



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**Προπτυχιακή Διπλωματική Μελέτη**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΗ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ**

**ΧΑΤΖΗΩΑΝΝΟΥ ΘΕΟΧΑΡΗΣ**

**ΒΟΛΟΣ 2010**



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

Αριθ. Εισ.: 8789/1  
Ημερ. Εισ.: 20-09-2010  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ  
2010  
ΧΑΤ

© 2010 Χατζηιωάννου Θεοχάρης

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. Βλαχογιάννης Μιχαήλ

(επβλέπων)

*Αναπληρωτής Καθηγητής*

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

**Δεύτερος Εξεταστής** Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου

*Καθηγητής*

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

**Τρίτος Εξεταστής** Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος

*Επίκουρος Καθηγητής*

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας



## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κύριο Μ.Βλαχογιάννη για την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης και της φιλικής σχέσης που αναπτύξαμε μέσα από τις συζητήσεις μας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στην Άννα Γεωργαντάκη, για την πολύτιμη βοήθεια στο ξεκίνημα των πειραμάτων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, που μαζί τους απέκτησα πολλές αναμνήσεις και εμπειρίες, περισσότερες από όσες θα μπορούσα να φανταστώ και που έπλασαν τον χαρακτήρα μου ως έχει. Ακόμα, θα ήθελα να αποδώσω ένα τεράστιο ευχαριστώ σε έναν άνθρωπο που είναι μαζί μου τα τελευταία δύο χρόνια και μου χαρίζει ευτυχισμένες στιγμές, την Μαρία.

Τέλος, δεν θα μπορούσα με ένα απλό ευχαριστώ να ανταποδώσω τις θυσίες της οικογένειας μου και την αμέριστη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια. Το μόνο που εύχομαι είναι να σταθώ αντάξιος των προσδοκιών τους. Στους γονείς μου και την αδερφή μου, με πολύ αγάπη.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	1
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	2
1.1 Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών.....	3
1.2 Σύμβολα – Παράμετροι της διφασικής ροής .....	4
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	7
2.1 Καθεστώτα ροής.....	7
2.1.1 Οριζόντια ροή.....	7
2.1.2 Ροή σε κεκλιμένους αγωγούς.....	9
2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων.....	10
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ροή.....	11
2.4 Χάρτες καθεστώτων ροής.....	12
2.5 Μεταπτώσεις περιοχών.....	18
2.5.1 Μετάπτωση από στρωματοποιημένη ροή σε διαλείπουσα ροή.....	18
2.5.2 Μετάπτωση από λεία διαχωριζόμενη σε διαχωρισμένη με κύματα .....	19
2.5.3 Μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα και στη δακτυλιοειδή ροή .....	21
2.6 Βασικά μοντέλα .....	22
2.6.1 Ομογενές μοντέλο.....	23
2.6.2 Διαχωρισμένο μοντέλο.....	24
2.7 Μοντελοποίηση ροών .....	25
2.7.1 Μοντελοποίηση της στρωματομένης ροής.....	25
2.7.2 Μοντελοποίηση της διαλείπουσας ροής.....	25
2.8 Επίδραση του πλάτους στη ροή υγρού υμένα.....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b> .....	28
3.1 Προσδιορισμός καθεστώτων ροής.....	28
3.1.1 Οπτική παρατήρηση.....	28
3.1.2 Αγωγιμομετρική μέθοδος.....	28
3.2 Πάχος υγρής στιβάδας.....	29
3.2.1 Μέθοδοι και τεχνικές πειραματικών μετρήσεων πάχους υγρής στιβάδας.....	30
3.2.1.1. Μέτρηση με την άμεση μέθοδο.....	30
3.2.1.2. Μέτρηση με την αγωγιμομετρική μέθοδο.....	31
3.3 Πειραματική διάταξη.....	33
3.4 Βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων.....	38
3.4.1 Βαθμονόμηση ροομέτρων.....	38
3.4.2 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής.....	38

3.5 Έλεγχος καλής λειτουργίας.....	40
3.6 Πειραματική διαδικασία.....	41

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

##### **ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ.....43**

4.1 Επίδραση της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής στα καθεστώτα ροής.....	43
4.2 Επίδραση του πλάτους της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής στα καθεστώτα ροής.....	44
4.3 Επίδραση του πλάτους της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής στα καθεστώτα ροής σε υπό κλίση αγωγό.....	48
4.4 Επίδραση της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής σε υπό κλίση αγωγό 1 <sup>ο</sup> χωρίς την επίδραση της αέριας φάσης.....	55

##### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....61**

##### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....62**

---

---

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A	: εμβαδόν επιφάνειας που καταλαμβάνει η κάθε φάση ( $m^2$ )
c	: ταχύτητα διάδοσης κύματος (m/s)
C	: ηλεκτρική αγωγιμότητα (S)
D	: διάμετρος αγωγού (m)
d	: διάμετρος συρμάτων (m)
$D_0$	: απόσταση μεταξύ συρμάτων (m)
$\frac{dP}{dL}$	: πτώση πίεσης ανά μονάδα μήκους του αγωγού (Pa/m)
f	: συντελεστής τριβής
Fr	: αριθμός Froude
G,L	: μαζική ταχύτητα αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα
h	: ύψος υγρής φάσης στον αγωγό (m)
j	: ογκομετρική ροή (m/s)
k	: κυματαριθμός ( $m^{-1}$ )
$q_G$	: συνολική ογκομετρική παροχή ανά μονάδα μήκους ( $m^2/s$ )
Q	: ογκομετρική παροχή κάθε φάσης ( $m^3/s$ )
R	: ακτίνα του αγωγού (m)
Re	: αριθμός Reynolds
S	: περίμετρος (m)
u	: μέση ταχύτητα (m/s)
$u_S$	: φαινομενική ταχύτητα (m/s)
We	: αριθμός Weber
X	: παράμετρος Lockhart-Martinelli
$\alpha$	: συγκράτηση
$\gamma$	: ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (S/m)
$\theta$	: γωνία κλίσης του αγωγού (rad)
$\lambda$	: διορθωτικός παράγοντας στο χάρτη Baker
$\mu$	: δυναμικό ιξώδες (Pa·s)
$\nu$	: κινηματικό ιξώδες ( $m^2/s$ )
$\rho$	: πυκνότητα ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	: επιφανειακή τάση (N/m)
$\tau$	: διατμητική τάση ( $N/m^2$ )
$\phi$	: παράμετρος Lockhart-Martinelli
$\psi$	: διορθωτικός παράγοντας στο χάρτη Baker
s	: συντελεστής προστασίας

Δείκτες:

G	: αέρια φάση
L	: υγρή φάση

Επεξηγήσεις εννοιών :

Test section : τμήμα σωλήνα από Plexiglas

## Περίληψη

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο σωλήνας διφασικής ροής με στόχο τη μελέτη της επίδρασης του πλάτους του καναλιού στη περίπτωση της ελεύθερης ροής. Η επίδραση του πλάτους του καναλιού στη ροή υγρού υμένα και ειδικότερα στην ευστάθειά του παίζει καταλυτικό ρόλο. Με τη μείωση του πλάτους αυξάνεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για τη μετάβαση από την ευσταθή στη ασταθή περιοχή.

Στόχος της εργασίας είναι να μελετήσουμε την ευστάθεια ενός υμένα σε ελεύθερη ροή στη περίπτωση του κυλινδρικού αγωγού. Κατασκευάστηκε σύστημα διαταραχής και μελετήθηκε η επίδραση της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής σε διάφορες κλίσεις του αγωγού ( $0.25^\circ$ ,  $0.5^\circ$  και  $1^\circ$ ) και σε διάφορα καθεστώτα ροής (διαστρωματωμένα, διδιάστατα κύματα και κύματα K-H). Στην συνέχεια σε κλίση  $1^\circ$  πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τη μελέτη της ευστάθειας. Διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει μία ξεκάθαρη τάση, καθώς ενώ αρχικά φαίνεται να περνάμε στην μετάβαση στην ασταθή περιοχή σε κάποια υψηλότερη παροχή υγρής φάσης η εξωτερική διαταραχή σβήνει δείχνοντας ότι ο υμένας είναι ευσταθής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 μεγέθι (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 πτερυγών αεροπλάνων κατά την πτήση υπό συνθήκες βροχόπτωσης.

Οι διφασικές ροές εμφανίζονται συχνά στη φύση και σε ένα πλήθος βιομηχανικών διεργασιών. Η διφασική ροή αερίου-υγρού σε οριζόντιους ή σε κεκλιμένους αγωγούς τα τελευταία 40 χρόνια έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πλήθος των εφαρμογών στις οποίες συναντάται, όπως σε συστήματα διακίνησης των γεωθερμικών ρευστών και των προϊόντων πετρελαίου, στη λειτουργία πυρηνικών και χημικών αντιδραστήρων καθώς και στα συστήματα ψύξης και θέρμανσης. Η μελέτη της διφασικής ροής δεν έχει μόνο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον, αλλά μπορεί να βοηθήσει στον καλύτερο σχεδιασμό ποικίλων συσκευών. Αν και πολλές σημαντικές έρευνες έχουν γίνει στο παρελθόν, οι προσπάθειες να γίνει κατανοητή η θεμελιώδης συμπεριφορά και οι μηχανισμοί της διφασικής ροής είναι προφανώς μια συνεχιζόμενη διαδικασία.

Στη διφασική ροή οι δυο φάσεις (για παράδειγμα αέρας και νερό) κατανέμονται στον αγωγό ή στη συσκευή με ποικίλους τρόπους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφόρων τύπων ή καθεστώτων ροής. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις διφασικές ροές είναι πολύπλοκες με αποτέλεσμα να είναι δυσχερής η ακριβής μαθηματική τους έκφραση, αφού η κάθε φάση επηρεάζεται από τις δικές της

ιδιότητες και συνθήκες, ενώ συγχρόνως επηρεάζει και επηρεάζεται από την άλλη φάση.

Το κύριο χαρακτηριστικό της ροής διφασικού μίγματος σε οριζόντιο η κεκλιμένο αγωγό είναι η μορφή της διεπιφάνεια αερίου-υγρό. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό, όταν αέριο και υγρό ρέουν ταυτόχρονα σε έναν κεκλιμένο ή οριζόντιο αγωγό σχηματίζουν διάφορα καθεστώτα ή περιοχές ροής (flow patterns ή flow regimes). Οι κυριότερες περιοχές που αφανίζονται σε οριζόντιο και ελαφρώς κεκλιμένο αγωγό είναι: η διαχωρισμένη ροή με ή χωρίς κύματα (smooth/wavy stratified flow), η διαλείπουσα ροή (slug flow) και η δακτυλιοειδής ροή (annular flow).

Η γνώση των χαρακτηριστικών της οριζόντιας και ελαφρώς κεκλιμένης διφασικής ροής είναι απαραίτητη στον σχεδιασμό των προαναφερθέντων συστημάτων ως και άλλων συσκευών διεργασιών. Τα κυριότερα από αυτά είναι το πάχος της υγρής στιβάδας (film), η πτώση πίεσης και ο συμπαρασυρμός (entrainment), δηλαδή το κλάσμα του υγρού που μεταφέρεται από την αέρια φάση, με τη μορφή των σταγονιδίων.

### 1.1 Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών

Η ανάλυση της διφασικής ροής στηρίζεται κυρίως σε πειραματικά δεδομένα καθώς και σε απλά ή σύνθετα αναλυτικά μοντέλα τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν ως οι εξής (Ανδρίτσος & Μποντόζογλου, 2006):

**1. Εμπειρικές Σχέσεις.** Στηρίζονται σε πειραματικές μετρήσεις και δίνονται με τη μορφή εξισώσεων. Δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις, επειδή προέκυψαν από πειράματα σε συγκεκριμένες συνθήκες.

**2. Απλά Αναλυτικά Μοντέλα.** Μοντέλα τα οποία δεν παίρνουν υπόψη τους τις λεπτομέρειες της ροής, αν και μερικές φορές μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στη πρόβλεψη διαφόρων παραμέτρων. Σε αυτά τα μοντέλα γίνεται χρήση των γενικευμένων εξισώσεων συνέχειας, ορμής και ενέργειας. Στο πιο απλό μοντέλο, στο **μοντέλο ομογενούς ροής (homogeneous flow model)**, τα δύο ρευστά περιγράφονται ως ένα ρευστό με κατάλληλα σταθμισμένες τιμές των φυσικών ιδιοτήτων και το οποίο υπακούει στους νόμους της μονοφασικής ροής. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του είναι μικρή, αφού δεν λαμβάνει υπόψη τη διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δυο φάσεων. Στο **μοντέλο διαχωρισμένης ροής (separated flow model)** οι δύο φάσεις θεωρούνται ότι ρέουν η μία χωριστά από την άλλη και οι βασικές εξισώσεις γράφονται ξεχωριστά για κάθε φάση.

**3. Σύνθετα Μοντέλα.** Προσπάθεια για ανάπτυξη σχέσεων για ορισμένες παραμέτρους, όπως η κατανομή της ταχύτητας και της συγκέντρωσης, ή για συγκεκριμένα καθεστώτα ροής ξεκινώντας από κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις. Η



περιγραφή του μοντέλου της ροής είναι ακριβής, όμως παρουσιάζεται αυξημένη δυσκολία στην επίλυση των εξισώσεων.

## 1.2 Σύμβολα - Παράμετροι της διφασικής ροής

Αρκετές παράμετροι της διφασικής ροής είναι συνέπεια του γεγονότος ότι λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο φάσεων η ελαφρότερη φάση ρέει ταχύτερα. Μερικές από τις ποσότητες που συναντιούνται σε ένα κείμενο διφασικής ροής και είναι χρήσιμες στο σχεδιασμό μιας συσκευής ή διεργασίας είναι οι εξής:

### *Συγκράτηση υγρού και Κλάσμα κενού*

Επειδή η αέρια φάση διαφέρει αισθητά από την υγρή ως προς την πυκνότητα και το ιξώδες, η αέρια φάση ρέει με μεγαλύτερη μέση ταχύτητα από την υγρή, φαινόμενο που χαρακτηρίζεται ως «συγκράτηση» ή «ολίσθηση» της μιας φάσης ως προς την άλλη. Ως *συγκράτηση υγρού (R, holdup)* ορίζεται ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το υγρό στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. *Κλάσμα κενού (a, void fraction)* είναι ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το αέριο στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. Εάν το εμβαδόν της διατομής του αγωγού είναι  $A$  και τα εμβαδά της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και τη υγρή φάση αντίστοιχα είναι  $A_G$  και  $A_L$ , τότε

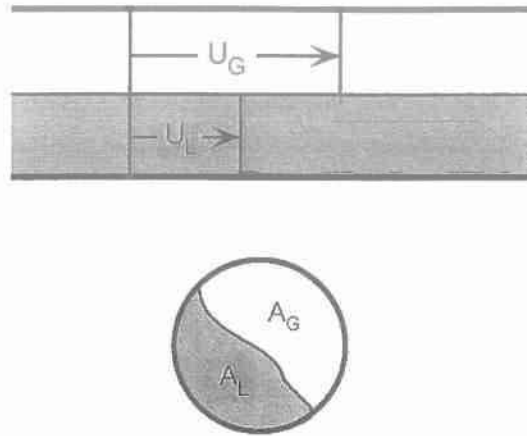
$$a = \frac{A_G}{A} \quad (1.1)$$

όπου  $A = A_G + A_L$ .

Τα δύο αυτά μεγέθη αυτά είναι σημαντικά επειδή προσδιορίζουν το χρόνο παραμονής των ρευστών στο σύστημα (μέγεθος συσκευών) και επειδή χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης, συνδέονται δε μεταξύ τους με τη σχέση:

$$R + a = 1 \quad (1.2)$$





Σχήμα 1.1. Απλοποιημένη εικόνα της διφασικής ροής υγρού-αερίου σε κυλινδρικό αγωγό.

### Μαζικές Ροές (total mass flow)

Η συνολική μαζική ροή ορίζεται ως το άθροισμα της μαζικής παροχής του υγρού ( $G_L$ ) και του αερίου ( $G_G$ ) σε kg/s:

$$G = G_L + G_G \quad (1.3)$$

### Ποιότητα

Στη θεώρηση φαινομένων όπου συμβαίνει αλλαγή φάσης είναι καταλληλότερη τις περισσότερες φορές η χρήση του όρου της *ποιότητας* ( $x$ , quality), η οποία ορίζεται ως το κλάσμα μάζας της αέριας φάσης:

$$x = \frac{\dot{m}_G}{G} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \quad (1.4)$$

όπου  $\dot{m}_G$  και  $\dot{m}_L$  είναι οι μαζικές παροχές των δύο φάσεων. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι οι δείκτες L και G εκφράζουν την υγρή και την αέρια φάση αντίστοιχα.

### Φαινομενικές Ταχύτητες Φάσεων

Σαν μέτρο της παροχής των δυο φάσεων συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία οι **φαινομενικές ταχύτητες** (superficial velocities) που ορίζονται από τις σχέσεις:

Η φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως

$$U_{GS} = \frac{Q_G}{A} = \frac{\dot{m}_G \rho_G}{A} \quad (1.5)$$

και η φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως

$$U_{LS} = \frac{Q_L}{A} = \frac{\dot{m}_L \rho_L}{A} \quad (1.6)$$

όπου  $Q_G$  είναι η ογκομετρική παροχή της αέριας φάσης,  $Q_L$  η ογκομετρική παροχή της υγρής φάσης και  $\rho$  η πυκνότητα.

**Μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (Average Phase Velocities):**

Η μέση πραγματική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$U_G = \frac{Q}{A\alpha} = \frac{G_G}{\rho_G A \alpha} = \frac{U_{GS}}{\alpha} \quad (1.7)$$

και η μέση πραγματική ταχύτητα υγρής φάσης γράφεται:

$$U_L = \frac{Q}{A\alpha} = \frac{G_L}{\rho_L A \alpha} = \frac{U_{LS}}{\alpha} \quad (1.8)$$

όπου  $\alpha$  είναι το κλάσμα κενού.

Ακόμη, μπορεί να γραφεί και μία μέση πραγματική ταχύτητα ρευστού (υγρής + αέριας φάσης) ως εξής:

$$U_M = \frac{Q_G + Q_L}{A} = U_{GS} + U_{LS} \quad (1.9)$$

**Ταχύτητα Ολίσθησης, S (Slip Ratio):**

Η ταχύτητα ολίσθησης, S (Slip Ratio), εκφράζει τη σχετική ταχύτητα της αέριας φάσης ( $U_G$ ) ως προς την υγρή ( $U_L$ ).

$$S = \frac{U_G}{U_L} = \frac{G_G \rho_L A_L}{G_L \rho_G A_G} = \left( \frac{x}{1-x} \right) \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right) \left( \frac{1-\alpha}{\alpha} \right) \quad (1.10)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

#### 2.1 ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ

Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής αερίου-υγρού είναι ότι η διεπιφάνεια αερίου-υγρού μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό γεωμετρικών μορφών, οι οποίες είναι γενικά γνωστές με το όνομα *πρότυπα ή περιοχές ροής (flow patterns, flow regimes)*. Τα καθεστώτα ροής εξαρτώνται από τη γεωμετρία του συστήματος, τις παροχές και τις ιδιότητες των ρευστών. Η δημιουργία ενός συγκεκριμένου καθεστώτος ροής εξαρτάται από τις συνθήκες της ροής (παροχές, πίεση) και της μεταφοράς θερμότητας, από τις φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων (πυκνότητες, ιξώδη, διατμητική τάση), καθώς και από τη γεωμετρία του αγωγού (Σχήμα διατομής, κλίση, ισοδύναμη διάμετρος).

Στη βιβλιογραφία απαντάται μεγάλος αριθμός ονομάτων περιοχών ροής, που προφανώς αποτελεί συνέπεια της υποκειμενικής φύσης των ορισμών. Άλλοι λόγοι για τη σύγχυση που επικρατεί είναι τα πολλά ονόματα για την ίδια περιοχή και η ύπαρξη υβριδικών καθεστώτων ροής, καθεστώτων δηλαδή που βρίσκονται στο στάδιο μετάπτωσης από ένα καθεστώς σε άλλο.

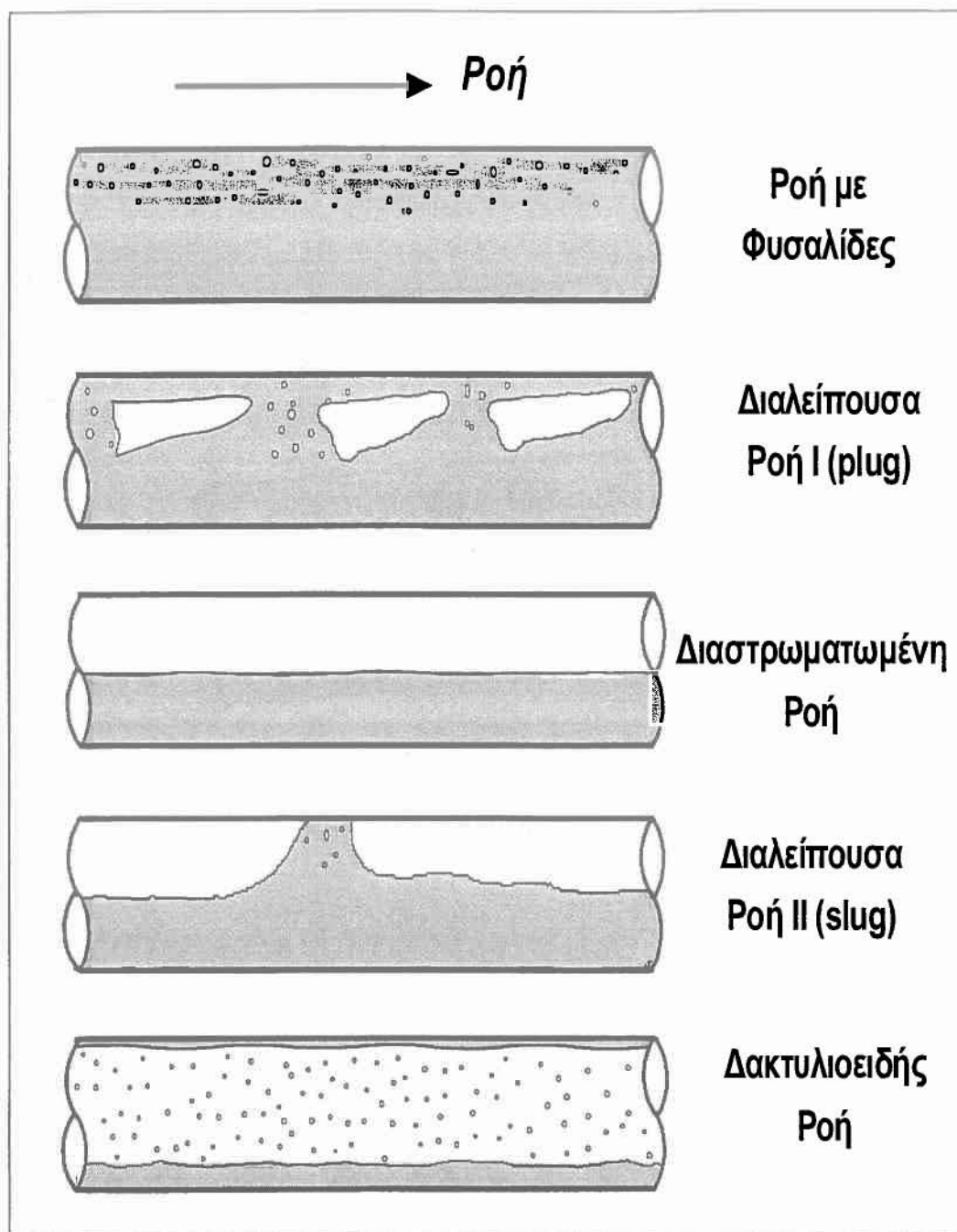
Επίσης, θα ήθελα να αναφέρω ότι για τη διατύπωση αυτού του κεφαλαίου αντλήθηκαν σημαντικά στοιχεία από τη διδακτορική διατριβή της Χριστίνας Τζώτζη και τη διπλωματική εργασία του Αζήζ Ερσάν.

#### 2.1.1 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΟΗ

Μία πληθώρα περιοχών ροής έχουν αναγνωρισθεί στη βιβλιογραφία σε οριζόντια διφασική ροή. Οι πλέον αποδεκτές περιοχές ροής που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1, είναι οι εξής:

- i. **Διαστρωματωμένη ροή (Stratified flow):** Σχηματίζεται για μικρές παροχές των ρευστών. Το υγρό ρέει στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στον πάνω μέρος του. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι *λεία* (smooth) ή να καλύπτεται με *κύματα* (wavy), κάτι που εξαρτάται κυρίως από την παροχή της αέριας φάσης. Σε χαμηλές ταχύτητες υγρού και αερίου παρατηρούνται δισδιάστατα κύματα μικρού πλάτους, με αδιατάρακτη επιφάνεια, που επεκτείνονται σε όλο το πλάτος του σωλήνα. Με την αύξηση της παροχής του αερίου, εμφανίζονται κύματα μεγάλου πλάτους (roll

- waves ή disturbance ή Kelvin-Helmholtz waves), η επιφάνεια των κυμάτων γίνεται τραχεία, και το υγρό μπορεί να αναρριχάται στα τοιχώματα του σωλήνα, χωρίς όμως να διαβρέχει ολόκληρη την περίμετρο του. Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας (παροχής) του αερίου σταγόνες από το υγρό αρχίζουν να κτυπούν στο πάνω μέρος του αγωγού, χαρακτηριστικό του φαινομένου που είναι γνωστό σαν ροή με εκνέφωση (atomization).
- ii. **Διαλείπουσα ροή** (Slug ή Intermittent flow): Χαρακτηρίζεται από την περιοδική διέλευση υγρών μαζών (slugs) στον αγωγό, που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Οι υγρές αυτές μάζες μπορεί να περιέχουν και να παρασύρουν πολυάριθμες φυσαλίδες αερίου. Η διαλείπουσα ροή είναι ανεπιθύμητη επειδή προκαλεί ανεπιθύμητες διακυμάνσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να δονούνται οι σωληνώσεις, απαιτούνται μεγάλοι διαχωριστές και αυξάνει ο ρυθμός μηχανικής διάβρωσης.
  - iii. **Ροή με φυσαλίδες** (Dispersed Bubble flow): Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διεσπαρμένων φυσαλίδων αερίου στην συνεχή υγρή φάση, οι οποίες τείνουν να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού και σε ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται σαν αφρός. Η υγρή φάση είναι συνεχής και μια διασπορά φυσαλίδων ρέει στο υγρό μέσο. Αυτή η περιοχή ροής δεν παρατηρήθηκε στα πειραματικά μας γιατί απαιτεί μεγάλη παροχή του υγρού.
  - iv. **Δακτυλιοειδής ροή** (Annular flow): Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός υγρού δακτυλίου που σχηματίζεται στην περιφέρεια του αγωγού και δεν είναι γενικά συμμετρικός λόγω βαρύτητας. Το υγρό ρέει στα τοιχώματα του σωλήνα με την μορφή φιλμ και η αέρια φάση ρέει στο κέντρο. Συνήθως ένα μέρος της υγρής φάσης εισέρχεται στο χώρο της αέριας φάσης με τη μορφή σταγονιδίων. Το είδος αυτό της ροής εμφανίζεται για μεγάλες παροχές του αερίου και όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι παροχές τόσο μειώνεται και ασυμμετρία του υγρού δακτυλίου.
  - v. **Ψευδο-διαλείπουσα** (Pseudo-slug): Το είδος αυτό της ροής μοιάζει αφενός με την δακτυλιοειδή ροή, στο ότι το υγρό σχηματίζει μια συνεχή στιβάδα στην περιφέρεια του αγωγού και αφετέρου με τη διαλείπουσα ροή, στο ότι παρουσιάζονται υγρές μάζες που μοιάζουν με «slugs». Οι τελευταίες δεν ρέουν με την ταχύτητα του αερίου και έτσι δεν προκαλούν απότομες μεταβολές πίεσης. Η παρουσία υγρής στιβάδας μεγάλου πάχους στον πυθμένα του σωλήνα δίνει την εντύπωση διαχωρισμένης ροής με κυματισμούς.
  - vi. **Ομιχλώδης ροή ή Ροή με Υγρασία** (wispy-annular flow): Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της υγρής φάσης, η συγκέντρωση σταγονιδίων στο χώρο της αέριας φάσης μεγαλώνει. Σαν συνέπεια έχουμε την συνένωση σταγονιδίων με την μορφή δεσμών ή ραβδώσεων. Η ροϊκή αυτή κατάσταση είναι χαρακτηριστική για ροές με μεγάλη ροή μάζας. Αυτή η περιοχή ροής δεν παρατηρήθηκε στα πειραματικά μας γιατί απαιτεί μεγάλη παροχή του υγρού



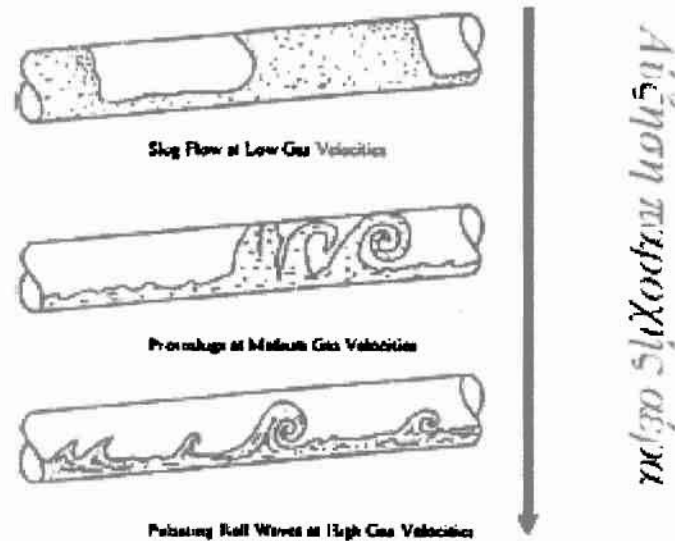
Σχήμα 2.1: Χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντια διαφασική ροή αερίου-υγρού

### 2.1.2 ΡΟΗ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Σε έναν οριζόντιο σωλήνα όταν αυξάνεται η γωνία του οι δυνάμεις βαρύτητας που ενεργούν στο υγρό γίνονται σημαντικότερες προκαλώντας αύξηση ή μείωση στην ταχύτητα του υγρού, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής.

**Τα κυριότερα συμπεράσματα από μελέτες σε αγωγούς με κλίση είναι:**

- Η μετάπτωση από τη διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην κλίση του αγωγού.
- Η μετάπτωση από τη διαλείπουσα στη δακτυλιοειδή ροή και στη ροή με φουσαλίδες επηρεάζονται ελάχιστα από την κλίση του αγωγού.

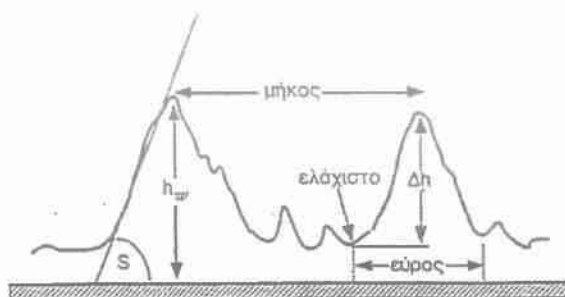


Σχήμα 2.2. Περιοχές ροής σε κεκλιμένο σωλήνα (μεταβάσεις περιοχών ροής που παρατηρούνται καθώς αυξάνεται η αέρια φαινομενική ταχύτητα)

## 2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η μορφή των κυμάτων χαρακτηρίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διεπιφάνεια αερίου και υγρού και συνδέεται άμεσα με φαινόμενα μεταφοράς και με την πτώση πίεσης που παρουσιάζει το διαφασικό μίγμα κατά μήκος του σωλήνα.

