

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



# **ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

---

υπό

**ΕΡΙΣ ΓΚΙΟΚΑ**

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

Βόλος 2014



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

Αριθ. Εισ.: 12882/1  
Ημερ. Εισ.: 08-09-2014  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ  
2014  
ΓΚΙ



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

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

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος  
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Νικόλαο Ανδρίτσο, για την συνολική του συνεισφορά στην διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής. Χωρίς την συμβολή του αλλά και τις απαραίτητες συμβουλές και υποδείξεις δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω αυτό το έργο στο χρονικό διάστημα που επιθυμούσα και με τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν στην πορεία.

Επίσης, ευχαριστώ και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους Καθηγητές Βασίλη Μποντόζογλου και Δημήτρη Βαλουγεώργη, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ οφείλω να το δώσω στους γονείς μου για όσα μου έχουν προσφέρει όχι μόνο αυτά τα χρόνια άλλα γενικά για όσα έχουν κάνει για μένα. Για τον κόπο , την κούραση άλλα και την προσπάθεια που έχουν καταβάλει για να μας εξασφαλίσουν ένα καλύτερο αύριο και ένα πιο δημιουργικό μέλλον. Παρόλα αυτά τα περισσότερα ευχαριστώ απευθύνονται στην αδερφή μου, Ενεϊντα, για την υπομονή της που με ανέχεται για οτιδήποτε έχω κάνει όλα αυτά τα χρόνια και για αυτά που έπονται.

# ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

ΓΚΙΟΚΑ ΕΡΙΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος , Καθηγητής Πειραματικών Φαινομένων  
Μεταφοράς

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η μεταφορά του πετρελαίου και του φυσικού αερίου αποτελεί μια σοβαρή και σημαντική δραστηριότητα με μεγάλο οικονομικό αντίκτυπο. Συνεπώς η γνώση και πρόβλεψη για το πώς συμπεριφέρονται τα υγρά και τα αέρια, αλλά και ποια θα είναι η προβλεπόμενη πτώση πίεσης αποτελούν σημαντικά στοιχεία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια σύντομη αναφορά για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο και τις ιδιότητες τους. Έπειτα γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων που συναντώνται στην βιβλιογραφία για την περιγραφή της ροή σε αγωγούς, αλλά και των μοντέλων για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε αγωγούς.

Τέλος, γίνεται σύγκριση των πειραματικών δεδομένων που βρήκαμε στην βιβλιογραφία με τα δεδομένα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς των μοντέλων της πτώσης πίεσης.

## **Transport of oil and natural gas in horizontal pipes**

### **ABSTRACT**

The transport of oil and gas is a serious and important activity with high economic impact. Therefore, knowledge and prediction of how fluids and gases behave are as essential as the estimated pressure drop will be.

The scope of this work is to evaluate four common empirical models which can be applied in oil-gas two-phase flow transport in horizontal pipes. First, a brief introduction is presented in oil and gas production as well as in oil and gas properties, followed by a literature review of flow patterns encountered in gas-liquid two-phase flows and of the most common models for estimation of pressure drop and liquid holdup.

In the main part of the work, air-water and air-oil flow data on pressure drop from the literature are compared with predictions from four empirical models. It is shown that, in general, the flow pattern can affect the predictability of the models.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
Transport of oil and natural gas in horizontal pipes .....	6
ABSTRACT .....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	11
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.1 Κίνητρο .....	12
1.2 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας .....	13
2 Γενικά περί πετρελαίου και φυσικού αερίου .....	14
2.1 Σύντομο ιστορικό σημείωμα.....	14
2.2 Το πετρέλαιο .....	16
2.2.1 Σχηματισμός πετρελαίου .....	16
2.2.2 Χημική σύσταση πετρελαίου.....	16
2.2.3 Φυσικές ιδιότητες πετρελαίου .....	17
2.3 Το Φυσικό Αέριο .....	19
2.3.1 Σχηματισμός φυσικού αερίου.....	19
2.3.2 Χημική σύσταση φυσικού αερίου .....	20
3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ ΡΟΩΝ .....	22
3.1 Καθεστώτα Ροής Πολυφασικών Ροών .....	23
3.1.1 Διφασική ροή υγρού – αερίου .....	23

3.1.2	Διφασική ροή υγρού – υγρού .....	26
3.1.3	Τριφασική Ροή.....	28
3.2	Χάρτες Καθεστώτων Ροής.....	31
3.3	Μαθηματικά μοντέλα περιγραφής της διφασικής ροής.....	32
3.3.1	Μοντέλο Ομογενούς Ροής.....	34
3.3.2	Μοντέλο Διαχωρισμένης Ροής.....	36
3.4	Επίδραση της κλίσης του αγωγού.....	37
3.5	Μοντέλα υπολογισμού Πτώσης Πίεσης .....	39
3.5.1	Μοντέλο των Lockhart – Martinelli .....	39
3.5.2	Μοντέλο των Baroczy – Chisholm.....	40
3.5.3	Μοντέλο του Friedel.....	42
3.5.4	Μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck .....	42
4	Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με προβλέψεις εμπειρικών μοντέλων.....	44
4.1	Διφασική ροή νερού – αέρα.....	44
4.1.1	Σύγκριση ως προς τα καθεστάτα ροής.....	45
4.1.2	Σύγκριση για κάθε μοντέλο .....	54
4.2	Διφασική ροή πετρελαίου – αέρα .....	57
5	Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	60
6	Βιβλιογραφία.....	62
	Παράρτημα .....	64

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3-1. Ροή με Διασπαρμένες Φυσαλίδες (Dispersed Bubble Flow).....	23
Σχήμα 3-2. Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow) .....	24
Σχήμα 3-3. Ήπια Διαλείπουσα ροή (Plug Flow) .....	24
Σχήμα 3-4. Έντονα Διαλείπουσα Ροή (Slug Flow) .....	25
Σχήμα 3-5. Διαστρωματωμένη Ροή (Stratified Flow) .....	25
Σχήμα 3-6. Διαστρωματωμένη με Κυματισμούς Ροή (Stratified Wavy Flow).....	26
Σχήμα 3-7. Διάφορα είδη διαστρωματωμένης ροής που παρατηρούνται σε οριζόντια ροή υγρού-υγρού .....	27
Σχήμα 3-8. Διάφορα είδη δακτυλιοειδούς ροής που παρατηρείται σε οριζόντια υγρού-υγρού ροής .....	28
Σχήμα 3-9. Άλλα καθεστώτα ροής που παρατηρείται σε οριζόντια υγρού-υγρού ροής.....	29
Σχήμα 3-10. Τριφασικό Διάγραμμα φυσικού αερίου – πετρελαίου - νερού για οριζόντιες σωληνώσεις. ....	30
Σχήμα 3-11. Χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό του Baker (1954) όπως τροποποιήθηκε από τον Scott (1963). ....	32
Σχήμα 3-12. Εμπειρικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Mandhane .....	33
Σχήμα 3-13. Όγκος ελέγχου για το ισοζύγιο ορμής στο ομογενές και το διαχωρισμένο μοντέλο διφασικής ροής.....	36
Σχήμα 3-14. Επίδραση της γωνίας κλίσης αγωγού πάνω σε χάρτη καθεστώτος ροής (Ghajar and Kim, 2005).....	38
Σχήμα 4-1. Σύγκριση ξεχωριστά των προβλέψεων πτώσης πίεσης από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα με τα πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για Διαλείπουσα και Ψευδο-διαλείπουσα ροή. ....	46

Σχήμα 4-2. Σύγκριση όλων μαζί των προβλέψεων πτώσης πίεσης από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα με τα πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για Διαλείπουσα και Ψευδο-διαλείπουσα ροή. ....	47
Σχήμα 4-3. Σύγκριση των προβλέψεων της πτώσης πίεσης ξεχωριστά από κάθε μοντέλο με τιμές πειραματικών δεδομένων του Andritsos (1986) για Δακτυλιοειδή Ροή. ....	48
Σχήμα 4-4. Σύγκριση των προβλέψεων της πτώσης πίεσης συνολικά από τα τέσσερα μοντέλα που εξετάζονται με τιμές πειραματικών δεδομένων του Andritsos (1986) για Δακτυλιοειδή Ροή. ....	49
Σχήμα 4-5. Σύγκριση των προβλέψεων της πτώσης πίεσης ξεχωριστά από κάθε μοντέλο με τιμές πειραματικών δεδομένων του Andritsos (1986) για Διαστρωματωμένη Ροή. ....	50
Σχήμα 4-6. Σύγκριση όλων μαζί των προβλέψεων πτώσης πίεσης από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα με τα πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για Διαστρωματωμένη Ροή. ....	51
Σχήμα 4-7. Σύγκριση προβλέψεων πτώσης πίεσης με τιμές πειραματικών δεδομένων του Hoogendoorn (1959). ....	52
Σχήμα 4-8. Σύγκριση συγκεντρωτικά των προβλέψεων πτώσης πίεσης με τιμές από τα πειραματικά δεδομένα του Hoogendoorn (1959). ....	53
Σχήμα 4-9. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης και τιμών που υπολογίζονται το μοντέλο των Lockhart – Martinelli. ....	54
Σχήμα 4-10. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης και τιμών που υπολογίζονται το μοντέλο του Friedel. ....	55
Σχήμα 4-11. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης και τιμών που υπολογίζονται το μοντέλο του Chisholm. ....	56
Σχήμα 4-12. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης και τιμών που υπολογίζονται το μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck. ....	57
Σχήμα 4-13. Σύγκριση των προβλέψεων πτώσης πίεσης από κάθε εξεταζόμενο εμπειρικό μοντέλο με τιμές από τα πειραματικά δεδομένα των Badie et al. ....	58

Σχήμα 4-14. Σύγκριση συγκεντρωτικά των προβλέψεων πτώσης πίεσης με τιμές από τα πειραματικά δεδομένα των Badie et al. .... 59

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Η Μέση Απόλυτη Απόκλιση των αποκλίσεων για δεδομένα Διαλείπουσας και Ψευδο-διαλείπουσας ροής. ....	46
Πίνακας 2. Μέση Απόλυτη Απόκλιση για την Δακτυλιοειδή Ροή (Annular Flow) .....	48
Πίνακας 3. Μέση Απόλυτη Απόκλιση για την Διαστρωματωμένη Ροή. ....	51
Πίνακας 4. Μέση Απόλυτη Απόκλιση για τα δεδομένα του Hoogendoorn (1959). ....	53
Πίνακας 5. Μέση Απόλυτη Απόκλιση για διφασική ροη πετρελαίου - αέρα .....	59
Πίνακας 6. Πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή (D=0,024 m, σύστημα αέρας-νερό).....	64
Πίνακας 7. Πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για δακτυλιοειδή ροή (D=0,024 m, σύστημα αέρας-νερό). ....	65
Πίνακας 8. Πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για διαστρωματωμένη ροή (D=0,024 m, σύστημα αέρας-νερό).....	66
Πίνακας 9. Πειραματικά δεδομένα του Hoogendoorn (1959) για διαστρωματωμένη ροή (D=0,14 m, σύστημα gas oil - αέρας).....	67
Πίνακας 10. Πειραματικά δεδομένα των Badie et al. (2000) για διαστρωματωμένη ροή (D=0,078 m, σύστημα oil - αέρας). ....	68



# Κεφάλαιο 1

---

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Κίνητρο

Διφασικές ροές όπως υγρού-υγρού ή αερίου-υγρού, συμβαίνουν σε πολλές εφαρμογές μεταποιητικών βιομηχανιών κυρίως αλλά και σε αρκετές καθημερινές εφαρμογές. Διφασική ροή αερίου – υγρού συμβαίνει σε στήλες απόσταξης, αντιδραστήρες δύο φάσεων και εναλλάκτες θερμότητας, ενώ ροή υγρού-υγρού συμβαίνει σε διάφορες συσκευές στη γαλακτοβιομηχανία, σε διφασικούς αντιδραστήρες με μη-αναμίξιμους υγρούς καταλύτες και στη βιομηχανία πετρελαίου. Η τελευταία εφαρμογή είναι αυτή η οποία αποτέλεσε τον κινητήριο μοχλό για την διεξαγωγή της μελέτης της ροής του πετρελαίου και του φυσικού αερίου σε οριζόντιους αγωγούς.

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής αργού πετρελαίου συχνά μαζί με το πετρέλαιο έρχονται στην επιφάνεια και σημαντικές ποσότητες φυσικού αερίου και νερού. Συνεπώς, και κατά την μεταφορά του εμφανίζεται σε αρκετές περιπτώσεις τριφασική ροή μέσα στον αγωγό, δηλαδή μεταφέρονται ταυτόχρονα πετρέλαιο, αέριο και νερό. Ωστόσο, μία ενδελεχής μελέτη της τριφασικής ροής μέσα σε αγωγό δεν θα ήταν εφικτή στο επίπεδο της πτυχιακής εργασίας, τόσο λόγω της έλλειψης γνώσεων όσο, κυρίως, λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων τριφασικής ροής. Αντιθέτως, η μελέτη των διφασικών συστημάτων υγρού-υγρού και υγρού – αερίου μπορούν να συνεισφέρουν μια αρκετά καλή προσέγγιση στη συμπεριφορά της τριφασικής ροής, θεωρώντας ότι οι αρχές που διέπουν την διφασική ροή των δυο αυτών συστημάτων, διέπουν και την τριφασική ροή.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η περιγραφή της διφασικής ροής υγρού-αερίου και υγρού-υγρού, καθώς και η αξιολόγηση τεσσάρων εμπειρικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία μέσω της σύγκρισης των προβλέψεων τους με πειραματικά δεδομένα.

## 1.2 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Η εργασία στο υπόλοιπο μέρος της χωρίζεται στα πέντε Κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο και γίνεται συνοπτική αναφορά στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του κάθε ρευστού.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα καθεστώτα ροής στην διφασική και την τριφασική ροή. Γίνεται εκτενής αναφορά στα μαθηματικά μοντέλα περιγραφής της ροής και στα μοντέλα υπολογισμού της πτώσης πίεσης σε οριζόντιους αγωγούς.

Η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων (αναφορικά με την πτώση πίεσης) με προβλέψεις από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα που θεωρήθηκαν γίνεται στο Κεφάλαιο 5. Επίσης γίνεται μια πρώτη αποτίμηση και συζήτηση για την αξιοπιστία κάθε μοντέλου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία και γίνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική επέκταση και ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επίσης, στο Παράρτημα παρουσιάζονται κάποιοι πίνακες με τα αποτελέσματα των υπολογισμών της πτώσης πιέσεις για διάφορα δεδομένα.

## Κεφάλαιο 2

### 2 Γενικά περί πετρελαίου και φυσικού αεριού

#### 2.1 Σύντομο ιστορικό σημείωμα

Η χρήση προϊόντων πετρελαίου πηγαίνει αρκετές χιλιετίες πίσω. Στην Μεσοποταμία υπήρχαν τουλάχιστον τριάντα περιοχές με επιφανειακές ενδείξεις και ροές πετρελαίου. Για τους Ασσύριους του 9<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ. η εκροή των απελευθερούμενων αερίων από τα κοιτάσματα πετρελαίου ήταν «η φωνή των θεών που έβγαινε από τους βράχους». Στο εύφλεκτο πετρέλαιο δόθηκε από τους Βαβυλώνιους το όνομα «νάφθα», δηλ. το υλικό που καίγεται με έντονη φλόγα. Η χρησιμοποίηση της πίσσας για τη στεγανοποίηση πλοιαρίων και την αδιαβροχοποίηση στεγών, στην τοιχοποιία και για φαρμακευτικούς σκοπούς ανάγεται στο 3000 π.Χ. Η ασφαλτος απετέλεσε σημαντικό εμπορικό προϊόν της Μεσοποταμίας ενώ η νάφθα, σε συνδυασμό με ασβέστη και άλλες προσμίξεις, ήταν το κύριο υλικό που χρησιμοποιούσαν οι Βυζαντινοί του 7<sup>ου</sup> μ.Χ. αιώνα στο περίφημο «ωγρό πυρ» (Greek fire) [24].

Κατά την προσεχτική απόσταξη αργού πετρελαίου, εκτός από τα βαριά κλάσματα που είναι κατάλληλα για φαρμακευτικές χρήσεις, λαμβάνονταν και κλάσματα που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για λίπανση αξόνων, στη βαφική και ως φωτιστικό πετρέλαιο στις λάμπες. Από το τέλος του 17<sup>ου</sup> αιώνα χρονολογείται ευρεσιτεχνία στην Αγγλία που περιγράφει την επεξεργασία πισσούχων σχιστόλιθων (κονιοποίηση και απόσταξη) στο Pitchford-on-Severn με προϊόντα το διαλύτη «νέφτι» και την πίσσα (pitch). Το 1712 ένας Έλληνας γιατρός στο Neuchâtel της Ελβετίας εφηύρε τα επικαλυπτικά υλικά που περιείχαν ασφαλτο και τριμμένα πετρώματα. Έπρεπε όμως να περάσουν εβδομήντα και πλέον χρόνια για να αρχίσει κάπως να γενικεύεται η χρήση βελτιωμένων υλικών του πετρελαίου. Η σύγχρονη βιομηχανία πετρελαίου δεν προήλθε πάντως από τις παραπάνω χρήσεις, αλλά από την ανάγκη για καλύτερο και αποδοτικότερο φωτισμό στη δεκαετία του 1850. Άλλωστε, η ίδια ανάγκη οδήγησε και στην τεχνολογία παραγωγής του φωταερίου από άνθρακα. Στην παραπάνω δεκαετία άρχισε να διατίθεται για φωτισμό το φωτιστικό πετρέλαιο ή παραφινέλαιο (paraffin-oil) στην Αγγλία (προερχόμενο από τους

βιτουμενιούχους σχίστες της Σκοτίας), ενώ στην Αμερική το ίδιο υλικό, με το όνομα κηροζίνη, παραγόταν από την άσφαλτο του Τρινιτάντ. Το υλικό αυτό αντικατέστησε το όλο και ακριβότερο λίπος των φαλαινών που χρησιμοποιούνταν ως τότε για φωτιστικό έλαιο. Οι πρώτες σχετικά προηγμένες τεχνολογικά γεωτρήσεις (που είχαν δανειστεί αρκετές ιδέες από τους Κινέζους) έγιναν μετά το 1830 για την εύρεση νερού ή ορυκτών αλάτων. Δεν ήταν λίγες οι φορές όμως που έπεφταν επάνω σε φλέβες πετρελαίου. Αν και η πρώτη ηθελημένη προσπάθεια για ανόρυξη γεώτρησης πετρελαίου ξεκίνησε τον Απρίλιο του 1857 στο Αμβούργο (και την ίδια χρονιά ολοκληρώθηκαν δύο χειροποίητες γεωτρήσεις στο Πλοέστι της Ρουμανίας), συχνά αναφέρεται ως απαρχή της εποχής του πετρελαίου η ανόρυξη γεώτρησης στις 27 Αυγούστου του 1859 στο Titusville της Πενσυλβάνιας από τον Edwin L. Drake, κατόπιν παραγγελίας του βιομηχάνου G.H. Bissell. Το βάθος της επιτυχούς αυτής γεώτρησης ήταν μόλις 69½ ft (21 m). Μέσα σε 15 χρόνια η παραγωγή πετρελαίου στην Πενσυλβάνια έφτασε τα 10 εκατομμύρια βαρέλια ετησίως [24].

Αρχικά, για την απόσταξη του αργού πετρελαίου χρησιμοποιούνταν οριζόντιοι κυλινδρικοί αποστακτήρες που θερμαίνονταν με ατμό και παρήγαγαν τρία κύρια προϊόντα: (1) τη βενζίνη (το ελαφρύτερο κλάσμα, που αρχικά θεωρήθηκε επικίνδυνο και άχρηστο), (2) την κηροζίνη και (3) το βαρύ υπόλειμμα που πωλούνταν ως καύσιμο. Μέχρι το 1880 στην Αμερική η όλη διεργασία απόσταξης γινόταν σε παρτίδες (διαλείπουσα διεργασία), ενώ στην Ευρώπη είχε εισαχθεί η συνεχής διεργασία.

Η έλευση του ηλεκτρισμού στη δεκαετία του 1880 και η συνεχής γενίκευση του ηλεκτρικού φωτισμού άρχισε να κάνει δύσκολη τη χρήση της κηροζίνης και να πιέζει τις τιμές του πετρελαίου προς τα κάτω. Έπρεπε να βρεθούν νέες χρήσεις των προϊόντων πετρελαίου. Αρχικά, το 1878, παρουσιάστηκε η σόμπα πετρελαίου στην Διεθνή Έκθεση του Παρισιού. Μέσα σε ένα χρόνο πουλήθηκαν μισό εκατομμύριο σόμπες. Έπρεπε όμως να περάσουν άλλα 25 χρόνια για να αρχίσει να παίρνει επάνω της η βιομηχανία πετρελαίου με τη μαζική παραγωγή βενζινοκίνητων αυτοκινήτων. Η εφεύρεση του βενζινοκινήτρου από τους Daimler και Benz το 1885 έφερε τη μεγάλη επανάσταση στη χρησιμοποίηση των προϊόντων του πετρελαίου ως καύσιμα αυτοκινήτων. Η σημαντική αύξηση της κυκλοφορίας των βενζινοκίνητων αυτοκινήτων είχε ως συνέπεια να παρατηρηθεί έλλειψη σε βενζίνη με ταυτόχρονο πλεόνασμα σε κηροζίνη, λόγω της

αυξανόμενης χρήσης των ηλεκτρικών λαμπτήρων. Η αλλαγή των δεδομένων της αγοράς ήταν η κύρια αιτία για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που θα παρήγαγαν επιπλέον βενζίνη χρησιμοποιώντας τα βαρέα κλάσματα.

