

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

‘ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ’

Διπλωματική Εργασία

Καλπακλή Αθανασία

Επιβλέπων: Δρ. Μ. Βλαχογιάννης

Φεβρουάριος 2008



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

Αριθ. Εισ.: 6142/1
Ημερ. Εισ.: 24-03-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2008
ΚΑΛ

© 2008 Καλπακλή Αθανασία

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
(Επιβλέπων)

Δρ. Μιχαήλ Βλαχογιάννης

Π Δ 140 F Τμήμα Μηχανοκτόμων
Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στον Αναπλ. Καθηγητή Μ. Βλαχογιάννη για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για την καθοδήγηση που μου προσέφερε, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια, προσφορά και συνεργασία του.

Επίσης, στην Διπλ. Χημικό Μηχανικό Τζώτζη Χριστίνα για την πολύτιμη βοήθειά της στην διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών	9
1.2 Σύμβολα – Παράμετροι της διφασικής ροής	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	12
2.1 Καθεστάτα ροής	12
2.1.1. Οριζόντια ροή	12
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ροή	15
2.3 Χάρτες καθεστώτων ροής	16
2.4 Μεταπτώσεις περιοχών	19
2.4.1. Μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα και στη δακτυλιοειδή ροή	19
2.5 Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής	20
2.5.1. Ομογενές μοντέλο	21
2.5.2. Διαχωρισμένο μοντέλο	22
2.6 Προσδιορισμός καθεστώτων ροής	25
2.6.1. Οπτική παρατήρηση	25
2.7 Πάχος υγρής στιβάδας	25
2.7.1. Μέθοδος και τεχνικές πειραματικών μετρήσεων πάχους υγρής στιβάδας	26
2.7.1.1. Μέτρηση με την άμεση μέθοδο	27
2.7.1.2. Μέτρηση με την αγωγιμομετρική μέθοδο	28
2.7.1.3. Βαθμονόμηση στα συρματάκια	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	31
3.1 Γενικά	31
3.2 Σύστημα έγχυσης	33
3.3 Σήμα άδειου σωλήνα	35
3.4 Πειραματική διαδικασία – Λήψη φωτογραφιών και σήματος	35
3.5 Διαδικασία λήψης φωτογραφιών και βίντεο	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ	37
4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	37
4.2 Οπτικοποίηση της ροής με έγχυση διαλύματος νερού – χρωστικής	39
4.2.1 Στρωματωμένη ροή	39
4.2.2 Κυματώδης ροή	42
4.2.3 Kelvin – Helmholtz	45
4.2.4 Ψευδοδιαλείπουσα ροή	48
4.3 Οπτικοποίηση της ροής με έγχυση διαλύματος νερού – χρωστικής – γλυκερίνης	51
4.3.1. Στρωματωμένη ροή	51

4.3.2. Κυματώδης ροή	54
4.3.3. Kelvin – Helmholtz	57
4.3.4. Ψευδοδιαλείπουσα ροή	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66

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
α	: συγκράτηση
γ	: ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (S/m)
θ	: γωνία κλίσης του αγωγού (rad)
λ	: διορθωτικός παράγοντας στο χάρτη Baker
μ	: δυναμικό ιξώδες (Pa·s)
ν	: κινηματικό ιξώδες (m ² /s)
ρ	: πυκνότητα (kg/m ³)
σ	: επιφανειακή τάση (N/m)
τ	: διατμητική τάση (N/m ²)
φ	: παράμετρος Lockhart-Martinelli
ψ	: διορθωτικός παράγοντας στο χάρτη Baker
s	: συντελεστής προστασίας

Δείκτες:

G	: αέρια φάση
L	: υγρή φάση

Επεξηγήσεις εννοιών :

Test section : τμήμα σωλήνα από Plexiglas

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διφασική ροή είναι από τις συνηθέστερες ροές στη φύση, όπως η ροή του αίματος και η κίνηση του καπνού και των σύννεφων. Ιδιαίτερη σημασία έχει αποκτήσει η ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους αγωγούς λόγω των πολλών 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.

Η διφασική ροή διέπεται βασικά από τις ίδιες βασικές αρχές της ρευστομηχανικής που προσδιορίζουν και την μονοφασική ροή ρευστών. Όμως, στη διφασική ροή οι δύο φάσεις (υγρή και αέρια) κατανομούνται 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.

Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής υγρού-αερίου είναι ότι η διεπιφάνεια υγρού-αερίου μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό δυνατών μορφών, οι οποίες είναι γενικά γνωστές με το όνομα καθεστώτα ή 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 θερμότητας, από τις φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων (πυκνότητες, ιξώδη, διατμητική τάση), καθώς και τη γεωμετρία του αγωγού (σχήμα διατομής, κλίση, ισοδύναμη διάμετρος). Η γνώση των χαρακτηριστικών της οριζόντιας 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.

Οι κυριότερες περιοχές που εμφανίζονται σε οριζόντιο αγωγό είναι: η διαχωρισμένη ροή με ή χωρίς κύματα (smooth/wavy stratified flow), η διαλείπουσα ροή (slug flow) και η δακτυλιοειδής ροή (annular flow).

Ο γενικός τρόπος εξέτασης των καθεστώτων ροής γίνεται με την κατασκευή χαρτών ροής. Οι χάρτες ροής είναι λογαριθμικά διαγράμματα που στον άξονα των x έχουν την φαινομενική ταχύτητα του αερίου και στον άξονα των y την φαινομενική ταχύτητα του υγρού.

Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην οπτική παρατήρηση των περιοχών ροής με φωτογράφιση και βιντεοσκόπηση. Χρησιμοποιήθηκε οριζόντιος αγωγός ($\theta=0^\circ$) νερού-αέρα, κυλινδρικής διατομής, ενώ λόγω μικρών παροχών ($U_{LS}=0.003-0.5\text{m/sec}$, $U_{GS}=1-11\text{m/sec}$) οι περιοχές ροής που εμφανίζονται είναι: η διαχωρισμένη ροή με ή χωρίς κύματα (smooth/wavy stratified flow) και η ψευδοδιαλείπουσα ροή (pseudoslug flow). Με σύστημα έγχυσης που θα περιγραφεί παρακάτω, έγινε εισαγωγή αρχικά ($1^{\text{η}}$ σειρά πειραμάτων) μείγματος νερού-χρωστικής

και έπειτα (2^η σειρά πειραμάτων) νερού-χρωστικής-γλυκερίνης και καταγράφηκαν με κάμερα και με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή τα καθεστώτα ροής υπό αυτές τις συνθήκες.

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 εξής (Ανδρίτσος & Παράς, 2004):

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 (α, 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

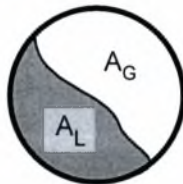
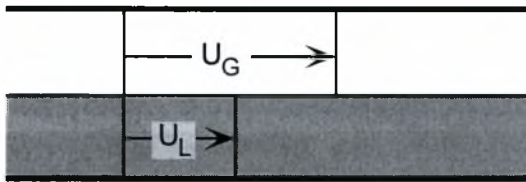
της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και τη υγρή φάση αντίστοιχα είναι A_G και A_L , τότε

$$a = \frac{A_G}{A}$$

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:

$$R + \alpha = 1$$



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:

$$G=G_L+G_G$$

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:

$$x = \frac{\dot{m}_G}{G} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L}$$

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

$$U_{GS} = \frac{Q_G}{A} = \frac{\dot{m}_G \rho_G}{A}$$

και η φαινομενική ταχύτητα υγρής φάσης ορίζεται ως

$$U_{LS} = \frac{Q_L}{A} = \frac{\dot{m}_L \rho_L}{A}$$

όπου Q_G είναι η ογκομετρική παροχή της αέριας φάσης, Q_L η ογκομετρική παροχή της υγρής φάσης και ρ η πυκνότητα.

Μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (Average Phase Velocities):

Η μέση πραγματική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$U_G = \frac{Q}{A\alpha} = \frac{G_G}{\rho_G A\alpha} = \frac{U_{GS}}{\alpha}$$

και η μέση πραγματική ταχύτητα υγρής φάσης γράφεται:

$$U_L = \frac{Q}{A\alpha} = \frac{G_L}{\rho_L A\alpha} = \frac{U_{LS}}{\alpha}$$

όπου α είναι το κλάσμα κενού.

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

$$U_M = \frac{Q_G + Q_L}{A} = U_{GS} + U_{LS}$$

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).

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

Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Αναφέρονται περιληπτικά τα καθεστώτα ροής που συναντώνται στη διφασική ροή υγρού-αερίου, ενώ περιγράφεται και η μετάπτωση στις διάφορες περιοχές ροής. Ακολουθούν οι εξισώσεις που διέπουν τη διφασική ροή και τα βασικά μεγέθη για την περιγραφή της. Τέλος γίνεται σύντομη αναφορά στα μοντέλα που προτάθηκαν κατά το παρελθόν για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ

Η μελέτη της διφασικής ροής συχνά περιορίζεται σε δύο γεωμετρίες, στη ροή σε κατακόρυφους αγωγούς και στη ροή σε οριζόντιους αγωγούς, αν και στην πράξη δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις ροών με συγκεκριμένη κλίση. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση του οριζόντιου αγωγού με μηδενική κλίση.

Δύο ακραίες περιπτώσεις καθεστώτων ροής συναντώνται :

1. η υγρή φάση είναι συνεχής και η αέρια φάση βρίσκεται διασπαρμένη σε αυτήν με τη μορφή μικρών φυσαλίδων και
2. η αέρια φάση είναι συνεχής με διασπαρμένη την υγρή φάση (μικρές φυσαλίδες)

Ανάμεσά τους υπάρχουν αρκετοί τύποι ανάμειξης των δύο φάσεων ενώ εμφανίζονται πλήρως διαχωρισμένες ροές (η διεπιφάνεια υγρού-αερίου είναι ορατή) και πλήρως αναμειγμένες (η διεπιφάνεια υγρού-αερίου δεν είναι ορατή).

2.1.1 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΟΗ

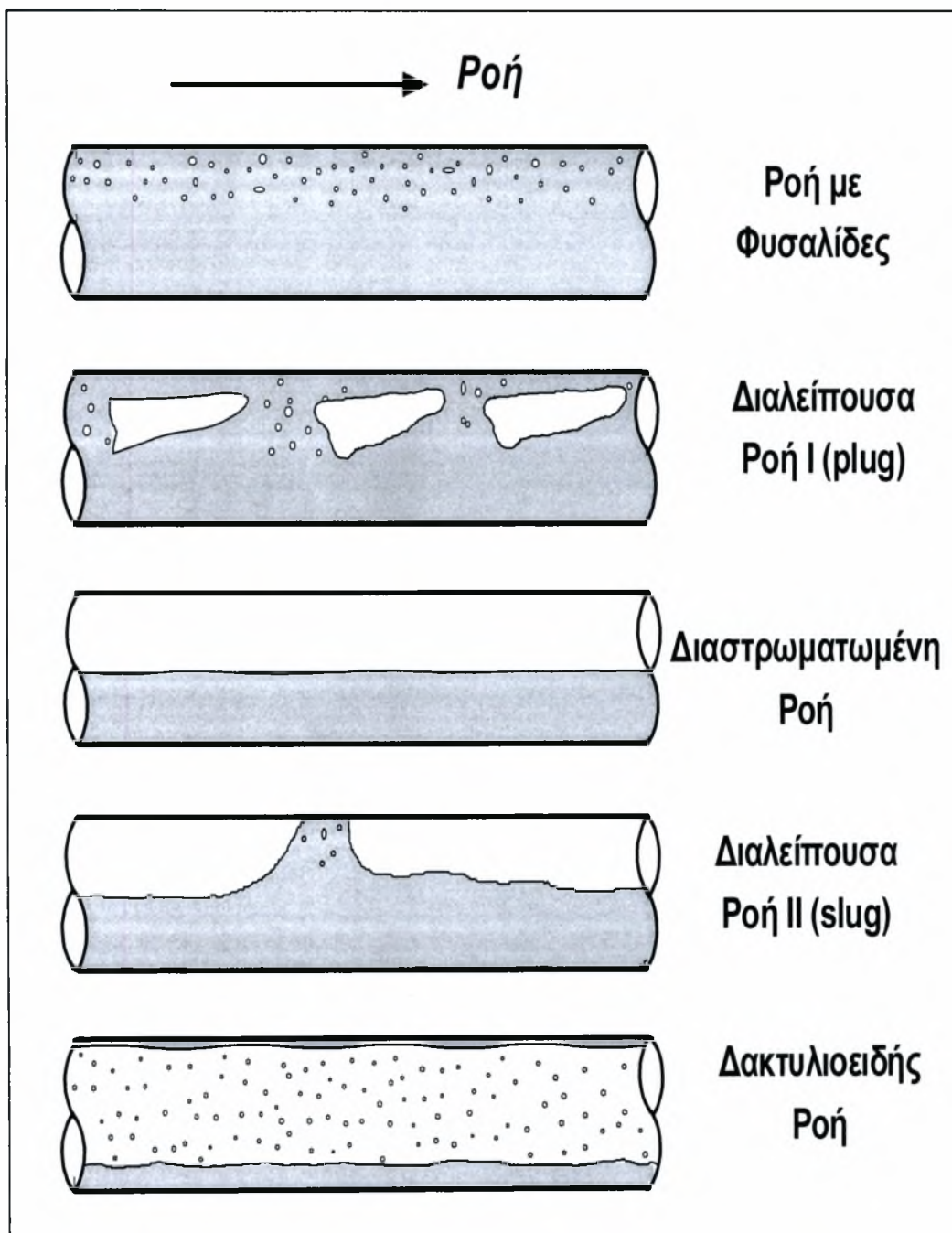
Μία πληθώρα περιοχών ροής έχουν αναγνωρισθεί στη βιβλιογραφία σε οριζόντια διφασική ροή. Οι πλέον αποδεκτές περιοχές ροής που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1, είναι οι εξής:

- 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.

Όπως προαναφέρθηκε, στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (εκτενής περιγραφή στο κεφάλαιο 3) για την παρούσα εργασία, εμφανίζονται μόνο η διαστρωματωμένη ροή (stratified flow), η κυματώδης ροή (wavy flow) και η ψευδοδιαλείπουσα ροή (pseudoslug flow).



Σχήμα 2.1: Σχηματική παράσταση των περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό

2.2 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 «αναρριχτικότητα» 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).

2.3 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).

Οι διάφοροι χάρτες καθεστώτων ροής που έχουν εμφανιστεί στη βιβλιογραφία συζητούνται εν συντομία παρακάτω κατά τη χρονολογική σειρά:

Οι Bergelin και Gazley (1949) πρότειναν έναν από τους πρώτους χάρτες καθεστώτων ροής. Το διάγραμμά τους βασίστηκε σε δεδομένα στο σύστημα αέρα-νερού σε σωλήνα 1 in. Ως συντεταγμένες χρησιμοποίησαν τις μαζικής ροές του υγρού και του αερίου, (M_L) και (M_G), αντίστοιχα.

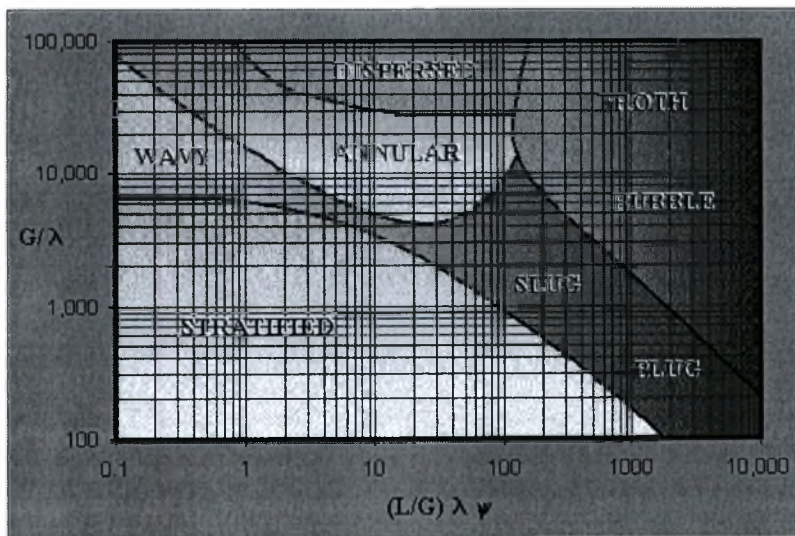
Ο Alves (1954) πρότεινε έναν χάρτη βασισμένο σε παρατηρήσεις για μίγματα αέρα-νερού και αέρα-λαδιού σε σωλήνα διαμέτρου 1,05 in. Ως συντεταγμένες χρησιμοποίησαν τις φαινομενικές ταχύτητες υγρού και αερίου αντίστοιχα, (U_{SL}) και (U_{SG}). Και τα δύο αυτά συστήματα μπορούσαν να σχεδιαστούν σε έναν ενιαίο χάρτη.

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/λ 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:

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\rho_G}{0.075} \cdot \frac{\rho_L}{62.3}\right)} \quad (2.1)$$

$$\psi = \left(\frac{73}{\sigma}\right) \left[\mu_L \left(\frac{62.3}{\rho_L}\right)^2\right]^{0.333} \quad (2.2)$$

όπου ρ_G και ρ_L οι πυκνότητες του αερίου και υγρού αντίστοιχα, μ_L το ιξώδες του υγρού και σ η επιφανειακή τάση.

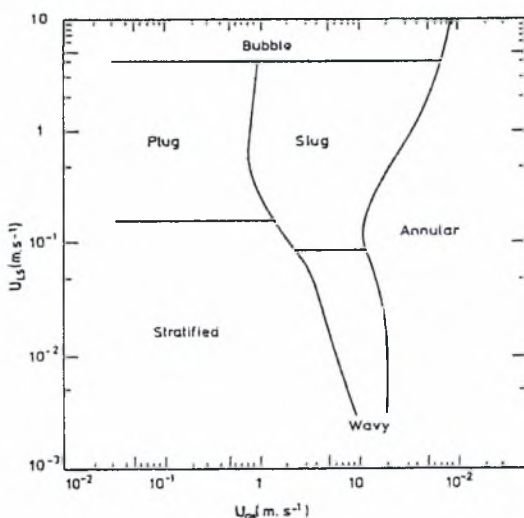


Σχήμα 2.2. Χάρτης καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό τύπου Baker

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.

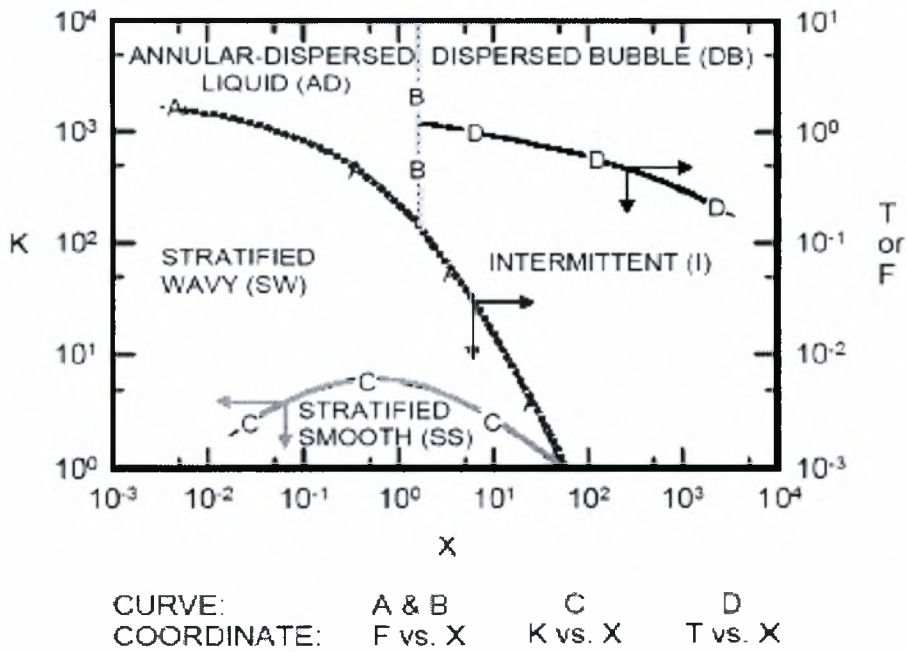
Ο Hoogendoorn (1959) έκανε χρήση την ταχύτητα του μίγματος, V_M , και το κλάσμα όγκου αερίου εισαγωγής, C_G , ως συντεταγμένες, όπως είχε υποδειχθεί προηγουμένως από το Kosterin (1949) σε έναν χάρτη καθεστώτων ροής που είναι βασισμένος σε αρκετά συστήματα όπως αέρας-πετρέλαιο και αέρας-νερό. Ο Hoogendoorn παρατήρησε μικρές επιδράσεις της διαμέτρου των αγωγών και του ιξώδους του υγρού για ιξώδες μικρότερο από 50 cp.

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.