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι το πλάτος του κύματος (wave amplitude), που ορίζεται ως το μισό της υψομετρικής διαφοράς, Δh, μεταξύ ενός ελάχιστου και του άμεσου επόμενου μεγίστου της υγρής στιβάδας (Nencini & Andreussi, 1982). Σαν ύψος του κύματος  $h_w$  ορίζεται η απόσταση της κορυφής του από το τοίχωμα του αγωγού. Το μήκος κύματος  $\lambda$  όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3 είναι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών κυμάτων.



Σχήμα 2.3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων (Παράς, 1990)

Από την γνωστή σχέση της κινηματικής:

$$\lambda = \frac{u_c}{f} \quad (2.1)$$

όπου  $f$  η χαρακτηριστική συχνότητα των κυμάτων, μπορούμε να συνδέσουμε το μήκος κύματος με την ταχύτητα του κύματος  $u_c$ . Το εύρος του κύματος  $\Delta L$  είναι η οριζόντια απόσταση δυο διαδοχικών ελαχίστων της υγρής στιβάδας μεταξύ των οποίων ορίζεται το κύμα διαταραχής. Μια ακόμη παράμετρος που περιγράφει το Σχήμα των κυμάτων διαταραχής είναι η αιχμηρότητα  $S$  που ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \arctan \frac{\Delta L}{2\Delta h} \quad (2.2)$$

### 2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΡΟΗ

Πρωταρχικά ο στόχος είναι να μπορούμε να προβλέπουμε την περιοχή ροής που εμφανίζεται κάτω από τις αντίστοιχες συνθήκες λειτουργίας (παροχές, ιδιότητες, γεωμετρία κλπ). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή είναι κυρίως οι παροχές των ρευστών, το ιξώδες, η πυκνότητα των ρευστών, η επιφανειακή τάση, η κλίση του αγωγού και η διάμετρος του αγωγού.

Το *ιξώδες* ή *συνεκτικότητα* (*viscosity*) είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των ρευστών και είναι το αίτιο εμφάνισης της διατμητικής εντατικής κατάστασης στη μάζα τους. Ιξώδες είναι η ιδιότητα των ρευστών να ανθίσταται στην διάτμηση τους, δηλαδή στην κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του. Το ιξώδες επηρεάζει την αναρρίχηση του υγρού στα τοιχώματα του σωλήνα. Μια άλλη επίδραση του ιξώδους είναι το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται το ιξώδες, χρειάζεται μεγαλύτερη παροχή αερίου για να ξεκινήσουν τα κανονικά δισδιάστατα κύματα. Επιπλέον, με αύξηση πάλι του ιξώδους, μικραίνει η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων. Ο Andritsos (1986), στη διδακτορική του διατριβή, κάνοντας έρευνα στη διφασική ροή σε οριζόντιους σωλήνες διαμέτρων 2,52, 5,08 και 9,53 cm και για υγρά με διαφορετικά ιξώδη έκανε τις παρακάτω παρατηρήσεις:



Η αύξηση του ιξώδους επιφέρει αύξηση στο μήκος κύματος των κυμάτων της διεπιφάνειας. Για σταθερή διάμετρο η μετάπτωση σε κύματα μεγάλου πλάτους είναι ανεξάρτητη από το ιξώδες.

Η *πυκνότητα του αερίου* διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μορφή της διεπιφάνειας αερίου υγρού. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της τόσο ισχυρότερα επηρεάζει τη μεταφορά των κυμάτων και περισσότερο αυτών που έχουν μεγάλο πλάτος. Σε μεγάλες πυκνότητες αερίου τα πρώτα κύματα που θα παρατηρηθούν θα είναι ακανόνιστα μεγάλου πλάτους κάτι που παρατηρείται στα υγρά μεγάλου ιξώδους. Αν αλλάξει η πυκνότητα του υγρού δε παρατηρείται σημαντική αλλαγή κατά την μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή. Όμως η μετάπτωση από τη διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή παρατηρείται ότι γίνεται σε μεγάλες παροχές υγρού. Επίσης η μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη με κύματα εμφανίζεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου (Weisman et al. 1979).

Με μείωση της επιφανειακής τάσης παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές για μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή και για μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα. Η σημαντική αλλαγή που παρατηρείται είναι από διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη με κύματα και εμφανίζεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου (Weisman et al. 1979).

Ο βαθμός που το υγρό «αναρριχάται» περιφερειακά στα τοιχώματα του σωλήνα εξαρτάται από τη διάμετρο του σωλήνα. Μικρή διάμετρος και υγρό με χαμηλό ιξώδες του δίνουν μεγαλύτερη «αναρριχητικότητα» στο υγρό. Με αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα παρατηρείται ότι η μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή γίνεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου και η μετάπτωση σε διαλείπουσα σε μεγαλύτερες παροχές υγρού. Επιπλέον, η περιοχή ψευδοδιαλείπουσας ροής μικραίνει καθώς μεγαλώνει η διάμετρος του σωλήνα (Lin and Hantatty 1986).

Η σημαντική επίδραση της κλίσης στα σχέδια ροής παρατηρείται στη μετάβαση μεταξύ της διαστρωματωμένης και της διαλείπουσας ή δακτυλιοειδούς ροής. Σε έναν κεκλιμένο σωλήνα όταν αυξάνεται η γωνία, οι δυνάμεις βαρύτητας που ενεργούν στο υγρό γίνονται σημαντικότερες προκαλώντας μια αύξηση ή μια μείωση στην ταχύτητα του υγρού, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής. Για προς τα πάνω κλίση του αγωγού παρατηρούμε ότι η υγρή στιβάδα γίνεται λεπτότερη, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται δυσκολότερα τα slugs. Ενώ για την κλίση του αγωγού προς τα κάτω η υγρή στιβάδα γίνεται παχύτερη.

#### **2.4 ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ**

Η πιο συνηθισμένη πρακτική για την παρουσίαση των καθεστώτων ροής είναι να σχεδιαστούν τα δεδομένα στους λεγόμενους «χάρτες καθεστώτων ροής» (flow regime maps). Οι άξονες των χαρτών αυτών περιλαμβάνουν παροχές ή και ιδιότητες φάσεων, καθώς και τη διάμετρο ή και γεωμετρία του αγωγού (π.χ. κλίση).

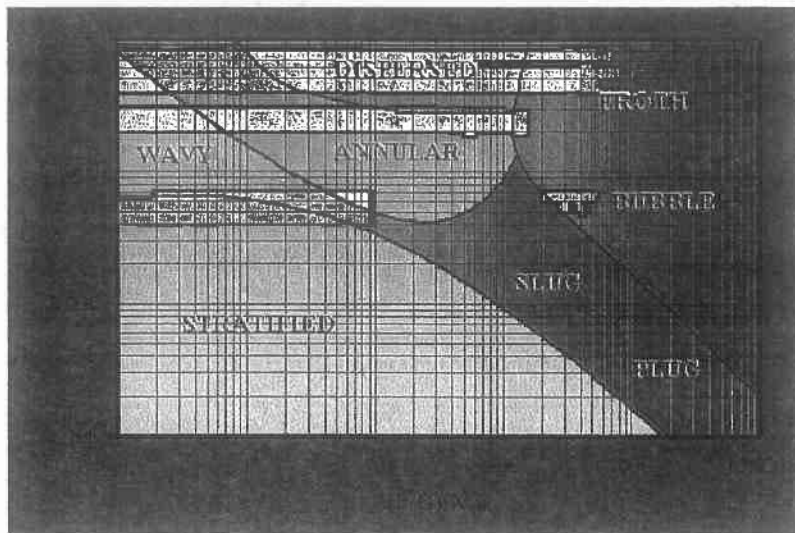


Έναν από τους πλέον γνωστούς και πρωτοποριακούς γενικευμένους χάρτες ροής σε οριζόντιο αγωγό πρότεινε ο Baker (1954). Βασισμένος σε δεδομένα παλαιότερων ερευνητών που αναφέρονται στο σύστημα αέρα-νερό, σχεδίασε τον όρο  $G/\lambda$  ως προς τον όρο  $L\psi/G$ . Για το σύστημα αέρα/ νερό, η παραπάνω συσχέτιση είναι ισοδύναμη με αυτή της μαζικής ταχύτητας αερίου,  $G$ , ως προς την κλίση της μαζικής ταχύτητας αερίου,  $L/G$ . Ο Baker έκανε εισαγωγή των ακολούθων παραμέτρων διόρθωσης των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών:

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\rho_G}{0.075} \cdot \frac{\rho_L}{62.3}\right)} \quad (2.3)$$

$$\psi = \left(\frac{73}{\sigma}\right) \left[\mu_L \left(\frac{62.3}{\rho_L}\right)^2\right]^{0.333} \quad (2.4)$$

όπου  $\rho_G$  και  $\rho_L$  οι πυκνότητες του αερίου και υγρού αντίστοιχα,  $\mu_L$  το ιξώδες του υγρού και  $\sigma$  η επιφανειακή τάση.



Σχήμα 2.4. Χάρτης καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό τύπου Baker

Κύριο μειονέκτημα του παραπάνω χάρτη είναι ότι δεν παίρνει υπόψη του την επίδραση της διαμέτρου του αγωγού, πράγμα που οδήγησε στη δημιουργία άλλων εμπειρικών χαρτών.

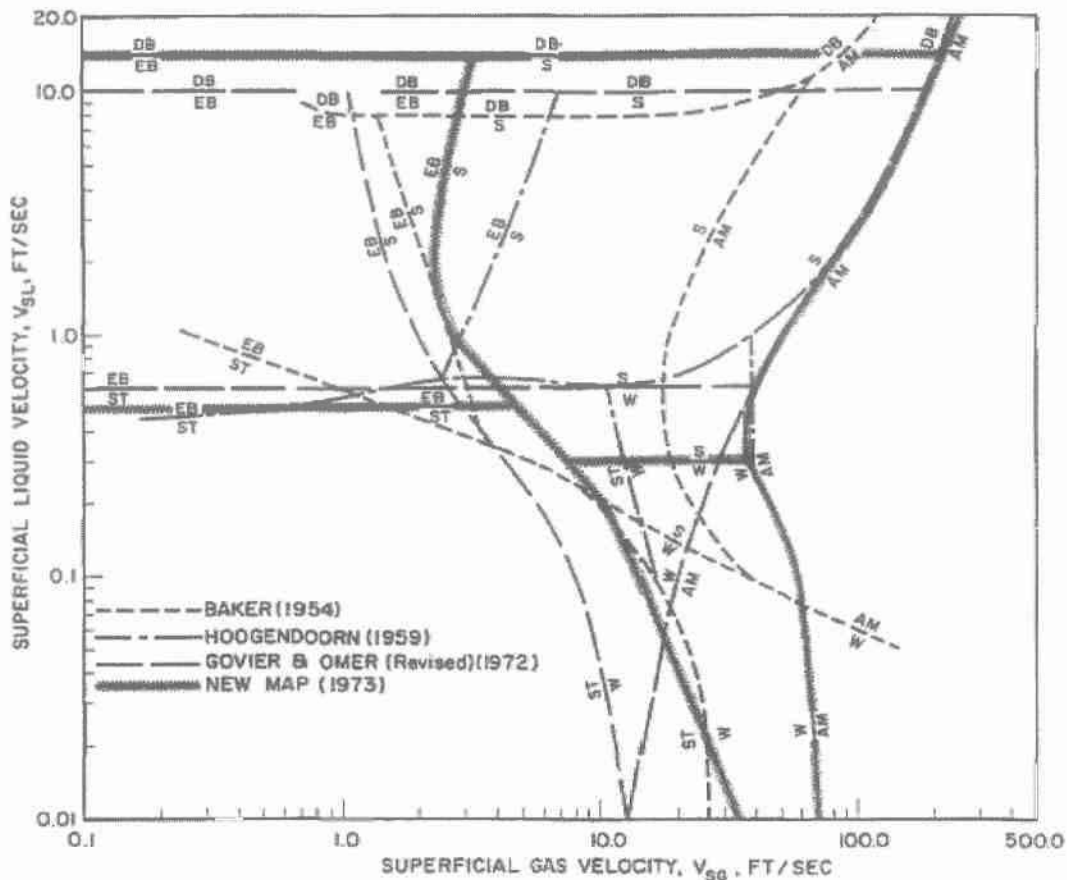
Οι White και Huntington (1955) πρότειναν ένα χάρτη καθεστώτων ροής βασισμένο στα δεδομένα που πήραν μέσα σε αγωγούς 1, 1 1/2, και 2 in και για μίγματα όπως φυσικό αέριο-πετρέλαιο, αέρας-πετρέλαιο και αέρας-νερό. Χρησιμοποίησαν τις μαζικές ταχύτητες υγρού και αερίου,  $L$  και  $G$ , σαν συντεταγμένες.

Ο Hoogendoorn (1959) έκανε χρήση την ταχύτητα του μίγματος,  $V_M$ , και το κλάσμα όγκου αερίου εισαγωγής,  $C_G$ , ως συντεταγμένες, όπως είχε υποδειχθεί προηγουμένως από το Kosterin (1949) σε έναν χάρτη καθεστώτων ροής που είναι

βασισμένος σε αρκετά συστήματα όπως αέρας-πετρέλαιο και αέρας-νερό. Ο Hoogendoorn παρατήρησε μικρές επιδράσεις της διαμέτρου των αγωγών και του ιξώδους του υγρού για ιξώδες μικρότερο από 50 cp.

Οι Govier και Omer (1962) παρουσίασαν ένα χάρτη βασισμένο στα δεδομένα τους για το σύστημα αέρας-νερό σε αγωγό 1,026 in. Οι μαζικές ταχύτητες υγρού και αερίου,  $L$  και  $G$ , χρησιμοποιήθηκαν ως συντεταγμένες στο χάρτη.

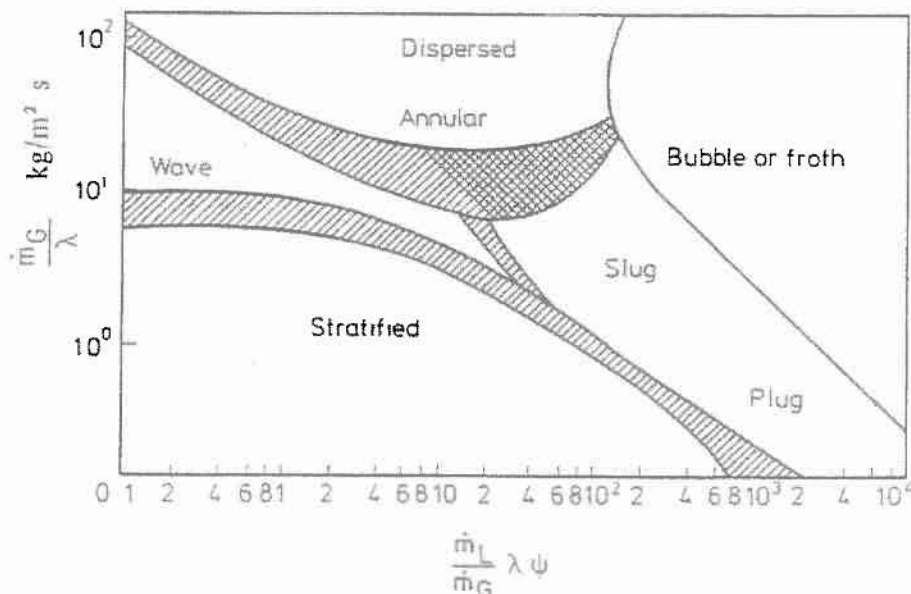
Ο Scott (1963) τροποποίησε το χάρτη του Baker χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Hoogendoorn ο οποίος μελέτησε τη διφασική ροή αέρα- νερού και αέρα διαλυμάτων ελαίων σε οριζόντιους αγωγούς. Δεν υπάρχει ακριβής θέση των συνόρων της μιας περιοχής ροής από την άλλη, στη θέση τους υπάρχει μια ευρεία «ταινία» ανάμεσα στις διάφορες περιοχές ροής.



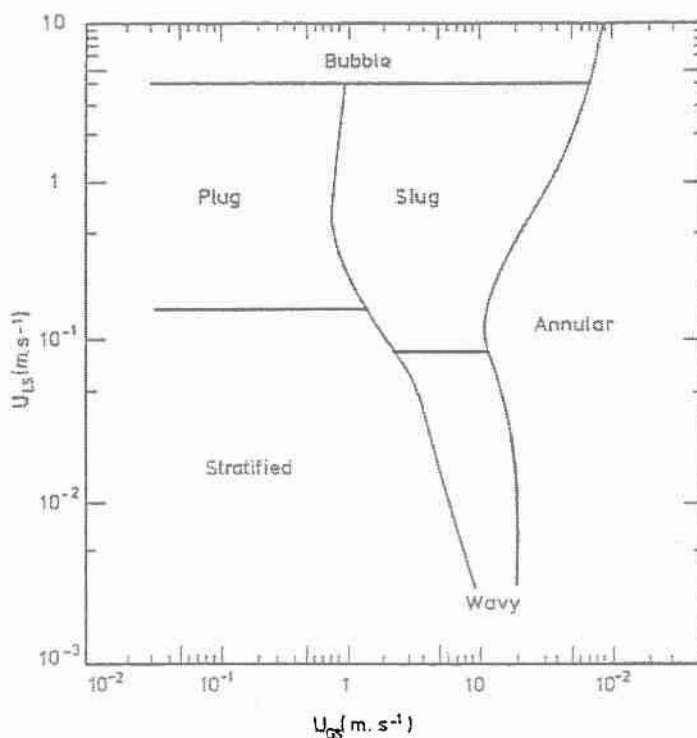
**Σχήμα 2.5:** Σύγκριση του προτεινόμενου χάρτη καθεστώτων ροής των Mandhane et al (1974) με άλλους που χρησιμοποιήθηκαν από πολλούς ερευνητές όπως, Baker, Hoogendoorn και Gover & Omer (revised). Όπου EB Bubble, elongated bubble flow; ST Stratified flow; W Wave flow; S Slug flow; AM Annular, annular-mist flow; DB Dispersed bubble flow.

Στα μέσα της δεκαετίας του '70 οι Mandhane et al (1974) μελέτησαν τη διφασική ροή αέριο-νερό σε οριζόντιους αγωγούς και παρουσίασαν ένα γενικευμένο χάρτη καθεστώτων ροής. Οι συντεταγμένες του χάρτη είναι οι φαινομενικές ταχύτητες υγρού και αερίου και αναφέρονται στο σύστημα αέρας-νερό.

Ο Gould (1974) μελέτησε τα καθεστώτα ροής σε έναν αγωγό με κλίση  $+45^\circ$  καθώς επίσης και στις οριζόντιες και κατακόρυφες θέσεις. Σχεδίασε τα αποτελέσματά χρησιμοποιώντας τους αριθμούς ταχύτητας υγρού και αερίου όπως προτείνονται από τους Duns και Ros (1963). Καθόρισαν τρία καθεστώτα ροής που αντιστοιχούν στη φυσαλίδα (υγρό συνεχής), διαλείπουσα ροή (και οι δύο φάσεις συνεχείς) και δακτυλιοειδή ροή (φάση αερίου συνεχής).



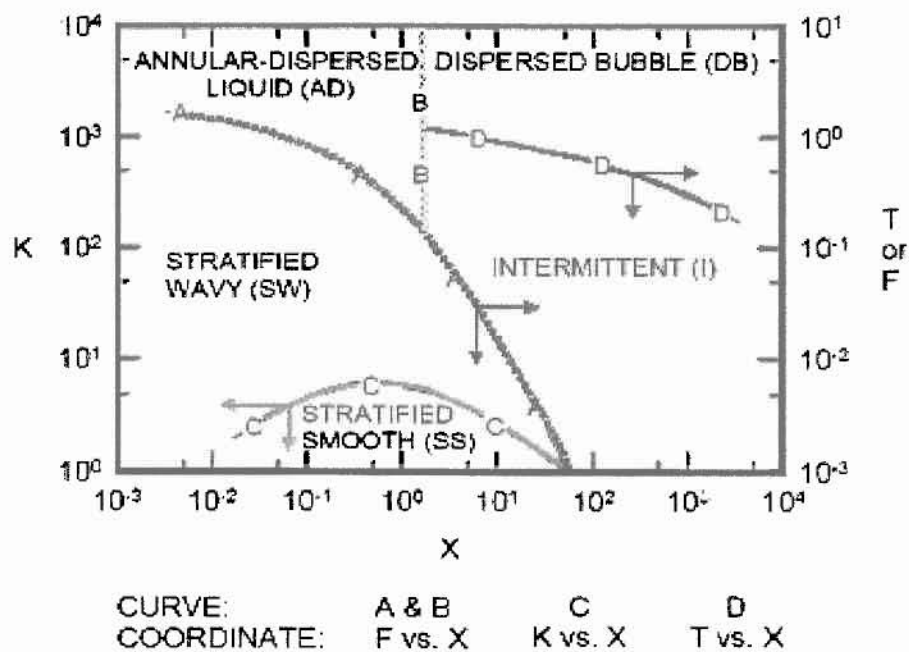
Σχήμα 2.6. Χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό του Baker (1954) όπως τροποποιήθηκε από τον Scott (1963).



Σχήμα 2.7. Εμπειρικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Mandhane et al (1974).

Ο Mukherjee (1979) παρουσίασε χάρτες καθεστώτων ροής για ολόκληρη σειρά κλίσεων ενός αγωγού και πρότεινε εμπειρικούς συσχετισμούς για τα όρια μετάβασης. Μια παρόμοια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε από τους Spedding και Nguyen (1980), οι οποίοι καθόρισαν τους χάρτες καθεστώτων ροής για πειράματα αέρα-νερού σε έναν σωλήνα διαμέτρου 40 mm.

Οι Weisman και Kang (1981) παρουσίασαν δεδομένα για τα συστήματα αέρας-νερό και αέρας-γλυκερίνη σε ελαφρώς κεκλιμένους σωλήνες και για ένα σύστημα ενός συστατικού (φρέον) για μεγαλύτερες γωνίες. Εμπειρικές εξισώσεις προτάθηκαν για όλες τις μεταπτώσεις. Πειράματα πραγματοποιήθηκαν επίσης σε οριζόντιο και ελαφρώς κεκλιμένο σωλήνα στο σύστημα αέρας-νερό από τους Barnea et al (1980). Για τις μεταπτώσεις καθεστώτων ροής σε κεκλιμένους σωλήνες προτάθηκε ένα μοντέλο από τους Barnea et al. (1982) (προς τα κάτω κεκλιμένοι σωλήνες) και Barnea et al. (1985) (ανοδικοί κεκλιμένοι σωλήνες). Αυτά τα μοντέλα είναι επεκτάσεις των προηγούμενων αναπτυγμένων μοντέλων των Taitel και Dukler (1976) για τους οριζόντιους και ελαφρώς κεκλιμένους σωλήνες και των Taitel et al (1980) για την κατακόρυφη προς τα πάνω ροή. Επίσης έγινε σύγκριση πειραματικών δεδομένων στο σύστημα αέρα-νερού με τις προβλέψεις των μοντέλων.

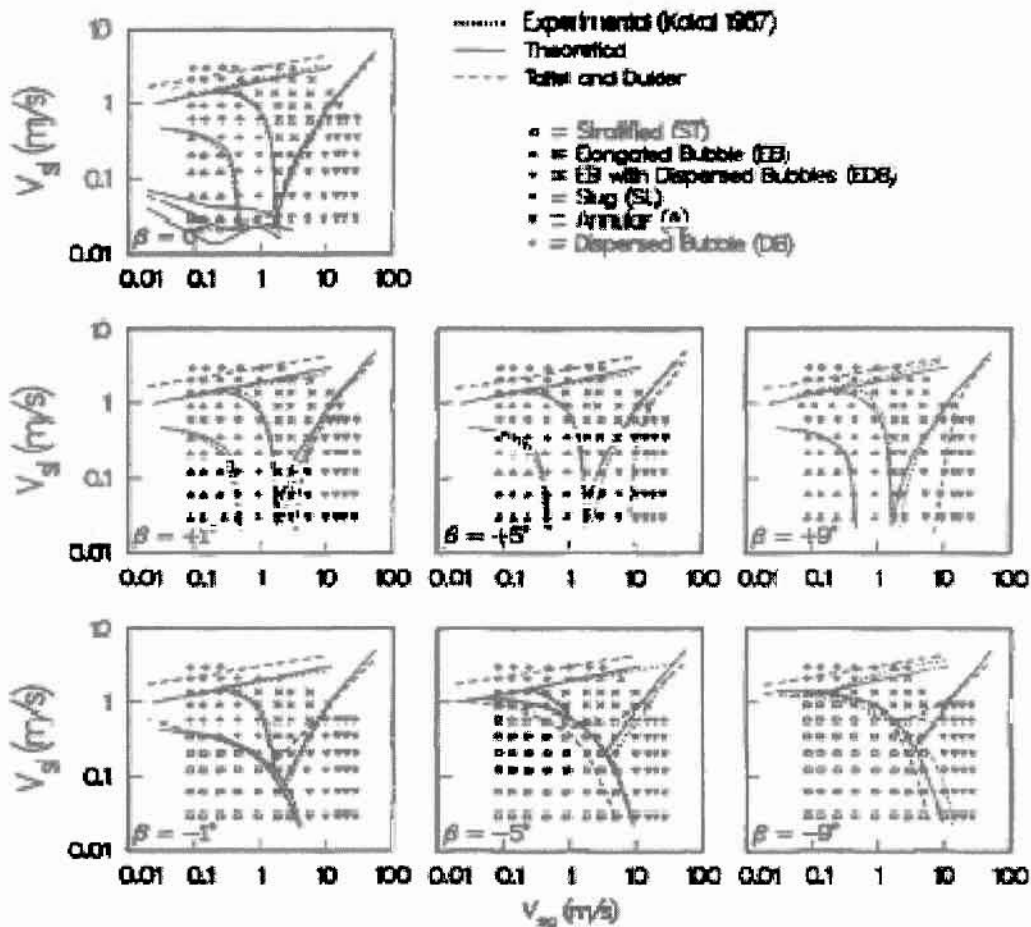


Σχήμα 2.8. Μηχανιστικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Taitel & Dukler (1976),

$$\text{όπου L-M parameter: } X = \left[ \frac{\left( \frac{dP}{dx} \right)_L}{\left( \frac{dP}{dx} \right)_G} \right]^{1/2}, \quad K = \left[ \frac{\rho_G u_{SG}^2 u_{SL}}{(\rho_L - \rho_G) g v_L \cos \alpha} \right]^{1/2}$$

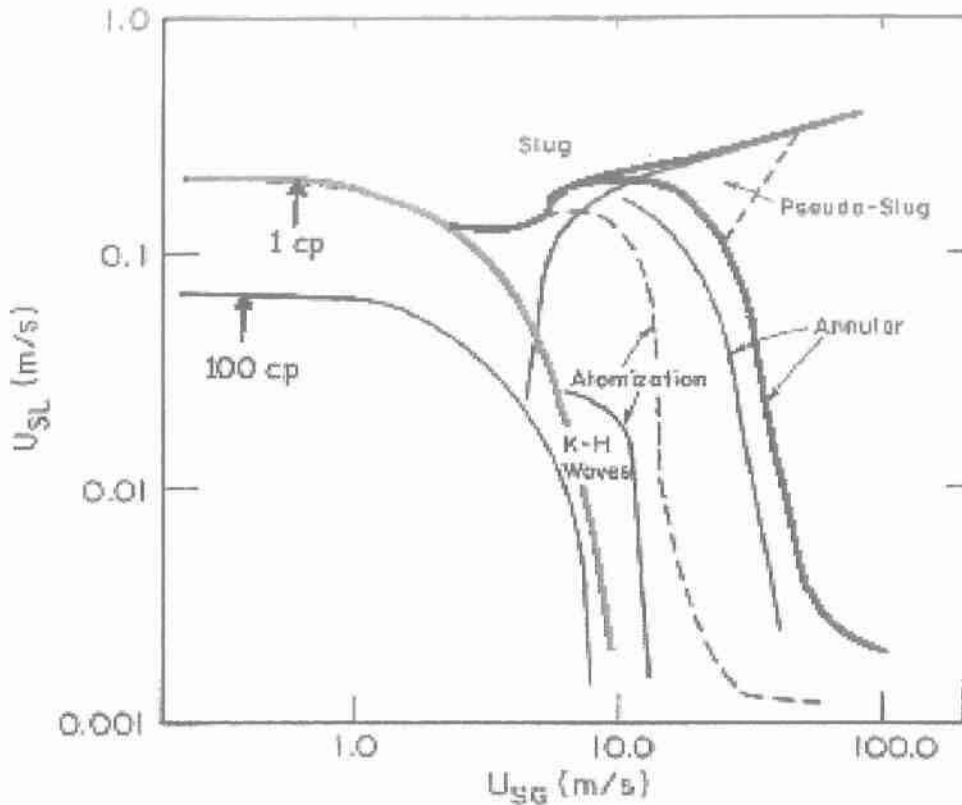
$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)}} \frac{u_{SG}}{\sqrt{Dg \cos \alpha}}, \quad T = \left[ \frac{\left| \frac{dP}{dx} \right|_L}{(\rho_L - \rho_G)g \cos \alpha} \right]^{1/2}$$

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζονται χάρτες καθεστώτων ροής για διάφορες κλίσεις του αγωγού όσον αφορά τον οριζόντιο αγωγό.



Σχήμα 2.9. Χάρτες σχεδίων ροής για διάφορες κλίσεις του σωλήνα σε διάμετρο 25,8 mm

Οι Andritsos & Hanratty (1987) έδειξαν ότι η θεωρία της γραμμικής ευστάθειας μπορεί να δώσει φυσική ερμηνεία στο φαινόμενο της δημιουργίας των κυμάτων, καθώς και να προβλέψει τις συνθήκες όπου παρατηρείται η πρώτη δημιουργία κυμάτων. Στα τέλη της δεκαετίας του '80 οι Andritsos et al. (1989) εξέτασαν την επίδραση του ιξώδους στις μεταβολές από διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10. Χάρτης των Andritsos et al (1989) για τα καθεστάτα ροής σε σύστημα νερό + γλυκερίνη-αέρας σε αγωγό διαμέτρου 9,5 cm.

## 2.5 ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

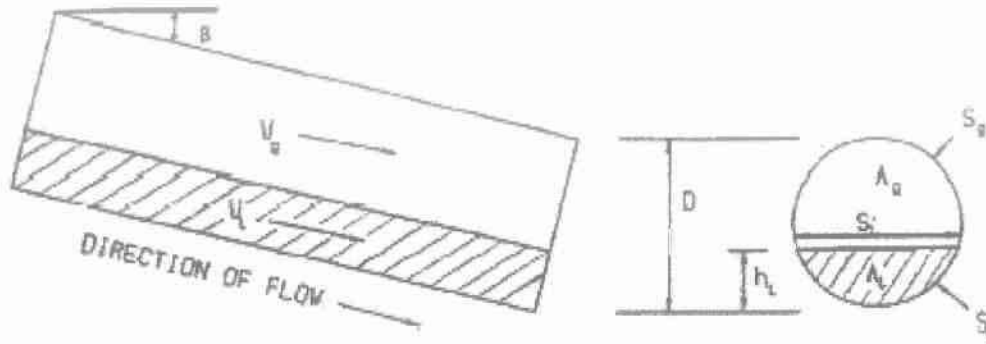
### 2.5.1 ΜΕΤΑΠΤΩΣΗ ΑΠΟ ΣΤΡΩΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΕ ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΡΟΗ

Οι Taitel και Dukler (1976) πρότειναν μια ανάλυση της μετάπτωσης από τη στρωματοποιημένη στη διαλείπουσα ροή. Η ανάλυση είναι βασισμένη στην ισορροπία της διαστρωματωμένης ροής (Σχήμα 3.1). Ένα ισοζύγιο ορμής σε κάθε φάση δίνει:

$$-A_L \frac{\Delta P}{\Delta x} - \tau_L S_L + \tau_i S_i - \rho_L A_L g \sin \theta = 0 \quad (2.5)$$

$$-A_G \frac{\Delta P}{\Delta x} - \tau_G S_G + \tau_i S_i - \rho_G A_G g \sin \theta = 0 \quad (2.6)$$

όπου  $\tau_{wG}$ ,  $\tau_{wL}$ , είναι διατμητικές τάσεις του αέριο και υγρού στο τοίχωμα, αντίστοιχα, και  $\tau_i$  η διεπιφανειακή διατμητική τάση. Το  $S_L$  και το  $S_G$  είναι τα τμήματα της περιμέτρου των σωλήνων σε επαφή με το υγρό και της αέριας φάσης, αντίστοιχα, ενώ  $S_i$  είναι η χορδή που σχηματίζει η διεπιφάνεια.



