

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ
ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ**

υπό

ΑΛΚΜΗΝΗΣ ΛΥΤΡΑ

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

Βόλος 2011



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

Αριθ. Εισ.: 9716/1
Ημερ. Εισ.: 15-07-2011
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2011
ΛΥΤ

© 2011 Λύτρα Αλκμήνη

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Μιχάλης Βλαχογιάννης
Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Ανδρίτσο, για όλα όσα έμαθα, την υπομονή του, την πολύ καλή συνεργασία, αλλά και για την συνεχή ενεργή παρουσία του κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κκ Καθηγητές Βασίλη Μποντόζογλου και Μιχάλη Βλαχογιάννη, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας. Ειδικά τον κ. Βλαχογιάννη και για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτορα του εργαστηρίου φυσικών και χημικών διεργασιών, κα Άννα Γεωργαντάκη, για την προθυμία και την βοήθειά της στις δυσκολίες που εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου θερμοδυναμικής και θερμικών μηχανών, κο Δημήτρη Τζιουρτζιούμη, για τις υποδείξεις και την βοήθεια στην συγγραφή παλαιότερων εργασιών, οι οποίες με έκαναν να εξοικειωθώ με την συγγραφή πειραματικών εργασιών.

Οφείλω να ευχαριστήσω τις κκ Άννα Ζερβάκη και Ολυμπία Ζώγου, όχι μόνο για τις συμβουλές τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου και την υποστήριξη τους, αλλά κυρίως διότι αποτελούν σύμβολα πετυχημένης γυναίκας-μηχανικού.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους φίλους μου Θένια, Φίλιππο, Έφη, Φαίδρα, Πηνελόπη, Γιάννη, Σπύρο και Εύη για την υποστήριξη, τα καλά τους λόγια και τις όμορφες στιγμές που έχω ζήσει μαζί τους όλα αυτά τα χρόνια. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στους Θένια και Γιάννη για την προθυμία και την βοήθεια τους στην επεξεργασία των σχημάτων της εργασίας.

Ως ελάχιστο δείγμα της ευγνωμοσύνης μου, αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου για την αγάπη τους και την υποστήριξη των επιλογών μου.

ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ

ΑΛΚΜΗΝΗ ΛΥΤΡΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2011

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διφασική ροή βρίσκει πολλές εφαρμογές στο τομέα της μηχανολογίας και ειδικά σε συσκευές θερμικών διεργασιών. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται πειραματικά η διφασική ροή για το σύστημα αέρας-νερό σε οριζόντιους αγωγούς διαμέτρου 9 και 4.8 mm σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Αρχικά γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων που συναντώνται στην βιβλιογραφία και στη συνέχεια περιγράφεται η πειραματική διάταξη/διαδικασία. Σκοπός της εργασίας είναι να κατασκευαστεί χάρτης ροής για κάθε αγωγό και να συγκριθεί με την βιβλιογραφία.

Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν τα εξής καθεστάτα ροής: διαστρωματωμένη, διαλείπουσα, ψευδό-διαλείπουσα, κυματοειδής, ροή με εκνέφωση και δακτυλοειδής ροή.

Η σύγκριση των πειραματικών χαρτών με αυτούς της βιβλιογραφίας είναι σε συμφωνία.

ABSTRACT

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	xi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο.....	1
1.2 Οργάνωση της διπλωματικής.....	2
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	3
2.1 Σύμβολα & Παράμετροι της Διφασικής Ροής.....	3
2.2 Διφασική Ροή σε Οριζόντιο Αγωγό Μεγάλης Διαμέτρου.....	8
2.2.1 Καθεστώτα Ροής.....	9
2.2.2 Χάρτες Καθεστώτων Ροής.....	11
2.2.3 Μαθηματικά Μοντέλα Περιγραφής της Διφασικής Ροής.....	15
2.3 Διφασική Ροή σε Οριζόντιο Αγωγό Μικρής Διαμέτρου.....	27
2.3.1 Κριτήρια Μετάβασης από Συμβατικό Αγωγό σε Μίνι και Μίκρο-Αγωγό.....	27
2.3.2 Καθεστώτα Ροής.....	31
2.3.3 Χάρτες Καθεστώτων Ροής.....	34
2.3.4 Μαθηματικά Μοντέλα.....	37
2.4 Επίδραση Διατομής στα Όρια Μετάπτωσης.....	40
2.5 Τρόποι ανίχνευσης Καθεστώτων Ροής.....	42
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΡΑΞΗ.....	44
3.1 Περιγραφή των Βασικών Τμημάτων της Πειραματικής Διάταξης.....	44
3.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας.....	46
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	47

4.1	Χάρτης Καθεστώτων Ροής.....	47
4.2	Πρότυπα Ροής.....	50
4.2.1	Καθεστώτα Ροής στον Αγωγό με Διάμετρο 9 mm.....	51
4.2.2	Καθεστώτα Ροής στον Αγωγό με Διάμετρο 4.8 mm.....	53
4.3	Σύγκριση Πειραματικών Αποτελεσμάτων.....	58
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	60
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	62
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	64
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 Πίνακες φυσικών ιδιοτήτων νερού και αέρα.....	65
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 Βαθμονόμηση ροόμετρων υγρής φάσης.....	67
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 Αναλυτικοί πίνακες μετρήσεων.....	68

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Απλοποιημένη εικόνα της διφασικής ροής υγρού-αερίου σε κυλινδρικό αγωγό.....	4
Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση των περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό.....	10
Σχήμα 2.3 Χάρτες περιοχών ροής, (α) Baker-1954, (β) Mandhane-1974.....	12
Σχήμα 2.4 Μηχανιστικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Taitel & Dukler, 1976.....	13
Σχήμα 2.5 Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στα όρια μετάπτωσης (Taitel & Dukler, 1976).....	14
Σχήμα 2.6 Όγκος ελέγχου για το ισοζύγιο ορμής στο ομογενές μοντέλο και το διαχωρισμένο μοντέλο διφασικής ροής.....	18
Σχήμα 2.7 Περιγραφή γεωμετρικών παραμέτρων στο διαχωρισμένο μοντέλο, Taitel & Dukler (1976).....	20
Σχήμα 2.8 Αστάθεια μοναχικού κύματος, Taitel & Dukler (1976).....	23
Σχήμα 2.9 Φωτογραφίες των καθεστώτων ροής για αγωγό 1.1 mm, (α) ροή με φυσαλίδες, (β) διαλείπουσα, (γ) ανάμεικτη, (δ) διαλείπουσα-δακτυλιοειδής, (ε) δακτυλιοειδής, Tripleet et al. (1999).....	32
Σχήμα 2.10 Σχηματική αναπαράσταση καθεστώτων ροής σε (α) mini-αγωγό και (b) micro-αγωγό, Kawaji & Chung (2004).....	33
Σχήμα 2.11 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιο αγωγό για το σύστημα αέρας-νερό, Barnea et al. (1983).....	34
Σχήμα 2.12 Χάρτης καθεστώτων ροής για οριζόντιο αγωγό 1.1 mm (πάνω) και 1.45 mm (κάτω), Tripleet et al (1999).....	35
Σχήμα 2.12 Χάρτης καθεστώτων ροής, Seriwana et al. (2001).....	36
Σχήμα 2.13 Χάρτης καθεστώτων ροής, Kawaji & Chung (2004).....	36
Σχήμα 2.14 Χάρτης καθεστώτων ροής, Coleman & Garimela (1998).....	41

Σχήμα 2.15 Χάρτης καθεστώτων ροής, Chung & Kawaji (2004).....	42
Σχήμα 2.16. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης.....	44
Σχήμα 2.17 Κάτοψη αγωγού δοκιμών.....	45
Σχήμα 2.18 Εικόνα της πειραματικής διάταξης από το χώρο του εργαστηρίου.....	46
Σχήμα 4.1 Πειραματικός χάρτης καθεστώτων ροής.....	48
Σχήμα 4.2 Πειραματικός χάρτης καθεστώτων ροής.....	49
Σχήμα 4.3 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής στον αγωγό με διάμετρο 9 mm.....	51
Σχήμα 4.4 Εξέλιξη της ροής σε χαμηλή παροχή της υγρής και υψηλή της αέριας φάσης.....	52
Σχήμα 4.5 Φωτογραφίες καθεστώτων στον αγωγό με διάμετρο 4.8 mm.....	58
Σχήμα 4.6 Σύγκριση περιοχών ροής για σύστημα νερό-αέρας (συνεχείς γραμμές) και CO ₂ -νερό (διακεκομμένες γραμμές).....	59
Σχήμα Π.3.1 Πίνακας πυκνότητας νερού.....	65
Σχήμα Π.3.2 Πίνακας πυκνότητας αέρα.....	65
Σχήμα Π.3.2 Επιφανειακής τάσης νερού.....	66
Σχήμα Π.1.1 Καμπύλη Βαθμονόμησης Ροόμετρου Μικρής Παροχής.....	67
Σχήμα Π.1.2 Καμπύλη Βαθμονόμησης Ροόμετρου Μεγάλης Παροχής.....	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικοί Χαρακτήρες

A	: εμβαδόν επιφανείας που καταλαμβάνει η κάθε φάση [m ²]	K	: Αδιάστατη παράμετρος [-]
Bd	: Αριθμός Bond [-]	Q	: Ογκομετρική παροχή [m ³ /s]
c	: Ταχύτητα διάδοσης κύματος [m/s]	R	: Συγκράτηση υγρού [-]
D	: Διάμετρος [m]	Re	: Αριθμός Reynolds [-]
dp_F/dz	: Πτώση πίεσης λόγω τριβής ανά μονάδα μήκους του αγωγού [Pa/m]	S	: Περίμετρος [m]
Eo	: Αριθμός Eötvös [-]	T	: Αδιάστατη παράμετρος [-]
F	: Αριθμός Froude [-], Δύναμη [N]	u	: Ταχύτητα [m/s]
f	: Συντελεστής τριβής [-]	u _s	: Φαινομενική ταχύτητα [m/s]
G	: Ειδικές μαζικές παροχές [kg/m ² s]	W	: Μαζική παροχή [kg/s]
h	: Ύψος στοιβάδας κάθε φάσης [m]	We	: Αριθμός Weber [-]
j	: Φαινομενική ταχύτητα [m/s]	X	: Παράμετρος Martinelli [-]
		x	: ποιότητα [-]

Ελληνικοί Χαρακτήρες

α	: Κλάσμα κενού [-]	ρ	: Πυκνότητα [kg/m ³]
θ	: Γωνία αγωγού με οριζόντιο επίπεδο [°]	τ_w	: Διατμητική τάση τοιχώματος [N/m ²]
λ	: Παράμετρος Baker [-]	ν	: Ειδικός όγκος [m ³ /kg]
ν	: Κινηματικό ιξώδες [m ² /s]	ψ	: Παράμετρος Baker [-]

Δείκτες

L	: Υγρή Φάση
G	: Αέρια Φάση
i	: Διεπιφάνεια

1. Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Η διφασική ροή είναι η ταυτόχρονη ροή δύο φάσεων σε ένα αγωγό. Οι δύο φάσεις μπορεί να αποτελούνται από το ίδιο ή διαφορετικά συστατικά. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη ροή υγρού-αερίου, καθώς έχει πολλές εφαρμογές, ιδιαίτερα στη βιομηχανία. Πιο συγκεκριμένα διφασική ροή συναντάμε σε συσκευές θερμικών διεργασιών (συμπυκνωτές, βραστήρες), αλλά και σε διεργασίες όπως η απορρόφηση, η απόσταξη ή κατά την λειτουργία ενός στροβίλου. Βέβαια, οι εφαρμογές της διφασικής (αλλά και της πολυφασικής ροής) δεν περιορίζονται στον τομέα της τεχνολογίας, αλλά επεκτείνονται σε τομείς όπως η ιατρική (ροή αίματος) ή το περιβάλλον (πχ. βροχή). Όσο αφορά την βιομηχανία, η κατανόηση της διφασικής ροής, αλλά και οι σωστοί υπολογισμοί, είναι ιδιαίτερα σημαντικοί, καθώς μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου και του μεγέθους της εγκατάστασης, Faghri & Zhang (2006).

Στη διφασική ροή σημαντικός παράγοντας στην κατανόηση, την περιγραφή, αλλά και τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της είναι η διάκριση των περιοχών (καθεστώτων ή προτύπων) ροής. Με το τελευταίο όρο εννοούμε τις γεωμετρικές μορφές που μπορεί να λάβει η διεπιφάνεια των δύο φάσεων κατά τη ροή μέσα στον αγωγό. Τα καθεστώτα ροής εξαρτώνται από τις συνθήκες ροής (παροχές και πίεση), από την μεταφορά θερμότητας (αδιαβατική και μη ροή), από τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών (πυκνότητα, ιξώδες, διατμητική τάση) και την γεωμετρία του αγωγού (σχήμα διατομής, κλίση, διάμετρος).

Στις μέρες μας, η ανάγκη για αξιόπιστες, υψηλής απόδοσης και οικονομικά ανταγωνίσιμες ηλεκτρικές συσκευές, ιδίως των electronic chips, έχει οδηγήσει στην απαίτηση για σχετικά μικρή μεταφορά θερμότητας, ικανή ωστόσο, ώστε να καλύψει τις ανάγκες για ψύξη σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασιακή κλίμακα. Στην κατεύθυνση αυτή χρησιμοποιούνται επιτυχώς κλειστές συσκευές διφασικής ροής, όπως αντλίες θερμότητας διαστάσεων της τάξης των μικρομέτρων (micro-heat pipes) και τριχοειδής αντλίες (capillary-pumped loops).

Τα πειράματα και οι θεωρητικές προσεγγίσεις που έχουν γίνει αποδεικνύουν πως η διφασική ροή στην κλίμακα των χιλιοστών (ή και λιγότερο) διαφέρει έντονα, τόσο στα καθεστώτα ροής, όσο και στα όρια μετάπτωσης.

Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η διφασική ροή σε δύο οριζόντιους αγωγούς κυκλικής διατομής. Ο πρώτος έχει εσωτερική διάμετρο 9 mm και θεωρείται συμβατικός, ενώ ο δεύτερος έχει εσωτερική διάμετρο 4.8 mm και βρίσκεται στο μεταίχμιο της «macro-» με την «micro» κλίμακα.

1.2 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Η εργασία στο υπόλοιπο μέρος της χωρίζεται στα Κεφάλαια 2, 3, 4, 5 και 6.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Αναφέρονται περιληπτικά τα καθεστώτα ροής που συναντώνται στην διφασική ροή για οριζόντιους αγωγούς και περιγράφεται η μετάπτωση στα καθεστώτα αυτά. Ακολουθούν τα μοντέλα που έχουν προταθεί για την περιγραφή των χαρακτηριστικών της διφασικής ροής. Τέλος, συζητούνται μια σειρά από πειραματικές εργασίες της βιβλιογραφίας που αναφέρονται στη διφασική ροή σε αγωγούς της τάξης των χιλιοστών ή και λιγότερο.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η πειραματική διάταξη και διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας και η σύγκριση τους με την βιβλιογραφία. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθεται η βιβλιογραφία στην οποία βασίστηκε η εργασία. Στις τελευταίες σελίδες υπάρχει το παράρτημα με συμπληρωματικές πληροφορίες της εργασίας.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1. Σύμβολα & Παράμετροι της Διφασικής Ροής

Αν και στην αρχή της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα σύμβολα, θεωρήθηκε σημαντικό να γίνει μια αναλυτική περιγραφή των επιμέρους παραμέτρων που περιγράφουν την διφασική ροή.

Αρκετές παράμετροι της διφασικής ροής είναι αποτέλεσμα του γεγονότος, ότι οι δύο φάσεις έχουν διαφορετικές πυκνότητες και η πιο ελαφριά ρέει ταχύτερα (εδώ η αέρια φάση). Μερικές από τις ποσότητες που συναντώνται στην διφασική ροή είναι χρήσιμες στον σχεδιασμό μιας συσκευής ή κάποιας διεργασίας (πχ εξάτμιση υγρού). Παρακάτω περιγράφονται ορισμένες παράμετροι που δεν συναντώνται στην κλασσική ρευστομηχανική και είναι καθοριστικής σημασίας για την διφασική ροή.

Συγκράτηση υγρού και κλάσμα κενού

Επειδή η αέρια φάση διαφέρει αισθητά από την υγρή ως προς την πυκνότητα και το ιξώδες, η αέρια φάση ρέει με μεγαλύτερη ταχύτητα από την υγρή, φαινόμενο που χαρακτηρίζεται ως «ολίσθηση» της μιας φάσης ως προς την άλλη. Ως *συγκράτηση υγρού* (R , holdup) ορίζεται ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το υγρό στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. *Κλάσμα κενού* (α , void fraction) είναι ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το αέριο στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. Εάν το εμβαδόν της διατομής του αγωγού είναι A και τα εμβαδά της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και την υγρή φάση είναι A_G και A_L , τότε:

$$R = \frac{A_L}{A} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{A_G}{A} \quad (2.2)$$

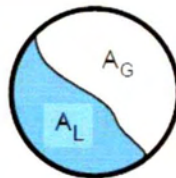
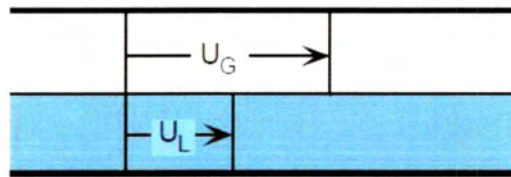
όπου,

$$A = A_L + A_G \quad (2.3)$$

Το κλάσμα κενού μπορεί να μετρηθεί με αξιοπιστία με τη μέθοδο των *δύο βαλβίδων ταχείας απόκρισης* (quick closing valves). Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι χρησιμοποιούνται οι δείκτες L και G για να δηλώσουν την υγρή και την αέρια φάση, αντίστοιχα. Συχνά στην βιβλιογραφία απαντούν με μικρά γράμματα. Επίσης, στα συστήματα ατμός-νερό χρησιμοποιείται το γράμμα f αντί για 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:

$$R + \alpha = 1 \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.1 Απλοποιημένη εικόνα της διφασικής ροής υγρού-αερίου σε κυλινδρικό αγωγό

Μαζικές παροχές

Η συνολική μαζική ροή ορίζεται ως το άθροισμα της μαζικής παροχής του υγρού (W_L) και του αερίου (W_G), σε [kg/s]

$$W = W_G + W_L \quad (2.5)$$

Ειδικές μαζικές παροχές (mass fluxes, mass velocities)

Είναι οι μαζικές παροχές διαιρεμένες με τη διατομή της ροής και οι μονάδες μετρήσεως είναι $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Προφανώς ισχύει:

$$G = \frac{W}{A} = \rho u = \frac{u}{v} \quad (2.6)$$

και

$$G = G_G + G_L \quad (2.7)$$

όπου,

ρ [kg/m^3]: η πυκνότητα της συνολικής ροής

u [m/s]: η ταχύτητα της συνολικής ροής

Ποιότητα (quality)

Σε διεργασίες που συμβαίνει αλλαγή φάσης (βρασμός, συμπύκνωση) είναι καταλληλότερη τις περισσότερες φορές η χρήση του όρου της (μαζικής) *ποιότητας* (x , quality), η οποία ορίζεται ως το κλάσμα μάζας της αέριας φάσης:

$$x = \frac{G_G}{G} = \frac{G_G}{G_G + G_L} \quad (2.8)$$

Η παράμετρος αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με τη «θερμοδυναμική ποιότητα», το λόγο της μάζας ατμού (όχι της μαζικής παροχής) ως προς την συνολική μάζα των δύο

φάσεων σε μία συγκεκριμένη θέση και στιγμή. Μόνο στην περίπτωση που οι ταχύτητες των δύο φάσεων είναι ίδιες (περίπτωση ομογενούς ροής) είναι και οι δύο ίδιες.

Φαινομενικές ταχύτητες φάσεων

Οι φαινομενικές ταχύτητες των φάσεων (superficial velocities) προσδιορίζονται θεωρώντας ότι οι δύο φάσεις ρέουν μόνες τους στον αγωγό. Η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$u_{GS} = \frac{Q_G}{A} = \frac{G_G}{\rho_G} \quad (2.9)$$

και η αντίστοιχη της υγρής φάσης ως:

$$u_{LS} = \frac{Q_L}{A} = \frac{G_L}{\rho_L} \quad (2.10)$$

όπου,

Q [m^3/s]: η ογκομετρική παροχή της αέριας (G) και της υγρής (L) φάσης, αντίστοιχα

ρ [kg/m^3]: η πυκνότητα της αέριας (G) και της υγρής (L) φάσης, αντίστοιχα.

Στην βιβλιογραφία και για την ίδια παράμετρο συναντάται ορισμένες φορές ο όρος *ειδική ογκομετρική παροχή* (volumetric flux) που συμβολίζεται με το j . Έτσι έχουμε:

$$j_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.11)$$

και

$$j_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.12)$$

Μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (average phase velocities)

Η μέση πραγματική ταχύτητα της αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$u_G = \frac{Q_G}{A\alpha} = \frac{G_G}{\rho_G\alpha} = \frac{u_{GS}}{\alpha} \quad (2.13)$$

και η μέση πραγματική ταχύτητα της υγρής φάσης γράφεται ως:

$$u_L = \frac{Q_L}{A(1-\alpha)} = \frac{G_L}{\rho_L(1-\alpha)} = \frac{u_{LS}}{1-\alpha} \quad (2.14)$$

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

$$u_M = \frac{Q_G + Q_L}{A} = u_{GS} + u_{LS} \quad (2.15)$$

Ταχύτητα ολίσθησης, S (Slip ratio)

Η ταχύτητα ολίσθησης, S, εκφράζει τη σχετική ταχύτητα της αέριας φάσης (U_G) ως προς την υγρή (U_L)

$$S = \frac{u_G}{u_L} = \frac{G_G\rho_L A_L}{G_L\rho_G A_G} = \left(\frac{x}{1-x}\right) \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right) \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \quad (2.16)$$

Συμπαρασυρμός, E (Entrainment)

Χρησιμοποιείται στη δακτυλιοειδή ροή και αναφέρεται στο κλάσμα του υγρού που βρίσκεται με τη μορφή σταγόνων στον αέριο πυρήνα.

2.2. Διφασική Ροή σε Οριζόντιο Αγωγό Μεγάλης Διαμέτρου

Σε κάθε μηχανολογική εγκατάσταση που περιλαμβάνει την παραγωγή/κατανάλωση έργου μέσω της εκτόνωσης/συμπίεσης ενός ρευστού βασικό ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης, των θερμικών συντελεστών καθώς και της κατανομής των ταχυτήτων. Είναι γνωστό πως η κλασική ρευστομηχανική μπορεί να κάνει ακριβείς υπολογισμούς μόνο για την μονοφασική ροή, και αυτό ισχύει μόνο σε χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds και στρωτή ροή. Όταν οι τιμές του αριθμού Reynolds είναι υψηλές η μοντελοποίηση βασίζεται πλέον σε εμπειρικές ή ημιεμπειρικές σχέσεις.

Στην διφασική ροή η διεπιφάνεια των δύο φάσεων είναι έντονα παραμορφώσιμη και αυτό καθιστά την αναλυτική επίλυση μια δύσκολη διαδικασία. Επίσης σε ροή με αλλαγή φάσης μία επιπλέον παράμετρος είναι η σύζευξη της ρευστομηχανικής και της μεταφοράς θερμότητας. Η αναλυτική επίλυση είναι εφικτή μόνο σε ιδανικές καταστάσεις όπως είναι η διαστρωματωμένη ροή.

