

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ & ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

ΑΣΛΑΝΙΔΗΣ Λ. ΜΙΧΑΗΛ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΛΑΧΟΓΙΑΝΝΗΣ ΜΙΧΑΗΛ
Δρ μηχανολόγος μηχανικός ΠΘ
διδάσκων (ΠΔ 407/80) Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

ΒΟΛΟΣ 2008



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

Αριθ. Εισ.: 6393/1

Ημερ. Εισ.: 07-07-2008

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ

2008

ΑΣΛ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την κατασκευή και πιο συγκεκριμένα τη βελτιστοποίηση της κατασκευής ενός καναλιού διφασικής ροής για τη διευκόλυνση της μελέτης του φαινομένου της διφασικής ροής με όλες τις δυνατές μεθόδους καθώς και την κατανόηση των καθεστώτων και των διαφόρων περιοχών διφασικής ροής αέρα νερού, τόσο στην οριζόντια όσο και στη ροή υπό κλίση.

Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε μεταλλικό κανάλι μήκους 12 m πάνω στο οποίο τοποθετήθηκε αγωγός Plexiglas μήκους επίσης 12m και διαμέτρου 2,54cm. Το κανάλι έχει τη δυνατότητα να παίρνει κλίσεις της τάξης +/- μιας μοίρας και στη παρούσα εργασία έγινε πειραματική μελέτη για -0,7 μοίρες. Το διφασικό μίγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αέρας-νερό ενώ για την ταυτοποίηση των καθεστώτων και περιοχών ροής έγινε με την οπτική παρατήρηση και την αγωγιμομετρική μέθοδο.

Αρχικά περιγράφονται τα σύμβολα και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται καθώς και τα διάφορα είδη και καθεστώτα ροής. Στη συνέχεια με την οπτική παρατήρηση ταυτοποιούνται και παρουσιάζονται χάρτες περιοχών ροής για οριζόντια ροή και στη συνέχεια για ροή υπό κλίση $\theta = -0,7$. Επιπλέον παρατίθενται διαγράμματα μετρήσεων τις αγωγιμομετρικής μεθόδου τόσο για οριζόντια όσο και για υπό κλίση ροή. Ακόμα παρουσιάζονται τα κυριότερα μοντέλα ανάλυσης της διφασικής ροής και περιγράφεται η διαδικασία πρόβλεψης των βασικότερων παραμέτρων ενώ αναφέρονται οι κυριότεροι μηχανισμοί μετάβασης των καθεστώτων ροής.

Στα τελευταία κεφάλαια γίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης και της διαδικασίας των μετρήσεων για το χάρτη περιοχών ροής και αυτών για το πάχος της υγρής στοιβάδας με την άμεση και κυρίως την αγωγιμομετρική μέθοδο. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη. Στο παράρτημα περιέχονται οι καμπύλες βαθμονόμησης των διαφόρων ροομέτρων και των μετρητικών εξαρτημάτων της αγωγιμομετρικής μεθόδου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα από όλα θέλω να ευχαριστήσω πραγματικά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Βλαχογιάννη Μιχαήλ για την υπερπολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και πάνω από όλα για τη συμπαράσταση το ενδιαφέρον και τις συμβουλές του. Επιπλέον ευχαριστώ για τη πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές τους ,τους καθηγητές μου κ.Ανδρίτσο Νικόλαο και κ.Μποντόζογλου Βασίλη.

Ευχαριστώ επίσης για όλη τους τη βοήθεια τους υποψήφιους διδάκτορες Βλάση Λεοντίδη και Χριστίνα Τζώτζη.

Ξεχωριστά θέλω να ευχαριστήσω για την βοήθεια και κυρίως για τη συμπαράσταση τους καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου αλλά και όλα αυτά τα χρόνια, τον φίλο μου Αποστολάκη Αντώνη και τους Παπαχαραλάμπους Χαράλαμπο, Πεπέ Δημήτρη, Μποιντά Χαράλαμπο, Μπαραμπούτη Νικόλαο, Σμπιλίρη Γιώργο, Αργύρη Δημήτρη, Σεφερλή Αντώνη, Λιαρόπουλο Ιωάννη, Νικολάου Ιωάννη, Βασιλικής Δανιήλ, Σκίπη Αθανάσιο, Καρέλη Σπύρο, Τριανταφύλλου Ορφέα, Σταθά Παναγιώτη, Ευθυμιού Ευθύμιο, Καλόγηρο Θωμά, Χατζημανωλάκη Εμμανουήλ, Μιχαλάκη Μαλαματή,Φυτιλή Μαριλένα, Αποστολάκη Όλγα, Ανδρέου Δήμητρα και Ευσταθίου Φλώρα.

Ακόμη ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω στους θείους μου Φουσέκα Νίκο και Σοφία και στα ξαδέρφια μου Φουσέκα Σωτήρη και Μαρία για όλη τους τη συμπαράσταση, συμβουλές και βοήθεια.

Πάνω από όλα είμαι ευγνώμων στους γονείς μου,Λεόντιο και Νίκη Ασλανίδη για την ολόψυχη αγάπη και στήριξη τους ,ηθική και οικονομική, όλα τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στο πατέρα μου, που έδωσε τα πάντα και θυσίασε ακόμα και την ζωή του για τη στήριξη και συμπαράσταση στο πρόσωπο μου,καθώς και στη μητέρα μου που εξίσου αγωνίστηκε και έδωσε όλα της τα ψυχικά αποθέματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

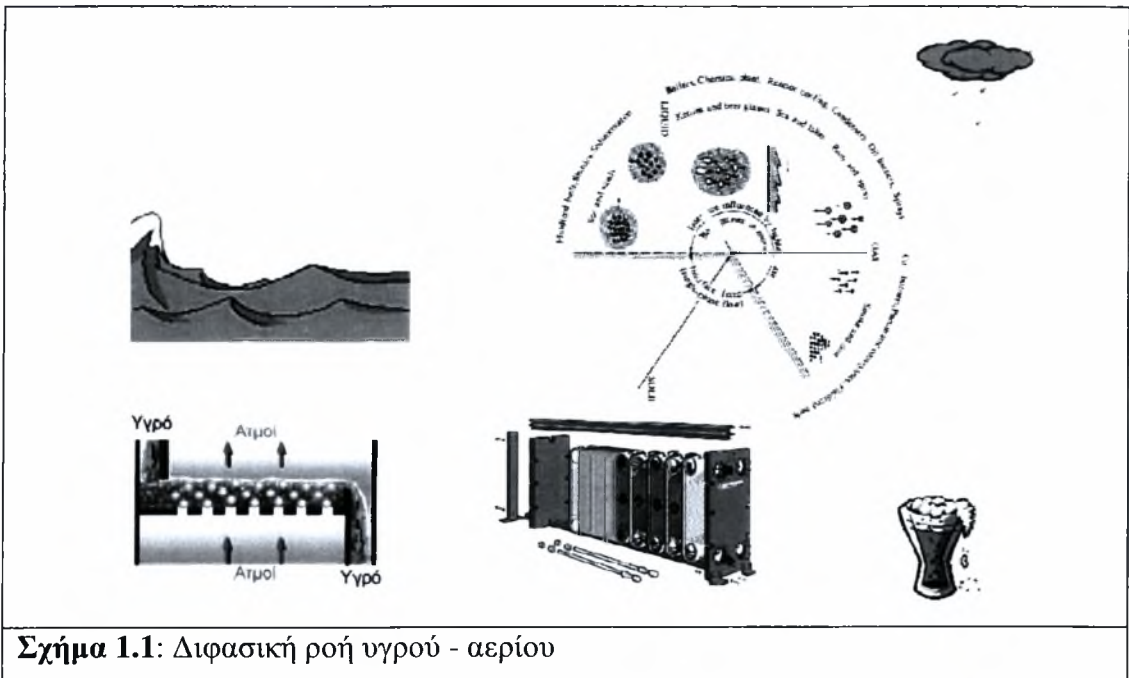
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών.....	3
1.3 Σύμβολα-Παράμετροι της διφασικής ροής.....	4
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	9
2.1 Καθεστώτα Ροής.....	9
2.1.1 Οριζόντια ροή - ομορορή.....	9
2.1.2 Ροή σε κεκλιμένους αγωγούς.....	13
2.2 Βασικά χαρακτηριστικά διφασικής ροής.....	14
2.2.1 Συμπαρασυρμός.....	14
2.2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων.....	14
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή.....	15
2.4 Χάρτες περιοχών ροής.....	16
3. ΜΕΤΑΠΤΩΞΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	27
3.1 Μετάπτωση από στρωματοποιημένη σε διαλείπουσα ροή.....	27
3.2 Μετάπτωση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με κύματα.....	31
3.3 Μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα και στη δακτυλιοειδή ροή.....	34
4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	38
4.1 Εισαγωγή.....	38
4.2 Ομογενές μοντέλο.....	40
4.3 Διαχωρισμένο μοντέλο.....	44
4.4 Μοντελοποίηση της στρωματοωμένης ροής.....	49
4.5 Μοντελοποίηση της διαλείπουσας ροής.....	51
4.6 Μοντελοποίηση της δακτυλιοειδούς ροής.....	55
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	60
5.1 Προσδιορισμός καθεστώτων ροής.....	60
5.1.1 Οπτική παρατήρηση.....	61
5.1.2 Αγωγιμομετρική μέθοδος.....	61
5.2 Πτώση πίεσης.....	64
5.3 Συμπαρασυρμός (entrainment).....	66
5.4 Συγκράτηση (hold-up).....	68
5.5 Πάχος υγρής στοιβάδας.....	69
5.5.1 Μέθοδοι και τεχνικές πειραματικών μετρήσεων πάχους υγρής στοιβάδας.....	70
5.5.2 Μέτρηση με την άμεση μέθοδο.....	71
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	73
6.1 Βαθμονόμηση Ροομέτρων.....	78
6.2 Βαθμονόμηση μετρητικών στοιχείων αγωγιμομετρικής μεθόδου.....	81
6.3 Διαδικασία μετρήσεων για τη σχεδίαση των καρτών καθεστώτων ροής - λήψη φωτογραφιών.....	82
7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ	93
7.1 Καθεστώτα Ροής.....	93
7.2 Περιγραφή των κυμάτων και μεταβάσεις καθεστώτων ροής.....	93
7.2.1 Για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες νερού.....	93
7.2.2 Για υψηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου.....	88
7.3 Ροή προς τα κάτω, κλίση $\theta = -0.7^\circ$ του αγωγού.....	89
7.4 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής από την οριζόντια ροή.....	103
7.5 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για τη ροή προς τα κάτω ($\theta = -0.7^\circ$).....	104
7.6 Πάχος υγρής στοιβάδας.....	106
7.6.1 Στρωματοωμένη ροή.....	107

7.6.2	Διαλείπουσα ροή.....	110
7.6.3	Ροή προς τα κάτω $\theta=-0,7$	111
8	. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	114
9	. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	116
10	. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	120

1.1 Εισαγωγικά

Η διφασική και γενικότερα η πολυφασική ροή είναι η συνηθέστερη ροή των ρευστών στη φύση. Η ροή του αίματος, η κίνηση του καπνού και των σύννεφων, το άδειασμα της μπίρας στο ποτήρι και η παρασκευή του γαλλικού καφέ είναι λίγα από τα πολλά παραδείγματα της καθημερινής μας επαφής με τα διφασικά ή πολυφασικά συστήματα. Πολυφασικές ροές συναντώνται σε περισσότερες από τις μισές φυσικές και χημικές διεργασίες. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν οι διεργασίες της απόσταξης, της ψύξης, του κλιματισμού, αλλά και της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.

Η συνηθέστερη πολυφασική ροή είναι η διφασική ροή υγρού-αερίου (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Διφασική ροή υγρού - αερίου

Ροή υγρού-αερίου συμβαίνει στις διεργασίες συμπύκνωσης και εξάτμισης, σε αγωγούς που μεταφέρουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο ή που μεταφέρουν γεωθερμικά ρευστά. Ροή υγρού-υγρού συμβαίνει κατά τη ροή δύο μη αναμίξιμων ρευστών, όπως για παράδειγμα στην εκχύλιση υγρού-υγρού και στην ταυτόχρονη ροή νερού-πετρελαίου. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε συχνά τριφασική ροή: νερό-πετρέλαιο-αέριο (φυσικό αέριο ή/και διοξείδιο του άνθρακα). Ροή αερίου-στερεού παρατηρείται στη διεργασία της καύσης, στις ρευστοστερεές κλίνες, στη δέσμευση των αερολυμάτων και στην πνευματική μεταφορά στερεών. Τέλος, ροή υγρού-στερεού απαντά κατά τη ροή αιωρημάτων, όπως η ροή ιζημάτων με τα ποτάμια, οι πολφοί γεωτρήσεων, οι πολφοί άνθρακα-νερού και η ροή σε κρυσταλλωτήρες.

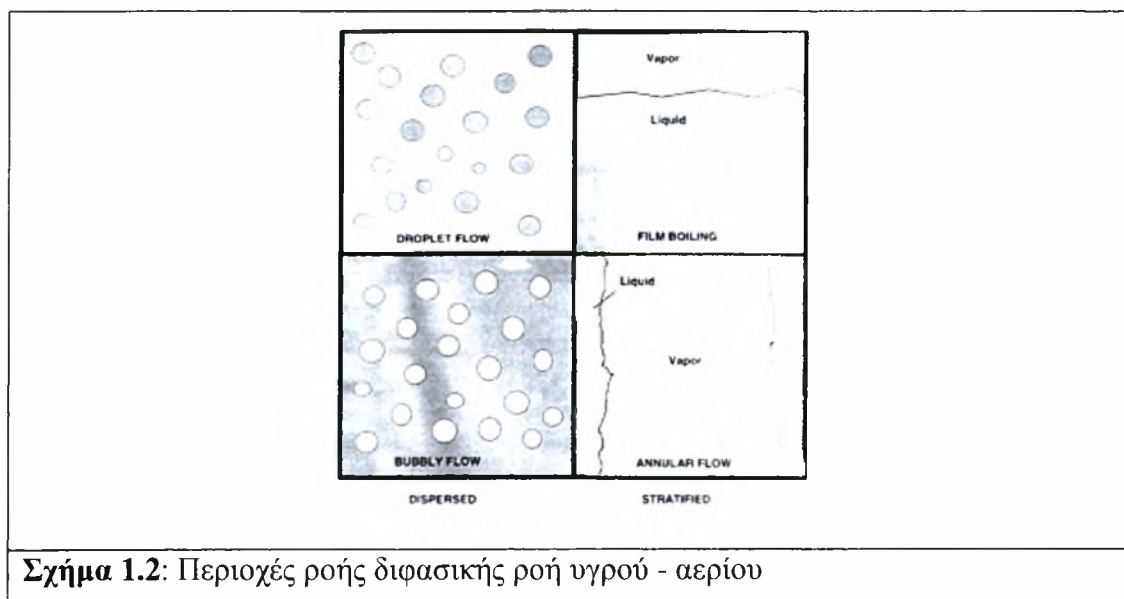
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ

Τα τελευταία χρόνια η διφασική ροή σε οριζόντιους ή σε κεκλιμένους αγωγούς έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διφασική ροή απαντάται σε πλήθος εφαρμογών όπως στα συστήματα διακίνησης γεωθερμικών ρευστών και προϊόντων πετρελαίου, στα συστήματα ψύξης και θέρμανσης καθώς και σε συστήματα απαραίτητα για τη λειτουργία πυρηνικών και χημικών αντιδραστήρων.

Η μελέτη της διφασικής ροής έχει όχι μόνο ακαδημαϊκό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον, αφού μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο στη βελτιστοποίηση αλλά και στο σχεδιασμό νέων συσκευών.

Η διφασική ροή διέπεται βασικά από τις ίδιες βασικές αρχές της ρευστομηχανικής που προσδιορίζουν και τη μονοφασική ροή ρευστών (υγρού ή αερίου). Όμως, στη διφασική ροή οι δύο φάσεις (υγρή και αέρια) κατανέμονται στον αγωγό ή στη συσκευή με ποικίλους τρόπους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφόρων τύπων ή καθεστώτων ροής. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις διφασικές ροές είναι πολύπλοκες με αποτέλεσμα να είναι δυσχερής η ακριβής μαθηματική τους έκφραση, αφού η κάθε φάση επηρεάζεται από τις δικές της ιδιότητες και συνθήκες, ενώ συγχρόνως επηρεάζει και επηρεάζεται από την άλλη φάση.

Ένα από τα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής σε οριζόντιο ή κεκλιμένο επίπεδο είναι ότι η διεπιφάνεια υγρού/αερίου μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό μορφών (Σχήμα 1.2) που είναι γνωστές ως **περιοχές ή καθεστώτα ροής (flow regimes or patterns)**.



Σχήμα 1.2: Περιοχές ροής διφασικής ροής υγρού - αερίου

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα καθεστώτα ροής είναι η γεωμετρία του συστήματος, οι παροχές και οι ιδιότητες των δύο φάσεων. Οι κυριότερες περιοχές που

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ

παρατηρούνται είναι: η διαχωρισμένη ροή με ή χωρίς κύματα (smooth/wavy stratified flow), η διαλείπουσα ροή (slug flow) και η δακτυλιοειδής ροή (annular flow).

Η γνώση των χαρακτηριστικών της οριζόντιας και ελαφρώς κεκλιμένης διφασικής ροής όπως το πάχος της υγρής στοιβάδας (film), η πτώση πίεσης και ο συμπαρασυρμός (entrainment) είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό των προαναφερθέντων συστημάτων.

Για τη μελέτη των καθεστώτων ροής χρησιμοποιούνται οι χάρτες ροής. Πρόκειται δηλαδή για λογαριθμικά διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή της φαινομενικής ταχύτητας του αερίου (οριζόντιος άξονας) συναρτήσει της φαινομενικής ταχύτητας του υγρού (κατακόρυφος άξονας). Η κατασκευή ενός τέτοιου χάρτη ροής είναι δύσκολη αφού μία μικρή αλλαγή στη διάμετρο, στην κλίση ή στο ιξώδες επιφέρει και αλλαγή στο χάρτη ροής.

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη μελέτη της επίδρασης της κλίσης του αγωγού στα καθεστώτα ροής. Το διφασικό μείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι νερό-αέρας.

1.2 Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών

Οι βασικοί νόμοι της ρευστοδυναμικής διέπουν και τη διφασική ροή, με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις που την περιγράφουν είναι πιο πολύπλοκες και περισσότερες από ότι για την περιγραφή της μονοφασικής ροής. Η ανάλυση της διφασικής ροής στηρίζεται κυρίως σε πειραματικά δεδομένα καθώς και σε απλά ή σύνθετα αναλυτικά μοντέλα τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν ως οι εξής:

1. Εμπειρικές Σχέσεις. Είναι εύκολες στη χρήση αλλά όχι ιδιαίτερα αξιόπιστες. Στηρίζονται σε πειραματικές μετρήσεις και δίνονται με τη μορφή εξισώσεων. Δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις, επειδή προέκυψαν από πειράματα σε συγκεκριμένες συνθήκες.

2. Απλά Αναλυτικά Μοντέλα. Μοντέλα τα οποία δεν παίρνουν υπόψη τους τις λεπτομέρειες της ροής, αν και μερικές φορές μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στη πρόβλεψη διαφόρων παραμέτρων. Σε αυτά τα μοντέλα γίνεται χρήση των γενικευμένων εξισώσεων συνέχειας, ορμής και ενέργειας.

- Στο **μοντέλο ομογενούς ροής (homogeneous flow model)**, τα δύο ρευστά περιγράφονται ως ένα ψευδορευστό με ενδιάμεσες τιμές φυσικών ιδιοτήτων και το οποίο υπακούει στους νόμους της μονοφασικής ροής. Στο μοντέλο αυτό η

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ

ταχύτητα πίεση και θερμοκρασία θεωρούνται κοινά για τις δύο φάσεις. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του είναι μικρή, αφού δεν λαμβάνει υπόψη τη διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δυο φάσεων.

- Στο **μοντέλο διαχωρισμένης ροής (separated flow model)** οι δύο φάσεις θεωρούνται ότι ρέουν η μία χωριστά από την άλλη και οι βασικές εξισώσεις γράφονται ξεχωριστά για κάθε φάση. Δηλαδή το μοντέλο αυτό παίρνει υπόψη του ότι οι δύο φάσεις μπορεί να έχουν διαφορετική ταχύτητα και φυσικές ιδιότητες. Υπάρχει συνεπώς μεταφορά ορμής ανάμεσα στις δύο φάσεις.

3. Σύνθετα Μοντέλα. Σ' αυτή την περίπτωση γίνεται προσπάθεια για ανάπτυξη σχέσεων για ορισμένες παραμέτρους, όπως η κατανομή της ταχύτητας και της συγκέντρωσης, ή για συγκεκριμένα καθεστάτα ροής ξεκινώντας από κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις. Η περιγραφή του μοντέλου της ροής είναι ακριβής, όμως παρουσιάζεται αυξημένη δυσκολία στην επίλυση των εξισώσεων.

1.3 Σύμβολα - Παράμετροι της διφασικής ροής

Στη μελέτη της διφασικής ροής πρέπει να συνεκτιμηθούν και να υπολογισθούν ένα πλήθος ιδιοτήτων των δύο ρευστών αλλά και παραμέτρων τους. Αυτές διακρίνονται σε:

Κύριες παράμετροι

- Συνθήκες: πίεση, θερμοκρασία, παροχές
- Γεωμετρικοί: διατομή και ισοδύναμη διάμετρος ροής, θερμαινόμενη επιφάνεια
- Θερμικοί: ειδική θερμοροή κ.λ.π.

Υπολογιζόμενες παράμετροι

- Μαζικές παροχές (στην εναλλαγή φάσης)
- Ποιότητα, πτώση πίεσης, κλάσμα κενού

Ιδιότητες ρευστών

- Πυκνότητα, ιξώδες, θερμική αγωγιμότητα, ενθαλπία, ειδική θερμότητα

Αρκετές παράμετροι της διφασικής ροής είναι συνέπεια του γεγονότος ότι, λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο φάσεων, η ελαφρότερη φάση ρέει ταχύτερα. Μερικές από τις ποσότητες που συναντιούνται σε ένα κείμενο διφασικής ροής και είναι χρήσιμες στο σχεδιασμό μιας συσκευής ή διεργασίας είναι οι εξής:

Πτώση πίεσης, Δp :

Είναι το ολοκλήρωμα του διαφορικού της πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Η σημασία της είναι προφανής στον υπολογισμό της ισχύος άντλησης των ρευστών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ

$$\Delta P = \int_0^L (dP/dz) dz \quad (1.1)$$

Οι δύο ακόλουθες ποσότητες είναι ιδιαίτερα σημαντικές γιατί προσδιορίζουν το χρόνο παραμονής των ρευστών στο σύστημα (μέγεθος συσκευών) και γιατί χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης.

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 μέση ταχύτητα από την υγρή, φαινόμενο που χαρακτηρίζεται ως «συγκράτηση» ή «ολίσθηση» της μιας φάσης ως προς την άλλη.

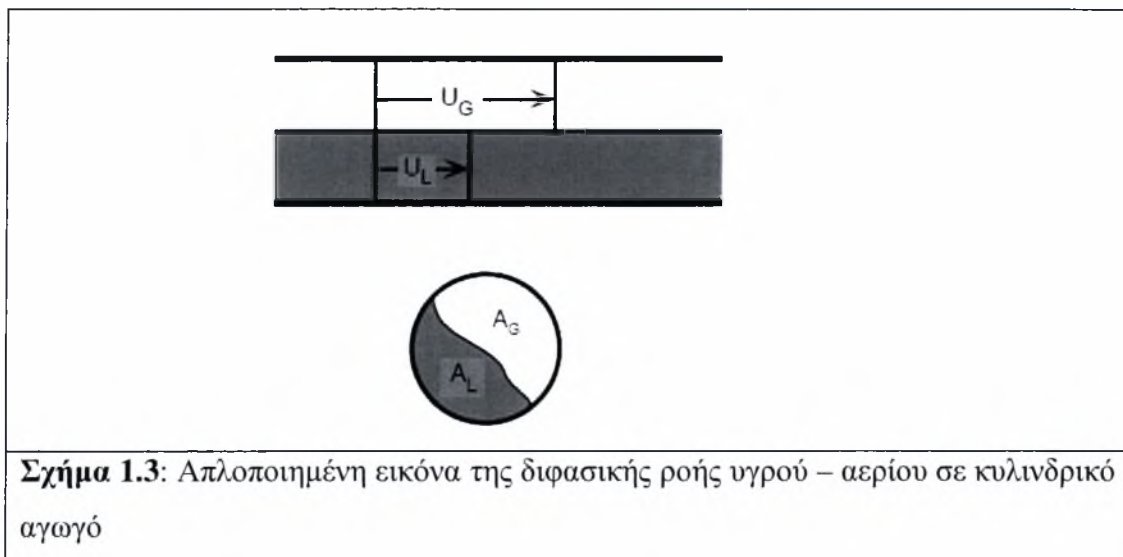
- **Συγκράτηση υγρού (R, holdup)** ορίζεται ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το υγρό στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του.
- **Κλάσμα κενού (α , void fraction)** είναι ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το αέριο στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. Εάν το εμβαδόν της διατομής του αγωγού είναι A και τα εμβαδά της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και τη υγρή φάση αντίστοιχα είναι A_G και A_L , τότε

$$\alpha = \frac{A_G}{A} \quad (1.2)$$

όπου $A = A_G + A_L$. Το κλάσμα κενού μπορεί να μετρηθεί με αξιοπιστία με τη μέθοδο 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 στη βιβλιογραφία απαντούν με μικρά γράμματα, ενώ συχνά αντί για L χρησιμοποιείται το γράμμα f. Τα δύο αυτά μεγέθη αυτά 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:

$$R + \alpha = 1 \quad (1.3)$$

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ



Σχήμα 1.3: Απλοποιημένη εικόνα της διφασικής ροής υγρού – αερίου σε κυλινδρικό αγωγό

Ποιότητα, x (quality):

Στη θεώρηση φαινομένων στα οποία συμβαίνει αλλαγή φάσης είναι καταλληλότερη τις περισσότερες φορές η χρήση του όρου της (μαζικής) *ποιότητας* (x , quality), η οποία ορίζεται ως το κλάσμα μάζας της αέριας φάσης:

$$x = \frac{\dot{m}_G}{G} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \quad (1.4)$$

Μαζικές Ροές (total mass flow):

Η συνολική μαζική ροή ορίζεται ως το άθροισμα της μαζικής παροχής του υγρού (GL) και του αερίου (GG), σε kg/s:

$$G = G_L + G_G \quad (1.5)$$

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι οι δείκτες **L** και **G** εκφράζουν την υγρή και την αέρια φάση αντίστοιχα.

Φαινομενικές Ταχύτητες Φάσεων:

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

$$U_{GS} = \frac{Q_G}{A} = \frac{\dot{m}_G \rho_G}{A} \quad (1.6)$$

και η αντίστοιχη της υγρής φάσης ως

$$U_{LS} = \frac{Q_L}{A} = \frac{\dot{m}_L \rho_L}{A} \quad (1.7)$$

όπου Q_G είναι η ογκομετρική παροχή της αέριας φάσης, Q_L η ογκομετρική παροχή της υγρής φάσης και ρ η πυκνότητα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ

Μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (Average Phase Velocities):

Η μέση πραγματική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$U_G = \frac{Q}{A\alpha} = \frac{G_G}{\rho_G A\alpha} = \frac{U_{GS}}{\alpha} \quad (1.8)$$

και η μέση πραγματική ταχύτητα υγρής φάσης γράφεται:

$$U_L = \frac{Q}{A\alpha} = \frac{G_L}{\rho_L A\alpha} = \frac{U_{LS}}{\alpha} \quad (1.9)$$

όπου α είναι το κλάσμα κενού.

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

$$U_M = \frac{Q_G + Q_L}{A} = U_{GS} + U_{LS} \quad (1.10)$$

Ταχύτητα Ολίσθησης, S (Slip Ratio):

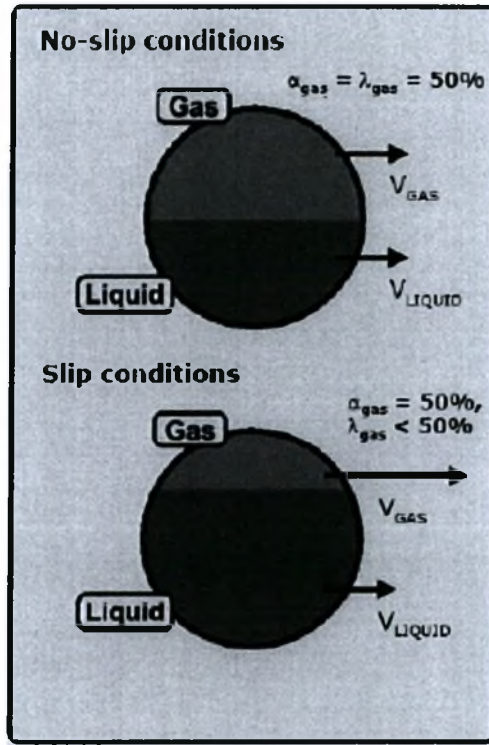
Η ταχύτητα ολίσθησης, S (Slip Ratio), εκφράζει τη σχετική ταχύτητα της αέριας φάσης (U_G) ως προς την υγρή (U_L)

$$S = \frac{U_G}{U_L} = \frac{G_G \rho_L A_L}{G_L \rho_G A_G} = \left(\frac{x}{1-x}\right) \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right) \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \quad (1.11)$$

Συμπαρασυρμός, E (entrainment):

Είναι το κλάσμα του υγρού που βρίσκεται με τη μορφή σταγόνων διεσπαρμένο στην αέρια φάση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ



Σχήμα 1.4: Συγκράτηση υγρού και κλάσμα κενού

2.1 Καθεστώτα Ροής

Κύριο χαρακτηριστικό της διφασικής ροής υγρού – αερίου είναι ότι η διεπιφάνειά τους μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό δυνατών μορφών, οι οποίες είναι γενικά γνωστές με το όνομα *καθεστώτα ή πρότυπα ή περιοχές ροής (flow patterns, flow regimes)*. Η δημιουργία ενός συγκεκριμένου καθεστώτος ροής εξαρτάται από τις συνθήκες της *ροής* (παροχές, πίεση) και της *μεταφοράς θερμότητας*, από τις *φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων* (πυκνότητες, ιξώδη, επιφανειακή τάση), καθώς και από τη *γεωμετρία του αγωγού* (σχήμα διατομής, κλίση, ισοδύναμη διάμετρος), την ύπαρξη τασιενεργών ή μειοτριβωτικών ουσιών, τον τρόπο εισόδου (ή δημιουργίας) της αέριας φάσης.

Οι πρώτες εργασίες στον προσδιορισμό των περιοχών ροής βασιζόνταν κυρίως σε οπτικές παρατηρήσεις. Αργότερα ο προσδιορισμός αυτός βοηθήθηκε με φωτογράφιση και με πλήθος από πειραματικές μεθόδους.

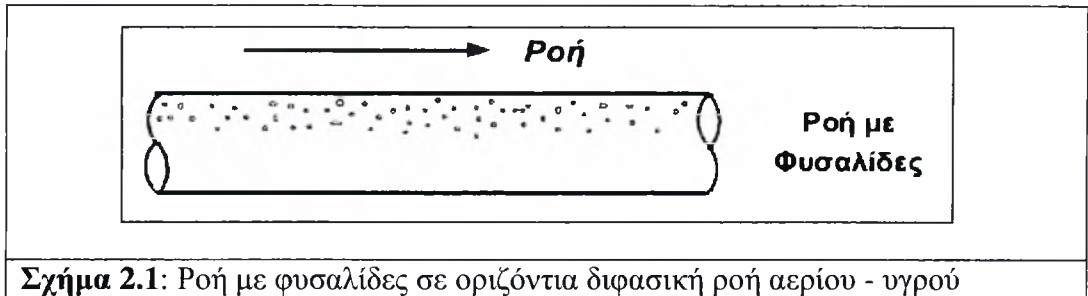
Εάν αναζητήσουμε βιβλιογραφικά πληροφορίες για τα καθεστώτα ροής θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός ονομάτων καθεστώτων ροής το οποίο υποδηλώνει και την υποκειμενικότητα των ορισμών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη πολλών ονομάτων για την ίδια περιοχή καθώς και στην ύπαρξη υβριδικών καθεστώτων ροής δηλαδή καθεστώτων που βρίσκονται στο στάδιο μετάπτωσης από ένα καθεστώς στο άλλο.

2.1.1 Οριζόντια Ροή - ομοροχή

Οι περιοχές ροής σε οριζόντιους αγωγούς είναι συνήθως περισσότερο σύνθετες από ότι σε κατακόρυφους, ως συνέπεια της επίδρασης της βαρύτητας, η οποία τείνει να συγκεντρώσει το υγρό στο κάτω μέρος του αγωγού και το αέριο στο επάνω μέρος του.

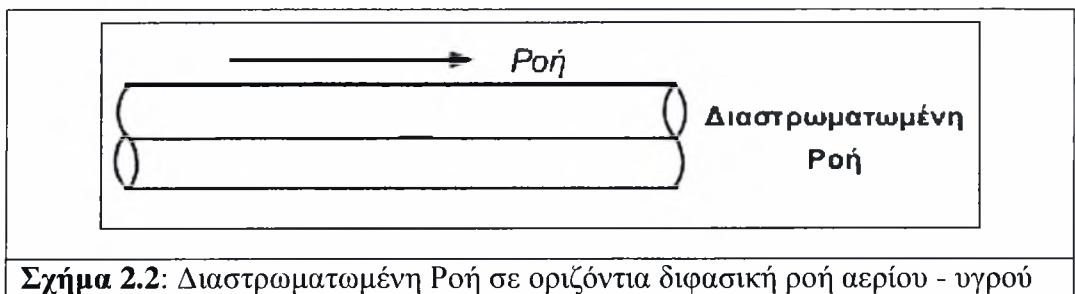
Πληθώρα περιοχών ροής έχουν αναγνωρισθεί και προταθεί στη βιβλιογραφία για ροή με ομοροχή σε οριζόντιους ή σχεδόν οριζόντιους αγωγούς. Οι κυριότεροι τύποι καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό είναι οι εξής:

- i. **Ροή με φυσαλίδες (Dispersed Bubble Flow):** Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διεσπαρμένων φυσαλίδων αερίου στη συνεχή υγρή φάση, οι οποίες τείνουν να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού και σε ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται σαν αφρός (froth flow). Η υγρή φάση είναι συνεχής και μία διασπορά φυσαλίδων ρέει στο υγρό μέσο. Αυτή η περιοχή ροής δεν παρατηρήθηκε στα πειράματά μας διότι απαιτεί μεγάλη παροχή του υγρού. Η ροή με φυσαλίδες απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Ροή με φυσαλίδες σε οριζόντια διφασική ροή αερίου - υγρού

- ii. **Διαστρωματωμένη (Stratified Flow):** Στον τύπο αυτό της ροής, το υγρό ρέει στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος. Σχηματίζεται για μικρές παροχές των ρευστών. Η διεπιφάνεια είναι αρχικά λεία (smooth), ενώ με την αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης καλύπτεται με κύματα (wavy). Σε χαμηλές ταχύτητες υγρού και αερίου παρατηρούνται δισδιάστατα κύματα μικρού πλάτους, με αδιατάρακτη επιφάνεια, που επεκτείνονται σε όλο το πλάτος του σωλήνα. Με την αύξηση της παροχής του αερίου, εμφανίζονται κύματα μεγάλου πλάτους (roll waves or disturbance or Kelvin-Helmholtz waves), η επιφάνεια των κυμάτων γίνεται τραχεία, και το υγρό μπορεί να αναρριχάται στα τοιχώματα του σωλήνα, χωρίς όμως να διαβρέχει ολόκληρη την περίμετρό του. Με περαιτέρω αύξηση της παροχής του αερίου σταγόνες από το υγρό αρχίζουν να κτυπούν στο πάνω μέρος του αγωγού, χαρακτηριστικό του φαινομένου που είναι γνωστό ως ροή με εκνέφωση (atomization). Η διαστρωματωμένη ροή απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.2.

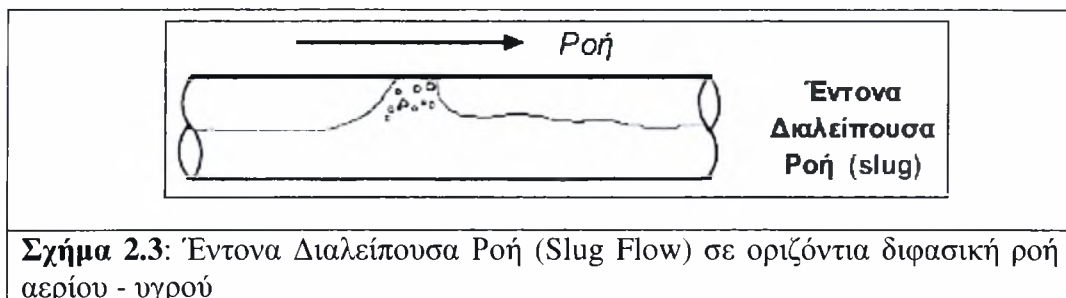


Σχήμα 2.2: Διαστρωματωμένη Ροή σε οριζόντια διφασική ροή αερίου - υγρού

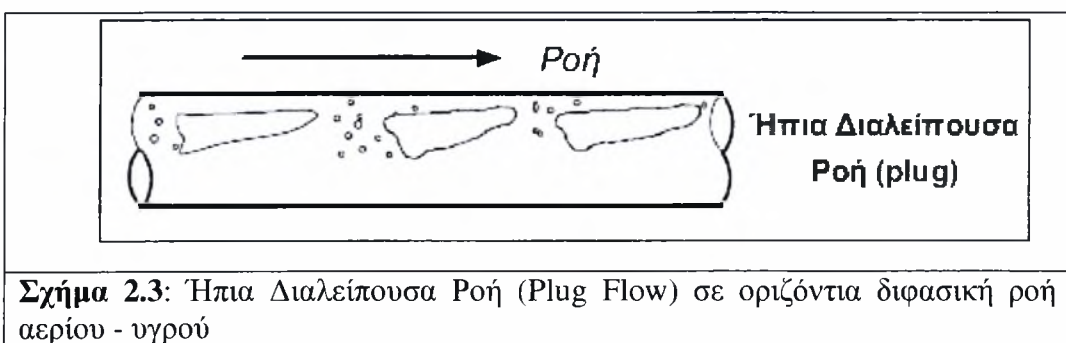
- iii. **Έντονα Διαλείπουσα Ροή (Slug ή Intermittent Flow):** Χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών (slugs) από τον αγωγό, οι οποίες κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Οι υγρές αυτές μάζες μπορεί να περιέχουν και να παρασύρουν πολυάριθμες φυσαλίδες αερίου. Η διαλείπουσα ροή είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη για τις περισσότερες εφαρμογές, επειδή προκαλεί

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

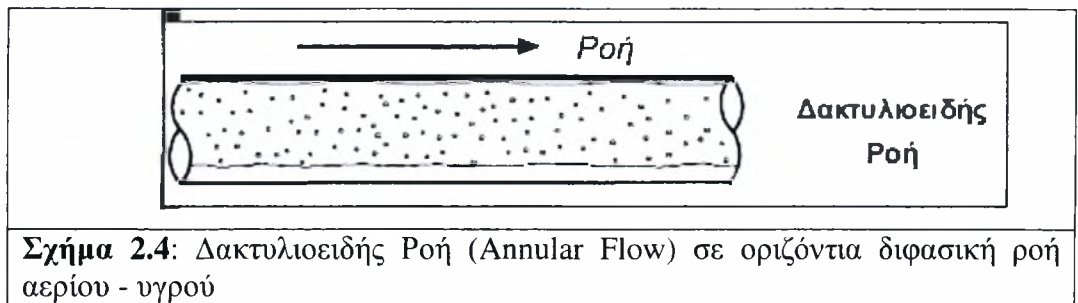
απότομες αυξήσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να δονούνται οι σωληνώσεις, να χρειάζονται μεγάλοι διαχωριστές κ.α. Έτσι είναι ιδιαίτερα σημαντικό για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές η πρόβλεψη της μετάπτωσης σε αυτό καθεστώς. Η Έντονα Διαλείπουσα Ροή απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.3.



- iv. **Ήπια Διαλείπουσα Ροή (Plug Flow).** Η ροή αυτή συνίσταται από διαμήκεις φυσαλίδες (elongated bubbles), οι οποίες ρέουν στο επάνω τμήμα του αγωγού. Διαφοροποιείται από την έντονα διαλείπουσα ροή από το σχήμα της κεφαλής της φυσαλίδας. Η Έντονα Διαλείπουσα Ροή απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.4.



- v. **Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow).** Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός υγρού δακτυλίου που σχηματίζεται στην περιφέρεια του αγωγού, ο οποίος δεν είναι συμμετρικός λόγω βαρύτητας. Μέρος του υγρού συμπαρασύρεται από την αέρια φάση με τη μορφή λεπτών σταγονιδίων. Το είδος αυτό της ροής εμφανίζεται σε μεγάλες παροχές του αερίου και όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι παροχές τόσο μειώνεται και η ασυμμετρία του υγρού δακτυλίου.



- vi. **Ψευδο-διαλείπουσα Ροή (Pseudo-slug):** Το είδος αυτό της ροής μοιάζει αφενός με τη δακτυλιοειδή ροή, στο ότι το υγρό σχηματίζει μία συνεχή στοιβάδα στην περιφέρεια του αγωγού και αφετέρου με τη διαλείπουσα ροή, στο ότι παρουσιάζονται υγρές μάζες που μοιάζουν με “slugs”. Οι τελευταίες δεν ρέουν με την ταχύτητα του αερίου και έτσι δεν προκαλούν απότομες μεταβολές πίεσης. Η παρουσία υγρής στοιβάδας μεγάλου πάχους στον πυθμένα του σωλήνα δίνει τη εντύπωση διαχωρισμένης ροής με κυματισμούς.
- vii. **Ομιχλώδης ροή ή Ροή με Υγρασία (wispy-annular flow):** Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της υγρής φάσης, η συγκέντρωση σταγονιδίων στο χώρο της αέριας φάσης μεγαλώνει. Σα συνέπεια έχουμε τη συνένωση σταγονιδίων με τη μορφή δεσμών ή ραβδώσεων. Η ροϊκή αυτή κατάσταση είναι χαρακτηριστική για ροές με μεγάλη ροή μάζας. Αυτή η περιοχή ροής δεν παρατηρήθηκε στα πειράματά μας διότι απαιτεί μεγάλη παροχή του υγρού.

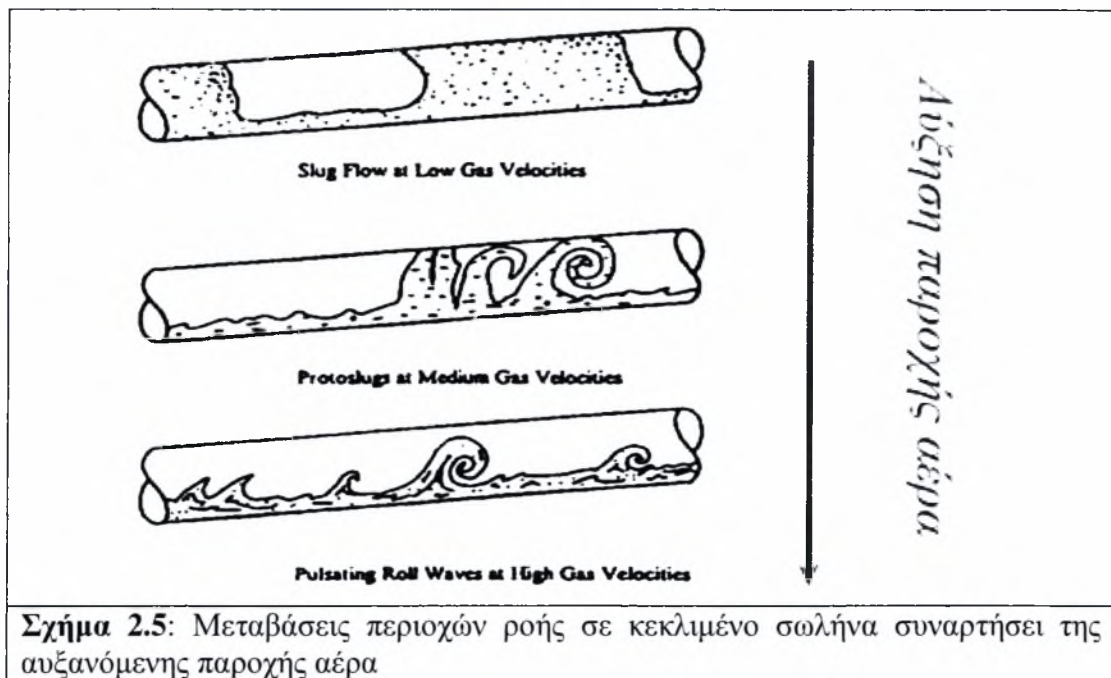
2.1.2 Ροή σε κεκλιμένους αγωγούς

Οι περισσότεροι από τους χάρτες περιοχών ροής που υπάρχουν στη βιβλιογραφία είναι για κατακόρυφους ή οριζόντιους αγωγούς, ενώ λιγότερες είναι οι προσπάθειες που έχουν γίνει στη μελέτη ροών σε αγωγούς με κλίση, παρά την τεράστια σημασία τέτοιων ροών.

