



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

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

**Επίδραση εισαγωγής πολυμερούς στη διφασική  
ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιο αγωγό**

---

Στεριάδης Γρηγόριος  
Μηχανολόγος Μηχανικός Π.Θ.

**Επιβλέπων: Αναπλ. Καθ. Ν. Ανδρίτσος**

**ΒΟΛΟΣ 2011**



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

Αριθ. Εισ.: 9682/1  
Ημερ. Εισ.: 15-07-2011  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
620.106 4  
ΣΤΕ

© 2011 Στεριάδης Γρηγόριος

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

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

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος

(Επιβλέπων) Αν. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Παπαθανασίου Αθανάσιος

Αν. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της προσθήκης διαλύματος πολυμερούς στη διαφασική ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η εισαγωγή διαλύματος πολυακρυλαμιδίου (PAM) σε καθεστώτα διαστρωματωμένης ροής με διδιάστατα κύματα, σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz και σε διαλείπουσα ροή. Παρατηρήθηκε απόσβεση των κυμάτων για μικρές συγκεντρώσεις του πολυμερούς στη ροή στα καθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής με διδιάστατα κύματα και της διαστρωματωμένης ροής με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz, καθώς και αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας. Στη διαλείπουσα ροή με την προσθήκη του διαλύματος του πολυμερούς παρατηρήθηκε ότι το πλάτος των κυμάτων μειώνεται ενώ ελαττώνεται ελάχιστα η συχνότητά τους. Όπως και στις περιπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής με διδιάστατα κύματα και της διαστρωματωμένης ροής με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz, έτσι και στη διαλείπουσα ροή αυξάνεται το πάχος της υγρής στιβάδας.

---

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

---

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ - ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ- ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΡΟΗ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιους αγωγούς.....	3
2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων.....	5
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή.....	6
2.4 Μεταπτώσεις περιοχών.....	8
2.4.1 Μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα και δακτυλιοειδή.....	8
2.4.2 Μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα.....	9
<b>3. ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ - ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ.....</b>	<b>11</b>
3.1 Χάρτες καθεστώτων ροής.....	11
3.2 Βασικά μοντέλα διφασικής ροής.....	14
3.2.1 Το ομογενές μοντέλο.....	14
3.2.2 Το διαχωρισμένο μοντέλο.....	17
3.2.3 Μοντελοποίηση της διαστρωματωμένης ροής.....	19
<b>4. ΤΡΙΒΟΜΕΙΩΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....</b>	<b>21</b>
4.1 Τριβομειωτικά πολυμερή.....	21
4.2 Ανασκόπηση τριβομειωτικής συμπεριφοράς πολυμερών.....	23
4.2.1 Πειραματική προσέγγιση.....	29
4.2.2 Θεωρητική-Αναλυτική προσέγγιση.....	31
4.2.3 Μοριακή δυναμική και σωματιδιακή δυναμική προσέγγιση.....	33
4.3 Προτεινόμενοι μηχανισμοί για διφασική ροή.....	33

4.4 Εφαρμογές σε πολυφασικές ροές.....	37
4.5 Ανακεφαλαίωση.....	37
<b>5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>39</b>
5.1 Πειραματική διάταξη.....	39
5.2 Τμήμα μετρήσεων.....	41
5.3 Μέθοδοι και τεχνικές πειραματικών μετρήσεων πάχους υγρής στιβάδας.....	41
5.3.1 Μετρήσεις πάχους στιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο.....	42
5.4 Προπαρασκευή διαλύματος πολυμερούς.....	44
<b>6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>45</b>
6.1 Επίδραση προσθήκης πολυμερούς.....	45
6.2 Συμπεράσματα.....	58
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>59</b>

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Η διφασική ροή αερίου/υγρού σε οριζόντιους ή σχεδόν οριζόντιους αγωγούς έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία 30 χρόνια. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πλήθος των εφαρμογών στις οποίες συναντάται, όπως σε συστήματα διακίνησης γεωθερμικών ρευστών, στη λειτουργία πυρηνικών και χημικών αντιδραστήρων, σε εναλλάκτες θερμότητας, όπου έχουμε αλλαγή φάσης. Έτσι εντάθηκε το ενδιαφέρον των επιστημόνων για την εύρεση σχεδιαστικών εξισώσεων, οι οποίες να προβλέπουν τις διάφορες παραμέτρους της διφασικής ροής.

Φάση είναι μια από τις καταστάσεις της ύλης και μπορεί να είναι αέρια, υγρή και στερεή (στις τρεις γνωστές φάσεις ή καταστάσεις της ύλης έχει προστεθεί σχετικά πρόσφατα και μια τέταρτη το πλάσμα). Στην περίπτωση της ροής υγρού με κάποιο αέριο εντός αγωγού, κάθε μια από τις φάσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι καταλαμβάνει αναλογικά (κατά μέσον όρο) ένα ποσοστό της διατομής του αγωγού. Ο τρόπος με τον οποίο διανέμονται οι δύο φάσεις εντός του αγωγού ποικίλλουν και οι διάφορες διαμορφώσεις στη διφασική ροή είναι γνωστές σαν καθεστώτα ροής (flow patterns ή flow regimes). Βασικό ρόλο στη διαμόρφωση των καθεστώτων διφασικής ροής σε αγωγούς διαδραματίζει η βαρύτητα η οποία τείνει να συγκεντρώσει το υγρό στο κάτω μέρος του οριζόντιου αγωγού. Η διφασική ροή εμφανίζεται τόσο στο φυσικό κόσμο (π.χ. ομίχλη, καπνός, βροχή,) όσο και στο χώρο της βιομηχανίας (εξάτμιση και συμπύκνωση, μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου, βρασμός κ.α.). Η διφασική ροή υπακούει σε όλους τους βασικούς νόμους της μηχανικής των ρευστών, με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις είναι περισσότερο πολύπλοκες από αυτές της μονοφασικής ροής και ότι η πτώση πίεσης είναι αισθητά μεγαλύτερη από την πτώση πίεσης σε μονοφασική ροή κάθε φάσης χωριστά.

Ο γενικός τρόπος εξέτασης των καθεστώτων ροής γίνεται με την κατασκευή *χαρτών καθεστώτων ροής*. Οι χάρτες ροής είναι διπλά λογαριθμικά διαγράμματα που στον άξονα X έχουν την φαινόμενη ταχύτητα του αερίου και στον άξονα Ψ τη φαινόμενη ταχύτητα του υγρού. Οι περισσότεροι έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα σε αγωγούς και για



διφασικό μίγμα αέρα/υγρού κοντά στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αλλαγή κυρίως στη διάμετρο, στο ιξώδες, στην κλίση και στη μορφή της διατομής επιφέρει και αλλαγή στο χάρτη ροής που έχει το διφασικό μίγμα.

Σε χαμηλές παροχές της υγρής και αέριας φάσης σε έναν οριζόντιο αγωγό επικρατεί η διαστρωματωμένη ροή, δηλαδή η υγρή φάση ρέει στον πυθμένα του αγωγού και η αέρια στο πάνω μέρος, ενώ στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων είναι δυνατόν να δημιουργηθούν κυματισμοί. Σε μεγάλες παροχές της υγρής φάσης δημιουργείται η διαλείπουσα ροή, η οποία χαρακτηρίζεται από την περιοδική διέλευση υγρών μαζών, ενώ σε αρκετά μεγάλες παροχές της υγρής φάσης κυριαρχεί η ροή με φυσαλίδες αερίου στη συνεχή υγρή φάση. Σε μεγάλες παροχές της αέριας φάσης κυριαρχεί η δακτυλιοειδής ροή, όπου η υγρή φάση κινείται περιφερειακά του αγωγού και η αέρια στο εσωτερικό του.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης προσθήκης διαλύματος πολυμερούς στη διφασική ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 2,4 cm και μήκους 12,75 m με σκοπό τη διερεύνηση της ικανότητας αυτών των πολυμερών για μείωση της πτώσης πίεσης λόγω τριβής (τριβομειωτική συμπεριφορά). Συγκεκριμένα εξετάζονται οι μεταβολές της διεπιφάνειας και του πάχους του υμένα της υγρής φάσης κατά την προσθήκη διαλύματος πολυμερούς συγκέντρωσης 100, 500 και 1000 ppm για διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D), για διαστρωματωμένη ροή με κύματα μεγάλου πλάτους και μήκους, η οποία ροή στη συνέχεια θα αναφέρεται ως ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz (K-H) και για διαλείπουσα ροή (Slug flow).

## 2. ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ - ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ - ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΡΟΗ-ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

---

### 2.1 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιους αγωγούς

Τα πιο συνηθισμένα καθεστώτα ροής, κατά τη διαφασική ροή σε οριζόντιο αγωγό, τα οποία έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.1. είναι:

- *Ροή με φυσαλίδες (Bubble flow)*

Κατά τη ροή με φυσαλίδες παρατηρείται η ροή διεσπαρμένων φυσαλίδων του αερίου στο υγρό τείνοντας να συγκεντρωθούνε στο πάνω μέρος του αγωγού. Το καθεστώς της ροής αυτής παρατηρείται για μεγάλες παροχές.

- *Λεία διαστρωματωμένη ροή (Smooth Stratified flow)*

Στη διαστρωματωμένη ροή, η οποία παρατηρείται για χαμηλές ταχύτητες υγρού και αερίου, υπάρχει πλήρης διαχωρισμός των δύο φάσεων και το υγρό ρέει στον πυθμένα του αγωγού ενώ το αέριο στο πάνω μέρος του με τη διεπιφάνειά τους να είναι λεία.

- *Διαστρωματωμένη κυματοειδής ροή (Wavy Stratified flow)*

Αυξάνοντας την ταχύτητα του αερίου, κατά τη διαστρωματωμένη ροή, σχηματίζονται κύματα στη διεπιφάνεια και τα οποία έχουν την κατεύθυνση της ροής. Το μέγεθος των κυμάτων εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα των δύο φάσεων και κατά το πέρασμά τους από τα πλαϊνά τοιχώματα του αγωγού σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα υγρού.

- *Εμβολική ροή (Plug flow)*

Η ροή αυτή χαρακτηρίζεται από επιμηκυμένες φυσαλίδες, η διάμετρος των οποίων, είναι μικρότερη από αυτή του αγωγού καθώς η υγρή φάση είναι συνεχόμενη στον πυθμένα του αγωγού κάτω από τις φυσαλίδες. Η εμβολική ροή συνήθως αναφέρεται και ως elongated bubble flow.

- *Διαλείπουσα ροή (Slug flow)*

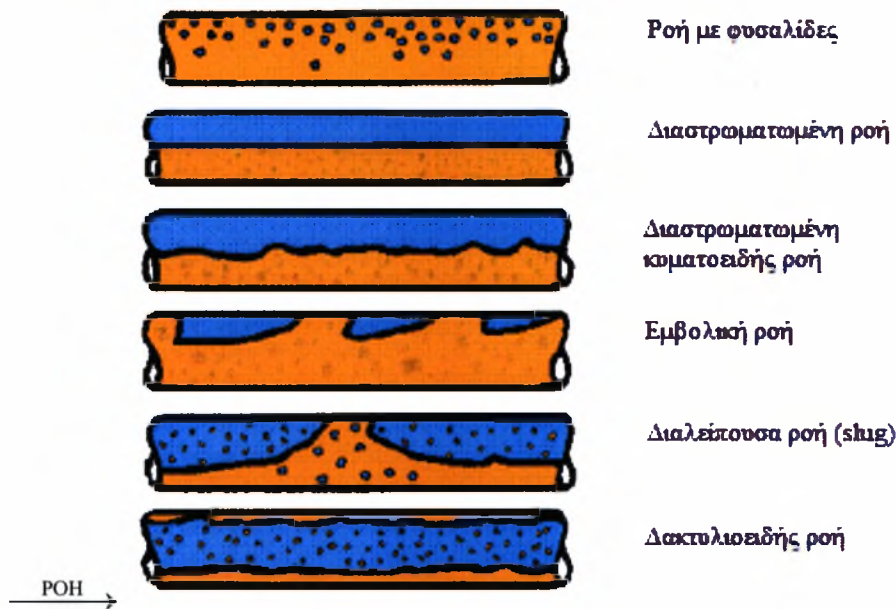
Για ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες του αερίου η διάμετρος των φυσαλίδων γίνεται ακόμα μεγαλύτερη με περιοδική διέλευση υγρών μαζών (slugs), οι οποίες διαχωρίζουν τις μεγάλης διαμέτρου φυσαλίδες. Κάτω από ορισμένες συνθήκες εμφανίζεται η λεγόμενη ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug flow) , όπου παρατηρούνται μεν υγρές μάζες, οι οποίες όμως δεν ρέουν με την ταχύτητα της υγρής φάσης (όπως σχεδόν συμβαίνει στη διαλείπουσα ροή), και έτσι δεν προκαλούν μεγάλες και απότομες διαφορές πίεσης.

- *Δακτυλιοειδής ροή (Annular flow)*

Η δακτυλιοειδής ροή εμφανίζεται σε ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες αερίου. Το υγρό σχηματίζει στιβάδα στα τοιχώματα του αγωγού και το πάχος της οποίας, λόγω βαρύτητας, είναι μεγαλύτερο στο κάτω μέρος, ενώ το αέριο ρέει στο κέντρο του. Επίσης στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου υπάρχουν κύματα μικρού πλάτους, ενώ η αέρια φάση συμπαρασύρει υγρά σταγονίδια στο εσωτερικό της.

- *Ροή με εκνέφωση (Mist flow)*

Κατά τη ροή με εκνέφωση λεπτές υγρές δέσμες και σταγονίδια από τις κορυφές των κυμάτων εναποτίθενται στο πάνω μέρος του αγωγού. Ο μηχανισμός της εναπόθεσης των σωματιδίων στο πάνω μέρος του αγωγού και η αναρρίχηση της υγρής στιβάδας, σε μικρής διαμέτρου αγωγούς είναι ο κύριος μηχανισμός μετάβασης σε δακτυλιοειδή ροή.



*Σχήμα 2.1: Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό*

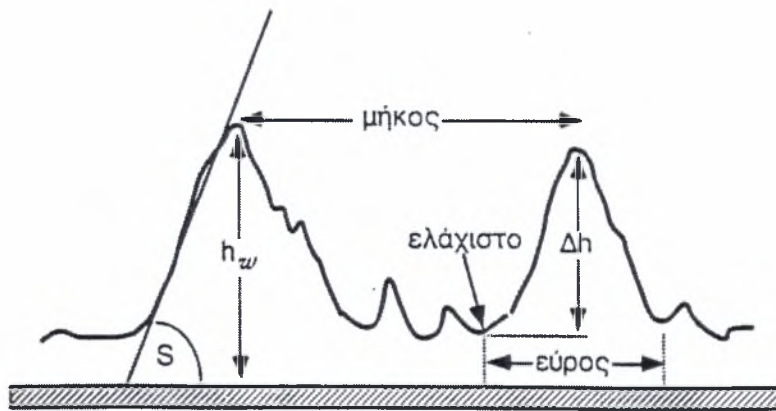
## 2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων

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

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι το πλάτος κύματος (wave amplitude) που ορίζεται ως το μισό της υψομετρικής διαφορά,  $\Delta h$ , μεταξύ ενός ελάχιστου και του αμέσως επόμενου μεγίστου της υγρής στοιβάδας (Nencini & Andreussi, 1983). Σαν ύψος του κύματος  $h_w$  ορίζεται η απόσταση της κορυφής του από το τοίχωμα του αγωγού. Το μήκος κύματος  $\lambda$  όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών κυμάτων. Από τη γνωστή σχέση της κινηματικής :

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

όπου  $f$  είναι η χαρακτηριστική συχνότητα των κυμάτων και  $u_c$  η ταχύτητα του κύματος. Το εύρος του κύματος  $\Delta L$  είναι η οριζόντια απόσταση δύο διαδοχικών ελαχίστων της υγρής στοιβάδας, μεταξύ των οποίων ορίζεται το κύμα διαταραχής.



Σχήμα 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων

### 2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το είδος του καθεστώτος ροής που επικρατεί είναι οι παροχές των δύο φάσεων, οι φυσικές ιδιότητές τους (ιξώδες υγρού, πυκνότητα, επιφανειακή τάση κτλ), καθώς και τα χαρακτηριστικά του αγωγού (διάμετρος, κλίση, γεωμετρία, τραχύτητα).

Η πυκνότητα του αερίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μορφή της διεπιφάνειας αερίου και υγρού. 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 δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή κατά την μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή. Όμως η μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή παρατηρείται ότι γίνεται σε μεγαλύτερες παροχές υγρού. Επίσης η μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη με κύματα γίνεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου και μεγαλώνει η περιοχή της ροής με φουσαλίδες (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 σημαντικότερη 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 σκαρφαλώνει περιφερειακά στα τοιχώματα του σωλήνα εξαρτάται από τη διάμετρο του σωλήνα. Μικρή διάμετρος και υγρό με χαμηλό ιξώδες δίνουν μεγαλύτερη αναρριχητικότητα στο υγρό. Με αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα

παρατηρείται ότι η μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή γίνεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου και η μετάπτωση σε διαλείπουσα σε μεγαλύτερες παροχές υγρού. Επιπλέον, η περιοχή ημιδιαλείπουσας ροής μικραίνει καθώς μεγαλώνει η διάμετρος του σωλήνα ( Lin & Hanratty 1986).

Το ιξώδες (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 αντιστέκονται στην διάτμησή τους, δηλαδή στην κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του. Από φαινομενολογικής σκοπιάς το ιξώδες μοιάζει με την τριβή δυο στερεών σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή και κινούνται σχετικά. Γι' αυτό το λόγο ονομάζεται και εσωτερική τριβή. Η φύση όμως των δυο δυνάμεων είναι τελείως διαφορετική. Επίσης γι' αυτό το λόγο παρατηρείται γρηγορότερη αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη ροή υγρών με μεγάλο ιξώδες.

Τα υγρά με χαμηλό ιξώδες χρειάζονται μεγαλύτερες παροχές υγρού για να ξεκινήσει η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, όταν η παροχή του αερίου είναι μικρή και μικρότερη παροχή υγρού, όταν μεγαλώνει η παροχή του αερίου. Αυτός είναι ο πρωταρχικός λόγος για την αλλαγή στο σχήμα της ψευδο-διαλείπουσας ροής που φαίνεται να μικραίνει με την αύξηση του ιξώδους του υγρού. Μια άλλη σημαντική 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. Άλλωστε, όπως έχει παρατηρηθεί, η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων παύει να υπάρχει για πολύ μεγάλο ιξώδες (Andritsos 1986).

Μια άλλη περιοχή που φαίνεται να επηρεάζεται από την αύξηση του ιξώδους είναι η δακτυλιοειδής. Το ιξώδες επηρεάζει το σκαρφάλωμα του υγρού στα τοιχώματα του σωλήνα. Έτσι για τη μετάβαση στην δακτυλιοειδή ροή χρειάζεται μεγαλύτερες παροχές αερίου για να επιτευχθεί.

Όπως έχει παρατηρηθεί σε διάφορες εργασίες (Mandhane et al 1974, Andritsos, 1986) τα άλλα καθεστώτα ροής δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε αλλαγές του ιξώδους. Το αποτέλεσμα της αύξησης του ιξώδους είναι να κάνει το σύστημα πιο σταθερό ως αναφορά το ξεκίνημα της διαλείπουσας ροής.

## 2.4 Μεταπτώσεις περιοχών

### 2.4.1 Μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα και δακτυλιοειδή

Για την μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή στη διαλείπουσα και τη δακτυλιοειδή θεωρείται ότι είναι υπεύθυνη η ρευστοδυναμική αστάθεια Kelvin – Helmholtz. Συγκεκριμένα, η παρουσία κυμάτων στη διεπιφάνεια αερίου/υγρού προκαλεί τοπική αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης στην κορυφή του κύματος με συνέπεια τη δημιουργία υποπίεσης. Αν οι δημιουργημένες κατ' αυτόν τον τρόπο ασταθεροποιητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης, τότε το κύμα τείνει να μεγαλώσει και η υγρή μάζα να καταλάβει τη διατομή του αγωγού. Ακολουθώντας την κλασική θεωρία των Kelvin – Helmholtz οι Taitel & Dukler (1976) προτείνουν ότι η μετάπτωση αρχίζει όταν

$$U_G = \left(1 - \frac{h}{D}\right) \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G)\alpha}{\rho_G S_i} \right]^{0.5} \quad (2.2)$$

όπου  $h$  το ύψος της υγρής στιβάδας,  $S_i$  το πλάτος της διεπιφάνειας,  $\alpha$  το κλάσμα κενού,  $D$  η διάμετρος του αγωγού και  $\rho_G$ ,  $\rho_L$  οι πυκνότητες της υγρής και της αέριας φάσης αντίστοιχα.

Οι Taitel & Dukler υποστηρίζουν ότι, αν η υγρή στιβάδα είναι μεγαλύτερη από το μισό της διαμέτρου, τότε υπάρχει μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη στη διαλείπουσα ροή, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η μετάπτωση οδηγεί στη δακτυλιοειδή ροή. Αν και η προσπάθεια των Taitel & Dukler είναι αρκετά αξιόλογη, αρκετά πειραματικά δεδομένα δεν συμφωνούν με τις προβλέψεις τους, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι το μοντέλο:

- Προβλέπει σημαντική επίδραση του ιξώδους του υγρού στη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη στη διαλείπουσα ροή
- Προβλέπει ότι η μετάπτωση στη δακτυλιοειδή ροή εξαρτάται έντονα από τη διάμετρο του αγωγού, σε αντίθεση με τα πειραματικά δεδομένα που δείχνουν μικρή ή καθόλου εξάρτηση (Lin 1985).

## 2.4.2 Μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα

Αναφορές στη βιβλιογραφία σχετικά με την δημιουργία των κυμάτων σε κανάλια ορθογωνικής διατομής παρουσιάζονται αρχικά από τους Hershman (1960) και Cohen (1964).

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

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

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

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της διαφασικής ροής είναι ο συμπαρασυρμός  $E$ . Ο συμπαρασυρμός είναι το κλάσμα της παροχής του υγρού που βρίσκεται στον αέριο πυρήνα με μορφή μικρών σταγονιδίων δια τη συνολική υγρή παροχή και ορίζεται ως :

$$E = \frac{W_{LE}}{W_L} = \frac{W_L - W_{LF}}{W_L} \quad (2.3)$$

όπου  $W_L$  είναι η συνολική παροχή υγρού,  $W_{LE}$  η παροχή της διασπαρμένης υγρής φάσης και  $W_{LF}$  η παροχή της υγρής στιβάδας. Ο συμπαρασυρμός επηρεάζεται από δυο βασικές διεργασίες, την εκνέφωση (με ρυθμό  $R_a$ ), δηλαδή την παραγωγή σταγονιδίων από την επιφάνεια των κυμάτων, και την εναπόθεση (με ρυθμό  $R_d$ ) των σταγονιδίων στην υγρή στιβάδα. Ο συμπαρασυρμός σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή (που συμβαίνει σε απόσταση μερικών διαμέτρων από το σημείο ανάμιξης) αποκτά σταθερή τιμή και ο ρυθμός εκνέφωσης γίνεται ίσος με το ρυθμό εναπόθεσης ( $R_a=R_d$ ). Θα πρέπει επίσης να επισημάνουμε πως έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει ένα όριο παροχής της υγρής στιβάδας  $W_{LFC}$  (critical film flow rate)



κάτω από το οποίο δεν προκαλείται εκνέφωση, ανεξάρτητα από την αύξηση της ταχύτητας του αερίου (Dallman 1978)

Το πάχος της υγρής στιβάδας και η κατανομή του στην περιφέρεια του αγωγού είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στη διαφασική ροή. Μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της είναι να εκφράζει την ταχύτητα του υγρού ή το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει το αέριο ή το υγρό μέσα στον σωλήνα. Ακόμα μπορεί να δώσει στοιχεία για την πτώση πίεσης και τη συνολική επιφάνεια εναλλαγής του υγρού ή του αερίου μέσα στο σωλήνα της διαφασικής ροής.