Η μελέτη της διφασικής ροής ξεκίνησε δυναμικά την δεκαετία του 1940 με σκοπό την κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, καθώς και την ασφαλή τους λειτουργία. Αν και η έρευνα σε αυτόν τον τομέα μετρά 60 και πλέον χρόνια, στα χιλιάδες άρθρα και εργασίες επικρατεί ακόμη αβεβαιότητα και ελλιπής κατανόηση αρκετών φαινομένων. Οι πρώτες εργασίες περιλαμβάνουν εμπειρικές προσεγγίσεις και κάνουν χρήση σχέσεων με παρεμβολή. Αργότερα έγινε προσπάθεια για αναλυτική προσέγγιση, που περιλαμβάνει την εξαγωγή συσχετίσεων από βασικές αρχές, και στη συνέχεια φαινομενολογική προσέγγιση, που περιλαμβάνει την κατανόηση της φυσικής του προβλήματος και την εξαγωγή μοντέλων. Τα τελευταία 15 χρόνια σημαντικά βήματα έχουν γίνει και στον τομέα της υπολογιστικής προσέγγισης (CFD).

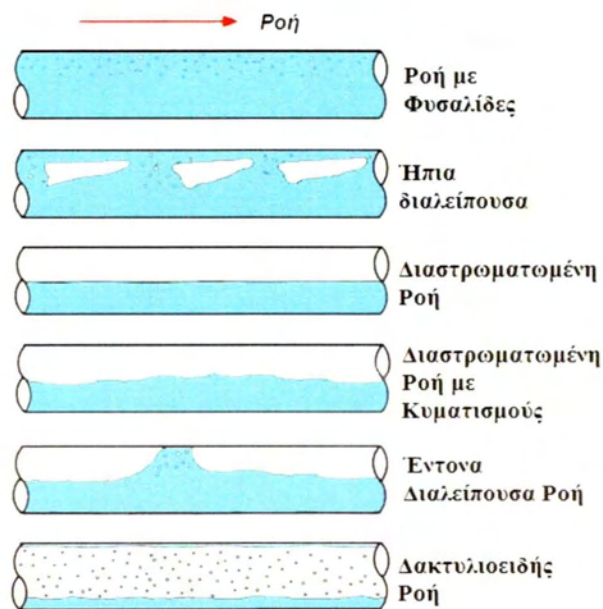
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μία από τις ιδιαιτερότητες της διφασικής ροής είναι ότι η διεπιφάνεια της υγρής και της αέριας φάσης μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών μορφών, οι οποίες είναι γνωστές ως καθεστώτα ροής ή πρότυπα ή περιοχές ροής (flow patterns, flow regimes). Τα καθεστώτα ροής εξαρτώνται από τη γεωμετρία του αγωγού (διατομή, κλίση κλπ), τις παροχές των δύο φάσεων καθώς και τις ιδιότητες των ρευστών (ιξώδες, πυκνότητα). Ένας τρόπος απεικόνισης της μετάπτωσης από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο είναι οι λεγόμενοι χάρτες καθεστώτων ροής. Σε αυτή τη παράγραφο

μελετώνται τα καθεστώτα ροής σε συμβατικούς αγωγούς (κάθετους και οριζόντιους), καθώς και σε αγωγούς μικρότερης διαμέτρου.

2.2.1. Καθεστώτα Ροής

Η διφασική ροή σε οριζόντιο αγωγό ή σε αγωγό με μικρή κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο και με διάμετρο μεγαλύτερη από περίπου 1 cm εμφανίζει διαφορετικά καθεστώτα ροής από την ροή σε κατακόρυφο αγωγό, διότι η βαρύτητα δρα κάθετα στην διεύθυνση της ροής. Η διφασική ροή σε οριζόντιο αγωγό είναι πιο πολύπλοκη από την κατακόρυφη ροή, διότι η ροή συνήθως δεν είναι συμμετρική, εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας, η οποία τείνει να συγκεντρώσει την υγρή φάση στο κάτω μέρος του αγωγού.. Τα καθεστώτα ροής είναι σύμφωνα με τους Taitel & Dukler (1976) τα εξής και παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.2:

- **Ροή με φυσαλίδες (Bubble flow):** Η αέρια φάση βρίσκεται διασπαρμένη στην συνεχή υγρή φάση. Οι φυσαλίδες τείνουν να συγκεντρωθούν στην κορυφή της ροής, εξαιτίας της επίδρασης της άνωσης. Όταν η ταχύτητα της υγρής φάσης είναι μεγάλη, οι φυσαλίδες τείνουν να γίνουν αφρός, όπως στην κατακόρυφη ροή.
- **Ήπια διαλείπουσα ροή (Plug flow):** Η ροή αυτή συνίσταται από διαμήκεις φυσαλίδες (elongated bubbles), οι οποίες ρέουν στο επάνω μέρος του αγωγού, εξαιτίας της επίδρασης της άνωσης. Διαφοροποιείται από την έντονα διαλείπουσα ροή (βλ παρακάτω) με βάση το σχήμα της κεφαλής της φυσαλίδας.



Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση των περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό

- **Διαστρωματωμένη ροή (Stratified flow):** Οι ταχύτητες της αέριας και της υγρής φάσης είναι σχετικά χαμηλές και η ποιότητα είναι σχετικά μεγάλη. Η υγρή φάση κινείται στο πυθμένα του αγωγού, εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας, ενώ η αέρια φάση κινείται στην κορυφή του αγωγού. Είναι επίσης δυνατό να εμφανιστεί και ένα λεπτό φιλμ υγρής φάσης στην κορυφή του αγωγού.
- **Διαστρωματωμένη με κυματισμούς ροή (Stratified wavy flow):** Όταν η ταχύτητα της αέριας φάσης αυξάνεται, η διατμητική τάση στην διεπιφάνεια υγρού-αερίου προκαλεί την δημιουργία κυματισμών.
- **Έντονα διαλείπουσα ροή (Slug flow):** Καθώς αυξάνεται η παροχή της υγρής φάσης, αυξάνονται οι κυματισμοί. Οι κορυφές των κυμάτων μπορούν να φράξουν όλη την διατομή του αγωγού δημιουργώντας φυσαλίδες σε σχήμα βλήματος. Ωστόσο, μια σημαντική ποσότητα υγρού παραμένει στον πυθμένα του αγωγού, εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας. Στο πάνω μέρος του αγωγού υπάρχει ένα λεπτό φιλμ του υγρού. Η ταχύτητα των αέριων μαζών είναι ίση με την ταχύτητα της υγρής φάσης. Η διαλείπουσα ροή είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη για τις περισσότερες εφαρμογές, επειδή προκαλεί απότομες αυξήσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να δονούνται οι σωληνώσεις, να χρειάζονται μεγάλοι διαχωριστές κ.α. Έτσι είναι ιδιαίτερα σημαντικό για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές η πρόβλεψη της μετάπτωσης σε αυτό το καθεστώς. Σε ορισμένες συνθήκες (και σε χαμηλές συνήθως διαμέτρους αγωγών)

εμφανίζεται η *ψευδό-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug)*. Και σε αυτό το καθεστώς εμφανίζονται υγρές μάζες, οι οποίες όμως δεν ρέουν με την ταχύτητα του αερίου και έτσι δεν προκαλούν απότομη πτώσης πίεσης.

- **Δακτυλιοειδής ροή (Annular flow):** Η δακτυλιοειδής ροή είναι παρόμοια με αυτή που συναντάται στην κατακόρυφη ροή, δηλαδή η υγρή φάση ρέει περιφερειακά στην επιφάνεια του αγωγού και η αέρια φάση ρέει στο κέντρο του αγωγού. Η σημαντική διαφορά είναι ότι ο δακτύλιος της υγρής φάσης δεν είναι συμμετρικός, εξαιτίας της βαρύτητας που τείνει να συγκεντρώσει το υγρό στον πυθμένα του αγωγού. Όμως, όπως και στην κατακόρυφη ροή, σχεδόν πάντοτε συναντάμε μέρος του υγρού να είναι συμπαρασυρμένο από την αέρια φάση με μορφή σταγονιδίων.

2.2.2. Χάρτες Καθεστώτων Ροής

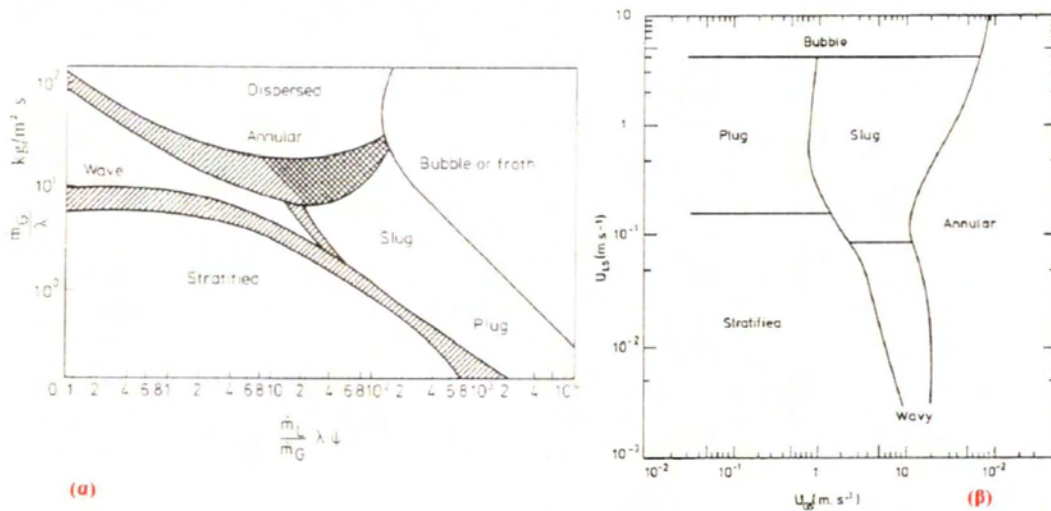
Ιδιαίτερα σημαντικό στη μελέτη της διαφασικής ροής είναι η θεωρητική πρόβλεψη των καθεστώτων ροής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται χάρτες καθεστώτων ροής (flow regime maps), οι οποίοι έχουν ως συντεταγμένες τις φαινομενικές ταχύτητες ή τις μαζικές παροχές των δύο φάσεων. Ενώ, επειδή τα καθεστώτα ροής επηρεάζονται από την γεωμετρία του αγωγού και τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών, συχνά αποτυπώνονται η γεωμετρία και οι φυσικές ιδιότητες στους χάρτες. Τα τελευταία εξήντα χρόνια έχουν προταθεί μια σειρά από χάρτες, οι οποίοι προέκυψαν είτε από πειραματικά αποτελέσματα είτε από θεωρητικά μοντέλα. Άλλοι χάρτες που είναι γνωστοί είναι αυτοί που χρησιμοποιούν αδιάστατες συντεταγμένες. Οι παράμετροι που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι ο αριθμός Reynolds, ο αριθμός Froude, καθώς και η παροχή κάθε φάσης.

Ένας από τους πρώτους και ίσως πιο γνωστούς χάρτες στην περιγραφή των καθεστώτων ροής είναι αυτός του Baker (1954). Ο Baker λαμβάνοντας υπόψη του τις φυσικές ιδιότητες των δύο ρευστών εισήγαγε τις παρακάτω παραμέτρους:

$$\lambda = \left(\frac{\rho_G}{1.23} \frac{\rho_L}{1000} \right)^{0.5} \quad (2.17)$$

$$\psi = \frac{\sigma_w}{0.072} \left[\frac{0.001}{\mu_w} \left(\frac{1000}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (2.18)$$

Μια τροποποίηση του χάρτη του Baker έγινε το 1963 από τον Scott και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Στην πορεία όμως αποδείχθηκε πως ο χάρτης του Baker δεν εξέφραζε ικανοποιητικά ορισμένους παραμέτρους, όπως είναι η διάμετρος του αγωγού. Ένας από τους επόμενους χάρτες που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι αυτός των Mandhane et al (1974), που βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα. Το βασικό όμως πρόβλημα παραμένει να είναι η περιγραφή των μεταπτώσεων να γίνεται από τις ίδιες παραμέτρους.



Σχήμα 2.3 Χάρτες περιοχών ροής, (α) Baker-1954, (β) Mandhane-1974

Οι Taitel and Dukler (1976) ήταν οι πρώτοι ερευνητές που προσπάθησαν να περιγράψουν φαινομενολογικά τις διάφορες μεταπτώσεις. Στην εργασία τους χρησιμοποίησαν διάφορες αδιάστατες παραμέτρους.

Η οριζόντια συντεταγμένη του χάρτη των Taitel & Dukler είναι η αδιάστατη παράμετρος Lockhart-Martinelli και ορίζεται ως:

$$X = \left[\frac{(dp_F/dz)_L}{(dp_F/dz)_G} \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

όπου, $(dp_F/dz)_\ell$ και $(dp_F/dz)_v$ [Pa/m] είναι η πτώση πίεσης λόγω τριβών της υγρής και της αέριας φάσης κατά μήκος του αγωγού, αντίστοιχα, αν αυτές οι φάσεις έρρεαν μόνες τους στον αγωγό.

Οι κατακόρυφες συντεταγμένες ορίζονται ως εξής:

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \frac{u_{GS}}{\sqrt{Dg \cos \theta}}} \quad (2.20)$$

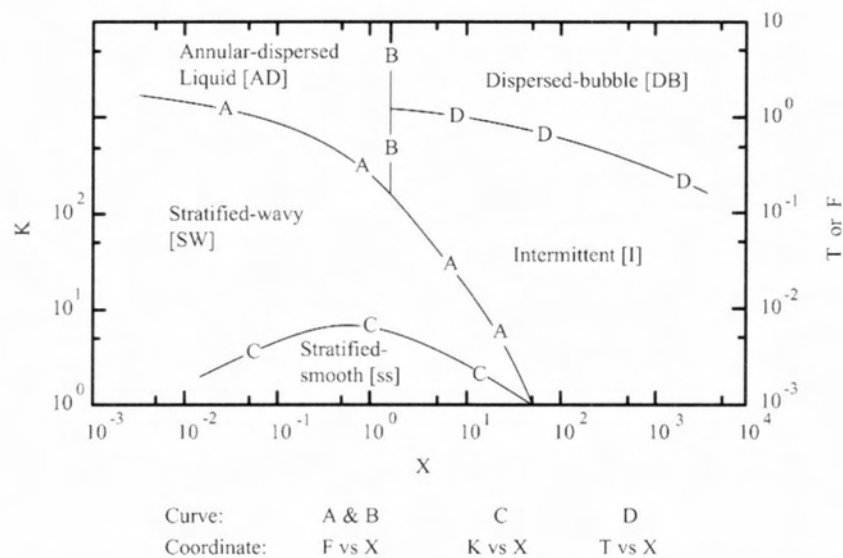
$$K = \left[\frac{\rho_G u_{GS}^2}{(\rho_L - \rho_G) D g \cos \theta} \frac{D u_{LS}}{v_L} \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

$$T = \left[\frac{(dp/dz)_L}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \theta} \right]^{1/2} \quad (2.22)$$

όπου,

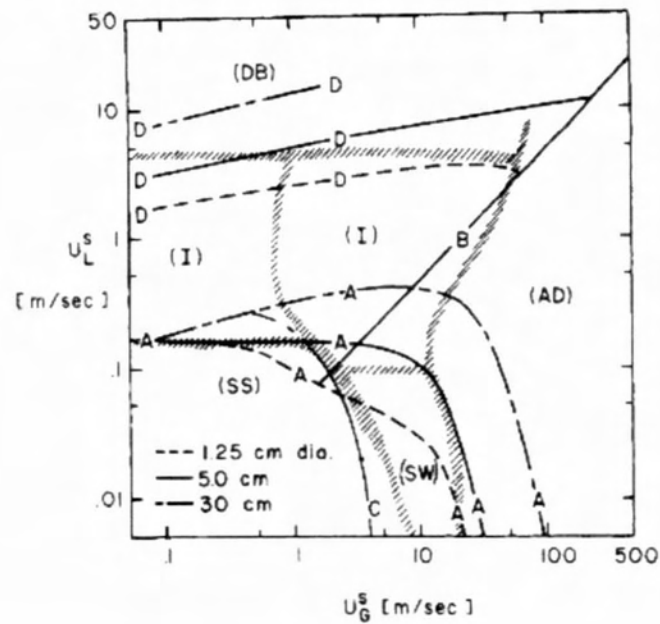
F είναι ο τροποποιημένος αριθμός Froude, D είναι η διάμετρος του αγωγού και θ η γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με το οριζόντιο επίπεδο.

Και ο χάρτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4



Σχήμα 2.4 Μηχανιστικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Taitel & Dukler, 1976

Στο Σχήμα 2.5 οι Taitel & Dukler παρουσίασαν μια σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με το μοντέλο τους για διάμετρο 12.5 mm, 50 mm και 300 mm και για το σύστημα νερό-αέρας 25 °C και 1 atm.



Σχήμα 2.5 Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στα όρια μετάπτωσης (Taitel & Dukler, 1976)

Σε αυτό το χάρτη παρουσιάζονται τα όρια μετάπτωσης από το ένα καθεστώς στο άλλο και γίνεται και σύγκριση των ορίων για αγωγούς με διαφορετική διάμετρο. Οι συντεταγμένες αυτού του χάρτη είναι οι φαινομενικές ταχύτητες των δύο φάσεων.

2.2.3. Μαθηματικά Μοντέλα Περιγραφής της Διφασικής Ροής

Η ανάγκη υπολογισμού διαφόρων παραμέτρων της διφασικής ροής με πρακτικό ενδιαφέρον, όπως είναι η πτώση πίεσης και το κλάσμα κενού, έχει οδηγήσει στην δημιουργία μιας σειράς μαθηματικών μοντέλων, που προσπαθούν υπολογίσουν διάφορες παραμέτρους, αλλά και να προβλέψουν τα όρια μετάπτωσης στα διάφορα καθεστώτα ροής. Σε αυτή την παράγραφο περιγράφεται το ομογενές, το διαχωρισμένο μοντέλο και το μοντέλο των Taitel & Dukler.

Ομογενές Μοντέλο

Η κεντρική παραδοχή στο ομογενές μοντέλο είναι ότι οι δύο φάσεις έχουν την ίδια ταχύτητα και υπάρχει καλή ανάμειξη, έτσι μπορεί να θεωρηθούν ως μία φάση. Αυτό το μοντέλο είναι πιο αποδεκτό για ροές κοντά στο κρίσιμο σημείο, όπου οι διαφορές των ιδιοτήτων της υγρής και της αέριας φάσης είναι αμελητέες, ή για διφασική ροή με μεγάλη μαζική παροχή της αέριας φάσης, όπου το καθεστώς ροής είναι ροή με φυσαλίδες. Η πυκνότητα του ομογενούς μίγματος ικανοποιεί την σχέση:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \Rightarrow$$
$$\rho = \frac{\rho_G \rho_L}{\rho_L x + \rho_G (1-x)} \quad (2.23)$$

Η μαζική παροχή κάθε φάσης ορίζεται ως:

$$G_L = \rho_L u A_L \quad (2.24)$$

$$G_G = \rho_G u A_G \quad (2.25)$$

Και αντικαθιστώντας στην σχέση (2.2),

παίρνουμε:

$$\alpha = \frac{G_G / \rho_G}{G_G / \rho_G + G_L / \rho_L} \quad (2.26)$$

Λαμβάνοντας υπόψη μας τον ορισμό της ποιότητας, σχέση (2.8), το κλάσμα κενού γίνεται:

$$\alpha = \frac{x}{x + (1-x)\rho_G/\rho_L} \quad (2.27)$$

Η ολική παροχή μάζας είναι:

$$G = \frac{G_L + G_G}{A} = \frac{\rho_L u A_L + \rho_G u A_G}{A} = \rho u \quad (2.28)$$

Οι εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας γράφονται:

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (GA) = 0 \quad (2.29)$$

$$A \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial (G^2 A / \rho)}{\partial z} = - \frac{\partial (pA)}{\partial z} - \rho g \cos \theta A - \tau_w P \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \cos \theta \right) \right] + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho u A \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \cos \theta \right) \right] \\ = \frac{P}{A} q_w'' + q''' + \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.31)$$

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

Αντικαθιστώντας την ολική παροχή μάζας, η εξίσωση ενέργειας γράφεται:

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

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

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{4\tau_w}{D} + \frac{\partial(G^2/\rho)}{\partial z} + \rho g \cos\theta \quad (2.32)$$

Οι τρεις όροι στο δεξί μέλος της παραπάνω εξίσωσης αντιστοιχούν στην πτώση πίεσης εξαιτίας της τριβής, dp_F/dz , της επιτάχυνσης, dp_a/dz , και της βαρύτητας, dp_g/dz , αντίστοιχα.

Έτσι η τελευταία σχέση (2.32) γράφεται:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\partial p_F}{\partial z} - \frac{\partial p_a}{\partial z} - \frac{\partial p_g}{\partial z} \quad (2.33)$$

Στην διφασική ροή, ο όρος της επιτάχυνσης δεν είναι σημαντικός όχι μόνο στην περίπτωση του συμπιεστού αερίου, αλλά κυρίως όταν μεταβάλλεται η σχετική παροχή υγρής και αέριας φάσης, όπως συμβαίνει κατά την διάρκεια της εξάτμισης ή της συμπύκνωσης.

Το κύριο ερώτημα κατά την εφαρμογή του ομογενούς μοντέλου αφορά την επιλογή της πυκνότητας του μίγματος, όπως αυτή υπολογίστηκε παραπάνω. Η επιλογή του ισοδύναμου ιξώδους είναι καθαρά εμπειρική. Μία από τις από σχέσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι και η σχέση των Isbin et al (1958), η οποία έχει ως προτέρημα να είναι ανάλογη της σχέσης της πυκνότητας:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_v} + \frac{1-x}{\mu_l} \quad (2.34)$$

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

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Lo} \varphi_{Lo}^2 \quad (2.35)$$

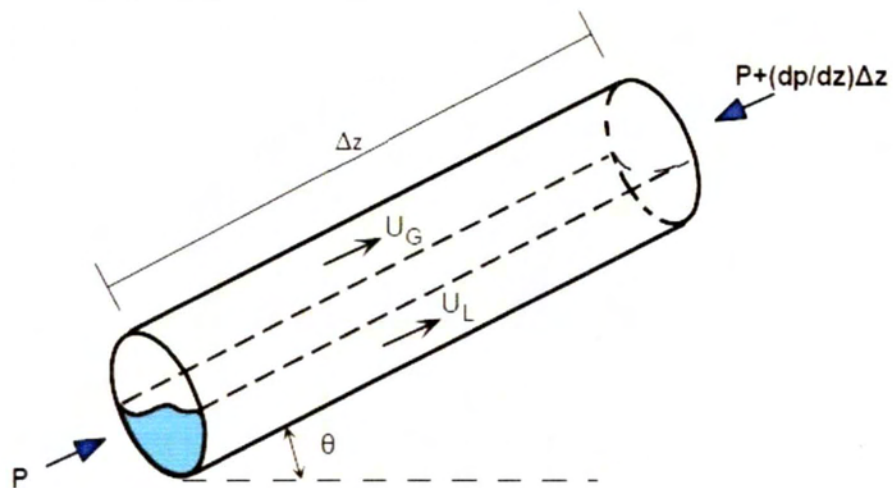
Ο όρος $(dp/dz)_{Lo}$ παριστάνει την πτώση πίεσης σε μονοφασική ροή, υγρού με παροχή ίση με τη συνολική παροχή, m'' , των δύο φάσεων. Ανάλογες σχέσεις προκύπτουν αν ληφθεί ως παροχή αναφοράς η παροχή μιας ή και των δύο φάσεων σε συνθήκες υγρού ή αερίου. Μια τιμή του πολλαπλασιαστή, φ_{Lo}^2 , για την πτώση πίεσης λόγω τριβής από το ομογενές μοντέλο βρίσκεται, με τη χρήση του τύπου του Blasius (π.χ. $f=0.079Re^{-0.25}$, $Re=GD/\mu$) για το συντελεστή τριβής, ίση με

$$\varphi_{Lo}^2 = \left[1 - x \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) \right] \left[1 + x \frac{(\mu_L - \mu_G)}{\mu_G} \right]^{-1/4} \quad (2.36)$$

Το ομογενές μοντέλο δίνει ικανοποιητικές εκτιμήσεις όταν $\rho_L/\rho_G < 10$ ή όταν $G > 2000$ $\text{kg/m}^2\text{s}$.

