

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

Διπλωματική εργασία

**ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΓΙΑ  
ΧΡΗΣΗ ΜΕ ΥΓΡΑ ΥΨΗΛΟΥ ΙΕΩΔΟΥΣ**

Κωνσταντίνα Συρανίδου

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

Βόλος, Οκτώβριος 2007



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

Αριθ. Εισ.: 5977/1  
Ημερ. Εισ.: 23-10-2007  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΓ – ΜΜΒ  
2007  
ΣΥΡ

© 2007 Κωνσταντίνα Συρανίδου

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

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής **Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου**

(Επιβλέπων)

*Καθηγητής*

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής **Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος**

*Επίκουρος Καθηγητής*

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής **Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ**

*Αναπληρωτής Καθηγητής*

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Β. Μποντόζογλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Συγχρόνως, θέλω να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μ. Βλαχογιάννη για την πολύτιμη βοήθεια, προσφορά και συνεργασία του.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ν. Ανδρίτσο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις του.

Επιπρόσθετα, θέλω να πω ένα ευχαριστώ σε όλους τους φίλους και τις φίλες μου, που ήταν δίπλα μου κάθε φορά που τους είχα ανάγκη και με βοήθησαν να περάσω τα ωραιότερα χρόνια της ζωής μου, καθώς και σε όλα τα παιδιά του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφεραν και για το χρόνο που μου αφιέρωσαν.

Πάνω απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ζωή και Ευγένιο Συρανίδη, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη και ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Παναγιώτη για την κατανόηση και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

*Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στους γονείς μου. Χωρίς αυτούς δεν θα γινόταν ποτέ πραγματικότητα.*

*Κωνσταντίνα Συρανίδου*

# ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΜΕ ΥΓΡΑ ΥΨΗΛΟΥ ΙΣΩΔΟΥΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ ΣΥΡΑΝΙΔΟΥ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ Βασίλειος Μποντόζογλου, Καθηγητής

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ροή υγρού υμένα κατά μήκος διαμορφωμένου τοιχώματος αποτελεί μία ενδιαφέρουσα διαφοροποίηση από το κλασσικό πρόβλημα ρευστομηχανικής της ροής υγρού υμένα λόγω βαρύτητας (ροή Nusselt). Έχει ποικίλες εφαρμογές, οι οποίες σχετίζονται με τον έλεγχο των ρυθμών μεταφοράς σε τοίχωμα και σε διεπιφάνεια, όπως είναι ο σχεδιασμός επιφανειών σε εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής και διαφόρων σχημάτων πληρωτικού υλικού σε στήλες απορρόφησης και απόσταξης. Παρ' όλες τις πολυάριθμες εφαρμογές του συγκεκριμένου είδους ροής, η μελέτη της τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά είναι περιορισμένη.

Είναι γνωστό ότι η ροή υγρού υμένα κατά μήκος ενός κεκλιμένου επίπεδου τοιχώματος είναι γραμμικά ασταθής πάνω από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds,  $Re_{cr}=(5/6)\cot\phi$ , όπου  $\phi$  η γωνία κλίσης. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η τροποποίηση καναλιού υγρού υμένα για χρήση με υγρά υψηλού ιξώδους καθώς και ο προσδιορισμός του κρίσιμου αριθμού Reynolds σε υψηλές γωνίες κλίσης, πάνω σε πλάκα ορθογωνικής διαταραχής.

Παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις που υπέστη το κανάλι καθώς και πειραματικά αποτελέσματα ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο κανάλι με περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Χρησιμοποιήθηκε η αγωγιμομετρική τεχνική για την

αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης του ύψους υμένα υπό την επιβολή περιοδικής διαταραχής.

Βρέθηκε ότι ο πειραματικός κρίσιμος αριθμός Reynolds,  $Re_{cr}$ , αντιστοιχεί στην τιμή όπου το ύψος κύματος που μετράται στην αρχή της ορθογωνικής πλάκας είναι ίσο με το ύψος κύματος που μετράται στο τέλος της. Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται στην αυξημένη ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται η μετάπτωση από την ευστάθεια στην αστάθεια. Έτσι, επιβεβαιώνεται με μεγάλη αξιοπιστία ότι η ορθογωνική διαμόρφωση του τοιχώματος έχει σταθεροποιητική επίδραση στη βασική ροή.

---

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

---

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<i>v</i>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b>	<i>vii</i>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<i>viii</i>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b>	<i>viii</i>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ</b>	<i>ix</i>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
1.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΣΗΜΑΣΙΑ.....	1
1.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	2
1.3. ΒΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ.....	2
1.4. ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ.....	7
1.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	8
1.6. ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ.....	8
<b>2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b>	<b>13</b>
2.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	13
2.1.1 Κανάλι ροής.....	13
2.1.2 Σύστημα επιβολής εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.....	18
2.1.3 Ευθυγράμμιση καναλιού ροής.....	19
2.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	21
2.3. ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ.....	23
2.3.1 Περιγραφή αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	23
2.3.2 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	25
<b>3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	<b>27</b>
3.1. ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΑ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ.....	27
3.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΟΥ $Re$ .....	29
3.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ $\varphi$ .....	33
<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</b>	<b>35</b>
4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	35
4.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	36
<b><u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u></b>	<b>37</b>
<b><u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u></b>	<b>39</b>
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΑ - ΧΡΟΝΟΥ.....	39
ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΞΩΔΟΥΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ ΓΛΥΚΕΡΙΝΗΣ - ΝΕΡΟΥ.....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ ΓΛΥΚΕΡΙΝΗΣ - ΝΕΡΟΥ.....	48



---

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

Σχήμα 1.1. Δυνάμεις πάνω σε ένα στοιχείο υγρού σε ροή υγρού υμένα.....	3
Σχήμα 1.2. Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα.....	7
Σχήμα 1.3. Ο ουδέτερα ευσταθής Re ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης.....	9
Σχήμα 1.4. (α) Κρίσιμος αριθμός Reynolds όπως προκύπτει από την εξ. (1.6-1) ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης του καναλιού για επίπεδο τοίχωμα (I) και για ημιτονοειδές τοίχωμα (II) με $\zeta=2\pi \times 0.05$ , (β) Κρίσιμος αριθμός Reynolds όπως προκύπτει από την εξ. (1.6-1) ως συνάρτηση της παραμέτρου $\zeta$ , για $\varphi=45^\circ$ .....	11
Σχήμα 1.5. Πειραματικός και υπολογιστικός κρίσιμος αριθμός Reynolds ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης.....	12
Σχήμα 2.1. Πλάκα ορθογωνικής διαμόρφωσης.....	14
Σχήμα 2.2. Πειραματική διάταξη.....	15
Σχήμα 2.3. Σύστημα διαταραχής.....	19
Σχήμα 2.4. Μέτωπο κύματος.....	20
Σχήμα 2.5. Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	24
Σχήμα 2.6. Πάχος υγρού υμένα κατά Nusselt για (α) επίπεδο και (β) ορθογωνικό τοίχωμα.....	25
Σχήμα 3.1. (α)Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο στην ευσταθή περιοχή (β) Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο στο σημείο μετάπτωσης (γ)Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο στην ασταθή περιοχή .....	28
Σχήμα 3.2. (α)Εξέλιξη του λόγου A σε συνάρτηση με τον πειραματικό αριθμό Reynolds για $\varphi=15^\circ$ , (β)Εξέλιξη του λόγου A σε συνάρτηση με τον πειραματικό αριθμό Reynolds για $\varphi=20^\circ$ , (γ)Εξέλιξη του λόγου A σε συνάρτηση με τον πειραματικό αριθμό Reynolds για $\varphi=27^\circ$ , (δ)Εξέλιξη του λόγου A σε συνάρτηση με τον πειραματικό αριθμό Reynolds για $\varphi=30^\circ$ .....	30
Σχήμα 3.3. Εξέλιξη του αριθμού Reynolds με τη γωνία $\varphi$ .....	34

---

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

Πίνακας 1. Ιξώδες διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού.....	47
Πίνακας 2. Πυκνότητα διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού.....	48

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

## ΛΑΤΙΝΙΚΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ

### *Σύμβολο*    *Ερμηνεία*

A	Λόγος υψών κύματος
B	Πλάτος διαμόρφωσης τοιχώματος
B <sub>0</sub>	Αριθμός Bond
f	Συχνότητα διαταραχής
F <sub>0</sub>	Αδιάστατο τοπικό πάχος υμένα
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
h	Πάχος υγρού υμένα
h <sub>N</sub>	Πάχος υγρού υμένα κατά Nusselt
Ka	Αριθμός Karitza
L	Μήκος κύματος
m	Μαζικός ρυθμός ροής
p	Πίεση
P <sub>atm</sub>	Ατμοσφαιρική πίεση
q, Q <sub>0</sub>	Ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους
Re	Αριθμός Reynolds
S	Διατομή
t	Χρόνος
u	Ταχύτητα
u <sub>max</sub>	Μέγιστη ταχύτητα
u <sub>0</sub>	Μέση ταχύτητα
V	Τάση
V	Όγκος
w	Πλάτος καναλιού
We	Αριθμός Weber

## ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ

### *Σύμβολο    Ερμηνεία*

$\gamma$	Επιφανειακή τάση
$\zeta$	Παράμετρος κυματισμού
$\theta$	Γωνία λόγω προφίλ του τοιχώματος
$\mu$	Δυναμικό ιξώδες
$\nu$	Κινηματικό ιξώδες
$\rho$	Πυκνότητα
$\sigma$	Επιφανειακή τάση
$\tau_{xy}$	Διατμητική τάση
$\varphi$	Γωνία κλίσης κεκλιμένου επιπέδου

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της είναι η πειραματική μελέτη της ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Συγκεκριμένα, διερευνάται πώς επηρεάζεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, δηλαδή ο αριθμός Reynolds στον οποίο η ροή μεταπίπτει από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή, με την εισαγωγή ορθογωνικής διαμόρφωσης στο τοίχωμα, σε συνάρτηση με τη γωνία κλίσης του τοιχώματος.

## 1.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΣΗΜΑΣΙΑ

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. Λειποί 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.

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.

## **1.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

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

Πιο συγκεκριμένα, ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα απιονισμένου νερού και γλυκερίνης (65% - 80% κ.β. γλυκερίνη), ενώ οι παροχές που μελετήθηκαν εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds μεταξύ  $0.56 < Re < 7.21$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή του είδους του διαλύματος και του εύρους του αριθμού Re υπαγορευόταν από τη γωνία κλίσης.

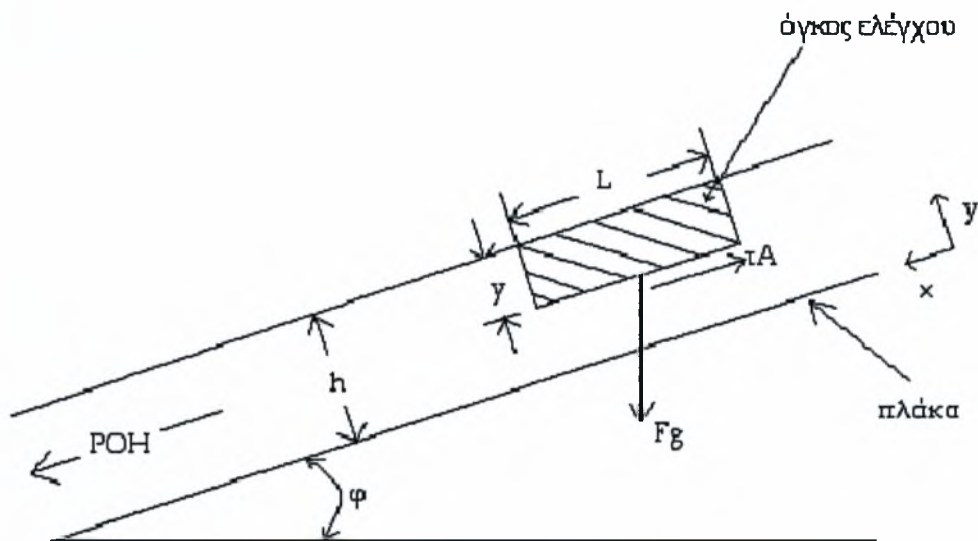
Η επιλογή των κλίσεων του τοιχώματος που μελετήθηκαν ( $15^\circ - 30^\circ$ ) υπαγορεύεται κυρίως από πειραματικούς περιορισμούς ενώ η εισαγωγή στο σύστημα συγκεκριμένης συχνότητας διαταραχής, δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου.

## **1.3. ΒΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ**

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 1.1. Η πλάκα έχει κλίση και σχηματίζει γωνία  $\varphi$ . Το πλάτος του στρώματος σε διεύθυνση κάθετη στην πλάκα είναι  $h$ . Απομονώνεται ένας όγκος ελέγχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, η επάνω επιφάνεια του όγκου ελέγχου βρίσκεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, τα δύο άκρα είναι επίπεδα στην πλάκα σε απόσταση  $L$  μεταξύ τους και η κατώτερη επιφάνεια είναι το επίπεδο που είναι παράλληλο με το τοίχωμα σε απόσταση  $y$  από την επάνω επιφάνεια του στρώματος.



Σχήμα 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 :

$$\rho \cdot g \cdot \sin \phi - \frac{d\tau_{yx}}{dy} = 0 \quad (1.3-1)$$

όπου

$g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας

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

$\rho$  : πυκνότητα του ρευστού

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει :

$$\frac{1}{\rho \cdot g \cdot \sin \phi} \cdot \tau_{yx} = y + c_1 \cdot a \quad (1.3-2)$$

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

$$\tau_{yx} = -\mu \cdot \frac{du_x}{dy} \quad (1.3-3)$$

όπου  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού. Από τις εξισώσεις (1.1-2) και (1.1-3) προκύπτει :

$$\frac{du_x}{dy} = -\frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{\mu} (y + c_1) \quad (1.3-4)$$

Ολοκληρώνοντας η εξ. (1.2-4) δίνει :

$$u_{xy}(y) = -\frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{\mu} \left( \frac{1}{2} \cdot y^2 + c_1 \cdot y \right) + c_2 \quad (1.3-5)$$

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 :

$$u_x(y) = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{2 \cdot \mu} \cdot y \cdot (2 \cdot h - y) \quad (1.3-6)$$

Η παραπάνω εξίσωση δηλώνει ότι στην 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 :

$$dm = \rho \cdot u_x \cdot W \cdot dy \quad (1.3-7)$$

Ο συνολικός μαζικός ρυθμός ροής του ρευστού είναι :

$$\dot{m} = \int_0^h \rho \cdot u_x \cdot W \cdot dy \Rightarrow \frac{\dot{m}}{W} = \frac{h^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \sin \phi}{3 \cdot \mu} \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \mu \cdot q}{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}} \quad (1.3-8)$$

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

Το πρόβλημα της ροής υγρού υμένα μπορεί να περιγραφεί από τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds και Weber ή Kapitza :

$$Re = \frac{u \cdot h_N}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad (1.3-9)$$



$$We = \frac{\gamma}{\rho \cdot u^2 \cdot h_N} \quad (1.2-10)$$

$$Ka = \frac{\gamma}{\rho \cdot \nu^{4/3} \cdot g^{1/3}} \quad (1.2-11)$$

Όπου  $u$  : μέση ταχύτητα του ρευστού

$h_N$  : πάχος του επιπέδου υμένα κατά Nusselt (εξ.(1.3-8))

$\gamma$  : επιφανειακή τάση του ρευστού

Η μέση ταχύτητα του ρευστού βρίσκεται εύκολα διαιρώντας με το εμβαδόν αυτό:

$$u = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi \cdot h_N^2}{3 \cdot \mu} \Rightarrow h_N = \sqrt{\frac{3 \cdot \mu \cdot u}{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}} \quad (1.3-12)$$

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

$$u_{\max} = u_x(y=h) = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi \cdot h^2}{2 \cdot \mu} \quad (1.3-13)$$

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

$$\frac{dp}{dy} = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \Rightarrow p = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot y + c_1 \quad (1.3-14)$$

Με συνοριακή συνθήκη :

- Για  $y=h$  είναι  $p=P_{\text{atm}}$

Επομένως, προκύπτει :

$$p = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot (y-h) + P_{\text{atm}} \quad (1.3-15)$$

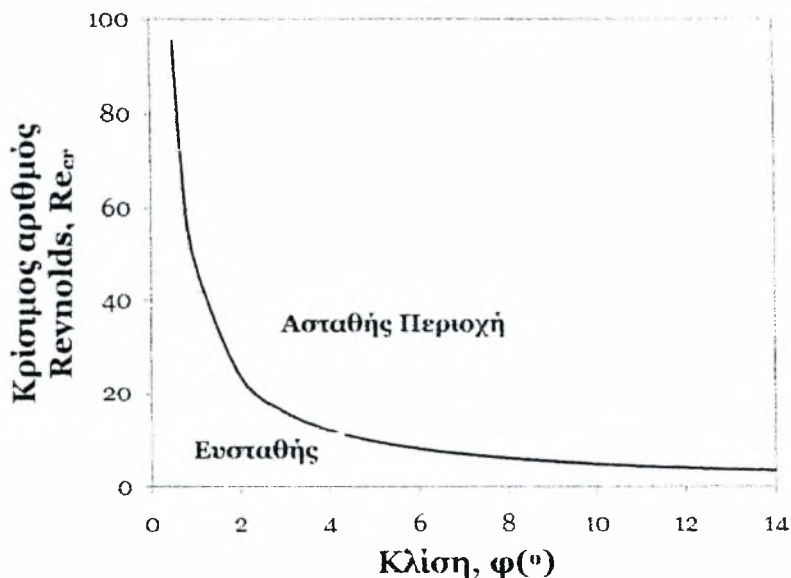
#### 1.4. ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

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 μία επιθυμητή κατάσταση, όπως η ενίσχυση της ανάμιξης των 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. [Ροζρικιδis, 1997].

Όπως έχει προκύψει από την ανάλυση για μονοδιάστατη ροή, για να είναι η ροή ασταθής πρέπει να ισχύει :

$$Re = Re_{crit} = \frac{5}{6} \cot \phi \quad (1.4)$$

Στη διεθνή βιβλιογραφία ο παράγοντας 5/6 ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα που θα επιλεγεί για να γίνει η αδιαστατοποίηση και τη θέση των αξόνων. Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται γραφικά η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds, δηλαδή του αριθμού εκείνου στον οποίο η ροή μεταπίπτει από ευσταθή σε ασταθή, ως προς τη γωνία κλίσης του επίπεδου τοιχώματος.