Οι πιο σημαντικές παρατηρήσεις οι οποίες προέκυψαν κατόπιν μελετών σε αγωγούς με κλίση είναι:

- Η μετάπτωση από τη διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην κλίση του αγωγού. Δηλαδή θετική κλίση 1° (ροή προς τα πάνω) μπορεί να εξαφανίσει σχεδόν τη διαχωρισμένη ροή. Αρνητική κλίση περιορίζει σημαντικά τη διαλείπουσα ροή σε όφελος της διαχωρισμένης ροής.
- Η μετάπτωση από τη διαλείπουσα στη δακτυλιοειδή ροή και στη ροή με φυσαλίδες επηρεάζονται ελάχιστα από την κλίση του αγωγού.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ



Σχήμα 2.5: Μεταβάσεις περιοχών ροής σε κεκλιμένο σωλήνα συναρτήσει της αυξανόμενης παροχής αέρα

2.2 Βασικά Χαρακτηριστικά Διφασικής Ροής

2.2.1 Συμπαρασυρμός

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της διφασικής ροής είναι ο συμπαρασυρμός (E). Ο συμπαρασυρμός είναι το κλάσμα της παροχής του υγρού που βρίσκεται στον αέριο πυρήνα με μορφή μικρών σταγονιδίων ως προς τη συνολική υγρή παροχή. Ο συμπαρασυρμός επηρεάζεται από δύο βασικές διεργασίες, την **εκνέφωση** δηλαδή την παραγωγή σταγονιδίων από την επιφάνεια των κυμάτων και την **εναπόθεση** των σταγονιδίων στην υγρή στοιβάδα. Ο συμπαρασυρμός σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή (που συμβαίνει σε απόσταση μερικών διαμέτρων από το σημείο ανάμιξης) αποκτά σταθερή τιμή και ο ρυθμός της εκνέφωσης γίνεται ίσος με τον αριθμό της εναπόθεσης.

Θα πρέπει τέλος να επισημανθεί πως έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει ένα όριο παροχής της υγρής στοιβάδας κάτω από το οποίο δεν προκαλείται εκνέφωση ανεξάρτητα από την αύξηση της ταχύτητας του αερίου.

2.2.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Κυμάτων

Τα κύρια χαρακτηριστικά των κυμάτων όπως φαίνονται και στο σχήμα 2.6 είναι:

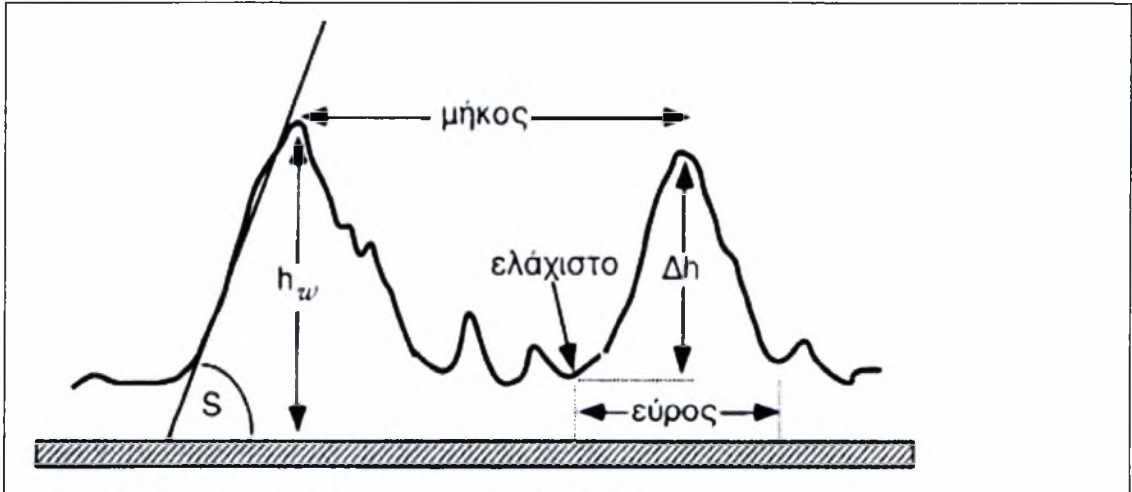
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

- **Το πλάτος κύματος** (wave amplitude) το οποίο ορίζεται ως το μισό της υψομετρικής διαφοράς, Δh , μεταξύ ενός ελάχιστου και του αμέσως επόμενου μεγίστου της υγρής στοιβάδας (Nencini & Andreussi, 1983).
- **Το ύψος κύματος h_w** το οποίο ορίζεται ως η απόσταση της κορυφής του από το τοίχωμα του αγωγού.
- **Το μήκος κύματος λ** , ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών κυμάτων. Το μήκος κύματος, η ταχύτητα του κύματος και η χαρακτηριστική του συχνότητα εκφράζονται από τη θεμελιώδη σχέση της κυματικής:

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

- **Το εύρος του κύματος ΔL** ορίζεται ως η οριζόντια απόσταση δύο διαδοχικών ελαχίστων της υγρής στοιβάδας μεταξύ των οποίων ορίζεται το κύμα διαταραχής.
- **Η αιχμηρότητα S** περιγράφει το σχήμα των κυμάτων διαταραχής και δίνεται από τη σχέση:

$$S = \arctan \frac{\Delta L}{2\Delta h} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.6: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Κυμάτων

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

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή είναι κυρίως η πυκνότητα των ρευστών, το ιξώδες, η επιφανειακή τάση και η διάμετρος του αγωγού.

Η μορφή της διεπιφάνειας αερίου και υγρού επηρεάζεται καθοριστικά από την πυκνότητα του αερίου. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της τελευταίας τόσο περισσότερο επηρεάζεται η μεταφορά των κυμάτων και δη αυτών που έχουν μεγάλο πλάτος. Σε μεγάλες δε πυκνότητες αερίου τα πρώτα κύματα που θα παρατηρηθούν θα είναι ακανόνιστα μεγάλου πλάτους κάτι που παρατηρείται στα υγρά μεγάλου ιξώδους. Εάν αλλάξει η πυκνότητα του υγρού δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή κατά τη μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή. Όμως η μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα παρατηρείται ότι γίνεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου και μεγαλώνει η περιοχή της ροής με φυσαλίδες (Weisman et al. 1979).

Ιξώδες είναι η ιδιότητα των ρευστών να ανθίστανται στην διάτμισή τους, δηλαδή στην κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του. Από φαινομενολογικής σκοπιάς το ιξώδες μοιάζει με την τριβή δύο στερεών σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή και κινούνται σχετικά. Γι' αυτό το λόγο ονομάζεται και εσωτερική τριβή. Η φύση όμως των δύο δυνάμεων είναι τελείως διαφορετική. Το ιξώδες ή συνεκτικότητα (viscosity), αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα των ρευστών. Μία επίδραση του ιξώδους είναι ότι επηρεάζει την αναρρίχηση του υγρού στα τοιχώματα του σωλήνα. Επιπλέον καθώς αυξάνεται η τιμή του ιξώδους χρειάζεται μεγαλύτερη παροχή αερίου για να ξεκινήσουν τα κανονικά δισδιάστατα κύματα. Επίσης με αύξηση πάλι του ιξώδους μικραίνει η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων. Η σημασία του ιξώδους έχει επισημανθεί και στη διδακτορική διατριβή του Δρ. Νικολάου Ανδρίτσου που αφορούσε στη διασική ροή σε οριζόντιους σωλήνες διαμέτρων 2.52, 5.08 και 9.53 cm και για υγρά με διαφορετικά ιξώδη. Μεταξύ άλλων παρατηρήθηκε ότι αύξηση του ιξώδους επιφέρει αύξηση στο μήκος κύματος των κυμάτων της διεπιφάνειας καθώς και ότι για σταθερή διάμετρο η μετάπτωση σε κύματα μεγάλου πλάτους είναι ανεξάρτητη του ιξώδους.

Η ροή όπως προαναφέραμε εξαρτάται από την επιφανειακή τάση. Μείωση της τελευταίας δεν προκαλεί σημαντικές αλλαγές προκειμένου για μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή και για μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα. Η σημαντικότερη αλλαγή που παρατηρείται είναι από στρωματωμένη σε στρωματωμένη με κύματα και εμφανίζεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου (Weisman et al. 1979).

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η διάμετρος του σωλήνα καθορίζει το βαθμό που το υγρό «αναρριχάται» περιφερειακά στα τοιχώματα του σωλήνα. Μικρή διάμετρος και υγρό με χαμηλό ιξώδες του δίνουν μεγαλύτερη «αναρριχητικότητα» στο υγρό. Με αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα παρατηρείται ότι η μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή γίνεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου και η μετάπτωση σε διαλείπουσα σε μεγαλύτερες παροχές υγρού. Επιπλέον η περιοχή ψευδοδιαλείπουσας ροής μικραίνει καθώς μεγαλώνει η διάμετρος του σωλήνα (Lin and Hantatty 1986).

Η επίδραση της κλίσης ενός αγωγού στη ροή εντοπίζεται κυρίως κατά τη μετάβαση μεταξύ της διαστρωματωμένης και της διαλείπουσας ή δακτυλιοειδούς ροής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνοντας την κλίση του αγωγού αυξάνονται οι δυνάμεις βαρύτητας που ενεργούν στο υγρό προκαλώντας μία αύξηση ή μείωση στην ταχύτητα του υγρού ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής. Για προς τα πάνω κλίση του αγωγού παρατηρούμε ότι η υγρή στιβάδα γίνεται λεπτότερη, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται δυσκολότερα τα slugs. Αντιθέτως, για κλίση του αγωγού προς τα κάτω η υγρή στιβάδα γίνεται παχύτερη.

2.4 Χάρτες περιοχών ροής

Η κοινή πρακτική μέχρι σήμερα στην παρουσίαση των ορίων μεταξύ των διαφόρων περιοχών ροής είναι οι δισδιάστατοι *χάρτες περιοχών ροής (flow regime maps)*. Οι άξονες των χαρτών αυτών απεικονίζουν παροχές ή/και ιδιότητες φάσεων καθώς και τη διάμετρο ή/και γεωμετρία του αγωγού (π.χ. κλίση).

Οι χάρτες αυτοί αφορούν συγκεκριμένα συστήματα και έχουν την αρχή τους στις εργασίες των *Bergelin & Gazley* (1949) και *Kosterin* (1949).

Οι *Bergelin & Gazley* (1949) μελέτησαν τις περιοχές ροής με έμφαση στην διαχωρισμένη ροή με κύματα προτείνοντας έναν από τους πρώτους χάρτες καθεστώτων ροής. Το διάγραμμά τους βασίστηκε σε δεδομένα στο σύστημα αέρα-νερού σε σωλήνα 1 in. Ως συντεταγμένες χρησιμοποιήσας τις μαζικές ροές του υγρού και του αερίου, M_L και M_G αντιστοίχως.

Ο *Kosterin* (1949) ανέπτυξε συσχετισμούς για περιοχές ροής.

Οι *Johnson & Abou-Sabe* (1952) κατασκεύασαν ένα χάρτη περιοχών ροής παρόμοιο μ' αυτόν των *Bergelin & Gazley* ο οποίος είναι βασισμένος στο σύστημα αέρα/νερού σε σωλήνα με διάμετρο 0.87 in.

Ο *Alves* (1954) καθόρισε οκτώ περιοχές ροής, προτείνοντας ένα χάρτη βασισμένο σε παρατηρήσεις για μίγματα αέρα-νερού και αέρα-λαδιού σε σωλήνα διαμέτρου 1 in.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Ως συντεταγμένες χρησιμοποιήσαν τις φαινομενικές ταχύτητες υγρού και αερίου αντίστοιχα, U_{SL} και U_{SG} . Και τα δύο αυτά συστήματα μπορούσαν να σχεδιασθούν σε έναν ενιαίο χάρτη.

Ο **Baker** (1954) κατασκεύασε έναν από τους πλέον γνωστούς και πρωτοποριακούς γενικευμένους χάρτες ροής σε οριζόντιο αγωγό που χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Βασισμένος στα δεδομένα παλαιότερων ερευνητών που αναφέρονταν στο σύστημα νερό-αέρας σχεδίασε τον όρο G/λ ως προς τον όρο $L\psi/G$. Για το σύστημα αέρας-νερό ο παραπάνω συνδυασμός είναι ισοδύναμος με αυτόν της μαζικής ταχύτητας αερίου G ως προς την κλίση της μαζικής ταχύτητας αερίου L/G . Ο Baker έκανε εισαγωγή των ακόλουθων παραμέτρων διόρθωσης των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών:

$$\lambda = \left(\frac{\rho_G}{0.075} \cdot \frac{\rho_L}{62.3} \right)^{0.5} \quad (2.3)$$

$$\psi = \left[\left(\frac{73}{\sigma} \cdot \frac{\mu_L}{1.0} \cdot \left(\frac{62.8}{\rho_L} \right)^2 \right)^{1/3} \right] \quad (2.4)$$

όπου ρ_G , ρ_L , οι πυκνότητες του αερίου και του υγρού αντίστοιχως, μ_L το ιξώδες του υγρού και σ η επιφανειακή τάση. Μειονέκτημα του χάρτη του Baker αποτελεί το γεγονός ότι δεν παίρνει υπόψιν του την επίδραση της διαμέτρου του αγωγού.

Οι **White & Huntington** (1955) κατασκεύασαν ένα χάρτη καθεστώτων ροής βασισμένο στα δεδομένα που πήραν μέσα σε αγωγούς 1, 1.5, και 2 in και για μίγματα όπως φυσικό αέριο-πετρέλαιο, αέρας-πετρέλαιο και αέρας-νερό. Χρησιμοποίησαν τις μαζικές ταχύτητες υγρού και αερίου L και G ως συντεταγμένες.

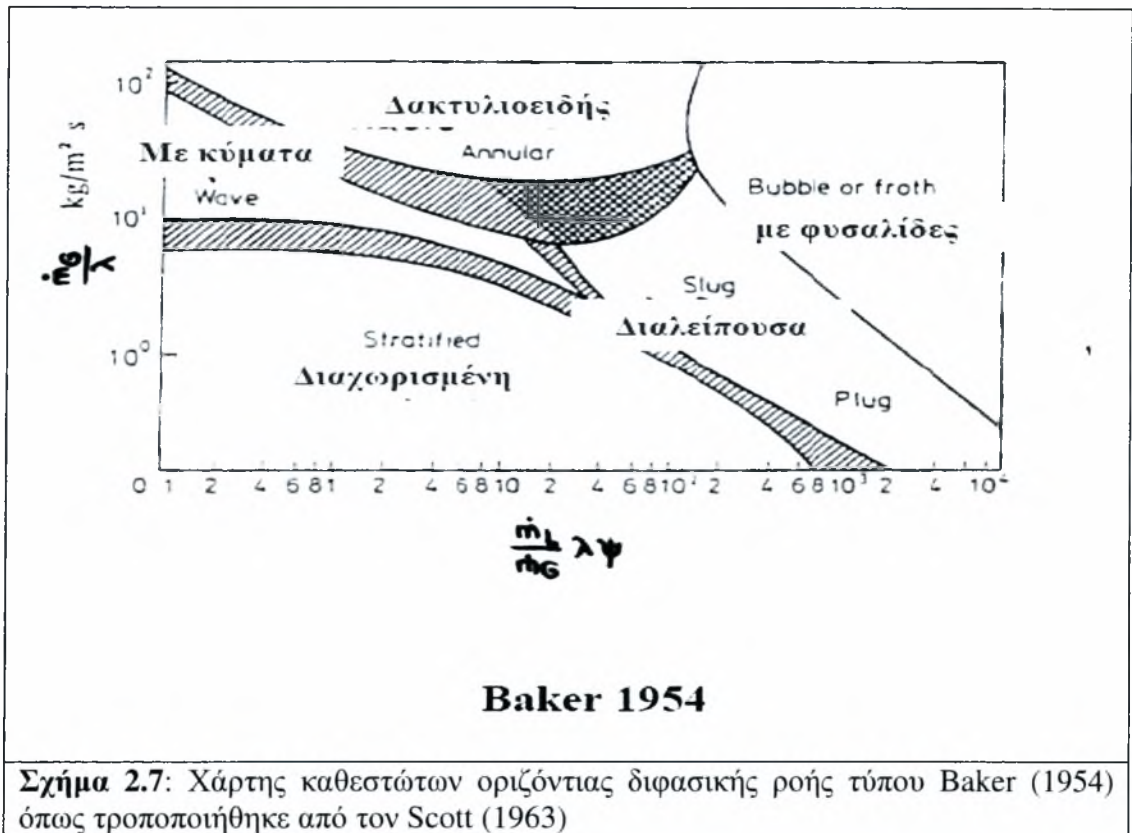
Ο **Hoogendoorn** (1959) περιέγραψε αναλυτικά τις περιοχές ροής και πρότεινε σχέσεις υπολογισμού της πτώσης πίεσης. Πιο συγκεκριμένα ανέπτυξε χάρτες καθεστώτων ροής χρησιμοποιώντας ως συντεταγμένες την ταχύτητα του μίγματος V_M και το κλάσμα όγκου αερίου εισαγωγής C_G σε συστήματα όπως αέρας-πετρέλαιο και αέρας-νερό. Ο Hoogendoorn παρατήρησε μικρές επιδράσεις της διαμέτρου των αγωγών και του ιξώδους του υγρού για ιξώδες μικρότερο από 50 cp.

Οι **Govier και Omer** (1962) ανέπτυξαν ένα χάρτη για σύστημα αέρα-νερού σε αγωγό 1.26 in. Ως συντεταγμένες στο χάρτη χρησιμοποιήθηκαν οι μαζικές ταχύτητες υγρού και αερίου L και G , αντίστοιχως.

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

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

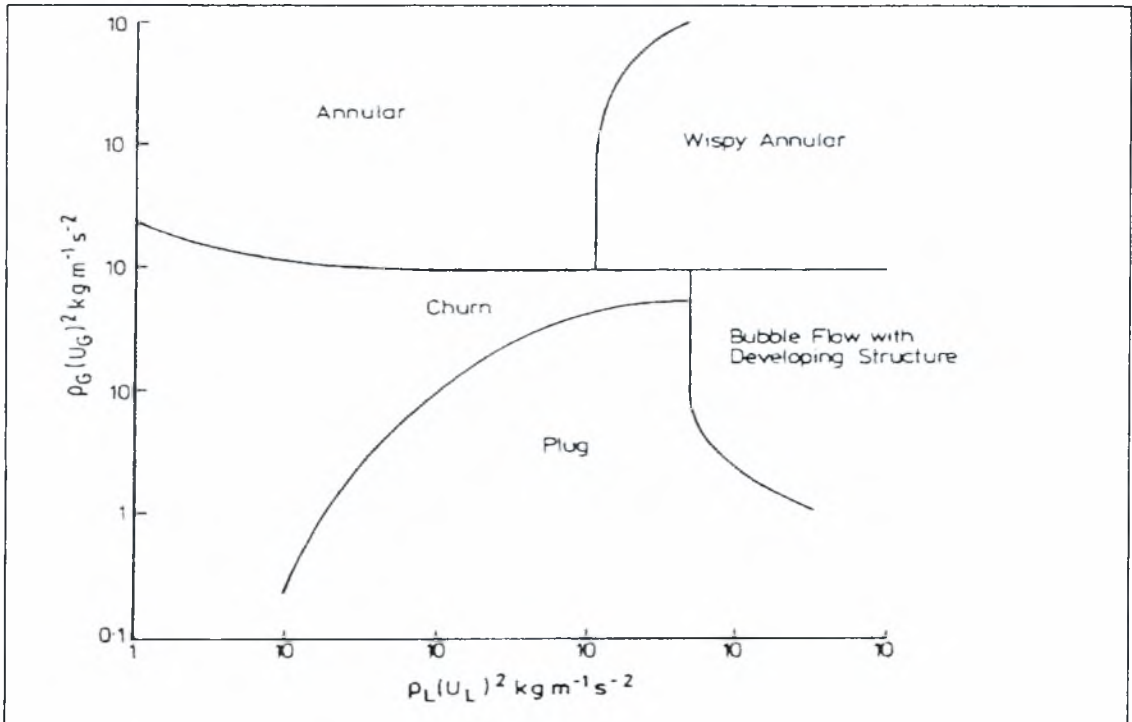
θέση των συνόρων της μιας περιοχής ροής από την άλλη, αλλά στη θέση τους μία ευρεία ταινία ανάμεσα στις διάφορες περιοχές ροής.



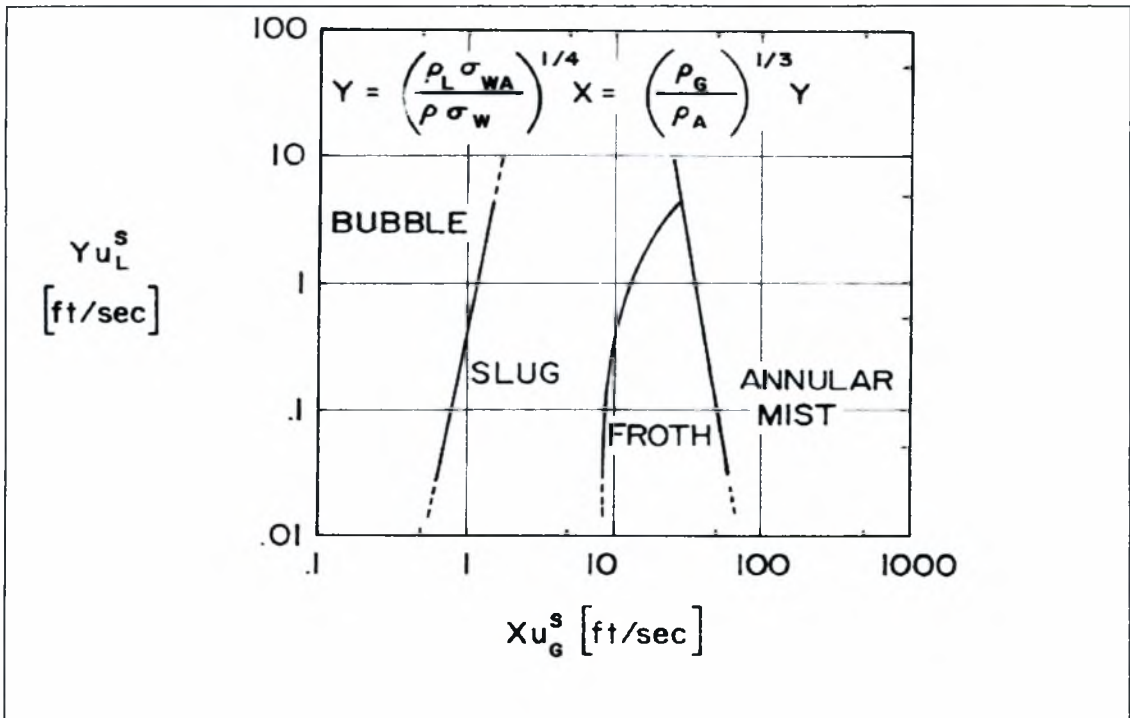
Σχήμα 2.7: Χάρτης καθεστώτων οριζόντιας διφασικής ροής τύπου Baker (1954) όπως τροποποιήθηκε από τον Scott (1963)

Στη δεκαετία του 1970 σχεδιάστηκαν διαγράμματα χαρτών περιοχών ροής με βάση πειραματικά δεδομένα με περιορισμένη εφαρμογή ροής σε κατακόρυφους αγωγούς οι οποίοι χρησιμοποιούν ως συντεταγμένες τις φαινομενικές ταχύτητες ή τις μαζικές παροχές των δύο φάσεων, συχνά σε συνδυασμό με γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος και τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών. Τέτοιοι χάρτες περιοχών ροής έχουν σχεδιαστεί πολλοί, όπως των Griffith & Wallis, Duns & Ros (1963), Hewitt & Roberts (1969), των Govier & Aziz (1972) και του Gould (1974). Ο Gould μελέτησε τα καθεστάτα ροής σ' έναν αγωγό με κλίση 45° καθώς επίσης και στις οριζόντιες και κατακόρυφες θέσεις. Σχεδίαση τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τους αριθμούς ταχύτητας υγρού και αερίου όπως προτείνονται από τους Duns και Ros. Καθόρισε τρία καθεστάτα ροής που αντιστοιχούν στη φυσαλίδα (υγρό-συνεχής), διαλείπουσα ροή (και οι δύο φάσεις συνεχείς) και δακτυλιοειδή ροή (φάση αερίου συνεχής). Οι προαναφερόμενοι χάρτες παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.8-2.10.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

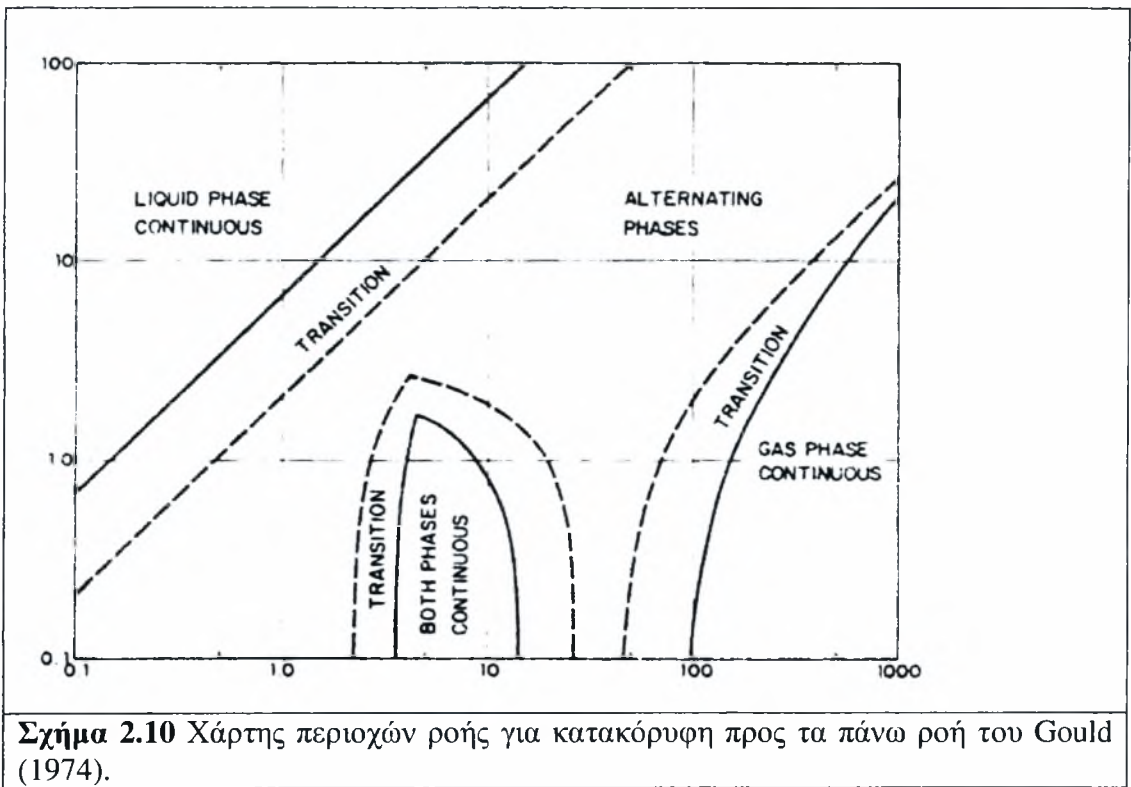


Σχήμα 2.8: Χάρτης περιοχών ροής για κατακόρυφη προς τα πάνω ροή των Hewitt & Roberts (1969). Βασίζεται σε παρατηρήσεις ροών αέρα-νερού σε χαμηλή πίεση και ατμού-νερού σε υψηλές πιέσεις σε αγωγούς με μικρή σχετικά διάμετρο (1-3 cm). Οι άξονες αντιπροσωπεύουν τις ειδικές ροές της ορμής των δύο φάσεων βασισμένες στις φαινομενικές ταχύτητες.



Σχήμα 2.9 Ο εμπειρικός χάρτης περιοχών ροής για κατακόρυφη προς τα πάνω ροή υγρού-αερίου σύμφωνα με τους Govier & Aziz (1972). Οι παράμετροι X και Y ορίζονται ως: $Y = [\rho_L \sigma_{water} / \rho_{water} \sigma]^{1/4}$ και $X = [\rho_G / \rho_L]^{1/3} Y$.

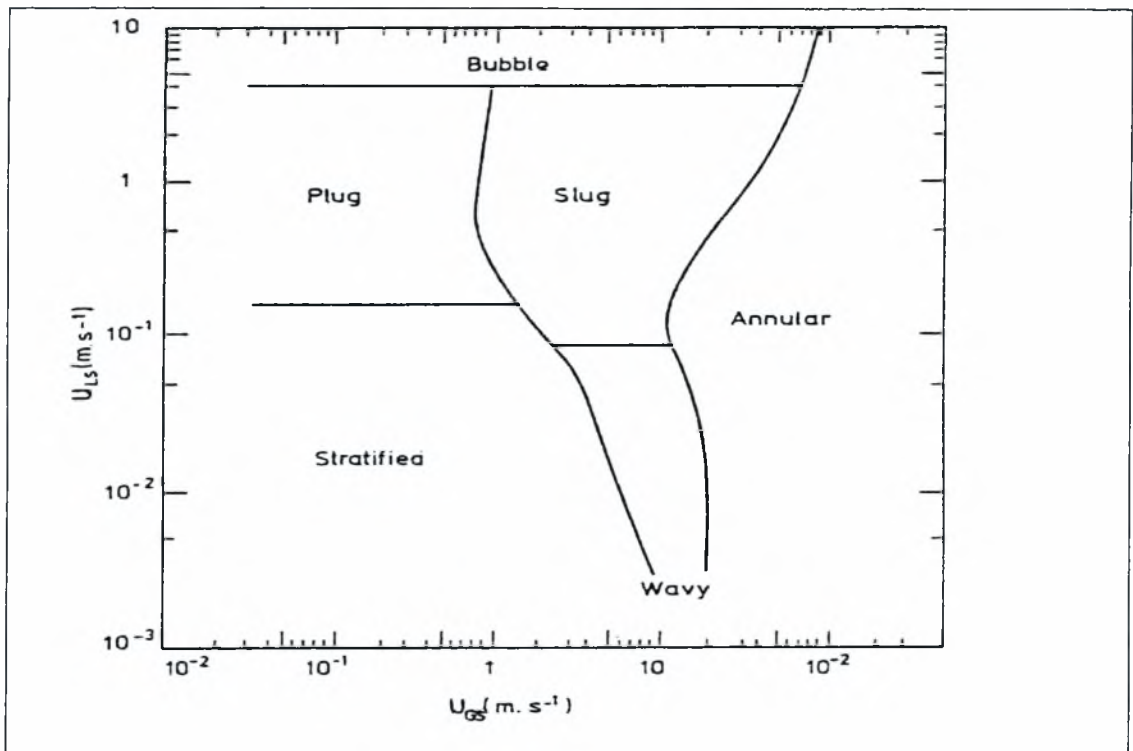
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ



Σχήμα 2.10 Χάρτης περιοχών ροής για κατακόρυφη προς τα πάνω ροή του Gould (1974).

Οι **Mandhane et al** το 1974 παρουσίασαν ένα γενικευμένο χάρτη καθεστώτων ροής η οποία αφορούσε στη διαφασική ροή αερίου-νερού. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε τράπεζα δεδομένων με αποτελέσματα παλαιότερων εργασιών. Αυτά προήλθαν από συστήματα με παρόμοιες ιδιότητες (ιξώδες, πυκνότητα, επιφανειακή τάση) και εύρος φαινομενικών ταχυτήτων, όπως του συστήματος αέρας-νερό. Οι συντεταγμένες του χάρτη είναι οι φαινομενικές ταχύτητες υγρού και αερίου και αναφέρονται στο σύστημα αέρας-νερό. Τα πειράματα έγιναν σε πλήθος διαμέτρων αγωγού κι έτσι ο χάρτης του αναφέρεται σε κάθε οριζόντιο αγωγό.

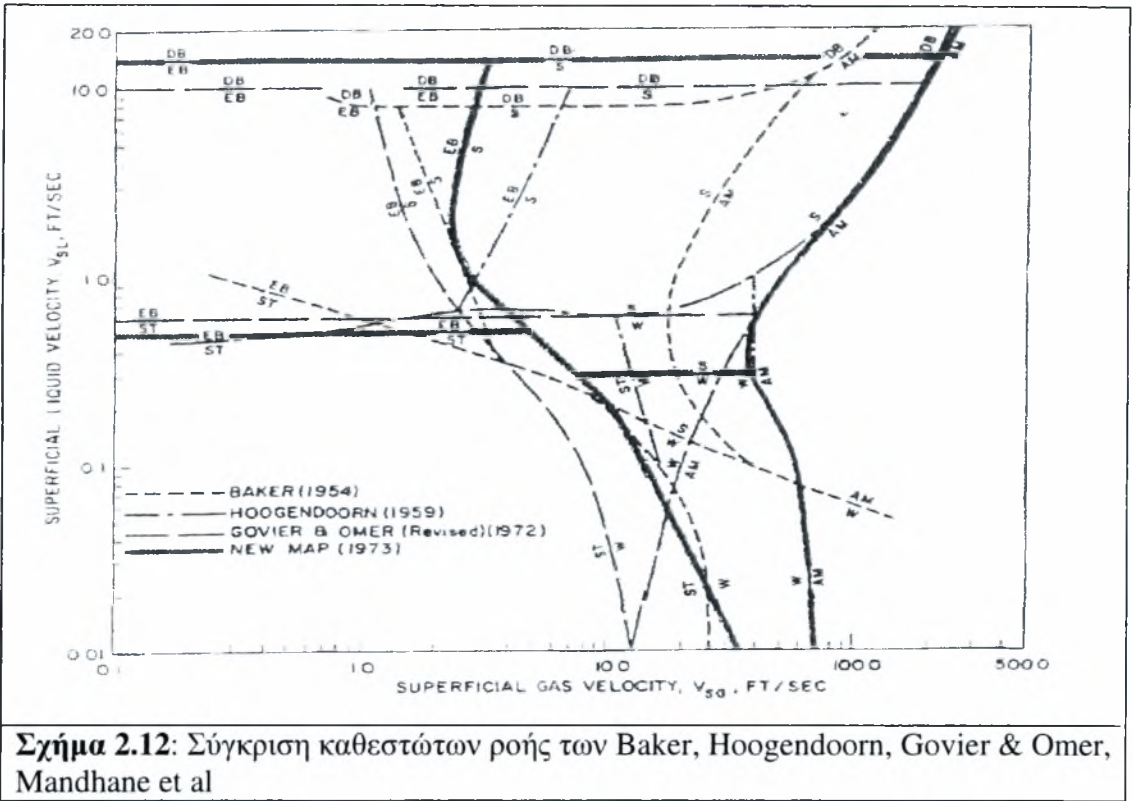
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ



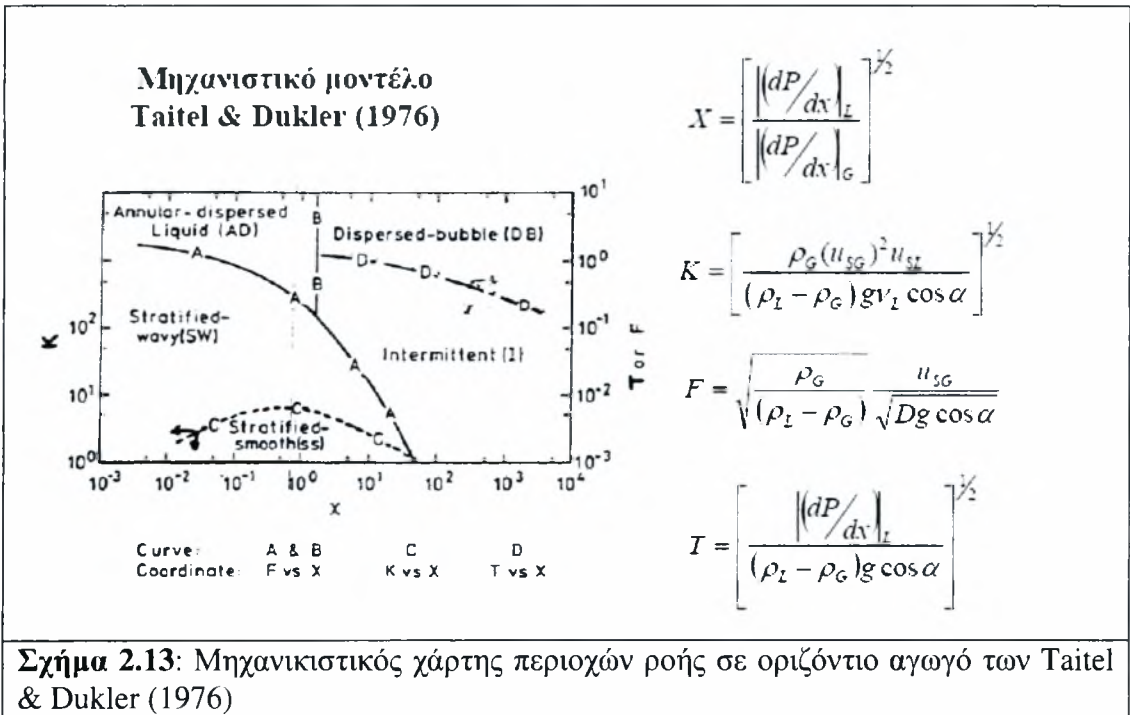
Σχήμα 2.11: Εμπειρικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Mandhane et al (1974)

Στο παρακάτω σχήμα συγκρίνεται ο προτεινόμενος χάρτης καθεστώτων ροής των Mandhane et al με χάρτες άλλων ερευνητών όπως Baker, Hoogenboom και Gover & Omer. Για το παρακάτω σχήμα έχουμε: W: Wave flow (ροή με κύματα), EB: Bubble, elongated bubble flow (επιμηκυμένη ροή με φουσαλίδες), ST: Stratified flow (διαχωρισμένη ροή), S: Slug flow (διαλείπουσα ροή), AM: Annular flow (δακτυλοειδής ροή), DB: Dispersed bubble flow (δισπαρμένες φουσαλίδες).

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ



Οι **Taitel & Dukler** (1976) κατασκεύασαν ένα μηχανιστικό χάρτη για οριζόντια διφασική ροή όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

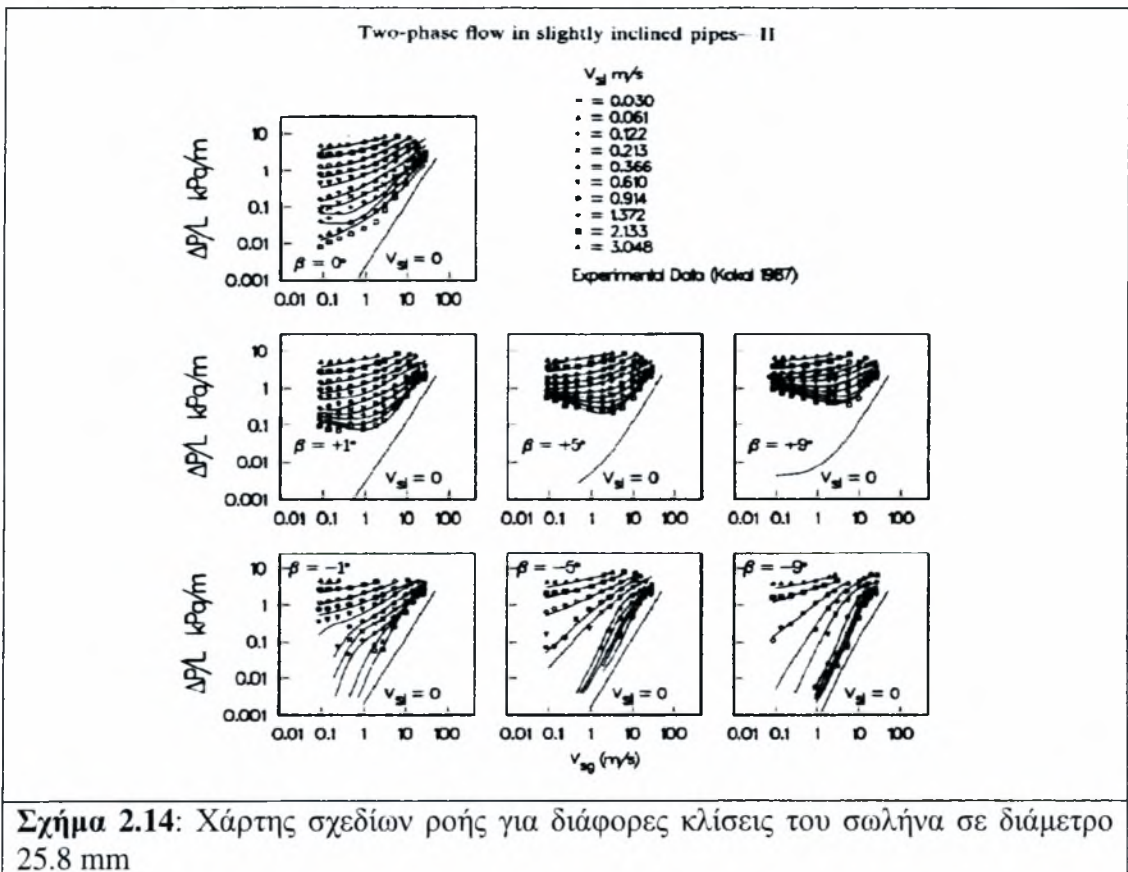


Στη συνέχεια ο **Mukherjee** (1979) ανέπτυξε χάρτες περιοχών ροής για ολόκληρη σειρά κλίσεων ενός αγωγού και πρότεινε εμπειρικούς συσχετισμούς για τα όρια

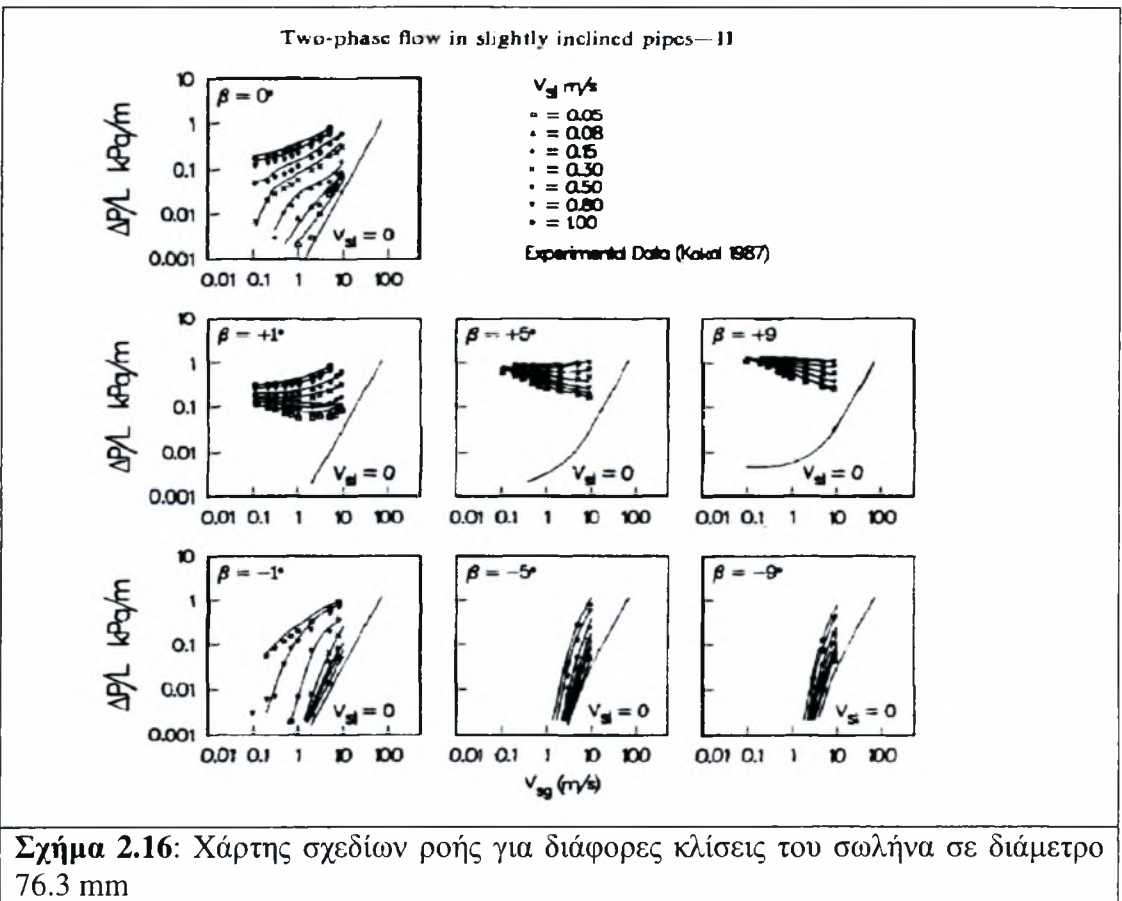
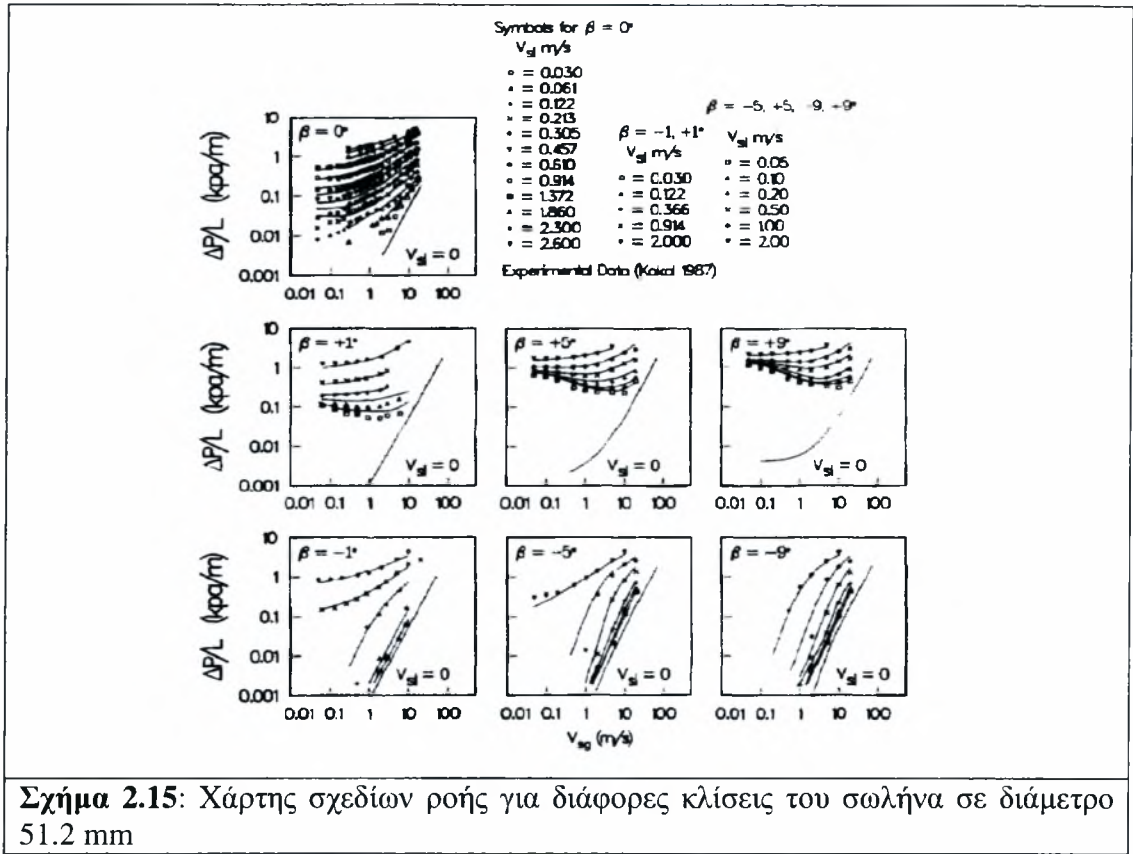
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

μετάβασης. Παρόμοια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε και από τους **Spedding και Nguyen** (1980) για τη δημιουργία χαρτών καθεστώτων ροής για πειράματα αέρα-νερού σε σωλήνα διαμέτρου 40cm.

