

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

Μεταπτυχιακή εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ  
ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ**

Παπαδημητρίου Ειρήνη  
Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός, Π.Δ.Μ.

Βόλος, Μάρτιος 2010

© 2010 Παπαδημητρίου Ειρήνη

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)

## **Τριμελής Επιτροπή**

### **Πρώτος εξεταστής**

Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ, Διδάσκων Π.Δ. 407, Τμήμα  
Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

### **Δεύτερος εξεταστής**

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

### **Τρίτος εξεταστής**

Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα  
Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

## Ευχαριστήριο Σημείωμα

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους υπήρξαν στήριγμα στη προσπάθεια μου αυτή.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας Δρ. Μ. Βλαχογιάννη, διδάσκοντα Π.Δ. 407 του τμήματος, για την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, και για το ενδιαφέρον που επέδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Καθώς, επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Β. Μποντόζογλου Καθηγητή του τμήματος για την συνεργασία του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Δρ. Ν. Ανδρίτσο Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος για τις χρήσιμες υποδείξεις του και τις γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο που έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στη διεξαγωγή της μεταπτυχιακής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την φοιτήτρια, υποψήφια διδάκτορα Άννα Γεωργαντάκη για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τον σπουδαστή Νομικό Τροικίλη, αλλά και φίλους για τη βοήθεια που μου παρείχαν κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

Αφιερώνω τη μεταπτυχιακή μου εργασία στην οικογένεια μου η οποία μου στάθηκε όπου τη χρειαζόμουν από τα μαθητικά μου χρόνια μέχρι σήμερα, αφού θεωρώντας δεδομένη την εξέλιξη μου με ώθησαν σε σωστές επιλογές που δεν θα μετανιώσω ποτέ, οπλίζοντας με, με σιγουριά και δύναμη όποτε το είχα ανάγκη.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε η αγωγιμομετρική τεχνική για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας.

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων για να προσδιοριστεί η ευστάθεια της ροής του υγρού υμένα υπό την επίδραση του ιξώδους. Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε επίπεδο τοίχωμα. Η μορφή της διαταραχής είχε τη μορφή κατακόρυφου υδραυλικού άλματος με πλάτος 50  $\mu\text{m}$ . Η κλίση του τοιχώματος παραμένει σταθερή και είναι ίση με  $2^\circ$ .

Πιο συγκεκριμένα, ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού και γλυκερίνης (10% – 60% κ.β. γλυκερίνη), ενώ οι παροχές που μελετήθηκαν εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds σε πάνω και κάτω από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για σταθερή κλίση.

Το βασικό συμπέρασμα αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ότι κάνοντας το διάγραμμα του πειραματικού Re με το κινηματικό ιξώδες παρατηρείται ότι αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε γλυκερίνη μειώνεται ο πειραματικός κρίσιμος αριθμός Re. Διαπιστώθηκε ότι σε μικρά ιξώδη ο κρίσιμος Re είναι πολύ μεγαλύτερος από τον θεωρητικό, ενώ σε μεγάλα ιξώδη προσεγγίζει την θεωρητική τιμή.

# Πίνακας περιεχομένων

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ</b>	<b>4</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b>	<b>6</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>8</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>13</b>
1.1 Στόχος της εργασίας	13
1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα	13
1.3 Επιλογή εύρους μελετώμενων παραμέτρων	15
1.4 Δομή της εργασίας	15
<b>2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b>	<b>17</b>
2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα	17
2.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια	22
2.3 Βιβλιογραφικές αναφορές	24
2.3.1 Συμπεράσματα πραγματοποιηθέντων μελετών	25
<b>3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b>	<b>28</b>
3.1 Πειραματική διάταξη	28
3.1.1 Δοχείο υπερχείλισης	28
3.1.2 Ατέρμονας κοχλίας	29
3.1.3 Αλφαιδολάστιχο	29
3.1.4 Ρυθμιστική βαλβίδα	31
3.1.5 Ηλεκτροβάνα	32
3.1.6 Στηρίγματα ευθυγράμμισης καναλιού	34
3.1.7 Κανάλι από Plexiglas	36
3.1.8 Δοχείο συλλογής	37
3.2 Ιδιότητες ρευστών	37
3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική	39
3.3.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής	41
3.4 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων	42
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	<b>44</b>
4.1 Η μεθοδολογία διαχωρισμού της μετάβασης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή	45
4.2 Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο	45
4.2.1 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για νερό	45
4.2.2 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 10% γλυκερίνη	48
4.2.3 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 15% γλυκερίνη.	51
4.2.4 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 20% γλυκερίνη.	53
4.2.6 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 30% γλυκερίνη.	59
4.2.7 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 35% γλυκερίνη	61
4.2.8 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 40% γλυκερίνη	64
	<b>6</b>

4.2.9 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 45% γλυκερίνη	66
4.2.10 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 50% γλυκερίνη	68
4.2.11 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 55% γλυκερίνη	71
4.2.12 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 60% γλυκερίνη	73
4.3 Εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re σε σχέση με το κινηματικό ιξώδες	75
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>77</b>
5.1 Συμπεράσματα	77
<b><i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</i></b>	<b>79</b>
<b><i>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</i></b>	<b>81</b>

## Πίνακας σχημάτων

**Σχήμα 2.1** Δυνάμεις πάνω σε ένα στοιχείο υγρού σε ροή υγρού υμένα

**Σχήμα 2.2** Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα

**Σχήμα 2.3** Εξάρτηση του κρίσιμου  $Re$  από το ύψος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

**Σχήμα 2.4** εξάρτηση του  $Re$  critical από τη συχνότητα της διαταραχής για το επίπεδο τοίχωμα για γωνία κλίσης  $\varphi=10^\circ$  και  $\varphi=15^\circ$

**Σχήμα 2.5** εξάρτηση του κρίσιμου  $Re$  από το πλάτος του καναλιού a) Ο κρίσιμος  $Re$  συναρτήσσει της γωνίας κλίσης b) Ο κρίσιμος  $Re$  συναρτήσσει του πλάτους του καναλιού.

**Σχήμα 3.1** Δοχείο υπερχειλίσης

**Σχήμα 3.2** Καθορισμός της γωνίας κλίσης με αλφαδολάστιχο και ατέρμονας κοχλίας

**Σχήμα 3.3** Ρυθμιστική βαλβίδα

**Σχήμα 3.4** Δοχείο κατανομής

**Σχήμα 3.5** Ηλεκτροβάνα

**Σχήμα 3.6** By – pass

**Σχήμα 3.7** Πλαίσιο στήριξης

**Σχήμα 3.8** Κανάλι από Plexiglas

**Σχήμα 3.9** Γέφυρα τοποθέτησης αγωγιμετρικών αισθητήρων και αγωγιμετρικοί αισθητήρες

**Σχήμα 3.10** Δοχείο συλλογής και εμβαπτιζόμενη αντλία

**Σχήμα 3.11** Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής

**Σχήμα 3.12** Πάχος υγρού υμένα κατά Nusselt για επίπεδο τοίχωμα



**Σχήμα 4.1** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατόντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 48.08$ , 2)  $Re = 48.74$ , 3)  $Re = 49.3$ , 4)  $Re = 50.95$ , 5)  $Re = 51.48$ , 6)  $Re = 62.59$

**Σχήμα 4.2** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.3** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατόντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 46.84$ , 2)  $Re = 50.56$ , 3)  $Re = 52.05$ , 4)  $Re = 54.84$ , 5)  $Re = 57.10$ , 6)  $Re = 68.97$

**Σχήμα 4.4** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.5** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατόντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 41.31$ , 2)  $Re = 42.79$ , 3)  $Re = 44.86$ , 4)  $Re = 46.54$ , 5)  $Re = 50.14$ , 6)  $Re = 58.68$

**Σχήμα 4.6** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.7** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατόντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 40.59$ , 2)  $Re = 42.97$ , 3)  $Re = 45.98$ , 4)  $Re = 46.79$ , 5)  $Re = 49.58$ , 6)  $Re = 60.33$

**Σχήμα 4.8** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.9** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατόντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 33.54$ , 2)  $Re = 35.51$ , 3)  $Re = 37.66$ , 4)  $Re = 38.66$ , 5)  $Re = 40.96$ , 6)  $Re = 32.57$

**Σχήμα 4.10** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.11** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατόντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 32.37$ , 2)  $Re = 33.73$ , 3)  $Re = 36.37$ , 4)  $Re = 38.11$ , 5)  $Re = 39.05$ , 6)  $Re = 47.26$

**Σχήμα 4.12** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.13** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 29.38$ , 2)  $Re = 30.15$ , 3)  $Re = 30.44$ , 4)  $Re = 31.44$ , 5)  $Re = 33.01$ , 6)  $Re = 38.47$

**Σχήμα 4.14** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.15** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 26.02$ , 2)  $Re = 26.72$ , 3)  $Re = 27.2$ , 4)  $Re = 28.14$ , 5)  $Re = 28.7$ , 6)  $Re = 47.77$

**Σχήμα 4.16** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.17** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 25.46$ , 2)  $Re = 25.79$ , 3)  $Re = 26.66$ , 4)  $Re = 27.62$ , 5)  $Re = 28.5$ , 6)  $Re = 29.89$

**Σχήμα 4.18** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.19** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 23.91$ , 2)  $Re = 24.51$ , 3)  $Re = 25.8$ , 4)  $Re = 26.5$ , 5)  $Re = 27.44$ , 6)  $Re = 43.51$

**Σχήμα 4.20** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.21** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 22.91$ , 2)  $Re = 24.00$ , 3)  $Re = 25.07$ , 4)  $Re = 25.65$ , 5)  $Re = 27.11$ , 6)  $Re = 48.04$

**Σχήμα 4.22** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.23** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατόντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 23.85$ , 2)  $Re = 25.13$ , 3)  $Re = 25.40$ , 4)  $Re = 25.83$ , 5)  $Re = 26.89$ , 6)  $Re = 40.00$

**Σχήμα 4.24** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

**Σχήμα 4.25** Εξάρτηση κινηματικού ιξώδους σε σχέση με τον κρίσιμο αριθμό  $Re$



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 Στόχος της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή 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 το ιξώδες του διαλύματος.

## 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 μεγέθη (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 εξάτμιση 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 μελετώμενων 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 παραμένει σταθερή και είναι ίση με  $2^\circ$ . Η εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή είναι σταθερή και της τάξεως των 50 $\mu\text{m}$ .

Πιο συγκεκριμένα, ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού και γλυκερίνης (10% – 60% κ.β. γλυκερίνη), ενώ οι παροχές που μελετήθηκαν εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds σε πάνω και κάτω από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για σταθερή κλίση.

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.



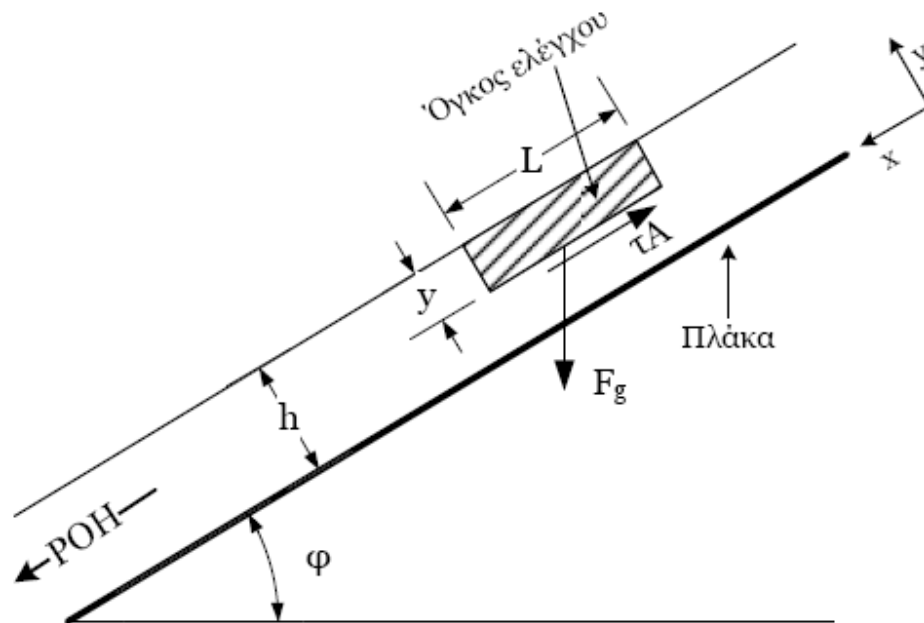
## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

---

### 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, οπότε και 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 1.1. Η πλάκα έχει κλίση και σχηματίζει γωνία  $\phi$ . Το πλάτος του στρώματος σε διεύθυνση κάθετη στην πλάκα είναι  $h$ . Απομονώνεται ένας όγκος ελέγχου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1, 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

$\tau_{yx}$ : διατμητική τάση στην κατώτερη επιφάνεια του όγκου ελέγχου

$\rho$ : 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  $\mu$  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))

$\gamma$ : 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  $p=P_{\text{atm}}$

Επομένως, προκύπτει :

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

## 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].

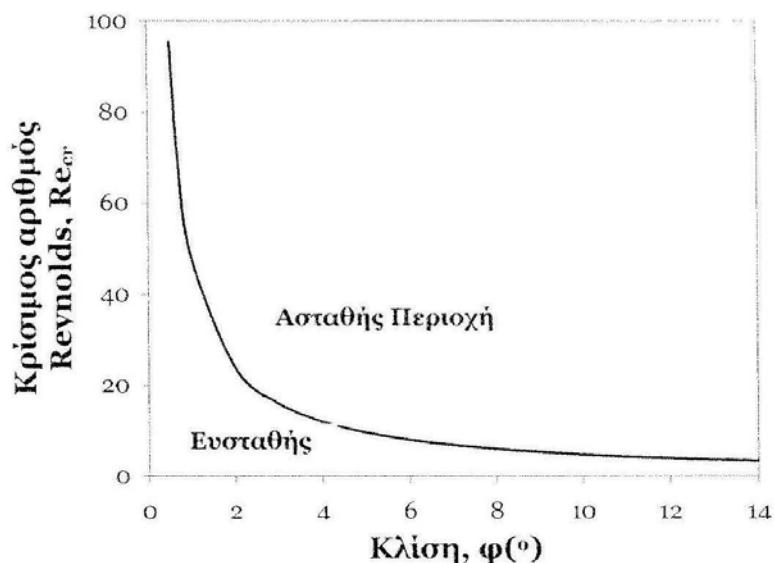
Η συμπεριφορά μιας διαταραχής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της και από τη δομή της αδιατάραχτης κατάστασης, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση αντιστοιχεί στη *βασική ροή*. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά που εξαρτάται από τιμές αδιάστατων αριθμών που περιγράφουν τη βασική ροή, όπως για παράδειγμα ο αριθμός Reynolds.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούν οι περιορισμοί της θεωρίας γραμμικής ευστάθειας. Μια ροή που είναι ευσταθής σύμφωνα με τη θεωρία γραμμικής αστάθειας δεν είναι σίγουρο ότι μπορεί να επιτευχθεί και στην πράξη. Μη γραμμικά φαινόμενα και μικρές αποκλίσεις από την υποτιθέμενη ιδανική γεωμετρία της ροής, εξαιτίας για παράδειγμα τραχύτητας του τοιχώματος, μπορεί να ευθύνονται για ασταθείς συμπεριφορές της ροής [Μποντόζογλου, 2006].

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.

