



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ
ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΑΝΟΔΟΥ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ**

υπό

ΓΙΑΝΝΙΚΗ ΜΑΡΙΝΑ

Διπλωματούχου Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Δ.Π.Θ., 2013

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Βόλος, Μάρτιος 2015



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ
ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΑΝΟΔΟΥ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ**

υπό

ΓΙΑΝΝΙΚΗ ΜΑΡΙΝΑ

Διπλωματούχου Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Δ.Π.Θ., 2013

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Βόλος, Μάρτιος 2015

© 2015 Γιαννίκη Μαρίνα

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 (Επιβλέπων)	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος 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.

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

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη απέναντι στους γονείς μου, Σοφία και Κώστα για την πίστη τους σε εμένα και για την προσπάθειά τους να μου εξασφαλίσουν τα απαραίτητα εφόδια για ένα μέλλον με προοπτικές. Σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού με υποστήριξαν όχι μόνο οικονομικά, αλλά πολύ περισσότερο ηθικά στις στιγμές που το χρειαζόμουν.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΑΝΟΔΟΥ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

ΜΑΡΙΝΑ ΓΙΑΝΝΙΚΗ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2015

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου για υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους μετρητές πολυφασικής ροής δικαιολογείται όλο και περισσότερο, δεδομένου ότι τα συμβατικά αποθέματα πετρελαίου εξαντλούνται ταχέως. Αυτό οδήγησε τις εταιρείες πετρελαίου στην ανάπτυξη μικρότερων/περιθωριακών πεδίων και ταμειυτήρων σε απομακρυσμένες περιοχές και περιοχές ανοικτής θάλασσας, θέτοντας έτσι μεγάλη ζήτηση για πιο αποδοτικές λύσεις της συνεχούς μέτρησης της πολυφασικής ροής.

Αυτή η μελέτη στοχεύει στη διερεύνηση των μεταβάσεων ροής σε κατακόρυφους αγωγούς ανόδου. Αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη εισαγωγή για την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, η οποία ακολουθείται από μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση των καθεστώτων ροής, των πρότυπα ροϊκών χαρτών και των διάφορων προσεγγίσεων και μοντέλων που εφαρμόζονται στις πολυφασικές ροές.

Οι παραγωγικές και ερευνητικές δραστηριότητες του πετρελαίου και φυσικού αερίου σε εξαιρετικά βαθιά ύδατα και εχθρικά περιβάλλοντα απαιτούν την ανάγκη ανάπτυξης καινοτόμων συστημάτων αγωγών ανόδου. Προκειμένου να κατανοηθεί η λειτουργία ενός συστήματος ανόδου, δίνεται μια σύντομη αναφορά που περιγράφει λεπτομερώς τα υφιστάμενα υπεράκτια συστήματα αγωγών ανόδου. Τέλος, παρουσιάζονται δύο βιβλιογραφικές μελέτες περιπτώσεων σχετικά με τη διφασική ροή. Η πρώτη περίπτωση αφορά μία ροή δύο φάσεων σε αγωγό ανόδου 52 mm και η δεύτερη εφαρμόζει το μοντέλο “multi-fluid” σε ένα κατακόρυφο κανάλι βρασμού.

Λέξεις-κλειδιά Κατακόρυφη Πολυφασική Ροή • Ροϊκός Χάρτης • Καθεστώς Ροής
• Αγωγός Ανόδου • Πολυφασικά Μοντέλα

Multiphase oil production – Modeling of multiphase flow in the riser

ABSTRACT

The oil and gas industry need for high performing and low cost multiphase meters is ever more justified given the rapid depletion of conventional oil reserves. This has led oil companies to develop smaller/marginal fields and reservoirs in remote locations and deep offshore, thereby placing great demands for compact and more cost effective solutions of on-line continuous multiphase flow measurement.

This study aims at investigating the flow pattern transitions in vertical risers. Initially, a brief introduction is presented in oil and gas production, followed by an extended literature review of flow regimes, flow patterns maps and multiphase approaches and models applied to multiphase flows.

Oil and gas exploration and production activities in deep and ultra deep waters in hostile environments necessitate the need to develop innovative riser systems. In order to understand a riser system, there is a review that describes thoroughly the existing offshore riser systems. Finally, there are presented two case studies of multiphase flow found in literature. The first case study concerns a two-phase flow in a 52 mm riser and the second one applies the “multi-fluid” model in a vertical boiling channel.

Keywords Vertical Multiphase Flow • Flow Pattern Map • Flow Regime • Riser • Multiphase Models

*Στους γονείς μου
και στον αγαπημένο μου αδερφό Δημήτρη...*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	IV
ABSTRACT	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	X
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	XI
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ.....	1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	4
ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ	4
2.1 Το ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ.....	4
2.1.1 Σύνοψη ιστορική ανασκόπηση.....	4
2.1.2 Σχηματισμός.....	6
2.1.3 Χημική σύσταση αργού πετρελαίου	7
2.1.4 Φυσικές ιδιότητες.....	9
2.2 Το ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	10
2.2.1 Σύνοψη ιστορική ανασκόπηση.....	10
2.2.2 Σχηματισμός φυσικού αερίου	11
2.2.3 Χημική σύσταση φυσικού αερίου.....	13
2.2.4 Ιδιότητες του φυσικού αερίου.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	16
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ ΡΟΩΝ	16
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ.....	18
3.3 ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ	21
3.4 ΡΟΪΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	22
3.5 ΡΟΪΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ.....	25
3.5.1 Βιβλιογραφική αναφορά σημαντικών ροϊκών χαρτών.....	26
3.5.2 Κριτήρια μετάβασης στα καθεστώτα ροής για κατακόρυφη προς τα άνω ροή.....	29
3.5.2.1 Μετάβαση από ροή με φυσαλίδες σε διαλείπουσα ροή.....	30
3.5.2.2 Μετάβαση από διαλείπουσα ροή σε ακανόνιστη ροή.....	32
3.5.2.3 Μετάβαση από ακανόνιστη ροή σε δακτυλοειδή ροή.....	35
3.6 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΩΝ ΡΟΩΝ.....	37
3.6.1 Προσέγγιση Euler-Lagrange.....	37
3.6.2 Προσέγγιση Euler-Euler.....	39
3.6.2.1 Προσέγγιση του όγκου ρευστού.....	41
3.6.2.2 Μοντέλο μείξης.....	41
3.6.2.3 Μοντέλο Euler	42

3.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ.....	42
3.7.1 Το μοντέλο “multi-fluid”.....	44
3.7.2 Το μοντέλο “multi-field”.....	45
3.7.3 Το μοντέλο “drift-flux”.....	47
3.7.4 Εμπειρικά μοντέλα.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	52
ΑΓΩΓΟΙ ΑΝΟΔΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	52
4.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	52
4.2 ΙΣΤΟΡΙΚΟ	54
4.3 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΓΩΓΩΝ ΑΝΟΔΟΥ	55
4.3.1 Εισαγωγή.....	55
4.3.2 Θαλάσσιο σύστημα αγωγού ανόδου	56
4.3.2.1 Κατακόρυφος τεταμένος αγωγός ανόδου πετρελαίου	57
4.3.2.2 Εύκαμπτος αγωγός ανόδου πετρελαίου	59
4.3.2.3 Υβριδικοί αγωγοί ανόδου πετρελαίου	60
4.3.2.4 Αλυσοειδής αγωγός ανόδου πετρελαίου	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	63
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΦΑΣΙΚΩΝ ΡΟΩΝ	63
5.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ-ΥΓΡΟΥ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΑΝΟΔΟΥ	63
5.1.1 Υπόβαθρο πειράματος.....	63
5.1.1.1 Μέτρηση του κλάσματος φάσης.....	63
5.1.1.1.1 Εξασθένηση ακτινοβολίας γ	63
5.1.1.1.2 Αισθητήρας συρμάτινου πλέγματος (WMS)	64
5.1.1.1.3 Μετρητής ροής μάζας Coriolis.....	64
5.1.1.2 Περιγραφή της δοκιμαστικής διάταξης	65
5.1.1.3 Περιοχή διαχωρισμού	66
5.1.1.4 Καθορισμός παραμέτρων εισόδου	68
5.1.2 Διφασική ροή αερίου-υγρού σε κατακόρυφο αγωγό ανόδου.....	68
5.1.2.1 Χαρακτηριστικά ροής αερίου-υγρού.....	69
5.1.2.1.1 Κλάσμα κενού	69
5.1.2.1.2 Πρότυπα ροών	70
5.1.2.1.3 Οπτικοποιημένες εικόνες διφασικής ροής με δεδομένα του WMS	77
5.1.2.1.4 Ροϊκός χάρτης.....	79
5.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ “MULTI-FLUID” ΓΙΑ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΑΕΡΙΟΥ-ΥΓΡΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΑΓΩΓΟ.....	80
5.2.1 Εισαγωγή.....	80
5.2.2 Ανάπτυξη μοντέλου “multi-fluid”.....	82
5.2.2.1 Εξισώσεις ισορροπίας	83
5.2.2.2 Νόμοι «κλεισίματος».....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	90
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Συλλογή του μουσείου Drake Well, Titusville, PA	5
Σχήμα 2.2 Η διάταξη κάποιων συστατικών του αργού πετρελαίου	8
Σχήμα 2.3 (α) Η πρώτη λάμπα φυσικού αερίου σε δρόμο της Αμερικής (1817), (β) Οι μυστηριώδεις ατμοί στο Μαντείο των Δελφών, (γ) Ο λύχνος του Robert Bunsen (1855)	11
Σχήμα 2.4 Ο σχηματισμός του φυσικού αερίου.....	13
Σχήμα 3.1 Διάφορα είδη πολυφασικών ροών	18
Σχήμα 3.2 Διφασική ροή σε κυκλικό αγωγό	19
Σχήμα 3.3 (α) Φωτογραφίες καθεστώτων ροής προς τα πάνω σε κατακόρυφο αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 4.26 mm, (β) Φυσαλίδα Taylor σε διαλείπουσα ροή [66].....	25
Σχήμα 3.4 Ροϊκός χάρτης του Fair [14]	28
Σχήμα 3.5 (α) Ροϊκός χάρτης των Hewitt & Roberts για κατακόρυφη μεταφορά αέρα – νερο [10], (β) Ροϊκός χάρτης των Golan & Stenning [12].....	28
Σχήμα 3.6 Χάρτης καθεστώτων ροής για κατακόρυφο σωλήνα διαμέτρου 254 mm. Οι γραμμές δείχνουν τις μεταβάσεις στα καθεστώτα ροής σύμφωνα με τους Taitel et al. [23].....	29
Σχήμα 3.7 Μέγιστο συσσωμάτωμα σφαιρικών φυσαλίδων κατά τη μετάβαση στη διαλείπουσα ροή [66].....	31
Σχήμα 3.8 (α) Μετάβαση από τη διαλείπουσα ροή στην ακανόνιστη ροή [21], (β) Μέγιστο συσσωμάτωμα ημισφαιρικών φυσαλίδων για τη μετάβαση στην ακανόνιστη ροή [66]	33
Σχήμα 4.1 Τυπικό σύστημα παραγωγής ημιβυθιζόμενης εξέδρας.....	55
Σχήμα 4.2 Απαραίτητα λειτουργικά στοιχεία ενός συστήματος αγωγού ανόδου.....	57
Σχήμα 4.3 Κατακόρυφος τεταμένος αγωγός μεταφοράς πετρελαίου (TTR)	58
Σχήμα 4.4 Πρότυπες διατάξεις του εύκαμπτου αγωγού ανόδου πετρελαίου (Compliant Riser)	59
Σχήμα 4.5 (α) Τυπική διάταξη του Free Standing Hybrid Riser (FSHR), (β) Ομαδοποιημένα SLOR	61
Σχήμα 4.6 Αλυσοειδής αγωγός riser (SCR)	62
Σχήμα 5.1 Ο αγωγός ανόδου διαμέτρου (52 mm) με τις υπάρχουσες συσκευές μέτρησης.....	66
Σχήμα 5.2 Μεταβολή του κλάσματος κενού για διάφορες τιμές της φαινομενικής ταχύτητας του υγρού.....	70
Σχήμα 5.3 Δεδομένα εξόδου αισθητήρα WMS για φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25$ m/s και $U_{sg} = 0.1$ m/s, (α) Χρονολογική σειρά κλάσματος κενού, (β) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)	72
Σχήμα 5.4 Σήματα πυκνόμετρου ακτινοβολίας γ για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25$ m/s και $U_{sg} = 0.1$ m/s, (α) Χρονολογική σειρά μέτρησης ακτινοβολίας γ , (β) Η συνάρτηση PDF της μέτρησης ακτινοβολίας γ	72

Σχήμα 5.5 Δεδομένα εξόδου αισθητήρα WMS για φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 0.1 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά κλάσματος κενού, (β) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)	73
Σχήμα 5.6 Σήματα πυκνόμετρου ακτινοβολίας γ για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 0.98 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά μέτρησης ακτινοβολίας γ , (β) Η συνάρτηση PDF της "μαλακής" ακτινοβολίας γ	74
Σχήμα 5.7 Δεδομένα αισθητήρα WMS για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 3.22 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά κλάσματος κενού, (β) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF).....	75
Σχήμα 5.8 Σήματα πυκνόμετρου ακτινοβολίας γ για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 3.22 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά μετρήσεων ακτινοβολίας γ , (β) Συνάρτηση PDF για τη μέτρηση της "μαλακής" ακτινοβολίας γ	75
Σχήμα 5.9 Δεδομένα αισθητήρα WMS για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 6.28 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά κλάσματος κενού, (β) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF).....	76
Σχήμα 5.10 Σήματα πυκνόμετρου ακτινοβολίας γ για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 6.28 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά μετρήσεων ακτινοβολίας γ , (β) Συνάρτηση PDF για τη μέτρηση της "μαλακής" ακτινοβολίας γ	77
Σχήμα 5.11 Εικόνες μέσω του αισθητήρα WMS σε σταθερή φαινομενική ταχύτητα υγρού 0.25 m/s και μεταβαλλόμενη ταχύτητα αερίου	78
Σχήμα 5.12 Χάρτης καθεστώτων ροής για ροές αέρα-νερού κατακόρυφο αγωγό ανόδου 52 mm .	79
Σχήμα 5.13 Πρότυπα διφασικής ροής σε κανάλι εξάτμισης.....	82
Σχήμα 5.14 Ο τροποποιημένος χάρτης του Bennett [63] για ανοδική ροή ατμού-νερού σε αγωγό υπό πίεση 7 MPa	89

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση του πετρελαίου σε σχέση με την πυκνότητά του	10
Πίνακας 2.2 Τυπική χημική σύσταση του φυσικού αερίου [4]	13
Πίνακας 2.3 Φυσικές ιδιότητες συστατικών φυσικού αερίου σε κανονικές συνθήκες.....	15
Πίνακας 3.1 Κριτήρια μετάβασης στα καθεστώτα ροής για αγωγούς μεγάλης διαμέτρου.....	36
Πίνακας 5.1 Προδιαγραφές και συνθήκες λειτουργίας της δοκιμαστικής διάταξης.....	67
Πίνακας 5.2 Οι φυσικές ιδιότητες του νερού και του αέρα.....	67
Πίνακας 5.3 Οι όροι πηγών των εξισώσεων ισορροπίας (Εξισώσεις 5.3, 5.4, 5.5) για ροή με φουσαλίδες.....	85
Πίνακας 5.4 Νόμοι «κλεισίματος» της ροής με φουσαλίδες	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A. Σύμβολα

Σύμβολο	Μονάδες	Περιγραφή
A	[m ²]	εμβαδόν επιφάνειας που καταλαμβάνει η κάθε φάση
C_0	[-]	παράμετρος κατανομής
D	[m]	εσωτερική διάμετρος του σωλήνα, υδραυλική διάμετρος
F	[N/m ³]	πηγή ορμής
f	[-]	συντελεστής ορμής
F_{drag}	[N]	οπισθέλκουσα δύναμη
G	[kg/m ² s]	ειδική μαζική ροή
g	[m/s ²]	επιτάχυνση της βαρύτητας
h	[m]	απόσταση από τη μύτη της φυσαλίδας Taylor
H	[-]	συγκράτηση του υγρού
j	[m/s]	φαινομενική ταχύτητα διφασικού μείγματος, ογκομετρική ροή
j_f	[m/s]	φαινομενική ταχύτητα υγρής φάσης
j_g	[m/s]	φαινομενική ταχύτητα εισερχόμενου αερίου στη βάση του αγωγού ανόδου
j_l	[m/s]	φαινομενική ταχύτητα υγρού
j_m	[m/s]	συνολική ογκομετρική ροή
L_b	[m]	μέσο μήκος της φυσαλίδας Taylor
P	[bar]	μέση πίεση μεταξύ των φάσεων
Q	[m ³ /s]	ογκομετρική παροχή κάθε φάσης
Re	[-]	αριθμός Reynolds
S, v_{gj}	[m/s]	ταχύτητα ολίσθησης
S_{mass}	[-]	όρος πηγής μάζας
U	[m/s]	μέση ταχύτητα
u	[m/s]	στιγμιαία ταχύτητα
u_{gs}	[m/s]	ταχύτητα αέρα στη φυσαλίδα Taylor
U_m	[m/s]	μέση πραγματική ταχύτητα του ρευστού
U_{sb}, U_{sg}	[m/s]	φαινομενικές ταχύτητες των φάσεων
v, u	[m/s]	ταχύτητα
v_f	[m/s]	ταχύτητα υγρής φάσης
v_g	[m/s]	ταχύτητα αέριας φάσης
W	[kg/s]	συνολική μαζική ροή
$N_{\mu f}$	[-]	αριθμός ιξώδους

B. Ελληνικά Σύμβολα

<i>Σύμβολο</i>	<i>Μονάδες</i>	<i>Περιγραφή</i>
α	[-]	κλάσμα κενού
α, ε	[-]	κλάσμα όγκου
β	[°]	γωνία κλίσης
Γ	[kg/(m ³ · s)]	πηγή μάζας
$\Delta\rho$	[kg/m ³]	απόλυτη τιμή της διαφοράς πυκνότητας
μ	[kg/(s · m)]	ιξώδες
μ_i	[kg/(s · m)]	κινηματικό ιξώδες υγρού
ρ	[kg/m ³]	πυκνότητα
ρ_g	[kg/m ³]	πυκνότητα αερίου
ρ_l	[kg/m ³]	πυκνότητα υγρού
σ	[N/m]	επιφανειακή τάση
τ	[N/m ²]	τανυστής ιξώδους τάσης, διατμητική τάση

Γ. Δείκτες

<i>Σύμβολο</i>	<i>Περιγραφή</i>
+	αδιαστατοποιημένη τιμή
<i>ext</i>	εξωτερικός
<i>f</i>	υγρή φάση
<i>g</i>	αέριο, αέρια φάση
<i>gl</i>	αέριο-υγρό
<i>gw</i>	αέριο-τοίχωμα
<i>i</i>	φάση, χρονικό βήμα, διεπιφάνεια
<i>int</i>	διεπιφάνεια (πίεση)
<i>k</i>	k-th φάση, πεδίο
<i>l</i>	υγρό
<i>lw</i>	υγρό-τοίχωμα
<i>m, mix</i>	μείγμα
<i>mass</i>	μάζα
<i>p</i>	σωματιδιακή φάση
<i>wk</i>	τοίχωμα και πεδίο

Δ. Τελεστές

$\langle \rangle$ μέση τιμή περιοχής

$\langle\langle \rangle\rangle$ μέση τιμή σταθμισμένου κλάσματος κενού

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο

Η πλειοψηφία των διφασικών ροών παρατηρείται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, ωστόσο συναντώνται συχνά και σε αρκετές καθημερινές εφαρμογές. Η 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 κατακόρυφους αγωγούς ανόδου πετρελαίου.

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 εκτενής εργαστηριακή μελέτη τριφασικής ροής σε έναν αγωγό ανόδου δεν θα ήταν εφικτή στο επίπεδο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, λόγω της έλλειψης του κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού, αλλά κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων τριφασικής ροής. Αντιθέτως, η μελέτη των διφασικών συστημάτων υγρού-υγρού και υγρού-αερίου μπορεί να συνεισφέρει μια ικανοποιητική προσέγγιση στη συμπεριφορά της τριφασικής ροής, θεωρώντας ότι οι αρχές που διέπουν τη διφασική ροή των δυο αυτών συστημάτων, διέπουν και την τριφασική ροή.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η βαθιά κατανόηση των αρχών και των μοντέλων που διέπουν την πολυφασική ροή, μέσω της λεπτομερούς βιβλιογραφικής ανάλυσης του υπόβαθρου αυτών των ροών και την παρουσίασης κατάλληλων παραδειγμάτων.

1.2 Διάρθρωση μεταπτυχιακής εργασίας

Αρχικά δίδεται μια σύντομη περίληψη της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, όπου παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια σημεία της. Ακολουθεί ο πίνακας περιεχομένων και το κύριο περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας, δομημένο σε έξι κεφάλαια. Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά το κάθε κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται ο σκοπός της διπλωματικής, οι φάσεις που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνησή της και αναλύεται το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου

Κεφάλαιο 2: Γενικά περί πετρελαίου και φυσικού αερίου

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

Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση πολυφασικών ροών

Στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση με θέμα τα καθεστώτα ροής στη διφασική και τριφασική ροή. Επίσης, πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση των προσεγγίσεων και των μοντέλων που βρίσκουν εφαρμογή σε μια πολυφασική ροή.

Κεφάλαιο 4: Αγωγοί ανόδου πετρελαίου

Το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφει τα διάφορα συστήματα αγωγών ανόδου που υπάρχουν, ανάλογα με το γεωμετρικό τους σχήμα (κατακόρυφοι και αλυσοειδείς αγωγοί ανόδου), το υλικό τους (χάλυβας, τιτάνιο) και τις τελικές τους λεπτομέρειες (εύκαμπτες αρθρώσεις, ενισχυτικά ελάσματα κάμψης κ.α.) για βαθέων υδάτων τομέα και αντίξοες συνθήκες.

Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα διφασικών ροών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται δύο παραδείγματα κατακόρυφης διφασικής ροής που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Το πρώτο παράδειγμα σχετίζεται με τη ροή αερίου-υγρού σε ένα κατακόρυφο αγωγό ανόδου. Σε αυτό το παράδειγμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών του κλάσματος κενού σύμφωνα με διάφορους τρόπους

μετρήσεων, οι απεικονίσεις της ροής μέσω του αισθητήρα WMS και ο ροϊκός χάρτης του πειράματος. Το δεύτερο παράδειγμα αφορά τη ροή αερίου-υγρού σε ένα κατακόρυφο κανάλι σε βρασμό. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, εφαρμόζεται το μοντέλο “multi-fluid” και αναπτύσσεται το μαθηματικό υπόβαθρο του μοντέλου για τη μελέτη των ροϊκών καθεστώτων που δημιουργούνται.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Το τελευταίο κεφάλαιο αφιερώνεται στην παρουσίαση των σημαντικότερων σημείων-συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη, καθώς και σε σχόλια και παρατηρήσεις για τις προοπτικές που ανοίγονται στο μέλλον.

Στο τέλος της διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές στην έρευνα αυτή με τους δείκτες να παραπέμπουν στα αντίστοιχα τμήματα της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Γενικά περί πετρελαίου και φυσικού αερίου

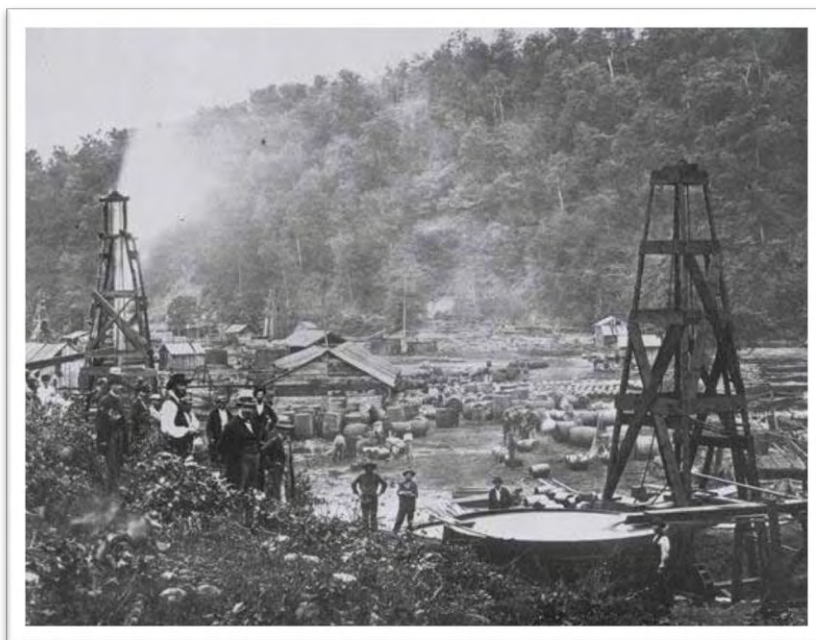
2.1 Το πετρέλαιο

2.1.1 Σύντομη ιστορική ανασκόπηση

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^{ου} αιώνα π.Χ. η εκροή των αερίων που απελευθερώνονταν από τα κοιτάσματα πετρελαίου ήταν «η φωνή των θεών που έβγαине 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 άσφαλτος 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^{ου} μ.Χ. αιώνα στο περίφημο «υγρό πυρ» (Greek fire).

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 [1]. Από το τέλος του 17^{ου} 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 άσφαλτο 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 Τρινιντάντ. 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.



Σχήμα 2.1 Συλλογή του μουσείου Drake Well, Titusville, PA

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 βενζινοκινητήρα 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 [1].

2.1.2 Σχηματισμός

Παρά την εντατική έρευνα και τις αντικρουόμενες απόψεις μεταξύ των γεωλόγων για πάνω από έναν αιώνα, ο σχηματισμός του πετρελαίου δε μπορεί να εξηγηθεί ικανοποιητικά ακόμη και σήμερα. Ρώσοι ειδικοί δεν εξαιρούν την πιθανότητα ότι το πετρέλαιο σχηματίστηκε από ανόργανα συστατικά (καρβίδια μετάλλων και υπέρθερμο ατμό) αν και θεωρείται εν γένει δεδομένο ότι το πετρέλαιο, καθώς επίσης και ο γαιάνθρακας (κάρβουνο) και το φυσικό αέριο, είναι κυρίως οργανικής προέλευσης. Οι έρευνες για πιθανά πετρελαιοφόρα πετρώματα τις περασμένες δεκαετίες έχουν συμβάλλει σημαντικά στην υιοθέτηση αυτής της γνώμης. Τα περισσότερα κοιτάσματά πετρελαίου 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 και στη

συνέχεια 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].

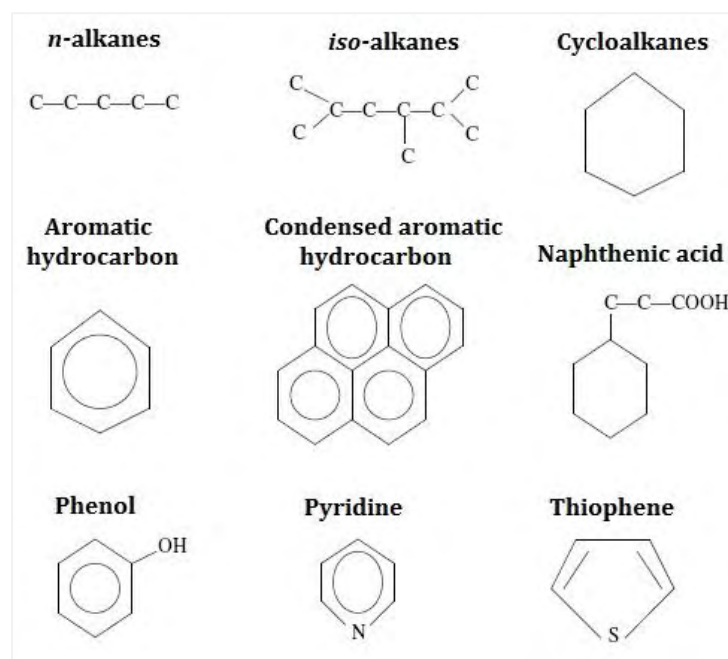
2.1.3 Χημική σύσταση αργού πετρελαίου

Το αργό πετρέλαιο είναι ένα ανομοιογενές υγρό που αποτελείται από πληθώρα υδρογονανθράκων. Περισσότερες από 3000 ενώσεις έχουν ταυτοποιηθεί στο αργό πετρέλαιο, στις οποίες περιλαμβάνονται αέρια, όπως το μεθάνιο, μέχρι και βαριές ασφαλτικές ενώσεις που δεν αποστάζουν. Πιο συγκεκριμένα, το αργό πετρέλαιο αποτελείται από ενώσεις υδρογονανθράκων σε ποσοστό 50-98% της συνολικής σύνθεσης και από ενώσεις που δεν περιέχουν υδρογονάνθρακες σε μια ευρεία σειρά συνδυασμών. Οι ενώσεις μη υδρογονανθράκων, οι οποίες υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες, μπορεί να είναι το οξυγόνο (<3%), το θείο (<4%) και το άζωτο (<1%). Επίσης, υπάρχουν πολύ μικρές συγκεντρώσεις μετάλλων (μέχρι 0.1%), όπως σίδηρος, νικέλιο, χρώμιο, βανάδιο κ.α. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται μερικές αντιπροσωπευτικές οργανικές ενώσεις που βρίσκονται στο αργό πετρέλαιο.

Τα συστατικά του πετρελαίου μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις μεγάλες ομάδες βασιζόμενοι στη διαφορετική διαλυτότητά τους στους οργανικούς διαλύτες. Αυτές είναι οι εξής:

- Κορεσμένοι υδρογονάνθρακες: Περιλαμβάνουν τα κανονικά και διακλαδισμένα αλκάνια της δομής 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: Είναι ακόρεστοι κυκλικοί υδρογονάνθρακες (C_nH_{2n-6}) που αποτελούνται από έναν ή περισσότερους βενζολικούς δακτυλίους, και τυπικά αποτελούν παράγωγα του βενζολίου. Περιλαμβάνουν τις μονοκυκλικές αρωματικές ενώσεις (π.χ. βενζόλιο, τολουόλιο και ξυλόλια) και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) (π.χ. ναφθαλίνη, ανθρακένιο και φθενανθρένιο), οι οποίοι έχουν δύο ή περισσότερους συζυγείς αρωματικούς δακτυλίους. Τα PAHs είναι ιδιαίτερης περιβαλλοντικής σημασίας, επειδή είναι πιθανές καρκινογόνες ουσίες ή μπορούν να μετασχηματιστούν σε καρκινογόνες ουσίες από το μικροβιακό μεταβολισμό. Τέλος, οι υδρογονάνθρακες αυτοί είναι ιδιαίτερα επιδεκτικοί στην οξείδωση και παραγωγή οργανικών οξέων.
- 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.



Σχήμα 2.2 Η διάταξη κάποιων συστατικών του αργού πετρελαίου

2.1.4 Φυσικές ιδιότητες

Οι σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες του πετρελαίου που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του στην εξόρυξη, τη μεταφορά αλλά και την επεξεργασία του είναι οι εξής:

- Πυκνότητα: Οι τύποι εκφράσεων της πυκνότητας του πετρελαίου που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι η ειδική πυκνότητα και η πυκνότητα API του Αμερικάνικου Ινστιτούτου Πετρελαίου (American Petroleum Institute, API). Η ειδική πυκνότητα είναι ο λόγος της μάζας μιας ουσίας στη μάζα του ισοδύναμου όγκου του νερού σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η πυκνότητα API ορίζεται από την Εξίσωση (2.1).

$$API\ Gravity = 141.5/\rho - 131.5 \quad (2.1)$$

Όπου, ρ είναι το ειδικό βάρος του πετρελαίου στους 15,6°C. Τα περισσότερα πετρέλαια ανήκουν στην κατηγορία των ελαφρών και των ενδιάμεσων αργών πετρελαίων. Βαρύτερα πετρέλαια χαρακτηρίζονται ως μη συμβατικά. Ένα ελαφρύ αργό πετρέλαιο παράγει κατά τη διύλιση του πολύ περισσότερα ελαφρά προϊόντα (βενζίνη) και λιγότερα βαριά από ότι παράγει ένα βαρύ αργό πετρέλαιο. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση του αργού πετρελαίου ανάλογα με την API πυκνότητά του.

- 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 – 32 °C.
- 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 [3].

Άλλες σημαντικές φυσικές ιδιότητες του πετρελαίου είναι το σημείο ανάφλεξης, η πίεση ατμού, η επιφανειακή τάση και η προσκόλληση.

Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση του πετρελαίου σε σχέση με την πυκνότητά του

	°API	ρ (στους 15,6 °C)
<i>Ελαφρύ</i>	>40 °API	<0,825
<i>Μέσο</i>	30 - 40 °API	0,825-0,875
<i>Βαρύ</i>	< 30 °API	0,825- 0,875
<i>Πολύ βαρύ</i>	< 10 °API	> 1

2.2 Το φυσικό αέριο

2.2.1 Σύντομη ιστορική ανασκόπηση

Το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα υδρογονανθράκων (και μη καύσιμων αερίων) σε αέρια κατάσταση, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο. Συνήθως βρίσκεται σε ξεχωριστούς ταμιευτήρες στο φλοιό της γης ή διαλυμένο στο πετρέλαιο. Η σύσταση του φυσικού αερίου στην έξοδο της γεώτρησης ποικίλλει σημαντικά τόσο ως προς τα συστατικά, όσο και ως προς τη συγκέντρωση αυτών των συστατικών και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε ταμιευτήρα.

Το φυσικό αέριο ήταν γνωστό από την αρχαιότητα και αρκετοί αρχαίοι ναοί, κυρίως στη Μέση Ανατολή, κτίστηκαν κοντά σε εκροές φυσικού αερίου. Ακόμη και για τους Δελφούς έχει διατυπωθεί η θεωρία ότι από την Κασταλία πηγή αναδυόταν μεθάνιο. Είναι πιθανόν ότι οι αναφορές του Πλούταρχου (100-125 μ.Χ.) στις «αιώνιες φωτιές» στην περιοχή του σύγχρονου Ιράκ να αφορούν στη φυσική διαρροή από το έδαφος και καύση φυσικού αερίου. Αναφέρεται ακόμη ότι ο Ιούλιος Καίσαρας είδε από κοντά την «καιόμενη πηγή» κοντά στη Γκρενόμπλ της Γαλλίας. Υποτυπώδεις γεωτρήσεις φυσικού αερίου είχαν ανορυχθεί στην Ιαπωνία πριν από το 615 μ.Χ., ενώ το 900 μ.Χ.

οι Κινέζοι μετέφεραν φυσικό αέριο με σωλήνες από μπαμπού σε μικρές αποστάσεις για να το χρησιμοποιήσουν στην εξάτμιση αλατούχου νερού. Πρακτικά, η σύγχρονη χρήση του φυσικού αερίου ξεκίνησε το 1821 στη Fredonia Gas Light Company της Νέας Υόρκης, όπου ανοίχθηκε η πρώτη γεώτρηση φυσικού αερίου, το οποίο χρησιμοποιούνταν για το φωτισμό παρακείμενων οικιών. Η πρώτη βιομηχανική χρήση του φυσικού αερίου έγινε σε χαλυβουργία και υαλουργία στο Πίτσμπουργκ των Η.Π.Α. το 1883. Το 1885 ο Robert Bunsen εφηύρε ένα σύστημα όπου αναμιγνύονταν φυσικό αέριο και αέρας. Ο «λύχνος Bunsen» κατέδειξε πως μπορεί να παραχθεί αποδοτικά θερμότητα από το φυσικό αέριο [1].