Οι **Barnea et al** (1980) πραγματοποίησαν πειράματα σε οριζόντιο και ελαφρώς κεκλιμένο σωλήνα για το σύστημα αέρας-νερό. Οι **Weisman και Kang** (1981), πραγματοποίησαν πειράματα στα συστήματα αέρας-νερό και αέρας-γλυκερίνη σε ελαφρώς κεκλιμένους σωλήνες και σε ένα σύστημα ενός συστατικού για μεγαλύτερες γωνίες. Τη δεκαετία του 1980 και πάλι οι Barnea et al προτείνουν ένα μοντέλο για τις μεταπτώσεις καθεστώτων ροής σε κεκλιμένους σωλήνες για προς τα κάτω κεκλιμένους σωλήνες το 1982, και ανοδικούς κεκλιμένους σωλήνες το 1985. Τα παραπάνω μοντέλα αποτελούν επεκτάσεις των μοντέλων που αναπτύχθηκαν από τους Taitel & Duckler το 1976 για οριζόντιους και ελαφρώς κεκλιμένους σωλήνες και των Taitel et al το 1980 για την κατακόρυφη προς τα άνω ροή. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται χάρτες καθεστώτων ροής για διάφορες κλίσεις του αγωγού όσον αφορά τον οριζόντιο αγωγό.



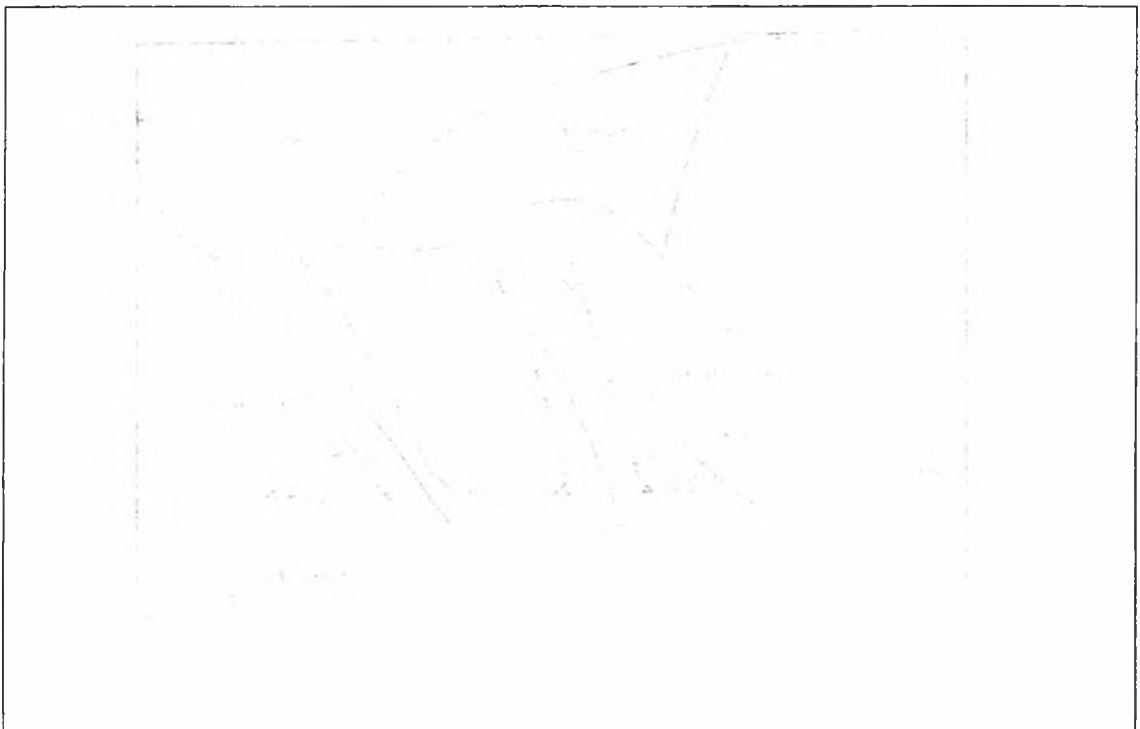
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ



2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

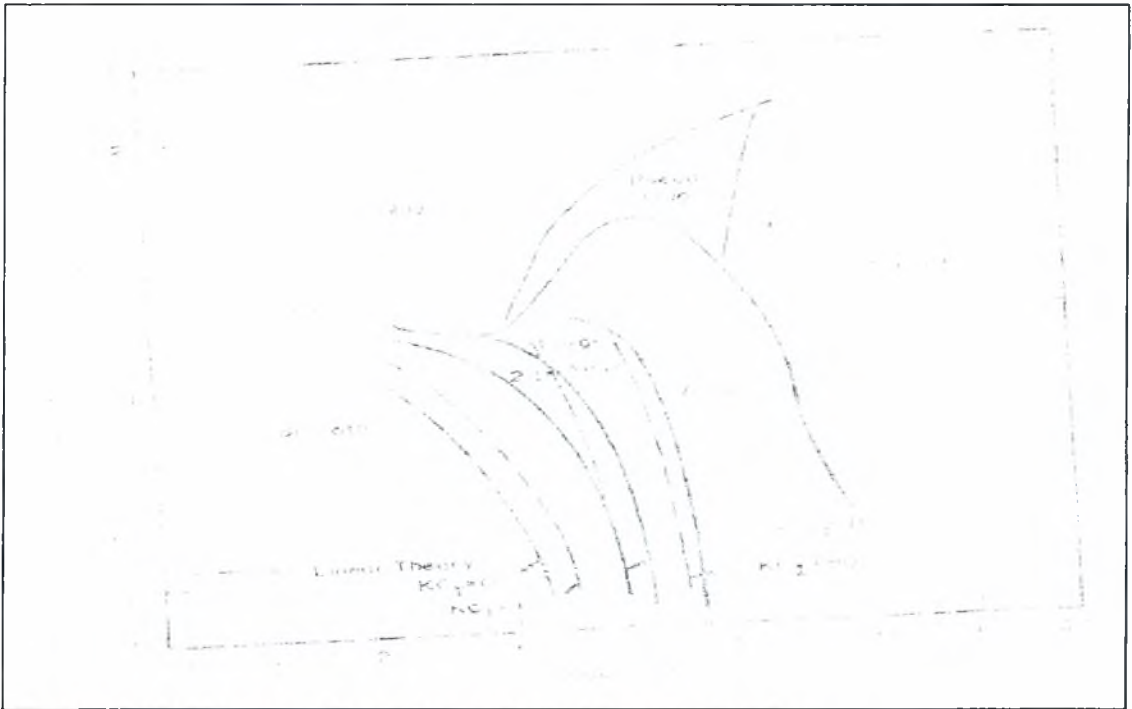
Οι **Lin & Hanratty** (1986) εξετάζοντας το σύστημα αέρας-νερό σε οριζόντιους αγωγούς από 2.54 ως 9.53 cm και για συνθήκες περιβάλλοντος, κατασκεύασαν τους αντίστοιχους χάρτες καθεστώτων ροής. Προσπαθώντας να ερμηνεύσουν την επίδραση της διαμέτρου του οριζόντιου αγωγού, συγκρίνουν τα δικά τους αποτελέσματα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

Οι **Andritsos & Hanratty** (1987) έδειξαν ότι η θεωρία της γραμμικής ευστάθειας μπορεί να δώσει φυσική ερμηνεία στο φαινόμενο της δημιουργίας των κυμάτων, καθώς και να προβλέψει τις συνθήκες όπου παρατηρείται η πρώτη δημιουργία κυμάτων. Στα τέλη της δεκαετίας του '80 ο Andritsos (1989) εξετάζει την επίδραση του ιξώδους στις μεταβολές από διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή.



Σχήμα 2.17: Χάρτης καθεστώτων ροής Andritsos et al (1 cp)

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

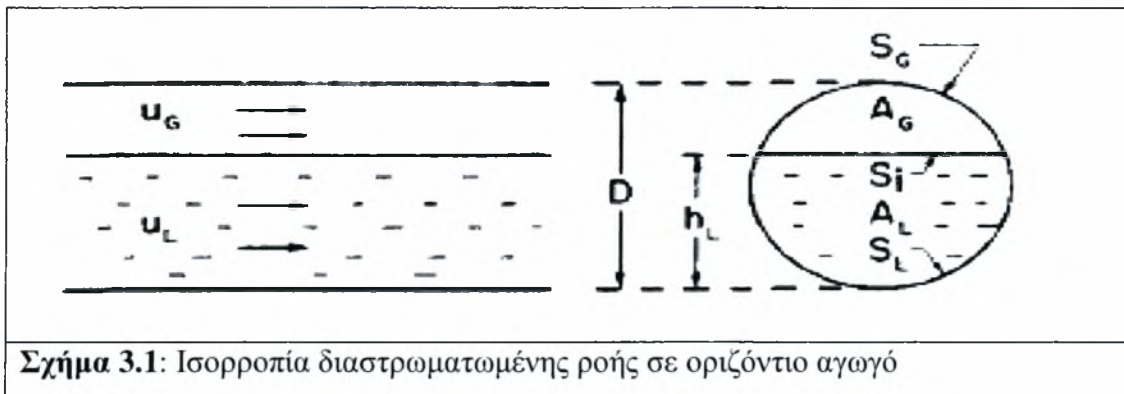


Σχήμα 2.18: Χάρτης καθεστώτων ροής Andritsos et al (4.5 cp)

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

3.1 Μετάπτωση από στρωματοποιημένη σε διαλείπουσα ροή

Μία ανάλυση για τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη στη διαλείπουσα ροή αναπτύχθηκε το 1976 από τους Taitel & Dukler. Η ανάλυση αυτή στηρίχθηκε στην ισορροπία της διαστρωματωμένης ροής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Ισορροπία διαστρωματωμένης ροής σε οριζόντιο αγωγό

Εάν γράψουμε το ισοζύγιο ροής για κάθε φάση σε οριζόντιο αγωγό προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$-A_L \cdot \frac{\Delta P}{dx} - \tau_{WL} \cdot S_L + \tau_i \cdot S_i = 0 \quad (3.1)$$

$$-A_G \cdot \frac{\Delta P}{dx} - \tau_{WG} \cdot S_G + \tau_i \cdot S_i = 0 \quad (3.2)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις A είναι η επιφάνεια ροής κάθε ρευστού, τ_{WG} , τ_{WL} , είναι οι διατμηματικές τάσεις του αερίου και του υγρού αντιστοίχως και τ_i η διατμηματική τάση η οποία επιδρά στη διεπιφάνεια S_i . Τα S_L και S_G είναι τα τμήματα της περιμέτρου των σωλήνων σε επαφή με το υγρό και το αέριο αντιστοίχως.

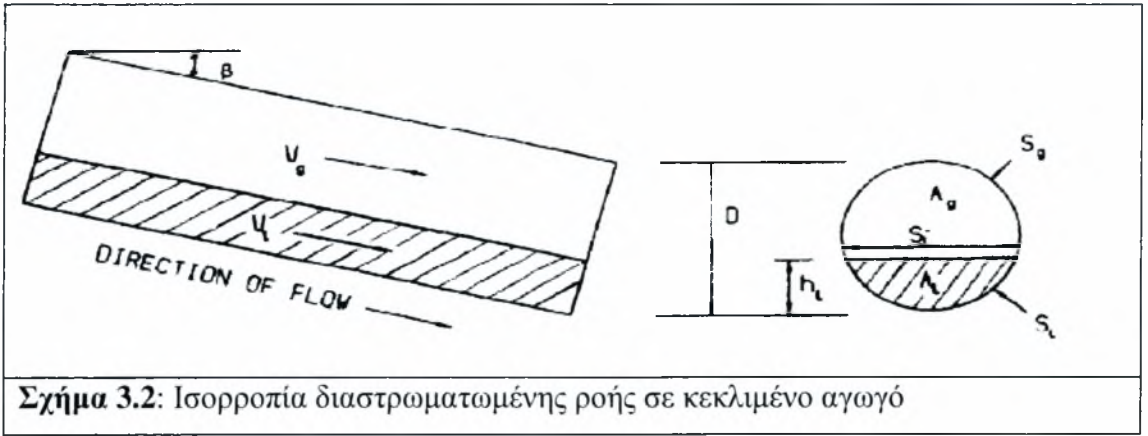
Οι εξισώσεις αυτές σε κεκλιμένο αγωγό διαφοροποιούνται και έχουν ως ακολούθως:

$$-A_L \cdot \frac{\Delta P}{dx} - \tau_{WL} \cdot S_L + \tau_i \cdot S_i - \rho_L \cdot A_L \cdot g \cdot \sin \beta = 0 \quad (3.3)$$

$$-A_G \cdot \frac{\Delta P}{dx} - \tau_{WG} \cdot S_G + \tau_i \cdot S_i - \rho_G \cdot A_G \cdot g \cdot \sin \beta = 0 \quad (3.4)$$

όπου ρ_G και ρ_L οι πυκνότητες του αερίου και του υγρού αντιστοίχως, και β η γωνία του κεκλιμένου αγωγού η οποία μετριέται θετική για προς τα άνω ροή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ



Σχήμα 3.2: Ισορροπία διαστρωματωμένης ροής σε κεκλιμένο αγωγό

Από τη στιγμή που η παράγωγος της πίεσης είναι ίδια και για τις δύο φάσεις τότε εξισώνοντας τις σχέσεις 3.3 και 3.4, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_{wG} \cdot \frac{S_G}{A_G} - \tau_{wL} \cdot \frac{S_L}{A_L} + \tau_i \cdot S_i \cdot \left(\frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) - (\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin \beta = 0 \quad (3.5)$$

Οι διατμηματικές τάσεις μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\tau_L = \frac{f_L \cdot \rho_L \cdot U_L^2}{2} \quad (3.6a)$$

$$\tau_G = \frac{f_G \cdot \rho_G \cdot U_G^2}{2} \quad (3.6b)$$

$$\tau_i = \frac{f_i \cdot \rho_G \cdot (U_G - U_L)^2}{2} \quad (3.6c)$$

όπου U_L και U_G είναι οι μέσες ταχύτητες του υγρού και του αερίου αντιστοίχως, f_L και f_G οι συντελεστές τριβής του υγρού και του αερίου αντιστοίχως. Συνήθως, στη συνθήκη ισορροπίας ισχύει $U_G \gg U_L$ οπότε ο όρος U_L στην εξίσωση 3.6c μπορεί να αγνοηθεί.

Οι συντελεστές τριβής υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$f_L = f \left(\frac{D_L \cdot U_L \cdot \rho_L}{\mu_L} \right) \quad (3.7a)$$

$$f_G = f \left(\frac{D_G \cdot U_G \cdot \rho_G}{\mu_G} \right) \quad (3.7b)$$

όπου οι διάμετροι D_L και D_G υπολογίζονται κατά τρόπο που έχει εκφρασθεί από τους Agrawal et al. (1973):

$$D_L = \frac{4 \cdot A_L}{S_L} \quad (3.8)$$

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

$$D_G = \frac{4 \cdot A_G}{S_G + S_i} \quad (3.9)$$

Στις παραπάνω σχέσεις η ροή του υγρού αντιστοιχεί σαν ροή σ'ανοικτό αγωγό, ενώ η ροή του αερίου σαν να είχαμε ροή σε κλειστό αυλάκι (duct). Οι εξισώσεις 3.5, 3.6a, 3.6b, 3.6c μπορούν να γραφούν σε αδιάστατη μορφή. Οι μεταβλητές αναφοράς που επιλέγονται είναι οι ακόλουθες: D για το μήκος, D² για το εμβαδόν, και U_{SL} και U_{SG} για τις ταχύτητες υγρού και αερίου αντιστοίχως. Θέτοντας τις αδιάστατες μεταβλητές στην εξίσωση 3.5, θα πάρουμε:

$$X^2 \cdot \frac{f_L}{f_{SL}} \cdot \frac{\overline{u_L}^2 \cdot S_L}{A_L} - \frac{f_G}{f_{SG}} \cdot \frac{\overline{u_{GL}}^2 \cdot S_G}{A_G} - \frac{f_L}{f_G} \cdot \overline{u_{SG}}^2 \cdot \left(\frac{S_L}{A_L} + \frac{S_G}{A_G} \right) + 4 \cdot Y = 0 \quad (3.10)$$

Οι συντελεστές τριβής υπολογίζονται με τη χρησιμοποίηση της εξίσωσης Chen(1979):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \cdot \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3.7065 \cdot D} - \frac{5.0452}{Re} \cdot \log \left[\frac{1}{2.8257} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right] \right\} \quad (3.11)$$

ενώ τα X (παράμετρος Lockhart-Martinelli) και Y ορίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$X^2 = \frac{\frac{4}{D} \cdot f_{SL} \cdot \frac{\rho_L \cdot U_{SL}^2}{2}}{\frac{4}{D} \cdot f_{SG} \cdot \frac{\rho_{GL} \cdot U_{SG}^2}{2}} \quad (3.12)$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot \sin \beta}{\left(\frac{dP}{dx} \right)_{SG}} \quad (3.13)$$

Η παράμετρος X μπορεί να υπολογισθεί εύκολα από τις παροχές του υγρού και του αερίου, τις ιδιότητες των ρευστών και τη διάμετρο του σωλήνα. Η παράμετρος Y αντιπροσωπεύει μία αναλογία των δυνάμεων βαρύτητας και πίεσης. Στις παραπάνω εξισώσεις f_{SG} και f_{SL} είναι οι μονοφασικοί συντελεστές τριβής αερίου και υγρού αντιστοίχως. Ο συντελεστής τριβής διεπιφάνειας f_i υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το συσχετισμό των Ellis & Gay (1959):

$$f_i = 1.3 \cdot Re_G^{-0.57} \quad (3.14)$$

Είναι επίσης κοινά αποδεκτό ότι οι Taitel & Dukler στηρίχθηκαν στη θεωρία του Gazley (1949) ότι στη λεία διαστρωματομένη ροή ισχύει f_i ≈ f_G. Εδώ η θεώρηση αυτή δεν ισχύει αλλά οι συντελεστές τριβής υπολογίζονται από τις αντίστοιχες παραπάνω

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

σχέσεις. Όλες οι αδιάστατες ποσότητες είναι συνάρτηση της μεταβλητής $h_L = h_L/D$ ως εξής:

$$\bar{A}_L = 0.25 \cdot [\pi - \cos^{-1}(2 \cdot \bar{h}_L - 1) + (2 \cdot \bar{h}_L - 1) \cdot \sqrt{1 - (2 \cdot \bar{h}_L - 1)^2}] \quad (3.15)$$

$$\bar{A}_G = 0.25 \cdot [\pi - \cos^{-1}(2 \cdot \bar{h}_L - 1) + (2 \cdot \bar{h}_L - 1) \cdot \sqrt{1 - (2 \cdot \bar{h}_L - 1)^2}] \quad (3.16)$$

$$\bar{S}_L = \pi - \cos^{-1}(2 \cdot \bar{h}_L - 1) \quad (3.17)$$

$$\bar{S}_G = \cos^{-1}(2 \cdot \bar{h}_L - 1) \quad (3.18)$$

$$\bar{S}_i = \sqrt{1 - (2 \cdot \bar{h}_L - 1)^2} \quad (3.19)$$

$$\bar{u}_L = \frac{\bar{A}}{A_L} \quad (3.20)$$

$$\bar{u}_G = \frac{\bar{A}}{A_G} \quad (3.21)$$

Οι τρεις μεταβλητές της εξίσωσης 3.10 είναι το πάχος του υγρού, και οι παράμετροι X και Y όπως δίνονται από τις εξισώσεις 3.12 και 3.13. Βασισμένοι στη θεωρία αστάθειας των Kelvin-Helmholtz οι Taitel & Dukler πρότειναν τις παρακάτω σχέσεις για τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη στη διαλείπουσα ροή:

$$F_r = (1 - \bar{h}_L) \cdot \left[\frac{\bar{A}_G}{u_G^2 \cdot \frac{dA_L}{dh_L}} \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

όπου F_r είναι ο τροποποιημένος αριθμός Froude ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$F_r = \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right)^{1/2} \cdot \frac{U_{SG}}{\sqrt{D \cdot g \cdot \cos \beta}} \quad (3.23)$$

και

$$\frac{dA_L}{dh_L} = \sqrt{1 - (2 \cdot \bar{h}_L - 1)^2} \quad (3.24)$$

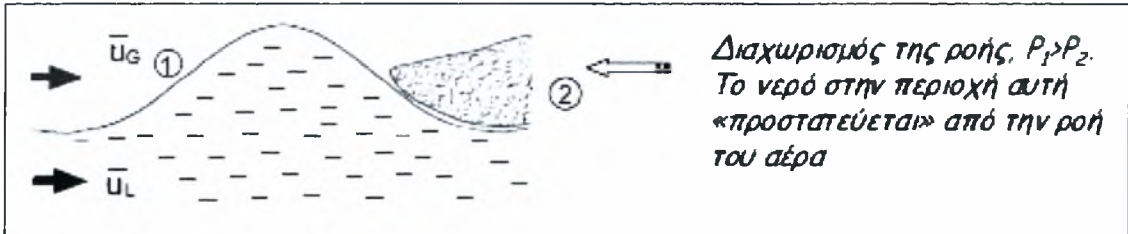
Οι μεταβλητές της εξίσωσης 3.22 είναι η φαινομενική ταχύτητα αερίου και το πάχος του υγρού. Η μετάπτωση καθορίζεται έτσι από τις τρεις αδιάστατες ομάδες X, Y και F_r . Για σταθερό Y, η μετάβαση καθορίζεται μόνο από τα X και F_r . Κατά συνέπεια για μία

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

δεδομένη φαινομενική ταχύτητα αερίου, οι εξισώσεις 3.10 και 3.22 λύνονται ταυτόχρονα για τη φαινομενική ταχύτητα αερίου και το πάχος υγρού.

3.2 Μετάπτωση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με κύματα

Η θεωρία kelvin-Helmholtz (βλέπε ενότητα 3.3) δεν μπορεί να προβλέψει το σχηματισμό των πρώτων κυμάτων στο νερό. Έτσι διατυπώθηκε η θεωρία του Jeffrey (1925) η οποία φαίνεται και στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Σχηματισμός κυμάτων κατά Jeffrey (1925)

Στη συνέχεια αναπτυχθήκαν πλήθος μελετών για το σχηματισμό κυμάτων, κάποιες εκ των οποίων παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω:

Ο Miles (1959) παρατήρησε ότι η παραγωγή των κυμάτων σε πολύ παχύρευστα υγρά είναι αποτέλεσμα “στατικής” αστάθειας λόγω διακυμάνσεων της πίεσης στην επιφάνεια των κυμάτων. Επιπλέον ο Miles τροποποίησε την ανάλυση kelvin-Helmholtz προκειμένου να συμπεριλάβει τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα του αερίου καθώς και το ιξώδες του υγρού. Επίσης επισήμανε ότι το τροποποιημένο μοντέλο kelvin-Helmholtz εξηγεί ικανοποιητικά τις αστάθειες σε παχύρευστα υγρά.

Οι Hershman (1960) και Cohen (1964) παρουσιάζουν τις εργασίες τους σχετικά με την παραγωγή κυμάτων. Ο Cohen ερεύνησε θεωρητικά και πειραματικά την ανάπτυξη των δισδιάστατων και τρισδιάστατων κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα ο Cohen παρουσιάζει στην εργασία του το μοντέλο των Miles & Benjamin, το οποίο αφορά στα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ταχύτητας του αερίου και της κυματισμένης επιφάνειας ενός υγρού με χαμηλό ιξώδες.

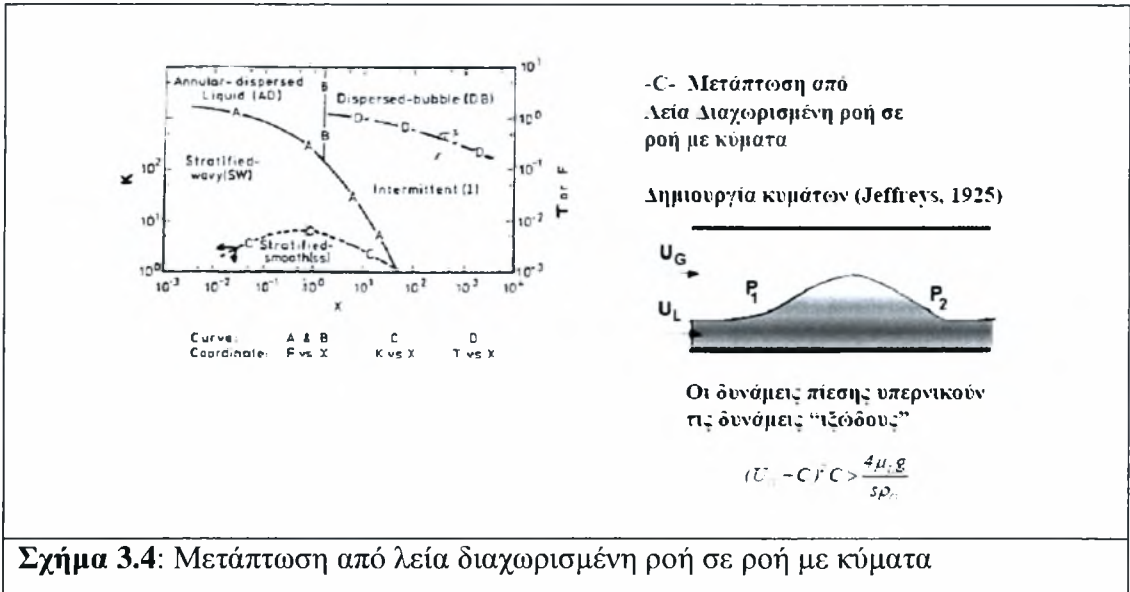
Ο Craik (1968) εξέλιξε τη δουλειά του Cohen προκειμένου να συμπεριλάβει μεγάλες στοιβάδες υγρού.

Ο Tatterson (1975) τροποποίησε τη μελέτη του Craik στο να μην καθορισθεί λεπτομερώς η κύρια κατανομή της ταχύτητας.

Ο Frederick (1982) επανεξέτασε τα πειραματικά αποτελέσματα των Cohen, Gottifredi & Jameson (1970), χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα για την επιφανειακή τάση.

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Στη διαχωρισμένη ροή έχουμε μεταφορά ενέργειας από την ταχύτερη αέρια φάση στη βραδύτερη υγρή φάση. Προκειμένου να υπάρξει μετάβαση από λεία σε διαχωρισμένη με κύματα ροή (Σχήμα 3.4) θα πρέπει η ταχύτητα του αερίου να είναι ικανή ώστε να δημιουργηθούν κύματα, χαμηλότερη όμως απ'αυτή που θα προκαλούσε μετάβαση στη διαλείπουσα ή την δακτυλιοειδή ροή.



Σχήμα 3.4: Μετάπτωση από λεία διαχωρισμένη ροή σε ροή με κύματα

Οι Taitel & Dukler προτείνουν την ακόλουθη συσχέτιση για τη μετάπτωση ανάμεσα στις δύο περιοχές:

$$U_G = \left[\frac{4v_L(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta}{s\rho_G U_L} \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

όπου s είναι ο συντελεστής προστασίας ($s=0.01$).

Η συσχέτιση αυτή μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή ως:

$$K > \frac{2}{\sqrt{\tilde{U}_L} \sqrt{\tilde{U}_G} \sqrt{s}} \quad (3.26)$$

όπου \tilde{U}_G & \tilde{U}_L είναι οι αδιάστατοι όροι που ορίζονται από συνδυασμό σχέσεων του θεωρητικού μοντέλου Taitel & Dukler, K είναι ο τροποποιημένος αριθμός Froude και της τετραγωνικής ρίζας του φαινομενικού αριθμού Reynolds για το υγρό:

$$K^2 = F^2 \text{Re}_{Ls} = \frac{\rho_G (U_{GS})}{(\rho_L - \rho_G) D_g \cos \beta} \frac{DU_{Ls}}{\nu} \quad (3.27)$$

Η ανίσωση των Taitel & Dukler δεν έχει νόημα για υγρά με υψηλό ιξώδες και κυρίως για υγρά με μεγαλύτερο από 20cp από τη στιγμή που τα 2-D κύματα δεν εμφανίζονται στην περίπτωση αυτή. Όπως έχει αναφερθεί η εξίσωση K-H είναι μία

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

καλή πρώτη προσέγγιση για την ταχύτητα του αερίου που απαιτείται για την έναρξη των ακανόνιστων κυμάτων μεγάλου πλάτους. Αυτή αναφέρεται ως U_{K-H} και ορίζεται για ροές υγρού αερίου ως:

$$(U_{K-H} - U_L)^2 \geq \left[\frac{kb}{\rho_G} + \frac{\rho_L g}{\rho_G k} \right] \tanh(k\tilde{H}) \quad (3.28)$$

Για εύρος του H που χρησιμοποιείται συνήθως σε πειράματα, η K-H θεωρία λέει ότι η μικρότερη τιμή της U_{K-H} επιτυγχάνεται για κυματικό αριθμό:

$$k_m = \sqrt{\frac{\rho_L g}{\sigma}} \quad (3.29)$$

Ένα καλλίτερο κριτήριο από την προηγούμενη εξίσωση για το ξεκίνημα ακανόνιστων κυμάτων μεγάλου πλάτους και το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν μικρή επίδραση του ύψους της υγρής στοιβάδας και του ιξώδους του υγρού είναι (Andritsos, 1986):

$$U_{GS} = U_{K-H} \left(\frac{\theta_w}{\theta} \right) \left(\frac{1}{\tan\left(\frac{k_m h}{10}\right)} \right)^{0.1} \alpha^{-1} \quad (3.30)$$

Ο αδιάστατος αριθμός θ χρησιμοποιήθηκε από τον Taylor(1963), λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του ιξώδους και ορίζεται ως:

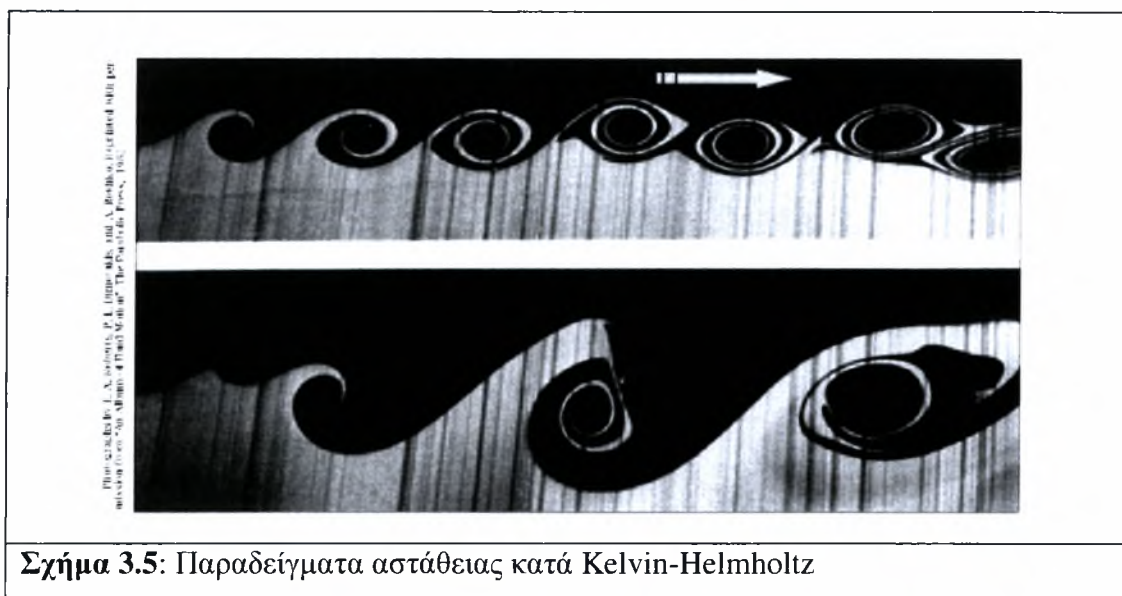
$$\theta = \frac{\rho_L}{\rho_G} \frac{\sigma^2}{\mu^2 U_G^2} \quad (3.31)$$

Το θ_w είναι η τιμή του θ εάν το υγρό είναι νερό. Η ταχύτητα U_{GS} είναι η φαινομενική ταχύτητα του αερίου για το ξεκίνημα των κυμάτων μεγάλου πλάτους και α το κλάσμα κενού. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση (3.28) λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση της πυκνότητας του αερίου. Ένα καλό κριτήριο για το ξεκίνημα της εκκένωσης είναι: $U_{GS}=1,8$ (U_{GS} δίνεται από εξίσωση 3.30).

3.3 Μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα και στη δακτυλιοειδή ροή

Για τη μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα θεωρείται ότι είναι υπεύθυνη η ρευστοδυναμική αστάθεια **kelvin-Helmholtz** (Σχήμα 3.5).

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ



Σχήμα 3.5: Παραδείγματα αστάθειας κατά Kelvin-Helmholtz

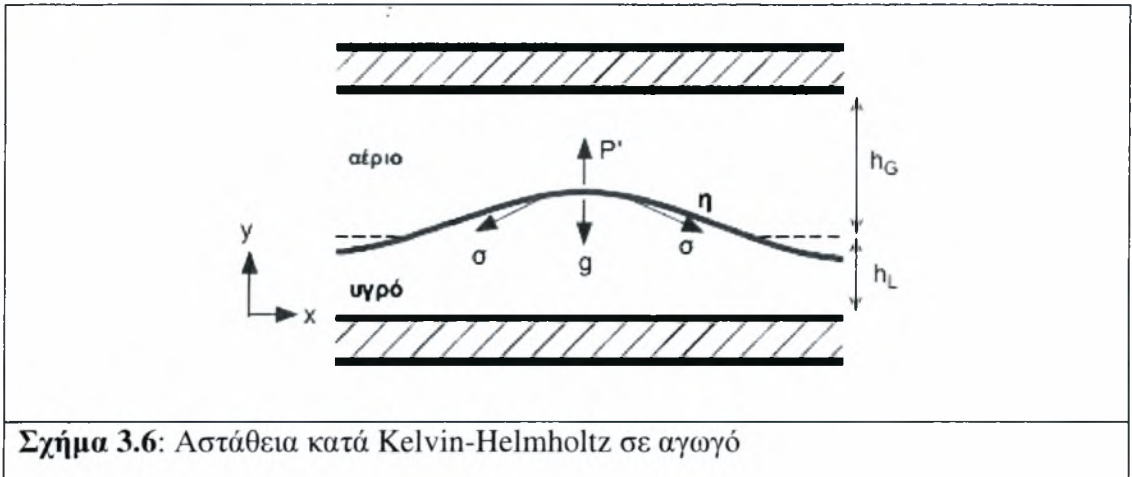
Τα χαρακτηριστικά της αστάθειας κατά Kelvin-Helmholtz συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η αστάθεια **Kelvin-Helmholtz** συμβαίνει όταν υπάρχει διαφορά ταχύτητας μέσα σ' ένα συνεχές ρευστό ή όταν υπάρχει ικανή διαφορά ταχύτητας στη διεπιφάνεια δύο ρευστών.
- Η θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της έναρξης της αστάθειας και μετάβαση στην τυρβώδη ροή σε ρευστά με διαφορετικές πυκνότητες.
- Ο Helmholtz (1821-1894) μελέτησε τη δυναμική δύο ρευστών με διαφορετική πυκνότητα όταν εισάγεται μία μικρή διαταραχή στη διεπιφάνεια.
- Για δύο ρευστά που κινούνται παράλληλα με διαφορετικές ταχύτητες και πυκνότητες, υπολογίζεται ότι η διεπιφάνεια είναι σταθής για κάθε ταχύτητα όταν αγνοείται η επιφανειακή τάση.
- Η επιφανειακή τάση σταθεροποιεί τις διαταραχές μικρού μήκους και η θεωρία προβλέπει ευστάθεια για τιμές της ταχύτητας μικρότερες από μία κρίσιμη ταχύτητα.
- Το ιξώδες παίζει ρόλο στη σταθερότητα της ροής με το να κρατάει μικρό το ρυθμό ανάπτυξης της διαταραχής.

Συγκεκριμένα, η παρουσία κυμάτων στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού προκαλεί τοπική αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης στην κορυφή του κύματος και μείωση στον πυθμένα με συνέπεια τη δημιουργία υποπίεσης. Εάν οι δημιουργημένες κατ' αυτόν τον τρόπο αποσταθεροποιητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις βαρύτητας

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

και της επιφανειακής τάσης, τότε το κύμα τείνει να μεγαλώσει και η υγρή μάζα να καταλάβει τη διατομή του αγωγού (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.6: Αστάθεια κατά Kelvin-Helmholtz σε αγωγό

Στηριζόμενοι στην κλασική θεωρία των kelvin-Helmholtz, οι **Taitel & Dukler** (1976) προτείνουν ότι η μετάπτωση αρχίζει όταν:

$$U_G = \left(1 - \frac{h}{D}\right) \cdot \left[\frac{g \cdot (\rho_L - \rho_G) \cdot a}{\rho_G \cdot S_i}\right]^{0.5} \quad (3.32)$$

όπου h το ύψος της υγρής στοιβάδας, S_i το πλάτος της διεπιφάνειας, a το κλάσμα κενού, D η διάμετρος του αγωγού και ρ_G, ρ_L οι πυκνότητες της υγρής και της αέριας φάσης αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να υπενθυμίσουμε τις παραμέτρους λ και ψ που όρισε ο Baker λαμβάνοντας υπ' όψιν του τις φυσικές ιδιότητες των μέσων (βλέπε κεφάλαιο 2, εξισώσεις 2.5, 2.6 που ξαναγράφονται παρακάτω):

$$\lambda = \left(\frac{\rho_G \cdot \rho_L}{\rho_A \cdot \rho_W}\right)^{0.5} \quad (3.33)$$

$$\psi = \frac{\sigma_W}{\sigma} \cdot \left[\frac{\mu_L}{\mu_W} \cdot \left(\frac{\rho_W}{\rho_L}\right)^2\right]^{1/3} \quad (3.34)$$

Οι όροι της εξίσωσης 3.3 μπορούν να αδιαστατοποιηθούν και να δώσουν μία σχέση μεταξύ της παραμέτρου Lockhart-Martinelli X και του τροποποιημένου αριθμού Froude, Fr , όπως δίνεται στο Σχήμα 2.10 το οποίο απεικονίζει το μηχανιστικό χάρτη περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Taitel & Dukler.

Υπενθυμίζεται ότι η παράμετρος X ορίζεται ως ο λόγος της πτώσης πίεσης της αέριας φάσης αν έρεε μόνη της στον αγωγό ως προς την αντίστοιχη της υγρής φάσης, ενώ ο αριθμός Froude δίνεται ως εξής:

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

$$F_r = \frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \cdot \frac{U_{GS}^2}{D \cdot g \cdot \cos \beta} \quad (3.35)$$

όπου β η κλίση του αγωγού, για μικρές κλίσεις από το οριζόντιο επίπεδο.

Σύμφωνα με τις εργασίες των Taitel & Dukler εάν η υγρή στοιβάδα είναι μεγαλύτερη από το μισό της διαμέτρου ή όταν το ύψος της υγρής στοιβάδας προς τη διάμετρο D του αγωγού ικανοποιεί τη συνθήκη $h/D > 0.3$, τότε παρατηρείται μετάπτωση από τη διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή. Στην αντίθετη περίπτωση η μετάπτωση οδηγεί στη δακτυλιοειδή ροή. Το τελευταίο συμπέρασμα μοιάζει αυθαίρετο. Πράγματι, εάν κανείς αναλογισθεί την ριζική διαφορά στην κατανομή του ρευστού στη διαστρωματωμένη και στη δακτυλιοειδή ροή καθώς και το γεγονός ότι η διακτυλιοειδής ροή είναι αποτέλεσμα συνδυασμού μηχανισμών, μεταξύ των οποίων η εναπόθεση σταγονιδίων, η εξάπλωση των κυμάτων στα τοιχώματα του αγωγού και η δευτερεύουσα ροή του αερίου.

Εάν και η προσπάθεια των Taitel & Duckler είναι αρκετά αξιόλογη, αρκετά πειραματικά δεδομένα δεν συμφωνούν με τις προβλέψεις τους, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι το μοντέλο:

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

Οι Andritsos et al (1989) επισημαίνουν ότι αυτό οφείλεται στην υπόθεση ότι η αστάθεια προέρχεται από διαταραχές μεγάλου μήκους κύματος. Οι τελευταίοι μάλιστα υποστηρίζουν ότι η μετάπτωση που προκύπτει για $(h/D) < 0,35$ οδηγεί στα λεγόμενα κύματα Kelvin-Helmholtz και όχι σε δακτυλιοειδή ροή.

3. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

4.1 Εισαγωγή

Όπως είχαμε αναφέρει και στη εισαγωγή της παρούσας εργασίας η διφασική ροή διέπεται από τους βασικούς νόμους της ρευστοδυναμικής, με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις που την περιγράφουν είναι πιο πολύπλοκες και περισσότερες απ' ό,τι για την περιγραφή της μονοφασικής ροής. Στα τελευταία σαράντα χρόνια στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιασθεί αρκετά μοντέλα περιγραφής της διφασικής ροής. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε απλοποιητικές παραδοχές για την κατανομή και τον τρόπο κίνησης των δύο φάσεων, και δεν παίρνουν υπόψη τους τις λεπτομέρειες της ροής, αν και μερικές φορές μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην πρόβλεψη διαφόρων παραμέτρων, κυρίως των παραμέτρων της πτώσης πίεσης και του κλάσματος κενού. Σ' αυτά τα μοντέλα γίνεται χρήση των γενικευμένων εξισώσεων συνέχειας, ορμής και ενέργειας. Τέτοια μοντέλα είναι:

- **μοντέλο ομογενούς ροής (*homogeneous flow*)**: τα δύο ρευστά περιγράφονται σαν ένα ψευδορευστό με ενδιάμεσες τιμές φυσικών ιδιοτήτων, που υπακούει στις σχέσεις για τη μονοφασική ροή. Τα ρευστά θεωρούμε ότι ρέουν με την ίδια ταχύτητα.



Σχήμα 4.1: Μοντέλο ομογενούς ροής

- **μοντέλο διαχωρισμένης ροής (*separated flow*)**: και οι δύο φάσεις έχουν διαφορετική ταχύτητα και φυσικές ιδιότητες. Οι βασικές εξισώσεις μπορούν να γραφούν ξεχωριστά για κάθε φάση.



Σχήμα 4.2: Μοντέλο διαχωρισμένης ροής-κατακόρυφη ροή με φυσαλίδες

Και στα δύο μοντέλα, οι δύο φάσεις θεωρούνται σε εμβολική ροή και αγνοούνται φαινόμενα κατανομής ταχυτήτων στην διατομή ροής. Το ομογενές μοντέλο μπορεί να

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

περιγράψει τη ροή φυσαλίδων ή σταγονιδίων, ενώ το διαχωρισμένο μοντέλο είναι καταλληλότερο για την περιγραφή ροών όπως της στρωματωμένης και της δακτυλιειδούς.

