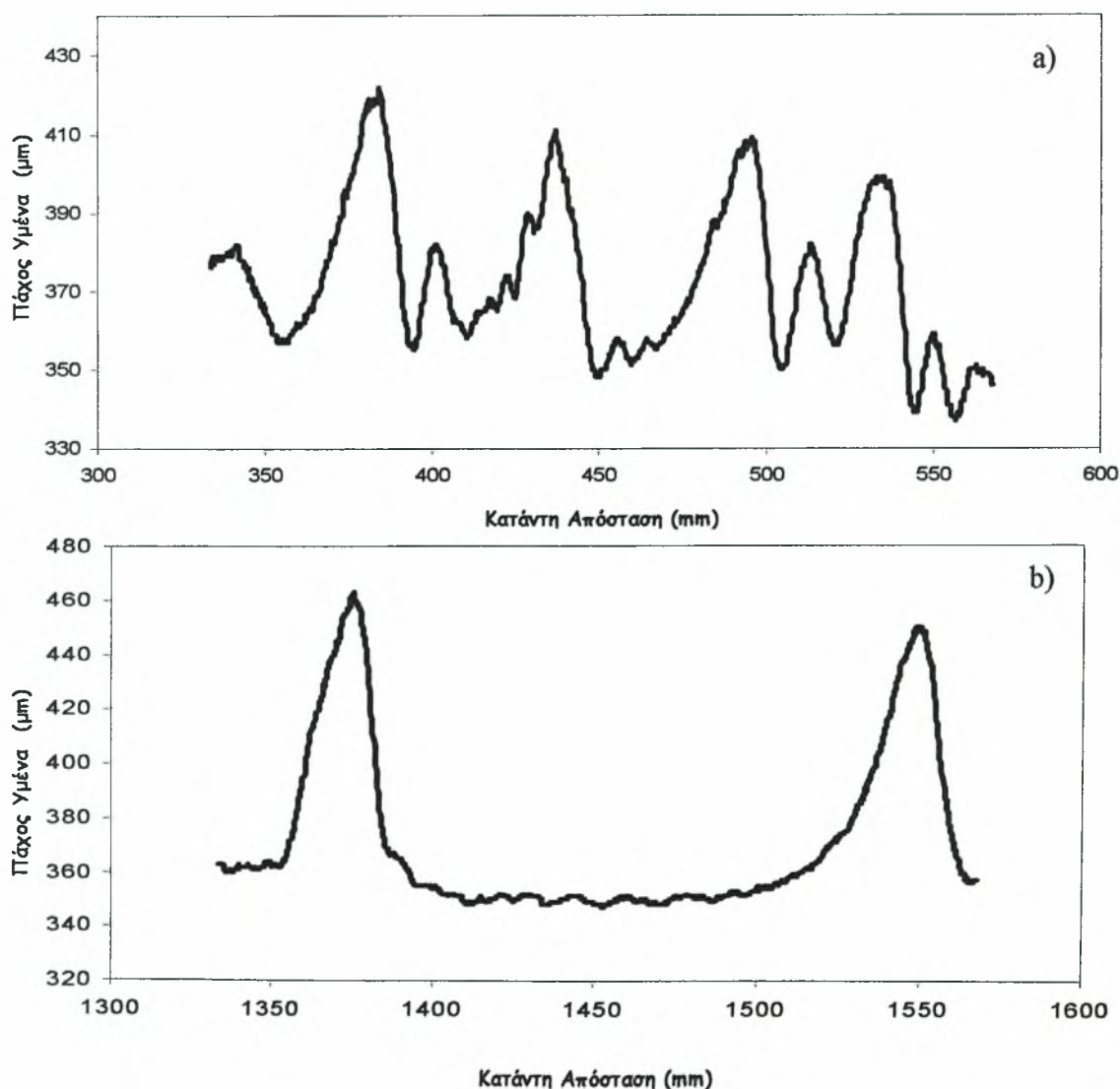


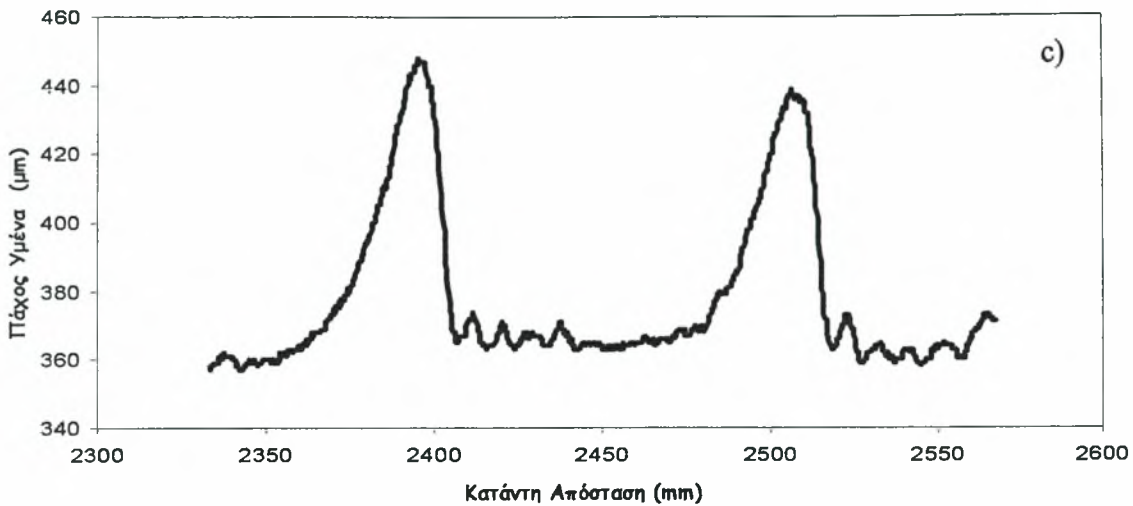
Σχήμα 4.15 Σύγκριση διδιάστατων και τρισδιάστατων δομών

4.4 Εμφάνιση παρασιτικών κυμάτων

4.4.1 Μοναχικά Κύματα

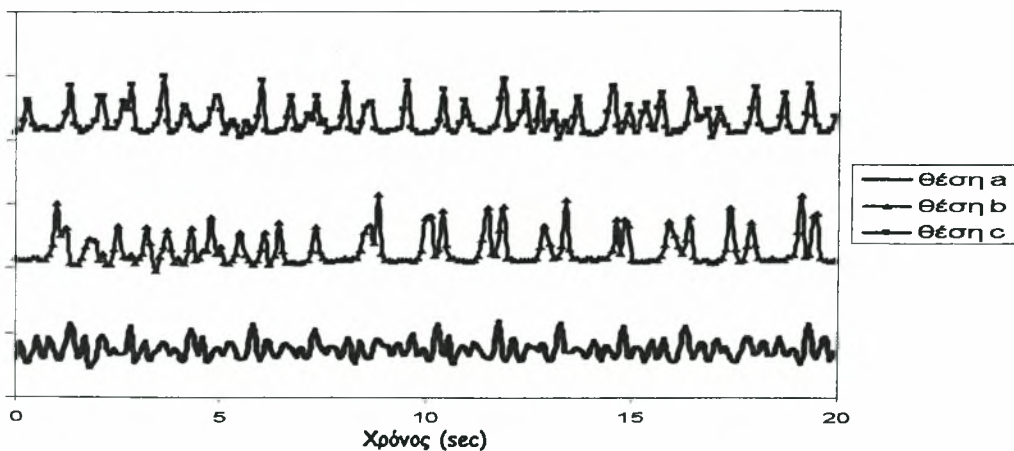
Τα μοναχικά κύματα έχουν μία κορυφή ανά περίοδο της οποίας προηγείται μια σειρά τριχοειδών ρυτιδώσεων. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται το προφίλ του υμένα σε τρεις διαφορετικές θέσεις κατάντη της ροής για διαταραχή 1Hz (ηλεκτροβαλβίδα on:0.5sec - off:0.5sec). Η συχνότητα όπως φαίνεται από το σχήμα 4.16 είναι ίδια με αυτή της επιβαλλόμενης διαταραχής.





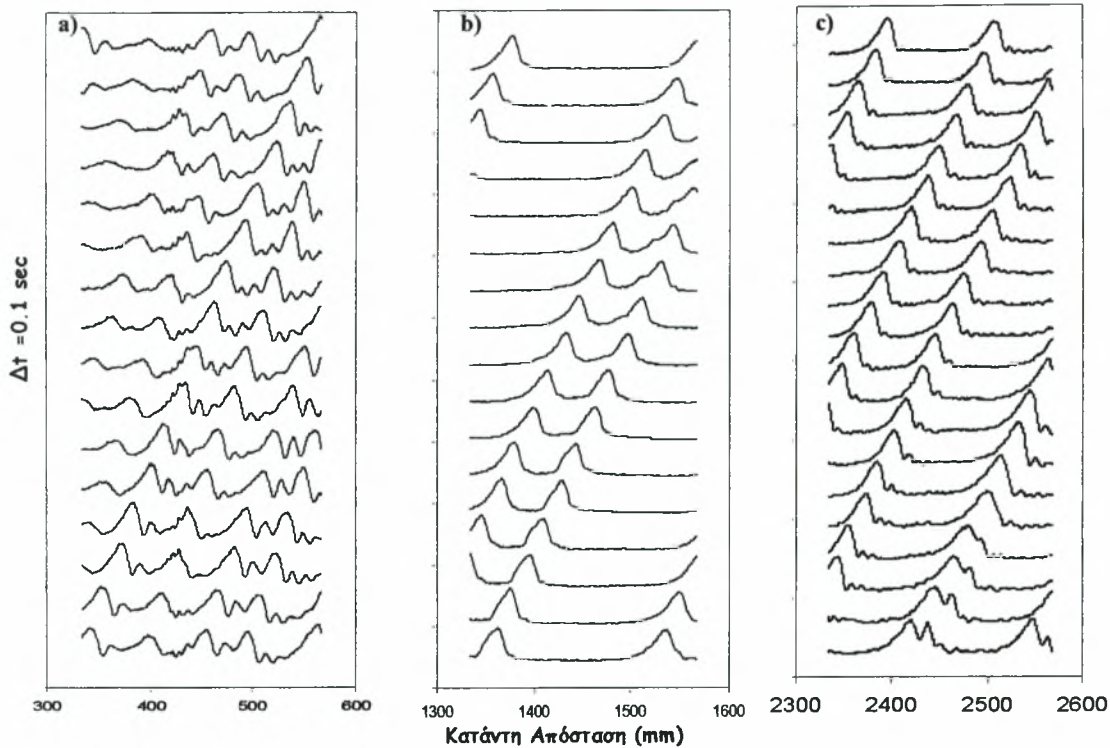
Σχήμα 4.16: Χωρική εξέλιξη μοναχικού κύματος για Re 22 διαταραχή 0,667 Hz α) Θέση a, b) Θέση b, c) Θέση c

Μία αναγκαία και ικανή συνθήκη που πιστοποιεί ότι τα κύματα έχουν αποκτήσει πλήρως αναπτυγμένη δομή, είναι η μεταβολή του ύψους τους κατά την εξέλιξη της ροής. Σταδιακά, τα κύματα εξελίσσονται από τη θέση a έως τη θέση c και παίρνουν τη μορφή των μοναχικών κυμάτων. Συνεπώς, όταν δεν μεταβάλλεται το ύψος του κύματος κατάντη της ροής είναι πολύ πιθανό τα κύματα να έχουν φτάσει σε μόνιμη κατάσταση. Παρατηρείται π.χ. ότι για Re , 16, 18 και 20 τα κύματα αυτά είναι μοναχικά και πλήρως ανεπτυγμένα. Η εμφάνιση της μιας κορυφής ανά περίοδο και για τις τρεις θέσεις του πεδίου των μετρήσεων πιστοποιείται από το σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17: Χρονική εξέλιξη της ροής Re 22, διαταραχή 0,667 Hz, θέσεις a-b-c

Η εξέλιξη της ροής στις τρεις θέσεις του πεδίου των μετρήσεων παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (4.18 (a)-(c)).