## **2.2 Το πετρέλαιο**

### **2.2.1 Σχηματισμός πετρελαίου**

Για το πώς δημιουργήθηκαν τα κοιτάσματά πετρελαίου υπάρχει ακόμα και σήμερα διαφωνία μεταξύ των γεωλόγων. Σύμφωνα με μία παλαιότερη θεωρία, πιστευόταν ότι είχαν ανόργανη προέλευση, δηλαδή ότι δημιουργήθηκαν από την ένωση άνθρακα και οξυγόνου με μία σειρά πολύπλοκων αντιδράσεων που συνέβησαν στο υπέδαφος. Με αυτόν τον τρόπο όμως δεν εξηγείται η παρουσία των αζωτούχων ενώσεων (πυριδίνη, μεθυλικά προϊόντα) που βρίσκονται μόνο σε ζωικούς ή φυτικούς οργανισμούς.

Σε γενικές γραμμές σήμερα είναι μάλλον αποδεκτό ότι το πετρέλαιο έχει οργανική προέλευση, όπως και ο γαιάνθρακας (κάρβουνο) και το φυσικό αέριο. Τα περισσότερα κοιτάσματά του σχηματίστηκαν πριν από 10 και πλέον εκατομμύρια χρόνια από λείψανα φυτικών και ζωικών οργανισμών (πλαγκτόν, φύκη, διάτομα, μικρά μαλάκια κτλ.), τα οποία ζούσαν στις θάλασσες, στις λιμνοθάλασσες ή στις εκβολές των ποταμών. Μεταφέρθηκαν και αποτέθηκαν κατά μεγάλες μάζες στους βυθούς ως «μαύρη λάσπη», μαζί με ανόργανα ιζήματα. Σταδιακά οι οργανισμοί αυτοί αποσυντέθηκαν μέσα στα πετρώματα που σχηματίστηκαν με τη βοήθεια αναερόβιων μικροβίων (βακτηρίδια). Τέτοια βακτηρίδια βρίσκονται ζωντανά ακόμα και σήμερα σε μερικά είδη αμερικανικών και ρωσικών πετρελαίων. Οι υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 200 °C) και πιέσεις που επικράτησαν, όταν τα διάφορα στρώματα βρέθηκαν σε μεγάλα βάθη, διαμόρφωσαν ακόμα περισσότερο τα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου.

### **2.2.2 Χημική σύσταση πετρελαίου**

Το αργό πετρέλαιο αποτελείται τόσο από ενώσεις υδρογονανθράκων (σε ποσοστό που κυμαίνεται από 50 μέχρι 98% κ.β.) όσο και από ενώσεις που δεν περιέχουν υδρογονάνθρακες (που περιέχουν θείο, άζωτο, οξυγόνο και διάφορα ίχνη μετάλλων) σε

μια ευρεία σειρά συνδυασμών όπως αναφέρονται από τους Clark & Brown [1]. Τα συστατικά του πετρελαίου μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις μεγάλες ομάδες που βασίζονται στη διαφορετική διαλυτότητά τους στους οργανικούς διαλύτες, σύμφωνα με τους Leahy & Colwell [2] :

➤ Κορεσμένοι υδρογονάνθρακες :

Περιλαμβάνουν τα κανονικά και διακλαδισμένα αλκάνια με δομή  $C_nH_{2n+2}$  (αλειφατικά) και κυκλικά αλκάνια με δομή  $C_nH_{2n}$  (αλεικυκλικές ενώσεις), τα οποία κυμαίνονται σε μήκος αλυσίδας από έναν άνθρακα έως και πάνω από 40 άνθρακες. Οι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες είναι συνήθως τα συστατικά που υπάρχουν σε αφθονία στο αργό πετρέλαιο.

➤ Αρωματικοί υδρογονάνθρακες :

Περιλαμβάνουν τις μονοκυκλικές αρωματικές ενώσεις (π.χ. βενζόλιο, τολουόλιο και ξυλόλια) και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) (π.χ. ναφθαλίνιο, ανθρακένιο), οι οποίοι έχουν δύο ή περισσότερους συζυγείς αρωματικούς δακτυλίους με δομή  $C_nH_{2n-6}$ .

➤ Ρητίνες :

Περιλαμβάνουν τις πολικές ενώσεις που περιέχουν άζωτο, θείο και οξυγόνο (π.χ. πυριδίνες και θειοφαίνια). Αναφέρονται συχνά ως ενώσεις NSO.

➤ Ασφαλτένια :

Αποτελούνται από τις φτωχά χαρακτηρισμένες ενώσεις υψηλού μοριακού βάρους που περιλαμβάνουν τόσο υψηλού μοριακού βάρους όσο και φτωχά χαρακτηρισμένους υδρογονάνθρακες και NSOs. Τα μέταλλα όπως το νικέλιο, το βανάδιο και ο σίδηρος συνδέονται επίσης με τα ασφαλτένια.

### 2.2.3 Φυσικές ιδιότητες πετρελαίου

Οι πιο σημαντικές φυσικές ιδιότητες του πετρελαίου που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του στην εξόρυξη και την μεταφορά του αλλά και μετέπειτα στην επεξεργασία του είναι :

➤ Πυκνότητα :

Δύο τύποι εκφράσεων της πυκνότητας του πετρελαίου χρησιμοποιούνται συχνά: η ειδική πυκνότητα (specific gravity) και η πυκνότητα (API gravity) του American Petroleum Institute (API). Η ειδική πυκνότητα (specific gravity) είναι ο λόγος της μάζας μιας ουσίας στη μάζα του ισοδύναμου όγκου του νερού σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η πυκνότητα API (API gravity) ορίζει αυθαίρετα μια τιμή 10 για το καθαρό νερό στους 10 °C (60 F). Η πυκνότητα API (API gravity) μπορεί να υπολογιστεί από την ειδική πυκνότητα χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$API\ Gravity = \frac{141.5}{Specific\ Gravity\ (^{16^{\circ}C}/_{60^{\circ}F})} - 131.5$$

Τα πετρέλαια με μικρές πυκνότητες ή χαμηλές ειδικές πυκνότητες έχουν υψηλές API πυκνότητες. Το αργό πετρέλαιο έχει ειδική πυκνότητα με εύρος από 0,79 έως 1,00 (ισοδύναμες API πυκνότητες από 10 έως 48) [1]. Η πυκνότητα πετρελαίου είναι ένας σημαντικός δείκτης της σύνθεσης πετρελαίου που χρησιμοποιείται συχνά για να προβλέψει της συμπεριφοράς του στους αγωγούς.

➤ Ιξώδες:

Το ιξώδες είναι η ιδιότητα ενός ρευστού που περιγράφει πώς αντιστέκεται σε μια αλλαγή στη μορφή ή τη μετακίνηση. Όσο χαμηλότερο ιξώδες έχει ένα ρευστό, τόσο ευκολότερα ρέει. Το ιξώδες του πετρελαίου συσχετίζεται με τη σύνθεση του πετρελαίου και την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

➤ Σημείο Ροής (Pour Point):

Το σημείο ροής ενός πετρελαίου είναι η θερμοκρασία στην οποία γίνεται ημιστερεό ή σταματά να ρέει. Το σημείο ροής του αργού πετρελαίου κυμαίνεται από -57 °C έως 32 °C. Είναι ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό όσον αφορά την τύχη του πετρελαίου στα διάφορα στάδια μεταφοράς του λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών.

➤ Διαλυτότητα στο νερό:

Η διαλυτότητα του πετρελαίου στο νερό είναι εξαιρετικά χαμηλή και εξαρτάται από τη χημική σύνθεση του εν λόγω πετρελαϊκού υδρογονάνθρακα και τη θερμοκρασία. Για ένα χαρακτηριστικό αργό πετρέλαιο, η διαλυτότητα είναι

περίπου 30 mg/L . Τα πιο διαλυτά τμήματα πετρελαίου είναι οι χαμηλού μοριακού βάρους αρωματικές ουσίες όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο και το ξυλόλιο.

Τέλος υπάρχουν και άλλες φυσικές ιδιότητες του πετρελαίου όπως το σημείο ανάφλεξης, η πίεση ατμού, η επιφανειακή τάση και η προσκόλληση.

## 2.3 Το Φυσικό Αέριο

### 2.3.1 Σχηματισμός φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο είναι και αυτό ένα ορυκτό καύσιμο, όπως και το πετρέλαιο και ο άνθρακας. Όλα αυτά τα ορυκτά καύσιμα προέρχονται από κατάλοιπα φυτών και ζώων, καθώς και μικροοργανισμών που έζησαν πριν από εκατομμύρια χρόνια. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές θεωρίες για το πώς έχουν δημιουργηθεί τα ορυκτά καύσιμα. Η πιο διαδεδομένη λέει ότι δημιουργούνται όταν οργανική ύλη (όπως τα φυτικά και ζωικά κατάλοιπα) συμπιέζονται σε πολύ υψηλές πιέσεις και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το μεθάνιο που δημιουργείται με τις παραπάνω συνθήκες αναφέρεται ως θερμογενές μεθάνιο. Με τρόπο παρόμοιο με το σχηματισμό πετρελαίου, το θερμογενές μεθάνιο αποτελείται από οργανικά μόρια μαζί με ιλύ και ιζήματα. Με την πάροδο του χρόνου όλο και περισσότερη ιλύς, ίζημα και άλλες αποθέσεις συσσωρεύονται πάνω από την οργανική ύλη. Οι εναποθέσεις αυτές ασκούν πολύ μεγάλες πιέσεις στην οργανική ύλη με αποτέλεσμα τη συμπίεσή της. Η συμπίεση αυτή, σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες που απαντούν σε κάποια βάθη του φλοιού της γης, προκαλεί την αποδόμηση των δεσμών του άνθρακα μέσα στην οργανική ύλη. Όσο πηγαίνουμε βαθύτερα στον φλοιό της γης, τόσο αυξάνει η θερμοκρασία. Στις χαμηλότερες θερμοκρασίες παράγεται περισσότερο πετρέλαιο σε σχέση με το φυσικό αέριο. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, όμως, παράγεται περισσότερο φυσικό αέριο από ό,τι πετρέλαιο. Για το λόγο αυτό το φυσικό αέριο συνδέεται συνήθως με πετρέλαιο σε κοιτάσματα που βρίσκονται ένα με τρία χιλιόμετρα κάτω από την επιφάνεια της γης. Βαθύτερα κοιτάσματα περιέχουν συνήθως κυρίως φυσικό αέριο και σε πολλές περιπτώσεις καθαρό μεθάνιο.



Το φυσικό αέριο μπορεί, επίσης, να σχηματιστεί με τη διεργασία του μετασχηματισμού της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς. Το είδος αυτό του μεθανίου αυτού είναι γνωστό ως βιογενές μεθάνιο. Οι μικροοργανισμοί αυτοί διασπούν με χημικό τρόπο την οργανική ύλη και παράγουν μεθάνιο. Συναντώνται σε περιοχές κοντά στην επιφάνεια της γης, όπου υπάρχουν ανοξικές συνθήκες. Ακόμα, ζουν στα έντερα πολλών ζώων, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου. Ο σχηματισμός μεθανίου με αυτόν τον τρόπο συνήθως συμβαίνει κοντά στην επιφάνεια της γης και το παραγόμενο μεθάνιο συνήθως χάνεται στην ατμόσφαιρα. Κάτω από ειδικές συνθήκες όμως το εκλυόμενο μεθάνιο μπορεί να παγιδευτεί κάτω από τη γη, από όπου μπορεί να αντληθεί ως φυσικό αέριο. Ένα παράδειγμα βιογενούς μεθανίου είναι το μεθάνιο που σχηματίζεται σε χώρους απόθεσης απορριμμάτων, όπου παράγεται ένα αρκετά υψηλό ποσοστό μεθανίου (μαζί με άλλα αέρια) από την αποσύνθεση των απορριμμάτων.

Ένας τρίτος τρόπος με τον οποίο δημιουργείται μεθάνιο είναι μέσω μιας αβιογενούς διαδικασίας. Σε εξαιρετικά μεγάλα βάθη κάτω από τον φλοιό της γης υπάρχουν αέρια πλούσια σε υδρογόνο και μόρια άνθρακα. Καθώς τα αέρια αυτά βαθμιαία ανεβαίνουν προς την επιφάνεια της γης, μπορεί να αντιδράσουν με άλλα ορυκτά που επίσης βρίσκονται εκεί, απουσία οξυγόνου. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να οδηγήσει σε μια αντίδραση σχηματισμού στοιχείων και συστατικών που συναντώνται στην ατμόσφαιρα (όπως άζωτο, οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, αργό και νερό). Αν οι πιέσεις που ασκούνται πάνω στα αέρια αυτά είναι αρκετά υψηλές, καθώς αυτά κινούνται προς την επιφάνεια της γης, μπορεί να σχηματιστούν κοιτάσματα από μεθάνιο, όπως και στην περίπτωση του θερμογενούς μεθανίου [Πηγή <http://naturalgas.org>]

### 2.3.2 Χημική σύσταση φυσικού αερίου

Όπως είναι γνωστό το φυσικό αέριο είναι ένα εύφλεκτο μίγμα που αποτελείται από αέριους υδρογονάνθρακες. Αν και το κύριο συστατικό είναι το μεθάνιο, μπορεί επίσης να συμπεριλαμβάνει αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο. Η σύσταση του φυσικού αερίου μπορεί να διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό από γεώτρηση σε γεώτρηση. Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζονται οι τυπικές συγκεντρώσεις των συστατικών του φυσικού αερίου πριν από τον καθαρισμό του.

Πίνακας 2-1 Τυπικά όρια περιεκτικότητας συστατικών φυσικού αερίου

Τυπική σύνθεση του φυσικού αερίου		
Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	70 – 90%
Αιθάνιο	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0 – 20%
Προπάνιο	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0 – 20%
Βουτάνιο	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0 – 20%
Διοξείδιο του Άνθρακα	CO <sub>2</sub>	0 – 8%
Οξυγόνο	O <sub>2</sub>	0 – 0.2%
Άζωτο	N <sub>2</sub>	0 – 5%
Υδρόθειο	H <sub>2</sub> S	0 – 5%
Ευγενή Αέρια	A, He, Xe, Ne	ίχνη

## Κεφάλαιο 3

### 3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ ΡΟΩΝ

Η γνώση μας και η κατανόηση για τη ροή πολυφασικών μειγμάτων σε αγωγούς είναι σε πολύ διαφορετικό στάδιο ανάπτυξης. Αν και η ροή πολλών φάσεων εμφανίζεται σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες, οι μέθοδοι μεταφοράς πολυφασικών μιγμάτων μέσω αγωγών έχει αναπτυχθεί με ταχείς ρυθμούς τις τελευταίες δεκαετίες. Οι τελευταίες εξελίξεις οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία πετρελαίου, καθώς είναι πλέον δυνατή η μεταφορά μη χωρισμένων μειγμάτων αερίων-πετρελαίου-νερού σε μεγάλες αποστάσεις.

Σήμερα είναι διαθέσιμα περισσότερο αξιόπιστα μοντέλα που περιγράφουν τις πολυφασικές ροές και που βοηθούν τόσο στην πρόβλεψη των ρυθμών παραγωγής, όσο και στην αξιολόγηση των εναλλακτικών τρόπων μεταφοράς, αποφεύγοντας τα προβλήματα με τη δημιουργία επικαθίσεων αλάτων, κηρών, ασφατενίων ή σωματιδίων. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται επίσης για να παρέχουν στοιχεία σε σχέση με το πρόβλημα της διάβρωσης των μεταλλικών αγωγών.

Η απλούστερη πολυφασική ροή είναι η διφασική ροή υγρού-αερίου, την οποία θα πραγματευτούμε κυρίως σε αυτήν την εργασία, αν και θα γίνει συζήτηση και για τη ροή υγρού-υγρού. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των καθεστώτων ροής που εμφανίζονται σε διφασικές ροές, καθώς και παρουσίαση ορισμένων μοντέλων που περιγράφουν τη ροή, κυρίως όσων θα χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Ως καθεστώς ροής (flow regime/flow pattern) ορίζεται η διαφορετική γεωμετρία που παίρνει η διεπιφάνεια μεταξύ δύο φάσεων.

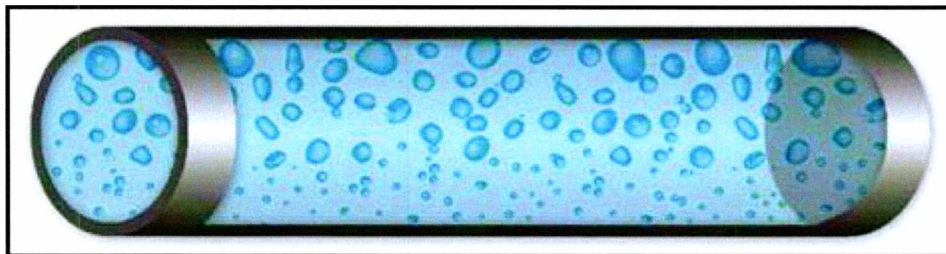
### 3.1 Καθεστώτα Ροής Πολυφασικών Ροών

#### 3.1.1 Διφασική ροή υγρού – αερίου

Τα καθεστώτα της διφασικής ροής σε οριζόντιους αγωγούς είναι αρκετά όμοια με αυτά που επικρατούν και στους κατακόρυφους αγωγούς, αν και είναι πιο σύνθετα λόγω του γεγονότος ότι η βαρύτητα παίζει καθοριστικό ρόλο. Εξαιτίας της βαρύτητας η υγρή φάση τείνει να συγκεντρωθεί στο κάτω μέρος του αγωγού, ενώ το αέριο στο επάνω, χωρίς όμως να έχουμε απόλυτη συμμετρία. Παρακάτω παρουσιάζονται οι επικρατέστερες και αποδεκτές περιοχές ροής που παρατηρούνται στους αγωγούς, αλλά και γενικά κατά την ροή πολυφασικών μιγμάτων, και παρατίθενται τα σχήματα διφασικής ροής αερίου – υγρού τα οποία προέρχονται από το βιβλίο του Bratland [4].

##### ➤ Ροή με Φυσαλίδες (Dispersed Bubble Flow)

Η ροή με φυσαλίδες χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διεσπαρμένων φυσαλίδων στη συνεχή υγρή φάση και παρατηρείται σε σχετικά υψηλές παροχές της υγρής φάσης. Οι φυσαλίδες τείνουν να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού, ενώ σε ιδιαίτερα μεγάλες παροχές των δύο φάσεων η κατανομή τους γίνεται ομοιόμορφη και σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται ως αφρός.



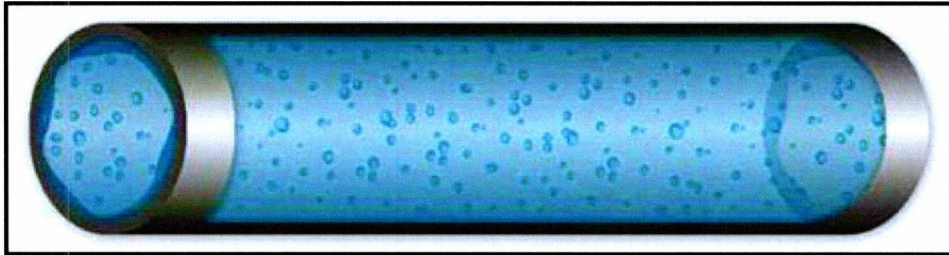
Σχήμα 3-1. Ροή με Διασπαρμένες Φυσαλίδες (Dispersed Bubble Flow)

##### ➤ Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)

Η δακτυλιοειδής ροή είναι παρόμοια με την αντίστοιχη ροή που παρατηρείται στη κατακόρυφη ροή, με τη σημαντική διαφορά ότι η υγρή στιβάδα πλέον δεν είναι συμμετρική γύρω από τον αγωγό λόγω της βαρύτητας. Εμφανίζεται για πολύ μεγάλες



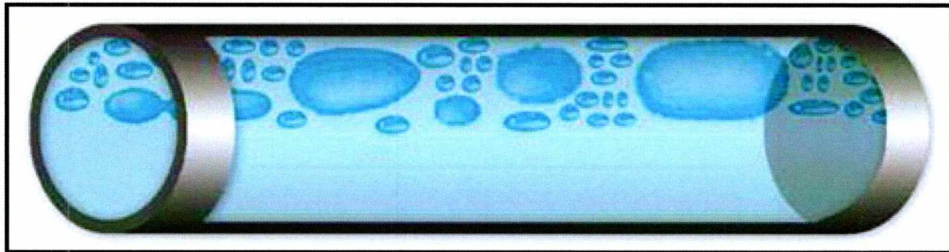
παροχές της αέριας μάζας. Σχεδόν πάντα στη δακτυλιοειδή ροή, μέρος του υγρού βρίσκεται συμπαρασυρόμενο από την αέρια φάση με τη μορφή σταγονιδίων.



Σχήμα 3-2. Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)

➤ **Ήπια Διαλείπουσα ροή (Plug Flow)**

Η ροή αυτή συνίσταται από διαμήκεις φυσαλίδες (elongated bubbles), οι οποίες ρέουν στο επάνω τμήμα του αγωγού. Διαφοροποιείται από την έντονα διαλείπουσα ροή από το σχήμα της κεφαλής της φυσαλίδας.

