

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

Διπλωματική εργασία

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕ
ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ**

Ζιούλης Ιωσήφ-Άγγελος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση
μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, Σεπτέμβριος 2011

© 2011 Ζιούλης Ιωσήφ - Άγγελος

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος εξεταστής **Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος**, *Καθηγητής*,
(επιβλέπων) Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας .

Δεύτερος εξεταστής **Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ**, *Αναπλ. Καθηγητής*,
 Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα
 Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Λάρισας.

Τρίτος εξεταστής **Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος**, *Αναπλ. Καθηγητής*,
 Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ευχαριστίες

Καταρχήν , θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου , τον Καθηγητή κ.Βασίλη Μποντόζογλου για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε για την εκπόνηση αυτής της εργασίας και την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ'ολη τη διάρκεια της εργασίας.

Επίσης , θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ.Μιχάλη Βλαχογιάννη για της χρήσιμες συμβουλές του αλλά και την πρακτική βοήθεια που μου προσέφερε για το στήσιμο της όλης πειραματικής διάταξης.

Επιπλέον , θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ.Νικόλαο Ανδρίτσο για τις εύστοχες παρατηρήσεις του και την τεχνική βοήθεια που μου προσέφερε όταν αυτό ήταν απαραίτητο , που διευκόλυναν πολύ το έργο μου .

Βεβαίως , δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους Zhehui Cao και Γεωργαντάκη Άννα με τους οποίους είχα άψογη συνεργασία και μου προσέφεραν τη βοήθειά τους όποτε τη χρειαζόμουν . Ειδικά τον Zhehui θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη έμπρακτη βοήθεια για την εκτέλεση των πειραμάτων .

Τέλος , θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή τους αλλά και την υπομονή που έδειξαν καθ'όλη τη διάρκεια , όχι μόνο , της διπλωματικής μου εργασίας , αλλά , και της φοιτητικής μου 'σταδιοδρομίας' γενικότερα .

Μετρήσεις ροής υγρού υμένα σε κατακόρυφη κυλινδρική διάταξη με περιοδικό τοίχωμα

Ζιούλης Ιωσήφ-Άγγελος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2011

Επιβλέπων Καθηγητής : **Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος**, Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ροή λεπτού υγρού υμένα συναντάται σε πολλές εφαρμογές της βιομηχανίας και ειδικά σε συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι εναλλάκτες θερμότητας, οι στήλες απορρόφησης, οι συμπυκνωτές και οι εξατμιστήρες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη ροής υγρού υμένα σε κυλινδρικό κατακόρυφο τοίχωμα με περιοδική διαμόρφωση κυματοειδούς μορφής. Σκοπός της εργασίας είναι να βρεθεί πειραματικά ο Re_{crit} στον οποίο γίνεται η μετάβαση από την ευστάθεια στην αστάθεια για κάθε μελετώμενο υγρό. Επίσης, μελετάται η εξέλιξη των κυματώσεων των ροών στην ασταθή περιοχή.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη, η οποία περιγράφεται εκτενώς στη συνέχεια της εργασίας, και, επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δύο πειραματικές τεχνικές για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η αγωγιμομετρική τεχνική για την εξεύρεση του Re_{crit} και η φωτογραφική τεχνική για τη λήψη εικόνων της εξέλιξης της ροής.

Βρέθηκε ότι ο Re_{crit} έχει πεπερασμένη τιμή και εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό Kapitza. Ειδικότερα, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός Kapitza τόσο αυξάνεται και ο Re_{crit} . Όσο αφορά την εξέλιξη των κυματώσεων, ξεκινώντας από υψηλό Reynolds παρατηρήθηκε αρχικά, τρισδιάστατη χαοτική 3D - δομή με κύματα πεταλοειδή τύπου, μετέπειτα, δισδιάστατη δομή με κύματα κυρίως μοναχικά, και τέλος 'αδρανής' δομή όπου τα κύματα αν υπάρχουν δεν είναι εμφανή.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΩΝ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	7
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1 Στόχος της εργασίας.....	9
1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα	9
1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων.....	10
1.4 Δομή της εργασίας	11
2.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	12
2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα.....	12
2.2 Θεωρία γραμμικής ευστάθειας για τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο.....	17
2.3 Βιβλιογραφικές αναφορές για ροή υγρού υμένα.....	22
3.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	24
3.1 Πειραματική διάταξη.....	24
3.1.1 Κύλινδρος ροής.....	25
3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.....	26
3.2 Τεχνικές μέτρησης.....	27
3.2.1 Αγωγιμομετρική τεχνική.....	27
3.2.1.1 Περιγραφή τεχνικής.....	28
3.2.1.2 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	29
3.2.2 Φωτογραφική τεχνική.....	30
3.2.1.1 Περιγραφή τεχνικής.....	30
3.3 Ιδιότητες Ρευστών	31
3.4 Πειραματική διαδικασία	32
3.4.1 Επίδραση θερμοκρασίας	32
3.4.2 Ευθυγράμμιση κυλίνδρου	35
3.4.3 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων.....	36
3.4.4 Ακρίβεια μετρήσεων.....	39
4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	40
4.1 Σειρές πειραμάτων.....	40
4.2 Πρωτογενής αστάθεια	41
4.2.1 Αποτελέσματα διαλύματος 66% γλυκερίνης.....	42
4.2.2 Αποτελέσματα διαλύματος 77% γλυκερίνης.....	45
4.2.3 Αποτελέσματα διαλύματος 85% γλυκερίνης.....	47
4.2.4 Συνοπτικά Αποτελέσματα.....	48
4.3 Δυναμική ασταθούς περιοχής	49
4.3.1 Αποτελέσματα διαλύματος 66% γλυκερίνης.....	49
4.3.2 Αποτελέσματα διαλύματος 77% γλυκερίνης.....	52
4.3.3 Αποτελέσματα διαλύματος 85% γλυκερίνης.....	55
5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	58
5.1 Συμπεράσματα.....	58
5.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.....	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	62

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Δυνάμεις πάνω σε ένα στοιχείο υγρού σε ροή υγρού υμένα.....	13
Σχήμα 2.2 Ανάπτυξη περιοδικών διαταραχών στη ροή υγρού υμένα.....	18
Σχήμα 2.3. Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα.....	21
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής	29
Σχήμα 3.2 Διάγραμμα τάσης-χρόνου του ρευστού του κυλίνδρου	33
Σχήμα 3.3 Διάγραμμα τάσης-χρόνου του ρευστού του δοχείου.....	33
Σχήμα 3.4 Πίνακας Θερμοκρασιών ρευστών και δωματίου	34
Σχήμα 3.5 Πίνακας τάσεων ρευστών.....	34
Σχήμα 3.6 Σκιαγράφημα της πειραματικής διάταξης.	36
Σχήμα 4.1 Πίνακας χαρακτηριστικών πρώτου διαλύματος.....	40
Σχήμα 4.2 Πίνακας χαρακτηριστικών δεύτερου διαλύματος.....	41
Σχήμα 4.3 Πίνακας χαρακτηριστικών τρίτου διαλύματος.....	41
Σχήμα 4.4 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα . 1)Re = 5.53 2)Re = 4.32 3)Re = 2.74 4)Re = 2.58 5)Re = 2.38 6)Re = 2.19 7)Re = 2.08 8)Re = 1.92	42
Σχήμα 4.5 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα . 1)Re = 2.05 2)Re = 1.75 3)Re = 1.51 4)Re = 1.37 5)Re = 1.26 6)Re = 1.31.....	45
Σχήμα 4.6 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα . 1)Re = 1.03 2)Re = 0.97 3)Re = 0.89 4)Re = 0.82 5)Re = 0.78	47
Σχήμα 4.7 Συνοπτικά αποτελέσματα πρωτογενούς αστάθειας	48
Σχήμα 5.1 Διάγραμμα συσχέτισης αριθμού Kapitza με αριθμό Reynolds.....	59

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1 Η πειραματική διάταξη.....	24
Εικόνα 3.2 Η κεφαλή του κυλίνδρου από την κάτω μεριά.....	25
Εικόνα 3.3 Η κεφαλή του κυλίνδρου από την πάνω μεριά.....	25
Εικόνα 3.4 Η κοιλότητα στο πάνω μέρος του κυλίνδρου.....	25
Εικόνα 3.5 Διακλάδωση σωληνώσεων εξόδου του ρευστού από τη βάση του κυλίνδρου.....	25
Εικόνα 3.6 Δοχείο συλλογής.....	25
Εικόνα 3.7 Γραναζωτή αντλία.....	26
Εικόνα 3.8 Inverter με ένδειξη -5 Hertz.....	26
Εικόνα 3.9 Η διακλάδωση κύριου αγωγού (κάθετος) με By-pass (οριζόντιος).....	26
Εικόνα 3.10 Η ηλεκτροβαλβίδα του By-pass.....	26
Εικόνα 3.11 Περιφερειακά συστήματα της αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	27
Εικόνα 3.12 Μετρητικό αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	28
Εικόνα 3.13 Γεννήτρια συχνοτήτων.....	28
Εικόνα 3.14 Αναλυτής	28
Εικόνα 3.15 Μικρόμετρο.....	29
Εικόνα 3.16 Πυκνόμετρο.....	31
Εικόνα 3.17 Ιξωδόμετρο.....	31
Εικόνα 3.18 Αγωγιμόμετρο Consort C834.....	31
Εικόνα 3.19 Διαθλασίμετρο Abbe 5 Refractometer - <i>Bellingham+Stanley Ltd</i>	31
Εικόνα 3.20 Ροή μη ομοιόμορφα κατανεμημένα.....	35
Εικόνα 3.21 Ροή ομοιόμορφα κατανεμημένα.....	35
Εικόνα 4.1 Ροή στον κύλινδρο , 3Hz - 4.500 Kg/min – Re =7.18.....	49
Εικόνα 4.2 Ροή στον κύλινδρο , 2.4Hz - 3.410 Kg/min - Re=5.44.....	49
Εικόνα 4.3 Ροή στον κύλινδρο , 2.1Hz - 2.940 Kg/min - Re=4.69.....	50
Εικόνα 4.4 Ροή στον κύλινδρο , 1.8Hz - 2.410 Kg/min - Re=3.85.....	50
Εικόνα 4.5 Ροή στο πάνω μέρος του κυλίνδρου , 2.1Hz - 2.940 Kg/min - Re=5.44	51

Εικόνα 4.6 Ροή στο κάτω μέρος του κυλίνδρου , 2.1Hz - 2.940 Kg/min - Re=5.44	51
Εικόνα 4.7 Ροή στον κύλινδρο , 3.5Hz – 5.893 Kg/min – Re =3.71.....	52
Εικόνα 4.8 Ροή στον κύλινδρο , 2.9Hz – 4.973 Kg/min – Re =3.01.....	52
Εικόνα 4.9 Ροή στον κύλινδρο , 2.6Hz – 4.26 Kg/min – Re =2.68.....	53
Εικόνα 4.10 Ροή στον κύλινδρο , 2.4Hz – 3.866 Kg/min – Re =2.44.....	53
Εικόνα 4.11 Ροή στο πάνω μέρος του κυλίνδρου , 2.9Hz - 4.793 Kg/min - Re=3.01	54
Εικόνα 4.12 Ροή στο κάτω μέρος του κυλίνδρου , 2.9Hz - 4.793 Kg/min - Re=3.01	54
Εικόνα 4.13 Ροή στον κύλινδρο , 5.0Hz – 8.620 Kg/min – Re =2.03.....	55
Εικόνα 4.14 Ροή στον κύλινδρο , 4.0Hz – 6.850 Kg/min – Re =1.62.....	55
Εικόνα 4.15 Ροή στον κύλινδρο , 3.5Hz – 5.960 Kg/min – Re =1.41.....	56
Εικόνα 4.16 Ροή στον κύλινδρο , 3.0Hz – 5.100 Kg/min – Re =1.20.....	56
Εικόνα 4.17 Ροή στο πάνω μέρος του κυλίνδρου , 4.0Hz – 6.850 Kg/min - Re=1.62.....	57
Εικόνα 4.18 Ροή στο κάτω μέρος του κυλίνδρου , 4.0Hz- 6.850 Kg/min - Re=1.62	57

1.1 Στόχος της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας . Στόχος της είναι η πειραματική μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφη κυλινδρική διάταξη με περιοδικό τοίχωμα κυματοειδούς μορφής ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά της ροής και τη δυναμική της. Πιο 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 διάφορες τιμές ιξώδους του ρευστού ή διάφορες τιμές του αριθμού Kapitza . Επιπλέον , μελετάται η ποιοτική εξέλιξη των φαινομένων (κυματισμών) καθώς το υγρό ρέει κατακόρυφα στην κύλινδρική διάταξη .

1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα

Ως ροή λεπτού υγρού υμένα ορίζεται η ροή εκείνη κατά την οποία το πάχος του ρευστού είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής . Η βασικότερη , ίσως , ροή υγρού υμένα είναι η ροή κατά μήκος επίπεδου τοιχώματος η οποία ονομάζεται και ροή Nusselt . Η ροή αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στις βαρυτικές δυνάμεις . Η ικανότητα των λεπτών υμένων αυτών να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση είναι αυτή που έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση τους σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές . Πιο συγκεκριμένα , λεπτοί υμένες χρησιμοποιούνται σε εναλλάκτες θερμότητας , αντιδραστήρες , στήλες απορρόφησης κ.α.

Κατά τη ροή αυτών των λεπτών υμένων αναπτύσσονται πολύπλοκες δομές επιφανειακών κυμάτων , η μορφή και τα χαρακτηριστικά των οποίων ποικίλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής . Τα χαρακτηριστικά της ροής και των δομών αυτών επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας και μάζας , με αποτέλεσμα να

καθορίζουν , σε μεγάλο βαθμό , τον βαθμό απόδοσης των συσκευών στις οποίες απαντώνται .

Υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες επιζητείται η μεγιστοποίηση των φαινομένων μεταφοράς . Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι συμπυκνωτές , οι εξατμιστήρες , οι στήλες απορρόφησης και οι διαφασικοί αντιδραστήρες . Αντίθετα , υπάρχουν και εφαρμογές στις οποίες είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση των φαινομένων μεταφοράς όπως είναι οι διεργασίες επίστρωσης λεπτών υμένων (film) , όπου η παρουσία κυμάτων στην επιφάνεια επίστρωσης δεν είναι επιθυμητή .

Τέλος , αναφέρουμε , ότι χρησιμοποιήθηκαν περιοδικά κυματοειδή τοιχώματα - όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας - σε διάφορες συσκευές , όπως , συμπυκνωτές και εξατμιστήρες , όπου επιβεβαιώθηκε από πειράματα ότι τα συγκεκριμένα τοιχώματα ενισχύουν τους συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας χωρίς , ωστόσο , να βρεθούν οι λόγοι που αυτό συμβαίνει .

1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων

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

Πιο συγκεκριμένα , ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα γλυκερίνης - νερού διαφορετικές συστάσεις για να μεταβάλλεται το ιξώδες αλλά και η πυκνότητα του μελετούμενου ρευστού (και κατ' επέκταση ο αριθμός Kapitza) . Οι παροχές που μετρήθηκαν εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds τόσο πάνω από τον χαρακτηριστικό κρίσιμο όσο και κάτω από αυτόν .

Επιλέχτηκε κατακόρυφο περιοδικά διαμορφωμένο κυματοειδές τοίχωμα ώστε να προσομοιωθεί η ροή υγρού υμένα στην πειραματική διάταξη με την πραγματική ροή υγρού υμένα σε βιομηχανικές εφαρμογές .

1.4 Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη ροή υγρού υμένα . Πιο συγκεκριμένα , αναφέρονται οι εξισώσεις που διέπουν την βασική ροή υγρού υμένα ή όπως ονομάζεται ροή Nusselt , αναλύεται η θεωρία της γραμμικής ευστάθειας και παραθέτονται κάποιες βιβλιογραφικές αναφορές με τις μέχρι τώρα μελέτες πάνω στη ροή υγρού υμένα .

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων . Περιγράφεται η πειραματική διάταξη , οι τεχνικές μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και γίνεται μία λεπτομερής περιγραφή βήμα- βήμα της διαδικασίας των πειραμάτων .

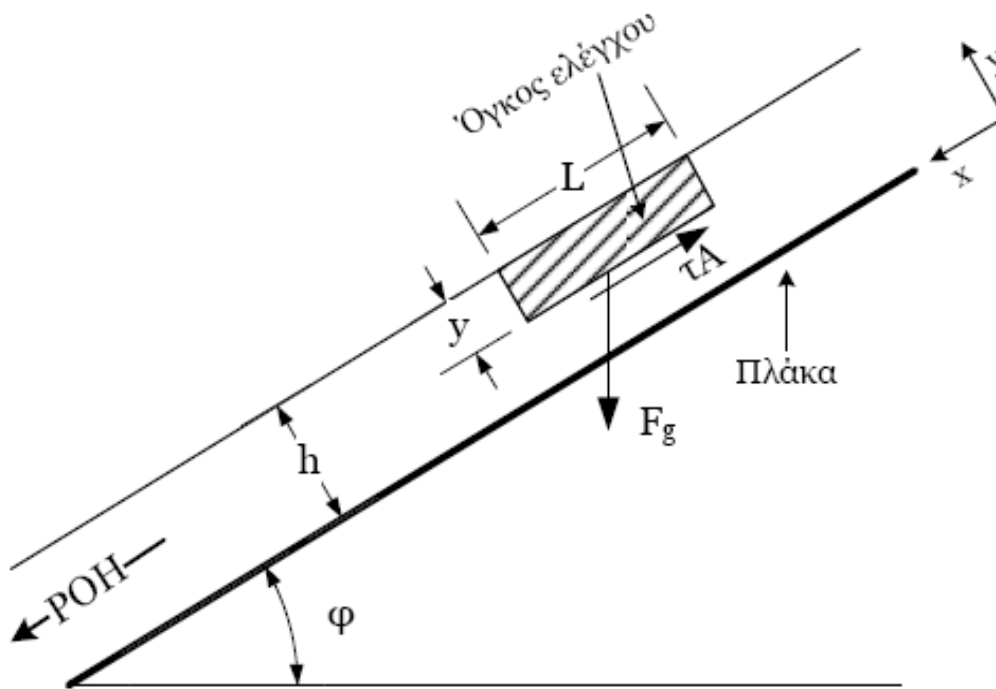
Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και γίνεται η επεξεργασία τους και στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα πειράματα που διεξήχθησαν για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας .

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα

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

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



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

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

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

Όπου:

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

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

ρ : πυκνότητα του ρευστού

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει :

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

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

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

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

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

Ολοκληρώνοντας η εξ. (2.1-4) δίνει :

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

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

- Για $y=0$ είναι $u_x(0)=0$ 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].

Η μέση ταχύτητα του ρευστού βρίσκεται εύκολα ολοκληρώνοντας την ταχύτητα u_x για ένα εμβαδό διατομής και διαιρώντας με το εμβαδόν αυτό:

$$u = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi \cdot h_N^2}{3 \cdot \mu} \Rightarrow h_N = \sqrt{\frac{3 \cdot \mu \cdot u}{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}} \quad (2.1-9)$$

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

$$u_{\max} = u_x (y = h) = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi \cdot h^2}{2 \cdot \mu} \quad (2.1-10)$$

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

$$\frac{dp}{dy} = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \Rightarrow p = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot y + c_1$$

Με συνοριακή συνθήκη :

- Για $y=h$ είναι $p=P_{atm}$

Επομένως, προκύπτει :

$$p = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot (y - h) + P_{atm} \quad (2.1-11)$$

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

$$Re = \frac{u \cdot h_N}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad (2.1-12)$$

$$We = \frac{\gamma}{\rho \cdot u^2 \cdot h_N} \quad (2.1-13)$$

$$Ka = \frac{\gamma}{\rho \nu^{4/3} g^{1/3}} \quad (2.1-14)$$

Όπου ,

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

u : μέση ταχύτητα

ρ : πυκνότητα του ρευστού

h_N : πάχος επίπεδου υμένα κατά Nusselt

γ : επιφανειακή τάση

Συνήθως χρησιμοποιείται ο αριθμός Kapitza αντί του αριθμού Webber διότι είναι συνάρτηση μόνο των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και ανεξάρτητος της παροχής.