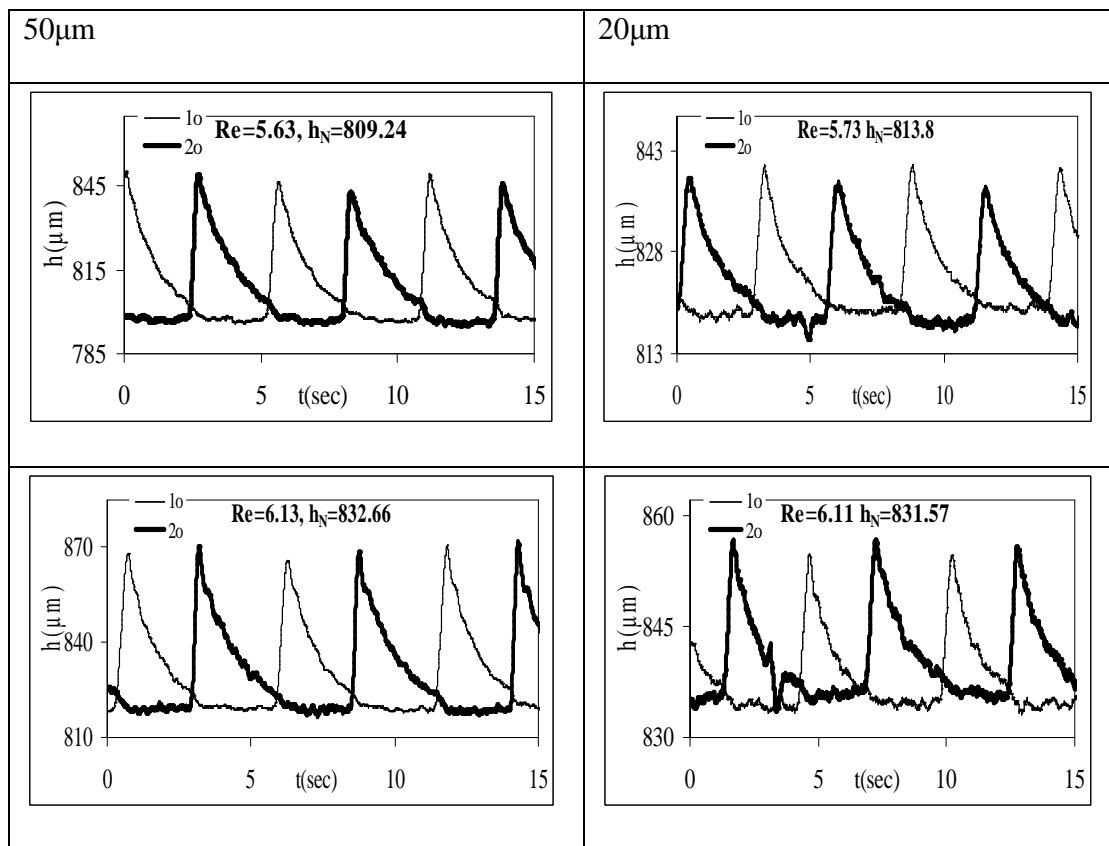
Οι Liu et al. (1993) λόγω της πρακτικής δυσκολίας να εκτιμήσουν ποσοτικά την αστάθεια, η οποία λαμβάνει χώρα σε κυματάριθμο ίσο με το μηδέν, βρήκαν την καμπύλη ουδέτερης αστάθειας  $f_{cr}$  (Re) και με μια διαδικασία προεκβολής υπολόγισαν τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για μηδέν συχνότητα (άπειρο μήκος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



### 2.3.1 Συμπεράσματα πραγματοποιηθέντων μελετών

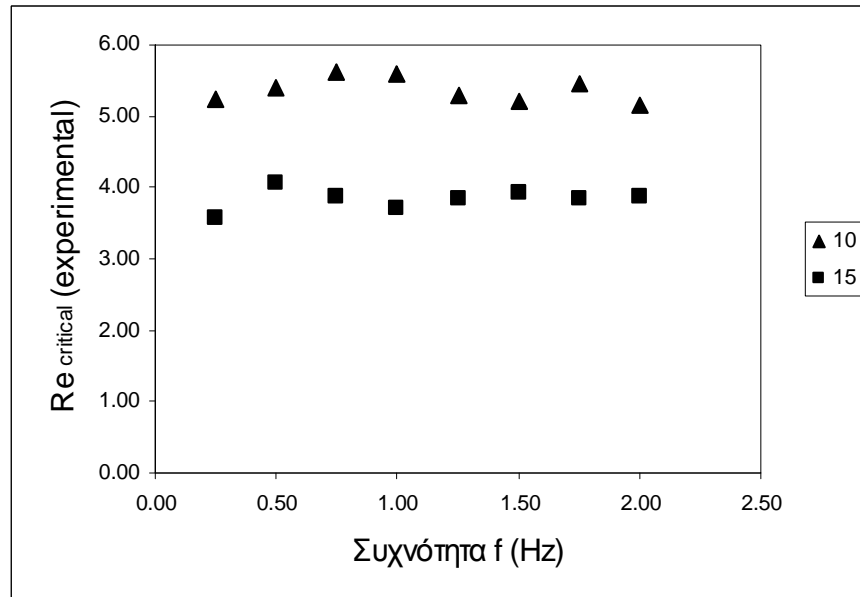
Έχει παρατηρηθεί σε προηγούμενη μεταπτυχιακή εργασία (Σαμαντάς Αθανάσιος, 2008), ότι:

- Το διαφορετικό ύψος της εισαγόμενης διαταραχής δεν επηρεάζει την ευστάθεια του υμένα, αφού και στις δύο περιπτώσεις η μετάβαση παρουσιάζεται σε όμοιους αριθμούς Reynolds.



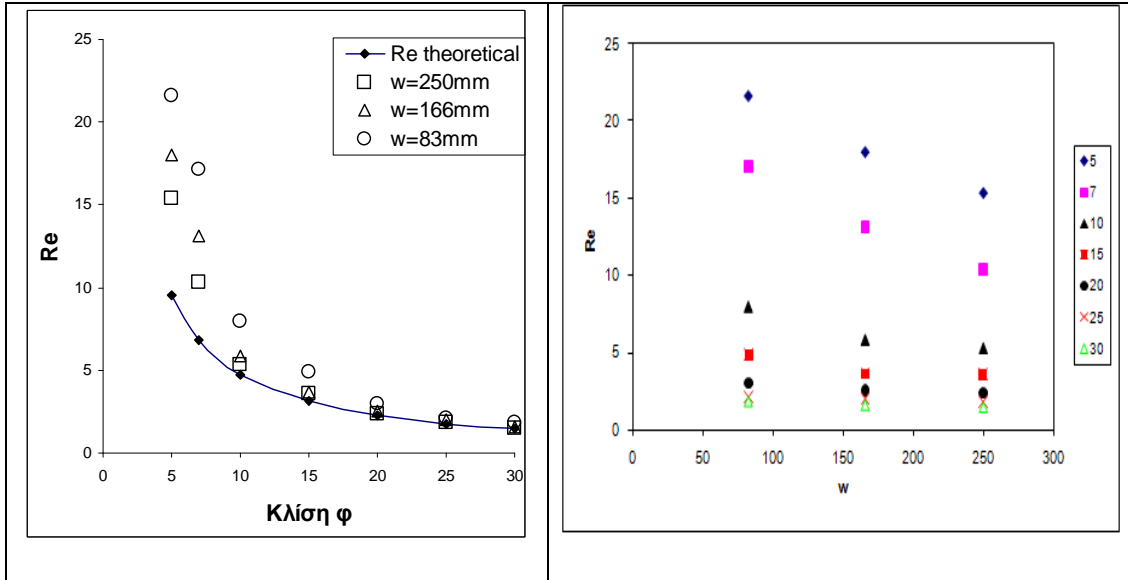
Σχήμα 2.3 εξάρτηση του κρίσιμου  $Re$  από το ύψος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

- Για οποιαδήποτε συχνότητα της διαταραχής και αν επιβάλλουμε ο κρίσιμος αριθμός μετάβασης παραμένει πρακτικά αμετάβλητος (για γωνία κλίσης  $\varphi=10^\circ$  και  $\varphi=15^\circ$  για επίπεδο τοίχωμα).



**Σχήμα 2.4** εξάρτηση του  $Re_{critical}$  από τη συχνότητα της διαταραχής για το επίπεδο τοίχωμα για γωνία κλίσης  $\phi=10^\circ$  και  $\phi=15^\circ$

- Η μείωση του πλάτους του καναλιού επιδρά σταθεροποιητικά στη ροή του υγρού υμένα, παρόλο που θεωρητικά, δε θα έπρεπε να επηρεάζει την μετάβαση από την ευστάθεια στην αστάθεια. Παρατηρήθηκε ότι για μικρές γωνίες κλίσης η διαφορά μεταξύ των θεωρητικών τιμών και των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι μεγάλη. Όσο η γωνία κλίσης αυξάνεται οι πειραματικές τιμές των μετρήσεων τείνουν σε αυτές της θεωρητικής πρόβλεψης.



**Σχήμα 2.5** εξάρτηση του κρίσιμου  $Re$  από το πλάτος του καναλιού a) Ο κρίσιμος  $Re$  συναρτῆσει της γωνίας κλίσης b) Ο κρίσιμος  $Re$  συναρτῆσει του πλάτους του καναλιού

## 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. Ακολουθεί η παρουσίαση της μεθόδου συλλογής των πειραματικών δεδομένων με την αγωγιμομετρική τεχνική και η διαδικασία επεξεργασίας τους. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε βρίσκεται στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

### 3.1 Πειραματική διάταξη

Στόχος της συσκευής είναι να τροφοδοτεί με ρευστό μια επιφάνεια. Η συσκευή είναι κατασκευασμένη από το πολυμερές υλικό Plexiglas ώστε να είναι ορατή η ροή από όλες τις πλευρές και να επιτρέπεται ο οπτικός έλεγχος, και έχει πλάτος καναλιού 25cm και μήκος 128cm και απαρτίζεται από τα παρακάτω.

#### 3.1.1 Δοχείο υπερχειλίσης

Το δοχείο υπερχειλίσης βρίσκεται σε ύψος από το έδαφος όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1. Σταθερή στάθμη στο δοχείο υπερχειλίσης εξασφαλίζει και σταθερή παροχή.



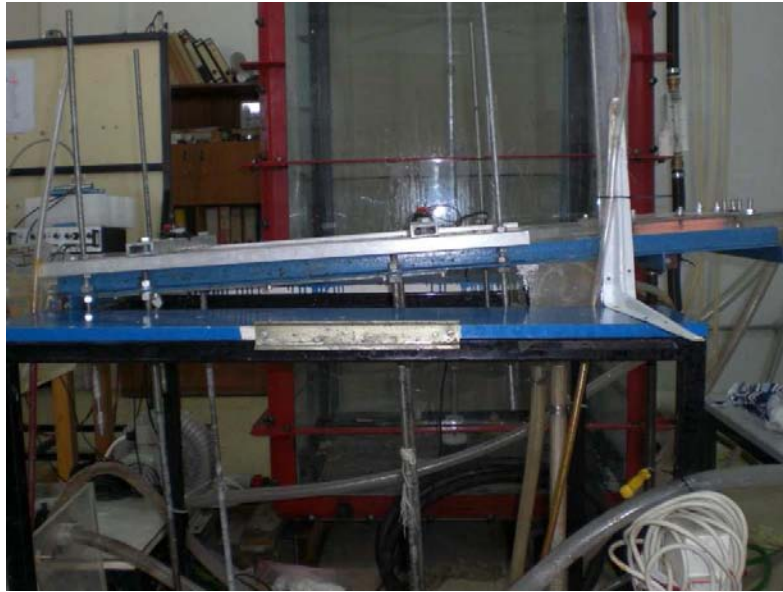
**Σχήμα 3.1** Δοχείο υπερχείλισης

### **3.1.2 Ατέρμονας κοχλίας**

Ο ατέρμονας κοχλίας (σχήμα 3.2), ρυθμίζει την κλίση του καναλιού με εύρος από 0-67 μοίρες. Στα πειράματα της παρούσας εργασίας, η κλίση παρέμεινε σταθερή και ήταν ίση με 2°. Με δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη κίνηση του ατέρμονα κοχλία κατέστη δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής κλίσης.

### **3.1.3 Αλφαδολάστιχο**

Για τον έλεγχο της κλίσης, έγινε χρήση του αλφαδολάστιχου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



**Σχήμα 3.2** Καθορισμός της γωνίας κλίσης με αφαδολάστιχο και ατέρμονας κοχλίας

Με το ένα άκρο του αφαδολάστιχου στερεωμένο στο κάτω μέρος του καναλιού και το άλλο στην αρχή της διάταξης, δεμένο πάνω σε βαθμονομημένο γνώμονα κατέστη δυνατή η μέτρηση της κλίσης. Από τη σχέση:

$$\epsilon\phi\phi = \frac{(x-9.5)}{128}$$

μπορούσαμε σε οποιαδήποτε θέση να πάρουμε μέτρηση της κλίσης

όπου

x: μέτρηση στο χάρακα βασισμένη στη στάθμη του αφαδολάστιχου

9.5: set- off (σημείο έναρξης)

128: μήκος καναλιού

### 3.1.4 Ρυθμιστική βαλβίδα

Η ρυθμιστική βαλβίδα (σχήμα 3.3), ελέγχει την παροχή του ρευστού και παρεμβάλλεται ανάμεσα στο δοχείο υπερχειλίσης και το δοχείο κατανομής. Η παροχή προσδιορίζεται μετρώντας το βάρος του ρευστού που εξέρχεται από το κανάλι και ζυγίζοντας την σε ζυγαριά ακριβείας.



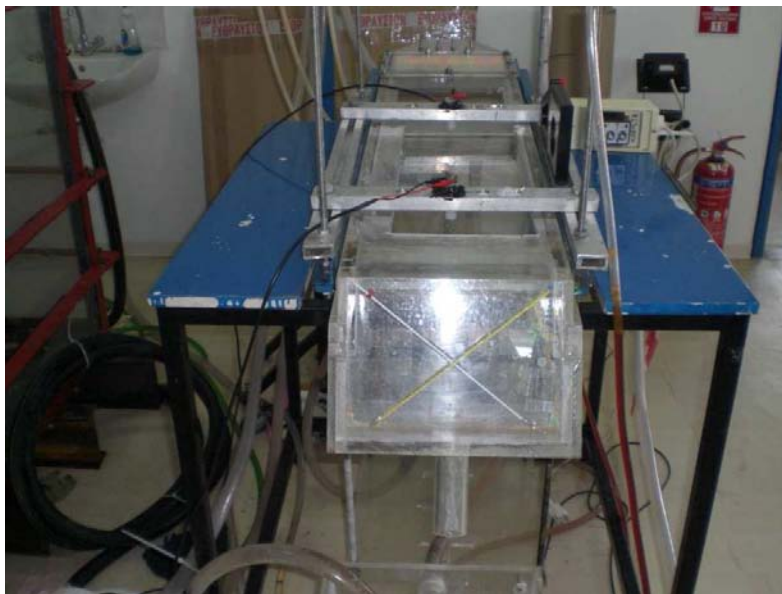
**Σχήμα 3.3** Ρυθμιστική βαλβίδα

Με τη ρυθμιστική βάνα είναι συνδεδεμένο ένα σύστημα σωλήνων πολυαιθυλενίου, από όπου το ρευστό οδηγείται στο δοχείο κατανομής (σχήμα 3.4) και μετά στο κανάλι.



**Σχήμα 3.4** Δοχείο κατανομής

### **3.1.5 Ηλεκτροβάνα**



**Σχήμα 3.5** Ηλεκτροβάνα



Το διαθέσιμο μήκος του καναλιού περιορίζει τη μελέτη της εξέλιξης των φυσικά δημιουργούμενων διαταραχών. Με την επιβολή εξωτερικής διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας δίνεται η δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα όπως σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα by-pass (σχήμα 3.6) με ηλεκτροβάνα. Η διαταραχή δημιουργείται με τη βοήθεια μιας χρονιζόμενης ηλεκτροβάνα (ON/OFF). Για το σκοπό αυτό ενώθηκε το δοχείο συλλογής, μέσω ενός ελαστικού σωλήνα, με το δοχείο κατανομής. 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 ηλεκτροβάνα. Ένας χρονοδιακόπτης ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο της ηλεκτροβάνας. Όταν η ηλεκτροβάνα 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). Το περιοδικό φράξιμο της παράκαμψης αυτής προκαλεί διαταραχή στην είσοδο του καναλιού με μορφή υδραυλικού άλματος που δημιουργεί μια σειρά μοναχικών κυμάτων.



