

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

## Μεταπτυχιακή Εργασία

**Προκαταρτική μελέτη επίδρασης επιφανειακής τάσης στην  
ευστάθεια και τα χαρακτηριστικά ροής υγρού υμένα**

Γεωργαντάκη Άννα  
*Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός Π.Θ*

Βόλος, Μάρτιος 2010



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

Αριθ. Εισ.: 8263/1  
Ημερ. Εισ.: 23-03-2010  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
620.106  
ΓΕΩ

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

## Μεταπτυχιακή Εργασία

**Προκαταρτική μελέτη επίδρασης επιφανειακής τάσης στην  
ευστάθεια και τα χαρακτηριστικά ροής υγρού υμένα**

Γεωργαντάκη Άννα  
*Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός Π.Θ*

Βόλος, Μάρτιος 2010

© 2010 Γεωργαντάκη Άννα

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

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

<b>Πρώτος εξεταστής</b> (επιβλέπων)	<b>Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος</b> , Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
<b>Δεύτερος εξεταστής</b>	<b>Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ</b> , Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Λάρισας
<b>Τρίτος εξεταστής</b>	<b>Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος</b> , Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Μποντόζογλου Βασίλειο για την ανάθεση της μεταπτυχιακής εργασίας και των ιδεών που μου έδωσε για την διεκπεραίωσή της.

Ταυτόχρονα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον αναπληρωτή καθηγητή κ. Βλαχογιάννη Μιχαήλ για τη διαρκή βοήθεια και επίβλεψή του.

Είμαι επίσης ευγνώμων στον αναπληρωτή καθηγητή κ. Ν. Ανδρίτσο ο οποίος ήταν πάντα διαθέσιμος για συμβουλές και τον ευχαριστώ επιπρόσθετα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου.

Τέλος, η λέξη ευχαριστώ είναι πολύ λίγη για να ανταποδώσω τη συμβολή της οικογένειάς μου. Όλα αυτά τα χρόνια μου έδειξαν την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξη τους. Χωρίς πολλά λόγια, ***θα ήθελα να αφιερώσω τη διατριβή αυτή στους Γονείς μου και τον αδελφό μου και τον Χρήστο αλλά και στον Γιώργο, που μας βλέπει από ψηλά και ξέρω πως τώρα νιώθει περήφανος για μένα.***

*Γεωργαντάκη Άννα*

# Προκαταρκτική μελέτη επίδρασης επιφανειακής τάσης στην ευστάθεια και τα χαρακτηριστικά ροής υγρού υμένα

Γεωργαντάκη Άννα

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος, Καθηγητής

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

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

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

Η μείωση της επιφανειακής τάσης έγινε με την προσθήκη επιφανειοδραστικών ουσιών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν αλκοόλες (βουτανόλη και προπανόλη) σε συγκεντρώσεις τέτοιες ώστε να επιτυγχάνεται ένα κατάλληλο εύρος τιμών επιφανειακής τάσης.

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

Βρέθηκε ότι ο παραγόντας που επηρεάζει τον πειραματικό κρίσιμο αριθμό Reynolds, δεν είναι η επιφανειακή τάση από μόνη της, αλλά ο αδιάστατος αριθμός

Karitza, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις ιδιότητες του ρευστού (επιφανειακή τάση, πυκνότητα και ιξώδες). Συγκριμένα, ο πειραματικός κρίσιμος αριθμός Reynolds μειώνεται όσο μειώνεται ο αριθμός Karitza, και καθώς μειώνεται, ελαχιστοποιείται και η διάφορα πειραματικού με θεωρητικού κρίσιμου αριθμού  $Re$ .

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται στην αυξημένη ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται η μετάπτωση από την ευστάθεια στην αστάθεια.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ..... 8

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 12

#### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 12

1.1 Στόχος της εργασίας.....	12
1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα.....	12
1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων.....	13
1.4 Δομή της εργασίας.....	14

#### 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ..... 15

2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα.....	15
2.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια.....	21
2.3 Γραμμική ευστάθεια μονοδιάστατων ροών.....	22
2.4 Ευστάθεια ροής υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο κανάλι.....	24
2.5 Βιβλιογραφικές αναφορές για τη ροή υγρού υμένα.....	27
2.7 Επιφανειοδραστικές ουσίες (Surfactants).....	30
2.8 Φυσικές ιδιότητες διαλυμάτων επιφανειοδραστικών.....	33
2.9 Επίδραση επιφανειοδραστικών στη ροή υμένων.....	34
2.10 Βιβλιογραφικές αναφορές για την επίδραση των επιφανειοδραστικών.....	36

#### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ..... 38

3.1 Πειραματική διάταξη.....	38
3.1.1 Κανάλι ροής.....	38
3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.....	40
3.1.3 Ευθυγράμμιση καναλιού ροής.....	41
3.2 Ιδιότητες ρευστών.....	43
3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική.....	45
3.3.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	47
3.4 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων.....	48

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ..... 50

4.1 Σειρές πειραμάτων.....	50
4.2 Προσδιορισμός κρίσιμου $Re$ ( $Re_{cr}$ ).....	53
4.3 Επίδραση της μείωσης της επιφανειακής τάσης.....	57
4.4 Ο αριθμός $Karitza$ .....	58
Χρονοσειρές 2 μοιρών με αύξοντα αριθμό $Ka$ κατά τη μετάβαση.....	60
Χρονοσειρές 3 μοιρών με αύξοντα αριθμό $Ka$ κατά τη μετάβαση.....	63
Χρονοσειρές 5 μοιρών με αύξοντα αριθμό $Ka$ κατά τη μετάβαση.....	69
Χρονοσειρές 7 μοιρών με αύξοντα αριθμό $Ka$ κατά τη μετάβαση.....	71
4.5 Η επίδραση του αριθμού $Karitza$ .....	73
2 μοίρες.....	73
3 μοίρες.....	75
5 μοίρες.....	77
7 μοίρες.....	78
Συνολικά.....	80
4.6 Σύγκριση προφίλ ροής σε ίδια γωνία κλίσης και ίδιους αριθμούς $Karitza$ .....	81
3 μοίρες.....	81
5 μοίρες.....	84

4.7 Η επίδραση της γωνίας κλίσης .....	86
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>88</b>
5.1 Συμπεράσματα.....	88
5.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.....	89
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>91</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>93</b>

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

<i>Σχήμα 2.1.1</i> Δυνάμεις πάνω σε ένα στοιχείο υγρού σε ροή υγρού υμένα .....	16
<i>Σχήμα 2.1.2</i> Σχηματικός Χάρτης ο οποίος απεικονίζει την αναμενόμενη συμπεριφορά κατακόρυφου υμένα εκφρασμένη στο επίπεδο ( $1/We, Ka$ ).....	21
<i>Σχήμα 2.2.</i> Γραφική απεικόνιση εξέλιξης ( $\alpha$ ) συναγωγικής ( $\beta$ ) απολυτής αστάθειας.....	22
<i>Σχήμα 2.3.</i> Ανάπτυξη περιοδικών διαταραχών στη ροή υγρού υμένα .....	24
<i>Σχήμα 2.4.</i> Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα.....	27
<i>Σχήμα 2.4.</i> Δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ μορίων στο εσωτερικό ενός υγρού και στη διεπιφάνεια .....	29
<i>Σχήμα 2.5:</i> Σχηματική αναπαράσταση του επιφανειοδραστικού μορίου .....	30
<i>Σχήμα 2.6:</i> Σχηματική αναπαράσταση του σχηματισμού μικκυλίων με την αύξηση της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού .....	33
<i>Σχήμα 2.7:</i> Σχηματική αναπαράσταση της μείωσης της επιφανειακής τάσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού .....	34
<i>Σχήμα 3.1</i> πειραματική διάταξη .....	40
<i>Σχήμα 3.2</i> Σύστημα διαταραχής .....	41
<i>Σχήμα 3.3</i> ευθυγραμμισμένο και μη ευθυγραμμισμένο κανάλι.....	42
<i>Σχήμα 3.3.</i> Η αγωγιμομετρική τεχνική .....	46
<i>Σχήμα 4.1 :</i> Διαχωρισμός του σήματος σε χρονικές περιόδου .....	53
<i>Σχήμα 4.2.1 :</i> προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 5 μοίρες 30% γλυκερίνη .....	54
<i>Σχήμα 4.2.2 :</i> προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 7 μοίρες 40% γλυκερίνη .....	54
<i>Σχήμα 4.3:</i> Κρίσιμος αριθμός Reynolds σε σχέση με την επιφανειακή τάση για γωνίες κλίσης 2,3,5,7 και 10 μοίρες .....	57
<i>Σχήμα 4.4.1:</i> 2° Διάλυμα 60% γλυκερίνης με $Ka=165.34$ , $Kax=506$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	60
<i>Σχήμα 4.4.2:</i> 2° Διάλυμα 55% γλυκερίνης με $Ka=218.55$ , $Kax=669$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	60
<i>Σχήμα 4.4.3:</i> 2° Διάλυμα 50% γλυκερίνης με $Ka=312.05$ , $Kax=955$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	61
<i>Σχήμα 4.4.4:</i> 2° Διάλυμα 45% γλυκερίνης με $Ka=445.22$ , $Kax=1362$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	61

<b>Σχήμα 4.4.5:</b> 2° Διάλυμα 40% γλυκερίνης με $K_a=607.12$ , $K_{ax}=1858$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	61
<b>Σχήμα 4.4.6:</b> 2° Διάλυμα 35% γλυκερίνης με $K_a=767.05$ , $K_{ax}=2347$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	61
<b>Σχήμα 4.4.7:</b> 2° Διάλυμα 30% γλυκερίνης με $K_a=1216.5$ , $K_{ax}=3723$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	62
<b>Σχήμα 4.4.8:</b> 2° Διάλυμα 20% γλυκερίνης με $K_a=1562.5$ , $K_{ax}=4781$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	62
<b>Σχήμα 4.4.9:</b> 2° Διάλυμα 15% γλυκερίνης με $K_a=1867.7$ , $K_{ax}=5715$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	62
<b>Σχήμα 4.4.10:</b> 2° Διάλυμα 10% γλυκερίνης με $K_a=2298$ , $K_{ax}=7032$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	62
<b>Σχήμα 4.4.11:</b> 2° Διάλυμα 100% νερό με $K_a=3246.4$ , $K_{ax}=9934$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	63
<b>Σχήμα 4.4.12:</b> 3° Διάλυμα 7% Βουτανόλη με $K_a=137$ , $K_{ax}=365.46$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	63
<b>Σχήμα 4.4.13:</b> 3° Διάλυμα 5% Βουτανόλη με $K_a=176$ , $K_{ax}=471.62$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	63
<b>Σχήμα 4.4.14:</b> 3° Διάλυμα 60% Προπανόλη με $K_a=183$ , $K_{ax}=489.43$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	64
<b>Σχήμα 4.4.15:</b> 3° Διάλυμα 55% Γλυκερίνη με $K_a=256$ , $K_{ax}=686$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	64
<b>Σχήμα 4.4.16:</b> 3° Διάλυμα 2% Βουτανόλη με $K_a=335$ , $K_{ax}=894.44$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	64
<b>Σχήμα 4.4.17:</b> 3° Διάλυμα 3% Βουτανόλη με $K_a=338$ , $K_{ax}=904.23$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	64
<b>Σχήμα 4.4.18:</b> 3° Διάλυμα 10% Προπανόλη με $K_a=373$ , $K_{ax}=996.9$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	65
<b>Σχήμα 4.4.19:</b> 3° Διάλυμα 7% Βουτανόλη με $K_a=414$ , $K_{ax}=1106.25$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	65
<b>Σχήμα 4.4.20:</b> 3° Διάλυμα 1% Βουτανόλη με $K_a=427$ , $K_{ax}=1140.41$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	65
<b>Σχήμα 4.4.21:</b> 3° Διάλυμα 5% Βουτανόλη με $K_a=477$ , $K_{ax}=1276.45$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	65
<b>Σχήμα 4.4.22:</b> 3° Διάλυμα 3% Βουτανόλη με $K_a=542$ , $K_{ax}=1449.88$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	66
<b>Σχήμα 4.4.23:</b> 3° Διάλυμα 2% Βουτανόλη με $K_a=564$ , $K_{ax}=1507.10$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	66
<b>Σχήμα 4.4.24:</b> 3° Διάλυμα 1,5% Βουτανόλη με $K_a=662$ , $K_{ax}=1770.85$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	66
<b>Σχήμα 4.4.25:</b> 3° Διάλυμα 1% Βουτανόλη με $K_a=675$ , $K_{ax}=1804.76$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a).	
Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	66

<b>Σχήμα 4.4.26:</b> 3°Διάλυμα 0,5% Βουτανόλη με $Ka=768$ , $Kax=2052,48$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	67
<b>Σχήμα 4.4.27:</b> 3°Διάλυμα 36% Γλυκερίνη με $Ka=873$ , $Kax=2333$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	67
<b>Σχήμα 4.4.28:</b> 3°Διάλυμα 25% Γλυκερίνη με $Ka=1163$ , $Kax=3110$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	67
<b>Σχήμα 4.4.29:</b> 3°Διάλυμα 20% Γλυκερίνη με $Ka=1563$ , $Kax=4177$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	67
<b>Σχήμα 4.4.30:</b> 3°Διάλυμα 10% Γλυκερίνη με $Ka=2298$ , $Kax=6143$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Μετάβαση (b).....	68
Πρώτη ασταθής μέτρηση (c) .....	68
<b>Σχήμα 4.4.31:</b> 3°Διάλυμα 0% Γλυκερίνη με $Ka=3328$ , $Kax=8897$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	68
<b>Σχήμα 4.4.32:</b> 5°Διάλυμα 60% Προπανόλη με $Ka=125$ , $Kax=281.64$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	69
<b>Σχήμα 4.4.33:</b> 5°Διάλυμα 7% Βουτανόλη με $Ka=137$ , $Kax=275.72$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	69
<b>Σχήμα 4.4.34:</b> 5°Διάλυμα 5% Βουτανόλη με $Ka=251$ , $Kax=565.97$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	69
<b>Σχήμα 4.4.35:</b> 5°Διάλυμα 55% Γλυκερίνη με $Ka=256$ , $Kax=578,39$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	69
<b>Σχήμα 4.4.36:</b> 5°Διάλυμα 10% Προπανόλη με $Ka=311$ , $Kax=700.88$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	70
<b>Σχήμα 4.4.37:</b> 5°Διάλυμα 2% Βουτανόλη με $Ka=335$ , $Kax=754,61$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	70
<b>Σχήμα 4.4.38:</b> 5°Διάλυμα 3% Βουτανόλη με $Ka=338$ , $Kax=762.86$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	70
<b>Σχήμα 4.4.39:</b> 5°Διάλυμα 1% Βουτανόλη με $Ka=827$ , $Kax=962.12$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	70
<b>Σχήμα 4.4.40:</b> 7°Διάλυμα 60% Προπανόλη με $Ka=50$ , $Kax=101.62$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	71
<b>Σχήμα 4.4.41:</b> 7°Διάλυμα 7% Βουτανόλη με $Ka=137$ , $Kax=275.72$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	71
<b>Σχήμα 4.4.42:</b> 7°Διάλυμα 5% Βουτανόλη με $Ka=251$ , $Kax=506.11$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	71
<b>Σχήμα 4.4.43:</b> 7°Διάλυμα 3% Βουτανόλη με $Ka=309$ , $Kax=682.20$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	72
<b>Σχήμα 4.4.44:</b> 7°Διάλυμα 3% Βουτανόλη με $Ka=338$ , $Kax=860.39$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b) .....	72
<b>Σχήμα 4.4.45:</b> 7°Διάλυμα 1.5% Βουτανόλη με $Ka=437$ , $Kax=1119.94$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b).....	72
<b>Σχήμα 4.5.1:</b> 2°. Η σχέση του αριθμού Kapitza με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds .....	73
<b>Σχήμα 4.5.2:</b> 2°. Η σχέση του αριθμού $Ka_x$ με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds .....	74

<b>Σχήμα 4.5.3 :</b> 2°. % διάφορα πειραματικού και θεωρητικού αριθμού $Re$ σε σχέση με την αύξηση του αριθμού $Ka$ .....	74
<b>Σχήμα 4.5.4:</b> 3°. Η σχέση του αριθμού $Karitzza$ με τον κρίσιμο αριθμό $Reynolds$ .....	75
<b>Σχήμα 4.5.5:</b> 3°. Η σχέση του αριθμού $Ka_x$ με τον κρίσιμο αριθμό $Reynolds$ .....	76
<b>Σχήμα 4.5.6 :</b> 3°. % διάφορα πειραματικού και θεωρητικού αριθμού $Re$ σε σχέση με την αύξηση του αριθμού $Ka$ .....	76
<b>Σχήμα 4.5.5:</b> 5°. Η σχέση του αριθμού $Karitzza$ με τον κρίσιμο αριθμό $Reynolds$ .....	77
<b>Σχήμα 4.5.8:</b> 5°. Η σχέση του αριθμού $Karitzza_x$ με τον κρίσιμο αριθμό $Reynolds$ .....	77
<b>Σχήμα 4.5.9 :</b> 5°. % διάφορα πειραματικού και θεωρητικού αριθμού $Re$ σε σχέση με την αύξηση του αριθμού $Ka$ .....	78
<b>Σχήμα 4.5.10:</b> 7°. Η σχέση του αριθμού $Karitzza$ με τον κρίσιμο αριθμό $Reynolds$ .....	79
<b>Σχήμα 4.5.11:</b> 7°. Η σχέση του αριθμού $Karitzza_x$ με τον κρίσιμο αριθμό $Reynolds$ .....	79
<b>Σχήμα 4.5.12 :</b> 7°. % διάφορα πειραματικού και θεωρητικού αριθμού $Re$ σε σχέση με την αύξηση του αριθμού $Ka$ .....	80
<b>Σχήμα 4.5.13:</b> Η σχέση του αριθμού $Ka$ με τον κρίσιμο αριθμό $Reynolds$ για όλες τις γωνίες κλίσης ....	80
<b>Σχήμα 4.5.14:</b> Η σχέση του αριθμού $Ka_x$ με τον κρίσιμο αριθμό $Reynolds$ για όλες τις γωνίες κλίσης...	81
<b>Σχήμα 4.6.1:</b> 3°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 5% Βουτανόλη, $Ka = 176$ , $Ka_x=471$ , .....	82
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 60% Προπανόλη, $Ka=183$ , $Ka_x=489$ .....	82
<b>Σχήμα 4.6.2:</b> 3°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 2% Βουτανόλη, $Ka = 335$ , $Ka_x=894$ , .....	82
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 3% Βουτανόλη, $Ka=338$ , $Ka_x=904$ .....	82
<b>Σχήμα 4.6.3:</b> 3°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 7% Βουτανόλη, $Ka = 414$ , $Ka_x=1106$ , .....	83
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 1% Βουτανόλη, $Ka=427$ , $Ka_x=1140$ .....	83
<b>Σχήμα 4.6.4:</b> 3°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 1,5% Βουτανόλη, $Ka = 662$ , $Ka_x=1770$ .....	83
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 1% Βουτανόλη, $Ka=675$ , $Ka_x=1804$ .....	83
<b>Σχήμα 4.6.5:</b> 5°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 60% Προπανόλη, $Ka = 125$ , $Ka_x=281$ , .....	84
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 7% Βουτανόλη, $Ka=137$ , $Ka_x=275$ .....	84
<b>Σχήμα 4.6.6:</b> 5°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 5% Βουτανόλη, $Ka = 251$ , $Ka_x=565$ , .....	85
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 55% Γλυκερίνη, $Ka=256$ , $Ka_x=578$ .....	85
<b>Σχήμα 4.6.7:</b> 5°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 10 % Προπανόλη, $Ka = 311$ , $Ka_x=700$ .....	85
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 2% Βουτανόλη, $Ka=335$ , $Ka_x=754$ .....	85
<b>Σχήμα 4.7.1</b> Συσχέτιση κανονικοποιημένου αριθμού $Reynolds$ με τον $Ka$ .....	86
<b>Σχήμα 4.7.2</b> Συσχέτιση κανονικοποιημένου αριθμού $Reynolds$ με τον $Ka_x$ .....	87

# 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 επιφανειακής τάσης στην ευστάθεια και στα χαρακτηριστικά ροής υγρού υμένα, πάνω σε επίπεδο τοίχωμα.. Συγκεκριμένα, διερευνάται πώς επηρεάζεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, δηλαδή ο αριθμός Reynolds στον οποίο η ροή μεταπίπτει από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή, σε συνάρτηση με τη γωνία κλίσης του τοιχώματος, και σε συνάρτηση με διαφορές τιμές επιφανειακής τάσης και τιμές αριθμού Karitza.

## 1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα

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

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

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

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

### **1.3 Επιλογή εύρους μελετώμενων παραμέτρων**

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

Πιο συγκεκριμένα, ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε διαλύματα νερού – γλυκερίνης, νερού – γλυκερίνης - βουτανόλης, νερού - γλυκερίνης - προπανόλης και νερού - προπανόλης, σε διαφορές περιεκτικότητες, ενώ οι παροχές που μελετήθηκαν εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds σε πάνω και κάτω από τον κρίσιμο αριθμό

Reynolds για κάθε κλίση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή του είδους του διαλύματος υπαγορευόταν από τη γωνία κλίσης.

Η επιλογή των κλίσεων του τοιχώματος που μελετήθηκαν ( $2^{\circ}$ – $7^{\circ}$ ) υπαγορεύεται κυρίως από πειραματικούς περιορισμούς ενώ η εισαγωγή στο σύστημα συγκεκριμένης συχνότητας διαταραχής, δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου.

#### **1.4 Δομή της εργασίας**

Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη ροή υγρού υμένα, 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 τόσο σε πειραματικές μελέτες, οι οποίες είναι περιορισμένες, όσο και σε υπολογιστικές. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αρχικά, περιγράφεται η πειραματική διάταξη που υπάρχει στο εργαστήριο. Ακολουθεί η παρουσίαση της μεθόδου συλλογής των πειραματικών δεδομένων και η διαδικασία επεξεργασίας τους.



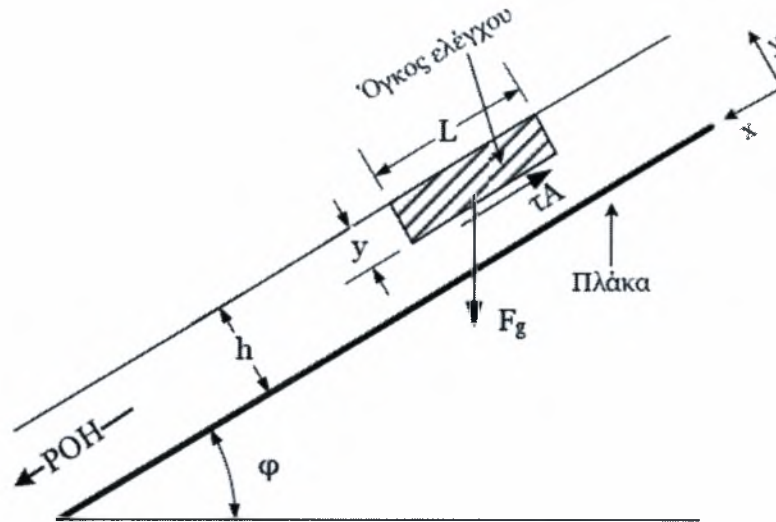
## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

---

### 2.1 Βασική ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα

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

Έστω ένα στρώμα ενός νευτωνικού ρευστού που ρέει σε μόνιμη ροή με σταθερό ρυθμό και σταθερό πάχος πάνω σε μια επίπεδη πλάκα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Η πλάκα έχει κλίση και σχηματίζει γωνία  $\phi$ . 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 2.1.1** Δυνάμεις πάνω σε ένα στοιχείο υγρού σε ροή υγρού υμένα.

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

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

Όπου:

$g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας

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

$\rho$  : πυκνότητα του ρευστού

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει :

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

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

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

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

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

Ολοκληρώνοντας η εξ. (2.1-4) δίνει :

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

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

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

Με χρήση των συνθηκών αυτών προκύπτουν οι δύο σταθερές :

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

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

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

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

Ο συνολικός μαζικός ρυθμός ροής του ρευστού είναι :

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

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

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 :

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

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:

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

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

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

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

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

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:

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

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

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,  $\gamma$  η επιφανειακή τάση του ρευστού και  $\hat{\sigma}$  ο τανυστής τάσεων.

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

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.

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

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

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, όπως θα δούμε και στη συνέχεια τις παρούσες 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].

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

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

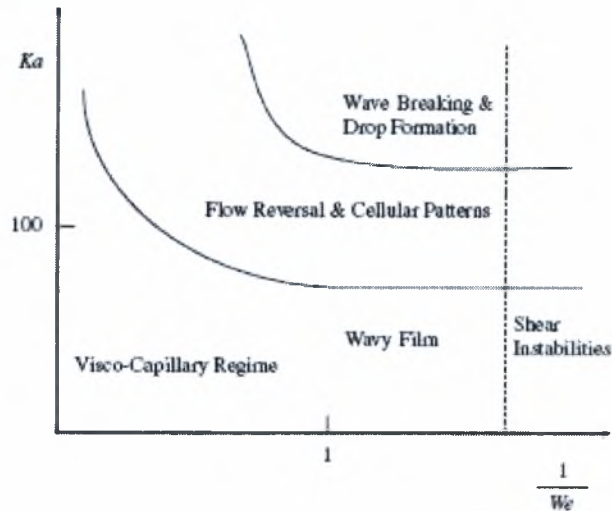
$$l_c = \sqrt{\gamma/(\rho g)} \quad (2.1-24)$$

Ο αριθμός Kapitza μπορεί να γραφεί ως:

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

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 λεπτές 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, με την αύξηση του αριθμού Kapitza, αυξάνεται και η σημασία των τριχοειδών φαινομένων αλλά και η πολυπλοκότητα της κυματοειδούς επιφάνειας. [Cesar E. Meza, Vemuri Balakotaiah (2007)]. Για κατακόρυφο και επίπεδο τοίχωμα, η συσχέτιση των We και Ka δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



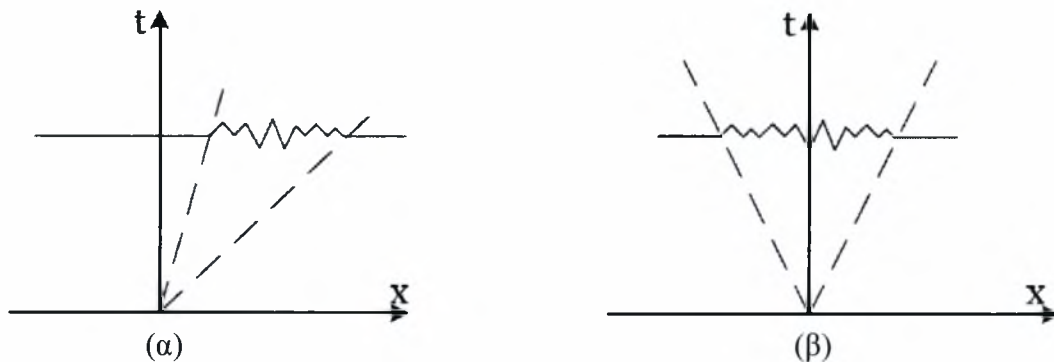
**Σχήμα 2.1.2** Σχηματικός Χάρτης ο οποίος απεικονίζει την αναμενόμενη συμπεριφορά κατακόρυφου υμένα εκφρασμένη στο επίπεδο  $(1/We, Ka)$

## 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 συγκεκριμένες 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). 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]. Παραδείγματα συναγωγικών ασταθειών είναι το οριακό στρώμα, η ροή υγρού υμένα και η δέσμη (jet), ενώ απόλυτης αστάθειας είναι η θερμαινόμενη δέσμη και η ροή λόγω περιστρεφόμενου δίσκου [Μποντόζογλου, 2006].



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

### 2.3 Γραμμική ευστάθεια μονοδιάστατων ροών

Ένας τρόπος εκτίμησης της ευστάθειας μιας ροής είναι να υποβληθεί η ροή σε μια μεγάλη κλίμακα διαταραχών διαφόρων μορφών και να παρατηρηθεί η διαδοχική εξέλιξη τους. Αν όλες οι διαταραχές αποσβένονται η ροή χαρακτηρίζεται ευσταθής, ενώ αν συγκεκριμένες διαταραχές ενισχύονται η ροή είναι ασταθής.

Η συμπεριφορά μιας διαταραχής μπορεί να μελετηθεί θεωρητικά επιλύοντας τις εξισώσεις κίνησης και συνέχειας με χρήση των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Όμως, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι πιθανές διαταραχές είναι αναρίθμητες είναι μάταιο να επιχειρηθεί να μελετηθούν όλες οι πιθανές διαταραχές και επομένως πρέπει να εφαρμοστεί μια εναλλακτική μέθοδος. Ένας τρόπος είναι να θεωρηθεί ότι το μέγεθος της διαταραχής είναι και παραμένει μικρό κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος και στη συνέχεια να γραμμικοποιηθεί η εξίσωση κίνησης ως προς την ταχύτητα της βασικής κατάστασης και να λυθεί για ένα μεγάλο εύρος αρχικών συνθηκών με κατάλληλες μεθόδους. Αυτού του είδους η



προσέγγιση αποτελεί την *ανάλυση γραμμικής ευστάθειας* (linear stability analysis). Ακόμα και μετά τη γραμμικοποίηση μια γενική λύση σε αναλυτική μορφή μπορεί να βρεθεί μόνο για περιορισμένες ροές με χρήση της ανάλυσης *ιδιομορφών* (normal mode analysis), η οποία εξετάζει τη συμπεριφορά διαταραχών που αυξάνουν ή σβήνουν εκθετικά με το χρόνο.

Αν η ανάλυση γραμμικής ευστάθειας δείξει ότι συγκεκριμένες διαταραχές ενισχύονται με το χρόνο, η ροή είναι σίγουρα ασταθής. Ωστόσο, το αντίστροφο ισχύει μόνο στην περίπτωση στην οποία το πλάτος της διαταραχής είναι και παραμένει μικρό συνέχεια, γιατί τα μη γραμμικά φαινόμενα που έχουν θεωρηθεί αμελητέα μπορεί να ευθύνονται για την ασταθή συμπεριφορά. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μη γραμμικά φαινόμενα μπορεί να επιβραδύνουν ή ακόμα και να εξαφανίζουν την πιθανότητα ανάπτυξης ασταθών διαταραχών και να οδηγούν σε μια νέα μόνιμη ή περιοδική κατάσταση [Drazin, 1997].

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, ευσταθής, οριακά ευσταθής ή ασταθής. Αν όλες οι διαταραχές σβήνουν, η βασική ροή είναι γραμμικά ευσταθής, αλλά αν συγκεκριμένες διαταραχές αυξάνονται είναι γραμμικά ασταθής.

Για την περίπτωση μονοδιάστατων ροών, για κάθε οριακά ευσταθή τρισδιάστατη διαταραχή υπάρχει διδιάστατη διαταραχή που είναι οριακά ευσταθής σε χαμηλότερο αριθμό Reynolds. Δηλαδή, οι διαταραχές κατά τη διεύθυνση της ροής είναι οι πλέον ασταθείς (θεώρημα Squire). Επομένως, η μελέτη της γραμμικής ευστάθειας μπορεί να στηριχθεί στη θεώρηση μόνο διδιάστατων διαταραχών [Μποντόζογλου, 2006].

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούν οι περιορισμοί της θεωρίας γραμμικής ευστάθειας. Μια ροή που είναι ευσταθής σύμφωνα με τη θεωρία γραμμικής

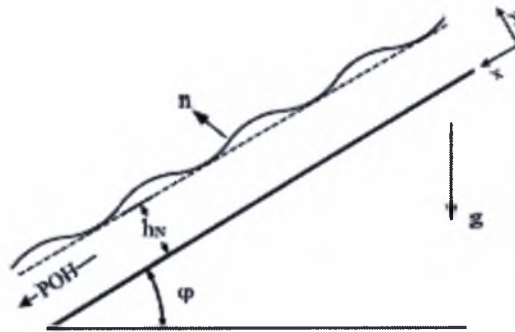
αστάθειας δεν είναι σίγουρο ότι μπορεί να επιτευχθεί και στην πράξη. Μη γραμμικά φαινόμενα και μικρές αποκλίσεις από την υποτιθέμενη ιδανική γεωμετρία της ροής, εξαιτίας για παράδειγμα τραχύτητας του τοιχώματος, μπορεί να ευθύνονται για ασταθείς συμπεριφορές της ροής [Μποντόζογλου, 2006].

## 2.4 Ευστάθεια ροής υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο κανάλι

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 :

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

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



Σχήμα 2.3. Ανάπτυξη περιοδικών διαταραχών στη ροή υγρού υμένα

και ορίζομαι 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  $\rho u_0^2$ . 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  $\hat{\phantom{x}}$  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  $\sigma$  ο τανυστής τάσεων του ρευστού, τότε ισχύει ισορροπία επαπτομενικών δυνάμεων:

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

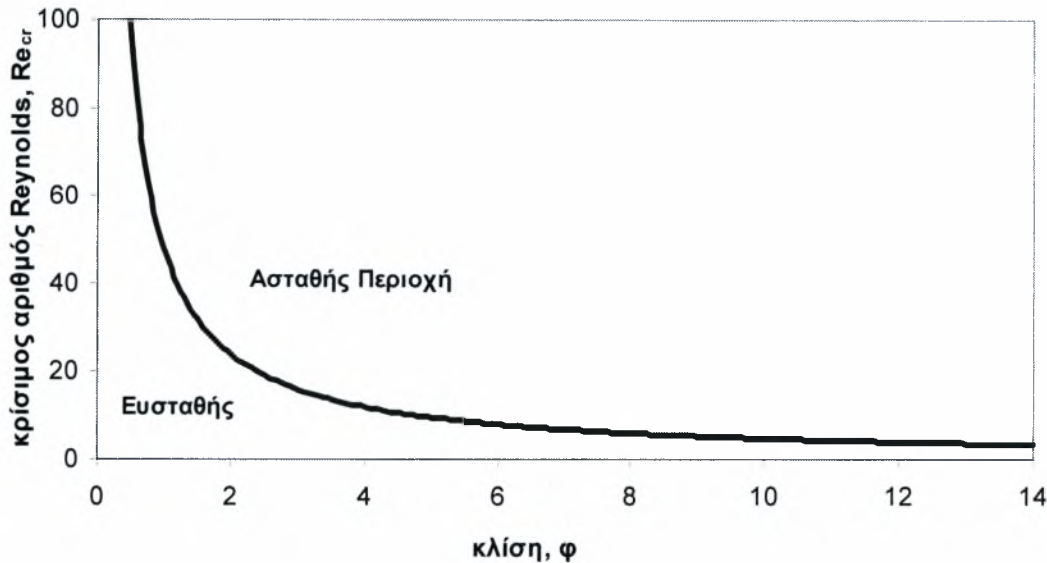
και εξισορρόπηση της δύναμης λόγω επιφανειακής τάσης,  $\gamma$ , από τις κάθετες δυνάμεις:

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

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  $\text{Re}$  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 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.