Μια πλήρης περιγραφή της ροής υγρού υμένα στη γενική περίπτωση μπορεί να προκύψει από τις εξισώσεις Navier-Stokes και την εξίσωση της συνέχειας σε συνδυασμό με της κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Με χρήση ως χαρακτηριστικών

μεγεθών του πάχους h_N , και της μέσης ταχύτητας u_0 , της λύσης Nusselt που αναλύσαμε παραπάνω, προκύπτουν οι εξής εξισώσεις σε αδιάστατη μορφή:

$$\underline{\nabla} \cdot \hat{\underline{u}} = 0 \quad (2.1-15)$$

$$\frac{\partial \hat{\underline{u}}}{\partial \hat{t}} = \hat{\underline{u}} \cdot \underline{\nabla} \hat{\underline{u}} = -\underline{\nabla} \hat{P} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \nabla^2 \hat{\underline{u}} + \frac{1}{\text{Fr}^2} \cdot \hat{\underline{g}} \quad (2.1-16)$$

όπου $\hat{\underline{u}} = (\hat{u}, \hat{v})$ είναι το διάνυσμα της ταχύτητας, ενώ το σύμβολο $\hat{\quad}$ δηλώνει αδιάστατο μέγεθος. Ο αριθμός Froude ορίζεται ως εξής :

$$\text{Fr} = \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot \sin \phi \cdot h_N}} \quad (2.1-17)$$

Οι συνοριακές συνθήκες που ολοκληρώνουν την περιγραφή του προβλήματος είναι οι συνθήκες μη-ολίσθησης και μη-διείσδυσης της ταχύτητας στο τοίχωμα:

$$\hat{u} = \hat{v} = 0 \quad (2.1-18)$$

και η κινηματική συνθήκη και η ισορροπία δυνάμεων στην ελεύθερη επιφάνεια:

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial \hat{t}} + \hat{u} \cdot \frac{\partial \hat{h}}{\partial \hat{x}} = \hat{v} \quad (2.1-19)$$

$$\underline{n} \cdot \hat{\underline{\sigma}} = \text{We} \cdot 2 \cdot H_c \cdot \underline{n} \quad (2.1-20)$$

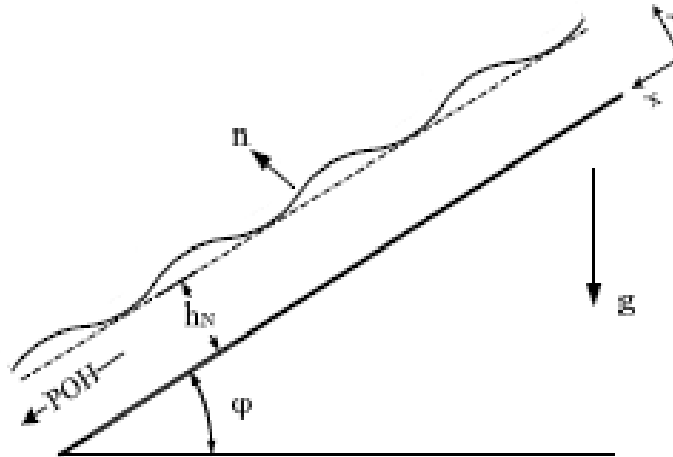
Όπου , $2H_c$ είναι η μέση καμπυλότητα της ελεύθερης επιφάνειας, \underline{n} το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην ελεύθερη επιφάνεια, γ η επιφανειακή τάση του ρευστού και $\hat{\underline{\sigma}}$ ο τανυστής τάσεων.

2.2 Θεωρία γραμμικής ευστάθειας για τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο

Η βασική ροή του προβλήματος, παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα και περιγράφεται από τις εξισώσεις ταχύτητας και πίεσης (2.1-6) και (2.1-11) αντίστοιχα τις οποίες τώρα γράφουμε ως :

$$u_x = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{2 \cdot \mu} \cdot y \cdot (2 \cdot h_N - y) = \frac{g \cdot \sin \phi \cdot h_N^2}{\nu} \left[\frac{y}{h_N} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h_N} \right)^2 \right] \quad (2.2-1)$$

$$P = \rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot (h_N - y) \quad (2.2-2)$$



Σχήμα 2.2 Ανάπτυξη περιοδικών διαταραχών στη ροή υγρού υμένα

και ορίζουμε τη ροϊκή συνάρτηση ως εξής:

$$\Psi(y) = \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{g \cdot \sin \phi \cdot h_N^3}{\nu} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{y}{h_N} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{y}{h_N} \right)^3 \right] \quad (2.2-3)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αδιαστατοποιούνται χρησιμοποιώντας ως χαρακτηριστική ταχύτητα τη μέση ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας, Εξ. (2.1-9), χαρακτηριστικό μήκος το ύψος του αδιατάραχτου υμένα, h_N , χαρακτηριστικό χρόνο το πηλίκο h_N/u_0 και πίεση τον όρο ρu_0^2 . Επομένως, οι Εξ. (2.2-1)-(2.2-3) γράφονται σε αδιάστατη μορφή:

$$\hat{u}_x(\hat{y}) = 3 \left(\hat{y} - \frac{1}{2} \hat{y}^2 \right) \quad (2.2-4)$$

$$\hat{P}(\hat{y}) = \frac{g \cdot h_N}{u_0^2} \cdot \cos \phi (1 - \hat{y}) = \frac{g \cdot \sin \phi \cdot h_N}{u_0^2} \cot \phi (1 - \hat{y}) = \frac{1}{Fr^2} \cot \phi (1 - \hat{y}) \quad (2.2-5)$$

$$\hat{\Psi}(\hat{y}) = 3 \left(\frac{1}{2} \hat{y}^2 - \frac{1}{6} \hat{y}^3 \right) = \frac{3}{2} \hat{y}^2 - \frac{1}{2} \hat{y}^3 \quad (2.2-6)$$

όπου το σύμβολο $\hat{}$ δηλώνει αδιάστατη μεταβλητή, ενώ Fr είναι ο αριθμός Froude και ορίζεται ως:

$$Fr^2 = \frac{u_0^2}{g \cdot \sin \phi \cdot h_N} = \frac{u_0}{g \cdot \sin \phi \cdot h_N} \frac{g \cdot \sin \phi \cdot h_N^2}{3\nu} = \frac{u_0 \cdot h_N}{3\nu} = \frac{Re}{3} \quad (2.2-7)$$

Επιβάλλουμε μια διδιάστατη γραμμική διαταραχή της μορφής που περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\hat{\psi}' = \hat{\Psi} + \hat{\psi} \quad (2.2-8)$$

$$\hat{\psi} = f(y) \cdot \exp[ia \cdot (\hat{x} - \hat{c} \cdot \hat{t})] \quad (2.2-9)$$

όπου:

a: αδιάστατος κυματαριθμός

c: η φασική ταχύτητα

Θεωρούμε ότι η επιφάνεια θα παραμορφωθεί με τέτοιο τρόπο που να συμφωνεί με τη χωρική δομή της διακύμανσης. Έτσι, το αδιάστατο πάχος υμένα \hat{h} , μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\hat{h}(\hat{x}, \hat{t}) = 1 + \hat{\eta}(\hat{x}, \hat{t}) = 1 + A \cdot \exp[ia \cdot (\hat{x} - \hat{c} \cdot \hat{t})] \quad (2.2-10)$$

όπου:

A: αδιάστατη σταθερά

Εφαρμόζοντας σταυρωτή παραγώγιση (cross-differentiation) στην εξίσωση Navier-Stokes απαλείφεται η πίεση και προκύπτει η αδιάστατη εξίσωση Orr-Sommerfeld (O-S):

$$f'''' - 2a^2 f'' + 4af = i \cdot a \cdot \text{Re} \left[(2\hat{y} - \hat{y}^2 - \hat{c}) \cdot (f'' - a^2 f) + 2f \right] \quad (2.2-11)$$

όπου οι αδιάστατες παράμετροι ορίζονται ως εξής :

$$f = \frac{\hat{u}_x}{u_0 \cdot h_N}, \quad \hat{U} = \frac{\hat{u}_x}{u_0}, \quad \hat{c} = \frac{c}{u_0}, \quad \hat{x} = \frac{x}{h_N}, \quad a = k \cdot h_N, \quad \text{Re} = \frac{u_0 \cdot h_N}{\nu} \quad (2.2-12)$$

Για να ολοκληρωθεί το πρόβλημα γραμμικής ευστάθειας απαιτούνται τέσσερις συνοριακές συνθήκες για τη συνάρτηση f . Οι δύο συνοριακές συνθήκες προκύπτουν από την απαίτηση ότι και οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας είναι μηδέν πάνω στο τοίχωμα Εξ.(2.1-18). Επομένως:

$$u' = v' = 0 \Rightarrow u = v = 0 \Rightarrow f(0) = f'(0) = 0 \quad (2.2-13)$$

Δύο επιπλέον συνθήκες θα προκύψουν για την ελεύθερη επιφάνεια από την εφαρμογή της κινηματικής, Εξ. (2.1-19), και της δυναμικής συνθήκης, Εξ. (2.1-20). Η κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια είναι:

$$\frac{DF}{Dt} = 0 \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial t} + u_x \frac{\partial F}{\partial x} + u_y \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_x \frac{\partial \eta}{\partial x} = u_y \quad (2.2-14)$$

Η δυναμική συνθήκη καθορίζει ότι οι δυνάμεις στην ελεύθερη επιφάνεια ισορροπούν μεταξύ τους. Αν σ ο τανυστής τάσεων του ρευστού, τότε ισχύει ισορροπία εφαπτομενικών δυνάμεων:

$$(\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{n}}) \cdot \underline{\underline{t}} = 0 \quad (2.2-15)$$

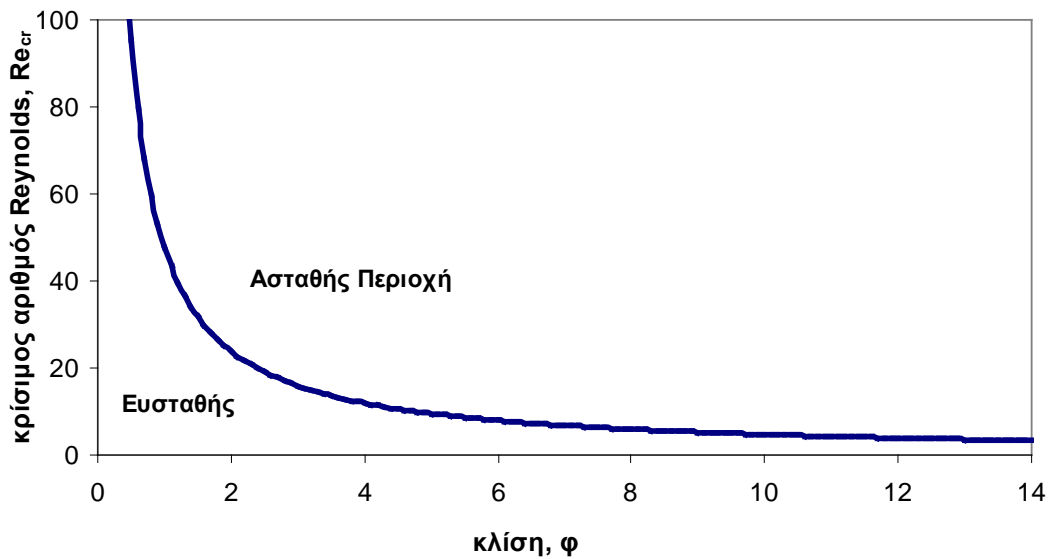
και εξισορρόπηση της δύναμης λόγω επιφανειακής τάσης, γ , από τις κάθετες δυνάμεις:

$$(\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{n}}) \cdot \underline{\underline{n}} = \gamma \cdot H_c \quad (2.2-16)$$

Η διαφορική εξίσωση (2.2-11) και οι συνοριακές συνθήκες που περιγράφονται από τις (2.2-13) έως (2.2-16) ορίζουν το πρόβλημα ιδιοτιμών. Για την περίπτωση που το μήκος κύματος είναι μεγάλο σε σχέση με το πάχος του υμένα, ή εναλλακτικά ο κυματαριθμός είναι μικρός ($\alpha \ll 1$), το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά [Yih,1963]. Η λύση που προκύπτει επιβεβαιώνει ότι η ροή είναι ασταθής από έναν κρίσιμο αριθμό Re και πάνω, ο οποίος εξαρτάται μόνο από τη γωνία κλίσης του καναλιού:

$$Re = Re_{crit} = \frac{5}{6} \cot \phi \quad (2.4-17)$$

Στο Σχήμα 2.3 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 2.3. Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα

2.3 Βιβλιογραφικές αναφορές για ροή υγρού υμένα

Υπάρχουν , πλέον , αρκετές μελέτες για ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένα επίπεδα τόσο με διαμορφωμένα τοιχώματα όσο και με επίπεδα τοιχώματα .Παρακάτω αναφέρονται οι μελέτες πάνω στις οποίες στηρίχθηκε η παρούσα διπλωματική.

Οι Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) μελέτησαν τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο με μικρή γωνία κλίσης $1^\circ < \phi < 8^\circ$, με περιοδική διαμόρφωση τοιχώματος ορθογωνικής μορφής ($L=12\text{mm}$, $h = 0.4\text{mm}$) και αριθμούς Reynolds που κυμαίνονταν από 10 έως 400 . Παρατήρησαν , αύξηση των κρίσιμων αριθμών Reynolds κατά 30% σε σχέση με τους αντίστοιχους κρίσιμους αριθμούς Reynolds για επίπεδο τοίχωμα . Έτσι , συμέραναν ότι , η ορθογωνική διαμόρφωση που χρησιμοποιήθηκε σταθεροποιούσε τη ροή του υγρού υμένα . Όσο αφορά , την εξέλιξη των κυματώσεων παρατηρήθηκε ότι , αρχικά ,σε χαμηλούς Reynolds υπήρχε μία στατική παραμόρφωση του υμένα (η οποία είχε το ίδιο μήκος κύματος με αυτό της περιοδικής διαμόρφωσης) , έπειτα , αυξάνοντας τον αριθμό Reynolds , δημιουργούνταν κύματα μοναχικά με πολλαπλές κορυφές και , τελικά, σε πολύ υψηλούς Reynolds ($Re > 300$) δημιουργούνταν μία σχεδόν σταθερή τρισδιάστατη μορφή κυματώσεων που οδηγούσε σε μία παροδική μείωση του πάχους του υμένα αλλά ταυτόχρονα σταθεροποιούσε σε μεγάλο βαθμό τη ροή .

Οι Argyriadi et al (2006) μελέτησαν , επίσης ,τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο με περιοδική ορθογωνική διαμόρφωση προσπαθώντας να εξάγουν συμπεράσματα για την επιρροή στη ροή που έχει το ύψος και το μήκος κύματος της διαμόρφωσης . Παρατήρησαν ότι το εύρος της στατικά παραμορφωμένης ελεύθερης επιφάνειας , που δημιουργείται αρχικά , είναι ανεξάρτητο του ύψους της διαμόρφωσης και εξαρτάται αποκλειστικά από τη γωνία κλίσης και τον αριθμό Reynolds. Επίσης , παρατήρησαν ότι η τρισδιάστατη μορφή κυματώσεων που παρατηρείται σε υψηλότερους Reynolds δεν δείχνει να επηρεάζεται από το ύψος της διαμόρφωσης. Τέλος , παρατήρησαν ότι απότομες διαμορφώσεις ,δηλαδή , διαμορφώσεις με μεγάλες τιμές του λόγου (ύψος /μήκος κύματος) , αυξάνουν ιδιαίτερα την ευσταθή περιοχή της ροής (αύξηση 40%-200%).

Οι Cao et al (2011 , in preparation) μελέτησαν τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο με τοίχωμα περιοδικής διαμόρφωσης , τόσο ορθογωνικής όσο και ημιστονοειδούς μορφής .Η κλίση του επιπέδου διαμορφωνόταν από 5-40 μοίρες και χρησιμοποιήθηκε διάλυμα 60% γλυκερίνης με νερό. Παρατήρησαν , ότι και τα δύο είδη διαμορφώσεων έχουν σταθεροποιητική επίδραση στη ροή , ωστόσο , η μεταβολή του λόγου (ύψος/μήκος κύματος) της διαμόρφωσης έχει διαφορετική επίδραση για κάθε μία διαμόρφωση. Στις ορθογωνικού τύπου διαμορφώσεις η αύξηση του λόγου αυτού επέφερε και αύξηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds ήταν της τάξης του 1.3-2.1 για γωνίες κλίσης έως 10 μοίρες και της τάξης 2-4.5 για γωνίες μεγαλύτερες των 25 μοιρών. Ενώ , στις κυματοειδούς μορφής διαμορφώσεις , η αύξηση του λόγου αυτού δεν επιφέρει απαραίτητα και περαιτέρω αύξηση στον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Ειδικότερα , η αύξηση σε μικρό λόγο είναι σχεδόν γραμμική σε σχέση με τη γωνία κλίσης αλλά εμφανώς μικρότερη από την αντίστοιχη ορθογωνικού τοιχώματος με ίδιο ύψος και μήκος κύματος .Σε μεγάλο λόγο , παρατηρήθηκε ότι η γωνία κλίσης δεν έχει ουσιαστικό ρόλο και η αύξηση είναι ίδια και περίπου της τάξης του 1.5.

Οι Adomeit & Renz (2000) μελέτησαν τη ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο κυλινδρικό τοίχωμα (η ροή ήταν στο εσωτερικό του σωλήνα) χωρίς διαμόρφωση για αριθμούς Reynolds από 27 έως 200 θέλοντας να δώσουν μία ποιοτική αναπαράσταση της μορφής της ροής . Παρατήρησαν , ότι σε χαμηλούς Reynolds (~27) σχηματίζονταν κύματα μορφής W ή U τα οποία αλληλεπιδρούσαν μεταξύ τους σε πολύ μικρό βαθμό . Σε υψηλότερους Reynolds (~75) συνέχιζαν να κυριαρχούν μικρά κύματα , ωστόσο, άρχισαν να εμφανίζονται περιοχές στροβιλισμού της ροής . Τέλος , σε πολύ υψηλούς Reynolds (~190) τα σχηματιζόμενα κύματα γίνονται εντελώς ασταθή και συγκρούονται συνεχώς μεταξύ τους σχηματίζοντας σχεδόν κάθε δεύτερη σύγκρουση και μία περιοχή στροβιλισμού της ροής .

Οι μελέτες που έχουν γίνει για κατακόρυφα τοιχώματα και όχι κεκλιμένα είναι πολύ λίγες και δεν επεκτείνονται και σε μελέτη διαμορφωμένων τοιχωμάτων αλλά κυρίως επίπεδων . Γι' αυτό , άλλωστε , επιλέχθηκε να γίνει μελέτη ροής υγρού υμένα σε κατακόρυφο κυλινδρικό τοίχωμα με περιοδική διαμόρφωση κυματοειδούς μορφής.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη ροής υγρού υμένα γύρω από κατακόρυφη κυλινδρική επιφάνεια περιοδικής διαμόρφωσης . Αρχικά, περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων .Έπειτα , αναλύονται οι τεχνικές μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των στοιχείων . Μετέπειτα γίνεται μία σύντομη αναφορά για την επίδραση της θερμοκρασίας και την ευθυγράμμιση του κυλίνδρου . Τέλος , γίνεται μία εκτενής περιγραφή της διαδικασίας διεξαγωγής των πειραμάτων αλλά και μια αναφορά για την ακρίβεια των μετρήσεων.

3.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην εικόνα 3.1. Σκοπός της διάταξης είναι να τροφοδοτείται ρευστό περιμετρικά και κατά μήκος της κατακόρυφης κυλινδρικής επιφάνειας ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της ροής.



Εικόνα 3.1 Η πειραματική διάταξη

3.1.1 Κύλινδρος ροής

Η κυλινδρική επιφάνεια κατασκευάστηκε με τη βοήθεια τόννου , αποτελείται από Ertalon και έχει περιοδική διαμόρφωση μήκους κύματος 12 mm και βάθους 2mm. Το ύψος της είναι 1 m και η διάμετρος 28 cm. Στο επάνω μέρος του κυλίνδρου υπάρχει μία κεφαλή με δύο οπές(Εικόνα 3.3) διαμέσου της οποίας ρέει το ρευστό και καταλήγει σε μία κοιλότητα (Εικόνα 3.4) .Το ρευστό εκεί υπερχειλίζει και ρέει προς τα κάτω σχηματίζοντας την επιθυμητή ροή. Με την υπερχειλίση εξασφαλίζεται ότι η ροή του ρευστού θα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη περιμετρικά του



Εικόνα 3.2 Η κεφαλή του κυλίνδρου από την κάτω μεριά.



Εικόνα 3.3 Η κεφαλή του κυλίνδρου από την πάνω μεριά.



Εικόνα 3.4 Η κοιλότητα στο πάνω μέρος του κυλίνδρου.

κυλίνδρου αλλά και κατά μήκος της επιφάνειάς του. Επιπλέον , για να είναι δυνατή η ρύθμιση της κλίσης της κυλινδρικής επιφάνειας προβλέφθηκε η επιφάνεια να είναι βιδωτή σε μία βάση που θα στηρίζεται σε 4 περιστρεφόμενα στηρίγματα (πόδια) . Στη βάση υπάρχουν 4 έξοδοι για το ρευστό όπου ανα δύο ενώνονται ,με τους κατάλληλους πλαστικούς σωλήνες , και καταλήγουν στο δοχείο συλλογής . Πριν την κατάληξή τους στο δοχείο συλλογής παρεμβάλλονται 2 βάννες , μία σε κάθε διαδρομή , ώστε να είναι δυνατή η αποκοπή της ροής σε οποιαδήποτε διαδρομή εφόσον αυτό είναι επιθυμητό. Το δοχείο συλλογής είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κατασκευασμένο από plexiglass με διαστάσεις 40x40x20 (σε cm) .Στον πάτο του δοχείου υπάρχει οπή όπου έχει συνδεθεί μία βάννα για να είναι εύκολο το άδειασμά του για την αλλαγή του ρευστού .