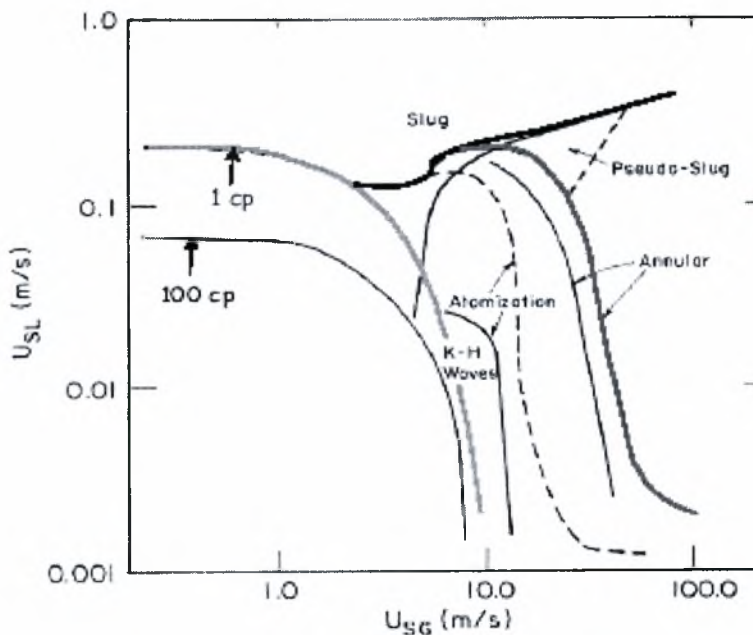
Σχήμα 2.3. Εμπειρικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Mandhane et al (1974).

Βέβαια το βασικό πρόβλημα ότι όλες οι μεταπτώσεις δεν μπορούν να αποδοθούν σωστά με κοινούς όρους παραμέτρων ισχύει και γι αυτόν τον χάρτη. Αυτό έχει αναγνωρισθεί από αρκετούς ερευνητές και οδήγησε στις προσπάθειες για μηχανιστική προσέγγιση στις μεταπτώσεις. Μια τέτοια επιτυχημένη προσπάθεια είναι αυτή των Taitel & Dukler (1976). (Σχήμα 2.4.)



Σχήμα 2.4. Μηχανιστικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Taitel & Dukler (1976)

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 2.5.



Σχήμα 2.5. Χάρτης των Andritsos et al (1989) για τα καθεστώτα ροής σε σύστημα νερό + γλυκερίνη-αέρας σε αγωγό διαμέτρου 9,5 cm.

2.4 ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

2.4.1. 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.

$$U_G > \left(1 - \frac{h}{D}\right) \left[\frac{g(U_L - U_G)\alpha}{U_G S_i} \right]^{0.5} \quad (2.3)$$

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 . 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:

$$Fr = \frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \frac{U_{GS}^2}{D g \cos \beta} \quad (2.4)$$

όπου β η κλίση του αγωγού, για μικρές κλίσεις από το οριζόντιο επίπεδο (στην παρούσα εργασία $\beta=0^\circ$). 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.

2.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων διφασικής ροής αερίου-υγρού (πτώση πίεσης, πάχος υγρής στιβάδας, συμπαρασυρμός) 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:

$$AG_g = AGx = \rho_g u_g A_g = \rho_g u_g \alpha A \quad (2.5.1)$$

και για την υγρή

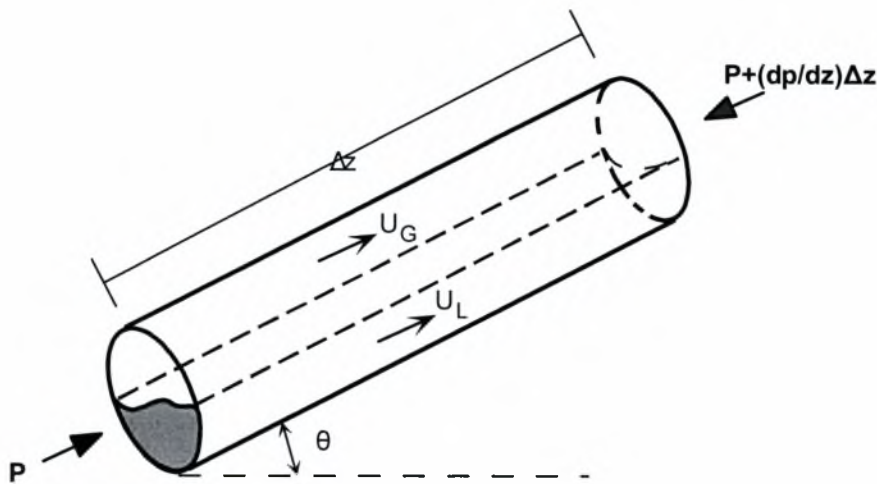
$$AG_l = AG(1-x) = \rho_l u_l A_l = \rho_l u_l (1-\alpha)A \quad (2.5.2)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις (2.6.1) και (2.6.2) προκύπτει

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_g}{u_l} \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{1-x}{x} \right)} \quad (2.5.3)$$

Η υπόλοιπη ανάλυση διαφοροποιείται ανάμεσα στα δύο μοντέλα.

Η υπόλοιπη ανάλυση διαφοροποιείται ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Αντιπροσωπευτικός όγκος ελέγχου για τα ισοζύγια μάζας και ορμής των δύο μοντέλων φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. 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.

2.5.1 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.

Στο ομογενές μοντέλο οι ταχύτητες των δύο φάσεων είναι ίσες επομένως

$$\alpha = 1/[1+(\rho_g/\rho_l)*((1-x)/x)] \quad (2.5.4)$$

Όταν ο λόγος πυκνοτήτων είναι μεγάλος-όπως συμβαίνει σε χαμηλές πιέσεις για τα συστήματα νερό/αέρα και νερό/ατμός- το κλάσμα κενού αυξάνεται απότομα με την ποιότητα και πλησιάζει την μονάδα ακόμα και για μικρές τιμές της ποιότητας.

Η πτώση πίεσης κατά τη ροή μπορεί να υπολογιστεί με ολοκληρωτικό ισοζύγιο ορμής για το σύνολο των δύο ρευστών. Ειδικά στο ομογενές μοντέλο το διφασικό μίγμα αντιμετωπίζεται ως ένα ρευστό, και συνεπώς το ισοζύγιο ορμής γίνεται :

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_F + \left(\frac{dp}{dz}\right)_A + \left(\frac{dp}{dz}\right)_G \quad (2.5.5)$$

Οι όροι στο δεξιό μέλος εκφράζουν την πτώση πίεσης λόγω τριβής, λόγω επιτάχυνσης και λόγω βαρύτητας. Η πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης θεωρείται συνήθως αμελητέα.

Το κύριο ερώτημα κατά την εφαρμογή του ομογενούς μοντέλου αφορά την επιλογή της πυκνότητας και του ιξώδους του ψευδορευστού που αναπαριστά το διφασικό μίγμα. Η πυκνότητα του μίγματος υπολογίζεται, από τις πυκνότητες των δύο φάσεων και το κλάσμα κενού, με τη σχέση :

$$\rho = \rho_g + \rho_l (1-\alpha) \quad (2.5.6)$$

Με αντικατάσταση από την (2.5.4) προκύπτει

$$1/\rho = x/\rho_g + (1-x)/\rho_l \quad (2.5.7)$$

Η επιλογή του ισοδύναμου ιξώδους είναι καθαρά εμπειρική. Μία από τις σχέσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι και η ακόλουθη, που έχει το προτέρημα να είναι ανάλογη με την εξίσωση (2.5.7) στην πυκνότητα.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l} \quad (2.5.8)$$

Η πτώση πίεσης κατά τη διφασική ροή εκφράζεται συχνά ως πολλαπλάσιο της πτώσης πίεσης κάποιας αντίστοιχης μονοφασικής ροής. Ένα παράδειγμα τέτοιου πολλαπλασιαστή δίνεται από τη σχέση :

$$(dp/dz)_F = (dp/dz)_{l0} \phi_{l0}^2 \quad (2.5.9)$$

Ο όρος $(dp/dz)_{l0}$ παριστάνει την πτώση πίεσης σε μονοφασική ροή, υγρού με παροχή ίση με την συνολική παροχή, G των δύο φάσεων. Ανάλογες σχέσεις προκύπτουν αν ληφθεί ως παροχή αναφοράς η παροχή μιας ή και των δύο φάσεων σε συνθήκες αερίου ή υγρού. Μία τιμή του πολλαπλασιαστή ϕ_{l0}^2 , για την πτώση πίεσης λόγω τριβής από το ομογενές μοντέλο βρίσκεται, με την χρήση του τύπου του Blasius για τον συντελεστή τριβής, ίση με :

$$\phi_{l0}^2 = [1-x(1-\rho_l/\rho_g)][1+x*(\mu_l-\mu_g)/\mu_g]^{-1/4} \quad (2.5.10)$$

Το ομογενές μοντέλο δίνει καλές εκτιμήσεις όταν $\rho_l/\rho_g < 10$ ή όταν $G > 2000 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Σε χαμηλές πιέσεις όμως, οι προβλέψεις του μοντέλου μπορεί να είναι ιδιαίτερα ανακριβείς.

2.5.2 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 (Φ^2) και το κλάσμα κενού (α) με τις ανεξάρτητες μεταβλητές ροής.

Η γενική εξίσωση για το κλάσμα κενού α είναι:

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

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.

Πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης + Πτώση πίεσης λόγω πίεσης + Πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας : Ορμή

Και έτσι

$$\begin{aligned} -\frac{dp}{dz} \delta z \frac{\pi d^2}{4} - \tau_w \delta z \pi d - \frac{\pi d^2}{4} \delta z [\alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_l] g \sin \theta = \\ \frac{\pi d^2}{4} \frac{d}{dz} [\alpha \rho_g u_g^2 + (1-\alpha) \rho_l u_l^2] \delta z \end{aligned} \quad (2.5.11)$$

Τώρα, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$u_g = \frac{xG}{\alpha \rho_g}$$

$$u_l = \frac{(1-x)G}{(1-\alpha) \rho_l}$$

$G = \frac{m}{A}$: ειδική μαζική ροή ($\text{kg/m}^2\text{s}$) = συνολική μαζική ροή/διατομή της ροής..

Η εξίσωση (2.5.11) γίνεται

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau_w}{D} + [\alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_l] g \sin \theta + G^2 \frac{d}{dz} \left[\frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_l} \right] \quad (2.5.12)$$

Μπορεί να σημειωθεί ότι:

1. Όπως με την ομογενή ροή, η συνολική πτώση πίεσης διαιρείται σε τρία μέρη: την πτώση πίεσης λόγω της τριβής, λόγω βαρύτητας και λόγω επιτάχυνσης.
2. Οι όροι της βαρύτητας και της επιτάχυνσης απαιτούν γνώση του κενού μέρους α .
3. Για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων απαιτούνται επιπλέον σχέσεις για τη διατμητική τάση στο τοίχωμα.

Ένας εναλλακτικός τρόπος επίλυσης είναι οι ημιεμπειρικές σχέσεις που ανέπτυξαν οι Lockhart & Martinelli (1949). Βασιζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα που καλύπτουν σχεδόν όλες τις περιοχές ροής που εμφανίζονται στην οριζόντια

διφασική ροή όρισαν τους πολλαπλασιαστές Φ_G^2 και Φ_L^2 που εκφράζουν το λόγο της πτώσης πίεσης του μίγματος στο σωλήνα ως προς την πτώση πίεσης κάθε ρευστού όταν ρέει μόνο του.

$$\Phi_G^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_G} \tag{2.5.13}$$

$$\Phi_L^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_L} \tag{2.5.14}$$

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \tag{2.5.15}$$

Οι πολλαπλασιαστές Φ_G^2 και Φ_L^2 μπορούν να συσχετιστούν με την παράμετρο X^2 με βάση τις παρακάτω σχέσεις (Chisholm, 1973):

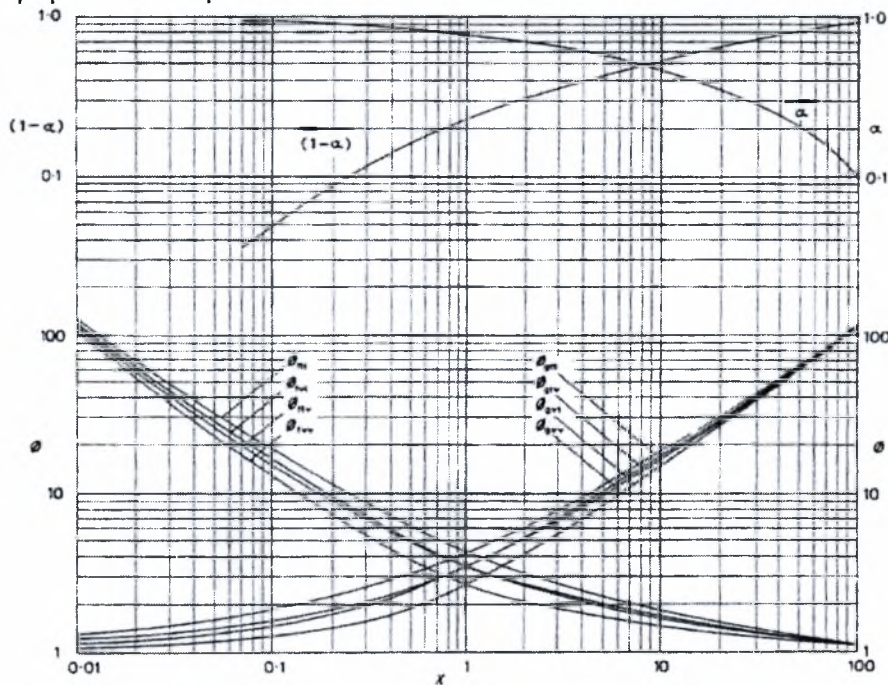
$$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2 \text{ και}$$

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

όπου C μια σταθερά η οποία μπορεί να πάρει τις παρακάτω τιμές:

Αέριο	Υγρό	C
τυρβώδης	τυρβώδης	20
τυρβώδης	στρωτή	12
στρωτή	τυρβώδης	10
στρωτή	Στρωτή	5

Επίσης στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ X και Φ από πολλά πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2.7 Η συσχέτιση των Lockhart-Martinelli

Μια πιθανόν ακριβέστερη εμπειρική σχέση είναι η συσχέτιση του Friedel (1979), η οποία προέκυψε από ελαχιστοποίηση του σφάλματος για μεγάλη βάση πειραματικών δεδομένων πτώσης πίεσης. Ο πολλαπλασιαστής ως προς τη συνολική παροχή, φ_{L0}^2 , δίνεται από τη σχέση

$$\varphi_{L0}^2 = A_1 + \frac{3,2A_2A_3}{Fr^{0.045}We^{0.035}} \quad (2.5.16)$$

όπου

$$A_2 = x^{0.78}(1-x)^{0.224} \quad (2.5.16 \alpha)$$

$$A_3 = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.7} \quad (2.5.16 \beta)$$

$$Fr = \frac{G^2}{gD\rho} \quad (2.5.17 \gamma)$$

$$We = \frac{G^2D}{\rho\sigma} \quad (2.5.17 \delta)$$

Οι συντελεστές τριβής f_{L0} και f_{G0} υπολογίζονται από τη συσχέτιση της μονοφασικής ροής για τη συνολική παροχή, G , ως υγρό και αέριο αντίστοιχα. D είναι η διάμετρος (ή η ισοδύναμη διάμετρος για μη-κυκλική διατομή), σ η επιφανειακή τάση και $\bar{\rho}$ η μέση πυκνότητα του ομογενούς μοντέλου, όπως ορίζεται από την εξ. (2.5.6).

2.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ

2.6.1 Οπτική παρατήρηση

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).

2.7 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 διφασική 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 διφασικής 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:

$$\frac{h}{D} = e^K \frac{(Re_{sL})^a}{(Re_{sG})^b} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^c \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^d \quad (2.7.1)$$

όπου, Re_{sG} , Re_{sL} είναι ο αριθμός Reynolds αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα.
 ρ_G , ρ_L είναι η πυκνότητα αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα.
 μ_G , μ_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 διφασική ροή. Η εξίσωση που παρουσίασε είναι:

$$\alpha = (1 + x^{0.8})^{-0.378} \quad (2.7.2)$$

όπου α 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:

$$\frac{\langle h \rangle}{D} = \frac{6.59 F_H}{[2.3^5 + (90 F_H)^5]^{0.2}} \quad (2.7.3)$$

όπου

$$F_H = \frac{\gamma}{Re_{sG}^{0.9}} \frac{\mu_L}{\mu_G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \quad (2.8.4)$$

2.7.1 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)

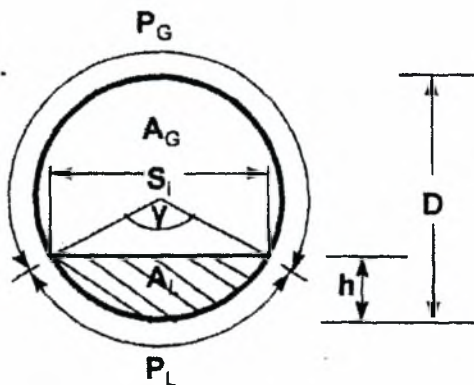
2.7.1.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟ

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.

$$P_L = \frac{\pi}{180^\circ} r \cdot \gamma \tag{2.7.1}$$

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left[1 - 2 \left(\frac{h}{D} \right) \right] \tag{2.7.2}$$

$$\frac{h}{D} = \frac{1 - \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right)}{2} \tag{2.7.3}$$



Σχήμα 2.8. Γεωμετρία υπολογισμού του υγρού ύψους

$$\frac{A_L}{A} = \frac{1}{2\pi} (\gamma - \sin \gamma) \quad (2.7.4)$$

$$\frac{A_G}{A} = 1 - \frac{A_L}{A} \quad (2.7.5)$$

$$\frac{S_i}{D} = \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (2.7.6)$$

2.7.1.2 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 :

$$C = \pi h \gamma / \ln ((D + (D^2 - d^2)^{0.5})/d) \quad (2.7.7)$$

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

Για να εφαρμοσθεί η παραπάνω σχέση δεν λαμβάνονται υπόψη η καμπυλότητα του αγωγού και οι διαταραχές του ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα των συρμάτων (end effects). Το μειονέκτημα αυτό αναιρείται αφενός με την τοποθέτηση των συρμάτων σε μικρή απόσταση και αφετέρου με τη βαθμονόμηση.

Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη από Plexiglas, η μορφή της οποίας φαίνεται στο σχήμα 2.9. Τα καθαυτό μετρητικά στοιχεία (β) έχουν τη μορφή βύσματος (plug) και μπορούν να τοποθετούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές. Το κάτω μέρος τους έχει υποστεί επεξεργασία σε τόρνο έτσι ώστε να μεταβάλλεται η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα. Υπάρχουν δύο ομάδες 8 θέσεων σε απόσταση 6 cm η μία από την άλλη κατά την αξονική διεύθυνση. Οι γειτονικές υποδοχές (θέσεις) σχηματίζουν γωνία 45° μεταξύ τους στην περιφέρεια του αγωγού. Στην πρώτη ομάδα τοποθετούνται ζεύγη συρμάτων (conductance probes) για την μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας. Στη δεύτερη ομάδα θέσεων τοποθετείται μία άλλη σειρά μετρητικών στοιχείων ώστε, σε συνδυασμό με την προηγούμενη, να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις της ταχύτητας των κυμάτων της υγρής στιβάδας.

Κάθε ζεύγος συρμάτων είναι κατασκευασμένο από μεταλλικά ανοξείδωτα σύρματα (chromel) διαμέτρου 0.5mm που απέχουν μεταξύ τους 2mm. Στο σχήμα 2.15 φαίνεται ένα μετρητικό στοιχείο με ζεύγος παράλληλων συρμάτων. Η σχετικά

μεγάλη διάμετρος των συρμάτων εξασφαλίζει την ακαμψία του μέσα στο πεδίο ροής, και παράλληλα επιτρέπει την βαθμονόμησή τους έξω από την μετρητική διάταξη. Η πιθανώς μειωμένη απόκριση σε σχέση με λεπτότερα σύρματα παρουσιάζεται σαν το μόνο μειονέκτημά τους. Για αυτόν ακριβώς το λόγο κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για έλεγχο μετρητικά με σύρματα διαμέτρου 0.1mm, τα οποία όμως βρέθηκε ότι δεν παρουσιάζουν σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά.