## 2.5 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.

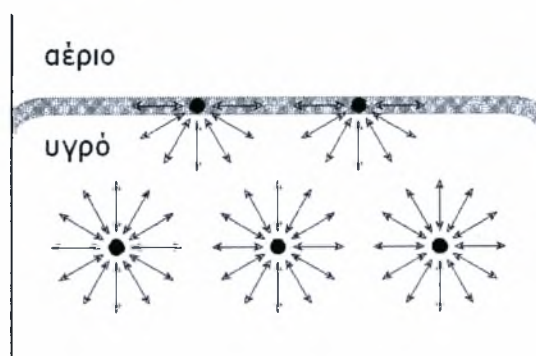
Ο Α. Σαμαντάς στη μεταπτυχιακή του εργασία, μελέτησε, εκτός από το παραπάνω των Vlachogiannis et al. (2010), και την ανάλυση ευστάθειας του υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Έγιναν μετρήσεις σε ημιτονοειδές και σε ορθογωνικό τοίχωμα διαφόρων χαρακτηριστικών διαμόρφωσης. Το πρώτο συμπέρασμα 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.

## **2.6 Επιφανειακά Φαινόμενα – Ορισμός της επιφανειακής τάσης**

Τα μόρια ενός υγρού ασκούν το ένα στο άλλο ισχυρές ελκτικές δυνάμεις συνοχής που ανθίστανται σε προσπάθειες διαχωρισμού τους. Έτσι, κάθε ποσότητα

ενός υγρού χαρακτηρίζεται από ένα ορισμένο ποσό δυναμικής ενέργειας (αρνητικής). 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 2.3, 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 2.4.** Δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ μορίων στο εσωτερικό ενός υγρού και στη διεπιφάνεια

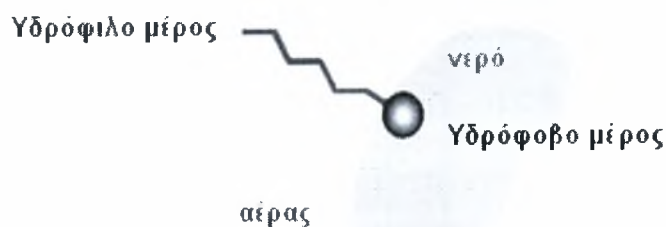
Έτσι όλη η ελεύθερη επιφάνεια του υγρού βρίσκεται κάτω από την επίδραση δυνάμεων οι οποίες συνεπάγονται την ύπαρξη μιας ενέργειας, που ονομάζεται ελεύθερη επιφανειακή ενέργεια. Το σύστημα έτσι τείνει να αποκτήσει τη χαμηλότερη στάθμη ενέργειας και τα υγρά αυθόρμητα ελαττώνουν την ενέργεια της επιφάνειάς 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

## 2.7 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 2.5: 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 ποικίλει 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 ( $\pi$ ). Λόγω της επιφανειακής πίεσης η αρχική επιφανειακή τάση ( $\gamma_0$ ), 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. Παραδείγματα αποτελούν οι σάπωνες ( $\text{RCOONa}^+$ ), τα αλκυλοβενζολοσουλφονικά άλατα ( $\text{SO}_3^-$ ), τα αλκυλοθειικά ( $\text{OSO}_3^-$ ), και τα αλκυλοφωσφορικά άλατα ( $\text{OPO}_3^{2-}$ ).
- **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

$(R(CH_2CH_2O)_nOH)$ , οι αιθοξυλιωμένες αλκυλοφαινόλες  $(RC_6H_4(CH_2CH_2O)_nOH)$ . Τα μη ιοντικά τασιενεργά σε θερμοκρασία δωματίου ως επί το πλείστον είναι υγρά

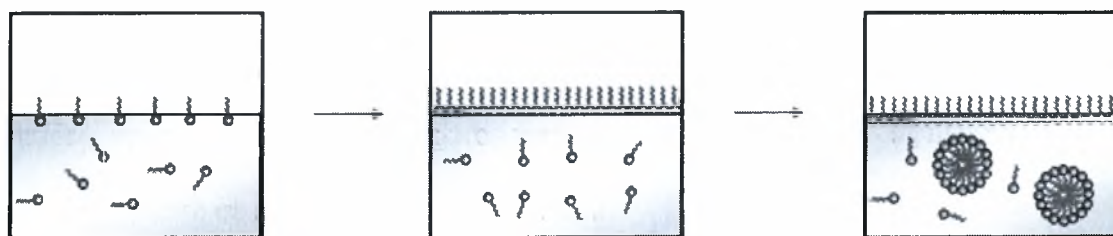
- Αμφοτερικά τασιενεργά. Έχουν αμφοτερικές υδρόφιλες ομάδες. Παραδείγματα αποτελούν τα αμινοκαρβοξυλικά οξέα  $(R_1N+R_2CH_2COO^-)$ , οι μπεταΐνες και οι σουλφομπεταΐνες.

## 2.8 Φυσικές ιδιότητες διαλυμάτων επιφανειοδραστικών

Η συμπεριφορά των διαλυμάτων των επιφανειοδραστικών ωφείλεται στη 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.

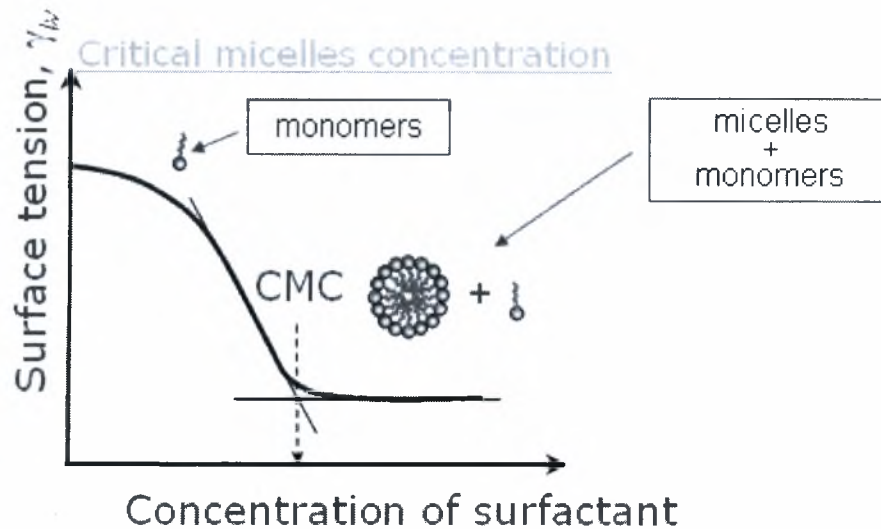
Η ανώμαλη αυτή συμπεριφορά θα μπορούσε να εξηγηθεί με την δημιουργία οργανωμένων συσσωμάτων, μικκυλίων, στα οποία οι λιπόφιλες υδρογονανθρακικές αλυσίδες προσανατολίζονται προς το εσωτερικό του μικκυλίου, αφήνοντας τις υδρόφιλες ομάδες σε επαφή με το υδατικό μέσο.

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 2.5.



**Σχήμα 2.6:** 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 2.6). Από τη συγκέντρωση αυτή και μετά η επιφανειακή τάση θεωρείται ότι παραμένει σταθερή.



**Σχήμα 2.7:** Σχηματική αναπαράσταση της μείωσης της επιφανειακής τάσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού

Οι αλκοόλες βουτανόλη και προπανόλη που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, συμπεριφέρονται ως μη ιοντικά επιφανειοδραστικά λόγω της μορφής του μορίου τους και των δυνάμεων διασποράς που εμφανίζουν στα υδατικά τους διαλύματα. Ωστόσο, λόγω του μικρού μοριακού βάρους τους, διαλύονται πλήρως στο νερό χωρίς να σχηματίζουν κάποιας μορφής συσσωματώματα.

## 2.9 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 προσρόφηση του επιφανειοδραστικού, μια διαδικασία που μπορεί να πραγματοποιηθεί εντός δευτερολέπτων ή να διαρκέσει για μία περίοδο ωρών. Για τα ιξώδη υγρά με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις επιφανειοδραστικών και σε παχύτερους υμένες, αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί γρήγορα, εντούτοις στους λεπτούς υμένες μπορεί να μην υπάρξει αρκετό επιφανειοδραστικό στην εκτεταμένη περιοχή επιφάνειας 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 αντιδράσει στη ροή υμένων στους αφρούς. (Laurier L. Schramm, [2000]).

Η επιβολή της εξωτερικής διαταραχής επιφέρει τη δημιουργία κυμάτων στην επιφάνεια του υμένα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του εμβαδού της

επιφάνειας του υμένα μέσω των κυμάτων. Όταν η συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού στο διάλυμα είναι κάτω από τη cmc τότε δεν θα είναι εύκολη η αποκατάσταση της ισορροπίας του υμένα, με αποτέλεσμα να μεγιστοποιούνται τα αποτελέσματα των εξωτερικών διαταραχών, κάτι που αναμένεται να ευνοεί την αστάθεια του υμένα. Αναμένεται δηλαδή στην περίπτωση αυτή να παρατηρηθεί μετάβαση από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή σε μικρότερους αριθμούς Reynolds.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται προσθήκη αλκοολών. Αναμένεται μείωση της επιφανειακής τάσης χωρίς να επηρεαστεί η ελαστικότητα της επιφάνειας και το ιξώδες, αφού θεωρούμε ότι τα διαλύματα αλκοολών συμπεριφέρονται σαν καθαρά υγρά με χαμηλότερη επιφανειακή τάση (Christina Tzotzi et. al, 2010). Η συμπεριφορά αυτή σύμφωνα με τους Lucassen et. al (1970) είναι αποτέλεσμα της σημαντικής διαλυτότητας των αλκοολών αυτών στο νερό, που σε συνδυασμό με το χαμηλό ιξώδες επιτρέπει γρήγορη διάχυση από την επιφάνεια στον κύριο όγκο του ρευστού.

## **2.10 Βιβλιογραφικές αναφορές για την επίδραση των επιφανειοδραστικών**

Οι μελέτες που έχουν γίνει είναι κυρίως υπολογιστικές και αφορούν την επίδραση των επιφανειοδραστικών σε ροές με περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα και την επίδραση στην ευστάθεια ενός υμένα σε επίπεδο τοίχωμα. Η σημασία τους στη ευστάθεια της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο έχει αναγνωριστεί και έχει ερευνηθεί από διάφορους συντάκτες, όπως Ji & Setterwall (1994). Τα πειράματα που έχουν γίνει, αφορούν την επίδραση των επιφανειοδραστικών σε επεκτεινόμενες ελεύθερες επιφάνειες. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των ερευνών που εξεταστήκαν προκειμένου να σχηματιστεί μια γενική εντύπωση για την επίδραση των επιφανειοδραστικών.

Ο C.Pozrikidis (2003) ερεύνησε την επίδραση ενός μη – διαλυτού επιφανειοδραστικού στη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο με περιοδικές διαμορφώσεις ή εγκοπές, σε μηδενικό αριθμό Reynolds. Μια ανάλυση διαταραχής για τα τοιχώματα με ημιτονοειδή διαμόρφωση μικρού πλάτους αποκαλύπτει ότι το

επιφανειοδραστικό μέσο ενισχύει την παραμόρφωση της επιφάνειας υμένων, αν και καθιστά το πάχος υμένων πιο ομοιόμορφο στην κεκλιμένη επιφάνεια. Η επίδραση του είναι σημαντικότερη όταν το πάχος των υμένων είναι η μικρότερο από τη μισή περίοδο των τοιχωμάτων. Διαπίστωθηκε ότι η παρουσία επιφανειοδραστικού μπορεί να ασκήσει βαθιά επίδραση στην κατανομή της επιφανειακής ταχύτητας και στην κινηματική της ροής. Συγκεκριμένα, τείνει να καταστήσει την εφαπτομενική ταχύτητα πιο ομοιόμορφη στη επιφάνεια υμένων

Οι M. G. Blyth & C. Pozrikidis (2004), μελέτησαν την επίδραση ενός αδιάλυτου επιφανειοδραστικού, στην ευστάθειας της ροής ενός υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο. Προσδιόριζαν, ότι ένα αδιάλυτο επιφανειοδραστικό έχει μια σταθεροποιητική επιρροή στη ροή λόγω βαρύτητας ενός υγρού υμένα σε κεκλιμένο ή κάθετο τοίχωμα, με την αύξηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds επάνω από τον οποίο η βασική ομοιοκατευθυνόμενη ροή Nusselt γίνεται ευαίσθητη στις απειροελάχιστες διαταραχές (Benjamin 1964 Whitaker 1964). Έδειξαν ότι η επίδραση ενός αδιάλυτου επιφανειοδραστικού είναι κυρίως ήπια, δεδομένου ότι τείνει να ηρεμήσει την επιφάνεια. Όταν εισάγεται επάνω στην επιφάνεια του υμένα, ο κρίσιμος αριθμός Reynolds αυξάνεται. Κατά συνέπεια, το επιφανειοδραστικό έχει μια σταθεροποιητική επίδραση στη δυναμική υμένων. Το ίδιο υποστηρίζεται και από τον J. Lucassen (1981), ο οποίος κάνει λόγο για την αύξηση του συντελεστή απόσβεσης κυμάτων παρουσία ενός αδιάλυτου επιφανειοδραστικού, όπως είναι το λάδι.

Οι C. J. W. Breward, R. C. Darton, P. D. Howell, και J. R. Ockendon (2000) μελέτησαν πειραματικά την επίδραση των επιφανειοδραστικών σε ελεύθερες επεκτεινόμενες επιφάνειες. Ανέπτυξαν μια συστηματική θεωρία για τη ροή που παρατηρείται στο πείραμα κυλίνδρου υπερχειλίσης. Το βασικό φαινόμενο που εξηγείται είναι η αύξηση μεγέθους της επιφανειακής ταχύτητας ενός δοχείου νερού το οποίο ξεχειλίζει αργά, η οποία προκαλείται από την προσθήκη ενός διαλυτού επιφανειοδραστικού σε μικρή ποσότητα.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

---

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

#### 3.1 Πειραματική διάταξη

##### 3.1.1 Κανάλι ροής

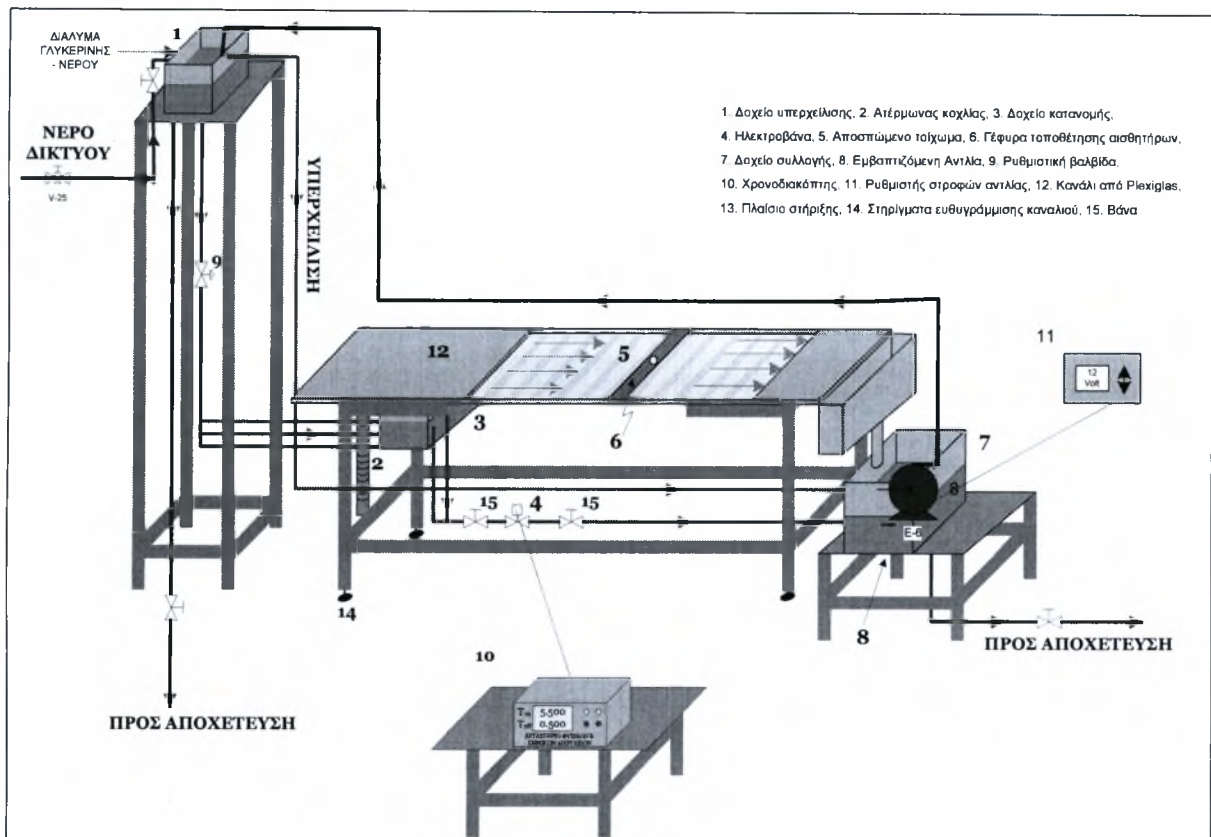
Η πειραματική διάταξη [Βλαχογιάννης, 2001] απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Στόχος της συσκευής είναι να τροφοδοτεί με ρευστό μια επιφάνεια, η οποία έχει τη δυνατότητα να παίρνει κλίση. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η μελέτη της ροής.

Το βασικό μέρος της συσκευής είναι ένα κανάλι (12)1, πλάτους 25 cm και μήκους 80 cm, πάνω στο οποίο ρέει το υγρό. Το κομμάτι αυτό της συσκευής, όπως και τα περισσότερα μέρη της διάταξης, είναι κατασκευασμένα από Plexiglas ώστε να είναι ορατή η ροή από όλες τις πλευρές και να επιτρέπεται ο οπτικός έλεγχος. Μέρος της βάσης του καναλιού (5) είναι αποσπώμενο, αποτελούμενο από πλάκα πλάτους 25 cm και μήκους 50 cm. Πάνω σε αυτή την πλάκα γίνονται οι μετρήσεις. Κατά την μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας του τοιχώματος, η πλάκα αυτή αντικαθίσταται από άλλες με την επιθυμητή μορφολογία επιφάνειας (π.χ. περιοδικό τοίχωμα). Η κλίση του καναλιού ρυθμίζεται με την βοήθεια ενός ατέρμονα κοχλία (2). Η γωνία που σχηματίζει το κανάλι με το οριζόντιο επίπεδο μπορεί να μεταβληθεί από 0° έως 67°.



Στα πειράματα της παρούσας εργασίας, η κλίση κυμάνθηκε από 2°-7°. Η λειτουργία της συσκευής περιγράφεται συνοπτικά ως εξής:

Αρχικά κατάλληλο ρευστό τοποθετείται στο δοχείο συλλογής (7). Το ρευστό αυτό, με τη βοήθεια μιας εμβαπτιζόμενης (8) αντλίας οδηγείται στο δοχείο υπερχειλίσσης (1). Από εκεί εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς και λόγω του βάρους του, το ρευστό ρέει μέσω ενός συστήματος σωλήνων πολυαιθυλενίου προς το δοχείο κατανομής (3), με το οποίο επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού στο τμήμα μετρήσεων του καναλιού (5). Στη συνέχεια, το ρευστό επιστρέφει στο δοχείο συλλογής για να ακολουθήσει την ίδια διαδρομή. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο είδος αντλίας είναι ότι δεν αυξάνει τη θερμοκρασία του ρευστού, γεγονός που πιθανόν να επηρέαζε τις μετρήσεις. Η παροχή του ρευστού ελέγχεται από μια ρυθμιστική βαλβίδα (9), η οποία παρεμβάλλεται ανάμεσα στο δοχείο υπερχειλίσσης και το δοχείο κατανομής. Πιο συγκεκριμένα, ρυθμίζεται τη βαλβίδα σε μια ορισμένη θέση και η παροχή προσδιορίζεται μετρώντας το βάρος του ρευστού που εξέρχεται από το κανάλι. Με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος επιτυγχάνεται η επιθυμητή παροχή. Επειδή η όλη κίνηση οφείλεται στην υψομετρική διαφορά του υγρού, σταθερή στάθμη στο δοχείο υπερχειλίσσης εξασφαλίζει και σταθερή παροχή.

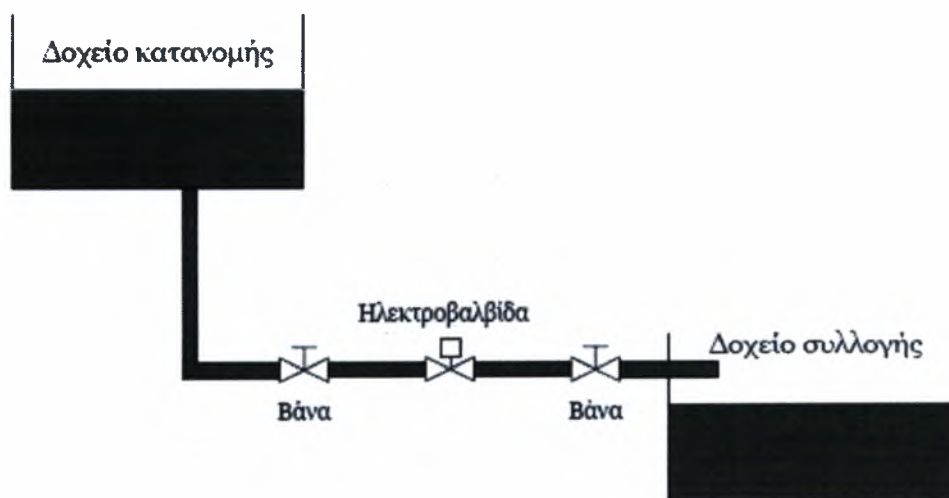


Σχήμα 3.1 πειραματική διάταξη

### 3.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Το διαθέσιμο μήκος του καναλιού περιορίζει τη μελέτη της εξέλιξης των φυσικά δημιουργούμενων διαταραχών. Η επιβολή εξωτερικής διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα by-pass με ηλεκτροβαλβίδα (4). Η διαταραχή δημιουργείται με τη βοήθεια μιας χρονιζόμενης ηλεκτρο- βαλβίδας (ON/OFF). Για το σκοπό αυτό ενώθηκε το δοχείο συλλογής, μέσω ενός ελαστικού σωλήνα, με το δοχείο κατανομής (Σχήμα 3.2). Μέσω της παράκαμψης αυτής ένα μέρος από το υγρό που βρίσκεται στο δοχείο κατανομής οδηγείται στο δοχείο συλλογής χωρίς να περάσει από την κεκλιμένη πλάκα του καναλιού. Στην παράκαμψη αυτή παρεμβάλλεται η ηλεκτροβαλβίδα. Ένας χρονοδιακόπτης ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας. Όταν η ηλεκτροβαλβίδα είναι ανοιχτή μια ποσότητα υγρού περνάει άμεσα προς το δοχείο

συλλογής. Όταν όμως είναι κλειστή, η ποσότητα αυτή του υγρού οδηγείται μέσω της κεκλιμένης πλάκας στο δοχείο συλλογής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εξωτερικά επιβαλλόμενη αυξομείωση του πάχους του υμένα με το χρόνο (κύμα στην αρχή του καναλιού). Δηλαδή, το περιοδικό φράξιμο της παράκαμψης αυτής προκαλεί διαταραχή στην είσοδο του καναλιού με μορφή υδραυλικού άλματος. Το υδραυλικό αυτό άλμα διαχωρίζεται κατάντη της ροής εξαιτίας των μη-γραμμικών αλληλεπιδράσεων και δημιουργεί μια σειρά μοναχικών κυμάτων. Το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής μπορεί να ρυθμιστεί από τον λόγο των χρονικών διαστημάτων που η δίοδος μένει ανοιχτή και κλειστή και από την ποσότητα του ρευστού που επιτρέπεται να περνάει διαμέσου του bypass. Η ποσότητα αυτή ρυθμίζεται από τις βάνες (15) που βρίσκονται εκατέρωθεν της ηλεκτροβαλβίδας. Επίσης, ρυθμίζοντας τον συνολικό χρόνο του φαινομένου, μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα της διαταραχής. Το σύστημα διαταραχής που περιγράφηκε μπορεί να παράγει συχνότητες διαταραχής από 0.1 Hz έως και 5 Hz.

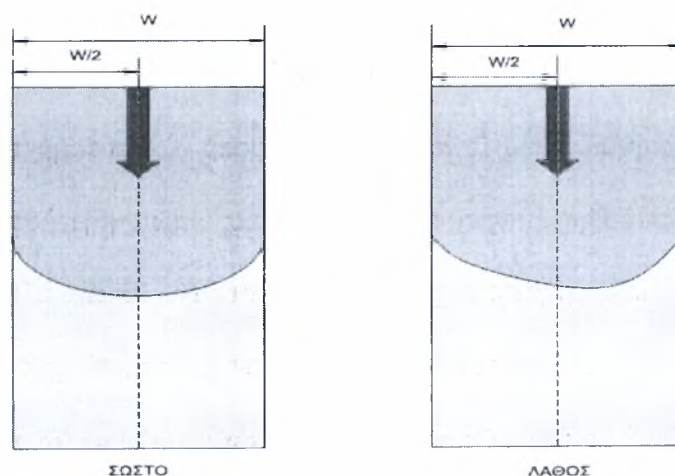


Σχήμα 3.2 Σύστημα διαταραχής

### 3.1.3 Ευθυγράμμιση καναλιού ροής

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο κανάλι είναι η ευθυγράμμιση του καναλιού. Για το σκοπό αυτό έχουν τοποθετηθεί στο πλαίσιο που στηρίζεται το κανάλι κατάλληλα περιστρεφόμενα στηρίγματα (14),

τα οποία δίνουν τη δυνατότητα μετακίνησης ολόκληρου του συστήματος προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Προκειμένου να ρυθμιστεί και να ελεγχθεί η ευθυγράμμιση του καναλιού ακολουθείται η εξής διαδικασία: Ρυθμίζεται η παροχή του ρευστού ώστε ο υμένας στο κανάλι να είναι σταθερός χωρίς την ύπαρξη εξωτερικής διαταραχής. Η περίοδος του χρονοδιακόπτη και το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής καθορίζονται σε μέτριο μέγεθος. Χαρακτηριστικές τιμές είναι περίπου 5 s ανοικτή και 0.5 s κλειστή η ηλεκτροβαλβίδα, ενώ ρυθμίζεται και η βάνα που βρίσκεται με την ηλεκτροβαλβίδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του μεγέθους της διαταραχής στο σημείο αυτό είναι ποιοτική. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται πάνω στο τοίχωμα ένα μέτωπο της υγρής φάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Σωστή ευθυγράμμιση συνεπάγεται ότι η κορυφή του μετώπου θα βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος. Σε αντίθετη περίπτωση ρυθμίζονται ανάλογα τα στηρίγματα. Δηλαδή στην περίπτωση, όπως αυτή του σχήματος 3.3, όπου το μέτωπο είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά, δηλώνει ότι περισσότερη μάζα ρευστού βρίσκεται στην πλευρά αυτή οπότε το σημείο αυτό είναι πιο ψηλά από το αντίστοιχο σημείο της αριστερής πλευράς και πρέπει είτε να ανυψωθεί το σημείο αυτό ή να μειωθεί το ύψος από την αριστερή πλευρά. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρι η κορυφή του κύματος να βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος σε όλο το μήκος της πλάκας.



Σχήμα 3.3 ευθυγραμμισμένο και μη ευθυγραμμισμένο κανάλι

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

### **3.2 Ιδιότητες ρευστών**

Ανάλογα με την επιθυμητή επιφανειακή τάση, επιλέγεται η κατάλληλη περιεκτικότητα αλκοόλης, ενώ η περιεκτικότητα γλυκερίνης επιλέγεται τόση ώστε να επιτυγχάνεται διαβροχή του υμένα ακόμα και για πολύ μικρές παροχές. Αύξηση του ιξώδους του ρευστού έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ανάπτυξης των δομών και της εξαφάνισης των τρισδιάστατων ασταθειών ακόμα και σε σχετικά μεγάλες γωνίες και αριθμούς Re. Βέβαια η προσθήκη μεγάλου ποσοστού γλυκερίνης θα είχε ως αποτέλεσμα την πολύ αργή εξέλιξη των φαινομένων και σ' αυτή την περίπτωση το μήκος του καναλιού δεν θα ήταν αρκετό για να αναπτυχθούν πλήρως. Οπότε, η επιλογή του ρευστού πρέπει να είναι προσεκτική ώστε να μην εξαχθούν εσφαλμένα συμπεράσματα για την εξέλιξη της ροής.

Ο προσδιορισμός της σύστασης και της πυκνότητας των διαλυμάτων νερού γλυκερίνης εκάστοτε διαλύματος έγινε μετρώντας στην αρχή και στο τέλος κάθε πειράματος τον δείκτη διάθλασης ( Πινάκας 3 παραρτήματος) του διαλύματος με τη

βοήθεια του διαθλασίμετρου (**Abbe 5 Refractometer - Bellingham+Stanley Ltd.**). Σε καμία μέτρηση δεν παρουσιάστηκε μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Στη συνέχεια, ανατρέχοντας στους πίνακες ιδιοτήτων των διαλυμάτων γλυκερίνης – νερού για τη θερμοκρασία των 20° C (Παράρτημα), υπολογιζόταν η τελική σύσταση του μίγματος και στη συνέχεια το κινηματικό ιξώδες χρησιμοποιώντας πάλι τους πίνακες του παραρτήματος με δεδομένη θερμοκρασία 20° C και σύσταση μίγματος αυτήν που προσδιορίστηκε με την προηγούμενη διαδικασία.

Για τα διαλύματα νερού - γλυκερίνης – αλκοόλης, επειδή δεν υπάρχουν πίνακες προσδιορισμού των ιδιοτήτων τους, γινόταν μέτρηση του ιξώδους και της πυκνότητας με τα όργανα μέτρησης του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα, η μέτρηση ιξώδους γινόταν με ιξωδόμετρο τριχοειδούς σωλήνα και η μέτρηση της πυκνότητας με πυκνόμετρα. Η αρχή μέτρησης των ιξωδομέτρων αυτών είναι κοινή. Για τον προσδιορισμό του κινηματικού ιξώδους 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.

Ο υπολογισμός της επιφανειακής τάσης στα διαλύματα της προπανόλης και της βουτανόλης, έγινε από τον πίνακα 4 και 5 αντίστοιχα, του παραρτήματος θεωρώντας το διάλυμα γλυκερίνης νερού, σαν καθαρό νερό, αφού η γλυκερίνη και το νερό έχουν την ίδια επιφανειακή τάση.

Βρέθηκε ότι η πειραματική τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί λειτουργεί για την περίπτωση που η αγωγιμότητα του ρευστού είναι μεταξύ 300-1000  $\mu\text{S}$ . Εξαιτίας του γεγονότος ότι η γλυκερίνη δεν είναι ιδιαίτερα αγωγήμη υπήρχαν περιπτώσεις όπου ήταν απαραίτητη η αύξηση της αγωγιμότητας των διαλυμάτων νερού-γλυκερίνη. Αυτό επιτυγχανόταν με την προσθήκη μικρής ποσότητας αλατιού στο διάλυμα. Η μέτρηση της αγωγιμότητας γινόταν χρησιμοποιώντας ένα αγωγιμόμετρο (Consort

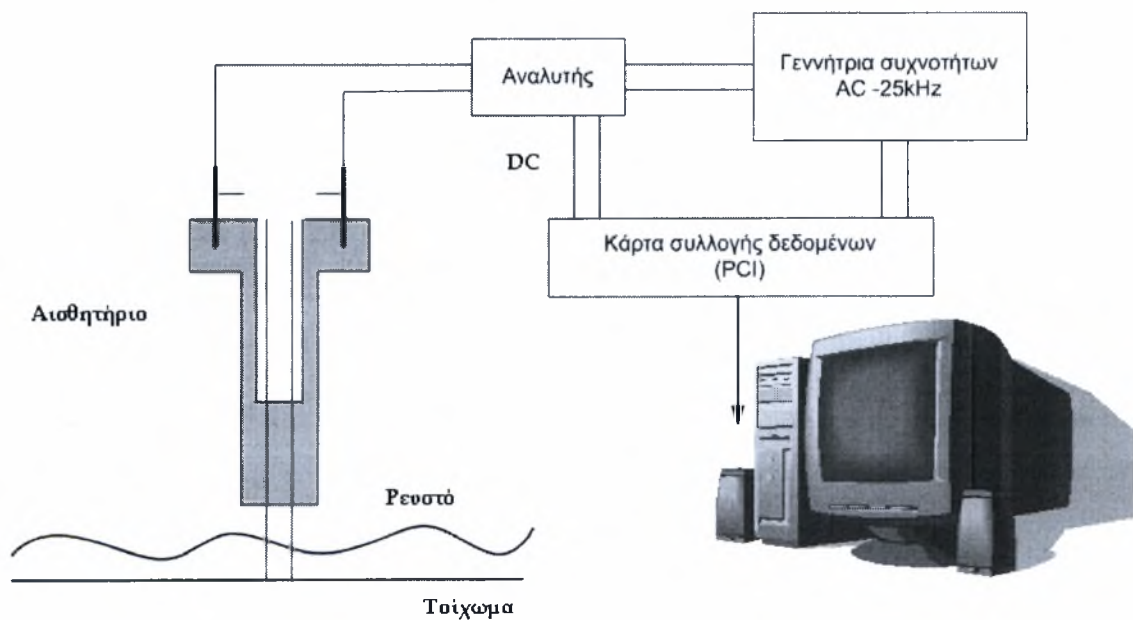
C834). Για το σκοπό αυτό λαμβανόταν δείγμα από το κανάλι αρκετές φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος.

