

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΜΕ
ΔΙΑΛΥΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΟΔΡΑΣΤΙΚΟ

υπό

ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ ΤΣΙΓΚΡΗ

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

Βόλος, 2013



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

Αριθ. Εισ.: 11577/1
Ημερ. Εισ.: 03-04-2013
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2013
ΤΣΙ

© 2013 Τσιγκρής Ευστάθιος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών 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**, *Καθηγητής*
 Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών,
 Τμήμα Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Λάρισας

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

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, καθηγητή κ. Μποντόζογλου Βασίλειο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την συγκεκριμένη εργασία. Τον ευχαριστώ ακόμα, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε οποιαδήποτε στιγμή και αν τη χρειάστηκα. Αισθάνομαι τιμή που δούλεψα με ένα τόσο πετυχημένο καθηγητή.

Ταυτόχρονα, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην υποψήφια διδάκτορα κα. Γεωργαντάκη Άννα για την πολύτιμη συμβολή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής. Χωρίς την παρουσία της και τις ιδέες της, η ολοκλήρωση της εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Είμαι επίσης ευγνώμων και στα δύο ακόμα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Βλαχογιάννη Μιχαήλ και κ. Ανδρίτσο Νικόλαο, οι οποίοι ήταν πάντα διαθέσιμοι για συμβουλές και τους ευχαριστώ επιπρόσθετα για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ακόμα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους φίλους μου, για την διαρκή στήριξη τους και όλες τις όμορφες στιγμές που έχουμε περάσει μαζί.

Τέλος, οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένειά μου. Όλα αυτά τα χρόνια μου παρείχαν τα απαραίτητα υλικά αλλά κυρίως συναισθηματικά εφόδια για να φτάσω σήμερα εδώ. **Θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική αυτή, στη μητέρα μου Φούλη και στον πατέρα μου Μιχάλη, που ξέρω πως είναι πολύ περήφανοι για μένα.**

Τσιγκρής Ευστάθιος

*Επίδραση γωνίας κλίσης στη ροή υγρού υμένα με διαλυτό
επιφανειοδραστικό*

Τσιγκρής Ευστάθιος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2013

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών εξετάζουμε ιξώδεις ροές με ελεύθερη επιφάνεια. Το πρότυπο με το οποίο δουλέψαμε στην εργασία αυτή για να μελετήσουμε και να κατανοήσουμε τη συγκεκριμένη κατηγορία ροών, είναι η ροή υγρού υμένα. Λεπτοί υμένες υγρού απαντώνται σε αρκετές συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα τους να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση τους σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Η συγκεκριμένη διπλωματική αφορά την πειραματική μελέτη της επίδρασης της γωνίας κλίσης στη ροή υγρού υμένα νερού με την προσθήκη διαλυτού επιφανειοδραστικού. Σκοπός είναι η αναγνώριση της μετάπτωσης της ροής από την ασταθή, στην ευσταθή περιοχή. Επιφανειοδραστική ουσία ονομάζεται εκείνη η οποία μεταβάλλει την επιφανειακή τάση του μέσου στο οποίο διαλύεται.

Στο πείραμά μας μελετήσαμε δυο διαφορετικές γωνίες κλίσης της ροής του υγρού υμένα, στις 5° και 10° αντίστοιχα. Στις δύο αυτές περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το επιφανειοδραστικό Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) σε διάφορες συγκεντρώσεις, τέτοιες ώστε να καλυφθεί το επιθυμητό εύρος τιμών για την επιφανειακή τάση.

Εν συνεχεία, μέσω της αγωγιμομετρικής τεχνικής καταφέραμε να απεικονίσουμε την εξέλιξη του ύψους των κυμάτων του υμένα. Το ύψος αυτό άλλαζε λόγω της επιβολής περιοδικής διαταραχής μέσω ελεγχόμενης ηλεκτροβάνας.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής παρουσιάζονται βάσει των γωνιών κλίσης στις οποίες υποβάλλαμε τη ροή. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση του επιφανειοδραστικού απέφερε έντονη αύξηση του ορίου ευστάθειας του υγρού υμένα.

Χάρη στα πειράματα που έγιναν αποτυπώσαμε με αυξημένη ακρίβεια τη μετάπτωση της ροής από ασταθή σε ευσταθή, σε σχέση με τη γωνία κλίσης.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
Πίνακας Σημμάτων	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Στόχος της εργασίας	10
1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα	10
1.3 Επιλογή εύρους μελετώμενων παραμέτρων	11
1.4 Δομή της εργασίας	12
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	13
2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα	13
2.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια	19
2.3 Ευστάθεια ροής υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο κανάλι	20
2.4 Βιβλιογραφικές αναφορές για τη ροή υγρού υμένα	24
2.5 Επιφανειακά Φαινόμενα – Ορισμός της επιφανειακής τάσης	26
2.6 Επιφανειοδραστικές ουσίες (Surfactants)	27
2.7 Φυσικές ιδιότητες διαλυμάτων επιφανειοδραστικών	31
2.8 Επίδραση επιφανειοδραστικών στη ροή υμένων	32
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	34
3.1 Πειραματική διάταξη	34
3.1.1 Κανάλι ροής	34
3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής	38
3.1.3 Ευθυγράμμιση καναλιού ροής	39
3.2 Ιδιότητες ρευστών	42
3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική	42
3.3.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής	44
3.3.2 Μέτρηση επιφανειακής τάσης	45
3.4 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων	48
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	50
4.1 Σειρές πειραμάτων	50
➤ Γωνία κλίσης καναλιού: 5 μοίρες	51
➤ Γωνία κλίσης καναλιού: 10 μοίρες	55
5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	61
5.1 Σχολιασμός - Συμπεράσματα	61
5.1.1 Γωνία κλίσης 5°: Σχήμα 4.1 – 4.5	61
5.1.2 Γωνία κλίσης 5°: Σχήμα 4.6 – 4.7	61
5.1.3 Γωνία κλίσης 10°: Σχήμα 4.8 – 4.12	62
5.1.4 Γωνία κλίσης 10°: Σχήμα 4.13 – 4.14	62
5.1.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων: Σχήμα 4.15 – Σχήμα 4.16	63

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1	Δυνάμεις πάνω σε ένα στοιχείο υγρού σε ροή υγρού υμένα.....	14
Σχήμα 2.2	Γραφική απεικόνιση εξέλιξης (α) συναγωγικής (β) απόλυτης αστάθειας	20
Σχήμα 2.3	Ανάπτυξη περιοδικών διαταραχών στη ροή υγρού υμένα	21
Σχήμα 2.4	Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα.....	24
Σχήμα 2.5	Δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ μορίων στο εσωτερικό ενός υγρού και στη διεπιφάνεια.....	27
Σχήμα 2.6	Σχηματική αναπαράσταση του επιφανειοδραστικού μορίου	28
Σχήμα 2.7	Σχηματική αναπαράσταση του σχηματισμού μικκυλίων με την αύξηση της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού.....	31
Σχήμα 2.8	Σχηματική αναπαράσταση της μείωσης της επιφανειακής τάσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού	32
Σχήμα 3.1	Πειραματική διάταξη	36
Σχήμα 3.2	Δοχείο συλλογής και εμβαπτιζόμενη αντλία	37
Σχήμα 3.3	Δοχείο κατανομής.....	37
Σχήμα 3.4	Σύστημα διαταραχής.....	39
Σχήμα 3.5	Ευθυγραμμισμένο και μη ευθυγραμμισμένο κανάλι.....	40
Σχήμα 3.6	Χρωματισμένο ρευστό για ευθυγράμμιση.....	41
Σχήμα 3.7	Η αγωγομετρική τεχνική	43
Σχήμα 3.8	Διαδικασία μέτρησης επιφανειακής τάσης.....	46
Σχήμα 3.9	Μετρητής επιφανειακής τάσης	47
Σχήμα 4.1	Πειράματα στις 5° και $f=0.125$ Hz	51
Σχήμα 4.2	Πειράματα στις 5° και $f=0.25$ Hz	52
Σχήμα 4.3	Πειράματα στις 5° και $f=0.5$ Hz.....	52
Σχήμα 4.4	Πειράματα στις 5° και $f=0.75$ Hz	53
Σχήμα 4.5	Πειράματα στις 5° και $f=1$ Hz	53
Σχήμα 4.6	Re_{cr} στις 5° συναρτήσει της συγκέντρωσης.....	54
Σχήμα 4.7	Re^* στις 5° συναρτήσει της συγκέντρωσης.....	54
Σχήμα 4.8	Πειράματα στις 10° και $f=0.125$ Hz	55
Σχήμα 4.9	Πειράματα στις 10° και $f=0.25$ Hz	55
Σχήμα 4.10	Πειράματα στις 10° και $f=0.5$ Hz	56
Σχήμα 4.11	Πειράματα στις 10° και $f=0.75$ Hz	56
Σχήμα 4.12	Πειράματα στις 10° και $f=1$ Hz	57
Σχήμα 4.13	Re_{cr} στις 10° συναρτήσει της συγκέντρωσης.....	58
Σχήμα 4.14	Re^* στις 10° συναρτήσει της συγκέντρωσης.....	58
Σχήμα 4.15	Αποτελέσματα ευστάθειας Re^* συναρτήσει της συγκέντρωσης.....	59
Σχήμα 4.16	Αποτελέσματα ευστάθειας Re_{cr} συναρτήσει της συγκέντρωσης.....	59

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της είναι η πειραματική μελέτη της επίδρασης της γωνίας κλίσης, στην ευστάθεια της ροής υγρού υμένα νερού, πάνω σε επίπεδο τοίχωμα με την χρήση διαλυτού επιφανειοδραστικού. Συγκεκριμένα, διερευνάται πώς επηρεάζεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, δηλαδή ο αριθμός Reynolds στον οποίο η ροή μεταπίπτει από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή, συναρτήσει της γωνίας κλίσης της ροής και συναρτήσει διαφόρων τιμών της επιφανειακής τάσης.

1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα

Με τον όρο ροή υγρού υμένα, εννοούμε την ροή εκείνη στην οποία το πάχος του ρευστού που ρέει είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μεγέθου (μήκος και πλάτος). Η ροή υγρού υμένα λόγω βαρύτητας (ροή Nusselt) κατά μήκος επίπεδου τοιχώματος αποτελεί μια βασική ροή της ρευστομηχανικής και συναντάται σε πολυάριθμα βιομηχανικά συστήματα, όπως σε εφαρμογές επικάλυψης, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες και στήλες απορρόφησης. Λεπτοί υμένες χρησιμοποιούνται στις περισσότερες συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Ο κυριότερος λόγος της χρήσης αυτού του είδους ροής είναι η ικανότητα των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση.

Το πεδίο ροής στον υμένα συχνά επηρεάζει έντονα τους ρυθμούς μεταφοράς και κατά συνέπεια καθορίζει το βαθμό απόδοσης των συσκευών. Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα

παραδείγματα αποτελούν οι συμπυκνωτές ατμού - όπου συνήθως η κύρια αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας προβάλλεται από τον υμένα του συμπυκνώματος -, οι εξάτμιστήρες και οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις - στα τμήματα εκείνα όπου ο μηχανισμός του βρασμού είναι η εξάτμιση από την επιφάνεια του υγρού - και οι συσκευές μεταφοράς μάζας όπου λαμβάνει χώρα απορρόφηση ελαφρά διαλυτού αερίου. Τα ίδια φαινόμενα ροής και ευστάθειας λεπτών υμένων καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και άλλων τεχνολογικών και περιβαλλοντικών συστημάτων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα τη συμπεριφορά πτερύγων αεροπλάνων κατά την πτήση υπό συνθήκες βροχόπτωσης (Pelekasis & Tsamopoulos 2001).

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

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

1.3 Επιλογή εύρους μελετώμενων παραμέτρων

Οι κύριες παράμετροι που μεταβάλλονται στην παρούσα εργασία είναι η κλίση του επίπεδου τοιχώματος, η επιφανειακή τάση, η παροχή του υμένα, και η ύπαρξη εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.

Πιο συγκεκριμένα, ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού – επιφανειοδραστικού SDS. Το επιφανειοδραστικό χρησιμοποιήθηκε σε διαφορές περιεκτικότητες, ενώ οι παροχές που μελετήθηκαν εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds τέτοιες ώστε να βρισκόμαστε πάνω και κάτω από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds σε κάθε κλίση.

Η επιλογή των κλίσεων του τοιχώματος που μελετήθηκαν (5° , 10°) υπαγορεύονται κυρίως από πειραματικούς περιορισμούς λόγω της μη ευελιξίας του καναλιού σε αλλαγή της γωνίας κλίσης. Η εισαγωγή στο σύστημα, συγκεκριμένης συχνότητας διαταραχής, δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου.

1.4 Δομή της εργασίας

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

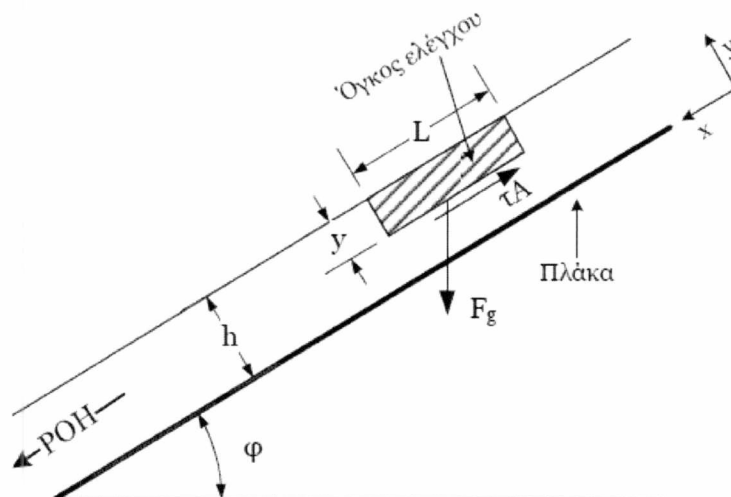
Αξίζει να σημειωθεί ότι γίνεται αναφορά κυρίως σε πειραματικές μελέτες, οι οποίες είναι περιορισμένες, και λιγότερο σε υπολογιστικές. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αρχικά, περιγράφεται η πειραματική διάταξη που υπάρχει στο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

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα

Η πιο απλή μορφή του προβλήματος της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο είναι αυτή της ροής Nusselt. Θεωρείται ένα στρώμα υγρού που ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας σε μια επικλινή επιφάνεια. Αν η ροή αυτή λαμβάνει χώρα σε μόνιμη κατάσταση με πλήρως ανεπτυγμένη κατανομή ταχύτητας το πάχος του στρώματος παραμένει σταθερό. Επίσης, η οπισθέλκουσα στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού λόγω του υπερκείμενου αέρα είναι τόσο μικρή που μπορεί να αγνοηθεί. Έτσι, η διατμητική τάση στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού λόγω του υπερκείμενου αέρα είναι τόσο μικρή που μπορεί να αγνοηθεί. Οπότε, 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 :

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

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

είναι :

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

Με χρήση των συνθηκών αυτών προκύπτουν οι δύο σταθερές :

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

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

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

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

Ο συνολικός μαζικός ρυθμός ροής του ρευστού είναι :

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

όπου q είναι η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους. Η εξίσωση αυτή δίνει το πάχος ενός πίπτοντος γραμμικού υμένα και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον 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 $p=P_{\text{atm}}$

Επομένως, προκύπτει :

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

Μια πλήρης και αναλυτική περιγραφή της ροής υγρού υμένα στη γενική περίπτωση μπορεί να προκύψει από τις εξισώσεις Navier-Stokes και από την εξίσωση της συνέχειας σε συνδυασμό με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Χρησιμοποιώντας ως χαρακτηριστικά μεγέθη το πάχος h_N , και τη μέση ταχύτητα u_0 ,