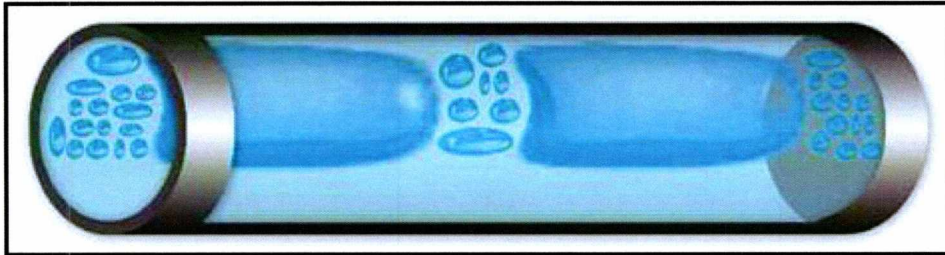


Σχήμα 3-3. Ήπια Διαλείπουσα ροή (Plug Flow)

➤ **Έντονα Διαλείπουσα Ροή (Slug Flow)**

Χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών (slugs) από τον αγωγό, οι οποίες κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Οι υγρές αυτές μάζες μπορεί να περιέχουν και να παρασύρουν πολυάριθμες φυσαλίδες αέριου. Η διαλείπουσα ροή είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη για τις περισσότερες εφαρμογές, επειδή προκαλεί απότομες αυξήσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να δονούνται οι σωληνώσεις, να χρειάζονται μεγάλοι διαχωριστές κ.α. Έτσι είναι ιδιαίτερα σημαντικό για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές η

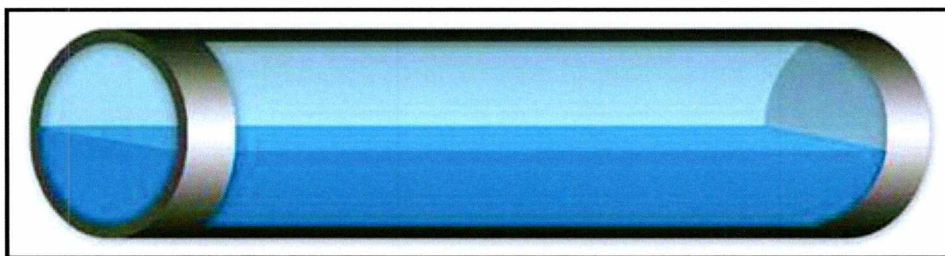
πρόβλεψη της μετάπτωσης σε αυτό το καθεστώς. Σε ορισμένες συνθήκες (και σε χαμηλές συνήθως διαμέτρους αγωγών) εμφανίζεται η *ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug)*. Και σε αυτό το καθεστώς εμφανίζονται υγρές μάζες, οι οποίες δεν ρέουν με την ταχύτητα του αέριου και έτσι δεν προκαλούν απότομες διαφορές πίεσης.



Σχήμα 3-4. Έντονα Διαλείπουσα Ροή (Slug Flow)

➤ **Διαστρωματωμένη Ροή (Stratified Flow)**

Το υγρό ρέει στο πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος. Σχηματίζεται για μικρές σχετικά παροχές των ρευστών. Η διεπιφάνεια είναι αρχικά λεία, ενώ με την αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης καλύπτεται με κύματα. Επίσης για μεγάλες ταχύτητες αερίου μπορεί το υγρό να «αναρριχάται» στα τοιχώματα του σωλήνα και να υπάρχει εκνέφωση σταγονιδίων.

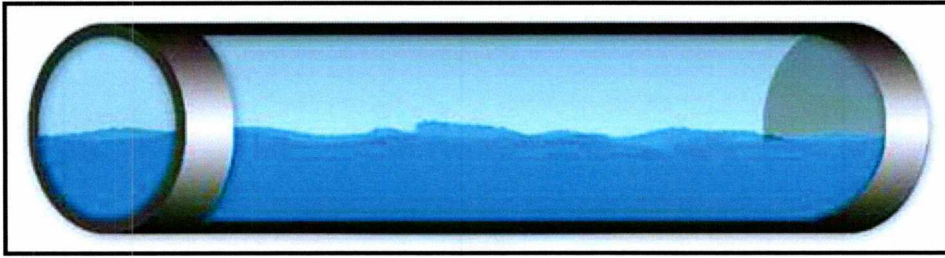


Σχήμα 3-5. Διαστρωματωμένη Ροή (Stratified Flow)

➤ **Διαστρωματωμένη με Κυματισμούς Ροή (Stratified Wavy Flow)**

Με μικρή αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης εμφανίζονται στη διεπιφάνεια τα πρώτα κανονικά κύματα, με μικρό μήκος και πλάτος κύματος, τα οποία παρατηρούνται για σχετικά στενό εύρος ταχυτήτων της αέριας φάσης. Ουσιαστικά, αρχικά παρατηρούνται ως διαταραχές στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων.





Σχήμα 3-6. Διαστρωματωμένη με Κυματισμούς Ροή (Stratified Wavy Flow)

### 3.1.2 Διφασική ροή υγρού – υγρού

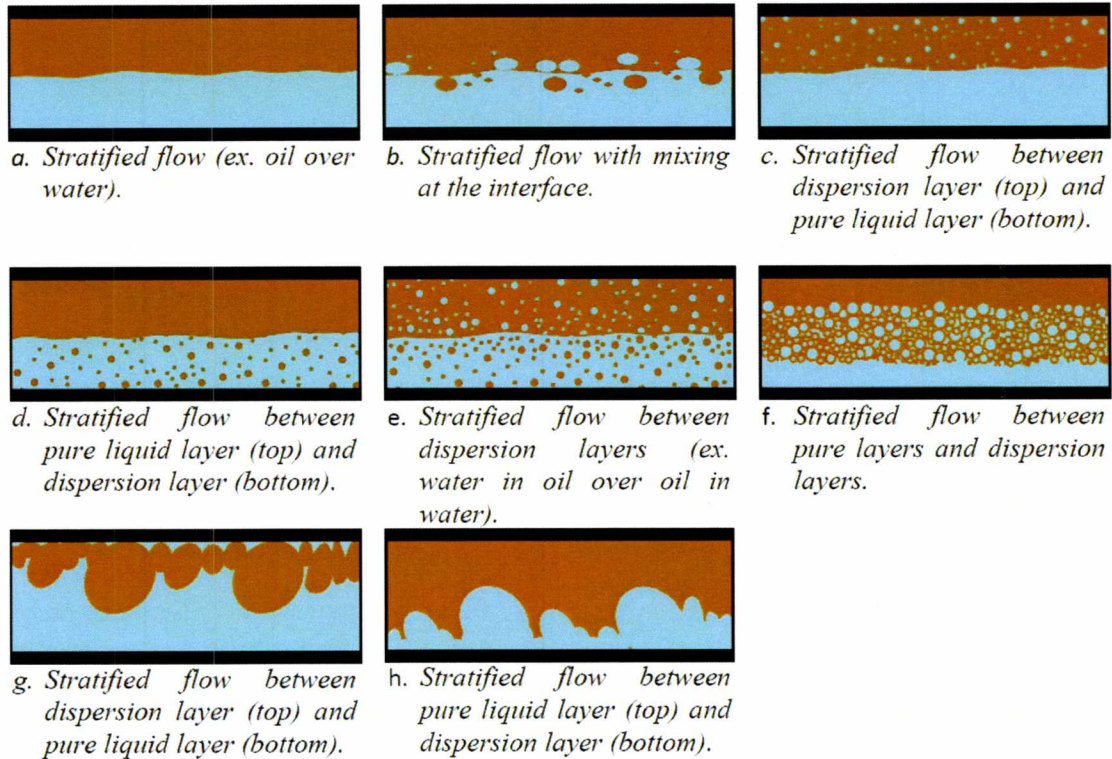
Ροές δύο μη αναμίξιμων υγρών, όπως το λάδι και το νερό, δεν έχουν διερευνηθεί στην ίδια έκταση όπως η ροή αερίου-υγρού. Η ροή υγρού-υγρού δύο φάσεων δεν είναι κατά κύριο λόγο διαφορετική από τη ροή του αερίου-υγρού δύο φάσεων, αλλά οι μικροί λόγοι των πυκνοτήτων και του ιξωδών το καθιστούν διαφορετικό και συνεπώς οι δύο φάσεις αναμιγνύονται με διαφορετικό τρόπο. Αυτό έχει συνέπεια κάποια μοντέλα που εξήχθησαν για η ροή αερίου-υγρού να μην ισχύουν για ροή υγρού-υγρού. Σε περίπτωση που τα δύο υγρά έχουν την ίδια πυκνότητα, τότε κανένα από τα δύο υγρά δεν έχει την τάση για να σχηματίσει το κατώτερο στρώμα σε διαστρωματωμένη ροή και τα καθεστώτα ροής γίνονται παρόμοια με αυτά που συναντώνται σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας. Όταν δεν υπάρχει επίδραση της βαρύτητας, τα καθεστώτα ροής γίνονται ανεξάρτητα της γωνίας κλίσης και διαστρωματωμένη ροή δεν μπορεί να υπάρξει. Επομένως, αντιλαμβανόμαστε ότι όσο πιο κοντά είναι οι πυκνότητες, τόσο λιγότερο επηρεάζεται η ροή από τη γωνία κλίσης. Από την άλλη πλευρά, όσο πιο διαφορετικές είναι οι πυκνότητες, τόσο περισσότερο η ροή τείνει να συμπεριφέρεται ως ροή αερίου-υγρού.

Οι πετρελαιοπηγές παράγουν συχνά μονοφασικό αργού πετρέλαιο στα αρχικά στάδια, αλλά είναι σύνηθες το φαινόμενο να εμφανίζεται νερό μετά από κάποιο χρονικό διάστημα της παραγωγής. Η περιεκτικότητα σε νερό μπορεί να είναι τόσο υψηλή όπως 90% ή και περισσότερο, καθιστώντας έτσι τις πετρελαιοπηγές μη αποδοτικές. Επίσης, η κατανόηση των κύριων μηχανισμών τόσο σε ροή σε σωλήνες αερίου-υγρού όσο σε ροή υγρού-υγρού είναι ένα καλό πρώτο βήμα προς την κατανόηση της ροής τριών φάσεων αερίου-πετρελαίου-νερού.



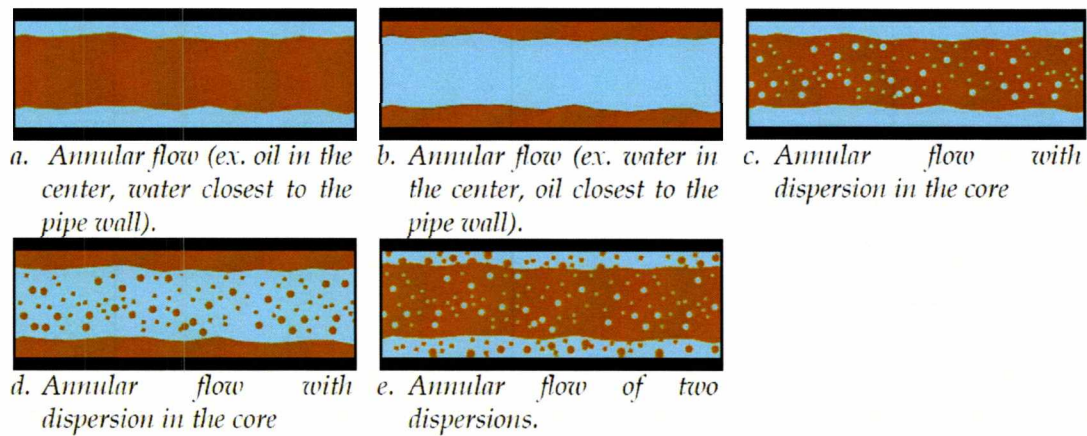
Από μία πρακτική άποψη, το κύριο ζήτημα στην πρόβλεψη της πτώσης πίεσης σε ομοιογενή ροή υγρού-υγρού είναι η μοντελοποίηση του ιξώδους του μίγματος. Αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ποια από τις δύο φάσεις είναι συνεχής (νερό-σε-πετρέλαιο ή πετρέλαιο-σε-νερό), και αυτό έχει και πάλι να κάνει με το φαινόμενο αναστροφής της φάσης.

Όσον αφορά τα καθεστάτα ροής, η ροή υγρού-υγρού δείχνει μια μεγαλύτερη διαφοροποίηση από ότι βλέπουμε στη ροή αερίου-υγρού, και αυτό το κάνει πιο δύσκολο να καθοριστεί ποιο καθεστώς της ροής είναι πιθανόν να σχηματιστεί σε μια δεδομένη κατάσταση. Στα Σχήματα 3.7-3.9 παρουσιάζονται τα κυριότερα καθεστάτα ροής που παρατηρούνται σε ροή υγρού-υγρού (Bratland [5]) και τα οποία βασίζονται κυρίως στην Brauner [6]. Στη διαστρωματωμένη ροή (Σχήμα 7.3) κάθε φάση μπορεί να εμφανιστεί είτε ως καθαρή μορφή ή ως διασπορά στο εσωτερικό του άλλου υγρού. Στο Σχήμα 3.7f βλέπουμε ότι αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κάτι αρκετά παρόμοιο με τη ροή τριών φάσεων, ακόμη και αν αρχίσουμε με ένα μίγμα από μόνο δύο υγρά.



Σχήμα 3-7. Διάφορα είδη διαστρωματωμένης ροής που παρατηρούνται σε οριζόντια ροή υγρού-υγρού [5].



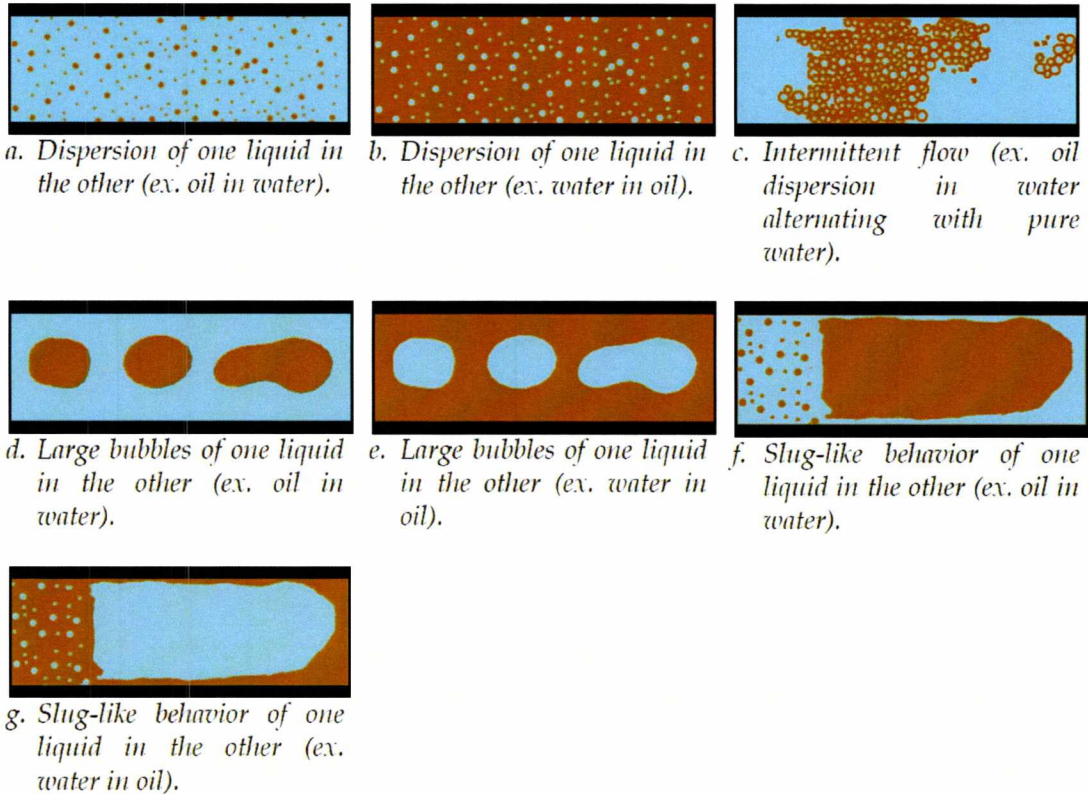


Σχήμα 3-8. Διάφορα είδη δακτυλιοειδούς ροής που παρατηρείται σε οριζόντια υγρού-υγρού ροής [5].

Όταν μελετάμε τα Σχήματα 3.7–3.9, παρατηρούμε ότι ένα από τα δύο υγρά μπορεί να είναι η συνεχής φάση, ενώ η άλλη φάση να είναι η ασυνεχής. Η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη μπορεί να είναι αρκετά αυθόρμητη και ονομάζεται αναστροφή φάσης. Αυτό μπορεί να συμβεί υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας όπου μια διασπορά πετρελαίου σε νερό μπορεί να αλλάξει σε διασπορά νερού σε πετρέλαιο ή αντιστρόφως.

### 3.1.3 Τριφασική Ροή

Αν και έχουν υπάρξει αρκετές προσπάθειες για τη μελέτη της τριφασικής ροής αέρα-νερού-πετρελαίου σε οριζόντιους και κεκλιμένους αγωγούς τα τελευταία χρόνια, ωστόσο η προσπάθεια αυτή δεν ήταν συστηματική. Έτσι κατά την διάρκεια των τελευταίων 20 ετών οι επιστήμονες έχουν δείξει αρκετό ενδιαφέρον για την περαιτέρω μελέτη της τριφασικής ροής και, ειδικότερα, για την κατασκευή χαρτών καθεστώτων ροής (flow pattern maps). Οι Acikgoz et al [7] κατασκεύασαν πειραματικό χάρτη καθεστώτων ροών που περιελάμβανε 10 καθεστώτα. Αργότερα, οι Lee et al [8] πρότειναν έναν χάρτη όπου όλες οι ροές ήταν χωρισμένες σε τρεις κύριες κατηγορίες: διαστρωματωμένη, διαλείπουσα και δακτυλιοειδή ροή. Οι ροές αυτές είναι αντίστοιχες ροές που συμβαίνουν στη διφασική ροή αερίου-υγρού.



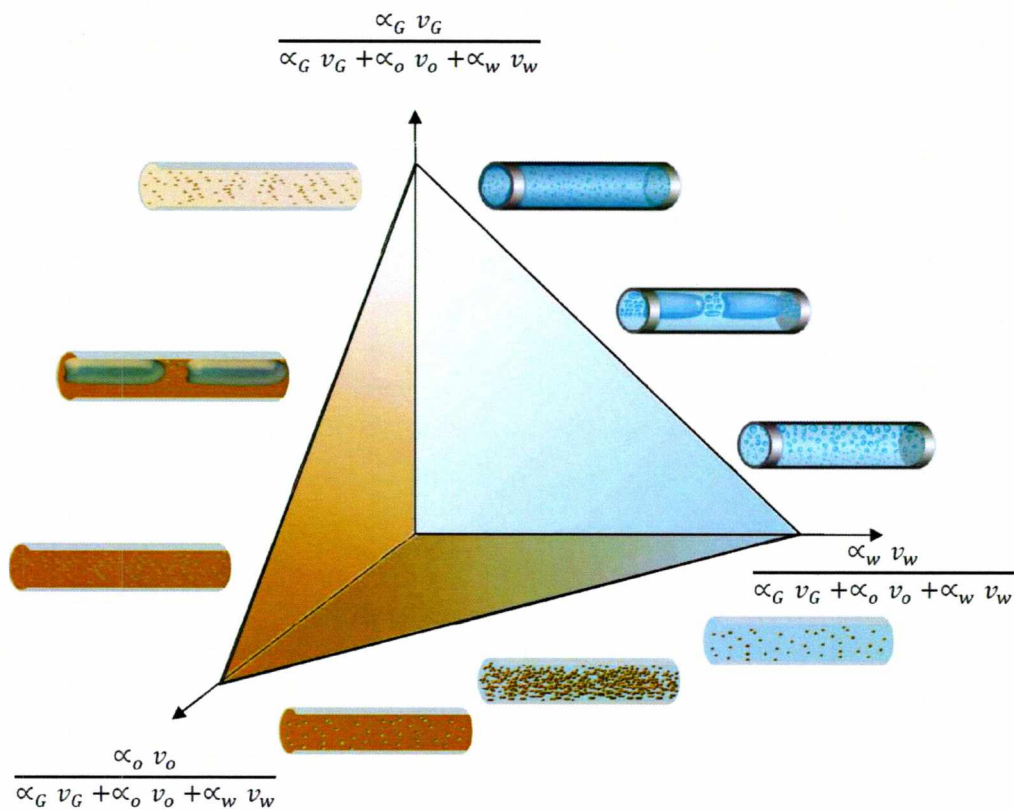
Σχήμα 3-9. Άλλα καθεστώτα ροής που παρατηρείται σε οριζόντια υγρού-υγρού ροής [5].

Σύμφωνα με τον Hewitt et al. [9] υπάρχουν τρεις παράγοντες για να καθοριστεί η κατάταξη των καθεστώτων ροής. Ο πρώτος παράγοντας είναι η κατανομή μεταξύ πετρελαίου και νερού στο εσωτερικό του υγρού μίγματος, ο δεύτερος παράγοντας είναι η συνέχεια μεταξύ του πετρελαίου και νερό και ο τρίτος παράγοντας είναι η χωρική κατανομή του αέρα και του υγρού στο μίγμα. Σύμφωνα με αυτή την κατάταξη, ο χάρτης καθεστώτων ροής περιλαμβάνει 15 πρότυπα ροής, τα οποία στην πραγματικότητα προέρχονται από το συνδυασμό ροής αέρα-νερού και πετρελαίου-νερού .