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

### **3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική**

Η αγωγιμομετρική τεχνική [Andritsos, 1986] χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας και των διακυμάνσεων της. Η τεχνική στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δύο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσα τους. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται το μετρητικό που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της τεχνικής. Το μετρητικό τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή και στη συνέχεια με τη βοήθεια κατάλληλης κάρτας συλλογής δεδομένων (Advantech PCI-1710HG, 16-bit) και προγράμματος που δημιουργήθηκε στο Εργαστήριο σε LabView αποθηκεύεται το εξερχόμενο από το μετρητικό σήμα (τάση DC ως προς

χρόνο). Το αισθητήριο είναι κατασκευασμένο από 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 χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες γέφυρες, οι οποίες τοποθετήθηκαν πάνω από το τοίχωμα σε 2 διαφορετικές θέσεις (στην αρχή, και στο τέλος). Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα της κατακόρυφης μετακίνησης του μετρητικού ώστε να τοποθετείται πολύ κοντά στο τοίχωμα. Για την ταυτόχρονη λήψη και από τις δυο θέσεις χρησιμοποιήθηκαν ένας αναλυτής (κάθε αναλυτής έχει δύο κανάλια εισόδου). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, βρέθηκε από πειράματα ότι η μέθοδος αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά για τις περιπτώσεις όπου η αγωγιμότητα του ρευστού κυμαίνονταν μεταξύ 300-1000  $\mu\text{S}$ .



**Σχήμα 3.3.** 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

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

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

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

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

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

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

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

### **3.4 Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας διεξαγωγής πειραμάτων**

Αρχικά, επιλέγεται το κατάλληλο ρευστό, αναδεύεται με τη βοήθεια του μαγνητικού αναδευτήρα και τοποθετείται στο δοχείο συλλογής. Στη συνέχεια τίθεται σε λειτουργία η αντλία και αφήνεται το σύστημα να λειτουργήσει επί 30 min. Η αντλία ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η στάθμη στο δοχείο υπερχειλίσης να είναι σταθερή. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος τίθεται σε λειτουργία και η ηλεκτροβαλβίδα για να εισέλθει ρευστό σε όλους τους σωλήνες και να μην υπάρχει καθόλου αέρα. Ακολουθεί το σημαντικότερο βήμα όλης της πειραματικής διαδικασίας, η ευθυγράμμιση του καναλιού. Σημαντική βοήθεια στην ευθυγράμμιση του καναλιού διαδραματίζει η χρωστική ουσία που έχει προστεθεί στο ρευστό. Ο τρόπος ευθυγράμμισης έχει περιγραφεί προηγουμένως. Αφού ευθυγραμμιστεί το κανάλι, αρχίζει η πειραματική διαδικασία με τη ρύθμιση της ηλεκτροβαλβίδας, συγκεκριμένα 5.5 s ανοικτή και 0.5 s κλειστή. Ενώ το ύψος της διαταραχής ρυθμίζεται κυρίως από τη βάνα που βρίσκεται μετά την ηλεκτροβαλβίδα. Η επιλογή της συχνότητας διαταραχής στηρίζεται στο γεγονός ότι πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, θεωρητικά ίση με μηδέν [Liu et al., 1993]. Ο χρόνος δειγματοληψίας κυμαίνεται μεταξύ 60-70 s, ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Η επιλογή του χρόνου έγινε ώστε να αποθηκεύονται αρκετοί περίοδοι και έτσι να ελέγχεται η επαναληπτικότητα των φαινομένων και να απορρίπτονται προβληματικές μετρήσεις. Οι συνηθέστεροι λόγοι για τους οποίους πειραματικά δεδομένα μπορεί να αποκλειστούν είναι η έντονη επίδραση του εξωτερικού θορύβου, η ύπαρξη κάποιας ακαθαρσίας ή φυσαλίδας στο πεδίο ροής και ο εσφαλμένος τρόπος λειτουργίας της ηλεκτροβαλβίδας. Μετά την ευθυγράμμιση και τη διαδικασία των πειραμάτων, ακολουθούν τα πειράματα βαθμονόμησης. Στα

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

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής λεπτού υγρού υμένα, με παρουσία διαλυτών στο νερό επιφανειοδραστικών, δηλαδή των αλκοολών προπανόλη και βουτανόλη.

Στόχος των πειραμάτων είναι να βρεθεί η επίδραση της μείωσης της επιφανειακής τάσης στην ευστάθεια και τα χαρακτηριστικά της ροής υγρού υμένα.

Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση των πρωτογενών δεδομένων του πειράματος, δηλαδή της εξέλιξης του πάχους του υμένα με το χρόνο.

### 4.1 Σειρές πειραμάτων

Τα πειράματα έγιναν πάνω σε επίπεδη πλάκα για γωνίες κλίσης  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7^\circ$  και  $10^\circ$ . Σε κάθε γωνία κλίσης μετρήθηκαν τουλάχιστον 15 διαφορετικές τιμές παροχών, δηλαδή 15 τουλάχιστον τιμές του αριθμού Reynolds. Επιλέχθηκαν διάφορα διαλύματα αλκοόλης, νερού γλυκερίνης, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της μείωσης της επιφανειακής τάσης στη ροή υγρού υμένα σε κάθε γωνία κλίσης. Όμως στη συνέχεια, παρατηρήθηκε ότι διαλύματα με χαμηλή επιφανειακή τάση (60% προπανόλη,  $\gamma=24 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ), μας έδωσαν ίδιο κρίσιμο πειραματικό αριθμό Reynolds με διαλύματα νερού γλυκερίνης (50% με  $\gamma=70 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) σε ίδια γωνία κλίσης. Έτσι, έγιναν κάποια επιπρόσθετα πειράματα, ώστε να συσχετιστούν οι ιδιότητες του ρευστού (διαστατός αριθμός Kapitza) με την ευστάθεια.

Επομένως τα πειράματα που έγιναν παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

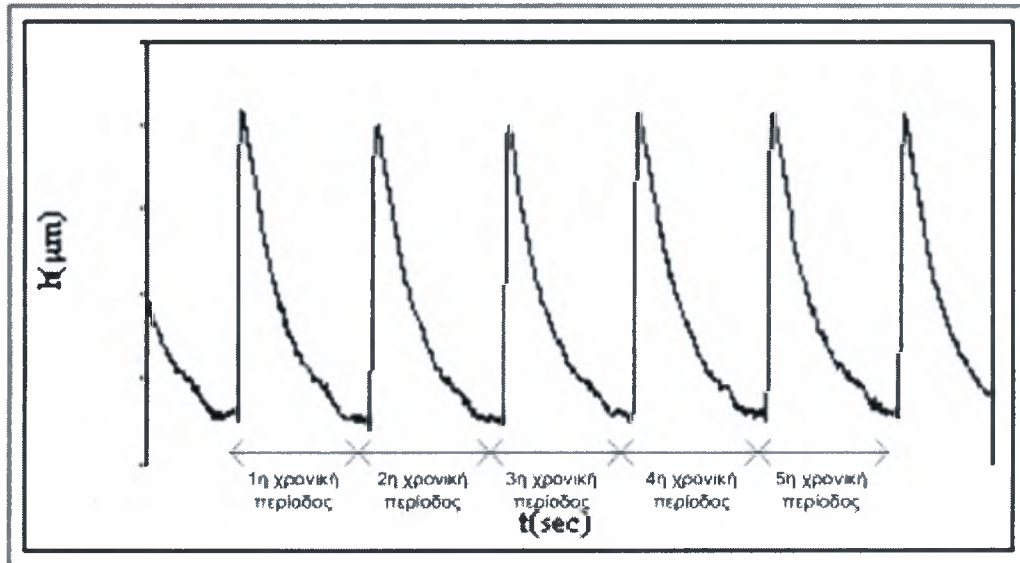
	γωνία κλίσης (μοίρες)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v$ (m <sup>2</sup> /s)	περιεκτικότητα γλυκερίνης κατά βάρος	περιεκτικότητα αλκοόλης κατά βάρος	$\gamma$ (mN*m-1)
1	2	1152.425	8.43E-06	60%	0%	70.00
2	2	1139.5	6.9E-06	55%	0%	70.00
3	2	1126.3	5.33E-06	50%	0%	70.00
4	2	1111.6	4.12E-06	45%	0%	70.00
5	2	1099.1	3.29E-06	40%	0%	70
6	2	1085.8	2.79E-06	35%	0%	70.00
7	2	1059.8	2.01E-06	25%	0%	70.00
8	2	1046.9	1.68E-06	20%	0%	70
9	2	1034.5	1.48E-06	15%	0%	70
10	2	1022.1	1.28E-06	10%	0%	70
11	2	998.23	1.01E-06	0%	0%	70
12	3	1131.8	6.15E-06	55%	0%	70
13	3	1078	2.55E-06	36%	0%	70.00
14	3	1062.4	2.07E-06	25%	0%	70
15	3	1047	1.7E-06	20%	0%	70
16	3	1022	1.3E-06	10%	0%	70
17	3	988.2	1E-06	0%	0%	72
18	3	1116.55	4.74E-06	30	7%	26
19	3	1112.8	4.37E-06	45%	5%	30.00
20	3	1099.3	3.38E-06	40%	2%	40.00
21	3	1094	3.18E-06	42%	3%	37.00
22	3	1064.95	2.14E-06	28%	7%	26.00
23	3	1099.3	3.38E-06	40%	1%	51.00
24	3	1064.95	2.14E-06	28%	5%	30.00
25	3	1070.1	2.27E-06	30%	3%	37.00
26	3	1091.35	2.63E-06	41%	1.50%	47.00
27	3	1072.7	2.33E-06	30%	2%	40.00

28	3	1072.7	2.33E-06	35%	1.50%	47.00
29	3	1075.35	2.44E-06	35%	1%	51.00
30	3	1075.35	2.44E-06	35%	0.50%	58.00
31	3	898	4.22E-06	0%	60%	24
32	3	1062.5	3.26E-06	20%	10%	41
33	5	1131.8	6.15E-06	55%	0%	70
34	5	1072.7	2.33E-06	30%	0%	70.00
35	5	1116.55	4.74E-06	30%	7%	26
36	5	1099.3	3.38E-06	45%	5%	30.00
37	5	1099.3	3.38E-06	40%	2%	40.00
38	5	1094	3.18E-06	42%	3%	37.00
39	5	1099.3	3.38E-06	40%	1%	51.00
40	5	1091.35	2.63E-06	41%	1.50%	47.00
41	5	900	5.61E-06	20%	60%	24
42	5	1077	3.70E-06	40%	10%	41
43	7	1099.3	3.38E-06	40%	0%	70.00
44	7	1116.55	4.74E-06	30%	7%	26
45	7	1099.3	3.38E-06	45%	5%	30.00
46	7	1094	3.18E-06	42%	3%	37.00
47	7	1099.3	3.38E-06	40%	1%	51.00
48	7	1091.35	2.63E-06	41%	1.50%	47.00
49	7	955.6	1.06E-05	40%	60%	24
50	10	1142.8	5.16E-06	56	0%	70
51	10	955.6	1.06E-05	40%	60%	24

Πινάκας 1. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν

## 4.2 Προσδιορισμός κρίσιμου Re (Recr)

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



Σχήμα 4.1 : Διαχωρισμός του σήματος σε χρονικές περιόδους

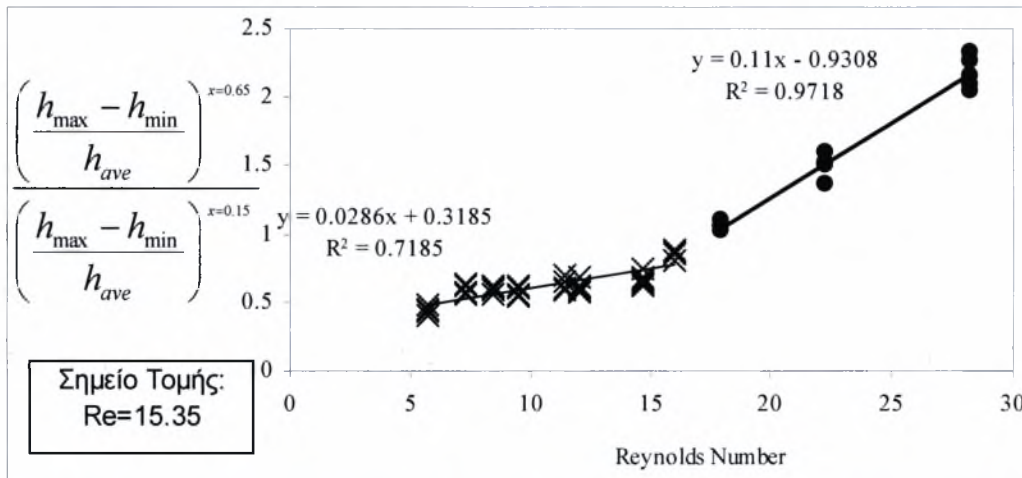
Στη συνέχεια σε κάθε χρονική περίοδο βρίσκουμε το μέγιστο ( $h_{\max}$ ) και το ελάχιστο ( $h_{\min}$ ) πάχος υμένα και στις δυο θέσεις κατάντη της ροής  $x_0=15$  cm και  $x_0=65$  cm. Έπειτα βρίσκουμε στην διαφορά  $h_{\max} - h_{\min}$  καθώς και τον μέσο όρο ( $h_{ave}$ ) των max και min και στις δυο θέσεις κατάντη της ροής.

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

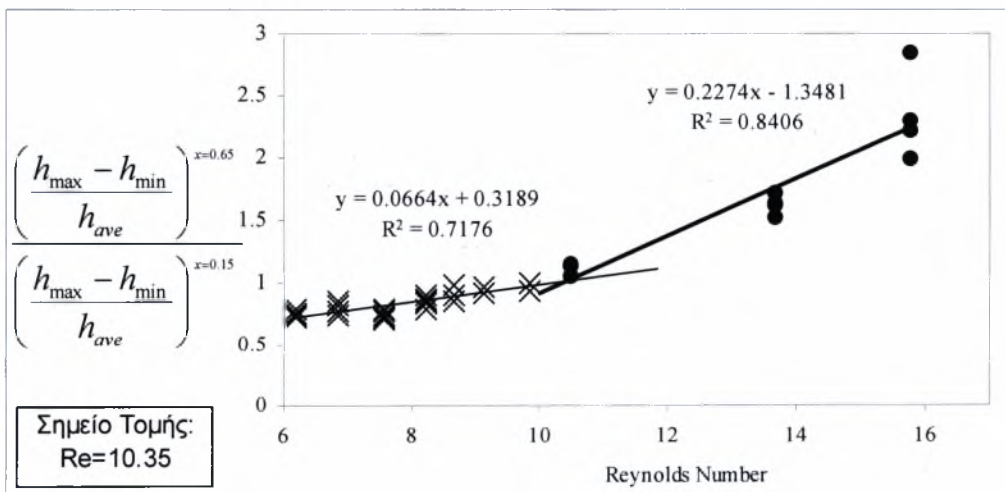
$$A = \frac{\frac{(h_{\max} - h_{\min})}{h_{ave}}_{x=0.65}}{\frac{(h_{\max} - h_{\min})}{h_{ave}}_{x=0.15}} \quad (4.1)$$

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

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



Σχήμα 4.2.1 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 5 μοίρες 30% γλυκερίνη



Σχήμα 4.2.2 : προσδιορισμός κρίσιμου αριθμού Reynolds για τις 7 μοίρες 40% γλυκερίνη



Ο προσδιοριζόμενος πειραματικός αριθμός Reynolds για κάθε πείραμα φαίνεται στον

πίνακα που ακολουθεί:

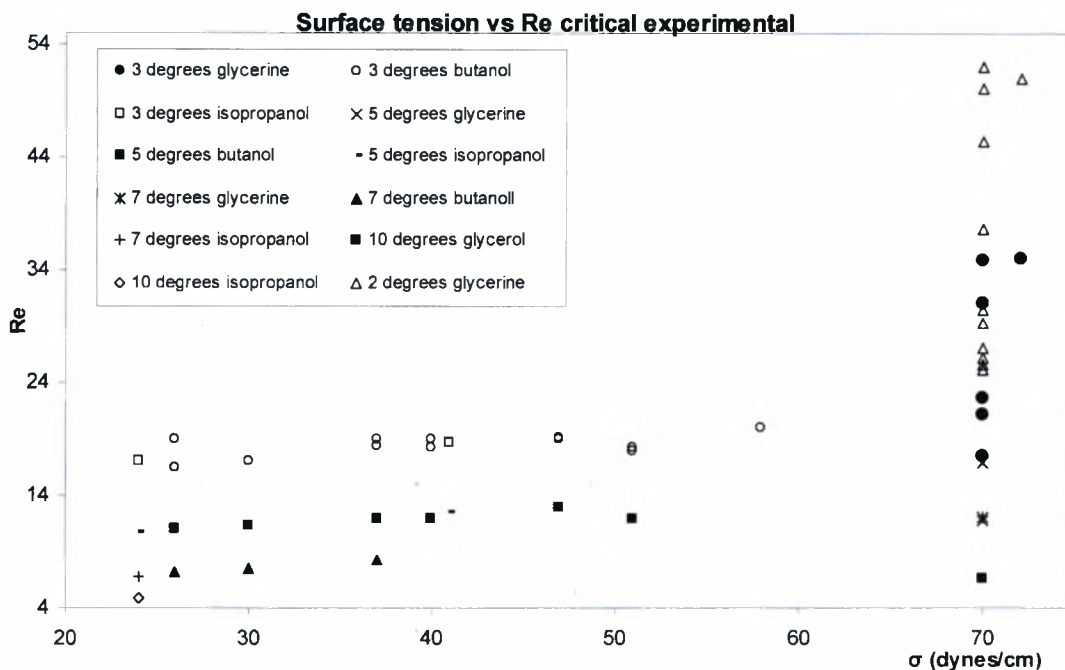
	γωνία κλίσης (μοίρες)	περιεκτικότητα γλυκερίνης κατά βάρος	περιεκτικότητα αλκοόλης κατά βάρος	$\gamma$ (mN*m-1)	Re critical πειραματικός	Re critical Θεωρητικός
1	2	60%	0%	70.00	25.2	23.9
2	2	55%	0%	70.00	25.65	23.9
3	2	50%	0%	70.00	26.15	23.9
4	2	45%	0%	70.00	27.14	23.9
5	2	40%	0%	70	29.27	23.9
6	2	35%	0%	70.00	30.44	23.9
7	2	25%	0%	70.00	37.66	23.9
8	2	20%	0%	70	45.5	23.9
9	2	15%	0%	70	50.14	23.9
10	2	10%	0%	70	52.05	23.9
11	2	0%	0%	70	50.97	23.9
12	3	55%	0%	70	17.5	15.9
13	3	36%	0%	70.00	21.19	15.9
14	3	25%	0%	70	22.685	15.9
15	3	20%	0%	70	30.8	15.9
16	3	10%	0%	70	34.81	15.9
17	3	0%	0%	72	35	15.9
18	3	30	7%	26	16.5	15.9
19	3	45%	5%	30.00	17.06	15.9
20	3	40%	2%	40.00	18.300	15.9
21	3	42%	3%	37.00	18.4	15.9
22	3	28%	7%	26.00	19.000	15.9
23	3	40%	1%	51.00	18.2	15.9
24	3	28%	5%	30.00	17.120	15.9
25	3	30%	3%	37.00	19	15.9

26	3	41%	1.50%	47.00	19.1	15.9
27	3	30%	2%	40.00	19	15.9
28	3	35%	1.50%	47.00	19	15.9
29	3	35%	1%	51.00	18	15.9
30	3	35%	0.50%	58.00	20.040	15.9
31	3	0%	60%	24	17.1	15.9
32	3	20%	10%	41	18.765	15.9
33	5	55%	0%	70	11.8	9.5
34	5	30%	0%	70.00	16.96	9.5
35	5	30%	7%	26	11	9.5
36	5	45%	5%	30.00	11.4	9.5
37	5	40%	2%	40.00	12	9.5
38	5	42%	3%	37.00	12	9.5
39	5	40%	1%	51.00	12	9.5
40	5	41%	1.50%	47.00	12.930	9.5
41	5	20%	60%	24	10.8	9.5
42	5	40%	10%	41	12.55	9.5
43	7	40%	0%	70.00	12.085	6.8
44	7	30%	7%	26	7.2	6.8
45	7	45%	5%	30.00	7.6	6.8
46	7	42%	3%	37.00	8.2	6.8
47	7	40%	1%	51.00	8.2	6.8
48	7	41%	1.50%	47.00	8.2	6.8
49	7	40%	60%	24	6.6	6.8
50	10	56	0%	70	6.66	4.7
51	10	40%	60%	24	4.84	4.7

**Πινάκας 4.2 :** Πειραματικοί αριθμοί Reynolds που υπολογίστηκαν για κάθε πείραμα

### 4.3 Επίδραση της μείωσης της επιφανειακής τάσης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραγράφου 4.2 τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2, υπολογίστηκαν οι κρίσιμες τιμές του πειραματικού αριθμού Reynolds για διαφορές γωνίες κλίσης και για διαφορές τιμές της επιφανειακής τάσης και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο ακόλουθο γράφημα.



Σχήμα 4.3: Κρίσιμος αριθμός Reynolds σε σχέση με την επιφανειακή τάση για γωνίες κλίσης 2,3,5,7 και 10 μοίρες

Με μια πρώτη ματιά, μπορούμε να πούμε, πως η μείωση της επιφανειακής τάσης, μειώνει τη διάφορα θεωρητικού και πειραματικού αριθμού Reynolds, όμως παρατηρούμε επίσης πως υπάρχουν διαφορετικές τιμές επιφανειακής τάσης οι οποίες μας δίνουν ίδιο πειραματικό αριθμό Reynolds, αλλά και ίδιες τιμές επιφανειακής τάσης στις 2 και 3 μοίρες, οι οποίες μας δίνουν διαφορετικό πειραματικό αριθμό Reynolds. Επομένως, έπρεπε να γίνει μια περαιτέρω διερεύνηση όσο αφορά και τις άλλες ιδιότητες του ρευστού.

#### 4.4 Ο αριθμός Karitza

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, ο αριθμός Karitza είναι ένας αδιάστατος αριθμός, ο οποίος εμπεριέχει όλες τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού και μπορεί να οριστεί με δύο τρόπους, όπως φαίνεται από τις σχέσεις 2.1-11. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται υπολογισμένοι οι αριθμοί  $K_a$  για όλα τα πειράματα και για τις 2 περιπτώσεις.

	γωνία κλίσης (μοίρες)	Ποκνότητα $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Κινηματικό ιξώδες $\nu$ m <sup>2</sup> /s	Επιφανειακή τάση $\gamma$ mN*m <sup>-1</sup>	$K_a$	$K_{ax}$
1	2	1152	8.4E-06	70.00	165.34	506
2	2	1140	6.9E-06	70.00	218.55	669
3	2	1126	5.3E-06	70.00	312.05	955
4	2	1112	4.1E-06	70.00	445.22	1362
5	2	1099	3.3E-06	70	607.12	1858
6	2	1086	2.8E-06	70.00	767.05	2347
7	2	1060	2E-06	70.00	1216.5	3723
8	2	1047	1.7E-06	70	1562.5	4781
9	2	1035	1.5E-06	70	1867.7	5715
10	2	1022	1.3E-06	70	2298	7032
11	2	998.2	1E-06	70	3246.4	9934
12	3	1132	6.1E-06	70	256	686
13	3	1078	2.55E-06	70.00	873	2333
14	3	1062	2.1E-06	70	1163	3110
15	3	1047	1.7E-06	70	1563	4177
16	3	1022	1.3E-06	70	2298	6143
17	3	988.2	1E-06	72	3328	8897
18	3	1116.55	4.74E-06	26	137	365.46

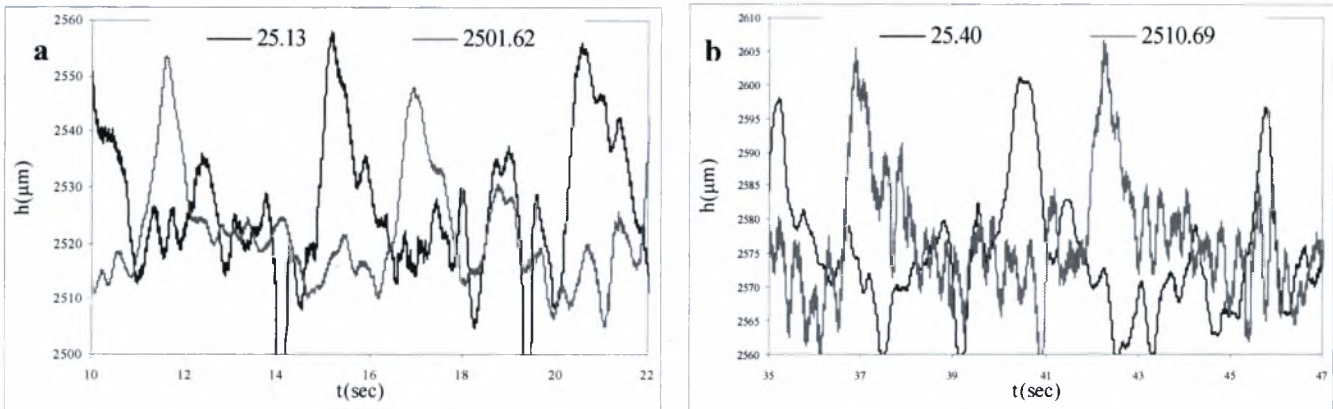
19	3	1113	4.37E-06	30.00	176	471.62
20	3	1099	3.38E-06	40.00	335	894.44
21	3	1094	3.18E-06	37.00	338	904.23
22	3	1065	2.14E-06	26.00	414	1106.25
23	3	1099	3.38E-06	51.00	427	1140.41
24	3	1065	2.14E-06	30.00	477	1276.45
25	3	1070	2.27E-06	37.00	542	1449.88
26	3	1091	2.63E-06	47.00	555	1484.44
27	3	1073	2.33E-06	40.00	564	1507.10
28	3	1073	2.33E-06	47.00	662	1770.85
29	3	1075	2.44E-06	51.00	675	1804.76
30	3	1075	2.44E-06	58.00	768	2052.48
31	3	898	4.2E-06	24	183	489.435
32	3	1063	3.3E-06	41	373	996.954
33	5	1132	6.1E-06	70	256	578.39
34	5	1073	2.33E-06	70.00	987	2225.10
35	5	1116.55	4.74E-06	26	137	308.32
36	5	1099	3.38E-06	30.00	251	565.95
37	5	1099	3.38E-06	40.00	335	754.61
38	5	1094	3.18E-06	37.00	338	762.86
39	5	1099	3.38E-06	51.00	427	962.12
40	5	1091	2.63E-06	47.00	555	1252.36
41	5	900	5.6E-06	24	125	281.643
42	5	1077	3.70E-06	41	311	700.881
43	7	1099	3.4E-06	70.00	585.5	1180.93
44	7	1116.55	4.74E-06	26	137	275.72
45	7	1099	3.38E-06	30.00	251	506.11
46	7	1094	3.18E-06	37.00	338	682.20

47	7	1099	3.38E-06	51.00	309	860.39
48	7	1091	2.63E-06	47.00	437	1119.94
49	7	955.6	1.1E-05	24	50	101.626
50	10	1143	5.2E-06	70	320.67	574.785
51	10	955.6	1.1E-05	24	50	90.3124

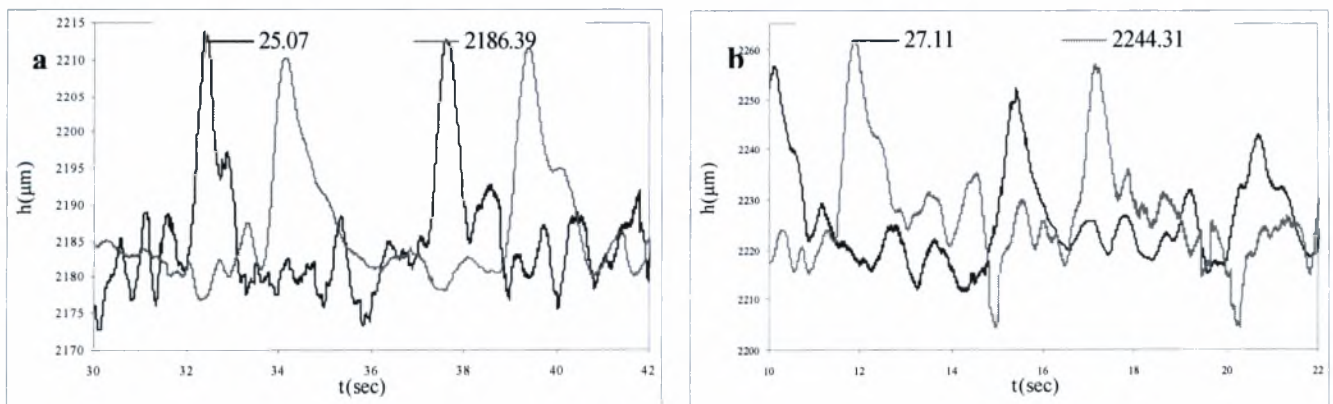
**Πινάκας 4.3 :** Οι αριθμοί Καρίτza που υπολογίστηκαν για κάθε πείραμα

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικά για γωνία κλίσης 2°,3°,5°,7°, χρονοσειρές πειραμάτων της μετάβαση από την ευστάθεια στη αστάθεια ανά αύξοντα αριθμό Καρίτza.