Διαχωρισμένο μοντέλο

Στο διαχωρισμένο μοντέλο η υγρή και η αέρια φάση θεωρείται ότι κινούνται με σταθερές, αλλά διαφορετικές ταχύτητες. Ο προσδιορισμός της πτώσης πίεσης για κάθε φάση γίνεται με εφαρμογή ολοκληρωτικού ισοζυγίου ορμής για μια διατομή του αγωγού, Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Όγκος ελέγχου για το ισοζύγιο ορμής στο ομογενές μοντέλο και το διαχωρισμένο μοντέλο διαφασικής ροής

Το ισοζύγιο ορμής γράφεται:

$$\begin{aligned}
 -\frac{dP}{dz}\Delta z\frac{\pi D^2}{4} - \tau\Delta z\pi D - \frac{\pi D^2}{4}\Delta z[\alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L]g\sin\theta \\
 = \frac{\pi D^2}{4}\frac{d}{dz}[\alpha\rho_G u_G^2 + (1-\alpha)\rho_L u_L^2]\Delta z
 \end{aligned}
 \tag{2.37}$$

Η ταχύτητες της υγρής και της αέριας φάσης μπορούν να γραφούν με τη βοήθεια της ολικής παροχής:

$$u_G = \frac{xG}{\alpha\rho_G} \tag{2.38}$$

$$u_L = \frac{(1-x)G}{(1-\alpha)\rho_L} \tag{2.39}$$

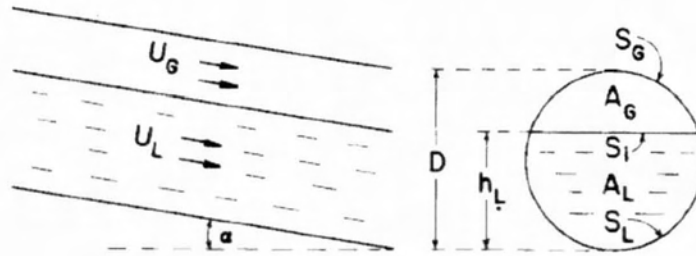
Αντικαθιστώντας στην Σχέση (2.40) έχουμε:

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{4\tau}{D} + [\alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L]g\sin\theta + G^2\frac{d}{dz}\left[\frac{x^2}{\alpha\rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L}\right] \tag{2.40}$$

Παρατηρούμε ξανά πως η ολική πτώση πίεσης έχει τρεις συνιστώσες, την τριβή, την βαρύτητα και την επιτάχυνση, αντίστοιχα. Η σύνθεση κάθε όρου μας επιτρέπει να συμπεράνουμε πως για τον υπολογισμό των δύο πρώτων απαιτείται η τιμή του κλάσματος κενού, ενώ με τον όρο της επιτάχυνσης μπορούν να περιγραφούν μεταβολές της ποιότητας λόγω αλλαγής φάσης μέσω του βρασμού ή της συμπύκνωσης.

Μοντέλο Taitel και Dukler

Οι Taitel και Dukler (1976) στην εργασία τους μοντελοποίησαν τις μεταπτώσεις στα καθεστώτα ροής βασισμένοι αρχικά στο διαχωρισμένο μοντέλο για οριζόντιο ή σχεδόν οριζόντιο αγωγό.



Σχήμα 2.7 Περιγραφή γεωμετρικών παραμέτρων στο διαχωρισμένο μοντέλο, Taitel & Dukler (1976)

Το ισοζύγιο ορμής για κάθε φάση γράφεται:

$$-A_L \left(\frac{dP}{dx} \right) - \tau_{WL} S_L + \tau_i S_i + \rho_L A_L g \sin \alpha = 0 \quad (2.41)$$

$$-A_G \left(\frac{dP}{dx} \right) - \tau_{WG} S_G - \tau_i S_i + \rho_G A_G g \sin \alpha = 0 \quad (2.42)$$

Εξισώνοντας την πτώση πίεσης στις δύο φάσεις έχουμε:

$$\tau_{WG} \frac{S_G}{A_G} - \tau_{WL} \frac{S_L}{A_L} + \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) + (\rho_L - \rho_G) g \sin \alpha = 0 \quad (2.43)$$

Η διατμητική τάση κάθε φάσης ορίζεται ως:

$$\tau_{WL} = f_L \frac{\rho_L u_L^2}{2} \quad (2.44)$$

$$\tau_{WG} = f_G \frac{\rho_G u_G^2}{2} \quad (2.45)$$

$$\tau_i = f_i \frac{\rho_G (u_G - u_L)^2}{2} \quad (2.46)$$

Όπου οι συντελεστές τριβής υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$f_L = C_L \left(\frac{D_L u_L}{\nu_L} \right)^{-n} \quad (2.47)$$

$$f_G = C_G \left(\frac{D_G u_G}{\nu_G} \right)^{-m} \quad (2.48)$$

Όπου,

$$D_L = \frac{4A_L}{S_L} \quad (2.49)$$

$$D_G = \frac{4A_G}{S_G + S_i} \quad (2.50)$$

Οι παράμετροι C_G , C_L , n και m παίρνουν τις εξής τιμές:

$$C_G = C_L = 0.046, n = m = 0.2 \text{ για τυρβώδη ροή}$$

$$C_G = C_L = 16, n = m = 1 \text{ για στρωτή ροή}$$

Η επιλογή των παραπάνω συντελεστών βασίζεται στον αριθμό Reynolds, ο οποίος υπολογίζεται με βάση την πραγματική ταχύτητα (και όχι την φαινομενική) και την υδραυλική διάμετρο κάθε φάσης.

Στην συνέχεια αδιαστατοποιείται η εξίσωση (2.46) ως εξής:

$$X^2 \left[(\tilde{u}_L \tilde{D}_L)^{-n} \tilde{u}_L^2 \frac{\tilde{S}_L}{\tilde{A}_L} \right] - \left[(\tilde{u}_G \tilde{D}_G)^{-m} \tilde{u}_G^2 \left(\frac{\tilde{S}_G}{\tilde{A}_G} + \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{A}_L} + \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{A}_G} \right) \right] - 4Y = 0 \quad (2.51)$$

Όπου,

$$X^2 = \frac{\frac{4C_L}{D} \left(\frac{D_L u_L^s}{\nu_L} \right)^{-n} \frac{\rho_L u_L^{s2}}{2}}{\frac{4C_G}{D} \left(\frac{D_G u_G^s}{\nu_G} \right)^{-m} \frac{\rho_G u_G^{s2}}{2}} = \frac{|(dP/dx)_L^s|}{|(dP/dx)_G^s|} \quad (2.52)$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G)gsina}{\frac{4C_G}{D} \left(\frac{D_G u_G^s}{\nu_G}\right)^{-m} \frac{\rho_G u_G^s}{2}} = \frac{(\rho_L - \rho_G)gsina}{|(dP/dx)_G^s|} \quad (2.53)$$

Η παράμετρος X είναι γνωστή και ως Lokchart-Martinelli number και μπορεί να υπολογιστεί απευθείας γνωρίζοντας την γεωμετρία του αγωγού και τις ιδιότητες και παροχές των ρευστών. Η παράμετρος Y είναι μηδέν για οριζόντιους αγωγούς και παριστάνει τον λόγο της δύναμης της βαρύτητας προς την πτώση πίεσης στην αέρια φάση.

Όλες οι άλλες αδιάστατες παράμετροι εξαρτώνται από τον λόγο του ύψους της υγρής στοιβάδας προς την διάμετρο του αγωγού, δηλαδή:

$$\tilde{h}_L = \frac{h_L}{D} \quad (2.54)$$

Και οι υπόλοιπες γεωμετρικές παράμετροι γράφονται:

$$\tilde{A}_L = 0.25 \left[\pi - \cos^{-1}(2\tilde{h}_L - 1) + (2\tilde{h}_L - 1) \sqrt{1 - (2\tilde{h}_L - 1)^2} \right] \quad (2.55)$$

$$\tilde{A}_G = 0.25 \left[\cos^{-1}(2\tilde{h}_L - 1) + (2\tilde{h}_L - 1) \sqrt{1 - (2\tilde{h}_L - 1)^2} \right] \quad (2.56)$$

$$\tilde{S}_L = \pi - \cos^{-1}(2\tilde{h}_L - 1) \quad (2.57)$$

$$\tilde{S}_G = \cos^{-1}(2\tilde{h}_L - 1) \quad (2.58)$$

$$\tilde{S}_i = \sqrt{1 - (2\tilde{h}_L - 1)^2} \quad (2.59)$$

$$\tilde{u}_L = \frac{\tilde{A}}{\tilde{A}_L} \quad \tilde{u}_G = \frac{\tilde{A}}{\tilde{A}_G} \quad (2.60)$$

Μετάπτωση μεταξύ διαστρωματωμένης ροής και διαλείπουσας ή δακτυλιοειδούς ροής:

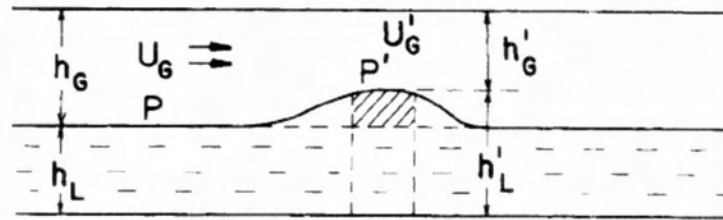
Θεωρούμε μια διαστρωματωμένη με κυματισμούς ροή στην οποία αυξάνεται η παροχή της αέριας φάσης. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης και σε μείωση της πίεσης πάνω από το κύμα, εξαιτίας του φαινομένου Bernoulli, η οποία τείνει να μεγαλώσει το κύμα. Ενώ η δύναμη της βαρύτητας τείνει να μικρώνει το κύμα. Οι Taitel and Dukler βασισμένοι στην θεωρία Kelvin-Helmholtz που θέτει τα κριτήρια ευστάθιας ξεκίνησαν από την σχέση:

$$u_G > \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)h_G}{\rho_G} \right]^{1/2} \quad (2.61)$$

Όπου,

h_G είναι η απόσταση της διεπιφάνειας υγρού-αερίου από το άνω άκρο του αγωγού.

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται μια αστάθεια στην διεπιφάνεια υγρού-αερίου.



Σχήμα 2.8 Αστάθεια μοναχικού κύματος, Taitel & Dukler (1976)

Και θεωρώντας πως η ταχύτητα του κύματος δεν είναι σημαντική, η συνθήκη για την ανάπτυξη του κύματος γίνεται:

$$P - P' > (h_G - h_G')(\rho_L - \rho_G)g \quad (2.62)$$

Με

$$P - P' = \frac{1}{2} \rho_G (u_G'^2 - u_G^2) \quad (2.63)$$

Και το κριτήριο αστάθειας γράφεται:

$$u_G > C_1 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)h_G}{\rho_G} \right]^{1/2} \quad (2.64)$$

Όπου το C_1 είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από το μέγεθος του κύματος:

$$C_1 = \left[\frac{2}{\frac{h_G}{h_G'} \left(\frac{h_G}{h_G'} + 1 \right)} \right]^{1/2} \quad (2.65)$$

Αν το μέγεθος της διαταραχής είναι μεγάλο, τότε:

$$\frac{h_G}{h_G'} \rightarrow 1, \quad C_1 \rightarrow 1 \quad (2.66)$$

Και πιο συγκεκριμένα για κεκλιμένο αγωγό κυκλικής διατομής καταλήγουμε στην:

$$u_G > \left[\frac{2(\rho_L - \rho_G)g \cos \alpha (h_L - h_L')}{\rho_G} \frac{A_G'^2}{A_G^2 - A_G'^2} \right]^{1/2} \quad (2.67)$$

Στη συνέχεια με ανάπτυγμα Taylor του A'_G γύρω από το A_G το κριτήριο γράφεται:

$$u_G > C_2 \left[\frac{(\rho_L - \rho_G) g \cos \alpha A_G}{\rho_G d A_L / d h_L} \right]^{1/2} \quad (2.68)$$

Όπου,

$$C_2 = 1 - \frac{h_L}{D} = 1 - \tilde{h}_L \quad (2.69)$$

Και σε αδιάστατη μορφή το κριτήριο γράφεται:

$$F^2 \left[\frac{1}{C_2^2} \frac{\tilde{u}_G d\tilde{A}_L / d\tilde{h}_L}{\tilde{A}_G} \right] \geq 1 \quad (2.70)$$

όπου,

$$F = \frac{\sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_G}} \frac{u_G^s}{\sqrt{Dg \cos \alpha}}}{\sqrt{\rho_L - \rho_G}} \quad (2.71)$$

και

$$\frac{d\tilde{A}_L}{d\tilde{h}_L} = \sqrt{1 - (2\tilde{h}_L - 1)^2} \quad (2.72)$$

Μετάπτωση μεταξύ διαλείπουσας και δακτυλιοειδούς ροής:

Σύμφωνα με το κριτήριο (2.74) καθώς ένα κύμα μεγαλώνει δύο πράγματα μπορούν να συμβούν ή θα γίνει μετάπτωση στην διαλείπουσα ροή ή στην δακτυλιοειδή. Αποδεικνύεται πως αυτό εξαρτάται από το λόγο h_L/D . Πιο συγκεκριμένα όταν $h_L/D > 0.5$ γίνεται μετάπτωση στην διαλείπουσα ροή, ενώ όταν $h_L/D < 0.5$ γίνεται μετάπτωση στην δακτυλιοειδή ροή. Η περίπτωση που $h_L/D = 0.5$ είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, καθώς για $X=1.6$ ορίζεται όριο μετάπτωσης σε δύο περιοχές. Για $X < 1.6$ ορίζει μετάπτωση από διαστρωματωμένη στην δακτυλιοειδή ροή και για $X > 1.6$ ορίζει μετάπτωση από διαστρωματωμένη στην διαλείπουσα.

Μετάπτωση μεταξύ στρωτής διαστρωματωμένης και διαστρωμένης με κυματισμούς:

Πρόκειται επί της ουσίας για δύο υποπεριοχές της διαστρωματωμένης ροής, με την δεύτερη να προκαλείται με αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης. Η αλήθεια είναι πως η γένεση ενός κύματος είναι πολύπλοκη και όχι απόλυτα κατανοητή, αλλά θεωρείται πως προκαλείται όταν η πίεση και η διατμητική τάση ξεπεράσουν τις δυνάμεις του ιξώδους. Οι Taitel & Dukler βασισμένοι σε παλαιότερες εργασίες θεώρησαν πως η συνθήκη σχηματισμού ενός κύματος είναι:

$$(u_G - c)^2 > \frac{4v_L g(\rho_L - \rho_G)}{s \rho_G} \quad (2.73)$$

Όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος και γενικά αποδεικνύεται ότι $u_G \gg c$, ενώ για λόγους απλοποίησης θεωρείται πως $u_L = c$. Τέλος, οι Taitel & Dukler θεώρησαν πως $s=0.01$.

Το τελευταίο κριτήριο γράφεται:

$$u_G \geq \left[\frac{4v_L(\rho_L - \rho_G)g \cos a}{s \rho_G u_L} \right]^{1/2} \quad (2.74)$$

Και σε αδιάστατη μορφή:

$$K \geq \frac{2}{\sqrt{\tilde{u}_L \tilde{u}_G \sqrt{s}}} \quad (2.75)$$

όπου,

$$K^2 = F^2 Re_L^s = \frac{\rho_G u_G^s}{(\rho_L - \rho_G) D g \cos a} \frac{D u_L^s}{v_L} \quad (2.76)$$

Μετάπτωση μεταξύ διαλείπουσας και ροής με φυσαλίδες:

Αυτή η μετάπτωση συμβαίνει σε υψηλές μαζικές παροχές της υγρής φάσης. Καθώς αυξάνει η ταχύτητα του υγρού τείνει να καλύψει όλη τη διατομή του αγωγού αφήνοντας την υγρή φάση να αναμειχθεί σε όλη την έκταση της υγρής. Η ιδέα του κριτηρίου της μετάπτωσης είναι πως μετάπτωση σε ροή με φυσαλίδες θα γίνει όταν η τύρβη είναι αρκετά μεγάλη και υπερνικήσει την δύναμη της άνωσης που τείνει να μαζέψει την αέρια φάση στην κορυφή του αγωγού.

Η δύναμη της άνωσης ορίζεται από την σχέση:

$$F_B = g \cos \alpha (\rho_L - \rho_G) A_G \quad (2.77)$$

Και η δύναμη που προκαλείται από την τύρβη ορίζεται:

$$F_T = \frac{1}{2} \rho_L \bar{u}'^2 S_i \quad (2.78)$$

Όπου,

\bar{u}' είναι η ακτινική ταχύτητα της ροής της οποίας η τετραγωνική ρίζα είναι ίση με την ταχύτητα τριβής.

$$\bar{u}'^2 = u_* = u_L \left(\frac{f_L}{2} \right)^{1/2} \quad (2.79)$$

Η μετάπτωση γίνεται όταν:

$$F_T \geq F_B \Rightarrow$$

$$u_L \geq \left[\frac{4A_G}{S_i} \frac{g \cos \alpha}{f_L} \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \right]^{1/2} \quad (2.80)$$

Και σε αδιάστατη μορφή:

$$T^2 \geq \left[\frac{8\tilde{A}_G}{\tilde{S}_i \tilde{u}_L^2 (\tilde{u}_L \tilde{D}_L)^{-n}} \right] \quad (2.81)$$

Όπου,

$$T = \left[\frac{4C_L \left(\frac{u_L^s D}{\nu_L} \right)^{-n} \frac{\rho_L u_L^s}{2}}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \alpha} \right]^{1/2} = \left[\frac{|(dP/dx)_L^s|}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \alpha} \right]^{1/2} \quad (2.82)$$

Έτσι η παράμετρος T μπορεί να θεωρηθεί ως ο λόγος της τύρβης προς την δύναμη του βαρύτητας.

2.3. Διφασική Ροή σε Οριζόντιο Αγωγό Μικρής Διαμέτρου

Στην κλίμακα των χιλιοστών ή και λιγότερο έχουν μελετηθεί εκτενώς μονοφασικές ροές, αλλά όπως και στους συμβατικούς αγωγούς η διφασική ροή διαφέρει έντονα. Τα τελευταία 15-20 χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην μελέτη της διφασικής ροής σε αυτή τη κλίμακα με σημαντικά μέχρι στιγμής αποτελέσματα. Αποδεικνύεται, κυρίως από πειραματικά αποτελέσματα, πως τα καθεστώτα ροής αλλάζουν σημαντικά. Τα κυριότερα καθεστώτα ροής είναι η δακτυλιοειδής και η διαλείπουσα, ενώ η διαστρωματωμένη δεν συναντάται. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια ανασκόπηση στα κριτήρια μετάβασης από τους συμβατικούς αγωγούς στους «micro» και «mini» αγωγούς καθώς και της περιγραφής των καθεστώτων που συναντώνται σε αυτή την κλίμακα.

2.3.1. Κριτήρια Μετάβασης από Συμβατικό σε Μίνι και Μικρο Αγωγό

Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν προκύψει για αγωγούς 3 mm-20 mm και δεν είναι όμως αποδεκτά για αγωγούς μικρής διαμέτρου. Το ζητούμενο στις μέρες μας είναι να διαμορφωθεί ένα κριτήριο με το οποίο θα είναι ξεκάθαρο μέχρι ποια ελάχιστη διάμετρο θα είναι αποδεκτά τα παραπάνω μοντέλα

Μέχρι και σήμερα δεν υπάρχει τέτοιο κριτήριο, που να είναι σαφές και κοινά αποδεκτό, για την μετάβαση από τους συμβατικούς αγωγούς στους μίνι ή και τους μικρο αγωγούς. Ωστόσο στην βιβλιογραφία απαντώνται διάφορα κριτήρια, τα οποία συζητούνται παρακάτω.

Μια φαινομενολογική προσέγγιση της διφασικής ροής σε αυτή την κλίμακα δείχνει πως κάποια χαρακτηριστικά της ροής (θερμικά και ροϊκά) μπορεί να γίνονται δευτερεύουσας σημασίας. Αυτό δεν σημαίνει πως υπάρχει μια δραματική αλλαγή στην ροή, αλλά υπάρχουν διαφορές που γίνονται σταδιακά και συναρτήσσει της διαμέτρου του αγωγού. Επιπλέον, πολλές από τις βασικές αρχές είναι αληθείς και στις δύο κλίμακες, αλλά οι μέθοδοι πρόβλεψης των καθεστώτων δεν δίνουν ασφαλή αποτελέσματα όταν γίνεται επέκταση από την μακρο-κλίμακα στην μικρο- ή μίνι-κλίμακα. Η δυνατότητα διάκρισης των ορίων των μοντέλων δεν έχει μόνο ερευνητικό ενδιαφέρον, αλλά και προφανώς πρακτικό για τις εφαρμογές της διφασικής ροής. Οι πρώτοι που προσπάθησαν να εισαγάγουν ένα κριτήριο κατάταξης των αγωγών είναι οι Mehendale & Jacobi (2000). Η διάκριση των αγωγών γίνεται ως εξής:

- Μικροκλίμακα: $1 \mu m \leq D \leq 100 \mu m$
- Μεσοκλίμακα: $100 \mu m \leq D \leq 1 mm$
- Compact: $1 mm \leq D \leq 6 mm$
- Μακροκλίμακα: $D \geq 6 mm$

Πιο πρόσφατα, οι Kandlikar & Grande (2003) πρότειναν την εξής ταξινόμηση των αγωγών:

- Νάνο-αγωγός: $D < 10 \mu m$
- Μίκρο-αγωγός: $10 \mu m \leq D \leq 200 \mu m$
- Μίνι-αγωγός: $200 \mu m < D \leq 3 mm$
- Συμβατικός αγωγός: $D > 3 mm$

Τα παραπάνω κριτήρια είναι η πρώτη προσπάθεια να διαχωριστούν οι μεγάλοι αγωγοί από τους μικρούς, για τους οποίους τα πειραματικά αποτελέσματα είναι διαφορετικά. Ωστόσο, αυτά τα κριτήρια υστερούν, διότι βασίζονται μόνο στην διάμετρο του αγωγού και δεν λαμβάνουν υπόψη τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών. Πρέπει να τονιστεί ότι στην μικροκλίμακα η βαρύτητα δεν παίζει σημαντικό ρόλο αλλά η επιφανειακή τάση, κάτι που συνέβαινε αντίστροφα στην μακρο-κλίμακα. Μια ακόμη σημαντική διαφορά είναι πως σε mini-αγωγούς ο αριθμός Reynolds είναι μικρός και κατά συνέπεια η ροή είναι στρωτή.

Στην προσπάθεια να δοθεί μια ποσοτική σύγκριση της βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης εισήχθη ο αριθμός Bond, Bd , ή αριθμός Eötvös, και ορίζεται ως ο λόγος της βαρύτητας προς την επιφανειακή τάση για ένα αγωγό με διάμετρο d_i .

$$Bd = \frac{g(\rho_L - \rho_G)d_i^2}{\sigma} \quad (2.83)$$

Οι Kew & Cornwell (1997) βασισμένοι σε πειραματικά αποτελέσματα πρότειναν ως κριτήριο μετάβασης από την μακρο-κλίμακα στην μικρο-κλίμακα την διάμετρο για την οποία $Bd=4$. Σύμφωνα με τους προηγούμενους για διαμέτρους μικρότερες από την:

$$d_{th} = 2 \left(\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right)^{1/2} \quad (2.84)$$

η ροή ανήκει στην κλίμακα των μm . Αυτό είναι προφανώς το πρώτο κριτήριο για ροή στην οποία το μέγεθος της φυσαλίδας είναι περιορισμένο από την διάμετρο του αγωγού. Βέβαια, σαν κριτήριο δεν λαμβάνει υπόψη του τις φαινομενικές ταχύτητες, την διάτμηση μεταξύ των φάσεων, αλλά και των φάσεων με τα τοιχώματα του σωλήνα.

