

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική μελέτη ευστάθειας ροής υγρού υμένα

Γουμενόπουλος Ιωάννης

A.M. : 765



© 2011 Γουμενόπουλος Ιωάννης

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

Τριμελής επιτροπή

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

Αριθ. Εισ.:	9968/1
Ημερ. Εισ.:	26-10-2011
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιδετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜ
	2011
	ΓΟΥ

Πρώτος εξεταστής: **Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ**, Αναπλ. Καθηγητής
(επιβλέπων) Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα
Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Λάρισας

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

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

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Βλαχογιάννη Μιχαήλ για τη διπλωματική εργασία που μου ανέθεσε και τη βοήθεια που μου παρείχε ώστε να ολοκληρωθεί και να παρουσιαστεί αυτή η εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Γεωργαντάκη Άννα και Zhehui Cao για τις καθοδηγήσεις τους και την διαρκή και πολύτιμη επίβλεψή τους τόσο στο πειραματικό σκέλος της εργασίας όσο και στο θεωρητικό, αλλά και τον συμφοιτητή μου Ζιούλη Ιωσήφ – Άγγελο για τις συμβουλές που μου έδωσε. Ειδικά ο Zhehui και ο Άγγελος με βοήθησαν πολύ στο «στήσιμο» της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω τη συγκεκριμένη εργασία στην οικογένειά μου, η οποία μου στάθηκε από την αρχή σε αυτόν τον αγώνα που έδωσα μέχρι το τέλος των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ευστάθεια της ροής υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα και ειδικότερα την ευστάθεια του υμένα, όταν επιδρούν πάνω του κάποιοι παράγοντες, όπως το μέγεθος της διαταραχής, η ένταση της παροχής και η αλλαγή κλίσης. Το τοίχωμα που εξετάζεται στα πειράματα είναι ημιτονοειδές και γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που ήδη υπάρχουν από το επίπεδο τοίχωμα.

Την εργασία την απαρτίζουν πέντε κεφάλαια. Το πρώτο είναι η εισαγωγή και αναφέρει τις εφαρμογές της ροής υγρού υμένα και ποιες είναι οι παράμετροι που εξετάζονται μέσω των πειραμάτων. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα και συμπεράσματα από παλαιότερες μελέτες, οι οποίες αφορούν τη θεωρία της ροής υγρού υμένα. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη και ποια διαδικασία ακολουθήθηκε ώστε να πραγματοποιηθούν οι πειραματικές μετρήσεις. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1	6
1.1 Στόχος της εργασίας	6
1.2 Περιοχές εφαρμογής της ροής του υγρού υμένα	6
1.3 Επίδραση παραμέτρων στα πειράματα	7
1.4 Δομή της εργασίας	8
Κεφάλαιο 2	9
2.1 Ροή υγρού υμένα σε επίπεδη πλάκα	9
2.1.1 Θεωρία και εξισώσεις για ροή Nusselt	9
2.1.2 Προσδιορισμός της ευστάθειας του ρευστού	12
2.2 Ροή υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα	13
2.2.1 Θεωρία και υπολογισμοί για τη μόνιμη ροή	13
2.2.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια σε ημιτονοειδές τοίχωμα	17
2.3 Πειραματικές μελέτες	17
Κεφάλαιο 3	23
3.1 Πειραματική διάταξη	23
3.1.1 Περιγραφή της διάταξης	23
3.1.2 Αλλαγές στην πειραματική διάταξη	25
3.2 Ρύθμιση παραμέτρων	25
3.2.1 Αλλαγή της γωνίας κλίσης	25
3.2.2 Έλεγχος της ευθυγράμμισης του καναλιού	25
3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική	26
3.4 Διαδικασία εισαγωγής διαταραχής	27
3.5 Επιλογή διαλύματος	28
3.6 Εφαρμογή των πειραμάτων	30
3.6.1 Βαθμονόμηση της τεχνικής μέτρησης της αγωγιμότητας	30
3.6.2 Μεθοδολογία πειραμάτων	31
Κεφάλαιο 4	32
4.1 Χαρακτηριστικά πειραματικών μετρήσεων	32
4.2 Μελέτη πρωτογενούς αστάθειας	33
4.2.1 Αποτελέσματα για διάλυμα 68% γλυκερίνης – νερού	33
4.2.2 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για διάλυμα 68%	49
4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαλύματα 68% & 58% σε γλυκερίνη	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	52
5.1 Συμπεράσματα	52
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	54
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Στόχος της εργασίας

Τα πειράματα της συγκεκριμένης εργασίας εκπονήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Λάρισας και είχαν ως στόχο τη μελέτη της ευστάθειας της ροής υγρού υμένα συναρτήσει της σύστασης του διαλύματος, της παροχής του ρευστού και της γωνίας κλίσης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής της γωνίας κλίσης, της περιεκτικότητας του διαλύματος σε γλυκερίνη, της παροχής του ρευστού και του αριθμού Kapitza στον κρίσιμο αριθμό Reynolds, που είναι ο αριθμός στον οποίο η στρωτή ροή αλλάζει σε τυρβώδης. Ακόμη μελετήθηκε η επίδραση της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής μετά την εισαγωγή της στο σύστημα. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις μετρήσεις στο ημιτονοειδές τοίχωμα με τα αποτελέσματα που υπάρχουν για το επίπεδο τοίχωμα.

1.2 Περιοχές εφαρμογής της ροής του υγρού υμένα

Ο όρος ροή υγρού υμένα υποδηλώνει τη ροή στην οποία το πάχος του ρευστού που ρέει στο κανάλι είναι πολύ μικρό συγκριτικά με το μήκος και το πλάτος του. Στη ρευστομηχανική, η ροή υγρού υμένα λόγω βαρύτητας κατά μήκος επίπεδου τοιχώματος είναι πολύ σημαντική και εφαρμόζεται σε πολλά βιομηχανικά συστήματα, όπως είναι οι εναλλάκτες θερμότητας, οι πύργοι διαβρεχόμενου τοιχώματος, οι εξατμιστήρες, οι αντιδραστήρες και οι στήλες απορρόφησης αερίων από ρέον υγρό, ενώ αποτελεί και αναπόσπαστο κομμάτι στη θεωρία πολλών μηχανολογικών μαθημάτων, όπως είναι οι Φυσικές Διεργασίες και τα Φαινόμενα Μεταφοράς. Η αναγκαιότητα της χρησιμοποίησης της ροής Nusselt σε συσκευές μεταφοράς μάζας και θερμότητας έγκειται στο ότι οι λεπτοί υμένες είναι ικανοί να μεταφέρουν ικανοποιητικά ποσά θερμότητας και μάζας χωρίς να έχουν υψηλή υδραυλική αντίσταση και χωρίς να απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ρευστού.

Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο για τη ροή υγρού υμένα είναι η επίδραση που ασκεί το

πεδίο ροής στο ρυθμό μεταφοράς της θερμότητας και της μάζας και κατά επέκταση και στην απόδοση των συσκευών. Ένα παράδειγμα είναι στους συμπυκνωτές ατμού, όπου ο υμένας του συμπυκνώματος δεν επιτρέπει την εύκολη μεταφορά της θερμότητας. Ακόμη, στις συσκευές μεταφοράς μάζας, το πεδίο του υμένα δυσκολεύει την εξάτμιση του διαλυτού αερίου, ενώ στους πύργους ψύξης το πάχος του υμένα καθορίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος, καθώς πιθανή αύξηση του πάχους, λόγω αλλαγής στην πτώση πίεσης, μπορεί να οδηγήσει σε πλημμύριση της διάταξης.

Όπως γίνεται αντιληπτό, το πεδίο του υγρού υμένα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα φαινόμενα μεταφοράς, των οποίων άλλοτε επιδιώκεται η ενίσχυσή τους και άλλοτε η ελαχιστοποίηση τους. Για παράδειγμα, σε συσκευές όπως είναι οι εναλλάκτες θερμότητας και οι αντιδραστήρες είναι επιθυμητή η μικρή αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας και μάζας, ενώ σε άλλες συσκευές, όπως αυτές που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία επιστρώσεων με ροή ρευστού, είναι σημαντικό να υπάρχουν χαμηλοί συντελεστές μεταφοράς. Τέλος, μεγάλη έμφαση δίνεται και στην επιφάνεια πάνω στην οποία ρέει το ρευστό, η οποία συνήθως δεν είναι επίπεδη και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή η εφαρμογή της θεωρίας και των εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθούν.

1.3 Επίδραση παραμέτρων στα πειράματα

Όπως θα αναλυθεί και σε επόμενο κεφάλαιο, οι παράμετροι που επηρεάζουν τις πειραματικές μελέτες είναι κυρίως η σύσταση του ρευστού, η παροχή του υγρού στο κανάλι, η γωνία κλίσης του καναλιού και η διαταραχή που εισάγεται στο σύστημα.

Συγκεκριμένα, το ρευστό που χρησιμοποιείται είναι νευτώνειο και αποτελεί διάλυμα γλυκερίνης – νερού. Τα περισσότερα πειράματα αφορούν διάλυμα περιεκτικότητας 58% και 68% σε γλυκερίνη, σε γωνίες κλίσης από 3° έως 45°. Τέλος, η παροχή του ρευστού ξεκινάει από την ασταθή περιοχή και μειώνεται μέχρι να καταλήξει στην ευσταθή περιοχή, σε μία προσπάθεια να βρεθεί ο κρίσιμος αριθμός Reynolds.

Το περιορισμένο μήκος του καναλιού καθιστά αναγκαία την εισαγωγή της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, ώστε να εμφανιστούν φαινόμενα, όπως είναι η μετάβαση της τυρβώδους ροής σε στρωτή και να επιτευχθεί έτσι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που

υπάρχουν για ροή σε επίπεδο τοίχωμα με τα αποτελέσματα που εξάγονται από τη χρήση του ημιτονοειδούς τοιχώματος. Η διαταραχή που εισάγεται, έχει τη μορφή κατακόρυφου υδραυλικού άλματος και συντελεί στην εύρεση και αξιολόγηση της μεταβατικής περιοχής της ροής.

1.4 Δομή της εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της θεωρίας τόσο της ροής υγρού υμένα, όσο και του αριθμού Reynolds που επηρεάζει την ευστάθεια της ροής, ενώ ταυτόχρονα παρατίθενται και συμπεράσματα που έχουν προκύψει από παλιότερες μελέτες. Αρχικά, μελετάται η ροή σε επίπεδο τοίχωμα, ενώ στη συνέχεια η ροή σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, όπως είναι το ημιτονοειδές που χρησιμοποιείται στην εργασία. Επίσης αναφέρονται και οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο της ροής Nusselt.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και αναλύεται η διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων. Ακόμη, γίνεται αναφορά στις παραμέτρους του συστήματος που επηρεάζουν τις συνθήκες ροής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, αλλά και διαγράμματα και πίνακες που βοηθούν στην κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις μετρήσεις και προτείνονται ιδέες για ενδεχόμενα μελλοντικά πειράματα.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση θεωρίας της ροής υγρού υμένα

2.1 Ροή υγρού υμένα σε επίπεδη πλάκα

2.1.1 Θεωρία και εξισώσεις για ροή Nusselt

Το πιο απλό παράδειγμα της ροής Nusselt είναι η ροή υγρού υμένα πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο. Η ροή είναι μονοδιάστατη και θεωρούμε ότι γίνεται πάνω σε επίπεδη επιφάνεια μήκους L και πλάτους W , έχοντας γωνία κλίσης θ ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η πυκνότητα, ρ και το κινηματικό ιξώδες, μ είναι σταθερά (συνεπώς και το κινηματικό ιξώδες, ν , αφού $\nu = \frac{\mu}{\rho}$). Επίσης, η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη και η περιοχή μήκους L απέχει αρκετά από τα σημεία εισόδου και εξόδου της ροής, με αποτέλεσμα η κατανομή της ταχύτητας να μη μεταβάλλεται στη x -διεύθυνση και άρα να μην εξαρτάται από τι μήκος x . Θεωρούμε ως στοιχειώδη όγκο ελέγχου ένα παραλληλεπίπεδο με πάχος dy , μήκος L , πλάτος W και παραλείπουμε τον όρο της συσσώρευσης. Η απεικόνιση της ροής και του όγκου ελέγχου γίνεται στο Σχήμα 2.1. Τουτέστιν, το ισοζύγιο ορμής στη x -διεύθυνση έχει ως εξής :

$$[\text{ΕΙΣΡΟΗ}] - [\text{ΕΚΡΟΗ}] + [\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}] = 0 \quad \text{ή}$$

$$\tau_{xy} \Big|_y \cdot (L \cdot W) - \tau_{xy} \Big|_{y+dy} \cdot (L \cdot W) + \rho \cdot g \cdot \eta \mu \theta \cdot dy \cdot (L \cdot W) = 0$$

Με χρήση του αναπτύγματος Taylor και με απαλοιφή του όρου $(L \cdot W)$ και για $dy \rightarrow 0$, η παραπάνω εξίσωση γίνεται :

$$\frac{d\tau_{xy}}{dy} = \rho \cdot g \cdot \eta \mu \theta$$

Χρησιμοποιούμε την εξίσωση του Newton $\tau_{xy} = -\mu \cdot \frac{du_x}{dy}$, αλλά και τις συνοριακές

συνθήκες 1) στο $y = h$, $\tau_{xy} = 0$ επειδή στη διεπιφάνεια υγρού – αερίου η διατμητική τάση είναι μηδενική, καθώς ο αέρας έχει πολύ μικρό ιξώδες.

2) στο $y = 0$, $u_x|_{y=0} = 0$ η οποία είναι η συνθήκη μη – ολίσθησης, καθώς η στερεή επιφάνεια δεν κινείται.

Έχουμε λοιπόν την κατανομή της ταχύτητας, η οποία είναι :

$$u_x(y) = \left[\frac{\rho \cdot g \cdot \eta \mu \theta}{2 \cdot \mu} \right] \cdot y(2 \cdot h - y)$$

Από την κατανομή της ταχύτητας προκύπτει η μέση ταχύτητα, $\{u_x\}$ σε μία διατομή της ροής και η οποία ισούται με τα $2/3$ της μέγιστης ταχύτητας

Από την εξίσωση της κατανομής, προκύπτει ακόμη η μέγιστη ταχύτητα, η οποία εμφανίζεται στη διεπιφάνεια για $y = h$ και είναι :

$$u_{x,\max} = \left[\frac{\rho \cdot g \cdot \eta \mu \theta}{2 \cdot \mu} \right] \cdot h^2$$

Αν λύσουμε την εξίσωση αυτή ως προς h , βρίσκουμε το πάχος του υγρού υμένα :

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot u_{x,\max}}{\rho \cdot g \cdot \eta \mu \theta}}$$

Από τη μέση ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί και η ογκομετρική παροχή :

$$Q = \{u_x\} \cdot W \cdot h$$

Η κατανομή της πίεσης, p στην y – κατεύθυνση, χρησιμοποιώντας τη συνοριακή συνθήκη για $y = h$, $p = P_{atm}$ είναι :

$$p = -\rho \cdot \sigma \nu \theta \cdot g \cdot (y - h) + P_{atm}$$

Ο αριθμός Reynolds που προκύπτει από αυτές τις εξισώσεις είναι :

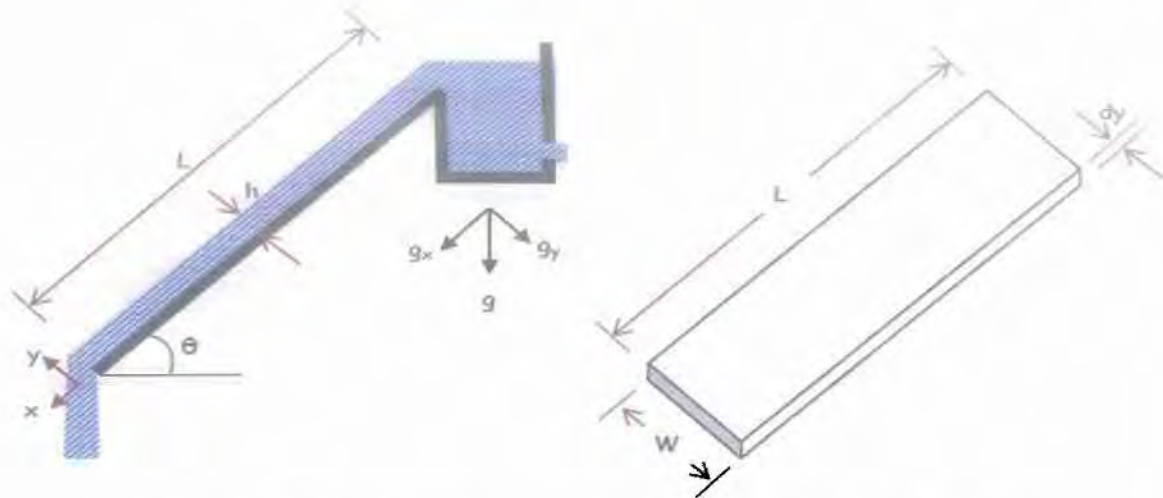
$$Re = \frac{4 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \eta \mu \theta \cdot h^2}{3 \mu^2}$$

Αν το πρόβλημα αδιαστατοποιηθεί, τότε περιγράφεται από τους αριθμούς Reynolds και Kapitza, οι οποίοι είναι :

$$Re = \frac{\{u\} \cdot h}{\nu}$$

$$Ka = \frac{\sigma}{\rho \cdot \nu^{\frac{4}{3}} \cdot g^{\frac{1}{3}}}$$

Όπου σ η επιφανειακή τάση. Ο αριθμός Kapitza προτιμάται, επειδή δεν εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού και από την παροχή. Παρόλα αυτά, η ανάλυση της ροής με ελεύθερη επιφάνεια είναι δύσκολη, καθώς η μορφή της επιφάνειας δεν είναι γνωστή και το πρόβλημα είναι μη – γραμμικό.



Σχήμα 2.1 Ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο και όγκος ελέγχου

2.1.2 Προσδιορισμός της ευστάθειας του ρευστού

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ρευστοδυναμική ευστάθεια σε πολλές πειραματικές και βιομηχανικές εφαρμογές, εισάγονται φυσικές ή εξωτερικά επιβαλλόμενες διαταραχές, η εξέλιξη των οποίων συναρτήσει του χρόνου και του χώρου μεταβάλλει την κατάσταση του συστήματος [Pozrikidis, 1997].

Το ρευστό στην αρχική του κατάσταση, χωρίς διαταραχές, ακολουθεί τη λεγόμενη βασική ροή, η οποία καθορίζει και τη συμπεριφορά της διαταραχής. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαταραχή είναι και οι αδιάστατοι αριθμοί, όπως είναι οι αριθμοί Kapitza και Reynolds. Δύο σημαντικές περιπτώσεις εξελίξεων των διαταραχών είναι η συναγωγικά ασταθής και η απόλυτα ασταθής. Στην πρώτη περίπτωση, η διαταραχή αυξάνεται αρχικά, αλλά στο τέλος η αρχική θέση επιβολής της ηρεμεί, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η διαταραχή επηρεάζει το πεδίο της ροής σε μεγάλο βαθμό και η θέση επιβολής της δεν ηρεμεί [Drazin, 2002].

Η κυριότερη μέθοδος για τον προσδιορισμό της ρευστοδυναμικής ευστάθειας ενός υγρού είναι η εισαγωγή ενός μεγάλου πλήθους διαφορετικών διαταραχών, ώστε να παρατηρηθεί ο τρόπος που εξελίσσονται. Με αυτόν τον τρόπο, όταν οι διαταραχές αποσβένουν με την πάροδο του χρόνου, η ροή ονομάζεται ευσταθής, ενώ όταν οι διαταραχές συνεχίζουν να επηρεάζουν το πεδίο ροής, η ροή ονομάζεται ασταθής. Επειδή όμως η εισαγωγή πολλών διαταραχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά είναι πολύ δύσκολη, εφαρμόζεται η μέθοδος της

ανάλυσης γραμμικής ευστάθειας για τη μελέτη της εξέλιξης της διαταραχής. Αρχικά, θεωρείται μικρού μεγέθους διαταραχή για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, ενώ στη συνέχεια η εξίσωση κίνησης γραμμικοποιείται ως προς την ταχύτητα της βασικής ροής, χρησιμοποιώντας αρκετές αρχικές συνθήκες και κατάλληλες μεθόδους για τη λύση τους. Αφού γίνει η γραμμικοποίηση, χρησιμοποιείται η ανάλυση ιδιομορφών, ώστε να βρεθεί ένας μικρός αριθμός ροών που έχουν μία γενική λύση σε αναλυτική μορφή, που εξετάζει την εκθετική ως προς το χρόνο μείωση ή αύξηση της εξέλιξης των διαταραχών. Αν κάποιες από αυτές τις διαταραχές αυξάνονται συναρτήσει του χρόνου, τότε η ροή είναι ασταθής. Για την αστάθεια ή την ευστάθεια της ροής ευθύνονται σε αυτήν την περίπτωση κυρίως τα μη γραμμικά φαινόμενα, τα οποία πολλές φορές μπορεί να προκαλέσουν ασταθή συμπεριφορά στη ροή του υγρού παρά το μικρό πλάτος της διαταραχής, ενώ άλλες φορές μπορεί να μειώνουν την ανάπτυξη ασταθών διαταραχών και να οδηγήσουν το ρευστό σε μία μόνιμη κατάσταση [Drazin, 1997]. Βέβαια, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά τη γραμμική ευστάθεια. Ένας περιορισμός έχει να κάνει με το γεγονός ότι πολλές φορές η ευστάθεια της ροής δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί και στην πράξη, ενώ μπορεί να δημιουργηθεί αστάθεια σε μία ιδανική ροή εξαιτίας μη γραμμικών φαινομένων που οφείλονται σε κατασκευαστικές ατέλειες ή επικαθίσεις [Μποντόζογλου, 2006].

