



Διπλωματική εργασία  
Τίτλος εργασίας:  
«ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ  
ΚΛΕΙΣΤΟ ΑΓΩΓΟ»

---

Φοιτήτρια:  
Γάτσου Ευαγγελία, 1606

---

Επιβλέπων καθηγητής:  
κος Ευστάθιος Κωνσταντινίδης

---





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ θερμά τον κύριο Ευστάθιο Κωνσταντινίδη, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, για την απλόχερη διάθεση των γνώσεών του καθώς και για την πολύτιμη συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Χωρίς τις συμβουλές και τις επισημάνσεις του η εργασία θα ήταν ελλιπής.

Επίσης, ευχαριστώ την οικογένειά μου, που με στήριξε και με στηρίζει σε όλα.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο συμπαρασυρμός αέρα στην υδραυλική μηχανική, ορίζεται ως η παγίδευση φυσαλίδων αέρα που προσάγονται εντός της τυρβώδους ροής. Η παράσυρση φυσαλίδων αέρα μπορεί να είναι τοπική ή συνεχής κατά μήκος της διεπιφάνειας αέρα-νερού. Το παραπάνω φαινόμενο επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά της ροής, καθώς την καθιστά διφασική. Μελετάται δηλαδή η ροή νερού-αέρα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναλύεται διεξοδικά το φαινόμενο του συμπαρασυρμού αέρα και περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της ροής σε έναν κλειστό κεκλιμένο αγωγό. Ειδικότερα, πραγματοποιείται ενδελεχής έλεγχος των υπάρχουσών επιστημονικά αποδεδειγμένων σχέσεων για τους υδραυλικούς υπολογισμούς που διεξάγονται στα πλαίσια της ανάλυσης της ροής.

Τη θεωρητική αυτή ανάλυση, διαδέχεται μια υπολογιστική εφαρμογή, όπου πραγματοποιείται πλήρης υπολογισμός των υδραυλικών μεγεθών, για διάφορες τιμές της κλίσεως του αγωγού τόσο για ανοδική όσο και για καθοδική ροή. Βασικά μεγέθη που μελετώνται είναι το κλάσμα υγρού (ή αλλιώς υγρή κοίτη όπως ονομάζεται-liquid holdup) αλλά και η μεταβολή της πίεσης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους για τις διάφορες κλίσεις αγωγού αλλά και σε σχέση με κάποια πειραματικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Συγκεφαλαιώνοντας, παρουσιάζεται μια συγκριτική αξιολόγηση των συμπερασμάτων αυτών, ενώ παράλληλα γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## **ABSTRACT**

In hydraulic engineering, air bubble entrainment is defined as the entrapment of air bubbles and pockets that are fed into the turbulent flow. The entrainment of air packets can be local or continuous along the air–water interface. The phenomenon described above, affects significantly the characteristics of the flow. The air-water flow is studied, which implies that we refer to a biphasic flow.

The characteristics of the flow occurring in a closed sloping pipe as well as the phenomenon of air entrainment are analyzed in detail throughout this study. More specifically, meticulous research is carried out about the scientifically proven scientific relations for the hydraulic calculations performed in the analysis of flow.

This theoretical analysis is followed by a design example, in which a full calculation of hydraulic sizes for various inclination values both in upward and downward flow takes place. The basic hydraulic sizes studied are the liquid holdup as well as the pressure drop. A comparison about the results for various inclination values takes place. In addition to this, the results of the design example are compared with the experimental results given by other researchers.

To sum up, a comparative assessment of these conclusions is presented, while suggestions for further and future research are made.

Ευχαριστίες

Περίληψη

Abstract

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Πινάκων

Κατάλογος Σχημάτων

## **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

1.1 Προσδιορισμός του αντικειμένου.....	1
1.2 Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας.....	4
1.3 Δομή-προεπισκόπηση διπλωματικής εργασίας.....	6

## **Κεφάλαιο 2: Διφασική ροή-Συμπαρασυρμός αέρα**

2.1 Ρευστό.....	7
2.2 Μηχανική Ρευστών.....	9
2.3 Είδη Ροών.....	10
2.4 Παράμετροι που επηρεάζουν την πτώση πίεσης σε μονοφασική ροή ρέοντος ρευστού...15	
2.5 Διφασική ροή.....	18
2.6 Διφασική ροή νερού-αέρα, Παράμετροι.....	21
2.7 Συμπαρασυρμός αέρα.....	25
2.8 Οριζόντια διφασική ροή σε αγωγό.....	25

## **Κεφάλαιο 3: Διφασική ροή σε κατακόρυφο αγωγό**

3.1 Γενικά.....	29
3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	29



3.3 Καθεστώτα ροής σε κατακόρυφο αγωγό.....	32
3.4 Χάρτης καθεστώτων ροής.....	38
3.5 Κατακόρυφη δακτυλιοειδής ροή.....	42
3.5.1 Ανάπτυξη δακτυλιοειδούς ροής.....	44
3.5.2 Συμπαρασυρμός και μετατόπιση υγρού.....	48
3.5.3 Επίδραση διαμέτρου σωλήνα στην κατακόρυφη ροή.....	50

#### **Κεφάλαιο 4: Διφασική ροή σε κεκλιμένο αγωγό**

4.1 Γενικά.....	56
4.2 Καθεστώτα ροής στη ροή ανάντη εντός κεκλιμένων αγωγών.....	57
4.3 Καθεστώτα ροής στη ροή κατόντη εντός κεκλιμένων αγωγών.....	58
4.4 Χάρτης καθεστώτων ροής σε κεκλιμένο αγωγό .....	58
4.5 $H_L$ σε κεκλιμένους αγωγούς (liquid holdup) .....	66
4.6 Πτώση πίεσης σε κεκλιμένους αγωγούς.....	70
4.7 Διαλείπουσα ροή.....	76
4.7.1 Ταχύτητα του slug.....	78
4.7.2 Ταχύτητα ολίσθησης (drift velocity).....	79
4.7.3 Slug holdup.....	82

#### **Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία Υπολογισμών και Ενδεικτικοί Υπολογισμοί**

5.1 Μεθοδολογία και σχέσεις υπολογισμών.....	85
5.2 Ενδεικτικοί υπολογισμοί και αποτελέσματα.....	100

## **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

6.1 Συμπεράσματα υπολογιστικής εφαρμογής.....110

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....115

Παράρτημα Α- Πίνακες υπολογισμών.....116

Βιβλιογραφία

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στην μετάβαση από την δακτυλιοειδή στην ανάμεικτη ροή. Στο σύνολο των βιβλιογραφικών αναφορών τα ρευστά είναι αέρας και νερό .....	55
Πίνακας 4.1: Παράμετροι για τον χάρτη καθεστώτων ροής των Weisman & Kang .....	62
Πίνακας 5.1: Ανεξάρτητες μεταβλητές υπολογιστικής εφαρμογής .....	88
Πίνακας 5.2: Δεδομένα γεωμετρίας αγωγού υπολογιστικής εφαρμογής..	89
Πίνακας 5.3: Σταθερές ορίων καθεστώτων ροής $L_1, L_2$ .....	92
Πίνακας 5.4: Συντελεστές απόλυτης τραχύτητας .....	98
Πίνακας 5.5: Υδραυλικά μεγέθη καθεστώτος διακοπτόμενης ροής .....	101
Πίνακας 5.6: Υδραυλικά μεγέθη καθεστώτος διασκορπισμένης ροής ..	102
Πίνακας 5.7: Υπολογισμός $H_L(\theta)$ , για καθοδική ροή για διάφορες τιμές της γωνίας $\theta$ .....	106
Πίνακας 5.8: Κατανομή πίεσης για καθοδική ροή για διάφορες τιμές της γωνίας $\theta$ .....	107
Πίνακας 6.1: Καθεστώτα ροής κατά Pothof .....	112
Πίνακας A.1: δεδομένα ροής .....	117
Πίνακας A.2: καθεστώτα ροής .....	118
Πίνακας A.3: Υπολογισμός $H_L(0)$ .....	119
Πίνακας A.4: Υπολογισμός παραμέτρων $C+, C-$ .....	121
Πίνακας A.5: Υπολογισμός παραμέτρου $\psi$ για ανοδική ροή .....	122
Πίνακας A.6: Υπολογισμός παραμέτρου $H_L(\theta)$ για ανοδική ροή .....	123
Πίνακας A.7: Υπολογισμός παραμέτρου $\psi$ για καθοδική ροή .....	125
Πίνακας A.8: Υπολογισμός παραμέτρου $H_L(\theta)$ για καθοδική ροή .....	126
Πίνακας A.9: Πυκνότητα διφασικού μίγματος ( $\rho_{tp}$ : two-phase mixture density) για ανοδική ροή .....	128
Πίνακας A.10: Πυκνότητα διφασικού μίγματος ( $\rho_{tp}$ : two-phase mixture density) για καθοδική ροή .....	129
Πίνακας A.11: Παράμετρος $y$ για ανοδική ροή .....	130

Πίνακας A.12: Παράμετρος $y$ για καθοδική ροή .....	132
Πίνακας A.13 Παράμετρος $S$ για ανοδική ροή .....	133
Πίνακας A.14: Παράμετρος $S$ για καθοδική ροή .....	134
Πίνακας A.15: Λόγος $f_{ip}/f_{ns}$ για ανοδική ροή .....	135
Πίνακας A.16: Λόγος $f_{ip}/f_{ns}$ για καθοδική ροή .....	137
Πίνακας A.17: $f_{ns}$ για την ανοδική και την καθοδική ροή .....	138
Πίνακας A.18: συντελεστής $f_{ip}$ για ανοδική ροή, για διάφορες κλίσεις του αγωγού .....	139
Πίνακας A.19: συντελεστής $f_{ip}$ για καθοδική ροή, για διάφορες κλίσεις του αγωγού .....	141
Πίνακας A.20: $dp/dz$ για ανοδική ροή, για διάφορες κλίσεις του αγωγού .....	142
Πίνακας A.21: $dp/dz$ για καθοδική ροή, για διάφορες κλίσεις του αγωγού .....	143

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση στρωτής και τυρβώδους ροής .....	13
Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Moody .....	18
Σχήμα 2.3: Απεικονίσεις διφασικής ροής νερού-αέρα .....	20
Σχήμα 2.4: Περιοχές ροής σε οριζόντια διφασική ροή νερού-αέρα .....	28
Σχήμα 3.1: Είδη ροών σε κατακόρυφο αγωγό .....	30
Σχήμα 3.2: Χάρτης καθεστώτων ροής κατάντη κατά Oshinowo .....	40
Σχήμα 3.3: Χάρτης καθεστώτων ροής κατάντη κατά Yamazaki, Yamaguchi .....	40
Σχήμα 3.4: Χάρτης καθεστώτων ροής κατάντη κατά Paras .....	41
Σχήμα 3.5: Χάρτης καθεστώτων ροής κατάντη κατά Yijun, Rezkallah .....	41
Σχήμα 3.6: Καθεστώς κατακόρυφης δακτυλιοειδούς ροής κατά Geraci .....	42
Σχήμα 3.7: Καθεστώτα δακτυλιοειδούς ροής βάσει της κατεύθυνσης ροής των ρευστών .....	43
Σχήμα 3.8: Μεταβάσεις μεταξύ των τριών τύπων ροής της δακτυλιοειδούς ροής .....	44
Σχήμα 3.9: Δομή δακτυλιοειδούς καθεστώτος ροής (a) πυρήνας δομής δακτυλιοειδούς με δέσμη καθεστώτος ροής (Bennett, 1965) και (b) κύματα στο υγρό φιλμ που προκλήθηκε από τα σταγονίδια (Lao, 2004) .....	47

Σχήμα 3.10: Μηχανισμοί συμπαρασυρμού μέσω (a) υποσκαφής κυμάτων και (b) κύλισης κυμάτων (Hewitt και Hall-Taylor, 2004) .....	48
Σχήμα 3.11: Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στην ταχύτητα μετάβασης του αερίου (a) μέσω της μεθόδου αναστροφής (b) μέσω της μεθόδου πλημμύρας (Τα ρευστά είναι αέρας και νερό) .....	54
Σχήμα 4.1: Καθεστώτα ροής σε διφασική ροή σε κεκλιμένο αγωγό .....	57
Σχήμα 4.2: : Γενικευμένος χάρτης καθεστώτων ροής των Weisman & Kang .....	61
Σχήμα 4.3: Σχέσεις για $H_L$ των Baker & Flanigan .....	67
Σχήμα 4.4: Κλάσμα όγκου υγρού για διάφορους αριθμούς Froude του Guzhov ....	69
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα κλίσης πίεσης . .....	71
Σχήμα 4.6: Χάρτης καθεστώτων ροής των Beggs& Brill .....	72
Σχήμα 4.7: Απεικόνιση διαλείπουσας ροής .....	77
Σχήμα 4.8: Πλευρική όψη του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε από τον Weber ....	81
Σχήμα 5.1 Καθεστώτα ροής των Beggs & Brill .....	91
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα μεταβολής $H_L(\theta)$ για ανοδική ροή .....	103
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα μεταβολής $H_L(\theta)$ για καθοδική ροή .....	104
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα μεταβολής $H_L(\theta)$ για διάφορες κλίσεις αγωγού (ανοδική ροή) .....	105
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα μεταβολής $H_L(\theta)$ για διάφορες κλίσεις αγωγού (καθοδική ροή) .....	105
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα κατανομής πίεσης για διάφορες κλίσεις αγωγού (ανοδική ροή) .....	108
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα κατανομής πίεσης για διάφορες κλίσεις αγωγού (καθοδική ροή) .....	108



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

## 1.1 Προσδιορισμός του αντικειμένου

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές τεχνικής φύσεως, προκύπτουν ζητήματα, για την αντιμετώπιση-λύση των οποίων απαιτούνται γνώσεις της επιστήμης της Υδραυλικής και της Μηχανικής Ρευστών.

Υδραυλική ονομάζεται η εφαρμοσμένη Υδρομηχανική. Αποτελεί τεχνική επιστήμη με κύριο αντικείμενο την εκμετάλλευση του ύδατος. Η Μηχανική των Ρευστών (γνωστή και ως Ρευστομηχανική) είναι ο κλάδος των φυσικών επιστημών που έχει ως αντικείμενο μελέτης τη στατική, την κινηματική και τη δυναμική των ρευστών (δηλαδή, των υγρών και των αερίων), ενώ η υδραυλική πραγματεύεται τους τρόπους "χαλιναγώγησης", αξιοποίησης και εκμετάλλευσης των υδάτων. (*Wikipedia*).

Ο χώρος εφαρμογής της υδραυλικής (τεχνικής) είναι τεράστιος. Τα αρδευτικά, τα αποστραγγιστικά και τα αντιπλημμυρικά έργα, η ύδρευση και αποχέτευση, η παντός είδους εκμετάλλευση της υδραυλικής δύναμης, τα λιμενικά έργα, οι θαλάσσιες ποτάμιες και λιμναίες συγκοινωνίες, οι διώρυγες αποτελούν αντικείμενα της υδραυλικής. Συνεπώς η συμβολή της στην ανάπτυξη του πολιτισμού θεωρείται σημαντική.

Η κατανόηση της ροής υπό πίεση σε κλειστούς αγωγούς είναι απαραίτητη για τον επιτυχημένο σχεδιασμό πολύπλοκων δικτύων. Ιστορικά, ο σχεδιασμός δικτύων ύδρευσης αποτέλεσε το πρώτο μεγάλο τεχνολογικού ενδιαφέροντος πεδίο εφαρμογής της υδραυλικής των



κλειστών αγωγών. Σήμερα, πέρα από τον σχεδιασμό δικτύων ύδρευσης και άρδευσης, ο σχεδιασμός δικτύων μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου βασίζεται στις ίδιες αρχές. (Λιακόπουλος, 2014).

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές μεταφοράς ρευστών μέσω κλειστών αγωγών, εμφανίζεται διφασική ροή. Οι διφασικές ροές εμφανίζονται συχνά στη φύση και σε ένα πλήθος βιομηχανικών διεργασιών. Η διφασική ροή αερίου-υγρού σε οριζόντιους ή σε κεκλιμένους αγωγούς τα τελευταία 40 χρόνια έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πλήθος των εφαρμογών στις οποίες συναντάται, όπως σε συστήματα διακίνησης των γεωθερμικών ρευστών και των προϊόντων πετρελαίου, στη λειτουργία πυρηνικών και χημικών αντιδραστήρων καθώς και στα συστήματα ψύξης και θέρμανσης. Αν και πολλές σημαντικές έρευνες έχουν γίνει στο παρελθόν, οι προσπάθειες να γίνει κατανοητή η θεμελιώδης συμπεριφορά και οι μηχανισμοί της διφασικής ροής είναι προφανώς μια συνεχιζόμενη διαδικασία.

Η διφασική ροή νερού-αέρα είναι μια ανεπιθύμητη κατάσταση, η οποία προκύπτει σε πολλά συστήματα μεταφοράς νερού ή ακόμη και αποβλήτων. Ο αέρας «φυλακίζεται» μέσα στα κανάλια αγωγών και επηρεάζει αρνητικά ολόκληρο το σύστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της αρνητικής αυτής επίπτωσης είναι οι φυσσαλίδες αέρα στους αγωγούς υδροηλεκτρικών έργων, που μπορούν να προκαλέσουν ακόμη φαινόμενα υποστροφής της ροής καθώς επίσης και ανεπίτρεπτες αυξήσεις πίεσης. (Αζήζ Ερσάν 2006).

Πληθώρα μελετών και αναλύσεων που αφορούν τη διφασική ροή σε οριζόντιους, ή σχεδόν οριζόντιους αγωγούς έχουν πραγματοποιηθεί και είναι διαθέσιμες στην ελληνική βιβλιογραφία. Αντιθέτως, η διφασική ροή σε κεκλιμένους αγωγούς, έχει μελετηθεί μόνο από ξένους ερευνητές, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Σημαντικά

χαρακτηριστικά της διφασικής ροής σε κεκλιμένους αγωγούς είναι ο συμπαρασυρμός αέρα (air entrainment) και η πτώση πίεσης που προκύπτει, όπου «συμπαρασυρμός» είναι το κλάσμα της περιοχής του υγρού που βρίσκεται στον αέριο πυρήνα με τη μορφή μικρών σταγονιδίων ως προς τη συνολική υγρή παροχή (Chanson, 1997).

Η παρουσία του αέρα σε συστήματα αγωγών μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα, όπως η απώλεια μεταφορικής ικανότητας, διατάραξη της ροής, μειωμένη αποδοτικότητα αντλιών και στροβίλων, επιπτώσεις στα υλικά των σωλήνων και στη δομή των αγωγών γενικότερα. Μπορεί επίσης να αλλάξει τις ιδιότητες του υγρού και να δημιουργήσει περιβαλλοντικά προβλήματα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών της διφασικής ροής σε κεκλιμένους αγωγούς. Ειδικότερα, θα μελετηθούν τα καθεστώτα ροής που αναπτύσσονται και τα βασικά υδραυλικά μεγέθη για κλίσεις από  $-90^\circ$  έως  $90^\circ$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι θα συμπεριληφθούν οριζόντιοι και κατακόρυφοι αγωγοί, καθώς και αγωγοί όλων των κλίσεων, τόσο σε ανοδική, όσο και σε καθοδική ροή. Το επιθυμητό επίτευγμα αυτής της προσπάθειας, είναι η εργασία αυτή να αποτελέσει ένα τεχνικό εγχειρίδιο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιος που γνωρίζει μηχανική ρευστών αλλά δε γνωρίζει πολλά ή τίποτα γύρω από τη διφασική ροή. Δεδομένου ότι στην ελληνική βιβλιογραφία υπάρχει κενό σε σχέση με τη διφασική ροή σε κεκλιμένους αγωγούς, θα γίνει προσπάθεια για την άρτια περιγραφή τόσο του φαινομένου όσο και της μεθοδολογίας υπολογισμού των βασικών υδραυλικών μεγεθών. Η ανάλυση θα επικεντρωθεί κυρίως στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε κεκλιμένους αγωγούς με διφασική ροή και στα μεγέθη γύρω από τον συμπαρασυρμό του αέρα.

## 1.2 Ανασκόπηση της Βιβλιογραφίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το φαινόμενο του συμπαρασυρμού αέρα και τις επιπτώσεις που έχει αυτό στη ροή ρέοντος ρευστού (νερού ειδικότερα) σε κεκλιμένους αγωγούς. Αναπτύσσεται διαφασική ροή, η οποία αναλύεται τόσο θεωρητικά, όσο και πρακτικά-υπολογιστικά.

Το εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας [1<sup>ο</sup> κεφάλαιο] περιλαμβάνει την περιγραφή του αντικειμένου της, την βιβλιογραφική ανασκόπηση και την παρουσίαση της δομής της εργασίας.

Αρχικά [2<sup>ο</sup> κεφάλαιο] παρουσιάζονται κάποιες εισαγωγικές έννοιες της επιστήμης της Μηχανικής Ρευστών (*Ιάκωβος Γ. Γκανούλης, 2007*), που αφορούν κυρίως τα είδη ροής και τα βασικά υδραυλικά μεγέθη (*Παπαϊωάννου Άγγελος, 2002*), ώστε να γίνει κατά το δυνατόν πιο ομαλή η μετάβαση στα επόμενα κεφάλαια, που αποτελούν τον κορμό της εργασίας, αλλά και για να υπενθυμιστούν κάποιες βασικές έννοιες στον αναγνώστη [*Πρίνος Παναγιώτης 2007*].

Περιγράφεται αναλυτικά το φαινόμενο του συμπαρασυρμού αέρα (*Chanson, 1997*), το φαινόμενο της εμφάνισης και ανάπτυξης της διαφασικής ροής νερού-αέρα (*Dong Liu, 2005*), ενώ παράλληλα αναφέρονται συνοπτικά οι γεωμετρίες στις οποίες δύναται να αναπτυχθεί το συγκεκριμένο είδος ροής, καθώς επίσης και οι προϋποθέσεις υπό τις οποίες επιτυγχάνεται αυτό.

Έπειτα, [3<sup>ο</sup> κεφάλαιο] γίνεται θεωρητική ανάλυση της διαφασικής ροής σε κατακόρυφο και σε οριζόντιο αγωγό. Αναλύονται τα καθεστώτα ροής που αναπτύσσονται στις παραπάνω γεωμετρίες, όπως αυτά περιγράφονται από πολλούς ερευνητές [*Nichols (1965), Golan (1968), Oshinowo (1971)*,

*Yamazaki και Yamaguchi (1979), Paras (1982), Crawford (1983), Nguyen (1975), Usui και Sato (1989), Yijun και Rezkallah (1993), Abdullah και Al-Khatab (1994)*]. Στη συνέχεια αναλύονται επίσης θεωρητικά κάποια βασικά μεγέθη και η επίδραση αυτών στην κατακόρυφη ροή.

Ακολουθεί [4<sup>ο</sup> κεφάλαιο] η ανάλυση της διαφασικής ροής σε έναν κλειστό κεκλιμένο αγωγό. Κρίθηκε απαραίτητη και ενδιαφέρουσα από κάθε άποψη αυτή η μελέτη, καθώς όπως τονίζουν σε μελέτη τους οι *Hasan και Kabir (1988)*, τα μοντέλα και οι συσχετισμοί που αναπτύχθηκαν για οριζόντια ή κάθετη ροή δεν είναι πάντοτε εφαρμόσιμοι, δεδομένου ότι οι εμπορικοί αγωγοί ακολουθούν τις κανονικές διακυμάνσεις του εδάφους και αποτελούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από κεκλιμένα τμήματα με φορά προς τα πάνω ή προς τα κάτω, γεγονός που συνεπάγεται πως προκύπτουν διαφασικές ροές ανάντη και κατάντη κεκλιμένων αγωγών.

Πραγματοποιείται λοιπόν ανάλυση του φαινομένου του συμπαρασυρμού αέρα και της μελέτης της ροής στη συγκεκριμένη γεωμετρία (*Pothof, Clemens, 2011*). Περιγράφονται τα καθεστώτα ροής ανάντη και κατάντη ενός κεκλιμένου αγωγού, παρουσιάζονται χάρτες καθεστώτων ροής (*Weisman και Kang, 1981*), ενώ παρουσιάζονται και οι σχέσεις υπολογισμού απαραίτητων υδραυλικών μεγεθών (*Beggs και Brill, 1973*).

Ακολουθεί [5<sup>ο</sup> κεφάλαιο] η παρουσίαση υπολογιστικής εφαρμογής βάσει της μεθοδολογίας των *Beggs και Brill (1973)* όπου εφαρμόζονται όλες εκείνες οι υδραυλικές σχέσεις που παρουσιάζονται στα προηγούμενα κεφάλαια. Στη συνέχεια, μετά τη θεωρητική και πρακτική-υπολογιστική ανάλυση του φαινομένου, παρατίθενται οι πίνακες αποτελεσμάτων, συνοδευόμενοι από διαγράμματα. Ουσιαστικά πραγματοποιείται μια ποιοτική και ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων τόσο για διαφορετικές κλίσεις αγωγού στην ίδια εφαρμογή όσο και σε σχέση με πειραματικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Στον επίλογο της διπλωματικής εργασίας [6<sup>ο</sup> κεφάλαιο], παρατίθενται τα συμπεράσματα της μελέτης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Οι πλήρεις πίνακες υπολογισμών παρατίθενται στο τέλος [Παράρτημα Α].

### **1.3 Δομή-προεπισκόπηση διπλωματικής εργασίας**

Η ανωτέρω αναλυθείσα ροή, οδηγεί στη δομή της διπλωματικής εργασίας σε κεφάλαια και παραρτήματα ως ακολούθως:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2: Διφασική ροή-Συμπαρασυρμός αέρα

Κεφάλαιο 3: Διφασική ροή σε κατακόρυφο αγωγό

Κεφάλαιο 4: Διφασική ροή σε κεκλιμένο αγωγό

Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία υπολογισμών και Ενδεικτικοί υπολογισμοί

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Παράρτημα Α: Πίνακες υπολογισμών

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Διφασική ροή-Συμπαρασυρμός αέρα

### 2.1 Ρευστό

Από τεχνικής άποψης, τα υλικά σώματα ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα ρευστά και τα στερεά. Κριτήριο για την ταξινόμηση αυτή είναι ο τρόπος με τον οποίο αντιδρούν τα διάφορα υλικά όταν υφίστανται την επίδραση διατμητικής τάσης (διατμητική τάση ονομάζεται το πηλίκο μιας διατμητικής -ή εφαπτομενικής- δύναμης που ασκείται πάνω σε μια επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής). Η διατμητική δύναμη έχει διεύθυνση παράλληλη προς το επίπεδο της θεωρούμενης επιφάνειας. Έτσι, ως ρευστά σώματα χαρακτηρίζονται τα υλικά τα οποία υπό την επίδραση διατμητικής τάσης (οσοδήποτε μικρή κι αν είναι) υφίστανται συνεχή παραμόρφωση, δηλαδή ρέουν (*Νερσισιγιάν, 2002*).

Με τον όρο ρευστό επομένως, χαρακτηρίζεται μια οποιαδήποτε ουσία που παρουσιάζει ροή. Τέτοιες ουσίες είναι τα υγρά και τα αέρια ή και στερεά που βρίσκονται (τα τελευταία) σε φάση ροής. Συνεπώς ο όρος ρευστό χαρακτηρίζει συνοπτικά τα υγρά και τα αέρια σώματα των οποίων οι δυνάμεις συνοχής είναι χαλαρές με συνέπεια η μάζα τους να ολισθαίνει ελεύθερα (περίπτωση υγρών) ή να μετατοπίζεται ανεξάρτητα (περίπτωση αερίων) έτσι ώστε να λαμβάνει κάθε φορά το σχήμα του χώρου που καταλαμβάνουν ή του μέσου δια του οποίου κινούνται αυτά (*Γκανούλης, 2007*).

Σημειώνεται ότι το φαινόμενο της ροής που χαρακτηρίζει γενικά τα ρευστά είναι ακριβώς τούτο: ότι σε αυτά δεν παρατηρείται κατάτμηση της μάζας τους όταν ασκούνται σε αυτήν εξωγενείς δυνάμεις αλλά αντίθετα αυτή αντιδρά ολισθαίνοντας συνεχώς ή μετατοπίζεται εξ ολοκλήρου ανεξάρτητα και συνεχώς. Φαινόμενο που δεν συμβαίνει στη μάζα των στερεών, υποκείμενη σε κατάτμηση, κάμψη, στρέψη ή άλλη

παραμόρφωση ή ακόμα και επαναφορά στην αρχική κατάσταση, εκτός και αν βρεθεί σε "φάση ροής" οπότε και έχει πάψει τότε να θεωρείται στερεό.

Τα ρευστά παρουσιάζουν μόνο μία δύναμη που ασκούν προς τα έξω την υδροστατική πίεση και η οποία εφαρμόζεται πάντα κάθετα προς οποιοδήποτε σημείο των τοιχωμάτων του χώρου που βρίσκονται. Τα ρευστά διακρίνονται στις τρεις ακόλουθες κατηγορίες:

#### Ιδανικά ρευστά ή τέλεια ρευστά ή και ακόμα ιδεώδη ή ιδεατά:

Χαρακτηρίζονται υποθετικά ρευστά (συνήθως υγρά) τα οποία είναι τελείως ασυμπίεστα και καμία εσωτερική τριβή των μορίων τους δεν αναπτύσσεται κατά τη ροή τους, όπως επίσης και καμία δύναμη συνάφειας μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων των δοχείων ή αγωγών που περιέχονται. Είναι προφανές ότι αυτά αποτελούν υποθετική θεωρητική κατάσταση και μόνο, που λαμβάνεται υπόψη στις έρευνες και μελέτες των Νόμων των ρευστών διευκολύνοντας έτσι κατά πολύ την εξαγωγή συμπερασμάτων με αντίστοιχους υπολογισμούς. Παρά ταύτα ορισμένα φυσικά ρευστά με πολύ χαμηλό ιξώδες και μικρή θερμική αγωγιμότητα είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν, βέβαια κατά προσέγγιση, ως ιδανικά ρευστά.

#### Φυσικά ρευστά καλούμενα και Νευτώνεια ρευστά:

Χαρακτηρίζονται όσα εμφανίζουν τις αποτρεπτικές ιδιότητες των προηγούμενων π.χ. το νερό, υδατικά διαλύματα, ορισμένοι υδατικοί διαλύτες, τα αραιά αιωρήματα και γαλακτώματα, καθώς και όλα τα αέρια.

#### Θιξότροπα ρευστά ή μη νευτώνεια ρευστά:

Τέτοια χαρακτηρίζονται συνήθως υγρά που παρουσιάζουν μικρότερης κλίμακας ιδιότητες των φυσικών ρευστών, δηλαδή

χαμηλό ιξώδες, ιδιαίτερα όταν υποβάλλονται σε ανάδευση και γίνονται περισσότερο λεπτόρρευστα, όπως, για παράδειγμα, το τυπογραφικό μελάνι, οι διάφορες βαφές (ελαιοχρώματα κ.λπ.). Επίσης σε αυτήν την κατηγορία υπάγονται τα πυκνά αιωρήματα καθώς και τα διάφορα πυκνά γαλακτώματα.

Κύρια στοιχεία της διαφορετικότητας των παραπάνω διακρίσεων των ρευστών είναι οι τρεις χαρακτηριστικές ιδιότητές τους: του **συμπιεστού**, της **συνοχής** μεταξύ των μορίων τους που ανθίσταται στη διάσπασή τους κατά τη ροή και που εκδηλώνεται ως εσωτερική τριβή, καλούμενη συντελεστής τριβής, ή συντελεστής ιξώδους ή πιο απλά ιξώδες και τέλος από τη **συνάφεια** των υγρών που παρατηρείται μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων των δοχείων ή αγωγών που μεταφέρονται. Η παραπάνω διάκριση των ρευστών προτάθηκε στα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα και ακολουθείται μέχρι και σήμερα (Λουκόπουλος, 2007).

## 2.2 Μηχανική Ρευστών

Η Στατική των Ρευστών επικεντρώνει το ενδιαφέρον της στη μελέτη της υδροστατικής πίεσης και τον υπολογισμό των δυνάμεων τις οποίες ασκούν τα ακίνητα ρευστά πάνω σε επιφάνειες πεπερασμένων διαστάσεων.

Η Κινηματική των Ρευστών ασχολείται με την περιγραφή της κίνησης των ρευστών και εξετάζει, κατά κύριο λόγο, μεγέθη που έχουν άμεση σχέση με αυτήν. Τέτοια μεγέθη είναι, π.χ., η ταχύτητα, η επιτάχυνση και η παροχή του ρευστού.

Τέλος, η Δυναμική των Ρευστών, η οποία αποτελεί και τον πιο σημαντικό τομέα της Ρευστομηχανικής, ενδιαφέρεται κυρίως για τις μεταβολές



ενέργειας και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη ροή των ρευστών. Η Ρευστομηχανική θεμελιώνεται πάνω στις βασικές αρχές και τους νόμους της Μηχανικής και, σε μικρότερο βαθμό, της Θερμοδυναμικής (Παπαϊωάννου, 2002).

### 2.3 Είδη ροών

Στην Κινηματική και τη Δυναμική με τον όρο ροή των ρευστών καλείται ειδικότερα η κίνηση των σωματιδίων των ρευστών, επειδή ακριβώς αυτά ρέουν, η οποία όμως κίνηση περιλαμβάνει επίσης τις έννοιες της δύναμης που προκαλεί την κίνηση, της ταχύτητας καθώς και της επιτάχυνσης του ρευστού.

Η κίνηση ενός ρευστού προκαλείται από διατμητικές τάσεις καθώς και από μη ισοζυγισμένες κάθετες τάσεις (πιέσεις) που ασκούνται στο ρευστό. Η ανάλυση των δυνάμεων αυτών αποτελεί το αντικείμενο μελέτης και έρευνας της "δυναμικής των ρευστών", ενώ η σπουδή των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των δυνάμεων αυτών που παράγουν τη κίνηση, δηλαδή την ταχύτητα και την επιτάχυνση, με την αντίστοιχη περιγραφή και απεικόνιση της κίνησης, αποτελούν αντικείμενα μελέτης της "κινηματικής των ρευστών".

Η μελέτη της ροής των ρευστών επιτελείται με τους ακόλουθους τρεις βασικούς τρόπους: την "μακροσκοπική", την "διαφορική", και την "διαστατική ανάλυση" (Βλαχάκης, 2017).

#### Μακροσκοπική ανάλυση

Στη μακροσκοπική ανάλυση εξετάζεται ο όγκος ελέγχου ρευστού. Ως όγκος ελέγχου ορίζεται μια περιοχή του χώρου με πεπερασμένες διαστάσεις εντός της οποίας συμβαίνει ροή μάζας ρευστού. Επειδή όμως

αυτή η μάζα κινούμενη αποτελεί φορέα ορμής (ενέργειας), θεωρείται ότι ο όγκος ελέγχου ανταλλάσσει ενέργεια με τον περιβάλλοντα χώρο.

Έχοντας λοιπόν υπόψη τις αρχές διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας στον όγκο ελέγχου του ρευστού, προκύπτουν οι ολοκληρωμένες ή μακροσκοπικές εξισώσεις συνέχειας ορμής και ενέργειας αντίστοιχα. Έτσι λύνοντας τις εξισώσεις αυτές καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των μέσων τιμών των διαφόρων παραμέτρων του ρευστού όπως είναι π.χ. η μέση ταχύτητα ροής του, η πτώση πίεσης κ.λπ.

#### Διαφορική ανάλυση

Στη Διαφορική ανάλυση εξετάζεται μεν ο όγκος ελέγχου ρευστού, όπως παραπάνω πλην όμως σε απειροστές διαστάσεις όπου και εφαρμόζονται ομοίως οι αρχές διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Έτσι ομοίως με την εφαρμογή τους προκύπτουν οι διαφορικές εξισώσεις της συνέχειας αυτών, η επίλυση των οποίων με τη χρήση οριακών αρχικών συνθηκών παρέχουν ακριβείς τιμές, ή και κατανομές των ιδιοτήτων των ρευστών, όπως π.χ. η ταχύτητα, η πίεση, η διατμητική τάση κ.λπ. Εξ αυτών καθίσταται δυνατός ακόμη και ο υπολογισμός των μέγιστων τιμών αυτών των μεγεθών.

#### Διαστατική ανάλυση

Η διαστατική ανάλυση εφαρμόζεται στις περιπτώσεις εκείνες της ροής των ρευστών που δεν επιδέχονται ακριβή θεωρητική λύση, ή η μαθηματική επίλυσή τους δεν είναι δυνατή. Έτσι στις περιπτώσεις αυτές ακολουθείται η πειραματική μελέτη αυτών όπου και εφαρμόζεται η διαστατική ανάλυση κατά την οποία το πλήθος των διαφόρων μεγεθών συγκροτούν, προς ευκολία συσχέτισής τους, περιορισμένο αριθμό αδιάστατων ομάδων.

Για τη πληρέστερη μελέτη και ανάλυση της ροής των ρευστών, από τα τέλη του 18ου αιώνα, προτάθηκε η διάκριση της ροής των ρευστών στις τρεις ακόλουθες κατηγορίες - πρότυπα, αντίστοιχα με τη διάκρισή των ιδίων των ρευστών: στη ροή των τέλειων ή ιδανικών ή ιδεωδών ρευστών, τη ροή των φυσικών, ή νευτώνειων ρευστών και τη ροή των μη νευτώνειων, ή θιξότροπων ρευστών. Γενικά η ροή των ρευστών μέσα σε αγωγούς ή σωλήνες παρουσιάζει δύο τύπους-μορφές ροής. Έτσι αυτή μπορεί να είναι: είτε ομαλή, ή στρωτή, ή παράλληλη ροή, είτε στροβιλώδης ή τυρβώδης ροή.

#### Ροή ιδανικών υγρών

Στη ροή των τέλειων, ή ιδανικών, ή ιδεωδών υγρών εφαρμόζονται δύο βασικοί Νόμοι της Υδροδυναμικής:

- Ο Νόμος της συνεχείας της ροής και
- Ο Νόμος του Bernoulli.

Συναφές επίσης είναι και το Θεώρημα του Torricelli.

#### Ροή φυσικών υγρών

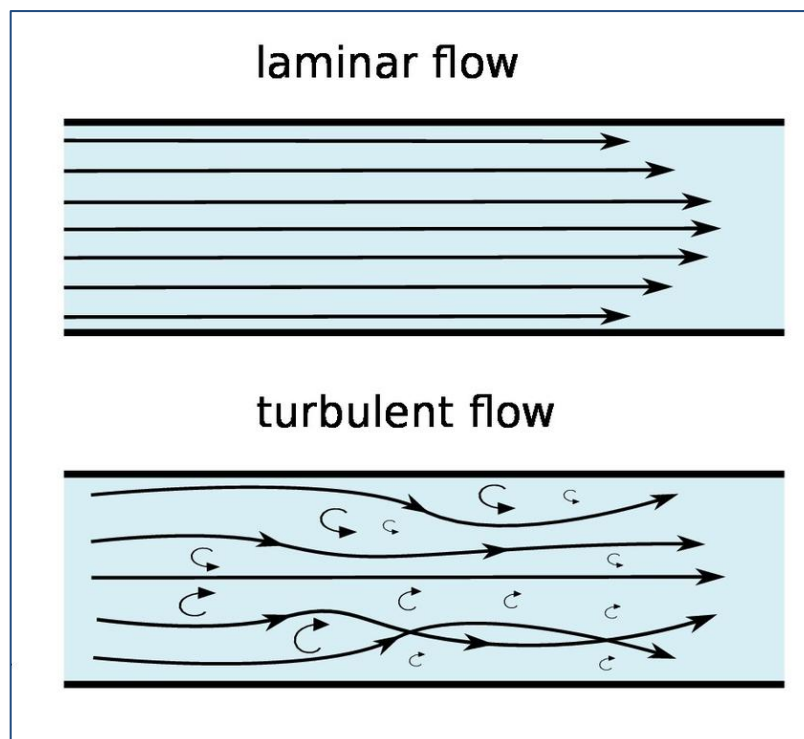
Η ροή των φυσικών υγρών είναι διάφορη από εκείνη των ιδεωδών και τούτο διότι επηρεάζονται από τα τρία χαρακτηριστικά των φυσικών υγρών, δηλαδή το συμπίεστό τους, την συνοχή των μορίων τους και την συνάφεια αυτών προς τα τοιχώματα των αγωγών.

Το συμπίεστό εν τούτοις ελάχιστα επηρεάζει τη ροή, δεδομένου ότι τα υγρά θεωρούνται πρακτικά ασυμπίεστα σε αντίθεση με τα αέρια όπου η επίρεια είναι μεγαλύτερη. Η συνοχή όμως των μορίων του φυσικού υγρού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικής τριβής μεταξύ αυτών, η οποία χαρακτηρίζεται από τον λεγόμενο συντελεστή συνεκτικότητας ή συντελεστή εσωτερικής τριβής ή συντελεστή ιξώδους.

Η συνάφεια, τέλος, προέρχεται από τη δύναμη επαφής μεταξύ του υγρού και των τοιχωμάτων του αγωγού. Αυτή εκδηλώνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα μόρια του υγρού που βρίσκονται σε επαφή με τα τοιχώματα να παρουσιάζουν μηδενική ταχύτητα, σε αντίθεση με εκείνα που βρίσκονται στο κέντρο του αγωγού και παρουσιάζουν τη μέγιστη ταχύτητα.

Δύο είναι τα βασικά είδη ροής. Ο χαρακτηρισμός αυτός της ροής γίνεται από δυναμική άποψη (συσχετισμός δυνάμεων). Έχουμε επομένως:

- στρωτή ροή
- τυρβώδης ροή



**Σχήμα 2.1:** Σχηματική απεικόνιση στρωτής και τυρβώδους ροής  
(<http://physiclessons.blogspot.gr>)

### Στρωτή ροή

Ονομάζεται η ροή που μπορεί να περιγραφεί με την παραδοχή ότι το ρευστό αποτελείται από πολλά λεπτά στρώματα που ολισθαίνουν το ένα πάνω στο άλλο. Κατά την ομαλή ροή, ή στρωτή ροή, ή παράλληλη ροή, ή μόνιμη ροή, το ρευστό ρέει σε παράλληλες προς τον άξονα του αγωγού

γραμμές δίνοντας έτσι την εικόνα της ομαλής ή στρωτής ροής. Επιπλέον όλα τα σωματίδια που διέρχονται από ένα σημείο έχουν την ίδια ταχύτητα. Συνήθης εικόνα παράλληλης ροής είναι εκείνη του νερού από τις βρύσες. Η στρωτή ροή πραγματοποιείται όταν οι δυνάμεις συνεκτικότητας (εξαιτίας των διατμητικών τάσεων, δηλαδή οι δυνάμεις τριβών που οφείλονται στην παρουσία στερεών τοιχωμάτων) είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις αδράνειας. Οι στρωτές ροές αποτελούν θεωρητική περίπτωση και πολύ σπάνια συμβαίνουν στη φύση.

### Τυρβώδης ροή

Κατά τη στροβιλώδη ροή, ή στροβιλοειδή ροή, ή τυρβώδη ροή οι γραμμές ροής του ρευστού λαμβάνουν μορφή ακανόνιστων καμπυλών οι οποίες τέμνουν συνεχώς αλλήλους, δίνοντας έτσι την εικόνα ροής με στροβιλισμούς. Στην τυρβώδη ροή τα ρευστά σωματίδια έχουν ακανόνιστη, σχεδόν τυχαία, διακυμαινόμενη κίνηση. Η ταχύτητα σε κάθε σημείο του ρευστού μεταβάλλεται με το χρόνο τόσο κατά μέγεθος, όσο και κατά διεύθυνση. Η ροή κατά στρώσεις με λείες γραμμές ροής που παρατηρείται στη στρωτή ροή, διασπάται πλήρως και συμβαίνει έντονη μακροσκοπική ανάμιξη μεταξύ δυο γειτονικών στρώσεων. Η τυρβώδης ροή πραγματοποιείται όταν οι δυνάμεις αδράνειας είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συνεκτικότητας. Στο φυσικό περιβάλλον, όλες σχεδόν οι ροές είναι τυρβώδεις. Εικόνες τυρβώδους ροής μας παρέχουν οι ποταμοί όταν παρουσιάζουν στροβίλους που μπορεί να οφείλονται σε υποκείμενα ρεύματα, σε τριβές σε βραχώδεις όχθες ή σε πετρώματα του βυθού ή σε απότομη στένωση του πλάτους τους. Τυρβώδη ροή επίσης είναι δυνατόν να προκαλέσουν και πλοία ή λέμβοι που κινούνται ενάντια στο ρεύμα του ποταμού καθώς επίσης και οι αεροστρόβιλοι που μπορεί να επηρεάσουν την άντωση του αεροπλάνου με συνέπεια να προκληθούν τρανταγμοί του σκάφους (Παπαϊωάννου, 2002).

## 2.4 Παράμετροι που επηρεάζουν την πτώση πίεσης σε μονοφασική ροή ρέοντος ρευστού

Στο σημείο αυτό, και πριν την θεωρητική ανάλυση της διφασικής ροής σε κλειστό αγωγό, κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστούν τα μεγέθη που επηρεάζουν την πτώση πίεσης σε μονοφασική ροή ρέοντος ρευστού, καθώς και οι σχέσεις υπολογισμού αυτών. Έτσι, εκτός από τα ειδικότερα συμπεράσματα που θα προκύψουν από τη μελέτη της διφασικής ροής και από τα αποτελέσματα της υπολογιστικής εφαρμογής, θα προκύψουν και συμπεράσματα όσον αφορά τα μεγέθη που επηρεάζουν τη μονοφασική και τη διφασική ροή.