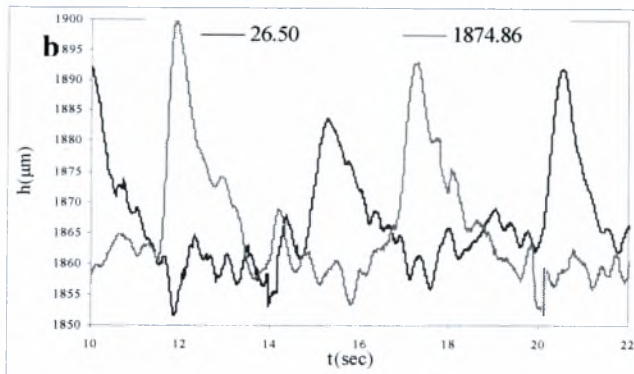
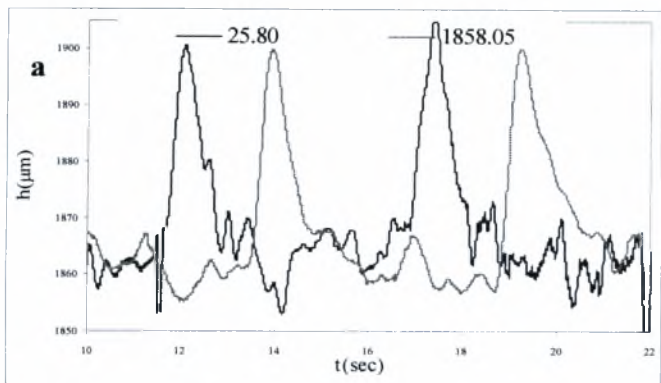
**Χρονοσειρές 2 μοιρών με αύξοντα αριθμό Κα κατά τη μετάβαση**



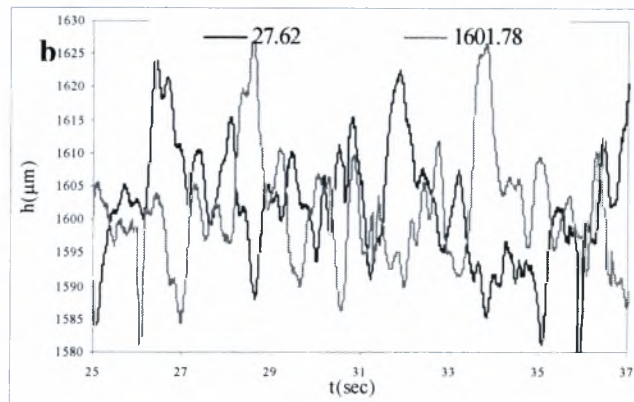
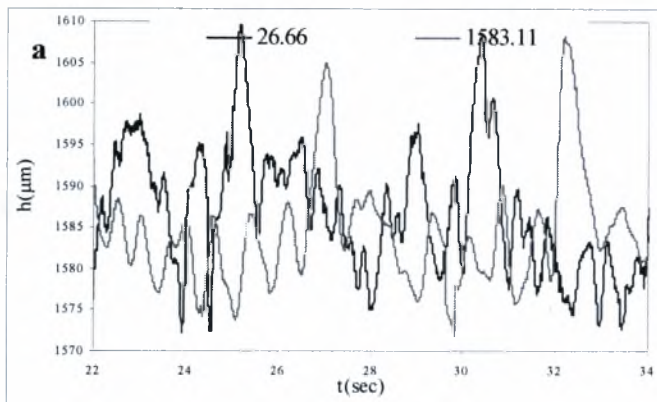
**Σχήμα 4.4.1:** 2° Διάλυμα 60% γλυκερίνης με  $Ka=165.34$ ,  $Ka_{ch}=506$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



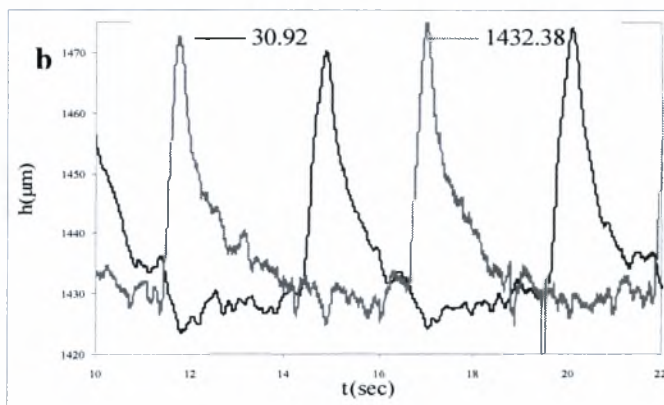
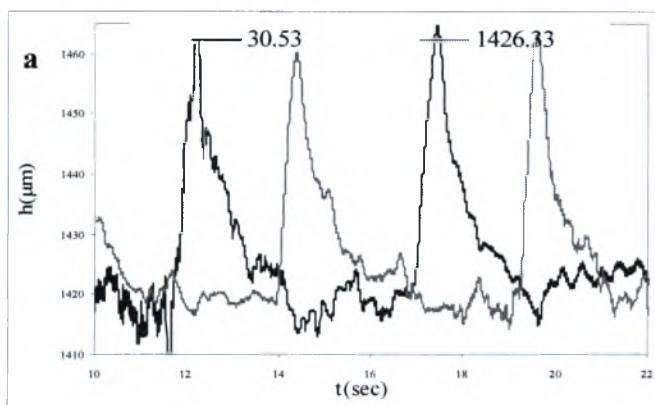
**Σχήμα 4.4.2:** 2° Διάλυμα 55% γλυκερίνης με  $Ka=218.55$ ,  $Ka_{ch}=669$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



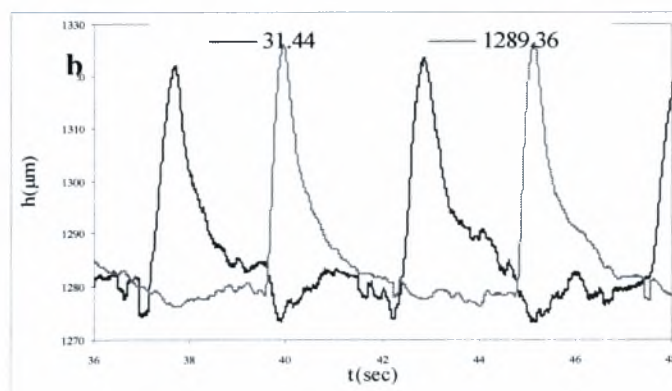
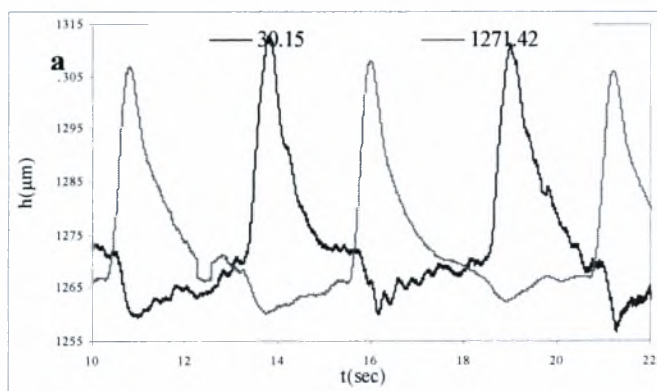
Σχήμα 4.4.3: 2° Διάλυμα 50% γλυκερίνης με  $Ka=312.05$ ,  $Kax=955$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



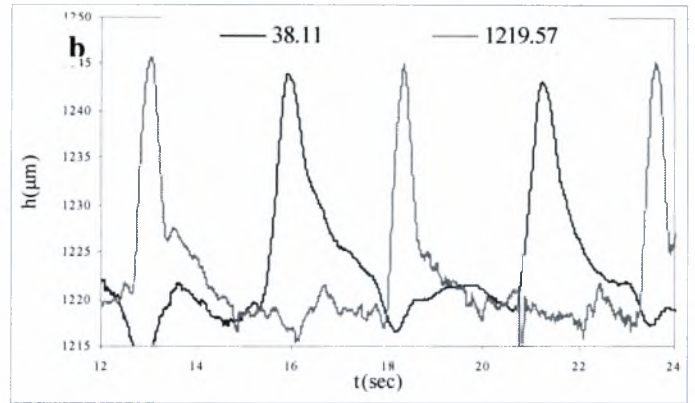
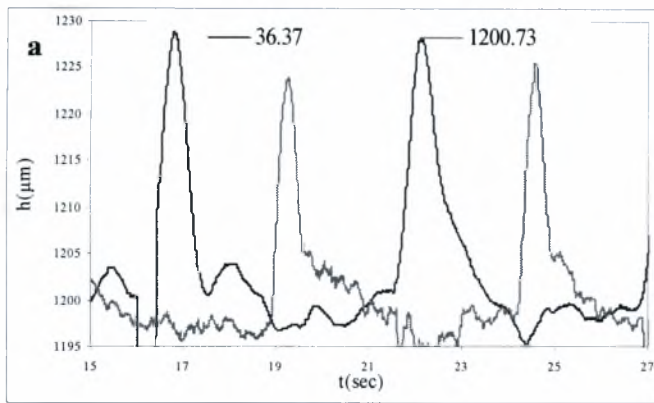
Σχήμα 4.4.4: 2° Διάλυμα 45% γλυκερίνης με  $Ka=445.22$ ,  $Kax=1362$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



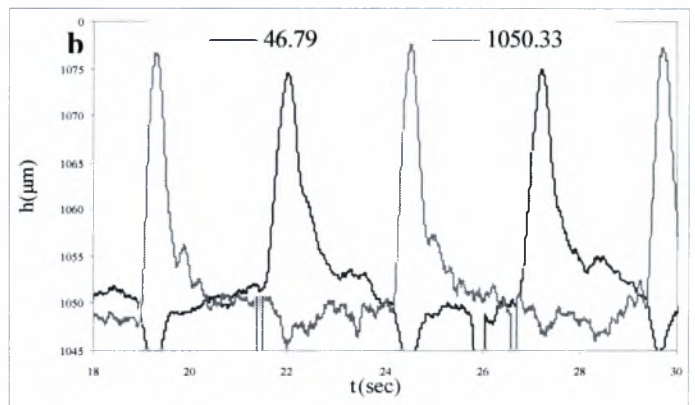
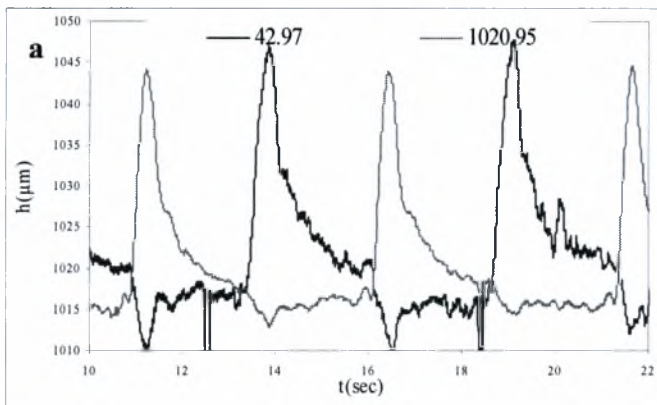
Σχήμα 4.4.5: 2° Διάλυμα 40% γλυκερίνης με  $Ka=607.12$ ,  $Kax=1858$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



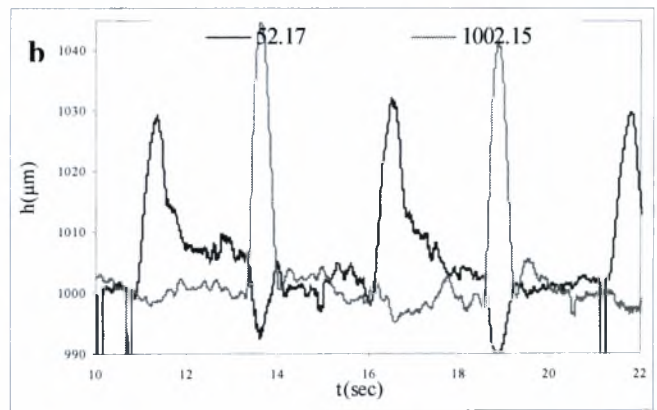
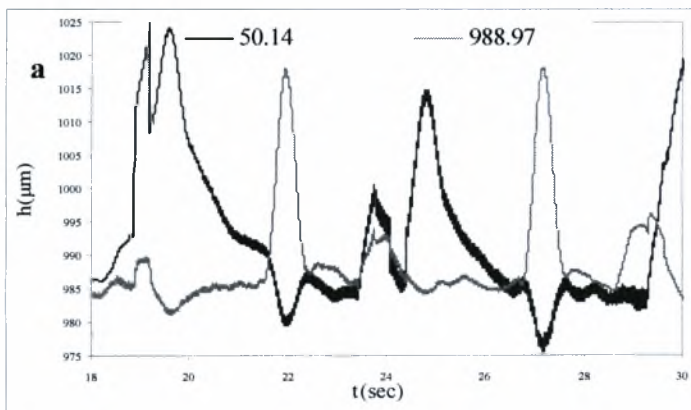
Σχήμα 4.4.6: 2° Διάλυμα 35% γλυκερίνης με  $Ka=767.05$ ,  $Kax=2347$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



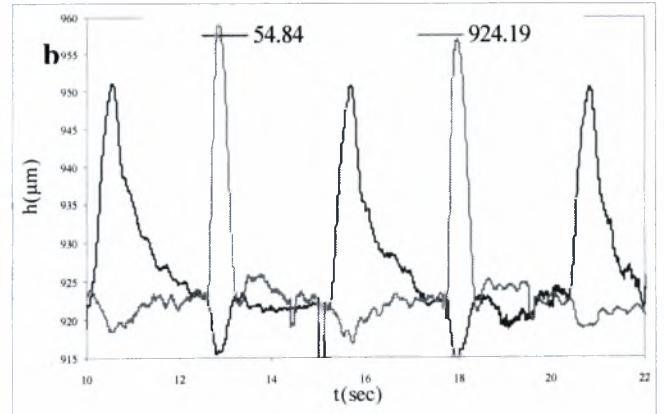
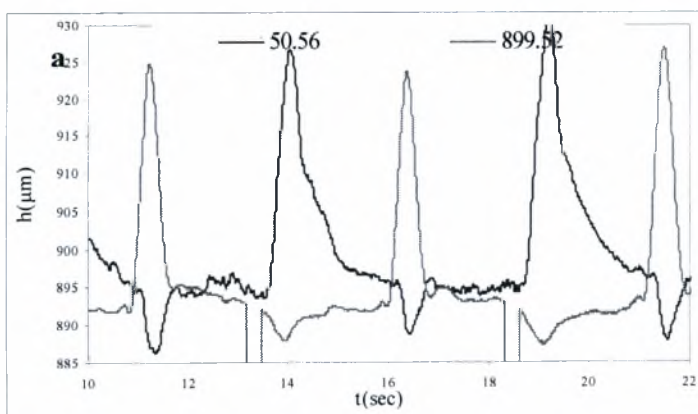
Σχήμα 4.4.7: 2° Διάλυμα 30% γλυκερίνης με  $K_a=1216.5$ ,  $K_{ax}=3723$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



Σχήμα 4.4.8: 2° Διάλυμα 20% γλυκερίνης με  $K_a=1562.5$ ,  $K_{ax}=4781$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)

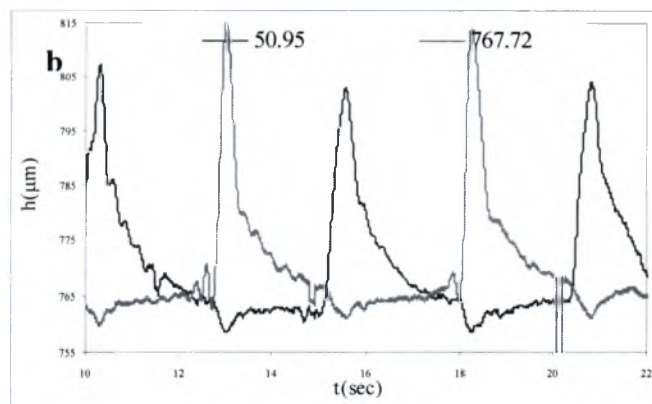
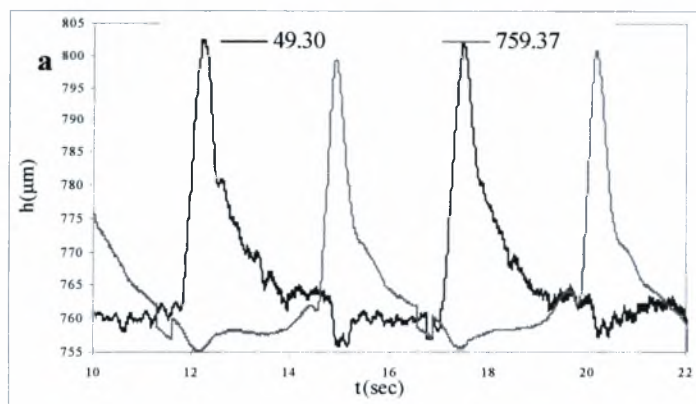


Σχήμα 4.4.9: 2° Διάλυμα 15% γλυκερίνης με  $K_a=1867.7$ ,  $K_{ax}=5715$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



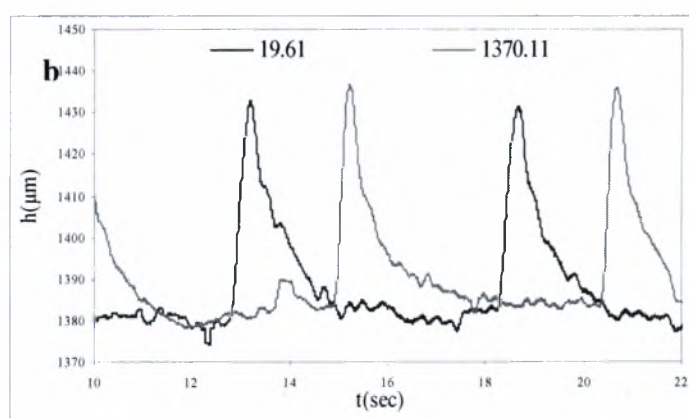
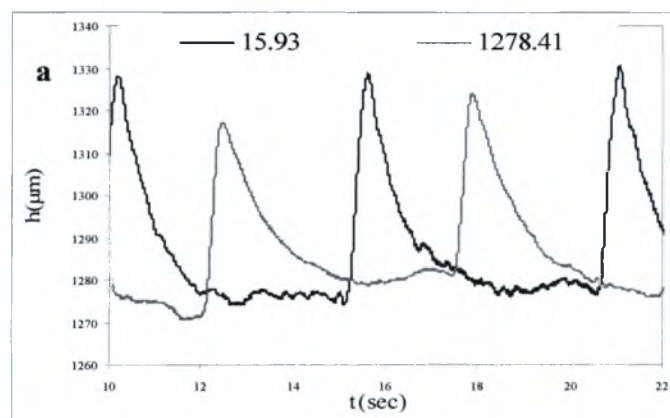
Σχήμα 4.4.10: 2° Διάλυμα 10% γλυκερίνης με  $K_a=2298$ ,  $K_{ax}=7032$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



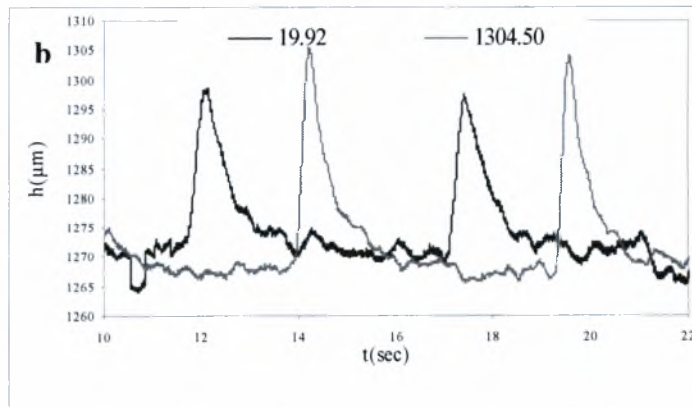
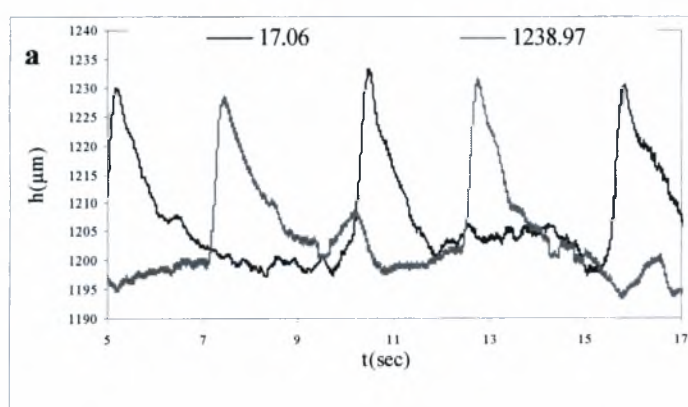


Σχήμα 4.4.11: 2° Διάλυμα 100% νερό με  $Ka=3246.4$ ,  $Kax=9934$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)

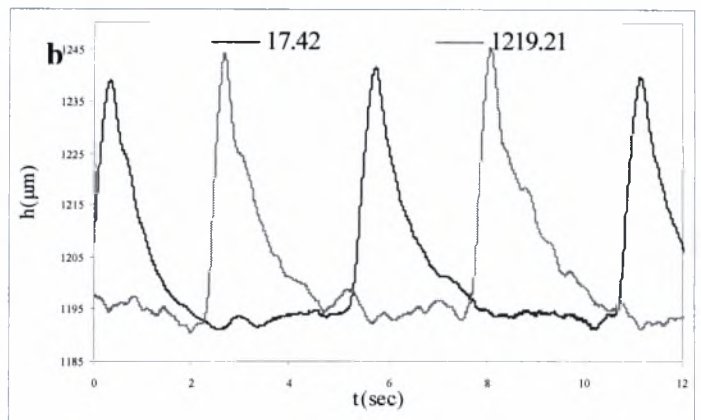
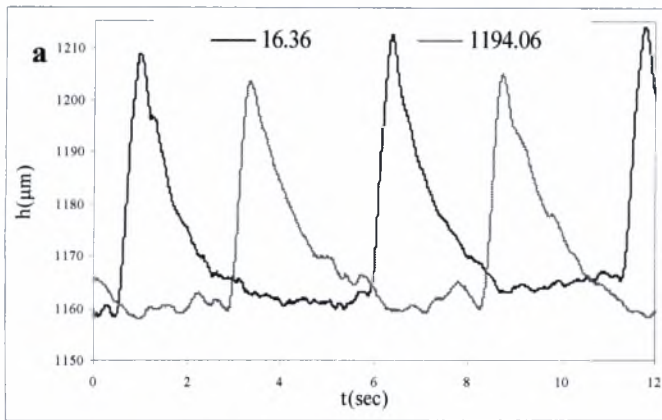
*Χρονοσειρές 3 μοιρών με αύξοντα αριθμό  $Ka$  κατά τη μετάβαση*



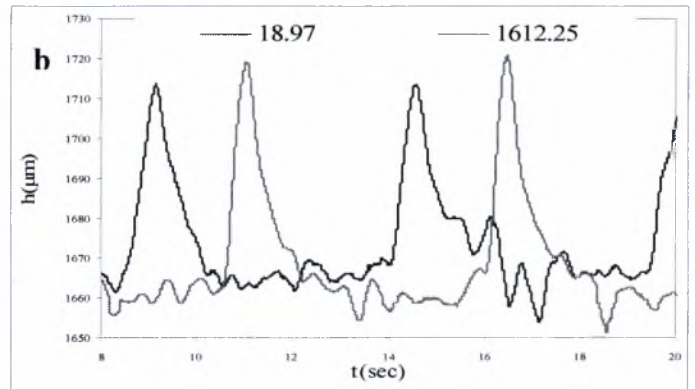
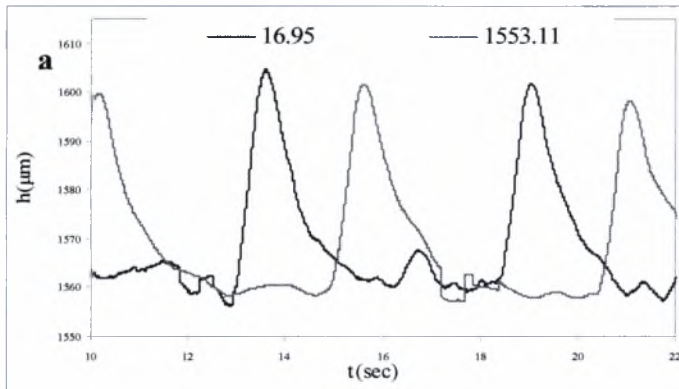
Σχήμα 4.4.12: 3° Διάλυμα 7% Βουτανόλη με  $Ka=137$ ,  $Kax=365.46$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



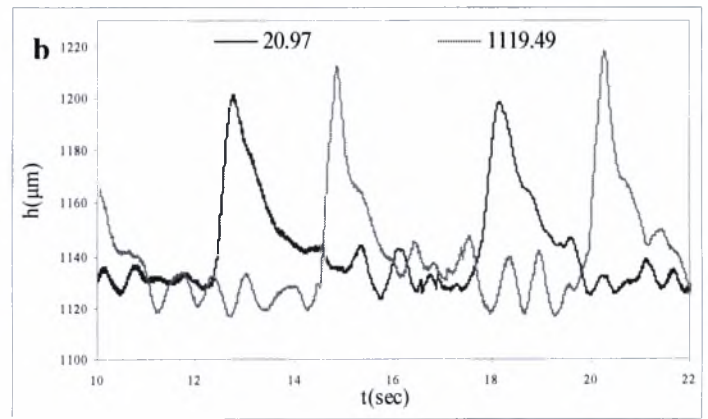
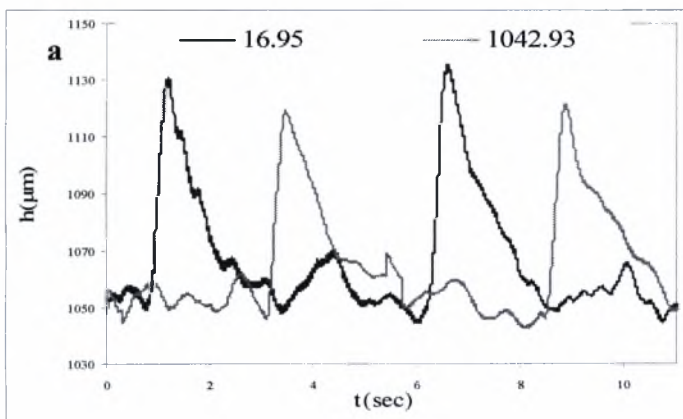
Σχήμα 4.4.13: 3° Διάλυμα 5% Βουτανόλη με  $Ka=176$ ,  $Kax=471.62$ . Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



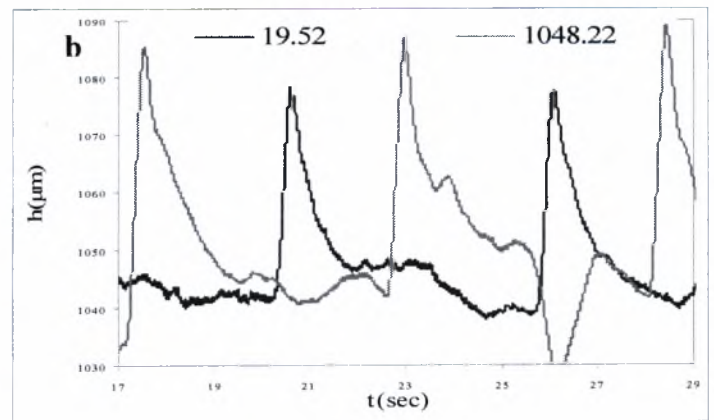
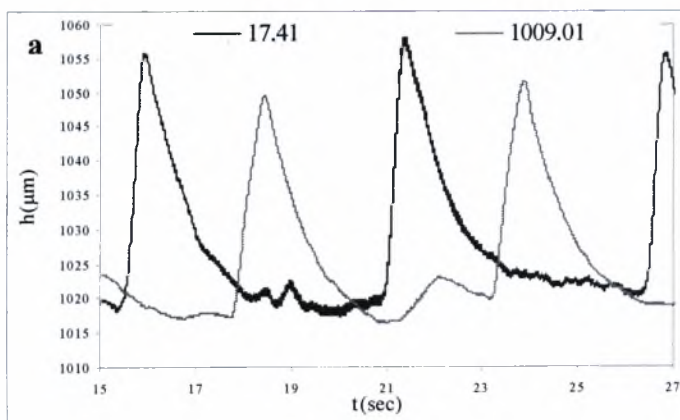
**Σχήμα 4.4.14:** 3° Διάλυμα 60% Προπανόλη με  $K_a=183$ ,  $K_{ax}=489.43$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



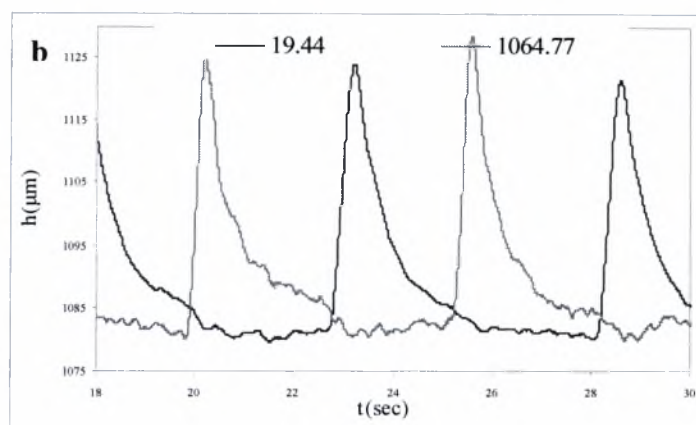
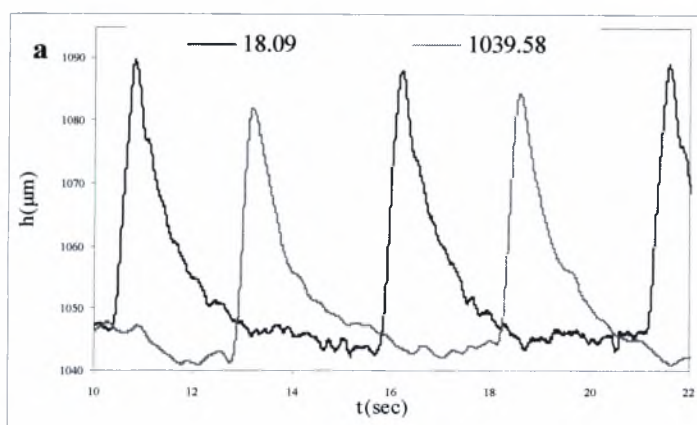
**Σχήμα 4.4.15:** 3° Διάλυμα 55% Γλυκερίνη με  $K_a=256$ ,  $K_{ax}=686$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



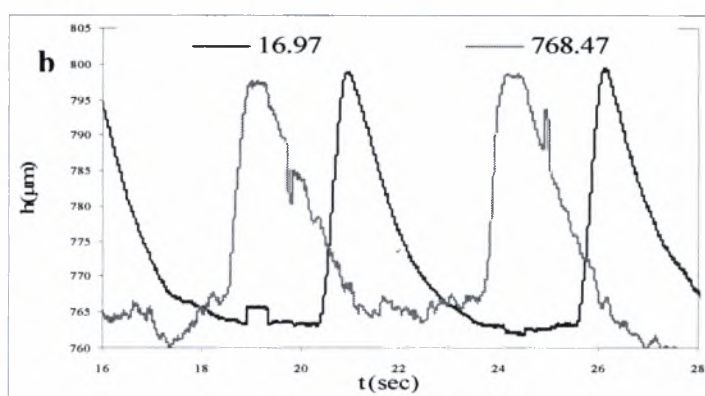
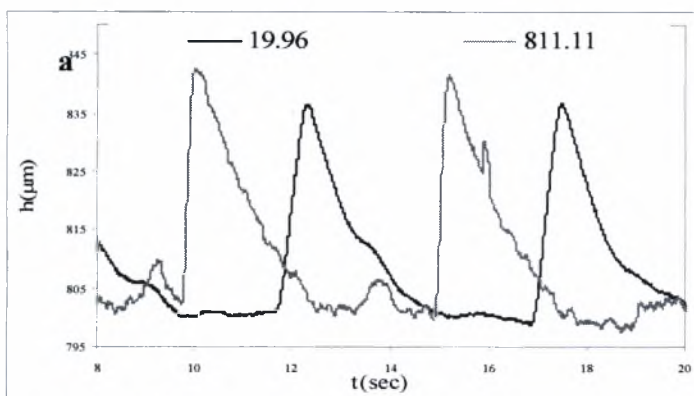
**Σχήμα 4.4.16:** 3° Διάλυμα 2% Βουτανόλη με  $K_a=335$ ,  $K_{ax}=894.44$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



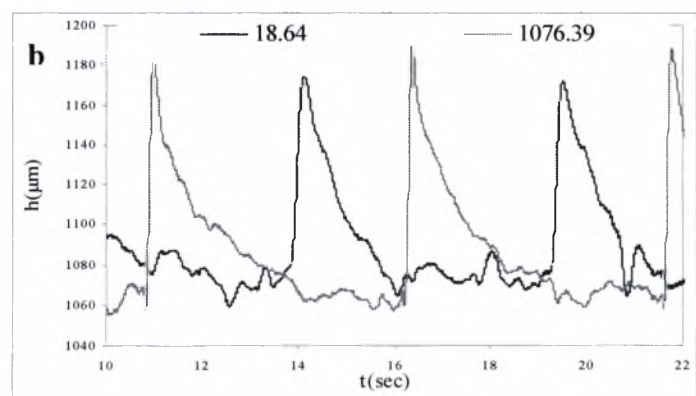
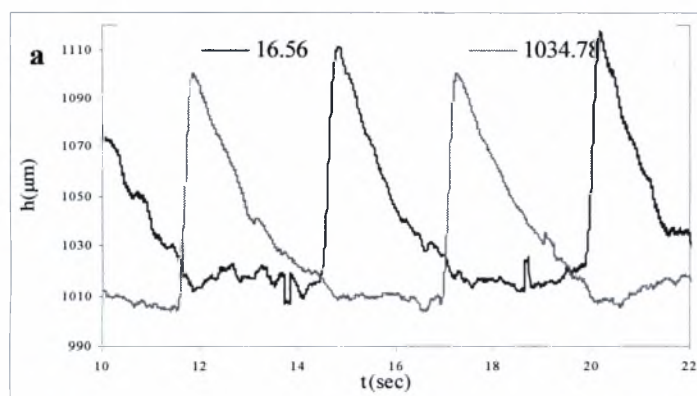
**Σχήμα 4.4.17:** 3° Διάλυμα 3% Βουτανόλη με  $K_a=338$ ,  $K_{ax}=904.23$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



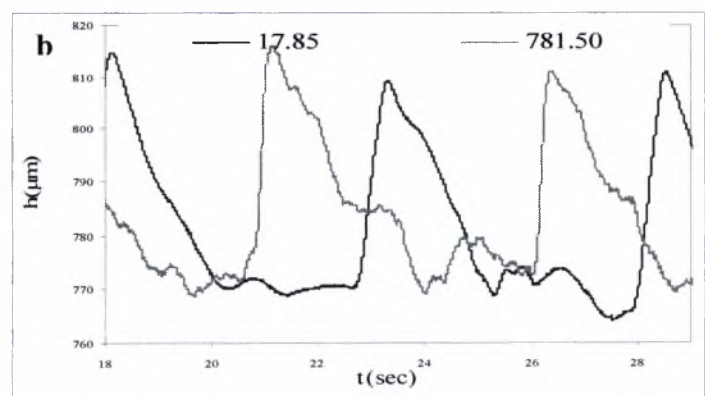
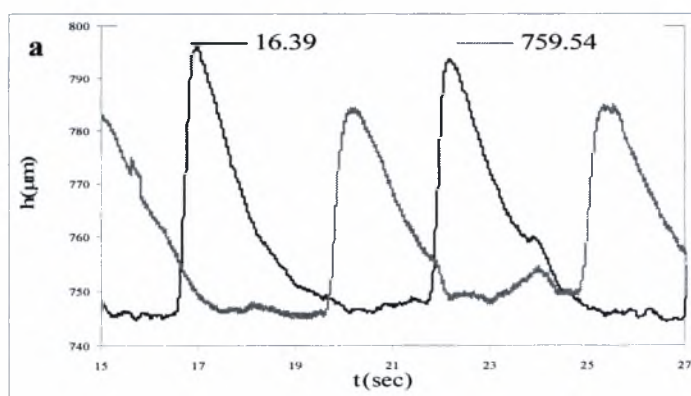
**Σχήμα 4.4.18:** 3° Διάλυμα 10% Προπανόλη με  $Ka=373$ ,  $Kax=996.9$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