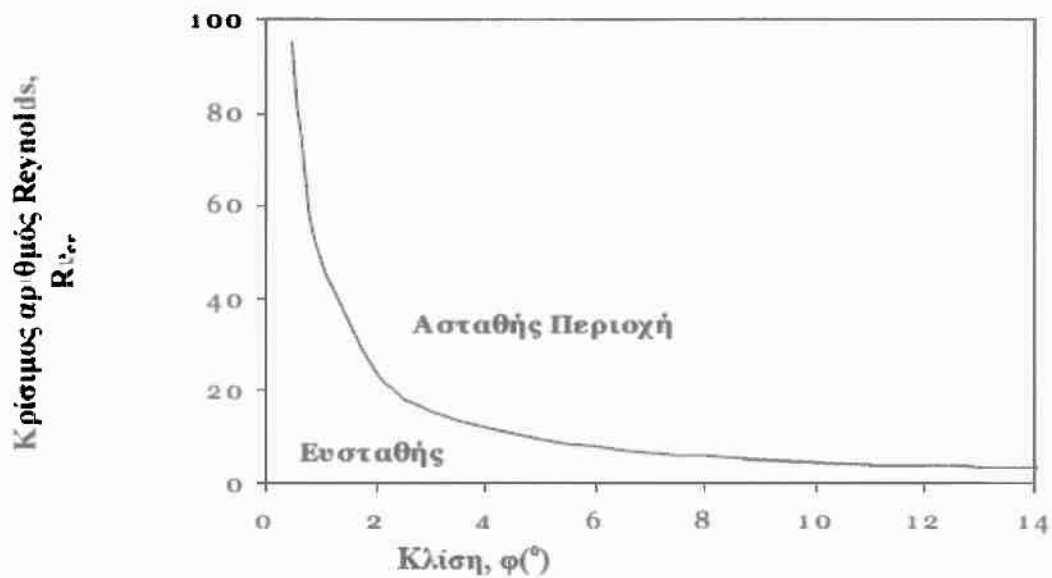
Συμπερασματικά, ο προσδιορισμός της ρευστοδυναμικής ευστάθειας συναρτήσει του χρόνου εξαρτάται κυρίως από τη βασική ροή του ρευστού και από το είδος της διαταραχής. Έτσι, υπάρχουν οι εξής πέντε περιπτώσεις για τον προσδιορισμό της ροής: της ευστάθειας, της γραμμικής ευστάθειας, της αστάθειας, της γραμμικής αστάθειας και της οριακής ευστάθειας. Στην πρώτη περίπτωση, το μέγεθος της διαταραχής αποσβένει, στη δεύτερη όλες οι διαταραχές αποσβένουν, στην τρίτη το μέγεθος της διαταραχής αυξάνεται, στην τέταρτη ένα μεγάλο μέρος των διαταραχών αυξάνεται και στην πέμπτη το μέγεθος της διαταραχής παραμένει σταθερό.

2.2 Ροή υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα

2.2.1 Θεωρία και υπολογισμοί για τη μόνιμη ροή

Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει πάνω στη ροή υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένα τοιχώματα αφορούν τη μόνιμη ροή. Τις πρώτες θεωρητικές μελέτες τις ξεκίνησε ο Wang (1981), ο οποίος ασχολήθηκε με τη ροή ενός λεπτού υμένα πάνω σε

κυματοειδές τοίχωμα, θεωρώντας μικρούς αριθμούς Reynolds και μικρό πλάτος πλάκας συγκριτικά με το ύψος του υγρού υμένα. Η παρατήρηση που έκανε ο Wang ήταν ότι στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού δημιουργήθηκε μία στατική περιοδική δομή με μήκος κύματος ίδιο με αυτό της πλάκας. Όσο μεγάλωνε ο αριθμός Reynolds, οι κυματοειδείς αυλακώσεις του τοιχώματος προκαλούσαν αστάθεια στη ροή, ενώ το μήκος κύματος παρέμενε παραπλήσιο με αυτό του τοιχώματος. Το σχήμα 2.3 φανερώνει την επίδραση του τοιχώματος στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

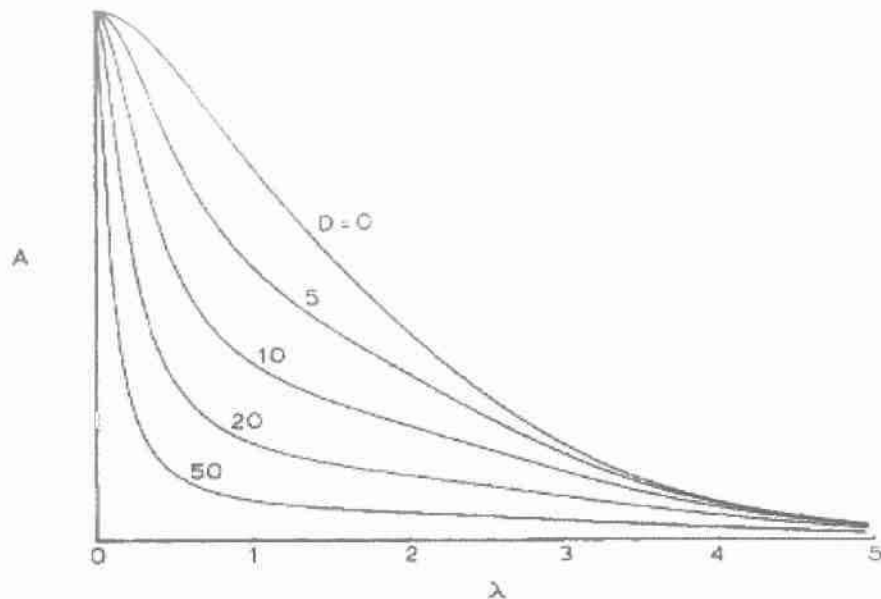


Σχήμα 2.2 Καμπύλη αστάθειας για ροή υγρού υμένα

Συγκεκριμένα, στο σχήμα φαίνεται πώς το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας A επηρεάζεται από την παράμετρο D και από το λόγο λ του μέσου ύψους του υμένα (h) προς το μήκος κύματος της πλάκας. Η παράμετρος D , η οποία συνδυάζει την επίδραση της γωνίας κλίσης του καναλιού, του είδους των αυλακώσεων του τοιχώματος και της διατμητικής τάσης στην αύξηση ή μείωση της ροής, ορίζεται ως εξής :

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

Όπου α : η μέση γωνία κλίσης του καναλιού, β_0 : η γωνία των κυματοειδών γραμμών, T : η επιφανειακή τάση του ρευστού και Q : η παροχή του υγρού



Σχήμα 2.3 Προσδιορισμός για το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας

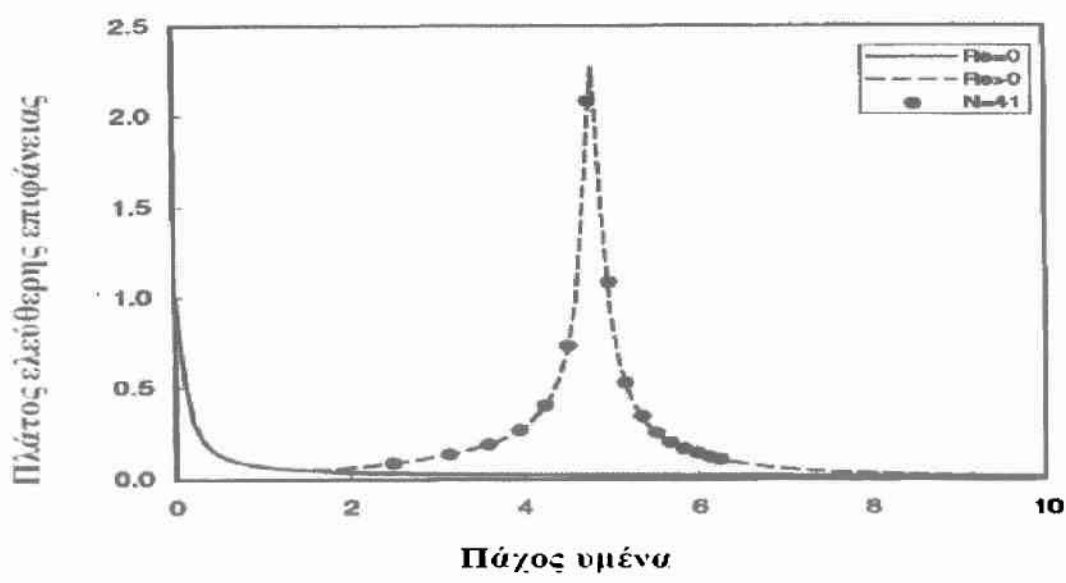
Στο σχήμα 2.3 γίνεται αντιληπτό ότι το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας είναι αντιστρόφως ανάλογο του μέσου πάχους του υμένα και ανάλογο του μήκους κύματος του κυματοειδούς τοιχώματος. Ακόμη, το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας είναι αντιστρόφως ανάλογο της παραμέτρου D και συνεπώς ανάλογο της γωνίας κλίσης ή αντιστρόφως ανάλογο με την επιφανειακή τάση.

Το 1988 ο Pozrikidis μελέτησε τη ροή με αριθμό Reynolds πολύ κοντά στο μηδέν (έρπουσα ροή) σε τοιχώματα τυχαίου πλάτους και μορφής και εξήχθησαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα για το ημιτονοειδές τοίχωμα. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι για σταθερό λόγο του πλάτους της πλάκας προς το μήκος κύματος της, το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας είναι αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού Reynolds. Ακόμη, διατηρώντας σε σταθερές τιμές την παροχή και το μήκος κύματος του τοιχώματος, μπορούμε να αυξήσουμε το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας, αν αυξήσουμε το πλάτος της πλάκας. Τέλος, διατηρώντας σε σταθερές τιμές την παροχή και το πλάτος του τοιχώματος, μπορούμε να αυξήσουμε το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας, αν αυξήσουμε το μήκος κύματος της πλάκας.

Μελέτες πάνω στην έρπουσα ροή σε πλάκα με μεγάλο πλάτος διαμόρφωσης έκαναν και οι Aksel et al (2003,2004) και έφτασαν στο συμπέρασμα ύστερα από πειράματα ότι όταν το πάχος του υγρού υμένα ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή, τότε δημιουργούνται δίνες στη ροή. Διαπίστωσαν δε ότι η εμφάνιση και το μέγεθος των δινών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το

πλάτος του τοιχώματος και το πάχος υμένα, ενώ δεν επηρεάζεται από τη γωνία κλίσης για μεγάλο ύψος υμένα. Συγκεκριμένα, όταν το πάχος του υμένα είναι μεγάλο και το πλάτος του τοιχώματος σχετικά μικρό, οι ροϊκές γραμμές ακολουθούν τη διαμόρφωση του τοιχώματος, ενώ η επιφάνεια του ρευστού μένει ανεπηρέαστη. Αν αρχίσουμε όμως και αυξάνουμε το πλάτος του τοιχώματος και συνεπώς και της ροής, τότε παρατηρείται η δημιουργία δινών στη ροή, οι οποίες εμφανίζονται κυρίως στις κοιλότητες του τοιχώματος. Από την άλλη, αν αρχίσουμε και μειώνουμε το πάχος του υμένα διατηρώντας σταθερό το ύψος του κύματος, οι δίνες αρχίζουν και αποσβένουν μέχρι να εξαφανιστούν για πολύ μικρά πάχη υμένα.

Το 1997, οι Bontozoglou & Paparolymerou έκαναν πειραματικές μελέτες σε μόνιμη ροή υμένα σε ευσταθή περιοχή, χρησιμοποιώντας ημιτονοειδή πλάκα και πεπερασμένους αριθμούς Reynolds. Παρατήρησαν ότι για $Re=0$, τα αποτελέσματα των πειραμάτων ταιριάζουν με τα αντίστοιχα του Wang (1981), ενώ για Re διάφορο του μηδενός τα αποτελέσματα διαφέρουν αρκετά. Επίσης, διαπίστωσαν ότι όσο το h_N πλησιάζει στο μηδέν, τα αποτελέσματα για αριθμό Reynolds διάφορο και ίσο με μηδέν συμπίπτουν, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4. Όταν όμως το πάχος του υμένα αρχίζει και αυξάνεται, τότε αυξάνεται και ο αριθμός Reynolds και τα αποτελέσματα είναι εντελώς διαφορετικά μεταξύ της έρπουσας και της στρωτής ροής, ενώ ενδέχεται να συντονιστεί η ελεύθερη επιφάνεια με το τοίχωμα. Στο σχήμα 2.4 που ακολουθεί, φαίνεται η εξάρτηση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας από το πάχος του υμένα και πώς συμπεριφέρεται ο αριθμός Reynolds τόσο στην έρπουσα όσο και στη στρωτή ροή.



Σχήμα 2.4 Σύγκριση της θεωρίας για έρπουσα και στρωτή ροή ($l=0.002m, \varphi=60^\circ$)

2.2.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια σε ημιτονοειδές τοίχωμα

Το 2003, οι Aksel et al χρησιμοποιώντας ημιτονοειδές τοίχωμα για να αναλύσουν τη γραμμική ευστάθεια της ψευδομόνιμης προσέγγισης της μόνιμης ροής έφτασαν στο συμπέρασμα ότι το πλάτος των κυμάτων των διαταραχών επηρεάζει άμεσα τη σταθεροποίηση της ροής. Ακόμη, συμπέραναν ότι υπάρχουν σε κάποιες συνθήκες παρατηρείται η δημιουργία τοπικής αστάθειας, ακόμη και όταν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο αριθμό για επίπεδο τοίχωμα. Αυτό που παρατήρησαν είναι ότι όταν αυτό συνέβαινε, αναπτύσσονταν κύματα στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού, τα οποία ήταν μεγαλύτερα από το πάχος του υμένα αλλά μικρότερα από το μήκος της διαμόρφωσης του υμένα.

2.3 Πειραματικές μελέτες

Όσον αφορά τη ροή πάνω σε διαμορφωμένο τοίχωμα, οι πειραματικές μελέτες που έχουν γίνει αυτά τα χρόνια δεν είναι πολλές. Το 1992 οι Zhao & Cerro και το 1993 οι Shetty & Cerro, έκαναν πειραματικές μελέτες για ροή σε κυματοειδές τοίχωμα σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds. Το 2003, οι Aksel et al διεξήγαγαν πειράματα για έρπουσα ροή σε τοίχωμα περιοδικής διαμόρφωσης και επιβεβαίωσαν, μέσω των αποτελεσμάτων τους, την ύπαρξη δινών στην κοιλότητα του τοιχώματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η περιοχή της ανακυκλοφορίας εξαρτάται κυρίως από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds και εμφανίζεται ως επί το πλείστον όταν η ροή ξεπεράσει αυτόν τον αριθμό. Το πάχος του υμένα είναι αυτό που καθορίζει την ταχύτητα και το μέγεθος της ανακυκλοφορίας, καθώς όσο αυξάνεται το πάχος του υμένα, αυξάνεται τόσο το μέγεθος όσο και η ταχύτητα με την οποία κινούνται οι δίνες. Ακόμη, το κρίσιμο πάχος του υμένα που καθορίζει την ανακυκλοφορία εξαρτάται ανάλογα από τη γωνία κλίσης και αντιστρόφως ανάλογα από την επιφανειακή τάση, από τις οποίες όμως παραμέτρους δεν εξαρτάται η μέγιστη τιμή του μεγέθους της δίνης. Εκτός από τη γωνία κλίσης και την επιφανειακή τάση, το κρίσιμο πάχος του υμένα εξαρτάται και από το πλάτος της διαμόρφωσης του τοιχώματος, το οποίο όσο αυξάνεται, τόσο μειώνεται το πάχος του υμένα μέχρι να μηδενιστεί και να επιτραπεί η εμφάνιση των δινών. Αν συνεχιστεί η αύξηση του πλάτους της διαμόρφωσης, εμφανίζεται και μία δεύτερη δίνη που εξαρτάται επίσης από το πάχος του υμένα και έχει μικρότερη ταχύτητα από την πρώτη. Τέλος, για λεπτό πάχος υμένα, η ταχύτητα ροής του ρευστού πάνω σε κυματοειδές τοίχωμα είναι μικρότερη από αυτήν πάνω σε επίπεδο τοίχωμα, κάτι το οποίο

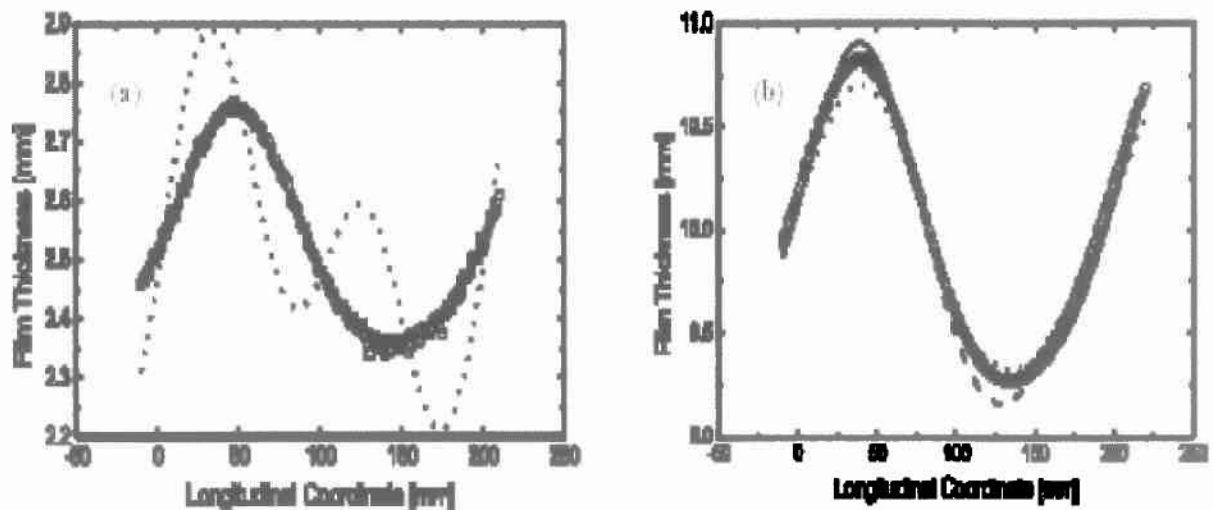
αλλάζει όσο αυξάνεται το πάχος του υμένα, καθώς οι δύο ταχύτητες τείνουν να εξισωθούν και το καταφέρνουν όταν το πάχος γίνεται πολύ μεγάλο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η δημιουργία της ανακυκλοφορίας δεν εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, ύστερα από πειράματα σε δύο ρευστά διαφορετικού ιξώδους αλλά ίδιου πάχους υμένα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ταχύτητες στις διαμορφώσεις των τοιχωμάτων είναι πολύ μικρότερες από τις ταχύτητες στην ελεύθερη επιφάνεια των υγρών. Τουτέστιν, οι ταχύτητες στις ζώνες ανακυκλοφορίας δεν αλλάζουν αισθητά, ενώ η μέση ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας είναι ίδια με την ταχύτητα της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα.

Το 2004, οι Wierschem & Aksel μελέτησαν τη ροή σε ένα ημιτονοειδές τοίχωμα με μήκος κύματος $L=30\text{cm}$ και για αριθμούς Reynolds της τάξης 10-100. Μέσα από τα πειράματα, παρατήρησαν την ύπαρξη δύο ξεχωριστών φαινομένων, τη δημιουργία κυμάτων με δίνες και την εμφάνιση κατακόρυφης διαταραχής με τη μορφή υδραυλικού άλματος. Γενικώς, τα δύο φαινόμενα δεν εμφανίζονται ταυτόχρονα, εκτός από μία περιοχή που εξαρτάται από την επιφανειακή τάση και τη γωνία κλίσης του τοιχώματος. Όταν το πάχος του κύματος είναι μεγάλο, η ανακυκλοφορία με δίνες δεν υπάρχει και γίνεται η εμφάνιση στατικής δομής συντονισμού, η οποία οφείλεται στην αμφίδρομη επιρροή μεταξύ του υμένα και της επιφάνειας του τοιχώματος. Ακόμη, είναι αντιληπτή η περιοδική εμφάνιση και των δύο δομών, όταν η διαταραχή μεταβαίνει από την περιοχή της μίας δομής στην άλλη. Η εμφάνιση των υδραυλικών αλμάτων γίνεται όταν αυξάνουμε το πάχος του υμένα, διατηρώντας σε μικρές τιμές τη γωνία κλίσης. Με περαιτέρω αύξηση όμως του πάχους του υμένα, τα υδραυλικά άλματα εξαφανίζονται και τη θέση τους παίρνουν τα κύματα με δίνες.

Το 2003 οι Wierschem, Schole & Aksel μελέτησαν τους λεπτούς υμένες και ειδικότερα τη ροή νευτώνειου ρευστού σε κεκλιμένο ημιτονοειδές τοίχωμα σε πολύ μικρούς αριθμούς Reynolds και επικεντρώθηκαν στην επίδραση που έχει το τοίχωμα στη ροή του υγρού υμένα. Παρατήρησαν ότι η δημιουργία των κυματικών δινών ξεκινάει κάτω από ένα κρίσιμο πάχος υμένα, το οποίο εξαρτάται από τη διαμόρφωση του τοιχώματος, τη γωνία κλίσης, την επιφανειακή τάση και όχι από τον αριθμό Reynolds.

Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν σιλικονούχο λάδι με ιξώδες από 1000 mPas έως 5000 mPas για να ελαχιστοποιήσουν τον αριθμό Reynolds και μία CCD κάμερα, εφοδιασμένη με μικροσκόπιο για τη μέτρηση του πάχους του υμένα, την οποία είχαν συνδέσει με μία XYZ εγκάρσια μονάδα για να ελέγχει τον πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των Wierschem, Schole & Aksel και Wang από τη μέτρηση του πάχους του υμένα και τα δεδομένα από τις θεωρητικές προσεγγίσεις, οι οποίες προσεγγίζουν πολύ καλά κυρίως την έρπουσα ροή.