### 1. Αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds (Re) είναι μια αδιάστατη παράμετρος που ορίζει τη μορφή της ροής. Είναι ο καθαρός αριθμός που ισούται με το πηλίκο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις τριβής.

Η σχέση υπολογισμού δίνεται παρακάτω:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot u^2}{\mu \cdot \frac{u}{L}} = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (2.1)$$

Όπου:

$\nu = \mu/\rho$ : συντελεστής κινηματικού ιξώδους

$\rho$ : πυκνότητα ρευστού

$u$ : μέση ταχύτητα ροής

$d$ : διάμετρος αγωγού

$\mu$ : δυναμικό ιξώδες

Ο αριθμός Reynolds μας βοηθάει να προσδιορίσουμε αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης:

### Στρωτή: $Re < 2000$

Χαρακτηριστικό της ροής αυτής είναι ότι η κίνηση πραγματοποιείται σε λείες στρώσεις παράλληλες μεταξύ τους δηλαδή χωρίς μίξη άλλων στρώσεων. Η ροή αυτή παρατηρείται όταν δυνάμεις συνοχής είναι μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό.

### Μεταβατική περιοχή: $2000 < Re < 5000$

Σε αυτήν την περιοχή του αριθμού Reynolds η κίνηση του ρευστού είναι ακανόνιστη, ασταθής και με έντονη μίξη του ρευστού.

### Τυρβώδης: $Re > 5000$

Είναι η ροή κατά την οποία οι δυνάμεις αδράνειας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο με τον οποίο ρέει το ρευστό. Άρα, προκαλούνται διαταραχές στη ροή οι οποίες μπορούν να διατηρηθούν, να μεγεθυνθούν ή να μεταφερθούν με τη ροή και με διάχυση να καταλάβουν ένα μεγάλο τμήμα της διατομής του αγωγού ή ακόμη και ολόκληρη τη διατομή.

## **2. Απώλειες λόγω τριβών**

Γνωρίζουμε πως η αρχή διατήρησης της ενέργειας ή αλλιώς εξίσωση Bernoulli (σχέση 2.2), ισχύει μεταξύ δύο σημείων του ρευστού που ικανοποιούν τις εξής προϋποθέσεις:

- το ρευστό είναι ασυμπίεστο
- το ρευστό είναι συνεκτικό
- η ροή είναι μόνιμη

$$d\left(\frac{P}{\rho} + g \cdot z + \frac{U^2}{2}\right) = 0 \quad (2.2)$$

Αυτό σημαίνει ότι η σχέση 2.2 ισχύει για ένα ιδανικό ρευστό. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, σε πραγματικές ροές οι προϋποθέσεις αυτές δεν ισχύουν και υπάρχουν απώλειες. Αποδεικνύεται θεωρητικά και

πειραματικά πως σε έναν κλειστό αγωγό με σταθερή εσωτερική διατομή, οι απώλειες λόγω τριβών εξαρτώνται από τη φύση του ρευστού, την ταχύτητά του, όπως επίσης και από τα κατασκευαστικά στοιχεία του αγωγού, το μήκος, τη διάμετρό του, την τραχύτητά του, κλπ. Οι απώλειες αυτές δίνονται από τη σχέση Darcy και Weisbach:

$$h_f = F \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (2.3)$$

Όπου:

$h_f$ : απώλειες

$l$ : το μήκος του αγωγού

$d$ : διάμετρος αγωγού

$\frac{u^2}{2g}$ : κινητό ύψος ή ύψος κινητικής ενέργειας

$F$ : ο αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών που εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds και την τραχύτητα του αγωγού:

$$F = c \cdot \left( a + \frac{b}{d} \right) \quad (2.4)$$

Όπου:

$a, b$ : σταθερές του αγωγού

$d$ : διατομή του αγωγού

$c$ : συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από τη διατομή  $L$

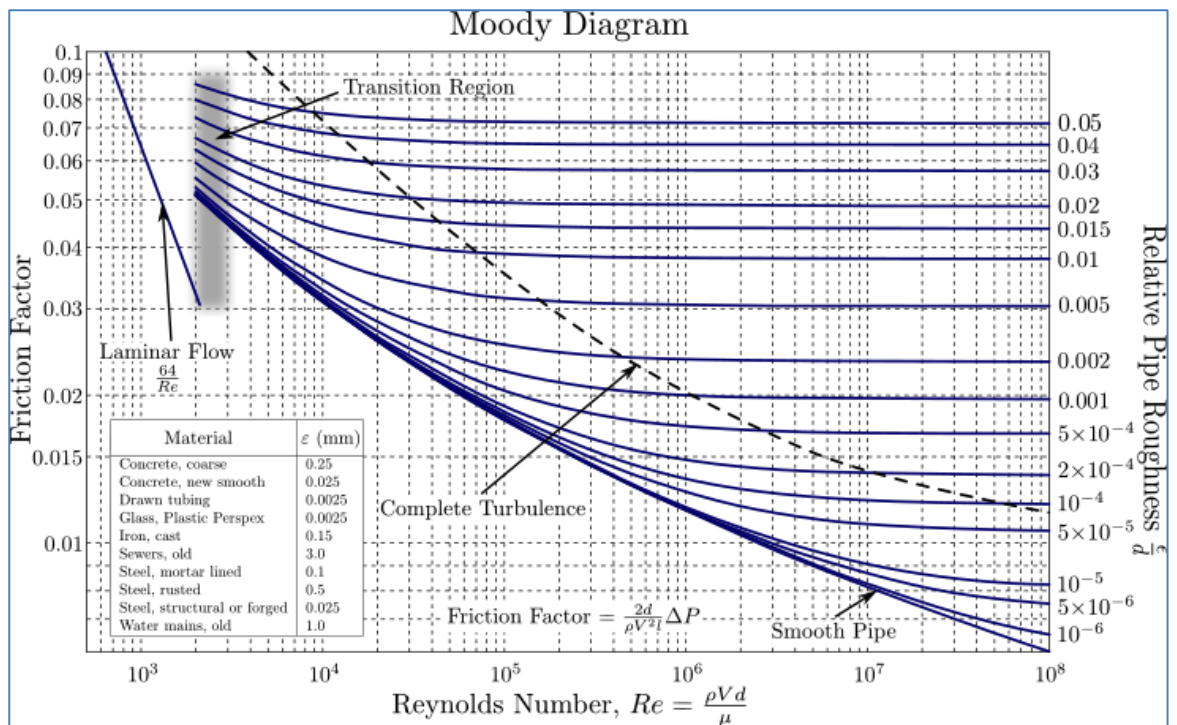
Η παραπάνω σχέση είναι γενική και ισχύει για κάθε αγωγό οποιασδήποτε διατομής και για κάθε μορφή ροής.

Εναλλακτικά, ο συντελεστής τριβής μπορεί να προσδιοριστεί από το διάγραμμα Moody. Το εν λόγω διάγραμμα δείχνει το συντελεστή τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds. Ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από τον  $Re$  και τον παράγοντα  $E/d$  που αντιστοιχεί στη σχετική τραχύτητα του αγωγού. Αλλάζοντας αυτόν τον παράγοντα ο Moody, σχεδίασε μια



ομάδα ενδεικτικών καμπυλών. Στην περιοχή στρωτής ροής όλες οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές του παράγοντα  $E/d$  ταυτίζονται με τη μοναδική καμπύλη  $64/Re$ . Προκύπτει δηλαδή ότι οι αγωγοί στη στρωτή ροή έχουν λεία συμπεριφορά ανεξάρτητα από την τραχύτητά τους. Όσο αυξάνεται ο  $Re$ , το πάχος του οριακού στρώματος ελαττώνεται με αποτέλεσμα οι καμπύλες της ομάδας να αποσπώνται από τη λεία καμπύλη.

Δίνεται το διάγραμμα Moody:



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Moody ([https://en.wikipedia.org/wiki/Moody\\_chart](https://en.wikipedia.org/wiki/Moody_chart))

## 2.5 Διφασική ροή

Πολυφασική ροή (multiphase flow) ονομάζεται η ταυτόχρονη ροή δύο ή περισσότερων φάσεων εντός αγωγού. Με τον όρο φάση δεν εννοούμε αναγκαστικά κατάσταση της ύλης αλλά μπορεί να έχουμε πολυφασική ροή ακόμη και αν έχουμε ταυτόχρονη ροή δύο ή περισσότερων υγρών ή

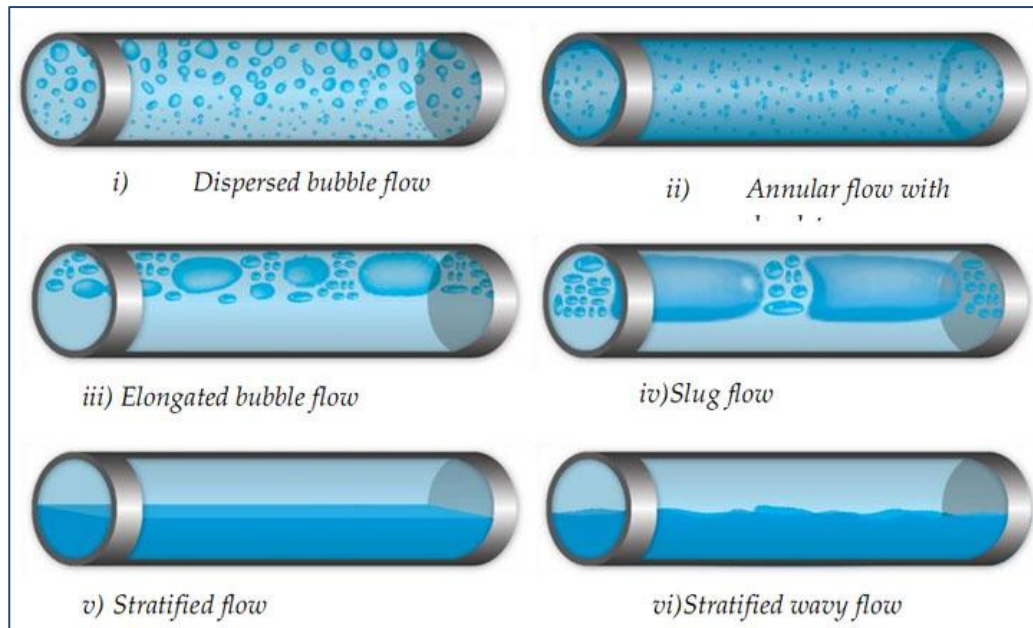
στερεού διαφόρων μεγεθών μαζί με ρευστό. Έτσι σε μια ροή που υπάρχουν ταυτόχρονα τρία υγρά, τρία αέρια και ένα στερεό (σε κόκκους) έχουμε 7-φασική ροή.

Σε πολυφασική ροή αέρα-στερεών σωματιδίων η ταχύτητα του αέρα πρέπει να είναι τόση ώστε τα σωματίδια να μεταφέρονται με αιώρηση. Το είδος αυτό ροής ονομάζεται πνευματική μεταφορά. Η πνευματική μεταφορά χωρίζεται σε αραιή όταν ο λόγος παροχής μαζών των σωματιδίων προς αυτής του φορέα (αέρας) είναι μικρός και σε πυκνή όταν ο παραπάνω λόγος είναι μεγάλος. Σε πολυφασική ροή όπου ο φορέας είναι νερό έχουμε υδραυλική μεταφορά.

Στην πνευματική μεταφορά υπάρχουν δύο θεωρίες για την προσέγγιση της:

α) Η θεωρία της ομογενούς διφασικής ροής όπου αέρας και σωματίδια θεωρούνται σαν ψευδο-ρευστό οι ιδιότητες του οποίου είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος των ιδιοτήτων των δύο φάσεων. Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα αέρα και σωματιδίων θεωρείται ως ίδια.

β) Η θεωρία της χωριστής διφασικής ροής όπου οι δύο φάσεις θεωρούνται ότι ρέουν χωριστά στον αγωγό και υπάρχει πλήρης αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Οι κατανομές ταχυτήτων αέρα και σωματιδίων θεωρούνται διαφορετικές.



**Σχήμα 2.3:** Απεικονίσεις διφασικής ροής νερού-αέρα  
 (<http://www.drbratland.com/PipeFlow2>)

Η διφασική ροή, δηλαδή η ταυτόχρονη ροή δύο φάσεων μέσα σε έναν αγωγό, αποτελεί μία από τις συνηθέστερες μορφές ροής που απαντώνται στη βιομηχανία, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη της ροής υγρού-αερίου εξαιτίας των πολλών εφαρμογών της. Οι διεργασίες συμπύκνωσης και εξάτμισης, η απορρόφηση και η απόσταξη, όπως επίσης και η μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι κάποιες από τις βασικές εφαρμογές της διφασικής ροής στη βιομηχανία.

Ένα σημαντικό στοιχείο που βοηθά στην κατανόηση της ροής και την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της διφασικής ροής νερού-αερίου μέσα σε έναν αγωγό είναι ο καθορισμός των καθεστώτων ροής που εμφανίζονται στη ροή. Με την έννοια καθεστώ ροής (flow regime, flow pattern) νοείται το γεωμετρικό σχήμα που έχει η διεπιφάνεια μεταξύ του αερίου και του υγρού κατά τη ροή μέσα σε αγωγό. Είναι αρκετές οι παράμετροι που καθορίζουν ποιο καθεστώ ροής θα σχηματιστεί: οι συνθήκες παροχής, πίεσης και μεταφοράς θερμότητας που επικρατούν

κατά τη ροή, οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών (όπως πυκνότητα και το ιξώδες των δύο φάσεων) καθώς και γεωμετρία του αγωγού, δηλαδή μορφή της διατομής, κλίση, ισοδύναμη διάμετρος και τραχύτητα του αγωγού.

Το πιο συνηθισμένο σύστημα που χρησιμοποιείται κατά τις πειραματικές μελέτες είναι το σύστημα αέρα - νερού και τα περισσότερα διαγράμματα καθεστώτων ροής που υπάρχουν στη βιβλιογραφία αναπαριστούν καθεστώτα κατά τη ροή σε οριζόντιους ή κατακόρυφους αγωγούς. Λίγες σχετικά είναι οι εργασίες αυτές που επικεντρώνονται στη μελέτη διφασικής ροής σε κεκλιμένους αγωγούς και ακόμα λιγότερες αυτές που μελετούν την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών. Η σημασία τους ωστόσο είναι καθοριστική για τον σχεδιασμό ενός αγωγού, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις βιομηχανικών εφαρμογών συναντώνται αγωγοί με απόκλιση από το οριζόντιο επίπεδο, έστω και μικρή.

Στην περίπτωση των κεκλιμένων αγωγών, όταν κλίση του αγωγού είναι προς τα κάτω, τότε η υγρή φάση ρέει με μεγαλύτερες ταχύτητες εξαιτίας της βαρυτικής δύναμης και κατά συνέπεια, είναι απαραίτητοι μεγαλύτεροι ρυθμοί ροής και για τις δυο φάσεις ώστε να συμβεί μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή στη διαλείπουσα και όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης αυξάνεται και το εύρος της περιοχής της διαστρωματωμένης ροής. Αντίστοιχα, σε αγωγούς με κλίση προς τα πάνω το εύρος της διαστρωματωμένης ροής μειώνεται και είναι ταχύτερη μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή (Αζήζ Ερσάν, 2006).

## **2.6 Διφασική ροή νερού-αέρα, παράμετροι**

Οι διφασικές ροές εμφανίζονται συχνά στη φύση και σε ένα πλήθος βιομηχανικών διεργασιών. Η διφασική ροή αερίου-υγρού σε οριζόντιους

ή σε κεκλιμένους αγωγούς τα τελευταία 40 χρόνια έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πλήθος των εφαρμογών στις οποίες συναντάται, όπως σε συστήματα διακίνησης των γεωθερμικών ρευστών και των προϊόντων πετρελαίου, στη λειτουργία πυρηνικών και χημικών αντιδραστήρων καθώς και στα συστήματα ψύξης και θέρμανσης.

Η μελέτη της διφασικής ροής δεν έχει μόνο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον, αλλά μπορεί να βοηθήσει στον καλύτερο σχεδιασμό ποικίλων συσκευών. Αν και πολλές σημαντικές έρευνες έχουν γίνει στο παρελθόν, οι προσπάθειες να γίνει κατανοητή η θεμελιώδης συμπεριφορά και οι μηχανισμοί της διφασικής ροής είναι προφανώς μια συνεχιζόμενη διαδικασία (*Pothof, 2011*).

Η διφασική ροή νερού-αέρα είναι μια ανεπιθύμητη κατάσταση, η οποία προκύπτει σε πολλά συστήματα μεταφοράς νερού ή ακόμη και αποβλήτων. Ο αέρας «φυλακίζεται» μέσα στα κανάλια αγωγών και επηρεάζει αρνητικά ολόκληρο το σύστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της αρνητικής αυτής επίπτωσης είναι οι φουσαλίδες αέρα στους αγωγούς υδροηλεκτρικών έργων, που μπορούν να προκαλέσουν ακόμη φαινόμενα υποστροφής της ροής καθώς επίσης και ανεπιτρεπτες αυξήσεις πίεσης.

Στη διφασική ροή οι δυο φάσεις (για παράδειγμα αέρας και νερό) κατανέμονται στον αγωγό ή στη συσκευή με ποικίλους τρόπους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφόρων τύπων ή καθεστώτων ροής. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις διφασικές ροές είναι πολύπλοκες με αποτέλεσμα να είναι δυσχερής η ακριβής μαθηματική τους έκφραση, αφού η κάθε φάση επηρεάζεται από τις δικές της ιδιότητες και συνθήκες, ενώ συγχρόνως επηρεάζεται και επηρεάζεται από την άλλη φάση. Το κύριο χαρακτηριστικό της ροής διφασικού μίγματος σε οριζόντιο η κεκλιμένο αγωγό είναι η μορφή της στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού. Με βάση αυτό

το χαρακτηριστικό, όταν αέριο και υγρό ρέουν ταυτόχρονα σε έναν κεκλιμένο ή οριζόντιο αγωγό σχηματίζουν διάφορα καθεστώτα ή περιοχές ροής (flow patterns ή flow regimes) (*Speeding & Nguyen, 1976*).

Οι κυριότερες περιοχές που εμφανίζονται σε οριζόντιο και ελαφρώς κεκλιμένο αγωγό είναι: η διαχωρισμένη ροή με ή χωρίς κύματα (smooth/wavy stratified flow), η διαλείπουσα ροή (slug flow) και η δακτυλιοειδής ροή (annular flow). Η γνώση των χαρακτηριστικών της οριζόντιας και ελαφρώς κεκλιμένης διφασικής ροής είναι απαραίτητη στον σχεδιασμό των προαναφερθέντων συστημάτων ως και άλλων συσκευών διεργασιών (*Marcano et al, 1996*).

Τα κυριότερα από αυτά είναι το πάχος της υγρής στιβάδας (film), η πτώση πίεσης και ο συμπαρασυρμός (entrainment), δηλαδή το κλάσμα του υγρού που μεταφέρεται από την αέρια φάση, με τη μορφή των σταγονιδίων. Γενικός τρόπος εξέτασης των καθεστώτων ροής γίνεται με την κατασκευή χαρτών ροής. Οι χάρτες ροής είναι λογαριθμικά διαγράμματα που στον άξονα των  $x$  έχουν την φαινομενική ταχύτητα του αερίου και στον άξονα των  $y$  την φαινομενική ταχύτητα του υγρού. Η κατασκευή ενός τέτοιου χάρτη περιοχών ροής είναι δύσκολη αφού μια μικρή αλλαγή κυρίως στη διάμετρο, στην κλίση ή στο ιξώδες επιφέρει και αλλαγή στο χάρτη ροής που έχει το διφασικό μείγμα (*Αζήζ Ερσάν, 2006*).

Αρκετές παράμετροι της διφασικής ροής, προκύπτουν ως συνέπεια του γεγονότος ότι λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο φάσεων (νερού και αέρα) η ελαφρύτερη φάση ρέει ταχύτερα. Μερικές από τις παραμέτρους και τα μεγέθη που συναντιούνται σε άρθρα ανάλυσης της διφασικής ροής και είναι χρήσιμα στο σχεδιασμό μιας γεωμετρίας μέσα στην οποία θα ρέει μια τέτοια ροή είναι οι παρακάτω (*Pothof, 2011*):

### Συγκράτηση υγρού R:

Επειδή η αέρια φάση διαφέρει αισθητά από την υγρή ως προς την πυκνότητα και το ιξώδες, η αέρια φάση ρέει με μεγαλύτερη μέση ταχύτητα από την υγρή, φαινόμενο που χαρακτηρίζεται ως «συγκράτηση» ή «ολίσθηση» της μιας φάσης ως προς την άλλη. Ως συγκράτηση υγρού ορίζεται ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το υγρό στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του.

### Κλάσμα κενού α:

Είναι ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το αέριο στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. Εάν το εμβαδόν της διατομής του αγωγού είναι και τα εμβαδά της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και τη υγρή φάση αντίστοιχα είναι  $A_G$  και  $A_L$ , τότε το κλάσμα κενού ισούται με τον λόγο  $A_G/A$  όπου  $A=A_G+A_L$ .

Τα δύο αυτά μεγέθη είναι σημαντικά επειδή προσδιορίζουν το χρόνο παραμονής των ρευστών στο σύστημα (μέγεθος συσκευών) και επειδή χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης, συνδέονται δε μεταξύ τους με τη σχέση:  $R + \alpha = 1$ .

Ακόμη, σημαντικές παράμετροι της διαφασικής ροής είναι οι παρακάτω:

- Μαζικές Ροές
- Ποιότητα
- Φαινομενικές Ταχύτητες Φάσεων (superficial velocities)
- Μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (Average Phase Velocities)
- Ταχύτητα Ολίσθησης, S (Slip Ratio)

## 2.7 Συμπαρασυρμός αέρα

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της διφασικής ροής είναι ο συμπαρασυρμός (entrainment). Συμπαρασυρμός είναι το κλάσμα της περιοχής του υγρού που βρίσκεται στον αέριο πυρήνα με τη μορφή μικρών σταγονιδίων ως προς τη συνολική υγρή παροχή.

Η παρουσία του αέρα σε συστήματα αγωγών μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα, όπως η απώλεια μεταφορικής ικανότητας, διατάραξη της ροής, μειωμένη αποδοτικότητα αντλιών και στροβίλων, επιπτώσεις στα υλικά των σωλήνων και στη δομή των αγωγών γενικότερα. Μπορεί επίσης να αλλάξει τις ιδιότητες του υγρού και να δημιουργήσει περιβαλλοντικά προβλήματα.

## 2.8 Οριζόντια διφασική ροή σε αγωγό

Μία πληθώρα περιοχών ροής έχουν αναγνωρισθεί στη βιβλιογραφία σε οριζόντια διφασική ροή. Οι πλέον αποδεκτές περιοχές ροής είναι οι εξής (*Hubbard M., 1965*):

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



κυμάτων γίνεται τραχεία, και το υγρό μπορεί να αναρριχάται στα τοιχώματα του σωλήνα, χωρίς όμως να διαβρέχει ολόκληρη την περίμετρο του. Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας (παροχής) του αερίου σταγόνες από το υγρό αρχίζουν να κτυπούν στο πάνω μέρος του αγωγού, χαρακτηριστικό του φαινομένου που είναι γνωστό σαν ροή με εκνέφωση (atomization).

#### Διαλείπουσα ροή (Slug ή Intermittent flow):

Χαρακτηρίζεται από την περιοδική διέλευση υγρών μαζών (slugs) στον αγωγό, που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Οι υγρές αυτές μάζες μπορεί να περιέχουν και να παρασύρουν πολυάριθμες φυσαλίδες αερίου. Η διαλείπουσα ροή είναι ανεπιθύμητη επειδή προκαλεί ανεπιθύμητες διακυμάνσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να δονούνται οι σωληνώσεις, απαιτούνται μεγάλοι διαχωριστές και αυξάνει ο ρυθμός μηχανικής διάβρωσης.

#### Ροή με φυσαλίδες (Dispersed Bubble flow):

Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διεσπαρμένων φυσαλίδων αερίου στην συνεχή υγρή φάση, οι οποίες τείνουν να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού και σε ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται σαν αφρός. Η υγρή φάση είναι συνεχής και μια διασπορά φυσαλίδων ρέει στο υγρό μέσο.

#### Δακτυλιοειδής ροή (Annular flow):

Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός υγρού δακτυλίου που σχηματίζεται στην περιφέρεια του αγωγού και δεν είναι γενικά συμμετρικός λόγω βαρύτητας. Το υγρό ρέει στα τοιχώματα του σωλήνα με την μορφή φιλμ και η αέρια φάση ρέει στο κέντρο. Συνήθως ένα μέρος της υγρής φάσης εισέρχεται στο χώρο της αέριας φάσης με τη μορφή σταγονιδίων. Το είδος αυτό της ροής εμφανίζεται για μεγάλες παροχές του αερίου και όσο

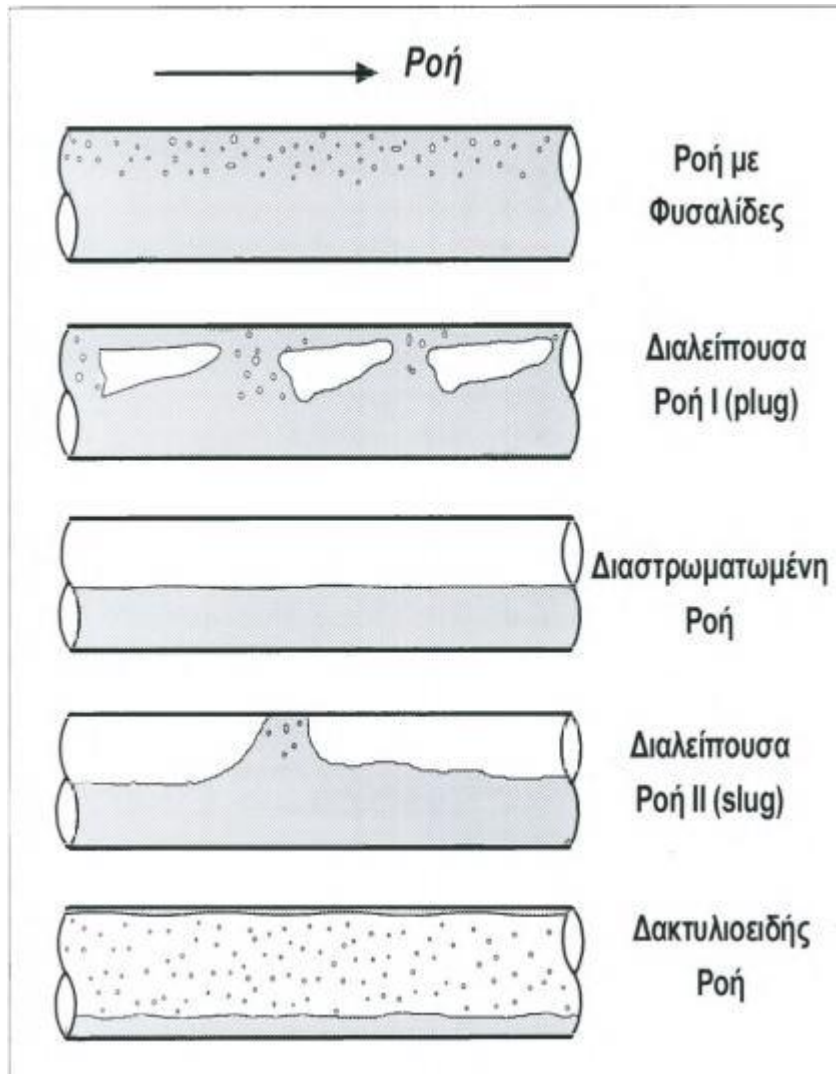
μεγαλύτερες είναι αυτές οι παροχές τόσο μειώνεται και ασυμμετρία του υγρού δακτυλίου.

Ψευδο-διαλείπουσα (Pseudo-slug):

Το είδος αυτό της ροής μοιάζει αφενός με την δακτυλιοειδή ροή, στο ότι το υγρό σχηματίζει μια συνεχή στιβάδα στην περιφέρεια του αγωγού και αφετέρου με τη διαλείπουσα ροή, στο ότι παρουσιάζονται υγρές μάζες που μοιάζουν με «slugs». Οι τελευταίες δεν ρέουν με την ταχύτητα του αερίου και έτσι δεν προκαλούν απότομες μεταβολές πίεσης. Η παρουσία υγρής στιβάδας μεγάλου πάχους στον πυθμένα του σωλήνα δίνει την εντύπωση διαχωρισμένης ροής με κυματισμούς.

Ομιγλώδης ροή ή Ροή με Υγρασία (wispy-annular flow):

Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της υγρής φάσης, η συγκέντρωση σταγονιδίων στο χώρο της αέριας φάσης μεγαλώνει. Σαν συνέπεια έχουμε την συνένωση σταγονιδίων με την μορφή δεσμών η ραβδώσεων. Η ροϊκή αυτή κατάσταση είναι χαρακτηριστική για ροές με μεγάλη ροή μάζας.



**Σχήμα 2.4:** Περιοχές ροής σε οριζόντια διφασική ροή νερού-αέρα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:**

### **ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΑΓΩΓΟ**

#### **3.1 Γενικά**

Κατακόρυφοι αγωγοί, μέσα στους οποίους αναπτύσσονται ροές προς τα άνω ή προς τα κάτω, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους, έχουν ευρεία χρήση σε εγκαταστάσεις μετάδοσης θερμότητας. Τυπικά, η ροή σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις μπορεί να είναι απλή-μονοφασική (υγρού ή αερίου) ή διφασική (υγρού - αερίου), κι αυτό εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού και τις συνθήκες των εργασιών που επικρατούν στις εγκαταστάσεις. Μεταξύ αυτών των ροών, η διφασική ροή υγρού – αερίου υπαγορεύει τα πιο απαιτητικά προβλήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό και τη λειτουργία των μηχανολογικών εγκαταστάσεων.

Κάποιες παράμετροι, όπως το κλάσμα του κενού αέρα στη διατομή, η πτώση πίεσης και το πάχος του υγρού φιλμ είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς της ροής σε τέτοιες εγκαταστάσεις. Η ακριβής μέτρηση και/ή η πρόβλεψη αυτών των παραμέτρων θα μπορούσε να οδηγήσει σε ενισχυμένο σχεδιασμό και παραγωγικότητα. Παρ' όλα αυτά, ενώ έχουν εκπονηθεί πολλές μελέτες και είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, η πλειονότητά τους αφορά ροή προς τα άνω εντός αγωγών με διαμέτρους κάτω των 50mm. Αντιθέτως, μελέτες για κατακόρυφους αγωγούς με διαμέτρους μεγαλύτερες των 100mm, είτε για ροή ανάντη είτε για κατάντη είναι ιδιαίτερος σπάνιες.

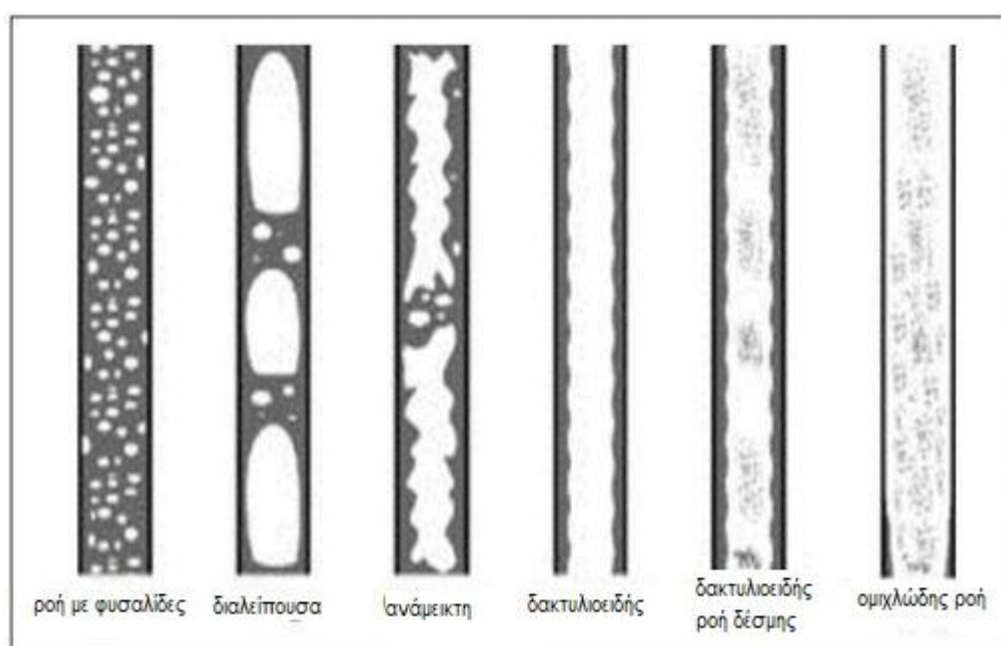
#### **3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο**

Οι διφασικές ροές είναι εξαιρετικά πολύπλοκες εξαιτίας των παραμορφωτικών διεπιφανειακών δομών αερίου-υγρού και της συμπιεστότητας της αέριας φάσης.

Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκύπτουν στις διαφασικές ροές αερίων-υγρών, κρίνεται αναγκαίο να εξακριβωθούν τα καθεστώτα ροής (επίσης γνωστά ως πρότυπα ροής). Το καθεστώς ροής ορίζεται ως η φυσική κατανομή στο χώρο δύο ή περισσότερων ρευστών κατά μήκος του αγωγού, που αναπαριστά τη δομή της ροής σχηματικά. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στη διαμόρφωση του καθεστώτος ροής είναι οι λειτουργικές συνθήκες (θερμοκρασία και πίεση), οι ιδιότητες του ρευστού (πυκνότητα, ιξώδες και επιφανειακή τάση), οι ρυθμοί ροής αερίου και υγρού, το κλάσμα κενού του αερίου, ο προσανατολισμός και η διάμετρος του αγωγού.

Για να αναγνωριστούν με ακρίβεια τα πρότυπα της διαφασικής ροής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί υψηλής ταχύτητας κάμερα ή/και οπτική παρατήρηση ή ανάλυση των συναρτήσεων πυκνοτήτων.

Είναι ευρέως αποδεκτό πως οι ροές υγρού-αερίου σε κατακόρυφους αγωγούς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:



**Σχήμα 3.1:** είδη ροών σε κατακόρυφο αγωγό (Cheng et al, 2008)

*Ροή με Φυσαλίδες (Bubble Flow):*

Κατά τη διαφασική ροή με φυσαλίδες η υγρή φάση είναι συνεχής με την αέρια διασπαρμένη με τη μορφή μικρών φυσαλίδων. Παρατηρείται σε μικρή σχετικά ογκομετρική παροχή αερίου με πλήρη ανάμιξη της αέριας στην υγρή φάση και για διάμετρο αγωγού μεγαλύτερη των περίπου 5 cm.

Σε μεγαλύτερες παροχές υγρού αναφέρεται ως Ροή με Διασπαρμένες Φυσαλίδες (Bubbly Dispersed Flow), αν και η διαφοροποίηση των δύο υπο-καθεστώτων είναι συνήθως δύσκολη.

*Διαλείπουσα Ροή (Intermittent, «Slug» or «Plug» Flow):*

Κύριο χαρακτηριστικό της διαλείπουσας ροής είναι οι αξονοσυμμετρικές μεγάλες φυσαλίδες αερίου, γνωστές ως φυσαλίδες Taylor (Taylor Bubble), που έχουν τη μορφή βλήματος. Η διάμετρός τους πλησιάζει τη διάμετρο του αγωγού με ομοιόμορφη ανοδική κίνηση. Ανάμεσα στα τοιχώματα του αγωγού και στις φυσαλίδες Taylor το υγρό ρέει προς τα κάτω με μορφή λεπτής στιβάδας. Μεταξύ των φυσαλίδων Taylor υπάρχει συνεχής υγρή φάση με διεσπαρμένη την αέρια σε μικρές φυσαλίδες. Αυξάνοντας την ταχύτητα του αερίου ο λόγος του μήκους της φυσαλίδας Taylor ως προς το μήκος της υγρής φάσης μειώνεται και η ροή μεταπίπτει στη λεγόμενη ανάμεικτη ροή.

*Ανάμεικτη Ροή (Churn Flow):*

Κατά την ανάμεικτη ροή, υπάρχει μια έντονη ακατάστατη ανάμειξη των δυο φάσεων. Η αύξηση της ογκομετρικής παροχής της αέριας φάσης σε σχέση με τη διαλείπουσα ροή έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση και τη διάσπαση των φυσαλίδων Taylor, οι οποίες γίνονται ακανόνιστες, στενότερες με μεγάλες συγκεντρώσεις κατά φάση. Συχνά χαρακτηρίζεται ως φαινόμενο εισόδου, διότι η ροή έπειτα από ορισμένο μήκος

σωλήνωσης (αναλόγως της διαμέτρου) μεταπίπτει σε διαλείπουσα δακτυλιοειδή. Κύριο γνώρισμά της είναι ταλαντωτική κίνηση των τμημάτων της υγρής φάσης.

Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow):

Στην περίπτωση της δακτυλιοειδούς ροής, η αέρια φάση είναι συνεχής στο κέντρο του αγωγού με σχετική διασπορά της υγρής φάσης με μικρά σταγονίδια. Η υγρή φάση ρέει κυρίως στα τοιχώματα του αγωγού ως λεπτή στιβάδα.

Δακτυλιοειδής ροή δέσμης (Wispy flow):

Όταν η ροή μάζας του υγρού είναι αρκετά μεγάλη, οι υγρές σταγόνες που εμφανίζονται στην κεντρική ζώνη του αγωγού είναι συσσωματωμένες σε μεγάλες δέσμες, που οδηγούν στη διαμόρφωση δακτυλιοειδούς ροή δέσμης.

Ομιχλώδης ροή (Mist flow):

Αυτή η ροή λαμβάνει χώρα μόνο σε μη αδιαβατικά συστήματα, όπου η υγρή φάση είναι πλήρως διασκορπισμένη.

### **3.3 Καθεστώτα ροής σε κατακόρυφο αγωγό**

Η διφασική ροή αποτελεί εν γένει ένα πολυσύνθετο φαινόμενο. Αυτό μερικώς οφείλεται στην ύπαρξη διαφορετικών καθεστώτων ροής (προτύπων ροής). Το καθεστώς ροής μπορεί να ποικίλει με βάση την σχετική διανομή της αέριας και υγρής φάσης μέσα σε έναν σωλήνα.

Σημαντικός αριθμός πειραμάτων έχουν διεξαχθεί από πολλούς ερευνητές τα τελευταία πενήντα χρόνια. Η πλειονότητα αυτών χρησιμοποίησε αέρα και νερό ως συνεργαζόμενα ρευστά. Ωστόσο, μερικοί χρησιμοποίησαν

διαφορετικά ρευστά, όπως συνδυασμό αέρα-λαδιού, αέρα-γλυκερίνης, αέρα με νέφτι και αέρα με κηροζίνη. Κατά συνέπεια, οι ερευνητές αυτοί επιστράτευαν διαφορετικές ονοματολογίες, για να περιγράψουν τα καθεστώτα ροής που αναπτύσσονται.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα καθεστώτα ροής μπορεί να είναι χαοτικά και αντικειμενικά ο προσδιορισμός τους καθίσταται πολύ δύσκολος. Στο σημείο αυτό, θα περιγραφούν οι προσπάθειες διαφόρων ερευνητών ανά τα χρόνια, που αφορούν τον προσδιορισμό των προτύπων ροής.

Ο Nichols (1965) κατά την μελέτη του σε κατακόρυφο αγωγό διαμέτρου 54mm, παρατήρησε τα εξής καθεστώτα ροής: bubbly flow (ροή με φυσαλίδες), bubbly-slug (διαλείπουσα ροή με φυσαλίδες), slug (διαλείπουσα ροή), falling film (ροή πτώσης φιλμ), annular flow (δακτυλοειδής ροή). Το καθεστώς πτώσεως του φιλμ (falling film) διαπιστώθηκε να αναπτύσσεται σε χαμηλούς ρυθμούς ροής αερίου και υγρού. Κατέληξε στο συμπέρασμα πως η δακτυλοειδής ροή είναι το πιο εμφανές και κυρίαρχο καθεστώς ροής σε ροή κατάντη κατακόρυφου αγωγού, όμως δεν παρατήρησε ροή αφρού (froth flow).

Ο Golan (1968) ανέφερε αποτελέσματα από τα εξής καθεστώτα ροής: bubbly flow (ροή με φυσαλίδες), slug flow (διαλείπουσα ροή), falling film (ροή πτώσης φιλμ), oscillatory (ταλαντευόμενη ροή) και annular flow (δακτυλοειδής ροή), που βασίστηκαν σε πειραματική μελέτη που διεξήχθη σε αγωγό διαμέτρου 38mm και μίγμα αέρα-νερού. Παρατήρησε ότι η ασταθής ταλαντευόμενη ροή παρουσιάστηκε καθώς η ταχύτητα των φυσαλίδων ισοδυναμούσε με την προς τα κάτω ταχύτητα υγρού και μπορούσε να αποδοθεί στην παρουσία καμπυλών U.



Εντούτοις, ο Golan παρατήρησε ότι ήταν ασυνήθιστο ένα τέτοιο καθεστώς ροής να εμφανίζεται σε κατακόρυφη ροή προς τα κάτω, απουσία καμπυλών U, και ότι η ροή φυσαλίδων υπάρχει μόνο εάν η ταχύτητα ροής του νερού υπερβαίνει την ταχύτητα των φυσαλίδων.

Ο Oshinowo (1971) σημείωσε τα εξής καθεστώτα ροής: bubbly (ροή φυσαλίδων), slug (διαλείπουσα ροή), falling film (ροή πτώσης μεμβράνης), froth (ροή αφρού), annular-mist flow (δακτυλιοειδής ομιχλώδης ροή), σε κατακόρυφο αγωγό διαμέτρου 25 mm με ροή προς τα πάνω και προς τα κάτω. Ο όρος «φυσαλίδες πυρήνα» χρησιμοποιήθηκε λόγω της προδιάθεσης των φυσαλίδων να ταξιδέψουν προς το κέντρο του σωλήνα. Διαπίστωσε ότι η ακτίνα του πυρήνα και το μέγεθος των φυσαλίδων αυξήθηκαν καθώς οι ρυθμοί ροής αυξήθηκαν και ότι καθεστώς διαλείπουσας ροής δεν είχε μικροσκοπικές φυσαλίδες. Το εμπρόσθιο άκρο ήταν αφρώδες το οποίο αποδόθηκε στο υγρό που αποστραγγίζεται από την πλευρά του γυάλινου δοχείου. Καθώς ο ρυθμός ροής αερίου αυξήθηκε περαιτέρω, προέκυψε παραμόρφωση του καθεστώτος διαλείπουσας ροής, έτσι ώστε οι άκρες να κινούνται προς το τοίχωμα του σωλήνα.

Αντιθέτως, με χαμηλές ταχύτητες ροής αερίων και υγρών, η υγρή φάση γλίστρησε εύκολα πάνω στην επιφάνεια του σωλήνα περιβάλλοντας έτσι τον εσωτερικό πυρήνα αερίου που περιέχει λίγο ή καθόλου κλάσμα υγρού. Ο Oshinowo κατέγραψε αυτό το καθεστώς ροής ως «ροή μεμβράνης που πέφτει» (falling-film flow). Σημειώθηκε επίσης ένα καθεστώς ροής όπου το υγρό φιλμ ήταν παχύτερο με μερικές παγιδευμένες φυσαλίδες αερίου. Αυτός το καθεστώς ροής ονομάστηκε «ροή πτώσης μεμβράνης με φυσαλίδες» (falling bubbly film flow).

Στο έργο των Yamazaki και Yamaguchi (1979) επιστρατεύτηκε η οπτική παρατήρηση και φωτογραφικές εικόνες για τη μελέτη της διαφασικής ροής

αέρα-νερού σε σωλήνα διαμέτρου 25 mm. Από τα πειράματά τους που πραγματοποιήθηκαν για ροή προς τα κάτω, παρατηρήθηκαν τα εξής καθεστώτα: slug (διαλείπουσα ροή), falling film (ροή πτώσης μεμβράνης), annular (δακτυλιοειδής) και wispy annular (δακτυλιοειδής ροή δέσμης). Στην δακτυλιοειδή ροή παρατηρήθηκε συμπαρασυρμός αέρα, σε χαμηλούς ρυθμούς ροής νερού και σε μέτριους ρυθμούς ροής αέρα. Αυτό ονομαζόταν «ροή βρεγμένου τοιχώματος» (wetted-wall flow). Αυτή η ροή χαρακτηρίστηκε επίσης ως «ροή πτώσης μεμβράνης» (falling-film) από άλλους ερευνητές.

Ένας σωλήνας μήκους 19,5 mm χρησιμοποιήθηκε από τον Paras (1982) για την πειραματική μελέτη της προς τα κάτω διφασικής ροής με αέρα-νερό ως το ρέον μίγμα. Παρατήρησε διαλείπουσα ροή (slug) με συνεχείς φυσαλίδες Taylor. Η ροή που παρατηρήθηκε με φυσαλίδες είχε μια τάση συγκέντρωσης στον πυρήνα.