Η τριφασική ροή συναντάται πιο συχνά ως μίγμα φυσικού αερίου, πετρελαίου και νερού. Η παρουσία της άμμου ή άλλων σωματιδίων μπορεί να οδηγήσει στη ροή τεσσάρων φάσεων, ή μπορεί να έχουμε ροή τριών φάσεων με τα στερεά αντί για μία από τις άλλες φάσεις. Η παρουσία της άμμου έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τη ροή ή ακόμα και να μπλοκάρει την ροή που είναι η πιο συνηθισμένη κατάσταση. Αν έχουμε υψηλές ταχύτητες ροής, η άμμος μεταφέρεται γρήγορα έξω από το σύστημα και, επομένως, μπορεί να

αγνοηθεί η παρουσία της στα μοντέλα ροής. Αντί αυτού, λαμβάνεται υπόψη μόνο στις εκτιμήσεις που σχετίζονται με τη διάβρωση ή τη θέσπιση ελάχιστων ορίων ροής για να αποφευχθεί η συσσώρευση άμμου.

Η δημιουργία σχηματικών απεικονίσεων των καθεστώτων ροής στα τριφασικά συστήματα, όπως είναι οι απεικονίσεις για τη ροή του αερίου-υγρού, είναι αρκετά δύσκολη υπόθεση. Μερικοί συγγραφείς το έχουν προσπαθήσει, αλλά καταλήγουν με πολύ πολύπλοκες απεικονίσεις περιορισμένης ισχύος, με την εκπαιδευτική τους αξία να είναι υπό αμφισβήτηση. Είναι ίσως πιο βολικό να απεικονίζεται η ροή των τριών φάσεων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-10. Το διάγραμμα έχει τρισδιάστατη απεικόνιση, μία για κάθε φάση.



Σχήμα 3-10. Τριφασικό Διάγραμμα φυσικού αερίου – πετρελαίου - νερού για οριζόντιες σωληνώσεις. Οι εικόνες κατά μήκος των συνόρων δείχνουν κάποια (αν όχι όλα) από τα καθεστώτα ροής δύο φάσεων, όπως του πετρελαίου – φυσικού αερίου (αριστερά), του φυσικού αερίου-νερού (δεξιά), και του πετρελαίου-νερού (κάτω) [5].



Ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στο αέριο ως ο λόγος της φαινομενικής ταχύτητας ως προς το άθροισμα των φαινομενικών ταχυτήτων όλων των φάσεων. Ο λόγος της φαινομενικής ταχύτητας έχει οριστεί έτσι ώστε να γίνεται μονάδα για την καθαρή ροή αερίου. Για καθαρά υγρά (πετρέλαιο - νερό) η ροή αντιστοιχεί σε μία ευθεία γραμμή στο επίπεδο πετρελαίου-νερού, ενώ το κλάσμα του αερίου είναι μηδέν. Ομοίως, αν η περιεκτικότητα σε νερό είναι μηδέν, το σημείο λειτουργίας μας βρίσκεται κάπου σε μια γραμμή στο επίπεδο του φυσικού αερίου-πετρελαίου και ούτω καθεξής για μηδενική περιεκτικότητα σε πετρέλαιο. Σημεία λειτουργίας στο εσωτερικό του τριγώνου αντιστοιχούν σε ροή τριών φάσεων.

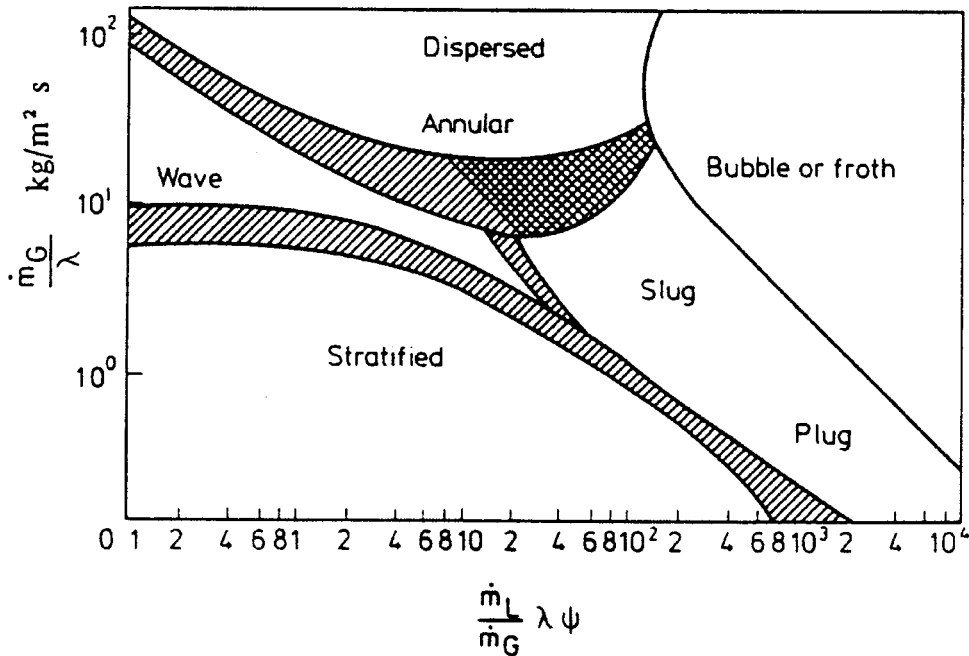
### 3.2 Χάρτες Καθεστώτων Ροής

Για την πρόβλεψη των καθεστώτων ροής στην διφασική ροή συχνά χρησιμοποιούνται οι χάρτες καθεστώτων ροής (flow regime maps) οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τόσο τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών όσο και την γεωμετρία των αγωγών. Ο πλέον διαδεδομένος χάρτης ροής είναι ο χάρτης του Baker [10], ο οποίος χρησιμοποιεί ως παραμέτρους τα :

$$\lambda = \left( \frac{\rho_G * \rho_L}{\rho_A * \rho_W} \right)^{0.5} \quad (3.1)$$

$$\psi = \frac{\sigma_w}{\sigma} \left[ \frac{\mu_L}{\mu_w} * \left( \frac{\rho_w}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (3.2)$$

όπου  $\rho$ ,  $\sigma$  και  $\mu$  είναι αντίστοιχα η πυκνότητα, η επιφανειακή τάση και το ιξώδες, ενώ οι δείκτες G και L υποδεικνύουν την αέρια και την υγρή φάση αντίστοιχα και οι δείκτες A, W δηλώνουν την τιμή του αντίστοιχου μεγέθους του αέρα και του νερού σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Μια τροποποίηση του χάρτη του Baker (από τον Scott, 1963) παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9.

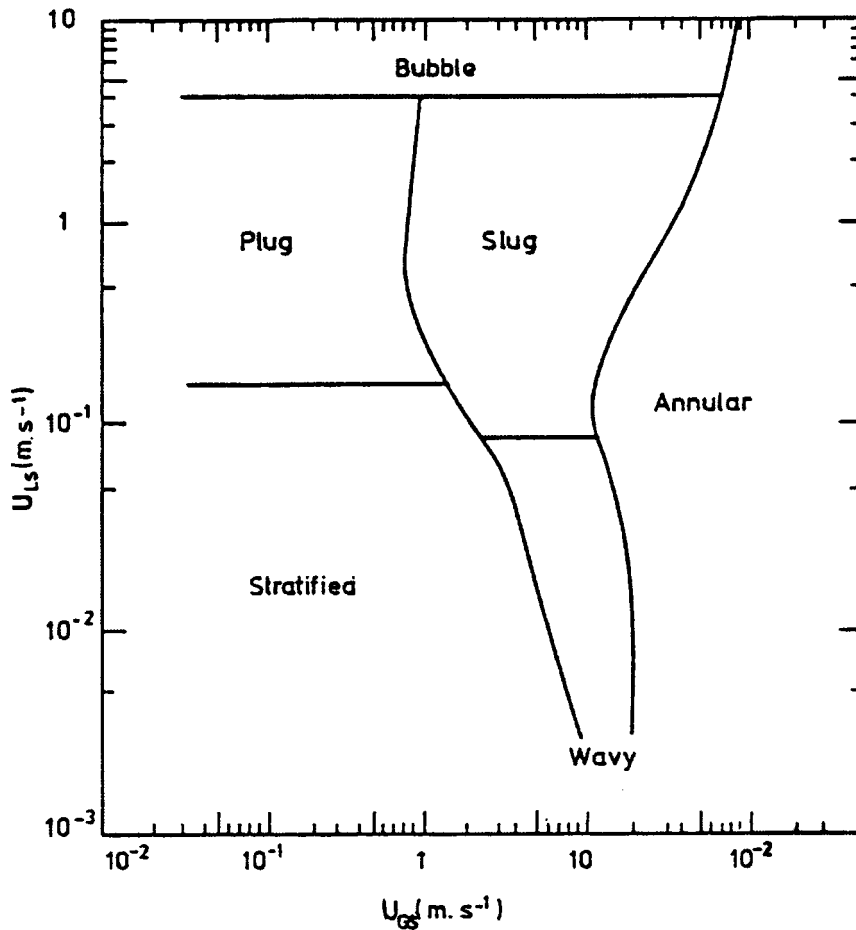


Σχήμα 3-11. Χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό του Baker (1954) όπως τροποποιήθηκε από τον Scott (1963).

Νεότερα όμως δεδομένα περιοχών ροής έχουν δείξει ότι ο χάρτης Baker δεν εκφράζει ικανοποιητικά ορισμένους παραμέτρους, όπως για παράδειγμα τη διάμετρο του αγωγού, πράγμα που οδήγησε στην δημιουργία άλλων εμπειρικών χαρτών. Ο πιο επιτυχημένος από αυτούς είναι ο χάρτης που αναπτύχθηκε από τους Mandhane et al [11] (Σχήμα 3.12), που βασίζεται σε μία πληθώρα πειραματικών δεδομένων.

### 3.3 Μαθηματικά μοντέλα περιγραφής της διφασικής ροής

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά μοντέλα υπολογισμού των βαθμίδων πίεσης σε διφασική ροή υγρών – αερίων, τα οποία βασίζονται λιγότερο ή περισσότερο σε πειραματικά δεδομένα, έχοντας έτσι εμπειρικό χαρακτήρα. Επιπλέον μερικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη το είδος της ροής (flow regime), δίνοντας και διάφορα κριτήρια για την εύρεση του αντίστοιχου είδους. Ωστόσο, όλα αυτά δεν έχουν γενική ισχύ και η αξιοπιστία τους είναι μικρή, στα όρια των διάφορων περιοχών, οπότε απαιτείται προσεκτική μελέτη των αποτελεσμάτων πριν την εφαρμογή τους.



Σχήμα 3-12. Εμπειρικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Mandhane et al [11].

Η διφασική ροή υγρών – αερίων είναι η πλέον πολύπλοκη από τα υπόλοιπα είδη διφασικής ροής, διότι συνδυάζει τα χαρακτηριστικά μιας μεταβλητής διαχωριστικής επιφάνειας και τα χαρακτηριστικά συμπίεσότητας της αέριας φάσης. Η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης στη διφασική ροή, του είδους της ροής, του κλάσματος κενού, των βαθμών πληρότητας και των συντελεστών τριβής αποτελούν σημαντικά αντικείμενα για το είδος της ροής. Οι παράμετροι των οποίων ο υπολογισμός έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η πτώση πίεση και το κλάσμα κενού.

Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα που βασίζονται σε απλουστευτικές παραδοχές για την κατανομή και τον τρόπο κίνησης των δύο φάσεων. Τέτοια μοντέλα είναι το μοντέλο της *ομογενούς ροής* (homogenous equilibrium flow model) και το

μοντέλο της διαχωρισμένης ροής (separated flow model) τα οποία περιγράφονται στις σημειώσεις των Ανδρίτσος και Μποντόζογλου [12].

### 3.3.1 Μοντέλο Ομογενούς Ροής

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό τα δύο συστατικά του μίγματος θεωρούνται ότι αποτελούν ένα ιδεατό ρευστό, του οποίου οι ιδιότητες αποτελούν ένα σταθμισμένο μέσο όρο των ιδιοτήτων των δύο φάσεων. Συνεπώς χρησιμοποιούμε την παραδοχή ότι οι δύο φάσεις έχουν ίδια ταχύτητα και υπάρχει μια αρκετά καλή και ομοιόμορφη ανάμιξη έτσι ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ως μία φάση. Αρχικά θα αναφέρουμε κάποιες χρήσιμες σχέσεις όπως :

Κλάσμα κενού

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left( \frac{\rho_G (1-x)}{\rho_L x} \right)} \quad (3.3)$$

Η μαζική παροχή κάθε φάσης

$$G_L = \rho_L u A_L \quad (3.4)$$

$$G_G = \rho_G u A_G \quad (3.5)$$

Η ολική μαζική παροχή

$$G = \frac{G_L + G_G}{A} = \frac{\rho_L u A_L + \rho_G u A_G}{A} = \rho u \quad (3.6)$$

Η πτώση πίεσης κατά την ροή μπορεί να υπολογιστεί με ολοκληρωτικό ισοζύγιο ορμής για το σύνολο των δύο ρευστών. Παρακάτω αναγράφονται αναλυτικά τα ισοζύγια συνέχειας, ορμής και ενέργειας από όπου θα προκύψει η εξίσωση της πτώσης πίεσης.

Ισοζύγιο συνέχειας

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (GA) = 0 \quad (3.7)$$

Ισοζύγιο Ορμής

$$A \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial (G^2 A / \rho)}{\partial z} = - \frac{\partial (pA)}{\partial z} - \rho g \cos \theta A - \tau_w P \quad (3.8)$$

Ισοζύγιο Ενέργειας

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( h + \frac{u^2}{2} + gz \cos \theta \right) \right] + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho u A \left( h + \frac{u^2}{2} + gz \cos \theta \right) \right] \\ = \frac{P}{A} q''_w + q''' + \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Όπου P είναι η περίμετρος, p η πίεση,  $q''_w$  είναι η ροή θερμότητας και  $q'''$  η παραγωγή θερμότητας ανά μονάδα όγκου του ρευστού.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 3.4 στην εξίσωση της ενέργειας θα πάρουμε :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (GAh) = \frac{P}{A} q''_w + q''' - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{G^3 A}{2\rho^2} \right) - gG \cos \theta - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{G^2}{2\rho} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.10)$$

Για μόνιμη διφασική ροή σε κυκλικό αγωγό σταθερής διατομής η εξίσωση ορμής γράφεται:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{4\tau_w}{D} + \frac{\partial(G^2/\rho)}{\partial z} + \rho g \cos \theta \quad (3.11)$$

Οι τρεις όροι στο δεξί μέλος της παραπάνω εξίσωσης αντιστοιχούν στην πτώση πίεσης εξαιτίας της τριβής,  $dp_F/dz$ , της επιτάχυνσης,  $dp_a/dz$ , και της βαρύτητας,  $dp_g/dz$ , αντίστοιχα. Έτσι η σχέση 3.9 θα γράφεται :

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\partial p_F}{\partial z} - \frac{\partial p_a}{\partial z} - \frac{\partial p_g}{\partial z} \quad (3.12)$$

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

$$\left( \frac{dp}{dz} \right)_F = \left( \frac{dp}{dz} \right)_{Lo} \varphi_{Lo}^2 \quad (2.13)$$

Ο όρος  $(dp/dz)_{Lo}$  παριστάνει την πτώση πίεσης σε μονοφασική ροή, υγρού με παροχή ίση με την συνολική παροχή, G, των δύο φάσεων. Ανάλογες σχέσεις προκύπτουν αν ληφθεί ως παροχή αναφοράς η παροχή μιας ή και των δύο φάσεων σε συνθήκες αερίου ή υγρού. Μία τιμή του πολλαπλασιαστή,  $\varphi_{Lo}^2$ , για την πτώση πίεσης λόγω τριβής από το ομογενές μοντέλο βρίσκεται, με τη χρήση του τύπου του Blasius (π.χ.  $f=0,079Re^{-0.25}$ ,  $Re=GD/\mu$ ) για το συντελεστή τριβής, ίση με :

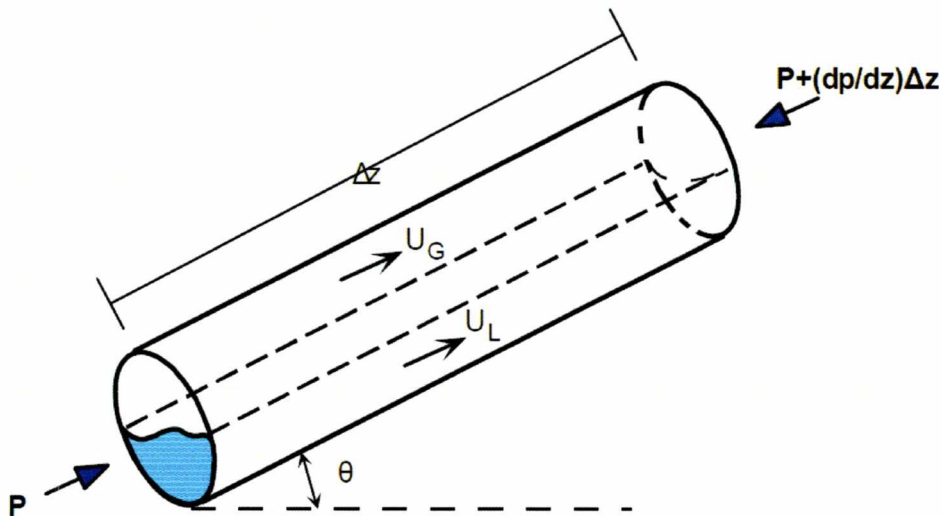


$$\varphi_{Lo}^2 = \left[ 1 - x \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) \right] \left[ 1 + x \frac{(\mu_L - \mu_G)}{\mu_G} \right]^{-1/4} \quad (2.14)$$

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

### 3.3.2 Μοντέλο Διαχωρισμένης Ροής

Το μοντέλο διαχωρισμένης ροής εξελίσσεται συνεχώς μετά το 1944 όταν οι Lockhart – Martinelli δημοσίευσαν την μελέτη τους στη διφασική ροή. Η διαφορά του με το ομογενές μοντέλο είναι ότι σε αυτό οι δύο φάσεις κινούνται με σταθερές, αλλά διαφορετικές μεταξύ τους ταχύτητες, οπότε το κλάσμα κενού (Σχέση 2.19) εξαρτάται από το λόγο ταχυτήτων  $s=U_G/U_L$ . Οι συνιστώσες της πτώσης πίεσης βρίσκονται πάλι με εφαρμογή ισοζυγίου ορμής για ολόκληρη τη διατομή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 3-13. Όγκος ελέγχου για το ισοζύγιο ορμής στο ομογενές και το διαχωρισμένο μοντέλο διφασικής ροής [12].

$$\begin{aligned} -\frac{dp}{dz} \Delta z \frac{\pi d^2}{4} - \tau \Delta z \pi d - \frac{\pi d^2}{4} \Delta z [\alpha \rho_G + (1 - \alpha) \rho_L] g \sin \theta \\ = \frac{\pi d^2}{4} \frac{d}{dz} [\alpha \rho_G u_G^2 + (1 - \alpha) \rho_L u_L^2] \Delta z \end{aligned} \quad (2.15)$$

Οι επιμέρους ταχύτητες μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της ολικής παροχής,  $G$ , και της ποιότητας,  $x$ , της ροής από τις σχέσεις :

$$u_G = \frac{xG}{\alpha\rho_G} \quad (2.16)$$

$$u_L = \frac{(1-x)G}{(1-\alpha)\rho_L} \quad (2.17)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις στην εξίσωση 2.13 προκύπτει ότι :

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau}{d} + [\alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L]g \sin\theta + G^2 \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2}{\alpha\rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right] \quad (2.18)$$

Παρατηρούμε ότι η ολική πτώση πίεσης κατανέμεται στις συνιστώσες τριβής, βαρύτητας και επιτάχυνσης. Ο όρος της επιτάχυνσης στη διαφορική του μορφή μπορεί να περιγράψει μεταβολές της ποιότητας λόγω εξάτμισης ή συμπύκνωσης. Για τον υπολογισμό των όρων της βαρύτητας και της επιτάχυνσης απαιτείται η γνώση του κλάσματος κενού. Ωστόσο, οι περισσότερες σχέσεις του κλάσματος κενού συνήθως αποτελούν συνάρτηση του λόγου ολίσθησης, ο οποίος εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες, της ποιότητας, τη μαζικής παροχής και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού. Μία θεωρία του Zivi [13] βασίζεται στην υπόθεση ότι οι δύο φάσεις καταλαμβάνουν τόσο χώρο ώστε η συνολική κινητική ενέργεια να γίνεται ελάχιστη. Με την υπόθεση αυτή υπολογίζονται οι σχέσεις :

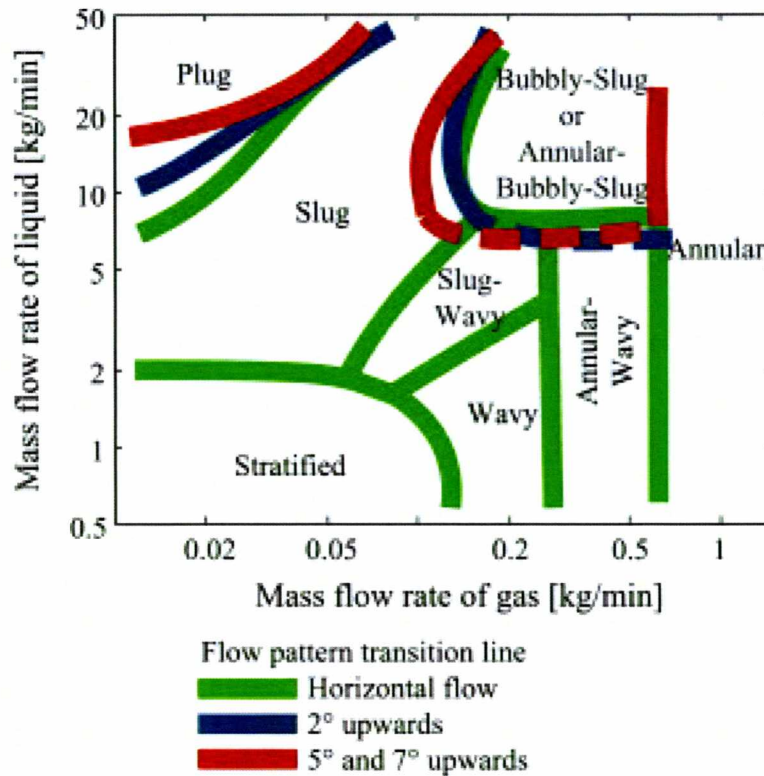
$$\frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{x}{1-x} \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{2/3} \quad (2.19)$$

$$s = \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{1/3} \quad (2.20)$$

### 3.4 Επίδραση της κλίσης του αγωγού

Η ροή σε αγωγούς που αποκλίνουν από την οριζόντια θέση είτε ελάχιστα είτε κατά πολύ παρουσιάζει διαφοροποιήσεις σε σχέση με αυτήν που υφίσταται στο εσωτερικό των αγωγών που βρίσκονται σε οριζόντια θέση. Η κλίση του αγωγού είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της ροής αλλά και στην μετάπτωση από το ένα πρότυπο στο άλλο. Ανάλογα με την φορά της ροής έχουμε δύο είδη κλίσης του

αγωγού, την κατωφερής και την ανωφερής. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.14 τα όρια των ροών μεταβάλλονται σε σχέση με την οριζόντια θέση.