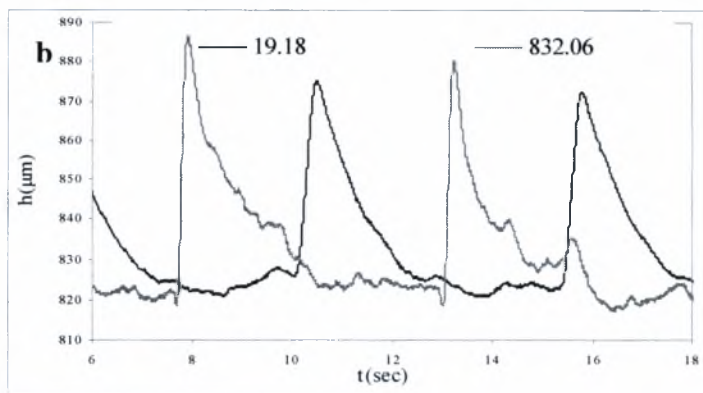
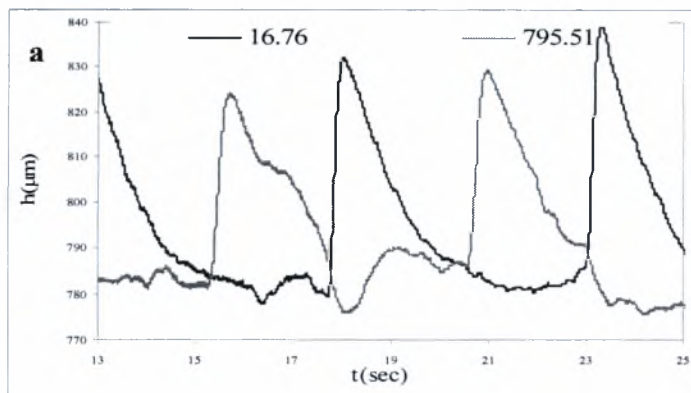
**Σχήμα 4.4.19:** 3° Διάλυμα 7% Βουτανόλη με  $Ka=414$ ,  $Kax=1106.25$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



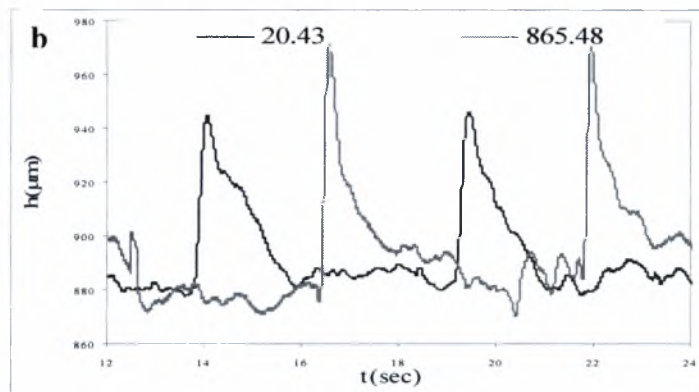
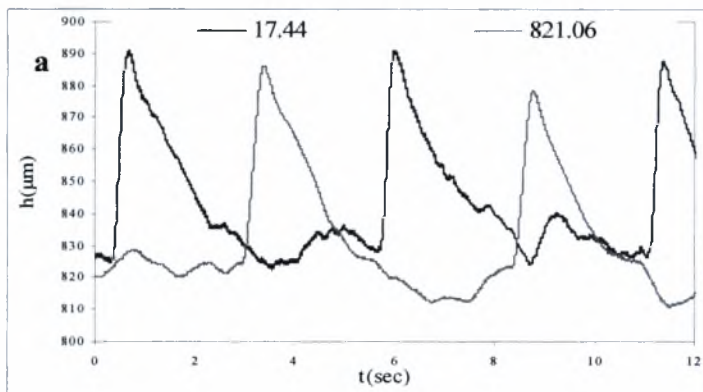
**Σχήμα 4.4.20:** 3° Διάλυμα 1% Βουτανόλη με  $Ka=427$ ,  $Kax=1140.41$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



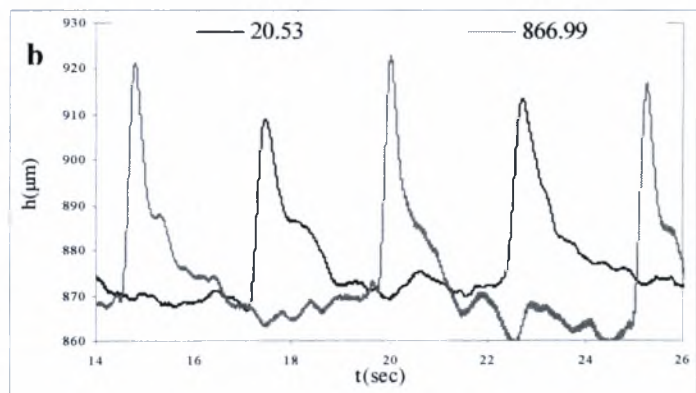
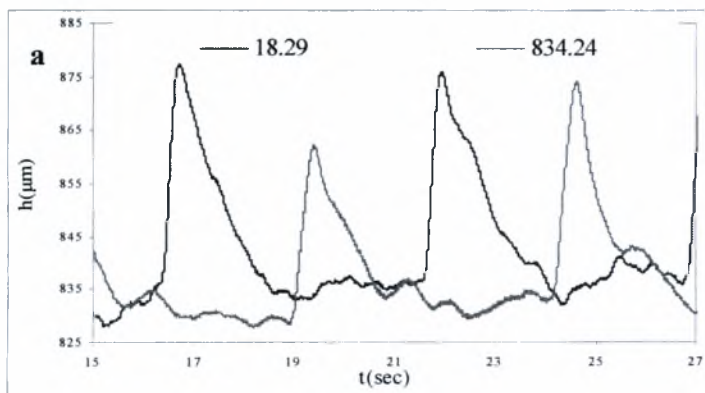
**Σχήμα 4.4.21:** 3° Διάλυμα 5% Βουτανόλη με  $Ka=477$ ,  $Kax=1276.45$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



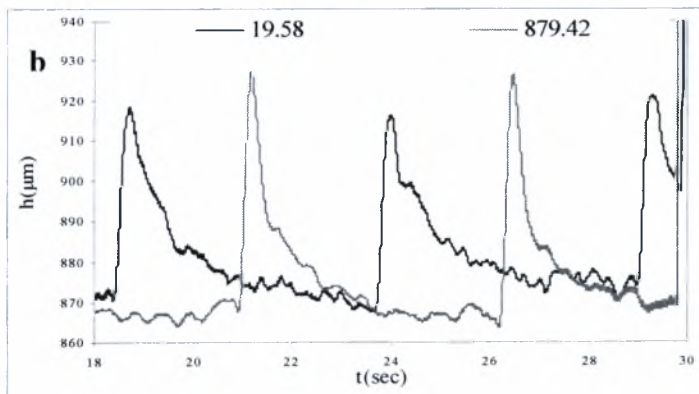
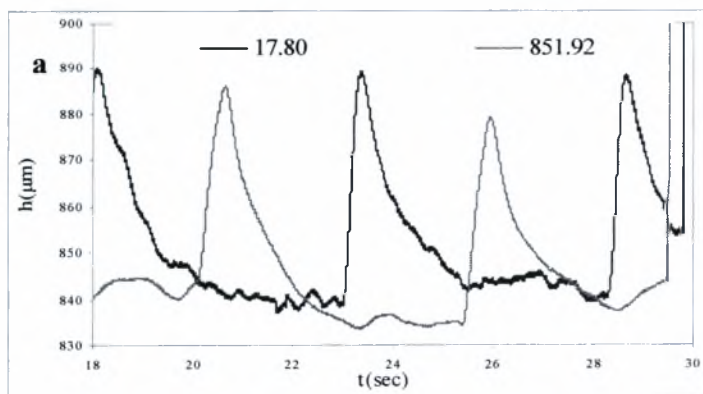
Σχήμα 4.4.22: 3° Διάλυμα 3% Βουτανόλη με  $K_a=542$ ,  $K_{ax}=1449.88$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



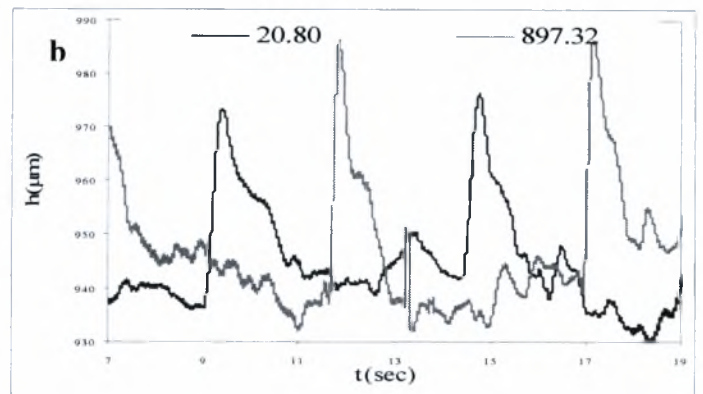
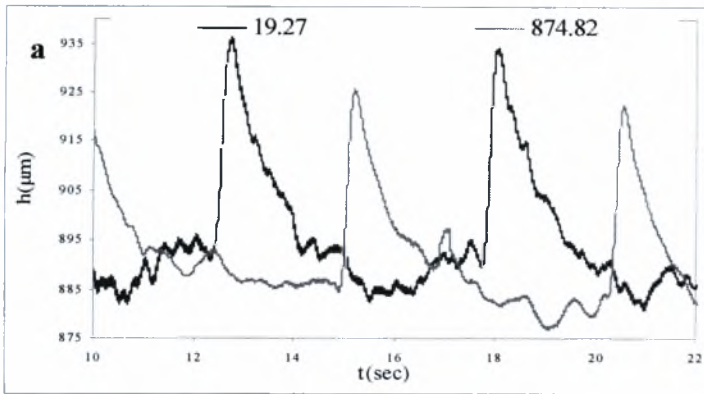
Σχήμα 4.4.23: 3° Διάλυμα 2% Βουτανόλη με  $K_a=564$ ,  $K_{ax}=1507.10$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



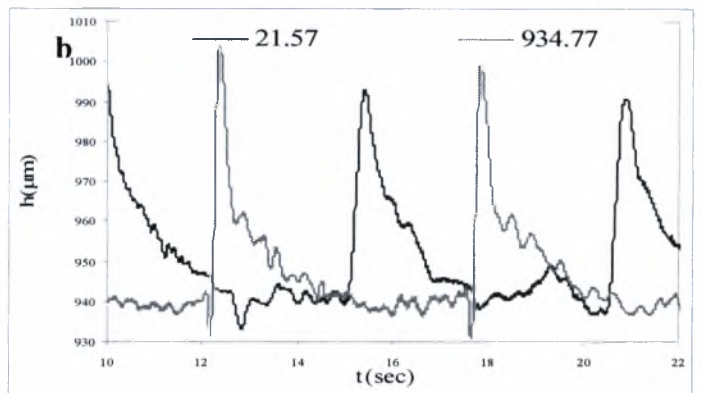
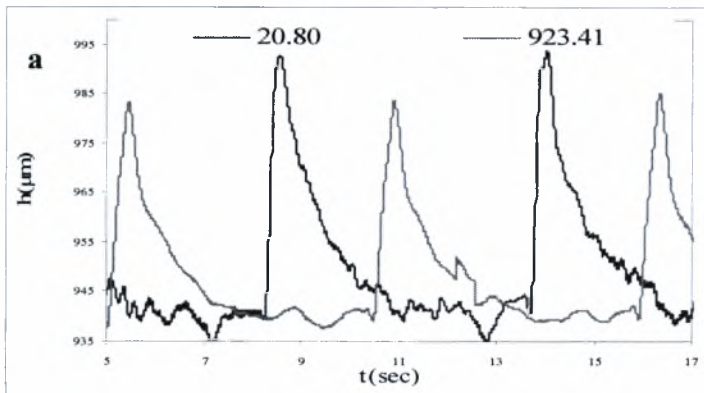
Σχήμα 4.4.24: 3° Διάλυμα 1,5% Βουτανόλη με  $K_a=662$ ,  $K_{ax}=1770.85$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



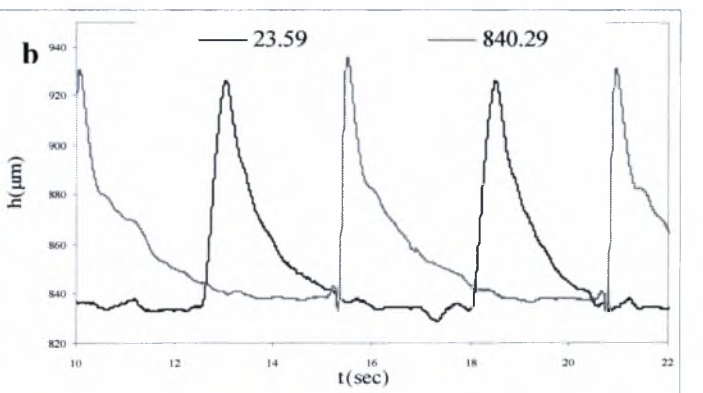
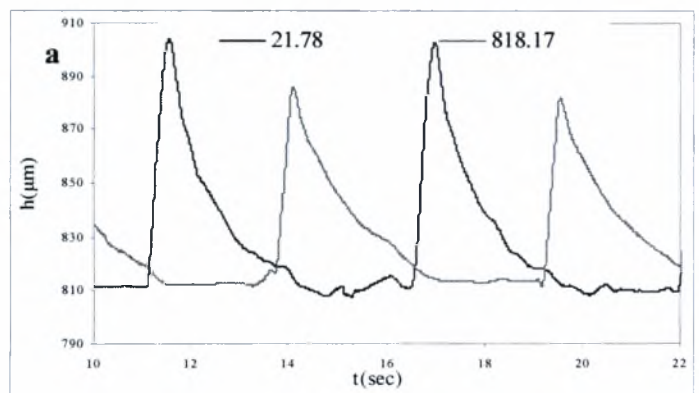
Σχήμα 4.4.25: 3° Διάλυμα 1% Βουτανόλη με  $K_a=675$ ,  $K_{ax}=1804.76$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



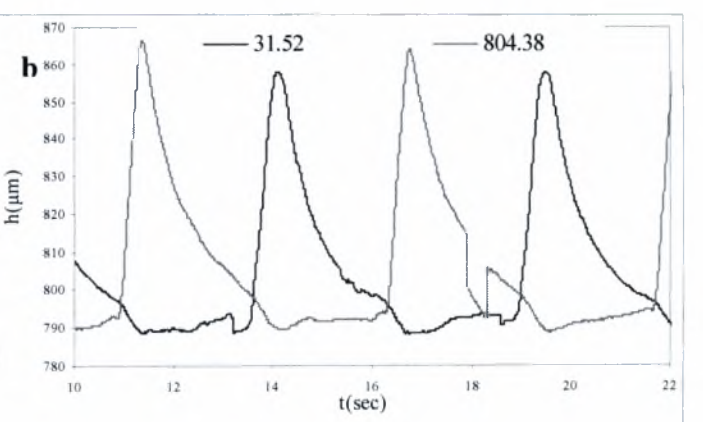
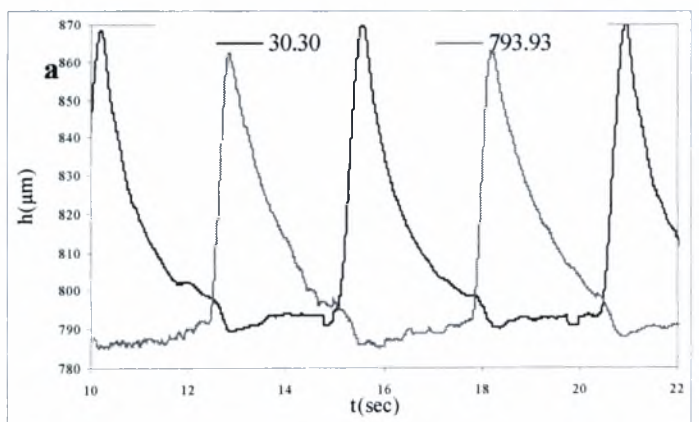
Σχήμα 4.4.26: 3° Διάλυμα 0,5% Βουτανόλη με  $K_a=768$ ,  $K_{ax}=2052,48$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (α). Πρώτη ασταθής μέτρηση (β)



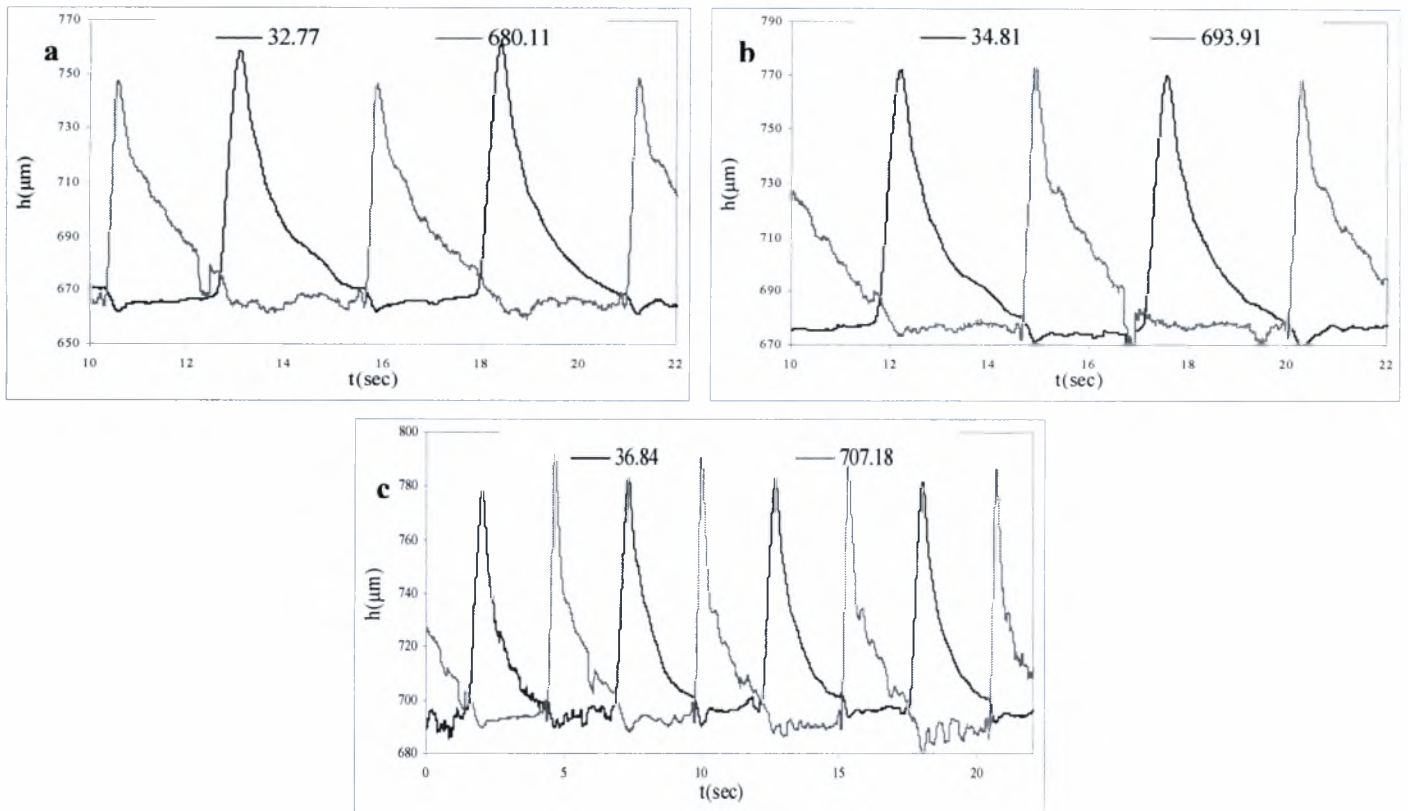
Σχήμα 4.4.27: 3° Διάλυμα 36% Γλυκερίνη με  $K_a=873$ ,  $K_{ax}=2333$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (α). Πρώτη ασταθής μέτρηση (β)



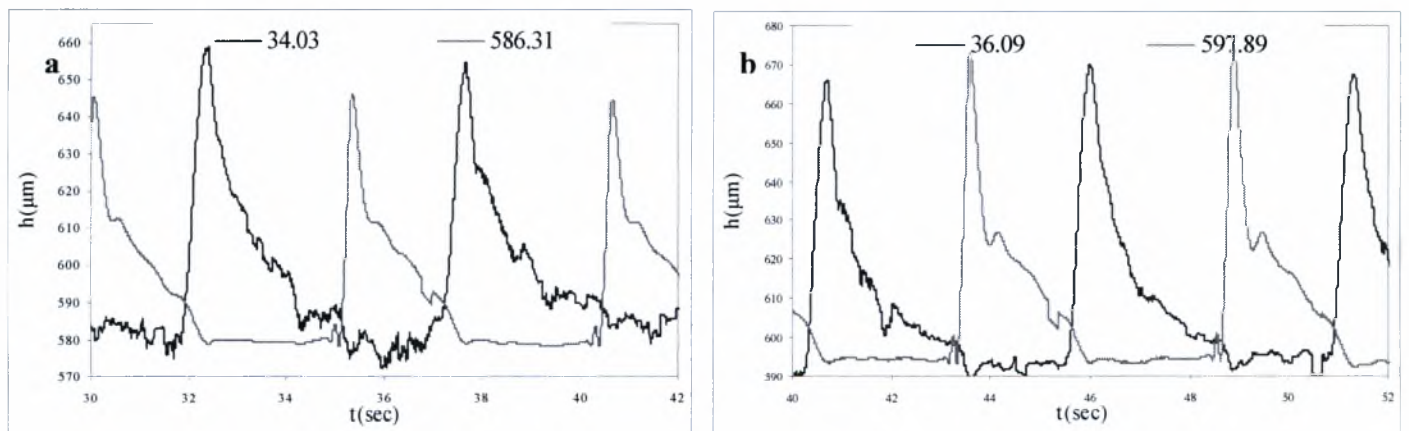
Σχήμα 4.4.28: 3° Διάλυμα 25% Γλυκερίνη με  $K_a=1163$ ,  $K_{ax}=3110$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (α). Πρώτη ασταθής μέτρηση (β)



Σχήμα 4.4.29: 3° Διάλυμα 20% Γλυκερίνη με  $K_a=1563$ ,  $K_{ax}=4177$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (α). Πρώτη ασταθής μέτρηση (β)

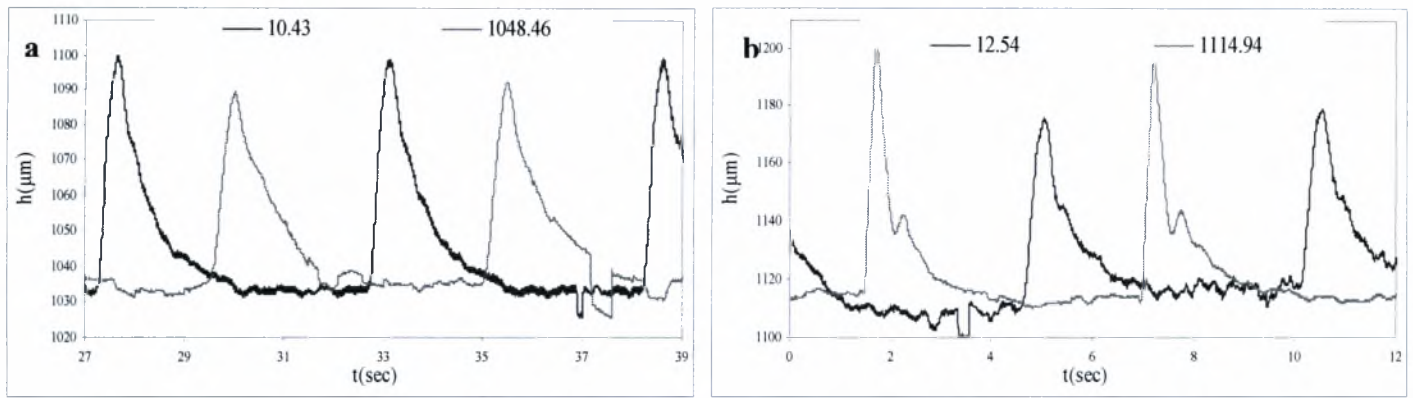


Σχήμα 4.4.30: 3°Διάλυμα 10% Γλυκερίνη με  $K_a=2298$ ,  $K_{ax}=6143$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Μετάβαση (b). Πρώτη ασταθής μέτρηση (c)

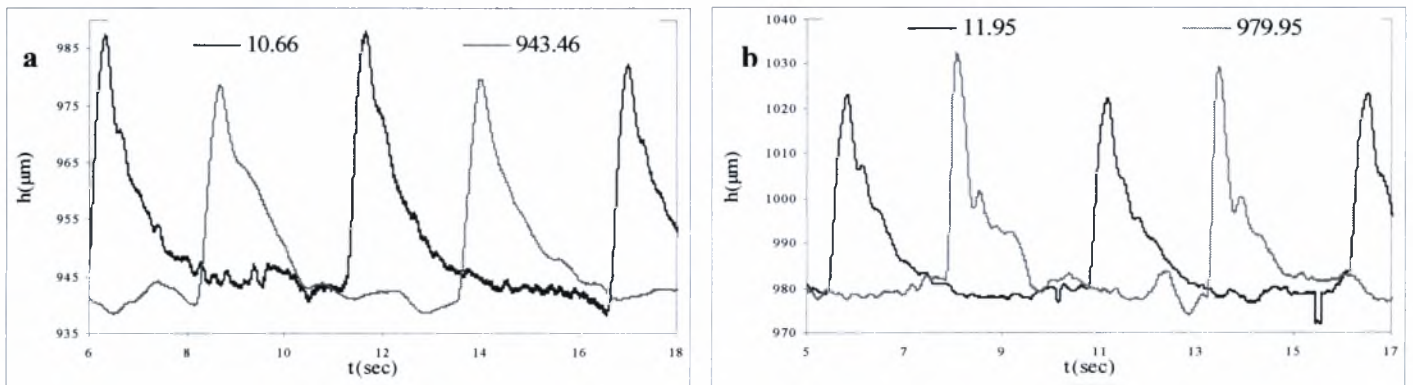


Σχήμα 4.4.31: 3°Διάλυμα 0% Γλυκερίνη με  $K_a=3328$ ,  $K_{ax}=8897$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)

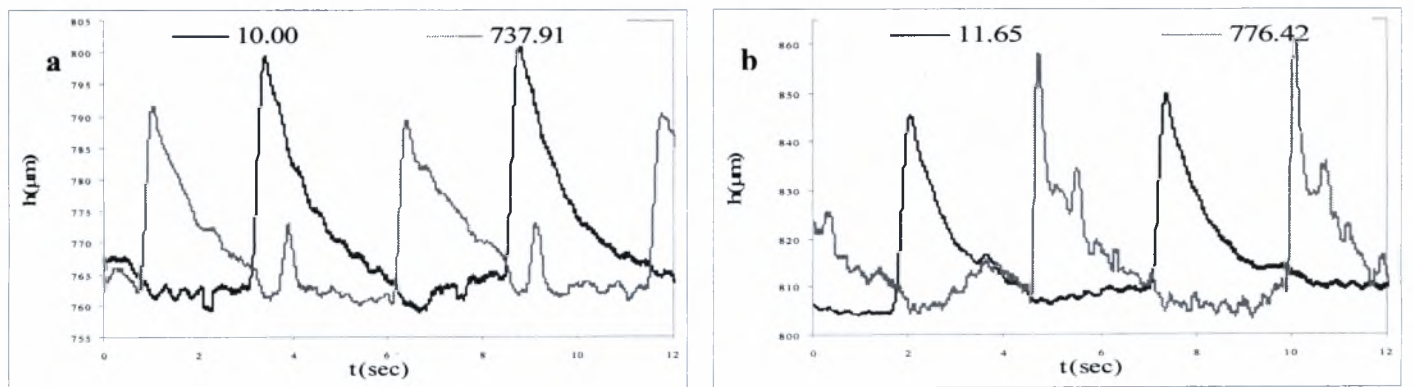
*Χρονοσειρές 5 μοιρών με αύξοντα αριθμό Ka κατά τη μετάβαση*



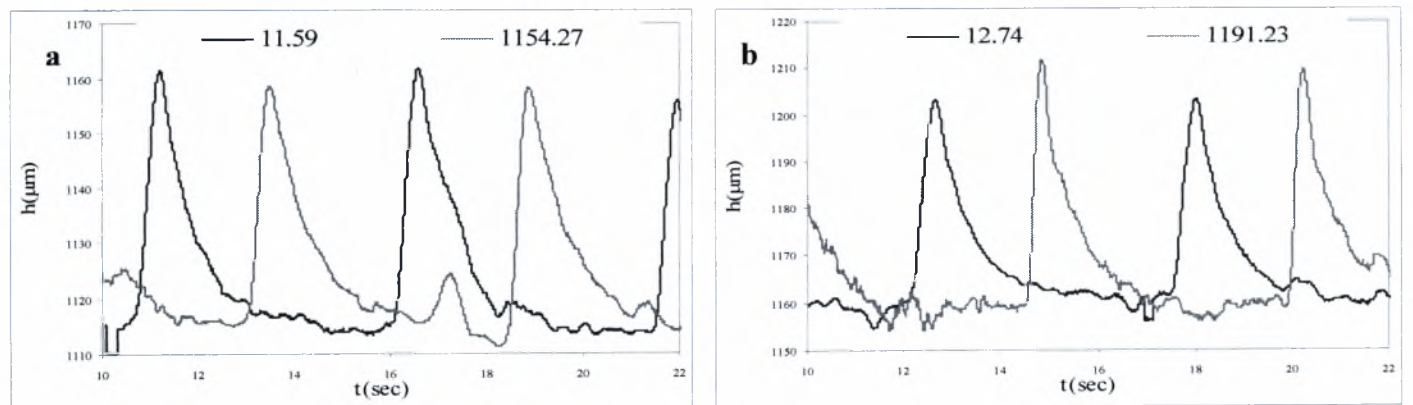
**Σχήμα 4.4.32:** 5° Διάλυμα 60% Προπανόλη με  $Ka=125$ ,  $Kax=281.64$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



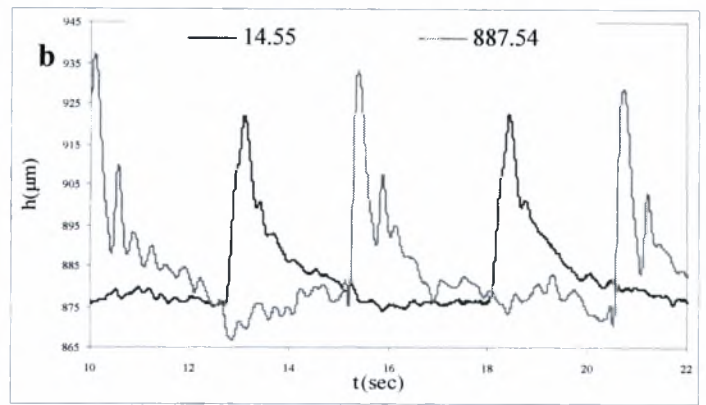
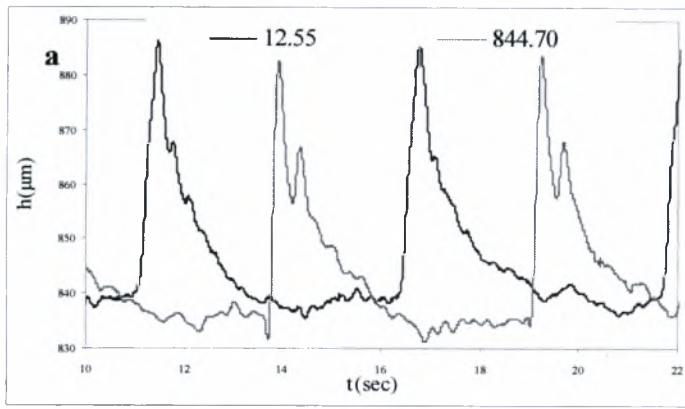
**Σχήμα 4.4.33:** 5° Διάλυμα 7% Βουτανόλη με  $Ka=137$ ,  $Kax=275.72$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



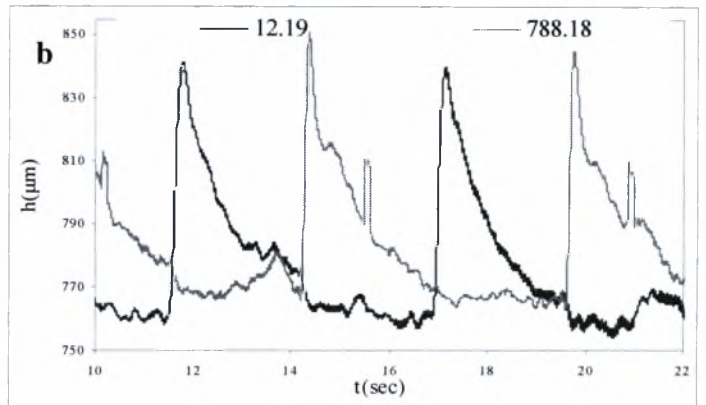
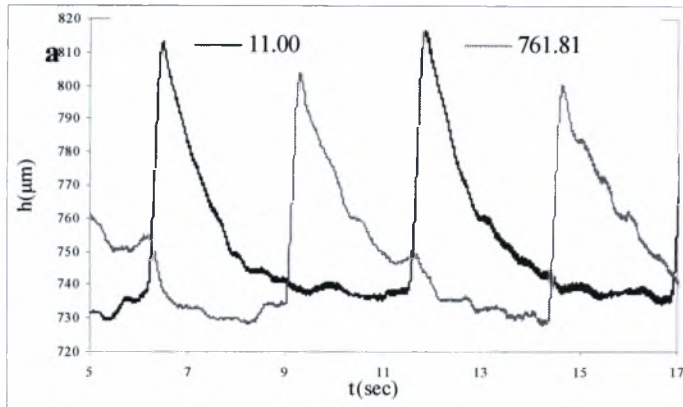
**Σχήμα 4.4.34:** 5° Διάλυμα 5% Βουτανόλη με  $Ka=251$ ,  $Kax=565.97$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