### 3. ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ - ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

---

#### 3.1 Χάρτες καθεστώτων ροής

Η πιο συνηθισμένη πρακτική για την παρουσίαση των καθεστώτων ροής είναι να σχεδιαστούν τα δεδομένα στους λεγόμενους χάρτες περιοχών ροής (flow regime maps), με άξονες όρους που περιλαμβάνουν παροχές ή και ιδιότητες φάσεων, καθώς και τη διάμετρο ή και γεωμετρία του αγωγού.

Έναν από τους πλέον γνωστούς και πρωτοποριακούς γενικευμένους χάρτες ροής σε οριζόντιο αγωγό πρότεινε ο Baker (1954). Βασισμένος στα δεδομένα παλαιότερων ερευνητών που αναφέρονταν στο σύστημα νερό – αέρας, σχεδίασε τον όρο  $G_g/\lambda$  ως προς τον όρο  $G_l\psi/G_g$ . Για το σύστημα αέρας-νερό ο παραπάνω σχεδιασμός είναι ισοδύναμος με αυτόν 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

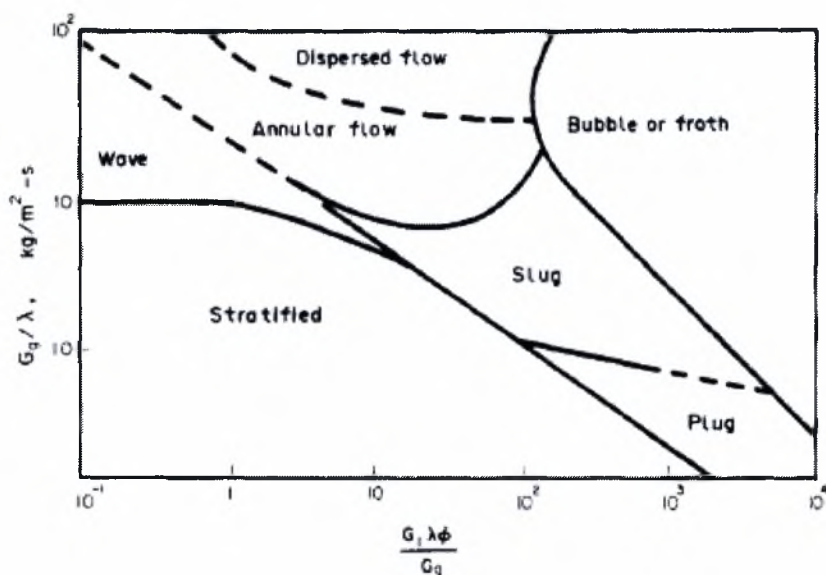
$$\lambda = \left[ \left( \frac{\rho_G}{0.075} \cdot \frac{\rho_L}{62.3} \right)^{0.5} \right] \quad (3.1)$$

$$\psi = \left( \frac{73}{\sigma} \cdot \frac{\mu_L}{1.0} \cdot \frac{62.8}{\rho_L} \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

όπου  $\rho_G$  και  $\rho_L$  οι πυκνότητες του αερίου και του υγρού αντίστοιχα (σε  $\text{lb}_m/\text{ft}^3$ ),  $\mu_L$  το ιξώδες του υγρού σε  $\text{cp}$  και  $\sigma$  η επιφανειακή τάση (σε  $\text{dyn/cm}$ ). Μειονέκτημα του χάρτη είναι ότι δεν παίρνει υπόψη του την επίδραση της διαμέτρου του αγωγού.

Αργότερα ο Scott (1963) τροποποιεί το χάρτη του Baker χρησιμοποιώντας τα πιο πρόσφατα δεδομένα του Hoogendoorn (1959) ο οποίος μελέτησε τη διφασική ροή αέρα-νερού και αέρα διαλυμάτων ελαίων σε οριζόντιες σωληνώσεις. Δεν υπάρχει ακριβής θέση

των συνόρων της μιας περιοχής ροής από την άλλη, αλλά στη θέση τους μια ευρεία ταινία ανάμεσα στις διάφορες περιοχές ροής.



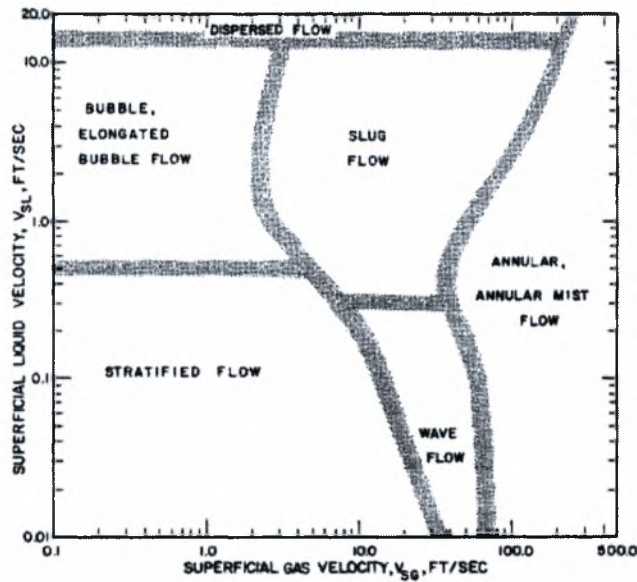
Σχήμα 3.1: Χάρτης περιοχών ροής Baker (1954)

Στα μέσα της δεκαετίας του '70 οι Manhane et al (1974) μελέτησαν τη διαφασική ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους αγωγούς και παρουσίασαν ένα γενικευμένο χάρτη καθεστώτων ροής (Σχήμα 3.2). Οι συντεταγμένες του χάρτη είναι οι φαινομενικές ταχύτητες υγρού και αερίου και αναφέρονται στο σύστημα αέρας-νερό. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε τράπεζα δεδομένων με αποτελέσματα παλαιότερων εργασιών. Αυτά προήλθαν από συστήματα με παρόμοιες ιδιότητες (ιξώδες, πυκνότητα, επιφανειακή τάση) και εύρος φαινομενικών ταχυτήτων, όπως του συστήματος αέρας - νερό. Τα πειράματα έγιναν σε πλήθος διαμέτρων αγωγού κι έτσι ο χάρτης του αναφέρεται σε κάθε οριζόντιο αγωγό. Αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλη τροποποίηση των αξόνων.

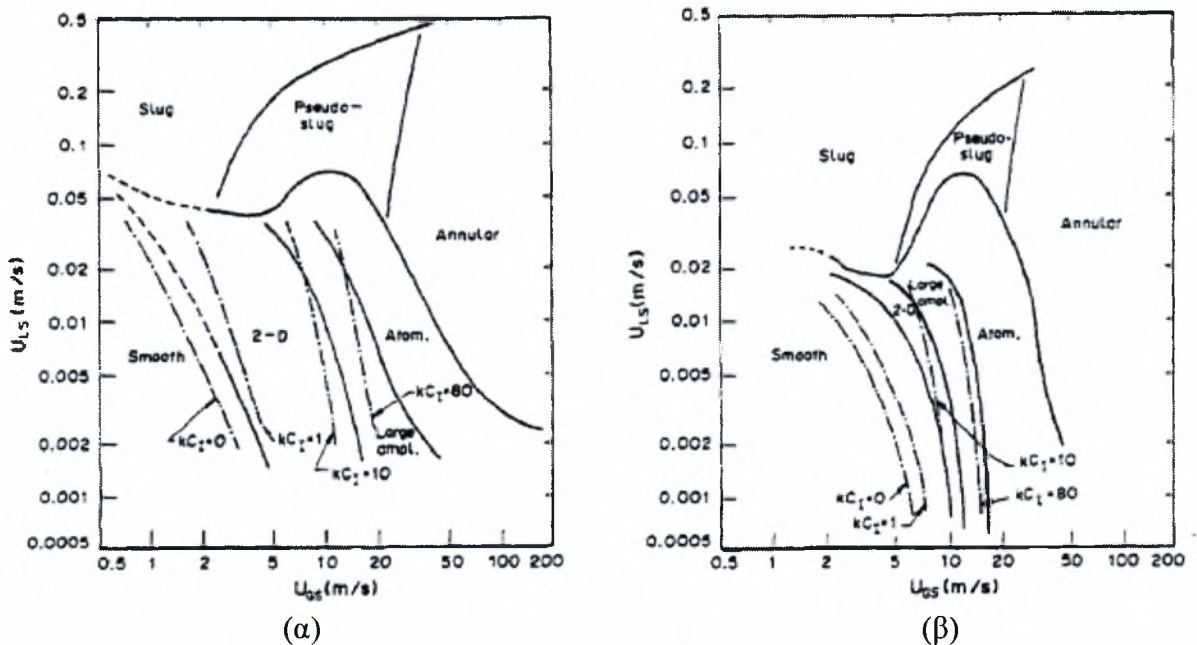
Οι Lin & Hanratty (1986) εξετάζοντας το σύστημα αέρας - νερό σε οριζόντιους αγωγούς 2.54 και 9.53 cm και για συνθήκες περιβάλλοντος, κατασκεύασαν τους αντίστοιχους χάρτες καθεστώτων ροής. Προσπαθώντας να ερμηνεύσουν την επίδραση της διαμέτρου του οριζόντιου αγωγού, συγκρίνουν τα δικά τους αποτελέσματα με αυτά του Mandhane (1974).

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 διεξοδικά την επίδραση του ιξώδους στις μεταβολές από διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή. Η επίδραση του ιξώδους στους χάρτες καθεστώτων ροής φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.2: Χάρτης περιοχών ροής Mandhane (1974)



Σχήμα 3.3: Πειραματικοί χάρτες περιοχών ροής για (α) αγωγό διαμέτρου 2.52 cm και υγρό ιξώδους 1 cP, (β) αγωγό διαμέτρου 2.52 cm και υγρό ιξώδους 16 cP (Andritsos et al., 1989)

## 3.2 Βασικά μοντέλα διφασικής ροής

Στα τελευταία σαράντα χρόνια εκτεταμένα στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται μοντέλα περιγραφής της διφασικής ροής. Παρακάτω θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα κυριότερα από αυτά όπως το ομογενές και το διαχωρισμένο μοντέλο, ενώ θα γίνει αναφορά για την μοντελοποίηση συγκεκριμένων περιοχών ροής όπως της διαστρωματωμένης και της δακτυλιοειδούς ροής.

### 3.2.1 Το ομογενές μοντέλο

Το ομογενές μοντέλο (homogeneous model) θεωρεί τη ροή των δύο φάσεων σαν ένα ψευδορυστό το οποίο έχει τις μέσες ιδιότητες του μίγματος και υπακούει στις εξισώσεις που διέπουν μια μονοφασική ροή. Οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται το μοντέλο είναι οι παρακάτω:

- ίσες ταχύτητες υγρού και αερίου,
- θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων του διφασικού μίγματος και
- χρήση κατάλληλου συντελεστή τριβής για τη διφασική ροή.

Από όσα έχουμε αναφέρει για τα καθεστώτα ροής αναμένεται πως το ομογενές μοντέλο είναι κατάλληλο για ροή με φυσαλίδες και στις περιοχές της δακτυλιοειδούς ροής.

Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν τη μονοδιάστατη ομογενή ροή είναι:

$$\text{συνέχειας: } m = A\bar{\rho}u = \text{σταθ.} \quad (3.3)$$

$$\text{ορμής: } m \frac{du}{dz} = -A \frac{dp}{dz} - P\tau_w - A\bar{\rho}g \cos \theta \quad (3.4)$$

$$\text{ενέργειας: } \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} = m \frac{d}{dz} \left( h + \frac{\bar{u}^2}{2} + gz_g \right) \quad (3.5)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις  $\bar{\chi}$  και  $\bar{u}$  είναι η μέση πυκνότητα και ταχύτητα του ομογενούς ρευστού αντίστοιχα,  $A$  και  $P$  η διατομή και η περίμετρος του σωλήνα,  $a_w$  η μέση τιμή της διατμητικής τάσης του τοιχώματος,  $\theta$  η κλίση του σωλήνα ως προς την οριζόντιο και  $z_g$  η κατακόρυφη απόσταση των άκρων του σωλήνα. Για οριζόντιο αγωγό  $\theta = z_g = 0$ .

Ο μέσος ειδικός όγκος  $\bar{u}$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ογκομετρικής παροχής  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) προς την συνολική μαζική παροχή  $m$  ( $\text{kg}/\text{s}$ ). Έτσι έχουμε:

$$\bar{v} = \frac{Q}{m} = [xv_G + (1-x)v_L] = [v_L + xv_{LG}] = \frac{J}{G} = \frac{1}{\rho} \quad (3.6)$$

όπου  $x = \frac{m_G}{m_G + m_L}$ , η ποιότητα μάζας (mass quality),  $G = \frac{m}{A} = \rho u = \frac{u}{v}$  [kg/m<sup>2</sup>s] (mass velocity) και  $j = \frac{Q}{A}$  [m/s] (volumetric flux or superficial velocity).

Με βάση την υπόθεση ότι η ταχύτητα του αερίου είναι ίση με την ταχύτητα του υγρού στο ομογενές μοντέλο έχουμε:  $u_f = u_g = \bar{u}$ , οπότε  $\bar{u} = G\bar{v} = j$

$$\text{και } \alpha = \frac{xv_G}{v} = \beta, \text{ και } (1-\alpha) = \frac{(1-x)v_L}{v} = (1-\beta)$$

όπου ως α ορίζουμε το κλάσμα κενού ( $\rho = \frac{A_G}{A}$  και  $(1-\rho) = \frac{A_L}{A}$ )

και β η ογκομετρική ποιότητα (volumetric quality) ( $\tau = \frac{Q_G}{Q}$  και  $(1-\tau) = \frac{Q_L}{Q}$ )

Η μέση διατμητική τάση που ασκείται από το τοίχωμα του σωλήνα στο ψευδορευστό είναι:

$$\tau_w = f_{TP} \left( \frac{\rho u^2}{2} \right) \quad (3.7)$$

Η εξίσωση (3.4) μπορεί να γραφεί ως προς την πτώση πίεσης:

$$\tau \frac{dp}{dz} = -\frac{P}{A} \tau_w - \frac{m}{A} \frac{du}{dz} - \rho g \cos \vartheta = \left( \frac{dp}{dz} \right)_F + \left( \frac{dp}{dz} \right)_A + \left( \frac{dp}{dz} \right)_G \quad (3.8)$$

Οι πρώτοι όροι προς τα δεξιά εκφράζουν την πτώση πίεσης λόγω τριβής, επιτάχυνσης και βαρύτητας. Η πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης θεωρείται αμελητέα όπως και η πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας για οριζόντιο σωλήνα. Έτσι για κυκλική διατομή σωλήνα όπου  $P/A=4/D$  η πτώση πίεσης λόγω τριβής είναι:

$$-\left( \frac{dp}{dz} \right)_F = \frac{4}{D} f_{TP} \left( \frac{\rho u^2}{2} \right) = \frac{4}{D} f_{TP} \left( \frac{v^2}{2} \right) \quad (3.9)$$

Από την εξίσωση (3.9) έχουμε:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{2f_{TP}G\bar{u}}{D} \quad (3.10)$$

Από τις εξισώσεις (3.9), (3.10)

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{2f_{TP}G^2}{D} [xv_G + (1-x)v_L] \quad (3.11)$$

Από την παραπάνω εξίσωση όλοι οι όροι είναι καθορισμένοι εκτός από τον συντελεστή τριβής των δύο φάσεων  $f_{TP}$ . Για να χρησιμοποιηθεί το ομογενές μοντέλο είναι απαραίτητο να καθορισθεί ένας μονοφασικός συντελεστής τριβής για το διαφασικό μίγμα.

Ένας τρόπος για να καθορίσουμε τον  $f_{TP}$  είναι να τον συσχετίσουμε με τον συντελεστή τριβής του υγρού  $f_{f_0}$  όταν έχει μαζική παροχή ( $G$ ) που είναι ίση με αυτή του ψευδορευστού. Έτσι η (3.11) γίνεται:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{2f_{TP}G^2}{D} [xv_G + (1-x)v_L] = \frac{2f_{f_0}G^2v_L}{D} \Phi_{f_0}^2 = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{f_0} \Phi_{f_0}^2 \quad (3.12)$$

όπου ο  $\Phi_{f_0}^2$  ονομάζεται πολλαπλασιαστής.

Το ιξώδες του μίγματος θα πρέπει να είναι  $\bar{\omega} = \omega_L$  όταν  $x=0$  και  $\bar{\omega} = \omega_G$  όταν  $x=1$ . Μερικές προτεινόμενες εκφράσεις για το ιξώδες του ψευδορευστού είναι:

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \quad \text{Mc Adams} \quad (3.13)$$

$$\bar{\mu} = xm_G + (1-x)\mu_L \quad \text{Cicchitti} \quad (3.14)$$

$$\bar{\mu} = \bar{\rho} [xv_G\mu_G + (1-x)v_L\mu_L] \quad \text{Dukler} \quad (3.15)$$

Υποθέτουμε ότι ο συντελεστής τριβής του ψευδορευστού για τυρβώδη ροή δίνεται από την εξίσωση Blasius και έχουμε:

$$f_{TP} = 0.079(\overline{GD}/\overline{\mu})^{-1/4} \quad (3.16)$$

Ο συντελεστής τριβής του υγρού για την ίδια μαζική παροχή με αυτή του μίγματος θα είναι :

$$f_{TP} = 0.079(\overline{GD}/\overline{\mu}_L)^{-1/4} \quad (3.17)$$

Στη συνέχεια κάνοντας χρήση των εξισώσεων (10), και (13-14) στην (9) θα έχουμε :

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{fo} \left[ 1 + x \left( \frac{v_G + v_L}{v_L} \right) \right] \left[ 1 + x \left( \frac{\mu_G - \mu_L}{\mu_L} \right) \right] \quad (3.18)$$

### 3.2.2 Το διαχωρισμένο μοντέλο

Το διαχωρισμένο μοντέλο μετά από το 1944 όπου 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 σ' αυτό του ομογενούς.

Οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται είναι :

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

Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν τη μονοδιάστατη διφασική ροή είναι :

$$\text{συνέχειας : } m = m_G + m_L = v a \rho \quad (3.19)$$

$$\text{ορμής : } -\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau_w}{D} + G \frac{d}{dz} [x u_G + (1-x) u_L] + [\rho \chi_G + (1-\rho) \chi_L] \cos \kappa \quad (3.20)$$

$$\text{ενέργειας : } \frac{1}{m} \left( \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} \right) = \frac{d}{dz} [x h_g + (1-x) h_L] + \frac{d}{dz} \left[ x \frac{\theta_G^2}{2} + (1-x) \frac{u_L^2}{2} \right] \quad (3.21)$$



Για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων απαιτούνται επιπλέον σχέσεις για τη διατμητική δύναμη του τοιχώματος και το κλάσμα κενού. 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  $\Phi_G^2$  και  $\Phi_L^2$  που εκφράζουν το λόγο της πτώσης πίεσης του μίγματος στο σωλήνα ως προς την πτώση πίεσης κάθε ρευστού όταν ρέει μόνο του.

$$\Phi_G^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_G} \quad (3.22)$$

$$\Phi_L^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_L} \quad (3.23)$$

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \quad (3.24)$$

Οι πολλαπλασιαστές  $\Phi_G^2$  και  $\Phi_L^2$  μπορούν να συσχετιστούν με την παράμετρο  $X^2$  με βάση τις παρακάτω σχέσεις :

$$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2 \quad (3.25)$$

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (3.26)$$

όπου η σταθερά C μπορεί να πάρει τις παρακάτω τιμές :

<u>υγρό</u>	<u>αέριο</u>	<u>C</u>
τυρβώδης	τυρβώδης	20
στρωτή	τυρβώδης	12
τυρβώδης	στρωτή	10
στρωτή	στρωτή	5

### 3.2.3 Μοντελοποίηση της διαστρωματωμένης ροής

Στα τέλη της δεκαετίας του εξήντα πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την μοντελοποίηση της διαστρωματωμένης ροής. Το 1972 ο Johannessen ήταν ο πρώτος που παρουσίασε μια θεωρία για χρήση των παραμέτρων L-M στη διαστρωματωμένη ροή. Το κύριο μειονέκτημα της ανάλυσής του ήταν ότι δεν έλαβε υπ' όψιν την διεπιφανειακή διατμητική τάση. Αργότερα το 1976 οι Taitel & Dukler επέκτειναν το μοντέλο του Johannessen εισάγοντας και την διεπιφανειακή διατμητική τάση αυτή την φορά.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ορμής για οριζόντιο αγωγό και για της δυο φάσεις ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$- A_L (dp/dl)_L - \tau_{WL}P_L + \tau_i S_i = 0 \quad (3.27)$$

$$- A_G (dp/dl)_G - \tau_{WG}P_L + \tau_i S_i = 0 \quad (3.28)$$

Όπου A η επιφάνεια κάθε φάσης,  $\tau_w$  η διατμητική τάση, P το μήκος της περιμέτρου και  $\tau_i$  η διεπιφανειακή διατμητική τάση. Οι Taitel & Dukler για τις παραπάνω ποσότητες πρότειναν τις εξής σχέσεις :

$$\alpha_{WG} = f_G \frac{\chi_G U_G^2}{2}, \quad \alpha_{WL} = f_L \frac{\chi_L U_L^2}{2}, \quad \alpha_i = f_i \frac{\chi_G (U_G - U_L)^2}{2}$$

Οι συντελεστές  $f_G$  και  $f_L$  μπορούν να προσδιοριστούν με καλή προσέγγιση από την εξίσωση του Blasius :

$$F_{(G \text{ ή } L)} = 16/Re \quad \text{για} \quad Re_{(G \text{ ή } L)} < 2000 \quad (3.29)$$

$$F_{(G \text{ ή } L)} = 0.046Re^{-0.2} \quad \text{για} \quad Re_{(G \text{ ή } L)} > 2000 \quad (3.30)$$

Η δυσκολία έγκειται στον προσδιορισμό του διεπιφανειακού συντελεστή  $f_i$ . Στην βιβλιογραφία προτείνεται μεγάλος αριθμός σχέσεων ωστόσο εμείς θα αναφέρουμε τον προσδιορισμό του Andritsos (1986).