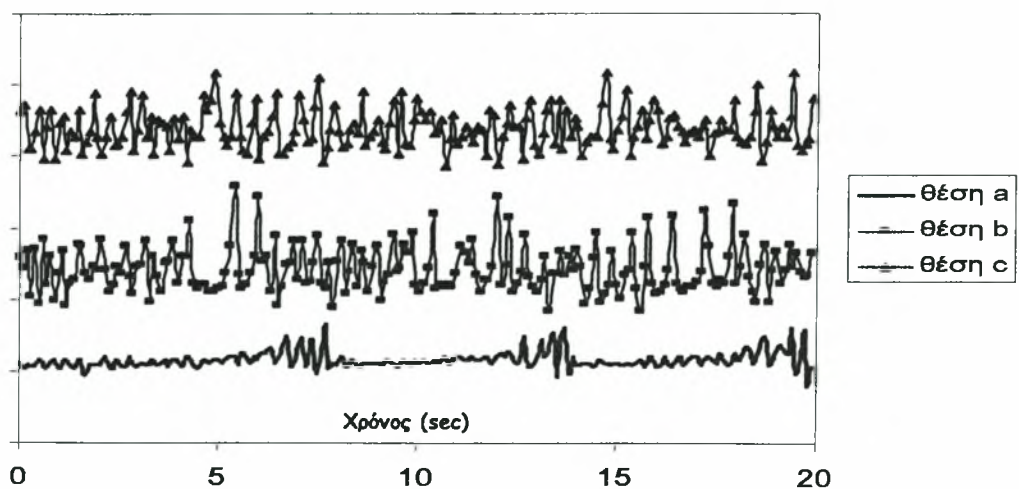
Σχήμα 4.18: Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής $Re=22$ -διαταραχή $0,667\text{ Hz}$ α)θέση a, b)θέση b, c)θέση c

Αντίστοιχες μετρήσεις ελήφθησαν και για τους υπόλοιπους αριθμούς Re και παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα. Η διαφορά που υπάρχει μεταξύ των διάφορων παροχών έγκειται στην εμφάνιση τρισδιάστατων δομών. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι διενεργήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων οι οποίες διέφεραν ως προς το μέγεθος της διαταραχής. Συγκεκριμένα στην πρώτη το μέγεθος της παροχής της επιβαλλόμενης διαταραχής ήταν $m=0.240\text{ kg/min}$ ενώ στη δεύτερη το μέγεθος της παροχής της επιβαλλόμενης διαταραχής ήταν $m=0.720\text{ kg/min}$. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι για $m=0.240\text{ kg/min}$ παρατηρούνται τρισδιάστατες δομές από $Re=22$ από τη θέση b ενώ για $m=0.720\text{ kg/min}$ παρατηρούνται διδιάστατες δομές έως $Re=43$ στη θέση c. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι ιδιαίτερα

σημαντική αφού καθορίζει το πότε εμφανίζονται τρισδιάστατες δομές στη ροή γεγονός που αποτελεί αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας. Συμπερασματικά, όταν η παροχή της διαταραχής είναι ασθενική για ίδια συχνότητα (π.χ. 1 Hz) αποσβένεται από την παροχή του δοχείου υπερχειλίσης και παρατηρούνται τρισδιάστατες δομές σε πολύ μικρούς Re . Αντιθέτως, όταν η διαταραχή είναι ισχυρή για ίδια πάντα συχνότητα «διαμορφώνει» τη δομή των κυμάτων και το οπτικό αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο ως προς τη μορφή των κυμάτων.

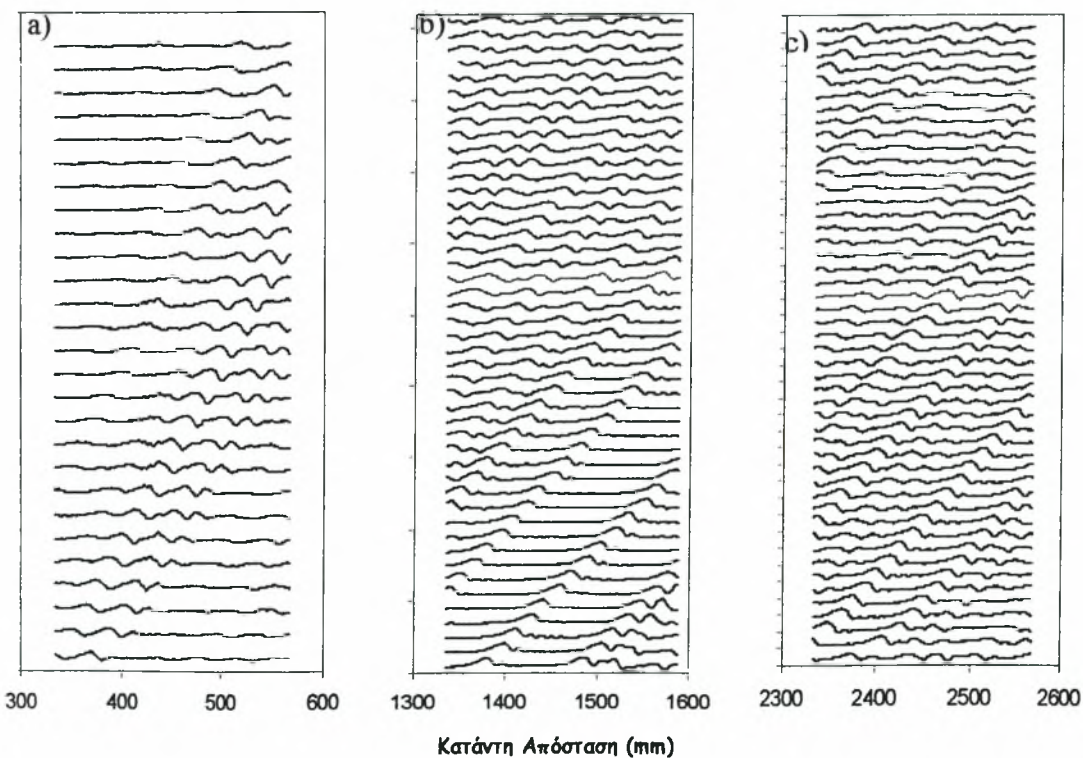
4.4.2 Παρασιτικά Κύματα

Όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο για μικρές συχνότητες διαταραχής εμφανίζεται συνήθως μια σειρά μοναχικών κυμάτων που απέχουν πολύ μεταξύ τους. Ανάμεσα σε δύο κύριες κορυφές αναπτύσσεται μια δευτερεύουσα δομή λόγω της μικρής συχνότητας διαταραχής όπου το μήκος του υποστρώματος είναι αρκετά μεγάλο και οδηγεί στη γένεση παρασιτικών κυμάτων που τείνουν να γίνουν μοναχικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων κυμάτων εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου η επιβαλλόμενη διαταραχή είναι 0.167 Hz.



Σχήμα 4.19: Χρονική εξέλιξη της ροής Re 18, διαταραχή 0,167 Hz, θέσεις a-b-c

Παρατηρώντας τα επόμενα σχήματα (4.20 (a)-(c)) διαπιστώνεται ότι πίσω από την ουρά κάθε κύριας κορυφής η οποία εξελίσσεται εωσότου πάρει τη μορφή μοναχικού κύματος, δημιουργείται ένα νέο κύμα και η κορυφή του μεγαλώνει και σχηματίζει νέους κυματισμούς μπροστά. Η εμφάνιση του δευτερεύοντος κύματος οφείλεται σε ανταλλαγή μάζας μεταξύ του κύριου κύματος και του υποστρώματος. Λόγω του ότι η διαταραχή έχει μικρότερο μέγεθος από τα μοναχικά κύματα, τα σχηματιζόμενα κύματα έχουν την τάση να έλκουν μάζα από το πίσω υπόστρωμα δημιουργώντας μια κοιλότητα, η οποία αποτελεί γενεσιουργό αιτία για τη δημιουργία παρασιτικών κυμάτων, τα οποία έχουν μικρό ύψος, άρα και ταχύτητα, οπότε απομακρύνονται διαρκώς από το κύριο κύμα. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζει επαναληψιμότητα αφού η δημιουργία παρασιτικών κορυφών αποτελεί μια διαδικασία η οποία παραμένει ίδια σε κάθε περίοδο επιβολής της εξωτερικής διαταραχής.

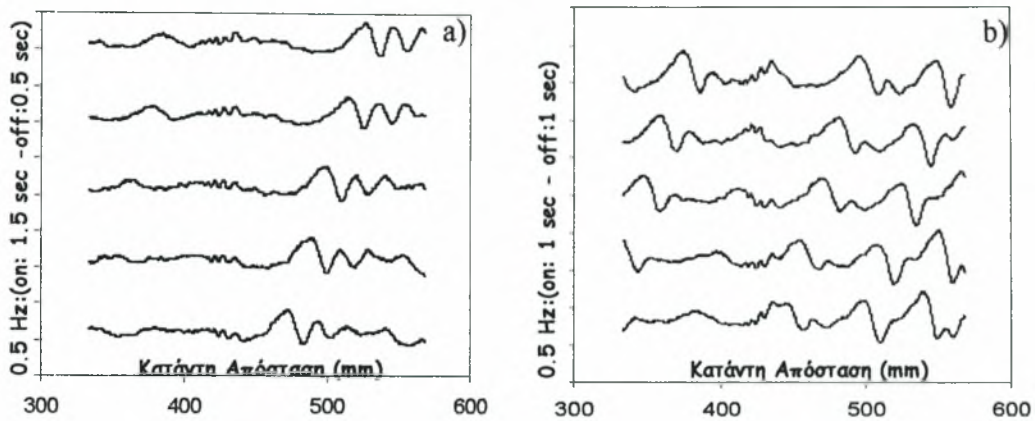


Σχήμα 4.20: Χρονική και χωρική εξέλιξη της ροής $Re\ 18$ -διαταραχή $0,167\ Hz$ α)θέση α, b)θέση b, c)θέση c

Παρατηρείται ένα μοναχικό κύμα να μπαίνει στο πεδίο παρατηρήσεων και να εξελίσσεται κατάντη της απόστασης. Πίσω από το κύμα ακολουθεί μια ελαφριά καμπούρα η οποία κερδίζει συνεχώς μάζα από το υπόστρωμα και θα εξελιχθεί σε ένα νέο κύμα. Στην επόμενη θέση η καμπούρα που ακολουθούσε το κύμα εξελίχθηκε σε παρασιτικό κύμα το οποίο όμως αποκτά μεγάλο ύψος. Σε αυτή τη θέση στο πεδίο παρατηρήσεων φαίνονται και αλλά παρασιτικά κύματα μικρότερου μεγέθους. Στην τελευταία θέση το μοναχικό κύμα εξελίσσεται ομαλά ενώ έχουν δημιουργηθεί πολλά παρασιτικά κύματα των οποίων το ύψος ποικίλει.

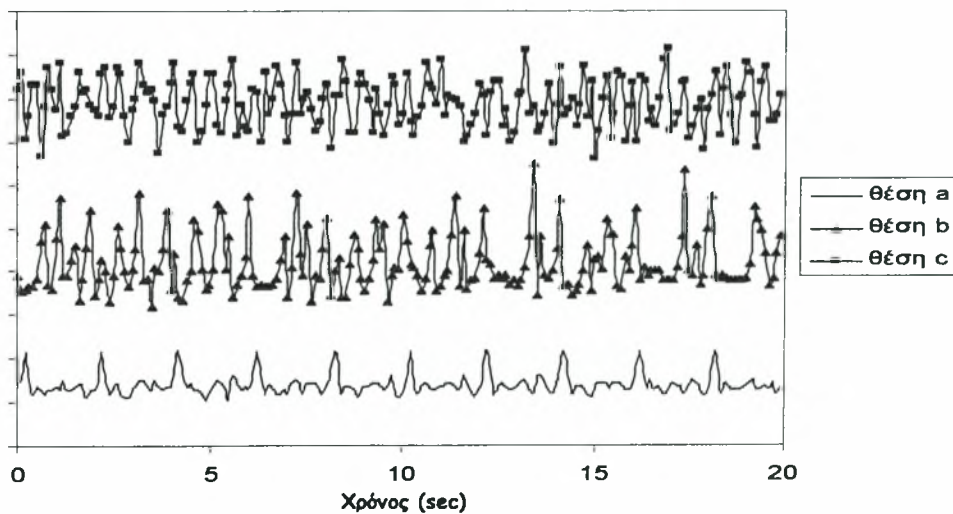
4.5 Επίδραση του πλάτους της διαταραχής

Ο τρόπος εφαρμογής της εξωτερικής διαταραχής αποτελεί αντικείμενο προς μελέτη. Στην παρούσα εργασία επιβλήθηκε διαταραχή 0.5 Hz με δύο διαφορετικούς τρόπους α) ηλεκροβαλβίδα on: 1.5 sec - off: 0.5 sec και β) ηλεκροβαλβίδα on:1 sec - off:1 sec. Δηλαδή στην πρώτη περίπτωση εισάγεται περισσότερο ρευστό στο κανάλι ροής. Διαπιστώθηκε ότι για ίδιες συχνότητες διαταραχής που εφαρμόστηκαν όμως με διαφορετικό τρόπο προέκυψαν διαφορετικά αποτελέσματα. Στο παρακάτω σχήμα γίνεται σύγκριση της χρονικής και χωρικής εξέλιξης του υμένα για επιβολή των δύο αυτών διαταραχών, στην αρχή του καναλιού:



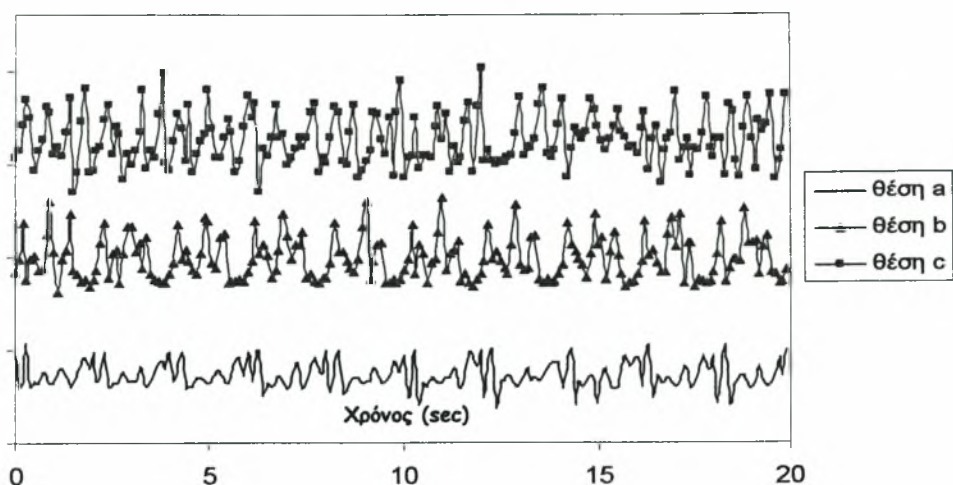
Σχήμα 4.21: Σύγκριση χωρικής και χρονικής εξέλιξης του υμένα στην αρχή του καναλιού για διαταραχές 0.5 Hz α) ηλεκτροβαλβίδα on:1.5 sec - off:0.5 sec και β) ηλεκτροβαλβίδα on:1 sec - off:1 sec

Για επιβολή διαταραχής 0.5 Hz (ηλεκτροβαλβίδα on: 1.5 sec - off:0.5 sec) τα αποτελέσματα που λήφθηκαν είναι:



Σχήμα 4.22: Χρονική εξέλιξη της ροής Re 16, διαταραχή 0.5 Hz (on:1.5sec-off:0.5sec), θέσεις a-b-c

Από το σχήμα 4.22 γίνεται αντιληπτό ότι κατά την εξέλιξη της ροής το ύψος των κυμάτων διαρκώς αυξάνει. Αντίστοιχα για τη δεύτερη περίπτωση (ηλεκτροβαλβίδα on:1sec-off:1sec), η χρονική εξέλιξη της ροής απεικονίζεται στο σχήμα 4.23.

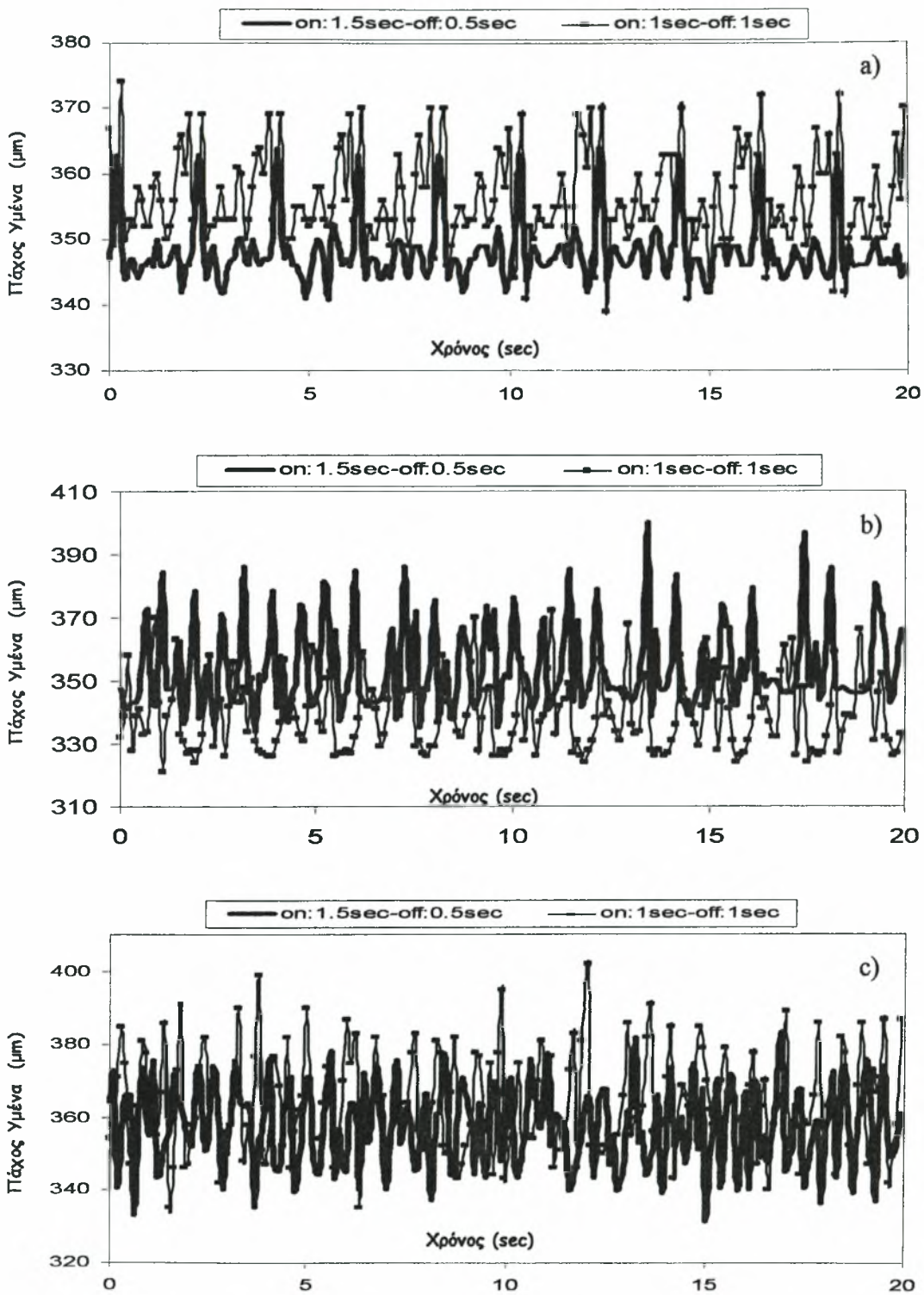


Σχήμα 4.23: Χρονική εξέλιξη της ροής Re 16, διαταραχή 0.5 Hz (on:1sec-off:1sec), θέσεις a-b-c

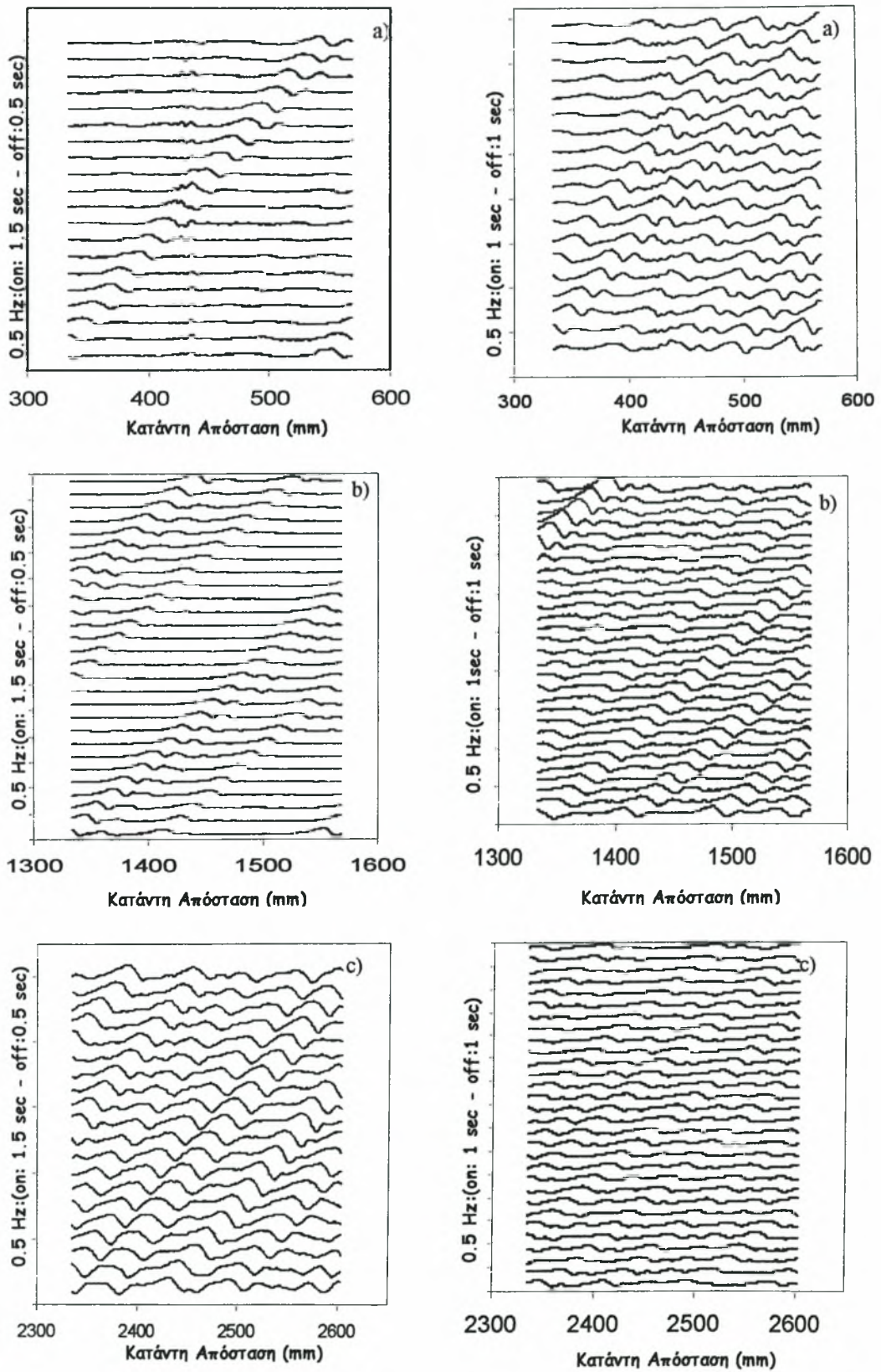
Στο σχήμα 4.23. παρατηρείται η εμφάνιση μιας δευτερεύουσας κορυφής η οποία κατόντη της ροής αυξάνεται διαρκώς. Ανάμεσα σε δύο κύριες κορυφές αναπτύσσεται μια δευτερεύουσα δομή λόγω της μικρής συχνότητας διαταραχής που οδηγεί στη γένεση παρασιτικών κυμάτων που τείνουν να γίνουν μοναχικά. Προκειμένου να γίνει σαφέστερη η σύγκριση, παρατίθενται τα ακόλουθα διαγράμματα, όπου απεικονίζεται για κάθε θέση του οπτικού πεδίου, η χρονική εξέλιξη της ροής για τις δύο διαταραχές (Σχήμα 4.24).

Στη συνέχεια, στο σχήμα 4.25, παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη χωρική και χρονική εξέλιξη του υμένα. Με βάση τα διαγράμματα αυτά γίνεται σύγκριση της ροής σε κάθε θέση του οπτικού πεδίου για τις δύο διαφορετικά επιβαλλόμενες διαταραχές.

Παρατηρείται και στις περιπτώσεις αυτές εμφάνιση παρασιτικών κυμάτων που αναπτύσσονται κατόντη της ροής. Πιο συγκεκριμένα, τα παρασιτικά κύματα λόγω του μικρότερου τους μεγέθους από τα κύρια, έχουν μικρότερη ταχύτητα, οπότε η μεταξύ τους απόσταση διαρκώς μεγαλώνει και πλησιάζουν ολοένα και περισσότερο τα επόμενα κύρια κύματα.