Σχήμα 3-14. Επίδραση της γωνίας κλίσης αγωγού πάνω σε χάρτη καθεστώτος ροής (Ghajar and Kim, 2005)

Κατά τη ροή με κατηφορική κλίση του αγωγού η υγρή φάση κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με τις ίδιες συνθήκες ροής σε οριζόντιο αγωγό και το πάχος της υγρής στιβάδας είναι μικρότερο εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας. Κατά συνέπεια, ευνοείται η διαστρωματωμένη ροή, ενώ η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερες παροχές της υγρής. Ακόμη ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ροής σε αγωγούς με κατωφερή κλίση είναι το γεγονός ότι η λεία διαστρωματωμένη ροή υφίσταται μόνο σε αρκετά χαμηλές παροχές της υγρής φάσης (και σε ιδιαίτερα μικρές κλίσεις), ενώ σε ελαφρά μεγαλύτερες παροχές εμφανίζονται κύματα στη διεπιφάνεια.

Χαρακτηριστικό της ροής σε αγωγό με ανωφερή κλίση είναι η επικράτηση της διαλείπουσας ροής έναντι της διαστρωματωμένης, ενώ η καμπύλη μετάπτωσης ανάμεσα

σε αυτές τις δύο περιοχές εξαρτάται έντονα από την κλίση του αγωγού, ενώ ακόμα και για κλίσεις μικρότερες από 1ο η διαστρωματωμένη ροή περιορίζεται σε μια περιοχή με σχήμα καμπάνας. Ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι η αντιστροφή της ροής σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Οι Simmons and Hanratty [14] παρατήρησαν ότι σε χαμηλές ταχύτητες της αέριας φάσης η υγρή κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση και συγκεντρώνεται στην είσοδο του αγωγού, έως ότου το ύψος της υγρής στιβάδας αυξηθεί τόσο ώστε λόγω της αστάθειας Kelvin-Helmholtz να δημιουργηθεί ένα «slug». Ανάμεσα σε δυο διαδοχικά «slugs» μέσα στον αγωγό επικρατεί διαστρωματωμένη περιοχή ροής με την υγρή φάση να κινείται αντίθετα. Η αντιστροφή της ροής της υγρής φάσης συνεχίζεται μέχρι η ταχύτητα της αέριας φάσης να αυξηθεί τόσο, ώστε η διάτμηση της να είναι αρκετή για να κινήσει την υγρή φάση προς την έξοδο του αγωγού.

### 3.5 Μοντέλα υπολογισμού Πτώσης Πίεσης

#### 3.5.1 Μοντέλο των Lockhart – Martinelli

Το παρακάτω μοντέλο πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγάλη προσοχή διότι αδυνατεί να λάβει υπόψη τόσο την επιφανειακή τάση όσο και την επίδραση της παροχής ανά μονάδα επιφάνειας. Αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση σημαντικών αποκλίσεων μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Για την πτώση πίεσης λόγω τριβής γίνεται χρήση των πολλαπλασιαστών  $\Phi_L$  και  $\Phi_G$  οπότε ισχύει:

$$-\frac{dp_F}{dz} = \Phi_G^2 \left( \frac{dp_F}{dz} \right)_G = \Phi_L^2 \left( \frac{dp_F}{dz} \right)_L \quad (3.21)$$

όπου  $dp_F/dz$  η βαθμίδα πίεσης λόγω τριβής,  $\Phi_L$  ο πολλαπλασιαστής τριβής υγρής φάσης,  $\Phi_G$  ο πολλαπλασιαστής τριβής αέριας φάσης και  $(dp_F/dz)_G$  και  $(dp_F/dz)_L$  οι βαθμίδες πίεσης λόγω τριβής για ροή στον αγωγό μόνο αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα. Στη συνέχεια γίνεται χρήση της παραμέτρου  $X$  που ορίζεται ως εξής:

$$X^2 = \frac{\left( \frac{dp_F}{dz} \right)_L}{\left( \frac{dp_F}{dz} \right)_G} \quad (3.22)$$

Όπου πιο αναλυτικά έχουμε ότι :

$$\left(\frac{dp_F}{dz}\right)_L = \frac{2f_L \dot{m}^2 (1-x)^2}{D \rho_L} \quad (3.23)$$

$$\left(\frac{dp_F}{dz}\right)_G = \frac{2f_G \dot{m}^2 x^2}{D \rho_G} \quad (3.24)$$

Τα  $f_L$ ,  $f_G$  αποτελούν τους συντελεστές τριβής για υγρή και αέρια φάση και υπολογίζονται συναρτήσει των αντίστοιχων αριθμών Reynolds:

$$Re_G = \frac{\dot{m} x D}{\mu_G} \quad (3.25)$$

$$Re_L = \frac{\dot{m} (1-x) D}{\mu_L} \quad (3.26)$$

Οι Lockhart και Martinelli [15] παρουσίασαν τη σχέση τους σε μορφή διαγράμματος, προτείνοντας διάφορες καμπύλες, οι οποίες εξαρτώνται από το αν η μονοφασική ροή κάθε φάσης είναι στρωτή ή τυρβώδης. Ανάλογα προσδιορίζονται οι πολλαπλασιαστές. Μια προσέγγιση της γραφικής σχέσης των Lockhart – Martinelli, δόθηκε από τον Chisholm [16]:

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{x} + \frac{1}{x^2} \quad (3.27)$$

$$\Phi_G^2 = 1 + Cx + x^2 \quad (3.28)$$

όπου  $C$  είναι μια αδιάστατη παράμετρος, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη φύση των μονοφασικών ροών και προκύπτει από κατάλληλο πίνακα.

### 3.5.2 Μοντέλο των Baroczy – Chisholm

Το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα από τα πιο εξελιγμένα, εμπειρικά και υπολογιστικά μοντέλα. Επινοήθηκε αρχικά από τον Baroczy παρουσιάζοντας το βασικό μειονέκτημα της γραφικής απεικόνισης. Ο Chisholm [17] στη συνέχεια πρότεινε μια σχέση, ακριβούς προσέγγισης των καμπυλών του Baroczy, επεκτείνοντας έτσι την περιοχή εφαρμογής του μοντέλου:

$$\Phi_L^2 = 1 + (Y^2 - 1) \left[ Bx^{(2-n)/2} (1-x)^{(2-n)/2} + x^{2-n} \right] \quad (3.29)$$

όπου  $n$  ο εκθέτης στη σχέση υπολογισμού του συντελεστή τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds και  $B$  η παράμετρος που προκύπτει από τις σχέσεις:

$$B = \frac{55}{\dot{m}^{1/2}} \quad \text{για } 0 < Y < 9.5 \quad (3.30)$$

$$B = \frac{520}{Y\dot{m}^{1/2}} \quad \text{για } 0 < Y < 28 \quad (3.31)$$

$$B = \frac{1500}{Y^2\dot{m}^{1/2}} \quad \text{για } 28 < Y \quad (3.32)$$

όπου η μεταβλητή  $Y$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$Y^2 = \frac{\left(\frac{dP_F}{dz}\right)_G}{\left(\frac{dP_F}{dz}\right)_L} \quad (3.33)$$

Στη Σχέση (3.15)  $(dP_F/dz)_G$  είναι η πτώση πίεσης λόγω τριβής, που εμφανίζεται για μονοφασική ροή της αέριας φάσης, με την ίδια συνολική παροχή μάζας και ταχύτητας, με τις φυσικές ιδιότητες της αέριας φάσης. Ανάλογη είναι η ερμηνεία του όρου  $(dP_F/dz)_L$  όσο αφορά την υγρή φάση.

Οι δύο πτώσεις πίεσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$\left(\frac{dP_F}{dz}\right)_G = \frac{2f_G\dot{m}^2x^2}{D\rho_G} \quad (3.34)$$

$$\left(\frac{dP_F}{dz}\right)_L = \frac{2f_L\dot{m}^2(1-x)^2}{D\rho_L} \quad (3.35)$$

Οι συντελεστές τριβής  $f_G$  και  $f_L$  υπολογίζονται από τους αντίστοιχους αριθμούς Reynolds:

$$Re_G = \frac{\dot{m}xD}{\mu_G} \quad (3.36)$$

$$Re_L = \frac{\dot{m}(1-x)D}{\mu_L} \quad (3.37)$$

Η πτώση πίεσης λόγω τριβής δίνεται από την παρακάτω σχέση συναρτήσει του πολλαπλασιαστή  $\Phi_L$ , ο οποίος προκύπτει από τη σχέση (3.11).

$$\left(\frac{dP_F}{dz}\right) = \Phi_L^2 \left(\frac{dP_F}{dz}\right)_L \quad (3.38)$$

### 3.5.3 Μοντέλο του Friedel

Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει μια νέα προσέγγιση όσον αφορά τον υπολογισμό του πολλαπλασιαστή  $\Phi_L$  που έδωσε ο Friedel [18]. Απαιτεί προσοχή στην πρακτική εφαρμογή του εξαιτίας του ότι παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα. Ο συντελεστής  $\Phi_L$  είναι ο εξής:

$$\Phi_L^2 = E + \frac{3.24FH}{F_r^{0.045}We^{0.035}} \quad (3.39)$$

Όπου οι μεταβλητές της σχέσης (3.21) αναλύονται ως εξής:

$$E = (1 - x^2) + x^2 \frac{\rho_L f_G}{\rho_G f_L} \quad (3.40)$$

$$F = x^{0.78}(1 - x)^{0.24} \quad (3.41)$$

$$H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.91} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right) \quad (3.42)$$

$$F_r = \frac{\dot{m}^2}{gD\rho_{TP}^2} \text{ Αριθμός Froude} \quad (3.43)$$

$$We = \frac{\dot{m}^2 D}{\rho_{TP}\sigma} \text{ Αριθμός Weber} \quad (3.44)$$

όπου  $\sigma$  είναι η επιφανειακή τάση του υγρού και  $\rho_{TP}$  η πυκνότητα του διφασικού μίγματος που προκύπτει από τη σχέση:

$$\rho_{TP} = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L}\right)^{-1} \quad (3.45)$$

### 3.5.4 Μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck

Οι Müller-Steinhagen και Heck [19] πρότειναν μια συσχέτιση για τον προσδιορισμό της πτώσης πίεσης τριβής διφασικού μίγματος που στην ουσία είναι μια εμπειρική παρεμβολή μεταξύ της ροής του υγρού και του ατμού. Η πτώση πίεσης υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$\left(\frac{dP_F}{dz}\right) = G[1 - x]^{1/3} + Bx^3 \quad (3.46)$$

Όπου οι ανωτέρω αναγραφόμενοι όροι  $G$  ,  $B$  υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους :

$$G = A + 2[B - A]x \quad (3.47)$$

$$A = \left[\frac{dp}{dz}\right]_{L_0} \quad (3.48)$$

$$B = \left[\frac{dp}{dz}\right]_{G_0} \quad (3.49)$$

Σύμφωνα με τη μελέτη των Tribbe and Müller-Steinhagen [20], αυτή η μέθοδος δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους πρόβλεψης της πτώσης πίεσης. Το συμπέρασμα αυτό βγήκε από τα πειράματα που διεξήχθησαν για διάφορα είδη διαφασικών ροών όπως αέρας – πετρέλαιο , αέρας – νερό , νερό – ατμός και για κάποια άλλα ψυκτικά υγρά.



## Κεφάλαιο 4

### 4 Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με προβλέψεις εμπειρικών μοντέλων

Όπως έχει συζητηθεί στο Κεφάλαιο 3, η κατανόηση των κύριων μηχανισμών τόσο σε ροή σε σωλήνες αερίου-υγρού όσο σε ροή υγρού-υγρού είναι ένα καλό πρώτο βήμα για την κατανόηση της ροής τριών φάσεων, δηλ. αερίου-πετρελαίου-νερού. Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την σύγκριση των προβλέψεων από τα εμπειρικά μοντέλα πτώσης πίεσης που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 με πειραματικά δεδομένα που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία.

Όπως είχε αναφερθεί στην Εισαγωγή, στόχος της διπλωματικής είναι να μελετηθεί βασικά η διφασική ροή πετρελαίου – φυσικού αερίου και νερού – φυσικού αερίου, αλλά λόγω της αδυναμίας εύρεσης δεδομένων για την ροή αργού πετρελαίου – φυσικού αερίου στην ελεύθερη βιβλιογραφία, η εργασία περιορίζεται στην μελέτη της διφασικής ροή νερού – αέρα και νερού – φυσικού αερίου.

#### 4.1 Διφασική ροή νερού – αέρα

Στην ενότητα γίνεται σύγκριση των πειραματικών δεδομένων πτώσης πίεσης διφασικής ροής νερού – αέρα με τις προβλέψεις από τέσσερα εμπειρικά μοντέλα. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι των Lockhart – Martinelli [15], Chisholm [17], Friedel [18] και Müller-Steinhagen and Heck [19]. Οι συσχετίσεις αυτών των μοντέλων είναι ευρέως αποδεκτά και γενικά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διφασικής πτώσης πίεσης σε μεγάλους αγωγούς.

Αρχικά γίνεται σύγκριση των δεδομένων για διφασική ροή νερού – αέρα με τα δεδομένα από τον Andritsos [21], τα οποία παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα I. Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν προέρχονται από μετρήσεις που έγιναν σε αγωγό διαμέτρου  $D=0.02515$  m και αφορούν τέσσερα είδη καθεστώτων ροής την *Έντονα Διαλείπουσα (slug flow)*, την *Ψευδό-διαλείπουσα (pseudo-slug flow)*, την *Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)* και την

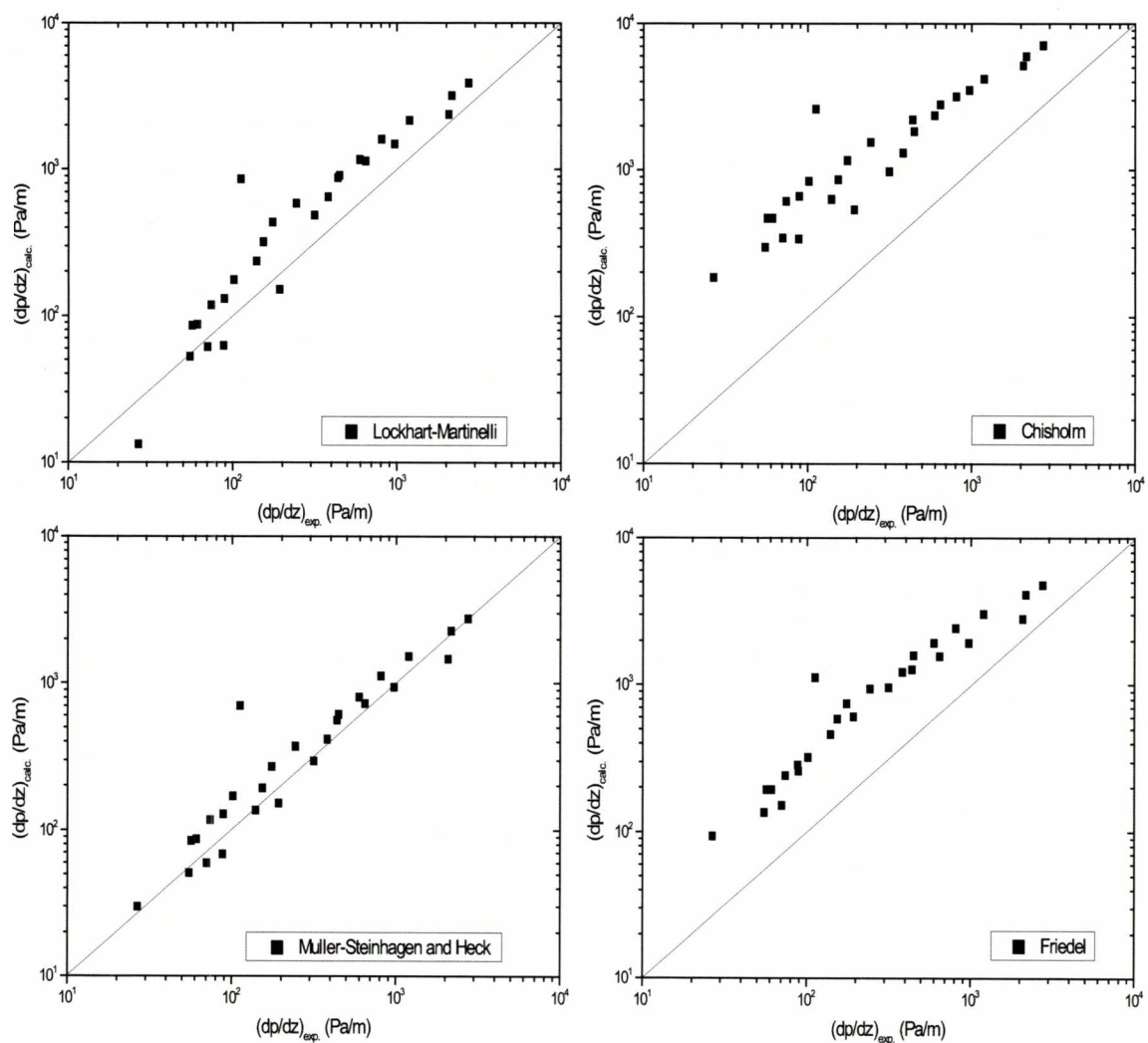
*Διατρωματομένη Ροή (Stratified Flow)* ροή. Ο σκοπός του διαχωρισμού των δεδομένων ανάλογα με το καθεστώς ροής είναι να διερευνηθεί εάν τα καθεστάτα ροής παίζουν ρόλο στα εμπειρικά μοντέλα, τα οποία, ως γνωστόν, δεν τα λαμβάνουν υπόψη. Ακολουθούν συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα των Hoogendoorn [22] και Badie et al. [23] για συστήματα υδρογονανθράκων και αέρα.

#### 4.1.1 Σύγκριση ως προς τα καθεστάτα ροής

##### Έντονα Διαλείπουσα (slug) - Ψευδό-διαλείπουσα (pseudo-slug) ροή

Το Σχήμα 4-1 παρουσιάζει τέσσερα γραφήματα που συγκρίνουν την πτώση πίεσης που υπολογίζεται από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα με τις πειραματικές τιμές, ενώ το Σχήμα 4-2 απεικονίζει σε ένα γράφημα όλα τα σημεία και δίνονται οι περιοχές σφάλματος  $\pm 50\%$ .

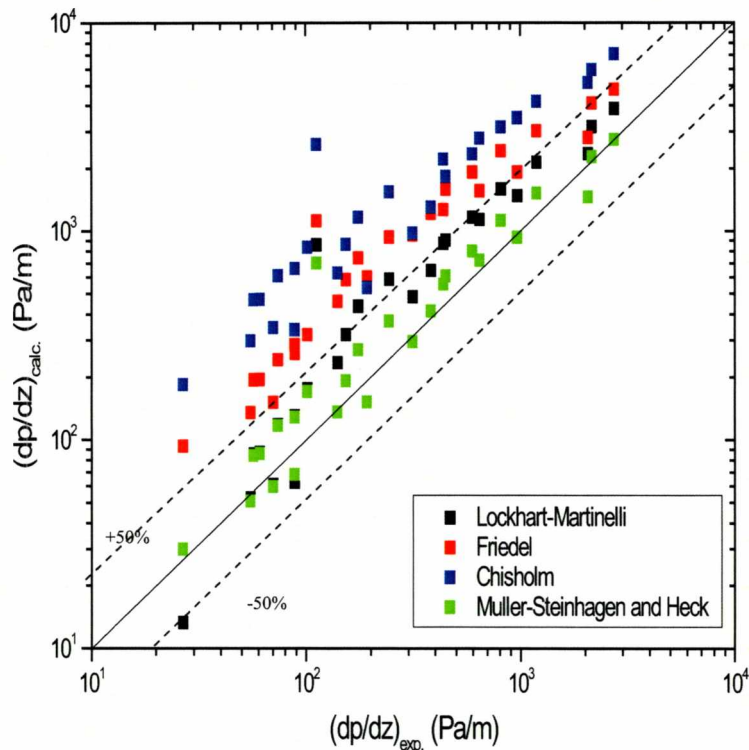
Όπως γίνεται φανερό από τις γραφικές απεικονίσεις των συγκρίσεων της πτώσης πίεσης, τα μοντέλα των Lockhart–Martinelli και Müller-Steinhagen and Heck προβλέπουν με καλύτερη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, το μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck έχει μικρή απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα της τάξης του 22% (όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4-1), το οποίο θεωρείται πολύ ικανοποιητικό. Από την άλλη το μοντέλο του Chisholm παρουσιάζει την μεγαλύτερη διαφοροποίηση από τις πραγματικές τιμές, οδηγώντας έτσι σε λανθασμένα αποτελέσματα. Βρίσκοντας την Μέση Απόλυτη Απόκλιση (MAD) ως ποσοστό από την πραγματική τιμή για το κάθε μοντέλο πρόβλεψης παρατηρούμε ότι με την μέθοδο Chisholm υπάρχει μια τεράστια απόκλιση με  $MAD=261\%$ , η οποία γίνεται άμεσα ορατή βεβαίως και στο Σχήμα 4-6. Στα ίδια επίπεδα κυμαίνεται και η απόκλιση του μοντέλου του Friedel με  $MAD=135\%$  σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Τέλος, το μοντέλο των Lockhart – Martinelli προβλέπει την πτώση πίεσης με  $MAD=62\%$  και σε χαμηλές ταχύτητες ροής οι προβλέψεις είναι μικρότερες από τις τιμές των πειραματικών δεδομένων, ενώ σε ενδιάμεσες και μεγάλες ταχύτητες οι προβλέψεις είναι μεγαλύτερες από τις πειραματικές τιμές.