Όπως προαναφέραμε οι παράμετροι που μας αφορούν κυρίως είναι η πτώση πίεσης και το κλάσμα κενού. Το τελευταίο μπορεί να υπολογιστεί και για τα δύο μοντέλα από απλά ισοζύγια μάζας. Για την αέρια φάση και την υγρή φάση ισχύουν οι δύο παρακάτω σχέσεις αντιστοίχως:

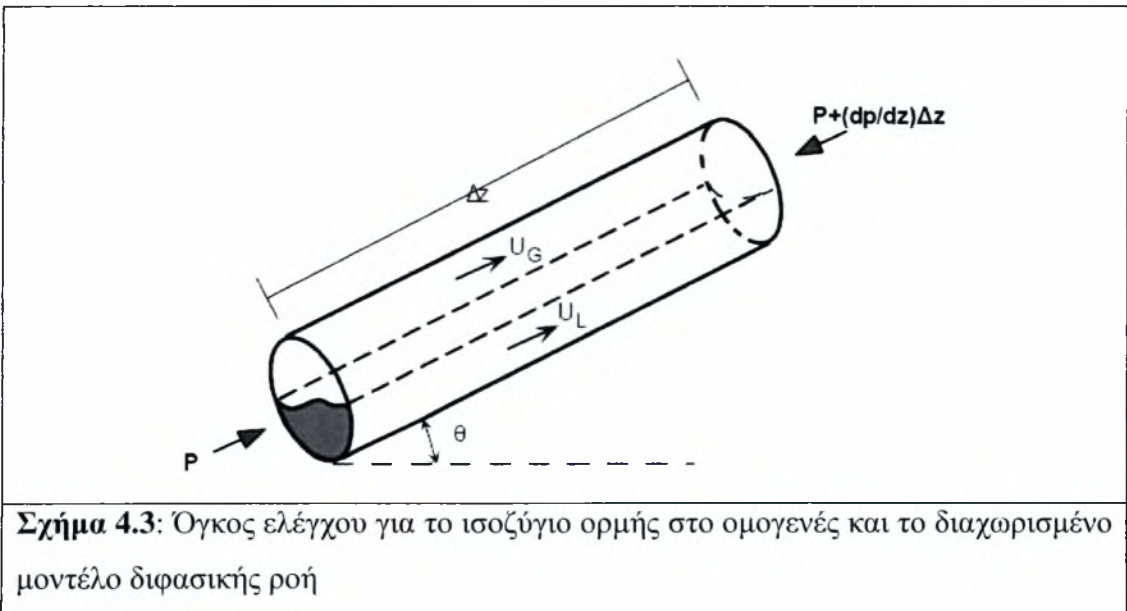
$$AG_g = A \cdot G \cdot x = \rho_g \cdot u_g \cdot A_g = \rho_g \cdot u_g \cdot \alpha \cdot A \quad (4.1)$$

$$AG_l = AG \cdot (1-x) = \rho_l \cdot u_l \cdot A_l = \rho_l \cdot u_l \cdot (1-\alpha) \cdot A \quad (4.2)$$

Εάν διαιρέσουμε κατά μέλη τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_g \cdot \rho_g \cdot (1-x)}{u_l \cdot \rho_l \cdot x} \right)} \quad (4.3)$$

Η υπόλοιπη ανάλυση διαφοροποιείται ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Στο παρακάτω σχήμα 4.3 φαίνεται ο αντιπροσωπευτικός όγκος ελέγχου για τα ισοζύγια μάζας και ορμής των δύο παραπάνω μοντέλων.



Ο πειραματικός προσδιορισμός του κλάσματος κενού και της πτώσης πίεσης γίνεται με διάφορους τρόπους. Η ολική πτώση πίεσης μετριέται με τη χρήση μανομέτρων (κλασικών ή ηλεκτρονικών), ενώ η συνεισφορά των τριβών που είναι συχνά κυρίαρχη υπολογίζεται αφαιρώντας τις καλλίτερες εκτιμήσεις για την πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης ή βαρύτητας. Για το κλάσμα κενού μπορούμε να λάβουμε μέση τιμή με σύστημα δύο βανών ταχείας απόκρισης, ενώ λεπτομερείς τοπικές τιμές

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

λαμβάνονται με μεθόδους ηλεκτρικής αγωγιμομετρίας ή μέτρησης διαπερατότητας ακτίνων γάμα.

Στη συνέχεια θα αναπτύξουμε τα μοντέλα αυτά, ενώ επιπλέον θα γίνει αναφορά για τη μοντελοποίηση συγκεκριμένων περιοχών ροής όπως της στρωματωμένης και της δακτυλιοειδής.

4.2 Ομογενές μοντέλο

Το ομογενές μοντέλο (homogeneous model) στηρίζεται στη βασική παραδοχή ότι ταχύτητα, πίεση και θερμοκρασία είναι κοινά και για τις δύο φάσεις. Η παραδοχή βασίζεται στο γεγονός ότι στο σύστημα υπάρχει ισορροπία και οποιαδήποτε διαφορά θα προάγει τη μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας ώστε να αποκατασταθεί τάχιστα η ισορροπία. Τα δύο ρευστά περιγράφονται σαν ένα ψευδορευστό με ενδιάμεσες τιμές φυσικών ιδιοτήτων, που υπακούει στις σχέσεις για τη μονοφασική ροή. Για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ψευδορευστού χρησιμοποιούνται επιπλέον εξισώσεις ενώ το μοντέλο στηρίζεται στις παρακάτω θεωρήσεις:

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

Οι ισχύουσες εξισώσεις για μονοδιάστατη ροή σε αγωγό που παρουσιάζει κλίση θ ως προς την κατακόρυφο είναι:

$$\text{Συνέχειας: } m = A\rho\bar{u} = \sigma\tau\alpha\theta. \quad (4.4)$$

$$\text{Ορμής: } m\frac{du}{dz} = -A\frac{dp}{dz} - P\tau_w - A\bar{\rho}g\cos\theta \quad (4.5)$$

$$\text{Ενέργειας: } \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} = m\frac{d}{dz}\left(h + \frac{\bar{u}^2}{2} + gz_g\right) \quad (4.6)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις $\bar{\rho}$ και \bar{u} είναι η μέση πυκνότητα και ταχύτητα του ομογενούς ρευστού, P η περίμετρος του σωλήνα, τ_w η μέση τιμή της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα και z_g η κατακόρυφη απόσταση των άκρων του σωλήνα. Για οριζόντιο σωλήνα ισχύει ότι $\theta = z_g = 0$.

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

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

$$\bar{v} = \frac{Q}{m} = [xv_G + (1-x)v_L] = [v_L + xv_{LG}] = \frac{J}{G} = \frac{l}{p} \quad (4.7)$$

όπου $x = m_G / (m_G + m_L)$, η ποιότητα μάζας (mass quality).

$$\bar{\rho} = \frac{GA}{\frac{GAx}{\rho_G} + \frac{GA(1-x)}{\rho_L}} \quad (4.8)$$

$$G = \frac{m}{A} = \rho u = \frac{u}{v} [Kg / m^2 s] \text{ (συνολικά μαζική ροή)} \quad (4.9)$$

και $j = \frac{Q}{A} [m/s]$ (volumetric flux or superficial velocity) (4.10)

Με βάση την υπόθεση για ίσες ταχύτητες αερίου και υγρού θα έχουμε:

$$u_i = u_g = \bar{u} \quad (4.11)$$

οπότε

$$\bar{u} = G\bar{v} = j \quad (4.12)$$

και

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

$$\alpha = \frac{A_G}{A} \text{ και } (1-\alpha) = \frac{A_L}{A} \text{ Ως } \alpha \text{ ορίζουμε το κλάσμα κενού} \quad (4.13)$$

$$\beta = \frac{Q_G}{Q} \text{ και } (1-\beta) = \frac{Q_L}{Q} \text{ όπου } \beta \text{ volumetric quality} \quad (4.14)$$

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

$$\tau_w = f_{TP} \left(\frac{\bar{\rho} \bar{u}}{2} \right)^2 \quad (4.15)$$

Με συνδυασμό των εξισώσεων (4.6) & (4.7) η πτώση πίεσης μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{P}{A} \tau_w - \frac{m}{A} \frac{du}{dz} - \bar{\rho} g \cos \theta = \left(\frac{dp}{dz} \right)_F + \left(\frac{dp}{dz} \right)_A + \left(\frac{dp}{dz} \right)_G \quad (4.16)$$

Οι όροι στο δεξιό μέλος εκφράζουν την πτώση πίεσης λόγω τριβής, επιτάχυνσης και βαρύτητας. Η πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης θεωρείται συνήθως αμελητέα. Έτσι για κυκλική διατομή σωλήνα όπου $P/A=4/D$ η πτώση πίεσης λόγω τριβής είναι:

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{4}{D} f_{TP} \left(\frac{\bar{\rho} \bar{v}^2}{2}\right) = \frac{4}{D} f_{TP} \left(\frac{1-\bar{v}^2}{2}\right) \quad (4.17)$$

και η πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας είναι

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_G = -\bar{\rho} g \cos \theta = -\frac{1}{\nu} g \cos \theta \quad (4.18)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 4.9 στην 4.17 θα έχουμε:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{2 f_{TP} G \bar{u}}{D} \quad (4.19)$$

Από τις εξισώσεις 4.8, 4.9 και 4.19 έχουμε:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{2 f_{TP} G^2}{D} (x \nu_G + (1-x) \nu_L) \quad (4.20)$$

Από την παραπάνω εξίσωση όλοι οι όροι είναι καθορισμένοι εκτός από το συντελεστή τριβής των δύο φάσεων f_{TP} . Για να χρησιμοποιηθεί το ομογενές μοντέλο είναι απαραίτητο να καθορισθεί ένας μονοφασικός συντελεστής τριβής για το διασπαστικό μίγμα. Ένας τρόπος για να καθορισθεί ο παραπάνω συντελεστής είναι να τον συσχετίσουμε με το συντελεστή τριβής του υγρού f_{fo} όταν έχει μαζική παροχή (G) που είναι ίση με του ψευδορευστού. Έτσι η 4.19 θα πάρει τη μορφή:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{2 f_{TP} G^2}{D} (x \nu_G + (1-x) \nu_L) = \frac{2 f_{fo} G^2 \nu_L}{D} \Phi_{fo}^2 = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{fo} \Phi_{fo}^2 \quad (4.21)$$

όπου το Φ_{fo}^2 ονομάζεται πολλαπλασιαστής.

Μία τιμή του πολλαπλασιαστή για την πτώση πίεσης λόγω τριβής από το ομογενές μοντέλο βρίσκεται, με τη χρήση του τύπου του Blasius (π.χ. $f = 0, 079 \text{Re}^{-0.25}$, $\text{Re} = GD/\mu$) για το συντελεστή τριβής, ίση με

$$\Phi_{fo}^2 = \left[1 - x \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_G} \right) \right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_L - \mu_G}{\mu_G} \right) \right]^{-1/4} \quad (4.22)$$

Ενδεικτικές τιμές του πολλαπλασιαστή στο ομογενές μοντέλο, ως συνάρτηση της ποιότητας και της πίεσης του μίγματος, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Ποιότητα ατμού % κ.Β	Πίεση, bar (psia)								
	1.01 (14.7)	6.89 (100)	34.4 (500)	68.9 (1000)	103 (1500)	138 (2000)	172 (2500)	207 (3000)	221.2
1	16.21	3.40	1.44	1.19	1.10	1.05	1.04	1.01	1.0
5	67.6	12.18	3.12	1.89	1.49	1.28	1.16	1.06	1.0
10	121.2	21.8	5.06	2.73	1.95	1.56	1.30	1.13	1.0
20	212.2	38.7	7.8	4.27	2.81	2.08	1.60	1.25	1.0
30	292.8	53.5	11.74	5.71	3.60	2.57	1.87	1.36	1.0
40	366	67.3	14.7	7.03	4.36	3.04	2.14	1.48	1.0
50	435	80.2	17.45	8.30	5.08	3.48	2.41	1.60	1.0
60	500	92.4	20.14	9.50	5.76	3.91	2.67	1.71	1.0
70	563	104.2	22.7	10.70	6.44	4.33	2.89	1.82	1.0
80	623	115.7	25.1	11.81	7.08	4.74	3.14	1.93	1.0
90	682	127	27.5	12.90	7.75	5.21	3.37	2.04	1.0
100	738	137.4	29.8	13.98	8.32	5.52	3.60	2.14	1.0

Πίνακας 4.1: Τιμές του πολλαπλασιαστή διφασικής πτώσης πίεσης από το ομογενές μοντέλο ροής

Το ιξώδες του μίγματος θα πρέπει να είναι $\bar{\mu} = \mu_L$ όταν $\chi=0$ και $\bar{\mu} = \mu_G$ όταν $\chi=1$. Μερικές από τις εκφράσεις για το ιξώδες του ψευδορευστού που έχουν προταθεί είναι:

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{\chi}{\mu_G} + \frac{1-\chi}{\mu_L} \quad \text{Mc Adams} \quad (4.23)$$

$$\bar{\mu} = \chi\mu_G + (1-\chi)\mu_L \quad \text{Cicchitti} \quad (4.24)$$

$$\bar{\mu} = \rho[\chi u_G \mu_G + (1-\chi)u_L \mu_L] \quad \text{Dukler} \quad (4.25)$$

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

$$f_{TP} = 0.079 \left(\frac{GD}{\mu} \right)^{-1/4} \quad (4.26)$$

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

$$f_{TP} = 0.079 \left(\frac{GD}{\mu_L} \right)^{-1/4} \quad (4.27)$$

Στη συνέχεια αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 4.23 και 4.26 στην 4.21 θα έχουμε:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{fo} \left[1 + x \left(\frac{v_{G+} + v_L}{v_L} \right) \right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_G - \mu_L}{\mu_L} \right) \right] \quad (4.28)$$

Παρατηρήσεις:

- Το ομογενές μοντέλο δίνει σχετικά ικανοποιητικές εκτιμήσεις όταν $\rho L/\rho G < 10$ ή όταν $G > 2000 \text{ kg/m}^2\text{s}$. (Για παράδειγμα, στο σύστημα νερού-ατμού η πρώτη συνθήκη αντιστοιχεί σε πίεση μεγαλύτερη από 120 bar.) Σε χαμηλές όμως πιέσεις, οι προβλέψεις του μοντέλου μπορεί να είναι ιδιαίτερα ανακριβείς.
- Όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο πρέπει να ελέγχεται η ισχύς της παραδοχής για ισορροπία μεταξύ των φάσεων, διότι διαφορετικά οδηγεί σε λάθη (π.χ. απότομες αλλαγές στην πίεση (εκτόνωση) ή την ταχύτητα (αλλαγή της διαμέτρου)).

4.3 Διαχωρισμένο μοντέλο

Το μοντέλο αυτό παίρνει υπόψη του ότι οι δύο φάσεις μπορεί να έχουν διαφορετική ταχύτητα και φυσικές ιδιότητες. Υπάρχει συνεπώς μεταφορά ορμής ανάμεσα στις δύο φάσεις. Οι βασικές εξισώσεις μπορούν να γραφούν ξεχωριστά για κάθε φάση. Στην πιο γενική μορφή γράφονται ξεχωριστές εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας για κάθε φάση και οι έξι εξισώσεις που προκύπτουν λύνονται ταυτόχρονα μαζί με εξισώσεις που περιγράφουν πως οι δύο φάσεις επιδρούν μεταξύ τους και με τα τοιχώματα του αγωγού. Όταν ο αριθμός των μεταβλητών υπερβαίνει τον αριθμό των εξισώσεων χρησιμοποιούνται απλοποιητικές παραδοχές ή συσχετισμοί από πειράματα.

Οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται το μοντέλο της διαχωρισμένης ροής είναι:

- Σταθερές, αλλά όχι υποχρεωτικά ίσες ταχύτητες ρευστών
- Θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των φάσεων του διφασικού μίγματος και
- Χρήση εμπειρικών σχέσεων που συσχετίζουν τους πολλαπλασιαστές (Φ^2) και το κλάσμα κενού (α) με τις ανεξάρτητες μεταβλητές ροής.

Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν τη μονοδιάστατη διφασική ροή είναι:

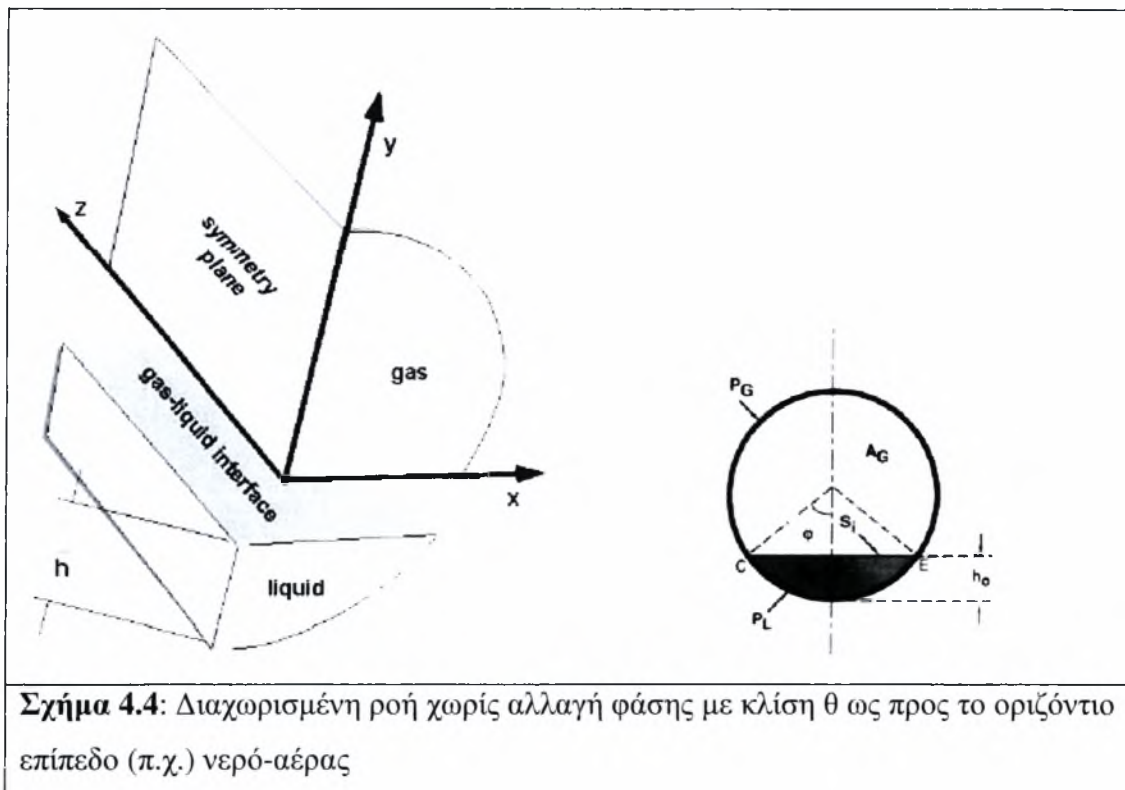
Συνέχειας: $m = m_G + m_L = \sigma \tau \alpha \theta$. (4.29)

Ορμής: $\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau_w}{D} + G \frac{d}{dz} [x u_G + (1-x) u_L] + [\alpha \rho_G + (1-\alpha) \rho_L] \cos \theta$ (4.30)

Ενέργειας: $\frac{1}{m} \left(\frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} \right) = \frac{d}{dz} [x h_g + (1-x) h_L] + \frac{d}{dz} \left[x \frac{u_G^2}{2} + (1-x) \frac{u_L^2}{2} \right]$ (4.31)

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Όπου η γωνία θ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.4:



Μπορεί να σημειωθεί ότι:

- Όπως με την ομογενή ροή, η συνολική πτώση πίεσης διαιρείται σε τρία μέρη: την πτώση πίεσης λόγω τριβής, λόγω βαρύτητας και λόγω επιτάχυνσης
- Οι όροι της βαρύτητας και της επιτάχυνσης απαιτούν γνώση του κενού μέρους α
- Για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων απαιτούνται επιπλέον σχέσεις για τη διατμηματική τάση στο τοίχωμα.

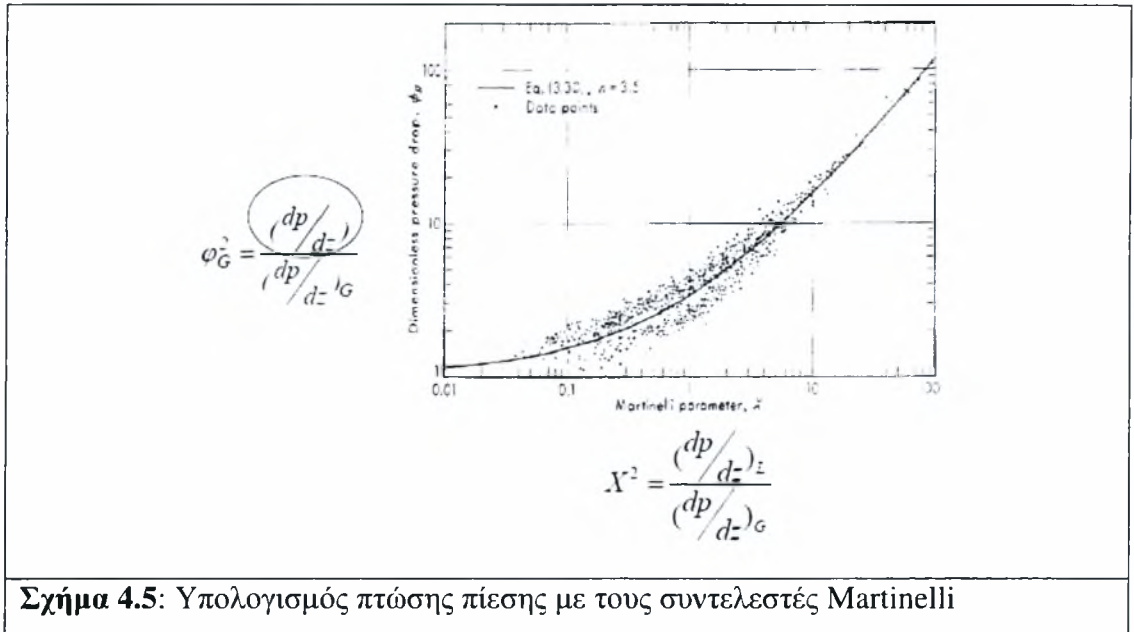
Ένας εναλλακτικός τρόπος επίλυσης είναι οι ημιεμπειρικές σχέσεις που ανέπτυξαν οι Lockhart & Martinelli (1949). Βασιζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα που καλύπτουν σχεδόν όλες τις περιοχές ροής που εμφανίζονται στην οριζόντια διφασική ροή όρισαν τους πολλαπλασιαστές Φ_G^2 και Φ_L^2 που εκφράζουν το λόγο της πτώσης πίεσης του μίγματος στο σωλήνα ως προς την πτώση πίεσης κάθε ρευστού όταν ρέει μόνο του.

$$\Phi_G^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_G} \quad (4.32)$$

$$\Phi_L^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_L} \quad (4.33)$$

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \quad (4.34)$$



Σχήμα 4.5: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με τους συντελεστές Martinelli

Έχει βρεθεί εμπειρικά ότι οι πολλαπλασιαστές προβλέπονται ικανοποιητικά από τη συσχέτιση Lockhart-Martinelli:

$$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2 \text{ και}$$

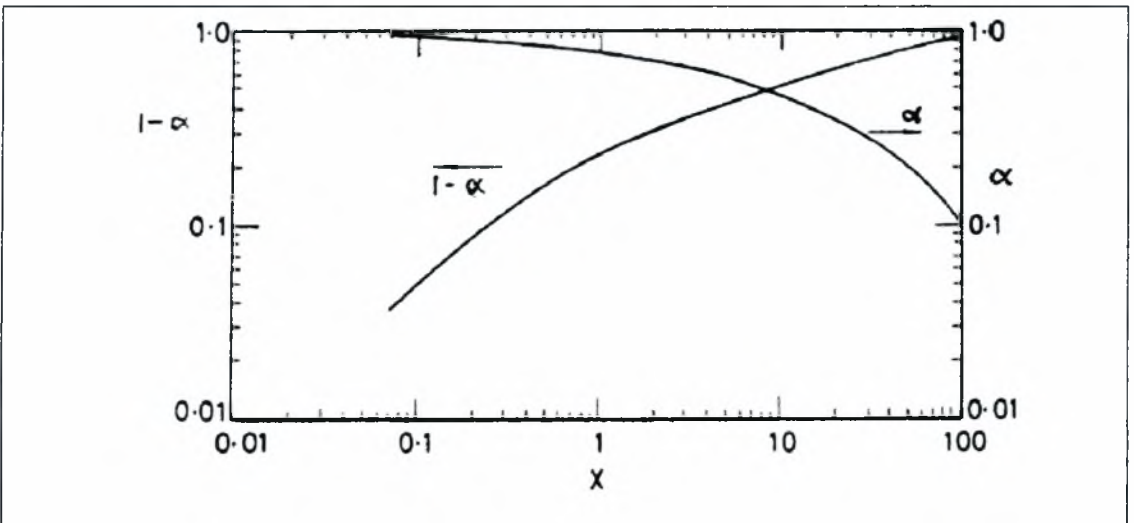
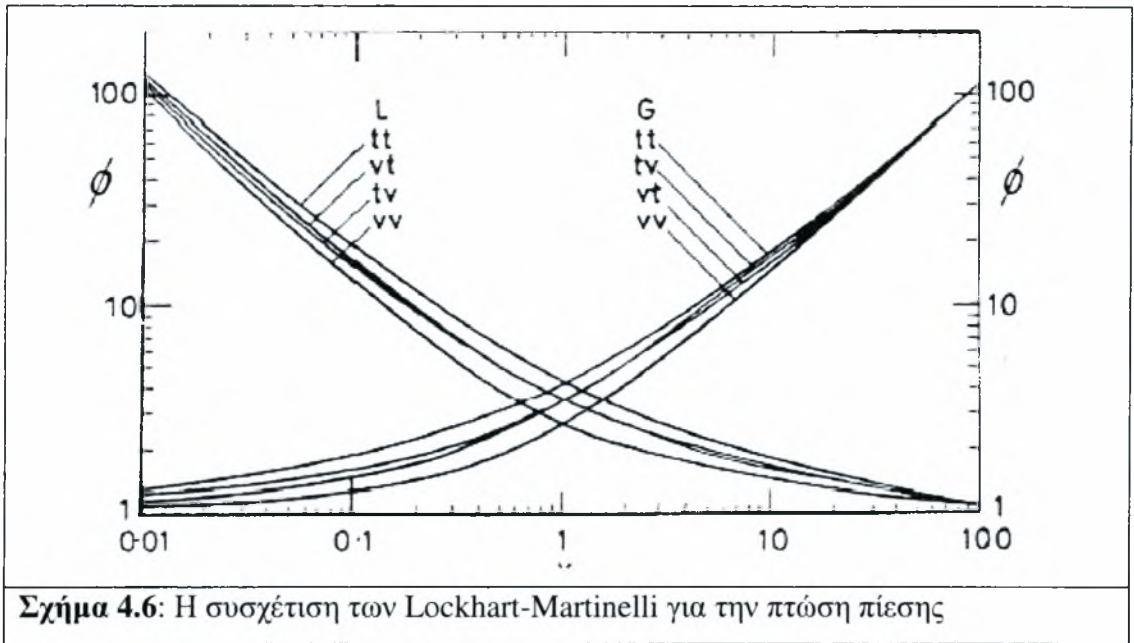
$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \text{ όπου } C \text{ μία σταθερά η οποία μπορεί να πάρει τις ακόλουθες}$$

τιμές:

Ροή υγρού	Ροή αερίου	Τιμή σταθεράς C
τυρβώδης	τυρβώδης	20
στρωτή	τυρβώδης	12
τυρβώδης	στρωτή	10
στρωτή	στρωτή	5

Μία απλή και αρκετά ακριβής αναλυτική παρουσίαση των συσχετίσεων Lockhart-Martinelli δίνεται από τον Chisholm (1967) στα σχήματα 4.6 και 4.7.

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ



Μία πιθανόν ακριβέστερη εμπειρική σχέση είναι η συσχέτιση του Friedel (1979), η οποία προέκυψε από ελαχιστοποίηση του σφάλματος για μεγάλη βάση πειραματικών δεδομένων πτώσης πίεσης. Ο πολλαπλασιαστής ως προς τη συνολική παροχή, φ_{Lo}^2 δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_{Lo}^2 = A_1 + \frac{3.2A_2A_3}{Fr^{0.045}We^{0.035}} \quad (4.35)$$

όπου

$$A_2 = x^{0.78}(1-x)^{0.224} \quad (4.36a)$$

$$A_3 = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.7} \quad (4.36b)$$

$$F_r = \frac{G^2}{gD\rho^2} \quad (4.36c)$$

$$W_e = \frac{G^2 D}{\rho\sigma} \quad (4.36d)$$

Οι συντελεστές τριβής f_{L0} και f_{G0} υπολογίζονται από τη συσχέτιση της μονοφασικής ροής για τη συνολική παροχή, G , ως υγρό και αέριο αντίστοιχα. D είναι η διάμετρος (ή η ισοδύναμη διάμετρος για μη-κυκλική διατομή, σ η επιφανειακή τάση και $\bar{\rho}$ η μέση πυκνότητα του ομογενούς μοντέλου όπως ορίζεται από τη σχέση 4.8.

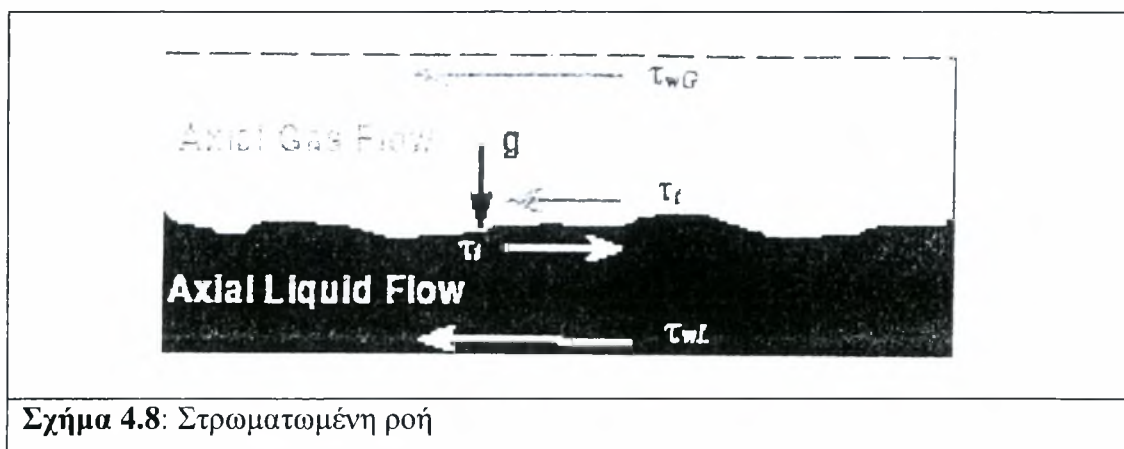
Παρατηρήσεις:

- Υπάρχουν δύο κυρίως διαφορές με το μοντέλο της ομογενούς ροής: δύο εξισώσεις ορμής στις οποίες εμφανίζεται η τριβή μεταξύ των φάσεων, η οποία οφείλεται στη διαφορά της ταχύτητας (σχετική ταχύτητα). Χρησιμοποιούνται οι φυσικές ιδιότητες της κάθε φάσης.
- Παραδοσιακά το μοντέλο χρησιμοποιείται για υπολογισμούς των χαρακτηριστικών των διαχωρισμένων ροών.
- Η χρήση του μοντέλου συνιστάται στις περιπτώσεις όπου η **διαφορά των πυκνοτήτων** των φάσεων είναι μεγάλη και υπάρχει η επίδραση του πεδίου βαρύτητας. Μεγάλη διαφορά στην πυκνότητα σημαίνει ότι η άνωση κάνει την ελαφριά φάση (αέριο) να κινείται ταχύτερα από την βαριά (υγρό) (π.χ. κατακόρυφη ροή με φυσαλίδες)

4.4 Μοντελοποίηση της στρωματωμένης ροής

Με τη μοντελοποίηση της στρωματωμένης ροής (σχήμα 4.8) ασχολήθηκαν πολλοί ερευνητές κυρίως στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Ο Johannessen το 1972 ήταν ο πρώτος που παρουσίασε μία θεωρία για χρήση των παραμέτρων L-M στη στρωματωμένη ροή, χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψιν του την διεπιφανειακή διατμητική τάση. Οι Taitel & Dukler το 1976 στηριζόμενοι στην ανάλυση του Johannessen επεκτείνουν τη θεωρία του εισάγοντας όμως τη διεπιφανειακή διατμητική τάση αυτή τη φορά.

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ



Σχήμα 4.8: Στρωματωμένη ροή

Για τον καθορισμό της σταθερότητας της στρωματωμένης ροής απαιτείται ο υπολογισμός του πάχους υγρού το οποίο με τη σειρά του υπολογίζεται από τις εξισώσεις των Taitel & Dukler. Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ορμής για κάθε φάση χωριστά έχουμε τις ακόλουθες σχέσεις:

$$-A_L \cdot \frac{\Delta P}{dx} - \tau_{wL} \cdot S_L + \tau_i \cdot S_i - \rho_L \cdot A_L \cdot g \cdot \sin \beta = 0 \quad (4.37)$$

$$-A_G \cdot \frac{\Delta P}{dx} - \tau_{wG} \cdot S_G + \tau_i \cdot S_i - \rho_G \cdot A_G \cdot g \cdot \sin \beta = 0 \quad (4.38)$$

όπου ρ_G και ρ_L οι πυκνότητες του αερίου και του υγρού αντιστοίχως, A είναι η επιφάνεια ροής κάθε ρευστού, τ_{wG} , τ_{wL} , είναι οι διατμηματικές τάσεις του αερίου και του υγρού αντιστοίχως και τ_i η διατμηματική τάση η οποία επιδρά στη διεπιφάνεια S_i . Τα S_L και S_G είναι τα τμήματα της περιμέτρου των σωλήνων σε επαφή με το υγρό και το αέριο αντιστοίχως, ενώ β είναι η γωνία του κεκλιμένου αγωγού η οποία μετρείται θετική για προς τα άνω ροή. Από τη στιγμή που η παράγωγος της πίεσης είναι ίδια και για τις δύο φάσεις τότε εξισώνοντας τις σχέσεις 4.37 και 4.38, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_{wG} \cdot \frac{S_G}{A_G} - \tau_{wL} \cdot \frac{S_L}{A_L} + \tau_i \cdot S_i \cdot \left(\frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) - (\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin \beta = 0 \quad (4.39)$$

Οι διατμηματικές τάσεις μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\tau_L = \frac{f_L \cdot \rho_L \cdot U_L^2}{2}, \quad \tau_G = \frac{f_G \cdot \rho_G \cdot U_G^2}{2}, \quad \tau_i = \frac{f_i \cdot \rho_G \cdot (U_G - U_L)^2}{2}$$

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

$$F_{(G \text{ or } L)} = 16/Re \quad \text{για } Re_{(G \text{ or } L)} < 2000 \quad (4.40)$$

$$F_{(G \text{ or } L)} = 0.046 Re^{-0.2} \quad \text{για } Re_{(G \text{ or } L)} > 2000 \quad (4.41)$$

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η δυσκολία έγκειται στον προσδιορισμό του διεπιφανειακού συντελεστή f_i . Στη βιβλιογραφία προτείνεται μεγάλος αριθμός σχέσεων, ωστόσο σύμφωνα με τον προσδιορισμό του Andritsos (1986), θα έχουμε τα κάτωθι:

Σε χαμηλές πιέσεις:

$$f_i = f_g \quad \text{για } u_{GS} \leq 5 \text{ m/sec} \quad (4.42)$$

$$f_i = f_g \left[1 + 15 \left(\frac{h}{D} \right)^{0.5} \left(-1 + \frac{u_{GS}}{5} \right) \right] \quad \text{για } u_{GS} \geq 5 \text{ m/sec} \quad (4.43)$$

Σε υψηλές πιέσεις:

$$f_i = f_g \quad \text{για } \left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_l} \right)^{0.5} u_{GS} \leq 1 \text{ m/s} \quad (4.44)$$

$$\frac{f_i}{f_g} = 1 + 15 \left(\frac{h}{D} \right)^{0.5} \left[\left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_l} \right)^{0.5} u_{GS} - 1 \right] \quad \text{για } \left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_l} \right)^{0.5} u_{GS} > 1 \text{ m/s} \quad (4.45)$$

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

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left[1 - 2 \left(\frac{h}{D} \right) \right] \quad (4.46)$$

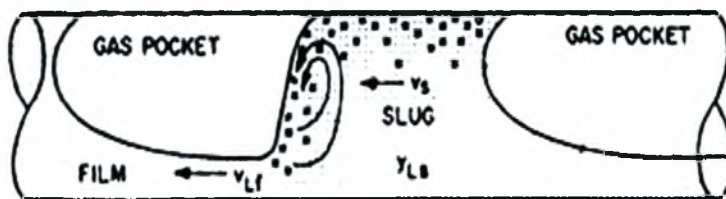
$$\frac{A_L}{A} = \frac{1}{2\pi} (\gamma - \sin \gamma) \quad (4.47)$$

$$\frac{A_G}{A} = 1 - \frac{A_L}{A} \quad (4.48)$$

Από την εξίσωση 4.37 ή 4.38 υπολογίζεται η πτώση πίεσης του διαφασικού μίγματος.

4.5 Μοντελοποίηση της διαλείπουσας ροής

Η Διαλείπουσα Ροή (Slug or Intermittent Flow), χαρακτηρίζεται από το πέρασμα περιοδικών υγρών μαζών (slugs), που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης (σχήμα 4.9). Οι υγρές αυτές μάζες μπορεί να περιέχουν και να παρασύρουν πολυάριθμες φυσαλίδες αερίου (plugs).



Σχήμα 4.9: Διαλείπουσα ροή

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Όπως αναφέρεται από τους Petalas & Aziz (2000), μετάπτωση από τη ροή με φυσαλίδες στη διαλείπουσα ροή εμφανίζεται όταν το κλάσμα υγρού στο «slug» υπερβαίνει την τιμή που αντιστοιχεί στη μέγιστη ογκομετρική πυκνότητα των διασκορπισμένων φυσαλίδων (σχήμα 4.13). Ο ίδιος μηχανισμός μπορεί να εμφανισθεί για χαμηλές παροχές υγρού όταν το υγρό δεν επαρκεί για τη δημιουργία των «slugs». Γι'αυτή την περίπτωση, ορίζεται ως κριτήριο μετάπτωσης (γραμμή I4 στο σχήμα 4.10) η σχέση:

$$E_L \leq 0.24 \quad (4.49)$$

Το κλάσμα όγκου του υγρού που υπολογίζεται για τη ροή των υγρών μαζών συζητείται παρακάτω. Αν και δεν αναφερόμαστε χωριστά για το καθεστώς ροής με plugs, η ροή αυτή ορίζεται ως το τμήμα της διαλείπουσας ροής για την οποία η υγρή μάζα δεν περιέχει διασκορπισμένες φυσαλίδες. Αυτός ο ορισμός παρουσιάζεται με αυθαίρετο τρόπο για την περιοχή όπου ισχύει:

$$E_L \geq 0.90 \quad (4.50)$$

Το κλάσμα όγκου του υγρού μπορεί να υπολογισθεί γράφοντας ένα συνολικό ισοζύγιο της μάζας του υγρού σε ένα τμήμα υγρών μαζών και φυσαλίδων. Υποθέτοντας ότι η ροή είναι ασυμπίεστη και ότι το πάχος της υγρής στοιβάδας είναι ομοιόμορφο προκύπτει ότι:

$$E_L = \frac{E_{LS} + V_{Gdb}(1 - E_{LS}) - V_{SG}}{V_t} \quad (4.51)$$

όπου το V_{Gdb} αντιπροσωπεύει την ταχύτητα των διασκορπισμένων φυσαλίδων, V_t είναι η ταχύτητα του slug, και E_{LS} είναι το κλάσμα όγκου του υγρού στο slug, η οποία

δίνεται από τη σχέση: $E_{LS} = \frac{1}{1 + (\frac{V_m}{8.66})^{1.39}}$. Όλες αυτές οι ποσότητες πρέπει να

προσδιορισθούν από εμπειρικούς συσχετισμούς. Η ταχύτητα των επιμήκων φυσαλίδων δίνεται από Bendiksen (1984) ως:

$$V_t = C_o V_m + V_d \quad (4.52)$$

όπου το C_o είναι ένας συντελεστής κατανομής που σχετίζεται με την ταχύτητα και την κατανομή της συγκέντρωσης στα διασκορπισμένα συστήματα. Σε ειδικές περιπτώσεις σχετίζεται με το αντίστροφο του παράγοντα K του Bankoff. Οι Zuber & Findlay (1965) έχουν επιβεβαιώσει εμπειρικά την εφαρμογή του σε άλλα καθεστάτα ροής, συμπεριλαμβανομένων της διαλείπουσας και της δακτυλιοειδούς ροής. Οι Nicklin et al, στη μελέτη τους για την ταχύτητα ανόδου φυσαλίδων Taylor, έχουν

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

βρει ότι για αριθμούς Reynolds του υγρού μεγαλύτερους από 8.000, $C_o=1.2$, ενώ για χαμηλότερους αριθμούς Reynolds η παράμετρος πλησιάζει το 2.0. Οι Petalaw & Aziz (2000) χρησιμοποιούν την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$C_o = (1.64 + 0.12 \sin \theta) \text{Re}_{ml}^{-0.031} \quad (4.53)$$

Ο τροποποιημένος αριθμός Reynolds στη σχέση (4.33) βασίζεται στην ταχύτητα του μίγματος και στις ιδιότητες του υγρού:

$$\text{Re}_{ml} = \frac{\rho_L V_m D}{\mu_L} \quad (4.54)$$

Η ταχύτητα ολίσθησης (drift velocity) των επιμήκων φυσαλίδων V_d μπορεί να υπολογισθεί από το συσχετισμό του Zuboski:

$$V_d = f_m V_{d\infty} \quad (4.55)$$

όπου $f_m = 0.316 \sqrt{\text{Re}_\infty}$ για $f_m < 1$, διαφορετικά $f_m = 1$ και

$$\text{Re}_\infty = \frac{\rho_L V_{d\infty} D}{2\mu_L} \quad (4.56)$$

Ο Bendiksen δίνει την ταχύτητα ολίσθησης των επιμήκων φυσαλίδων σε υψηλούς αριθμούς Reynolds ως:

$$V_{d\infty} = V_{dh\infty} \cos \theta - V_{dv\infty} \sin \theta \quad (4.57)$$

Η ταχύτητα ολίσθησης των επιμήκων φυσαλίδων σε ένα οριζόντιο σύστημα σε μεγάλους αριθμούς Reynolds δίνεται από Weber ως:

$$V_{dh\infty} = \left[0.54 - \frac{1.76}{Bo^{0.56}} \right] \sqrt{\frac{gD(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L}} \quad (4.58)$$

όπου ο αριθμός Bond ορίζεται ως: $Bo = \frac{(\rho_L - \rho_G)}{c} gD^2$

Η ταχύτητα ολίσθησης των επιμήκων φυσαλίδων σε ένα κατακόρυφο σύστημα σε υψηλούς αριθμούς Reynolds επιτυγχάνεται από μία τροποποιημένη μορφή του συσχετισμού του Wallis (1969):

$$V_{dv\infty} = 0.345(1 - e^{-\beta}) \sqrt{\frac{gD(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L}} \quad (4.59)$$

Ο συντελεστής β δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = Bo e^{(3.278 - 1.424 \ln Bo)} \quad (4.60)$$

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τέλος το κλάσμα όγκου του υγρού (σχέση 4.51) υπολογίζεται από τη σχέση (4.53) και η ταχύτητα ανόδου των διασκορπισμένων φυσαλίδων από τη σχέση του Harmathy:

$$V_b = 1.53 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \sin \theta \quad (4.61)$$

Η εμπειρική φύση των συσχετισμών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κλάσματος όγκου του υγρού που απαιτεί την επιβολή ορίων στις υπολογιζόμενες τιμές. Ο πρώτος περιορισμός αναφέρεται στην εξίσωση (4.60), όπου είναι δυνατό, για ορισμένες συνθήκες ροής προς τα κάτω η τιμή της V_{Gdb} γίνεται αρνητική. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η V_{Gdb} λαμβάνεται μηδέν. Σ' άλλες περιπτώσεις είναι δυνατόν να υπολογισθούν τιμές για E_L μεγαλύτερες από 1.0. Σ' αυτές τις περιπτώσεις η E_L τίθεται ίση με το C_L .

Όταν κανένα από τα κριτήρια μετάπτωσης που απαριθμούνται παραπάνω δεν ικανοποιείται, το καθεστώς ροής ονομάζεται αφρός (froth), υπονοώντας μία μεταβατική κατάσταση μεταξύ άλλων καθεστώτων ροής.

Υπολογισμός της πτώσης πίεσης και το κλάσμα όγκου του υγρού:

Ο υπολογισμός για το κλάσμα όγκου του υγρού και για τη διαλείπουσα ροή έχει περιγραφεί ήδη στη σχέση (4.30). Η πτώση πίεσης μπορεί να ληφθεί γράφοντας το ισοζύγιο ορμής σ' ένα ζεύγος υγρών μαζών –φυσαλίδων:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right) = \rho_m \frac{g}{g_m} \sin \theta + \frac{1}{L_u} \left[L_s \left(\frac{\tau_{LS} \pi D}{A} \right) + L_f \left(\frac{\tau_{Lf} S_{Lf} + \tau_{Gdb} S_{Gdb}}{A} \right) \right] \quad (4.62)$$

Δυστυχώς καμία αξιόπιστη μέθοδος δεν υπάρχει για τον υπολογισμό του μήκους των υγρών μαζών L_s , ούτε για το μήκος της περιοχής φυσαλίδων L_f . Επιπλέον αν και είναι γνωστό ότι η διατμητική τάση στη φυσαλίδα αερίου είναι κανονικά μικρή έναντι αυτής στο υγρό, καμμία αξιόπιστη μέθοδος δεν είναι διαθέσιμη για τον υπολογισμό τους. Οι Xiao et al έχουν εξετάσει την περιοχή των φυσαλίδων και έχουν υποθέσει ότι είναι ανάλογη με τη στρωματοποιημένη ροή. Παίρνοντας υπόψιν αυτές τις αβεβαιότητες, η ακόλουθη απλή σχέση μπορεί να γραφεί:

$$-\left(\frac{dp}{dL}\right) = \rho_m \frac{g}{g_r} \sin \theta + \eta \left(\frac{dp}{dL}\right)_{frSL} + (1 - \eta) \left(\frac{dp}{dL}\right)_{frAM} \quad (4.63)$$

Η ποσότητα η είναι ένας εμπειρικά καθορισμένος παράγοντας στάθμισης, σχετικός με την αναλογία του μήκους υγρών μαζών στο συνολικό μήκος μονάδων υγρών μαζών, L_s/L_u , και υπολογίζεται από τη σχέση:

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

$$\eta = C_L^{(0.75-E_L)} \quad (4.64)$$

με τον όρο αυτό $\eta \leq 1.0$.