Σχήμα 1.2. Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα

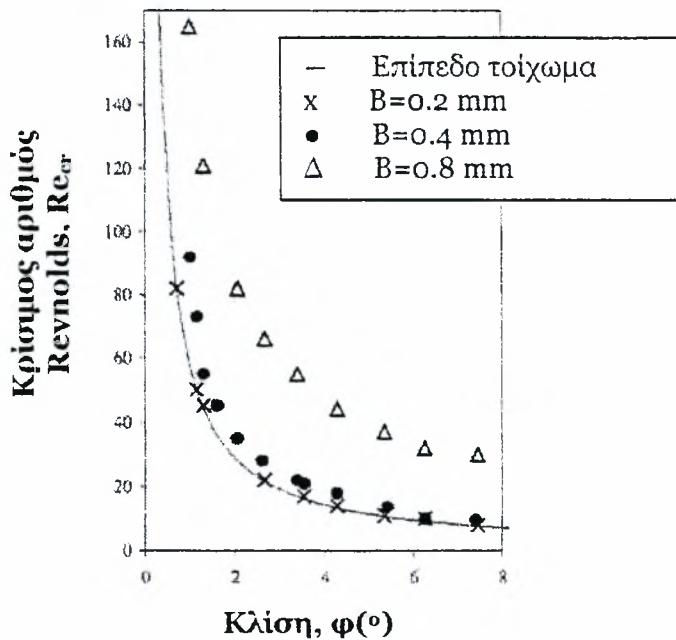
## 1.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

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 (1.4) για μικρές γωνίες κλίσης (έως  $10^{\circ}$ ), ενώ ως ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό ή διάλυμα νερού-γλυκερίνης.

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

## 1.6. ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ

Ακόμα πιο περιορισμένες είναι οι εργασίες σχετικά με την πειραματική μελέτη της ευστάθειας πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Οι Vlachogiannis and Bontozoglou (2002) και οι Argyriadi et al. (2006) παρατήρησαν ότι για την περίπτωση ορθογωνικής διαμόρφωσης με μήκος κύματος  $L=12\text{mm}$  και τρία διαφορετικά ύψη διαμόρφωσης ( $B=0.2, 0.4, 0.8 \text{ mm}$ ) η ροή σταθεροποιείται σε σχέση με την αντίστοιχη ροή σε επίπεδο τοίχωμα και συγκεκριμένα η σταθεροποιητική δράση είναι μεγαλύτερη για τοιχώματα με μεγαλύτερο ύψος διαμόρφωσης (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3. Ο ουδέτερα ευσταθής  $Re$  ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης [Argyriadi et al., 2006].

Οι Wierschem and Aksel (2003) και οι Wierschem et al (2002) χρησιμοποιώντας την ανάλυση της γραμμικής ευστάθειας για την περίπτωση ροής Νευτωνικού υγρού υμένα σε κεκλιμένο ημιτονοειδές τοίχωμα βρήκαν πώς μεταβάλλεται η ευστάθεια της μόνιμης ροής σε σχέση με την αντίστοιχη ροή σε επίπεδο κανάλι. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησαν υπολογιστικά την περίπτωση όπου το μήκος κύματος της διαμόρφωσης ήταν μεγαλύτερο από το πάχος του υμένα και κατέληξαν ότι ο κρίσιμος αριθμός Reynolds δίνεται από την εξίσωση :

$$Re_{cr} = \frac{5}{4} \cdot \frac{1}{F_0^3} \cdot \left[ \cot \phi (\phi - \theta) \cdot F_0^3 + \frac{1}{Bo} \cdot \left( k^2 \cdot F_0^8 + 17 \cdot \left( \frac{\partial F_0}{\partial X} \right)^2 \cdot F_0^4 \right) \right] \quad (1.6-1)$$

όπου  $\theta$ : τοπική κλίση του τοιχώματος

$Bo$ : αριθμός Bond

$F_0$ : αδιάστατο τοπικό πάχος υμένα

$X$ : αδιάστατη συνιστώσα της x-κατεύθυνσης

Για το  $F_0$  ισχύει :

$$F_0 = \left( \frac{\sin \phi}{\sin(\phi - \theta)} \right)^{1/3} \quad (1.6-2)$$

ενώ οι αριθμοί Reynolds και Bond ορίστηκαν ως :

$$Re = \frac{\rho \cdot u_{\max} \cdot H}{\mu} \quad \text{και} \quad Bo = \left( \frac{L}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi}{\sigma}$$

όπου  $u_{\max}$ : μέγιστη ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια

H: πάχος υμένα πάνω από επίπεδη πλάκα για ίδια παροχή

L: μήκος κύματος της διαμόρφωσης του τοιχώματος

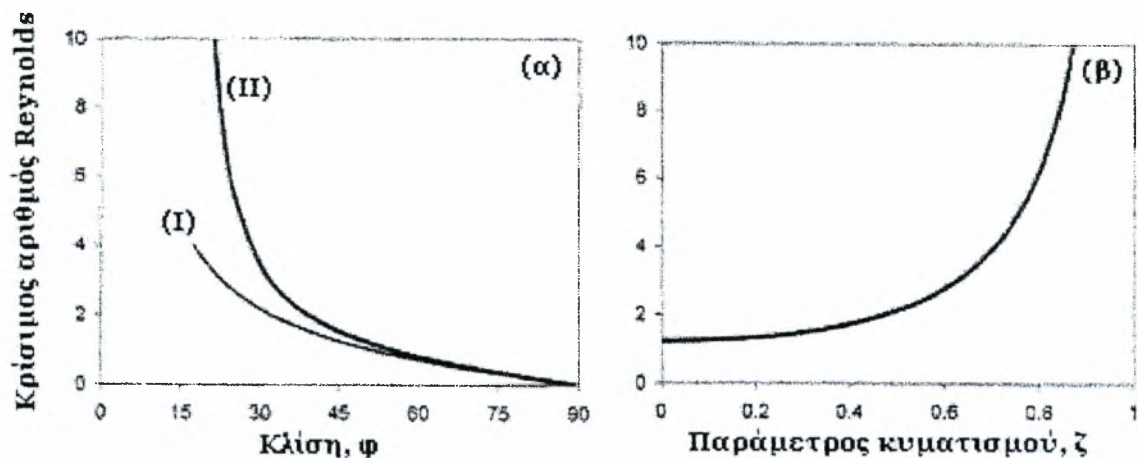
$\sigma$ : επιφανειακή τάση

Ο χαρακτηρισμός του ημιτονοειδούς τοιχώματος έγινε χρησιμοποιώντας την παράμετρο κυματισμού (waviness) που ορίζεται με τη βοήθεια του μήκους κύματος, L, και του πλάτους, B, ως εξής :

$$\zeta = \frac{2 \cdot \pi \cdot B}{L} \quad (1.6-3)$$

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για την περίπτωση επίπεδης πλάκας ( $\theta=0$ ) οι εξ. (1.6-1) και (1.6-2) συμπίπτουν με την εξ. (1.6-3). Για την περίπτωση ημιτονοειδούς τοιχώματος με μεγάλο μήκος κύματος προκύπτει ότι ο κρίσιμος αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος (Σχήμα 1.4.α) από τον αντίστοιχο για επίπεδη πλάκα όταν η γωνία κλίσης του καναλιού κυμαίνεται μεταξύ  $15^\circ$  -  $90^\circ$ . Στο σχήμα 1.4.β απεικονίζεται η μεταβολή του κρίσιμου αριθμού Reynolds σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του τοιχώματος για συγκεκριμένη γωνία κλίσης του καναλιού. Φαίνεται ότι η απόκλιση του κρίσιμου αριθμού από την τιμή του στο επίπεδο τοίχωμα ( $\zeta=0$ ) αυξάνεται όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος ή όσο μικρότερο το μήκος κύματος της διαμόρφωσης.

Οι Wierschem et al. (2005) χρησιμοποιώντας μια διαφορετική τεχνική (ανάλυση Floquet) κατέληξαν σχεδόν στην ίδια εξίσωση με προηγουμένως για τον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Επιπλέον, πραγματοποίησαν πειράματα σε κανάλι πλάτους περίπου 0.25mm και το οποίο αποτελούνταν από τρία ημιτονοειδή κύματα με μήκος κύματος 300mm και πλάτος 15mm. Ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκαν ρευστά μεγάλου ιξώδους (μεγαλύτερου από 46 cS), ενώ οι γωνίες που εξετάστηκαν ήταν μεγαλύτερες από  $15^\circ$ .



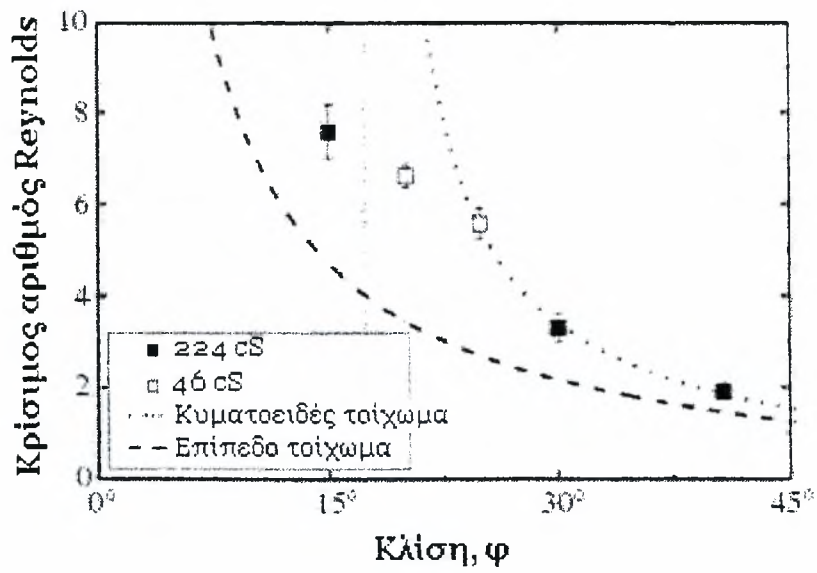
Σχήμα 1.4. (α) Κρίσιμος αριθμός Reynolds όπως προκύπτει από την εξ. (1.6-1) ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης του καναλιού για επίπεδο τοίχωμα (I) και για ημιτονοειδές τοίχωμα (II) με  $\zeta=2\pi \times 0.05$

(β) Κρίσιμος αριθμός Reynolds όπως προκύπτει από την εξ. (1.6-1) ως συνάρτηση της παραμέτρου  $\zeta$ , για  $\varphi=45^\circ$ . [Wierschem and Aksel (2003)]

Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και η πρόβλεψη της θεωρίας για τον κρίσιμο αριθμό Reynolds ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης του καναλιού. Για γωνίες μεγαλύτερες από  $25^\circ$  η θεωρία προβλέπει αρκετά ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα.

Ο λόγος που οι δύο προαναφερθείσες θεωρίες δεν μπορούν να προβλέψουν τον κρίσιμο αριθμό για μικρές γωνίες είναι ότι η τοπική γωνία κλίσης ( $\varphi-\theta$ ) τείνει στο μηδέν. Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζεται με μια κάθετη γραμμή και το όριο πάνω από το οποίο δεν υπάρχει η ιδιορρυθμία αυτή.

Τόσο τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί μέχρι σήμερα σε ορθογωνικό και ημιτονοειδές τοίχωμα όσο και οι υπολογιστικές προβλέψεις φανερώνουν μια τάση αύξησης του κρίσιμου αριθμού Reynolds σε σχέση με τον αντίστοιχο αριθμό για ροή πάνω από επίπεδη πλάκα. Ωστόσο, ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν μπορεί να γίνει εξαιτίας των διαφορετικών διαμορφώσεων και πειραματικών συνθηκών.



Σχήμα 15. Πειραματικός και υπολογιστικός κρίσιμος αριθμός Reynolds ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης [Wierschem et al. (2005)].

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

---

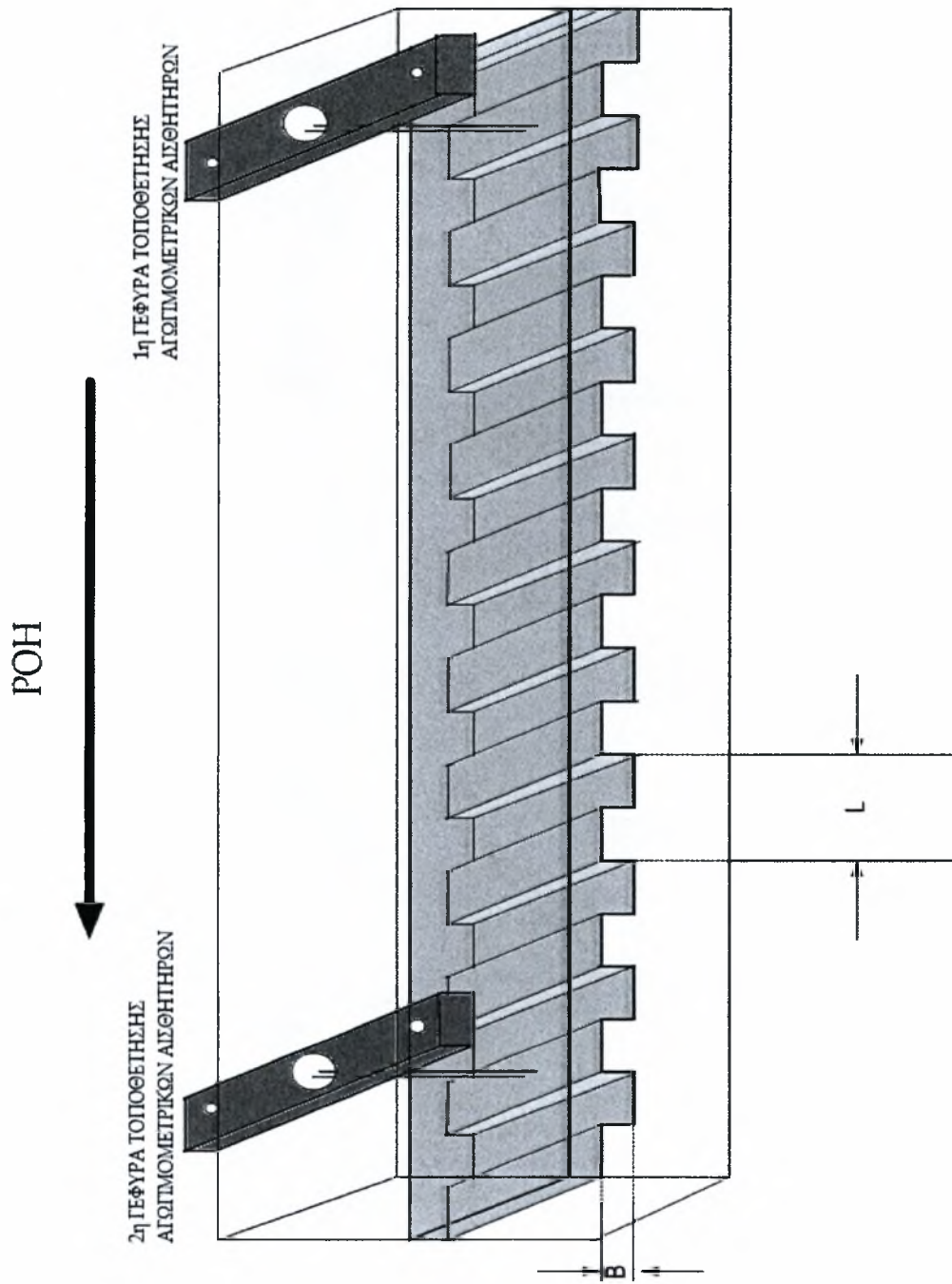
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη της ροής λεπτού υγρού υμένα πάνω από κεκλιμένο τοίχωμα. Αρχικά, περιγράφεται η πειραματική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, ο σχεδιασμός των τροποποιήσεων που έγιναν καθώς και το σύστημα εισαγωγής διαταραχών. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων. Τέλος, γίνεται παρουσίαση της μεθόδου συλλογής των πειραματικών δεδομένων με την αγωγιμομετρική τεχνική.

### 2.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

#### 2.1.1 Κανάλι ροής

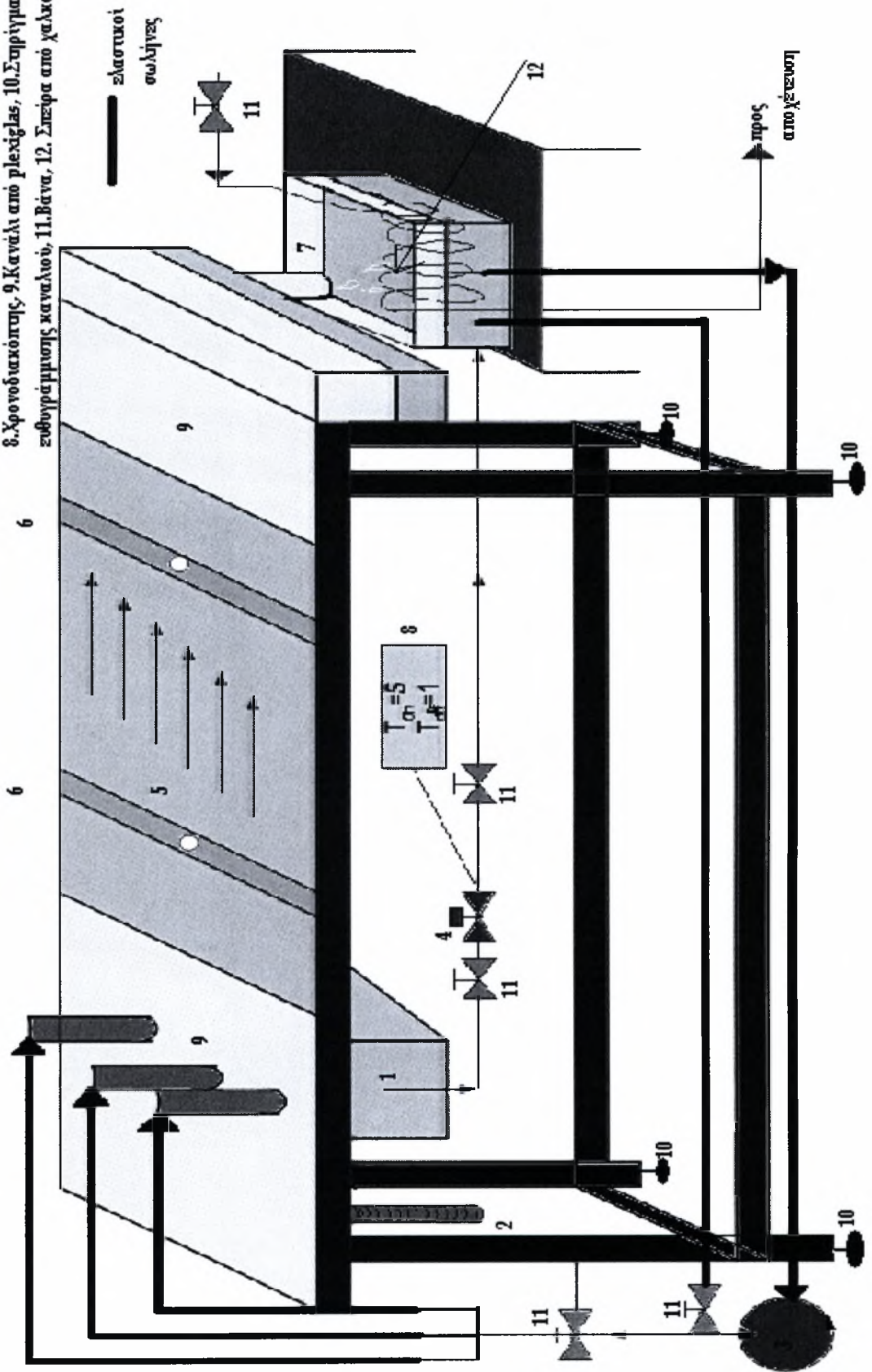
Η πειραματική διάταξη [Βλαχογιάννης, 2001] έχει ως στόχο να τροφοδοτεί με ρευστό μια επιφάνεια, η οποία έχει τη δυνατότητα να παίρνει κλίση (Σχήμα 2.2). Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η μελέτη της ροής. Το βασικό μέρος της συσκευής είναι ένα κανάλι (9), πλάτους 25 cm και μήκους 80 cm, πάνω στο οποίο 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 είναι αποσπώμενο, αποτελούμενο από πλάκα πλάτους 25 cm και μήκους 50 cm (5). Πάνω σ' αυτήν την πλάκα γίνονται οι μετρήσεις και υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης της πλάκας με την επιθυμητή κάθε φορά μορφολογία επιφάνειας (π.χ. περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα). Η μορφολογία της πλάκας είναι ορθογωνική με ύψος  $B=400\mu\text{m}$  και μήκος κύματος  $L=1200\mu\text{m}$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.