**Σχήμα 3.6** by – pass

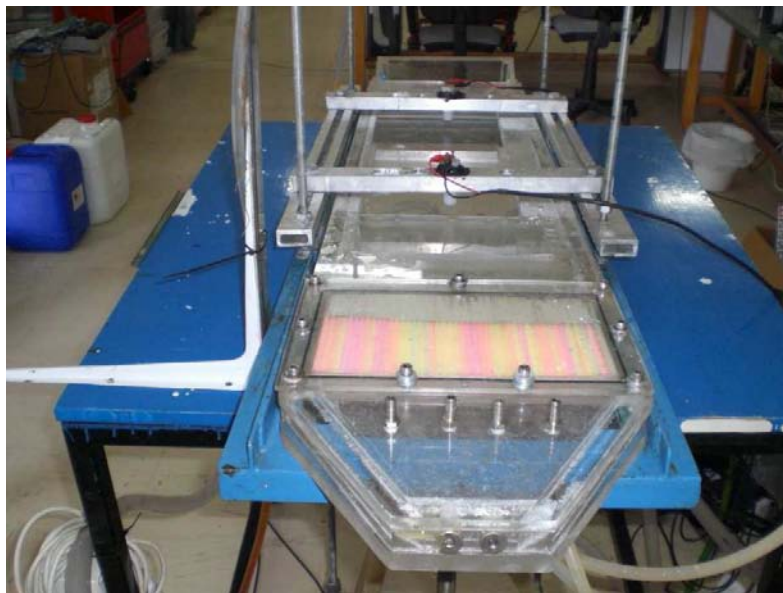
### **3.1.6 Στηρίγματα ευθυγράμμισης καναλιού**



**Σχήμα 3.7** Πλαίσιο στήριξης

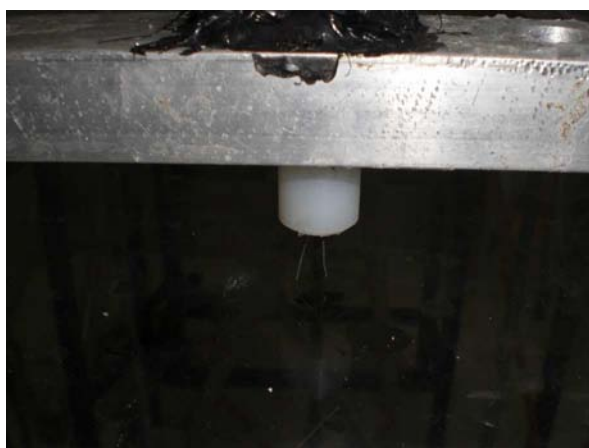
Σημαντικότερος παράγοντας στη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο κανάλι είναι η ευθυγράμμιση του καναλιού. Για το σκοπό αυτό έχουν τοποθετηθεί στο πλαίσιο που στηρίζεται το κανάλι (σχήμα 3.7) κατάλληλα περιστρεφόμενα στηρίγματα, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα μετακίνησης ολόκληρου του συστήματος προς τα πάνω ή προς τα κάτω. 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 ηλεκτροβάννα, ενώ ρυθμίζεται και η βάννα που βρίσκεται με την ηλεκτροβάννα. Σωστή ευθυγράμμιση συνεπάγεται ότι η κορυφή του μετώπου θα βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος. Σε αντίθετη περίπτωση ρυθμίζονται ανάλογα τα στηρίγματα. Όταν το μέτωπο είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά 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.

### 3.1.7 Κανάλι από Plexiglas



**Σχήμα 3.8** Κανάλι από Plexiglas

Το κανάλι έχει πλάτος 25cm και μήκος 80cm, και πάνω του ρέει το υγρό. Αποτελείται από μία αποσπώμενη πλάκα πλάτους 25cm και μήκους 50cm. Πάνω σε αυτή την πλάκα γίνονται οι μετρήσεις. Στο κανάλι έχουν στερεωθεί γέφυρες όπου τοποθετούνται οι αγωγιμετρικοί αισθητήρες (σχήμα 3.9).



**Σχήμα 3.9** Γέφυρα τοποθέτησης αγωγιμετρικών αισθητήρων και αγωγιμετρικοί αισθητήρες

### 3.1.8 Δοχείο συλλογής

Στο δοχείο συλλογής συγκεντρώνεται το διάλυμα όπου μεταφέρεται στο δοχείο υπερχειλίσης και από εκεί γίνεται η κατανομή του ρευστού στο κανάλι με τη βοήθεια μιας εμβαπτιζόμενη αντλίας (σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10 Δοχείο συλλογής και εμβαπτιζόμενη αντλία

### 3.2 Ιδιότητες ρευστών

Επιλέγεται το κατάλληλο ρευστό για τα πειράματα και εισάγεται στο δοχείο συλλογής. Συγκεκριμένα, για τις 2<sup>ο</sup> χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού – γλυκερίνης με 10% - 60% γλυκερίνη.

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.

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.

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.

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.

### **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 3.12 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 Ertalon, ένα υλικό που επεξεργάζεται εύκολα και παρουσιάζει ικανοποιητική θερμική αντοχή, ενώ το σύρμα ήταν από χρωμονικέλιο διαμέτρου 0.4-0.5mm. 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).

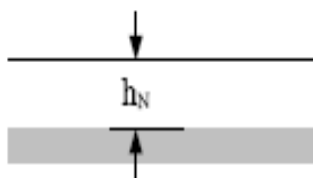


**Σχήμα 3.11** Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής



### 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 3.12 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 εξίσωση:

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

για διαφορες παροχές του ρευστού ( $Q_0$ , kg/s) καταγραφόταν το σήμα (Volt) για περίπου 30s με ρυθμό δειγματοληψίας 100Hz 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 :

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

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

όπου  $w$  το πλάτος του καναλιού και  $h_N$  το πάχος του υμένα σε  $\mu\text{m}$ . 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

Επιλέγεται το κατάλληλο ρευστό για τα πειράματα και εισάγεται στο δοχείο συλλογής. Συγκεκριμένα, για τις  $2^\circ$  χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού – γλυκερίνης με 10% - 60% γλυκερίνη. Τα πειράματα ξεκίνησαν δηλαδή με ένα διάλυμα 10% γλυκερίνης και ανάλογα με τα αποτελέσματα προστέθηκε ποσότητα γλυκερίνης ώστε να είναι πιο σταθερός ο υμένας.

Στη συνέχεια τίθεται σε λειτουργία η αντλία και αφήνεται το σύστημα να λειτουργήσει επί 30min. Η αντλία ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η στάθμη στο δοχείο υπερχειλίσης 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 αέρα. Ακολουθεί το σημαντικότερο βήμα όλης της πειραματικής διαδικασίας, η ευθυγράμμιση του καναλιού. Ο τρόπος ευθυγράμμισης έχει περιγραφεί προηγουμένως.

Αφού ευθυγραμμιστεί το κανάλι, αρχίζει η πειραματική διαδικασία με τη ρύθμιση της ηλεκτροβαλβίδας, συγκεκριμένα 5.5s ανοικτή και 0.5s κλειστή. Ενώ το ύψος της διαταραχής ρυθμίζεται κυρίως από τη βάνα που βρίσκεται μετά την ηλεκτροβαλβίδα.

Ο χρόνος δειγματοληψίας κυμαίνεται μεταξύ 20-30s, ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 100Hz 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.

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής λεπτού υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο τοίχωμα. Στόχος των πειραμάτων είναι η μελέτη της εξάρτησης του ιξώδους σε σχέση με τον κρίσιμο αριθμό Re. 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.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνθήκες των πειραμάτων όπου περιλαμβάνονται: η γωνία κλίσης του καναλιού ( $\phi$ ), το πλάτος του καναλιού (W), η περιεκτικότητα του διαλύματος κατά βάρος σε γλυκερίνη (% κ.β), η θερμοκρασία (T), το εύρος των αριθμών Reynolds (Re), η πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες του διαλύματος ( $\rho, \nu$ ), το μέγεθος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής και η μορφή του τοιχώματος ροής.

$\phi$ (°)	W (mm)	Περιεκτικότητα Γλυκερίνης (% κ.β)	T (°C)	Re	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Μέγεθος διαταραχής ( $\mu\text{m}$ )	Τοίχωμα
2	250	0	20 $\pm$ 1	26,03-116,19	1000	1	50	επίπεδο
2	250	10	20 $\pm$ 1	26,46-76,97	1022,1	1,28167	50	επίπεδο
2	250	15	20 $\pm$ 1	29,32-58,68	1034,5	1,44998	50	επίπεδο
2	250	20	20 $\pm$ 1	31,17-73,85	1046,9	1,68115	50	επίπεδο
2	250	25	20 $\pm$ 1	25,75-61,02	1059,8	1,98151	50	επίπεδο
2	250	30	20 $\pm$ 1	24,52-65,16	1072,7	2,33057	50	επίπεδο
2	250	35	20 $\pm$ 1	24,00-43,69	1086	2,86372	50	επίπεδο
2	250	40	20 $\pm$ 1	21,27-47,77	1099,3	3,38397	50	επίπεδο
2	250	45	20 $\pm$ 1	16,02-31,67	1112,8	4,36736	50	επίπεδο
2	250	50	20 $\pm$ 1	16,26-43,51	1126,3	5,32718	50	επίπεδο
2	250	55	20 $\pm$ 1	16,11-48,04	1140	7,45614	50	επίπεδο
2	250	60	20 $\pm$ 1	16,08-40,00	1154	9,35875	50	επίπεδο

#### **4.1 Η μεθοδολογία διαχωρισμού της μετάβασης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή**

Χρησιμοποιώντας την αγωγιμομετρική τεχνική δόθηκε η δυνατότητα της μέτρησης του πάχους της υγρής στοιβάδας  $h(x_o, y_o, t)$  σε δύο σημεία κατάντη της ροής. Συγκεκριμένα μετρήθηκε το πάχος του υγρού υμένα σε απόσταση  $x_o=15\text{cm}$  και σε απόσταση  $x_o=65\text{cm}$  από την έναρξη του καναλιού. Σκοπός είναι να εξετάσουμε το ύψος του δημιουργούμενου κύματος ( $h_{\max}-h_{\min}$ ) και στα δύο σημεία μέτρησης.

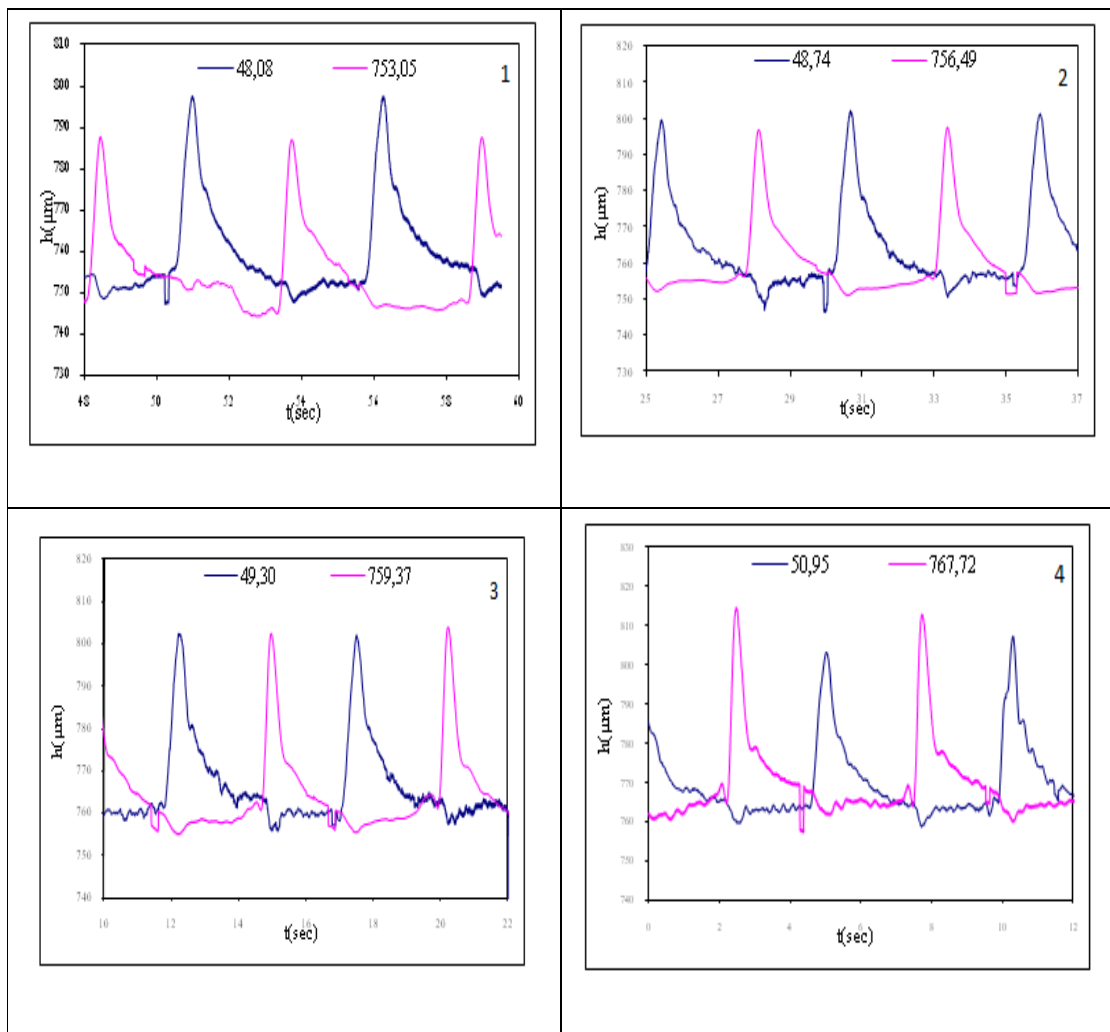
Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_o, y_o, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_o=15\text{ cm}$  και  $-x_o=65\text{cm}$ ). Από τα διαγράμματα αυτά, υπάρχει μία πρώτη εκτίμηση για τη μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή.

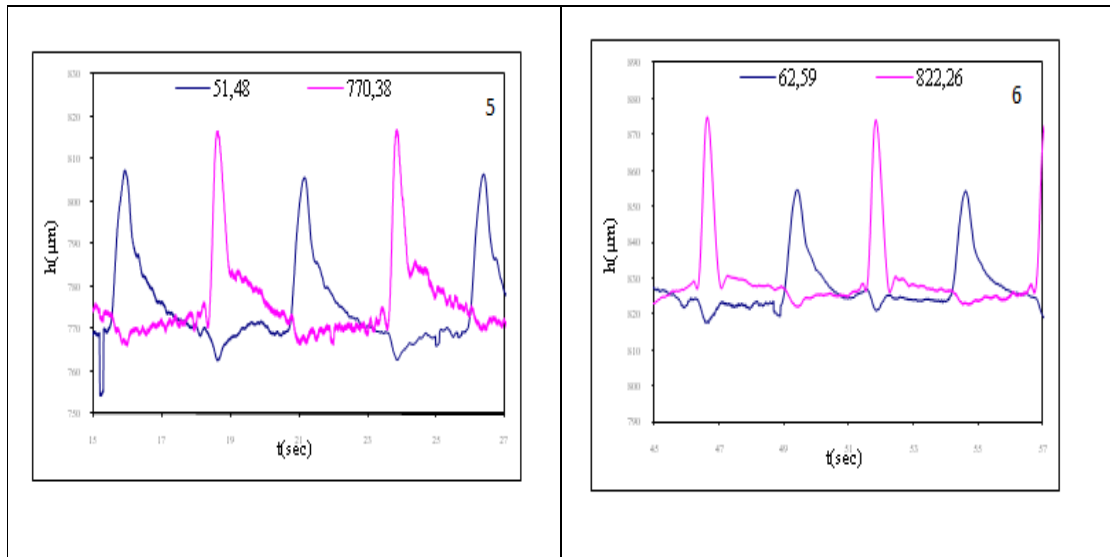
#### **4.2 Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο**

Τα πειράματα έγιναν πάνω σε επίπεδη πλάκα για γωνία κλίσης  $2^\circ$ . Μετρήθηκαν 15-20 διαφορετικές τιμές παροχών, δηλαδή 15-20 τιμές του αριθμού Reynolds. 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.

##### **4.2.1 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για νερό**

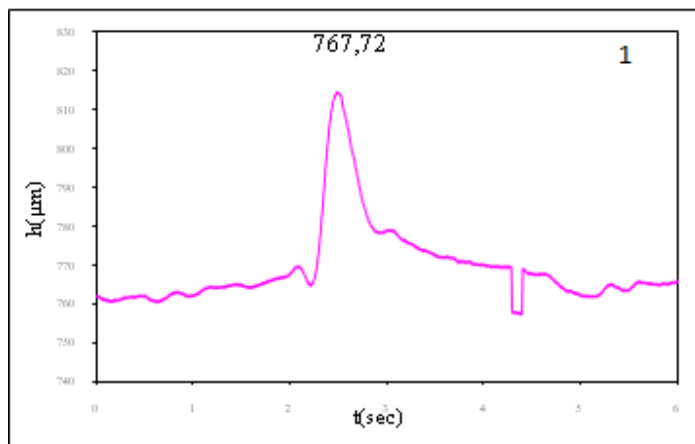
Για το πείραμα των 2°, χρησιμοποιήθηκε νερό. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 26.03 έως 116.19. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την χρονική εξέλιξη του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.