Η πτώση πίεσης για το τμήμα υγρών μαζών υπολογίζεται από:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{frSL} = 2 \frac{f_{mL} V_m^2 \rho_m}{gD} \quad (4.65)$$

Ο συντελεστής τριβής f_{mL} , υπολογίζεται από τις τυποποιημένες μεθόδους χρησιμοποιώντας την τραχύτητα των σωλήνων και τον αριθμό Reynolds που δίνεται

$$\text{Re}_{mL} = \frac{D \rho_L V_m}{\mu_L}.$$

Ο όρος που πρέπει ακόμη να καθορισθεί στη σχέση (4.63) είναι η πτώση πίεσης που υπολογίζεται για τη δακτυλιοειδή-υδρονέφουσα ροή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση του κλάσματος όγκου του υγρού που δίνεται από τη σχέση (4.51) για να υπολογισθεί το πάχος της υγρής στοιβάδας με την υπόθεση ότι έχουμε δακτυλιοειδή- υδρονέφουσα ροή. Κατά συνέπεια από τη σχέση

$$E_L = 1 - (1 - 2\tilde{\delta}_L)^2 \frac{V_{SG}}{V_{SG} + FEV_{SL}} \text{ θα έχουμε:}$$

$$\tilde{\delta}_L = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\left(1 - E_L \frac{(FEV_{SL} + V_{SG})}{V_{SG}} \right)} \right] \quad (4.66)$$

Η πτώση πίεσης βασισμένη στη δακτυλιοειδή-υδρονέφουσα ροή υπολογίζεται έπειτα από:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{frAM} = \frac{4\tau_{wL}}{D} \quad (4.67)$$

Η διατμηματική τάση τ_{wL} , υπολογίζεται από τη σχέση: $\tau_{wL} = \frac{f_L \rho_L V_f^2}{2}$

Όταν το υπολογισμένο πάχος της υγρής στοιβάδας στη σχέση (4.66) είναι λιγότερο από (1×10^{-4}) , τότε χρησιμοποιείται ένα απλό ομογενές μοντέλο με ολίσθηση:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{frAM} = \frac{2f_m V_m^2 \rho_m}{g_o D} \quad (4.68)$$

Ο συντελεστής τριβής, f_m , υπολογίζεται από τις τυποποιημένες μεθόδους χρησιμοποιώντας την τραχύτητα του αγωγού και τον αριθμό Reynolds που δίνεται από τη σχέση:

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

$$\text{Re}_m = \frac{D\rho_m V_m}{\mu_m}$$

Η πυκνότητα και το ιξώδες του μίγματος δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\rho_m = E_L \rho_L + E_G \rho_G$$

$$\mu_m = E_L \mu_L + E_G \mu_G$$

4.6 Μοντελοποίηση της δακτυλιοειδούς ροής

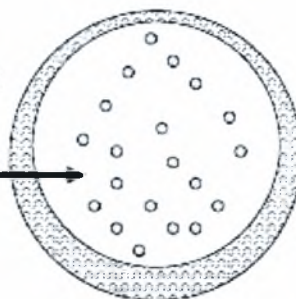
Από τις προσπάθειες των Hewitt και Hall-Taylor το 1970 για την κατανόηση των φαινομένων του συμπαρασυρμού και της εναπόθεσης υγρών σταγονιδίων προέκυψε μία πρώτη μέθοδος μοντελοποίησης της δακτυλιοειδούς ροής (σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Δακτυλιοειδής ροή

Η δακτυλιοειδής ροή είναι παρόμοια με αυτήν που παρατηρείται σε κατακόρυφους αγωγούς, με τη σημαντική διαφορά ότι η υγρή στοιβάδα δεν είναι συμμετρική γύρω από την περιφέρεια του αγωγού λόγω βαρύτητας. Εμφανίζεται για πολύ μεγάλες παροχές της αέριας φάσης. Μέρος του υγρού βρίσκεται συμπαρασυρμένο (entrained) από την αέρια φάση με τη μορφή σταγονιδίων (σχήμα 4.11).

Σταγονίδια εντός της
αέριας φάσης



Σχήμα 4.11: Λεπτομέρεια της δακτυλιοειδούς ροής

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της δακτυλιοειδούς ροής είναι τα ακόλουθα:

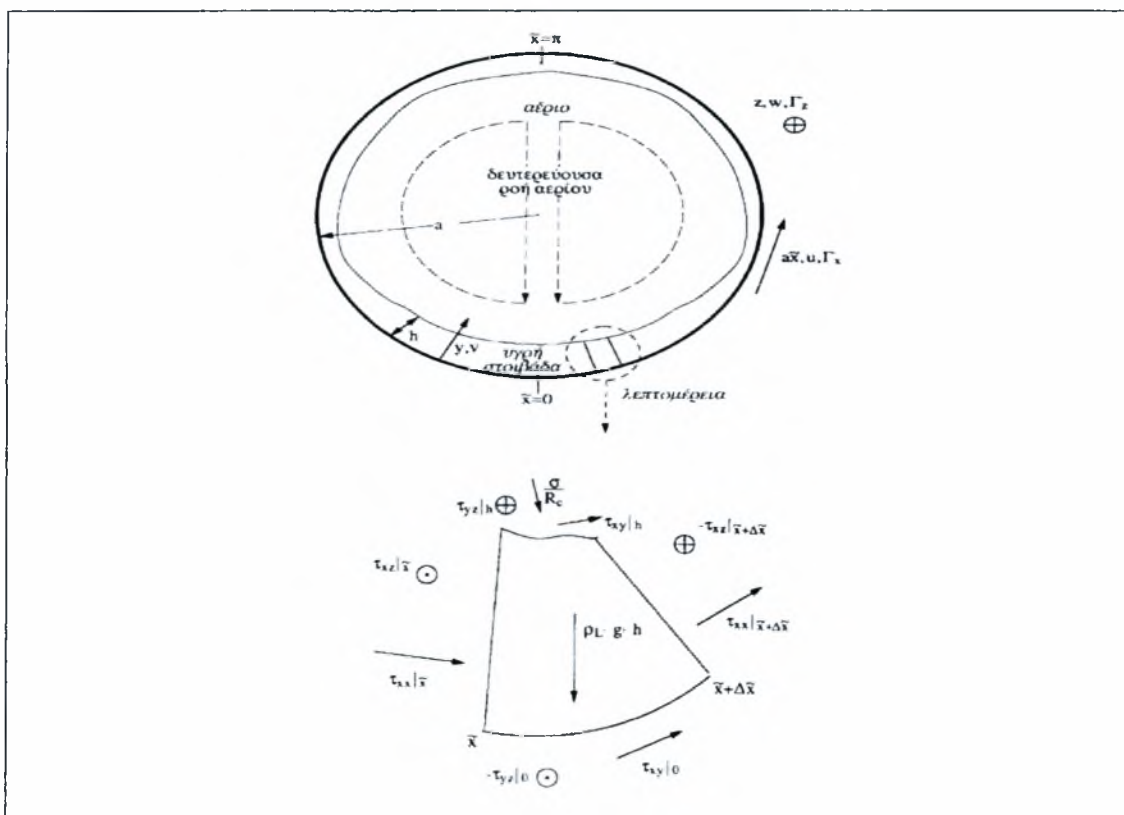
- Πτώση πίεσης
- Συγκράτηση (ύψος υγρής στοιβάδας)
- Συμπαρασυρμός (entrainment)

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

- Κατανομή συγκέντρωσης σταγονιδίων
- Ρυθμός εναπόθεσης/δημιουργίας σταγονιδίων
- Κατανομή των διατμητικών τάσεων (τοίχωμα, διεπιφάνεια)
- Τραχύτητα της διεπιφάνειας
- Κατανομή ταχύτητας των φάσεων

Η μοντελοποίηση της δακτυλιοειδούς ροής λαμβάνει υπόψιν της τη δημιουργία και τη διατήρηση της υγρής στιβάδας στην περιφέρεια του αγωγού για την οποία έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί, όπως:

- η εκνέφωση και η εναπόθεση σταγονιδίων
- η περιφερειακή εξάπλωση των κυμάτων, προκαλούμενη από δυνάμεις που οφείλονται σε διακυμάνσεις της ροής στην κατεύθυνση της περιφέρειας
- η δευτερεύουσα ροή στον αέριο πυρήνα, που προκαλείται από την περιφερειακά μεταβαλλόμενη τραχύτητα της διεπιφάνειας αερίου/υγρού και
- η αντλητική δράση εξ αιτίας μεταβολών της στατικής πίεσης στην επιφάνεια των μεγάλων κυμάτων.



Σχήμα 4.12: Μοντέλο δακτυλιοειδούς ροής

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η προσέγγιση που ακολουθεί είναι βασισμένη στην εργασία των Taitel & Dukler (1976) και των Oliemans et al (1987). Το μοντέλο υποθέτει ένα σταθερό πάχος της υγρής στοιβάδας και αγνοεί το συμπαρασυρμό των σταγονιδίων. Η ισορροπία ορμής στον πυρήνα και στην υγρή στοιβάδα δίνει:

$$-A_f \cdot \left(\frac{dp}{dL}\right) - \tau_{wL} \cdot S_L + \tau_i \cdot S_i - \rho_L \cdot A_f \cdot g \cdot \sin \theta = 0 \quad (4.69)$$

$$-A_c \cdot \left(\frac{dp}{dL}\right) - \tau_i \cdot S_i - \rho_c \cdot A_c \cdot g \cdot \sin \theta = 0 \quad (4.70)$$

Οι γεωμετρικές παράμετροι μπορούν να εκφραστούν μέσω ενός αδιάστατου πάχους της υγρής στοιβάδας $\tilde{\delta}_L = \frac{\delta_L}{D}$, και το κλάσμα του υγρού που παρασύρεται από το αέριο FE (συμπαρασυρμός). Οι διατμητικές τάσεις δίνονται από:

$$\tau_{wL} = \frac{f_L \cdot \rho_L \cdot V_f^2}{2g_o} \quad (4.71)$$

$$\tau_i = \frac{f_i \cdot \rho_o \cdot (V_o - V_f) |V_o - V_f|}{2g_o} \quad (4.72)$$

Ο συντελεστής τριβής για την υγρή στοιβάδα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τους τυποποιημένους συσχετισμούς με την τραχύτητα σωλήνων και στοιβάδας από τον αριθμό Reynolds όπως εκφράζεται από:

$$\text{Re}_f = \frac{D_f \rho_L V_f}{\mu_L}$$

Προκειμένου να λυθούν οι εξισώσεις (4.71) και (4.72), δύο πρόσθετοι συντελεστές πρέπει να καθορισθούν: ο διεπιφανειακός συντελεστής τριβής (f_i) και το FE. Αυτοί υπολογίζονται από τις εμπειρικές σχέσεις:

$$\frac{FE}{1-FE} = 0.735 N_B^{0.074} \left(\frac{V_{SG}}{V_{SL}}\right)^{0.2} \quad (4.73)$$

$$\frac{f_i}{f_c} = 0.24 \left\{ \frac{\sigma}{\rho_c V_c^2 D_c} \right\}^{0.085} \text{Re}_f^{0.305} \quad (4.74)$$

όπου ο αδιάστατος αριθμός N_B ορίζεται ως $N_B = \frac{\mu_L^2 V_{SG}^2 \rho_G}{\sigma^2 \rho_L}$

Η Barnea (1986) παρουσίασε ένα μοντέλο για τη μετάπτωση από τη δακτυλιοειδή ροή βασισμένη σε δύο όρους. Η πρώτη μετάβαση που προείνεται είναι βασισμένη στην παρατήρηση ότι η ελάχιστη διατμητική τάση συνδέεται με μια αλλαγή στην

4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

κατεύθυνση της ταχύτητας μέσα στην υγρή στοιβάδα. Όταν η κατανομή της ταχύτητας γίνεται αρνητική, η σταθερή δακτυλιοειδής ροή δεν μπορεί να διατηρηθεί και συμβαίνει μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή. Αυτός ο μηχανισμός μετάπτωσης αφορά μόνο τη ροή προς τα πάνω. Ο ελάχιστος όρος της διατμητικής τάσης μπορεί να

καθορισθεί από τη συνθήκη $\frac{\partial \tau_f}{\partial \tilde{\delta}_L} = 0$.

$$2f_L \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_c} \frac{V_{SL}^2 (1 - FE)^2}{gD \sin \theta} = \frac{E_f^2 (1 - \frac{2}{3} E_f)}{2 - \frac{3}{2} E_f} \quad (4.75)$$

και το κλάσμα υγρού στη στοιβάδα δίνεται από:

$$E_f = \frac{A_f}{A} = 4\tilde{\delta}_L (1 - \tilde{\delta}_L) \quad (4.76)$$

Η σχέση (4.75) μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας μία επαναληπτική διαδικασία για να καθορισθεί το πάχος της υγρής στοιβάδας στο οποίο η ελάχιστη διατμητική τάση εμφανίζεται στο $\tilde{\delta}_{L_{min}}$ (γραμμή A1, σχήμα 4.11).

Ο δεύτερος μηχανισμός που προτείνεται από τη Barnea για την αστάθεια της δακτυλιοειδούς ροής εμφανίζεται όταν ο εφοδιασμός του υγρού στη στοιβάδα είναι επαρκής για να προκαλέσει την παρεμπόδιση του αερίου στον πυρήνα με το γεφύρωμα του σωλήνα. Ως εκ τούτου, η μετάβαση από τη δακτυλιοειδή ροή εμφανίζεται όταν (γραμμή A2 στο σχήμα 4.11):

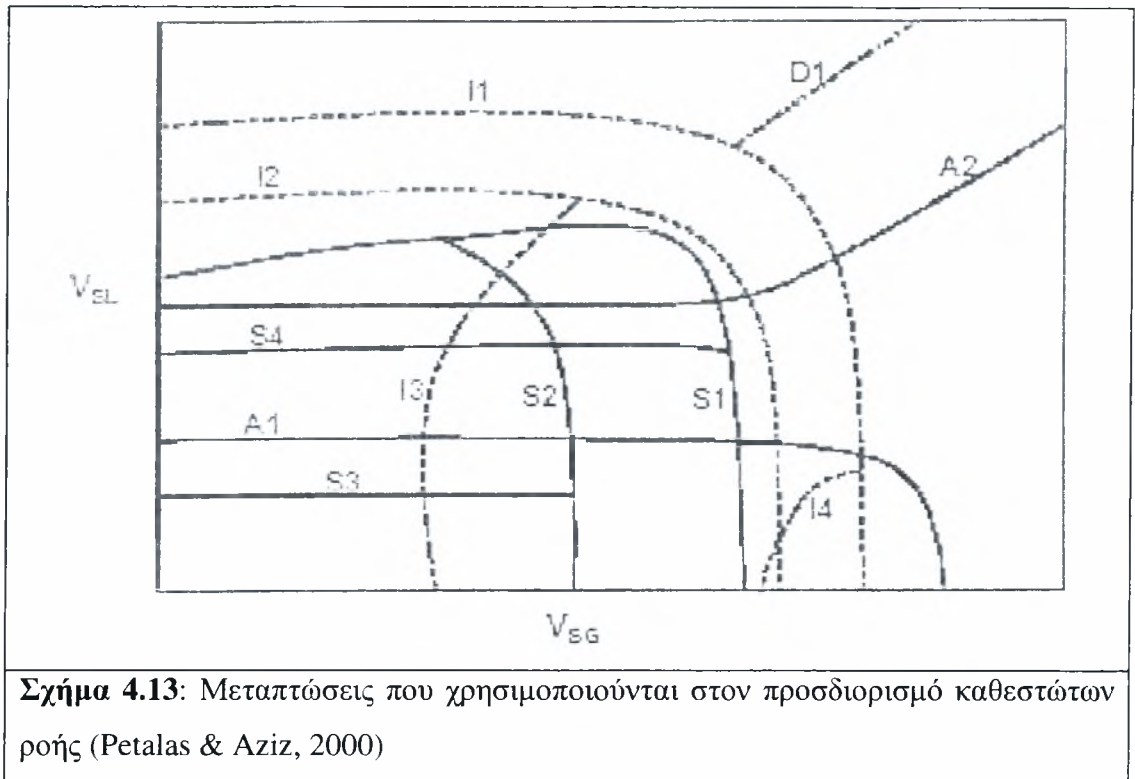
$$E_L \geq \frac{1}{2}(1 - 0.52) \text{ ή } E_L \geq 0.24 \quad (4.77)$$

Υπολογισμός της πτώσης πίεσης και του κλάσματος παροχής υγρού:

Ο συμπαρασυρμός E, κατά τη διάρκεια της δακτυλιοειδούς ροής μπορεί να υπολογισθεί από τις γεωμετρικές σχέσεις όταν είναι γνωστό το πάχος της υγρής στοιβάδας:

$$E_L = 1 - (1 - 2\tilde{\delta}_L)^2 \frac{V_{SG}}{V_{SG} + FEV_{SL}} \quad (4.78)$$

Επομένως η πτώση πίεσης μπορεί να υπολογισθεί από τις σχέσεις (4.69) και (4.70).



Σχήμα 4.13: Μεταπτώσεις που χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό καθεστώτων ροής (Petalas & Aziz, 2000)

Επισκόπηση

Από την επισκόπηση των μοντέλων που έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια προκύπτει ότι:

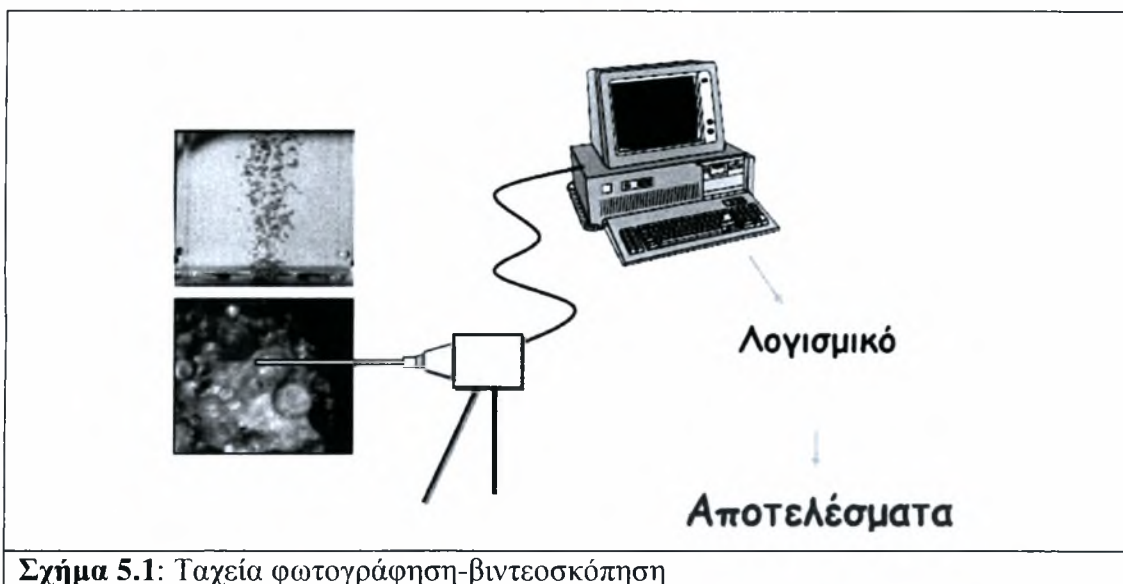
- Γίνονται πολλές δραστικές παραδοχές που δεν τεκμηριώνονται από πειραματικά δεδομένα.
- Προβλέψεις βασιζόμενες σε εντελώς διαφορετικούς μηχανισμούς προσαρμόζονται ουσιαστικά στα λίγα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, με χρήση αριθμητικών συντελεστών αμφιβόλου φυσικής σημασίας.
- Μέχρι σήμερα η συμβολή των μοντέλων στην αποκάλυψη του κύριου μηχανισμού διαμόρφωσης της υγρής στοιβάδας είναι περιορισμένη.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

5.1 Προσδιορισμός Καθεστώτων Ροής

5.1.1 Οπτική παρατήρηση

Οι οπτικές παρατηρήσεις σε ένα διαφανές τμήμα του αγωγού είναι ο απλούστερος τρόπος ανίχνευσης των μορφών της διφασικής ροής. Στην περίπτωση ταχύτατα εξελισσομένων φαινομένων, όπου η απλή παρατήρηση δεν είναι αρκετή, η χρήση φωτογραφικής μεθόδου μεγάλης ταχύτητας (high-speed photography), Σχήμα 5.1 ή η φωτογράφιση αξονικής διατομής (axial view photography) είναι επιβεβλημένη (Hewitt & Roberts, 1969).



Σχήμα 5.1: Ταχεία φωτογράφιση-βιντεοσκόπηση

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 λόγω υψηλής πίεσης).

5.1.2 Αγωγιμομετρική μέθοδος

Η αγωγιμομετρική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί πολύ συχνά για μετρήσεις πάχους στοιβάδας. Για πολύ μικρές στοιβάδες (<0.5mm) χρησιμοποιούνται τα «εφαπτόμενα» στοιχεία (flush mounted probes). Αυτή η μέθοδος στηρίζεται στο ότι η αγωγή ρεύματος μεταξύ δύο συρμάτων, τοποθετημένα εφαπτομενικά πάνω στο τοίχωμα όπου ρέει μία υγρή στοιβάδα εξαρτάται από το πάχος της στοιβάδας. Η ηλεκτρική συμπεριφορά αυτού του είδους των στοιχείων μελετήθηκε από τον Coney (1973) {Καραπάντσιος – 1987}, ο οποίος τόνισε ότι η μέθοδος χάνει την ευαισθησία της για μεγάλα πάχη υγρού. Δηλαδή η απόκριση των στοιχείων δεν είναι ικανοποιητική για πάχη μεγαλύτερα κάποιας συγκεκριμένης τιμής που εξαρτάται κυρίως από την

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

απόσταση των δύο ηλεκτροδίων. Αλλά αύξηση της απόστασης αυτής δεν δίνει πια τοπικές μετρήσεις. Η σχέση που συνδέει την αγωγή του ρεύματος με το πάχος υγρού προσδιορίζεται συνήθως πειραματικά. Καθώς η υγρή στοιβάδα ξεπερνά κάποια τιμή, χάνεται η γραμμικότητα μεταξύ αγωγής και πάχους στοιβάδας και η αγωγή τείνει προς μία σταθερή τιμή ρεύματος.

Τα αγωγιμομετρικά σύρματα για μεγαλύτερο πάχος στοιβάδας χρησιμοποιήθηκαν από τον Swanson (1976) και κυρίως από τον Hanratty και τους συνεργάτες του (Miyu et al 1971, Tatterson 1975, Dalman 1978, Laurinat 1979, Andritsos 1986). Αυτή η τεχνική χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία.

Η ηλεκτρική συμπεριφορά αυτών των probes παρουσιάζεται από τους Brown et al (1978). Αυτή η τεχνική απαιτεί δύο λεπτά παράλληλα σύρματα τοποθετημένα δίπλα-δίπλα στο σωλήνα, κάθετα στη διεύθυνση της ροής. Χρησιμοποιώντας το υγρό σαν αγωγό είναι δυνατόν να μετρηθεί η αντίσταση μεταξύ των δύο συρμάτων και να μετατραπεί κατόπιν σε πάχος υγρής στοιβάδας. Η ηλεκτρική αντίσταση ανάμεσα σε δύο παράλληλα σύρματα που είναι κάθετα στη διεύθυνση της ροής δίνεται από τη σχέση:

$$R_f = \frac{1}{\pi \gamma_m h} \ln \frac{D_e + (D_e^2 - d_w^2)^{0.5}}{d_w} \quad (5.1)$$

όπου:

R_f , η αντίσταση σε Ohm,

γ_m η αγωγιμότητα του μέσου $\text{ohm}^{-1} \text{m}^{-1}$

D_e η απόσταση μεταξύ των συρμάτων, m

d_w η διάμετρος των συρμάτων, m

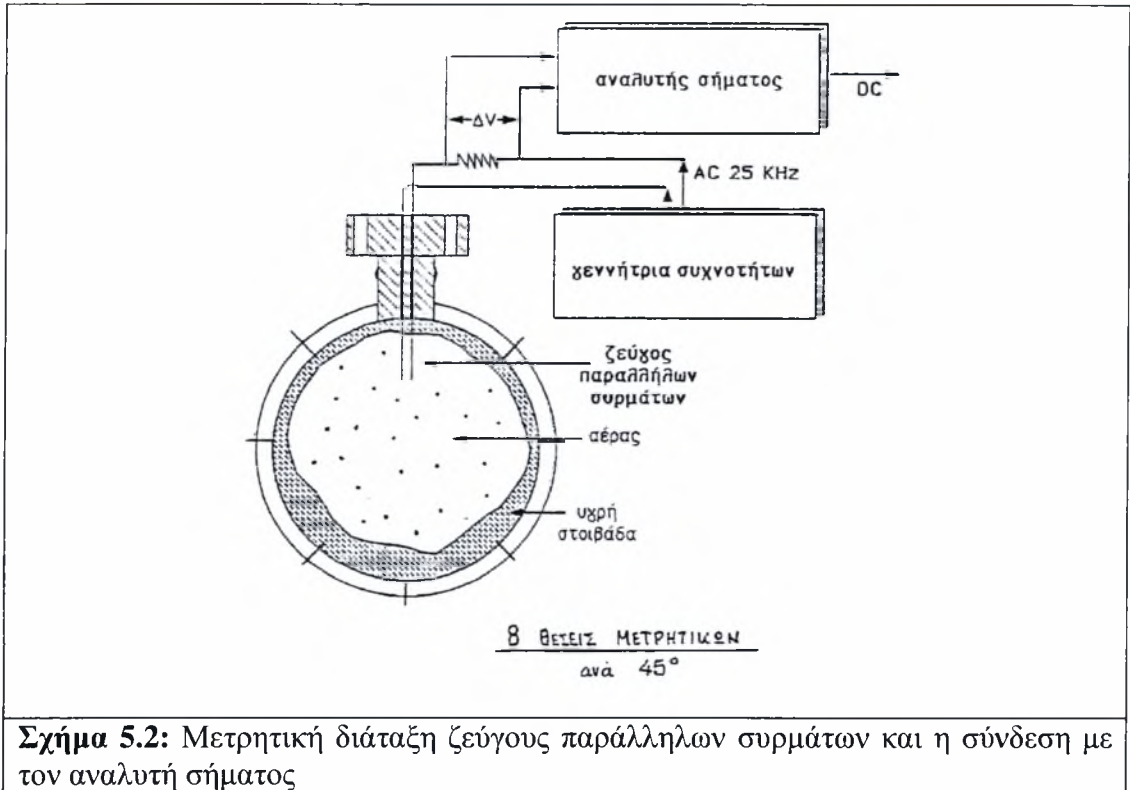
h πάχος της αγωγίμης στοιβάδας, m.

Η χρήση των συρμάτων αυτών βασίζεται στο ότι η αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους των συρμάτων που είναι βυθισμένα στο υγρό. Αυτό επιβεβαιώθηκε πειραματικά τόσο στην παρούσα εργασία όσο και σ' άλλες προηγούμενες (Swanson 1966, Zabaras 1985) {Καραπάντσιος 1987}.

Το μετρητικό τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25KHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στοιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσομένου ρεύματος που διαρέει το

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές, οι οποίες μετρούνται στα άκρα μία μικρής αντίστασης (50Ω), τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Μετρητική διάταξη ζεύγους παραλλήλων συρμάτων και η σύνδεση με τον αναλυτή σήματος

Ο αναλυτής αυτός, σχεδιάστηκε αρχικά στο Πανεπιστήμιο του Illinois (Andritsos 1986), αποτελείται από ένα διαφορικό ενισχυτή, ο οποίος ενισχύει τις πολύ μικρές μεταβολές της τάσης (μερικά mV), και το τμήμα αποδιαμόρφωσης και φιλτραρίσματος του σήματος. Η εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 25KHz, που τροφοδοτείται στον αναλυτή, είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, δηλαδή η μεταβολή του πλάτους της αντιστοιχεί στις μεταβολές της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Επομένως, η πληροφορία που μας ενδιαφέρει βρίσκεται στη μορφή της περιβάλλουσας των κορυφών της εναλλασσόμενης τάσης. Το κύκλωμα του Σχήματος 5.2 εξασφαλίζει στην έξοδο του συνεχή τάση απαλλαγμένη από την υψηλή συχνότητα του φορέα και ανάλογη των μεταβολών του πάχους της υγρής στοιβάδας.

Η βαθμονόμηση του αναλυτή έγινε χρησιμοποιώντας γνωστές ωμικές αντιστάσεις αντί των συρμάτων που κάλυπταν όλο το εύρος των μετρούμενων τιμών πάχους υγρού (από 232 Ω μέχρι 37800). Η τάση βρέθηκε να είναι γραμμική σχεδόν σ' όλο το εύρος τιμών των αντιστάσεων.

Για τη βαθμονόμηση του ζεύγους των παραλλήλων συρμάτων, δηλαδή τον προσδιορισμό της σχέσης ανάμεσα στο πάχος της υγρής στοιβάδας και της μετρούμενης αγωγιμότητας ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία: αφού

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

απομονώσαμε το μετρητικό στοιχείο από την πειραματική διάταξη το τοποθετήσαμε με προσοχή οριζόντια και σφραγίσαμε τα άκρα του με φλάντζες. Ρίχνοντας κάθε φορά γνωστή ποσότητα νερού (20ml) σημειώναμε την τάση εξόδου του αναλυτή. Στη συνέχεια γνωρίζοντας τις διαστάσεις καθώς και τη γεωμετρία του μετρητικού (κύλινδρος) μετατρέπαμε την ποσότητα του υγρού σε ύψος υγρής στοιβάδας χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{h}{D} \right) \quad (5.2)$$

και

$$V_L = \frac{LD^2}{8} (\gamma - \sin \gamma) \quad (5.3)$$

Έτσι προέκυψε η γραμμική σχέση, που συνδέει το πάχος της υγρής στοιβάδας με την αγωγή ρεύματος μέσα από τη στοιβάδα, παρατηρώντας ότι στον αέρα (άπειρη αντίσταση) η τάση εξόδου είναι μηδέν. Η αναγωγή των καμπυλών βαθμονόμησης στις συνθήκες του πειράματος εξασφαλίζεται με τη μέτρηση της αγωγιμότητας του νερού πριν από κάθε πείραμα. Τελικά οι μετρήσεις της τάσης εξόδου του αναλυτή μετατρέπονται σε πάχος υγρής στοιβάδας χρησιμοποιώντας:

- I. την καμπύλη βαθμονόμησης του αναλυτή, η οποία υπολογίζεται στην αρχή κάθε πειράματος,
- II. την καμπύλη βαθμονόμησης του μετρητικού, η οποία εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του μετρητικού (πάχος, μήκος, απόσταση συρμάτων) και
- III. την ειδική αγωγιμότητα του νερού για τις συνθήκες του πειράματος.

Η ακρίβεια της τεχνικής αυτής εκτιμάται ότι είναι της τάξης του $\pm 5\%$, συνυπολογιζόμενης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στη διαδικασία βαθμονόμησης (π.χ. μεταβολές θερμοκρασίας, ηλεκτρονικός θόρυβος κλπ). Επιπλέον για υγρές στοιβάδες πάχους μικρότερου των 0.05mm τα αποτελέσματα δε θεωρούνται αξιόπιστα.

Είναι βέβαια δυνατόν να διατυπώθει αντίρρηση ως προς την καταλληλότητα των συρμάτων για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στοιβάδας σε αναλογία με τις άμεσες μεθόδους διότι η εισαγωγή τους στη ροή δημιουργεί διαταραχές στο υγρό και ταυτόχρονα δημιουργείται μηνίσκος από τη διαβροχή τους. Για το λόγο αυτό τα συρματακία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν πάχους 0,5mm τα οποία έχουν και ένα ακόμη πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται μεγάλη ενίσχυση και συνεπώς δεν αυξάνεται η επίδραση του ηλεκτρονικού θορύβου. Παρ' όλα αυτά ένα μέρος του υγρού μπορεί να παραμένει πάνω τους με αποτέλεσμα την ανίχνευση μεγαλύτερου πάχους από το

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

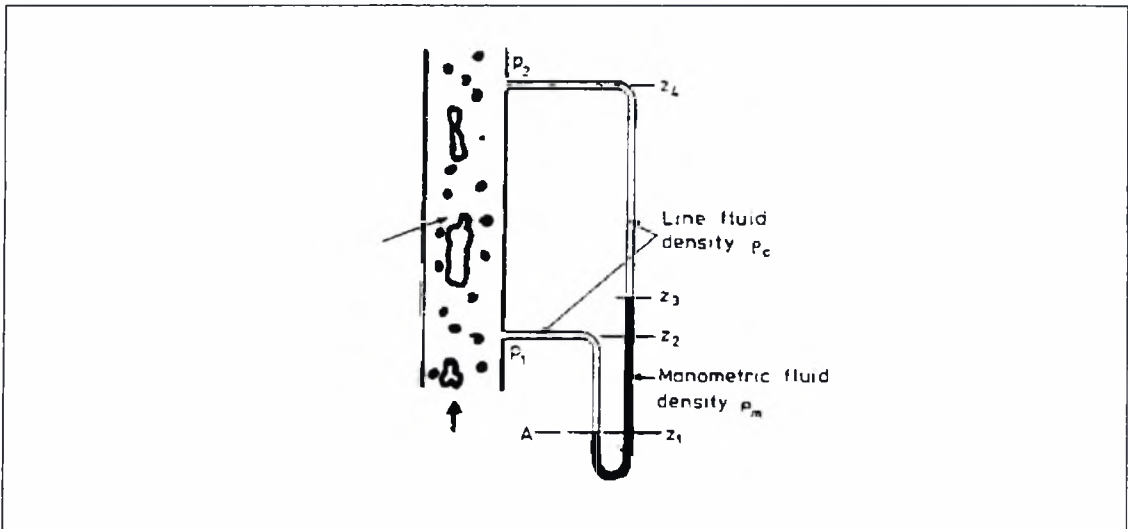
πραγματικό. Δηλαδή ένα ποσοστό καθυστέρησης εισάγεται στη δυναμική συμπεριφορά των συρμάτων.

5.2 Πτώση Πίεσης

Η γνώση της πτώσης πίεσης είναι σημαντική διότι ρυθμίζει την αντλητική ισχύ του συστήματος. Η μέτρηση της πτώσης πίεσης γίνεται με:

- διαφορικούς μεταλλάκτες (differential pressure transducers) /αισθητήρες πίεσης
- μανόμετρα υγρού

Με τα μανόμετρα υγρού (σχήμα 5.3), λαμβάνονται άμεσες αλλά «χονδρικές» εκτιμήσεις της μέσης τιμής της πτώσης πίεσης.

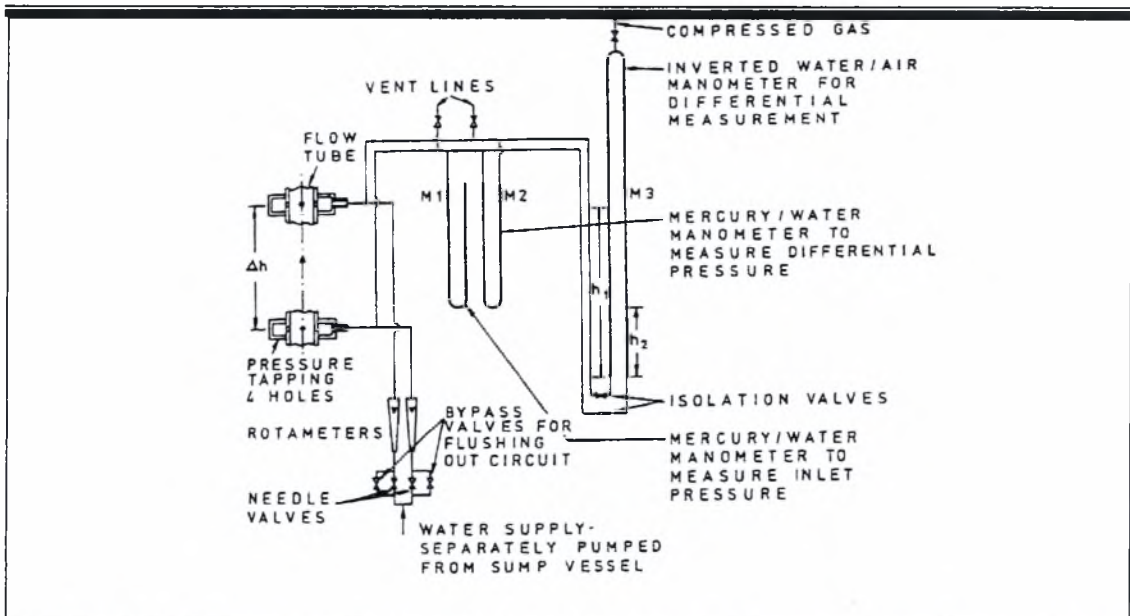


Σχήμα 5.3: Μέτρηση πτώσης πίεσης χρησιμοποιώντας μανόμετρα υγρού

Τα προβλήματα που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση των μανομέτρων είναι η αλλοίωση των μετρήσεων (αλλαγή της πυκνότητας του μανομετρικού υγρού) και δραστική μείωση της απόκρισης του συστήματος μέτρησης που προκαλεί η είσοδος της αντίθετης φάσης από εκείνη που πληροί τις γραμμές σύνδεσης του μετρητικού με τον κυρίως αγωγό (αέριες φυσαλίδες στο υγρό ή σταγόνες στο αέριο). Επίσης συμπύκνωση του αερίου ή αποσυμπίεση του υγρού είναι δυνατόν να έχουν τα ίδια αποτελέσματα.

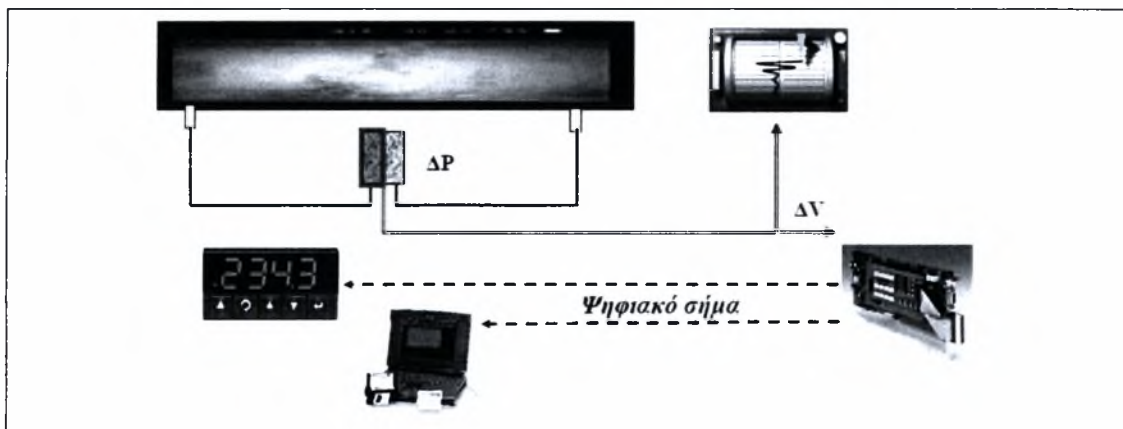
Συνήθως οι γραμμές σύνδεσης γεμίζονται με την υγρή φάση και πρέπει, αν είναι δυνατόν, να είναι διαφανείς, ώστε να φαίνεται η κατάσταση του ρευστού μέσα σ' αυτές (φυσαλίδες κλπ). Σε αυτή την περίπτωση ένα σύστημα απομάκρυνσης των φυσαλίδων όπως αυτό του Σχήματος 5.4 λύνει το πρόβλημα.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ



Σχήμα 5.4: Σύστημα καθαρισμού των γραμμών σύνδεσης για μετρήσεις πτώσης πίεσης (Hewitt et al., 1962)

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς διαφορικής πίεσης είναι εύχρηστοι από την άποψη της αποτύπωσης της αναλογικής μέτρησης (πίεση) σε ψηφιακό σήμα επεξεργάσιμο από το χρήστη μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα.

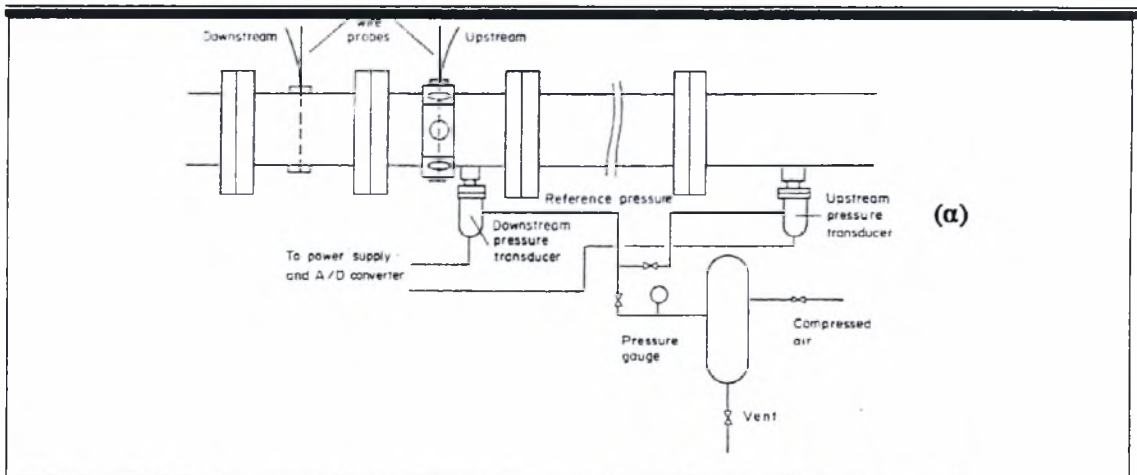


Σχήμα 5.5: Μέτρηση πτώσης πίεσης χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς μετατροπείς διαφορικής πίεσης

Στην περίπτωση των μετατροπέων πίεσης (pressure transducers) τα συνηθέστερα προβλήματα είναι:

- Η παγίδευση φυσαλίδων στις γραμμές σύνδεσης με αποτέλεσμα τη μείωση της συχνότητας απόκρισης (όμοια με τα κοινά μανόμετρα)
- Η αδυναμία μέτρησης μικρών τιμών ΔP (κοντά στο "offset" του οργάνου)
- Η αλλοίωση των μετρήσεων από δονήσεις της συσκευής (ιδιαίτερα στη διαλείπουσα περιοχή)
- Η συχνή βαθμονόμηση των μετρητικών

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ



Σχήμα 5.6: Μέτρηση πτώσης πίεσης διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό

5.3 Συμπαρασυρμός (Entrainment)

Ως συμπαρασυρμός ορίζεται το κλάσμα της συνολικής παροχής του υγρού (W_L), που υπό μορφή σταγονιδίων μεταφέρεται από την αέρια φάση και προκύπτει από τη δυναμική ισορροπία μεταξύ του ρυθμού εκνέφωσης και του ρυθμού εναπόθεσης σταγονιδίων. Αυτό εκφράζεται μαθηματικά από την παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{W_{LE}}{W_L} = \frac{W_L - W_{LF}}{W_L} \quad (5.4)$$

όπου W_L η συνολική παροχή, W_{LE} η παροχή της διασποράς υγρής φάσης και W_{LF} η παροχή της υγρής στοιβάδας.

Ο συμπαρασυρμός εξαρτάται από:

- την εκνέφωση, δηλαδή την παραγωγή σταγονιδίων από την επιφάνεια των κυμάτων και
- την εναπόθεση των σταγονιδίων στην υγρή στοιβάδα.

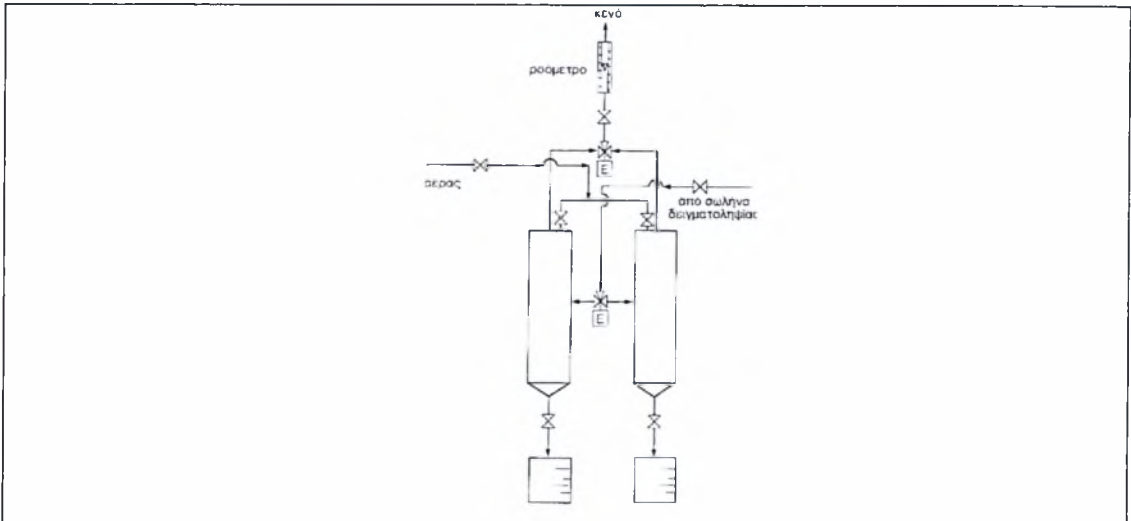
Ο συμπαρασυρμός σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή (που συμβαίνει σε απόσταση μερικών διαμέτρων από το σημείο ανάμιξης) αποκτά σταθερή τιμή και ο ρυθμός της εκνέφωσης γίνεται ίσος με το ρυθμό της εναπόθεσης.