της λύσης Nusselt που αναλύσαμε πιο πάνω, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις σε αδιάστατη μορφή:

$$\nabla \cdot \hat{u} = 0 \quad (2.1-12)$$

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} = \hat{u} \cdot \nabla \hat{u} = -\nabla \hat{P} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \nabla^2 \hat{u} + \frac{1}{\text{Fr}^2} \cdot \hat{g} \quad (2.1-13)$$

Όπου $\hat{u} = (\hat{u}, \hat{v})$ είναι το διάνυσμα της ταχύτητας, ενώ το σύμβολο $\hat{\cdot}$ δηλώνει αδιάστατο μέγεθος. Οι αριθμοί Reynolds και Froude ορίζονται ως εξής:

$$\text{Re} = \frac{u \cdot h_N}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad (2.1-14)$$

$$\text{Fr} = \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot \sin \phi \cdot h_N}} \quad (2.1-15)$$

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

$$\hat{u} = \hat{v} = 0 \quad (2.1-16)$$

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

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial \hat{t}} + \hat{u} \cdot \frac{\partial \hat{h}}{\partial \hat{x}} = \hat{v} \quad (2.1-17)$$

$$\underline{n} \cdot \hat{\sigma} = \text{We} \cdot 2 \cdot H_c \cdot \underline{n} \quad (2.1-18)$$

όπου ο αριθμός Weber δίνεται από την εξίσωση (2.1-19), $2H_c$ είναι η μέση καμπυλότητα της ελεύθερης επιφάνειας, \underline{n} το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην ελεύθερη επιφάνεια, γ η επιφανειακή τάση του ρευστού και $\hat{\sigma}$ ο τανυστής τάσεων.

$$\text{We} = \frac{\gamma}{\rho \cdot u^2 \cdot h_N} \quad (2.1-19)$$

Εναλλακτικά του αριθμού Weber, ο οποίος εκφράζει το λόγο των τριχοειδών δυνάμεων ως προς τις αδρανειακές δυνάμεις, η επίδραση των τριχοειδών φαινομένων

μπορεί να περιγραφεί από άλλους αδιάστατους αριθμούς, όπως ο τριχοειδής αριθμός Ca , και ο αριθμός Kapitza.

$$Ca = \frac{\mu u_0}{\gamma} \quad (2.1-20)$$

$$Ka = \frac{\gamma}{\rho v^{4/3} g^{1/3}} \quad Ka_x = \frac{\gamma}{\rho v^{4/3} (g \sin \phi)^{1/3}} \quad (2.1-21)$$

Ο Ka_x είναι ο αριθμός Kapitza εκφρασμένος κατά τη συνιστώσα της βαρύτητας στη διεύθυνση ροής. Είναι ένας αδιάστατος αριθμός, ιδιαίτερα χρήσιμος για πειραματικές εργασίες, επειδή εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του ρευστού. Θεωρούμε το χαρακτηριστικό χρόνο t_v (2.1-22) και το χαρακτηριστικό μήκος l_v (2.1-23) βάση του ιξώδους και της επιτάχυνσης της βαρύτητας καθώς και το τριχοειδές χαρακτηριστικό μήκος l_c (2.1-24) [Ruyer-Quill,2008].

$$t_v = v^{1/3} g^{-2/3} \quad (2.1-22)$$

$$l_v = v^{2/3} g^{-1/3} \quad (2.1-23)$$

$$l_c = \sqrt{\gamma/(\rho g)} \quad (2.1-24)$$

Ο αριθμός Kapitza μπορεί να γραφεί ως:

$$Ka = \frac{\gamma}{\rho v^{4/3} g^{1/3}} = \frac{\gamma/l_v}{\mu/t_v} \quad \text{αλλά και } Ka = \left(\frac{l_c}{l_v}\right)^2 \quad (2.1-25)$$

εκφράζοντας έτσι τις επιφανειακές τάσεις ως προς τις ιξώδεις τάσεις στην πρώτη περίπτωση και τη σχέση ανάμεσα στο τριχοειδές και ιξώδες χαρακτηριστικό μήκος.

Όπως περιγράψαμε, ο αριθμός Weber είναι ένας αδιάστατος αριθμός, του οποίου η τάξη μεγέθους, εκφράζει τη σημαντικότητα των αδρανειακών φαινομένων στον υμένα (συγκρινόμενα με τα ιξώδη και τριχοειδή φαινόμενα). Μεγάλες τιμές του αριθμού We , αντιστοιχούν σε λεπτούς υμένες, στους οποίους ο ρόλος των

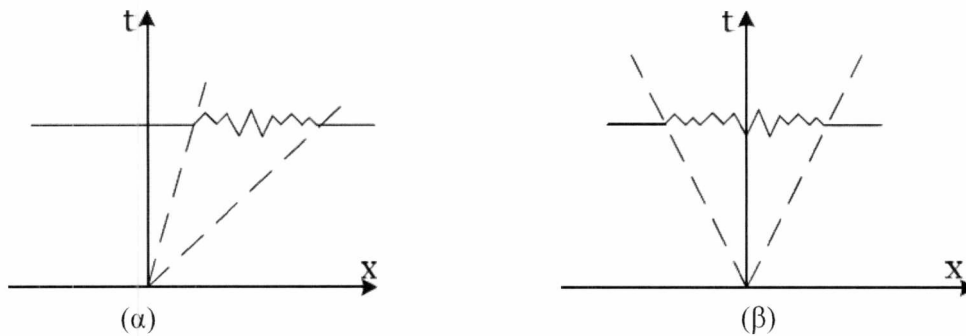
αδρανειακών δυνάμεων, δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικός, ενώ για μικρές τιμές και υμένες μεγαλύτερου πάχους, τα αδρανειακά φαινόμενα έχουν ιδιαίτερη σημασία. Για ένα συγκεκριμένο αριθμό Weber, αυξάνεται και η σημασία των τριχοειδών φαινομένων αλλά και η πολυπλοκότητα της κυματοειδούς επιφάνειας. [Cesar E. Meza, Vemuri Balakotaiah, 2007].

2.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια

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

Η συμπεριφορά μιας διαταραχής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της και από τη δομή της αδιατάραχτης κατάστασης, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση αντιστοιχεί στη βασική ροή. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν διαφορετική εξέλιξη, ανάλογα με τη φύση της ροής και την τιμή του αριθμού Reynolds. Σε ορισμένες περιπτώσεις η διαταραχή αυξάνει και παρασύρεται κατάντη (ή και ανάντη) της ροής και η αρχική θέση επιβολής της, τελικά ηρεμεί. Η εξέλιξη αυτή χαρακτηρίζεται ως συναγωγική αστάθεια (convective instability). Χαρακτηριστικό παράδειγμα συναγωγικής αστάθειας είναι η περίπτωση που μελετούμε, η ροή υγρού υμένα. Αντίθετα, στις περιπτώσεις όπου η διαταραχή απλώνεται σταδιακά στο μεγαλύτερο τμήμα του πεδίου ροής και ειδικότερα η θέση επιβολής της δεν ηρεμεί, τότε η εξέλιξη αυτή χαρακτηρίζεται ως απόλυτη αστάθεια

(absolute instability). Οι αστάθειες αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2 [Drazin, 2002].



Σχήμα 2.2. Γραφική απεικόνιση εξέλιξης (α) συναγωγικής (β) απόλυτης αστάθειας

2.3 Ευστάθεια ροής υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο κανάλι

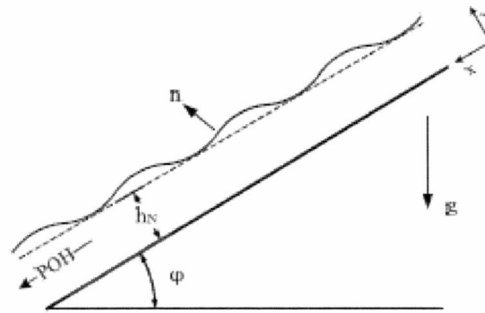
Ανάλογα με τη δομή της βασικής ροής και το είδος της διαταραχής, οι μη μόνιμες συνιστώσες μπορεί να ενισχύονται ή να σβήνουν τοπικά ή συνολικά. Αν το μέγεθος της διαταραχής αυξάνεται, παραμένει σταθερό ή σβήνει με το χρόνο τότε η διαταραχή ονομάζεται, αντίστοιχα, ασταθής, οριακά ευσταθής ή ευσταθής. Αν όλες οι διαταραχές σβήνουν, η βασική ροή είναι γραμμικά ευσταθής, αλλά αν συγκεκριμένες διαταραχές αυξάνονται είναι γραμμικά ασταθής

Η *ανάλυση γραμμικής ευστάθειας*, είναι η μέθοδος που επιλέξαμε για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της διαταραχής που εμείς επιβάλλαμε και τι αποτελέσματα επιφέρει αυτή στη ροή μας.

Η βασική ροή του προβλήματος που αντιμετωπίσαμε, 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 :

$$u_x = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{2 \cdot \mu} \cdot y \cdot (2 \cdot h_N - y) = \frac{g \cdot \sin \phi \cdot h_N^2}{\nu} \left[\frac{y}{h_N} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h_N} \right)^2 \right] \quad (2.4-1)$$

$$P = \rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot (h_N - y) \quad (2.4-2)$$



Σχήμα 2.3. Ανάπτυξη περιοδικών διαταραχών στη ροή υγρού υμένα

και ορίζουμε τη ροϊκή συνάρτηση ως εξής:

$$\Psi(y) = \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{g \cdot \sin \phi \cdot h_N^3}{\nu} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{y}{h_N} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{y}{h_N} \right)^3 \right] \quad (2.4-3)$$

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. (2.4-1)-(2.4-3) γράφονται σε αδιάστατη μορφή:

$$\hat{u}_x(\hat{y}) = 3 \left(\hat{y} - \frac{1}{2} \hat{y}^2 \right) \quad (2.4-4)$$

$$\hat{P}(\hat{y}) = \frac{g \cdot h_N}{u_0^2} \cdot \cos \phi (1 - \hat{y}) = \frac{g \cdot \sin \phi \cdot h_N}{u_0^2} \cot \phi (1 - \hat{y}) = \frac{1}{Fr^2} \cot \phi (1 - \hat{y}) \quad (2.4-5)$$

$$\hat{\Psi}(\hat{y}) = 3 \left(\frac{1}{2} \hat{y}^2 - \frac{1}{6} \hat{y}^3 \right) = \frac{3}{2} \hat{y}^2 - \frac{1}{2} \hat{y}^3 \quad (2.4-6)$$

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

$$Fr^2 = \frac{u_0^2}{g \cdot \sin \phi \cdot h_N} = \frac{u_0}{g \cdot \sin \phi \cdot h_N} \frac{g \cdot \sin \phi \cdot h_N^2}{3\nu} = \frac{u_0 \cdot h_N}{3\nu} = \frac{Re}{3} \quad (2.4-7)$$

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

$$\hat{\psi}' = \hat{\Psi} + \hat{\psi} \quad (2.4-8)$$

$$\hat{\psi} = f(y) \cdot \exp[ia \cdot (\hat{x} - \hat{c} \cdot \hat{t})] \quad (2.4-9)$$

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:

$$\hat{h}(\hat{x}, \hat{t}) = 1 + \hat{\eta}(\hat{x}, \hat{t}) = 1 + A \cdot \exp[ia \cdot (\hat{x} - \hat{c} \cdot \hat{t})] \quad (2.4-10)$$

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):

$$f'''' - 2a^2 f'' + 4af = i \cdot a \cdot \text{Re} \left[(2\hat{y} - \hat{y}^2 - \hat{c}) \cdot (f'' - a^2 f) + 2f \right] \quad (2.4-11)$$

όπου οι αδιάστατες παράμετροι ορίζονται ως εξής :

$$f = \frac{\hat{u}_x}{u_0 \cdot h_N}, \hat{U} = \frac{\hat{u}_x}{u_0}, \hat{c} = \frac{c}{u_0}, \hat{x} = \frac{x}{h_N}, a = k \cdot h_N, \text{Re} = \frac{u_0 \cdot h_N}{\nu} \quad (2.4-12)$$

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.(2.1-16). Επομένως:

$$u' = v' = 0 \Rightarrow u = v = 0 \Rightarrow f(0) = f'(0) = 0 \quad (2.4-13)$$

Δύο επιπλέον συνθήκες θα προκύψουν για την ελεύθερη επιφάνεια από την εφαρμογή της κινηματικής, Εξ. (2.1-17), και της δυναμικής συνθήκης, Εξ. (2.1-18). Η κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια είναι:

$$\frac{DF}{Dt} = 0 \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial t} + u_x \frac{\partial F}{\partial x} + u_y \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_x \frac{\partial \eta}{\partial x} = u_y \quad (2.4-14)$$

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:

$$(\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{n}}) \cdot \underline{\underline{t}} = 0 \quad (2.4-15)$$

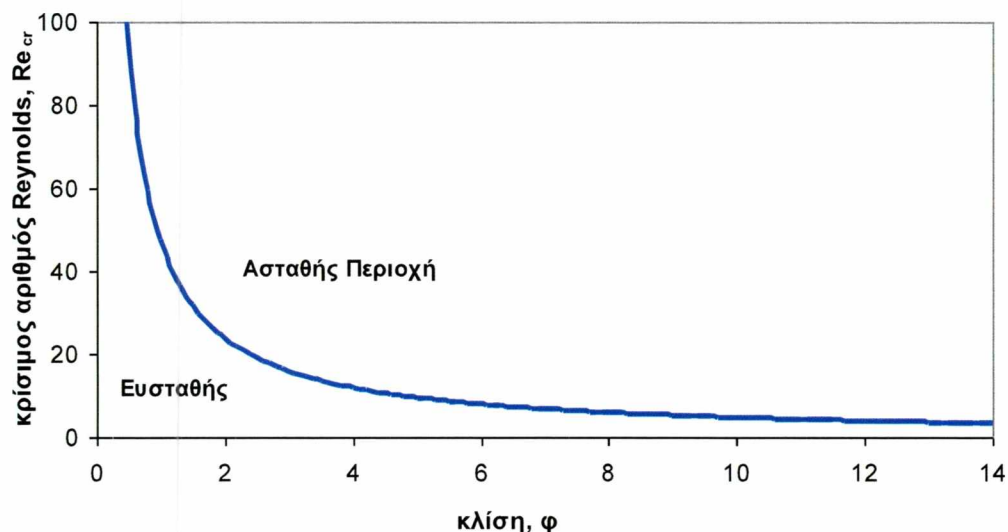
και εξισορρόπηση της δύναμης λόγω επιφανειακής τάσης, γ , από τις κάθετες δυνάμεις:

$$(\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{n}}) \cdot \underline{\underline{n}} = \gamma \cdot H_c \quad (2.4-16)$$

Η διαφορική εξίσωση (2.4-11) και οι συνοριακές συνθήκες που περιγράφονται από τις (2.4-13) έως (2.4-16) 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 2.4 απεικονίζεται γραφικά η εξάρτηση του θεωρητικού 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 2.4. Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα

Η Εξ. (2.4-17) επαληθεύτηκε αργότερα τόσο αναλυτικά όσο και αριθμητικά από αρκετούς ερευνητές. Ωστόσο, η πειραματική επιβεβαίωση της είναι περιορισμένη και η κυριότερη αιτία είναι η πρακτική δυσκολία επίτευξης μηδενικού κυματαριθμού όπου λαμβάνει χώρα η αστάθεια.