Στην πραγματικότητα οι Kew & Cornwell πρότειναν τον αριθμό Co , που ορίζεται ως εξής:

$$Co = \left(\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)d_i^2} \right)^{1/2} \quad (2.85)$$

Και συγκρινόμενος με τον αριθμό Bond είναι:

$$Co = \frac{\sqrt{Bd}}{Bd} \quad (2.86)$$

Επίσης παρατήρησαν ότι όταν $Co > 0.5$ τα χαρακτηριστικά της ροής ήταν εντελώς διαφορετικά από αυτά σε αγωγούς μεγάλης διαμέτρου.

Μετέπειτα οι Kawaji & Chung (2003) με βάση την μέχρι τότε βιβλιογραφία και πειραματικά αποτελέσματα όρισαν ως κριτήριο μετάβασης:

$$(2.87)$$

$$Bd = \frac{g(\rho_L - \rho_G)d_i^2}{\sigma} \ll 4 \quad (\alpha)$$

$$Ca_L = \frac{\mu_L U_{LS}}{\sigma} \ll 1 \quad (\beta)$$

$$We_{SL} = \frac{\rho_L U_{LS}^2 d_i}{\sigma} \ll 1 \quad (\gamma)$$

$$We_{SG} = \frac{\rho_G U_{GS}^2 d_i}{\sigma} \ll 1 \quad (\delta)$$

$$Re_{LS} = \frac{\rho_L U_{LS} d_i}{\mu_L} < 2000 \quad (\epsilon)$$

$$Re_{GS} = \frac{\rho_G U_{GS} d_i}{\mu_G} < 2000 \quad (\sigma\tau)$$

Άλλη μια σημαντική εργασία στην προσπάθεια διαχωρισμού των αγωγών μεγάλης διαμέτρου από τους mini-αγωγούς είναι αυτή των Li & Wang (2003). Οι προηγούμενοι έθεσαν τον αριθμό Bond ίσο με 0.05 (το οποίο ορίζει συμμετρικό φιλμ στην υγρή φάση) και υπολόγισαν μια κρίσιμη διάμετρο η οποία δίνεται από την σχέση:

$$d_{cr1} = 0.224 \left[\frac{\sigma}{(\rho_L - \rho_G)g} \right]^{1/2} \quad (2.88)$$

Ενώ για $Bo=1.212$, το οποίο ορίζει μετάπτωση στην διαστρωματωμένη ροή, υπολόγισαν ακόμη μία κρίσιμη διάμετρο:

$$d_{cr2} = 1.75 \left[\frac{\sigma}{(\rho_L - \rho_G)g} \right]^{1/2} \quad (2.89)$$

Με βάση αυτές τις δύο κρίσιμες διαμέτρους όρισαν το εξής κριτήριο:

- $d_{cr1} \leq D \leq d_{cr2}$: το βάρος και η επιφανειακή τάση είναι δυνάμεις συγκρίσιμες και τα καθεστώτα ροής που ανιχνεύθηκαν είναι: δακτυλιοειδής, ασύμμετρη δακτυλιοειδής, και ροή με φυσαλίδες
- $D < d_{cr1}$: το βάρος μπορεί να αγνοηθεί και τα καθεστώτα που ανιχνεύθηκαν είναι: δακτυλιοειδής και ροή με φυσαλίδες.
- $D > d_{cr2}$: τα καθεστώτα ροής είναι όμοια με αυτά που συζητήθηκαν για αγωγούς μεγάλης διαμέτρου, με την διαφορά πως καθώς μειώνεται η διάμετρος του αγωγού, η επιφανειακή τάση παίζει όλο και πιο σημαντικό ρόλο.

Πιο πρόσφατα, οι Ullman & Brauner (2006) συνεχίζοντας προηγούμενη εργασία των Brauner & Moalem-Maron (1992) και ορίζοντας τον αριθμό Eötvös ως εξής:

$$Eo = \frac{g(\rho_L - \rho_G)d_i^2}{8\sigma} \quad (2.90)$$

πρότειναν ως κριτήριο μετάβασης το

$$Eo < 0.2 \quad (2.91)$$

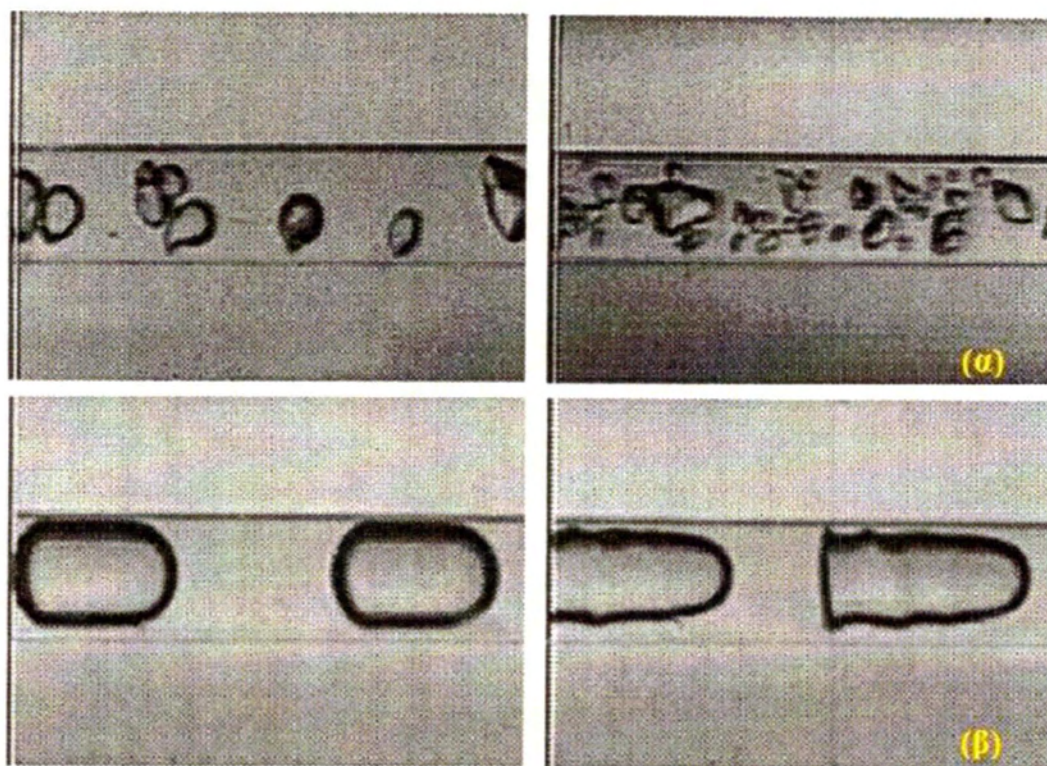
Και εύκολα μπορεί να δει κάποιος ότι:

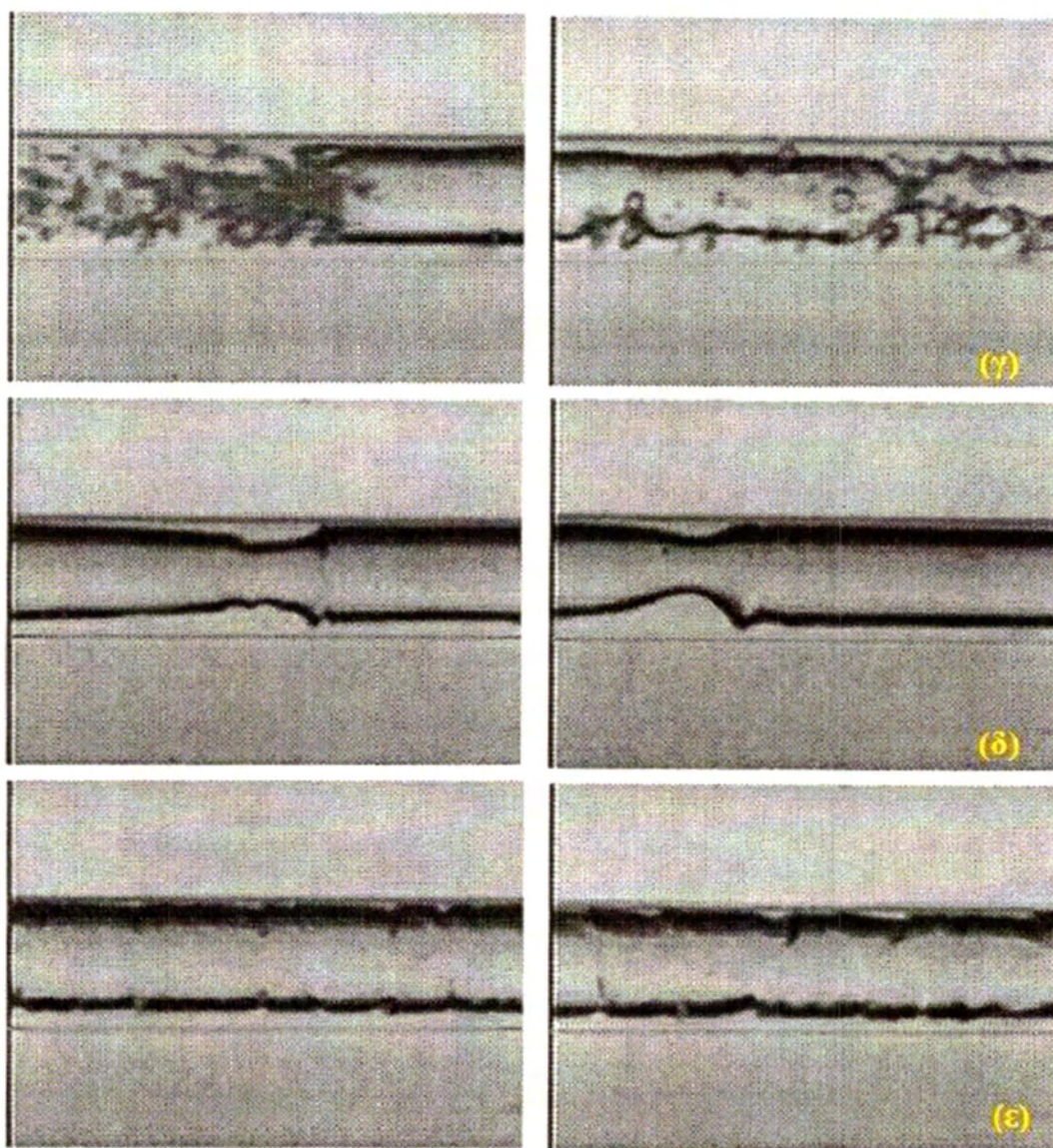
$$Eo = \frac{Bd}{8} \quad (2.92)$$

Το κριτήριο που προτάθηκε από τους Ullman & Brauner βασίστηκε από ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Triplett et al. (1999) για το σύστημα αέρας-νερό σε αγωγό 1.1 mm ($Eo=0.021$). Ένα από τα σημαντικά συμπεράσματα των Ullman & Brauner είναι ότι ο αριθμός Eötvös παίζει σημαντικό ρόλο στην περιγραφή της διφασικής ροής σε mini-αγωγούς.

2.3.2. Καθεστώτα Ροής

Η πρώτη εργασία που έγινε για τον εντοπισμό καθεστώτων ροής σε mini-αγωγούς είναι αυτή των Suo & Griffith (1964). Στην πειραματική τους εργασία μελέτησαν τριχοειδής αγωγούς για το σύστημα νερό-αέρας, νερό-άζωτο κ.α. στην οποία εντόπισαν διαλείπουσα και δακτυλιοειδή ροή. Οι επόμενες εργασίες έκαναν την εμφάνιση τους τα τελευταία 20 χρόνια. Μια πρόσφατη πειραματική εργασία είναι αυτή των Triplett et al (1999). Στην εργασία τους μελέτησαν αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 1.1 mm και 1.45 mm για το σύστημα νερού-αέρα και εντόπισαν ροή με φυσαλίδες, ανάμεικτη, διαλείπουσα, δακτυλιοειδή-διαλείπουσα και δακτυλιοειδή. Στο Σχήμα 2.9 φαίνονται ορισμένες από τις εικόνες που αποτυπώνουν τα πειραματικά αποτελέσματα των Triplett et al.

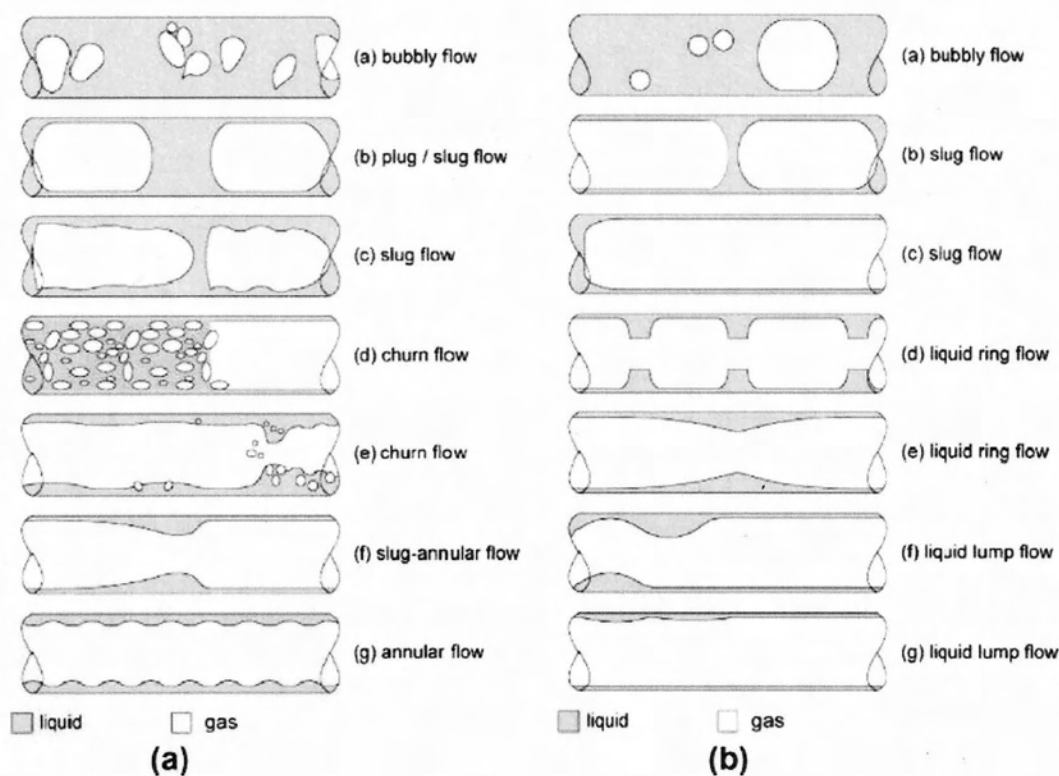




Σχήμα 2.9 Φωτογραφίες των καθεστώτων ροής για αγωγό 1.1 mm, (α) ροή με φυσαλίδες, (β) διαλείπουσα, (γ) ανάμεικτη, (δ) διαλείπουσα-δακτυλιοειδής, (ε) δακτυλιοειδής, Tripleet et al. (1999)

Επίσης οι Seriwana et al (2001) μελέτησαν πειραματικά το σύστημα νερού-αέρα σε αγωγούς κυκλικής διατομής και εσωτερικής διαμέτρου 20, 25, 100 μm και το σύστημα ατμός-νερό σε αγωγό 50 μm . Τα καθεστώτα ροής που εντόπισαν είναι ροή με φυσαλίδες, διαλείπουσα ροή και δακτυλιοειδής ροή.

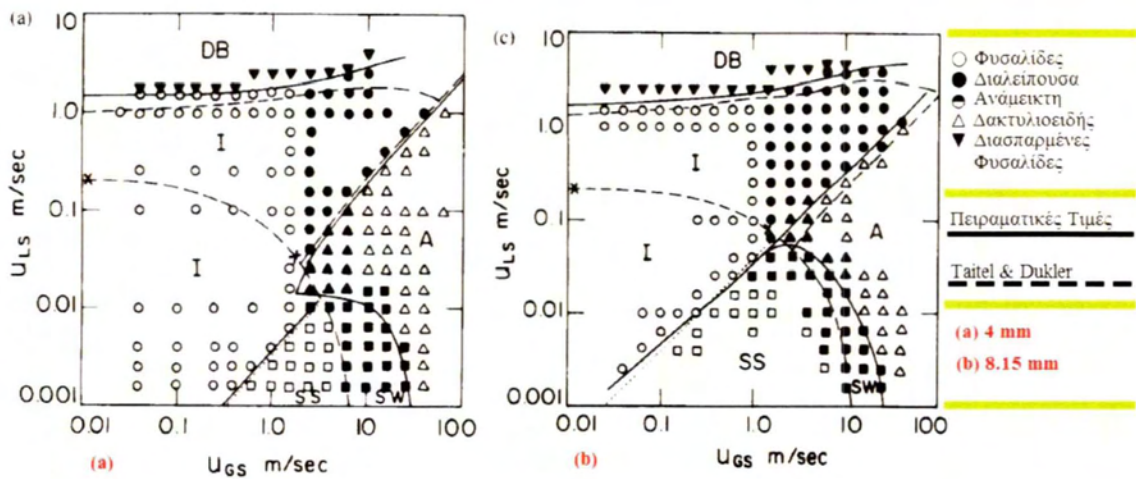
Ενώ οι Kawaji & Chung (2004) μελέτησαν πειραματικά αγωγούς κυκλικής και τετραγωνικής διατομής και υδραυλικής διαμέτρου 95 και 99 μm . Στα αποτελέσματά τους εντοπίστηκε κυρίως διαλείπουσα ροή και ημι-δακτυλιοειδής. Επίσης σε αυτή την εργασία γίνεται μια σύνοψη των καθεστώτων ροής που έχουν εντοπιστεί μέχρι στιγμής σε αγωγούς μικρής διαμέτρου, Σχήμα 2.10



Σχήμα 2.10 Σχηματική αναπαράσταση καθεστώτων ροής σε (α) mini-αγωγό και (β) micro-αγωγό, Kawaji & Chung (2004)

2.3.3. Χάρτες Καθεστώτων Ροής

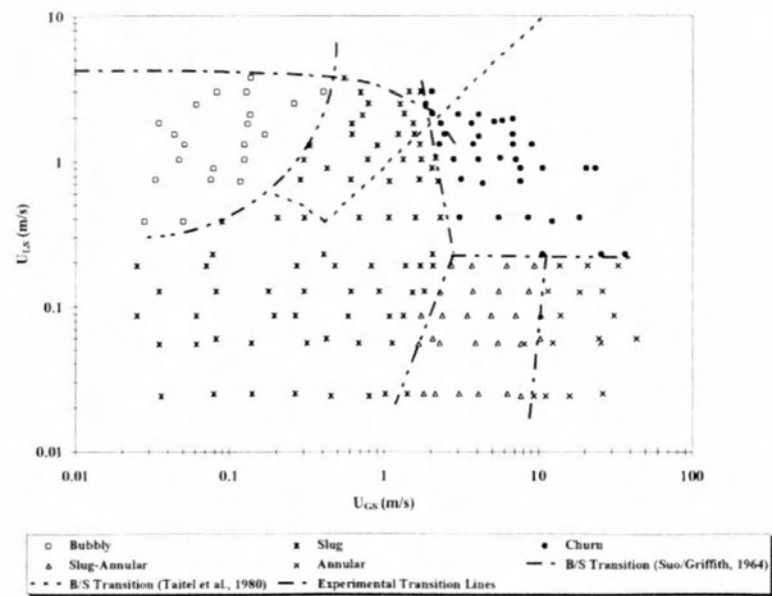
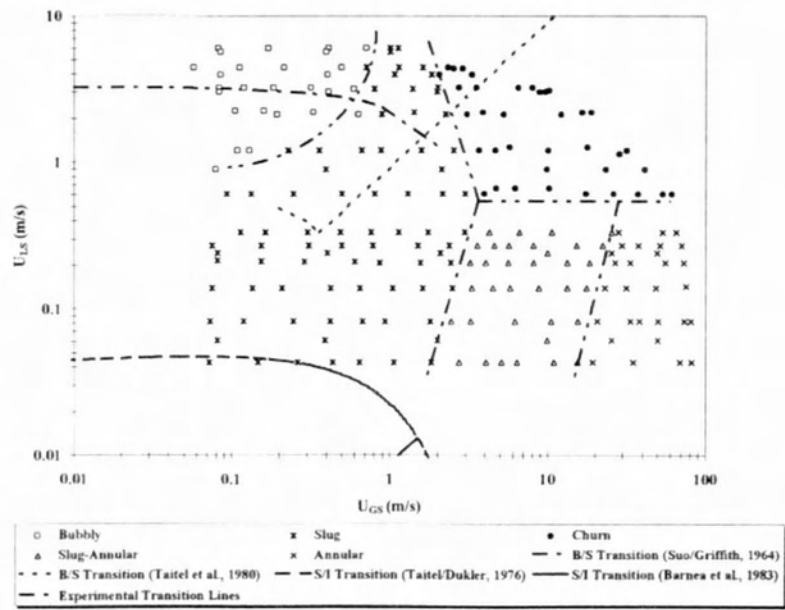
Οι Barnea et al (1983) μελέτησαν το σύστημα νερού-αέρα (0.1 Μpa και 25 °C) για αγωγούς κυκλικής διατομής και εσωτερικής διαμέτρου 4 και 8.15mm. Τα πειραματικά τους αποτελέσματα αποτυπώθηκαν σε δύο ξεχωριστούς χάρτες για την κάθε διατομή, στους οποίους επίσης απεικονίζονται τα όρια μετάπτωσης από την θεωρία Taitel & Dukler, Σχήμα 2.11 Οι συντεταγμένες του κάθε χάρτη είναι οι φαινομενικές ταχύτητες της υγρής και της αέριας φάσης.



Σχήμα 2.11 Καθεστάτα ροής σε οριζόντιο αγωγό για το σύστημα αέρας-νερό, Barnea et al. (1983)

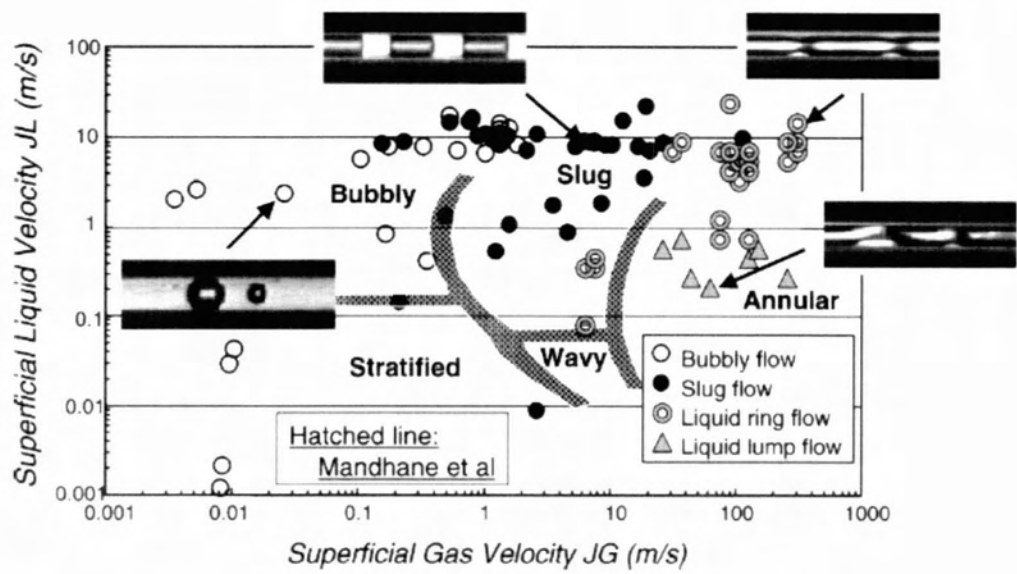
Οι Tripleet et al (1999) στην εργασία τους αποτύπωσαν τα πειραματικά τους αποτελέσματα σε αντίστοιχο χάρτη, ενδεικτικά παραθέτονται δύο από αυτούς, Σχήμα 2.11.