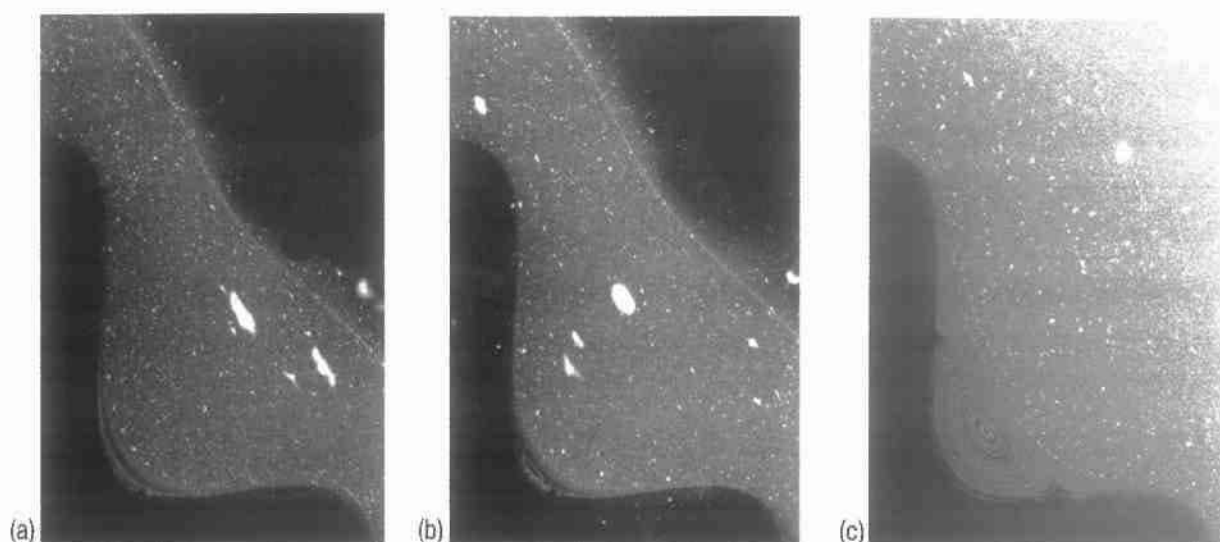


Σχήμα 2.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μέτρησης του πάχους του υμένα από τον Wang (με τη μαύρη χοντρή γραμμή), από τους Wierschem, Schole & Aksel (με τα διάσπαρτα τετραγωνάκια) και τα δεδομένα από τις θεωρητικές προσεγγίσεις (με τη λεπτή μαύρη γραμμή). Η κορυφή και το κοίλωμα του κυματισμού ανήκουν στο εύρος 0-100 mm, το μήκος κύματος είναι 200 mm, ο $Re=10^{-3}$ και το πλάτος είναι 4 mm. Στο αριστερά σχήμα έχουμε $Re=10^{-1}$ και στο δεξιά $\phi=30^\circ$.

Ακόμη οι μελετητές κατάφεραν να οπτικοποιήσουν τις δίνες που δημιουργούνται και τη ροή του υγρού υμένα, χρησιμοποιώντας φθορίζουσες χρωστικές ουσίες. Στο σχήμα 2.7, παρατίθενται τρεις εικόνες, οι οποίες βοηθάνε στην κατανόηση της δημιουργίας των ζωνών ανακυκλοφορίας. Στην εικόνα 2.7 a) δεν παρατηρείται κάποια ζώνη ανακυκλοφορίας, η οποία όμως αρχίζει να δημιουργείται στην εικόνα b) καθώς αυξάνεται το πάχος του υμένα, μέχρι να φανεί ξεκάθαρα στην εικόνα c) όπου έχει αυξηθεί περαιτέρω το πάχος του υμένα. Γενικότερα, δεν παρατηρείται εμφάνιση δινών μέχρι τον κρίσιμο αριθμό Reynolds, αλλά μετά από αυτόν τον αριθμό, το μέγεθος τους εξαρτάται άμεσα από τον Re . Επίσης, όταν η ροή του ρευστού είναι στρωτή, το μέγεθος των δινών εξαρτάται ανάλογα από τον αριθμό Froude

$(Fr = \frac{\{u_c\}}{\sqrt{g \cdot \sin \theta \cdot h}})$. Οι δίνες παραμορφώνονται και εξαφανίζονται εξαιτίας της αδράνειας των

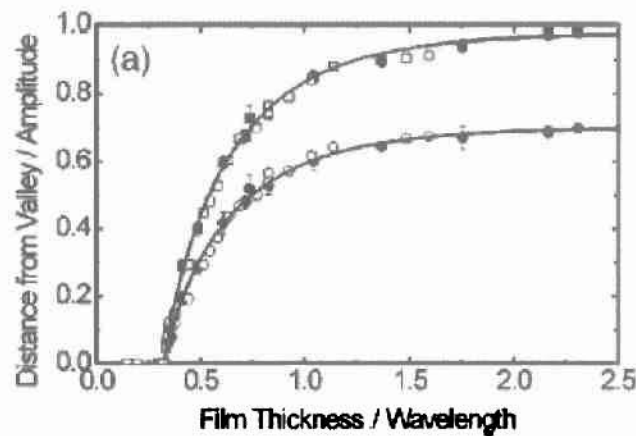
επιφανειακών κυμάτων, κάτι που προκαλεί ροή μάζας και ιδιαίτερα σε ανταλλαγή υλικού μεταξύ των ζωνών ανακυκλοφορίας και του υμένα. Η ανταλλαγή υλικού επιτυγχάνεται είτε μέσω μίας έλικας εισροής και εκροής στο κέντρο της ανακυκλοφορίας είτε με την ακτινική κίνηση σωματιδίων, η οποία δεν είναι ίδια με την κύρια ροή του ρευστού.



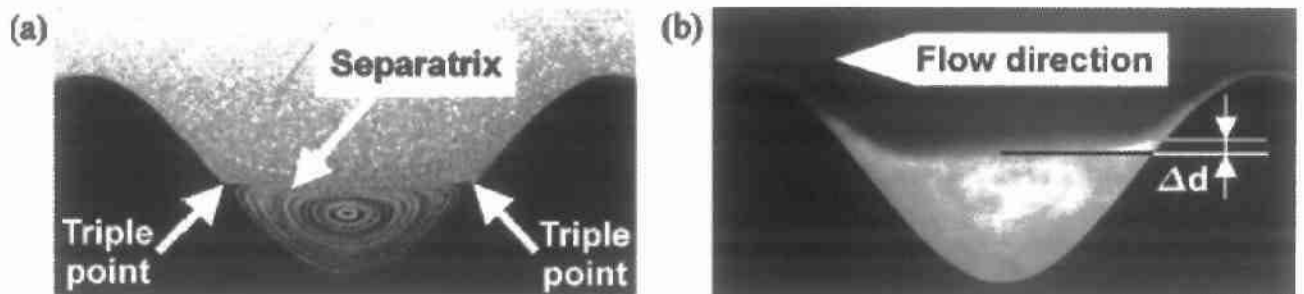
Σχήμα 2.6 Οπτικοποίηση της ροής του ρευστού και των δινών που δημιουργούνται. Στο κάτω αριστερά τμήμα φαίνεται το περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, στο πάνω δεξιά τμήμα φαίνεται η ελεύθερη επιφάνεια του υγρού με τη μορφή μίας λεπτής φωτεινής γραμμής, ενώ η ενδιάμεση περιοχή τους είναι ο υγρός υμένας.

Όσον αφορά την ταχύτητα του υμένα του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος, η γωνία κλίσης του καναλιού είναι και ο σημαντικότερος παράγοντας για τη δημιουργία των ζωνών ανακυκλοφορίας, οι οποίες δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από μικρούς αριθμούς Reynolds της τάξης $3 \cdot 10^{-5} - 12 \cdot 10^{-1}$. Η μη εξάρτηση των δινών από τον αριθμό Reynolds οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η ταχύτητα στον πυθμένα του τοιχώματος είναι αρκετά μικρότερη από την ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού, η οποία είναι ίση με την ταχύτητα στο επίπεδο τοίχωμα. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 2.7, όπου παρουσιάζεται η εξάρτηση του μεγέθους των δινών από το πάχος του υμένα και όχι από τον αριθμό Reynolds. Στο σχήμα 2.8 παρατίθενται δύο εικόνες, οι οποίες απεικονίζουν τη δημιουργία ανακυκλοφορίας σε υγρό σιλικονούχο λάδι σε μικρό και μεγάλο αριθμό Reynolds, γωνίας κλίσης 45° και με πάχος υμένα

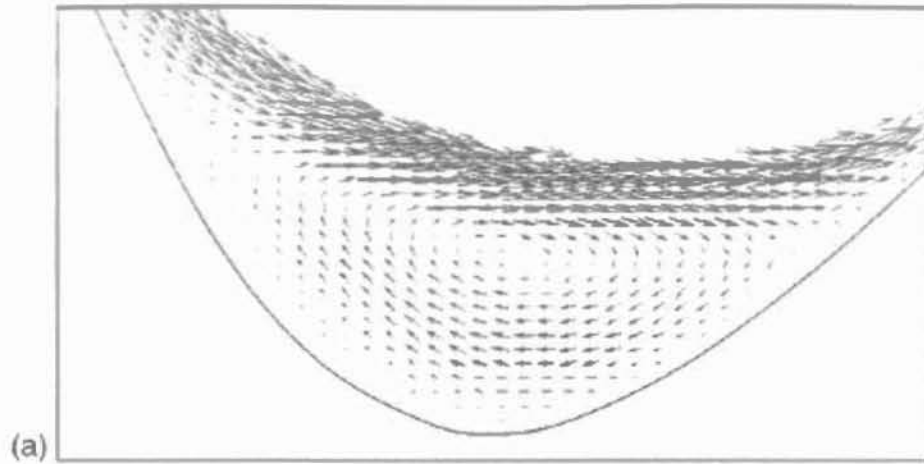
14,2 mm. Τέλος, στο σχήμα 2.9 γίνεται μία αναπαράσταση της ζώνης ανακυκλοφορίας στον πυθμένα του τοιχώματος, καθώς και η εξάρτηση της ταχύτητας της από το πάχος του υμένα.



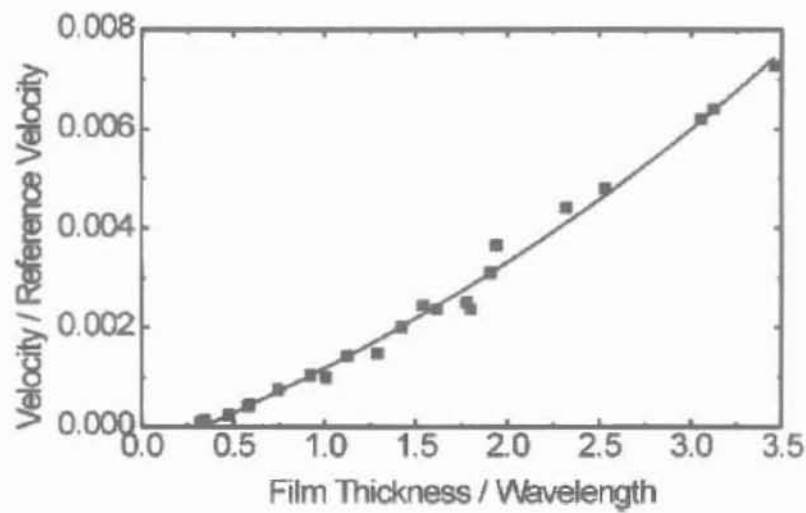
Σχήμα 2.7 Μέγεθος του στροβιλισμού ανάλογα με το πάχος του υμένα



Σχήμα 2.8 Απεικόνιση των ζωνών ανακυκλοφορίας σε γωνία κλίσης $\varphi=45^\circ$. Στην εικόνα a) έχουμε μικρό αριθμό Reynolds, $Re=0.2$, ενώ στην εικόνα b) έχουμε $Re=228$.



(a)



(b)

Σχήμα 2.9 a) Πεδίο ταχυτήτων στον πυθμένα του τοιχώματος. b) η ταχύτητα της δίνης συναρτήσει του πάχους του υγρού υμένα.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διαδικασία

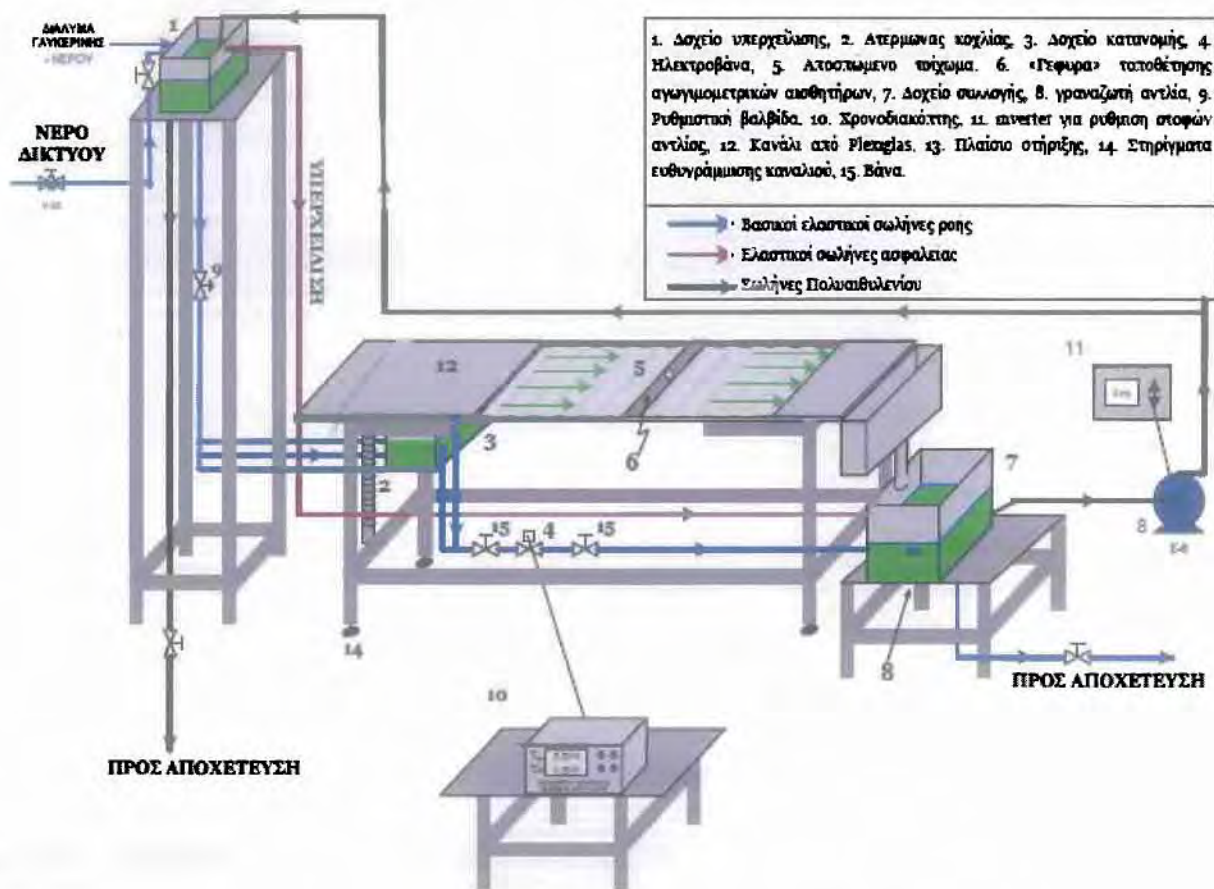
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε προκειμένου να ολοκληρωθούν οι μελέτες. Στην αρχή γίνεται παρουσίαση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και των απαραίτητων ρυθμίσεων που έγιναν σε αυτήν ώστε να πραγματοποιηθούν τα πειράματα. Στη συνέχεια μελετάται το σύστημα της εξωτερικής διαταραχής όπως και η τεχνική για τη μέτρηση της αγωγιμότητας. Τέλος, ακολουθεί η ανάλυση της εκτέλεσης των πειραμάτων και της διαμόρφωσης των δεδομένων που εξήχθησαν από αυτά.

3.1 Πειραματική διάταξη

3.1.1 Περιγραφή της διάταξης

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, βρίσκεται στο Εργαστήριο Μηχανολογίας στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Λάρισας. Το κύριο τμήμα της διάταξης είναι κατασκευασμένο από πολυμερές υλικό Plexiglas και είναι σημαντικό αυτό διότι επιτρέπει στο χρήστη να πειραματιστεί με ρευστά διαλύματα χωρίς να έχει κάποιο περιορισμό στο είδος του ρευστού. Τα κύρια εξαρτήματα της διάταξης είναι το κανάλι, πάνω στο οποίο μελετήθηκε η ροή του διαλύματος γλυκερίνης-νερού, το δοχείο υπερχειλίσης, το δοχείο συλλογής, η συσκευή για την εισαγωγή της διαταραχής, η εμβαπτιζόμενη αντλία, καθώς και οι συσκευές για τον έλεγχο των στροφών της αντλίας και για τη μέτρηση της αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα, το κανάλι έχει μήκος 128 cm, πλάτος 25 cm και στηρίζεται πάνω σε μεταλλική βάση, η οποία διαθέτει στηρίγματα για την ευθυγράμμιση του καναλιού. Στο κανάλι γίνεται η τοποθέτηση της εξεταζόμενης πλάκας, η οποία στην περίπτωσή μας είναι ημιτονοειδούς μορφής, πλάτους 25 cm και μήκους 50 cm. Επίσης, πάνω στο κανάλι είναι τοποθετημένες δύο μεταλλικές "γέφυρες", στις οποίες εναποτίθενται οι αγωγιμομετρικοί αισθητήρες. Επιπλέον, στη διάταξη είναι δυνατό να επιτευχθεί γωνία κλίσης καναλιού έως και 67° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, χάρη στην ύπαρξη ενός ατέρμονα κοχλία. Όσον αφορά τη ροή του διαλύματος, αυτή ξεκινάει από τη δεξαμενή υπερχειλίσης, η οποία βρίσκεται σε ύψος περίπου δύο μέτρα από το έδαφος

και συνδέεται με την παροχή νερού δικτύου. Ακόμη, συνδέεται με την αποχέτευση μέσω δύο σωληνώσεων, σε περίπτωση που θέλουμε να αποβάλλουμε το διάλυμα από τη διάταξη προς αποφυγή φαινομένων διαρροής ή για να καθαρίσουμε τη διάταξη, με τη βοήθεια υπεροξειδίου του υδρογόνου (Peridrol). Η ρύθμιση της παροχής του ρευστού στο κανάλι επιτυγχάνεται χάρη στη ρυθμιστική βαλβίδα, η οποία βρίσκεται στην έξοδο του δοχείου υπερχείλισης και συνδέεται με το δοχείο κατανομής, που περιέχει μεγάλο αριθμό ακροφυσίων, μέσω ενός συστήματος τριοδικής κατεύθυνσης. Αφού το διάλυμα διαπεράσει το κανάλι, πέφτει στο δοχείο συλλογής, από το οποίο είτε θα ανακυκλοφορήσει στο σύστημα και συγκεκριμένα στο δοχείο υπερχείλισης μέσω της εμβαπτιζόμενη αντλία είτε θα αποβληθεί από τη διάταξη προς την αποχέτευση. Σε περίπτωση εισαγωγής διαταραχής στο σύστημα χρησιμοποιείται ηλεκτροβάνα, η οποία συνδέεται με χρονοδιακόπτη και παρέχει υψηλή ακρίβεια όσον αφορά τη διάρκεια και τη συχνότητα της διαταραχής.



Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη

3.1.2 Αλλαγές στην πειραματική διάταξη

Η μόνη αλλαγή που κρίθηκε αναγκαία ήταν η τοποθέτηση εξωτερικής αντλίας, καθώς η εμβαισιζόμενη αντλία που ήδη υπήρχε στη διάταξη δεν ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική στις μετρήσεις για διαλύματα με υψηλή περιεκτικότητα σε γλυκερίνη. Τουτέστιν χρησιμοποιήθηκε γριναζωτή αντλία, της οποίας οι στροφές ρυθμίζονταν από τον inverter και με αυτόν τον τρόπο αποφύγαμε την εμφάνιση κατανομών με διαφορετικές θερμοκρασίες. Η γριναζωτή αντλία συνδέθηκε με τη διάταξη μέσω του δοχείου συλλογής και του δοχείου υπερχειλίσης.

3.2 Ρύθμιση παραμέτρων

3.2.1 Αλλαγή της γωνίας κλίσης

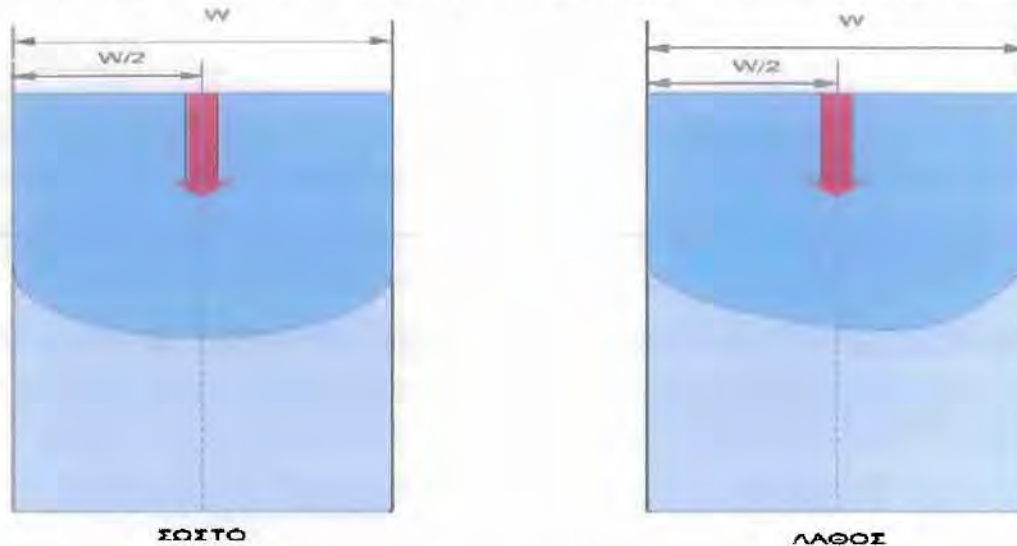
Στα πειράματα της εργασίας αυτής μελετώνται οι ιδιότητες του εξεταζόμενου κάθε φορά ρευστού σε διαφορετικές γωνίες κλίσης, οι οποίες ποικίλλουν από 0° έως 45°. Για το λόγο αυτό ήταν αναγκαία η ύπαρξη ενός μηχανισμού που θα δίνει τη δυνατότητα επίτευξης αυτών των γωνιών κλίσης. Τουτέστιν, υπήρχε στη βάση της διάταξης ένας ατέρμονας κοχλίας, ο οποίος ανάλογα με τη φορά στρέψης παρείχε την επιθυμητή γωνία κλίσης, η οποία ανήκε στο φάσμα των 0° έως 67°. Συγκεκριμένα, η δεξιόστροφη ή η αριστερόστροφη κίνηση του κοχλία επέφερε την κάθοδο ή την ανύψωση αντίστοιχα της σιδερένιας βάσης. Ο έλεγχος της κλίσης γινόταν με ψηφιακό αλφάδι (Bosch DNM 120L).