Σχήμα 2.1. Πλάκα ορθογωνικής διαμόρφωσης.

1. Δοχείο κατανομής, 2. Ατέρμωνας κοχλίας, 3. ΑΝΤΛΙΑ,
4. Ηλεκτροβάννα, 5. Αποσπώμενο τοίχωμα, 6. Τέφρα τοποθέτησης
- αγωγιομετρικών αισθητήρων, 7. Δοχείο συλλογής,
8. Χρονοδιακόπτης, 9. Κανάλι από πλεξιλάς, 10. Στιρίγματα
- συθραμμισης καναλιού, 11. Βάννα, 12. Σπέρα από χαλκοχλωρίνα



Σχήμα 2.2. Πειραματική διάταξη.

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° ως 67°. Στα πειράματα της παρούσας εργασίας, η κλίση κυμάνθηκε από 15° - 30°.

Η πρώτη τροποποίηση που ήταν απαραίτητη για τη χρήση του καναλιού με υγρά υψηλού ιξώδους, ήταν η αντικατάσταση της εμβαπτιζόμενης αντλίας με μία εξωτερική φυγοκεντρική αντλία (3), κατάλληλη να παρέχει τα επιθυμητά μανομετρικά ύψη και παροχές. Και στις δύο περιπτώσεις, ο σχεδιασμός βασίζεται στην ανακυκλοφορία του ρευστού και επομένως δυνατότητα της χρήσης του ίδιου διαλύματος πολλές φορές (αλλιώς θα απαιτούνταν περίπου 20kg καθαρής γλυκερίνης για κάθε μέτρηση).

Κριτήριο της επιλογής αντλίας ήταν το εύρος παροχών να μπορεί επιτύχει αριθμούς Reynolds της τάξεως του 10 στην επιφάνεια της πλάκας. Για την ογκομετρική παροχή  $Q$  ισχύει :

$$Q = q \cdot w \quad (2.1.1)$$

όπου  $w$ : το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας

αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1.2.9) και λύνοντας ως προς  $Q$  προκύπτει:

$$Q = Re \cdot v \cdot w \quad (2.1.2)$$

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της μέγιστης επιθυμητής παροχής είναι :

$$Re_{\max} = 30$$

$$w = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$$

$$v = 0.000237 \text{ m}^2/\text{s} \quad [\text{για διαλύματα γλυκερίνης - νερού περιεκτικότητας σε γλυκερίνη 95\% και θερμοκρασίας 30}^\circ \text{C}]$$

Μετά από αντικατάσταση των παραπάνω τιμών προέκυψε  $Q = 6.399 \text{ m}^3/\text{h}$  και επιλέχθηκε η αντλία DAB K45/SOT N.394 με εύρος παροχών  $Q = 2 - 6.5 \text{ m}^3/\text{h}$  η οποία ικανοποιούσε τις απαιτήσεις του πειράματος.

Η επόμενη τροποποίηση που υπέστη το κανάλι ήταν η αντικατάσταση των σωλήνων μέσω των οποίων γίνεται η διακίνηση του ρευστού με σωλήνες μεγαλύτερης διατομής και αυξημένης αντοχής. Η τροποποίηση αυτή έγινε διότι η αύξηση του ιξώδους του μίγματος δημιουργεί απαγορευτική αύξηση των

διατμητικών τάσεων και των τριβών στην αρχική σωλήνωση. Η αυξημένη διατομή μειώνει την ταχύτητα και συνεπώς και την πτώση πίεσης. Η διάμετρος της σωλήνωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 2 cm. Επίσης επιλέχθηκε τοίχωμα αυξημένης αντοχής ώστε να παραλαμβάνει τις σχετικά υψηλές πιέσεις στο άνω όριο των μελετώμενων παροχών.

Άλλη μία τροποποίηση που έγινε στο κανάλι είναι η απ' ευθείας παροχή του ρευστού στο δοχείο κατανομής (1) αντί στο δοχείο υπερχειλίσσης. Η τροποποίηση έγινε με σκοπό την μείωση του μήκους της σωλήνωσης και επομένως τη μείωση των απωλειών τριβής, αλλά και τη μείωση της διαφοράς ύψους ώστε να περιοριστεί το απαιτούμενο μανομετρικό ύψος της αντλίας. Για το σκοπό αυτό, ανοίχτηκαν τρεις οπές στην άνω πλευρά του δοχείου κατανομής και συνδέθηκαν τρεις σωλήνες ούτως ώστε να γίνεται ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού σε όλο το πλάτος της πλάκας του καναλιού.

Στη συνέχεια συνδέθηκε στην αντλία μια βάνα (11) ακριβώς πριν τη διακλάδωση των σωλήνων για ρύθμιση της παροχής του ρευστού στο κανάλι. Ωστόσο, η παροχή που έδινε η αντλία εξακολουθούσε να είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να επιτευχθεί μικρός αριθμός Reynolds στην ελεύθερη επιφάνεια της πλάκας. Για το λόγο αυτό, συνδέθηκε άλλος ένας σωλήνας αμέσως μετά τη βάνα ρύθμισης της παροχής, μαζί με μία ακόμη βάνα (11) η οποία ρυθμίζει την παροχή του ρευστού μέσα από τον συγκεκριμένο σωλήνα, ο οποίος κατέληγε στο δοχείο συλλογής (by-pass). Επιτεύχθηκε δηλαδή μέσω της ανακυκλοφορίας του μίγματος από το σωλήνα αυτό η δυνατότητα ρύθμισης της παροχής με μεγαλύτερη ευελιξία και η επίτευξη έτσι μεγαλύτερου εύρους τιμών του αριθμού Reynolds. Ρυθμίζονται λοιπόν οι βάνες σε μία συγκεκριμένη θέση και η παροχή προσδιορίζεται μετρώντας το βάρος του ρευστού που εξέρχεται από το κανάλι. Με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος επιτυγχάνεται η επιθυμητή παροχή.

Κατά τη δοκιμαστική λειτουργία της συσκευής, παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού κατά 23° C σε μία ώρα, λόγω υπερθέρμανσης της αντλίας και τριβής του ρευστού στα τοιχώματα της σωλήνωσης. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του ιξώδους και της πυκνότητας του μίγματος που χρησιμοποιήθηκε. Για το λόγο αυτό προστέθηκε μία σπείρα από

χαλκοσωλήνα (12) εξωτερικής διαμέτρου 1 cm και μήκους 5.6 m στο δοχείο συλλογής (7), στην οποία παρεχόταν νερό δικτύου θερμοκρασίας 18° C. Στα δύο άκρα του χαλκοσωλήνα προσαρτήθηκαν δύο λάστιχα αντίστοιχης διαμέτρου. Το ένα συνδέθηκε με μία βάννα (11) από την οποία ρυθμιζόταν η παροχή του νερού και το άλλο με την αποχέτευση όπου κατέληγε όλη η ποσότητα του παρεχόμενου νερού. Τοιοιτοτρόπως, η αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού περιορίστηκε στους 8° C στον ίδιο χρόνο. Η τελική θερμοκρασία του ρευστού ήταν 33° C και σε αυτήν τη θερμοκρασία υπολογίστηκαν όλες οι ιδιότητές του.

Τέλος, πάνω στο τοίχωμα των μετρήσεων έχουν τοποθετηθεί δύο “γέφυρες” (6) στην αρχή και στο τέλος του αποσιώμενου μέρους του καναλιού. Σε κάθε μια από τις γέφυρες έχει προσαρμοστεί κατάλληλο αισθητήριο για τη μέτρηση της αγωγιμότητας. Το σύστημα αυτό θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια.

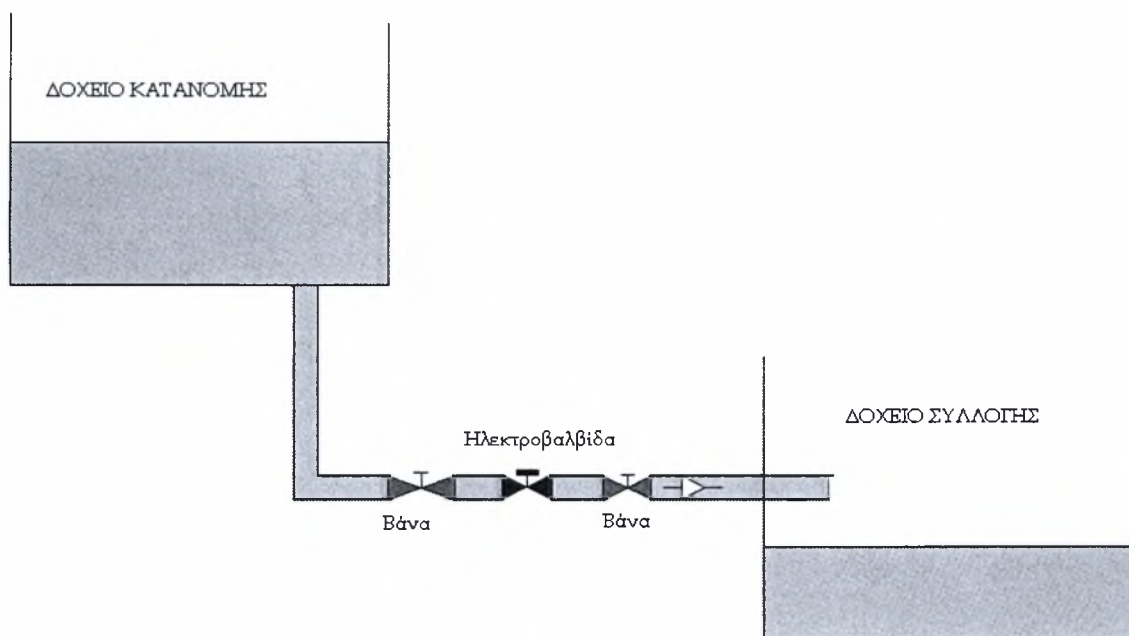
#### *2.1.2 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής*

Το διαθέσιμο μήκος του καναλιού περιορίζει την εξέλιξη των φυσικά δημιουργούμενων διαταραχών. Η επιβολή εξωτερικής διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα by-pass με ηλεκτροβαλβίδα (4).

Η διαταραχή δημιουργείται με τη βοήθεια μιας χρονιζόμενης ηλεκτροβαλβίδας (ON/OFF). Για το σκοπό αυτό ενώθηκε το δοχείο συλλογής μέσω ενός ελαστικού σωλήνα με το δοχείο κατανομής (Σχήμα 2.3). 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 (8) 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 αυτού 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 διόδος μένει ανοιχτή και κλειστή και από την ποσότητα του ρευστού που επιτρέπεται να περνάει διαμέσου του by-pass. Η ποσότητα αυτή ρυθμίζεται από τις βάνες (11) που βρίσκονται εκατέρωθεν της ηλεκτροβαλβίδας. Επίσης, ρυθμίζοντας το 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 ως και 1 Hz.

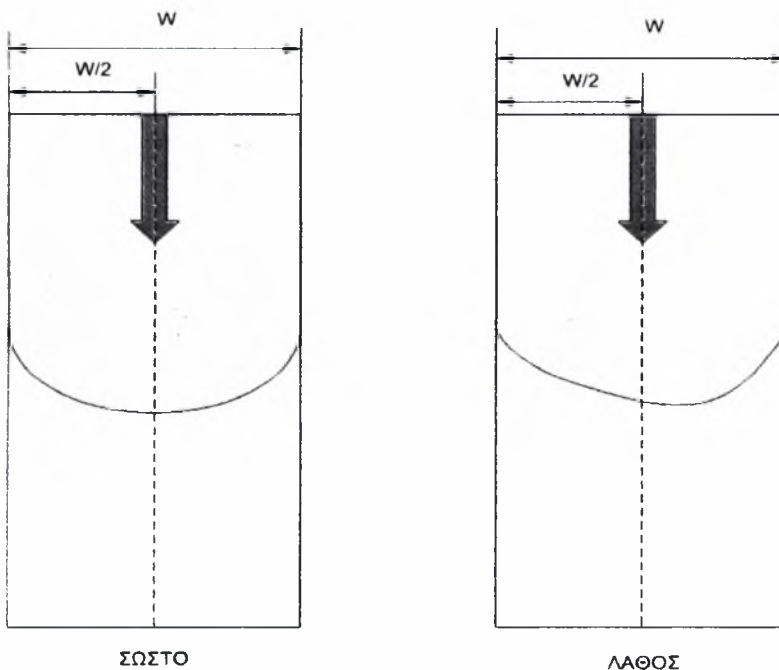


Σχημα 2.3. Σύστημα διαταραχής

### 2.1.3 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 (10), 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 ύπαρξη εξωτερικής διαταραχής. Η περίοδος του χρονοδιακόπτη και το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής καθορίζονται σε μέτριο μέγεθος. Χαρακτηριστικές τιμές είναι 5 s ανοικτή και 1 s κλειστή η ηλεκτροβαλβίδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του μεγέθους της διαταραχής στο σημείο αυτό είναι ποιοτική. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται πάνω στο τοίχωμα ένα μέτωπο υγρής φάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. 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 2.4., όπου το μέτωπο του κύματος 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 είτε 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 2.4. Μέτωπο κύματος

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.

## 2.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Αρχικά, ανάλογα με την κλίση επιλέγεται το κατάλληλο ρευστό για τα πειράματα και εισάγεται στο δοχείο συλλογής. Συγκεκριμένα, για κλίσεις 30° - 27° χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού - γλυκερίνης με 80% γλυκερίνη. Για κλίσεις 20° χρησιμοποιήθηκε διάλυμα γλυκερίνης - νερού με 75% γλυκερίνη. Τέλος, για κλίσεις 15° χρησιμοποιήθηκε διάλυμα γλυκερίνης - νερού με 65% γλυκερίνη. Η μείωση της ποσότητας της γλυκερίνης παράλληλα με την μείωση της κλίσης του καναλιού έγινε διότι μετά από κάθε πείραμα, το κανάλι καθαριζόταν με νερό και έμενε μια ποσότητα νερού περίπου 2 kg στο δοχείο κατανομής, στους ελαστικούς σωλήνες αλλά και στην αντλία λόγω αναρρόφησης. Τα πειράματα στις κλίσεις 30° και 27° έγιναν την ίδια μέρα και δεν μεσολάβησε καθαρισμός του καναλιού, γι' αυτό και το ποσοστό γλυκερίνης στο διάλυμα δεν μεταβλήθηκε.

Ο πειραματικός προσδιορισμός της σύστασης και της πυκνότητας του εκάστοτε διαλύματος έγινε μετρώντας στο τέλος κάθε πειράματος τη μάζα και τον όγκο μιας ποσότητας του διαλύματος και αντικαθιστώντας στη σχέση :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2.1)$$



Στη συνέχεια, ανατρέχοντας στους πίνακες που βρίσκονται στο Παράρτημα για τις ιδιότητες των διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού για τη θερμοκρασία των 33° C, υπολογιζόταν η τελική σύσταση του μίγματος και στη συνέχεια το κινηματικό ιξώδες, χρησιμοποιώντας πάλι τους πίνακες του Παραρτήματος με δεδομένη τη θερμοκρασία 33° C και σύσταση μίγματος αυτήν που προσδιορίστηκε με την προηγούμενη διαδικασία

Στη συνέχεια τίθεται σε λειτουργία η αντλία και αφήνεται το σύστημα να λειτουργήσει επί 60 min ώστε να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του μίγματος. Η αντλία ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η στάθμη στο δοχείο διανομής να είναι σταθερή. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος τίθεται σε λειτουργία και η ηλεκτροβαλβίδα για 5 min για να εισέλθει ρευστό σε όλους τους σωλήνες και να μην υπάρχει αέρας.

Ακολουθεί η ευθυγράμμιση του καναλιού. Σημαντική βοήθεια στην ευθυγράμμιση του καναλιού διαδραματίζει η χρωστική ουσία που έχει προστεθεί στο ρευστό. Ο τρόπος ευθυγράμμισης του καναλιού έχει περιγραφεί προηγουμένως.

Μετά την σταθεροποίηση της ροής και την ευθυγράμμιση ακολουθούν τα πειράματα βαθμονόμησης. Στα πειράματα αυτά 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 της 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.