Σχήμα 2.3 (α) Η πρώτη λάμπα φυσικού αερίου σε δρόμο της Αμερικής (1817), (β) Οι μυστηριώδεις ατμοί στο Μαντείο των Δελφών, (γ) Ο λύχνος του Robert Bunsen (1855)

2.2.2 Σχηματισμός φυσικού αερίου

Εκατομμύρια χρόνια πριν πραγματοποιήθηκαν γεωλογικές καθιζήσεις κατά τη διάρκεια των οποίων τεράστιες ποσότητες οργανικής ύλης εγκλωβίστηκαν μέσα στη γη, συμβάλλοντας στο σχηματισμό πετρωμάτων. Με το πέρασμα των χρόνων, οι υψηλές θερμοκρασίες και οι πιέσεις που αναπτύχθηκαν από τις καθιζήσεις μαζών γης, πυροδότησαν μια σειρά χημικών διεργασιών που είχαν ως αποτέλεσμα τη μετατροπή της οργανικής ύλης σε υδρογονάνθρακες, οι οποίοι απορροφήθηκαν από πορώδη

πετρώματα δημιουργώντας κοιτάσματα. Με μια διαδικασία που διήρκεσε εκατομμύρια έτη, το αέριο τμήμα αυτών των υδρογονανθράκων διαχωριζόμενο από το βαρύτερο υγρό τμήμα (πετρέλαιο) ανερχόταν προς την επιφάνεια της γης. Κατά την ανοδική του πορεία, το αέριο αυτό τμήμα παγιδεύτηκε μέσα σε ειδικές δομές του υπεδάφους, σχηματίζοντας έτσι τις κοιλότητες φυσικού αερίου. Μια απαραίτητη προϋπόθεση για τη συσσώρευση του φυσικού αερίου είναι η παρουσία πορωδών πετρωμάτων, τα οποία καλύπτονται από μη διαπερατά πετρώματα, δηλαδή πετρώματα με δομή που εμποδίζει τη διέλευση του. Αυτή η γεωλογική διάταξη δεν παρατηρείται σε ολόκληρο τον γήινο φλοιό, παρά μόνο σε ορισμένες περιοχές και σε ορισμένα βάθη όπου και συναντάμε το φυσικό αέριο.

Το φυσικό αέριο μπορεί, επίσης, να σχηματιστεί με τη διεργασία του μετασχηματισμού της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς. Το είδος αυτό του μεθανίου 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. Όμως, κάτω από ειδικές συνθήκες 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 (π.χ. 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 [4].



Σχήμα 2.4 Ο σχηματισμός του φυσικού αερίου

2.2.3 Χημική σύσταση φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο είναι ένα εύφλεκτο μείγμα αέριων υδρογονανθράκων, το οποίο παράγεται από την αναερόβια αποσύνθεση οργανικής ύλης. Εξάγεται από υπόγειες κοιλότητες και εξαιτίας των ιδιοτήτων του θεωρείται ένα από τα λιγότερο ρυπογόνα καύσιμα. Το κύριο συστατικό του είναι το μεθάνιο (CH_4) και είναι το ίδιο αέριο που είναι ευρέως διαδεδομένο για χρήσεις θέρμανσης, μαγειρέματος κ.α. Ειδικότερα, το φυσικό αέριο αποτελείται κατά 70-90% από μεθάνιο και το υπόλοιπο ποσοστό αποτελείται κυρίως από σημαντικές ποσότητες αιθάνιου, προπάνιου και βουτάνιου. Επίσης, μπορεί να περιέχει σε μικρές ποσότητες διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, υδρόθειο, οξυγόνο και ευγενή αέρια. Η σύσταση του φυσικού αερίου μπορεί να διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό από γεώτρηση σε γεώτρηση. Η τυπική σύσταση του φυσικού αερίου παρατίθεται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Τυπική χημική σύσταση του φυσικού αερίου [4]

Συστατικά	% κατά όγκο σύσταση
Μεθάνιο (CH_4)	70 – 90 %
Αιθάνιο (C_2H_6)	0 – 20 %
Προπάνιο (C_3H_8)	
Βουτάνιο (C_4H_{10})	
Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2)	0 – 8 %
Άζωτο (N_2)	0 – 5 %
Υδρόθειο (H_2S)	
Οξυγόνο (O_2)	0 – 0.2 %
Ευγενή Αέρια (A, He, Xe, Ne)	ίχνη

Ανάλογα με την παρουσία ή την απουσία κάποιων συγκεκριμένων συστατικών, τα οποία έχουν ήδη περιγραφεί, το φυσικό αέριο μπορεί να χαρακτηριστεί στις εξής κατηγορίες:

- ❖ Ξηρό αέριο (dry): είναι το φυσικό αέριο που είναι απαλλαγμένο από τους υδρογονάνθρακες εκτός του μεθανίου και το νερό, δηλαδή το καθαρό μεθάνιο.
- ❖ Υγρό αέριο (wet): είναι το φυσικό αέριο που συμπεριλαμβάνει και άλλους υδρογονάνθρακες εκτός από το μεθάνιο (αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο κ.α.). Το φυσικό αέριο γίνεται περισσότερο «υγρό», καθώς αυξάνει το βάθος από το οποίο προέρχεται.
- ❖ Οξινό αέριο (sour): είναι το φυσικό αέριο που περιέχει CO_2 (σε ποσοστό $>2\%$), υδρόθειο και άλλες ενώσεις θείου, σε συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν συγκεκριμένα όρια.
- ❖ Γλυκό αέριο (sweet): είναι το φυσικό αέριο που περιέχει CO_2 σε μικρές συγκεντρώσεις ($<2\%$), ενώ οι συγκεντρώσεις του υδρόθειου και άλλων ενώσεων θείου είναι μικρότερες από κάποια όρια [1].

2.2.4 Ιδιότητες του φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο είναι ορυκτό καύσιμο που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4), είναι άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό. Η χαρακτηριστική του οσμή δίνεται τεχνικά, ώστε να γίνεται αντιληπτό σε τυχόν διαρροές. Ανήκει στη δεύτερη οικογένεια των αέριων καυσίμων. Είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και το ειδικό βάρος του είναι ίσο με 0.59. Σε περίπτωση επομένως διαρροής διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα. Τα όρια ανάφλεξης του φυσικού αερίου είναι 4.5% - 15% (δηλαδή η καύση δεν μπορεί να διατηρηθεί εάν η περιεκτικότητα του αέρα σε φυσικό αέριο είναι εκτός αυτών των ορίων). Η καύση του φυσικού αερίου, σε σχέση με αυτή άλλων καυσίμων, όπως ο γαιάνθρακας, έχει λιγότερο επιβλαβείς συνέπειες για το περιβάλλον. Για παράδειγμα, παράγει μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα για κάθε μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Η θερμογόνο δύναμη του φυσικού αερίου κυμαίνεται από 9.000-11.000 Kcal/Nm³, ενώ στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των αερίων που περιέχονται σε αυτό [5].

Πίνακας 2.3 Φυσικές ιδιότητες συστατικών φυσικού αερίου σε κανονικές συνθήκες

Συστατικό	Μοριακό βάρος M (kg/kmol)	Μοριακός όγκος V (m ³ /kmol)	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	Σχετική πυκνότητα d (Αέρας = 1)
Μεθάνιο	16.043	22.360	0.7175	0.5549
Αιθάνιο	30.069	22.191	1.355	1.048
Προπάνιο	44.096	21.928	2.011	1.555
κ-Βουτάνιο	58.123	21.461	2.708	2.094
Ισοβουτάνιο	58.123	21.550	2.697	2.086
κ-Πεντάνιο	72.150*	20.90*	3.452*	2.670*
Ισοπεντάνιο	72.150*	21.06*	3.426*	2.650*
κ-Εξάνιο	86.177*	20.10*	4.29*	3.315*
κ-Επτάνιο	100.203*	18.3*	5.48*	4.235*
Άζωτο	28.0134	22.403	1.2504	0.9671
Διοξείδιο του άνθρακα	44.0098	22.261	1.9770	1.5290
Υδροθείο	34.076	22.192	1.5355	1.1875
Ήλιο	4.0026	22.426	0.17848	0.1380

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική ανασκόπηση πολυφασικών ροών

3.1 Εισαγωγή

Φάση είναι μια από τις καταστάσεις της ύλης και μπορεί να είναι αέρια, υγρή και στερεή. Πολυφασική ροή είναι η ταυτόχρονη ροή διαφόρων φάσεων. Διφασική ροή είναι η απλούστερη περίπτωση της πολυφασικής ροής. Οι πολυφασικές ροές συναντώνται στη βιομηχανία, με παραδείγματα τη ροή αερίου-υγρού σε εξατμιστές και συμπυκνωτές, τις ροές αερίου-υγρού-στερεού σε χημικούς αντιδραστήρες, τις ροές στερεού-αερίου σε συστήματα μεταφοράς πεπιεσμένου αέρα κ.α. Στις ροές πολλαπλών φάσεων, η στερεά φάση συμβολίζεται με το δείκτη S , η υγρή φάση με το δείκτη L και η αέρια φάση με το δείκτη G . Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των τριών τύπων φάσης, είναι τα εξής:

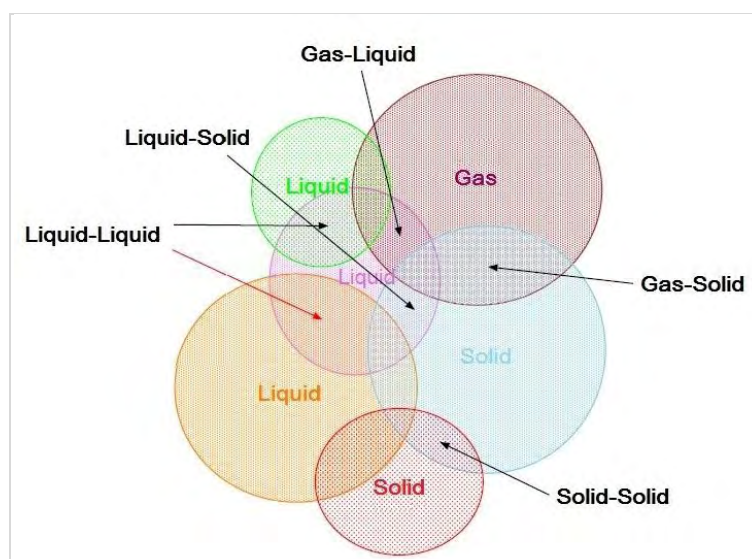
- ❖ Στερεά φάση: Σε μία πολυφασική ροή, η στερεά φάση είναι στη μορφή συσσωματωμάτων ή σωματιδίων τα οποία μεταφέρονται κατά μήκος της ροής. Τα χαρακτηριστικά της κίνησης του στερεού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των επιμέρους στοιχείων και από την κίνηση των σχετικών υγρών. Πολύ μικρά σωματίδια ακολουθούν τις κινήσεις του ρευστού, ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια αντιδρούν λιγότερο.
- ❖ Υγρή φάση: Σε μία πολυφασική ροή που περιέχει μία υγρή φάση, το υγρό μπορεί να είναι η συνεχής φάση που περιέχει διεσπαρμένα στερεά στοιχεία (σωματίδια), αέρια (φουσαλίδες) ή άλλα υγρά (σταγόνες). Επίσης, η υγρή φάση μπορεί να είναι μη συνεχής, όπως όταν η μορφή σταγόνων διακόπτεται σε μία αέρια φάση ή σε μία άλλη υγρή φάση. Μία άλλη σημαντική ιδιότητα των υγρών φάσεων σχετίζεται με τη διαβρεκτικότητα. Όταν μία υγρή φάση έρχεται σε επαφή με μία στερεά φάση (όπως στο τοίχωμα ενός καναλιού) και συνορεύει με μία άλλη φάση, η οποία είναι επίσης σε επαφή με το τοίχωμα, τότε υπάρχει μία

τριπλή διεπιφάνεια στο τοίχωμα και η γωνία που σχηματίζεται σε αυτή τη διεπιφάνεια, από τη διεπιφάνεια του υγρού-αερίου και του υγρού-στερεού είναι γνωστή ως γωνία επαφής.

- ❖ Αέρια φάση: Ένα αέριο έχει τις ίδιες ιδιότητες με ένα υγρό όταν αντιδρά σε δυνάμεις. Ωστόσο, έχει τη σημαντική επιπλέον ιδιότητα ότι είναι πολύ συμπίεσιμο σε σχέση με τα υγρά και τα στερεά. Παρά αυτή την ιδιότητα πολλές πολυφασικές ροές που περιέχουν αέρια αντιμετωπίζονται ως ασυμπίεστες, ειδικά όταν η πίεση είναι αρκετά υψηλή και ο αριθμός Mach σε σχέση με την αέρια φάση είναι χαμηλός (π.χ. < 0.2).

Η πιο συνηθισμένη κατηγορία πολυφασικών ροών είναι οι διφασικές ροές, στις οποίες περιλαμβάνονται η ροή αερίου-υγρού, η ροή αερίου-στερεού, η ροή υγρού-υγρού και η ροή υγρού-στερεού. Οι τριφασικές ροές έχουν πρακτική σημασία και τα παραδείγματά τους είναι τα εξής:

- ❖ Ροές αερίου-υγρού-στερεού: Αυτός ο τύπος συστήματος εμφανίζεται σε ρευστοποιημένη κλίνη δύο φάσεων και σε χημικούς αντιδραστήρες ανύψωσης αερίου, όπου μία αντίδραση αερίου-υγρού προάγεται από στερεά σωματίδια καταλύτη που αιωρούνται στο μίγμα.
- ❖ Τριφασικές ροές αερίου-υγρού-υγρού: μίγματα ατμών και δύο μη αναμίξιμες υγρές φάσεις συναντώνται σε χημικές εγκαταστάσεις. Παραδείγματα, είναι οι ροές αερίου-πετρελαίου-νερού σε συστήματα ανάκτησης πετρελαίου και οι μη αναμίξιμες ροές συμπυκνωμένου ατμού σε συστήματα συμπύκνωσης ατμού/υδρογονάνθρακα.
- ❖ Ροές στερεού-υγρού-υγρού: Ένα παράδειγμα τέτοιας ροής είναι η αντίδραση ενός μη αναμίξιμου υγρού-υγρού, κατά την οποία σχηματίζεται μία στερεά φάση που διαχωρίζεται στο σύστημα.



Σχήμα 3.1 Διάφορα είδη πολυφασικών ροών

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι οι πολυφασικές ροές δεν περιορίζονται μόνο σε τρεις φάσεις. Για παράδειγμα, ένα σύστημα ροής τεσσάρων φάσεων είναι η κρυστάλλωση με άμεση επαφή, στην οποία υγρό βουτάνιο εγχέεται σε διάλυμα από το οποίο σχηματίζονται κρύσταλλοι και η ψύξη είναι αποτέλεσμα της εξάτμισης του υγρού βουτανίου. Σε αυτή την περίπτωση οι τέσσερις φάσεις είναι το υγρό βουτάνιο, οι ατμοί βουτανίου, η φάση της διαλυόμενης ουσίας και η κρυσταλλική (στερεή) φάση [6].

3.2 Παράμετροι διφασικής ροής

Στη ρευστομηχανική η ροή μιας φάσης περιγράφεται από τα μεγέθη της ταχύτητας, της πυκνότητας και της πίεσης. Η ύπαρξη περισσότερων φάσεων σε μια πολυφασική ροή δημιουργεί την ανάγκη της εισαγωγής πρόσθετων παραμέτρων για την ολοκληρωμένη περιγραφή της ροής. Οι κατανομές της ταχύτητας, της πυκνότητας και της πίεσης πρέπει να συμπληρωθούν με τη διαμόρφωση κάθε φάσης.

Το Σχήμα 3.2 δείχνει την τομή μιας τυπικής ροής δύο φάσεων αερίου-υγρού σε έναν οριζόντιο ή σχεδόν οριζόντιο κυκλικό αγωγό. Η υγρή φάση, που είναι και η βαρύτερη, θα παραμείνει σε ένα συνεχές στρώμα κατά μήκος της βάσης του σωλήνα. Το αέριο θα ρέει σε ένα συνεχές στρώμα στο πάνω μέρος του σωλήνα. Μέρος του υγρού ή αερίου μπορεί επίσης να εισέρχεται στην άλλη φάση, το υγρό ως σταγονίδια στο αέριο και το αέριο ως φυσαλίδες στο υγρό.



Σχήμα 3.2 Διφασική ροή σε κυκλικό αγωγό

Οι σχετικές ταχύτητες των φάσεων προκύπτουν από την Εξίσωση (3.1), όπου A είναι το εμβαδόν της διατομής του αγωγού, με A_g , A_l τα εμβαδά της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και τη υγρή φάση αντίστοιχα και Q_l , Q_g τις αντίστοιχες ογκομετρικές παροχές στην υγρή και αέρια φάση. Οι περιοχές που καλύπτονται από κάθε φάση περιλαμβάνουν τόσο τα συνεχή στρώματα όσο και συστατικά που συμπαρασύρονται από την άλλη φάση.

$$Q = Q_l + Q_g, A = A_l + A_g, U_l = \frac{Q_l}{A_l}, U_g = \frac{Q_g}{A_g} \quad (3.1)$$

Μια σημαντική παράμετρος της διφασικής ροής είναι η σχέση μεταξύ των ποσοτήτων υγρού σε σχέση με το αέριο. Αυτή η παράμετρος ορίζεται ως η συγκράτηση του υγρού (holdup, H) και δείχνει το μέσο χρονικά όγκο που καταλαμβάνει το υγρό σε ορισμένο τμήμα του. Κλάσμα κενού (void fraction, a) είναι ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το αέριο στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. Τα δύο αυτά μεγέθη δίνονται από την Εξίσωση (3.2) και είναι σημαντικά επειδή προσδιορίζουν το χρόνο παραμονής των ρευστών στο σύστημα και επειδή χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης. Η σχέση μεταξύ τους είναι σταθερή και ίση με τη μονάδα.

$$H = \frac{A_l}{A}, a = \frac{A_g}{A}, H + a = 1 \quad (3.2)$$

Τα κλάσματα φάσης a_i χρησιμοποιούνται συχνά όταν υπάρχουν περισσότερες από δύο φάσεις. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, το άθροισμα των κλασμάτων πρέπει να ισούται με τη μονάδα (Εξίσωση 3.3).

$$\sum_{i=1}^N a_i = 1 \quad (3.3)$$

Επίσης, μπορεί να είναι ευκολότερη η περιγραφή της ροής των κλασμάτων όγκου ε_i σε όγκους ελέγχου. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός είναι η περιγραφή της σχετικής παρουσίας των φάσεων.

$$\varepsilon_i = \frac{V_{i,cv}}{V_{cv}}, \quad \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = 1 \quad (3.4)$$

Ειδική μαζική ροή είναι η μαζική ροή διαιρεμένη με τη διατομή της ροής ($\text{kg/m}^2\text{s}$) και δίνεται από την Εξίσωση (3.5).

$$G = \frac{W}{A} = \rho u \quad (3.5)$$

$$G = G_g + G_l \quad (3.6)$$

Όπου, ρ και u είναι η πυκνότητα και η ταχύτητα της συνολικής ροής.

Μερικές φορές είναι πιο πρακτική η χρήση των φαινομενικών ταχυτήτων των φάσεων (superficial velocities) αντί των σχετικών ταχυτήτων των φάσεων, δεδομένου ότι κάθε φάση διανέμεται σε ολόκληρη την επιφάνεια της διατομής. Στην Εξίσωση (3.7) δίνονται οι φαινομενικές ταχύτητες, οι οποίες ορίζονται από την ογκομετρική παροχή κάθε φάσης προς τη συνολική επιφάνεια του αγωγού.

$$U_{sl} = \frac{Q_l}{A} = \frac{G_l}{\rho_l}, \quad U_{sg} = \frac{Q_g}{A} = \frac{G_g}{\rho_g} \quad (3.7)$$

Οι φαινομενικές ταχύτητες των φάσεων μπορούν να συνδεθούν με τις ταχύτητες φάσης, μέσω της συγκράτησης του υγρού και του κλάσματος κενού του υγρού (Εξίσωση 3.8).

$$U_{sl} = HU_l, \quad U_{sg} = aU_g \quad (3.8)$$

Οι μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (average phase velocities) για την υγρή και αέρια φάση δίνονται από την Εξίσωση (3.9).

$$U_g = \frac{Q_g}{A\alpha} = \frac{G_g}{\rho_g\alpha} = \frac{U_{sg}}{\alpha} \quad (3.9)$$

$$U_l = \frac{Q_l}{A(1-\alpha)} = \frac{G_l}{\rho_l(1-\alpha)} = \frac{U_{sl}}{1-\alpha} \quad (3.10)$$

Ως μέση πραγματική ταχύτητα ρευστού U_m , ορίζεται το άθροισμα των φαινομενικών ταχυτήτων την υγρής και της αέριας φάσης, όπως φαίνεται στην Εξίσωση (3.11).

$$U_m = \frac{Q_l + Q_g}{A} = U_{sl} + U_{sg} \quad (3.11)$$

Κάθε φάση ταξιδεύει με διαφορετική ταχύτητα και η αναλογία των ταχυτήτων φάσης συμβολίζει την ταχύτητα ολίσθησης S . Η ταχύτητα ολίσθησης μπορεί να συνδεθεί επίσης

με τις φαινομενικές ταχύτητες των φάσεων. Επίσης, μπορεί να σχετίζονται με τις επιφανειακές ταχύτητες. Στην Εξίσωση (3.12) δίνεται η ολίσθηση, η οποία κυμαίνεται τυπικά σε μία περιοχή εγκάρσιας διατομής και όταν είναι γνωστή χρησιμοποιείται για την εύρεση μιας εκ των δύο ταχυτήτων.

$$S = \frac{U_g}{U_l} = \frac{HU_{sg}}{aU_{sl}} \quad (3.12)$$

Η συγκράτηση του υγρού (H) υπολογίζεται όταν η πυκνότητα του υγρού-αέριου μείγματος είναι γνωστή. Αυτό προκύπτει από τον ορισμό του H . Η Εξίσωση (3.13) χρησιμοποιείται συχνά, καθώς η μέτρηση της πυκνότητας του μίγματος μπορεί να γίνει, για παράδειγμα, με ανιχνευτές εμπέδησης.

$$H = \frac{\rho_{mix} - \rho_g}{\rho_l - \rho_g} \quad (3.13)$$

Η πλειοψηφία αυτών των παραμέτρων χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μετάθεσης (bulk motion/advection) της πολυφασικής ροής σε αγωγούς, δηλαδή της μεταφοράς ενέργειας στο ρευστό με τη φυσική μετατόπιση της ύλης. Στην πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών οι υπολογισμοί σε τέτοιες ροές είναι μονοδιάστατοι και περιγράφεται μόνο η έννοια της μετάθεσης, ενώ κατά την εξέταση των στοιχείων της ροής πρέπει να χρησιμοποιείται μία δισδιάστατη προσέγγιση [7].

3.3 Διφασική ροή

Η ροή υγρού-αερίου αποτελεί τον πιο πολύπλοκο τύπο διφασικής ροής, καθώς συνδυάζει τα χαρακτηριστικά μιας μεταβαλλόμενης διεπιφάνειας των φάσεων και τη συμπίεστικότητα της μιας τουλάχιστον από τις δύο φάσεις. Για γνωστές παροχές του υγρού και του αερίου, σε ένα γεωμετρικά ορισμένο αγωγό, η διεπιφάνεια μεταξύ των φάσεων μπορεί να πάρει οποιαδήποτε μορφή από έναν πολύ μεγάλο αριθμό πιθανών σχημάτων. Η πολυμορφία της διφασικής ροής, οφείλεται στην αύξηση ή γενικά στην μεταβολή της διεπιφάνειας, η οποία εξαρτάται από τα ρευστοθερμικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Η μορφή της διεπιφάνειας στην περίπτωση ροής σε αγωγό, εξαρτάται από τη γεωμετρία του, τις ιδιότητες του ρευστού και την κατανομή των φάσεων στη διατομή του. Ορισμένα ροϊκά φαινόμενα που βοηθούν στην ταξινόμηση της διφασικής ροής είναι τα εξής:

- Ανάλογα με τις συνθήκες ροής μπορεί να υπάρξουν περιοχές στον αγωγό όπου η μια φάση είναι συνεχής και η άλλη ασυνεχής (π.χ. φυσαλίδες αερίου σε υγρό μέσο).
- Στην περιοχή όπου η υγρή ή η αέρια φάση είναι συνεχής η φάση που εμφανίζει ασυνέχεια (φυσαλίδες ή σταγονίδια), τείνει να πάρει ένα σχεδόν σφαιρικό σχήμα υπό την επίδραση της επιφανειακής τάσης.
- Γενικά, η υγρή φάση έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα του αγωγού ενώ η αέρια εμφανίζει την τάση να συγκεντρώνεται στο κέντρο του αγωγού.
- Στην οριζόντια ροή η επίδραση των δυνάμεων της βαρύτητας συντείνει στη ροή των φάσεων σε στρώματα (στρωματοποίηση της ροής).

Ο συνδυασμός των παραπάνω παραγόντων κάνει δυνατή την ταξινόμηση των διαφορετικών περιοχών ροής υγρού-αερίου σε διάφορα ροϊκά καθεστώτα (flow regimes). Στην προσπάθεια ανάλυσης της μορφολογίας της διφασικής ροής οι ερευνητές υιοθέτησαν ένα μεγάλο αριθμό ονομάτων για να χαρακτηρίσουν τους διάφορους τύπους ροής. Μερικά από αυτά είναι εναλλακτικές ονομασίες για τον ίδιο τύπο ροής, άλλα αναφέρονται σε υποκατηγορίες τους και άλλα σε ομαδοποιήσεις συναφών ροϊκών τύπων.

3.4 Ροϊκοί τύποι κατακόρυφης διφασικής ροής

Η πολυμορφία των διφασικών ροϊκών τύπων συνέβαλε στην ανάπτυξη της πολυπλοκότητας των προτύπων ανάλυσης της διφασικής ροής. Η σωστή διάγνωση του ροϊκού τύπου παίζει καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων, δηλαδή στον καθορισμό των απωλειών λόγω τριβής του συστήματος. Η τελική μορφή που θα πάρει η διεπιφάνεια των φάσεων για συγκεκριμένες ροϊκές συνθήκες στον αγωγό εξαρτάται από την επίδραση διαφόρων παραμέτρων, με κυριότερο την παροχή μάζας των φάσεων. Έτσι το ροϊκό πεδίο μπορεί να έχει τη μορφή της πλήρους διασποράς του αερίου (ροή με φυσαλίδες) έως την πλήρη διασπορά της υγρής φάσης (ομιχλώδης ροή). Η διφασική ροή σε έναν κατακόρυφο αγωγό τείνει να είναι πιο συμμετρική, επειδή η βαρύτητα δρα ισότιμα στις περιφερειακές κατευθύνσεις. Η επίδραση της βαρύτητας διαδραματίζει έναν πιο κυρίαρχο ρόλο στην υγρή φάση, και ως εκ τούτου σε ολόκληρη

τη διαφασική ροή σε έναν κατακόρυφο αγωγό. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζονται οι ροϊκοί τύποι κατακόρυφης διαφασικής ροής και η ανάπτυξη μιας φυσαλίδας Taylor σε διαλείπουσα ροή. Η ταξινόμηση των κυριότερων ροϊκών τύπων της διαφασικής ροής υγρού-αερίου σε κατακόρυφους αγωγούς είναι η εξής [8]:

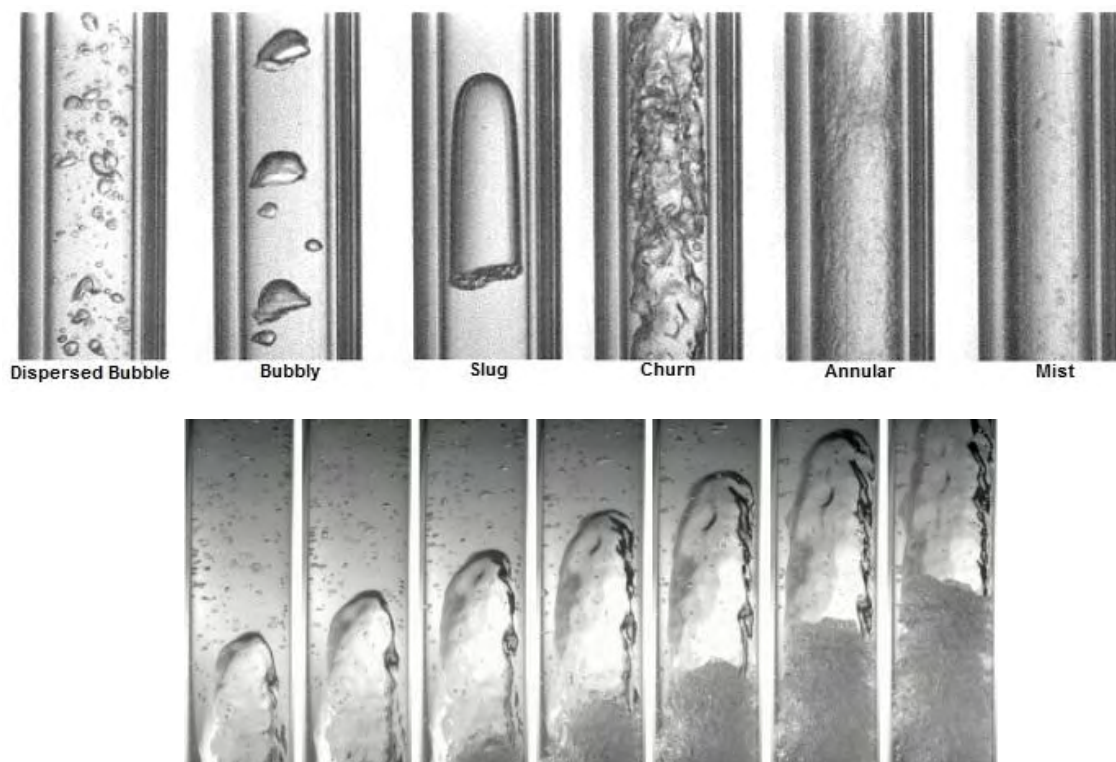
- ❖ **Ροή με φυσαλίδες (Bubbly flow):** Η φέρουσα φάση είναι η υγρή, ενώ η αέρια φάση εμφανίζει μεγάλη διασπορά στο υγρό μέσο με τη μορφή φυσαλίδων. Οι φυσαλίδες του αερίου κινούνται μέσα σε τυρβώδες περιβάλλον που επηρεάζει σημαντικά την κίνηση τους. Λόγω της επίδρασης των δυνάμεων άνωσης και του προφίλ της ταχύτητας, η μέση ταχύτητα της αέριας φάσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν της υγρής φάσης. Το μέγεθος των φυσαλίδων ποικίλλει ευρέως, αλλά είναι γενικά μικρό σε σύγκριση με τη διάμετρο του αγωγού. Γενικά, διακρίνονται δύο διαφορετικοί τύποι ροών με φυσαλίδες: η ροή με φυσαλίδες σε διασπορά (dispersed bubble flow) και η ροή με φυσαλίδες σε παραμόρφωση (distorted bubble flow). Στον πρώτο τύπο ροής οι φυσαλίδες είναι σχεδόν σφαιρικές και βρίσκονται σε διασπορά λόγω του τυρβώδους ροϊκού πεδίου της φέρουσας φάσης. Στο δεύτερο τύπο ροής ενώνονται μικρές σφαιρικές φυσαλίδες δημιουργώντας επιμήκεις φυσαλίδες μη-σφαιρικού σχήματος, οι οποίες αποφεύγουν τη στένωση λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας. Ο δεύτερος τύπος ροής υφίσταται μόνο σε κατακόρυφους αγωγούς, ενώ ο πρώτος παρατηρείται σε αγωγούς οποιασδήποτε κλίσης. Είναι σημαντικό να γίνει αυτός ο διαχωρισμός, στην περίπτωση υπολογισμού της διαμέτρου της φυσαλίδας και του συντελεστή αντίστασης, που διαφέρουν για κάθε τύπο ροής.

- ❖ **Διαλείπουσα ροή (Slug/plug flow):** Το ροϊκό πεδίο συνίσταται σε δύο περιοχές ροής, της φυσαλίδας Taylor και της περιοχής μίξης των φάσεων (liquid slug). Αυτό το είδος ροής δημιουργείται όταν η διάμετρος των φυσαλίδων του αερίου τείνει να γίνει ίση με τη διάμετρο του αγωγού. Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται βληματοειδείς συμμετρικές φυσαλίδες ως προς τον άξονα του αγωγού (bullet-shaped bubbles), οι οποίες είναι γνωστές ως «φυσαλίδες Taylor». Οι φυσαλίδες Taylor σε μία ανοδική ροή, διαχωρίζονται συνήθως από περιοχές που καταλαμβάνονται από το υγρό μαζί με μία διασπορά σφαιρικών φυσαλίδων μικρής διαμέτρου. Η μέση ταχύτητα της αέριας φάσης συνήθως είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν της υγρής φάσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το

μήκος της περιοχής μίξης είναι αρκετά μικρό. Λόγω της ύπαρξης ανομοιομορφίας στο μείγμα η ροή τείνει να πάρει παλμοειδή μορφή φαινόμενο που δυσχεραίνει σημαντικά τις πειραματικές μετρήσεις.

- ❖ **Ακανόνιστη Ροή (Churn flow):** Καθώς οι φυσαλίδες Taylor μεγαλώνουν, λόγω των υψηλών ταχυτήτων της αέριας φάσης, αρχίζουν να διασπώνται, κάτι που οδηγεί σε μία περισσότερο τυχαία και ασταθή ροή, με ισχυρές ταλαντώσεις και αναταράξεις της υγρής φάσης. Παρόλο που το αέριο κινείται συνεχώς προς τα πάνω, στην υγρή φάση μπορεί να εμφανιστεί διαλείπουσα προς τα άνω και προς τα κάτω ροή, αφού η διατμητική δύναμη από την αέρια φάση μπορεί να ισορροπήσει την κλίση της πίεσης που επιβάλλεται και τη δύναμη της βαρύτητας. Αυτό το καθεστώς ροής ονομάζεται ακανόνιστη ροή και είναι ένα ενδιάμεσο καθεστώς μεταξύ της διαλείπουσας ροής (slug/plug flow) και της δακτυλιοειδούς ροής (annular flow). Η ροή αυτή παρατηρείται κυρίως σε αγωγούς μεγάλης διαμέτρου όπου και το φαινόμενο είναι περισσότερο έντονο σε σχέση με τους αγωγούς μικρότερης διαμέτρου. Όταν η διάμετρος του κατακόρυφου σωλήνα είναι μικρή και η παροχή είναι υψηλή, το πρότυπο της ροής μπορεί να αλλάξει κατευθείαν από διαλείπουσα ροή σε μία εκφυλισμένη μορφή δακτυλιοειδούς ροής, με τη δημιουργία διεπιφανειακών κυμάτων και με το υγρό φιλμ να αλλάζει συνεχώς διεύθυνση, χωρίς να περάσει από το καθεστώς της ακανόνιστης ροής .
- ❖ **Δακτυλιοειδής Ροή (Annular flow):** Αυτό το είδος ροής απαντάται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές διφασικής ροής. Σε σχετικά υψηλή ταχύτητα, η λεπτή στρώση υγρού ρέει κατά μήκος της εσωτερικής περιμέτρου του αγωγού και στον κεντρικό πυρήνα του αγωγού ρέει η αέρια φάση. Η δακτυλιοειδής ροή προκαλείται από τη διεπιφανειακή διάτμηση του αερίου υψηλής ταχύτητας στο υγρό φιλμ που κυριαρχεί επί της βαρύτητας. Στη συνέχεια, αποβάλλεται υγρό από το κέντρο του σωλήνα σχηματίζοντας ένα φιλμ στο τοίχωμα του σωλήνα. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του αερίου στον πυρήνα είναι αρκετά υψηλότερη από την ταχύτητα του υγρού, η αέρια φάση του πυρήνα μπορεί να αναταράξει το στρώμα του υγρού και να προκαλέσει κύματα στο υγρό φιλμ. Επίσης, είναι πιθανό μια ποσότητα υγρού να κατακρατηθεί από την αέρια φάση υπό μορφή σταγονιδίων ή κάποιες μικρές φυσαλίδες να παρασυρθούν

μέσα στο υγρό φιλμ. Τέλος, σε υψηλές ποιότητες του μίγματος όταν υφίσταται και πρόσδωση θερμότητας, το φιλμ του υγρού πρακτικά εξαφανίζεται ή διασπάται, έτσι ώστε όλο το υγρό να ρέει μαζί με το αέριο υπό μορφή υγρασίας. Αυτή η ειδική περίπτωση δακτυλιοειδούς ροής ονομάζεται ομιχλώδης ροή (mist flow).