3.2.2 Έλεγχος της ευθυγράμμισης του καναλιού

Εκτός από τη γωνία κλίσης, ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα πειράματα είναι η ευθυγράμμιση του καναλιού. Ο έλεγχος για την ευθυγράμμιση πρέπει να γίνεται πριν και μετά από κάθε μέτρηση και κυρίως μετά την αλλαγή κλίσης του καναλιού, καθώς ενδεχόμενη παρέκκλιση μπορεί να μας οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Για αυτό το λόγο στη βάση της διάταξης υπάρχουν περιστρεφόμενα στηρίγματα, τα οποία μας παρέχουν τη δυνατότητα, όπως και ο ατέρμονας κοχλίας, να ανυψώσουμε ή να μειώσουμε το ύψος της πλευράς του συστήματος που μας ενδιαφέρει.

Συγκεκριμένα, το πρώτο βήμα για να ελέγξουμε αν η ροή του ρευστού είναι ευθυγραμμισμένη, είναι να διατηρήσουμε σταθερή την παροχή ώστε το εξεταζόμενο υγρό να

αποκτήσει στρωτή ροή σε όλο το μήκος του καναλιού. Στη συνέχεια εισάγουμε τη διαταραχή κάθε 6 sec, ρυθμίζοντας την ηλεκτροβάννα να μένει ανοιχτή για 5.5 sec και να κλείνει για 0.5 sec. Δημιουργείται έτσι ένας κυματισμός στο ρευστό, ο οποίος διασχίζει το κανάλι. Σε περίπτωση που το κανάλι είναι ευθυγραμμισμένο, η κορυφή του κύματος βρίσκεται πάνω στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της ημιτονοειδούς πλάκας. Σε αντίθετη περίπτωση, η κορυφή του κύματος βρίσκεται δεξιά ή αριστερά από τον άξονα συμμετρίας, οπότε μία περιστροφή των κατάλληλων στηριγμάτων ανυψώνει ή μειώνει το ύψος της «προβληματικής» πλευράς.

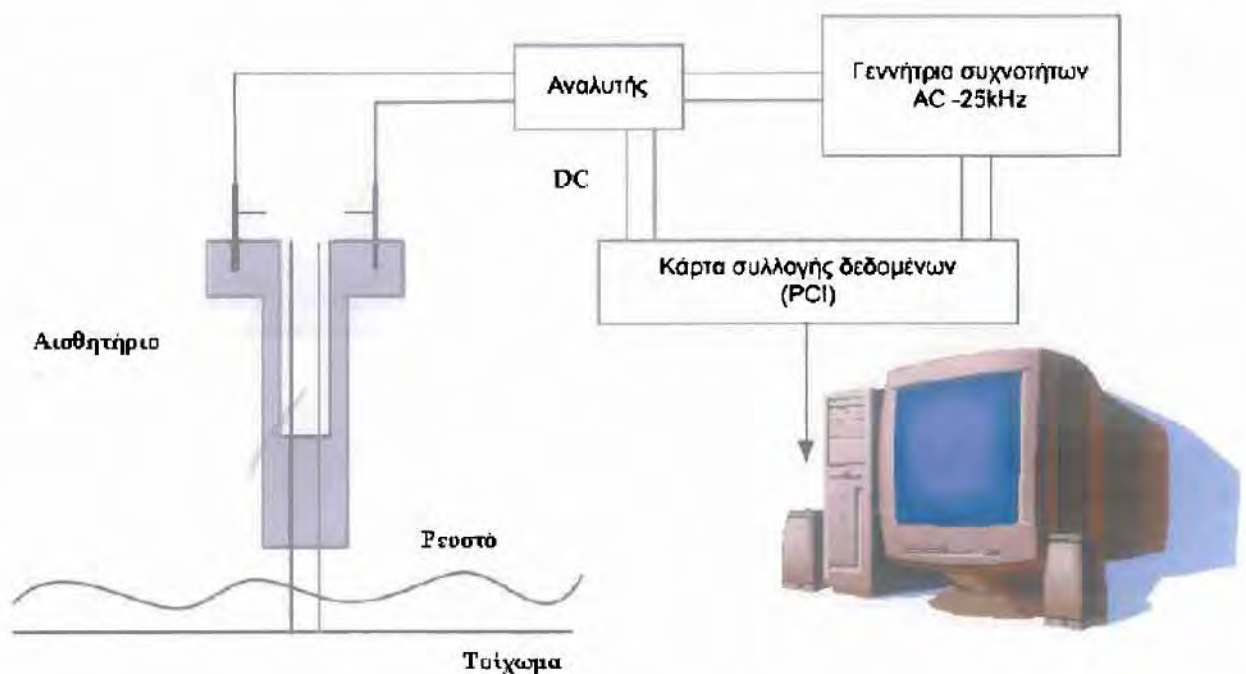


Σχήμα 3.2 Συμμετρική και μη συμμετρική ροή

3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική

Η τεχνική για τη μέτρηση της αγωγιμότητας αποτέλεσε σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη των πειραμάτων της εργασίας, καθώς κατέστη δυνατή η μέτρηση του πάχους του υμένα και των διαταραχών που εισάγονταν. Η βασική αρχή της τεχνικής είναι η εξάρτηση της αγωγιμότητας μεταξύ των δύο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων, διαμέτρου περίπου 0,4 mm, που χρησιμοποιήθηκαν με το ύψος του ρευστού που παρεμβάλλεται ανάμεσά τους. Συγκεκριμένα, όποτε αλλάζει το ύψος του παρεμβαλλόμενου ρευστού, μεταβάλλεται και η αντίσταση μεταξύ των συρμάτων και η διαφορά δυναμικού (καθώς συνδέονται γραμμικά από τη σχέση $\Delta V = I \cdot R$) και κατά συνέπεια μεταβάλλεται το πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Τα δεδομένα των μεταβολών αυτών εισάγονται στον ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή μέσω δύο καναλιών εισόδου και συλλέγονται από την κάρτα συλλογής δεδομένων (Advantech PCI-1710HG, 16-bit) και από το πρόγραμμα Labview, το οποίο έχει δημιουργηθεί στο εργαστήριο. Τέλος, αποθηκεύεται το σήμα που εξέρχεται από τα

αισθητήρια. Τα μετρητικά που χρησιμοποιούνται, τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας της τάξης των 25 kHz, από γεννήτρια συχνοτήτων (Rigol DG 2021A) και έτσι το νερό δεν υφίσταται ηλεκτρόλυση, κάτι που θα συνέβαινε αν η τροφοδοτούμενη τάση ήταν σταθερή. Ακόμη, τα αισθητήρια είναι κατασκευασμένα από Ertalon, ώστε να αντέχουν σε υψηλή θερμοκρασία και να επεξεργάζονται εύκολα, ενώ τα σύρματα είναι από χρωμονικέλιο. Οι αξιόπιστες μετρήσεις των πειραμάτων οφείλονται σε ένα βαθμό στο γεγονός ότι τα μετρητικά τοποθετήθηκαν στην αρχή και στο τέλος του καναλιού, όπου παρουσιάζεται και το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον και ήταν εύκολη η οριζόντια ή κατακόρυφη μετακίνησή τους χάρη στη χρήση δύο μεταλλικών «γεφυρών». Τέλος, προκειμένου να είναι αξιόπιστη η αγωγιμομετρική τεχνική πρέπει η αγωγιμότητα του υγρού να βρίσκεται στην περιοχή από 300 έως 1000 μS .



Σχήμα 3.3 Διάταξη αγωγιμομετρικής τεχνικής

3.4 Διαδικασία εισαγωγής διαταραχής

Το σύστημα εισαγωγής εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής χρησιμοποιήθηκε, επειδή το περιορισμένο μήκος της πειραματικής διάταξης και κυρίως του καναλιού δεν

ευνοούσε την εξέλιξη φυσικών διαταραχών, καθιστώντας αδύνατη τη μελέτη σημαντικών φαινομένων, όπως η μετάβαση από την τυρβώδη στη στρωτή ροή. Το σύστημα διαταραχής αποτελείται από ένα χρονοδιακόπτη, μία ηλεκτροβάννα, δύο βάνες και έναν ελαστικό σωλήνα. Συγκεκριμένα, ο χρονοδιακόπτης καθορίζει τη συχνότητα των επιβαλλόμενων διαταραχών και τη διάρκεια που θα μένει ανοιχτή ή κλειστή η ηλεκτροβάννα. Η ηλεκτροβαλβίδα είναι εφοδιασμένη με σύστημα αυτομάτου ελέγχου, ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια στη χρονική διάρκεια που λαμβάνει σήμα από το χρονοδιακόπτη και είναι τοποθετημένη ανάμεσα από δύο βάνες πάνω σε έναν πλαστικό σωλήνα, ο οποίος συνδέει το δοχείο κατανομής με το δοχείο συλλογής. Με τον τρόπο αυτό ένα τμήμα του ρευστού που βρίσκεται στο δοχείο κατανομής παρακάμπτεται και οδηγείται στο δοχείο συλλογής, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει κανονικά τη ροή του από το κανάλι. Όταν η ηλεκτροβαλβίδα παίρνει σήμα από το χρονοδιακόπτη και ανοίγει, τότε το τμήμα του υγρού που παρακάμπτεται, οδηγείται απευθείας στο δοχείο συλλογής, ενώ όταν η ηλεκτροβάννα κλείνει αυτό το τμήμα του ρευστού περνάει από το κανάλι. Δημιουργείται έτσι η επιθυμητή διαταραχή, με τη μορφή κυματισμών, η οποία στην ουσία αποτελεί τη μεταβολή στο πάχος του υμένα συναρτήσεως του χρόνου. Το μέγεθος της αυξομείωσης του πάχους του υμένα καθορίζεται από τη διάρκεια που μένει ανοιχτή ή κλειστή η ηλεκτροβάννα και από την ποσότητα του ρευστού που παρακάμπτεται, η οποία ρυθμίζεται από τις βάνες.

3.5 Επιλογή διαλύματος

Στα πειράματα που διεξήχθησαν, χρησιμοποιήθηκε αρχικά διάλυμα γλυκερίνης-νερού και λίγο αλάτι με 68% γλυκερίνη σε γωνίες κλίσης $3^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ και στη συνέχεια διάλυμα με 58% γλυκερίνη στις $5^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$.

Τόσο η αλλαγή της γωνίας κλίσης, όσο και η αλλαγή στη σύσταση του διαλύματος επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Η επίδραση της γωνίας κλίσης αφορά το μέγεθος των διαταραχών και το πόσο εύκολα θα αποσβεστούν τα κύματα μέχρι το τέλος του καναλιού. Η αλλαγή στη σύσταση του ρευστού επηρεάζει το ιξώδες του υγρού και συνεπώς την εμφάνιση και το μέγεθος των διαταραχών, καθώς όταν αυξάνεται το ιξώδες, το υγρό γίνεται πιο παχύρρευστο και δυσκολεύεται η ανάπτυξη των φαινομένων. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να ελέγχονται και να ρυθμίζονται αυτές οι δύο παράμετροι.

Ο έλεγχος για τη γωνία κλίσης γίνεται με το ψηφιακό αλφάδι όπως έχει προαναφερθεί. Για τον έλεγχο της σύστασης του ρευστού χρησιμοποιείται το διαθλασίμετρο (Abbe 5 Refractometer – Bellingham & Stanley Ltd.). Συγκεκριμένα, περιμένουμε το διάλυμα να ομογενοποιηθεί και να αποκτήσει την ίδια σύσταση σε όλη τη μάζα του και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας δείγμα από το υγρό στο κανάλι, μετράμε το δείκτη διάθλασης. Παράλληλα ελέγχουμε και την πιθανή μεταβολή της θερμοκρασίας, η οποία επηρεάζει σε ένα βαθμό τα αποτελέσματά μας. Αφού βρεθεί ο δείκτης διάθλασης, ανατρέχουμε στους πίνακες ιδιοτήτων για διαλύματα γλυκερίνης – νερού σε θερμοκρασία 20 °C και ελέγχουμε σε ποια σύσταση αντιστοιχεί ο δείκτης διάθλασης που χρησιμοποιήθηκε σαν δείγμα. Η εύρεση της επιθυμητής σύστασης του ρευστού μπορεί να απαιτεί δειγματοληψία παραπάνω από μία φορά, για αυτό είναι σημαντικό να έχει επέλθει η ομογενοποίηση του υγρού. Αφού λοιπόν βρεθεί η σύσταση του διαλύματος, πρέπει να γίνει έλεγχος και του κινηματικού ιξώδους του, καθώς επηρεάζει τον αριθμό Reynolds και συνεπώς και τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται το ιξωδόμετρο τριχοειδούς σωλήνα, που λειτουργεί βάσει του νόμου Poiseuille για στρωτή ροή σε νευτώνειο ρευστό και σύμφωνα με το οποίο λαμβάνονται τρία διαδοχικά δείγματα και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων από αυτά. Τέλος, γίνεται έλεγχος για την αγωγιμότητα του ρευστού, η οποία είναι σημαντικό να βρίσκεται μεταξύ 300 και 1000 μS . Σε περίπτωση που χρειάζεται να αυξηθεί η αγωγιμότητα, προστίθεται μικρή ποσότητα αλατιού στο διάλυμα. Η μέτρηση της αγωγιμότητας γίνεται με το αγωγιμόμετρο (Consort C834).

Ένα ακόμη σημείο που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση είναι η εμφάνιση φυσαλίδων πάνω στο κανάλι ή στις σωληνώσεις εξαιτίας του εγκλωβισμού του αέρα μέσα στο διάλυμα. Συγκεκριμένα, όταν γίνεται αλλαγή του τοιχώματος με ένα καινούριο, εμφανίζονται μικρές φυσαλίδες πάνω στην πλάκα και πρέπει να αφήσουμε το διάλυμα να ρέει για αρκετή ώρα (περίπου 2-3 ώρες) μέχρι να εξαφανιστούν οι φυσαλίδες, οι οποίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ειδικότερα όταν βρίσκονται στην εγγύτερη περιοχή των ακροδεκτών. Ακόμη είναι πιθανή η εμφάνιση των φυσαλίδων, όταν αναμιγνύονται η γλυκερίνη και το νερό και σε αυτήν την περίπτωση ο χρόνος αναμονής μέχρι να ξεκινήσουν οι μετρήσεις είναι περίπου μία ώρα, για να αποκτήσει το ρευστό ενιαία σύσταση σε όλη τη μάζα του και να σταθεροποιηθεί η ροή. Τέλος, υπάρχει η περίπτωση να δημιουργηθούν φυσαλίδες εξαιτίας της ύπαρξης έντονης τυρβώδους ροής σε διάφορα σημεία της διάταξης και αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την ομαλοποίηση της ροής σε όλα τα σημεία της συσκευής και κυρίως στις

σωληνώσεις που συνδέουν το δοχείο υπερχειλίσης με το δοχείο συλλογής, αλλά και το δοχείο υπερχειλίσης με το κανάλι.

Σε περίπτωση που η επιφάνεια του καναλιού δε διαβρέχεται καλά από το υγρό εξαιτίας μεγάλης κλίσης γωνίας ή μικρής παροχής, τότε το τοίχωμα επαλείφεται με Sodium Silicate, το οποίο είναι ένα κολλώδες υλικό και αυξάνει ελάχιστα την αγωγιμότητα του διαλύματος.

3.6 Εφαρμογή των πειραμάτων

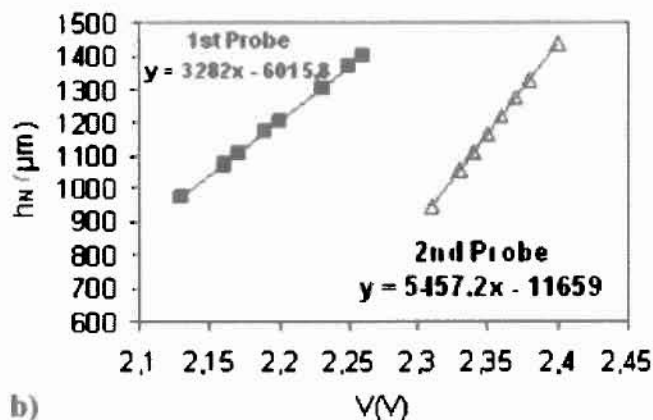
3.6.1 Βαθμονόμηση της τεχνικής μέτρησης της αγωγιμότητας

Αφού ρυθμιστούν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν το πείραμα και το διάλυμα γλυκερίνης-νερού φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας, όσον αφορά τη σύσταση, το κινηματικό ιξώδες, την αγωγιμότητα και τη θερμοκρασία, τότε είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση της αγωγιμομετρικής τεχνικής. Όπως έχει προαναφερθεί, το σήμα που εξέρχεται από το μετρητικό αποθηκεύεται στον υπολογιστή και στην ουσία αποτελεί το πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο στόχος της βαθμονόμησης είναι να μετατραπεί αυτή η μεταβολή της τάσης σε πάχος υμένα και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt, που ισχύει για στρωτή ροή. Συγκεκριμένα, μέσω της σχέσης $Re = Re_{crit} = \frac{5}{6} \cdot \cot \varphi$ υπολογίζεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για επίπεδη πλάκα. Στη συνέχεια, παίρνουμε ένα αριθμό μετρήσεων και καταγράφουμε τις διάφορες παροχές Q_0 (kg / sec) και το σήμα V (Volt) για 60 sec με ρυθμό δειγματοληψίας 200 Hz ή 400 Hz για κάθε μετρητικό. Ο στόχος είναι να πάρουμε μετρήσεις με παροχές που πλησιάζουν κατά πολύ τον κρίσιμο αριθμό Reynolds.

Χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις : $Re = \frac{Q_0}{w \cdot \rho \cdot v}$ και $h_N = 10^0 \cdot \left[\frac{3 \cdot Re \cdot v^2}{g \cdot \sin \varphi} \right]^{\frac{1}{3}}$, όπου Q_0 είναι η

παροχή, w το πλάτος του καναλιού, ρ η πυκνότητα του ρευστού, v το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, h_N το πάχος του υμένα Nusselt, φ η γωνία κλίσης, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και μαζί και με τις τιμές των τάσεων των δύο ακροδεκτών, βρίσκουμε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τις γραμμικές σχέσεις που φανερώνουν πώς το ύψος του υμένα εξαρτάται από την τάση. Οι γραμμικές σχέσεις είναι της γνωστής μορφής : $h_i = A \cdot V_i + B$, όπου A , B σταθερές και το i υποδηλώνει ποιο είναι το μετρητικό που εξετάζεται. Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε τάση καταγραφεί από τις μετρήσεις μπορεί να αναλυθεί σε πάχος υμένα. Ένα παράδειγμα των

γραμμικών σχέσεων (όχι από τη συγκεκριμένη εργασία) φαίνεται στο σχήμα 3.6, όπου τα έντονα σημεία (τετράγωνα και τρίγωνα) είναι οι τάσεις από το μετρητικό.



Σχήμα 3.6 Γραμμικές σχέσεις εξάρτησης πάχους υμένα και τάσης

3.6.2 Μεθοδολογία πειραμάτων

Στα πειράματα της εργασίας χρησιμοποιείται πλάκα ημιτονοειδούς μορφής και διάλυμα 20 lt γλυκερίνης – νερού με λίγο αλάτι για να είναι αγωγίμο το ρευστό. Αφού ελεγχθούν όλες οι παράμετροι, όπως είναι η γωνία κλίσης και η συμμετρία του κύματος, περιμένουμε το ρευστό να ομογενοποιηθεί, ελέγχουμε και τις ιδιότητες του ρευστού, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες και η θερμοκρασία του υγρού και στο τέλος ξεκινάμε τις μετρήσεις. Στην αρχή από κάθε μέτρηση γίνεται η απαραίτητη βαθμονόμηση της αγωγιμομετρικής τεχνικής και στη συνέχεια εισάγεται εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή με τη μορφή κατακόρυφου υδραυλικού άλματος. Ο στόχος της μετρήσεων είναι να καθοριστεί η περιοχή του αριθμού Reynolds, στην οποία γίνεται η μετάβαση από την ασταθή ροή στην στρωτή και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά που υπάρχουν από τα πειράματα σε επίπεδο τοίχωμα. Αυτό επιτυγχάνεται με το να ξεκινάμε τις μετρήσεις με ροή, στην οποία ο αριθμός Reynolds είναι αρκετά υψηλός και σταδιακά να μειώνουμε την παροχή μέχρι να φτάσουμε σε πλήρως ευσταθή περιοχή. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων επεξεργάζονται σε φύλλα Excel, ώστε να βρεθεί με σχετική ακρίβεια η περιοχή που αλλάζει ο αριθμός Reynolds και να παρατηρηθούν σημαντικά φαινόμενα που μπορεί να μας οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 4

Πειραματικά αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σε κεκλιμένο ημιτονοειδές τοίχωμα. Στην αρχή, παρατίθενται τα αποτελέσματα για την πρωτογενή αστάθεια, δηλαδή για την προσπάθεια να βρεθεί η περιοχή του κρίσιμου αριθμού Reynolds σε διάλυμα γλυκερίνης – νερού, περιεκτικότητας 68% και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση με αποτελέσματα για ίδιο διάλυμα, περιεκτικότητας 58%. Εκτός από γλυκερίνη και νερό, στο διάλυμα υπάρχει και μικρή ποσότητα αλατιού, ώστε να αυξηθεί η αγωγιμότητα του ρευστού.

4.1 Χαρακτηριστικά πειραματικών μετρήσεων

Προκειμένου να αναλυθεί η ευστάθεια της ροής υγρού υμένα, γίνονται αρκετές μετρήσεις στο εκάστοτε ρευστό, με παράλληλη εισαγωγή διαταραχής. Ακολουθεί πίνακας, όπου παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία των πειραματικών μετρήσεων των διαλυμάτων για διαφορετικούς αριθμούς Kapitza και Reynolds, αλλά και για διαφορετικές γωνίες κλίσης.