Εικόνα 3.5 Διακλάδωση σωληνώσεων εξόδου του ρευστού από τη βάση του κυλίνδρου.



Εικόνα 3.6 Δοχείο συλλογής.

Η τροφοδοσία του ρευστού στο σύστημα γίνεται διαμέσου γραναζωτής αντλίας (Εικόνα 3.7) η οποία είναι τοποθετημένη στο δάπεδο αριστερά της κύριας διάταξης που φαίνεται στην εικόνα 3.1. Η παροχή της αντλίας ρυθμίζεται με τη βοήθεια inverter (Εικόνα 3.8) ώστε να διατηρούνται οι στροφές της σταθερές και επομένως και η παροχή σταθερή . Επιπλέον μέσω του inverter ρυθμίζεται και η κατεύθυνση της ροής (ένδειξη – για αντίστροφη κατεύθυνση). Η βαθμονόμηση της αντλίας παρουσιάζεται στο παράρτημα στο τέλος.



Εικόνα 3.7 Γραναζωτή αντλία.



Εικόνα 3.8 Inverter με ένδειξη -5 Hertz.

3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Το διαθέσιμο ύψος του κυλίνδρου , 1m , περιορίζει τη μελέτη της εξέλιξης των φυσικά δημιουργούμενων διαταραχών . Ο περιορισμός αυτός μπορεί να ξεπεραστεί με την επιβολή μιας εξωτερικής διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας μιας και μας παρέχει τη δυνατότητα μετάβασης σε μία περιοχή ροής αντίστοιχη με τη φυσική ροή υγρού υμένα σε κύλινδρο μεγαλύτερου ύψους.

Έτσι , για την επιβολή της απαιτούμενης εξωτερικής διαταραχής χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα by-pass με ηλεκτροβαλβίδα. Πιο συγκεκριμένα , στον κύριο αγωγό μεταξύ της



Εικόνα 3.9 Η διακλάδωση κύριου αγωγού (κάθετος) με By-pass (οριζόντιος).



Εικόνα 3.10 Η ηλεκτροβαλβίδα του By-pass.

αντλίας και της κοιλότητας υπερχειλίσης στο πάνω μέρος του κυλίνδρου παρεμβάλλεται μία διακλάδωση (by-pass , Εικόνα 3.9) στην οποία υπάρχει μία ηλεκτρονική βάνα , που ρυθμίζεται με χρονοδιακόπτη , για την εισαγωγή διαταραχής όταν αυτό χρειάζεται. Η ηλεκτροβαλβίδα (Εικόνα 3.10) είναι χρονιζόμενη τύπου ON/OFF , επομένως, όταν είναι ανοιχτή ένα μέρος του ρευστού παρακάμπτει τη βασική ροή και πηγαίνει κατευθείαν στην δεξαμενή ενώ όταν είναι κλειστή η ποσότητα αυτή του ρευστού κατευθύνεται στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η εξωτερικά επιβαλλόμενη αυξομείωση του πάχους του υγρού υμένα με το χρόνο (δηλαδή, δημιουργία κύματος). Το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής μπορεί να ρυθμιστεί από τον λόγο των χρονικών διαστημάτων όπου η βαλβίδα μένει ανοιχτή ή κλειστή και την ποσότητα του ρευστού που επιτρέπεται να περνάει μέσω του by-pass .

Τέλος , ρυθμίζοντας τον συνολικό χρόνο του φαινομένου , μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα της διαταραχής η οποία μάλιστα κυμαίνεται από 0.1 έως 5 Hz.

3.2 Τεχνικές μέτρησης

3.2.1 Αγωγιμομετρική τεχνική



Εικόνα 3.11 Περιφερειακά συστήματα της αγωγιμομετρικής τεχνικής.

3.2.1.1 Περιγραφή τεχνικής

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



Εικόνα 3.12 Μετρητικό αγωγιμομετρικής τεχνικής.

εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσα τους. Στην εικόνα 3.12 απεικονίζεται το μετρητικό που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της τεχνικής. Το μετρητικό τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας



Εικόνα 3.13 Γεννήτρια συχνοτήτων.

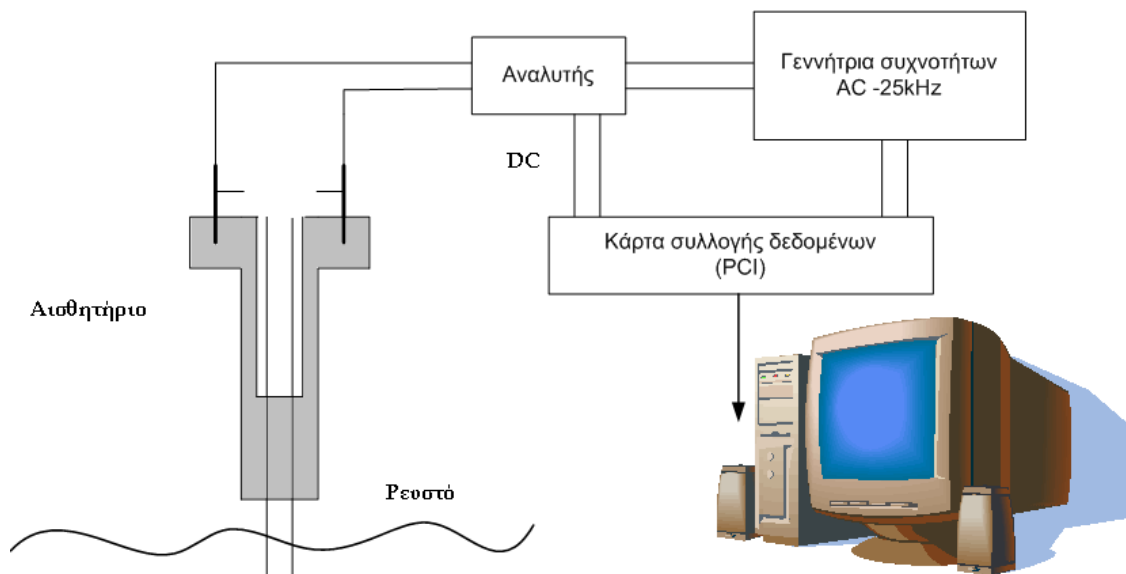
(25 kHz) μέσω μιας γεννήτριας συχνοτήτων (Εικόνα 3.13) , ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές



Εικόνα 3.14 Αναλυτής .

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 0.4-0.5 mm. Για την τοποθέτηση των μετρητικών χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο

κατακόρυφο υποστήλωμα πάνω στο οποίο στηρίχτηκαν τα μετρητικά σε δύο θέσεις, μία σε σημείο υψηλότερο της μέσης του κυλίνδρου και μία σε σημείο χαμηλότερο της μέσης του κυλίνδρου. Για την ταυτόχρονη λήψη και από τις δυο θέσεις χρησιμοποιήθηκε ένας αναλυτής (Εικόνα 3.14) μιας και κάθε αναλυτής έχει δύο κανάλια εισόδου. Συνολικά, η διαδικασία λήψης δεδομένων με την αγωγιμομετρική τεχνική φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής .

Τέλος, έχει βρεθεί από πειράματα ότι η μέθοδος αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά για τις περιπτώσεις όπου η αγωγιμότητα του ρευστού κυμαίνεται μεταξύ 300-1000 μS .

3.2.1.2 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, 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.



Εικόνα 3.15 Μικρόμετρο

Για το σκοπό αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt, η οποία προβλέπει το πάχος του υμένα για την περίπτωση που ο υμένας είναι ευσταθής ωστόσο επειδή στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη ο κύλινδρος δεν έχει λείο τοίχωμα αλλά έχει περιοδική διαμόρφωση αυτό καθίσταται αδύνατο. Έτσι, ως εναλλακτική λύση επιλέχτηκε να μετρηθεί το πάχος του υμένα με τη βοήθεια μικρομέτρου. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, χωρίς να υφίσταται ροή ρευστού καταγραφόταν η ένδειξη του μικρομέτρου όταν η μύτη του ακουμπούσε το τοίχωμα του κυλίνδρου στο κέντρο μιας κοιλότητας, που βρισκόταν περίπου στο μέσο ύψος μεταξύ των 2 μετρητικών. Έπειτα, καταγραφόταν η ένδειξη του μικρομέτρου ενώ υπήρχε ροή ρευστού τη στιγμή που η μύτη του μικρομέτρου ακουμπούσε για πρώτη φορά τη ροή. Η διαφορά των 2 ενδείξεων μας έδινε και το πάχος του υμένα του ρευστού. Ταυτόχρονα, καταγραφόταν το σήμα (Volt) για περίπου 60 sec με ρυθμό δειγματοληψίας 200 Hz σε κάθε μετρητικό. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβανόταν για διάφορες παροχές του ρευστού (Q_0 , kg/s). Η επιλογή των παροχών γινόταν έτσι ώστε να μην είναι εμφανής η εμφάνιση κυμάτων αλλά και να μην 'σπάει' ο υμένας του υγρού. Τέλος, λαμβάνοντας 5-7 μετρήσεις με αυτόν τον τρόπο μπορούσαμε να βρούμε μία γραμμική σχέση που να συνδέει τα volt του σήματος με το πάχος του υμένα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για τις περαιτέρω μετρήσεις. Η διαδικασία της βαθμονόμησης γινόταν στην αρχή κάθε πειράματος.

3.2.2 Φωτογραφική τεχνική

3.2.1.1 Περιγραφή τεχνικής

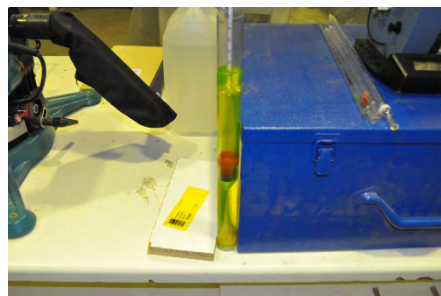
Η φωτογραφική τεχνική χρησιμοποιήθηκε για να λάβουμε μία ποιοτική αναπαράσταση της εξέλιξης των φαινομένων καθώς το υγρό ρέει κατακόρυφα στον κύλινδρο. Η τεχνική είναι σχετικά απλή. Τοποθετείται μία κάμερα σε κατάλληλη απόσταση από τον κύλινδρο και λαμβάνονται φωτογραφίες με υψηλή συχνότητα ώστε να μπορεί να παρατηρηθεί η εξέλιξη τυχόν κυμάτων. Για να είναι πιο ευδιάκριτες οι φωτογραφίες χρησιμοποιήθηκε φωτισμός UV-LIGHT ώστε να φθορίζει το ρευστό (λόγω της fluorescein) και τοποθετήθηκε κατάλληλο φίλτρο στη φωτογραφική μηχανή που επιτρέπει να περάσει φως συγκεκριμένου μήκους κύματος ώστε να είναι ευδιάκριτες οι φωτογραφίες. Η φωτογραφική μηχανή που

χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Nikon D-90 , μέγιστης ανάλυσης 4.288x2.848 (pixel) , και είχε μέγιστη ταχύτητα λήψεων 4,5 φωτογραφίες/sec (frames/sec).

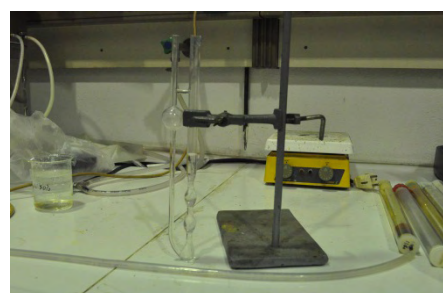
3.3 Ιδιότητες Ρευστών

Για την εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών αλλά και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων με βάση τα πειράματα που διεξήχθησαν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε κάποιες φυσικές ιδιότητες των υγρών που μελετήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα , πρέπει να γνωρίζουμε , την πυκνότητα , το ιξώδες και την αγωγιμότητα. Επιπλέον , δεδομένου ότι τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαλύματα νερού-γλυκερίνης για να μπορούμε να βρούμε την ακριβή συστασή τους κατά βάρος έπρεπε να γίνει και μέτρηση του δείκτη διάθλασης. Οι συστάσεις κατά βάρος των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν (66-34) , (77-23) , (84-16) .(%γλυκερίνης - %νερού αντίστοιχα).

Αναλυτικότερα , η μέτρηση ιξώδους γινόταν με ιξωδόμετρο τριχοειδούς σωλήνα (Εικόνα 3.17) .Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή , πιο συγκεκριμένα , μετράται ο χρόνος εκροής ορισμένης ποσότητας ρευστού , μέσω τριχοειδούς σωλήνα σύμφωνα με το νόμο του Poisseuille. Σύμφωνα με το νόμο αυτό, ο χρόνος ροής του λαδιού είναι ανάλογος του ιξώδους , όταν η ροή είναι στρωτή και το υγρό νευτωνικό. Η μέτρηση της πυκνότητας γινόταν με πυκνόμετρο (Εικόνα 3.16) . Η μέτρηση της αγωγιμότητας γινόταν χρησιμοποιώντας



Εικόνα 3.16 Πυκνόμετρο.



Εικόνα 3.17 Ιξωδόμετρο.



Εικόνα 3.18 Αγωγιμόμετρο Consort C834.



Εικόνα 3.19 Διαθλασίμετρο Abbe 5 Refractometer - Bellingham+Stanley Ltd.

ένα αγωγιμόμετρο και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο Consort C834 (Εικόνα 3.18) . Η μέτρηση του δείκτη διάθλασης γινόταν με διαθλασίμετρο (Εικόνα 3.19) και πιο συγκεκριμένα με το (Abbe 5 Refractometer - *Bellingham+Stanley Ltd.*). Αξίζει να επισημάνουμε ότι με βάση τον δείκτη διάθλασης υπολογίζονταν οι συστάσεις ανατρέχοντας στους πίνακες ιδιοτήτων των διαλυμάτων γλυκερίνης – νερού για τη θερμοκρασία των 20° C (Παράρτημα) .

3.4 Πειραματική διαδικασία

3.4.1 Επίδραση θερμοκρασίας

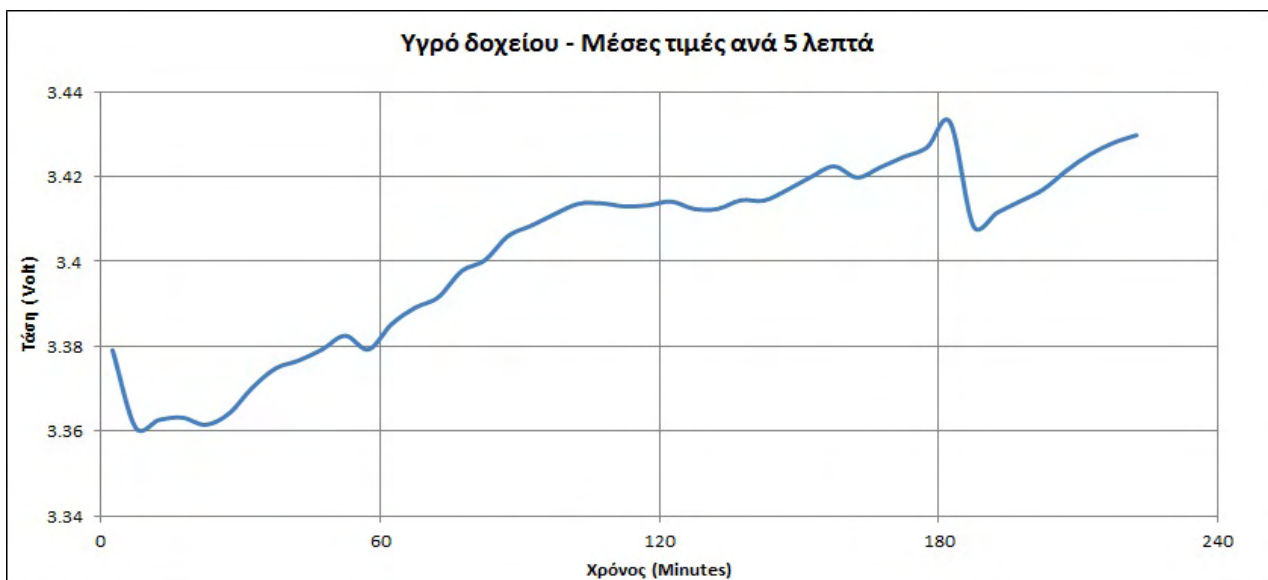
Είναι γεγονός ότι ακόμα και μια μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες αλλαγές στις ιδιότητες της γλυκερίνης (ιξώδες ,πυκνότητα). Έτσι , επειδή στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα γλυκερίνης με νερό κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί τυχόν αύξηση της θερμοκρασίας τι επιπτώσεις θα έχει στα αποτελέσματα . Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή αυτής της μελέτης ήταν διάλυμα γλυκερίνης-νερού κατ' αναλογία (75-25)% , και μικρές ποσότητες αλατιού (για την επίτευξη της κατάλληλης αγωγιμότητας) και χρωστικής ουσίας (για την ευκολότερη οπτική παρατήρηση των φαινομένων που λάμβαναν χώρα). Έτσι , για να εντοπιστούν οι αλλαγές λόγω αύξησης της θερμοκρασίας ,τόσο λόγω χρησιμοποίησης αντλίας για την παροχή του ρευστού όσο και λόγω της αύξησης της εξωτερικής θερμοκρασίας (τα πειράματα έγιναν αρχές καλοκαιριού και η θερμοκρασία εμφάνιζε διακυμάνσεις) κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η τάση που λαμβανόταν από ένα μετρητικό για συνεχόμενη λειτουργία 4 ωρών της διάταξης σε υψηλή παροχή . Επιπλέον , ταυτόχρονα , τοποθετήθηκε και ένα μετρητικό μέσα σε ένα δοχείο με μικρή ποσότητα του ίδιου ρευστού ώστε να μελετηθεί τυχόν διακύμανση της τάσης που οφειλόταν τόσο στην τυχόν αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας όσο και της θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιούνταν .

Παρακάτω , παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα τόσο για το ρευστό που έρεε στον κύλινδρο όσο και για το ακίνητο ρευστό που τοποθετήθηκε στο δοχείο.

Επιπλέον , παρατίθενται πίνακες που δείχνουν τις τιμές της θερμοκρασίας του δωματίου , του υγρού που ρέει στον κύλινδρο, του υγρού στο δοχείο , αλλά και τις τάσεις των δύο υγρών , κατά τη διάρκεια των 4 ωρών του πειράματος.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα τάσης-χρόνου του ρευστού του κυλίνδρου .



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα τάσης-χρόνου του ρευστού του δοχείου.

	<u>FL.Temp.R</u>	<u>FL.Temp.S</u>	<u>Ambient</u>
<u>14:02</u>	27.2	27	27.1
<u>17:00</u>	27.5	27.4	27.5
<u>17:45</u>	27.8	27.6	27.7

Σχήμα 3.4 Πίνακας Θερμοκρασιών ρευστών και δωματίου .

	<u>FL.R</u>	<u>FL.S</u>
Max.Volt	1.833901	3.43278
Min Volt	1.751972	3.360707

Σχήμα 3.5 Πίνακας τάσεων ρευστών.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του δωματίου αυξήθηκε κατά 0.6 °C σε διάστημα περίπου 4 ωρών (όσο κρατάει τυπικά και μία καθημερινή διεξαγωγή μέτρησης). Η τάση από το μετρητικό στο δοχείο έχει μία αύξηση της τάξης 2.15% , ενώ η τάση στο μετρητικό του κινούμενου ρευστού της τάξης 4.7%. Επειδή , όμως, η τάση του ρευστού στο δοχείο επηρεάζεται μόνο από την διακύμανση της θερμοκρασίας του δωματίου και των ηλεκτρονικών συστημάτων ενώ η τάση του κινούμενου ρευστού επηρεάζεται και από την χρησιμοποίηση της αντλίας μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η περαιτέρω αύξηση της μεταβολής της τάσης από το 2.15% στο 4.7% (περίπου 2.5%) οφείλεται αποκλειστικά στην χρήση της αντλίας . Επιπλέον , παρατηρώντας το σχήμα 3.2 και τον πίνακα 3.3 είναι εμφανές ότι η τάση του μετρητικού παραμένει σχετικά σταθερή μέχρι τις 3 ώρες του πειράματος , όπου από τα δεδομένα θερμοκρασιών που έχουμε φαίνεται ότι υπάρχει απότομη αύξηση 0.4 °C. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας που οφείλεται στην αντλία συμβαίνει γρήγορα και διατηρείται σταθερή. Επομένως , ένα διάστημα της μίας ώρας είναι υπέρτακτο για να φτάσει το σύστημα στην μέγιστη δυνατή θερμοκρασία από την επίδραση αποκλειστικά της αντλίας.