- Σε χαμηλές πιέσεις

$$f_i = f_g \text{ για } u_{GS} \leq 5\text{m/s} \quad (3.31)$$

$$f_i = f_g [1+15(h/D)^{0.5}(-1+u_{GS}/5)] \text{ για } u_{GS} > 5\text{m/s} \quad (3.32)$$

- Και σε υψηλές πιέσεις

$$f_i = f_g \text{ για } \left( \frac{k_m \chi_g}{g \chi_L} \right)^{0.5} u_{GS} \leq 1 \quad (3.33)$$

$$\frac{f_i}{f_g} = 1 + 15 \left( \frac{h}{D} \right)^{0.5} \left[ \left( \frac{k_m \rho_G}{g \chi_L} \right)^{0.5} u_{GS} - 1 \right] \text{ για } \left( \frac{k_m \chi_g}{g \chi_L} \right)^{0.5} u_{GS} > 1 \quad (3.34)$$

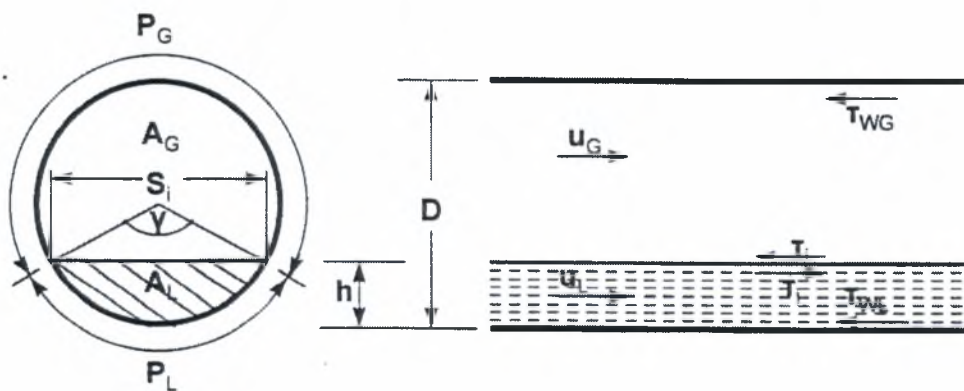
Μετρώντας το πάχος της υγρής στιβάδας από τις παρακάτω γεωμετρικές σχέσεις βρίσκουμε τα εμβαδά  $A_G$  και  $A_L$  :

$$\gamma = 2 \cos^{-1} [1 - 2(h/D)] \quad (3.35)$$

$$\frac{A_L}{A} = \frac{1}{2\sigma} (\varepsilon - \sin \varepsilon) \quad (3.36)$$

$$\frac{A_G}{A} = 1 - \frac{A_L}{A} \quad (3.37)$$

και έτσι από τις εξισώσεις (3.27) ή (3.28)) υπολογίζουμε την πτώση πίεσης του διφασικού μίγματος.



Σχήμα 3.4: Διαστρωματωμένη ροή

## 4. ΤΡΙΒΟΜΕΙΩΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

---

### 4.1 Τριβομειωτικά πολυμερή

Μια από τις σημαντικότερες εξελίξεις στη μελέτη της τυρβώδους μονοφασικής ροής είναι ότι η προσθήκη μικρών ποσοτήτων πολυμερών, με μεγάλου μήκους αλυσίδες, στη ροή του υγρού μπορεί να προκαλέσει μεγάλη μείωση στην τριβή στα τοιχώματα (Toms, 1948). Το πολυμερές είναι ένα μεγάλο μόριο (μακρομόριο) το οποίο αποτελείται από επαναλαμβανόμενα δομικά στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με χημικό δεσμό. Επίσης τα πολυμερή μπορεί να είναι φυσικά όπως το DNA και το καουτσούκ ή συνθετικά όπως τα πλαστικά. Η χρήση τους είναι διαδεδομένη λόγω του μεγάλου εύρους των ιδιοτήτων τους. Ο ρόλος του μοριακού βάρους των πολυμερών είναι σημαντικός, επειδή καθορίζει πολλές από τις φυσικές τους ιδιότητες, όπως για παράδειγμα τη θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως, τη σκληρότητα, την ιξωδοελαστικότητα και γενικότερα τη μηχανική αντοχή τους.

Το μοριακό βάρος ενός πολυμερούς δεν έχει μια συγκεκριμένη τιμή καθώς ένα πολυμερές έχει κατανομή μοριακών βαρών, η οποία εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε. Επομένως η αναφορά στο μοριακό βάρος ενός πολυμερούς έχει να κάνει με την κατανομή του μοριακού του βάρους ή με το μέσο όρο του μοριακού του βάρους. Τα μέσα μοριακά βάρη υπολογίζονται με βάση τον αριθμό (number averaged molecular weight  $M_n$ ), το βάρος (weight averaged molecular weight  $M_w$ ) και το ιξώδες (viscosity average molecular weight  $M_v$ ) σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους :

$$M_n = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i} \quad (4.1)$$

$$M_w = \frac{\sum w_i M_i}{\sum w_i} = \frac{\sum n_i M_i M_i}{\sum n_i M_i} = \frac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i} \quad (4.2)$$

$$M_w = \left( \frac{\sum n_i M_i^{1+a}}{\sum n_i M_i} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (4.3)$$

όπου  $n_i$  ο αριθμός των μορίων με μοριακό βάρος  $M_i$ ,  $w_i$  το βάρος κάθε μακρομορίου με μοριακό βάρος  $M_i$ ,  $a$  σταθερά που εξαρτάται από το διάλυμα πολυμερούς-διαλύτη. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα εύρη των μοριακών βαρών με βάση το ιξώδες (οριακό ιξώδες).

**Πίνακας 4.1:** Εύρη των μοριακών βαρών με βάση το ιξώδες (οριακό ιξώδες). (Πηγή: M. Kurata and Y. Tsunashima, “Viscosity-Molecular Weight of Linear Chain Molecules”, Polymer Handbook, 3<sup>rd</sup> ed. Wiley-Interscience, NY 1989)

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΔΙΑΛΥΤΗΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(°C)	ΕΥΡΟΣ ΜΟΡΙΑΚΟΥ ΒΑΡΟΥΣ (MBx 10 <sup>-4</sup> )
Polyacrylamide	Water	30	2-50
Polyacrylic acid	Dioxane-1,4	30	13-82
Polyacrylonitrile	Butyrolactone	20	4-40
Polymethyl methacrylate	Acetone	20	7-700
Polybutadiene	Toluene	30	5-50
Polychloroprene	Benzene	25	6-150
Polyisoprenes	Benzene	30	8-28
Polyvinyl chloride	Benzyl alcohol	155.4	4-35
Polyethylene, low pressure	Biphenyl	127.5	2-30
Polyethylene, high pressure	Decalin	70	0.2-3.5
Polypropylene, atactic	Benzene	25	6-31
Polypropylene, isotactic	Biphenyl	125.1	5-42
Polypropylene, syndiotactic	Heptane	30	9-45
Polystyrene, atactic	Benzene	20	1-300
Polystyrene, isotactic	Benzene	30	4-75
Polyvinyl alcohol	Water	25	1-7
Polyoxymethylene	Dimethylformamide	130	0.15-1.5
Polypropylene oxide	Acetone	25	0.1-0.4
Polytetrahydrofuran	Ethyl acetate	30	2.6-113
Polyethylene terephthalate	Tetrachloroethane	50	0.04-0.1
Nylon 6	Trifluoroethanol	50	1.3-10
Nylon 6.6	Aqueous HCOOH	25	0.6-6.5
Nylon 6.10	m-Cresol	25	0.8-2.4

## 4.2 Ανασκόπηση τριβομειωτικής συμπεριφοράς πολυμερών

Από τις παλαιότερες ίσως πειραματικές εργασίες σχετικά με την τριβομείωση σε διφασική ροή είναι η εργασία των Oliver και Young Hoon. (1968) οι οποίοι χρησιμοποίησαν υδατικό διάλυμα οξειδίου του πολυαιθυλενίου (PEO) 1.3% με αέρα. Παρατήρησαν πως στη διαλείπουσα ροή το υγρό έρεε λιγότερο περιστροφικά, ενώ στη δακτυλιοειδή ροή υπήρχε απόσβεση των κυματισμών με αποτέλεσμα η διεπιφάνεια να είναι λιγότερο τραχειά. Οι Greskovich και Shrier (1971) ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν τον όρο DRP (drag reducing polymers) σε πολυφασικά συστήματα και παρατήρησαν μείωση στην τριβή, η οποία μπορεί να φτάσει το 40% κατά τη διάρκεια διαλείπουσας ροής στο σύστημα αέρας-νερό. Από τότε το φαινόμενο έχει διερευνηθεί από αρκετούς ερευνητές για ποικιλία συστημάτων με διαφορετικά αποτελέσματα (Otten and Fayed, 1976; Thwaites et al., 1976).

Οι Scott και Rhodes (1972) διερεύνησαν την επίδραση του πολυακρυλαμιδιακού πολυμερούς Polyhall295 σε διφασική διαλείπουσα ροή. Σε αγωγό διαμέτρου 2.5 cm ο αριθμός Reynolds του νερού ήταν 13.000 και του αέρα κυμαινόταν από 1.500 μέχρι 6.100. Ως συμπέρασμα κατέληξαν ότι η μείωση στη διφασική ροή ήταν μεγαλύτερη απ' ό τι για ροή μόνο του υγρού για τις ίδιες πάντα ταχύτητες. Οι μειώσεις στην τριβή, που μετρήθηκαν είχαν εύρος από 29 έως 33% για μονοφασική ροή και αριθμό Reynolds μεταξύ 7.000 και 30.000. Η συνολική πτώση πίεσης της βαθμίδας της πίεσης διαχωρίζεται σε αυτή της τριβής στα τοιχώματα και σε αυτή που αφορά στην εσωτερική επίδραση στη διαλείπουσα ροή. Σε όλες τις περιπτώσεις η πτώση πίεσης, σε σχέση με την επιτάχυνση, ήταν μεγαλύτερη από αυτή σε σχέση με την τριβή στην περιοχή της διαλείπουσας ροής. Η μέγιστη μείωση που μετρήθηκε ήταν 33% για συγκέντρωση πολυμερούς 68 ppm κατά βάρος, ενώ τελικά το πολυμερές υποβαθμιζόταν, λόγω διάτμησης, χάνοντας την αποδοτικότητά του μετά από έξι φορές.

Μελέτες σχετικά με την επίδραση ενός τριβομειωτικού πολυμερούς στις απώλειες λόγω τριβής έγιναν και από τους Rosehart et al.(1972), οι οποίοι βρήκαν μεγαλύτερη μείωση της τριβής στη διαλείπουσα ροή απ' ό τι στη μονοφασική ροή. Η επίδραση προσθήκης πολυμερούς σε δακτυλιοειδή ροή υγρού-αερίου μελετήθηκε και από τους Sylvester και Brill (1976) για ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 1.27 cm και μήκους 6.1 m. Το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε περιείχε το πολυμερές οξύδιο του πολυαιθυλενίου, με συγκέντρωση 100 ppm, το οποίο εισαγόταν στον αγωγό μέσω αντλίας για αναμιχθεί με τον αέρα μέσω διάταξης σχήματος “ταφ”. Τα διαγράμματα που παρουσίασαν ήταν η πτώση

πίεσης σε σχέση με το ρυθμό ροής του υγρού, με φαινομενική ταχύτητα του αερίου που κυμαινόταν από 86 μέχρι 111 m/s. Η εκατοστιαία μεταβολή της πτώσης πίεσης σε σχέση με αυτή όπου απουσιάζει το πολυμερές ποικίλει από 0 έως 37. Καμία εξήγηση δεν δόθηκε σχετικά με τις μεταβολές αυτές.

Η αποτελεσματικότητα του πολυμερούς εκφράζεται με όρους μείωσης της πτώσης πίεσης (drag reduction DR):

$$DR = \frac{\Delta P_{without.DRA} - \Delta P_{with.DRA}}{\Delta P_{without.DRA}}$$

Όπου  $\Delta P_{withDRA}$  είναι η πτώση πίεσης κατά την παρουσία πολυμερούς και  $\Delta P_{without DRA}$  η πτώση πίεσης χωρίς την παρουσία του πολυμερούς

Σε πειράματα διαλείπουσας ροής οι Rosehart et al. (1972) μετρήσαν μεγαλύτερη μείωση στην τριβή απ' ό τι στη μονοφασική ροή ενώ οι Saether et al. (1989) μικρότερη.

Οι Kang et al. (1997) μελέτησαν την επίδραση ενός προσθέτου (το οποίο δεν ανέφεραν) σε τριφασική ροή πετρελαίου-νερού-διοξειδίου του άνθρακα, όπου η μείωση ήταν 35% για τις δύο μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες που εξέτασαν,  $U_{sg}=13$  και  $14$  m/s.

Από την ανασκόπηση σε αυτήν την περιοχή από τους Manfield et al. (1999) συμπεραίνεται ότι η κατανόηση της επίδρασης των πρόσθετων πολυμερών σε πολυφασικές ροές δεν είναι ικανοποιητική.

Οι Al-Sarkhi και Hanratty (2001) μελέτησαν την επίδραση της προσθήκης πολυμερών σε δακτυλιοειδή ροή νερού σε οριζόντιο αγωγό διαμέτρου  $0.0953$  m και μήκους  $23$  m. Το χρησιμοποιούμενο διάλυμα ήταν το polyacrylamide με sodium-acrylate (co-polymer Percol 727) σε νερό. Η εισαγωγή του διαλύματος γινόταν χωρίς χρήση αντλίας και οδηγούσε σε μείωση της πτώσης πίεσης μέχρι και 48% για συγκεντρώσεις μόνο 10-15 wppm στο νερό. Επίσης διαπίστωσαν ότι η δακτυλιοειδής ροή μετατρέπεται και παίρνει τη μορφή διαστρωματωμένης ροής σε μεγάλες μειώσεις της τριβής. Επιπρόσθετα ανέφεραν ότι δεν πρέπει να γίνεται χρήση αντλίας υψηλής διάμεσης.

Οι Warholic, Massah και Hanratty (1999) χρησιμοποίησαν διάλυμα πολυακρυλαμιδίου και sodium-acrylate (Percol 727) σε νερό, όπου παρατήρησαν αξιόλογη μείωση στην τριβή ακόμα και για χαμηλές συγκεντρώσεις όπως  $0.25$  ppm. Η κυριότερη επίδραση του πολυμερούς είναι η μείωση της διατμητικής τάσης Reynolds και της διακύμανσης της ταχύτητας κατά την κάθετη κατεύθυνση ως προς το τοίχωμα. Μέγιστες μειώσεις της τριβής,

κατά τις οποίες οι τάσεις Reynolds είναι περίπου ίσες με το μηδέν, παρατηρήθηκαν για συγκεντρώσεις 13 και 50 ppm.

Οι ροές πετρελαίου-νερού-φυσικού αερίου σε αγωγούς είναι συνηθισμένο φαινόμενο κατά την παραγωγή πετρελαίου. Σε διάφορες τεχνικές γίνεται έγχυση αερίου στον αγωγό άντλησης για να επιτευχθεί μείωση στις απώλειες της στατικής πίεσης. Συνήθως δεν είναι πρακτικό και πολύ ακριβό να γίνει διαχωρισμός κατά την εκροή του μίγματος πετρελαίου-νερού αερίου και έτσι αυτό αντλείται μέχρι το σταθμό διαχωρισμού. Η διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει τότε το πολυφασικό μίγμα είναι συχνά αρκετά χιλιόμετρα και η πτώση πίεσης είναι ένας πολύ μεγάλος παράγοντας κόστους.

Οι εταιρίες παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν χρησιμοποιήσει πρόσθετα για τη μείωση της πτώσης πίεσης και έτσι να μειώσουν την πτώση πίεσης κατά τη μονοφασική ροή υγρού σε μεγάλες αποστάσεις. Μια από τις σημαντικότερες επιτυχίες, όσον αφορά στα πολυμερή, ήταν η σημαντική αύξηση του ρυθμού ροής με την προσθήκη πολυμερούς 10 ppm διαλυτού στο πετρέλαιο κατά την ροή σε αγωγό μήκους 1300 km στην Αλάσκα (Burger et al., 1982).

Όταν αναφερόμαστε στα συγκεκριμένα πολυμερή εννοούμε πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους ( $MB > 106 \text{ kg/kmol}$ ) το οποίο προστίθεται (ως μίγμα ή με έγχυση) στο ρέον υγρό στο σωλήνα σε χαμηλή συγκέντρωση, συνήθως χαμηλότερη των 100 ppm κατά μάζα και όπου η μείωση παρατηρείται εύκολα.

Επίσης οι Al-Sarkhi και Hanratty (2002) μελέτησαν την επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στην απόδοση του πολυμερούς σε δακτυλιοειδή ροή νερού-αέρα, αλλάζοντας τη διάμετρο από 0.0953 m σε 0.0254 m. Οι μειώσεις της πτώσης πίεσης που παρατηρήθηκαν ήταν 63% για διάμετρο 0.0254 m σε σύγκριση με αυτές για διάμετρο 0.0953 m που ήταν 48%. Στη μέγιστη μείωση ο λόγος του συντελεστή τριβής προς το συντελεστή τριβής όταν το αέριο ρέει μόνο του στον αγωγό,  $f/f_g$ , είναι 1.2 έως 1.9 για διάμετρο 9.53 cm και 1.2 έως 2.0 για διάμετρο 2.54 cm.

Οι Soleimani et al. (2002) προσέθεσαν συμπολυμερές (co-polymer) διάλυμα polyacrylamide και sodium acrylate σε διαστρωματωμένη ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 0.0254 m, όπου παρατηρήθηκε απόσβεση των κυμάτων και αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας. Αυτές οι αλλαγές προκάλεσαν αύξηση στην ταχύτητα του αέρα και μείωση στη διεπιφανειακή διατμητική τάση. Η μετάβαση σε διαλείπουσα ροή γινόταν για μεγαλύτερες ταχύτητες του νερού.



Οι Baik και Hanratty (2003) μελέτησαν το πως η προσθήκη πολυμερών σε διαστρωματωμένη επηρεάζει τη δομή των κυμάτων. Τα πειράματά τους πραγματοποιήθηκαν για ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό από Plexiglas διαμέτρου 0.0953 m και μήκους 23 m χρησιμοποιώντας διάλυμα Magnafloc 1011 με νερό. Η συγκέντρωση του κύριου διαλύματος του πολυμερούς ήταν 1000 wppm και η εισαγωγή πραγματοποιήθηκε μέσω οπής διαμέτρου 10 mm η οποία βρισκόταν στο κάτω μέρος του σωλήνα και σε απόσταση 2.9 m από την είσοδο. Η συγκέντρωση της ροής ήταν 50 wppm και παρατηρήσαν ότι το πλάτος των κυμάτων ελαττώθηκε δραματικά για φαινομενική ταχύτητα υγρού  $U_{SL} = 0.15$  m/s και μικρή φαινομενική ταχύτητα του αέρα  $U_{SG}$ , ενώ υπήρξε καθυστέρηση στη μετάβαση σε διαλείπουσα ροή. Για υψηλή ταχύτητα του αέρα ( $U_{SG} = 5$  m/s) δεν παρατηρήθηκε επίδραση όσον αφορά στην κρίσιμη ταχύτητα  $U_{SL}$  για τη μετάβαση σε διαλείπουσα ροή.

Οι Al-Sarkhi και Soleimani (2004) μελέτησαν την επίδραση της προσθήκης πολυμερούς, στη μορφή της ροής, για ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 0.0254 m και μήκους 17 m. Το πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε ήταν συμπολυμερές polyacrylamide και sodium acrylate (η ονομασία του ήταν Percol 727 ενώ τώρα λέγεται Magnafloc 1011) και χρησιμοποίησαν την ίδια τεχνική ανάμιξης με αυτή που πρώτοι χρησιμοποίησαν οι Warholich et al. (1999). Επίσης περιγράψανε τα χαρακτηριστικά της διαφασικής ροής με και χωρίς τα πολυμερή, αναφέροντας ότι οι προσθήκη των πολυμερών αυτών αλλάζει τη μορφή της ροής και η πτώση πίεσης εμφανίζεται σχεδόν σε όλα τα είδη των ροών. Η μέγιστη μείωση εμφανίζεται κατά την αλλαγή από διαλείπουσα ροή σε ψευδοδιαλείπουσα ή δακτυλοειδή σε διαστρωματωμένη.

Οι Fernandes et al. (2004) μετρήσανε πειραματικά τη μείωση της τριβής σε οριζόντια δακτυλοειδή διαφασική ροή. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε υψηλή πίεση (10 bar) διαφασικής ροής μεθανίου ( $CH_4$ ) και συμπυκνώματος με θερμοφυσικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του δεκανίου ( $C_{10}H_{22}$ ) σε αγωγό διαμέτρου 0.019 m. Τα πρόσθετα ήταν πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους (poly-alpha-olefins) και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μείωση της τριβής στη δακτυλοειδή ροή οφείλεται κυρίως στις μεταβολές της ροής και στη μορφή της. Επίσης παρατήρησαν ότι στη δακτυλοειδή περιοχή για μια συγκεκριμένη φαινομενική ταχύτητα αερίου το μέγεθος της μείωσης της πτώσης πίεσης αυξάνει με αύξηση της ταχύτητας του υγρού. Για ταχύτητες  $U_{SL} = 0.2$  m/s και πάνω μπορούσε να επιτευχθεί μέγιστη μείωση της πτώσης πίεσης, ενώ αυξάνοντας τις  $U_{SL}$  από ένα σημείο και μετά η μείωση της πτώσης πίεσης παρέμενε σταθερή για όλες τις ταχύτητες που εξετάστηκαν πάνω από τα 0.7

m/s. Πάντως για ταχύτητες του αερίου ( $U_{sg}$ ), για τις οποίες η ροή ήταν δακτυλιοειδής, η μέγιστη μείωση της πτώσης πίεσης μειωνόταν με αύξηση της  $U_{sg}$ , καθώς με αύξηση από τα 10.4 στα 21.3 m/s η μέγιστη μείωση της πτώσης πίεσης ελαττώθηκε από 62% σε 44%. Τέλος κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, για χαμηλές ταχύτητες του υγρού, η μείωση στη διεπιφανειακή τριβή ήταν ο κύριος παράγοντας στη συνολική μείωση της πτώσης πίεσης.

Οι Al-Sarkhi και Abu-Nada (2005) μελετήσανε την επίδραση προσθήκης πολυμερούς σε δακτυλιοειδή ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 0.0127 m και μήκους 7 m, χρησιμοποιώντας μίγμα Magnafloc 1011 (polyacrylamide) σε νερό μέσα σε δεξαμενή όγκου 150 λίτρων συγκέντρωσης 1000 wppm. Η εισαγωγή του διαλύματος (χωρίς χρήση αντλίας) είχε ως αποτέλεσμα μείωση της πτώσης πίεσης κατά 47% για συγκεντρώσεις 40 wppm στο νερό. Επίσης για μεγάλες μειώσεις η δακτυλιοειδής ροής μεταβαίνει σε διαστρωματωμένη, ενώ η αποδοτικότητα του πολυμερούς εξαρτάται από τους ρυθμούς ροής του υγρού και του αερίου.

Οι Mowla και Naderi (2006) χρησιμοποίησαν διαφορετικούς οριζόντιους αγωγούς με στόχο να υπολογίσουν τη μεταβολή της πτώσης πίεσης κατά την προσθήκη πολυμερούς σε διφασική διαλείπουσα ροή αργού πετρελαίου και νερού. Για την πειραματική διάταξη χρησιμοποίησαν ένα λείο πολυκαρβονικό αγωγό μήκους 10.3 m και εσωτερικής διαμέτρου 0.0254 m, έναν τραχύ αγωγό από γαλβανισμένο σίδηρο μήκους 8.8 m και διαμέτρου 0.0254m και έναν τραχύ αγωγό από γαλβανισμένο σίδηρο μήκους 8.8 m και διαμέτρου 0.0127 m. Το πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Polyisobutylene (Polyalpha olefin) και τα πειράματα έδειξαν ότι από ένα σημείο και μετά η πτώση πίεσης παρέμενε σταθερή και για κάποιες συνθήκες η μείωσή της πήρε την τιμή του 40%. Επίσης η επίδραση ήταν μεγαλύτερη στον τραχύ σωλήνα απ' ό,τι στο λείο και ακόμα μεγαλύτερη στον αγωγό με διάμετρο 0.0127m.