Ο χάρτης του καθεστώτος ροής του Paras περιελάμβανε μεγάλες περιοχές ανάμεικτης ροής (churn flow), με τις φυσαλίδες να περιβάλλουν μια ακανόνιστη κενή περιοχή. Αυτό το καθεστώς ροής έχει ομοιότητες με τη διαλείπουσα ροή, όσον αφορά τις διακυμάνσεις που έχουν. Οι παρατηρήσεις για δακτυλιοειδή ροή (annular) σε αυτές τις συνθήκες ήταν ανάλογες της μεμβράνης που πέφτει στις άκρες του σωλήνα.

Ο Crawford (1983) διερεύνησε πειραματικά τη διφασική ροή χρησιμοποιώντας το ψυκτικό R-113 και τον ατμό του σε σωλήνα με εσωτερική διάμετρο 38 mm. Οι παρατηρούμενες ροές ήταν: ροή φυσαλίδων πυρήνα (core bubbly), διαλείπουσα (slug), ανάμεικτη (churn), πτώσης μεμβράνης (falling film) και δακτυλιοειδής (annular).

Συνειδητοποίησε ότι οι μικρότερες φυσαλίδες που κινούνται γρήγορα μπορούσαν να συσσωρευτούν προς το κέντρο των σωλήνων, ενώ οι

μεγαλύτερες μεταφέρθηκαν στον τοίχο του σωλήνα. Μεγάλες φυσαλίδες αέρα, ίσες σχεδόν με το μέγεθος του σωλήνα, ήταν επίσης παρούσες. Οι τυπικές φυσαλίδες Taylor εμφανίστηκαν μόνο σε σχετικά χαμηλές πιέσεις και παραμορφώθηκαν όταν αυξήθηκε η πίεση.

Η ροή πτώσης μεμβράνης (falling-film) και η δακτυλιοειδής ροή (annular) που παρατηρήθηκε στο σχέδιο Crawford είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνες άλλων ερευνητών όπως ο Nguyen (1975), του οποίου η εργασία ήταν μια εκτεταμένη μελέτη των κατακόρυφων καθεστώτων ανάντη και κατάντη ροών.

Επτά καθεστάτα ροής παρατηρήθηκαν στον σωλήνα των 45,5 mm που χρησιμοποιήθηκε. Αυτά αναφέρονται ως: bubble (ροή φυσαλίδων), slug (διαλείπουσα), slug-froth (αφρώδης-διαλείπουσα), annular (δακτυλιοειδής), annular roll-wave (δακτυλιοειδής με κύματα) annular droplet (δακτυλιοειδής με σταγονίδια), αν και οι λεπτομερείς περιγραφές αυτών των καθεστώτων απουσίαζαν από την μελέτη του. Το παρατηρούμενο σχήμα του καθεστώτος της δακτυλιοειδούς-διαλείπουσας ροής (annular-slug) ήταν παρόμοιο με την ανάμεικτη ροή ή την ημιδακτυλιοειδή ροή (semi-annular) που περιγράφεται σε άλλες μελέτες.

Οι Usui και Sato (1989), χρησιμοποιώντας ένα σωλήνα διαμέτρου 16 mm σε ατμοσφαιρική πίεση, διερεύνησαν ροές αέρα-νερού και μπόρεσαν να παρατηρήσουν τέσσερα διαφορετικά καθεστάτα ροής: ροή φυσαλίδων (bubble), διαλείπουσα (slug), ροή πτώσης μεμβράνης (falling film) και δακτυλιοειδή ροή (annular). Οι φυσαλίδες στο καθεστώς ροής φυσαλίδων ήταν σε θέση να ρέουν ως αποτέλεσμα μιας ανυψωτικής δύναμης που επενεργούσε στις φυσαλίδες που σχηματίστηκαν όταν η ταχύτητα φάσης μειώθηκε σταδιακά.

Σημείωσαν επίσης ότι στη διαλείπουσα ροή, η πλειοψηφία των φυσαλίδων αέρα δεν είχε το κλασικό σφαιρικό σχήμα των φυσαλίδων Taylor. Οι δυνάμεις πλευστότητας που επενεργούν αντίθετα στη ροή ήταν υπεύθυνες για την παραμόρφωση των φυσαλίδων έτσι ώστε κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα να έχουν σφηνοειδή μορφή. Οι Usui και Sato (1989) παρατήρησαν ότι η μετάβαση σε δακτυλιοειδή ροή συνέβη καθώς οι ρυθμοί ροής του υγρού αυξήθηκαν.

Οι Yijun και Rezkallah (1993) διεξήγαγαν μια πειραματική εκστρατεία με σωλήνα διαμέτρου 9,5 mm στην κατακόρυφη προς τα κάτω κατεύθυνση χρησιμοποιώντας αέρα-νερό ως ρευστά. Τα αποτελέσματα έδειξαν τα εξής καθεστώτα: ροή φυσαλίδων, διαλείπουσα, ροή αφρού, δακτυλιοειδή ροή και ροή πτώσης μεμβράνης. Για χαμηλές ταχύτητες ροής αερίου και υψηλές ταχύτητες ροής υγρού, παρατηρήθηκε ροή φυσαλίδων.

Οι Abdullah και Al-Khatib (1994) εξέτασαν τα δεδομένα ροής αέρα-νερού που λήφθηκαν σε σωλήνα διαμέτρου 38 mm. Παρήγαγαν έναν χάρτη διαγράμματος ροής ο οποίος προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας οπτικές παρατηρήσεις και σαφώς καθορισμένη ροή φυσαλίδων, διαλείπουσα και δακτυλιοειδή ροή. Δηλώνουν ότι σε χαμηλές ταχύτητες ροής αέρα, μικρές φυσαλίδες αέρα κινούνται τυχαία προς τα κάτω και απομακρύνονται από τον άξονα του σωλήνα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με όσα έχουν αναφέρει άλλοι ερευνητές σε σχέση με τη ροή των φυσαλίδων. Η συσσωμάτωση φυσαλίδων παρουσιάστηκε σε υψηλότερους ρυθμούς ροής. Οι μεγάλες φυσαλίδες της διαλείπουσας ροής εμφανίστηκαν με ακόμη υψηλότερες ροές αέρα και μετακινήθηκαν στο κέντρο του σωλήνα και, παρά την καθοδική ροή, οι είχαν σχήμα σφαιρικό. Περαιτέρω αύξηση του ρυθμού ροής αέρα παρήγαγε μία δακτυλιοειδή ροή έτσι ώστε το πάχος της μεμβράνης να μειώνεται σημαντικά.

Από τα παραπάνω, είναι σαφές ότι η αναγνώριση του καθεστώτος ροής είναι υποκειμενική χωρίς τη χρήση συνεκτικών ποσοτικών μεθόδων για τον προσδιορισμό ξεχωριστών μοτίβων ροής. Ωστόσο, μπορεί να αναφερθεί ότι τα καθεστάτα ροής εξαρτώνται από τη γεωμετρία του σωλήνα, τον προσανατολισμό ροής, τον συνδυασμό των ρεόντων ρευστών και των φυσικών τους ιδιοτήτων.

Τα καθεστάτα ροής φυσαλίδων (bubble), διαλείπουσας (slug), πτώσης μεμβράνης (falling film) και δακτυλιοειδούς ροής (annular) υπογραμμίζουν ότι η πλειονότητα των ερευνών διεξήχθη σε διφασική ροή κατάντη. Τα περισσότερα από τα καθεστάτα ροής διεξήχθησαν σε σωλήνες μικρής διαμέτρου. Το καθεστώς περιορισμένης ροής ερευνήθηκε για μεγάλες διαμέτρους σωλήνων, ειδικά για ροές κατάντη. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη να διευρυνθούν τα καθεστάτα ροής σε κατακόρυφους σωλήνες για να συμπεριληφθούν οι σωλήνες μεγάλης διαμέτρου.

### **3.4 Χάρτης καθεστώτων ροής**

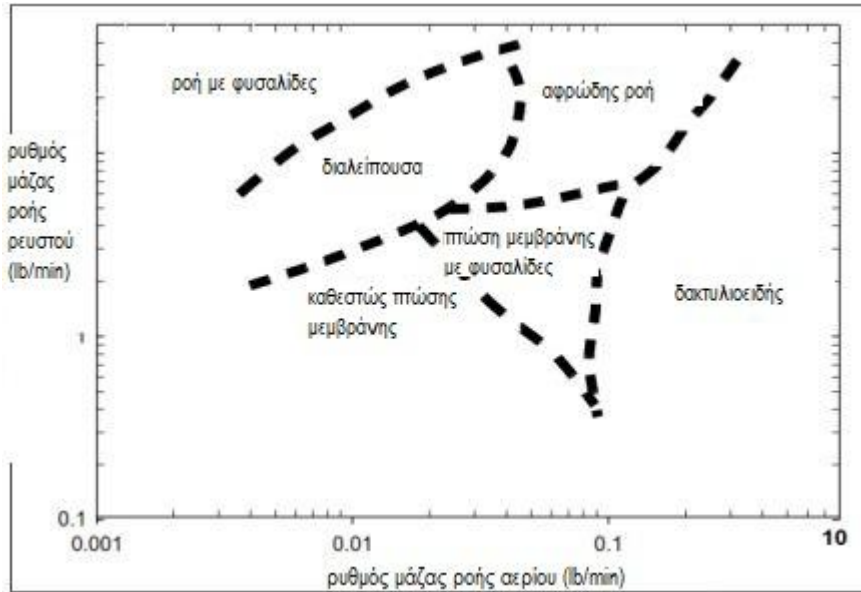
Ο χάρτης καθεστώτων ροής είναι μια γραφική απεικόνιση των διαφορετικών μοτίβων ροής που συμβαίνουν σε ένα σωλήνα όταν μεταβάλλονται οι ρυθμοί ροής των αντίστοιχων φάσεων. Ο τύπος του χάρτη καθεστώτων ροής εξαρτάται από τις ιδιότητες που απεικονίζονται στους άξονες.

Αρκετοί χάρτες καθεστώτων ροής εμφανίστηκαν στη βιβλιογραφία, που περιλάμβαναν όχι μόνο τις επιφανειακές ταχύτητες αλλά και τους ρυθμούς ροής μάζας, τις ροές μάζας ή τους αδιάστατους αριθμούς όπως ο αριθμός ρευστού Reynolds και ο αριθμός Froude. Ως εκ τούτου, οι χάρτες καθεστώτος ροής είναι εργαλεία που ταξινομούν την ύπαρξη ενός

συγκεκριμένου μοντέλου ροής, δεδομένων των προαναφερθεισών παραμέτρων ροής. Ένα πρόβλημα με την αναγνώριση του καθεστώτος ροής είναι ότι οι μεταβάσεις του ρυθμού ροής δεν καθορίζονται απότομα αλλά βαθμιαία.

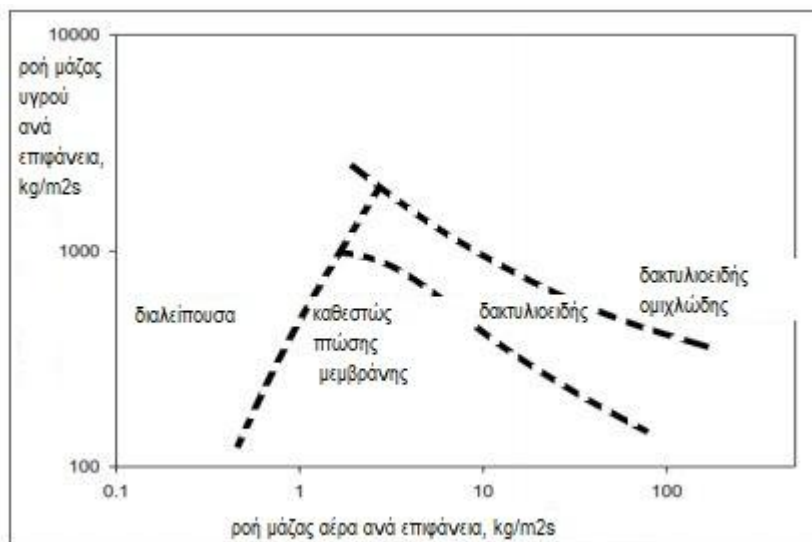
Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι, δεδομένου ότι ο ορισμός του προτύπου ροής και, συνεπώς, η ταυτοποίηση, εξαρτάται από την ατομική αντίληψη, δεν υπάρχουν γενικοί χάρτες μοτίβου ροής. Η βιβλιογραφία περιέχει πολλούς χάρτες μοτίβου ροής που υποβλήθηκαν από πολλούς ερευνητές. Αυτοί σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικές φυσικές παραμέτρους στους άξονες.

Ο χάρτης που παρουσιάστηκε από τον Oshinowo (1971) σχεδιάστηκε για σωλήνα διαμέτρου 25 mm με τους ρυθμούς ροής μάζας υγρών (αέρα-νερού) στις αντίστοιχες συντεταγμένες (Σχήμα 3-2). Παρατήρησε ότι η ροή φυσαλίδων αναπτύσσεται σε υψηλές ταχύτητες ροής μάζας νερού και χαμηλή ροή αέριου μάζας, και ως εκ τούτου το καθεστώς ροής πτώσης μεμβράνης κατατάσσεται μεταξύ του καθεστώτος falling film και του bubbly falling film flow. Ο χάρτης του μοτίβου ροής δεν είχε συγκεκριμένη γραμμή που δείχνει τη μετάβαση του ρυθμού ροής, με αποτέλεσμα η δακτυλιοειδής ροή να καταλαμβάνει ένα κυρίαρχο τμήμα του χάρτη.



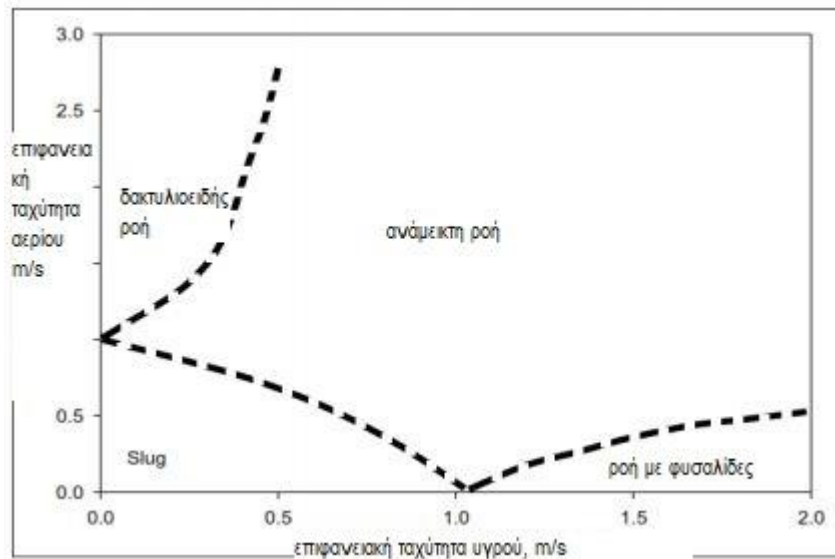
Σχήμα 3.2: Χάρτης καθεστώτων ροής κατάντη (Oshinowo, 1971)

Οι Yamazaki και Yamaguchi (1979) σχεδίασαν έναν χάρτη (Σχήμα 3-3) από την σκοπιά των ροών μάζας φάσης, ο οποίος ήταν στην πραγματικότητα ο μόνος χάρτης καθεστώτων ροής που αναφέρεται σε όρους ροής μάζας σε  $\text{kg/m}^2\text{s}$ . Η ροή με φυσαλίδες δεν αναφέρθηκε στα πειράματά τους.



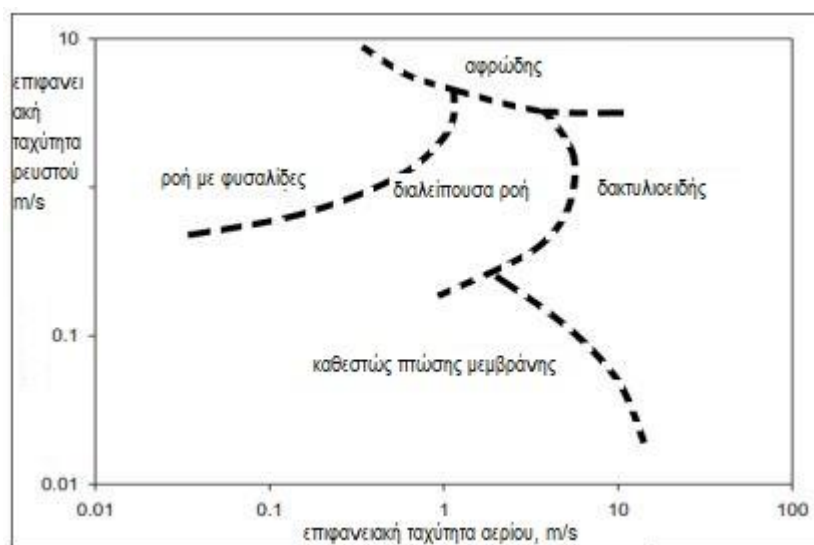
Σχήμα 3.3: Χάρτης καθεστώτων ροής κατάντη (Yamazaki και Yamaguchi, 1979)

Το σχήμα 3-4 δείχνει τον χάρτη του Paras (1982). Όπως φαίνεται, τα όρια της ανάμεικτης ροής (churn flow) δεν έχουν καθοριστεί επαρκώς.



Σχήμα 3.4: Χάρτης καθεστώτων ροής κατάντη (Paras, 1982)

Ο χάρτης καθεστώτων ροής των Yijun και Rezkallah (1993) ήταν σε σχέση με τις επιφανειακές ταχύτητες υγρών και αερίων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-5. Αυτό δείχνει πόσο πολύ εξαρτώνται των καθεστώτα ροής από τη διάμετρο του σωλήνα και το συνδυασμό υγρών.

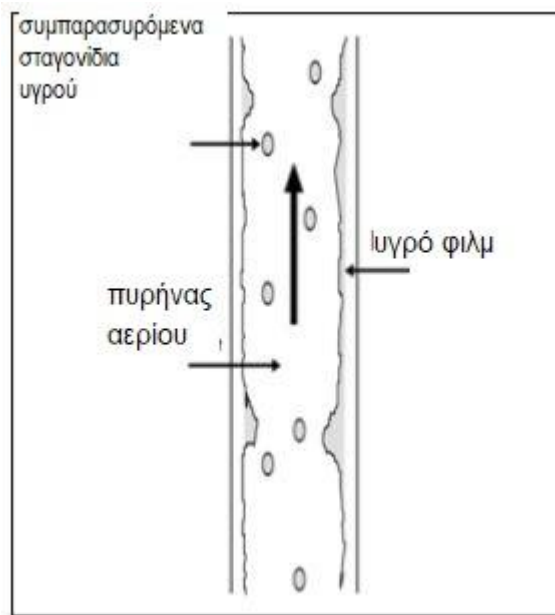


Σχήμα 3.5: Χάρτης καθεστώτων ροής κατάντη (Yijun και Rezkallah, 1993)



### 3.5 Κατακόρυφη δακτυλιοειδής ροή

Όπως αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα, στις δακτυλιοειδείς ροές το μεγαλύτερο μέρος της αέριας φάσης καταλαμβάνει το κέντρο του σωλήνα, ενώ η υγρή φάση ρέει κατά μήκος του εσωτερικού τοιχώματος του σωλήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-6 που ακολουθεί.



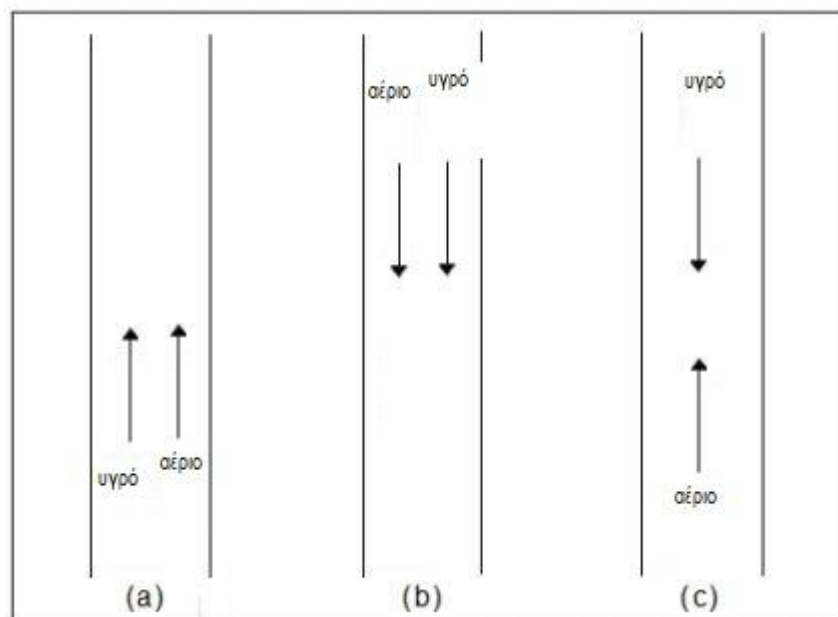
Σχήμα 3.6: Καθεστώς κατακόρυφης δακτυλιοειδούς ροής (Geraci, 2007)

Η δακτυλιοειδής ροή μπορεί να ομαδοποιηθεί με βάση τις κατευθύνσεις της ροής του ρευστού στις εξής ροές:

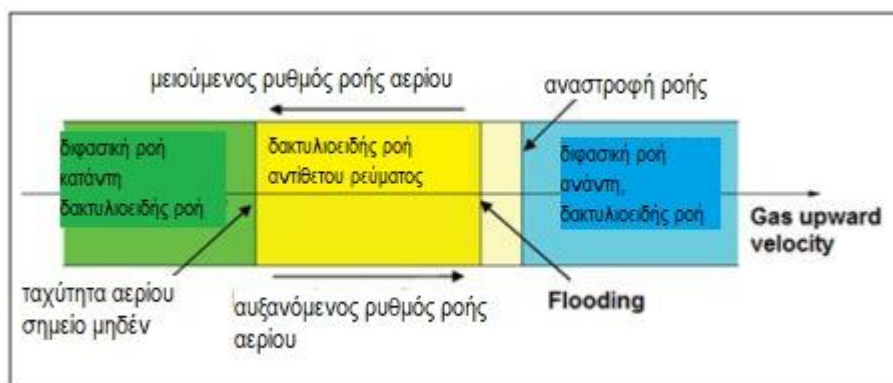
- A) ταυτόχρονη προς τα πάνω δακτυλιοειδής ροή: τόσο το αέριο όσο και το υγρό ρέουν προς τα πάνω (Σχήμα 3-7 (a)),
- B) ταυτόχρονη προς τα κάτω δακτυλιοειδής ροής: τόσο το αέριο όσο και το υγρό ρέουν προς τα κάτω (Σχήμα 3-7 (b))
- Γ) ροή αντirroής δακτυλίου: η ροή του αερίου κινείται προς τα πάνω και το υγρό ρέει προς τα κάτω (Σχήμα 3-7 (c)).

Προφανώς, για ένα δεδομένο ρυθμό ροής υγρού, η ροή αντιρροής δακτυλίου μπορεί να λάβει χώρα μόνο για ένα περιορισμένο εύρος των ρυθμών ροής του αερίου. Εκτός του εύρους, το καθεστώς ροής γίνεται είτε μία ταυτόχρονη ανοδική ροή είτε μία ταυτόχρονη προς τα κάτω ροή, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3-8.

Για έναν κατακόρυφο σωλήνα με υγρό φιλμ σε σταθερό ρυθμό ροής υγρού, η αύξηση του ρυθμού ροής προς τα πάνω του αερίου σταδιακά θα αλλάζει το καθεστώς ροής, και από ροή αντιρροής δακτυλίου θα προκύπτει η ταυτόχρονη προς τα πάνω δακτυλιοειδής ροή. Η μετάβαση αυτή της ροής από τα κατάντη στα ανάντη είναι γνωστή ως πλημμύρα. Σε ανοδική ταυτόχρονη δακτυλιοειδή ροή, η μείωση του ρυθμού ροής αερίου θα οδηγήσει επίσης σε ροή αντιρροής. Η αλλαγή κατεύθυνσης ροής του υγρού είναι γνωστή ως αναστροφή ροής. Η μετάβαση από την ροή αντιρροής στην ταυτόχρονη προς τα πάνω και προς τα κάτω ροής είναι πολύ απλούστερη λόγω της αναστροφής της κατεύθυνσης του αερίου.



**Σχήμα 3.7:** Καθεστώτα δακτυλιοειδούς ροής βάσει της κατεύθυνσης ροής των ρευστών (Almabrok, 2013)



**Σχήμα 3.8:** Μεταβάσεις μεταξύ των τριών τύπων ροής της δακτυλιοειδούς ροής (Almabrok, 2013)

### 3.5.1 Ανάπτυξη δακτυλιοειδούς ροής

Η διερεύνηση της ανάπτυξης ροής είναι σημαντική στη διφασική ροή. Πειραματική εργασία που διεξήχθη από τους Omebere-Iyari et al. (2008), αποκάλυψε ότι για να επιτευχθεί μια πλήρως ανεπτυγμένη ροή, οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της συμπεριφοράς ροής πρέπει να εγκατασταθούν σε σωλήνα διαμέτρου τουλάχιστον ίση με το 40πλάσιο της διαμέτρου στο σημείο εισόδου του υγρού.

Οι συμπεριφορές της διφασικής ροής σε αγωγούς σχήματος «σερπαντίνας» αλλάζουν όταν ρέουν μέσα από τις στροφές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ροή θα συνεχίσει να αναπτύσσεται ακόμα μετά τις στροφές (δηλαδή κατά την είσοδο σε ένα ευθύ τμήμα του σωλήνα). Αυτό οφείλεται στην επίδραση της καμπύλης στα υγρά που υπάρχουν στο παρακείμενο τμήμα. Ως εκ τούτου, η γνώση της ανάπτυξης δύο φάσεων ροής είναι απαραίτητη για την κατανόηση της κατανομής φάσης στον αγωγό με οφιοειδή γεωμετρία (σχήμα σερπαντίνας). Η κύρια ανησυχία για τη λειτουργία μιας μονάδας εναλλαγής θερμότητας, σχετίζεται στενά με την κατανομή υγρού φιλμ στην επιφάνεια του τοιχώματος του

σωλήνα, οπότε η γνώση της εξέλιξης που σχετίζεται με το καθεστώς δακτυλιοειδούς ροής είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Η ανάπτυξη των δακτυλιοειδών ροών αερίου / υγρού έχει παρατηρηθεί εδώ και καιρό από αρκετούς ερευνητές, αλλά μέχρι στιγμής οι περισσότερες ροές που μελετήθηκαν ήταν σε ανοδική ροή.

Οι Gill (1963) και Gill & Hewitt (1966) εκπόνησαν μετρήσεις για το πάχος της μεμβράνης (υγρού φιλμ) και την ροή των σταγονιδίων σε διαφορετικές αξονικές θέσεις, όπου η διάμετρος κυμαινόταν από 5-160 φορές επί με τη διάμετρο εισόδου του εγχυτήρα αερίου-υγρού, σε διάμετρο σωλήνα 31,8 mm. Συγκρίθηκαν επίσης τα αποτελέσματα από διαφορετικούς ψεκαστήρες υγρού και διαπιστώθηκε ότι η ανάπτυξη του πάχους υγρού φιλμ στην κατακόρυφη δακτυλιοειδή ροή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία εισόδου όταν εφαρμόζεται μια ροή μικρής μάζας υγρού.

Ο Brown (1975) επέκτεινε τις παραπάνω έρευνες και διεξήγαγε μετρήσεις της κλίσης πίεσης και της ταχύτητας συλλήψεως που επιτυγχάνονταν σε αποστάσεις ίσες με έως και 560 φορές επί τις διαμέτρους σωλήνων από την είσοδο.

Ο Hawkes (2000) ανέφερε πειράματα για τη μελέτη της δακτυλιοειδούς ροής δέσμης (wispy annular flow), με ροές μάζας αέρα και νερού 70-210 kg/m<sup>2</sup>s και 120-1030 kg/m<sup>2</sup>s αντίστοιχα. Παρατήρησαν ότι η συχνότητα των δεσμών που υπάρχουν στον πυρήνα του αερίου κυμαινόταν από 5 έως 8 Hz και κινήθηκε με παρόμοια ταχύτητα της αέριας φάσης.

Ο Wolf (2001) ανέφερε μια μελέτη σχετικά με την ανάπτυξη δακτυλιοειδούς ροής προς τα πάνω αέρα-νερού, δίνοντας τοπικά τιμές

κλίσης πίεσης, πάχους μεμβράνης, διατμητικής τάσης τοιχώματος, ταχύτητας ροής φιλμ, ταχύτητας κύματος διαταραχής και συχνότητας.

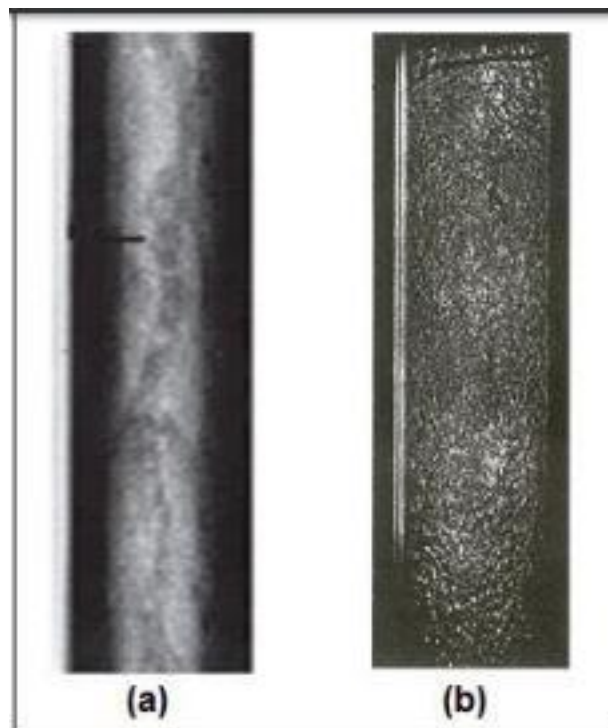
Ο Lao (2004) επέκτεινε τις συνθήκες ροής μέχρι ροή μάζας υγρού ίση με  $1200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , χρησιμοποιώντας διαφορετικές συσκευές εισόδου υγρού. Προέκυψε το συμπέρασμα ότι, σε μία ροή με υψηλή ροή μάζας υγρού, η επίδραση της έγχυσης επί του πάχους της μεμβράνης του τοιχώματος ήταν λιγότερο σημαντική από εκείνη της χαμηλής ροής μάζας υγρού.

Πιο πρόσφατα, ο Hazuku (2008) ανέφερε τις μετρήσεις της εξέλιξης της διεπιφανειακής δομής κύματος για την προς τα άνω δακτυλιοειδή διαφασική ροή σε κατακόρυφο σωλήνα χρησιμοποιώντας μια τεχνική μετατόπισης εστίασης λέιζερ (LFD). Πειράματα διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας έναν σωλήνα μήκους 3 m, διαμέτρου 11 mm, με αριθμούς Reynolds που κυμαίνονται από 31.800 έως 98.300 για την αέρια φάση και 1.050 έως 9.430 για την υγρή φάση. Διαπίστωσε ότι η ανάπτυξη της ροής παρέμεινε μέχρι το τέλος του σωλήνα.

Τέλος, ο Abdulkadir (2012) μελέτησε πειραματικά την ανάπτυξη της δακτυλιοειδούς ροής, από την μετώπη με ροή κατάντη μιας καμπύλης επιστροφής και από την καμπύλη προς μια προς το άνω μέρος μιας καμπύλης. Σημείωσε ότι, το μέσο πάχος της μεμβράνης τόσο στο κατώτερο σημείο όσο και στην μετώπη του αγωγού ήταν διαφορετικό σε σχέση με το πάχος στην καμπύλη του αγωγού. Ως εκ τούτου, έδειξε ότι η ροή δύο φάσεων αναπτύσσεται τόσο μέσα στην καμπύλη όσο και μετά από αυτήν.

Ένας αριθμός μεταβλητών, π.χ. το υγρό κοίλωμα, το προφίλ ταχύτητας και η κατανομή των σταγονιδίων, χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις βασικές δομές. Μόλις η παροχή υγρού είναι αρκετά υψηλή, μπορεί να συμβεί μια ουσιαστική αλλαγή στη δομή του πυρήνα. Στη συνέχεια, η

υγρή φάση εμφανίζεται με τη μορφή υγρών σβώλων και όχι ως σταγονίδια, λόγω των διαδικασιών συσσωμάτωσης και διάσπασης στην υγρή φάση. Αυτά συνοδεύονται από μια πολύ μεγάλη αστάθεια στις βασικές δομές. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μεγάλες διακυμάνσεις στις σχετικές μεταβλητές, όπως η κλίση της πίεσης, το  $H_L$  (liquid holdup) και, αναπόφευκτα, τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας. Η δομή των υγρών αυτών σβώλων παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Bennett (1965), χρησιμοποιώντας μια τεχνική ακτινογραφίας ακτίνων X (Σχήμα 3-10 (a)). Ο Lao (2004) παρατηρούσε τα κύματα που προκλήθηκαν από τα σταγονίδια που «χτυπούσαν» και «επέστρεφαν» από την υγρή μεμβράνη, χρησιμοποιώντας φωτογραφία που τραβήχτηκε σε μια συγκεκριμένη διατομή σε δακτυλιοειδές καθεστώς ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10 (β).

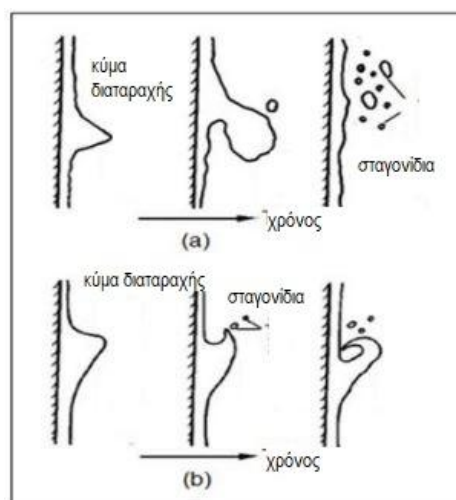


**Σχήμα 3.9:** Δομή δακτυλιοειδούς καθεστώτος ροής (a) πυρήνας δομής δακτυλιοειδούς με δέσμη καθεστώτος ροής (Bennett, 1965) και (b) κύματα στο υγρό φιλμ που προκλήθηκε από τα σταγονίδια (Lao, 2004)

### 3.5.2 Συμπαρασυρμός και μετατόπιση υγρού

Στις δακτυλιοειδείς ροές, ένα μέρος του υγρού ρέει υπό τη μορφή μεμβράνης επί του τοιχώματος του σωλήνα ενώ το άλλο μέρος ρέει ως συμπαρασυρόμενα σταγονίδια υγρού στον πυρήνα του αερίου. Τα σταγονίδια υγρού στον πυρήνα παράγονται με συμπαρασυρμό (ή ψεκασμό) ενώ εναποτίθενται πίσω στο υγρό φιλμ, οδηγώντας έτσι σε συνεχή ανταλλαγή μάζας, ορμής και ενέργειας μεταξύ του υγρού φιλμ και του ρευστού στον πυρήνα. Ο λόγος του ρυθμού ροής της υγρής μάζας που υπάρχει στον πυρήνα του αερίου σε μορφή σταγονιδίων, προς τη συνολική παροχή υγρού μάζας, ορίζεται ως το υγρό κλάσμα συμπαρασυρμού. Υπάρχουν τρεις τύποι μηχανισμών με τους οποίους η υγρή μεμβράνη παρασύρεται στον πυρήνα του αερίου σε κατακόρυφη δακτυλιοειδή ροή:

(α) Συμπαρασυρμός από κυλινδρικό κύμα (ή κύμα διαταραχής): αυτή η διέγερση προκαλείται από την κατανομή των κυμάτων. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί κατανομής του κύματος: με υποσκαφή και κύλιση, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-11 (α) και (β) αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.10:** Μηχανισμοί συμπαρασυρμού μέσω (α) υποσκαφής κυμάτων και (β) κύλισης κυμάτων (Hewitt και Hall-Taylor, 2004)

(β) Συμπαρασυρμός με απελευθέρωση φυσαλίδων: Η φυσαλίδα εκρήγνυται στην επιφάνεια της υγρής μεμβράνης που την οδηγεί στην παραγωγή και μεταφορά των σταγονιδίων στο κέντρο του σωλήνα. Το μέσο μέγεθος αυτών των σταγονιδίων είναι συνήθως πολύ μικρό, της τάξης του 1 mm (Newitt, 1954).

(γ) Συμπαρασυρμός με πρόσκρουση σταγονιδίων: Αυτός ο τύπος σύλληψης αναγνωρίστηκε από τους Woodmansee και Hanratty (1969), οι οποίοι πρότειναν να απομακρυνθούν οι διακυμάνσεις πάνω από τα κύματα διαταραχής από το εισερχόμενο ρεύμα αερίου που προκαλεί συμπαρασυρμό. Η μελέτη τους βασίστηκε στη χρήση φωτογραφικής μηχανής υψηλής ταχύτητας.

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι ο συμπαρασυρμός μέσω των κυμάτων διαταραχής είναι ο πιο κυρίαρχος μηχανισμός δέσμευσης υγρών, ενώ άλλοι δύο τύποι γενικά δεν συναντώνται. Το γεγονός αυτό υποστηρίχθηκε από το πειραματικό έργο των Azzopardi και Whalley (1980), παράγοντας με τεχνητό τρόπο τεχνητά κύματα διαταραχής. Έπειτα, παρατηρούσαν τη ροή στην ανώτερη θέση του σωλήνα, μέσω κάμερας υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ειδική συσκευή αξονικής προβολής. Σημείωσαν ότι, τα σταγονίδια δεν ήταν ικανά να σχηματιστούν όταν δεν υπήρχαν τα κύματα. Τα σταγονίδια αναγνωρίστηκαν μόνο μετά την έγχυση υγρού στον σωλήνα. Ο αριθμός αυτών των σταγονιδίων αυξήθηκε καθώς τα κύματα πλησίαζαν το άκρο του σωλήνα. Μετά το πέρας των κυμάτων, δεν παρατηρήθηκαν σταγονίδια. Για μια πλήρως ανεπτυγμένη δακτυλιοειδή ροή είναι λογικό να υποθέσουμε ότι το κλάσμα συμπαρασυρμού είναι σταθερό, λόγω μιας δυναμικής ισορροπίας μεταξύ του συμπαρασυρμού και της απόθεσης των σταγονιδίων.



Η ανταλλαγή σταγονιδίων μεταξύ της υγρής μεμβράνης και της δομής του πυρήνα είναι σημαντική τόσο για τις θεμελιώδεις όσο και για τις πρακτικές πτυχές των μελετών δακτυλιοειδών ροών. Οι Cousins και Hewitt (1968) πρότειναν ότι ο ρυθμός εναπόθεσης ( $D$ ) της δακτυλιοειδούς ροής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$D=k \cdot c \quad (3.1)$$

Όπου  $k$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας και  $c$  είναι η συγκέντρωση σταγονιδίων στη δομή πυρήνα. Μεταγενέστεροι μελετητές, π.χ. οι Namie και Ueda (1973) και Govan (1990) έδειξαν ότι η τιμή του συντελεστή  $k$  εξαρτάται από τη συγκέντρωση  $c$ .

### 3.5.3 Επίδραση διαμέτρου σωλήνα στην κατακόρυφη ροή

Ένας σημαντικός αριθμός ερευνητών ανέφερε ότι οι συμπεριφορές της διασπαστικής ροής σε κατακόρυφο σωλήνα και τα χαρακτηριστικά της ροής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διάμετρο του σωλήνα. Η λεπτομερής ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που καλύπτει τα κύρια αποτελέσματα αυτής της παραμέτρου σε μια τέτοια ροή είναι ένας από τους κύριους λόγους ύπαρξης αυτής της παραγράφου.

Ο Wallis (1969) υποθέτει ότι η διάμετρος του σωλήνα έχει σημαντικό αντίκτυπο σε μια κατακόρυφη ροή δύο φάσεων. Οι παρακάτω εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν στην παραδοχή:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (3.2)$$

$$Fr = \left[ \frac{\rho \cdot U^2 \cdot D}{D \cdot g \cdot (\Delta\rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

$$Bo = \frac{D^2 \cdot g \cdot (\Delta\rho)}{\sigma} \quad (3.4)$$

Όπου Re, Fr, Bo είναι οι αριθμοί Reynolds, Froude, Bond αντίστοιχα και  $\rho$ , U,  $\mu$  είναι η πυκνότητα, η ταχύτητα και το ιξώδες του υγρού. Ως  $\Delta\rho$  συμβολίζεται η διαφορά πυκνοτήτων υγρού-αερίου, D είναι η διάμετρος του σωλήνα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\sigma$  η επιφανειακή τάση.

Οι παραπάνω αδιάστατες παράμετροι σχετίζονται με τη διάμετρο του σωλήνα (D). Από πειραματικής άποψης, τα καθεστώτα ροής παρατηρήθηκε ότι ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη διάμετρο του σωλήνα. Τα πειράματα σε διφασική ροή αερίου-υγρού σε σωλήνες μικρής κλίμακας έδειξαν ότι η κλίση του σωλήνα έχει ελάχιστη επίδραση στον σχηματισμό της ροής και δεν υπήρχε στρωματοποιημένη ροή, ακόμη και σε οριζόντιο σωλήνα, οπότε ο χάρτης καθεστώτος ροής θα μπορούσε να βασιστεί στην διάμετρο του σωλήνα, αντί να εξαρτάται από τον προσανατολισμό του σωλήνα (Serizawa και Feng, 2002). Από την άλλη μεριά, με κατακόρυφο σωλήνα μεγάλης διαμέτρου, μελέτες έδειξαν τη σκέδαση μεγάλων φυσαλίδων σε ροές αερίου-υγρού προς τα πάνω, π.χ. Omebere-Iyari (2007) και Ali και Yeung (2008). Ο Cheng (1998) σημείωσε επίσης ότι, αντί της παραδοσιακής διαλείπουσας ροής στα 150 mm υπάρχει μια πολύ βαθμιαία μετάβαση σε έναν τύπο ανάμεικτης ροής καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αερίου.

Ο ρυθμός ροής του αερίου που σχετίζεται με την πλημμύρα ή την αναστροφή της ροής επηρεάζεται σημαντικά από τη μετάβαση μεταξύ της ανάμεικτης και δακτυλιοειδούς ροής. Η μετάβαση συμβαίνει είτε μειώνοντας είτε αυξάνοντας την ταχύτητα του αερίου. Η ταχύτητα του

αερίου μετάβασης, η διάμετρος του σωλήνα και οι συνθήκες ροής πρέπει να είναι καλά καθορισμένες. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι η ακριβής τιμή του ρυθμού ροής αερίου μετάβασης εξαρτάται από το πόσο μπορεί να εισαχθεί υγρό στο σύστημα, επειδή η μετάβαση αντιστοιχεί σε διατμητική τάση μηδενικού τοιχώματος (Hewitt και Hall-Taylor, 1970).

Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει ένα αριθμό αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την επίδραση της διαμέτρου του σωλήνα στη μετάβαση μεταξύ των ανάμεικτων και των δακτυλιοειδών κατακόρυφων ροών. Μερικά από αυτά τα αποτελέσματα παριστάνονται επίσης με την απεικόνιση της ταχύτητας αερίου μετάβασης έναντι της διαμέτρου του σωλήνα, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3-12 (a) και (b).

Η ταχύτητα μετάβασης του αερίου μετρήθηκε με μεθόδους αντιστροφής ροής και πλημμύρας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-12 (a) και (b) αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι υπήρξαν κάποιες αποκλίσεις ως προς τις επιδράσεις της διαμέτρου του σωλήνα στην ταχύτητα μετάβασης.

Οι Pushkina και Sorokin (1969), που εφάρμοσαν τη μέθοδο αναστροφής, παρατήρησαν ότι η διάμετρος του σωλήνα επέφερε μόνο μια μικρή επίδραση στην ταχύτητα μετάβασης.