**Σχήμα 4.1** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 48.08$ , 2)  $Re = 48.74$ , 3)  $Re = 49.3$ , 4)  $Re = 50.95$ , 5)  $Re = 51.48$ , 6)  $Re = 62.59$

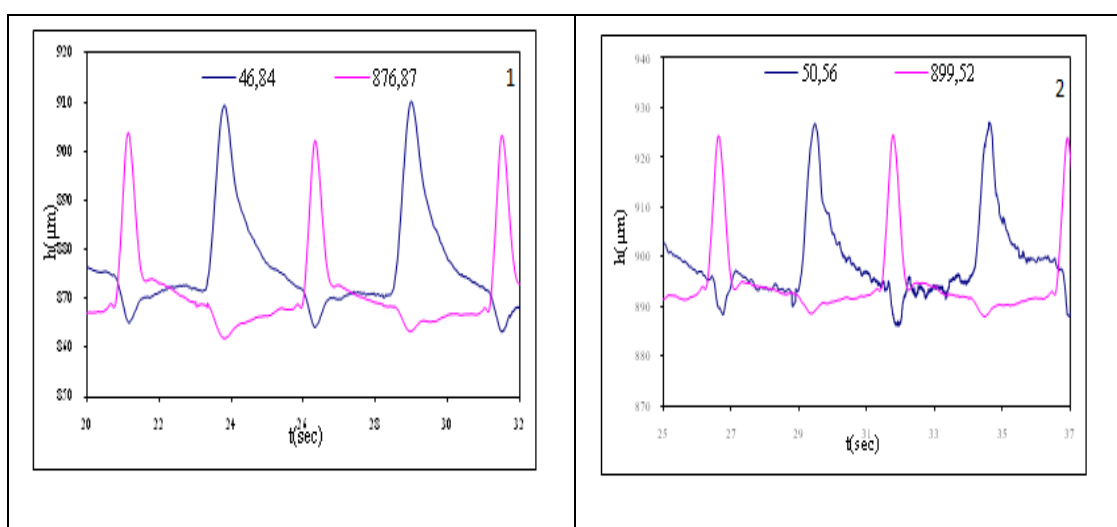
Στο σχήμα 4.1 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για το νερό, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 49.3.



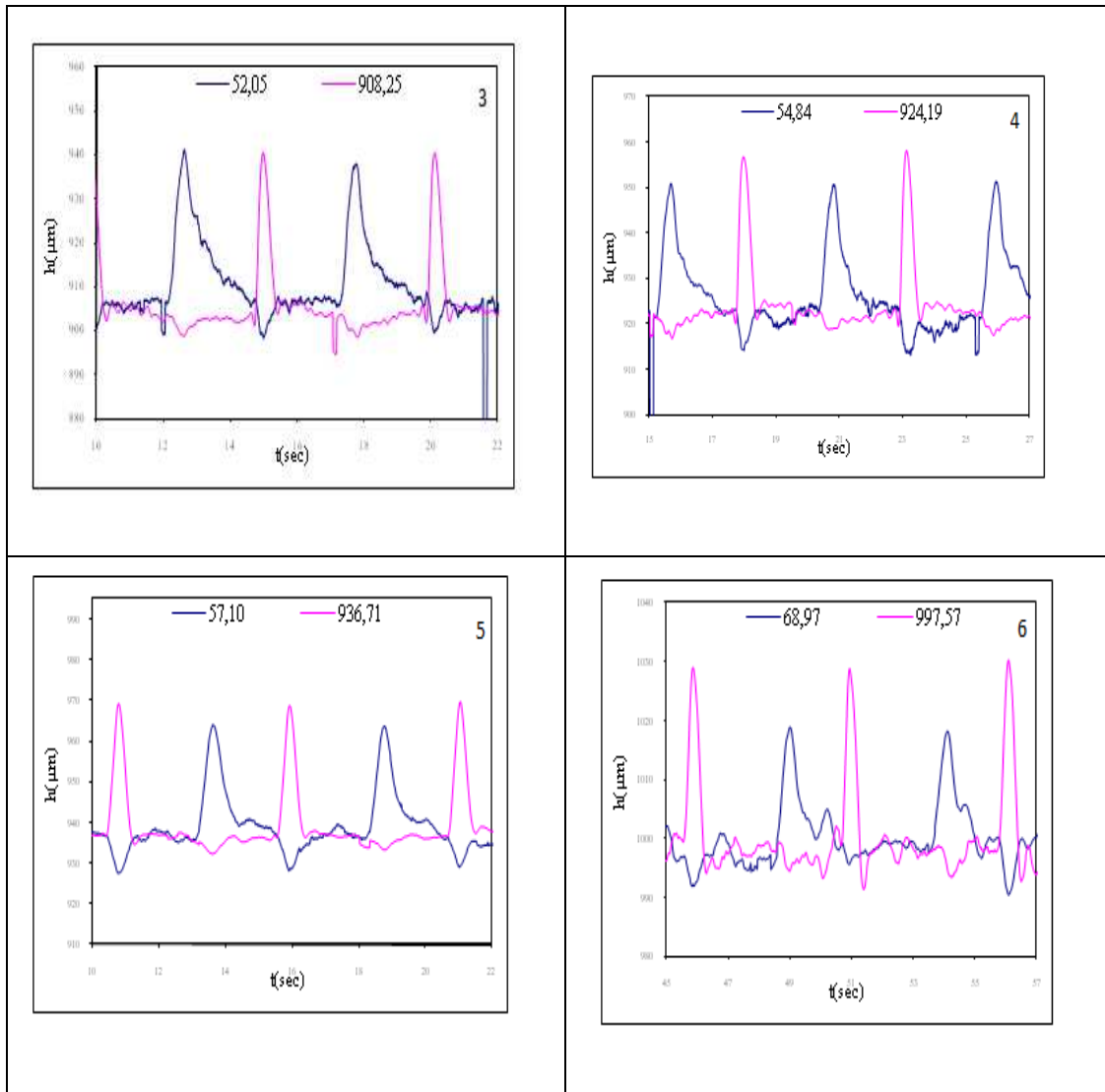
Σχήμα 4.2 Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### 4.2.2 Αποτελέσματα στις 2 μούρες για 10% γλυκερίνη

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 10% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2<sup>ο</sup> σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματά μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 26.46 έως 76.97. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.



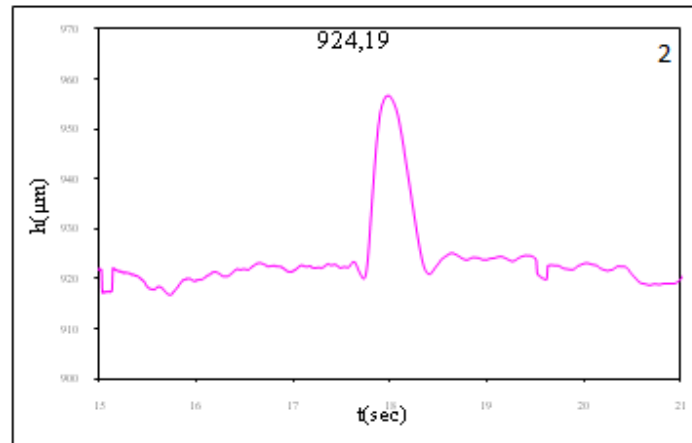




**Σχήμα 4.3** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $\text{Re} = 46.84$ , 2)  $\text{Re}=50.56$ , 3)  $\text{Re} = 52.05$ , 4)  $\text{Re} = 54.84$ , 5)  $\text{Re}= 57.10$ , 6)  $\text{Re}= 68.97$

Στο σχήμα 4.3 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 10% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα

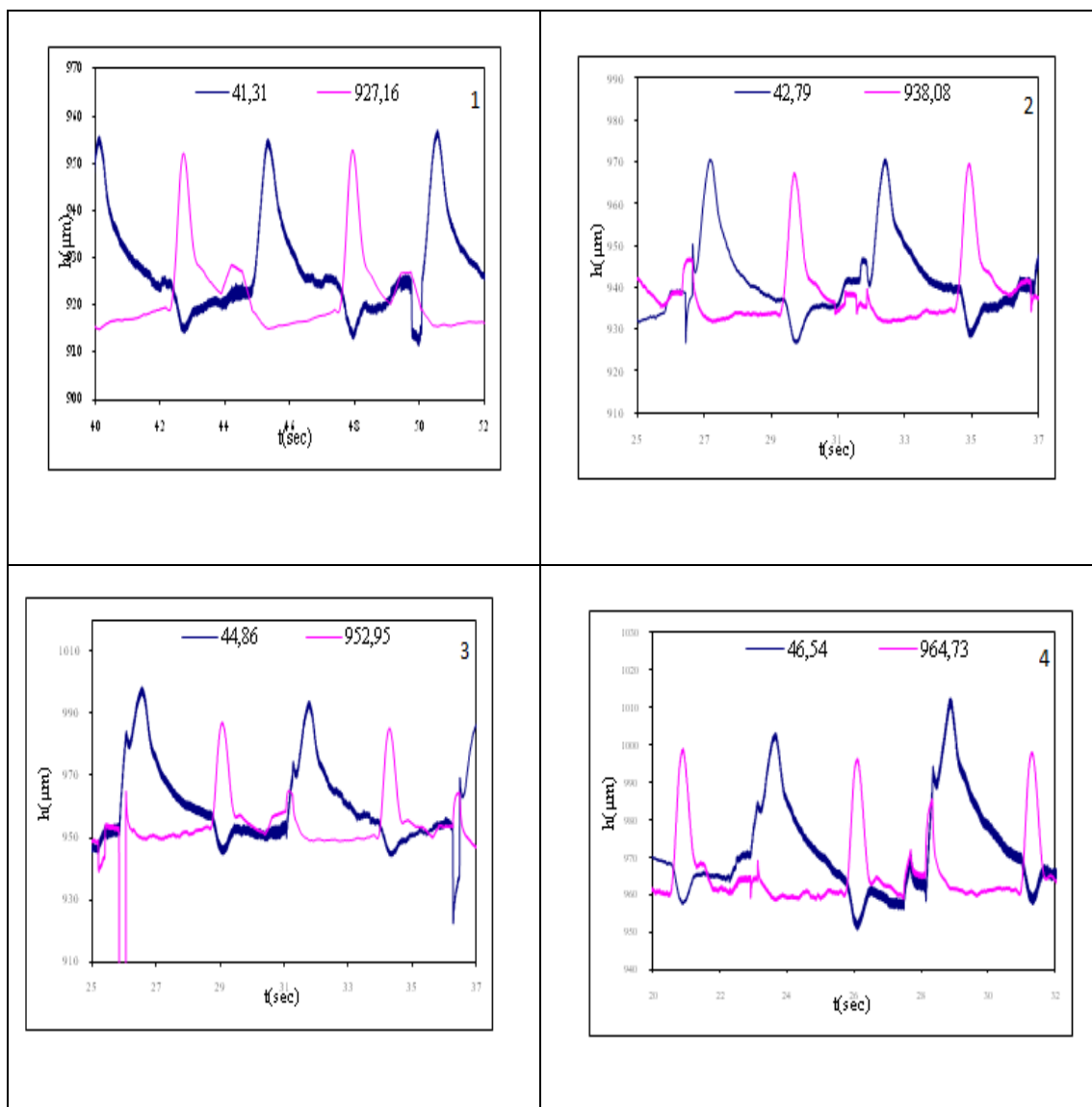
στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 52.05.

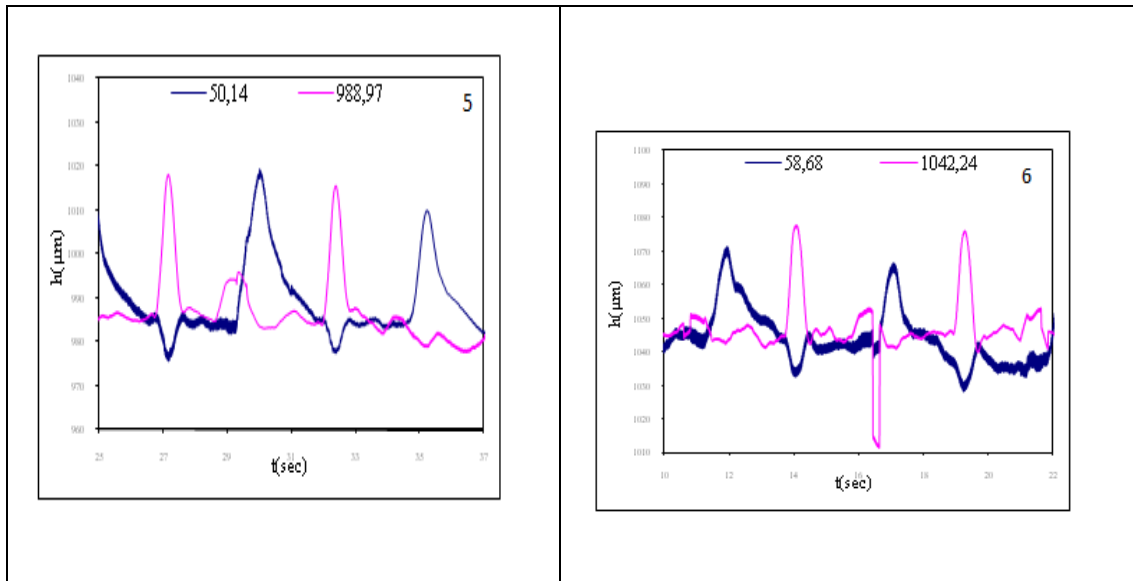


**Σχήμα 4.4** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

### 4.2.3 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 15% γλυκερίνη.

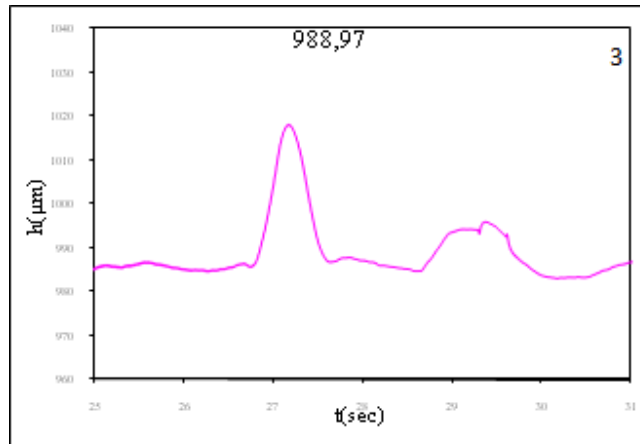
Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 15% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματά μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 29.32 έως 58.68. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.





**Σχήμα 4.5** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 41.31$ , 2)  $Re= 42.79$ , 3)  $Re = 44.86$ , 4)  $Re= 46.54$ , 5)  $Re= 50.14$ , 6)  $Re= 58.68$

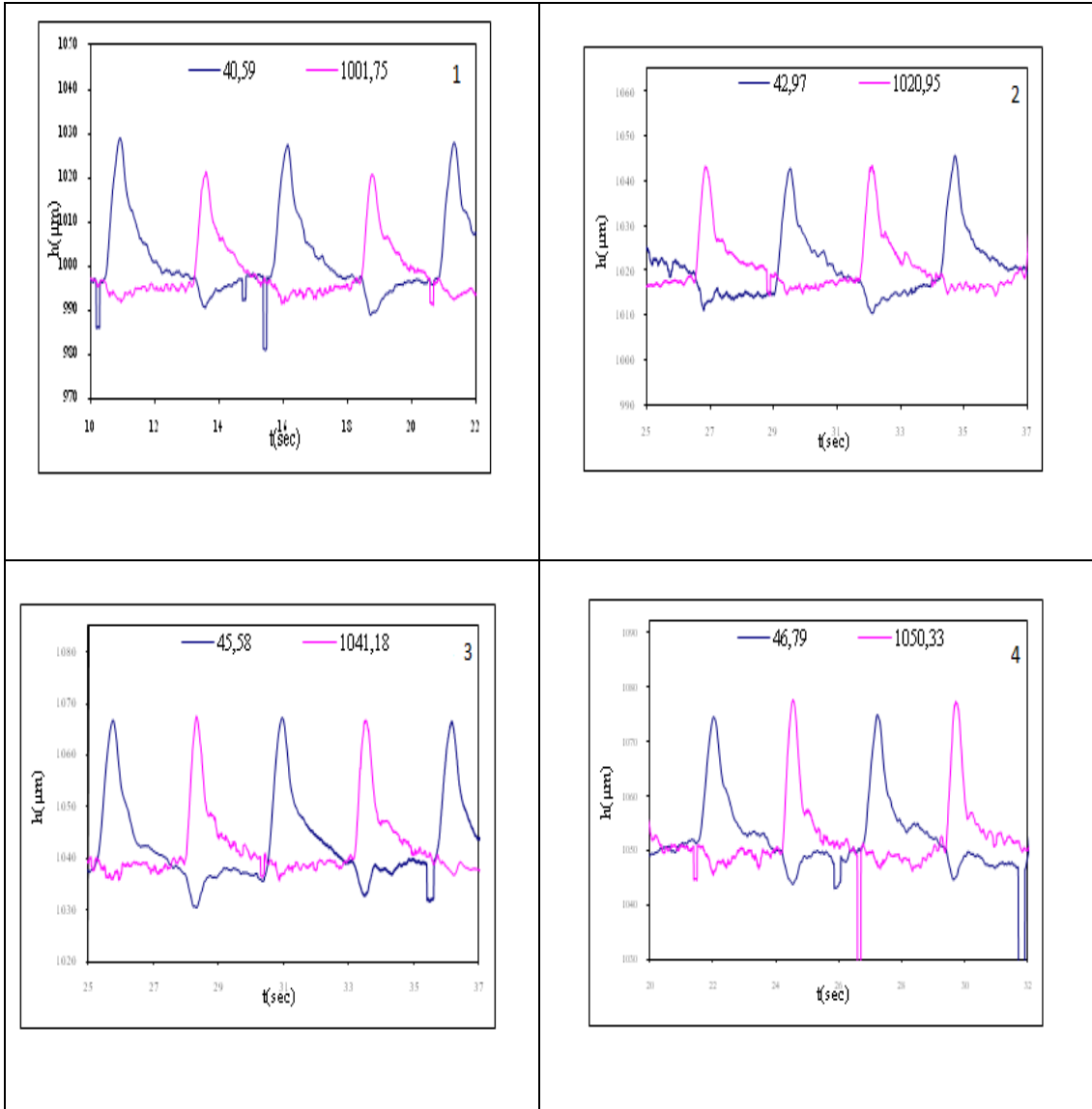
Στο σχήμα 4.5 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 15% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 44.86.