Σχήμα 2.11. Στρωματοποιημένη ροή σε κεκλιμένο σωλήνα.

Βασισμένοι στη θεωρία αστάθειας Kelvin-Helmholtz, οι Taitel και Dukler (1976) πρότειναν το εξής κριτήριο για τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροής:

$$F_r = (1 - \bar{h}_L) \left[ \frac{\bar{A}_G}{\bar{v}_L^2 \frac{dA_L}{dh_L}} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

όπου  $F_r$  είναι ένας τροποποιημένος αριθμός Froude που ορίζεται ως:

$$F_r = \left( \frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right)^{1/2} \frac{U_{SG}}{\sqrt{Dg \cos \beta}} \quad (2.8)$$

και

$$d\bar{A}_L / d\bar{h}_L = \sqrt{1 - (2\bar{h}_L - 1)^2} \quad (2.9)$$

Οι μεταβλητές της εξίσωσης (2.7) είναι η φαινομενική ταχύτητα αερίου και το πάχος του υγρού  $\bar{h}_L$ .

### 2.5.2 ΜΕΤΑΠΤΩΣΗ ΑΠΟ ΛΕΙΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΗ ΜΕ ΚΥΜΑΤΑ

Όπως αναφέρεται από τον Andritsos (1986), αναφορές στη βιβλιογραφία σχετικά με την παραγωγή των κυμάτων παρουσιάζονται αρχικά από τους Hershman (1960) & Cohen (1964). Ο δεύτερος στην εργασία του παρουσιάζει με λεπτομέρειες το μοντέλο των Miles και Benjamin (Miles, 1957, 1959a, 1962a, 1962b, Benjamin 1959), το οποίο εστιάζεται σε αποτελέσματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της ταχύτητας του αερίου και της επιφάνειας με κύματα ενός υγρού με χαμηλό ιξώδες.

Ο Cohen (1964) ερεύνησε θεωρητικά και πειραματικά την ανάπτυξη των δισδιάστατων και τρισδιάστατων κυμάτων. Ο Craik (1968) προέκτεινε τη δουλειά του



Cohen (1964) για να συμπεριλάβει μεγάλες στιβάδες υγρού. Ο Tatterson (1975) τροποποίησε την ανάλυση του Craik στο να μην καθοριστεί λεπτομερώς η κύρια κατανομή της ταχύτητας. Ο Frederick (1982) επανεξέτασε τα πειραματικά αποτελέσματα των Cohen, Gottifredi & Jameson (1970) χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα για την επιφανειακή τάση.

Ο Miles (1959b) πρότεινε ότι η δημιουργία των κυμάτων σε πολύ παχύρρευστα υγρά είναι αποτέλεσμα της «στατικής» αστάθειας λόγω διακυμάνσεων της πίεσης στην επιφάνεια των κυμάτων. Τροποποίησε την ανάλυση Kelvin-Helmoltz για να συμπεριλάβει διακυμάνσεις στην ταχύτητα του αερίου και το ιξώδες του υγρού. Τόνισε ότι το τροποποιημένο K-H μοντέλο εξηγεί ικανοποιητικά τις αστάθειες σε παχύρρευστα υγρά.

Στην περίπτωση της διαχωρισμένης ροής η ταχύτερη αέρια φάση μεταφέρει ενέργεια στη βραδύτερη υγρή φάση. Η μετάπτωση από λεία σε διαχωρισμένη με κύματα ροή συμβαίνει όταν τα ταχύτητα του αερίου είναι ικανή να προκαλέσει ανάπτυξη των κυμάτων, αλλά χαμηλότερη απ' ότι απαιτείται για την ταχύτερη ανάπτυξη τους που θα προκαλούσε μετάβαση στη διαλείπουσα ή την δακτυλιοειδή ροή.

Το φαινόμενο της ανάπτυξης των κυμάτων είναι σύνθετο και όχι απόλυτα κατανοητό. Είναι γενικά παραδεκτό ότι το κύμα αναπτύσσεται όταν η πίεση που ενεργεί σ' αυτό μπορεί να τις ενισχύσει λόγω ιξώδους. Παρόλα αυτά υπάρχει αμφιβολία σχετικά με τον τρόπο που γίνεται η μεταφορά της ενέργειας.

Οι Taitel & Dukler προτείνουν την ακόλουθη συσχέτιση για την μετάπτωση ανάμεσα στις δυο περιοχές:

$$U_G > \left[ \frac{4\nu_L (\rho_L - \rho_G) g \cos \beta}{s\rho_G U_L} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

όπου  $s$ =συντελεστής «προστασίας» ( $s=0,01$ ).

Η ανίσωση των Taitel & Dukler δεν έχει νόημα για υγρά με υψηλό ιξώδες και κυρίως για υγρά με μεγαλύτερο από 20 cp από την στιγμή που τα 2-D κύματα δεν εμφανίζεται στην περίπτωση αυτή.

Ένα καλύτερο κριτήριο από την προηγούμενη εξίσωση για το ξεκίνημα των ακανόνιστων κυμάτων μεγάλου πλάτους και το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν μικρή επίδραση του ύψους της υγρούς στιβάδας και του ιξώδους του υγρού είναι (Andritsos, 1986):

$$U_{GS} = U_{K-H} \left( \frac{\theta_w}{\theta} \right) \left( \frac{1}{\tan \left( \frac{k_m h}{10} \right)} \right)^{0.1} \cdot \sigma^{-1} \quad (2.11)$$

Ο αδιάστατος αριθμός  $\theta$  χρησιμοποιήθηκε από τον Taylor (1963), λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του ιξώδους, και ορίζεται ως:

$$\theta = \frac{\rho_L \cdot \sigma^2}{\rho_G \mu^2 U_G^2} \quad (2.12)$$



Το  $\theta_w$  είναι η τιμή του  $\theta$  εάν υγρό είναι νερό. Η ταχύτητα  $U_{GS}$  είναι η φαινομενική ταχύτητα του αερίου για το ξεκίνημα των κυμάτων μεγάλου πλάτους και  $\alpha$  το κλάσμα κενού.

### 2.5.3 ΜΕΤΑΠΤΩΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΗ ΡΟΗ ΣΤΗ ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΚΑΙ ΣΤΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗ ΡΟΗ

Σύμφωνα με τους Taitel and Dukler (1976) θεωρείται ότι η **αστάθεια Kelvin-Helmholtz** είναι υπεύθυνη γι' αυτή τη μετάπτωση. Μια σύντομη φυσική ερμηνεία της αστάθειας αυτής είναι: η παρουσία κυμάτων στη διεπιφάνεια προκαλεί τοπική αύξηση της αέριας ταχύτητας στη κορυφή του κύματος και μείωση στον πυθμένα. Έτσι σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli δημιουργείται υποπίεση στη κορυφή. Αν αυτές οι αποσταθεροποιητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις σταθεροποιητικές δυνάμεις της βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης (για μικρά μήκη κύματος), τότε το κύμα μεγαλώνει με αποτέλεσμα η υγρή μάζα να φράξει τη διατομή του αγωγού. Ακολουθώντας την κλασική θεωρία των Kelvin-Helmholtz οι Taitel & Dukler (1976) προτείνουν την παρακάτω σχέση για τη μετάπτωση.

$$U_G > \left(1 - \frac{h}{D}\right) \left[ \frac{g(U_L - U_G)\alpha}{U_G S_i} \right]^{0.5} \quad (2.13)$$

όπου  $h$  είναι το ύψος της υγρής στιβάδας από το πυθμένα αγωγού διαμέτρου  $D$  και  $S_i$  είναι το πλάτος της διεπιφάνειας.

$$\text{Οι όροι της εξίσωσης } \psi = \frac{\sigma_w}{\sigma} \left[ \frac{\mu_L}{\mu_w} \left( \frac{\rho_w}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3} \text{ μπορούν να αδιαστατοποιηθούν}$$

και να δώσουν μία σχέση μεταξύ της παραμέτρου Lockhart-Martinelli  $X$  και του τροποποιημένου αριθμού Froude,  $F$ , όπως δίνεται στο (Σχήμα 2.8 στους χάρτες ροής). Η παράμετρος  $X$  ορίζεται ως ο λόγος της πτώσης πίεσης της αέριας φάσης αν έρεε μόνη της στον αγωγό ως προς την αντίστοιχη της υγρής φάσης, ενώ ο αριθμός Froude δίνεται ως εξής:

$$Fr = \frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \frac{U_{GS}^2}{D g \cos \beta} \quad (2.14)$$

όπου  $\beta$  η κλίση του αγωγού, για μικρές κλίσεις από το οριζόντιο επίπεδο. Οι Taitel και Dukler υποστηρίζουν ότι αν η υγρή στιβάδα είναι μεγαλύτερη από το μισό της διαμέτρου τότε υπάρχει μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η μετάπτωση οδηγεί στην δακτυλιοειδή ροή. Το δεύτερο φαίνεται αρκετά αυθαίρετο αν αναλογιστεί κανείς τη τόσο διαφορετική κατανομή του ρευστού στην διαχωρισμένη και στη δακτυλιοειδή ροή και ότι η δακτυλιοειδής ροή είναι αποτέλεσμα ενός συνδυασμού μηχανισμών, μεταξύ των οποίων η εναπόθεση σταγονιδίων, η εξάπλωση των κυμάτων στα τοιχώματα του αγωγού και η δευτερεύουσα ροή του αερίου.

Αν και η προσπάθεια των Taitel και Dukler είναι αξιόλογη, εν τούτοις αρκετά πειραματικά δεδομένα δεν συμφωνούν με τις προβλέψεις που δίνει το μοντέλο τους. Μερικές από τις ανεπάρκειες του μοντέλου αυτού είναι:

- (i) Το μοντέλο προβλέπει μεγάλη επίδραση του ιξώδους του υγρού στη μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή, πράγμα που δεν έχει επαληθευτεί σε πειράματα άλλων ερευνητών.
- (ii) Όπως γίνεται φανερό, από τον αριθμό  $F$ , η μετάπτωση στη δακτυλιοειδή ροή φαίνεται σαν συνάρτηση της διαμέτρου του αγωγού, σε αντίθεση με πειραματικά δεδομένα που δείχνουν ελάχιστη εξάρτηση.

Σύμφωνα με τους Andritsos et al (1989) αυτό οφείλεται στην υπόθεση ότι η αστάθεια προέρχεται από διαταραχές μεγάλου μήκους κύματος. Οι τελευταίοι μάλιστα υποστηρίζουν ότι η μετάπτωση που προκύπτει για  $(h/D) < 0,5$  οδηγεί στα λεγόμενα Kelvin-Helmholtz κύματα και όχι σε δακτυλιοειδή ροή.

## 2.6. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων διασπαστικής ροής αερίου-υγρού στα τελευταία 40 χρόνια στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που βασίζονται σε απλοποιητικές παραδοχές για την κατανομή και τον τρόπο κίνησης των δύο φάσεων. Τέτοια μοντέλα είναι το μοντέλο της ομογενούς και το μοντέλο της διαχωρισμένης ροής.

Στο πρώτο μοντέλο γίνεται η υπόθεση ότι οι δύο φάσεις αναμιγνύονται καλά και ρέουν με την ίδια πραγματική ταχύτητα,  $U_G = U_L$ . Αντίθετα, στη διαχωρισμένη ροή οι δύο φάσεις κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Και στα δύο μοντέλα, οι δύο φάσεις θεωρούνται σε εμβολική ροή και αγνοούνται φαινόμενα κατανομής ταχυτήτων στη διατομή της ροής. Είναι διαισθητικά φανερό ότι το ομογενές μοντέλο μπορεί να περιγράψει τη ροή φυσαλίδων ή σταγονιδίων, ενώ το διαχωρισμένο μοντέλο είναι καταλληλότερο για την περιγραφή ροών όπως της στρωματωμένης και της δακτυλιοειδούς.

Το κλάσμα κενού μπορεί να υπολογιστεί και για τα δύο μοντέλα από απλά ισοζύγια μάζας.

Για την αέρια φάση ισχύει:

$$AG_g = AGx = \rho_g u_g A_g = \rho_g u_g \alpha A \quad (2.15)$$

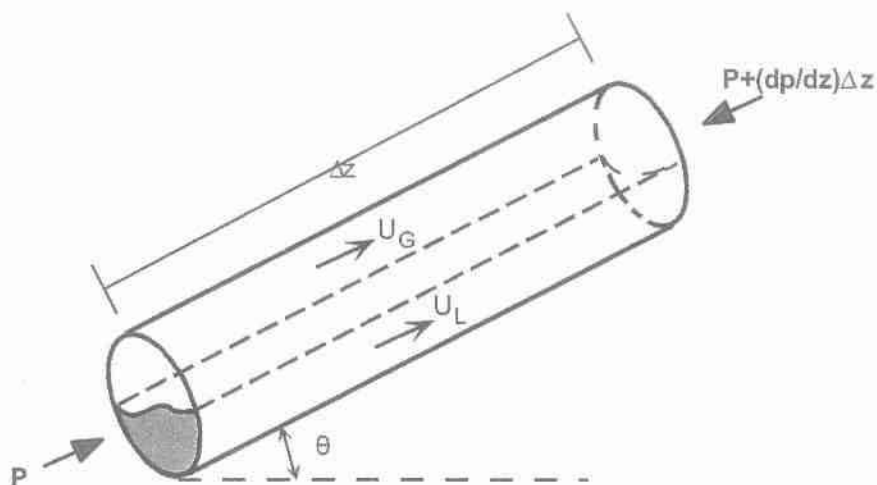
και για την υγρή

$$AG_l = AG(1-x) = \rho_l u_l A_l = \rho_l u_l (1-\alpha)A \quad (2.16)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις (2.15) και (2.16) προκύπτει

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left( \frac{u_g \rho_g (1-x)}{u_l \rho_l x} \right)} \quad (2.17)$$

Η υπόλοιπη ανάλυση διαφοροποιείται ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Αντιπροσωπευτικός όγκος ελέγχου για τα ισοζύγια μάζας και ορμής των δύο μοντέλων φαίνεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12. Όγκος ελέγχου για το ισοζύγιο ορμής στο ομογενές και το διαχωρισμένο μοντέλο διφασικής ροής.

Όσον αφορά τον πειραματικό προσδιορισμό των βασικών παραμέτρων, το κλάσμα κενού μετράται με διάφορους τρόπους. Μέση τιμή μπορεί να ληφθεί με σύστημα δύο βανών ταχείας απόκρισης, ενώ λεπτομερείς τοπικές τιμές λαμβάνονται με μεθόδους ηλεκτρικής αγωγιμομετρίας ή μέτρησης διαπερατότητας ακτίνων γάμα. Η ολική πτώση πίεσης μετράται με κλασικά ή ηλεκτρονικά μανόμετρα και η συνεισφορά των τριβών (που είναι συχνά η κυρίαρχη) υπολογίζεται αφαιρώντας τις καλύτερες εκτιμήσεις για την πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης και λόγω βαρύτητας.

### 2.6.1 ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το ομογενές μοντέλο (homogeneous model) θεωρεί την ροή των δυο φάσεων σαν ένα ψευδορευστό το οποίο έχει τις μέσες ιδιότητες του μίγματος και υπακούει στις εξισώσεις που διέπουν τη μονοφασική ροή. Σε αυτό το μοντέλο υποτίθεται ότι οι δύο φάσεις αναμιγνύονται καλά και επομένως ρέουν στις πραγματικές ταχύτητες.

Οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται το μοντέλο είναι οι παρακάτω:

- Θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των δυο φάσεων του διφασικού μίγματος,
- Ίσες ταχύτητες αερίου και υγρού και
- Χρήση κατάλληλου συντελεστή τριβής για τη διφασική ροή.

Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν την μονοδιάστατη ομογενή ροή έχουν την παρακάτω φόρμα:

$$\text{Συνέχειας: } m = A \bar{\rho} \bar{u} = \text{σταθ.} \quad (2.18)$$

$$\text{Ορμής: } m \frac{du}{dz} = -A \frac{dp}{dz} - P \tau_w - A \rho g \cos \vartheta \quad (2.19)$$

$$\text{Ενέργειας: } \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} = m \frac{d}{dz} \left( h + \frac{\bar{u}^2}{2} + gz_g \right) \quad (2.20)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις  $\bar{\rho}$  και  $\bar{u}$  είναι η μέση πυκνότητα και ταχύτητα του ομογενούς ρευστού,  $P$  η περίμετρος του σωλήνα,  $\tau_w$  η μέση τιμή της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα,  $\vartheta$  η κλίση του σωλήνα ως προς την οριζόντιο άξονα και  $z_g$  η κατακόρυφη απόσταση των άκρων του σωλήνα. Για οριζόντιο σωλήνα  $\vartheta = z_g = 0$ .

### 2.6.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το διαχωρισμένο μοντέλο από το 1944, όταν οι Lockhart & Martinelli δημοσίευσαν την μελέτη τους σε διφασική ροή, εξελίσσεται συνεχώς. Η διαφορά του με το ομογενές είναι πως δέχεται την ύπαρξη δυο φάσεων όπου υγρό και αέριο ρέουν ξεχωριστά έχοντας σταθερή ταχύτητα. Στην περίπτωση όμως όπου οι ταχύτητες είναι ίσες το μοντέλο μας απλοποιείται σε αυτό του ομογενούς.

Οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται είναι:

- Σταθερές, αλλά όχι υποχρεωτικά ίσες ταχύτητες για την υγρή και αέρια φάση.
- Θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των φάσεων του διφασικού μίγματος και
- Χρήση εμπειρικών σχέσεων που συσχετίζουν τους πολλαπλασιαστές ( $\Phi^2$ ) και το κλάσμα κενού ( $\alpha$ ) με τις ανεξάρτητες μεταβλητές ροής.

Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν τη μονοδιάστατη διφασική ροή είναι:

$$\text{Συνέχειας: } m = m_G - m_L = \text{σταθ} \quad (2.21)$$

$$\text{Ορμής} \left\{ \begin{array}{l} -\frac{dp}{dz} \bar{\alpha} \frac{\pi d^2}{4} - \tau_w \delta z \pi d - \frac{\pi d^2}{4} \delta z [\alpha \rho_v + (1-\alpha) \rho_l] g \sin \theta = \\ \frac{\pi d^2}{4} \frac{d}{dz} [\alpha \rho_g u_g^2 + (1-\alpha) \rho_l u_l^2] \delta z \end{array} \right. \quad (2.22)$$

$$\text{Ενέργειας: } \frac{1}{m} \left( \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} \right) = \frac{d}{dz} [x h_g + (1-x) h_L] + \frac{d}{dz} \left[ x \frac{v_G^2}{2} + (1-x) \frac{u_L^2}{2} \right] \quad (2.23)$$

Η γενική εξίσωση για το κλάσμα κενού  $\alpha$  είναι:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left( \frac{u_g}{u_l} \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)} \quad (2.24)$$

με τον λόγο ταχυτήτων (αέρα/υγρού)  $u_g / u_l$ , που καλείται συχνά λόγος ταχύτητας  $S$  ολίσθησης. Έτσι, για την ομογενή ροή το  $S$  είναι ίσο με τη μονάδα. Για τη διαχωρισμένη ροή το  $S$  δεν είναι ίσο με την μονάδα: είναι συνήθως μεγαλύτερο από το ένα, μια που το αέριο κινείται γρηγορότερα από την υγρή φάση.

## 2.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΩΝ

### 2.7.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

Στα τέλη της δεκαετίας του εξήντα πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την μοντελοποίηση της στρωματωμένης ροής.

Το 1972 ο Johannessen ήταν ο πρώτος που παρουσίασε μια θεωρία για τη χρήση των παραμέτρων L-M στη στρωματωμένη ροή.

Το κύριο μειονέκτημα της ανάλυσης του ήταν ότι δεν έλαβε υπ' όψιν την διεπιφανειακή διατμητική τάση. Αργότερα το 1976 οι Taitel & Dukler επέκτειναν το μοντέλο του Johannessen εισάγοντας και τη διεπιφανειακή διατμητική τάση αυτή την φορά.

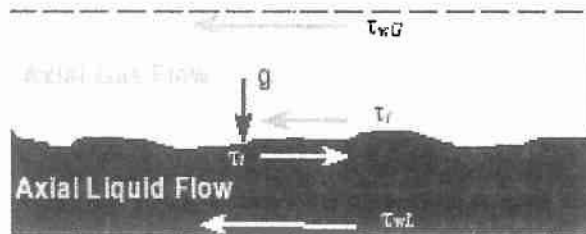
Ο καθορισμός της σταθερότητας του στρωματοποιημένου καθεστώτος ροής απαιτεί τον υπολογισμό του πάχους υγρού, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις που περιγράφουν την ισορροπία των δύο φάσεων, όπως έγινε από τους Taitel & Dukler

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ορμής για τις δυο φάσεις ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$-A_L \frac{\Delta P}{\Delta x} - \tau_{wL} S_L + \tau_i S_i - \rho_L A_L g \sin \theta = 0 \quad (2.25)$$

$$-A_G \frac{\Delta P}{\Delta x} - \tau_{wG} S_G + \tau_i S_i - \rho_G A_G g \sin \theta = 0 \quad (2.26)$$

όπου  $A$  η επιφάνεια κάθε φάσης.  $\tau_{wG}$ ,  $\tau_{wL}$ , είναι διατμητικές τάσεις το αέριο, υγρό αντίστοιχα και  $\tau_i$  η διεπιφανειακή διατμητική τάση. Το  $S_L$  και το  $S_G$ , είναι οι περίμετροι σωλήνων σε επαφή με το υγρό και της αέριας φάσης, αντίστοιχα, ενώ  $S_i$  είναι η ενδιάμεση περίμετρος.



Σχήμα 2.13. Στρωματωμένη ροή

### 2.7.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑΣ ΡΟΗΣ

Ως διαλείπουσα ροή εδώ εννοείται η ροή με υγρές μάζες (slugs) και η ροή με επιμήκεις φυσαλίδες (plugs). Χαρακτηρίζεται από την εναλλαγή των υγρών μαζών που ακολουθούνται από τις επιμήκεις φυσαλίδες του αερίου. Οι υγρές μάζες μπορούν

να περιέχουν και διασκορπισμένες φυσαλίδες, ενώ κάτω από τις φυσαλίδες αερίου υπάρχει συνήθως μια υγρή στιβάδα.

Όπως αναφέρεται από τους Petalas and Aziz (2000), μετάπτωση από τη ροή με φυσαλίδες στη διαλείπουσα ροή εμφανίζεται όταν το κλάσμα υγρού στο «slug» υπερβαίνει την τιμή που αντιστοιχεί στην μέγιστη ογκομετρική πυκνότητα των διασκορπισμένων φυσαλίδων. Ο ίδιος μηχανισμός μπορεί να εμφανιστεί για χαμηλές παροχές υγρού όταν το υγρό δεν επαρκεί για τη δημιουργία των «slugs». Για αυτή την περίπτωση, ορίζεται ως κριτήριο μετάπτωσης (γραμμή 14 στον Σχήμα 4.7) η σχέση

$$E_L : 0.24 \tag{2.27}$$

Το κλάσμα όγκου του υγρού που υπολογίζεται για τη ροή των υγρών μαζών συζητείται παρακάτω. Αν και δεν αναφερόμαστε χωριστά για το καθεστώς ροής με plugs, η ροή αυτή ορίζεται ως το τμήμα της διαλείπουσας ροής για την οποία η υγρή μάζα δεν περιέχει διασκορπισμένες φυσαλίδες. Αυτή ο ορισμός παρουσιάζεται με αυθαίρετο τρόπο για την περιοχή όπου ισχύει:

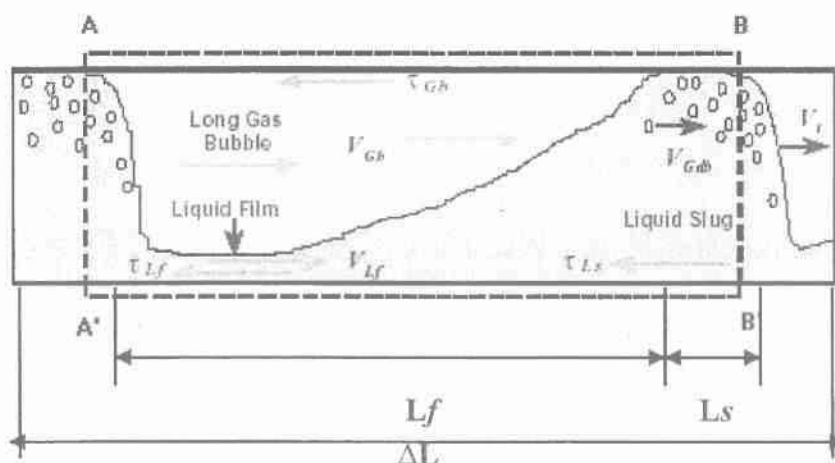
$$E_L \geq 0.90 \tag{2.28}$$

Το κλάσμα όγκου του υγρού μπορεί να υπολογιστεί γράφοντας ένα συνολικό ισοζύγιο της μάζας του υγρού σε ένα τμήμα υγρών μαζών-φυσαλίδων. Υποθέτοντας ότι η ροή είναι ασυμπίεστη και ότι το πάχος της υγρής στιβάδας είναι ομοιόμορφο προκύπτει ότι:

$$E_L = \frac{E_{Ls} V_i - V_{Gdb} (1 - E_{Ls}) - V_{SG}}{V_i} \tag{2.29}$$

όπου το  $V_{Gdb}$  αντιπροσωπεύει την ταχύτητα των διασκορπισμένων φυσαλίδων,  $V_i$  είναι η ταχύτητα του slug, και  $E_{Ls}$  είναι το κλάσμα όγκου του υγρού στο slug, η οποία δίνεται από τη σχέση

$$E_{Ls} = \frac{1}{1 + \left( \frac{V_m}{8.66} \right)^{1.39}} \tag{2.30}$$



Σχήμα 2.14. Διαλείπουσα ροή (slug flow)



## **2.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΣΤΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ**

Η μεταπτυχιακή εργασία του κ. Σαμαντά που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας είχε ως σκοπό την πειραματική μελέτη της ευστάθειας της ροής υγρού υμένα συναρτήσει του πλάτους του καναλιού ροής. Συγκεκριμένα μελετήθηκε πως επηρεάζεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, δηλαδή ο αριθμός Reynolds στον οποίο η ροή μεταπίπτει από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή, από τη μείωση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας του ανοιχτού αγωγού. Η επίδραση του πλάτους στη ροή υγρού υμένα αποδείχθηκε ότι επηρεάζει την ευστάθεια της ροής. Και συγκεκριμένα, η μείωση του πλάτους είναι αυτή που δρα σταθεροποιητικά στη ροή καθώς όσο μικρότερο είναι το πλάτος του καναλιού τόσο μεγαλύτερος γίνεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για την μετάβαση.

Στην περίπτωση λοιπόν του κυλινδρικού αγωγού στον οποίο θα πραγματοποιηθεί το πείραμά μας, όπου η γεωμετρία του και τα υπόλοιπα στοιχεία του θα αναφερθούν στη συνέχεια, θα πρέπει να πάρουμε αποτελέσματα από τα οποία να διαπιστωθεί η ευστάθεια του συστήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

#### 3.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ

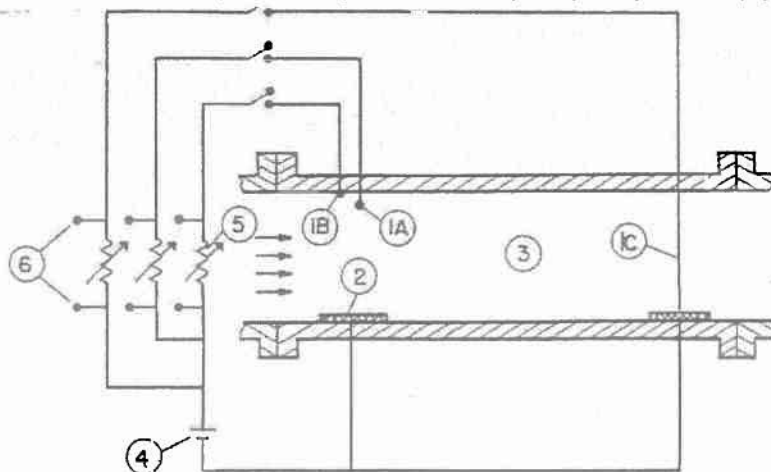
##### 3.1.1 ΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

Οι οπτικές παρατηρήσεις σε ένα διαφανές τμήμα του αγωγού είναι ο απλούστερος τρόπος ανίχνευσης των μορφών της διφασικής ροής. Στην περίπτωση ταχύτατα εξελισσομένων φαινομένων, όπου η απλή παρατήρηση δεν είναι αρκετή, η χρήση φωτογραφικής μεθόδου μεγάλης ταχύτητας (high-speed photography) ή η φωτογράφιση αξονικής διατομής (axial view photography) είναι επιβεβλημένη (Hewitt & Roberts, 1969).

Η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που είναι αδύνατη η οπτική επαφή με το εσωτερικό του αγωγού (π.χ. αδυναμία χρήσης διαφανούς σωλήνα λόγω υψηλής πίεσης).

##### 3.1.2 ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Χρησιμοποιείται μόνον όταν η υγρή φάση είναι (ή μπορεί να γίνει) αγωγίμη. Βασίζεται στη χρήση μετρητικού (probe), που όταν βρίσκεται σε επαφή με την υγρή φάση δίνει υψηλό σήμα εξόδου ενώ σε επαφή με την αέρια δίνει σχεδόν μηδενικό. Για τον προσδιορισμό των καθεστώτων ροής έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές (Barnea et al, 1980) κατάλληλοι συνδυασμοί ηλεκτροδίων (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 3.1. Διάταξη ανίχνευσης καθεστώτων ροής (Barnea et al., 1980).



### 3.2 ΠΑΧΟΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΙΒΑΔΑΣ

Στα προηγούμενα χρόνια έγινε μια σοβαρή προσπάθεια να ερευνηθούν οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της ροής υγρής στιβάδας πάνω σε οριζόντιο στέρεο τοίχωμα. Ιστορικά οι ερευνητικές προσπάθειες ξεκίνησαν με τη δημιουργία εμπειρικών συσχετισμών, αλλά σύντομα στράφηκαν στη μελέτη των φαινομένων που έχουν σαν αποτέλεσμα των σχηματισμό κυμάτων και των μηχανισμών που τροφοδοτούν την υγρή στιβάδα αντισταθμίζοντας τις απώλειες υγρού λόγω βαρύτητας. Το πάχος της υγρής στιβάδας και η κατανομή του στην περιφέρεια του αγωγού είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που παίζει μεγάλο ρόλο στη διασπαστική ροή. Μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της είναι να εκφράζει την ταχύτητα του υγρού η το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει το αέριο η το υγρό μέσα στον σωλήνα. Μπορεί ακόμη να δώσει στοιχεία για την πτώση πίεσης και την συνολική επιφάνεια εναλλαγής του υγρού ή του αερίου μέσα στο σωλήνα της διασπαστικής ροής.