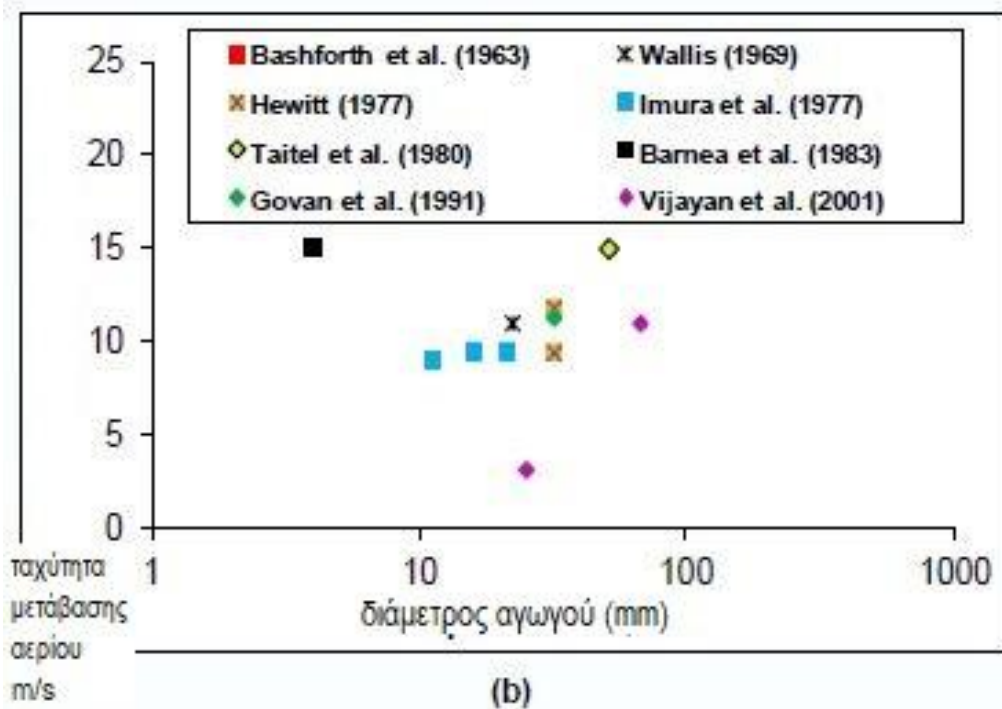
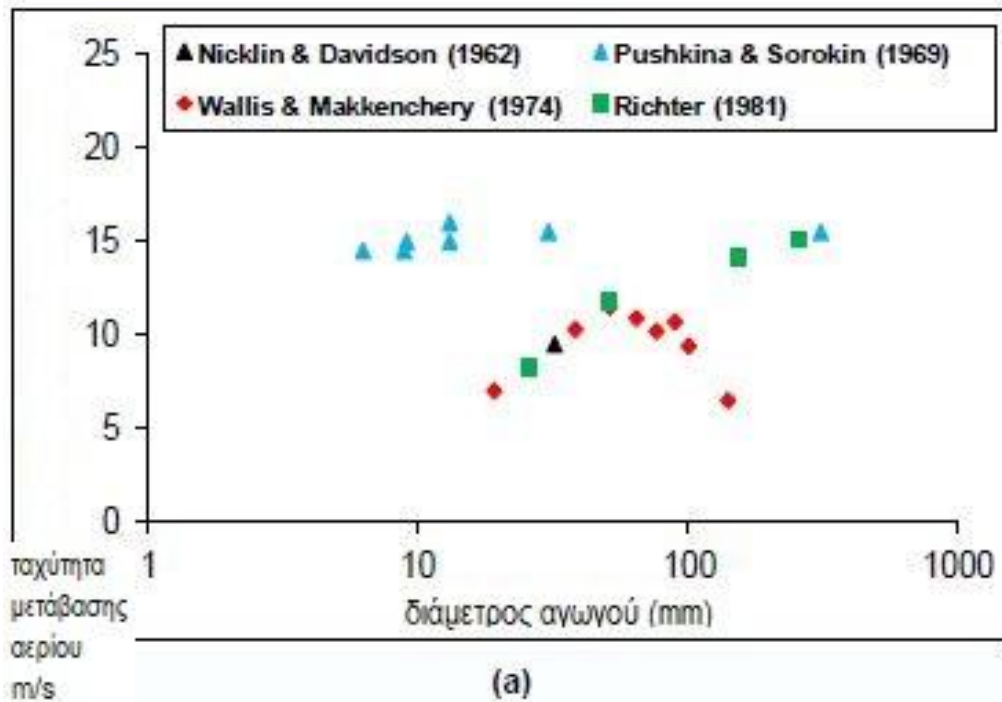
Οι Wallis και Makkenchery (1974) έλαβαν μέγιστη επιφανειακή ταχύτητα αερίου 11,5 m/s χρησιμοποιώντας σωλήνα διαμέτρου 51 mm. Παρατηρήθηκε ότι, η ταχύτητα μετάβασης μειώθηκε στα 6,5 m/s, όταν η διάμετρος του σωλήνα αυξήθηκε στα 140 mm.

Ο Richter (1981), ο οποίος χρησιμοποίησε επίσης μια μέθοδο αναστροφής της ροής, δήλωσε ότι υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας μετάβασης και της διαμέτρου του σωλήνα ( $D$ ), όπως

παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-12 (a). Για μια συγκεκριμένη διάμετρο, όταν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πλημμύρας, η ταχύτητα μετάβασης διασκορπίστηκε σε αρκετά ευρύ φάσμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-12 (b). Μια ακραία περίπτωση ήταν αυτή που αναφέρθηκε από τον Vijayan (2001) που χρησιμοποίησε σωλήνα διαμέτρου 25 mm. Παρατηρήθηκε η χαμηλότερη μεταβατική ταχύτητα, η οποία ήταν στα 3 m/s.

Από την άλλη πλευρά, ο Wallis (1969) σημείωσε ότι η ταχύτητα μετάβασης θα μπορούσε να φτάσει τα 11 m/s για την ίδια διάμετρο σωλήνα δηλαδή 25 mm. Ωστόσο, αν παραμεληθεί αυτή η εξαιρετική περίπτωση, τα δεδομένα από τη μέθοδο πλημμύρας παρουσιάζουν αξιοσημείωτη τάση για αύξηση της μεταβατικής ταχύτητας με αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα. Παρ'όλα αυτά, φαίνεται ότι τα όρια μετάβασης του καθεστώτος ροής που λαμβάνονται από διάφορους ερευνητές ήταν σημαντικά διαφορετικά.

Οι Hewitt και Hall-Taylor (1970) επεσήμαναν ότι αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκληθεί ως αποτέλεσμα αστάθειας φιλμ εξαιτίας χρησιμοποίησης διαφορετικών μεθόδων έγχυσης υγρού. Υποστήριξαν ότι η μέθοδος ελάχιστης πίεσης θα έδινε πιο σαφή αποτελέσματα για την ταχύτητα του αερίου μετάβασης. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η μεταβατική ταχύτητα μπορεί να επηρεάζεται ελαφρώς από τον ρυθμό ροής του υγρού.



**Σχήμα 3.11:** Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στην ταχύτητα μετάβασης του αερίου (a) μέσω της μεθόδου αναστροφής (b) μέσω της μεθόδου πλημμύρας (Τα ρευστά είναι αέρας και νερό) (Almabrok, 2013)

Πηγή/μελετητής:	Διάμετρος (mm)	Ταχύτητα ροής (m/s)	Μέθοδος (αναστροφής ροής ή πλημμύρας)
Nicklin and Davidson (1962)	31.8	9.5	αντιστροφή ροής
Bashforth et al. (1963)	31.8	9.5	πλημμύρα
Pushkina and Sorokin (1969)	6.2	14.5	πλημμύρα και αντιστροφή ροής
	8.8	14.5	
	9	15	
	13	15	
	13	16	
30.2	15.5		
Wallis (1969)	22.2	11	πλημμύρα
Wallis and Makkenchery (1974)	19	7	αντιστροφή ροής
	38	10.3	
	51	11.5	
	64	10.9	
	76	10.2	
	89	10.7	
	100	9.4	
140	6.5		
Hewitt (1977)	31.8	9.4	πλημμύρα
	31.8	11.8	
Imura et al. (1977)	11.2	9	πλημμύρα
	16	9.5	
	21	9.5	
Suzuki and Ueda (1977)	10	11	πλημμύρα και αντιστροφή ροής
	18	11	
	28.8	12	
Taitel et al. (1980)	51	15	πλημμύρα
Richter (1981)	25.4	8.3	αντιστροφή ροής
	50.8	11.8	
	152	14.2	
	254	15.1	
Barnea et al. (1982)	4	15	πλημμύρα
Govan et al. (1991)	31.8	11.3	πλημμύρα
Vijayan et al. (2001)	25	2~4.3	πλημμύρα
	67	9~13	

**Πίνακας 3.1:** Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στην μετάβαση από την δακτυλιοειδή στην ανάμεικτη ροή. Στο σύνολο των βιβλιογραφικών αναφορών τα ρευστά είναι αέρας και νερό (Almabrok, 2013)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Διφασική ροή σε κεκλιμένο αγωγό

### 4.1 Γενικά

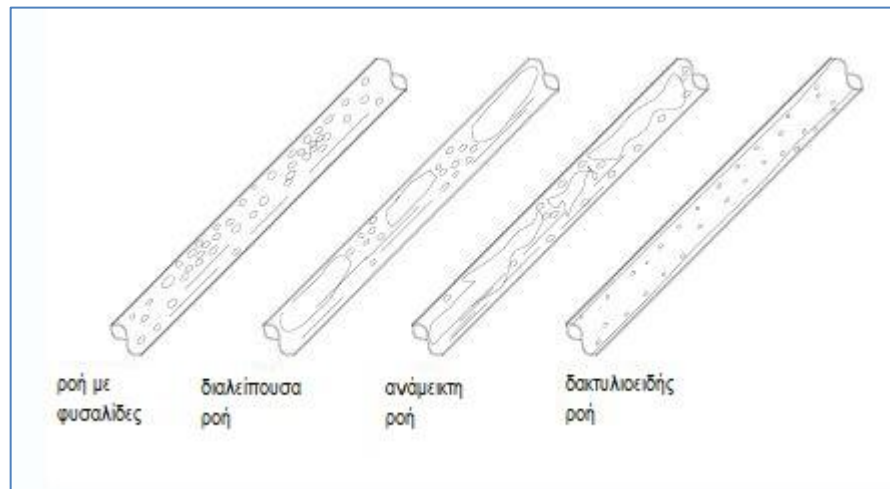
Στη βιβλιογραφία υπάρχουν εκτεταμένες μελέτες σχετικά με οριζόντια και κατακόρυφη προς τα πάνω διφασική ροή νερού-αέρα. Αυτές περιλαμβάνουν μοντέλα και συσχετίσεις για μεταβάσεις μεταξύ των καθεστώτων ροής, καθώς και λεπτομέρειες για βασικές παραμέτρους της διφασικής ροής, όπως είναι πτώση πίεσης και το μέγεθος liquid holdup. Το συγκεκριμένο μέγεθος δεν είναι παρά ένα κλάσμα που εκφράζει το ποσοστό του σωλήνα που καταλαμβάνεται από υγρό. Συμβολίζεται με  $H_L$  και ορίζεται ως ο όγκος υγρού σε μια διατομή σωλήνα προς τον αντίστοιχο ωφέλιμο όγκο της διατομής αυτής. Χάριν συντομίας, όταν θα γίνεται αναφορά στο κλάσμα αυτό, θα χρησιμοποιείται ο αγγλικός όρος.

Αν και στη βιβλιογραφία αναλύθηκαν κυρίως οι ροές σε οριζόντιους και κατακόρυφους αγωγούς (όπως προαναφέρθηκε), οι εμπορικοί αγωγοί ακολουθούν τις κανονικές διακυμάνσεις του εδάφους και αποτελούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από κεκλιμένα τμήματα με φορά προς τα πάνω ή προς τα κάτω, γεγονός που συνεπάγεται πως προκύπτουν διφασικές ροές ανάντη και κατάντη κεκλιμένων αγωγών. Ως εκ τούτου, τα μοντέλα και οι συσχετισμοί που αναπτύχθηκαν για οριζόντια ή κάθετη ροή δεν είναι πάντοτε εφαρμόσιμοι, όπως τονίζουν σε μελέτη τους οι Hasan και Kabir (1988). Η κλίση των σωλήνων προσθέτει μια άλλη διάσταση στα ήδη πολύπλοκα φαινόμενα ροής, που γενικά παρατηρούνται σε οριζόντιους και κάθετους αγωγούς.

Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στην επισήμανση των πιο βασικών πτυχών που σχετίζονται με την υφιστάμενη κατάσταση σε τομείς της τεχνολογίας, όσον αφορά στην διφασική ροή σε κεκλιμένους σωλήνες.

## 4.2 Καθεστώτα ροής στη ροή ανάντη ενός κεκλιμένου αγωγού

Τα πρότυπα ροής που παρατηρούνται στην προς τα πάνω κεκλιμένη ροή είναι αρκετά παρόμοια με εκείνα που παρατηρούνται στην κατακόρυφη ανοδική ροή, ειδικά για σχεδόν κάθετα συστήματα. Περιλαμβάνουν καθεστώτα ροής με φυσαλίδες, διαλείπουσα, ανάμεικτη και δακτυλιοειδή ροή όπως αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1.



**Σχήμα 4.1:** καθεστώτα ροής σε διαφασική ροή σε κεκλιμένο αγωγό (Hernandez Perez, Valente, 2008)

Για συστήματα που αποκλίνουν περισσότερο από  $20^\circ$  από τον κατακόρυφο άξονα, παρατηρείται σπάνια ανάμεικτη ροή (churn flow). Για αγωγούς που έχουν μικρές κλίσεις και πλησιάζουν τα οριζόντια συστήματα, το καθεστώς ροής με φυσαλίδες απουσιάζει. Πράγματι, ο Taitel (1978) ισχυρίστηκε ότι για συστήματα που αποκλίνουν περισσότερο από  $50^\circ$  από τον κατακόρυφο άξονα, η ροή με φυσαλίδες δεν εμφανίζεται ποτέ. Επιπλέον, για σχεδόν οριζόντια συστήματα, έχει παρατηρηθεί η στρωματοποιημένη ροή.



### **4.3 Καθεστώτα ροής στη ροή κατάντη ενός κεκλιμένου αγωγού**

Η ταυτόχρονη προς τα κάτω ροή αερίου και υγρού, αν και σπάνια, είναι σημαντική στη βιομηχανία χημικών διεργασιών και στην παραγωγή πετρελαίου. Ένα παράδειγμα διφασικής προς τα κάτω ροής είναι η έγχυση υγρού ατμού σε θερμική ανάκτηση.

Ο Barnea (1982) μελέτησε τη μετάβαση του ρυθμού ροής για διφασική κατάντη ροή για μεταβολή της γωνίας κλίσης από την οριζόντια στην κατακόρυφη διεύθυνση. Διαπίστωσαν ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης επηρεάζει έντονα το σχήμα της διεπιφάνειας των δύο ρευστών, που κυμαίνεται από σχεδόν στρωτή για μηδενική κλίση, έως κυματοειδής διαστρωματωμένη σε υψηλότερες κλίσεις και σε σχεδόν αξονικά συμμετρική δακτυλιοειδή ροή για γωνίες κλίσης πλησίον της κατακόρυφης.

### **4.4 Χάρτης καθεστώτων ροής**

Υπάρχουν πολύ λίγα σύνολα δεδομένων ή συσχετισμοί που είναι διαθέσιμα για τη μετάβαση του ρυθμού ροής σε κεκλιμένα συστήματα. Η φυσική μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων είναι ακόμη πιο σπάνια. Ο Gould (1974) δημοσίευσε χάρτες μοτίβων ροής για οριζόντια και κάθετη ροή και για ανοδική ροή σε κλίση  $45^\circ$ . Οι Mukherjee και Brill (1985) ανέφεραν εκτεταμένα στοιχεία σχετικά με την διφασική ροή σε κεκλιμένα συστήματα. Οι Spedding και Nguyen (1976) συνέκριναν τους χάρτες καθεστώτος ροής που αναπτύχθηκαν από άλλους με πειραματικά δεδομένα αέρα-νερού για συνθήκες από κατακόρυφη ροή προς τα κάτω σε κατακόρυφη ανοδική ροή.

Το έργο των Weisman και Kang (1981) αποτελεί σημαντική συμβολή στον τομέα αυτό. Βασική αρχή τους είναι ότι τα όρια των μοτίβων ροής σε υψηλές ταχύτητες ροής συνήθως δεν επηρεάζονται από την κλίση του σωλήνα (π.χ., δεν είναι σαφής η μετάβαση σε καθεστώς δακτυλιοειδούς ροής ή ροής με διασκορπισμένες φυσαλίδες). Υποστηρίζουν ότι αυτή η παρατήρηση εκτείνεται σε όλη τη διαδρομή από την κάθετη στην οριζόντια διεύθυνση. Ο απλουστευμένος συσχετισμός τους για τη μετάβαση σε δακτυλιοειδή ροή, για όλες τις γωνίες κλίσης, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$(Fr_{SG}) \cdot (Ku_{SG}) = 25 \cdot \left( \frac{U_{SG}}{U_{SL}} \right)^{0.625} \quad (4.1)$$

Όπου τόσο ο αριθμός Froude ( $Fr_{SG} = \frac{U_{SG}^2}{g \cdot d}$ ) όσο και ο αριθμός Kutadelaze, σχετίζονται με την επιφανειακή ταχύτητα αέρα,  $U_{SG}$ .

$$Ku_{SG} = \frac{U_{SG}}{[g \cdot (\rho_L - \rho_G) \cdot \sigma]^{0.25}} \quad (4.2)$$

Η μετάβαση σε καθεστώς ροής με διασκορπισμένες φυσαλίδες για όλες τις κλίσεις αγωγών δίνεται από την σχέση:

$$\left[ \frac{\left( -\frac{dp}{dz} \right)_L}{g \cdot (\rho_L - \rho_G)} \right]^{0.5} \cdot \left[ \frac{g \cdot (\rho_L - \rho_G) \cdot d^2}{\sigma} \right] \geq 9.7 \quad (4.3)$$

Όπου  $(dp/dz)_L$  είναι η κλίση πίεσης τριβής του υγρού που ρέει μόνο του στον αγωγό. Η σχέση των Weisman-Kang για τη μετάβαση σε ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες είναι παρόμοια με εκείνη του Taitel (1978) για κατακόρυφη ροή. Και οι δύο σχέσεις υποδεικνύουν ταχύτητα

μίγματος περίπου 3 m/s για συστήματα αέρα-νερού υπό κανονικές συνθήκες, για μετάβαση σε ροή διασκορπισμένων φυσαλίδων. Η σχέση των Weisman-Kang δείχνει την ανεξαρτησία αυτής της μετάβασης από την ταχύτητα του αερίου, ενώ του Taitel (1978) δεν το κάνει.

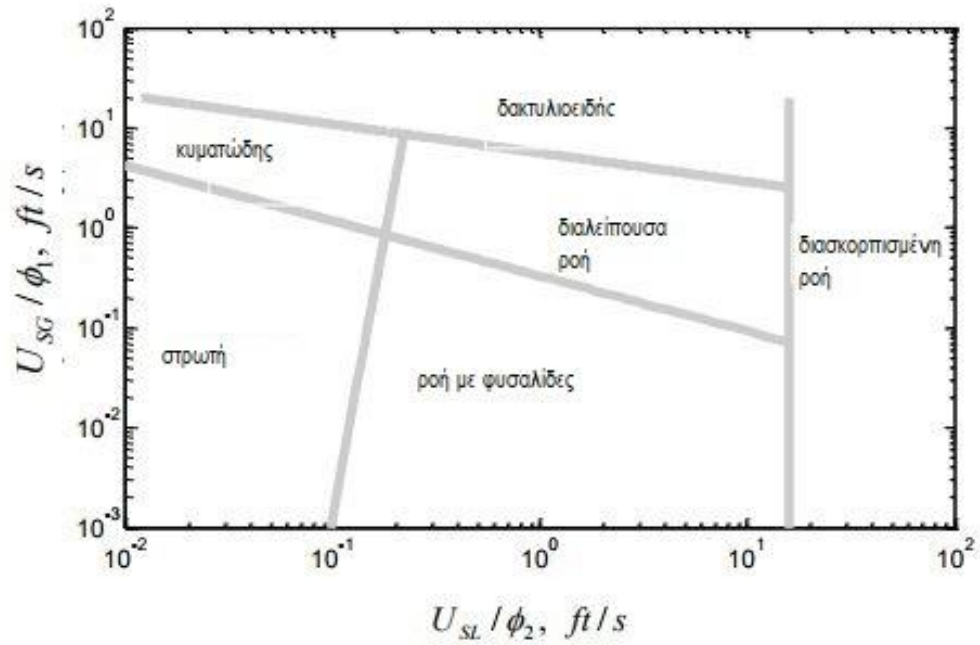
Ακολουθώντας την προσέγγιση του Barnea (1980) για οριζόντια και ελαφρώς κεκλιμένα συστήματα, οι Weisman και Kang (1981) δεν διακρίνουν την ανάμεικτη από τη διαλείπουσα ροή και ενσωματώνουν αυτά τα δύο καθεστώτα ροής σε ένα, χαρακτηρίζοντας την συγκεκριμένη ροή ως διακοπτόμενη ροή «intermittent flow». Η μετάβαση της προσέγγισής τους μεταξύ ροής φυσαλίδων και διαλείπουσας ροής χρησιμοποιεί τους αριθμούς Froude, με βάση τις  $U_{SG}$  και  $U_m$ , ως τις συσχετιζόμενες παραμέτρους. Η μεταβατική έκφρασή τους δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{U_{SG}^2}{g \cdot d} = 0.2 \cdot \left[ \frac{U_m}{g \cdot d} \right]^{1.56} \cdot (1 - 0.65 \cdot \cos\theta)^2 \quad (4.4)$$

Ο τελευταίος όρος του γινομένου  $(1 - 0.65 \cdot \cos\theta)^2$  αντικατοπτρίζει την επίδραση της κλίσης του αγωγού.

Το Σχήμα 4.2 παρουσιάζει τον χάρτη γενικευμένων καθεστώτων ροής των Weisman και Kang (1981).

Ο βασικός χάρτης, χρησιμοποιεί τα μεγέθη  $U_{SL}$  και  $U_{SG}$ , ως άξονες για τη διφασική ροή σε οριζόντιο σύστημα με συγκεκριμένες (τυπικές) τιμές ιδιοτήτων ρευστού και διαστάσεων του συστήματος.



**Σχήμα 4.2:** Γενικευμένος χάρτης καθεστώτων ροής των Weisman & Kang (1981)

Οι παράμετροι  $\phi_1$  και  $\phi_2$  χρησιμοποιούνται για να κάνουν τον χάρτη γενικό, όχι μόνο για όλα τα υγρά αλλά και για τις γωνίες κλίσης. Οι εκφράσεις για τα  $\phi_1$  και  $\phi_2$  όπως αναφέρθηκαν από τους Weisman και Kang (1981) αναπαράγονται στον Πίνακα 4.1.

κατεύθυνση ροής	μετάβαση σε:	$\phi_1$	$\phi_2$
οριζόντια, κατακόρυφη και κεκλιμένη ροή	δακτυλιοειδής ροή	$(\rho_{sG}/\rho_G)^{0.23}$ $(\Delta\rho/\Delta\rho_s)^{0.11}$ $(\sigma/\sigma_s)^{0.11}$ $(d/d_s)^{0.415}$	1.0
	διασκορπισμένη ροή	1.0	$(\rho_L/\rho_{sL})^{-0.33}$ $(d/d_s)^{0.16}$ $(\mu_L/\mu_s)^{0.09}$ $(\sigma/\sigma_s)^{0.24}$
οριζόντια ροή	κυματώδης, στρωματοποιημένη ροή	$(d_s/d)^{0.17} (\mu_{sG}/\mu_G)^{1.55}$ $(\rho_{sG}/\rho_G)^{1.55} (\Delta\rho_{sG}/\Delta\rho_G)^{0.69}$ $(\sigma_{sG}/\sigma_G)^{0.69}$	1
οριζόντια και σχεδόν οριζόντια ροή	διαχωρισμένη διακοπτόμενη ροή	1	$(d/d_s)^{0.45}$
κατακόρυφη και κεκλιμένη ροή	διακοπτόμενη ροή με φυσαλίδες	$(d/d_s)^n$ $(1-0.65\cos\theta)$ $n=0.26e^{-0.17}$	1.0 $v_{sL}/v_{sL}$

S denotes standard conditions,  $d_s=1.0$  in,  $\rho_{sG}=0.0013$  kg/l,  $\rho_{sL}=1$  kg/l,  $\sigma_s=70$  dynes/cm,  $v_{sL}=1$  ft/s

**Πίνακας 4.1:** Παράμετροι για τον χάρτη καθεστώτων ροής των Weisman & Kang (1981)

Ο Barnea (1985) συνόψισε τα πιο αξιοσημείωτα μοντέλα για την πρόβλεψη των μεταβάσεων μεταξύ των καθεστώτων ροής στις διαφασικές ροές αερίου-υγρού σε κεκλιμένα συστήματα. Επίσης πρότεινε μια λογική μεθοδολογία για συστηματικό προσδιορισμό των καθεστώτων ροής που καλύπτουν όλο το φάσμα των κλίσεων από την οριζόντια μέχρι και την κατακόρυφη διεύθυνση. Πιο πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί άλλα κριτήρια για τη μετάβαση από το ένα στο άλλο καθεστώς ροής, όπως παρουσιάζονται παρακάτω με στοιχεία και αναλύσεις από διάφορους ερευνητές.

Μετάβαση από τη ροή με φυσαλίδες στην διαλείπουσα ροή:

Η φυσική ανάλυση για τη μετάβαση από τη ροή με φυσαλίδες σε διαλείπουσα ροή, που παρουσιάστηκε από τους Hasan και Kabir (1988) ακολουθεί μια προσέγγιση αντίστοιχη αυτής που ισχύει για τα κατακόρυφα συστήματα. Για κατακόρυφα συστήματα, όταν το κλάσμα κενών υπερβαίνει το 0,25, γενικά πραγματοποιείται μετάβαση από την ροή με φυσαλίδες.

Για έναν κεκλιμένο σωλήνα, η αέρια φάση τείνει να ρέει κατά μήκος του άνω τοίχωματος. Έτσι, κοντά στο άνω τοίχωμα, το κλάσμα κενών μπορεί να υπερβεί την τιμή 0,25, με αποτέλεσμα την αυξημένη σύγκρουση μεταξύ των φυσαλίδων, σχηματίζοντας φυσαλίδες Taylor. Στην περίπτωση αυτήν η μετάβαση σε διαλείπουσα ροή πραγματοποιείται για τιμή του κλάσματος κενών μικρότερο από 0,25.

Υποθέτοντας ότι σε έναν κεκλιμένο σωλήνα η πραγματική επιφάνεια διατομής που διατίθεται για το αέριο είναι η προβολή της περιοχής σε ένα οριζόντιο επίπεδο και το  $A$  είναι η περιοχή διατομής, η περιοχή που είναι διαθέσιμη για τη ροή αερίου μέσω ενός σωλήνα κεκλιμένου υπό γωνία  $\theta$ , στην οριζόντια είναι  $A \sin \theta$ , και η πραγματική επιφανειακή ταχύτητα της αέριας φάσης είναι:

$$(U_{SG})_{\theta} = \frac{Q_s}{A \cdot \sin \theta} = \frac{U_{SG}}{\sin \theta} \quad (4.5)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση για το holdup σε κατακόρυφα συστήματα σε έναν κεκλιμένο σωλήνα, λαμβάνεται το τοπικό κλάσμα όγκου,  $\alpha_G$ , κοντά στο άνω τοίχωμα:

$$\alpha_G = \frac{\left[ \frac{U_{SG}}{\sin\theta} \right]}{Co \cdot \left[ U_{SL} + \frac{U_{SL}}{\sin\theta} \right] + U_\infty} \quad (4.6)$$

Όπου:

$$U_\infty = 1.53 \left[ \frac{g \cdot \sigma_L \cdot (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.7)$$

Η ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας,  $U_\infty$ , που καθορίζεται από την ισορροπία των δυνάμεων πλευστότητας και οπισθέλκουσας, μπορεί να είναι διαφορετική για έναν κεκλιμένο σωλήνα σε σχέση με έναν κατακόρυφο. Η δύναμη πλευστότητας μειώνεται καθώς ο σωλήνας αποκλίνει από την κατακόρυφη διεύθυνση, γεγονός που τείνει να μειώσει την ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας. Ωστόσο, η απόκλιση από την κατακόρυφη διεύθυνση κάνει επίσης τη «μύτη» της φυσαλίδας πιο έντονη. Μια πιο έντονη «μύτη» της φυσαλίδας προκαλεί μείωση της δύναμης ολίσθησης πάνω σε αυτήν. Έτσι η επίδραση της κλίσης του σωλήνα στην ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας μπορεί να είναι αμελητέα.

Ο Barnea (1985) επέκτεινε επίσης την ανάλυσή του για μετάβαση σε κατακόρυφα συστήματα, σε κεκλιμένα συστήματα, αντικαθιστώντας την ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας με  $U_\infty \cdot \sin\theta$ . Για παράδειγμα, πρότεινε ότι η μετάβαση από τη ροή με φυσαλίδες εμφανίζεται όταν το  $U_{SG}$  είναι μεγαλύτερο από  $0,33U_{SL} + 0,25 U_\infty \cdot \sin\theta$ .

Επίσης, επεσήμανε ότι η «κατά προτίμηση» μετανάστευση των φυσαλίδων στο ανώτερο τμήμα ενός αποκλίνοντος σωλήνα οδηγεί σε μια περιορισμένη γωνία κλίσης πέρα από την οποία μπορεί να λάβει χώρα ομαλή ροή. Εξισώνοντας τις δυνάμεις πλευστότητας με τις δυνάμεις

ανύψωσης, πρότεινε ότι όταν η κλίση (από την οριζόντια) είναι μικρότερη από αυτή που δίνεται από την παρακάτω σχέση, δεν μπορεί να αναπτυχθεί ροή φυσαλίδων:

$$\frac{\cos\theta}{\sin\theta} = \frac{3}{4} \cdot \cos 45^\circ \cdot \frac{U_\infty}{g} \cdot \left( \frac{C_L \cdot \gamma^2}{g} \right) \quad (4.8)$$

Για τον συντελεστή ανύψωσης  $C_L$ , ο Barnea (1985) συνέστησε μια τιμή 0,8, ενώ ο συντελεστής διανομής,  $\gamma$ , κυμαίνεται μεταξύ 1,1 και 1,5. Για τη ροή του αέρα-νερού μέσω ενός σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 51 mm σε τυποποιημένες συνθήκες, η εξίσωση (4.8) υποδηλώνει ότι η μέγιστη κλίση του σωλήνα για ροή με φυσαλίδες είναι περίπου  $55^\circ$  έως  $70^\circ$ .

Εκτός από την κλίση, η διάμετρος του σωλήνα επιβάλλει επίσης περιορισμό στην εμφάνιση ροής με φυσαλίδες. Η διάμετρος του συστήματος πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να ικανοποιεί την προϋπόθεση ότι η ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας Taylor είναι μεγαλύτερη από εκείνη των μικρών φυσαλίδων.

Μετάβαση στην ανάμεικτη ροή (churn flow):

Η χαοτική φύση του καθεστώτος ανάμεικτης ροής καθιστά πολύ δύσκολη τη μοντελοποίηση της δυναμικής αυτής της ροής. Ο Kaya (2001) παρουσίασε μια ανάλυση που φαίνεται ελπιδοφόρα και υποστηρίζεται καλά από τα δεδομένα.

Σημείωσε ότι η μετάβαση σε ανάμεικτη ροή πραγματοποιείται όταν το κλάσμα όγκου αερίου,  $\alpha$  υπερβαίνει το 0,78. Για τιμή του κλάσματος  $\alpha$  ίση με 0.78 και του συντελεστή  $C_0=1.2$ , κατέληξε στην παρακάτω σχέση για την τιμή της ταχύτητας  $U_{SG}$ , για την οποία πραγματοποιείται μετάβαση στην ανάμεικτη ροή:



$$U_{SG} = 12,19 \cdot (1,2 \cdot U_{SL} + U_{\infty} \cdot r\theta) \quad (4.9)$$

Μετάβαση στη δακτυλιοειδή ροή:

Μετά την προσέγγιση των Taitel (1980) και Barnea (1985), παρουσιάστηκε μια ανάλυση που καταλήγει στην έκφραση για τη μετάβαση σε δακτυλιοειδή ροή, η οποία είναι γραμμένη ως:

$$U_{SG} = 3,1 \cdot \sin\theta^{\frac{1}{4}} \left( g \cdot \sigma \cdot (\rho_L - \rho_G) / \rho_G^2 \right) \quad (4.10)$$

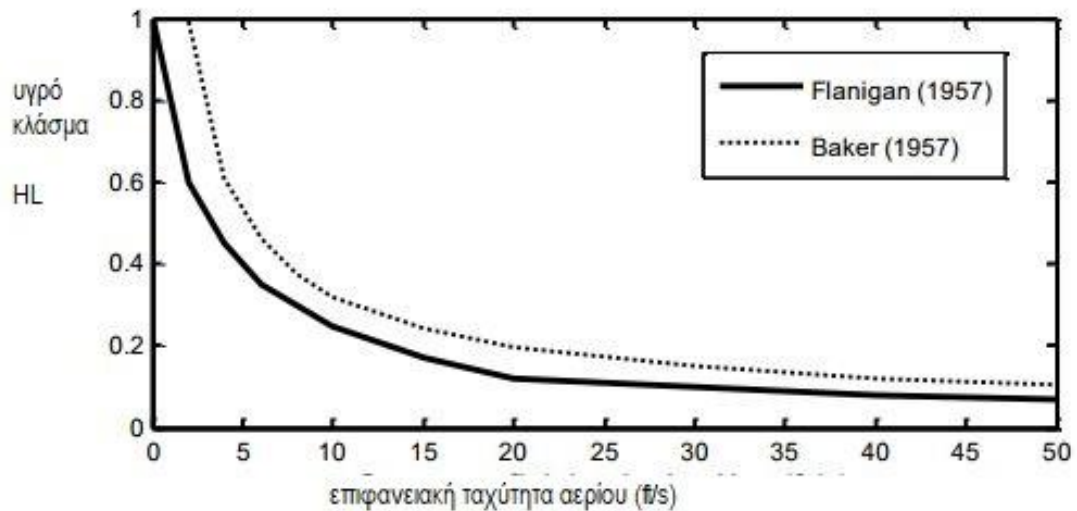
Η εξίσωση (4.10) δείχνει ότι η επιφανειακή ταχύτητα αερίου, που απαιτείται για τη μετάβαση σε δακτυλιοειδή ροή, εξαρτάται από την τιμή του ημιτόνου της γωνίας κλίσης του αγωγού.

Το έργο του Weisman και του Kang (1981) δείχνει ότι, με εξαίρεση τη μετάβαση σε διαλείπουσα ροή με φυσαλίδες, τα κριτήρια μετάβασης που έχουν καθοριστεί για κατακόρυφα συστήματα είναι προφανώς εφαρμόσιμα και σε κεκλιμένα συστήματα. Ωστόσο, το κριτήριο που προτείνεται από τον Kaya (2001) για τη μετάβαση στην ανάμεικτη ροή δείχνει ελαφρά εξάρτηση αυτής της μετάβασης από την κλίση του αγωγού. Το έργο του Barnea (1985) δείχνει επίσης ότι η μετάβαση σε δακτυλιοειδή ροή επηρεάζεται ελαφρά από τη γωνία κλίσης.

#### **4.5 H<sub>L</sub> (liquid holdup) σε κεκλιμένους αγωγούς**

Το υγρό κλάσμα (liquid holdup) είναι μια σημαντική παράμετρος ενδιαφέροντος για τη μελέτη της ροής των διφασικών μιγμάτων. Επειδή οι δύο φάσεις δεν ρέουν γενικά με την ίδια ταχύτητα, το κλάσμα όγκου επί τόπου σχεδόν πάντοτε θα είναι διαφορετικό από εκείνο στην είσοδο

του σωλήνα. Δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία πετρελαίου για τον σχεδιασμό αγωγών δύο φάσεων είναι αυτές του Baker (1957) και του Flanigan (1958). Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις Baker και Flanigan για  $H_L$ .



**Σχήμα 4.3:** Σχέσεις για  $H_L$  των Baker (1957) & Flanigan (1958)

Η καμπύλη του Baker, καθορίζεται από την σχέση:

$$H_L = 1.61 \cdot U_{SG}^{-0.70} \quad (4.11)$$

Όπου η ταχύτητα είναι μετρημένη σε μονάδες ft/s. Η καμπύλη του Flanigan προέκυψε από ζεύγη συντεταγμένων που παρουσίασε ο ίδιος. Για επιφανειακές ταχύτητες αερίου μικρότερες από 10ft/s υπάρχει σημαντική διαφορά στις δύο σχέσεις και καμπύλες.

Ο Guzhon (1967) πρότεινε ότι το κλάσμα όγκου υγρού,  $E_L$ , θα μπορούσε να προσδιοριστεί από την γνώση του υγρού κλάσματος που εισέρχεται στον σωλήνα,  $C_L$  και του αριθμού Froude με βάση την ταχύτητα του μίγματος,  $U_m$ .

Χρησιμοποιώντας δεδομένα για γωνία σωλήνα  $9^\circ$  προς την οριζόντια, έλαβε μια σειρά από ευθείες γραμμές όλες συγκλίνουσες στο  $C_L=E_L=1$ , Σχήμα 2.9. Όλα τα σημεία για τα οποία το  $Fr_m > 4$  βρέθηκε να βρίσκεται σε μία ευθεία γραμμή.

Ο Greskovich (1973) πρότεινε μια απλοποιημένη διαδικασία βασισμένη στο γεγονός ότι ευθείες γραμμές προέκυψαν από τη μελέτη του Guzhon (1967) για ένα δεδομένο μείγμα του αριθμού Froude σε μια γραφική παράσταση μεταξύ των μεγεθών  $E_L$  και  $C_L$ , Σχήμα 4.4.

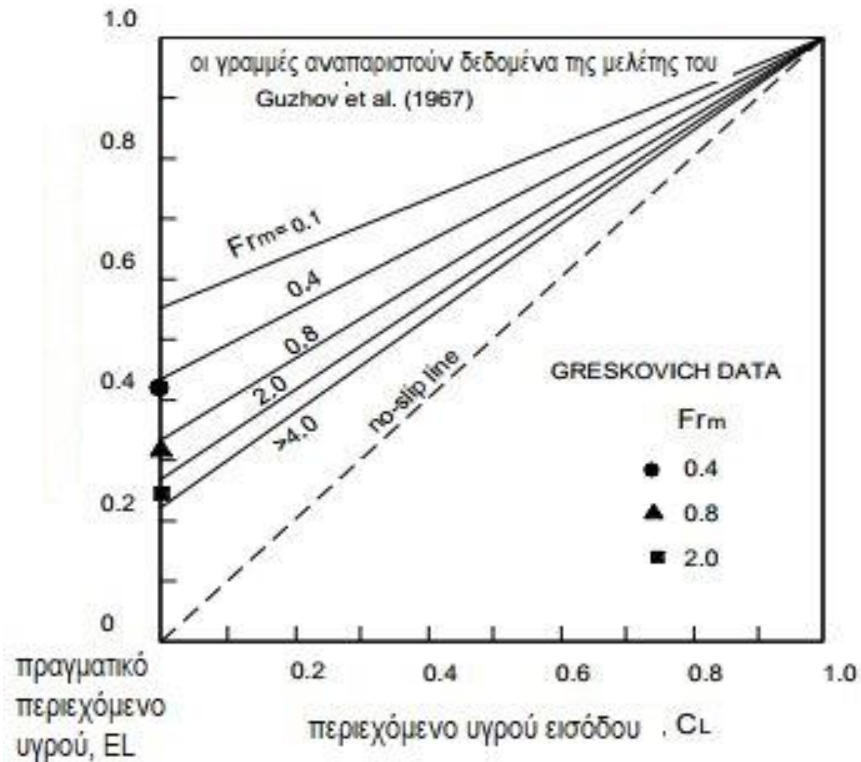
Δεδομένου ότι σε  $C_L=1$ , όλες αυτές οι γραμμές συγκλίνουν στο  $E_L=1$ , ο Greskovich (1973) πρότεινε να μετρηθεί μόνο η απόσταση που αντιστοιχεί στο  $C_L=0$  προκειμένου να καθοριστεί ολόκληρη η καμπύλη για έναν δεδομένο αριθμό Froude.

Επίσης, πρότεινε ότι αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη ροή αερίου μέσω ενός αρχικά γεμισμένου με υγρό σωλήνα και να μετρηθεί η προκύπτουσα τιμή του liquid holdup όταν έχει επέλθει ισορροπία. Υπό αυτές τις συνθήκες δεν υπάρχει πραγματική ροή υγρού και  $C_L=0$ .

Ωστόσο, μπορεί κανείς να δει τον αριθμό Froude με βάση την ταχύτητα του αερίου ως ένα μείγμα του αριθμού Froude στο σημείο αυτό. Ως εκ τούτου ολόκληρη η γραμμή για ένα διασπαστικό μείγμα μπορεί να ληφθεί τραβώντας την ευθεία γραμμή μέσα από το μετρημένο  $E_L$  σε  $C_L=0$  και το σημείο  $E_L=C_L=1$ .

Ο Greskovich παρουσιάζει επίσης δεδομένα για  $C_L=0$  για κλίσεις σωλήνων  $2^\circ$ ,  $6^\circ$  και  $10^\circ$ . Αυτά τα δεδομένα δείχνουν σημαντική επίδραση της κλίσης στην τιμή του liquid holdup που κυμαίνεται από 0,13 έως 0,22 για  $Fr_m=0,4$  και 0,32 έως 0,41 για  $Fr_m=2,0$ .

Μπορεί να σημειωθεί ότι αυτό διαφωνεί με την μελέτη του Guzhon σύμφωνα με την οποία υπάρχει μικρή επίδραση της κλίσης του αγωγού στο liquid holdup.



**Σχήμα 4.4:** Κλάσμα όγκου υγρού για διάφορους αριθμούς Froude του Guzhon (1967)

Ο Gregory (1974) εξέτασε τη συσχέτιση του Guzhon και έδειξε ότι δεν ήταν αξιόπιστη σε χαμηλές τιμές του liquid holdup, ενώ οι συνηθισμένες συσχετίσεις μεταξύ Baker και Flanigan οδηγούν σε σημαντικά σφάλματα. Πρότεινε να χρησιμοποιηθεί ο συσχετισμός του Guzhon, εκτός αν προβλέπει τιμές μικρότερες από 0,25.

Οι Mattar και Gregory (1974) μελετούσαν τη διαλείπουσα ροή αέρα-πετρελαίου σε έναν κεκλιμένο σωλήνα προς τα πάνω υπό γωνίες κλίσεων κυμαινόμενες από 0 έως 10°. Έλαβαν δεδομένα για παραμέτρους όπως το liquid holdup και η ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων. Πρότειναν την ακόλουθη σχέση για το liquid holdup.

$$H_L = 1 - \frac{U_{SG}}{1.3 \cdot (U_{SG} + U_{SL}) + 0.7} \quad (4.12)$$

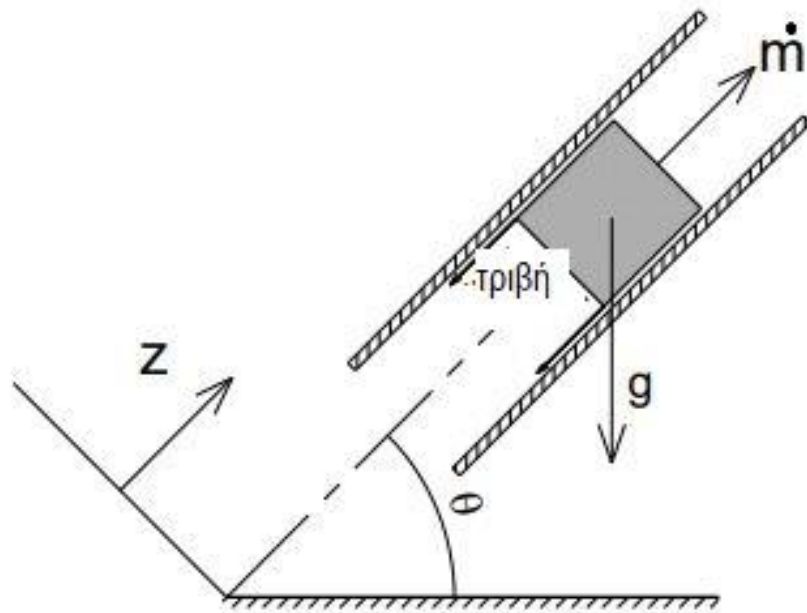
Άλλες μελέτες σχετικά με το liquid holdup έχουν εκπονήσει οι Kokal και Stanislav (1989), οι οποίοι επικεντρώνονται σε ελαφρώς κεκλιμένους σωλήνες και χρησιμοποιούν διφασική ροή ελαίου-αέρα με ακρυλικό σωλήνα μήκους 25 μέτρων.

Πιο πρόσφατες μελέτες έχουν επίσης δημοσιευτεί, για παράδειγμα των Grolman και Fortuin (1997), οι οποίες παρείχαν στοιχεία σχετικά με την υγρασία και την πτώση πίεσης για κεκλιμένους σωλήνες διαμέτρου 26 και 51 mm, σε γωνίες κλίσης μεταξύ 0,1° και 6,0°.

#### 4.6 Πτώση πίεσης σε κεκλιμένους αγωγούς

Η πτώση πίεσης κατά μήκος ενός κεκλιμένου σωλήνα συνδέεται με τη βαρυτική δύναμη, τις δυνάμεις επιτάχυνσης και την διατμητική τάση τριβής. Μια ισορροπία ορμής σε ένα τμήμα μιας διφασικής ροής δύο φάσεων (Σχήμα 4.5) θα παράγει μια βασική εξίσωση κλίσης πίεσης όπως φαίνεται παρακάτω. Η ακόλουθη εξίσωση δείχνει τα τρία κύρια συστατικά της κλίσης πίεσης:

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{dP_{fric}}{dz} - \frac{dP_{acc}}{dz} - \frac{dP_{grav}}{dz} \quad (4.13)$$



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα κλίσης πίεσης (Hernandez Perez, 2008)

Στην κεκλιμένη διφασική ροή η πιο εκτεταμένη μελέτη έχει πραγματοποιηθεί από τους Beggs και Brill (1973). Ενώ από τότε έχουν εκτελεστεί άλλα σημαντικά έργα, κυρίως από τους Mukherjee και Brill (1985), η μέθοδος Beggs και Brill παραμένει ίσως η πιο γνωστή.

