

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΤΙΠΡΥΠΛΑΝΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική εργασία

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ

υπό

Γεωργαντάκη Άννα

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

Βόλος, Απρίλιος 2008



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

Αριθ. Εισ.: 6316/1
Ημερ. Εισ.: 18-06-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2008
ΓΕΩ

© 2008 Γεωργαντάκη Άννα

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής **Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ**
(επιβλέπων) *Διδάσκων Π.Δ. 407*
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

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

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

Ευχαριστίες

Χωρίς καμία αμφιβολία, πρώτο μεταξύ όλων επιθυμώ να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μ.Βλαχογιάννη. Δε νομίζω ότι μπορεί να περιγράψει η εκτίμηση μου για το πρόσωπο του σε δυο γραμμές κείμενο, το μονό που μπορώ να πω είναι πως τον ευχαριστώ για την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Πάνω από όλα όμως θα ήθελα να τον ευχαριστήσω επειδή με βοήθησε να καταλάβω την έννοια του να είσαι μηχανικός.

Είμαι επίσης ευγνώμων στον Καθηγητή κ. Β. Μποντόζογλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου και στον επίκουρο Καθηγητή κ. Ν. Ανδρίτσο και στον για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Θανάση Σαματά, για τη βοήθεια του στην τροποποίηση της διάταξης αλλά και για την πολύτιμη βοήθεια στη διάρκεια των πειραμάτων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω στο Βλάσση και τη Χριστίνα, γιατί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια τους, δε θα ήταν δυνατή η επίτευξη των πειραμάτων.

Επιπρόσθετα, θέλω να πω ένα ευχαριστώ σε όλους τους φίλους και τις φίλες μου, που ήταν δίπλα μου κάθε φορά που τους είχα ανάγκη και με βοήθησαν να περάσω τα ωραιότερα χρόνια της ζωής μου. Με ξεχωριστή σημασία, θέλω να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη και ένα τεράστιο ευχαριστώ στο Χρηστό γιατί τα τελευταία χρόνια είναι δίπλα μου σε ότι και αν έχει συμβεί.

Τέλος, η λέξη ευχαριστώ είναι πολύ λίγη για να ανταποδώσω τη συμβολή της οικογένειάς μου. Όλα αυτά τα χρόνια μου έδειξαν την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξη τους. Χωρίς πολλά λόγια, *θα ήθελα να αφιερώσω τη διατριβή αυτή στους Γονείς μου και τον αδελφό μου. Χωρίς αυτούς δεν θα γινόταν ποτέ πραγματικότητα.*

Γεωργαντάκη Άννα

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ

Γεωργαντάκη Άννα

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2008

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ, Διδάσκων Π.Δ. 407

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Λεπτοί υμένες συναντώνται σε σημαντικές συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Ενδιαφέροντα παραδείγματα αποτελούν οι συμπυκνωτές ατμού, οι εξατμιστήρες, οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις και οι συσκευές επαφής όπου λαμβάνει χώρα απορρόφηση ελαφρά διαλυτού αερίου.

Βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η πειραματική μελέτη της ευστάθειας στη ροή υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο τοίχωμα. Είναι γνωστό ότι η ροή υγρού υμένα κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου τοιχώματος είναι γραμμικά ασταθής πάνω από τον κρίσιμο αριθμό $Re_{cr}=(5/6)\cot\phi$, όπου ϕ η γωνία κλίσης. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να βρεθεί πειραματικά, ο Re_{cr} στον οποίο γίνεται η μετάβαση από την ευστάθεια στη αστάθεια.

Έγιναν κάποιες τροποποιήσεις στην υπάρχουσα πειραματική διάταξη και χρησιμοποιήθηκε η αγωγιμομετρική τεχνική για την αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης του ύψους υμένα υπό την επιβολή περιοδικής διαταραχής.

Βρέθηκε ότι ο πειραματικός κρίσιμος αριθμός Reynolds, μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του τοιχώματος, και καθώς αυξάνεται η γωνία ϕ , μειώνεται η διάφορα πειραματικού με θεωρητικού κρίσιμου αριθμού Re . Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται στην αυξημένη ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται η μετάπτωση από την ευστάθεια στην αστάθεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Στόχος της εργασίας.....	9
1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα.....	9
1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων.....	10
1.4 Δομή της εργασίας.....	11
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	12
2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα.....	12
2.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια.....	17
2.3 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	18
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	19
3.1 Πειραματική διάταξη.....	19
3.1.1 Κανάλι ροής.....	19
3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.....	22
3.1.3 Ευθυγράμμιση καναλιού ροής.....	24
3.2 Ιδιότητες ρευστών.....	26
3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική.....	28
3.3.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	29
3.4 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων.....	30
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	33
4.1 Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο.....	33
4.1.1 Αποτελέσματα στις 5 μοίρες.....	34
4.1.2 Αποτελέσματα στις 7 μοίρες.....	37
4.1.3 Αποτελέσματα στις 10 μοίρες.....	40
4.1.4 Αποτελέσματα στις 15 μοίρες.....	42
4.1.5 Αποτελέσματα στις 20 μοίρες.....	44
4.1.6 Αποτελέσματα στις 25 μοίρες.....	47
4.1.7 Αποτελέσματα στις 30 μοίρες.....	48
4.1.8 Μετάβαση από την ευστάθεια στην αστάθεια.....	50
4.2 Προσδιορισμός κρίσιμου Re ($Recr$).....	51
4.3 Επίδραση της γωνίας φ	55
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	59
5.1 Συμπεράσματα.....	59
5.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.....	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	62

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 : Δυνάμεις πάνω σε ένα στοιχείο υγρού σε ροή υγρού υμένα.....	16
Σχήμα 2.2. Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα.....	21
Σχήμα 3.1 (α) πειραματική διάταξη για 5 έως 20 μοίρες.....	25
Σχήμα 3.1 (β) πειραματική διάταξη για 25 και 30 μοίρες.....	25
Σχήμα 3.2. Σύστημα διαταραχής	27
Σχήμα 3.3 ευθυγραμμισμένο και μη ευθυγραμμισμένο κανάλι.....	28
Σχήμα 3.4. Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	32
Σχήμα 3.5. Πάχος υγρού υμένα κατά Nusselt για επίπεδο τοίχωμα.....	32
Σχήμα 4.1.1 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής 1ο $x_0=15$ cm. 2ο $x_0=65$ cm. 1) Re = 5.7, 2) Re= 7.33, 3) Re = 8.41, 4) Re= 9.5, 5) Re= 11.4, 6) Re= 12.07, 7) Re= 14.65, 8) Re= 16.01, 9) Re= 17.91, 10) Re=22.25, 11) Re=28.22	40
Σχήμα 4.1.2 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής 1ο $x_0=15$ cm. 2ο $x_0=65$ cm. 1) Re = 6.2, 2) Re= 6.85, 3) Re = 7.57, 4) Re= 8.21, 5) Re= 8.66, 6) Re= 9.85, 7) Re= 10.49, 8) Re= 13.68, 9) Re= 15.78	42
Σχήμα 4.1.3 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής 1ο $x_0=15$ cm. 2ο $x_0=65$ cm. 1) Re = 3.67, 2) Re= 4.15, 3) Re = 5.63, 4) Re= 7.19, 5) Re= 8.78, 6) Re= 10.26, 7) Re= 12.90	44
Σχήμα 4.1.4 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής 1ο $x_0=15$ cm. 2ο $x_0=65$ cm. 1) Re = 1.58, 2) Re= 2.16, 3) Re = 2.74, 4) Re= 3.12, 5) Re= 3.32, 6) Re= 3.57, 7) Re= 4.32, 8) Re= 5.07, 9) Re= 6.36, 10) Re=7.44	47
Σχήμα 4.1.5 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής 1ο $x_0=15$ cm. 2ο $x_0=65$ cm. 1) Re = 0.92, 2) Re= 1.12, 3) Re = 1.68, 4) Re= 2.05, 5) Re= 2.37, 6) Re= 2.66, 7) Re= 3.25, 8) Re= 3.87, 9) Re= 4.3	50
Σχήμα 4.1.6 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής 1ο $x_0=15$ cm. 2ο $x_0=65$ cm. 1) Re = 0.53, 2) Re = 1.46, 3) Re= 2.2, 4) Re= 3.68.....	51
Σχήμα 4.1.7 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής 1ο $x_0=15$ cm. 2ο $x_0=65$ cm. 1) Re = 0.56, 2) Re= 0.76, 3) Re = 1.1, 4) Re= 1.28, 5) Re= 1.45, 6) Re= 1.86, 7) Re= 2.18, 8) Re= 2.73, 9) Re= 3.43	53
Σχήμα 4.2 : Διαχωρισμός του σήματος σε χρονικές περιόδους	55
Σχήμα 4.2.1 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 5 μοίρες.....	56
Σχήμα 4.2.2 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 7 μοίρες.....	56
Σχήμα 4.2.3 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 10 μοίρες.....	57
Σχήμα 4.2.4 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 15 μοίρες.....	57
Σχήμα 4.2.5 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 20 μοίρες.....	57
Σχήμα 4.2.6 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 30 μοίρες.....	57
Σχήμα 4.3.α: % διαφορά πειραματικής και θεωρητικής τιμής κρίσιμου αριθμού Re σε συνάρτηση με την αύξηση της γωνίας φ	58
Σχήμα 4.4.α Εξέλιξη του αριθμού Re με τη γωνία φ	58
Σχήμα 4.3.β: επαλήθευση % διαφοράς πειραματικής και θεωρητικής τιμής κρίσιμου αριθμού Re σε συνάρτηση με την αύξηση της γωνίας φ	59
Σχήμα 4.4.β επαλήθευση εξέλιξης του αριθμού Re με τη γωνία φ	60

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της είναι η πειραματική μελέτη της ευστάθειας της ροής υγρού υμένα. Συγκεκριμένα, διερευνάται πώς επηρεάζεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, δηλαδή ο αριθμός Reynolds στον οποίο η ροή μεταπίπτει από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή, σε συνάρτηση με τη γωνία κλίσης του τοιχώματος.

1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα

Με τον όρο ροή υγρού υμένα, εννοείται η ροή εκείνη στην οποία το πάχος του ρέοντος ρευστού είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μεγέθου (μήκος και πλάτος). Η ροή υγρού υμένα λόγω βαρύτητας (ροή Nusselt) κατά μήκος επίπεδου τοιχώματος αποτελεί μια βασική ροή της ρευστομηχανικής και συναντάται σε πολυάριθμα βιομηχανικά συστήματα, όπως σε εφαρμογές επικάλυψης, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες, στήλες απορρόφησης κ.ά. Λεπτοί υμένες χρησιμοποιούνται στις περισσότερες συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας, και ίσως ο κυριότερος λόγος της χρήσης αυτού του είδους ροής είναι η ικανότητα των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση. Το πεδίο ροής στον υμένα συχνά επηρεάζει έντονα τους ρυθμούς μεταφοράς και κατά συνέπεια καθορίζει το βαθμό απόδοσης των συσκευών. Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα παραδείγματα αποτελούν οι συμπυκνωτές ατμού - όπου συνήθως η κύρια αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας προβάλλεται από τον υμένα του συμπυκνώματος -, οι

εξατμιστήρες και οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις - στα τμήματα εκείνα όπου ο μηχανισμός του βρασμού είναι η εξατμίσση από την επιφάνεια του υγρού (και όχι η πυρηνογένεση στο τοίχωμα) – και οι συσκευές μεταφοράς μάζας όπου λαμβάνει χώρα απορρόφηση ελαφρά διαλυτού αερίου. Τα ίδια φαινόμενα ροής και ευστάθειας λεπτών υμένων καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και άλλων τεχνολογικών και περιβαλλοντικών συστημάτων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα τη συμπεριφορά πτερύγων αεροπλάνων κατά την πτήση υπό συνθήκες βροχόπτωσης (Pelekasis & Tsamopoulos 2001).

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση των φαινομένων μεταφοράς, ενώ σε άλλες επιδιώκεται η ελαχιστοποίησή τους. Στην πρώτη περίπτωση ανήκουν οι περιπτώσεις συσκευών μεταφοράς μάζας ή θερμότητας (εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες κ.ά.), στις οποίες απαιτούνται υψηλοί συντελεστές μεταφοράς, ενώ χαρακτηριστικό παράδειγμα της δεύτερης περίπτωσης είναι οι διεργασίες επίστρωσης λεπτών υμένων, όπου η παρουσία κυμάτων στην επιφάνεια επίστρωσης δεν είναι επιθυμητή.

Ωστόσο, στα περισσότερα συστήματα το ρευστό δεν ρέει πάνω σε τελείως επίπεδη επιφάνεια, κυρίως λόγω κατασκευαστικών ατελειών ή επικαθίσεων, και είναι αξιοσημείωτο ότι οι περισσότερες δημοσιευμένες εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν επικεντρωθεί στη ροή σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα.

1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων

Οι κύριες φυσικές και λειτουργικές παράμετροι που μεταβάλλονται στην παρούσα εργασία είναι το ιξώδες της υγρής φάσης, η παροχή του υμένα, η κλίση του τοιχώματος και η ύπαρξη εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.

Πιο συγκεκριμένα, ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού και γλυκερίνης (30% – 80% κ.β. γλυκερίνη), ενώ οι παροχές που μελετήθηκαν

εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds σε πάνω και κάτω από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για κάθε κλίση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή του είδους του διαλύματος υπαγορευόταν από τη γωνία κλίσης.

Η επιλογή των κλίσεων του τοιχώματος που μελετήθηκαν (5° – 30°) υπαγορεύεται κυρίως από πειραματικούς περιορισμούς ενώ η εισαγωγή στο σύστημα συγκεκριμένης συχνότητας διαταραχής, δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου.

1.4 Δομή της εργασίας

Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη ροή υγρού υμένα και την ευστάθεια της ροής, ξεκινώντας από τη βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα. Αναφέρονται οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο και η λύση που δόθηκε αρχικά από τον Nusselt. Στη συνέχεια αναλύεται η θεωρία γραμμικής ευστάθειας και η λύση που έχει προκύψει για ροή σε επίπεδο τοίχωμα.

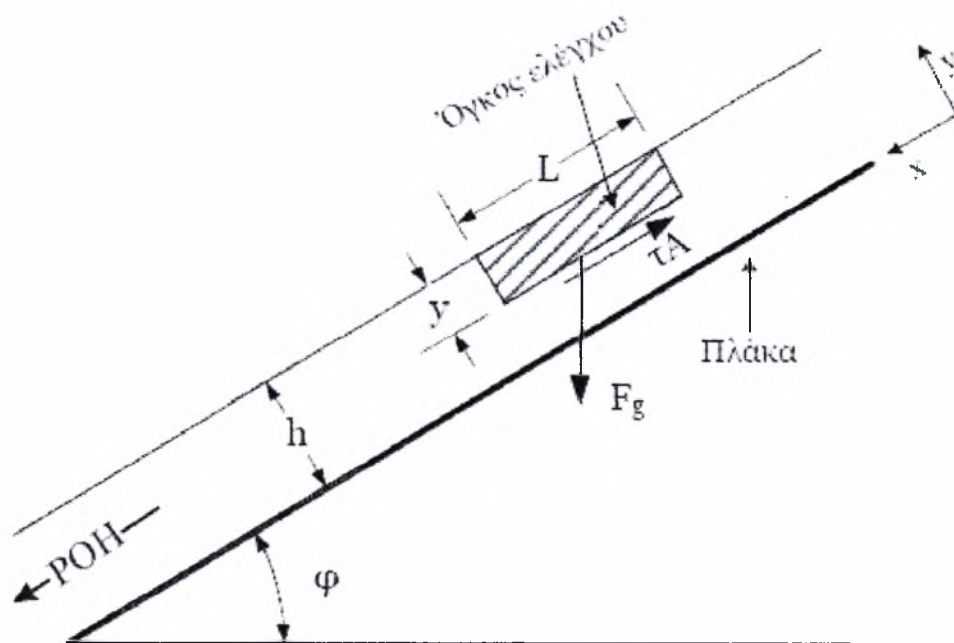
Αξίζει να σημειωθεί ότι γίνεται αναφορά τόσο σε πειραματικές μελέτες, οι οποίες είναι περιορισμένες, όσο και σε υπολογιστικές. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αρχικά, περιγράφεται η πειραματική διάταξη που υπάρχει στο εργαστήριο. Ακολουθεί η παρουσίαση της μεθόδου συλλογής των πειραματικών δεδομένων και η διαδικασία επεξεργασίας τους.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα

Η πιο απλή μορφή του προβλήματος της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο είναι αυτή της ροής Nusselt. Θεωρείται ένα στρώμα υγρού που ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας σε μια επικλινή επιφάνεια. Αν η ροή αυτή λαμβάνει χώρα σε μόνιμη κατάσταση με πλήρως ανεπτυγμένη κατανομή ταχύτητας το πάχος του στρώματος παραμένει σταθερό. Επίσης, η οπισθέλκουσα στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού λόγω του υπερκείμενου αέρα είναι τόσο μικρή που μπορεί να αγνοηθεί. Έτσι, η διατμητική τάση στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού λόγω του υπερκείμενου αέρα είναι τόσο μικρή που μπορεί να αγνοηθεί. Έτσι, η διατμητική τάση στην ελεύθερη επιφάνεια λαμβάνεται ίση με μηδέν. Αν επιπλέον η ροή είναι στρωτή και η επιφάνεια του υγρού επίπεδη χωρίς κυματισμούς, η κίνηση του ρευστού μπορεί να αναλυθεί εύκολα μαθηματικά.

Έστω ένα στρώμα ενός νευτωνικού ρευστού που ρέει σε μόνιμη ροή με σταθερό ρυθμό και σταθερό πάχος πάνω σε μια επίπεδη πλάκα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Η πλάκα έχει κλίση και σχηματίζει γωνία ϕ . Το πλάτος του στρώματος σε διεύθυνση κάθετη στην πλάκα είναι h . Απομονώνεται ένας όγκος ελέγχου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, η επάνω επιφάνεια του όγκου ελέγχου βρίσκεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, τα δύο άκρα είναι επίπεδα στην πλάκα σε απόσταση L μεταξύ τους και η κατώτερη επιφάνεια είναι το επίπεδο που είναι παράλληλο με το τοίχωμα σε απόσταση y από την επάνω επιφάνεια του στρώματος.



Σχήμα 2.1 : Δυνάμεις πάνω σε ένα στοιχείο υγρού σε ροή υγρού υμένα.

Αφού το στρώμα βρίσκεται σε μόνιμη ροή χωρίς επιτάχυνση, τότε σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, το άθροισμα όλων των δυνάμεων στον όγκο ελέγχου θα είναι ίσο με μηδέν. Οι δυνάμεις που πιθανώς να ενεργούν στον όγκο ελέγχου σε διεύθυνση παράλληλη με τη ροή, είναι οι δυνάμεις πίεσης στα άκρα, οι διατμητικές δυνάμεις στην επάνω και στην κάτω όψη και η συνιστώσα της δύναμης της βαρύτητας στη διεύθυνση της ροής. Επειδή η πίεση στην εξωτερική επιφάνεια είναι η ατμοσφαιρική, οι πιέσεις στα άκρα του όγκου ελέγχου είναι ίσες και αντίθετες. Λόγω παραδοχής, η διατμητική τάση στην επάνω επιφάνεια του στοιχείου αγνοείται. Άρα οι δύο δυνάμεις που απομένουν είναι η διατμητική δύναμη στην κατώτερη επιφάνεια του όγκου ελέγχου και η συνιστώσα της βαρύτητας στην κατεύθυνση της ροής :

$$\rho \cdot g \cdot \sin \phi - \frac{d\tau_{yx}}{dy} = 0 \quad (2.1-1)$$

Όπου:

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

τ_{yx} : διατμητική τάση στην κατώτερη επιφάνεια του όγκου ελέγχου

ρ : πυκνότητα του ρευστού

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει :

$$\frac{1}{\rho \cdot g \cdot \sin \phi} \cdot \tau_{yx} = y + c_1 \cdot a \quad (2.1-2)$$

όπου c_1 η σταθερά ολοκλήρωσης. Επειδή η ροή είναι στρωτή ισχύει :

$$\tau_{yx} = -\mu \cdot \frac{du_x}{dy} \quad (2.1-3)$$

όπου μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού. Από τις εξισώσεις (2.1-2) και (2.1-3)

προκύπτει :

$$\frac{du_x}{dy} = -\frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{\mu} (y + c_1) \quad (2.1-4)$$

Ολοκληρώνοντας η εξ. (2.1-4) δίνει :

$$u_{xy}(y) = -\frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{\mu} \left(\frac{1}{2} \cdot y^2 + c_1 \cdot y \right) + c_2 \quad (2.1-5)$$

όπου c_2 η σταθερά ολοκλήρωσης. Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα είναι :

- Για $y=0$ είναι $u_x(y)=0$ και
- Για $y=h$ είναι $\tau_{yx} = 0$.

Με χρήση των συνθηκών αυτών προκύπτουν οι δύο σταθερές :

$$u_x(y) = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{2 \cdot \mu} \cdot y \cdot (2 \cdot h - y) \quad (2.1-6)$$

Η παραπάνω εξίσωση δηλώνει ότι στη περίπτωση στρωτής ροής υγρού υμένα πάνω από επίπεδη κεκλιμένη πλάκα η κατανομή της ταχύτητας είναι παραβολική.

Εξετάζοντας ένα διαφορικό στοιχείο διατομής dS , όπου $dS=Wdy$, ο διαφορικός μαζικός ρυθμός dm μέσα από αυτό το στοιχείο είναι :

$$dm = \rho \cdot u_x \cdot W \cdot dy \quad (2.1-7)$$

Ο συνολικός μαζικός ρυθμός ροής του ρευστού είναι :

$$\dot{m} = \int_0^h \rho \cdot u_x \cdot W \cdot dy \Rightarrow \frac{\dot{m}}{W} = \frac{h^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \sin \phi}{3 \cdot \mu} \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \mu \cdot q}{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}} \quad (2.1-8)$$

όπου q είναι η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους. Η εξίσωση αυτή που δίνει το πάχος ενός πίπτοντος γραμμικού υμένα παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από το Nusselt [McCabe et al., 2002].