Ο πρώτος εμπειρικός συσχετισμός που προτάθηκε για την κατανομή του πάχους της υγρής στιβάδας είναι αυτός του McManus (1961). Ο συσχετισμός αυτός προέκυψε από πειραματικές μετρήσεις σε οριζόντιους αγωγός διαμέτρου 2,54 cm, 5,08 cm και 7,62 cm για μίγματα νερού και διαλυμάτων γλυκερίνης + νερού με αέρα και δίνεται από την σχέση:

$$\frac{h}{D} = e^K \frac{(Re_{sL})^a}{(Re_{sG})^b} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^c \left( \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^d \quad (3.1)$$

όπου,  $Re_{sG}$ ,  $Re_{sL}$  είναι ο αριθμός Reynolds αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα.  
 $\rho_G$ ,  $\rho_L$  είναι η πυκνότητα αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα.  
 $\mu_G$ ,  $\mu_L$  είναι το δυναμικό ιξώδες (dynamic viscosity) αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα.

Οι εκθέτες  $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  προσδιορίζονται εμπειρικά και εξαρτώνται από τις παροχές των δυο φάσεων.

Σημαντικός είναι ο εμπειρικός συσχετισμός του Martinelli για χαμηλές πιέσεις και οριζόντια διασπαστική ροή. Η εξίσωση που παρουσίασε είναι:

$$\alpha = (1 + x^{0.8})^{-0.378} \quad (3.2)$$

όπου  $\alpha$  το κλάσμα κενού και  $x$  κάποιος παράγοντας ροής. Ανάλογα με το είδος της ροής, το κλάσμα κενού μπορεί να συσχετιστεί με το πάχος της υγρής στιβάδας.

Οι Laurinat et al (1984) κάνοντας πειράματα σε αγωγούς 2,54 cm και 5,08 cm με νερό και αέρα την τροποποίησαν κατάλληλα και συσχέτισαν τον παράγοντα ροής  $F_H$  (flow factor) με δεδομένα της μέσης τιμής  $\langle h \rangle$  του πάχους της υγρής στιβάδας:

$$\frac{\langle h \rangle}{D} = \frac{6.59 F_L}{[2.3^5 + (90 F_H)^5]^{0.2}} \quad (3.3)$$

όπου

$$F_H = \frac{\gamma}{\text{Re}_{SG}^{0.9}} \frac{\mu_L}{\mu_G} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \quad (3.4)$$

### 3.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΧΟΥΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΙΒΑΔΑΣ

Οι μέθοδοι και οι τεχνικές μετρήσεων για την μέτρηση πάχους στιβάδας όπως εμφανίζονται στη βιβλιογραφία, χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- i. Άμεσες μέθοδοι και
- ii. Έμμεσες μέθοδοι

#### i) Άμεσες μέθοδοι

Ως άμεσες μέθοδοι χαρακτηρίζονται αυτές που χρησιμοποιούν κατάλληλα μικρόμετρα σε απευθείας επαφή με το υγρό. Τέτοια μέθοδο χρησιμοποίησε στο παρελθόν ο Kirkdride (1934) και άλλοι. Όταν εφαρμόζεται προσεκτικά και με ακρίβεια είναι χρήσιμη για τιμές πάχους σε στρωτή ροή χωρίς κύματα, όταν όμως αρχίσουν οι κυματισμοί τότε εισάγει σφάλμα. Μια τροποποιημένη εφαρμογή είναι αυτή που μια λεπτή βελόνα στηριγμένη με μικρόμετρο τοποθετείται κατάλληλα.

#### ii) Έμμεσες μέθοδοι

Επιγραμματικά αναφέρουμε τις παρακάτω μεθόδους:

- Μέθοδος αποχέτευσης η κατακράτησης
- Φωτογραφίες σκιών
- Ραδιενεργοί ιχνηθέτες
- Μέθοδος εξισορροπητικού υγρού
- Φωτομετρικές μέθοδοι-Μέθοδοι οπτικής παρεμβολής
- Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης και ηλεκτρικής χωρητικότητας (αγωγιμομετρική μέθοδος)

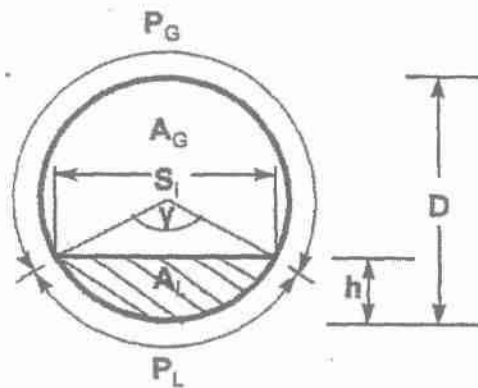
#### 3.2.1.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟ

Για την μέτρηση της υγρής στιβάδας, χρησιμοποιήθηκε μια κατάλληλα βαθμονομημένη «μεζούρα» για τις περιοχές λεία διαχωρισμένη, διαχωρισμένη με δισδιάστατα κύματα και κύματα μεγάλου πλάτους. Αφού μετρήσαμε την υγρή περιφέρεια του αγωγού με τη μεζούρα, μετατρέψαμε τα αποτελέσματα σε ύψος υγρής στιβάδας με του παρακάτω τύπους.

$$P_t = \frac{\pi}{180^\circ} r \cdot \gamma \quad (3.5)$$

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left[ 1 - 2 \left( \frac{h}{D} \right) \right] \quad (3.6)$$

$$\frac{h}{D} = \frac{1 - \cos \left( \frac{\gamma}{2} \right)}{2} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.2. Γεωμετρία υπολογισμού του υγρού ύψους

$$\frac{A_L}{A} = \frac{1}{2\pi} (\gamma - \sin \gamma) \quad (3.8)$$

$$\frac{A_G}{A} = 1 - \frac{A_L}{A} \quad (3.9)$$

$$\frac{S_i}{D} = \sin \left( \frac{\gamma}{2} \right) \quad (3.10)$$

### 3.2.1.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Το ύψος των κυμάτων και το πάχος της υγρής στιβάδας στην διφασική ροή μετρούνται με ειδική αγωγιμομετρική μέθοδο. Η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ των δύο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσά τους. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον Swanson (1966) και αργότερα από τον Hanratty και τους συνεργάτες του. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάμεσα σε δύο σύρματα κάθετα στη διεύθυνση της ροής αγωγίμου ρευστού που εκτείνεται στο άπειρο προς όλες τις κατευθύνσεις, δίνεται από τη σχέση :

$$C = \pi h \gamma / \ln ((D + (D^2 - d^2)^{0.5})/d) \quad (3.11)$$

- Όπου C η ηλεκτρική αγωγιμότητα (S)
- h το πάχος της υγρής στιβάδας (m)
- $\gamma$  η ειδική αγωγιμότητα του ρευστού (S/m)
- D η απόσταση των συρμάτων (m)
- D η διάμετρος των συρμάτων (m)

Για λεπτά πάχη της υγρής στιβάδας προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ της αγωγιμότητας που μετριέται και τους πάχους είναι γραμμική. Η σχέση μεταξύ αγωγιμότητας και πάχους της στιβάδας βρίσκεται ύστερα από κατάλληλη βαθμονόμηση της μετρητικής διάταξης.

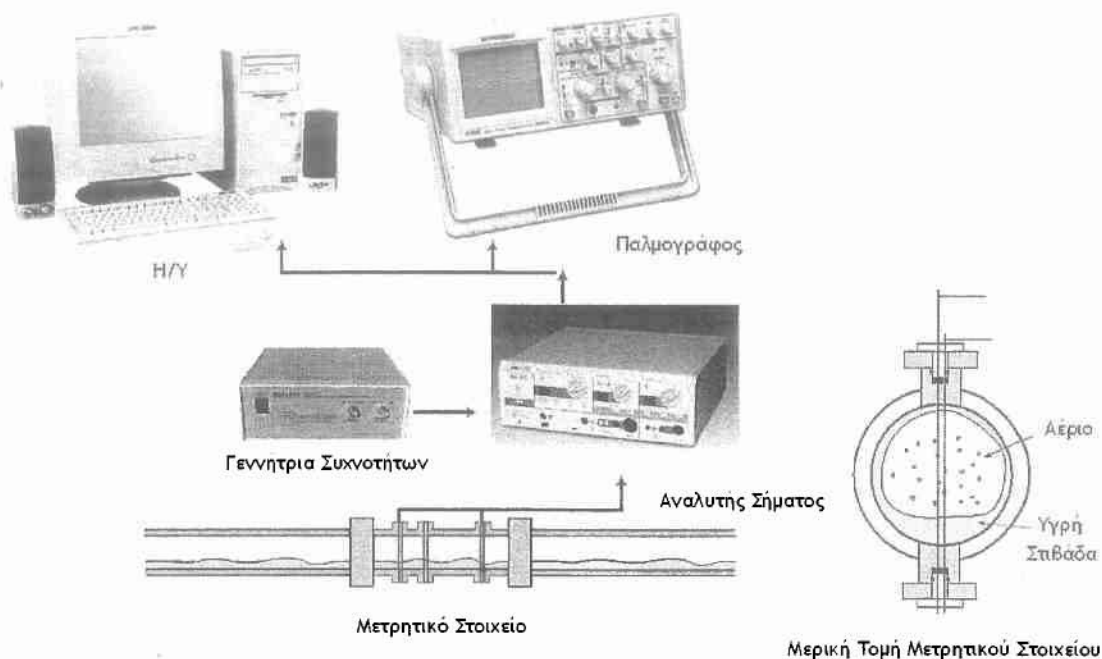
Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας με τη αγωγιμομετρική τεχνική, ενώ σε κάθε μετρητικό υπάρχουν 3 ζεύγη παράλληλων συρμάτων που μετράνε το ύψος της υγρής στιβάδας κάθε φορά. Κάθε ζεύγος συρμάτων είναι κατασκευασμένο από μεταλλικά ανοξείδωτα σύρματα (chromel) διαμέτρου 0.4 mm που απέχουν μεταξύ τους 3 mm.

Το μετρητικό (probe) τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές που μετρούνται στα άκρα μιας μικρής αντίστασης (50  $\Omega$ ) τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή.

Ο αναλυτής που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία, σχεδιάστηκε αρχικά στο Πανεπιστήμιο του Illinois (Andritsos, 1986) και βελτιώθηκε στο εργαστήριό μας. Αποτελείται από ένα διαφορικό ενισχυτή, ο οποίος ενισχύει τις πολύ μικρές μεταβολές της τάσης (μερικά mV) και το τμήμα αποδιαμόρφωσης και φιλτραρίσματος του σήματος. Η εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 25 kHz, που τροφοδοτείται στον αναλυτή, είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, δηλαδή η μεταβολή του πλάτους της αντιστοιχεί στις μεταβολές της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Επομένως, η πληροφορία που μας ενδιαφέρει βρίσκεται στη μορφή της περιβάλλουσας των κορυφών της εναλλασσόμενης τάσης.

Η συνεχής αυτή τάση με τη βοήθεια μιας κάρτας ATD ψηφιοποιείται και αποθηκεύεται στον υπολογιστή. Ηλεκτρικό κύκλωμα εξασφαλίζει στην έξοδο του συνεχή τάση απαλλαγμένη από την υψηλή συχνότητα του φορέα και ανάλογη των μεταβολών του πάχους της υγρής στιβάδας.

Για τη βαθμονόμηση του ζεύγους των παράλληλων συρμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ειδική διάταξη, παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκε με τον τρόπο που επεξηγείται λεπτομερώς στη συνέχεια στην ενότητα 3.4.2.



Σχήμα 3.3 Μετρητικό στοιχείο ζεύγους παράλληλων συρμάτων και η σύνδεση με τον αναλυτή σήματος

### 3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τις ανάγκες αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, αλλά και για άλλες εργασίες στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών αναβαθμίστηκε υπάρχον σύστημα μελέτης διαφασικών ροών διαμέτρου 0,025 m. Η αναβάθμιση περιελάμβανε αλλαγή της θέσης του συστήματος, επιμήκυνση του αγωγού στα 12.5 m, και δυνατότητα του συστήματος να αλλάζει κλίση κατά  $\pm 3^\circ$ . Σχηματική παράσταση της διάταξης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4. Το κύριο μέρος της διάταξης μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η διαφασική ροή αποτελείται από τμήματα Plexiglas με εσωτερική διάμετρο 2,4 cm. Ο αγωγός περιλαμβάνει το τμήμα εισόδου, το τμήμα ανάπτυξης της ροής, το τμήμα μετρήσεων και το τμήμα εξόδου. Τα τμήματα συνδέονται με φλάντζες και έτσι μας δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης και εναλλαγής των διαφόρων μετρητικών διατάξεων στο σύστημα. Ιδιαίτερη φροντίδα δόθηκε στις ενώσεις των τμημάτων του σωλήνα, για να μην υπάρχει ανωμαλία στη ροή. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ελαστικά δακτυλίδια (o-rings), τοποθετημένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το διάκενο μεταξύ δυο σωλήνων.

Το τμήμα ανάμιξης των δυο φάσεων είναι ένα απλό «Υ» όπου οι δύο φάσεις, αέρας και νερό, εισάγονται υπό γωνία  $-35^\circ$ ,  $+35^\circ$  ως προς την οριζόντια. Η διάταξη περιλαμβάνει εκτός των άλλων δύο test section τους σχήματος 3.3 για την μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο και την ταχύτητα των κυμάτων της υγρής στιβάδας. Τα συρματάκια συνδέονται με τον αναλυτή που περιγράφηκε πιο πάνω και με την χρήση του προγράμματος LabView καταγράφουμε



το σήμα για κάθε καθεστώς ροής. Η απόσταση μεταξύ του τμήματος ανάμιξης και των τμημάτων όπου είναι τοποθετημένα τα δύο μετρητικά στοιχεία είναι  $x=2.0\text{m}$  για το πρώτο και  $x=8.4\text{m}$  για το δεύτερο.

Η επιλογή του Plexiglas έγινε για δυο λόγους:

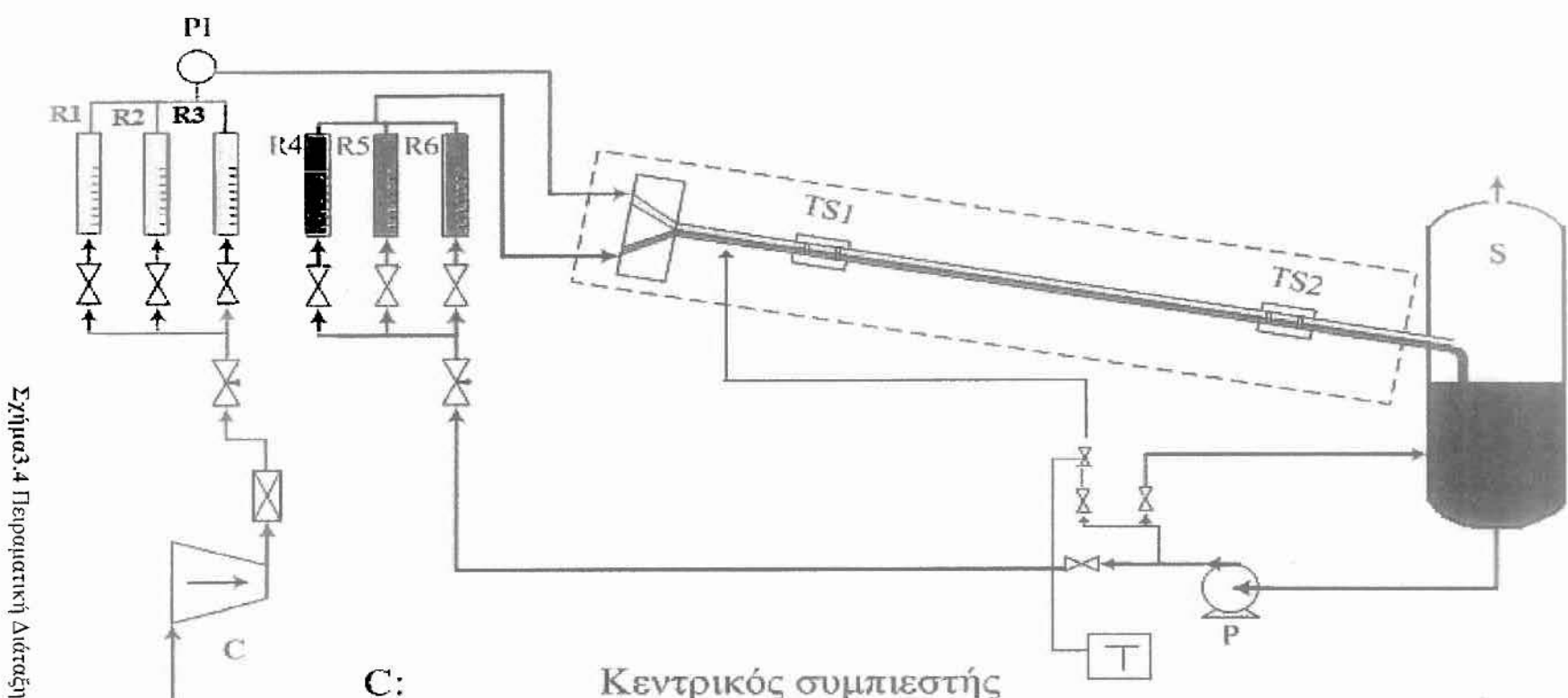
- Επιτρέπει οπτικές παρατηρήσεις.
- Επεξεργάζεται αρκετά καλά στον τόρνο και κολλάει εύκολα με χλωροφόρμιο.

Στο τέλος του αγωγού η ροή εισάγεται σε ένα πλαστικό δοχείο διαχωρισμού φάσεων κατασκευασμένο από φύλλο ανοξείδωτου χάλυβα. Ο αέρας εκρέει στην ατμόσφαιρα από την κορυφή του διαχωριστή και το νερό από τον πυθμένα του διαχωριστή για ανακύκλωση στη δεξαμενή νερού. Το νερό από τη δεξαμενή ανακυκλώνεται με τη βοήθεια φυγοκεντρικής αντλίας.

Ως υγρή φάση για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα μίγμα νερού που αποτελούταν από 75% νερού το οποίο προερχόταν από πηγάδι και 25% από το δίκτυο του πανεπιστημίου. Η συγκεκριμένη αναλογία χρησιμοποιήθηκε μετά από γρήγορους υπολογισμούς για την εύρεση της σωστής αγωγιμότητας του νερού η οποία μετριόταν πριν από κάθε ξεκίνημα ενός πειράματος με το αγωγιμόμετρο METROHM 712 και ήταν συνεχώς κοντά στα  $830 \mu\text{s/cm}$ . Η ρύθμιση της παροχής του νερού γίνεται από μια βάνα και η μέτρηση της παροχής γίνεται από τρία ροόμετρα ένα μικρό για μικρές παροχές, ένα μεσαίο για λίγο πιο μεγάλες παροχές και ένα μεγάλο ροόμετρο για μεγάλες παροχές υγρού. Για αποφυγή στραγγαλισμού της αντλίας στην έξοδο της υπάρχει ένα by-pass που οδηγεί το επιπλέον νερό στη δεξαμενή νερού.

Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται από συμπιεστή και στη συνέχεια υφίσταται μερική ξήρανση και καθαρισμό. Η παροχή του αέρα ρυθμίζεται από μια βάνα τύπου διαφράγματος. Η μέτρηση της παροχής γίνεται και εδώ από τρία ροόμετρα, ένα μικρό, ένα μεσαίο και ένα μεγάλο, στα οποία έχει τοποθετηθεί ένα μανόμετρο που μετράει την πίεση του αέρα στον αγωγό εξόδου. Η μέγιστη ογκομετρική παροχή αέρα (με  $P=1 \text{ bar}$  και  $T=0^\circ\text{C}$ ) που μπορεί να περάσει από το μικρό ροόμετρο είναι  $14 \text{ m}^3/\text{h}$  και από το μεγάλο ροόμετρο  $84 \text{ m}^3/\text{h}$ .

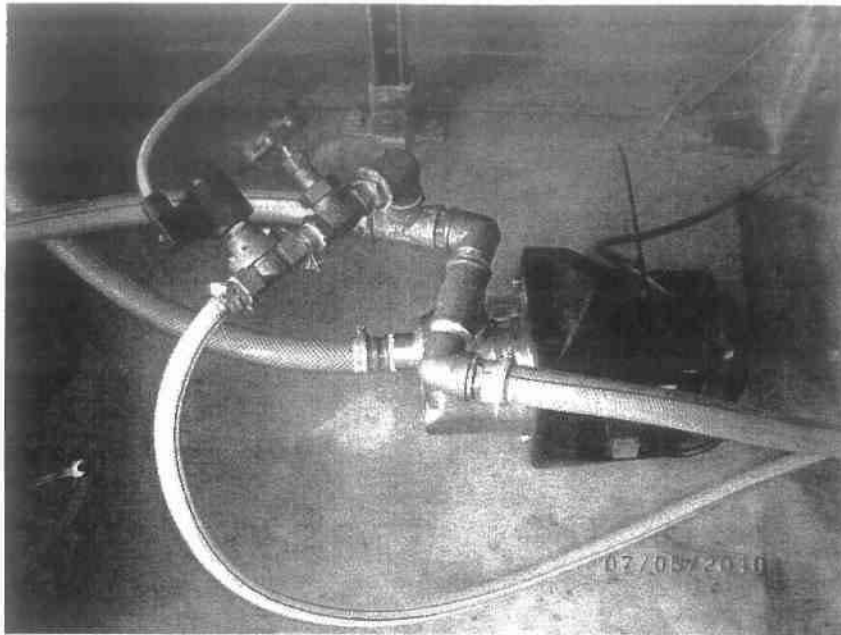
Τέλος, η κυριότερη αναβάθμιση που έγινε στη διάταξη για να μπορέσει να ανταποκριθεί στους στόχους της παρούσας διπλωματικής, ήταν η δημιουργία μιας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής στον αγωγό. Η δημιουργία της διαταραχής επιτεύχθηκε με την τοποθέτηση μίας ακόμα σύνδεσης στη φυγοκεντρική αντλία όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 η οποία καταλήγει λίγα εκατοστά μετά το τμήμα ανάμιξης των δύο φάσεων σχήμα 3.6. Πάνω στην σύνδεση υπάρχει επίσης μία βάνα για την ρύθμιση της παροχής του νερού της διαταραχής αλλά και μία ηλεκτροβάνα η οποία ανοιγοκλείνει σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν δοθεί στον χρονοδιακόπτη (σχήμα 3.7) που είναι συνδεδεμένη. Στα σχήματα 3.8 έως και 3.13 φωτογραφείται υμένας με την επίδραση της διαταραχής.



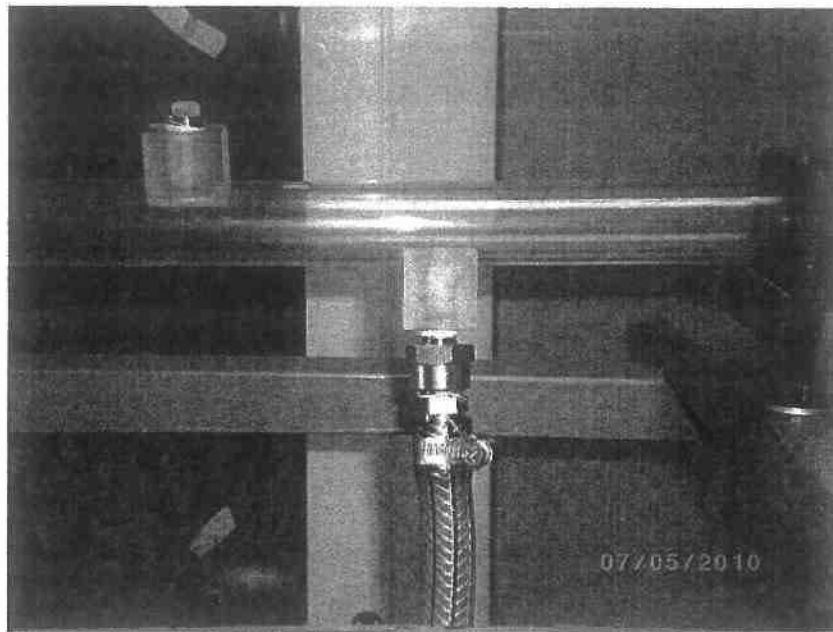
Σχήμα 3.4 Πειραματική Διάταξη

- C: Κεντρικός συμπιεστής
- P: Αντλία
- S: Δοχείο διαχωρισμού
- R1,R2,R3 : Ροόμετρα αέριας φάσης
- R4,R5,R6 : Ροόμετρα υγρής φάσης
- TS1, TS2: Μετρητικά πάχους υγρής στιβάδας
- PI: Μανόμετρο
- T : Χρονοδιακόπτης

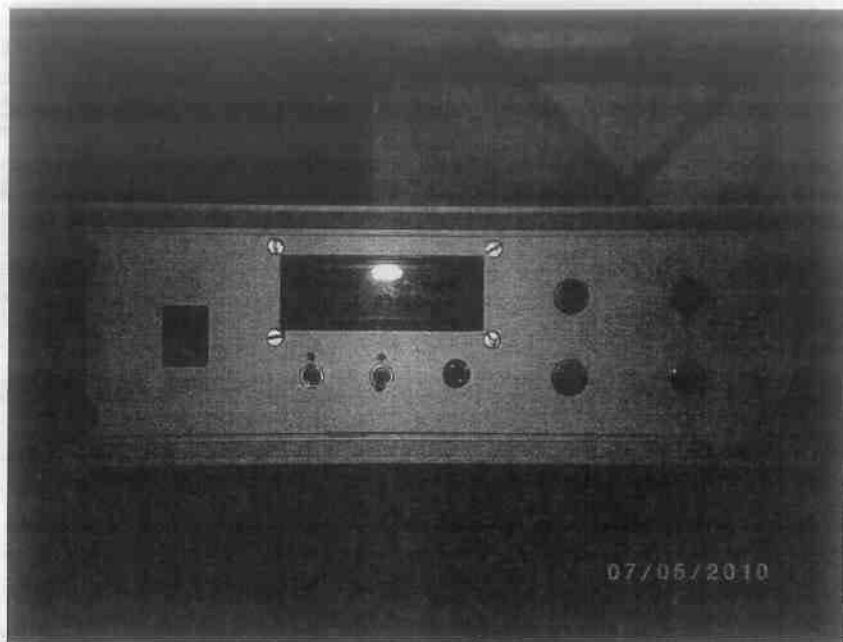




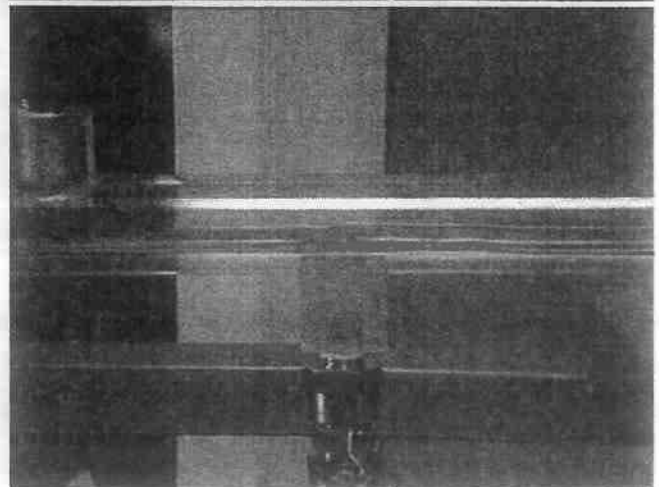
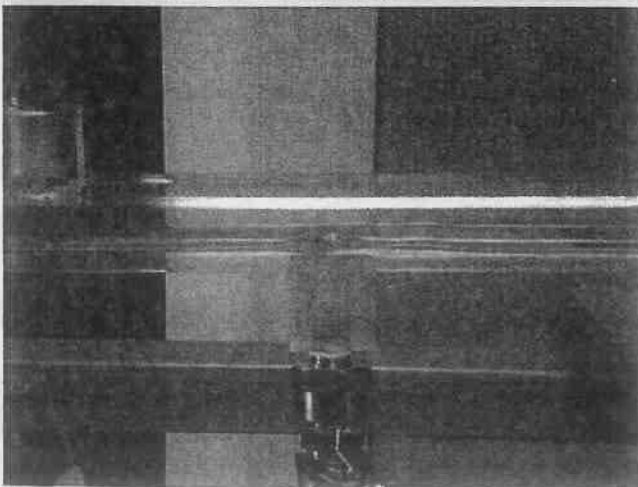
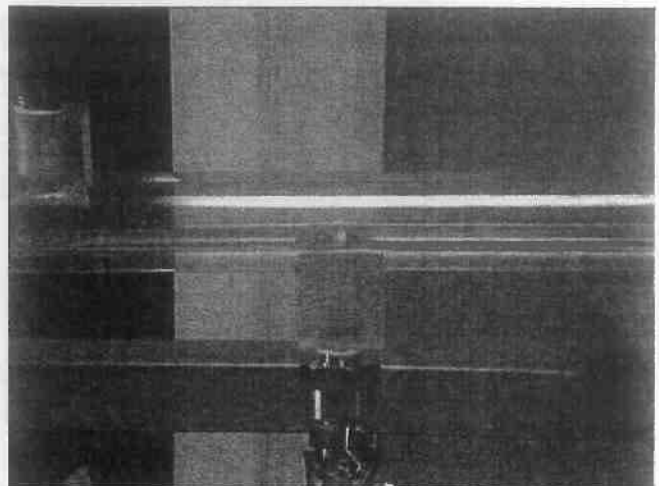
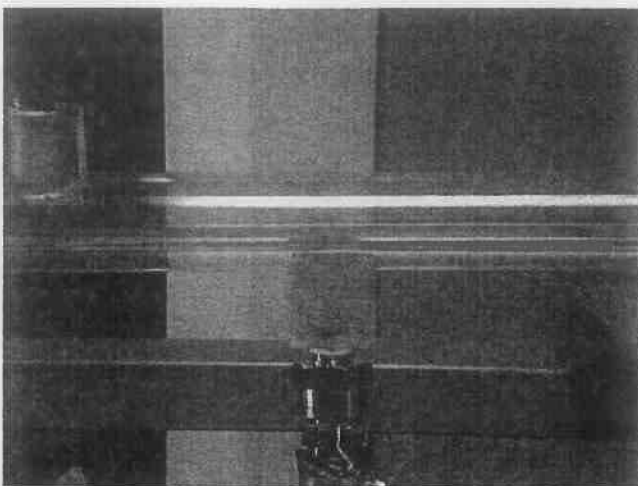
Σχήμα3.5 Επιπλέον σύνδεση : βάνα-ηλεκτροβάνα

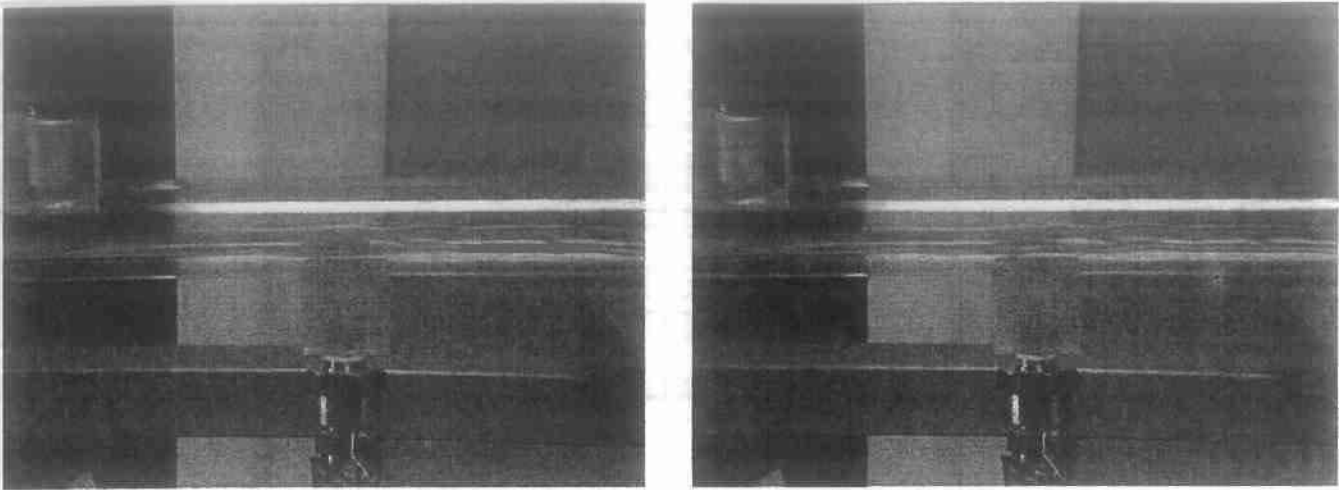


Σχήμα3.6 Σύνδεση διαταραχής με αγωγό



Σχήμα 3.7 Χρονοδιακόπτης





Σχήματα 3.8-3.13 Φωτογράφιση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

### **3.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΕΤΡΙΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ**

#### **3.4.1 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ**

Οι καμπύλες βαθμονόμησης των ροόμετρων και της υγρής αλλά και της αέριας φάσης παρατίθενται στο παράρτημα και πάρθηκαν σύμφωνα με τη διδακτορική διατριβή της Χριστίνας Τζώζη.