Σχήμα 4-1. Σύγκριση ξεχωριστά των προβλέψεων πτώσης πίεσης από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα με τα πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για Διαλείπουσα και Ψευδο-διαλείπουσα ροή.

Πίνακας 1. Η Μέση Απόλυτη Απόκλιση των αποκλίσεων για δεδομένα Διαλείπουσας και Ψευδο-διαλείπουσας ροής.

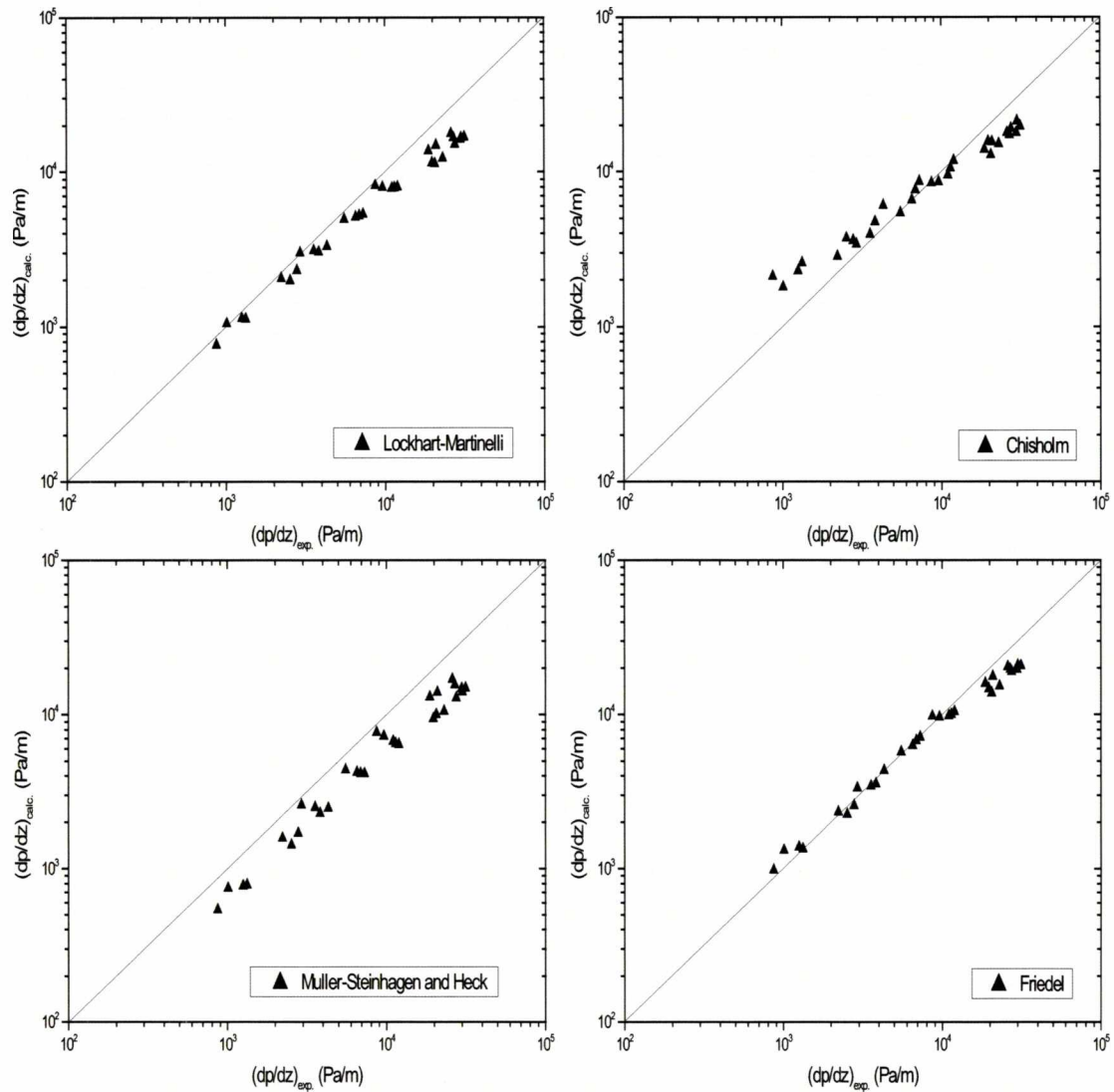
	Mean Absolute Deviation
Lockhart – Martinelli	62%
Friedel	135%
Chisholm	261%
Müller-Steinhagen & Heck	22%



Σχήμα 4-2. Σύγκριση όλων μαζί των προβλέψεων πτώσης πίεσης από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα με τα πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για Διαλείπουσα και Ψευδο-διαλείπουσα ροή.

### Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)

Οι πειραματικές τιμές και οι προβλέψεις για σημεία όπου επικρατεί η δακτυλιοειδής ροή παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-3 και 4-4. Από τα σχήματα αυτά γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης στην Δακτυλιοειδής Ροή από τα τέσσερα μοντέλα είναι μάλλον ικανοποιητικός. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα των Friedel και Chisholm δίνουν καλύτερα αποτελέσματα και με μικτότερη απόκλιση, γεγονός που τα καθιστά περισσότερο αξιόπιστα. Λαμβάνοντας υπόψη και το MAD, τότε επιβεβαιώνεται και η καταλληλότητα αυτών των δύο μοντέλων έναντι των αντίστοιχων των Lockhart – Martinelli και Müller-Steinhagen and Heck, αφού το μοντέλο του Friedel με  $MAD=23\%$  (Πίνακας 4-2) και το μοντέλο του Chisholm με  $MAD=28\%$  έχουν αισθητά μικρότερη απόκλιση με τα άλλα δυο. Το μοντέλο των Lockhart – Martinelli παρουσιάζει  $MAD=36\%$  και ακόμα μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζει το μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck με  $MAD=44\%$ .

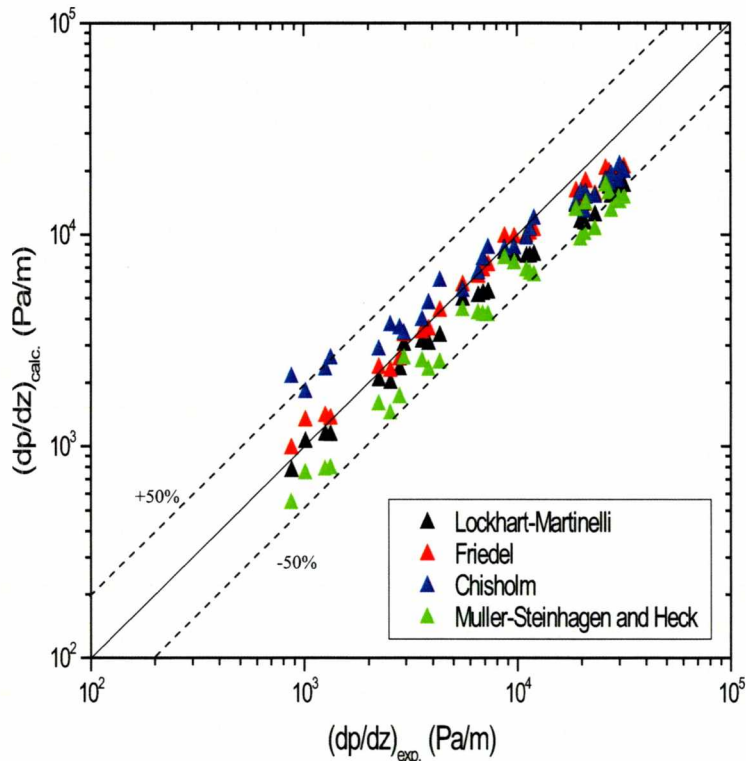


Σχήμα 4-3. Σύγκριση των προβλέψεων της πτώσης πίεσης ξεχωριστά από κάθε μοντέλο με τιμές πειραματικών δεδομένων του Andritsos (1986) για Δακτυλιοειδή Ροή.

Πίνακας 2. Μέση Απόλυτη Απόκλιση για την Δακτυλιοειδή Ροή (Annular Flow)

	Mean Absolute Deviation
Lockhart – Martinelli	36%
Friedel	23%
Chisholm	28%
Müller-Steinhagen & Heck	44%





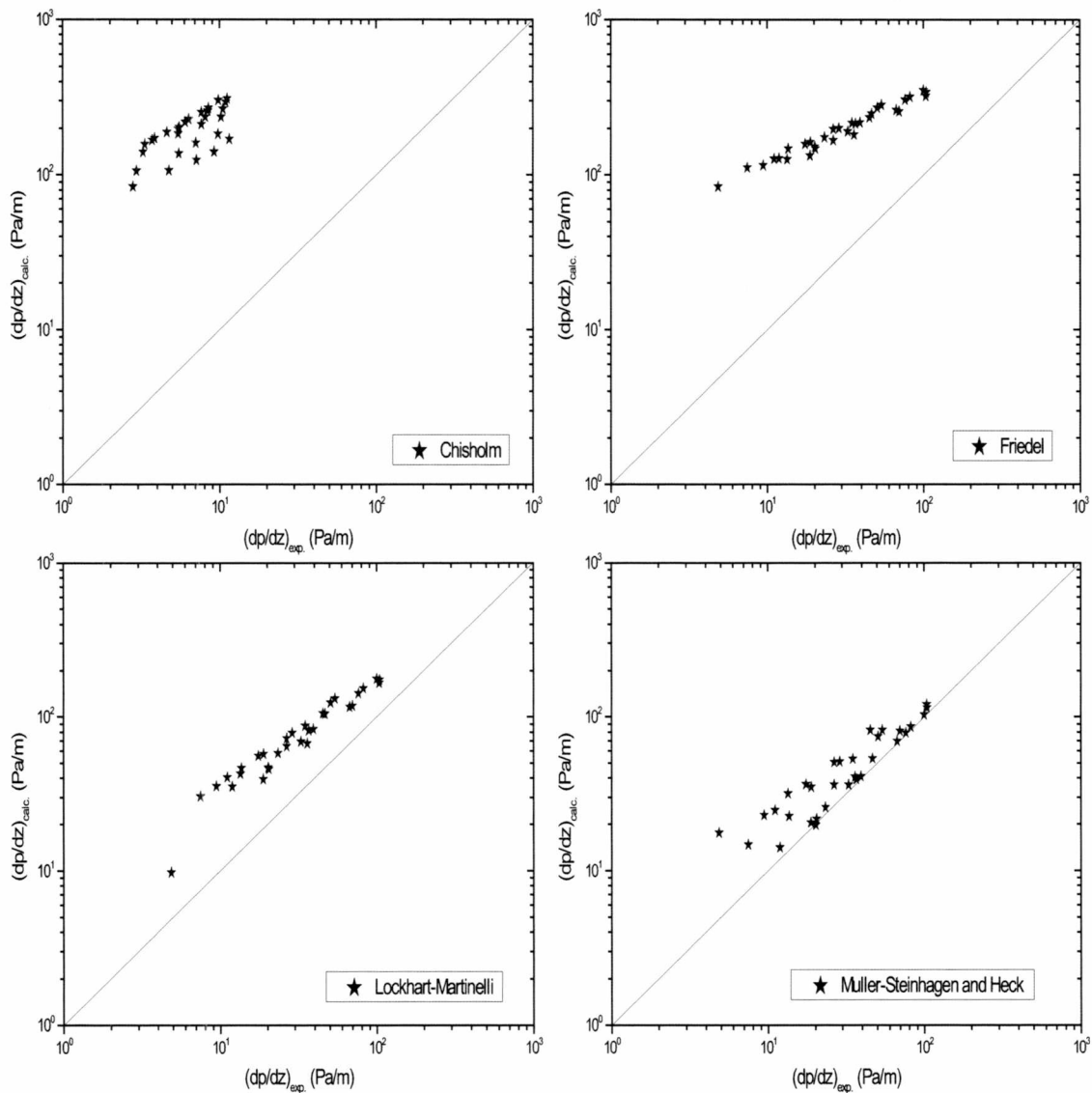
Σχήμα 4-4. Σύγκριση των προβλέψεων της πτώσης πίεσης συνολικά από τα τέσσερα μοντέλα που εξετάζονται με τιμές πειραματικών δεδομένων του Andritsos (1986) για Δακτυλιοειδή Ροή.

Αξίζει να διευκρινιστεί ότι οι τιμές της πτώση πίεσης που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα των Lockhart – Martinelli και Müller-Steinhagen and Heck είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές, ενώ με τα άλλα δύο μοντέλα έχουμε μικρότερες και μεγαλύτερες τιμές.

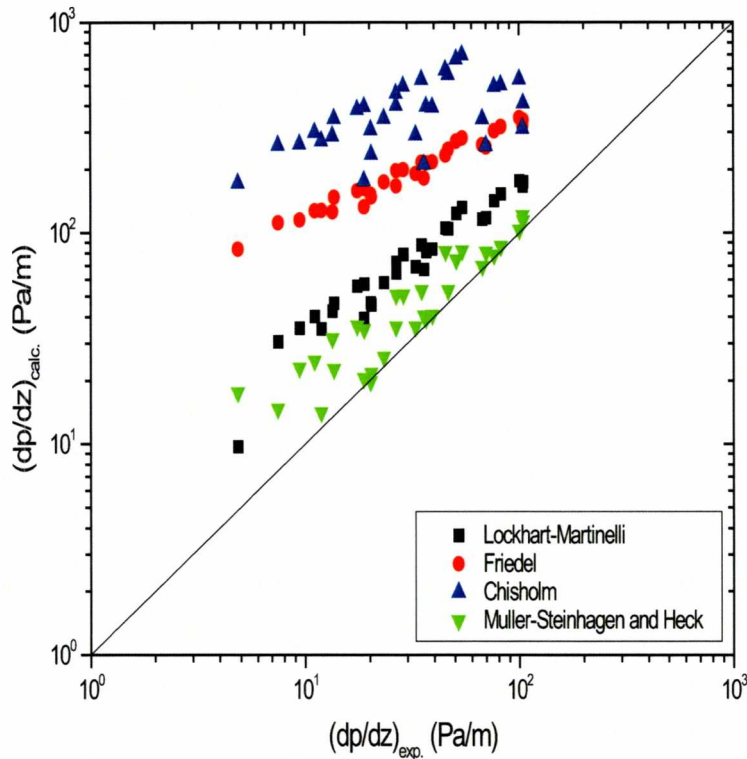
#### Διατρωματωμένη Ροή (Stratified Flow)

Στην Διατρωματωμένη ροή τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια με αυτά που βρέθηκαν και στην Διαλείπουσα Ροή. Παρατηρώντας το Σχήμα 4-5 γίνεται αντιληπτό ότι μόνο το μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck προβλέπει σχετικά ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα, ενώ οι προβλέψεις από τα άλλα μοντέλα παρεκκλίνουν πολύ και ειδικότερα το μοντέλο του Chisholm. Υπολογίζοντας και την Μέση Απόλυτη Απόκλιση

(MAD), γίνεται εμφανές ότι τα μοντέλα των Chishom με MAD=882% και του Friedel με MAD=421% αδυνατούν να δώσουν μια σωστή προσέγγιση της πτώσης πίεσης. Αντίθετα, το μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck με MAD=28% μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο και κατάλληλο για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε συνθήκες που επικρατεί διαστρωματωμένη ροή, αφού και το μοντέλο των Lockhart – Martinelli εμφανίζει MAD=111%.



Σχήμα 4-5. Σύγκριση των προβλέψεων της πτώσης πίεσης ξεχωριστά από κάθε μοντέλο με τιμές πειραματικών δεδομένων του Andritsos (1986) για Διαστρωματωμένη Ροή.



Σχήμα 4-6. Σύγκριση όλων μαζί των προβλέψεων πτώσης πίεσης από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα με τα πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για Διαστρωματωμένη Ροή.

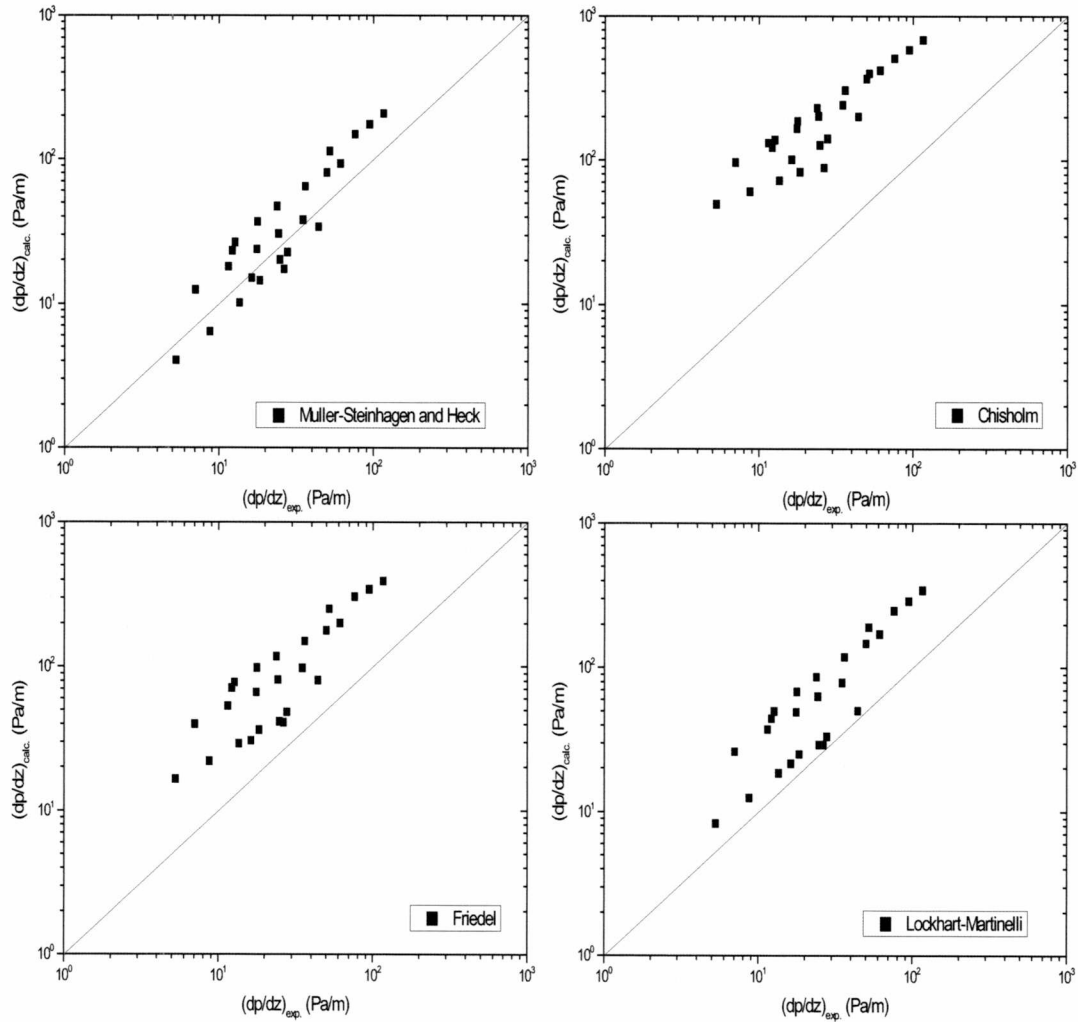
Πίνακας 3. Μέση Απόλυτη Απόκλιση για την Διαστρωματωμένη Ροή.

	Mean Absolute Deviation
Lockhart – Martinelli	111%
Friedel	421%
Chisholm	882%
Müller-Steinhagen & Heck	28%

**Δεδομένα του Hoogendoorn – Διαστρωματωμένη Ροή**

Σύγκριση των προβλέψεων από τα τέσσερα μοντέλα γίνεται και με τα πειραματικά δεδομένα του Hoogendoorn [22], όπως παρουσιάζονται στην [21], που αναφέρονται σε διαστρωματωμένη ροή αέρα με μίγμα υδρογονανθράκων (gas oil) με ιξώδες 2,36 mPa s σε αγωγό διαμέτρου 0.14 m. Οι συγκρίσεις παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-7 και 4-8, αν και αυτές θα μπορούσαν να παρουσιαστούν στην Ενότητα 4.3.