2.4 Βιβλιογραφικές αναφορές για τη ροή υγρού υμένα

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

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

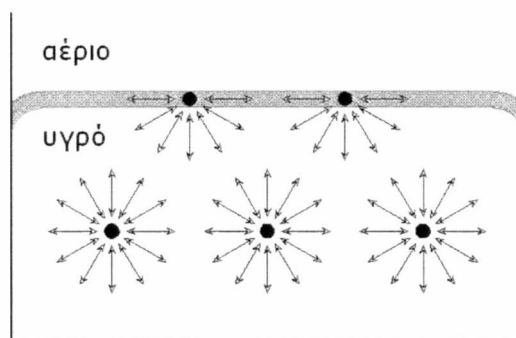
Οι Vlachogiannis et al. (2010) μελέτησαν πειραματικά την επίδραση του πλάτους του τοιχώματος για γωνίες κλίσης 5 έως 30 μοίρες. Έγιναν μετρήσεις σε δύο διαφορετικά πλάτη καναλιού των οποίων η τιμή ήταν ίση με το 1/3 και 2/3 του αρχικού πλάτους. Αποδείχθηκε ότι η μείωση του πλάτους δρα σταθεροποιητικά στη ροή καθώς όσο μικρότερο είναι το πλάτος του καναλιού τόσο μεγαλύτερος γίνεται ο αριθμός μετάβασης. Έγιναν πειράματα με συχνότητα διαταραχής από 0.167 έως 1.5 Hz και αποδείχθηκε, ότι για τόσο μικρές συχνότητες διαταραχής, δεν επηρεάζεται το όριο της ευστάθειας.

Ο Α. Σαμαντάς στη μεταπτυχιακή του εργασία, μελέτησε, εκτός από το παραπάνω των Vlachogiannis et al. (2010), και την ανάλυση ευστάθειας του υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Έγιναν μετρήσεις σε ημιτονοειδές και σε ορθογωνικό τοίχωμα διαφόρων χαρακτηριστικών διαμόρφωσης. Το πρώτο συμπέρασμα που εξήχθη ήταν η σταθεροποιητική δράση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος στη ροή υγρού υμένα. Το δεύτερο, ήταν η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού μετάβασης από το μέγεθος της διαμόρφωσης. Αποδείχθηκε ότι όσο πιο μεγάλη είναι η διαμόρφωση του τοιχώματος τόσο πιο σταθερή είναι η ροή. Τέλος αποδείχθηκε ότι και στα συγκεκριμένα τοιχώματα η συχνότητα της διαταραχής δεν επηρεάζει τον κρίσιμο αριθμό Reynolds.

2.5 Επιφανειακά Φαινόμενα – Ορισμός της επιφανειακής τάσης

Τα μόρια ενός υγρού ασκούν το ένα στο άλλο ισχυρές ελκτικές δυνάμεις συνοχής που αντιστέκονται σε προσπάθειες διαχωρισμού τους. Έτσι, κάθε ποσότητα ενός υγρού χαρακτηρίζεται από ένα ορισμένο ποσό δυναμικής ενέργειας. Η δυναμική ενέργεια των μορίων του εσωτερικού έχει μεγαλύτερη απόλυτη τιμή από την δυναμική ενέργεια των μορίων της επιφάνειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να μεταβεί ένα μόριο από το εσωτερικό του υγρού στην επιφάνεια πρέπει να καταναλώσει κάποια ενέργεια. Τα μόρια αλληλεπιδρούν μόνο με τους άμεσους γείτονές τους και άρα η δυναμική ενέργεια που σχετίζεται μ' ένα σύνολο μορίων είναι ανάλογη του αριθμού τους. Σαν αποτέλεσμα, τα μόρια της επιφάνειας έλκονται προς το εσωτερικό ενώ στα μόρια του εσωτερικού η συνισταμένη δύναμη είναι μηδενική. Επειδή η επιφάνεια ενός υγρού σε κατάσταση ισορροπίας είναι η ελάχιστη, για να την αυξήσουμε πρέπει να καταναλώσουμε έργο. Το ποσό αυτού του έργου ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται **επιφανειακή τάση**.

Επιφανειακή τάση λοιπόν χαρακτηρίζεται το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται στην επιφάνεια ενός υγρού λόγω της ασύμμετρης έλξης των επιφανειακών μορίων με συνέπεια την ελάττωση της επιφάνειας του υγρού. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5, σε ένα μόριο το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό του υγρού οι δυνάμεις αυτές αλληλοεξουδετερώνονται, ενώ σε ένα επιφανειακό μόριο ασκούνται μονόπλευρα προς το εσωτερικό του διαλύματος. Η συνισταμένη όλων αυτών των δυνάμεων είναι η δύναμη συνοχής η οποία τείνει να φέρει τα μόρια της επιφάνειας προς το εσωτερικό του υγρού.



Σχήμα 2.5. Δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ μορίων στο εσωτερικό ενός υγρού και στη διεπιφάνεια

Έτσι όλη η ελεύθερη επιφάνεια του υγρού βρίσκεται κάτω από την επίδραση δυνάμεων οι οποίες συνεπάγονται την ύπαρξη μιας ενέργειας, που ονομάζεται ελεύθερη επιφανειακή ενέργεια. Το σύστημα έτσι τείνει να αποκτήσει τη χαμηλότερη στάθμη ενέργειας και τα υγρά αυθόρμητα ελαττώνουν την ενέργεια της επιφάνειάς τους. Αποτέλεσμα αυτής ακριβώς της τάσης είναι το σφαιρικό σχήμα που παίρνουν οι σταγόνες. Μέτρο της επιφανειακής τάσης είναι ο συντελεστής επιφανειακής τάσης, ο οποίος παρέχει το έργο W που απαιτείται για την αύξηση της επιφάνειας S ενός υγρού κατά μία μονάδα.

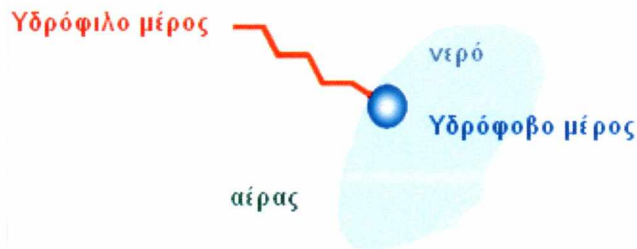
Με τον όρο διεπιφάνεια εννοούμε την περιοχή η οποία δημιουργείται ανάμεσα σε δύο διαφορετικές φάσεις που έρχονται σε επαφή και η έκτασή της δεν ξεπερνά τις διαστάσεις μιας μονομοριακής στοιβάδας

2.6 Επιφανειοδραστικές ουσίες (Surfactants)

Επιφανειοδραστική ονομάζεται γενικά μία ουσία που επενεργεί και μεταβάλλει την επιφανειακή τάση του μέσου στο οποίο διαλύεται, ή την διεπιφανειακή τάση μεταξύ του διαλύματος αυτής και μιας άλλης φάσης ρευστού.

Η δράση των επιφανειοδραστικών, αποδίδεται στην τάση αυτών να έχουν στην διεπιφάνεια διαφορετική συγκέντρωση από εκείνη που έχουν στο εσωτερικό των

φάσεων. Τα επιφανειοδραστικά, έχουν χαρακτηριστική μοριακή δομή που αποτελείται από δύο μέρη, το υδρόφιλο και το υδρόφοβο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση του επιφανειοδραστικού μορίου

Κατά την διάλυση μιας τέτοιας ουσίας, αφενός η παρουσία της υδρόφιλης ομάδας προκαλεί παραμόρφωση της δομής του διαλύτη αυξάνοντας την ελεύθερη ενέργεια του συστήματος, με αποτέλεσμα η επιφανειοδραστική ουσία να συγκεντρώνεται στην διεπιφάνεια του συστήματος. Αφετέρου, η υδρόφοβη ομάδα εμποδίζει την απομάκρυνση του επιφανειοδραστικού από τον διαλύτη σαν ξεχωριστή φάση. Η διπλή δομή του επιφανειοδραστικού προκαλεί όχι μόνο τη συγκέντρωσή του στην διεπιφάνεια αλλά και την ελάττωση της επιφανειακής τάσης του διαλύτη.

Η δομή των ομάδων, που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν σαν υδρόφιλα ή υδρόφοβα τμήματα του επιφανειοδραστικού μορίου ποικίλουν ανάλογα με τη φύση του διαλύτη και τις συνθήκες χρησιμοποίησής τους. Οργανικές ουσίες, όπως τα λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες, είναι διαλυτές τόσο στο νερό όσο και σε ελαιώδεις διαλύτες. Το υδρογοναθρακικό μέρος του μορίου ευνοεί τη διάλυση στην ελαιώδη φάση, ενώ η πολική ομάδα $-COOH$ ή $-OH$ ευνοεί τη διάλυση στο νερό. Όταν τα μόρια αυτά προσροφούνται στην διεπιφάνεια αέρα - υγρού, προσανατολίζουν την

υδρόφιλη ομάδα - κεφαλή στην υδατική φάση και την λιπόφιλη υδρογονανθρακική αλυσίδα στην αέρια φάση.

Το σχήμα και το μέγεθος του υδρόφιλου και του υδρόφοβου τμήματος ποικίλει και είναι αυτό που εξηγεί πολλές από τις ιδιότητες τους. Η προσρόφηση ενός επιφανειοδραστικού σε μια διεπιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή πολλών φυσικών ιδιοτήτων του υγρού. Όσα περισσότερα μόρια προσροφούνται στη διεπιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η αλλαγή των ιδιοτήτων αυτών.

Η ισχυρή τάση προσρόφησης τέτοιων οργανικών ενώσεων στην διεπιφάνεια με την μορφή μονομοριακών στρωμάτων ονομάζεται επιφανειακή ενεργότητα. Η επιφανειακή ενεργότητα είναι δυναμικό φαινόμενο μιας και η τελική κατάσταση της διεπιφάνειας είναι αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ της τάσης για προσρόφηση στη διεπιφάνεια και της τάσης για πλήρη ανάμιξη στο εσωτερικό του. Η τάση των επιφανειοδραστικών να κατευθύνουν στην διεπιφάνεια ευνοεί την διαστολή της (ώστε να διευθετηθούν περισσότερα μόρια επιφανειοδραστικού). Αυτή η τάση προς διαστολή θα πρέπει να εξισορροπηθεί με την τάση προς συστολή της διεπιφάνειας υπό την επίδραση της επιφανειακής τάσης. Η τάση αυτή της διαστολής της επιφάνειας ονομάζεται επιφανειακή πίεση και συμβολίζεται με το γράμμα (π). Λόγω της επιφανειακής πίεσης η αρχική επιφανειακή τάση (γ_0), της διεπιφάνειας θα μειωθεί σε: $\gamma = \gamma_0 - \pi$.

Τα επιφανειοδραστικά ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με τη χημική δομή των υδρόφιλων ομάδων τους. Οι υδρόφιλες ομάδες δύναται να είναι ιοντικές ή μη ιοντικές και η χημική τους δομή να μεταβάλλεται ευρέως. Οι κυριότερες κατηγορίες είναι οι ακόλουθες :

- **Ανιοντικά.** Είναι αμφίφιλα συστατικά όπου το υδρόφοβο τμήμα περιέχει ανιοντικές ομάδες με παρουσία μικρών θετικά φορτισμένων ιόντων όπως

το νάτριο, το κάλλιο ή τα αμμωνιακά ιόντα. Το επιφανειοδραστικό SDS (Sodium Dodecyl Sulfate) που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ανιοντικού επιφανειοδραστικού. Επιπλέον παραδείγματα αποτελούν οι σάπωνες (RCOONa^+), τα αλκυλοβενζολοσουλφονικά άλατα (SO_3^-), τα αλκυλοθειικά (OSO_3^-), και τα αλκυλοφωσφορικά άλατα (OPO_3^{2-}).

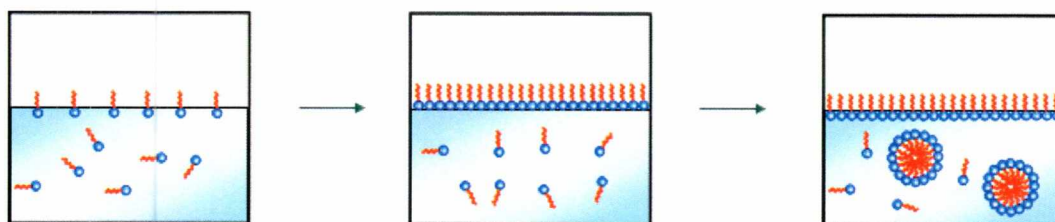
- **Κατιοντικά.** Είναι αμφίφιλα συστατικά στα οποία το υδρόφοβο τμήμα περιέχει κατιόντα με αντίθετα ιόντα χλωρίου, θείου ή με οξικό ανιόν. Παραδείγματα αποτελούν το τριαλκυλικά άλατα του αμμωνίου ($\text{R}_3\text{N}^+\text{Br}$).
- **Μη ιοντικά.** Είναι αμφίφιλα συστατικά, τα οποία δεν δίστανται στα υδατικά διαλύματα, δηλαδή δεν μεταφέρουν κάποιο διακριτό φορτίο όταν διαλύονται σε υδατικά μέσα. Η υδροφιλικότητα των μη ιοντικών τασιενεργών παρέχεται από τη δημιουργία δεσμού υδρογόνου με τα μόρια του νερού. Τα άτομα οξυγόνου και οι ομάδες υδροξυλίου σχηματίζουν άμεσα ισχυρούς δεσμούς υδρογόνου, ενώ οι εστέρες και οι αμιδικές ομάδες σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου λιγότερο άμεσα. Παραδείγματα μη ιοντικών τασιενεργών είναι: οι αιθοξυλιωμένες λιπαρές αλκοόλες ($\text{R}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{OH}$), οι αιθοξυλιωμένες αλκυλοφαινόλες ($\text{RC}_6\text{H}_4(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{OH}$). Τα μη ιοντικά τασιενεργά σε θερμοκρασία δωματίου ως επί το πλείστον είναι υγρά
- **Αμφοτερικά τασιενεργά.** Έχουν αμφοτερικές υδρόφιλες ομάδες. Παραδείγματα αποτελούν τα αμινοκαρβοξυλικά οξέα ($\text{R}_1\text{N}^+\text{R}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$), οι μεταΐνες και οι σουλφομεταΐνες.

2.7 Φυσικές ιδιότητες διαλυμάτων επιφανειοδραστικών

Η συμπεριφορά των διαλυμάτων των επιφανειοδραστικών οφείλεται στην ιδιαιτερότητα των μορίων τους εμφανίζοντας έτσι ασυνήθιστες φυσικές ιδιότητες. Σε αραιό υδατικό διάλυμα η επιφανειοδραστική ουσία συμπεριφέρεται όπως κάθε διαλυμένη ουσία. Από κάποια όμως συγκέντρωση και πάνω, παρατηρούνται απότομες αλλαγές σε διάφορες φυσικές ιδιότητες, όπως η οσμωτική πίεση, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η επιφανειακή τάση και η θολότητα.

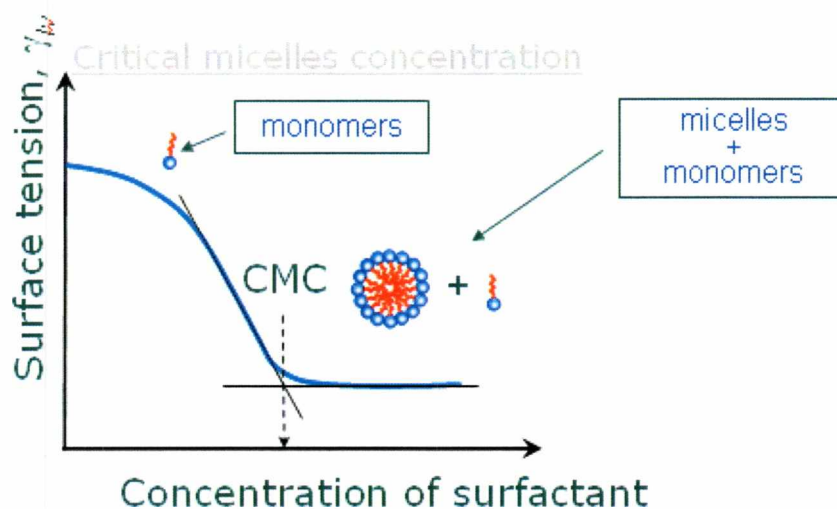
Η ανώμαλη αυτή συμπεριφορά θα μπορούσε να εξηγηθεί με την δημιουργία οργανωμένων συσσωμάτων, μικκυλίων, στα οποία οι λιπόφιλες υδρογονανθρακικές αλυσίδες προσανατολίζονται προς το εσωτερικό του μικκυλίου, αφήνοντας τις υδρόφιλες ομάδες σε επαφή με το υδατικό μέσο.