Σχήμα 3.3 (α) Φωτογραφίες καθεστώτων ροής προς τα πάνω σε κατακόρυφο αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 4.26 mm, (β) Φυσαλίδα Taylor σε διαλείπουσα ροή [66]

3.5 Ροϊκοί χάρτες κατακόρυφης ροής

Μια πολυφασική ροή χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη των διασυνδέσεων μεταξύ των φάσεων και των ασυνεχειών των ιδιοτήτων που σχετίζονται. Οι μονοφασικές ροές μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την εξωτερική γεωμετρία του καναλιού ροής, καθώς επίσης και το είδος της ροής (π.χ. στρωτή ροή), ανάλογα με τις διακυμάνσεις και τις χαοτικές κινήσεις που παρουσιάζονται. Αντίθετα, η πολυφασική ροή ταξινομείται σύμφωνα με τις εσωτερικές κατανομές των φάσεων ή αλλιώς των «προτύπων ροής» (flow patterns) ή απλά των «καθεστώτων» (regimes). Ο πιο διαδεδομένος τρόπος απεικόνισης των ροϊκών τύπων διφασικής ροής είναι η ταξινόμηση τους με βάση πειραματικές παρατηρήσεις από μεθόδους οπτικοποίησης της ροής (flow visualisation)

και η απεικόνιση τους σε ένα διάγραμμα εργασίας-χάρτης περιοχών ροής (flow regime map), αναφορικά με κάποιες χαρακτηριστικές ροϊκές παραμέτρους του συστήματος. Σε ένα μείγμα δύο φάσεων αερίου-υγρού σε ένα κανάλι, εμφανίζονται διαφορετικές δομές ή γεωμετρίες στην εσωτερική ροή, ανάλογα με το μέγεθος ή τον προσανατολισμό του καναλιού ροής, τα μεγέθη των παραμέτρων ροής του αερίου και του υγρού, τα σχετικά μεγέθη αυτών των παραμέτρων ροής και τις ιδιότητες του ρευστού των δύο φάσεων. Στη βιβλιογραφία, συγκεντρώνεται μία ευρεία ποικιλία πολυφασικών προτύπων ροής. Για παράδειγμα, το 1983 διεξήχθη μια έρευνα, η οποία πρότεινε 84 διαφορετικά πρότυπα ροής που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία [9]. Οι διαφορετικές αυτές παραλλαγές οφείλονται στην υποκειμενική φύση των ορισμών των προτύπων ροής και εν μέρει σε μια ποικιλία ονοματολογίας που έχει δοθεί σε κάποια αναγκαστικά πανομοιότυπα πρότυπα ροής. Στην πραγματικότητα υπάρχουν λίγα βασικά πρότυπα ροής με μεταβάσεις που συνδέονται.

3.5.1 Βιβλιογραφική αναφορά σημαντικών ροϊκών χαρτών

Αν και υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του προτύπου ροής, η επικρατέστερη μέθοδος είναι η ταυτοποίηση των προτύπων ροής μέσω της οπτικής παρατήρησης σε πειράματα και ο εντοπισμός τους στο ροϊκό χάρτη. Στη βιβλιογραφία υπάρχει μία ευρεία ποικιλία ροϊκών χαρτών σε αγωγούς. Η πλειοψηφία αυτών των χαρτών έχει ως σύστημα συντεταγμένων τις φαινομενικές ταχύτητες της αέριας-υγρής φάσης, ωστόσο βιβλιογραφικά υπάρχει μία ποικιλία ροϊκών χαρτών, που χρησιμοποιεί διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων, όπως είναι οι ροϊκοί χάρτες των Hewitt & Roberts [10] και του Baker [11]. Νωρίτερα, οι περισσότεροι ροϊκοί χάρτες βασιζόνταν σε εμπειρικούς συσχετισμούς που προήλθαν από πειραματικά δεδομένα και είχαν περιορισμένη εφαρμογή.

Στην περίπτωση της καθοδικής κατακόρυφης ροής, τα ροϊκά πεδία που παρατηρούνται είναι πολύ διαφορετικά από τα αντίστοιχα της ανοδικής, με κύριο χαρακτηριστικό την επικράτηση του δακτυλιοειδούς ροϊκού πεδίου. Εργασίες για κατακόρυφη καθοδική ροή έχουν δημοσιευτεί από τους Golan & Stenning [12] και Oshinowo & Charles [13]. Ο χάρτης των Golan & Stenning για μείγμα νερού-αέρα φαίνεται στο Σχήμα 3.5 (β). Οι Oshinowo & Charles προσπάθησαν να γενικεύσουν τις πειραματικές μετρήσεις που

παρήγαγαν, αλλά τα αποτελέσματα τους αποκλίνουν σημαντικά με τα αντίστοιχα του χάρτη των Golan & Stenning.

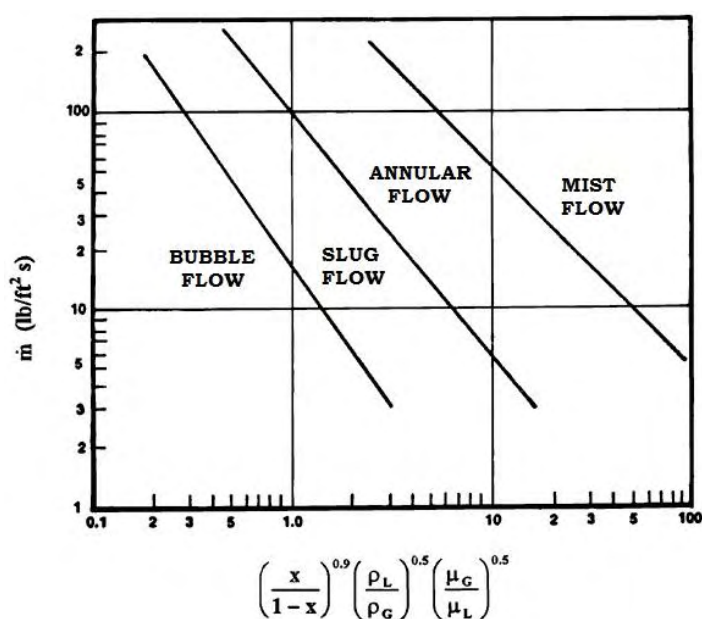
Στο ροϊκό χάρτη του Fair [14], αρχικά υπολογίζεται η τιμή του άξονα x και η μαζική ταχύτητα ($\text{lb/ft}^2\text{s}$). Στη συνέχεια, αυτές οι δύο τιμές χρησιμοποιούνται για την κάθετη και οριζόντια μελέτη του γραφήματος προκειμένου να βρεθεί το σημείο τομής. Η θέση αυτού του σημείου καθορίζει το καθεστώς της ροής, δηλαδή αν η ροή ανήκει στη ροή με φυσαλίδες, στη διαλείπουσα ροή, στη δακτυλιοειδή ροή ή στην ομιχλώδη ροή, ενώ οι πλάγιες γραμμές του γραφήματος δείχνουν τα όρια μετάβασης μεταξύ των ροϊκών καθεστώτων.

Όσον αφορά τον ροϊκό χάρτη των Hewitt & Roberts [10] για ανοδική ροή σε κατακόρυφο αγωγό, υπολογίζονται αρχικά οι μαζικές ταχύτητες του υγρού και του αερίου (ή του ατμού), χρησιμοποιώντας την ποιότητα του ατμού. Έπειτα, καθορίζονται οι τιμές των συντεταγμένων x και y και το σημείο τομής τους στο χάρτη προσδιορίζει το πρότυπο της ροής, το οποίο προβλέπεται ότι υπάρχει στις συγκεκριμένες συνθήκες ροής [15].

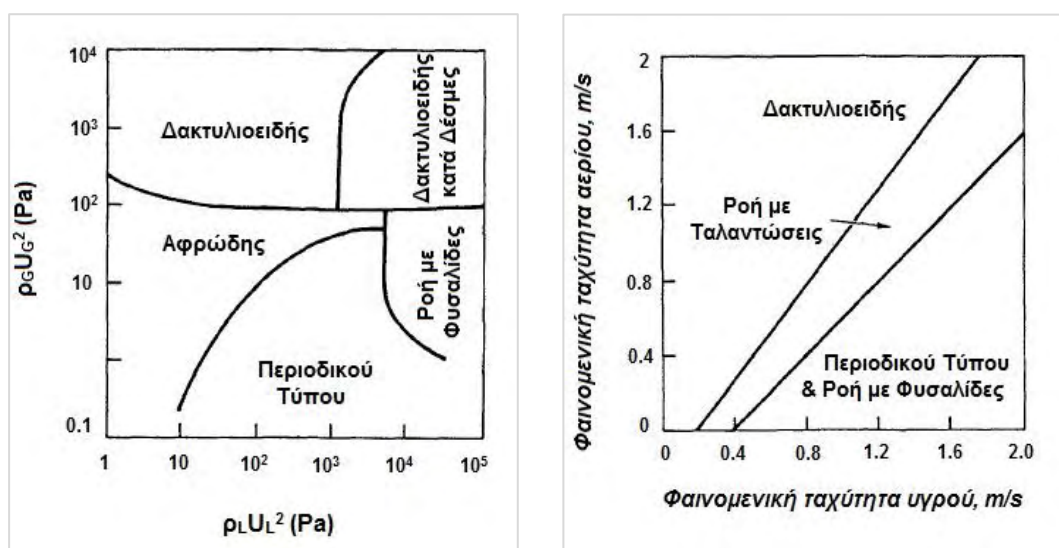
Οι Taitel et al. [16] δημιούργησαν τον πρώτο μηχανιστικό χάρτη ροής για οριζόντιες ροές με βάση τον μηχανισμό των φυσικών μεταβάσεων για κάθε καθεστώς ροής. Οι Taitel et al. [17] τροποποίησαν το ροϊκό χάρτη των Dukler & Taitel [18] για κατακόρυφη προς τα άνω ροή αέρα-νερού στους 25°C και $0,1\text{ MPa}$, σε σωλήνες 25 και 50 χιλιοστών. Οι Weisman & Kang [19] και οι McQuillan & Whalley [20], παρουσίασαν επίσης τροποποιημένους ροϊκούς χάρτες για κατακόρυφη διφασική ροή προς τα άνω. Οι Mishima & Ishii [21] όπως και οι Taitel et al. [17] παρουσίασαν επίσης μία μηχανιστική μετάβαση στα καθεστώτα ροής για ανοδική διφασική ροή σε κάθετους αγωγούς, που ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό με άλλους κάθετους χάρτες ροής. Ένα ενιαίο μοντέλο για όλο το φάσμα των κλίσεων ενός σωλήνα, συμπεριλαμβανομένης της κάθετης και οριζόντιας κλίσης, παρουσιάστηκε από τον Barnea [22]. Το Σχήμα 3.6 δείχνει τον ροϊκό χάρτη των Taitel et al. [17] για κατακόρυφη προς τα άνω ροή.

Σήμερα, η χρήση των ροϊκών χαρτών παραμένει ευρέως διαδεδομένη, αν και αναγνωρίζεται ότι η ακρίβεια των προβλέψεων περιορίζεται για ένα μικρό πεδίο ροϊκών παραμέτρων. Το πρόβλημα γίνεται εμφανές σε περιπτώσεις ροής με υψηλές πιέσεις και αγωγούς μεγάλης διαμέτρου, αφού η πλειοψηφία των διαγραμμάτων αναπτύχθηκε για διφασική ροή αέρα-νερού σε αγωγούς μικρής διαμέτρου. Υπάρχει μια συνεχής

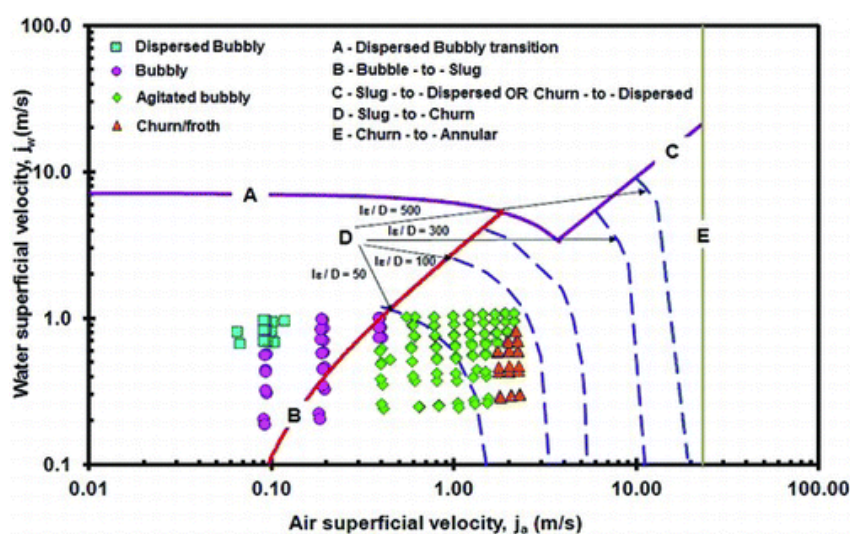
αναζήτηση για ροϊκούς χάρτες των οποίων οι συντεταγμένες μπορούν να γενικευτούν. Ωστόσο, η μεγαλύτερη δυσκολία προκύπτει από το γεγονός ότι αν και για συγκεκριμένες ροϊκές συνθήκες είναι δυνατή η πρόβλεψη του τύπου ροής που θα εμφανιστεί, οι συνθήκες στις οποίες θα γίνει η μετάβαση από έναν τύπο ροής σε άλλο δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν αξιόπιστα και με ακρίβεια. Η ανάγκη για ακριβή πρόβλεψη του τύπου ροής αλλά και των ορίων του οδήγησε τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη κριτηρίων μετάβασης που βασίζονται περισσότερο στη θεωρητική διερεύνηση και μαθηματική προσομοίωση των ρευστοθερμικών φαινομένων που προκαλούν την μετάβαση και λιγότερο στα εμπειρικά ή πειραματικά διαγράμματα ροής.



Σχήμα 3.4 Ροϊκός χάρτης του Fair [14]



Σχήμα 3.5 (α) Ροϊκός χάρτης των Hewitt & Roberts για κατακόρυφη μεταφορά αέρα – νερό [10], (β) Ροϊκός χάρτης των Golan & Stenning [12]



Σχήμα 3.6 Χάρτης καθεστώτων ροής για κατακόρυφο σωλήνα διαμέτρου 254 mm. Οι γραμμές δείχνουν τις μεταβάσεις στα καθεστώτα ροής σύμφωνα με τους Taitel et al. [23]

3.5.2 Κριτήρια μετάβασης στα καθεστώτα ροής για κατακόρυφη προς τα άνω ροή

Η γνώση του ποιου προτύπου ροής εμφανίζεται κάτω από ποια κατάσταση είναι πολύ σημαντική, καθώς κάθε καθεστώς ροής καταλήγει σε διαφορετικά υδροδυναμικά χαρακτηριστικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν περαιτέρω ιδιότητες, όπως είναι η πτώση πίεσης και η δυνατότητα μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Ως εκ τούτου, ο προσδιορισμός του καθεστώτος ροής και των μεταβάσεών του παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο. Οι μεταβάσεις των καθεστώτων ροής εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι οι ταχύτητες αερίου-υγρού, οι ιδιότητες του ρευστού, ο προσανατολισμός του αγωγού, η διάμετρος του αγωγού και οι συνθήκες λειτουργίας. Η πειραματική μέθοδος είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος αναγνώρισης των καθεστώτων ροής, αλλά ο προσδιορισμός των μεταβάσεων στα διάφορα καθεστώτα ροής μπορεί να γίνει και με τη χρήση εμπειρικών και μηχανιστικών μοντέλων. Ο δεύτερος τρόπος προσδιορισμού είναι αρκετά επιτυχής, επειδή εξηγεί το μηχανισμό που διέπει τη μετάβαση μεταξύ των καθεστώτων ροής. Οι Taitel et al. [17], οι Mishima & Ishii [21], οι McQuillan & Whalley (1985) και ο Barnea [22], είναι μερικοί από τους πιο γνωστούς ερευνητές, που δημιούργησαν μηχανιστικά μοντέλα για τους συνηθέστερους ροϊκούς τύπους κατακόρυφης ροής. Ωστόσο, υπάρχουν και κάποιοι άλλοι ερευνητές που δημιούργησαν ειδικά μοντέλα για συγκεκριμένα καθεστώτα ροής, όπως είναι η

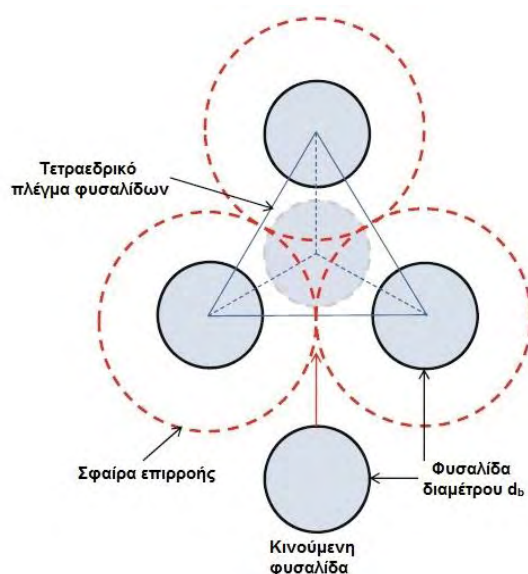
μετάβαση από τη ροή με φυσαλίδες στη ροή με φυσαλίδες σε διασπορά και η μετάβαση από τη διαλείπουσα ροή στην ακανόνιστη ροή. Η πλειοψηφία των ερευνών που διεξήχθησαν παλαιότερα, σχετίζονταν με τις συνολικές μεταπτώσεις ροής για όλα τα καθεστώτα ροής ή για ένα μόνο καθεστώς ροής, με εφαρμογή κυρίως σε συμβατικά μεγέθη σωλήνα ($D < 100\text{mm}$).

3.5.2.1 Μετάβαση από ροή με φυσαλίδες σε διαλείπουσα ροή

Η μετάβαση σε ένα σωλήνα από τη ροή με φυσαλίδες στη διαλείπουσα ροή εμφανίζεται κυρίως λόγω της συσσώρευσης και της συνένωσης των μικρότερων φυσαλίδων σε βληματοειδείς φυσαλίδες. Όταν σχηματιστεί μια βληματοειδής φυσαλίδα, επιπλέον συσσωματώματα φυσαλίδων ακολουθούν την περιοχή απορεύματος της βληματοειδής φυσαλίδας. Σύμφωνα με πειράματα η μετάβαση αυτή συμβαίνει όταν το κλάσμα κενού ισούται περίπου με 0.3. Οι Radovicich & Moissis [24] απέδειξαν ποιοτικά ότι η πιθανότητα των συγκρούσεων αυξάνεται σημαντικά όταν το κλάσμα κενού είναι περίπου 0.3, το οποίο έθεσαν ως αξίωμα για την αιτία μετάβασης του καθεστώτος της ροής. Οι Dukler & Taitel [16] πρότειναν ως κριτήριο μετάβασης το κλάσμα κενού να ισούται με 0.3. Στη συνέχεια, χρησιμοποίησαν μία συσχέτιση της σχετικής ταχύτητας την οποία μετέτρεψαν σε μια συμβατική μορφή που βασίζονταν στις φαινομενικές ταχύτητες του υγρού και του αερίου. Επομένως, μετά από αυτές τις παρατηρήσεις, το κριτήριο μετάβασης από τη ροή με φυσαλίδες στη διαλείπουσα ροή δίνεται από την Εξίσωση (3.14).

$$\alpha = 0.3 \quad (3.14)$$

Η τιμή του 0.3 μπορεί επίσης να ληφθεί μόνο από μία πολύ απλή γεωμετρική εξέταση. Υποθέτουμε ότι οι φυσαλίδες διανέμονται σε ένα τετραεδρικό πρότυπο πλέγματος, στο οποίο κάθε φυσαλίδα αυξομειώνεται. Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχει μια σφαίρα επιρροής γύρω από κάθε φυσαλίδα. Παρόλο που αυτές οι σφαίρες επιρροής αλληλοεπικαλύπτονται σε ορισμένες περιπτώσεις, το άθροισμα των όγκων τους ισούται με το συνολικό όγκο του μείγματος. Ο αριθμός τόσο των συγκρούσεων όσο και των συσσωματωμάτων θεωρείται ότι γίνεται πολύ μεγάλος, αν η μέγιστη πιθανή απόσταση l μεταξύ δύο φυσαλίδων γίνει μικρότερη από τη διάμετρο μιας φυσαλίδας d_b . Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το τετραεδρικό πλέγμα φυσαλίδων που προτάθηκε από τους Mishima & Ishii [21].



Σχήμα 3.7 Μέγιστο συσσωμάτωμα σφαιρικών φυσαλίδων κατά τη μετάβαση στη διαλείπουσα ροή [66]

Υπό αυτές τις συνθήκες, είναι προφανές ότι οι φυσαλίδες παραμορφώνονται σημαντικά κατά τη διάρκεια κάθε αλληλεπίδρασης. Η προϋπόθεση αυτής της συνθήκης δίνεται από την Εξίσωση (3.15).

$$\alpha = \left(\frac{2}{3}\right)^3 = 0.296 \cong 0.3 \quad (3.15)$$

Για τη μετατροπή της Εξίσωσης (3.16) σε μια συμβατική μορφή βασισμένη στις φαινομενικές ταχύτητες, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση μεταξύ του j_g και του j_r η οποία προέρχεται από την ταχύτητα μετατόπισης για ροή με φυσαλίδες.

$$\frac{j_g}{\alpha} = C_0 j + \sqrt{2 \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2}\right)^{1/4}} (1 - \alpha)^{1.75} \quad (3.16)$$

Όπου,

- j_g : φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης
- α : κλάσμα κενού
- C_0 : παράμετρος κατανομής
- j : φαινομενική ταχύτητα του μίγματος δύο φάσεων
- σ : επιφανειακή τάση
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας
- $\Delta \rho$: απόλυτη τιμή της διαφοράς πυκνότητας

- ρ_f : πυκνότητα υγρής φάσης

Η παράμετρος C_0 δίνεται από τις Εξισώσεις (3.17) και (3.18).

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)}, \text{ για αγωγούς κυλινδρικής διατομής} \quad (3.17)$$

$$C_0 = 1.35 - 0.35 \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)}, \text{ για αγωγούς ορθογωνικής διατομής} \quad (3.18)$$

Επίσης, σύμφωνα με την Εξίσωση (3.19) ισχύει ότι η φαινομενική ταχύτητα του μείγματος ισούται με το άθροισμα της φαινομενικής ταχύτητας του αερίου και του υγρού.

$$j = j_g + j_f \quad (3.19)$$

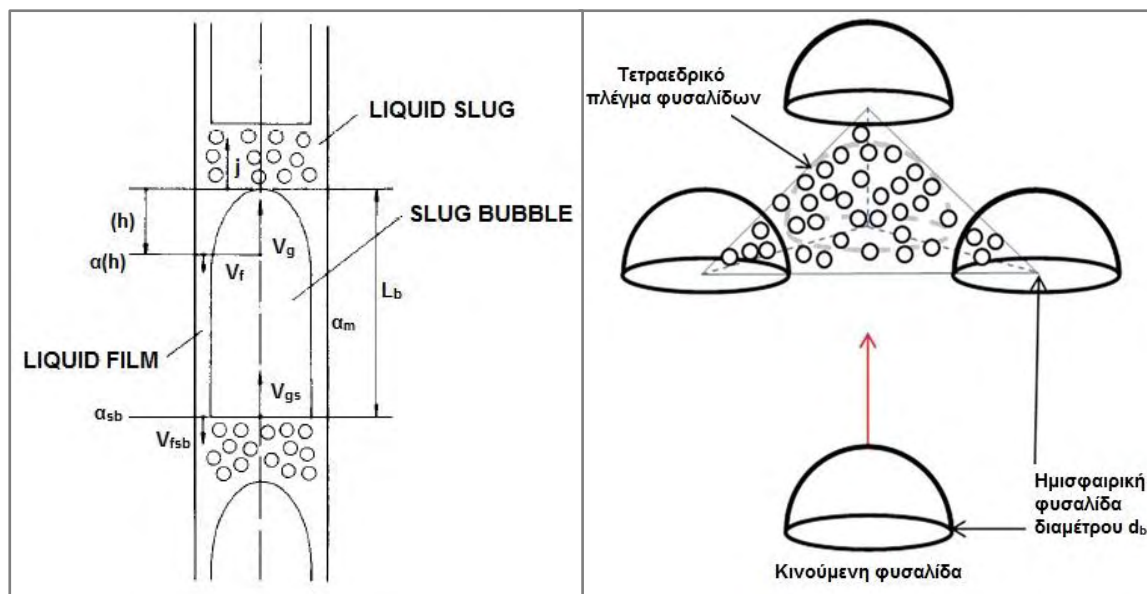
Επομένως, η σχέση μεταξύ j και j_f κατά τη μετάβαση δίνεται από την Εξίσωση (3.20).

$$j_f = \left(\frac{3.33}{C_0} - 1\right) j_g - \frac{0.76}{C_0} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.20)$$

3.5.2.2 Μετάβαση από διαλείπουσα ροή σε ακανόνιστη ροή

Με την αύξηση του ρυθμού εισαγωγής του αέρα, μειώνεται όπως είναι φυσικό και η πυκνότητα της υγρής μάζας ανάμεσα στις φυσαλίδες Taylor. Αν ξεπεράσουμε μια προκαθορισμένη τιμή θα λάβει χώρα και η μετάπτωση στην ανάμεικτη ροή. Κατά την ανάμεικτη ροή οι φυσαλίδες Taylor έχουν χάσει τη μορφή τους. Ο αυξημένος ρυθμός εισαγωγής αέρα προκαλεί ασυνέχεια στις υγρές μάζες που βρίσκονται ανάμεσα στις φυσαλίδες Taylor. Οι τελευταίες χάνουν την ισορροπία τους, συσσωρεύονται και υψώνονται ξανά από την αέρια φάση. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της ανάμεικτης ροής είναι η ταλαντωτική πάνω-κάτω κίνηση του υγρού φιλμ και των υγρών μαζών.

Ένα χαρακτηριστικό μοντέλο διαλείπουσας ροής φαίνεται στο Σχήμα 3.8 (α), ενώ στο Σχήμα 3.8 (β) παρουσιάζεται η διάταξη των φυσαλίδων κατά τη μετάβαση στην ακανόνιστη ροή. Η υγρή μάζα μπορεί να διαιρεθεί στην περιοχή αποκόλλησης, στη μεταβατική και στην αναπτυγμένη περιοχή. Φυσαλίδες εισέρχονται στη μεταβατική περιοχή από την περιοχή αποκόλλησης κοντά στον άξονα του αγωγού και διαχέονται σε όλο το σωλήνα. Με την αύξηση του ρυθμού ροής της αέριας φάσης, επεκτείνεται η περιοχή αποκόλλησης και η ροή γίνεται περισσότερο τυρβώδης.



Σχήμα 3.8 (α) Μετάβαση από τη διαλείπουσα ροή στην ακανόνιστη ροή [21], (β) Μέγιστο συσσωμάτωμα ημισφαιρικών φυσαλίδων για τη μετάβαση στην ακανόνιστη ροή [66]

Η εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli δίνει το τοπικό κλάσμα κενού σε απόσταση h από την «μύτη» της φυσαλίδας Taylor, εκτός από την περιοχή πολύ κοντά στη μύτη της φυσαλίδας. Έτσι, δημιουργείται η Εξίσωση

$$\alpha(h) = \frac{\sqrt{(2gh\Delta\rho/\rho_f)}}{\sqrt{(2gh\Delta\rho/\rho_f) + (C_0 - 1)j + 0.35\sqrt{(\Delta\rho gD/\rho_f)}}} \quad (3.21)$$

Όπου,

- h : απόσταση από τη μύτη της φυσαλίδας Taylor
- D : εσωτερική διάμετρος του σωλήνα

Η ταχύτητα του αέρα στη φυσαλίδα δίνεται από την Εξίσωση (3.22).

$$u_{gs} = C_0 j + 0.35 \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho g D}{\rho_f}\right)} \quad (3.1)$$

Το μέσο κλάσμα κενού υπολογίζεται από την Εξίσωση (3.23).

$$a_m = \frac{1}{L_b} \int_0^{L_b} a(h) dh \quad (3.23)$$

Όπου, L_b είναι το μέσο μήκος της φυσαλίδας Taylor. Με την ολοκλήρωση της Εξίσωσης (3.25) και λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση (3.27), παράγεται η Εξίσωση (3.24) [21].

$$\alpha_m = 1 - 2X + 2X^2 \ln\left(1 + \frac{1}{X}\right) \quad (3.24)$$

Όπου,

$$X \equiv \sqrt{\left(\frac{\rho_f}{2g\Delta\rho L_b}\right)} \left[(C_0 - 1)j + \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho g D}{\rho_f}\right)} \right] \quad (3.25)$$

Έπειτα από την επίλυση περισσότερων ακόμα εξισώσεων, το μοντέλο των Mishima & Ishii [21] καταλήγει στο μαθηματικό συμπέρασμα, ότι η μετάβαση από τη διαλείπουσα ροή στην ακανόνιστη ροή συμβαίνει όταν το μέσο κλάσμα κενού της περιοχής της φυσαλίδας Taylor γίνεται ίσο με το μέσο κλάσμα κενού του σωλήνα.

$$\alpha_{avg} = \frac{j_g}{C_0 j_m + 0.35 \sqrt{\frac{Dg(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}}} \quad (3.26)$$

$$\alpha_b = 1 - 0.813 \left[\frac{(C_0 - 1)(j_g + j_l) + 0.35 \sqrt{\frac{Dg(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}}}{j_m + 0.75 \sqrt{\frac{Dg(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}} \left(\frac{(\rho_l - \rho_g)D^3 \rho_l}{\mu_l^2}\right)^{1/18}} \right] \quad (3.27)$$

Όπου, j_m είναι η ογκομετρική ροή και είναι το άθροισμα των j_g και j_l . Με j_g και j_l συμβολίζονται οι φαινομενικές ταχύτητες της αέριας και της υγρής φάσης, g είναι η

επιτάχυνση της βαρύτητας, D είναι η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα, μ_l είναι το κινηματικό ιξώδες του υγρού, α_{avg} είναι το κλάσμα κενού του αερίου, α_b είναι το μέσο κλάσμα κενού του αερίου στη φυσαλίδα Taylor, ενώ με ρ_l , ρ_g συμβολίζονται αντίστοιχα οι πυκνότητες του υγρού και του αερίου.

3.5.2.3 Μετάβαση από ακανόνιστη ροή σε δακτυλιοειδή ροή

Οι περισσότεροι ερευνητές έχουν μοντελοποιήσει τη μετάβαση από το καθεστώς της ακανόνιστης ροής στη δακτυλιοειδή ροή, μέχρι το σημείο όπου η φαινομενική ταχύτητα του αερίου είναι αρκετά υψηλή για την αποφυγή της πτώσης των σταγονιδίων του υγρού. Έτσι, το υγρό φιλμ ρέει προς τα πάνω κοντά στο τοίχωμα με υψηλή ταχύτητα αερίου και μεταφέρει επίσης τα συμπαρασυρόμενα σταγονίδια υγρού στο κέντρο του σωλήνα. Η προς τα άνω κίνηση του υγρού φιλμ που αντιτίθεται στη δύναμη της βαρύτητας είναι αποτέλεσμα της ταχύτερης κίνησης του αερίου πυρήνα. Το υγρό φιλμ έχει κυματοειδή επιφάνεια και τα κύματα έχουν την τάση να καταστρέφονται και να εισέρχονται ως σταγονίδια στον αέριο πυρήνα. Ωστόσο, συνεχίζουν να κινούνται προς τα πάνω εξαιτίας της διάτμησης και της οπισθέλκουσας δύναμης που ασκείται τόσο στα κύματα όσο και στα σταγονίδια.

Οι Taitel et al. [17] εφάρμοσαν το ισοζύγιο δυνάμεων μεταξύ της βαρύτητας και της οπισθέλκουσας δύναμης, για τον προσδιορισμό της ελάχιστης ταχύτητας αερίου που απαιτείται για να ανασταλεί η πτώση των σταγονιδίων. Έτσι, η ταχύτητα στην οποία δεν υπάρχει δακτυλιοειδής ροή δίνεται από την Εξίσωση (3.28).

$$j_g = \frac{K_v}{\sqrt{\rho_g}} [\sigma g (\rho_l - \rho_g)]^{1/4} \quad (3.28)$$

Οι Taitel et al. [17] πρότειναν για την Εξίσωση (3.28) την τιμή $K_v = 3.1$, όπου με ρ_l και ρ_g συμβολίζονται οι πυκνότητες του υγρού και του αερίου, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και σ είναι η επιφανειακή τάση. Οι Pushkina & Sorokin [25] πρότειναν μία παρόμοια εξίσωση με εκείνη των Taitel et al. [17], για την πρόβλεψη της μετάβασης της ροής από την ακανόνιστη στη δακτυλιοειδή, για $K=3.2$.

Οι Mishima & Ishii [21] χαρακτήρισαν τη μετάβαση από την ακανόνιστη ροή στη δακτυλιοειδή ως αστάθεια του ρευστού που κινείται προς τα πάνω. Τα κριτήρια αυτής της μετάβασης πραγματοποιούνται με δύο διαφορετικούς μηχανισμούς: (α) αντιστροφή

ροή στο υγρό φιλμ, που ρέει δίπλα από μεγάλες φυσαλίδες και (β) καταστροφή των φυσαλίδων Taylor ή μεγάλων κυμάτων που παρασύρονται ή παραμορφώνονται. Το κριτήριο του πρώτου μηχανισμού παρουσιάζεται από την Εξίσωση (3.29) και του δεύτερου από την Εξίσωση (3.30). Σε αυτές τις εξισώσεις, ρ_l και ρ_g οι πυκνότητες του υγρού και του αερίου, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, σ είναι η επιφανειακή τάση και D η διάμετρος του αγωγού.

$$j_g = \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}} (a - 0.11), \quad \text{για } \alpha_{avg} > \alpha_m \text{ \& για μικρό } D \quad (3.29)$$

$$j_g \geq \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \cdot N_{mf}^{-0.2}, \quad \text{για μεγάλο } D \quad (3.30)$$

$$N_{mf} = \frac{\mu_l}{\left[\rho_l \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \right]^{1/2}} \quad D > \frac{\left(\sqrt{\sigma/\Delta\rho g} \right) N_{mf}^{-0.4}}{\left[(1 - 0.11C_0)/C_0 \right]^2} \quad (3.31)$$

Στη μετάβαση από ακανόνιστη ροή σε δακτυλιοειδή ροή αξίζει να σημειωθεί ότι η σχέση των Taitel et al. [17] είναι ανεξάρτητη της διαμέτρου και της φαινομενικής ταχύτητας του υγρού, ενώ οι εξισώσεις των Wallis [26], Mishima & Ishii [21] και McQuillan & Whalley [20] εξαρτώνται από τη διάμετρο του αγωγού, αλλά είναι ανεξάρτητες από τη φαινομενική ταχύτητα του υγρού [27]. Στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται τα κριτήρια μετάβασης στα καθεστώτα ροής, σύμφωνα με τους Schlegel et al [28].

Πίνακας 3.1 Κριτήρια μετάβασης στα καθεστώτα ροής για αγωγούς μεγάλης διαμέτρου

Μετάβαση καθεστώτος ροής	Κριτήρια
Ροή με φυσαλίδες σε διαλείπουσα ροή	$\alpha = 0.30$
Διαλείπουσα ροή σε ακανόνιστη ροή	$\alpha = 0.51$
Ακανόνιστη ροή σε δακτυλιοειδή ροή	$j_g = \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_g^2} \right)^{1/4} N_{mf}^{-0.2}$

3.6 Προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση πολυφασικών ροών

Ένα σύστημα πολυφασικής ροής αποτελείται από έναν αριθμό περιοχών μονοφασικής ροής, οι οποίες οριοθετούνται από κινούμενες διεπιφάνειες. Αρχικά, ένα πολυφασικό μοντέλο ροής θα μπορούσε να διατυπωθεί ως προς τις τοπικές στιγμιαίες μεταβλητές που σχετίζονται με κάθε φάση και τις αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες σε όλες τις διεπιφάνειες των φάσεων. Η άμεση επίλυση ενός πολυφασικού συστήματος είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Ως σημείο εκκίνησης, για την εξαγωγή των μακροσκοπικών εξισώσεων που αντικαθιστούν την τοπική στιγμιαία περιγραφή κάθε φάσης, τίθεται η συλλογική περιγραφή των φάσεων.