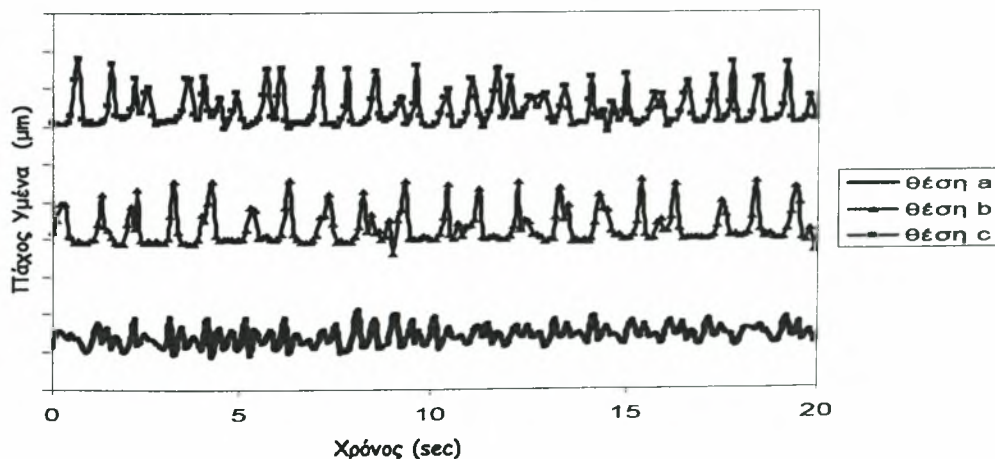
Σχήμα 4.24: Σύγκριση της χρονικής εξέλιξης της ροής για $Re\ 16$ - διαταραχές 0.5Hz : (on:1.5 sec - off:0.5 sec) - (on:1 sec - off:1 sec), a) θέση a, b) θέση b, c) θέση c



Σχήμα 4.25: Χωρική και χρονική εξέλιξη της ροής για $Re = 16$ - διαταραχές 0.5 Hz : (on: 1.5 sec - off: 0.5 sec) - (on: 1 sec - off: 1 sec), a) θέση a, b) θέση b, c) θέση c

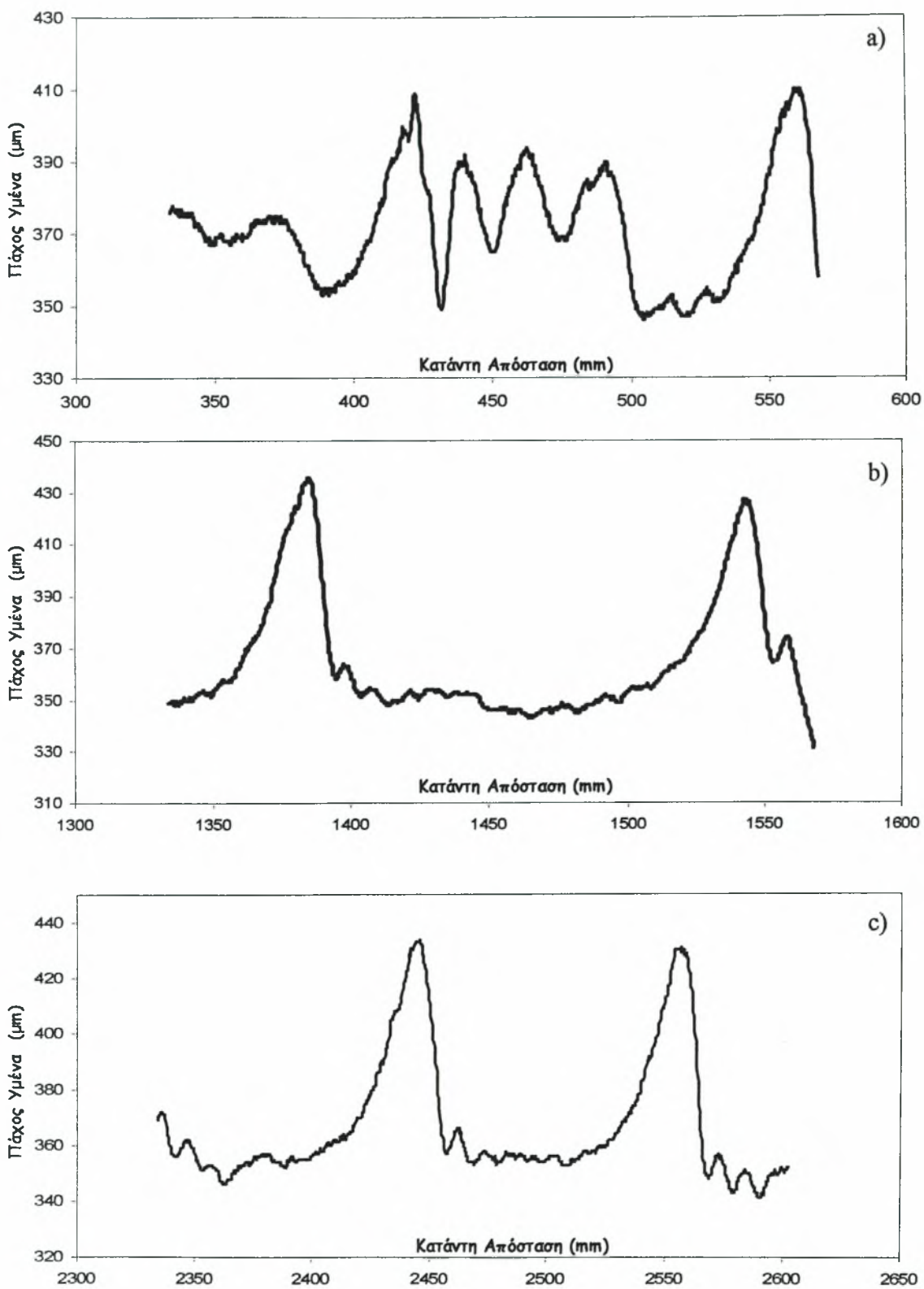
4.6 Πλήρως Ανεπτυγμένο Μοναχικό Κύμα

Μοναχικά ή σολιτονικά χαρακτηρίζονται τα κύματα που έχουν ασύμμετρη κύρτωση, απότομο μέτωπο, ομαλή ουρά και έπονται τριχοειδών ρυτιδώσεων. Πλήρως ανεπτυγμένο κύμα θεωρείται εκείνο που αποκτά σταθερή δομή και τη διατηρεί κατάντη της ροής. Δυο κριτήρια χρησιμοποιούνται για να χαρακτηριστεί ένα μοναχικό κύμα, ως πλήρως ανεπτυγμένο. Το πρώτο αφορά το ύψος του μοναχικού κύματος, συγκεκριμένα, αν ένα κύμα έπειτα από μία θέση και μετά αποκτήσει σταθερό ύψος τότε είναι πολύ πιθανό να έχει φτάσει σε κατάσταση πλήρους ανεπτυγμένης δομής. Το δεύτερο και συμπληρωματικό κριτήριο αφορά τη μορφή του υμένα στο μέτωπο και στην ουρά του κύματος. Δηλαδή σε περίπτωση που ισχύει το πρώτο κριτήριο και το υπόστρωμα που προπορεύεται του κύματος έχει ίδιο πάχος με αυτό που το ακολουθεί, τότε το κύμα χαρακτηρίζεται ως πλήρως ανεπτυγμένο. Στο σχήμα 4.26 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του ύψους του υμένα, για τρεις διαφορετικές θέσεις κατάντη της ροής, όπου παρατηρείται το κύμα να αποκτά σταθερό ύψος.



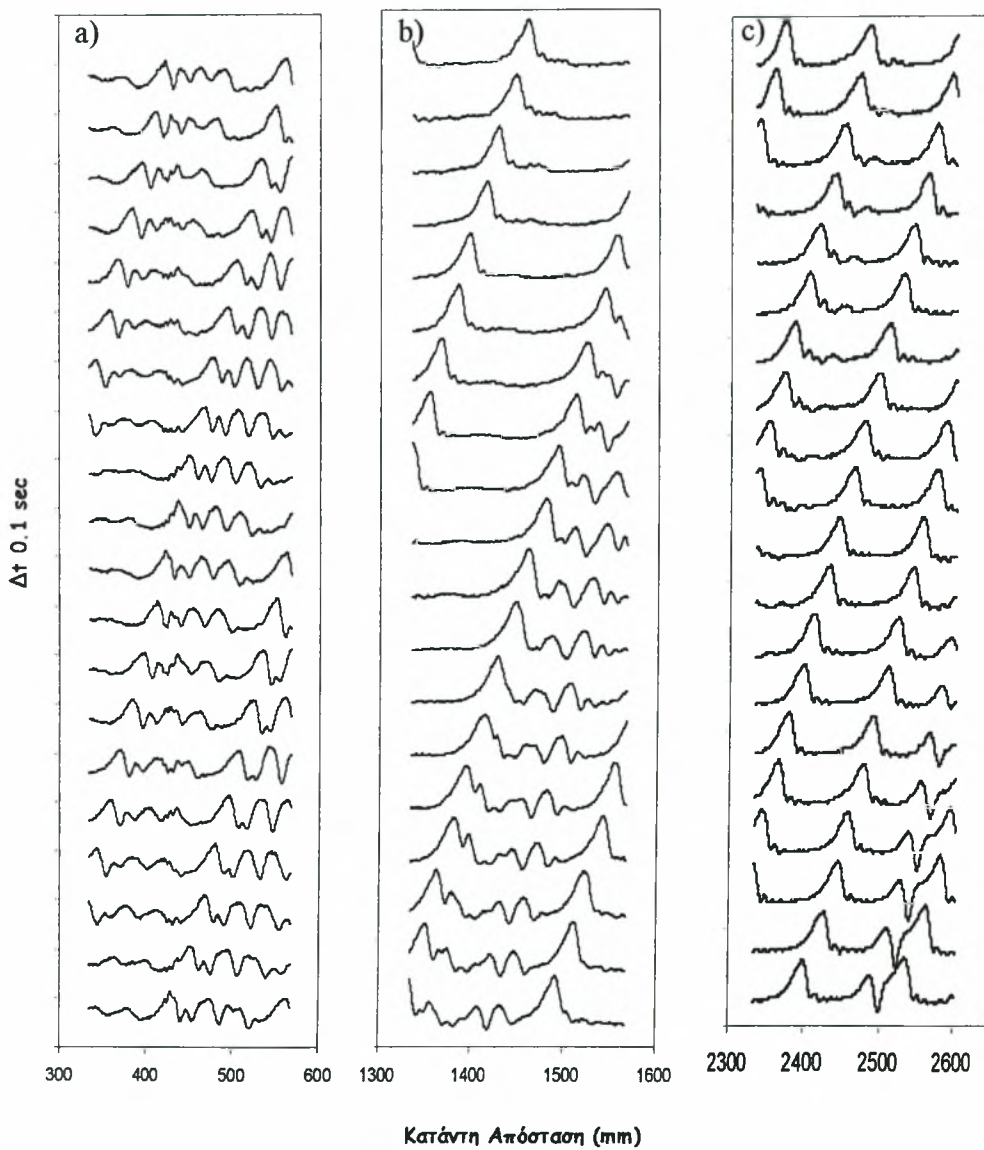
Σχήμα 4.26: Χρονική εξέλιξη της ροής $Re\ 20$, διαταραχή $1\ Hz$, θέσεις a-b-c

Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από το σχήμα 4.27 όπου απεικονίζονται τα προφίλ του υμένα σε τρεις διαφορετικές θέσεις του πεδίου των παρατηρήσεων.



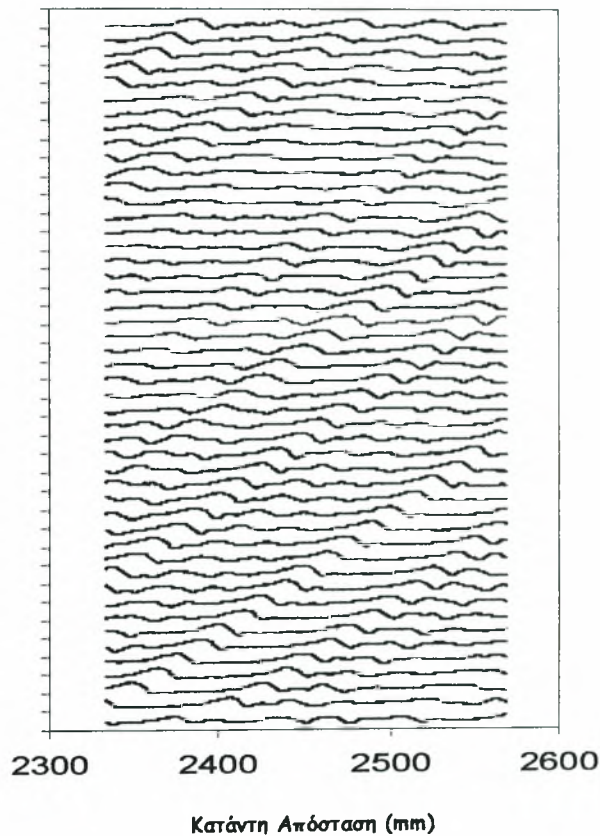
Σχήμα 4.27: Σύγκριση προφίλ υμένα Re 20 διαταραχή 1Hz - α)θέση a, β) θέση b, γ) θέση c

Από το πιο πάνω σχήμα (4.27) διαπιστώνεται ότι το κύμα στη θέση c έχει αποκτήσει πλέον σταθερό ύψος. Επίσης, το υπόστρωμα στο μέτωπο του έχει το ίδιο πάχος με αυτό στην ουρά του. Δηλαδή επαληθεύονται και τα δύο κριτήρια, οπότε το κύμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλήρως ανεπτυγμένο. Η χωρική και χρονική ανάπτυξη του κύματος κατόντη της ροής παρουσιάζεται πιο αναλυτικά στο σχήμα 4.28.



Σχήμα 4.28: Χωρική και χρονική εξέλιξη της ροής για $Re = 20$ - διαταραχή 1 Hz a) θέση a, b) θέση b, c) θέση c

Θα πρέπει τέλος να αναφερθεί, ότι όταν εμφανίζονται κύματα που έχουν προκύψει από αλληλεπιδράσεις και δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένα δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του μήκους κύματος. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται κύματα που προέκυψαν από αλληλεπίδραση.