#### **3.4.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΓΩΓΙΓΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ**

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 κάποιες μετρήσεις σε τέτοιες συνθήκες όπου το πάχος του υμένα να είναι γνωστό.

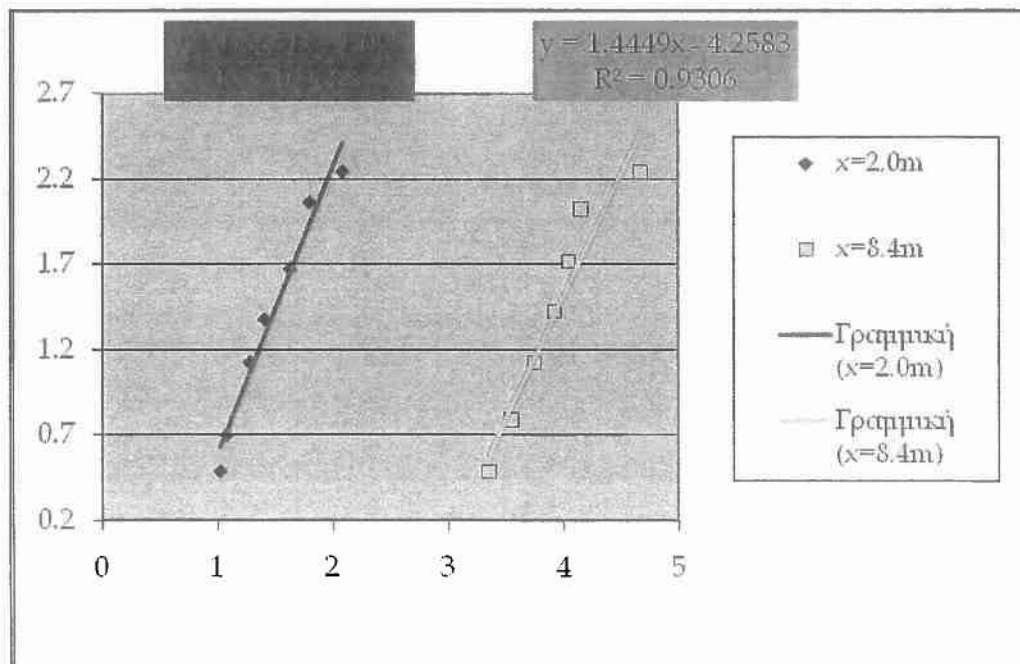
Η διαδικασία έγινε κλείνοντας την έξοδο του αγωγού και γεμίζοντάς τον σταδιακά. Σε κάθε αύξηση του πάχους του υμένα παίρναμε δύο μετρήσεις, στη πρώτη μετράμε με μία πρότυπη μεζούρα την περιβρεχόμενη επιφάνεια για την εύρεση του ύψους του υμένα σύμφωνα με τους τύπους που καταγράφονται από κάτω και την αντίστοιχη διαφορά τάσης στα συρματάκια και στις δύο θέσης, πίνακας 3.1. Έπειτα με την βοήθεια του Excel παίρνουμε τις ανάλογες γραμμικές εξισώσεις που συνδέουν το πάχος του υμένα και της ένδειξης της αγωγιμομετρικής μεθόδου, σχήμα 3.14.

$$S = \frac{\pi}{180^\circ} r \cdot \theta \quad (3.12)$$

$$h = r(1 - \cos(\theta/2)) \quad (3.13)$$

Test section 1				
Μέτρηση i	S <sub>i</sub> [cm]	θ	h [cm]	V <sub>1</sub>
1	2.3	103.76401	0.486050593	1.025
2	2.8	126.3214	0.696608153	1.079
3	3.7	166.92471	1.125402908	1.279
4	4.2	189.48211	1.374968781	1.409
5	4.8	216.55098	1.668254554	1.629
6	5.7	257.15429	2.061931075	1.796
7	6.2	279.71168	2.240819395	2.081
Test section 2				
Μέτρηση i	S <sub>i</sub> [cm]	θ	h [cm]	V <sub>2</sub>
1	2.3	103.76401	0.486050593	3.349
2	3	135.34436	0.787520215	3.551
3	3.7	166.92471	1.125402908	3.745
4	4.3	193.99358	1.42470349	3.92
5	4.9	221.06246	1.715411667	4.041
6	5.6	252.64281	2.022239038	4.148
7	6.2	279.71168	2.240819395	4.659

Πίνακας 3.1

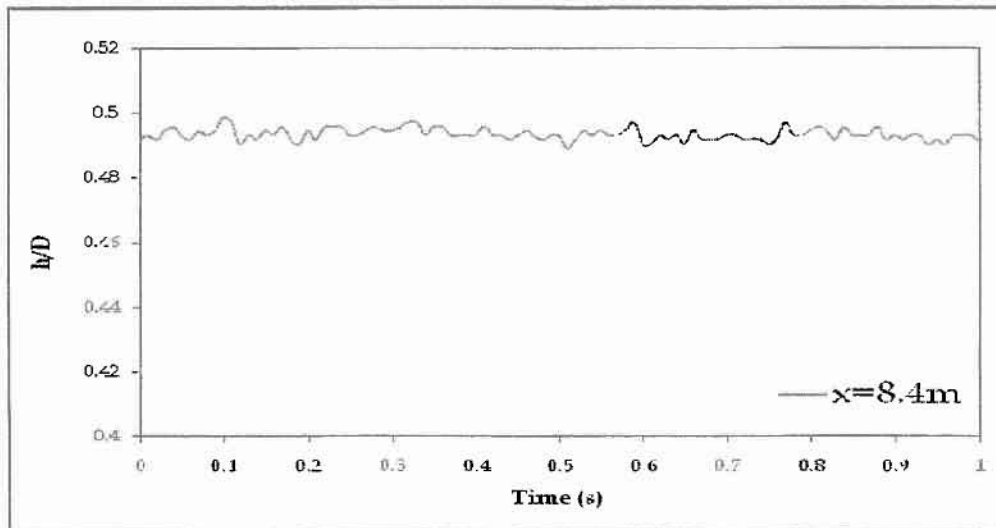


Σχήμα 3.14 Βαθμονόμηση

### 3.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το επόμενο βήμα πριν την έναρξη της καταγραφής των μετρήσεων για το πείραμα είναι η πραγματοποίηση ενός ελέγχου καλής λειτουργίας για την απόδειξη της σωστής λειτουργίας του αγωγού μας, λόγω της αντικατάστασης του παλαιού αγωγού εξαιτίας κάποιων φθορών του.

Ο λειτουργικός έλεγχος έγινε παίρνοντας τρεις μετρήσεις, μία για κάθε περιοχή ροής, δηλαδή λεία διαστρωματωμένη ροή, διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D και διαστρωματωμένη ροή με κύματα K-H σε ακριβώς ίδια δεδομένα που υπάρχουν και στη βιβλιογραφία μας και συγκεκριμένα στη διδακτορική διατριβή της Χριστίνας Τζώτζη. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα και παρατίθενται στα σχήματα 3.15, 3.16 και 3.17 για τις αντίστοιχες ροές, όπου  $\alpha$  είναι τα καινούρια και  $\beta$  τα παλαιότερα.

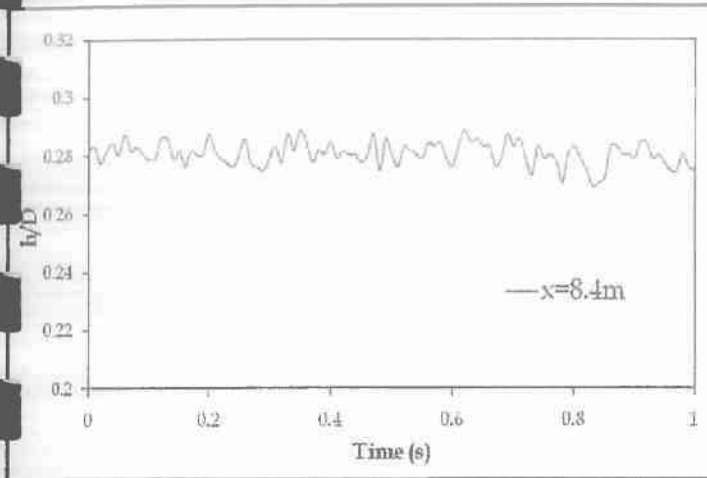


Σχήμα 3.15 Λεία διαστρωματωμένη ροή

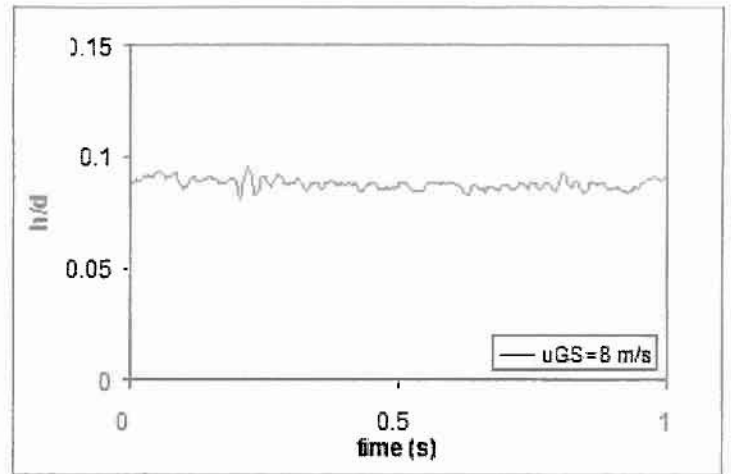
$$u_{LS} = 0.0116 \text{ m/s}$$

$$u_{GS} = 2 \text{ m/s}$$

Δεν υπάρχει αντίστοιχο για αντιπαράθεση



Σχήμα 3.16.α

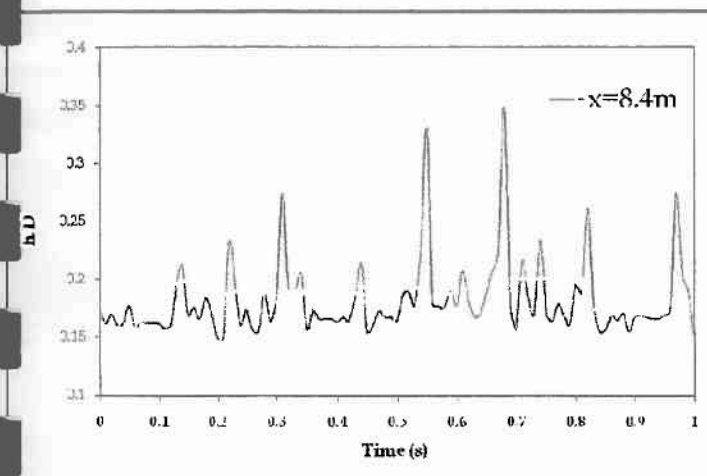


Σχήμα 3.16.β

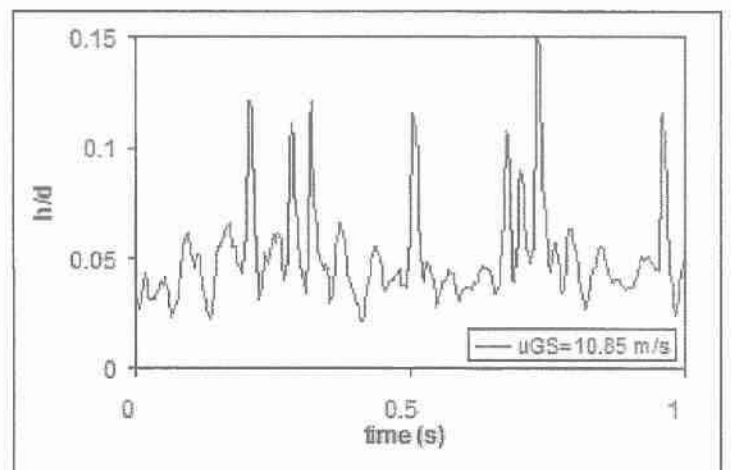
Διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D

$$u_{LS} = 0.0116 \text{ m/s}$$

$$u_{GS} = 8 \text{ m/s}$$



Σχήμα 3.17.α



Σχήμα 3.17.β

Διαστρωματωμένη ροή με κύματα K-H

$$u_{LS} = 0.0116 \text{ m/s}$$

$$u_{GS} = 10.85 \text{ m/s}$$

### 3.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στη συνέχεια, αφού διαπιστώθηκε πως ο αγωγός δουλεύει άψογα μπορούμε να ξεκινήσουμε την πειραματική διαδικασία.

#### **Πρώτο βήμα:**

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν να βάλουμε την εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή να ανοιγοκλείνει με μία συχνότητα έξι δευτερολέπτων όπου αλλάζαμε το χρόνο που παρέμενε ανοιχτή, δηλαδή παίρναμε μία μέτρηση για  $t_{on}=1.5$

s , μία για  $t_{on}=1.0$  s και τελευταία για  $t_{on}=0.5$  s. Τις συγκεκριμένες τρεις μετρήσεις τις επαναλαμβάνουμε σε κάθε περιοχή ροής.

**Δεύτερο βήμα:**

Στη συνέχεια, μετά την ολοκλήρωση των εννέα μετρήσεων στον αγωγό(τρεις διαφορετικές διαταραχές σε τρεις διαφορετικές ροές), ο οποίος βρίσκεται σε οριζόντια θέση, το μόνο που μένει να κάνουμε είναι να αρχίσουμε να αυξάνουμε την κλίση του αγωγού και να επαναλάβουμε τις μετρήσεις. Οι γωνίες που παίρνουμε είναι οι εξής :  $\gamma = 0,25^\circ$  ,  $\gamma = 0,5^\circ$  και  $\gamma = 1^\circ$ .

**Τρίτο βήμα:**

Τέλος, ενώ βρίσκεται ο αγωγός μας σε κλίση  $1^\circ$ , σταματάμε την παροχή αέρα και ξεκινάμε να παίρνουμε μετρήσεις σε διαφορετικές παροχές της υγρής φάσης με την διαταραχή μας να είναι ανοιχτή για  $t_{on}=0.5$  s. Επίσης παίρνουμε κ μία ενδεικτική μέτρηση κλείνοντας τη διαταραχή αλλά δημιουργώντας μία δική μας ανοιγοκλείνοντας τυχαία την παροχή του αέρα.

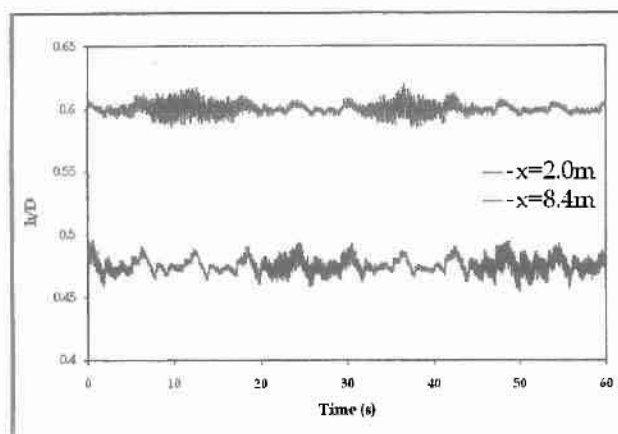


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

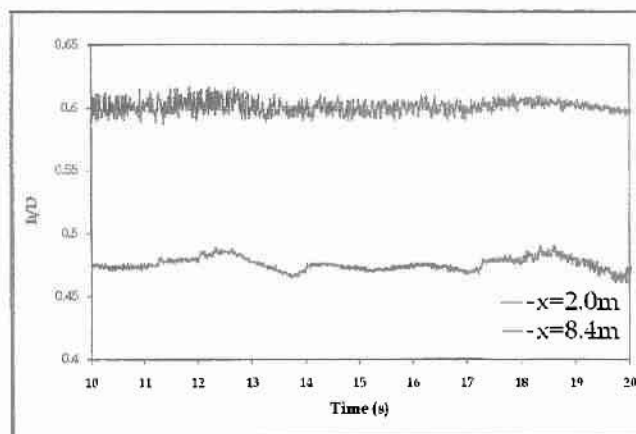
#### 4.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΣΤΑ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ

Ενώ ο αγωγός βρίσκεται σε οριζόντια θέση, η επίδραση της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής στα καθεστώτα ροής καταγράφεται στα σχήματα 4.1 , 4.2 και 4.3 μετά την επεξεργασία των δεδομένων για λεία διαστρωματωμένη ροή, για διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D και διαστρωματωμένη ροή με K-H κύματα αντίστοιχα. Πρέπει να επισημανθεί ότι παρατίθενται τα σχήματα για ενδεικτική περίοδο του χρονοδιακόπτη  $T = 6\text{ s}$  όπου ισχύει :  $t_{\text{off}} = 5.5\text{ s}$  και  $t_{\text{on}} = 0.5\text{ s}$ .

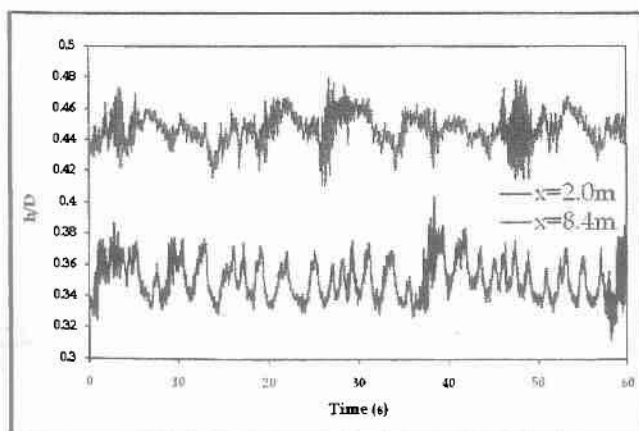


Σχήμα 4.1.α

Διαστρωματωμένη ροή,  $u_{LS} = 0.0224\text{ m/s}$ ,  $u_{GS} = 1.5\text{ m/s}$



Σχήμα 4.1.β (μεγέθυνση)

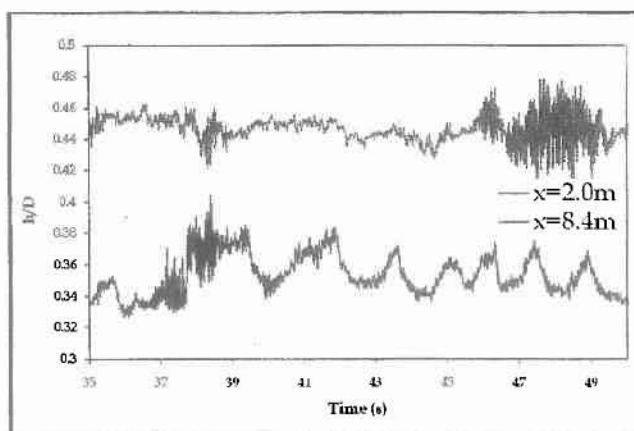


Σχήμα 4.2.α

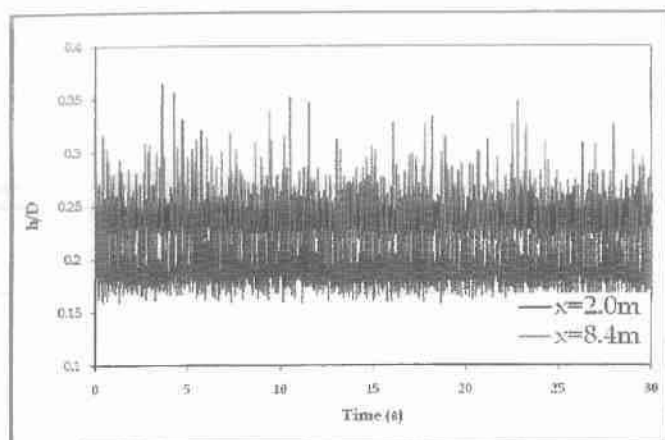
Διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D

$u_{LS} = 0.0224\text{ m/s}$

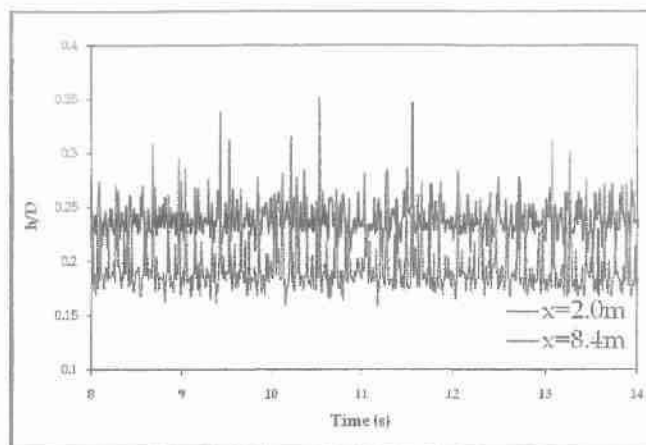
$u_{GS} = 5\text{ m/s}$



Σχήμα 4.2.β (μεγέθυνση)



Σχήμα 4.3.α



Σχήμα 4.3.β (μεγέθυνση)

Διαστρωματωμένη ροή με κύματα K-H

$$u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$$

$$u_{GS} = 14 \text{ m/s}$$

Παρατηρείται ότι η εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή επηρεάζει μόνο τα δύο καθεστώτα ροής, τη λεία διαστρωματωμένη ροή και τη διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D, ενώ η διαστρωματωμένη ροή με κύματα K-H δεν έχει επηρεαστεί καθόλου.

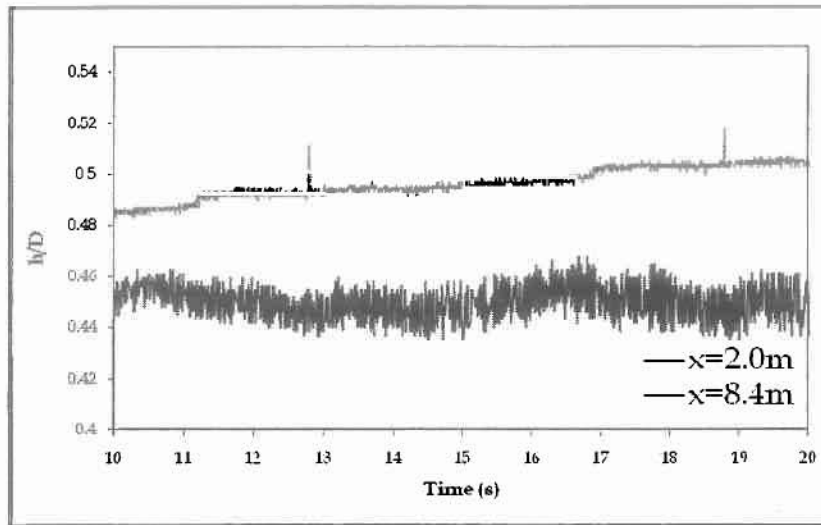
Στη διαστρωματωμένη ροή, ενώ στη θέση 1 ( $x=2\text{m}$ ) φαίνεται καθαρά η διαταραχή μέχρι να φτάσει στη θέση 2 ( $x=8.4\text{m}$ ) παρατηρείτε ότι η διαταραχή έχει μειωθεί σημαντικά με την δημιουργία πολύ μικρότερων αναταραχών στην επιφάνεια της ροής.

Στη διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D έχουμε κ εδώ μείωση της διαταραχής, το οποίο φαίνεται από την ελαχιστοποίηση των ακρότατων σε μία πιο ήπια ροή.

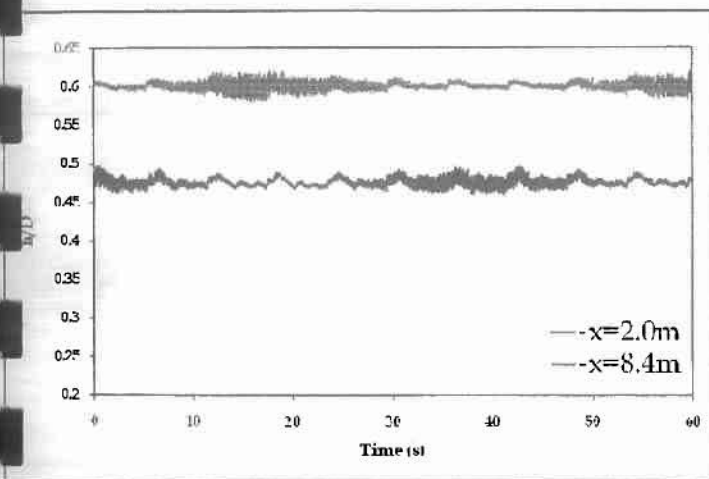
#### 4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΣΤΑ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ

Ενώ ο αγωγός εξακολουθεί να βρίσκεται σε οριζόντια θέση, θέλοντας να μελετήσουμε την επίδραση του πλάτους της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής καταγράφονται οι μετρήσεις και κατηγοριοποιούνται στα παρακάτω διαγράμματα ανάλογα με το καθεστώς ροής και το πλάτος της διαταραχής.

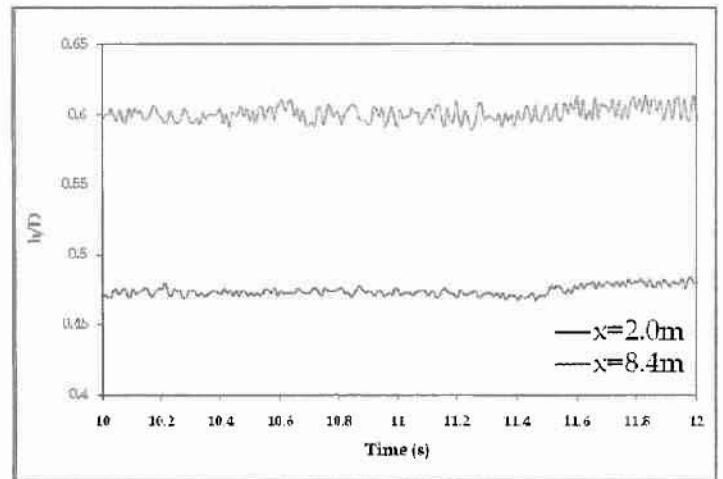
1. Λεία διαστρωματωμένη ροή :  $u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 1.5 \text{ m/s}$



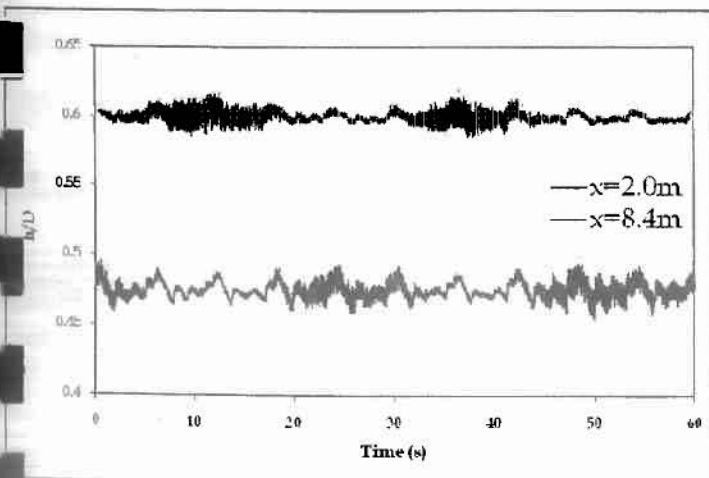
Σχήμα 4.4.  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$



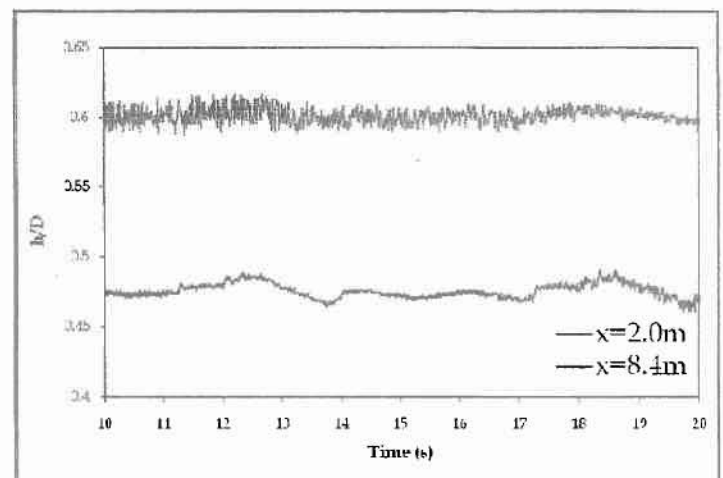
Σχήμα 4.5.α  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.5.β  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

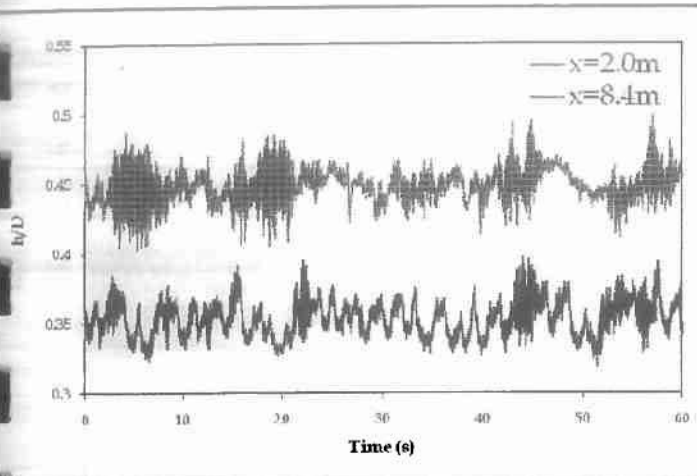


Σχήμα 4.6.α  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$

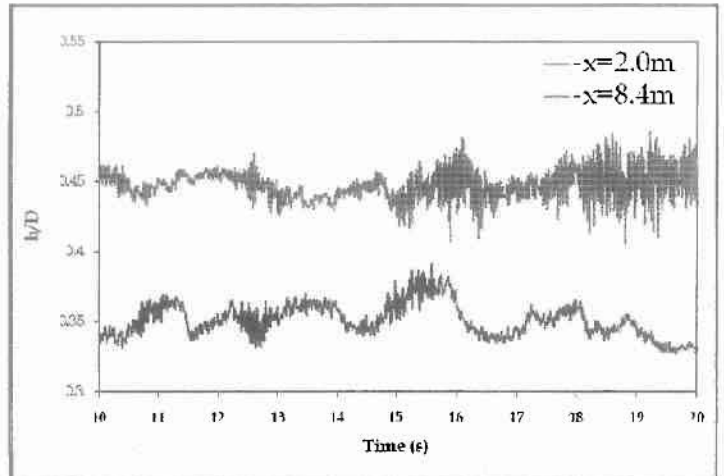


Σχήμα 4.6.β  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

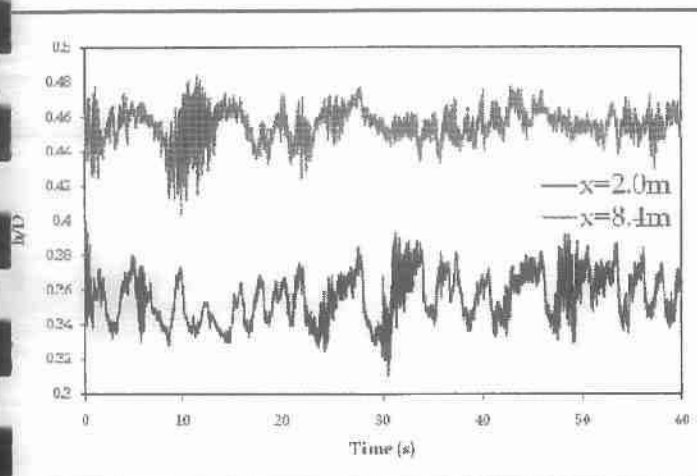
2. Διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D :  $u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 5 \text{ m/s}$