Τέλος, μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων βαθμονόμησης τίθεται σε λειτουργία η ηλεκτροβαλβίδα με περίοδο 6 s, συγκεκριμένα 5 s ανοικτή και 1 s κλειστή. Ενώ το ύψος της διαταραχής ρυθμίζεται κυρίως από τη βάννα που βρίσκεται μετά από την ηλεκτροβαλβίδα. Η επιλογή της συχνότητας της διαταραχής στηρίζεται στο γεγονός ότι πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, θεωρητικά ίση με μηδέν [Liu et al., 1993]. Η τιμή στην πράξη θεωρείται αρκετά μικρή. Το ύψος και η μορφή της διαταραχής καθορίζονται κυρίως από πειραματικούς περιορισμούς και τη γωνία κλίσης. Το ύψος της πρέπει οπωσδήποτε να είναι αρκετά μεγαλύτερο από την ακρίβεια της πειραματικής τεχνικής.

Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι ίσος με 30 s για τις μετρήσεις βαθμονόμησης και ίσος με 60 s για τα πειράματα, ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Δηλαδή για την περίπτωση των πειραμάτων όπου η περίοδος διαταραχής είναι 6 s συλλαμβάνονται 10 περίοδοι. Η επιλογή του χρόνου έγινε ώστε να αποθηκεύονται αρκετές 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 και ο εσφαλμένος τρόπος λειτουργίας της ηλεκτροβαλβίδας.

## **2.3. ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ**

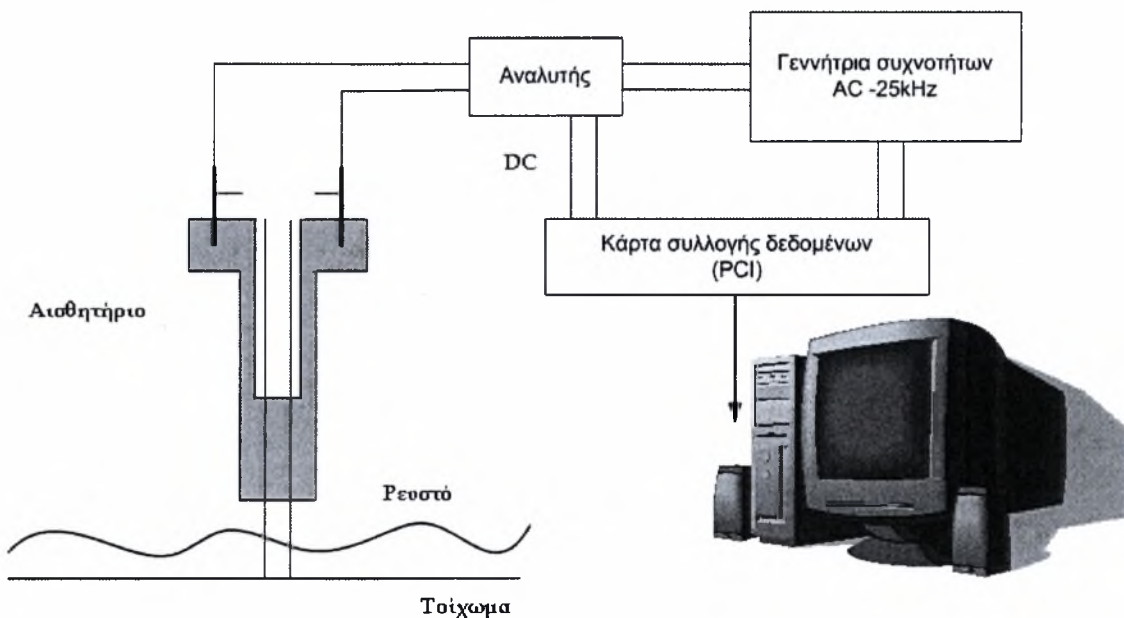
### *2.3.1 Περιγραφή αγωγιμομετρικής τεχνικής*

Η αγωγιμομετρική τεχνική [Andritsos, 1986] χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας και των διακυμάνσεών της. Η τεχνική στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δύο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσά τους. Στο Σχήμα 2.5. 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 0.1mm. Για την τοποθέτηση των

μετρητικών κατασκευάστηκαν κατάλληλες γέφυρες, οι οποίες τοποθετήθηκαν πάνω από το τοίχωμα σε δύο 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 δύο θέσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο αναλυτές (κάθε αναλυτής έχει δύο κανάλια εισόδου).

Έχει βρεθεί από πειράματα ότι η μέθοδος λειτουργεί ικανοποιητικά για τις περιπτώσεις όπου η αγωγιμότητα του ρευστού κυμαινόταν μεταξύ 300-1000  $\mu\text{S}$ . Στο πείραμα η αγωγιμότητα του μίγματος έπαιρνε τιμές μεταξύ 580-980  $\mu\text{S}$ . Η διαφοροποίηση αυτή στις τιμές της αγωγιμότητας οφείλεται στην ανάμιξη του αρχικού διαλύματος απιονισμένου νερού - γλυκερίνης - αλατιού (με σύσταση 18.8% - 80% - 0.2% αντίστοιχα) με το νερό δικτύου που παρέμενε στο κανάλι μετά τη διαδικασία καθαρισμού και είχε αγωγιμότητα περίπου 2000 $\mu\text{S}$ .

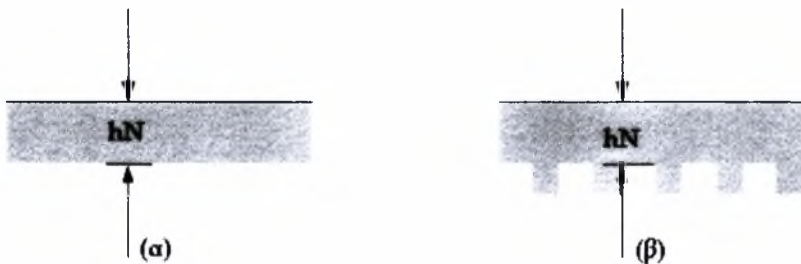
Για τις μετρήσεις της αγωγιμότητας των διαλυμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα αγωγιμόμετρο (Consort C834). Για το σκοπό αυτό λαμβανόταν δείγμα από το κανάλι κατά τη διάρκεια του πειράματος, μετά την πάροδο μίας ώρας έτσι ώστε να επιτευχθεί σωστή ανάμιξη των συστατικών και σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του διαλύματος.



Σχήμα 2.5. Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής

### 2.3.2 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. Έχει βρεθεί πειραματικά [Βλαχογιάννης,2001] ότι για την περίπτωση ευσταθούς ροής πάνω από ορθογωνικό τοίχωμα, όπως αυτό που θα μελετηθεί στη συγκεκριμένη εργασία, το πάχος που υπολογίζεται από τη λύση Nusselt αντιστοιχεί στο πάχος του υμένα από ένα ύψωμα του τοιχώματος έως την ελεύθερη επιφάνεια (Σχήμα 2.6.).



Σχήμα 2.6. Πάχος υγρού υμένα κατά Nusselt για (α)επίπεδο τοίχωμα και (β)ορθογωνικό τοίχωμα

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ήταν η εξής : βάσει της γωνίας κλίσης του τοιχώματος υπολογιζόταν ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για επίπεδο τοίχωμα από την εξίσωση (1.4). για τρεις παροχές του ρευστού ( $Q_0$ , kg/s) καταγραφόταν το σήμα (Volt) για περίπου 30 s με ρυθμό δειγματοληψίας 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Η επιλογή των παροχών καθοριζόταν από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Γενικά γινόταν προσπάθεια, οι παροχές που θα γινόταν η βαθμονόμηση να ήταν όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Από την παροχή υπολογιζόταν ο αριθμός Reynolds και το πάχος υμένα Nusselt από τις εξισώσεις :

$$Re = \frac{Q_0}{w \cdot \rho \cdot v} \quad (2.3.1)$$

$$h_N = 10^6 \cdot \left( \frac{3 \cdot Re \cdot v^2}{g \cdot \sin \phi} \right)^{1/3} \quad (2.3.2)$$

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 :

$$h_i = A \cdot V_i + B \quad (2.3.3)$$

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

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

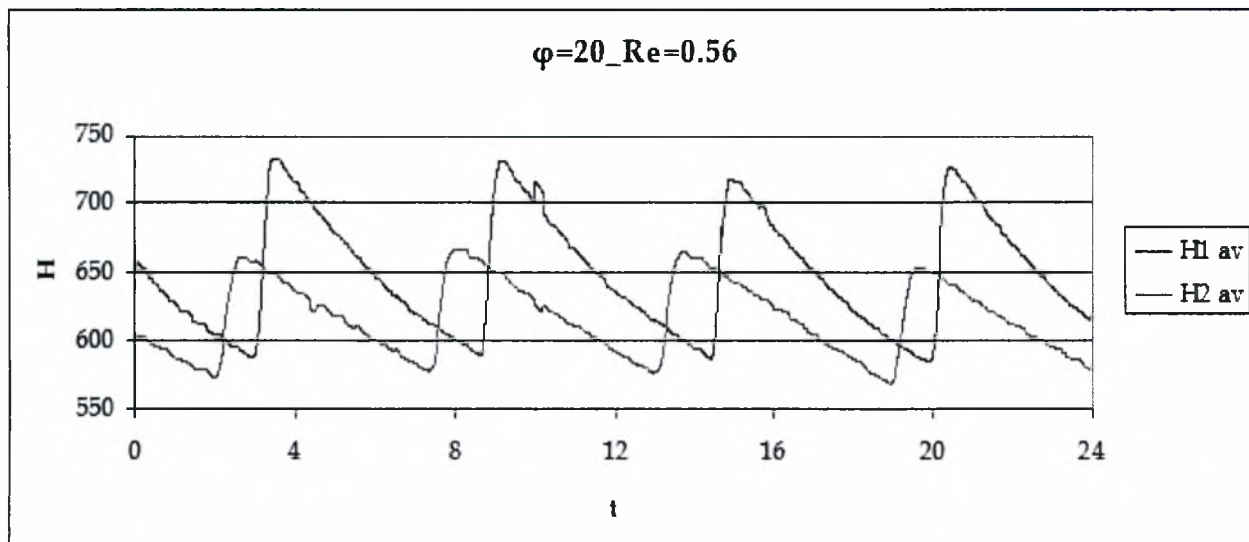
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ροής υγρού υμένα πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Στόχος των πειραμάτων είναι η μελέτη της επίδρασης της κλίσης του τοιχώματος στον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση των πρωτογενών δεδομένων του πειράματος, δηλαδή της εξέλιξης του πάχους του υμένα με το χρόνο. Στη συνέχεια, γίνεται ο προσδιορισμός της πειραματικής τιμής του κρίσιμου αριθμού Reynolds και συγκρίνεται με την θεωρητική τιμή του για επίπεδο τοίχωμα. Τέλος, παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας  $\phi$  στον κρίσιμο αριθμό Reynolds.

### 3.1. ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΑ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

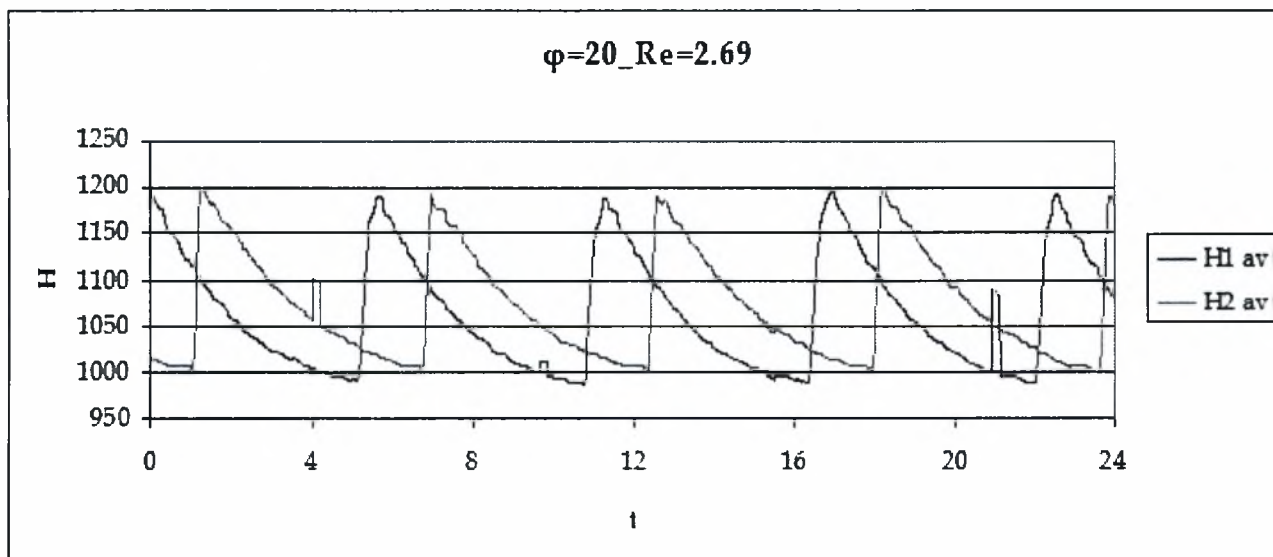
Τα πειράματα έγιναν πάνω σε πλάκα με περιοδική ορθογωνική διαμόρφωση για γωνίες κλίσης  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $27^\circ$  και  $30^\circ$ . Σε κάθε γωνία κλίσης μετρήθηκαν 6-8 διαφορετικές τιμές παροχών, δηλαδή 6-8 τιμές του αριθμού Reynolds. Το εύρος των μετρήσεων του αριθμού Reynolds περιορίστηκε λόγω των μεγάλων κλίσεων, διότι δεν ήταν εφικτή η ρύθμιση περισσότερων διαφορετικών τιμών παροχών στην ευσταθή περιοχή. Η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή συνέβαινε ολοένα σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds με την αύξηση της γωνίας κλίσης, όπως ήταν αναμενόμενο από τη θεωρία, οι οποίοι ήταν δύσκολο να επιτευχθούν όσο αυξανόταν η γωνία κλίσης.

Τα πρωτογενή δεδομένα είναι χρονοσειρές της τάσης στους αισθητήρες αγωγιμότητας. Έπειτα από εφαρμογή της εξ. (2.3.3) σε όλα τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές του πάχους υμένα. Στη συνέχεια, έγινε επεξεργασία των τιμών στο Excel ώστε να απομακρυνθούν διαταραχές υψηλής συχνότητας που δεν έχουν φυσική σημασία αλλά προέρχονται από ηλεκτρικό θόρυβο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ενδεικτικά για γωνία κλίσης  $20^\circ$ , στο Σχήμα 3.1., (α) για μετρήσεις στην ευσταθή περιοχή και (β) για μετρήσεις στο σημείο μετάπτωσης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή και (γ) για μετρήσεις στην

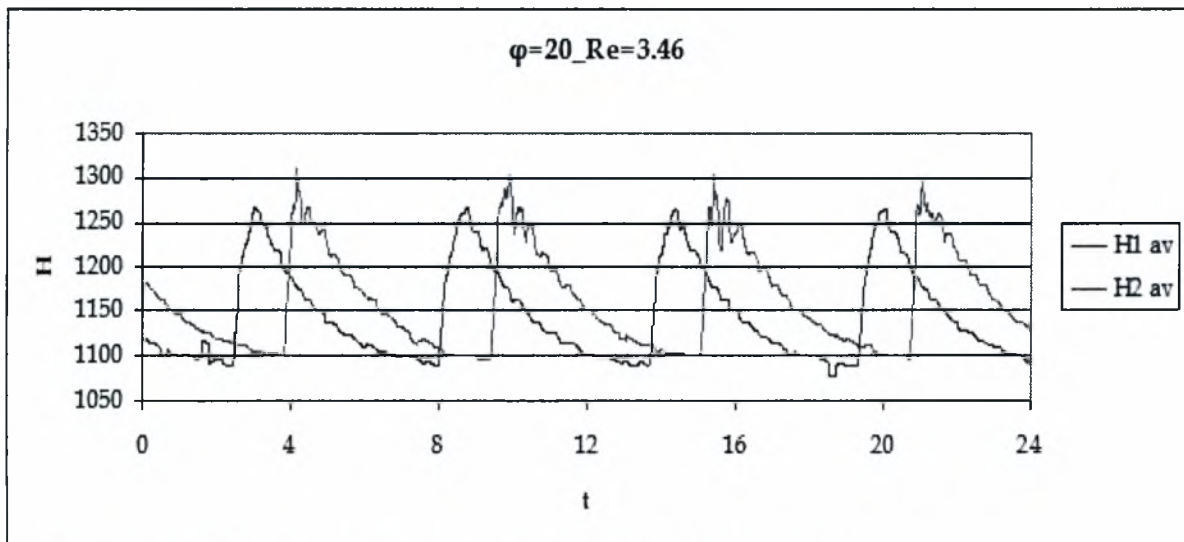
ασταθή περιοχή. Διαφαιίνεται καθαρά η εξέλιξη του πάχους υμένα με το χρόνο  $t$  σε ένα χρονικό διάστημα 24 sec. Με  $H_1$  παριστάνεται το πάχος υμένα που μετρήθηκε στην αρχή της ελεύθερης επιφάνειας της πλάκας, ενώ με  $H_2$  παριστάνεται το πάχος υμένα που μετρήθηκε στο τέλος της ελεύθερης επιφάνειας της πλάκας. Περισσότερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα.



Σχήμα 3.1.α. Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο στην ευσταθή περιοχή



Σχήμα 3.1.β. Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο στο σημείο μετάπτωσης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή.



Σχήμα 3.1.γ. Εξέλιξη πάχους υμένα με το χρόνο στην ασταθή περιοχή

Στο σχήμα 3.1. παρουσιάζονται τέσσερις περιόδους διαταραχής του υγρού υμένα. Φαίνεται καθαρά ότι στο σχήμα 3.1.α υπάρχει ευστάθεια διότι το μέγιστο πάχος υμένα που λαμβάνεται στο πρώτο μετρητικό μειώνεται αισθητά στο δεύτερο μετρητικό. Αντιθέτως, στο σχήμα 3.1.γ είναι φανερή η ύπαρξη αστάθειας στη ροή, διότι το μέγιστο πάχος υμένα που λαμβάνεται στο πρώτο μετρητικό αυξάνεται αισθητά στο δεύτερο και υπάρχουν διακυμάνσεις στις κορυφές της διαταραχής. Ωστόσο, στο σχήμα 3.1.β φαίνεται η *έναρξη* δημιουργίας αστάθειας, διότι το μέγιστο πάχος υμένα αυξάνεται *οριακά* από το πρώτο στο δεύτερο μετρητικό. Επίσης, διαφαινόνται και πολύ μικρές αστάθειες στις κορυφές της διαταραχής. Τέλος, παρατηρείται έντονη αύξηση του μέγιστου πάχους υμένα με την αύξηση του αριθμού Reynolds, εφόσον στο πρώτο διάγραμμα το μέγιστο πάχος υμένα είναι 135 $\mu\text{m}$ , ενώ στο δεύτερο και στο τρίτο είναι 210 $\mu\text{m}$ .