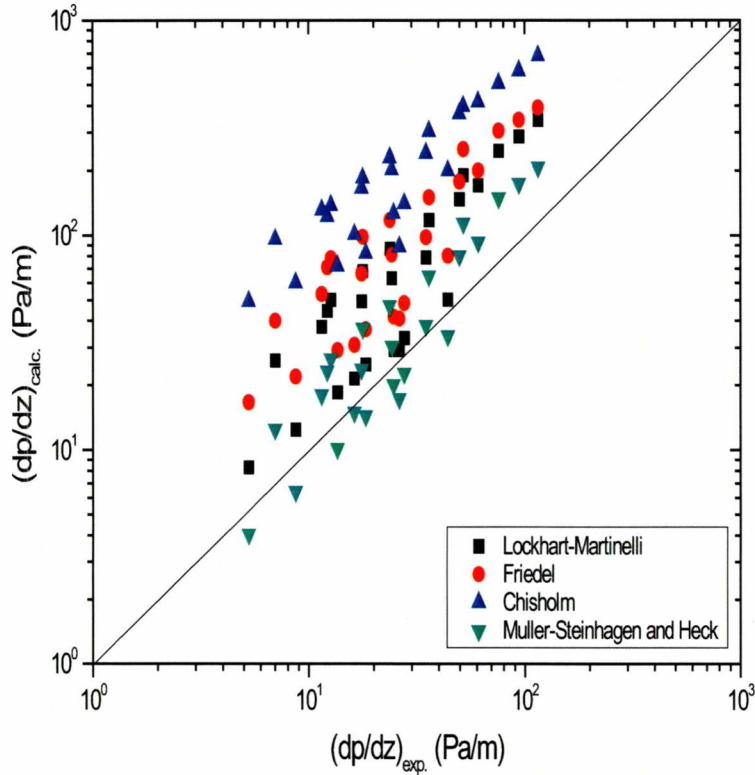




Σχήμα 4-7. Σύγκριση προβλέψεων πτώσης πίεσης με τιμές πειραματικών δεδομένων του Hoogendoorn (1959).

Όπως παρατηρούμε από τα Σχήματα 4-7 και 4-8 στα τρία από τα τέσσερα μοντέλα οι προβλέψεις της πτώσης πίεσης διαφέρουν σημαντικά από τα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, τα προβλεπόμενα αποτελέσματα έχουν πιο μεγάλες τιμές από αυτά που βρέθηκαν από τα πειράματα, ενώ μόνο το μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck προβλέπει κάποιες τιμές σχετικά κοντά στις πειραματικές. Η μέθοδος Chisholm δίνει προβλέψεις υψηλότερες από τις πραγματικές και με μεγάλη απόκλιση μάλιστα, δηλαδή με  $MAD=583\%$  (Πίνακας 4). Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και με την μέθοδο Friedel, καθώς οι προβλέψεις του παρουσιάζουν μέση απόλυτη απόκλιση περίπου ίση με  $MAD= 244\%$ . Σημειώνεται πάντως ότι και στις τέσσερις μεθόδους, σε χαμηλές ταχύτητες ροής οι

προβλέψεις της πτώσης πίεσης τείνουν να προσεγγίζουν καλύτερα τις πειραματικές τιμές. Τέλος, η μέθοδος των Müller-Steinhagen and Heck έχει την καλύτερη συμπεριφορά με απόκλιση MAD μόλις 64% και, συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί η πλέον αξιόπιστη μέθοδος, όπως ακριβώς και με τα δεδομένα για το σύστημα αέρας-νερό.



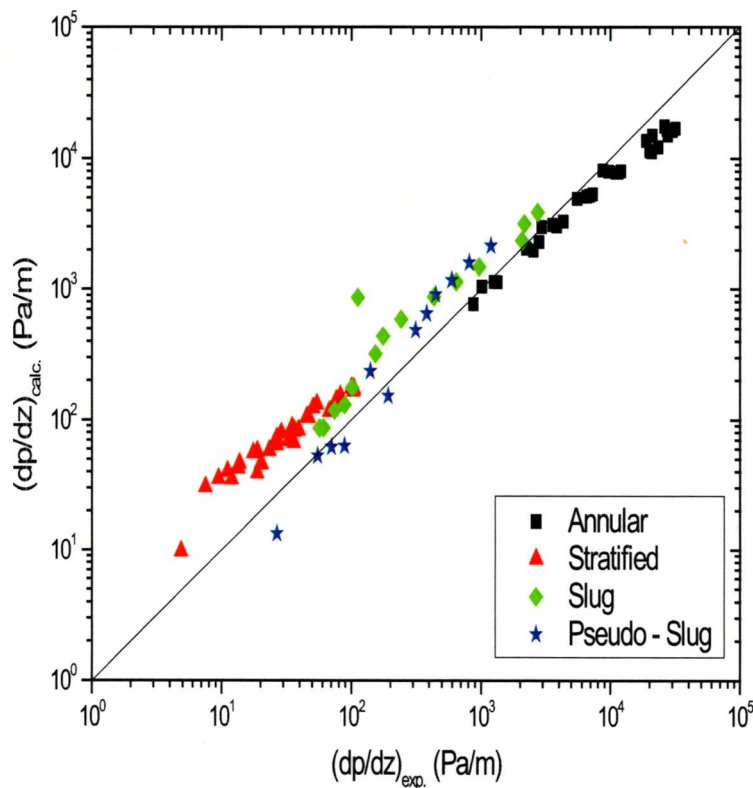
Σχήμα 4-8. Σύγκριση συγκεντρωτικά των προβλέψεων πτώσης πίεσης με τιμές από τα πειραματικά δεδομένα του Hoogendoorn (1959).

Πίνακας 4. Μέση Απόλυτη Απόκλιση για τα δεδομένα του Hoogendoorn (1959).

	Mean Absolute Deviation
Lockhart – Martinelli	168%
Friedel	244%
Chisholm	583%
Müller-Steinhagen & Heck	64%

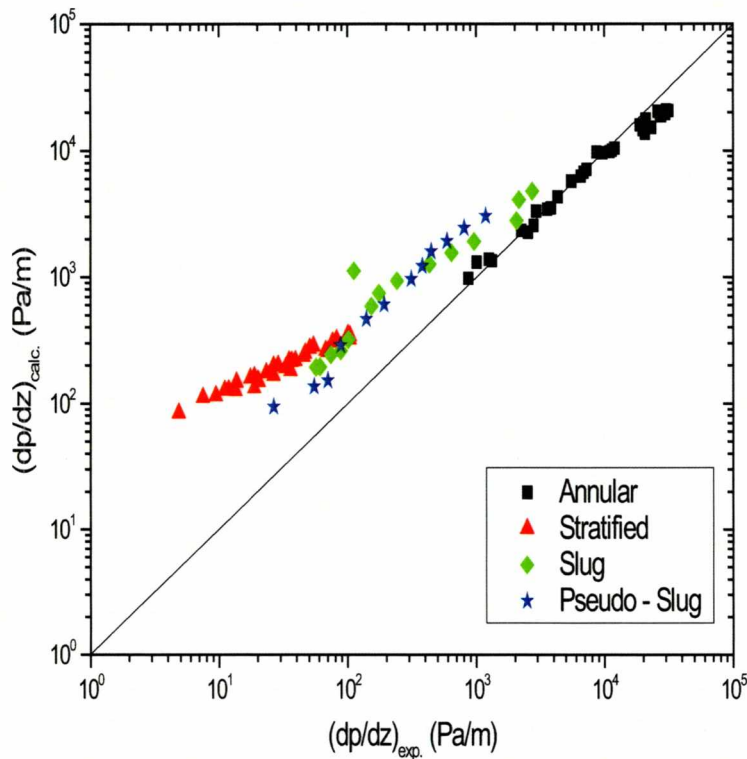
#### 4.1.2 Σύγκριση για κάθε μοντέλο

Στα Σχήμα 4-9 μέχρι 4-12 συγκρίνονται οι προβλέψεις από κάθε μοντέλο που θεωρήθηκε με όλα τα πειραματικά δεδομένα του Andritsos [21]. Από το Σχήμα 4-9 γίνεται αντιληπτό ότι το μοντέλο των Lockhart – Martinelli είναι μάλλον κατάλληλο για την πρόβλεψη της πτώσης πίεσης όταν επικρατεί Δακτυλιοειδής Ροή, καθώς οι τιμές που υπολογίζονται τείνουν να προσεγγίσουν τις πειραματικές με  $MAD=36\%$ . Δεν μπορεί να ειπωθεί με σιγουριά πως πρόκειται για το καταλληλότερο μοντέλο υπολογισμού για την πτώση πίεσης όταν επικρατεί Δακτυλιοειδής ροή, αλλά σίγουρα το μοντέλο αυτό δεν ενδείκνυται για χρήση στην περίπτωση της Διατρωματωμένης Ροής, αφού εμφανίζει  $MAD=111\%$ .



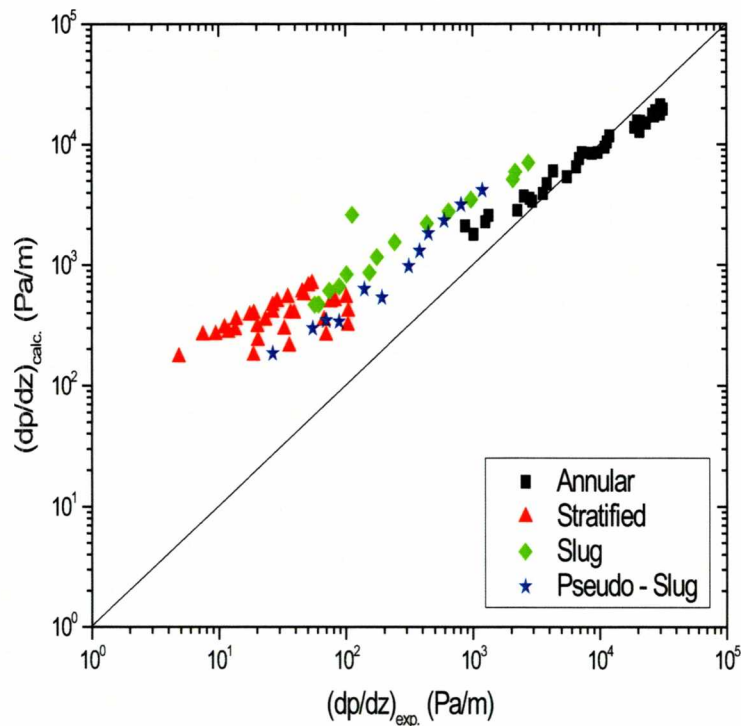
Σχήμα 4-9. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης και τιμών που υπολογίζονται το μοντέλο των Lockhart – Martinelli.

Επίσης, το Σχήμα 4-10 δείχνει ότι η μέθοδος του Friedel είναι κατάλληλη για να προβλέπει την πτώση πίεσης σε Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow), καθώς οι προβλεπόμενες τιμές τείνουν να προσεγγίσουν τις πειραματικές με MAD=23%. Μάλιστα, φαίνεται ότι είναι το καταλληλότερο μοντέλο όταν επικρατεί στο αγωγό Δακτυλιοειδής ροή. Από την άλλη μεριά, το μοντέλο αυτό δεν ενδείκνυται για χρήση όταν επικρατούν Διατρωματωμένη Ροή, Έντονα Διαλείπουσα και Ψευδό-διαλείπουσα ροή. Η μέθοδος αυτή αποτυγχάνει ιδιαίτερα στην περίπτωση της Διατρωματωμένης Ροής (MAD=421%).



**Σχήμα 4-10.** Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης και τιμών που υπολογίζονται το μοντέλο του Friedel.

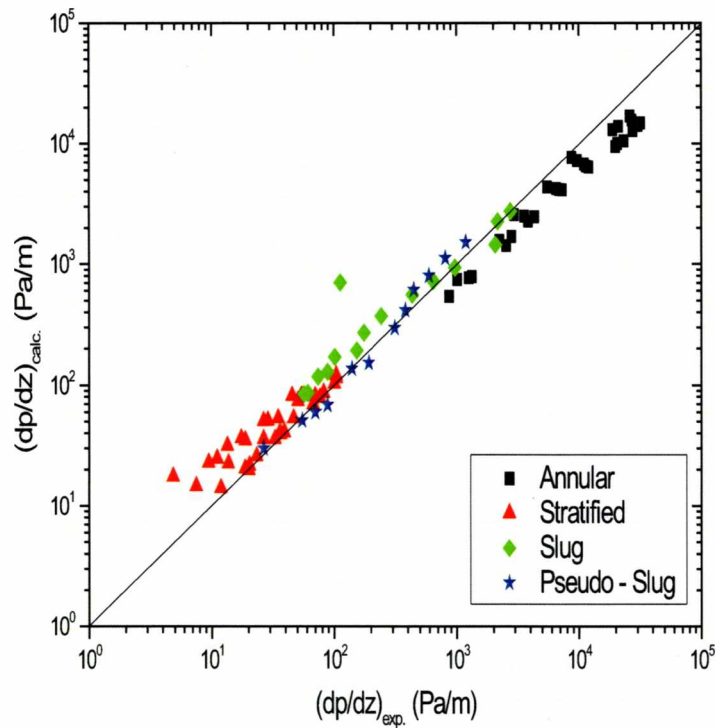
Από το Σχήμα 4-11 φαίνεται ότι η μέθοδος του Chisholm είναι κατάλληλη να προβλέπει την πτώση πίεσης σε Δακτυλιοειδής Ροή (με μια αποδεκτή απόκλιση MAD=28%), δεν ενδείκνυται όμως για χρήση όταν επικρατούν Διατρωματωμένη Ροή, Έντονα Διαλείπουσα και Ψευδό-διαλείπουσα ροή. Ιδιαίτερα για τη Διατρωματωμένη Ροή οι αποκλίσεις είναι τεράστιες.



Σχήμα 4-11. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης και τιμών που υπολογίζονται το μοντέλο του Chisholm.

Τέλος, το Σχήμα 4-12 φανερώνει ότι η μέθοδος των Müller-Steinhagen and Heck είναι η πλέον κατάλληλη για να προβλέψει την πτώση πίεσης σε όλες τις ροές που θεωρήθηκαν. Το μοντέλο των αυτό παρουσιάζει αποδεκτές αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές με  $MAD=22\%$  για την Έντονα Διαλείπουσα και Ψευδό-διαλείπουσα ροή, με  $MAD=44\%$  για τη Δακτυλιοειδή Ροή και με  $MAD=28\%$  για τη Διαστρωματωμένη Ροή. Επομένως, το μοντέλο αυτό είναι το πλέον αξιόπιστο από τα άλλα τρία και παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δίνει σωστές προβλέψεις και για τα τέσσερα είδη ροών, πράγμα που δεν συμβαίνει το ίδιο με τα υπόλοιπα μοντέλα.





Σχήμα 4-12. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης και τιμών που υπολογίζονται το μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck

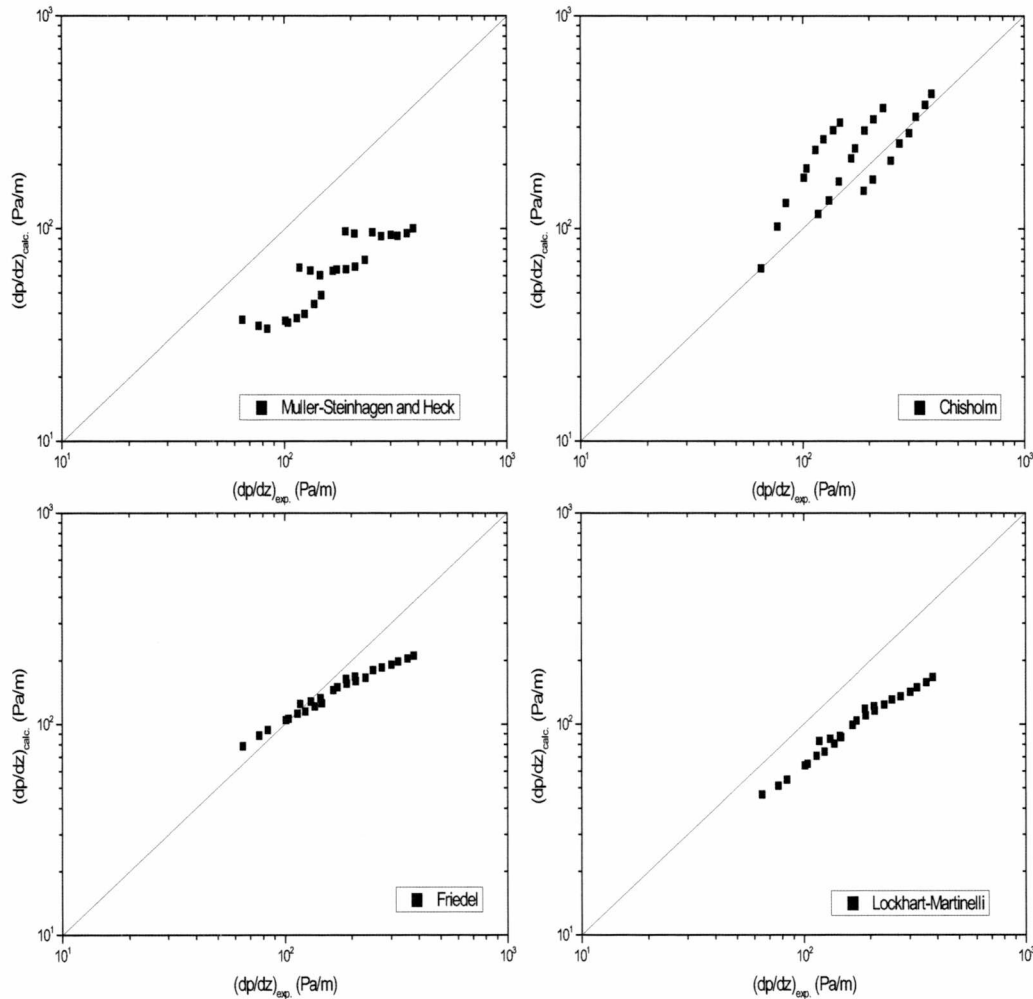
## 4.2 Διφασική ροή πετρελαίου – αέρα

Στην ενότητα αυτή γίνεται σύγκριση των πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης σε διφασική ροής πετρελαίου – αέρα με προβλέψεις από τα τέσσερα εμπειρικά μοντέλα. Τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από την εργασία των Badie et al. [23] και αφορούν σε ροή πετρελαίου «Shell Tellus 22» με πυκνότητα  $845 \text{ kg/m}^3$  και ιξώδες  $40 \text{ mPa s}$  και αέρα σε αγωγό με εσωτερική διάμετρο  $0,078 \text{ m}$ .

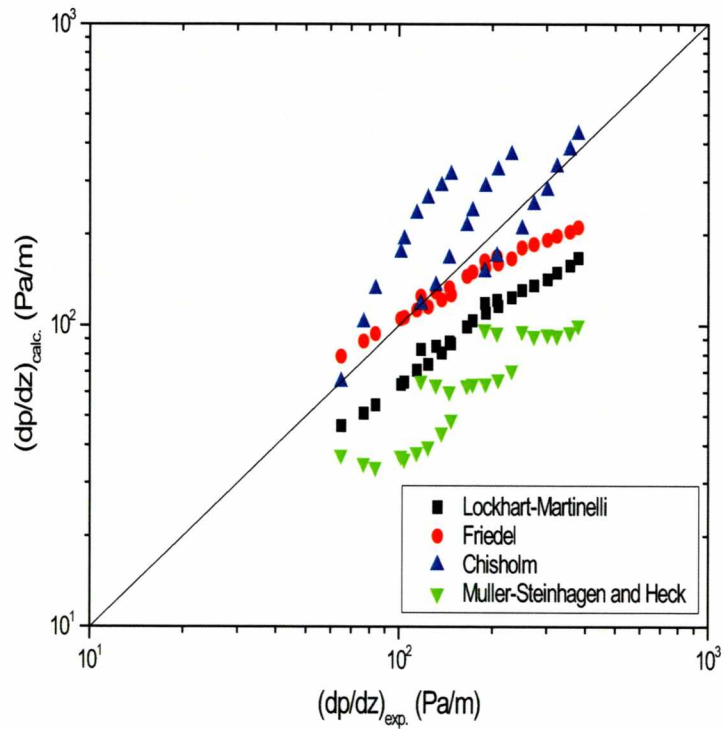
Στα Σχήματα 4-13 και 4-14 γίνεται εμφανές η αδυναμία των εμπειρικών μοντέλων για την πρόβλεψη της πτώσης πίεσης διφασικής ροής πετρελαίου – αέρα. Παρατηρώντας τα διαγράμματα φαίνεται ότι μόνο τα μοντέλα των Lockhart – Martinelli, Chisholm και Friedel εμφανίζουν κάποια λογικά αποτελέσματα, ενώ εκείνο των Müller-Steinhagen and Heck αδυνατεί ουσιαστικά και μόνο να προσεγγίσει την πτώση πίεσης. Η μέθοδος του Friedel αποδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα με μέση απόκλιση  $\text{MAD}=24\%$  που είναι και



αποδεκτό. Αυτό σημαίνει ότι μόνο η συσχέτιση του Friedel καταφέρνει να λειτουργεί αξιόπιστα, ενώ και το μοντέλο του Chisholm που έχει MAD=34% δεν είναι ικανοποιητικό. Τέλος, το μοντέλο των Lockhart – Martinelli δίνει αποτελέσματα με MAD=45% και παρατηρείται μια ομοιομορφία σε αυτά ενώ των Müller-Steinhagen and Heck με παρουσιάζει απόκλιση με MAD=65%



Σχήμα 4-13. Σύγκριση των προβλέψεων πτώσης πίεσης από κάθε εξεταζόμενο εμπειρικό μοντέλο με τιμές από τα πειραματικά δεδομένα των Badie et al. [23].