Σύσταση % κ.β. (γλυκερίνης - νερού)	ϕ (°)	ρ (kg/m ³)	$\nu * 10^6$ (m ² /s)	T (°C)	Ka	Δείκτης διάθλασης	probe distance from corrugation (mm)
58	5	1158	5.661	28.8	267.8874	1.411	1st 35/2nd 450
58	6	1158	6.149	27	239.9223	1.4115	1st 35/2nd 450
58	7	1160	5.876	27.6	254.4592	1.4116	1st 35/2nd 450
58	10	1158	5.666	28.6	267.5723	1.411	1st 35/2nd 450
58	15	1158	5.616	28	270.7533	1.411	1st 35/2nd 450
58	20	1155	5.902	28	254.0607	1.411	1st 35/2nd 450
58	25	1155	5.835	28	257.9578	1.411	1st 35/2nd 450
58	30	1155	5.731	27.6	264.2181	1.411	1st 35/2nd 450
58	35	1157	5.731	29	263.7614	1.412	1st 35/2nd 450
58	40	1157	5.622	29	270.6018	1.412	1st 35/2nd 450
58	45	1157	5.429	29.2	283.5036	1.411	1st 35/2nd 450

68	3	1177	6.5469	22	218.4163	1.41	1st 80/2nd 460
68	7	1177	7.307	25	187.5383	1.415	1st 80/2nd 460
68	10	1177	7.307	24.5	188.6303	1.415	1st 80/2nd 460
68	15	1157	8.501	18.5	154.184	1.413	1st 80/2nd 460
68	20	1157	9.408	22.3	134.6903	1.417	1st 80/2nd 460
68	25	1157	10.544	21	115.6979	1.42	1st 80/2nd 460
68	30	1157	10.544	21	115.6979	1.42	1st 80/2nd 460
68	35	1177	12.42	21.5	92.84576	1.426	1st 80/2nd 460
68	40	1177	12.42	21.5	92.84576	1.426	1st 80/2nd 460
68	45	1177	12.4	21.5	93.04548	1.426	1st 80/2nd 460

Πίνακας 4.1 Συνοπτικός πίνακας των χαρακτηριστικών των πειραματικών μετρήσεων.

4.2 Μελέτη πρωτογενούς αστάθειας

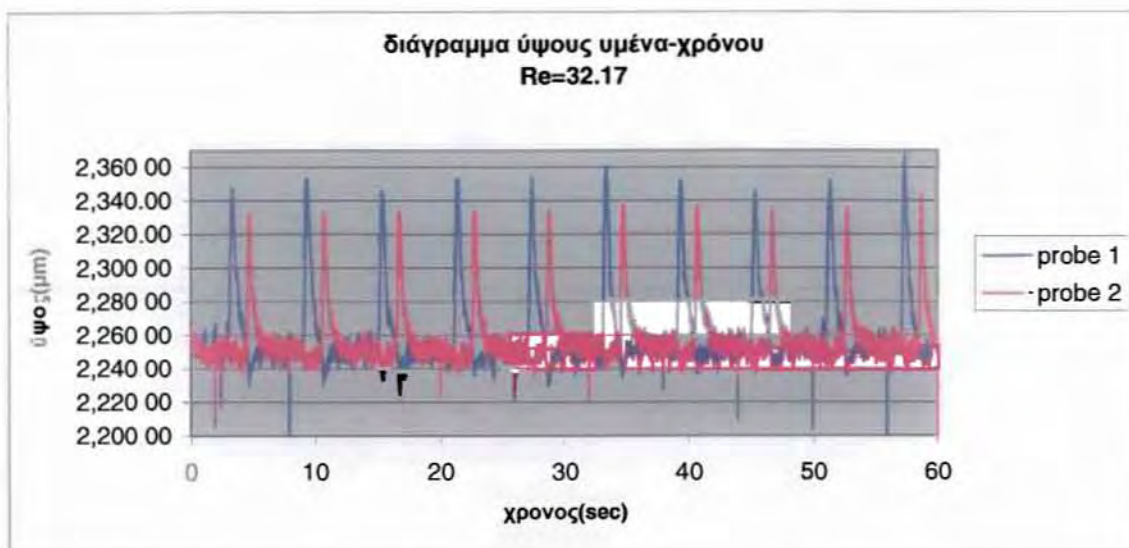
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων για διάλυμα γλυκερίνης – νερού, περιεκτικότητας 68% σε γλυκερίνη, αλλάζοντας κάθε φορά τη γωνία κλίσης και τον αριθμό Reynolds. Ο στόχος είναι να βρεθεί σε κάθε γωνία κλίσης η περιοχή του Re_{crit} , η περιοχή δηλαδή όπου γίνεται η μετάβαση της τυρβώδους ροής σε στρωτή, μεταβάλλοντας σταδιακά την παροχή του ρευστού. Η εύρεση αυτής της περιοχής είναι εφικτή χάρη στην αγωγιμομετρική τεχνική, η οποία μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε τα διαγράμματα ύψους υμένα – χρόνου. Στα διαγράμματα φαίνονται τα κύματα που σχηματίζονται λόγω της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, στις δύο θέσεις των μετρητικών και εκτιμάται η περιοχή μετάβασης. Συγκεκριμένα, όταν το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μικρότερο από το ύψος στο δεύτερο μετρητικό, τότε η ροή είναι ασταθής, ενώ όταν το ύψος μειώνεται καθώς τα κύματα περνάνε από το πρώτο μετρητικό στο δεύτερο, τότε η ροή είναι ευσταθής.

4.2.1 Αποτελέσματα για διάλυμα 68% γλυκερίνης – νερού

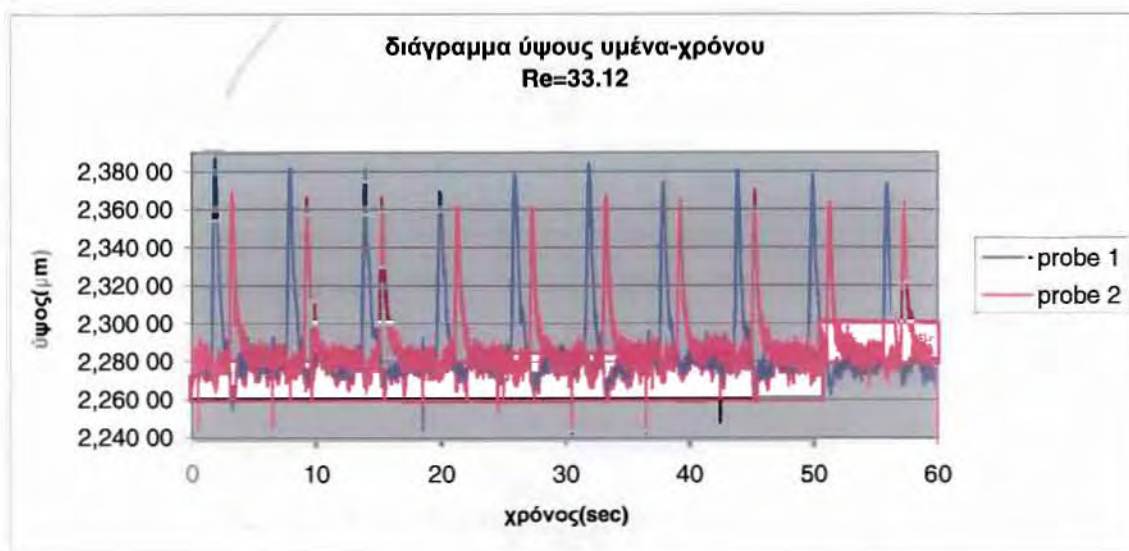
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, φαίνεται η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα του ρευστού, σε γωνίες κλίσης $3^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ και 45° . Για κάθε γωνία κλίσης παρατίθενται 3 – 4 διαγράμματα, τα οποία δείχνουν πώς γίνεται η μετάβαση από την ασταθή

περιοχή στην ευσταθή, ενώ στη συνέχεια γίνεται μία εκτίμηση της περιοχής του κρίσιμου αριθμού Reynolds.

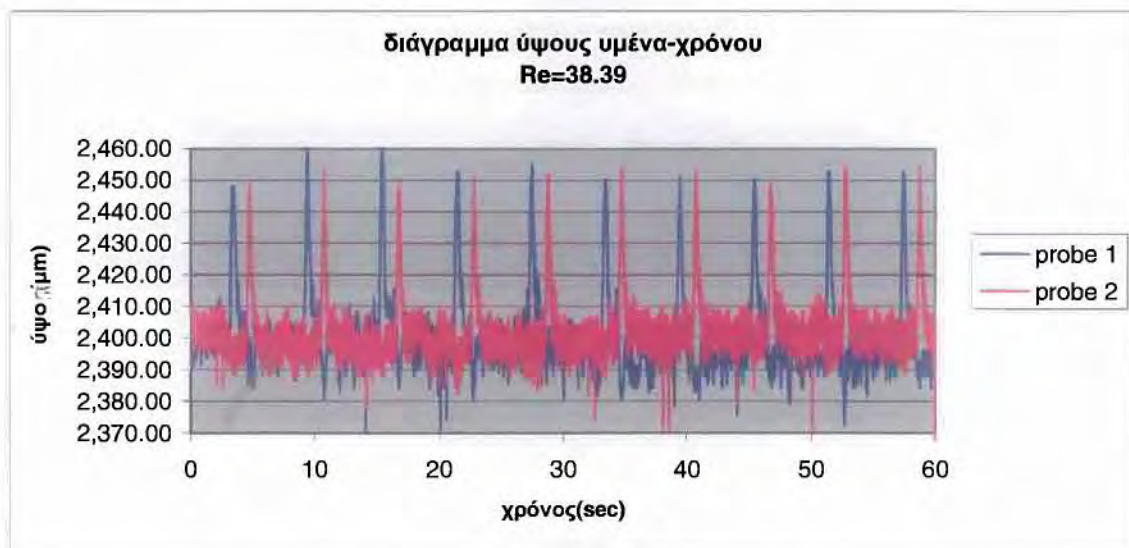
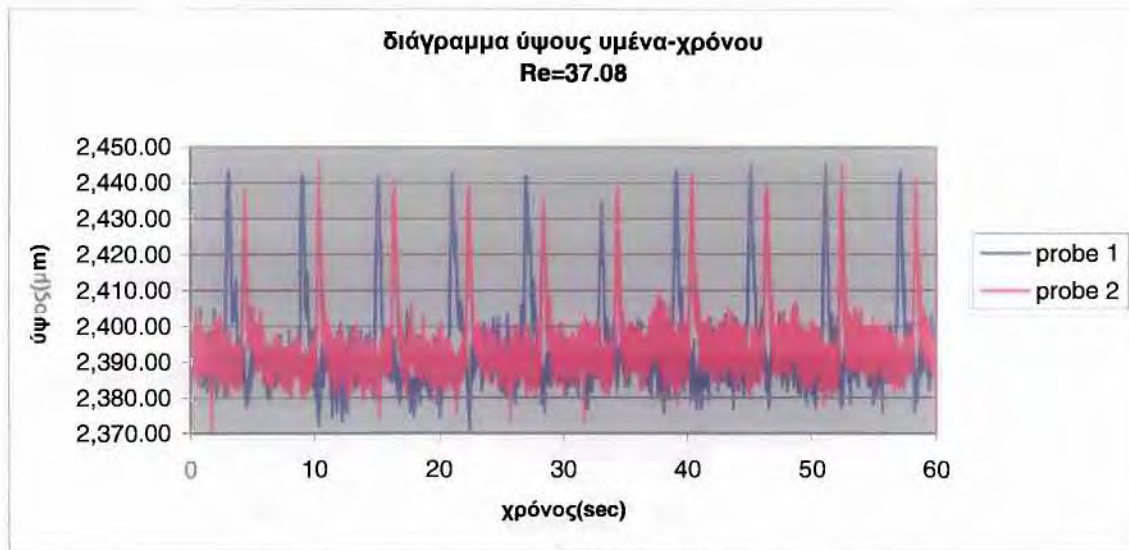
Για γωνία κλίσης 3° :



Διάγραμμα 4.3.1



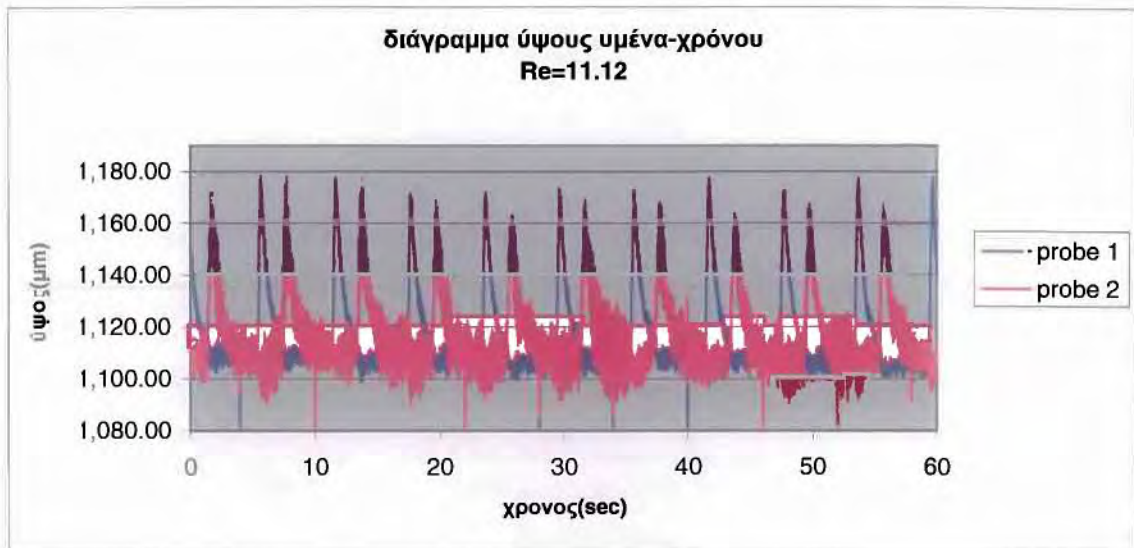
Διάγραμμα 4.3.2



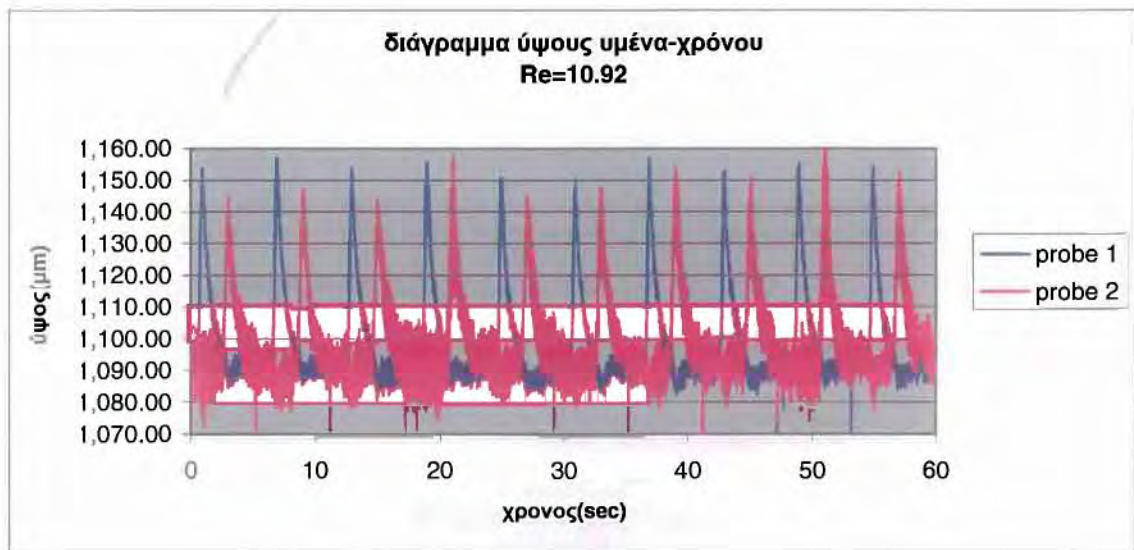
Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, αρχικά η ροή είναι στην ευσταθή περιοχή στα διαγράμματα 4.3.1 και 4.3.2, ενώ στη συνέχεια μεταβαίνει στην περιοχή της αστάθειας στα διαγράμματα 4.3.3 και 4.3.4. Η μετάβαση φαίνεται στο ύψος των κυμάτων που περνάνε από τα δύο μετρητικά, αφού στα δύο πρώτα διαγράμματα, το ύψος των κυμάτων που περνάνε από το πρώτο μετρητικό (με το μπλε χρώμα) είναι μεγαλύτερα από το ύψος των κυμάτων που περνάνε από το δεύτερο μετρητικό (με το κόκκινο χρώμα), κάτι που σημαίνει ότι :

$33.12 < Re_{crit} < 37.08$, όταν ο κρίσιμος αριθμός Reynolds που έχουμε από τη θεωρία για επίπεδο τοίχωμα είναι $Re_{crit} = 15.9$.

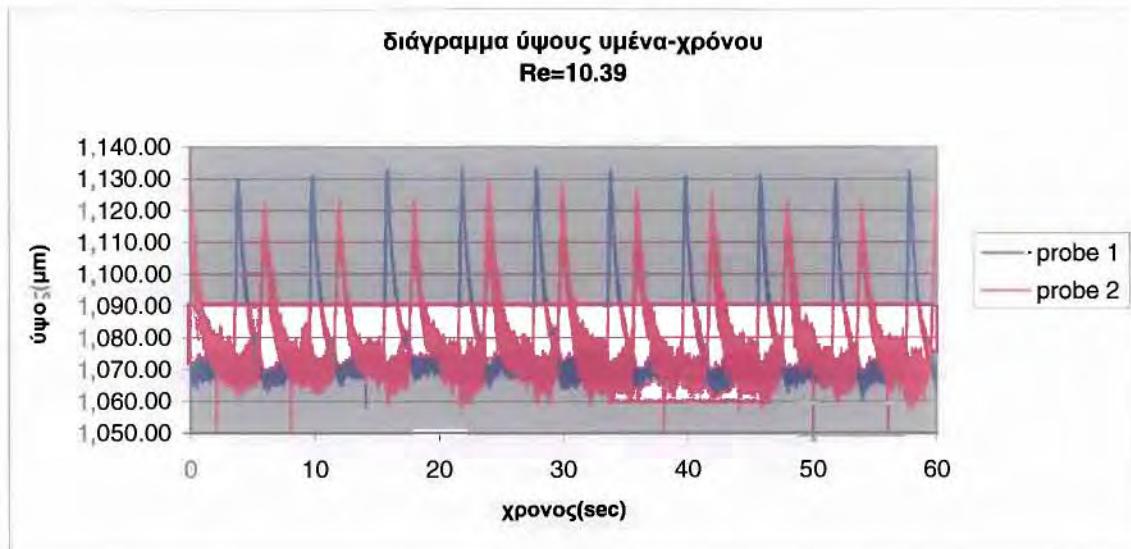
Για νωνία κλίσης 7° :



Διάγραμμα 4.7.1

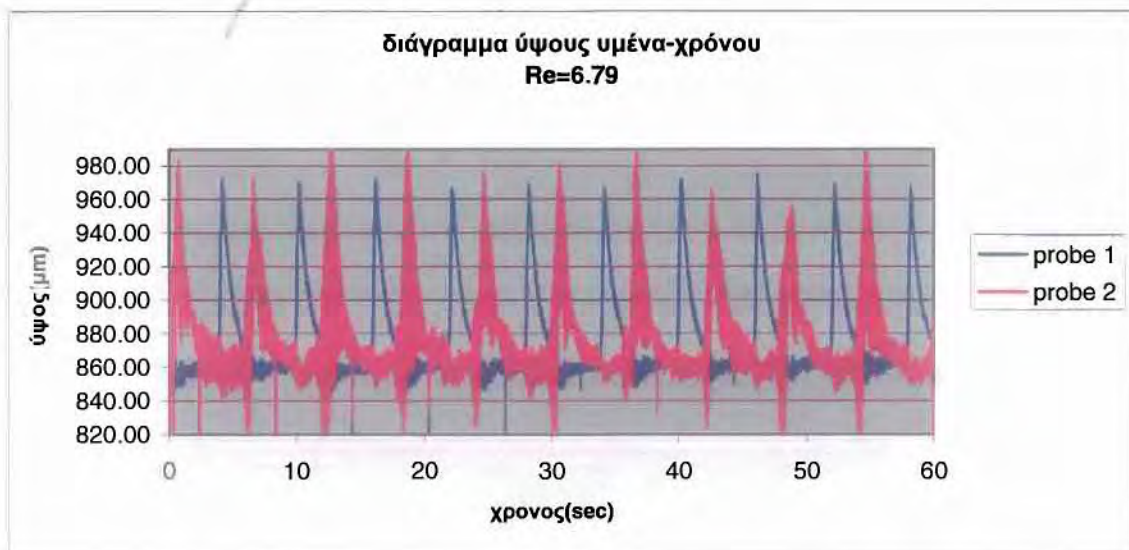


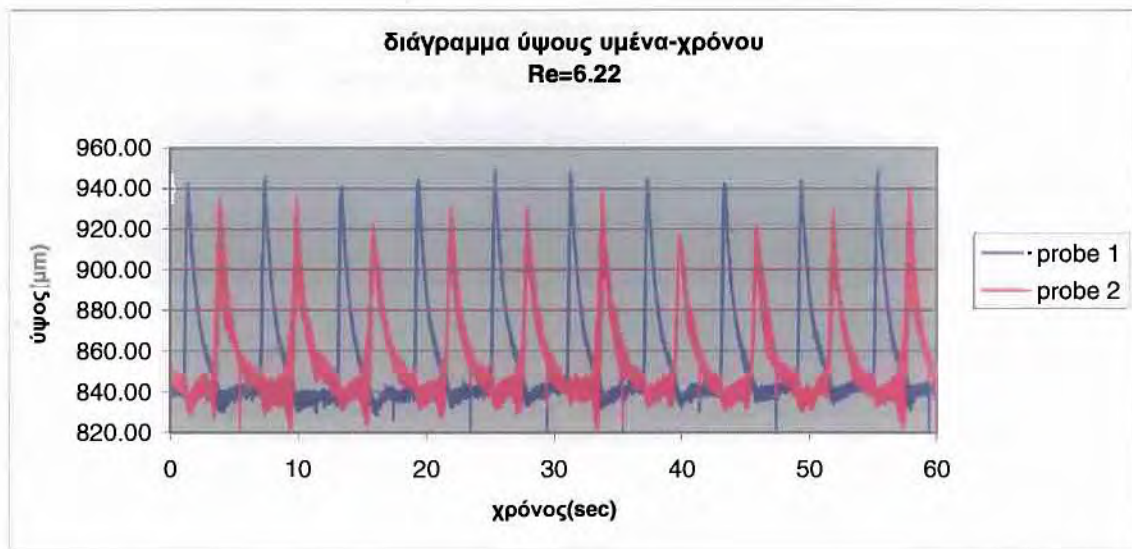
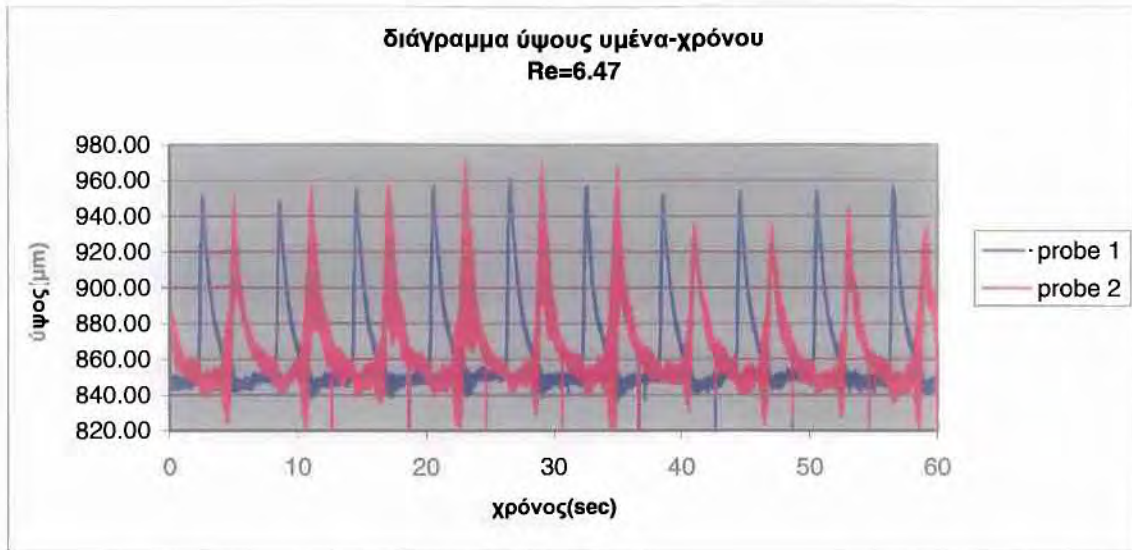
Διάγραμμα 4.7.2



Για γωνία κλίσης 7° , φαίνεται ότι στο διάγραμμα 4.7.1 η ροή βρίσκεται στην ασταθή περιοχή, στο διάγραμμα 4.7.2 η ροή βρίσκεται στη μεταβατική περιοχή, ενώ μεταβαίνει στην ευσταθή περιοχή στο διάγραμμα 4.7.3. Άρα ο κρίσιμος αριθμός Reynolds βρίσκεται στην περιοχή $10.39 < Re_{crit} < 10.92$, όταν από τη θεωρία έχουμε ότι $Re_{crit} = 6.79$.