Το πρόβλημα της ροής υγρού υμένα μπορεί να περιγραφεί από τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds και Weber ή Kapitza :

$$Re = \frac{u \cdot h_N}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad (2.1-9)$$

$$We = \frac{\gamma}{\rho \cdot u^2 \cdot h_N} \quad (2.1-10)$$

$$Ka = \frac{\gamma}{\rho \cdot \nu^{4/3} \cdot g^{1/3}} \quad (2.1-11)$$

Όπου u : μέση ταχύτητα του ρευστού

h_N : πάχος του επίπεδου υμένα κατά Nusselt (εξ.(2.1-8))

γ : επιφανειακή τάση του ρευστού

Η μέση ταχύτητα του ρευστού βρίσκεται εύκολα διαιρώντας με το εμβαδόν αυτό:

$$u = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi \cdot h_N^2}{3 \cdot \mu} \Rightarrow h_N = \sqrt{\frac{3 \cdot \mu \cdot u}{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}} \quad (2.1-12)$$

Ενώ η μέγιστη ταχύτητα, u_{\max} , στην ελεύθερη επιφάνεια είναι :

$$u_{\max} = u_x (y = h) = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi \cdot h^2}{2 \cdot \mu} \quad (2.1-13)$$

Η κατανομή της πίεσης, p , στην y κατεύθυνση είναι :

$$\frac{dp}{dy} = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \Rightarrow p = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot y + c_1 \quad (2.1-14)$$

Με συνοριακή συνθήκη :

- Για $y=h$ είναι $p=P_{atm}$

Επομένως, προκύπτει :

$$p = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot (y - h) + P_{atm} \quad (2.1-15)$$

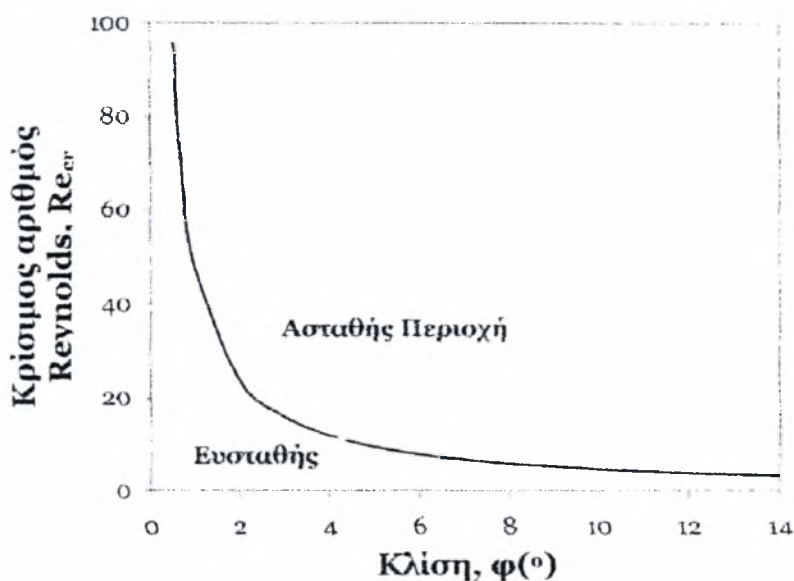
2.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια

Συνήθως οι βιομηχανικές και εργαστηριακές εφαρμογές υπόκεινται σε μικρού πλάτους διαταραχές εξαιτίας διαφόρων λόγων, όπως είναι η δόνηση των συσκευών κατά τη λειτουργία τους. Επίσης, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις διαταραχή εισάγεται σε ένα σύστημα ώστε να επιτευχθεί μια επιθυμητή κατάσταση, όπως η ενίσχυση της ανάμιξης ρευστών. Οπότε είναι πιθανόν φυσικές ή τεχνητές διαταραχές να ενισχύονται με το χρόνο ή το χώρο οδηγώντας σε μη μόνιμη κίνηση ή σε μια νέα κατάσταση [Pozrikidis, 1997].

Όπως έχει προκύψει από την ανάλυση για μονοδιάστατη ροή, για να είναι η ροή ασταθής πρέπει να ισχύει :

$$Re = Re_{crit} = \frac{5}{6} \cot \phi \quad (2.2-1)$$

στη διεθνή βιβλιογραφία ο παράγοντας $5/6$ ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα που θα επιλεγεί για να γίνει η αδιαστατοποίηση και τη θέση των αξόνων. Στο σχήμα 2.2 απεικονίζεται γραφικά η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds, δηλαδή του αριθμού εκείνου στον οποίο η ροή μεταπίπτει από ευσταθή σε ασταθή, ως προς τη γωνία κλίσης του επίπεδου τοιχώματος.



Σχήμα 2.2. Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα

2.3 Βιβλιογραφικές αναφορές

Οι πειραματικές εργασίες σχετικά με τη μελέτη της ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο κανάλι είναι ελάχιστες. Συγκεκριμένα, οι Liu et al. (1993) και οι Vlachogiannis and Bontozoglou (2002) επιβεβαίωσαν πειραματικά την εξίσωση (2.2-1) για μικρές γωνίες κλίσης (έως 10^0), ενώ ως ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό ή διάλυμα νερού-γλυκερίνης.

Οι Liu et al. (1993) λόγω της πρακτικής δυσκολίας να εκτιμήσουν ποσοτικά την αστάθεια, η οποία λαμβάνει χώρα σε κυματάριθμο ίσο με το μηδέν, βρήκαν την καμπύλη ουδέτερης αστάθειας $f_{cr}(Re)$ και με μια διαδικασία προεκβολής υπολόγισαν τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για μηδέν συχνότητα (άπειρο μήκος κύματος). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν κεκλιμένο επίπεδο κανάλι μήκους 200cm και πλάτους 50cm.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη της ροής λεπτού υμένα υγρού πάνω από κεκλιμένο τοίχωμα. Αρχικά, περιγράφεται η διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα καθώς και το σύστημα εισαγωγής των διαταραχών. Στη συνέχεια αναφέρονται τα είδη των διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίστηκαν οι φυσικές τους ιδιότητες. Ακολουθεί η παρουσίαση της μεθόδου συλλογής των πειραματικών δεδομένων με την αγωγιμομετρική τεχνική και η διαδικασία επεξεργασίας τους.

3.1 Πειραματική διάταξη

3.1.1 Κανάλι ροής

Η πειραματική διάταξη [Βλαχογιάννης, 2001] απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Στόχος της συσκευής είναι να τροφοδοτεί με ρευστό μια επιφάνεια, η οποία έχει τη δυνατότητα να παίρνει κλίση. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η μελέτη της ροής.

Η πρώτη τροποποίηση που ήταν απαραίτητη για τη χρήση του καναλιού με υγρά υψηλού ιξώδους, ήταν η αντικατάσταση της φυγοκεντρικής αντλίας με μια γραναζωτή (8) τις οποίας οι στροφές ρυθμίζονται με inverter (11), κατάλληλη να παρέχει τα επιθυμητά μανομετρικά ύψη και παροχές.

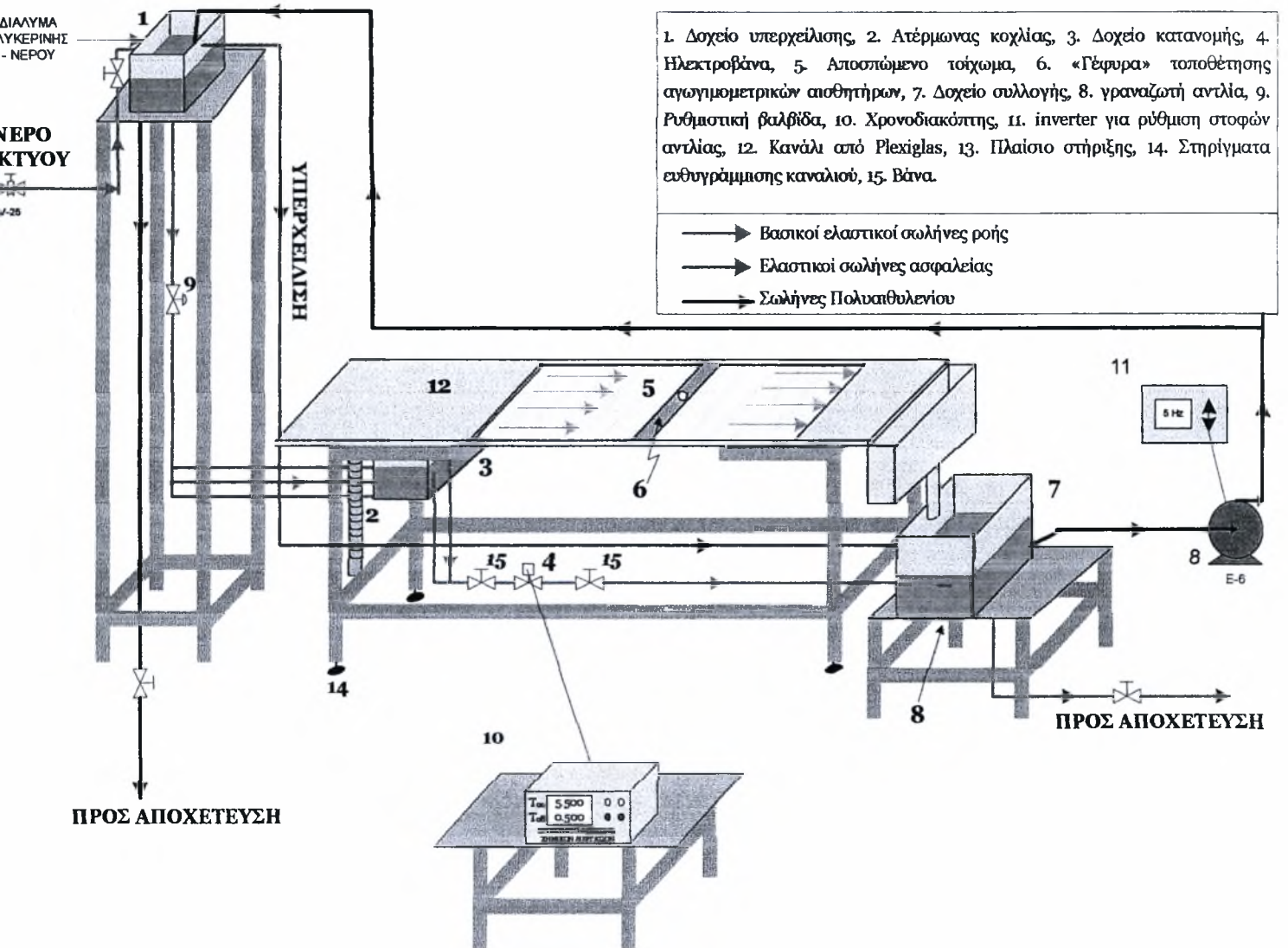
Το βασικό μέρος της συσκευής είναι ένα κανάλι (12)¹, πλάτους 25 cm και μήκους 80 cm, πάνω στο οποίο ρέει το υγρό. Το κομμάτι αυτό της συσκευής, όπως και τα

περισσότερα μέρη της διάταξης, είναι κατασκευασμένα από Plexiglas ώστε να είναι ορατή η ροή από όλες τις πλευρές και να επιτρέπεται ο οπτικός έλεγχος. Μέρος της βάσης του καναλιού (5) είναι αποσπώμενο, αποτελούμενο από πλάκα πλάτους 25 cm και μήκους 50 cm. Πάνω σε αυτή την πλάκα γίνονται οι μετρήσεις. Κατά την μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας του τοιχώματος, η πλάκα αυτή αντικαθίσταται από άλλες με την επιθυμητή μορφολογία επιφάνειας (π.χ. περιοδικό τοίχωμα). Η κλίση του καναλιού ρυθμίζεται με την βοήθεια ενός ατέρμονα κοχλία (2). Η γωνία που σχηματίζει το κανάλι με το οριζόντιο επίπεδο μπορεί να μεταβληθεί από 0° έως 67°. Στα πειράματα της παρούσας εργασίας, η κλίση κυμάνθηκε από 5°-30°. Η λειτουργία της συσκευής περιγράφεται συνοπτικά ως εξής:

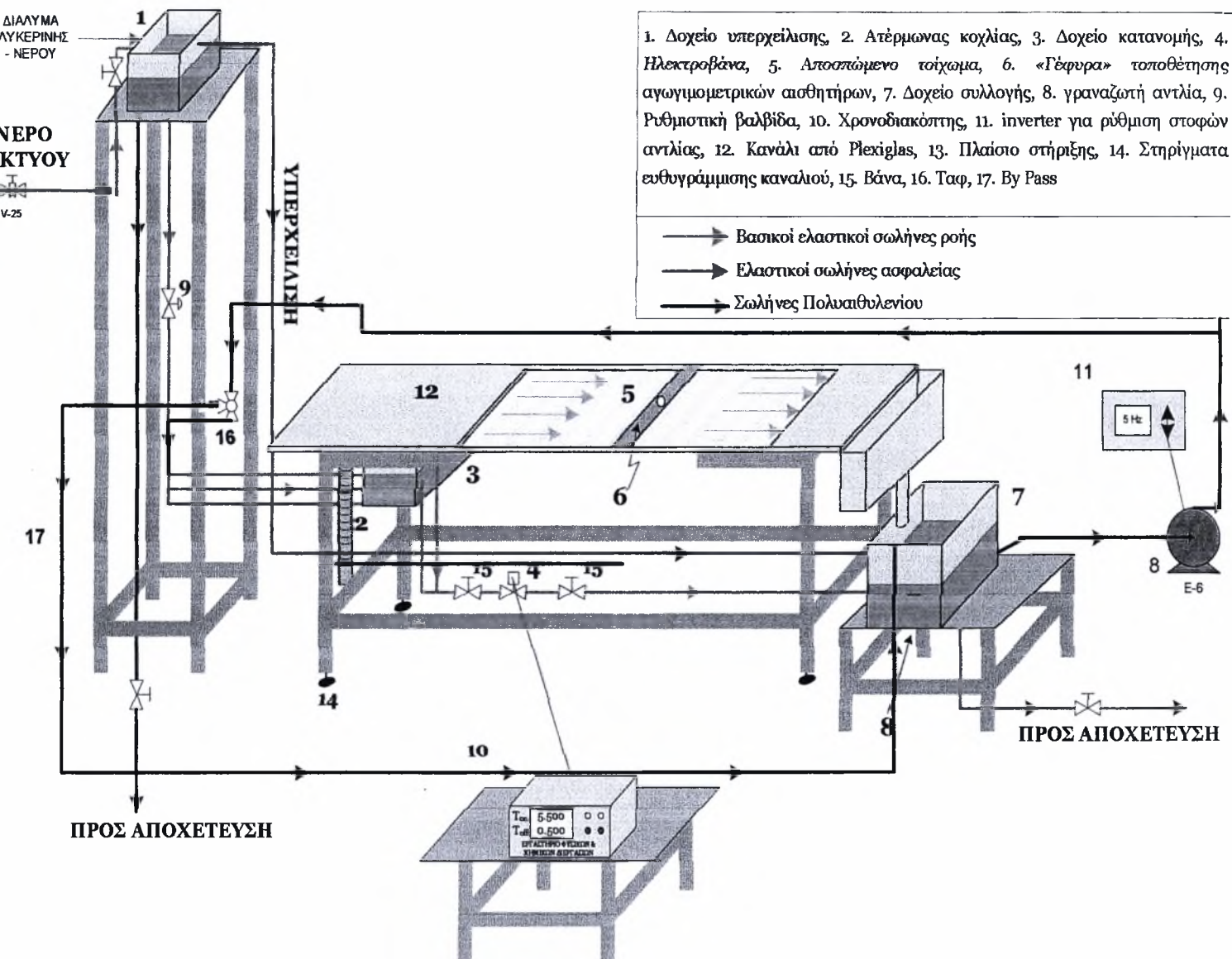
- **Από 5 έως 20 μοίρες (Σχήμα 3.1 (α))** : Αρχικά κατάλληλο ρευστό τοποθετείται στο δοχείο συλλογής (7). Το ρευστό αυτό, με τη βοήθεια μιας γραναζωτής (8) αντλίας και σταθερών στρόφων στον inverter (11), οδηγείται στο δοχείο υπερχειλίσσης (1). Από εκεί εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς και λόγω του βάρους του, το ρευστό ρέει μέσω ενός συστήματος σωλήνων πολυαιθυλενίου προς το δοχείο κατανομής (3), με το οποίο επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού στο τμήμα μετρήσεων του καναλιού (5). Στη συνέχεια, το ρευστό επιστρέφει στο δοχείο συλλογής για να ακολουθήσει την ίδια διαδρομή. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο είδος αντλίας είναι ότι δεν αυξάνει τη θερμοκρασία του ρευστού, γεγονός που πιθανόν να επηρέαζε τις μετρήσεις. Η παροχή του ρευστού ελέγχεται από μια ρυθμιστική βαλβίδα (9), η οποία παρεμβάλλεται ανάμεσα στο δοχείο υπερχειλίσσης και το δοχείο κατανομής. Πιο συγκεκριμένα, ρυθμίζεται τη βαλβίδα σε μια ορισμένη θέση και η παροχή προσδιορίζεται μετρώντας το βάρος του ρευστού που εξέρχεται από το κανάλι. Με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος επιτυγχάνεται η επιθυμητή

παροχή. Επειδή η όλη κίνηση οφείλεται στην υψομετρική διαφορά του υγρού, σταθερή στάθμη στο δοχείο υπερχείλισης εξασφαλίζει και σταθερή παροχή.

- Στις 20 και 25 μοίρες (Σχήμα 3.1 (β)): η παροχή ρυθμιζόταν από τις στροφές του inverter. Η μονή διάφορα εδώ, ήταν πως δε χρησιμοποιήθηκε το δοχείο υπερχείλισης. Μέσω των πλαστικών σωλήνων πολυαιθυλενίου το ρευστό διοχετευόταν κατευθείαν στο δοχείο κατανομής με διαχωρισμό του ρευστού σε τρεις ίδιους ελαστικούς σωλήνες. Με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος επιτυγχάνεται η επιθυμητή παροχή η οποία προσδιορίζεται μετρώντας το βάρος του ρευστού που εξέρχεται από το κανάλι.



Σχήμα 3.1 (α) πειραματική διάταξη για 5 έως 20 μοίρες

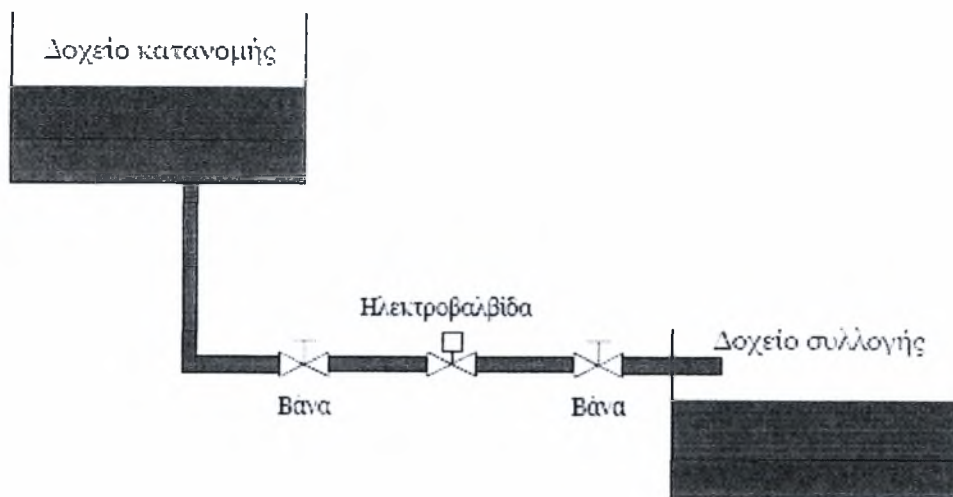


Σχήμα 3.1 (β) πειραματική διάταξη για 25 και 30 μούρες

3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Το διαθέσιμο μήκος του καναλιού περιορίζει τη μελέτη της εξέλιξης των φυσικά δημιουργούμενων διαταραχών. Η επιβολή εξωτερικής διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την

επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα by-pass με ηλεκτροβαλβίδα (4). Η διαταραχή δημιουργείται με τη βοήθεια μιας χρονιζόμενης ηλεκτρο- βαλβίδας (ON/OFF). Για το σκοπό αυτό ενώθηκε το δοχείο συλλογής, μέσω ενός ελαστικού σωλήνα, με το δοχείο κατανομής (Σχήμα 3.2). Μέσω της παράκαμψης αυτής ένα μέρος από το υγρό που βρίσκεται στο δοχείο κατανομής οδηγείται στο δοχείο συλλογής χωρίς να περάσει από την κεκλιμένη πλάκα του καναλιού. Στην παράκαμψη αυτή παρεμβάλλεται η ηλεκτροβαλβίδα. Ένας χρονοδιακόπτης ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας. Όταν η ηλεκτροβαλβίδα είναι ανοιχτή μια ποσότητα υγρού περνάει άμεσα προς το δοχείο συλλογής. Όταν όμως είναι κλειστή, η ποσότητα αυτή του υγρού οδηγείται μέσω της κεκλιμένης πλάκας στο δοχείο συλλογής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εξωτερικά επιβαλλόμενη αυξομείωση του πάχους του υμένα με το χρόνο (κύμα στην αρχή του καναλιού). Δηλαδή, το περιοδικό φράξιμο της παράκαμψης αυτής προκαλεί διαταραχή στην είσοδο του καναλιού με μορφή υδραυλικού άλματος. Το υδραυλικό αυτό άλμα διαχωρίζεται κατάντη της ροής εξαιτίας των μη-γραμμικών αλληλεπιδράσεων και δημιουργεί μια σειρά μοναχικών κυμάτων. Το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής μπορεί να ρυθμιστεί από τον λόγο των χρονικών διαστημάτων που η δίοδος μένει ανοιχτή και κλειστή και από την ποσότητα του ρευστού που επιτρέπεται να περνάει διαμέσου του bypass. Η ποσότητα αυτή ρυθμίζεται από τις βάνες (15) που βρίσκονται εκατέρωθεν της ηλεκτροβαλβίδας. Επίσης, ρυθμίζοντας τον συνολικό χρόνο του φαινομένου, μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα της διαταραχής. Το σύστημα διαταραχής που περιγράφηκε μπορεί να παράγει συχνότητες διαταραχής από 0.1 Hz έως και 5 Hz.