- Για $D=1.1$ mm $\Rightarrow Eo=0.021$
- Για $D=1.45$ mm $\Rightarrow Eo=0.037$



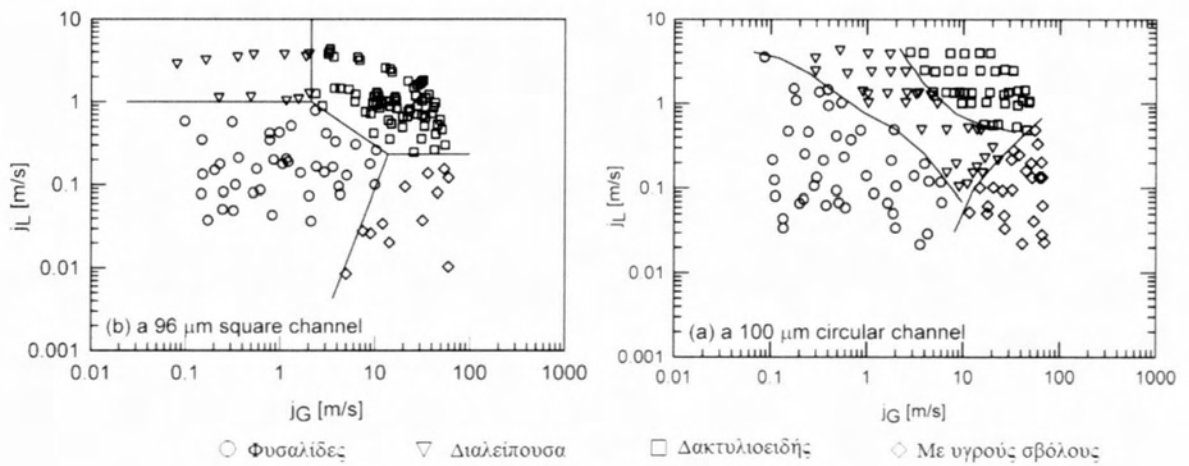
Σχήμα 2.12 Χάρτης καθεστώτων ροής για οριζόντιο αγωγό 1.1 mm (πάνω) και 1.45 mm (κάτω), Triplett et al (1999)

Αντίστοιχος χάρτης υπάρχει στην εργασία των Seriwana et al (2001) για κυκλικό αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 20 μm. Στο Σχήμα 2.13 είναι ο χάρτης των Seriwana et al, στον οποίο οι συντεταγμένες είναι οι φαινομενικές ταχύτητες των δύο φάσεων.



Σχήμα 2.12 Χάρτης καθεστώτων ροής, Seriwana et al. (2001)

Επίσης στην εργασία των Kawaji & Chung (2004) συναντώνται δύο αντίστοιχοι χάρτες για αγωγούς υδραυλικής διαμέτρου 96 και 100 μm , Σχήμα 2.13. Για την πρώτη διάμετρο η τιμή του αριθμού Εϊθνος είναι 0.000175 και για την δεύτερη διάμετρο είναι 0.000044.



Σχήμα 2.13 Χάρτης καθεστώτων ροής, Kawaji & Chung (2004)

2.3.4. Μαθηματικά Μοντέλα

Οι Ullman & Brauner (2007) επανεξετάζοντας την επίδραση της διατομής του αγωγού στις μεταπτώσεις των καθεστώτων ροής πρότειναν νέα μοντέλα, τα οποία εκφράζονται με τη βοήθεια του αριθμού Εϊτνους.

Πιο συγκεκριμένα οι Ullman & Brauner παρατήρησαν για συστήματα ροής με $Eo_D \sim 0.04$ πως η χαμηλή ταχύτητα των φυσαλίδων μπορεί να οδηγήσει σε καθεστώτα ροής όμοια με αυτά που συναντώνται σε συμβατικούς αγωγούς σε συνθήκες χαμηλής βαρύτητας. Για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων τους σύγκριναν την προσέγγιση τους με τα πειραματικά αποτελέσματα των Tripleet et al. (1999).

Ο χάρτης των Ullman & Brauner περιγράφει πέντε καθεστώτα ροής: Ροή με διασπαρμένες φυσαλίδες, ροή με φυσαλίδες, διαλείπουσα, διαλείπουσα με έντονο αερισμό και δακτυλιοειδής.

Μετάπτωση σε ροή με διασπαρμένες φυσαλίδες

Αυτή η μετάπτωση συμβαίνει όταν η συνεχής φάση είναι αρκετά τυρβώδης και ικανή να προκαλέσει φυσαλίδες στην διασπαρμένη φάση. Το μέγεθος της μεγαλύτερης φυσαλίδας, d_{max} , θα πρέπει να είναι τότε μικρότερο από μια κρίσιμη τιμή, d_{crit} . Το μέγιστο μέγεθος μιας φυσαλίδας, $d_{max,o}$, σε ροή με χαμηλή πυκνότητα των φυσαλίδων, υπολογίστηκε από την εξίσωση της ορμής που προκαλούν οι τυρβώδεις δίνες με την επιφανειακή τάση. Ενώ για μια ροή με πυκνές φυσαλίδες, το μέγιστο μέγεθος μιας φυσαλίδας, $d_{max,e}$. Η μεγαλύτερη τιμή ανάμεσα στις δύο τελευταίες ορίζει και το μέγιστο μέγεθος της φυσαλίδας για το σύστημα.

Η κρίσιμη τιμή των συγκεντρωμένων φυσαλίδων ορίστηκε ως μικρότερη τιμή των τριών ακόλουθων μεγεθών: 1^ο του μεγέθους μιας μη σφαιρικής φυσαλίδας, d_{cs} , 2^ο του μεγέθους μιας φυσαλίδας που επιπλέει εξαιτίας της άνωσης, d_{cb} , και 3^ο του μισού της διαμέτρου. Το κριτήριο μετάπτωσης συνοψίζεται ως εξής:

$$d_{max} = MAX\{d_{max,o}, d_{max,e}\} \leq d_{crit} = MIN\{d_{cs}, d_{cb}, 0.5D\} \quad (2.93)$$

Μετάπτωση από την ροή με φυσαλίδες στην διαλείπουσα

Η τιμή της φαινομενικής ταχύτητας της υγρής φάσης κατά την μετάπτωση είναι:

$$u_L = \frac{1 - (\varepsilon_G)_{crit}}{(\varepsilon_G)_{crit}} u_G \quad (2.94)$$

όπου, ε_G είναι μια κρίσιμη τιμή του κλάσματος κενού στην οποία συμβαίνει η μετάπτωση. Οι Ullmann & Brauner υπέθεσαν πως η κρίσιμη τιμή του κλάσματος κενού που ορίζει την μετάπτωση μπορεί να υπολογιστεί από γεωμετρικές παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα υπέθεσαν πως η μετάπτωση συμβαίνει όταν η φυσαλίδα γίνει ίση με το μισό της διαμέτρου του αγωγού, η οποία αντιστοιχεί σε τιμή 0.16 για το κλάσμα κενού.

Μετάπτωση από την διαστρωματωμένη στην δακτυλιοειδή ροή

Οι Ullman & Brauner πρότειναν δύο μηχανισμούς μετάπτωσης από την διαστρωματωμένη ροή στην δακτυλιοειδή:

A. Αστάθεια στην διαστρωματωμένη ροή:

Για λεπτά φιλμ της υγρής φάσης σε οριζόντιους αγωγούς, η αστάθεια συμβαίνει σε μια κρίσιμη τιμή της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης:

$$u_G \geq C_1 \left[\frac{D(\rho_L - \rho_G)g \cos \alpha + D\sigma k^2}{\rho_G} \right]^{0.5} \quad (2.95)$$

όπου k είναι ο κυματάριθμος:

$$k \approx \frac{2\pi}{D} \quad (2.96)$$

και

$$C_1 \approx 0.63 \left(\frac{h}{D} \right)^{-0.25} \quad (2.97)$$

όπου h είναι το ύψος της υγρής φάσης στην διαστρωματωμένη ροή. Είναι προφανές πως για την εφαρμογή αυτού του κριτηρίου απαιτείται η τιμή του ύψους της υγρής στοιβάδας, για δεδομένες παροχές της υγρής και της αέριας φάσης.

B. Συμπαρασυρμός υγρών σταγονιδίων:

Ένας άλλος τρόπος για την δημιουργία του υγρού δακτυλιοειδούς φιλμ είναι ο συμπαρασυρμός υγρών μαζών εξαιτίας της αδράνειας της υγρής φάσης, αφού γενικά η αέρια κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Μία κρίσιμη τιμή της σχετικής ταχύτητας των δύο φάσεων είναι:

$$\Delta u_G = u_G - u_L \geq 4.36 \left[\frac{\sigma(\rho_L - \rho_G) \cos \alpha}{\rho_G^2} \right]^{\frac{1}{4}} F(on) \quad (2.98)$$

όπου,

$$F(on) = \{1 + 1.443(N_{vd} \cos \alpha)^{0.4}\}^{0.5} \quad (2.99)$$

και

$$N_{vd} = \frac{\mu_L^4 (\rho_L - \rho_G) g}{\rho_L^2 \sigma^3} \quad (2.100)$$

Οι Ullman & Brauner περιέγραψαν τους δύο μηχανισμούς ως ανταγωνιστικούς μεταξύ τους. Για δεδομένη ταχύτητα της υγρής φάσης, u_L , ο μηχανισμός που θα επικρατήσει είναι αυτός που θα προβλέψει μικρότερη τιμή για την ταχύτητα της αέριας φάσης, u_G .

Μετάπτωση από διαλείπουσα σε δακτυλιοειδή ροή:

Οι Ullman & Brauner διαπίστωσαν πως η μετάπτωση στην δακτυλιοειδή ροή απαιτεί μια ελάχιστη τιμή στην φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης που ικανοποιεί το εξής κριτήριο:

$$u_G \geq \tilde{\varepsilon} \left[\tilde{\varepsilon} \frac{\mu_L}{\mu_G} + 2 \right] u_L \quad (2.101)$$

όπου,

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1 - \varepsilon_L^{crit}}{\varepsilon_L^{crit}} \quad (2.102)$$

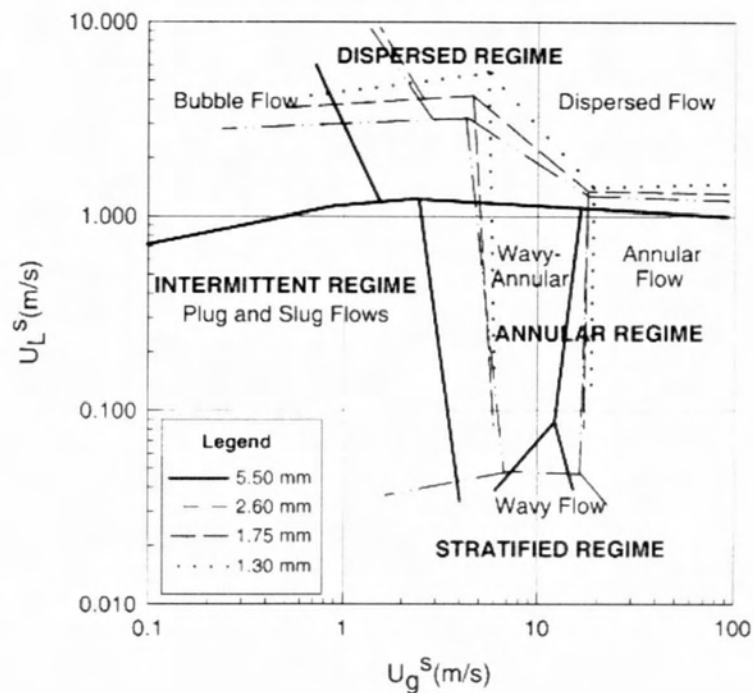
Επίσης διαπίστωσαν πως μια κρίσιμη τιμή του κλάσματος κενού είναι η 0.4 για να διατηρηθεί η δακτυλιοειδής ροή.

2.4. Επίδραση Διατομής Αγωγού στα Όρια Μετάπτωσης

Η μελέτη της επίδρασης της διατομής του αγωγού είναι από τα βασικά ερωτήματα που προσπαθεί να απαντήσει η επιστημονική κοινότητα παράλληλα με τη συνολική μελέτη της διαφασικής ροής.

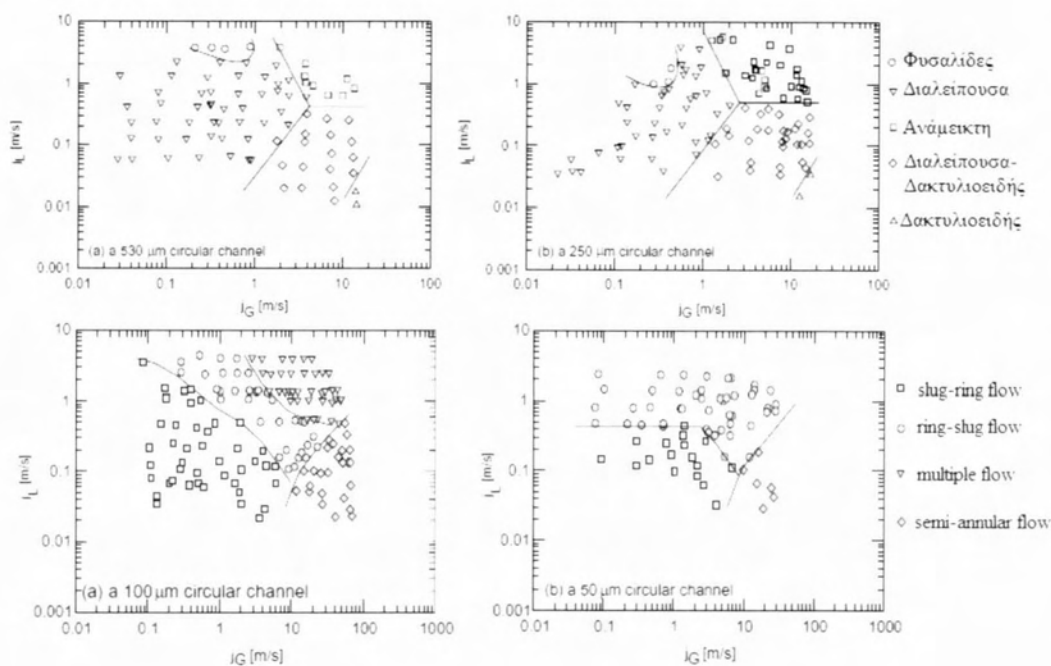
Οι πρώτες εργασίες που σύγκριναν τα χαρακτηριστικά της ροής για διαφορετικές διαμέτρους έγιναν από τους Suo & Griffith (1964) και των Barnea et al. (1983). Στις μέρες μας το ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί σε αγωγούς μικρής διαμέτρου και στο πως επιδρά η διατομή στα όρια μετάπτωσης.

Οι Coleman & Garimella (1998) μελέτησαν πειραματικά την διαφασική ροή νερού-αέρα σε κυκλικούς αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 1.30 mm, 1.75 mm, 2.60 mm και 5.50 mm. Σκοπός της εργασίας τους ήταν η συσχέτιση της διαμέτρου με τα όρια μετάπτωσης. Πιο συγκεκριμένα διαπίστωσαν πως καθώς μειώνεται η διατομή του αγωγού, η μετάπτωση από την διαλείπουσα ροή στην ροή με φυσαλίδες συμβαίνει σε όλο και υψηλότερες τιμές της φαινομενικής ταχύτητας της υγρής φάσης. Αυτό δικαιολογείται από τους ίδιους, διότι με την μείωση της διατομής η επιφανειακή τάση παίζει όλο και πιο σημαντικό ρόλο και έτσι η υγρή φάση «προσκολλάει» πιο εύκολα στην περιφέρεια του αγωγού. Η μετάπτωση από την διαλείπουσα στην δακτυλιοειδή ροή συμβαίνει σε υψηλότερες τιμές της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, καθώς η διατομή μειώνεται. Βέβαια, παρατήρησαν πως από την διάμετρο των 1.75 mm στην 1.30 mm δεν υπήρξε κάποια σημαντική μεταβολή. Μια συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων γίνεται στο Σχήμα 2.14



Σχήμα 2.14 Χάρτης καθεστώτων ροής, Coleman & Garimela (1998)

Οι Chung & Kawaji (2004) μελέτησαν πειραματικά το σύστημα αζώτου-νερού σε κυκλικούς αγωγούς διαμέτρου 530, 250, 100 και 50 μm . Ένας από τους σκοπούς της εργασίας τους ήταν να μελετήσουν τα φαινόμενα που ξεχωρίζουν τους micro-αγωγούς από τους mini-αγωγούς. Διαπίστωσαν πως για τους αγωγούς με διάμετρο 250 και 530 μm τα καθεστώτα ροής ήταν όμοια με αυτά σε αγωγούς με διάμετρο 1 mm, δηλαδή ροή με φυσαλίδες, διαλείπουσα, ανάμεικτη και δακτυλιοειδής. Αντίθετα για τους αγωγούς με διάμετρο 100 και 50 μm εντόπισαν κατ' ουσία μόνο διαλείπουσα ροή. Η απουσία των άλλων καθεστώτων ροής οφείλεται κατά τους Chung & Kawaji στην μεγάλη επίδραση του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης στην υγρή φάση. Στο Σχήμα 2.15 φαίνονται τα όρια μετάπτωσης για τους τέσσερις αγωγούς.



Σχήμα 2.15 Χάρτης καθεστώτων ροής, Chung & Kawaji (2004)

Παρατηρώντας τους αγωγούς με διάμετρο 530 και 250 μm , θα διαπιστώσουμε πως τα όρια μετάπτωσης είναι σχεδόν τα ίδια, δηλαδή η μετάπτωση στα διάφορα καθεστώτα ροής συμβαίνει στις ίδιες τιμές των φαινομενικών ταχυτήτων για τις δύο διατομές. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τους αγωγούς με διάμετρο 100 και 50 μm , παρατηρούμε επικρατεί η διαλείπουσα ροή, ενώ κάποια υποκαθεστώτα της διαλείπουσας ροής δεν συναντώνται στον αγωγό με διάμετρο 50 μm .

2.5 Τρόποι Ανίχνευσης Καθεστώτων Ροής

Η πειραματική ανίχνευση των καθεστώτων ροής και των συνόρων μετάβασης βασίζεται στα προκαθορισμένα πρότυπα ροής. Παρόλο που τα σύνορα μετάπτωσης είναι καλά ορισμένα, η ανίχνευση των καθεστώτων ροής είναι συνήθως δύσκολη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διφασική ροή είναι από τη φύση της πολύπλοκη και χαοτική, αλλά και στο γεγονός πως η μετάπτωση είναι μια σταδιακή διαδικασία. Η ανίχνευση μπορεί να γίνει με:

1. οπτική παρατήρηση
2. την αγωγιμομετρική μέθοδο
3. ακτίνες X (Röntgen)

Διφασική ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους αγωγούς μικρής διαμέτρου

Η οπτική παρατήρηση σε ένα διαφανές κομμάτι του αγωγού είναι ο πιο απλός τρόπος ανίχνευσης του καθεστώτος ροής. Βέβαια στην περίπτωση ταχύτατα εξελισσόμενων φαινομένων, όπου η απλή παρατήρηση δεν είναι αρκετή, η χρήση φωτογραφικής μεθόδου μεγάλης ταχύτητας (high speed photography) ή η φωτογράφιση αξονικής διατομής (axial view photography) είναι επιβεβλημένη. Η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που είναι αδύνατη η οπτική επαφή με το εσωτερικό του αγωγού (π.χ. αδυναμία χρήσης διαφανούς σωλήνα εξαιτίας υψηλών πιέσεων). Η μέθοδος έχει «κατηγορηθεί» ως υποκειμενική.

Μια περισσότερο αντικειμενική μέθοδος είναι η δεύτερη, η οποία είναι εφαρμόσιμη μόνο στην περίπτωση που η ροή είναι αγωγή (ή μπορεί να γίνει). Βασίζεται στη χρήση μετρητικού (probe), που όταν βρίσκεται σε επαφή με την υγρή φάση δίνει υψηλό σήμα εξόδου ενώ σε επαφή με την αέρια δίνει σχεδόν μηδενικό.

Ακόμη μια μέθοδος που προσδιορίζει αντικειμενικά τα καθεστώτα ροής είναι αυτή με ακτίνες X και προτάθηκε από τους Jones & Zuber (1975). Χρησιμοποιώντας τις ακτίνες X μέτρησαν το κλάσμα κενού και σχεδίασαν την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των μετρήσεων

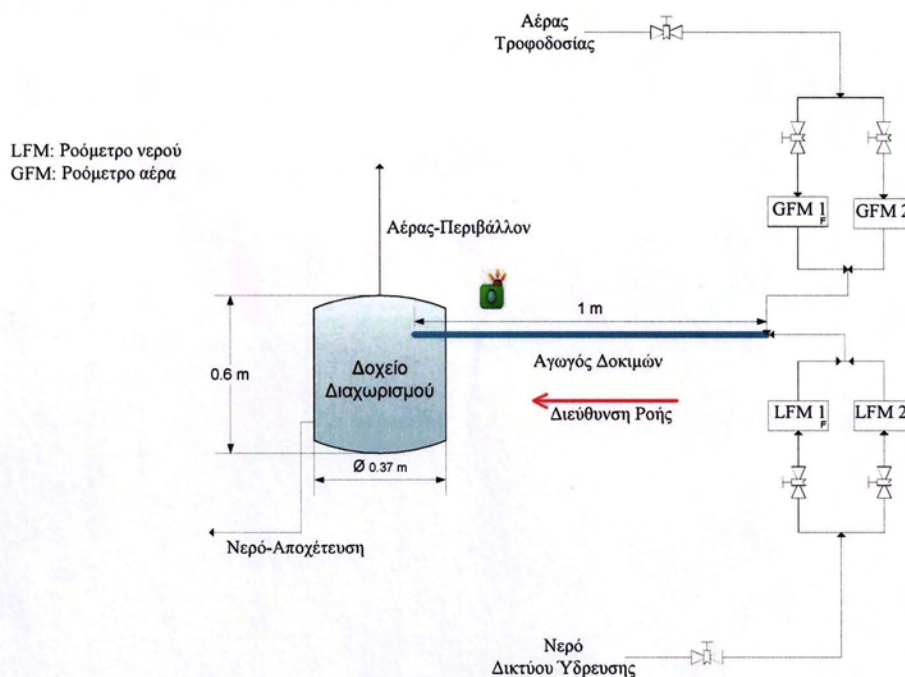
Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν διαφανείς αγωγοί που επιτρέπουν την απευθείας οπτική επαφή με την ροή.

3. Πειραματική Διάταξη

3.1. Περιγραφή των Βασικών Τμημάτων της Διάταξης

Μια απλοποιημένη αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήσαμε για την μελέτη της διφασικής ροής σε οριζόντιους αγωγούς μικρής διαμέτρου φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει τον αγωγό δοκιμών, τα ροόμετρα, τους αγωγούς εισόδου και το δοχείο διαχωρισμού.



Σχήμα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης

Αγωγός δοκιμών: Χρησιμοποιήθηκαν δύο αγωγοί κυκλικής διατομής, εσωτερικής διαμέτρου 9 και 4.8 mm και συνολικού μήκους 1 m, ο καθένας. Οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από Plexiglas και στηρίχθηκαν σε τρία σημεία, ώστε να ελαχιστοποιούνται

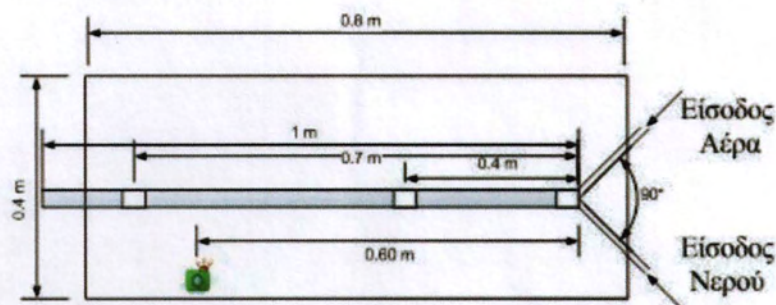
Διφασική ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους αγωγούς μικρής διαμέτρου

οι διαταραχές κατά την λειτουργία. Κατά μήκος του αγωγού διακρίνεται η περιοχή εισόδου και ανάμειξης των δύο φάσεων, η περιοχή ανάπτυξης της ροής, το τμήμα των παρατηρήσεων και η περιοχή εξόδου. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται μια κάτοψη του αγωγού. Κατά μήκος του αγωγού και σε απόσταση 0.4 m και 0.7 m φαίνονται οι στηρίξεις που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στα 0.60 m είναι το σημείο της φωτογράφισης των καθεστώτων ροής.