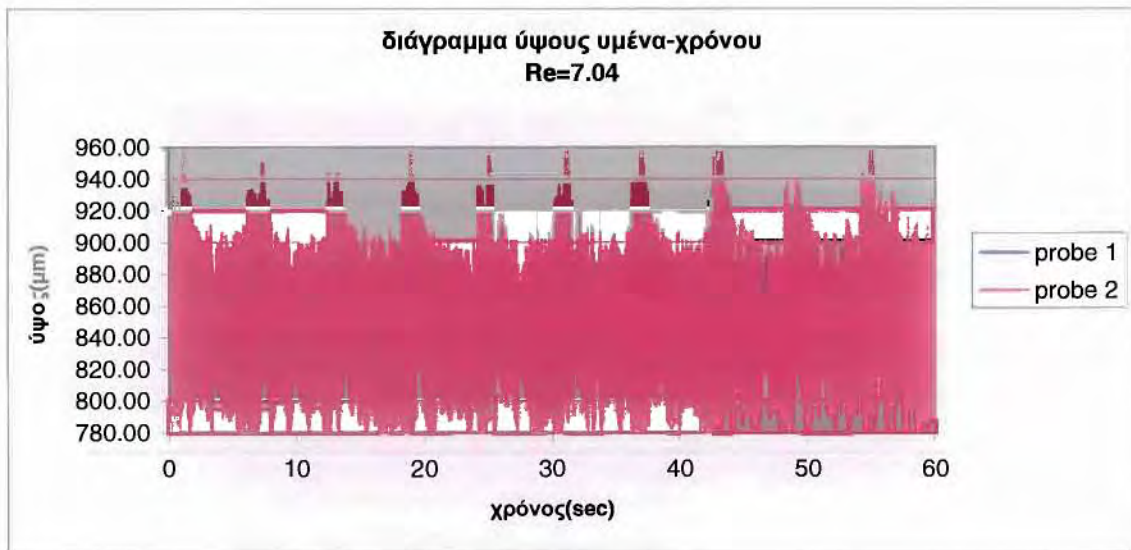
Για γωνία κλίσης 10° :



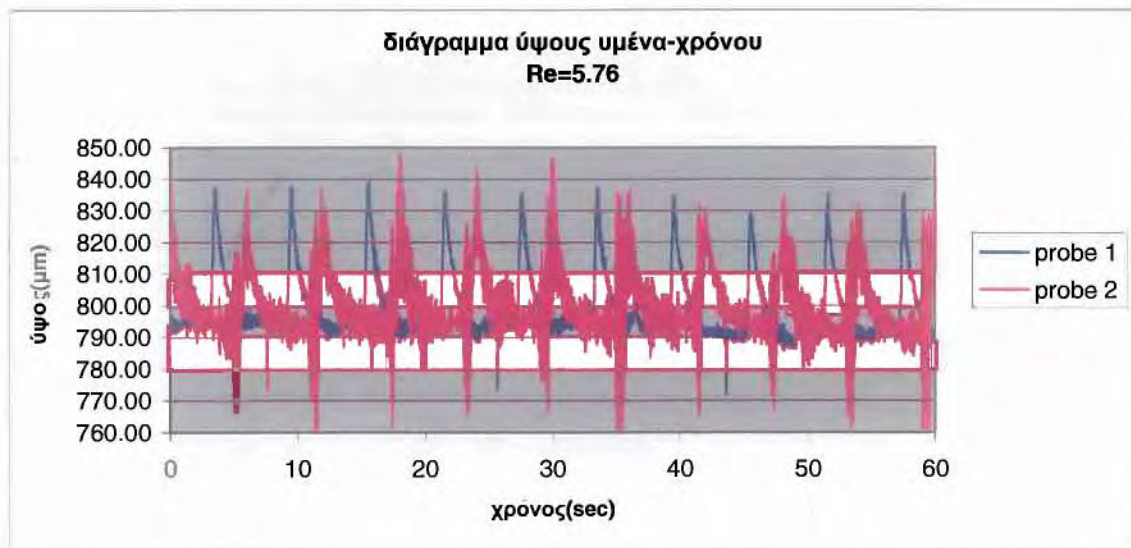


Διαπιστώνεται από τα διαγράμματα ότι η μετάβαση από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή γίνεται για κρίσιμο αριθμό Reynolds : $6.22 < Re_{crit} < 6.47$, όταν $Re_{crit} = 4.73$ για επίπεδο τοίχωμα.

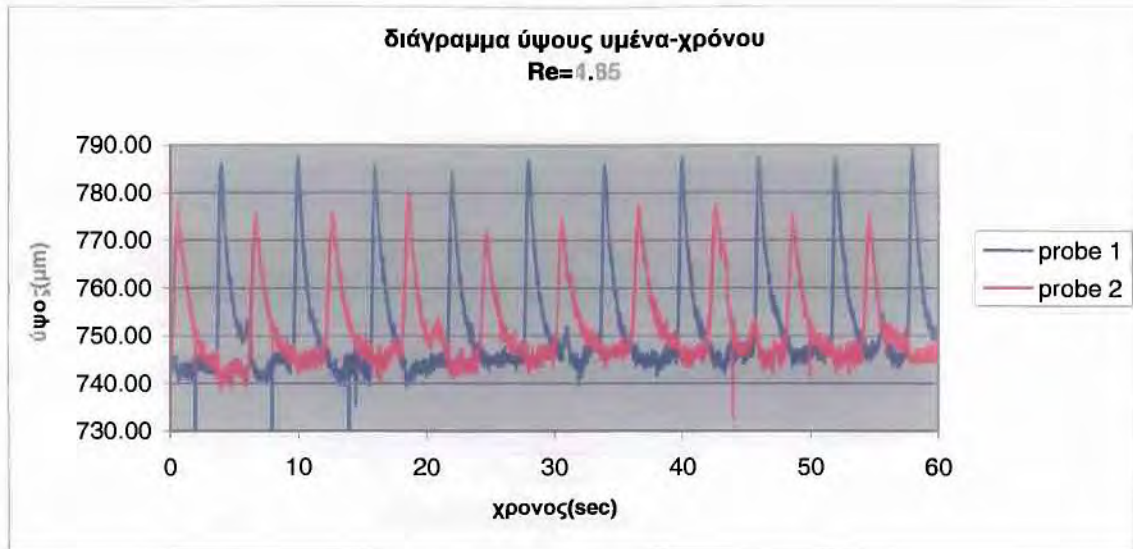
Για γωνία κλίσης 15° :



Διάγραμμα 4.15.1

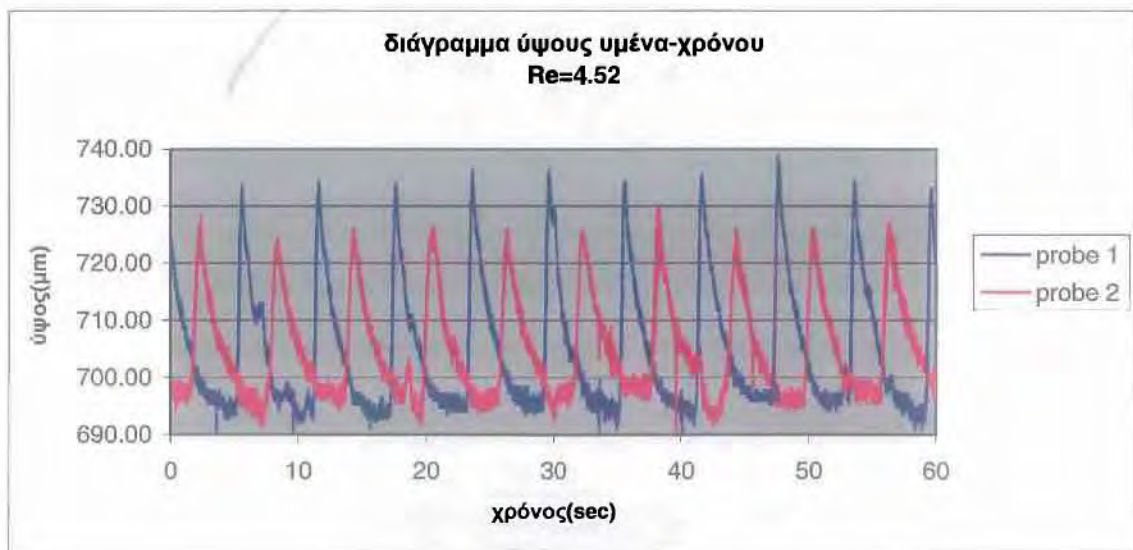


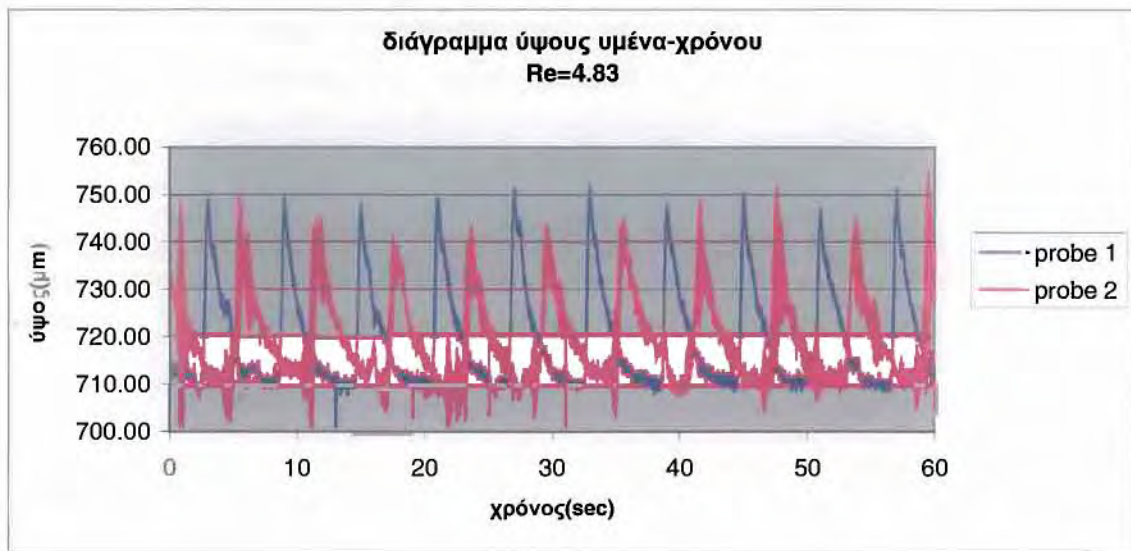
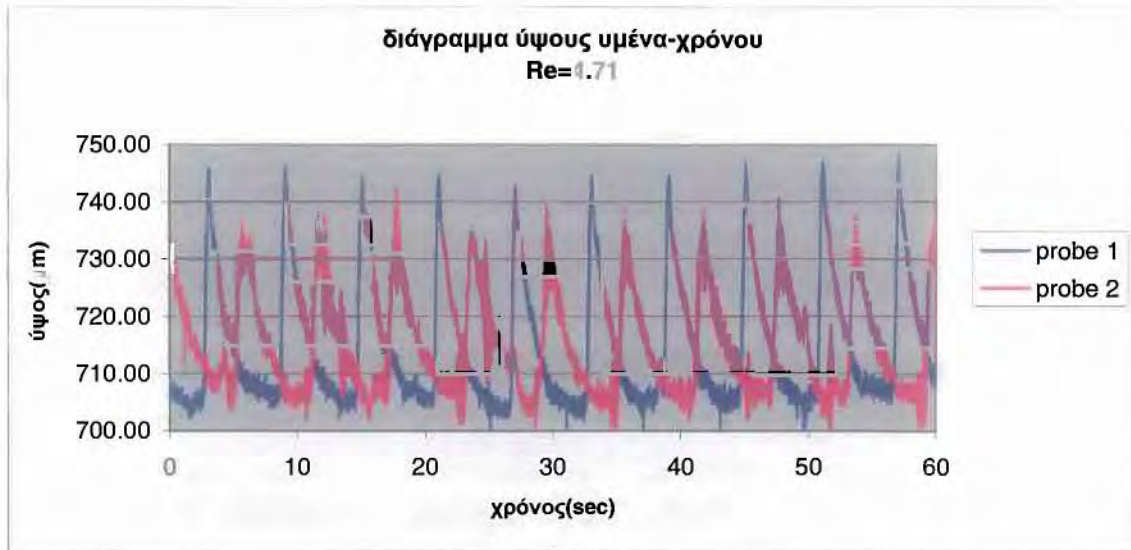
Διάγραμμα 4.15.2



Στο διάγραμμα 4.15.2 φαίνεται ότι το ύψος του κύματος στο δεύτερο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό, κάτι που δε συμβαίνει στο διάγραμμα 4.15.3. Άρα : $4.85 < Re_{crit} < 5.76$. Ο θεωρητικός κρίσιμος αριθμός Reynolds είναι $Re_{crit} = 3.11$.

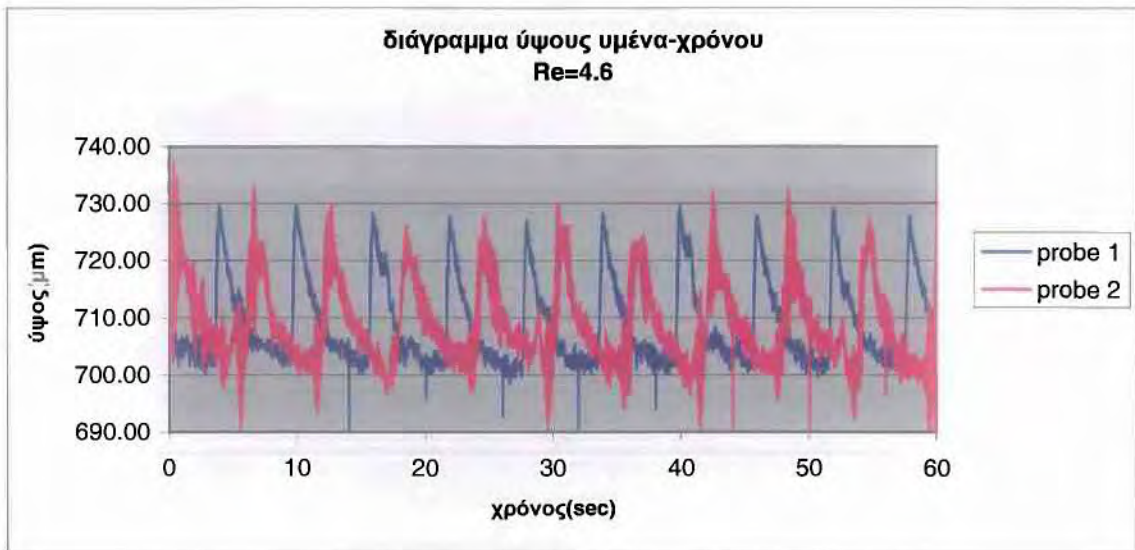
Για γωνία κλίσης 20° :



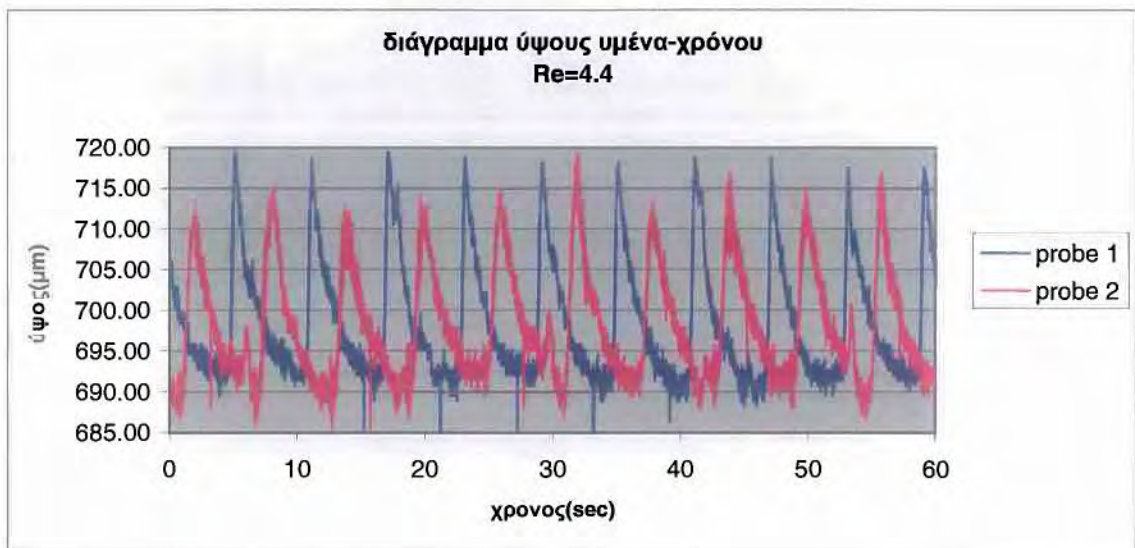


Στα διαγράμματα 4.20.1 και 4.20.2 τα κύματα αποσβένουν όσο περνάει ο χρόνος, κάτι που αποτελεί ένδειξη για ευστάθεια στη ροή, σε αντίθεση με το διάγραμμα 4.20.3, όπου τα κύματα αρχίζουν και μεγαλώνουν καθώς διασχίζουν το τοίχωμα. Η περιοχή μετάβασης είναι : $4.71 < Re_{crit} < 4.83$ και ο κρίσιμος αριθμός Reynolds είναι : $Re_{crit} = 2.29$.