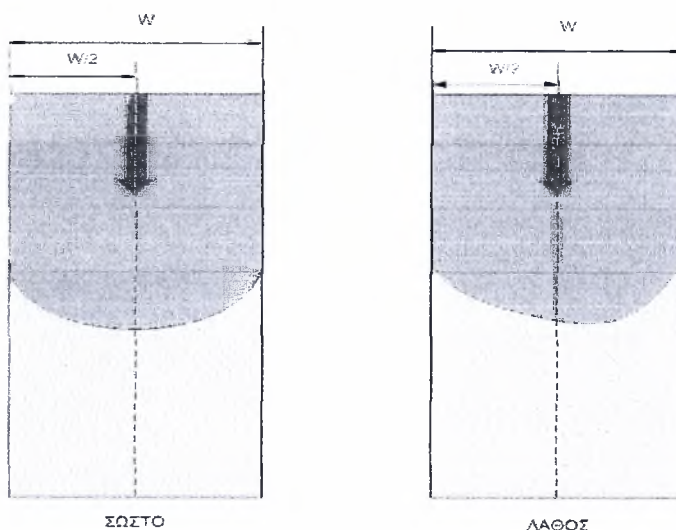


Σχήμα 3.2. Σύστημα διαταραχής.

3.1.3 Ευθυγράμμιση καναλιού ροής

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο κανάλι είναι η ευθυγράμμιση του καναλιού. Για το σκοπό αυτό έχουν τοποθετηθεί στο πλαίσιο που στηρίζεται το κανάλι κατάλληλα περιστρεφόμενα στηρίγματα (14), τα οποία δίνουν τη δυνατότητα μετακίνησης ολόκληρου του συστήματος προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Προκειμένου να ρυθμιστεί και να ελεγχθεί η ευθυγράμμιση του καναλιού ακολουθείται η εξής διαδικασία: Ρυθμίζεται η παροχή του ρευστού ώστε ο υμένας στο κανάλι να είναι σταθερός χωρίς την ύπαρξη εξωτερικής διαταραχής. Η περίοδος του χρονοδιακόπτη και το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής καθορίζονται σε μέτριο μέγεθος. Χαρακτηριστικές τιμές είναι περίπου 5 s ανοικτή και 0.5 s κλειστή η ηλεκτροβαλβίδα, ενώ ρυθμίζεται και η βάνα που βρίσκεται με την ηλεκτροβαλβίδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του μεγέθους της διαταραχής στο σημείο αυτό είναι ποιοτική. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται πάνω στο τοίχωμα ένα μέτωπο της υγρής φάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Σωστή ευθυγράμμιση συνεπάγεται ότι η κορυφή του μετώπου θα βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος. Σε

αντίθετη περίπτωση ρυθμίζονται ανάλογα τα στηρίγματα. Δηλαδή στην περίπτωση, όπως αυτή του σχήματος 3.3, όπου το μέτωπο είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά, δηλώνει ότι περισσότερη μάζα ρευστού βρίσκεται στην πλευρά αυτή οπότε το σημείο αυτό είναι πιο ψηλά από το αντίστοιχο σημείο της αριστερής πλευράς και πρέπει είτε να ανυψωθεί το σημείο αυτό ή να μειωθεί το ύψος από την αριστερή πλευρά. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρι η κορυφή του κύματος να βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος σε όλο το μήκος της πλάκας.



Σχήμα 3.3 ευθυγραμμισμένο και μη ευθυγραμμισμένο κανάλι

Προκειμένου να είναι πιο εύκολα αντιληπτό το μέτωπο του κύματος το ρευστό χρωματίζεται. Πιο συγκεκριμένα, προστίθεται μικρή ποσότητα κατάλληλης χρωστικής ουσίας (ουρανίνη-sodium salt of flurorescein), 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 ουσία αυτή έχει βρεθεί ότι δεν επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών που χρησιμοποιούνται στην εργασία.

Λόγω της ευαισθησίας του συγκεκριμένου συστήματος στήριξης του καναλιού και της έντονης επίδρασης της κακής ευθυγράμμισης στις πειραματικές

μετρήσεις η ευθυγράμμιση του ελεγχόταν στην αρχή κάθε μέρας, μετά την αλλαγή κλίσης του καναλιού.

3.2 Ιδιότητες ρευστών

Ανάλογα με την κλίση επιλέγεται το κατάλληλο ρευστό για τα πειράματα και εισάγεται στο δοχείο συλλογής. Συγκεκριμένα, για τις 5° χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού – γλυκερίνης με 30% γλυκερίνη, ενώ για τις 7°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα 40%, 56%, 66%, 73%, 76% και 80% αντίστοιχα.

Αύξηση του ιξώδους του ρευστού έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ανάπτυξης των δομών και της εξαφάνισης των τρισδιάστατων ασταθειών ακόμα και σε σχετικά μεγάλες γωνίες και αριθμούς Re. Βέβαια η προσθήκη μεγάλου ποσοστού γλυκερίνης θα είχε ως αποτέλεσμα την πολύ αργή εξέλιξη των φαινομένων και σ' αυτή την περίπτωση το μήκος του καναλιού δεν θα ήταν αρκετό για να αναπτυχθούν πλήρως. Οπότε, η επιλογή του ρευστού πρέπει να είναι προσεκτική ώστε να μην εξαχθούν εσφαλμένα συμπεράσματα για την εξέλιξη της ροής.

Ο προσδιορισμός της σύστασης και της πυκνότητας του εκάστοτε διαλύματος έγινε μετρώντας στην αρχή και στο τέλος κάθε πειράματος τον δείκτη διάθλασης του διαλύματος με τη βοήθεια του διαθλασίμετρου (*Abbe 5 Refractometer - Bellingham+Stanley Ltd.*). Σε καμία μέτρηση δεν παρουσιάστηκε μεταβολή του δείκτη διάθλασης.

Στη συνέχεια, ανατρέχοντας στους πίνακες ιδιοτήτων των διαλυμάτων γλυκερίνης – νερού για τη θερμοκρασία των 20° C (Παράρτημα), υπολογιζόταν η τελική σύσταση του μίγματος και στη συνέχεια το κινηματικό ιξώδες χρησιμοποιώντας πάλι τους πίνακες του παραρτήματος με δεδομένη θερμοκρασία 20° C και σύσταση μίγματος αυτήν που προσδιορίστηκε με την προηγούμενη διαδικασία.

Βρέθηκε ότι η πειραματική τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί λειτουργεί για την περίπτωση που η αγωγιμότητα του ρευστού είναι μεταξύ 300-1000 μS . Εξαιτίας του γεγονότος ότι η γλυκερίνη δεν είναι ιδιαίτερα αγωγίμη υπήρχαν περιπτώσεις όπου ήταν απαραίτητη η αύξηση της αγωγιμότητας των διαλυμάτων νερού-γλυκερίνη. Αυτό επιτυγχανόταν με την προσθήκη μικρής ποσότητας αλατιού στο διάλυμα.

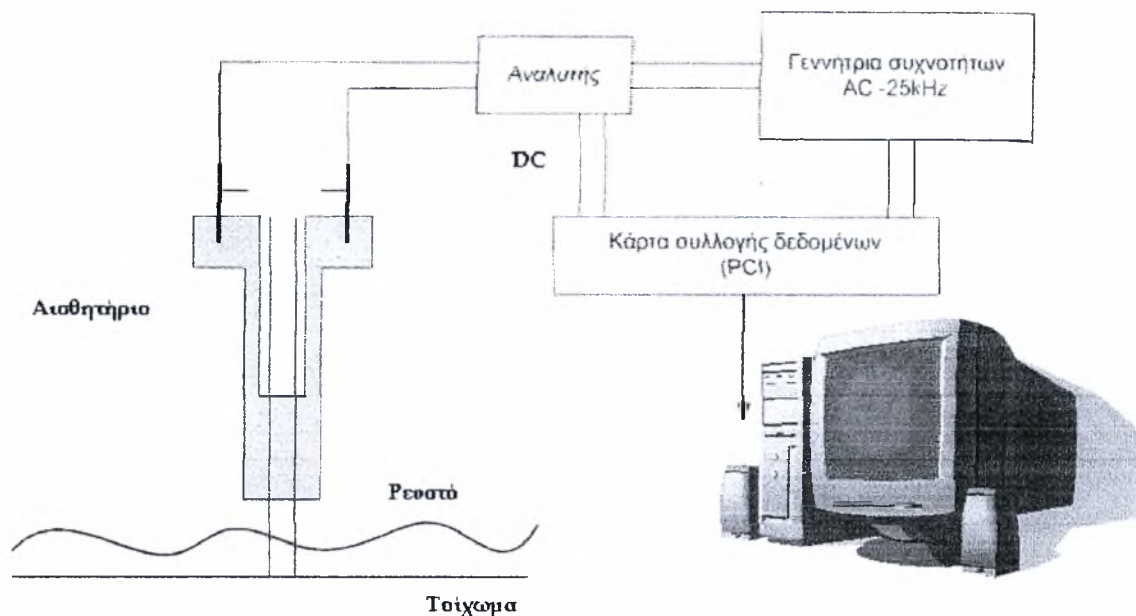
Η μέτρηση της αγωγιμότητας γινόταν χρησιμοποιώντας ένα αγωγιμόμετρο (Consort C834). Για το σκοπό αυτό λαμβανόταν δείγμα από το κανάλι αρκετές φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος.

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

Το πρόβλημα της μη καλής διαβροχής της επιφάνειας του καναλιού από το υγρό, το οποίο είναι δυνατό να παρουσιαστεί σε μεγάλες κλίσεις και μικρούς αριθμούς Re , αντιμετωπίζεται με την επάλειψη του καναλιού με το κολλώδες υλικό Sodium Silicate, το οποίο βρέθηκε ότι επηρεάζει ελάχιστα την αγωγιμότητα των ρευστών (προκαλεί μικρή αύξηση). Τέλος για τον καθαρισμό της συσκευής χρησιμοποιείται υπεροξείδιο του υδρογόνου (Peridrol). Οι δύο τελευταίες ουσίες δεν επηρεάζουν τα μέρη της διάταξης.

3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική

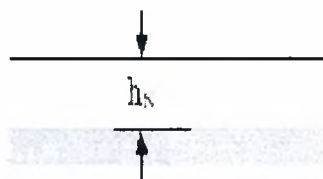
Η αγωγιμομετρική τεχνική [Andritsos, 1986] χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας και των διακυμάνσεων της. Η τεχνική στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δύο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσα τους. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται το μετρητικό που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της τεχνικής. Το μετρητικό τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή και στη συνέχεια με τη βοήθεια κατάλληλης κάρτας συλλογής δεδομένων (Advantech PCI-1710HG, 16-bit) και προγράμματος που δημιουργήθηκε στο Εργαστήριο σε LabView αποθηκεύεται το εξερχόμενο από το μετρητικό σήμα (τάση DC ως προς χρόνο). Το αισθητήριο είναι κατασκευασμένο από Eptalon, ένα υλικό που επεξεργάζεται εύκολα και παρουσιάζει ικανοποιητική θερμική αντοχή, ενώ το σύρμα ήταν από χρωμονικέλιο διαμέτρου 0.4-0.5 mm. Για την τοποθέτηση των μετρητικών χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες γέφυρες, οι οποίες τοποθετήθηκαν πάνω από το τοίχωμα σε 2 διαφορετικές θέσεις (στην αρχή, και στο τέλος). Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα της κατακόρυφης μετακίνησης του μετρητικού ώστε να τοποθετείται πολύ κοντά στο τοίχωμα. Για την ταυτόχρονη λήψη και από τις δυο θέσεις χρησιμοποιήθηκαν ένας αναλυτής (κάθε αναλυτής έχει δύο κανάλια εισόδου). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, βρέθηκε από πειράματα ότι η μέθοδος αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά για τις περιπτώσεις όπου η αγωγιμότητα του ρευστού κυμαίνονταν μεταξύ 300-1000 μS .



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής.

3.3.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σήμα που αποθηκεύεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι η μεταβολή της τάσης ως προς το χρόνο. Προκειμένου να μετατραπεί η τάση σε πάχος υμένα είναι απαραίτητο να γίνουν κάποια πειράματα σε τέτοιες συνθήκες όπου το πάχος του υμένα να είναι γνωστό. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt, η οποία προβλέπει το πάχος του υμένα για την περίπτωση που ο υμένας είναι ευσταθής.



Σχήμα 3.5. Πάχος υγρού υμένα κατά Nusselt για επίπεδο τοίχωμα.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ήταν η εξής : βάσει της γωνίας κλίσης του τοιχώματος υπολογιζόταν ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για επίπεδο τοίχωμα από την

$$\text{εξίσωση : } Re = Re_{crit} = \frac{5}{6} \cot \phi$$

για διαφορες παροχές του ρευστού (Q_0 , kg/s) καταγραφόταν το σήμα (Volt) για περίπου 30 s με ρυθμό δειγματοληψίας 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Η επιλογή των παροχών καθοριζόταν από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Γενικά γινόταν προσπάθεια, οι παροχές που θα γινόταν η βαθμονόμηση να ήταν όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Από την παροχή υπολογιζόταν ο αριθμός Reynolds και το πάχος υμένα Nusselt από τις εξισώσεις :

$$Re = \frac{Q_0}{w \cdot \rho \cdot r} \quad (3.3.3 -1)$$

$$h_N = 10^6 \cdot \left(\frac{3 \cdot Re \cdot r^2}{g \cdot \sin \phi} \right)^{1/3} \quad (3.3.3-2)$$

όπου w το πλάτος του καναλιού και h_N το πάχος του υμένα σε μm . Από τις τιμές τάσης και το πάχος του υμένα με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι γραμμικές σχέσεις που δίνουν την εξάρτηση του πάχους από την τάση και είναι της μορφής :

$$h_i = A \cdot V_i + B \quad (3.3.3-3)$$

όπου A και B σταθερές και ο δείκτης i αντιστοιχεί στα μετρητικά. Με την βοήθεια της εξίσωσης αυτής οποιαδήποτε τάση μπορεί να εκφραστεί σε πάχος υμένα. Η διαδικασία της βαθμονόμησης γινόταν στο τέλος κάθε πειράματος (για κάθε γωνία).

3.4 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων

Αρχικά, ανάλογα με την κλίση, επιλέγεται το κατάλληλο ρευστό για τα πειράματα και εισάγεται στο δοχείο συλλογής. Συγκεκριμένα, για τις 5° χρησιμοποιήθηκε διάλυμα

νερού – γλυκερίνης με 30% γλυκερίνη, ενώ για τις 7°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα 40%, 56%, 66%, 73%, 76% και 80% . Τα πειράματα ξεκίνησαν δηλαδή με ένα διάλυμα 30% γλυκερίνης και ανάλογα με τα αποτελέσματα προστέθηκε ποσότητα γλυκερίνης ώστε να είναι πιο σταθερός ο υμένας σε μεγαλύτερες γωνίες. Επίσης, στο ρευστό προστίθεται και μικρή ποσότητα χρωστικής ουσίας για την οπτικοποίηση της ροής.

Στη συνέχεια τίθεται σε λειτουργία η αντλία και αφήνεται το σύστημα να λειτουργήσει επί 30 min. Η αντλία ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η στάθμη στο δοχείο υπερχειλίσσης να είναι σταθερή. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος τίθεται σε λειτουργία και η ηλεκτροβαλβίδα για να εισέλθει ρευστό σε όλους τους σωλήνες και να μην υπάρχει καθόλου αέρας. Ακολουθεί το σημαντικότερο βήμα όλης της πειραματικής διαδικασίας, η ευθυγράμμιση του καναλιού. Σημαντική βοήθεια στην ευθυγράμμιση του καναλιού διαδραματίζει η χρωστική ουσία που έχει προστεθεί στο ρευστό. Ο τρόπος ευθυγράμμισης έχει περιγραφεί προηγουμένως.

Αφού ευθυγραμμιστεί το κανάλι, αρχίζει η πειραματική διαδικασία με τη ρύθμιση της ηλεκτροβαλβίδας, συγκεκριμένα 5.5 s ανοικτή και 0.5 s κλειστή. Ενώ το ύψος της διαταραχής ρυθμίζεται κυρίως από τη βάνα που βρίσκεται μετά την ηλεκτροβαλβίδα. Η επιλογή της συχνότητας διαταραχής στηρίζεται στο γεγονός ότι πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, θεωρητικά ίση με μηδέν [Liu et al., 1993].

Ο χρόνος δειγματοληψίας κυμαίνεται μεταξύ 20-30 s, ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Η επιλογή του χρόνου έγινε ώστε να αποθηκεύονται αρκετοί περίοδοι και έτσι να ελέγχεται η επαναληπτικότητα των φαινομένων και να απορρίπτονται προβληματικές μετρήσεις. Οι συνηθέστεροι λόγοι για τους οποίους πειραματικά δεδομένα μπορεί να αποκλειστούν είναι η έντονη επίδραση του

εξωτερικού θορύβου, η ύπαρξη κάποιας ακαθαρσίας ή φυσαλίδας στο πεδίο ροής και ο εσφαλμένος τρόπος λειτουργίας της ηλεκτροβαλβίδας.

Μετά την ευθυγράμμιση και τη διαδικασία των πειραμάτων, ακολουθούν τα πειράματα βαθμονόμησης. Στα πειράματα αυτά αρχικά η παροχή ρυθμίζεται σε σχετικά μικρές τιμές και αυξάνεται σταδιακά μέχρι να φανεί κάποια διαταραχή λόγω φυσικού θορύβου στο λαμβανόμενο σήμα. Κύριος στόχος κατά τη διάρκεια βαθμονόμησης ήταν να ληφθούν σήματα όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Μια πρωταρχική εκτίμηση του κρίσιμου Re γινόταν από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία που αναφέρθηκε προηγουμένως.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής λεπτού υγρού υμένα πάνω σε περιοδικά επίπεδο τοίχωμα. Στόχος των πειραμάτων είναι η επιβεβαίωση της εξίσωσης που δίνει τη μεταβολή του κρίσιμου αριθμού Reynolds συναρτήσει της γωνίας κλίσης. Το γεγονός αυτό καθιστά αυτόματα ορθή τη λειτουργία της πειραματικής τεχνικής και των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της μετάβασης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή. Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση των πρωτογενών δεδομένων του πειράματος, δηλαδή της εξέλιξης του πάχους του υμένα με το χρόνο. Στη συνέχεια, γίνεται ο προσδιορισμός της πειραματικής τιμής του κρίσιμου αριθμού Reynolds και συγκρίνεται με την θεωρητική για επίπεδο τοίχωμα. Τέλος, παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας φ στον κρίσιμο αριθμό Reynolds.

4.1 Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο

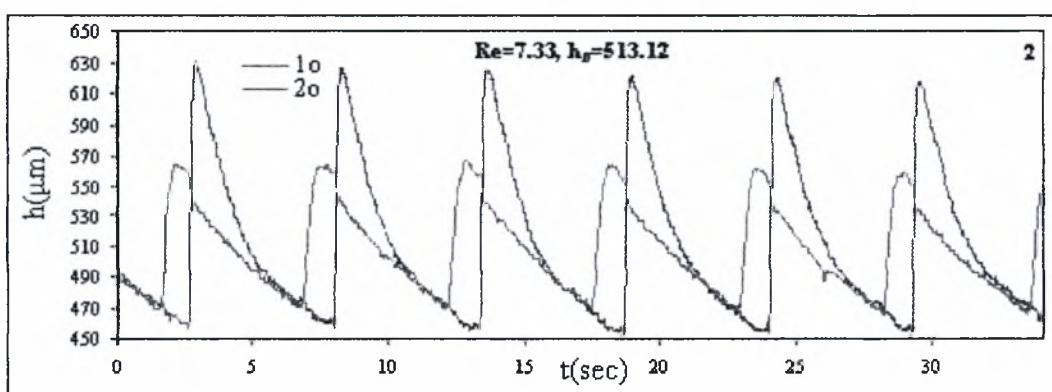
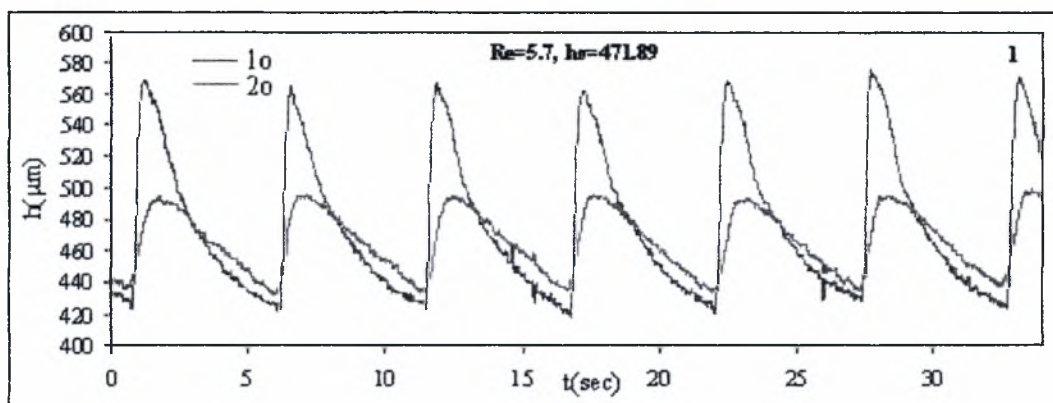
Τα πειράματα έγιναν πάνω σε επίπεδη πλάκα για γωνίες κλίσης 5° , 7° , 10° , 15° , 20° , 25° και 30° . Σε κάθε γωνία κλίσης μετρήθηκαν 10-12 διαφορετικές τιμές παροχών, δηλαδή 8-12 τιμές του αριθμού Reynolds. Η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή συνέβαινε ολόένα σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds με την αύξηση της γωνίας κλίσης, όπως ήταν αναμενόμενο από τη θεωρία.