Οι Jubran et al. (2005) δημοσίευσαν μια ανασκόπηση σχετικά με τη μείωση της πτώσης πίεσης σε μονοφασικές και πολυφασικές ροές με ιδιαίτερη αναφορά στη βιομηχανία πετρελαίου. Η εργασία τους είναι σχετική με τις θεωρίες για τη μείωση της πτώσης πίεσης, την επίδραση των διαφορετικών τύπων μείωσης της πτώσης πίεσης, της υδροδυναμικής και των χαρακτηριστικών της μεταφοράς θερμότητας κατά την παρουσία μειωτικού πρόσθετου. Αναφέρουν επίσης ότι χρειάζεται περαιτέρω έρευνα στην περιοχή όπου εμφανίζεται υποβάθμιση λόγω διάτμησης και την επίδραση της κλίσης του αγωγού, με έμφαση στην άντληση πετρελαίου.

Η πειραματική εργασία των Dass και Bleyle (2006) πραγματοποιήθηκε σε οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 0.1 m για ροή διοξειδίου του άνθρακα και δύο ειδών πετρελαίου με πυκνότητες  $800 \text{ kg/m}^3$  και  $830 \text{ kg/m}^3$ , όπου μελέτησαν την επίδραση του ιξώδους των υγρών στη συνολική πτώση πίεσης για διφασική διαλείπουσα ροή. Ως συμπέρασμα κατέληξαν στο ότι η πτώση πίεσης ελαττώθηκε περισσότερο για τη ροή με ιξώδες του υγρού  $0.0025 \text{ Pa s}$  (πυκνότητα  $800 \text{ kg/m}^3$ ) αλλά η μείωση της πτώσης πίεσης ήταν μεγαλύτερη για το υγρό με ιξώδες  $0.05 \text{ Pa s}$  (πυκνότητα  $830 \text{ kg/m}^3$ ).

Οι Al-Sarkhi et al. (2006) χρησιμοποίησαν κεκλιμένο προς τα επάνω αγωγό διαμέτρου 0.0127 m για ροή νερού-αέρα. Η εισαγωγή του πολυμερούς προκαλούσε μείωση της πτώσης πίεσης 71% για συγκέντρωση 100 ppm μέσα στον αγωγό. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μέγιστη μείωση της πτώσης πίεσης λάμβανε χώρα κατά την αλλαγή της ροής σε διαστρωματωμένη, ενώ η μείωση είναι ευαίσθητη στις φαινομενικές ταχύτητες του υγρού και του αερίου και στην κλίση του αγωγού. Μέγιστη μείωση της πτώσης πίεσης επιτεύχθηκε για κλίση  $1.28^\circ$  για τη χαμηλότερη επιφανειακή ταχύτητα του αερίου και τη μεγαλύτερη επιφανειακή ταχύτητα του υγρού. Για πρώτη φορά αναφέρθηκε η εξάρτηση της μείωσης από την τετραγωνική ρίζα του λόγου των φαινομενικών ταχυτήτων για ίδια καθεστάτα ροής.

Οι Parimal et al. (2008) πραγματοποίησαν τα πειράματά τους σε πολυφασικό σύστημα ροής μήκους 36 m και διαμέτρου 10 cm με στόχο την εξέταση της επίδρασης προσθήκης τριβομειωτικών παραγόντων στη μέση πτώση πίεσης και στα χαρακτηριστικά της διαλείπουσας ροής. Τα πρόσθετα ήταν διαλυτά στο νερό και στο πετρέλαιο και οι φαινομενικές ταχύτητες του υγρού κυμαινόταν από 0.5 μέχρι 1.5 m/s, ενώ του αερίου από 4 έως 10 m/s. Η θερμοκρασία και η πίεση ήταν σταθερές στους  $30^\circ\text{C}$  και 0.45 MPa αντίστοιχα, με τις συγκεντρώσεις να παίρνουν τις τιμές 0.25 και 50 ppm. Ως συμπέρασμα επισημάνθηκε ότι η μέση πτώση πίεσης ελαττώνεται σημαντικά κατά την αλλαγή των χαρακτηριστικών της ροής. Σε κάποιες περιπτώσεις γινόταν αλλαγή της ροής από διαλείπουσα σε κυματοειδή διαστρωματωμένη, καθώς και μείωση στην ένταση της τύρβης στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου. Όταν στο πολυφασικό μίγμα επικρατούσαν συνθήκες κατά τις οποίες παρουσιαζόταν συμπυκνώματα (emulsions) τότε εμφανιζόταν αρνητική αποτελεσματικότητα, επειδή το ιξώδες του συμπυκνώματος αυξανόταν σημαντικά, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση στην πτώση πίεσης. Η σύνθεση ή το όνομα και το μοριακό βάρος του πρόσθετου που χρησιμοποιήθηκε δεν αναφέρεται.

Άλλη μια πειραματική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε από τους Fernandes et al. (2009) για κατακόρυφη δακτυλιοειδή διφασική ροή. Το κίνητρο γι' αυτή τη μελέτη προέκυψε λόγω του περιορισμένου ρυθμού συμπύκνωσης εξαιτίας της τριβής στους αγωγούς για δακτυλιοειδή ροή. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση στην πτώση πίεσης κατά 74%, αλλά παρατηρήθηκε και μια έντονη αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας κατά 27%. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “DRA-induced flooding”. Καθώς η ροή παρέμενε κατακόρυφη η αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνεισφοράς της υδροστατική πίεσης στην κλίση της πίεσης κατά 25% αντισταθμίζοντας έτσι κάποιο μέρος της μείωσης λόγω ελάττωσης της τριβής.

#### 4.2.1 Πειραματική προσέγγιση

Η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης προσθήκης πολυμερών σε πολυφασικές ροές έχει γίνει με δύο διαφορετικές τεχνικές όσον αφορά στον τρόπο εισαγωγής του πολυμερούς στη ροή και είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας της επιτυχίας των πειραμάτων. Το πρώτο σκέλος είναι η προετοιμασία του υγρού με την κατάλληλη συγκέντρωση πολυμερούς, ενώ το δεύτερο είναι η ανάμιξή του με το αέριο. Ένας δεύτερος τρόπος, ο οποίος είναι και ο πιο αποτελεσματικός, είναι η εισαγωγή διαλύματος πολυμερούς, υψηλής συγκέντρωσης, στο υγρό του σωλήνα. Το Σχήμα 4.1 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη και μέθοδο εισαγωγής που χρησιμοποίησαν οι Al-sarkhi και Hanratty (2001) για δακτυλιοειδή ροή νερού και αέρα.

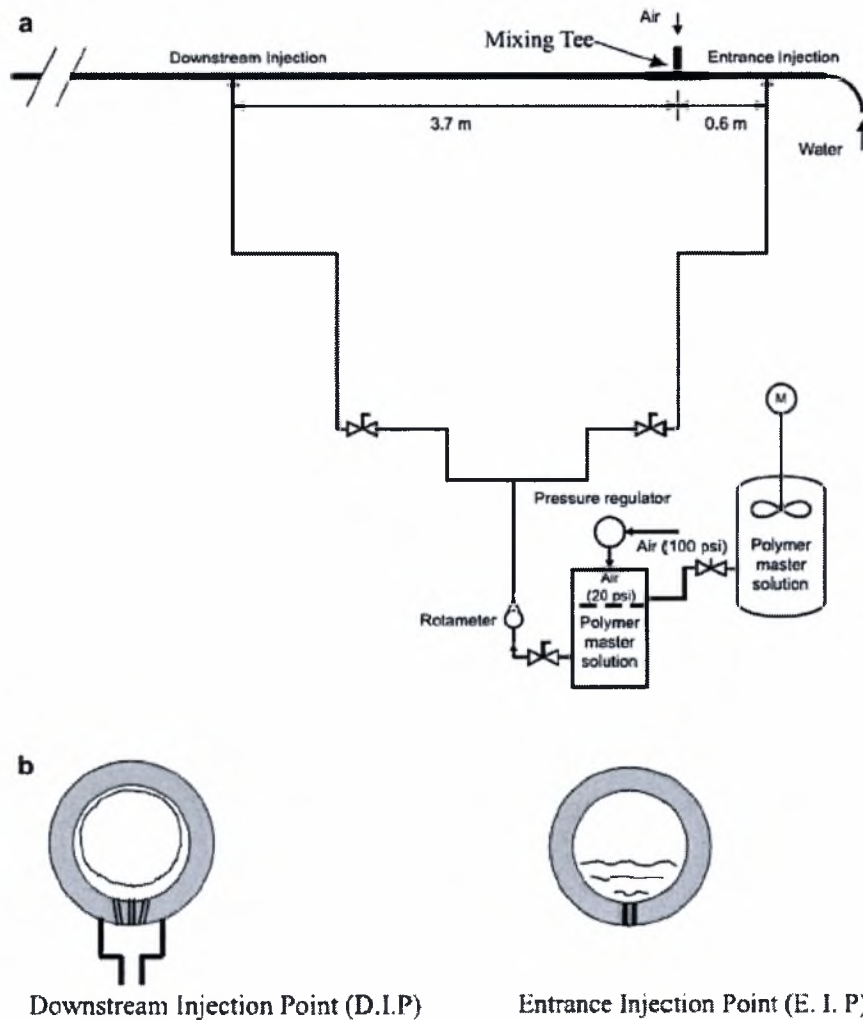
Το διάλυμα του πολυμερούς εισαγόταν με έγχυση στη ροή με δύο τρόπους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1β. Ο πρώτος από αυτούς είχε να κάνει με την εισαγωγή του κυρίου διαλύματος στο υγρό μέσω μιας οπής διαμέτρου 18 mm στο κάτω μέρος του σωλήνα, 0,6 m μετά τη διάταξη “ταφ” όπου γίνεται η ανάμιξη του νερού με τον αέρα. Η δεύτερη μέθοδος είχε να κάνει με την εισαγωγή σε θέση όπου είχε αναπτυχθεί η δακτυλιοειδής ροή για παράδειγμα σε απόσταση 3.7 m από το “ταφ”. Ο μηχανισμός έγχυσης περιλαμβάνει τη χρήση τριών οπών διαμέτρου 3 mm οι οποίες βρίσκονται στην κατακόρυφο και +/- 15° από αυτή. Τα αποτελέσματα της δεύτερης μεθόδου είναι κατά πολύ καλύτερα απ' ό,τι της πρώτης.

Η αποτελεσματικότητα του εισαγόμενου πολυμερούς είναι ευαίσθητη στην τεχνική εισαγωγής του πολυμερούς στη ροή και στη συγκέντρωση του κυρίου διαλύματος του πολυμερούς. Το κύριο διάλυμα πρέπει να προετοιμαστεί με αργό τρόπο και να εισαχθεί μέσα στον υμένα (κοντά στο τοίχωμα) με τρόπο τέτοιο ώστε να κατανέμεται κατά μήκος της

περιφέρειας, ενώ για την εισαγωγή δε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αντλίες που προκαλούν υψηλή διάτμηση. Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση του πολυμερούς στο κύριο διάλυμα έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η βέλτιστη (η βέλτιστη συγκέντρωση για τα πειράματα των Al-Sarkhi και Hanratty (2001) βρέθηκε ότι είναι τα 1000 ppm).

Η υποβάθμιση του πολυμερούς πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο ένας περιλαμβάνει τη διάρρηξη των συσσωματωμάτων των πολυμερών και ο άλλος, ο οποίος προϋποθέτει μεγάλες υδροδυναμικές δυνάμεις, είναι η αλλαγή στο μπλέξιμο των αλυσίδων των μεγάλου μοριακού βάρους πολυμερών. Η ερμηνεία των φαινομένων αυτών αναφέρονται στην εργασία των Warholic et al. (1999).

Το πλεονέκτημα εισαγωγής του διαλύματος του πολυμερούς μέσα στο λεπτό στρώμα του υγρού στο τοίχωμα μιας δακτυλιοειδούς ροής περιγράφεται από τους Vissman και Bewersdorff (1989). Η εισαγωγή των πολυμερών δια μέσω στενών οπών μπορεί να προκαλέσει την επιμήκυνσή τους, ενώ η ισχυρή διάτμηση, στα τοιχώματα, μπορεί να τα διατηρήσει σ' αυτήν την επιθυμητή μορφή (Al-Sarkhi και Hanratty, 2001). Οι Vlachogiannis et al. (2003) μελέτησαν την αποτελεσματικότητα των πολυμερών σε σχέση με την κατανομή των μοριακών τους βαρών και των δομών τους. Αναφέρουν ότι η αποτελεσματικότητα των πολυμερών μειώνεται όταν εκτίθενται για αρκετό χρόνο σε έντονη τυρβώδη ροή. Η εξήγηση είναι ότι τα μόρια αλλά και τα συσσωματώματα (aggregates) του πολυμερούς διαρρηγνύονται, εξαιτίας της ροής, με αποτέλεσμα τη μείωση του μέσου μοριακού βάρους και την αλλαγή της κατανομής του. Ως συμπέρασμα κατέληξαν στο ότι η μηχανική υποβάθμιση του πολυμερούς (hydrolyzed polyacrylamide) συνοδεύεται από αλλαγές στην κατανομή του μοριακού βάρους, αλλά όχι μεγάλες. Η παρατήρηση αυτή σημαίνει ότι τα συμπλέγματα των πολυμερών (aggregates ή clusters) έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην τύρβη απ' ό,τι τα μόρια ξεχωριστά, επομένως η υποβάθμιση τελείται με την καταστροφή των συμπλεγμάτων αυτών. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί με την παρατήρηση ότι μεγαλύτερες μειώσεις εμφανίζονται κατά την εισαγωγή διαλύματος πολυμερούς στη ροή του υγρού.



**Σχήμα 4.1:** (a) Η πειραματική διάταξη και οι τοποθεσίες εισαγωγής (b) τρόπος εισαγωγής του κόβριου διαλύματος Al-Sarkhi και Hanratty (2001)

Τέλος σύμφωνα με τους Berman (1977), Hunston και Reischman (1975) και R. Nadolink (1987) το μεγάλο μοριακό βάρος φαίνεται να είναι ο κυρίαρχος παράγοντας που ευθύνεται για τη μείωση της τριβής στη ροή.

#### 4.2.2 Θεωρητική-Αναλυτική προσέγγιση

Για την εύρεση του πάχους του υγρού υμένα ή της πτώσης πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης της ορμής. Οι Al-Sarkhi και Hanratty (2001) έδειξαν ότι η επίδραση της προσθήκης πολυμερούς σε δακτυλιοειδή ροή νερού-αέρα μπορεί να εξηγηθεί με το ότι τα πολυμερή αποσβένουν τα κύματα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα του υγρού να εξαπλωθεί προς τα πάνω. Αν κανείς παρατηρήσει τους κυματισμούς,

καθώς αναπτύσσεται η τύρβη, τότε η καταστροφή τους μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της δραστηριότητας της τύρβης. Κάποιοι ερευνητές έχουν βρει παρόμοια αποτελέσματα για διαστρωματωμένη ροή αερίου-υγρού. Η εισαγωγή του πολυμερούς αποσβένει τα μεγάλα πλάτους κύματα (για συγκεκριμένες συνθήκες) με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας λείας διαστρωματωμένης ροής. Για τη διαστρωματωμένη ροή αλλά και τη δακτυλιοειδή, όπου δεν υπάρχουν σταγόνες στο κύριο σώμα του αερίου, μπορεί να εφαρμοστεί το μοντέλο ροής δύο-υγρών (two-fluid model) και μια συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης μείωσης της πτώσης πίεσης, της κλίσης της πίεσης και του πάχους της υγρής στιβάδας μπορεί να αναπτυχθεί. Άλλος ένας τρόπος ανάλυσης της διαστρωματωμένης ροής, μετά την προσθήκη πολυμερούς, είναι ο έλεγχος της διεπιφανειακής διατμητικής τάσης και της διατμητικής τάσης στα τοιχώματα όπου ένα μοντέλο δύο εξισώσεων μπορεί να εφαρμοστεί εισάγοντας νέους συσχετισμούς ή παράγοντες για τη διεπιφανειακή διατμητική τάση. Η διαστατική ανάλυση μπορεί να είναι μια ακόμα προσέγγιση, καθώς υπάρχουν πολλά παρόμοια πειραματικά δεδομένα, με την οποία μπορεί να αναπτυχθεί μια σχέση της μείωσης της πτώσης πίεσης χρησιμοποιώντας αρχικά έναν αγωγό μικρής διαμέτρου Al-Sarkhi et al. (2006).

Επίσης, οι Fernades et al. (2004) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τη μείωση της πτώσης πίεσης σε οριζόντια διφασική δακτυλιοειδή ροή, το οποίο θεωρεί ότι η μείωση προκαλείται από την ελάττωση του ύψους των μικρού μήκους κυμάτων στον υγρό υμένα και από την ελάττωση του ρυθμού εισόδου σταγονιδίων στην αέρια φάση και βασίζεται στην οπτική αναπαράσταση της δακτυλιοειδούς ροής με και χωρίς την παρουσία πολυμερούς. Η οπτική αναπαράσταση δείχνει ότι η εισαγωγή του πολυμερούς σε δακτυλιοειδή ροή περιορίζει την τραχύτητα του υγρού υμένα αλλά και την είσοδο σταγόνων από την υγρή στην αέρια φάση και έτσι το μοντέλο προσδιορίζει την ποσότητα της μείωσης της πτώσης πίεσης λόγω ελάττωσης της τραχύτητας και της εισόδου σταγόνων στην αέρια φάση. Το προτεινόμενο μοντέλο δε λαμβάνει υπόψη την επίδραση των ρεολογικών ιδιοτήτων των πολυμερών στη μείωση της πτώσης πίεσης και χρησιμοποιεί τα πειραματικά δεδομένα για τον προσδιορισμό των παραμέτρων για ροή αερίου-συμπυκνώματος και νερού-αέρα, ενώ υπήρξε ποσοτική συμφωνία μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων.

### 4.2.3 Μοριακή δυναμική και σωματιδιακή δυναμική προσέγγιση

Η δυναμική της σκέδασης σωματιδίων (Dissipative particle dynamics DPD) είναι μια υπολογιστική μέθοδος που προσομοιάζει δυναμικές και ρεολογικές ιδιότητες των απλών αλλά και σύνθετων ρευστών και είναι μια στοχαστική τεχνική. Τα μόρια του υγρού και του πολυμερούς μπορούν να προσομοιωθούν, στη διφασική ροή υγρού-αερίου, εστιάζοντας στην περιοχή της διεπιφάνειας, όπου αναδεικνύεται ο ρόλος των μορίων των πολυμερών για διαφορετικές συνθήκες. Οι προκλήσεις στην προσομοίωση στη μοριακή δυναμική (Molecular dynamic, MD) και στη δυναμική σκέδασης σωματιδίων είναι ότι με μεγάλο αριθμό σωματιδίων μπορούμε να έχουμε μια καθαρή εικόνα της κατάστασης με πολλές λεπτομέρειες. Οι υπολογιστικές απαιτήσεις γι' αυτές τις προσομοιώσεις υπερβαίνουν κατά πολύ τις δυνατότητες των σημερινών υπολογιστών και μόνο απλές περιπτώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν, με αρκετά συμπεράσματα.

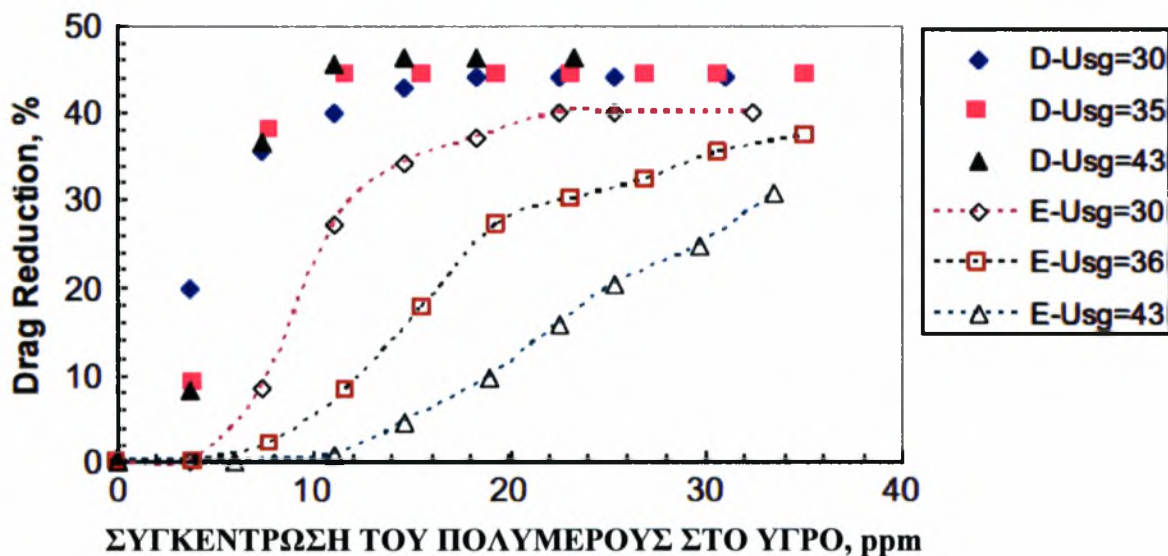
### 4.3 Προτεινόμενοι μηχανισμοί για διφασική ροή

Παρόλο που έχουν προταθεί πολλές θεωρίες οι οποίες προσπαθούν να ερμηνεύσουν το φαινόμενο (μηχανισμό) της μείωσης της αντίστασης στη ροή ή να τη συσχετίσουν με τη συγκέντρωση του πολυμερούς, κυρίως στις πολυφασικές ροές, καμία δεν είναι ακριβής προς το παρόν. Για τη ροή του υγρού, πιστεύεται ότι η μείωση της τριβής υφίσταται στην περιοχή γύρω από τα τοιχώματα ή στην ουδέτερη ζώνη, με τα πρόσθετα πολυμερή να μειώνουν το συντελεστή τριβής ελαττώνοντας την παραγωγή τύρβης. Οι Warholic et al. (1999) θεώρησαν ότι η κύρια επίδραση του πολυμερούς είναι η μείωση που προκαλεί στις διατμητικές τάσεις Reynolds και στις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη διεύθυνση κάθετη στο τοίχωμα. Μέγιστες μειώσεις είναι αυτές για τις οποίες οι τάσεις Reynolds είναι περίπου μηδέν.

Οι Al-Sarkhi και Hanratty (2001) αναφέρουν στην εργασία τους, για δακτυλιοειδή ροή νερού-αέρα, ότι υπάρχει μια ελάχιστη συγκέντρωση που απαιτείται για την έναρξη της μείωσης, ενώ η μέγιστη μείωση σχετίζεται ασυμπτωτικά με τη συγκέντρωση του πολυμερούς και τη μέθοδο εισαγωγής του στο υγρό του αγωγού. Επίσης η μέγιστη μείωση και οι σταδιακές αλλαγές που πραγματοποιούνται στη σχηματομορφή της ροής με την προσθήκη του πολυμερούς, είναι συνάρτηση του κυρίου διαλύματος που εισάγεται και η βέλτιστη συγκέντρωση για τα πειράματά τους ήταν τα 1000 ppm (Σχήμα 4.2). Επίσης η μείωση της



πτώσης πίεσης είναι ισχυρά εξαρτημένη από τη φαινομενική ταχύτητα του αερίου ( $U_{SG}$ ) και τη φαινομενική ταχύτητα του υγρού ( $U_{SL}$ ). Η διαδικασία υπολογισμού της μείωσης της πτώσης πίεσης γίνεται αυξάνοντας τη συγκέντρωση του πολυμερούς σταδιακά. Δηλαδή θεωρώντας δακτυλιοειδή ροή νερού-αέρα στην αρχή τα κύματα διαταραχής αρχίζουν να χάνονται, στη συνέχεια οι σταγόνες στο κέντρο της ροής εξαφανίζονται και τελικά στο σημείο της μέγιστης μείωσης της πτώσης πίεσης η ροή γίνεται διαστρωματωμένη. Πολλοί ερευνητές πιστεύουν πως η μείωση της τριβής, οφείλεται στις μεταβολές των καθεστώτων ροής και επομένως δεν είναι η πηγή της μεταβολής τους αλλά το αποτέλεσμα της αλλαγής αυτής. Η επίδραση της εισαγωγής ενός πολυμερούς σε δακτυλιοειδή ροή εξηγείται ως εξής: κατά τη συγκεκριμένη ροή το υγρό διαβρέχει όλη την περιφέρεια του αγωγού και είναι εμφανής η παρουσία μεγάλης κλίμακας κυμάτων μέσα στον αγωγό. Μια ροή με τους ίδιους ρυθμούς ροής υγρού και αερίου με την προσθήκη 15 ppm πολυμερούς στο υγρό είναι μια ροή με ομαλή (λεία) επιφάνεια και με αμελητέες ποσότητες εισερχομένων σταγονιδίων στην αέρια φάση και έτσι δεν μπορεί να δημιουργηθεί υγρός υμένας στο πάνω μέρος του αγωγού (Al-Sarkhi και Hanratty, 2001).