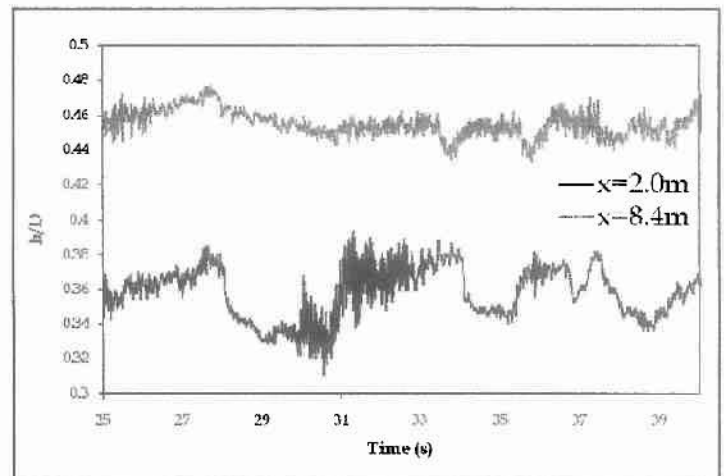
Σχήμα 4.7.α  $t_{off} = 4.5 \text{ s} - t_{on} = 1.5 \text{ s}$



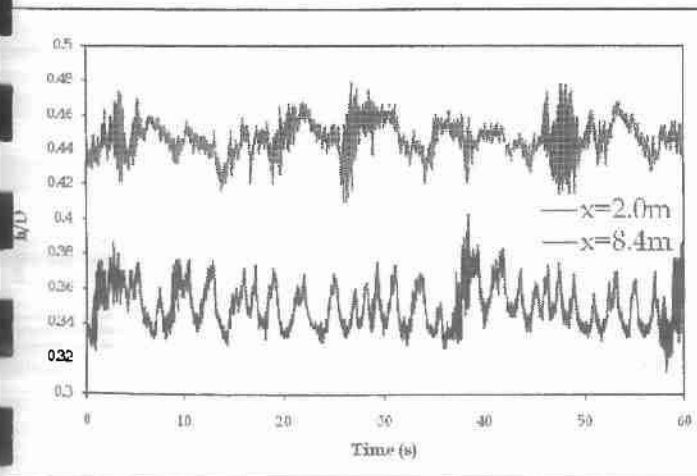
Σχήμα 4.7.β  $t_{off} = 4.5 \text{ s} - t_{on} = 1.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



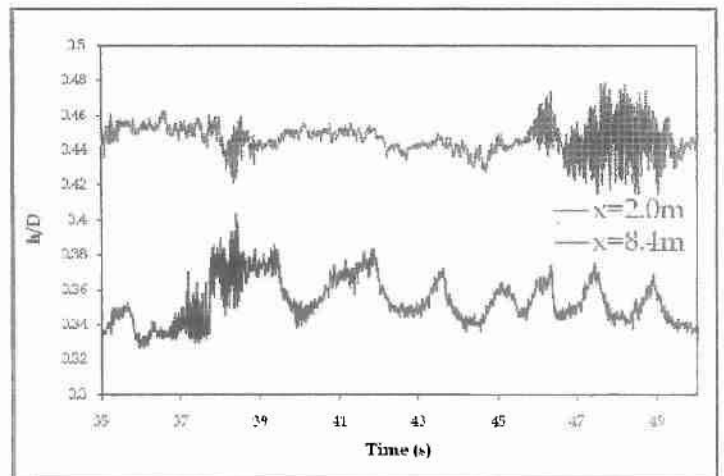
Σχήμα 4.8.α  $t_{off} = 5 \text{ s} - t_{on} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.8.β  $t_{off} = 5 \text{ s} - t_{on} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

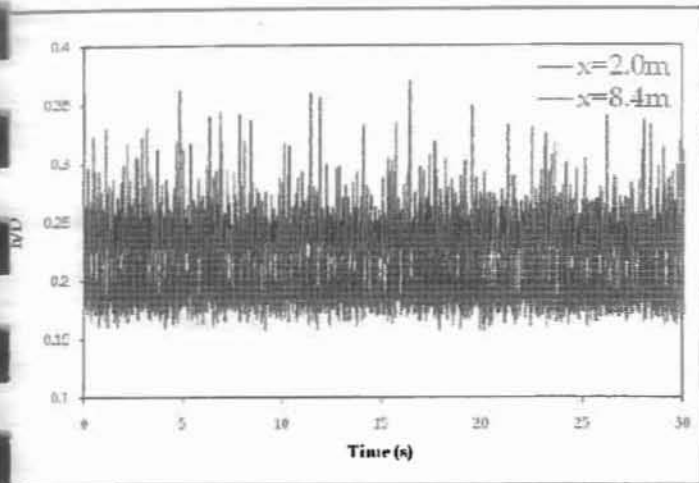


Σχήμα 4.9.α  $t_{off} = 5.5 \text{ s} - t_{on} = 0.5 \text{ s}$

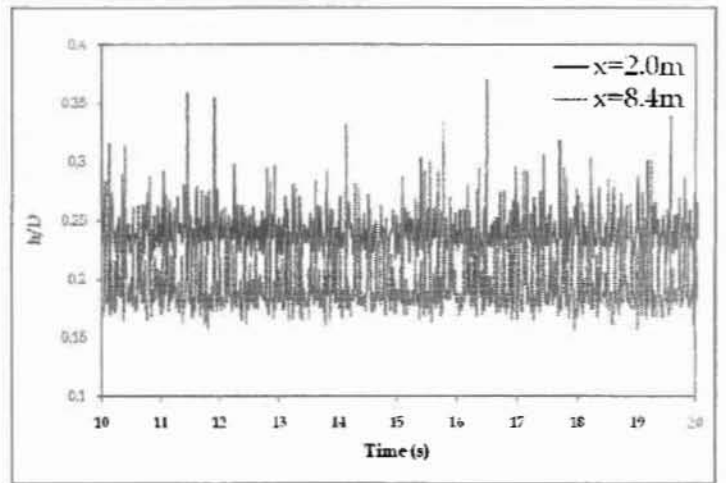


Σχήμα 4.9.β  $t_{off} = 5.5 \text{ s} - t_{on} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

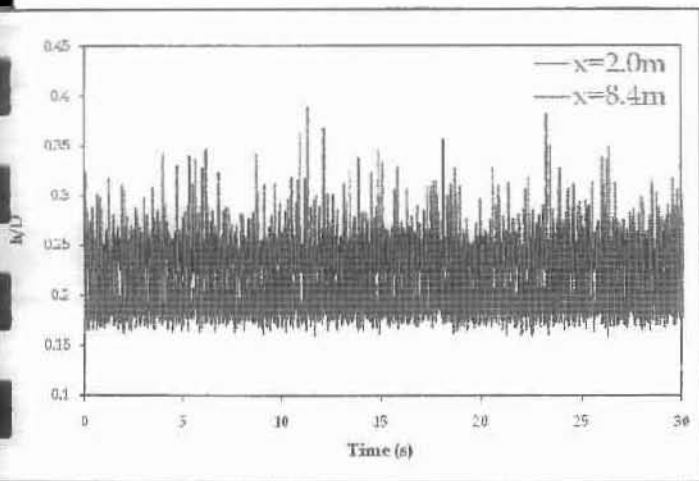
3. Διαστρωματωμένη ροή με κύματα Κ-Η :  $u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 14 \text{ m/s}$



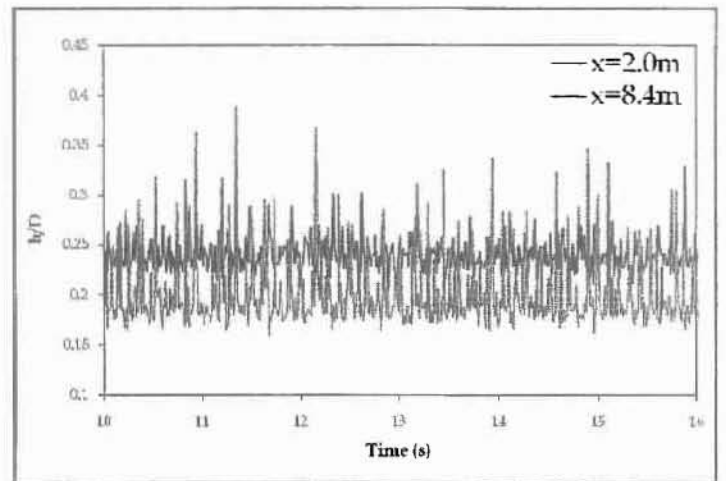
Σχήμα 4.10.α  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$



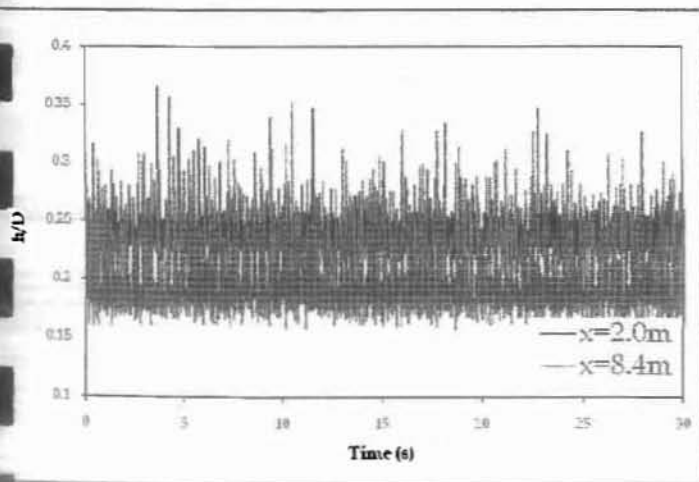
Σχήμα 4.10.β  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



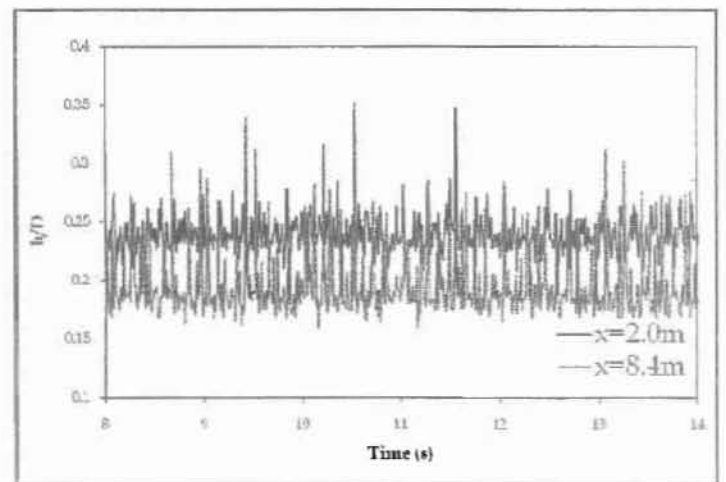
Σχήμα 4.11.α  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.11.β  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



Σχήμα 4.12.α  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$



Σχήμα 4.12.β  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

Παρατηρείτε ότι, οποιαδήποτε μεταβολή στο πλάτος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, δεν επηρεάζει καθόλου τη διαστρωματωμένη ροή με κύματα K-H αλλά μόνο τα άλλα δύο καθεστώτα ροής.

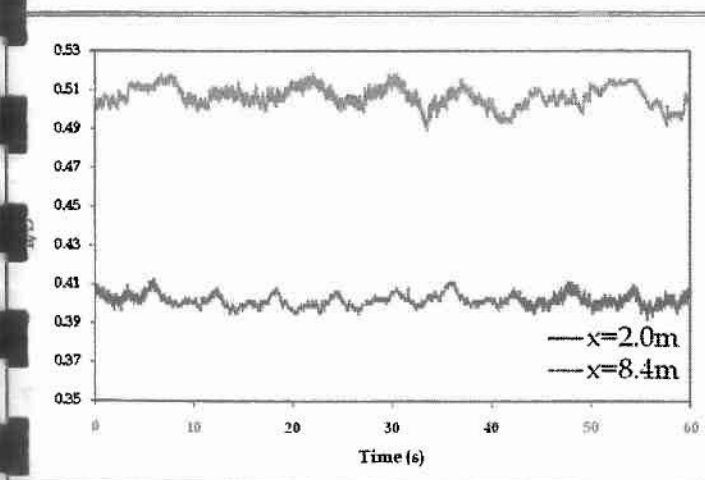
Για τη λεία διαστρωματωμένη ροή και για τη διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D ενώ όταν μειώνεται το πάχος της διαταραχής, στη θέση 1 φαίνεται ξεκάθαρα το πέταγμα της διαταραχής, στη θέση 2 η διαταραχή έχει μειωθεί σημαντικά. Όταν πάλι αυξάνεται το πάχος της, φαίνεται στη λεία διαστρωματωμένη ροή να έχουμε μετάβαση σε άλλη περιοχή ροής, δηλαδή σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D.

#### 4.3 ΕΠΙΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΣΤΑ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ ΣΕ ΥΠΟ ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟ

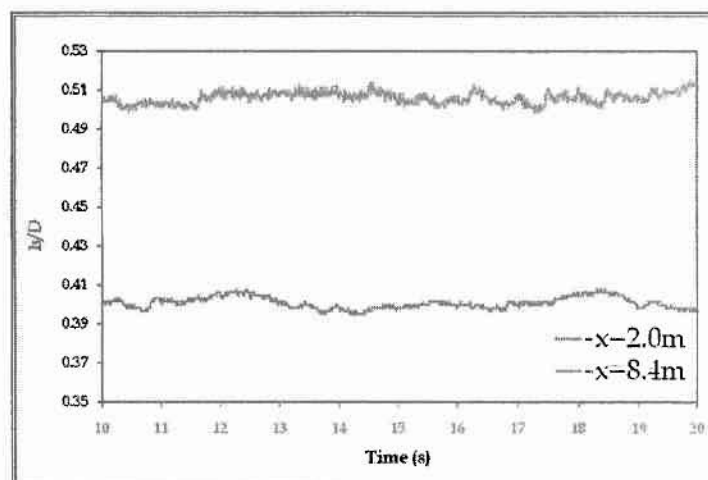
Στη συνέχεια του πειράματος, επαναλαμβάνονται όλες οι προηγούμενες μετρήσεις με την διαφορά ότι ξεκινάμε μία σταδιακή αύξηση της κλίσης του αγωγού. Τα αποτελέσματα παρατίθενται ταξινομημένα κατά γωνία κλίσης, καθεστώτος ροής και πάχους της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.

##### 1. Κλίση : 0,25°

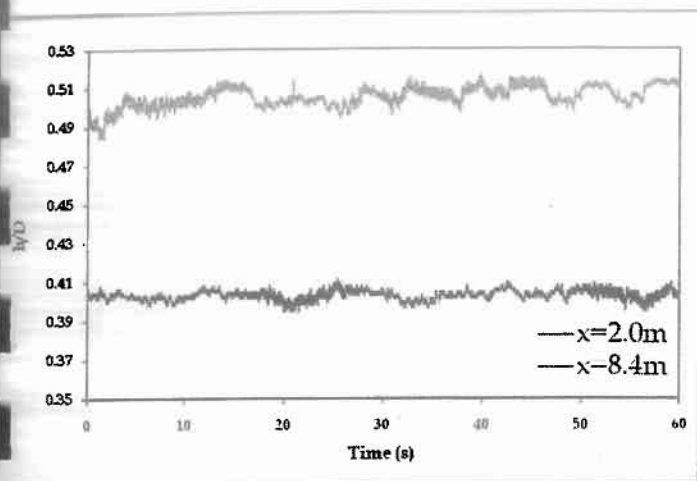
1.1 Λεία διαστρωματωμένη ροή :  $u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 1.5 \text{ m/s}$



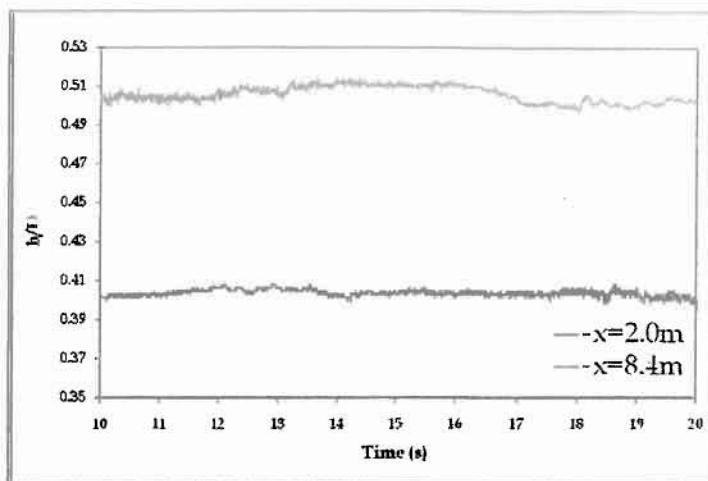
Σχήμα 4.13.α  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s}$  -  $t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$



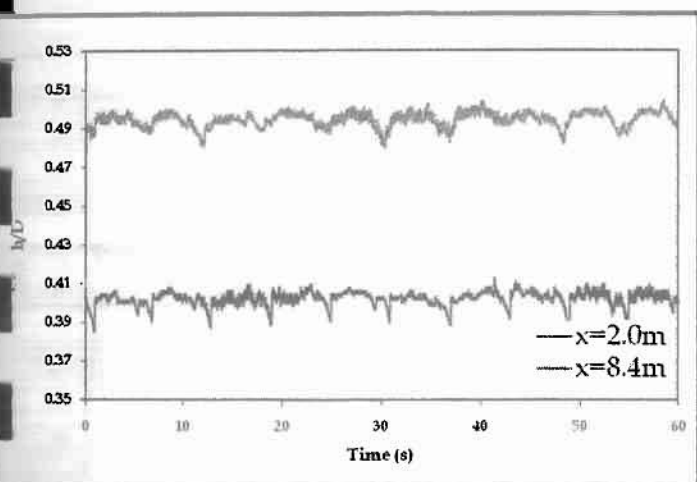
Σχήμα 4.13.β  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s}$  -  $t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



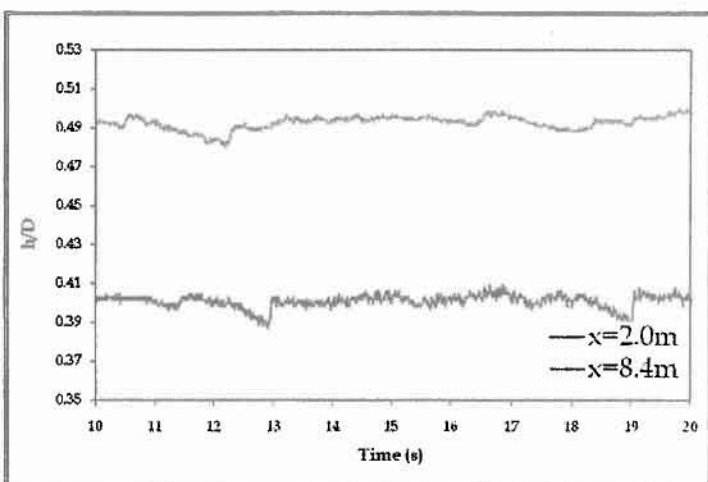
Σχήμα 4.14.α  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.14.β  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

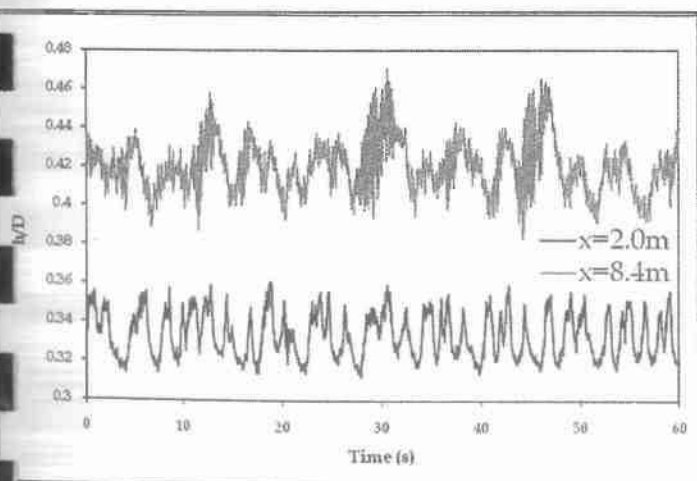


Σχήμα 4.15.α  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$

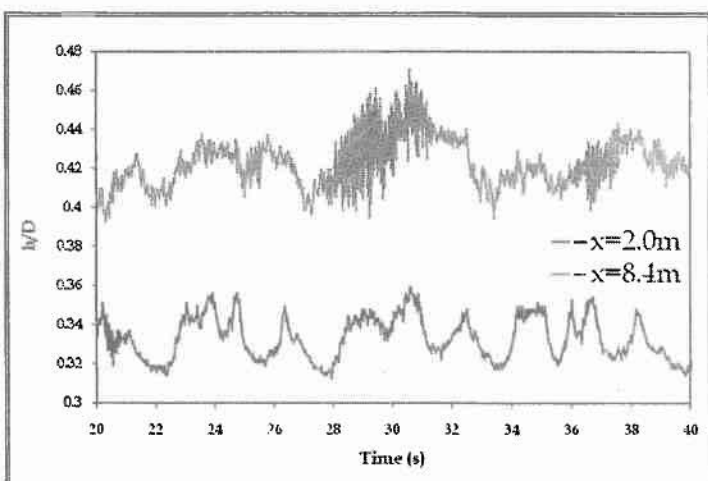


Σχήμα 4.15.β  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

1.2 Διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D :  $u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 5 \text{ m/s}$

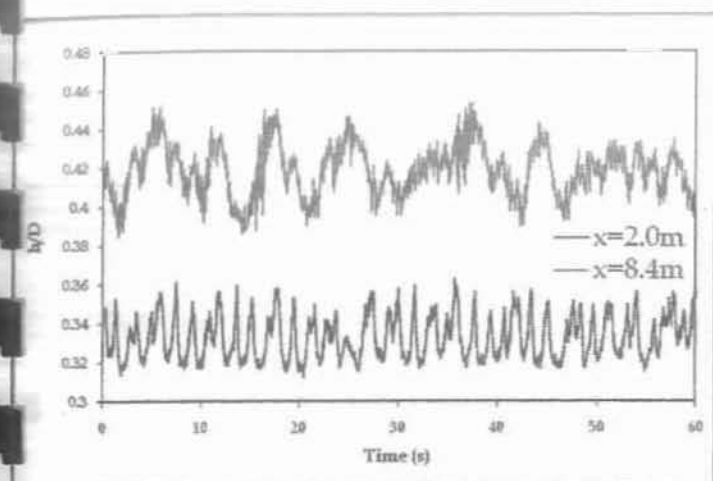


Σχήμα 4.16.α  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$

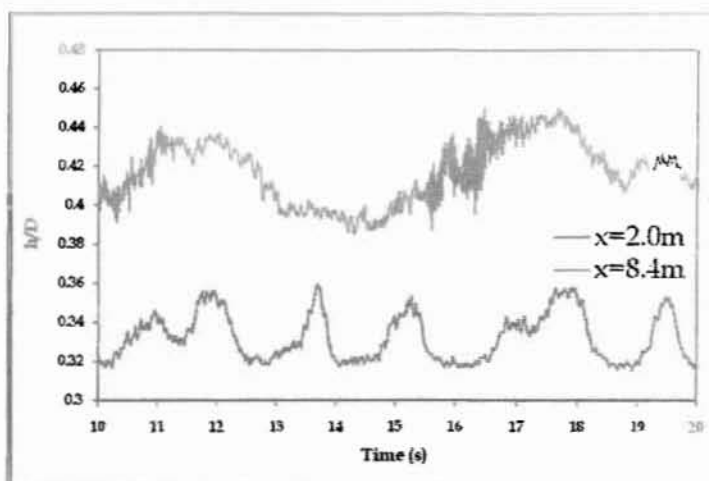


Σχήμα 4.16.β  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

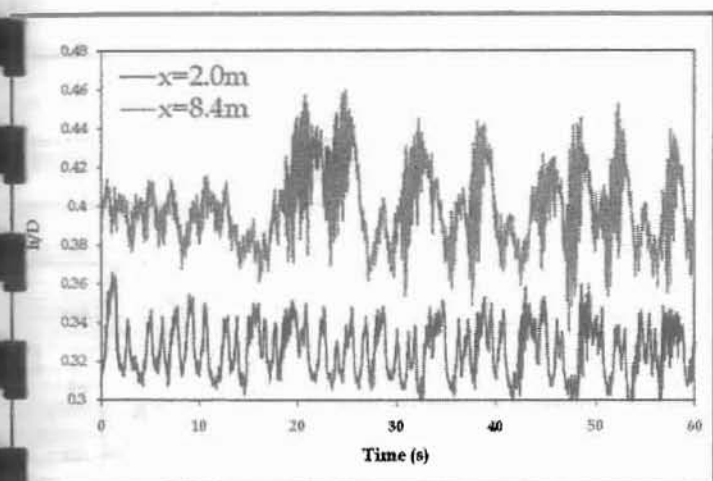




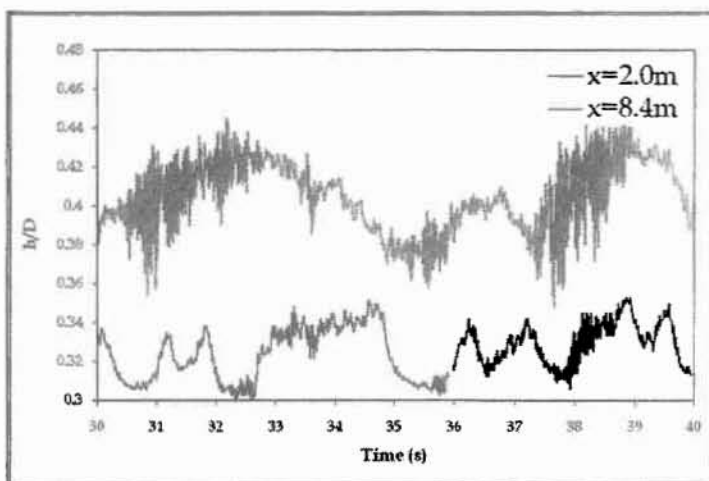
Σχήμα 4.17.α  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.17.β  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



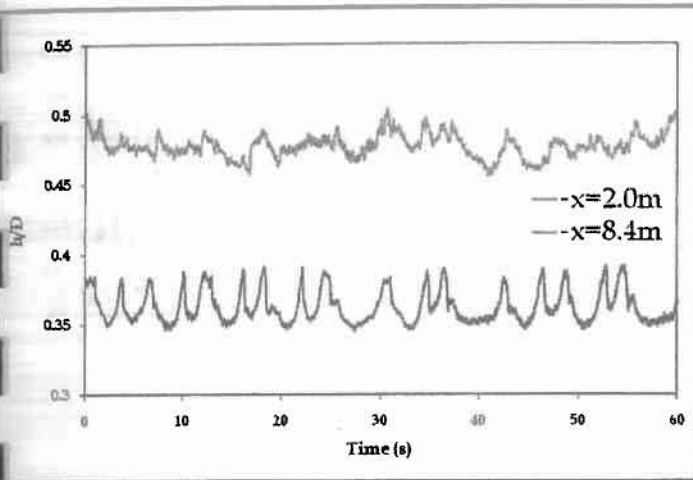
Σχήμα 4.18.α  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$



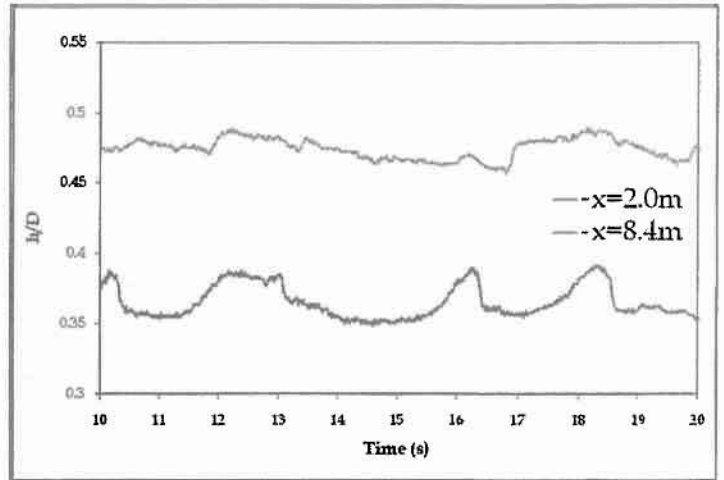
Σχήμα 4.18.β  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

2. Κλίση :  $0,5^\circ$

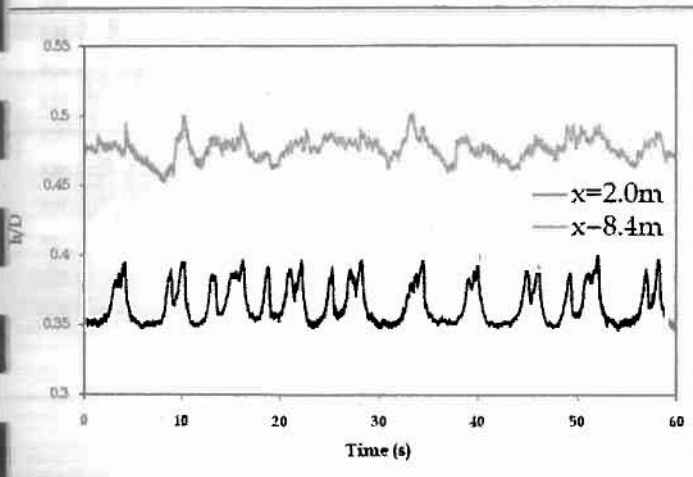
2.1 Λεία διαστρωματωμένη ροή :  $u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 1.5 \text{ m/s}$



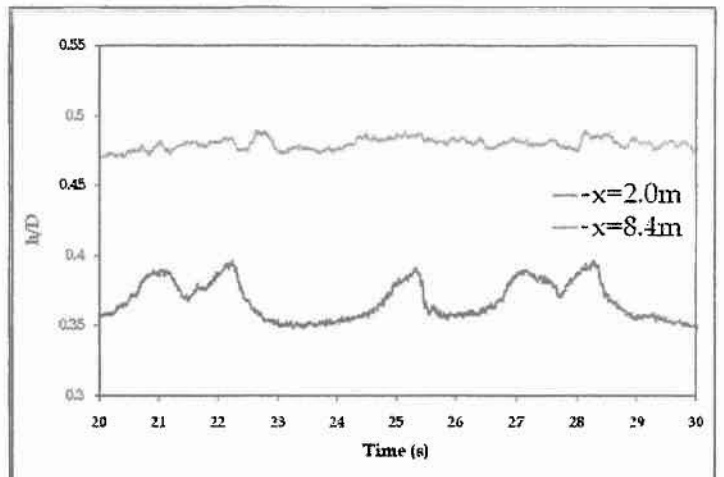
Σχήμα 4.19.α  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$