Υπάρχουν τρεις πειραματικές μέθοδοι μέτρησης του συμπαρασυρμού:

1. Η πρώτη μέθοδος είναι αυτή της ισοκινητικής δειγματοληψίας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το υγρό συλλέγεται σε δύο όμοιους μικρούς διαχωριστές συνδεδεμένους παράλληλα. Η εξασφάλιση σταθερώ συνθηκών ροής κατά τη δειγματοληψία επιτυγχάνεται με την εναλλακτική χρησιμοποίηση δύο διαχωριστών σε παράλληλη σύνδεση. Η ροή από το σωλήνα δειγματοληψίας κατευθύνεται με την ενεργοποίηση δύο ηλεκτρικών τριοδικών βανών στον ένα

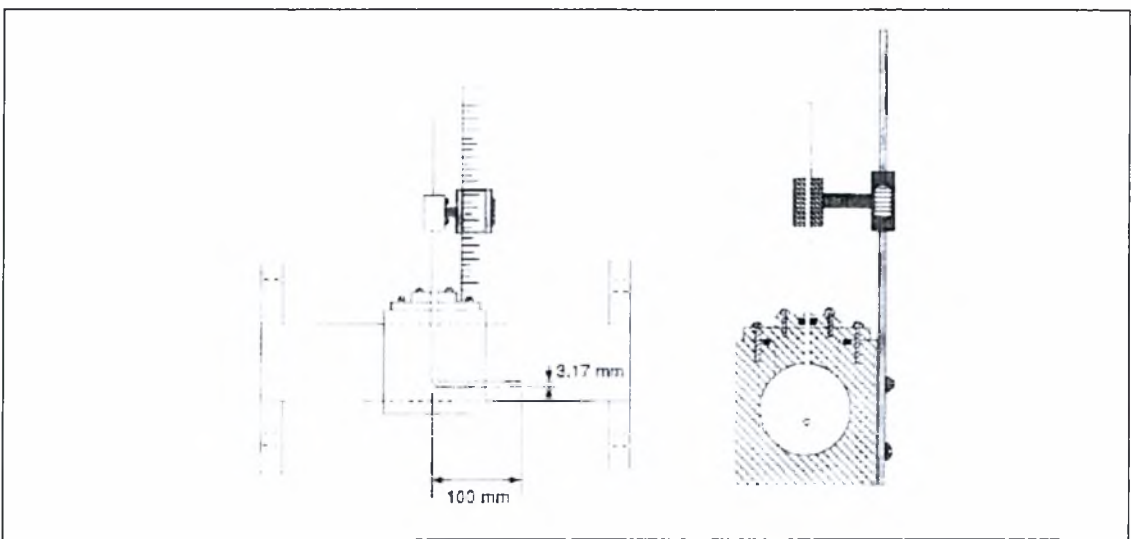
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

από τους δύο διαχωριστές. Στην κορυφή των διαχωριστών δημιουργείται κενό, ώστε να επιτυγχάνονται συνθήκες ισοκινητικής δειγματοληψίας (σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7: Μέτρηση συμπαρασυρμού με ισοκινητική δειγματοληψία

2. Απομάκρυνση με εφαρμογή κενού της υγρής στοιβάδας μέσω ειδικής διάταξης (π.χ. τμήμα αγωγού με πορώδες τοίχωμα, βλέπε σχήμα 5.8). Η πυκνότητα ροής των διεσπαρμένων σταγονιδίων (**flux**, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) μετρείται συλλέγοντας τα σταγονίδια του υγρού από την περιοχή της αέριας φάσης. Το ποσοστό της διεσπαρμένης υγρής φάσης υπολογίζεται με ολοκλήρωση των τιμών της προκύπτουσας κατανομής της πυκνότητας ροής των σταγονιδίων στο τμήμα της διατομής που καταλαμβάνεται από την αέρια φάση. Οι μετρήσεις της κατανομής του πάχους της υγρής στοιβάδας χρησιμοποιούνται για να εξαιρεθεί το τμήμα της διατομής που καταλαμβάνει η υγρή στοιβάδα.



Σχήμα 5.8: Μετρητική διάταξη της πυκνότητας ροής διεσπαρμένων σταγονιδίων

3. Συνεχής ιχνοθέτηση της υγρής στοιβάδας (π.χ. με αλάτι) και μέτρηση της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο υγρό σε μία απόσταση από το σημείο

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

έγχυσης. Ο συμπαρασυρμός υπολογίζεται με την εφαρμογή ισοζυγίου μάζας (Schadel 1988). Θα πρέπει επίσης να επισημάνουμε πως έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει ένα όριο στην παροχή της υγρής στιβάδας, το λεγόμενο WLFC (Critical film flow rate), κάτω από το οποίο δεν προκαλείται εκνέφωση, ανεξάρτητα από την αύξηση της ταχύτητας του αερίου (Dallman 1978, Παράς 1991).

5.4 Συγκράτηση (Hold-up)

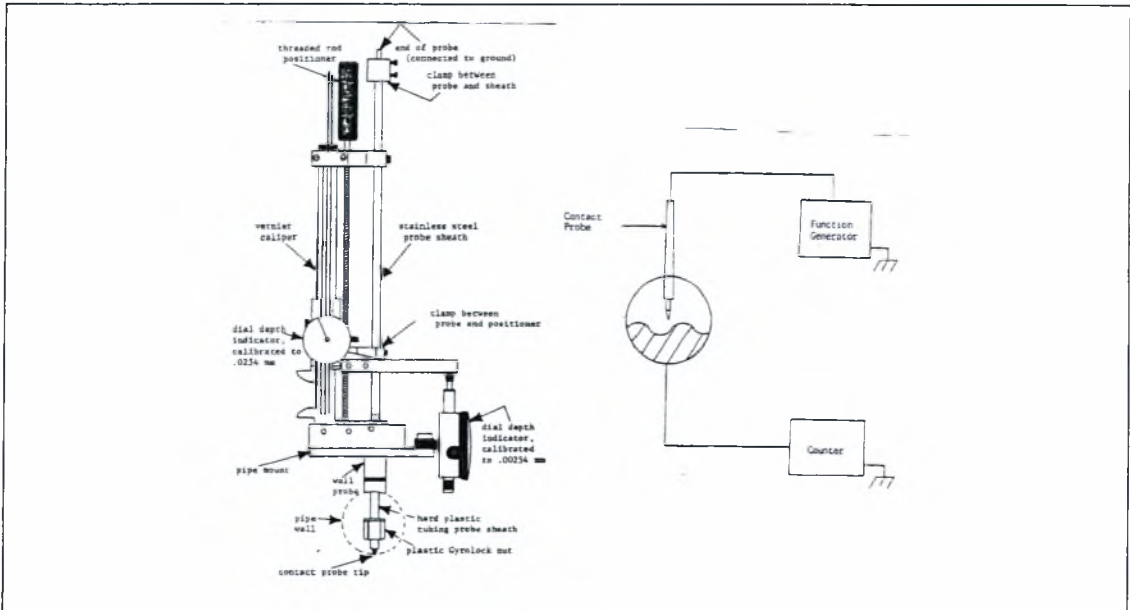
- **Αγωγιμομετρική μέθοδος:** Το ύψος των κυμάτων και το στιγμιαίο ή μέσο πάχος της υγρής στιβάδας στη διφασική ροή μπορούν να μετρηθούν με αγωγιμομετρική μέθοδο εφόσον η υγρή φάση είναι ή μπορεί γίνει αγωγή. Η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δύο παραλλήλων λεπτών μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται μεταξύ τους. Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής φάσης χρησιμοποιείται μια πειραματική διάταξη, η μορφή της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Τα μετρητικά στοιχεία έχουν τη μορφή «βύσματος» (plug), τα οποία μπορούν να τοποθετούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές. Το κάτω μέρος τους έχει υποστεί ειδική επεξεργασία σε τόρνο έτσι ώστε να μη διαταράσσεται η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα.

Κάθε ζεύγος συρμάτων κατασκευάζεται από μεταλλικά σύρματα (chromel) διαμέτρου 0,5 mm και απέχουν μεταξύ τους 2-5 mm. Στο Σχήμα 5.9 φαίνεται επίσης ένα μετρητικό στοιχείο με ζεύγος παραλλήλων συρμάτων. Η τοποθέτηση μετρητικών ζευγών συρμάτων σε μια δεύτερη σειρά είναι απαραίτητη όταν απαιτούνται χαρακτηριστικά των κυμάτων, όπως είναι η ταχύτητα τους. Τα μετρητικά στοιχεία για τις αγωγιμομετρικές μετρήσεις συνδέονται σε ηλεκτρονικό κύκλωμα (αναλυτής), που μετρά την αντίσταση της υγρής στιβάδας που περιέχεται μεταξύ των συρμάτων και παράγει ένα σήμα DC που αντιστοιχεί στο ύψος της υγρής στιβάδας. Είναι απόλυτα αναγκαίο να γίνει βαθμονόμηση της συσκευής πριν από κάθε σειρά πειραμάτων και να καταγράφεται η αγωγιμότητα της υγρής φάσης (ή η θερμοκρασία της) για τις αναγκαίες διορθώσεις.

- **Μέθοδος ηλεκτροδίου επαφής (needle contact method):** Η μέθοδος συνίσταται στη μέτρηση της απόστασης από το τοίχωμα του αγωγού, όπου ένα ηλεκτρόδιο κάνει επαφή με την υγρή φάση. Επειδή υπάρχουν κύματα

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

στην επιφάνεια του υγρού, το ηλεκτρόδιο δεν έρχεται συνεχώς σε επαφή με το υγρό και το πάχος της στοιβάδας εκτιμάται από το χρόνο επαφής. Η μέθοδος είναι σχετικά απλή και φθηνή. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται χαρακτηριστική διάταξη ηλεκτροδίου επαφής (Laurinat, 1982).



Σχήμα 5.9: Πειραματική διάταξη ηλεκτροδίου επαφής

- Με Απορρόφηση ακτίνων X (ή ακτίνων γ)

5.5 Πάχος υγρής στοιβάδας

Στα προηγούμενα χρόνια έγινε μία σοβαρή προσπάθεια να ερευνηθούν οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της ροής υγρής στοιβάδας πάνω σε οριζόντιο στέρεο τοίψωμα. Ιστορικά οι ερευνητικές προσπάθειες ξεκίνησαν με τη δημιουργία εμπειρικών συσχετισμών, αλλά σύντομα στράφηκαν στη μελέτη φαινομένων που έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό κυμάτων και των μηχανισμών που τροφοδοτούν την υγρή στοιβάδα αντισταθμίζοντας τις απώλειες υγρού λόγω βαρύτητας. Το πάχος της υγρής στοιβάδας και η κατανομή του στην περιφέρεια του αγωγού είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που παίζει μεγάλο ρόλο στη διφασική ροή. Μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της είναι να εκφράζει την ταχύτητα του υγρού ή το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει το αέριο ή το υγρό μέσα στο σωλήνα. Μπορεί ακόμη να δώσει στοιχεία για την πτώση πίεσης και τη συνολική επιφάνεια εναλλαγής του υγρού ή του αερίου μέσα στο σωλήνα της διφασικής ροής.

Ο πρώτος εμπειρικός συσχετισμός που προτάθηκε για την κατανομή του πάχους της υγρής στοιβάδας είναι αυτός του McManus (1961). Ο

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

συσχετισμός αυτός προέκυψε από πειραματικές μετρήσεις σε οριζόντιους αγωγούς διαμέτρου 2.54 cm, 5.08 cm, και 7.62 cm για μίγματα νερού και διαλυμάτων γλυκερίνης & νερού με αέρια και δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{h}{D} = e^k \frac{(\text{Re}_{SL})^a}{(\text{Re}_{SG})^b} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^c \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^d \quad (5.5)$$

όπου, Re_{SG} , Re_{SL} είναι ο αριθμός Reynolds αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα, ρ_G , ρ_L , η πυκνότητα αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα και μ_G , μ_L το δυναμικό ιξώδες (dynamic viscosity) αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα.

Οι εκθέτες K , a , b , c , d προσδιορίζονται εμπειρικά και εξαρτώνται από τις περιοχές των δύο φάσεων. Σημαντικός είναι ο εμπειρικός συσχετισμός του Martinelli για χαμηλές πιέσεις και οριζόντια διφασική ροή. Η εξίσωση που παρουσίασε είναι:

$$\alpha = (1 + x^{0.8})^{-0.378} \quad (5.6)$$

όπου α , το κλάσμα κενού και x κάποιος παράγοντας ροής. Ανάλογα με το είδος της ροής, το κλάσμα κενού μπορεί να συσχετισθεί με το πάχος της υγρής στοιβάδας.

Οι Laurinat et al (1984) κάνοντας πειράματα σε αγωγούς 2.54 cm, 5.08 cm, με νερό και αέρα την τροποποίησαν κατάλληλα και συσχέτισαν τον παράγοντα ροής F_H (flow factor) με δεδομένα της μέσης τιμής $\langle h \rangle$ του πάχους της υγρής στοιβάδας:

$$\frac{\langle h \rangle}{D} = \frac{6.59 F_H}{[2.3^5 + (90 F_H)^5]^{0.2}} \quad (5.7)$$

όπου

$$F_H = \frac{\gamma}{\text{Re}_{SG}^{0.9}} \frac{\mu_L}{\mu_G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} \quad (5.8)$$

5.5.1 Μέθοδοι και τεχνικές πειραματικών μετρήσεων πάχους υγρής στοιβάδας

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

- **Άμεσες μέθοδοι:** Ως άμεσες μέθοδοι χαρακτηρίζονται αυτές που χρησιμοποιούν κατάλληλα μικρόμετρα σ'απευθείας επαφή με το υγρό. Όταν εφαρμόζεται προσεκτικά και με ακρίβεια είναι χρήσιμη για τιμές πάχους σε στρωτή ροή χωρίς κύματα, όταν όμως αρχίσουν οι κυματισμοί τότε εισάγει σφάλμα. Μία τροποποιημένη εφαρμογή είναι αυτή που μία

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

λεπτή βελόνα στηριγμένη με μικρόμετρο τοποθετείται κατάλληλα έτσι ώστε να αγγίζει το υγρό.

- **Έμμεσες μέθοδοι:** Στις έμμεσες μεθόδους ανήκουν τα παρακάτω:
 - Μέθοδοι αποχέτευσης ή κατακράτησης
 - Φωτογραφίες σκιών
 - Ραδιενεργοί ιχνοθέτες
 - Μέθοδος εξισορροπητικού υγρού
 - Φωτομετρικές μέθοδοι-Μέθοδοι οπτικής παρεμβολής
 - Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης και ηλεκτρικής χωρητικότητας (αγωγιμομετρική μέθοδος)

5.5.2 Μέτρηση με την άμεση μέθοδο

Για την μέτρηση της υγρής στοιβάδας, χρησιμοποιήθηκε μία κατάλληλα βαθμονομημένη «μεζούρα» για τις περιοχές λεία διαχωρισμένη, διαχωρισμένη με δισδιάστατα κύματα και κύματα μεγάλου πλάτους. Αφού μετρήσαμε την υγρή περιφέρεια του αγωγού με τη μεζούρα, μετατρέψαμε τα αποτελέσματα σε ύψος υγρής στοιβάδας με τους παρακάτω τύπους:

$$P_L = \frac{\pi}{180^\circ} r \cdot \gamma \quad (5.9)$$

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

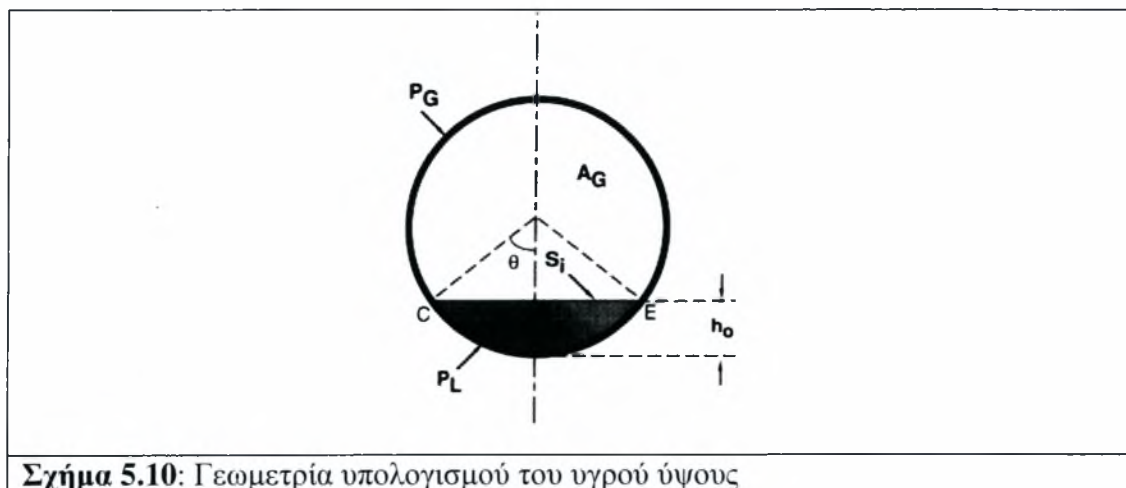
$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left[1 - 2 \left(\frac{h}{D} \right) \right] \quad (5.10)$$

$$\frac{h}{D} = \frac{1 - \cos(\frac{\gamma}{2})}{2} \quad (5.11)$$

$$\frac{A_L}{A} = \frac{1}{2\pi} (\gamma - \sin \gamma) \quad (5.12)$$

$$\frac{A_G}{A} = 1 - \frac{A_L}{A} \quad (5.13)$$

$$\frac{S_i}{D} = \sin(\frac{\gamma}{2}) \quad (5.14)$$



Σχήμα 5.10: Γεωμετρία υπολογισμού του υγρού ύψους

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η πειραματική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις φαίνεται στο σχήμα 6.1. Για τις ανάγκες αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, αλλά και για άλλες εργασίες στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών αναβαθμίστηκε υπάρχον σύστημα μελέτης διφασικών ροών διαμέτρου 0,025m. Η αναβάθμιση περιελάμβανε αλλαγή της θέσης του συστήματος, επιμήκυνση του αγωγού 12,0m, και δυνατότητα του συστήματος να αλλάζει κλίση. Για την επίτευξη βελτιστοποίησης του συνολικού συστήματος της πειραματικής διάταξης κατασκευάστηκε μεταλικό κανάλι συνολικού μήκους 12,0m αποτελούμενο από πέντε επιμέρους τμήματα. Το καθένα από αυτά τα τμήματα αποτελείται από τέσσερα κομμάτια στρατζαριστής κοιλοδοκού μήκους 2,5m τετραγωνικής διατομής και πάχους 3,0cm με εξαίρεση το πέμπτο τμήμα που τα τέσσερα αυτά κομμάτια είναι μήκους 2,0m. Τα τέσσερα αυτά κομμάτια σε κάθε τμήμα κολλήθηκαν σε κατακόρυφη απόσταση 40,0cm, ανά δύο μεταξύ τους και οριζόντια σε απόσταση 30,0cm, σε μορφή ορθογωνίου δικτυώματος. Τα κομμάτια αυτά συγκολλήθηκαν μεταξύ τους με κάθετα, προς αυτά, μικρότερα επιμέρους κομμάτια μήκους 40,0cm και 30,0cm αντίστοιχα και πάχους 3,0cm τετραγωνικής διατομής, τα οποία τοποθετήθηκαν ανα αποστάσεις ισομετρικές τετοιές ώστε η μεταλική κατασκευή να είναι συμμετρική και στιβαρή. Στη πάνω οριζόντια πλευρά έχουν συγκολληθεί τετοιά κομμάτια παράλληλα μεταξύ τους ανα 32cm, τα οποία στο μέσο τους φέρουν οπές συνευθειακές, επί της ίδιας νοητής ευθείας, στις οποίες τοποθετούνται τα στηρίγματα του σωλήνα Plexiglas η βάση των οποίων φέρει σπύρωμα και έτσι υπάρχει η δυνατότητα αυξομείωσης ελαφρώς της κατακόρυφης θέσης τους προκειμένου να επιτευχθεί ισοψής τοποθέτηση του σωλήνα (αλφάδιασμα). Στις κατακόρυφες πλευρές των πέντε μεταλικών τμημάτων έχουν συγκολληθεί φύλλα λαμαρίνας, συνολικά είκοσι, τα οποία έχουν διαστάσεις 50cm μήκος, 10cm υψος και πάχος 5,0mm. Στα φύλλα αυτά, τα οποία συγκολλήθηκαν με τη πλευρά του μήκους παράλληλη προς το έδαφος, διανοίχτηκαν συνολικά έξι οπές διαμέτρου 20mm ισαπέχουσες μεταξύ τους και ανα τρεις συνευθειακές κατά μήκος των φύλλων. Η διάνοιξη των οπών έγινε προκειμένου να τοποθετηθούν μεταλικοί κοχλίες και έτσι τα αντικριστά φύλλα να ενωθούν ανα δύο μεταξύ τους και κατ' επέκταση τα μεταλικά τμήματα του καναλιού, προς το τελικό σχηματισμό του συνολικού. Στο ακριανό τμήμα του καναλιού, το οποίο βρίσκεται προς το σταθερό σημείο και συγκεκριμένα πάνω στο φύλλο λαμαρίνας έχουν συγκολληθεί μεταλικοί κυλινδροί με οπή (τύπου μεντεσέ) καθώς και στο σταθερό

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

σημείο το οποίο είναι μια μεταλική κοιλοδοκός. Το σύστημα αυτό των τεσσάρων συνολικά κυλίνδρων από τις οπές των οποίων διέρχονται μεταλικοί πύροι δίνει στο κανάλι τη δυνατότητα κατακόρυφης κίνησης δηλαδή τη δυνατότητα να παίρνει κλίσεις έως και 1,0 μοίρας. Η κίνηση αυτή και οι διάφορες κλίσεις στο κανάλι δίνονται από ένα σύστημα τροχαλιών και συρματοσχοίων (κρικοπαλάγκο) τοποθετημένο σε σταθερό σημείο σε απόσταση 10m από το σταθερό σημείο του καναλιού και τα συρματοσχοίνα του οποίου προσαρμόζονται στο κανάλι κατά τρόπο τέτοιο ώστε να κινούν ομοιόμορφα το κανάλι. Για τη σύνδεση των τμημάτων του καναλιού χρησιμοποιήθηκαν μεταλικοί κοχλίες M19 και M17 καθώς και οι αντίστοιχες ροδέλες, ενώ για τη συγκόλληση όλων των μεταλικών τμημάτων και γενικότερα όλου του καναλιού χρησιμοποιήθηκε σύστημα συγκόλλησης τύπου MIG (ARGON) και για κάποιες επιμέρους εργασίες χρησιμοποιήθηκε ηλεκτροσυγκόλληση με ηλεκτρόδιο. Ο σωλήνας μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η διασπαστική ροή αποτελείται από 6 τμήματα Plexiglas με εσωτερική διάμετρο 2,54cm. Ο αγωγός, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μπορεί να δέχεται ελαφρές κλίσεις (προς τα κάτω και προς τα πάνω) $\pm 1^\circ$, όσον αφορά στην οριζόντια θέση. Ο αγωγός περιλαμβάνει το τμήμα εισόδου, το τμήμα ανάπτυξης της ροής, το τμήμα μετρήσεων και το τμήμα εξόδου. Τα τμήματα συνδέονται με φλάτζες και έτσι μας δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης και εναλλαγής των διαφόρων μετρικών διατάξεων στο σύστημα. Ιδιαίτερη φροντίδα δόθηκε στις ενώσεις των τμημάτων του σωλήνα, για να μην υπάρχει ανωμαλία στη ροή. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ελαστικά δακτύλια (o-rings), τοποθετημένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το διάκενο μεταξύ δύο σωλήνων.

Το τμήμα ανάμιξης των δύο φάσεων είναι ένα απλό « Y » όπου οι δύο φάσεις, αέρας και νερό, εισάγονται υπό γωνία -35° , $+35^\circ$ ως προς την οριζόντια. Η απόσταση μεταξύ του τμήματος ανάμιξης και του τμήματος όπου ήταν τοποθετημένη η κάμερα είναι 6m ή περίπου 250 διάμετροι.

Η επιλογή του Plexiglas έγινε για δύο λόγους :

- A) Επιτρέπει οπτικές παρατηρήσεις και λήψη φωτογραφιών
- B) Επεξεργάζεται αρκετά καλά στον τόρνο και κολλάει εύκολα με χλωροφόρμιο.

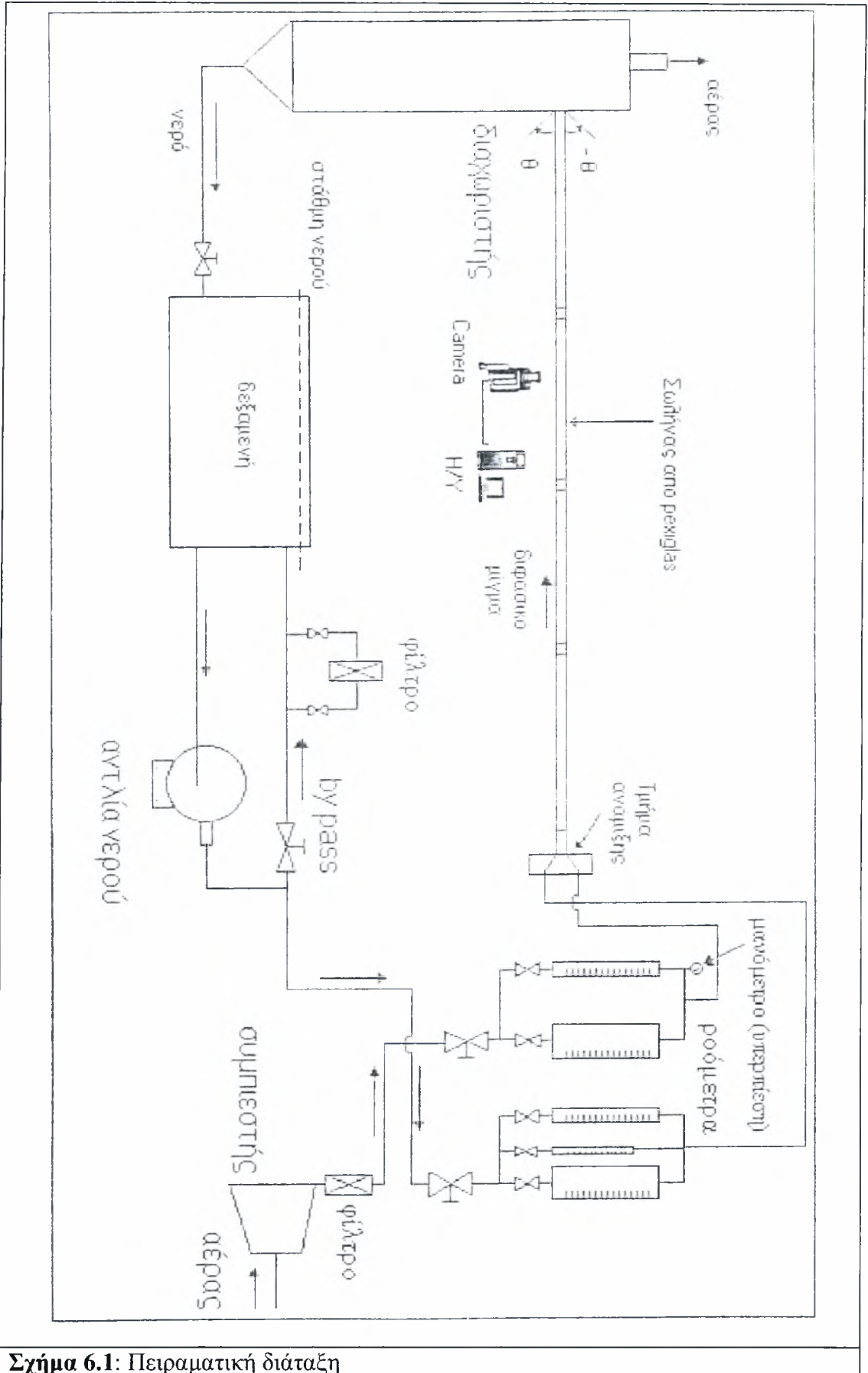
Στο τέλος του σωλήνα, στην παλιά διάταξη, είχαμε εισαγωγή της ροής εφαιπτομενικά σε δοχείο διαχωρισμού φάσεων κατασκευασμένο από φύλλο

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ανοξείδωτου χάλυβα. Για το λόγο όμως ότι η ροή εισάγεται στο δοχείο διαχωρισμού με αυτό τον τρόπο και λόγω του ότι δημιουργείται κάποια κλίση στο τέλος του σωλήνα η οποία επιρεάζει τη ροή και ενδεχομένως και τις περιοχές και τα καθεστώτα της ροής, ο μεταλικός διαχωριστής αντικαταστάθηκε από πλαστικό δοχείο στο οποίο διανοίχτηκε οπή στο ύψος του σωλήνα. Έτσι ένα μικρό τμήμα του αγωγού εισέρχεται στο δοχείο και έτσι έχουμε ομαλή εισαγωγή της ροής και όχι εφαιπτομενική χάρις δημιουργία κλίσης και όλες τις ανεπιθύμητες συνέπειες. Ο αέρας εκρέει στην ατμόσφαιρα από την κορυφή του πλαστικού δοχείου διαχωρισμού και το νερό από τον πυθμένα του για ανακύκλωση στη δεξαμενή νερού. Το νερό από τη δεξαμενή ανακυκλώνεται με τη βοήθεια φυγοκεντρικής αντλίας.

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε στην διάταξη ήταν νερό του δικτύου ύδρευσης ενώ για την οπτική παρατήρηση των φαινομένων προστέθηκε και κάποια χρωστική. Για την αγωγιμομετρική μέθοδο, έγινε χρήση κοινού νερού και έγινε με βάση την ευκολία στην αναπλήρωσή του και την σχετικά καλή του αγωγιμότητα, η οποία εξασφάλιζε ικανοποιητικό επίπεδο σήματος της αγωγιμομετρικής μετρικής διάταξης. Η ρύθμιση της παροχής του νερού γίνεται από μία βάννα και η μέτρηση της παροχής γίνεται από τρία ροόμετρα ένα μικρό για μικρές παροχές, ένα μεσαίο για λίγο πιο μεγάλες παροχές και ένα μεγάλο ροόμετρο για μεγάλες παροχές υγρού. Για αποφυγή στραγγαλισμού της αντλίας στην έξοδο της υπάρχει ένα by-pass που οδηγεί το επιπλέον νερό στη δεξαμενή νερού.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



Σχήμα 6.1: Πειραματική διάταξη

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται από συμπιεστή και στη συνέχεια υφίσταται μερική ξήρανση και καθαρισμό. Η παροχή του αέρα ρυθμίζεται από μία βάνα τύπου διαφράγματος. Η μέτρηση της παροχής γίνεται από δύο ροόμετρα, ένα μικρό και ένα μεγάλο, στα οποία έχει τοποθετηθεί ένα μανόμετρο που μετράει την πίεση του αέρα στο αγωγό εξόδου. Η μέγιστη ογκομετρική παροχή αέρα (με $P=1 \text{ bar}$ $T=0^\circ\text{C}$) που μπορεί να περάσει από το ροόμετρο είναι $14\text{m}^3/\text{h}$ και από το μεγάλο ροόμετρο $84\text{m}^3/\text{h}$.

Μεγάλη προσοχή δόθηκε στην οριζοντιοποίηση του σωλήνα. Αυτό έγινε με ένα αλφαδολάστιχο. Πρώτα το γεμίζουμε καλά με νερό (έτσι ώστε να μην έχει κενό αέρα) και στη συνέχεια με το ένα άκρο του αλφαδολάστιχου περνάμε ένα σημείο από την αρχική θέση στο οποίο στηριζόταν ο σωλήνας, έχοντας ως σημείο αναφοράς τη θέση αυτή βρίσκουμε και τα άλλα σημεία με το άλλο άκρο του αλφαδολάστιχου . Για το λόγω αυτό τοποθετήθηκαν τα στηρίγματα που προαναφέραμε και με κατάλληλη ρύθμισή τους επιτυγχανούμε την οριζοντιοποίηση του αγωγού χωρίς να κάνει καμπύλη λόγω του μήκους του.Μεγάλη δυσκολία αντιμετωπίστηκε στη διαδικασία αλλαγής της γωνίας του αγωγού στη παλιά διάταξη.Στη νέα διαταξη με τη τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων που προαναφέραμε η διαδικασία αλλαγής κλίσης είναι άμεση, γρήγορη και επιτυγχάνεται με μια απλή ενέργεια(κίνηση του παλάγκου).

Σε ότι αφορά το τμήμα μετρήσεων και συγκεκριμένα το πάχος της υγρής στοιβάδας όπως έχει αναφερθεί χρησιμοποιήθηκε μια πειραματική διάταξη από Plexiglas η οποία φέρει τα μετρητικά στοιχεία τα οποία έχουν μορφή βύσματος και μπορούν να τοποθετούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές.Καθε τέτοιο ζεύγος μετρητικών είναι κατασκευασμένο από μεταλλικά ανοξείδωτα σύρματα (chromel) διαμέτρου $0,5\text{mm}$ που απέχουν μεταξύ τους 2mm

Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται εικόνες της πειραματικής διάταξης και όλων των παραπάνω που περιγράφονται.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1 Βαθμονόμηση Ροομέτρων

Για το σύστημα αέρα – νερού πρέπει να γίνει βαθμονόμηση των ροόμετρων υγρού. Για τη διαδικασία βαθμονόμησης των ροόμετρων υγρού απομονώνεται ο αγωγός από το διαχωριστή στο τέλος του σωλήνα και οδηγείται στην δεξαμενή με εύκαμπτο πλαστικό σωλήνα που εφαρμόζεται στο τέλος του σωλήνα. Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα να μετράμε το βάρος του υγρού και το χρόνο.

Η ογκομετρική παροχή του υγρού υπολογίζεται ως :

$$Q = \frac{V}{t} [m^3 / s] \quad (6.1)$$

όπου V m^3 και t σε sec.

Η φαινομενική ταχύτητα του υγρού υπολογίζεται θεωρώντας ότι όλη η διατομή του αγωγού καλύπτεται από το υγρό και ισούται με :

$$U_{LS} = \frac{Q}{A} [m / s] \quad (6.2)$$

Στη συνέχεια σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων παριστάνεται η φαινομενική ταχύτητα του υγρού ως προς την ένδειξη του ροόμετρου. Συνήθως η σχέση μεταξύ της φαινομενικής ταχύτητας και της ένδειξης του ροόμετρου είναι γραμμική.

Για τη βαθμονόμηση των ροόμετρων του αέρα χρησιμοποιήθηκε μία ειδική συσκευή μέτρησης όγκου του αέρα. Για τη διαδικασία αυτή απομονώνεται ο αγωγός του αέρα από το τμήμα ανάμιξης και συνδέεται με την συσκευή, έτσι έχουμε τη δυνατότητα να μετράμε τον όγκο του αέρα που διέρχεται από τη συσκευή και το χρόνο.

Η ογκομετρική παροχή του αέρα υπολογίζεται από την ίδια σχέση που υπολογίσαμε την ογκομετρική παροχή του υγρού :

$$Q = \frac{V}{t} [m^3 / s] \quad (6.3)$$

Για την ογκομετρική παροχή του αέρα, γίνεται μία διόρθωση που δίνεται από τη σχέση :

$$Q_{act} = \frac{Q_{mesur}}{\sqrt{(P_{rometers} + 1)}} [m^3 / s] \quad (6.4)$$

όπου Q_{mesur} είναι η ογκομετρική παροχή του αέρα που υπολογίστηκε από τη σχέση (3) και $P_{rometers}$ είναι η πίεση που δείχνει το ροόμετρο κάθε φορά που αλλάζουμε την ένδειξη του ροόμετρου.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η φαινομενική ταχύτητα του υγρού υπολογίζεται θεωρώντας ότι όλη η διατομή του αγωγού καλύπτεται από το υγρό και ισούται με :

$$U_{LG} = \frac{Q_{act}}{A} [m/s] \quad (6.5)$$

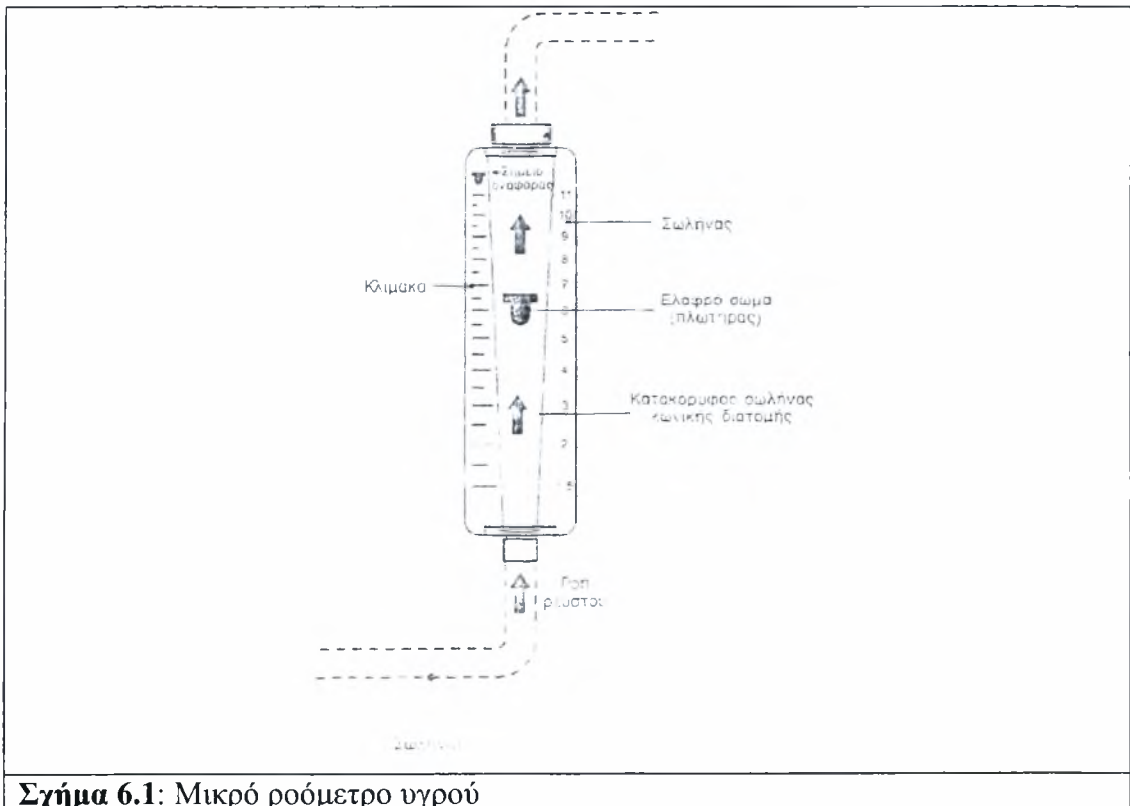
Η βαθμονόμηση όλων των ροόμετρων, για το σύστημα αέρας-νερό, παρουσιάζονται στο παράρτημα.

Τα ροόμετρα (rotameters) που χρησιμοποιούνται στην πειραματική διάταξη είναι απλές και γερές κατασκευές που περιέχουν στο εσωτερικό τους έναν πλωτήρα ο οποίος ανυψώνεται ανάλογα με την παροχή του υγρού ή του αερίου και σταθεροποιείται μέχρι να επέλθει ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων βαρύτητας άνωσης και αντίστασης του πλωτήρα.

$$p_b g V_b = \rho g V_b + F_d \quad (6.6)$$

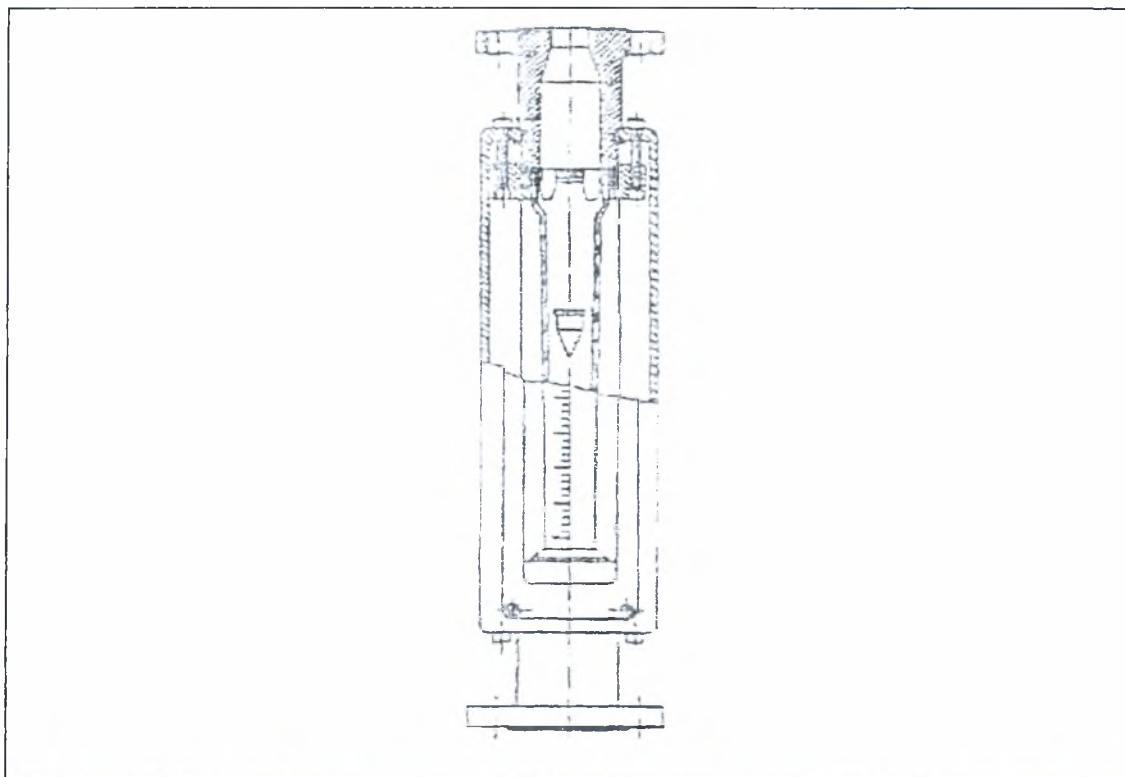
Βάρος = Άνοση + Αντίσταση

Στις συσκευές αυτές η πτώση πίεσης είναι μικρή. Η παροχή είναι ανάλογη του ύψους του πλωτήρα και υπολογίζεται απλά, διαβάζοντας την ένδειξη του ροόμετρου στην οποία έχει φτάσει ο πλωτήρας. Χρησιμοποιώντας δύο ροόμετρα για το υγρό και δύο για τον αέρα, για μεγάλες και μικρές παροχές αντίστοιχα. Στα σχήματα 6.2 και 6.3 φαίνεται ο τύπος του ροόμετρου που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 6.1: Μικρό ροόμετρο υγρού

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



Σχήμα 6.2: Ροόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη για τον αέρα και για το υγρό

6.2 Βαθμονόμηση μετρικών στοιχείων αγωγιμομετρικής μεθόδου.

Όπως περιγράψαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο στα γενικά περί αγωγιμομετρικής μεθόδου, γίνεται βαθμονόμηση των μετρητικών στοιχείων, του αναλυτή και του test section, δηλαδή του ζεύγους των παράλληλων συρμάτων.

Η βαθμονόμηση του αναλυτή έγινε χρησιμοποιώντας γνωστές ωμικές αντιστάσεις αντί των συρμάτων που κάλυπταν όλο το εύρος των μετρούμενων τιμών πάχους υγρού (από 232 Ω μέχρι 37800). Η τάση βρέθηκε να είναι γραμμική σχεδόν σ' όλο το εύρος τιμών των αντιστάσεων.

Για τη βαθμονόμηση του ζεύγους των παραλλήλων συρμάτων, δηλαδή τον προσδιορισμό της σχέσης ανάμεσα στο πάχος της υγρής στοιβάδας και της μετρούμενης αγωγιμότητας ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία: αφού απομονώσαμε το μετρητικό στοιχείο από την πειραματική διάταξη το τοποθετήσαμε με προσοχή οριζόντια και σφραγίσαμε τα άκρα του με φλάντζες. Ρίχνοντας κάθε φορά γνωστή ποσότητα νερού (20ml) σημειώναμε την τάση εξόδου του αναλυτή. Στη

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

συνέχεια γνωρίζοντας τις διαστάσεις καθώς και τη γεωμετρία του μετρητικού (κύλινδρος) μετατρέπαμε την ποσότητα του υγρού σε ύψος υγρής στοιβάδας χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{h}{D} \right) \quad (6.7)$$

και

$$V_L = \frac{LD^2}{8} (\gamma - \sin \gamma) \quad (6.8)$$

Έτσι προέκυψε η γραμμική σχέση, που συνδέει το πάχος της υγρής στοιβάδας με την αγωγή ρεύματος μέσα από τη στοιβάδα, παρατηρώντας ότι στον αέρα (άπειρη αντίσταση) η τάση εξόδου είναι μηδέν. Η αναγωγή των καμπυλών βαθμονόμησης στις συνθήκες του πειράματος εξασφαλίζεται με τη μέτρηση της αγωγιμότητας του νερού πριν από κάθε πείραμα. Τελικά οι μετρήσεις της τάσης εξόδου του αναλυτή μετατρέπονται σε πάχος υγρής στοιβάδας χρησιμοποιώντας:

- I. την καμπύλη βαθμονόμησης του αναλυτή, η οποία υπολογίζεται στην αρχή κάθε πειράματος,
- II. την καμπύλη βαθμονόμησης του μετρητικού, η οποία εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του μετρητικού (πάχος, μήκος, απόσταση συρμάτων) και
- III. την ειδική αγωγιμότητα του νερού για τις συνθήκες του πειράματος.