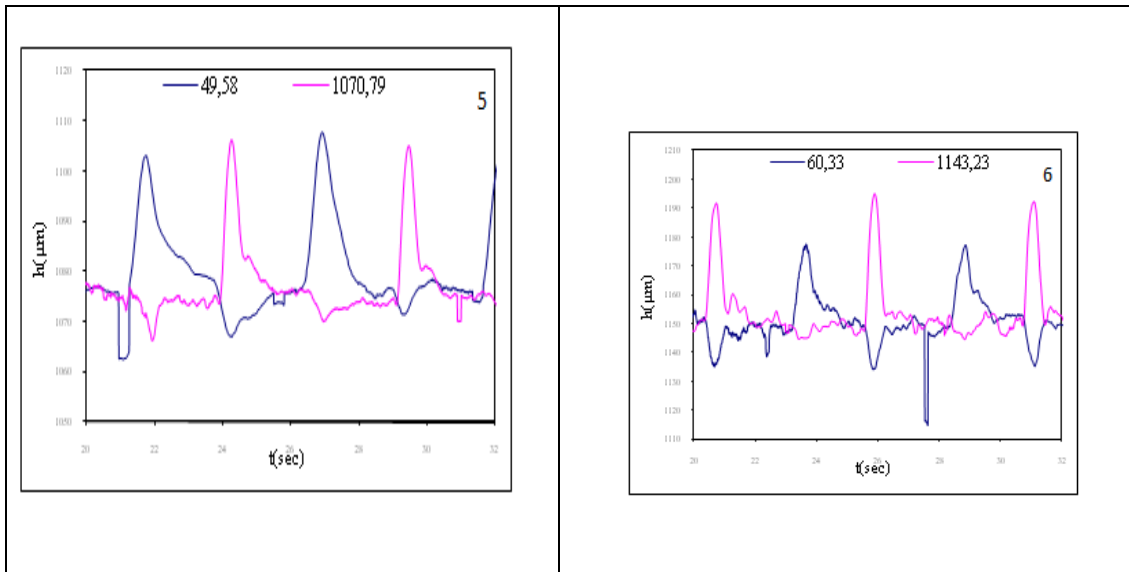


**Σχήμα 4.6** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### **4.2.4 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 20% γλυκερίνη.**

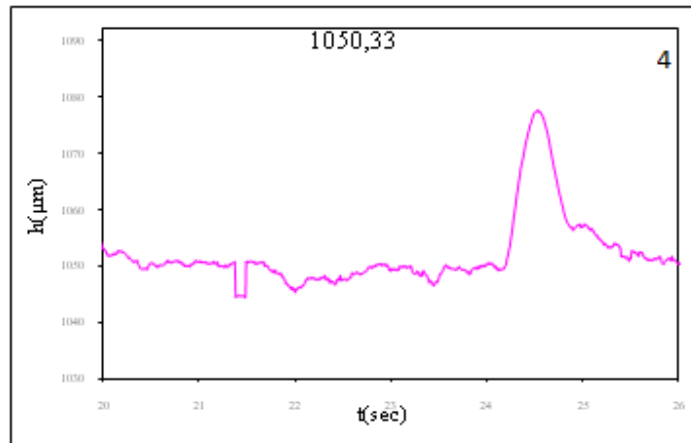
Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 20% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 31.17 έως 73.85. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.





**Σχήμα 4.7** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 40.59$ , 2)  $Re= 42.97$ , 3)  $Re = 45.98$ , 4)  $Re= 46.79$ , 5)  $Re= 49.58$ , 6)  $Re= 60.33$

Στο σχήμα 4.7 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 20% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 45.58.

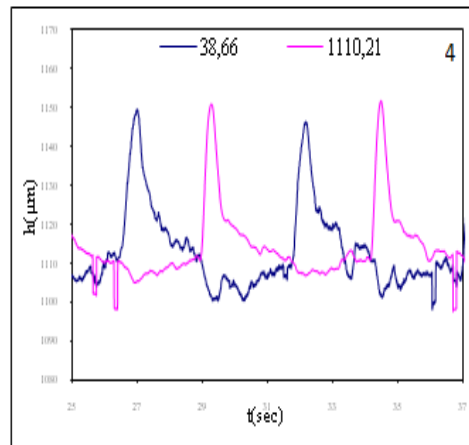
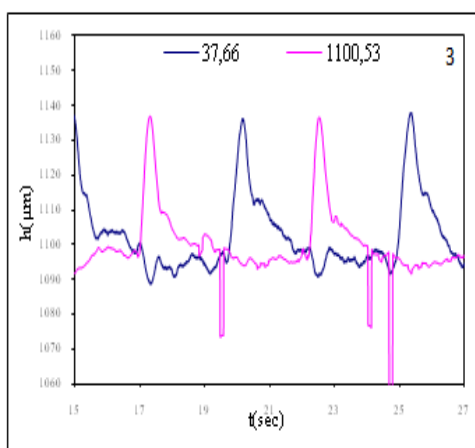
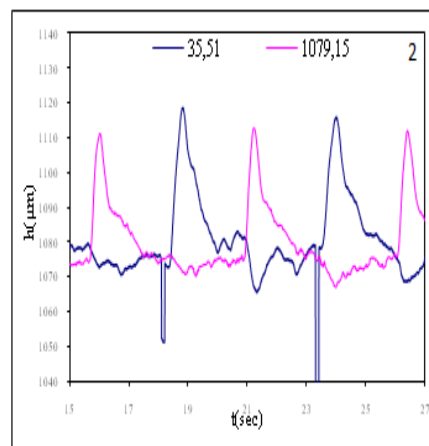
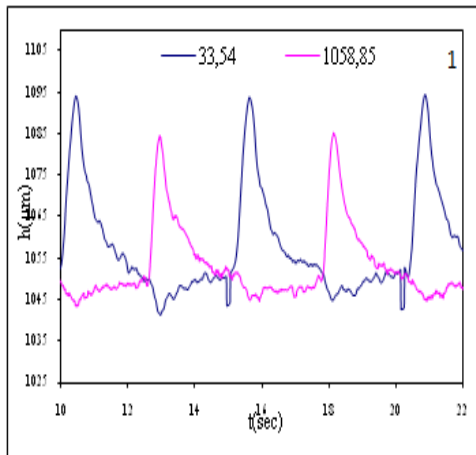


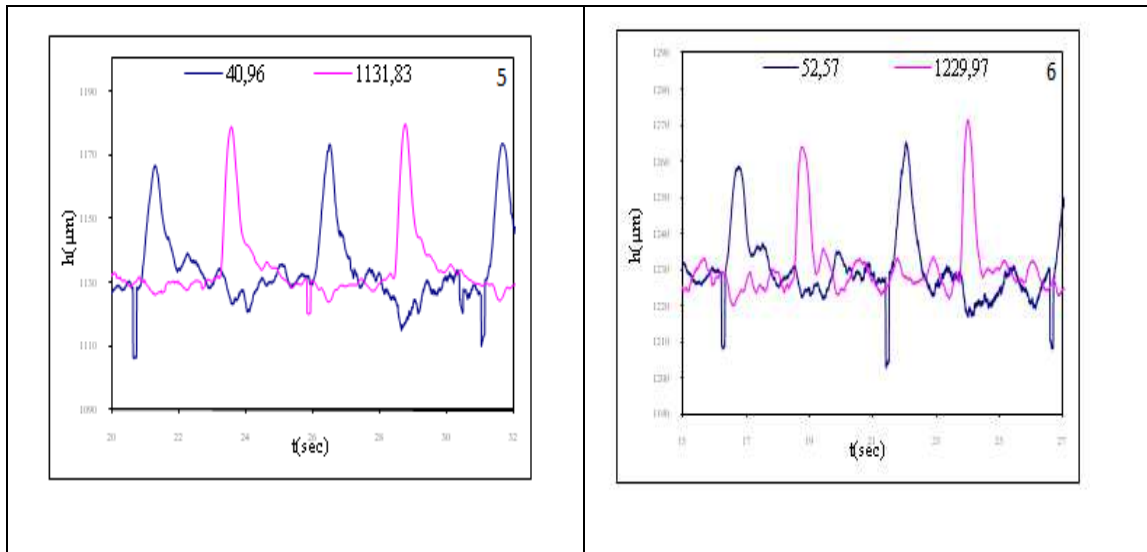
**Σχήμα 4.8** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### **4.2.5 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 25% γλυκερίνη.**

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 25% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 25.75 έως 61.02. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

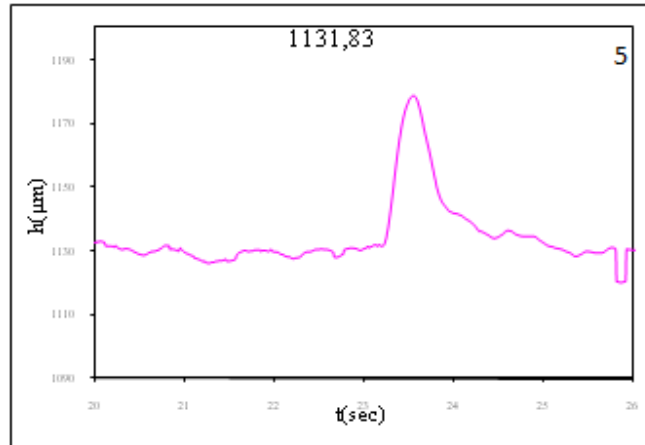






**Σχήμα 4.9** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 33.54$ , 2)  $Re = 35.51$ , 3)  $Re = 37.66$ , 4)  $Re = 38.66$ , 5)  $Re = 40.96$ , 6)  $Re = 32.57$

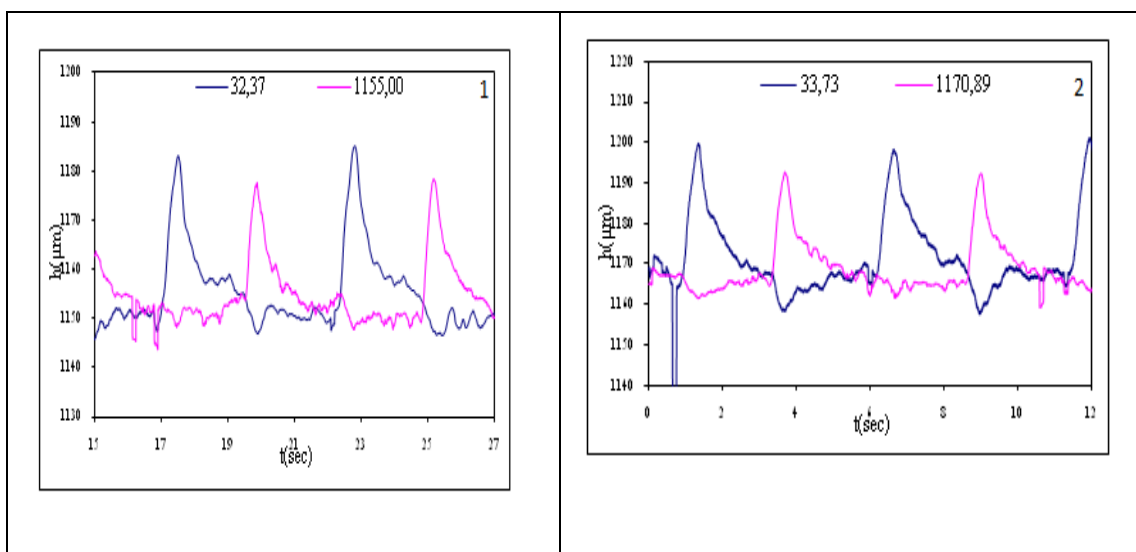
Στο σχήμα 4.9 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 25% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 37.66.

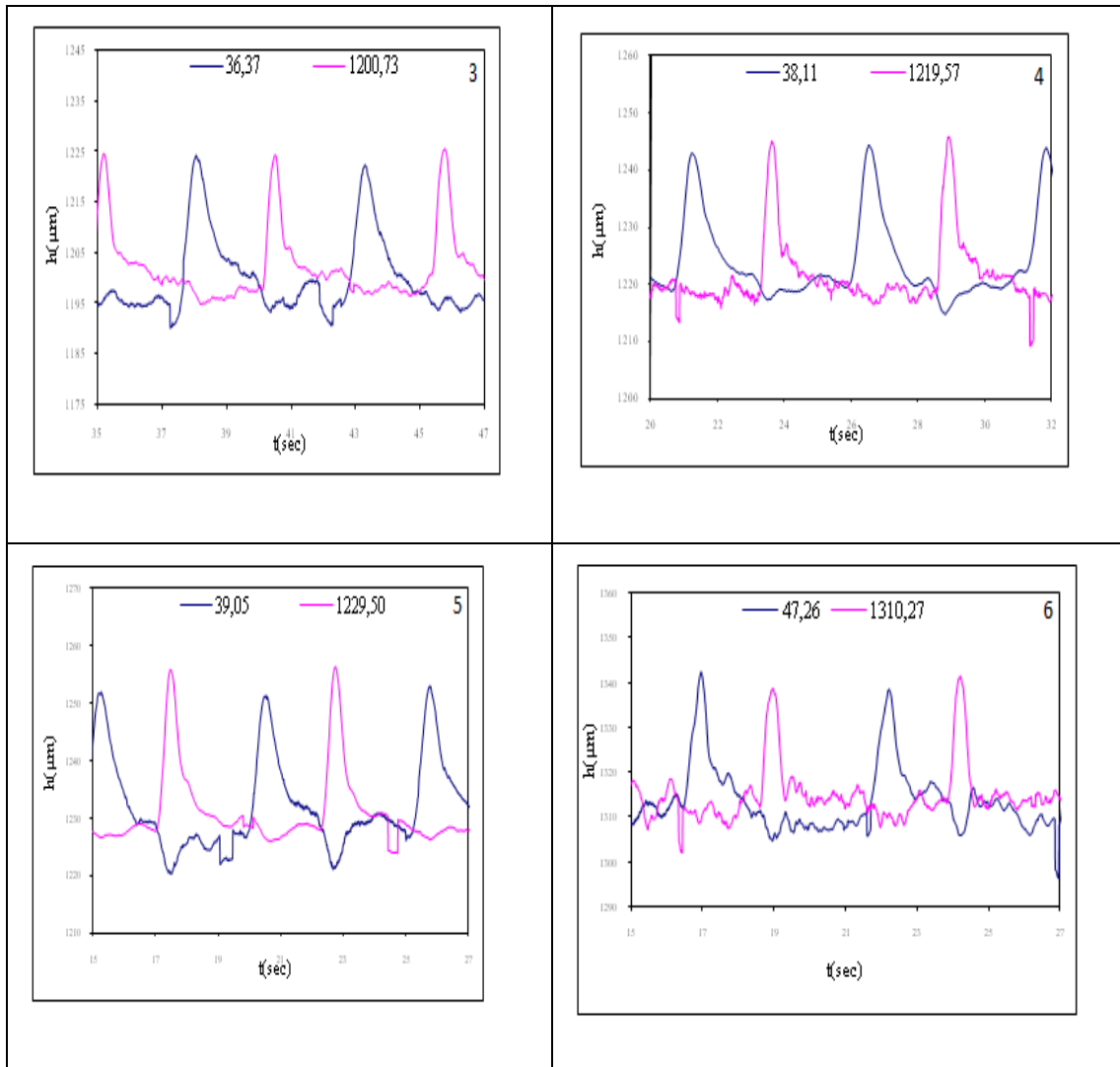


Σχήμα 4.10 Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### 4.2.6 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 30% γλυκερίνη.