Ροόμετρα: Με σκοπό την κάλυψη μεγάλου εύρους των τιμών των παροχών των δύο φάσεων χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα ροόμετρα. Έτσι, για κάθε φάση χρησιμοποιήθηκαν δύο ροόμετρα, τα οποία ήταν συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους. Για τον αέρα χρησιμοποιήθηκαν δύο ροόμετρα, το πρώτο έχει εύρος τιμών 1-10,7 L/min και το δεύτερο 14-113 L/min. Αντίστοιχα, τα ροόμετρα του νερού έχουν εύρος τιμών 10-80 ml/min και 50-750 ml/min. Η βαθμονόμηση των δύο ροομέτρων της υγρής φάσης παρουσιάζεται στο Παράρτημα 2.

Αγωγοί εισόδου: Πρόκειται για δύο αγωγούς που σχηματίζουν γωνία 90° μεταξύ τους και μέσω αυτών παρέχεται το νερό και ο αέρας. Το σημείο σύνδεσής τους είναι η είσοδος του αγωγού δοκιμών.

Διαχωριστικό δοχείο: Πρόκειται για κυλινδρικό πλαστικό δοχείο διαμέτρου 370 mm και ύψους 600 mm. Σε αυτό το δοχείο καταλήγει η έξοδος του αγωγού δοκιμών. Στο πυθμένα συλλέγεται το νερό και στην κορυφή ο αέρας.



Σχήμα 3.2 Κάτοψη αγωγού δοκιμών

Όλη η διάταξη βρίσκεται στερεωμένη σε μια ξύλινη ορθογώνια πλάκα, διαστάσεων 0.8 m×0.400 m, της οποίας η οριζόντια θέση ρυθμίζεται με τέσσερις ειδικές βίδες. Το νερό εισάγεται από το δίκτυο ύδρευσης και καταλήγει στην αποχέτευση, ενώ ο αέρας λαμβάνεται από το δίκτυο τροφοδοσίας και καταλήγει στο περιβάλλον του εργαστηρίου.

Η παρατήρηση της ροής έγινε με τη βοήθεια ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής Nikon D90.

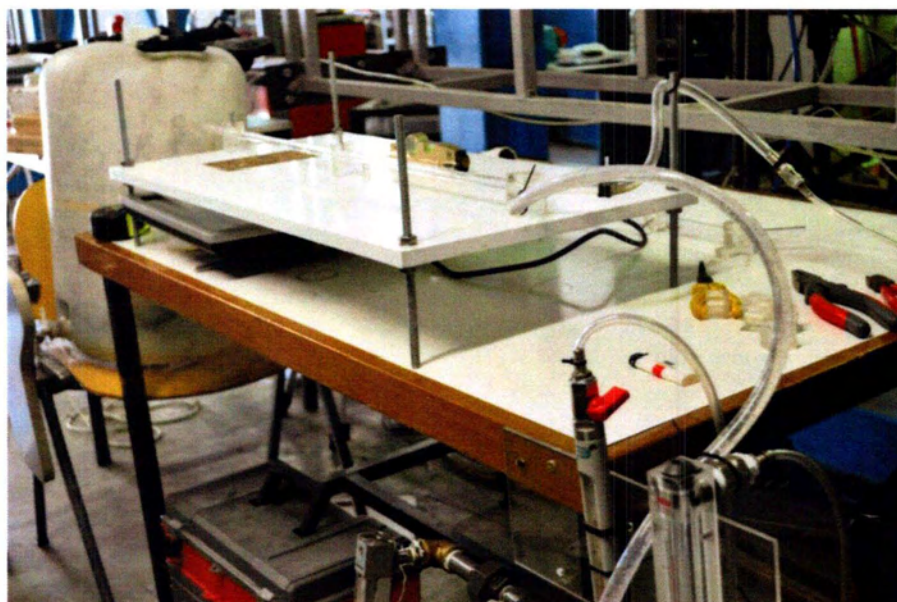
3.2. Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

Ανοίγουμε την παροχή του νερού από το δίκτυο ύδρευσης και ρυθμίζουμε στο ροόμετρο την επιθυμητή παροχή. Στη συνέχεια ανοίγουμε την παροχή του αέρα από το δίκτυο τροφοδοσίας και από το αντίστοιχο ροόμετρο της αέριας φάσης ρυθμίζουμε την επιθυμητή παροχή του αέρα.

Τα ρεύματα συναντώνται στην είσοδο του σωλήνα υπό γωνία 90° και ρέουν κατά μήκος του αγωγού δοκιμών. Με τη βοήθεια μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής φωτογραφίζουμε την ροή μετά το μέσο του αγωγού, ώστε να έχει αναπτυχθεί η ροή. Οι μετρήσεις έγιναν διατηρώντας σταθερή την παροχή του νερού και σαρώνοντας τις παροχές του αέρα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και σε άλλες τιμές της παροχής του νερού. Οι τιμές που μετρώνται καταγράφονται για την δημιουργία των αντίστοιχων χαρτών.

Οι παροχές του νερού είναι από 10 ml/min μέχρι 750 ml/min, ενώ του αέρα είναι από 1.5 ml/min μέχρι 9000 ml/min.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια εικόνα της πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο.



Σχήμα 3.3 Εικόνα της πειραματικής διάταξης από το χώρο του εργαστηρίου

4. Αποτελέσματα

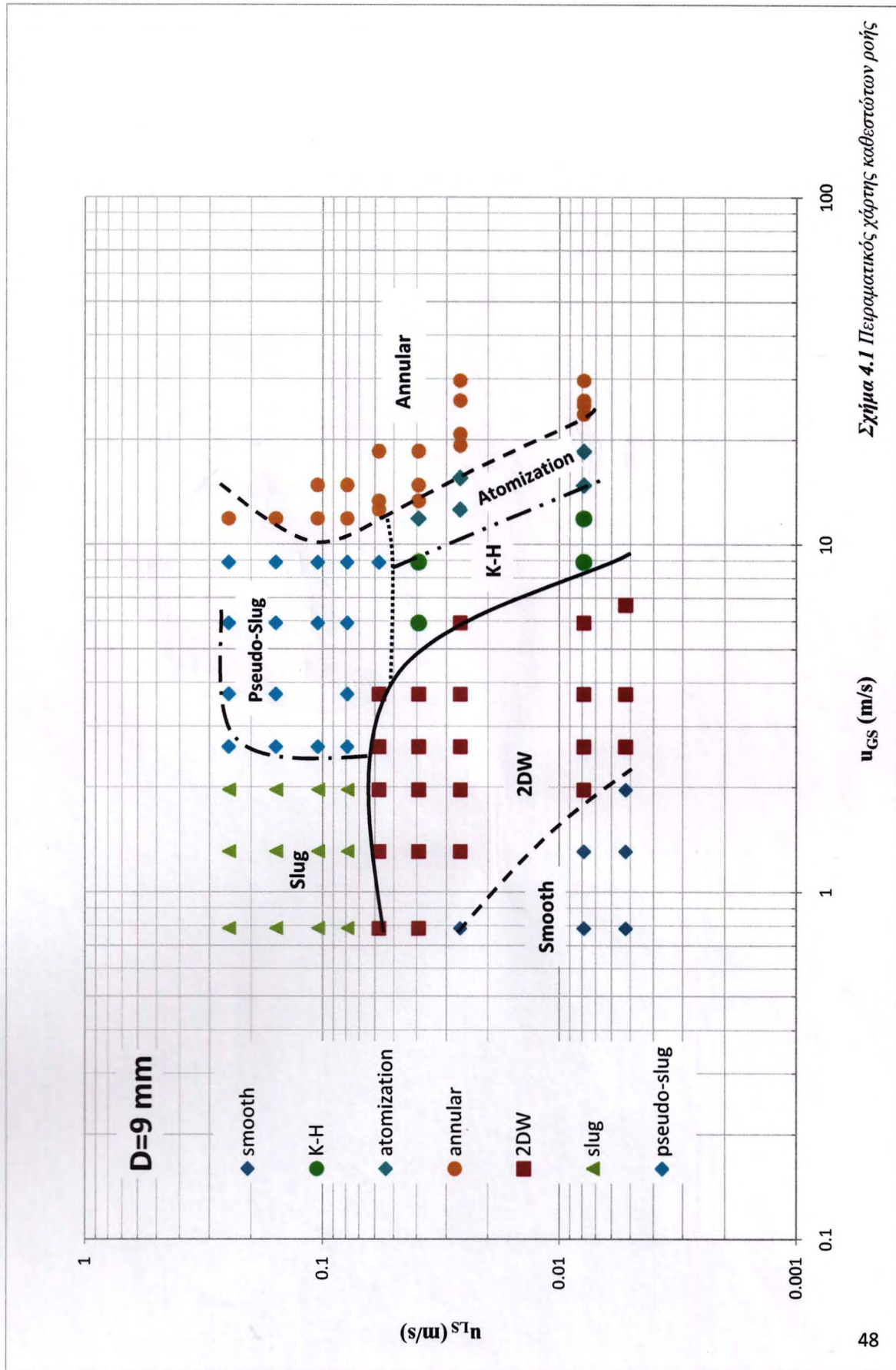
4.1 Χάρτης Καθεστώτων Ροής

Ένας από τους βασικούς στόχους της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός χάρτη καθεστώτων ροής για κάθε αγωγό του πειράματος. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν περίπου 100 συνδυασμοί ογκομετρικών παροχών για τον αγωγό των 9 mm και περίπου 60 συνδυασμοί ογκομετρικών παροχών στον αγωγό των 4.8 mm. Σε κάθε συνδυασμό παροχής φωτογραφήθηκε η ροή με σκοπό να καταγραφεί το πρότυπο ροής.

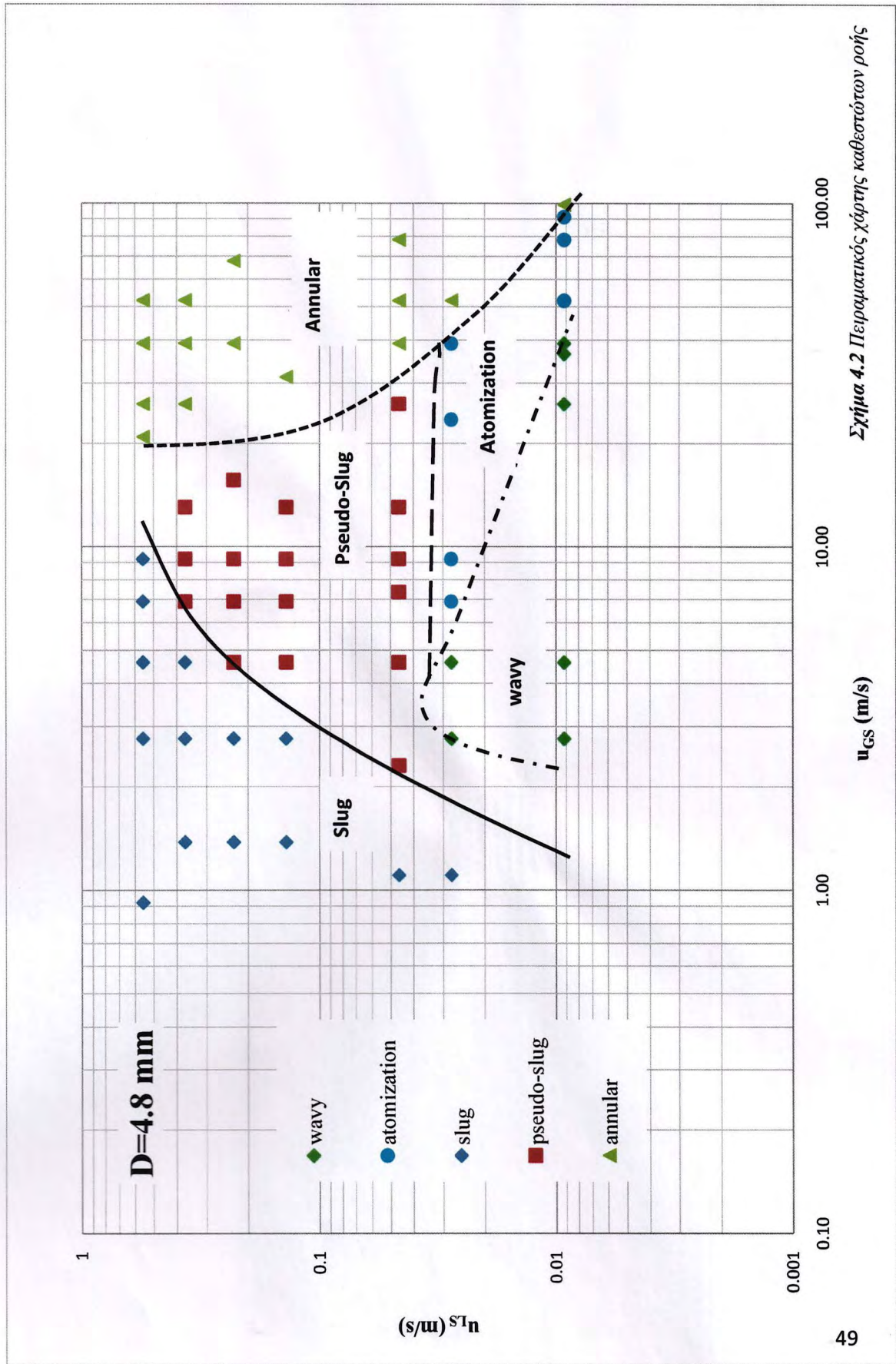
Με την βοήθεια των σχέσεων (2.9)-(2.10) και τις κατάλληλες μετατροπές των μονάδων υπολογίστηκαν οι φαινομενικές ταχύτητες κάθε φάσης. Τα ζεύγη των φαινομενικών ταχυτήτων τοποθετήθηκαν σε λογαριθμικούς άξονες για την δημιουργία του χάρτη των καθεστώτων ροής. Η οριζόντια συντεταγμένη του χάρτη είναι η φαινομενική ταχύτητα του αέρα και η κατακόρυφη είναι η φαινομενική ταχύτητα του νερού.

Πρέπει να τονιστεί πως η ανίχνευση των προτύπων ροής έγινε με οπτική παρατήρηση κάθε φωτογραφίας. Επομένως, είναι αναμενόμενο στον χάρτη να υπάρχει κάποιο υποκειμενικό στοιχείο, ιδιαίτερα για τις παροχές που οδηγούν σε μετάπτωση. Σε αυτές τις παροχές τα καθεστώτα ροής είναι υβριδικά και δεν κατατάσσονται με ένα εύκολο τρόπο σε κάποιο πρότυπο ροής. Σημαντικό ρόλο στη φωτογράφιση των καθεστώτων ροής έπαιξε και η ίδια η φωτογραφική μηχανή, καθώς στις υψηλές παροχές δεν ήταν πάντα εφικτό να καταγραφούν όλα τα χαρακτηριστικά της ροής.

Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 αναπαριστώνται οι χάρτες των καθεστώτων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για τους αγωγούς με διατομή 9 και 4.8 mm. Στο Παράρτημα 3 παρατίθεται αναλυτικός πίνακας των μετρήσεων.



Σχήμα 4.1 Πειραματικός χάρτης καθεστώτων ροής



Σχήμα 4.2 Πειραματικός χάρτης καθεστώτων ροής

$$Eo(4.8 \text{ mm}) = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (998.7 - 1.2) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.0048^2 \text{m}^2}{8 \cdot 7.28 \cdot 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}} = 0.38 > 0.2$$

$$Eo(9 \text{ mm}) = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (998.7 - 1.2) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.009^2 \text{m}^2}{8 \cdot 7.28 \cdot 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}} = 1.36 > 0.2$$

$$Eo(24 \text{ mm}) = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (998.7 - 1.2) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.024^2 \text{m}^2}{8 \cdot 7.28 \cdot 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}} = 9.7 > 0.2$$

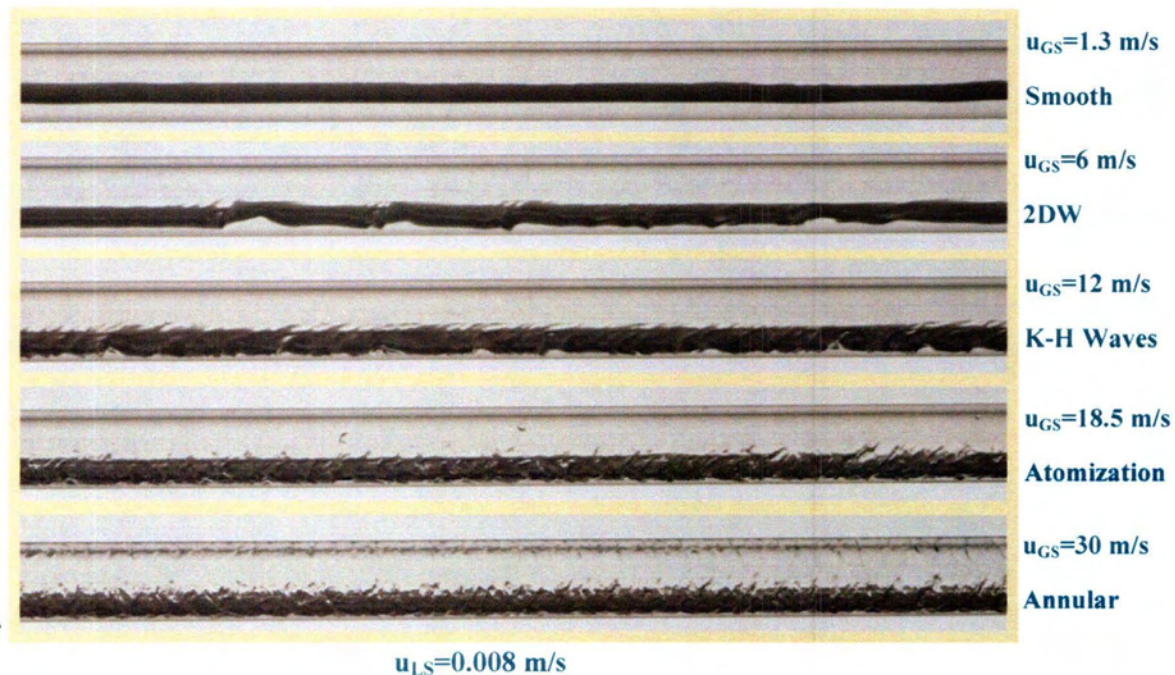
Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς, κανένας αγωγός δεν ικανοποιεί το κριτήριο (2.91) που έθεσαν η Ullman & Brauner (2006), και άρα κανείς δεν μπορεί να θεωρηθεί «mini» αγωγός. Πρέπει να σημειωθεί βέβαια πως ο μικρός αγωγός της πειραματικής διαδικασίας είναι πολύ κοντά στην τιμή του κριτηρίου.

4.2 Πρότυπα Ροής

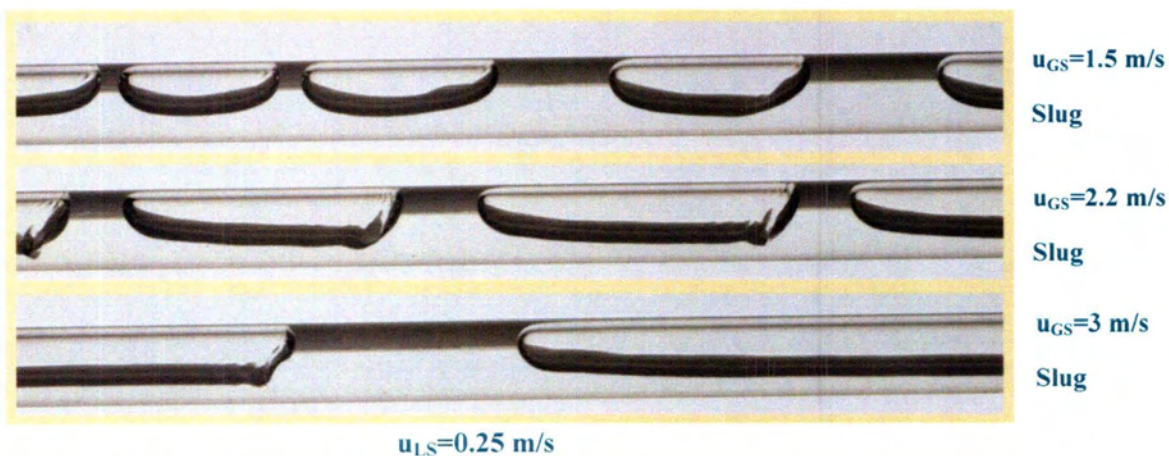
Ένας ακόμη στόχος της εργασίας είναι η λεπτομερής περιγραφή του τρόπου ανάπτυξης των καθεστώτων ροής καθώς και των χαρακτηριστικών τους που αναπτύχθηκαν στον κάθε αγωγό. Στον αγωγό των 9 mm εντοπίστηκαν τα εξής καθεστώτα ροής: λεία διαστρωματωμένη ροή, διαλείπουσα, ψευδό-διαλείπουσα, ροή με διδιάστατα κύματα, ροή με κύματα Kelvin-Helmholtz, ροή με εκνέφωση και δακτυλιοειδής ροή. Στον αγωγό των 4.8 mm δεν ήταν δυνατόν να γίνει διάκριση μεταξύ των διδιάστατων κυμάτων και των κυμάτων Kelvin-Helmholtz.

4.2.1 Καθεστώτα Ροής στον Αγωγό με Εσωτερική Διάμετρο 9 mm

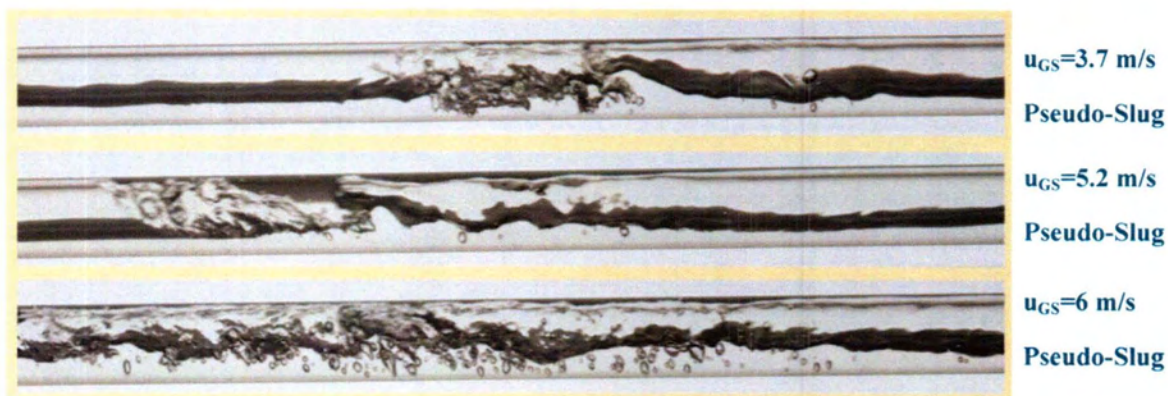
Στο Σχήμα 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τα διάφορα καθεστώτα ροής. Σε κάθε σειρά φωτογραφιών η φαινομενική ταχύτητα της υγρής φάσης είναι σταθερή και αυξάνεται η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης.



Σχήμα 4.3 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για σταθερή παροχή της υγρής φάσης και αυξανόμενη της αέριας.