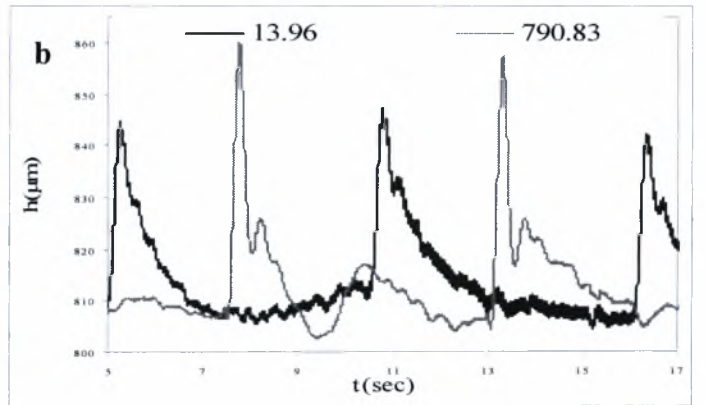
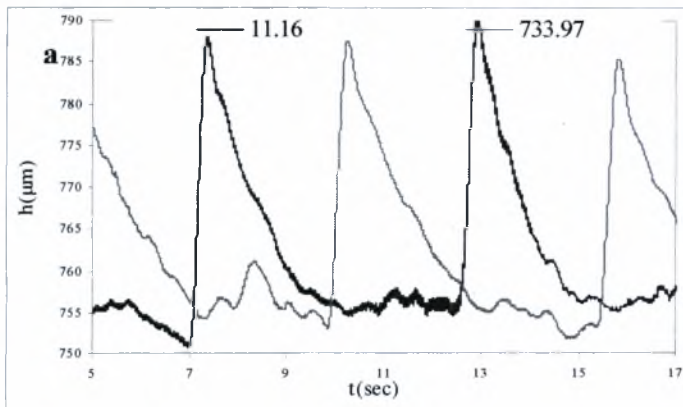
**Σχήμα 4.4.35:** 5° Διάλυμα 55% Γλυκερίνη με  $Ka=256$ ,  $Kax=578.39$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



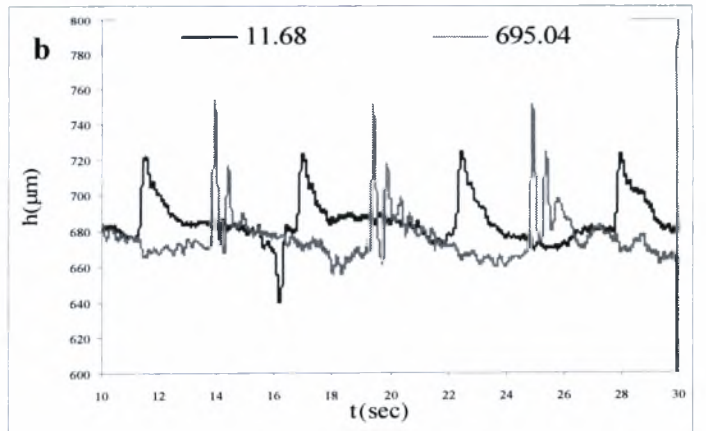
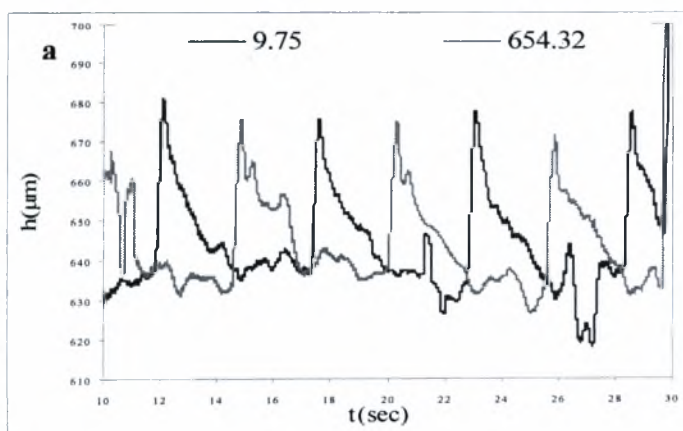
Σχήμα 4.4.36: 5° Διάλυμα 10% Προπανόλη με  $K_a=311$ ,  $K_{ax}=700.88$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



Σχήμα 4.4.37: 5° Διάλυμα 2% Βουτανόλη με  $K_a=335$ ,  $K_{ax}=754.61$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



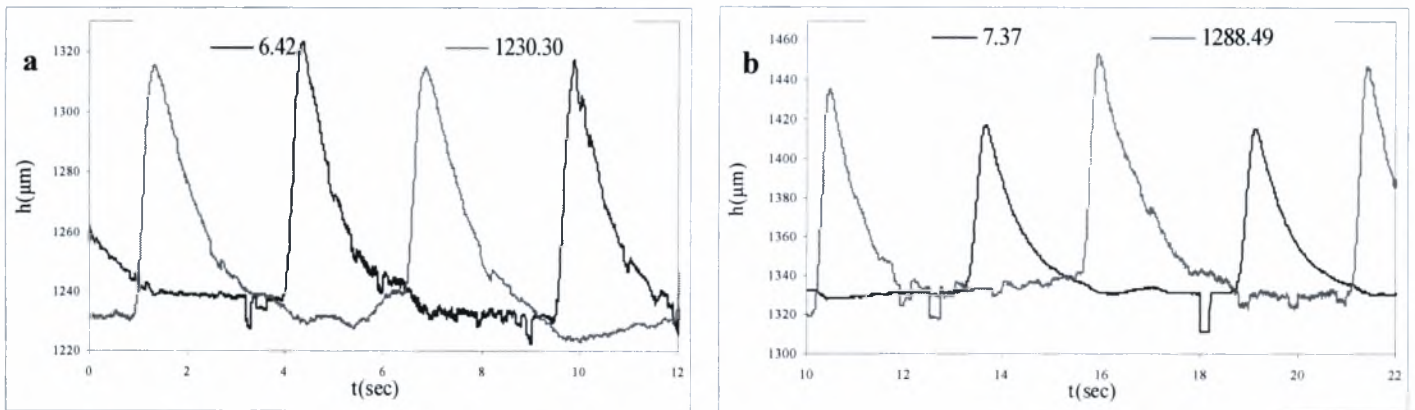
Σχήμα 4.4.38: 5° Διάλυμα 3% Βουτανόλη με  $K_a=338$ ,  $K_{ax}=762.86$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



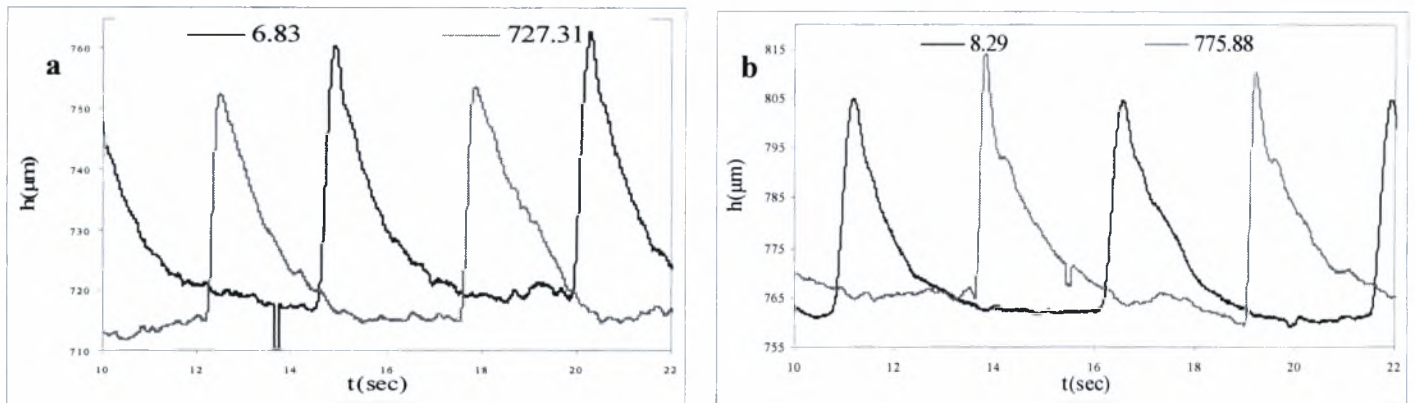
Σχήμα 4.4.39: 5° Διάλυμα 1% Βουτανόλη με  $K_a=827$ ,  $K_{ax}=962.12$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



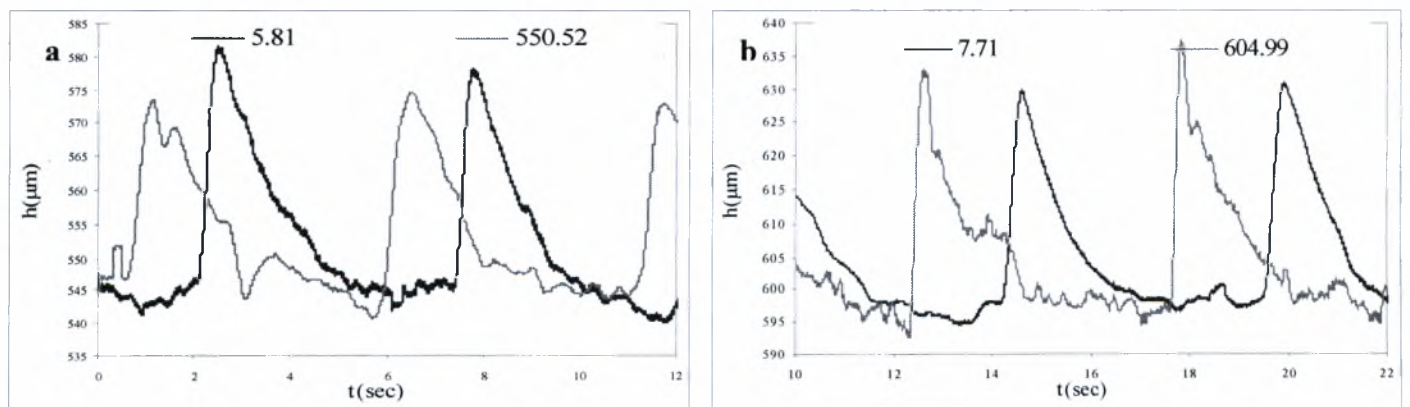
*Χρονοσειρές 7 μοιρών με αύξοντα αριθμό Ka κατά τη μετάβαση*



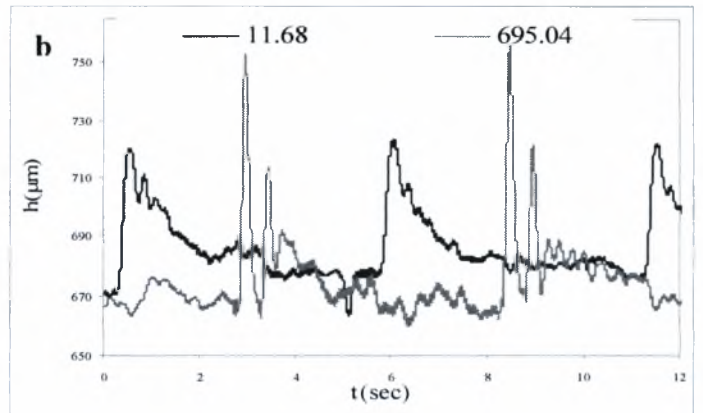
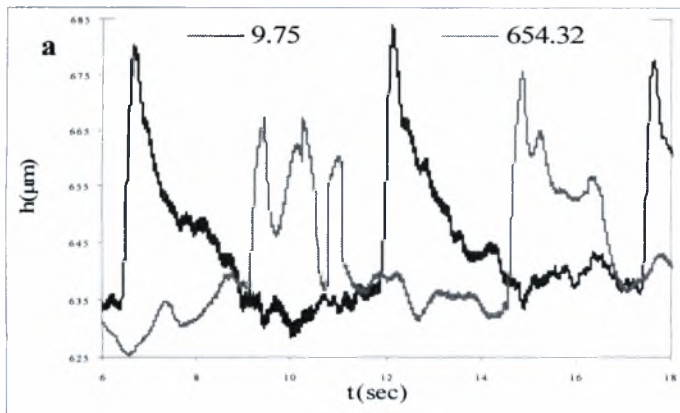
**Σχήμα 4.4.40:** 7° Διάλυμα 60% Προπανόλη με  $Ka=50$ ,  $Kax=101.62$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



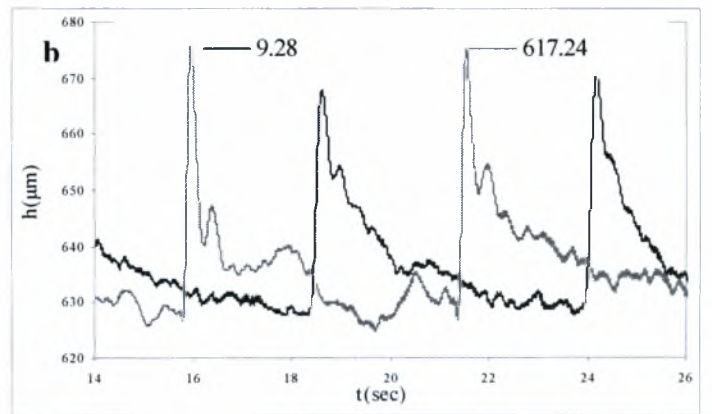
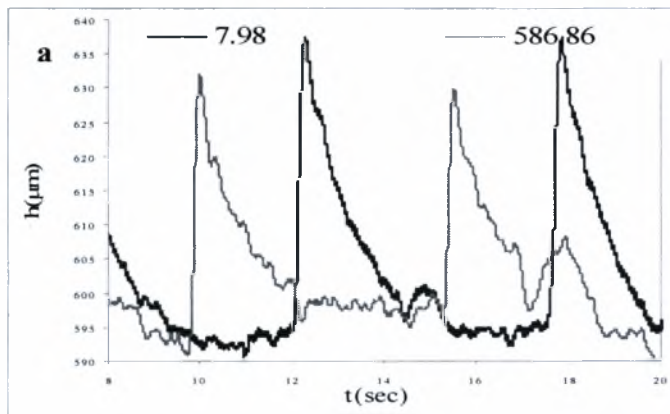
**Σχήμα 4.4.41:** 7° Διάλυμα 7% Βουτανόλη με  $Ka=137$ ,  $Kax=275.72$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



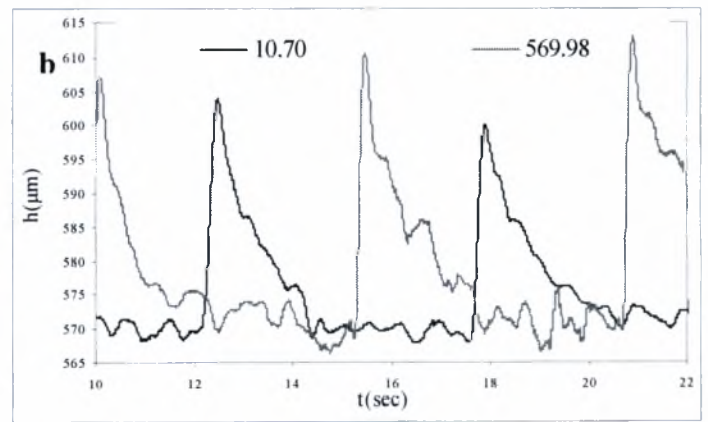
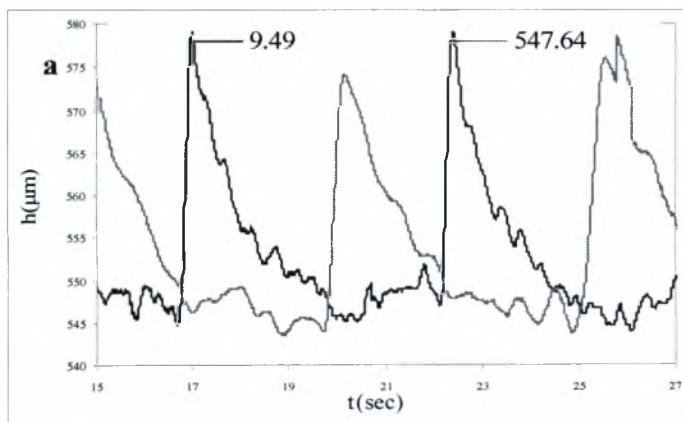
**Σχήμα 4.4.42:** 7° Διάλυμα 5% Βουτανόλη με  $Ka=251$ ,  $Kax=506.11$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



Σχήμα 4.4.43: 7° Διάλυμα 3% Βουτανόλη με  $K_a=309$ ,  $K_{ax}=682.20$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



Σχήμα 4.4.44: 7° Διάλυμα 3% Βουτανόλη με  $K_a=338$ ,  $K_{ax}=860.39$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)



Σχήμα 4.4.45: 7° Διάλυμα 1.5% Βουτανόλη με  $K_a=437$ ,  $K_{ax}=1119.94$ , Τελευταία ευσταθής μέτρηση (a). Πρώτη ασταθής μέτρηση (b)

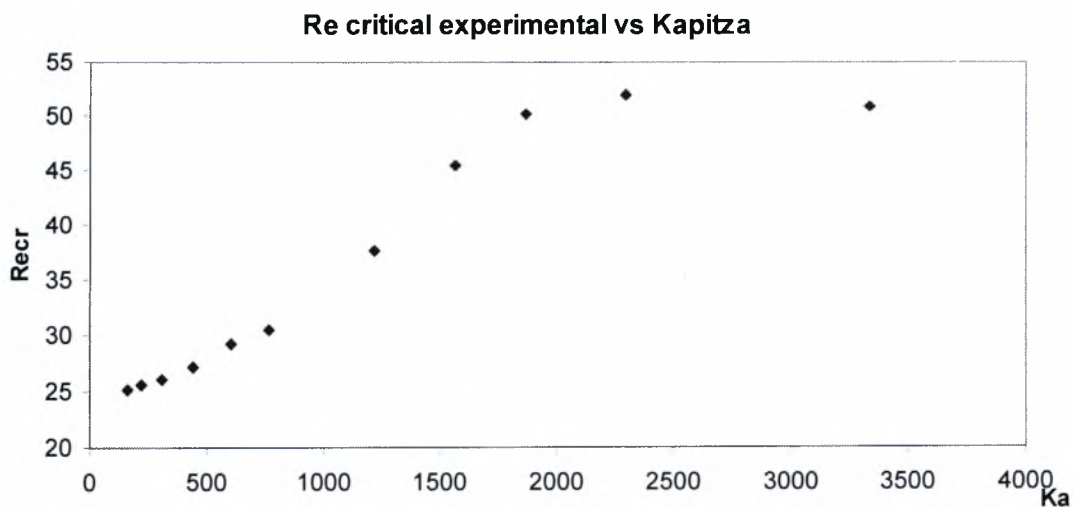
#### 4.5 Η επίδραση του αριθμού Kapitza

Στους πίνακες και στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές του πειραματικού αριθμού Reynolds για κάθε γωνία κλίση σε σχέση με τον αριθμό Kapitza και τον αριθμό Kapitza με την συνιστώσα της επιτάχυνσης της βαρύτητας και η διάφορα που προκύπτει από τον θεωρητικό αριθμό Reynolds.

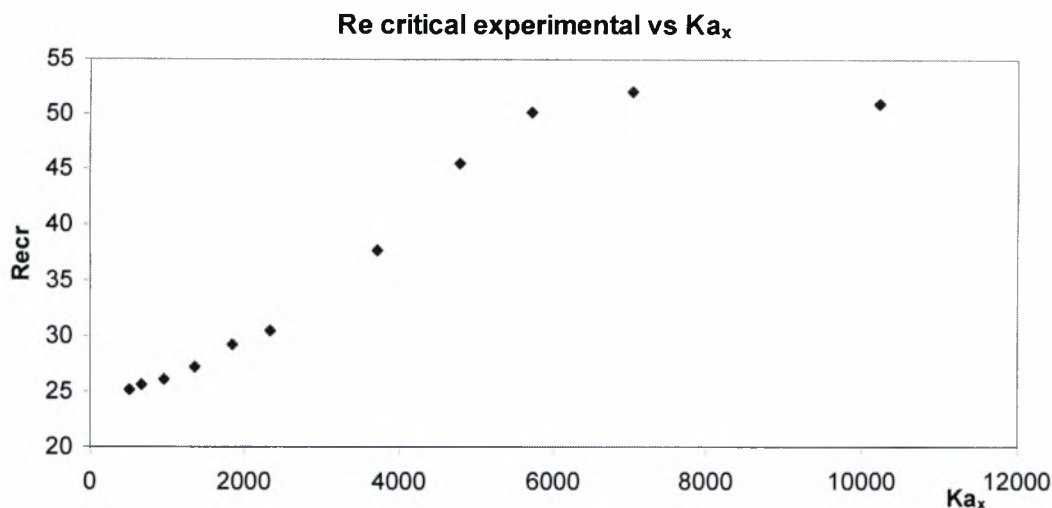
2 μοίρες

Ka	Ka <sub>x</sub>	Rec	Re theoretical	% διαφορά
165.34	506	25.2	23.9	5.60%
218.55	669	25.65	23.9	7.49%
312.05	955	26.15	23.9	9.58%
445.22	1362	27.14	23.9	13.73%
607.12	1858	29.27	23.9	22.66%
767.05	2347	30.44	23.9	27.56%
1216.5	3723	37.66	23.9	57.81%
1562.5	4781	45.5	23.9	90.67%
1867.7	5715	50.14	23.9	110.11%
2298	7032	52.05	23.9	118.12%
3339	10218	50.97	23.9	113.59%

Πινάκας 4.4 : Πειραματικοί αριθμοί Reynolds που υπολογίστηκαν για τις 2 μοίρες για διάφορους αριθμούς Kapitza



Σχήμα 4.5.1: 2°. Η σχέση του αριθμού Kapitza με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds



**Σχήμα 4.5.2:** 2°. Η σχέση του αριθμού  $Ka_x$  με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds

Παρατηρούμε, πως καθώς αυξάνεται ο αριθμός Karitza και για τις 2 περιπτώσεις, αυξάνεται και ο πειραματικός αριθμός Reynolds εκθετικά, μέχρι μια μέγιστη τιμή, και μετά μπορούμε να πούμε ότι παραμένει σταθερός. Επίσης παρατηρούμε, ότι με την αύξηση του αριθμού Karitza, αυξάνεται και η διαφορά θεωρητικού με πειραματικού αριθμού, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.

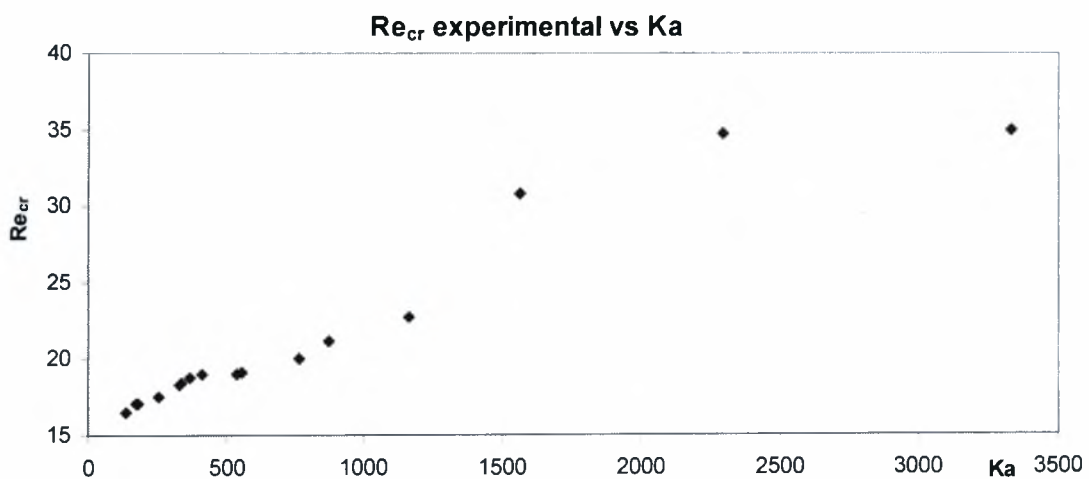


**Σχήμα 4.5.3 :** 2°. % διάφορα πειραματικού και θεωρητικού αριθμού Re σε σχέση με την αύξηση του αριθμού Ka

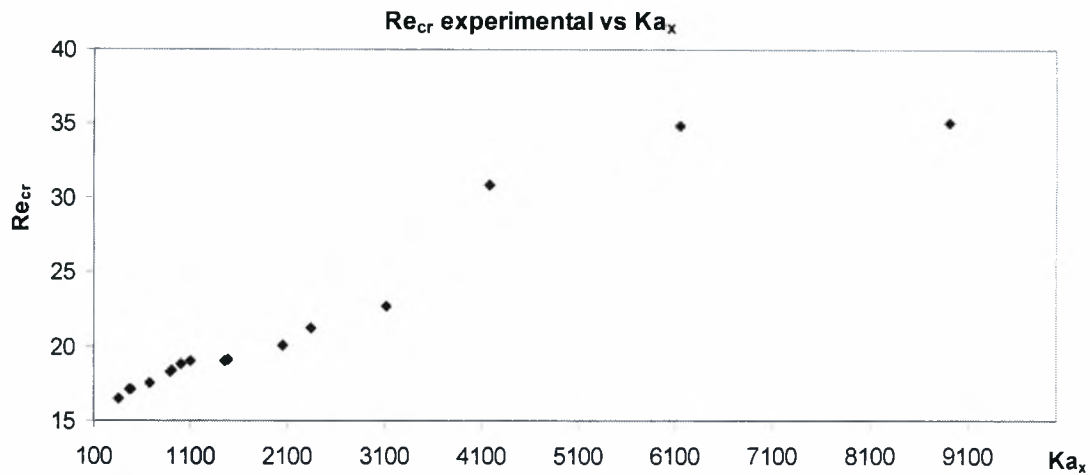
### 3 μοίρες

Ka	Ka <sub>x</sub>	Rec	Re theoretical	% διαφορά
136.7	365.46	16.5	15.9	3.77%
176.4	471.62	17.06	15.9	7.30%
183.1	489.4353	17.1	15.9	7.55%
256.4	686	17.5	15.9	10.06%
334.6	894.44	18.300	15.9	15.09%
338.2	904.23	18.4	15.9	15.72%
372.9	996.9539	18.765	15.9	18.02%
413.8	1106.25	19.000	15.9	19.50%
426.6	1140.41	18.2	15.9	14.47%
477.5	1276.45	17.120	15.9	7.67%
542.3	1449.88	19	15.9	19.50%
555.3	1484.44	19.1	15.9	20.13%
563.7	1507.10	19	15.9	19.50%
662.4	1770.85	19	15.9	19.50%
675.1	1804.76	18	15.9	13.21%
767.7	2052.48	20.040	15.9	26.04%
872.8	2333	21.19	15.9	33.27%
1163.3	3110	22.685	15.9	42.67%
1562.5	4177	30.8	15.9	93.71%
2298.0	6143	34.81	15.9	118.93%
3327.9	8897	35	15.9	120.13%

Πινάκας 4.5 : Πειραματικοί αριθμοί Reynolds που υπολογίστηκαν για τις 3 μοίρες για διάφορους αριθμούς Kapitza

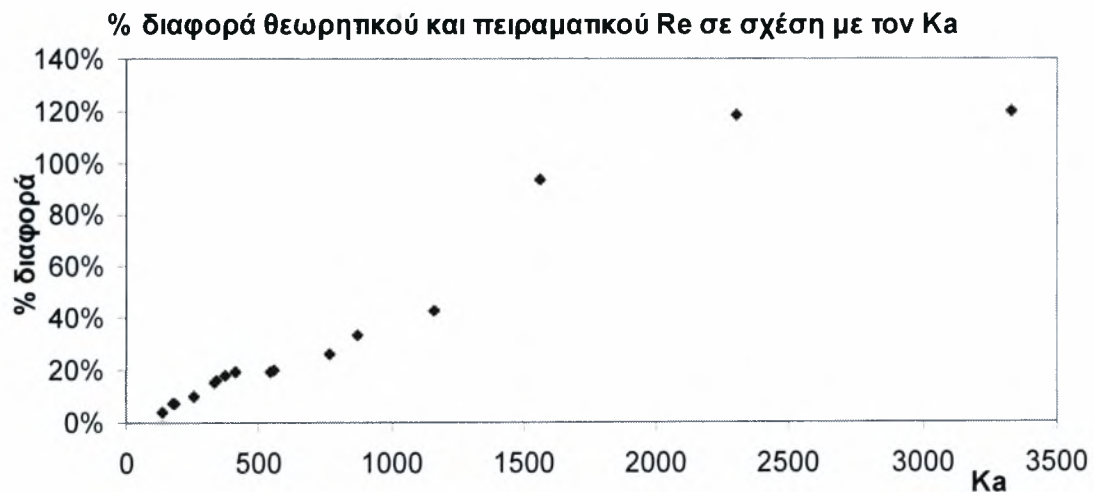


Σχήμα 4.5.4: 3°. Η σχέση του αριθμού Kapitza με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds



Σχήμα 4.5.5: 3°. Η σχέση του αριθμού  $Ka_x$  με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds

Παρατηρούμε, όπως ακριβώς και στις 2 μοίρες, πως καθώς αυξάνεται ο αριθμός Karitzka και για τις 2 περιπτώσεις, αυξάνεται και ο πειραματικός αριθμός Reynolds εκθετικά, μέχρι μια μέγιστη τιμή, και μετά μπορούμε να πούμε ότι παραμένει σταθερός. Επίσης παρατηρούμε, ότι με την αύξηση του αριθμού Karitzka, αυξάνεται και η διαφορά θεωρητικού με πειραματικού αριθμού, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.