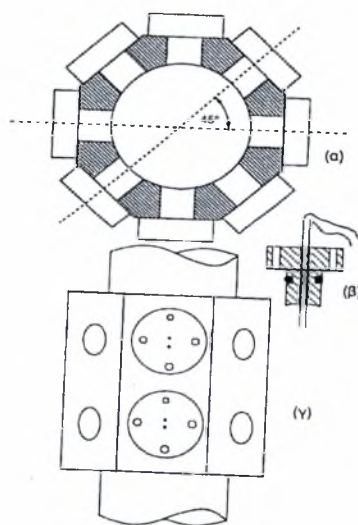
Το μετρητικό (probe) τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές που μετρούνται στα άκρα μιας μικρής αντίστασης (50 Ω) 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 φίλτραρίσματος 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 βαθμονόμηση του αναλυτή γίνεται μετρώντας την τάση εξόδου του, όταν στη θέση του μετρητικού χρησιμοποιηθούν γνωστές ωμικές αντιστάσεις ακρίβειας 1 %.

Η τάση V μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την αγωγιμότητα (R^{-1} , mS). Τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόζονται για μεγαλύτερη ακρίβεια σε πολυώνυμο τετάρτου βαθμού.

Για τη βαθμονόμηση του ζεύγους των παράλληλων συρμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ειδική διάταξη, παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκε με τον τρόπο που επεξηγείται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2.7.1.3.



Σχήμα 2.9 Ειδική διάταξη για μετρήσεις πάχους υγρής στιβάδας
 (α) Τομή του τμήματος μετρήσεων
 (β) Τομή του ειδικού βύσματος με τα παράλληλα σύρματα
 (γ) Κάτοψη του τμήματος μετρήσεων

2.7.1.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΤΑ ΣΥΡΜΑΤΑΚΙΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκτός από την οπτικοποίηση της διφασικής ροής του συστήματος που περιγράφηκε στο κυρίως μέρος ήταν να διεξάγουμε και κάποια συμπεράσματα από την μέτρηση του πάχους και της ταχύτητας των κυμάτων της υγρής στιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο.

Πριν όμως από την καταγραφή των αποτελεσμάτων έπρεπε να βαθμονομηθούν τα συρματάκια μέσω των οποίων έγιναν οι μετρήσεις.

Η βαθμονόμηση έγινε ως εξής : επιλέξαμε τυχαία 4 σημεία διαφορετικών παροχών νερού και μετρήσαμε με μία πρότυπη μεζούρα την περιβρεχόμενη επιφάνεια. Έπειτα με χρήση των παρακάτω σχέσεων και για διάμετρο σωλήνα $D = 0,025 \text{ m}$ υπολογίσαμε το h/D (ύψος υγρής στιβάδας / διάμετρο σωλήνα) :

$$P_L = \frac{\pi}{180^\circ} r \cdot \gamma \tag{2.7.8}$$

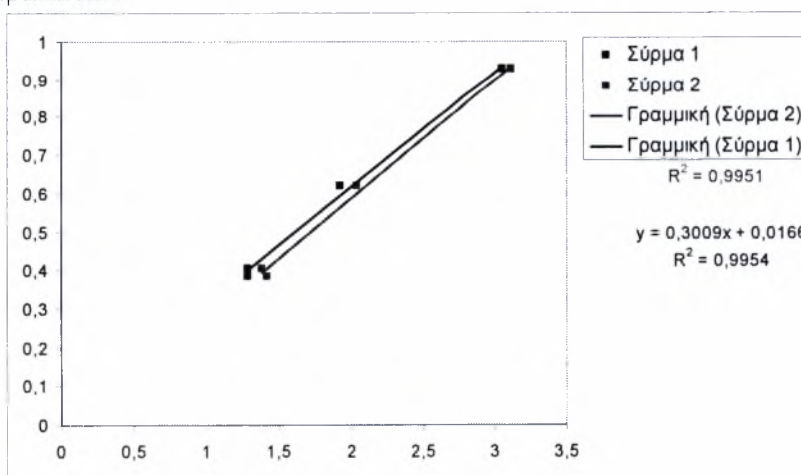
$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left[1 - 2 \left(\frac{h}{D} \right) \right] \tag{2.7.9}$$

$$\frac{h}{D} = \frac{1 - \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right)}{2} \tag{2.7.8}$$

Τα 4 σημεία που επιλέχθηκαν καθώς και οι αντίστοιχες μετρήσεις που πάρθηκαν συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα :

	D=	0,0254	m		
	conductivity		$\mu\text{S/cm}$		
	S_L	$\gamma/2$	h/D	V_1	V_2
1	0,066	2,5984252	0,928038	3,056126	3,119584
2	0,034	1,33858268	0,384934	1,280848	1,418717
3	0,046	1,81102362	0,618962	1,926427	2,04191
4	0,035	1,37795276	0,404175	1,279046	1,384156

Το διάγραμμα που προέκυψε από τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνει ότι το πάχος της υγρής στιβάδας μεταβάλλεται γραμμικά με την μετρούμενη αγωγιμότητα και φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 2.10 Διάγραμμα γραμμικής μεταβολής του πάχους υγρής στιβάδας με την αγωγιμότητα.

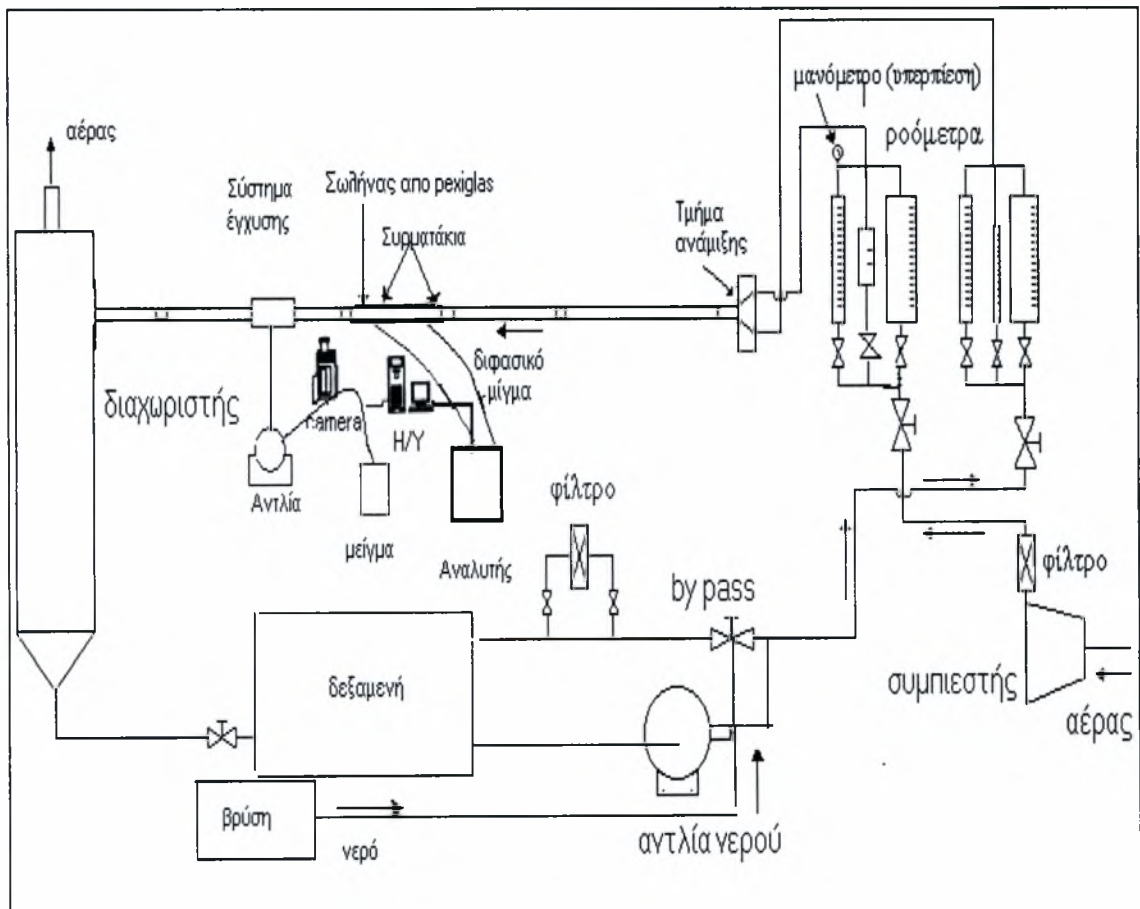
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1 Γενικά

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η οπτικοποίηση της διφασικής ροής σε σύστημα νερού-αέρα στο οποίο γίνεται έγχυση αρχικά μίγματος νερού-χρωστικής (1^η σειρά πειραμάτων) και έπειτα νερού-χρωστικής-γλυκερίνης (2^η σειρά πειραμάτων). Επίσης, μετράται σε κάθε περίπτωση το πάχος και η ταχύτητα των κυμάτων της υγρής στιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.8.1.2 . Συνολικά έγιναν 12 μετρήσεις για κάθε σειρά πειραμάτων οι οποίες χωρίστηκαν ανά τριάδες για κάθε μία από τις 4 περιοχές ροής του συστήματος διφασικής ροής (στρωματωμένη ροή, κυματώδης ροή, κύματα Kelvin-Helmholtz, ψευδοδιαλείπουσα ροή).

Η πειραματική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Αποτελείται από έναν σωλήνα κυλινδρικής διατομής μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η διφασική ροή και ο οποίος απαρτίζεται από τμήματα Plexiglas με εσωτερική διάμετρο 2,54 cm. Η επιλογή του Plexiglas επιτρέπει την οπτική παρακολούθηση της ροής μέσα στον σωλήνα και την λήψη φωτογραφιών.



Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη

Τα τμήματα συνδέονται με φλάντζες και έτσι μας δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης και εναλλαγής των διαφόρων μετρητικών διατάξεων στο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τη διεξαγωγή του συγκεκριμένου πειράματος

χρησιμοποιήθηκε νερό από πηγάδι το οποίο δεν ανακυκλοφορείται μέσω της αντλίας νερού αλλά διοχετεύεται στο σύστημα κατευθείαν από την πηγή και καταλήγει πάλι σε αυτή.

Στο τέλος του σωλήνα η ροή εισάγεται εφαιπομενικά σε 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 να διοχετευτεί και πάλι στο πηγάδι. Η ρύθμιση της παροχής του νερού γίνεται κατευθείαν από την βρύση και η μέτρηση της παροχής γίνεται από τρία ροόμετρα ένα μικρό (σχήμα 3.2) για μικρές παροχές, ένα μεσαίο για λίγο πιο μεγάλες παροχές και ένα μεγάλο ροόμετρο για μεγάλες παροχές υγρού.

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 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 $84 \text{ m}^3/\text{h}$.

Η διάταξη περιλαμβάνει εκτός των άλλων το test section τους σχήματος 2.15 για την μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας με την αγωγομετρική μέθοδο και την ταχύτητα των κυμάτων της υγρής στιβάδας. Τα συρματάκια (κόκκινο - μαύρο στο σχήμα 3.1) συνδέονται με τον αναλυτή που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.8.2 και με την χρήση του προγράμματος LabView καταγράφουμε το σήμα για κάθε καθεστώς ροής.

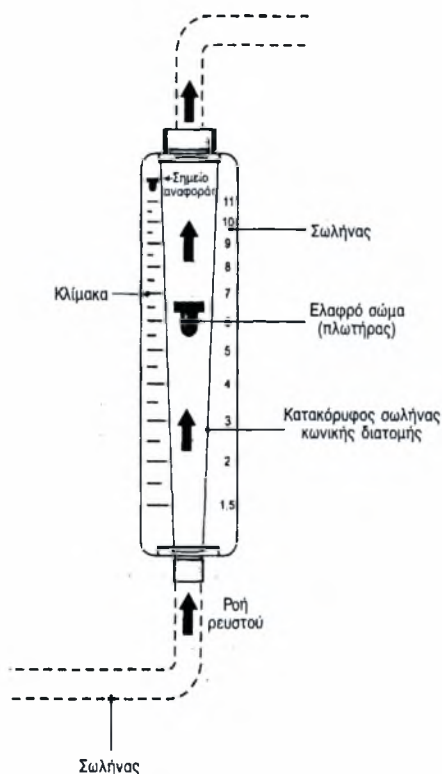
Σημαντικό τμήμα της διάταξης επίσης, αποτελεί το σύστημα έγχυσης το οποίο κατασκευάστηκε από Plexiglas σε σχήμα κύβου. Ο κύβος τρυπήθηκε διαμπερώς και αφού επικολλήθηκε στο σωλήνα, συνδέθηκε με τα μείγματα νερού- χρωστικής και νερού-χρωστικής-γλυκερίνης μέσω ενός λάστιχου και μιας δοσομετρικής αντλίας.

Για την τοποθέτηση του συστήματος έγχυσης έπρεπε αρχικά να τοποθετηθεί ένα επιπλέον test section από Plexiglas ανάμεσα από τον διαχωριστή και την διάταξη του σχήματος 2.15, για το λόγο ότι παρουσιαζόταν πρόβλημα σε οποιοδήποτε άλλο σημείο τοποθετούνταν (έλλειψη χώρου στο εργαστήριο, δυσκολία στην τοποθέτηση της κάμερας, απομάκρυνση από το σημείο μέτρησης σήματος). Επίσης αρχικά υπήρξε η σκέψη να μην τοποθετηθεί καινούργιο τμήμα στο σωλήνα, αλλά να αναποδογυριστεί και να μετακινηθεί απλώς κατά ένα test section αριστερά. Λόγω της ύπαρξης όμως της διάταξης με τα συρματάκια αυτό ήταν αδύνατο καθώς οποιαδήποτε μετακίνηση τμήματος του σωλήνα θα την κατέστρεφε .

Πριν την τοποθέτηση του τμήματος στον σωλήνα χαράχτηκε η αξονική του με κόκκινο μαρκαδόρο έτσι ώστε να συμπέσουν οι οπές του με τις οπές του κύβου μέσω του οποίου θα γινόταν η έγχυση. Έπειτα, με χρήση υγρού Plexiglas κολλήσαμε το νέο test section με τον κύβο και το αφήσαμε να στεγνώσει καλά για 24 ώρες έτσι ώστε να μην υπάρχουν διαρροές. Τέλος , τοποθετήθηκε το νέο test section μετά την παραπάνω επεξεργασία στον σωλήνα στην θέση που φαίνεται στο σχήμα 3.1 και ακολούθησε η εκ νέου οριζοντιοποίηση του σωλήνα. Αυτό έγινε με ένα αλφαδολάστιχο. Πρώτα το γεμίζουμε καλά με νερό (έτσι ώστε να μην έχει κενό αέρα) και στην συνέχεια με το ένα άκρο του αλφαδολάστιχου περνάμε ένα σημείο από την αρχική θέση στο οποίο στηριζόταν ο σωλήνας, έχοντας ως σημείο αναφοράς τη θέση αυτή βρίσκουμε και τα άλλα σημεία με το άλλο άκρο του αλφαδολάστιχου στις υπόλοιπες στηρίξεις.

Δεύτερος τρόπος που χρησιμοποιήθηκε ήταν: κλείνουμε την έξοδο του αγωγού και το γεμίζουμε σιγά- σιγά με νερό, στη συνέχεια μετράμε την υγρή περιφέρεια του αγωγού και μετρώντας την απόσταση από το σημείο μηδέν μέχρι το σημείο που

μετράμε την υγρή περιφέρεια του αγωγού βρίσκουμε με απλή γεωμετρία την γωνία του αγωγού.

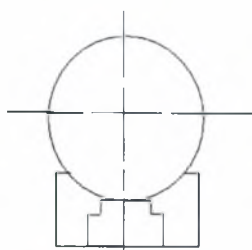


Σχήμα 3.2 Μικρό ροόμετρο νερού

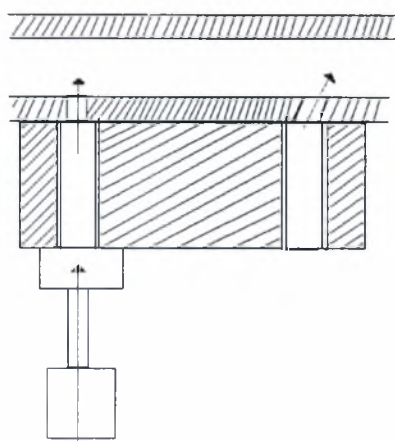
3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, βασικό κομμάτι της πειραματικής διάταξης αποτέλεσε το σύστημα έγχυσης μέσω του οποίου έγινε η εισαγωγή (injection) των διαλυμάτων νερού-χρωστικής και νερού-χρωστικής-γλυκερίνης. Ένα σκαρίφημα του συστήματος και του τρόπου έγχυσης του διαλύματος στον σωλήνα φαίνεται στο σχήμα 3.3 ενώ παραθέτουμε και δύο φωτογραφίες του συστήματος έγχυσης που λήφθηκαν στο εργαστήριο ((1),(2)).

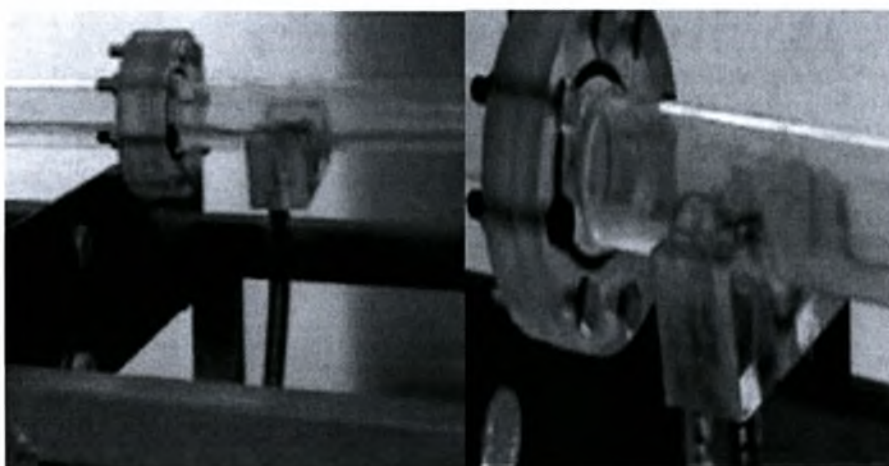
Η εισαγωγή του διαλύματος στο σωλήνα έγινε με τη βοήθεια μιας δοσομετρικής αντλίας η οποία ήταν συνδεδεμένη με το σύστημα έγχυσης μέσω ενός λάστιχου. Η αντλία τέθηκε σε λειτουργία στην χαμηλότερη δυνατή παροχή (10g/min) έτσι ώστε να γίνεται εισαγωγή του διαλύματος χωρίς να διαταράσσεται η ροή (κυρίως η διαστρωματωμένη).



Σχήμα 3.3 (α) Πρόοψη της εισόδου έγχυσης



Σχήμα 3.3 (β) Τομή του συστήματος έγχυσης



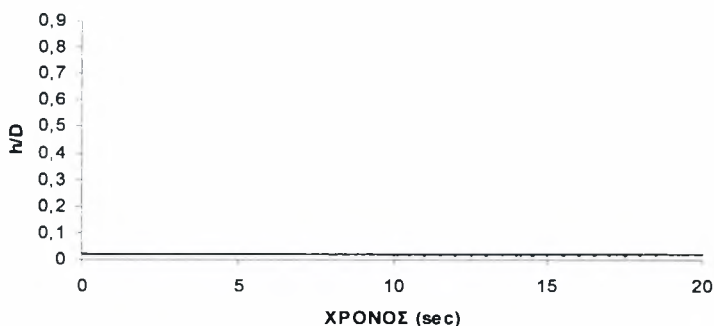
Φωτο.1 Σύστημα έγχυσης

Φωτο.2 Κοντινή λήψη του συστήματος έγχυσης (Υπεριώδες Φως)

Για την παρασκευή του διαλύματος νερού-χρωστικής διαλύθηκαν 10g χρωστικής (Fluorescein Sodium Salt της εταιρείας Sigma-Aldrich) σε 4kg νερό ενώ για την 2^η σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε 40% διάλυμα γλυκερίνης.

3.3 ΣΗΜΑ ΑΔΕΙΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

Πριν ξεκινήσουμε την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας παραθέτουμε τα στοιχεία από τη μέτρηση του σήματος του σωλήνα όταν δεν διαρέεται από νερό και αέρα έτσι ώστε να αφαιρεθεί αργότερα από τα υπόλοιπα σήματα που θα παίρναμε για τις διάφορες συνθήκες ροής. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα που πήραμε σε διάγραμμα $h/D - t$.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα h/D vs t για τον σωλήνα όταν δεν βρίσκεται σε λειτουργία

3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΛΗΨΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΤΟΣ

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας διεξήχθησαν 2 σειρές πειραμάτων . Και οι δύο περιλάμβαναν την λήψη φωτογραφιών και βίντεο για την οπτικοποίηση της διφασικής ροής του συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω καθώς και την λήψη σήματος μέσω της διάταξης με τα συρματάκια (σχήμα 2.9).

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων όπως προείπαμε , έγινε έγχυση διαλύματος χρωστικής-νερού και στη δεύτερη, νερού-χρωστικής-γλυκερίνης. Τέλος έγιναν συνολικά 24 μετρήσεις για όλες τις δυνατές περιοχές ροής , τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται σε πίνακα στο επόμενο κεφάλαιο. Παρακάτω περιγράφεται λεπτομερώς η πειραματική διαδικασία .