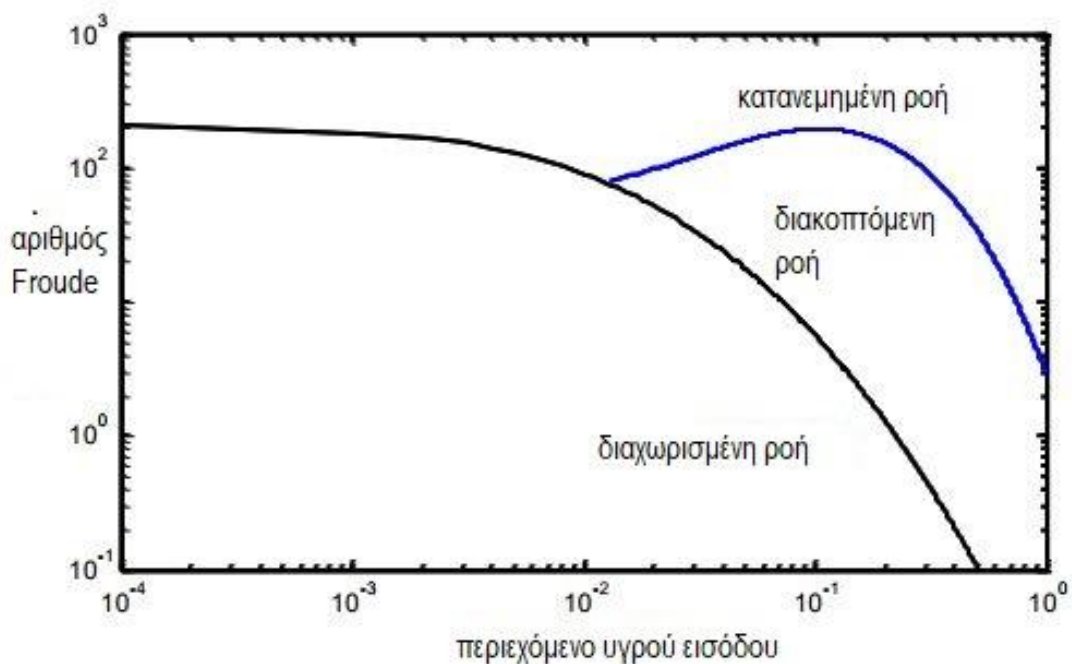
Ο συσχετισμός Beggs and Brill (1973) βασίζεται σε δεδομένα που συγκεντρώθηκαν σε σωλήνες 90 ft με πάχη 1 και 1,5 in. Αυτοί οι σωλήνες ήταν κεκλιμένοι σε διάφορες γωνίες μεταξύ 0 και 90 μοιρών τόσο προς την κατεύθυνση προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω.

Οι σχέσεις υπολογισμού που προτείνουν για κεκλιμένους σωλήνες βασίζεται στην τροποποίηση των σχέσεων που ισχύουν για τα οριζόντια συστήματα. Διαχωρίζουν τα πρότυπα ροής που παρατηρούνται σε οριζόντια συστήματα σε τέσσερις κατηγορίες.

Η πρώτη είναι η διαχωρισμένη ροή, η οποία περιλαμβάνει καθεστάτα ομαλής και κυματιστής στρωματοποιημένης ροής, καθώς και καθεστώς δακτυλιοειδούς ροής. Το καθεστώς της διακοπτόμενης ροής περιλαμβάνει τη διαλείπουσα ροή (slug flow) και τη ροή βύσματος (plug flow).

Το καθεστώς μεταβατικής ροής περιλαμβάνει περιοχές μεταξύ διακοπτόμενων και στρωματοποιημένων καθεστώτων ροής και το καθεστώς κατανεμημένης ροής, που περιλαμβάνει ροή φυσαλίδων και ομίχλης.

Ακολουθεί ο χάρτης καθεστώτων ροής, όπως αυτός σχεδιάστηκε από τους Begg & Brill (1973) βάσει του αριθμού Froude και του κλάσματος υγρού που εισάγεται στον σωλήνα.



Σχήμα 4.6: Χάρτης καθεστώτων ροής των Begg & Brill (1973)

Έχουν προταθεί κάποιες ακόμη μέθοδοι για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς ροής χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση των καθεστώτων ροής. Με βάση δεδομένα από σωλήνες με κλίση 5, 10 και 15 μοίρες από την οριζόντια, οι Singh και Griffith (1970) πρότειναν ότι το liquid holdup σε κεκλιμένη διαλείπουσα ροή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$H_L = U_{SG}/(0.95 \cdot U_m + 1.15) \quad (4.14)$$

Επιπλέον, η σύγκριση αυτής της εξίσωσης με το αντίστοιχο σε κατακόρυφα συστήματα δείχνει ότι οι Singh και Griffith βρήκαν πως η ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας Taylor, σε κεκλιμένους σωλήνες, είναι ανεξάρτητη όχι μόνο από τη διάμετρο του σωλήνα αλλά και από τη γωνία κλίσης. Οι Beggs και Brill (1973) βρήκαν ότι το liquid holdup είναι ευθέως ανάλογο της κλίσης του σωλήνα.

Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες ωστόσο, φαίνεται να συμφωνούν ότι το liquid holdup για διαλείπουσα ροή σε σωλήνα που ελαφρώς αποκλίνει από την κατακόρυφη είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίζεται υπό συνθήκες παρόμοιες με αυτές που επικρατούν στην κατακόρυφη ροή. Πράγματι, τα δεδομένα των Beggs και Brill (1973) υποδηλώνουν ότι το liquid holdup γίνεται μέγιστο σε γωνία 50 μοίρες από την οριζόντια διεύθυνση.

Η σχέση των Beggs και Brill (1973) επιτρέπει τον υπολογισμό του liquid holdup και τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης για όλες τις γωνίες κλίσης, συμπεριλαμβανομένης της ροής με κατεύθυνση προς τα κάτω. Οι Mukherjee και Brill (1985) παρουσίασαν επίσης εκτεταμένα δεδομένα και σχέσεις για ροή προς τα κάτω. Και οι δύο σχέσεις είναι αρκετά ισχυρές. Ωστόσο, είναι λιγότερο αξιόπιστες σε χαμηλούς ρυθμούς υγρών λόγω της παραμετρικής τους εξάρτησης από το εισερχόμενο υγρό κλάσμα.



Υπάρχουν πολύ λίγα μηχανιστικά μοντέλα για τον υπολογισμό του liquid holdup και της πτώσης πίεσης στα κεκλιμένα συστήματα. Οι Hasan και Kabir (1988), Kaya (2001) και Gomez (2000) έχουν προτείνει ολοκληρωμένα μοντέλα για κεκλιμένα συστήματα.

Το μοντέλο Hasan-Kabir χρησιμοποιεί μια προσέγγιση σχεδίασης ροής για κατακόρυφα συστήματα, με τροποποιήσεις για την απόκλιση του συστήματος από τον κατακόρυφο προσανατολισμό. Οι Hasan και Kabir (1988) καθώς και ο Kaya (2001) σημείωσε ότι για δακτυλιοειδή και ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες, οι ρυθμοί ροής είναι πολύ υψηλοί. Κατά συνέπεια, η επίδραση της πλευστότητας είναι μικρή και το αποτέλεσμα της κλίσης του σωλήνα είναι αμελητέο. Επομένως, για αυτά τα καθεστώτα ροής, οι σχέσεις που αναπτύσσονται για κατακόρυφα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς καμία τροποποίηση.

Ροή με φυσαλίδες:

Για κάθετα συστήματα, οι Hasan και Kabir (1988) υποθέτουν ότι η επιτόπια ταχύτητα  $U_G$  της αέριας φάσης είναι το άθροισμα της τελικής ταχύτητας ανόδου  $U$ , και της ταχύτητας του μίγματος  $U_m$ , πολλαπλασιασμένης με την παράμετρο ροής  $C_0$ . Η ανάλυση ισχύει επίσης για τους κεκλιμένους σωλήνες. Το liquid holdup δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_L = 1 - \alpha = 1 - \frac{U_{SG}}{C_0 \cdot U_m + U_\infty} \quad (4.15)$$

Οι Kaya (2001) και Gomez et al. (2000) ακολουθώντας την προσέγγιση του Ansari (1994) για τα κατακόρυφα συστήματα, έφτασε σε μια ελαφρώς διαφορετική έκφραση:

$$H_L = 1 - \alpha = 1 - \frac{U_{SG}}{C_0 \cdot U_m + U_\infty \cdot \sqrt{H_L \cdot \sin\theta}} \quad (4.16)$$

Επομένως, η διαδικασία εκτίμησης του liquid holdup και της πτώσης πίεσης κεκλιμένα συστήματα θα είναι παρόμοια με αυτή για κατακόρυφα συστήματα. Ωστόσο, θα χρειαστούν τιμές για την παράμετρο ροής  $C_0$  και την ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας για κεκλιμένο σύστημα.

Παράμετρος ροής και ταχύτητα ανόδου φυσαλίδων:

Για κατακόρυφα συστήματα, μπορούμε να πούμε ότι η τιμή της παραμέτρου ροής,  $C_0$ , πρέπει να είναι 1,2 επειδή η ροή είναι τυρβώδης, και οι φυσαλίδες ρέουν στο κεντρικό τμήμα του καναλιού, όπου η ταχύτητα του μίγματος είναι 1,2 φορές την αντίστοιχη ταχύτητα για τη μέση διατομή. Το προφίλ συγκέντρωσης φυσαλίδων είναι πιθανό να επηρεαστεί από την κλίση του σωλήνα. Στη συνέχεια, μπορεί κανείς να αναμένει ότι το  $C_0$  θα επηρεαστεί από την κλίση, η οποία οδήγησε τον Gomez (2000) για να χρησιμοποιήσει  $C_0=1.15$ .

Ωστόσο, η επίδραση της κλίσης του σωλήνα στο  $C_0$ , φαίνεται αμελητέα. Οι Hasan και Kabir (1988) και Kaya (2001) πρότειναν μια τιμή 1,2 για το  $C_0$ . Η ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας μπορεί να θεωρηθεί ότι παραμένει αμετάβλητη με την κλίση του σωλήνα. Επομένως, η ίδια έκφραση, με τις ίδιες τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε κάθετους σωλήνες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του liquid holdup σε κεκλιμένους σωλήνες. Η μόνη διαφορά μεταξύ της ροής με φυσαλίδες στους κεκλιμένους σωλήνες και στους κατακόρυφους είναι η μετάβαση στη διαλείπουσα ροή. Μόλις εκτιμηθεί η τιμή του liquid holdup, η συνολική κλίση της πίεσης μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τα στοιχεία τριβής και επιτάχυνσης στο βάρος της υγρής στήλης. Η συμβολή αυτών των παραμέτρων, η οποία είναι πολύ μικρή, μπορεί να εκτιμηθούν με τη μέθοδο που εφαρμόζεται σε κάθετα συστήματα. Το βάρος της

υγρής στήλης (static head) για έναν κεκλιμένο σωλήνα φυσικά είναι  $\rho_m \cdot \sin\theta$ .

#### Διαλείπουσα ροή:

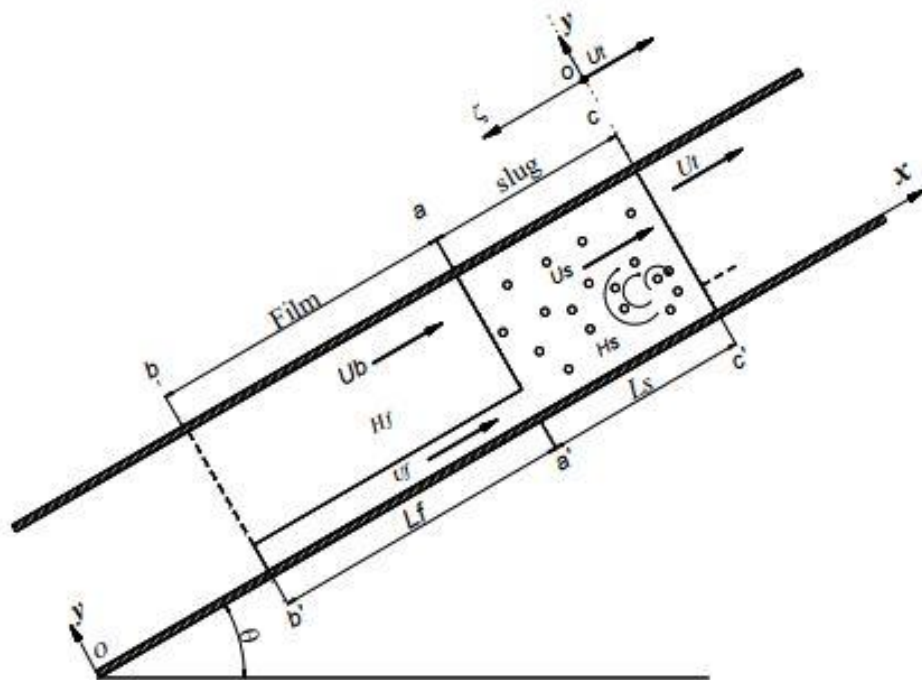
Η εφαρμογή του απλού μοντέλου ροής, που έχει αναπτυχθεί για ροή με κυματισμό, για τη διαλείπουσα ροή, είναι δύσκολη. Αυτή η δυσκολία οφείλεται στη διαφορά στις ταχύτητες ολίσθησης μεταξύ των μικρών φυσαλίδων και των φυσαλίδων Taylor και στη συμμετρική φύση της κατανομής και του σχήματος των φυσαλίδων. Ένας απλός τρόπος για να υπολογιστούν οι διαφορετικές ταχύτητες ολίσθησης στη διαλείπουσα ροή είναι να χρησιμοποιηθεί κάποιος τύπος μίας μέσης ταχύτητας ανύψωσης για όλες τις φυσαλίδες αερίου, μεγάλες και μικρές. Συνεπώς, για την εκτίμηση του κλάσματος όγκου υγρού επί τόπου κατά τη διάρκεια της διαλείπουσας ροής, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$H_L = 1 - \alpha_G = 1 - \frac{U_{SG}}{C_0 \cdot U_m + \bar{U}_{\infty\theta}} \quad (4.17)$$

#### **4.7 Διαλείπουσα ροή**

Το καθεστώς διαλείπουσας ροής είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα πρότυπα ροής που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια κανονικών συνθηκών λειτουργίας σε διφασική ροή. Χαρακτηρίζεται από ταχέως μεταβαλλόμενες υγρές σφαίρες (slugs) με υψηλές τιμές liquid holdup που εναλλάσσονται με μεγάλες περιοχές φυσαλίδων αερίου ή μεμβράνες. Η ροή είναι πολύ δυναμική, δεδομένου ότι οι ταχέως κινούμενες υγρές σφαίρες (slugs) διατηρούν υπερβολικά αργά κινητά υγρά φιλμ μπροστά τους. Έτσι ένα σωματίδιο υγρού στην υγρή μεμβράνη συλλέγεται συνεχώς από το μπροστινό μέρος του slug, επιταχύνεται σε πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα, στη συνέχεια επιβραδύνεται καθώς ταξιδεύει κατά

μήκος της περιοχής ανάπτυξης της διαλείπουσας ροής και τελικά ρίχνεται στην ουρά στο υγρό φιλμ πίσω καθώς η ταχύτητα προσεγγίζει και πάλι την ταχύτητα του φιλμ. Οι Hubbard (1965) και οι Dukler και Hubbard (1975) παρείχαν το πρώτο ολοκληρωμένο μοντέλο διαλείπουσας ροής, το οποίο χρησίμευσε ως βάση για τη μοντελοποίηση ροής από τότε.



**Σχήμα 4.7:** Απεικόνιση διαλείπουσας ροής (Hernandez Perez, Valente, 2008)

Το σχήμα 4.7 δείχνει ένα απλοποιημένο φυσικό μοντέλο διαλείπουσας ροής. Το μοντέλο ξεκινά από τη βασική ιδέα ότι μια μονάδα slug αποτελείται αφ' ενός από ένα υγρό τμήμα μέσα στο οποίο βρίσκονται διασκορπισμένες φυσαλίδες, το slug, το οποίο καταλαμβάνει μήκος  $L_s$  και το αντίστοιχο liquid holdup είναι  $H_s$  και αφ' ετέρου από μία ζώνη αερίου και μια ζώνη υγρού φιλμ μήκους  $L_f$  με liquid holdup  $H_f$  αντίστοιχα. Στο μπροστινό μέρος του σώματος της διαλείπουσας ροής, που κινείται στην μεταφορική ταχύτητα  $U_t$ , υπάρχει μια ζώνη ανάμιξης όπου το υγρό απορροφάται από την μεμβράνη μπροστά και επιταχύνεται

στην ταχύτητα  $U_s$ . Υπάρχουν δύο στοιχεία ταχύτητας που σχετίζονται με τη ζώνη της ταινίας:  $U_f$  για την ταχύτητα υγρού φιλμ και  $U_{GP}$  για την ταχύτητα του αέρα. Το μοντέλο υποθέτει ότι η ποσότητα του υγρού που απορροφάται είναι ίση με την ποσότητα του ρευστού που ρίχνεται. Ως εκ τούτου, το μήκος του σώματος slug, παραμένει σταθερό καθώς ταξιδεύει κατά μήκος του σωλήνα.

Προκειμένου να αναπτυχθούν οι εξισώσεις για το slug, ολόκληρο το υγρό φιλμ και οι θύλακες αερίου στη ζώνη του φιλμ χρησιμοποιούνται ως όγκο; ελέγχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής εξάγονται για αυτές σε σχέση με ένα σύστημα συντεταγμένων που κινείται με τη μεταφορική ταχύτητα  $U_t$ .

Με την παραδοχή ότι η ροή είναι πλήρως διασκορπισμένη, η αναπαράσταση μικρών τμημάτων της ροής οδηγεί στην εξιδανικευμένη κατάσταση στην οποία η ροή είναι περιοδική τόσο στον χρόνο όσο και στο χώρο.

#### 4.7.1 Ταχύτητα του slug

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, slug ονομάζεται το υγρό τμήμα της διαλείπουσας ροής, μέσα στο οποίο βρίσκονται διασκορπισμένες φυσαλίδες. Χάριν συντομίας θα χρησιμοποιείται ο αγγλικός όρος, slug.

Οι Dukler και Hubbard (1975) πέτυχαν ισορροπία των υγρών μαζών μεταξύ του εμπρόσθιου τμήματος της διαλείπουσας ροής και του τμήματος της ροής με ταχύτητα  $U_s$ , του λεγόμενου slug, όπου έχει επιταχυνθεί πλήρως η ροή. Η ισορροπία αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$H_s \cdot (U_t - U_s) = H_f \cdot (U_t - U_f) \quad (4.18)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί και να γραφεί ως εξής:

$$U_t = (1 + C) \cdot U_s = C_0 \cdot U_s \quad (4.19)$$

Όπου:

$$C = \frac{H_f}{H_s} \cdot \left( \frac{U_t - U_f}{U_s} \right) \quad (4.20)$$

Έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι το  $C_0$  κυμαίνεται μεταξύ 1,2 και 1,35. Ο Kouba (1987) συμπέρανε πειραματικά ότι το  $C_0$  μπορεί να φτάσει ακόμη και την τιμή 1,8 για μερικές συνθήκες ροής (χαμηλές επιφανειακές ταχύτητες υγρού και αερίου). Πιο πρόσφατα, ο Zheng (1994) ανέφερε επίσης μια πειραματικά παρατηρούμενη τιμή 1,20 για το  $C_0$  για ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων διαλείπουσας ροής, ακόμη και με γωνίες κλίσης μέχρι  $5^\circ$ . Στις περισσότερες περιπτώσεις, το  $C_0$  ποικίλει μόνο μεταξύ 1,2 και 1,25. Θεωρείται συνήθως μια τιμή 1,2 για το  $C_0$ , η οποία θα αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ταχύτητα για πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή. Προκειμένου να υπολογιστεί η ταχύτητα του slug, επιτυγχάνεται ισορροπία μαζών και για τις δύο φάσεις μεταξύ της εισόδου και κάθε μονάδας slug και αποδείχθηκε ότι:

$$U_s = U_m \equiv U_{SL} + U_{SG} \quad (4.21)$$

#### 4.7.2 Ταχύτητα ολίσθησης (drift velocity)

Η πρώτη απόπειρα μελέτης της κίνησης των επιμήκων φυσαλίδων έγινε από τον Nicklin (1962) για την κατακόρυφη διεύθυνση ροής. Πρότεινε

μια σχέση για τον υπολογισμό της μεταφορικής ταχύτητας μιας επιμήκουσ φυσαλίδας σε συνεχή διαλείπουσα ροή:

$$U_b = C_0 \cdot U_m + U_d \quad (4.22)$$

Όπου  $U_d$  είναι η ταχύτητα ολίσθησης της φυσαλίδας σε στάσιμο υγρό και  $U_m$  είναι η ταχύτητα του μίγματος που ορίζεται ως το άθροισμα των επιφανειακών ταχυτήτων υγρού και αερίου  $U_{SL}$  και  $U_{SG}$ . Όσον αφορά στην τιμή της σταθεράς  $C_0$ , βασίστηκε στην παραδοχή ότι η ταχύτητα διάδοσης των φυσαλίδων ακολουθεί τη μέγιστη τοπική ταχύτητα  $U_{max}$  μπροστά από την μύτη του slug και γι' αυτό:

$$C_0 = \frac{U_{max}}{U_m} \quad (4.23)$$

Συνεπώς, η τιμή του  $C_0$  ισούται με περίπου 1,2 για πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή και 2,0 για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή. Υπάρχει έντονη ένδειξη ότι η  $C_0$  αυξάνεται καθώς ο αριθμός Reynolds μειώνεται και φτάνει σε τιμή περίπου 2. Η ακριβής τιμή του  $C_0$  για την τυρβώδη ροή και ιδιαίτερα για τη στρωτή ροή δεν είναι καθοριστική. Υπάρχει πληθώρα πειραματικών δεδομένων. Για κάθετη ροή η αποδεκτή τιμή για την ταχύτητα ολίσθησης δίνεται από την σχέση:

$$U_d^v = 0.35 \cdot \sqrt{g \cdot d} \quad (4.24)$$

Για την οριζόντια ροή, οι Zuber και Findlay (1965) πρότειναν ότι η ταχύτητα ολίσθησης προέκυψε εξαιτίας της διαφοράς στην υδροστατική πίεση μεταξύ του υγρού στο slug και του υγρού στην μεμβράνη, προκαλώντας την αποστράγγιση του υγρού στην μεμβράνη. Έδειξαν ότι παρομοίως με τις κατακόρυφες ροές, η σχέση μεταξύ της ταχύτητας

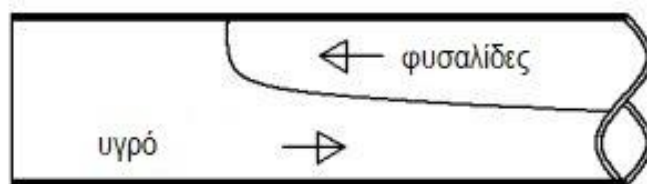
ολίσθησης και της μεταφορικής ταχύτητας  $U_t$  δίνεται από τη γραμμική μορφή που υπαγορεύεται από την εξίσωση συνέχειας.

Για την οριζόντια ροή, ο Benjamin (1968) προτείνει μια ασυμπτωτική λύση για ταχύτητα ολίσθησης που χαρακτηρίζεται από αδράνεια:

$$U_d^h = 0.54 \cdot \sqrt{g \cdot d} \quad (4.25)$$

Η εξίσωση (4.25) έχει συσχετιστεί με δεδομένα ταχύτητας φυσαλίδων για οριζόντιες ροές στις επιμήκεις φυσαλίδες και στα slugs (Nicholson κ.ά. (1978), Dukler and Hubbard (1975), Mattar and Gregory (1974)). Μερικοί ερευνητές διαπίστωσαν ότι  $U_d=0$  (Dukler και Hubbard (1975), Heywood και Richardson (1979), Gregory and Scott (1969)), ενώ άλλοι όχι. Πριν από μερικά χρόνια αποδείχθηκε και πλέον έχει γίνει ευρέως παραδεκτό ότι το  $U_d$  πρέπει να είναι ίσο με μηδέν για οριζόντια ροή. Πιο πρόσφατα όμως, έχει προταθεί ότι μπορεί να υπάρχει μη μηδενική ταχύτητα ολίσθησης, Nicholson (1978).

Ο Weber (1981) εξέθεσε το φαινόμενο της ολίσθησης για οριζόντια ροή καθώς και έναν τρόπο υπολογισμού της ταχύτητας ολίσθησης. Θεώρησε την κατάσταση όπου ένας κλειστός οριζόντιος σωλήνας αρχικά γεμίζει με υγρό και το ένα άκρο είναι ανοιχτό. Έτσι, το υγρό αποστραγγίζεται, εξαιτίας της διαφοράς υδροστατικής πίεσης μεταξύ του πάνω μέρους και του πυθμένα του σωλήνα, Σχήμα 4.8.



**Σχήμα 4.8:** Πλευρική όψη του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε από τον Weber (1981)



Μια εκτεταμένη φυσαλίδα ατμού θα ταξιδέψει μέσω του σωλήνα σε αντίθετη κατεύθυνση αντικαθιστώντας το υγρό. Ο μηχανισμός που προκαλεί την αποστράγγιση του υγρού και συνεπώς και την κίνηση της φυσαλίδας, είναι ταυτόσημη με εκείνη που προκαλεί την εξάπλωση του υγρού σε μια οριζόντια επιφάνεια.

Ο Weber (1981) προτείνει μια έκφραση για την ταχύτητα φυσαλίδων,  $U_b$ , και έδειξε ότι μειώνεται στο μηδέν για τις τιμές του  $E_{OD}=12$ , όπου ο  $E_{OD}$  είναι ο αριθμός Eotvos. Αυτός ο αριθμός με τη σειρά του εξαρτάται από τη διάμετρο του σωλήνα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{OD} = \frac{\rho_L \cdot g \cdot d^2}{\sigma} \quad (4.26)$$

Ο Zukoski (1966) μελέτησε την επίδραση της επιφανειακής τάσης, της κλίσης του ιξώδους και του σωλήνα στην ταχύτητα των μεγάλων φυσαλίδων. Με βάση τα αποτελέσματά του καθώς και εκείνων άλλων ερευνητών, πρότεινε ότι για αριθμούς Reynolds μεγαλύτερους από περίπου 200, τα ποσοστά διάδοσης είναι ουσιαστικά ανεξάρτητα από τα ιξώδη αποτελέσματα. Από την ανάλυση του Weber (1981) προκύπτει πως η ταχύτητα ολίσθησης γίνεται αμελητέα για μικρούς σωλήνες (<5mm).

### 4.7.3 Slug holdup

Η πρόβλεψη του liquid holdup στο σώμα του slug για διφασική ροή αερίου-υγρού είναι σημαντική για τον ακριβή υπολογισμό της πτώσης πίεσης. Οι Dukler και Hubbard (1975) έδειξαν ότι ένα κενό κλάσμα στο slug εξαρτάται από την αναλογία του υγρού εισαγωγής. Η επίδραση του σωλήνα έχει ερευνηθεί από τους Andreussi και Bendiksen (1989) και άλλους. Οι ιδιότητες όπως η επιφανειακή τάση και η πυκνότητα υγρού

συμπεριλήφθηκαν από τον Malnes (1983). Μια ξεχωριστή εξάρτηση από την κλίση του σωλήνα προτάθηκε από τον Andreussi (1993). Οι Brauner και Ullmann (2004) παρουσιάζουν μια κριτική επισκόπηση των διαφορετικών προσεγγίσεων για τη μοντελοποίηση του κενού κλάσματος σε slugs. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη συσχέτιση για την εκτίμηση του κλάσματος αερίου σε slugs ως συνάρτηση του επιφανειακού ρυθμού ροής μίγματος παρουσιάστηκε από τον Gregory (1978):

$$H_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{U_m}{8.66}\right)^{1.39}} \quad (4.27)$$

Όπου το  $U_m$  εκφράζεται σε m/s. Ο Gregory (1978) προειδοποίησε ότι η χρήση αυτής της σχέσης θα πρέπει να περιορίζεται σε περιπτώσεις όπου το  $U_m$  είναι μικρότερο από 10 m/s για να μειωθεί η πιθανότητα εισόδου στη μεταβατική ζώνη μεταξύ διαλείπουσας και των δακτυλιοειδούς ροής, όπου η σχέση δεν θα ήταν εφαρμόσιμη. Ο Malnes (1983) λαμβάνοντας υπ' όψιν ιδιότητες υγρού (επιφανειακή τάση και υγρή πυκνότητα) πρότεινε την ακόλουθη σχέση:

$$H_s = 1 - \frac{U_m}{\left[ 83 \cdot \left( \frac{g \cdot \sigma_{GL}}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{4}} + U_m^{1.39} \right]} \quad (4.28)$$

Ο Marcano (1996) πραγματοποίησε πειράματα σε οριζόντιο αγωγό διαμέτρου  $d=77,9$  mm, και μήκους  $L=420$  m. Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κηροζίνη και αέρας και η πίεση λειτουργίας ήταν περίπου 5,5 bar. Με βάση τις μετρήσεις κενού κλάσματος που έγιναν με αισθητήρες χωρητικότητας, προτάθηκε η παρακάτω σχέση για το κενό κλάσμα σε slugs, όπου το  $U_m$  είναι η ταχύτητα του μίγματος σε [ft/s]:

$$H_s = \frac{1}{(1.001 + 0.0179 \cdot U_m + 0.0011 \cdot U_m^2)} \quad (4.29)$$

Ο Gomez (2000) χρησιμοποίησε δεδομένα από άλλους ερευνητές, για πιέσεις από 1,5 έως 20 bar, διαμέτρους σωλήνων από 51 έως 203 mm και κλίσεις σωλήνων στην περιοχή 0-90°. Τα δεδομένα υποδεικνύουν σαφή εξάρτηση μεταξύ της γωνίας του σωλήνα, του αριθμού Reynolds και του κλάσματος κενού στο slug. Προτάθηκε μια σχέση:

$$H_s = e^{-(0.45\theta + C \cdot Re)} \quad (4.30)$$

όπου η γωνία του σωλήνα  $\theta$  μετριέται σε [rad], ο συντελεστής  $C=2.48 \times 10^{-6}$  και ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως:

$$Re = \frac{\rho_L \cdot U_m \cdot d}{\mu_L} \quad (4.31)$$

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μεθοδολογία Υπολογισμών και Ενδεικτικοί Υπολογισμοί**

### **5.1 Μεθοδολογία και σχέσεις υπολογισμών**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, καλύφθηκε σε ικανοποιητικό βαθμό, από βιβλιογραφικής απόψεως το φαινόμενο της διαφασικής ροής νερού-αέρα σε κεκλιμένο κλειστό αγωγό.

Πολλοί μελετητές ασχολήθηκαν με το φαινόμενο και τα είδη ροής που αναπτύσσονται. Μεταξύ αυτών, ο Beggs σε συνεργασία με τον Brill (1973) παρουσίασαν την πιο ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό όλων εκείνων των παραμέτρων που αφορούν στην διαφασική ροή νερού-αέρα σε κεκλιμένο αγωγό. Ακολούθησαν μελέτες των Gould (1974) -περιορίστηκε στη δημοσίευση των μοτίβων και των χαρτών ροής-Speeding και Nguyen (1976) -χρησιμοποίησαν πειραματικά δεδομένα και σύγκριναν τα αποτελέσματά τους με τα καθεστάτα ροής άλλων ερευνητών- καθώς επίσης και των Barnea (1980,1985) και Weisman και Kang (1981) που ήταν οι πρώτοι μετά τους Beggs και Brill (1973) που πρότειναν σχέσεις υπολογισμού των υδραυλικών μεγεθών.

Ακολούθησαν οι Kokal και Stanislav (1989), οι Grolman και Fortuin (1998), Kabir (1988), Kaya (2000) και Gomez (2001) και πολλοί ακόμη, με πιο πρόσφατη την μελέτη του Pothof (2011). Ο Pothof στην διατριβή του “Co-current air-water flow in downward sloping pipes” (ταυτόχρονη ροή αέρα-νερού σε κεκλιμένους αγωγούς με ροή κατάντη) προβαίνει σε μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση και μελέτη του φαινομένου της διαφασικής ροής, και στη συνέχεια παρουσιάζει μια πειραματική μελέτη, στην οποία αναλύει τις επιπτώσεις που έχουν υδραυλικά μεγέθη όπως: η διάμετρος του αγωγού, η επιφανειακή τάση, η απόλυτη πίεση στην ροή.

Στην διατριβή του πολλά από τα υδραυλικά μεγέθη μετρώνται κατά την πειραματική διαδικασία, ενώ τα αποτελέσματα αφορούν στα εξής μεγέθη:

- αριθμός ροής  $F_w$ ,
- ταχύτητα ροής  $v$
- απώλειες λόγω τριβής,
- η διαφορά πίεσης  $\Delta p$  και
- ο αριθμός υδραυλικών αλμάτων

Ενώ η διατριβή του Pothof (2008) αποτελεί σημαντικό εργαλείο για περαιτέρω έρευνα και μελέτη, και η πειραματική διαδικασία που εκπόνησε ήταν πολύ σύγχρονη και τα αποτελέσματα σημαντικά, στην κεκλιμένη διφασική ροή, η πιο εκτεταμένη και γνωστή μελέτη έχει πραγματοποιηθεί από τους Beggs και Brill (1973).

Στο άρθρο τους “A study of two-phase flow in Inclined Pipes” αναλύεται διεξοδικά η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό κυρίως της επίδρασης της κλίσης του αγωγού στο liquid holdup  $H_L$  και στην πτώση πίεσης.

Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά στη μελέτη τους, μελετήθηκε διεξοδικά η διφασική ροή νερού-αέρα σε κεκλιμένους αγωγούς, ώστε να καθοριστεί η επίδραση της γωνίας κλίσης του αγωγού στο liquid holdup  $H_L$  και στην πτώση πίεσης. Αναπτύχθηκαν σχέσεις για το liquid holdup  $H_L$  και τον συντελεστή τριβής, ώστε να προβλεφθούν οι μεταβολές πίεσης για διφασική ροή σε αγωγούς με ποικίλες κλίσεις και για διάφορες συνθήκες ροής.

Η υπολογιστική διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογίζονται τα μεγέθη:

1.  $\rho_L$  : πυκνότητα νερού
2.  $\rho_g$  : πυκνότητα αέρα
3.  $\mu_L$  : ιξώδες νερού
4.  $\mu_g$  : ιξώδες αέρα
5.  $\rho_m$  : πυκνότητα μίγματος
6.  $\mu_m$  : ιξώδες μίγματος
7.  $\lambda$  : κλάσμα εισόδου νερού
8.  $\sigma$  : επιφανειακή τάση νερού
9.  $g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας
10.  $d$  : διάμετρος αγωγού
11.  $A_p$  : διατομή αγωγού
12.  $q_g$  : παροχή αέρα
13.  $q_L$  : παροχή νερού
14.  $w_g$  : παροχή μάζας αέρα
15.  $w_L$  : παροχή μάζας νερού
16.  $vs_g$  : ογκομετρικός ρυθμός ροής αέρα
17.  $vs_L$  : ογκομετρικός ρυθμός ροής νερού
18.  $v_m$  : ογκομετρικός ρυθμός ροής μίγματος
19.  $N_{FR}$  : αριθμός Froude
20.  $N_{Re}$  : αριθμός Reynolds
21.  $N_{Lv}$  : αριθμός ταχύτητας υγρού κλάσματος

Κάποια από αυτά τα μεγέθη αποτελούν σταθερές που ισχύουν για τα ρευστά που χρησιμοποιούνται, κάποια αφορούν τα γεωμετρικά μεγέθη του αγωγού και κάποια αφορούν τα δεδομένα της ροής. Παρατίθενται πίνακες και επεξήγηση:

ανεξάρτητες μεταβλητές			
	ΣΥΜΒΟΛΟ:	ΤΙΜΗ:	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ:
πυκνότητα νερού:	$\rho_L$	1000	kg/m <sup>3</sup>
πυκνότητα αέρα:	$\rho_g$	1,293	kg/m <sup>3</sup>
ιξώδες νερού	$\mu_L$	1,14*10 <sup>-3</sup>	kg/ms
ιξώδες αέρα	$\mu_g$	1,78*10 <sup>-5</sup>	kg/ms
επιτάχυνση βαρύτητας	$g$	9,84	m/s <sup>2</sup>
κλάσμα νερού εισόδου	$\lambda$	0,167	-
επιφανειακή τάση νερού	$\sigma$	0,075	N/m
ιξώδες μίγματος	$\mu_m$	2,048*10 <sup>-4</sup>	kg/ms

**Πίνακας 5.1:** Ανεξάρτητες μεταβλητές υπολογιστικής εφαρμογής

Οι πυκνότητες νερού-αέρα και τα ιξώδη, αφορούν στις ιδιότητες που έχουν τα συγκεκριμένα ρευστά για τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, ενώ η επιτάχυνση της βαρύτητας μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο. Ομοίως η επιφανειακή τάση του νερού δίνεται από πίνακες για συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Όσον αφορά το κλάσμα νερού εισόδου και τις ιδιότητες πυκνότητας και ιξώδους των μιγμάτων, ισχύουν τα εξής:

Κατά την πειραματική διαδικασία οι Beggs και Brill, μελέτησαν το φαινόμενο σε διαφανείς ακρυλικούς σωλήνες μήκους 90 ft (27,43 μέτρα), με παροχή ροής αέρα από 0 έως 300 Msfc (0-100 l/s) και παροχή ροής νερού από 0 έως 30 gal/min (0-2 l/s). Αντίστοιχες τιμές λαμβάνονται και στην συγκεκριμένη υπολογιστική εφαρμογή, επομένως προκύπτει ότι το κλάσμα νερού εισόδου είναι ίσο με 0,167.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τα μεγέθη  $\lambda$ ,  $\mu_m$  είναι οι ακόλουθες:

$$\lambda = q_L \cdot (q_L + q_g) \quad (5.1)$$

$$\mu_m = \mu_L \cdot \lambda + \mu_g \cdot (1 - \lambda) \quad (5.2)$$

δεδομένα γεωμετρίας αγωγού (σταθερά):			
	ΣΥΜΒΟΛΟ:	ΤΙΜΗ:	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ:
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΑΓΩΓΟΥ:	d	0,05	m
ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΓΩΓΟΥ:	A <sub>p</sub>	0,0020	m <sup>3</sup>

**Πίνακας 5.2:** Δεδομένα γεωμετρίας αγωγού υπολογιστικής εφαρμογής

Κατά την πειραματική διαδικασία οι Beggs και Brill, μελέτησαν το φαινόμενο σε διαφανείς ακρυλικούς σωλήνες μήκους 90 ft (27,43 μέτρα), με διάμετρο 1 ή 1,5 ιντσών. Στην παρούσα εφαρμογή, για απλούστευση της διαδικασίας, θα ληφθεί μια τιμή διαμέτρου ίση με 5 εκ. Επομένως τα γεωμετρικά δεδομένα του αγωγού είναι τα παραπάνω.

Για όλα τα υπόλοιπα δεδομένα, επειδή αυτά επηρεάζονται από τις παροχές αέρα και νερού, έχουμε περισσότερες τιμές, εντός των ευρών που περιγράφηκαν παραπάνω, και δίνονται στον Πίνακα 1 του Παραρτήματος.

Υπενθυμίζεται πως λαμβάνεται παροχή ροής αέρα ( $q_g$ ) από 0 έως 300 Msfc (0-100 l/s) και παροχή ροής νερού ( $q_L$ ) από 0 έως 30 gal/min (0-2 l/s). Για τα υπόλοιπα μεγέθη, χρησιμοποιούνται οι εξής σχέσεις:

$$w_g = \rho \cdot q_g \quad (5.3)$$

$$w_L = \rho \cdot q_L \quad (5.4)$$

$$vs_g = \frac{q_g}{A_p} \quad (5.5)$$



$$v_{sL} = \frac{q_L}{A_p} \quad (5.6)$$

$$v_m = \frac{q_g + q_L}{A_p} \quad (5.7)$$

$$N_{Fr} = \frac{v_m^2}{g \cdot d} \quad (5.8)$$

$$N_{Rens} = \frac{G_m \cdot d}{\mu_L \cdot \lambda + \mu_g \cdot (1 - \lambda)} \quad (5.9)$$

$$N_{Lv} = v_{sL} \left( \frac{\rho_L}{g \cdot \sigma} \right)^{0.25} \quad (5.10)$$

$$G_m = G_L + G_g = \frac{W_L + W_g}{A_p} \quad (5.11)$$

2. Ακολουθεί ο υπολογισμός των μεγεθών  $L_1$ ,  $L_2$  με τις παρακάτω σχέσεις:

$$L_1 = \exp(-4.62 - 3.77X - 0.481X^2 - 0.0207X^3) \quad (5.12)$$

$$L_2 = \exp(1.061 - 4.602X - 1.609X^2 - 0.179X^3 + 0.635 \cdot 10^{-3} \cdot X^5) \quad (5.13)$$

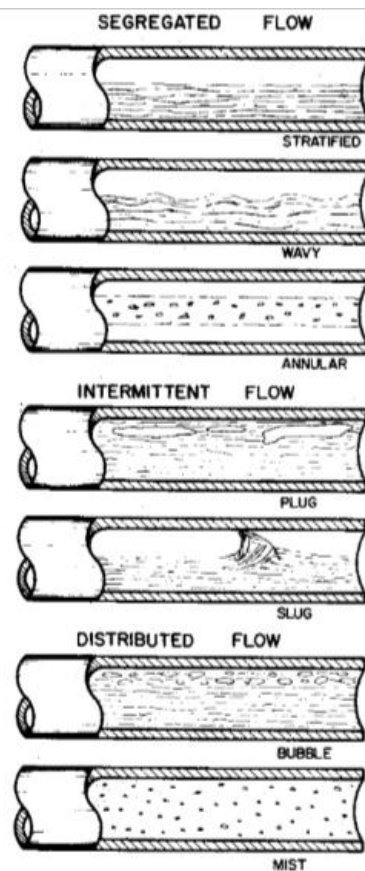
Όπου:

$$X = \ln(\lambda) \quad (5.14)$$

Και  $L_1$ ,  $L_2$  είναι παράμετροι που καθορίζουν τα όρια των καθεστώτων ροής. Όσον αφορά τα καθεστώτα ροής, αξίζει να σημειωθεί πως οι Beggs και Brill δε διαχωρίζουν τα καθεστώτα ροής στα συνήθη καθεστώτα (διαλείπουσα, δακτυλιοειδής ροή, ροή φουσαλίδων), αλλά διακρίνουν τα παρακάτω τρία καθεστώτα ροής:

1. Segregated flow-διαχωρισμένη ροή: Περιλαμβάνει τα εξής καθεστώτα: stratified, wavy, annular flow, δηλαδή το συγκεκριμένο είδος ροής περιλαμβάνει την στρωτή, την ροή κυμάτων και την δακτυλιοειδή ροή.
2. Intermittent flow-διακοπόμενη ροή: Περιλαμβάνει τα εξής καθεστώτα: plug flow, slug flow, δηλαδή το συγκεκριμένο είδος ροής περιλαμβάνει τη ροή «βύσματος» (είδος ροής κατά το οποίο συγκεντρώνονται μεγάλες επιμήκεις φυσαλίδες στο άνω μέρος του αγωγού) και τη διαλείπουσα ροή.
3. Distributed flow-κατανεμημένη ροή: Περιλαμβάνει τα εξής καθεστώτα: bubble flow, mist flow, δηλαδή το συγκεκριμένο είδος ροής περιλαμβάνει τη ροή με φυσαλίδες και την ομιχλώδη ροή.

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση των καθεστώτων ροής σύμφωνα με τους Beggs και Brill:



Σχήμα 5.1: Καθεστώτα ροής (Beggs, Brill, 1973)

- Αν  $N_{FR} < L_1$ , έχουμε καθεστώς **διαχωρισμένης ροής** που περιλαμβάνει καθεστώτα ομαλής και κυματιστής στρωματοποιημένης ροής
- Αν  $N_{FR} > L_1$  και  $N_{FR} > L_2$  έχουμε καθεστώς **κατανεμημένης ροής** που περιλαμβάνει τη ροή φυσαλίδων και ομίχλης
- Και τέλος αν  $L_1 < N_{FR} < L_2$  έχουμε **διακοπτόμενη ροή**.

Εφόσον η παράμετρος  $\lambda$  είναι σταθερή, θα είναι σταθερές και οι παράμετροι  $L_1$  και  $L_2$  που καθορίζουν τα όρια μεταξύ των καθεστώτων ροής. Οι τιμές τους δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

σταθερές ορίων καθεστώτων ροής		
$L_1$		2,034
$L_2$		173,691
$X$	$\ln(\lambda)$	-1,792

**Πίνακας 5.3:** Σταθερές ορίων καθεστώτων ροής  $L_1, L_2$

Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 2 του Παραρτήματος.