3.4.2 Ευθυγράμμιση κυλίνδρου

Για να εξασφαλιστεί η ομοιομορφία της ροής του ρευστού περιμετρικά του κυλίνδρου είναι απαραίτητη η ευθυγράμμιση του κυλίνδρου ώστε να έχει μηδενική κλίση. Όπως προαναφέραμε, η ρύθμιση της κλίσης του κυλίνδρου γίνεται από τα 4 περιστρεφόμενα στηρίγματα (πόδια) που βρίσκονται στη βάση του. Αρχικά, η



Εικόνα 3.20 Ροή μη ομοιόμορφα κατανομημένη.

ευθυγράμμιση έγινε χρησιμοποιώντας αλφάδια για να ελεγχτεί η καθετότητα ωστόσο αυτή η μέθοδος δεν αποδείχτηκε αρκετά αποτελεσματική μιας και η ροή ήταν εμφανώς μη κατανομημένη ομοιόμορφα. Έτσι, τελικά η μέθοδος που επιλέχτηκε ήταν η σύγκριση της ροής στο τέλος του κυλίνδρου (χαμηλότερο σημείο). Πιο συγκεκριμένα επιλέχτηκε η ελάχιστη δυνατή παροχή ρευστού ώστε να σχηματίζονται στο τέλος της επιφάνειας του κυλίνδρου λεπτοί συμμετρικοί υμένες ροής (ένδειξη inverter αντλίας : 1, σε χαμηλότερη ένδειξη σχηματίζονταν περιμετρικά εξ'ολοκλήρου σταγόνες). Όταν ο κύλινδρος δεν ήταν απόλυτα κάθετος σε κάποια σημεία περιμετρικά σχηματιζόταν αντί για συνεχόμενη

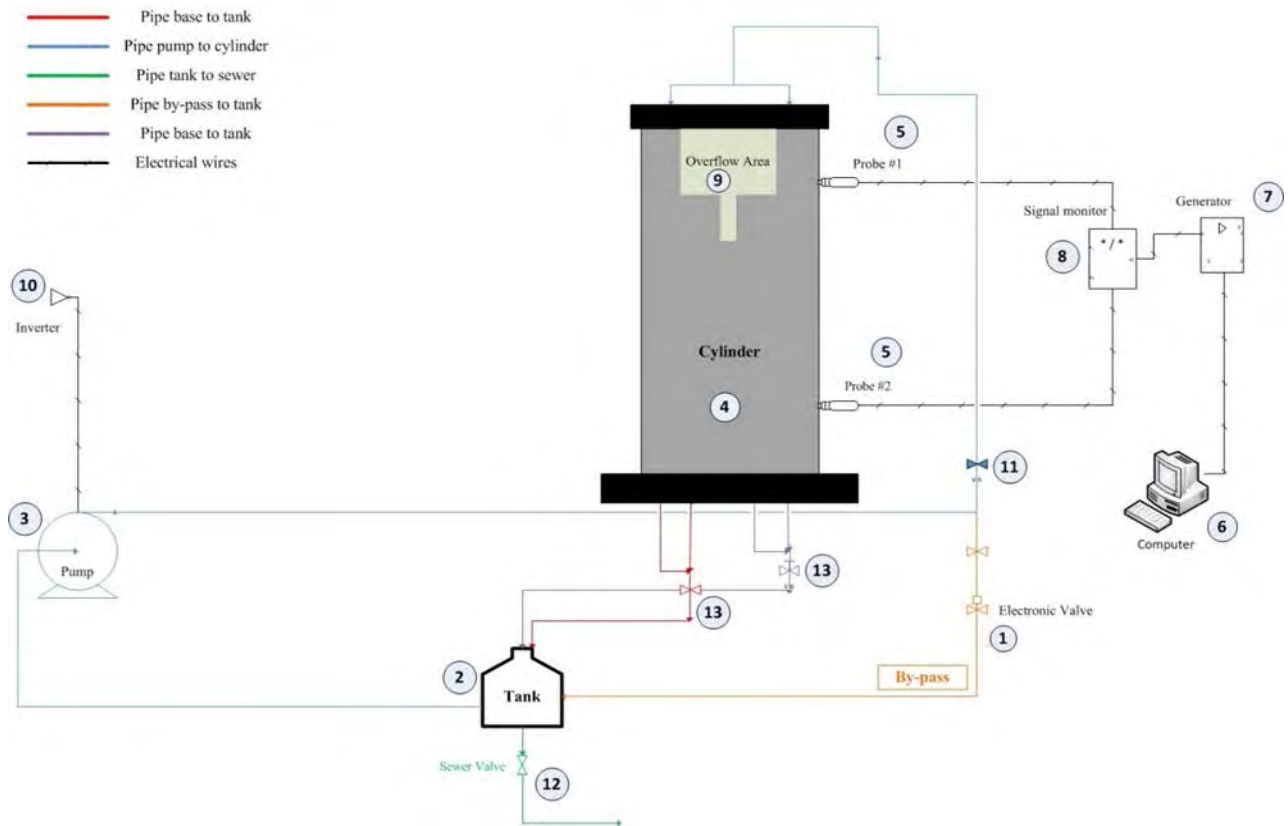


Εικόνα 3.21 Ροή ομοιόμορφα κατανομημένη

ροή λεπτού υμένα, σταγόνες, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.20 (αριστερό μέρος σταγόνες, δεξιά συνεχόμενη ροή). Αυτό αυτομάτως σήμαινε ότι η πλευρά που σχηματιζόταν οι σταγόνες δεν διαβρεχόταν αρκετά, δηλαδή, η παροχή του ρευστού εκεί ήταν χαμηλότερη. Έτσι, με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος και κάνοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις στα στηρίγματα του κυλίνδρου επιτεύχθηκε η ευθυγράμμιση του κυλίνδρου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.21. Για να είναι σίγουρο ότι η ευθυγράμμιση έγινε σωστά το σύστημα αφέθηκε να λειτουργεί επί μία ώρα στην χαμηλότερη δυνατή παροχή όπου δεν 'έσπαγε' ο υμένας χωρίς να σχηματιστούν σταγόνες.

3.4.3 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων

Το σκιαγράφημα της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο σχήμα 3.5



Σχήμα 3.6 Σκιαγράφημα της πειραματικής διάταξης.

1. Ηλεκτροβάννα , 2. Δοχείο συλλογής , 3. Γραναζωτή αντλία , 4. Κύλινδρος , 5. Μετρίτικό , 6. Υπολογιστής , 7. Γεννήτρια συχνοτήτων , 8. Αναλυτής , 9. Περιοχή υπερχειλίσσης , 10. Inverter , 11. Βάνα κύριας ροής . 12. Βάνα αποχέτευσης , 13. Βάνα αποκοπής ροής .

Αρχικά , ελέγχεται η θέση των μετρίτικών της αγωγιμομετρικής τεχνικής και του μικρομέτρου ώστε , να βρίσκονται στο σωστό ύψος στον κύλινδρο για να γίνεται η μέτρηση στο κέντρο του μήκους της κοιλότητας της διαμόρφωσης. Επίσης , γεμίζετε το δοχείο συλλογής με το ρευστό που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Έπειτα , λαμβάνεται η μέτρηση του τοιχώματος του κυλίνδρου χωρίς να υπάρχει ροή του ρευστού με τη βοήθεια του μικρομέτρου και σημειώνεται . Στη συνέχεια , τροφοδοτείται η διάταξη με το ρευστό έχοντας κλειστή την βάνα του by-pass και

παραμένει σε λειτουργία για τουλάχιστον 40 λεπτά για να αυξηθεί η θερμοκρασία στο μέγιστο δυνατό από την αντλία, για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω. Η αντλία για αυτό το σκοπό ρυθμίζεται μέσω του inverter σε υψηλή παροχή δηλαδή της τάξης 3-3.5 Hz (ένδειξη inverter) .Σε αυτό το σημείο ελέγχεται και η ευθυγράμμιση του κυλίνδρου με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω.

Στη συνέχεια λαμβάνεται δείγμα του ρευστού ώστε να μετρηθούν διάφορες φυσικές του ιδιότητες αλλά και η συγκέντρωσή του. Πιο συγκεκριμένα , μετριέται η πυκνότητά του , το ιξώδες , η αγωγιμότητα αλλά και ο δείκτης διάθλασης .Εδώ αξίζει να επισημάνουμε ότι αυτές οι μετρήσεις γίνονται πριν την αρχή κάθε πειράματος μιας και οι φυσικές αυτές ιδιότητες παίζουν μεγάλο ρόλο στα αποτελέσματα που λαμβάνουμε. Επιπλέον , πρέπει να αναφέρουμε ότι για την μέθοδο της αγωγιμότητας είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση της τεχνικής κάθε φορά που διεξάγονται μετρήσεις.

Πιο αναλυτικά, η βαθμονόμηση γίνεται ως εξής:

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η βαθμονόμηση πρέπει να γίνει σε περιοχές ροής όπου αυτή είναι ευσταθής (δηλαδή , δεν εμφανίζονται κύματα) οι παροχές που χρησιμοποιούνται κυμαίνονται από 0.9-1.3 Hz στον inverter της αντλίας. Αρχικά , ξεκινάμε από την υψηλότερη παροχή δίνοντας την τιμή 1.3 στον inverter. Έπειτα περιμένουμε 4 λεπτά για να σταθεροποιηθεί η παροχή και η ροή στον κύλινδρο και παίρνουμε την μέτρηση με το μικρόμετρο για το ύψος του υμένα .Έτσι , έχοντας την μέτρηση του τοιχώματος και του υμένα κάνοντας μια απλή αφαίρεση λαμβάνουμε το πάχος του υμένα .Ταυτόχρονα , καταγράφεται το σήμα (Volt) για περίπου 60 sec με ρυθμό δειγματοληψίας 200 Hz σε κάθε μετρητικό . Έτσι , παίρνοντας την μέση τιμή του σήματος και την τιμή του μικρομέτρου έχουμε ένα ζεύγος τάσης - πάχους.

Εδώ θα έπρεπε να αναφέρουμε ότι η αντλία (φυγοκεντρική) λόγω του τρόπου που λειτουργεί , δηλαδή , στέλνοντας το ρευστό με παλμούς στον κύλινδρο στις μετρήσεις εμφανιζόταν θόρυβος συγκεκριμένης συχνότητας . Αυτός ο θόρυβος απαλείφθηκε εν μέρη κλείνοντας τη βάνα της κύριας ροής κατά 85-90%.

Επιπλέον , γίνεται και μέτρηση της παροχής ,κρατώντας κλειστή τη μία βάνα εξόδου του ρευστού από τον πάτο του κυλίνδρου ,μαζεύοντας το ρευστό που

εξέρχεται για 1 λεπτό σε ένα δοχείο και ζυγίζοντάς το. Έτσι , λαμβάνουμε την παροχή σε kg/min. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για το εύρος παροχών 0.9-1.3 Hz με βήμα 0.1 Hz λαμβάνουμε 5 σημεία που χρησιμοποιούνται για την γραμμική συσχέτιση του πάχους του υμένα με την τάση. Τελικά , έχουμε μία συσχέτιση της τάσης με το πάχος του υμένα του τύπου $H(\mu\text{m})=A * V(\text{volt}) + B$, όπου A , B σταθερές.

Στη συνέχεια , γίνονται οι μετρήσεις με διαταραχή. Πιο συγκεκριμένα , ανοίγεται η βάνα του by-pass σε μία συγκεκριμένη θέση (90-270 degrees) και ρυθμίζεται ο inverter σε υψηλότερη παροχή από πριν μιας και ένα σημαντικό μέρος του ρευστού θα χανεται μέσω της ροής διαμέσου του by-pass. Τυπικά , τοποθετείται σε τιμές 2.5-5 Hz ο inverter. Η διαταραχή δημιουργείται μέσω της ηλεκτροβάνας που βρίσκεται στην διαδρομή του by-pass και ρυθμίζεται για άνοιγμα από 5-5.5 sec και κλείσιμο 0.5-1 sec . Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι επειδή τυπικά θέλουμε η διαταραχή να μην ξεπερνάει τα 50 μm σε ύψος κρίνεται πολλές φορές αναγκαίο να ρυθμίζεται η βάνα πριν την ηλεκτροβάνα (άνοιγμα της βάνας σε μοίρες) που καθορίζει την παροχή από το by-pass κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Μετέπειτα , γίνονται οι μετρήσεις με διαταραχή για τιμές παροχής κυμαινόμενες από 1-4 Hz με σκοπό την εύρεση του κρίσιμου αριθμού Reynolds όπου η ροή γίνεται ασταθής. Αυτό επιτυγχάνεται καταγράφοντας το σήμα (Volt) για 60 sec και μετατρέποντάς το σε ύψος , μέσω της εξίσωσης που προέκυψε από τη βαθμονόμηση , λαμβάνουμε ένα διάγραμμα της εξέλιξης των κυμάτων της ροής . Έτσι , αλλάζοντας την παροχή μέσω του Inverter και παρατηρώντας τη μορφή των κυμάτων τελικά μπορούμε να προσδιορίσουμε τον κρίσιμο αριθμό Reynolds.

Έπειτα , αφού ολοκληρωθούν όλες οι μετρήσεις με την διαταραχή εφαρμόζεται η φωτογραφική τεχνική. Πιο συγκεκριμένα , τοποθετείται η κάμερα σε απόσταση περίπου ενός μέτρου από τον κύλινδρο και περιφερειακά του κυλίνδρου εφαρμόζεται UV-LIGHT με τη βοήθεια ειδικών λαμπών. Στη συνέχεια , λαμβάνονται φωτογραφίες για διάφορες παροχές του ρευστού τόσο με διαταραχή όσο και χωρίς για να παρατηρηθεί οπτικά η δυναμική της εξέλιξης των κυμάτων. Μάλιστα , η φωτογραφική τοποθετείται σε 2 σημεία ύψους ώστε να καταγραφεί η εξέλιξη από την κορυφή του κυλίνδρου μέχρι τον πάτο του. Σημειώνεται , ότι και στην φωτογραφική

τεχνική όταν αλλάζει η παροχή αφήνεται το σύστημα για 4 λεπτά να ισορροπήσει προτού ληφθούν οι φωτογραφίες και γίνει η μέτρηση της παροχής όπως ακριβώς στην αγωγιμομετρική τεχνική.

3.4.4 Ακρίβεια μετρήσεων

Μία πολύ σημαντική παράμετρος κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων είναι η ακρίβεια των μετρήσεων που γίνονται. Στο συγκεκριμένο πείραμα οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια είναι οι εξής:

- Η ακρίβεια του μικρόμετρου. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε έχει ακρίβεια της τάξης των 10 μm. Έτσι, έχοντας ως δεδομένο από τα αποτελέσματα ότι οι μετρήσεις που έγιναν με αυτό είναι της τάξης των 500-1500 μm είναι εμφανές ότι το μέγιστο ποσοστό σφάλματος είναι 2%.
- Η διακύμανση της θερμοκρασίας και η ευαισθησία των μετρητικών και των ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τυχόν διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών συστημάτων λόγω πολύωρης χρησιμοποίησης επηρεάζει τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε κατά 2.15%. Παρόλο που αφήνουμε το σύστημα να λειτουργήσει για 1 ώρα πριν γίνουν οποιεσδήποτε μετρήσεις ώστε να απαληφθεί το σφάλμα της αύξησης της θερμοκρασίας από την αντλία θεωρούμε σωστό για παν ενδεχόμενο να συμπεριληφθεί και αυτό το τυχόν σφάλμα, αυξάνοντας το ποσοστό σφάλματος από αυτόν τον παράγοντα συνολικά στο 4.7%.
- Η καθετότητα του κυλίνδρου. Όσο διεξοδικά και αν έγινε η ευθυγράμμιση του κυλίνδρου επειδή δεν μπορεί να ελεγχθεί αν είναι απόλυτα κάθετος θεωρούμε ένα μέγιστο ποσοστό σφάλματος της καθετότητας της τάξης του 2%.

Συνοπτικά, και με βάση τα παραπάνω, το ολικό μέγιστο σφάλμα των μετρήσεων που διεξήχθησαν κυμαίνεται στο 8.7%.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής υγρού υμένα σε κατακόρυφο κύλινδρο με περιοδική διαμόρφωση. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την πρωτογενή αστάθεια, δηλαδή, για την εξεύρεση του κρίσιμου αριθμού Reynolds κάθε διαλύματος. Μετέπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την δυναμική της ασταθούς περιοχής, δηλαδή, οι 2-D εικόνες που λήφθηκαν ώστε να φανεί ποιοτικά η εξέλιξη των κυμάτων στις ασταθείς περιοχές κάθε διαλύματος.

4.1 Σειρές πειραμάτων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για 3 διαφορετικά διαλύματα νερού - γλυκερίνης. Επιλέχθηκαν 3 διαλύματα για να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του υγρού υμένα για διαφορετικούς αριθμούς Kapitza αλλά και διαφορετικά ιξώδη. Σε κάθε διάλυμα μετρήθηκαν τουλάχιστον 10 διαφορετικές τιμές παροχών, δηλαδή, διαφορετικές τιμές και του αριθμού Reynolds. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των πειραμάτων που διεξήχθησαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Σύσταση κ.β (%γλυκερίνης - %νερού)	ν (cm ² /s)	ρ (kg/m ³)	Δείκτης Διάθλασης	Αγωγιμότητα (μ s/cm)	Kapitza Number	Micrometer distance from top(m)	Probe distance from top(m)	
(66-34)	10.0125	1185.8	1.419	2367	127.78	0.42	1st	0.36
							2nd	0.87

Σχήμα 4.1 Πίνακας χαρακτηριστικών πρώτου διαλύματος.

Σύσταση κ.β (%γλυκερίνης - %νερού)	ν (cm ² /s)	ρ (kg/m ³)	Δείκτης Διάθλασης	Αγωγιμότητα (μ s/cm)	Kapitza Number	Micrometer distance from top(m)	Probe distance from top(m)	
(77-23)	24.9558	1207	1.4384	1307	37.15	0.29	1st	0.22
							2nd	0.84

Σχήμα 4.2 Πίνακας χαρακτηριστικών δεύτερου διαλύματος.

Σύσταση κ.β (%γλυκερίνης - %νερού)	ν (cm ² /s)	ρ (kg/m ³)	Δείκτης Διάθλασης	Αγωγιμότητα (μ s/cm)	Kapitza Number	Micrometer distance from top(m)	Probe distance from top(m)	
(85-15)	65.252	1231	1.4509	202.8	10.11	0.45	1st	0.35
							2nd	0.86

Σχήμα 4.3 Πίνακας χαρακτηριστικών τρίτου διαλύματος.

Σε αυτό το σημείο , πρέπει να αναφερθεί ότι στα διαλύματα προστέθηκε ,όταν ήταν απαραίτητο , μικροποσότητα αλατιού για να αυξηθεί η αγωγιμότητά του αλλά και μικροποσότητα fluorescein , μιας χρωστικής ουσίας , για να είναι ευκολότερη η οπτική παρατήρηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων .

4.2 Πρωτογενής αστάθεια

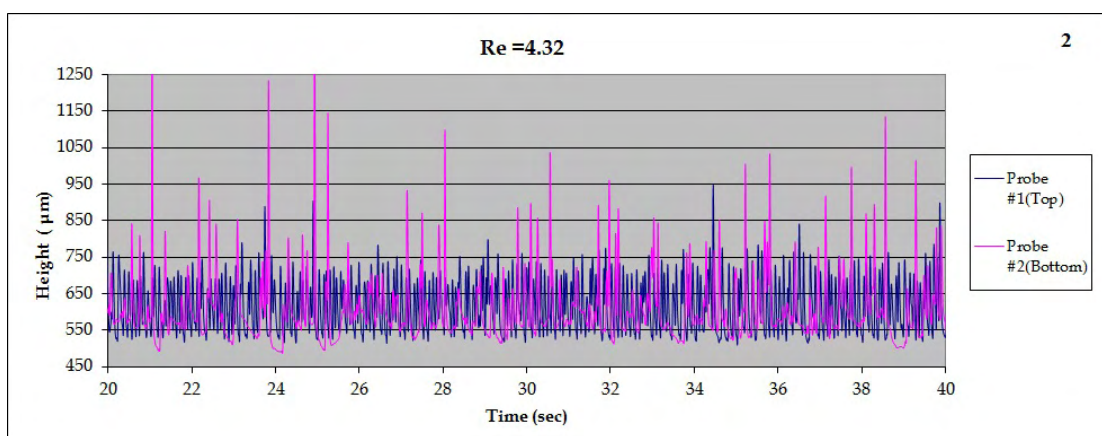
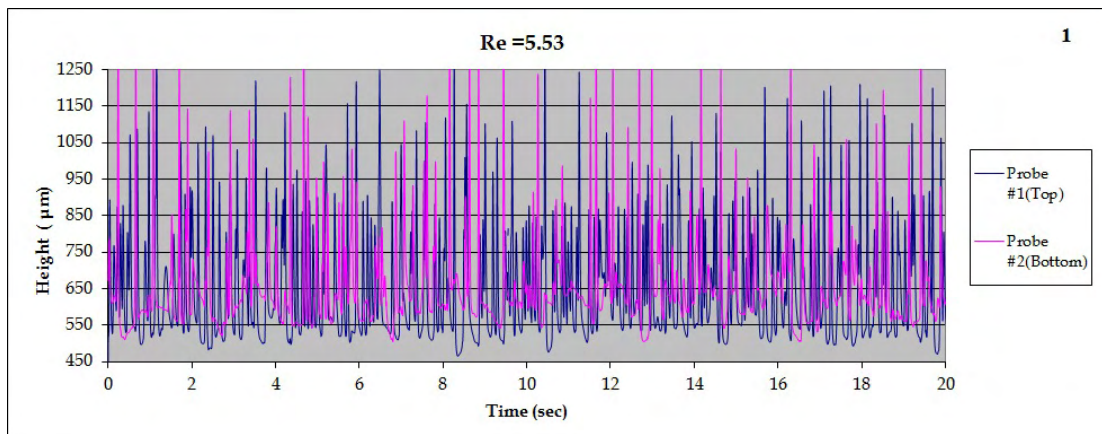
Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε ένα από τα διαλύματα που εξετάστηκαν ως πριν την εμφάνιση της πρωτογενής αστάθειας , δηλαδή , τον αριθμό Reynolds στον οποίο η ροή υγρού υμένα στον κύλινδρο περνάει από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή . Αυτός ο αριθμός Reynolds ονομάζεται και κρίσιμος (Re_{crit}) .