Σχήμα 4-14. Σύγκριση συγκεντρωτικά των προβλέψεων πτώσης πίεσης με τιμές από τα πειραματικά δεδομένα των Badie et al. [23].

Πίνακας 5. Μέση Απόλυτη Απόκλιση για διφασική ροή πετρελαίου - αέρα

	Mean Absolute Deviation
Lockhart – Martinelli	62%
Friedel	135%
Chisholm	261%
Müller-Steinhagen & Heck	22%

## Κεφάλαιο 5

### 5 Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σκοπό την συστηματική μελέτη της συμπεριφοράς τριφασικής ροής πετρελαίου – νερού - φυσικού αερίου κατά την μεταφορά τους σε οριζόντιο αγωγό. Λόγω όμως της δυσκολίας μοντελοποίησης και ανάλυσης της τριφασικής ροής που επικρατεί στο εσωτερικό των σωληνώσεων μεταφοράς, αντί να μελετηθεί η τριφασική ροή, μελετάται η διφασική ροή υγρού – αέρα και υγρού – υγρού που προσεγγίζουν, όταν συνδυαστούν, στο τι συμβαίνει κατά την τριφασική ροή. Έτσι, αυτή η εργασία ασχολείται με την μελέτη της διφασικής ροής νερού – αέρα και πετρελαίου – αέρα και, ειδικότερα, επικεντρώνεται στην πτώση πίεσης. Η εστίαση στην πτώση πίεσης για τα συστήματα νερού – αέρα και όχι τα συστήματα πετρελαίου – αερίου προέκυψε λόγω της αδυναμίας εύρεσης πειραματικών δεδομένων στην ελεύθερη βιβλιογραφία για την πτώση πίεσης σε συστήματα πετρελαίου – φυσικού αερίου. Συνεπώς, στην εργασία αυτή επιχειρείται μία αξιολόγηση τεσσάρων εμπειρικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται ακόμη στη βιομηχανία με πειραματικά δεδομένα πτώσης πίεσης που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή συγκρίνονται πειραματικά δεδομένα των Andritsos [21], Hoogendoorn [22] και Badie et al. [23] με προβλέψεις από τα τέσσερα μοντέλα. Τα κυριότερα συμπεράσματα που συνάγονται είναι:

- Για χαμηλές ταχύτητες ροής οι προβλέψεις των μοντέλων τείνουν να προσεγγίζουν κάπως τα πειραματικά, με μικτή όμως εικόνα απόκλισης.
- Στις υψηλές ταχύτητες ροής και, ιδιαίτερα, όταν μεταβάλλεται πολύ η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης, τότε η εκτιμώμενη πτώση πίεσης σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη από την πειραματική.
- Σε όλα τα δεδομένα συνολικά παρατηρείται ότι το μοντέλο των Müller-Steinhagen and Heck δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και με μικρή σχετικά απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα.
- Το μοντέλο του Chisholm είναι εκείνο το οποίο θεωρείται το πλέον αναξιόπιστο για την πρόβλεψη της πτώσης πίεσης, αφού τα αποτελέσματα που δίνει διαφέρουν

πάρα πολύ από τα πειραματικά με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε λάθος συμπεράσματα, εκτός από την Δακτυλιοειδή Ροή, όπου δίνει την καλύτερη πρόβλεψη.

- Στην διφασική ροή πετρελαίου – αέρα το μοντέλο του Friedel είναι εκείνο που δίνει την καλύτερη πρόβλεψη, ενώ τα άλλα μοντέλα παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα.

Η διφασική ροή υγρού – αερίου που στην προκειμένη περίπτωση είχε παραπλήσια αποτελέσματα με αυτά που θα έδινε και η διφασική ροή πετρελαίου – αερίου, αποτελεί μια επιστημονική περιοχή με έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, τόσο σε πειραματικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο. Είναι βέβαιο πως περαιτέρω έρευνα απαιτείται όχι μόνο σε αυτόν τον τομέα, αλλά γενικά πάνω στη συμπεριφορά της διφασικής ροής. Οι προτάσεις για μελλοντική εργασία είναι οι εξής:

- Μελέτη της διφασικής ροής σε αγωγό υπό κλίση και περιγραφή των αλλαγών που προκαλεί η βαρυτική δύναμη.
- Μελέτη της διφασικής ροή πετρελαίου – αέρα. Δημιουργία χαρτών καθεστώτων ροής και υπολογισμός της πτώσης πίεσης
- Μελέτη της διφασικής ροή πετρελαίου – φυσικού αερίου. Δημιουργία χαρτών καθεστώτων ροής και υπολογισμός της πτώσης πίεσης
- Μελέτη της διφασικής ροής σε οριζόντιους αγωγούς, αλλά με την χρήση άλλων ρευστών, ώστε να μελετηθεί η επίδραση της πυκνότητας, του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης στα χαρακτηριστικά της ροής
- Δημιουργία πειραματικής προσομοίωσης της ροής πετρελαίου – φυσικού αερίου σε κυκλικό αγωγό μεγάλης διαμέτρου για την μελέτη και υπολογισμό της πτώσης πίεσης.

## 6 Βιβλιογραφία

1. Clark, R. C. and Brown, D. W. (1977). Petroleum: properties and analysis in biotic and abiotic systems. In Malins (Ed) *Effects of Petroleum on Arctic and Subarctic Environments and Organisms Vol. 1. Nature and Fate of Petroleum*. Academic Press, Inc., New York, 1-89.
2. Leahy, J.G.; Colwell, R.R. (1990). Microbial Degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbial Reviews*, 53(3), 305-315.
3. <http://naturalgas.org>
4. Bratland, Ove. (2010). *Multi-phase Flow Assurance*. Vol. 2, pp 8.
5. Bratland, Ove. (2010). *Multi-phase Flow Assurance*. Vol. 2, pp 223-226
6. Brauner, N. (2003). *Liquid-Liquid Two-Phase Flow Systems*. School of Engineering, Tel-Aviv University, Israel
7. M. Acikgoz, F. Franca, R.T. Lahey, (1992). An experimental study of three-phase flow regimes, *Int. J. Multiphase Flow* 18, pp.327–336.
8. A.H. Lee, J.Y. Sun, W.P. Jepson, (1993). Study of flow regime transitions of oil–water–gas mixtures in horizontal pipelines, in: *Int. Soc. Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*, Golden, CO, USA, pp. 159–164.
9. G.F. Hewitt, L. Pan, S.H. Khor, (1997). Three-phase gas–liquid–liquid flow: flow patterns, holdups and pressure drop, in: *Int. Acad. Publ. Beijing, China*.
10. Baker, O. (1954). Simultaneous flow of oil and gas. *Oil and Gas J.*, 53(45), 185-195.
11. Mandhane, J.M., Gregory, G.A., and Aziz, K., \*(1974) A flow Pattern Map for Gas Liquid Flow in Horizontal Pipes, *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol.1, pp. 537-553.
12. Ανδρίτσος, Ν. και Μποντόζογλου, Β. (2008). *Διφασική Ροή και Μεταφορά Θερμότητας*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος
13. Zivi, S.M.(1964). Estimation of Steady-State Steam Void Fraction by Means of The Principle of Minimum Entropy Production. *Journal of Heat Transfer*, vol. 86, pp. 247-252
14. Simmons, M.J.H. and Hanratty, T.J. (2001) Transition from Stratified to Intermittent Flows in Small Angle Upflows. *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 27, p.p. 599-616.
15. Lockhart, R.C., Martinelli (1949). R.W., Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-phase, Two Component Flow in Pipes. *Chem. Eng. Progr.*, vol. 45, pp. 39-48.
16. Chisholm, D. (1967). A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 10, 1767-1778.
17. Chisholm, D. (1973). Pressure Gradients due to Friction During the Flow of Evaporating Two-phase Mixtures in Smooth Tubes and Channels. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol.16, pp. 347-348.
18. Friedel. L. (1979). Improved Friction pressure drop correlations for horizontal and vertical Two-phase pipe flow, in: *European Two-phase Flow Group Meeting*, Ispra, Italy, paper E2.

19. Müller-Steinhagen, H., Heck, K. (1986). A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. *Chem. Eng. Process.* Vol. 20, pp. 297–308.
20. C. Tribbe, H.M. Mueller-Steinhagen (2000). An evaluation of the performance of phenomenological models for predicting pressure gradient during gas-liquid flow in horizontal pipelines. *Int. J. Multiphase Flow*, vol.26 , pp 1019 -1036.
21. Andritsos, N. (1986) *Effect of pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow*. PhD Thesis, University of Illinois, Urbana.
22. Hoogendoorn, C.J. (1959) Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. *Chem. Eng. Sci.*, 1 9, 205-217.
23. S. Badie, C.P. Hale, C.J. Lawrence, G.F. Hewitt (2000). Pressure gradient and holdup in horizontal two-phase gas-liquid flows with low liquid loading, *Int. J. Multiphase Flow*, 26, pp.1525-1543.
24. Ν. Ανδρίτσος, Κεφ. 5 - Πετρέλαιο, Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα Ενέργεια και Περιβάλλον, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2008.



## Παράρτημα

Πίνακας 6. Πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή (D=0,024 m, σύστημα αέρας-νερό).

Είδος Ροής	$U_{GS}$ (m/s)	$U_{LS}$ (m/s)	$(dp_F/dz)$ (Pa/m) Exp. data	$(dp_F/dz)$ calculated (Pa/m)			
				Lockhart-Martinelli	Friedel	Chisholm	Müller-Steinhagen
Pseudo	1,16	0,06297	26,72	13,29	93,27	184,17	29,84
Pseudo	2,42	0,06111	70,38	61,25	151,04	344,45	59,48
Slug	3,47	0,0605	56,87	85,89	193,29	468,16	84,24
Slug	5,19	0,06151	88,69	130,28	259,14	661,81	128,27
Slug	6,84	0,06151	101,4	175,68	319,70	836,83	170,11
Slug	23,93	0,06157	111,9	857,54	1116,08	2605,23	700,67
Pseudo	1,16	0,1396	88,4	62,43	285,69	337,71	68,20
Pseudo	2,42	0,1396	140,01	234,42	460,45	629,37	135,87
Slug	3,51	0,1381	153,4	318,84	584,70	862,52	192,39
Slug	4,91	0,1396	175,1	434,71	744,44	1162,33	269,94
Slug	6,77	0,1396	243,7	586,52	935,96	1541,65	370,63
Slug	10,15	0,1396	436,4	871,30	1267,73	2209,00	555,45
Slug	13,17	0,1396	646,1	1137,02	1559,17	2790,95	723,31
Slug	16,96	0,1387	967,5	1479,15	1918,68	3498,96	933,00
Slug	25,79	0,1381	2071	2354,84	2810,88	5141,84	1452,85
Pseudo	1,17	0,292	192,5	151,37	603,39	534,17	151,76
Pseudo	2,51	0,2877	314,6	483,82	956,28	975,08	295,75
Pseudo	3,5	0,295	382,1	645,81	1214,01	1306,10	414,57
Pseudo	5,18	0,2975	448,5	904,60	1582,52	1831,97	608,16
Pseudo	6,89	0,2975	596,1	1162,71	1916,01	2344,63	801,72
Pseudo	9,7	0,2975	810	1590,99	2425,67	3165,57	1120,43
Pseudo	13,22	0,2975	1191	2138,23	3027,47	4171,30	1521,24
Slug	19,21	0,306	2159	3176,95	4115,18	5943,17	2270,91
Slug	23,21	0,306	2745	3859,66	4779,03	7074,32	2747,60
Pseudo	2,04	0,06187	55,04	52,51	134,92	298,07	50,86
Slug	3,47	0,06187	61,03	86,76	194,11	469,85	86,06
Slug	4,71	0,06187	74,01	118,01	241,53	609,92	116,92



Πίνακας 7. Πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για δακτυλιοειδή ροή ( $D=0,024$  m, σύστημα αέρας-νερό).

$U_{GS}$ (m/s)	$U_{LS}$ (m/s)	$(dp_F/dz)$ (Pa/m) Exp. data	$(dp_F/dz)$ calculated (Pa/m)			
			Lockhart- Martinelli	Friedel	Chisholm	Müller- Steinhagen
105,89	0,003475	8700	8167,54	9733,22	8446,47	7659,51
138,25	0,003203	18830	13644,94	15930,04	13872,12	13013,09
157,74	0,003033	26010	17615,45	20347,88	17802,13	16917,14
61,47	0,006443	2934	2998,76	3335,78	3381,15	2582,67
80,16	0,006431	5531	4916,97	5728,52	5397,66	4374,42
103,42	0,006218	9655	7949,83	9639,80	8551,06	7262,64
143,59	0,006096	20910	14902,24	17634,36	15506,92	13959,11
151,89	0,006096	26970	16609,75	19572,65	17213,76	15612,21
32,8	0,01274	1013	1044,79	1319,52	1793,99	744,21
48,13	0,01353	2232	2039,87	2335,95	2840,51	1571,79
60,91	0,01353	3575	3104,03	3437,72	3920,47	2501,35
79,44	0,01615	6539	5096,86	6298,81	6549,00	4225,41
100,37	0,01551	11010	7831,70	9806,98	9481,04	6736,58
122,17	0,01344	20660	11246,38	13788,03	12764,92	10000,10
148,45	0,01289	29860	16258,58	19588,90	17789,40	14770,15
32,61	0,02368	1254	1131,13	1383,96	2284,27	771,32
49,8	0,02368	2806	2299,73	2564,06	3585,97	1697,82
57,88	0,02673	3836	3025,70	3545,41	4710,82	2278,60
78,85	0,02597	6878	5217,25	6760,36	7613,82	4152,74
98,88	0,02518	11440	7853,76	10056,01	10501,72	6493,94
126	0,02368	23160	12257,64	15289,62	15025,07	10529,70
149,48	0,02231	31610	16848,99	20651,23	19633,96	14832,11
23,68	0,04042	871	762,76	975,88	2109,11	538,85
30,96	0,0367	1327	1124,39	1346,56	2579,09	782,77
44,1	0,03591	2534	1980,63	2259,89	3718,78	1421,87
59,41	0,0381	4328	3300,29	4334,50	6001,55	2464,39
78,33	0,03627	7279	5317,48	7121,88	8591,63	4138,72
98,05	0,03746	11980	7973,57	10449,42	11781,00	6404,91
119,41	0,03731	19820	11417,43	14627,67	15603,10	9433,01
139,45	0,03219	27580	15073,35	18867,64	18985,99	12839,66
146,25	0,0367	30150	16599,67	20810,23	21140,24	14101,66

Πίνακας 8. Πειραματικά δεδομένα του Andritsos (1986) για διαστρωματωμένη ροή (D=0,024 m, σύστημα αέρας-νερό).

U <sub>GS</sub> (m/s)	U <sub>LS</sub> (m/s)	(dp <sub>F</sub> /dz) (Pa/m) Exp. data	(dp <sub>F</sub> /dz) <sup>calculated</sup> (Pa/m)			
			Lockhart- Martinelli	Friedel	Chisholm	Müller- Steinhagen
4,94	0,00182	18,82	39,19	132,59	176,76	20,47
7,12	0,00182	36	66,93	181,29	211,28	40,49
10,25	0,00174	69,95	117,37	255,57	259,27	80,93
12,62	0,00182	103,7	165,73	321,07	312,78	120,33
5,08	0,002923	20,39	45,48	147,95	235,01	21,69
6,69	0,003383	32,89	69,13	190,97	291,68	35,94
9,52	0,003261	67,18	115,53	261,81	347,13	69,28
12,37	0,003261	104,4	173,81	341,28	412,19	114,03
3,51	0,006096	11,94	35,11	127,56	272,83	14,07
5,24	0,006218	23,33	58,00	173,76	347,56	25,77
6,81	0,006005	36,76	81,33	214,05	396,55	39,27
10,11	0,005883	76,39	141,85	304,35	493,12	78,65
2,37	0,01326	7,498	30,44	111,41	260,62	14,65
3,51	0,01326	13,67	46,30	147,17	348,87	22,56
5,17	0,01326	26,61	72,38	196,62	458,92	35,94
6,9	0,01356	46,63	104,16	248,56	563,18	53,30
2,46	0,02332	11,1	40,15	127,10	299,42	24,71
3,5	0,02286	18,9	57,13	162,29	395,42	34,93
5,14	0,02301	35,01	87,40	215,76	533,98	53,21
6,9	0,02286	50,78	123,34	271,55	666,28	74,32
1,17	0,03566	4,863	9,72	83,66	171,79	17,54
2,16	0,0352	13,45	42,51	125,70	287,80	31,59
3,16	0,03886	26,65	64,34	166,53	402,01	50,64
5,05	0,03886	45,31	104,85	233,72	592,45	81,76
4,49	0,00573	20,25	46,51	151,77	307,21	19,75
6,99	0,005761	39,35	83,40	217,31	394,35	40,77
10,64	0,005761	82,08	152,37	318,72	503,29	86,25
11,71	0,005761	100,2	176,00	350,50	534,54	102,98
2,05	0,02627	9,458	35,30	114,71	263,17	22,91
3,26	0,02597	17,51	55,90	157,93	383,37	36,27
4,5	0,02597	28,83	78,84	199,51	495,52	50,87
7,07	0,02518	54,1	131,28	281,55	697,45	82,19



Πίνακας 9. Πειραματικά δεδομένα του Hoogendoorn (1959) [22] για διαστρωματωμένη ροή ( $D=0,14$  m, σύστημα gas oil - αέρας).

$U_{GS}$ (m/s)	$U_{LS}$ (m/s)	$(dp_F/dz)$ (Pa/m) Exp. data	$(dp_F/dz)_{\text{calculated}}$ (Pa/m)			
			Lockhart- Martinelli	Friedel	Chisholm	Müller- Steinhagen
9,71	0,31	52,1	190,31	250,73	398,06	113,84
12,76	0,31	76	247,10	304,98	506,56	148,95
14,9	0,31	94,5	287,66	342,11	581,53	173,71
17,79	0,31	116	343,41	391,68	681,73	207,36
3,74	0,16	12,2	44,25	70,80	122,59	23,17
4,29	0,16	12,7	50,02	77,73	138,02	26,46
6	0,16	17,8	68,09	98,21	184,72	36,70
7,69	0,16	23,8	86,22	117,51	229,50	46,88
10,59	0,16	36,2	118,13	149,66	304,19	64,54
13,11	0,16	50,0	146,76	177,34	367,57	80,12
15,12	0,16	61,1	170,24	199,52	417,41	92,73
4,54	0,0701	7,02	26,03	39,83	95,86	12,45
6,53	0,0701	11,5	37,33	52,96	131,42	17,99
8,52	0,0701	17,6	49,16	66,09	165,54	23,71
10,72	0,0701	24,3	62,88	80,89	202,06	30,30
13,12	0,0701	35	78,66	97,61	240,90	37,86
9,17	0,0369	16,3	21,41	30,64	100,84	14,96
11,61	0,0369	24,8	29,12	41,50	126,64	20,00
12,77	0,0369	27,8	33,11	48,21	140,86	22,61
17,19	0,0369	44,2	50,19	80,17	200,05	33,94
5,74	0,012	5,28	8,26	16,56	49,22	4,03
7,81	0,012	8,73	12,41	21,88	59,96	6,38
10,38	0,012	13,6	18,49	29,06	71,97	10,12
12,73	0,012	18,4	24,95	36,27	82,40	14,38
14,11	0,012	26,4	29,14	40,82	88,47	17,27

Πίνακας 10. Πειραματικά δεδομένα των Badie et al. (2000) [23] για διαστρωματωμένη ροή ( $D=0,078$  m, σύστημα oil - αέρας).

$U_{GS}$ (m/s)	$U_{LS}$ (m/s)	$(dp_F/dz)$ (Pa/m) Exp. data	$(dp_F/dz)$ calculated (Pa/m)			
			Lockhart- Martinelli	Friedel	Chisholm	Müller- Steinhagen
14,98	0,001	64,93	46,36	78,63	64,83	37,13
14,69	0,003	76,68	50,97	88,39	102,19	34,84
14,55	0,005	83,87	54,38	93,68	132,03	33,79
15,23	0,008	101,38	63,56	104,95	174,01	36,88
14,96	0,01	103,95	64,72	106,11	192,64	36,05
14,95	0,015	114,19	70,75	112,10	234,31	37,84
14,72	0,02	124,07	74,26	114,79	263,58	39,54
15,14	0,024	137,34	80,97	121,17	289,96	43,97
15,34	0,029	147,34	86,75	126,06	315,30	48,52
20,27	0,002	117,57	83,12	124,62	117,18	65,40
20,06	0,003	131,51	85,22	128,52	135,34	63,49
19,68	0,005	145,35	88,09	133,01	166,69	60,39
20,23	0,008	165,88	98,89	145,31	213,58	63,24
20,34	0,01	172,98	103,56	150,14	239,03	64,02
20,12	0,015	190,37	109,86	155,56	287,96	64,18
20,01	0,02	209,03	115,71	160,05	327,26	66,22
20,1	0,026	230,99	123,59	166,09	367,83	71,03
24,83	0,002	189,26	118,25	163,84	150,44	96,76
24,66	0,003	207,13	121,18	168,62	169,60	94,69
24,97	0,005	250,06	130,80	180,32	208,56	95,82
24,59	0,008	273,34	135,56	185,43	251,64	92,11
24,78	0,01	302,18	141,88	191,69	280,40	93,36
24,54	0,015	324,18	149,38	197,69	335,27	92,65
24,55	0,02	356,93	157,68	204,04	382,12	95,17
24,63	0,026	380,16	167,09	210,82	429,64	100,05





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000121515