Η συγκέντρωση, πάνω από την οποία γίνεται σημαντικός σε έκταση σχηματισμός των μικκυλίων, ονομάζεται κρίσιμη συγκέντρωση σχηματισμού μικκυλίων ή κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλιοποίησης, (Critical Micelle Concentration, CMC), σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση του σχηματισμού μικκυλίων με την αύξηση της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού

Η προσρόφηση του επιφανειοδραστικού οδηγεί σε αλλαγές φυσικών ιδιοτήτων του διαλύματος, όμως η πιο σημαντική είναι η αλλαγή στην επιφανειακή τάση. Η επιφανειακή τάση μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης, μέχρι μια τιμή συγκέντρωσης η οποία αντιστοιχεί στην cmc (σχήμα 2.8). Από τη συγκέντρωση αυτή και μετά η επιφανειακή τάση θεωρείται ότι παραμένει σταθερή.



Σχήμα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση της μείωσης της επιφανειακής τάσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού

2.8 Επίδραση επιφανειοδραστικών στη ροή υμένων

Με την επιβολή της εξωτερικής διαταραχής έχουμε δημιουργία κυμάτων στην επιφάνεια του υμένα. Καθώς το επιφανειοδραστικό μέσο συγκεντρώνεται σε μια διεπιφάνεια, η επιφανειακή τάση μειώνεται. Εάν η επιφάνεια ενός σταθεροποιημένου υμένα με επιφανειοδραστικό υποβληθεί σε μια ξαφνική επέκταση (όπως με την επιβολή μιας διατραχής), η στιγμιαία επεκταθείσα ποσότητα του υμένα θα έχει έναν χαμηλότερο βαθμό συγκέντρωσης επιφανειοδραστικού από τις μη επεκταμένες ποσότητες επειδή το εμβαδό της επιφάνειας θα έχει αυξηθεί. Αυτό προκαλεί μια παροδική αύξηση της επιφανειακής τάσης που επιφέρει την άμεση συστολή του τμήματος της επιφάνειας.

Η επιφάνεια του υμένα συνδέεται μέσω ιξωδών δυνάμεων, με τα κατώτερα υγρά στρώματα. Κατά συνέπεια, η συστολή της επιφάνειας προκαλεί λόγω του τριχοειδούς φαινομένου (Capillary effect) τη ροή υγρού στη περιοχή κοντά στην επιφάνεια, από τη χαμηλής τάσης περιοχή στην περιοχή υψηλής τάσης. Η μεταφορά της μάζας του

υγρού λόγω των διαβαθμίσεων της επιφανειακής τάσης καλείται φαινόμενο Marangoni. Το φαινόμενο Gibbs - Marangoni εμμένει μόνο έως ότου αποκατασταθεί η ισορροπία στην προσρόφιση του επιφανειοδραστικού, μια διαδικασία που μπορεί να πραγματοποιηθεί εντός δευτερολέπτων ή να διαρκέσει για μία περίοδο ωρών. Στους λεπτούς υμένες μπορεί να μην υπάρξει αρκετό επιφανειοδραστικό στην εκτεταμένη περιοχή επιφάνειας, εν αντιθέσει με παχύτερους υμένες, για να επανακτηθεί η ισορροπία γρήγορα, απαιτώντας τη διάχυση και από άλλα μέρη του υμένα. Οι διαδικασίες αποκατάστασης είναι επομένως η μετακίνηση των μορίων του επιφανειοδραστικού κατά μήκος της διεπιφάνειας από μια περιοχή χαμηλής επιφανειακής τάσης προς περιοχές με υψηλότερη επιφανειακή τάση και η μετακίνηση των μορίων του από το σώμα του λεπτού υμένα προς την επιφάνειά του. Κατά συνέπεια, το φαινόμενο Gibbs - Marangoni παρέχει μια δύναμη που αντιδρά στη ροή υμένων στους αφρούς. [Laurier L. Schramm, 2000].

Η επιβολή της εξωτερικής διαταραχής επιφέρει τη δημιουργία κυμάτων στην επιφάνεια του υμένα, άρα αύξηση του εμβαδού της επιφάνειάς του. Όταν η συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού στο διάλυμα είναι κάτω από τη cmc, τότε θα είναι δύσκολη η αποκατάσταση της ισορροπίας του υμένα, οπότε και μεγιστοποιούνται τα αποτελέσματα των εξωτερικών διαταραχών, κάτι που αναμένεται να ευνοεί την αστάθεια του υμένα. Αναμένεται δηλαδή, να παρατηρηθεί μετάβαση από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή σε μικρότερους αριθμούς Reynolds.

Στην παρούσα εργασία, προσπαθούμε να εντοπίσουμε πότε γίνεται αυτή η μετάβαση και για ποιούς αριθμούς Reynolds. Αυτά σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού SDS.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

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

3.1 Πειραματική διάταξη

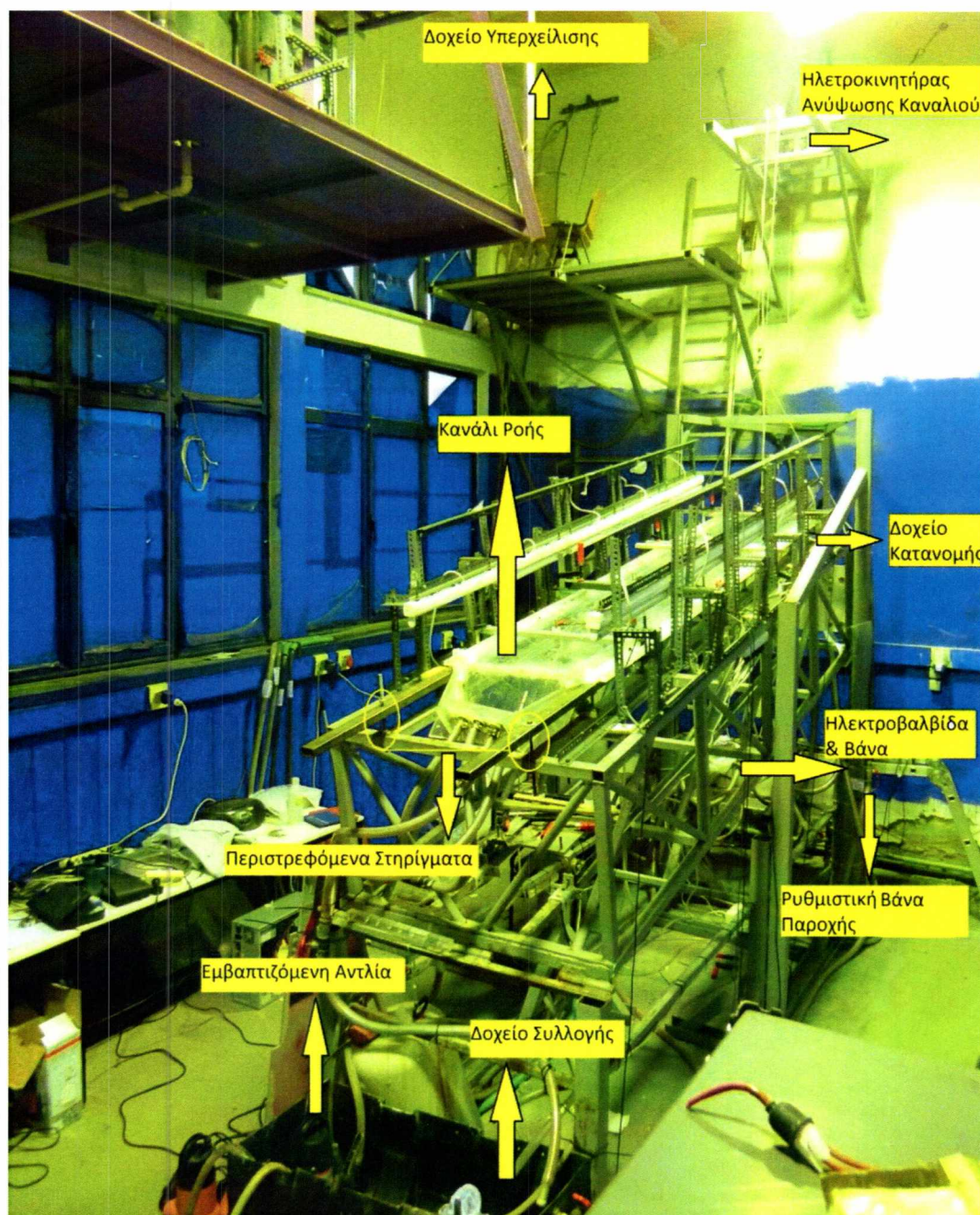
3.1.1 Κανάλι ροής

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

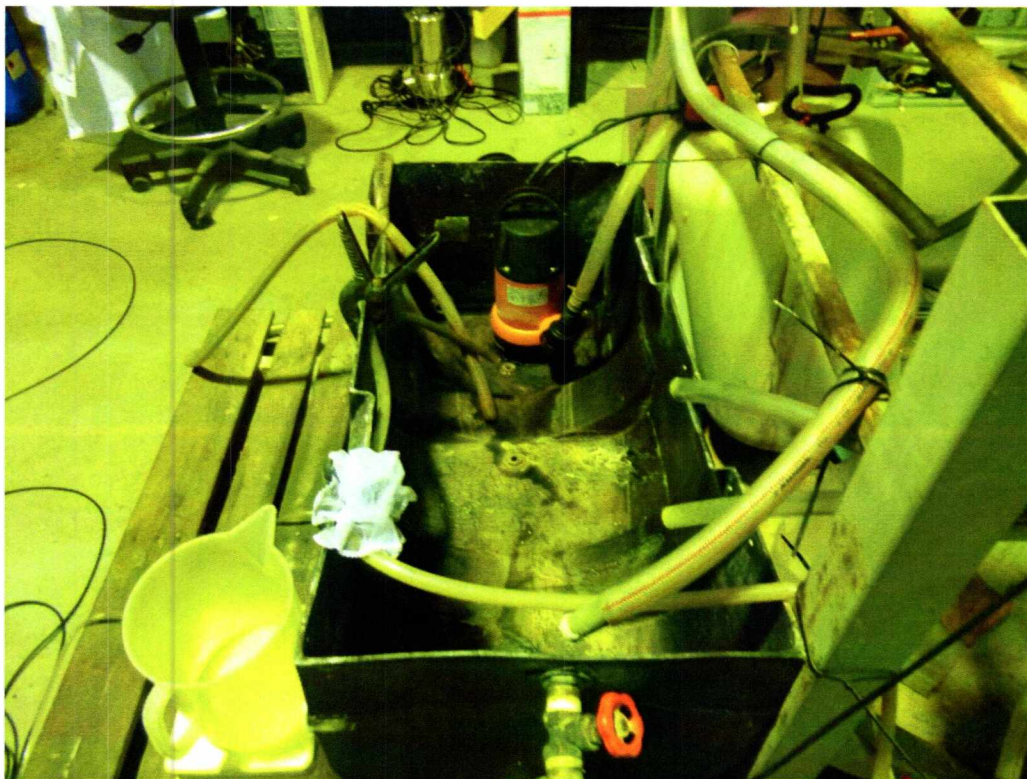
Το βασικό μέρος της συσκευής είναι το «Κανάλι Ροής», πλάτους 45 cm και μήκους 300 cm, πάνω στο οποίο ρέει το υγρό. Το κομμάτι αυτό της συσκευής, όπως και τα περισσότερα μέρη της διάταξης, είναι κατασκευασμένα από Plexiglas ώστε να είναι ορατή η ροή από όλες τις πλευρές και να επιτρέπεται ο οπτικός έλεγχος. Πάνω στο κανάλι ροής γίνονται οι μετρήσεις. Η κλίση του καναλιού ρυθμίζεται με την βοήθεια του «Ηλεκτροκινητήρα Ανύψωσης Καναλιού». Η γωνία που σχηματίζει το κανάλι με το οριζόντιο επίπεδο μπορεί να μεταβληθεί από 0° έως 35° περίπου. Στα

πειράματα της παρούσας εργασίας, η κλίση κυμάνθηκε στις 5° και 10°. Η λειτουργία της συσκευής περιγράφεται συνοπτικά ως εξής:

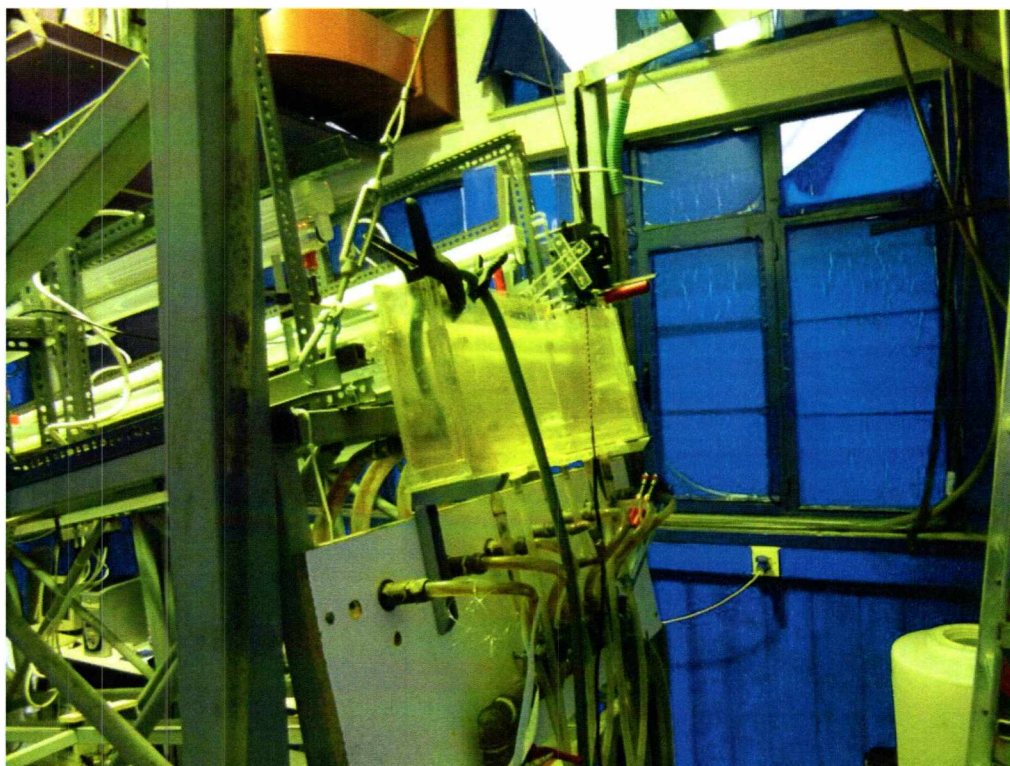
Αρχικά κατάλληλο ρευστό τοποθετείται στο «Δοχείο Συλλογής». Το ρευστό αυτό, με τη βοήθεια της «Εμβαπτιζόμενης Αντλίας» οδηγείται στο «Δοχείο Υπερχείλισης». Από εκεί εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς και λόγω του βάρους του, το ρευστό ρέει μέσω ενός συστήματος σωλήνων πολυαιθυλενίου προς το «Δοχείο Κατανομής», με το οποίο επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού στο «Κανάλι Ροής» απ' όπου λαμβάνονται και οι μετρήσεις. Στο σημείο αυτό αξίζει να έχουμε μια καλύτερη εικόνα για το «Δοχείο Συλλογής» με την «Εμβαπτιζόμενη Αντλία» στο Σχήμα 3.2 και για το «Δοχείο Κατανομής» στο Σχήμα 3.3. Στη συνέχεια, το ρευστό επιστρέφει στο «Δοχείο Συλλογής» για να ακολουθήσει την ίδια διαδρομή. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο είδος αντλίας είναι ότι δεν αυξάνει τη θερμοκρασία του ρευστού, γεγονός που πιθανόν να επηρέαζε τις μετρήσεις. Η παροχή του ρευστού ελέγχεται από την «Ρυθμιστική Βάνα Παροχής», η οποία παρεμβάλλεται ανάμεσα στο δοχείο υπερχείλισης και το δοχείο κατανομής. Πιο συγκεκριμένα, ρυθμίζεται η βάνα σε μια ορισμένη θέση και η παροχή προσδιορίζεται μετρώντας το βάρος του ρευστού που εξέρχεται από το κανάλι. Με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος επιτυγχάνεται η επιθυμητή παροχή. Επειδή η όλη κίνηση οφείλεται στην υψομετρική διαφορά του υγρού, σταθερή στάθμη στο δοχείο υπερχείλισης εξασφαλίζει και σταθερή παροχή.



Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη



Σχήμα 3.2 Δοχείο συλλογής και εμβαπτιζόμενη αντλία

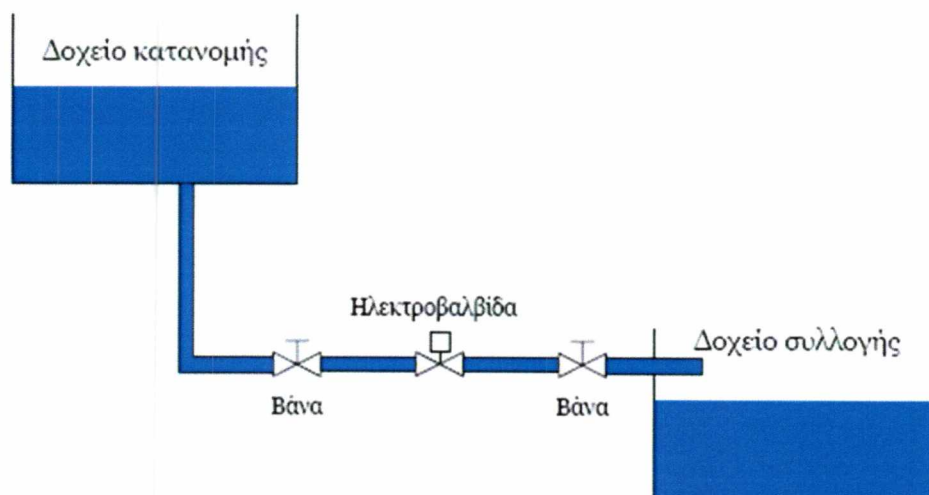


Σχήμα 3.3 Δοχείο κατανομής

3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Το διαθέσιμο μήκος του καναλιού περιορίζει εν μέρει τη μελέτη της εξέλιξης των φυσικά δημιουργούμενων διαταραχών. Η επιβολή εξωτερικής διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα by-pass με ηλεκτροβαλβίδα (4). Η διαταραχή δημιουργείται με τη βοήθεια μιας χρονιζόμενης ηλεκτροβαλβίδας (ON/OFF). Για το σκοπό αυτό ενώθηκε το «Δοχείο Συλλογής», μέσω ενός ελαστικού σωλήνα, με το «Δοχείο Κατανομής» (Σχήμα 3.4). Μέσω της παράκαμψης αυτής ένα μέρος από το υγρό που βρίσκεται στο «Δοχείο Κατανομής» οδηγείται στο «Δοχείο Συλλογής» χωρίς να περάσει από το «Κανάλι Ροής». Στην παράκαμψη αυτή παρεμβάλλεται η «Ηλεκτροβαλβίδα & Βάνα». Ένας χρονοδιακόπτης ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο της «Ηλεκτροβαλβίδας». Όταν η «Ηλεκτροβαλβίδα» είναι ανοιχτή μια ποσότητα υγρού περνάει άμεσα προς το «Δοχείο Συλλογής». Όταν όμως είναι κλειστή, η ποσότητα αυτή του υγρού οδηγείται μέσω του «Καναλιού Ροής» στο «Δοχείο Συλλογής». Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εξωτερικά επιβαλλόμενη αυξομείωση του πάχους του υμένα με το χρόνο (κύμα στην αρχή του καναλιού). Δηλαδή, το περιοδικό φράξιμο της παράκαμψης αυτής προκαλεί διαταραχή στην είσοδο του καναλιού με μορφή υδραυλικού άλματος. Το υδραυλικό αυτό άλμα διαχωρίζεται κατάντη της ροής εξαιτίας των μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων και δημιουργεί μια σειρά μοναχικών κυμάτων. Το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής μπορεί να ρυθμιστεί από τον λόγο των χρονικών διαστημάτων που η δίοδος μένει ανοιχτή και κλειστή και από την ποσότητα του ρευστού που επιτρέπεται να περνάει διαμέσου του bypass. Η ποσότητα

αυτή ρυθμίζεται από τις βάνες («Βάνα») που βρίσκονται εκατέρωθεν της ηλεκτροβαλβίδας. Στο πείραμά μας, η «Βάνα» ήταν τελείως ανοιχτή καθ' όλη την πειραματική διαδικασία. Επίσης, ρυθμίζοντας τον συνολικό χρόνο του φαινομένου, μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα της διαταραχής. Το σύστημα διαταραχής που περιγράφηκε μπορεί να παράγει συχνότητες διαταραχής από 0.125 Hz έως και 1 Hz.

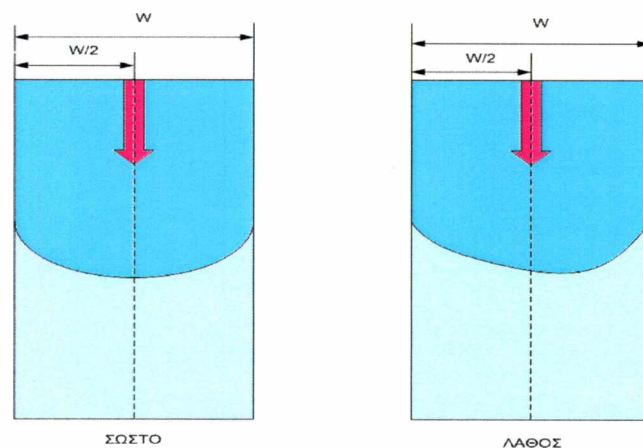


Σχήμα 3.4 Σύστημα διαταραχής

3.1.3 Ευθυγράμμιση καναλιού ροής

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο κανάλι είναι η ευθυγράμμιση του καναλιού. Για το σκοπό αυτό έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος του «Καναλιού Ροής» κατάλληλα «Περιστρεφόμενα στηρίγματα» τα οποία δίνουν τη δυνατότητα μετακίνησης ολόκληρου του κεκλιμένου επιπέδου προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Προκειμένου να ρυθμιστεί και να ελεγχθεί η ευθυγράμμιση του καναλιού ακολουθείται η εξής διαδικασία: Ρυθμίζεται η παροχή του ρευστού ώστε ο υμένας στο κανάλι να είναι σταθερός χωρίς την ύπαρξη εξωτερικής διαταραχής. Η περίοδος του χρονοδιακόπτη και το μέγεθος της παραγόμενης

διαταραχής καθορίζονται σε μέτριο μέγεθος. Χαρακτηριστικές τιμές είναι περίπου 5 s ανοικτή και 0.5 s κλειστή η ηλεκτροβαλβίδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του μεγέθους της διαταραχής στο σημείο αυτό είναι ποιοτική. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται πάνω στο τοίχωμα ένα μέτωπο της υγρής φάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Σωστή ευθυγράμμιση συνεπάγεται ότι η κορυφή του μετώπου θα βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος. Σε αντίθετη περίπτωση ρυθμίζονται ανάλογα τα «Περιστρεφόμενα Στηρίγματα». Δηλαδή στην περίπτωση, όπως αυτή του Σχήματος 3.5, όπου το μέτωπο είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά, δηλώνει ότι περισσότερη μάζα ρευστού βρίσκεται στην πλευρά αυτή οπότε το σημείο αυτό είναι πιο ψηλά από το αντίστοιχο σημείο της αριστερής πλευράς και πρέπει είτε να ανυψωθεί το σημείο αυτό ή να μειωθεί το ύψος από την αριστερή πλευρά. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρι η κορυφή του κύματος να βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος σε όλο το μήκος της πλάκας.

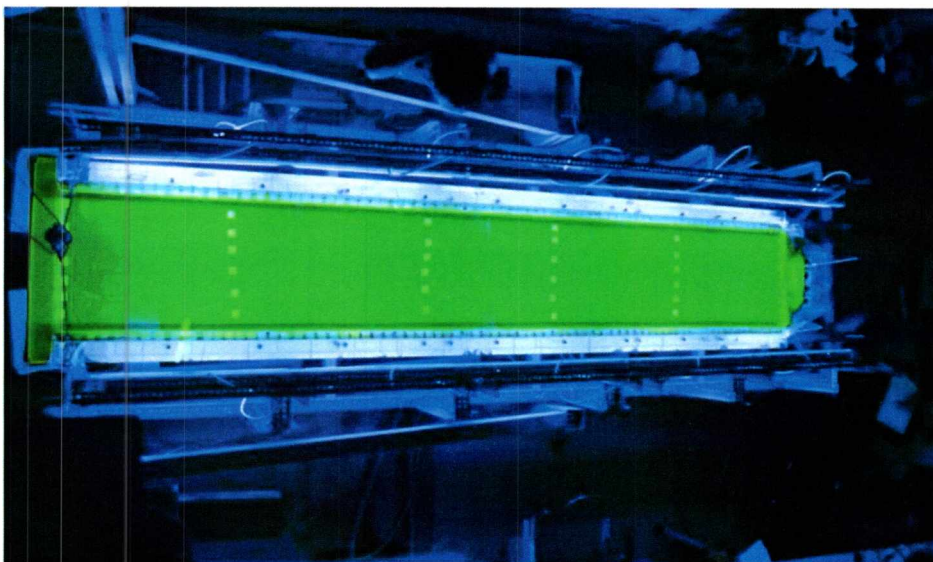


Σχήμα 3.5 Ευθυγραμμισμένο και μη ευθυγραμμισμένο κανάλι

Προκειμένου να είναι πιο εύκολα αντιληπτό το μέτωπο του κύματος το ρευστό χρωματίζεται. Πιο συγκεκριμένα, προστίθεται μικρή ποσότητα κατάλληλης χρωστικής ουσίας (ουρανίνη-sodium salt of fluorescein), η οποία έχει την ιδιότητα

να φθορίζει κάτω από την επίδραση υπεριώδους φωτός εκπέμποντας ορατό πράσινο-κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 525-580 nm (Σχήμα 3.6). Η ουσία αυτή έχει βρεθεί ότι δεν επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών που χρησιμοποιούνται στην εργασία.

Λόγω της ευαισθησίας του συγκεκριμένου συστήματος στήριξης του καναλιού και της έντονης επίδρασης της κακής ευθυγράμμισης στις πειραματικές μετρήσεις η ευθυγράμμισή του ελεγχόταν στην αρχή κάθε μέρας, μετά την αλλαγή κλίσης του καναλιού.



Σχήμα 3.6 Χρωματισμένο ρευστό για ευθυγράμμιση

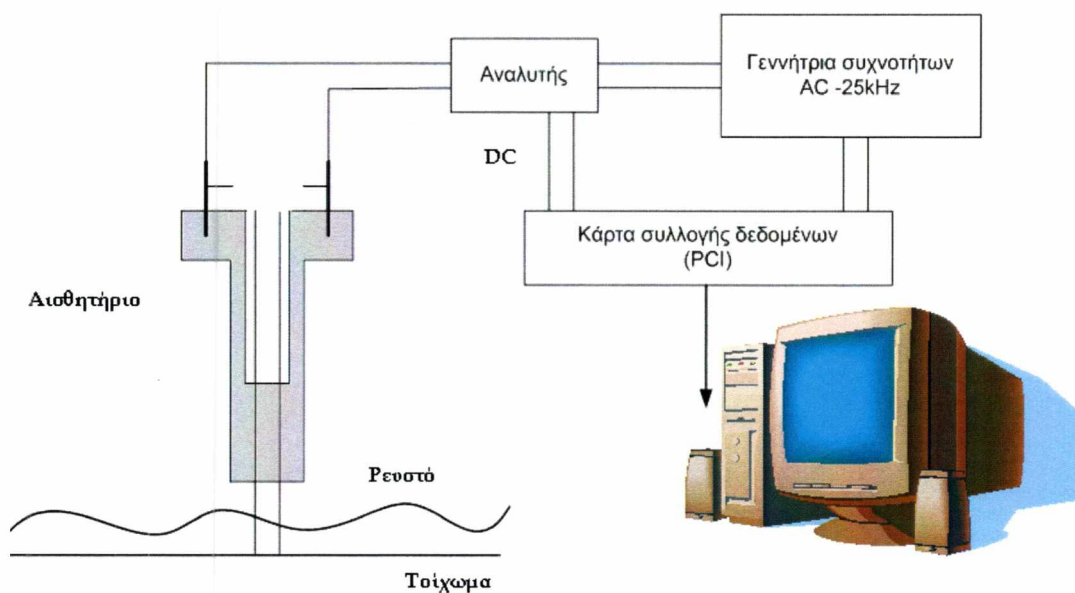
3.2 Ιδιότητες ρευστών

Ανάλογα με την επιθυμητή επιφανειακή τάση, επιλέγεται η κατάλληλη περιεκτικότητα SDS. Επιλέχθηκαν οι εξής περιεκτικότητες για γωνία κλίσης 5° : 3%, 4%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% και 50% της κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλιοποίησης. Ενώ για τη γωνία κλίσης των 10° , οι περιεκτικότητες που δουλέψαμε ήταν: 3%, 4%, 5%, 10%, 20%, 35% και 50% της κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλιοποίησης. Τα υδατικά διαλύματα SDS παρουσιάζουν κατά κύριο λόγο, επιφανειακή ελαστικότητα και επιφανειακό ιξώδες. Ως εκ τούτου δεν μπορούμε να μπορούσαμε να θεωρήσουμε πως το σύστημά μας συμπεριφέρεται σαν καθαρό υγρό. Παρόλα αυτά όμως, οι τοπικές μεταβολές της επιφανειακής τάσης που θα μπορούσαν να αποδώσουν ιξωδοελαστικές ιδιότητες στην επιφάνεια είναι αμελητέες για το εύρος συχνοτήτων 0.125 – 1 Hz [Lucassen, 1982], που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μελέτη.

3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική

Η αγωγιμομετρική τεχνική [Andritsos, 1986] χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας και των διακυμάνσεων της. Η τεχνική στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δύο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσα τους. Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται το μετρητικό που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της τεχνικής. Το μετρητικό τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή και στη συνέχεια με τη βοήθεια κατάλληλης κάρτας συλλογής

δεδομένων (Advantech PCI-1710HG, 16-bit) και προγράμματος που δημιουργήθηκε στο Εργαστήριο σε LabView αποθηκεύεται το εξερχόμενο από το μετρητικό σήμα (τάση DC ως προς χρόνο). Το αισθητήριο είναι κατασκευασμένο από Ertalon, ένα υλικό που είναι εύκολα επεξεργάσιμο και παρουσιάζει ικανοποιητική θερμική αντοχή, ενώ το σύρμα ήταν από χρωμονικέλιο διαμέτρου 0.4-0.5 mm. Για την τοποθέτηση των μετρητικών χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες γέφυρες, οι οποίες τοποθετήθηκαν πάνω από το τοίχωμα σε 5 διαφορετικές θέσεις. Για την ταυτόχρονη λήψη και από τις πέντε θέσεις χρησιμοποιήθηκαν τρεις αναλυτές (κάθε αναλυτής έχει δύο κανάλια εισόδου). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, βρέθηκε από πειράματα ότι η μέθοδος αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά για τις περιπτώσεις όπου η αγωγιμότητα του ρευστού κυμαινόταν μεταξύ 300-1000 μS .