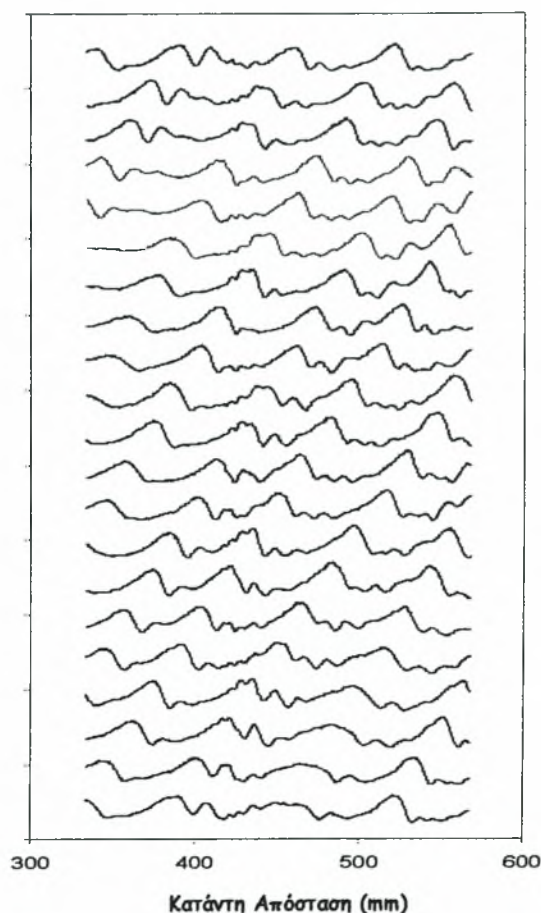


Σχήμα 4.29: Κύματα που προέκυψαν από αλληλεπίδραση $Re=18$, διαταραχή $0,167$ Hz
Θέση c

4.7 Συγχώνευση Κυμάτων

Όπως αναφέρεται στην εργασία των Vlachogiannis και Bontozoglou (2001) το φαινόμενο της συγχώνευσης έγκειται στη διαφορά ύψους μεταξύ δύο κυμάτων. Η διαφορά αυτή είναι σημαντική για τον καθορισμό της χρονικής διάρκειας της συγχώνευσης και της αποκατάστασης της τελικής μορφής του

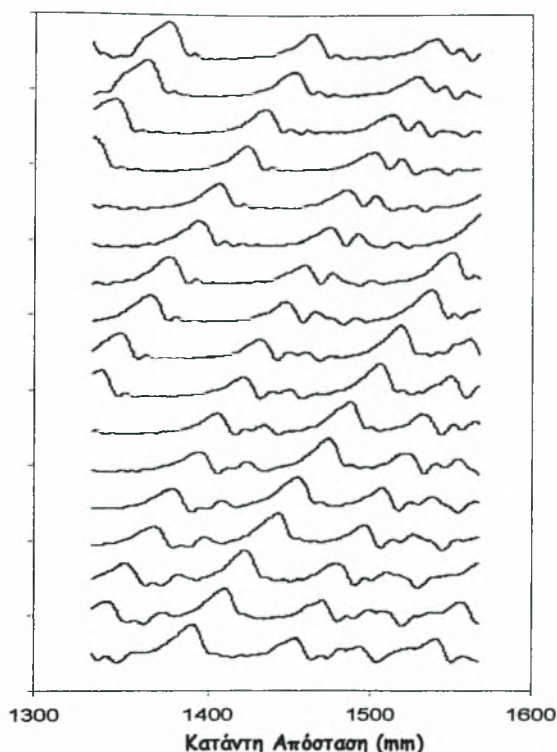
νέου κύματος. Για το λόγο αυτό η χρονική διάρκεια της συγχώνευσης είναι μικρή όταν δημιουργούνται μεγάλες διαφορές ύψους μεταξύ δύο κυμάτων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συγχώνευσης μεταξύ δύο κυμάτων απεικονίζεται στο σχήμα 4.30 όπου ένα κύμα πλησιάζει ένα μικρότερο, επιτυγχάνεται η μεταξύ τους συγχώνευση και στη συνέχεια αποκαθίσταται η τελική μορφή του νέου κύματος με τη δημιουργία μπροστινών ρυτιδώσεων (front running ripples).



Σχήμα 4.30: Συγχώνευση μεταξύ δύο κυμάτων $Re=25$, διαταραχή $0,5 \text{ Hz}$ (1-1), θέση α

Υπάρχει περίπτωση, δύο κύματα να πλησιάζουν αρκετά μεταξύ τους χωρίς όμως να συγχωνεύονται. Αυτό συμβαίνει όταν η διαφορά ύψους μεταξύ τους είναι μικρότερη από $0.1h_N$. Τότε δημιουργείται μια δομή δύο κορυφών (two

hump structure), οι οποίες κινούνται μαζί κατά μήκος της ροής και ίσως καταλήξουν στη δημιουργία δύο ανεξάρτητων μοναχικών κυμάτων (Σχήμα 4.31).

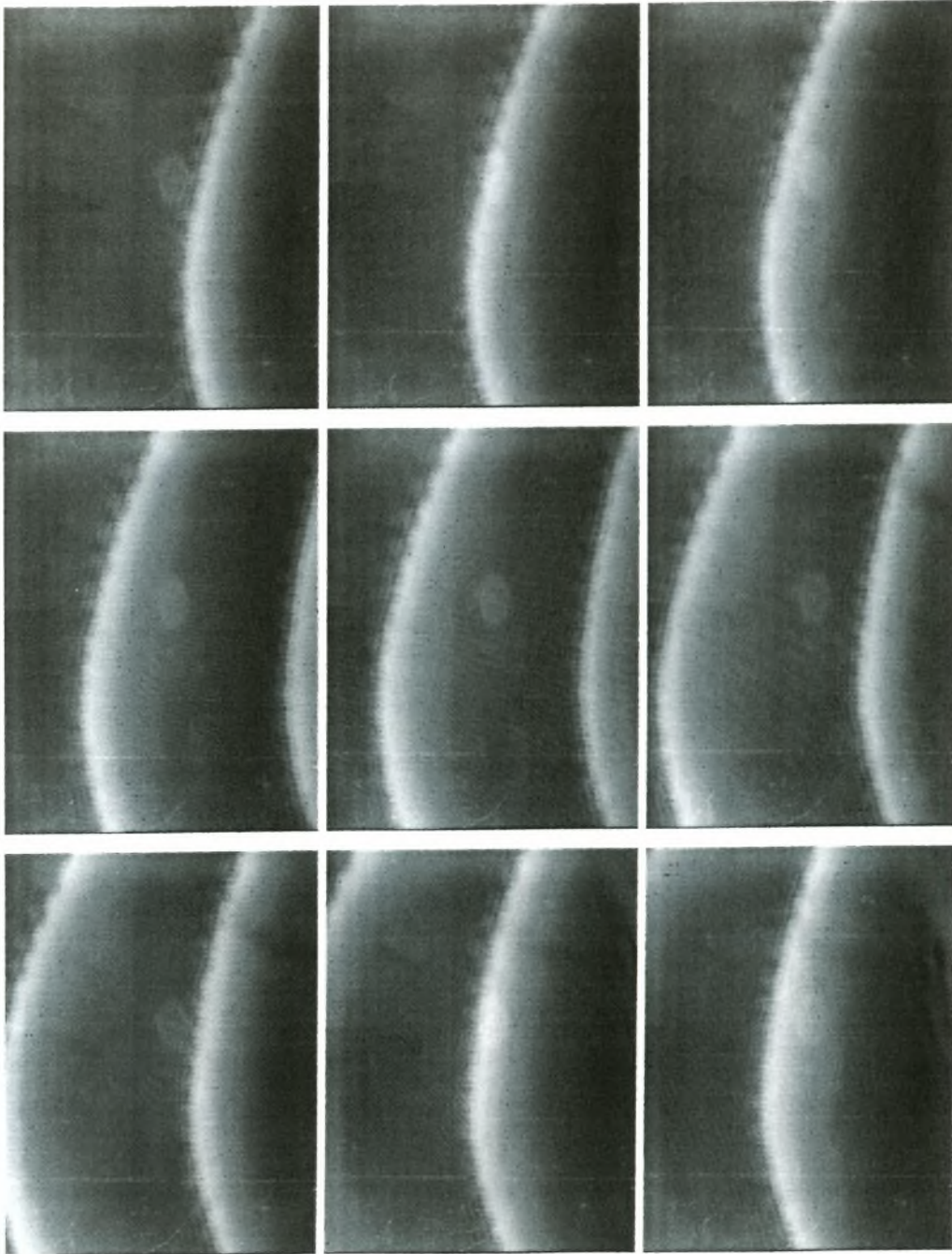


Σχήμα 4.31: Δημιουργία δομής δύο κορυφών (two hump structure), $Re=23$, διαταραχή 0.5 Hz, (1-1) θέση b

4.8 Παγωμένες τρισδιάστατες δομές

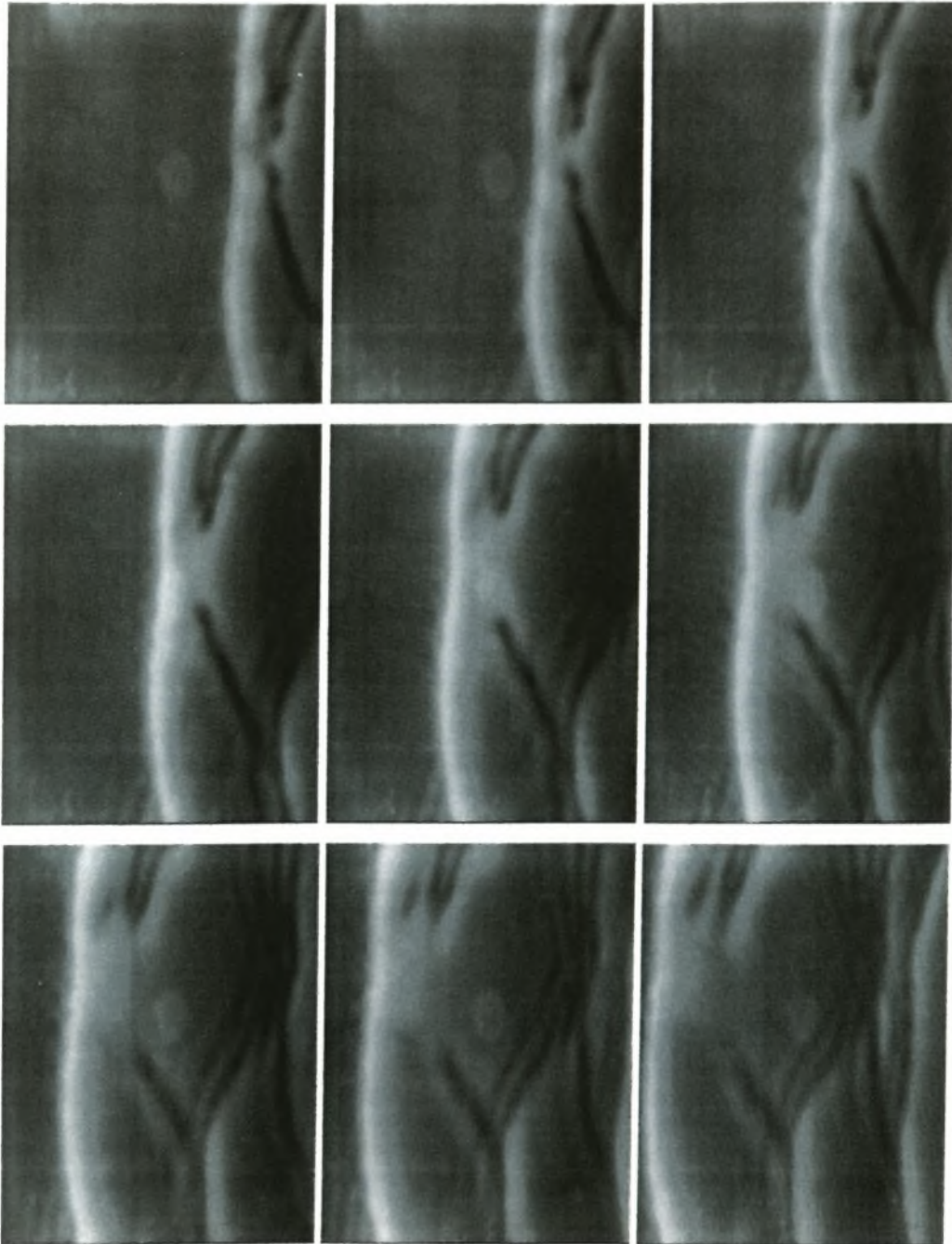
Οι τρισδιάστατες δομές είναι αποτέλεσμα εγκάρσιων διαχωρισμών που εμφανίζονται στις κορυφές των πιο ψηλών κυμάτων και οφείλονται σε αστάθειες παρόμοιες με αυτές των διδιάστατων δομών. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ακανόνιστων σχηματισμών στο μέτωπο αλλά και σε όλο το εύρος του υμένα. Παρά το ακανόνιστο σχήμα που διέπει τις τρισδιάστατες δομές παρατηρούνται «παγωμένες δομές» κατά τη ροή του υμένα και ονομάζονται έτσι γιατί φαίνεται να διατηρούν αμετάβλητη μορφή κατά την

εξέλιξη της ροής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα «παγωμένης δομής» στο μέτωπο του κύματος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.32.