Για τη διαμόρφωση μιας πολυφασικής ροής, οι βασικές αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης ελεύθερων επιφανειών ή διεπιφανειών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες ομάδες, η προσέγγιση Boltzmann, η προσέγγιση Lagrange και η προσέγγιση Euler [29]. Εδώ, θα αναλυθούν δύο τρόποι αριθμητικής προσέγγισης για την επίλυση μιας πολυφασικής ροής στη ρευστοδυναμική, η προσέγγιση κατά Euler ή προσέγγιση των ρευστών δύο φάσεων (προσέγγιση Euler-Euler) και η προσέγγιση κατά Lagrange ή προσέγγιση των τροχιών (προσέγγιση Euler-Lagrange).

3.6.1 Προσέγγιση Euler-Lagrange

Η απεικόνιση ενός πεδίου ροής κατά Lagrange αποτελεί επέκταση στη μηχανική ρευστών του τρόπου απεικόνισης της κίνησης των υλικών σημείων, όπως αυτή παρουσιάζεται στην κλασική μηχανική. Στην περίπτωση αυτή παρακολουθούμε την κίνηση κάποιου στοιχείου του ρευστού καθώς διατρέχει την τροχιά του από την αρχή μέτρησης του χρόνου t_0 , όπου το σημείο βρισκόταν στη θέση (x_0, y_0, z_0) . Η σωματιδιακή φάση θεωρείται διακριτή και διασκορπιζόμενη στη συνεχή φάση του ρευστού μέσου. Οι εξισώσεις διατήρησης επιλύονται για τη συνεχή φάση και η φάση των σωματιδίων καταγράφεται από την επίλυση των εξισώσεων κίνησης για κάθε σωματίδιο, όπως φαίνεται στις Εξισώσεις (3.32), (3.33) και (3.34).

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) = S_{mass} \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u_f) = \alpha_f \nabla p - \alpha_f \nabla \tau_f - S_p + \alpha_f \rho_f g = 0 \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = \sum F \quad (3.34)$$

Όπου, α είναι το κλάσμα όγκου, S_{mass} είναι ένας όρος πηγής μάζας που υφίσταται στην περίπτωση της ανταλλαγής μάζας μεταξύ των φάσεων, S_p είναι η ορμή που υπάρχει στην περίπτωση ανταλλαγής ορμής μεταξύ των φάσεων και F είναι δύναμη. Οι δείκτες f, p αναφέρονται αντίστοιχα στη φάση του υγρού και των σωματιδίων.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια ποικίλουν ανάλογα με την κατάσταση της ροής. Η οπισθέλκουσα δύναμη γενικά περιλαμβάνεται, ενώ άλλες σημαντικές δυνάμεις είναι, για παράδειγμα, η δύναμη λόγω κλίσης πίεσης, η δύναμη αεροδυναμικής αντίστασης, η δύναμη φαινόμενης μάζας, οι δυνάμεις άνωσης, η δύναμη Basset, η δύναμη της βαρύτητας, η δύναμη Coulomb και η δύναμη της αδράνειας. Γενικά, στο δεξί μέλος της Εξίσωσης (3.34), εισάγονται οι σημαντικές δυνάμεις που πρέπει να συμπεριληφθούν για την εκτέλεση της αριθμητικής μοντελοποίησης. Η προσθήκη περισσότερων δυνάμεων σε ένα μοντέλο αυξάνει την ακρίβεια και την πολυπλοκότητά του. Η αλληλεπίδραση των δύο φάσεων (σύζευξη σωματιδίου-δίνης) μοντελοποιείται με την εισαγωγή όρων πηγών στις εξισώσεις διατήρησης της συνεχούς φάσης. Η διαδικασία επίλυσης της διαφασικής ροής αρχίζει με τον υπολογισμό του πεδίου ροής της συνεχούς φάσης. Οι εξισώσεις διατήρησης επιλύονται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η παρουσία των σωματιδίων. Στη συνέχεια, παρακολουθούνται οι τροχιές ενός αντιπροσωπευτικού αριθμού σωματιδίων και υπολογίζονται οι όροι πηγών. Το πεδίο ροής του ρευστού επαναυπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους όρους πηγών. Κατόπιν, νέες τροχιές και νέοι όροι πηγών υπολογίζονται επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία μέχρι τελικής σύγκλισης του πεδίου ροής της συνεχούς φάσης.

Η προσέγγιση κατά Lagrange φαίνεται να ταιριάζει περισσότερο στην επίλυση των αραιών διαφασικών ροών, γιατί μπορεί εύκολα να περιγράψει τις φυσικές διαδικασίες που διέπουν το φαινόμενο. Πραγματικά, η ελλειπτική φύση της ροής του ρευστού και η παραβολική φύση της σωματιδιακής ροής εκφράζονται απόλυτα από αυτό το μοντέλο.

Ωστόσο, η προσέγγιση Euler-Lagrange παρουσιάζει αρκετά προβλήματα στην περίπτωση πυκνών διαφασικών ροών αερίου-υγρού, όπου ο αριθμός των σωματιδίων είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Η περιγραφή της κίνησης όλων των σωματιδίων συνεπάγεται έναν πολύ μεγάλο αριθμό εξισώσεων με αποτέλεσμα το υπολογιστικό κόστος να αυξάνεται δραματικά. Επίσης, ο υπολογισμός των τροχιών ενός μεγάλου αριθμού σωματιδίων είναι απαραίτητος για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης εικόνας. Τέλος, η αύξηση του προκαθορισμένου αριθμού κύκλων σύζευξης, μεταξύ της φάσης σε διασπορά και της συνεχούς φάσης μπορεί να προκαλέσει αριθμητικά προβλήματα ευστάθειας [30].

3.6.2 Προσέγγιση Euler-Euler

Στην προσέγγιση Euler-Euler οι δύο φάσεις θεωρούνται συνεχείς και έχουν τη δυνατότητα να αλληλοδιεισδύουν η μία μέσα στην άλλη και να μοιράζονται τον ίδιο χώρο. Κάθε φάση είναι διακριτή μέσα στο χώρο και μπορεί να ονομαστεί κλάσμα όγκου [31], [32]. Η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως προσέγγιση των δύο ρευστών και σε περίπτωση που έχουμε περισσότερες από δύο φάσεις, η προσέγγιση ονομάζεται προσέγγιση των πολλών ρευστών [29]. Η προσέγγιση μοντελοποίησης πολλών ρευστών βρίσκει κατάλληλη εφαρμογή σε διαχωρισμένες ροές, όπου και οι δύο φάσεις περιγράφονται ως συνεχείς. Ωστόσο, η προσέγγιση κατά Euler μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση ροών σε διασπορά, στην περίπτωση που η συνολική κίνηση των σωματιδίων είναι σημαντικότερη από την παρακολούθηση μεμονωμένων σωματιδίων. Οι εξισώσεις της φάσης της διασποράς αντιστοιχίζονται σε κάθε υπολογιστικό κελί για την επίτευξη των μέσων πεδίων. Η περιγραφή μια φάσης σε διασπορά ως συνεχής, προϋποθέτει ότι το κλάσμα όγκου πρέπει να είναι υψηλό, το οποίο καθιστά κατάλληλη την προσέγγιση αυτή για πυκνές ροές.

Οι φάσεις μελετώνται ξεχωριστά και για κάθε φάση επιλύεται ένα σύνολο εξισώσεων διατήρησης. Η σύζευξη μεταξύ των φάσεων επιτυγχάνεται μέσω κοινών συντελεστών πίεσης και αλληλεπίδρασης των φάσεων. Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης διεπιφάνειας πρέπει να διαμορφωθούν. Ακριβώς όπως και στην προσέγγιση Euler-Lagrange ορίζονται τα φαινόμενα της διεπιφάνειας, τα οποία πρέπει να συμπεριληφθούν για τη μοντελοποίηση. Στη βιβλιογραφία, έχει αναπτυχθεί ένας κατάλληλος αριθμός μοντέλων για διαφορετικούς τύπους ροής. Εδώ δεν θα δοθούν λεπτομέρειες για τη μοντελοποίηση

της αλληλεπίδρασης των διεπιφανειών. Εκτός από τις τακτικές εξισώσεις μεταφοράς, επιλύεται επίσης μια εξίσωση μεταφοράς για το κλάσμα όγκου κάθε φάσης. Το άθροισμα των κλασμάτων όγκου θα πρέπει να ισούται με τη μονάδα. Οι καταστατικές εξισώσεις για ένα μοντέλο διαφασικής ροής με δύο συνεχείς φάσεις παρουσιάζονται παρακάτω.

$$\frac{\partial a_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (a_k \rho_k U_k) = 0 \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial a_k \rho_k U_k}{\partial t} + \nabla \cdot (a_k \rho_k U_k U_k) = -a_k \nabla P + a_k \nabla \cdot \tau_k + a_k \rho_k g_k + S_k = 0 \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial a_k}{\partial t} + \nabla \cdot (a_k U_k) = 0 \quad (3.37)$$

Όπου, a είναι το κλάσμα όγκου, ρ είναι η πυκνότητα, U είναι η μέση ταχύτητα του πεδίου, P είναι η μέση πίεση που μοιράζονται οι φάσεις, τ είναι ο τανυστής ιξώδους τάσης και S ένας όρος πηγής. Ο δείκτης k αναφέρεται στην k^{th} συνεχή φάση.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της προσέγγισης Euler-Euler είναι η αδυναμία της να περιγράψει τις δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια της διασκορπισμένης φάσης, όπως είναι η δύναμη αεροδυναμικής αντίστασης ή η δύναμη άνωσης. Επίσης, η μοντελοποίηση της κατά μέσο όρο επίδρασης των σωματιδίων της φάσης σε διασπορά στη ροή αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα των εξισώσεων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος.

Ωστόσο, η προσέγγιση Euler-Euler των ρευστών δύο φάσεων είναι συχνά αποδοτικότερη από την προσέγγιση Lagrange, επειδή τα σωματίδια της διασκορπισμένης φάσης δεν παρακολουθούνται και οι υπολογισμοί δεν περιορίζονται στη μεταβατική ροή. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τη διασκορπισμένη και τη συνεχή φάση διακρίνονται χρησιμοποιώντας το ίδιο υπολογιστικό πλέγμα και λύνονται με τις ίδιες αριθμητικές μεθόδους που εφαρμόζονται στην περίπτωση της μονοφασικής ροής, λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη τους όρους που περιγράφουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο φάσεων. Επιπλέον, η προσέγγιση κατά Euler επιτρέπει τον εύκολο χειρισμό των αριθμητικών προβλημάτων που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των δύο φάσεων [33].

Γενικά, η προσέγγιση Euler-Euler απαρτίζεται από τρία μοντέλα πολυφασικής ροής:

- ❖ Προσέγγιση του όγκου ρευστού (VOF)
- ❖ Μοντέλο Mixture
- ❖ Μοντέλο Euler

3.6.2.1 Προσέγγιση του όγκου ρευστού

Στη δυναμική των ρευστών (Computational Fluid Dynamics, CFD) η προσέγγιση του όγκου ρευστού (Volume of Fluid Approach) αποτελεί τη πιο διαδεδομένη μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων ελεύθερης επιφάνειας. Στη μέθοδο αυτή επιλύονται οι βασικές εξισώσεις διατήρησης, για τις υπολογιστικές φάσεις που συμμετέχουν στο πεδίο ροής. Το σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων διατήρησης επιλύεται μία φορά, θεωρώντας ουσιαστικά ότι όλες οι συμμετέχουσες υπολογιστικές φάσεις στο υπό εξέταση πεδίο ροής, αποτελούν συστατικά μείγματος μιας φάσης [34]. Οι μέθοδοι που αναπτύσσονται στοχεύουν στον ακριβή υπολογισμό θέσεως της διεπιφάνειας μεταξύ των συστατικών του μείγματος σε κάθε κελί υπολογισμού.

Στις τυπικές εφαρμογές της μεθόδου ανήκουν, οι στρωματοποιημένες ροές, οι ροές ελεύθερης επιφάνειας, οι ροές πλήρωσης, η κίνηση μεγάλων φυσαλίδων σε υγρό και η ελεύθερη κίνηση του ρευστού μετά την κατάρρευση φράγματος. Η χρήση των μεθόδων αυτών περιορίζεται σε διφασικά πεδία ροής μικρού αριθμού στοιχείων διασκορπισμένης φάσης. Σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ή μεγάλου αριθμού στοιχείων διασκορπισμένης φάσης, το υπολογιστικό κόστος για την επίλυση των χαρακτηριστικών ροής είναι αρκετά υψηλό.

3.6.2.2 Μοντέλο μείξης

Το μοντέλο μείξης (Mixture Model) είναι ένα απλοποιημένο πολυφασικό μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Το μοντέλο μείξης εφαρμόζεται στη μοντελοποίηση πολυφασικών ροών, όπου κάθε φάση κινείται με διαφορετική ταχύτητα, στη μοντελοποίηση ομογενών πολυφασικών ροών και στον υπολογισμό του ιξώδους μη νευτωνικών ρευστών. Η μέθοδος μπορεί να μοντελοποιήσει n φάσεις (υγρού ή σωματιδίων) από την επίλυση της εξίσωσης της συνέχειας και της ορμής για το μείγμα, όπου το μείγμα μπορεί να είναι ο συνδυασμός της συνεχούς φάσης και της φάσης σε διασπορά. Επιπλέον, με το μοντέλο επιλύεται η εξίσωση ενέργειας του μείγματος, οι

εξισώσεις του κλάσματος όγκου για τις δευτερογενείς φάσεις, καθώς επίσης και οι αλγεβρικές εκφράσεις των σχετικών ταχυτήτων στην περίπτωση που οι φάσεις κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Εφαρμογές αυτού του μοντέλου περιλαμβάνουν ροές με υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων και χαμηλή ένταση, ροές φυσαλίδων, ζήματοποίηση και διαχωριστές τύπου κυκλώνα [35].

3.6.2.3 Μοντέλο Euler

Το μοντέλο Euler είναι το πιο περίπλοκο μοντέλο πολυφασικής ροής. Επιλύει ένα σύστημα n εξισώσεων ορμής και συνέχειας για κάθε φάση. Ο συνδυασμός τους επιτυγχάνεται μέσω των συντελεστών εναλλαγής πίεσης και ανταλλαγής φάσης μεταξύ των φάσεων. Ο τρόπος με τον οποίο διαχειρίζεται αυτός ο συνδυασμός, εξαρτάται από τον τύπο των φάσεων που συμπεριλαμβάνονται. Για παράδειγμα, σε κοκκώδεις ροές τα μεγέθη της ροής προκύπτουν από την εφαρμογή της κινητικής θεωρίας. Η εναλλαγή ορμής μεταξύ των φάσεων εξαρτάται επίσης από τον τύπο του μείγματος που μοντελοποιείται. Οι εφαρμογές του πολυφασικού μοντέλου Euler περιλαμβάνουν στήλες φυσαλίδων, πλατφόρμες, αιώρηση σωματιδίων και ρευστοποιημένα στρώματα.

3.7 Μοντελοποίηση πολυφασικής ροής

Η σωστή και ακριβής προσομοίωση της πολυφασικής ροής απαιτεί μοντέλα, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τη μηχανική των ρευστών και τα φαινόμενα που παρουσιάζονται. Σε θεωρητικό επίπεδο, θα έπρεπε να είναι δυνατή η πλήρης εφαρμογή του συνόλου των εξισώσεων Navier-Stokes, σε συνδυασμό με κατάλληλους όρους πηγής, με στόχο την επίλυση όλων των παραμέτρων της ροής σε μια άμεση προσέγγιση αριθμητικής προσομοίωσης. Ωστόσο, η υψηλή πολυπλοκότητα της ροής θα αύξανε το υπολογιστικό κόστος της προσέγγισης και ως εκ τούτου, η χρήση διαφορετικών προσεγγίσεων θα κρινόταν απαραίτητη.

Ιστορικά, τα εμπειρικά μοντέλα συνέβαλαν στην απόκτηση των πρώτων εκτιμήσεων για την πολυφασική ροή. Τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση της δομής μεταξύ σημαντικών παραμέτρων, όπως είναι η πτώση πίεσης και οι ταχύτητες. Η χρήση αυτών των εμπειρικών μοντέλων είναι αρκετά απλή, δεδομένου ότι απαιτούν βασική κατανόηση. Ωστόσο, η ποιότητα των μοντέλων θα εξαρτηθεί σε

μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, επειδή τα δεδομένα αποτελούνται μόνο από μετρήσεις συνδυασμένων αποτελεσμάτων. Στην καλύτερη περίπτωση ένα καθαρά εμπειρικό μοντέλο μεταξύ σημαντικών παραμέτρων θα μπορούσε να δώσει τη σωστή προσέγγιση στη ρεολογική συμπεριφορά. Η χρήση εμπειρικών μοντέλων ήταν αρκετά διαδεδομένη στο παρελθόν, κυρίως λόγω της έλλειψης αποτελεσματικών μηχανιστικών μοντέλων [36].

Στη μηχανιστική μοντελοποίηση, η θεμελιώδης γνώση της ρευστομηχανικής χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της δομής μεταξύ των παραμέτρων [37]. Μια τυπική προσέγγιση είναι η χρήση των εξισώσεων συνέχειας, με σκοπό την αριθμητική επίλυση ενός μαθηματικού συστήματος. Δεδομένου ότι μια προσέγγιση πολυφασικής ροής λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των σχετικών παραμέτρων, το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι ένα γενικό μοντέλο με περισσότερο ρεαλιστικές προβλέψεις.

Ακόμη και σήμερα, υπάρχουν περιορισμοί στη θεμελιώδη γνώση ορισμένων επιδράσεων σε μια πολυφασική ροή, κάτι το οποίο καθιστά απαραίτητη τη χρήση εμπειρικών σχέσεων για την ολοκληρωμένη επίλυση του συνόλου των εξισώσεων. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διεπιφανειών, όπως η μεταφορά μάζας και η διατμητική τάση θα χρειαστούν εμπειρικές σχέσεις. Επίσης, θα πρέπει να καθοριστεί η διαμόρφωση της ροής. Συνήθως, η επίλυση του κατά μέσου όρου μοντέλου γίνεται σε χαμηλή ανάλυση προκειμένου να επιλυθούν οι μικρές διακυμάνσεις που προκαλεί η μετάβαση στα καθεστώτα ροής [38]. Η γνώση των σημείων μετάβασης στο καθεστώς ροής είναι σημαντική, καθώς τα μοντέλα και οι σχέσεις ποικίλλουν μεταξύ των ροϊκών καθεστώτων. Έχει υποστηριχθεί ότι η επίδραση των δυνάμεων μπορεί να αλλάξει τη διαμόρφωση της ροής. Ειδικότερα, ένα μοντέλο που βασίζεται στην επιρροή ενός συνόλου δυνάμεων μπορεί ενδεχομένως να μην εφαρμόζεται όταν μεταβάλλεται το καθεστώς της ροής.

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν κάποιες κοινές προσεγγίσεις των μηχανιστικών μοντέλων πολυφασικής ροής. Ένα τυπικό μοντέλο βασίζεται στις εξισώσεις μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σειρά συζευγμένων μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες ολοκληρώνονται σε όγκους ελέγχου καταλήγοντας σε ένα σύνολο εξισώσεων που επιλύονται αριθμητικά. Στη συνέχεια, οι εξισώσεις αυτές συμπληρώνονται με εμπειρικά μοντέλα για την τριβή, τις χημικές επιδράσεις, τη

μεταφορά μάζας και θερμότητας, για την επίλυση των δράσεων που σχετίζονται με το ρευστό και τη διεπιφάνεια.

3.7.1 Το μοντέλο “multi-fluid”

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι το μοντέλο “multi-fluid”. Εδώ οι εξισώσεις διατήρησης χρησιμοποιούνται για κάθε παρούσα φάση [39]. Η μάζα, η ορμή και η ενέργεια κάθε ρευστού διατηρείται σε έναν όγκο ελέγχου, δίνοντας ένα σύστημα εξισώσεων το οποίο υπολογίζει τις ταχύτητες, την πίεση, τη θερμοκρασία και τα κλάσματα φάσης.

Όταν το μοντέλο “multi-fluid” εφαρμόζεται σε ένα σύστημα δύο φάσεων, το σύνολο εξισώσεων που προκύπτει ονομάζεται μοντέλο δύο ρευστών. Η διατήρηση μάζας για ένα σύστημα υγρού-αερίου, χωρίς πηγές, εκφράζεται με τις Εξισώσεις (3.38) και (3.39).

$$\frac{\partial \rho_g a_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g a_g u_g)}{\partial x} = 0 \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial \rho_l a_l}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_l a_l u_l)}{\partial x} = 0 \quad (3.39)$$

Αυτά είναι συνολικά ισοζύγια μάζας για κάθε φάση και πρέπει να περιλαμβάνουν τόσο τα συνεχή όσο και τα συμπαρασυρόμενα μέρη. Ο πρώτος όρος στο αριστερό μέλος υπολογίζει τη χρονική συσσώρευση της μάζας, ενώ ο δεύτερος όρος δηλώνει τη μεταφορά μάζας με συναγωγή.

Η διατήρηση της ορμής για τις δύο φάσεις, χωρίς εξωτερικές πηγές, μπορεί να εκφραστεί με τις Εξισώσεις (3.40) και (3.41).

$$\frac{\partial (\rho_g a_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g a_g u_g^2)}{\partial x} = -a_g \frac{\partial p}{\partial x} - \alpha_g \rho_g g \sin \beta - \frac{\tau_{gl} S_{gl}}{A} - \frac{\tau_{gw} S_{gw}}{A} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial (\rho_l a_l u_l)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_l a_l u_l^2)}{\partial x} = -a_l \frac{\partial p}{\partial x} - \alpha_l \rho_l g \sin \beta + \frac{\tau_{gl} S_{gl}}{A} - \frac{\tau_{lw} S_{lw}}{A} \quad (3.41)$$

Ο πρώτος όρος στο αριστερό μέλος δηλώνει τη χρονική μεταβολή της ορμής. Ο δεύτερος είναι η μεταβολή της ορμής που οφείλεται στην επιτάχυνση λόγω συναγωγής. Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους είναι η πτώση πίεσης. Στη συνέχεια, ακολουθεί η

συνεισφορά της βαρύτητας, ενώ οι δύο τελευταίοι όροι είναι οι διατμητικές τάσεις. Για την αέρια φάση, τόσο το τοίχωμα όσο και το υγρό επιβραδύνουν την προς τα κάτω ροή. Όσον αφορά το υγρό, το τοίχωμα θα ασκήσει δυνάμεις τριβής κατά την κίνησή του. Ωστόσο, δεδομένου ότι το αέριο επιβραδύνεται από το υγρό, το υγρό θα πρέπει να επιταχυνθεί από το αέριο και έτσι προκύπτει η θετική ένδειξη στον όρο της διατμητικής τάσης υγρού-αερίου.

Οι Εξισώσεις (3.38), (3.39), (3.40) και (3.41) δίνουν μια σχέση μεταξύ των ταχυτήτων, της πίεσης και ενός από τα κλάσματα φάσης, χρησιμεύοντας ως βάση για την ανάπτυξη ενός συνόλου εξισώσεων που μπορεί να προσομοιώσει την παροδική εξέλιξη ενός συστήματος. Για την επίλυση, οι υπόλοιποι όροι θα πρέπει να είναι γνωστοί ή πρότυποι, και θα πρέπει να δίνονται σωστές αρχικές τιμές και οριακές συνθήκες ως δεδομένα εισόδου. Η μοντελοποίηση του όρου που συμβολίζει τη διατμητική τάση της διεπιφάνειας μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολη, όταν οι ταχύτητες είναι υψηλές και υπάρχει έντονη ανάμιξη [40]. Αυτό κάνει το μοντέλο λιγότερο κατάλληλο για άλλα καθεστώτα από τη στρωματοποιημένη ροή.

3.7.2 Το μοντέλο “multi-field”

Το μοντέλο δύο ρευστών είναι κατάλληλο για την προσομοίωση μιας στρωματοποιημένης ροής, στην οποία οι όροι των διατμητικών τάσεων μεταξύ των φάσεων μοντελοποιούνται εύκολα, επειδή μοιράζονται μία μεγάλη διεπιφάνεια. Ωστόσο, σε οποιοδήποτε άλλο τύπο ροής θα υπάρχουν δυσκολίες στην καταγραφή της φυσικής ροής. Συχνά μία φάση μπορεί να βρίσκεται σε διασπορά είτε μπορεί να εμφανίζεται ταυτόχρονα ως συνεχής και ως εισερχόμενο στοιχείο στην άλλη φάση. Το μοντέλο “multi-field”, είναι ένα μοντέλο που σέβεται την υποκείμενη φυσική κατάσταση ενός συστήματος [39]. Στο μοντέλο “multi-field”, κάθε πεδίο (field) έχει το δικό του σύνολο εξισώσεων μεταφοράς. Έτσι, εκτός από τα συνεχή πεδία, τα πεδία ροής με φυσαλίδες και σταγονίδια πρέπει εξίσου να έχουν εξισώσεις μεταφοράς.

Ένα τυπικό μονοδιάστατο μοντέλο δύο υγρών και τεσσάρων πεδίων χρησιμοποιεί ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων διατήρησης για κάθε πεδίο [41]. Δεδομένου ότι αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ύπαρξη μιας φάσης σε πολλά πεδία, για να υπάρχει μεταφορά μάζας συμπεριλαμβάνονται οι όροι πηγής. Ως εκ τούτου, οι εξισώσεις διατήρησης

μάζας και ορμής με τους όρους πηγής θα πρέπει να μπορούν να μοντελοποιήσουν τους διαφορετικούς συνδυασμούς πεδίων ροής.

Μία εφαρμογή του μοντέλου “multi-field” περιγράφεται από τον Danielson et al [41]. Η διατήρηση της μάζας ενός πεδίου δίνεται από την Εξίσωση (3.42). Ο δείκτης k συμβολίζει το συνεχές πεδίο ροής ενός αερίου, υγρού, σταγονιδίου ή φυσαλίδας. Το αριστερό μέλος της Εξίσωσης (3.42) είναι ίδιο με το αριστερό μέλος των εξισώσεων διατήρησης μάζας του μοντέλου “multi-fluid” (Εξισώσεις 3.38, 3.39). Στο δεξιό μέλος της Εξίσωσης (3.42) υπάρχουν δύο όροι πηγής. Ο όρος Γ_{ki} αντιπροσωπεύει την καθαρή μεταφορά μάζας από άλλα πεδία και ο όρος Γ_{ext} την εξωτερική πηγή καθαρής μάζας. Η μεταφορά μάζας μεταξύ των πεδίων γίνεται με μηχανικό, θερμικό και χημικό τρόπο. Εδώ, η μεταφορά γίνεται μέσω της μηχανικής λειτουργίας συμπαρασυρμού, απεμπλοκής και συγκόλλησης. Οι άλλοι τρόποι μεταφοράς μάζας περιλαμβάνουν μια σειρά επιδράσεων, όπως η εξάτμιση, η συμπύκνωση, η τήξη, η στερεοποίηση, η διάλυση και οι διαδικασίες διαλυτοποίησης και διάχυσης.

$$\frac{\partial a_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (a_k \rho_k u_k) = \sum_{i \neq k} \Gamma_{ki} + \Gamma_{ext} \quad (3.42)$$

Η διατήρηση ορμής του πεδίου k δίνεται από την Εξίσωση (3.43). Στην εξίσωση αυτή υπάρχουν δύο τύποι πιέσεων, P_k και P_{int} , που αντιπροσωπεύουν τις κατά μέσο όρο πιέσεις της φάσης και της διεπιφάνειας. Ο όρος F_{ki} αντιπροσωπεύει τη μεταφορά ορμής της διεπιφάνειας με άλλα πεδία, ενώ ο όρος F_{kw} είναι η δύναμη τριβής από τον τοίχο. Οι όροι $\Gamma_{ki} u_{ki}$ και Γ_{kext} συμβολίζουν τη μεταβολή της ορμής, που οφείλεται αντίστοιχα στη μαζική μεταφορά από άλλα πεδία και εξωτερικές πηγές.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (a_k \rho_k u_k) + \frac{\partial}{\partial x} (a_k \rho_k u_k^2) \\ &= -\frac{\partial a_k P_k}{\partial x} - g a_k \rho_k \sin \theta + \frac{\partial a_k \tau_k}{\partial x} + P_{int} \frac{\partial a_k}{\partial x} + \sum_{i \neq k} F_{ki} \\ & - F_{kw} + \sum_{i \neq k} \Gamma_{ki} u_{ki} + \Gamma_{kext} u_{kext} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Με την ύπαρξη δύο πιέσεων, το μοντέλο αντιπροσωπεύει τη διαφορά πίεσης μεταξύ φάσης και διεπιφάνειας. Επίσης, λαμβάνει υπόψη την κάθετη μεταβολή της πίεσης που οφείλεται στο ύψος του υγρού. Στην πράξη, η πίεση της διεπιφάνειας συνδέεται με την πίεση του συστήματος και το ύψος του υγρού και εισάγεται ξανά στην εξίσωση.

Είναι προφανές ότι αυτό το μοντέλο με τις εξισώσεις διατήρησης, που έχουν επιλυθεί για κάθε συνεχές και διεσπαρμένο πεδίο, θα πρέπει να προσαρμοστεί καλύτερα για την προσομοίωση όλων των πιθανών ροϊκών διαμορφώσεων για μια πραγματική διφασική ροή. Η εύρεση σχέσεων για τους όρους πηγής και διεπιφάνειας είναι ευκολότερη τώρα που η μοντελοποίηση γίνεται με έναν γενικότερο τρόπο. Για παράδειγμα, η ύπαρξη μιας εμπειρικής σχέσης «κλεισίματος» του υπολογισμού της τριβής μεταξύ του αερίου και του υγρού, μπορεί να αντικατασταθεί από σχέσεις για την τριβή μεταξύ ενός συνεχούς αερίου και υγρού, ενός συνεχούς αερίου και ενός υγρού σε διασπορά και ενός συνεχούς υγρού και αερίου σε διασπορά. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα αυξάνεται όσο προστίθενται περισσότερες εξισώσεις προς επίλυση. Τέλος, υπάρχει πιθανότητα το σύνολο των εξισώσεων που προκύπτει να μην μπορεί να επιλυθεί, ενώ έχουν αναφερθεί και ορισμένα προβλήματα σχετικά με τις αστάθειες του μοντέλου [38].

3.7.3 Το μοντέλο “drift-flux”

Το μοντέλο “drift-flux” είναι ένα από τα πιο πρακτικά και ακριβή μοντέλα για την ανάλυση διφασικής ροής. Το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις των προφίλ της μη-ομοιόμορφης ταχύτητας και του κλάσματος κενού, καθώς και την επίδραση της τοπικής σχετικής ταχύτητας μεταξύ των φάσεων. Η επίλυση διάφορων προβλημάτων μηχανικής που αφορούν τις διφασικές ροές γίνεται με αυτό το μοντέλο. Ειδικότερα, η εφαρμογή του σε συστήματα εξαναγκασμένης συναγωγής ήταν αρκετά επιτυχής. Το μονοδιάστατο μοντέλο “drift-flux” προέκυψε από την κατά μέσο όρο προσέγγιση της τοπικής ταχύτητας ολίσθησης στο κανάλι διατομής [42]. Το μοντέλο διατυπώνεται σύμφωνα με την Εξίσωση (3.44).

$$\frac{\langle j_g \rangle}{\langle a \rangle} = \langle \langle v_g \rangle \rangle = C_0 \langle j \rangle + \langle \langle v_{gj} \rangle \rangle \quad (3.44)$$

Οι αγκύλες $\langle \rangle$ υποδηλώνουν τη μέση περιοχή μιας ποσότητας, F , σε μία περιοχή εγκάρσιας διατομής (A) της διαδρομής της ροής, που ορίζεται μαθηματικά από την Εξίσωση (3.45).

$$\langle F \rangle = \frac{1}{A} \int_A F dA \quad (3.45)$$

Το κλάσμα κενού και η ογκομετρική ροή του μείγματος συμβολίζονται με a και j αντίστοιχα. Με $\langle\langle v_g \rangle\rangle$ συμβολίζεται το σταθμισμένο κλάσμα κενού της μέσης ταχύτητας του αερίου. Η Εξίσωση (3.46) δίνει τον συντελεστή κατανομής C_0 , που παριστά το λόγο του μέσου όρου του γινομένου του κλάσματος κενού και της μέσης ογκομετρικής ροής του μείγματος προς το γινόμενο των μέσων όρων των ίδιων παραμέτρων της ροής, ενώ στην Εξίσωση (3.47) ορίζεται αντίστοιχα το σταθμισμένο κλάσμα κενού της μέσης ταχύτητας του αερίου.

$$C_0 = \frac{\langle aj \rangle}{\langle a \rangle \langle j \rangle} \quad (3.46)$$

$$\langle\langle v_{gj} \rangle\rangle = \frac{\langle v_{gj} a \rangle}{\langle a \rangle} \quad (3.47)$$

Όπου, v_{gj} είναι η τοπική ταχύτητα ολίσθησης της αέριας φάσης και ορίζεται στην Εξίσωση (3.48), ενώ με v_g και v_f συμβολίζονται αντίστοιχα οι ταχύτητες αερίου και υγρού.

$$v_{gj} = v_g - j = (1 - a)(v_g - v_f) \quad (3.48)$$

Το σταθμισμένο κλάσμα κενού της μέσης ταχύτητας του αερίου $\langle\langle v_g \rangle\rangle$ και η μέση ογκομετρική ροή του μείγματος $\langle j \rangle$ είναι παράμετροι που λαμβάνονται εύκολα σε πειράματα. Επομένως, η Εξίσωση (3.44) προτείνει ένα διάγραμμα του $\langle\langle v_g \rangle\rangle$ σε σχέση με το $\langle j \rangle$. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό ενός τέτοιου διαγράμματος είναι ότι για ροϊκά καθεστώτα δύο φάσεων με πλήρως ανεπτυγμένα προφίλ ταχύτητας και κλάσματος κενού, τα σημεία δεδομένων ομαδοποιούνται γύρω από μια ευθεία γραμμή. Η τιμή του συντελεστή κατανομής, C_0 , μπορεί να ληφθεί έμμεσα από την κλίση της γραμμής, ενώ το σημείο τομής της γραμμής αυτής με τον άξονα του σταθμισμένου κλάσματος κενού της μέσης ταχύτητας του αερίου, ερμηνεύεται ως το σταθμισμένο κλάσμα κενού της μέσης ταχύτητας ολίσθησης, $\langle\langle v_{gj} \rangle\rangle$. Η πρόσφατη ανάπτυξη της τεχνολογίας των τοπικών αισθητήρων [43] επιτρέπει τη μέτρηση των τοπικών ροϊκών παραμέτρων στη ροή με φυσαλίδες, συμπεριλαμβανομένων του κλάσματος κενού και των ταχυτήτων αερίου και υγρού. Οι τιμές των C_0 και $\langle\langle v_{gj} \rangle\rangle$ στη ροή με φυσαλίδες μπορούν να

προσδιοριστούν άμεσα από τις Εξισώσεις (3.46) και (3.47) από την πειραματική μέτρηση των τοπικών παραμέτρων ροής.

Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι μερικές φορές οι αδιάστατες παράμετροι των Εξισώσεων (3.49), (3.50), (3.51), (3.52) και (3.53) εισάγονται για την αδιαστατοποίηση του μοντέλου “drift-flux”. Η τελική μορφή του αδιαστατοποιημένου μοντέλου “drift-flux” δίνεται από την Εξίσωση (3.54).

$$\langle j_g^+ \rangle = \frac{\langle j_g \rangle}{\left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4}} \quad (3.49)$$

$$\langle j_f^+ \rangle = \frac{\langle j_f \rangle}{\left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4}} \quad (3.50)$$

$$\langle j^+ \rangle = \frac{\langle j \rangle}{\left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4}} \quad (3.51)$$

$$\langle \langle v_g^+ \rangle \rangle = \frac{\langle \langle v_g \rangle \rangle}{\left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4}} \quad (3.52)$$

$$\langle \langle v_{gj}^+ \rangle \rangle = \frac{\langle \langle v_{gj} \rangle \rangle}{\left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4}} \quad (3.53)$$

$$\frac{\langle j_g^+ \rangle}{\langle a \rangle} = \langle \langle v_g^+ \rangle \rangle = C_0 \langle j^+ \rangle + \langle \langle v_{gj}^+ \rangle \rangle \quad (3.54)$$

3.7.4 Εμπειρικά μοντέλα

Η επίτευξη «κλεισίματος» των εξισώσεων που αναπτύσσονται σε κάθε μοντέλο, απαιτεί την εύρεση σχέσεων για τους όρους πηγής. Οι όροι πηγής στις εξισώσεις ορμής και μάζας που σχετίζονται με τη διατμητική τάση, τη μεταφορά μάζας και την οπισθέλκουσα θα πρέπει να έχουν επίσης τα δικά τους μοντέλα.

Συνήθως, οι διατμητικές τάσεις της διεπιφάνειας και του τοιχώματος μοντελοποιούνται με συντελεστές τριβής. Σε αυτή την περίπτωση, η διατμητική τάση στο τοίχωμα του πεδίου ή της φάσης k δίνεται από την Εξίσωση (3.55) [38].

$$\tau_{wk} = \frac{1}{2} f_{wk} \rho_k |u_k| u_k \quad (3.55)$$

Σε μεγάλες διεπιφάνειες μεταξύ συνεχών πεδίων, η διατμητική τάση μοντελοποιείται επίσης ως συνάρτηση των συντελεστών

τριβής, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται επιπλέον η σχετική ταχύτητα. Στην Εξίσωση (3.56) παρουσιάζεται η διατμητική τάση μεταξύ μιας αέριας και υγρής φάσης.

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_g |u_g - u_l| (u_g - u_l) \quad (3.56)$$

Οι συντελεστές τριβής υπολογίζονται από εμπειρικές σχέσεις. Οι τυπικές λειτουργίες του αριθμού Reynolds και της υδραυλικής διαμέτρου εξαρτώνται από τις μεταβλητές ροής, τις ιδιότητες του ρευστού και τη γεωμετρία της ροής. Σε μη ομαλούς σωλήνες ή κυματιστές διεπιφάνειες εφαρμόζονται προσεγγίσεις για το ύψος της τραχύτητας. Ο αριθμός Reynolds και η υδραυλική διάμετρος για το πεδίο ή τη φάση k δίνονται από την Εξίσωση (3.57).

$$Re_k = \frac{\rho_k u_k D_k}{\mu_k}, \quad D_k = \frac{4A_k}{S_k} \quad (3.57)$$

Σε πεδία σε διασπορά, η οπισθέλκουσα δύναμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της αντίστασης από το περιβάλλον. Η οπισθέλκουσα δύναμη που ασκείται στις φυσαλίδες ή στα σταγονίδια εκφράζεται συχνά ως συνάρτηση της σχετικής ταχύτητας και του συντελεστή οπισθέλκουσας. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι τυπικά μία συνάρτηση του μεγέθους των διεσπαρμένων σωματιδίων. Επίσης, πρέπει να προβλέπονται εμπειρικές σχέσεις για τη διάμετρο της φυσαλίδας ή των σταγονιδίων.

Η Εξίσωση (3.58) περιγράφει την οπισθέλκουσα δύναμη που ασκείται σε ένα διεσπαρμένο σωματίδιο στο πεδίο k , η οποία εξαρτάται από τον συντελεστή οπισθέλκουσας C_D , τη σχετική ταχύτητα u_r και την προβλεπόμενη περιοχή του σωματιδίου A_d [44].

$$F_{drag} = -\frac{1}{2} \rho_k C_D u_r |u_r| A_d \quad (3.58)$$

Άλλοι όροι των τύπων που χρειάζονται «κλείσιμο» είναι οι όροι μεταφοράς μάζας, όπως είναι ο ρυθμός εισχώρησης, αποκόλλησης και εναπόθεσης. Αυτοί οι όροι αποτελούν συχνά εμπειρικές εκφράσεις των ιδιοτήτων του ρευστού και των μεταβλητών της ροής. Μια σχέση για το ρυθμό εναπόθεσης των σωματιδίων, Φ_d , δίνεται στην Εξίσωση (3.59) [38].

$$\Phi_d = \frac{4}{D} k_d \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_g} \rho_l \quad (3.59)$$

Κεφάλαιο 4

Αγωγοί ανόδου πετρελαίου

4.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Υπάρχουν δύο είδη κατακόρυφων αγωγών ανόδου (risers) πετρελαίου, στα οποία ανήκουν οι άκαμπτοι και οι εύκαμπτοι αγωγοί ανόδου. Υπάρχει μια ποικιλία διαμορφώσεων στα υποθαλάσσια συστήματα αγωγών μεταφοράς πετρελαίου. Κάποια από αυτά είναι οι αλυσοειδείς αγωγοί ανόδου πετρελαίου (Steel Catenary Risers, SCRs), οι κατακόρυφοι τεταμένοι αγωγοί ανόδου πετρελαίου (Top-Tensioned Risers, TTRs) κ.α. Μία ευρέως διαδεδομένη διάταξη για μεγάλο θαλάσσιο βάθος είναι το σύστημα αλυσοειδών αγωγών riser (Free Hanging Catenary Risers) που κρέμονται ελεύθερα (Bai, 2001).

Ο λεπτόγραμμος αλυσοειδής αγωγός ανόδου (SCR) έχει την ικανότητα να αντισταθμίζει την κατακόρυφη κίνηση της πλατφόρμας, δηλαδή μπορεί να ανυψωθεί ή να μετακινηθεί προς το βυθό της θάλασσας. Ο συγκεκριμένος αγωγός ανόδου είναι επίσης εξαιρετικά ευαίσθητος σε περιβαλλοντικά φορτία. Παρόλο που ο αγωγός ανόδου διαθέτει εξαιρετική αντοχή σε υψηλά επίπεδα τάσεων, λόγω του σχεδιασμού του, ο συνδυασμός των κινήσεων του σκάφους, των περιβαλλοντικών φορτίων και της επίδρασης της εσωτερικής ροής μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της διάρκειας ζωής του. Επιπρόσθετα, οι μηχανικές ιδιότητες του αγωγού ανόδου και η υδροστατική πίεση λόγω των εσωτερικών και εξωτερικών ρευστών ασκούν σημαντική επιρροή στον αγωγό.

Κατά τη διάρκεια των ετών μελετήθηκε διεξοδικά τόσο η αντίδραση του αγωγού ανόδου σε περιβαλλοντικά φορτία όσο και οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την τοπική καμπυλότητα του αγωγού, εξαιτίας του αλυσοειδούς σχήματός του, οι συγγραφείς πιστεύουν ότι το ισοζύγιο της εσωτερικής ροής θα μπορούσε να προκαλέσει μια διέγερση κατά μήκος του αγωγού ανόδου. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες, είναι σαφές ότι το φαινόμενο αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Σύμφωνα με τους Gregory & Paidoussis [45], ορισμένες κρίσιμες τιμές της ταχύτητας του ρευστού μέσα σε ένα σωλήνα, μπορεί να προκαλέσουν αστάθεια και να αυξήσουν το πλάτος της ταλάντωσης. Ο Paidoussis [46] πρότεινε ένα φυσικό μοντέλο για τον προσδιορισμό των συνθηκών ευστάθειας των κάθετων σωληνοειδών προβόλων μεταφοράς υγρού. Διαπιστώθηκε ότι η δυναμική αυτού του συστήματος εξαρτάται από τρεις αδιάστατες παραμέτρους που σχετίζονται με τις αδρανειακές δυνάμεις, την αναλογία κάμψης ακαμψίας και τις συνθήκες ροής. Επίσης, διεξήχθη μια πειραματική μελέτη για την επικύρωση του θεωρητικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα ταυτίζονταν σε ικανοποιητικό βαθμό μεταξύ θεωρίας και πειράματος.

Οι Moe & Chucheeepsakul [47] ερεύνησαν τις επιπτώσεις μιας σταθερής ομογενούς ροής σε ένα κατακόρυφο αγωγό ανόδου πετρελαίου με σταθερή τάση κορυφής. Η επίδραση της εσωτερικής ροής σε φυσική συχνότητα θεωρήθηκε μέτρια, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου ο ρυθμός της ροής ήταν υψηλός. Σε αυτές τις περιπτώσεις λαμβάνεται υπόψη και η ροπή κάμψης. Οι συγγραφείς επισημαίνουν επίσης ότι μπορεί να προκληθεί αστάθεια σε αγωγούς ανόδου λόγω της εσωτερικής ροής, κυρίως στην περίπτωση της χρονικά εξαρτημένης διαλείπουσας ροής.

Οι Patel & Seyed [48] παρουσίασαν τις καταστατικές εξισώσεις για εύκαμπτους αγωγούς ανόδου, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις των δυνάμεων διέγερσης λόγω της εσωτερικής ροής. Απέδειξαν ότι η καμπυλότητα και η διαλείπουσα ροή σε έναν εύκαμπτο αλυσοειδή αγωγό ανόδου πετρελαίου, επάγουν δυνάμεις που οφείλονται στις διακυμάνσεις της ορμής της ροής. Επίσης, επιβεβαίωσαν ότι η διφασική διαλείπουσα ροή προκαλεί τάσεις μεγάλων διακυμάνσεων στον αγωγό και σημαντική κυκλική φόρτιση κόπωσης.

Οι Wu & Lou [49] ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την κατακόρυφη κίνηση ενός αγωγού ανόδου. Σκοπός της έρευνάς τους ήταν να εξετάσουν την επίδραση της εσωτερικής μονοφασικής ροής και της καμπτικής ακαμψίας στη δυναμική συμπεριφορά του αγωγού ανόδου. Το μοντέλο υποβλήθηκε επίσης στην ταυτόχρονη δράση κυμάτων, ρευμάτων και αντιστάθμισης της πλατφόρμας. Η ακαμψία γίνεται σημαντικότερη σε σχέση με τη δυναμική απόκριση των αγωγών ανόδου σε υψηλές εσωτερικές ταχύτητες ροής.

Τις περισσότερες φορές η παραγωγή του πετρελαίου χαρακτηρίζεται ως μία ροή πολλαπλών φάσεων στην οποία συμμετέχουν το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το νερό

και διάφορα ιζήματα. Συνήθως, οι κύριες φάσεις είναι αυτές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, αν και το νερό παρουσιάζεται επίσης σε πολλές πραγματικές περιπτώσεις.

Οι Bornea et al. [50] ανέπτυξαν ένα μηχανιστικό μοντέλο για την πρόβλεψη των μεταβάσεων μεταξύ των διαφόρων προτύπων διαφασικής ροής σε κατακόρυφους αγωγούς. Απέδειξαν ότι για την περιγραφή της μετάβασης μεταξύ δύο οποιονδήποτε προτύπων ροής, απαιτούνται μόνο δύο αδιάστατες ομάδες αριθμών. Με βάση αυτές τις παραμέτρους δημιούργησαν μία γενίκευση για την ταυτοποίηση των προτύπων ροής. Τέλος, το ερευνητικό τους έργο ταυτίζονταν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα πειραματικά δεδομένα.

Οι Beggs & Brill [51] ανέπτυξαν μια μέθοδο για την πρόβλεψη της κλίσης της πίεσης σε οριζόντιους και κεκλιμένους άκαμπτους αγωγούς. Στην εργασία τους, παρουσίασαν ότι η συγκράτηση του υγρού (δηλ. το υγρό περιεχόμενο σε ένα τμήμα του σωλήνα που εκφράζεται ως το ογκομετρικό κλάσμα του τμήματος, liquid hold-up), όπως επίσης και τα πρότυπα ροής ποικίλλουν ανάλογα με την κλίση του σωλήνα. Έτσι, τα πρότυπα ροής που παρατηρούνται κατά μήκος μιας κεκλιμένης ροής μπορεί να διαφέρουν αρκετά σε σύγκριση με αυτά σε μία οριζόντια ροή [52].

4.2 Ιστορικό

Η ανοιχτή θάλασσα είναι το νεότερο και το πιο συναρπαστικό σύνορο της υπεράκτιας κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η ανακάλυψη των γιγαντιαίων πεδίων πετρελαίου και φυσικού αερίου σε βαθιά ύδατα παρουσίασε μια σημαντική πρόκληση για τη βιομηχανία, η οποία είχε ως αποτέλεσμα αξιοσημείωτες εξελίξεις στον τρόπο του εξοπλισμού, των διαδικασιών, των οργάνων και των απομακρυσμένων λειτουργιών.

Η πρόοδος στη τεχνολογία των αγωγών ανόδου είναι ένα από τα σημαντικότερα κύρια στοιχεία για τη μελλοντική ανάπτυξη στον τομέα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Οι μηχανικοί εξακολουθούν να προσπαθούν να παράγουν τον οικονομικότερο σχεδιασμό και τεχνικά φιλικότερη λύση των αγωγών ανόδου. Υπάρχει ένας αριθμός διαμορφώσεων των αγωγών ανόδου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο πεδίο της ανοιχτής θαλάσσης, όπως είναι οι εύκαμπτοι αγωγοί ανόδου, οι λεπτόγραμμοι αλυσοειδείς αγωγοί ανόδου (SCRs) και οι υβριδικοί αγωγοί ανόδου.

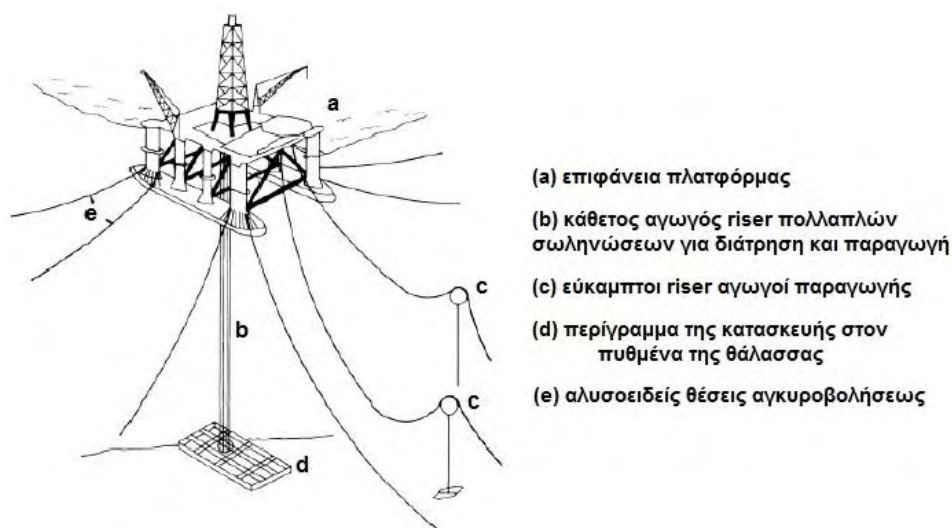
Τα συστήματα αγωγών ανόδου μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό ποσοστό του κόστους ανάπτυξης των πλωτών συστημάτων παραγωγής, τα οποία θεωρούνται όλο και περισσότερο σημαντικά τόσο για την τρέχουσες όσο και για τις μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα. Οι λεπτόγραμμοι αλυσοειδείς αγωγοί ανόδου προσφέρουν μια εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους έναντι των συμβατικών άκαμπτων και εύκαμπτων αγωγών ανόδου που χρησιμοποιούνται στις πλωτές εξέδρες και μπορούν επίσης να παρέχουν οικονομικές λύσεις σχεδιασμού σε σταθερές πλατφόρμες.

Στη συνέχεια, περιγράφονται διάφορα είδη αγωγών ανόδου με βάση το γεωμετρικό τους σχήμα, το υλικό τους (π.χ. χάλυβας, τιτάνιο κ.α.) και τις τελικές τους λεπτομέρειες (π.χ. εύκαμπτες αρθρώσεις, ενισχυτικά ελάσματα κάμψης κ.α.) για βαθιά ύδατα και αντίξοες συνθήκες.

4.3 Υποθαλάσσια συστήματα αγωγών ανόδου

4.3.1 Εισαγωγή

Ένας κατακόρυφος αγωγός ανόδου πετρελαίου είναι ένας αγωγός, ο οποίος συνδέει ένα φρεάτιο πετρελαίου ανοικτής θαλάσσης με την αντίστοιχη πλατφόρμα γεώτρησης. Ο αγωγός ανόδου εκτείνεται από τον πυθμένα της θάλασσας μέχρι την πλατφόρμα της γεώτρησης.



Σχήμα 4.1 Τυπικό σύστημα παραγωγής ημιβυθιζόμενης εξέδρας

Το σύστημα αγωγών ανόδου αποτελεί βασικό στοιχείο για την παροχή ασφάλειας κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων, ξεκινώντας από τη γεώτρηση, την ολοκλήρωση των εργασιών επισκευής ή διέγερσης της υφιστάμενης παραγωγικής γεώτρησης, την παραγωγή μέχρι και την εξαγωγή. Η κύρια λειτουργία των αγωγών ανόδου είναι η μεταφορά υγρών ή αερίων από τον πυθμένα της θάλασσας στις πλατφόρμες υποδοχής. Κάποιες πρόσθετες λειτουργίες των αγωγών ανόδου ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής τους είναι οι εξής [53]:

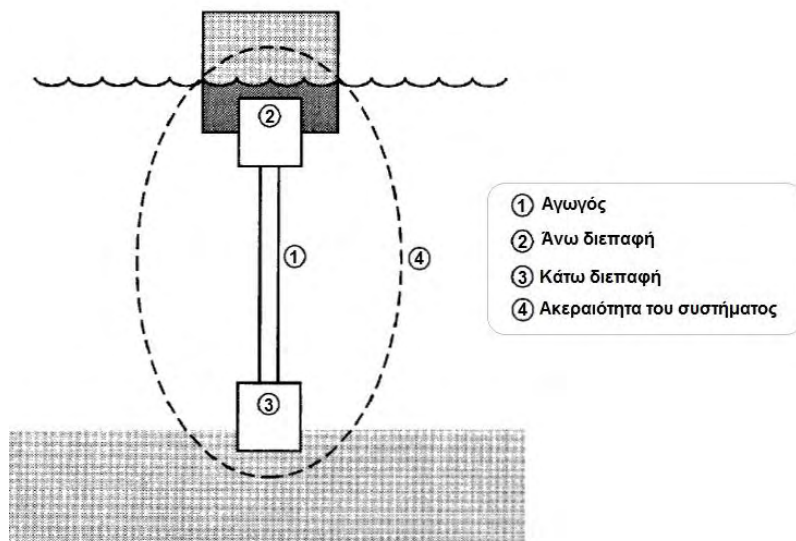
- Μεταφορά του ρευστού μεταξύ των φρεατίων και των πλωτήρων
- Εξαγωγή του ρευστού από των πλωτήρα στις σωληνώσεις
- Καθοδήγηση της γεώτρησης ή των εργαλείων ολοκλήρωσης και των σωλήνων πετρελαίου μέσα στα φρεάτια

Οι εφαρμογές των συστημάτων τους ποικίλουν ανάλογα με το βάθος του νερού και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο σχεδιασμός των αγωγών ανόδου βαθέων υδάτων είναι σαφώς δυσκολότερος σε σχέση με τον σχεδιασμό σε αβαθή ύδατα. Οι αγωγοί ανόδου βαθέων υδάτων έχουν εφαρμοστεί ευρέως στον κόλπο του Μεξικού, στη Βραζιλία και στη δυτική Αφρική. Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές συνθήκες, στις προαναφερθείσες τοποθεσίες η περιβαλλοντική κατάσταση είναι ήπια, ενώ σε περιοχές όπως η Βόρεια Θάλασσα, η Νορβηγική Θάλασσα ή η Θάλασσα του Μπάρεντς η περιβαλλοντική κατάσταση γίνεται σκληρή. Στο μέλλον προβλέπεται ότι η ανάπτυξη του πετρελαίου και του φυσικού αερίου θα κινηθεί γύρω από τα βαθέα ύδατα και τις σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες.

4.3.2 Θαλάσσιο σύστημα αγωγού ανόδου

Τα τυπικά στοιχεία ενός συστήματος αγωγών ανόδου είναι τα εξής [53]:

- Το σώμα του αγωγού: μεταλλικός ή εύκαμπτος αγωγός
- Οι διεπαφές του συστήματος: άνω και κάτω διεπαφή



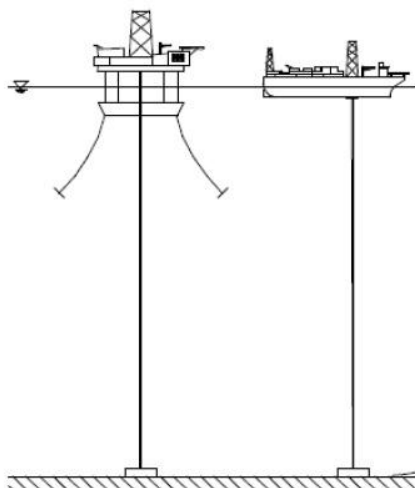
Σχήμα 4.2 Απαραίτητα λειτουργικά στοιχεία ενός συστήματος αγωγού ανόδου

Το σύστημα αγωγού ανόδου βρίσκεται στη σύνδεση μεταξύ μιας στατικής δομής στην κάτω διεπαφή και μιας δυναμικής πλωτής δομής στην πάνω διεπαφή. Η δυναμική συμπεριφορά του πλωτήρα στην επιφάνεια είναι η κύρια πρόκληση για το σχεδιασμό του συστήματος αγωγού ανόδου. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για την ακόλουθη κατηγοριοποίηση των συστημάτων αγωγών ανόδου σύμφωνα με την ικανότητά τους να αντιμετωπίσουν την κίνηση της πλωτής κατασκευής:

- Κατακόρυφος τεταμένος αγωγός ανόδου πετρελαίου (Top-Tensioned Riser, TTR)
- Εύκαμπτος αγωγός ανόδου πετρελαίου (Compliant Riser)
- Υβριδικός αγωγός ανόδου πετρελαίου (Hybrid Riser), ο οποίος ορίζεται ως ο συνδυασμός των δύο αυτών συστημάτων

4.3.2.1 Κατακόρυφος τεταμένος αγωγός ανόδου πετρελαίου

Ο αγωγός ανόδου στους κατακόρυφους τεταμένους αγωγούς ανόδου πετρελαίου (TTRs) υποστηρίζεται στον πλωτήρα, με την παροχή ισχύος μεγάλης έντασης, προκειμένου να διατηρηθεί η αποδεκτή κατακόρυφη κίνηση. Οι οριζόντιες κινήσεις του πλωτήρα μπορεί να προκαλέσουν τάσεις στη βάση του αγωγού ανόδου και στο άκρο της κορυφής κοντά στις εύκαμπτες αρθρώσεις. Κάποιες τυπικές εφαρμογές των συστημάτων TTR παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.



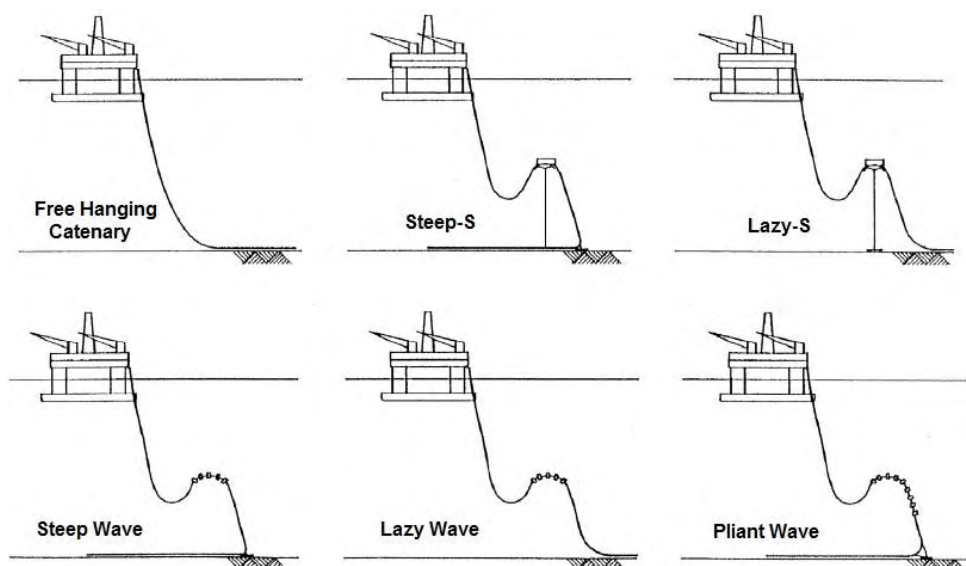
Σχήμα 4.3 Κατακόρυφος τεταμένος αγωγός μεταφοράς πετρελαίου (TTR)

Τα συστήματα τύπου TTR βρίσκουν εφαρμογή σε εγκαταστάσεις παραγωγής, όπως είναι οι πλατφόρμες εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων επί ιστών (πλατφόρμες τύπου Spar) ή σε πλατφόρμες με τεταμένους τένοντες (πλατφόρμες τύπου Tension Leg Platform, TLPs). Οι πλατφόρμες τύπου Spar και TLP έχουν μικρή κίνηση ταλάντωσης, η οποία είναι επιθυμητή για την κατηγορία των συστημάτων τύπου TTR. Σε κάποιο βαθμό, οι ημιβυθιζόμενες πλατφόρμες (τύπου Semi-Submersible) μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως πλατφόρμες υποδοχής για συστήματα τύπου TTR, ενσωματώνοντας ένα ξεχωριστό σύστημα υψηλής αντιστάθμισης για τις κινήσεις του πλωτήρα. Γενικότερα, οι κατακόρυφοι τεταμένοι αγωγοί ανόδου πετρελαίου (TTRs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις διαδικασίες εξόρυξης, παραγωγής, έγχυσης και εξαγωγής.

Το σύστημα TTR λειτουργεί απευθείας από το υποθαλάσσιο φρεάτιο στο κατάστρωμα του πλοίου. Στον αγωγό ανόδου εφαρμόζεται τάση είτε από πλωτούς κυλίνδρους είτε από υδρο-πνευματικούς εντατήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο κατάστρωμα. Για τις πλατφόρμες επί ιστών (τύπου Spar), η τοποθέτηση των πλωτών κυλίνδρων είναι μια πολύπλοκη, δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία. Η εφαρμογή τεταμένων αγωγών ανόδου πετρελαίου που χρησιμοποιούν υδρο-πνευματικούς εντατήρες σε πλατφόρμες επί ιστών (Spars) και σε πλατφόρμες με τεταμένους τένοντες (TLPs) αποτελεί λιγότερο πολύπλοκη διαδικασία και έχει μικρότερο χρόνο εγκατάστασης σε σύγκριση με τη χρήση πλωτών κυλίνδρων.

4.3.2.2 Εύκαμπτος αγωγός ανόδου πετρελαίου

Ο εύκαμπτος αγωγός ανόδου πετρελαίου (Compliant Riser) παρέχει ευελιξία για την αντιμετώπιση των κινήσεων του πλωτήρα. Οι διατάξεις του εύκαμπτου αγωγού ανόδου διαμορφώνονται έτσι ώστε να απορροφούν τις κινήσεις του πλωτήρα χωρίς τη συνεισφορά πρόσθετου εξοπλισμού, όπως είναι το σύστημα αντιστάθμισης. Η ευελιξία του σχεδιασμού του συστήματος, του προσδίδει υψηλή δυναμική αντίσταση και τη δυνατότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερο θαλάσσιο βάθος καθώς και σε σκληρά περιβάλλοντα. Οι εύκαμπτοι αγωγοί ανόδου πετρελαίου βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στις διαδικασίες της παραγωγής, της εξαγωγής και της έγχυσης. Αυτός ο τύπος αγωγού εφαρμόζεται σε διάφορους τύπους πλωτών εξέδρων, όπως είναι οι πλατφόρμες με τεταμένους τένοντες (TLPs), οι ημιβυθιζόμενες πλατφόρμες (Semi-Submersible) και τα πλοία.



Σχήμα 4.4 Πρότυπες διατάξεις του εύκαμπτου αγωγού ανόδου πετρελαίου (Compliant Riser)

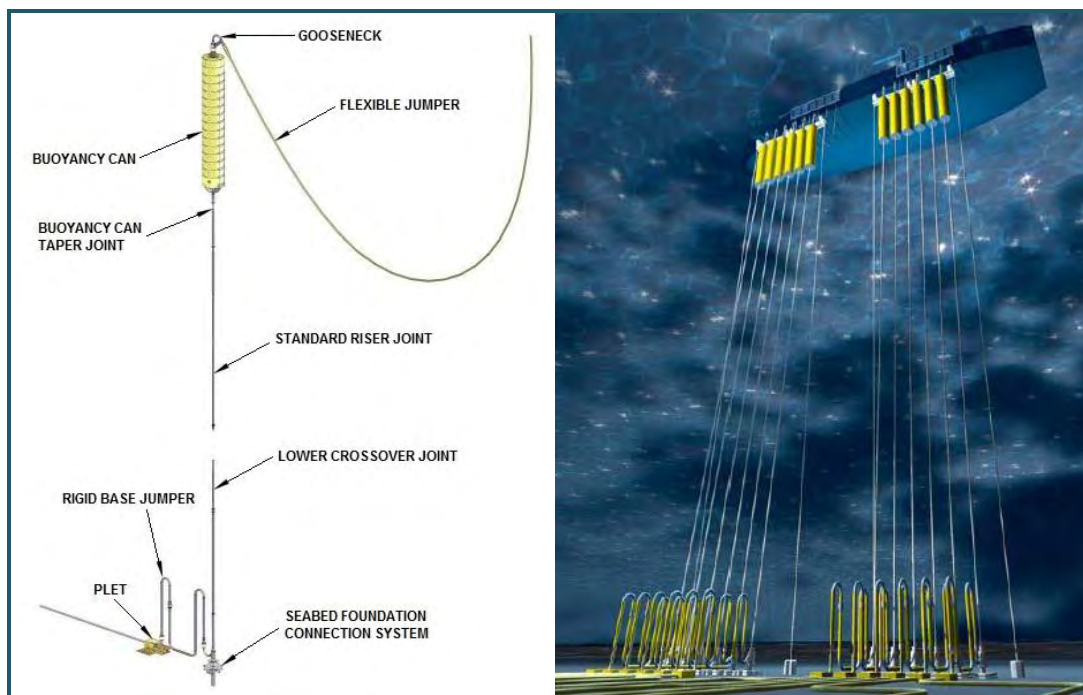
Οι εύκαμπτοι αγωγοί ανόδου πετρελαίου (Compliant Risers) μπορούν να εγκατασταθούν σε έναν αριθμό διαφορετικών διατάξεων. Ο σχεδιασμός της διάταξης του εύκαμπτου αγωγού ανόδου θα πρέπει να εκτελείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της παραγωγής και των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών. Ειδικότερα, μερικοί παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό της κατάλληλης διάταξης, είναι το βάθος του νερού, η πρόσβαση σε πλοία υποδοχής, η διάταξη του πεδίου (π.χ. αριθμός και τύπος αγωγών ανόδου), τα περιβαλλοντικά δεδομένα και τα χαρακτηριστικά κίνησης του πλοίου υποδοχής.

4.3.2.3 Υβριδικοί αγωγοί ανόδου πετρελαίου

Καθώς οι εξελίξεις στο θαλάσσιο τομέα εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στοχεύουν συνεχώς σε βαθύτερα ύδατα, οι υβριδικοί πύργοι αγωγών ανόδου (Hybrid Riser Towers, HRTs) έχουν γίνει μια από τις λύσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα προσαρμογής των υβριδικών πύργων μεταφοράς πετρελαίου στις απαιτήσεις αγωγών ανόδου μεγάλης διαμέτρου, στις υψηλές απαιτήσεις διασφάλισης της ροής και στην εύρωστη διάταξη για μελλοντικές φάσεις ανάπτυξης.

Ο υβριδικός αγωγός ανόδου τύπου Free Standing (Free Standing Hybrid Riser, FSHR) είναι ένα κατακόρυφο τμήμα αγωγού, το οποίο τεντώνεται από μία κοντινή επιφάνεια ενός πλωτού κυλίνδρου, ο οποίος συνδέεται στην κορυφή του αγωγού ανόδου. Ο αγωγός ανόδου δένεται στην πίσω πλευρά του πλοίου μέσω ενός εύκαμπτου σύρματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5. Μία τυπική διάταξη FSHR αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά στοιχεία:

- Άνω τμήμα συναρμολόγησης αγωγού: Περιλαμβάνει τη δομική σύνδεση μεταξύ του αγωγού ανόδου και του συστήματος πρόσδεσης ή της εύκαμπτης άρθρωσης, το οποίο μεταφέρει την τάση που παρέχεται από το δοχείο αέρος.
- Gooseneck: Επιτρέπει τη σύνδεση και την πορεία της ροής μεταξύ του εύκαμπτου σύρματος πρόσδεσης (flexible jumper) και του αγωγού ανόδου.
- Flexible jumper: Μεταφέρει υγρό μεταξύ του αγωγού ανόδου και του σκάφους.
- Άνω τμήμα εύκαμπτης άρθρωσης: Χρησιμοποιείται κάτω από το άνω άκρο της συναρμολόγησης ή του δοχείου αέρος για τη μείωση των υψηλών τάσεων που δημιουργούνται λόγω φορτίων κάμψης που επιβάλλονται από το εύκαμπτο σύρμα πρόσδεσης και το δοχείο αέρος.
- Κάτω τμήμα εύκαμπτης άρθρωσης: Μειώνει τις υψηλές καταπονήσεις που προκαλούνται στη βάση του αγωγού ανόδου από τις μετατοπίσεις του σκάφους.
- Κάτω τμήμα συναρμολόγησης αγωγού: Περιλαμβάνει μία διάταξη απόληξης που συνδέεται με μια άκαμπτη βάση παρέχοντας έτσι πρόσβαση στη γραμμή της ροής.
- Θεμελιώσεις: Λαμβάνουν διάφορες μορφές ανάλογα με τις δυνατότητες του σκάφους εγκατάστασης και τη διαμόρφωση της βάσης του αγωγού ανόδου.



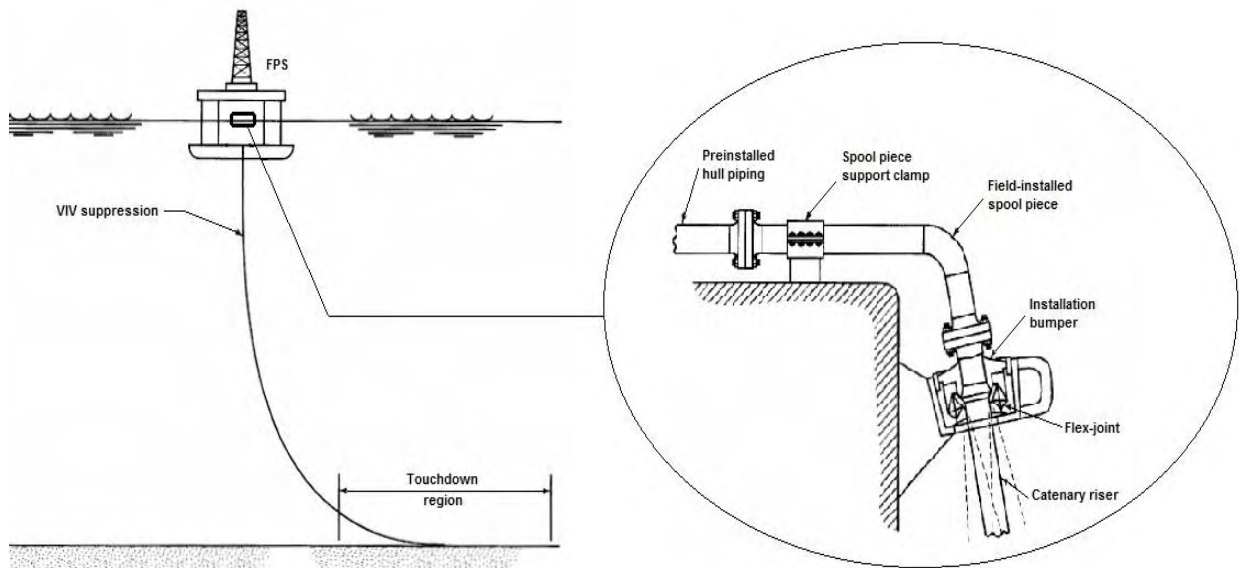
Σχήμα 4.5 (α) Τυπική διάταξη του Free Standing Hybrid Riser (FSHR), (β) Ομαδοποιημένα SLOR

4.3.2.4 Αλυσοειδής αγωγός ανόδου πετρελαίου

Η αυξανόμενη ανάγκη για εκμετάλλευση κοιτασμάτων σε μεγαλύτερα βάθη θάλασσας οδήγησε τα τελευταία χρόνια τη βιομηχανία των θαλάσσιων πλωτών κατασκευών εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων στο σχεδιασμό και στην εγκατάσταση πολύ μεγάλου μήκους, εύκαμπτων, λεπτόγραμμων κατασκευών (Steel Catenary Risers, SCRs). Σήμερα οι κατασκευές αυτές εγκαθίστανται συστηματικά σε υποθαλάσσιο βάθος 1500 μέτρων, ενώ ήδη σχεδιάζονται μοντέλα για βάθη τάξεως 3.000 μέτρων [54].