Σχήμα 3.7 Η αγωγιμομετρική τεχνική

3.3.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής

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

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ήταν η εξής: Βάσει της γωνίας κλίσης του τοιχώματος υπολογιζόταν ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για επίπεδο τοίχωμα από την εξίσωση : $Re = Re_{crit} = \frac{5}{6} \cot \phi$ για διάφορες παροχές του ρευστού (Q_0 , kg/s), καταγραφόταν το σήμα (Volt) για περίπου 30 s με ρυθμό δειγματοληψίας 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Η επιλογή των παροχών καθοριζόταν από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Γενικά γινόταν προσπάθεια, οι παροχές που θα γινόταν η βαθμονόμηση να ήταν όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Από την παροχή υπολογιζόταν ο αριθμός Reynolds και το πάχος υμένα Nusselt από τις εξισώσεις :

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

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

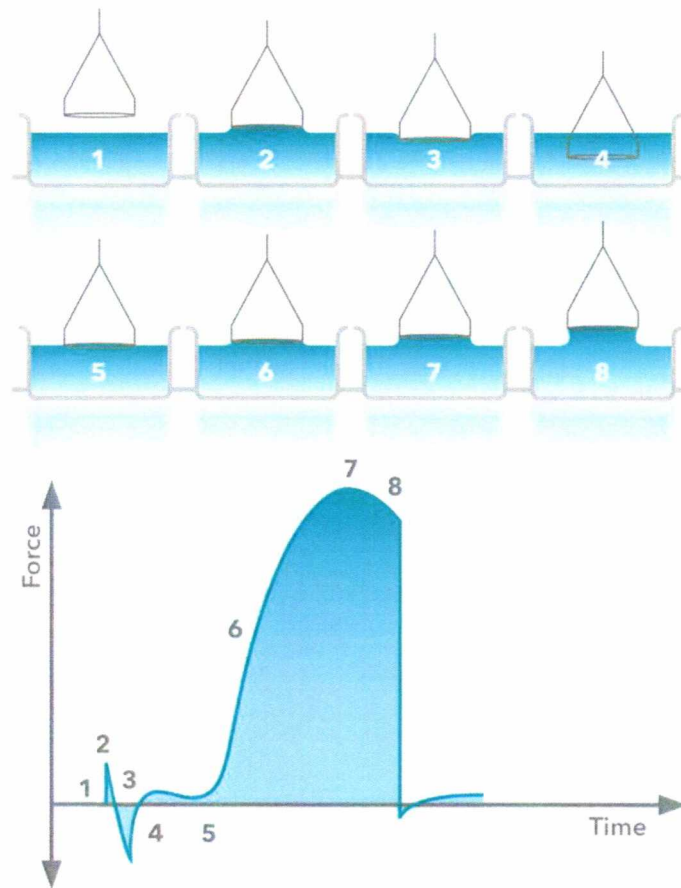
όπου w το πλάτος του καναλιού και h_N το πάχος του υμένα σε μm . Από τις τιμές τάσης και το πάχος του υμένα με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι γραμμικές σχέσεις που δίνουν την εξάρτηση του πάχους από την τάση και είναι της μορφής :

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

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

3.3.2 Μέτρηση επιφανειακής τάσης

Για την μέτρηση της επιφανειακής τάσης του διαλύματός μας, χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο Du Noüy ή μέθοδο του ζυγού. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την αλληλεπίδραση ενός δαχτυλιδιού από λευκόχρυσο με την εξεταζόμενη επιφάνεια. Το δαχτυλίδι καταδύεται κάτω από την επιφάνεια διεπαφής και στη συνέχεια κινείται προς τα πάνω. Καθώς το δαχτυλίδι κινείται ανοδικά δημιουργεί ένα εξόγκωμα στο υγρό. Τελικά αυτό το εξόγκωμα αποσχίζεται από το δαχτυλίδι και επιστρέφει στην αρχική θέση του. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η μέτρηση της μέγιστης δύναμης που χρειάζεται για να αποσχισθεί το δαχτυλίδι από το εξόγκωμα. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 3.8):

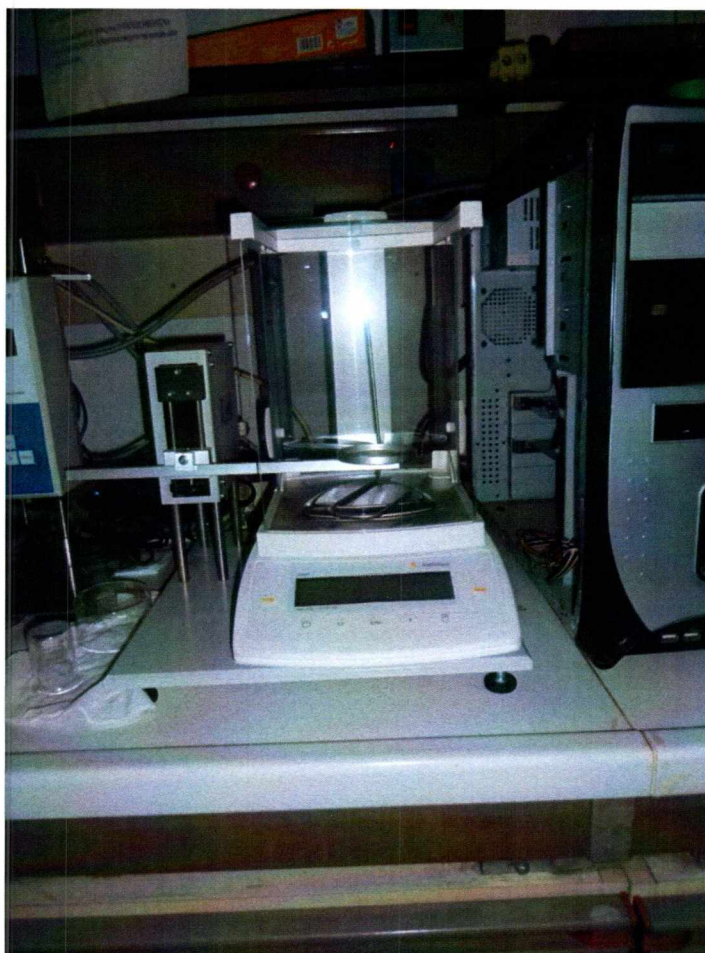


Σχήμα 3.8 Διαδικασία μέτρησης επιφανειακής τάσης

1. Το δαχτυλίδι είναι επάνω από την επιφάνεια και η δύναμη μηδενίζεται.
2. Το δαχτυλίδι ακουμπά την επιφάνεια και υπάρχει μια μικρή θετική δύναμη λόγω της «συγκολλητικής» δύναμης μεταξύ του δαχτυλιδιού και της επιφάνειας.
3. Το δαχτυλίδι πρέπει να προωθηθεί μέσω της επιφάνειας, λόγω της επιφανειακής τάσης η οποία προκαλεί μια μικρή αρνητική δύναμη.
4. Το δαχτυλίδι διαπερνά την επιφάνεια και μια μικρή θετική δύναμη μετριέται από τα σύρματα που στηρίζουν το δαχτυλίδι.

5. Όταν το δαχτυλίδι ανυψώνεται μέσω της επιφάνειας η μετρούμενη δύναμη αρχίζει να αυξάνεται
6. και συνεχίζει να αυξάνεται έως ότου
7. επιτευχθεί η μέγιστη δύναμη.
8. Μετά από τη μέγιστη δύναμη υπάρχει μια μικρή μείωση μέχρι να αποκολληθεί το εξόγκωμα από το δαχτυλίδι.

Ακολουθεί στο Σχήμα 3.9 μία εικόνα του εργαστηριακού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της επιφανειακής τάσης.



Σχήμα 3.9 Μετρητής επιφανειακής τάσης

3.4 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων

Αρχικά γεμίζουμε το δοχείο συλλογής με 70 λίτρα νερό. Η ποσότητα αυτή είναι οριοθετημένη από σημεία μέσα στο δοχείο. Ακόμα η ποσότητα αυτή είναι ικανή να διατηρεί, αφενός το δοχείο γεμάτο ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στην εμβαπτιζόμενη αντλία, αφετέρου να έχουμε συνεχή κυκλοφορία του νερού στο σύστημα. Στη συνέχεια τίθεται η εμβαπτιζόμενη αντλία σε λειτουργία και αφήνεται το σύστημα να λειτουργήσει έως ότου νερό τρέξει στο κανάλι και βρεθεί πάλι στο δοχείο συλλογής. Πλέον, ήρθε η ώρα να προσθέσουμε την κατάλληλη ποσότητα SDS έτσι ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή περιεκτικότητα. Μόλις γίνει αυτό, αφήνουμε το διάλυμα να αναδευτεί από την εξαναγκασμένη κυκλοφορία στο οποίο το έχουμε υποβάλει, για περίπου 2 (για τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις) έως 4 ώρες (για τις πιο υψηλές). Μετά το πέρας των ωρών αυτών συλλέγουμε δείγμα από το διάλυμά μας και με τον κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό, μετρούμε την επιφανειακή του τάση. Μέσω του προσδιορισμού αυτού του μεγέθους, μπορούμε να κρίνουμε αν η ανάδευση ήταν επιτυχής. Ακολουθεί το σημαντικότερο βήμα όλης της πειραματικής διαδικασίας, η ευθυγράμμιση του καναλιού. Σημαντική βοήθεια στην ευθυγράμμιση του καναλιού μας δίνει η χρωστική ουσία που έχει προστεθεί στο νερό. Ο τρόπος ευθυγράμμισης όπως και η τεχνική μέτρησης της επιφανειακής τάσης έχουν περιγραφεί προηγουμένως. Αφού ευθυγραμμιστεί το κανάλι, ακολουθούν τα πειράματα της βαθμονόμησης. Στα πειράματα αυτά, αρχικά η παροχή ρυθμίζεται σε σχετικά μικρές τιμές έτσι ώστε να έχουμε αριθμό Reynolds τέτοιον ώστε να είμαστε σίγουροι ότι δεν έχουμε κύματα στη ροή. Κάτι τέτοιο επαληθεύεται και από το σήμα που απεικονίζεται στο πρόγραμμα ελέγχου LabView. Στη συνέχεια ακολουθούμε τη διαδικασία όπως περιγράφηκε πιο πάνω. Αυτή η διαδικασία γίνεται 5 – 7 φορές, με

μικρή μείωση της παροχής κάθε φορά. Με τον τρόπο αυτό μέσω ενός απλού προγράμματος στο EXCEL καταφέρνουμε να προσδιορίσουμε τα A και B της εξίσωσης 3.3.3-3, άρα μπορούμε πλέον κάθε φορά να μεταφράσουμε την τάση από τα μετρητικά στο κανάλι, σε πάχος υμένα. Αφού ολοκληρωθούν τα πειράματα της βαθμονόμησης, αρχίζει η πειραματική διαδικασία με την ρύθμιση της ηλεκτροβαλβίδας. Συγκεκριμένα, για κάθε γωνία κλίσης καναλιού και για κάθε περιεκτικότητα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συχνότητες:

- $f = 0.125 \text{ Hz} - T = 8 \text{ s}$
- $f = 0.25 \text{ Hz} - T = 4 \text{ s}$
- $f = 0.5 \text{ Hz} - T = 2 \text{ s}$
- $f = 0.75 \text{ Hz} - T = 1.3 \text{ s}$
- $f = 1 \text{ Hz} - T = 1 \text{ s}$

Αυτό σημαίνει ότι, για παράδειγμα στη συχνότητα $f = 0.75 \text{ Hz}$, εφοδιάζουμε (ανοίγει η ηλεκτροβαλβίδα) για χρονικό διάστημα ίσο με $T/2 = 0.65 \text{ s}$, με επιπλέον όγκο νερού το δοχείο κατανομής έτσι ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή κυμάτωση στον υμένα. Τον υπόλοιπο χρόνο, δηλαδή $(1 - T/2) \text{ s}$, το δοχείο κατανομής δεν εφοδιάζεται με επιπλέον όγκο νερού, η ηλεκτροβαλβίδα είναι κλειστή και η ποσότητα νερού που προλαβαίνει να συσσωρευτεί επιστρέφει στο δοχείο συλλογής. Η ίδια λογική ισχύει και στις υπόλοιπες συχνότητες. Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι περίπου 60 s, ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Η επιλογή του χρόνου έγινε ώστε να αποθηκεύονται αρκετές περίοδοι και έτσι να ελέγχεται η επαναληπτικότητα των φαινομένων και να απορρίπτονται προβληματικές μετρήσεις. Προβληματικές μετρήσεις μπορεί να έχουμε λόγω επίδρασης εξωτερικού θορύβου ή λόγω ύπαρξης κάποιας ακαθαρσίας ή φυσαλίδας στο πεδίο ροής.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής λεπτού υμένα νερού με την παρουσία του διαλυτού επιφανειοδραστικού Sodium Dodecyl Sulfate - SDS.

Στόχος των πειραμάτων είναι να βρεθεί πως επιδρά η γωνία κλίσης και η μείωση της επιφανειακής τάσης, λόγω προσθήκης SDS, στην ροή του υγρού υμένα νερού. Πιο συγκεκριμένα, μας απασχολεί η μετάπτωση της ροής από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή.

Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση των πρωτογενών δεδομένων του πειράματος και στη συνέχεια παρουσιάζονται πίνακες με τα πειράματα που έγιναν.

4.1 Σειρές πειραμάτων

Τα πειράματα έγιναν πάνω στο «Κανάλι Ροής» για γωνίες κλίσης 5° και 10° . Σε κάθε γωνία κλίσης μετρήθηκαν τουλάχιστον 15 διαφορετικές τιμές παροχών, δηλαδή 15 τουλάχιστον τιμές του αριθμού Reynolds. Από κάποιο αριθμό Reynolds και κάτω παρατηρείται η μετάπτωση στην ευσταθή περιοχή. Αυτός ο αριθμός Reynolds ονομάζεται κρίσιμος αριθμός Reynolds, Re_{cr} , και είναι αυτός που μετρήθηκε από τα πειράματα. Ο θεωρητικός αριθμός Reynolds, Re_{th} , είναι αυτός όπως έχει περιγραφεί από τη σχέση $Re = \frac{5}{6} \cot \phi$. Διαιρώντας τον Re_{cr} με τον Re_{th} προκύπτει ο κανονικοποιημένος αριθμός Reynolds Re^* , με τον οποίο έχουμε μια σαφέστερη εικόνα για τον κρίσιμο αριθμό Reynolds ανεξαρτήτως της γωνίας κλίσης του καναλιού ροής.

Επίδραση γωνίας κλίσης στη ροή υγρού υμένα 2013 με διαλυτό επιφανειοδραστικό

Ακολουθούν πίνακες και διαγράμματα με τα πειράματα που έγιναν ταξινομημένοι βάσει: i) της γωνίας κλίσης, ii) της συχνότητας της διαταραχής και iii) συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού. Όπου δεν υπάρχει συμπληρωμένο δεδομένο στον πίνακα, σημαίνει ότι το πείραμα δεν έγινε.