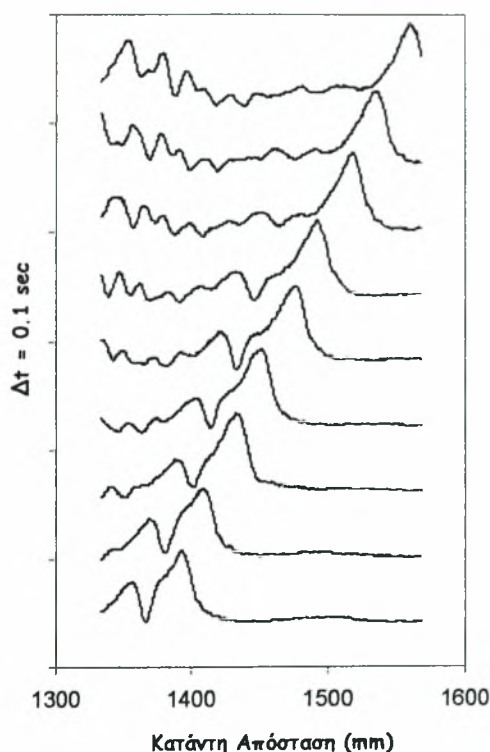
Σχήμα 4.32: Εξέλιξη τρισδιάστατων δομών στο μέτωπο κύματος $Re\ 50$ - διαταραχή $0,667\ Hz$ θέση b

Πέρα των τρισδιάστατων παγωμένων δομών στο μέτωπο του κύματος, παρατηρείται εμφάνιση τους και σε όλο το εύρος του υμένα. Στο σχήμα 4.33 απεικονίζονται τρισδιάστατες παγωμένες δομές κατά την εξέλιξη της ροής.



Σχήμα 4.33: Τρισδιάστατες παγωμένες δομές για $Re = 50$, διαταραχή 1 Hz, θέση b, $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$

Τέλος στο σχήμα 4.34 παρουσιάζεται η χωρική και χρονική εξέλιξη των προηγούμενων εικόνων όπου και διαπιστώνεται η αμετάβλητη μορφή των παγωμένων δομών.



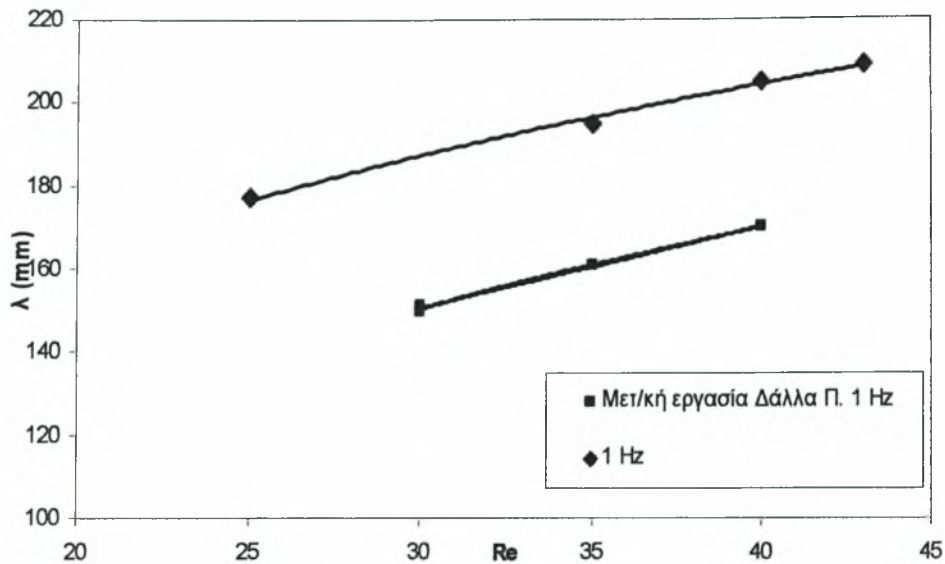
Σχήμα 4.34 Χρονική και χωρική εξέλιξη τρισδιάστατων παγωμένων δομών

4.9 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από την πειραματική διαδικασία και συγκρίνονται με αυτά των εργασιών των Tihon et al. (2006) και του κ Π. Δάλλα (2007). Οι πειραματικές συνθήκες αυτών των εργασιών προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.

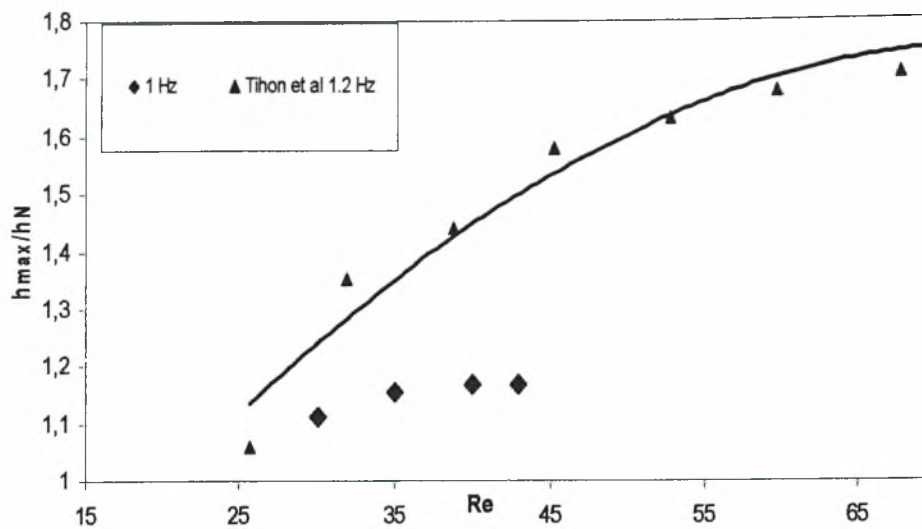
Όσον αφορά το μήκος κύματος των μοναχικών κυμάτων λ , παρατηρείται ότι αυξάνεται όσο μεγαλώνει ο αριθμός Re (Σχήμα 4.35). Στο ίδιο σχήμα

απεικονίζονται και τα αποτελέσματα της εργασίας του Π. Δάλλα, τα οποία βρίσκονται σε μεγάλη συμφωνία με της παρούσας.



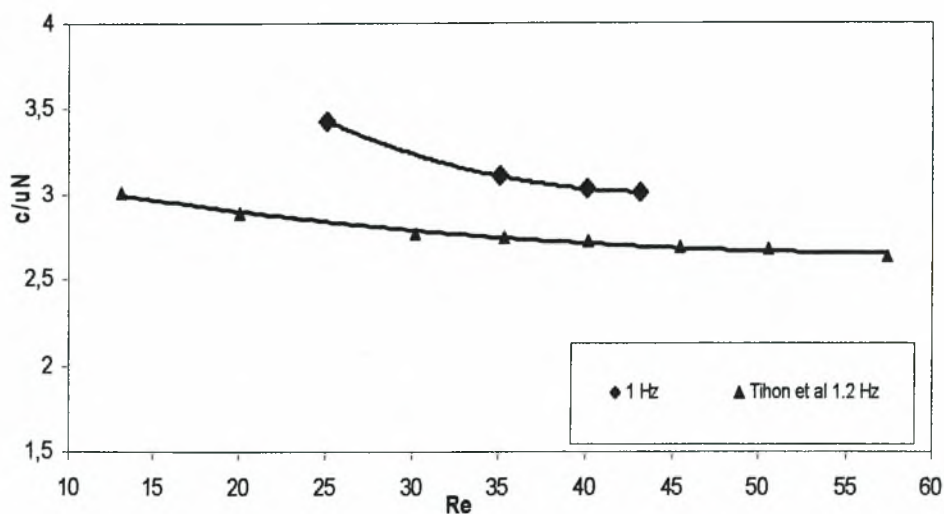
Σχήμα 4.35: Εξάρτηση μήκους κύματος από τον αριθμό Re

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό των μοναχικών κυμάτων είναι η εξάρτηση της ταχύτητας από το ύψος τους, όπου και τα δύο αυτά μεγέθη ποικίλουν ανάλογα με τον αριθμό Re . Τα αποτελέσματα που φαίνονται στα σχήματα 4.36 και 4.37 αποδεικνύουν ότι ο αριθμός Re επιδρά διαφορετικά στη φασική ταχύτητα και στο ύψος των σολιτονικών κυμάτων (μέγιστο πάχος υμένα). Από τα πειραματικά αποτελέσματα του σχήματος 4.36, όπου το μέγιστο πάχος του υμένα έχει αδιαστατοποιηθεί με το κατά Nusselt πάχος του υμένα, εμφανίζεται αύξηση της ποσότητας h_{max}/h_N που πιθανότατα θα οδηγήσει στην ασυμπτωτική συμπεριφορά που προβλέπεται στα αποτελέσματα της εργασίας των Tihon et al.



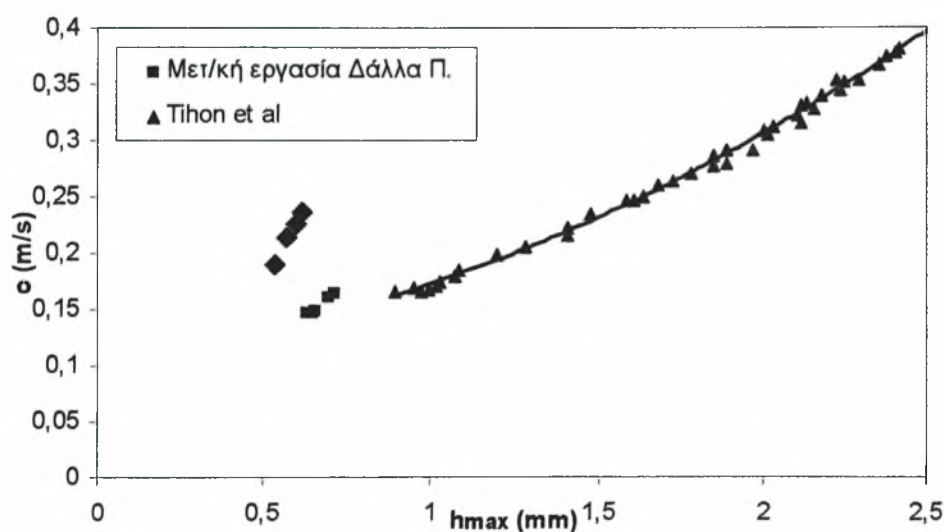
Σχήμα 4.36: Εξάρτηση του αδιαστατοποιημένου μέγιστου ύψους των μοναχικών κυμάτων από τον Re

Η φασική ταχύτητα των μοναχικών κυμάτων, αδιαστατοποιημένη με τη μέση ταχύτητα κατά Nusselt, φαίνεται να μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός Re , όπως αποδεικνύεται από το σχήμα 4.37. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν την ίδια τάση με αυτά που προκύπτουν από την εργασία των Tihon et al. και τείνουν να αποκτήσουν μια σταθερή τιμή.



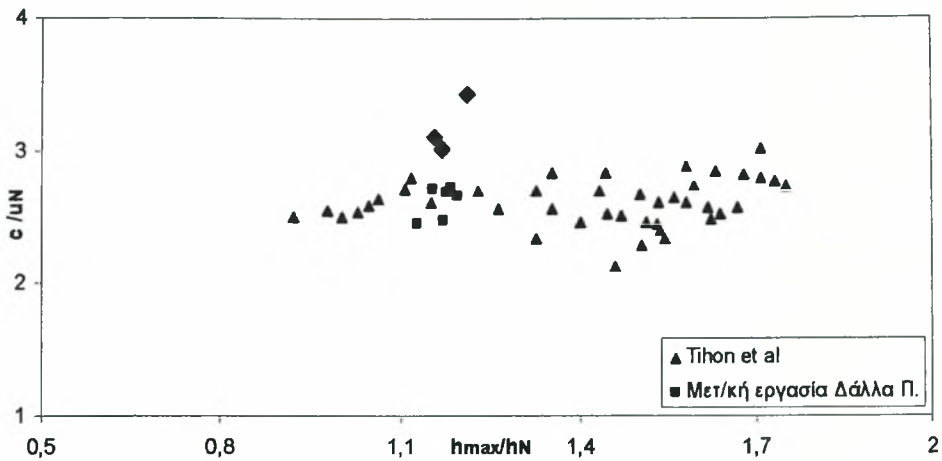
Σχήμα 4.37: Εξάρτηση της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από τον Re

Στο σχήμα 4.38 παρουσιάζεται η εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το μέγιστο πάχος του υμένα σε διαστατικά μεγέθη. Από το σχήμα αυτό, είναι εμφανής η συσχέτιση μεταξύ των δύο προαναφερθέντων ποσοτήτων για όλο το εύρος των αριθμών Re των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά των Τihon et al. και του Π. Δάλλα καθώς και τα τρία έχουν αυξητική τάση.