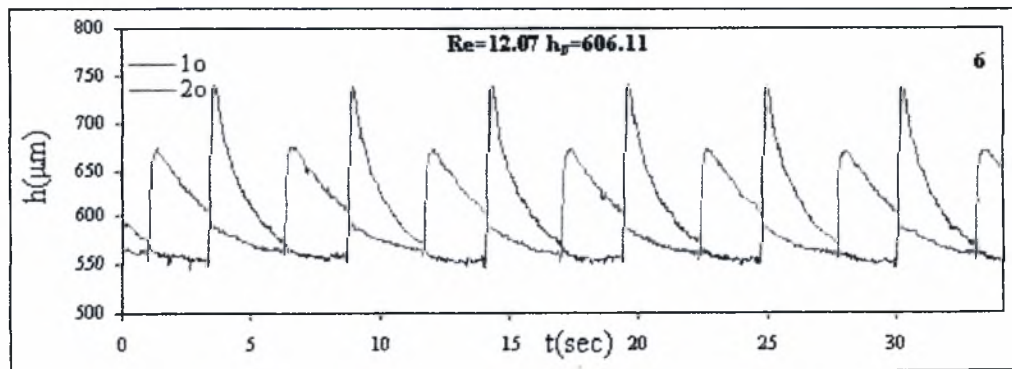
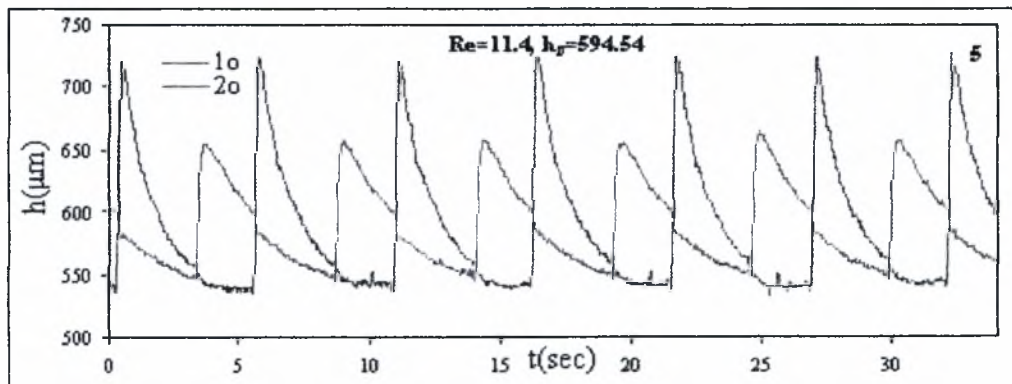
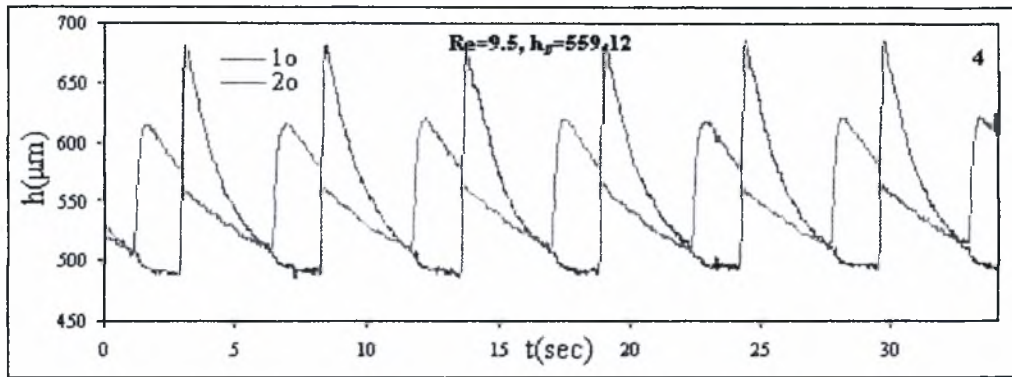
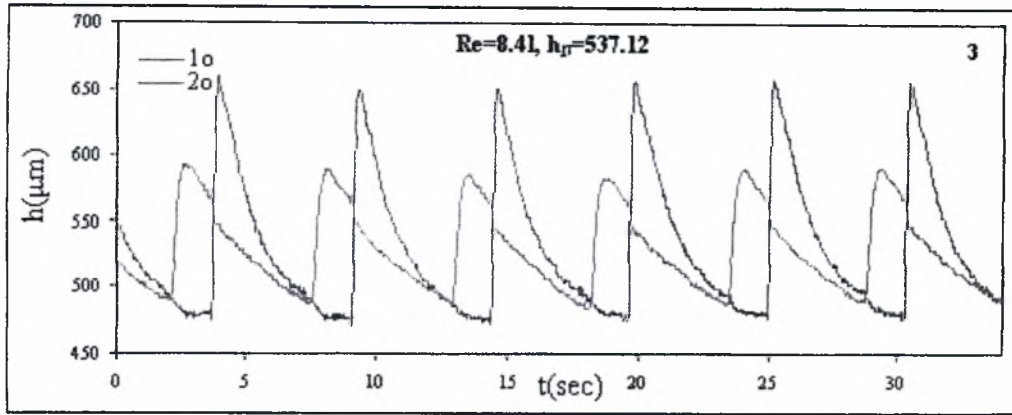
Τα πρωτογενή δεδομένα είναι χρονοσειρές της τάσης στους αισθητήρες αγωγιμότητας. Έπειτα από εφαρμογή της εξ. (3.3.3-3) σε όλα τα πειραματικά

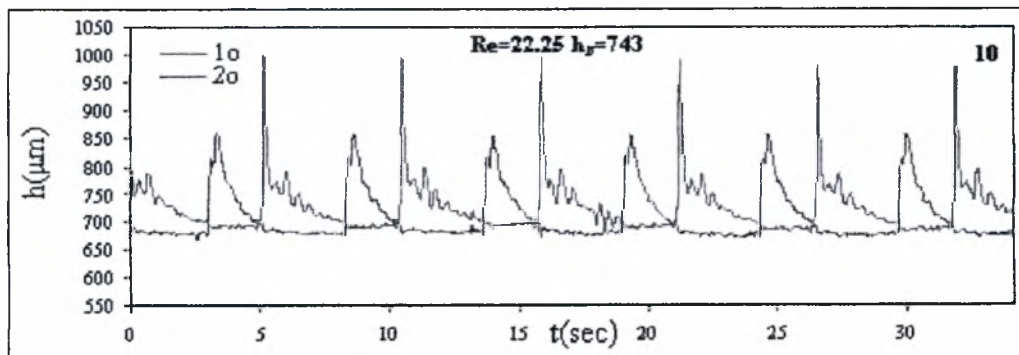
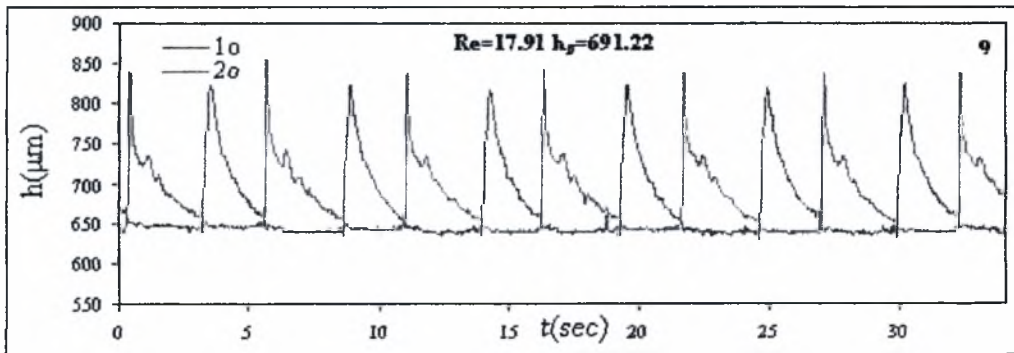
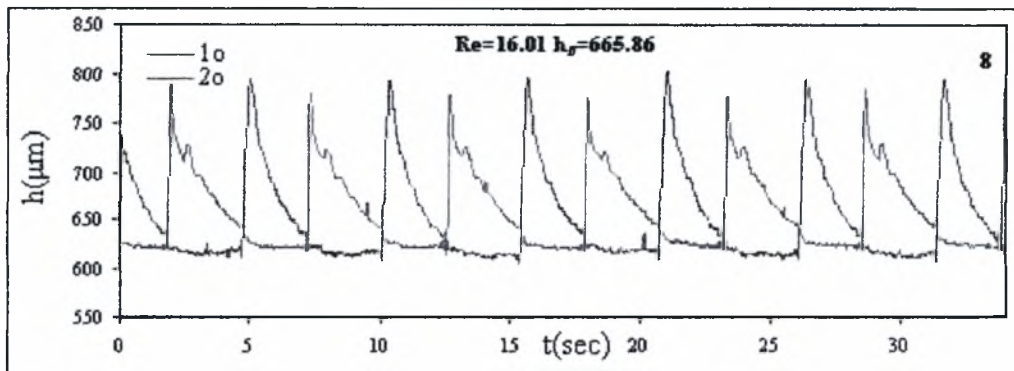
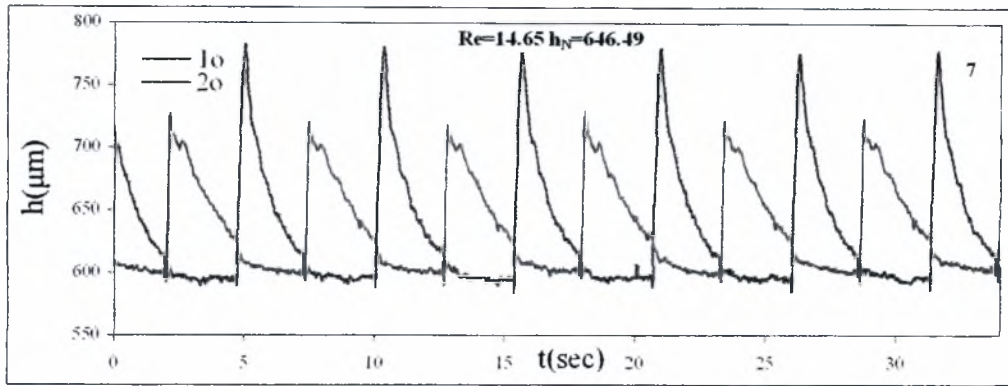
αποτελέσματα προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές του πάχους υμένα. Τα διαγράμματα του πάχους του υμένα με το χρόνο για κάθε κλίση παρουσιάζονται παρακάτω.

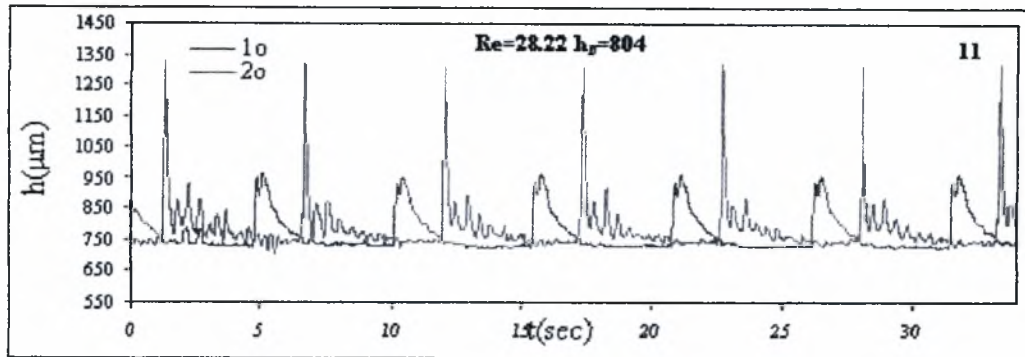
4.1.1 Αποτελέσματα στις 5 μοίρες.

Για τα πειράματα των 5°, χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 30% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 5° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 9.53, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 5.7 έως 28.22. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την χρονική εξέλιξη του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.





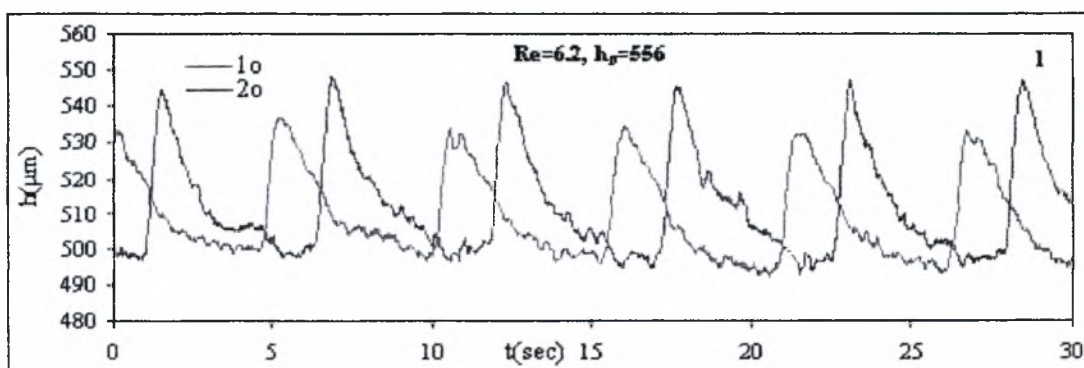


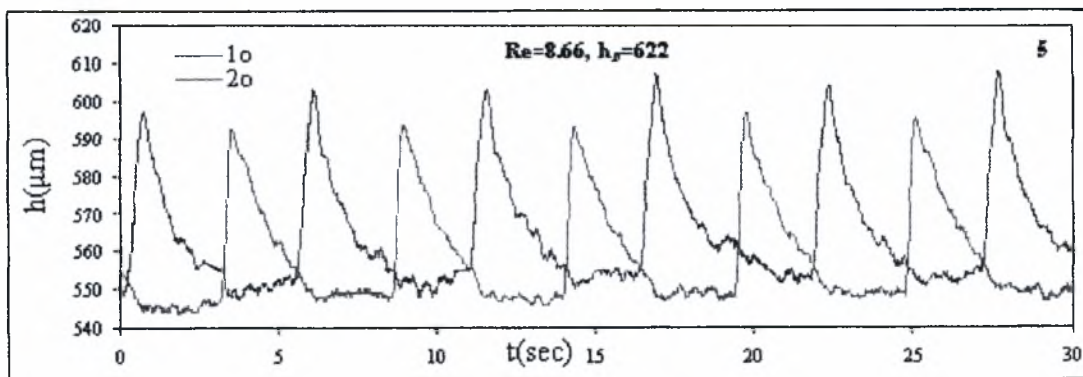
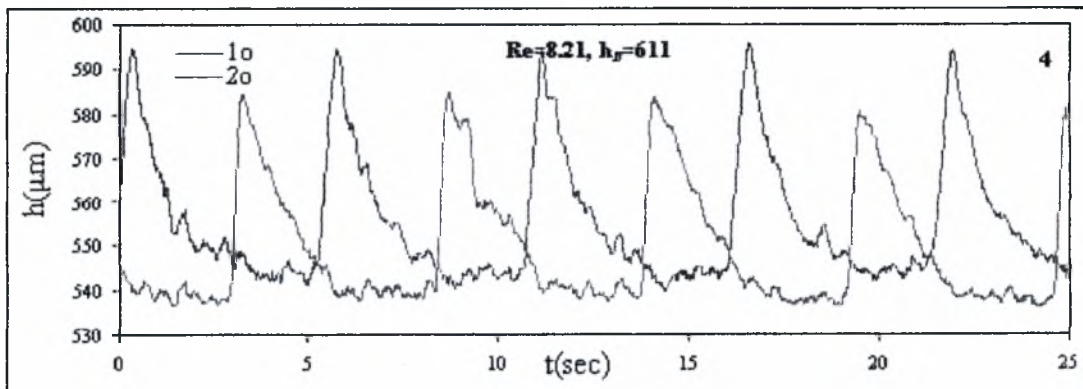
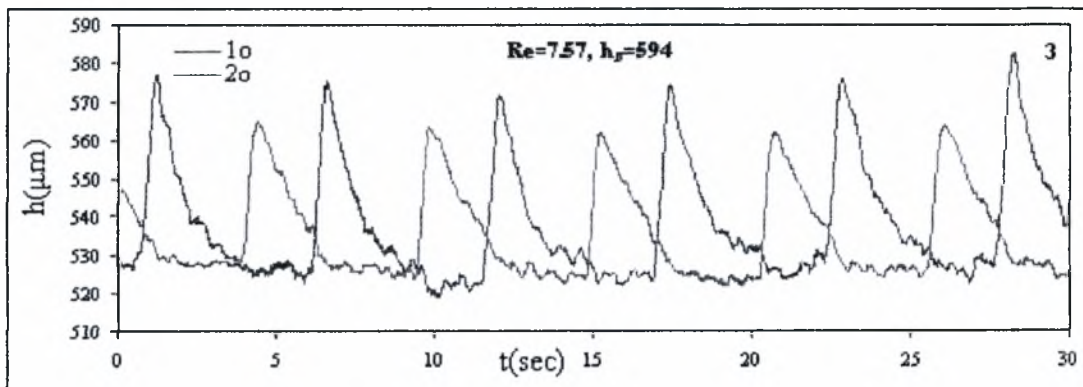
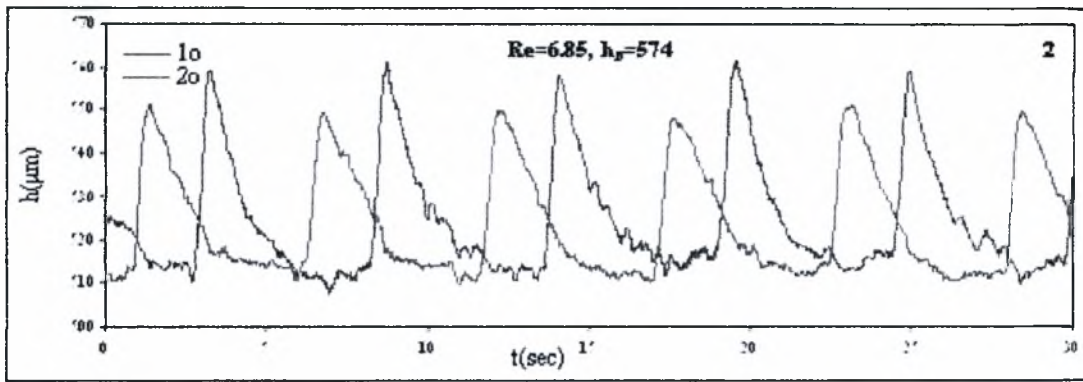


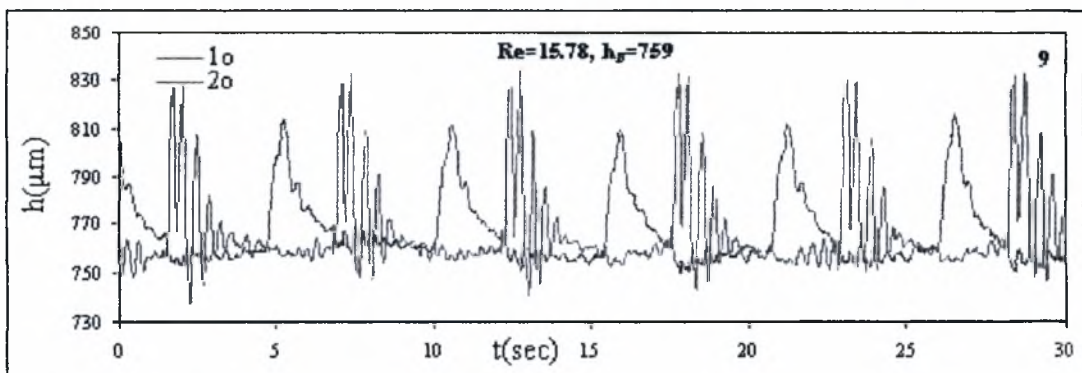
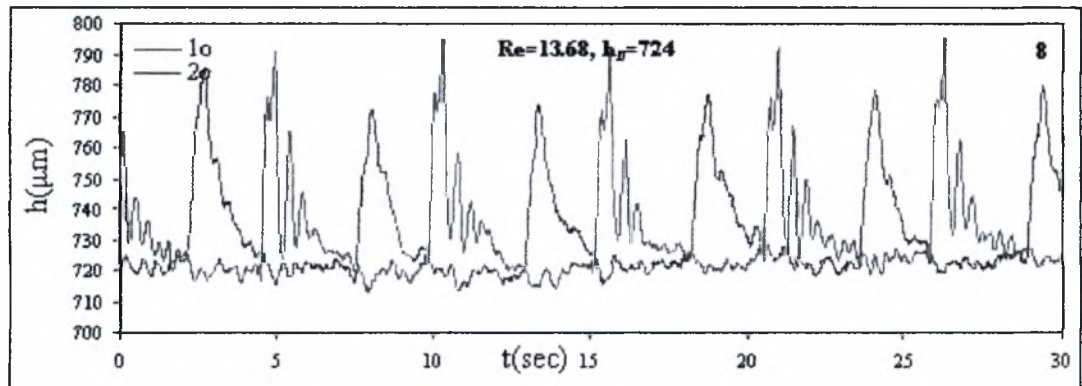
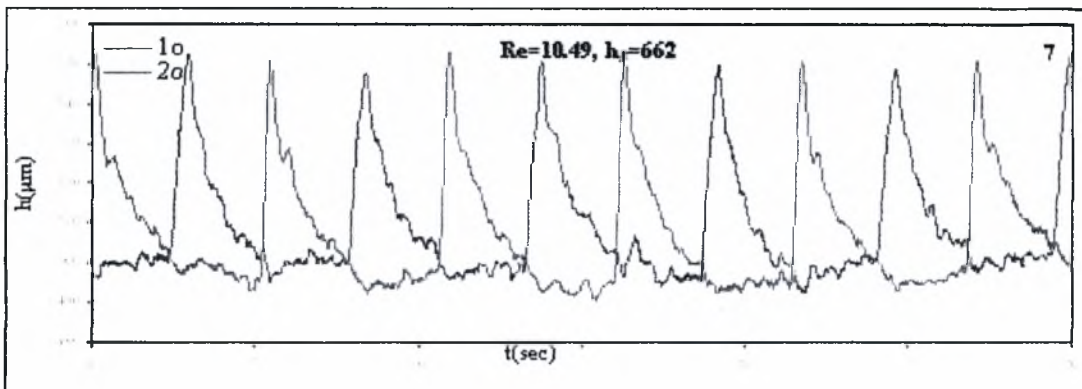
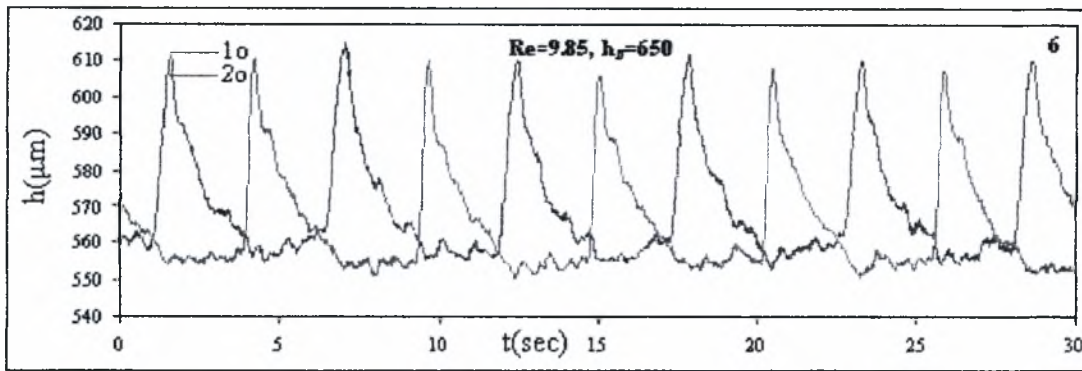
Σχήμα 4.1.1 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής : 1ο $x_0=15$ cm, 2ο $x_0=65$ cm. 1) $Re = 5.7$, 2) $Re = 7.33$, 3) $Re = 8.41$, 4) $Re = 9.5$, 5) $Re = 11.4$, 6) $Re = 12.07$, 7) $Re = 14.65$, 8) $Re = 16.01$, 9) $Re = 17.91$, 10) $Re = 22.25$, 11) $Re = 28.22$

4.1.2 Αποτελέσματα στις 7 μοίρες.