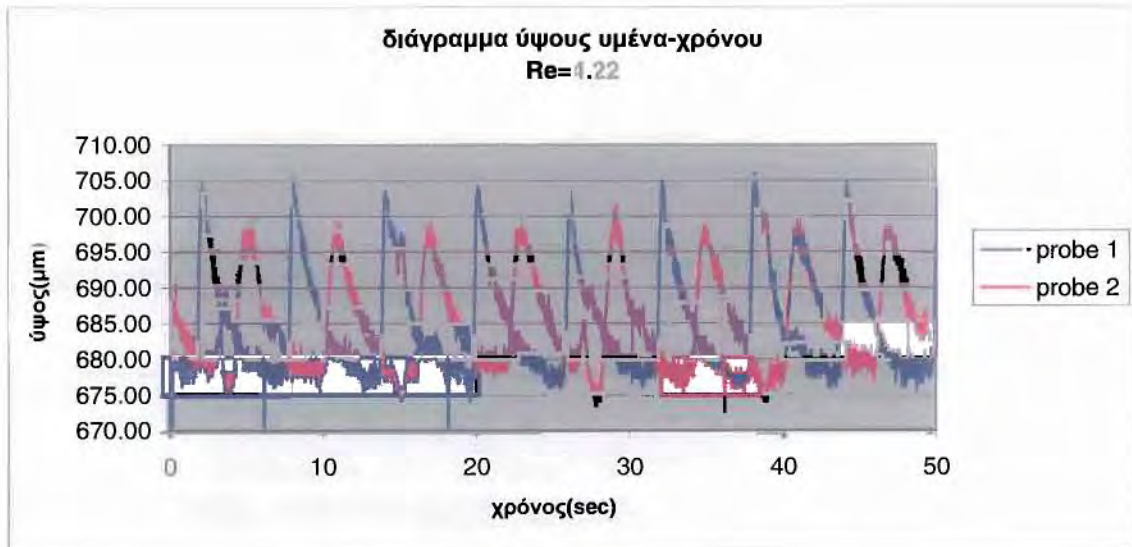
Για γωνία κλίσης 25° :



Διάγραμμα 4.25.1

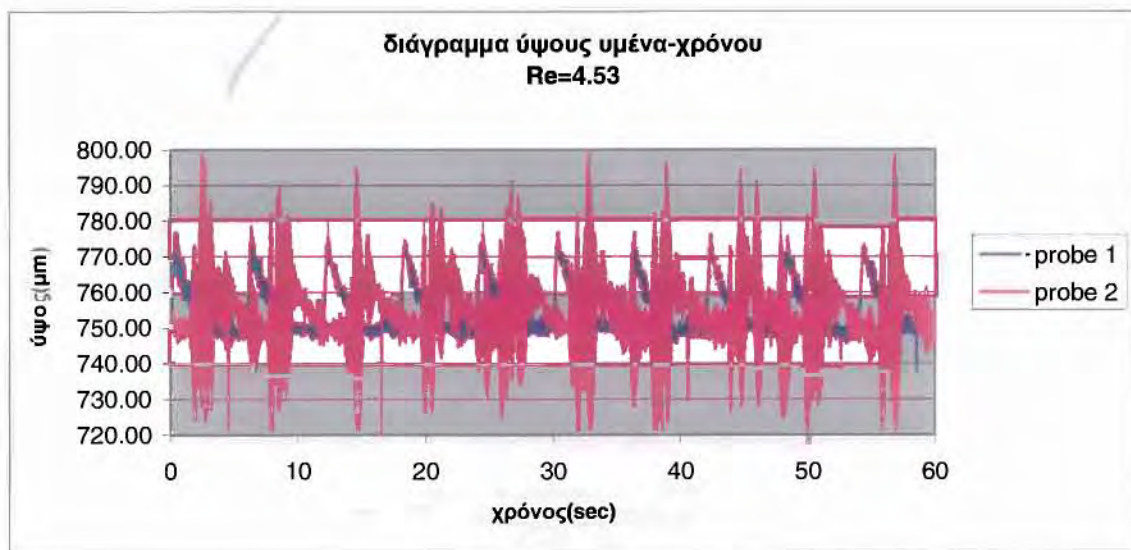


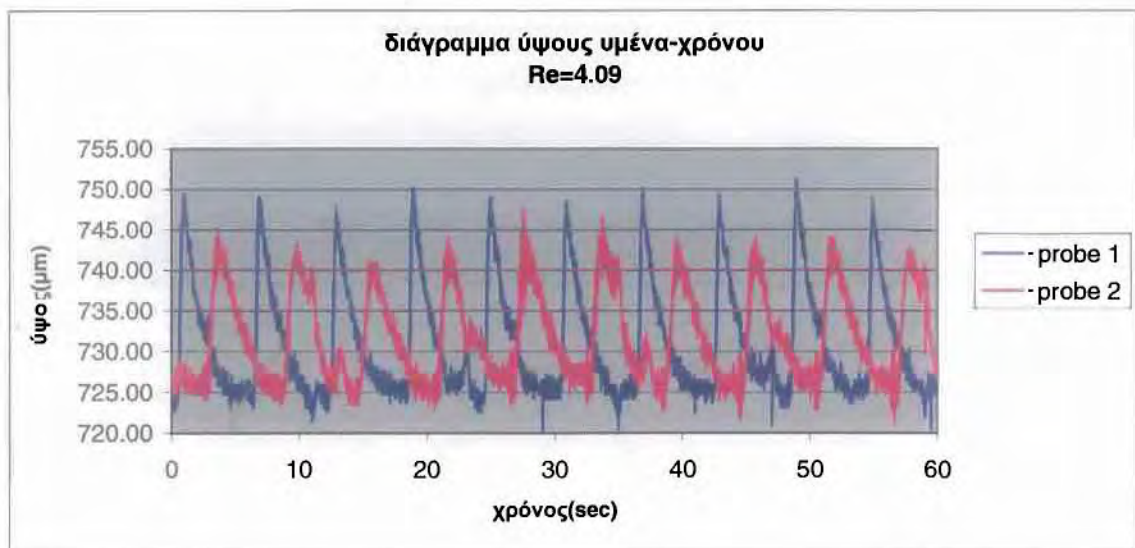
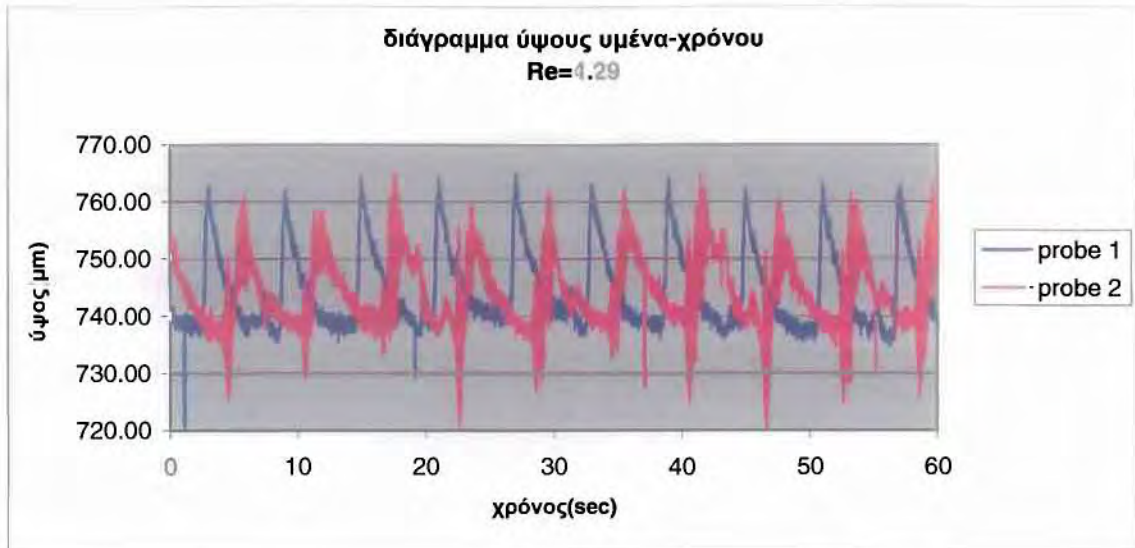
Διάγραμμα 4.25.2



Στο διάγραμμα 4.25.1 φαίνεται η αστάθεια της ροής, η οποία στο διάγραμμα 4.25.2 είναι στη μεταβατική περιοχή και στο διάγραμμα 4.25.3 μεταβαίνει στην ευσταθή περιοχή. Η περιοχή του Re_{crit} είναι : $4.22 < Re_{crit} < 4.6$ και ο θεωρητικός Re_{crit} είναι $Re_{crit} = 1.79$.

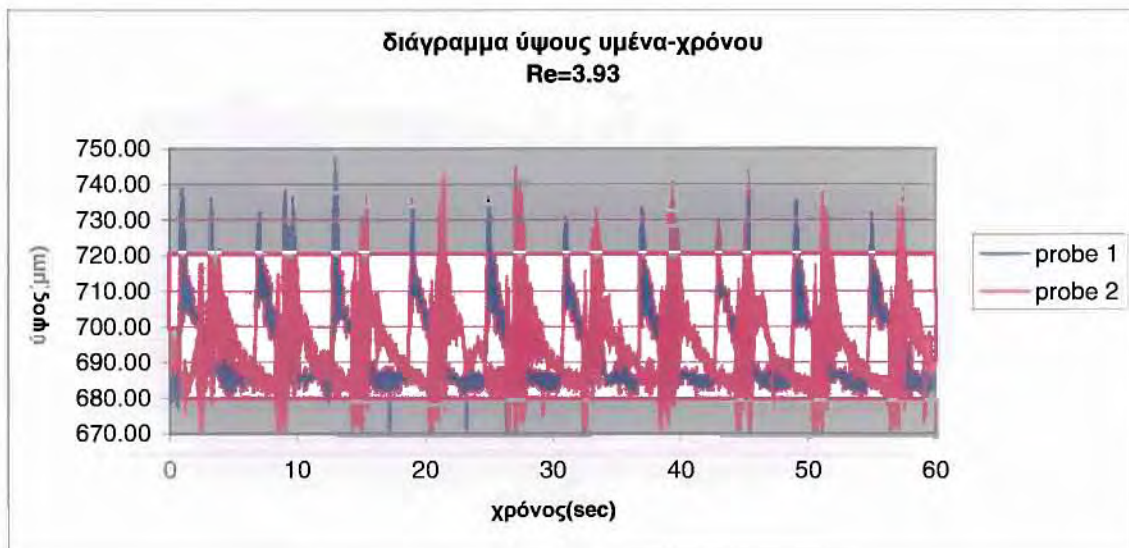
Για γωνία κλίσης 30° :



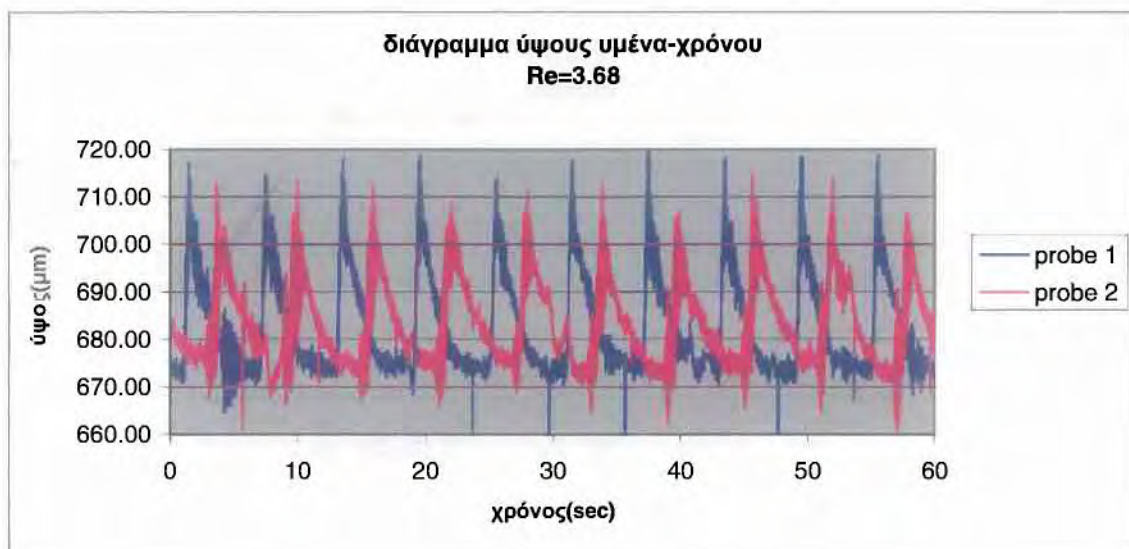


Στα διαγράμματα φαίνεται η μετάβαση της ροής από την αστάθεια του διαγράμματος 4.30.1 στην ευστάθεια του διαγράμματος 4.30.2, με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds να ανήκει στην περιοχή $4.09 < Re_{crit} < 4.53$ όταν από τη θεωρία έχουμε ότι $Re_{crit} = 1.44$.

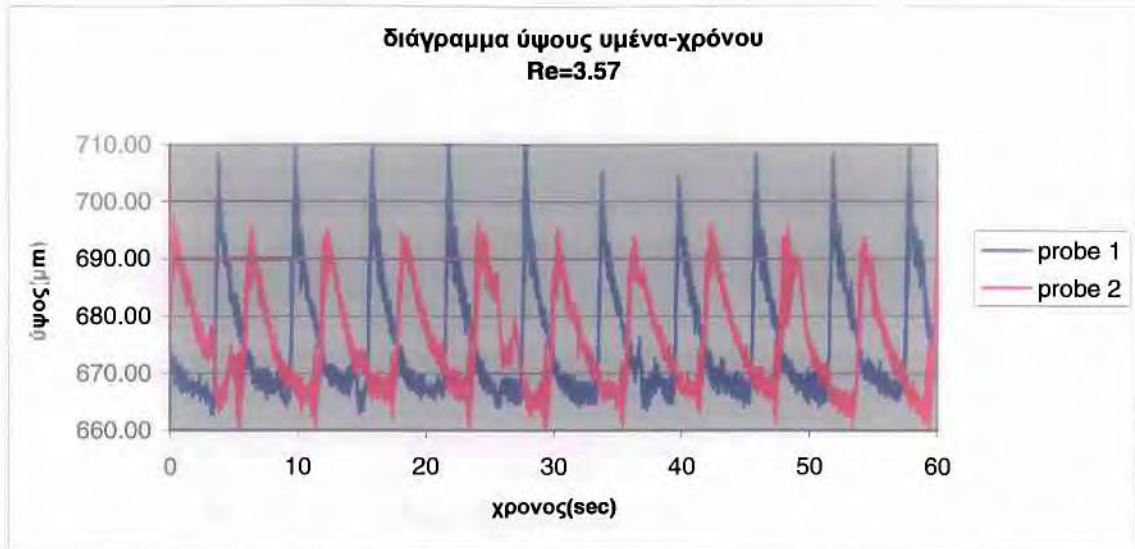
Για γωνία κλίσης 35° :



Διάγραμμα 4.35.1

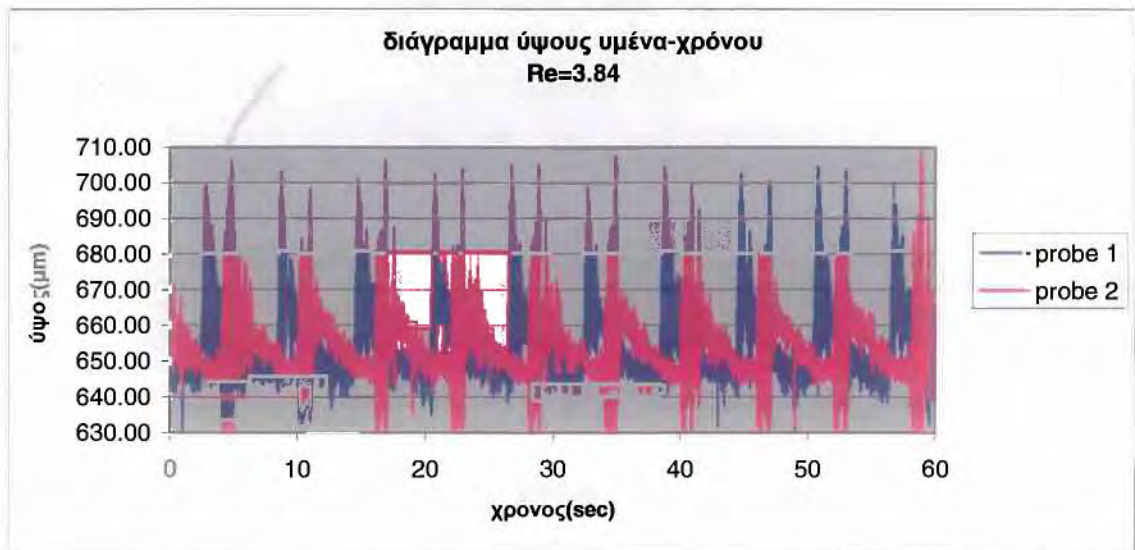


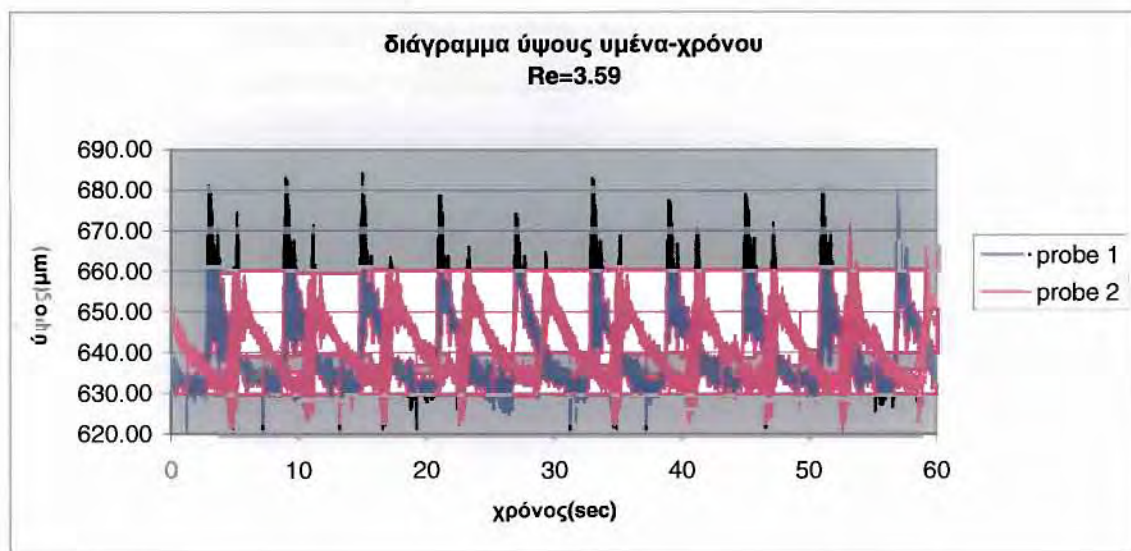
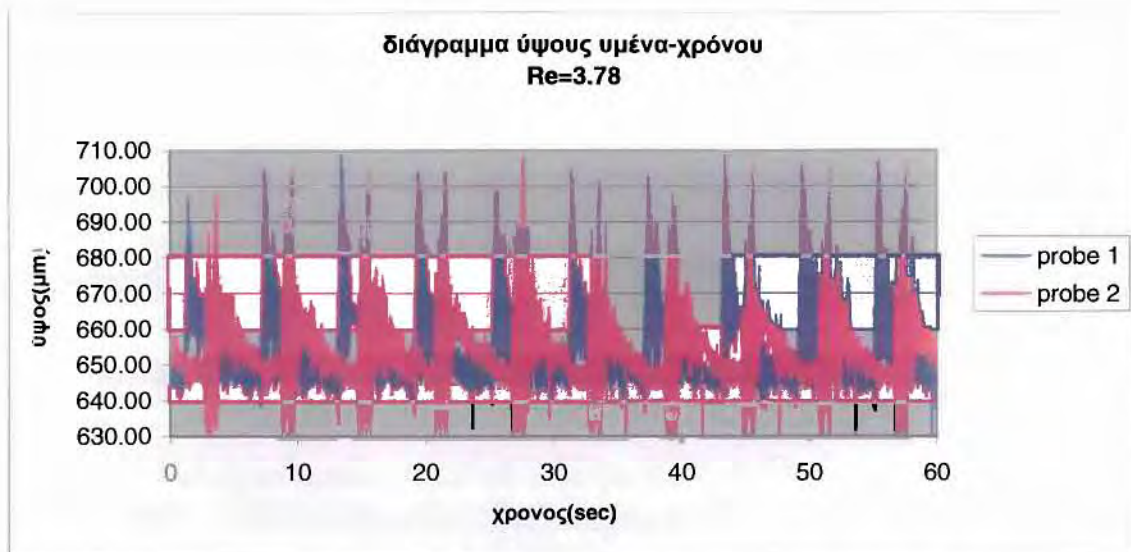
Διάγραμμα 4.35.2



Η ροή από τυρβώδης γίνεται στρωτή σε περιοχή αριθμού Reynolds : $3.57 < Re_{crit} < 3.68$, ενώ από τη θεωρία έχουμε ότι $Re_{crit} = 1.19$.

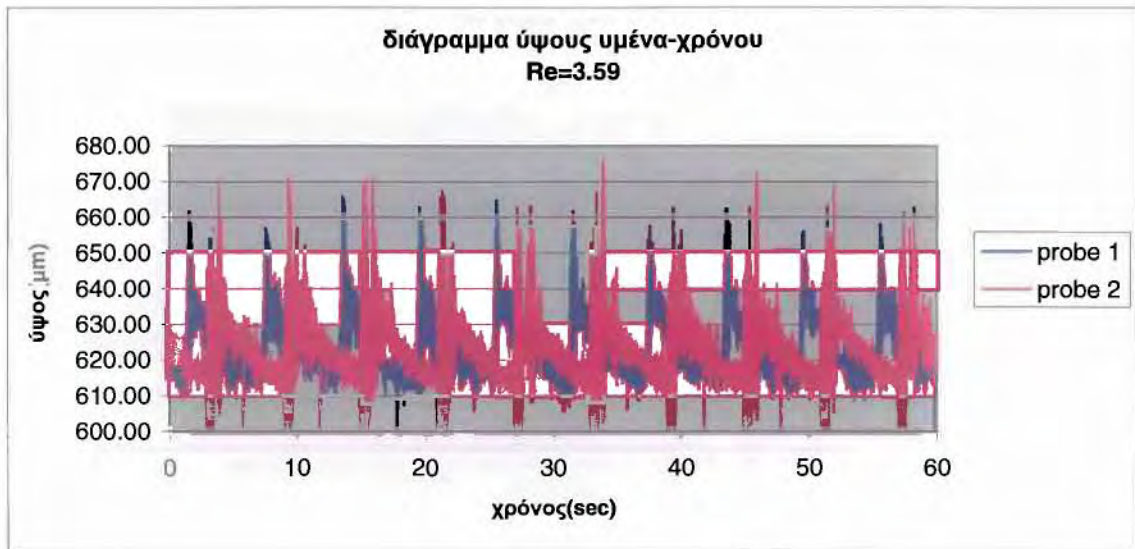
Για γωνία κλίσης 40° :



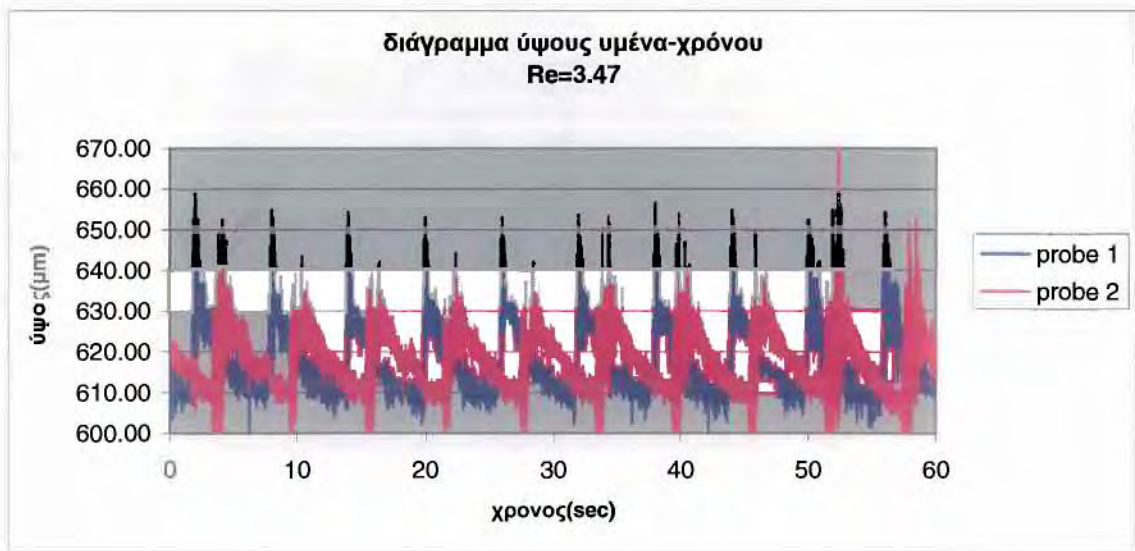


Οι πειραματικές μελέτες δείχνουν ότι για κλίση γωνίας 40° η κρίσιμη περιοχή μετάβασης από την αστάθεια στην ευστάθεια είναι : $3.59 < Re_{crit} < 3.78$. Για επίπεδο τοίχωμα έχουμε : $Re_{crit} = 0.99$.