➤ Γωνία κλίσης καναλιού: 5 μοίρες

Συχνότητα Διαταραχής f (Hz)	Συγκέντρωση επιφανειοδραστικού c_{ps}	Ποκνότητα Διαλύματος ρ (kg/m ³)	Κινηματικό ιξώδες Διαλύματος ν (m ² /s)	Επιφανειακή τάση σ (mN/m)	Re_{cr}	Re^*
0,125	0,04	996,8658	8,74E-07	53	132	13,851
0,125	0,05			51,4		
0,125	0,1			43,5		
0,125	0,2			36,2		
0,125	0,3	997,13	8,94E-07	33,8	103	10,80797
0,125	0,4	996,8658	8,74E-07	31,3	90,5	9,496327
0,125	0,5	997,13	8,937E-07	28,5	85	8,919203

Σχήμα 4.1 Πειράματα στις 5° και f=0.125 Hz

f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
0,25	0,04	996,8658	8,74E-07	53	131	13,74607
0,25	0,05			51,4		
0,25	0,1			43,5		
0,25	0,2			36,2		
0,25	0,3	996,8658	8,74E-07	33,8	102,5	10,75551
0,25	0,4	996,8658	8,74E-07	31,3	91	9,458793
0,25	0,5	997,13	8,94E-07	28,5	85,2	8,940189

Σχήμα 4.2 Πειράματα στις 5° και f=0.25 Hz

f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
0,5	0	996,8658	8,74E-07	70	16	1,678909
0,5	0,03	996,8658	8,74E-07	61,2	92,7	9,727177
0,5	0,04	996,8658	8,74E-07	53	132	13,851
0,5	0,05	997,13	8,94E-07	51,4	130	13,64113
0,5	0,1	997,13	8,94E-07	43,5	127	13,32634
0,5	0,2	996,8658	8,94E-07	36,2	102	10,70304
0,5	0,3	997,13	8,74E-07	33,8	102	10,70304
0,5	0,4	996,8658	8,74E-07	31,3	90	9,443861
0,5	0,5	996,8658	8,94E-07	28,5	86	9,024134

Σχήμα 4.3 Πειράματα στις 5° και f=0.5 Hz

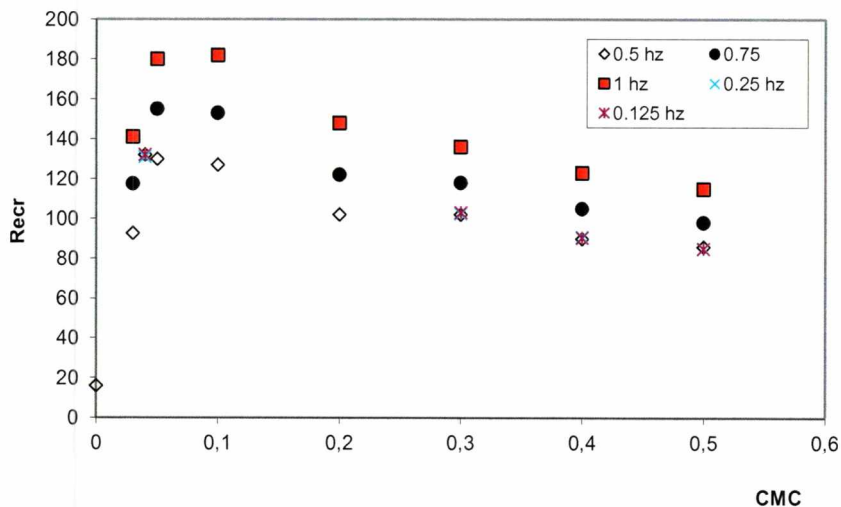
f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
0,75	0,03	996,8658	8,74E-07	61,2	117,5	12,32949
0,75	0,05	997,13	8,94E-07	51,4	155	16,26443
0,75	0,1	997,13	8,94E-07	43,5	153	16,05456
0,75	0,2	996,8658	8,74E-07	36,2	122	12,80168
0,75	0,3	997,13	8,94E-07	33,8	118	12,38195
0,75	0,4	996,8658	8,74E-07	31,3	105	11,07184
0,75	0,5	996,8658	8,74E-07	28,5	98	10,28332

Σχήμα 4.4 Πειράματα στις 5° και f=0.75 Hz

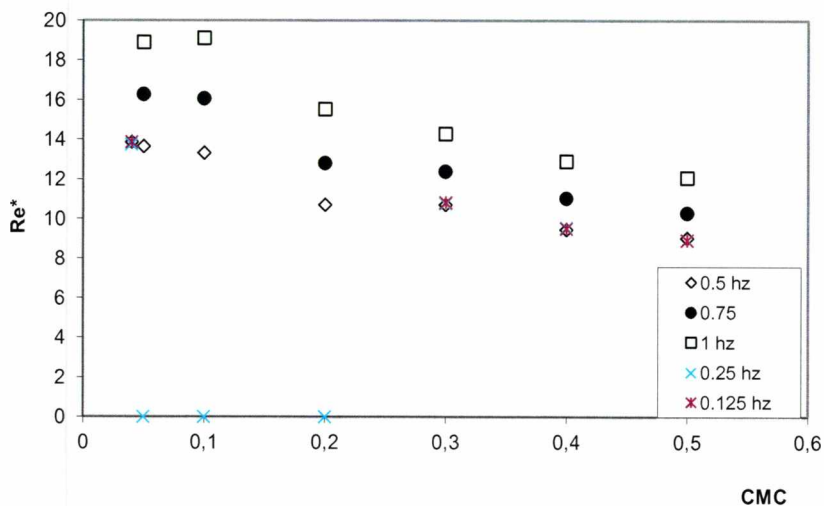
f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
1	0,03	996,8658	8,74E-07	61,2	141	14,79538
1	0,05	997,13	8,94E-07	51,4	180	18,88772
1	0,1	997,13	8,94E-07	43,5	182	19,09759
1	0,2	996,8658	8,74E-07	36,2	148	15,52991
1	0,3	997,13	8,94E-07	33,8	136	14,27072
1	0,4	996,8658	8,74E-07	31,3	123	12,90661
1	0,5	996,8658	8,74E-07	28,5	115	12,06716

Σχήμα 4.5 Πειράματα στις 5° και f=1 Hz

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται πιο συνοπτικά η κρίσιμη τιμή Reynolds και η κανονικοποιημένη τιμή Reynolds σε σχέση με την συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού.



Σχήμα 4.6 Re_{cr} στις 5° συναρτήσει της συγκέντρωσης



Σχήμα 4.7 Re^* στις 5° συναρτήσει της συγκέντρωσης

Επίδραση γωνίας κλίσης στη ροή υγρού υμένα 2013 με διαλυτό επιφανειοδραστικό

➤ Γωνία κλίσης καναλιού: 10 μοίρες

f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
0,125	0,03	996,8658	8,74E-07	64,1	103,54	21,89006
0,125	0,04	996,8658	8,74E-07	55	122,5	25,89858
0,125	0,05	996,8658	8,74E-07	53	134,2	28,37209
0,125	0,1	996,8658	8,74E-07	47,4	127,34	26,92178
0,125	0,2	997,13	8,94E-07	37,2	104,3	22,05074
0,125	0,35	996,8658	8,74E-07	32,7	94	19,87315
0,125	0,45	997,13	8,94E-07			

Σχήμα 4.8 Πειράματα στις 10° και f=0.125 Hz

f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
0,25	0,03	996,8658	8,74E-07	64,1	105	22,19873
0,25	0,04	996,8658	8,74E-07	55	123,8	26,17336
0,25	0,05	996,8658	8,74E-07	53	136,1	28,77378
0,25	0,1	996,8658	8,74E-07	47,4	126,55	26,75476
0,25	0,2	997,13	8,94E-07	37,2	108	22,83298
0,25	0,35	996,8658	8,74E-07	32,7	95	20,08457
0,25	0,45	997,13	8,94E-07		85,2	18,01268

Σχήμα 4.9 Πειράματα στις 10° και f=0.25 Hz

f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
0,5	0,03	996,8658	8,74E-07	64,1	104,14	22,01691
0,5	0,04	996,8658	8,74E-07	55	122,6	25,91966
0,5	0,05	996,8658	8,74E-07	53	134,2	28,37209
0,5	0,1	996,8658	8,74E-07	47,4	126	26,63848
0,5	0,2	997,13	8,94E-07	37,2	108,5	22,93869
0,5	0,35	996,8658	8,74E-07	32,7	95	20,08457
0,5	0,45	997,13	8,94E-07			

Σχήμα 4.10 Πειράματα στις 10° και f=0.5 Hz

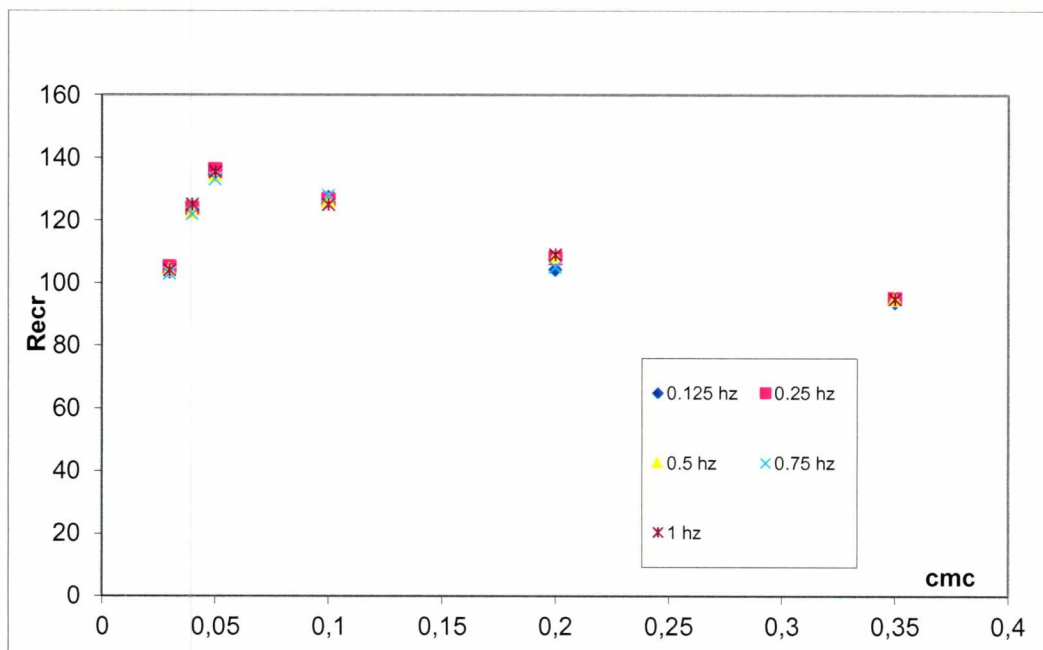
f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
0,75	0,03	996,8658	8,74E-07	64,1	103	21,7759
0,75	0,04	996,8658	8,74E-07	55	122	25,79281
0,75	0,05	996,8658	8,74E-07	53	133,2	28,16068
0,75	0,1	996,8658	8,74E-07	47,4	128	27,06131
0,75	0,2	997,13	8,94E-07	37,2	105,1	22,21987
0,75	0,35	996,8658	8,74E-07	32,7	95	20,08457
0,75	0,45	997,13	8,94E-07		98	20,71882

Σχήμα 4.11 Πειράματα στις 10° και f=0.75 Hz

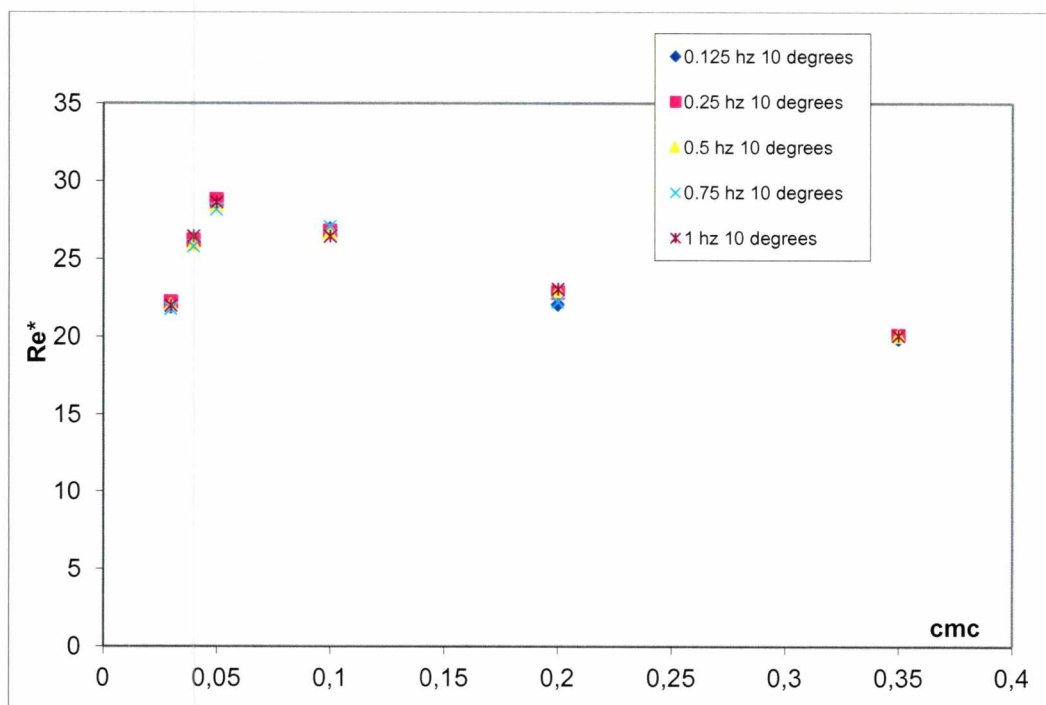
f (Hz)	cmc	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	σ (mN/m)	Re _{cr}	Re*
1	0,03	996,8658	8,74E-07	64,1	104	21,98732
1	0,04	996,8658	8,74E-07	55	125	26,42706
1	0,05	996,8658	8,74E-07	53	135,4	28,62579
1	0,1	996,8658	8,74E-07	47,4	125	26,42706
1	0,2	997,13	8,94E-07	37,2	109	23,0444
1	0,35	996,8658	8,74E-07	32,7	95	20,08457
1	0,45	997,13	8,94E-07			

Σχήμα 4.12 Πειράματα στις 10° και f=1 Hz

Ακολουθούν τα διαγράμματα συνοπτικής παρουσίασης του κρίσιμου αριθμού Reynolds και του κανονικοποιημένου αριθμού Reynolds συναρτήσει της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού.