-1^η σειρά πειραμάτων

- Αρχικά γίνεται η βαθμονόμηση στα συρματάκια με τη μέθοδο που περιγράφεται λεπτομερώς στο παράρτημα.
- Κατασκευάζεται το σύστημα έγχυσης
- Παρασκευάζεται το διάλυμα νερού – χρωστικής (10g χρωστική σε 4 kg νερό)
- Συνδέεται η δοσομετρική αντλία με το σύστημα έγχυσης και το διάλυμα μέσω ενός αφαδολάστιχου.
- Τίθεται σε λειτουργία ο H/Y ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον παλμογράφο και τον ενισχυτή.
- Τίθονται σε λειτουργία ο παλμογράφος και η γεννήτρια και ρυθμίζεται η συχνότητα στα 25kHz και η λήψη ημιτονοειδούς σήματος
- Ανοίγει ο αναλυτής και έπειτα το πρόγραμμα LabView του H/Y

- Παίρνω σήμα για τον σωλήνα όταν είναι άδειος για να το αφαιρέσω έπειτα από το σήμα του σωλήνα σε πλήρη ροή .
- Μετρώω την αγωγιμότητα του νερού (πρέπει να είναι περίπου ίση με $1000 \text{ R}^{-1}\text{S}$)
- Σημειώνουμε στον χάρτη ροών τα σημεία στα οποία θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις (καθορίζονται τα ζεύγη φαινομενικών ταχυτήτων για κάθε περιοχή που μας ενδιαφέρει -3 ζεύγη για την κάθε περιοχή -και βρίσκεται η αντιστοιχία τους στα ροόμετρα αέρα και νερού).
- Τίθεται σε λειτουργία το πείραμα. Ανοίγουμε την βρύση, αφού πρώτα έχουμε κλείσει την βάνα της δεξαμενής και έχουμε ανοίξει τη βάνα by-bass. Επίσης ανοίγουμε την βάνα εξόδου του διαχωριστή για να εξάγεται το νερό στο πηγάδι και να μην ανακυκλώνεται.
- Ανοίγουμε τα ροόμετρα αέρα και νερού τα οποία είναι ήδη βαθμονομημένα και κανονίζουμε τις παροχές ανάλογα με το καθεστώς ροής και το σημείο που θέλουμε να πετύχουμε. Πρέπει η τιμή της υπερπίεσης στα ροόμετρα του αέρα να μην υπερβαίνει τα 2 bar .Η περιοχή των φαινομενικών ταχυτήτων που μας ενδιαφέρει καλύπτεται και από τα 3 ροόμετρα αέρα και υγρού.
- Εισάγεται το διάλυμα στο σύστημα με τη βοήθεια της δοσομετρικής αντλίας (10g/min)
- Καταγράφεται το σήμα σε αρχεία excel με την βοήθεια της πειραματικής διάταξης του σχήματος 2.15 και του προγράμματος LabView
- Γίνεται λήψη φωτογραφιών και βίντεο για την κάθε μέτρηση. Για την καλύτερη και λεπτομερέστερη φωτογράφιση χρησιμοποιείται πηγή φθορισμού. Η λήψη των φωτογραφιών έγινε με ψηφιακή κάμερα SONY DSC-P200 (7.2 megapixels , 3.0 x zoom).

-2^η σειρά πειραμάτων

- Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για την 2^η σειρά πειραμάτων όπου παρασκευάζουμε διάλυμα γλυκερίνης 40%.

3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΛΗΨΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΚΑΙ ΒΙΝΤΕΟ

Οι φωτογραφίες στην παρούσα εργασία λήφθηκαν με την χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (SONY DSC-P200 , 7.2 megapixels , 3.0 x zoom) και της κάμερας του εργαστηρίου.

Για την ακριβέστερη λήψη των φωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε επίσης ειδικός τρίποδας για την στήριξη της κάμερας.

Όλες οι φωτογραφίες και τα βίντεο υπέστησαν ειδική επεξεργασία πριν την εισαγωγή τους στο έγγραφο της διπλωματικής. Με την χρήση του προγράμματος pinnacle του H/Y τα βίντεο από την κάμερα μετατράπηκαν σε αρχεία .mpg και έπειτα με το πρόγραμμα powerdvd 6.0 σε εικόνες τύπου bitmap.

Επελέγησαν οι πιο αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες από κάθε μέτρηση και με την χρήση του προγράμματος Microsoft office Picture Manager 'κόπηκαν' και συμπίεστηκαν έτσι ώστε να μην προκαλέσουν πρόβλημα χωρητικότητας στο αρχείο της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα αποτελέσματα από τις δύο σειρές πειραμάτων καταγράφηκαν σε αρχεία excel , κατασκευάστηκαν τα σχετικά διαγράμματα (h/D vs t) και έπειτα συγκεντρώθηκαν σε πίνακες για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων (κεφάλαιο 5 στην παρούσα εργασία).

4.1 ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

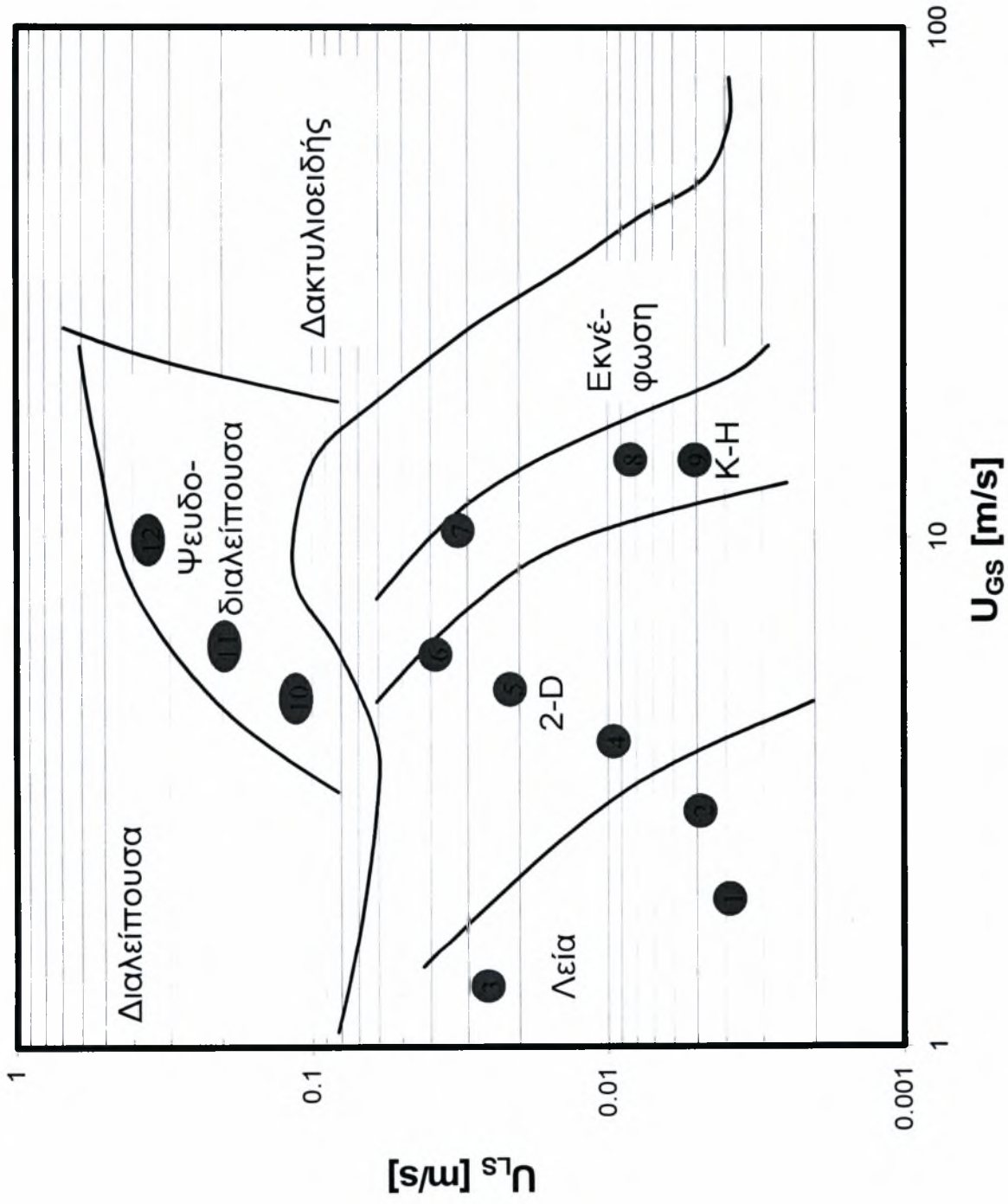
Στον παρακάτω πίνακα έχουν συγκεντρωθεί οι συνθήκες διεξαγωγής των δύο πειραμάτων καθώς και τα ζεύγη φαινομενικών ταχυτήτων αέρα-νερού που επιλέχθηκαν για την μελέτη της έγχυσης των δ/των στο σύστημα διφασικής ροής.

α.α	ΕΙΔΟΣ ΡΟΗΣ	Qw	QAIR	UGS (m/s)	ULS (m/s)	ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ(1 ^ο πείραμα)	ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ(2 ^ο πείραμα)
1&13	ΛΕΙΑ	100	110	2	0,003	1853	1415
2&14	ΛΕΙΑ	155	172	3	0,005	1853	1415
3&15	ΛΕΙΑ	0,16	50	1	0,02	1853	1415
4&16	WAVY FLOW	305	234	4	0,01	1840	1415
51&7	WAVY FLOW	0,16	295	5	0,02	1840	1415
6&18	WAVY FLOW	0,24	357	6	0,03	1840	1415
7&19	K-H	0,24	108	10	0,03	1840	1415
8&20	K-H	275	13	10,5	0,009	1840	1415
9&21	K-H	155	13	10,5	0,005	1840	1415
10&22	ΨΕΥΔΟΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ	22	234	4	0,1	1840	1415
11&23	ΨΕΥΔΟΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ	40	357	6	0,2	1840	1415
12&24	ΨΕΥΔΟΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ	75	13	10	0,4	1840	1415

Σχήμα 4.Α Συνολικός πίνακας δεδομένων για την διεξαγωγή των πειραμάτων

Παρακάτω φαίνεται ο χάρτης ροών που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή των σημείων μέτρησης (ζεύγη φαινομενικών ταχυτήτων αέρα-νερού). Τα σημεία που επιλέχθηκαν για τα 2 πειράματα ήταν κοινά και γι αυτό σημειώνονται 12 σημεία στο χάρτη που όμως αντιστοιχούν σε 24 μετρήσεις. Ο αριθμός κάθε σημείου αντιστοιχεί στον αριθμό της μέτρησης π.χ. το σημείο με τον αριθμό 1 αντιστοιχεί στην 1^η και στην 13^η μέτρηση , το 2^ο στην 2^η μέτρηση και στην 14^η μέτρηση κ.ο.κ.

Επίσης είναι σκιασμένο με γαλάζιο χρώμα το εύρος της περιοχής στην οποία μπορεί να λειτουργήσει η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη.

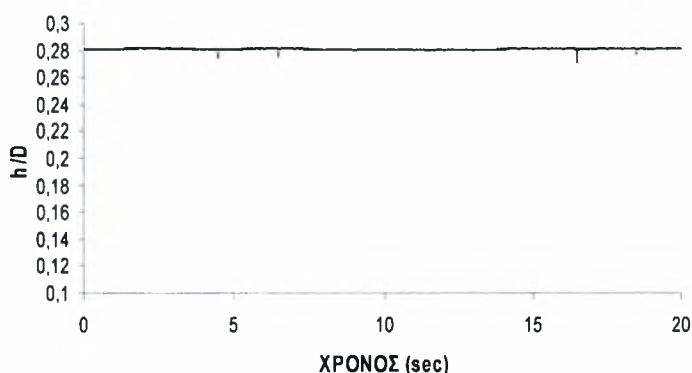


Σχήμα 4.Β Χάρτης ροών με τα επιλεγμένα σημεία μέτρησης (κόκκινες βούλες) και την περιοχή λειτουργίας της πειραματικής διάταξης (γαλάζια περιοχή).

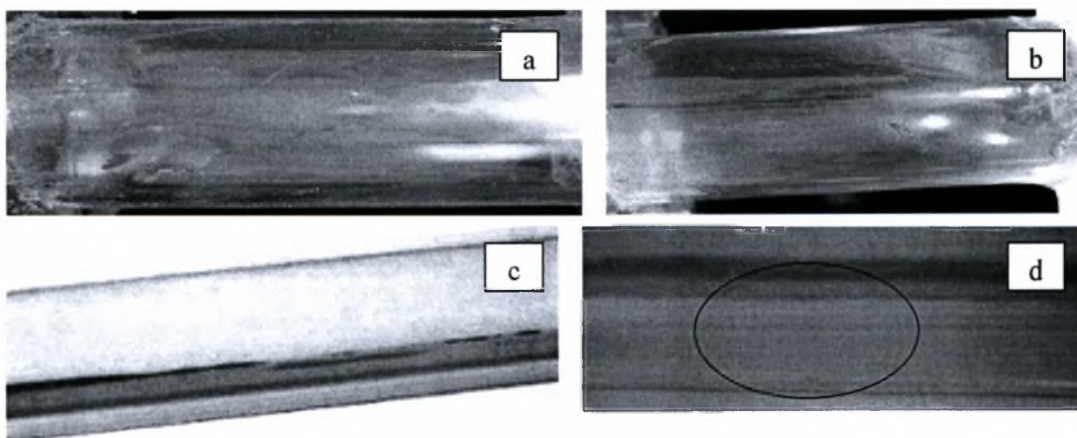
4.2 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ-ΧΡΩΣΤΙΚΗΣ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι πιο ενδιαφέρουσες λήψεις από την 1^η σειρά πειραμάτων όπου εισήχθη διάλυμα νερού-χρωστικής στο σύστημα διφασικής ροής που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Οι φωτογραφίες παρουσιάζονται ομαδοποιημένες για κάθε περιοχή ροής για τα σημεία που φαίνονται στον παραπάνω χάρτη. Επίσης παρουσιάζονται τα διαγράμματα του πάχους της υγρής στιβάδας προς τον χρόνο (h/D vs t) όπως προέκυψαν από την αγωγιμομετρική μέθοδο που περιγράφηκε στα κεφάλαια 2 & 3.

4.2.1 Στρωματωμένη ροή (stratified flow)



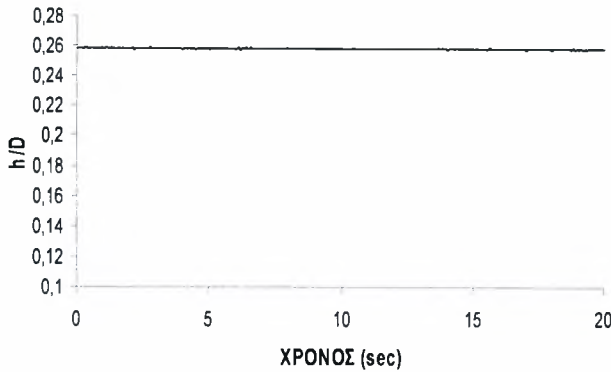
Σχήμα 4.1 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=2\text{m/s}$, $U_{LS}=0.003\text{m/s}$ (1^η μέτρηση)



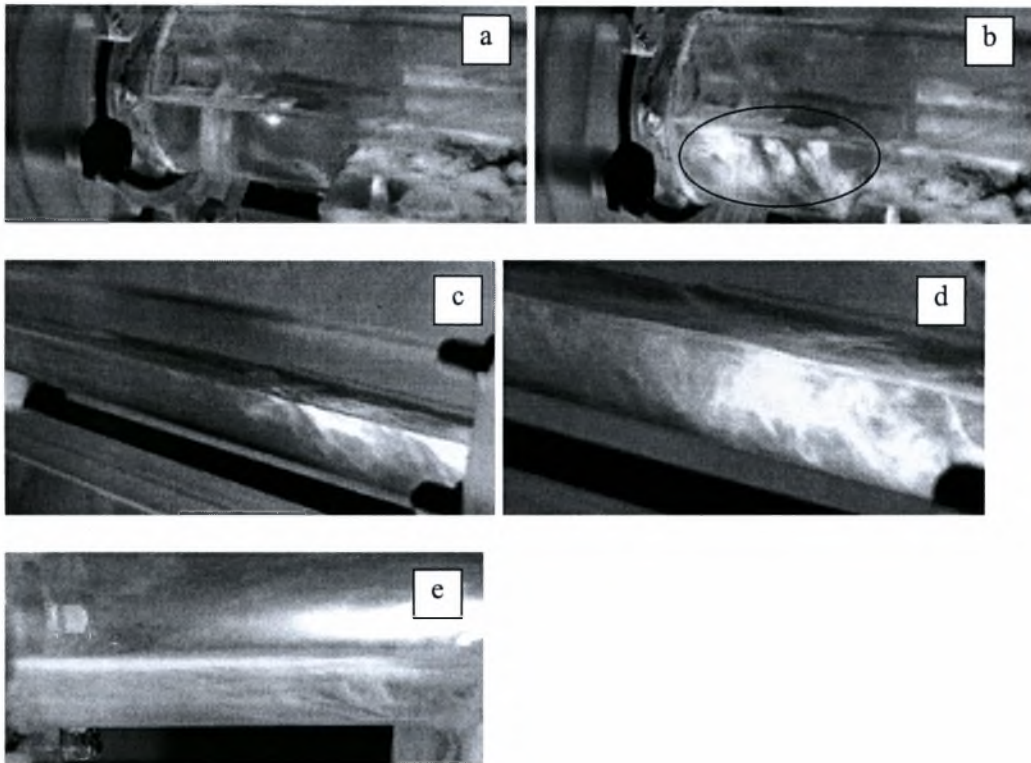
Σχήμα 4.2 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Πάνω όψη του σωλήνα (b) Λήψη του κάτω μέρους του σωλήνα (c) Τμήμα πριν τον διαχωριστή (d) Τμήμα πριν τον διαχωριστή (Υπεριώδες φως)

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Όσον αφορά την πρώτη σειρά πειραμάτων, το νερό και η χρωστική έχουν την ίδια πυκνότητα επομένως αναμιγνύονται πλήρως και αυτό γίνεται εμφανές από την στιγμή της έγχυσης και κατά μήκος όλης της ροής.

Παρατηρείται επίσης ξεκάθαρα ότι η χρωστική καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του υγρού και με την ελάχιστη παροχή της δοσομετρικής αντλίας η ροή δεν διαταράσσεται σχεδόν καθόλου.



Σχήμα 4.3 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=3\text{m/s}$, $U_{LS}=0.005\text{m/s}$ ($2^{\text{η}}$ μέτρηση)

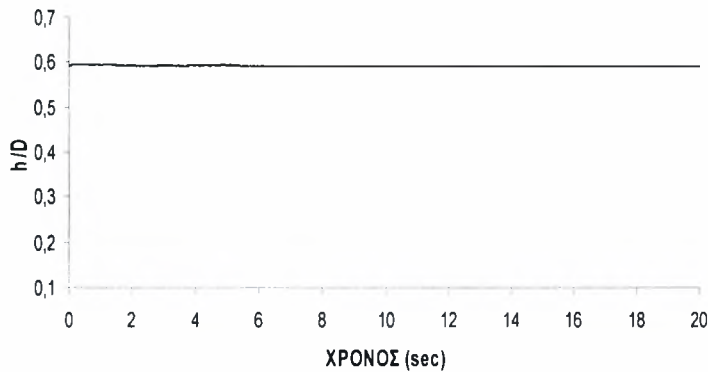


Σχήμα 4.4 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Τμήμα έγχυσης - Λήψη $1^{\text{η}}$ εισαγωγής του διαλύματος νερού - χρωστικής

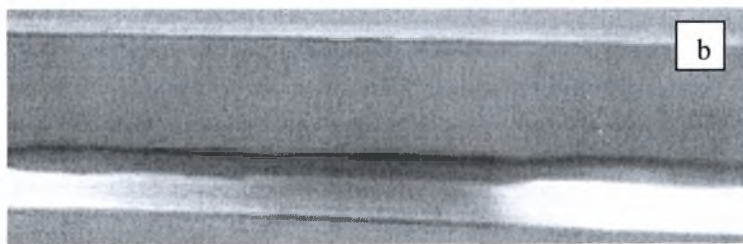
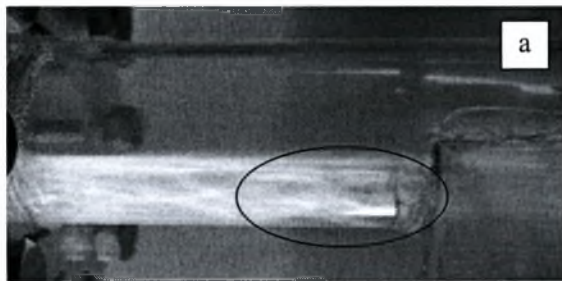
(b) Τμήμα έγχυσης - Λήψη εξέλιξης της εισαγωγής του διαλύματος (c) Τμήμα λίγο μετά το σύστημα έγχυσης - Διάχυση χρωστικής στο διφασικό μείγμα (d) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης (e) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης - Με την πάροδο του χρόνου επέρχεται η πλήρης ομογενοποίηση του διφασικού μείγματος.