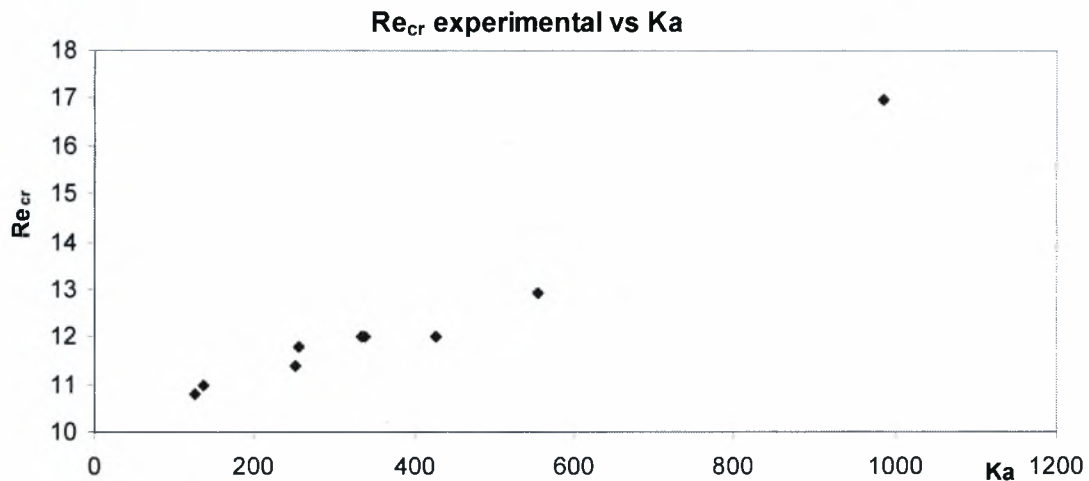


Σχήμα 4.5.6 : 3°. % διάφορα πειραματικού και θεωρητικού αριθμού Re σε σχέση με την αύξηση του αριθμού  $Ka$

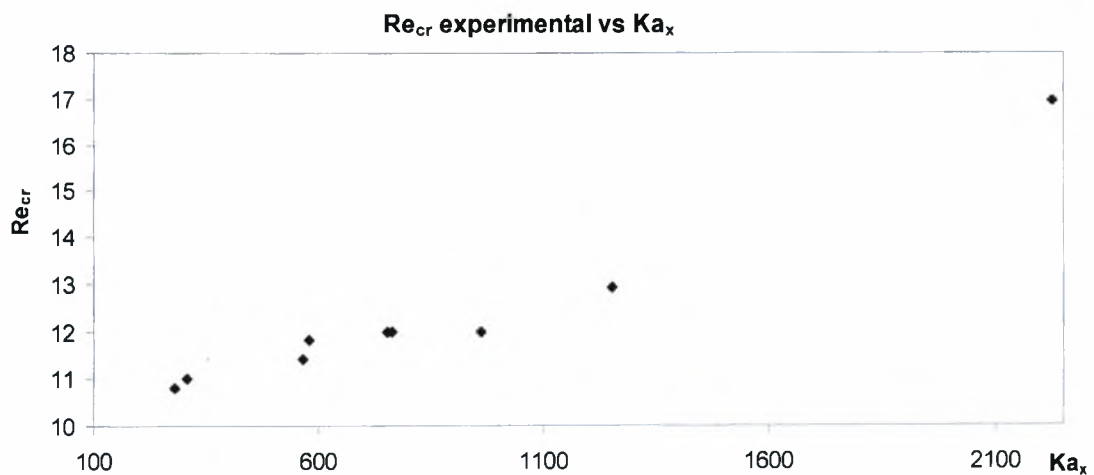
5 μοίρες

Ka	Ka <sub>x</sub>	Re <sub>cr</sub>	Re theoretical	% διαφορά
125	281.6428	10.8	9.5	13.68%
137	308.3213	11	9.5	15.79%
251	565.9539	11.4	9.5	20.00%
256	578.3898	11.8	9.5	24.21%
311	700.8808	12.55	9.5	32.11%
335	754.6052	12	9.5	26.32%
338	762.8623	12	9.5	26.32%
427	962.1217	12	9.5	26.32%
555	1252.36	12.930	9.5	36.11%
987	2225.098	16.96	9.5	78.53%

Πινάκας 4.5 : Πειραματικοί αριθμοί Reynolds που υπολογίστηκαν για τις 5 μοίρες για διάφορους αριθμούς Kapitza

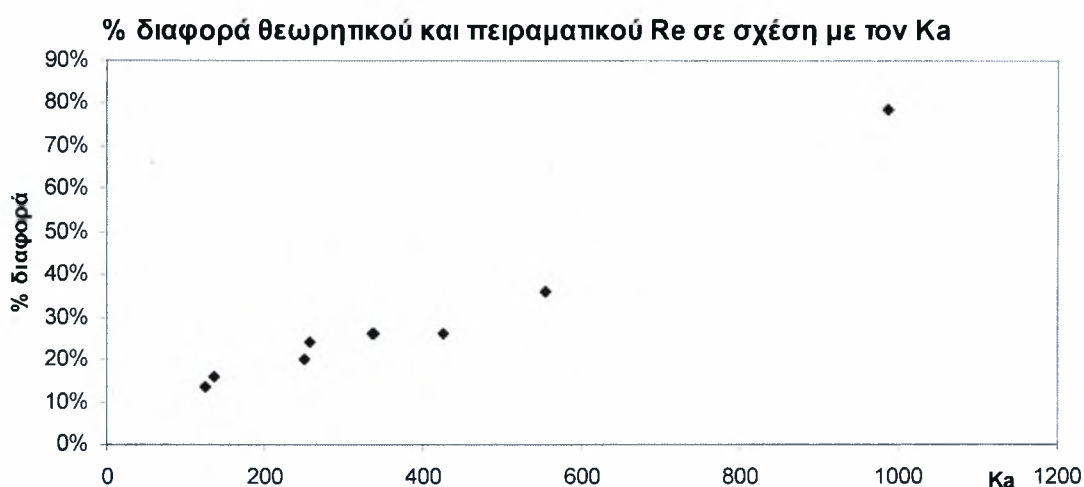


Σχήμα 4.5.5: 5°. Η σχέση του αριθμού Kapitza με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds



Σχήμα 4.5.8: 5°. Η σχέση του αριθμού Kapitza<sub>x</sub> με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds

Παρατηρούμε, όπως ακριβώς και στις 2 και 3 μοίρες, πως καθώς αυξάνεται ο αριθμός Karitza και για τις 2 περιπτώσεις, αυξάνεται και ο πειραματικός αριθμός Reynolds εκθετικά. Εδώ όμως δεν ήταν δυνατό να διερευνήσουμε τι συμβαίνει σε μεγαλύτερους αριθμούς  $Ka$  καθώς ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθούν διαλύματα χαμηλότερου ιξώδους λόγω της διαβροχής του υμένα. Επίσης παρατηρούμε, ότι με την αύξηση του αριθμού Karitza, αυξάνεται και η διαφορά θεωρητικού με πειραματικού αριθμού, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



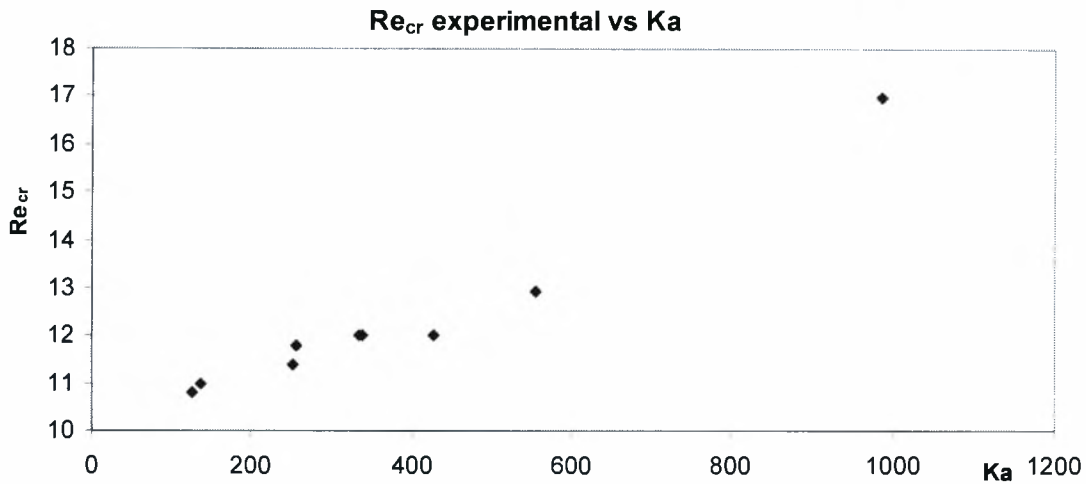
**Σχήμα 4.5.9 :** % διάφορα πειραματικού και θεωρητικού αριθμού Re σε σχέση με την αύξηση του αριθμού  $Ka$

### 7 μοίρες

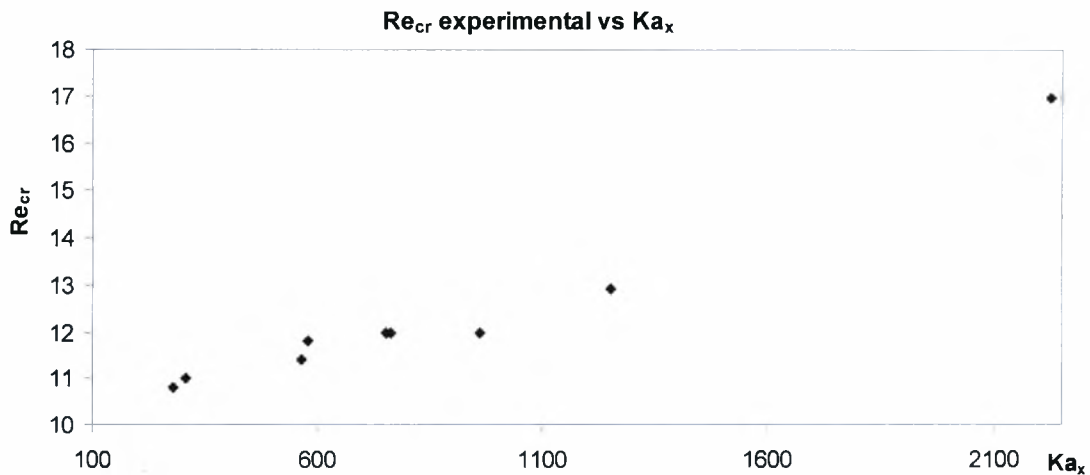
$Ka$	$Ka_x$	Rec	Re theoretical	% διαφορά
50	101.6263	6.8	6.8	0.00%
137	275.7215	7.2	6.8	5.88%
251	506.1139	7.6	6.8	11.76%
309	860.3936	10.715	6.8	57.57%
338	682.2025	8.2	6.8	20.59%
437	1119.944	10.095	6.8	48.46%
585.495	1180.932	12.085	6.8	77.72%

**Πινάκας 4.6 :** Πειραματικοί αριθμοί Reynolds που υπολογίστηκαν για τις 7 μοίρες για διάφορους αριθμούς Karitza



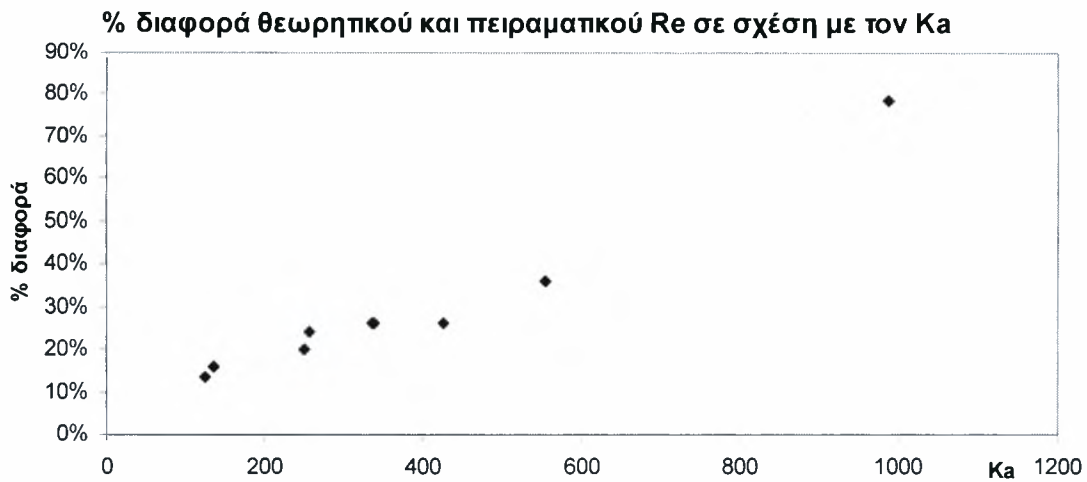


**Σχήμα 4.5.10:** 7°. Η σχέση του αριθμού Karitza με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds



**Σχήμα 4.5.11:** 7°. Η σχέση του αριθμού Karitza<sub>x</sub> με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds

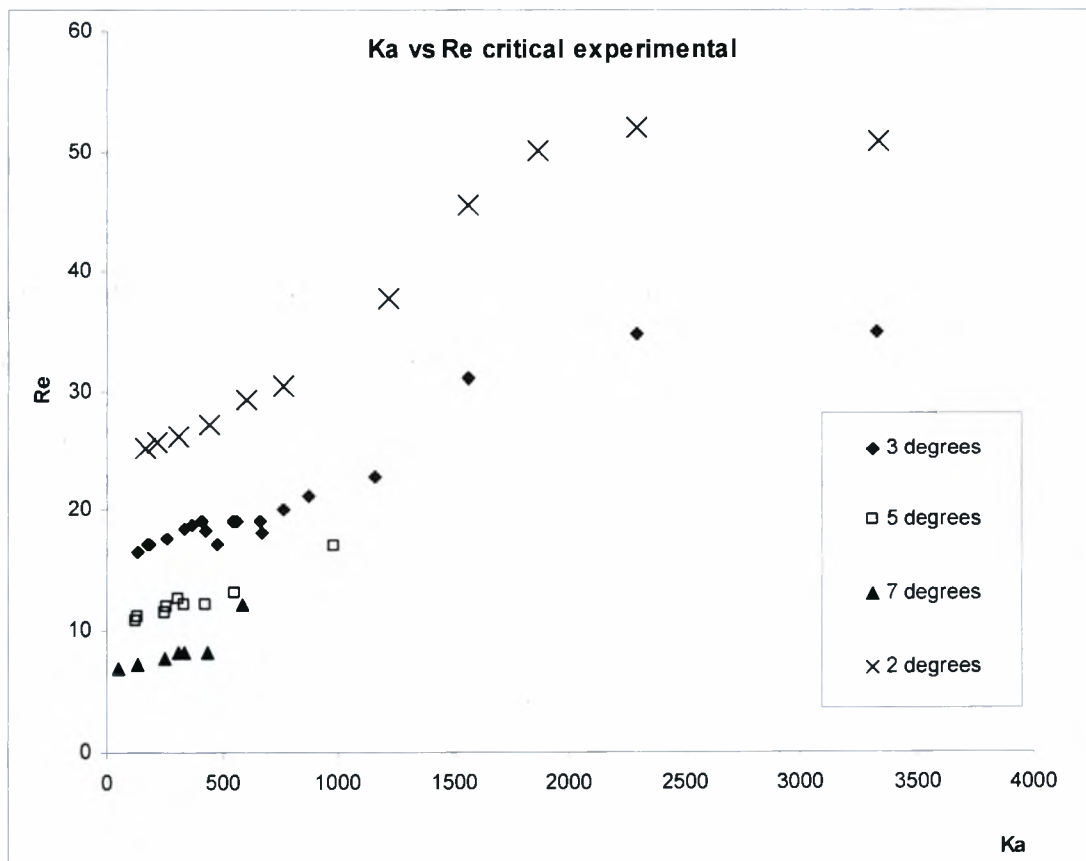
Παρατηρούμε, όπως ακριβώς και στις 2,3 και 5μοίρες, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Karitza και για τις 2 περιπτώσεις, αυξάνεται και ο πειραματικός αριθμός Reynolds εκθετικά. Και εδώ όμως δεν ήταν δυνατό να διερευνήσουμε τι συμβαίνει σε μεγαλύτερους αριθμούς  $Ka$  καθώς ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθούν διαλύματα χαμηλότερου ιξώδους λόγω της διαβροχής του υμένα. Επίσης παρατηρούμε, ότι με την αύξηση του αριθμού Karitza, αυξάνεται και η διαφορά θεωρητικού με πειραματικού αριθμού, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



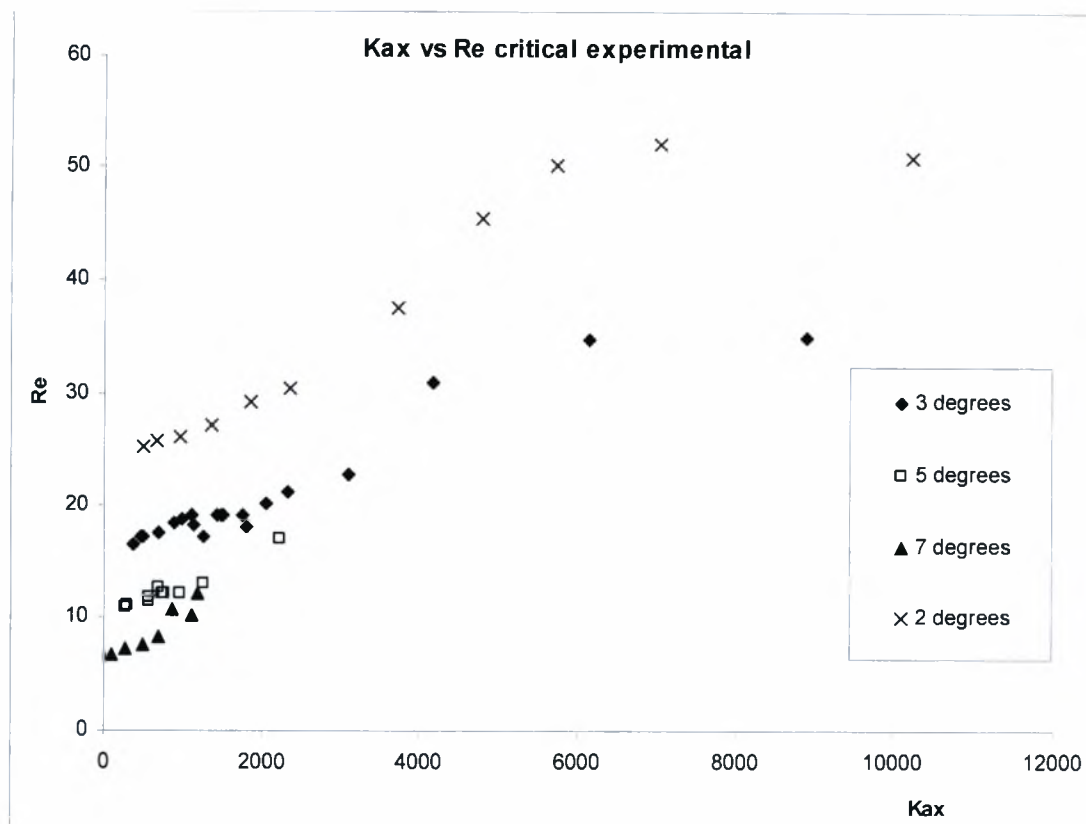
**Σχήμα 4.5.12 :** 7°.% διάφορα πειραματικού και θεωρητικού αριθμού Re σε σχέση με την αύξηση του αριθμού Ka

### Συνολικά

Στις παραπάνω ενότητες, παρατηρήσαμε τι συμπεριφορά του κρίσιμου αριθμού Reynolds, για κάθε γωνία κλίσης, σε σχέση και με τους δύο ορισμούς του αριθμού Karitza. Εδώ παραθέτουμε απλά, συνολικά γραφήματα αυτών που παρουσιάστηκαν παρά πάνω.



**Σχήμα 4.5.13:** Η σχέση του αριθμού Ka με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για όλες τις γωνίες κλίσης

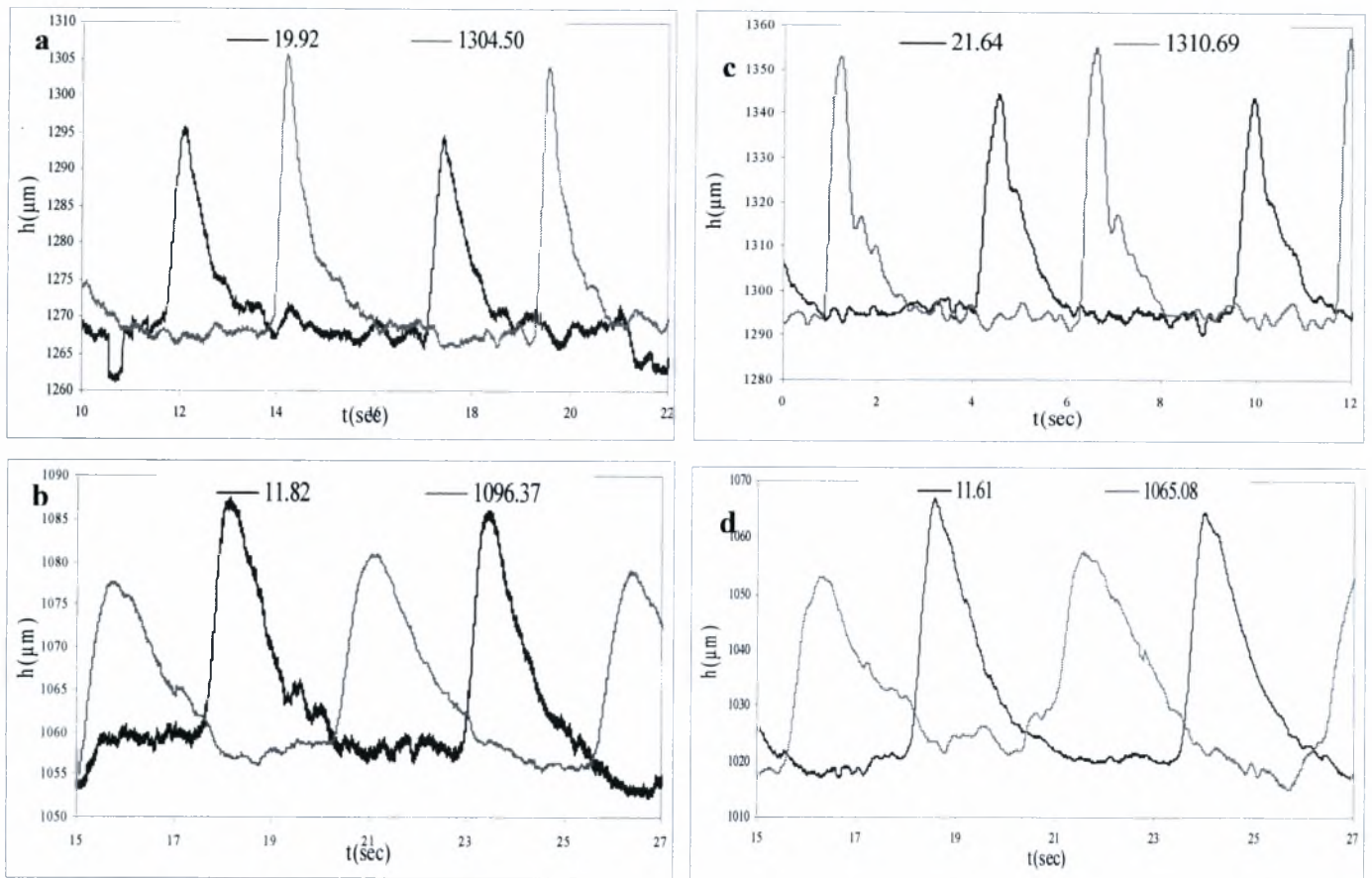


Σχήμα 4.5.14: Η σχέση του αριθμού  $Ka_x$  με τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για όλες τις γωνίες κλίσης

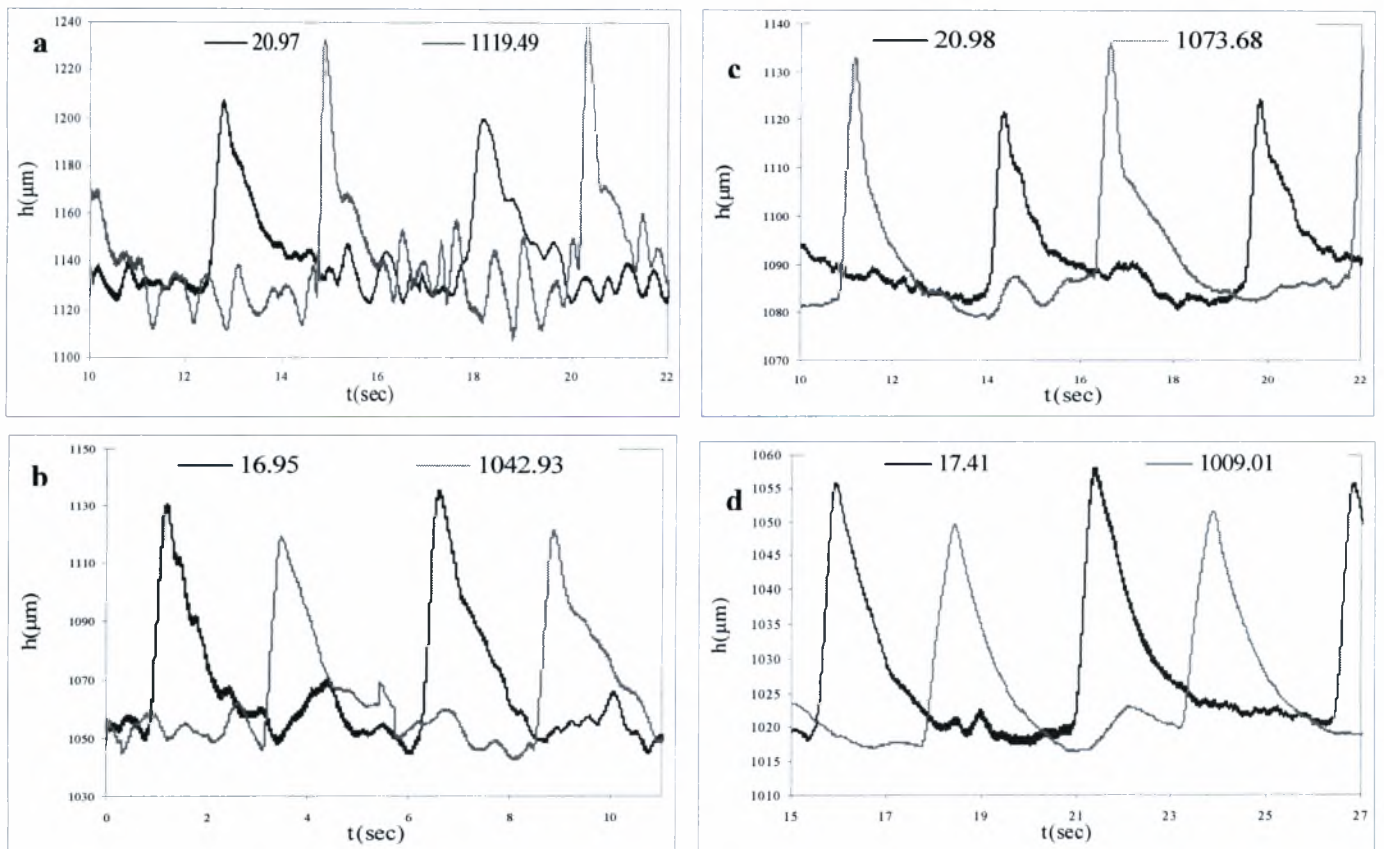
#### 4.6 Σύγκριση προφίλ ροής σε ίδια γωνία κλίσης και ίδιους αριθμούς Karitza

Στους πίνακες 4.5 και 4.6 παρατηρούμε πως για γωνία κλίσης  $3^\circ$  και  $5^\circ$  αντίστοιχα, έχουν υπολογιστεί σχεδόν ίδιοι αριθμοί Karitza και αυτό προέκυψε από τα διάφορα διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν με διαφορετικό ιξώδες, πυκνότητα και επιφανειακή τάση. Όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, ο κρίσιμος αριθμός Reynolds επηρεάζεται από τον αριθμό Karitza και συγκεκριμένα πολύ κοντινοί αριθμοί  $Ka$  μας δίνουν σχεδόν ίδιο κρίσιμο αριθμός Reynolds. Υπάρχει όμως το ερώτημα, αν ο αριθμός Karitza επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της ροής. Μια προσέγγιση σε αυτό το ερώτημα θα γίνει συγκρίνοντας προφίλ ροής σε ίδιους αριθμούς  $Ka$  και σε κοντινούς αριθμούς  $Re$  για συνθήκες ευστάθειας και αστάθειας.

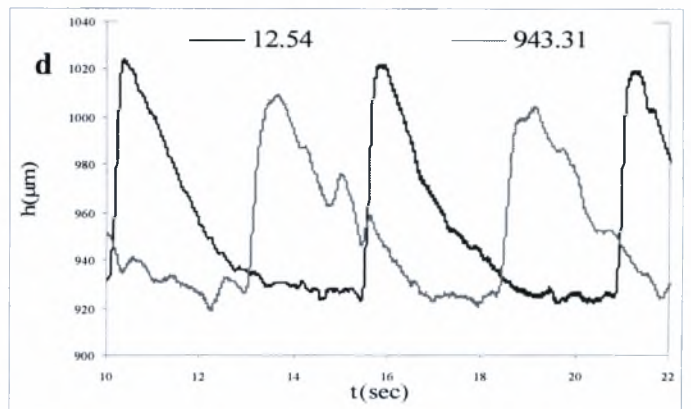
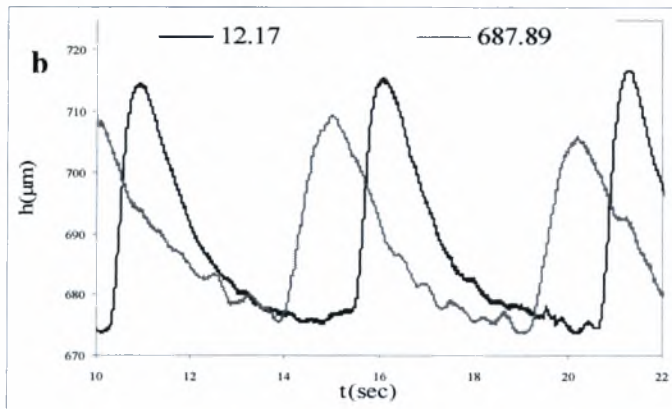
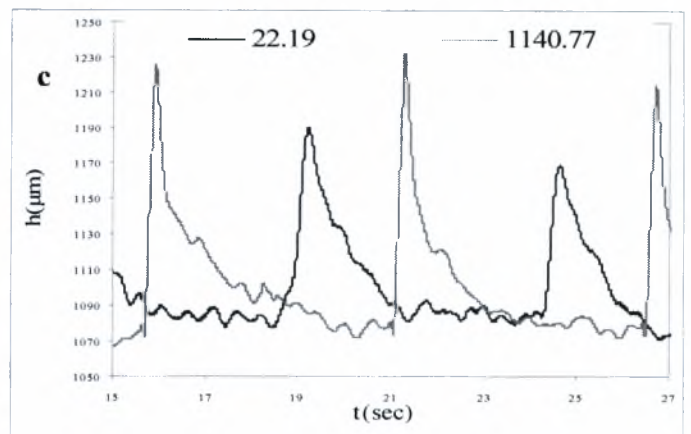
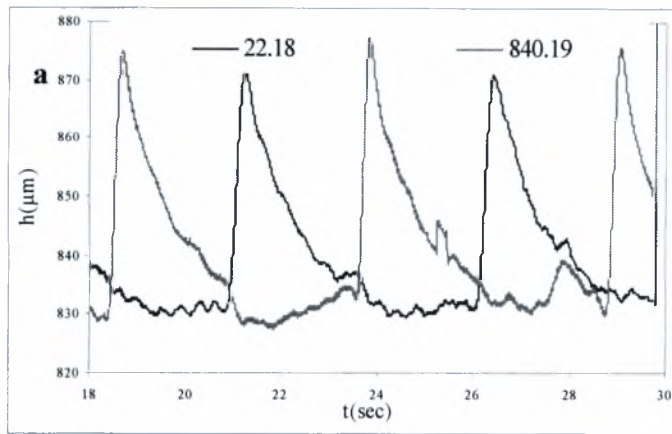
#### 3 μοίρες



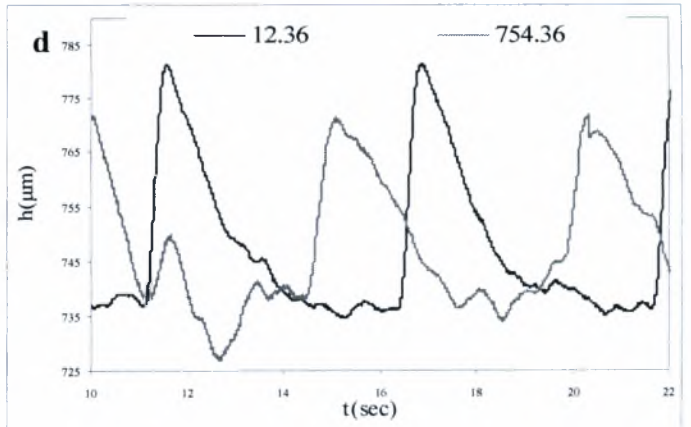
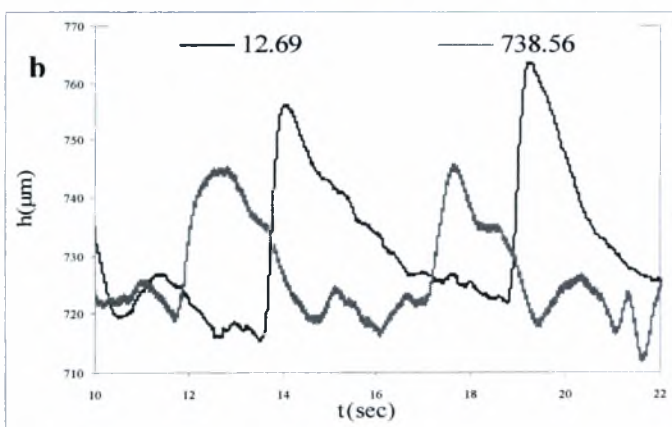
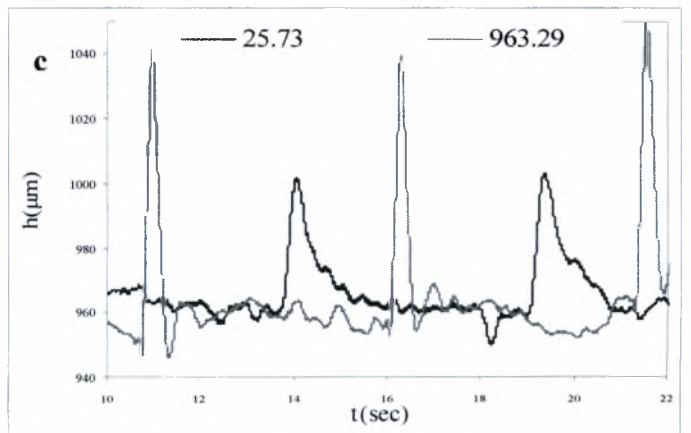
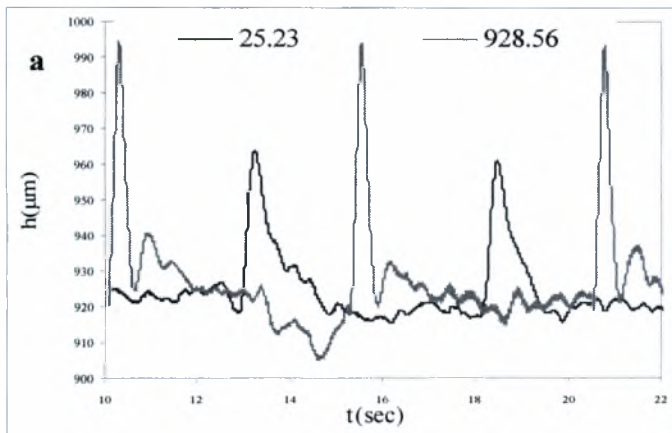
**Σχήμα 4.6.1:** 3°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 5% Βουτανόλη,  $K\alpha = 176$ ,  $K\alpha\kappa=471$ ,  
 (c) ασταθής, (d) ευσταθής 60% Προπανόλη,  $K\alpha=183$ ,  $K\alpha\kappa=489$



**Σχήμα 4.6.2:** 3°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 2% Βουτανόλη,  $K\alpha = 335$ ,  $K\alpha\kappa=894$ ,  
 (c) ασταθής, (d) ευσταθής 3% Βουτανόλη,  $K\alpha=338$ ,  $K\alpha\kappa=904$