Από τα βασικότερα ζητήματα σχεδιασμού των SCRs είναι η αντοχή σε κόπωση, η οποία επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες εδάφους του θαλάσσιου πυθμένα στην περιοχή επαφής του αγωγού με το έδαφος. Σήμερα, οι πρωτοπόροι της έρευνας στην περιοχή της υδρομηχανικής ανάλυσης των SCR θεωρούν ότι η εκτίμηση της επιχειρησιακής διάρκειας ζωής ενός συστήματος υποθαλάσσιων αγωγών SCR, απαιτεί καλή γνώση της ακαμψίας του εδάφους του θαλάσσιου πυθμένα στην περιοχή επαφής. Η αστοχία λόγω κόπωσης της κατασκευής ενός αλυσοειδούς αγωγού ανόδου συνδέεται άμεσα με τις μεγάλες τιμές καμπτικής τάσης και ροπής που εμφανίζονται στην περιοχή γύρω από το σημείο της κατασκευής που έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα, το οποίο χαρακτηρίζεται διεθνώς με το αρκτικόλεξο TDP (Touch Down Point). Οι φορτίσεις

αυτές εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από την καμπτική ακαμψία της κατασκευής σε συνδυασμό με την «απόσβεση» που επιβάλλει ο πυθμένας στο εδραζόμενο τμήμα της κατασκευής όταν αυτό εκτελεί δυναμικές ταλαντωτικές κινήσεις. Η αιτία τέτοιων κινήσεων βρίσκεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως είναι τα κύματα, τα ρεύματα κ.α. Τα ζητήματα αυτά ωθούν τη βιομηχανία στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των συστημάτων SCR, προκειμένου να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις σκληρές συνθήκες των βαθέων υδάτων [55].



Σχήμα 4.6 Αλυσοειδής αγωγός riser (SCR)

Κεφάλαιο 5

Παραδείγματα διφασικών ροών

5.1 Παράδειγμα διφασικής ροής αερίου-υγρού σε αγωγό ανόδου

Αρχικά θα αναλυθεί το υπόβαθρο του πειράματος, ξεκινώντας από τους τρόπους μέτρησης του κλάσματος φάσης. Στη συνέχεια, θα περιγραφεί η διάταξη του αγωγού ανόδου, θα παρουσιαστούν οι συνθήκες λειτουργίας και οι φυσικές ιδιότητες των υγρών-αερίων και θα καθοριστούν οι παράμετροι εισόδου.

5.1.1 Υπόβαθρο πειράματος

5.1.1.1 Μέτρηση του κλάσματος φάσης

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τη μέτρηση των κλασμάτων και των κατανομών των αερίων και υγρών, καθώς επίσης και για τον εντοπισμό διάφορων καθεστώτων πολυφασικής ροής σε αγωγούς. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές εξασθένησης ακτινοβολίας γ , μετρητής ροής μάζας Coriolis, αισθητήρας συρμάτινου πλέγματος και άλλες κοινές τεχνικές που περιγράφονται εν συντομία στη συνέχεια.

5.1.1.1.1 Εξασθένηση ακτινοβολίας γ

Η αρχή της τεχνικής εξασθένησης της ακτινοβολίας γ , εξηγείται από το γεγονός ότι οι ακτίνες γ εξασθενούν καθώς περνούν μέσα από ένα αντικείμενο λόγω της αλληλεπίδρασης των φωτονίων των ακτίνων με αυτό. Η έκταση της εξασθένησης των ακτίνων γ εξαρτάται από την ενέργειά τους και από την πυκνότητα του απορροφητικού μέσου [56]. Για τη μέτρηση πολυφασικών ροών σε αγωγούς αναπτύχθηκαν αρκετές μέθοδοι που χρησιμοποιούν την ακτινοβολία γ . Οι δύο πιο διαδεδομένες μέθοδοι εξασθένησης της ακτινοβολίας γ , είναι η εξασθένηση μονής δέσμης και διπλής ενέργειας.

5.1.1.1.2 Αισθητήρας συρμάτινου πλέγματος (WMS)

Ο αισθητήρας συρμάτινου πλέγματος (Wire Mesh Sensor, WMS) είναι μια καινούρια τεχνική απεικόνισης και μέτρησης της ροής, η οποία επιτρέπει μετρήσεις της πολυφασικής ροής υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης. Αυτός ο τύπος του αισθητήρα εισήχθη για πρώτη φορά στη Γερμανία, στο ερευνητικό κέντρο “Helmholtz” (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR) της Δρέσδης [57]. Τα συρμάτινα ηλεκτρόδια του αισθητήρα WMS τεντώνονται σε ολόκληρη τη διατομή της ροής, ενώ δύο ομάδες συρμάτινων ηλεκτροδίων τοποθετούνται κάθετα η μία στην άλλη με ένα μικρό αξονικό διαχωρισμό, δημιουργώντας έτσι ένα πλέγμα ηλεκτροδίων. Η μία ομάδα ενεργεί ως πομπός και η άλλη ως δέκτης. Τα ηλεκτρόδια του πομπού ενεργοποιούνται με τη σειρά, ενώ τα ηλεκτρόδια του δέκτη ενεργοποιούνται παράλληλα. Το ηλεκτρονικό σύστημα του αισθητήρα WMS μετράει τις τοπικές ηλεκτρικές ιδιότητες (αγωγιμότητα ή διαπερατότητα) του υγρού σε κάθε σημείο διασταύρωσης των συρμάτων, εφαρμόζοντας διαδοχικά τάση διέγερσης σε κάθε ηλεκτρόδιο του πομπού με παράλληλη διατήρηση των υπόλοιπων ηλεκτροδίων του πομπού σε δυναμικό γείωσης και μετρώντας αντίστοιχα την άμεση (DC) ή εναλλασσόμενη (AC) ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε όλα τα συγχρονισμένα ηλεκτρόδια του δέκτη. Με βάση αυτές τις ηλεκτρικές μετρήσεις (αγωγιμότητα ή διαπερατότητα) ο αισθητήρας δίνει πληροφορίες σχετικά με το στιγμιαίο κλάσμα φάσης και την κατανομή του υγρού σε όλο το μήκος της διατομής. Επιπρόσθετα, οι μετρήσεις του αισθητήρα παρέχουν μία απεικόνιση των διάφορων καθεστώτων ροής που αναπτύσσονται εντός των αγωγών. Οι δύο βασικότεροι τύποι αισθητήρων συρμάτινου πλέγματος είναι οι αισθητήρες αγωγιμότητας και χωρητικότητας. Οι αισθητήρες αγωγιμότητας συρμάτινου πλέγματος είναι ικανοί να μετρήσουν την αγωγή φάση της ροής ενός μείγματος, ενώ οι αισθητήρες χωρητικότητας συρμάτινου πλέγματος επιτρέπουν τη μέτρηση μη αγωγίων ρευστών, όπως είναι το πετρέλαιο ή τα οργανικά ρευστά [58].

5.1.1.1.3 Μετρητής ροής μάζας Coriolis

Ο μετρητής ροής μάζας Coriolis αποτελείται από ένα εύκαμπτο σωλήνα ροής και από έναν μαγνητικό αισθητήρα. Στα σημεία που δεν υπάρχει ροή στο μετρητή, ο σωλήνας μέτρησης ταλαντώνεται ομοιόμορφα και οι αισθητήρες στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα καταγράφουν αυτή την ομοιόμορφη ταλάντωση. Καθώς το υγρό αρχίζει να ρέει, επιβάλλεται επιπλέον στρέψη στο σωλήνα, λόγω της αδράνειας του ρευστού. Ως αποτέλεσμα, τα τμήματα εισόδου και εξόδου του σωλήνα ταλαντώνονται ταυτόχρονα

σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η διαφορά στην ταλάντωσή τους συνδέεται άμεσα με το ποσοστό ροής μάζας τους. Αυτή η μετατόπιση φάσης εντοπίζεται από τον αισθητήρα και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ρυθμού ροής μάζας. Ο μετρητής ροής μάζας Coriolis μπορεί επίσης να μετρήσει την πυκνότητα ενός υγρού. Ο σωλήνας μέτρησης βρίσκεται συνεχώς σε συχνότητα συντονισμού. Η μεταβολή της μάζας και κατά επέκταση της πυκνότητας του συστήματος σε ταλάντωση, καταλήγει στην αυτόματη ρύθμιση της συχνότητας ταλάντωσης. Έτσι, η συχνότητα ταλάντωσης είναι ένας τρόπος άμεσης μέτρησης της πυκνότητας του ρευστού. Η μέτρηση της πυκνότητας του υγρού και του ρυθμού ροής της μάζας πραγματοποιείται ταυτόχρονα αλλά ανεξάρτητα [59].

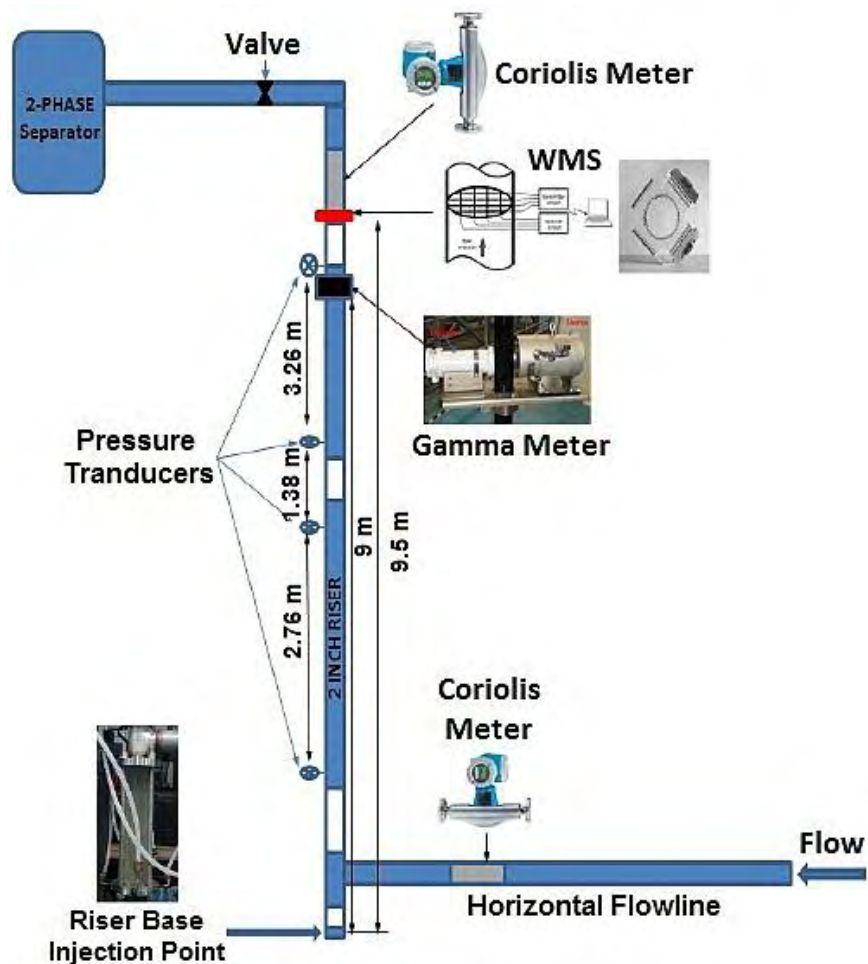
5.1.1.2 Περιγραφή της δοκιμαστικής διάταξης

Ο αγωγός ανόδου 52 mm στη δοκιμαστική εγκατάσταση πολυφασικής ροής είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα NB10. Αποτελείται από μία οριζόντια γραμμή ροής μήκους 40 m, η οποία συνδέεται σε ένα κατακόρυφο αγωγό ύψους 10.5 m.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται ο κατακόρυφος αγωγός ανόδου από ανοξείδωτο χάλυβα, οποίος έχει τέσσερα διαφανή πλαστικά τμήματα μήκους 30 cm, 60 cm, 20 cm και 40 cm. Τα τμήματα αυτά είναι αντίστοιχα τοποθετημένα σε απόσταση 0.01 m, 0.5 m, 5.5 m και 9 m πάνω από τη βάση του αγωγού ανόδου. Μέσω αυτών των τμημάτων πραγματοποιείται η οπτική παρατήρηση της ροής. Η έξοδος του αγωγού ανόδου συνδέεται με ένα κατακόρυφο σύστημα διαχωρισμού δύο φάσεων, στο οποίο διαχωρίζεται ο αέρας και το υγρό. Κατά μήκος του αγωγού ανόδου εγκαθίστανται αρκετά όργανα για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της πολυφασικής ροής στο εσωτερικό του. Μεταξύ του αγωγού ανόδου και του διαχωριστή διφασικής ροής εγκαθίσταται μια βαλβίδα ελέγχου, διαμέτρου 2 ιντσών, η οποία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των ροϊκών συνθηκών στο δοκιμαστικό τμήμα.

Στη δοκιμαστική διάταξη του αγωγού ανόδου τοποθετούνται ακόμη δύο μετρητές ροής μάζας Coriolis. Ο ένας μετρητής εγκαθίσταται στο οριζόντιο τμήμα του βρόχου ροής σε απόσταση 1.2 m από τη βάση του αγωγού ανόδου και ο άλλος τοποθετείται στην κορυφή του κατακόρυφου αγωγού ανόδου. Επίσης, σε απόσταση 9 m και 9.5 m από τη βάση του αγωγού ανόδου τοποθετούνται αντίστοιχα ένας μετρητής ακτίνων γ και ένας αισθητήρας συρμάτινου πλέγματος (WMS). Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται οι

προδιαγραφές και οι συνθήκες λειτουργίας του δοκιμαστικού βρόχου του αγωγού ανόδου 52 mm.



Σχήμα 5.1 Ο αγωγός ανόδου διαμέτρου (52 mm) με τις υπάρχουσες συσκευές μέτρησης

5.1.1.3 Περιοχή διαχωρισμού

Αυτή η περιοχή αποτελείται από δύο κύριους διαχωριστές, ένα κατακόρυφο διαχωριστή δύο φάσεων και έναν οριζόντιο διαχωριστή τριών φάσεων. Στην έξοδο της δοκιμαστικής διάταξης, το μείγμα υγρού-αερίου διαχωρίζεται σε ένα κατακόρυφο διαχωριστή δύο φάσεων. Το υγρό μείγμα από τον διαχωριστή δύο φάσεων πηγαίνει στον οριζόντιο διαχωριστή τριών φάσεων, όπου διαχωρίζεται με τη βαρύτητα σε αντίστοιχες φάσεις. Η πίεση και η στάθμη της διεπιφάνειας του νερού ή του αερίου στο διαχωριστή τριών φάσεων ελέγχονται με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή πίεσης και δύο ελεγκτών στάθμης, με αποτέλεσμα την εκκένωση του εναπομείναντα αέρα στην

ατμόσφαιρα. Το νερό εισέρχεται στο φίλτρο συγχώνευσης και στη συνέχεια στην αντίστοιχη δεξαμενή αποθήκευσης. Τέλος, στον Πίνακα 5.2 συνοψίζονται οι φυσικές ιδιότητες των συστατικών του μείγματος.

Πίνακας 5.1 Προδιαγραφές και συνθήκες λειτουργίας της δοκιμαστικής διάταξης

Παράμετρος	Βρόχος αγωγού ανόδου 52 mm	
Διάμετρος βρόχου ροής & αγωγού ανόδου	2 inch (52 mm) NB Schedule 10	
Μήκος βρόχου ροής	10.5 m κατακόρυφος αγωγός/40 m γραμμή ροής	
Κλίση βρόχου ροής	0°	
Σχήμα αγωγού ανόδου	κατακόρυφο	
Πίεση βρόχου ροής	20 barg	
Θερμοκρασία πειραματικής διάταξης	0-80°	
Πίεση αντλίας νερού	100 m ³ /hr ή 10 barg	
Πίεση συμπιεστή αέρα	570 m ³ /hr FAD ή 7 barg	
Εύρος μετρητή ροής νερού στην είσοδο		
Μαγνητικός μετρητής ροής	0 - 7.36 kg/s	(Ακρίβεια ±0.20%)
Μετρητής ροής μάζας Coriolis	0 - 30 kg/s	(Ακρίβεια ±0.15%)
Εύρος μετρητή ροής αέρα στην είσοδο		
Μετρητής ροής μάζας (½” Rosemount)	0 - 150 Sm ³ /hr	(Ακρίβεια ± 0.90 %)
Μετρητής ροής μάζας (1” Rosemount)	100 - 4250 Sm ³ /hr	

Πίνακας 5.2 Οι φυσικές ιδιότητες του νερού και του αέρα

Ιδιότητα	Νερό	Αέρας
Πυκνότητα (kg/m ³)	998	1.225
Ιξώδες (mPa·s)	1	0.0185
Σημείο βρασμού (°C)	100	-
Σχετική διαπερατότητα	80	1
Αγωγιμότητα (μS/cm)	310	0
Επιφανειακή τάση (mN/m)	71	-

5.1.1.4 Καθορισμός παραμέτρων εισόδου

Ο ρυθμός ροής του αέρα μετρήθηκε σε κανονικές συνθήκες κοντά στο συμπιεστή και στη βάση του αγωγού ανόδου από δύο μετρητές ροής μάζας (τύπου Rosemount). Ο αέρας θεωρήθηκε ιδανικό αέριο, ενώ λήφθηκε υπόψη και η επίδραση της τοπικής πίεσης στο δοκιμαστικό τμήμα. Η φαινομενική ταχύτητα του αέρα στην κορυφή του κατακόρυφου αγωγού ανόδου συνέχεια υπολογίζεται από την Εξίσωση (5.1).

$$U_{sg} = \frac{Q_g}{A_p} = \frac{P_{std} T_t}{P_t T_{std}} \frac{Q_{std}}{A_p} \quad (5.1)$$

Όπου, Q_g και Q_{std} είναι οι ρυθμοί ροής του όγκου αέρα σε πειραματικές και κανονικές συνθήκες. Οι T_t , T_{std} είναι η δοκιμαστική και η κανονική θερμοκρασία. Με P_t , P_{std} συμβολίζονται αντίστοιχα η μέση πειραματική πίεση και η μέση κανονική πίεση. Τέλος, το A_p είναι το εμβαδόν του αγωγού ανόδου.

Το νερό παρέχεται χωριστά από τη δεξαμενή αποθήκευσής του μέσω αντλίας πολλαπλών βαθμίδων. Ο ρυθμός ροής του νερού (Q_w) μετρείται από ένα μαγνητικό μετρητή ροής (τύπου 1” Rosemount) πριν εισέλθει στο σύστημα του αγωγού ανόδου 52 mm. Έτσι, η φαινομενική ταχύτητα του νερού προσδιορίζεται από την Εξίσωση (5.2).

$$U_{sw} = \frac{Q_w}{1000 A_p} \quad (5.2)$$

Όπου, το Q_w είναι ο ρυθμός ροής νερού (l/s) και με U_{sw} συμβολίζεται η φαινομενική ταχύτητα του νερού (m/s).

5.1.2 Διφασική ροή αερίου-υγρού σε κατακόρυφο αγωγό ανόδου

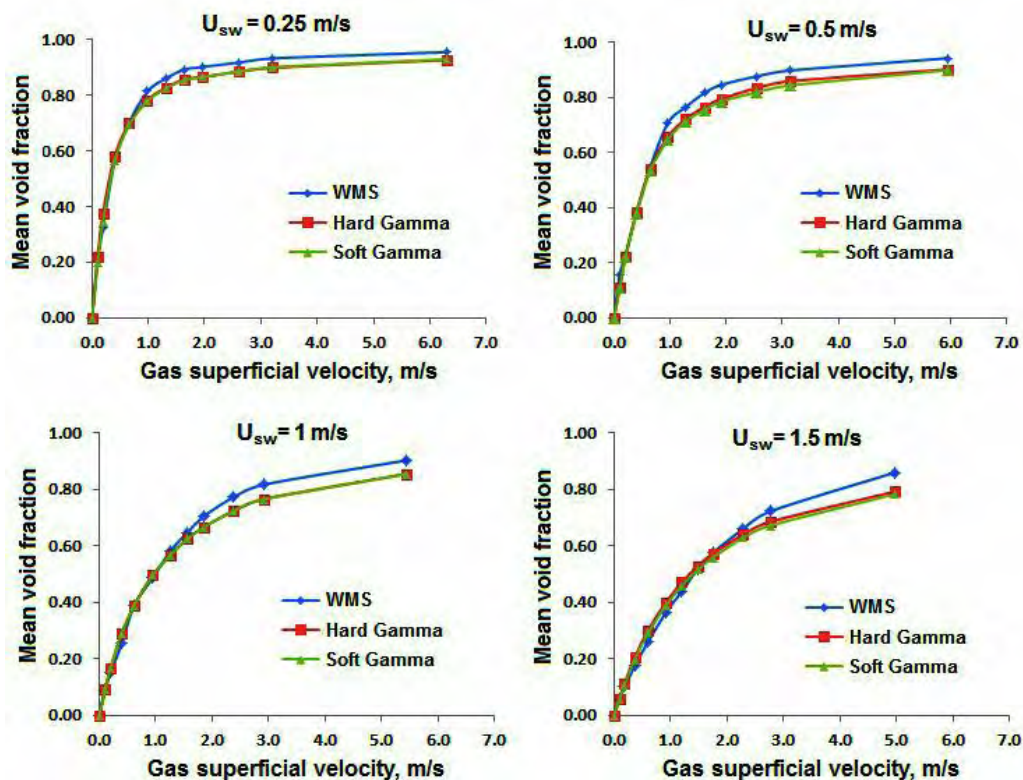
Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα μιας σειράς εργαστηριακών πειραμάτων για διφασική ροή αέρα-νερού σε αγωγό ανόδου. Το παράδειγμα βασίζεται σε διδακτορική διατριβή που διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο του Cranfield και τα πειράματα αφορούν ένα σύστημα κατακόρυφου αγωγού ανόδου, εσωτερικής διαμέτρου 52 mm [60].

5.1.2.1 Χαρακτηριστικά ροής αερίου-υγρού

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά της ροής αερίου-υγρού (αέρα-νερού) με έγχυση αερίου σε κατακόρυφο αγωγό ανόδου. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν με τις διάφορες τεχνικές μεθόδους που αναλύθηκαν νωρίτερα για τον προσδιορισμό των προτύπων ροής.

5.1.2.1.1 Κλάσμα κενού

Τα πειράματα διεξήχθησαν για διάφορες τιμές της φαινομενικής ταχύτητας του αέρα. Ειδικότερα, το φάσμα τιμών του κυμαινόταν από 0.1 έως 6.25 m/s, ενώ η φαινομενική ταχύτητα του νερού διατηρούνταν σταθερή, λαμβάνοντας τις τιμές των 0.25, 0.5, 1, 1.5 και 2 m/s. Οι τιμές του κλάσματος κενού στη ροή αέρα-νερού υπολογίστηκαν στην κορυφή του αγωγού ανόδου, με βάση τα δεδομένα από τον αισθητήρα συρμάτινου πλέγματος (WMS) και από τον μετρητή ακτινοβολίας γ . Η μέση διατομής του κλάσματος κενού υπολογίστηκε κατευθείαν από τον αισθητήρα WMS, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονολογική σειρά του μέσου κλάσματος κενού της διατομής. Στην περίπτωση του μετρητή ακτινοβολίας γ , το κλάσμα κενού υπολογίστηκε από το μέσο όρο των μετρήσεων κάθε σημείου δοκιμής με τη χρήση της «σκληρής» και «μαλακής» ακτινοβολίας γ . Το Σχήμα 5.2 δείχνει ότι το μέσο κλάσμα κενού που υπολογίζεται με τις δύο τεχνικές μέτρησης, αυξάνεται συστηματικά με την αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας του αέρα σε κάθε σταθερή φαινομενική ταχύτητα υγρού. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αύξηση του ρυθμού ροής του αερίου προκαλεί την αύξηση της παραγωγής φυσαλίδων, η οποία καταλήγει στην αύξηση του κλάσματος κενού. Αντιθέτως, το κλάσμα κενού της μέτρησης μειώνεται με την αύξηση της παροχής του νερού. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της ποσότητας υγρού στο σωλήνα, η οποία προκαλεί μείωση στο κλάσμα κενού του αερίου, εξαιτίας της αύξησης της συγκράτησης του υγρού (liquid holdup).



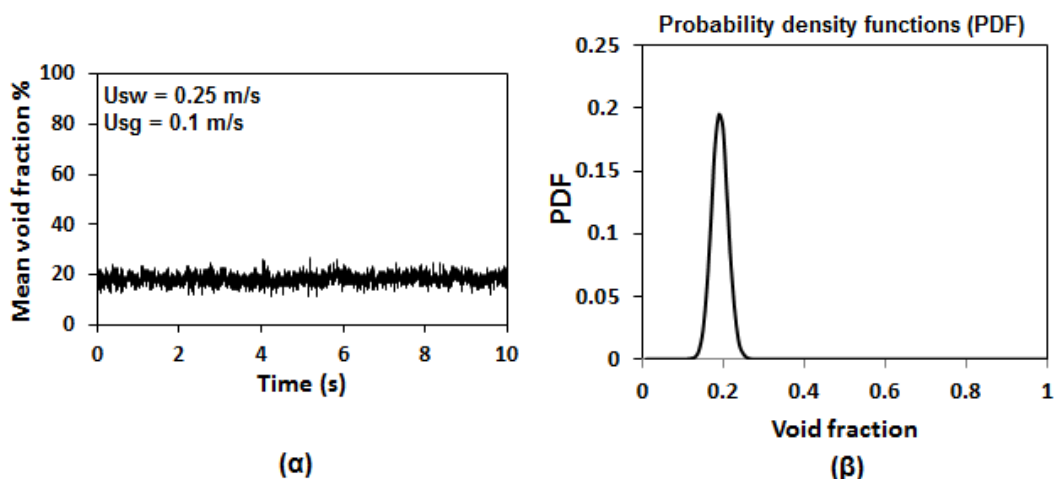
Σχήμα 5.2 Μεταβολή του κλάσματος κενού για διάφορες τιμές της φαινομενικής ταχύτητας του υγρού

5.1.2.1.2 Πρότυπα ροών

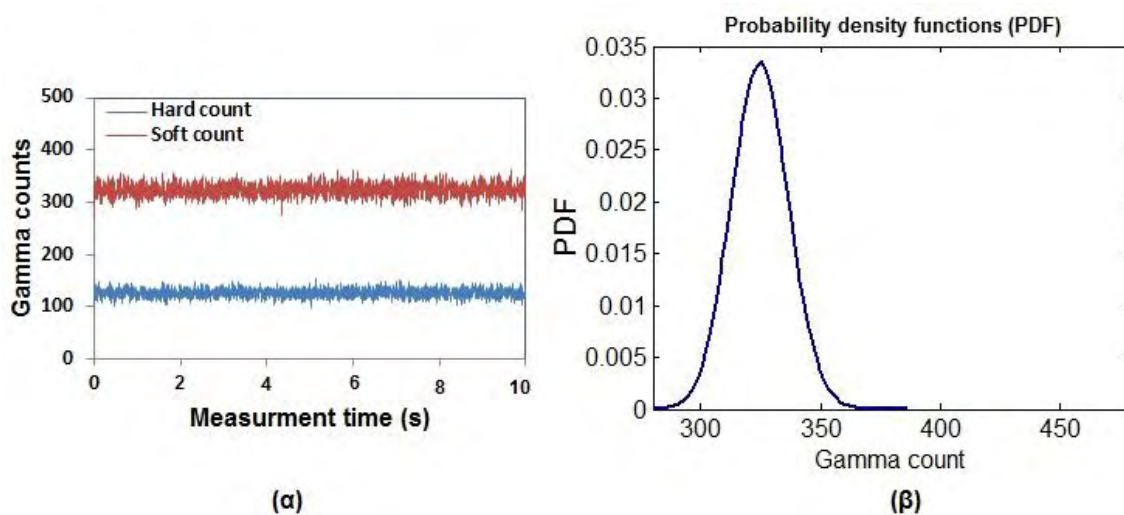
Διεξήχθησαν διάφορα πειράματα για ροές αέρα-νερού σε κάθετο αγωγό ανόδου 52 mm. Τα πρότυπα ροής στον αγωγό ανόδου ταυτοποιήθηκαν για κάθε κατάσταση ροής που μελετήθηκε στα πειράματα αυτά. Η ταυτοποίηση των προτύπων πραγματοποιήθηκε στην κορυφή του αγωγού ανόδου χρησιμοποιώντας τον εξής συνδυασμό μεθόδων: (1) την οπτική παρατήρηση (2) τα χρονικά κλάσματα κενού και την αντίστοιχη συνάρτηση πιθανότητας πυκνότητας (Probability Density Function, PDF) που λήφθηκαν από τα δεδομένα του αισθητήρα WMS και του πυκνόμετρου ακτινοβολίας γ και (3) την οπτικοποίηση των δεδομένων που προέρχονται από τον αισθητήρα WMS. Η χρήση της οπτικής παρατήρησης για τον προσδιορισμό των προτύπων ροής έχει το μειονέκτημα ότι είναι υποκειμενική και υπάρχει απόκλιση στην ερμηνεία των προτύπων ροής. Επιπλέον, στην περίπτωση των πραγματικών βιομηχανικών αγωγών, οι οποίοι συνήθως δεν είναι διαφανείς, η οπτική μέθοδος παρατήρησης δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Ωστόσο, δεδομένου ότι κάθε πρότυπο ροής έχει ένα χαρακτηριστικό ίχνος σήματος, τα χρονικά ίχνη και οι αντίστοιχες συναρτήσεις PDF για την ανάλυση των ληφθέντων σημάτων, αποτελούν ένα απλό ποσοτικό μέσο για τον καθορισμό των προτύπων ροής στο εσωτερικό του αγωγού. Ως αποτέλεσμα αυτού, οι χρονολογικές σειρές και οι

αντίστοιχες συναρτήσεις PDF των ληφθέντων διακυμάνσεων των σημάτων για ροές αέρα-νερού υιοθετούνται για την αντικειμενική και ποσοτική αναγνώριση προτύπου ροής.

Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης ροής αέρα-νερού τα δεδομένα που λήφθηκαν από τον αισθητήρα WMS και το πυκνόμετρο ακτινοβολίας γ σε κάθε κατάσταση ροής (στην κορυφή του κατακόρυφου αγωγού ανόδου), χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των αντίστοιχων συναρτήσεων PDF των καταγεγραμμένων σημάτων. Ουσιαστικά οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων PDF χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση των προτύπων ροής στον αγωγό. Για παράδειγμα, το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει τη χρονολογική σειρά του κλάσματος κενού και της αντίστοιχης συνάρτησης PDF που είναι αποτέλεσμα των δεδομένων του αισθητήρα WMS για ροή αέρα-νερού σε σταθερή φαινομενική ταχύτητα υγρού 0.25 m/s και χαμηλότερη φαινομενική ταχύτητα αερίου που εγγέεται στη βάση του αγωγού ανόδου που ισούται περίπου με 0.1 m/s (αντιστοιχεί σε παροχή αέρα 1.5 Sm³/h). Παρατηρείται ότι το ίχνος χρόνου του κλάσματος κενού (Σχήμα 5.3 (α)) σε αυτή την κατάσταση ροής βρίσκεται σε ένα χαμηλό μέσο κλάσματος κενού διατομής και ισούται περίπου με 18.5%, με πολύ μικρές διακυμάνσεις (τυπική απόκλιση $\pm 2\%$), που αντιστοιχούν στο πέρασμα μικρών φυσαλίδων στη δομή του υγρού υποδεικνύοντας ένα καθεστώς τυπικής ροής με φυσαλίδες. Στην αντίστοιχη συνάρτηση PDF (Σχήμα 5.3 (β)) παρουσιάζεται μια ενιαία, στενή, ψηλή κορυφή για το σχετικά χαμηλό κύριο κλάσμα κενού. Η κορυφή της συνάρτησης αντιστοιχεί σε κλάσματα κενού εύρους 0.14 – 0.25, το οποίο αποτελεί ένδειξη χαμηλών διακυμάνσεων γύρω από την μέση τιμή. Η μοναδική, στενή κορυφή της συγκεκριμένης γραφικής παράστασης της συνάρτησης PDF, αποτελεί επίσης χαρακτηριστικό της ροής με φυσαλίδες. Αυτά τα ίχνη χρόνου και η συνάρτηση PDF που λαμβάνεται από τα δεδομένα του αισθητήρα WMS για την κατάσταση ροής αέρα-νερού συγκλίνουν με εκείνα που εξάγονται από το πυκνόμετρο ακτινοβολίας γ (μετρήσεις «μαλακής» και «σκληρής» ακτινοβολίας γ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4 (α) και (β). Επίσης, το πρωτογενές σήμα για τις δύο μετρήσεις τις ακτινοβολίας γ δείχνει μικρές διακυμάνσεις (τυπική απόκλιση $\pm 8\%$ και $\pm 10\%$, για τις αντίστοιχες μετρήσεις «σκληρής» και «μαλακής» ακτινοβολίας) και είναι ενδεικτικό του προτύπου ροής με φυσαλίδες.