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται και οι περιοχές για το εκάστοτε καθεστώς ροής. Καθίσταται σαφές πως το πρώτο καθεστώς ροής (segregated flow-διαχωρισμένη ροή) δεν προλαβαίνει καθόλου να αναπτυχθεί, ή αναπτύσσεται ελάχιστα για πολύ μικρές τιμές παροχής των ρευστών ( $q_g < 0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $q_L < 0,0004 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

3. Ακολουθεί ο υπολογισμός του liquid holdup  $H_L(0)$  για μηδενική κλίση, μέγεθος που είναι η βασική παράμετρος του  $H_L(\theta)$  για όλες τις πιθανές γωνίες κλίσεως του αγωγού.

Οι σχέσεις υπολογισμού του  $H_L(0)$  διαφέρουν για κάθε καθεστώς ροής, και δίνονται παρακάτω:

a. Segregated flow

$$H_L(0) = \frac{0.98 \cdot \lambda^{0.4846}}{N_{FR}^{0.0868}} \quad (5.15)$$

b. Intermittent flow

$$H_L(0) = \frac{0.845 \cdot \lambda^{0.5351}}{N_{FR}^{0.0173}} \quad (5.16)$$

c. Distributed flow

$$H_L(0) = \frac{1.065 \cdot \lambda^{0.5824}}{N_{FR}^{0.0609}} \quad (5.17)$$

Δίνεται ο πίνακας υπολογισμών, Πίνακας 3, στο Παράρτημα.

4. Ακολουθεί ο υπολογισμός της παραμέτρου C, μέγεθος που είναι ένας συντελεστής που αποτελεί επίσης βασική παράμετρο για τον υπολογισμό του  $H_L(\theta)$  για όλες τις πιθανές γωνίες κλίσεως του αγωγού.

Οι σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή C, όπως και για το μέγεθος  $H_L(0)$  διαφέρουν για κάθε καθεστώς ροής, και δίνονται παρακάτω:

a. Segregated flow

$$C+ = (1 - \lambda) \cdot \ln \left[ \frac{0.011 \cdot N_{LV}^{3.539}}{\lambda^{3.768} \cdot N_{FR}^{1.614}} \right] \quad (5.18)$$

$$C- = (1 - \lambda) \cdot \ln \left[ \frac{4.7 \cdot N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692} \cdot N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (5.19)$$

b. Intermittent flow

$$C+ = (1 - \lambda) \cdot \ln \left[ \frac{2.96 \cdot \lambda^{0.305} \cdot N_{FR}^{0.0978}}{N_{LV}^{0.4473}} \right] \quad (5.20)$$

$$C- = (1 - \lambda) \cdot \ln \left[ \frac{4.7 \cdot N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692} \cdot N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (5.19)$$

c. Distributed flow

$$C+ = 0 \quad (5.21)$$

$$C- = (1 - \lambda) \cdot \ln \left[ \frac{4.7 \cdot N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692} \cdot N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (5.19)$$

Στο Παράρτημα, στον Πίνακα 4, δίνονται οι τιμές C+, C-.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί πως η παράμετρος C+ ισχύει για ανοδική ροή, ενώ η παράμετρος C- για καθοδική ροή.

5. Θα γίνει υπολογισμός του liquid holdup  $H_L(\theta)$  για όλες τις γωνίες και για τις δύο περιπτώσεις ροής.

Θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\varphi = 1.8 \cdot \theta \quad (5.22)$$

$$\psi = 1 + C \cdot \left( \sin \varphi - \frac{1}{3} \cdot \sin^3 \varphi \right) \quad (5.23)$$

$$H_L(\theta) = H_L(0) \cdot \psi \quad (5.23)$$

Ακολουθούν πίνακες υπολογισμών στο Παράρτημα Α:

Για ανοδική ροή: Πίνακας 5 και Πίνακας 6.

Για καθοδική ροή: Πίνακας 7 και Πίνακας 8.

6. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η πυκνότητα του διφασικού μίγματος νερού αέρα, συναρτήσει του  $H_L(\theta)$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho_{tp} = \rho_L \cdot H_L + \rho_g \cdot (1 - H_L) \quad (5.24)$$

Εφόσον η παράμετρος  $H_L(\theta)$  έχει υπολογιστεί για ανοδική και καθοδική ροή, το ίδιο θα γίνει και για τον υπολογισμό της πυκνότητας.

Στο Παράρτημα δίνονται οι πίνακες υπολογισμού για ανοδική και για καθοδική ροή:

Πίνακας 9: Πυκνότητα διφασικού μίγματος ( $\rho_{tp}$ : two-phase mixture density) για ανοδική ροή

Πίνακας 10: Πυκνότητα διφασικού μίγματος ( $\rho_{tp}$ : two-phase mixture density) για καθοδική ροή

7. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί ο λόγος συντελεστών τριβής  $f_{tp}/f_{ns}$

Όπου:

$f_{tp}$ : ο συντελεστής τριβής του διαφασικού μίγματος

$f_{ns}$ : ο συντελεστής τριβής μη-ολίσθησης

Ο λόγος δίνεται από την σχέση:

$$\frac{f_{tp}}{f_{ns}} = e^S \quad (5.25)$$

Όπου:

$$S = [\ln(y)] \left\{ -0,0523 + 3,182 \cdot \ln(y) - 0,8725 \cdot [\ln(y)]^2 + 0,01853 \cdot [\ln(y)]^4 \right\} \quad (5.26)$$

Και:

$$y = \frac{\lambda}{[H_L(\theta)]^2} \quad (5.27)$$

Στο Παράρτημα, δίνονται οι πίνακες υπολογισμών, βάσει των παραπάνω τύπων για τα μεγέθη:

$y$ ,  $S$  και του λόγου  $f_{tp}/f_{ns}$  τόσο για ανοδική όσο και για καθοδική ροή

-Πίνακας 11, Πίνακας 12 για την παράμετρο  $y$ ,

-Πίνακας 13, Πίνακας 14 για την παράμετρο  $S$ ,

-Πίνακας 15, Πίνακας 16 για τον λόγο  $f_{tp}/f_{ns}$

8. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί ο συντελεστής τριβής μη ολίσθησης  $f_{ns}$

Για τον υπολογισμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η παρακάτω σχέση (με τη θεώρηση πως οι αγωγοί είναι υδραυλικά λείοι), είτε το διάγραμμα Moody (για μη λείους αγωγούς, για τους οποίους δίνεται και η τιμή της σχετικής τραχύτητας), ώστε να γίνει γραφικά ο προσδιορισμός.

$$f_{ns} = \left[ 2 \log \left( \frac{N_{Rens}}{4,5223 \cdot \log(N_{Rens}) - 3,8215} \right) \right]^{-2} \quad (5.28)$$

Στην παρούσα εφαρμογή, θα επιλεγεί ο υπολογισμός του συντελεστή μέσω της σχέσης (5.28), και για απλούστευση των υπολογισμών θεωρείται πως ο αγωγός είναι λείος.

Ένας αγωγός θεωρείται λείος, σύμφωνα με το διάγραμμα Moody, για τιμές της σχετικής τραχύτητας  $\varepsilon/D < 10^{-6}$ . Αυτό πρακτικά είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε πραγματικές συνθήκες, δεδομένης της απόλυτης τραχύτητας που έχουν τα υλικά κατασκευής των αγωγών στο εμπόριο. Για πολύ μεγάλες διαμέτρους αγωγών και για συγκεκριμένα υλικά, ίσως θα μπορούσε να επιτευχθεί σχετική τραχύτητα τέτοια ώστε να θεωρείται υδραυλικά λείος ο αγωγός. Επομένως στο συγκεκριμένο σημείο, για την παρούσα υπολογιστική εφαρμογή γίνεται η παραδοχή ότι ο χρησιμοποιούμενος αγωγός είναι λείος (smooth).

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας με τις τιμές απόλυτης τραχύτητας για διάφορα υλικά κατασκευής αγωγών, ενδεικτικά:



## Roughness of pipes

Aluminium, drawn/pressed	new	0.0013 - 0.0015 mm
Aluminium, drawn/pressed	used	to 0.03 mm
Asbestos-cement	new, smooth	0.03 - 0.1 mm
Brass, drawn/pressed	new	0.0013 - 0.0014 mm
Brass, drawn/pressed	used	to 0.03 mm
Cast iron	average city sewerage	1.2 mm
Cast iron	incrusted	to 3.0 mm
Cast iron	new, bituminized	0.10 - 0.13 mm
Cast iron	new, with skin	0.2 - 0.6 mm
Cast iron	operating several years, cleaned	1.5 mm
Cast iron	slightly rusty	1.0 - 1.5 mm
Clay	new, clay tile	9.0 mm
Clay, Drainage-pipe	new, calcined	0.7 mm
Concrete	new, medium rough	1.0 - 2.0 mm
Concrete	new, rough	2.0 - 3.0 mm
Concrete	new, smooth	0.3 - 0.8 mm
Concrete	operating several years	0.2 - 0.3 mm
Concrete, Centrifugal-	new, smooth plastered	0.1 - 0.15 mm
Concrete, Centrifugal-	new, without plaster	0.2 - 0.8 mm
Concrete, Steel-	new, smooth	0.1 - 0.15 mm
Copper, drawn/pressed	new	0.0013 - 0.0015 mm
Copper, drawn/pressed	used	to 0.03 mm
Glass, drawn/pressed	new	0.0013 - 0.0015 mm
Glass, drawn/pressed	used	to 0.03 mm
Plastic, drawn/pressed	new	0.0013 - 0.0015 mm
Plastic, drawn/pressed	used	to 0.03 mm
Rubber	new, smoot	0.0016 mm
Steel	after long operation cleaned	0.15 - 0.20 mm
Steel	homogeneous corrosion pits	0.15 mm
Steel	intensely incrusted	2.0 - 4.0 mm
Steel	slightly rusty and incrusted	0.15 - 0.40 mm
Steel, longitudinal welded	new, bituminized	0.01 - 0.05 mm
Steel, longitudinal welded	new, galvanized	0.008 mm
Steel, longitudinal welded	new, rolling skin	0.04 - 0.1 mm
Steel, weldless	new, comm.size galvanized	0.10 - 0.16 mm
Steel, weldless	new, neatly galvanized	0.07 - 0.10 mm
Steel, weldless	new, pickled	0.03 - 0.04 mm
Steel, weldless	new, rolling skin	0.02 - 0.06 mm
Steel, weldless	new, unpickled	0.03 - 0.06 mm
Stoneware		0.25 mm
Wood	after long operating	0.1 mm
Wood	new	0.2 - 1.0 mm

**Πίνακας 5.4:** Συντελεστές απόλυτης τραχύτητας

([https://www.spray.com/calculators/Pressure\\_Drop\\_Calc](https://www.spray.com/calculators/Pressure_Drop_Calc))

9. Έπειτα, υπολογίζεται και ο συντελεστής τριβής του διαφασικού μίγματος  $f_{tp}$  χρησιμοποιώντας τις τιμές του συντελεστή  $f_{ns}$  από το βήμα 8, καθώς και του λόγου  $f_{tp}/f_{ns}$  από το βήμα 7, μέσω της σχέσης:

$$f_{tp} = f_{ns} \cdot \left( \frac{f_{tp}}{f_{ns}} \right) \quad (5.29)$$

Κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα βήματα υπολογισμών, ο συντελεστής  $f_{tp}$  θα δίνεται από δύο πίνακες, ο ένας θα αφορά περίπτωση ανοδικής ροής και ο άλλος περίπτωση καθοδικής ροής.

Σημειώνεται πως ο συντελεστής τριβής του διαφασικού μίγματος  $f_{tp}$  είναι βασικό μέγεθος για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης, που είναι το τελευταίο μέγεθος που υπολογίζεται από την μεθοδολογία που προτείνουν οι Beggs και Brill.

Στο Παράρτημα, δίνεται ο Πίνακας 17 για την ανοδική και την καθοδική ροή, όπου υπολογίζονται τα μεγέθη  $f_{ns}$ ,  $f_{tp}$ .

Στην τελευταία στήλη του παραπάνω πίνακα, υπολογίστηκε ο συντελεστής  $f_{ns}$ , ο οποίος είναι ανεξάρτητος από τις γωνίες κλίσης του αγωγού. Στο Παράρτημα, δίνονται οι Πίνακες 18 και 19 με τον συντελεστή  $f_{tp}$  για ανοδική και καθοδική ροή, για διάφορες κλίσεις του αγωγού.

Το τελευταίο (και ίσως σημαντικότερο) μέγεθος που υπολογίζεται σε αυτήν την εφαρμογή είναι ο λόγος  $dp/dZ$  που είναι η μεταβολή της πίεσης προς την αντίστοιχη υψομετρική διαφορά, ή αλλιώς η κατανομή της πίεσης. Για τον υπολογισμό του μεγέθους θα χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$-\frac{dp}{dZ} = \frac{\frac{g}{g_c} \cdot \sin\theta \cdot \rho_L \cdot H_L + \rho_g \cdot (1 - H_L) + \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d}}{1 - \frac{[\rho_L \cdot H_L + \rho_g \cdot (1 - H_L)] \cdot v_m \cdot v_{sg}}{g_c \cdot P}} \quad (5.30)$$

Παρατηρούμε ότι στη σχέση, εκτός από τα μεγέθη που έχουν ήδη υπολογιστεί, υπάρχει και η σταθερά  $g_c$  (gravitational constant= $6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ), καθώς και η πίεση  $p$  που αφορά την

πίεση του συστήματος. Στην πειραματική εφαρμογή των Beggs και Brill η πίεση αυτή κυμαίνεται από 35 έως 95 psia επομένως έχουμε ένα εύρος πιέσεων (241-655 kPa, δηλαδή  $241.000 \text{ kg/m}\cdot\text{s}^2$  έως  $655.000 \text{ kg/m}\cdot\text{s}^2$ ).

Οι πίνακες υπολογισμού για ανοδική και καθοδική ροή, παρατίθενται στο Παράρτημα και είναι οι Πίνακες 20 και 21.

## **5.2 Ενδεικτικοί υπολογισμοί και αποτελέσματα**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο Beggs σε συνεργασία με τον Brill (1973) παρουσίασαν την πιο ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό όλων εκείνων των παραμέτρων που αφορούν στην διφασική ροή νερού-αέρα σε κεκλιμένο αγωγό. Στο άρθρο τους “A study of two-phase flow in Inclined Pipes” αναλύεται διεξοδικά η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό κυρίως της επίδρασης της κλίσης του αγωγού στο liquid holdup  $H_L$  και στην πτώση πίεσης.

Ακολουθούν κάποιοι ενδεικτικοί υπολογισμοί και αποτελέσματα της υπολογιστικής εφαρμογής, τα οποία συμφωνούν με τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία των Beggs και Brill. Σημειώνεται πως στη μελέτη τους, οι Beggs και Brill παρουσιάζουν μόνο τη μεθοδολογία υπολογισμού και δεν προβαίνουν σε υπολογισμούς, ενώ τα συμπεράσματα που παραθέτουν για τη διφασική ροή, αφορούν πειραματικά αποτελέσματα.

Στους παρακάτω πίνακες, δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα για τις παροχές των κλασμάτων νερού και αέρα, για τις αντίστοιχες ταχύτητες των δύο ρευστών, για τους αριθμούς Froude και ταχύτητας υγρού κλάσματος, βάσει των οποίων υπολογίζεται η τιμή του  $H_L$  liquid holdup για οριζόντιο αγωγό, καθώς και των παραμέτρων  $C+$  (που ισχύει για ανοδική ροή) και  $C-$  (για καθοδική ροή), οι οποίοι υπεισέρχονται στην σχέση υπολογισμού του μεγέθους  $H_L(\theta)$ .

$q_g$	$q_L$	$v_m$	$v_{sL}$	$N_{FR}$	$N_{LV}$	καθεστώς ροής	C+	C-	$H_L(0)$
0,002	0,0004	1,222	0,204	3,037	2,188	<b>intermittent flow</b>	0,248	1,454	0,318
0,004	0,0008	2,445	0,407	12,147	4,376		0,102	0,942	0,310
0,006	0,0012	3,667	0,611	27,330	6,563		0,017	0,642	0,306
0,008	0,0016	4,889	0,815	48,587	8,751		-0,043	0,430	0,303
0,010	0,0020	6,112	1,019	75,917	10,939		-0,090	0,265	0,301
0,012	0,0024	7,334	1,222	109,320	13,127		-0,128	0,130	0,299
0,014	0,0028	8,556	1,426	148,797	15,315		-0,161	0,016	0,297

Πίνακας 5.5: Υδραυλικά μεγέθη καθεστώς διακοπτόμενης ροής

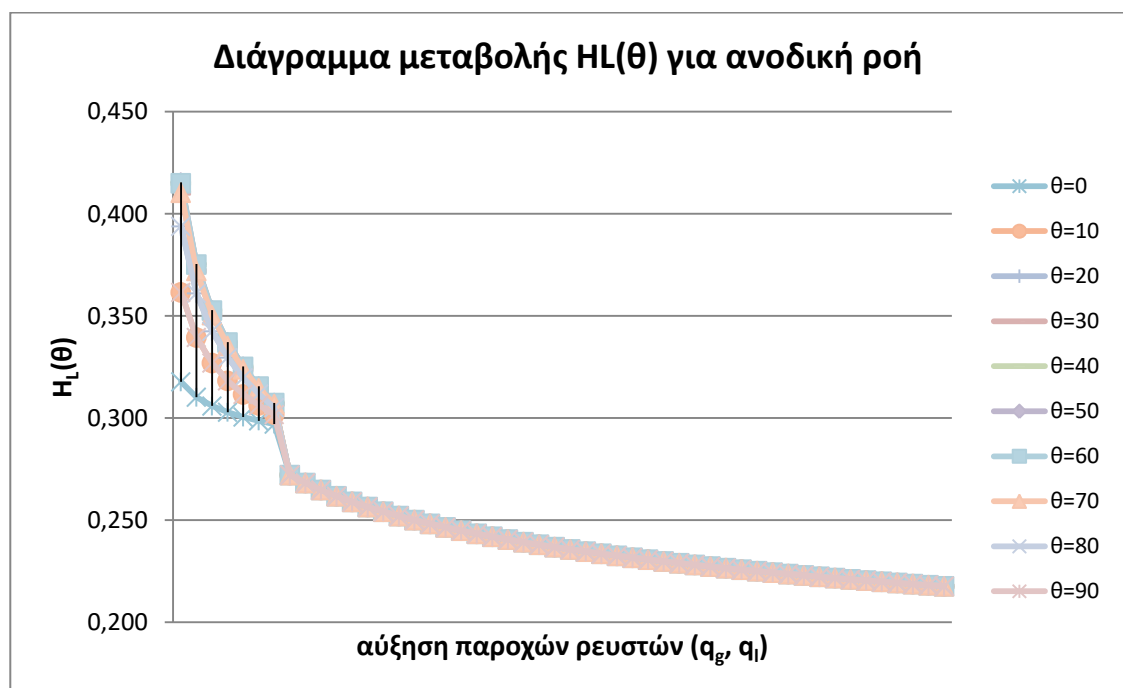
$q_g$	$q_L$	$v_m$	$v_{sL}$	$N_{FR}$	$N_{LV}$	καθεστώς ροής	C+	C-	$H_L(0)$
0,016	0,0032	9,778	1,630	194,347	17,502	<b>distributed flow</b>	0	-0,083	0,272
0,018	0,0036	11,001	1,833	245,970	19,690		0	-0,170	0,268
0,020	0,0040	12,223	2,037	303,667	21,878		0	-0,248	0,265
0,022	0,0044	13,445	2,241	367,437	24,066		0	-0,318	0,262
0,024	0,0048	14,668	2,445	437,280	26,254		0	-0,382	0,259
0,026	0,0052	15,890	2,648	513,197	28,441		0	-0,441	0,257
0,028	0,0056	17,112	2,852	595,187	30,629		0	-0,496	0,254
0,030	0,0060	18,335	3,056	683,251	32,817		0	-0,547	0,252
0,032	0,0064	19,557	3,259	777,388	35,005		0	-0,595	0,250
0,034	0,0068	20,779	3,463	877,598	37,193		0	-0,640	0,248
0,036	0,0072	22,002	3,667	983,881	39,380		0	-0,682	0,247
0,038	0,0076	23,224	3,871	1096,238	41,568		0	-0,722	0,245
0,040	0,0080	24,446	4,074	1214,668	43,756		0	-0,760	0,243
0,042	0,0084	25,669	4,278	1339,171	45,944		0	-0,796	0,242
0,044	0,0088	26,891	4,482	1469,748	48,132		0	-0,830	0,241
0,046	0,0092	28,113	4,686	1606,398	50,319		0	-0,863	0,239

0,048	0,0096	29,335	4,889	1749,122	52,507		0	-0,895	0,238
0,050	0,0100	30,558	5,093	1897,919	54,695		0	-0,925	0,237
0,052	0,0104	31,780	5,297	2052,789	56,883		0	-0,954	0,236
0,054	0,0108	33,002	5,500	2213,732	59,071		0	-0,982	0,235
0,056	0,0112	34,225	5,704	2380,749	61,258		0	-1,008	0,234
0,058	0,0116	35,447	5,908	2553,839	63,446		0	-1,034	0,233
0,060	0,0120	36,669	6,112	2733,003	65,634		0	-1,059	0,232
0,062	0,0124	37,892	6,315	2918,240	67,822		0	-1,084	0,231
0,064	0,0128	39,114	6,519	3109,550	70,010		0	-1,107	0,230
0,066	0,0132	40,336	6,723	3306,934	72,197		0	-1,130	0,229
0,068	0,0136	41,559	6,926	3510,391	74,385		0	-1,152	0,228
0,070	0,0140	42,781	7,130	3719,921	76,573		0	-1,173	0,227
0,072	0,0144	44,003	7,334	3935,524	78,761		0	-1,194	0,227
0,074	0,0148	45,225	7,538	4157,201	80,949		0	-1,214	0,226
0,076	0,0152	46,448	7,741	4384,951	83,136		0	-1,234	0,225
0,078	0,0156	47,670	7,945	4618,775	85,324		0	-1,253	0,224
0,080	0,0160	48,892	8,149	4858,672	87,512		0	-1,272	0,224
0,082	0,0164	50,115	8,352	5104,642	89,700		0	-1,290	0,223
0,084	0,0168	51,337	8,556	5356,686	91,888		0	-1,308	0,222
0,086	0,0172	52,559	8,760	5614,803	94,075		0	-1,325	0,222
0,088	0,0176	53,782	8,964	5878,993	96,263		0	-1,342	0,221
0,090	0,0180	55,004	9,167	6149,257	98,451		0	-1,359	0,221
0,092	0,0184	56,226	9,371	6425,594	100,639		0	-1,375	0,220
0,094	0,0188	57,449	9,575	6708,004	102,827		0	-1,391	0,219
0,096	0,0192	58,671	9,778	6996,488	105,014		0	-1,407	0,219
0,098	0,0196	59,893	9,982	7291,045	107,202		0	-1,422	0,218
0,100	0,0200	61,115	10,186	7591,675	109,390		0	-1,437	0,218

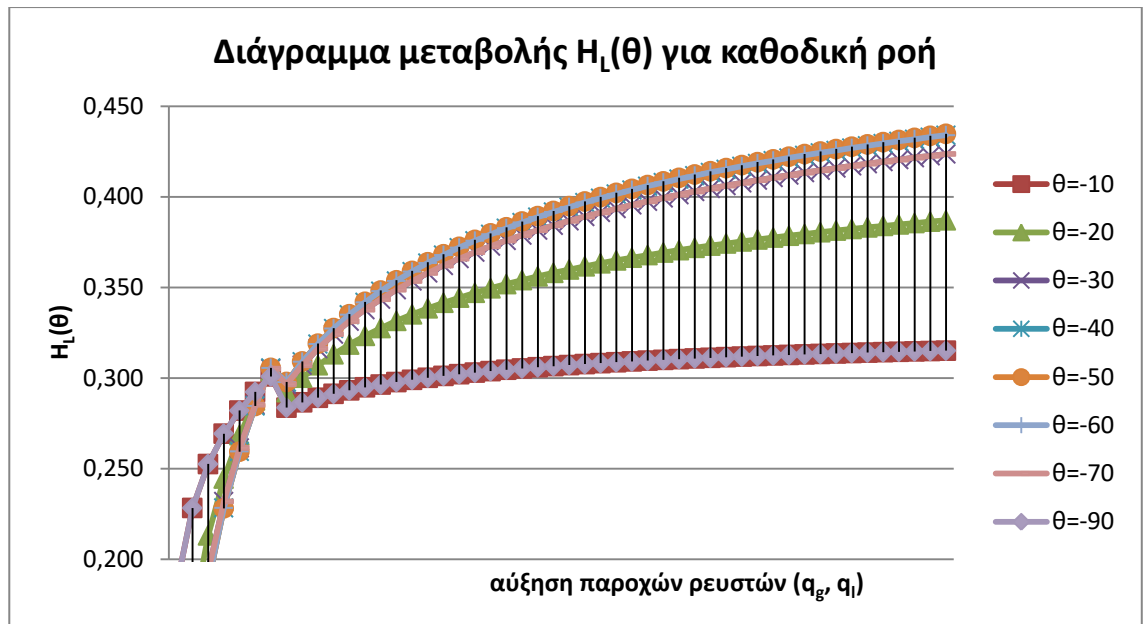
**Πίνακας 5.6:** Υδραυλικά μεγέθη καθεστώτος διασκορπισμένης ροής

Παρατηρείται πως το μέγεθος  $H_L$  liquid holdup για γωνία κλίσης  $0^\circ$  μειώνεται όσο αυξάνονται οι τιμές παροχής των ρευστών. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του αριθμού Froude της ροής, ο οποίος σαφώς αυξάνεται με την αύξηση των παροχών και είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθος  $H_L$  liquid holdup για γωνία κλίσης  $0^\circ$ . Στους ίδιους πίνακες δίνονται και οι τιμές των παραμέτρων  $C+$  (που ισχύει για ανοδική ροή) και  $C-$  (για καθοδική ροή), οι οποίοι υπεισέρχονται στην σχέση υπολογισμού του μεγέθους  $H_L(\theta)$  και παρατηρούμε την μεταβολή τους. Για το καθεστώς διακοπτόμενης ροής (intermittent flow) η μεταβολή της παραμέτρου  $C+$  δεν παρουσιάζει μονοτονία, ενώ η παράμετρος  $C-$  μειώνεται με την αύξηση των παροχών. Στο καθεστώς της διασκορπισμένης ροής (distributed flow), η παράμετρος  $C+$  λαμβάνει μηδενική τιμή, ενώ η απόλυτη τιμή της παραμέτρου  $C+$ , αυξάνεται με την αύξηση της παροχής.

Ακολουθούν διαγράμματα για το μέγεθος  $H_L(\theta)$ , για τις διάφορες κλίσεις αγωγών, τόσο σε ανοδική όσο και σε καθοδική ροή.

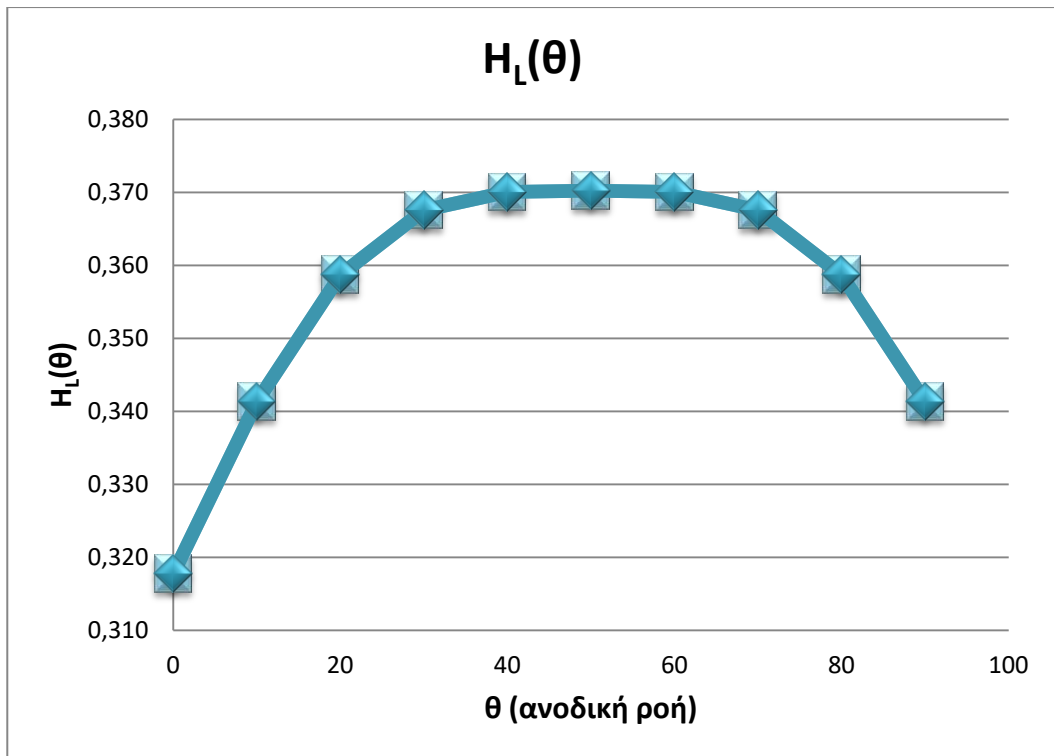


**Σχήμα 5.2:** Διάγραμμα μεταβολής  $H_L(\theta)$  για ανοδική ροή

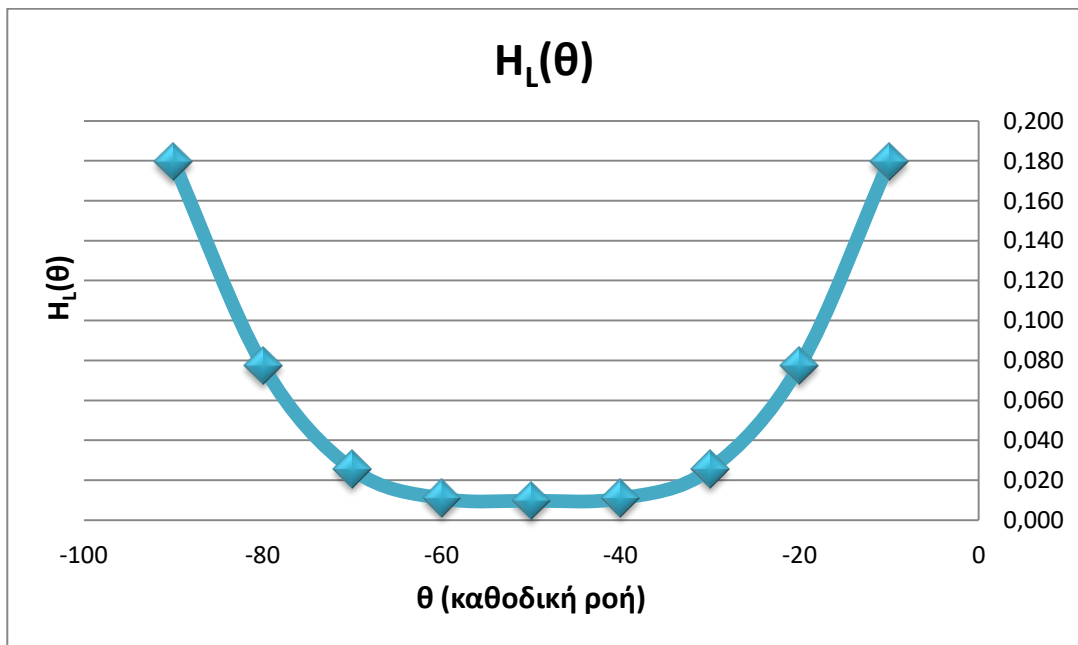


Σχήμα 5.3: Διάγραμμα μεταβολής  $H_L(\theta)$  για καθοδική ροή

Παρατηρούμε πως στην διαφασική ροή σε κεκλιμένους αγωγούς, το μέγεθος  $H_L$  liquid holdup παρουσιάζει ακρότατο (μέγιστο) σε μια γωνία κλίσης περίπου ίση με  $\theta=50^\circ$  και (ελάχιστο) για γωνία ίση με  $\theta=-50^\circ$ . Αυτό αποδεικνύεται και από τα παρακάτω διαγράμματα που προκύπτουν για οποιονδήποτε συνδυασμό παροχής ρευστών. Δίνεται η μεταβολή του  $H_L(\theta)$  για διάφορες τιμές της γωνίας κλίσης αγωγού, τόσο για ανοδική όσο και για καθοδική ροή:



**Σχήμα 5.4:** Διάγραμμα μεταβολής  $H_L(\theta)$  για διάφορες κλίσεις αγωγού (ανοδική ροή)



**Σχήμα 5.5:** Διάγραμμα μεταβολής  $H_L(\theta)$  για διάφορες κλίσεις αγωγού (καθοδική ροή)



Παρατηρείται πως οι τιμές του  $H_L(\theta)$  είναι περίπου ίσες για γωνίες  $\theta=10^\circ$  και  $\theta=90^\circ$  γεγονός που εξηγεί τον λόγο για τον οποίο οι σχέσεις για κατακόρυφους αγωγούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως έναν ικανοποιητικό βαθμό για οριζόντια ροή.

Οι σχέσεις υπολογισμού του liquid holdup και της μεταβολής πίεσης για όλες τις γωνίες κλίσεως αγωγού για ροή προς τα κάτω, κρίνονται ως λιγότερο αξιόπιστες σε χαμηλούς ρυθμούς ροής, λόγω της παραμετρικής τους εξάρτησης από το εισερχόμενο κλάσμα. Αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της υπολογιστικής εφαρμογής.

Υπολογισμός $H_L(\theta)$ , για καθοδική ροή για διάφορες τιμές της γωνίας $\theta$								
$\theta$								
-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
$H_L(\theta)=H_L(0)*\psi$								
<b>0,180</b>	<b>0,077</b>	<b>0,026</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>	<b>0,011</b>	<b>0,026</b>	<b>0,077</b>	<b>0,180</b>
0,223	0,158	0,125	0,116	0,115	0,116	0,125	0,158	0,223
0,247	0,204	0,182	0,175	0,175	0,175	0,182	0,204	0,247
0,264	0,235	0,221	0,216	0,216	0,216	0,221	0,235	0,264

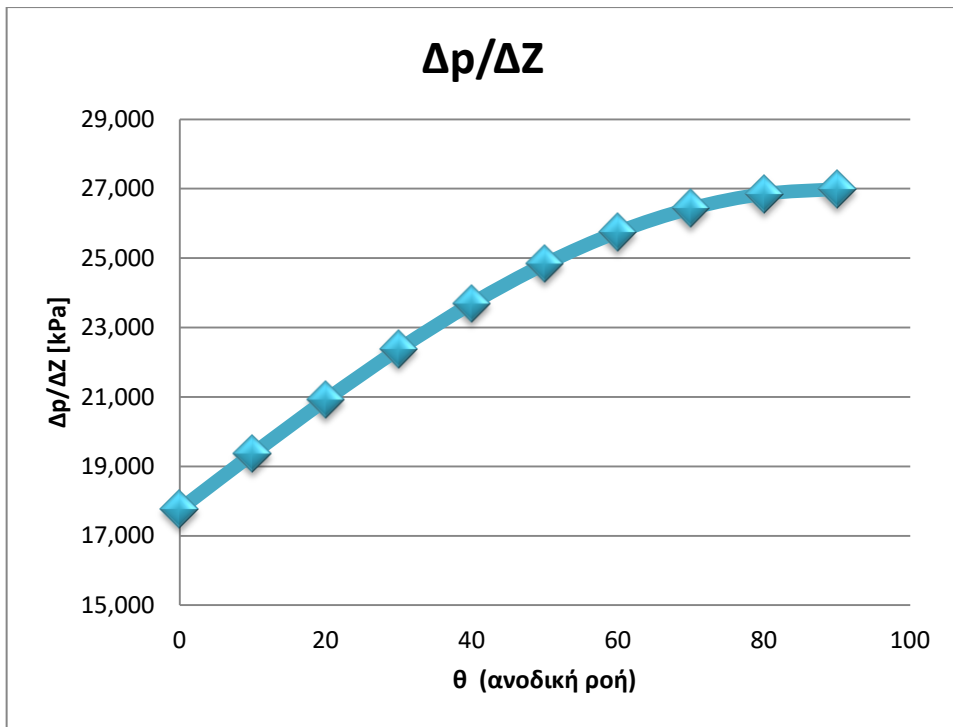
**Πίνακας 5.7:** Υπολογισμός  $H_L(\theta)$ , για καθοδική ροή για διάφορες τιμές της γωνίας  $\theta$

κατανομή πίεσης για καθοδική ροή								
$\theta$								
-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
$dp/dZ$ (σε kPa)								
<b>-52,558</b>	<b>-23,872</b>	<b>-4,768</b>	<b>-0,178</b>	<b>-1,528</b>	<b>-4,989</b>	<b>-27,442</b>	<b>-130,164</b>	<b>-408,673</b>
-6,067	-12,226	-14,034	-19,657	-27,484	-34,584	-46,121	-73,728	-126,620
4,977	-1,987	-7,117	-12,982	-18,970	-24,068	-29,902	-40,381	-58,347
9,445	3,553	-1,327	-6,186	-10,743	-14,537	-18,176	-23,216	-30,681

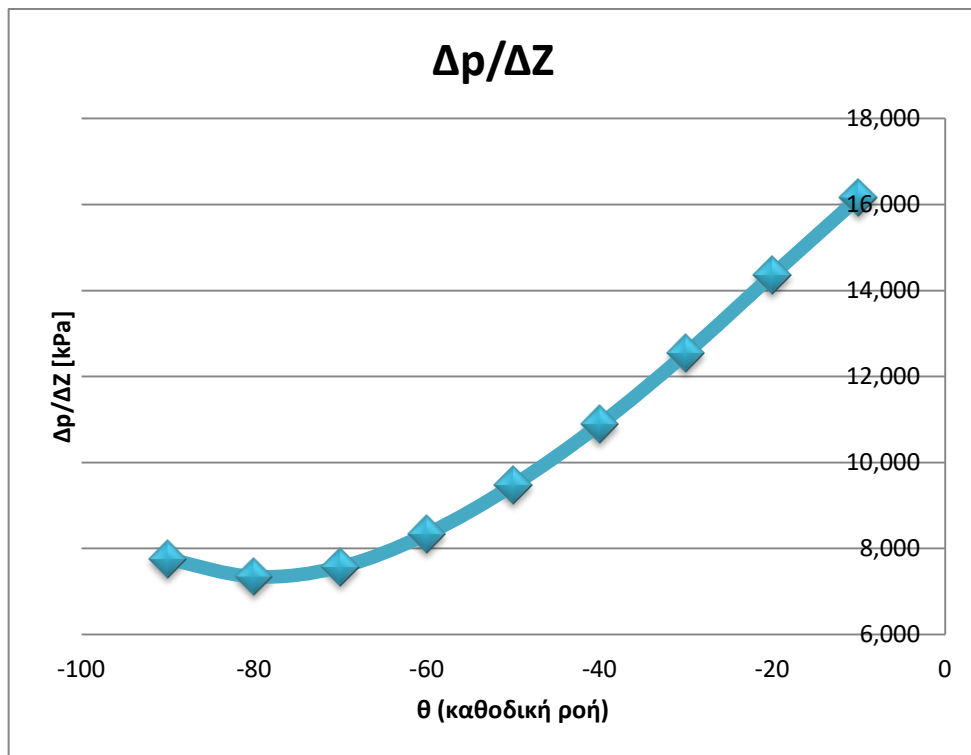
**Πίνακας 5.7:** Κατανομή πίεσης για καθοδική ροή για διάφορες τιμές της γωνίας  $\theta$

Στους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε τις πρώτες τιμές των liquid holdup και της μεταβολής πίεσης για όλες τις γωνίες κλίσεως αγωγού για ροή προς τα κάτω. Στην πρώτη γραμμή έχουμε τους χαμηλότερους ρυθμούς ροής των ρευστών και βλέπουμε πόσο μεγάλη απόκλιση έχουν οι τιμές των υπολογιζόμενων μεγεθών σε σχέση με τις υπόλοιπες γραμμές του πίνακα (ενδεικτικά παρουσιάζονται τα μεγέθη για 4 συνδυασμούς ρυθμών ροής από τους 50).

Η μεταβολή πίεσης για ανοδική ροή εμφανίζει μέγιστο για γωνία κλίσης αγωγού  $\theta=80^\circ$ , ενώ για καθοδική ροή εμφανίζει ελάχιστο για γωνία κλίσης αγωγού  $\theta=-80^\circ$ . Παρατίθενται σχετικά διαγράμματα για έναν (τυχαίο) συνδυασμό ρυθμών ροής:



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα κατανομής πίεσης για διάφορες κλίσεις αγωγού (ανοδική ροή)



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα κατανομής πίεσης για διάφορες κλίσεις αγωγού (καθοδική ροή)

Η γωνία κλίσης του αγωγού στη διφασική ροή επηρεάζει σημαντικά τα βασικά μεγέθη  $H_L$  liquid holdup και την μεταβολή της πίεσης για όλες τις συνθήκες ροής. Αυτό καθίσταται σαφές από τις τιμές που δίνονται στους πίνακες  $H_L$ ,  $\Delta p/\Delta Z$ . Οι τιμές  $H_L(\theta)$  διαφέρουν πολύ από τις τιμές  $H_L(0)$  για τις διάφορες τιμές κλίσης αγωγού, τόσο για ανοδική όσο και για καθοδική ροή. Μεγάλη διακύμανση παρατηρείται και στις τιμές της μεταβολής πίεσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### 6.1 Συμπεράσματα υπολογιστικής εφαρμογής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναλύθηκε διεξοδικά, τόσο θεωρητικά όσο και υπολογιστικά η διφασική ροή σε κεκλιμένο κλειστό αγωγό. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στον προσδιορισμό δύο βασικών μεγεθών, του liquid holdup  $H_L$  (το κλάσμα που εκφράζει το ποσοστό του σωλήνα που καταλαμβάνεται από υγρό-ορίζεται ως ο όγκος υγρού σε μια διατομή σωλήνα προς τον αντίστοιχο ωφέλιμο όγκο της διατομής αυτής) και της πτώσης πίεσης. Οι σχέσεις υπολογισμού αυτών των δύο μεγεθών, μαρτυρούν την εξάρτησή τους από τις διάφορες παραμέτρους. Έτσι, από τη σχέση 5.30, παρατηρούμε πως η μεταβολή πίεσης εξαρτάται από τα παρακάτω μεγέθη:

-από την ταχύτητα ροής του διφασικού μίγματος (που ουσιαστικά είναι ο μέσος όρος των ταχυτήτων των δύο ρευστών)

-από τη διάμετρο και την γωνία κλίσεως του αγωγού

-από τον συντελεστή τριβής του διφασικού μίγματος, που εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό Reynolds

-από το μέγεθος  $H_L(\theta)$  που εξαρτάται από το κλάσμα νερού εισόδου, από τον αριθμό Froude, και φυσικά από την κλίση του αγωγού.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν ομοιότητες μεταξύ της μονοφασικής και διφασικής ροής όσον αφορά τα μεγέθη τα οποία επηρεάζουν την πτώση πίεσης. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, όπου περιγράφηκαν αρκετές εισαγωγικές έννοιες της μηχανικής ρευστών, παρουσιάστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την πτώση πίεσης μονοφασικής ροής

ρέοντος ρευστού σε κλειστό αγωγό, οι οποίοι δεν ήταν άλλοι από τον συντελεστή τραχύτητας, την απώλεια τριβών, καθώς και τον αριθμό Reynolds της ροής. Παρατηρείται λοιπόν συνάφεια, παρά την πολυπλοκότητα στους υπολογισμούς της διφασικής ροής.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε μια υπολογιστική εφαρμογή, βάσει της μεθοδολογίας που προτείνουν ο Beggs σε συνεργασία με τον Brill (1973) για το φαινόμενο της διφασικής ροής νερού-αέρα σε κεκλιμένο κλειστό αγωγό.

Οι Beggs και Brill (1973) παρουσίασαν την πιο ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό όλων εκείνων των παραμέτρων που αφορούν στην διφασική ροή νερού-αέρα σε κεκλιμένο αγωγό. Στο άρθρο τους “A study of two-phase flow in Inclined Pipes” αναλύεται διεξοδικά η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό κυρίως της επίδρασης της κλίσης του αγωγού στο liquid holdup  $H_L$  και στην πτώση πίεσης.

Σημειώνεται πως στην υπολογιστική εφαρμογή, δε λαμβάνεται υπ’ όψιν η τραχύτητα του αγωγού. Το μέγεθος το οποίο επηρεάζεται από την απόλυτη τραχύτητα του αγωγού είναι ο συντελεστής τριβής μη ολίσθησης  $f_{ns}$ . Για τραχείς αγωγούς ο συντελεστής αυτός προσδιορίζεται από το διάγραμμα Moody, ενώ για λείους αγωγούς δίνεται η σχέση 5.28, βάσει της οποίας ο συντελεστής τριβής μη ολίσθησης εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds της ροής. Για την υπολογιστική εφαρμογή, έγινε η παραδοχή χρησιμοποίησης λείων αγωγών.