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 30% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματά μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 24.52 έως 65.16. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

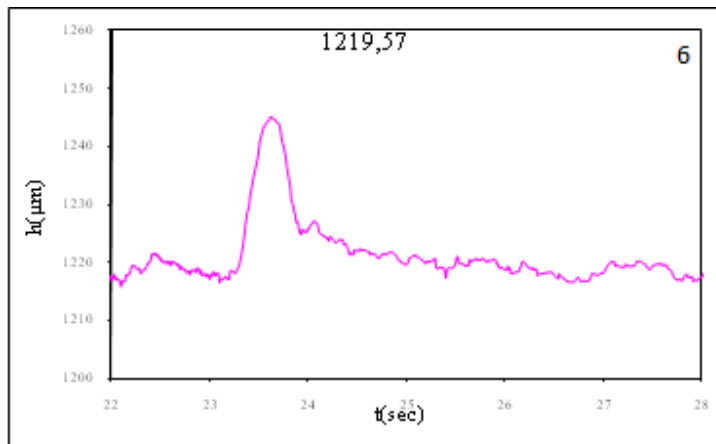




**Σχήμα 4.11** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής :1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 32,37$ , 2)  $Re= 33,73$ , 3)  $Re = 36,37$ , 4)  $Re= 38,11$ , 5)  $Re= 39,05$ , 6)  $Re= 47,26$

Στο σχήμα 4.11 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 30% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα

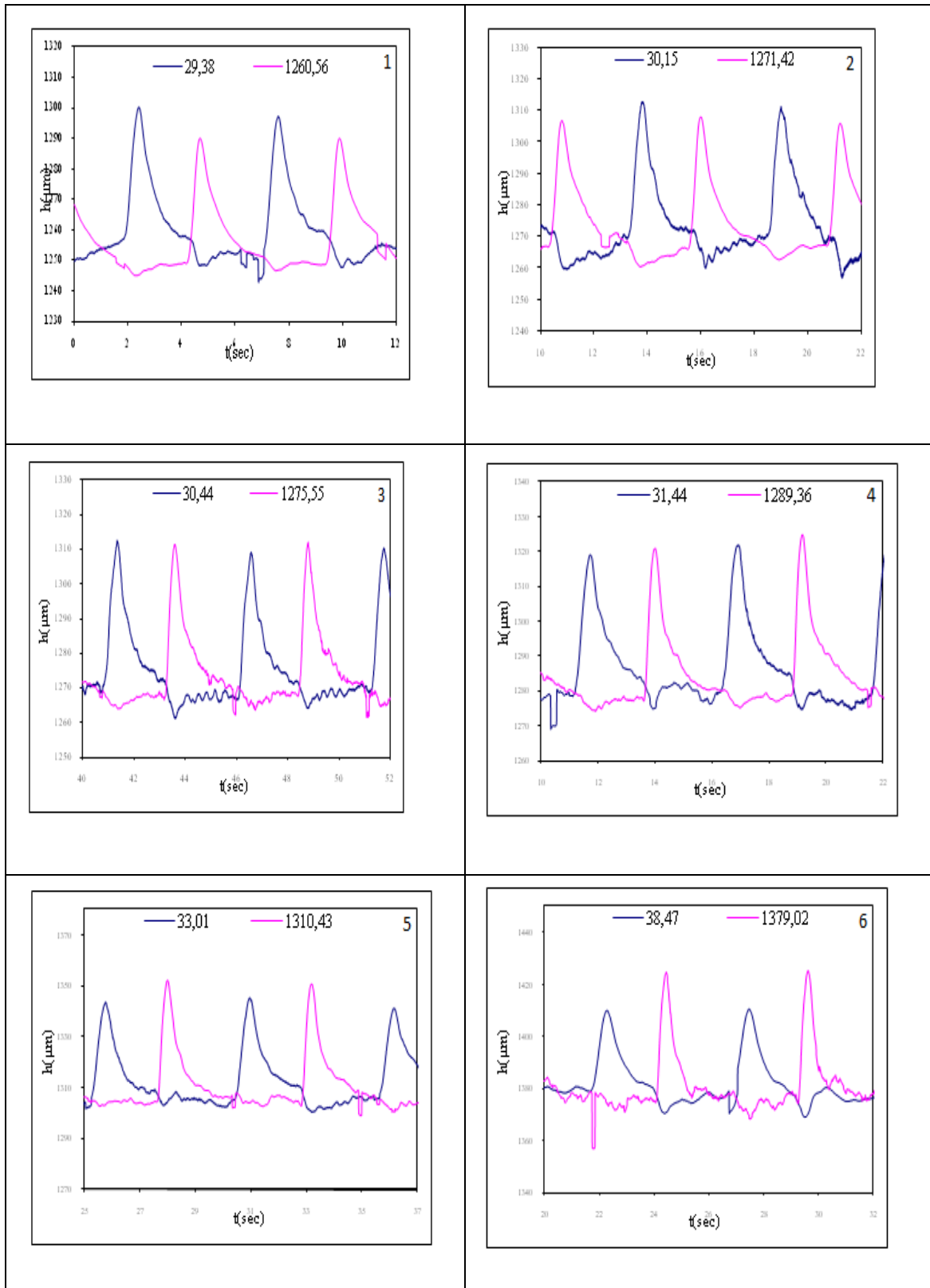
στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 36.37.



Σχήμα 4.12 Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

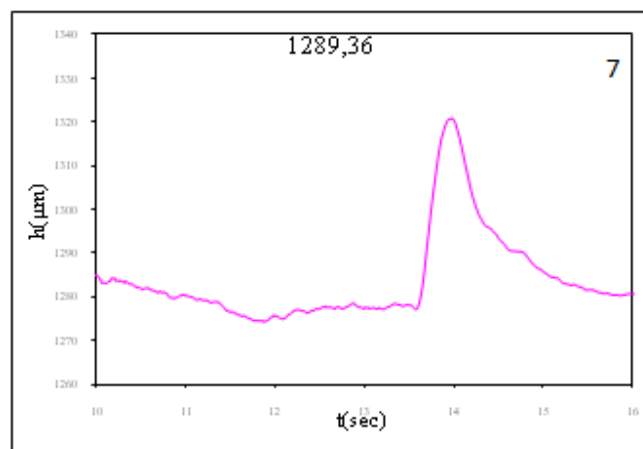
#### 4.2.7 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 35% γλυκερίνη

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 35% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 24.00 έως 43.69. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.



**Σχήμα 4.13** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 29.38$ , 2)  $Re = 30.15$ , 3)  $Re = 30.44$ , 4)  $Re = 31.44$ , 5)  $Re = 33.01$ , 6)  $Re = 38.47$

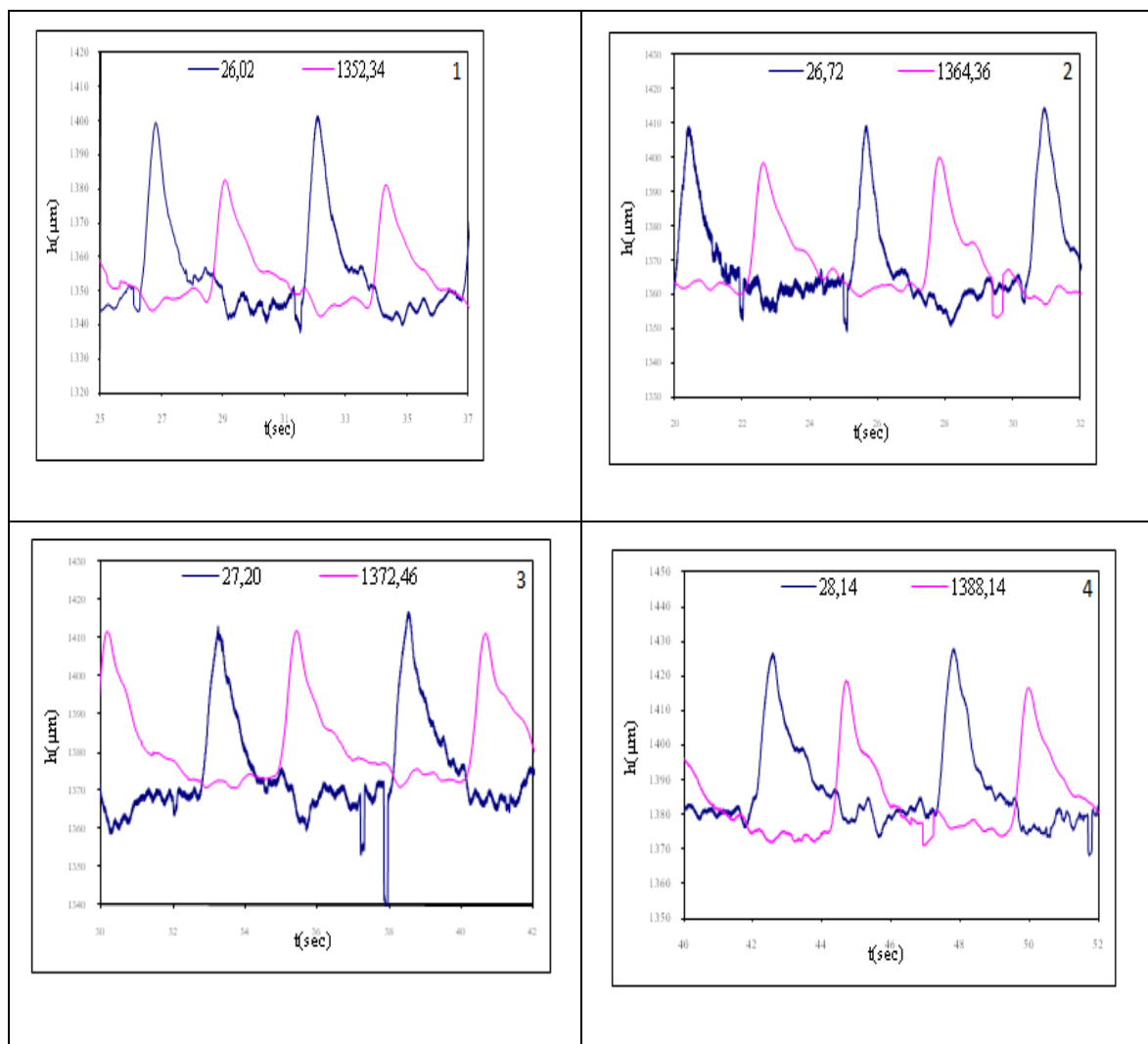
Στο σχήμα 4.13 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 35% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 36.37.



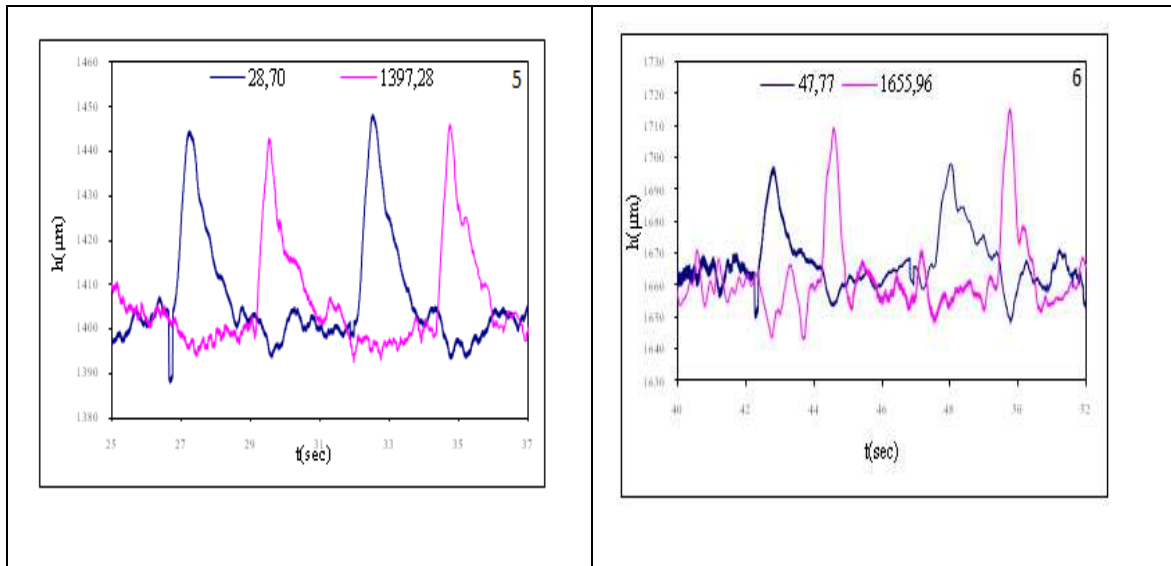
**Σχήμα 4.14** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### 4.2.8 Αποτελέσματα στις 2 μίρες για 40% γλυκερίνη

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 40% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματά μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 21.27 έως 47.77. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

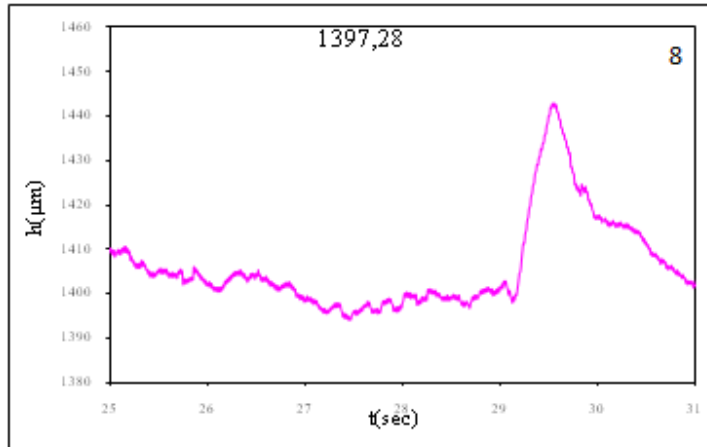






**Σχήμα 4.15** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re=26.02$ , 2)  $Re=26.72$ , 3)  $Re=27.2$ , 4)  $Re=28.14$ , 5)  $Re=28.7$ , 6)  $Re=47.77$

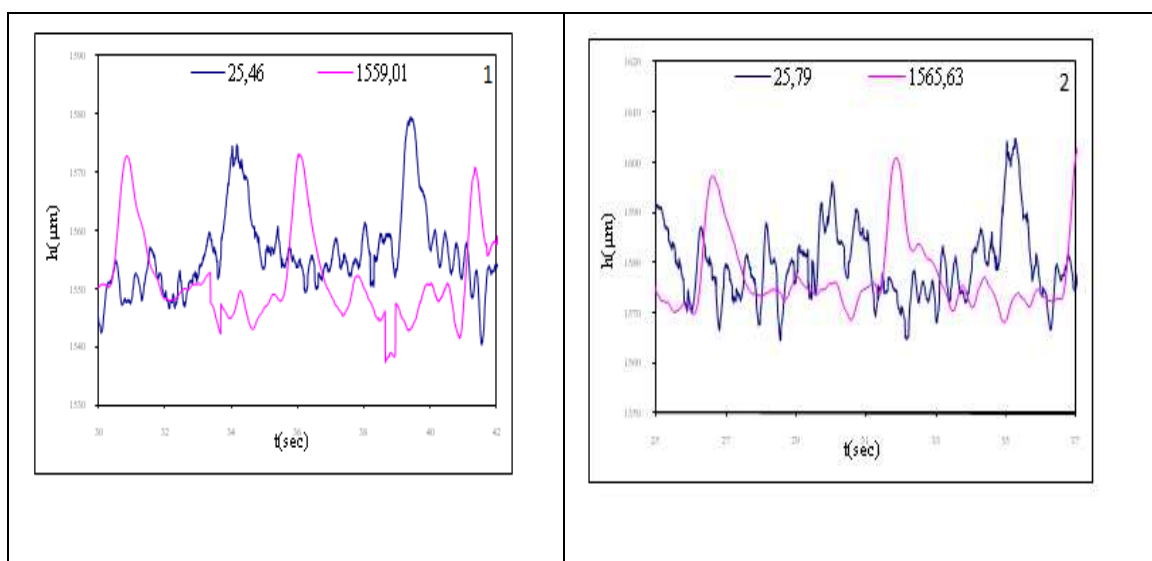
Στο σχήμα 4.15 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 40% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 27.20.