Σχήμα 4.38: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας των μοναχικών κυμάτων από το μέγιστο ύψος τους

Αυτή η πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των διαστατικών μεγεθών του σχήματος 4.38 εξαλείφεται όταν το πάχος του υμένα και η φασική ταχύτητα αδιαστατοποιούνται με τις αντίστοιχες ποσότητες κατά Nusselt (Σχήμα 4.39). Η αδιαστατοποίηση δεν είναι επιτυχής καθώς το διάγραμμα παρουσιάζει μεγάλη διασπορά, γεγονός που εμφανίζεται και στα αποτελέσματα της εργασίας των Τihon et al και Π. Δάλλα.

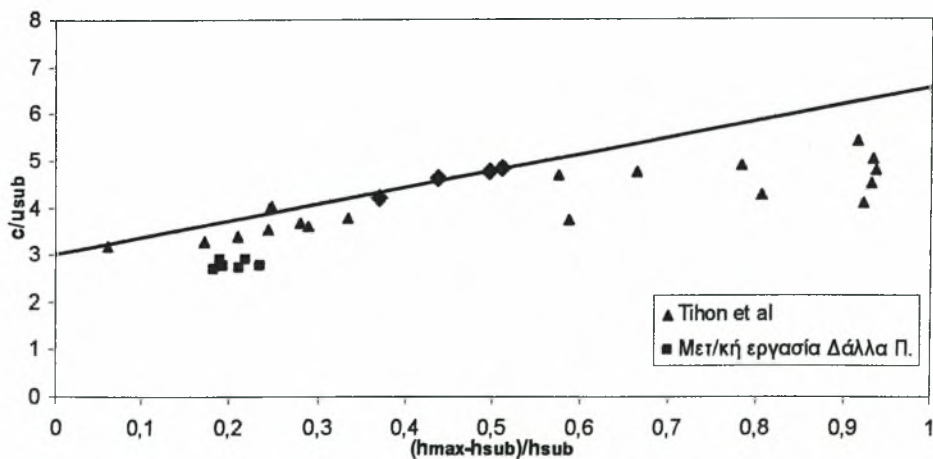


Σχήμα 4.39: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα αδιαστατοποιημένα με τα αντίστοιχα μεγέθη κατά Nusselt

Αντιθέτως, σε περίπτωση που το πάχος του υποστρώματος h_{sub} και η μέση ταχύτητα του υποστρώματος u_{sub} χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα ως παράμετροι για αδιαστατοποίηση του ύψους του κύματος και της φασικής του ταχύτητας παρατηρείται καλύτερη συσχέτιση των μεγεθών εφόσον

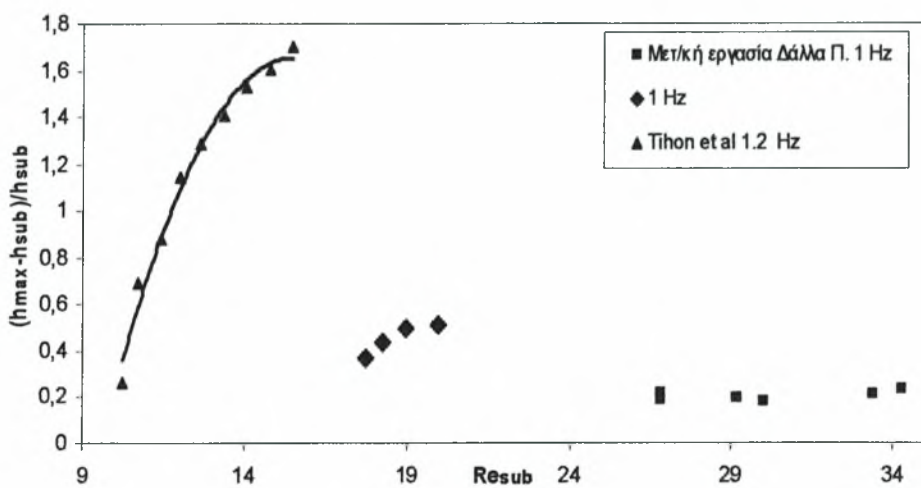
επαληθεύεται η σχέση
$$\left(\frac{c}{u_{sub}} - 3\right) = a \left(\frac{h_{max} - h_{sub}}{h_{sub}}\right) \quad (4-2) \quad (\text{Σχήμα 4.40}).$$
 Τα

αποτελέσματα και στο σημείο αυτό έχουν πολύ καλή συμφωνία με αυτά των Tihon et al και Π. Δάλλα.

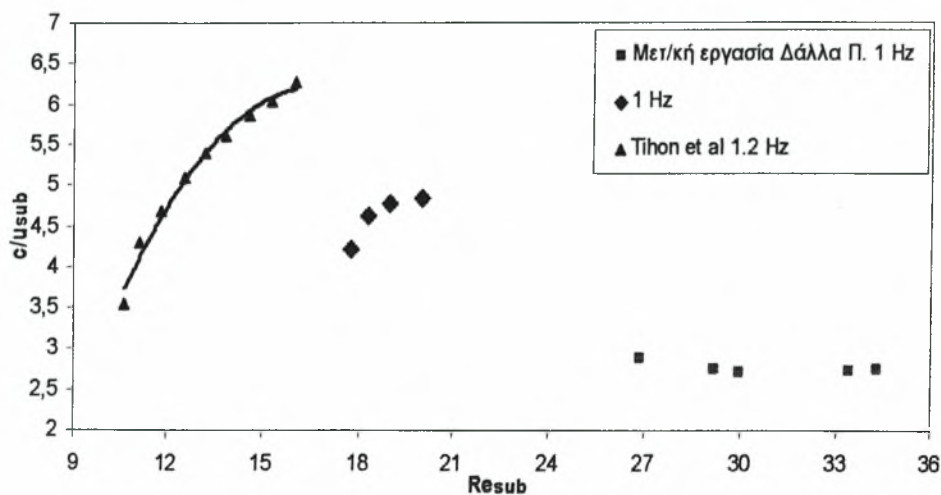


Σχήμα 4.40: Εξάρτηση της φασικής ταχύτητας από το πάχος του υμένα αδιαστατοποιημένα με τα αντίστοιχα μεγέθη του υποστρώματος

Στα σχήματα 4.41 και 4.42 απεικονίζεται το αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα και η αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα με τα αντίστοιχα μεγέθη του υποστρώματος συναρτήσει του αριθμού Re_{sub} όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα της εργασίας των Tihon et al. για συχνότητα 1,2Hz και του Π. Δάλλα για συχνότητα 1Hz. Τα πειραματικά αποτελέσματα εν συγκρίσει με αυτά της εργασίας των Tihon et al. και του Π. Δάλλα έχουν απόκλιση, παρατηρείται ωστόσο η αυξητική τάση στα αποτελέσματα των Tihon et al. και σε αυτά της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.41: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού Re_{sub}

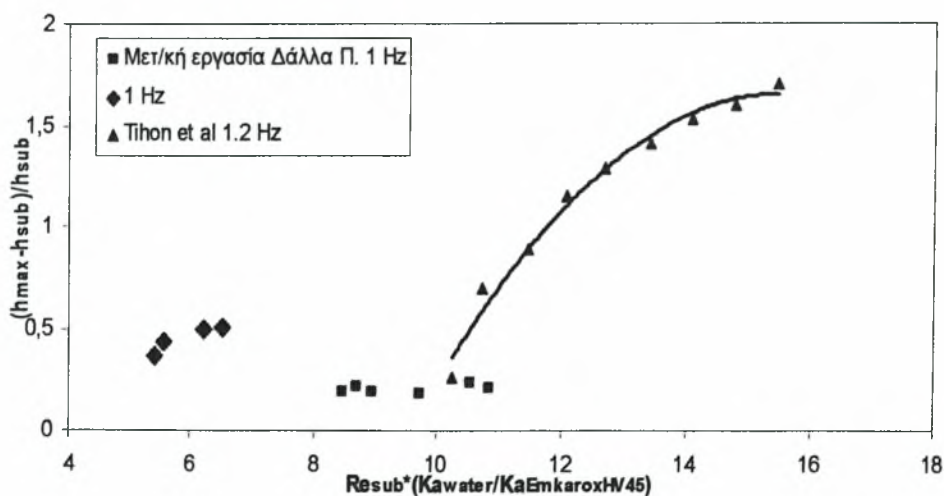


Σχήμα 4.42: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού Re_{sub}

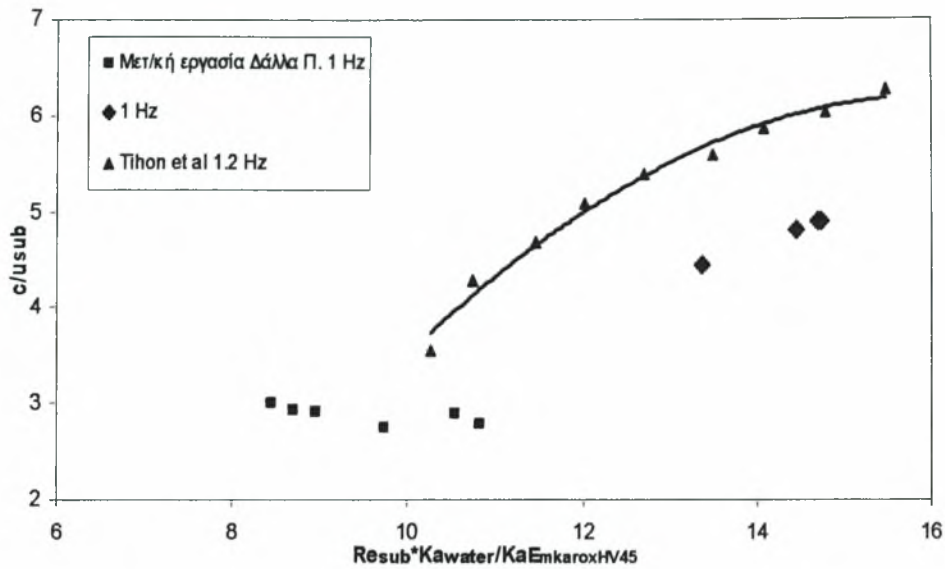
Η απόκλιση των καμπυλών της εργασίας των Tihon et al και της παρούσας οφείλεται στο ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο ιξώδες των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν εφόσον $\nu_{\text{water}} = 1,004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ και $\nu_{\text{EmkaroxHV45}} = 3,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Η απόκλιση των καμπυλών της εργασίας του Π. Δάλλα και της παρούσας οφείλεται στη διαφορά της γωνίας κλίσης των δύο πειραματικών διατάξεων εφόσον τα πειραματικά αποτελέσματα της πρώτης ελήφθησαν για γωνία κλίσης $3,16^\circ$ ενώ τα αποτελέσματα της δεύτερης είναι για γωνία κλίσης $5,2^\circ$. Ένας εναλλακτικός τρόπος αδιαστατοποίησης που προτείνεται (όπως έχει αναφερθεί) από τον Π. Δάλλα εισάγει τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε ρευστού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί για το κάθε ρευστό τον αδιάστατο αριθμό Ka που του αντιστοιχεί και ο οποίος λαμβάνει υπόψη το ιξώδες του ρευστού

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

Πολλαπλασιάζοντας το Re_{sub} με το λόγο $Ka_{\text{water}}/Ka_{\text{EmkaroxHV45}}$ καταφέρνει να εξαλείψει μερικώς τη μεγάλη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του και των Tihon et al. Όμως, αυτή η αδιαστατοποίηση δεν εξαλείφει τη διαφορά καμπυλών της εργασίας των Tihon et al και της παρούσας, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

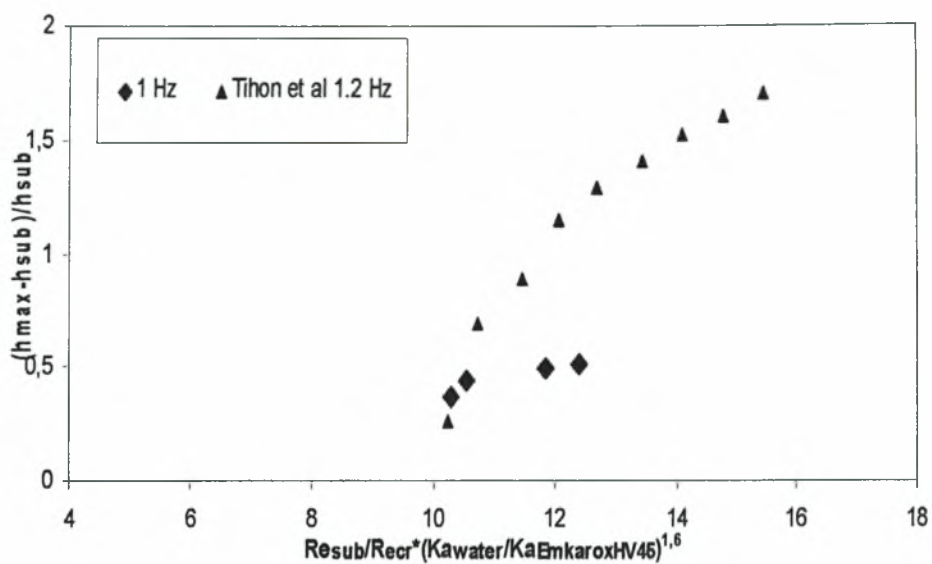


Σχήμα 4.43: Αδιαστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού $Re_{\text{sub}} \cdot Ka_{\text{water}} / Ka_{\text{EmkaroxHV45}}$