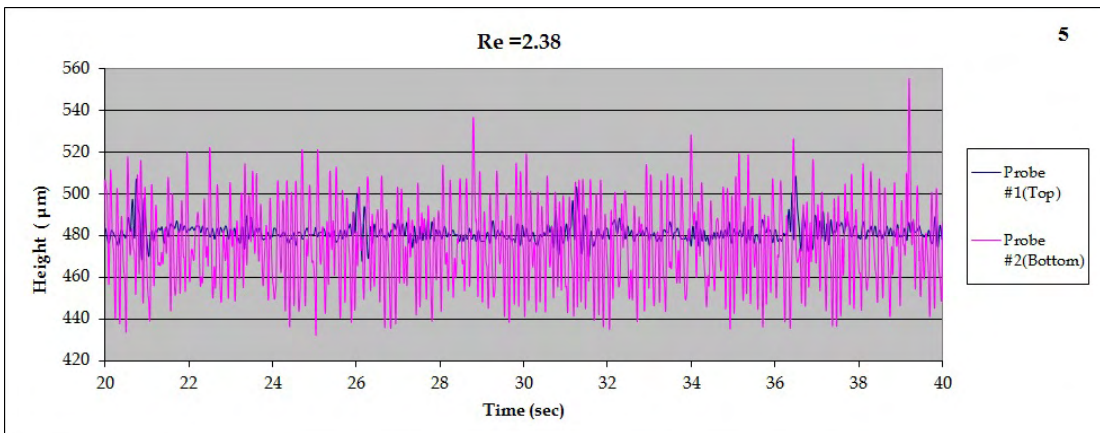
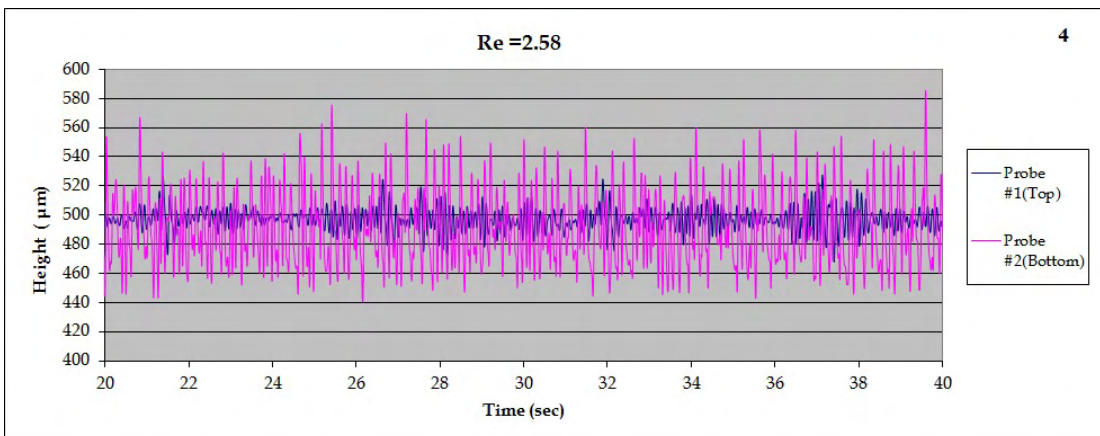
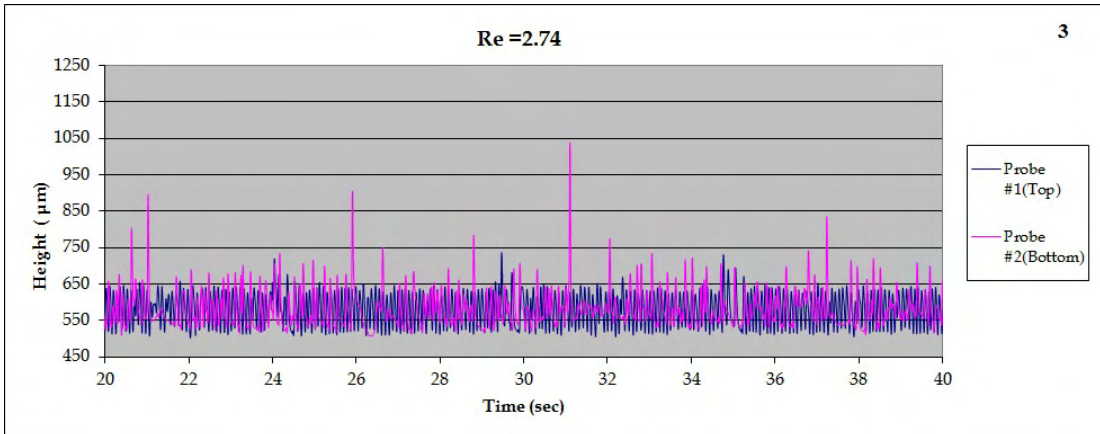
Ο διαχωρισμός της μετάβασης από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή γίνεται με βάση τα στοιχεία που λαμβάνουμε από την αγωγιμομετρική τεχνική. Πιο

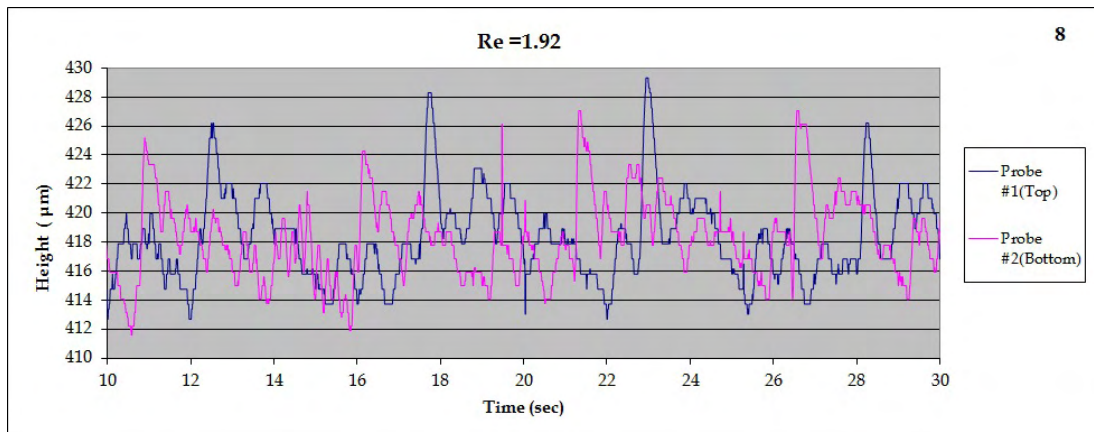
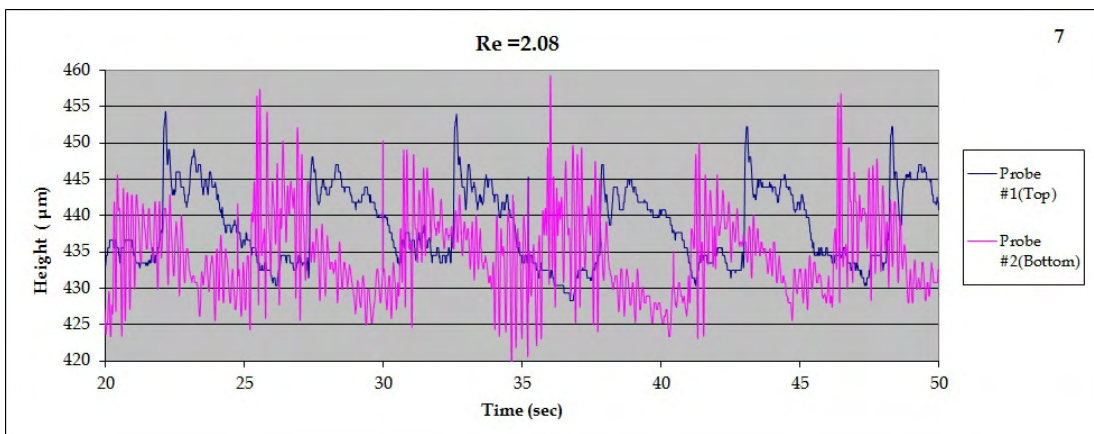
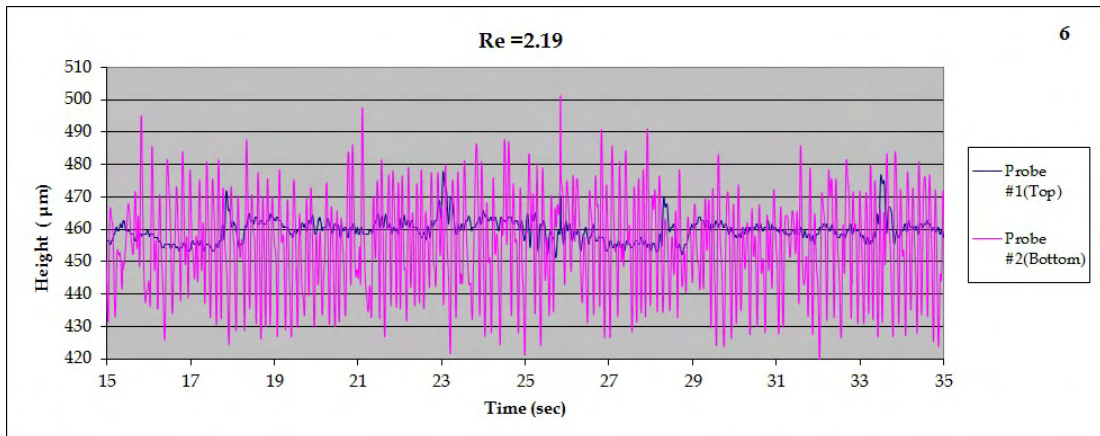
συγκεκριμένα , σχηματίζοντας τα διαγράμματα ύψους υμένα – χρόνου παρατηρούμε σε ποιον αριθμό Reynolds τα σχηματιζόμενα κύματα (που πρέπει να έχουν την μορφή μοναχικών κυμάτων και όχι χασοτική μορφή) χάνουν ύψος καθώς κινούνται καθοδικά στον κύλινδρο αντί να αυξάνουν ύψος . Δηλαδή , σε πιον αριθμό Reynolds το ύψος των κυμάτων , που σχηματίζονται λόγω της διαταραχής που επιβάλλουμε , έχουν μεγαλύτερο ύψος όταν περνάνε από το πρώτο (στο ψηλότερο σημείο) μετρητικό σε σχέση με το δεύτερο μετρητικό (στο χαμηλότερο σημείο) . Τότε , σε εκείνο τον αριθμό Reynolds γίνεται η μετάβαση .

4.2.1 Αποτελέσματα διαλύματος 66% γλυκερίνης

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα ύψους – χρόνου για τη ροή υγρού υμένα σύστασης 66% γλυκερίνης για αριθμούς Reynolds από 1.92 έως 5.53 .





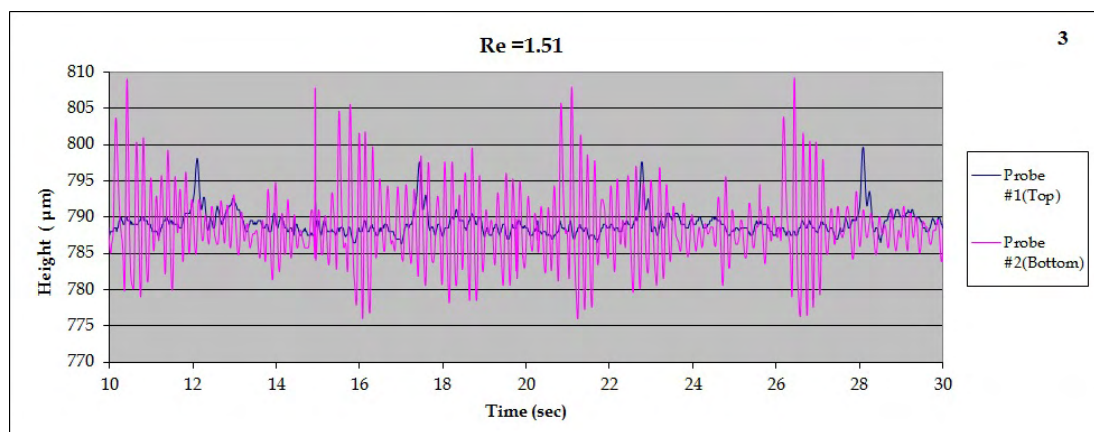
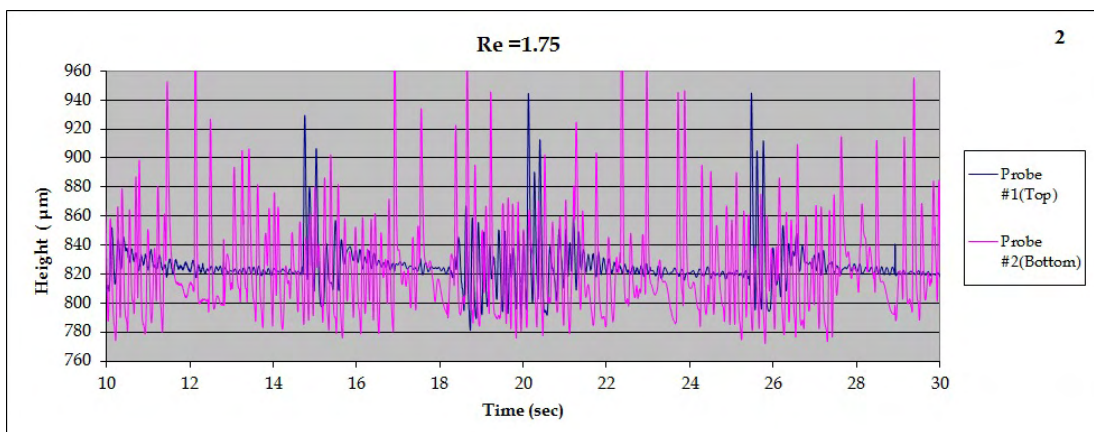
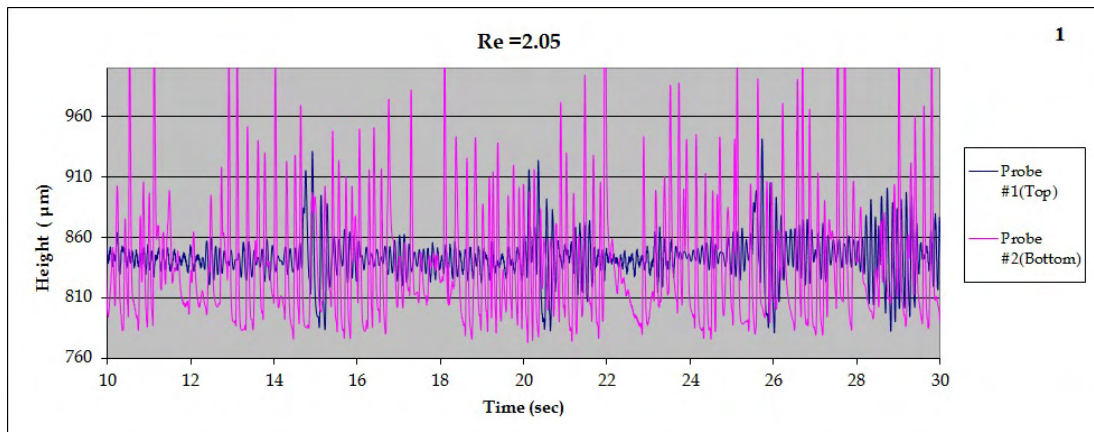


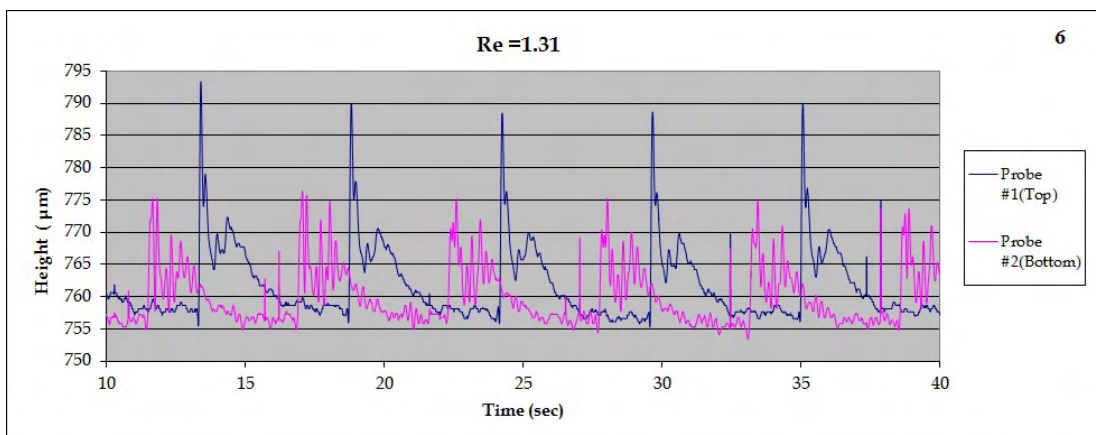
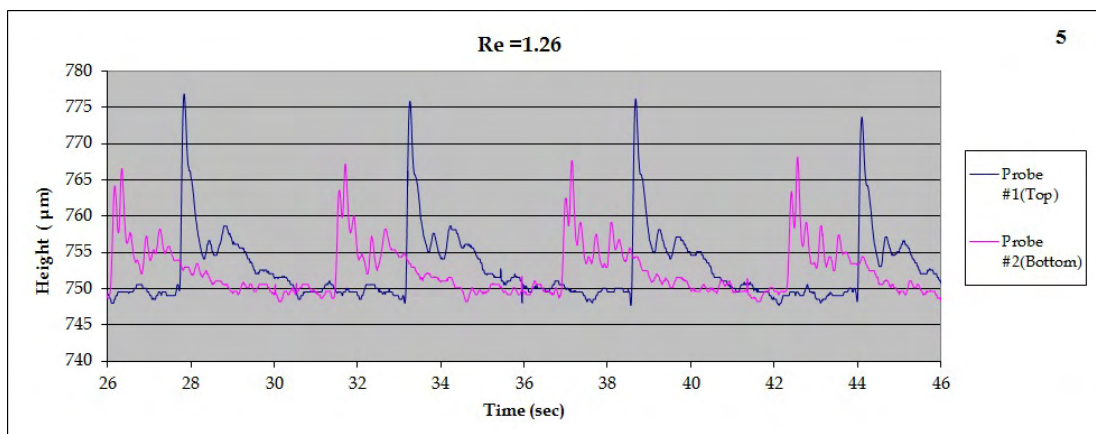
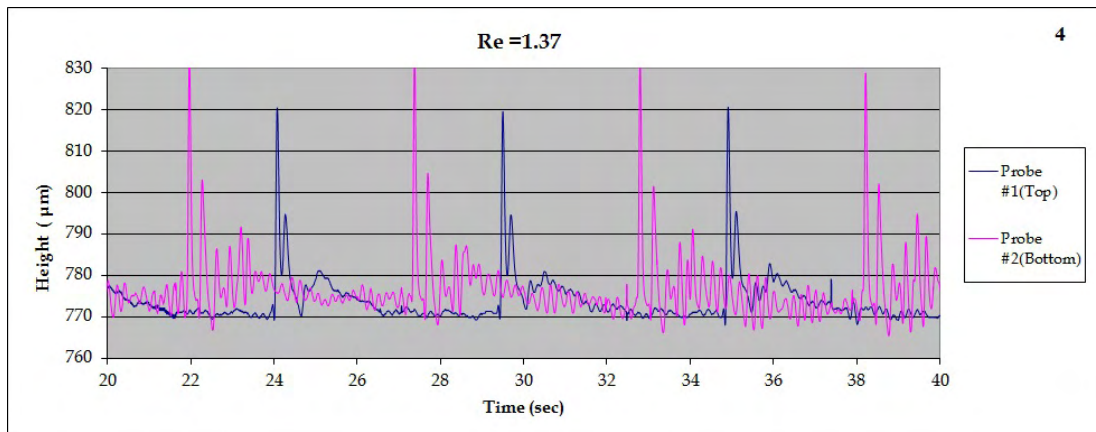
Σχήμα 4.4 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα . 1)Re = 5.53 2)Re = 4.32 3)Re = 2.74 4)Re = 2.58 5)Re =2.38 6)Re = 2.19 7)Re = 2.08 8)Re = 1.92 .