Για τα πειράματα των 7° , χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 40% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 7° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 6.79, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 6.2 έως 15.78. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.



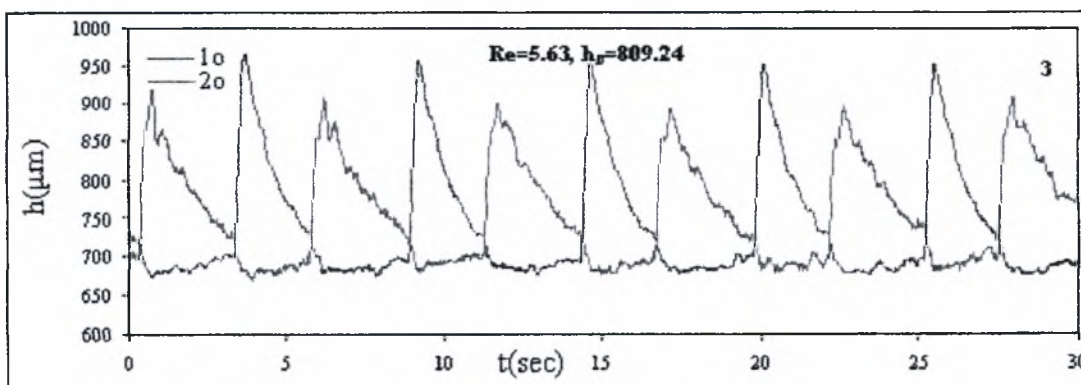
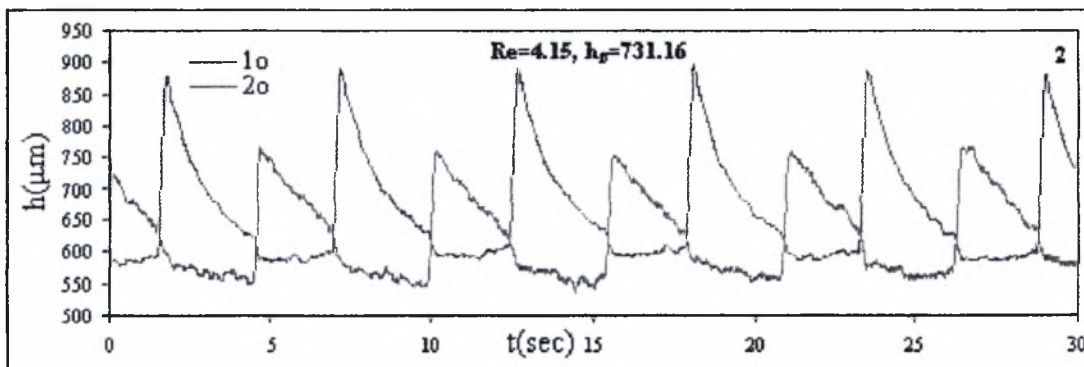
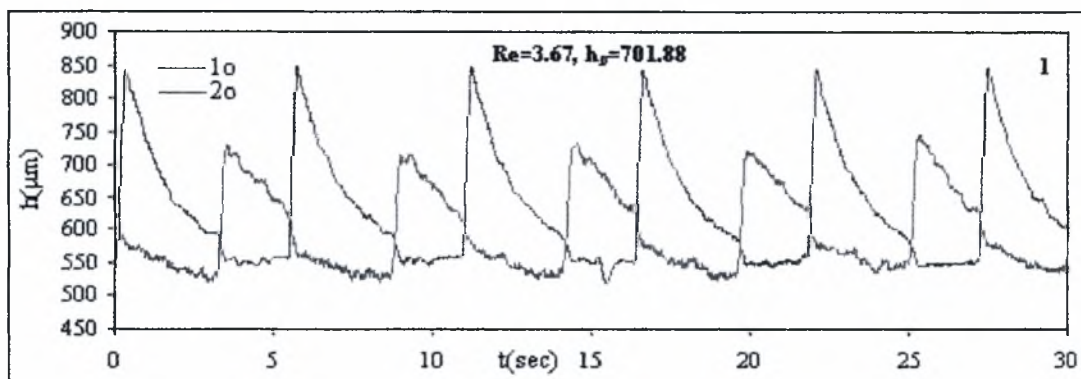


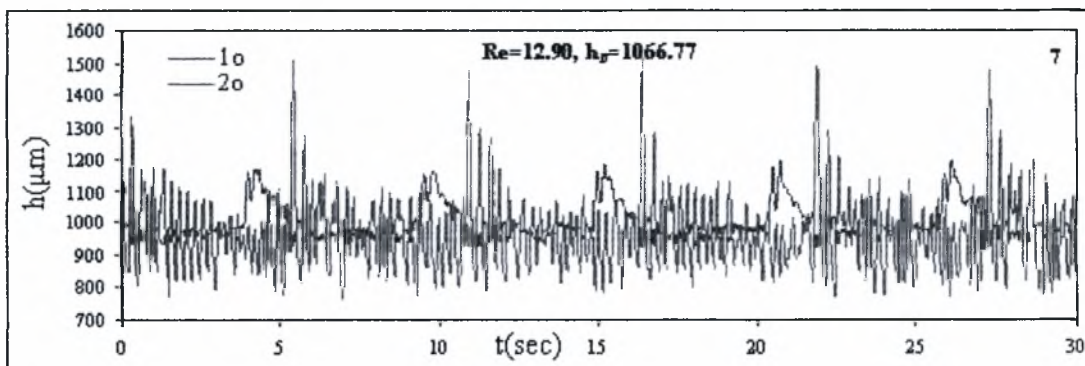
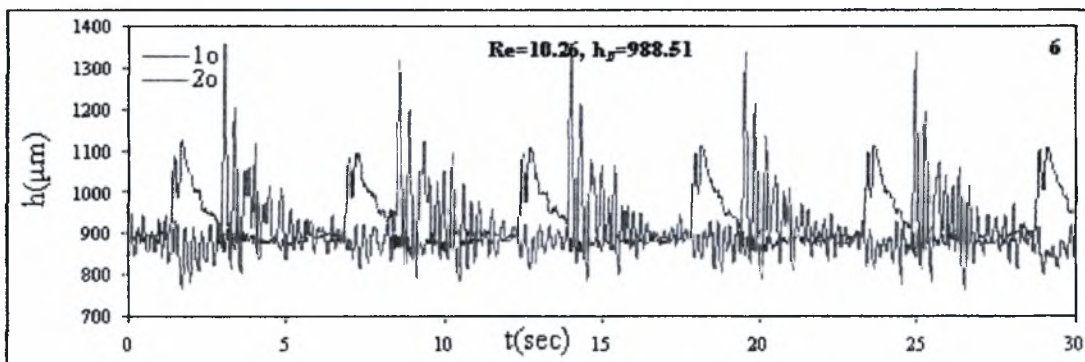
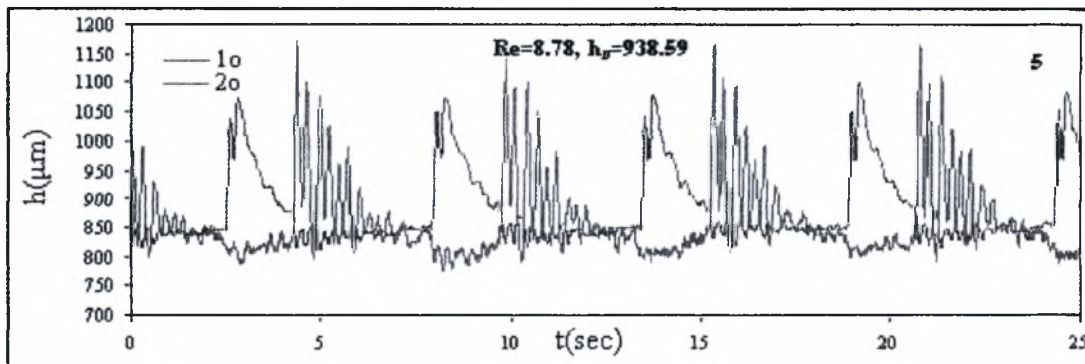
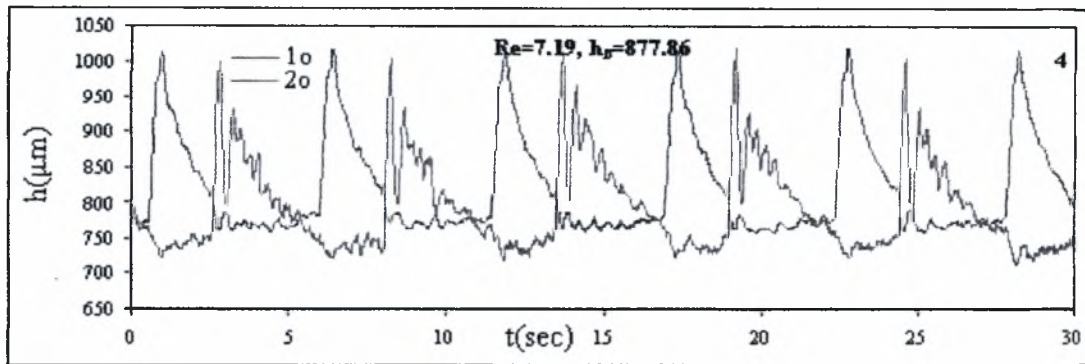


Σχήμα 4.1.2 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής : 1ο $x_0=15$ cm, 2ο $x_0=65$ cm. 1) $Re = 6.2$, 2) $Re = 6.85$, 3) $Re = 7.57$, 4) $Re = 8.21$, 5) $Re = 8.66$, 6) $Re = 9.85$, 7) $Re = 10.49$, 8) $Re = 13.68$, 9) $Re = 15.78$

4.1.3 Αποτελέσματα στις 10 μοίρες.

Για τα πειράματα των 10°, χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 56% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 10° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 4.73, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 3.67 έως 12.90. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

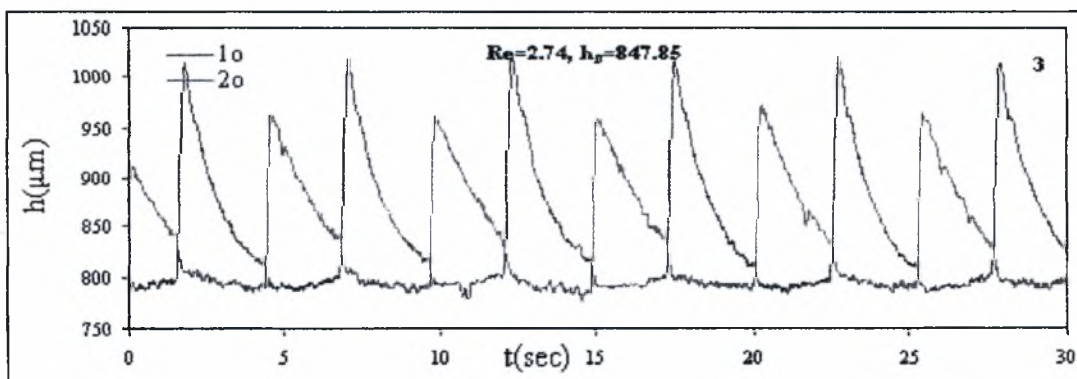
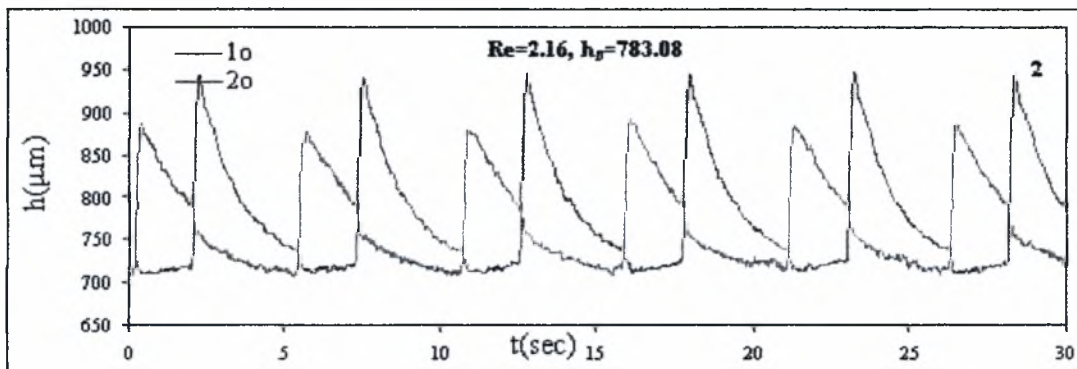
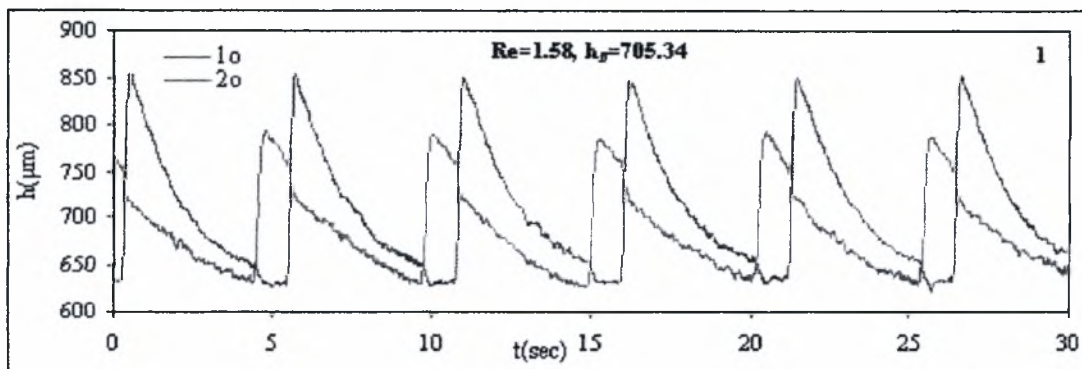


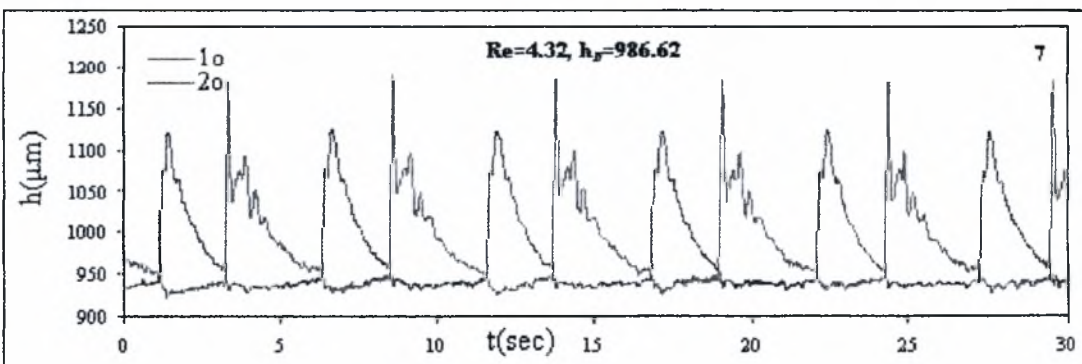
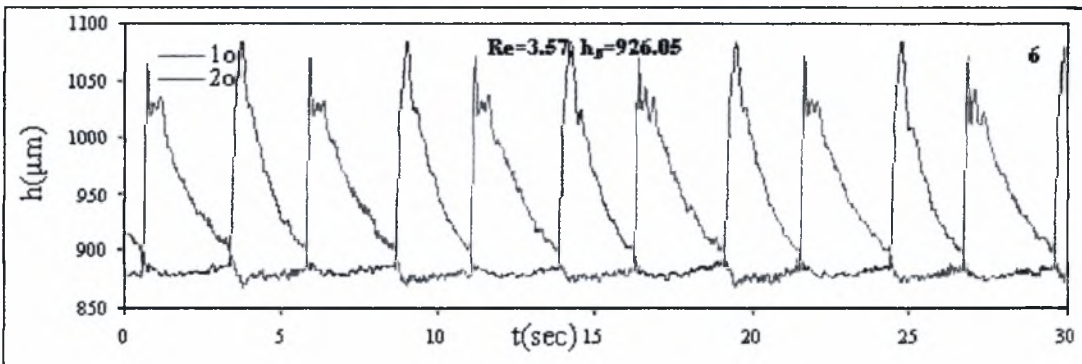
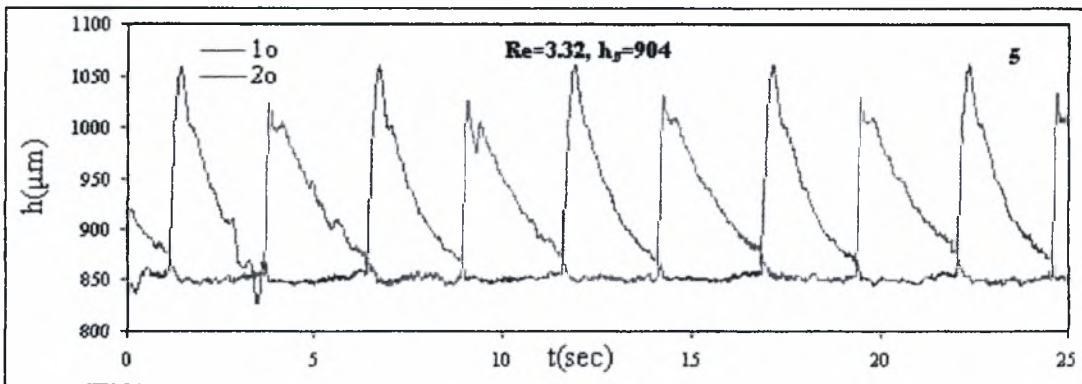
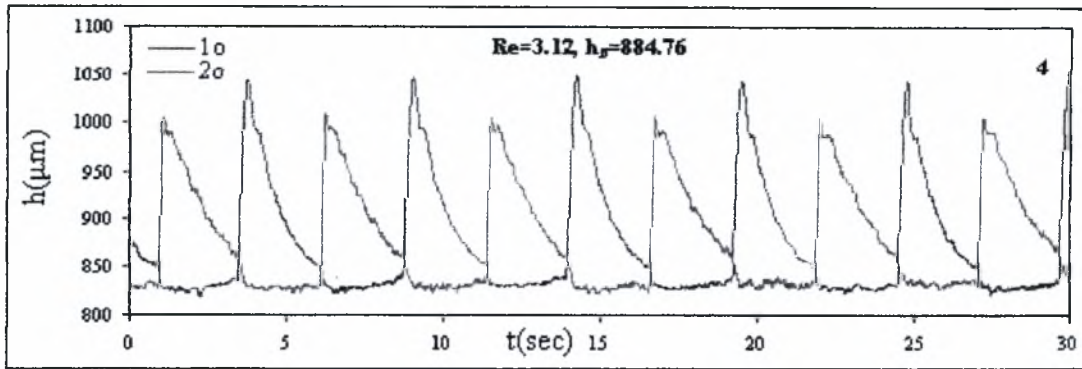


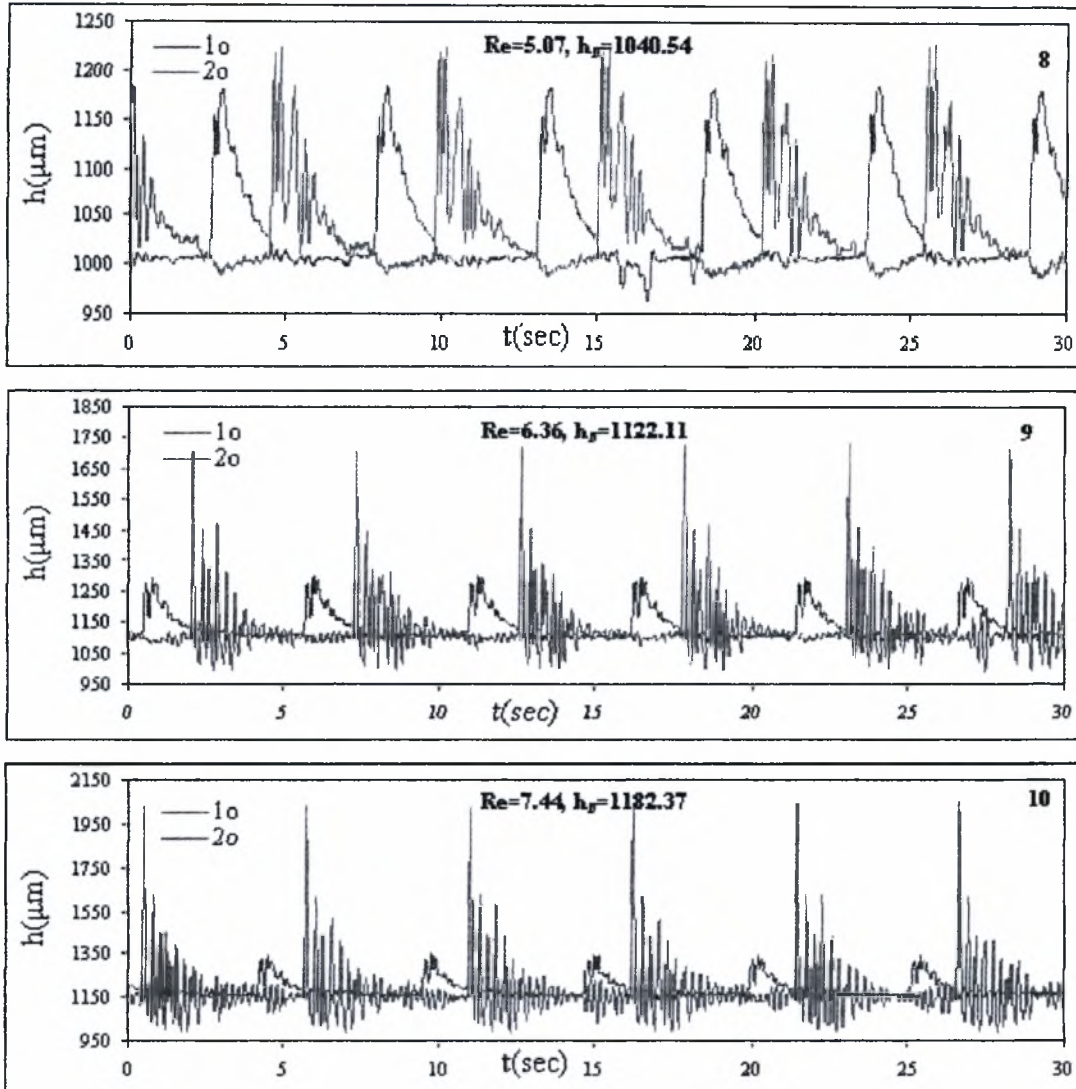
Σχήμα 4.1.3 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατόπιν της ροής : 1ο $x_0=15$ cm, 2ο $x_0=65$ cm. 1) $Re = 3.67$, 2) $Re = 4.15$, 3) $Re = 5.63$, 4) $Re = 7.19$, 5) $Re = 8.78$, 6) $Re = 10.26$, 7) $Re = 12.90$

4.1.4 Αποτελέσματα στις 15 μοίρες.