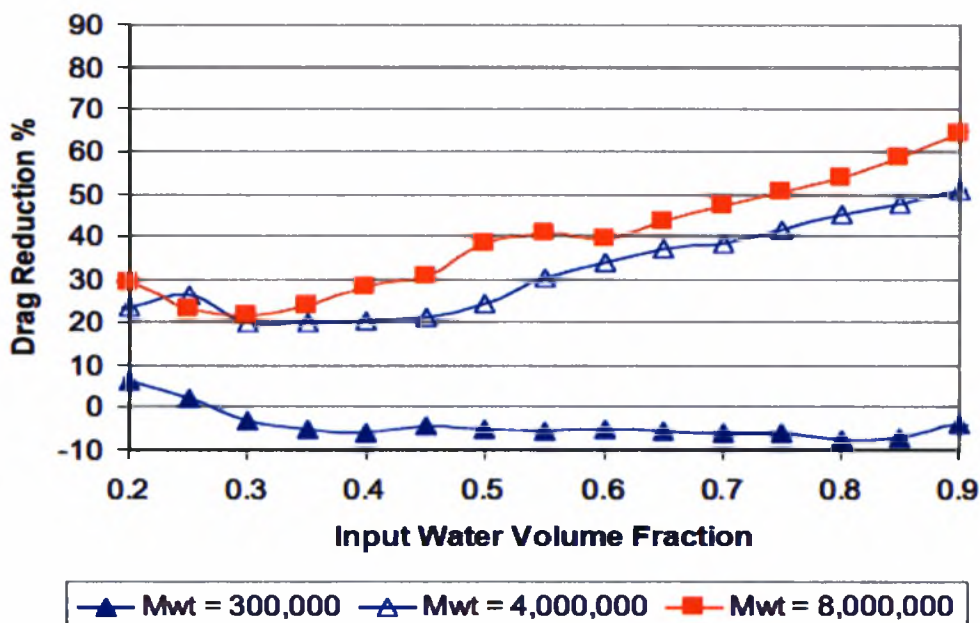
**Σχήμα 4.2.** Μείωση πτώσης πίεσης για  $U_{SL} = 0.0601 \text{ m/s}$  ( $D$  η κατάντη εισαγωγή,  $E$  η εισαγωγή στην είσοδο),  $U_{SG} [\text{m/s}]$  (Al-Sarkhi και Hanratty, 2001)

Επομένως τα πολυμερή αποσβένουν τα κύματα και αυτό έχει ως επακόλουθο τη μείωση της ικανότητας του υγρού να δημιουργεί σταγόνες και έτσι να μην μπορεί να καταφέρει να φτάσει στο πάνω μέρος του αγωγού. Αν θεωρήσουμε τα κύματα ως εξέλιξη της

τύρβης, τότε η καταστροφή τους θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση στη δραστηριότητα της τύρβης. Το Σχήμα 4.2 δείχνει ξεκάθαρα ότι πρέπει να υπάρχει κάποιο ελάχιστο σημείο εκκίνησης της μείωσης της πτώσης πίεσης, ενώ η καμπύλη της μέγιστης μείωσης είναι ασυμπτωτική και καθώς η συγκέντρωση του πολυμερούς αυξάνει το είδος της ροής αλλάζει μέχρι να πάρει την τελική νέα μορφή.

Οι Al-Yaari et al. (2009) έδωσαν μια πιθανή εξήγηση για την αλλαγή σε διαστρωματωμένη ροή τονίζοντας ότι με τη συνεχόμενη διασπορά του πολυμερούς στο νερό υφίσταται σημαντική μείωση στις δυνάμεις ανάμιξης της τύρβης και επιπλέον αύξηση του ρυθμού συνένωσης των σταγόνων με αποτέλεσμα να επικρατεί η δύναμη της βαρύτητας πάνω σε αυτές. Επομένως η προσθήκη ενός διαλυτού στο νερό πολυμερούς διατηρεί τη ροή διαστρωματωμένη για ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες του νερού και καθυστερεί την εμφάνιση κυματισμών και ροής με σταγόνες αλλά και αποσβένοντας τα μεγάλα μήκους κύματα στη διεπιφάνεια.

Η επίδραση του μοριακού βάρους του πολυμερούς στο φαινόμενο της μείωσης για ροή νερού-πετρελαίου έχει αναφερθεί από τους Al-Yaari et al. (2009). Τα διαλύματα πολυμερούς, με ιδανικές χημικές κατασκευές και συγκεντρώσεις αλλά με διαφορετικά μοριακά βάρη, διασπείρονται συνέχεια μέσα στο νερό. Χρησιμοποιήθηκαν 50 ppm διαλυμάτων πολυμερούς οξειδίου του πολυαιθυλενίου με μοριακά βάρη  $3 \times 10^5$ ,  $4 \times 10^6$  και  $8 \times 10^6$  για εισαγωγή σε νερό με λόγο όγκου από 0.2-0.9 για φαινομενική ταχύτητα ανάμιξης 2 m/s. Τα αποτελέσματα της επίδρασης του μοριακού βάρους παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.



**Σχήμα 4.3.** Επίδραση του μοριακού βάρους του πολυμερούς στην πτώση πίεσης για ταχύτητα ανάμιξης 2 m/s (Al-Yaari et al. 2009).

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 4.3 η προσθήκη πολυμερούς με μοριακό βάρος  $3 \times 10^5$  έχει αρνητική επίδραση στην πτώση πίεσης, ενώ για μοριακά βάρη  $4 \times 10^6$  και  $8 \times 10^6$  η πτώση της πίεσης ελαττώθηκε σημαντικά. Η μείωση στην αντίσταση ελαττώνεται ελαφρά με αύξηση του λόγου του όγκου του νερού, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται σταδιακά στο 51.1% για λόγο 0.9 και πολυμερές μοριακού βάρους  $4 \times 10^6$  και στο 64.5% για μοριακό βάρος  $8 \times 10^6$ . Μια πιθανή εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι με την αύξηση του μοριακού βάρους ενισχύεται το μπλέξιμο των αλυσίδων των πολυμερών με αποτέλεσμα το σχηματισμό συσσωματωμάτων, τα οποία παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη μείωση της πτώσης πίεσης, όπως έχει αναφερθεί από τους Vlachogiannis et al. (2003) και Cox et al. (1947).

Πάντως τα αρνητικά αποτελέσματα του πολυμερούς με μοριακό βάρος  $3 \times 10^5$  συμφωνούν με αυτά που αναφέρονται από τους Sellin et al. (1982), οι οποίοι καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα πολυμερή δεν είναι αποτελεσματικά εκτός και αν το μοριακό τους βάρος είναι μεγαλύτερο από ένα εκατομμύριο.

#### 4.4 Εφαρμογές σε πολυφασικές ροές

Τα περισσότερα άρθρα αναφέρονται για την πρακτική εφαρμογή, της προσθήκης πολυμερούς σε μονοφασικές ροές υγρού (Manfield et al., 1999). Στη διφασική ροή οι πρακτικές εφαρμογές μπορεί να είναι οι εξής:

- Για ροή υγρού-υγρού ή υγρού-αερίου είναι εφικτή η αύξηση του ρυθμού ροής ανά μονάδα πτώσης πίεσης ή η μείωση της πτώσης πίεσης λόγω τριβής για τον ίδιο ρυθμό ροής
- Ελαττώνεται η απαιτούμενη ισχύς των αντλιών
- Η μορφή της διφασικής ροής αλλάζει και η αλλαγή για παράδειγμα της δακτυλιοειδούς ροής σε διαστρωματωμένη για μεγάλες μειώσεις της πτώσης πίεσης μπορεί σε κάποιες εφαρμογές να είναι σημαντικότερη απ' ό,τι η ίδια η μείωση καθώς κάποιες ροές είναι πιο επιθυμητές απ' ό,τι άλλες.
- Διαχωρισμός διφασικής ροής: η εισαγωγή πολυμερούς στο στρώμα του υγρού έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της ροής και προκαλεί μεγαλύτερη “στρωματοποίηση” με αποτέλεσμα η ροή να διατηρείται σε αυτή τη μορφή για ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες του υγρού καθώς υπάρχει απόσβεση των μεγάλου πλάτους κυμάτων τα οποία προκαλούν την είσοδο σταγονιδίων του υγρού στην αέρια φάση.

#### 4.5 Ανακεφαλαίωση

Οι μελέτες για ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους αγωγούς αναδεικνύουν ότι

- 1) Στη δακτυλιοειδή ροή πραγματοποιείται απόσβεση των κυμάτων που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας του υγρού να εισέλθει στην αέρια φάση, ενώ η ροή αλλάζει σε διαστρωματωμένη.
- 2) Στη διαστρωματωμένη ροή πραγματοποιείται απόσβεση των κυμάτων κάτι το οποίο μπορεί να έχει δύο αποτελέσματα α) τη μείωση της διεπιφανειακής τριβής και β) την αύξηση του ύψους του υγρού τα οποία έχουν αντίθετη επίδραση στην κλίση της πίεσης.
- 3) Στη διαλείπουσα ροή η καταστολή της τύρβης του υγρού ελαττώνει την τριβή στα τοιχώματα και αλλάζει τη συμπεριφορά των φυσαλίδων του αερίου αλλά και μειώνει τη συχνότητα εμφάνιση μεγάλων φυσαλίδων (Soleimani et al., 2002).
- 4) Στη ροή με φυσαλίδες τα πολυμερή έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν το μέγεθος της τύρβης και των φυσαλίδων. Η μέγιστη μείωση συνήθως υφίσταται όταν μια

διαλείπουσα, ψευδιδιαλείπουσα ή δακτυλιοειδής ροή αλλάζει σε διαστρωματωμένη. Η αποτελεσματικότητα του προστιθέμενου πολυμερούς επηρεάζεται από την τρόπο που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή του στη ροή και από τη συγκέντρωσή του στο κύριο διάλυμα. Τα συσσωματώματα των πολυμερών έχουν ακόμα μεγαλύτερη επίδραση στην τύρβη απ' ό,τι τα μόριά τους ξεχωριστά, παρόλα αυτά υφίστανται υποβάθμιση κατά την καταστροφή των συσσωματωμάτων αυτών.

Στις κατακόρυφες ροές αυτό μπορεί να επηρεάσει τη μετάβαση από ροή με φυσαλίδες σε διαλείπουσα ροή. Επίσης η προσθήκη πολυμερών προκαλεί την αύξηση του πάχους του υγρού υμένα (Fernandes et al., 2009). Οι διαφορές σχετικές με τη χρήση πολυμερών διαλυτών στο υγρό πρέπει να εξακριβωθούν. Τέλος οι ροές υγρού-υγρού μπορούν να εξεταστούν με παρόμοιο τρόπο.

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

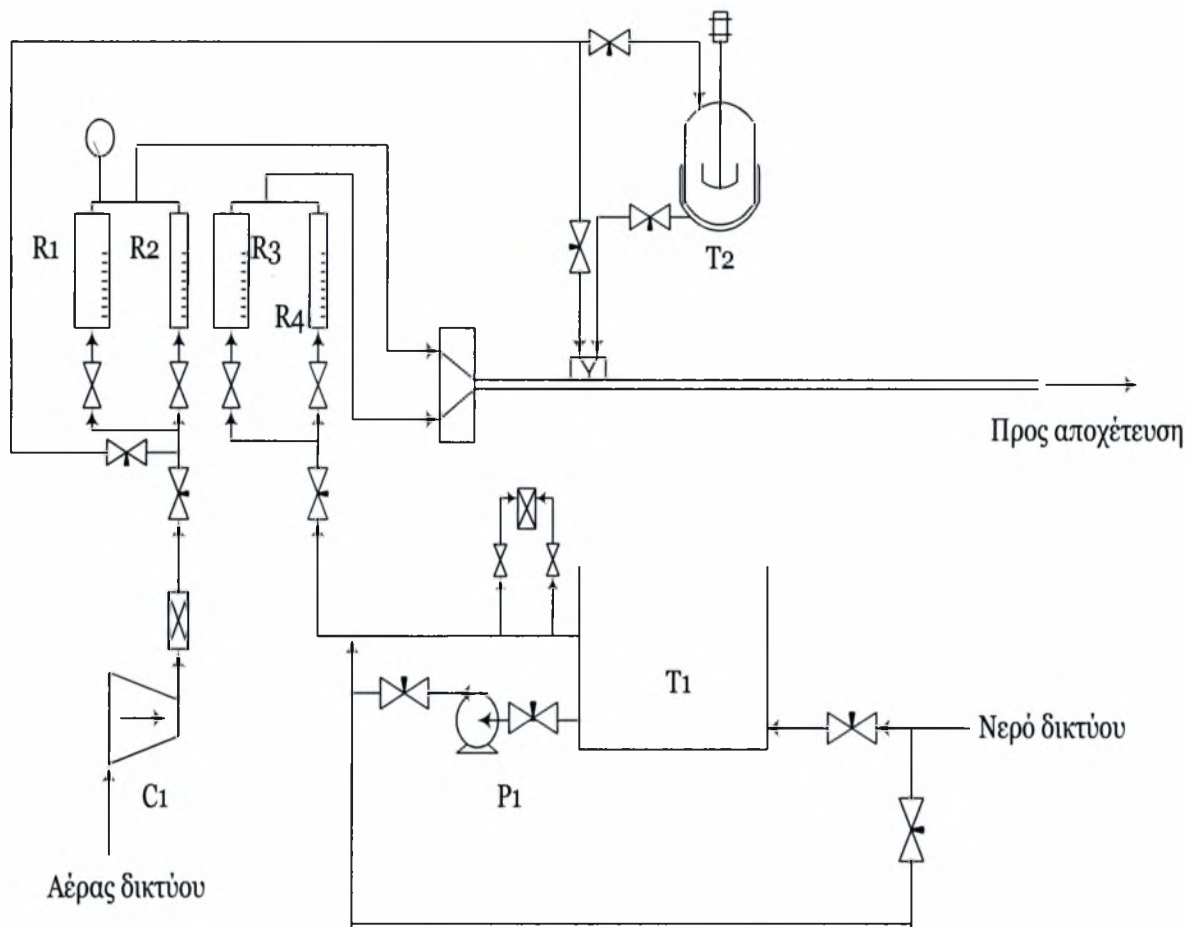
---

### 5.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που έγιναν οι μετρήσεις και οι παρατηρήσεις φαίνονται στο σχήμα 5.1. Ο οριζόντιος σωλήνας μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η διαφασική ροή αποτελείται από τμήματα κατασκευασμένα από plexiglas συνολικού μήκους 12.75 m περίπου και εσωτερικής διαμέτρου 2,4 cm. Περιλαμβάνει το τμήμα εισόδου, το τμήμα ανάμιξης της ροής, το τμήμα μετρήσεων και το τμήμα εξόδου. Τα τμήματα συνδέονται με φλάντζες και έτσι μας δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης και εναλλαγής των διαφόρων μετρητικών διατάξεων στο σύστημα. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ελαστικά δακτυλίδια (o-rings), τοποθετημένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το διάκενο μεταξύ των δύο σωλήνων.

Η επιλογή plexiglas έγινε για 2 λόγους :

- Επιτρέπει οπτικές παρατηρήσεις και λήψη φωτογραφιών
- Επεξεργάζεται αρκετά καλά με τον τόρνο και κολλάει εύκολα με χλωροφόρμιο. Επιπλέον είναι αρκετά σκληρό και για πειράματα με όχι δραστικά υγρά δεν αλλοιώνεται.



Σχήμα 5.1: Πειραματική διάταξη

Το τμήμα ανάμιξης των δυο φάσεων έχει σχήμα Y όπου οι δύο φάσεις εισάγονται υπό γωνία  $-35^\circ$  και  $35^\circ$  ως προς την οριζόντια. Η απόσταση μεταξύ του τμήματος ανάμιξης και του τμήματος μετρήσεων είναι 1.7 m, δηλαδή περίπου 71 διάμετροι όσον αφορά στην πρώτη μετρητική διάταξη και 7.20m, δηλαδή περίπου 300 διάμετροι, όσον αφορά στη δεύτερη μετρητική διάταξη. Σε απόσταση 50 cm από την είσοδο γινόταν η εισαγωγή του διαλύματος του πολυμερούς, το οποίο προπαρασκευαζόταν σε δεξαμενή χωρητικότητας 21 λίτρων με δυνατότητα ανάδευσης. Στο τέλος του σωλήνα η ροή εισάγεται σε δοχείο απ' όπου καταλήγει στην αποχέτευση. Το νερό που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη ήταν νερό του δικτύου ύδρευσης. Η ρύθμιση της παροχής του υγρού γίνεται από μια βάνα και η μέτρηση της παροχής γίνεται από τα συνδεδεμένα στη ροή ροόμετρα. Για την αποφυγή στραγγαλισμού της αντλίας στην έξοδό της υπάρχει ένα by-pass που οδηγεί το επιπλέον υγρό πίσω στη δεξαμενή. Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται από συμπιεστή και στη συνέχεια

υφίσταται μερική ξήρανση και καθαρισμό. Η παροχή του αέρα ρυθμίζεται από μια βάνα διαφράγματος. Η μέτρηση της παροχής γίνεται από ροόμετρα στα οποία έχει τοποθετηθεί ένα μανόμετρο που μετράει την πίεση του αέρα μέσα σε αυτά.

## 5.2 Τμήμα μετρήσεων

Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας χρησιμοποιήθηκε μια πειραματική διάταξη από plexiglas η μορφή της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Τα καθαυτά μετρητικά στοιχεία (β) έχουν τη μορφή βύσματος (plug) και μπορούν να τοποθετούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές. Κάθε ζεύγος συρμάτων είναι κατασκευασμένο από μεταλλικά ανοξείδωτα σύρματα (chromel) διαμέτρου 0.5mm που απέχουν μεταξύ τους 2 mm. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται ένα μετρητικό στοιχείο με ζεύγος παράλληλων συρμάτων.

## 5.3 Μέθοδοι και τεχνικές πειραματικών μετρήσεων πάχους υγρής στιβάδας

Οι μέθοδοι και οι τεχνικές μετρήσεων για τη μέτρηση του πάχους στιβάδας, όπως εμφανίζονται στη βιβλιογραφία, χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες : α) άμεσες και β) έμμεσες

### α) 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 ροη χωρίς κύματα, όταν όμως αρχίσουν οι κυματισμοί τότε εισάγει σφάλμα. Μια τροποποιημένη εφαρμογή είναι αυτή που μια λεπτή βελόνα στηριγμένη με μικρόμετρο τοποθετείται κατάλληλα έτσι ώστε να αγγίζει το υγρό.

### β) Έμμεσες μέθοδοι

Επιγραμματικά αναφέρουμε τις παρακάτω μεθόδους :

- Ραδιενεργοί ιχνηθέτες
- Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης και ηλεκτρικής χωρητικότητας
- Φωτομετρικές μέθοδοι



### 5.3.1 Μετρήσεις πάχους στιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο

Η αγωγιμομετρική μέθοδος είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις τους πάχους της στιβάδας. Η αγωγιμομετρική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί πολύ συχνά για μετρήσεις πάχους στιβάδας. Για πολύ μικρές στιβάδες (<0.5 mm) χρησιμοποιούνται τα ‘εφαπτόμενα’ στοιχεία (flush mounted probes) . Αυτή η μέθοδος στηρίζεται στο ότι η αγωγή ρεύματος μεταξύ δυο συρμάτων, τοποθετημένα εφαπτομενικά πάνω στο τοίχωμα όπου ρέει μια υγρή στιβάδα, εξαρτάται από το πάχος της στιβάδας. Η εξάρτηση του πάχους της υγρής στιβάδας και της αγωγιμότητας είναι σχεδόν γραμμική. Η ηλεκτρική συμπεριφορά αυτού του είδους των στοιχείων μελετήθηκε από τον Coney (1973), ο οποίος τόνισε ότι η μέθοδος χάνει τη ευαισθησία της για μεγάλα πάχη υγρού. Δηλαδή η απόκριση των στοιχείων δεν είναι ικανοποιητική για πάχη μεγαλύτερα κάποιας συγκεκριμένης τιμής που εξαρτάται κυρίως από την απόσταση των δυο ηλεκτροδίων, αλλά αύξηση της απόστασης αυτής δεν δίνει πια τοπικές μετρήσεις. Η σχέση που συνδέει την αγωγή του ρεύματος με το πάχος του υγρού προσδιορίζεται πειραματικά. Καθώς η υγρή στιβάδα ξεπερνά κάποια τιμή, χάνεται η γραμμικότητα μεταξύ αγωγής και πάχους στιβάδας και η αγωγή τείνει προς μια σταθερή τιμή ρεύματος.

Τα αγωγιμομετρικά σύρματα για μεγαλύτερο πάχος στιβάδας χρησιμοποιήθηκαν από τον Swatson (1966) και κυρίως από τον Hanratty και τους συνεργάτες του (Miya et al 1971, Tatterson 1975, Dalman 1978, Laurinat 1979, Andritsos 1986). Η ηλεκτρική συμπεριφορά αυτών των συρμάτων παρουσιάζεται από τον Brown et al (1978). Αυτή η τεχνική απαιτεί δύο λεπτά παράλληλα σύρματα τοποθετημένα δίπλα-δίπλα στο σωλήνα, κάθετα στη διεύθυνση της ροής. Χρησιμοποιώντας το υγρό σαν αγωγό είναι δυνατόν να μετρηθεί η αντίσταση μεταξύ των δύο συρμάτων και να μετατραπεί σε πάχος υγρής στιβάδας. Η θεωρία για τη χρήση της αγωγιμομετρικής τεχνικής με ζεύγος παράλληλων συρμάτων βασίζεται στην ανάλυση του ηλεκτρικού δυναμικού. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάμεσα σε δύο τέλεια αγωγίμους μεταλλικούς κυλίνδρους που βρίσκονται βυθισμένοι σε ένα λιγότερο αγωγίμο υγρό, δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Laurinat,1982) :

$$C = \frac{\pi \gamma h}{\ln \left( \frac{D_0 + (D_0^2 - d^2)^{0.5}}{d} \right)}$$

όπου:

C: η ωμική αγωγιμότητα

h: το πάχος της υγρής στιβάδας

$\gamma$ : η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος

$D_0$ : η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων

d: η διάμετρος των κυλίνδρων

Η χρήση των συρμάτων αυτών βασίζεται στο ότι η αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους των συρμάτων που είναι βυθισμένα στο υγρό. Το μετρητικό στοιχείο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) για να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του υγρού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του ύψους του υγρού, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές τροφοδοτούνται σε ειδικό αναλυτή.