Η ακρίβεια της τεχνικής αυτής εκτιμάται ότι είναι της τάξης του $\pm 5\%$, συνυπολογιζόμενης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στη διαδικασία βαθμονόμησης (π.χ. μεταβολές θερμοκρασίας, ηλεκτρονικός θόρυβος κλπ). Επιπλέον για υγρές στοιβάδες πάχους μικρότερου των 0.05mm τα αποτελέσματα δε θεωρούνται αξιόπιστα. Στο παράρτημα παραθέτονται οι καμπύλες βαθμονόμησης των προαναφερθέντων στοιχείων.

6.3 Διαδικασία μετρήσεων για τη σχεδίαση των χαρτών καθεστώτων ροής – λήψη φωτογραφιών

Όπως έχει τονιστεί, κύριος στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης του οριζόντιου αγωγού στα καθεστώτα ροής. Στα πειράματα γίνονται λήψεις φωτογραφιών για τα καθεστώτα ροής που παρατηρήθηκαν.

Για τη διαδικασία μετρήσεων ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια με τη σειρά που αναφέρονται:

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Γίνεται πρώτα η βαθμονόμηση των τριών ροόμετρων του υγρού και των δύο ροόμετρων του αέρα που καλύπτουν την περιοχή των φαινομενικών ταχυτήτων που μας ενδιαφέρουν.

Στη συνέχεια γίνεται η βαθμονόμηση των μετρικών εξαρτημάτων τις αγωγιμομετρικής μεθόδου του αναλυτή και του test section.

Αφού κάνουμε πρώτα τις βαθμονομήσεις, αλλάζουμε την κλίση του αγωγού (αρνητική κλίση του αγωγού, ροή προς τα κάτω). Πριν ανοίξουμε την αντλία, ανοίγουμε μέχρι τη μέση τη βάνα επιστροφής του υγρού που είναι συνδεδεμένη λίγο μετά την αντλία και λίγο πριν τη δεξαμενή, έτσι ώστε να μπορούμε να στέλνουμε το υγρό προς δύο κατευθύνσεις, προς τα ροόμετρα υγρού και προς τη δεξαμενή. (Αν το νερό που στέλνει η αντλία πάει κατευθείαν στα ροόμετρα μπορεί να μας δημιουργήσει πρόβλημα, π.χ. διαρροές κτλ.).

Ανοίγουμε τις βάνες τροφοδοσίας του νερού και του αερίου. Το υγρό και το αέριο περνάνε πρώτα από τα ροόμετρα. Πρέπει η τιμή της υπερπίεσης στα ροόμετρα του αέρα να μην ξεπερνάει τα 2 bar. Η περιοχή των φαινομενικών ταχυτήτων που μας ενδιαφέρει, καλύπτεται από δύο ροόμετρα αέρα και δύο ροόμετρα τα οποία λειτουργούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Το μικρό ροόμετρο αερίου και υγρού χρησιμοποιείται για μικρές παροχές και το μεγάλο για μεγάλες παροχές αερίου και υγρού και τα οποία είναι μόνιμα συνδεδεμένα.

Καθορίζονται τα ζεύγη των φαινομενικών ταχυτήτων που καλύπτουν την περιοχή που μας ενδιαφέρει. Στη συνέχεια κρατάμε σταθερή την παροχή του υγρού και αυξάνουμε σταδιακά την παροχή του αέρα παρτηρώντας και σημειώνοντας κάθε φορά το καθεστώς ροής στο οποίο βρισκόμαστε. Αφού καλύψουμε αρκετές περιοχές του αέρα στο ένα ροόμετρο, κάνουμε το ίδιο και για το δεύτερο ροόμετρο. Στην συνέχεια αυξάνουμε την υγρή παροχή και επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία.

Την ίδια διαδικασία ακολουθούμε κρατώντας την παροχή του αέρα σταθερή και μεταβάλλοντας την παροχή του υγρού. Με αποτέλεσμα να καλύπτουν και αλλαγές καθεστώτων ροής που ίσως να μην αντιλαμβανόμαστε καλά έχοντας μόνο την παροχή του υγρού σταθερή. Πρέπει να τονιστεί ότι απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα 2min έως 10min περίπου ανάλογα με την περιοχή ροής που απαιτείται μέχρι το σύστημα να φτάσει σε ισορροπία, όταν μεταβάλλεται η ροή στο κάθε ροόμετρο. Τότε η παρατήρηση που γίνεται είναι έγκυρη. Ο

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

προσδιορισμός των καθεστώτων ροής γίνεται οπτικά σε τμήμα που απέχει 6m από το τμήμα εισόδου αέρα – νερού. Αφού έχουμε όλα τα ζεύγη των φαινομενικών ταχυτήτων μπορούμε να δημιουργήσουμε τους χάρτες καθεστώτων ροής.

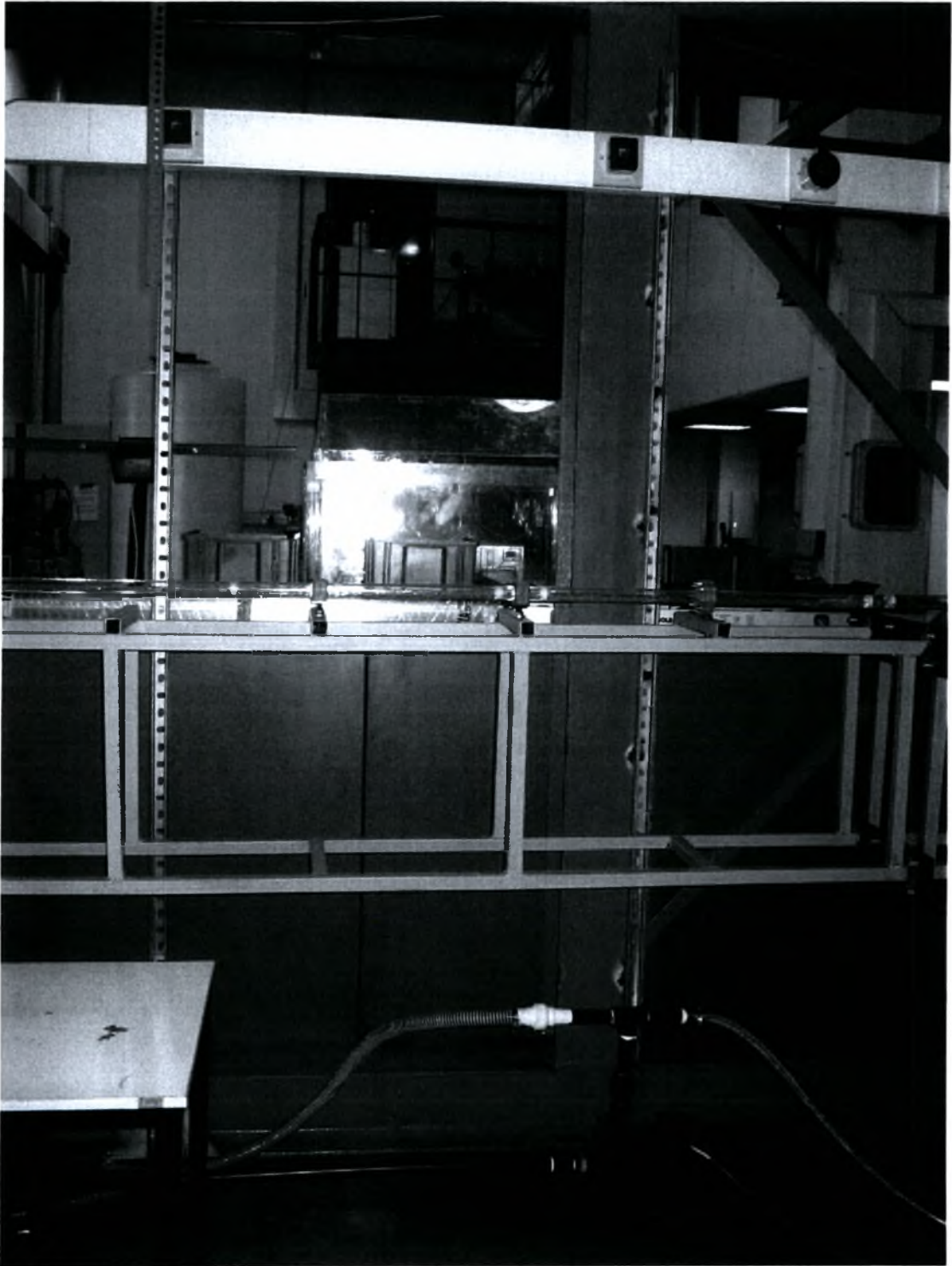
Οι μεταπτώσεις περιοχών καταγράφονται με μία κάμερα, η οποία είναι τοποθετημένη σε απόσταση 7m από το τμήμα ανάμιξης των δύο φάσεων όπου έγιναν και οι οπτικές μας παρατηρήσεις. Η κάμερα είναι συνδεδεμένη με τον υπολογιστή στον οποίο μπορούμε να επεξεργαστούμε τις φωτογραφίες και τα video που παίρναμε.

Ακολουθούν εικόνες και φωτογραφίες της πειραματικής διατάξης.



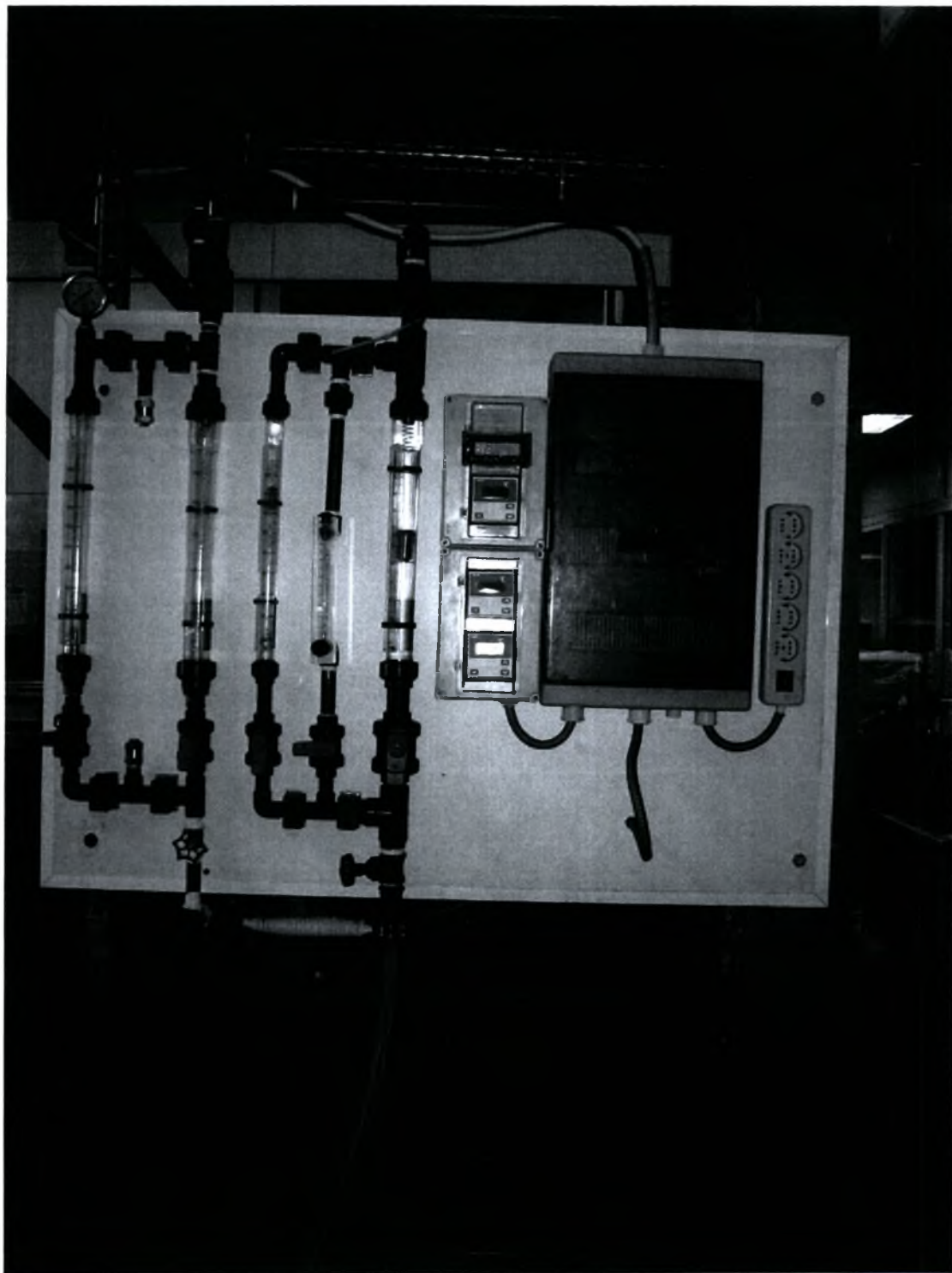
Εικόνα 1. γενική άποψη πειραματικής διάταξης.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



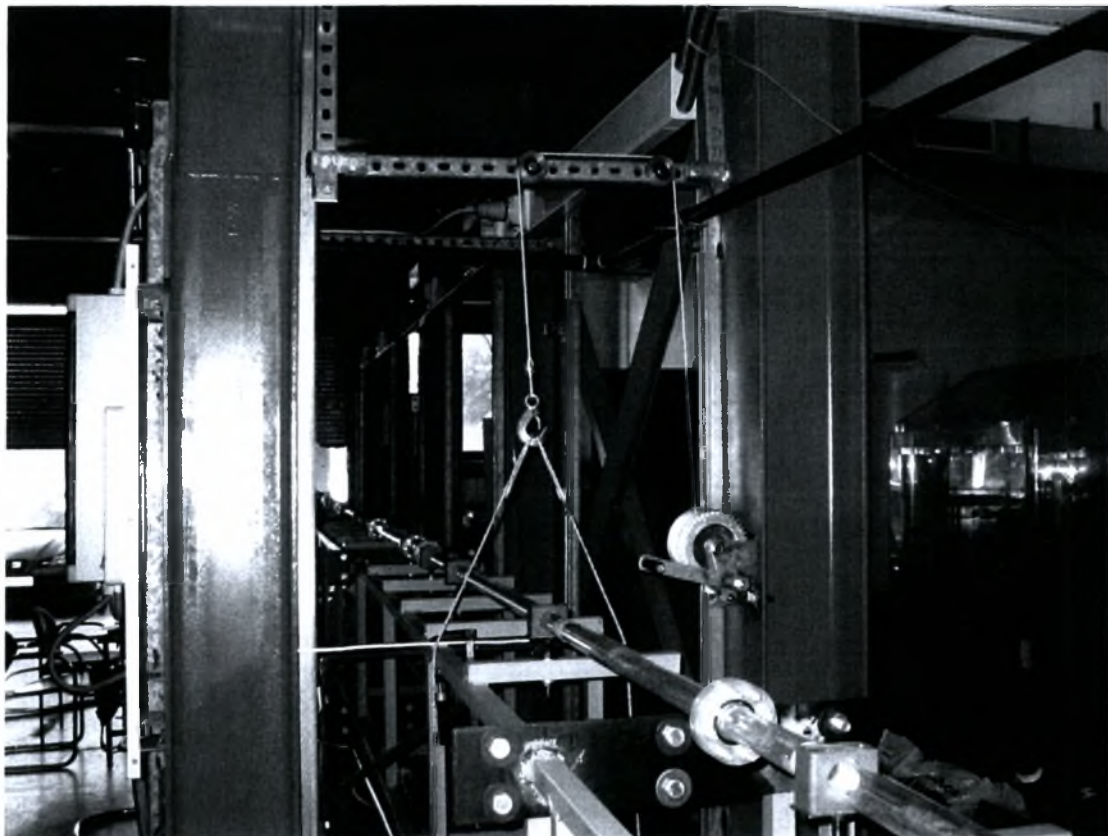
Εικόνα 2.Μεταλλικό κανάλι και φυγοκεντρική αντλία.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

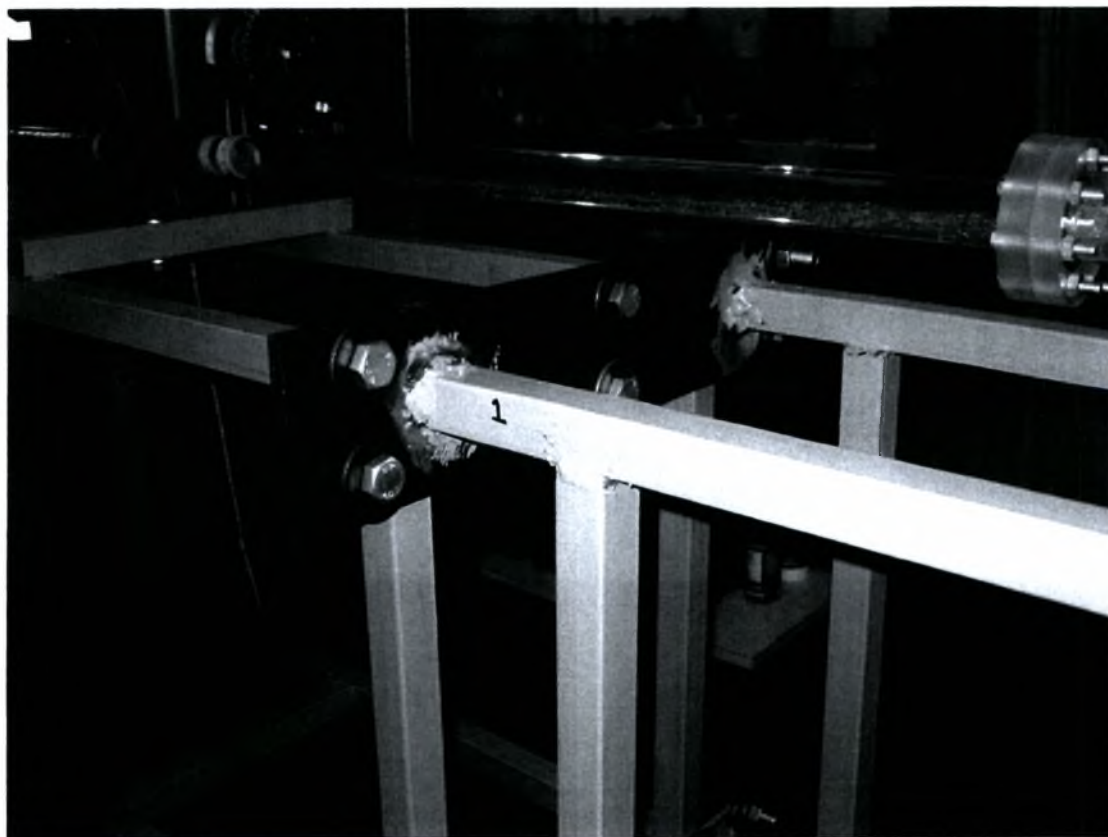


Εικόνα 3. Σύστημα ρομέτρων.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

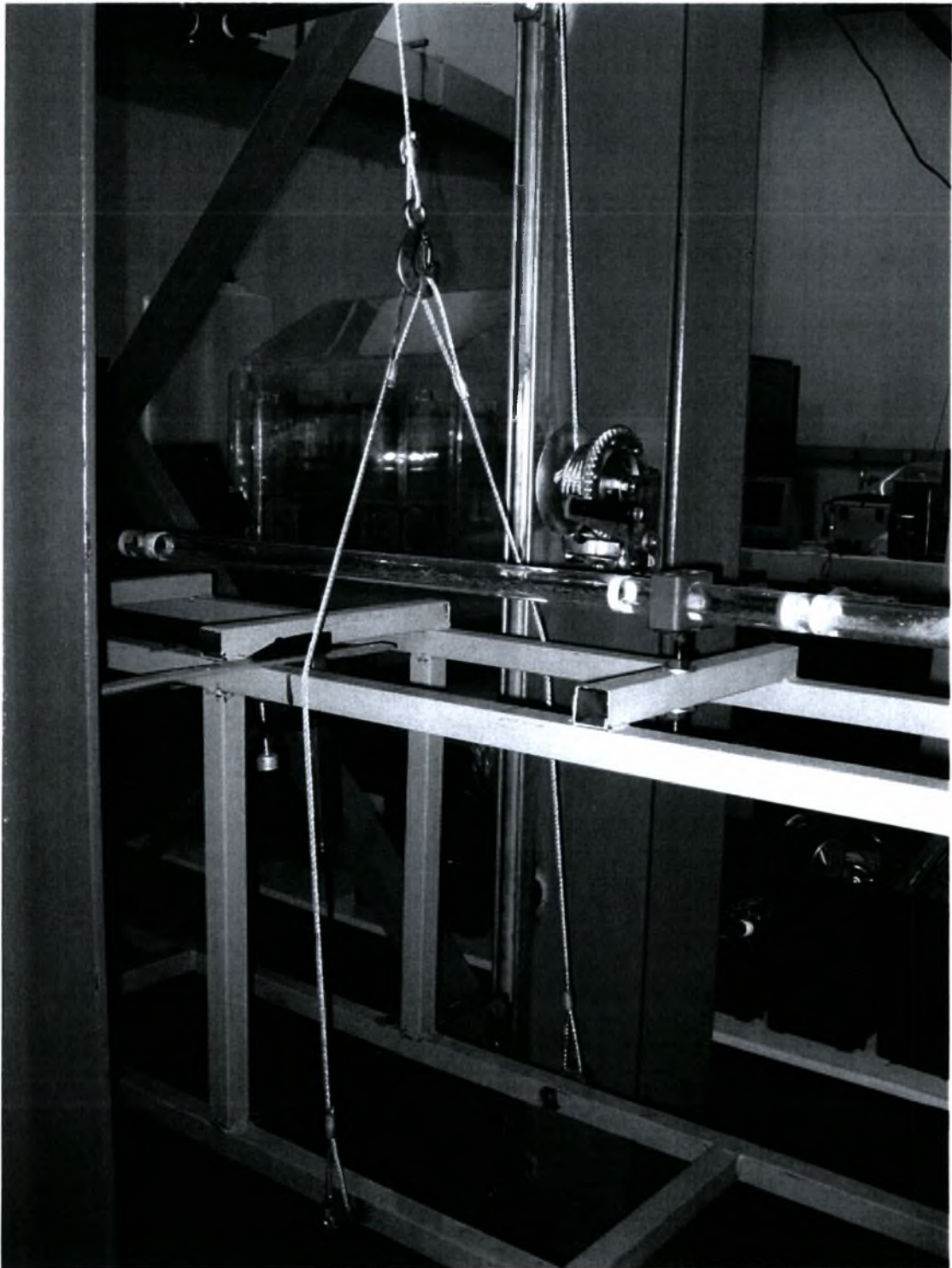


Εικόνα 4. Σύστημα τροχαλιών (παλαγκο) για την κίνηση του καναλιού.



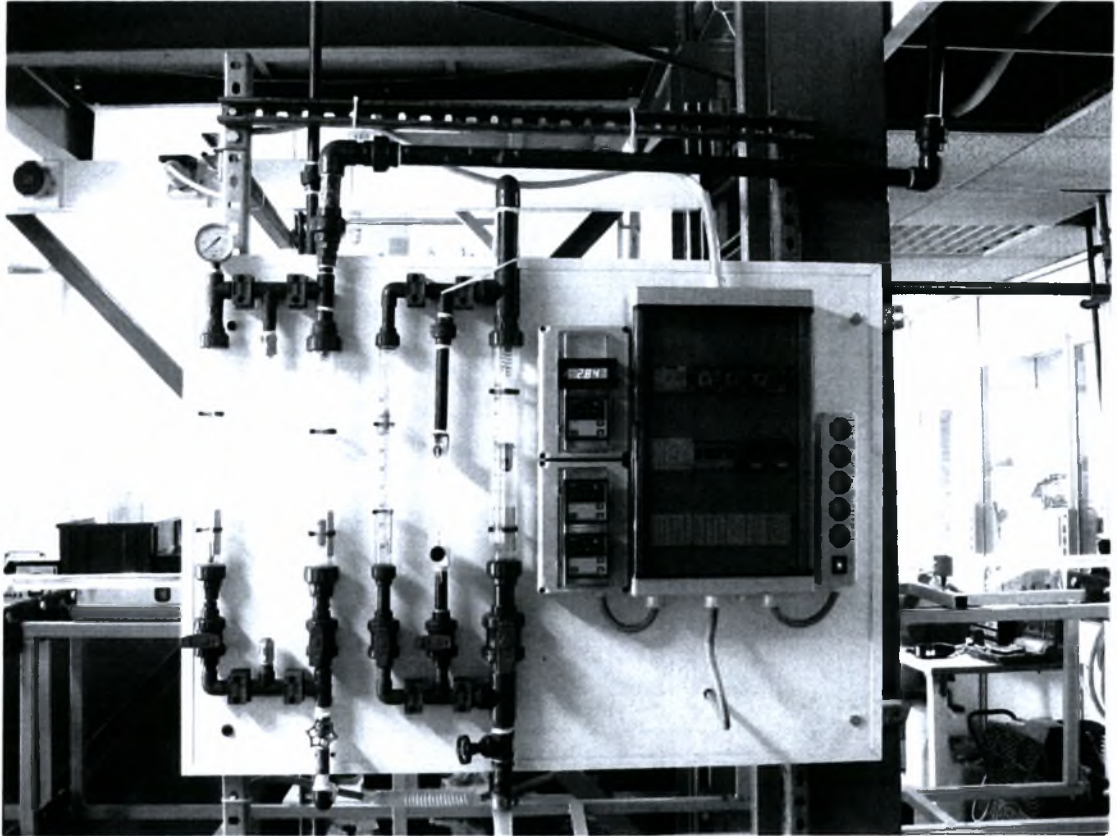
Εικόνα 5. Απεικόνιση ενώσης δύο τμημάτων του καναλιού και δύο του αγωγού.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



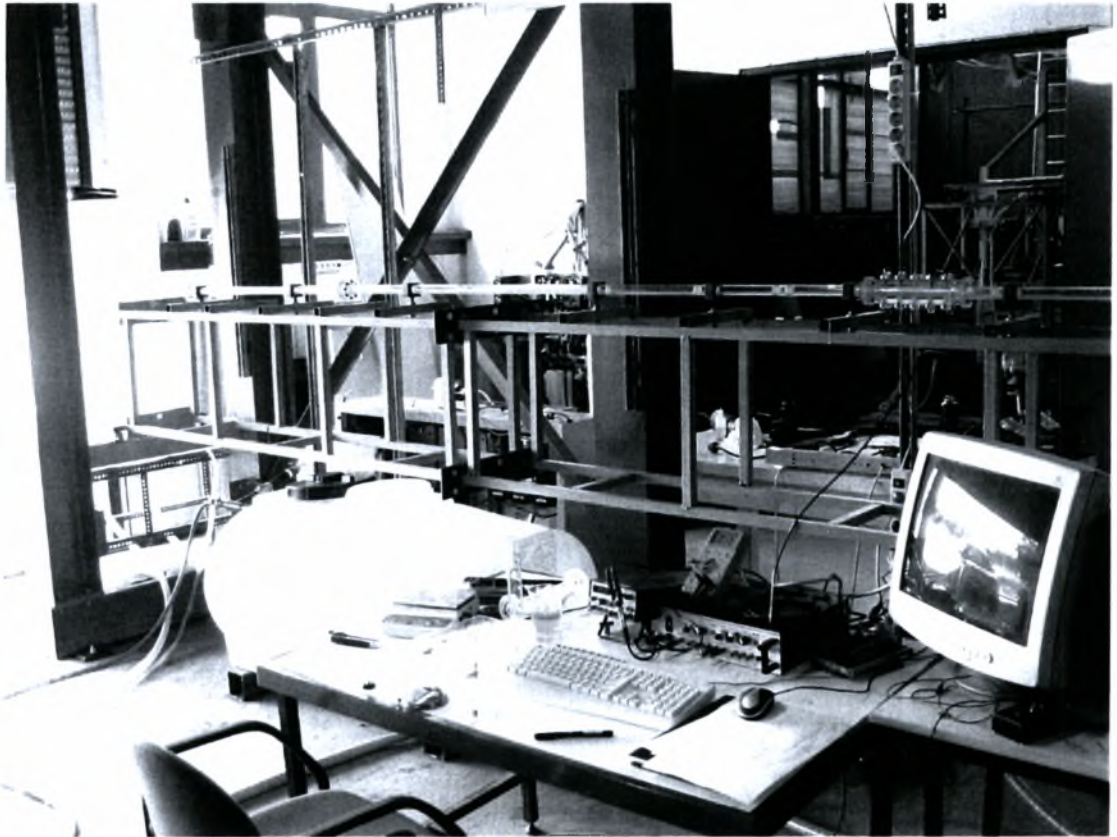
Εικόνα 6. Άλλη μια εικόνα του συστήματος τροχαλιών (παλαγκο).

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



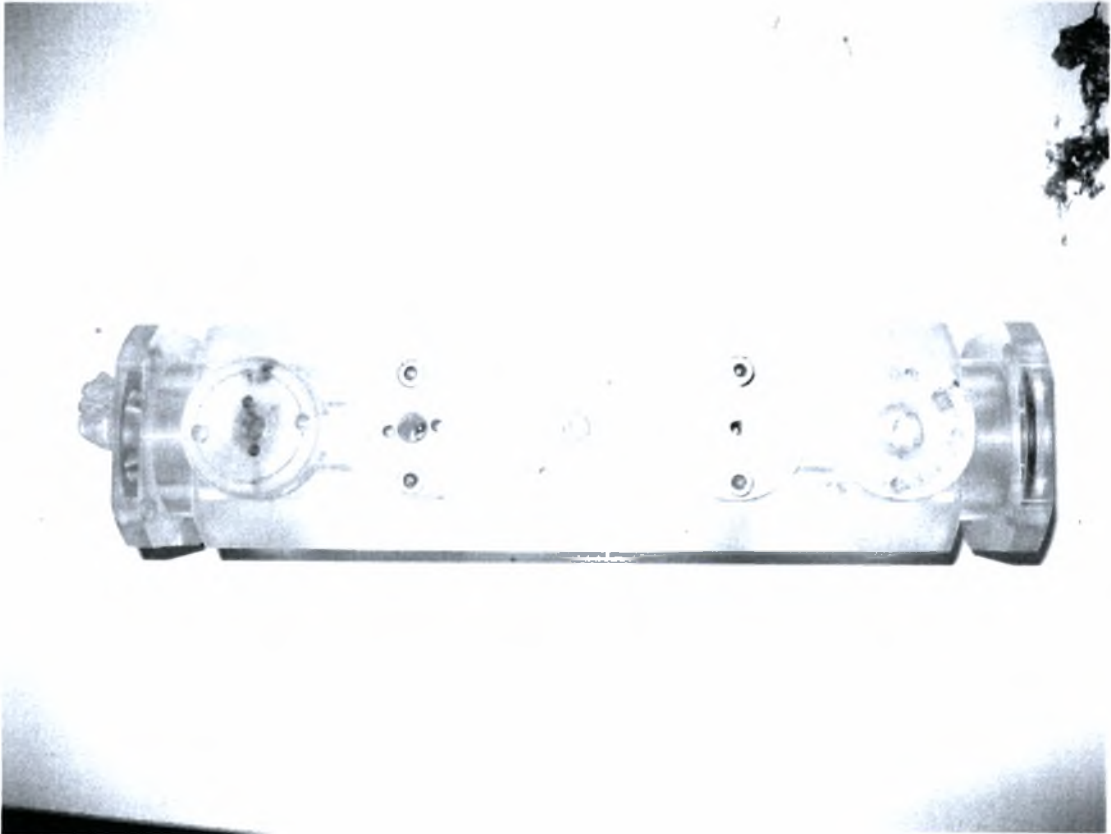
Εικόνα 7. Σύστημα ροομέτρων.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



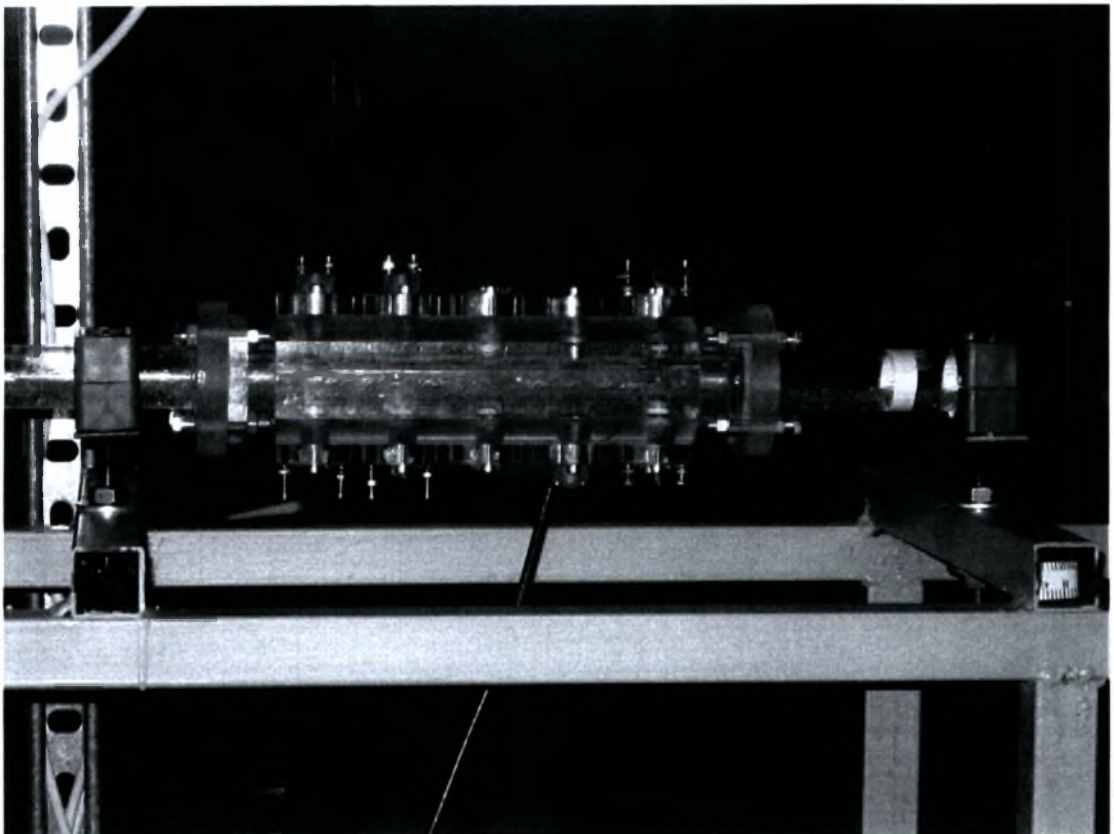
Εικόνα 8. Σύστημα αναλυτή ,μετρητικών στοιχείων και λοιπών εξαρτημάτων αγωγιμομετρικής διάταξης.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

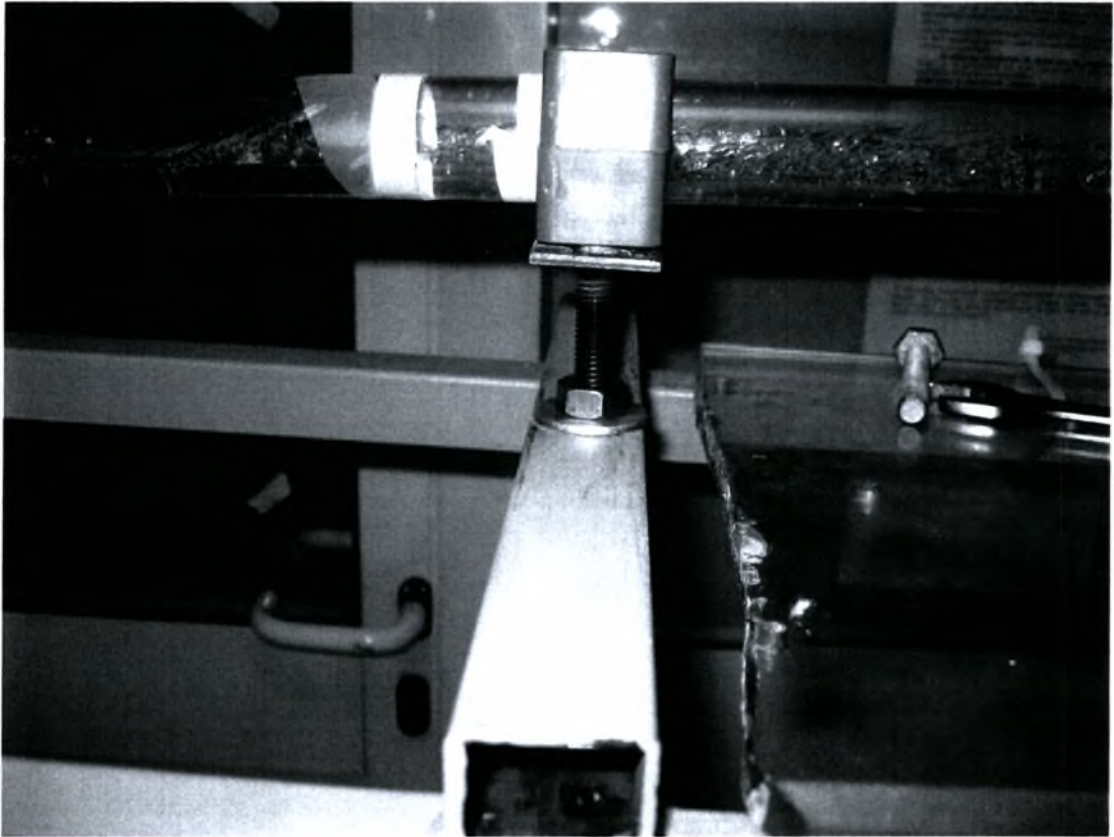


Εικόνα 9. Απεικόνιση μετρητικού τμήματος (test section).

Εικόνα 10. Το μετρητικό τμήμα προσαρμοσμένο στον αγωγό.



6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



Εικόνα 3. Απεκόνιση στηρίγματος αγωγού καθώς και της ροής των δύο φάσεων στον αγωγό.

Στις παραπάνω εικόνες είναι φανερά όλα όσα περιγράφηκαν προηγουμένως, η μεταλλική κατασκευή του καναλιού, το σύστημα με το ποίο παίρνει κλίσεις το κανάλι (παλάγκο), το σύστημα ροομέτρων, το test section, η φυγοκεντρική αντλία και όλα τα υπόλοιπα σημεία και εξαρτήματα τις διάταξης.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

7.1 Καθεστώτα Ροής

Ο χάρτης καθεστώτων ροής για την οριζόντια ροή παρουσιάζεται στο σχήμα 7.1.1 και 7.1.2 και ο χάρτης καθεστώτων ροής για τη ροή προς τα άνω ($\theta=0.7^\circ$) στο σχήμα 7.2. Στην ουσία έγινε επιβεβαίωση του χάρτη περιοχών διασπαστικής ροής για 2,52cm διάμετρο σωλήνα και υγρό νερό Anditsos. Δηλαδή για μια σειρά φαινομενικών ταχυτήτων αέριας και υγρής φάσης επιβεβαιώνονται οι περιοχές ροής που απεικονίζονται στους χάρτες αυτούς. Οι μετρήσεις αυτές παρατίθενται στη συνέχεια. Οι χάρτες καθεστώτων ροής είναι τύπου Mandhane, έχει ως άξονες τις φαινομενικές ταχύτητες της αέριας και της υγρής φάσης αντίστοιχα, και οι άξονες είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Η αναγνώριση των καθεστώτων ροής έγινε οπτικά.

Τα πρώτα συμπεράσματα που μπορούν να παρατηρηθούν από το χάρτη καθεστώτων ροής για την οριζόντια ροή είναι: όσο αυξάνεται η ταχύτητα του νερού χρειάζεται μικρότερη παροχή αέρα για να αρχίσουν τα δισδιάστατα κύματα. Σε χαμηλές παροχές νερού απαιτείται μεγάλη παροχή του αέρα για να παρατηρηθούν τα δισδιάστατα κύματα και κύματα μεγάλου πλάτους. Ενώ για την κλίση προς τα κάτω τα συμπεράσματα που μπορούν να αναχθούν είναι: η μετάπτωση μεταξύ της διαχωρισμένης και διαλείπουσας ροής πραγματοποιείται σε υψηλές ταχύτητες υγρού. Σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια παρουσιάζονται παρακάτω.

Ακολουθεί η περιγραφή των κυμάτων, οι μεταπτώσεις των καθεστώτων ροής για τη ροή προς τα κάτω ($\theta=0.7^\circ$) και οι μετρήσεις για το πάχος της υγρής στοιβάδας.

7.2 Περιγραφή των κυμάτων και μεταβάσεις καθεστώτων ροής

7.2.1 Για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες νερού

Σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου και νερού εμφανίζεται η διαχωρισμένη ροή στην οποία το νερό ρέει στον πυθμένα του σωλήνα και ακριβώς πάνω από το αέριο, κάτι που οφείλεται προφανώς στη διαφορά πυκνότητας. Σε χαμηλή φαινομενική ταχύτητα του νερού και με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας του αερίου έχουμε το σχηματισμό των πρώτων δισδιάστατων κυμάτων στη διεπιφάνεια αερίου-νερού, που εκτείνονται σ' όλο το πλάτος του σωλήνα. Τα κύματα αυτά εμφανίζονται συνήθως με μορφή ακολουθίας και φαίνεται ότι το μήκος και το πλάτος τους αυξάνονται με τη φαινομενική ταχύτητα του αέρα. Σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου, η διασπαστική ροή δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη και τα κύματα αυξάνουν συνεχώς σε πλάτος και μήκος κύματος όσο απομακρύνονται από το σημείο εισόδου. Για περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας του αερίου

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

παρατηρείται ότι κάποια κύματα έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από κάποια άλλα προκαλώντας κύματα μεγάλου πλάτους, χωρίς όμως να διαβρέχουν την κορυφή του σωλήνα. Τα κύματα αυτά στην αρχή συνυπάρχουν με τα δισδιάστατα κύματα και ρέουν πάνω σ' αυτά αφού έχουν αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα. Επίσης παρατηρείται ότι το μήκος κύματος στην αρχή του σωλήνα είναι μικρό και μεγαλώνει προς την έξοδο του σωλήνα. Καθώς αυξάνει η αέρια φαινομενική ταχύτητα μικραίνει το μήκος κύματός τους ενώ μεγαλώνει η συχνότητα εμφάνισής τους. Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας του αερίου το υγρό αρχίζει να σκαρφαλώνει στα τοιχώματα του αγωγού και σιγά-σιγά σταγόνες αποσπώνται από τη διεπιφάνεια και συμπαρασύρονται από την αέρια φάση και αποτίθενται στα πλευρικά τοιχώματα του σωλήνα, οπότε έχει αρχίσει και το φαινόμενο της εκνέφωσης. Καθώς προχωράει η εκνέφωση σταγόνες που έχουν εναποτεθεί και συσσωρεύονται στα τοιχώματα του σωλήνα συμπαρασύρονται από τον αέρα και σχηματίζουν ρυάκια μέχρι να συναντήσουν το νερό στον πυθμένα του σωλήνα. Περιοδική διέλευση των λεγόμενων «κυμάτων διαταραχής» μεγάλου πλάτους που αναρριχώνται στα πλευρικά τοιχώματα του αγωγού, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες στο σχήμα 7.1, προετοιμάζει την εισαγωγή στη δακτυλιοειδή ροή.

Σε πολύ μεγάλες φαινομενικές ταχύτητες αερίου ($u_{GS} > 21$ m/s) μπαίνουμε στη δακτυλιοειδή ροή όπου το νερό σχηματίζει μία συνεχή υγρή στοιβάδα σ' όλη την περιφέρεια του αγωγού. Το πάχος της υγρής στοιβάδας δεν είναι σταθερό σ' όλη την περίμετρο λόγω της βαρύτητας, αλλά είναι συμμετρικό ως προς την κατακόρυφη, η τιμή του είναι ελάχιστη στην κορυφή και αυξάνει συνέχεια παίρνοντας μέγιστη τιμή στον πυθμένα του σωλήνα. Στις πάρα πολύ μεγάλες αέριες παροχές το πάχος της υγρής στοιβάδας παρατηρείται να είναι σχεδόν σταθερό σ' όλη την περίμετρο του σωλήνα. Ο συμπαρασυρμός (E) σ' αυτές τις συνθήκες παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές του και η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ως «ομιχλώδης» δακτυλιοειδής ροή.

7.2.2 Για υψηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου

Σε υψηλές παροχές νερού σχηματίζεται η διαλείπουσα ροή. Αυτή η ροή χαρακτηρίζεται από την περιοδική διέλευση υγρών μαζών (slugs) που κλείνουν όλη τη διατομή του αγωγού για κάποια εκατοστά μήκους συμπαρασύροντας πολυάριθμες φυσαλίδες στην κορυφή και κινούνται με την ταχύτητα του αερίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διέλευση υγρών μαζών επιφέρει απότομες και μεγάλες αλλαγές στην τιμή της πίεσης μέσα στο σωλήνα μ' αποτέλεσμα να έχουμε δόνηση του αγωγού.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Καθώς αυξάνει η ογκομετρική παροχή του νερού όλο και μειώνεται η φαινομενική ταχύτητα του αέρα που απαιτείται για την εισαγωγή στη διαλείπουσα ροή.