Για τα πειράματα των 15°, χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 66% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 15° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 3.11, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 1.58 έως 7.44. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.



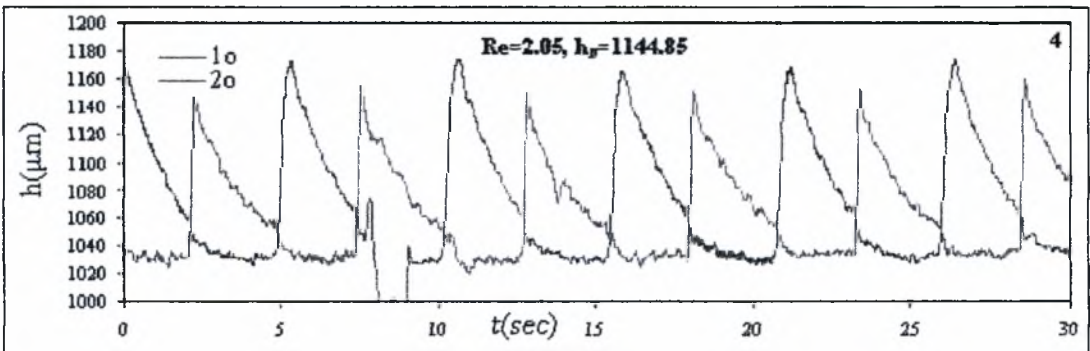
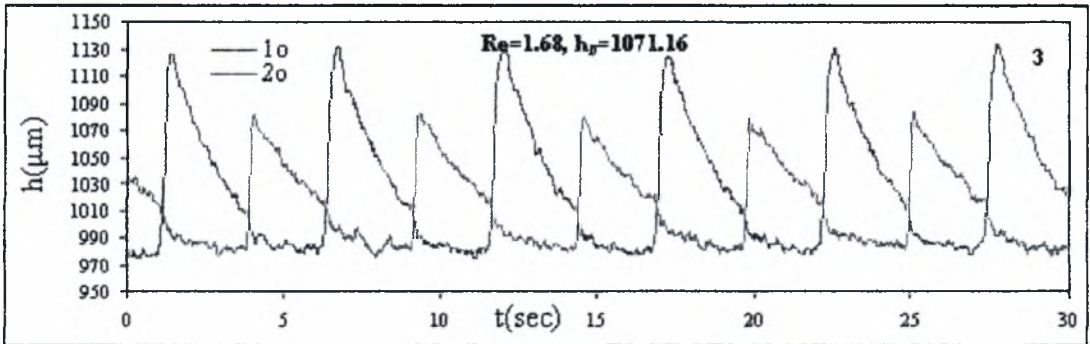
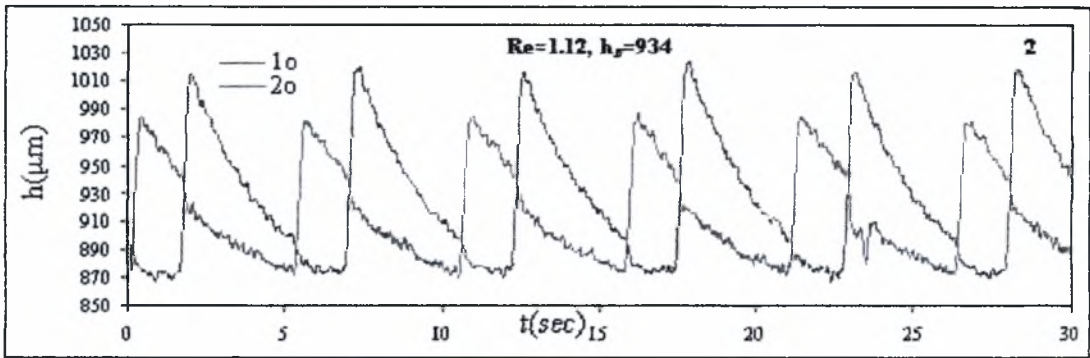
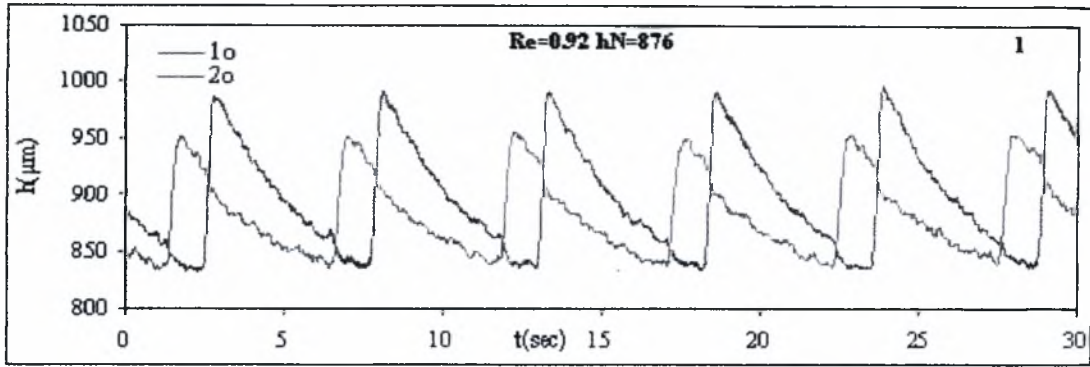


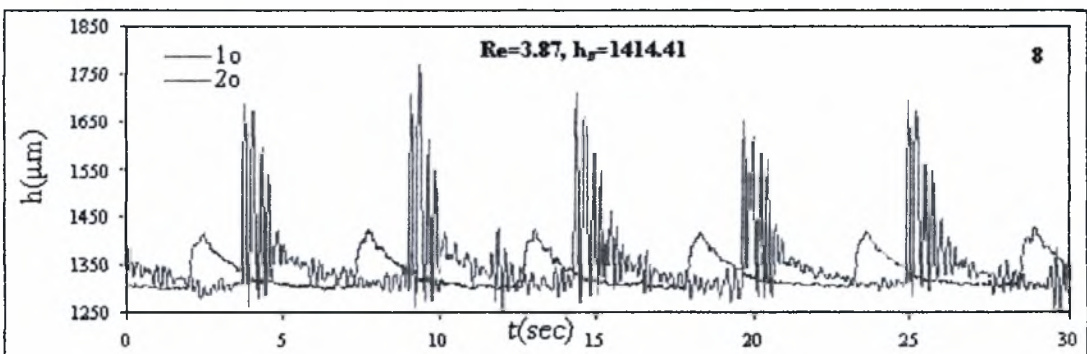
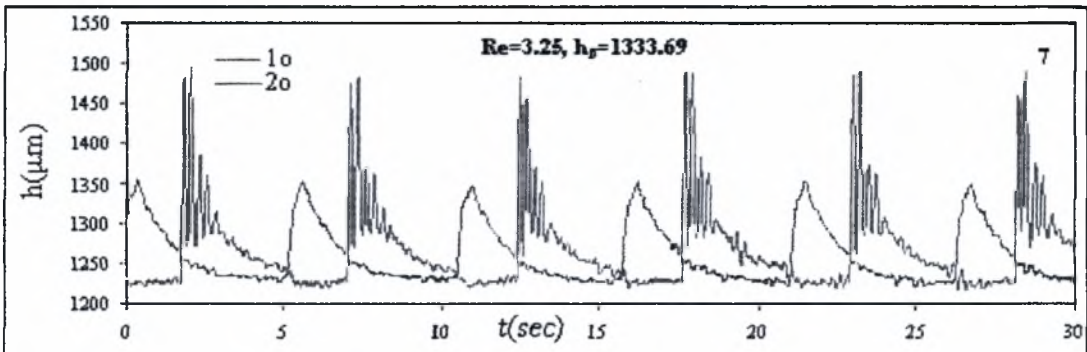
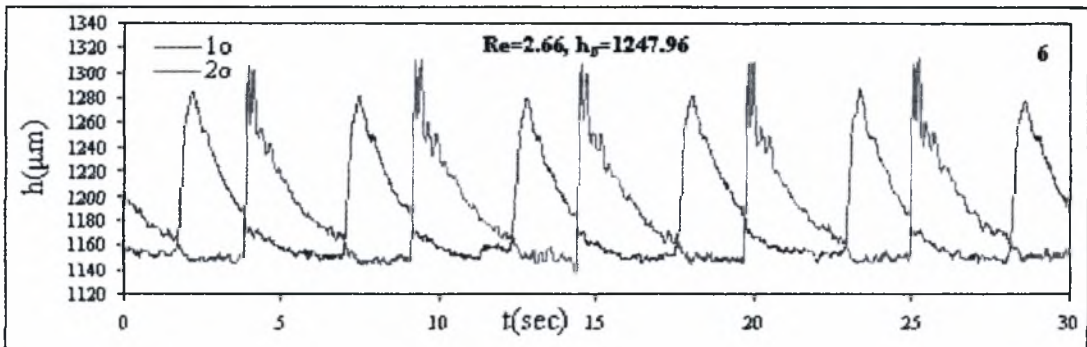
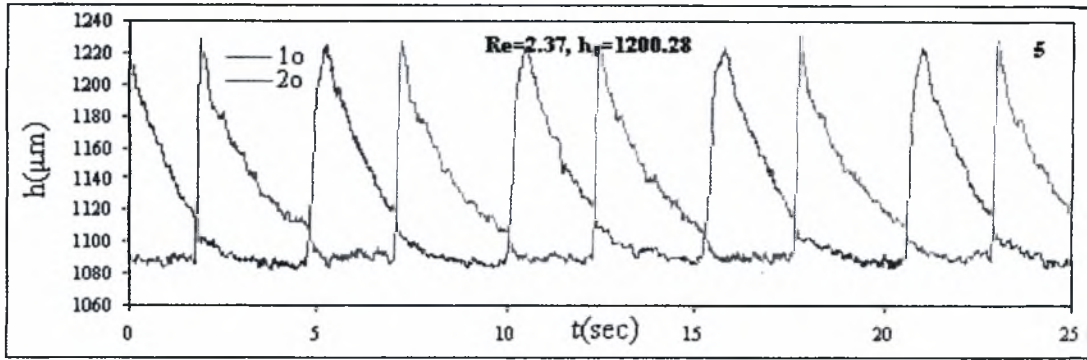


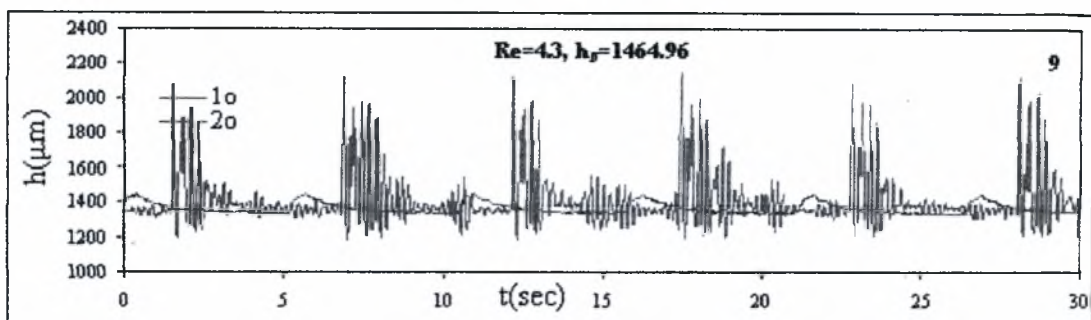
Σχήμα 4.1.4 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δύο θέσεις κατόντη της ροής : 1ο $x_0=15$ cm, 2ο $x_0=65$ cm. 1) $Re = 1.58$, 2) $Re = 2.16$, 3) $Re = 2.74$, 4) $Re = 3.12$, 5) $Re = 3.32$, 6) $Re = 3.57$, 7) $Re = 4.32$, 8) $Re = 5.07$, 9) $Re = 6.36$, 10) $Re = 7.44$

4.1.5 Αποτελέσματα στις 20 μοίρες.

Για τα πειράματα των 20° , χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 73% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 20° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 2.29, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 0.92 έως 5.73. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.



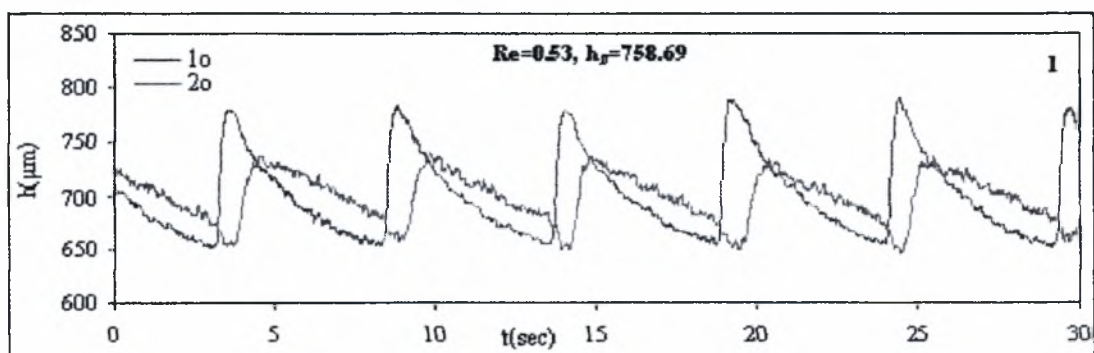


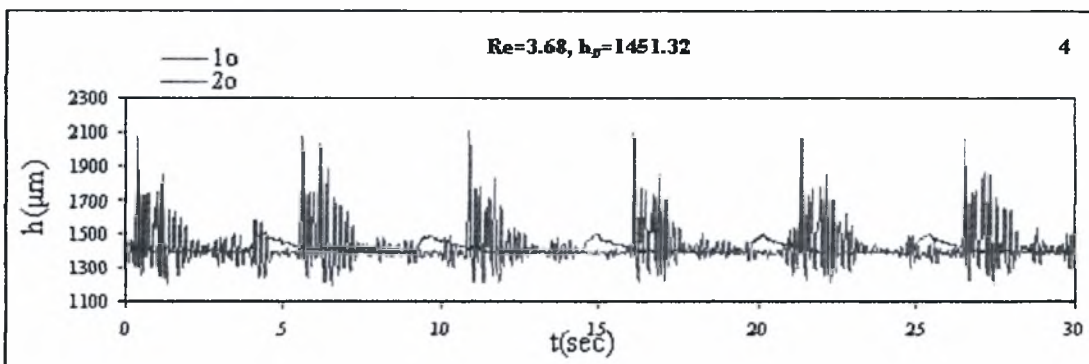
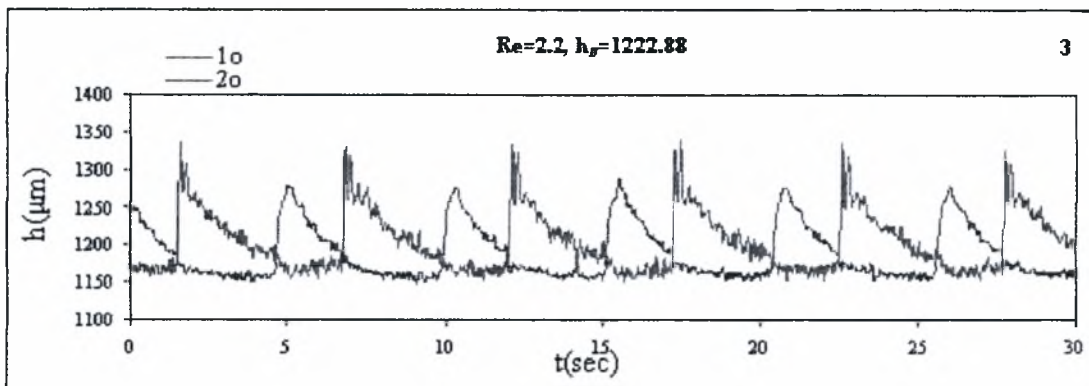
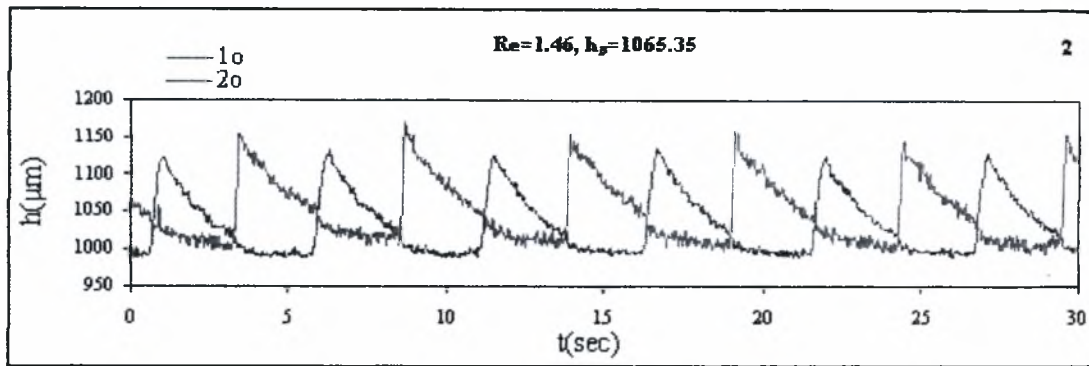


Σχήμα 4.1.5 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο $x_0=15$ cm, 2ο $x_0=65$ cm. 1) $Re = 0.92$, 2) $Re= 1.12$, 3) $Re = 1.68$, 4) $Re= 2.05$, 5) $Re= 2.37$, 6) $Re= 2.66$, 7) $Re= 3.25$, 8) $Re= 3.87$, 9) $Re= 4.3$

4.1.6 Αποτελέσματα στις 25 μοίρες.

Για τα πειράματα των 25° , χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 76% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 25° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 1.79, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 0.53 έως 3.68. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds

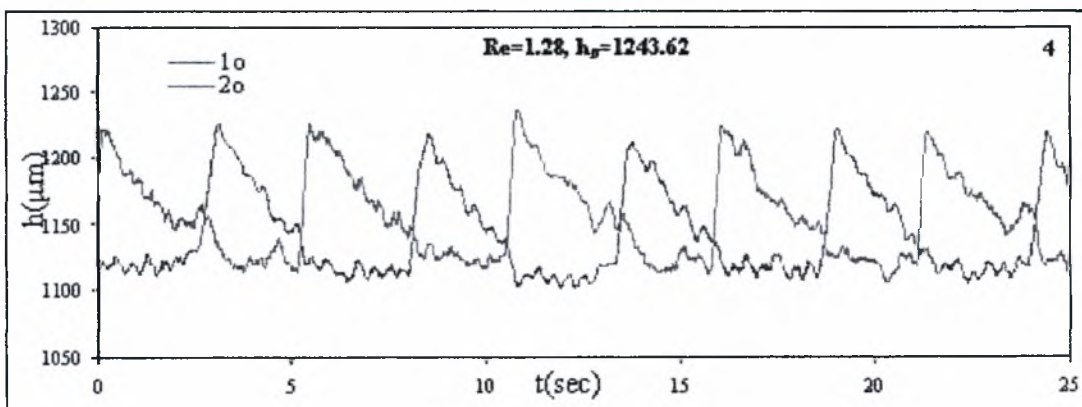
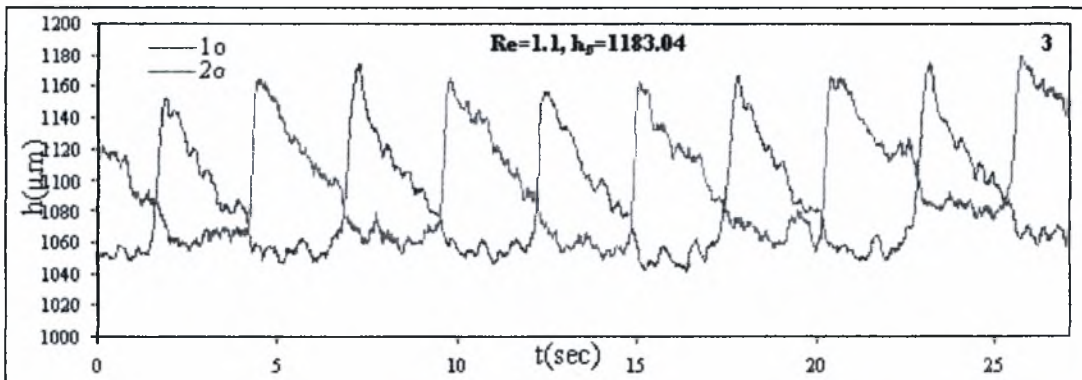
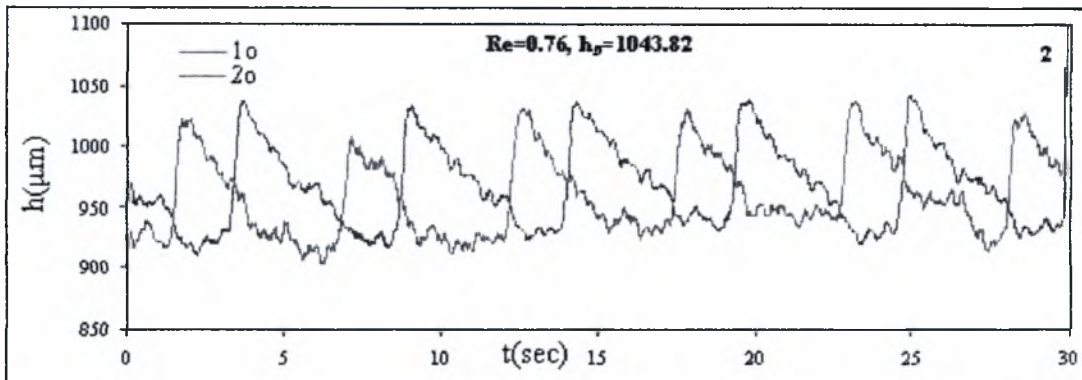
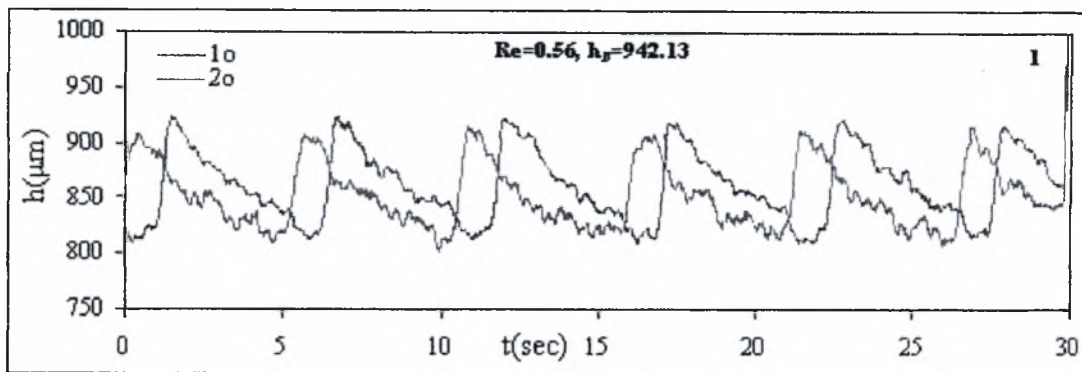