### 3.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΟΥ Re ( $Re_{cr}$ )

Στη συνέχεια έγινε μία επεξεργασία όλων των διαγραμμάτων πάχους υμένα  $H_{av}$  - χρόνου  $t$  που προέκυψαν. Για κάθε ένα από αυτά τα διαγράμματα, υπολογίστηκε στο Excel η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του πάχους υμένα  $H_{av}$  για τα



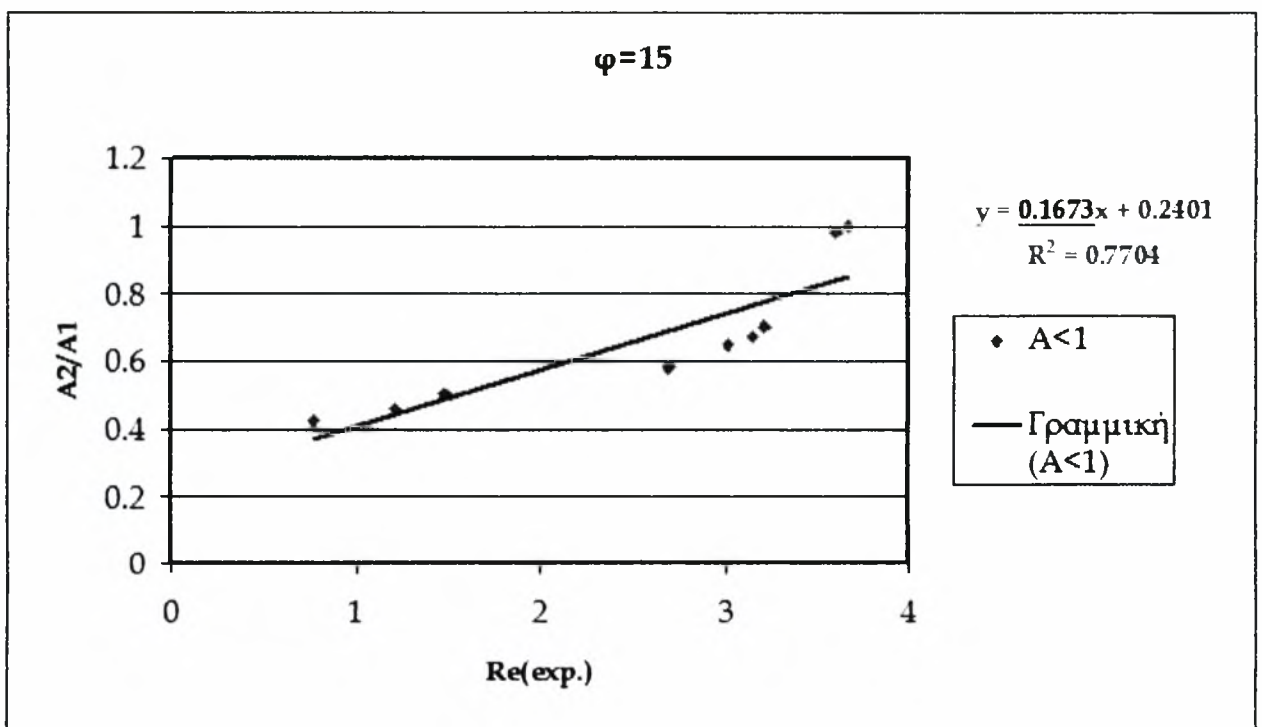
δύο μετρητικά και στη συνέχεια υπολογίστηκε το ύψος του κύματος  $A_i$  σύμφωνα με τη σχέση :

$$A_i = H_{iav}^{max} - H_{iav}^{min} \quad (3.2.1)$$

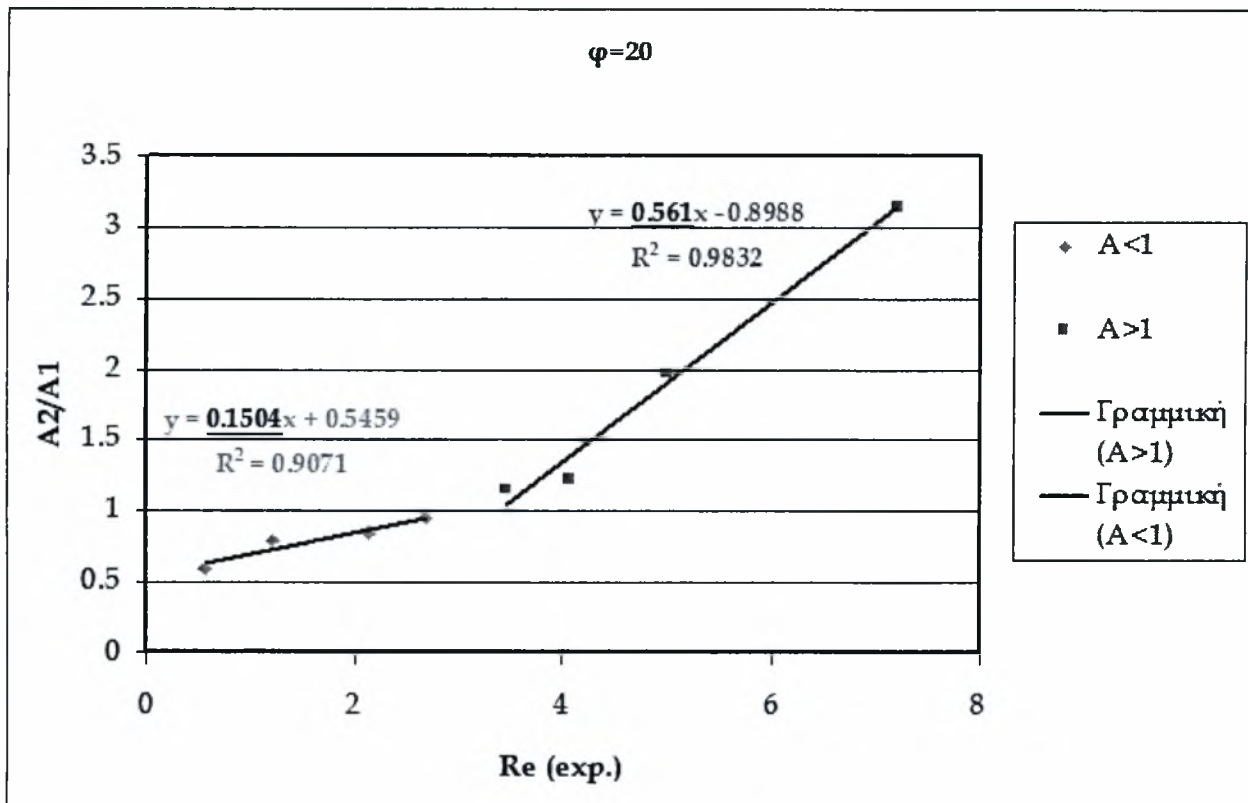
Η ενίσχυση ή απόσβεση με την κατάντη απόσταση της κυματικής διαταραχής μπορεί να εκφραστεί από τον λόγο των υψών κύματος στις δύο θέσεις μέτρησης. Έτσι, υπολογίστηκε για όλες τις τιμές των παροχών ο λόγος του ύψους του κύματος στο δεύτερο μετρητικό ( $A_2$ ) προς το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό ( $A_1$ ) από τη σχέση :

$$A = \frac{A_2}{A_1} \quad (3.2.2)$$

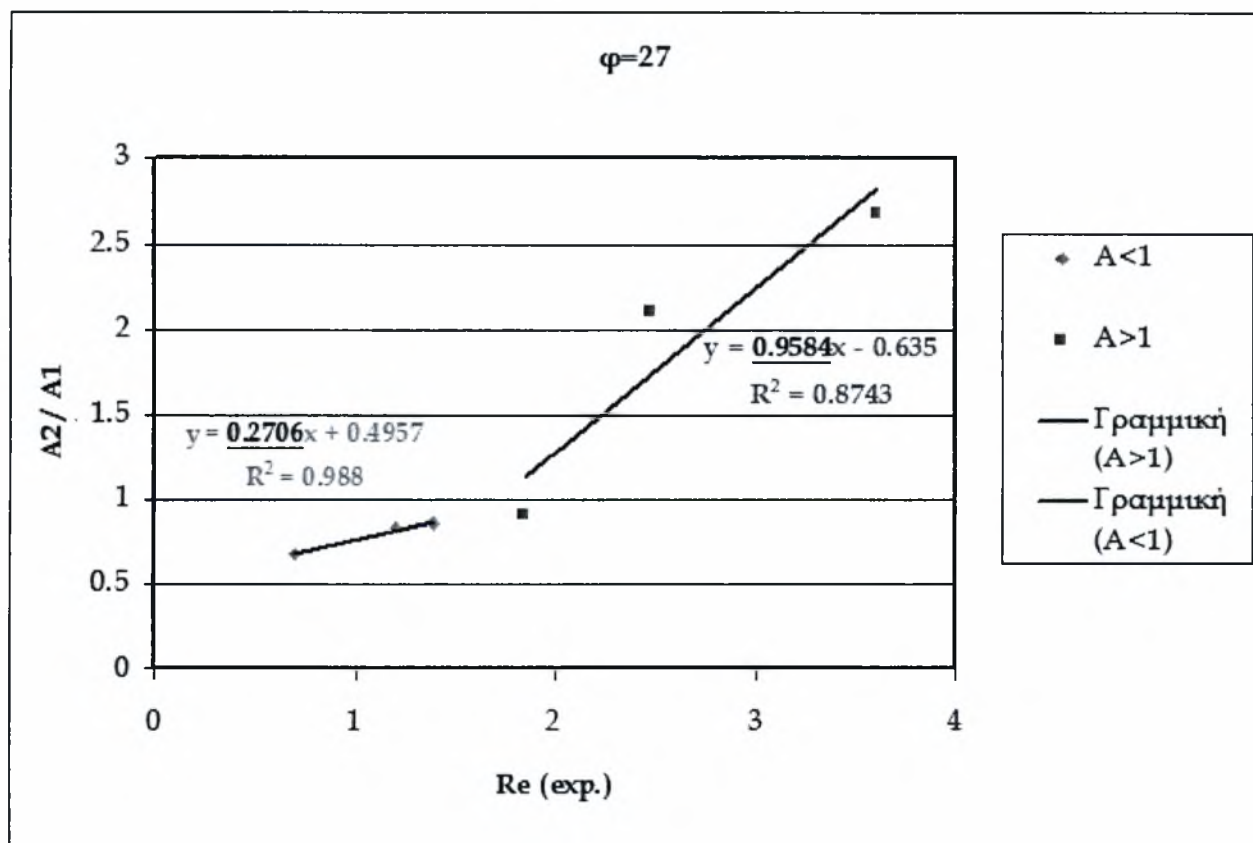
Οι τιμές που προέκυψαν σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές των αριθμών Reynolds για κάθε παροχή, απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2.



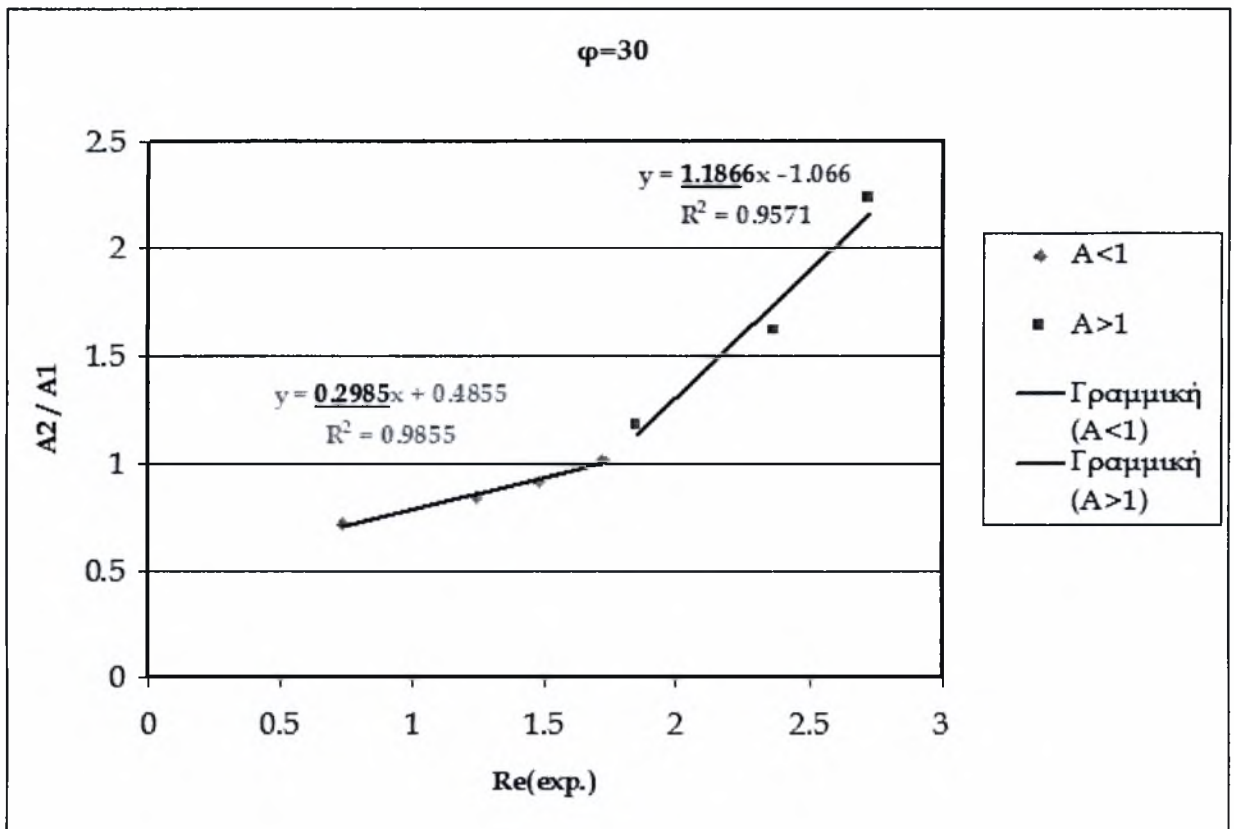
Σχήμα 3.2.α Εξέλιξη του λόγου A σε συνάρτηση με τον πειραματικό αριθμό Reynolds για  $\varphi=15^\circ$ .



Σχήμα 3.2.β Εξέλιξη του λόγου A σε συνάρτηση με τον πειραματικό αριθμό Reynolds για  $\varphi=20^\circ$ .



Σχήμα 3.2.γ Εξέλιξη του λόγου A σε συνάρτηση με τον πειραματικό αριθμό Reynolds για  $\varphi=27^\circ$ .



Σχήμα 3.2.δ Εξέλιξη του λόγου A σε συνάρτηση με τον πειραματικό αριθμό Reynolds για  $\varphi=30^\circ$ .

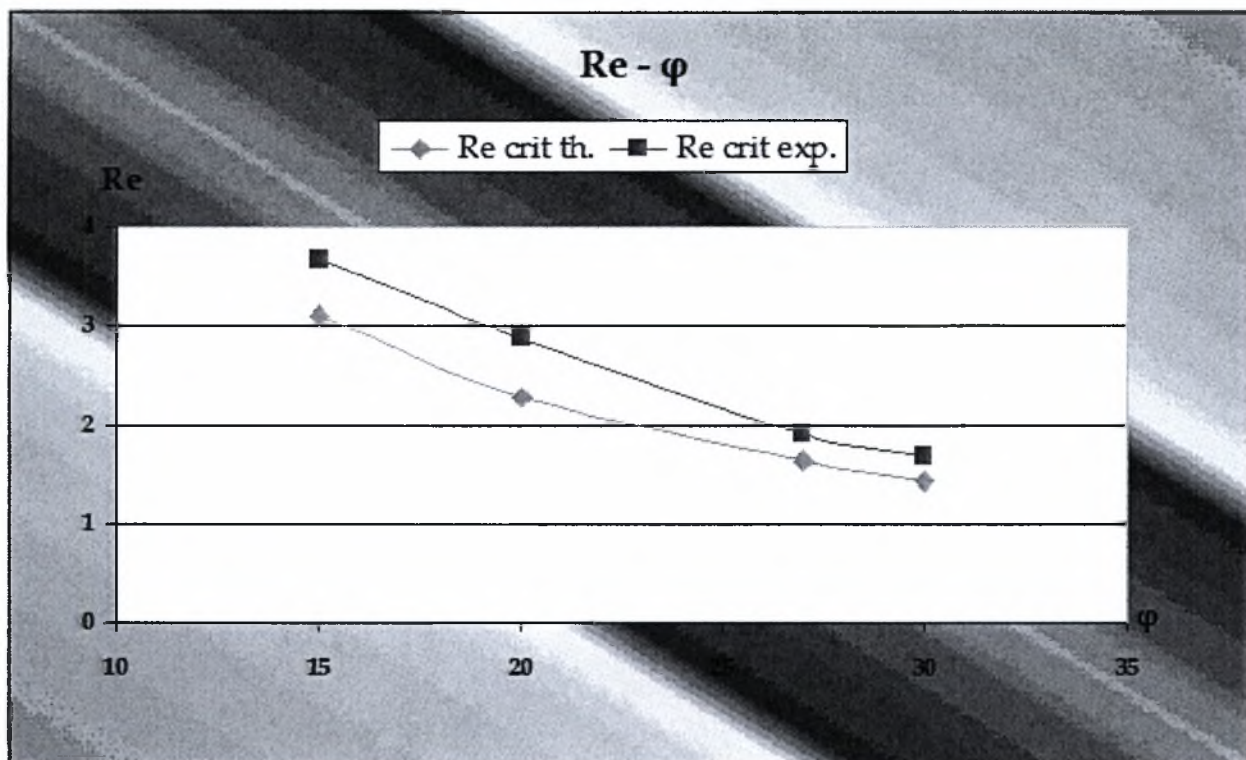
Το σημείο μετάπτωσης από την ευστάθεια στην αστάθεια με αύξηση του Re προσδιορίζεται καταρχήν από την τιμή  $A=1$ . Το γεγονός ότι το κριτήριο αυτό πράγματι αντιστοιχεί στην μετάπτωση επιβεβαιώνεται επίσης από την αλλαγή στην τάση των παραπάνω διαγραμμάτων για  $A < 1$  και  $A > 1$ . Πράγματι, στα σχήματα (3.2.β), (3.2.γ) και (3.2.δ) παρατηρούμε μία πολύ σημαντική ομοιότητα : η μεταβολή του A με τον Re παριστάνεται ικανοποιητικά από ευθεία γραμμή για κάθε μία από τις δύο υποπεριοχές,  $A < 1$  και  $A > 1$  (βλ. αποτελέσματα γραμμικής παρεμβολής στα σχήματα). Η κλίση αυτών των ευθειών παρουσιάζει μία *απότομη αύξηση* ακριβώς στο σημείο όπου ο λόγος A είναι ίσος με τη μονάδα ( $A=1$ ). Συνάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι ο κρίσιμος αριθμός Reynolds αντιστοιχεί στο σημείο όπου  $A=1$ , δηλαδή στο σημείο όπου το ύψος κύματος που μετράται στο πρώτο μετρητικό (στην αρχή της πλάκας) είναι ίσο με το ύψος κύματος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό (στο τέλος της πλάκας).

Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι η απότομη αύξηση της κλίσης αυτών των ευθειών γίνεται μεγαλύτερη με την αύξηση της κλίσης της γωνίας του καναλιού. Στο σχήμα 3.2.α δεν διαφαίνονται τα παραπάνω συμπεράσματα διότι οι παροχές που μετρήθηκαν, ανήκαν όλες στην ευσταθή περιοχή και δεν φαίνεται η αλλαγή της κλίσης. Ωστόσο, η τελευταία μέτρηση είναι πολύ κοντά στο  $A=1$ , όπου επίσης παρατηρείται ότι στο σημείο αυτό βρίσκεται η κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds.

Επίσης, είναι γεγονός ότι οι τιμές αυτές των κρίσιμων αριθμών Reynolds συμπίπτουν με τις τιμές που αναμένονται εκ πρώτης όψεως από τα διαγράμματα των πρωτογενών δεδομένων με βάση την εξέλιξη της μορφής των κυμάτων (Παράρτημα). Ειδικότερα, με αύξηση του  $Re$  πέρα από τον κρίσιμο, το κύμα στην δεύτερη θέση όχι μόνον αυξάνει σε ύψος αλλά παρουσιάζει έντονη ανάπτυξη δευτερευουσών κορυφών. Συνεπώς, μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε ότι η κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds υπολογίζεται στο σημείο όπου η τιμή του λόγου  $A$  είναι ίση με τη μονάδα.

### **3.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ $\varphi$**

Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.2., υπολογίστηκαν οι κρίσιμες τιμές του πειραματικού αριθμού Reynolds στο σημείο  $A=1$  με γραμμική παρεμβολή στις τιμές που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα. Οι τιμές του θεωρητικού αριθμού Reynolds για επίπεδο τοίχωμα υπολογίστηκαν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, από την εξίσωση (1.4). Στη συνέχεια παραστήθηκε η εξέλιξη των τιμών αυτών που υπολογίστηκαν σε συνάρτηση με την κλίση της γωνίας  $\varphi$  στο διάγραμμα του Σχήματος 3.3.



Σχήμα 3.3. Εξέλιξη του αριθμού Re με τη γωνία φ

Παρατηρούμε καταρχάς ότι ο κρίσιμος αριθμός Reynolds μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του τοιχώματος. Η τάση αυτή ισχύει τόσο για το επίπεδο τοίχωμα όσο και για το διαμορφωμένο. Όμως ο κρίσιμος αριθμός Reynolds που προσδιορίστηκε πειραματικά για το τοίχωμα με ορθογωνική διαμόρφωση είναι συστηματικά υψηλότερος κατά 20-30% των τιμών που προβλέπονται θεωρητικά για επίπεδο τοίχωμα με αντίστοιχη κλίση. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η συγκεκριμένη διαμόρφωση του τοιχώματος έχει σταθεροποιητική επίδραση στη βασική ροή. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με προγενέστερες παρατηρήσεις της βιβλιογραφίας. Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται στην αυξημένη ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται η μετάπτωση από την ευστάθεια στην αστάθεια. Συνεπώς, η σταθεροποιητική επίδραση της διαμόρφωσης του τοιχώματος επιβεβαιώνεται με περισσότερη αξιοπιστία.

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Αντικείμενο της μελέτης ήταν η ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο κανάλι, ενώ κύριος στόχος ήταν η τροποποίηση του καναλιού υγρού υμένα για χρήση με υγρά υψηλού ιξώδους καθώς και η μελέτη της εξέλιξης του κρίσιμου αριθμού Reynolds σε υψηλές γωνίες κλίσης, πάνω σε πλάκα ορθογωνικής διαταραχής πλάτους  $B=400\mu\text{m}$ .

### 4.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ★ Έγιναν τροποποιήσεις στη συσκευή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με υγρά υψηλού ιξώδους.
- ★ Διεξήχθησαν πειράματα σε γωνίες  $\varphi=15^\circ, 20^\circ, 27^\circ$  και  $30^\circ$  για αριθμούς Reynolds από 0.56 έως 7.21 με πλάκα ορθογωνικής διαμόρφωσης μήκους κύματος  $L=1200\mu\text{m}$  και ύψος  $B=400\mu\text{m}$ .
- ★ Από μετρήσεις σε δύο θέσεις κατά μήκος της ροής ορίστηκε ως κριτήριο ενίσχυσης μιας διαταραχής ο λόγος  $A$  των αντίστοιχων υψών.
- ★ Συνάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα :
  - ⊕ με αύξηση του  $Re$  πέρα από τον κρίσιμο, το κύμα στην δεύτερη θέση όχι μόνον αυξάνει σε ύψος αλλά παρουσιάζει έντονη ανάπτυξη δευτερευουσών κορυφών (αστάθεια).
  - ⊕ ο κρίσιμος αριθμός Reynolds μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του τοιχώματος τόσο για το επίπεδο τοίχωμα (θεωρία) όσο και για το διαμορφωμένο (πείραμα).
  - ⊕ το σημείο μετάπτωσης από την ευστάθεια στην αστάθεια με αύξηση του  $Re$  προσδιορίζεται από την τιμή  $A=1$ .
  - ⊕ η ορθογωνική διαμόρφωση του τοιχώματος έχει σταθεροποιητική επίδραση στη βασική ροή.

## 4.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

- ☞ Ένα βασικό μειονέκτημα των τροποποιήσεων που εφαρμόστηκαν είναι ότι παρουσιάστηκαν δυσκολίες στην επίτευξη χαμηλών αριθμών Reynolds στην επιφάνεια της πλάκας, οι οποίες γινόταν περισσότερο αισθητές όσο αυξανόταν η γωνία κλίσης και δημιουργούνταν λόγω των μεγάλων παροχών της αντλίας. Για την αποφυγή των παραπάνω δυσκολιών, προτείνεται η προσθήκη περισσότερων διακλαδώσεων των σωλήνων σε συνδυασμό με την προσθήκη πριν από αυτούς επιπλέον βανών ρύθμισης της παροχής του ρευστού στο δοχείο κατανομής.
- ☞ Επίσης, παρουσιάστηκαν δυσκολίες κατά την ευθυγράμμιση του καναλιού διότι στους χαμηλούς αριθμούς Reynolds δεν έρεε το διάλυμα και από τους τρεις σωλήνες, αλλά μόνο από έναν ή δύο, λόγω μεγάλης αναρρόφησης της αντλίας. Έτσι, δεν ήταν καθόλου εύκολο να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού σε όλο το πλάτος της πλάκας και να ευθυγραμμιστεί το μέτωπο του κύματος με το μέσο του πλάτους της πλάκας. Προτείνεται λοιπόν η κατασκευή ενός δοχείου υπερχείλισης και η τοποθέτησή του σε ύψος κατά τι μεγαλύτερο από το ύψος του δοχείου κατανομής, ώστε να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα.
- ☞ Ενδιαφέρον θα ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά τοιχωμάτων διαφορετικής διαμόρφωσης, παραδείγματος χάριν ημιτονοειδούς διαμόρφωσης μεγάλου μήκους κύματος ή ορθογωνικής διαμόρφωσης διαφορετικού πάχους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Andritsos N.

*“Effect of Pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow”*

Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1986.

Argyriadi K., Vlachogiannis M. and Bontozoglou V.

*“Experimental Study of Inclined Film Flow along Periodic corrugations : The Effect of Wall Steepness”*

Phys. Fluids, 18, p.012102, 2006.

Liu J., Paul J. D. and Gollub J. P.

*“Measurements of the Primary Instabilities of Film Flows”*

J. Fluid Mech., 250, p.69, 1993.

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.

Vlachogiannis M. and Bontozoglou V.

*“Experiments on Laminar Film Flow along a Periodic Wall”*

J. Fluid Mech., 457, p.133, 2002.

Wierschen A. and Aksel N.

*“Instability of a Liquid Film Flowing Down an Inclined Wavy Plane”*

Physica D., 186, p. 221, 2003.

Wierschen A., Lepski C. and Aksel N.

*“Effect of Long undulated Bottoms on Thin Gravity – Driven Films”*

Acta Mechanica, 179, p.41, 2005



Wierschen A., Scholle M. and Aksel N.

*“Comparison of Different Theoretical Approaches to Experiments on Film Flow Down an Inclined Wavy Channel”*

Exp. Fluids, 33, p. 429, 2002.

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.

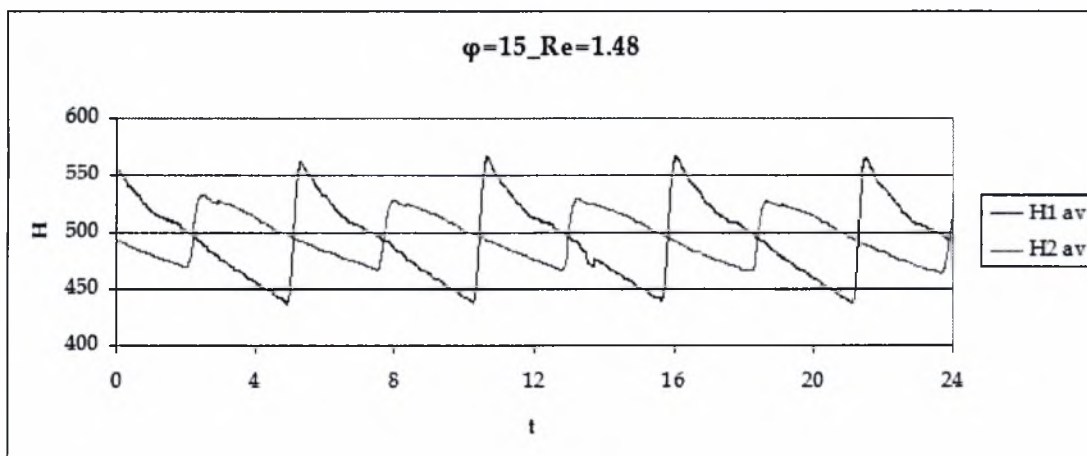
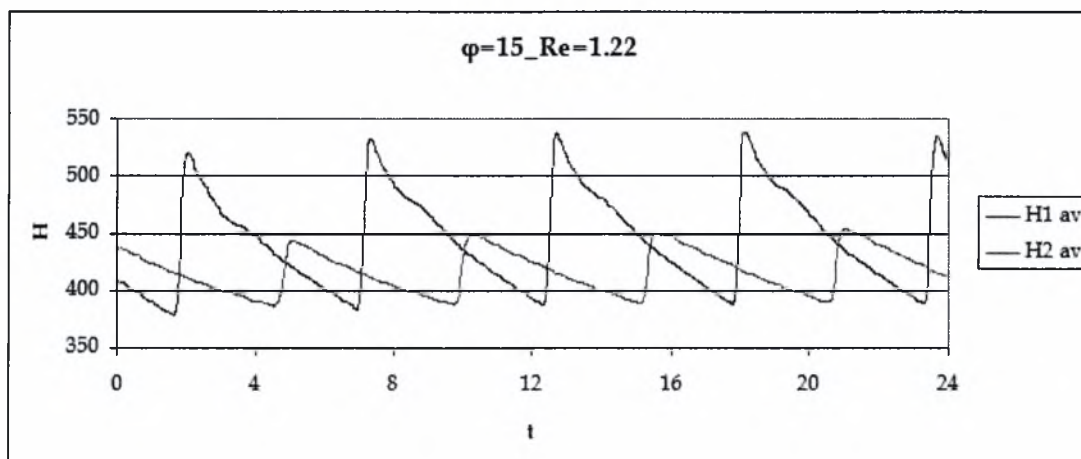
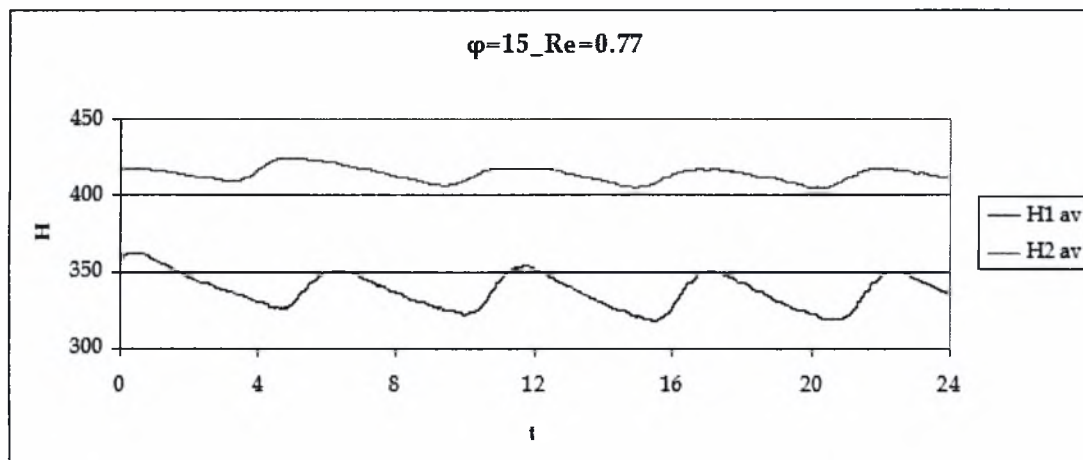
*“Ανάλυση Ευστάθειας Ροής Υγρού Υμένα σε Περιοδικά Διαμορφωμένο Τοίχωμα”*

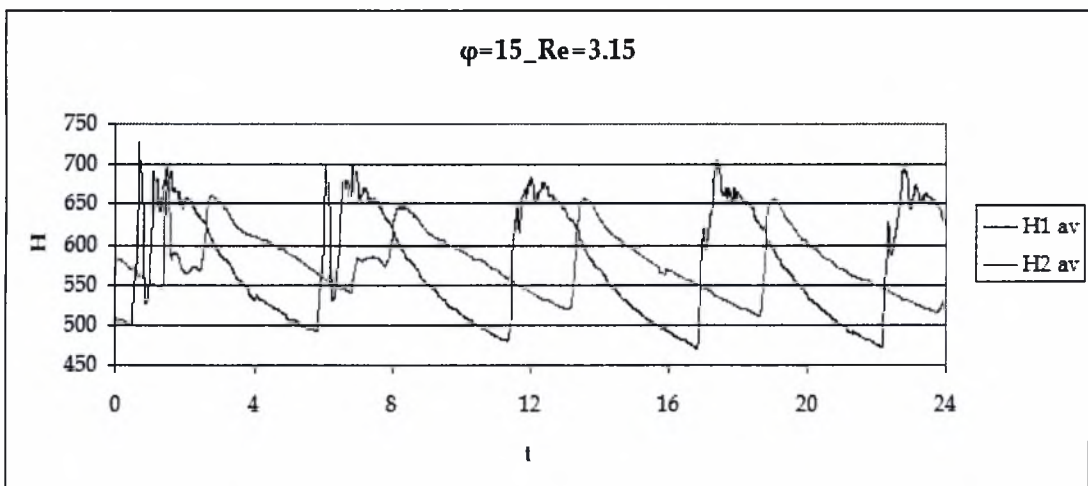
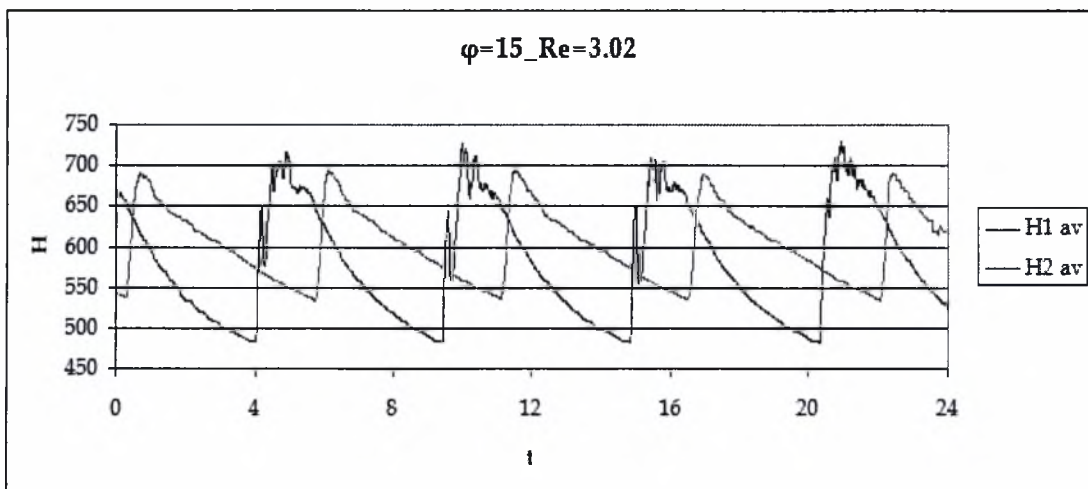
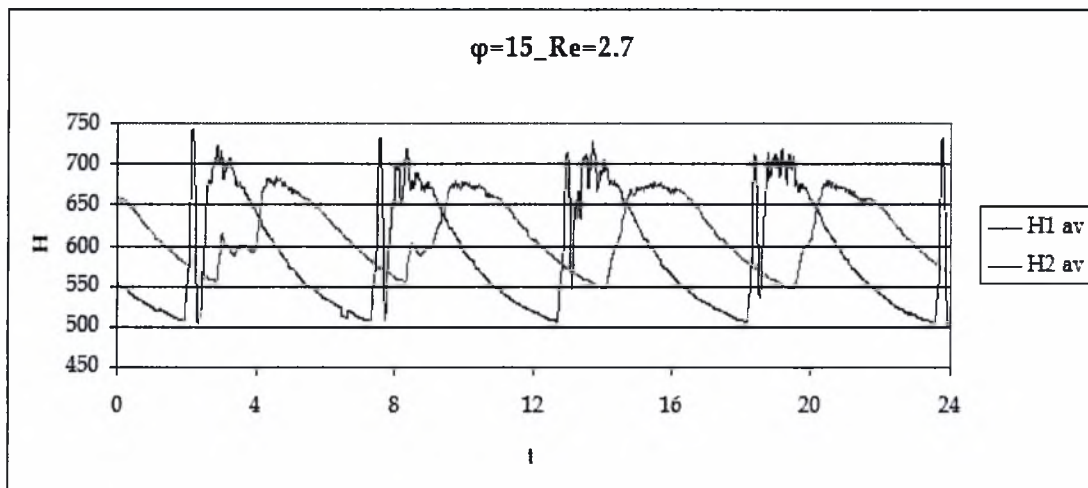
Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2007.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