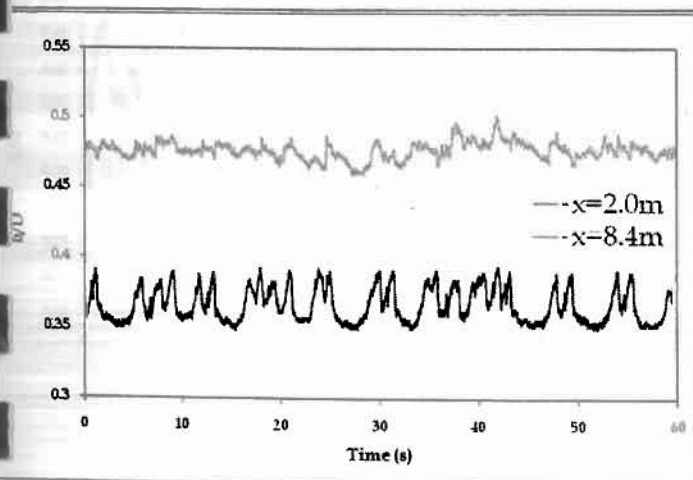
Σχήμα 4.19.β  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



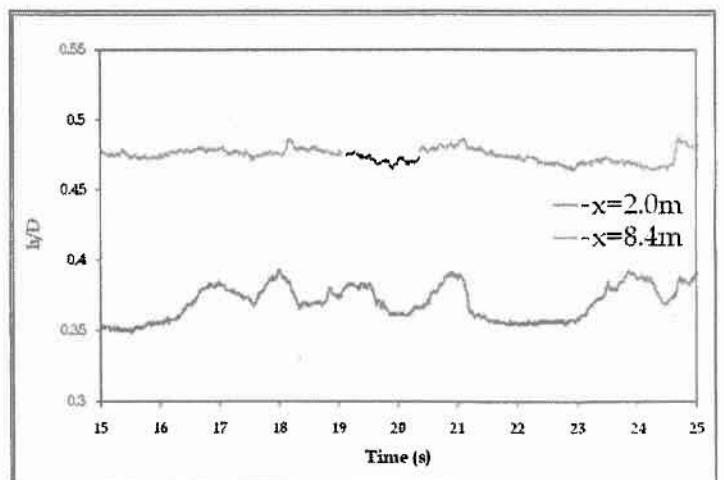
Σχήμα 4.20.α  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.20.β  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

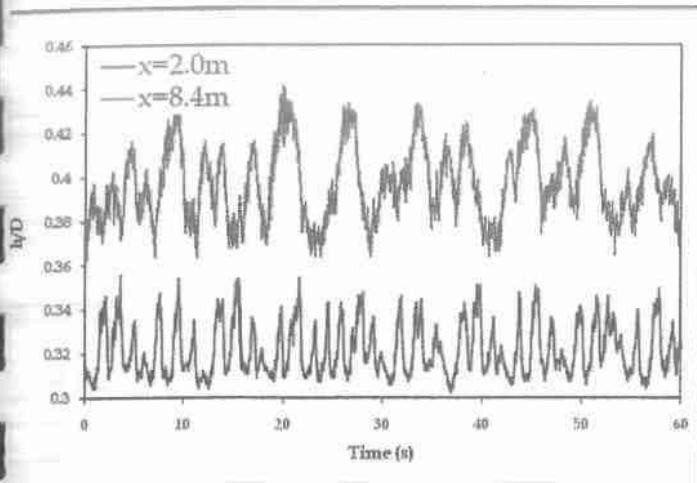


Σχήμα 4.21.α  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$

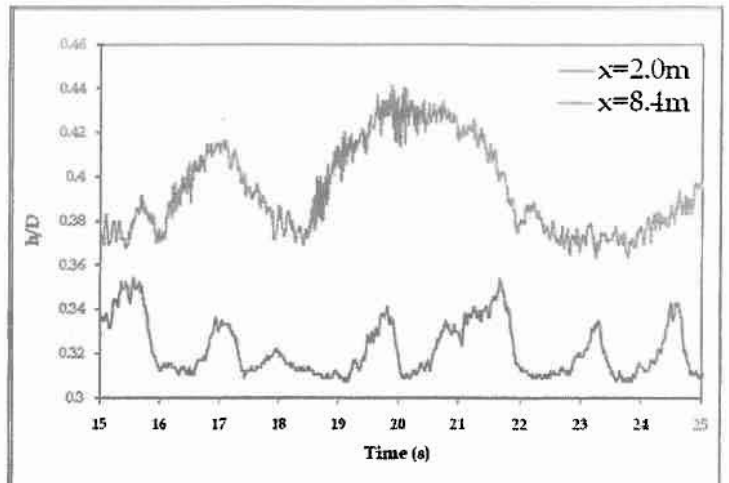


Σχήμα 4.21.β  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

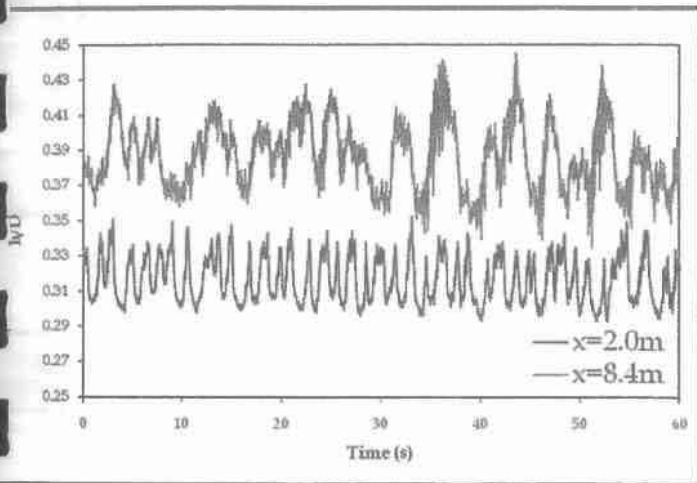
2.2 Διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D :  $u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 5 \text{ m/s}$



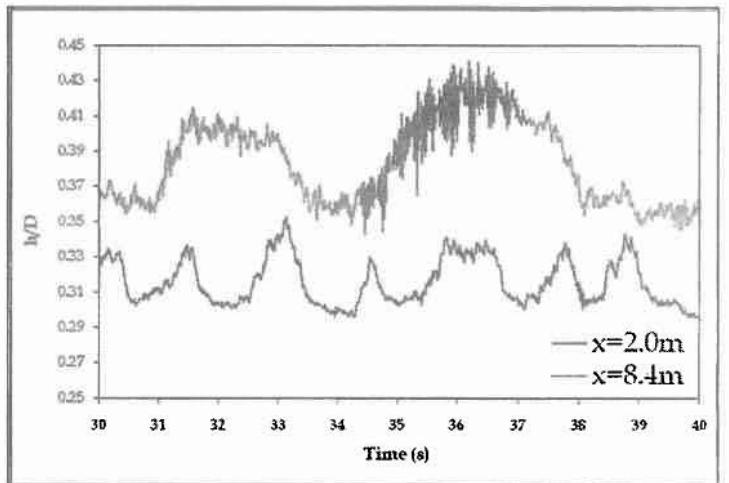
Σχήμα 4.22.α  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$



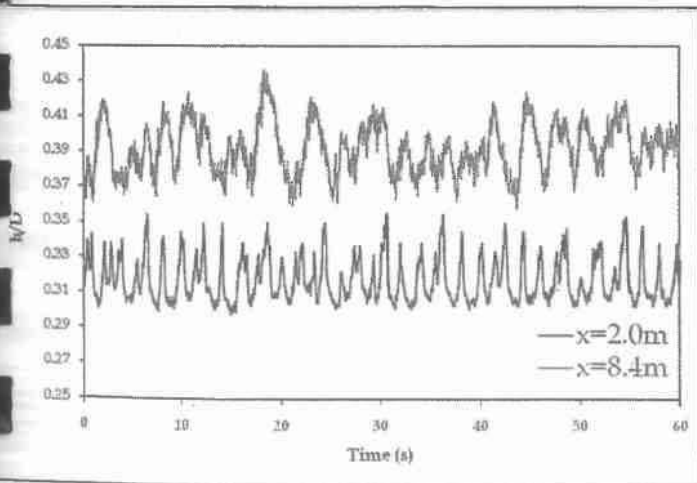
Σχήμα 4.22.β  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



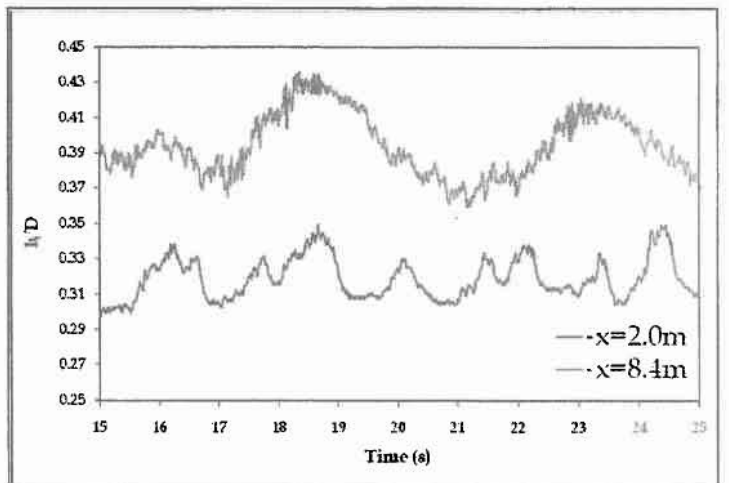
Σχήμα 4.23.α  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.23.β  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



Σχήμα 4.24.α  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$

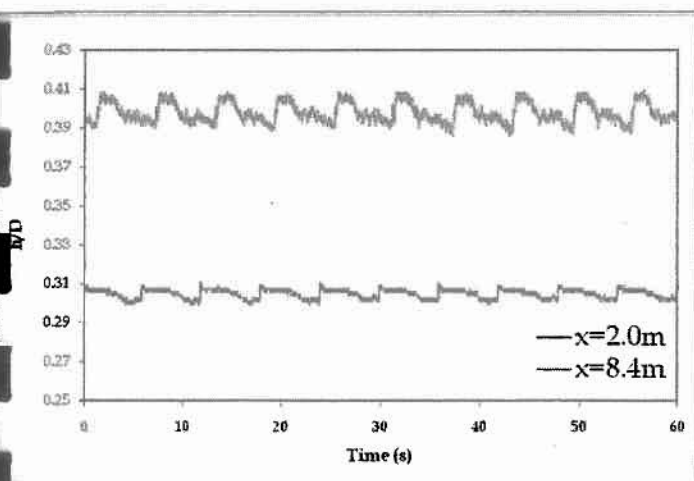


Σχήμα 4.24.β  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

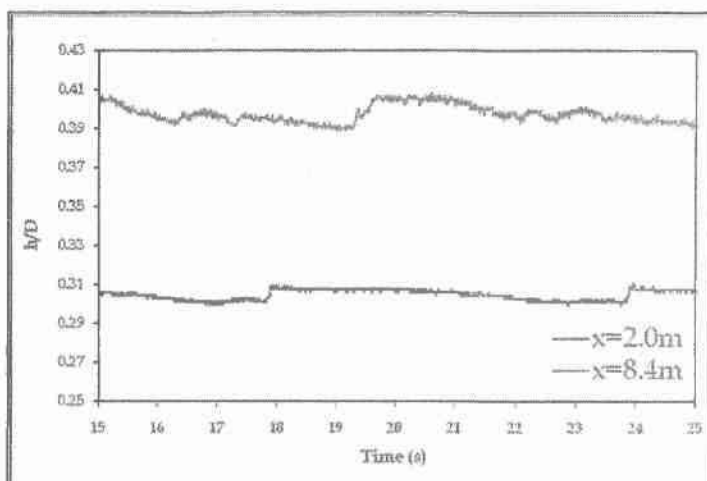
3. Κλίση : 1°

3.1 Λεία διαστρωματωμένη ροή :  $u_{LS} = 0.0116 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 1.5 \text{ m/s}$

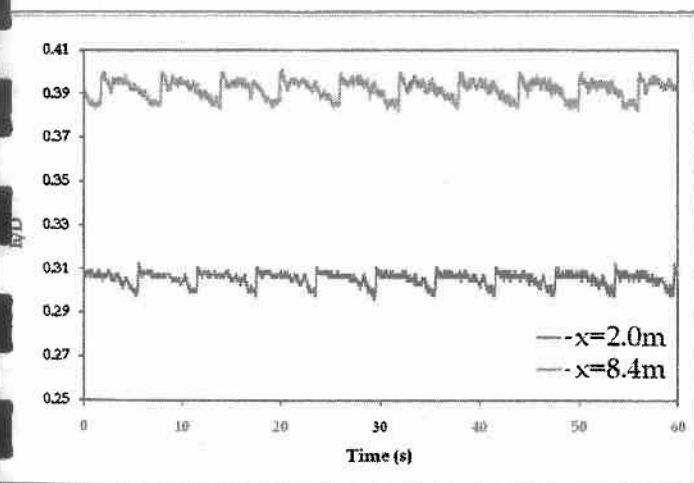
Μειώνουμε την παροχή της υγρής φάσης, διότι λόγο βαρύτητας αλλάζουν οι χάρτες καθεστώτων ροής με αποτέλεσμα την εύκολη μετατροπή από λεία διαστρωματωμένη ροή , σε διαστρωματωμένη ροή με 2-D κύματα.



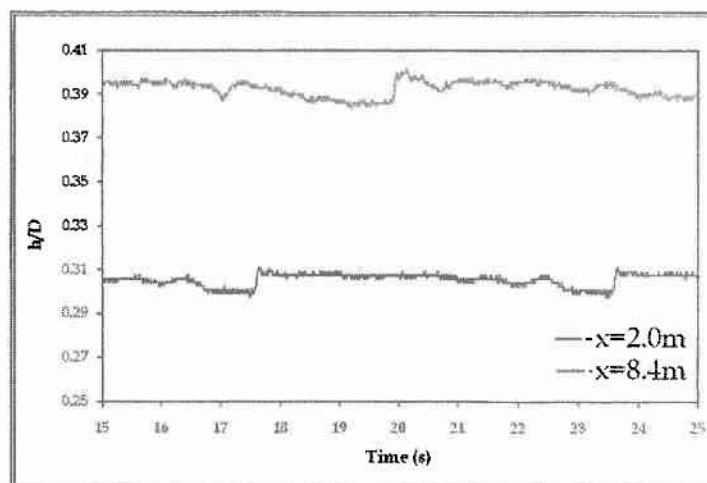
Σχήμα 4.25.α  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$



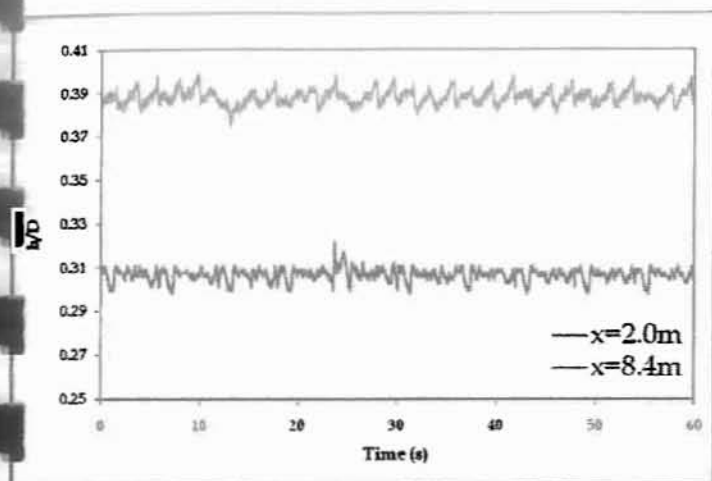
Σχήμα 4.25.β  $t_{\text{off}} = 4.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



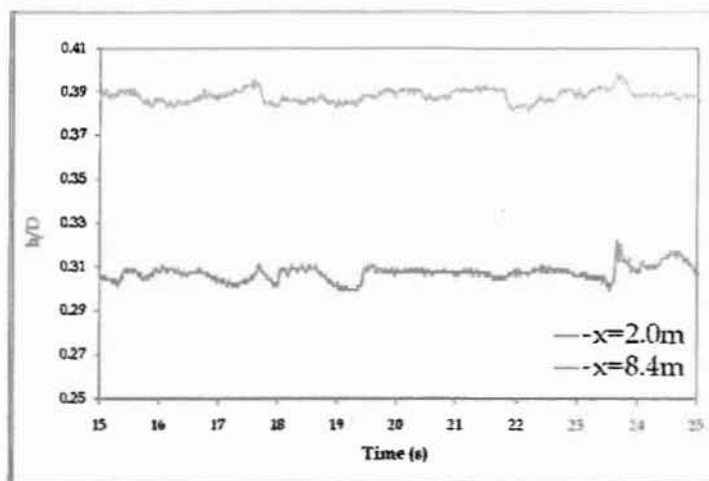
Σχήμα 4.26.α  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.26.β  $t_{\text{off}} = 5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

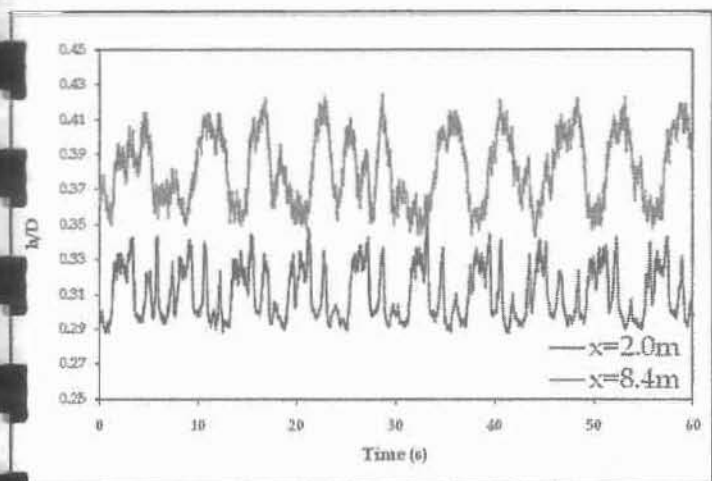


Σχήμα 4.27.α  $t_{off} = 5.5 \text{ s} - t_{on} = 0.5 \text{ s}$

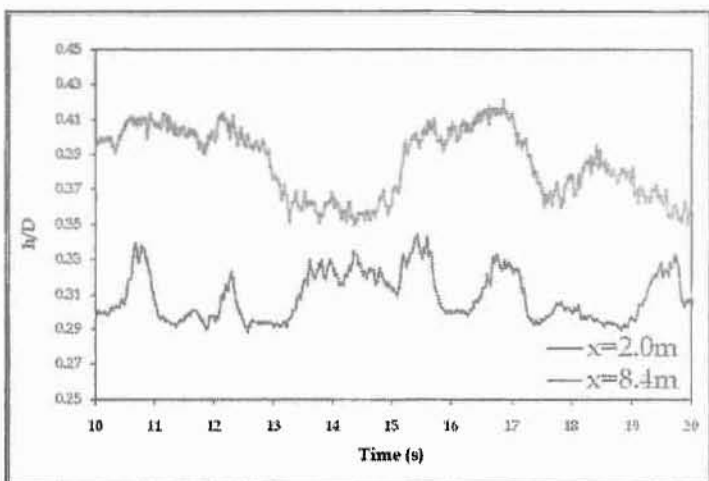


Σχήμα 4.27.β  $t_{off} = 5.5 \text{ s} - t_{on} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

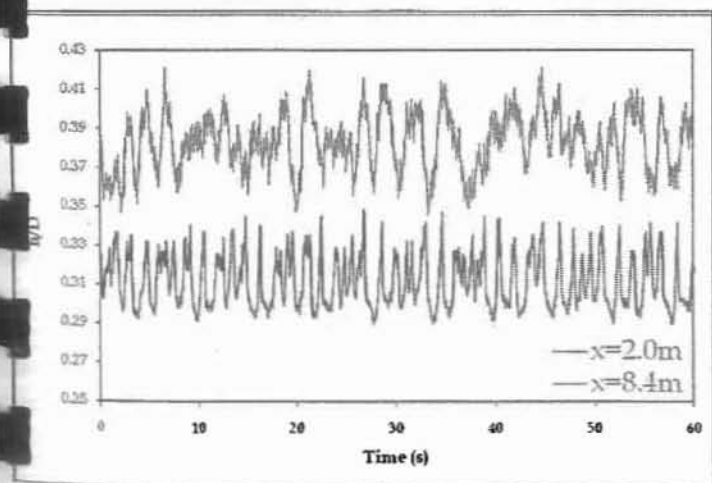
3.2 Διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D :  $u_{LS} = 0.0224 \text{ m/s}$  ,  $u_{GS} = 5 \text{ m/s}$



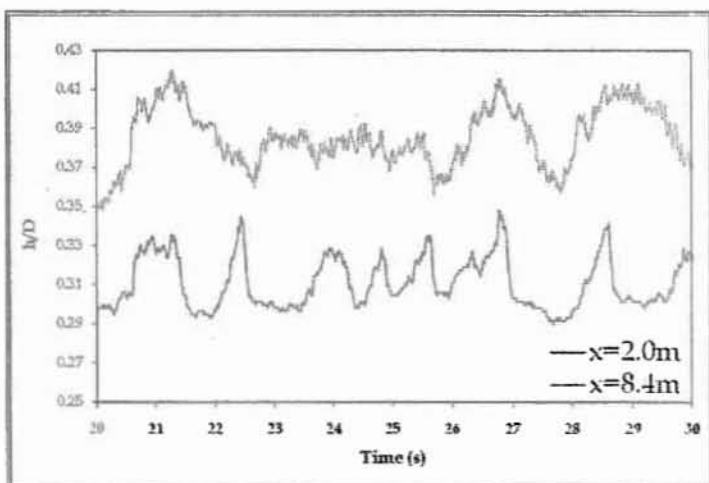
Σχήμα 4.28.α  $t_{off} = 4.5 \text{ s} - t_{on} = 1.5 \text{ s}$



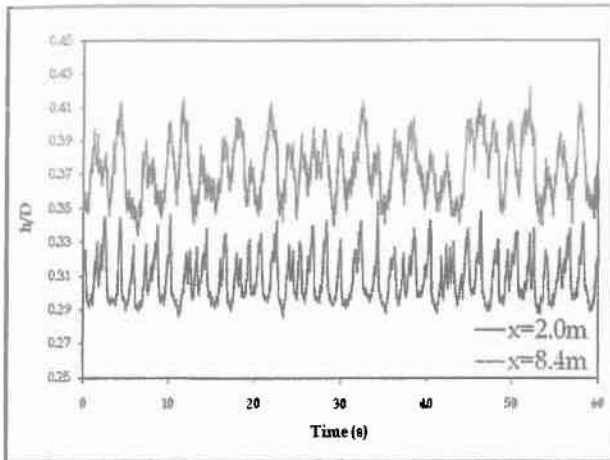
Σχήμα 4.28.β  $t_{off} = 4.5 \text{ s} - t_{on} = 1.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



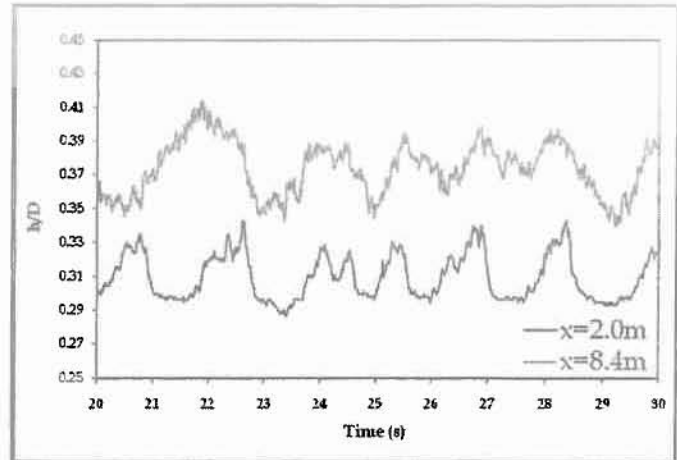
Σχήμα 4.29.α  $t_{off} = 5 \text{ s} - t_{on} = 1 \text{ s}$



Σχήμα 4.29.β  $t_{off} = 5 \text{ s} - t_{on} = 1 \text{ s}$  (μεγέθυνση)



Σχήμα 4.30.α  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$



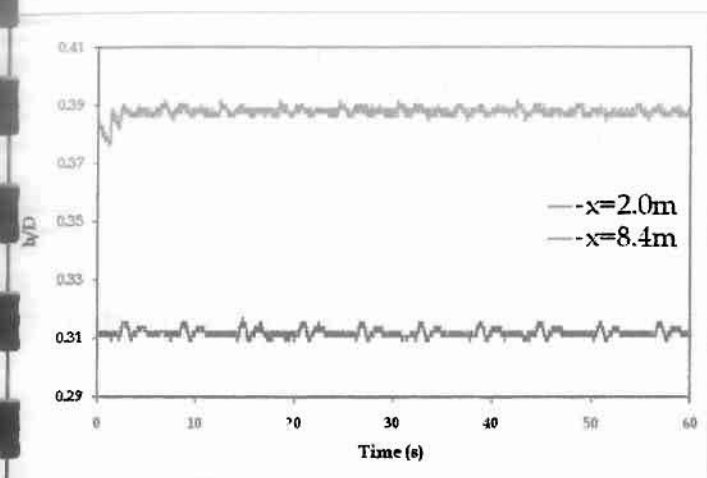
Σχήμα 4.30.β  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s} - t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$  (μεγέθυνση)

Για τη λεία διαστρωματωμένη ροή, παρατηρείτε ότι δεν υπάρχει μία ξεκάθαρη τάση. Καθώς, ενώ αρχικά φαίνεται να περνάμε στην μετάβαση στην ασταθή περιοχή σε κλίση  $0,25^\circ$  όπου βλέπουμε αύξηση της διαταραχής και μία μικρή μεταβολή στο καθεστώς ροής, στη συνέχεια σε κλίση  $0,5^\circ$  η διαταραχή μειώνεται, ενώ πάλι σε κλίση  $1^\circ$  παρατηρείται αύξηση της διαταραχής. Επίσης πρέπει αν σημειωθεί ότι τα παραπάνω ισχύουν ανεξαρτήτως του πάχους της διαταραχής.

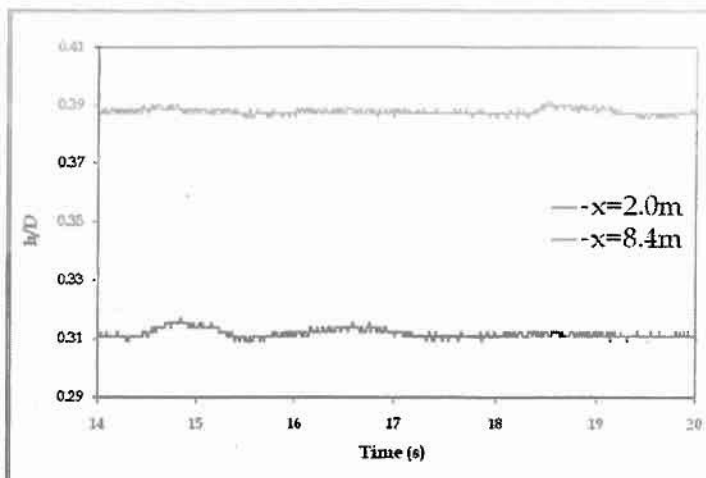
Για τη διαστρωματωμένη ροή με κύματα 2-D παρατηρείται σε όλες τις κλίσεις μια συνεχής αύξηση της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, που κ εδώ δεν παίζει ρόλο το πάχος της.

#### **4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΣΕ ΥΠΟ ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟ $1^\circ$ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ**

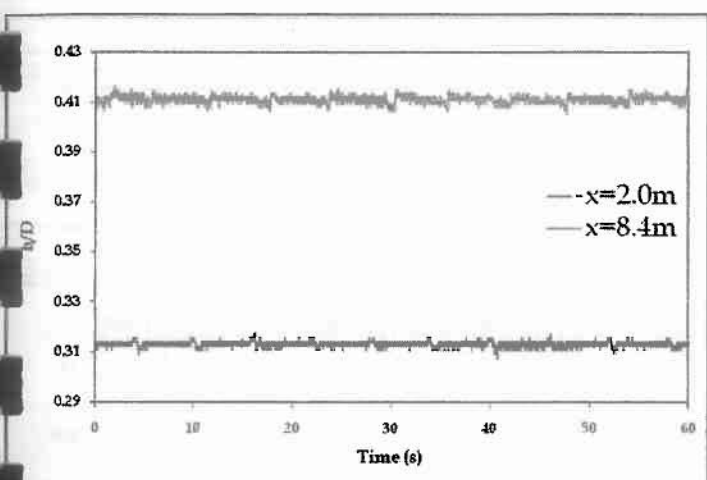
Το τελευταίο στάδιο του πειράματος είναι να γίνουν κάποιες μετρήσεις με την συνεχή αύξηση της παροχής της υγρής φάσης, κρατώντας σταθερή την εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή για  $t_{\text{off}} = 5.5 \text{ s}$  και  $t_{\text{on}} = 0.5 \text{ s}$ . Το πιο σημαντικό δε, είναι η μη επίδραση της αέριας φάσης στο σύστημα. Τα αποτελέσματα παρατίθενται κατά αύξουσα σειρά της παροχής της υγρής φάσης.