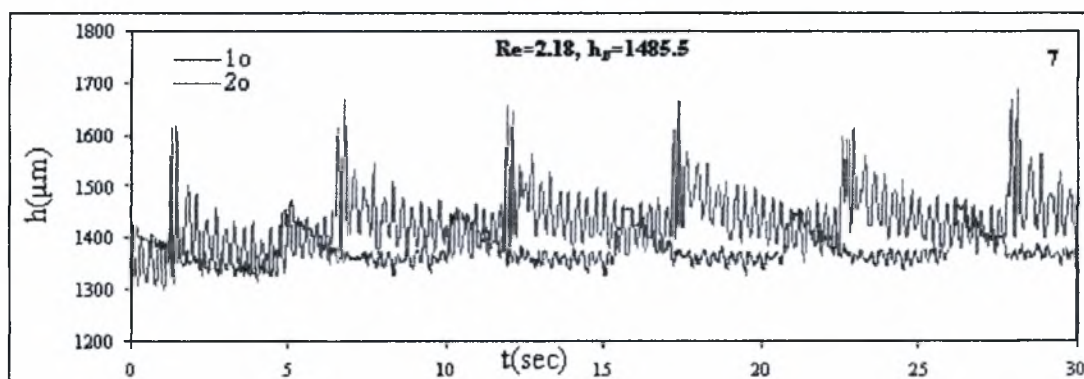
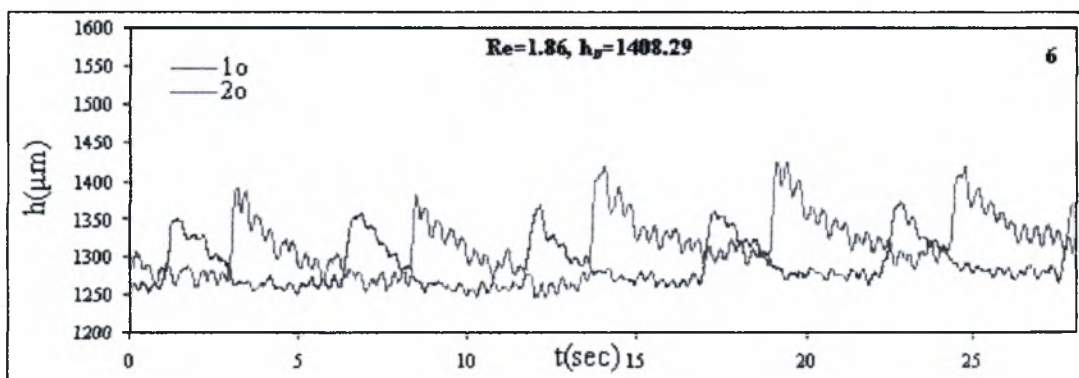
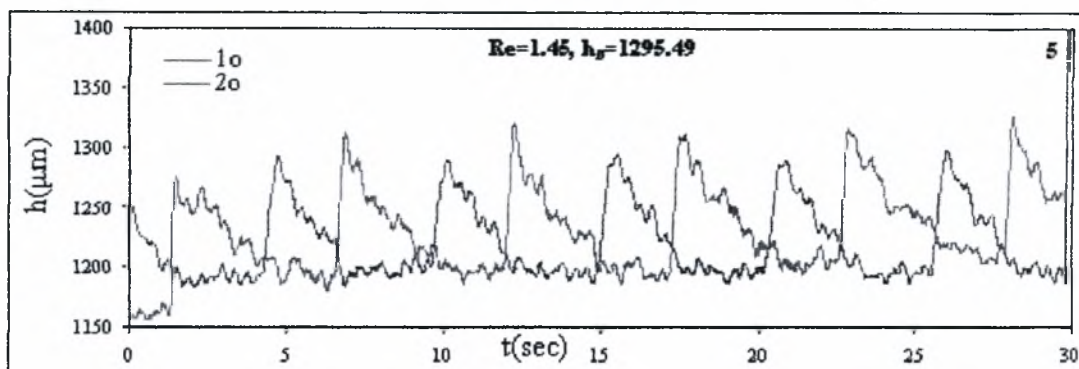


Σχήμα 4.1.6 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δύο θέσεις κατά τη της ροής : 1ο $x_0=15$ cm, 2ο $x_0=65$ cm. 1) $Re=0.53$, 2) $Re=1.46$, 3) $Re=2.2$, 4) $Re=3.68$

4.1.7 Αποτελέσματα στις 30 μοίρες.

Για τα πειράματα των 30°, χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 80% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 30° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 1.44, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 0.56 έως 3.43. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds

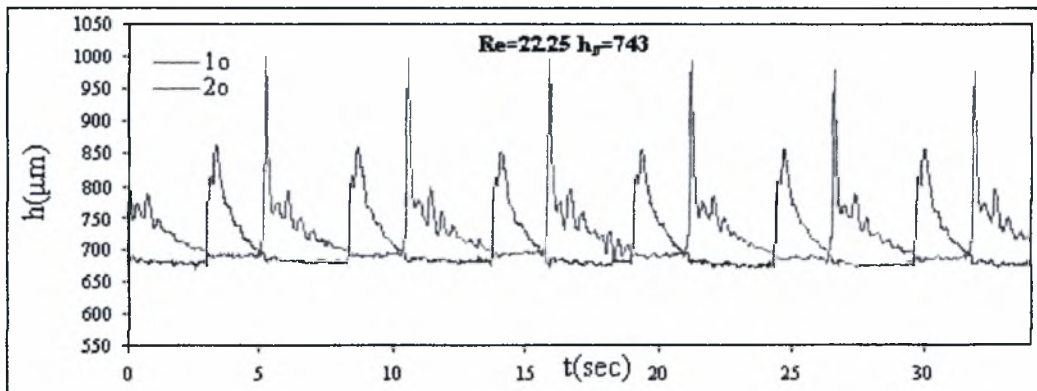
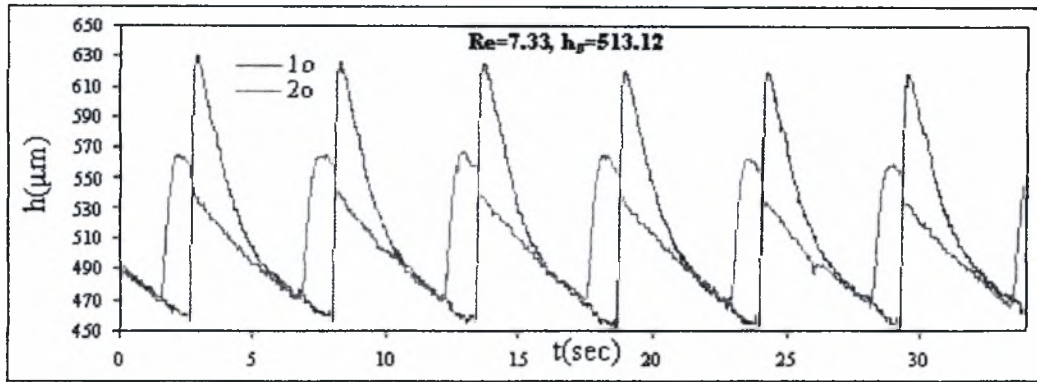




Σχήμα 4.1.7 : Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις καάντη της ροής : 1ο $x_0=15$ cm, 2ο $x_0=65$ cm. 1) $Re = 0.56$, 2) $Re = 0.76$, 3) $Re = 1.1$, 4) $Re = 1.28$, 5) $Re = 1.45$, 6) $Re = 1.86$, 7) $Re = 2.18$

4.1.8 Μετάβαση από την ευστάθεια στην αστάθεια

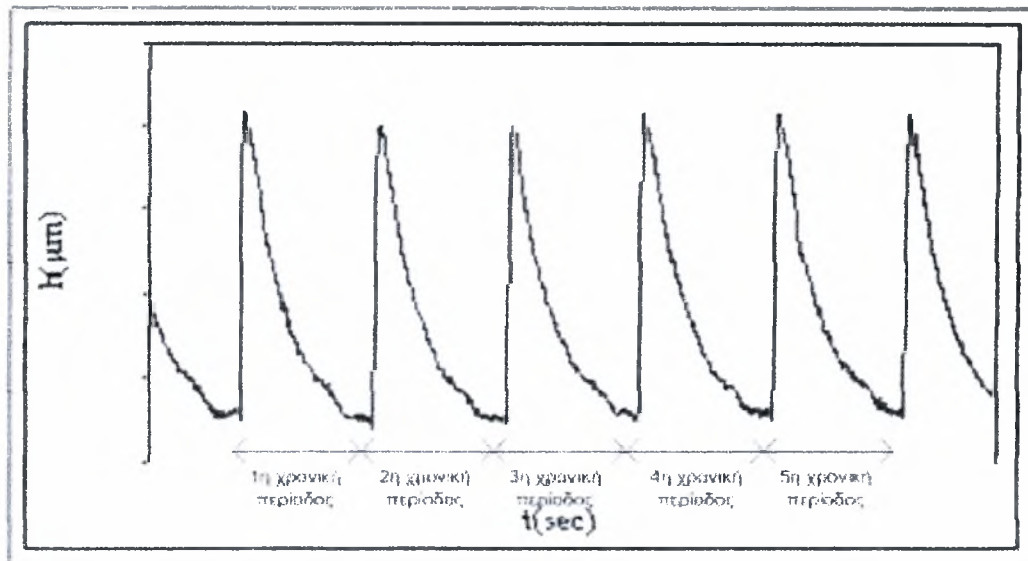
Για να κατανοήσουμε στα παραπάνω σχήματα τις περιπτώσεις ευσταθείας και αστάθειας, παραθέτουμε δυο παραδείγματα από τα διαγράμματα των 5 μοιρών.



Φαίνεται καθαρά ότι στο πρώτο διάγραμμα υπάρχει ευστάθεια διότι το μέγιστο πάχος υμένα που λαμβάνεται στο πρώτο μετρητικό μειώνεται αισθητά στο δεύτερο μετρητικό. Αντιθέτως, στο δεύτερο, φαίνεται η έναρξη δημιουργίας αστάθειας, διότι το μέγιστο πάχος υμένα αυξάνεται *οριακά* από το πρώτο στο δεύτερο μετρητικό.

4.2 Προσδιορισμός κρίσιμου Re (Re_{cr})

Αρχικά απομονώσαμε την κάθε μέτρηση, για κάθε αριθμό Reynolds σε 5 χρονικές περιόδους όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4.2 : Διαχωρισμός του σήματος σε χρονικές περιόδου

Στη συνέχεια σε κάθε χρονική περίοδο βρίσκουμε το μέγιστο (h_{\max}) και το ελάχιστο (h_{\min}) πάχος υμένα και στις δυο θέσεις κατάντη της ροής $x_0=15$ cm και $x_0=65$ cm.

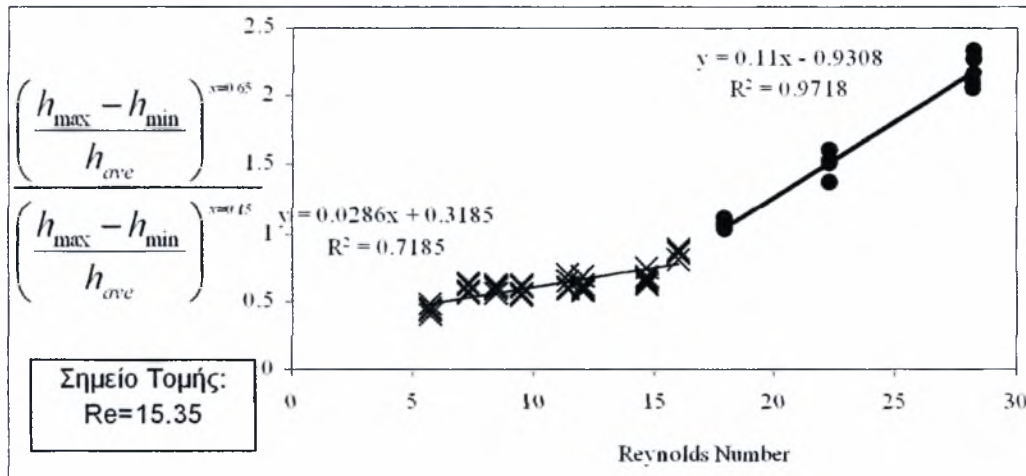
Έπειτα βρίσκουμε στην διαφορά $h_{\max} - h_{\min}$ καθώς και τον μέσο όρο (h_{ave}) των max και min και στις δυο θέσεις κατάντη της ροής.

Ακολούθως, η ενίσχυση ή απόσβεση με την κατάντη απόσταση της κυματικής διαταραχής μπορεί να εκφραστεί από τον λόγο των υψών κύματος στις δύο θέσεις μέτρησης. Έτσι, υπολογίστηκε στις 5 χρονικές περιόδους για κάθε αριθμό Reynolds, ο λόγος του μέσου ύψους του κύματος στο δεύτερο μετρητικό προς το μέσο ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό από τη σχέση :

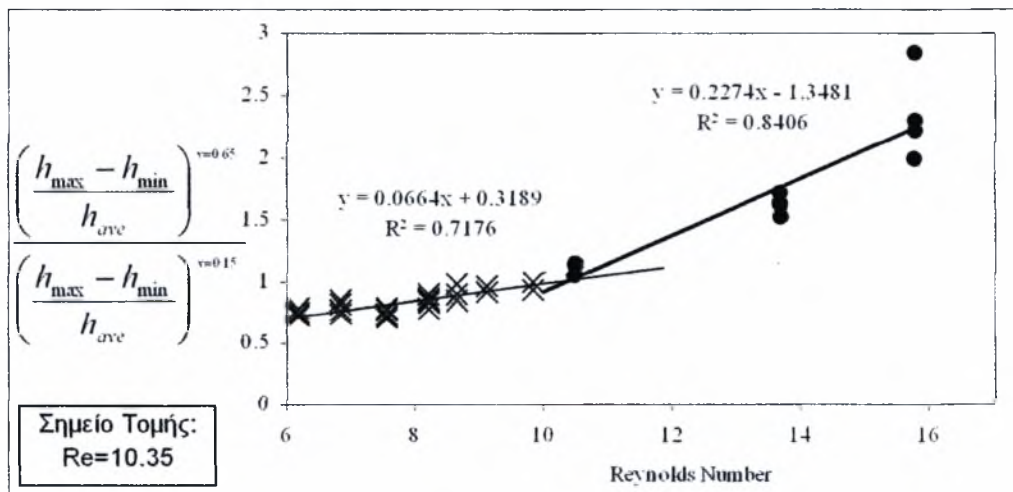
$$A = \frac{\frac{(h_{\max} - h_{\min})}{h_{ave}}_{x=0.65}}{\frac{(h_{\max} - h_{\min})}{h_{ave}}_{x=0.15}} \quad (4.1)$$

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν τα μέσα ύψη, είναι για να αναληφθεί κάθε σφάλμα βαθμονόμησης.

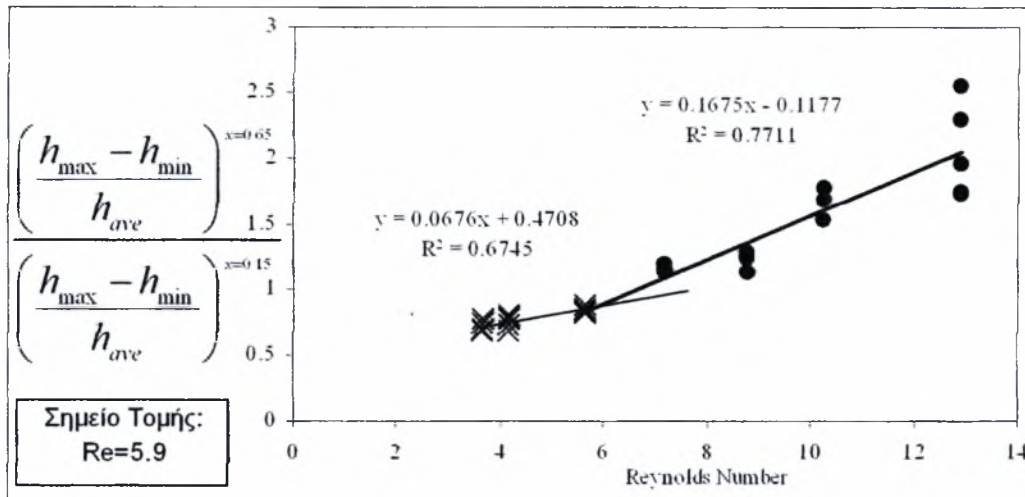
Στη συνέχεια, και για κάθε γωνία κλίσης, παρατίθενται τα διαγράμματα του A σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds. Οι δυο ευθείες αντιστοιχούν σε σημεία όπου $A < 1$ και $A > 1$ και ο κρίσιμος αριθμός Reynolds προσδιορίζεται από το σημείο τομής των 2 ευθειών.



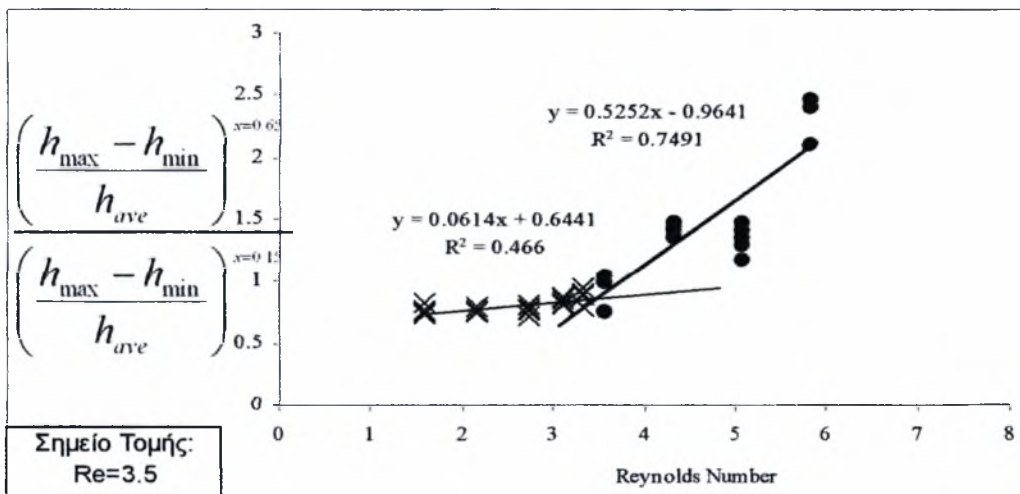
Σχήμα 4.2.1 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 5 μοίρες



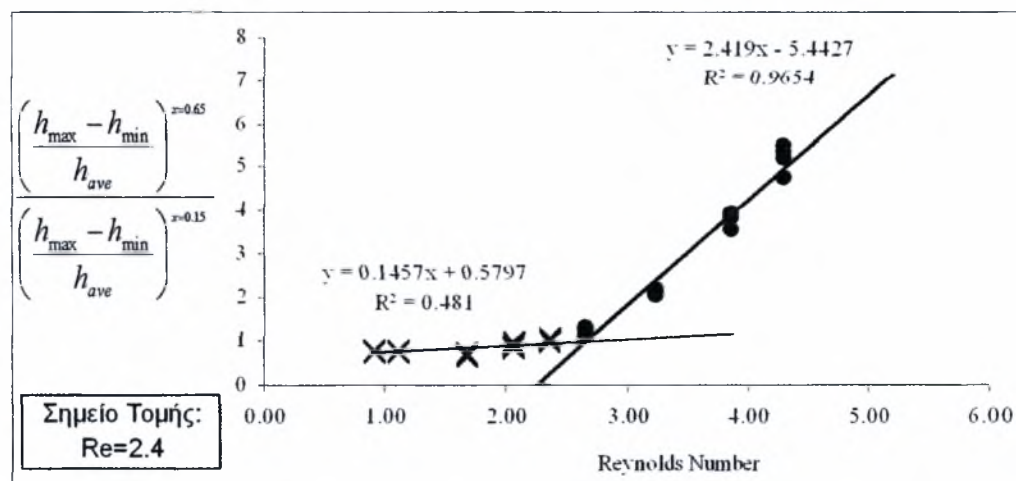
Σχήμα 4.2.2 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 7 μοίρες



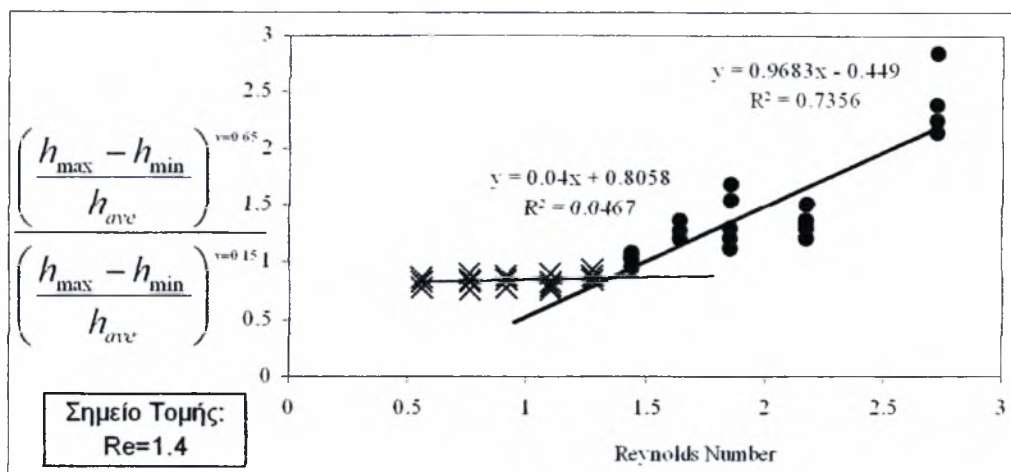
Σχήμα 4.2.3 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 10 μίρες



Σχήμα 4.2.4 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 15 μίρες



Σχήμα 4.2.5 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 20 μίρες

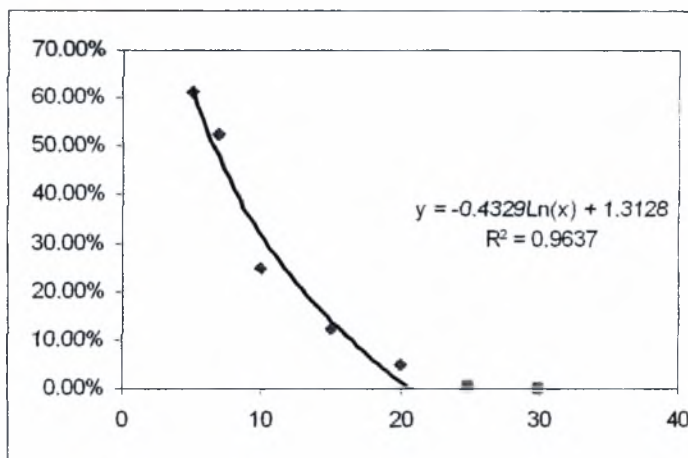


Σχήμα 4.2.6 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 30 μίρες

4.3. Επίδραση της γωνίας φ

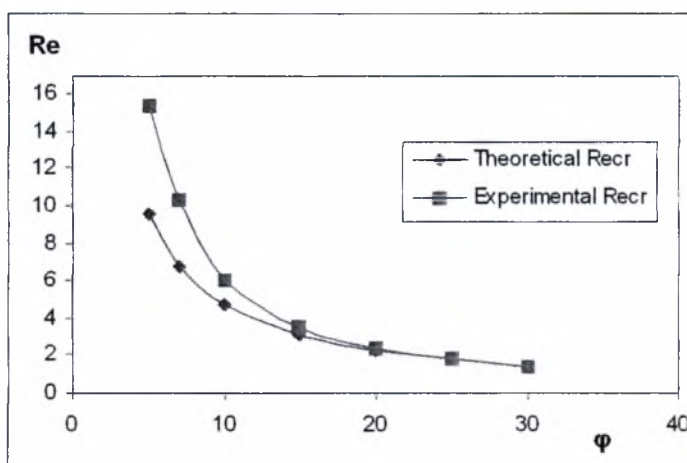
Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραγράφου 4.2, υπολογίστηκαν οι κρίσιμες τιμές του πειραματικού αριθμού Reynolds. Οι τιμές του θεωρητικού αριθμού Reynolds για επίπεδο τοίχωμα υπολογίστηκαν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, από την εξίσωση (2.2-1). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα με τα θεωρητικά, καθώς και η μεταξύ τους διαφορά, η οποία απεικονίζεται και στο σχήμα 4.3.α.