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Εδώ φαίνεται η εξέλιξη της διάχυσης του διαλύματος. Δεν υπάρχει καμία διαταραχή στην ροή παρόλο που αυξήθηκαν οι φαινομενικές ταχύτητες από πριν. Με την πάροδο του χρόνου φαίνεται ότι η χρωστική διαχέεται πλήρως στο νερό και μάλιστα προς την ίδια κατεύθυνση ταχύτητας (y -κατεύθυνση,

σχήμα 4.4b). Επιπρόσθετα, η κατανομή της χρωστικής ουσίας εντός του διαλύματος δείχνει ότι η κινούσα δύναμη της ανάμιξης είναι η ταχύτητα (συναγωγή). Όπως φαίνεται, η χρωστική ουσία αποτυπώνει το προφίλ της ταχύτητας εντός του αγωγού.



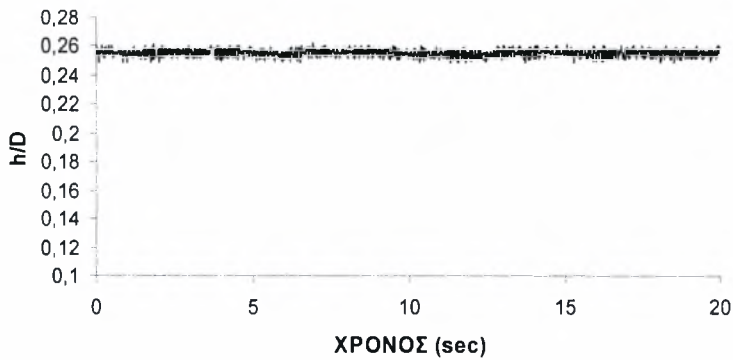
Σχήμα 4.5 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=1\text{m/s}$, $U_{LS}=0,02\text{m/s}$ ($3^{\text{η}}$ μέτρηση)



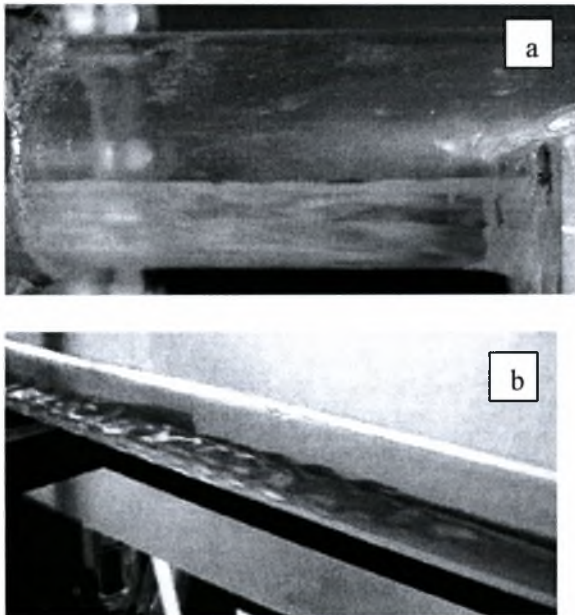
Σχήμα 4.6 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Σημείο εισαγωγής του διαλύματος νερού - χρωστικής. Λήψη με υπεριώδες φώς. (b) Τμήμα πριν τον διαχωριστή (Υπεριώδες φως)

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Οι φαινομενικές ταχύτητες αυξήθηκαν και άλλο και αυτό που παρατηρείται είναι η σχεδόν ακαριαία ανάμιξη της χρωστικής με το νερό. Ήδη από την στιγμή που εισάγεται το μίγμα η χρωστική διαλύεται στο νερό σχεδόν αμέσως. (Σχήμα 4.6a)

4.2.2 Κυματώδης ροή (Wavy flow)

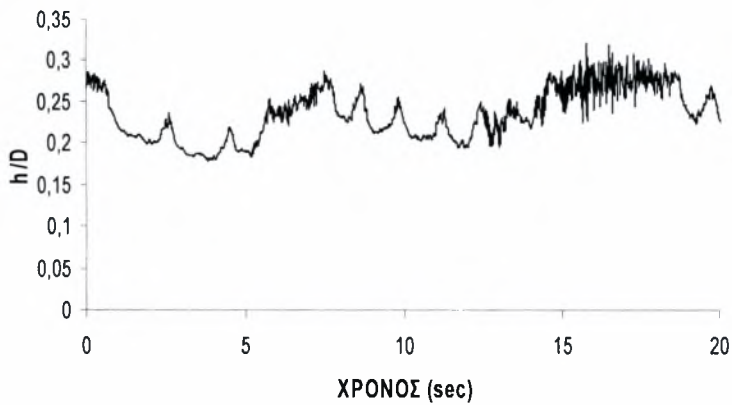


Σχήμα 4.7 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=4$ m/s, $U_{LS}=0.01$ m/s (4^η μέτρηση)

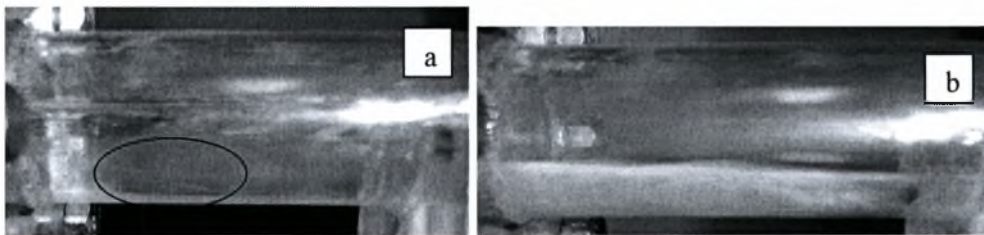


Σχήμα 4.8 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Τμήμα έγχυσης (b) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης

Παρατηρήσεις-Σχόλια :Σ’ αυτή την περίπτωση δεν παρατηρείται κάτι το διαφορετικό σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις. Ίσως εξαιτίας του γεγονότος ότι βρισκόμαστε σε σημείο αρκετά κοντά στην λεία περιοχή. Η ανάμειξη της χρωστικής με το νερό γίνεται ακαριαία. Σχηματίζονται μικροί κυματισμοί που γίνονται λιγότερο αισθητοί καθώς αναπτύσσεται η ροή προς τον διαχωριστή. (Σχήμα 4.8b)

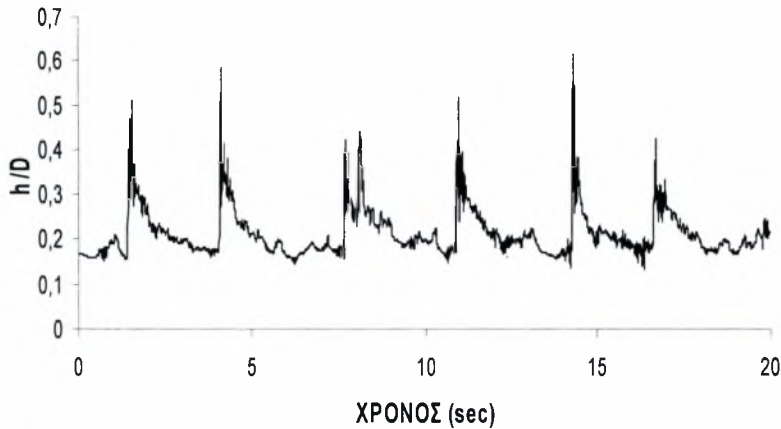


Σχήμα 4.9 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=5\text{m/s}$, $U_{LS}=0,02\text{m/s}$ ($5^{\text{η}}$ μέτρηση)

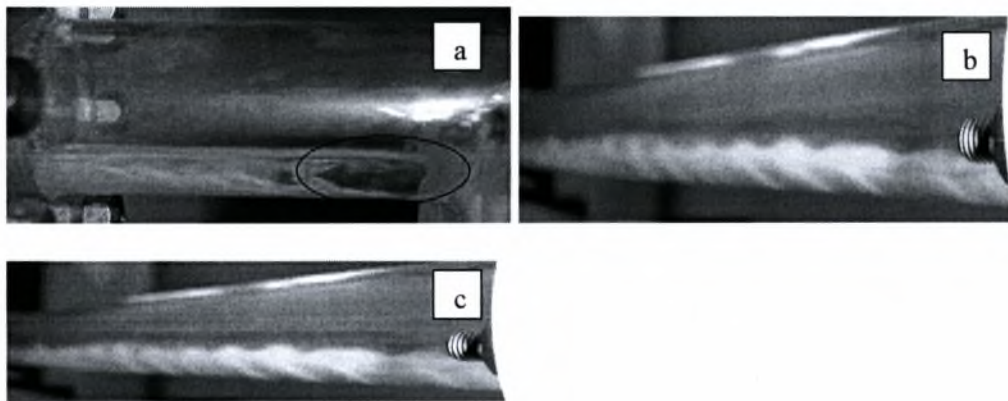


Σχήμα 4.10 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Τμήμα έγχυσης – αρχή της διαδικασίας εισαγωγής (b) Τμήμα έγχυσης

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Απεικονίζεται το ξεκίνημα των κυματισμών πριν προλάβει να εισαχθεί ικανοποιητική ποσότητα χρωστικής στο σύστημα. Για μικρή ποσότητα χρωστικής που διέρχεται ,πάντως, παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη ταχύτητα διαλυτοποίησης της.(Σχήμα 4.10a) Καθώς εισέρχεται μεγαλύτερη ποσότητα χρωστικής στο σύστημα φαίνεται ξεκάθαρα η πλήρης ομογενοποίηση του μίγματος. (Σχήμα 4.10b)



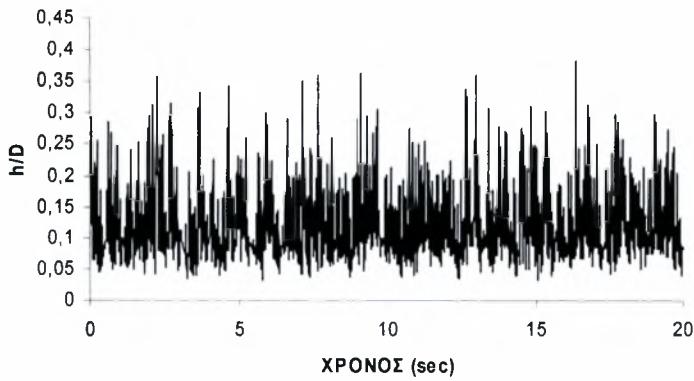
Σχήμα 4.11 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=6\text{m/s}$, $U_{LS}=0,03\text{m/s}$ (6^η μέτρηση)



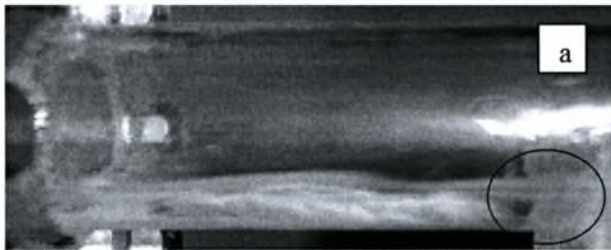
Σχήμα 4.12 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a)Τμήμα έγχυσης (b)Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης (c)Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Στην αρχή της εισαγωγής του διαλύματος δημιουργούνται 3 ζώνες χρωστική –νερό –χρωστική και έπειτα η χρωστική αναμειγνύεται πλήρως.(Σχήμα 4.12a) Αυτό μπορεί να συμβαίνει γιατί με την αύξηση των φαινομενικών ταχυτήτων δημιουργούνται μικροί στροβιλισμοί που επηρεάζουν την ροή. Η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη και τα κύματα στη διεπιφάνεια φαίνονται ξεκάθαρα. (Σχήματα 4.12b, 4.12c)

4.2.3 Kelvin - Helmholtz

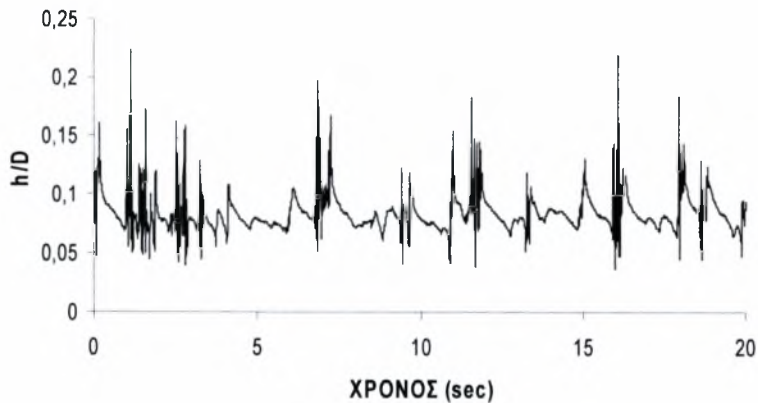


Σχήμα 4.13 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=10\text{m/s}$, $U_{LS}=0,03\text{m/s}$ (7^η μέτρηση)

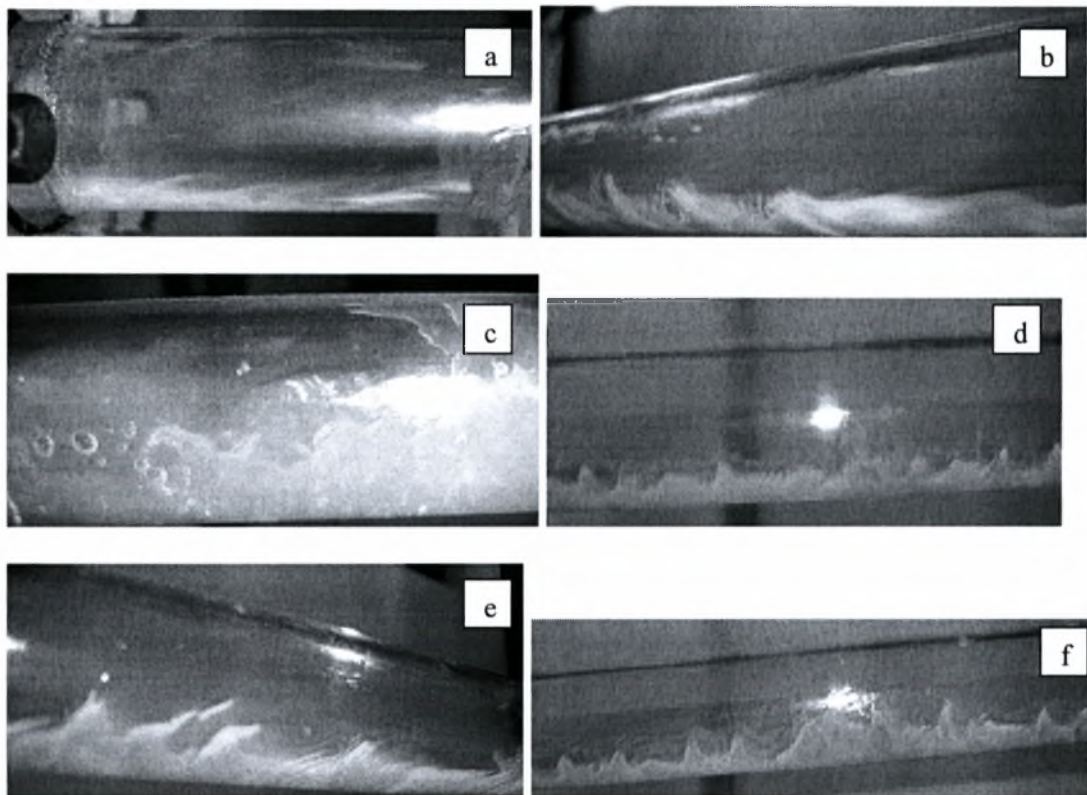


Σχήμα 4.14 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Τμήμα έγχυσης

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Εδώ παρατηρούνται τρισδιάστατα κύματα στην διεπιφάνεια καθώς και πλήρης ανάμιξη του μίγματος λίγο μετά την αρχή του σημείου εισαγωγής του διαλύματος. Αρχικά παρατηρείται και εδώ η δημιουργία των 3 ζωνών νερού-χρωστικής-νερού που όμως εξαφανίζονται σχεδόν αμέσως μετά από την στιγμή της έγχυσης με αποτέλεσμα την πλήρη ανάμιξη του μίγματος όπως προείπαμε. (Σχήμα 4.14a)

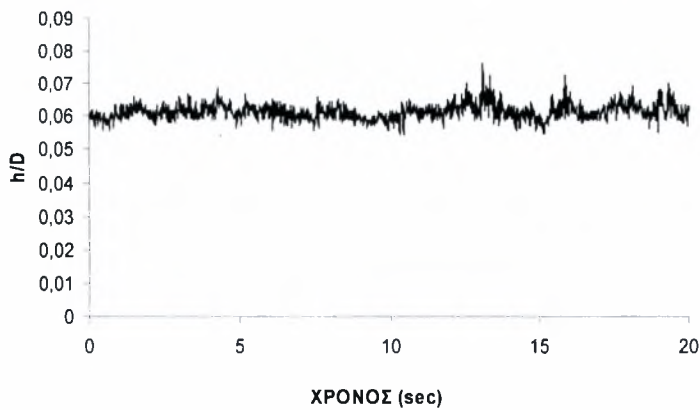


Σχήμα 4.15 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=10,5\text{m/s}$, $U_{LS}=0,009\text{m/s}$ ($8^{\text{η}}$ μέτρηση)

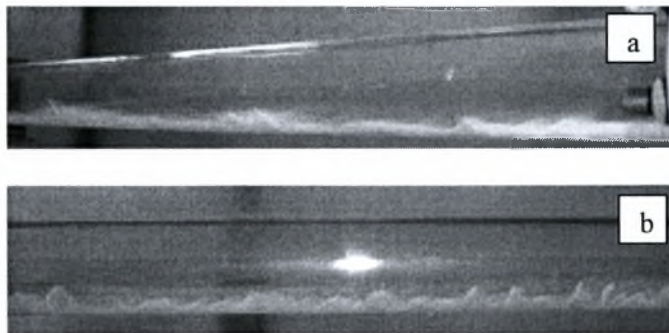


Σχήμα 4.16 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Τμήμα έγχυσης (Υπεριώδες φως) (b) Τμήμα του σωλήνα μετά το τμήμα έγχυσης (c) Τμήμα του σωλήνα μετά το τμήμα έγχυσης (d) Τμήμα του σωλήνα πριν τον διαχωριστή (e) Τμήμα του σωλήνα πριν τον διαχωριστή (f) Τμήμα του σωλήνα μετά το τμήμα έγχυσης

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Σε αυτή την περίπτωση, λόγω μεγάλης ταχύτητας του αέρα διακρίνονται έντονοι κυματισμοί K-H . Η χρωστική αρχικά μπαίνει με την ίδια κατεύθυνση ταχύτητας με το νερό και έπειτα φαίνεται ότι καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του υγρού και με την πάροδο του χρόνου διαχέεται πλήρως.



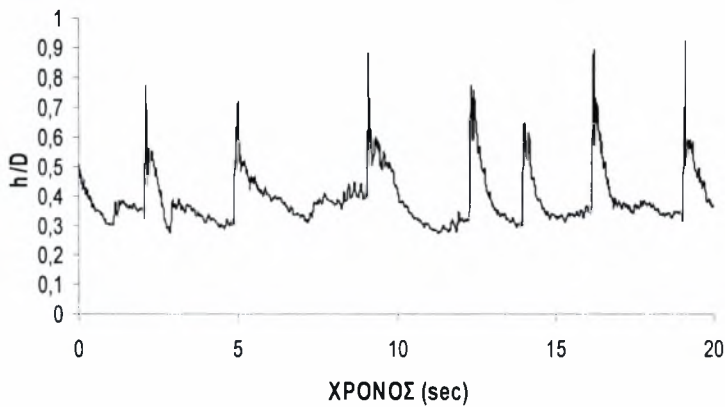
Σχήμα 4.17 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=10,5\text{m/s}$, $U_{LS}=0,005\text{m/s}$ ($9^{\text{η}}$ μέτρηση)



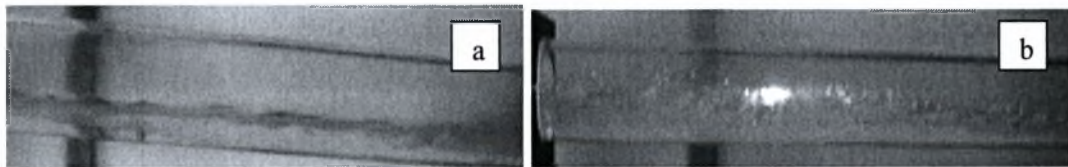
Σχήμα 4.18 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Τμήμα του σωλήνα μετά το σύστημα έγχυσης (Υπεριώδες φως) (b) Τμήμα του σωλήνα πριν τον διαχωριστή (Υπεριώδες φως)

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Εδώ η ταχύτητα του αέρα παρέμεινε στην ίδια τιμή με πριν αλλά μειώθηκε η ταχύτητα του νερού, οπότε οι κυματισμοί δεν είναι τόσο έντονοι. Παρ' όλα αυτά η χρωστική διαλυτοποιείται και σ' αυτές τις συνθήκες πλήρως. Και εδώ σχηματίζονται τρισδιάστατα κύματα στην διεπιφάνεια.