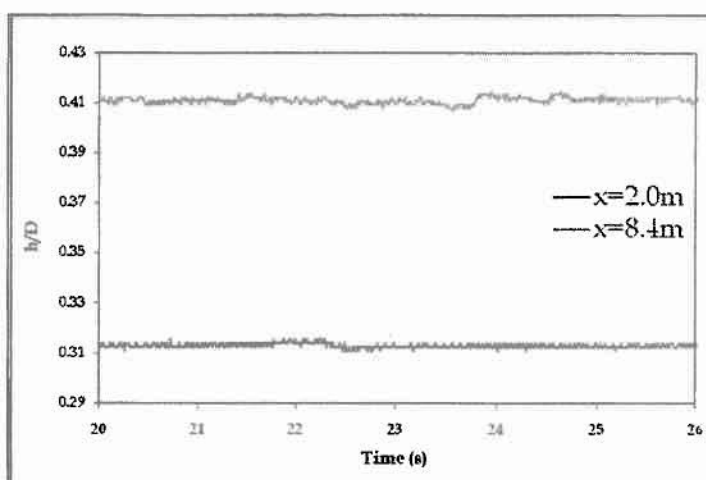
Σχήμα 4.31.α  $u_{LS} = 0.008763$  m/s



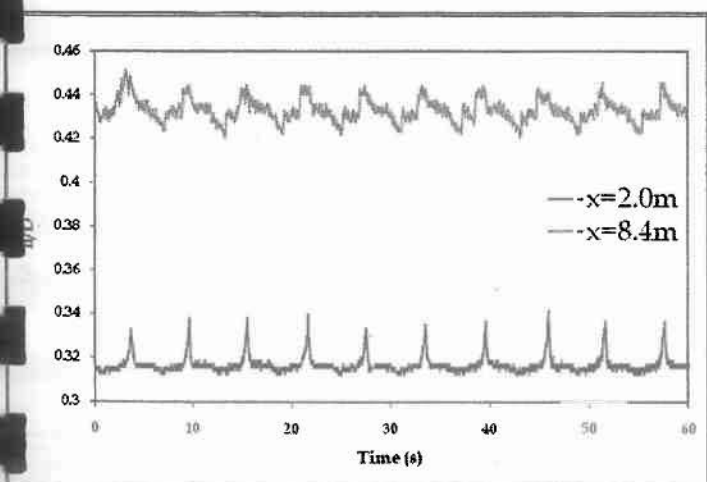
Σχήμα 4.31.β  $u_{LS} = 0.008763$  m/s (μεγέθυνση)



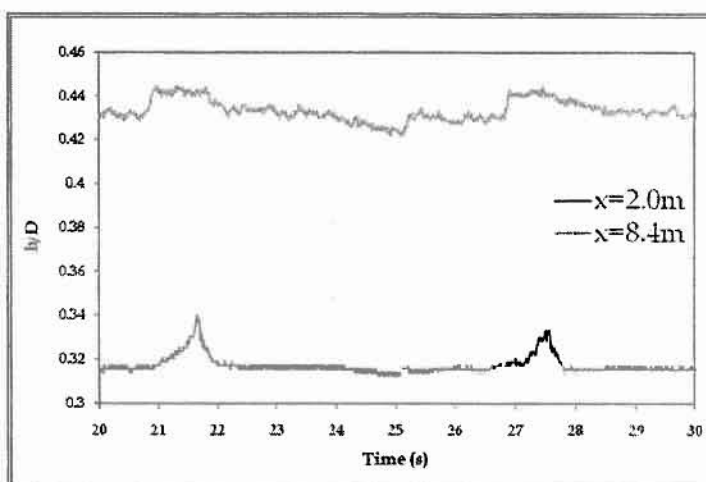
Σχήμα 4.32.α  $u_{LS} = 0.012563$  m/s



Σχήμα 4.32.β  $u_{LS} = 0.012563$  m/s (μεγέθυνση)

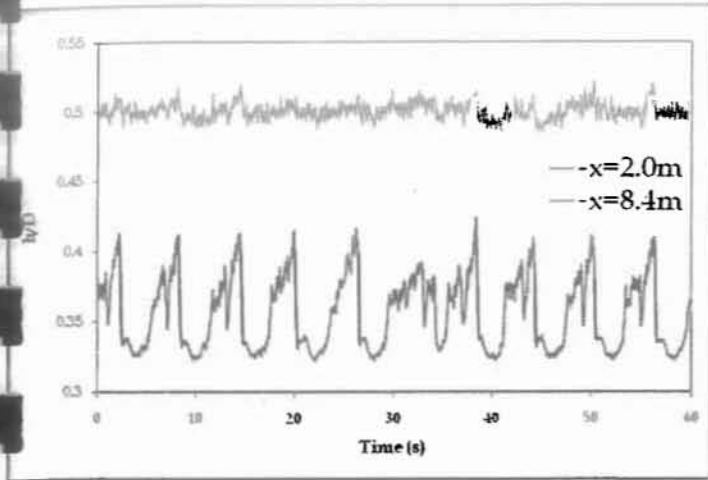


Σχήμα 4.33.α  $u_{LS} = 0.01688$  m/s

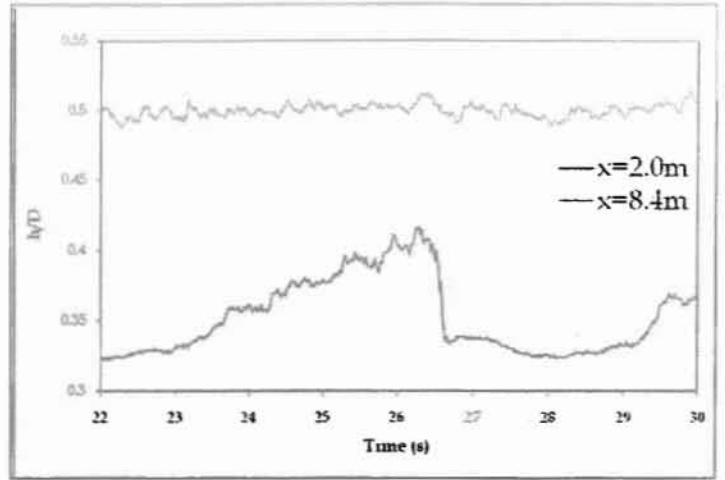


Σχήμα 4.33.β  $u_{LS} = 0.01688$  m/s (μεγέθυνση)

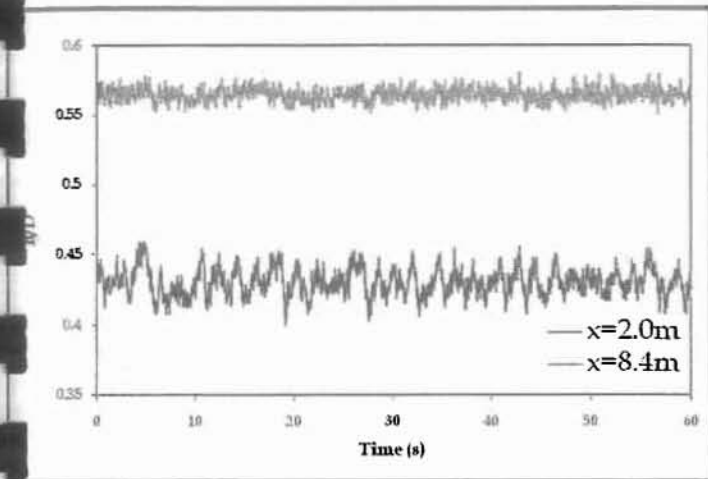




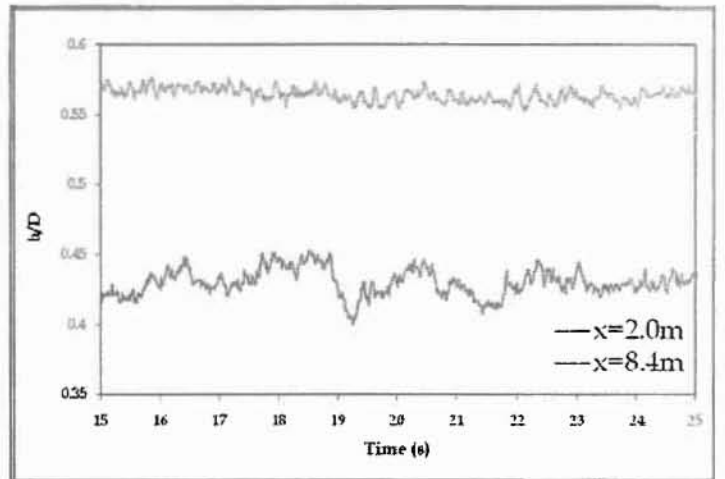
Σχήμα 4.34.α  $u_{LS} = 0.04464 \text{ m/s}$



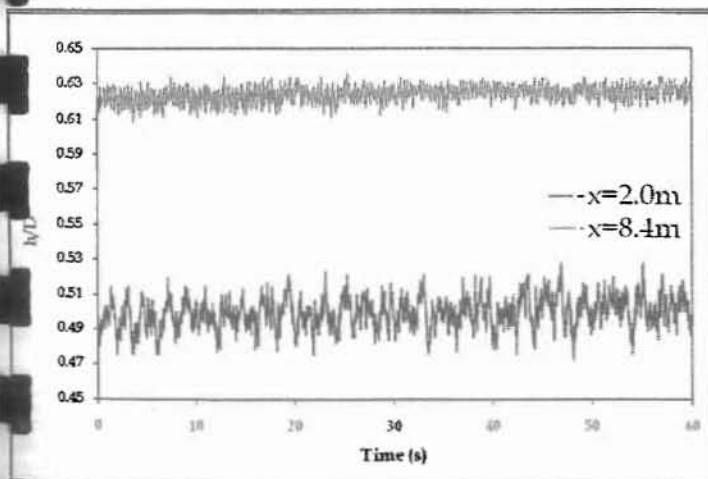
Σχήμα 4.34.β  $u_{LS} = 0.04464 \text{ m/s}$  (μεγέθυνση)



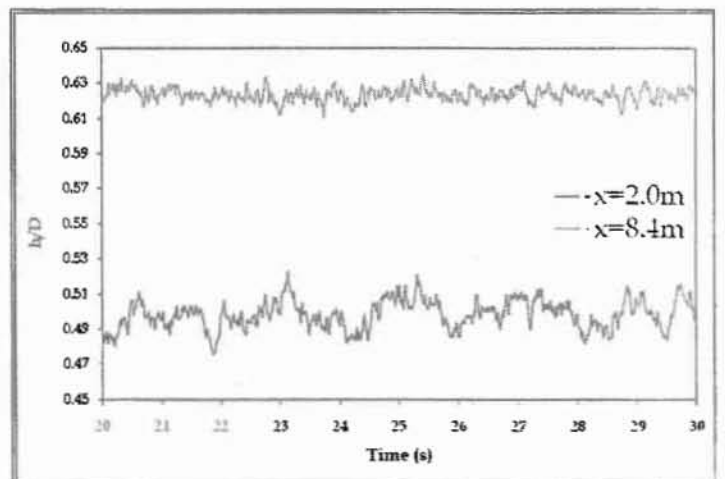
Σχήμα 4.35.α  $u_{LS} = 0.0724 \text{ m/s}$



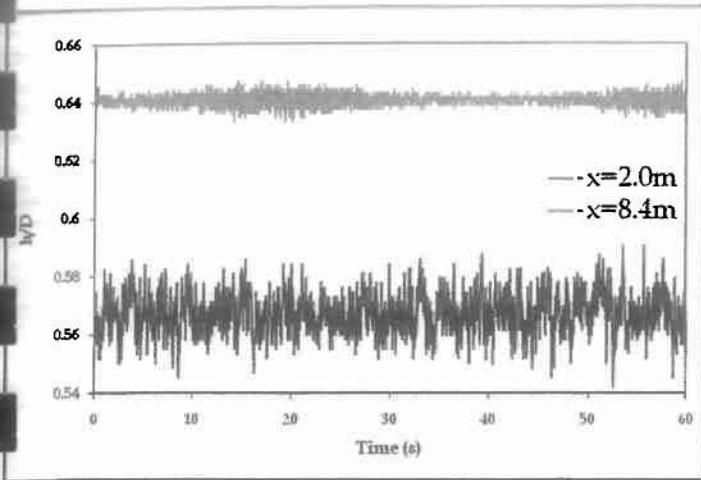
Σχήμα 4.35.β  $u_{LS} = 0.0724 \text{ m/s}$  (μεγέθυνση)



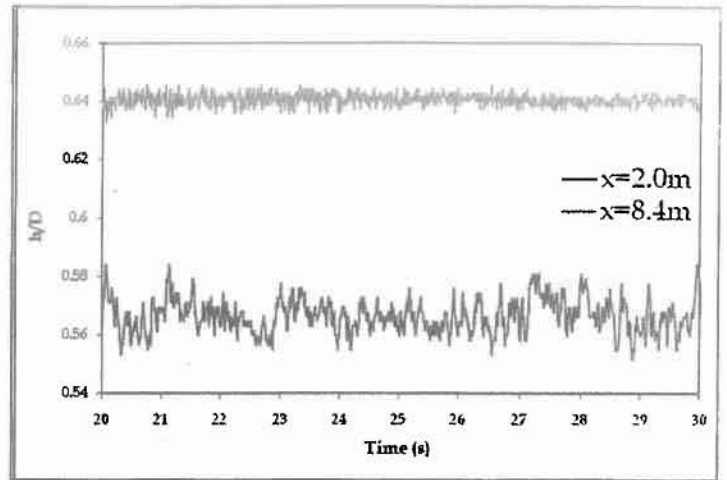
Σχήμα 4.36.α  $u_{LS} = 0.08628 \text{ m/s}$



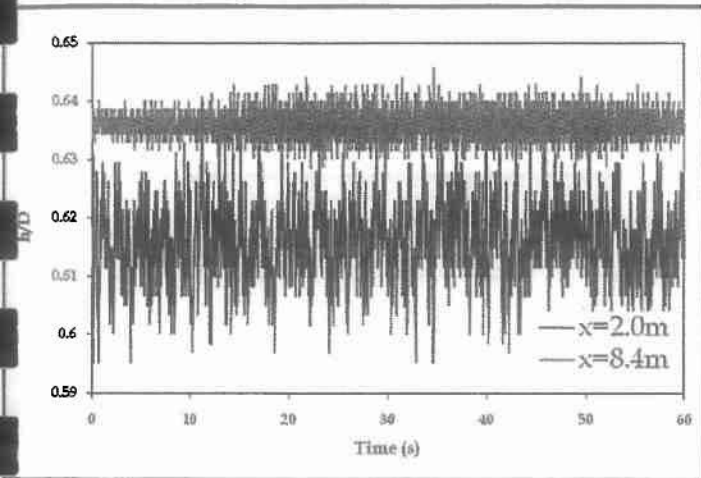
Σχήμα 4.36.β  $u_{LS} = 0.08628 \text{ m/s}$  (μεγέθυνση)



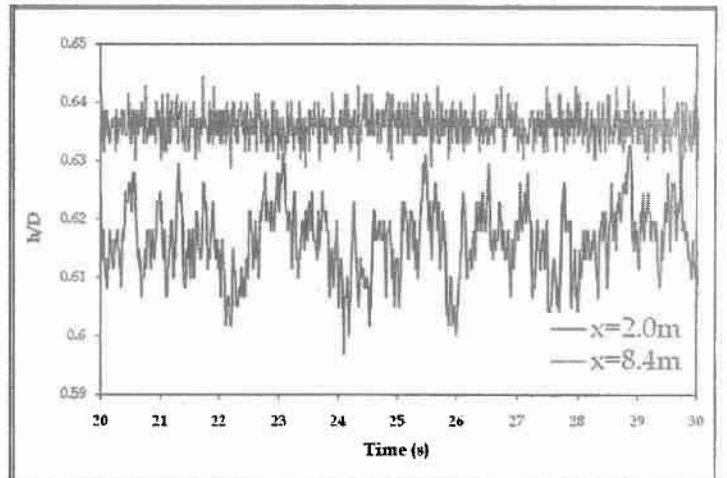
Σχήμα 4.37.α  $u_{LS} = 0.11404$  m/s



Σχήμα 4.37.β  $u_{LS} = 0.11404$  m/s (μεγέθυνση)

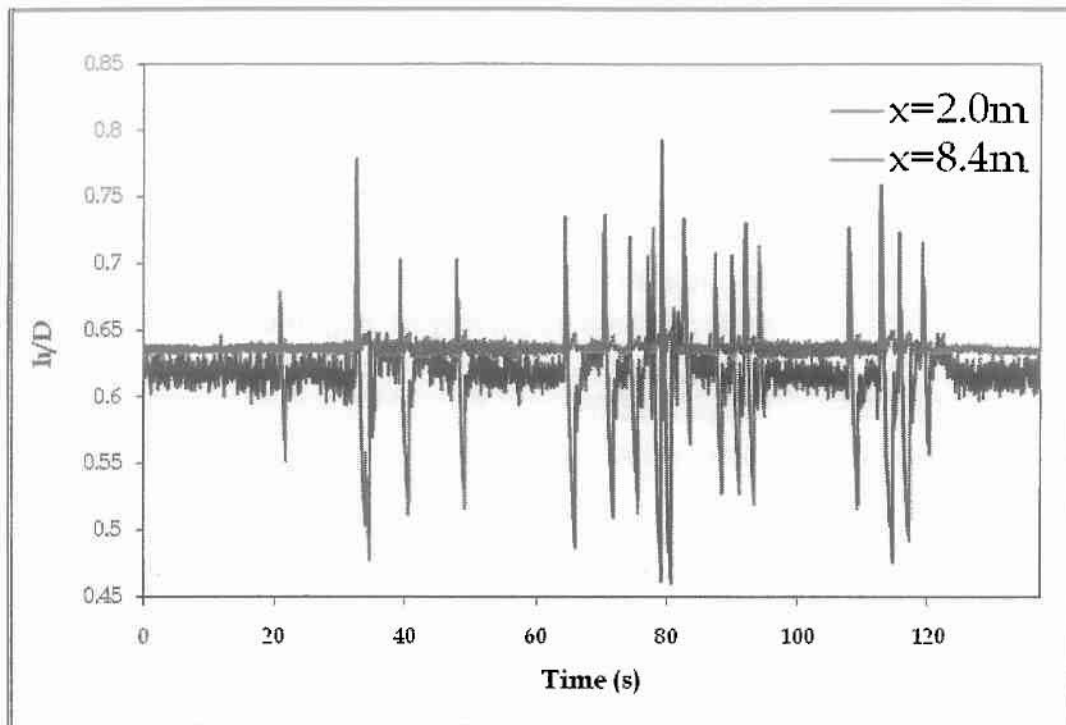


Σχήμα 4.38.α  $u_{LS} = 0.14184$  m/s

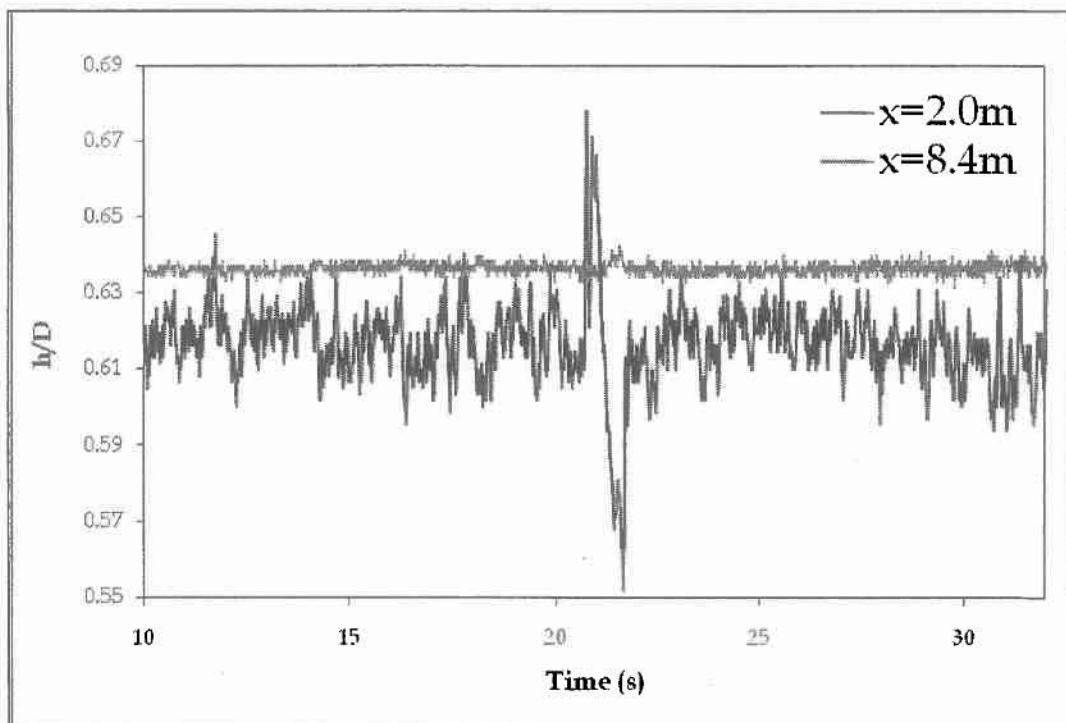


Σχήμα 4.38.β  $u_{LS} = 0.1418$  m/s (μεγέθυνση)

Η τελευταία μέτρηση που πραγματοποιείται, γίνεται κλείνοντας την εξωτερικά μεταβαλλόμενη διαταραχή αλλά δημιουργώντας μία δική μας ανοιγοκλείνοντας τυχαία την παροχή του αέρα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 4.39.



Σχήμα 4.39.α  $u_{LS} = 0.14184 \text{ m/s}$



Σχήμα 4.39.β  $u_{LS} = 0.1418 \text{ m/s}$  (μεγέθυνση)

**Συμπεράσματα :**

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει μία ξεκάθαρη συμπεριφορά της ροής. Καθώς ενώ κρατάμε σταθερό το πάχος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής για μικρές παροχές της υγρής φάσης, μέχρι και το σχήμα 4.33, φαίνεται να αυξάνεται η διαταραχή από τη θέση 1 ( $x=2m$ ) μέχρι τη θέση 2 ( $x=8.4m$ ). Στη συνέχεια όμως ενώ έχουμε αύξηση της παροχής η εξωτερική διαταραχή φαίνεται να σβήνει δείχνοντας ότι ο υμένας τείνει να είναι ευσταθής.

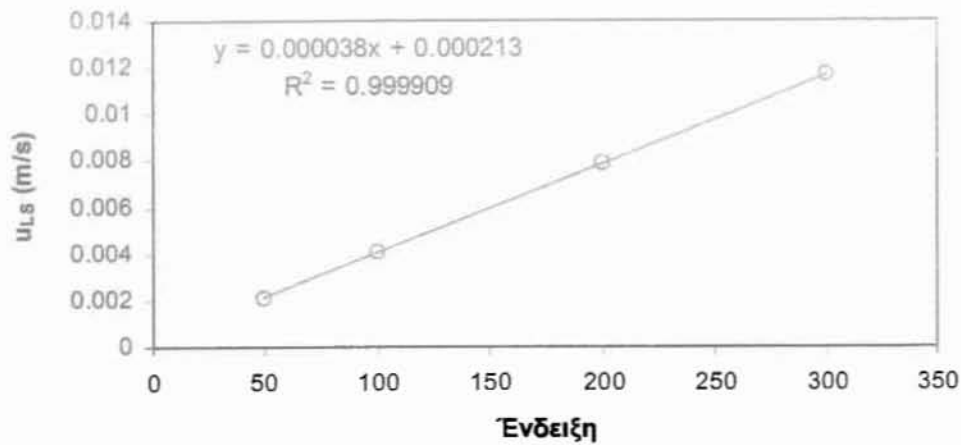
Η τάση του υμένα για ευστάθεια φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 4.39.β όπου ενώ η εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή είναι τεράστια στη θέση 1, γεμίζοντας σχεδόν όλο τον αγωγό, στη θέση 2 η διαταραχή φαίνεται σαν να μην υπάρχει.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

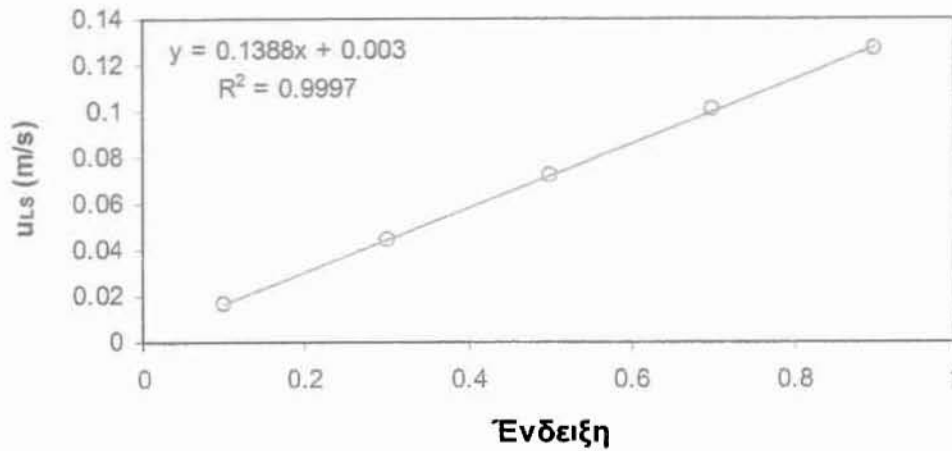
- Ανδρίτσος Ν. και Μποντόζογλου Β., «Σημειώσεις: Διφασική Ροή και Μεταφορά Θερμότητας», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 2006.
- Σαμαντάς Αθανάσιος, «Πειραματική μελέτη ευστάθειας ροής υγρού υμένα», Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 2008
- Χριστίνα Τζώτζη, «Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στη διφασική ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 2009
- Αζήζ Ερσάν, «Καθεστάτα διφασικής ροής αέρα-νερού σε οριζόντιο ή σχεδόν οριζόντιο αγωγό», Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 2006
- Andritsos, N, and T.J. Hanratty, Interfacial of interfacial waves in stratified gas-liquid flow. *AIChE J*, **33**, 444-454, 1987
- Andritsos, N., "Effect of pipe diameter and liquid viscosity on horizontal stratified flow", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1986
- Baker, O. Simultaneous Flow in Oil and Gas. *Oil and Gas J.*, **53**, 185- 195, 1954
- Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y., "Flow pattern transition for downward Inclined two phase flow; Horizontal to Vertical", *Chemical Engineering Science*, **37**, pp 735-740, 1982
- Govier, G. W. and Omer, M. M. Horizontal Pipeline Flow of Air-Water Mixture. *Can. J. Chemical Engineering*, **40** (3), pp. 93-104, 1962
- Hoogendoorn, C.J. Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. *Chem Engng Sci*, **9**, pp 205-217, 1959.
- Kosterin, S.I. An Investigation of the Influence of Diameter and Inclination of a Tube on the Hydraulic Resistance and Flow Structure of Gas-Liquid Mixtures. *Izvest. Akad. Nauk. USSR*, **12**, pp 1824-1830, 1949
- Lin, P.Y. , and T.J. Hanratty Effects of pipes diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, **13**, 549-563 1987
- Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K. "A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, **1**, pp. 537-553, 1974
- Petalas, N. and Aziz, K., "A mechanistic model for multiphase flow in pipes", *J. Can. Pet. Technol.*, **39**, pp. 43-55, 2000
- Scott, D.S. " Properties of co-current gas liquid flow." In Advances in Chemical Engineering, Vol. 4, Academic Press, New York, p. 200, 1963
- Spedding, P. L., Chen, J. J. J. and Nguyen, V.T., "Pressure drop in two phase gas-liquid flow in inclined pipes.", *Int. J. Multiphase Flow*, **8**, pp. 407-431, 1982
- Taitel, Y and Dukler, A.E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow". *AIChE J*, **26**, 47-55, 1976
- Weisman, J. and Kang, S. Y. "Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines". *Int. J. Multiphase Flow* **7**, 271-291, 1981
- Weisman, J., Dunkan, D., Gibson, J. and Crawford, Z. Effect of fluid properties and pipe diameter on two phase flow patterns in horizontal lines. *Int. J. Multiphase Flow* **5**, 437-461, 1979
- White, P.D. and R.L. Huntington, Horizontal Co-Current Two-Phase Flow of Fluid in Pipe Lines. *The Petroleum Engineer*, **27**(9), p 40, 1958

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

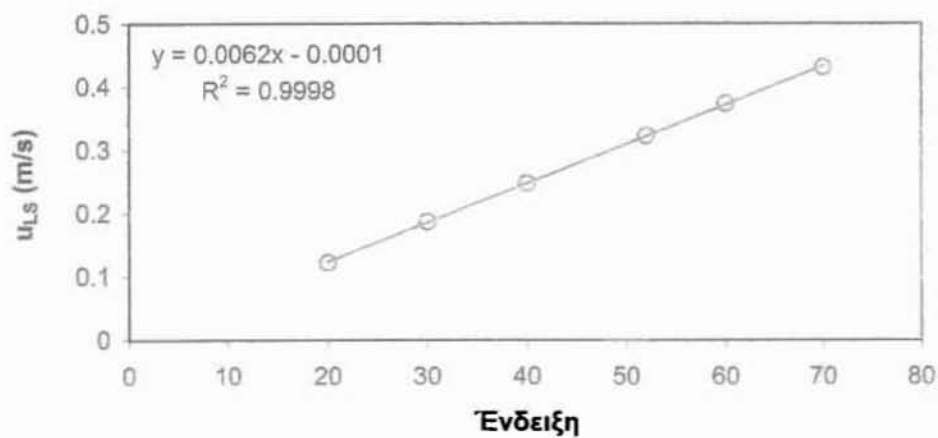
## Καμπύλες Βαθμονόμησης Ροομέτρων Υγρής φάσης



Σχήμα Π.1 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R4 (μικρής παροχής)



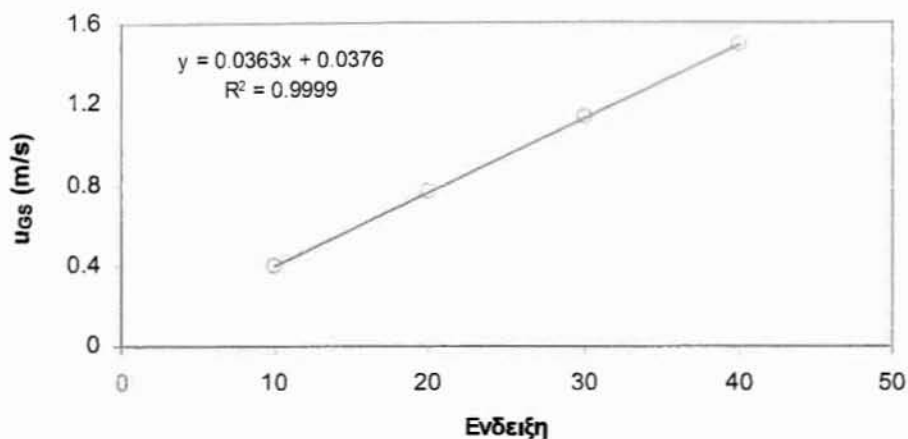
Σχήμα Π.2 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R5 (μεσαίας παροχής)



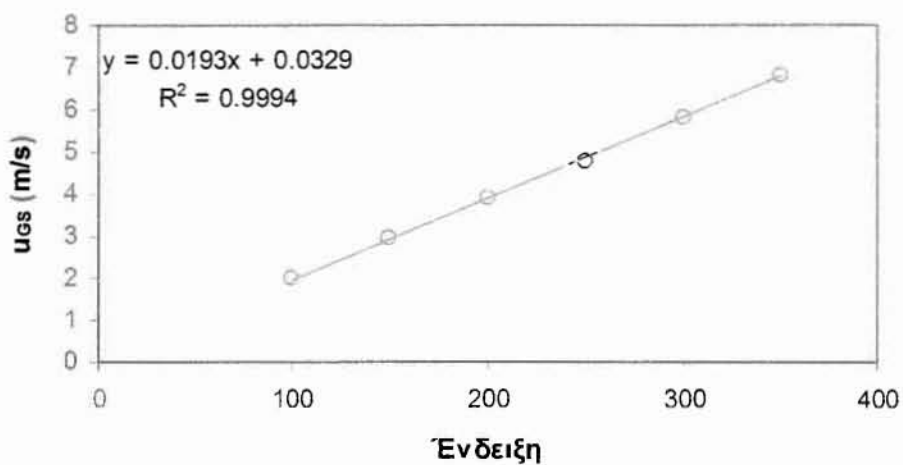
Σχήμα Π.3 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R6 (μεγάλης παροχής)



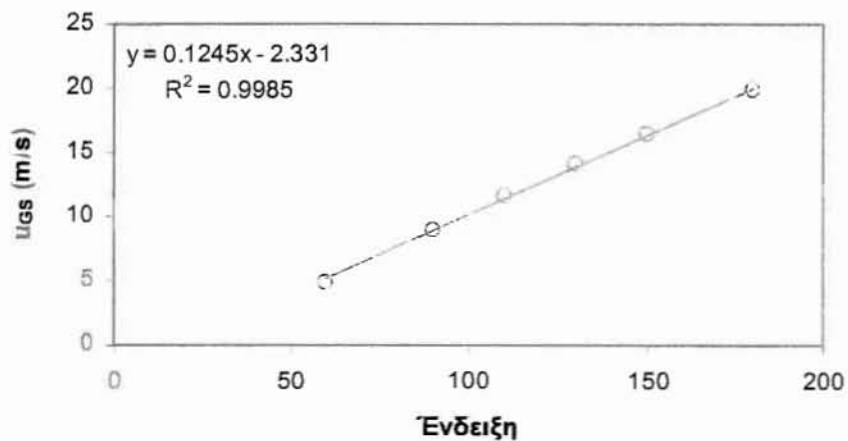
## Καμπύλες Βαθμονόμησης Ροομέτρων Αέριας Φάσης



Σχήμα Π.4 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R1 (μικρής παροχής) για αέρα



Σχήμα Π.5 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R2 (μεσαίας παροχής) για αέρα



Σχήμα Π.6 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R3 (μεγάλης παροχής) για αέρα



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104866