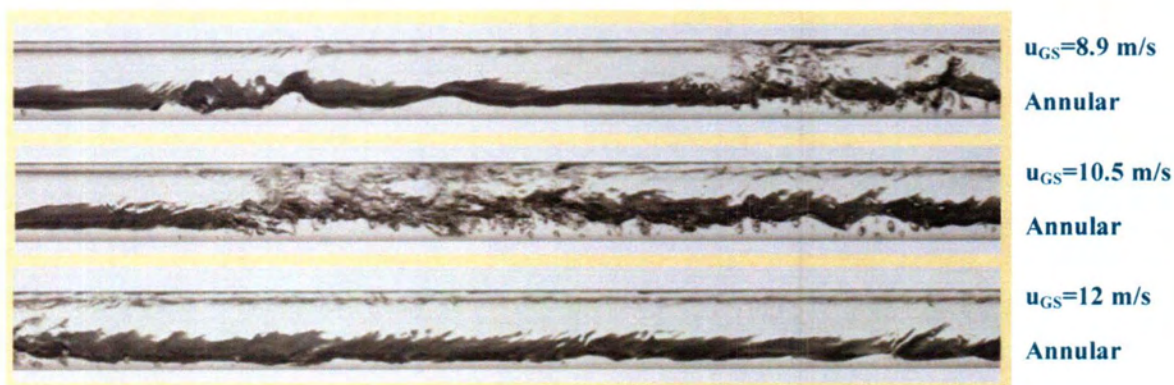


Σχήμα 4.4 (α) Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για σταθερή παροχή της υγρής φάσης και αυξανόμενη της αέριας (εξέλιξη διαλείπουσας ροής)



$u_{LS}=0.25 \text{ m/s}$

Σχήμα 4.4 (β) Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για σταθερή παροχή της υγρής φάσης και αυξανόμενη της αέριας (εξέλιξη ψευδο-διαλείπουσας ροής)

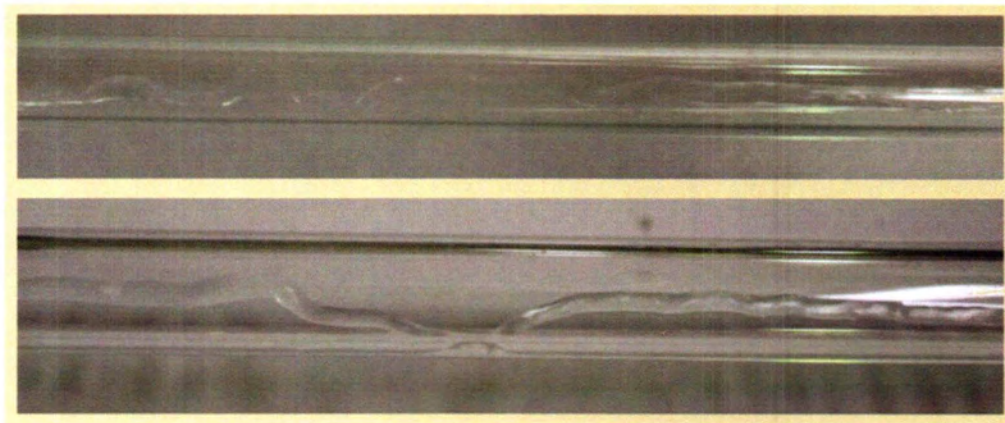


$u_{LS}=0.25 \text{ m/s}$

Σχήμα 4.4 (γ) Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για σταθερή παροχή της υγρής φάσης και αυξανόμενη της αέριας (εξέλιξη δακτυλιοειδούς ροής)

Η λεία διαστρωματωμένη ροή εμφανίστηκε σε σχετικά χαμηλές τιμές των δύο παροχών. Πιο συγκεκριμένα σε φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης από 0.005 m/s μέχρι 0.03 m/s και στην αέρια από 0.8 m/s μέχρι 2 m/s. Σε αυτό το καθεστώς το νερό ρέει στο κάτω μέρος του σωλήνα και ο αέρας στο πάνω. Οι δύο φάσεις είναι εντελώς διαχωρισμένες και η μόνη αλληλεπίδραση είναι στην διεπιφάνεια τους. Η διεπιφάνεια φαίνεται να είναι λεία, αν και λόγω της ικανότητας διαβροχής της επιφάνειας του αγωγού παρατηρούνται κάποιες καμπυλότητες της υγρής στοιβάδας, οι οποίες όμως είναι στάσιμες. Σε μεγαλύτερες αέριες ταχύτητες αρχικά εμφανίζονται μάλλον κανονικά (διδιάστατα) κύματα, τα οποία όμως μετατρέπονται σε ακανόνιστα, μεγάλου πλάτους (κύματα Kelvin-Helmholtz) με περαιτέρω αύξηση της αέριας ταχύτητας.

Επίσης, στην χαμηλότερη παροχή της υγρής φάσης, δηλαδή για ταχύτητα 0.004 m/s, αλλά υψηλές της αέριας, από 10-20 m/s, εμφανίστηκε ένα είδος διαστρωματωμένης ροής, η οποία κάλυπτε μόνο ένα μικρό μέρος του αγωγού και ήταν παραμορφωμένο κατά μήκος, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Εξέλιξη της διαστρωματωμένης ροής σε χαμηλή παροχής της υγρής και υψηλή της αέριας (Η φωτογράφιση είναι από πάνω)

Η ψεύδο-διαλείπουσα ροή εμφανίζεται σε αρκετούς συνδυασμούς των παροχών της υγρής και της αέριας φάσης. Σε αυτό το καθεστώς μεταπίπτει η ροή όταν η ταχύτητα της αέριας ή της υγρής φάσης αυξηθεί. Πιο συγκεκριμένα καθώς αυξάνει η ταχύτητα κάποιες από τις δύο φάσεις η διεπιφάνεια υγρού-αερίου αρχίζει να παραμορφώνεται και να δημιουργούνται κυματισμοί που σχεδόν αγγίζουν το πάνω μέρος του αγωγού. Το εύρος των φαινομενικών ταχυτήτων του νερού είναι 0.08-0.3 m/s και του αέρα 2.5-9 m/s. Σε όλες τις περιπτώσεις μια λεπτή στοιβάδα υγρού φαίνεται ότι καλύπτει το πάνω μέρος του αγωγού, αλλά μάλλον είναι στάσιμο.

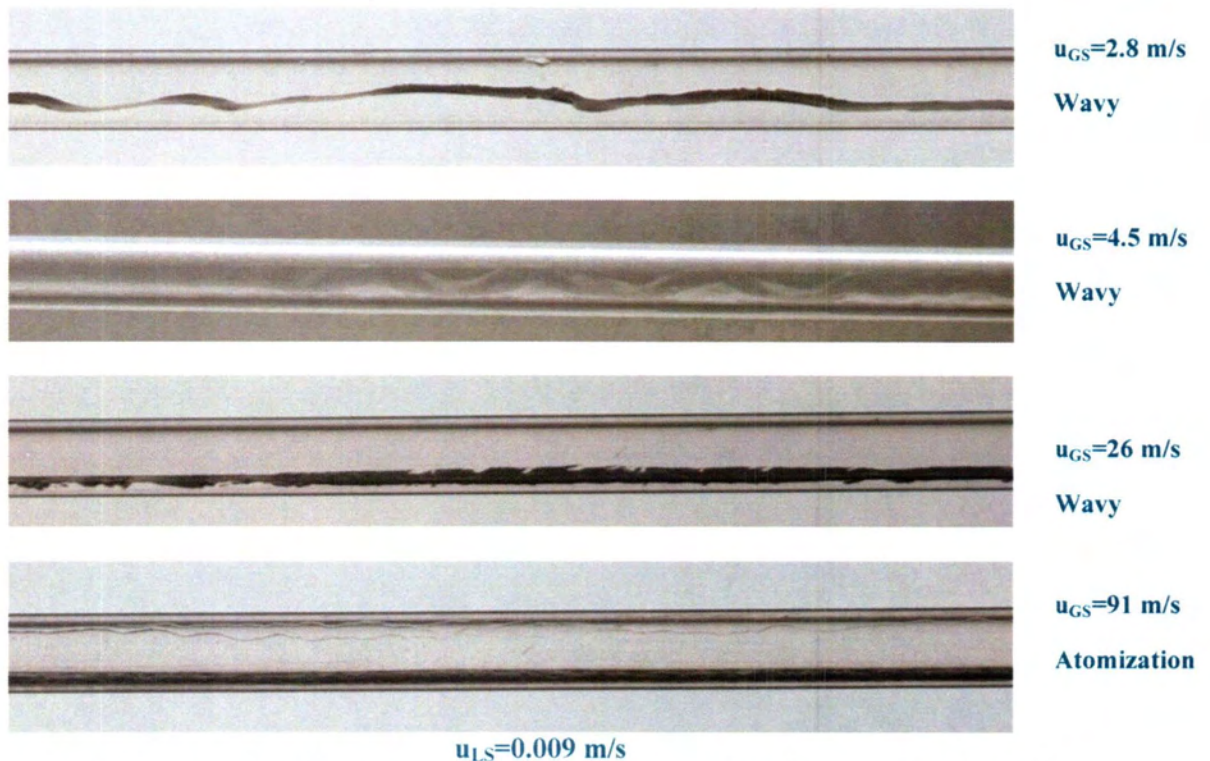
Η ροή με εκνέφωση εμφανίζεται για σχετικά χαμηλές ταχύτητες του νερού και υψηλές του αέρα. Κατά την εκνέφωση η ταχύτητα του αέρα είναι αρκετά υψηλή με αποτέλεσμα να παρασύρονται σταγόνες νερού. Η φαινομενική ταχύτητα του νερού κυμαίνεται από 0.008-0.04 m/s, ενώ του αέρα από 15-18.5 m/s.

Τέλος, σε μεγάλες ταχύτητες της αέριας φάσης εμφανίζεται η δακτυλιοειδής ροή, κατά την οποία μια υγρή στοιβάδα καλύπτει όλη την περιφέρεια του αγωγού. Βεβαίως, λόγω βαρύτητας το μεγαλύτερο μέρος του υγρού ρέει στον πυθμένα του αγωγού. Με αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης η στοιβάδα τείνει να γίνει πιο ομοιόμορφη. Σημειώνεται πάντως,

πως για να επιτευχθεί δακτυλιοειδής ροή απαιτείται μια ελάχιστη παροχή μάζας της υγρής φάσης. Έτσι για $u_{LS}=0.005$ m/s δεν παρατηρήθηκε δακτυλιοειδής ροή.

4.2.2 Καθεστώτα Ροής στον Αγωγό με Εσωτερική Διάμετρο 4.8 mm

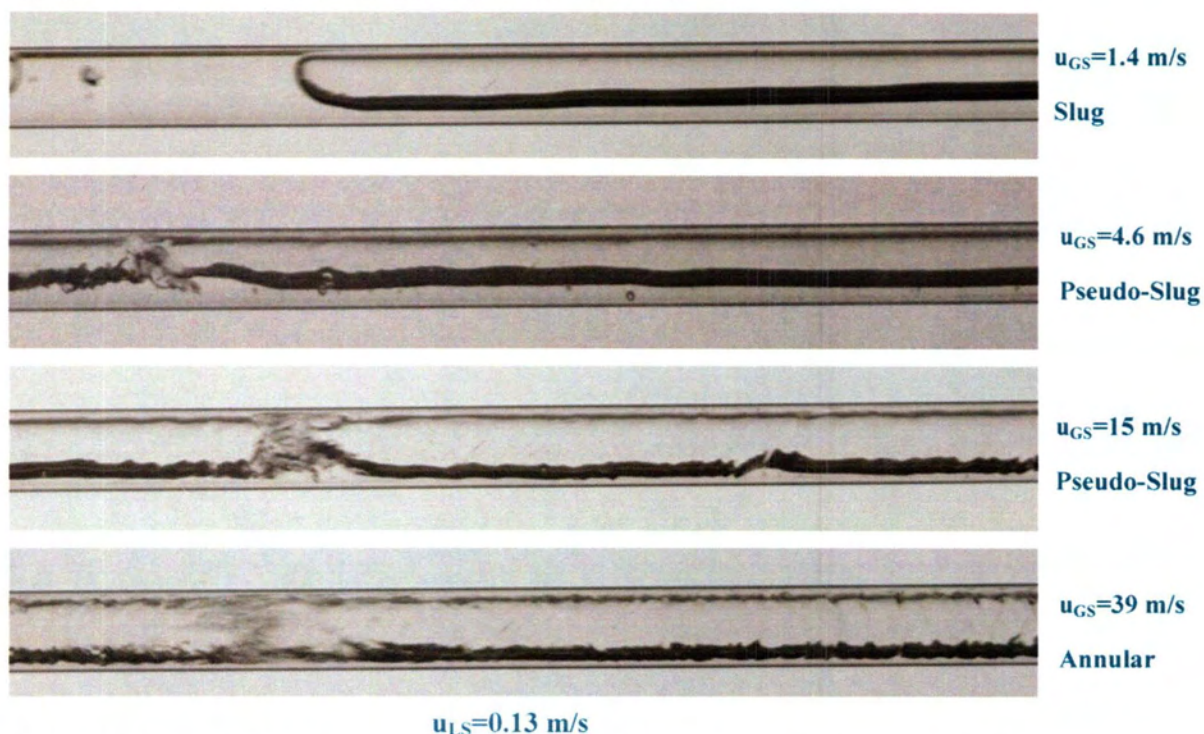
Στον αγωγό με διάμετρο 4.8 mm συναντήθηκαν τα περισσότερα καθεστώτα ροής που βρέθηκαν και στον αγωγό των 9 mm. Πρέπει όμως να σημειωθεί πως δεν ήταν δυνατό να διαφοροποιηθούν οι κυματισμοί στις διάφορες υποκατηγορίες (κύματα Kelvin-Helmholtz ή διδιάστατα κύματα), εξαιτίας των πολύ μικρής διαμέτρου του αγωγού. Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται τα καθεστώτα ροής που εντοπίστηκαν στην χαμηλότερη υγρή παροχή με αυξανόμενη την ταχύτητα.



Σχήμα 4.6 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για σταθερή ταχύτητα της υγρής φάσης και αυξανόμενη της αέριας.

Στην χαμηλότερη φαινομενική ταχύτητα του νερού, η ροή σε όλη την έκταση της αέριας ταχύτητας είναι κυματοειδής και αποτελείται από ακίνητες διαταραχές. Πιθανά αν την

μελετούσαμε και σε χαμηλότερες αέριες ταχύτητες να συναντούσαμε και διαλείπουσα ροή. Η κυματοειδής ροή εμφανίστηκε σε φαινομενικές ταχύτητες του νερού 0.009-0.03 m/s και του αέρα 3-40 m/s. Επίσης, στην φαινομενική ταχύτητα 0.009 m/s του νερού και σε υψηλές ταχύτητες του αέρα εμφανίστηκε ξανά κυματοειδής ροή, παραμορφωμένη κατά μήκος, και κάλυπτε ένα μικρό μόνο μέρος του αγωγού. Η ροή με εκνέφωση εμφανίζεται στις ίδιες υγρές παροχές με την κυματοειδή, αλλά σε εύρος ταχυτήτων αέρα από 7-90 m/s.



Σχήμα 4.7 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για σταθερή ταχύτητα της υγρής φάσης και αυξανόμενη της αέριας.

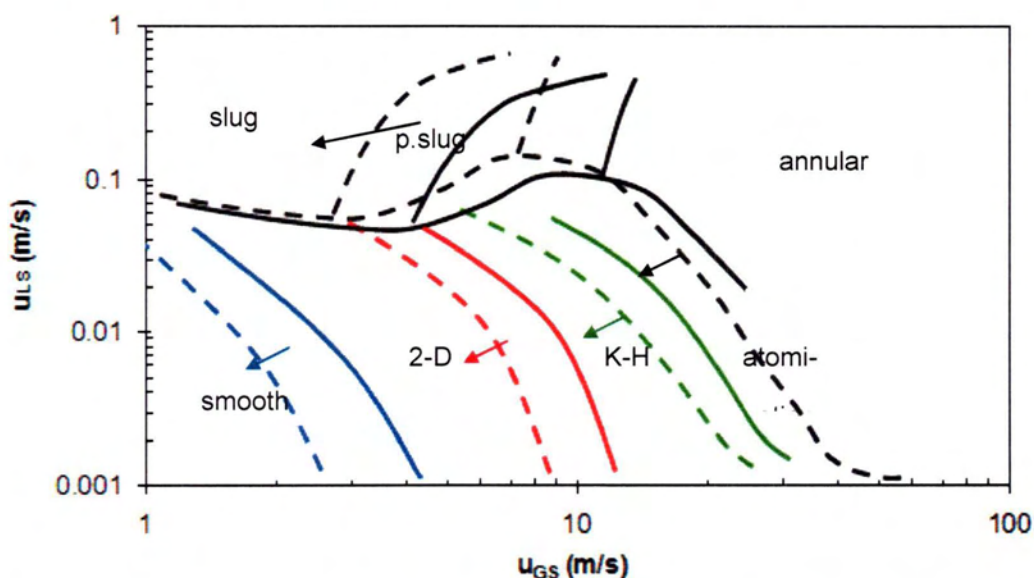
Η ψευδό-διαλείπουσα ροή εμφανίζεται όταν η υγρή φαινομενική ταχύτητα κυμαίνεται από 0.05-0.4 m/s και αντίστοιχα του αέρα 2.5-26 m/s. Στις πολύ μικρές υγρές παροχές δεν παρατηρήθηκε ψευδό-διαλείπουσα ροή. Η διαλείπουσα ροή είναι κι εδώ ένα καθεστώς ροής που συναντάται σε αρκετούς συνδυασμούς παροχών. Πιο συγκεκριμένα εντοπίζεται όταν η υγρή φαινομενική ταχύτητα κυμαίνεται από 0.03-0.55 m/s και αντίστοιχα ο αέρας από 0.9-9 m/s. Στο Σχήμα 4.7 φαίνονται ενδεικτικά ορισμένες από τις φωτογραφίες των καθεστώτων ροής για μεσαία παροχή νερού. Κι εδώ θα πρέπει να τονιστεί πως ειδικά για τις παροχές που οδηγούν σε μετάβαση δεν είναι απολύτως αντικειμενικός ο χαρακτηρισμός διαλείπουσα ή ψευδό-διαλείπουσα. Το ίδιο ισχύει και στην μετάπτωση από την ψευδό-διαλείπουσα στην

δακτυλιοειδή ροή. Η δακτυλιοειδής ροή εμφανίζεται σε ένα εύρος υγρών φαινομενικών ταχυτήτων 0.009-0.55 m/s και αντίστοιχα του αέρα 21-99 m/s.

4.3 Σύγκριση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει μια σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων της εργασίας με παλαιότερες εργασίες. Πιο συγκεκριμένα θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με τα αποτελέσματα της διδακτορικής διατριβής της Τζώτζη (2009).

Η Τζώτζη (2009) ανάμεσα σε πολλά άλλα πειράματα μελέτησε πειραματικά την διφασική ροή νερού-αέρα για οριζόντιο αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 2.5 cm. Στο Σχήμα 4. 8 φαίνονται με συνεχή γραμμή τα όρια μετάπτωσης για το σύστημα νερού-αέρα και με διακεκομμένη τα όρια μετάπτωσης για το σύστημα νερού- CO₂.



Σχήμα 4.8 Σύγκριση περιοχών ροής για σύστημα νερό-αέρας (συνεχείς γραμμές) και CO₂-νερό (διακεκομμένες γραμμές)

Συγκρίνοντας τον χάρτη για το αγωγό των 9 mm με αυτό του Σχήματος 4.8 θα διαπιστώσουμε πως υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων όσον αφορά τις τιμές των παροχών που συμβαίνουν οι μεταπτώσεις. Βέβαια, παρατηρείται ότι η μετάπτωση

των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας από την λεία διαστρωματωμένη στα διδιάστατα κύματα και από την διαλείπουσα στην ψευδό-διαλείπουσα συμβαίνει σε λίγο μικρότερες ταχύτητες από ότι στο Σχήμα 4.8

Από την άλλη μεριά, ο χάρτης του αγωγού των 4.8 mm διαφέρει αρκετά από τους προαναφερθέντες χάρτες. Η μετάπτωση σε διαλείπουσα ή σε ψευδό-διαλείπουσα παρατηρείται σε πολύ χαμηλότερες υγρές φαινομενικές ταχύτητες ή με άλλα λόγια η περιοχή της διαστρωματωμένης ροής περιορίζεται σημαντικά. Επίσης φαίνεται να υπάρχει μια καθυστέρηση στην επίτευξη της δακτυλιοειδούς ροής.

5. Συμπεράσματα-Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως σκοπό την μελέτη της οριζόντιας διφασικής ροής νερού-αέρα σε αγωγούς μικρής διαμέτρου και την λεπτομερή καταγραφή των προτύπων ροής, καθώς και των μεταπτώσεων σε αυτά.

Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη στην οποία χρησιμοποιήθηκαν δύο αγωγοί εσωτερικής διαμέτρου 9 και 4.8 mm. Για κάθε αγωγό κατασκευάστηκε χάρτης καθεστώτων ροής στον οποίο απεικονίζονται τα καθεστάτα ροής συναρτήσει των φαινομενικών ταχυτήτων της υγρής και της αέριας φάσης. Η ανίχνευση των καθεστώτων έγινε με οπτική παρατήρηση και ψηφιακή φωτογραφική μηχανή. Τέλος έγινε σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την εργασία της Τζώτζη (2009).

Τα κυριότερα συμπεράσματα που συνάγονται από την παρούσα μελέτη είναι τα εξής:

- Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, η διεπιφάνεια υγρού-αερίου μπορεί να παραμορφωθεί κατά πολλούς τρόπους και να συναντώνται πολλά καθεστάτα ροής. Εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας, αλλά και του υποκειμενικού χαρακτήρα της ανίχνευσης ενός καθεστώτος, στην βιβλιογραφία συναντώνται αρκετά ονόματα για την περιγραφή τους. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα βασικά καθεστάτα ροής. Πιο συγκεκριμένα εντοπίστηκε διαστρωματωμένη ροή, διαλείπουσα ροή, ψεύδο-διαλείπουσα ροή, ροή με διδιάστατα κύματα, ροή με κύματα Kelvin-Helmholtz, ροή με εκνέφωση και δακτυλιοειδής ροή.
- Για την κατασκευή του πειραματικού χάρτη έγιναν οι αντίστοιχες μετρήσεις σε κάθε αγωγό. Στον αγωγό των 9 mm μελετήθηκαν 100 συνδυασμοί ογκομετρικών παροχών και για τον αγωγό των 4.8 mm μελετήθηκαν 60 συνδυασμοί παροχών.
- Από την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τους χάρτες ροών της βιβλιογραφίας προκύπτει συμφωνία στις μεταπτώσεις όσον αφορά τον αγωγό των 9 mm, όχι όμως τον αγωγό των 4.8 mm. Με άλλα λόγια δεν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στα όρια μετάπτωσης από 24 μέχρι 9 mm, ενώ παρατηρείται διαφοροποίηση στα 4.8 mm. Άρα, η ταξινόμηση των Mehendale & Jacobi (2000) φαίνεται να περιγράφει

καλύτερα τους δύο αγωγούς που εξετάστηκαν, όσον αφορά την κατάταξη τους σε συμβατικούς αγωγούς και «mini»-αγωγούς.

- Τέλος, στον αγωγό των 4.8 mm φαίνεται να υπάρχει μια καθυστέρηση της επίτευξης της δακτυλιοειδούς ροής. Δηλαδή, η μετάπτωση σε αυτό το καθεστώς γίνεται σε μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης.