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι τα σχηματιζόμενα κύματα αρχίζουν να σβήνουν για $Re = 1.92$ επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι $1.92 < Re_{crit} < 2.08$ για το διάλυμα σύστασης 66% σε γλυκερίνη .

4.2.2 Αποτελέσματα διαλύματος 77% γλυκερίνης

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα ύψους – χρόνου για τη ροή υγρού υμένα σύστασης 77% γλυκερίνης για αριθμούς Reynolds από 1.26 έως 2.05 .



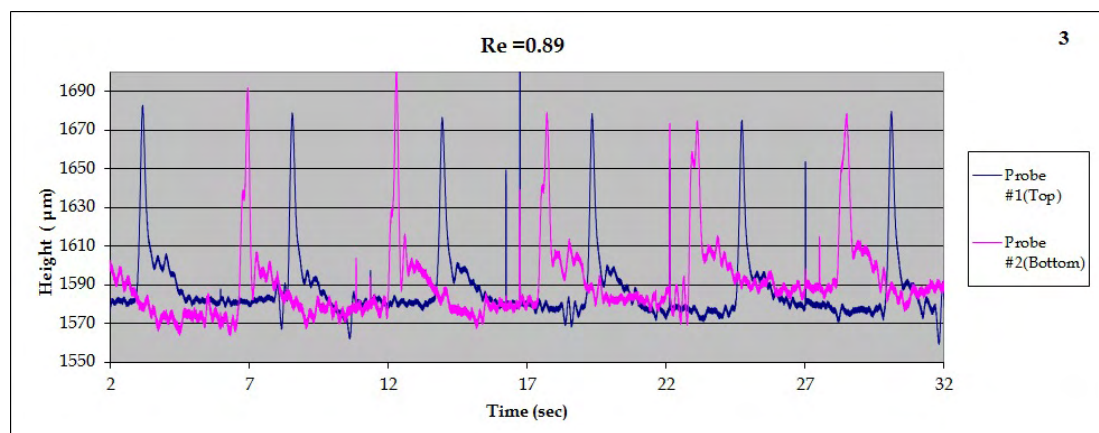
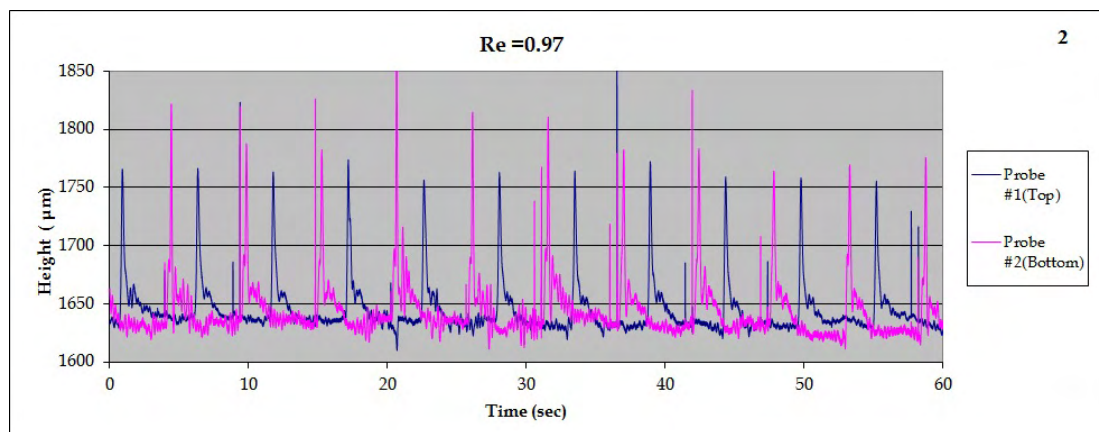
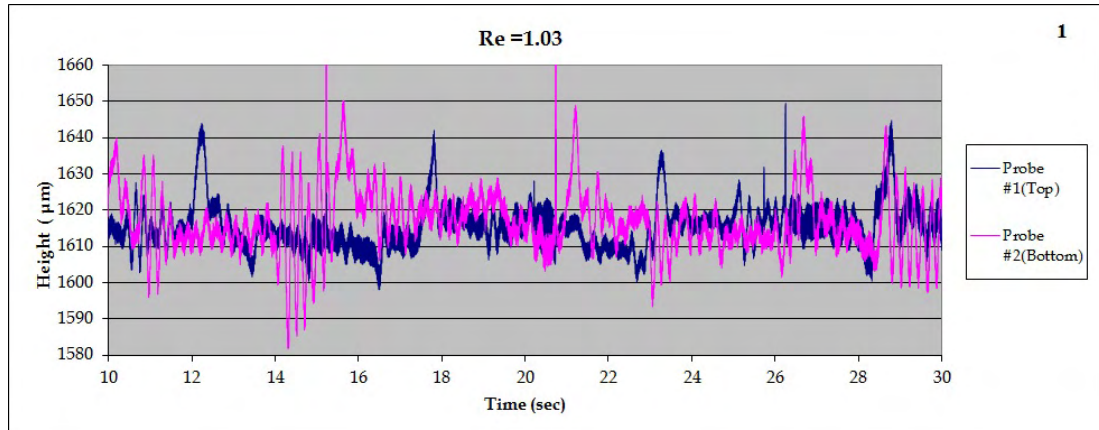


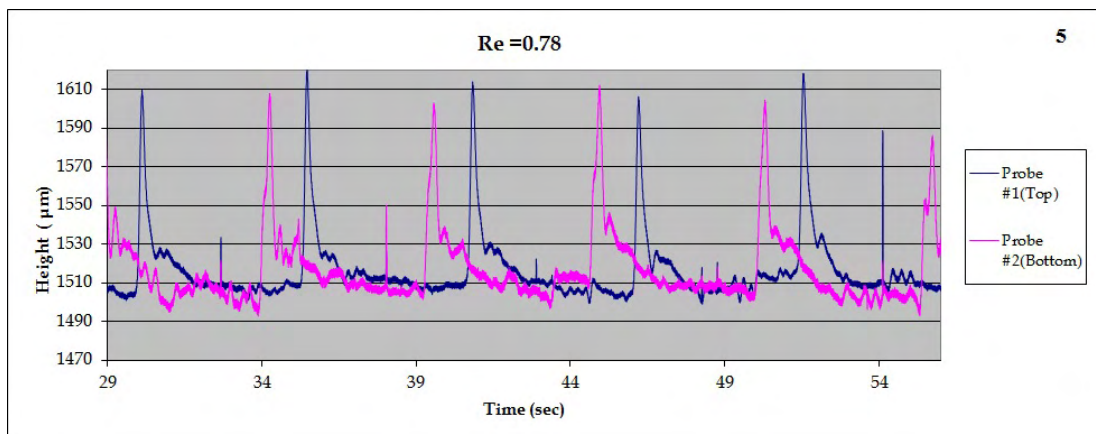
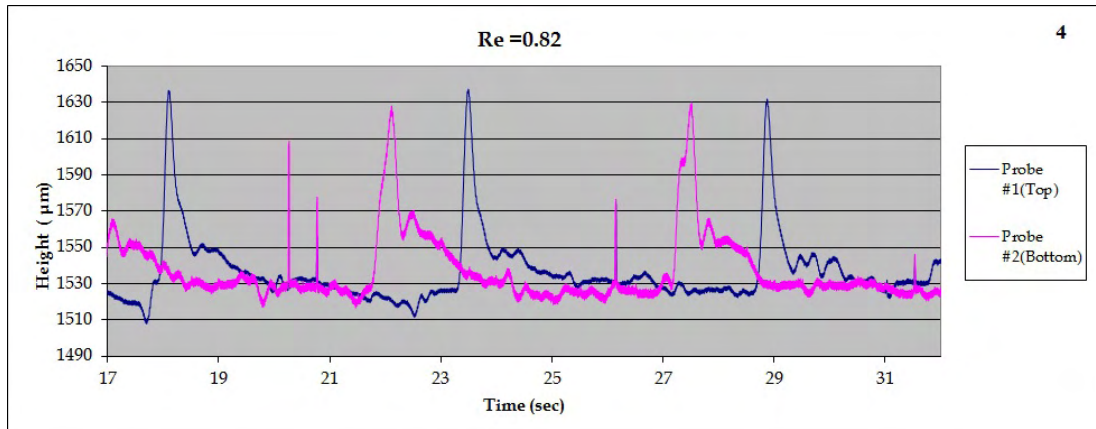
Σχήμα 4.5 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα . 1)Re = 2.05 2)Re = 1.75 3)Re = 1.51 4)Re = 1.37 5)Re = 1.26 6)Re = 1.31.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι τα σχηματιζόμενα κύματα αρχίζουν να σβήνουν για $Re = 1.31$ επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι $1.31 < Re_{crit} < 1.37$ για το διάλυμα σύστασης 77% σε γλυκερίνη.

4.2.3 Αποτελέσματα διαλύματος 85% γλυκερίνης

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα ύψους – χρόνου για τη ροή υγρού υμένα σύστασης 85% γλυκερίνης για αριθμούς Reynolds από 0.78 έως 1.03 .





Σχήμα 4.6 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα . 1)Re = 1.03 2)Re = 0.97 3)Re = 0.89 4)Re = 0.82 5)Re =0.78 .

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι τα σχηματιζόμενα κύματα αρχίζουν να σβήνουν για $Re = 0.82$ επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι $0.82 < Re_{crit} < 0.89$ για το διάλυμα σύστασης 85% σε γλυκερίνη.

4.2.4 Συνοπτικά Αποτελέσματα

Σύσταση κ.β (%γλυκερίνης - %νερού)	Καριτζα Number	Re_{crit}
(85-15)	10.11	0.82 - 0.89
(77-23)	37.15	1.31 - 1.37
(66-34)	127.78	1.92 - 2.08

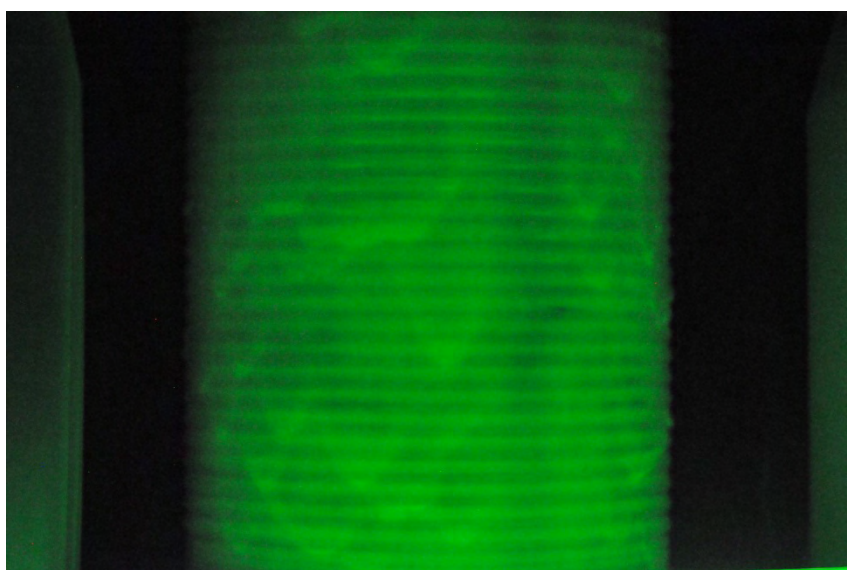
Σχήμα 4.7 Συνοπτικά αποτελέσματα πρωτογενούς αστάθειας .

4.3 Δυναμική ασταθούς περιοχής

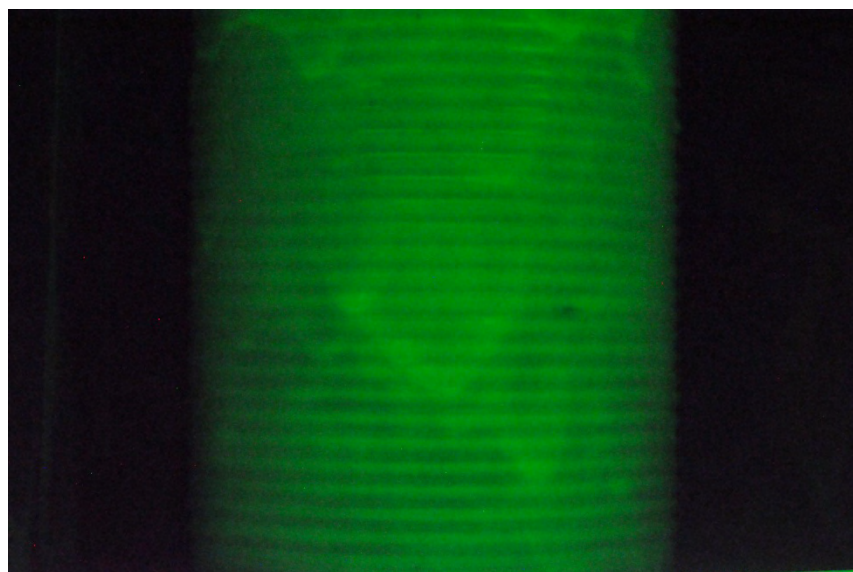
Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε ένα από τα διαλύματα που εξετάστηκαν ως πριν την δυναμική της ασταθούς τους περιοχής . Δηλαδή , την ποιοτική εξέλιξη των κυμάτων που σχηματίζονται στην ασταθή περιοχή κάθε διαλύματος όπως αυτή φαίνεται μέσα από τις ληφθείσες 2-D εικόνες .

4.3.1 Αποτελέσματα διαλύματος 66% γλυκερίνης

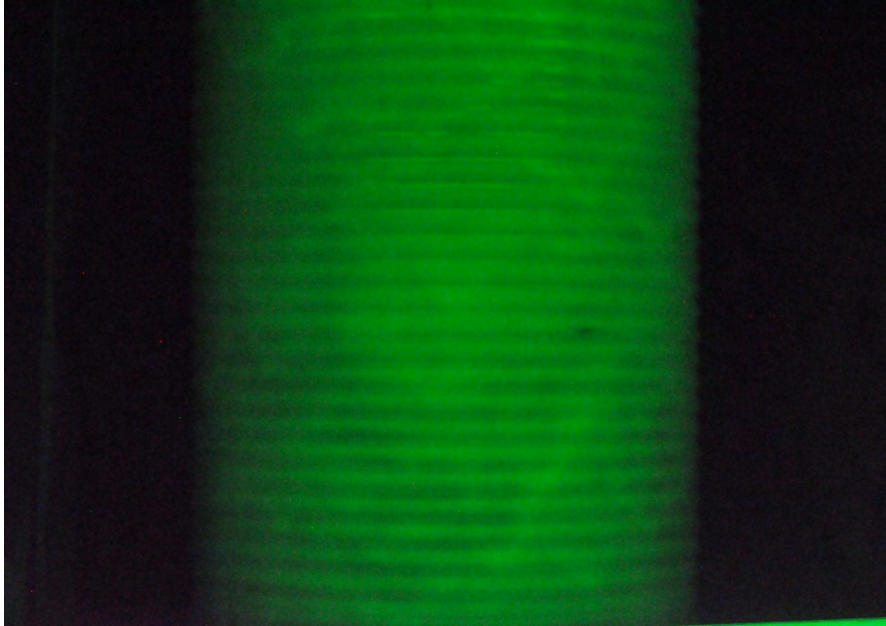
Παρακάτω παρατίθενται οι φωτογραφίες για τη ροή υγρού υμένα σύστασης 66% γλυκερίνης για αριθμούς Reynolds από 3.85 έως 7.18 χωρίς διαταραχή .



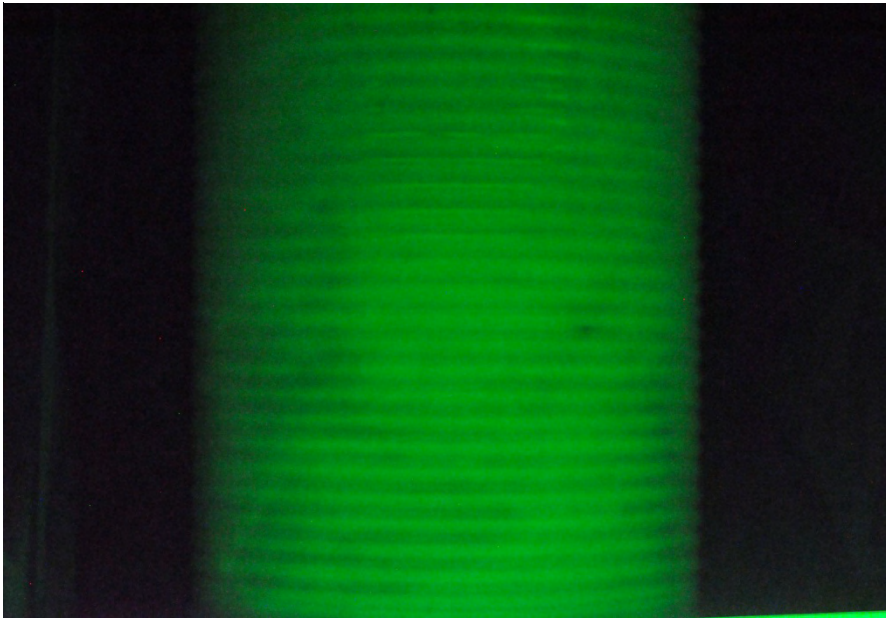
Εικόνα 4.1 Ροή στον κύλινδρο , 3Hz - 4.500 Kg/min – Re =7.18



Εικόνα 4.2 Ροή στον κύλινδρο , 2.4Hz - 3.410 Kg/min - Re=5.44



Εικόνα 4.3 Ροή στον κύλινδρο , 2.1Hz - 2.940 Kg/min - Re=4.69

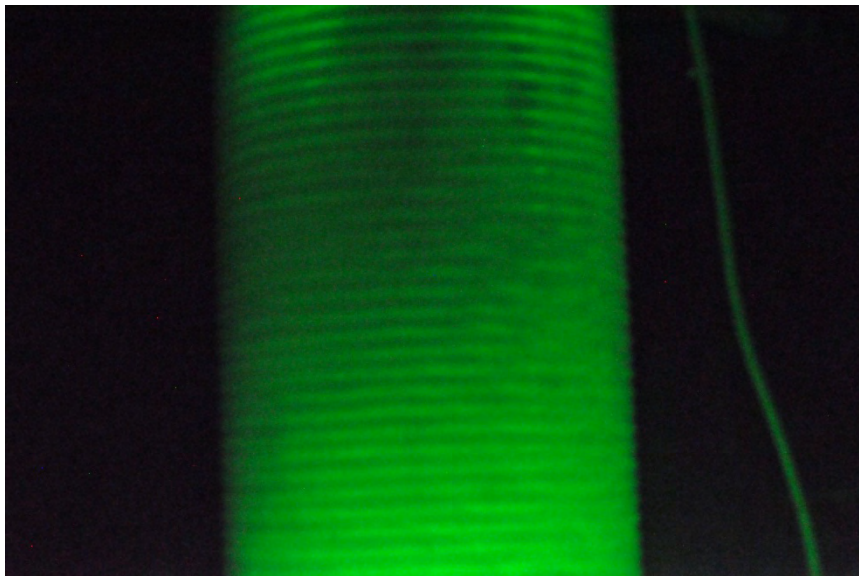


Εικόνα 4.4 Ροή στον κύλινδρο , 1.8Hz - 2.410 Kg/min - Re=3.85

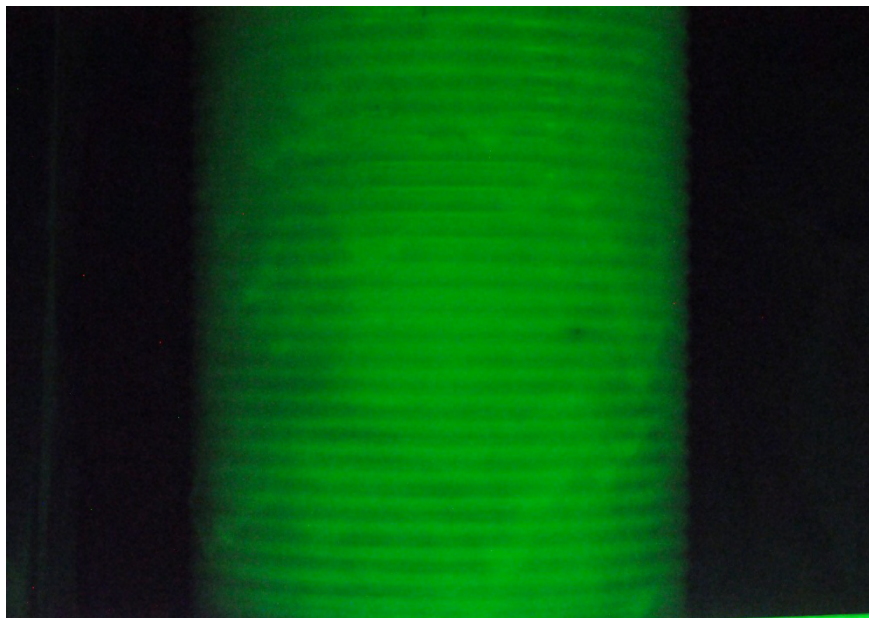
Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνεται ο αριθμός Reynolds μειώνονται και οι κυματώσεις . Επιπλέον, στην εικόνα 4.1 παρατηρούμε ότι κάθε κύμα δεν προλαβαίνει να αναπρυχθεί πλήρως πριν δημιουργηθεί το επόμενο και έτσι δημιουργείται μία χαοτική δομή όπου όλα τα κύματα ενώνονται μεταξύ τους .Στις επόμενες εικόνες 4.2 , 4.3 παρατηρούμε ότι αυτό το φαινόμενο εξασθενεί και παρουσιάζονται κύματα μοχανικά ($Re = 5.44- 4.69$) . Τέλος , για $Re = 3.85$ και κάτω τα κύματα δεν είναι πλέον εμφανή παρόλο ότι βρισκόμαστε ακόμα στην ασταθή περιοχή ($1.92 < Re_{crit} < 2.08$) πράγμα που οφείλεται στο πολύ μικρό ύψος των

κυμάτων αλλά και στην ακρίβεια των εικόνων που δεν είναι επαρκής για να καταγράψει τόσο μικρές μεταβολές (δηλαδή λόγω τεχνικών περιορισμών) .