4.2.4 Ψευδοδιαλείπουσα ροή (Pseudoslug flow)

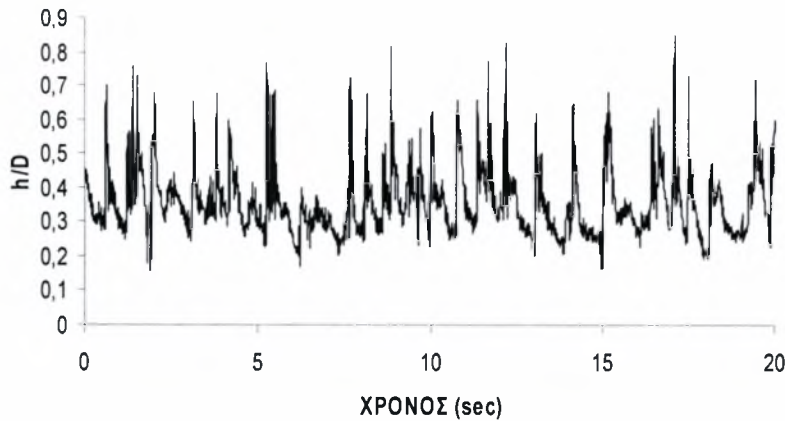


Σχήμα 4.19 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=4\text{m/s}$, $U_{LS}=0,1\text{m/s}$ (10^{n} μέτρηση)

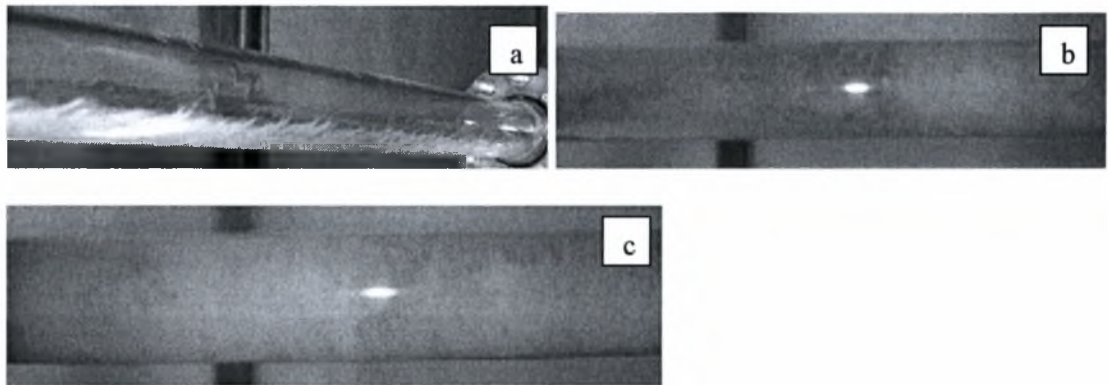


Σχήμα 4.20 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Τμήμα του σωλήνα πριν τον διαχωριστή - Πριν το slug (b) Τμήμα του σωλήνα πριν τον διαχωριστή - Μετά την επιρροή του slug

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Η χρωστική αναμιγνύεται πλήρως και ακαριαία με το νερό. Το Slug φαίνεται να 'παρασύρει' τη χρωστική καθώς αναπτύσσεται η ροή.

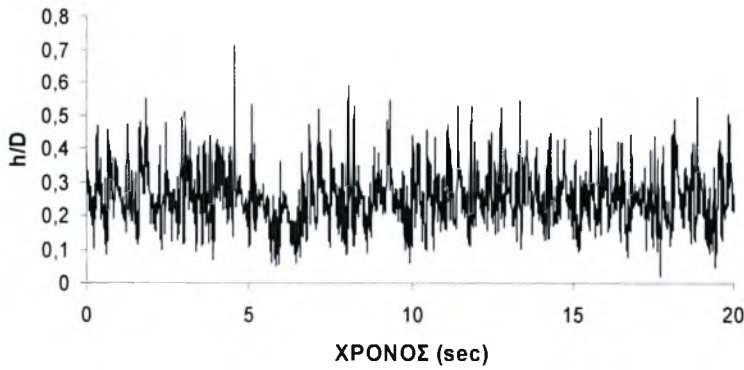


Σχήμα 4.21 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=6\text{m/s}$, $U_{LS}=0,2\text{m/s}$ ($11^{\text{η}}$ μέτρηση)

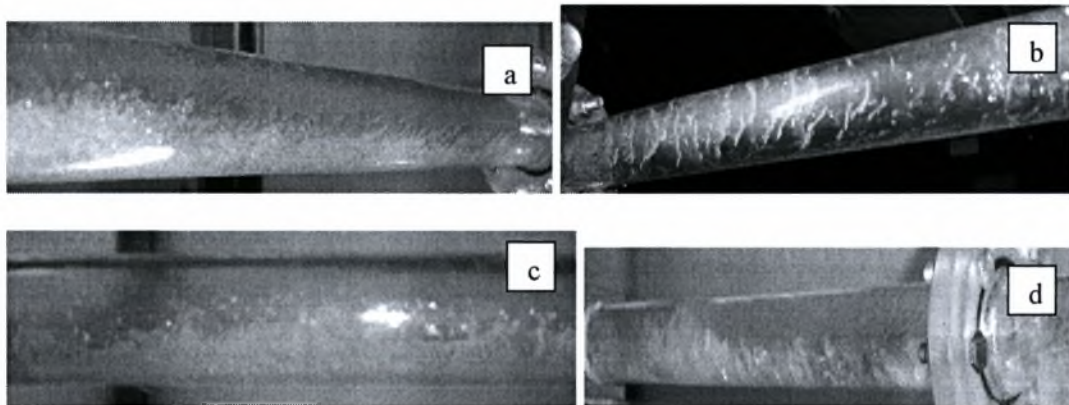


Σχήμα 4.22 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a) Λήψη του κάτω μέρους του σωλήνα. Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης (Υπεριώδες φως) (b) Τμήμα πριν τον διαχωριστή (c) Τμήμα πριν τον διαχωριστή

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Η ροή είναι αρκετά έντονη και τα κύματα ‘αναρριχώνται’ στον σωλήνα. Η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη. Φαίνεται η στιγμή που κατευθύνεται το slug προς το σημείο λήψης – η χρωστική ‘παρασύρεται’ μαζί του. (Σχήμα 4.22b) Πραγματοποιείται λήψη τη στιγμή που το slug περνάει από το σημείο και περιβρέχει το σωλήνα σε όλη του τη διάμετρο. (Σχήμα 4.22c)



Σχήμα 4.23 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=10\text{m/s}$, $U_{LS}=0,4\text{m/s}$ ($12^{\text{η}}$ μέτρηση)



Σχήμα 4.24 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής (a)Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης (Υπεριώδες φως)-Λήψη της στιγμής που περνάει το slug από το σημείο και κατευθύνεται προς τον διαχωριστή παρασέρνοντας μαζί του την χρωστική. (b)Κάτω μέρος του τμήματος μετά το σύστημα έγχυσης (Υπεριώδες φως) (c)Τμήμα πριν τον διαχωριστή (d)Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης

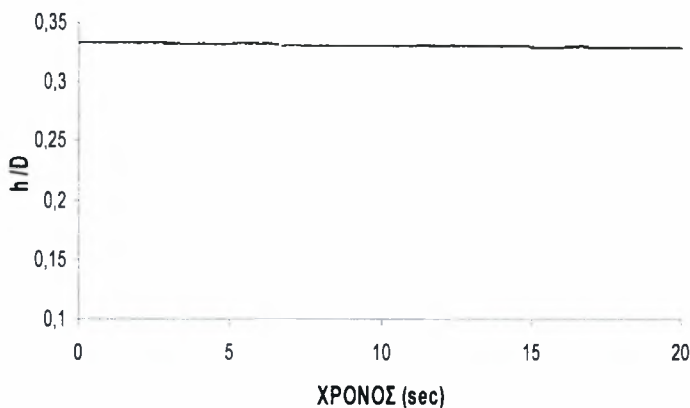
Παρατηρήσεις-Σχόλια : Γενικά στην ψευδοδιαλείπουσα ροή το slug τείνει να ‘παρασειρεί’ την χρωστική μαζί του και λόγω των έντονων κυματισμών περιβρέχεται ο σωλήνας σε όλη του την διάμετρο.

Επίσης, η κατεύθυνση της ταχύτητας του slug είναι ίδια με αυτή της χρωστικής όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις.

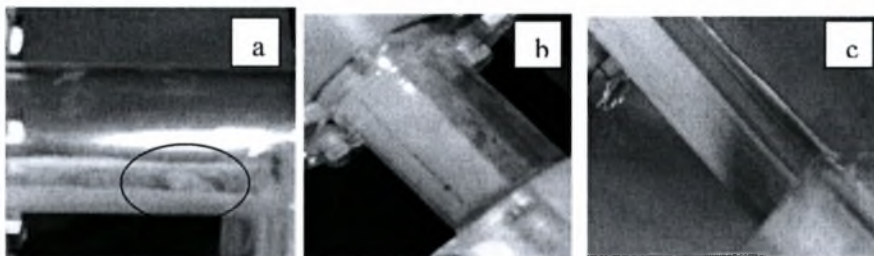
4.3 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ-ΧΡΩΣΤΙΚΗΣ-ΓΛΥΚΕΡΙΝΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζεται το φωτογραφικό υλικό από την 2^η σειρά πειραμάτων. Πραγματοποιήθηκαν 12 μετρήσεις όπως ακριβώς και στην 1^η σειρά πειραμάτων (ίδια ζεύγη φαινομενικών ταχυτήτων αέρα – υγρού) με την διαφορά ότι σ' αυτή την περίπτωση έγινε εισαγωγή διαλύματος νερού-χρωστικής- γλυκερίνης (40%).

4.3.1 Στρωματωμένη ροή (stratified flow)

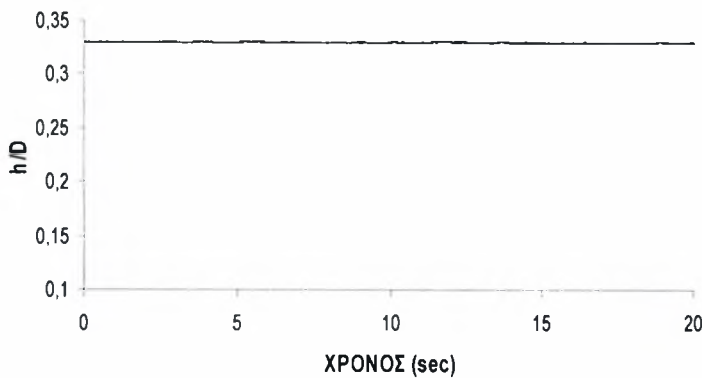


Σχήμα 4.25 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=2\text{m/s}$, $U_{LS}=0.003\text{m/s}$ (13^η μέτρηση)

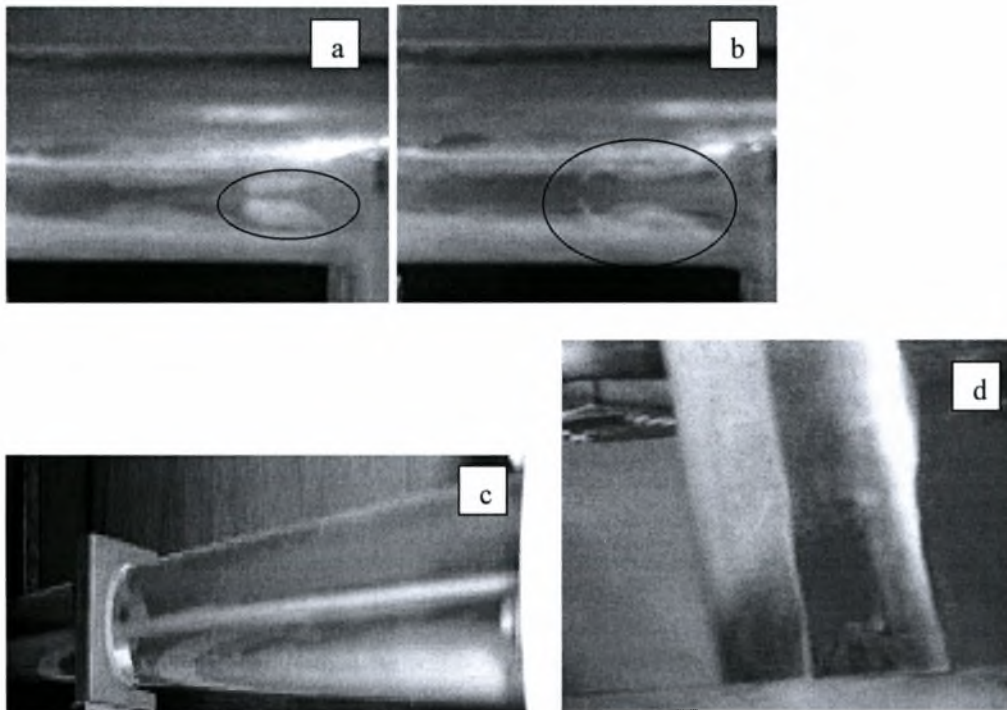


Σχήμα 4.26 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα έγχυσης- Λήψη της εισαγωγής του διαλύματος νερού- χρωστικής- γλυκερίνης (Υπεριώδες φως) (b) Λήψη του κάτω τμήματος της διάταξης έγχυσης. (c) Τμήμα έγχυσης – Οι 3 ζώνες διαχωρισμού του μείγματος.

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Με την έγχυση του διαλύματος της γλυκερίνης παρατηρείται ο διαχωρισμός του διφασικού μείγματος σε 3 ζώνες. (Σχήμα 4.26a) Το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται καλύτερα στην λεία ροή και όσο πιο μικρές είναι οι φαινομενικές ταχύτητες αέρα- νερού τόσο πιο καθαρά φαίνεται στον φωτογραφικό φακό. Ο διαχωρισμός αυτός οφείλεται στο γεγονός ότι η γλυκερίνη έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό και καθιζάνει λόγω βαρύτητας. Η χρωστική η οποία περιέχεται μέσα στο διάλυμα διαχέεται στο νερό και με αποτέλεσμα να δημιουργούνται, οπτικά, δύο στρώματα υγρών. Αυτό εξηγεί και το γεγονός ότι παρόλο που η συναγωγή είναι μεγάλη κάποιο μέρος της γλυκερίνης παραμένει στο πυθμένα.

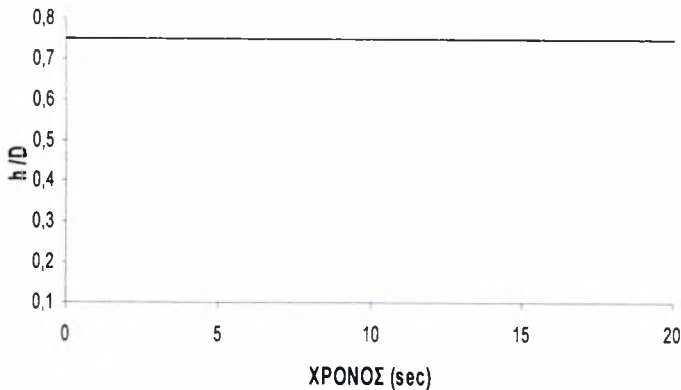


Σχήμα 4.27 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{Gs}=3\text{m/s}$, $U_{Ls}=0.005\text{m/s}$ ($14^{\text{η}}$ μέτρηση)

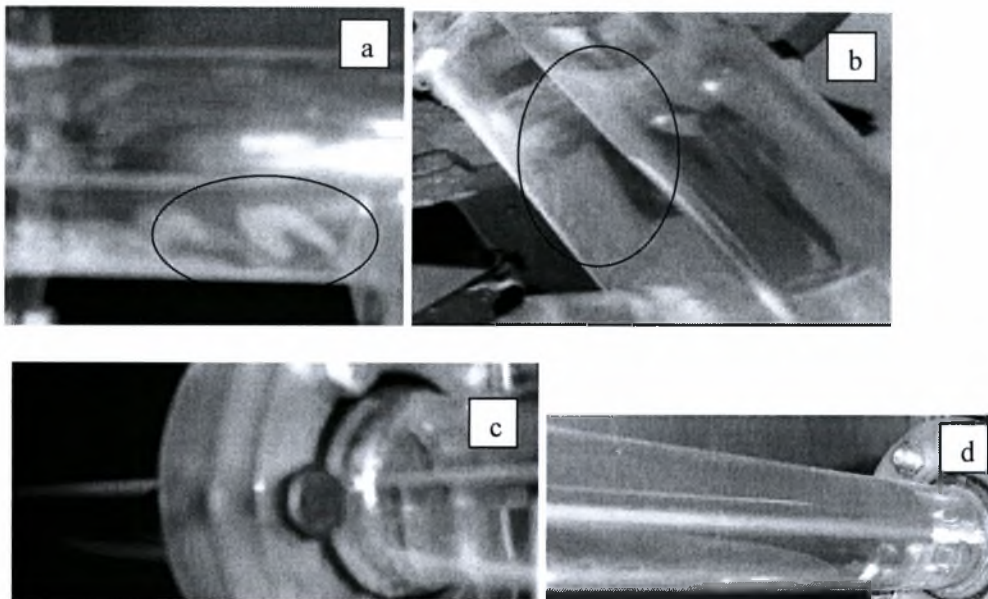


Σχήμα 4.28 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής -γλυκερίνης (a)Τμήμα έγχυσης -Στιγμή που μπαίνει το διάλυμα στο σύστημα (b)Τμήμα έγχυσης - Στιγμή λίγο μετά την εισαγωγή του διαλύματος όπου αρχίζει να διαχέεται στο διφασικό μείγμα (c)Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης - Πλήρης διαχωρισμός σε όλη την έκταση της διάταξης (d)Τμήμα έγχυσης- Πλήρης απεικόνιση των 3 ζωνών

Παρατηρήσεις-Σχόλια :Πραγματοποιείται λήψη της εισαγωγής του διαλύματος στο νερό και ο σταδιακός σχηματισμός των 3 ζωνών: διάλυμα γλυκερίνης-νερού, νερό και αέρας(Σχήματα 4.28a, 4.28b). Η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη, ενώ φαίνεται ξεκάθαρα η διάχυση της χρωστικής ουσίας από το διάλυμα νερού-γλυκερίνης προς το νερό, καθώς και η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ρευστών με διαφορετικά ιξώδη.



Σχήμα 4.29 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=1\text{m/s}$, $U_{LS}=0,02\text{m/s}$ ($15^\text{η}$ μέτρηση)

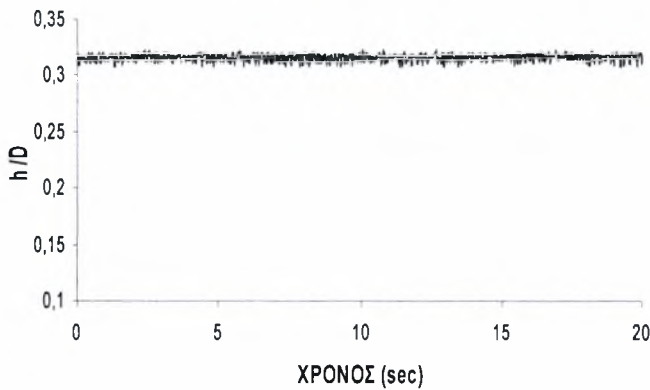


Σχήμα 4.30 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα έγχυσης – Τροφοδότηση του συστήματος από την αντλία με την ελάχιστη δυνατή παροχή έτσι ώστε να μην υπάρξουν διαταραχές στην επιφάνεια του μείγματος (Υπεριώδες φως). (b) Τμήμα έγχυσης – Λήψη εισαγωγής του διαλύματος γλυκερίνης και απεικόνιση του τρόπου σχηματισμού των 3 ζωνών. (c) Τμήμα από το σύστημα έγχυσης και πέρα. Πλήρης διαχωρισμός σε όλη την έκταση της διάταξης. (d) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης – Απεικόνιση των 3 ζωνών διαχωρισμού του μείγματος.