Η διφασική ροή υγρού-αερίου σε αγωγούς μικρής διαμέτρου αποτελεί μια επιστημονική περιοχή με έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, τόσο σε πειραματικό, όσο και θεωρητικό επίπεδο. Είναι βέβαιο πως η επιστημονική κοινότητα έχει να δώσει πολλά ακόμα σε αυτό τον τομέα, ιδιαίτερα στο πεδίο των εφαρμογών της. Οι προτάσεις που γίνονται για μελλοντική εργασία είναι οι εξής:

- Μελέτη της διφασικής ροής σε χαμηλότερες αέριες παροχές και υψηλότερες υγρές για τον εντοπισμό ροής με φυσαλίδες.
- Μελέτη της διφασικής ροής σε αγωγούς με διάμετρο μικρότερη των 3 mm. Εξέταση της επίδρασης της διατομής στα όρια μετάπτωσης. Δημιουργία πειραματικών χαρτών και διερεύνηση νέων καθεστώτων ροής. Μελέτη των κριτηρίων μετάπτωσης από τους μακρο-αγωγούς στους «mini» και «micro» συναρτήσει του αριθμού Eotvos. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με νέα προτεινόμενα μοντέλα.
- Μελέτη της διφασικής ροής σε αγωγό υπό κλίση. Εξέταση της επίδρασης της κλίσης στα χαρακτηριστικά της ροής.
- Μελέτη της διφασικής ροής σε οριζόντιους αγωγούς, αλλά με τη χρήση άλλων ρευστών, ώστε να μελετηθεί η επίδραση της πυκνότητας, του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης στα χαρακτηριστικά της ροής.
- Μελέτη μη αδιαβατικών ροών, ώστε να εξεταστεί η επίδραση της ροής της θερμότητας στα χαρακτηριστικά της ροής.
- Μελέτη της διφασικής ροής μη κυκλικούς αγωγούς, ώστε να μελετηθεί η επίδραση του σχήματος της διατομής στα χαρακτηριστικά της ροής.
- Μέτρηση του ύψους της υγρής στοιβάδας και της πτώσης πίεσης ή των διαταραχών της πτώσης πίεσης.
- Ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων για την μελέτη διφασικής ροής και σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα.

6. Βιβλιογραφία

- Baker, O. (1954). Simultaneous flow of oil and gas. *Oil and Gas J.*, Vol. 53(45), pp. 185-195.
- Beggs, H.D. and Brill, J.P., (1973), A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes, *J. of petroleum Technology*, Vol. 25, pp. 607-617.
- Barnea, D, Luninski, Y, Taitel, Y, (1983), Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes, *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 61, pp. 617-620.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E., (1985), Gas-Liquid Flow in Inclined Tubes: Flow pattern Transitions for Upward Flow, *Chem. Engineering Science*, Vol. 40, pp. 131-136.
- Brauner, N. and Maron, D.M., (1992), Identification of the range of small diameters conduits, regarding two phase flow pattern transitions, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 29-39.
- Chung, P.M.-Y. and Kawaji, M., (2004), The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 30, pp. 735-761.
- Coleman, J. W. and Garimella, S., (1999), Characterization of two phase tow patterns in small diameter round and rectangular tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2869-2881
- Isbin, H.S., Shear, N.C., and Eddy, K.C., (1958), Void fractions in two-phase steam-water flow, *A.I.Ch.E. J.*, Vol. 3, pp. 136-142.
- Jones, O.C., and Zuber, N., (1974), The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two phase flow, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2, pp. 273-306.
- Kandlikar, S. G. and Grande, W.J., (2002), Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology, *ASME-International Mechanical Engineering Congress & Exposition*
- Kawaji, M., and Chung, P. M. Y. (2003), Unique characteristics of adiabatic gas-liquid flows in microchannels: Diameter and shape effects on flow patterns, void fraction and pressure drop, *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 1, pp. 115-127.
- Kawaji, M. and Chung, Y., (2004), Adiabatic gas-liquid flow in microchannels, *Nanoscale and Thrmophysical Engineering*, Vol. 8 (3), pp. 239-257.

- Kew, P.A. and Cornwell, K., (1997). Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, pp. 705-715
- Li, J.M., and Wang, B.X., (2003), Size effect on two phase flow regime for condensation in micro/mini tubes, *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 32 (1), pp. 65-71.
- Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K., (1974), A flow pattern map for gas-liquid in horizontal pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 537-553.
- Mehendale, S.S. and Jacobi, A.M., (2000), Evaporative heat transfer in mesoscale heat exchangers, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*, Vol. 106 (1), pp. 446-452.
- Ong, C.L. and Thome, J.R., (2011), Macro-to –microchannel transition in two phase flow: Part 1 – Two phase patterns and film thickness measurements, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, pp. 37-47.
- Serizawa, A. Feng, Z., Kawara, Z., (2002), Two-phase flow in microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 26, pp. 703-714.
- Suo, M. and Griffith, P., (1964), Two-phase flow in capillary tubes, *J. Basic Eng.*, Vol. **86**, pp. 576–582.
- Taitel, Y. and Dukler, (1976a), A.E., A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow, *AIChE J.*, Vol 22, 47-55
- Triplett, K.A., Ghiasiaan, S.M, Abdel-Khalik, S.I., Sadowski, D.L., (1998), Gas–liquid two-phase flow in microchannels, Part I: two phase flow patterns, *Int. J Multiphase Flow*, Vol 25, pp. 377-394.
- Ullman, A. and Brauner, N., (2006), The prediction of flow maps in minichannels, *Multiphase Science and Technology*, Vol. 19, pp. 49-73.

BIBΛΙΑ-ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ-ΔΙΑΤΡΙΒΕΣ

- Faghri, A. and Zhang, Y., (2006). *Transport Phenomena In Multiphase Systems*, Elsevier Academic Press.
- Thome, R. (2004). *Engineering Data Book III*, Wolverine Tube, INC., Chapter 20.
- Ανδρίτσος, Ν. και Μποντόζογλου, Β., (2008). *Διφασική Ροή και Μεταφορά Θερμότητας*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.
- Τζώτζη, Χ., (2009), *Επίδραση των Φυσικών Ιδιοτήτων των Ρευστών στη Διφασική Ροή Υγρού-Αερίου σε Οριζόντιους και Σχεδόν Οριζόντιους Αγωγούς*, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Πίνακες Φυσικών Ιδιοτήτων Νερού και Αέρα

Temperature - t - (°C)	Density - ρ - (kg/m ³)
0	999.9
5	1000
10	999.7
20	998.2
30	995.7
40	992.2
50	988.1
60	983.2

Σχήμα Π.1.1 Πίνακας πυκνότητας νερού,

http://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html

Temperature - t - (°C)	Density - ρ - (kg/m ³)
-150	2.793
-100	1.980
-50	1.534
0	1.293
20	1.205
40	1.127
60	1.067

Σχήμα Π.1.2 Πίνακας πυκνότητας αέρα,

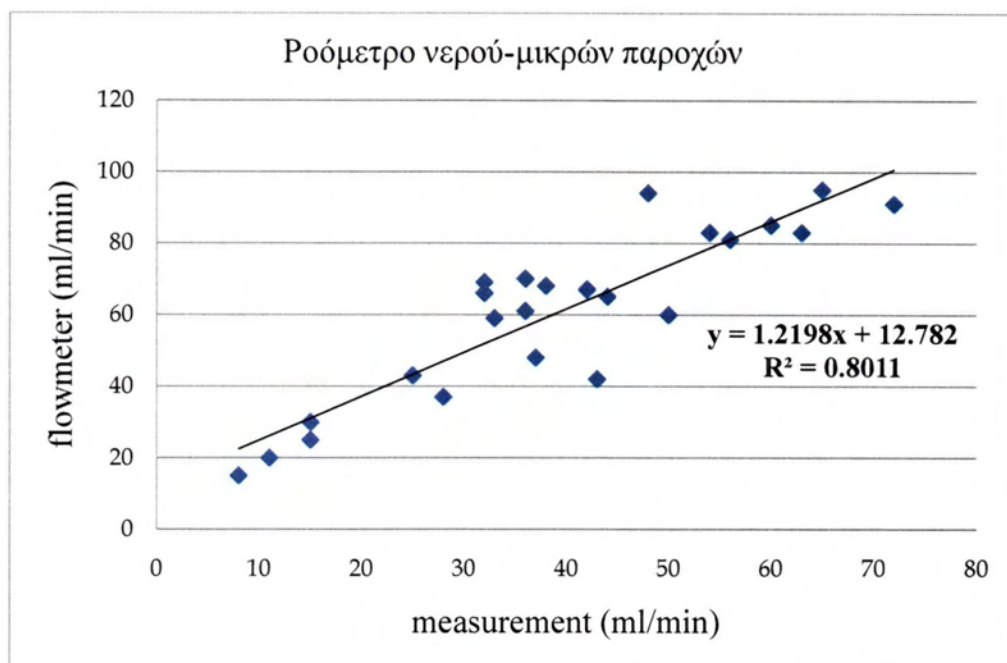
http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html

Temperature - t - (°C)	Surface Tension in contact with air - σ - 10 ⁻² (N/m)
0	7.56
5	7.49
10	7.42
20	7.28
30	7.12
40	6.96
50	6.79
60	6.62
70	6.44
80	6.26
90	6.08
100	5.89
150	4.82
200	3.76
250	2.64
300	1.47
350	0.37
374.1	0.0

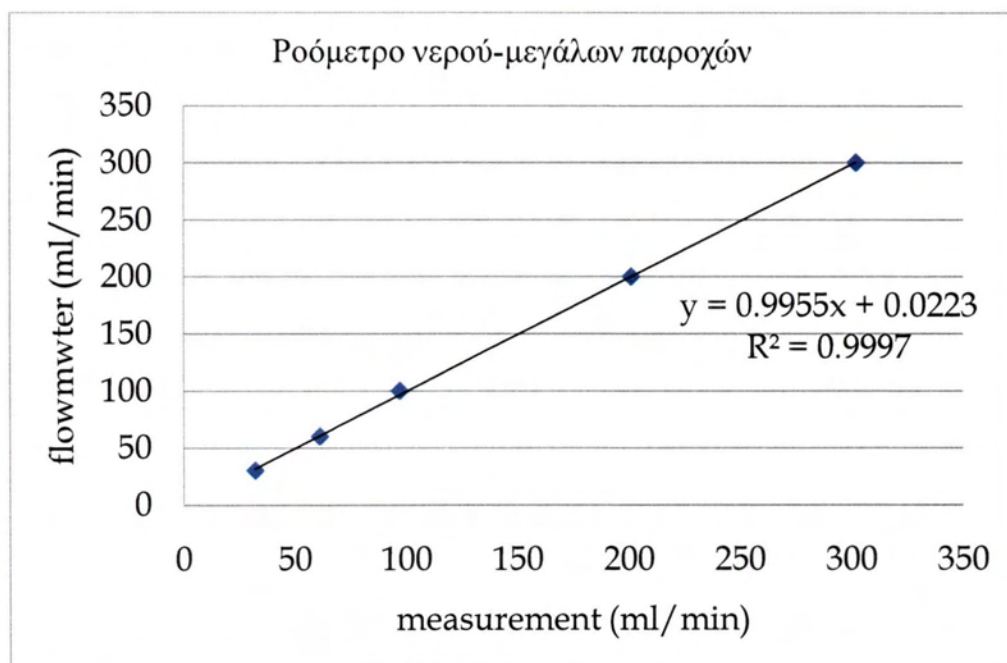
Σχήμα Π.1.3 Επιφανειακή τάση νερού,

http://www.engineeringtoolbox.com/water-surface-tension-d_597.html

Π.2 Βαθμονόμηση Ροόμετρων Υγρής Φάσης



Σχήμα Π.2.1 Καμπύλη βαθμονόμησης ροόμετρου μικρών παροχών



Σχήμα Π.2.2 Καμπύλη βαθμονόμησης ροόμετρου μεγάλων παροχών

Διφασική ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους αγωγούς μικρής διαμέτρου

Π.3 Αναλυτικοί Πίνακες Μετρήσεων

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	20	0.00002	0.00524233	smooth	
5	0.005	1.31058164	20	0.00002	0.00524233	smooth	
7.5	0.0075	1.96587245	20	0.00002	0.00524233	smooth	
10	0.01	2.62116327	20	0.00002	0.00524233	2DW	
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.5	0.014158423	3.71115391	20	0.00002	0.00524233	2DW	
0.9	0.025485162	6.68007704	20	0.00002	0.00524233	2DW	
1.5	0.04247527	11.1334617	20	0.00002	0.00524233	үрэгцүүр	169
2.5	0.070792116	18.5557696	20	0.00002	0.00524233	үрэгцүүр	
4	0.113267386	29.6892313	20	0.00002	0.00524233	үрэгцүүр	-173

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	30	0.00003	0.00786349	smooth	5*6
5	0.005	1.31058164	30	0.00003	0.00786349	smooth	7
7.5	0.0075	1.96587245	30	0.00003	0.00786349	2DW	8*9
10	0.01	2.62116327	30	0.00003	0.00786349	2DW	10*11*12
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.5	0.014158423	3.71115391	30	0.00003	0.00786349	2DW	13*19
0.8	0.022653477	5.93784626	30	0.00003	0.00786349	2DW	20*21
1.2	0.033980216	8.90676939	30	0.00003	0.00786349	K-H W	22*26
1.6	0.045306955	11.8756925	30	0.00003	0.00786349	K-H W	27*28*29
2	0.056633693	14.8446157	30	0.00003	0.00786349	atomization	30*31*32
2.5	0.070792116	18.5557696	30	0.00003	0.00786349	atomization	33*34
3.2	0.090613909	23.751385	30	0.00003	0.00786349	annular	
3.4	0.096277278	25.2358466	30	0.00003	0.00786349	annular	
3.5	0.099108963	25.9780774	30	0.00003	0.00786349	annular	
4	0.113267386	29.6892313	30	0.00003	0.00786349	annular	

35

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	100	0.0001	0.02621163	smooth	164
5	0.005	1.31058164	100	0.0001	0.02621163	2DW	
7.5	0.0075	1.96587245	100	0.0001	0.02621163	2DW	
10	0.01	2.62116327	100	0.0001	0.02621163	2DW	
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.5	0.014158423	3.71115391	100	0.0001	0.02621163	2DW	*****
0.8	0.022653477	5.93784626	100	0.0001	0.02621163	2DW	*****
1.7	0.048138639	12.6179233	100	0.0001	0.02621163	atomization	
2.1	0.059465378	15.5868464	100	0.0001	0.02621163	atomization	
2.6	0.073623801	19.2980004	100	0.0001	0.02621163	annular	153*154
2.8	0.07928717	20.7824619	100	0.0001	0.02621163	annular	
3.5	0.099108963	25.9780774	100	0.0001	0.02621163	annular	
4	0.113267386	29.6892313	100	0.0001	0.02621163	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	150	0.00015	0.03931745	2DW	41*43
5	0.005	1.31058164	150	0.00015	0.03931745	2DW	44*45
7.5	0.0075	1.96587245	150	0.00015	0.03931745	2DW	46*50
10	0.01	2.62116327	150	0.00015	0.03931745	2DW	51*53
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.5	0.014158423	3.71115391	150	0.00015	0.03931745	2DW	56*56
0.8	0.022653477	5.93784626	150	0.00015	0.03931745	K-H W	
1.2	0.033980216	8.90676939	150	0.00015	0.03931745	K-H W	60*64
1.6	0.045306955	11.8756925	150	0.00015	0.03931745	atomization	
1.8	0.050970324	13.3601541	150	0.00015	0.03931745	annular	
2	0.056633693	14.8446157	150	0.00015	0.03931745	annular	76
2.5	0.070792116	18.5557696	150	0.00015	0.03931745	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	220	0.00022	0.05766559	2DW	152
5	0.005	1.31058164	220	0.00022	0.05766559	2DW	
7.5	0.0075	1.96587245	220	0.00022	0.05766559	2DW	
10	0.01	2.62116327	220	0.00022	0.05766559	2DW	
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.5	0.014158423	3.71115391	220	0.00022	0.05766559	2DW	56*56
1.2	0.033980216	8.90676939	220	0.00022	0.05766559	pseudo-slug	
1.7	0.048138639	12.6179233	220	0.00022	0.05766559	annular	60*64
2.5	0.070792116	18.5557696	220	0.00022	0.05766559	annular	
1.8	0.050970324	13.3601541	220	0.00022	0.05766559	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	300	0.0003	0.0786349	slug	-80
5	0.005	1.31058164	300	0.0003	0.0786349	slug	
7.5	0.0075	1.96587245	300	0.0003	0.0786349	slug	-92
10	0.01	2.62116327	300	0.0003	0.0786349	pseudo-slug	
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.5	0.014158423	3.71115391	300	0.0003	0.0786349	pseudo-slug	
0.8	0.022653477	5.93784626	300	0.0003	0.0786349	pseudo-slug	-112
1.2	0.033980216	8.90676939	300	0.0003	0.0786349	pseudo-slug	114
1.6	0.045306955	11.8756925	300	0.0003	0.0786349	annular	-117
2	0.056633693	14.8446157	300	0.0003	0.0786349	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	400	0.0004	0.10484653	slug	124
5	0.005	1.31058164	400	0.0004	0.10484653	slug	
7.5	0.0075	1.96587245	400	0.0004	0.10484653	slug	-134
10	0.01	2.62116327	400	0.0004	0.10484653	pseudo-slug	
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.8	0.022653477	5.93784626	400	0.0004	0.10484653	pseudo-slug	
1.2	0.033980216	8.90676939	400	0.0004	0.10484653	pseudo-slug	
1.6	0.045306955	11.8756925	400	0.0004	0.10484653	annular	
2	0.0566633693	14.8446157	400	0.0004	0.10484653	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	600	0.0006	0.1572698	slug	144
5	0.005	1.31058164	600	0.0006	0.1572698	slug	
7.5	0.0075	1.96587245	600	0.0006	0.1572698	slug	
10	0.01	2.62116327	600	0.0006	0.1572698	pseudo-slug	
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.5	0.014158423	3.71115391	600	0.0006	0.1572698	pseudo-slug	
0.8	0.022653477	5.93784626	600	0.0006	0.1572698	pseudo-slug	
1.2	0.033980216	8.90676939	600	0.0006	0.1572698	pseudo-slug	
1.6	0.045306955	11.8756925	600	0.0006	0.1572698	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3	0.003	0.78634898	750	0.00075	0.24880573	slug	144
5	0.005	1.31058164	750	0.00075	0.24880573	slug	
7.5	0.0075	1.96587245	750	0.00075	0.24880573	slug	
10	0.01	2.62116327	750	0.00075	0.24880573	pseudo-slug	
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.5	0.014158423	3.71115391	750	0.00075	0.24880573	pseudo-slug	
0.8	0.022653477	5.93784626	750	0.00075	0.24880573	pseudo-slug	
1.2	0.033980216	8.90676939	750	0.00075	0.24880573	pseudo-slug	
1.6	0.045306955	11.8756925	750	0.00075	0.24880573	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
1.50	0.0015	1.38	150.00	0.00015	0.138225407	slug	20.00
3.00	0.003	2.76	150.00	0.00015	0.138225407	slug	-6.00
5.00	0.005	4.61	150.00	0.00015	0.138225407	pseudo-slug	
7.50	0.0075	6.91	150.00	0.00015	0.138225407	pseudo-slug	26.00
10.00	0.01	9.22	150.00	0.00015	0.138225407	pseudo-slug	27-30
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.50	0.014158423	13.05	150.00	0.00015	0.138225407	pseudo-slug	-34.00
1.20	0.033980216	31.31	150.00	0.00015	0.138225407	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
1.50	0.0015	1.38	250.00	0.00025	0.230375678	slug	-61.00
3.00	0.003	2.76	250.00	0.00025	0.230375678	slug	-53.00
5.00	0.005	4.61	250.00	0.00025	0.230375678	pseudo-slug	-77.00
7.50	0.0075	6.91	250.00	0.00025	0.230375678	pseudo-slug	-94.00
10.00	0.01	9.22	250.00	0.00025	0.230375678	pseudo-slug	-87.00
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.60	0.016990108	15.66	250.00	0.00025	0.230375678	pseudo-slug	-102.00
1.50	0.04247527	39.14	250.00	0.00025	0.230375678	annular	
2.60	0.073623801	67.84	250.00	0.00025	0.230375678	annular	-111.00

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
1.50	0.0015	1.38	400.00	0.0004	0.368601085	slug	118.00
3.00	0.003	2.76	400.00	0.0004	0.368601085	slug	136.00
5.00	0.005	4.61	400.00	0.0004	0.368601085	slug	143.00
7.50	0.0075	6.91	400.00	0.0004	0.368601085	pseudo-slug	-153.00
10.00	0.01	9.22	400.00	0.0004	0.368601085	pseudo-slug	-165.00
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.50	0.014158423	13.05	400.00	0.0004	0.368601085	pseudo-slug	-172.00
1.00	0.028316847	26.09	400.00	0.0004	0.368601085	annular	-178.00
1.50	0.04247527	39.14	400.00	0.0004	0.368601085	annular	-182.00
2.00	0.056633693	52.19	400.00	0.0004	0.368601085	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
1.00	0.001	0.92	600.00	0.0006	0.552901628	slug	-193.00
3.00	0.003	2.76	600.00	0.0006	0.552901628	slug	-200.00
5.00	0.005	4.61	600.00	0.0006	0.552901628	slug	-210.00
7.50	0.0075	6.91	600.00	0.0006	0.552901628	slug	-216.00
10.00	0.01	9.22	600.00	0.0006	0.552901628	slug	-223.00
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.80	0.022653477	20.88	600.00	0.0006	0.552901628	annular	-234.00
1.00	0.028316847	26.09	600.00	0.0006	0.552901628	annular	-228.00
1.50	0.04247527	39.14	600.00	0.0006	0.552901628	annular	-241.00
2.00	0.056633693	52.19	600.00	0.0006	0.552901628	annular	-247.00

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
3.00	0.003	2.76	10.00	0.00001	0.009215027	wavy	-16.00
5.00	0.005	4.61	10.00	0.00001	0.009215027	wavy	
7.50	0.0075	6.91	10.00	0.00001	0.009215027	potamaki	
10.00	0.01	9.22	10.00	0.00001	0.009215027	potamaki	-6.00
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
1.50	0.04247527	39.14	10.00	0.00001	0.009215027	wavy	-27.00
0.70	0.019821793	18.27	10.00	0.00001	0.009215027	potamaki	32.00
1.00	0.028316847	26.09	10.00	0.00001	0.009215027	wavy	44.00
1.40	0.039643585	36.53	10.00	0.00001	0.009215027	wavy	55.00
2.00	0.056633693	52.19	10.00	0.00001	0.009215027	atomization	64+330
3.00	0.08495054	78.28	10.00	0.00001	0.009215027	atomization	
3.80	0.107604017	99.16	10.00	0.00001	0.009215027	annular	
3.50	0.099108963	91.33	10.00	0.00001	0.009215027	atomization	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
10.00	0.01	9.22	50.00	0.00005	0.046075136	pseudo-slug	-128.00
8.00	0.008	7.37	50.00	0.00005	0.046075136	pseudo-slug	-142.00
5.00	0.005	4.61	50.00	0.00005	0.046075136	pseudo-slug	-156.00
2.50	0.0025	2.30	50.00	0.00005	0.046075136	pseudo-slug	-188.00
1.20	0.0012	1.11	50.00	0.00005	0.046075136	slug	-222.00
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.50	0.014158423	13.05	50.00	0.00005	0.046075136	pseudo-slug	-78.00
1.00	0.028316847	26.09	50.00	0.00005	0.046075136	pseudo-slug	-91.00
1.50	0.04247527	39.14	50.00	0.00005	0.046075136	annular	-102.00
2.00	0.056633693	52.19	50.00	0.00005	0.046075136	annular	-116.00
3.00	0.08495054	78.28	50.00	0.00005	0.046075136	annular	

QG(L/min)	QG(m3/min)	uGS(m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
1.20	0.0012	1.11	30.00	0.00003	0.027645081	slug	-247.00
3.00	0.003	2.76	30.00	0.00003	0.027645081	wavy	-260.00
5.00	0.005	4.61	30.00	0.00003	0.027645081	wavy	-269.00
7.50	0.0075	6.91	30.00	0.00003	0.027645081	atomization	-281.00
10.00	0.01	9.22	30.00	0.00003	0.027645081	atomization	-294.00
QG(scfm)	QG(m3/min)	uGS (m/sec)	QL(ml/min)	QL(m3/min)	uLS(m/sec)	comments	#photo#
0.90	0.025485162	23.48	30.00	0.00003	0.027645081	atomization	-304.00
1.50	0.04247527	39.14	30.00	0.00003	0.027645081	atomization	-315.00
2.00	0.056633693	52.19	30.00	0.00003	0.027645081	annular	-326.00



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000106331