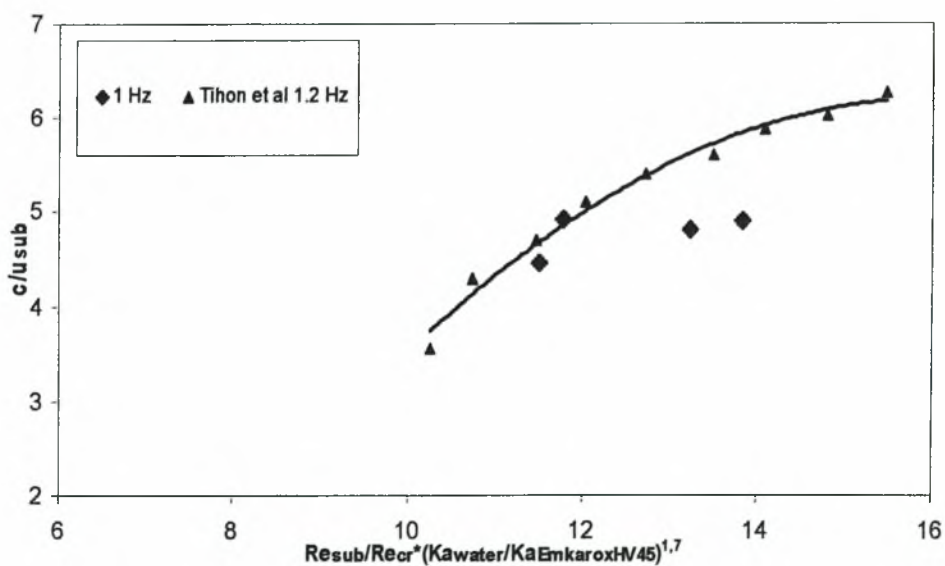


Σχήμα 4.44: Αδιαστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub} * Ka_{water} / Ka_{EmkaeroxHV45}$

Πιθανότατα ένας άλλος τρόπος αδιαστατοποίησης που να εισάγει τη γωνία κλίσης θα μπορούσε να αποδειχθεί. Μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος θα μπορούσε να δοθεί αν χρησιμοποιηθεί ο αδιάστατος αριθμός Re_{cr} ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη γωνία κλίσης αφού $Re_{cr} = \frac{5}{6} \cot \phi$. Διαιρώντας τον Re_{sub} με τον Re_{cr} και πολλαπλασιάζοντας το λόγο αυτό με τον λόγο $(Ka_{water} / Ka_{EmkaeroxHV45})$ υψωμένο σε μία δύναμη για το πάχος υμένα και τη φασική ταχύτητα αντίστοιχα, φαίνεται από τα διαγράμματα που λαμβάνονται, να εξαλείφεται μερικώς η μεγάλη απόκλιση (Σχήματα 4.45 - 4.46).



Σχήμα 4.45: Αδισστατοποιημένο πάχος υμένα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub}/Re_{cr} * (K_{a_{water}}/K_{a_{EmkaroxHV45}})^{1.6}$



Σχήμα 4.46: Αδισστατοποιημένη φασική ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού $Re_{sub}/Re_{cr} * (K_{a_{water}}/K_{a_{EmkaroxHV45}})^{1.7}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται τα χαρακτηριστικά των μοναχικών κυμάτων σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα, όταν αυτά αποκτούν πλήρως ανεπτυγμένη μορφή, υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, δίνοντας έμφαση στην επίδραση της κλίσης. Η κλίση του καναλιού ήταν 5,2 μοίρες, το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν νερό και η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν απεικόνιση με φθορισμό. Προκειμένου να μελετηθούν τα διδιάστατα κύματα εξετάσθηκαν περιοχές ροής χαμηλών αριθμών Re , καθώς σε υψηλότερους εμφανίζονται τρισδιάστατες δομές στην εγκάρσια κατεύθυνση, τόσο του μετώπου όσο και της κορυφής του κύματος. Ο διαχωρισμός έγινε οπτικά και παρατηρήθηκε ότι η εξέλιξη της διδιάστατης δομής είναι προβλέψιμη ενώ η εξέλιξη της τρισδιάστατης δομής δεν μπορεί να προβλεφθεί αφού δεν υπάρχει καμιά αρμονικότητα.

Για να εξεταστεί συστηματικότερα η ροή υγρού υμένα, η λήψη των δεδομένων έγινε σε τρεις θέσεις κατάντη της ροής και επιβλήθηκε εξωτερική διαταραχή πέντε διαφορετικών συχνοτήτων: Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Σε χαμηλές συχνότητες διαταραχής παρατηρήθηκε εμφάνιση παρασιτικών κυμάτων, γεγονός που οφείλεται στο μεγάλο μήκος του υποστρώματος και την ανταλλαγή μάζας μεταξύ του κύριου κύματος και του υποστρώματος. Επίσης, ήταν έντονες οι συγχωνεύσεις μεταξύ κυμάτων, οι οποίες χαρακτηρίζονταν από μικρή διάρκεια, όταν η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο κυμάτων ήταν μεγάλη.
- Σε χαμηλές τιμές του αριθμού Re τα κύματα είναι διδιάστατα, ενώ σε υψηλότερες παρατηρείται μετάπτωση σε τρισδιάστατες δομές. Κύρια χαρακτηριστικά των τελευταίων είναι τα περιοδικά βαθουλώματα στο μέτωπο του κύματος και οι ακανόνιστες παγωμένες δομές πίσω από το μέτωπο.
- Κύρια χαρακτηριστικά των διδιάστατων κυμάτων είναι το μήκος και το ύψος τους καθώς και η φασική ταχύτητα με την οποία διασχίζουν το πεδίο ροής. Όλα αυτά τα μεγέθη βρέθηκαν να αυξάνονται με αύξηση του αριθμού Re της ροής.
- Οι μετρήσεις επαλήθευσαν τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των διαστατικών τιμών της φασικής ταχύτητας και του μέγιστου ύψους του κύματος. Όμως, η κλίση της γραμμής διαφέρει τόσο από τα πειράματα των Tihon et al (2006) όσο και από του Π. Δάλλα (2007), υποδεικνύοντας εξάρτηση από τη γωνία κλίσης του καναλιού και από το ιξώδες του υγρού.
- Αδιαστατοποιώντας με το πάχος υμένα και τη μέση ταχύτητα κατά Nusselt, (h_N , u_N) παρατηρείται ότι με αύξηση του αριθμού Re τόσο το

ύψος όσο και η ταχύτητα του κύματος προσεγγίζουν ασυμπτωτικά σταθερές τιμές, σε ποιοτική συμφωνία με τα αποτελέσματα της εργασίας των Tihon et al.

- Ο θεωρητικά πλέον ενδεδειγμένος τρόπος αδιαστατοποίησης, με βάση το πάχος και τη μέση ταχύτητα του υποστρώματος, οδηγεί σε ποιοτική συμφωνία με τα αποτελέσματα των Tihon et al. και Π. Δάλλα αλλά σε ποσοτικές αποκλίσεις. Συνεπάγεται ότι η αδιαστατοποίηση δεν καλύπτει πλήρως όλο το εύρος κλίσεων του καναλιού. Για την εξαγωγή βελτιωμένης συσχέτισης, προτείνεται η εισαγωγή του αριθμού Karitsa και του κρίσιμου αριθμού Reynolds (Re_{cr}). Ο τελευταίος περιλαμβάνει έμμεσα την εξάρτηση από τη γωνία κλίσης.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Προκειμένου να μελετηθεί περαιτέρω η συμπεριφορά της ροής υγρού υμένα αλλά και των χαρακτηριστικών μεγεθών των οδευόντων κυμάτων προτείνονται τα ακόλουθα:

- Διεξαγωγή πειραμάτων σε μεγαλύτερες γωνίες κλίσεις του καναλιού, γεγονός που επιφέρει τη μείωση του κρίσιμου αριθμού Re για μετάβαση από ασταθή σε ευσταθή περιοχή και επιταχύνει την εξέλιξη κατά μήκος του καναλιού.

- Χρήση ρευστών διαφορετικών ιξωδών (π.χ διάφορα διαλύματα νερού γλυκερίνης) προκειμένου να γίνει μια πιο εμπειριστατωμένη μελέτη των χαρακτηριστικών των οδευόντων κυμάτων.
- Επιβολή διαταραχών σε συχνότητες μεγαλύτερες από 1Hz ώστε να αποφεύγεται η γέννηση των παρασιτικών δομών και κατά συνέπεια η αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυμάτων.
- Αύξηση του αριθμού Re που θα οδηγήσει σε τρισδιάστατες δομές και θα έχει ως στόχο τη μελέτη των χαρακτηριστικών τους.
- Κατασκευή διάταξης που να χωρίζει το κανάλι και θα έχει ως αποτέλεσμα τη μελέτη της επίδρασης του πλάτους καναλιού στα χαρακτηριστικά των μοναχικών κυμάτων.
- Δημιουργία συστήματος ημιτονοειδούς διαταραχής όπως προβλέπεται από τη θεωρία γραμμικής ευστάθειας.
- Κατασκευή περιοδικά διαμορφωμένων τοιχωμάτων στο νέο κανάλι ροής ώστε να μελετηθούν εκτενέστερα τα διάφορα φαινόμενα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

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. Alekseenko, S .V., Nakoryakov, V. Y. & Pokusaev, B. G. 1994. "Wave flow of liquid films". Begell House, Edited by T. Fukano
3. Benjamin, T. B. 1961. "Wave formation in laminar flow down an inclined plane". *J. Fluid Mech.* 10, 401.
4. Benney, D. J. 1966. "Long waves on liquid films". *J. Math. Phys.* 45, 150-155.
5. Βλαχογιάννης, Μ. 2001. «Πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο και σε κυματοειδές τοίχωμα», Διδακτορική Διατριβή, Παν/μιο Θεσσαλίας.
6. Chang, H.-C., Cheng, M., Demekhin, E. A. & Kopelevich, D.I. 1994. "Secondary and tertiary excitation of three-dimensional patterns on a falling film". *J. Fluid Mech.* 270, 451-275.
7. Chang, H.-C., 1994. "Wave evolution on a falling film". *Annu. Rev. Fluid Mech.* 26, 103-136.
8. Chang, H.-C., Demekhin, E. A. 1999 "Mechanism for drop formation on a coated vertical fibre". *J. Fluid Mech.* 380, 233.
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. Δάλλας Πέτρος 2007 Μελέτη Οδευόντων Κυμάτων σε Κεκλιμένο Κανάλι Ροής Μεταπτυχιακή Εργασία Παν/μιο Θεσσαλίας

11. Deissler, R. J., Oron, A. & Lee, Y. G 1991. "Evolution of two-dimensional waves in externally perturbed flow on a vertical cylinder". *Phys. Rev. A* 43, 4558-4561.
12. Joo, S. W. & Davis, S. H. 1992. "Instabilities of three-dimensional viscous falling films". *J. Fluid Mech.* 242, 529-547.
13. Liu, J., Paul, J. D., & Gollub, J.P. 1993. "Measurements of the primary instabilities of film flow". *J. Fluid Mech.* 250, 69-101.
14. Liu, J. & Gollub, J. P. 1994. "Solitary wave dynamics of film flows". *Phys. Fluids* 6, 1702-1712.
15. Pelekasis, N.A & Tsamopoulos J.A. 2001. "Linear stability of a gas boundary layer flowing past a thin liquid film over a flat plate". *J. Fluid Mech*, 436, 321-352.
16. Σταθάς, Π. 2007. «Κατασκευή πειραματικής διάταξης για τη μελέτη ροής υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα με τη βοήθεια συστήματος ψηφιακής απεικόνισης», Διπλωματική Εργασία, Παν/μιο Θεσσαλίας.
17. Tihon, J., Serifi, K., Argiriadi, K. & Bontozoglou, V. 2006. "Solitary Waves on inclined films: their characteristics and the effects on wall shear stress". *Experiments in Fluids* 41: 79-89.
18. Vlachogiannis, M. & Bontozoglou, V. 2001. "Observations of solitary wave dynamics of film flows". *J. Fluid Mech.* 435, 191.
19. Yih, C.S. 1963. "Stability of liquid flow down an inclined plane". *Phys. Fluids* 6, 321-334.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091450