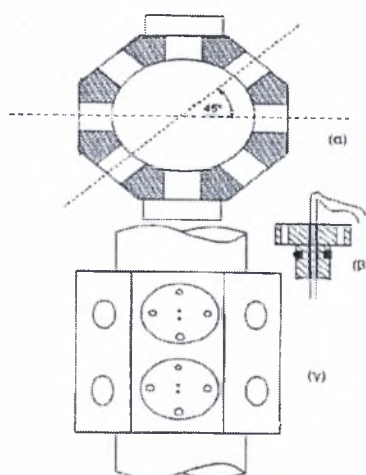
Ο αναλυτής αυτός αποτελείται από ένα διαφορικό ενισχυτή, ο οποίος ενισχύει τις πολύ μικρές μεταβολές της τάσης (μερικά mV) και το τμήμα αποδιαμόρφωσης και φιλτραρίσματος του σήματος. Η εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 25 kHz που τροφοδοτείται στον αναλυτή, είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, δηλαδή η μεταβολή του πλάτους της αντιστοιχεί σε μεταβολές της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Επομένως, η πληροφορία που μας ενδιαφέρει βρίσκεται στη μορφή της περιβάλλουσας των κορυφών της εναλλασσόμενης τάσης. Το κύκλωμα παρέχει στην έξοδό του συνεχή τάση, απαλλαγμένη από την υψηλή συχνότητα του φορέα και ανάλογη των μεταβολών του πάχους της υγρής στιβάδας.

Για τη βαθμονόμηση των παράλληλων συρμάτων, δηλαδή τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ του πάχους της υγρής στιβάδας και της μετρούμενης αγωγιμότητας (τάσης) ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία: Κλείνουμε την έξοδο του αγωγού έτσι ώστε να κατακρατηθεί στο εσωτερικό του μικρή ποσότητα υγρού. Στη συνέχεια σημειώνουμε την τάση εξόδου του αναλυτή και μετράμε την περιφέρεια που καλύπτει το υγρό στον αγωγό η οποία μετατρέπεται χρησιμοποιώντας γεωμετρικούς υπολογισμούς σε πάχος υμένα. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για διαφορετικές ποσότητες υγρού και σχηματίζουμε την καμπύλη βαθμονόμησης.

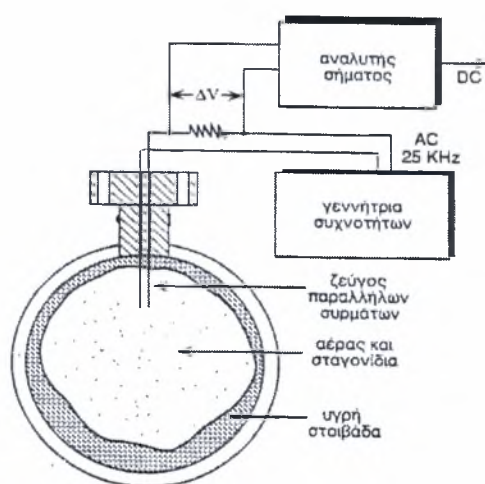
Η ακρίβεια της τεχνικής αυτής εκτιμάται ότι είναι της τάξης του +/- 5%, συνυπολογιζόμενης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στη διαδικασία της βαθμονόμησης (π.χ. μεταβολές θερμοκρασίας, ηλεκτρονικός θόρυβος κ.α.). Επιπλέον για υγρές στιβάδες πάχους μικρότερο των 0,05 mm τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται αξιόπιστα.

## 5.4 Προπαρασκευή διαλύματος πολυμερούς

Τα διαλύματα του πολυμερούς που χρησιμοποιήθηκαν είχαν συγκεντρώσεις 100, 500 και 1000 ppm και σχηματίστηκαν προσθέτοντας πολυμερές στο νερό της δεξαμενής. Επειδή διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο η προπαρασκευή του διαλύματος του πολυμερούς το διάλυμα των 100 ppm χρησιμοποιήθηκε μετά από ανάδευση τεσσάρων ωρών και αναμονή επίσης τεσσάρων ωρών έτσι ώστε να υπάρχει ο κατάλληλος χρόνος χαλάρωσης. Ο χρόνος ανάδευσης για τα διαλύματα με συγκέντρωση 500 και 1000 ppm ήταν αντίστοιχα 8 και 12h ενώ ο χρόνος χαλάρωσης επίσης 8 και 12h αντίστοιχα.



Μετρητικό στοιχείο



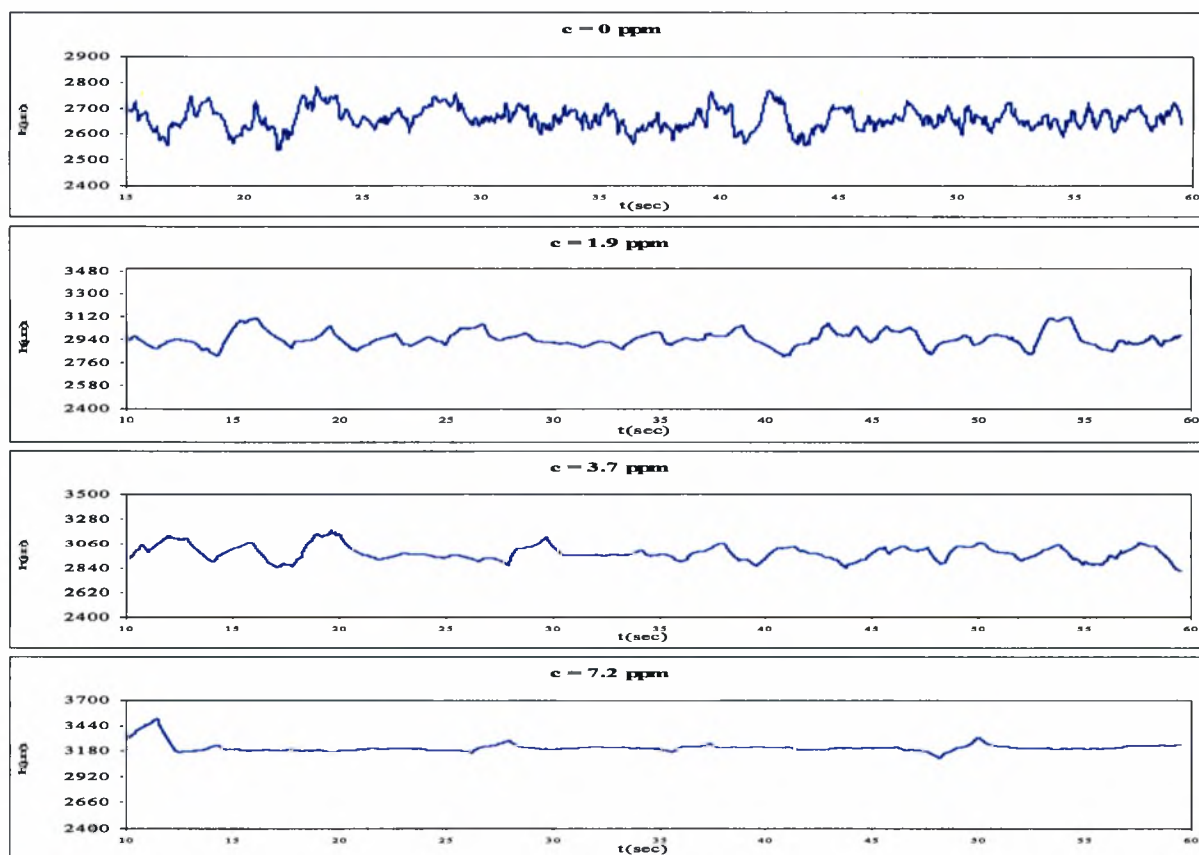
Σχήμα 5.2: Μετρητικό στοιχείο-Τμήμα μετρήσεων

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 Επίδραση προσθήκης πολυμερούς

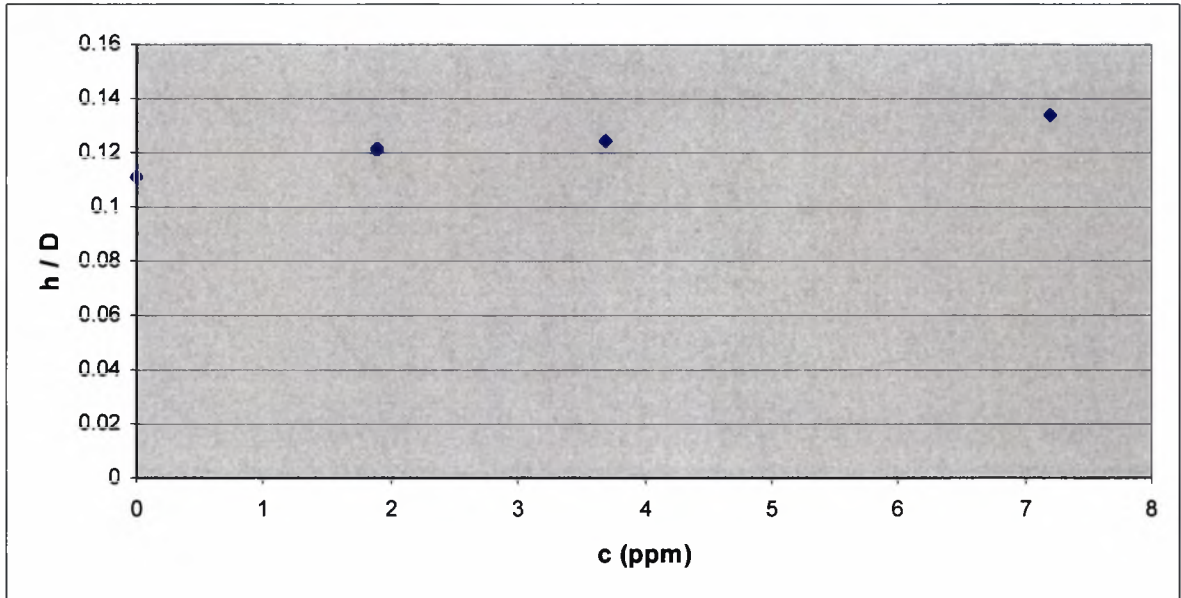
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων και μετρήσεων για τα καθεστώτα διαστρωματωμένης ροής με διδιάστατα κύματα, για διαστρωματωμένη ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz (K-H) και για διαλείπουσα ροή (Slug flow).

Στα Σχήματα 6.1, 6.3 και 6.4 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των κυμάτων που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια χρησιμοποιώντας αρχικό διάλυμα πολυμερούς 100 ppm. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου όρου του πάχους της υγρής στιβάδας σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του πολυμερούς στη ροή. Οι συγκεντρώσεις που εμφανίζονται στα σχήματα αφορούν στη συγκέντρωση του πολυμερούς στη ροή.

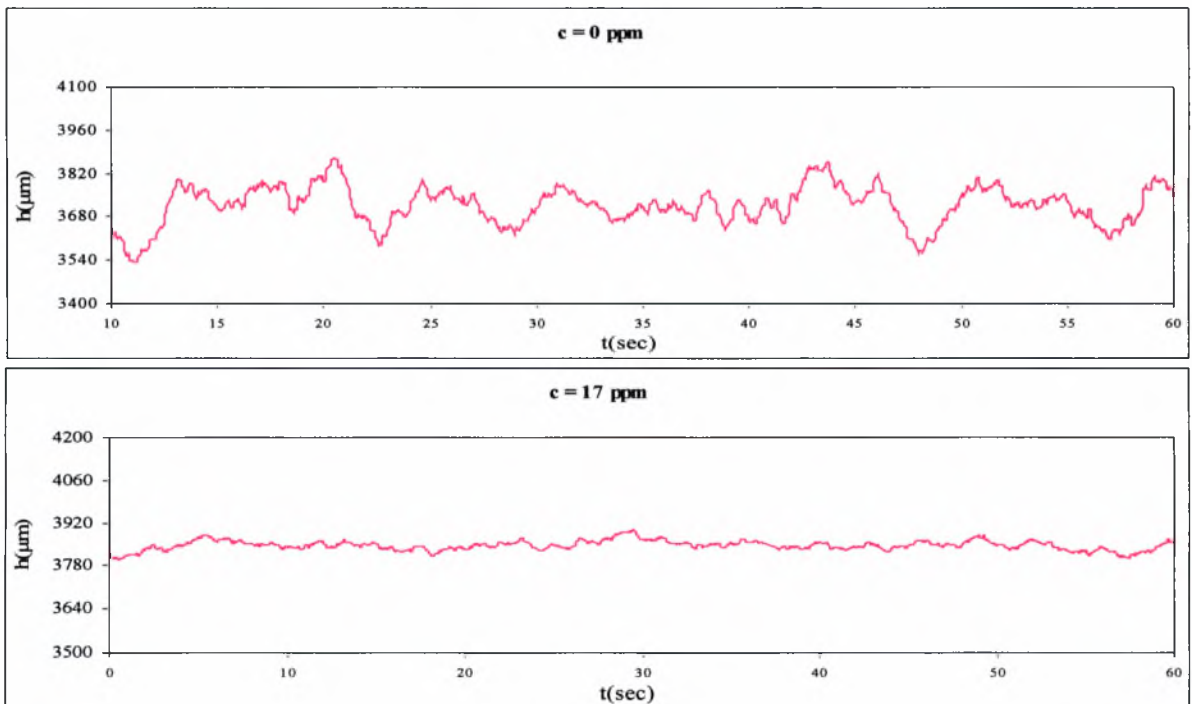


**Σχήμα 6.1:** Αποτύπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.01 \text{ m/s}$  και  $u_{gs}=10.5 \text{ m/s}$  και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.

Στο Σχήμα 6.1 παρατηρούμε ότι με αύξηση της συγκέντρωσης του πολυμερούς στη ροή η συχνότητα εμφάνισης των διαταραχών γίνεται μικρότερη. Επίσης οι διαταραχές γίνονται πιο λείες και αυξάνει το πάχος της υγρής στιβάδας, κάτι το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 6.2.

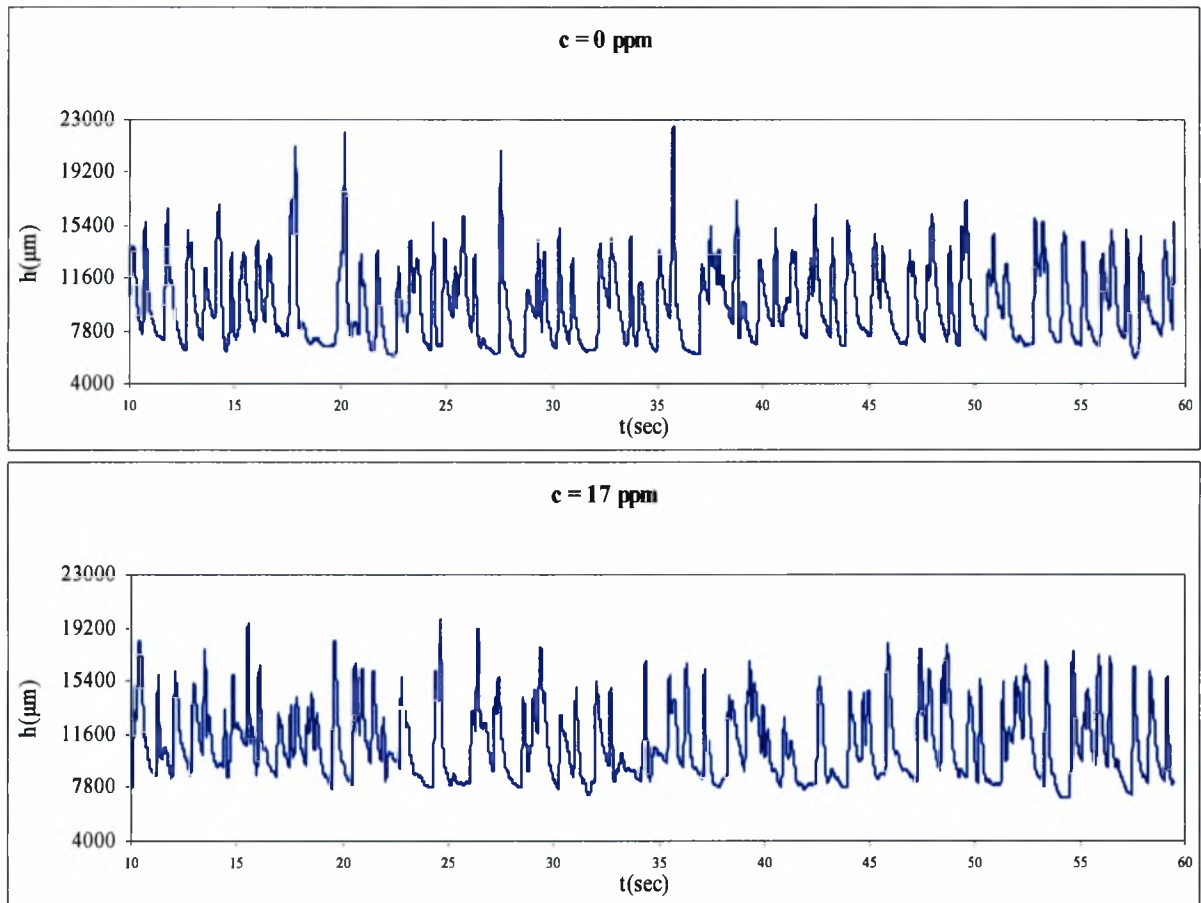


**Σχήμα 6.2:** Μεταβολή του πάχους της υγρής στιβάδας για διαστρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα για  $u_{sl}=0.01$  m/s και  $u_{gs}=10.5$  m/s



**Σχήμα 6.3:** Αποτύπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.01$  m/s και  $u_{gs}=11.37$  m/s και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.

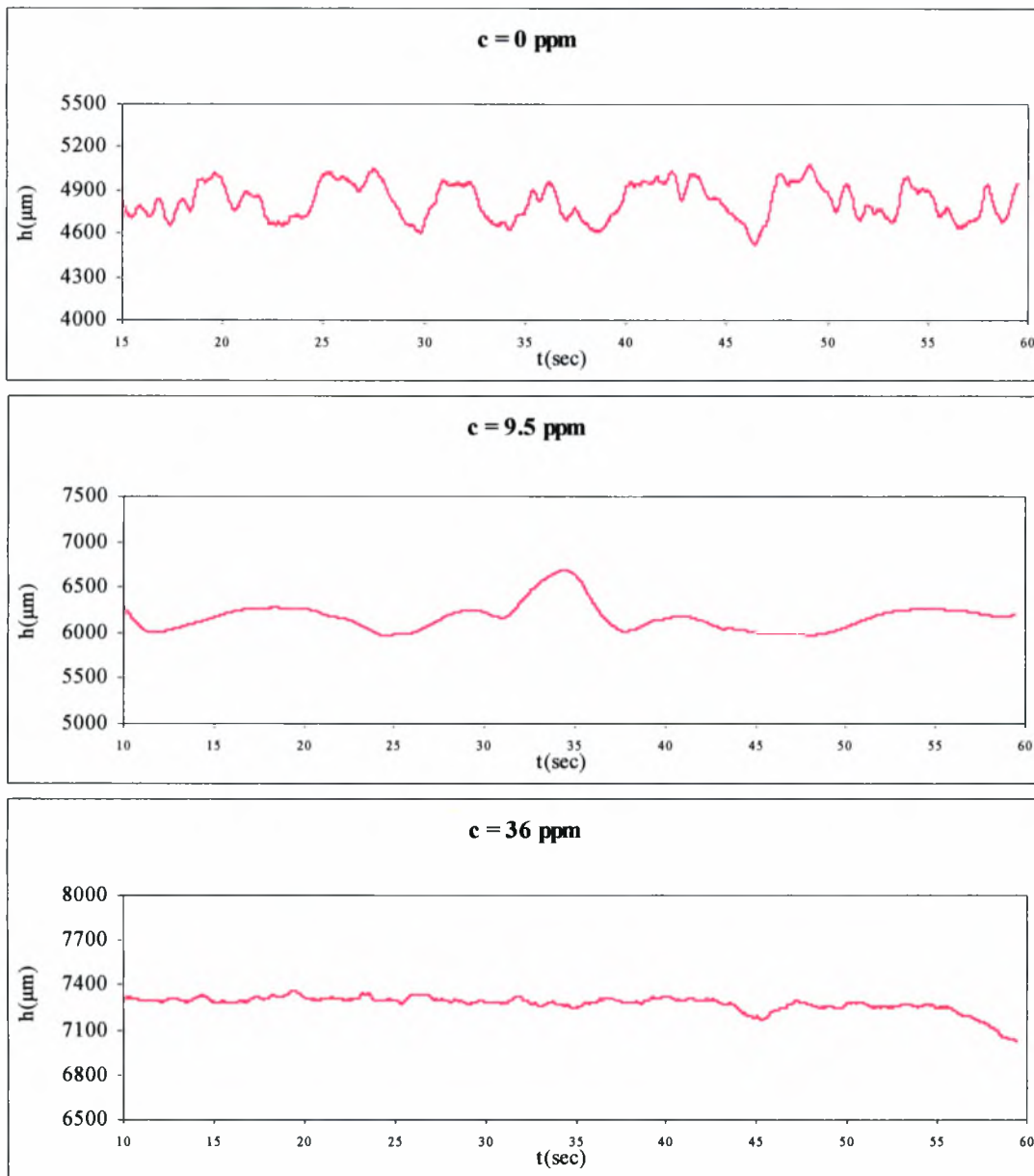
Στο Σχήμα 6.3 παρατηρούμε επίσης ότι με αύξηση της συγκέντρωσης του πολυμερούς στη ροή η συχνότητα εμφάνισης των διαταραχών γίνεται μικρότερη και ότι οι διαταραχές γίνονται πιο λείες και αυξάνει το πάχος της υγρής στιβάδας.



**Σχήμα 6.4:** Αποτόπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.29 \text{ m/s}$  και  $u_{gs}=3 \text{ m/s}$  και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.

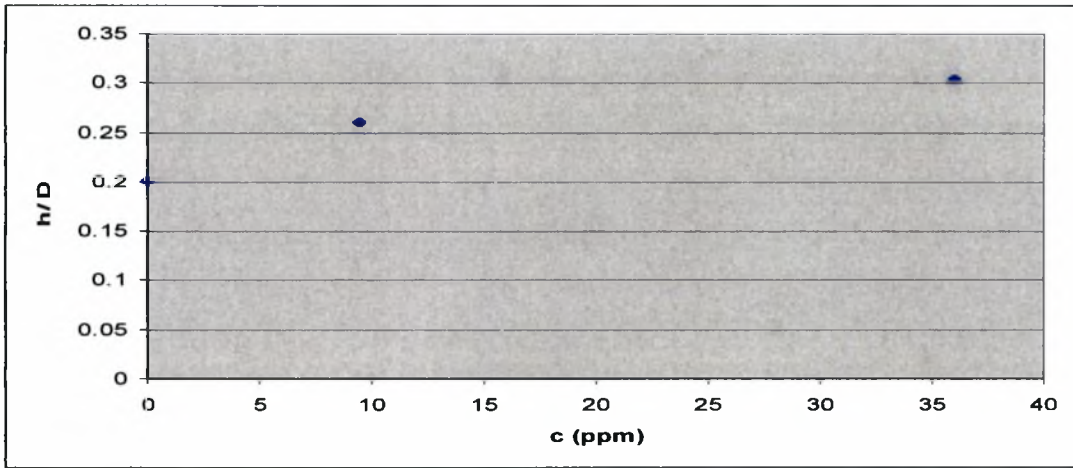
Στο Σχήμα 6.4 παρατηρούμε ότι κατά την προσθήκη του διαλύματος του πολυμερούς το πλάτος των κυμάτων ελαττώνεται και κυρίως το πλάτος των μεγάλου μεγέθους κυμάτων, ενώ αυξάνεται ελάχιστα το πάχος της υγρής στιβάδας.