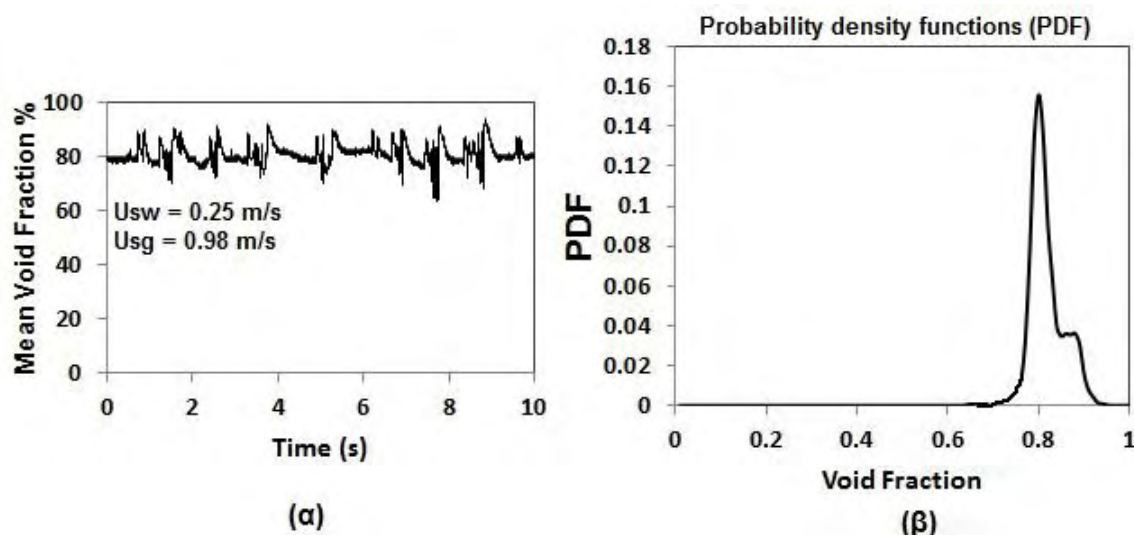
Σχήμα 5.3 Δεδομένα εξόδου αισθητήρα WMS για φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 0.1 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά κλάσματος κενού, (β) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)



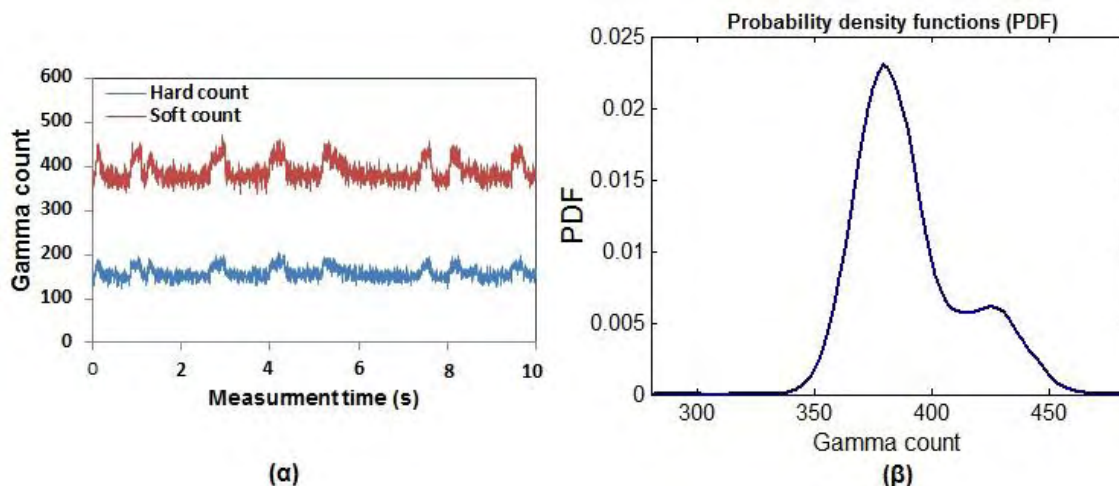
Σχήμα 5.4 Σήματα πυκνόμετρου ακτινοβολίας γ για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 0.1 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά μέτρησης ακτινοβολίας γ , (β) Η συνάρτηση PDF της μέτρησης ακτινοβολίας γ

Αυξάνοντας τη φαινομενική ταχύτητα του αερίου σε 0.98 m/s (αντιστοιχεί σε παροχή αέρα $15 \text{ Sm}^3/\text{h}$) στην ίδια ροή νερού των 0.25 m/s , το πρότυπο ροής στον αγωγό ανόδου μετατρέπεται σε καθεστώς διαλείπουσας ροής. Αυτό φαίνεται από τις χρονολογικές σειρές και τις συναρτήσεις PDF που λαμβάνονται από τον αισθητήρα WMS και το πυκνόμετρο ακτινοβολίας γ (Gamma Densitometer, GD), όπως παρουσιάζεται αντίστοιχα στα Σχήματα 5.5 και 5.6. Από αυτά τα σχήματα, παρατηρείται ότι η χρονολογική σειρά και οι συναρτήσεις PDF δείχνουν παρόμοιες τάσεις για αυτή την

κατάσταση ροής. Οι χρονολογικές σειρές του κλάσματος κενού σύμφωνα με τη μέτρηση του αισθητήρα WMS στο Σχήμα 5.5 (α) και τις μετρήσεις της ακτινοβολίας γ στο Σχήμα 5.6, παρουσιάζουν διακυμάνσεις με διακριτές κορυφές και κοιλάτες, οι οποίες δημιουργούνται από το πέρασμα σχετικά μεγαλύτερων φυσαλίδων αέρα στην περιοχή μέτρησης του αγωγού ανόδου. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ύπαρξης διαλείπουσας ροής. Παρατηρώντας τα Σχήματα 5.5 (β) και 5.6 (β), διαπιστώνεται ότι οι γραφικές παραστάσεις των PDF εμφανίζουν μικρότερες κορυφές από τις συναρτήσεις PDF της προηγούμενης κατάστασης και αναπτύσσουν σταδιακά μια δεύτερη κορυφή. Επίσης, οι συναρτήσεις PDF παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος για τα κλάσματα κενού και τη μέτρηση της «μαλακής» ακτινοβολίας γ , σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η φαινομενική ταχύτητα αερίου ήταν 0.1 m/s. Η μορφή των συναρτήσεων PDF σε αυτή την κατάσταση ροής υποδηλώνει την ύπαρξη διαλείπουσας ροής στον αγωγό ανόδου.

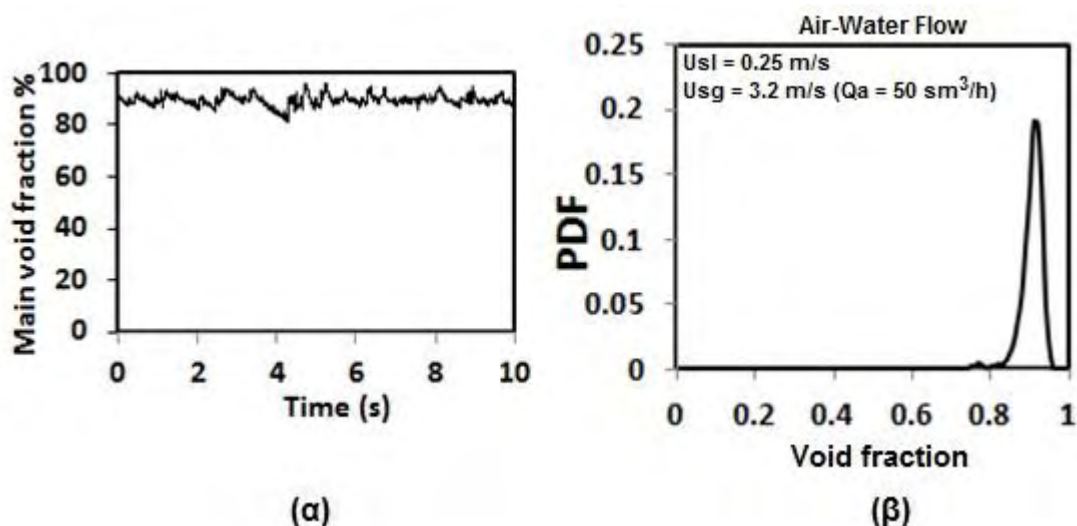


Σχήμα 5.5 Δεδομένα εξόδου αισθητήρα WMS για φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 0.1 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά κλάσματος κενού, (β) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)

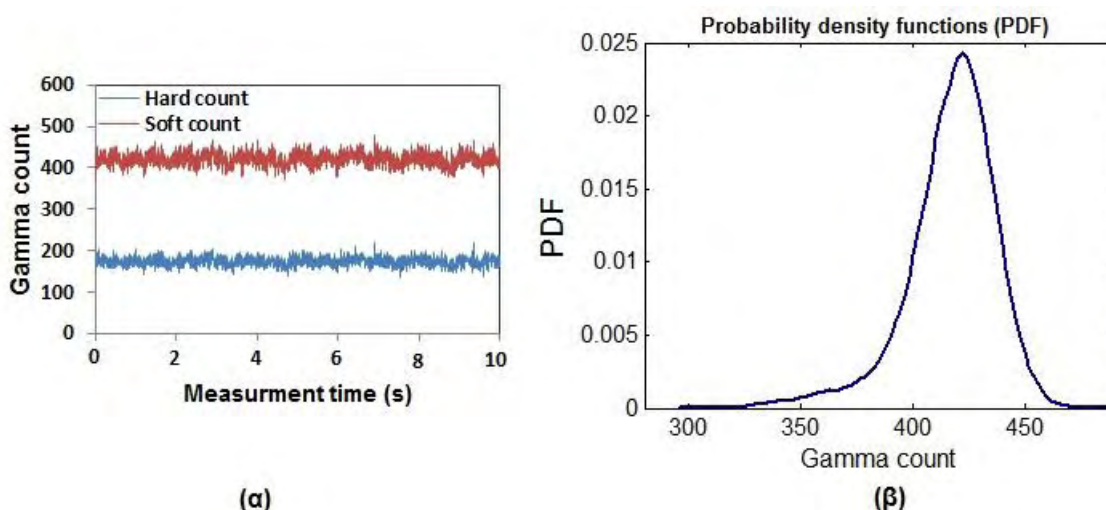


Σχήμα 5.6 Σήματα πυκνόμετρου ακτινοβολίας γ για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25$ m/s και $U_{sg} = 0.98$ m/s, (α) Χρονολογική σειρά μέτρησης ακτινοβολίας γ , (β) Η συνάρτηση PDF της "μαλακής" ακτινοβολίας γ

Όταν η φαινομενική ταχύτητα αερίου αυξάνεται σε 3.22 m/s, η οποία αντιστοιχεί σε παροχή αέρα που εγχέεται στη βάση του αγωγού ανόδου ίση με $50 \text{ Sm}^3/\text{h}$, με την ίδια ροή νερού 0.25 m/s στο σύστημα του αγωγού ανόδου, οι συναρτήσεις PDF από τον αισθητήρα WMS και το πυκνόμετρο ακτινοβολίας γ , καταλήγουν σε ελαφρώς παρόμοιες γραφικές παραστάσεις για αυτή την κατάσταση ροής. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.7 (β) η συνάρτηση PDF από τον αισθητήρα WMS εμφανίζει μια κύρια κορυφή σε μια περιοχή υψηλότερου κλάσματος κενού (κλάσμα κενού 89%) με μια μικρή ουρά που εκτείνεται προς το χαμηλότερο κλάσμα κενού, σηματοδοτώντας το καθεστώς της ακανόνιστης ροής. Στο Σχήμα 5.8 (β) παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της συνάρτησης PDF για τη μέτρηση της «μαλακής» ακτινοβολίας γ , που λαμβάνεται από το πυκνόμετρο ακτινοβολίας γ για τη συγκεκριμένη κατάσταση ροής. Όπως παρατηρείται, υπάρχει μια ευρεία μονή κορυφή, η οποία κλείνει σε υψηλό εύρος μέτρησης ακτινοβολίας γ , με αντίστοιχη ουρά προς τις χαμηλότερες μετρήσεις που δείχνει τη ύπαρξη προτύπου ακανόνιστης ροής στον αγωγό ανόδου.



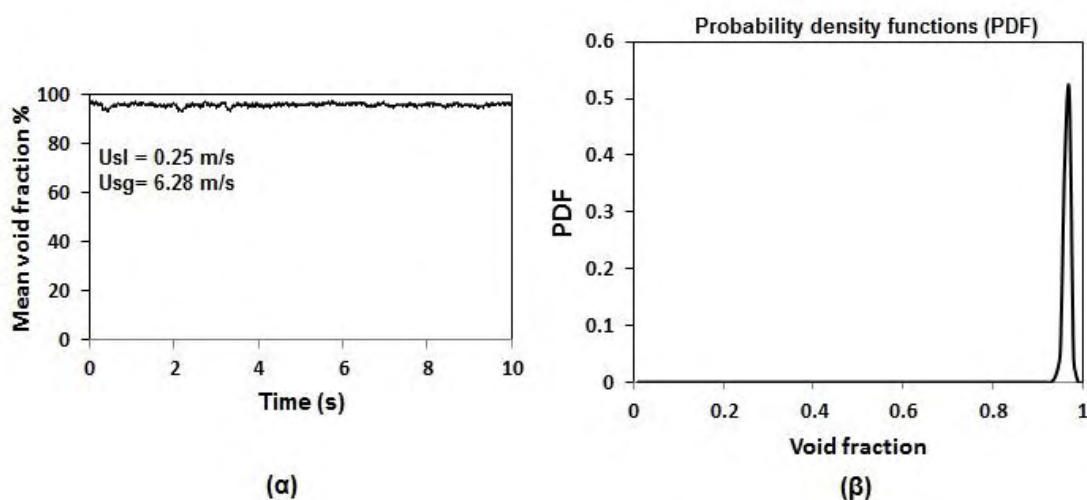
Σχήμα 5.7 Δεδομένα αισθητήρα WMS για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25$ m/s και $U_{sg} = 3.22$ m/s, (α) Χρονολογική σειρά κλάσματος κενού, (β) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)



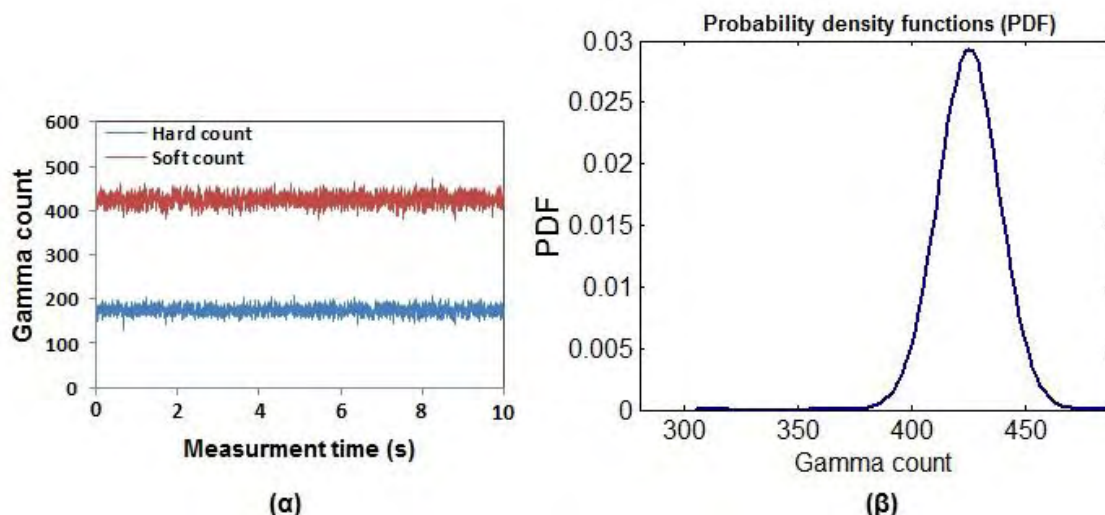
Σχήμα 5.8 Σήματα πυκνόμετρου ακτινοβολίας για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25$ m/s και $U_{sg} = 3.22$ m/s, (α) Χρονολογική σειρά μετρήσεων ακτινοβολίας γ , (β) Συνάρτηση PDF για τη μέτρηση της "μαλακής" ακτινοβολίας γ

Για υψηλότερη φαινομενική ταχύτητα αερίου περίπου 6.28 m/s (που αντιστοιχεί σε παροχή αερίου 100 Sm³/h στη βάση του αγωγού ανόδου), η χρονολογική σειρά του κλάσματος κενού που λαμβάνεται από τον αισθητήρα WMS δείχνει ένα σχεδόν σταθερό κλάσμα κενού (τυπική απόκλιση $\pm 0,65\%$) με μια υψηλή μέση τιμή κλάσματος κενού 0.96%, που αντικατοπτρίζει το πρότυπο δακτυλιοειδής ροής στον αγωγό ανόδου (Σχήμα 5.9 (α)). Η αντίστοιχη γραφική παράσταση της συνάρτησης PDF στο Σχήμα 5.9 (β)

δείχνει μια ψηλή, πολύ στενή, μοναδική κορυφή που βρίσκεται στην υψηλότερη περιοχή κλάσματος κενού αντιστοιχώντας στο εύρος τιμών 0.93-1, υποδεικνύοντας έτσι το πρότυπο δακτυλιοειδής ροής. Οι μετρήσεις της ακτινοβολίας γ , που παριστάνονται γραφικά ως συνάρτηση του χρόνου, παρουσιάζουν πολύ χαμηλές διακυμάνσεις σημάτων για τη μέτρηση της «σκληρής» και «μαλακής» ακτινοβολίας γ (αντίστοιχη τυπική απόκλιση 9% και 11%), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10 (α). Οι τιμές του κλάσματος κενού που μετρήθηκαν ισούνται περίπου με 93% τόσο για τη «σκληρή» όσο και για τη «μαλακή» ακτινοβολία. Στο Σχήμα 5.10 (β) η γραφική παράσταση της συνάρτησης PDF για τη μέτρηση της «μαλακής» ακτινοβολίας γ δείχνει μια μοναδική κυρίαρχη κορυφή για υψηλό εύρος μέτρησης, της τάξης των 380-480. Η κατανομή της συνάρτησης PDF δείχνει επίσης την ύπαρξη δακτυλιοειδής ροής σε αυτή την κατάσταση ροής.



Σχήμα 5.9 Δεδομένα αισθητήρα WMS για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και $U_{sg} = 6.28 \text{ m/s}$, (α) Χρονολογική σειρά κλάσματος κενού, (β) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)



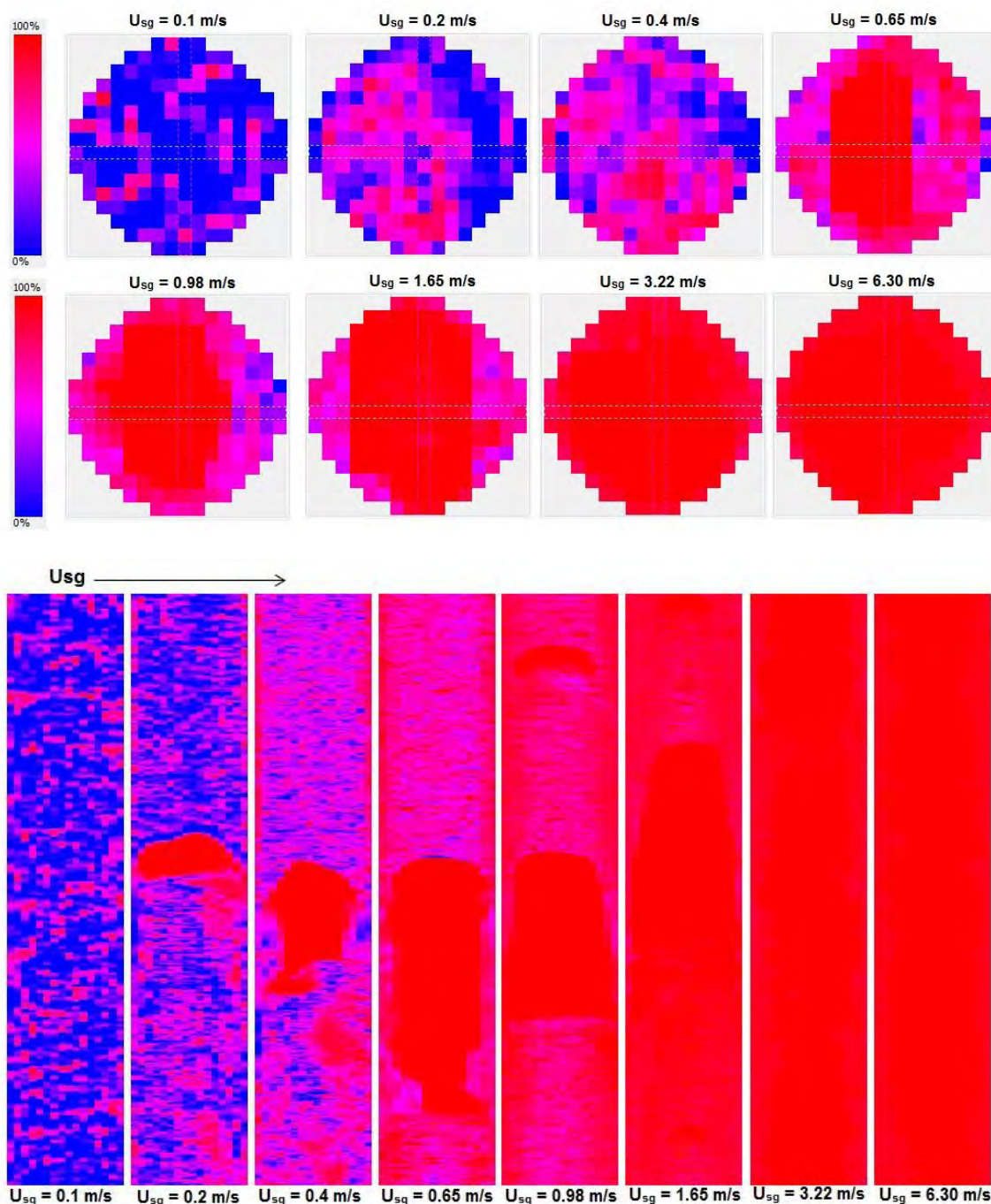
Σχήμα 5.10 Σήματα πυκνόμετρου ακτινοβολίας γ για ροή αέρα-νερού σε φαινομενικές ταχύτητες $U_{sl} = 0.25$ m/s και $U_{sg} = 6.28$ m/s, (α) Χρονολογική σειρά μετρήσεων ακτινοβολίας γ , (β) Συνάρτηση PDF για τη μέτρηση της "μαλακής" ακτινοβολίας γ

5.1.2.1.3 Οπτικοποιημένες εικόνες διφασικής ροής με δεδομένα του WMS

Εκτός από τις προαναφερθέντες μεθόδους που χρησιμοποιούν τη χρονολογική σειρά κλάσματος κενού και τις αντίστοιχες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (PDFs) για την αναγνώριση των ροϊκών καθεστώτων, χρησιμοποιήθηκαν οι απεικονίσεις που παρέχονται από τον αισθητήρα WMS για την επιβεβαίωση των προτύπων ροής που δημιουργούνται μέσα στον αγωγό ανόδου.

Το Σχήμα 5.11 δείχνει τις εικόνες κάθετης τομής και κατακόρυφου τεμαχισμού των δεδομένων κλάσματος κενού που ελήφθησαν από τον αισθητήρα WMS για σταθερή ταχύτητα υγρού 0.25 m/s και διάφορες φαινομενικές ταχύτητες αερίου. Το κόκκινο χρώμα των εικόνων συμβολίζει την αέρια φάση και το μπλε χρώμα την υγρή φάση, ενώ η κλίμακα χρώματος επιδεικνύει τις τιμές διαπερατότητας. Στις εικόνες του Σχήματος 5.11 παρουσιάζονται τα διάφορα καθεστάτα ροής που συναντήθηκαν με την αύξηση των φαινομενικών ταχυτήτων αερίου για σταθερή φαινομενική ταχύτητα νερού. Συμπεραίνεται ότι αυτά τα αποτελέσματα υποστηρίζουν τα αποτελέσματα του αέρα-νερού που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Σε επιφανειακή ταχύτητα αερίου περίπου ίση με 0.1 m/s είναι σαφές ότι το πρότυπο ροής στον αγωγό ανόδου είναι η ροή με φυσαλίδες. Όταν η ταχύτητα αερίου αυξάνεται σε $U_{sg} = 0.98$ m/s, απεικονίζονται πρότυπα διαλείπουσας ροής για τη ροή αέρα-νερού στην κορυφή του αγωγού ανόδου. Ειδικότερα, σχηματίζονται σχετικά μεγάλοι θύλακες αερίου, ενώ

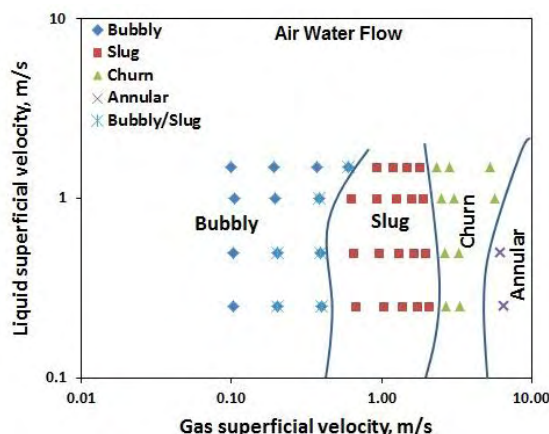
υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης μικρών φυσαλίδων αερίου στη δομή του υγρού. Στην υψηλότερη φαινομενική ταχύτητα αερίου $U_{sg} = 6.28 \text{ m/s}$, η οποία αντιστοιχεί σε παροχή αερίου $100 \text{ Sm}^3/\text{h}$, παρατηρείται ότι η ροή αέρα-νερού αλλάζει σε δακτυλιοειδή ροή. Αυτά τα αποτελέσματα ταυτίζονται σχεδόν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των χρονολογικών σειρών και των συναρτήσεων PDF για τις ίδιες συνθήκες ροής που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 5.1.2.1.1).



Σχήμα 5.11 Εικόνες μέσω του αισθητήρα WMS σε σταθερή φαινομενική ταχύτητα υγρού 0.25 m/s και μεταβαλλόμενη ταχύτητα αερίου

5.1.2.1.4 Ροϊκός χάρτης

Σύμφωνα με τα πειράματα που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες εντοπίστηκαν τα πρότυπα ροής για κάθε συνθήκη ροής. Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκε ένας χάρτης καθεστώτων ροής για τη ροή αέρα-νερού με έγχυση αερίου στη βάση του αγωγού ανόδου. Αυτός ο χάρτης καθεστώτων ροής σχεδιάστηκε με τις τιμές των τοπικών φαινομενικών ταχυτήτων αερίου και υγρού στους άξονες. Τα χαρακτηριστικά ροής που προσδιορίστηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης αφορούν τη ροή με φυσαλίδες, τη μετάβαση από τη ροή με φυσαλίδες στη διαλείπουσα ροή (δημιουργία φυσαλίδων Taylor), τη διαλείπουσα, την ακανόνιστη και τη δακτυλιοειδή ροή. Το Σχήμα 5.12 απεικονίζει τον χάρτη καθεστώτων ροής για τις εξεταζόμενες ροές αέρα-νερού. Οι συμπαγείς γραμμές δείχνουν τα όρια μεταξύ των περιοχών καθεστώτων ροής. Για τη ροή αέρα-νερού, αναγνωρίστηκε η ροή με φυσαλίδες για φαινομενική ταχύτητα υγρού $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$ και φαινομενική ταχύτητα αερίου περίπου $U_{sg} = 0.1 \text{ m/s}$ (παροχή ταχύτητα αέρα $1.5 \text{ Sm}^3/\text{h}$). Στην επόμενη υψηλότερη ταχύτητα αερίου $U_{sg} = 0.2 \text{ m/s}$, για την ίδια ταχύτητα υγρού $U_{sl} = 0.25 \text{ m/s}$, πραγματοποιείται η μετάβαση από την ροή με φυσαλίδες στη διαλείπουσα ροή. Με την αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας αερίου σε $U_{sg} = 0.98 \text{ m/s}$ (παροχή αέρα $15 \text{ Sm}^3/\text{h}$) η ροή τείνει να σχηματίζει διαλείπουσα ροή. Στην υψηλότερη ταχύτητα αερίου του πειράματος, $U_{sg} = 6.28 \text{ m/s}$, οι ροές αέρα-νερού παρουσιάζουν χαρακτηριστικά δακτυλιοειδής ροής. Ο χάρτης καθεστώτων ροής του πειράματος ταυτίζεται αρκετά με τον ροϊκό χάρτη των Hewitt & Roberts [10], ο οποίος αφορούσε ανοδική ροή αερίου-υγρού σε κατακόρυφο αγωγό υπό υψηλή πίεση. Ωστόσο, μερικά καθεστώτα ροής που παρατηρήθηκαν στον χάρτη των Hewitt & Roberts δεν εμφανίστηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης.



Σχήμα 5.12 Χάρτης καθεστώτων ροής για ροές αέρα-νερού κατακόρυφο αγωγό ανόδου 52 mm

5.2 Παράδειγμα μοντέλου “multi-fluid” για διφασική ροή αερίου-υγρού σε κατακόρυφο αγωγό

Για την πρόβλεψη διφασικών ροών σε κατακόρυφους αγωγούς αναπτύσσεται ένα σταθερό μονοδιάστατο μοντέλο “multi-fluid”. Το μοντέλο βασίζεται στις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας για κάθε ροή ρευστού που εμπλέκεται στο διφασικό πρότυπο ροής που βρίσκεται υπό παρατήρηση και στους αντίστοιχους νόμους «κλεισίματος» των διαδικασιών μεταφοράς στις διεπιφάνειες. Οι εξισώσεις στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας μετασχηματίζονται στην κατάλληλη μορφή για την άμεση εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου ολοκλήρωσης των συνήθων διαφορικών εξισώσεων του συστήματος. Κατά μήκος ολόκληρου του καναλιού ροής σε βρασμό προσομοιώνονται θερμοϋδραυλικές διεργασίες, από την ροή και τη θέρμανση του υπόψυκτου ρευστού στην είσοδο του καναλιού ροής μέχρι την ξήρανση του υγρού φιλμ και την ομιχλώδη ροή των εισερχόμενων σταγονιδίων αερίου στην έξοδο. Επίσης, το μοντέλο εξετάζεται σε αρκετές επιμέρους επιδράσεις την διφασικής ροής.

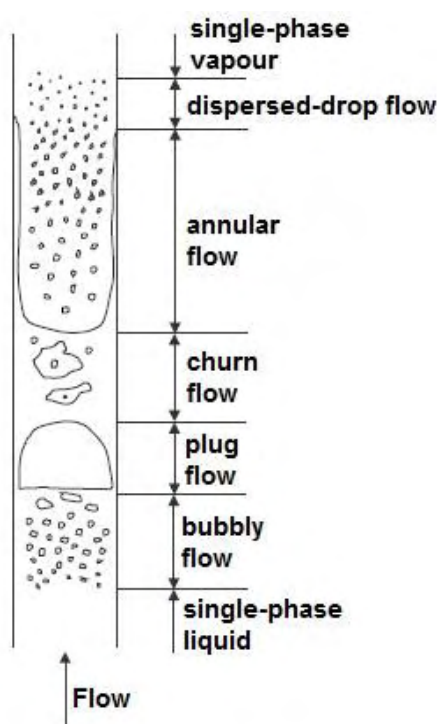
5.2.1 Εισαγωγή

Οι διφασικές ροές αερίου-υγρού σε κατακόρυφους αγωγούς συναντώνται σε διάφορους τύπους ατμογεννητριών, εναλλακτών θερμότητας και συμπυκνωτών [26]. Η πρόβλεψη των διφασικών παραμέτρων ροής παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στην ανάλυση λειτουργίας και ασφάλειας του εξοπλισμού.

Τα τυπικά πρότυπα διφασικών ροών σε ένα κατακόρυφο κανάλι εξάτμισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.13. Στην είσοδο του αγωγού υπάρχει ροή μιας φάσης. Ο σχηματισμός φυσαλίδων στο θερμαινόμενο τοίχωμα, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του υγρού εξακολουθεί να είναι υπόψυκτο, είναι γνωστός ως υπόψυκτος βρασμός. Στον κορεσμένο βρασμό οι φυσαλίδες που δημιουργούνται πάνω στην επιφάνεια, ανεβαίνουν λόγω άνωσης στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, ενώ φρέσκο υγρό αναπληρώνει τον όγκο προς φυσαλίδα και μία καινούρια φυσαλίδα αρχίζει να αναπτύσσεται στη θέση της παλιάς. Η διαλείπουσα και η ακανόνιστη ροή εμφανίζονται με την αύξηση των κλασμάτων κενού. Σε υψηλά κλάσματα κενού η δακτυλιοειδής ροή μετατρέπεται σε

ομιχλώδη ροή μέχρι την πλήρη εξάτμιση του υγρού φιλμ στο θερμαινόμενο τοίχωμα. Σε ένα συγκεκριμένο μήκος καναλιού υπάρχει κάποιο πρότυπο ροής, το οποίο μετατρέπεται στη συνέχεια σε άλλο πρότυπο ροής. Η μετατροπή από το ένα πρότυπο στο άλλο μπορεί να συνοδεύεται από την αλλαγή του αριθμού των ρευμάτων του ρευστού. Τα πρότυπα της ακανόνιστης ροής και της ροής με φυσαλίδες που χαρακτηρίζονται από δύο ρεύματα ρευστών (υγρό και ατμός), μετατρέπονται σε πρότυπο δακτυλιοειδής ροής με τρία ρεύματα ρευστού, τα οποία είναι το υγρό φιλμ στο τοίχωμα, ο πυρήνας ατμού και τα συμπαρασυρόμενα σταγονίδια στο ρεύμα ατμού. Ως εκ τούτου, μια διφασική ροή σε ένα κανάλι ροής χαρακτηρίζεται συνήθως από περιοχές που περιλαμβάνουν διάφορα ρεύματα ρευστών και κάθε περιοχή επικρατεί σε ένα συγκεκριμένο μήκος του καναλιού. Η εφαρμογή του μοντέλου “multi-fluid” σε τέτοιες συνθήκες ροής σημαίνει ότι ένα κανάλι διφασικής ροής θα πρέπει να περιγράφεται με πολλά μοντέλα “multi-fluid”. Κάθε επιμέρους μοντέλο “multi-fluid” θα πρέπει να βασίζεται στις εξισώσεις του ισοζυγίου μάζας, ορμής και ενέργειας για κάθε ρεύμα ρευστού που σχετίζεται με τη διφασική ροή, καθώς και στους αντίστοιχους νόμους «κλεισίματος» πρόβλεψης των διαδικασιών μεταφοράς στη διεπιφάνεια του αερίου-υγρού και του υγρού-τοιχώματος. Για την πρόβλεψη των μεταβάσεων στα καθεστάτα ροής εφαρμόζονται μηχανιστικά μοντέλα, με διάφορους τρόπους μεταφοράς της μάζας, ορμής και ενέργειας στη διεπιφάνεια, όπως είναι ο συμπαρασυρμός και η εναπόθεση σταγονιδίων και ο βρασμός σε διαβατικές και αδιαβατικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να εφαρμοστεί καλύτερος φυσικός ορθολογισμός στη μοντελοποίηση αυτών των συγκεκριμένων διαδικασιών, οι οποίοι είναι πολύ σημαντικοί για τη σωστή κατανόηση των φαινομένων και την ακριβή πρόβλεψη των διαδικασιών μεταφοράς της διφασικής ροής. Η προσέγγιση του μοντέλου “multi-fluid” υπερτερεί σε σύγκριση με την επικρατούσα εφαρμογή των καθαρά εμπειρικών συσχετισμών για τα φαινόμενα διφασικής ροής. Επομένως, επιτρέπει τη φυσική διερεύνηση διάφορων φαινομένων διφασικής ροής, όπως είναι η κρίση βρασμού, το κλάσμα ατμού, η μεταβολή πίεσης και η πτώση πίεσης λόγω τριβών, οι κρίσιμες συνθήκες ροής, η πλυμμύριση κ.α. Στο παρελθόν, οι προσεγγίσεις του μοντέλου “multi-fluid” εφαρμόστηκαν για την πρόβλεψη διάφορων φαινομένων διφασικής ροής, όπως ο συμπαρασυρμός των σταγονιδίων στη δακτυλιοειδή ροή, η πρόβλεψη της κρίσιμης θερμορροής και οι μεταβολές πίεσης στη διφασική ροή [61] [62].

Αυτή η μελέτη περίπτωσης παρουσιάζει τις θεμελιώδεις εξισώσεις του μοντέλου “multi-fluid” για τη ροή το πολύ τεσσάρων ρευμάτων ρευστού, μαζί με τους αντίστοιχους νόμους «κλεισίματος». Κάθε ρεύμα ρευστού περιγράφεται από τις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας. Αυτές οι θεμελιώδεις εξισώσεις συνδέονται με τους νόμους «κλεισίματος» των διαδικασιών μεταφοράς στις διεπιφάνειες των υγρών. Το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά τα φαινόμενα διφασικής ροής και μπορεί να εφαρμοστεί σε παραδείγματα αριθμητικών προβλέψεων των κλασμάτων όγκου της αέριας φάσης στη ροή με φυσαλίδες και στη μεταβατική ακανόνιστη ροή, στην κρίση βρασμού σε κατακόρυφη ανοδική διφασική ροή και σε κρίσιμες διφασικές ροές.