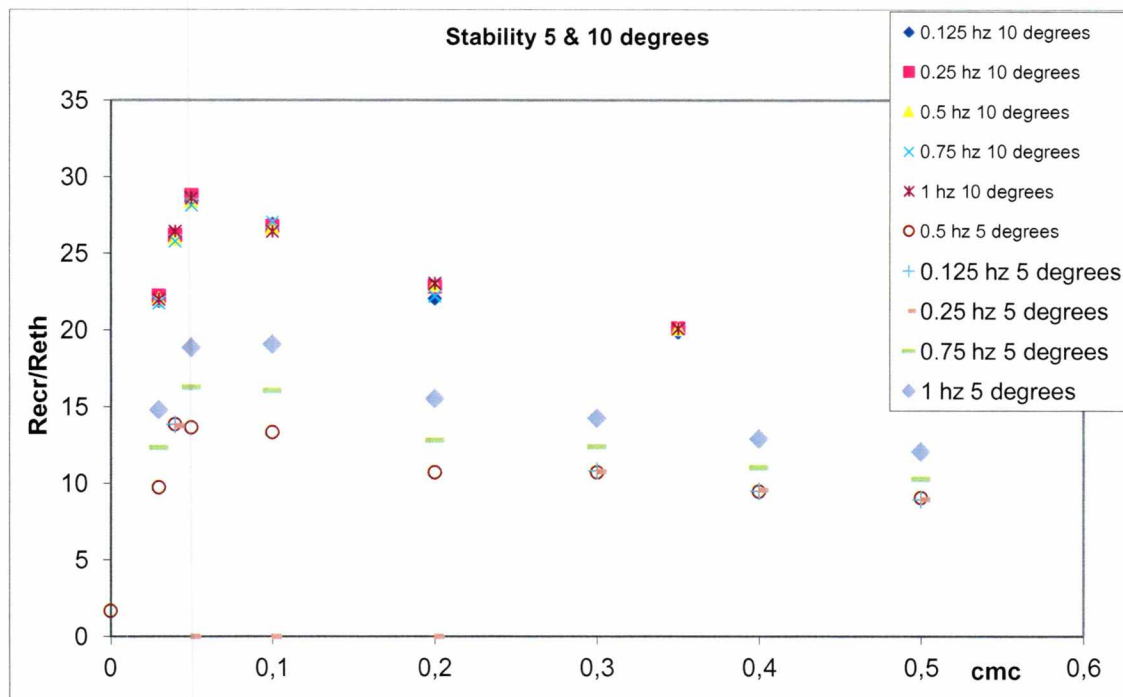


Σχήμα 4.13 Re_{cr} στις 10^0 συναρτήσει της συγκέντρωσης

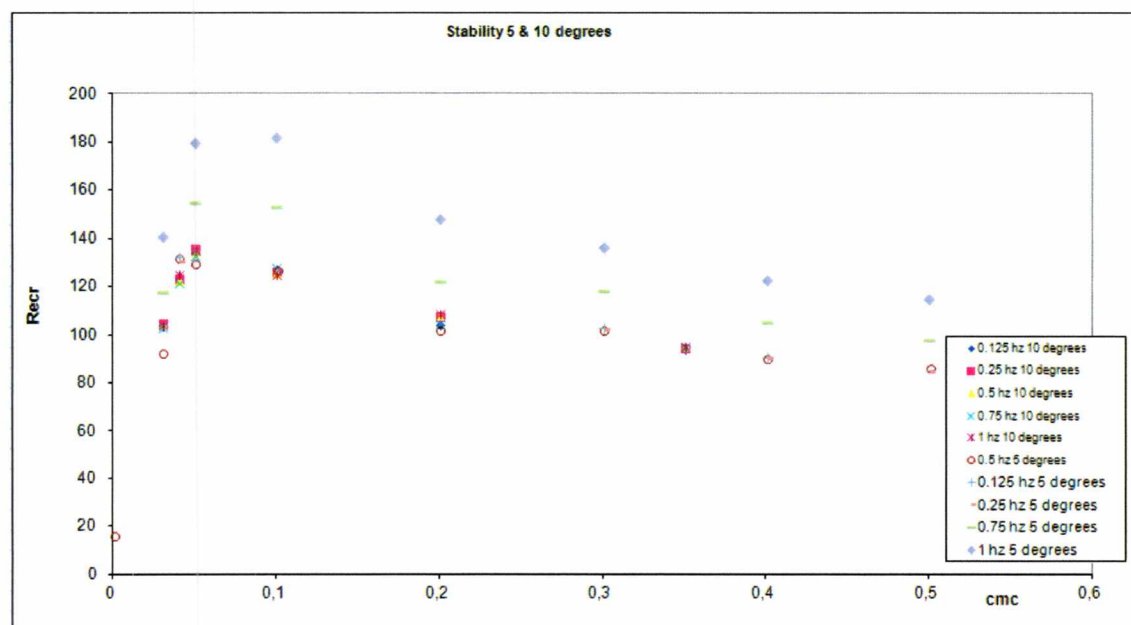


Σχήμα 4.14 Re^* στις 10^0 συναρτήσει της συγκέντρωσης

Στα παρακάτω διαγράμματα, εμφανίζονται τα αποτελέσματα ευστάθειας συμπτυγμένα και για τις δύο γωνίες κλίσης του καναλιού αλλά και για όλες τις συχνότητες διαταραχής.



Σχήμα 4.15 Αποτελέσματα ευστάθειας Re^* συναρτήσει της συγκέντρωσης



Σχήμα 4.16 Αποτελέσματα ευστάθειας Re_{cr} συναρτήσει της συγκέντρωσης

Προτού περάσουμε στο σχολιασμό, αξίζει στο συγκεκριμένο σημείο να αναφέρουμε ότι για το καθαρό νερό η σχέση του κρίσιμου αριθμού Reynolds διαιρώντας με τον θεωρητικό αριθμό Reynolds, δηλαδή ο κανονικοποιημένος Reynolds, $Re^* \approx 1.2$.

Έπεται, ο σχολιασμός των διαγραμμάτων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τα οποία εξάγαμε παρατηρώντας τα στοιχεία που συλλέξαμε από τα πειράματά μας.

5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο παρόν κεφάλαιο σχολιάζονται τα ανωτέρω σχήματα και εξάγονται τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αντικείμενο της εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης της γωνίας κλίσης στην ευστάθεια της ροής υγρού υμένα νερού υπό την χρήση του διαλυτού επιφανειοδραστικού Sodium Dodecy Sulfate – SDS.

5.1 Σχολιασμός - Συμπεράσματα

Αρχικά έγιναν τα πειράματα έχοντας το κανάλι ροής σε γωνία κλίσης 5° . Αργότερα η γωνία κλίσης του καναλιού αυξήθηκε στις 10° . Σε κάθε περίπτωση είχαμε ίδιες συχνότητες διαταραχής και σχεδόν πανομοιότυπες συγκεντρώσεις επιφανειοδραστικού. Επομένως τα κυριότερα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τα σχήματα του κεφαλαίου 4 είναι τα εξής:

5.1.1 Γωνία κλίσης 5° : Σχήμα 4.1 – 4.5

- Σε ίδιες τιμές επιφανειακής τάσης η μετάβαση από την αστάθεια στην ευστάθεια γίνεται σε αρκετούς διαφορετικούς κρίσιμους αριθμούς Reynolds.
- Όσο μειώνεται η επιφανειακή τάση τόσο μειώνεται και το πηλίκο της διαίρεσης Re_{cr}/Re_{th} , άρα και η διαφορά του Re_{cr} με τον Re_{th} .

5.1.2 Γωνία κλίσης 5° : Σχήμα 4.6 – 4.7

- Όσο υψηλότερη συχνότητα διαταραχής επιβάλουμε, για την ίδια συγκέντρωση επιφανειοδραστικού, ο κρίσιμος αριθμός Reynolds αυξάνει. Άρα η μετάπτωση από την αστάθεια στην ευστάθεια γίνεται γρηγορότερα.

- Παρατηρούμε μια σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων για συχνότητες διαταραχής 0,5 hz, 0,25 hz και 0,125 hz, σε κάθε συγκέντρωση.
- Σε κάθε συχνότητα διαταραχής, παρουσιάζεται ένας μέγιστος κρίσιμος αριθμός Reynolds. Σε κάθε περίπτωση αυτός βρίσκεται είτε στην συγκέντρωση 10% cmc ($f=1$ hz) είτε στην συγκέντρωση 5% cmc ($f=0.75$ hz, $f=0.5$ hz).
- Όσο αυξάνει η συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού - μετά την συγκέντρωση όπου επετεύχθη η μέγιστη τιμή αριθμού Reynolds - το όριο μετάβασης χαμηλώνει, δηλαδή η ευστάθεια επιτυγχάνεται πιο αργά για κάθε συχνότητα διαταραχής.

5.1.3 Γωνία κλίσης 10° : Σχήμα 4.8 – 4.12

- Σε ίδιες τιμές επιφανειακής τάσης η μετάβαση από την αστάθεια στην ευστάθεια γίνεται σε διαφορετικούς αριθμούς Reynolds. Παρόλα αυτά, οι διαφορές των αριθμών αυτών είναι τόσο μικρές που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και αμελητέες.
- Όσο μειώνεται η επιφανειακή τάση τόσο μειώνεται και το πηλίκο της διαίρεσης Re_{cr}/Re_{th} , άρα και η διαφορά του Re_{cr} με τον Re_{th} .

5.1.4 Γωνία κλίσης 10° : Σχήμα 4.13 – 4.14

- Παρατηρούμε μια σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων για ΟΛΕΣ τις συχνότητες διαταραχής σε κάθε συγκέντρωση. Πράγμα που σημαίνει ότι στις 10° γωνία κλίσης καναλιού η διαταραχή δεν παίζει κανένα ρόλο.

- Σε κάθε συχνότητα διαταραχής, παρουσιάζεται ένας μέγιστος κρίσιμος αριθμός Reynolds. Σε κάθε περίπτωση αυτός βρίσκεται στην συγκέντρωση 5% cmc.
- Όπως και στις 5° έτσι και στις 10° γωνία κλίσης καναλιού, όσο αυξάνει η συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού - μετά την συγκέντρωση όπου επετεύχθη η μέγιστη τιμή αριθμού Reynolds - το όριο μετάβασης χαμηλώνει, δηλαδή η ευστάθεια επιτυγχάνεται πιο αργά για κάθε συχνότητα διαταραχής.

5.1.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων: Σχήμα 4.15 – Σχήμα 4.16

- Σε μικρές συχνότητες (0.125 hz, 0.25 hz, 0.5 hz) δεν παρατηρείται σχεδόν καμία διαφορά στο όριο ευστάθειας.
- Το όριο ευστάθειας σε σχέση με το νερό ($Re_{cr}/Re_{th} \approx 1.2$) όσον αφορά τις 10° γωνία κλίσης καναλιού, είναι πολύ πιο αυξημένο συγκριτικά με τις 5°. Πιο συγκεκριμένα το όριο ευστάθειας στις 10° φτάνει να είναι μέχρι και 25 φορές μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό του νερού. Ενώ στις 5°, η αύξηση του ορίου ευστάθειας είναι 15απλάσια σε σχέση με το νερό.
- Για την ίδια συχνότητα διαταραχής, φαίνεται ότι η γωνία καναλιού 5 μοιρών μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα ευστάθειας από αυτή των 10. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε υψηλότερους αριθμούς Reynolds κι επομένως γρηγορότερη μετάβαση από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή.

5.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

Στα πειράματά μας ασχοληθήκαμε με την εύρεση του ορίου μετάβασης από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή του πεδίου ροής υγρού υμένα νερού με τη χρήση διαλυτού επιφανειοδραστικού. Μιλήσαμε δηλαδή, για ευστάθεια, επιφανειακή τάση και συχνότητες διαταραχής.

Δεν αναρωτηθήκαμε όμως τι ρόλο διαδραματίζουν οι ιδιότητες (πυκνότητα και ιξώδες) του ρευστού το οποίο μελετάμε. Ο αδιάστατος αριθμός Karitza είναι εκείνος που περιέχει όλες τις αυτές τις ιδιότητες σε μια πληροφορία. Καλό λοιπόν θα ήταν να γίνει κάποια μελέτη που θα αφορά τη σχέση του αριθμού αυτού με τα όρια ευστάθειας της ροής υγρού υμένα.

Ακόμα, θα μπορούσε κάποιος να διερευνήσει εκτός από την ευστάθεια της ροής ενός υγρού υμένα, τα χαρακτηριστικά της ροής του. Δηλαδή τις κυματομορφές που αναπτύσσονται, την μορφή που εξελίσσονται και τον τρόπο που αποσβένουν. Όλα αυτά σε συνάρτηση με συχνότητες διαταραχής ή/και συγκεντρώσεις επιφανειοδραστικού.

Επιπλέον, καλό θα ήταν να μελετηθούν τα ίδια φαινόμενα σε ένα κανάλι όπου το μήκος και το πλάτος είναι μεγαλύτερα από το δεδομένο «Κανάλι Ροής». Ίσως εκεί τα φαινόμενα να εξελίσσονται διαφορετικά, καθώς θα υπάρχει μεγαλύτερο μήκος εξέλιξης.

Τέλος, προτείνεται η χρήση επιπλέον επιφανειοδραστικών, διαλυτών και μη, ώστε να γίνει διερεύνηση και των φαινομένων που αφορούν την ελαστικότητα της επιφάνειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Balakotaiah, L. T. N. a. V. (2000). "Modeling and experimental studies of wave evolution on free falling viscous films." Physics of fluids **12**(2000): 2236-2256

C. RUYER-QUIL, P. T., F. GIORGIUTTI-DAUPHINE, C. DUPRAT AND S. KALLIADASIS (2008). "Modelling film flows down a fibre." Journal of Fluid Mechanics **603**(2008): 431-462

C.J.W. Breward, R. C. D., P.D. Howell, J.R. Ockendon (2001). "The effect of surfactants on expanding free surfaces." Chemical Engineering Science **56**(2001): 2867-2878

C.POZRIKIDIS (2003). "Effect of surfactants on film flow down a periodic wall." Journal of Fluid Mechanics **496**(2003): 105-127

C.POZRIKIDIS, M. G. B. A. (2004). "Effect of surfactant on the stability of film flow down an inclined plane." Journal of Fluid Mechanics **521**(2004): 241-250

Cesar E. Meza, V. B. (2008). "Modeling and experimental studies of large amplitude waves on vertically falling films." Chemical Engineering Science **63**(2008): 4704-4734

Christina Tzotzi, V. B., Michael Vlachogiannis and Nikolaos Andritsos (2010). "Effect of Fluid Properties on Flow Patterns in Two-Phase Gas-Liquid Flow in Horizontal and Downward Pipes." I&ECR(2010)

E.I.P Drosos, S. V. P., A.J. Karabelas (2004). "Characteristics of developing free falling films at intermediate Reynolds and high Kapitza numbers." International Journal of Multiphase Flow **30**(2004): 853-876

Gonzalo Vhquez, E. A., and Jose M. Navaza (1995). "Surface Tension of Alcohol + Water from 20 to 50 "C." Journal of Chemical and Engineering Data **40**(1995): 611-614

Lin, S. P. (1967). "Instability of a Liquid Film Flowing down an Inclined Plane." The Physics of Fluids **10**(1967): 308-313

Liu J., P. J. D. a. G. J. P. (1993). "Measurements of the Primary Instabilities of Film Flows." Journal of Fluid Mechanics **250**(1993): 69

LUCASSEN, J. (1982). "Effect of Surface-Active Material on the Damping of Gravity Waves: A Reappraisal." Journal of Colloid and Interface Science **85**(1982): 52-58

Lucassen-Reynders, E. H., Lucassen, J. (1970). "Properties of Capillary Waves." Advances Colloid Interface Sci. **2**(1970): 347

M. Vlachogiannis, A. S., V. Leontidis, and V. Bontozoglou (2010). "Effect of channel width on the primary instability of inclined film flow." Physics of fluids **22**(2010): 1-9
Manneville, C. R.-Q. a. P. (2000). "Improved modeling of flows down inclined planes." THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL **15**(2000): 357-369

Youngbae Han , N. S. (2009). "Measurement of liquid film thickness in micro square channel." International Journal of Multiphase Flow **35**(2009): 896–903

McCabe W. L., Smith J. C. and Harriot P., "Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής" Εκδόσεις Τζιόλα, 2002.

Pozrikidis C. "Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics" .Oxford University Press, 1997.

H.-C. Chang and E.A Demekhin. "Complex Wave Dynamics on Thin Films". Elsevier, 2002

P. G. Drazin. "Introduction to Hydromynamic Stability", Cambridge University Press, 2002

NELSON. F MURPHY, J. E. L., JAMES G.FALLIS (1957). "Correlation of Interfacial Tension of Two-Phase Three-Component Systems." Industrial and Engineering Chemistry **49**(1957): 1035-1042.

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

Βλαχογιάννης Μ. "*Πειραματική Μελέτη της Ροής Υγρού Υμένα πάνω σε Επίπεδο και σε Κυματοειδές Τοίχωμα*", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2001.

Λεοντίδης Β. " Τρισδιάστατα Φαινόμενα στη Ροή Υγρού Υμένα", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2009

Σαμαντάς Α. " Πειραματική Μελέτη Ευστάθειας στη Ροή Υγρού Υμένα", Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2009

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

<http://www.attension.com/surface-tension>



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000116090