κλίση σε μίρες	Theoretical Recr	Experimental Recr	% διαφορά
5	9.525043586	15.35	61.15%
7	6.786955357	10.35	52.50%
10	4.726068183	5.9	24.84%
15	3.11004234	3.5	12.54%
20	2.289564516	2.4	4.82%
25	1.7870891	1.795	0.44%
30	1.443375673	1.445	0.11%



Σχήμα 4.3.α: % διαφορά πειραματικής και θεωρητικής τιμής κρίσιμου αριθμού Re σε συνάρτηση με την αύξηση της γωνίας ϕ

Στη συνέχεια παραστήθηκε η εξέλιξη των τιμών αυτών που υπολογίστηκαν σε συνάρτηση με την κλίση της γωνίας ϕ στο διάγραμμα του Σχήματος 4.4.α.

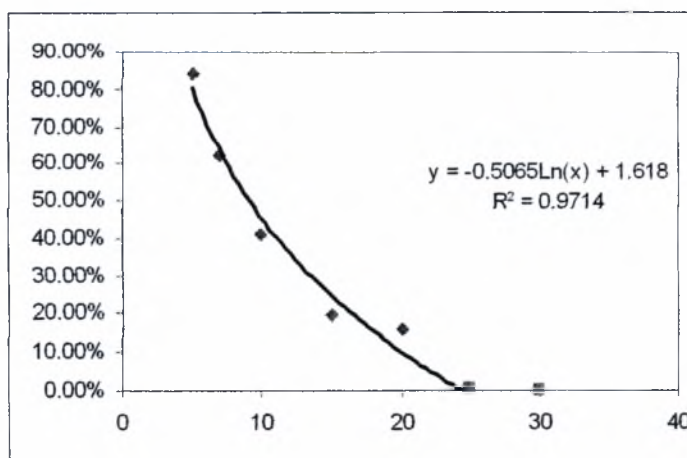


Σχήμα 4.4.α Εξέλιξη του αριθμού Re με τη γωνία ϕ

Παρατηρούμε ότι ο κρίσιμος αριθμός Reynolds μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του τοιχώματος, και καθώς αυξάνεται η γωνία ϕ , μειώνεται η διάφορα πειραματικού με θεωρητικού κρίσιμου αριθμού Re.

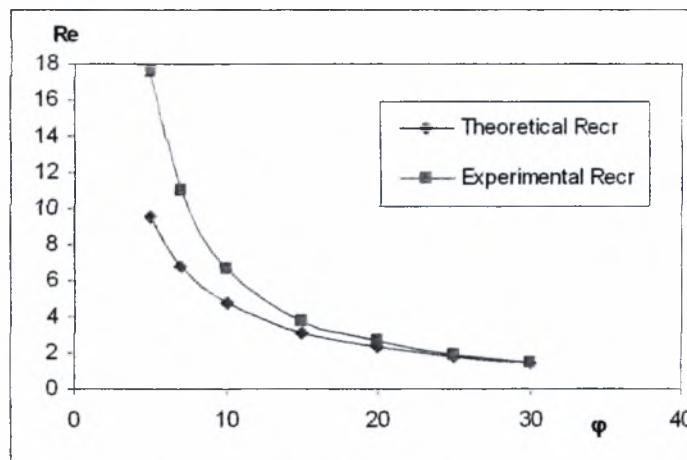
Για να επαληθεύουμε την επίδραση της γωνίας φ σε σχέση με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds που προσδιορίστηκε με τη μέθοδο του σημείου τομής των εξισώσεων για τα σημεία όπου $A < 1$ και $A > 1$, προσδιορίζουμε ξανά τον κρίσιμο αριθμό Reynolds με ένα διαφορετικό τρόπο. Όπως εξηγήσαμε και πριν η μετάβαση από την ευστάθεια στην αστάθεια γίνεται στο σημείο όπου $A = 1$. Αν πάρουμε λοιπόν τις εξισώσεις ευθείας που πρόεκυψαν για $A > 1$ και τις εξισώσουμε με τη μονάδα, τότε ο αριθμός που θα προκύψει, αντιστοιχεί στον αριθμό Reynolds που μας εισάγει οριακά στην περιοχή της αστάθειας, άρα ουσιαστικά πρόκειται για κρίσιμο αριθμό Reynolds. Επομένως θα εξετάσουμε όπως και πριν την επίδραση της γωνίας φ , με τους νέους αριθμούς. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα με τα θεωρητικά, καθώς και η μεταξύ τους διάφορα., η οποία απεικονίζεται και στο σχήμα 4.3.β

κλίση σε μοίρες	Theoretical Recr	Experimental Recr	% διαφορά
5	9.525043586	17.55	84.25%
7	6.786955357	11	62.08%
10	4.726068183	6.66	40.92%
15	3.11004234	3.73	19.93%
20	2.289564516	2.66	16.18%
25	1.7870891	1.9	6.32%
30	1.443375673	1.496	3.65%



Σχήμα 4.3.β: επαλήθευση % διαφοράς πειραματικής και θεωρητικής τιμής κρίσιμου αριθμού Re σε συνάρτηση με την αύξηση της γωνίας ϕ

Στη συνέχεια παραστήθηκε η εξέλιξη των τιμών αυτών που υπολογίστηκαν σε συνάρτηση με την κλίση της γωνίας ϕ στο διάγραμμα του Σχήματος 4.4.β.



Σχήμα 4.4.β επαλήθευση εξέλιξης του αριθμού Re με τη γωνία ϕ

Είναι φανερό πως τα διαγράμματα δεν διαφέρουν σημαντικά, επομένως ο προσδιορισμός της εξέλιξης του αριθμού Re με την γωνία ϕ έγινε με ακρίβεια.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αντικείμενο της εργασίας ήταν η μελέτη ευστάθειας στη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο κανάλι και σε επίπεδο τοίχωμα.

5.1 Συμπεράσματα

- Τροποποιήθηκε κατάλληλα η πειραματική διάταξη και χρησιμοποιήθηκε η αγωγιμομετρική τεχνική για τον προσδιορισμό του πάχους του υμένα $h(x,y,t)$.
- Η πειραματική μέθοδος (αγωγιμομετρική τεχνική) που εφαρμόστηκε για την εύρεση του ορίου ευστάθειας έδωσε με ικανοποιητική ακρίβεια το ύψος του υγρού υμένα ($\sim 10\mu\text{m}$).
- Το σημείο μετάπτωσης από την ευστάθεια στην αστάθεια με αύξηση του Re προσδιορίζεται από την τιμή $A=1$ και η κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds υπολογίζεται στο σημείο όπου η τιμή του λόγου A είναι ίση με τη μονάδα. Έτσι προσδιορίζεται με αυξημένη ακρίβεια η μετάπτωση από την ευστάθεια στην αστάθεια.
- Με αύξηση του Re πέρα από τον κρίσιμο, το κύμα στην δεύτερη θέση όχι μόνον αυξάνει σε ύψος αλλά παρουσιάζει έντονη ανάπτυξη δευτερευουσών κορυφών (αστάθεια).
- Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του τοιχώματος και καθώς αυξάνεται η γωνία κλίσης, η πειραματική τιμή του κρίσιμου αριθμού Reynolds, προσεγγίζει την θεωρητική.

5.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

- Όπως έχει αναφερθεί, ένα βασικό μειονέκτημα της πειραματικής μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε είναι ότι η διαταραχή που επιβάλλεται εξωτερικά στο σύστημα δεν είναι με τη μορφή που καθορίζει η ανάλυση γραμμικής ευστάθειας. Για το σκοπό αυτό πρόκειται να κατασκευαστεί ένα σύστημα αποτελούμενο από σερβομοτέρ, το οποίο θα προσαρμοστεί σε μια βάνα. Το σύστημα αυτό θα τροφοδοτείται με κατάλληλο σήμα είτε από γεννήτρια συχνοτήτων είτε από ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια της εξωτερική κάρτας που χρησιμοποιείται για τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων. Το σήμα θα μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή (ημιτονοειδές, τριγωνικό και ορθογωνικό ή συνδυασμό αυτών), ενώ θα μπορεί να μεταβληθεί η συχνότητα του και το ποσοστό που θα ανοίγει και κλείνει η βάνα.
- Ενδιαφέρον θα ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά τοιχωμάτων διαφορετικής διαμόρφωσης, παραδείγματος χάριν ημιτονοειδούς διαμόρφωσης ή ορθογωνικής διαμόρφωσης με τα ίδια διαλύματα νερού γλυκερίνης και με τις ίδιες γωνίες κλίσης.
- Στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών υπάρχει ένα μεγαλύτερο κανάλι, συνολικού μήκους 3 m. Καλό θα ήταν να μελετηθούν τα ίδια φαινόμενα στο μεγάλο κανάλι όπου το μήκος και το πλάτος είναι μεγαλύτερα και έτσι ίσως εκεί τα φαινόμενα να εξελίσσονται διαφορετικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Liu J., Paul J. D. and Gollub J. P.
‘Measurements of the Primary Instabilities of Film Flows’
J. Fluid Mech., 250, p.69, 1993.
- McCabe W. L., Smith J. C. and Harriot P.
‘Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής’
Εκδόσεις Τζιόλα, 2002.
- Pozrikidis C.
‘Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics’
Oxford University Press, 1997.
- Wierschen A., Lepski C. and Aksel N.
‘Effect of Long undulated Bottoms on Thin Gravity – Driven Films’
Acta Mechanica, 179, p.41, 2005
- Weast, R. C.
"Handbook of Chemistry and Physics"
CRC Press, 1975.
- Αργυριάδη Αικ.
‘Ροή Υγρού Υμένα : Επίδραση Χαρακτηριστικών Δοσαταραχής και μορφολογίας Τοίχωματος’
Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2005.
- Βλαχογιάννης Μ.
‘Πειραματική Μελέτη της Ροής Υγρού Υμένα πάνω σε Επίπεδο και σε Κυματοειδές Τοίχωμα’
Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2001.
- Λεοντίδης Β.
‘Ανάλυση Ευστάθειας Ροής Υγρού Υμένα σε Περιοδικά Διαμορφωμένο Τοίχωμα’
Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2007.
- Συρανίδου Κ.
‘Τροποποίηση και δόκιμες καναλιού υγρού υμένα για χρήση με υγρά υψηλού ιξώδους’
Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2007.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1. Ιξώδες διαλυμάτων γλυκερίνης – νερού

Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions in Centipoises/mPa s											
Glycerine percent weight	Temperature (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 ⁰¹	1.792	1.308	1.005	0.8007	0.6560	0.5494	0.4688	0.4061	0.3565	0.3165	0.2838
10	2.44	1.74	1.31	1.03	0.826	0.680	0.575	0.500	-	-	-
20	3.44	2.41	1.76	1.35	1.07	0.879	0.731	0.635	-	-	-
30	5.14	3.49	2.50	1.87	1.46	1.16	0.956	0.816	0.690	-	-
40	8.25	5.37	3.72	2.72	2.07	1.62	1.30	1.09	0.918	0.763	0.668
50	14.6	9.01	6.00	4.21	3.10	2.37	1.86	1.53	1.25	1.05	0.910
60	29.9	17.4	10.8	7.19	5.08	3.76	2.85	2.29	1.84	1.52	1.28
65	45.7	25.3	15.2	9.85	6.80	4.89	3.66	2.91	2.28	1.86	1.55
67	55.5	29.9	17.7	11.3	7.73	5.50	4.09	3.23	2.50	2.03	1.68
70	76	38.8	22.5	14.1	9.40	6.61	4.86	3.78	2.90	2.34	1.93
75	132	65.2	35.5	21.2	13.6	9.25	6.61	5.01	3.80	3.00	2.43
80	255	116	60.1	33.9	20.8	13.6	9.42	6.94	5.13	4.03	3.18
85	540	223	109	58	33.5	21.2	14.2	10.0	7.28	5.52	4.24
90	1310	498	219	109	60.0	35.5	22.5	15.5	11.0	7.93	6.00
91	1590	592	259	127	68.1	39.8	25.1	17.1	11.9	8.62	6.40
92	1950	729	310	147	78.3	44.8	28.0	19.0	13.1	9.46	6.82
93	2400	860	367	172	89	51.5	31.6	21.2	14.4	10.3	7.54
94	2930	1040	437	202	105	58.4	35.4	23.6	15.8	11.2	8.19
95	3690	1270	523	237	121	67.0	39.9	26.4	17.5	12.4	9.08
96	4600	1580	624	281	142	77.8	45.4	29.7	19.6	13.6	10.1
97	5770	1950	765	340	166	88.9	51.9	33.6	21.9	15.1	10.9
98	7370	2460	939	409	196	104	59.8	38.5	24.8	17.0	12.2
99	9420	3090	1150	500	235	122	69.1	43.6	27.8	19.0	13.3
100	12070	3900	1410	612	284	142	81.3	50.6	31.9	21.3	14.8

⁰¹Viscosity of water taken from "Properties of Ordinary Water-Substance." N.E. Dorsey, p. 184. New York (1940)

Πίνακας 2. Πυκνότητα διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού

Density of Glycerine-Water Solutions											
Glycerine (%)	Density (g/cm ³)					Glycerine (%)	Density (g/cm ³)				
	15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C		15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C
100	1.26415	1.26381	1.26198	1.25802	1.25495	50	1.12870	1.12845	1.12630	1.12375	1.12110
99	1.26160	1.26125	1.25850	1.25545	1.25235	49	1.12600	1.12575	1.12360	1.12110	1.11845
98	1.25900	1.25865	1.25590	1.25290	1.24975	48	1.12325	1.12305	1.12090	1.11840	1.11580
97	1.25645	1.25610	1.25335	1.25030	1.24710	47	1.12055	1.12030	1.11820	1.11575	1.11320
96	1.25385	1.25350	1.25080	1.24770	1.24450	46	1.11780	1.11760	1.11550	1.11310	1.11055
95	1.25130	1.25095	1.24825	1.24515	1.24190	45	1.11510	1.11490	1.11280	1.11040	1.10795
94	1.24865	1.24830	1.24560	1.24250	1.23930	44	1.11235	1.11215	1.11010	1.10775	1.10530
93	1.24600	1.24565	1.24300	1.23985	1.23670	43	1.10960	1.10945	1.10740	1.10510	1.10265
92	1.24340	1.24305	1.24035	1.23725	1.23410	42	1.10690	1.10670	1.10470	1.10240	1.10005
91	1.24075	1.24040	1.23770	1.23460	1.23150	41	1.10415	1.10400	1.10200	1.09975	1.09740
90	1.23810	1.23775	1.23510	1.23200	1.22890	40	1.10145	1.10130	1.09930	1.09710	1.09475
89	1.23545	1.23510	1.23245	1.22935	1.22625	39	1.09875	1.09860	1.09665	1.09445	1.09215
88	1.23280	1.23245	1.22975	1.22665	1.22350	38	1.09605	1.09590	1.09400	1.09180	1.08955
87	1.23015	1.22980	1.22710	1.22400	1.22095	37	1.09340	1.09320	1.09135	1.08915	1.08690
86	1.22750	1.22710	1.22445	1.22135	1.21830	36	1.09070	1.09050	1.08865	1.08655	1.08430
85	1.22485	1.22445	1.22180	1.21870	1.21565	35	1.08800	1.08780	1.08600	1.08390	1.08165
84	1.22220	1.22180	1.21915	1.21605	1.21300	34	1.08530	1.08515	1.08335	1.08125	1.07905
83	1.21955	1.21915	1.21650	1.21340	1.21035	33	1.08265	1.08245	1.08070	1.07860	1.07645
82	1.21690	1.21650	1.21380	1.21075	1.20770	32	1.07995	1.07975	1.07800	1.07600	1.07380
81	1.21425	1.21385	1.21115	1.20810	1.20505	31	1.07725	1.07705	1.07535	1.07335	1.07120
80	1.21160	1.21120	1.20850	1.20545	1.20240	30	1.07455	1.07435	1.07270	1.07070	1.06855
79	1.20885	1.20845	1.20575	1.20275	1.19970	29	1.07185	1.07175	1.07010	1.06815	1.06605
78	1.20610	1.20570	1.20305	1.20005	1.19705	28	1.06915	1.06915	1.06755	1.06560	1.06355
77	1.20335	1.20300	1.20030	1.19735	1.19435	27	1.06645	1.06655	1.06495	1.06305	1.06105
76	1.20060	1.20025	1.19760	1.19465	1.19170	26	1.06370	1.06390	1.06240	1.06055	1.05855
75	1.19785	1.19750	1.19485	1.19195	1.18900	25	1.06100	1.06130	1.05980	1.05800	1.05605
74	1.19510	1.19480	1.19215	1.18925	1.18635	24	1.05830	1.05870	1.05720	1.05545	1.05350
73	1.19235	1.19205	1.18940	1.18650	1.18365	23	1.05565	1.05610	1.05465	1.05290	1.05100
72	1.18965	1.18930	1.18670	1.18380	1.18100	22	1.05300	1.05350	1.05205	1.05035	1.04850
71	1.18690	1.18655	1.18395	1.18110	1.17830	21	1.05030	1.05090	1.04950	1.04780	1.04600
70	1.18415	1.18385	1.18125	1.17840	1.17565	20	1.04760	1.04825	1.04690	1.04525	1.04350
69	1.18135	1.18105	1.17850	1.17565	1.17290	19	1.04500	1.04575	1.04440	1.04280	1.04105
68	1.17860	1.17830	1.17575	1.17295	1.17020	18	1.04235	1.04325	1.04195	1.04035	1.03860
67	1.17585	1.17555	1.17300	1.17020	1.16745	17	1.03975	1.04075	1.03945	1.03790	1.03615
66	1.17310	1.17275	1.17025	1.16745	1.16470	16	1.03715	1.03825	1.03695	1.03545	1.03370
65	1.17030	1.17000	1.16750	1.16475	1.16195	15	1.03450	1.03570	1.03440	1.03300	1.03130
64	1.16755	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	14	1.03185	1.03320	1.03200	1.03065	1.02895
63	1.16480	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	13	1.02925	1.03070	1.02955	1.02825	1.02660
62	1.16200	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	12	1.02665	1.02820	1.02705	1.02580	1.02420
61	1.15925	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	11	1.02405	1.02565	1.02455	1.02335	1.02180
60	1.15650	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	10	1.02145	1.02315	1.02210	1.02090	1.01935
59	1.15370	1.15340	1.15105	1.14830	1.14555	9	1.01885	1.02065	1.01970	1.01855	1.01705
58	1.15095	1.15065	1.14830	1.14560	1.14285	8	1.01625	1.01815	1.01730	1.01620	1.01470
57	1.14815	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	7	1.01365	1.01560	1.01485	1.01390	1.01245
56	1.14535	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	6	1.01105	1.01310	1.01245	1.01155	1.01015
55	1.14260	1.14230	1.14005	1.13740	1.13470	5	1.00845	1.01060	1.01005	1.00920	1.00785
54	1.13980	1.13955	1.13730	1.13465	1.13195	4	1.00585	1.00810	1.00760	1.00685	1.00555
53	1.13705	1.13680	1.13455	1.13195	1.12925	3	1.00325	1.00560	1.00510	1.00445	1.00320
52	1.13425	1.13400	1.13180	1.12920	1.12650	2	1.00065	1.00315	1.00270	1.00210	1.00095
51	1.13150	1.13125	1.12905	1.12650	1.12380	1	0.99805	1.00065	1.00020	0.99965	0.99850



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091530