Στη συνέχεια , παρουσιάζονται 2 εικόνες που δείχνουν την εξέλιξη των κυμάτων κατα μήκος όλου του κυλίνδρου στις ίδιες συνθήκες. Αρχικά , δίνεται το πάνω μέρος και έπειτα το κάτω μέρος του κυλίνδρου .



Εικόνα 4.5 Ροή στο πάνω μέρος του κυλίνδρου , 2.1Hz - 2.940 Kg/min - Re=5.44

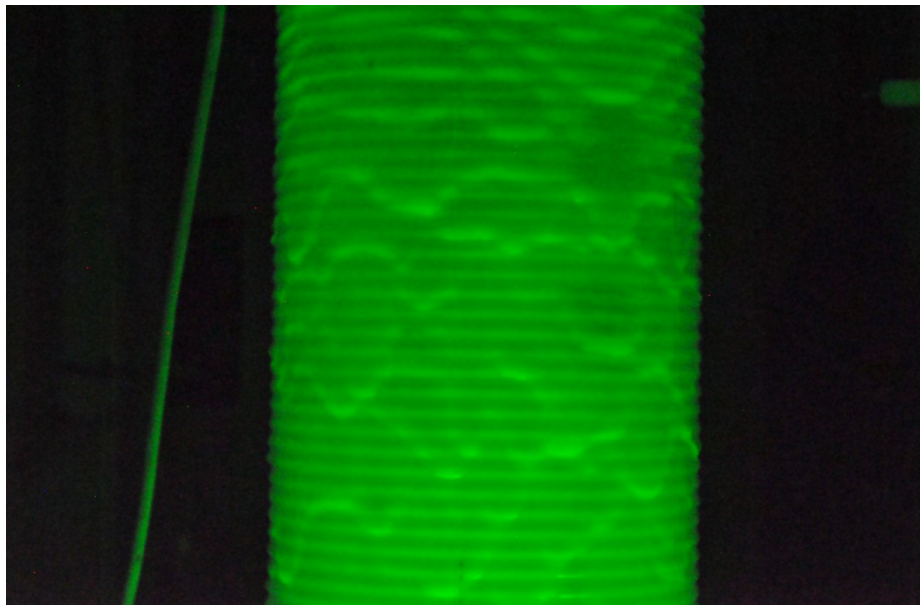


Εικόνα 4.6 Ροή στο κάτω μέρος του κυλίνδρου , 2.1Hz - 2.940 Kg/min - Re=5.44

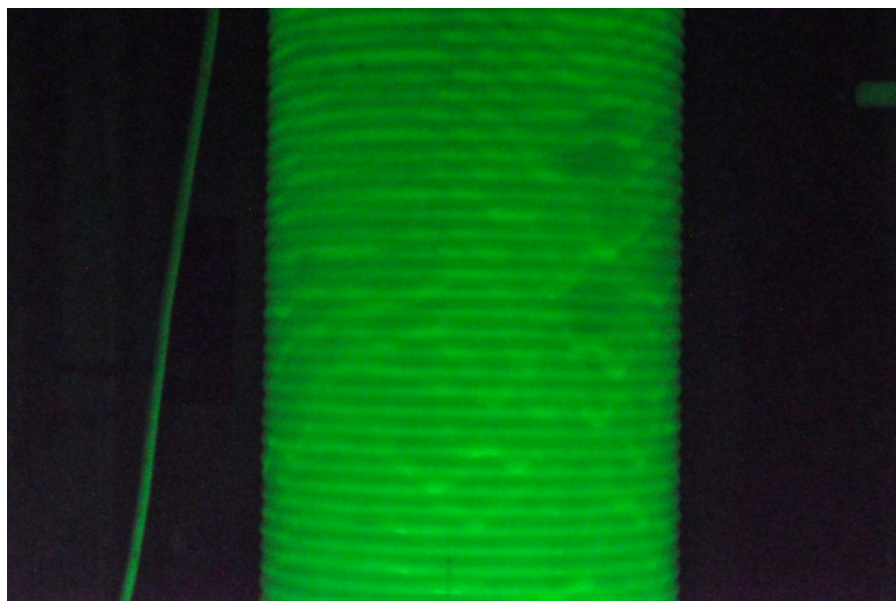
Παρατηρούμε ότι οι κυματώσεις εξελίσσονται και γίνονται πιο εμφανείς όσο πιο χαμηλά στον κύλινδρο κοιτάμε, πράγμα αναμενόμενο μιας και η ροή είναι στην ασταθή περιοχή.

4.3.2 Αποτελέσματα διαλύματος 77% γλυκερίνης

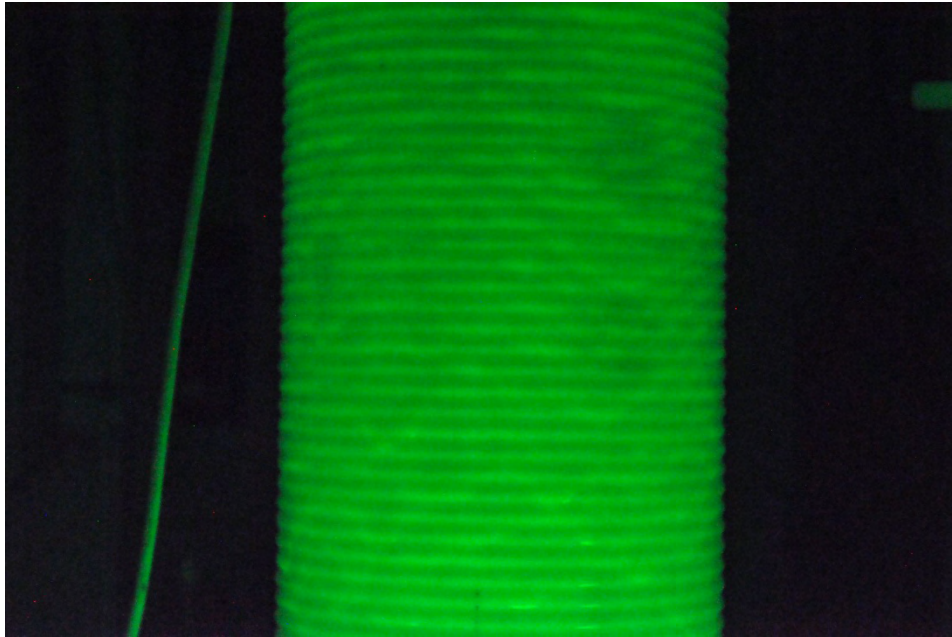
Παρακάτω παρατίθενται οι φωτογραφίες για τη ροή υγρού υμένα σύστασης 77% γλυκερίνης για αριθμούς Reynolds από 2.44 έως 3.71 χωρίς διαταραχή.



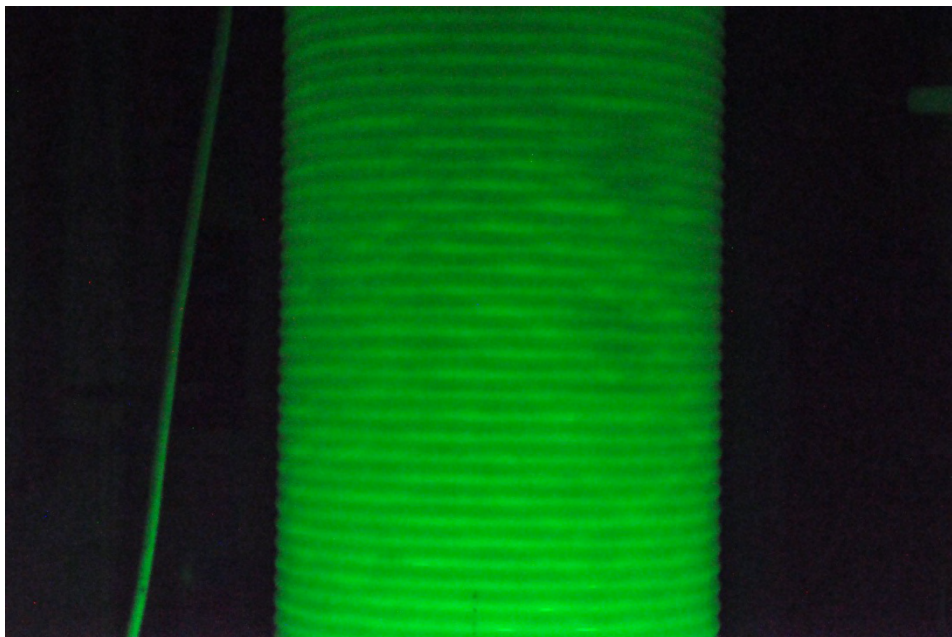
Εικόνα 4.7 Ροή στον κύλινδρο, 3.5Hz – 5.893 Kg/min – Re =3.71



Εικόνα 4.8 Ροή στον κύλινδρο, 2.9Hz – 4.973 Kg/min – Re =3.01



Εικόνα 4.9 Ροή στον κύλινδρο , 2.6Hz – 4.26 Kg/min – Re =2.68

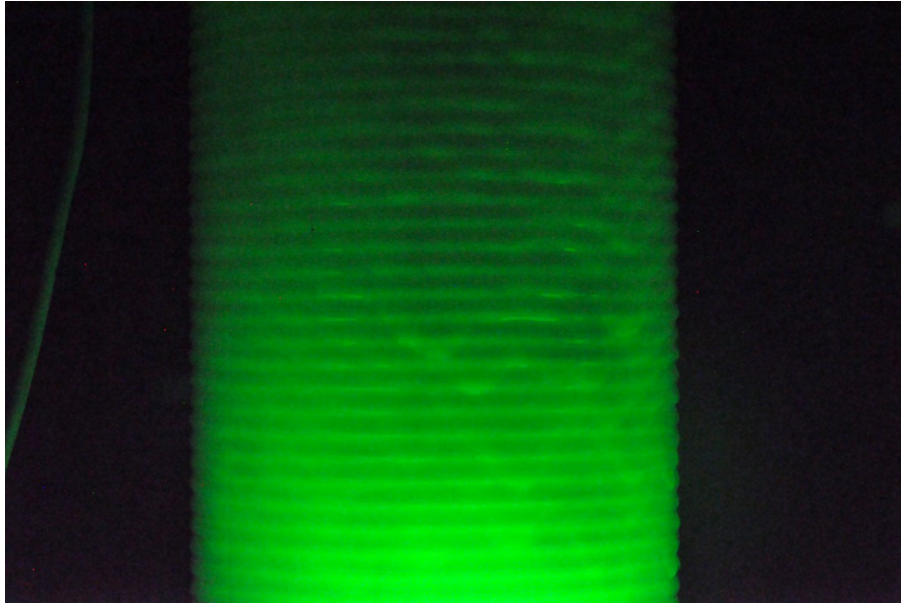


Εικόνα 4.10 Ροή στον κύλινδρο , 2.4Hz – 3.866 Kg/min – Re =2.44

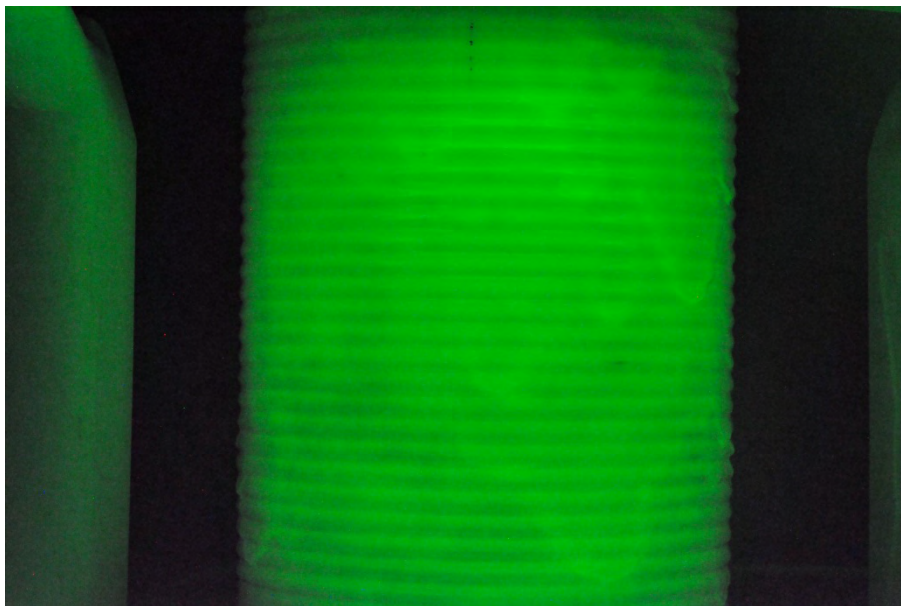
Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνεται ο αριθμός Reynolds μειώνονται και οι κυματώσεις . Επιπλέον, στην εικόνα 4.7 παρατηρούμε ότι κάθε κύμα δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί πλήρως πριν δημιουργηθεί το επόμενο και έτσι δημιουργείται μία χαοτική δομή όπου όλα τα κύματα ενώνονται μεταξύ τους .Στις επόμενες εικόνες 4.8 , 4.9 παρατηρούμε ότι αυτό το φαινόμενο εξασθενεί και

παρουσιάζονται κύματα μοχανικά ($Re = 3.01 - 2.68$) . Τέλος , για $Re = 2.44$ και κάτω τα κύματα δεν είναι πλέον εμφανή παρόλο ότι βρισκόμαστε ακόμα στην ασταθή περιοχή ($1.31 < Re_{crit} < 1.37$) .

Στη συνέχεια , παρουσιάζονται 2 εικόνες που δείχνουν την εξέλιξη των κυμάτων κατα μήκος όλου του κυλίνδρου στις ίδιες συνθήκες. Αρχικά , δίνεται το πάνω μέρος και έπειτα το κάτω μέρος του κυλίνδρου .



Εικόνα 4.11 Ροή στο πάνω μέρος του κυλίνδρου , 2.9Hz - 4.793 Kg/min - $Re=3.01$

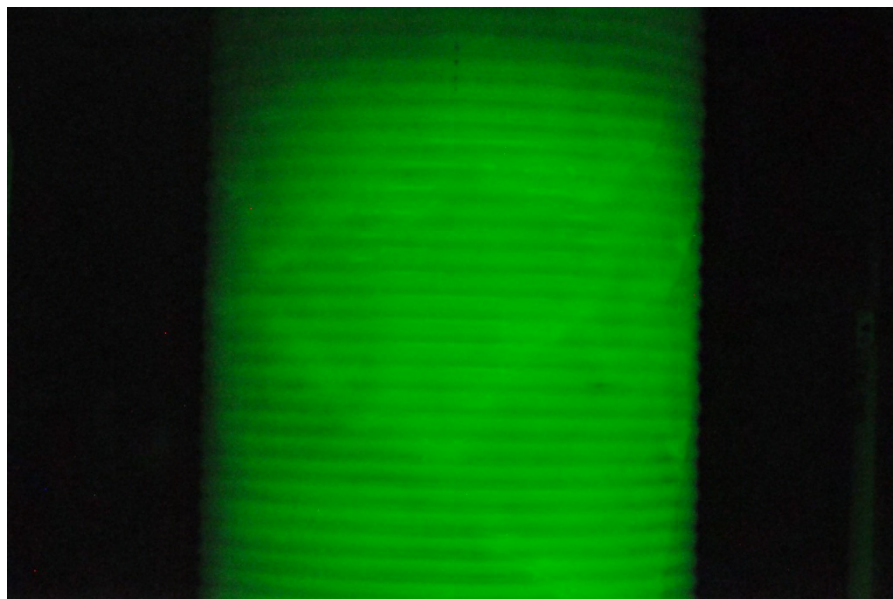


Εικόνα 4.12 Ροή στο κάτω μέρος του κυλίνδρου , 2.9Hz - 4.793 Kg/min - $Re=3.01$

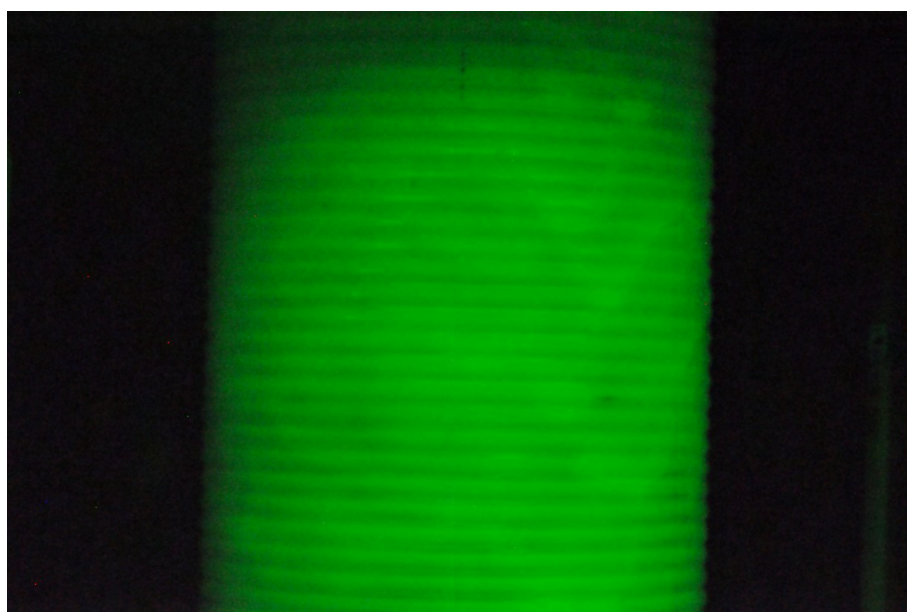
Και εδώ παρατηρούμε ότι οι κυματώσεις εξελίσσονται και γίνονται πιο εμφανείς όσο πιο χαμηλά στον κύλινδρο κοιτάμε, πράγμα αναμενόμενο μιας και η ροή είναι στην ασταθή περιοχή.

4.3.3 Αποτελέσματα διαλύματος 85% γλυκερίνης

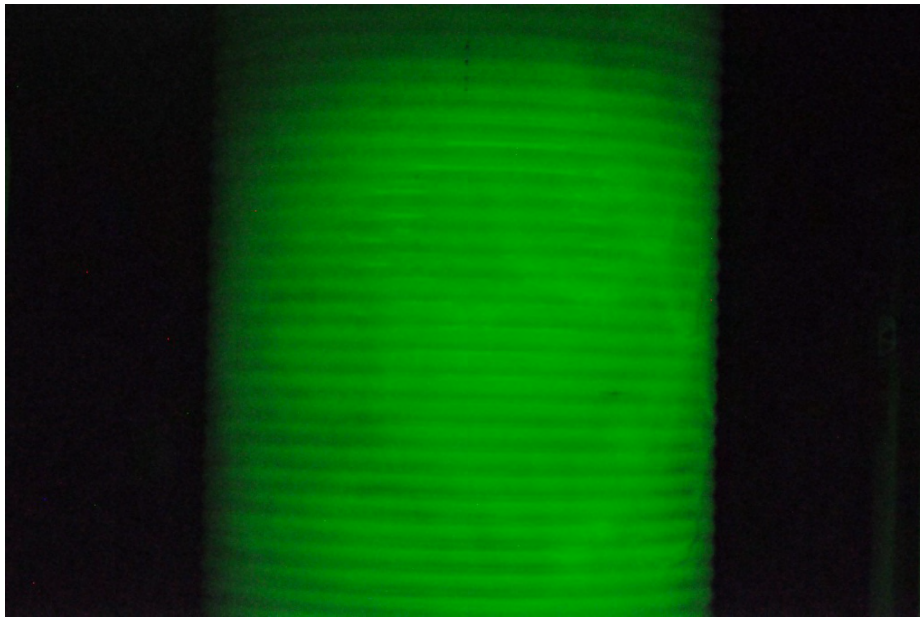
Παρακάτω παρατίθενται οι φωτογραφίες για τη ροή υγρού υμένα σύστασης 85% γλυκερίνης για αριθμούς Reynolds από 2.44 έως 2.03 χωρίς διαταραχή.