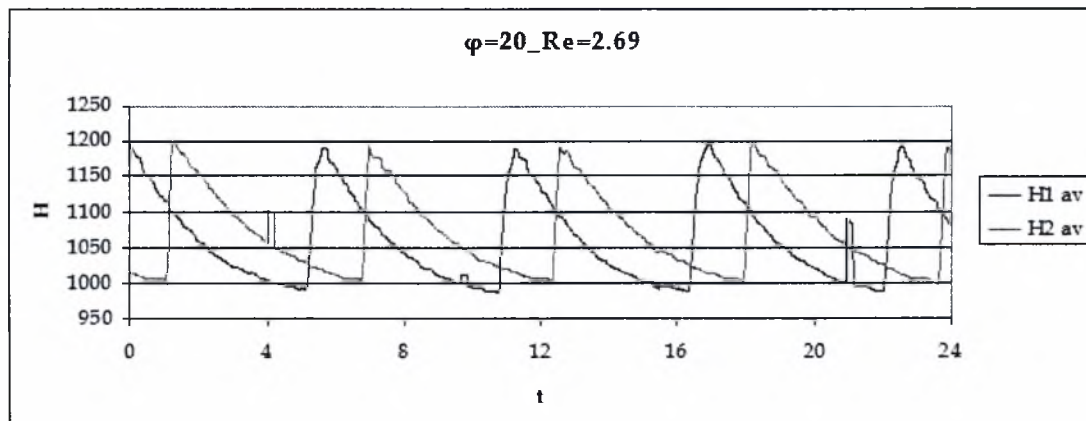
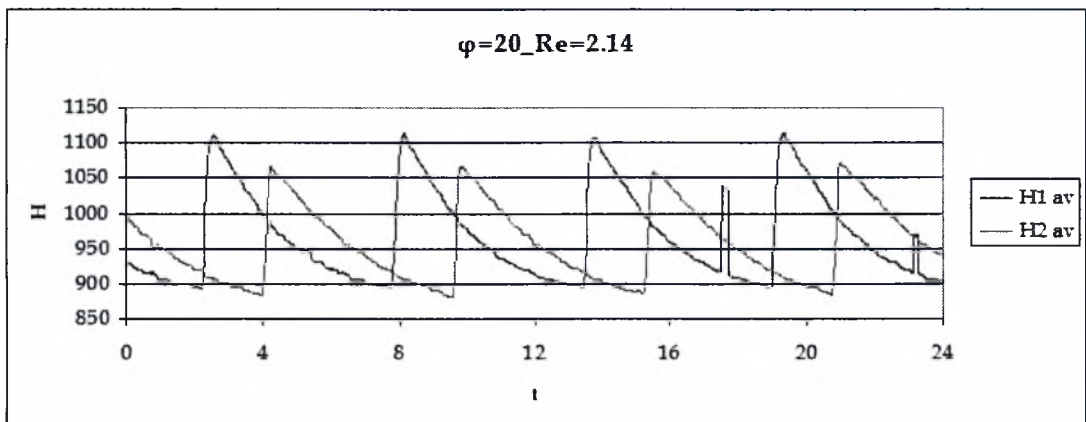
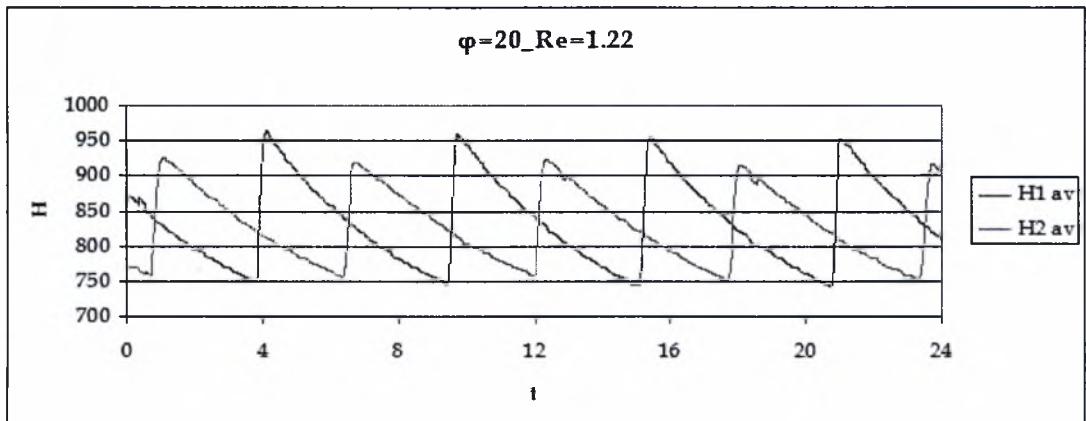
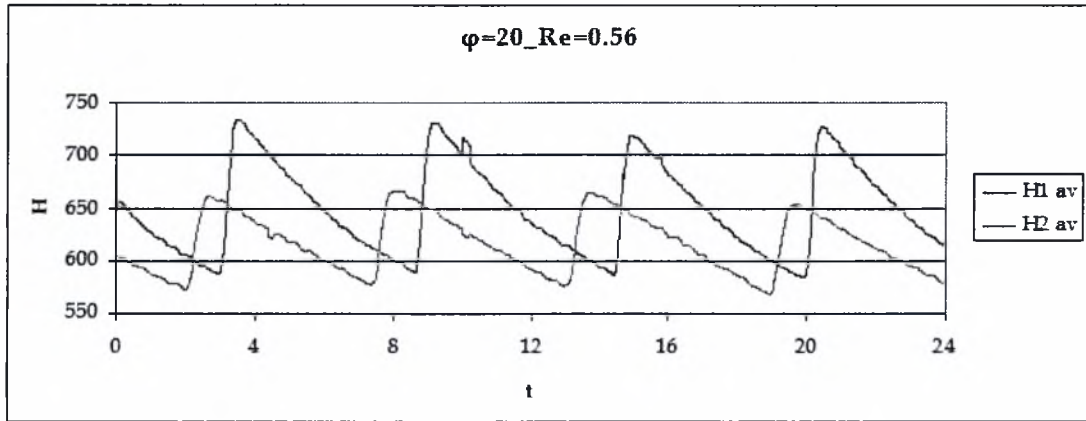
## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΑ - ΧΡΟΝΟΥ

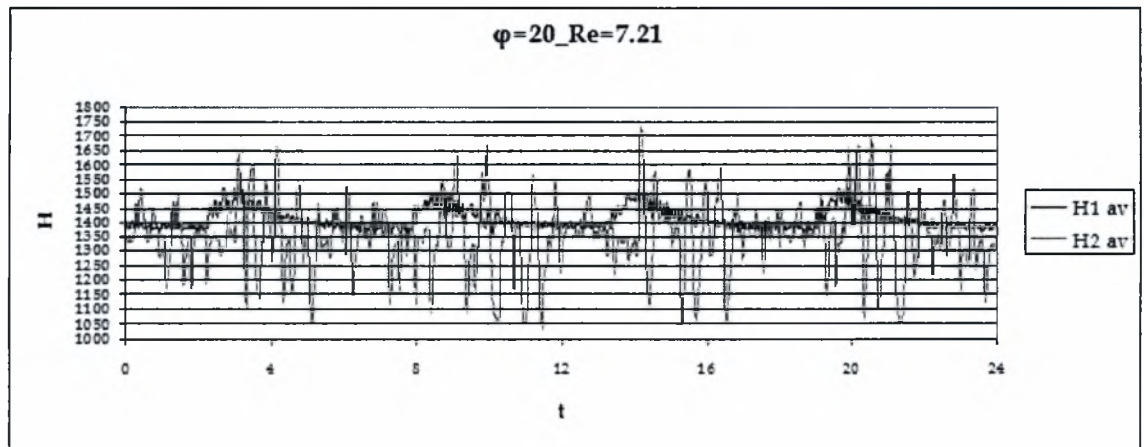
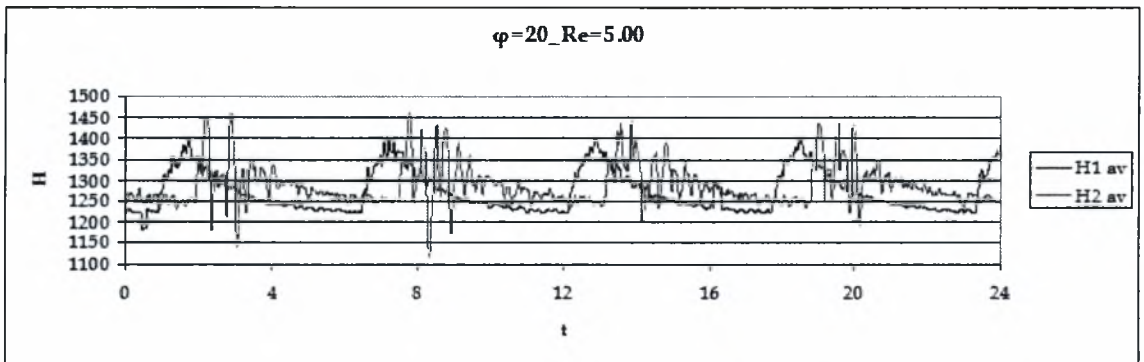
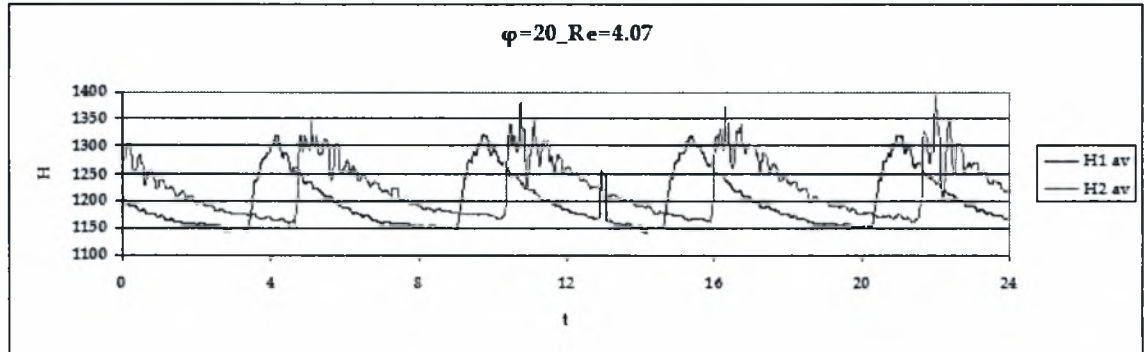
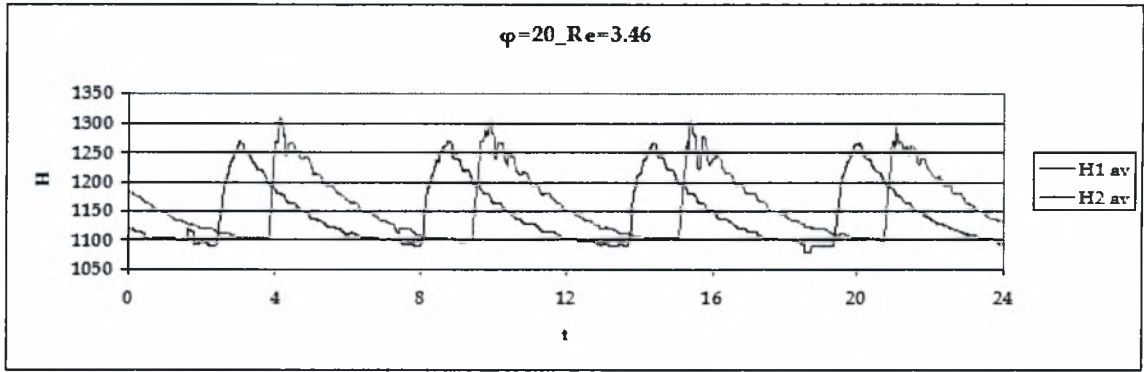
❖  $\varphi=15^\circ$



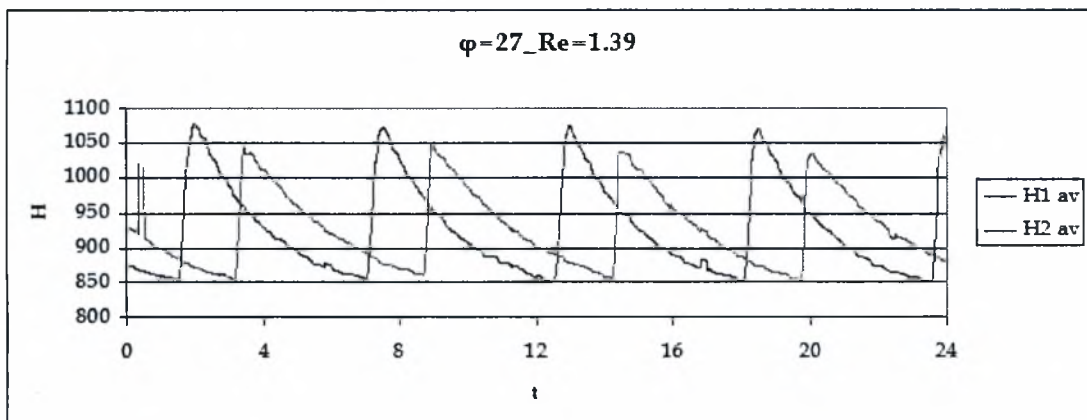
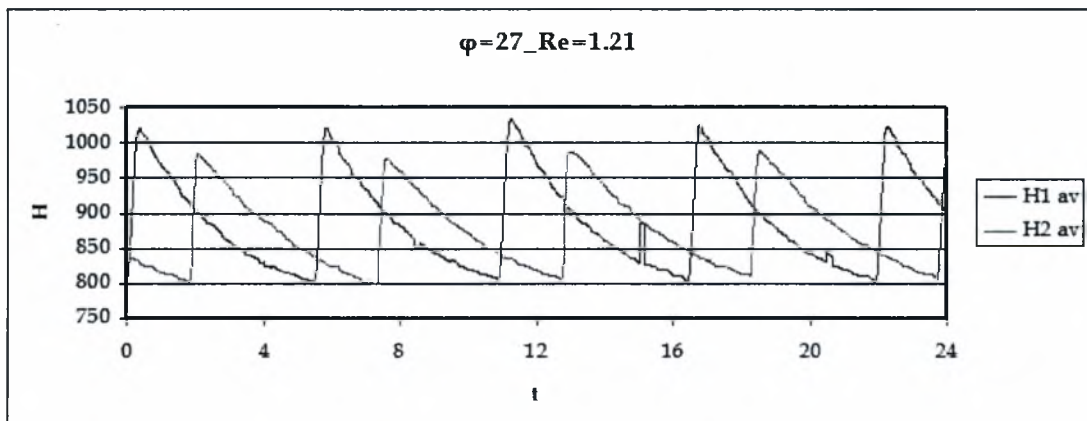
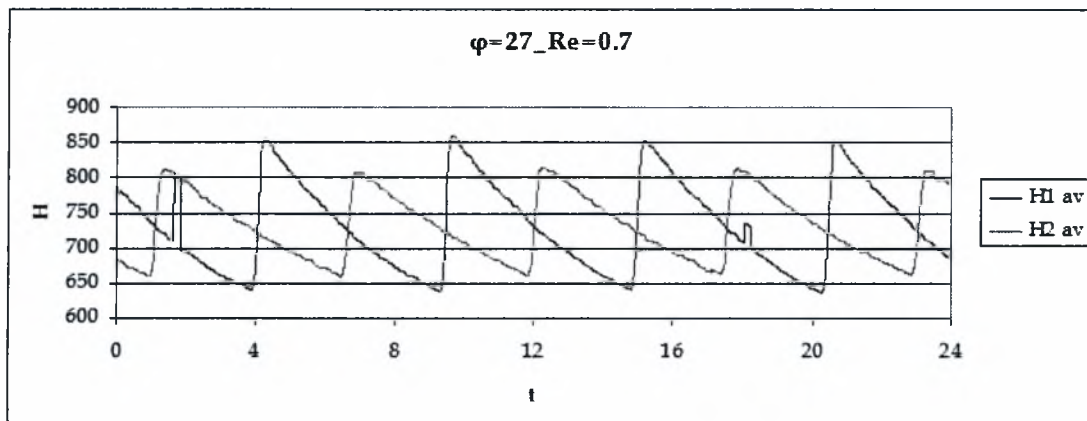