Ο Pothof στην διατριβή του “Co-current air-water flow in downward sloping pipes” (ταυτόχρονη ροή αέρα-νερού σε κεκλιμένους αγωγούς με ροή κατάντη) προβαίνει σε μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση και μελέτη του φαινομένου της διφασικής ροής, και στη συνέχεια παρουσιάζει μια πειραματική μελέτη, στην οποία αναλύει τις επιπτώσεις που έχουν υδραυλικά μεγέθη όπως: η διάμετρος του αγωγού, η

επιφανειακή τάση, η απόλυτη πίεση στην ροή. Στην διατριβή του πολλά από τα υδραυλικά μεγέθη μετρώνται κατά την πειραματική διαδικασία, ενώ τα αποτελέσματα αφορούν στα εξής μεγέθη:

- αριθμός ροής  $F_w$ ,
- ταχύτητα ροής  $v$
- απώλειες λόγω τριβής,
- η διαφορά πίεσης  $\Delta p$  και
- ο αριθμός υδραυλικών αλμάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα αποτελέσματα της υπολογιστικής και στο σημείο που αυτό είναι δυνατόν, θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας του Pothof.

1. Στην υπολογιστική εφαρμογή, αρχικά προσδιορίζονται τα καθεστώτα ροής που εμφανίζονται. Έτσι και στην πειραματική εφαρμογή του Pothof, δίνεται πίνακας με τα εμφανιζόμενα καθεστώτα ροής:

Table 3.3: Observed flow regimes in facility 4. The table lists the flow regime identifiers from section 3.5.1

$F_w$	0.09	0.18	0.27	0.36	0.45	0.54	0.63	0.72	0.81	0.9	0.98	1.07	1.16
$F_g \cdot 1000$													
0.4	1	1	2a	2a	2a	2b	2b	2b	3	3	4	4	4
0.8	1	1	1	1	2a	2b	2b	2b	2b	3	3	4	4
2	1	1	1	1	2a	2b	2b	2b	2b	2b	3	3	4
4	1	1	1	1	2a	2b	2b	2b	2b	2b	3	3	3
6	1	1	1	1	2a	2b	2b	2b	2b	2b	3	3	3

Πίνακας 6.1: Καθεστώτα ροής κατά Pothof (2008)

Όπου με τους παραπάνω δείκτες συμβολίζονται:

1. Καθεστώς στρωτής ροής

2. Καθεστώς ροής μετάβασης
3. Καθεστώς διαλείπουσας ροής
4. Καθεστώς κατανεμημένης ροής

Τα καθεστώτα ροής είναι παρόμοια με αυτά που προέκυψαν στην υπολογιστική εφαρμογή με το καθεστώς ροής μετάβασης να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της ροής και στις δύο περιπτώσεις. Η διαφορά είναι ότι το καθεστώς στρωτής ροής αναπτύσσεται σε πολύ μικρό τμήμα (για  $N_{FR} < 2,034$  και για πολύ μικρές παροχές ρευστών). Ακόμη το καθεστώς κατανεμημένης ροής, εμφανίζεται και στις δύο εφαρμογές.

2. Παρατηρείται ότι στην πειραματική του ανάλυση, ο Pothof, δεν υπολογίζει την παράμετρο liquid holdup  $H_L$  η οποία είναι η βασικότερη παράμετρος για τους υπολογισμούς στη μελέτη των Beggs και Brill. Αντιθέτως υπολογίζει την παράμετρο  $\Delta H_g$  gas pocket head loss, μέγεθος το οποίο αφορά την απώλεια ενέργειας λόγω φυσαλίδων αέρα και επηρεάζει σημαντικά την πτώση πίεσης. Όλα τα υπόλοιπα μεγέθη που υπολογίζει ο Pothof, τα συγκρίνει με την μεταβολή του  $\Delta H_g$  gas pocket head loss και παρουσιάζει τα αντίστοιχα διαγράμματα. Επομένως, εφόσον για όλα τα υπόλοιπα μεγέθη μελετάται η επίδραση που έχουν στο  $\Delta H_g$  gas pocket head loss, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί περαιτέρω σύγκριση αποτελεσμάτων. Σημειώνεται ακόμη πως ο Pothof εκτελεί τα πειράματα, σε κεκλιμένους αγωγούς μόνο για καθοδική ροή.

Ακολουθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της υπολογιστικής εφαρμογής, τα οποία συμφωνούν με τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία των Beggs και Brill. Σημειώνεται πως στη μελέτη τους, οι Beggs και Brill παρουσιάζουν μόνο τη μεθοδολογία υπολογισμού και δεν προβαίνουν σε υπολογισμούς, ενώ τα συμπεράσματα που παραθέτουν για τη διφασική ροή, αφορούν πειραματικά αποτελέσματα.



A. Η γωνία κλίσης του αγωγού στη διαφασική ροή επηρεάζει σημαντικά τα βασικά μεγέθη  $H_L$  liquid holdup και την μεταβολή της πίεσης για όλες τις συνθήκες ροής. Αυτό καθίσταται σαφές από τις τιμές που δίνονται στους πίνακες  $H_L$ ,  $\Delta p/\Delta Z$ . Οι τιμές  $H_L(\theta)$  διαφέρουν πολύ από τις τιμές  $H_L(0)$  για τις διάφορες τιμές κλίσης αγωγού, τόσο για ανοδική όσο και για καθοδική ροή. Μεγάλη διακύμανση παρατηρείται και στις τιμές της μεταβολής πίεσης.

B. Στην διαφασική ροή σε κεκλιμένους αγωγούς, το μέγεθος  $H_L$  liquid holdup παρουσιάζει ακρότατο (μέγιστο) σε μια γωνία κλίσης περίπου ίση με  $\theta=50^\circ$  και (ελάχιστο) για γωνία ίση με  $\theta=-50$ .

Γ. Παρατηρείται πως οι τιμές του  $H_L(\theta)$  είναι περίπου ίσες για γωνίες  $\theta=10^\circ$  και  $\theta=90^\circ$  γεγονός που εξηγεί τον λόγο για τον οποίο οι σχέσεις για κατακόρυφους αγωγούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως έναν ικανοποιητικό βαθμό για οριζόντια ροή.

Δ. Το κλάσμα εισόδου υγρού  $\lambda$ , καθώς και ο αριθμός Froude ροής  $N_{FR}$ , είναι δύο πολύ βασικές παράμετροι για τη διαφασική ροή. Από μεταγενέστερους ερευνητές είχε σχολιαστεί η μεθοδολογία των Beggs και Brill. Συγκεκριμένα, ενώ ακόμη και σήμερα κρίνονται ως πολύ ισχυρές οι σχέσεις υπολογισμού του liquid holdup και της μεταβολής πίεσης για όλες τις γωνίες κλίσεως αγωγού για ροή προς τα κάτω, κρίνονται ως λιγότερο αξιόπιστες σε χαμηλούς ρυθμούς ροής, λόγω της παραμετρικής τους εξάρτησης από το εισερχόμενο κλάσμα. Αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της υπολογιστικής εφαρμογής.

E. Η απώλεια λόγω τριβών, όπως και οι συντελεστής τριβής στη διαφασική ροή, είναι μεγέθη που εξαρτώνται άμεσα από το liquid holdup. Ομοίως η μεταβολή πίεσης εξαρτάται τόσο από τον συντελεστή τριβής όσο και από το liquid holdup. Η μεταβολή πίεσης για ανοδική ροή εμφανίζει μέγιστο για γωνία κλίσης αγωγού  $\theta=80^\circ$ , ενώ για καθοδική ροή εμφανίζει ελάχιστο για γωνία κλίσης αγωγού  $\theta=-80^\circ$ .

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σε αυτήν την βιβλιογραφική αναζήτηση μελετών σχετικά με τη διφασική ροή σε κεκλιμένους αγωγούς, διαπιστώθηκε πως υπάρχουν εκτεταμένες μελέτες της ροής οι οποίες συνοδεύονται και από πειραματικά δεδομένα για διάφορες μεταβλητές (υγρή κοίτη «liquid holdup», πτώση πίεσης «pressure drop», ταχύτητα «velocity») για διαφορετικές γωνίες κλίσης και ρυθμούς ροής. Σε πολλές μελέτες ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην ανάλυση του καθεστώτος διαλείπουσας ροής «slug flow».

Αν και έχει πραγματοποιηθεί σημαντική κάλυψη του βιβλιογραφικού κενού με τις μελέτες που έχουν ήδη διεξαχθεί, υπάρχουν σαφώς κάποια ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

-Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές διαμέτροι σωλήνων, τόσο μεγαλύτερες όσο και μικρότερες, προκειμένου να προσδιοριστεί καλύτερα η επίδραση της διαμέτρου του σωλήνα στο διφασικό μείγμα, όσον αφορά τι διάφορες παραμέτρους της διφασικής ροής.

-Ακόμη, θα ήταν ωφέλιμο να διεξαχθούν περαιτέρω πειράματα σχετικά με την πτώση πίεσης για υψηλότερους ρυθμούς ροής αερίου και υγρού. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας έρευνας θα μπορούσαν να επιβεβαιώσουν τα αποτελέσματα των ερευνητών που βρέθηκαν για την επίδραση της κλίσης στην πτώση πίεσης.

-Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η χρήση περισσότερο σχετικών με τη βιομηχανία υγρών όπως το έλαιο πυριτίου και η κηροζίνη. Διερεύνηση της επίδρασης των ιδιοτήτων τέτοιων ρευστών (ιξώδες, πυκνότητα και επιφανειακή τάση) θα παρουσίαζαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΠΙΝΑΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

δεδομένα ροής (μεταβαλλόμενα):			
	ΣΥΜΒΟΛΟ:	ΤΙΜΗ:	ΜΟΝΑΔΕΣ
παροχή αέρα	$q_e$	0,00	m <sup>3</sup> /s
		0,02	m <sup>3</sup> /s
		0,04	m <sup>3</sup> /s
		0,06	m <sup>3</sup> /s
		0,08	m <sup>3</sup> /s
		0,10	m <sup>3</sup> /s
παροχή νερού	$q_l$	0,000	m <sup>3</sup> /s
		0,004	m <sup>3</sup> /s
		0,008	m <sup>3</sup> /s
		0,012	m <sup>3</sup> /s
		0,016	m <sup>3</sup> /s
		0,020	m <sup>3</sup> /s
παροχή μάζας αέρα	$w_p$	0,000	kg/s
		0,026	kg/s
		0,052	kg/s
		0,078	kg/s
		0,103	kg/s
		0,129	kg/s
παροχή μάζας νερού	$w_l$	0,00	kg/s
		4,00	kg/s
		8,00	kg/s
		12,00	kg/s
		16,00	kg/s
		20,00	kg/s
ογκομετρικός ρυθμός ροής αέρα:	$vs_e$	0,00	m/s
		10,19	m/s
		20,37	m/s
		30,56	m/s
		40,74	m/s
		50,93	m/s
ογκομετρικός ρυθμός ροής νερού:	$vs_l$	0,00	m/s
		2,04	m/s
		4,07	m/s
		6,11	m/s
		8,15	m/s
		10,19	m/s
ογκομετρικός ρυθμός ροής μίγματος:	$v_m$	0,00	m/s
		12,22	m/s
		24,45	m/s
		36,67	m/s
		48,89	m/s
		61,12	m/s
αριθμός Froude:	$N_{FR}$	0,0	αδιάστατος

		303,7	αδιάστατος
		1214,7	αδιάστατος
		2733,0	αδιάστατος
		4858,7	αδιάστατος
		7591,7	αδιάστατος
αριθμός Reynolds μίνιατος:	$N_{Rens}$	0,000000	αδιάστατος
		500493,16	αδιάστατος
		1000986,33	αδιάστατος
		1501479,49	αδιάστατος
		2001972,66	αδιάστατος
		2502465,82	αδιάστατος
αριθμός ταχύτητας υγρού κλάσματος:	$N_{lv}$	0,0000	αδιάστατος
		21,878	αδιάστατος
		43,756	αδιάστατος
		65,634	αδιάστατος
		87,512	αδιάστατος
		109,390	αδιάστατος
ρυθμός παροχής μάζας μίνιατος	$G_m$	0,00	kg/m <sup>2</sup> s
		2050,35	kg/m <sup>2</sup> s
		4100,71	kg/m <sup>2</sup> s
		6151,06	kg/m <sup>2</sup> s
		8201,41	kg/m <sup>2</sup> s
		10251,77	kg/m <sup>2</sup> s

Πίνακας Α.1: δεδομένα ροής

$g$	$q_L$	$v_m$	$N_{FR}$	καθεστώς ροής
<b>0,000</b>	0,0000	0,000	0,000	<b>segregated flow</b>
<b>0,002</b>	0,0004	1,222	3,037	<b>intermittent flow</b>
<b>0,004</b>	0,0008	2,445	12,147	
<b>0,006</b>	0,0012	3,667	27,330	
<b>0,008</b>	0,0016	4,889	48,587	
<b>0,010</b>	0,0020	6,112	75,917	
<b>0,012</b>	0,0024	7,334	109,320	
<b>0,014</b>	0,0028	8,556	148,797	
<b>0,016</b>	0,0032	9,778	194,347	<b>distributed flow</b>
<b>0,018</b>	0,0036	11,001	245,970	
<b>0,020</b>	0,0040	12,223	303,667	
<b>0,022</b>	0,0044	13,445	367,437	
<b>0,024</b>	0,0048	14,668	437,280	
<b>0,026</b>	0,0052	15,890	513,197	
<b>0,028</b>	0,0056	17,112	595,187	
<b>0,030</b>	0,0060	18,335	683,251	
<b>0,032</b>	0,0064	19,557	777,388	
<b>0,034</b>	0,0068	20,779	877,598	
<b>0,036</b>	0,0072	22,002	983,881	
<b>0,038</b>	0,0076	23,224	1096,238	

<b>0,040</b>	0,0080	24,446	1214,668
<b>0,042</b>	0,0084	25,669	1339,171
<b>0,044</b>	0,0088	26,891	1469,748
<b>0,046</b>	0,0092	28,113	1606,398
<b>0,048</b>	0,0096	29,335	1749,122
<b>0,050</b>	0,0100	30,558	1897,919
<b>0,052</b>	0,0104	31,780	2052,789
<b>0,054</b>	0,0108	33,002	2213,732
<b>0,056</b>	0,0112	34,225	2380,749
<b>0,058</b>	0,0116	35,447	2553,839
<b>0,060</b>	0,0120	36,669	2733,003
<b>0,062</b>	0,0124	37,892	2918,240
<b>0,064</b>	0,0128	39,114	3109,550
<b>0,066</b>	0,0132	40,336	3306,934
<b>0,068</b>	0,0136	41,559	3510,391
<b>0,070</b>	0,0140	42,781	3719,921
<b>0,072</b>	0,0144	44,003	3935,524
<b>0,074</b>	0,0148	45,225	4157,201
<b>0,076</b>	0,0152	46,448	4384,951
<b>0,078</b>	0,0156	47,670	4618,775
<b>0,080</b>	0,0160	48,892	4858,672
<b>0,082</b>	0,0164	50,115	5104,642
<b>0,084</b>	0,0168	51,337	5356,686
<b>0,086</b>	0,0172	52,559	5614,803
<b>0,088</b>	0,0176	53,782	5878,993
<b>0,090</b>	0,0180	55,004	6149,257
<b>0,092</b>	0,0184	56,226	6425,594
<b>0,094</b>	0,0188	57,449	6708,004
<b>0,096</b>	0,0192	58,671	6996,488
<b>0,098</b>	0,0196	59,893	7291,045
<b>0,100</b>	0,0200	61,115	7591,675

Πίνακας Α.2: καθεστώτα ροής

<b><math>N_{FR}</math></b>	<b>καθεστώς ροής</b>	<b><math>H_L(0)</math></b>
<b>0,000</b>	<b>segregated flow</b>	-
<b>3,037</b>		0,318
<b>12,147</b>		0,310
<b>27,330</b>		0,306
<b>48,587</b>	<b>intermittent flow</b>	0,303
<b>75,917</b>		0,301
<b>109,320</b>		0,299
<b>148,797</b>		0,297

194,347		0,272
245,970		0,268
303,667		0,265
367,437		0,262
437,280		0,259
513,197		0,257
595,187		0,254
683,251		0,252
777,388		0,250
877,598		0,248
983,881		0,247
1096,238		0,245
1214,668		0,243
1339,171		0,242
1469,748		0,241
1606,398		0,239
1749,122		0,238
1897,919		0,237
2052,789		0,236
2213,732		0,235
2380,749		0,234
2553,839	<b>distributed flow</b>	0,233
2733,003		0,232
2918,240		0,231
3109,550		0,230
3306,934		0,229
3510,391		0,228
3719,921		0,227
3935,524		0,227
4157,201		0,226
4384,951		0,225
4618,775		0,224
4858,672		0,224
5104,642		0,223
5356,686		0,222
5614,803		0,222
5878,993		0,221
6149,257		0,221
6425,594		0,220
6708,004		0,219
6996,488		0,219
7291,045		0,218
7591,675		0,218

Πίνακας Α.3: Υπολογισμός  $H_L(0)$

$N_{FR}$	$N_{LV}$	καθεστώς ροής	C+	C-
0,000	0,000	segregated flow	-	-
3,037	2,188	intermittent flow	0,248	1,454
12,147	4,376		0,102	0,942
27,330	6,563		0,017	0,642
48,587	8,751		-0,043	0,430
75,917	10,939		-0,090	0,265
109,320	13,127		-0,128	0,130
148,797	15,315		-0,161	0,016
194,347	17,502		distributed flow	0
245,970	19,690	0		-0,170
303,667	21,878	0		-0,248
367,437	24,066	0		-0,318
437,280	26,254	0		-0,382
513,197	28,441	0		-0,441
595,187	30,629	0		-0,496
683,251	32,817	0		-0,547
777,388	35,005	0		-0,595
877,598	37,193	0		-0,640
983,881	39,380	0		-0,682
1096,238	41,568	0		-0,722
1214,668	43,756	0		-0,760
1339,171	45,944	0		-0,796
1469,748	48,132	0		-0,830
1606,398	50,319	0		-0,863
1749,122	52,507	0		-0,895
1897,919	54,695	0		-0,925
2052,789	56,883	0		-0,954
2213,732	59,071	0		-0,982
2380,749	61,258	0		-1,008
2553,839	63,446	0		-1,034
2733,003	65,634	0		-1,059
2918,240	67,822	0		-1,084
3109,550	70,010	0	-1,107	
3306,934	72,197	0	-1,130	
3510,391	74,385	0	-1,152	
3719,921	76,573	0	-1,173	
3935,524	78,761	0	-1,194	
4157,201	80,949	0	-1,214	
4384,951	83,136	0	-1,234	
4618,775	85,324	0	-1,253	
4858,672	87,512	0	-1,272	
5104,642	89,700	0	-1,290	
5356,686	91,888	0	-1,308	
5614,803	94,075	0	-1,325	
5878,993	96,263	0	-1,342	
6149,257	98,451	0	-1,359	
6425,594	100,639	0	-1,375	









**Υπολογισμός  $\psi$ , για καθοδική ροή για διάφορες τιμές της γωνίας  $\theta$**

C-	$\theta$								
	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
	$\phi$								
	-18	-36	-54	-72	-90	-108	-126	-144	-162
	$\psi=1+C(\sin\phi-1/3*\sin^3\phi)$								
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,454	0,565	0,244	0,080	0,034	0,031	0,034	0,080	0,244	0,565
0,942	0,718	0,510	0,404	0,374	0,372	0,374	0,404	0,510	0,718
0,642	0,808	0,666	0,594	0,573	0,572	0,573	0,594	0,666	0,808
0,430	0,871	0,777	0,728	0,715	0,714	0,715	0,728	0,777	0,871
0,265	0,921	0,862	0,833	0,824	0,824	0,824	0,833	0,862	0,921
0,130	0,961	0,932	0,918	0,914	0,913	0,914	0,918	0,932	0,961
0,016	0,995	0,992	0,990	0,989	0,989	0,989	0,990	0,992	0,995
-0,083	1,025	1,043	1,052	1,055	1,055	1,055	1,052	1,043	1,025
-0,170	1,051	1,088	1,107	1,113	1,113	1,113	1,107	1,088	1,051
-0,248	1,074	1,129	1,157	1,164	1,165	1,164	1,157	1,129	1,074
-0,318	1,095	1,165	1,201	1,211	1,212	1,211	1,201	1,165	1,095
-0,382	1,114	1,199	1,242	1,254	1,255	1,254	1,242	1,199	1,114
-0,441	1,132	1,230	1,279	1,293	1,294	1,293	1,279	1,230	1,132
-0,496	1,148	1,258	1,314	1,330	1,331	1,330	1,314	1,258	1,148
-0,547	1,164	1,285	1,346	1,364	1,365	1,364	1,346	1,285	1,164
-0,595	1,178	1,309	1,376	1,395	1,397	1,395	1,376	1,309	1,178
-0,640	1,191	1,333	1,405	1,425	1,426	1,425	1,405	1,333	1,191
-0,682	1,204	1,355	1,431	1,453	1,455	1,453	1,431	1,355	1,204
-0,722	1,216	1,375	1,457	1,480	1,481	1,480	1,457	1,375	1,216
-0,760	1,227	1,395	1,481	1,505	1,507	1,505	1,481	1,395	1,227
-0,796	1,238	1,414	1,503	1,529	1,531	1,529	1,503	1,414	1,238
-0,830	1,248	1,432	1,525	1,552	1,553	1,552	1,525	1,432	1,248
-0,863	1,258	1,449	1,546	1,573	1,575	1,573	1,546	1,449	1,258
-0,895	1,268	1,465	1,566	1,594	1,596	1,594	1,566	1,465	1,268
-0,925	1,277	1,481	1,585	1,614	1,616	1,614	1,585	1,481	1,277
-0,954	1,285	1,496	1,603	1,634	1,636	1,634	1,603	1,496	1,285
-0,982	1,294	1,510	1,621	1,652	1,654	1,652	1,621	1,510	1,294
-1,008	1,302	1,524	1,638	1,670	1,672	1,670	1,638	1,524	1,302
-1,034	1,309	1,538	1,654	1,687	1,690	1,687	1,654	1,538	1,309
-1,059	1,317	1,551	1,670	1,704	1,706	1,704	1,670	1,551	1,317
-1,084	1,324	1,564	1,685	1,720	1,722	1,720	1,685	1,564	1,324
-1,107	1,331	1,576	1,700	1,735	1,738	1,735	1,700	1,576	1,331
-1,130	1,338	1,588	1,715	1,751	1,753	1,751	1,715	1,588	1,338
-1,152	1,345	1,599	1,729	1,765	1,768	1,765	1,729	1,599	1,345
-1,173	1,351	1,610	1,742	1,779	1,782	1,779	1,742	1,610	1,351
-1,194	1,357	1,621	1,755	1,793	1,796	1,793	1,755	1,621	1,357
-1,214	1,363	1,632	1,768	1,807	1,810	1,807	1,768	1,632	1,363

<b>-1,234</b>	1,369	1,642	1,781	1,820	1,823	1,820	1,781	1,642	1,369
<b>-1,253</b>	1,375	1,652	1,793	1,833	1,836	1,833	1,793	1,652	1,375
<b>-1,272</b>	1,381	1,662	1,805	1,845	1,848	1,845	1,805	1,662	1,381
<b>-1,290</b>	1,386	1,671	1,816	1,857	1,860	1,857	1,816	1,671	1,386
<b>-1,308</b>	1,391	1,680	1,827	1,869	1,872	1,869	1,827	1,680	1,391
<b>-1,325</b>	1,397	1,689	1,838	1,881	1,884	1,881	1,838	1,689	1,397
<b>-1,342</b>	1,402	1,698	1,849	1,892	1,895	1,892	1,849	1,698	1,402
<b>-1,359</b>	1,407	1,707	1,860	1,903	1,906	1,903	1,860	1,707	1,407
<b>-1,375</b>	1,411	1,715	1,870	1,914	1,917	1,914	1,870	1,715	1,411
<b>-1,391</b>	1,416	1,724	1,880	1,924	1,927	1,924	1,880	1,724	1,416
<b>-1,407</b>	1,421	1,732	1,890	1,935	1,938	1,935	1,890	1,732	1,421
<b>-1,422</b>	1,425	1,740	1,899	1,945	1,948	1,945	1,899	1,740	1,425
<b>-1,437</b>	1,430	1,747	1,909	1,955	1,958	1,955	1,909	1,747	1,430

Πίνακας Α.7: Υπολογισμός παραμέτρου  $\psi$  για καθοδική ροή

Υπολογισμός $H_L(\theta)$ , για καθοδική ροή για διάφορες τιμές της γωνίας $\theta$									
$H_L(0)$	$\theta$								
	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
	$\phi$								
	-18	-36	-54	-72	-90	-108	-126	-144	-162
	$H_L(\theta)=H_L(0)*\psi$								
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>0,318</b>	0,180	0,077	0,026	0,011	0,010	0,011	0,026	0,077	0,180
<b>0,310</b>	0,223	0,158	0,125	0,116	0,115	0,116	0,125	0,158	0,223
<b>0,306</b>	0,247	0,204	0,182	0,175	0,175	0,175	0,182	0,204	0,247
<b>0,303</b>	0,264	0,235	0,221	0,216	0,216	0,216	0,221	0,235	0,264
<b>0,301</b>	0,277	0,259	0,250	0,248	0,248	0,248	0,250	0,259	0,277
<b>0,299</b>	0,287	0,278	0,274	0,273	0,273	0,273	0,274	0,278	0,287
<b>0,297</b>	0,296	0,295	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,295	0,296
<b>0,272</b>	0,279	0,284	0,286	0,287	0,287	0,287	0,286	0,284	0,279
<b>0,268</b>	0,282	0,292	0,297	0,298	0,299	0,298	0,297	0,292	0,282
<b>0,265</b>	0,284	0,299	0,306	0,308	0,309	0,308	0,306	0,299	0,284
<b>0,262</b>	0,287	0,305	0,314	0,317	0,317	0,317	0,314	0,305	0,287
<b>0,259</b>	0,289	0,311	0,322	0,325	0,325	0,325	0,322	0,311	0,289
<b>0,257</b>	0,290	0,315	0,328	0,332	0,332	0,332	0,328	0,315	0,290
<b>0,254</b>	0,292	0,320	0,334	0,338	0,338	0,338	0,334	0,320	0,292
<b>0,252</b>	0,293	0,324	0,339	0,344	0,344	0,344	0,339	0,324	0,293

<b>0,250</b>	0,295	0,327	0,344	0,349	0,349	0,349	0,344	0,327	0,295
<b>0,248</b>	0,296	0,331	0,349	0,354	0,354	0,354	0,349	0,331	0,296
<b>0,247</b>	0,297	0,334	0,353	0,358	0,359	0,358	0,353	0,334	0,297
<b>0,245</b>	0,298	0,337	0,357	0,362	0,363	0,362	0,357	0,337	0,298
<b>0,243</b>	0,299	0,340	0,360	0,366	0,367	0,366	0,360	0,340	0,299
<b>0,242</b>	0,300	0,342	0,364	0,370	0,370	0,370	0,364	0,342	0,300
<b>0,241</b>	0,300	0,344	0,367	0,373	0,374	0,373	0,367	0,344	0,300
<b>0,239</b>	0,301	0,347	0,370	0,376	0,377	0,376	0,370	0,347	0,301
<b>0,238</b>	0,302	0,349	0,373	0,380	0,380	0,380	0,373	0,349	0,302
<b>0,237</b>	0,302	0,351	0,375	0,382	0,383	0,382	0,375	0,351	0,302
<b>0,236</b>	0,303	0,353	0,378	0,385	0,386	0,385	0,378	0,353	0,303
<b>0,235</b>	0,304	0,354	0,380	0,388	0,388	0,388	0,380	0,354	0,304
<b>0,234</b>	0,304	0,356	0,383	0,390	0,391	0,390	0,383	0,356	0,304
<b>0,233</b>	0,305	0,358	0,385	0,392	0,393	0,392	0,385	0,358	0,305
<b>0,232</b>	0,305	0,359	0,387	0,395	0,395	0,395	0,387	0,359	0,305
<b>0,231</b>	0,306	0,361	0,389	0,397	0,397	0,397	0,389	0,361	0,306
<b>0,230</b>	0,306	0,362	0,391	0,399	0,400	0,399	0,391	0,362	0,306
<b>0,229</b>	0,306	0,364	0,393	0,401	0,401	0,401	0,393	0,364	0,306
<b>0,228</b>	0,307	0,365	0,394	0,403	0,403	0,403	0,394	0,365	0,307
<b>0,227</b>	0,307	0,366	0,396	0,405	0,405	0,405	0,396	0,366	0,307
<b>0,227</b>	0,308	0,367	0,398	0,406	0,407	0,406	0,398	0,367	0,308
<b>0,226</b>	0,308	0,368	0,399	0,408	0,409	0,408	0,399	0,368	0,308
<b>0,225</b>	0,308	0,370	0,401	0,410	0,410	0,410	0,401	0,370	0,308
<b>0,224</b>	0,309	0,371	0,402	0,411	0,412	0,411	0,402	0,371	0,309
<b>0,224</b>	0,309	0,372	0,404	0,413	0,413	0,413	0,404	0,372	0,309
<b>0,223</b>	0,309	0,373	0,405	0,414	0,415	0,414	0,405	0,373	0,309
<b>0,222</b>	0,309	0,374	0,406	0,416	0,416	0,416	0,406	0,374	0,309
<b>0,222</b>	0,310	0,375	0,408	0,417	0,418	0,417	0,408	0,375	0,310
<b>0,221</b>	0,310	0,375	0,409	0,418	0,419	0,418	0,409	0,375	0,310
<b>0,221</b>	0,310	0,376	0,410	0,420	0,420	0,420	0,410	0,376	0,310
<b>0,220</b>	0,310	0,377	0,411	0,421	0,422	0,421	0,411	0,377	0,310
<b>0,219</b>	0,311	0,378	0,412	0,422	0,423	0,422	0,412	0,378	0,311
<b>0,219</b>	0,311	0,379	0,413	0,423	0,424	0,423	0,413	0,379	0,311
<b>0,218</b>	0,311	0,380	0,415	0,424	0,425	0,424	0,415	0,380	0,311
<b>0,218</b>	0,311	0,380	0,416	0,425	0,426	0,425	0,416	0,380	0,311

Πίνακας Α.8: Υπολογισμός παραμέτρου  $H_L(\theta)$  για καθοδική ροή

**πυκνότητα διφασικού μίγματος  $\rho_{tp}$  για ανοδική ροή**

$\theta$									
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
<b><math>\rho_{tp} = \rho_L * H_L(\theta) + \rho_g * (1 - H_L(\theta))</math></b>									
318,66	342,17	359,53	368,37	370,86	371,05	370,87	368,37	359,53	342,17
311,14	320,62	327,61	331,17	332,18	332,26	332,18	331,17	327,61	320,62
306,82	308,39	309,55	310,14	310,31	310,32	310,31	310,14	309,55	308,39
303,80	299,89	297,01	295,54	295,12	295,09	295,12	295,54	297,01	299,89
301,47	293,39	287,43	284,39	283,53	283,47	283,53	284,39	287,42	293,39
299,58	288,14	279,69	275,39	274,18	274,09	274,18	275,39	279,69	288,14
297,99	283,74	273,22	267,87	266,35	266,24	266,35	267,87	273,22	283,74
273,07	273,07	273,07	273,07	273,07	273,07	273,07	273,07	273,07	273,07
269,20	269,20	269,20	269,20	269,20	269,20	269,20	269,20	269,20	269,20
265,79	265,79	265,79	265,79	265,79	265,79	265,79	265,79	265,79	265,79
262,73	262,73	262,73	262,73	262,73	262,73	262,73	262,73	262,73	262,73
259,98	259,98	259,98	259,98	259,98	259,98	259,98	259,98	259,98	259,98
257,47	257,47	257,47	257,47	257,47	257,47	257,47	257,47	257,47	257,47
255,17	255,17	255,17	255,17	255,17	255,17	255,17	255,17	255,17	255,17
253,04	253,04	253,04	253,04	253,04	253,04	253,04	253,04	253,04	253,04
251,07	251,07	251,07	251,07	251,07	251,07	251,07	251,07	251,07	251,07
249,23	249,23	249,23	249,23	249,23	249,23	249,23	249,23	249,23	249,23
247,51	247,51	247,51	247,51	247,51	247,51	247,51	247,51	247,51	247,51
245,90	245,90	245,90	245,90	245,90	245,90	245,90	245,90	245,90	245,90
244,37	244,37	244,37	244,37	244,37	244,37	244,37	244,37	244,37	244,37
242,93	242,93	242,93	242,93	242,93	242,93	242,93	242,93	242,93	242,93
241,57	241,57	241,57	241,57	241,57	241,57	241,57	241,57	241,57	241,57
240,27	240,27	240,27	240,27	240,27	240,27	240,27	240,27	240,27	240,27
239,03	239,03	239,03	239,03	239,03	239,03	239,03	239,03	239,03	239,03
237,86	237,86	237,86	237,86	237,86	237,86	237,86	237,86	237,86	237,86
236,73	236,73	236,73	236,73	236,73	236,73	236,73	236,73	236,73	236,73
235,65	235,65	235,65	235,65	235,65	235,65	235,65	235,65	235,65	235,65
234,61	234,61	234,61	234,61	234,61	234,61	234,61	234,61	234,61	234,61
233,62	233,62	233,62	233,62	233,62	233,62	233,62	233,62	233,62	233,62
232,66	232,66	232,66	232,66	232,66	232,66	232,66	232,66	232,66	232,66
231,74	231,74	231,74	231,74	231,74	231,74	231,74	231,74	231,74	231,74
230,85	230,85	230,85	230,85	230,85	230,85	230,85	230,85	230,85	230,85
229,99	229,99	229,99	229,99	229,99	229,99	229,99	229,99	229,99	229,99
229,16	229,16	229,16	229,16	229,16	229,16	229,16	229,16	229,16	229,16
228,36	228,36	228,36	228,36	228,36	228,36	228,36	228,36	228,36	228,36
227,58	227,58	227,58	227,58	227,58	227,58	227,58	227,58	227,58	227,58
226,82	226,82	226,82	226,82	226,82	226,82	226,82	226,82	226,82	226,82
226,09	226,09	226,09	226,09	226,09	226,09	226,09	226,09	226,09	226,09
225,38	225,38	225,38	225,38	225,38	225,38	225,38	225,38	225,38	225,38

224,69	224,69	224,69	224,69	224,69	224,69	224,69	224,69	224,69	224,69
224,02	224,02	224,02	224,02	224,02	224,02	224,02	224,02	224,02	224,02
223,37	223,37	223,37	223,37	223,37	223,37	223,37	223,37	223,37	223,37
222,73	222,73	222,73	222,73	222,73	222,73	222,73	222,73	222,73	222,73
222,11	222,11	222,11	222,11	222,11	222,11	222,11	222,11	222,11	222,11
221,51	221,51	221,51	221,51	221,51	221,51	221,51	221,51	221,51	221,51
220,92	220,92	220,92	220,92	220,92	220,92	220,92	220,92	220,92	220,92
220,35	220,35	220,35	220,35	220,35	220,35	220,35	220,35	220,35	220,35
219,79	219,79	219,79	219,79	219,79	219,79	219,79	219,79	219,79	219,79
219,24	219,24	219,24	219,24	219,24	219,24	219,24	219,24	219,24	219,24
218,70	218,70	218,70	218,70	218,70	218,70	218,70	218,70	218,70	218,70

Πίνακας Α.9: Πυκνότητα διφασικού μίγματος ( $\rho_{tp}$ : two-phase mixture density)  
για ανοδική ροή

πυκνότητα διφασικού μίγματος $\rho_{tp}$ για καθοδική ροή								
$\theta$								
-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
$\rho_{tp} = \rho_L * H_L(\theta) + \rho_g * (1 - H_L(\theta))$								
180,60	78,65	26,77	12,10	11,01	12,10	26,77	78,64	180,58
223,83	159,37	126,56	117,28	116,59	117,28	126,56	159,36	223,82
248,12	204,78	182,72	176,48	176,02	176,48	182,72	204,77	248,11
264,92	236,21	221,60	217,47	217,16	217,47	221,60	236,21	264,91
277,70	260,15	251,21	248,69	248,50	248,69	251,21	260,14	277,70
287,98	279,42	275,06	273,83	273,74	273,83	275,06	279,42	287,98
296,57	295,52	294,99	294,83	294,82	294,83	294,99	295,52	296,57
279,79	284,76	287,28	288,00	288,05	288,00	287,28	284,76	279,79
282,80	292,85	297,96	299,40	299,51	299,40	297,96	292,85	282,81
285,37	299,84	307,20	309,28	309,44	309,28	307,20	299,84	285,38
287,61	305,97	315,32	317,96	318,16	317,96	315,32	305,97	287,61
289,56	311,41	322,53	325,67	325,91	325,67	322,53	311,41	289,57
291,30	316,28	329,00	332,59	332,86	332,59	329,00	316,29	291,31
292,85	320,68	334,84	338,85	339,15	338,85	334,85	320,69	292,86
294,25	324,69	340,17	344,55	344,88	344,55	340,17	324,69	294,26
295,52	328,35	345,05	349,78	350,13	349,78	345,06	328,35	295,53
296,68	331,72	349,55	354,59	354,97	354,59	349,55	331,72	296,69
297,75	334,84	353,71	359,05	359,45	359,05	353,71	334,84	297,75
298,72	337,73	357,58	363,20	363,61	363,20	357,58	337,74	298,73
299,63	340,43	361,19	367,06	367,50	367,06	361,19	340,43	299,64
300,47	342,95	364,57	370,68	371,14	370,68	364,57	342,95	300,48
301,25	345,31	367,74	374,08	374,55	374,08	367,74	345,32	301,26
301,98	347,54	370,73	377,29	377,77	377,29	370,73	347,55	301,99
302,66	349,64	373,55	380,31	380,81	380,31	373,55	349,64	302,67

303,30	351,62	376,21	383,17	383,69	383,17	376,22	351,63	303,31
303,90	353,50	378,74	385,88	386,41	385,88	378,75	353,51	303,91
304,47	355,29	381,15	388,46	389,00	388,46	381,15	355,29	304,48
305,00	356,98	383,43	390,92	391,47	390,92	383,44	356,99	305,02
305,51	358,60	385,62	393,26	393,82	393,26	385,62	358,61	305,52
305,99	360,14	387,70	395,49	396,07	395,49	387,70	360,15	306,00
306,45	361,62	389,69	397,63	398,22	397,63	389,69	361,62	306,46
306,88	363,03	391,60	399,68	400,28	399,68	391,60	363,03	306,89
307,30	364,38	393,43	401,64	402,25	401,64	393,43	364,38	307,31
307,69	365,67	395,18	403,53	404,15	403,53	395,19	365,68	307,70
308,06	366,92	396,87	405,34	405,97	405,34	396,87	366,93	308,08
308,42	368,12	398,50	407,09	407,73	407,09	398,50	368,12	308,43
308,77	369,27	400,06	408,77	409,42	408,77	400,06	369,28	308,78
309,09	370,38	401,57	410,39	411,05	410,39	401,57	370,39	309,11
309,41	371,45	403,03	411,96	412,62	411,96	403,03	371,46	309,42
309,71	372,49	404,43	413,47	414,14	413,47	404,44	372,49	309,72
310,00	373,49	405,79	414,93	415,61	414,93	405,80	373,49	310,01
310,28	374,45	407,11	416,35	417,03	416,35	407,11	374,46	310,29
310,55	375,39	408,38	417,72	418,41	417,72	408,39	375,39	310,56
310,80	376,29	409,62	419,05	419,74	419,05	409,62	376,30	310,82
311,05	377,17	410,82	420,33	421,04	420,33	410,82	377,18	311,07
311,29	378,02	411,98	421,58	422,29	421,58	411,98	378,03	311,30
311,52	378,84	413,10	422,80	423,51	422,80	413,11	378,85	311,54
311,74	379,65	414,20	423,97	424,70	423,97	414,20	379,65	311,76
311,96	380,42	415,27	425,12	425,85	425,12	415,27	380,43	311,97
312,17	381,18	416,30	426,23	426,97	426,24	416,30	381,19	312,18

Πίνακας Α.10: Πυκνότητα διφασικού μίγματος ( $\rho_{\text{TP}}$ : two-phase mixture density) για καθοδική ροή

παράμετρος $\gamma$ για ανοδική ροή									
$\theta$									
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\gamma = \lambda / [H_L(\theta)]^2$									
1,650	1,431	1,295	1,234	1,217	1,216	1,217	1,234	1,295	1,431
1,732	1,630	1,561	1,528	1,518	1,518	1,518	1,528	1,561	1,630
1,781	1,763	1,749	1,743	1,741	1,741	1,741	1,743	1,749	1,763
1,817	1,864	1,901	1,920	1,925	1,926	1,925	1,920	1,901	1,864
1,845	1,948	2,030	2,074	2,087	2,088	2,087	2,074	2,030	1,948
1,868	2,020	2,145	2,213	2,232	2,234	2,232	2,213	2,145	2,020
1,888	2,084	2,248	2,339	2,366	2,368	2,366	2,339	2,248	2,084
2,251	2,251	2,251	2,251	2,251	2,251	2,251	2,251	2,251	2,251
2,316	2,316	2,316	2,316	2,316	2,316	2,316	2,316	2,316	2,316
2,376	2,376	2,376	2,376	2,376	2,376	2,376	2,376	2,376	2,376



2,432	2,432	2,432	2,432	2,432	2,432	2,432	2,432	2,432	2,432
2,484	2,484	2,484	2,484	2,484	2,484	2,484	2,484	2,484	2,484
2,533	2,533	2,533	2,533	2,533	2,533	2,533	2,533	2,533	2,533
2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579
2,623	2,623	2,623	2,623	2,623	2,623	2,623	2,623	2,623	2,623
2,665	2,665	2,665	2,665	2,665	2,665	2,665	2,665	2,665	2,665
2,704	2,704	2,704	2,704	2,704	2,704	2,704	2,704	2,704	2,704
2,742	2,742	2,742	2,742	2,742	2,742	2,742	2,742	2,742	2,742
2,778	2,778	2,778	2,778	2,778	2,778	2,778	2,778	2,778	2,778
2,813	2,813	2,813	2,813	2,813	2,813	2,813	2,813	2,813	2,813
2,847	2,847	2,847	2,847	2,847	2,847	2,847	2,847	2,847	2,847
2,879	2,879	2,879	2,879	2,879	2,879	2,879	2,879	2,879	2,879
2,911	2,911	2,911	2,911	2,911	2,911	2,911	2,911	2,911	2,911
2,941	2,941	2,941	2,941	2,941	2,941	2,941	2,941	2,941	2,941
2,971	2,971	2,971	2,971	2,971	2,971	2,971	2,971	2,971	2,971
2,999	2,999	2,999	2,999	2,999	2,999	2,999	2,999	2,999	2,999
3,027	3,027	3,027	3,027	3,027	3,027	3,027	3,027	3,027	3,027
3,054	3,054	3,054	3,054	3,054	3,054	3,054	3,054	3,054	3,054
3,080	3,080	3,080	3,080	3,080	3,080	3,080	3,080	3,080	3,080
3,105	3,105	3,105	3,105	3,105	3,105	3,105	3,105	3,105	3,105
3,130	3,130	3,130	3,130	3,130	3,130	3,130	3,130	3,130	3,130
3,155	3,155	3,155	3,155	3,155	3,155	3,155	3,155	3,155	3,155
3,178	3,178	3,178	3,178	3,178	3,178	3,178	3,178	3,178	3,178
3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202
3,224	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224
3,246	3,246	3,246	3,246	3,246	3,246	3,246	3,246	3,246	3,246
3,268	3,268	3,268	3,268	3,268	3,268	3,268	3,268	3,268	3,268
3,290	3,290	3,290	3,290	3,290	3,290	3,290	3,290	3,290	3,290
3,310	3,310	3,310	3,310	3,310	3,310	3,310	3,310	3,310	3,310
3,331	3,331	3,331	3,331	3,331	3,331	3,331	3,331	3,331	3,331
3,351	3,351	3,351	3,351	3,351	3,351	3,351	3,351	3,351	3,351
3,371	3,371	3,371	3,371	3,371	3,371	3,371	3,371	3,371	3,371
3,390	3,390	3,390	3,390	3,390	3,390	3,390	3,390	3,390	3,390
3,409	3,409	3,409	3,409	3,409	3,409	3,409	3,409	3,409	3,409
3,428	3,428	3,428	3,428	3,428	3,428	3,428	3,428	3,428	3,428
3,446	3,446	3,446	3,446	3,446	3,446	3,446	3,446	3,446	3,446
3,464	3,464	3,464	3,464	3,464	3,464	3,464	3,464	3,464	3,464
3,482	3,482	3,482	3,482	3,482	3,482	3,482	3,482	3,482	3,482
3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500
3,517	3,517	3,517	3,517	3,517	3,517	3,517	3,517	3,517	3,517