Στα Σχήματα 6.5, 6.7, 6.9 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των κυμάτων που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια, ενώ στα Σχήματα 6.6 και 6.8 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου όρου του πάχους της υγρής στιβάδας σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του πολυμερούς στη ροή χρησιμοποιώντας αρχικό διάλυμα πολυμερούς 500 ppm.

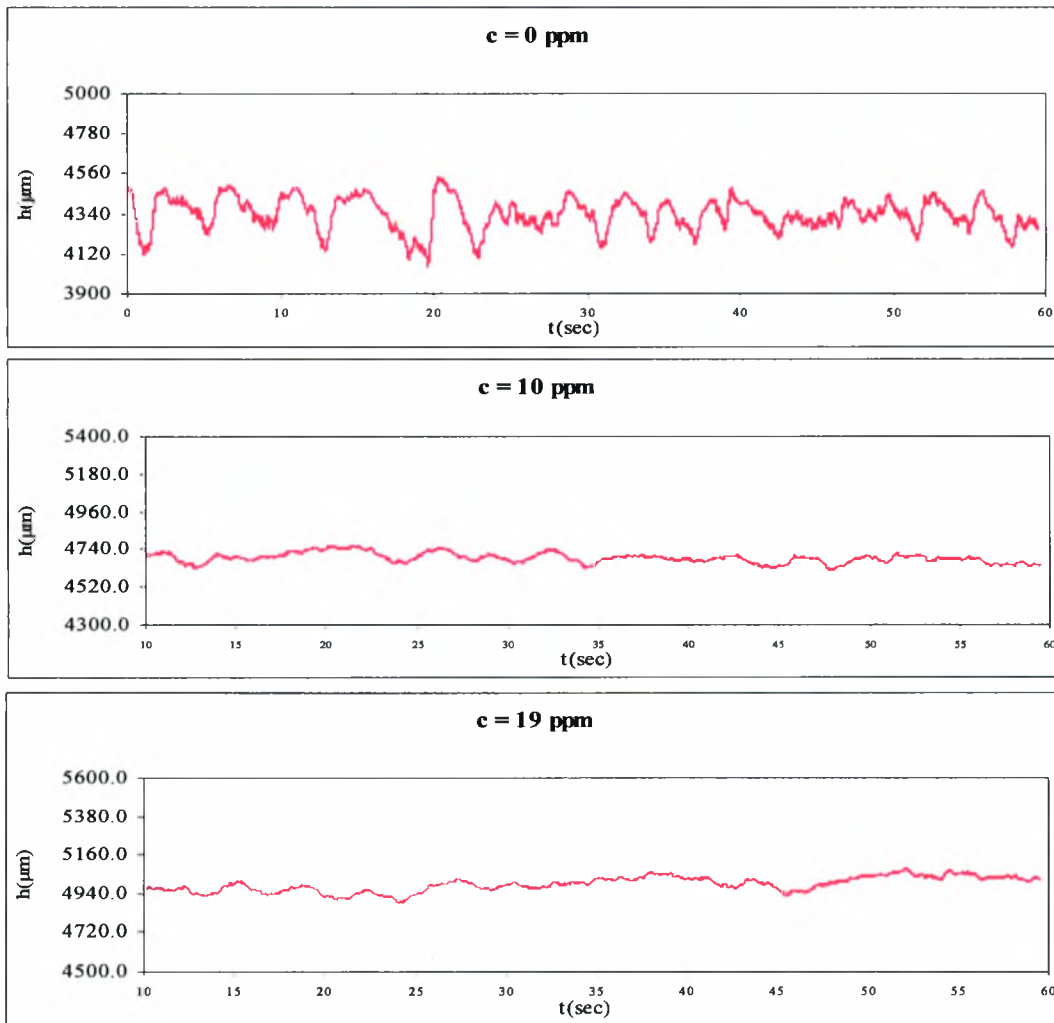


**Σχήμα 6.5:** Αποτόπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.01 \text{ m/s}$  και  $u_{gs}=9 \text{ m/s}$  και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.

Στο Σχήμα 6.5 παρατηρούμε ότι μετά την προσθήκη του διαλύματος του πολυμερούς και για συγκέντρωση του στη ροή 9.5 ppm η συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων ελαττώνεται ενώ για συγκέντρωση 36 ppm τα κύματα σχεδόν αποσβένονται. Επίσης είναι φανερή η αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας, κάτι το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 6.6.

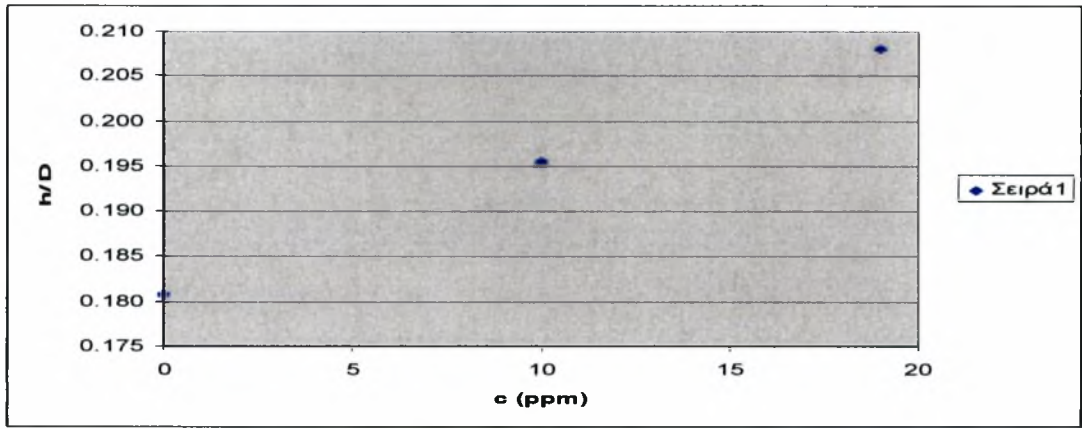


**Σχήμα 6.6:** Μεταβολή του πάχους της υγρής στιβάδας για διαστρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα για  $u_{sl}=0.01$  m/s και  $u_{gs}=11.37$  m/s



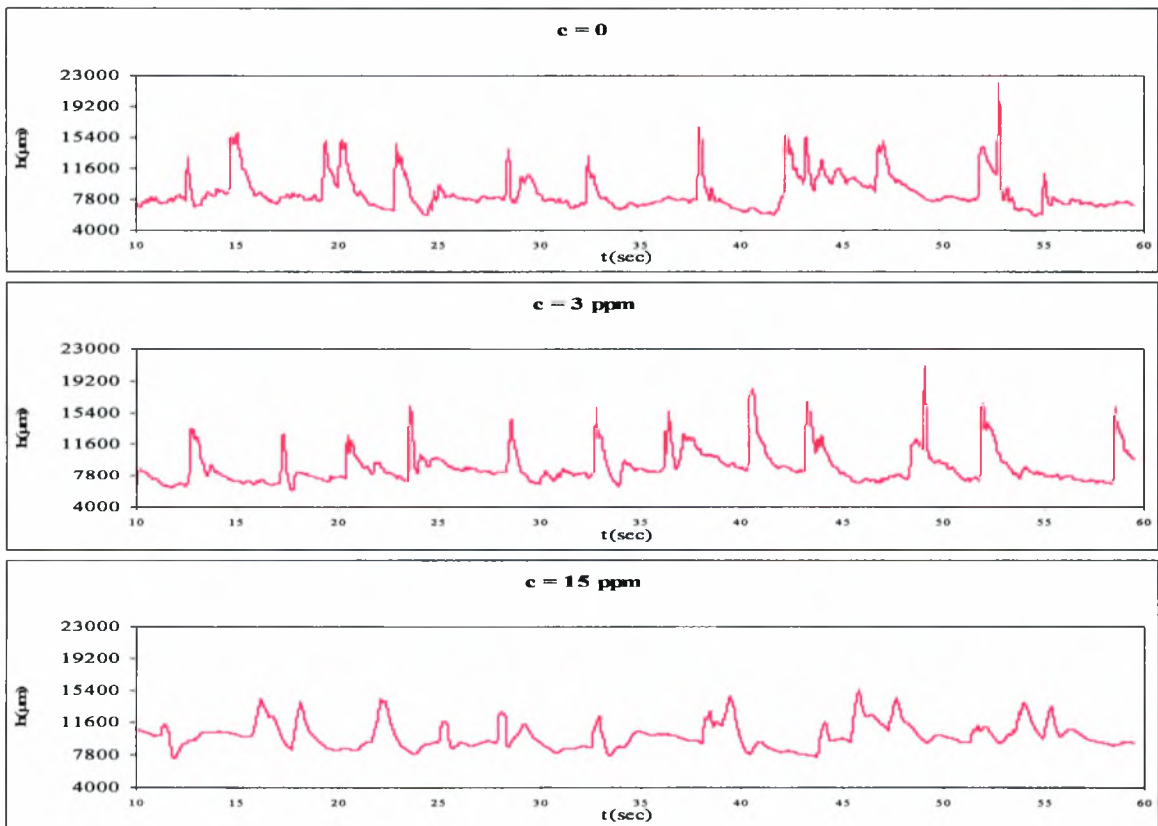
**Σχήμα 6.7:** Αποτύπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.03$  m/s και  $u_{gs}=12$  m/s και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.





**Σχήμα 6.8:** Μεταβολή του πάχους της υγρής στιβάδας για διαστρωματομένη ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz για  $u_{sl}=0.03$  m/s και  $u_{gs}=12$  m/s

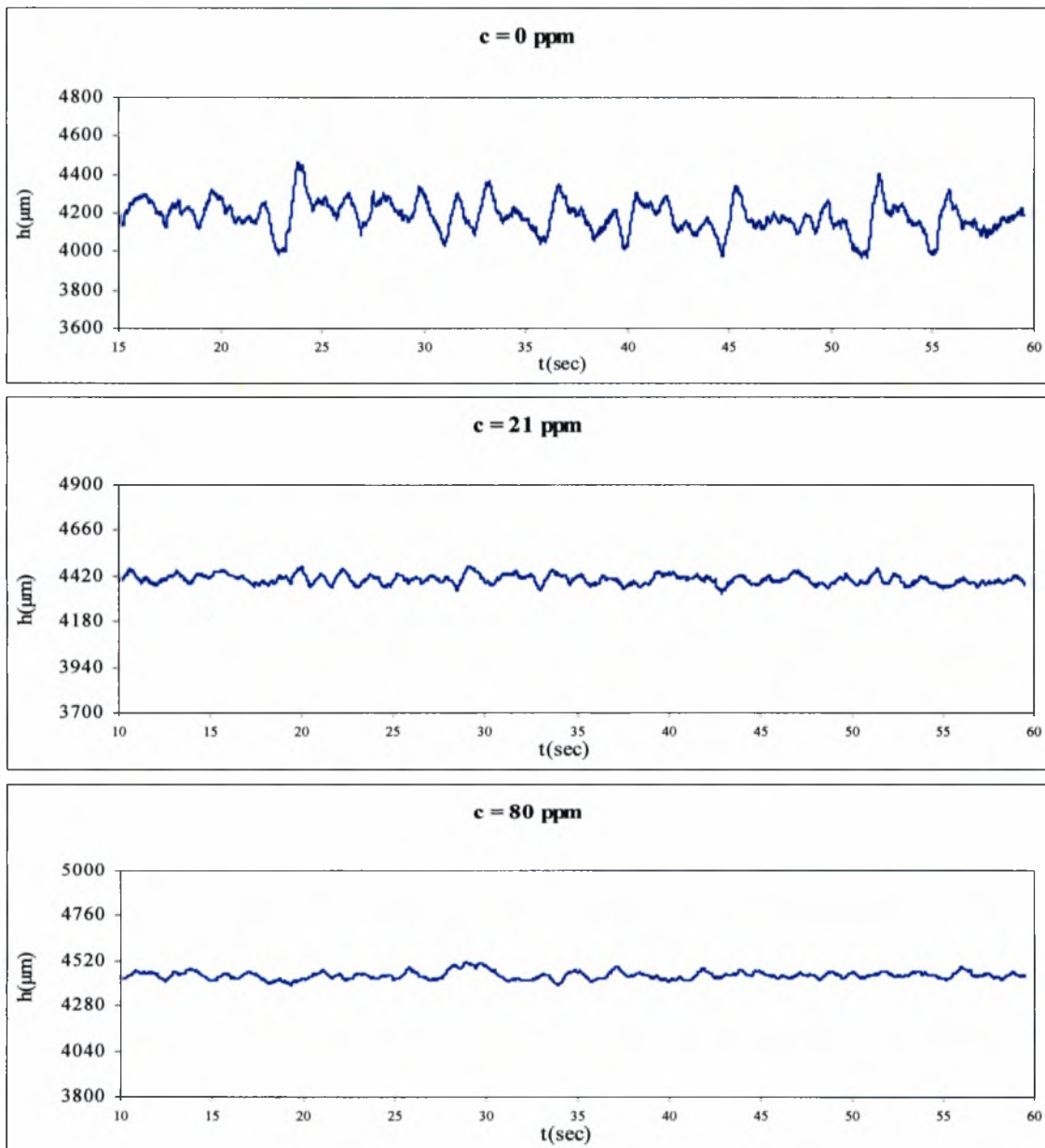
Στο Σχήμα 6.7 παρατηρούμε ότι μετά την προσθήκη του διαλύματος του πολυμερούς και για συγκέντρωση του στη ροή 10 ppm η συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων ελαττώνεται ενώ για συγκέντρωση 19 ppm τα κύματα σχεδόν αποσβένονται. Επίσης είναι φανερή η αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας, κάτι το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 6.8.



**Σχήμα 6.9:** Αποτύπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.13$  m/s και  $u_{gs}=3$  m/s και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.

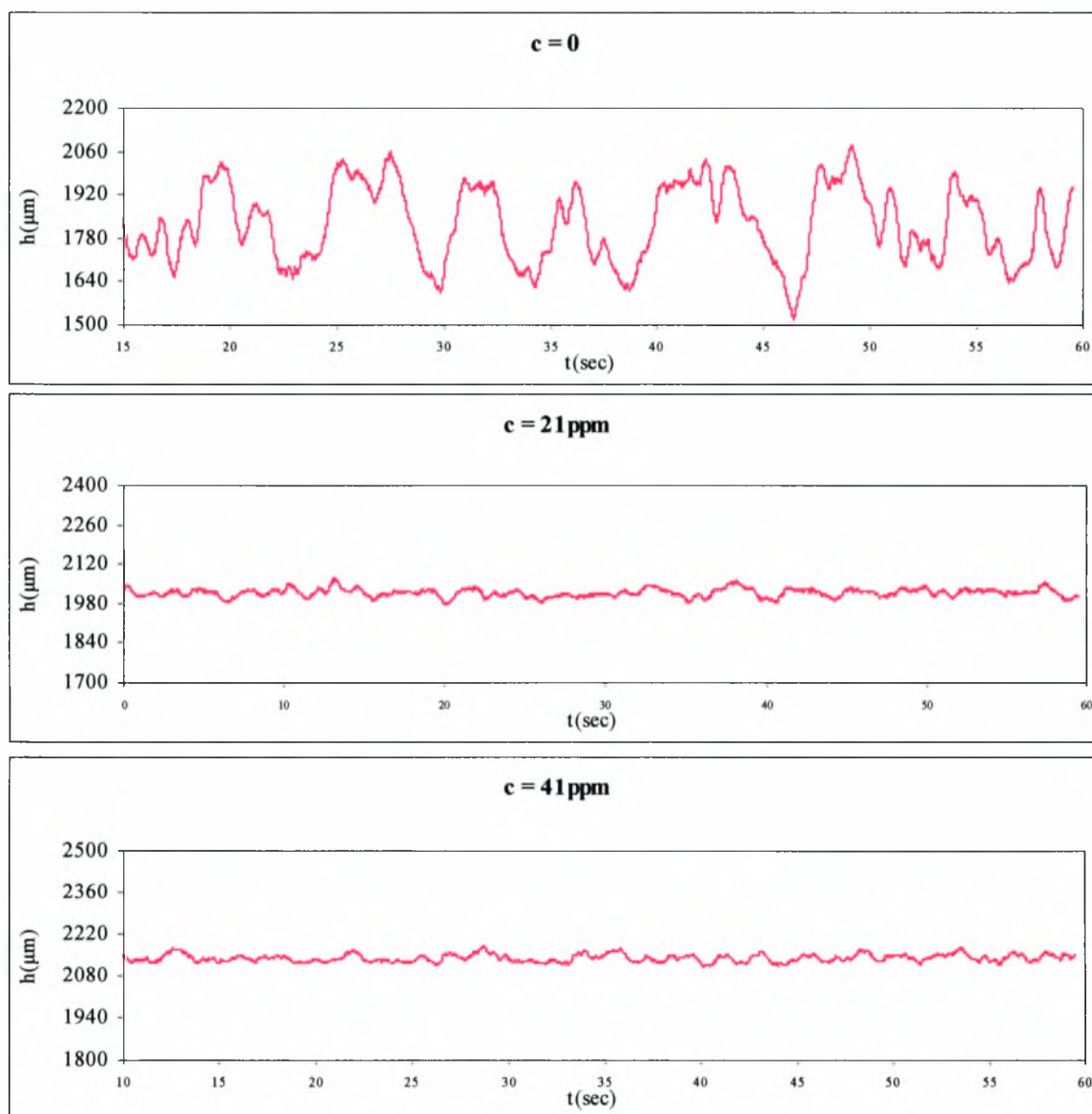
Στο Σχήμα 6.9 παρατηρούμε ότι για συγκέντρωση του πολυμερούς στη ροή 3 ppm δεν σημειώνεται κάποια ουσιαστική μεταβολή, αλλά για συγκέντρωση 15 ppm το πλάτος των κυμάτων ελαττώνεται και κυρίως το πλάτος των μεγάλου μεγέθους κυμάτων, ενώ αυξάνεται ελάχιστα το πάχος της υγρής στιβάδας.

Στα σχήματα 6.10, 6.11, 6.13 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των κυμάτων χρησιμοποιώντας ως διάλυμα πολυμερούς αρχικής συγκέντρωσης 1000 ppm.

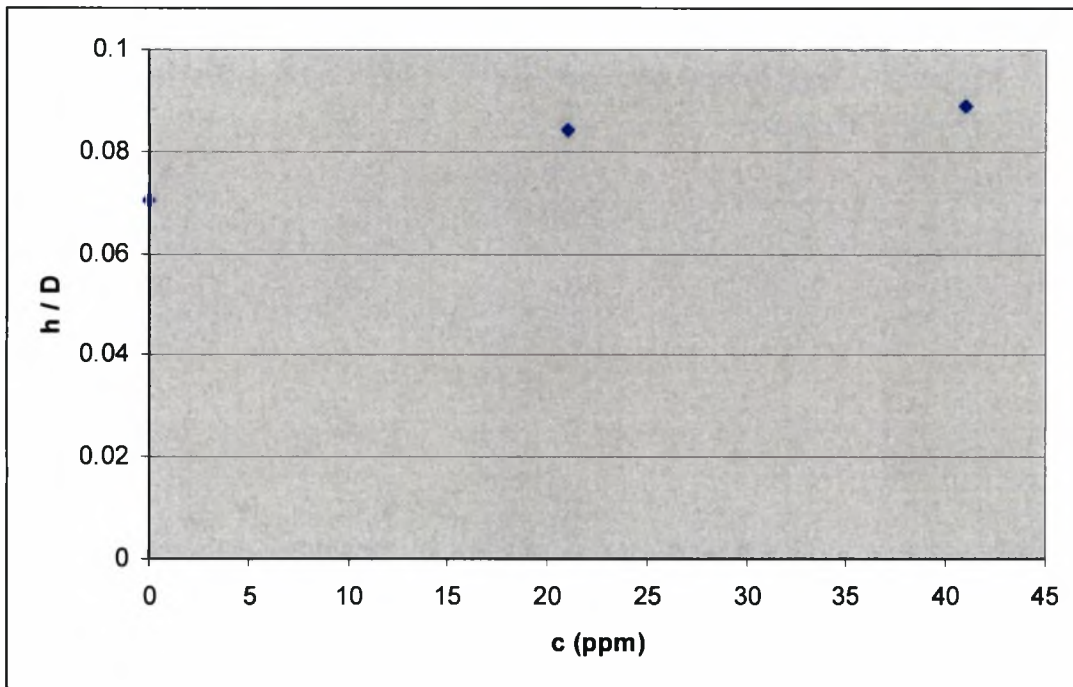


**Σχήμα 6.10:** Αποτύπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.009 \text{ m/s}$  και  $u_{gs}=9 \text{ m/s}$  και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.

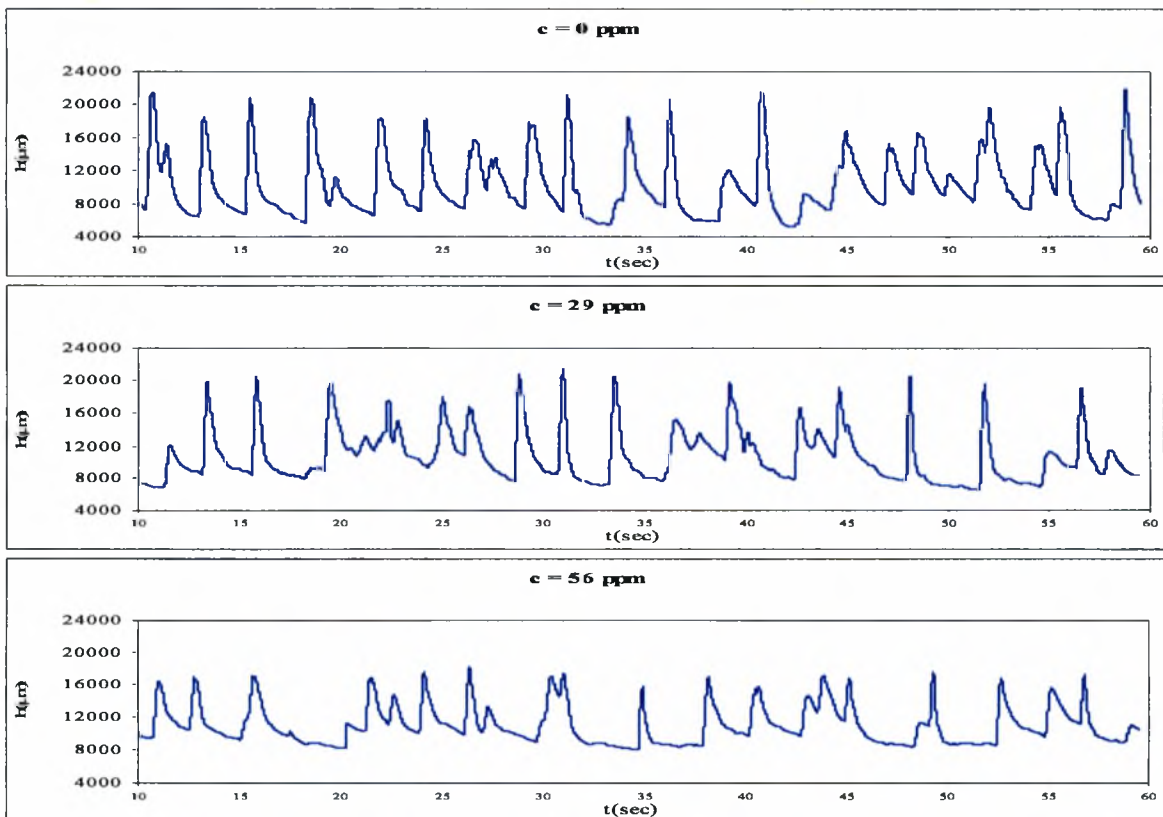
Παρατηρώντας το Σχήμα 6.10 συμπεραίνουμε ότι για συγκέντρωση του πολυμερούς στη ροή 21 ppm μειώνεται το πλάτος των κυμάτων ενώ για συγκέντρωση 80 ppm δεν παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή. Αντίστοιχα για συγκέντρωση 21 ppm αυξάνει το πάχος της υγρής στιβάδας, κάτι το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 6.11, ενώ η αύξηση για συγκέντρωση 80 ppm είναι πολύ μικρή. Η ίδια επίδραση της προσθήκης του πολυμερούς, για διαφορετική όμως φαινομενική ταχύτητα του αέρα, φαίνεται και στο Σχήμα 6.11 όπου πάλι για συγκέντρωση πάνω από 21 ppm δεν παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή.