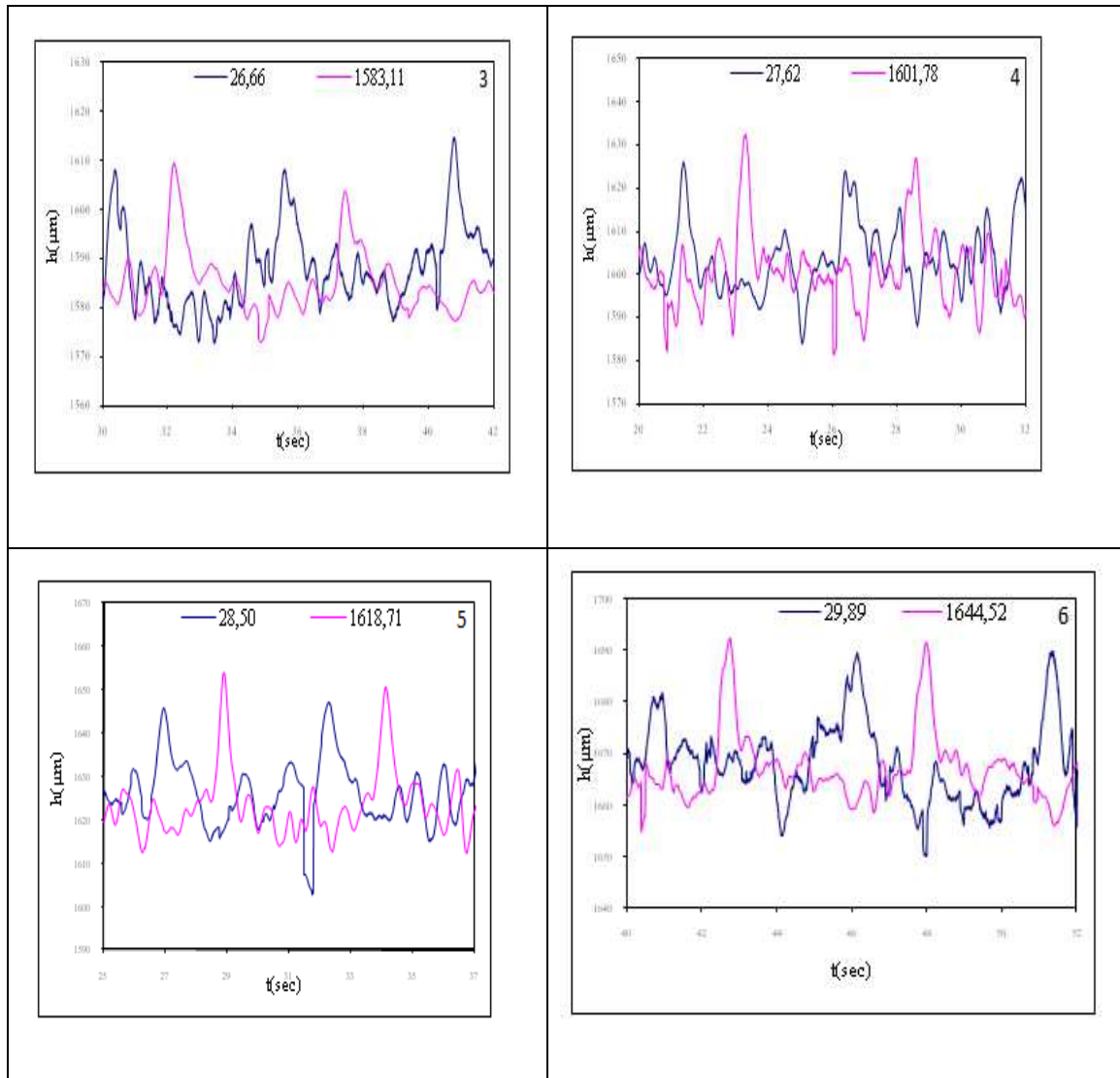


Σχήμα 4.16 Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### 4.2.9 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 45% γλυκερίνη

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 45% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 16.02 έως 31.67. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

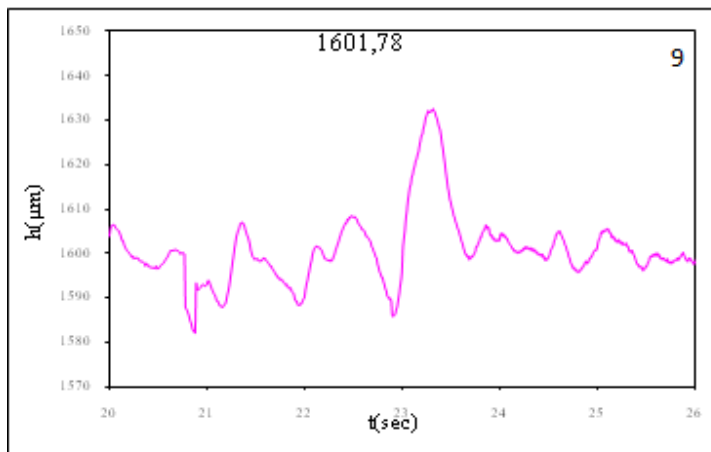




**Σχήμα 4.17** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re=25.46$ , 2)  $Re=25.79$ , 3)  $Re=26.66$ , 4)  $Re=27.62$ , 5)  $Re=28.5$ , 6)  $Re=29.89$

Στο σχήμα 4.17 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 45% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας

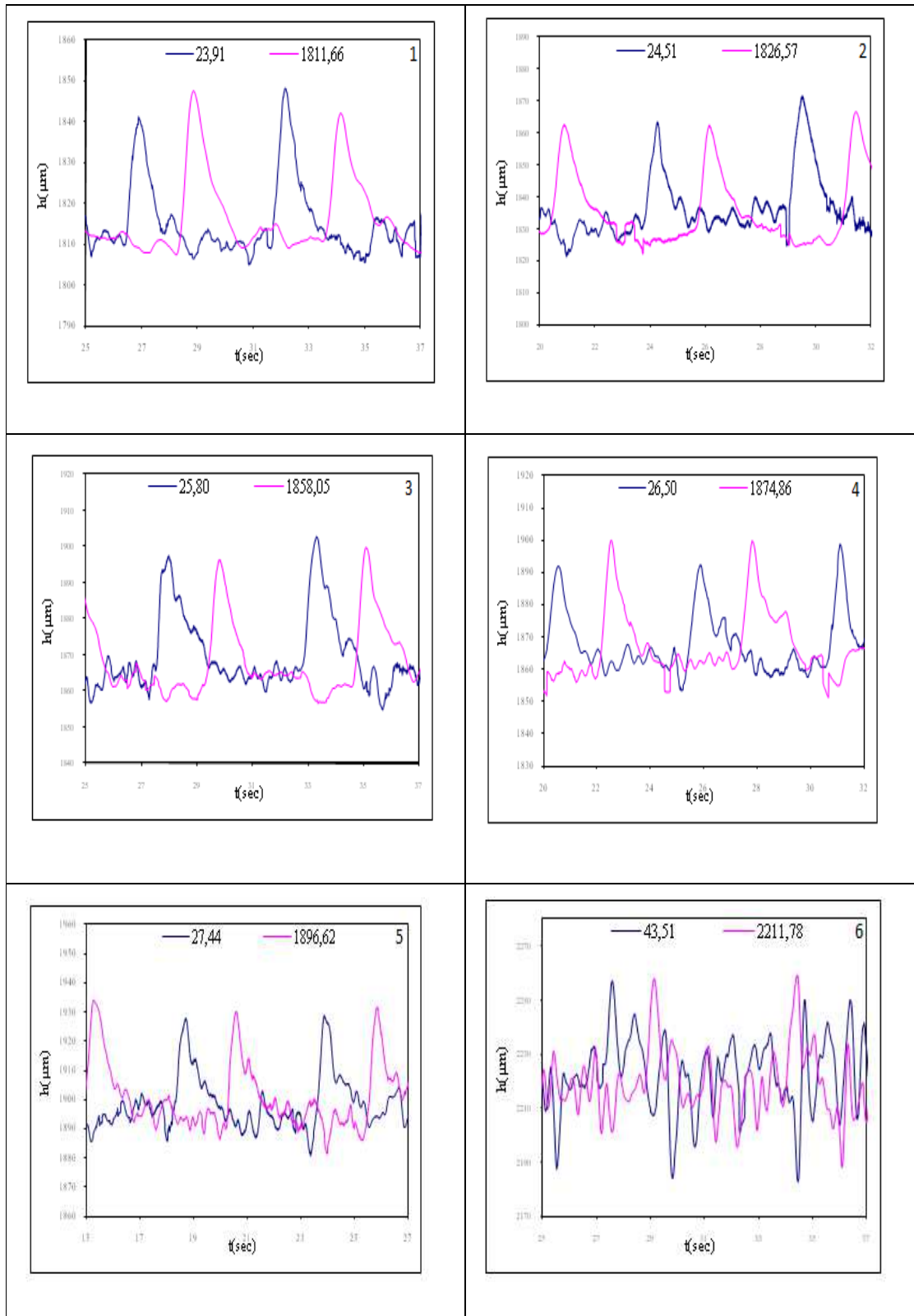
βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 26.66.



Σχήμα 4.18 Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

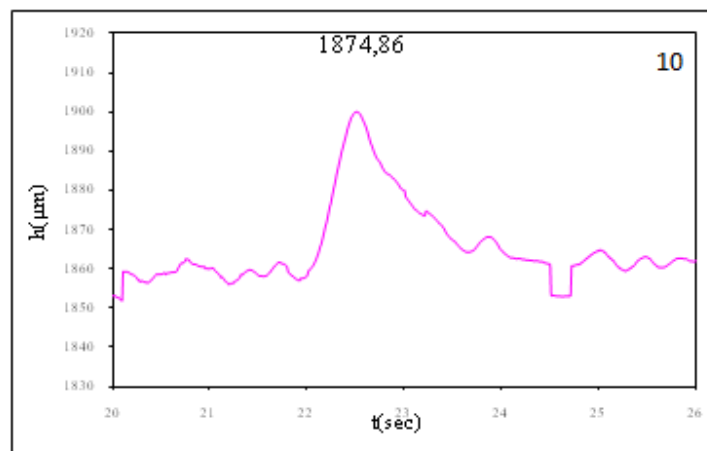
#### 4.2.10 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 50% γλυκερίνη

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 50% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματα μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 16.26 έως 43.51. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.



**Σχήμα 4.19** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re=23.91$ , 2)  $Re=24.51$ , 3)  $Re=25.8$ , 4)  $Re=26.5$ , 5)  $Re=27.44$ , 6)  $Re=43.51$

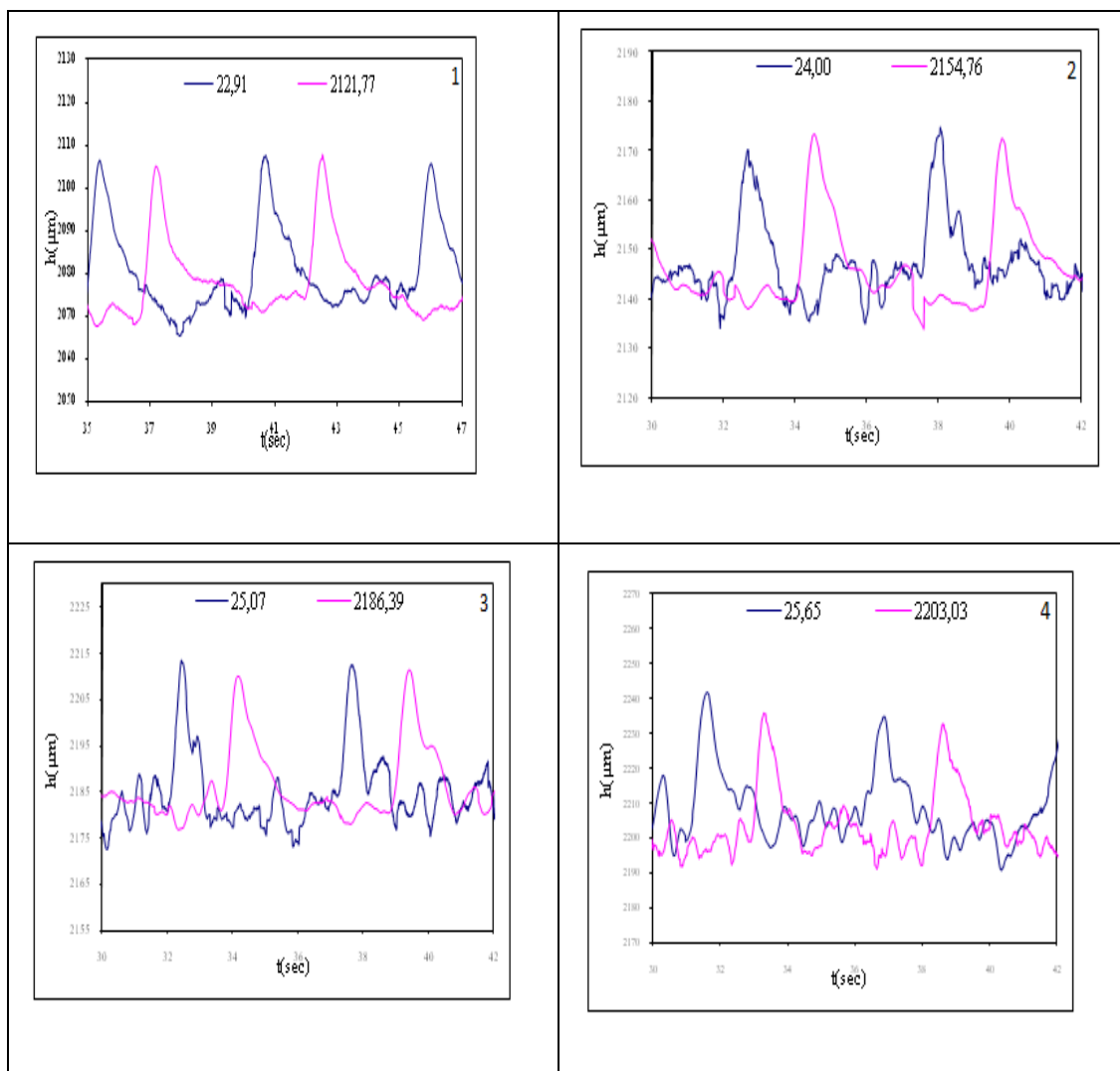
Στο σχήμα 4.19 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 50% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 25.80.

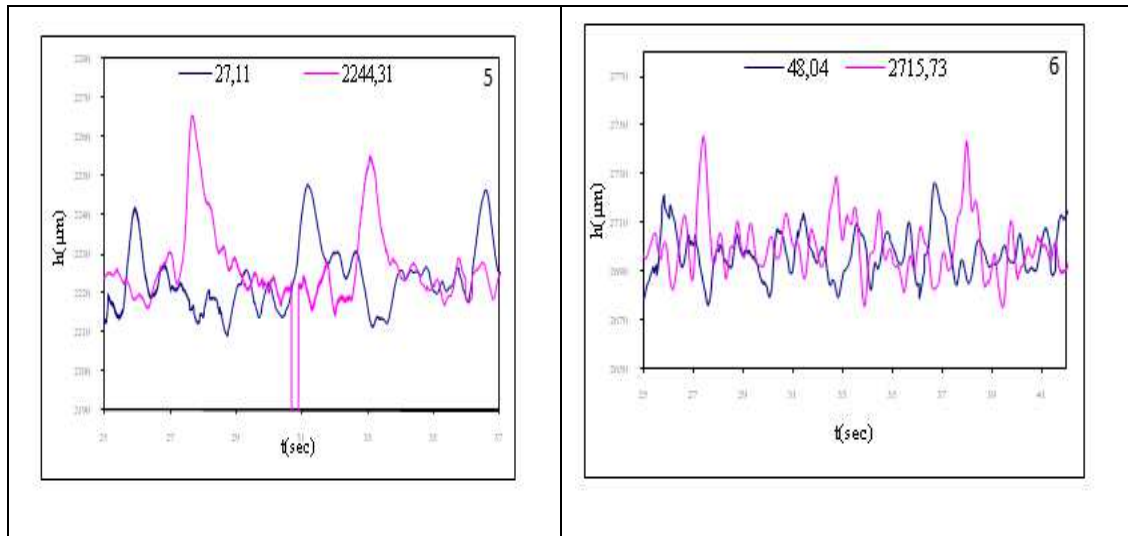


**Σχήμα 4.20** Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### 4.2.11 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 55% γλυκερίνη

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 55% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματά μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 16.11 έως 48.04. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

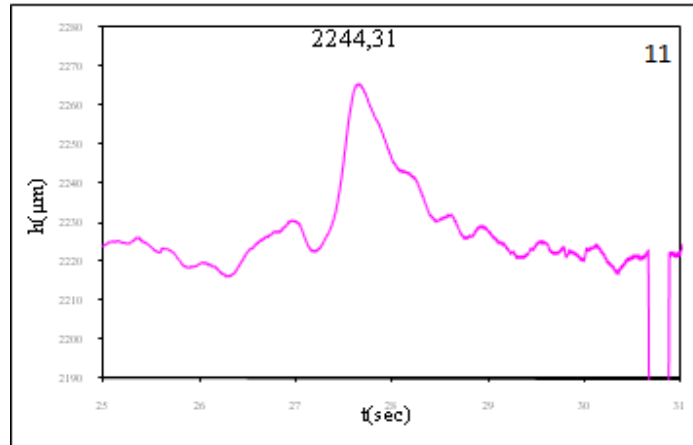




**Σχήμα 4.21** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re = 22.91$ , 2)  $Re = 24.00$ , 3)  $Re = 25.07$ , 4)  $Re = 25.65$ , 5)  $Re = 27.11$ , 6)  $Re = 48.04$

Στο σχήμα 4.21 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $-x_0=15\text{ cm}$  και  $-x_0=65\text{cm}$ ), για 55% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 25.07.