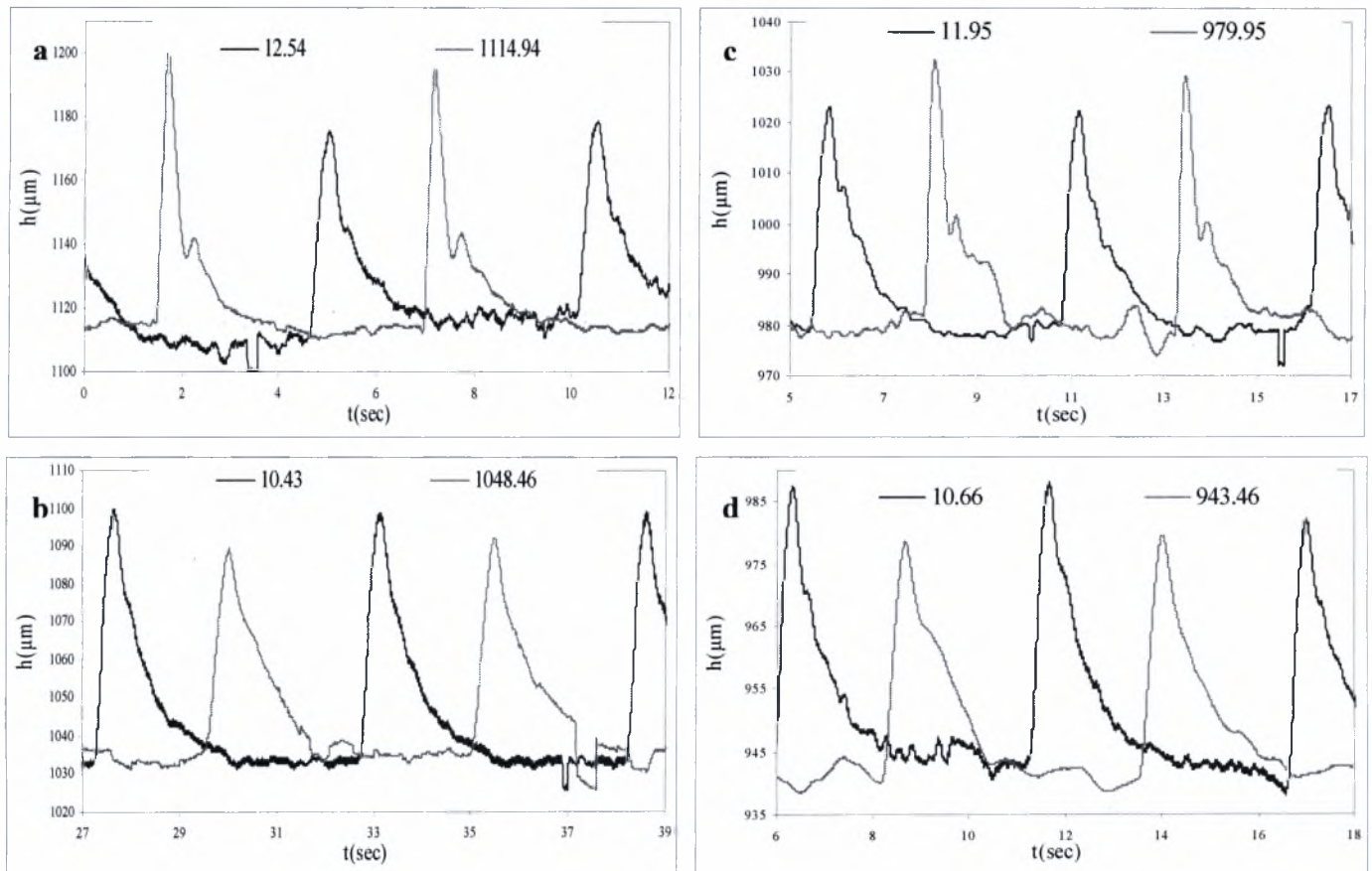
**Σχήμα 4.6.3:** 3°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 7% Βουτανόλη,  $K\alpha = 414$ ,  $K\alpha\kappa=1106$ ,  
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 1% Βουτανόλη,  $K\alpha=427$ ,  $K\alpha\kappa=1140$



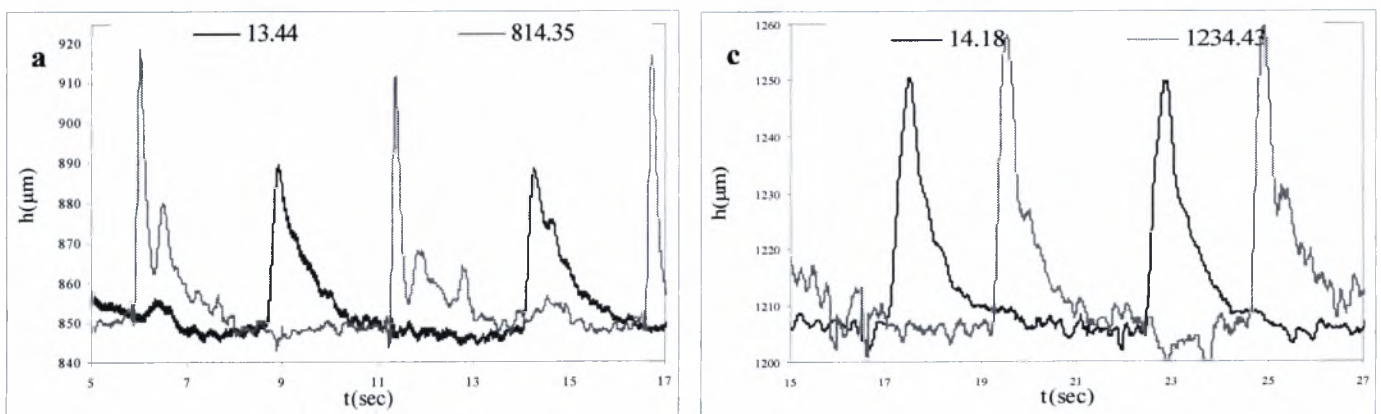
**Σχήμα 4.6.4:** 3°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 1,5% Βουτανόλη,  $K\alpha = 662$ ,  $K\alpha\kappa=1770$   
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 1% Βουτανόλη,  $K\alpha=675$ ,  $K\alpha\kappa=1804$

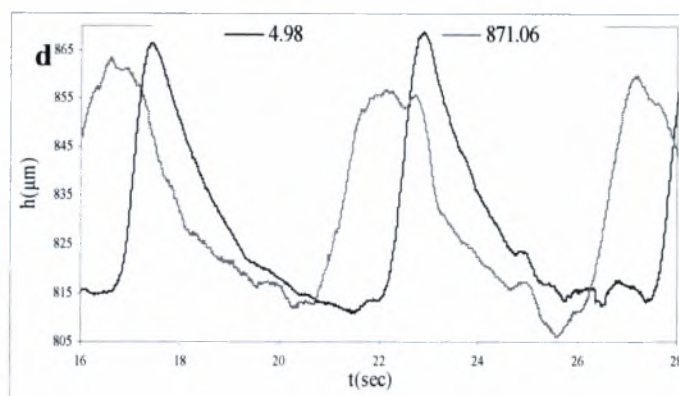
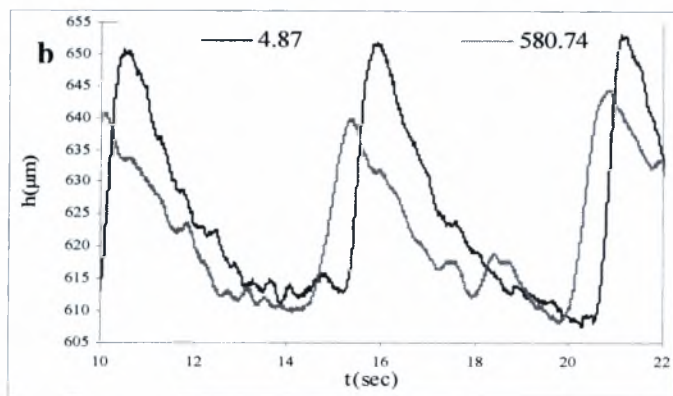
Παρατηρούμε πως στα διαγράμματα που έχουν επιλεγεί για σύγκριση, και ιδιαίτερα στα σχήματα 3.6.3 και 3.6.4 παρουσιάζονται ομοιότητες στο καταγεγραμμένο σήμα. Παρατηρείται δηλαδή ίδια μορφή των πρωταρχικών και ιδιαίτερα στο σχήμα 3.6.4 παρατηρείται εμφάνιση όμοιων δευτερευόντων κυμάτων.

### 5 μοίρες

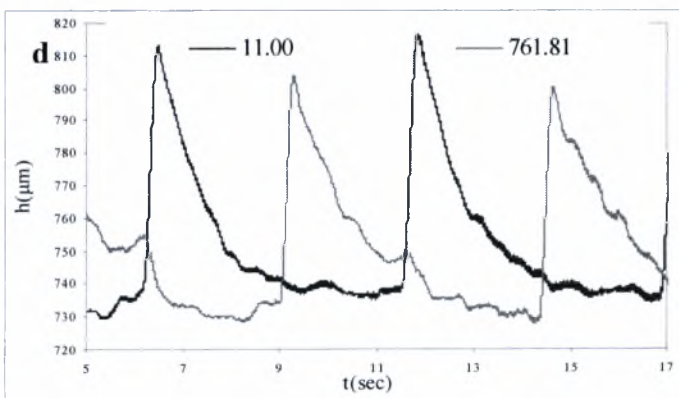
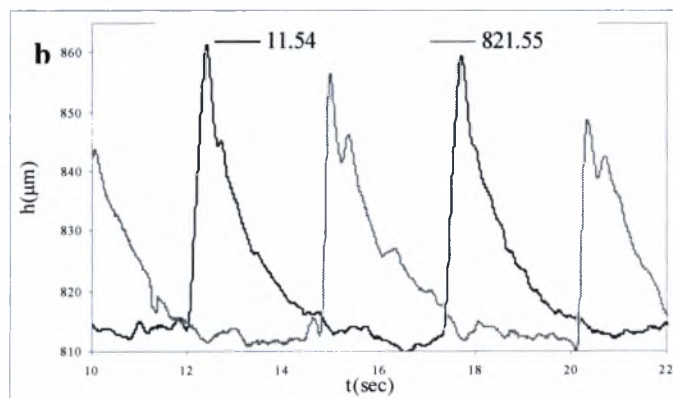
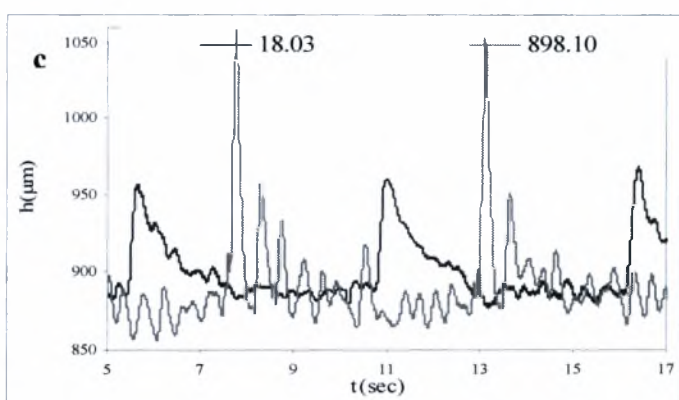
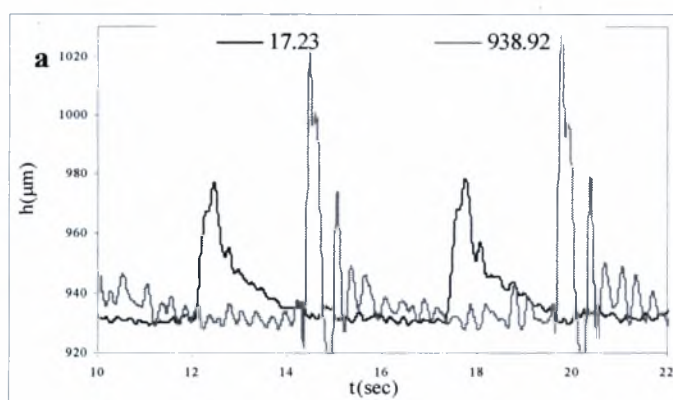


Σχήμα 4.6.5: 5°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 60% Προπανόλη,  $K_a = 125$ ,  $K_{ax}=281$ ,  
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 7% Βουτανόλη,  $K_a=137$ ,  $K_{ax}=275$





**Σχήμα 4.6.6:** 5°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 5% Βουτανόλη,  $K_a = 251$ ,  $K_{ax}=565$ ,  
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 55% Γλυκερίνη,  $K_a=256$ ,  $K_{ax}=578$



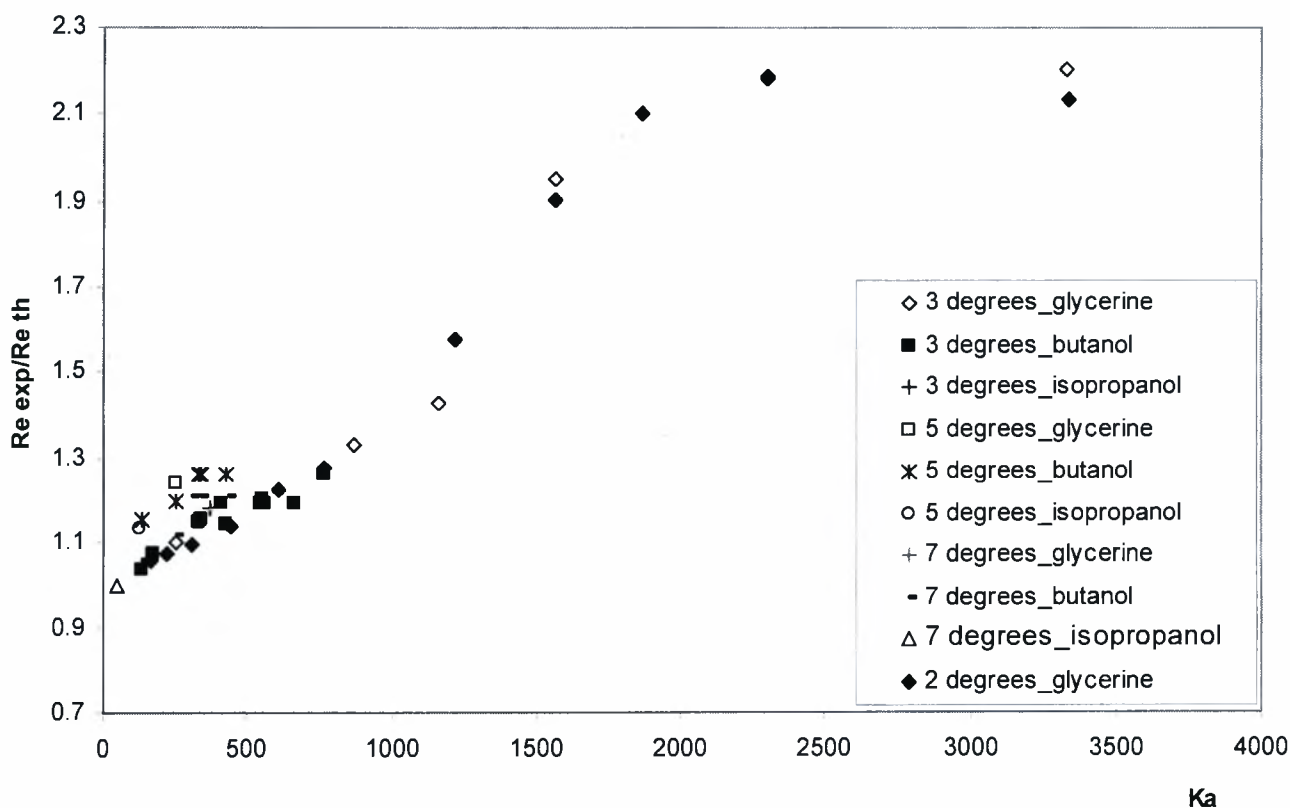
**Σχήμα 4.6.7:** 5°. (a) ασταθής, (b) ευσταθής 10 % Προπανόλη,  $K_a = 311$ ,  $K_{ax}=700$   
(c) ασταθής, (d) ευσταθής 2% Βουτανόλη,  $K_a=335$ ,  $K_{ax}=754$

Όπως αναφέρθηκε και πιο πριν για τα παραδείγματα των τριών μοιρών, υπάρχουν κάποιες ομοιότητες στη ροή. Στα συγκεκριμένα παραδείγματα των 5 μοιρών οι ομοιότητες αυτές γίνονται πιο εύκολα διακριτές και είναι αξιοσημείωτο,

πως τα διαλύματα που συγκρίνονται είναι εντελώς διαφορετικά, αφού πρόκειται για διαλύματα προπανόλης και βουτανόλης.

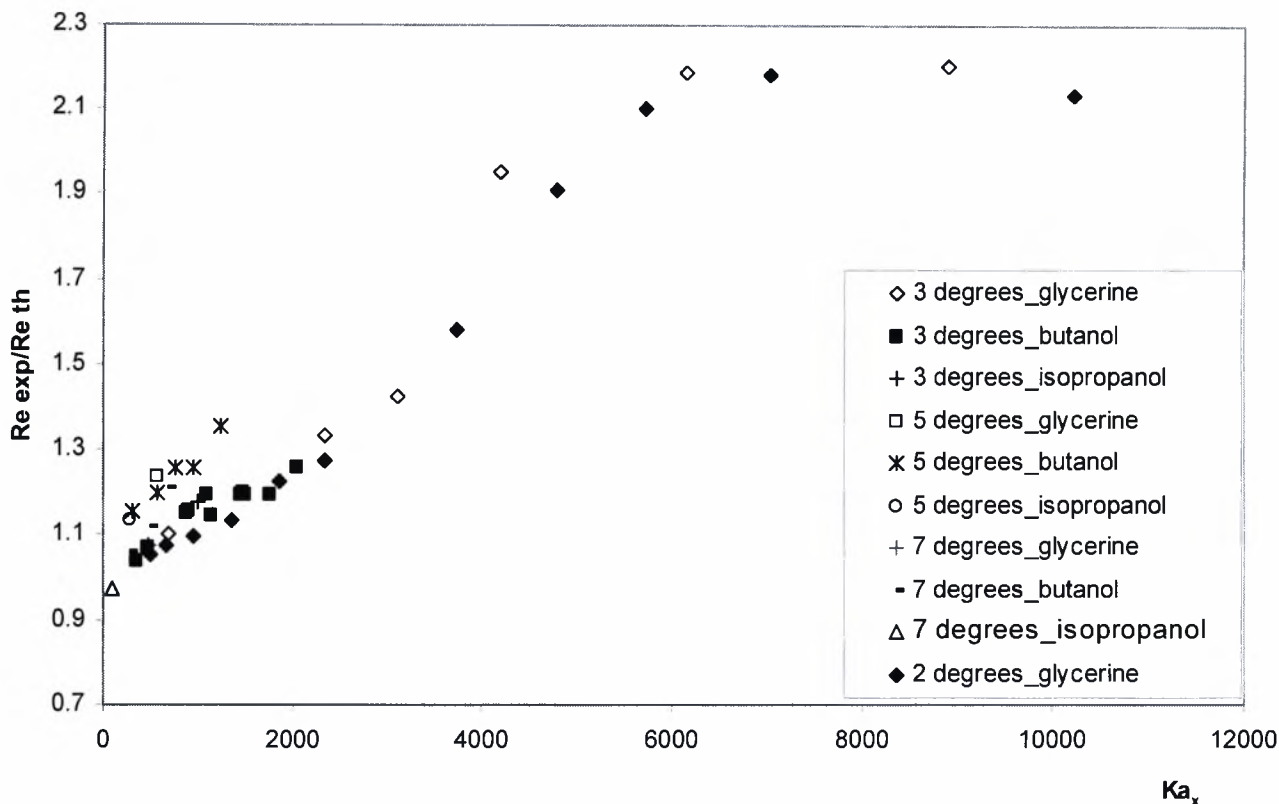
#### 4.7 Η επίδραση της γωνίας κλίσης

Αν θέλαμε να δούμε όλα τα παραπάνω σφαιρικά, για όλες τις γωνίες κλίσης και για όλους τους αριθμούς Reynolds που προέκυψαν, τότε, μπορούμε να θεωρήσουμε τον κανονικοποιημένο αριθμό Reynolds οριζόμενο ως το πηλίκο του πειραματικού αριθμού Reynolds, ως προς τον αντίστοιχο θεωρητικό. Με αυτή τη θεώρηση, ουσιαστικά δίνεται μια ευρύτερη και σαφέστερη εικόνα της εξάρτησης του κρίσιμου αριθμού Reynolds με τον αριθμό Kapitza, ανεξάρτητα με της γωνίας κλίσης. Τα αποτελέσματα αυτής της θεώρησης παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα και για τις 2 περιπτώσεις του αριθμού Kapitza.



Σχήμα 4.7.1 Συσχέτιση κανονικοποιημένου αριθμού Reynolds με τον  $Ka$





Σχήμα 4.7.2 Συσχέτιση κανονικοποιημένου αριθμού Reynolds με τον  $Ka_x$

Παρατηρούμε, ότι όλα σχεδόν τα σημεία, ακολουθούν τη συμπεριφορά που περιγράψαμε για τις 2 και 3 μοίρες και συμπίπτουν, πάνω στην ίδια γραμμή. Αυτό σημαίνει, πως η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds τον αριθμό Kapitza είναι ανεξάρτητη της γωνίας κλίσης του τοιχώματος. Για μικρούς δηλαδή αριθμούς  $Ka_x$ , και για κάθε γωνία κλίσης, ο αριθμός  $Re$  φαίνεται να αυξάνεται εκθετικά μέχρι ένα μέγιστο σημείο και μετά παραμένει σταθερός.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

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

### 5.1 Συμπεράσματα

Αρχικά έγιναν κάποια πειράματα με διαλύματα αλκοολών, προπανόλης και βουτανόλης, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της μείωσης της επιφανειακής τάσης κυρίως στην ευστάθεια, αλλά και στα χαρακτηριστικά της ροής υγρού υμένα. Επιτεθήκαν λοιπόν διαφορές τιμές επιφανειακής τάσης και παρατηρήθηκε, ότι σε ίδιες τιμές επιφανειακής τάσης (από διαφορετικά διαλύματα), η μετάβαση από την ευστάθεια στην αστάθεια, γινόταν σε αρκετά διαφορετικούς αριθμούς Reynolds. Το γεγονός αυτό, μας έδωσε το έναυσμα, να αναρωτηθούμε, το ρόλο των υπολοίπων ιδιοτήτων του ρευστού (πυκνότητα και ιξώδες). Ο αδιάστατος αριθμός Kapitza είναι εκείνος που περιέχει όλες τις αυτές τις ιδιότητες.

Στη συνέχεια λοιπόν, αφού υπολογίστηκε ο  $Ka$  για όλα τα πειράματα που είχαν γίνει, άρχισε να γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει μια συσχέτιση ανάμεσα στον κρίσιμο πειραματικό αριθμό  $Re$  και στον  $Ka$ . Άρχισε δηλαδή να φαίνεται, πως για μικρούς  $Ka$  (ιξώδη διαλύματα ή διαλύματα με χαμηλή επιφανειακή τάση), ο όριο της μετάβασης είναι μικρότερο, σε σχέση μεγαλύτερους  $Ka$ .

Για να επαληθευτεί το παραπάνω, έγιναν κάποια επιπρόσθετα πειράματα στις 2 και 3 μοίρες για ένα μεγάλο εύρος αριθμών  $Ka$  με διαλύματα γλυκερίνης νερού. Με επιφανειακή τάση σχεδόν σταθερή και με αλλαγή μονό στο ιξώδες και την πυκνότητα (αφού αυτά μόνο μεταβάλλονται με την περιεκτικότητα της γλυκερίνης), έγιναν πειράματα σε αρκετούς αριθμούς  $Ka$ . Αποδείχθηκε, ότι η αύξηση του αριθμού

Ka, αυξάνει το όριο της ευστάθειας μέχρι ένα μέγιστο σημείο, και μετά παραμένει σταθερό. Επομένως τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Ρευστά με μικρότερο Ka (ιξώδη ή ρευστά με χαμηλή επιφανειακή τάση) είναι πιο ασταθή.
- Με την αύξηση του Ka, μεγαλώνει η διαφορά ανάμεσα στον πειραματικό και θεωρητικό αριθμό Reynolds, μέχρι ένα μέγιστο σημείο (περίπου μέχρι την τιμή 2 στον κανονικοποιημένο αριθμό Re), και μετά παραμένει σταθερή.
- Η γωνία κλίσης δεν επηρεάζει την σχέση του αριθμού Re σε σχέση με τον Ka, όπως φαίνεται από τα γραφήματα του κανονικοποιημένου αριθμού Re σε σχέση με τον Ka.
- Για ίδιες γωνίες κλίσης και κοντινούς αριθμούς Ka, παρατηρούνται ομοιότητες στη μορφή των δευτερογενών κυμάτων που δημιουργούνται.
- Θα πρέπει να επαληθευτούν τα πειράματα με τις αλκούλες, καθώς δεν υπήρχε ακριβής τρόπος μέτρησης της επιφανειακής και γι αυτό το λόγο, ο αριθμός Reynolds που υπολογίστηκε σε κάθε περίπτωση και ιδιαίτερα στα διαλύματα βουτανόλης, φαίνεται να μην είναι σωστός.
- Η πειραματική μέθοδος (αγωγιμομετρική τεχνική) που εφαρμόστηκε για την εύρεση του ορίου ευστάθειας έδωσε με ικανοποιητική ακρίβεια το ύψος του υγρού υμένα (~10μm).

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

- Σε παλιότερες εργασίες έχει αποδειχθεί ότι η μείωση του πλάτους δρα σταθεροποιητικά στη ροή καθώς όσο μικρότερο είναι το πλάτος του καναλιού τόσο μεγαλύτερος γίνεται ο αριθμός μετάβασης. Ενδιαφέρον θα ήταν να διερευνηθεί η επίδραση του αριθμού Ka σε διαφορετικά πλάτη καναλιού.

- Η αγωγιμομετρική μέθοδος δεν μπορεί να μας δώσει με ακρίβεια πληροφορίες για τη μορφή και τα χαρακτηριστικά των κυμάτων. Η μείωση όμως της επιφανειακής τάσης, ενδεχομένως να επηρεάζει τις δομές τους και για το λόγο αυτό, προτείνεται η διερεύνηση με τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό.
- Στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών υπάρχει ένα μεγαλύτερο κανάλι, συνολικού μήκους 3 m. Καλό θα ήταν να μελετηθούν τα ίδια φαινόμενα στο μεγάλο κανάλι όπου το μήκος και το πλάτος είναι μεγαλύτερα και έτσι ίσως εκεί τα φαινόμενα να εξελίσσονται διαφορετικά, καθώς υπάρχει πολύ περισσότερο μήκος εξέλιξης.
- Προτείνεται ακόμα 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

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1. Ιξώδες διαλυμάτων γλυκερίνης – νερού

Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions in Centipoises/mPa s											
Glycerine percent weight	Temperatur e (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 <sup>(1)</sup>	1.792	1.308	1.005	0.8007	0.6560	0.5494	0.4688	0.4061	0.3565	0.3165	0.2838
10	2.44	1.74	1.31	1.03	0.826	0.680	0.575	0.500	-	-	-
20	3.44	2.41	1.76	1.35	1.07	0.879	0.731	0.635	-	-	-
30	5.14	3.49	2.50	1.87	1.46	1.16	0.956	0.816	0.690	-	-
40	8.25	5.37	3.72	2.72	2.07	1.62	1.30	1.09	0.918	0.763	0.668
50	14.6	9.01	6.00	4.21	3.10	2.37	1.86	1.53	1.25	1.05	0.910
60	29.9	17.4	10.8	7.19	5.08	3.76	2.85	2.29	1.84	1.52	1.28
65	45.7	25.3	15.2	9.85	6.80	4.89	3.66	2.91	2.28	1.86	1.55
67	55.5	29.9	17.7	11.3	7.73	5.50	4.09	3.23	2.50	2.03	1.68
70	76	38.8	22.5	14.1	9.40	6.61	4.86	3.78	2.90	2.34	1.93
75	132	65.2	35.5	21.2	13.6	9.25	6.61	5.01	3.80	3.00	2.43
80	255	116	60.1	33.9	20.8	13.6	9.42	6.94	5.13	4.03	3.18
85	540	223	109	58	33.5	21.2	14.2	10.0	7.28	5.52	4.24
90	1310	498	219	109	60.0	35.5	22.5	15.5	11.0	7.93	6.00
91	1590	592	259	127	68.1	39.8	25.1	17.1	11.9	8.62	6.40
92	1950	729	310	147	78.3	44.8	28.0	19.0	13.1	9.46	6.82
93	2400	860	367	172	89	51.5	31.6	21.2	14.4	10.3	7.54
94	2930	1040	437	202	105	58.4	35.4	23.6	15.8	11.2	8.19
95	3690	1270	523	237	121	67.0	39.9	26.4	17.5	12.4	9.08
96	4600	1580	624	281	142	77.8	45.4	29.7	19.6	13.6	10.1
97	5770	1950	765	340	166	88.9	51.9	33.6	21.9	15.1	10.9
98	7370	2460	939	409	196	104	59.8	38.5	24.8	17.0	12.2
99	9420	3090	1150	500	235	122	69.1	43.6	27.8	19.0	13.3
100	12070	3900	1410	612	284	142	81.3	50.6	31.9	21.3	14.8

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

Πίνακας 2. Πυκνότητα διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού

**Density of Glycerine-Water Solutions**

Glycerine (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )					Glycerine (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )				
	15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C		15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C
100	1.26415	1.26381	1.26108	1.25802	1.25495	50	1.12870	1.12845	1.12630	1.12375	1.12110
99	1.26160	1.26125	1.25850	1.25545	1.25235	49	1.12800	1.12575	1.12360	1.12110	1.11845
98	1.25900	1.25865	1.25590	1.25290	1.24975	48	1.12325	1.12305	1.12090	1.11840	1.11580
97	1.25645	1.25610	1.25335	1.25030	1.24710	47	1.12055	1.12030	1.11820	1.11575	1.11320
96	1.25385	1.25350	1.25080	1.24770	1.24450	46	1.11780	1.11760	1.11550	1.11310	1.11055
95	1.25130	1.25095	1.24825	1.24515	1.24190	45	1.11510	1.11490	1.11280	1.11040	1.10795
94	1.24865	1.24830	1.24560	1.24250	1.23930	44	1.11235	1.11215	1.11010	1.10775	1.10530
93	1.24600	1.24565	1.24300	1.23985	1.23670	43	1.10960	1.10945	1.10740	1.10510	1.10265
92	1.24340	1.24305	1.24035	1.23725	1.23410	42	1.10690	1.10670	1.10470	1.10240	1.10005
91	1.24075	1.24040	1.23770	1.23460	1.23150	41	1.10415	1.10400	1.10200	1.09975	1.09740
90	1.23810	1.23775	1.23510	1.23200	1.22890	40	1.10145	1.10130	1.09930	1.09710	1.09475
89	1.23545	1.23510	1.23245	1.22935	1.22625	39	1.09875	1.09860	1.09665	1.09445	1.09215
88	1.23280	1.23245	1.22975	1.22665	1.22360	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	1.20300	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	1.05895	1.05870	1.05720	1.05545	1.05350
73	1.19235	1.19205	1.18940	1.18650	1.18365	23	1.05635	1.05610	1.05465	1.05290	1.05100
72	1.18965	1.18930	1.18670	1.18380	1.18100	22	1.05375	1.05350	1.05205	1.05035	1.04850
71	1.18690	1.18655	1.18395	1.18110	1.17830	21	1.05110	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	1.03550	1.03570	1.03450	1.03300	1.03130
64	1.16755	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	14	1.03300	1.03330	1.03200	1.03055	1.02885
63	1.16480	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	13	1.03040	1.03070	1.02955	1.02805	1.02640
62	1.16200	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	12	1.02780	1.02820	1.02705	1.02560	1.02395
61	1.15925	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	11	1.02525	1.02565	1.02455	1.02315	1.02150
60	1.15650	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	10	1.02265	1.02315	1.02210	1.02070	1.01905
59	1.15370	1.15340	1.15105	1.14835	1.14555	9	1.02005	1.02075	1.01970	1.01835	1.01670
58	1.15095	1.15065	1.14830	1.14560	1.14285	8	1.01740	1.01835	1.01730	1.01600	1.01440
57	1.14815	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	7	1.01480	1.01560	1.01465	1.01340	1.01205
56	1.14535	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	6	1.01220	1.01350	1.01255	1.01125	1.00970
55	1.14260	1.14230	1.14005	1.13740	1.13470	5	1.01130	1.01110	1.01015	1.00890	1.00735
54	1.13980	1.13955	1.13730	1.13465	1.13195	4	1.00875	1.00870	1.00780	1.00655	1.00505
53	1.13705	1.13680	1.13455	1.13195	1.12925	3	1.00625	1.00620	1.00540	1.00415	1.00270
52	1.13425	1.13400	1.13180	1.12920	1.12650	2	1.00375	1.00365	1.00300	1.00180	1.00035
51	1.13150	1.13125	1.12905	1.12650	1.12380	1	1.00125	1.00145	1.00080	0.99945	0.99800
						0	0.99875	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	-

Πινάκας 4. Επιφανειακή τάση διαλυμάτων προπανόλης

**Surface Tension of 2-Propanol (1) + Water (2)**

mass %	$x_1$	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$ at $t/^\circ\text{C}$						
		20	25	30	35	40	45	50
0	0.000	72.75	72.01	71.21	70.42	69.52	68.84	67.92
5	0.016	50.32	49.58	48.88	48.16	47.37	46.66	45.82
10	0.032	41.21	40.42	39.73	39.06	38.43	37.78	37.04
15	0.050	35.27	34.63	34.01	33.38	32.76	32.13	31.51
20	0.070	31.16	30.57	29.98	29.37	28.79	28.18	27.59
25	0.091	28.88	28.28	27.71	27.14	26.58	26.04	25.47
30	0.114	27.38	26.82	26.26	25.73	25.18	24.66	24.11
40	0.167	25.81	25.27	24.74	24.23	23.72	23.21	22.69
50	0.231	24.78	24.26	23.76	23.27	22.78	22.29	21.81
60	0.310	24.05	23.51	22.97	22.54	22.03	21.52	21.01
70	0.412	23.17	22.68	22.18	21.71	21.22	20.76	20.28
80	0.545	22.62	22.14	21.66	21.18	20.71	20.23	19.78
90	0.730	22.21	21.69	21.18	20.66	20.16	19.74	19.23
100	1.000	21.74	21.22	20.72	20.23	19.71	19.21	18.69

Πινάκας 5. Επιφανειακή τάση διαλυμάτων βουτανόλης

20 ° C	
Wt % Butanol	$\gamma$ dynes/cm
0	71.9
0.5	57.8
1	51.0
1.5	46.7
3	37.7
4.9	30.7
6.9	26.3



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073784