Σχήμα 5.13 Πρότυπα διφασικής ροής σε κανάλι εξάτμισης

5.2.2 Ανάπτυξη μοντέλου “multi-fluid”

Το ανεπτυγμένο μοντέλο “multi-fluid” αποτελείται από μέχρι και τέσσερα ρεύματα ρευστού, όπου ο αριθμός των ρευμάτων ρευστού (n) εξαρτάται από το προσομοιωμένο πρότυπο διφασικής ροής. Ένα ρεύμα ρευστού ($n = 1$) εφαρμόζεται στην απλούστερη κατάσταση ροής μιας φάσης. Δυο ρεύματα ρευστού ($n = 2$) εφαρμόζονται σε πρότυπα μεταβατικής ροής (ακανόνιστη ή διαλείπουσα) και ροής με φυσαλίδες, σε συμπαρασυρόμενα σωματίδια αερίου στην ομιχλώδη ροή σε περίπτωση εξάντλησης του

υγρού φιλμ και στη ξήρανση του τοιχώματος σε δακτυλιοειδή ροή. Η ροή του υγρού φιλμ στο τοίχωμα, η ροή του ατμού και των συμπαρασυρόμενων σταγονιδίων στον πυρήνα ατμού αντιπροσωπεύονται από τρία ρεύματα ρευστού ($n = 3$) για πρότυπα δακτυλιοειδούς ροής σε έναν αγωγό. Τα τέσσερα ρεύματα ρευστού ($n = 4$) αντιστοιχούν σε δακτυλιοειδή ροή, όπου τα ρεύματα αυτά αντιπροσωπεύουν το υγρό φιλμ στο εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα, τον πυρήνα ατμού και τα συμπαρασυρόμενα σταγονίδια στο ρεύμα ατμού. Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας γράφονται για κάθε ρεύμα ρευστού. Οι διαδικασίες μεταφοράς στις διεπιφάνειες των ζευγών των ρευστών που βρίσκονται σε επαφή και μεταξύ των ρευμάτων ρευστού και των τοιχωμάτων υπολογίζονται από τους νόμους «κλεισίματος». Στη συνέχεια, αναλύεται η γενική μορφή των εξισώσεων διατήρησης σε συνθήκες μεταβατικής μονοδιάστατης ροής.

5.2.2.1 Εξισώσεις ισορροπίας

Τα ισοζύγια μάζας, ορμής και ενέργειας δίνονται από τις Εξισώσεις (5.3), (5.4) και (5.5).

$$\frac{\partial(a_k \rho_k)}{\partial t} + \frac{\partial(a_k \rho_k u_k)}{\partial x} = M_k \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial(a_k \rho_k u_k)}{\partial t} + \frac{\partial(a_k \rho_k u_k^2)}{\partial x} + a_k \frac{\partial p}{\partial x} = M_{n+k} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial(a_k \rho_k h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(a_k \rho_k h_k u_k)}{\partial x} = M_{2n+k} \quad (5.5)$$

Όπου, το M αντιπροσωπεύει τους όρους πηγών μάζας, ορμής και ενέργειας, ο δείκτης $k = 1, \dots, n$ δηλώνει το ρεύμα ρευστού και το n δείχνει το συνολικό αριθμό των ρευμάτων ρευστού που εμπλέκονται στο προσομοιωμένο διφασικό πρότυπο ροής. Οι όροι πηγών στη δεξιά πλευρά των Εξισώσεων (5.3–5.5) εξαρτώνται από το μοντελοποιημένο διφασικό πρότυπο ροής. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι όροι πηγών για τις περιπτώσεις των προτύπων ροών με φυσαλίδες και των μεταβατικών ροών. Οι Εξισώσεις (5.3–5.5) συμπληρώνονται με το ισοζύγιο για το κλάσμα όγκου που δίνεται από την Εξίσωση (5.6).

$$\sum_{k=1}^n a_k = 1 \quad (5.6)$$

Σε μόνιμες συνθήκες, το σύστημα εξισώσεων ισορροπίας που έχει περιγραφεί μετασχηματίζεται σε μια μορφή κατάλληλη για αριθμητική ολοκλήρωση. Όταν οι συνθήκες είναι μόνιμες συνεπάγεται ότι οι παράγωγοι του χρόνου ισούνται με μηδέν, δηλαδή $\frac{\partial}{\partial t} = 0$. Το αριστερό μέλος της Εξίσωσης (5.5) διαφορίζεται και καταλήγουμε στην Εξίσωση (5.7).

$$h_k \frac{d(a_k \rho_k u_k)}{dx} + a_k \rho_k u_k \frac{dh_k}{dx} = M_{2n+k}, \quad k = 1, n \quad (5.7)$$

Αντικαθιστώντας το ισοζύγιο διατήρησης της μάζας που δίνεται από την Εξίσωση (5.3) στην Εξίσωση (5.7), λαμβάνεται η σχέση για τον υπολογισμό της ενθαλπίας όπως φαίνεται στην Εξίσωση (5.8).

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{M_{2n+k} - h_k M_k}{a_k \rho_k u_k} \quad (5.8)$$

Η διαφορίαση του όρου συναγωγής της Εξίσωσης (5.3) και ο πολλαπλασιασμός της εξίσωσης με την ταχύτητα του ρευστού δίνει την Εξίσωση (5.9). Η Εξίσωση (5.10) λαμβάνεται από τη διαφορίαση της Εξίσωσης (5.4).

$$a_k \rho_k u_k \frac{du_k}{dx} + \rho_k u_k^2 \frac{da_k}{dx} + a_k u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial p} \frac{dp}{dx} + a_k u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial h_k} \frac{dh_k}{dx} = u_k M_k \quad (5.9)$$

$$2a_k \rho_k u_k \frac{du_k}{dx} + \rho_k u_k^2 \frac{da_k}{dx} + a_k u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial p} \frac{dp}{dx} + a_k u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial h_k} \frac{dh_k}{dx} + a_k \frac{dp}{dx} = M_{n+k} \quad (5.10)$$

Η Εξίσωση (5.11) δίνει την παράγωγο της ταχύτητας που εμφανίζεται στις Εξισώσεις (5.9) και (5.10).

$$\frac{du_k}{dx} = \frac{u_k M_k - \rho_k u_k^2 \frac{da_k}{dx} - a_k u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial p} \frac{dp}{dx} - a_k u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial h_k} \frac{dh_k}{dx}}{a_k \rho_k u_k} \quad (5.11)$$

Έπειτα από την αντικατάσταση της παραγώγου της ταχύτητας (Εξίσωση 5.11) στην Εξίσωση (5.10) λαμβάνεται η Εξίσωση (5.12).

$$\frac{da_k}{dx} = a_k \frac{1 - u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial p}}{\rho_k u_k^2} \frac{dp}{dx} - \frac{M_{n+k} - 2u_k M_k + a_k u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial h_k} \frac{dh_k}{dx}}{\rho_k u_k^2} \quad (5.12)$$

Πίνακας 5.3 Οι όροι πηγών των εξισώσεων ισορροπίας (Εξισώσεις 5.3, 5.4, 5.5) για ροή με φουσαλίδες

Οι όροι πηγών του ισοζυγίου μάζας	
Ροή αερίου	$M_1 = \Gamma_{21} - \Gamma_{12}$
Ροή υγρού	$M_2 = \Gamma_{12} - \Gamma_{21}$
Οι όροι πηγών του ισοζυγίου ορμής	
Ροή αερίου	$M_3 = -\alpha_{21}\tau_{21} - \alpha_{1W}\tau_{1W} + \Gamma_{21}u_2 - \Gamma_{12}u_1 - a_1\rho_1g \sin \theta$
Ροή υγρού	$M_4 = \alpha_{21}\tau_{21} - \alpha_{2W}\tau_{2W} + \Gamma_{12}u_1 - \Gamma_{21}u_2 - a_2\rho_2g \sin \theta$
Οι όροι πηγών του ισοζυγίου ενέργειας	
Ροή αερίου	$M_5 = (\Gamma_{21} - \Gamma_{12})h'' + \dot{Q}_1$
Ροή υγρού	$M_6 = (\Gamma_{12} - \Gamma_{21})h'' + \dot{Q}_2$
Αριθμός ρευμάτων ρευστού: $n = 2$ Δείκτες ρευμάτων ρευστού: $k = 1$ (<i>gas</i>), $k = 2$ (<i>υγρό</i>)	

Η Εξίσωση (5.12) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα ρεύματα του ρευστού που εμπλέκονται στα πρότυπα διφασικής ροής, δηλ. για $k = 1, 2, \dots, n$ και οι εξισώσεις αυτές αθροίζονται. Η Εξίσωση (5.13) παρουσιάζει τη διαφορική μορφή της Εξίσωσης (5.6).

$$\sum_{k=1}^3 \frac{da_k}{dx} = 0 \quad (5.13)$$

Στο άθροισμα της Εξίσωσης (5.12) για κάθε ρευστό, ο υπολογισμός της πίεσης προκύπτει από την Εξίσωση (5.14).

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{M_{n+k} - u_k M_k + a_k u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial h_k} \frac{dh_k}{dx}}{\rho_k u_k^2}}{\sum_{k=1}^3 a_k \frac{1 - u_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial p}}{\rho_k u_k^2}} \quad (5.14)$$

Το τελικό σύνολο των εξισώσεων ισορροπίας προέρχεται από τη μορφή των Εξισώσεων (5.8), (5.11), (5.12) και (5.14). Αυτές οι εξισώσεις υπολογίζονται για κάθε ρεύμα

ρευστού που συμμετέχει στο μοντελοποιημένο πρότυπο διαφοσικής ροής. Αυτή η μορφή των εξισώσεων είναι κατάλληλη για την άμεση εφαρμογή μιας μεθόδου ολοκλήρωσης. Σε αυτό το παράδειγμα έχει εφαρμοστεί η μέθοδος Runge-Kutta. Οι παράγωγοι υπολογίζονται έτσι ώστε η παράγωγος της ενθαλπίας να υπολογίζεται πρώτη από την Εξίσωση (5.8). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το αποτέλεσμα της Εξίσωσης (5.8) υπολογίζεται η παράγωγος της πίεσης που δίνεται από την Εξίσωση (5.14). Η Εξίσωση (5.12) υπολογίζεται από τα αποτελέσματα των Εξισώσεων (5.8) και (5.14). Τελικά, η παράγωγος της Εξίσωσης (5.11) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των τριών προηγούμενων Εξισώσεων (5.8), (5.12) και (5.14). Η αριθμητική προσομοίωση της διαφοσικής ροής αποτελεί τη λύση του προβλήματος Cauchy, όπου οι αρχικές συνθήκες είναι καθορισμένοι παράμετροι ροής (εξαρτημένες μεταβλητές $\alpha_{k,0}$, $u_{k,0}$, $h_{k,0}$, p_0) στην είσοδο του καναλιού ροής (η αρχική τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής είναι $x_0 = 0$).

5.2.2.2 Νόμοι «κλεισίματος»

Ένα σύνολο νόμων «κλεισίματος» απαιτείται για τον υπολογισμό των διαδικασιών μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας στη διεπιφάνεια για κάθε μοντελοποιημένο πρότυπο ροής. Μια αναλυτική παρουσίαση όλων των νόμων «κλεισίματος» θα υπερέβαινε το περιεχόμενο του παραδείγματος, κατά συνέπεια, ως επεξήγηση παρουσιάζονται μόνο οι νόμοι για το «κλείσιμο» της ροής με φυσαλίδες στον Πίνακα 5.4. Τα ποσοστά εξάτμισης και συμπύκνωσης σε όλα τα πρότυπα ροής υπολογίζονται με τη χρήση θερμικών μοντέλων σε συνθήκες μη-ισορροπίας. Η ειδική θερμορροή του τοιχώματος καθορίζεται σύμφωνα με τις προσομοιωμένες πειραματικές συνθήκες και τη θερμότητα που μεταφέρεται από το τοίχωμα στο πλήθος των υγρών φάσεων που βρίσκονται σε επαφή με το τοίχωμα.

Πίνακας 5.4 Νόμοι «κλεισίματος» της ροής με φυσαλίδες

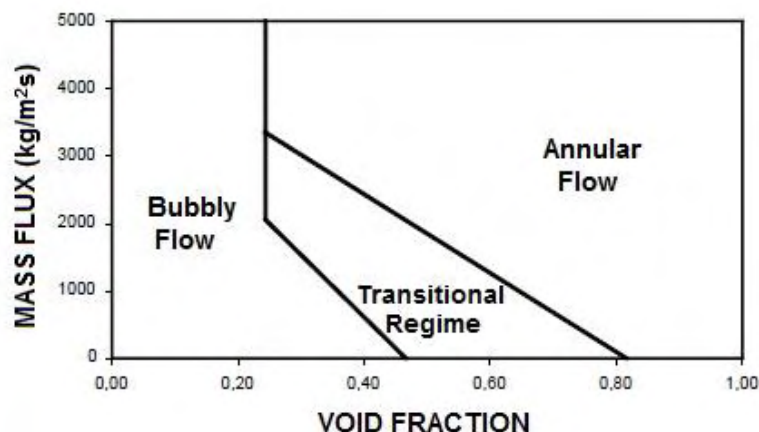
Καταστατική σχέση	Ροή στο σωλήνα	Ροή στο δακτύλιο
Περιοχή συγκέντρωσης	$\alpha_{kW} = \frac{4a_k}{D_h}$, $k = 1,2$	$D_h = \frac{4A}{S}$
τοιχώματος-υγρού	$A = \frac{\pi D^2}{4}$, $S = \pi D$	$A = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4}$, $S = \pi(S_1 + S_2)$

<p>Διατμητική τάση τοιχώματος</p>	$\tau_{kW} = f_{kW} \frac{\rho_k u_k u_k}{2}, \quad k = 1, 2,$ $f_{kW} = \frac{C}{Re_k^n}$ <p>Για τυρβώδη ροή: $C = 0.079, n = 0.25$ Για στρωτή ροή: $C = 16, n = 1$</p> $Re_k = \frac{\rho_k u_k D_h}{\mu_k}$
<p>Περιοχή συγκέντρωσης στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου</p>	$\alpha_{21} = 6 \frac{\alpha_1}{D_B}$ $D_{B,max} = 31.68 D_h^{\frac{2}{5}} \left(\frac{\sigma}{\rho_1} \right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\frac{1}{5}} u_m^{\frac{6}{5}},$ $D_B = 0.0615 D_{B,max}$ $u_m = (a_1 \rho_1 u_1 + a_2 \rho_2 u_2) / \rho_m$ $\rho_m = a_1 \rho_1 + a_2 \rho_2$
<p>Διατμητική τάση διεπιφάνειας</p>	$\tau_{21} = \frac{1}{8} \rho_2 f_{21} u_1 - u_2 (u_1 - u_2)$ $f_{LG} = \frac{24}{Re_B} (1 + 0.15 Re_B^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 4.25 \cdot 10^4 Re_B^{-1.16}}$ $Re_B = \frac{ u_1 - u_2 D_B \rho_2}{\mu_2}$
<p>Υπόψυκτος βρασμός</p>	$\Gamma_{21} = G \frac{dX_1}{dX},$ $X_1 = X_{eq} - X_1 \exp\left(\frac{X_{Geq}}{X_1} - 1\right), \text{ όπου } X_{Geq} = \frac{h_{in} + 4q_w x / (GD) - h'}{h_1 - h_2}$ $St \frac{\dot{q}_w}{0.88 \cdot 10^7} = 0.0065 \text{ (για } Pe > 70000), Nu \frac{\dot{q}_w}{0.88 \cdot 10^7} = 455 \text{ (για } Pe < 70000)$ $St = \frac{\dot{q}_w}{G c_{p2} (T_{sat} - T_2)}, Nu = \frac{\dot{q}_w D}{k_2 (T_{sat} - T_2)}, Pe = \frac{G D c_{p2}}{k_2}, X_1 = \frac{c_{p2} (T_2 - T_{sat})}{h_1 - h_2}, G = \sum_{k=1}^2 a_k \rho_k u_k$
<p>Κορεσμένος βρασμός</p>	$\Gamma_{21} = \frac{1}{\tau_e} \frac{h_2 - h'}{h'' - h'}$

Το πρότυπο της ομιγλώδους ροής εξετάζεται μετά την εξάντληση του υγρού φιλμ στη δακτυλιοειδή ροή. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της αέριας φάσης και του τοιχώματος στην ομιγλώδη ροή υπολογίζεται όπως στη ροή με φυσαλίδες, ενώ οι διαδικασίες των

σταγονιδίων στη διεπιφάνεια υπολογίζονται, όπως στο καθεστώς της δακτυλιοειδούς ροής και η θερμότητα μεταφέρεται απευθείας από το τοίχωμα στα σταγονίδια. Στην περίπτωση εξάτμισης όλων των σταγονιδίων, υπολογίζεται η μονοφασική ροή του ατμού. Οι ασήμαντες καταστάσεις (αναφορικά με τις συνθήκες διφασικής ροής) της ροής ατμού και ρευστού μιας φάσης δεν αναλύονται και αντιμετωπίζονται ως οριακή συνθήκη της ροής με φυσαλίδες, όταν είτε το κλάσμα όγκου του ατμού ή το κλάσμα όγκου του ρευστού ισούται με μηδέν. Η αποκατάσταση της δακτυλιοειδούς ροής από την ομιχλώδη ροή καθορίζεται από το κριτήριο ότι ο ρυθμός εναπόθεσης των σταγονιδίων ξεπερνά τον ρυθμό εξάτμισης του συνόλου των σταγονιδίων. Οι μεταβάσεις από το καθεστώς της ροής με φυσαλίδες στην ακανόνιστη ροή και από την ακανόνιστη ροή στη δακτυλιοειδή έχουν προβλεφθεί σύμφωνα με τον τροποποιημένο ροϊκό χάρτη Bennet [63], που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14.

Για τη δακτυλιοειδή ροή, έχει υιοθετηθεί ότι η ξήρανση συμβαίνει όταν το υγρό φιλμ εξαντλείται εντελώς. Η πλήρης εξάντληση του φιλμ συμβαίνει όταν το πάχος του φιλμ γίνει το ελάχιστο δυνατό, το οποίο καθορίζεται από τις σύνθετες επιπτώσεις των συνθηκών της δακτυλιοειδούς ροής, όπως είναι ο συμπαρασυρμός και η εναπόθεση των σταγονιδίων, η υδροδυναμική σταθερότητα των κυμάτων στην επιφάνεια του υγρού φιλμ, η πυρηνογένεση φυσαλίδων, η κατάρρευση τους στην επιφάνεια του τοιχώματος κ.α. Στην αδιαβατική ατμοσφαιρική ροή νερού-αέρα του πειράματος, το ελάχιστο πάχος του υγρού φιλμ προβλέφθηκε να είναι 100 μm . Το φιλμ στο θερμαινόμενο τοίχωμα θα πρέπει να έχει μικρότερο ελάχιστο πάχος. Ο Serizawa [64] πρόβλεψε πειραματικά και θεωρητικά ότι το ελάχιστο πάχος του φιλμ σε συνθήκες υπόψυκτου βρασμού έχει εύρος από 2 έως 10 μm . Τα αριθμητικά αποτελέσματα σε σταθερά ελάχιστο πάχος φιλμ και σε μη κοντινές συνθήκες ξήρανσης, είναι αρκετά χαμηλά και φτάνουν έως και τα 35 μm . Τα προηγούμενα αποτελέσματα δείχνουν ότι το ελάχιστο δυνατό πάχος του φιλμ πριν την ενεργοποίηση της ξήρανσης έχει εύρος αρκετών μικρών (μm). Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, το ελάχιστο δυνατό πάχος του φιλμ κατά την έναρξη της ξήρανσης θεωρείτε ότι είναι ίσο ή μικρότερο από 4 μm .



Σχήμα 5.14 Ο τροποποιημένος χάρτης του Bennett [63] για ανοδική ροή ατμού-νερού σε αγωγό υπό πίεση 7 MPa

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη μεθοδολογία στην προσομοίωση και την ανάλυση του νερού σε βρασμό στο σωλήνα με ξήρανση στο κανάλι εξόδου, καθώς και στην κρίσιμη διαφασική ροή θερμού ρευστού με αδιαβατική εξάτμιση. Επιπρόσθετα, επιλύθηκαν μοντέλα ενός, δύο και τριών ρευστών για τον αντίστοιχο υπολογισμό της ροής με φυσαλίδες και της ακανόνιστης ροής και της δακτυλιοειδούς ροής με συμπαρασυρόμενα σωματίδια. Τέλος, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία του εφαρμοζόμενου μοντέλου “multi-fluid”, αναλύθηκαν αρχικά κάποιες ξεχωριστές επιδράσεις που σχετίζονται με τη ροή με φυσαλίδες, την ακανόνιστη και τη δακτυλιοειδή ροή, αλλά η περιγραφή τους θα υπερέβαινε τα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η τριφασική ροή συναντάται αρκετά συχνά στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Τα περισσότερα πηγάδια παραγωγής φυσικού αερίου παράγουν μικρά κλάσματα συμπυκνώματος και νερού, τα οποία μεταφέρονται ταυτόχρονα στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Η τριφασική ροή είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο και πολύπλοκο πρόβλημα και η μοντελοποίηση της περιλαμβάνει την επίλυση πολύπλοκων θερμοδυναμικών και υδροδυναμικών μαθηματικών σχέσεων. Αυτό το είδος της ροής προκαλεί συχνά σοβαρά προβλήματα στους μηχανικούς, μειώνοντας συχνά τη ροϊκή ικανότητα του αγωγού ή δημιουργώντας το κατάλληλο περιβάλλον για το σχηματισμό ουσιών που επηρεάζουν αρνητικά την υδραυλική απόδοση και τη μηχανική ακεραιότητα ενός συστήματος αγωγών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά των πολυφασικών ροών που αναπτύσσονται σε κατακόρυφους αγωγούς ανόδου. Λόγω όμως της δυσκολίας μοντελοποίησης και ανάλυσης της τριφασικής ροής σε κατακόρυφους αγωγούς, η μελέτη της τριφασικής ροής, αντικαταστάθηκε με τη μελέτη της διφασικής ροής, η οποία προσεγγίζει τα φαινόμενα που διέπουν την τριφασική ροή. Έτσι, αυτή η εργασία ασχολείται με τη μελέτη της διφασικής ροής σε κατακόρυφους αγωγούς ανόδου πετρελαίου. Αρχικά, έγινε μία εισαγωγή για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, η οποία περιείχε μια σύντομη ιστορική περιγραφή και πληροφορίες για τη σύστασή τους. Το επόμενο βήμα της εργασίας είχε στόχο την εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση πολυφασικών ροών. Αναλύθηκαν οι παράμετροι που συμμετέχουν σε ένα τέτοιο είδος ροής, τα καθεστώτα ροής που εμφανίζονται σε κατακόρυφους αγωγούς, οι σημαντικότεροι ροϊκοί χάρτες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και τα κριτήρια μετάβασης μεταξύ των διάφορων καθεστώτων ροής. Το θεωρητικό υπόβαθρο των πολυφασικών ροών ολοκληρώθηκε με την ανάλυση των προσεγγίσεων και των μοντέλων που εφαρμόζονται σε αυτό το είδος ροών. Επίσης, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η λειτουργία ενός αγωγού ανόδου παρουσιάστηκαν τα σημαντικότερα υπεράκτια συστήματα αγωγών ανόδου πετρελαίου που υπάρχουν. Δεδομένου της

αδυναμίας διεξαγωγής ενός πειράματος διαφασικής ροής στις υφιστάμενες εργαστηριακές εγκαταστάσεις, παρουσιάζονται δύο μελέτες περίπτωσης που ανακτήθηκαν από τη βιβλιογραφία. Στόχος αυτών των παραδειγμάτων ήταν η κατανόηση των φαινομένων σε έναν αγωγό ανόδου μικρής διαμέτρου, μέσω της παρατήρησης της ροής με τη βοήθεια συγκεκριμένου τεχνικού εξοπλισμού.

Οι πολυφασικές ροές αποτελούν μια επιστημονική περιοχή με έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, τόσο σε πειραματικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο. Είναι βέβαιο ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα στον συγκεκριμένο τομέα σε σχέση με τη συμπεριφορά αυτών των ροών.

Οι προτάσεις για μελλοντική εργασία είναι οι εξής:

- ❖ Μελέτη της διαφασικής ροής σε κατακόρυφους αγωγούς ανόδου με τη χρήση διαφορετικών ρευστών, ώστε να μελετηθεί η επίδραση της πυκνότητας, του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης στα χαρακτηριστικά της ροής.
- ❖ Η συμπαραγωγή άμμου μαζί με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο στα φρεάτια εξόρυξης μπορεί να προκαλέσει απώλεια της ικανότητας παραγωγής, μπλοκάρισμα του αγωγού, βλάβη στον εξοπλισμό και αυξημένη διάβρωση των σωληνώσεων. Η παρουσία της άμμου επηρεάζει ενδεχομένως την απόδοση της μέτρησης των διάφορων συστημάτων μέτρησης της ροής. Ως εκ τούτου, θα μπορούσαν να διεξαχθούν πειράματα για τη διερεύνηση της επίδρασης διάφορων συγκεντρώσεων άμμου στην ακρίβεια ταξινόμησης, καθώς και για την ικανότητα εξαγωγής πληροφοριών σε σχέση με τη συγκέντρωση της άμμου και της ταχύτητας εναπόθεσης και μεταφοράς με τη χρήση συστημάτων μέτρησης της ροής.
- ❖ Δημιουργία πειραματικής προσομοίωσης της ροής πετρελαίου-φυσικού αερίου σε αγωγό ανόδου μεγάλης διαμέτρου για την μελέτη και υπολογισμό της πτώσης πίεσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ν. Ανδρίτσος, «Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα Ενέργεια και Περιβάλλον,» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2008.
- [2] Προέλευση Πετρελαίου, «Ελληνική Ελεύθερη Εγκυκλοπαίδεια,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.livepedia.gr/index.php/Πετρέλαιο>.
- [3] Μ. Π. Νικολοπούλου, "Ενισχυμένη Βιοδιέγερση Εγγενών Θαλάσσιων Μικροοργανισμών με τη Χρήση Λιπόφιλων Λιπασμάτων σε Συνδυασμό με Επιφανειοδραστικές Βιολογικές Ουσίες για Αποικοδόμηση Πετρελαιοκηλίδων", Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2005.
- [4] The Formation of Natural Gas, «NaturalGas.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://naturalgas.org/overview/background/>.
- [5] Γ. Τασιολάμπρος, "Το φυσικό αέριο ως καύσιμο στις μεταφορές στην Ελλάδα. Υφιστάμενη χρήση και προοπτικές", Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αθήνα, 2013.
- [6] Multiphase Flow, «Thermopedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.thermopedia.com/content/4/>.
- [7] J. M. Jansen, "Evaluation of a flow simulator for multiphase pipelines", Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology - Department of Energy and Process Engineering, Sandefjord, 2009.
- [8] Δ. Κ. Φέρτης, "Μη-μόνιμη διφασική ροή υγρών-αερίων σε ενεργειακά συστήματα μεταφοράς υδρογονανθράκων", Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών - Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πάτρα, 1998.
- [9] S. Rouhani and M. Sohel, "Two-Phase Flow Pattern: A Review of Research Result", Progress in Nuclear Energy, Vol. 11, p.p. 217-259, 1983..
- [10] G. Hewitt and D. Robertson, "Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous X-ray and Flash Photography", Rept AERE-M2159, UKAEA, Harwell, 1969.
- [11] D. Baker, "Simultaneous Flow of Oil and Gas", Oil and Gas Journal, Vol. 53, p.p. 183-195, 1954.
- [12] L. Golan και A. Stenning, "Two-Phase Vertical Flow Maps", Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 184, p.p. 110-116, 1969.

- [13] T. Oshinowo and M. Charles, "*Vertical two-phase flow I: Flow pattern correlations*", Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 52, p.p.25-35, 1974.
- [14] J. Fair, "*What you need to design thermosiphon reboilers*", Pet. Ref., Vol. 39, No. 2, p.p. 105-123, 1960.
- [15] J. R. Thome, "*Engineering Data Book III*", Chapter 12, Wolverine Tube Inc., Decatur, Alabama, USA, 2004.
- [16] Y. Taitel and A. Dukler, "*A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near-horizontal gas-liquid flow*", AIChE Journal, Vol. 22, No. 1, p.p. 47-55, 1976.
- [17] Y. Taitel, D. Barnea and A. Dukler, "*Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes*", AIChE Journal, vol. 26, pp. 345-354, 1980.
- [18] Y. Taitel and A. Dukler, "*A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near-horixontal pipes*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 3, 1977.
- [19] J. Weisman and S. Kang, "*Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 7, p.p. 271-291, 1981.
- [20] K. McQuillan and P. Whalley, "*Flow patterns in vertical two-phase flow*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 11, No. 2, p.p. 161-175, 1985.
- [21] K. Mishima και M. Ishii, "*Flow regime transition criteria for upward two- phase flow in vertical tubes*", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, p.p. 723-737, 1984.
- [22] D. Barnea, "*A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 13, No. 1, p.p. 1-12, 1987.
- [23] S. Farman Ali και H. Yeung, "*Experimental Study of Two Phase Air-Water Flow in Large Diameter Vertical Pipe*", Chemical Engineering Communications, Vol. 202, No. 6, 2015.
- [24] N. Radovicich and R. Moissis, "*The Transition from Two-Phase Bubble Flow to Slug Flow*", MIT Report 7-7673-22, 1962.
- [25] O. Pushkina and Y. Sorokin, "*Breakdown of liquid film motion in vertical tubes*", Heat Transfer Soviet Research, Vol. 1, p.p. 56-64, 1969.
- [26] G. Wallis, "*One-dimensional two-phase flow*", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 42, No.2, p.p. 428-432, 1969.
- [27] S. Ali, "*Two phase flow in large diameter vertical riser*", Ph.D. Thesis, School of Engineering - Department of Process and Systems Engineering, Cranfield University, Bedfordshire, 2009.

- [28] J. Schlegel, P. Sawant, S. Paranjape, B. Ozar, T. Hibiki and M. Ishii, "*Void fraction and flow regime in adiabatic upward two-phase flow in large diameter vertical pipes*", Nuclear Engineering and Design Journal, Vol. 239, p.p. 2864-2874, 2009.
- [29] M. Ishii, "*Thermodynamic Theory of Two Phase Flow*", Eyrolles, Paris, 1975.
- [30] C. Kralj, "*Numerical simulation of diesel spray*", PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK, 1993.
- [31] N. C. Markatos, "*Modeling of two-phase transient flow and combustion of granular propellants*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 12, No. 6, p.p. 913-933, 1986.
- [32] D. B. Spalding, "*Numerical Computation of Multiphase Flow and Heat transfer, Contribution to Recent Advances in Numerical Methods in Fluids*", p.p. 139-167, Eds. C. Taylor & K. Morgan, Pineridge Press, Swansea, 1980.
- [33] G. N. Patel, "*CFD Simulation of Two-phase and Three-phase Flows in Internal-loop Airlift*", Master's thesis, Department of Mathematics and Physics, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2010.
- [34] E. Delnoij, J. A. M. Kuipers and W. P. M. van Swaaij, "*Numerical simulation of bubble coalescence using a volume of fluid (VOF) model*", Third International Conference on Multiphase Flow, Lyon, France, June 8–12, 1998.
- [35] ANSYS FLUENT 12.1 Theory Guide, 2010.
- [36] R. Issa, "*Prediction of turbulent, stratified, two-phase flow in inclined pipes and channels*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 14, No. 2, p.p. 141-154, 1988.
- [37] T. Ming, "*Overview of mechanistic modelling techniques*", Newcastle University-Department of Chemical and Process Engineering, p.p. 1-6, 2000.
- [38] M. Bonizzi, P. Andreussi and S. Banerjee, "*Flow regime independent, high resolution multi-field modelling of near-horizontal gas-liquid flows in pipelines*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 35, No. 1, p.p. 34-46, 2009 .
- [39] M. Bonizzi and R. I. Issa, "*A model for simulating gas bubble entrainment in two-phase horizontal slug flow*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 29, No. 11, p.p. 1685-1717, 2003.
- [40] R. I. Issa, M. Bonizzi and S. Barbeau, "*Improved closure models for gas entrainment and interfacial shear for slug flow modelling in horizontal pipes*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 32, p.p. 1287-1293, 2006.
- [41] T. J. Danielson, K. M. Bansal, R. Hansen and E. Leporcher, "*Leda: the next multiphase flow performance simulator*", Proceedings 12th International BHR Group Conference on

Multiphase Production Technology, Barcelona, 2005.

- [42] N. Zuber and J. A. Findlay, "Average volumetric concentration in two-phase flow systems", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 87, No. 4, p.p. 453-468, 1965.
- [43] X. Shen, Y. Saito, K. Mishima and H. Nakamura, "Methodological improvement of an intrusive four-sensor probe for the multi-dimensional two-phase flow measurement", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 31, No. 5, p.p. 593–617, 2005.
- [44] M. Ishii and N. Zuber, "Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows", *AIChE Journal*, Vol. 25, No. 5, p.p. 843-855, 1979.
- [45] R. Gregory and M. Paidoussis, "Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid – I Theory", *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 293, p.p. 512-527, 1966.
- [46] M. Paidoussis, "Dynamics of Tubular Cantilevers Conveying Fluid", *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 12, No. 2, p.p. 96-103, 1970.
- [47] G. Moe and S. Chucheeepsakul, "The effect of Internal Flow on Marine Risers", *Seventh International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Houston, Texas, February 1988.
- [48] M. Patel and F. Seyed, "Internal Flow-Induced Behavior of Flexible Risers", *Engineering Structures*, Vol. 11, p.p. 266-280, 1989.
- [49] M. Wu and J. Lou, "Effects of Rigidity and Internal Flow on Marine Riser Dynamics", *Applied Ocean Research*, Vol. 13, No. 5, p.p. 235-244, 1991.
- [50] D. Bornea, A. Duckler and Y. Taitel, "Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes", *AIChE Journal*, Vol. 26, p.p. 345-354, 1980.
- [51] H. Beggs and J. Brill, "Study of two-phase flow in inclined pipes", *Journal of Petroleum Technology*, p.p. 607-617, 1973.
- [52] C. C. P. Cavalcante, S. N. Bordalo, C. K. Morooka, C. G. C. Matt and R. Franciss, "Experimental investigation on a laboratory-scale model of the fluid-pipe interaction on catenary risers for offshore petroleum production", *Brazilian Journal of Petroleum and Gas* Vol. 1, No. 2, p.p. 78-87, 2007.
- [53] A. R. P. 2RD, "Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs)", *American Petroleum Institute*, First Edition, USA, 1998.
- [54] Σ. Κατηφέογλου, "Δυναμική αλληλεπίδραση λεπτόγραμμων θαλάσσιων αγωγών με τον πυθμένα", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο-Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, 2011.

- [55] H. Dikdogmus, *"Riser Concepts for Deep Waters"*, Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology-Department of Marine Technology, Trondheim, 2012.
- [56] S. Blaney and H. Yeung, *"Gamma Radiation Methods for Cost-Effective Multiphase Flow Metering"*, 13th International Conference on Multiphase Production Technology, 13-15 June, Edinburgh, UK, 2007.
- [57] H. Prasser, A. Bottger and J. Zschau, *"A new electrode-mesh tomography for gas/liquid flows"*, Flow Measurement and Instrumentation, Voll. 9, No. 2, p.p. 111-119, 1998.
- [58] M. Da Silva, E. Schleicher and U. Hampel, *"Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions"*, Measurement Science and Technology, Vol. 18, No. 7, p.p. 2245-2251, 2007.
- [59] T. Arubi, *"Multiphase Flow Measurement Using Gamma-Based Techniques"*, PhD thesis, School of Engineering, Cranfield University, UK, 2011.
- [60] A. Brini, *"A study of gas lift on oil/water flow in vertical risers"*, Ph.D. Thesis, School of Engineering - Department Of Offshore, Process and Energy Engineering, Cranfield University, Bedfordshire, 2009.
- [61] T. Saito, D. Hughes and M. Carbon, *"Multi-fluid modeling of annular two-phase flow"*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 50, p.p. 225-271, 1978.
- [62] S. Sami, *"An improved numerical model for annular two-phase flow with liquid entrainment"*, International Communication in Heat and Mass Transfer, Vol. 15, p.p. 281-292, 1988.
- [63] A. Bennet, G. Hewitt, H. Kearsey and R. Keeys, *"Heat transfer to steam-water mixtures flowing in uniformly heated tubes in which the critical heat flux has been exceeded"*, Report AERE-R-5373, 1967.
- [64] A. Serizawa, *"Theoretical Prediction of Maximum Heat Flux in Power Transients"*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 26, p.p. 921-932, 1983.
- [65] L. Chen, Y. S. Tian and T. G. Karayiannis, *"Vertical upward flow patterns in small diameter tubes"*, London South Bank University, 6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Matsushima, Miyagi, Japan, April 17-21, 2005.
- [66] X. Shen, J. Schlegel, S. Chen, S. Rassame, M. Griffiths, T. Hibiki and M. Ishii, *"Flow Characteristics and Void Fraction Prediction in Large Diameter Pipes"*, Frontiers and Progress in Multiphase Flow I, Chapter II, p.p. 55-103, 2014.