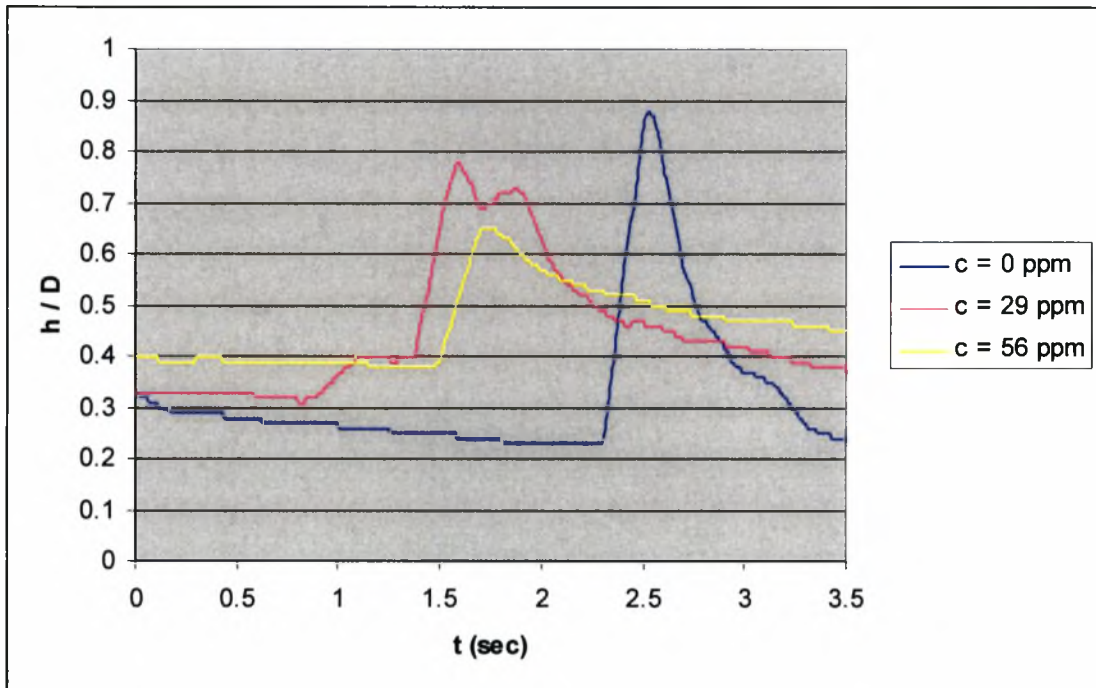
**Σχήμα 6.11:** Αποτόπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.009 \text{ m/s}$  και  $u_{gs}=12 \text{ m/s}$  και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.



**Σχήμα 6.12:** Μεταβολή του πάχους της υγρής στιβάδας για διαστρωματωμένη ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz για  $u_{sl}=0.009$  m/s και  $u_{gs}=12$  m/s



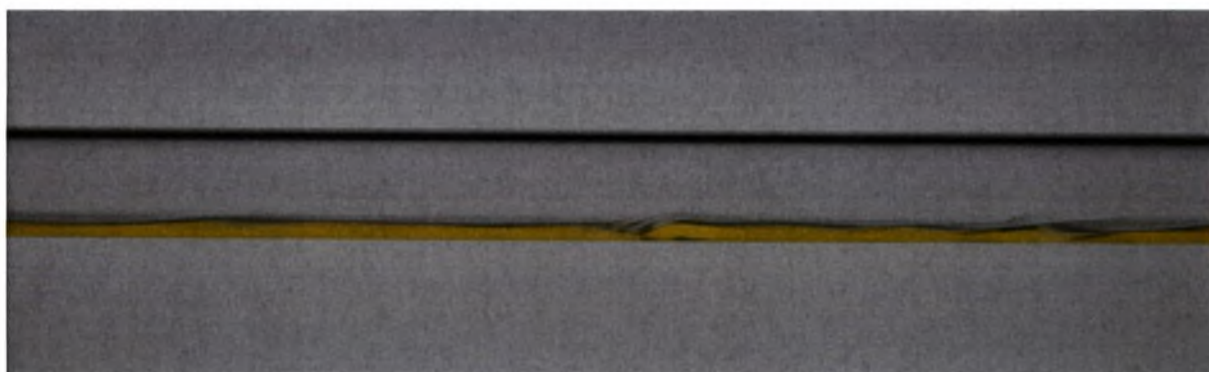
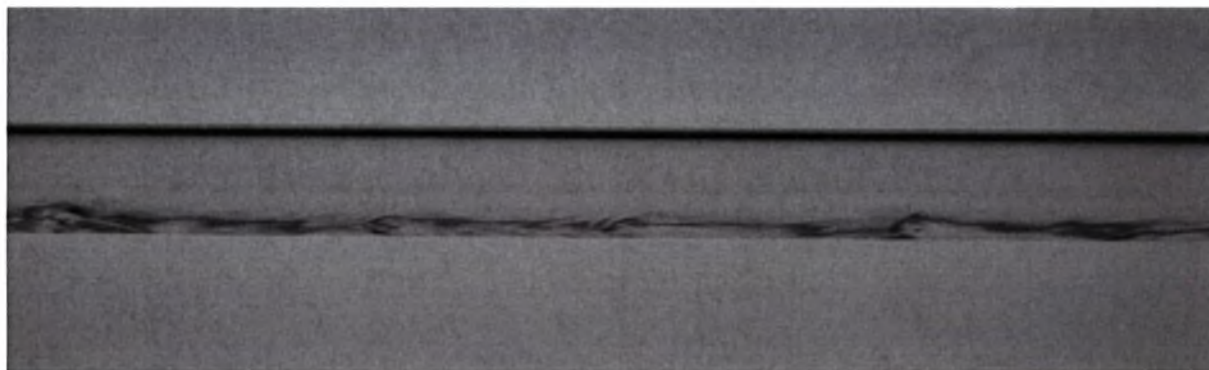
**Σχήμα 6.13:** Αποτύπωση του πάχους της υγρής στιβάδας για  $u_{sl}=0.29$  m/s και  $u_{gs}=3$  m/s και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.



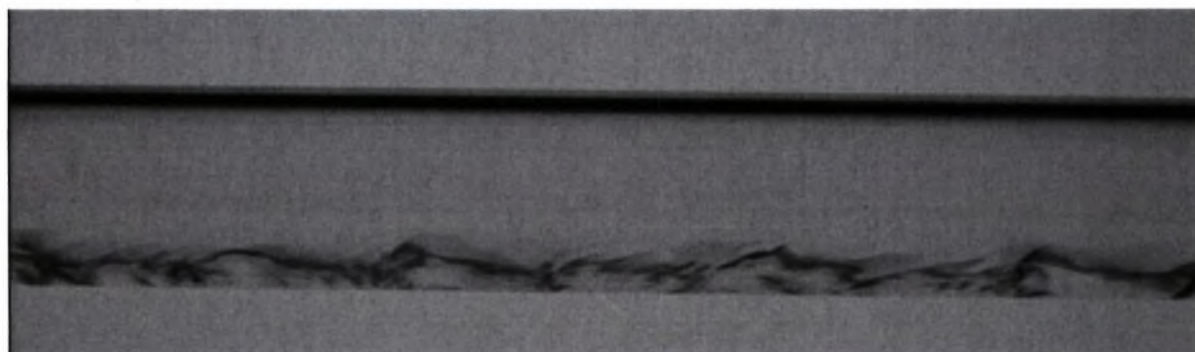
**Σχήμα 6.14:** Μεταβολή του πάχους της υγρής στιβάδας για διαλείπουσα ροή για  $u_{sl}=0.29$  m/s και  $u_{gs}=3$  m/s και για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του πολυμερούς.

Στο Σχήμα 6.13 παρατηρούμε ότι με την εισαγωγή στη ροή πολυμερούς συγκέντρωσης 29 ppm το πλάτος των κυμάτων ελαττώνεται ελάχιστα αλλά ακόμα περισσότερο για συγκέντρωση 56 ppm. Η αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας είναι πιο ευδιάκριτη στο Σχήμα 6.14.

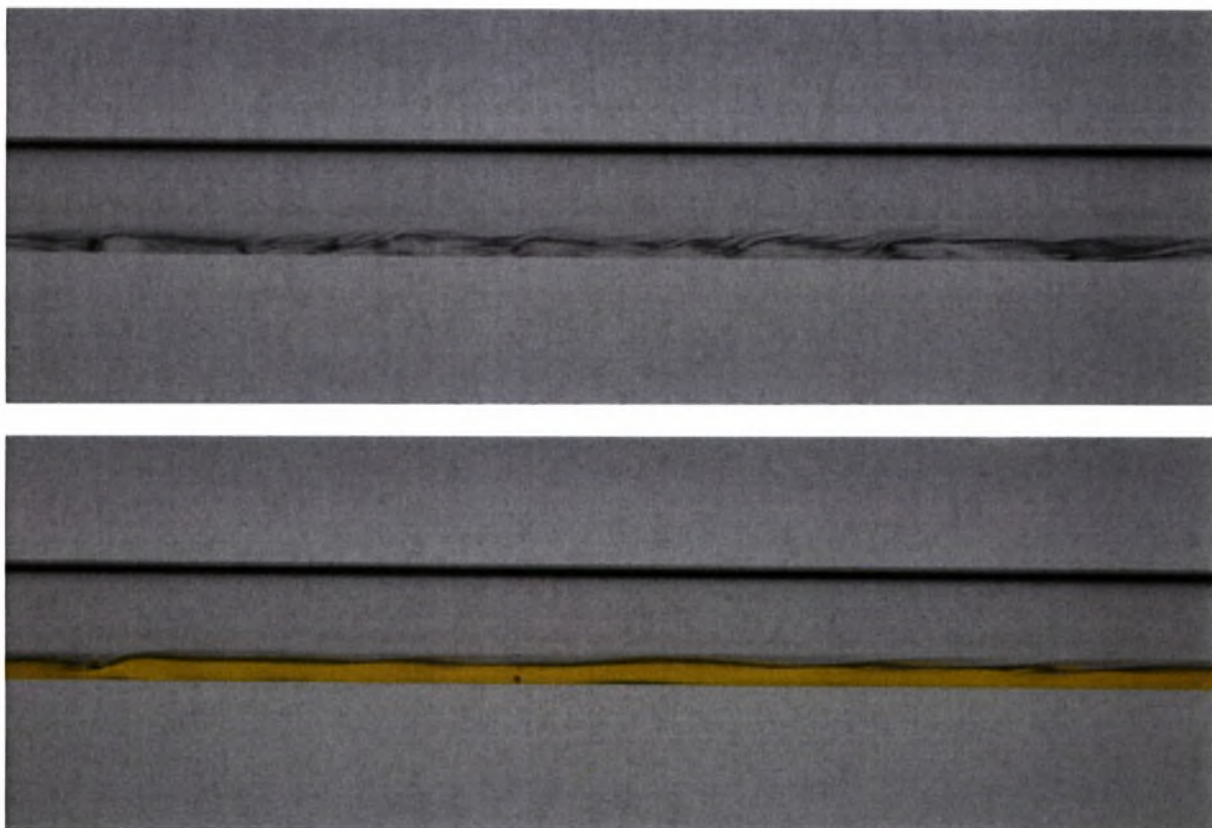
Στις Εικόνες 6.1, 6.2 και 6.3 παρουσιάζονται οι αποσβέσεις των κυμάτων σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz για αρχική συγκέντρωση πολυμερούς 100, 500 και 1000 ppm αντίστοιχα και για συγκέντρωση μέσα στον αγωγό 38, 36 και 37 ppm αντίστοιχα.



**Εικόνα 6.1:** Επίδραση προσθήκης πολυμερούς συγκέντρωσης 38 ppm για  $u_{sl}=0.011$  m/s και  $u_{gs}=12$  m/s.



**Εικόνα 6.2:** Επίδραση προσθήκης πολυμερούς συγκέντρωσης 36 ppm για  $u_{sl}=0.011$  m/s και  $u_{gs}=12$  m/s.



**Εικόνα 6.3:** Επίδραση προσθήκης πολυμερούς συγκέντρωσης 37 ppm για  $u_{sl}=0.01$  m/s και  $u_{gs}=12$  m/s.

## 6.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση προσθήκης πολυμερούς σε διφασική ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό για καθεστώτα διαστρωματωμένης ροής με διδιάστατα κύματα, διαστρωματωμένης ροής με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz και για διαλείπουσα ροή χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά αρχικά διαλύματα πολυμερούς με συγκεντρώσεις 100, 500 και 1000 ppm.

Με την προσθήκη του πολυμερούς διαπιστώθηκε ότι υπάρχει απόσβεση των κυμάτων για καθεστώτα διαστρωματωμένης ροής με διδιάστατα κύματα και διαστρωματωμένης ροής με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz για πολύ μικρές συγκεντρώσεις του πολυμερούς μέσα στον αγωγό. Συγκεκριμένα η απόσβεση παρατηρείται για συγκεντρώσεις από 7 ppm, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης δεν έχει επίδραση στην απόσβεση.

Στη διαλείπουσα ροή η επίδραση της προσθήκης του πολυμερούς έχει να κάνει με την αύξηση του πλάτους του υγρού υμένα μέσα στον αγωγό, καθώς και με την καταγραφή κυμάτων μικρότερου πλάτους, μετά από την προσθήκη του πολυμερούς, για συγκεντρώσεις από 17 ppm. Επίσης η συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων “slugs” μειώνεται ελαφρώς. Επίσης υπάρχει η τάση τα κύματα να αποκτήσουν μεγαλύτερο μήκος, χωρίς να φράσουν όλη τη διατομή. Σε εργασία των Al-Sarkhi και Soleimani (2004) παρατηρείται η μείωση της συχνότητας των “slugs” καθώς και η αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας για διαλείπουσα ροή σε αγωγό διαμέτρου 2.54 cm.

Σε όλες τις μετρήσεις διαπιστώθηκε αύξηση του ύψους του υγρού υμένα (liquid holdup) κατά την προσθήκη του διαλύματος του πολυμερούς. Για ίδιες συνθήκες ροής και για σχεδόν ίδιες συγκεντρώσεις του πολυμερούς μέσα στον αγωγό παρατηρήθηκε (οπτικά) πως το αρχικό διάλυμα με συγκέντρωση 1000 ppm έχει μεγαλύτερη επίδραση.



Al-Sarkhi, A., Abu-Nada, E., Effect of drag reducing polymer on annular flow patterns of air and water in a small horizontal pipeline. In: Twelfth International Conference on Multiphase Production Technology, Barcelona, Spain, 25–27 May 2005.

Al-Sarkhi, A., Hanratty, T.J., 2001. Effect of drag-reducing polymer on annular gasliquid flow in a horizontal pipe. *Int. J. Multiphase Flow* 27 (7), 1151–1162.

Al-Sarkhi, A., Hanratty, T.J., 2002. Effect of pipe diameter on the performance of drag-reducing polymers in annular gas–liquid flows. *Trans IChemE, Chem. Eng. Res. Des.* 79 (Part A), 402–408.

Al-Sarkhi, A., Soleimani, A., 2004. Effect of drag reducing polymers on two-phase gas-liquid flows in a horizontal pipe. *Trans IChemE, Chem. Eng. Res. Des.* 82 (A12), 1583–1588.

Al-Sarkhi, A., Abu-Nada, E., Batayneh, M., 2006. Effect of drag reducing polymer on air-water annular flow in an inclined pipe. *Int. J. Multiphase Flow* 32, 926–934.

Al-Wahaibi, T., Smith, S., Angeli, P., 2007. Effect of drag-reducing polymers on horizontal oil water flows. *J. Petrol. Sci. Eng.* 57, 334–346.

Al-Yaari, M., Soleimani, A., Abu-Sharkh, B., Al-Mubaiyedh, U., Al-Sarkhi, A., 2009. Effect of drag reducing polymers on oil–water flow in a horizontal pipe. *Int. J. Multiphase flow* 35 (6), 516–524.

Baik, S., Hanratty, T.J., 2003. Effects of a drag reducing polymer on stratified gas– liquid flow in a large diameter horizontal pipe. *International Journal of Multiphase Flow* 29 (11), 1749–1757.

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

Berman, N. S., “Drag reduction of the highest molecular weight fractions of polyethylene oxide,” *Phys. Fluids* 20, 715 (1977).

Brown D.J., Disequilibrium annular flow. In: *Ph.D. Thesis*, Univ. of Oxford, Oxon (1978).for isothermal two phase, two component flows in pipes, *CEP* 45 (1949), pp. 39–48

Burger, E.D., Munk, W.R., Wahl, H.A., 1982. Flow increase in Trans Alaska pipeline through use of polymeric drag reduction additive. *J. Petrol. Eng.*, 377–386.

Carcoana, A., 1992. *Applied Enhanced Oil Recovery*, vol. 140. Prentice Hall.

Cox, L.R., Dunlop, E.H., North, A.M., 1947. Role of molecular aggregate in liquid drag reduction by polymer. *Nature (London)* 249, 243.

Daas, M., Bleyle, D., 2006. Computational and experimental investigation of the drag reduction and the components of pressure drop in horizontal slug flow using liquids of different viscosities. *Exp. Thermal Fluid Sci.* 30, 307–317.

Fernandes, R.L.J., Jutte, B.M., Rodri'guez, M.G., 2004. Drag reduction in horizontal annular two-phase flow. *Int. J. Multiphase Flow* 30, 1051–1069.

- Fernandes, R.L.J., Fleck, B.A., Heidrick, T.R., Torres, L., Rodriguez, M.G., 2009. Experimental study of DRA for vertical two-phase annular flow. *J. Energy Res. Technol.* 131 (2).
- Greskovich, E.J., Shrier, A.L., 1971. Pressure drop and hold up in horizontal slug flow. *AIChE J.* 17, 1214–1219.
- Harder, K.J., Tiederman, W.G., 1991. Drag-reduction and turbulent structure in two dimensional channel flows. *Phil. Trans. R. Soc., Lond. A* 336, 19–34.
- Hunston D. L. and Reischman M. M., “The role of polydispersity in the mechanism of drag reduction,” *Phys. Fluids* 18, 1626 (1975).
- Jubran, B.A., Zurigat, Y.H., Goosen, M.F.A., 2005. Drag reducing agents in multiphase flow pipelines: recent trends and future needs. *Petrol. Sci. Technol.* 23, 1403–1424.
- Kang, C., Vancko, R.M., Green, A., Kerr, H., Jepson, W., 1997. Effect of drag-reducing agents in multiphase flow pipelines. *J. Energy Resour. Technol.* 120, 15–19.
- Lin P.Y. and Hanratty T.J., Prediction of the initiation of slugs with linear stability theory (1986).
- Lockhart and Martinelli, 1949 Lockhart M.W. and Martinelli R.C., Proposed correlation of data Brown, (1978).
- Manfield, C.J., Lawrence, C., Hewitt, G., 1999. Drag-reduction with additive in multiphase flow: a literature survey. *Multiphase Sci. Technol.* 11, 197–221.
- Mandhane, J.M., G.A. Gregory and K. Aziz, A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes (1974)
- Mowla, D., Naderi, A., 2006. Experimental study of drag reduction by a polymeric additive in slug two-phase flow of crude oil and air in horizontal pipes. *Chem. Eng. Sci.* 61 (5), 1549–1554.
- Nadolink R. H., Ph.D. thesis, University of California, San Diego, (1987).
- Nencini R.M. and Andreussi P., Study of the behavior of large disturbance waves in annular two-phase flow, *Can. J. Chem. Engng* 60 (1983), pp. 459–466
- Oliver, D.R., Young Hoon, A., 1968. Two-phase non-Newtonian flow. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 46, T106.
- Otten, L., Fayed, A.S., 1976. Pressure drop and drag-reduction in two-phase non-Newtonian slug flow. *Can. J. Chem. Eng.* 54, 111–114.
- Parimal, P., Cheolho, K., Alvaro, A., September 29–October 3, 2008. The performance of drag reducing agents in multiphase flow conditions at high pressure; positive and negative effects. In: *Proceedings of IPC2008, Seventh International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada.*
- Rosehart, R.G., Scott, D., Rhodes, E., 1972. Gas–liquid slug flow with drag-reducing polymer solutions. *AIChE J.* 18 (4), 744–750.

Saether, G., Kubberud, K., Nuland, S., Lingelem, M.N., 1989. Drag reduction in two phase flow. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Multiphase Flow, France, pp. 171–184.

Scott, D., Rhodes, E., 1972. Gas–liquid slug flow with drag reducing polymer solutions. *AIChE J.* 18, 744–750.

Sellin, R.H., W Hoyt, J., Scrivener, O., 1982. The effect of drag-reducing additives on liquid flows and their industrial applications part I: basic aspects. *J. Hydraul. Res.* 20 (1), 29–68.

Sifferman, T., Greenkorn, R., 1981. Drag reduction in three distinctly different fluid systems. *SPE J.*, 663–668.

Soleimani, A., Al-Sarkhi, A., Hanratty, T.J., 2002. Effect of drag reducing polymers on pseudo-slugs-interfacial drag and transition to slug flow. *Int. J. Multiphase Flow* 28 (12), 1911–1927.

Sylvester, N.D., Brill, J.P., 1976. Drag-reduction in two-phase annular mist flow of air and water. *AIChE J.* 22 (3), 615–617.

Thwaites, G.R., Kulov, N.N., Nedderman, N.M., 1976. Liquid film properties in two phase annular flow. *Chem. Eng. Sci.* 31, 481.

Toms, B.A., 1948. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. In: Proceedings of the First International Congress on Rheology, vol. 2. North Holland Publication Company, Amsterdam. 135–141.

Vissman, K., Bewersdorff, 1989. The influence of pre-shearing on the elongational behavior of drag-reducing fluids. In: Sellin, R.H.J., Moses, R.T. (Eds.), *Drag Reduction in Fluid Flows*. Ellis Horwood Publishers, pp. 61–67.

Vlachogiannis, M., Liberatore, M.W., McHugh, A.J., Hanratty, T.J., 2003. Effectiveness of a drag reducing polymer: relation to molecular weight distribution and structuring. *Phys. Fluids* 15 (12), 3786–3794.

Warholic, M., Massah, H., Hanratty, T.J., 1999. Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of Reynolds number, concentration and mixing. *Exp. Fluid* 27, 461–472.

Wei, T., Willmarth, W.W., 1992. Modifying turbulent structure with drag-reducing polymer additives in turbulent channel flows. *J. Fluid Mech.* 245, 619–641.

Στεριάδης, Γρηγόριος  
"Επίσραυ Εισαγωγής πολυτε-  
-ρών στην Σικελική πολι-  
-τική - αγωγή. 64 σελίδες  
1980"

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ

ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
Τηλ.: 24210 06300



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000106299