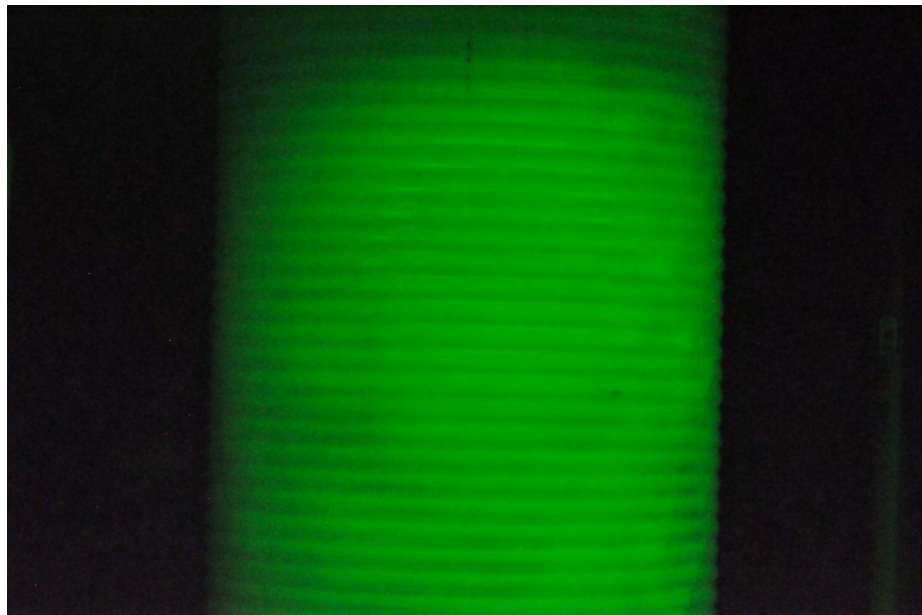
Εικόνα 4.13 Ροή στον κύλινδρο, 5.0Hz – 8.620 Kg/min – $Re = 2.03$



Εικόνα 4.14 Ροή στον κύλινδρο, 4.0Hz – 6.850 Kg/min – $Re = 1.62$



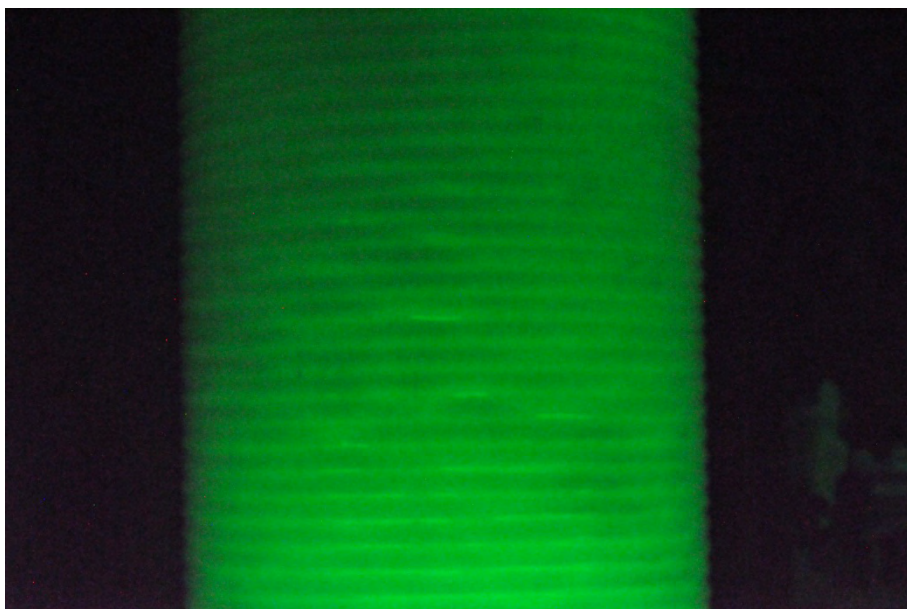
Εικόνα 4.15 Ροή στον κύλινδρο , 3.5Hz – 5.960 Kg/min – $Re = 1.41$



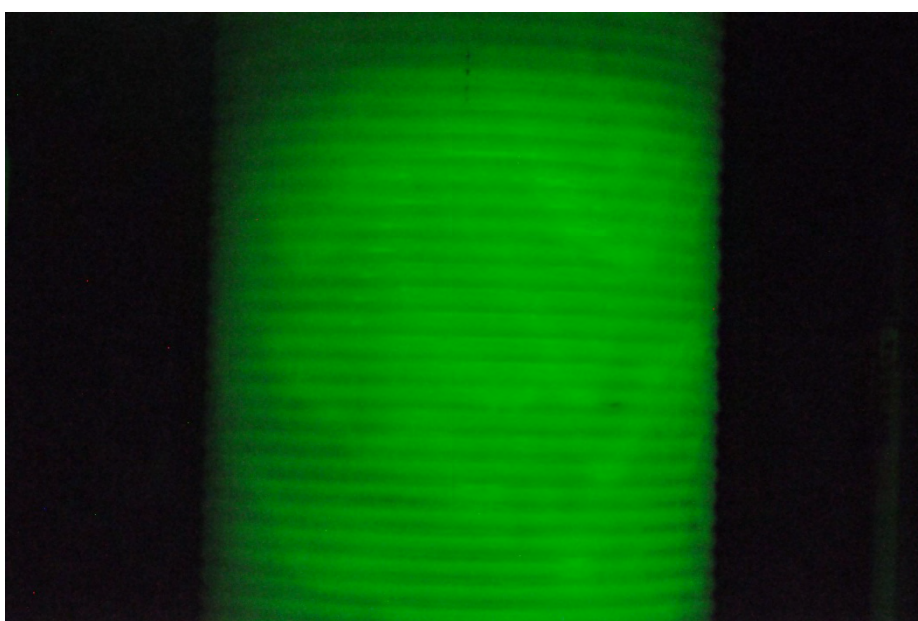
Εικόνα 4.16 Ροή στον κύλινδρο , 3.0Hz – 5.100 Kg/min – $Re = 1.20$

Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνεται ο αριθμός Reynolds μειώνονται και οι κυματώσεις . Ωστόσο , τα κύματα εξαρχής εμφανίζονται ως μοναχικά .Ίσως η μελέτη μεγαλύτερου αριθμού Reynolds από 2.03 να μας έδινε τη χασοτική μορφή όπως στα προηγούμενα διαλύματα . Επιπλέον , για $Re = 1.20$ και κάτω τα κύματα δεν είναι πλέον εμφανή παρόλο ότι βρισκόμαστε ακόμα στην ασταθή περιοχή ($0.82 < Re_{crit} < 0.89$).

Στη συνέχεια , παρουσιάζονται 2 εικόνες που δείχνουν την εξέλιξη των κυμάτων κατά μήκος όλου του κυλίνδρου στις ίδιες συνθήκες. Αρχικά , δίνεται το πάνω μέρος και έπειτα το κάτω μέρος του κυλίνδρου .



Εικόνα 4.17 Ροή στο πάνω μέρος του κυλίνδρου , 4.0Hz – 6.850 Kg/min - Re=1.62



Εικόνα 4.18 Ροή στο κάτω μέρος του κυλίνδρου , 4.0Hz- 6.850 Kg/min - Re=1.62

Και εδώ παρατηρούμε ότι οι κυματώσεις εξελίσσονται και γίνονται πιο εμφανείς όσο πιο χαμηλά στον κύλινδρο κοιτάμε , πράγμα αναμενόμενο μιας και η ροή είναι στην ασταθή περιοχή .

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Συμπεράσματα

- Μελετήθηκε πειραματικά η ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφη κυλινδρική διάταξη με περιοδική διαμόρφωση . Η διαμόρφωση ήταν κυματοειδούς μορφής , μήκους κύματος 12 mm και βάθους 2mm .

- Οι πειραματικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής :

(α) Η αγωγιμομετρική τεχνική , που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του ορίου ευστάθειας και έδωσε με ικανοποιητική ακρίβεια το ύψος του υμένα (το συνολικό σφάλμα ήταν της τάξης 8,7%) .

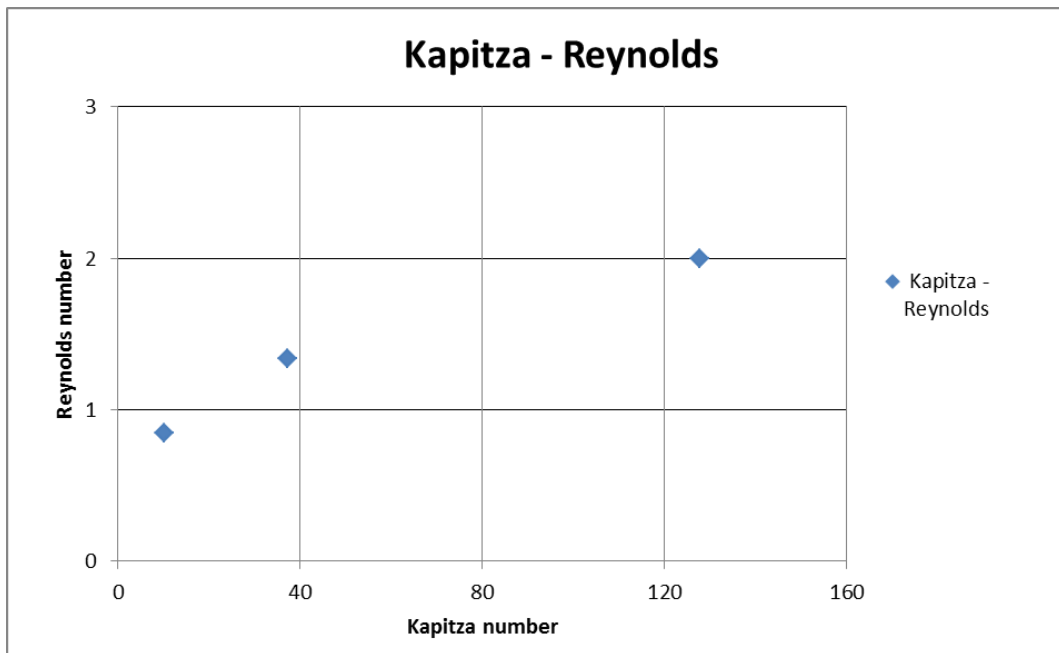
(β) Η φωτογραφική τεχνική , που χρησιμοποιήθηκε για την ποιοτική περιγραφή της εξέλιξης των σχηματιζόμενων κυματώσεων στην ασταθή περιοχή .

- Το εύρος των χαρακτηριστικών των υγρών που μελετήθηκαν φαίνεται παρακάτω :

▪ <u>Σύσταση κ.β γλυκερίνης :</u>	66%-85%
▪ <u>Κινηματικό ιζώδες (cm^2/s) :</u>	10.0125 – 65.252
▪ <u>Αριθμός Kapitza :</u>	10.11 – 127.78
▪ <u>Αγωγιμότητα ($\mu s/cm$) :</u>	202.8 - 2367

- Από την μελέτη πρωτογενούς αστάθειας προέκυψε ότι ο κρίσιμος βαθμός Reynolds έχει πεπερασμένη τιμή ($Re_{crit} > 0$) ,δηλαδή , δεν υπακούει στην συνθήκη $Re_{crit} = (5/6) \cot \varphi$, όπως , άλλωστε , ήταν και αναμενόμενο μιας και , η συγκεκριμένη εξίσωση προέκυψε για τοιχώματα επίπεδα και όχι

διαμορφωμένα . Επιπλέον , παρατηρήθηκε μια συσχέτιση του κρίσιμου αριθμού Reynolds με τον αριθμό Kapitza , και πιο συγκεκριμένα , όσο αυξάνεται ο αριθμός Kapitza αυξάνεται και ο αριθμός Reynolds , επομένως , η ροή γίνεται πιο ευσταθής . Ο συσχετισμός των δύο αριθμών όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα αφήνει μία υπόνοια ότι η επίδραση του αριθμού Kapitza τείνει να εκφυλιστεί μετά από ένα σημείο .



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα συσχέτισης αριθμού Kapitza με αριθμό Reynolds.

- Από την μελέτη της δυναμικής ασταθούς περιοχής , παρατηρώντας τις εικόνες συμπεραίνουμε ότι , παρότι , την σταθεροποίηση της ροής που προσφέρει η αύξηση του αριθμού Kapitza στη ροή , ταυτόχρονα , όσο αυξάνεται ο αριθμός kapitza μειώνεται και η πολυπλοκότητα των κυματώσεων . Δηλαδή , όσο αυξάνεται ο αριθμός Kapitza οι κυματώσεις γίνονται πιο μικρές σε πλάτος και εμφανίζονται πολύ πιο συχνά αλληλεπιδρώντας η μία με την άλλη ενώ σε μικρούς αριθμούς Kapitza οι κυματώσεις είναι λιγότερες με μεγαλύτερο πλάτος . Επίσης , υπογραμμίζουμε ότι , ανεξαρτήτως του αριθμού Kapitza , ξεκινώντας από έναν υψηλό αριθμό Reynolds και πλησιάζοντας στον κρίσιμο οι κυματώσεις μεταπίπτουν σε όλα τα μελετούμενα υγρά στις εξής καταστάσεις : τρισδιάστατη χαοτική 3D - δομή με κύματα πεταλοειδή τύπου ,

δισδιάστατη δομή με κύματα κυρίως μοναχικά , και τέλος ‘αδρανής’ δομή όπου τα κύματα αν υπάρχουν δεν φαίνονται λόγω τεχνικών περιορισμών αλλά και προσέγγισης της ευσταθούς περιοχής .

5.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

- Όπως έχει αναφερθεί , η συγκεκριμένη εργασία αφοσιώθηκε στη μελέτη ροής υγρού υμένα σε κατακόρυφη κυλινδρική διάταξη με περιοδική διαμόρφωση κυματοειδούς μορφής . Αποδείχτηκε ότι η ροή δεν υπακούει στην εξίσωση $Re_{crit} = (5/6) \cot \varphi$, ωστόσο , θα μπορούσε να μελετηθεί επίπεδο κυλινδρικό τοίχωμα για να μελετηθεί η ισχύς αυτής της εξίσωσης για $\varphi = 90^\circ$.
- Επίσης , θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση που έχουν στην ευστάθεια του υγρού υμένα αλλά και στην εξέλιξη των κυμάτων στην ασταθή περιοχή διαφορετικού τύπου περιοδικές διαμορφώσεις. Όπως , για παράδειγμα , ορθογωνικές διαμορφώσεις . Μάλιστα , θα μπορούσε να διερευνηθεί τυχόν διαφοροποίηση του μήκους κύματος και βάθους ή του μήκους και βάθους , για κυματοειδή ή ορθογωνική διαμόρφωση αντίστοιχα , πως επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της ροής .
- Τέλος , έχοντας υπόψη το διάγραμμα του σχήματος 5.1 , θα μπορούσε να διερευνηθεί αν όντως η επίδραση του αριθμού Kapitza στην σταθεροποίηση της ροής (δηλαδή στην αύξηση του Re_{crit}) εκφυλίζεται , δηλαδή μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό Kapitza ο αριθμός Re_{crit} παραμένει σταθερός και ανεξαρτοποιείται από τον Kapitza . Αυτό, θα μπορούσε να γίνει με την υπάρχουσα διάταξη χρησιμοποιώντας υγρά με μεγαλύτερο αριθμό Kapitza και ελέγχοντας ταυτόχρονα τον αριθμό Reynolds όπου η ροή γίνεται ευσταθής .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Wierschem and N. Aksel , "Hydraulic jumps and standing waves in gravity-driven flows of viscous liquids in wavy open channels ". Physics of fluids 16 , 11 (2004) .

Adomeit, P. & Renz, U. Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films . Intl J. Multiphase Flow 26, 1183-1208. (2000)

K.Argyriadi , M. Vlachogiannis and V. Bontozoglou , " Experimental study of inclined film flow along periodic corrugations: the effect of wall steepness". Physics of fluids 18, 012102 , (2006) .

M. Vlachogiannis and V. Bontozoglou , "Experiments on laminar film flow along a periodic wall". J. Fluid Mech. vol. 457, pp. 133-156 , (2002).

Streeter/Wylie/Bedford Batchelor, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ, G.K., "An Introduction to Fluid Dynamics", Cambridge University Press, (1967).

Z. Cao, M. Vlachogiannis and V. Bontozoglou, "Evidence for a new instability mode in film flow along periodic corrugations", in preparation.(2011)

Αργυριάδη Αικ. "Ροή Υγρού Υμένα : Επίδραση Χαρακτηριστικών Διαταραχής και μορφολογίας Τοιχώματος", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, (2005).

Γεωργαντάκη Άννα "Προκαταρκτική μελέτη επίδρασης επιφανειακής τάσης στην ευστάθεια και τα χαρακτηριστικά ροής υγρού υμένα " , Μεταπτυχιακή Εργασία , Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας , (2010) .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1. Ιξώδες διαλυμάτων γλυκερίνης – νερού

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 2. Πυκνότητα διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού

Density of Glycerine-Water Solutions											
Glycerine (%)	Density (g/cm ³)					Glycerine (%)	Density (g/cm ³)				
	15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C		15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C
100	1.26415	1.26381	1.26108	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	1.12900	1.12575	1.12360	1.12110	1.11845
98	1.25900	1.25865	1.25590	1.25290	1.24975	48	1.12325	1.12305	1.12090	1.11840	1.11580
97	1.25645	1.25610	1.25335	1.25030	1.24710	47	1.12065	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	1.20895	1.20845	1.20575	1.20275	1.19970	29	1.07195	1.07175	1.07010	1.06815	1.06605
78	1.20630	1.20570	1.20305	1.20005	1.19705	28	1.06935	1.06915	1.06755	1.06560	1.06355
77	1.20365	1.20300	1.20030	1.19735	1.19435	27	1.06670	1.06655	1.06495	1.06305	1.06105
76	1.20100	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	1.04580	1.04575	1.04440	1.04280	1.04105
68	1.17860	1.17830	1.17575	1.17295	1.17020	18	1.04325	1.04325	1.04195	1.04035	1.03860
67	1.17585	1.17555	1.17300	1.17020	1.16745	17	1.04065	1.04075	1.03945	1.03790	1.03615
66	1.17305	1.17275	1.17025	1.16745	1.16470	16	1.03805	1.03825	1.03695	1.03545	1.03370
65	1.17030	1.17000	1.16750	1.16475	1.16195	15	1.03540	1.03570	1.03440	1.03300	1.03130
64	1.16755	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	14	1.03280	1.03320	1.03200	1.03055	1.02885
63	1.16480	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	13	1.03020	1.03070	1.02955	1.02805	1.02640
62	1.16200	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	12	1.02760	1.02820	1.02705	1.02560	1.02395
61	1.15925	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	11	1.02505	1.02565	1.02455	1.02315	1.02150
60	1.15650	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	10	1.02245	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	1.01825	1.01835	1.01730	1.01600	1.01440
57	1.14815	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	7	1.01660	1.01590	1.01495	1.01360	1.01205
56	1.14535	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	6	1.01395	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	1.00865	1.00870	1.00780	1.00655	1.00505
53	1.13705	1.13680	1.13455	1.13195	1.12925	3	1.00605	1.00630	1.00540	1.00415	1.00270
52	1.13425	1.13400	1.13180	1.12920	1.12650	2	1.00345	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
						0	0.99913	0.99905	0.99823	0.99708	0.99568

Πινάκας 3. Δείκτης διάθλασης 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	1.47399	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	1.36669	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 4. Βαθμονόμηση αντλίας για ρευστό σύστασης 77% σε γλυκερίνη.

Pump indication (Hz)	Flow Rate Measurement (kg/min)
2.5	4.28
2.3	3.85
2.1	3.47
1.9	3.125
1.7	2.775
1.5	2.395
1.4	2.195
1.3	2.01
1.2	1.84
1.1	1.645
1	1.445
0.9	1.23
0.8	1.025
0.7	0.775
0.6	0.515
0.5	0.275

Σχήμα 1. Διάγραμμα βαθμονόμησης αντλίας για ρευστό σύστασης 77% σε γλυκερίνη.