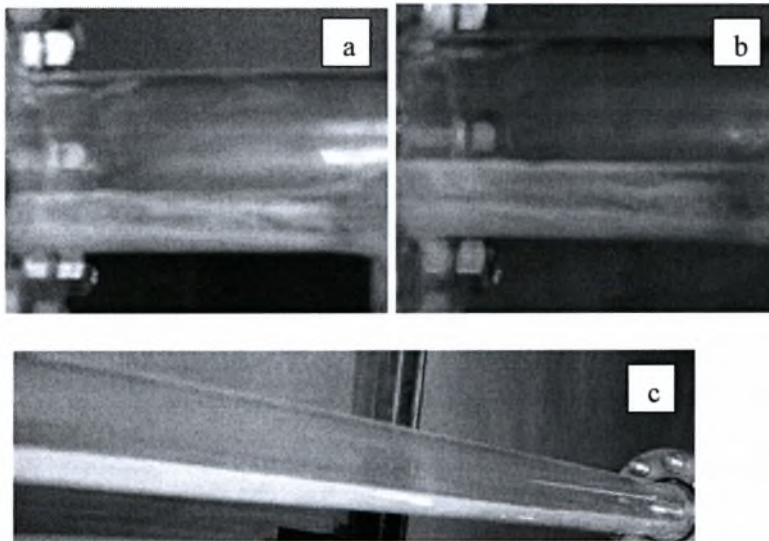
Παρατηρήσεις-Σχόλια: Σε αυτό το σημείο μέτρησης λόγω των χαμηλών φαινομενικών ταχυτήτων αέρα – νερού το φαινόμενο του διαχωρισμού του μείγματος σε 3 ζώνες καθώς και ο τρόπος εισαγωγής και διάχυσης του διαλύματος στο σύστημα απεικονίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το διάλυμα εισέρχεται παράλληλα προς τη κατεύθυνση ροής του νερού (Σχήμα 4.30a). Παρόλο που δεν υπάρχει καμία διαταραχή στην ελεύθερη επιφάνεια, η οπτικοποίηση του τρόπου διάχυσης του

εισαγόμενου διαλύματος είναι εντυπωσιακή και δείχνει ότι η συναγωγή είναι η κινούσα δύναμη μεταφοράς μάζας.

4.3.2 Κυματώδης ροή (Wavy flow)

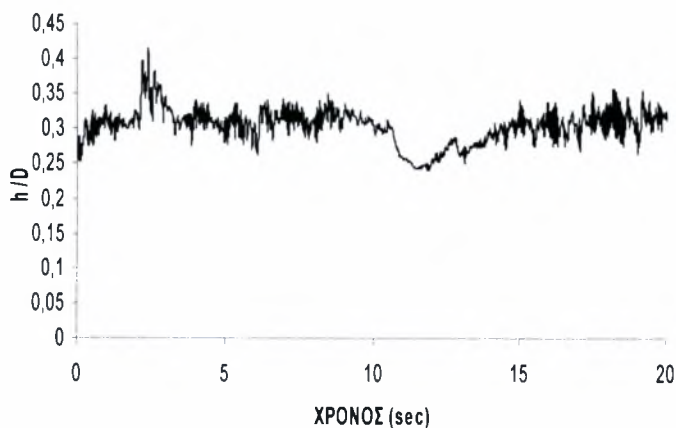


Σχήμα 4.31 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{Gs}=4\text{m/s}$, $U_{Ls}=0,01\text{m/s}$ (16^{th} μέτρηση)

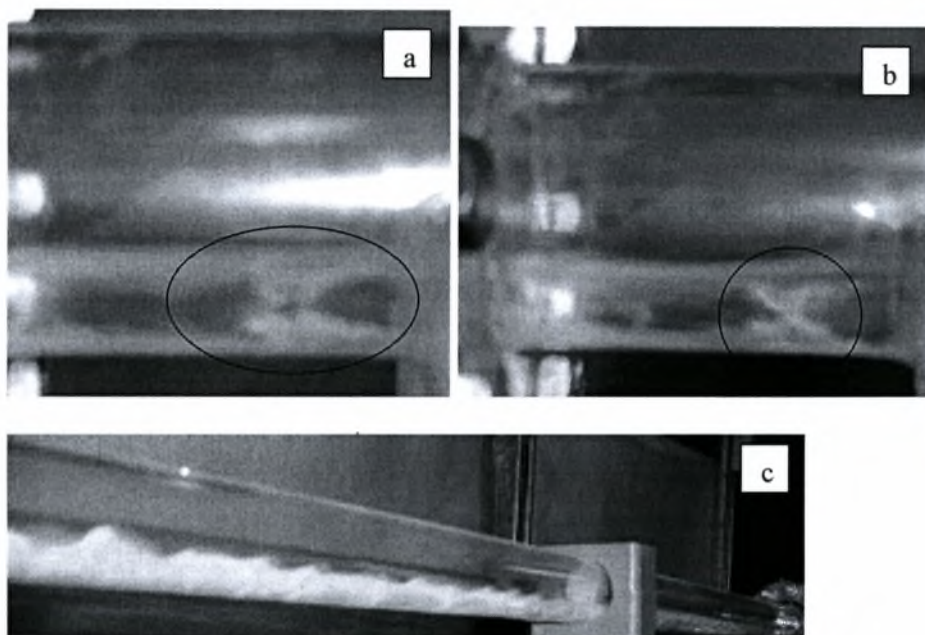


Σχήμα 4.32 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα έγχυσης (b) Τμήμα έγχυσης (Υπεριώδες φως) (c) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Στην κυματώδη ροή και σε αυτές τις συνθήκες το φαινόμενο του διαχωρισμού στις 3 ζώνες δεν είναι ιδιαίτερα εμφανές . Παρατηρείται ένας διαχωρισμός τη στιγμή εισαγωγής του διαλύματος στο σύστημα, έπειτα όμως τείνει να εξαφανιστεί.

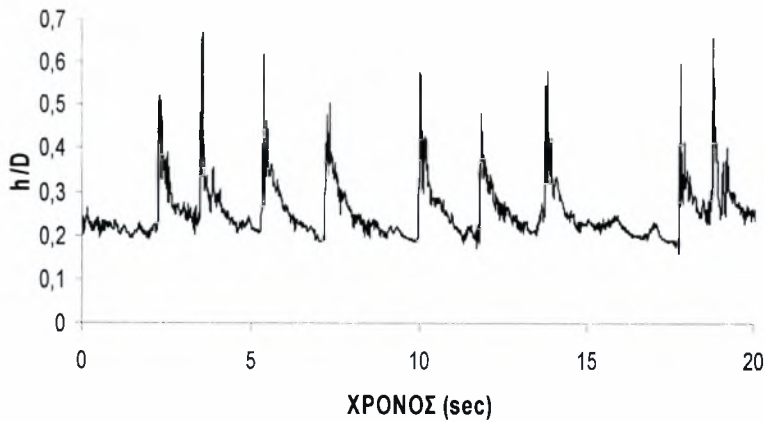


Σχήμα 4.33 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) $U_{GS}=5\text{m/s}$, $U_{LS}=0,02\text{m/s}$ (17^η μέτρηση)

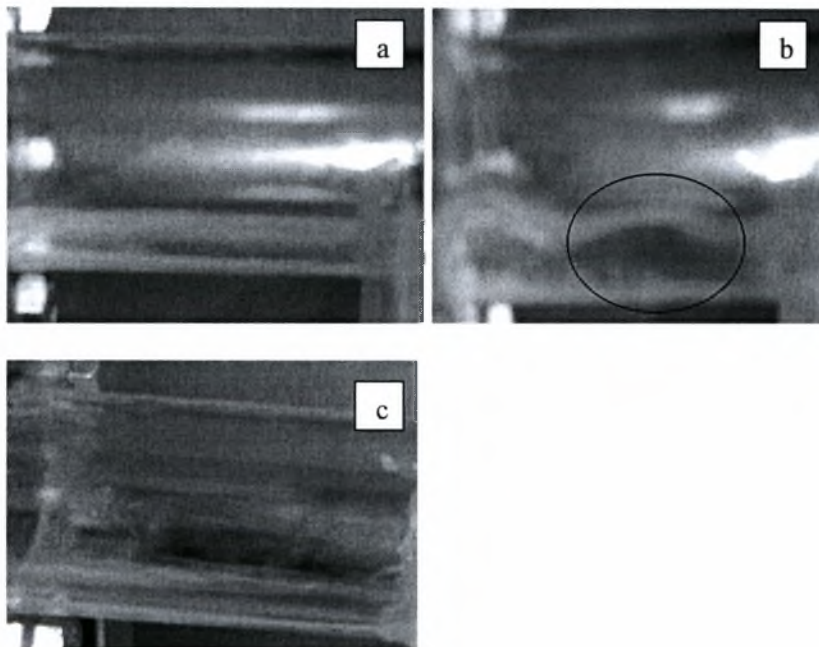


Σχήμα 4.34 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα έγχυσης (Υπεριώδες φως) (b) Τμήμα έγχυσης (c) Τμήμα πριν τον διαχωριστή

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Απεικονίζεται καθαρά ο τρόπος εισαγωγής του διαλύματος και ο σχηματισμός των 3 ζωνών στο τμήμα έγχυσης. (Σχήμα 4.34a, 4.34b). Έπειτα και καθώς αναπτύσσεται η ροή το φαινόμενο εξασθενεί, ίσως λόγω των έντονων κυματισμών που μπορεί να προκαλούν έντονη ανάμειξη του μίγματος και να ‘υπερνικούν’ την μεγάλη πυκνότητα της γλυκερίνης. Όσο αυξάνονται οι φαινομενικές ταχύτητες αυτό γίνεται πιο εμφανές.



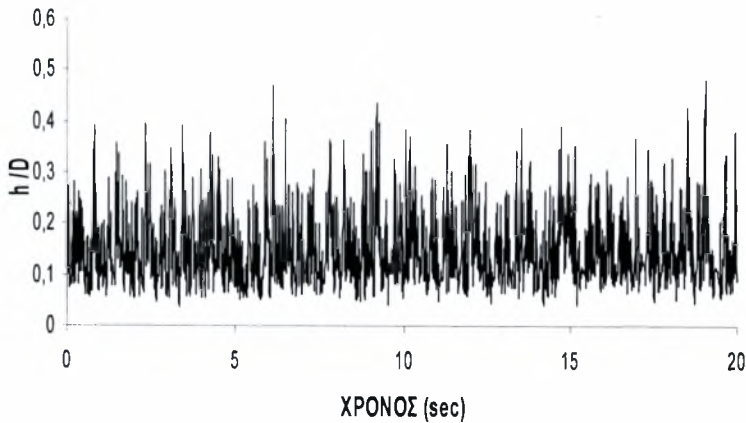
Σχήμα 4.35 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=6\text{m/s}$, $U_{LS}=0,03\text{m/s}$ ($18^{\text{η}}$ μέτρηση)



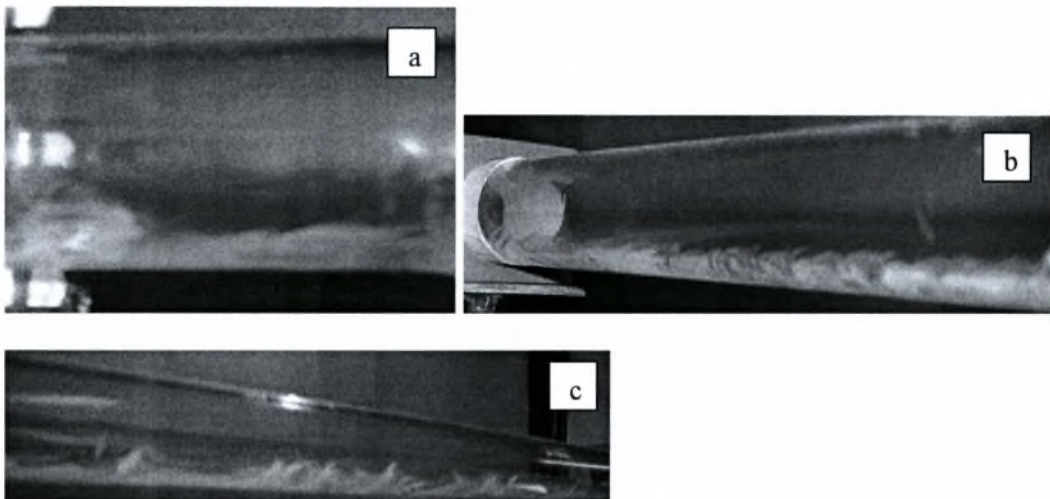
Σχήμα 4.36 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα έγχυσης – Πλάγια Λήψη (Υπεριώδες φως) (b) Τμήμα έγχυσης (Υπεριώδες φως) (c) Τμήμα έγχυσης – Λήψη από πάνω (Υπεριώδες φως)

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Από τις δύο τελευταίες μετρήσεις παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται οι φαινομενικές ταχύτητες αέρα – υγρού και όσο γίνονται εντονότερα τα κύματα, το φαινόμενο του διαχωρισμού στις 3 ζώνες γίνεται εντονότερο στο τμήμα έγχυσης (Σχήμα 4.36a, 4.36b) και τείνει να εξαφανιστεί όσο κινούμαστε προς τον διαχωριστή (Σχήμα 4.36c) προσφέροντας μία πλήρως αναπτυγμένη κυματώδη ροή.

4.3.3 Kelvin - Helmholtz

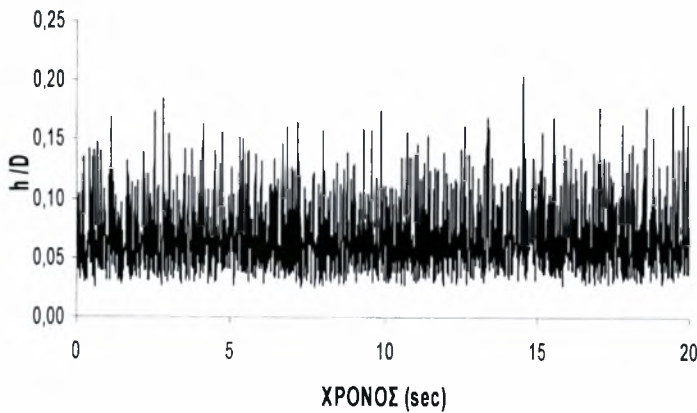


Σχήμα 4.37 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=10$ m/s, $U_{LS}=0,03$ m/s (19^{th} μέτρηση)

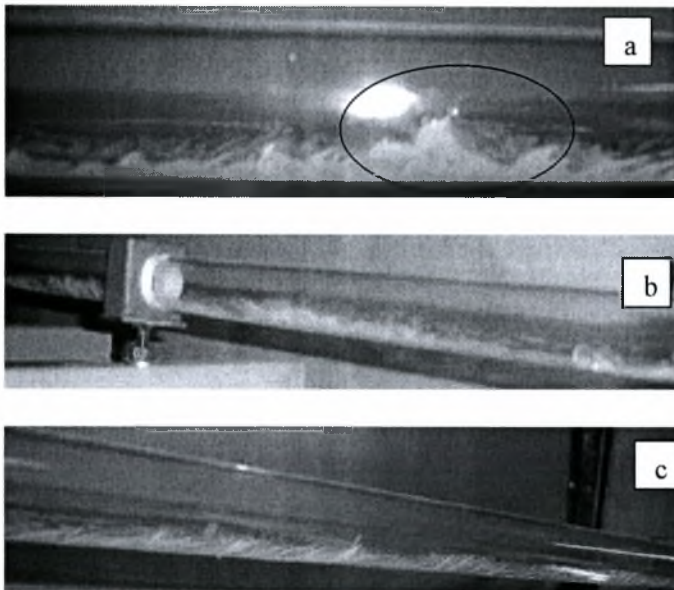


Σχήμα 4.38 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής -γλυκερίνης (a)Τμήμα έγχυσης (b)Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης (c)Τμήμα πριν τον διαχωριστή (Υπεριώδες φως)

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Σ'αυτή την περίπτωση, το φαινόμενο του διαχωρισμού στις 3 ζώνες δεν είναι ιδιαίτερα εμφανές. Σχηματίζονται τρισδιάστατα κύματα K-H στην ελεύθερη επιφάνεια ενώ το διάλυμα χρωστικής-γλυκερίνης-νερού τείνει να καταλάβει όλη την επιφάνεια του νερού καθώς αναπτύσσεται η ροή. (Σχήματα 4.30a, 4.30b)

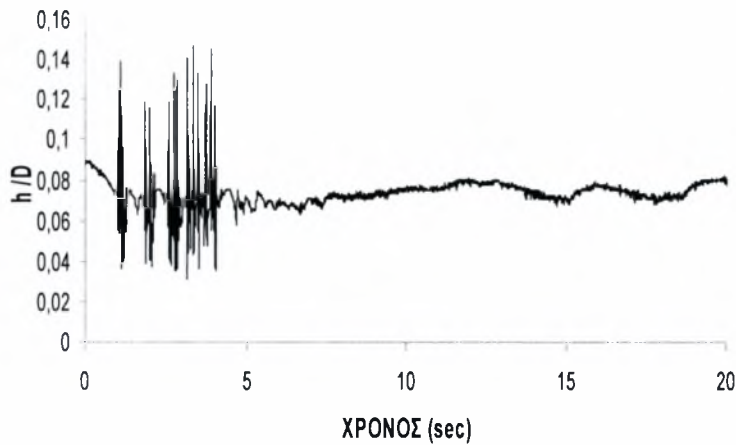


Σχήμα 4.39 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=10,5\text{m/s}$, $U_{LS}=0,009\text{m/s}$ ($20^{\text{η}}$ μέτρηση)

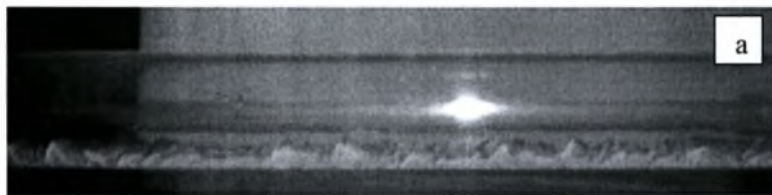


Σχήμα 4.40 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a)Τμήμα πριν τον διαχωριστή (b)Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης (c)Τμήμα πριν τον διαχωριστή (Υπεριώδες φως)

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Εδώ έχει μειωθεί η ταχύτητα του νερού ενώ αυξήθηκε λίγο η ταχύτητα του αέρα και οι κυματισμοί είναι πολύ εντονότεροι ενώ το διάλυμα χρωστικής-γλυκερίνης-νερού φαίνεται ότι καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του υγρού. Επίσης, φαίνονται ξεκάθαρα τα τρισδιάστατα κύματα K-H στην διεπιφάνεια.(Σχήμα 4.40a)



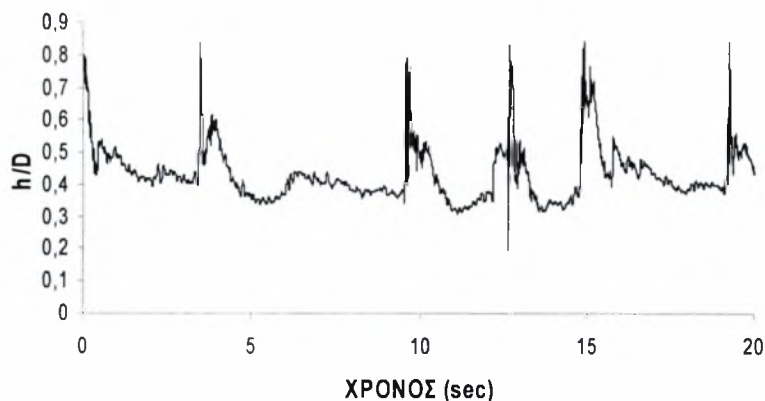
Σχήμα 4.41 Το πάχος της υγρής στιβάδας h/D για $U_{GS}=10,5\text{m/s}$, $U_{LS}=0,005\text{m/s}$ (21^η μέτρηση)



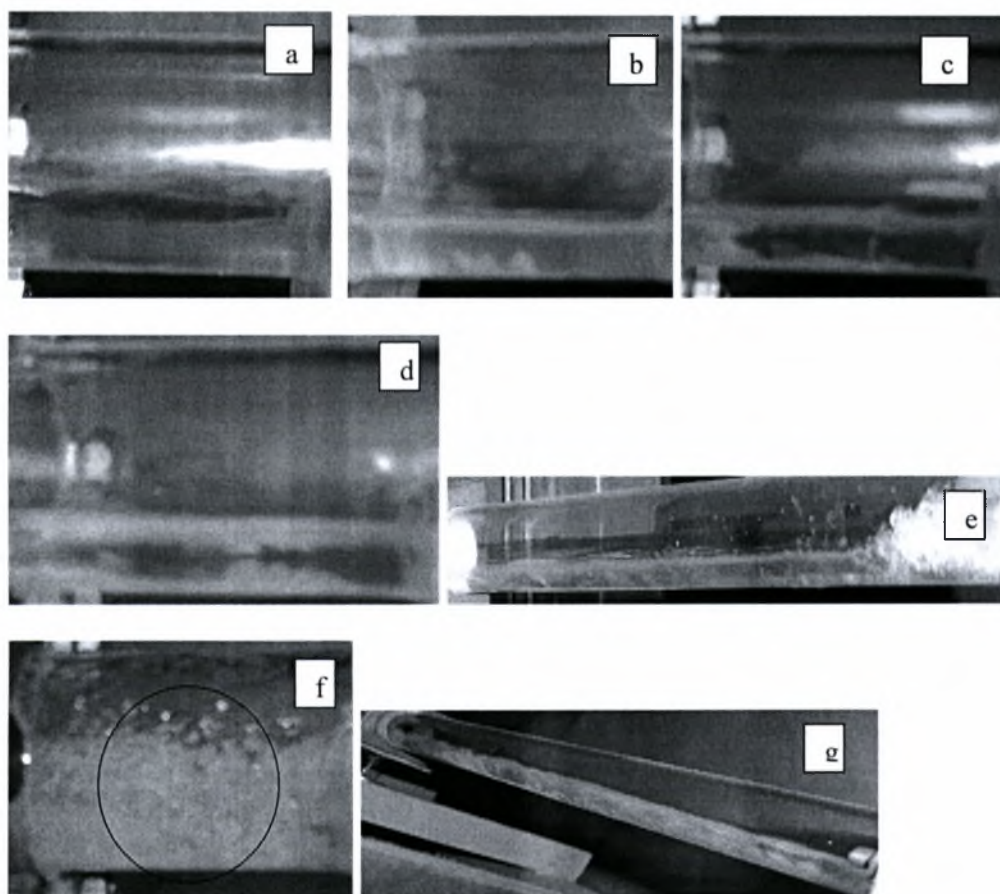
Σχήμα 4.42 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης. (b) Τμήμα πριν τον διαχωριστή (Υπεριώδες φως)

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Σε αυτή την περίπτωση, η ταχύτητα του αέρα παρέμεινε στην υψηλότερη τιμή της και η ταχύτητα του νερού μειώθηκε και άλλο επομένως οι κυματισμοί K-H είναι ακόμα πιο έντονοι και το φαινόμενο του διαχωρισμού των 3 ζωνών δείχνει να έχει εξαφανιστεί.