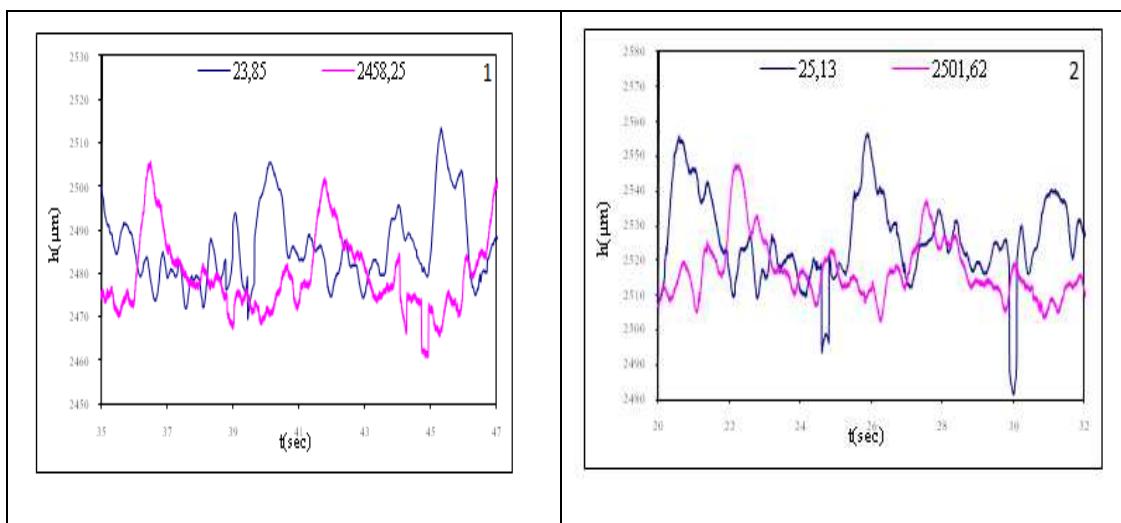


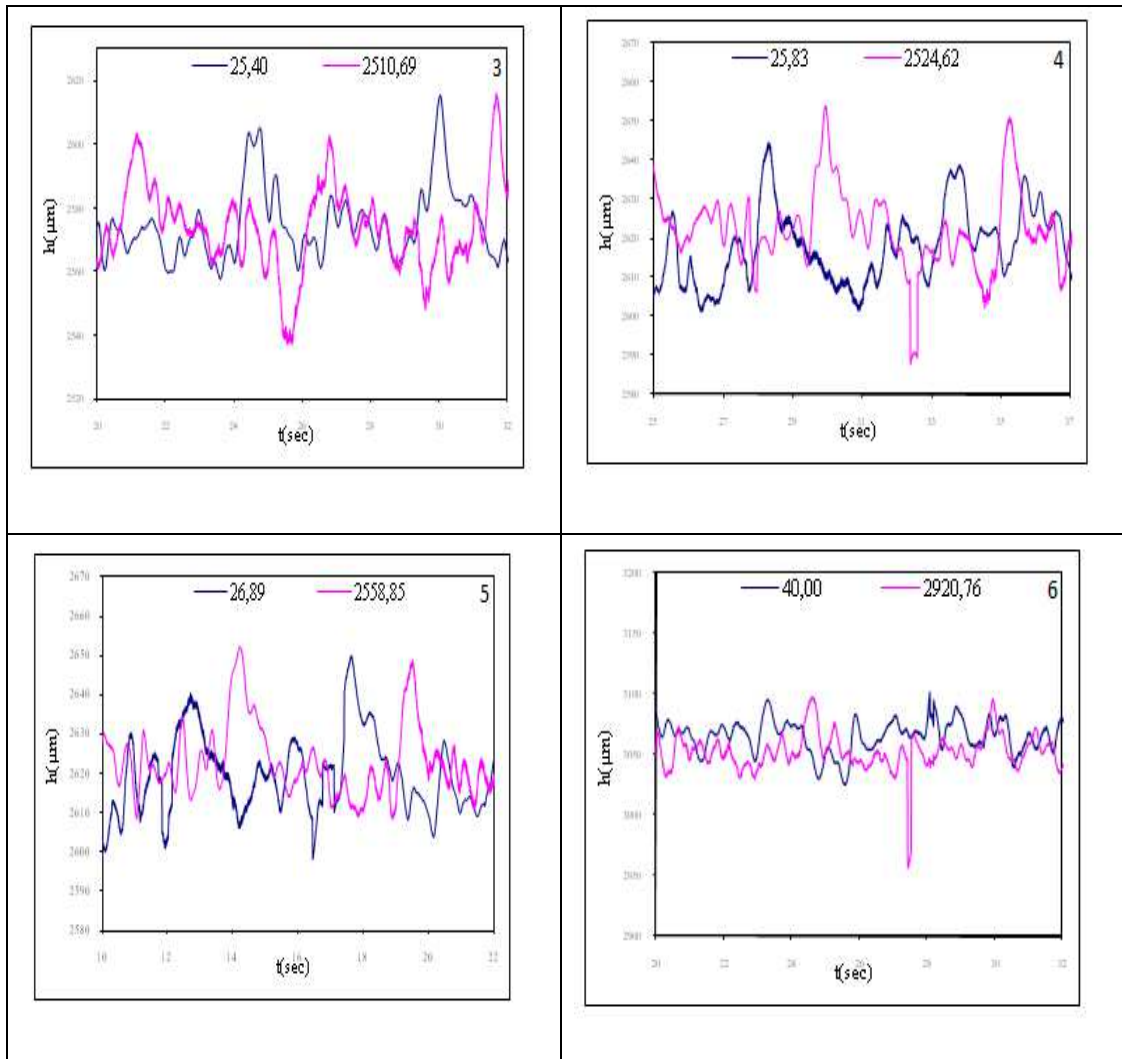


Σχήμα 4.22 Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### 4.2.12 Αποτελέσματα στις 2 μοίρες για 60% γλυκερίνη

Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού γλυκερίνης περιεκτικότητας 60% σε γλυκερίνη. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στις 2° σύμφωνα με τη θεωρία είναι 23.86, ενώ για τα πειράματά μας επιλέξαμε ένα εύρος αριθμών Reynolds από 18.08 έως 40.00. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρακολουθούμε την αύξηση του πάχους υμένα, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

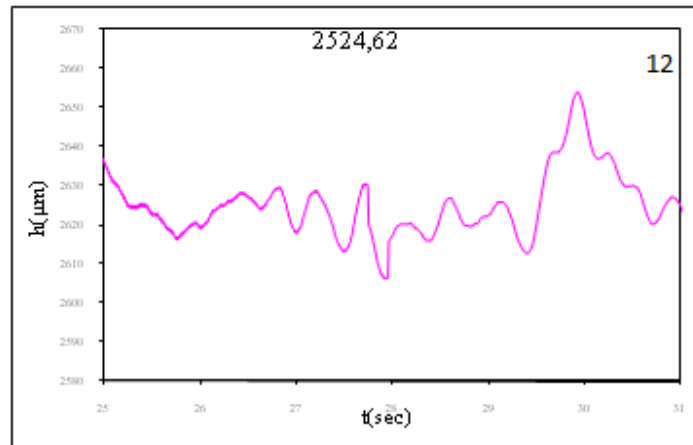




**Σχήμα 4.23** Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής : 1ο  $x_0=15\text{cm}$ , 2ο  $x_0=65\text{cm}$ . 1)  $Re=23.85$ , 2)  $Re=25.13$ , 3)  $Re=25.40$ , 4)  $Re=25.83$ , 5)  $Re=26.89$ , 6)  $Re=40.00$

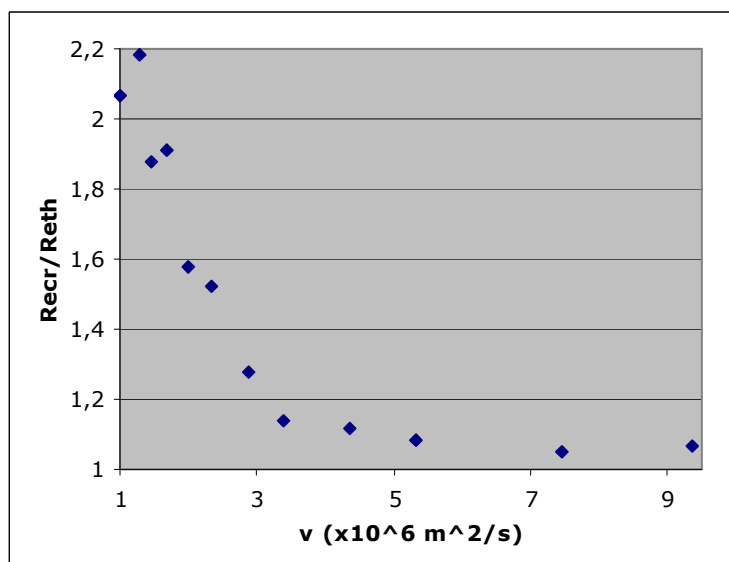
Στο σχήμα 4.23 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα  $h(x_0, y_0, t)$  σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ( $x_0=15\text{ cm}$  και  $x_0=65\text{cm}$ ), για 60% γλυκερίνη, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με  $\varphi=2^\circ$ . Στα διαγράμματα 1, 2 το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα 4, 5 και 6 το πάχος του υμένα

στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα στον αριθμό Reynolds 25.40.



Σχήμα 4.24 Χαρακτηριστική μορφή κύματος σε αστάθεια υμένα

#### 4.3 Εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re σε σχέση με το κινηματικό ιξώδες



Σχήμα 4.25 Εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re σε σχέση με το κινηματικό ιξώδες

Κάνοντας το διάγραμμα του πειραματικού  $Re$  με το κινηματικό ιξώδες παρατηρείται ότι αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε γλυκερίνη μειώνεται ο πειραματικός κρίσιμος αριθμός  $Re$ . Διαπιστώθηκε ότι σε μικρά ιξώδη ο κρίσιμος  $Re$  είναι πολύ μεγαλύτερος από τον θεωρητικό, ενώ σε μεγάλα ιξώδη προσεγγίζει την θεωρητική τιμή.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού διπλώματος. 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 το ιξώδες του διαλύματος.

### 5.1 Συμπεράσματα

Χρησιμοποιήθηκε η αγωγιμομετρική τεχνική για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας.

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων για να προσδιοριστεί η ευστάθεια της ροής του υγρού υμένα υπό την επίδραση του ιξώδους. Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε επίπεδο τοίχωμα. Η μορφή της διαταραχής είχε τη μορφή κατακόρυφου υδραυλικού άλματος με πλάτος 50  $\mu\text{m}$ . Η κλίση του τοιχώματος παραμένει σταθερή και είναι ίση με  $2^\circ$ .

Πιο συγκεκριμένα, ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού και γλυκερίνης (10% – 60% κ.β. γλυκερίνη), ενώ οι παροχές που μελετήθηκαν εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds σε πάνω και κάτω από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για σταθερή κλίση.

Το βασικό συμπέρασμα αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ότι κάνοντας το διάγραμμα του πειραματικού Re με το κινηματικό ιξώδες παρατηρείται ότι αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε γλυκερίνη μειώνεται ο πειραματικός κρίσιμος αριθμός Re.

Διαπιστώθηκε ότι σε μικρά  $\epsilon$  ο κρίσιμος  $Re$  είναι πολύ μεγαλύτερος από τον θεωρητικό, ενώ σε μεγάλα  $\epsilon$  προσεγγίζει την θεωρητική τιμή.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Πίνακας 1.** Ιξώδες διαλυμάτων γλυκερίνης – νερού

<b>Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions in Centipoises/mPa s</b>											
Glycerine percent weight	Temperatur e (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 <sup>0)</sup>	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

<sup>0)</sup>Viscosity 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 <sup>3</sup> )					Glycerine (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )				
	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	1.26108	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	1.12300	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	1.22360	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	1.07195	1.07175	1.07010	1.06815	1.06605
78	1.20610	1.20570	1.20305	1.20005	1.19705	28	1.06935	1.06915	1.06755	1.06560	1.06355
77	1.20335	1.20300	1.20030	1.19735	1.19435	27	1.06670	1.06655	1.06495	1.06305	1.06105
76	1.20060	1.20025	1.19760	1.19465	1.19170	26	1.06410	1.06390	1.06240	1.06055	1.05855
75	1.19785	1.19750	1.19485	1.19195	1.18900	25	1.06150	1.06130	1.05980	1.05800	1.05605
74	1.19510	1.19480	1.19215	1.18925	1.18635	24	1.05885	1.05870	1.05720	1.05545	1.05350
73	1.19235	1.19205	1.18940	1.18650	1.18365	23	1.05625	1.05610	1.05465	1.05290	1.05100
72	1.18965	1.18930	1.18670	1.18380	1.18100	22	1.05365	1.05350	1.05205	1.05035	1.04850
71	1.18690	1.18655	1.18395	1.18110	1.17830	21	1.05100	1.05090	1.04950	1.04780	1.04600
70	1.18415	1.18385	1.18125	1.17840	1.17565	20	1.04840	1.04825	1.04690	1.04525	1.04350
69	1.18135	1.18105	1.17850	1.17565	1.17290	19	1.04590	1.04575	1.04440	1.04280	1.04105
68	1.17860	1.17830	1.17575	1.17295	1.17020	18	1.04335	1.04325	1.04195	1.04035	1.03860
67	1.17585	1.17555	1.17300	1.17020	1.16745	17	1.04085	1.04075	1.03945	1.03790	1.03615
66	1.17305	1.17275	1.17025	1.16745	1.16470	16	1.03835	1.03825	1.03695	1.03545	1.03370
65	1.17030	1.17000	1.16750	1.16475	1.16195	15	1.03580	1.03570	1.03450	1.03300	1.03130
64	1.16755	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	14	1.03330	1.03320	1.03200	1.03055	1.02885
63	1.16480	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	13	1.03080	1.03070	1.02955	1.02805	1.02640
62	1.16200	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	12	1.02830	1.02820	1.02705	1.02560	1.02395
61	1.15925	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	11	1.02575	1.02565	1.02455	1.02315	1.02150
60	1.15650	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	10	1.02325	1.02315	1.02210	1.02070	1.01905
59	1.15370	1.15340	1.15105	1.14835	1.14555	9	1.02085	1.02075	1.01970	1.01835	1.01670
58	1.15095	1.15065	1.14830	1.14560	1.14285	8	1.01840	1.01835	1.01730	1.01600	1.01440
57	1.14815	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	7	1.01600	1.01590	1.01495	1.01360	1.01205
56	1.14535	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	6	1.01360	1.01350	1.01255	1.01125	1.00970
55	1.14260	1.14230	1.14005	1.13740	1.13470	5	1.01120	1.01110	1.01015	1.00890	1.00735
54	1.13980	1.13955	1.13730	1.13465	1.13195	4	1.00875	1.00870	1.00780	1.00655	1.00505
53	1.13705	1.13680	1.13455	1.13195	1.12925	3	1.00635	1.00630	1.00540	1.00415	1.00270
52	1.13425	1.13400	1.13180	1.12920	1.12650	2	1.00395	1.00385	1.00300	1.00180	1.00035
51	1.13150	1.13125	1.12905	1.12650	1.12380	1	1.00155	1.00145	1.00060	0.99945	0.99800



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- **N. Malamataris, M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou** 2002, *Solitary waves on inclined films: Flow structure and binary interactions*. Phys. Fluids, 14, 1082-1094.
- **M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou** 2001, *Observations of solitary wave dynamics of film flows*. J. Fluid Mech., 435, 191-215
- **Liu J., Paul J. D. and Gollub J. P.** 1993, Measurements of the primary instabilities of film flows. Journal of Fluid Mechanics 250, p. 69.
- **Σαμαντάς Αθανάσιος** 2008, Πειραματική μελέτη ευστάθειας ροής υγρού υμένα
- **McCabe W. L., Smith J. C. and Harriot P.** 2002, Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής. Εκδόσεις Τζιόλα.