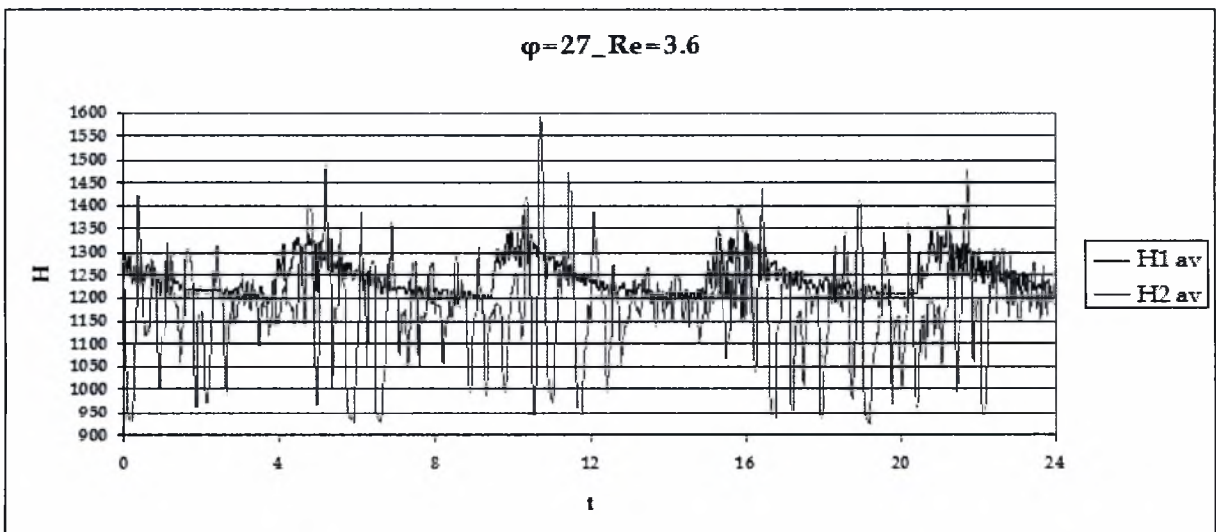
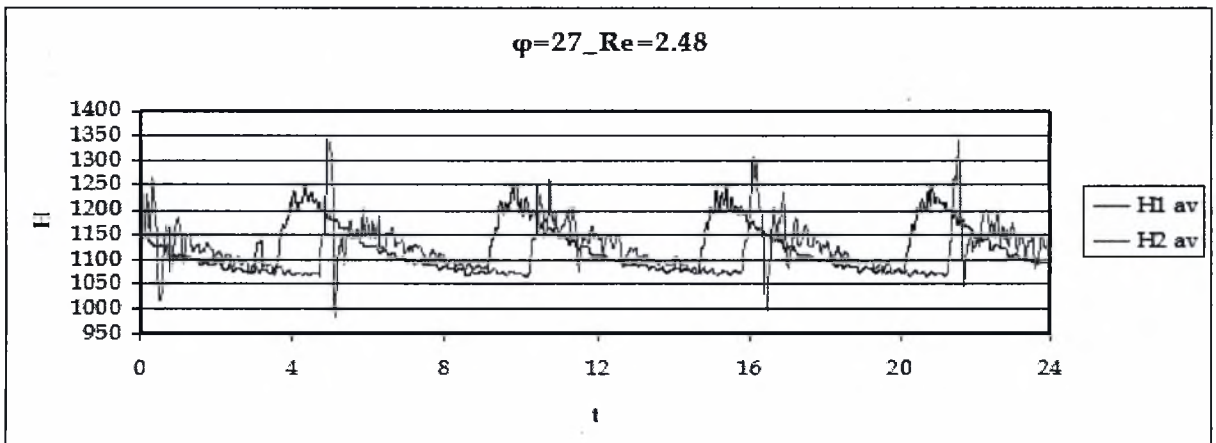
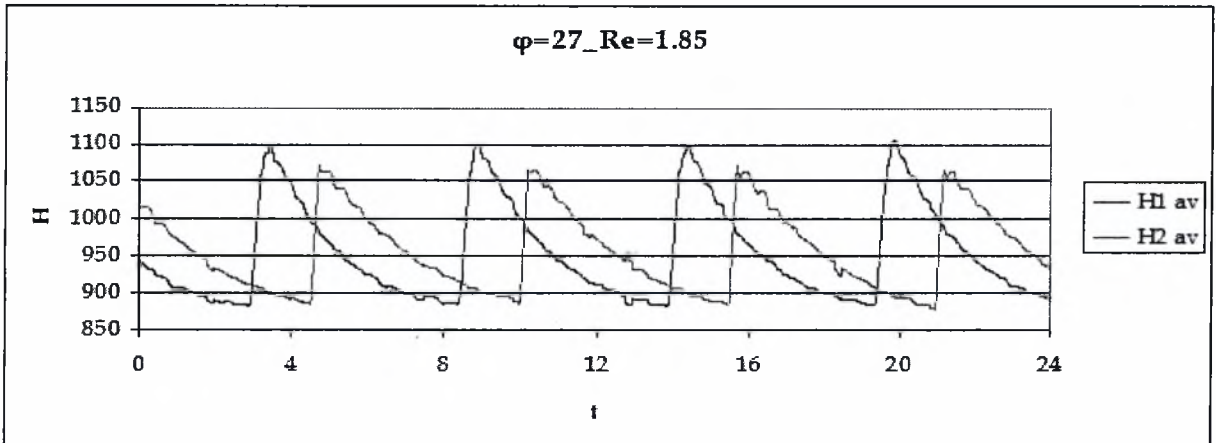
❖  $\varphi=20^\circ$



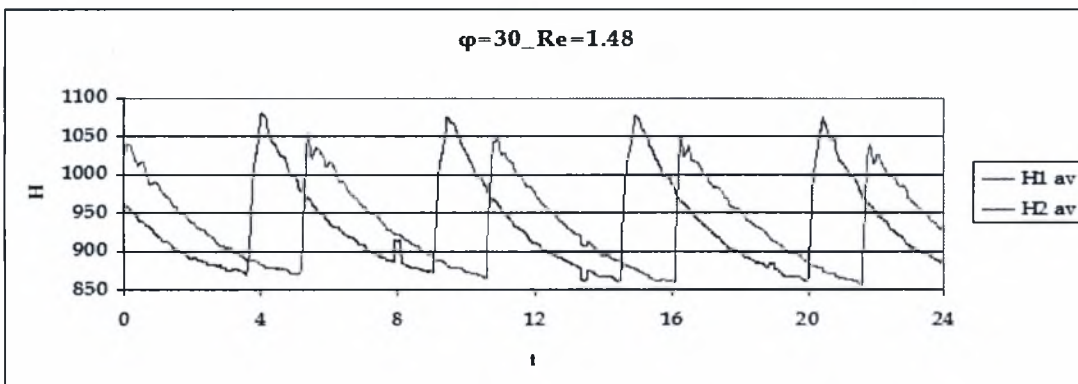
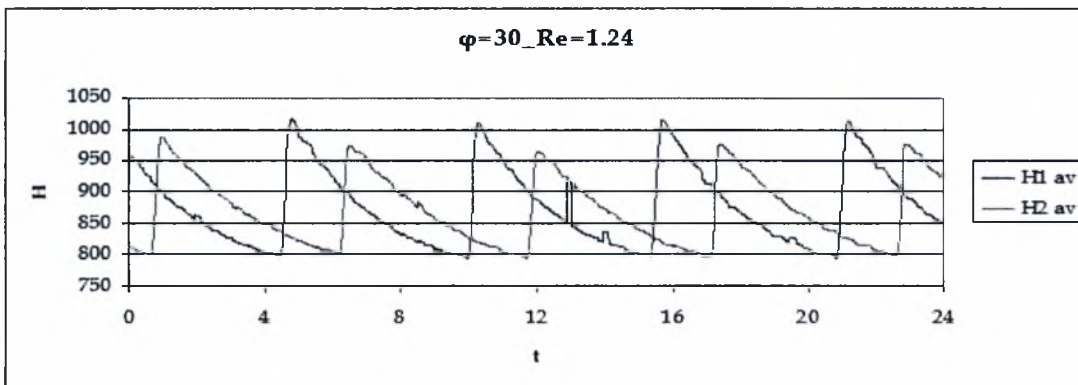
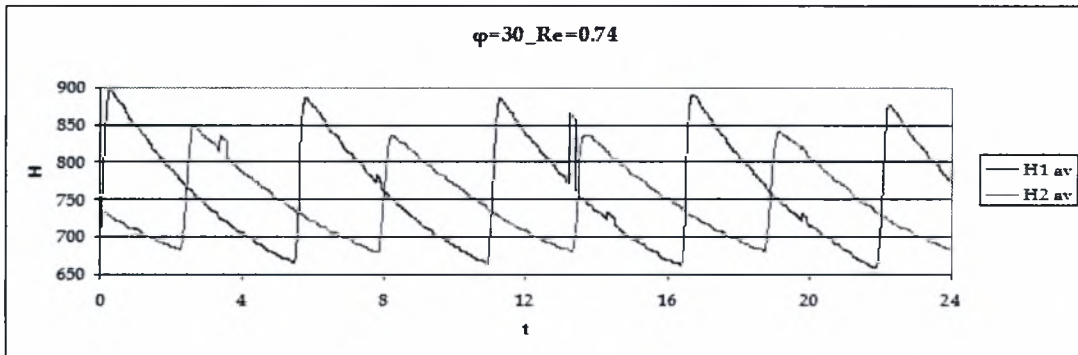


❖  $\varphi=27^\circ$

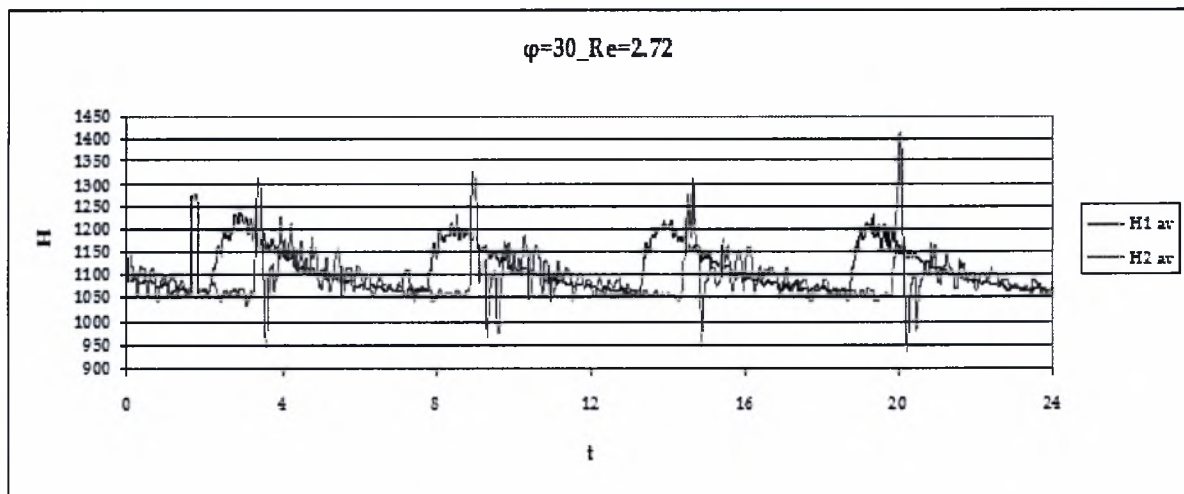
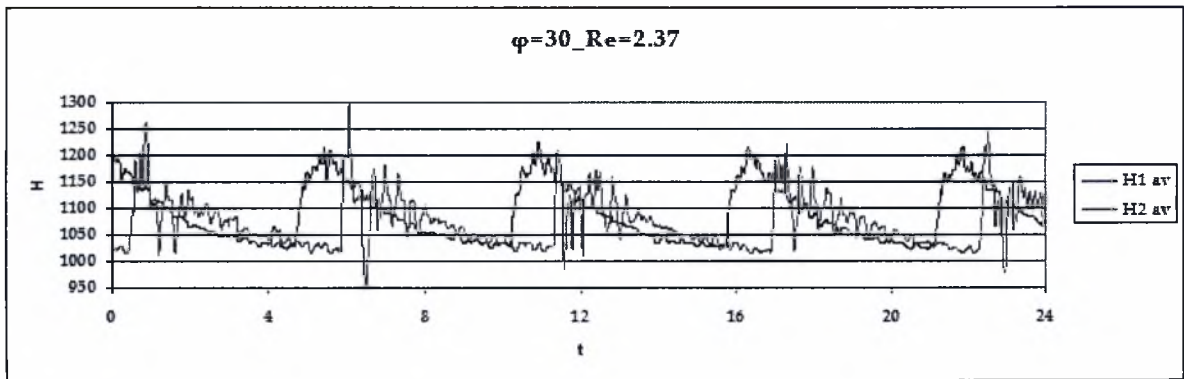
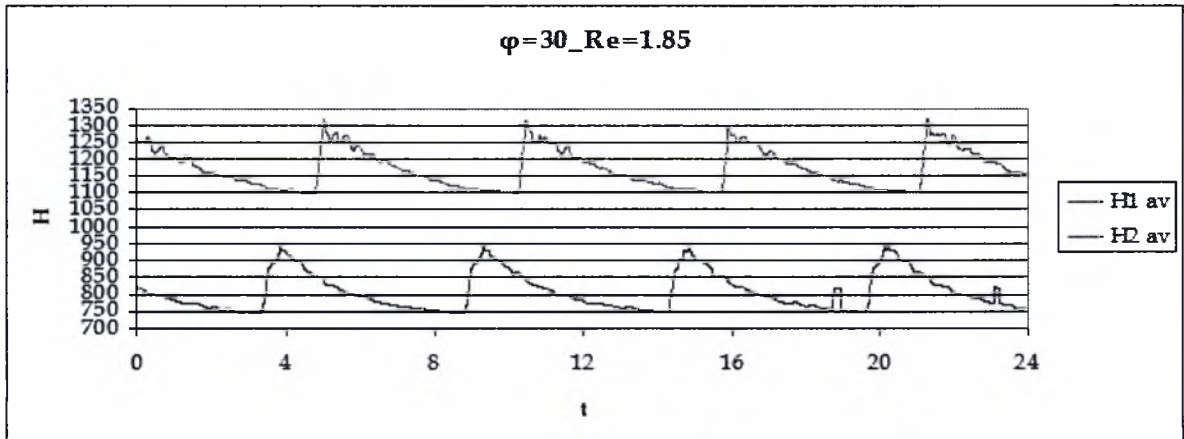
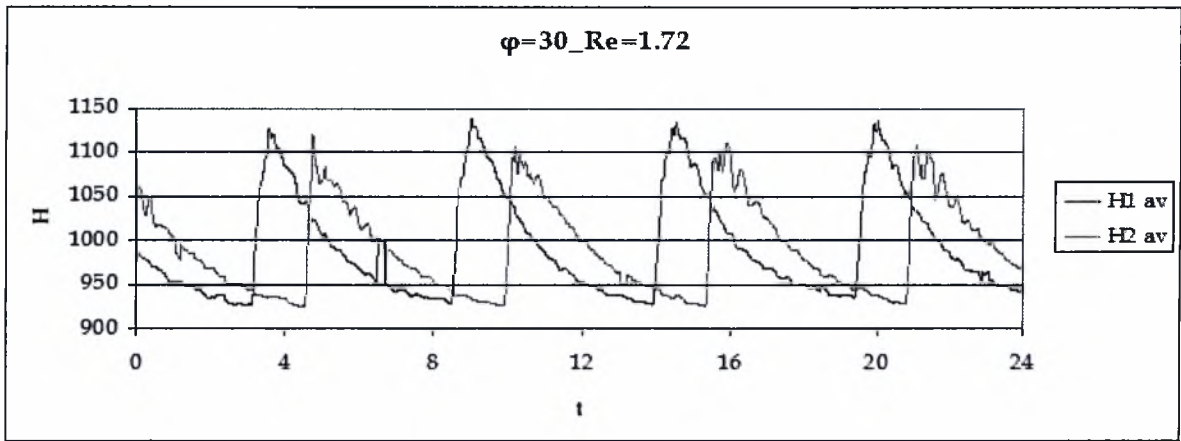




❖  $\varphi=30^\circ$







Πίνακας 1. Ιξώδες διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού

**Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions  
in Centipoises/mPa s**

Glycerine percent weight	Temperature (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 <sup>a)</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>a)</sup>Viscosity of water taken from "Properties of Ordinary Water-Substance." N.E. Dorsey, p. 184. New York (1940)

Πίνακας 2. Πυκνότητα διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού

Density of Glycerine-Water Solutions											
Glycerine (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )					Glycerine (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )				
	15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C		15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C
100	1.26415	1.26381	1.26108	1.25802	1.25495	50	1.12870	1.12845	1.12630	1.12375	1.12110
99	1.26160	1.26125	1.25850	1.25545	1.25235	49	1.12600	1.12575	1.12360	1.12110	1.11845
98	1.25900	1.25865	1.25590	1.25290	1.24975	48	1.12325	1.12305	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	1.20305	1.20005	1.19705	28	1.06935	1.06915	1.06755	1.06560	1.06355
77	1.20365	1.20300	1.20030	1.19735	1.19435	27	1.06670	1.06655	1.06495	1.06305	1.06105
76	1.20100	1.20025	1.19760	1.19465	1.19170	26	1.06410	1.06390	1.06240	1.06055	1.05855
75	1.19835	1.19750	1.19485	1.19195	1.18900	25	1.06150	1.06130	1.05980	1.05800	1.05605
74	1.19570	1.19480	1.19215	1.18925	1.18635	24	1.05895	1.05870	1.05720	1.05545	1.05350
73	1.19305	1.19205	1.18940	1.18650	1.18365	23	1.05635	1.05610	1.05465	1.05290	1.05100
72	1.19040	1.18930	1.18670	1.18380	1.18100	22	1.05375	1.05350	1.05205	1.05035	1.04850
71	1.18775	1.18655	1.18395	1.18110	1.17830	21	1.05115	1.05090	1.04950	1.04780	1.04600
70	1.18510	1.18385	1.18125	1.17840	1.17565	20	1.04855	1.04825	1.04690	1.04525	1.04350
69	1.18245	1.18105	1.17850	1.17565	1.17290	19	1.04595	1.04575	1.04440	1.04280	1.04105
68	1.17980	1.17830	1.17575	1.17295	1.17020	18	1.04335	1.04325	1.04195	1.04035	1.03860
67	1.17715	1.17555	1.17300	1.17020	1.16745	17	1.04075	1.04075	1.03945	1.03790	1.03615
66	1.17450	1.17275	1.17025	1.16745	1.16470	16	1.03815	1.03825	1.03695	1.03545	1.03370
65	1.17185	1.17000	1.16750	1.16475	1.16195	15	1.03555	1.03570	1.03450	1.03300	1.03130
64	1.16920	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	14	1.03295	1.03320	1.03200	1.03055	1.02885
63	1.16655	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	13	1.03035	1.03070	1.02955	1.02805	1.02640
62	1.16390	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	12	1.02775	1.02820	1.02705	1.02560	1.02395
61	1.16125	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	11	1.02515	1.02565	1.02455	1.02315	1.02150
60	1.15860	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	10	1.02255	1.02315	1.02210	1.02070	1.01905
59	1.15595	1.15340	1.15105	1.14835	1.14555	9	1.02000	1.02075	1.01970	1.01835	1.01670
58	1.15330	1.15065	1.14830	1.14560	1.14285	8	1.01740	1.01835	1.01730	1.01600	1.01440
57	1.15065	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	7	1.01480	1.01590	1.01495	1.01360	1.01205
56	1.14800	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	6	1.01220	1.01350	1.01255	1.01125	1.00970
55	1.14535	1.14230	1.14005	1.13740	1.13470	5	1.00960	1.01110	1.01015	1.00890	1.00735
54	1.14270	1.13955	1.13730	1.13465	1.13195	4	1.00700	1.00875	1.00780	1.00655	1.00505
53	1.14005	1.13680	1.13455	1.13195	1.12925	3	1.00440	1.00630	1.00540	1.00415	1.00270
52	1.13740	1.13400	1.13180	1.12920	1.12650	2	1.00180	1.00385	1.00300	1.00180	1.00035
51	1.13475	1.13125	1.12905	1.12650	1.12380	1	1.00000	1.00145	1.00060	0.99945	0.99800



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085976