4.3.4 Ψευδοδιαλείπουσα ροή (Pseudoslug flow)



Σχήμα 4.43 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS} = 4\text{m/s}$, $U_{LS} = 0,1\text{m/s}$ ($22^{\text{η}}$ μέτρηση)



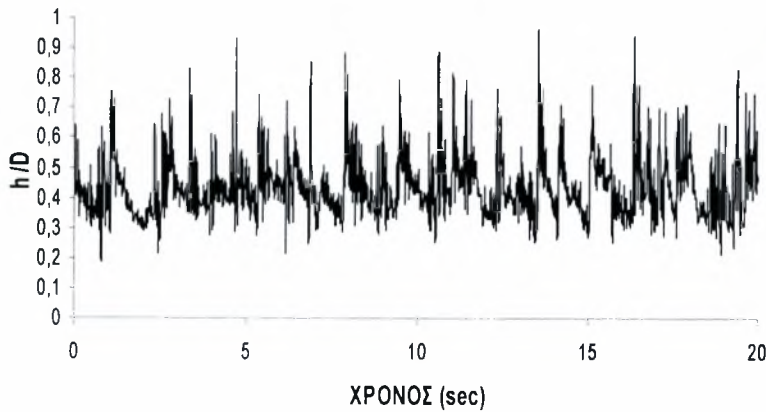
Σχήμα 4.44 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα έγχυσης - Λήψη της στιγμής της εισαγωγής του διαλύματος (b) Τμήμα έγχυσης - Λήψη της στιγμής διάχυσης του διαλύματος στο σύστημα (c) Τμήμα έγχυσης-Διάχυση και σχηματισμός των 3 ζώνων. (d) Τμήμα έγχυσης - Διάχυση και σχηματισμός των 3 ζώνων (Υπεριώδες φως) (e) Τμήμα μετά το σύστημα

έγχυσης- το slug έχει περάσει από το σημείο έγχυσης και παρασύροντας την γλυκερίνη και την χρωστική κατευθύνεται προς τον διαχωριστή.

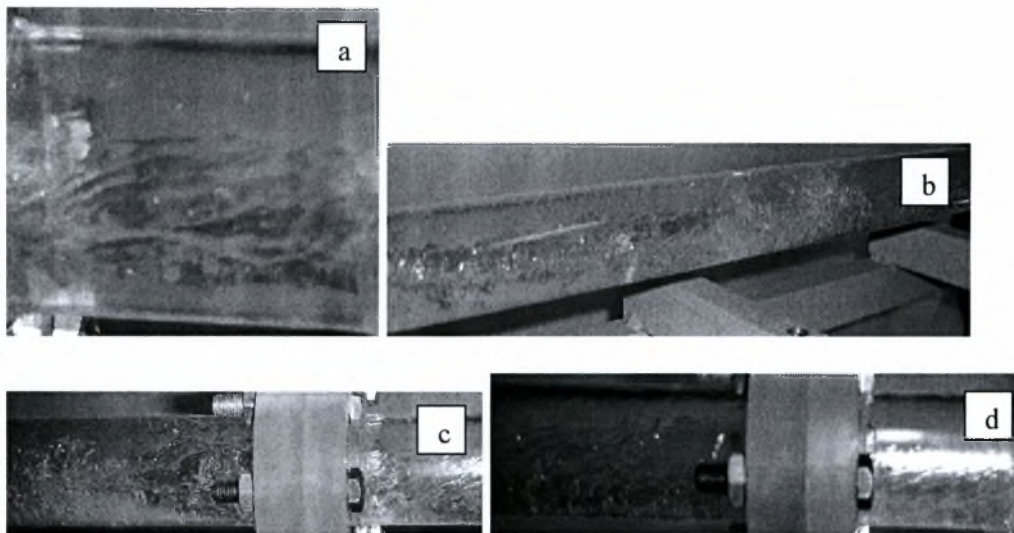
(f)Τμήμα έγχυσης – Λήψη της στιγμής που περνάει το Slug (Υπεριώδες φως).

(g)Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης-Οι 3 ζώνες τείνουν να εξαφανιστούν κατά μήκος της διάταξης.

Παρατηρήσεις-Σχόλια :Πραγματοποιείται λήψη της εισαγωγής του διαλύματος χρωστικής-νερού-γλυκερίνης και του σχηματισμού των 3 ζωνών με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Μικρή ποσότητα χρωστικής προσπαθεί να καταλάβει όλη την επιφάνεια του υγρού ενώ ήδη μία ποσότητα έχει ανέβει προς τα πάνω (Σχήμα 4.44b)Επίσης γίνεται λήψη της στιγμής που περνάει το slug και παρατηρείται η ποσότητα νερού σαν να 'περνάει πάνω' από ποσότητα γλυκερίνης (Σχήμα 4.44f)

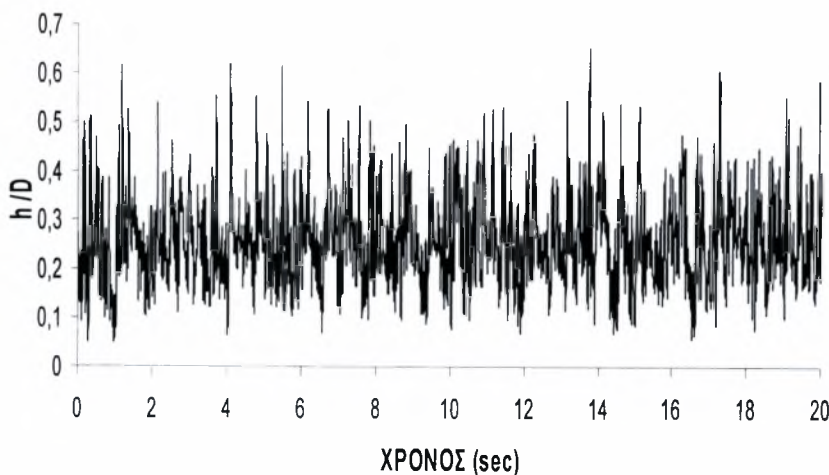


Σχήμα 4.45 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=6\text{m/s}$, $U_{LS}=0,2\text{m/s}$ ($23^{\text{η}}$ μέτρηση)

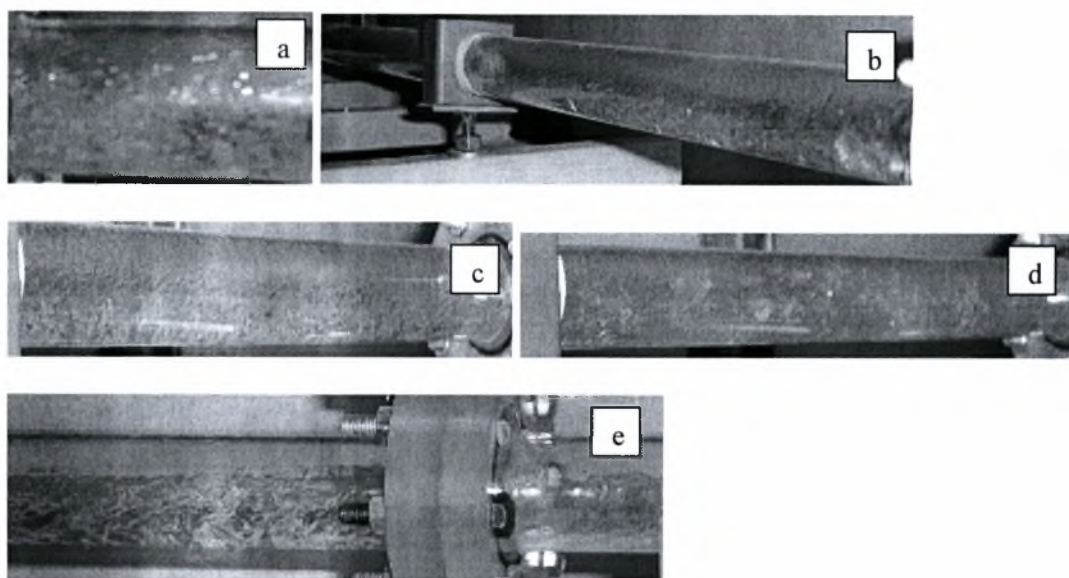


Σχήμα 4.46 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα έγχυσης – Λήψη της στιγμής που περνάει το slug από το σημείο εισαγωγής (b) Τμήμα πριν τον διαχωριστή – Απεικόνιση του slug την στιγμή που παρασύρει την χρωστική με την γλυκερίνη. (c) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης – Η στιγμή που το slug φεύγει από το σημείο λήψης. (d) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης (Υπεριώδες φως)

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Σε αυτή την περίπτωση έχει αυξηθεί πολύ η ταχύτητα του αέρα και η ροή είναι σχεδόν ‘χαοτική’. Το slug παρασύρει την γλυκερίνη με την χρωστική και μετά την επέλασή του αφήνει μόνο νερό.



Σχήμα 4.47 Το πάχος της υγρής στιβάδας (h/D) για $U_{GS}=10\text{m/s}$, $U_{LS}=0,4\text{m/s}$ (24^{th} μέτρηση)



Σχήμα 4.48 Οπτική απεικόνιση του σωλήνα με την έγχυση διαλύματος νερού - χρωστικής - γλυκερίνης (a) Τμήμα έγχυσης – Λήψη της στιγμής που περνάει το slug από το σημείο εισαγωγής (b) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης (c) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης – Η χρωστική με την γλυκερίνη δεν διακρίνονται σχεδόν καθόλου. (d) Τμήμα μετά το σύστημα έγχυσης – Απεικόνιση του slug που παρασέρνει την χρωστική με την γλυκερίνη. (e) Τμήμα έγχυσης και πέρα – Αρχικά η γλυκερίνη με τη χρωστική διακρίνονται, έπειτα παρασύρονται από τα slugs.

Παρατηρήσεις-Σχόλια : Όπως εξετάστηκε και στις προηγούμενες μετρήσεις, στην ψευδοδιαλείπουσα ροή και ειδικά όσο αυξάνονται οι φαινομενικές ταχύτητες αέρα – υγρού, παρατηρείται ότι ο διαχωρισμός του μείγματος στις 3 ζώνες σχεδόν εξαλείφεται ενώ όσο αναπτύσσεται η ροή κατά μήκος της διάταξης η χρωστική με τη γλυκερίνη παρασύρονται από τα slugs.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η οπτικοποίηση της διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό νερού-αέρα κυλινδρικής διατομής με έγχυση αρχικά διαλύματος νερού-χρωστικής και έπειτα νερού-χρωστικής-γλυκερίνης.

Πραγματοποιήθηκαν λήψεις σε διάφορα σημεία του χάρτη ροής και για όλες τις περιοχές για τις οποίες λειτουργεί το σύστημα. (Στρωματωμένη ροή, Κυματώδης ροή, Kelvin-Helmoltz, Ψευδοδιαλείπουσα ροή)

Μία γενική παρατήρηση για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι ότι η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη και ο διαχωρισμός του χάρτη ροής γίνεται πολύ εύκολα. Οι μεταπτώσεις από τη μία περιοχή ροής στην άλλη είναι ιδιαίτερα ευδιάκριτες όπως επίσης και η αλλαγή από το ένα σημείο μέτρησης στο επόμενο της ίδιας περιοχής στο χάρτη ροής.

Πιο συγκεκριμένα, για την πρώτη σειρά πειραμάτων και για την περίπτωση της στρωματωμένης ροής συμπεραίνουμε ότι η ροή δεν διαταράσσεται καθόλου από την παροχή του διαλύματος μέσω της δοσομετρικής αντλίας ενώ παράλληλα φαίνεται ξεκάθαρα ότι η χρωστική ακολουθεί το προφίλ ταχύτητας του υγρού. Επίσης, η χρωστική διαχέεται πλήρως στο νερό –λόγω της ίδιας πυκνότητας του διαλύματος έγχυσης και του διαλύματος ροής- και η ταχύτητα διάχυσής της αυξάνεται με την αύξηση των φαινομενικών ταχυτήτων αέρα-νερού. Τέλος, από την κατανομή της χρωστικής ουσίας εντός του διαλύματος φαίνεται ότι η κινούσα δύναμη της ανάμιξης είναι η ταχύτητα (συναγωγή).

Στην περίπτωση της κυματώδους ροής παρατηρείται ότι η ταχύτητα διαλυτοποίησης της χρωστικής στο νερό αυξάνεται καθώς περνάμε σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες αέρα-νερού καθώς και σε πιο έντονους κυματισμούς της ελεύθερης επιφάνειας. Στην κυματώδη ροή και για το ζεύγος ταχυτήτων : $U_{GS}=6\text{m/s}$, $U_{LS}=0,03\text{m/s}$ παρατηρείται ο σχηματισμός τριών ζωνών χρωστικής-νερού-χρωστικής που οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στην δημιουργία μικρών στροβιλισμών από την αύξηση των ταχυτήτων νερού-αέρα. Καθώς όμως αυξάνονται και άλλο οι φαινομενικές ταχύτητες και αρχίζουμε να πλησιάζουμε στην περιοχή των κυμάτων Kelvin-Helmoltz, το φαινόμενο του διαχωρισμού εξαλείφεται, δηλαδή η ανάμιξη είναι πλήρης σε πολύ μικρή απόσταση από το σημείο έγχυσης. Επίσης, σε αυτές τις περιοχές τα κύματα απεικονίζονται με ξεκάθαρο τρόπο και η χρωστική ουσία βοηθά στην καλύτερη απεικόνιση των περιοχών ροής.

Για την δεύτερη σειρά πειραμάτων όπου έγινε έγχυση διαλύματος νερού-χρωστικής-γλυκερίνης, παρατηρήθηκε το φαινόμενο του διαχωρισμού του μίγματος σε 3 περιοχές. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η γλυκερίνη έχει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό και έτσι η χρωστική ουσία διαχέεται από το διάλυμα νερού-γλυκερίνης προς το νερό, ενώ τα δύο ρευστά με τα διαφορετικά ιξώδη αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σχηματίζοντας μια διεπιφάνεια, κάτω από την οποία βρίσκεται το ρευστό με την μεγαλύτερη πυκνότητα. Επίσης, λόγω του ότι δεν υπάρχει καμιά διαταραχή στην διεπιφάνεια από την εισαγωγή του διαλύματος (στρωματωμένη ροή) φαίνεται ξεκάθαρα ότι η συναγωγή είναι η κινούσα δύναμη μεταφοράς μάζας. Όσο αυξάνονται οι φαινομενικές ταχύτητες νερού-αέρα και προχωράμε σε περιοχές του χάρτη ροής με πιο έντονες συνθήκες ροής, το φαινόμενο του διαχωρισμού στις τρεις ζώνες δεν αποτυπώνεται καθαρά διότι τα δύο ρευστά αναμιγνύονται μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της ψευδοδιαλείπουσας ροής, όπου η ροή είναι

σχεδόν χαοτική, μικρές ποσότητες γλυκερίνης φαίνεται να συμπαρασύρονται από τα slugs ενώ λόγω των μεγάλων διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται η βαρύτητα της γλυκερίνης 'υπερνικείται' και το διάλυμα φαίνεται να αναμιγνύεται πλήρως με το νερό.

Εν τέλει, το πιο σημαντικό απόφθεγμα της παρούσας εργασίας είναι ο ρόλος που παίζει η βαρύτητα της εκάστοτε ουσίας η οποία εισάγεται στο σύστημα. Όσο πιο μεγάλη πυκνότητα έχει η ουσία τόσο πιο έντονο θα είναι και το φαινόμενο του διαχωρισμού στις τρεις περιοχές στον αγωγό. Θα ήταν ίσως ενδιαφέρον να γίνει έγχυση ουσίας με πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα από την γλυκερίνη για να εξετασθεί και το κατά πόσο είναι ικανές οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις να συμπαρασύρουν το ρευστό. Στην περίπτωση με την γλυκερίνη διαπιστώσαμε ότι ήταν ικανές να το καταφέρουν. Τέλος, μία άλλη ενδιαφέρουσα προσέγγιση θα ήταν η οπτικοποίηση διφασικής ροής στο ίδιο σύστημα και με έγχυση διαλύματος γλυκερίνης-νερού-χρωστικής αλλά αυτή τη φορά με κλίση του αγωγού όπου η μετάπτωση από την διαχωρισμένη στην διαλείπουσα είναι πολύ ευαίσθητη

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ανδρίτσος Ν. & Μποντόζογλου Β. (2006). Διφασική ροή και Μεταφορά Θερμότητας. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Andritsos, N. (1986). Effect of pipe diameter and liquid viscosity on horizontal stratified flow. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Andritsos N. and T.J. Hanratty (1987). Influence of interfacial waves in stratified gas-liquid flows. AIChE J, **33**,444-454.

Baker O. (1954). Simultaneous flow of oil and gas. Oil and Gas J., **53(45)**, 185-195.

Barnea D.O. Shohan, Y. Taitel (1980). Flow pattern characterization in two phase flow by electrical conductance probe. Int. J. Multiphase Flow, **6**, 387-397.

Chisholm D. (1967). A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. Int. J. Heat Mass Transfer, **10**, 1767-1778.

Friedel, L.(1979). Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow. European Two Phase Flow Group Meet., Ispra, Italy, paper E2.

Hewitt G.F.and Roberts D.N. (1969). Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flash photography. Rept. AERE-M2159, UKAEA, Harwell.

Laurinat J.E. (1982). Studies of the effect of pipe size on horizontal annular two-phase flows. Ph.D. Dissertation, Univ. of Illinois.

Lin P.Y. and T.J. Hanratty (1987). Effects of pipes diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes. Int. J. Multiphase Flow, **13**, 549-563.

Lockhart R.W. and R.C. Martinelli (1949).Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. Chem. Eng. Progr., **45**, 39-48.

Mandhane J.M., G.A. Gregory and K.Aziz (1975). A flow pattern map for gas liquid flow in horizontal pipes. Int. J. Multiphase Flow, **1**, 537-551.

Scott D.S. (1963). Properties of co-current gas liquid flow. In Advances in Chemical Engineering, **4**, 199-277, Academic, New York.

Τζώτζη Χριστίνα (2007). Μοντελοποίηση της διεπιφανειακής διατμητικής τάσης κατά την οριζόντια διαστρωματωμένη ροή υγρού-αερίου. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

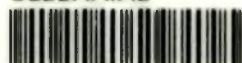
Taitel Y. and A.E. Dukler (1976a). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AIChE J., **22**, 47-55.

Taitel Y. and A.E. Dukler (1976b). A theoretical approach to the Lockhart-Martinelli correlations for stratified flow. Int. J. Multiphase Flow, **2**, 291-595.

Weisman J., Dunkan D., Gibson J. and Crawford Z. (1979). Effect of fluid properties and pipe diameter on two phase flow patterns in horizontal lines. *Int. J. Multiphase Flow* **5**, 437-461.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091451