Πίνακας Α.11: Παράμετρος  $\gamma$  για ανοδική ροή

παράμετρος  $y$  για καθοδική ροή

$\theta$									
-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	
$y=\lambda/[H_L(\theta)]^2$									
5,171	27,776	256,015	1423,19	1759,53	1423,38	256,114	27,786	5,172	
3,357	6,653	10,594	12,357	12,505	12,357	10,594	6,654	3,357	
2,729	4,015	5,050	5,417	5,445	5,417	5,050	4,015	2,729	
2,392	3,012	3,425	3,557	3,567	3,557	3,425	3,012	2,392	
2,176	2,481	2,661	2,716	2,720	2,716	2,661	2,481	2,176	
2,023	2,149	2,218	2,238	2,240	2,238	2,218	2,149	2,023	
1,907	1,920	1,927	1,929	1,929	1,929	1,927	1,920	1,907	
2,143	2,069	2,032	2,022	2,022	2,022	2,032	2,069	2,143	
2,098	1,956	1,889	1,871	1,869	1,871	1,889	1,956	2,098	
2,060	1,865	1,776	1,752	1,751	1,752	1,776	1,865	2,060	
2,028	1,791	1,686	1,658	1,656	1,658	1,686	1,791	2,028	
2,000	1,729	1,611	1,580	1,578	1,580	1,611	1,728	2,000	
1,977	1,675	1,548	1,515	1,512	1,515	1,548	1,675	1,976	
1,956	1,630	1,494	1,459	1,456	1,459	1,494	1,630	1,955	
1,937	1,590	1,448	1,411	1,408	1,411	1,448	1,589	1,937	
1,920	1,554	1,407	1,369	1,366	1,369	1,407	1,554	1,920	
1,905	1,523	1,371	1,332	1,329	1,332	1,371	1,523	1,905	
1,892	1,494	1,338	1,299	1,296	1,299	1,338	1,494	1,891	
1,879	1,469	1,310	1,269	1,266	1,269	1,310	1,469	1,879	
1,868	1,445	1,283	1,243	1,240	1,243	1,283	1,445	1,868	
1,857	1,424	1,260	1,218	1,215	1,218	1,260	1,424	1,857	
1,848	1,405	1,238	1,196	1,193	1,196	1,238	1,405	1,848	
1,839	1,387	1,218	1,176	1,173	1,176	1,218	1,387	1,839	
1,830	1,370	1,200	1,157	1,154	1,157	1,200	1,370	1,830	
1,823	1,354	1,183	1,140	1,137	1,140	1,183	1,354	1,822	
1,815	1,340	1,167	1,124	1,121	1,124	1,167	1,340	1,815	
1,809	1,327	1,152	1,109	1,106	1,109	1,152	1,327	1,808	
1,802	1,314	1,138	1,095	1,092	1,095	1,138	1,314	1,802	
1,796	1,302	1,125	1,082	1,079	1,082	1,125	1,302	1,796	
1,791	1,291	1,113	1,070	1,067	1,070	1,113	1,291	1,790	
1,785	1,280	1,102	1,058	1,055	1,058	1,102	1,280	1,785	
1,780	1,270	1,091	1,047	1,044	1,047	1,091	1,270	1,780	
1,775	1,261	1,081	1,037	1,034	1,037	1,081	1,261	1,775	
1,771	1,252	1,071	1,027	1,024	1,027	1,071	1,252	1,771	
1,766	1,244	1,062	1,018	1,015	1,018	1,062	1,243	1,766	
1,762	1,235	1,054	1,010	1,006	1,010	1,054	1,235	1,762	
1,758	1,228	1,045	1,001	0,998	1,001	1,045	1,228	1,758	
1,755	1,220	1,038	0,993	0,990	0,993	1,038	1,220	1,754	
1,751	1,213	1,030	0,986	0,983	0,986	1,030	1,213	1,751	
1,748	1,206	1,023	0,978	0,975	0,978	1,023	1,206	1,747	
1,744	1,200	1,016	0,972	0,968	0,972	1,016	1,200	1,744	
1,741	1,194	1,009	0,965	0,962	0,965	1,009	1,194	1,741	
1,738	1,188	1,003	0,959	0,955	0,959	1,003	1,188	1,738	
1,735	1,182	0,997	0,953	0,949	0,953	0,997	1,182	1,735	
1,733	1,177	0,991	0,947	0,944	0,947	0,991	1,177	1,732	

1,730	1,171	0,986	0,941	0,938	0,941	0,986	1,171	1,730
1,727	1,166	0,980	0,936	0,932	0,936	0,980	1,166	1,727
1,725	1,161	0,975	0,930	0,927	0,930	0,975	1,161	1,725
1,722	1,157	0,970	0,925	0,922	0,925	0,970	1,156	1,722
1,720	1,152	0,965	0,921	0,917	0,921	0,965	1,152	1,720

Πίνακας Α.12: Παράμετρος  $y$  για καθοδική ροή

παράμετρος $S$ για ανοδική ροή									
$\theta$									
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$S = \ln(y) / \{-0,0523 + 3,182 \cdot \ln(y) - 0,8725 \cdot [\ln(y)]^2 + 0,01853 \cdot [\ln(y)]^4\}$									
0,378	0,367	0,363	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364	0,363	0,367
0,383	0,377	0,373	0,372	0,371	0,371	0,371	0,372	0,373	0,377
0,386	0,385	0,384	0,384	0,384	0,384	0,384	0,384	0,384	0,385
0,388	0,391	0,393	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,393	0,391
0,390	0,396	0,401	0,403	0,404	0,404	0,404	0,403	0,401	0,396
0,391	0,400	0,407	0,411	0,412	0,412	0,412	0,411	0,407	0,400
0,392	0,404	0,413	0,418	0,420	0,420	0,420	0,418	0,413	0,404
0,413	0,413	0,413	0,413	0,413	0,413	0,413	0,413	0,413	0,413
0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417
0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420
0,424	0,424	0,424	0,424	0,424	0,424	0,424	0,424	0,424	0,424
0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427
0,429	0,429	0,429	0,429	0,429	0,429	0,429	0,429	0,429	0,429
0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432
0,434	0,434	0,434	0,434	0,434	0,434	0,434	0,434	0,434	0,434
0,436	0,436	0,436	0,436	0,436	0,436	0,436	0,436	0,436	0,436
0,439	0,439	0,439	0,439	0,439	0,439	0,439	0,439	0,439	0,439
0,441	0,441	0,441	0,441	0,441	0,441	0,441	0,441	0,441	0,441
0,443	0,443	0,443	0,443	0,443	0,443	0,443	0,443	0,443	0,443
0,445	0,445	0,445	0,445	0,445	0,445	0,445	0,445	0,445	0,445
0,446	0,446	0,446	0,446	0,446	0,446	0,446	0,446	0,446	0,446
0,448	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448
0,450	0,450	0,450	0,450	0,450	0,450	0,450	0,450	0,450	0,450
0,451	0,451	0,451	0,451	0,451	0,451	0,451	0,451	0,451	0,451
0,453	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453
0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454
0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456
0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457
0,459	0,459	0,459	0,459	0,459	0,459	0,459	0,459	0,459	0,459
0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460
0,461	0,461	0,461	0,461	0,461	0,461	0,461	0,461	0,461	0,461
0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462
0,464	0,464	0,464	0,464	0,464	0,464	0,464	0,464	0,464	0,464

0,465	0,465	0,465	0,465	0,465	0,465	0,465	0,465	0,465	0,465
0,466	0,466	0,466	0,466	0,466	0,466	0,466	0,466	0,466	0,466
0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467
0,468	0,468	0,468	0,468	0,468	0,468	0,468	0,468	0,468	0,468
0,469	0,469	0,469	0,469	0,469	0,469	0,469	0,469	0,469	0,469
0,470	0,470	0,470	0,470	0,470	0,470	0,470	0,470	0,470	0,470
0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471
0,472	0,472	0,472	0,472	0,472	0,472	0,472	0,472	0,472	0,472
0,473	0,473	0,473	0,473	0,473	0,473	0,473	0,473	0,473	0,473
0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474
0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475
0,476	0,476	0,476	0,476	0,476	0,476	0,476	0,476	0,476	0,476
0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477
0,478	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,479	0,479	0,479	0,479	0,479	0,479	0,479	0,479	0,479	0,479
0,480	0,480	0,480	0,480	0,480	0,480	0,480	0,480	0,480	0,480
0,481	0,481	0,481	0,481	0,481	0,481	0,481	0,481	0,481	0,481

Πίνακας Α.13: Παράμετρος S για ανοδική ροή

<b>παράμετρος S για καθοδική ροή</b>									
<b>θ</b>									
-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	
<b><math>S = \ln(y) / \{-0,0523 + 3,182 * \ln(y) - 0,8725 * [\ln(y)]^2 + 0,01853 * [\ln(y)]^4\}</math></b>									
0,556	1,056	0,669	0,254	0,228	0,254	0,669	1,057	0,556	
0,473	0,615	0,744	0,792	0,796	0,792	0,744	0,615	0,473	
0,440	0,505	0,551	0,566	0,567	0,566	0,551	0,505	0,440	
0,421	0,455	0,476	0,483	0,483	0,483	0,476	0,455	0,421	
0,409	0,426	0,436	0,439	0,440	0,439	0,436	0,426	0,409	
0,400	0,407	0,411	0,413	0,413	0,413	0,411	0,407	0,400	
0,393	0,394	0,394	0,395	0,395	0,395	0,394	0,394	0,393	
0,407	0,403	0,401	0,400	0,400	0,400	0,401	0,403	0,407	
0,404	0,396	0,392	0,391	0,391	0,391	0,392	0,396	0,404	
0,402	0,391	0,386	0,384	0,384	0,384	0,386	0,391	0,402	
0,400	0,386	0,380	0,379	0,379	0,379	0,380	0,386	0,400	
0,399	0,383	0,376	0,374	0,374	0,374	0,376	0,383	0,399	
0,397	0,380	0,373	0,371	0,371	0,371	0,373	0,380	0,397	
0,396	0,377	0,370	0,368	0,368	0,368	0,370	0,377	0,396	
0,395	0,375	0,368	0,366	0,366	0,366	0,368	0,375	0,395	
0,394	0,373	0,366	0,365	0,365	0,365	0,366	0,373	0,394	
0,393	0,371	0,365	0,364	0,364	0,364	0,365	0,371	0,393	
0,392	0,370	0,364	0,363	0,363	0,363	0,364	0,370	0,392	
0,392	0,369	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363	0,369	0,392	
0,391	0,368	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363	0,368	0,391	
0,390	0,367	0,363	0,364	0,364	0,364	0,363	0,367	0,390	

0,390	0,366	0,364	0,366	0,366	0,366	0,364	0,366	0,390
0,389	0,365	0,364	0,368	0,368	0,368	0,364	0,365	0,389
0,389	0,365	0,366	0,371	0,371	0,371	0,366	0,365	0,389
0,388	0,364	0,367	0,375	0,376	0,375	0,367	0,364	0,388
0,388	0,364	0,369	0,380	0,381	0,380	0,369	0,364	0,388
0,388	0,364	0,372	0,387	0,388	0,387	0,372	0,364	0,387
0,387	0,363	0,375	0,396	0,398	0,396	0,375	0,363	0,387
0,387	0,363	0,379	0,408	0,412	0,408	0,379	0,363	0,387
0,386	0,363	0,384	0,426	0,432	0,426	0,384	0,363	0,386
0,386	0,363	0,391	0,453	0,463	0,453	0,391	0,363	0,386
0,386	0,363	0,399	0,497	0,516	0,497	0,399	0,363	0,386
0,386	0,363	0,409	0,583	0,629	0,583	0,409	0,363	0,386
0,385	0,363	0,423	0,815	1,018	0,815	0,423	0,363	0,385
0,385	0,363	0,442	3,650	-3,095	3,654	0,442	0,363	0,385
0,385	0,364	0,468	-0,425	-0,196	-0,425	0,468	0,364	0,385
0,385	0,364	0,509	-0,025	0,034	-0,024	0,509	0,364	0,385
0,384	0,364	0,578	0,091	0,118	0,091	0,578	0,364	0,384
0,384	0,365	0,720	0,146	0,162	0,146	0,721	0,365	0,384
0,384	0,365	1,180	0,178	0,189	0,178	1,182	0,365	0,384
0,384	0,365	-7,671	0,199	0,207	0,199	-7,490	0,365	0,384
0,384	0,366	-0,414	0,214	0,219	0,214	-0,413	0,366	0,384
0,383	0,367	-0,073	0,224	0,229	0,224	-0,072	0,367	0,383
0,383	0,367	0,048	0,233	0,236	0,233	0,048	0,367	0,383
0,383	0,368	0,110	0,239	0,242	0,239	0,110	0,368	0,383
0,383	0,369	0,147	0,244	0,247	0,244	0,147	0,369	0,383
0,383	0,369	0,172	0,248	0,251	0,248	0,172	0,369	0,383
0,383	0,370	0,190	0,252	0,254	0,252	0,190	0,370	0,383
0,382	0,371	0,203	0,255	0,256	0,255	0,203	0,371	0,382
0,382	0,372	0,213	0,257	0,259	0,257	0,213	0,372	0,382

Πίνακας Α.14: Παράμετρος S για καθοδική ροή

λόγος συντελεστών τριβής $f_{tp}/f_{ns}$ για ανοδική ροή									
$\theta$									
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{tp}/f_{ns}=e^S$									
<b>1,460</b>	1,443	1,438	1,439	1,440	1,440	1,440	1,439	1,438	1,443
<b>1,467</b>	1,458	1,453	1,450	1,450	1,449	1,450	1,450	1,453	1,458
<b>1,471</b>	1,469	1,468	1,468	1,468	1,467	1,468	1,468	1,468	1,469
<b>1,474</b>	1,478	1,481	1,483	1,483	1,483	1,483	1,483	1,481	1,478
<b>1,476</b>	1,485	1,493	1,496	1,498	1,498	1,498	1,496	1,493	1,485
<b>1,478</b>	1,492	1,503	1,508	1,510	1,510	1,510	1,508	1,503	1,492
<b>1,480</b>	1,497	1,512	1,519	1,522	1,522	1,522	1,519	1,512	1,497
<b>1,512</b>	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512
<b>1,517</b>	1,517	1,517	1,517	1,517	1,517	1,517	1,517	1,517	1,517



λόγος συντελεστών τριβής  $f_{tp}/f_{ns}$  για καθοδική ροή

$\theta$								
-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
$f_{tp}/f_{ns}=e^S$								
1,744	2,876	1,953	1,290	1,256	1,290	1,953	2,876	1,744
1,604	1,849	2,104	2,209	2,217	2,209	2,104	1,849	1,604
1,553	1,656	1,735	1,761	1,764	1,761	1,735	1,657	1,553
1,524	1,576	1,610	1,621	1,621	1,621	1,610	1,576	1,524
1,505	1,532	1,547	1,552	1,552	1,552	1,547	1,532	1,505
1,492	1,503	1,509	1,511	1,511	1,511	1,509	1,503	1,492
1,482	1,483	1,484	1,484	1,484	1,484	1,484	1,483	1,482
1,502	1,496	1,493	1,492	1,492	1,492	1,493	1,496	1,502
1,498	1,486	1,480	1,479	1,479	1,479	1,480	1,486	1,498
1,495	1,478	1,471	1,468	1,468	1,468	1,471	1,478	1,495
1,492	1,472	1,463	1,461	1,460	1,461	1,463	1,472	1,492
1,490	1,466	1,457	1,454	1,454	1,454	1,457	1,466	1,490
1,488	1,462	1,452	1,449	1,449	1,449	1,452	1,462	1,488
1,486	1,458	1,448	1,445	1,445	1,445	1,448	1,458	1,486
1,484	1,455	1,445	1,442	1,442	1,442	1,445	1,455	1,484
1,483	1,452	1,442	1,440	1,440	1,440	1,442	1,452	1,483
1,482	1,450	1,440	1,439	1,438	1,439	1,440	1,450	1,482
1,480	1,448	1,439	1,438	1,438	1,438	1,439	1,448	1,480
1,479	1,446	1,438	1,438	1,438	1,438	1,438	1,446	1,479
1,478	1,444	1,438	1,438	1,438	1,438	1,438	1,444	1,478
1,478	1,443	1,438	1,440	1,440	1,440	1,438	1,443	1,478
1,477	1,442	1,438	1,442	1,442	1,442	1,438	1,442	1,477
1,476	1,441	1,440	1,445	1,445	1,445	1,440	1,441	1,476
1,475	1,440	1,441	1,449	1,450	1,449	1,441	1,440	1,475
1,475	1,439	1,444	1,455	1,456	1,455	1,444	1,439	1,475
1,474	1,439	1,447	1,462	1,464	1,462	1,447	1,439	1,474
1,473	1,438	1,450	1,472	1,475	1,472	1,450	1,438	1,473
1,473	1,438	1,455	1,486	1,489	1,486	1,455	1,438	1,473
1,472	1,438	1,461	1,504	1,510	1,504	1,461	1,438	1,472
1,472	1,438	1,469	1,531	1,540	1,531	1,469	1,438	1,472
1,471	1,438	1,478	1,573	1,589	1,573	1,478	1,438	1,471
1,471	1,438	1,490	1,644	1,676	1,644	1,490	1,438	1,471
1,470	1,438	1,506	1,791	1,876	1,791	1,506	1,438	1,470
1,470	1,438	1,527	2,259	2,767	2,259	1,527	1,438	1,470
1,470	1,438	1,555	38,474	0,045	38,642	1,555	1,438	1,470
1,469	1,438	1,597	0,654	0,822	0,654	1,597	1,438	1,469
1,469	1,439	1,663	0,976	1,034	0,976	1,663	1,439	1,469
1,469	1,439	1,782	1,096	1,126	1,096	1,783	1,439	1,469
1,468	1,440	2,055	1,158	1,176	1,158	2,056	1,440	1,468
1,468	1,441	3,255	1,195	1,208	1,195	3,262	1,441	1,468
1,468	1,441	0,000	1,220	1,230	1,220	0,001	1,441	1,468
1,468	1,442	0,661	1,238	1,245	1,238	0,662	1,442	1,468

1,467	1,443	0,930	1,252	1,257	1,252	0,930	1,443	1,467
1,467	1,444	1,049	1,262	1,266	1,262	1,049	1,444	1,467
1,467	1,445	1,116	1,270	1,274	1,270	1,116	1,445	1,467
1,467	1,446	1,158	1,277	1,280	1,277	1,158	1,446	1,467
1,466	1,447	1,188	1,282	1,285	1,282	1,188	1,447	1,466
1,466	1,448	1,209	1,286	1,289	1,286	1,209	1,448	1,466
1,466	1,449	1,225	1,290	1,292	1,290	1,225	1,449	1,466
1,466	1,450	1,238	1,293	1,295	1,293	1,238	1,451	1,466
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Πίνακας Α.16: Λόγος  $f_{tp}/f_{ns}$  για καθοδική ροή

$w_g$	$w_L$	$G_m$	$N_{Rens}$	$f_{ns}$
0,000	0,000	0,00	0,000	-
0,003	0,400	205,04	50049,316	0,020906
0,005	0,800	410,07	100098,633	0,018003
0,008	1,200	615,11	150147,949	0,016568
0,010	1,600	820,14	200197,266	0,015648
0,013	2,000	1025,18	250246,582	0,014984
0,016	2,400	1230,21	300295,898	0,014471
0,018	2,800	1435,25	350345,215	0,014058
0,021	3,200	1640,28	400394,531	0,013713
0,023	3,600	1845,32	450443,848	0,013419
0,026	4,000	2050,35	500493,164	0,013164
0,028	4,400	2255,39	550542,480	0,012939
0,031	4,800	2460,42	600591,797	0,012739
0,034	5,200	2665,46	650641,113	0,012558
0,036	5,600	2870,50	700690,429	0,012394
0,039	6,000	3075,53	750739,746	0,012245
0,041	6,400	3280,57	800789,062	0,012107
0,044	6,800	3485,60	850838,379	0,011980
0,047	7,200	3690,64	900887,695	0,011862
0,049	7,600	3895,67	950937,011	0,011751
0,052	8,000	4100,71	1000986,328	0,011648
0,054	8,400	4305,74	1051035,644	0,011551
0,057	8,800	4510,78	1101084,961	0,011460
0,059	9,200	4715,81	1151134,277	0,011373
0,062	9,600	4920,85	1201183,593	0,011292
0,065	10,000	5125,88	1251232,910	0,011214
0,067	10,400	5330,92	1301282,226	0,011140
0,070	10,800	5535,95	1351331,543	0,011070



0,072	11,200	5740,99	1401380,859	0,011002
0,075	11,600	5946,03	1451430,175	0,010938
0,078	12,000	6151,06	1501479,492	0,010876
0,080	12,400	6356,10	1551528,808	0,010817
0,083	12,800	6561,13	1601578,124	0,010761
0,085	13,200	6766,17	1651627,441	0,010706
0,088	13,600	6971,20	1701676,757	0,010653
0,091	14,000	7176,24	1751726,074	0,010603
0,093	14,400	7381,27	1801775,390	0,010554
0,096	14,800	7586,31	1851824,706	0,010506
0,098	15,200	7791,34	1901874,023	0,010461
0,101	15,600	7996,38	1951923,339	0,010416
0,103	16,000	8201,41	2001972,656	0,010373
0,106	16,400	8406,45	2052021,972	0,010332
0,109	16,800	8611,49	2102071,288	0,010291
0,111	17,200	8816,52	2152120,605	0,010252
0,114	17,600	9021,56	2202169,921	0,010214
0,116	18,000	9226,59	2252219,238	0,010177
0,119	18,400	9431,63	2302268,554	0,010141
0,122	18,800	9636,66	2352317,870	0,010106
0,124	19,200	9841,70	2402367,187	0,010072
0,127	19,600	10046,73	2452416,503	0,010039
0,129	20,000	10251,77	2502465,819	0,010006

Πίνακας Α.17:  $f_{ns}$  για την ανοδική και την καθοδική ροή

συντελεστής τριβής $f_{tp}$ για ανοδική ροή									
$\theta$									
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{tp}=f_{ns}*(f_{tp}/f_{ns})$									
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,0305	0,0302	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0302
0,0264	0,0263	0,0262	0,0261	0,0261	0,0261	0,0261	0,0261	0,0262	0,0263
0,0244	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243
0,0231	0,0231	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0231
0,0221	0,0223	0,0224	0,0224	0,0224	0,0224	0,0224	0,0224	0,0224	0,0223
0,0214	0,0216	0,0217	0,0218	0,0219	0,0219	0,0219	0,0218	0,0217	0,0216
0,0208	0,0210	0,0212	0,0214	0,0214	0,0214	0,0214	0,0214	0,0212	0,0210



### συντελεστής τριβής $f_{tp}$ για καθοδική ροή

$\theta$								
-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
$f_{tp}=f_{ns}*(f_{tp}/f_{ns})$								
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,0365	0,0601	0,0408	0,0270	0,0263	0,0270	0,0408	0,0601	0,0365
0,0289	0,0333	0,0379	0,0398	0,0399	0,0398	0,0379	0,0333	0,0289
0,0257	0,0274	0,0287	0,0292	0,0292	0,0292	0,0287	0,0274	0,0257
0,0238	0,0247	0,0252	0,0254	0,0254	0,0254	0,0252	0,0247	0,0238
0,0226	0,0229	0,0232	0,0232	0,0233	0,0232	0,0232	0,0229	0,0226
0,0216	0,0217	0,0218	0,0219	0,0219	0,0219	0,0218	0,0217	0,0216
0,0208	0,0208	0,0209	0,0209	0,0209	0,0209	0,0209	0,0208	0,0208
0,0206	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0206
0,0201	0,0199	0,0199	0,0198	0,0198	0,0198	0,0199	0,0199	0,0201
0,0197	0,0195	0,0194	0,0193	0,0193	0,0193	0,0194	0,0195	0,0197
0,0193	0,0190	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189	0,0190	0,0193
0,0190	0,0187	0,0186	0,0185	0,0185	0,0185	0,0186	0,0187	0,0190
0,0187	0,0184	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0184	0,0187
0,0184	0,0181	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0181	0,0184
0,0182	0,0178	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0178	0,0182
0,0180	0,0176	0,0175	0,0174	0,0174	0,0174	0,0175	0,0176	0,0180
0,0178	0,0174	0,0173	0,0172	0,0172	0,0172	0,0173	0,0174	0,0177
0,0176	0,0172	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171	0,0172	0,0176
0,0174	0,0170	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0170	0,0174
0,0172	0,0168	0,0167	0,0168	0,0168	0,0168	0,0167	0,0168	0,0172
0,0171	0,0167	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	0,0167	0,0171
0,0169	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0169
0,0168	0,0164	0,0164	0,0164	0,0164	0,0164	0,0164	0,0164	0,0168
0,0167	0,0163	0,0163	0,0164	0,0164	0,0164	0,0163	0,0163	0,0167
0,0165	0,0161	0,0162	0,0163	0,0163	0,0163	0,0162	0,0161	0,0165
0,0164	0,0160	0,0161	0,0163	0,0163	0,0163	0,0161	0,0160	0,0164
0,0163	0,0159	0,0161	0,0163	0,0163	0,0163	0,0161	0,0159	0,0163
0,0162	0,0158	0,0160	0,0163	0,0164	0,0163	0,0160	0,0158	0,0162
0,0161	0,0157	0,0160	0,0165	0,0165	0,0165	0,0160	0,0157	0,0161
0,0160	0,0156	0,0160	0,0167	0,0168	0,0167	0,0160	0,0156	0,0160
0,0159	0,0156	0,0160	0,0170	0,0172	0,0170	0,0160	0,0156	0,0159
0,0158	0,0155	0,0160	0,0177	0,0180	0,0177	0,0160	0,0155	0,0158
0,0157	0,0154	0,0161	0,0192	0,0201	0,0192	0,0161	0,0154	0,0157
0,0157	0,0153	0,0163	0,0241	0,0295	0,0241	0,0163	0,0153	0,0157
0,0156	0,0152	0,0165	0,4079	0,0005	0,4097	0,0165	0,0152	0,0156
0,0155	0,0152	0,0169	0,0069	0,0087	0,0069	0,0169	0,0152	0,0155
0,0154	0,0151	0,0175	0,0103	0,0109	0,0103	0,0175	0,0151	0,0154
0,0154	0,0151	0,0186	0,0115	0,0118	0,0115	0,0186	0,0151	0,0154
0,0153	0,0150	0,0214	0,0121	0,0123	0,0121	0,0214	0,0150	0,0153
0,0152	0,0149	0,0338	0,0124	0,0125	0,0124	0,0338	0,0149	0,0152
0,0152	0,0149	0,0000	0,0126	0,0127	0,0126	0,0000	0,0149	0,0152
0,0151	0,0148	0,0068	0,0127	0,0128	0,0127	0,0068	0,0148	0,0151
0,0150	0,0148	0,0095	0,0128	0,0129	0,0128	0,0095	0,0148	0,0150
0,0150	0,0147	0,0107	0,0129	0,0129	0,0129	0,0107	0,0147	0,0150

0,0149	0,0147	0,0114	0,0129	0,0130	0,0129	0,0114	0,0147	0,0149
0,0149	0,0147	0,0117	0,0129	0,0130	0,0129	0,0117	0,0147	0,0149
0,0148	0,0146	0,0120	0,0130	0,0130	0,0130	0,0120	0,0146	0,0148
0,0148	0,0146	0,0122	0,0130	0,0130	0,0130	0,0122	0,0146	0,0148
0,0147	0,0145	0,0123	0,0130	0,0130	0,0130	0,0123	0,0145	0,0147
0,0147	0,0145	0,0124	0,0129	0,0130	0,0129	0,0124	0,0145	0,0147

Πίνακας Α.19: συντελεστής  $f_{ip}$  για καθοδική ροή, για διάφορες κλίσεις του αγωγού

κατανομή πίεσης για ανοδική ροή									
$\theta$									
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0,000	<b>0,174</b>	<b>0,342</b>	<b>0,500</b>	<b>0,643</b>	<b>0,766</b>	<b>0,866</b>	<b>0,940</b>	<b>0,985</b>	<b>1,000</b>
$dp/dz$ (σε kPa)									
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22,438	200,157	400,179	595,969	767,410	910,684	1025,612	1099,098	1108,121	1043,350
19,845	61,536	104,597	145,692	182,285	213,426	238,566	256,042	263,332	259,170
18,788	36,810	54,473	71,091	86,068	98,965	109,417	117,043	121,465	122,465
18,256	28,233	37,649	46,429	54,427	61,377	67,027	71,296	74,260	75,953
17,980	24,290	30,079	35,446	40,385	44,711	48,236	50,975	53,121	54,786
17,850	22,186	26,076	29,674	33,017	35,965	38,373	40,288	41,930	43,435
17,814	20,963	23,742	26,313	28,723	30,862	32,612	34,033	35,339	36,676
17,615	20,078	22,466	24,707	26,732	28,481	29,899	30,944	31,584	31,800
17,674	19,634	21,534	23,317	24,928	26,319	27,448	28,279	28,788	28,960
17,771	19,371	20,924	22,380	23,696	24,833	25,754	26,433	26,849	26,990
17,896	19,231	20,526	21,742	22,840	23,788	24,557	25,124	25,471	25,587
18,043	19,177	20,277	21,308	22,241	23,045	23,698	24,179	24,474	24,573
18,208	19,185	20,132	21,021	21,824	22,517	23,080	23,494	23,748	23,833
18,388	19,240	20,066	20,841	21,541	22,146	22,636	22,997	23,219	23,293
18,579	19,330	20,058	20,741	21,358	21,891	22,323	22,642	22,837	22,902
18,780	19,448	20,095	20,703	21,252	21,726	22,110	22,394	22,567	22,625
18,989	19,588	20,168	20,713	21,205	21,630	21,975	22,229	22,384	22,437
19,205	19,746	20,270	20,762	21,206	21,590	21,901	22,130	22,271	22,318
19,427	19,918	20,394	20,841	21,245	21,594	21,876	22,085	22,212	22,255
19,654	20,103	20,538	20,946	21,315	21,633	21,892	22,082	22,199	22,238
19,885	20,297	20,697	21,072	21,410	21,703	21,940	22,115	22,222	22,258
20,120	20,500	20,869	21,214	21,527	21,797	22,016	22,177	22,276	22,309
20,358	20,710	21,052	21,372	21,661	21,911	22,114	22,263	22,355	22,386

20,599	20,927	21,244	21,542	21,811	22,043	22,232	22,371	22,456	22,484
20,843	21,148	21,444	21,722	21,973	22,190	22,366	22,495	22,575	22,601
21,089	21,375	21,652	21,912	22,146	22,349	22,514	22,635	22,709	22,734
21,337	21,605	21,865	22,109	22,329	22,519	22,674	22,788	22,857	22,881
21,586	21,838	22,083	22,313	22,520	22,699	22,844	22,951	23,017	23,039
21,837	22,075	22,306	22,522	22,718	22,887	23,024	23,125	23,187	23,208
22,089	22,315	22,533	22,737	22,922	23,082	23,212	23,307	23,366	23,385
22,343	22,556	22,763	22,957	23,132	23,284	23,406	23,497	23,552	23,571
22,598	22,800	22,996	23,180	23,347	23,491	23,607	23,693	23,745	23,763
22,853	23,046	23,232	23,408	23,566	23,702	23,813	23,895	23,945	23,962
23,110	23,293	23,471	23,638	23,789	23,919	24,024	24,102	24,150	24,166
23,367	23,542	23,712	23,871	24,015	24,139	24,240	24,314	24,359	24,375
23,625	23,792	23,954	24,106	24,244	24,363	24,459	24,530	24,573	24,588
23,883	24,043	24,199	24,344	24,476	24,589	24,682	24,749	24,791	24,805
24,142	24,296	24,444	24,584	24,710	24,819	24,907	24,972	25,012	25,026
24,402	24,549	24,692	24,826	24,947	25,051	25,136	25,198	25,237	25,249
24,662	24,803	24,940	25,069	25,185	25,285	25,367	25,427	25,464	25,476
24,922	25,058	25,190	25,314	25,425	25,522	25,600	25,658	25,693	25,705
25,182	25,313	25,440	25,560	25,667	25,760	25,836	25,891	25,925	25,937
25,443	25,569	25,692	25,807	25,911	26,000	26,073	26,126	26,159	26,170
25,704	25,826	25,944	26,055	26,155	26,242	26,312	26,363	26,395	26,406
25,966	26,083	26,197	26,304	26,401	26,485	26,552	26,602	26,633	26,643
26,227	26,341	26,451	26,554	26,648	26,729	26,794	26,842	26,872	26,882
26,489	26,599	26,705	26,805	26,896	26,974	27,037	27,084	27,113	27,122
26,750	26,857	26,960	27,057	27,145	27,220	27,282	27,327	27,354	27,364
27,012	27,116	27,216	27,309	27,394	27,468	27,527	27,571	27,598	27,607
27,274	27,374	27,471	27,562	27,645	27,716	27,773	27,816	27,842	27,851

Πίνακας Α.20:  $dp/dz$  για ανοδική ροή, για διάφορες κλίσεις του αγωγού

κατανομή πίεσης για καθοδική ροή									
-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	
-0,17	-0,34	-0,50	-0,64	-0,77	-0,87	-0,94	-0,98	-1,00	
$dp/dZ$ (σε kPa)									
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-52,558	-23,872	-4,768	-0,178	-1,528	-4,989	-27,442	-130,164	-408,673	
-6,067	-12,226	-14,034	-19,657	-27,484	-34,584	-46,121	-73,728	-126,620	
4,977	-1,987	-7,117	-12,982	-18,970	-24,068	-29,902	-40,381	-58,347	
9,445	3,553	-1,327	-6,186	-10,743	-14,537	-18,176	-23,216	-30,681	
11,795	6,927	2,676	-1,328	-4,929	-7,891	-10,426	-13,150	-16,435	
13,257	9,214	5,552	2,198	-0,747	-3,149	-5,044	-6,619	-7,976	

14,283	10,897	7,735	4,875	2,402	0,394	-1,097	-2,048	-2,444
15,121	12,572	10,128	7,927	6,041	4,516	3,434	2,907	2,997
15,685	13,546	11,442	9,544	7,926	6,620	5,722	5,387	5,700
16,162	14,359	12,539	10,883	9,473	8,336	7,570	7,345	7,755
16,582	15,061	13,481	12,024	10,779	9,776	9,107	8,940	9,378
16,964	15,685	14,313	13,021	11,910	11,015	10,418	10,277	10,700
17,320	16,252	15,062	13,910	12,910	12,103	11,561	11,423	11,807
17,659	16,776	15,748	14,718	13,811	13,078	12,575	12,426	12,755
17,984	17,268	16,387	15,463	14,635	13,964	13,490	13,319	13,583
18,299	17,734	16,989	16,160	15,400	14,781	14,328	14,125	14,320
18,607	18,181	17,561	16,819	16,118	15,543	15,104	14,863	14,984
18,910	18,612	18,112	17,450	16,800	16,264	15,830	15,545	15,591
19,209	19,030	18,644	18,058	17,454	16,951	16,518	16,182	16,152
19,504	19,438	19,164	18,650	18,088	17,614	17,173	16,783	16,676
19,796	19,837	19,673	19,232	18,707	18,258	17,804	17,352	17,169
20,087	20,229	20,175	19,808	19,317	18,889	18,415	17,895	17,636
20,375	20,616	20,674	20,385	19,926	19,516	19,010	18,417	18,081
20,662	20,997	21,171	20,967	20,539	20,143	19,595	18,920	18,508
20,948	21,374	21,670	21,563	21,165	20,780	20,173	19,407	18,919
21,233	21,748	22,173	22,181	21,814	21,435	20,748	19,880	19,317
21,517	22,119	22,684	22,836	22,503	22,124	21,325	20,342	19,703
21,801	22,488	23,208	23,547	23,254	22,867	21,909	20,793	20,079
22,083	22,854	23,748	24,349	24,109	23,697	22,505	21,235	20,447
22,365	23,219	24,313	25,300	25,139	24,675	23,120	21,670	20,806
22,647	23,582	24,911	26,523	26,502	25,922	23,766	22,097	21,158
22,927	23,944	25,556	28,301	28,595	27,722	24,455	22,519	21,505
23,208	24,305	26,269	31,515	32,825	30,959	25,208	22,935	21,845
23,488	24,665	27,082	40,835	50,121	40,301	26,060	23,346	22,181
23,767	25,025	28,051	730,507	-0,925	733,178	27,065	23,754	22,513
24,046	25,384	29,283	11,167	14,140	10,668	28,331	24,158	22,840
24,325	25,743	31,002	17,680	18,574	17,195	30,082	24,559	23,163
24,603	26,102	33,782	20,360	20,712	19,889	32,894	24,957	23,484
24,881	26,461	39,665	21,933	22,071	21,476	38,816	25,352	23,801
25,158	26,821	64,264	23,040	23,074	22,597	63,563	25,746	24,115
25,436	27,180	-0,919	23,908	23,885	23,477	-1,734	26,138	24,427
25,712	27,540	12,674	24,636	24,579	24,218	11,901	26,529	24,736
25,989	27,900	18,462	25,275	25,197	24,868	17,699	26,918	25,043
26,265	28,261	21,235	25,854	25,762	25,458	20,488	27,307	25,348
26,541	28,623	22,945	26,390	26,290	26,004	22,216	27,695	25,651
26,816	28,986	24,163	26,895	26,789	26,518	23,452	28,082	25,952
27,091	29,350	25,114	27,375	27,266	27,007	24,420	28,470	26,252
27,366	29,715	25,904	27,836	27,726	27,478	25,227	28,857	26,550
27,641	30,081	26,589	28,283	28,172	27,932	25,928	29,245	26,846
27,915	30,449	27,203	28,717	28,607	28,374	26,556	29,633	27,142

Πίνακας A21:  $dp/dz$  για καθοδική ροή, για διάφορες κλίσεις του αγωγού



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:**

### **Έντυπη Βιβλιογραφία:**

#### Ξένη Βιβλιογραφία:

Almabrok Abushanaf, *Gas liquid two-phase flow in up and down vertical pipes*, (2013), PhD Thesis, Cranfield University

Andreussi P. and Bendiksen K., *An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid pipe flow*, (1989), International Journal of Multiphase flow, Vol. 15, No 6, pp. 937-946

Andreussi P, Bendiksen K. H. and Nydal O. J., *Void distribution in slug flow*, (1993), International Journal of Multiphase Flow, Vol. 19, No 5, pp. 817-828

Barnea D., Shoham O., Taitel Y. and Duckler A., *Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes. Comparison of experimental data with theory*, (1980), International Journal of Multiphase flow, Vol. 6, No 3, pp. 217-225

Barnea D., Shoham O., Taitel Y. and Duckler A., *Gas liquid flow in inclined tubes: Flow pattern transitions for upward flow*, (1985), Chemical Engineering Science, Vol. 40, No 5, pp. 131-136

Barnea D., *A unified model for predicting flow pattern transitions for the whole range of pipe inclinations*, (1987), International Journal of Multiphase flow, Vol. 13, pp. 1-12

Barnea D. and Taitel Y., *A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow*, (1993), International Journal of Multiphase flow, Vol. 19, No 5, pp. 829-838

Beggs H. Dale, *An experimental study of two-phase flow in inclined pipes*, (1972), PhD dissertation, U. of Tulsa

Beggs H. Dale, James P. Brill, *A study of two-phase flow in inclined pipe*, (1973), SPE AIME, U. of Tulsa, pp. 607-617



Benjamin T. B., *Gravity currents and related phenomena*, (1968), Journal of Fluid Mechanics, Vol. 31, pp. 209-248

Brauner N. and Ullmann A., *Modelling of gas entrainment from Taylor bubbles, Part A: Slug flow*, (2004), International Journal of Multiphase flow, Vol. 30, No 3, pp. 239-272

Dukler A. E. and Hubbard M. G., *A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes*, (1975), Ind. Eng. Chem. Fundamentals, Vol. 14, No 4, pp. 337-347

Flanigan O., *Effect of uphill flow on pressure drop in design of two-phase gathering systems*, (1958), Oil and gas journal, Vol. 56, No 10, pp. 132

Gomez L. E., Shoham O. and Taitel Y., *Prediction of slug liquid holdup horizontal to upward vertical flow*, (2000), International Journal of Multiphase flow, Vol. 26, pp. 517-521

Gould T. L. Tek M. R. and Katz D. L., *Two phase flow through vertical, inclined or curved pipes*, (1974), J. Pet. Tech., Vol. 19, pp. 815-828

Gregory G. A., *Comments on the predictions of liquid holdup for gas-liquid flow in inclined pipes*, (1974), The Canadian Journal of chemical engineering, Vol. 52, pp. 438-448

Gregory G. A., Nicholson M. K. and Aziz K., *Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow*, (1978), International Journal of Mutliphase flow, Vol. 4, No 1, pp. 33-39

Greskovich E. J., *Prediction of gas-liquid holdup for inclined flows*, (1973), AIChE Journal, Vol. 19, No 5, pp. 1060-1061

Grolman E. and Fortuin Jan M. H., *Liquid holdup, pressure gradient and flow patterns in inclined gas-liquid pipe flow*, (1997), Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 15, No 3, pp. 174-182

Guzhov A. I., Mamayev A. A. and Odishariya G.E., *A study of transportation in gas-liquid systems*, (1967), 10<sup>th</sup> International Gas Conference, Hamburg, Germany, IGU/C, pp. 19-67

Hasan A. R. and Kabir C. S., *Predicting multiphase behavior in a deviated well*, (1988), SPEPF, pp. 474

Hernandez Perez, Valente, *Gas-liquid two-phase flow in inclined pipes*, (2008), PhD Thesis, University of Nottingham

Heywood N. I. and Richardson J. F., *Slug Flow of Air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of Liquid Hold-up by ray absorption*, (1979), Chemical Engineering Science, Vol. 34, pp. 17-30

Hubbard M. G., *An analysis of horizontal gas-liquid slug*, (1965), PhD Thesis, University of Houston, USA

Kaya A. S., Sarica C. and Brill J. P., *Mechanistic modeling of two-phase flow in deviated wells*, (2001), SPEPF, Vol. 156

Kokal S. L. and Stanislav J. F., *An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes II. Liquid holdup and pressure drop*, (1989), Chemical Engineering Science, Vol. 44, No 3, pp. 681-693

Kouba G. E., *Horizontal slug flow modeling and metering*, (1987), PhD thesis, Dept. of petroleum engineering, University of Tulsa

Malnes D., *Slug flow in vertical, horizontal and inclined pipes*, (1983), Institute for Energy Technology, IFE/KR/E-83/002, Rev.

Marcano R, Chen X, Sarica C. and Brill J. P., *A study of slug characteristics for two-phase horizontal flow*, (1996), Int. Petr. Conf. Mexico, SP 39856, pp. 213-219

Mukherjee H. and Brill J. P., *Empirical equations to predict flow patterns in two-phase inclined flow*, (1985), International Journal of Multiphase Flow, Vol. 11, No 3, pp. 299-315

Nicklin O. J., Wilkes J. O. and Davison J. F., *Two-phase flow in vertical tubes*, (1962), Transactions of the institute of Chemical Engineers, Vol. 40, pp. 61-68

Pothof Ivo, *Co-current air-water flow in downward sloping pipes*, (2011), Thesis CAPWAT joint industry

Pothof Ivo and Clemens, *Experimental study of air-water flow in downward sloping pipes*, (2011), International Journal of Multiphase flow, Vol. 37, No 3, pp. 278-292

Singh G. and Griffith P., *Determination of the Pressure drop optimum pipe size for a two-phase slug flow in an inclined pipe*, (1970), ASME, Vol. 92, pp. 717-726

Spedding P. L. and Nguyen V. T., *Regime maps for air-water two-phase flow*, (1976), Chemical Engineering Science, Vol. 35, pp. 779-793

Spedding P. L. ChenVan J. J. J. and Nguyen T., *Pressure drop in two phase gas-liquid flow in inclined pipes*, (1982), International Journal of Multiphase flow, Vol. 8, No 4, pp. 407-431

Taitel Y., Barnea D., *A consistent approach for calculating pressure drop in inclined slug flow*, (1990), Chemical Engineering Science, Vol. 45, No 5, pp. 1199-1206

Weisman J. and Kang S. Y., *Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines*, (1981), International Journal of Multiphase flow, Vol. 7, No 3, pp. 271-291

Yamazaki Y. and Yamaguchi K., *Characteristics of two phase flow in tubes: Flow pattern, void fraction and pressure drop*, (1979), Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 16, pp. 245-255

Yijun J. and Rezkallah, *A study on void fraction in vertical co-current upward and downward two-phase gas-liquid flow- I: Experimental results*, (1993), Chemical Engineering Communication, Vol. 126, pp. 221-243

Zheng G., Brill J. P. and Taitel Y., *Slug flow behavior in a hilly terrain pipeline*, (1994), International Journal of Multiphase flow, Vol. 20, No 1, pp. 63-74

Zuber N. and Findlay J. A., *Average Volumetric Concentration in Two phase flow system*, (1965), Journal of Heat Transfer, Vol. 87, pp. 453-468

Zukoski E. E., *Influence of viscosity, surface tension and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes*, (1966), Journal of Fluid mechanics, Vol. 25, pp. 821-837

#### Ελληνική Βιβλιογραφία:

Αζήζ Ερσάν, *Καθεστώτα διαφασικής ροής αέρα-νερού σε οριζόντιο ή σχεδόν οριζόντιο αγωγό*, (2006), Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος

Ιάκωβος Γ. Γκανούλης, *Εισαγωγή στη Μηχανική των Ρευστών*, (2007), καθηγητής Πολυτεχνικής Σχολής Α.Π.Θ.

Λουκόπουλος Βασίλειος, *Εισαγωγικές έννοιες Μηχανικής Ρευστών*, (2014) Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Φυσικής, διδακτικές σημειώσεις

Μηνάς Νερσιγιάν, *Σημειώσεις Μηχανικής Ρευστών*, (2002), ΚΕΣΕΝ/Μ, Πειραιάς

Νεκτάριος Βλαχάκης, *Δυναμική των Ρευστών*, (2017), Τμήμα Φυσικής Πανεπιστημίου Αθηνών

Παπαϊωάννου Άγγελος, *Μηχανική των Ρευστών*, (2002), Πρώτος Τόμος

#### **Ηλεκτρονική βιβλιογραφία:**

<http://en.wikipedia.org/wiki>

<http://hydrotopics.wordpress.com>

<http://theconstructor.org>

<http://physiclessons.blogspot.gr>

<http://www.drbratland.com>