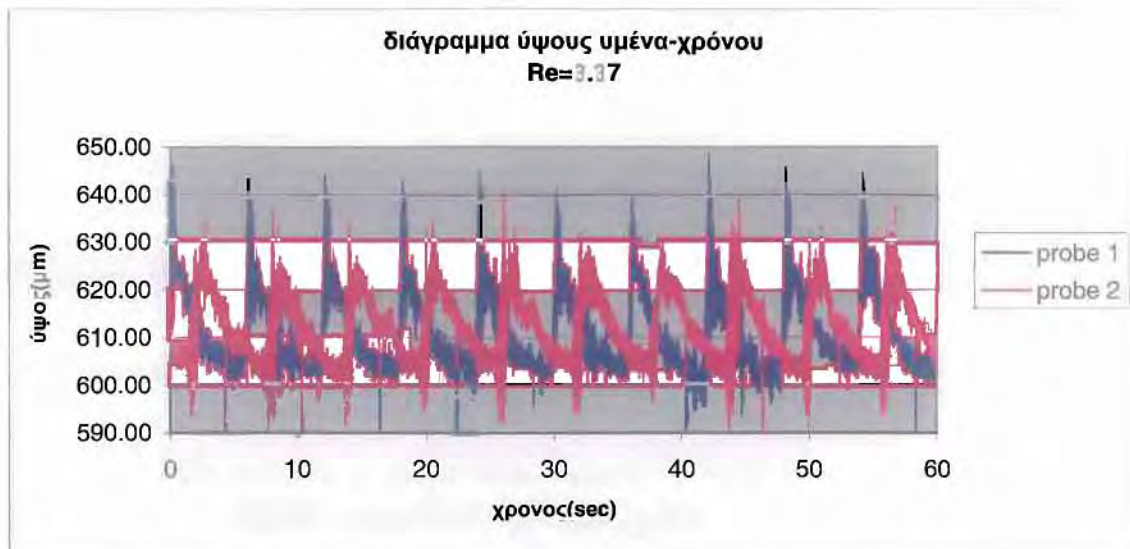
Για γωνία κλίσης 45° :



Διάγραμμα 4.45.1



Διάγραμμα 4.45.2



Διάγραμμα 4.45.3

Τέλος, για γωνία κλίσης 45° , όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, η ροή μεταβαίνει στην ευσταθή περιοχή για $Re_{crit} : 3.37 < Re_{crit} < 3.59$, ενώ η θεωρητική τιμή είναι $Re_{crit} = 0.83$.

4.2.2 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για διάλυμα 68%

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα από τις πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν και αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Η πρώτη στήλη αφορά τη γωνία κλίσης του καναλιού. Στη δεύτερη στήλη παρατίθενται οι περιοχές όπου βρίσκεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, σύμφωνα με την ανάλυση της πρωτογενούς αστάθειας σε ημιτονοειδές τοίχωμα. Τέλος, η τρίτη στήλη περιλαμβάνει τις τιμές που έχουμε για τον κρίσιμο αριθμό Reynolds από τη θεωρία για επίπεδο τοίχωμα.

φ ($^\circ$)	Re_{crit}	Re_{crit}^*	ποσοστό σφάλματος (%)
3	33.12 - 37.08	15.90094724	11.96
7	10.39 - 10.92	6.786955357	5.1
10	6.22 - 6.47	4.726068183	4
15	4.85 - 5.76	3.11004234	18.76
20	4.71 - 4.83	2.289564516	2.55
25	4.22 - 4.6	1.7870891	9
30	4.09 - 4.53	1.443375673	10.76
35	3.57 - 3.68	1.190123339	3.1
40	3.59 - 3.78	0.993127994	5.3
45	3.37 - 3.59	0.833333333	6.5

Πίνακας 4.2

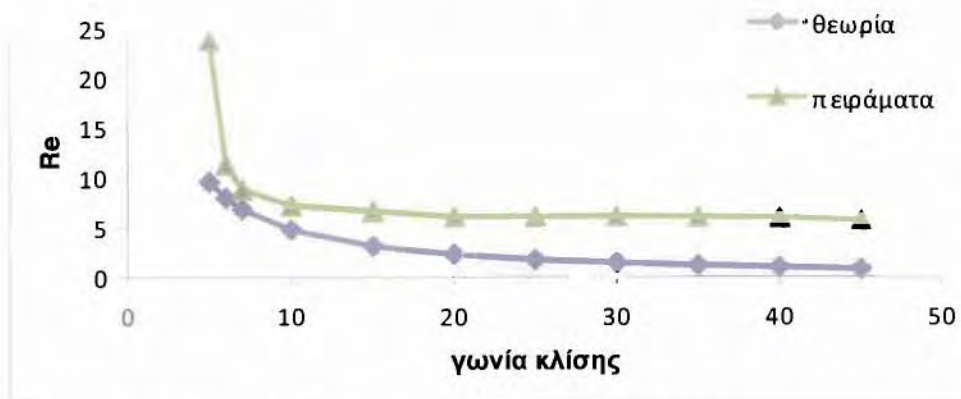
4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαλύματα 68% & 58% σε γλυκερίνη

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρατίθενται τρία διαγράμματα, τα οποία φανερώνουν τη συμπεριφορά του κρίσιμου αριθμού Reynolds συναρτήσει της γωνίας κλίσης, αλλά και τη συμπεριφορά του αριθμού Karitza συναρτήσει της γωνίας κλίσης. Εκτός από τα πειραματικά αποτελέσματα που διεξήχθησαν για διάλυμα με 68% γλυκερίνη, χρησιμοποιούνται και τα αποτελέσματα κάποιων πειραμάτων που έγιναν στο εργαστήριο μαζί με τον Zhehui Cao για διάλυμα με 58% γλυκερίνη, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται και στον Πίνακα 1, στην αρχή του κεφαλαίου. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 4.2.3.1 γίνεται σύγκριση των τιμών του Re_{crit} που εξάγονται από τα πειραματικά αποτελέσματα και των τιμών του Re_{crit} που υπάρχουν από τη θεωρία για επίπεδο τοίχωμα, για διάλυμα γλυκερίνης - νερού, σύστασης 68% - 32%. Στο διάγραμμα 4.2.3.2 γίνεται η ίδια σύγκριση των δύο Re_{crit} , αλλά σε διάλυμα με σύσταση 58% σε γλυκερίνη. Τέλος, στο διάγραμμα 4.2.3.3 γίνεται μία σύγκριση των πειραματικών τιμών των Re_{crit} των δύο διαλυμάτων. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα τρία αυτά διαγράμματα θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

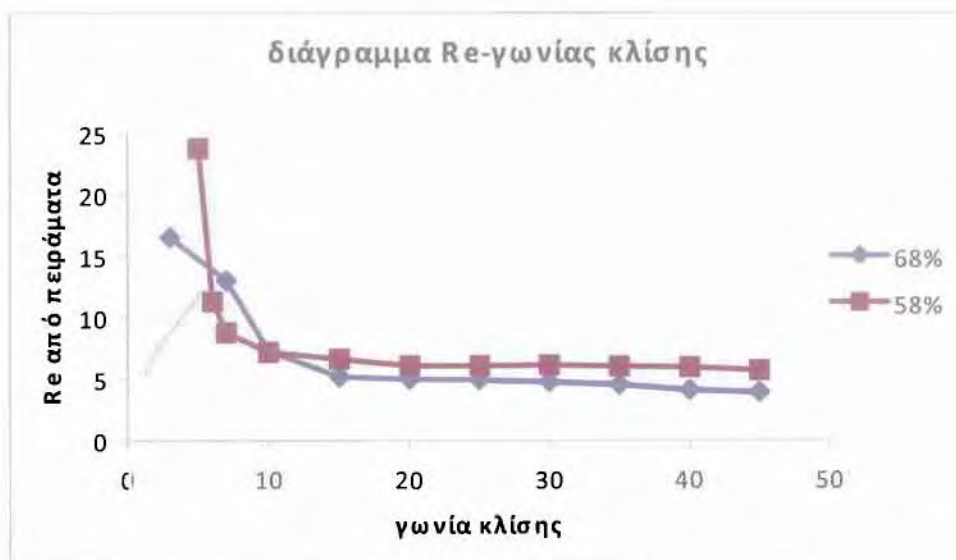


Διάγραμμα 4.2.3.1 Σύγκριση πειραματικών Re_{crit} και θεωρητικών Re_{crit} συναρτήσει της γωνίας κλίσης, για διάλυμα γλυκερίνης-νερού με 68% γλυκερίνη

διάγραμμα Re-γωνίας κλίσης



Διάγραμμα 4.2.3.2 Σύγκριση πειραματικών Re_{crit} και θεωρητικών Re_{crit} συναρτήσεϊ της γωνίας κλίσεϊ, για διάλυμα γλυκερίνης-νερού με 58% γλυκερίνη



Διάγραμμα 4.2.3.3 Σύγκριση πειραματικών Re_{crit} συναρτήσεϊ της γωνίας κλίσεϊ, για διαλύματα γλυκερίνης-νερού με 68% γλυκερίνη και 58% γλυκερίνη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη συγκεκριμένη εργασία. Το θέμα της εργασίας αφορούσε την πειραματική μελέτη της ευστάθειας ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο ημιτονοειδές τοίχωμα, συναρτήσει κάποιων παραμέτρων που άλλαζαν όσο διαρκούσαν τα πειράματα. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που μεταβάλλονταν ήταν η σύσταση του διαλύματος που μελετήθηκε, η παροχή του ρευστού στο κανάλι, η γωνία κλίσης του καναλιού και η εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή που εισαγόταν στο σύστημα.

5.1 Συμπεράσματα

Η πειραματική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του ορίου ευστάθειας είναι η αγωγιμομετρική τεχνική, όπου με τη χρήση του μετρήθηκε το πάχος του υγρού υμένα με μέση τιμή σφάλματος της τάξης του 7.7%.

Μελετήθηκαν δύο διαλύματα γλυκερίνης – νερού, το πρώτο με σύσταση 68% σε γλυκερίνη και μέσο αριθμό Karitza περίπου 140 και το δεύτερο με σύσταση 58% σε γλυκερίνη και μέσο αριθμό Karitza περίπου 260. Τα πειράματα έγιναν σε ημιτονοειδές κεκλιμένο επίπεδο. Η συχνότητα της διαταραχής που εισήχθη στο σύστημα ήταν 0.17 Hz και διατηρήθηκε σταθερή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει από τα πειράματα και τη μελέτη της πρωτογενούς αστάθειας, είναι ότι η χρήση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος σταθεροποιεί τη ροή του υγρού υμένα, κάτι που οφείλεται στην αύξηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds και της κατά επέκταση και της ευστάθειας. Από τα διαγράμματα 4.2.3.1 και 4.2.3.2 του προηγούμενου κεφαλαίου, φαίνεται ότι και για τα δύο διαλύματα ο Re_{crit} που προκύπτει από τα πειράματα σε ημιτονοειδές τοίχωμα είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για επίπεδο τοίχωμα, ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση $Re = Re_{crit} = \frac{5}{6} \cdot \cot \varphi$. Από τα διαγράμματα

αυτά προκύπτει ακόμη το συμπέρασμα ότι όσο μειώνεται το κινηματικό ιξώδες, δηλαδή αυξάνεται ο αριθμός Karitza, τόσο αυξάνεται και ο κρίσιμος αριθμός Reynolds και συνεπώς αυξάνεται και η ευστάθεια του υγρού υμένα. Από το διάγραμμα 4.2.3.3 φαίνεται ότι για γωνίες κλίσης 3° , 5° , 6° , 7° και 10° δε μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την επίδραση του αριθμού Karitza στον κρίσιμο αριθμό Reynolds, ενώ για γωνία κλίσης μεγαλύτερη από 10° παρατηρείται μικρή αύξηση της ευστάθειας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions in Centipoises/mPa s

Glycerine per cent weight	Temperatur e (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 ⁽¹⁾	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

⁽¹⁾Viscosity of water taken from "Properties of Ordinary Water-Substance." N.E. Dorsey, p. 184. New York (1940)

Πίνακας 1. Ιξώδες διαλυμάτων γλυκερίνης – νερού

Refractive Index of Glycerine-Water Solutions at 20 C (69 F)

Glycerine % by Weight	Refractive Index n_D^{20}	Difference for 1%	Glycerine % by Weight	Refractive Index n_D^{20}	Difference for 1%
100	1.47389	0.00165	50	1.39809	0.00149
99	1.47234	0.00163	49	1.39660	0.00147
98	1.47071	0.00161	48	1.39513	0.00145
97	1.46909	0.00157	47	1.39368	0.00141
96	1.46752	0.00156	46	1.39227	0.00138
95	1.46597	0.00154	45	1.39089	0.00136
94	1.46443	0.00153	44	1.38953	0.00135
93	1.46290	0.00151	43	1.38818	0.00135
92	1.46139	0.00150	42	1.38683	0.00135
91	1.45989	0.00150	41	1.38548	0.00135
90	1.45839	0.00150	40	1.38413	0.00135
89	1.45689	0.00150	39	1.38278	0.00135
88	1.45539	0.00150	38	1.38143	0.00135
87	1.45389	0.00152	37	1.38008	0.00134
86	1.45237	0.00152	36	1.37874	0.00134
85	1.45085	0.00155	35	1.37740	0.00134
84	1.44930	0.00156	34	1.37606	0.00134
83	1.44770	0.00160	33	1.37472	0.00134
82	1.44612	0.00162	32	1.37338	0.00134
81	1.44450	0.00160	31	1.37204	0.00134
80	1.44290	0.00155	30	1.37070	0.00134
79	1.44135	0.00153	29	1.36936	0.00134
78	1.43982	0.00150	28	1.36802	0.00133
77	1.43832	0.00149	27	1.36668	0.00133
76	1.43683	0.00149	26	1.36536	0.00132
75	1.43534	0.00149	25	1.36404	0.00132
74	1.43385	0.00149	24	1.36272	0.00131
73	1.43236	0.00149	23	1.36141	0.00131
72	1.43087	0.00149	22	1.36010	0.00131
71	1.42938	0.00149	21	1.35879	0.00130
70	1.42789	0.00149	20	1.35749	0.00130
69	1.42640	0.00149	19	1.35619	0.00129
68	1.42491	0.00149	18	1.35490	0.00129
67	1.42342	0.00149	17	1.35361	0.00128
66	1.42193	0.00149	16	1.35233	0.00127
65	1.42044	0.00149	15	1.35106	0.00126
64	1.41895	0.00149	14	1.34980	0.00126
63	1.41746	0.00149	13	1.34854	0.00125
62	1.41597	0.00149	12	1.34729	0.00125
61	1.41448	0.00149	11	1.34604	0.00123
60	1.41299	0.00149	10	1.34481	0.00122
59	1.41150	0.00149	9	1.34359	0.00121
58	1.41001	0.00149	8	1.34238	0.00120
57	1.40852	0.00149	7	1.34118	0.00119
56	1.40703	0.00149	6	1.33999	0.00119
55	1.40554	0.00149	5	1.33880	0.00118
54	1.40405	0.00149	4	1.33762	0.00117
53	1.40256	0.00149	3	1.33645	0.00115
52	1.40107	0.00149	2	1.33530	0.00114
51	1.39958	0.00149	1	1.33416	0.00113
			0	1.33303	-

Πίνακας 2. Δείκτης διάθλασης 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	1.26361	1.26106	1.25800	1.25495	50	1.12670	1.12645	1.12330	1.12075	1.11810
99	1.26160	1.26125	1.25859	1.25545	1.25235	49	1.12600	1.12575	1.12260	1.12005	1.11745
98	1.25900	1.25865	1.25590	1.25280	1.24975	48	1.12325	1.12305	1.11990	1.11735	1.11475
97	1.25645	1.25610	1.25335	1.25030	1.24710	47	1.12055	1.12030	1.11720	1.11465	1.11205
96	1.25385	1.25350	1.25080	1.24770	1.24450	46	1.11780	1.11760	1.11450	1.11200	1.10940
95	1.25130	1.25095	1.24825	1.24515	1.24190	45	1.11510	1.11490	1.11200	1.11040	1.10785
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	1.09660	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	1.20895	1.20845	1.20575	1.20275	1.19970	29	1.07185	1.07175	1.07010	1.06815	1.06605
78	1.20630	1.20570	1.20305	1.20005	1.19705	28	1.06915	1.06915	1.06755	1.06560	1.06355
77	1.20365	1.20300	1.20030	1.19735	1.19435	27	1.06645	1.06655	1.06495	1.06305	1.06105
76	1.20100	1.20025	1.19760	1.19465	1.19170	26	1.06375	1.06390	1.06240	1.06055	1.05855
75	1.19835	1.19750	1.19485	1.19195	1.18900	25	1.06105	1.06130	1.05980	1.05800	1.05605
74	1.19570	1.19480	1.19215	1.18925	1.18635	24	1.05835	1.05870	1.05720	1.05545	1.05350
73	1.19305	1.19205	1.18940	1.18650	1.18365	23	1.05565	1.05610	1.05465	1.05290	1.05100
72	1.19040	1.18930	1.18670	1.18380	1.18100	22	1.05295	1.05350	1.05205	1.05035	1.04850
71	1.18775	1.18655	1.18395	1.18110	1.17830	21	1.05025	1.05090	1.04950	1.04780	1.04600
70	1.18510	1.18385	1.18125	1.17840	1.17565	20	1.04755	1.04835	1.04700	1.04535	1.04365
69	1.18245	1.18115	1.17855	1.17575	1.17290	19	1.04485	1.04575	1.04440	1.04280	1.04115
68	1.17980	1.17840	1.17575	1.17295	1.17020	18	1.04215	1.04325	1.04195	1.04035	1.03880
67	1.17715	1.17565	1.17300	1.17020	1.16745	17	1.03945	1.04075	1.03945	1.03790	1.03635
66	1.17450	1.17275	1.17025	1.16745	1.16470	16	1.03675	1.03825	1.03695	1.03545	1.03390
65	1.17185	1.17000	1.16750	1.16475	1.16195	15	1.03405	1.03570	1.03450	1.03300	1.03150
64	1.16920	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	14	1.03135	1.03320	1.03200	1.03055	1.02905
63	1.16655	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	13	1.02865	1.03070	1.02955	1.02805	1.02655
62	1.16390	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	12	1.02595	1.02820	1.02705	1.02560	1.02415
61	1.16125	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	11	1.02325	1.02565	1.02455	1.02315	1.02165
60	1.15860	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	10	1.02055	1.02315	1.02210	1.02070	1.01925
59	1.15595	1.15340	1.15105	1.14835	1.14555	9	1.01785	1.02065	1.01970	1.01835	1.01690
58	1.15330	1.15065	1.14830	1.14560	1.14285	8	1.01515	1.01815	1.01730	1.01600	1.01450
57	1.15065	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	7	1.01245	1.01560	1.01485	1.01360	1.01215
56	1.14800	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	6	1.00975	1.01300	1.01225	1.01105	1.00960
55	1.14535	1.14230	1.14005	1.13740	1.13470	5	1.00705	1.01040	1.01015	1.00900	1.00755
54	1.14270	1.13955	1.13730	1.13465	1.13195	4	1.00435	1.00780	1.00760	1.00655	1.00505
53	1.14005	1.13680	1.13455	1.13185	1.12925	3	1.00165	1.00520	1.00500	1.00405	1.00255
52	1.13740	1.13405	1.13180	1.12920	1.12650	2	0.99895	1.00260	1.00240	1.00150	0.99995
51	1.13475	1.13125	1.12905	1.12650	1.12380	1	0.99625	1.00000	1.00000	0.99915	0.99760
0						0	0.99355	0.99735	0.99735	0.99655	0.99505

Πίνακας 3. Πυκνότητα διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **Σαμαντάς Αθανάσιος**, “Πειραματική μελέτη ευστάθειας ροής υγρού υμένα”, μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, (2008)
- **Ανδρίτσος Νικόλαος**, “Σημειώσεις «Φαινόμενα Μεταφοράς»: Συνοριακές Συνθήκες – Μονοδιάστατη Μεταφορά”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- **M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou**, “Experiments on laminar film flow along a periodic wall”. *J. Fluid Mech.* Vol. 457, pp. 133-156, (2002)
- **Wierschem A., Scholle M., Aksel N.**, “Vortices in film flow over strongly undulated bottom profiles at low Reynolds numbers”. *Physics Of Fluids.* Vol. 15, No 2, pp. 426-435, (2003)
- **Argyriadi K., Vlachogiannis M., Bontozoglou V.**, “Experimental study of inclined film flow along periodic corrugations: The effect of wall steepness”. *Physics Of Fluids* 18. p. 012102, (2006)
- **Drazin P. G.**, “Introduction to Hydrodynamic Stability”. Cambridge University Press, (2002)
- **Wang C-Y**, “Liquid film flowing slowly down a wavy incline”. *Michigan State University. AIChE Journal.* Vol. 27. No. 2, (1981)
- **Pozrikidis C.**, “The flow of a liquid film along a periodic wall”. *J. Fluid Mech.* Vol 188. pp. 275-300, (1988)
- **Wierschem A., Lepski C., Aksel N.**, “Effect of bottom undulations on thick in gravity-driven films”, *Acta Mechanica* 179, 41-66, (2005)
- **Bontozoglou V. & Papapolymerou G.**, “Laminar film flow down a wavy incline”, *Int. J. Multiphase Flow.* Vol.23. No 1. pp. 69-79, (1997)
- **Βλαχογιάννης Μ.**, “Πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο και σε κυματοειδές τοίχωμα”, Διδακτορική διατριβή, (2001)
- **Malamataris N. A., Bontozoglou V.**, “Computer aided analysis of viscous film flow along an inclined wavy wall”. *J. Comp. Phys.* Vol. 154. pp. 372-392, (1999)

ΓΟΥΜΕΝΟΣΟΥΛΟΣ, ΓΙΩΑΝΝΗΣ

" ΡΕΙΣΜΑΤΙΚΗ ΜΑΡΚΗ

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

ΕΝΣΤΑΣΙΑΣ ΡΩΣ

ΤΙΤΛΟΣ

ΥΓΡΟΥ ΥΜΒΡΑ 12

ΛΗΞΗ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Τηλ.: 24210-06300-1



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000 08268