Στις χαμηλές παροχές αερίου (της διαλείπουσας ροής) η διφασική ροή ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία. Ξεκινώντας από τελείως οριζόντια διεπιφάνεια με την παρέλευση του χρόνου εμφανίζονται δισδιάστατα κύματα που έχουν μικρό πλάτος που συνεχώς αυξάνει σαν να έχουμε ένα είδος εξαναγκασμένης ταλάντωσης του νερού μέχρι την εμφάνιση ενός slug στο κέντρο περίπου του σωλήνα που πολύ σύντομα ακολουθείται από ένα άλλο slug που ξεκινάει από το σημείο ανάμιξης των δύο φάσεων. Στις μεγάλες παροχές του αέρα τα slugs εμφανίζονται σε πολύ μικρή απόσταση από το σημείο ανάμιξης των δύο φάσεων.

Επιπλέον οι υγρές μάζες παρασύρουν μεγάλη μάζα υγρού και έτσι αφήνουν ένα λεπτό υγρό στρώμα πίσω τους, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αργούν να σχηματισθούν οι επόμενες υγρές μάζες. Μετά το πέρας της υγρής μάζας η αμέσως επόμενη υγρή μάζα μπορεί να σχηματισθεί στην αρχή του τμήματος ανάμιξης και σε απόσταση 175 και 200 διαμέτρους από το τμήμα ανάμιξης, κάτι το οποίο εξαρτάται από την υγρή στοιβάδα. Σε σχετικά μεγάλες φαινομενικές ταχύτητες υγρού και μικρή ταχύτητα αερίου, μετά το πέρας της υγρής μάζας το ύψος της υγρής στοιβάδας που παραμένει είναι μεγαλύτερο απ' ότι σε μεγάλες φαινομενικές ταχύτητες αερίου. Σ' αυτή την περίπτωση σχηματίζονται δύο ή και τρία slugs τα οποία έχουν διαφορετικό μήκος κύματος και συχνότητα εμφάνισής τους.

Περαιτέρω αύξηση της αέριας φαινομενικής ταχύτητας εισάγει το μίγμα στη λεγόμενη «ψευδοδιαλείπουσα» ροή που αποτελεί και το ποιο συγκεκριμένο είδος ροής, αφού μοιάζει στις μικρές αέριες παροχές πιο πολύ με τη διαλείπουσα. Η παροχή αυτή χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση μεγάλων κυμάτων που μοιάζουν με slugs, αλλά δεν κινούνται με τόσο υψηλές ταχύτητες, δεν προκαλούν απότομες μεγάλες μεταβολές στην πίεση και έχουν πολύ μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης απ' αυτή που έχουν τα slugs. Στις μεγάλες παροχές αερίου, η ψευδοδιαλείπουσα μοιάζει με τη δακτυλιοειδή ροή στο ότι το υγρό σχηματίζει μία υγρή στοιβάδα στην περιφέρεια του αγωγού, η ύπαρξη της οποίας οφείλεται κυρίως στο ξέπλυμα των κυμάτων.

Τέλος, το διφασικό μίγμα εισάγεται στη δακτυλιοειδή ροή, που έχει κάποιες μικρές διαφορές με τη δακτυλιοειδή ροή που εμφανίζονται στις μικρές παροχές νερού, κάτι που άλλωστε είναι αναμενόμενο. Στις μεγάλες παροχές υπάρχει έντονη παρουσίαση κυμάτων μεγάλου πλάτους, μερικά από τα οποία περιοδικά κλείνουν όλη τη διατομή. Τα κύματα στη δακτυλιοειδή ροή έχουν στις μικρές παροχές, μορφή

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

δακτυλίου κάθετου στο σωλήνα. Ο δακτύλιος αυτός αποτελείται από ένα νέφος σταγονιδίων πολύ μικρής διαμέτρου. Στις μεγάλες παροχές υγρού τα κύματα μεγάλου πλάτους ρέουν στον πυθμένα του σωλήνα και έχουν ακανόνιστη μορφή. Γενικά η ψευδοδιαλείπουσα ροή μοιάζει με τη διαλείπουσα ροή για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου. Για το μίγμα νερού-αέρα παρατηρήθηκε ότι στις μεγάλες περιοχές όπου υπάρχει διασπασμένη ροή ο αέρας μπορεί να φθάσει στον κορεσμό σε σχετικά μικρό μήκος σωλήνα.

7.3 Ροή προς τα κάτω, κλίση $\theta=0,7^\circ$ του αγωγού

Όπως είναι αναμενόμενο για τη ροή προς τα κάτω (κλίση $\theta=0,7^\circ$ του αγωγού) είναι αναμενόμενο ότι η υγρή στοιβάδα είναι λεπτότερη σε σχέση με την οριζόντια ροή στις ίδιες φαινομενικές ταχύτητες υγρού, λόγω της δύναμης βαρύτητας που προκαλεί μία αύξηση στην ταχύτητα του υγρού, με αποτέλεσμα να έχουμε επίδραση στα καθεστώτα ροής σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου. Η ανύψωση του νερού στην κορυφή του σωλήνα γίνεται όλο και πιο δύσκολη, καθώς αυξάνει η υγρή παροχή. Ο λόγος του πάχους της υγρής στοιβάδας στον πυθμένα προς την κορυφή είναι φθίνουσα συνάρτηση της υγρής παροχής.

Στις υψηλότερες ταχύτητες αερίου, το ύψος της υγρής στοιβάδας δε διαφέρει σημαντικά απ' αυτό στην οριζόντια ροή. Στην ουσία αυτό σημαίνει ότι το υγρό διατρέχει ευκολότερα στο σωλήνα. Ακόμη για τη ροή προς τα κάτω, η φυσική αστάθεια της διεπιφάνειας εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της ροής λόγω της βαρύτητας ακόμη και εάν δεν υπάρχει αέρια φάση. Για τη μετάβαση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με κύματα δε μπορεί ακριβώς να καθορισθεί για το λόγο που αναφέραμε παραπάνω.

Η σημαντικότερη επίδραση της κλίσης στα καθεστώτα ροής παρατηρείται στη μετάπτωση μεταξύ της διαχωρισμένης και της διαλείπουσας ροής, η οποία συμβαίνει σε υψηλές φαινομενικές ταχύτητες υγρού. Στην περιοχή της διαλείπουσας ροής μετά το πέρας της πρώτης υγρής μάζας, η αμέσως επόμενη υγρή μάζα μπορεί να σχηματισθεί στην αρχή του τμήματος ανάμιξης περίπου 75 και 100 ισοδύναμες διαμέτρους του αγωγού από το τμήμα αναάμιξης, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στην οριζόντια ροή, εκεί όπου εμφανίζονται σε περισσότερες ισοδύναμες διαμέτρους του αγωγού από το τμήμα ανάμιξης. Η διαχωρισμένη-δακτυλιοειδής μετάπτωση εμφανίζεται σε υψηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου. Ο χάρτης καθεστώτων ροής για ροή προς τα κάτω, ($\theta=0,7^\circ$ κλίση του αγωγού) δίνεται στο Σχήμα 6.2. Σύμφωνα

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

με το χάρτη καθεστώτων ροής (Barnea et al 1982), η διαχωρισμένη ροή για κλίσεις σωλήνων προς τα κάτω είναι πάντα κυματοειδής, κάτι που παρατηρείται και στα πειράματά μας (Σχήμα 6.5α). Επίσης για φαινομενικές ταχύτητες του αερίου πάνω από 9 m/s δεν έχουμε καμμία διαφοροποίηση με την οριζόντια ροή. Η μετάπτωση από την διαλείπουσα στη δακτυλιοειδή ροή επηρεάζεται ελάχιστα από την κλίση του αγωγού. Από πειράματα που έχουν γίνει (Barnea et al 1982), στις προς τα κάτω απότομες κλίσεις, η μετάβαση από τη στρωματοποιημένη στη δακτυλιοειδή παρατηρείται ακόμη και στις πολύ χαμηλές παροχές αερίου.

Μεγάλο ροομ. Νερο	Μεσαίο ροομ. νερού	Μικρό ροομ. Αέρα	Μεγάλο ροομ. αέρα	ULS m/s	UGS m/s	Περ.ροής	
#		20	50	#	0,0095	1,01	s.s
#		20	55	#	0,0095	^	s.s
#		20	60	#	0,0095	^	s.s
#		20	65	#	0,0095	^	s.s
#		20	70	#	0,0095	^	s.s
#		20	75	#	0,0095	^	s.s
#		20	80	#	0,0095	^	s.s
#		20	85	#	0,0095	^	s.s
#		20	90	#	0,0095	^	s.s
#		20	95	#	0,0095	^	s.s
#		20	100	#	0,0095	^	s.s
#		20	105	#	0,0095	^	s.s
#		20	110	#	0,0095	^	s.s
#		20	115	#	0,0095	^	s.s
#		20	120	#	0,0095	^	s.s
#		20	125	#	0,0095	^	s.s
#		20	130	#	0,0095	^	s.s
#		20	135	#	0,0095	^	s.s
#		20	140	#	0,0095	2,2478	s.s
#		20	145	#	0,0095	^	s.s
#		20	150	#	0,0095	^	s.s
#		20	155	#	0,0095	^	s.s
#		20	160	#	0,0095	^	s.s
#		20	165	#	0,0095	^	s.s
#		20	170	#	0,0095	^	s.s
#		20	175	#	0,0095	2,9833	αρχή 2d
#		20	180	#	0,0095	^	2d
#		20	190	#	0,0095	^	2d
#		20	200	#	0,0095	^	2d
#		20	210	#	0,0095	^	2d
#		20	220	#	0,0095	^	2d
#		20	230	#	0,0095	^	2d
#		20	240	#	0,0095	^	2d
#		20	260	#	0,0095	^	2d
#		20	280	#	0,0095	^	2d

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

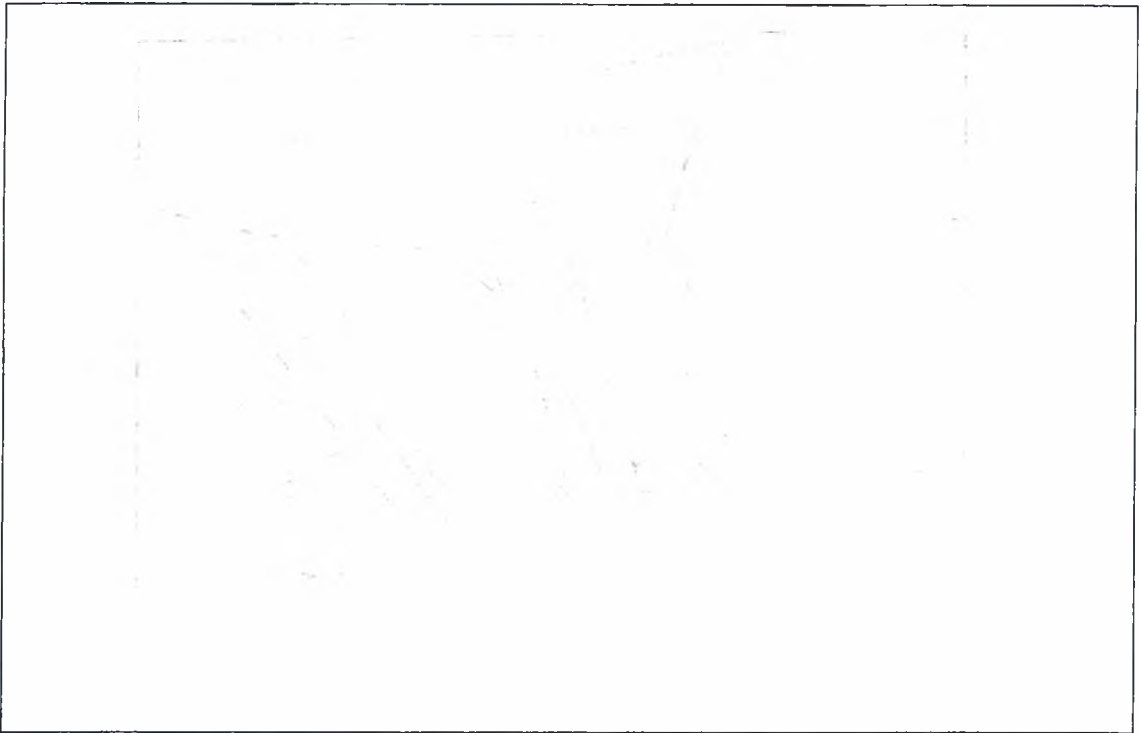
#	20	300 #	0,0095	^	2d
#	20	320 #	0,0095	^	2d
#	20	340 #	0,0095	^	2d
#	20	360 #	0,0095	^	2d
#	20	380 #	0,0095	^	2d
#	20	400 #	0,0095	6,716	2d
#	20 #		70	0,0095	^ 2d
#	20 #		80	0,0095	6,6306 2d
#	20 #		90	0,0095	^ 2d
#	20 #		100	0,0095	^ 2d
#	20 #		110	0,0095	10,106 αρχη ΚΗ
#	20 #		120	0,0095	^ ΚΗ
#	20 #		130	0,0095	^ ΚΗ
#	20 #		140	0,0095	^ ΚΗ
#	20 #		150	0,0095	^ ΚΗ
#	20 #		160	0,0095	^ ΚΗ
#	20 #		170	0,0095	^ ΚΗ
#	20 #		180	0,0095	19,0101 αρχη atom
#	20 #		190	0,0095	^ atom
#	20 #		200	0,0095	^ atom
#	20 #		260	0,0095	^ atom
#	20 #		262	0,0095	28,0884 atom
#	38	50 #	0,0203	1,01	s.s
#	38	55 #	0,0203	^	s.s
#	38	60 #	0,0203	^	s.s
#	38	65 #	0,0203	^	s.s
#	38	70 #	0,0203	^	s.s
#	38	75 #	0,0203	^	s.s
#	38	80 #	0,0203	^	s.s
#	38	85 #	0,0203	^	s.s
#	38	90 #	0,0203	^	s.s
#	38	100 #	0,0203	^	s.s
#	38	110 #	0,0203	1,8	αρχή 2d
#	38	120 #	0,0203	^	2d
#	38	130 #	0,0203	^	2d
#	38	140 #	0,0203	^	2d
#	38	150 #	0,0203	^	2d
#	38	160 #	0,0203	^	2d
#	38	170 #	0,0203	^	2d
#	38	180 #	0,0203	^	2d
#	38	190 #	0,0203	^	2d
#	38	200 #	0,0203	^	2d
#	38	210 #	0,0203	^	2d
#	38	220 #	0,0203	^	2d
#	38	230 #	0,0203	^	2d
#	38	240 #	0,0203	^	2d
#	38	250 #	0,0203	^	2d
#	38	260 #	0,0203	^	2d
#	38	270 #	0,0203	^	2d
#	38	280 #	0,0203	^	2d
#	38	290 #	0,0203	^	2d
#	38	300 #	0,0203	^	2d

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

#		38		320	#	0,0203	^	2d
#		38		340	#	0,0203	^	2d
#		38		360	#	0,0203	^	2d
#		38		380	#	0,0203	^	2d
#		38		400	#	0.0203	6,716	2d
	22	#		50		1,017	1,01	slug
	22	#		55		1,017	^	slug
	22	#		60		1,017	^	slug
	22	#		65		1,017	^	slug
	22	#		70		1,017	^	slug
	22	#		75		1,017	^	slug
	22	#		80		1,017	^	slug
	22	#		85		1,017	^	slug
	22	#		90		1,017	^	slug
	22	#		110		1,017	^	slug
	22	#		120		1,017	^	slug
	22	#		130		1,017	^	slug
	22	#		140		1,017	^	slug
	22	#		150		1,017	^	slug
	22	#		200		1,017	3,5375	Ap.pseudo
	22	#		250		1,017		pseudoslug
	22	#		300		1,017		pseudoslug
	22	#		350		1,017		pseudoslug
	22	#		400		1,017		pseudoslug

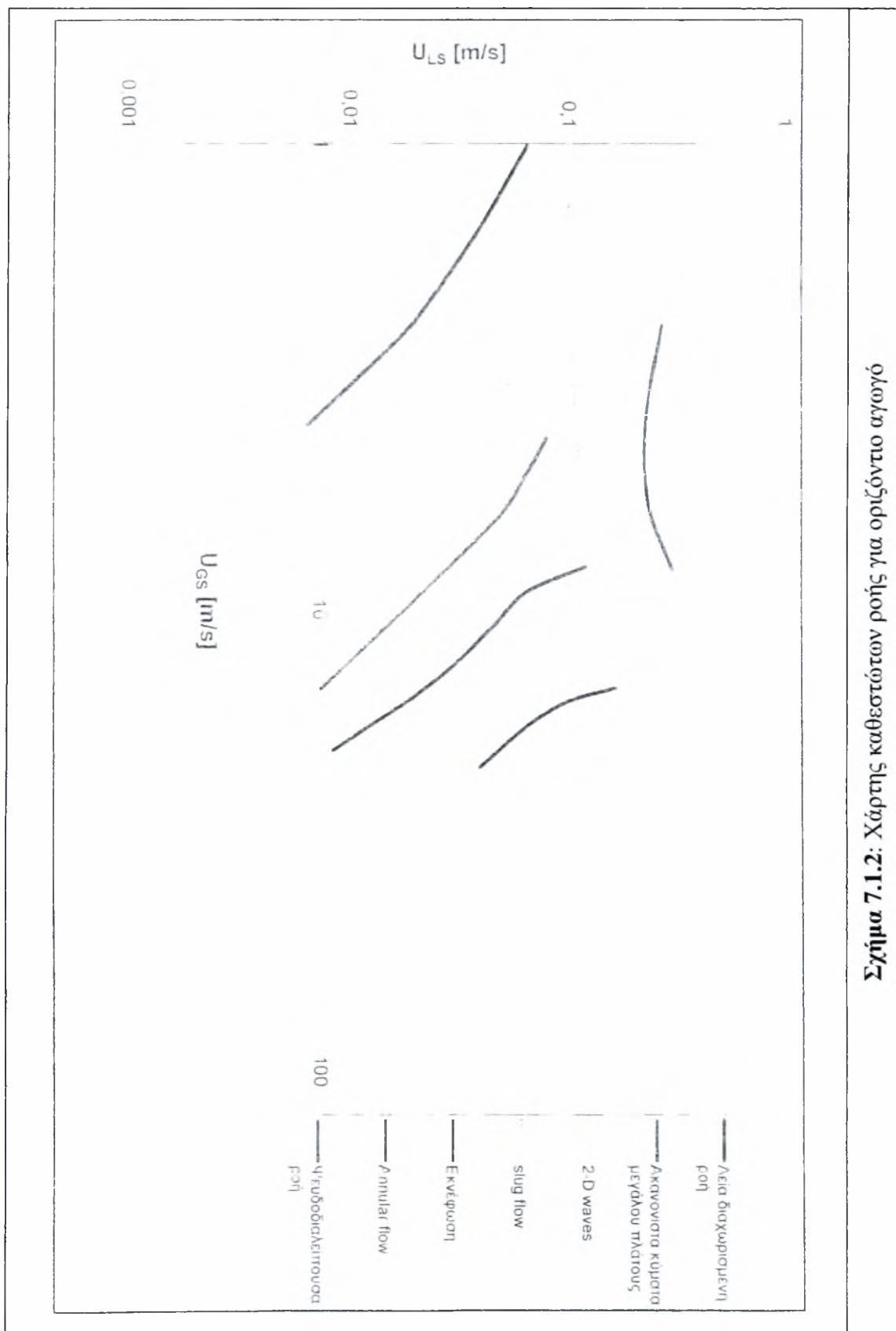
Αυτός είναι ο πίνακας των μετρήσεων που κάναμε και οι οποίες μας οδηγούν στη κατασκευή του παρακάτω χάρτη που, όπως είπαμε στην ουσία είναι ο χάρτης Andrtsos, στη περίπτωση της οριζόντιας ροής. Την ίδια διαδικασία ακολοθήσαμε και για τη ροή υπό κλίση. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι για ULS 0,0095 m/s και UGS 1,01 m/s s.s όπως και για UGS 2 m/s. Για UGS 5m/s έχουμε 2D ενώ για UGS 20 m/s έχουμε atom. Για ULS 0,1017 m/s και UGS 1,01 m/s έχουμε slug και UGS 10 m/s έχουμε pseudoslug και για UGS 20 m/s έχουμε annular. Τέλος για ULS 0,0203 m/s και UGS 1,01 m/s έχουμε s.s και για UGS 2 m/s και UGS 5m/s έχουμε 2D ενώ για UGS 10 m/s έχουμε KH και για UGS 20 m/s έχουμε atom. Όλα αυτά για την οριζόντια ροή και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία και για τη ροή υπό κλίση.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ



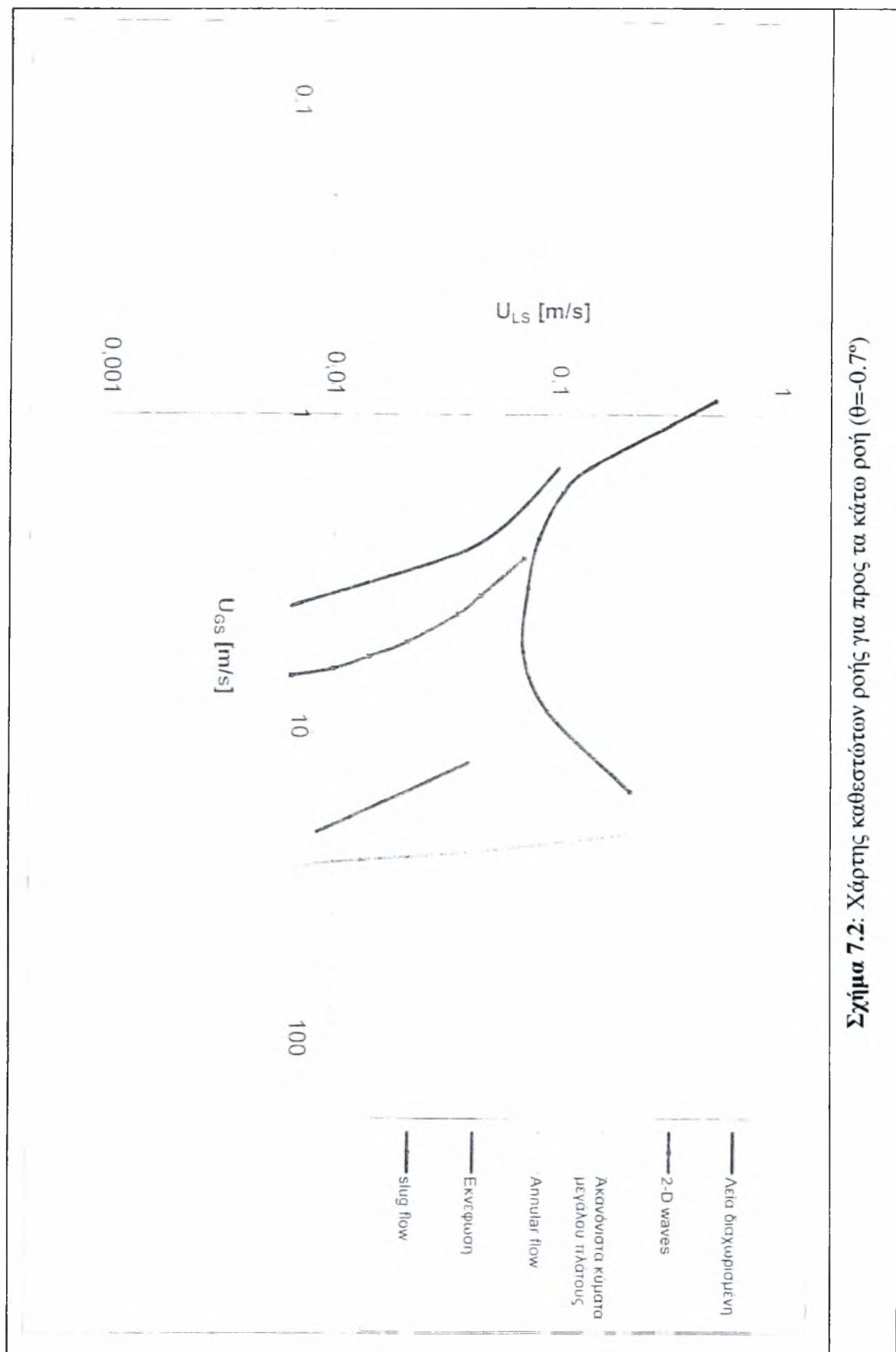
Σχήμα 7.1.1: Χάρτης καθεστώτων ροής Andritsos et al (1 cp)

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ



Σχήμα 7.1.2: Χάρτης καθεστώτων ροής για οριζόντιο αγωγό

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

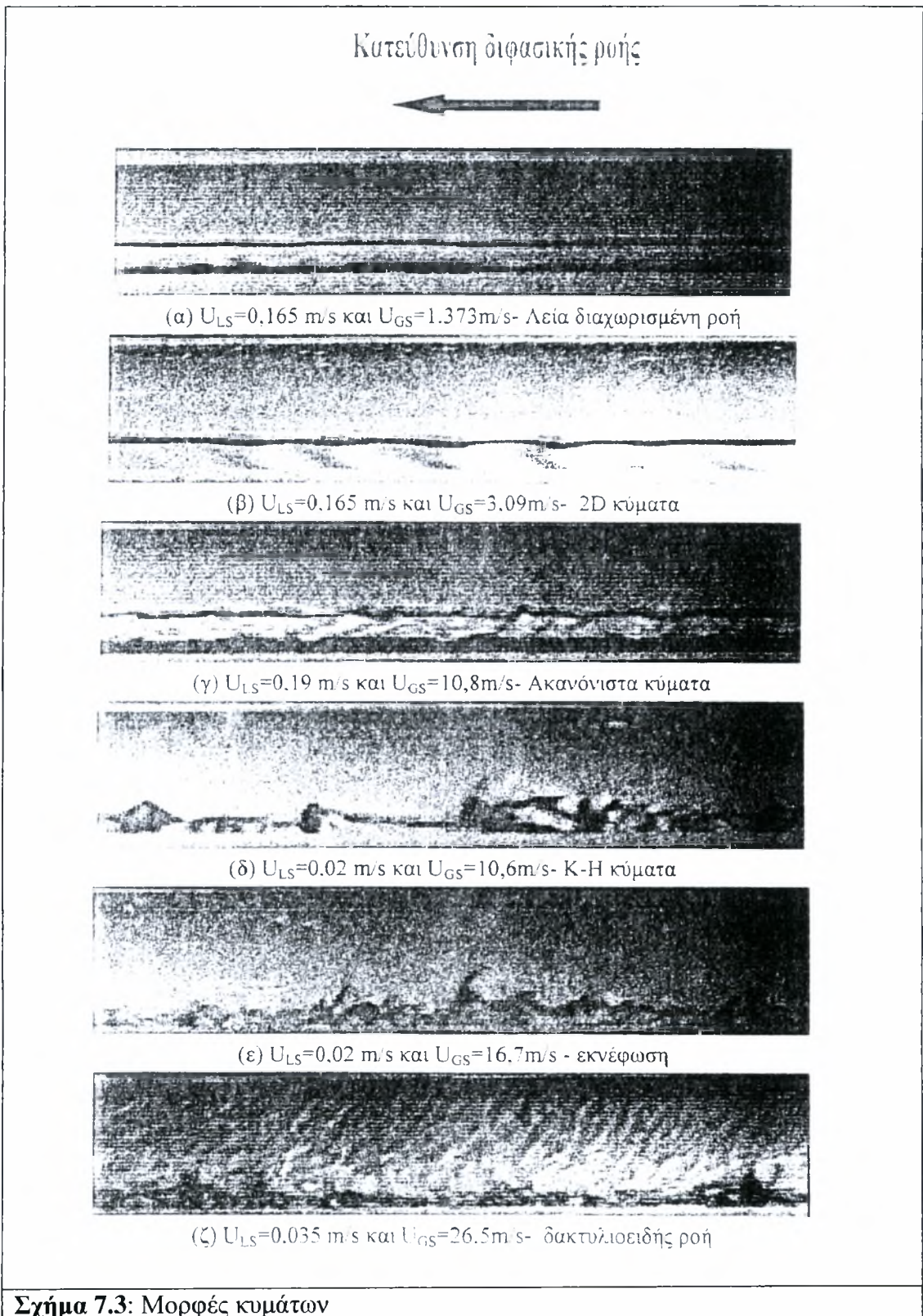


Σχήμα 7.2: Χάρτης καθεστώτων ροής για προς τα κάτω ροή ($\theta = -0.7^\circ$)

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

7.4 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής από την οριζόντια ροή

Για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες νερού και αλλάζοντας την παροχή του αέρα σχηματίζονται καθεστώτα ροής που παρουσιάζονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



Σχήμα 7.3: Μορφές κυμάτων

Για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου και αλλάζοντας την παροχή του νερού σχηματίζονται καθεστώτα ροής που φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κατεύθυνση διφασικής ροής



(α) $U_{LS}=0,165$ m/s και $U_{GS}=5,8$ m/s - Αρχή σχηματισμού του slug



(β) $U_{LS}=0,165$ m/s και $U_{GS}=5,8$ m/s- Slug



(γ) $U_{LS}=0,165$ m/s και $U_{GS}=5,8$ m/s - Μετά το πέρασμα του slug



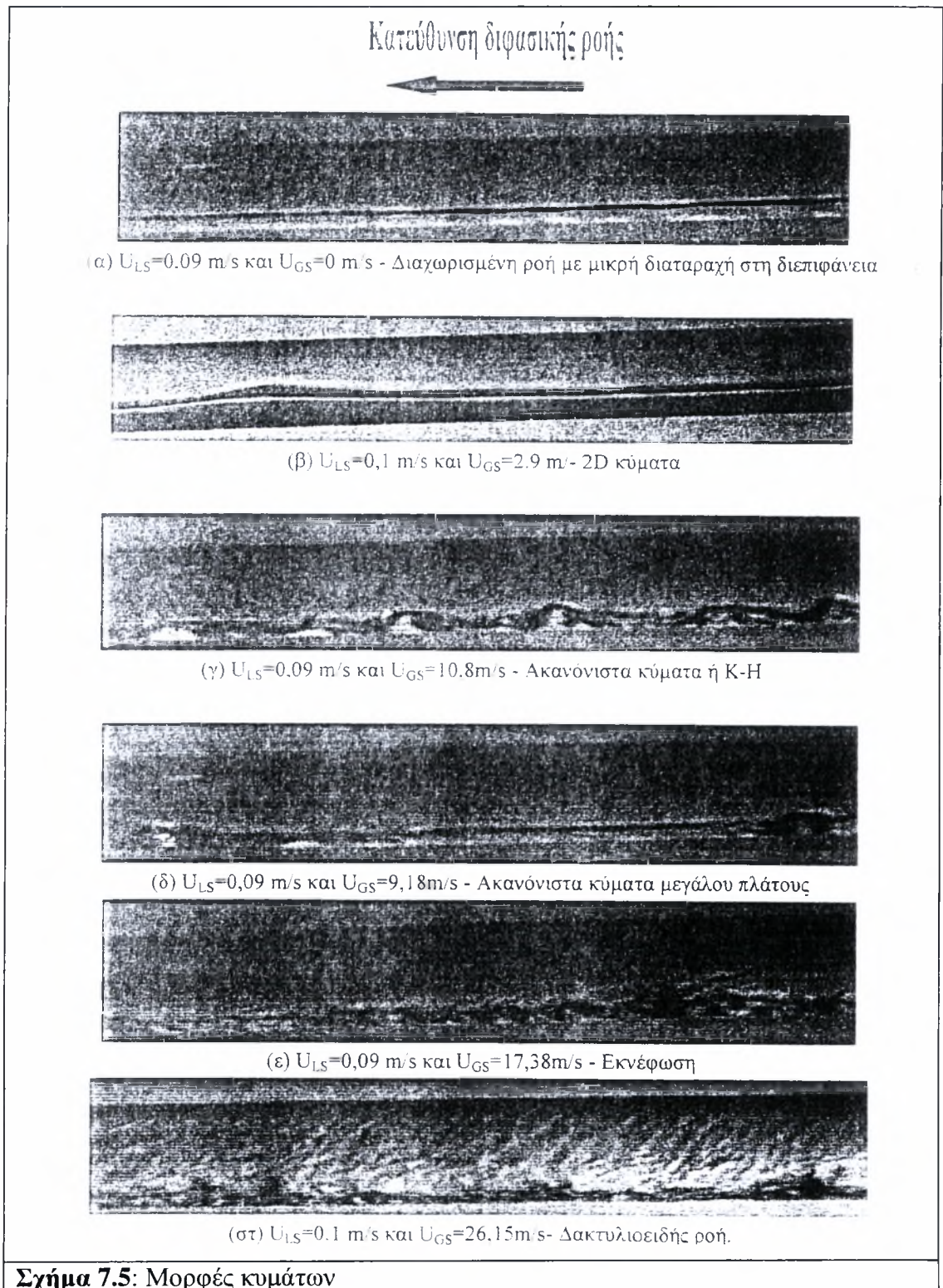
(δ) $U_{LS}=0,03$ m/s και $U_{GS}=14,765$ m/s: ψευδοδιαλειπουσα

Σχήμα 7.4: Μορφές κυμάτων

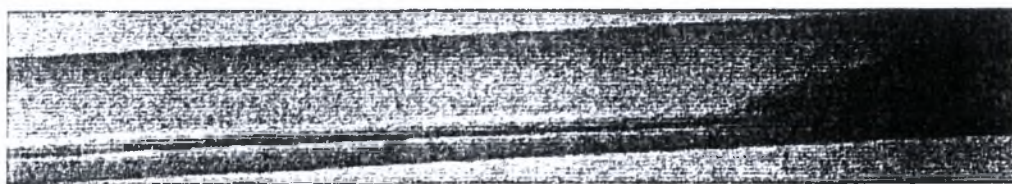
7.5 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για τη ροή προς τα κάτω ($\theta=-0.7^\circ$)

Για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες νερού και αλλάζοντας την παροχή του αέρα σχηματίζονται καθεστώτα ροής που φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ



Για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες αερίου και αλλάζοντας την παροχή του νερού σχηματίζονται καθεστώτα ροής που φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



(α) $U_{LS}=0.2$ m/s και $U_{GS}=3,09$ m/s
Αρχή σχηματισμού του slug



(β) $U_{LS}=0.2$ m/s και $U_{GS}=3.09$ m/s
Slug



(γ) $U_{LS}=0.165$ m/s και $U_{GS}=5.8$ m/s
Τέλος του slug

Σχήμα 7.6: Μορφές κυμάτων

7.6 Πάχος υγρής στοιβάδας

Όπως αναφέραμε στα πρώτα κεφάλαια το πάχος της υγρής στοιβάδας και η κατανομή του στην περιφέρεια του αγωγού είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που παίζει μεγάλο ρόλο στη διφασική ροή.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται το ύψος της υγρής στοιβάδας σε σχέση με τα δεδομένα της δειγματοληψίας, για τις μεταπτώσεις της λείας διαχωρισμένης ροής σε 2D κύματα και κύματα μεγάλου πλάτους στον οριζόντιο αγωγό και στην κλίση του αγωγού.

Το κυρίως συμπέρασμα που παρατηρείται στα διαγράμματα αυτά είναι ότι για την ίδια φαινομενική ταχύτητα υγρού στην οριζόντια και προς τα κάτω ροή, όπως είναι αναμενόμενο, το ύψος της υγρής στοιβάδας είναι μικρότερο στην προς τα κάτω ροή απ' ό τι το ύψος της υγρής στοιβάδας στην οριζόντια ροή.

Επίσης, κάτι το οποίο παρατηρείται στην οριζόντια και προς τα κάτω ροή ($\theta=0.7^\circ$) είναι ότι το ύψος της υγρής στοιβάδας μειώνεται καθώς όσο πλησιάζουμε προς

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

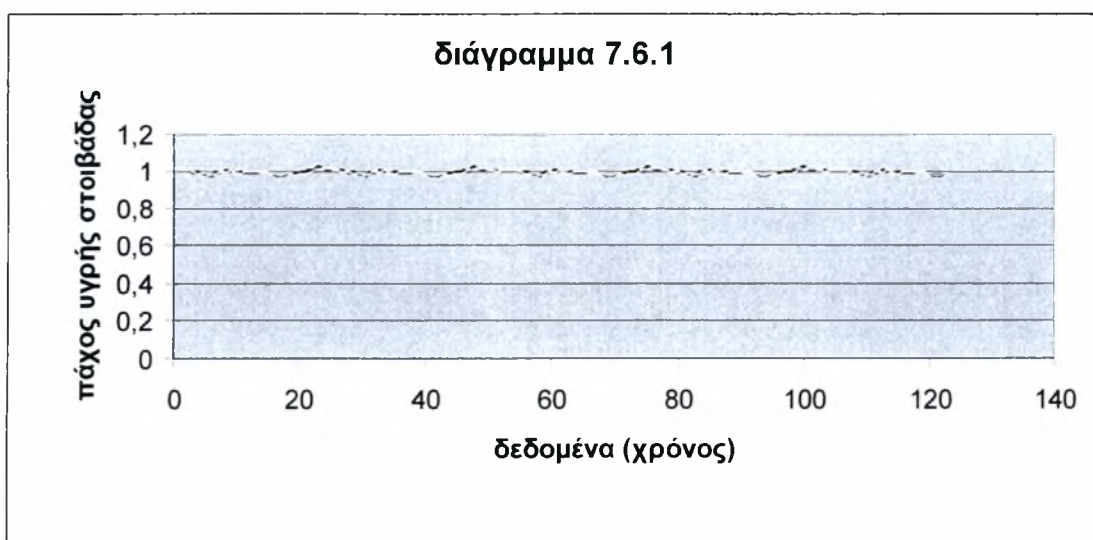
το τέλος του σωλήνα και όσο μεγαλώνει η ταχύτητα του αερίου μικραίνει το ύψος της υγρής στοιβάδας λόγω της δύναμης που ασκεί η αέρια φάση στο υγρό.

Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στοιβάδας μετατρέπουμε τις μετρήσεις της τάσης εξόδου του αναλυτή σε πάχος υγρής στοιβάδας χρησιμοποιώντας την καμπύλη βαθμονόμησης του αναλυτή που είναι υπολογισμένη στην αρχή κάθε πειράματος, την καμπύλη βαθμονόμησης του μετρητικού και την ειδική αγωγιμότητα του νερού για τις συνθήκες του πειράματος. Έτσι τις μετρήσεις, οι οποίες αποθηκεύονται απευθείας από το μετρητικό πρόγραμμα σε αρχεία Excel και οι οποίες είναι σε V, μετατρέπονται σε πάχος υγρής στοιβάδας με βάση όλα τα παραπάνω. Η ακρίβεια της μεθόδου αυτής υπολογίζεται ότι είναι της τάξης του $\pm 5\%$ αλλά για στοιβάδες πάχους μικρότερου του 0,05mm τα αποτελέσματα δε θεωρούνται αξιόπιστα.

Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα της αγωγιμομετρικής μεθόδου για μετρήσεις που πάρθηκαν σε διάφορες περιοχές ροής τόσο στην οριζόντια όσο και στην υπό κλίση. Χάρην σύγκρισης οι μετρήσεις και στις δύο περιπτώσεις έγιναν για ίδιες φαινομενικές ταχύτητες φάσεων.

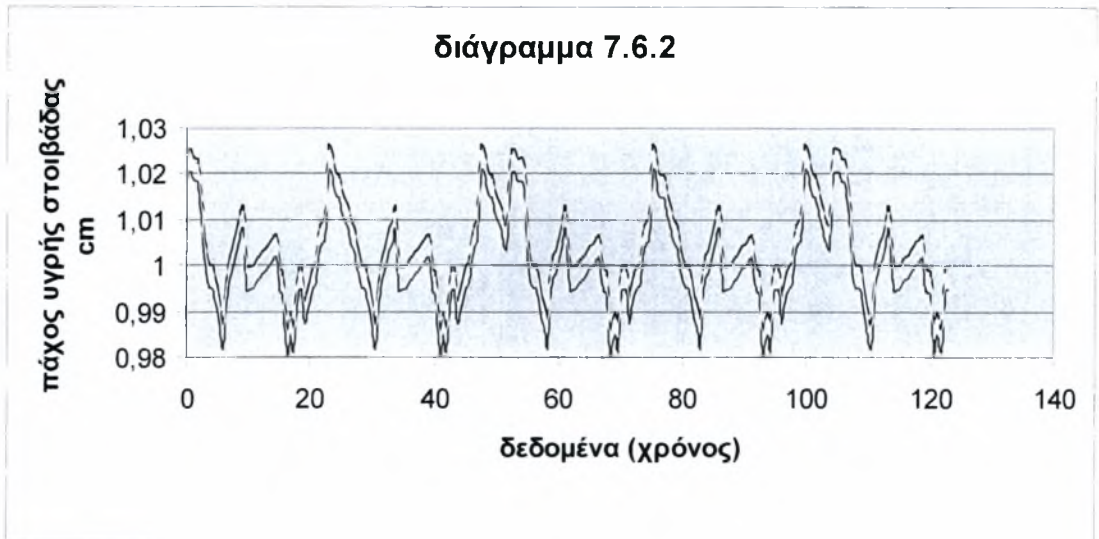
7.6.1. Στρωματομένη ροή.

Στη περιοχή της στρωματομένης ροής σε μικρές ταχύτητες και των δύο φάσεων έχουμε την εμφάνιση διδιάστατων κυμάτων όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

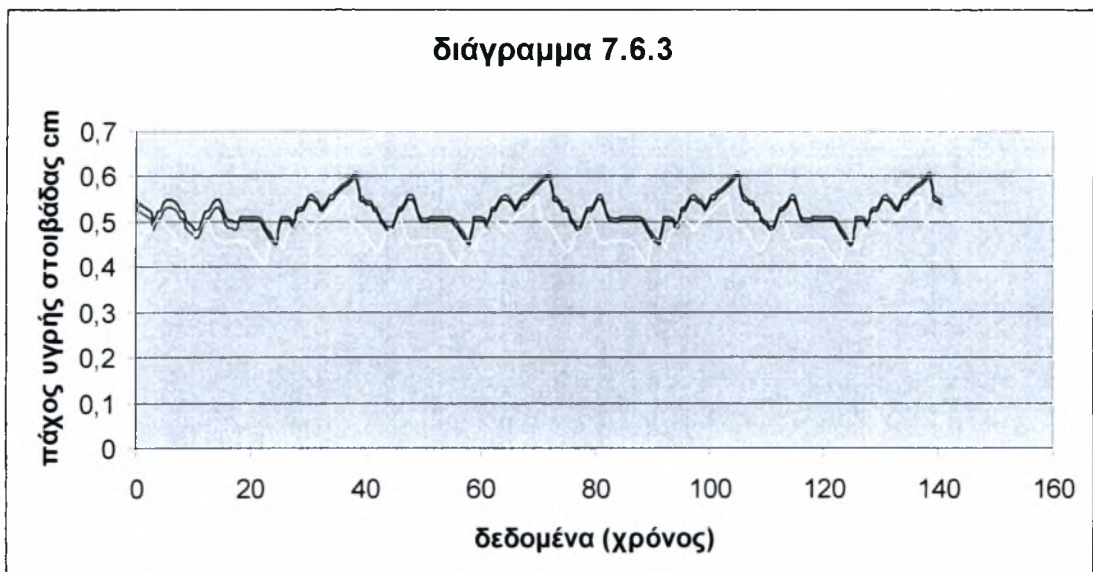


Σχήμα 7.6.1. Στρωματομένη ροή με διδιάστατα κύματα. Η συχνότητα δείγματος είναι 25KHz και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0,043\text{m/s}$ και $U_{GS}=2,385\text{m/s}$. Οι τρεις διαφορετικές γραμμές απεικονίζουν τα τρία ζεύγη συρμάτων.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

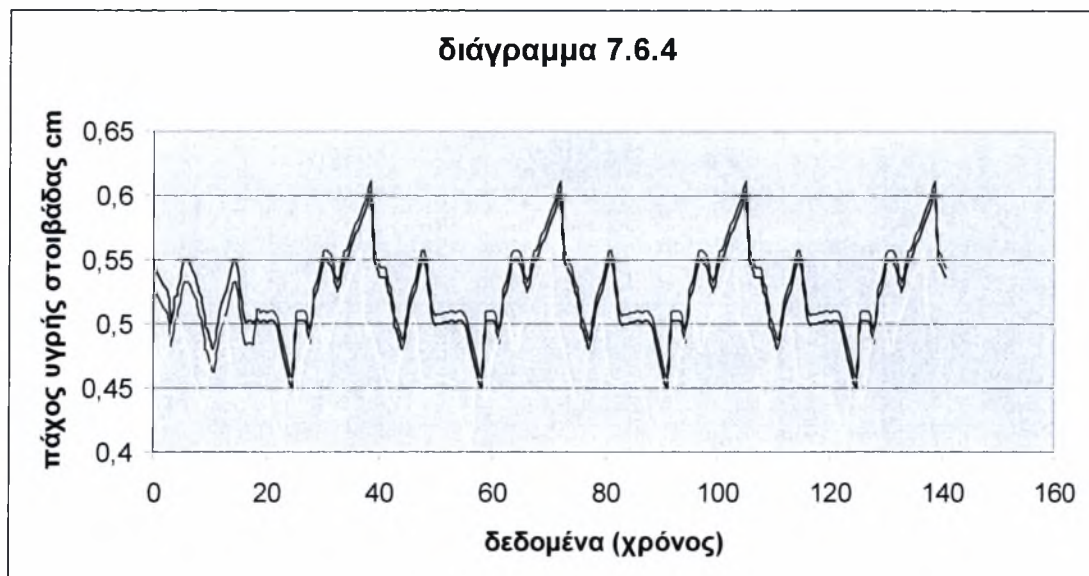


Σχήμα 7.6.2.Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα.Η συχνότητα δείγματος είναι 25ΚΗ και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0.043\text{m/s}$ και $U_{GS}=2,385\text{m/s}$.Οι τρεις διαφορετικές γραμμές απεικονίζουν τα τρία ζεύγη συρμάτων.



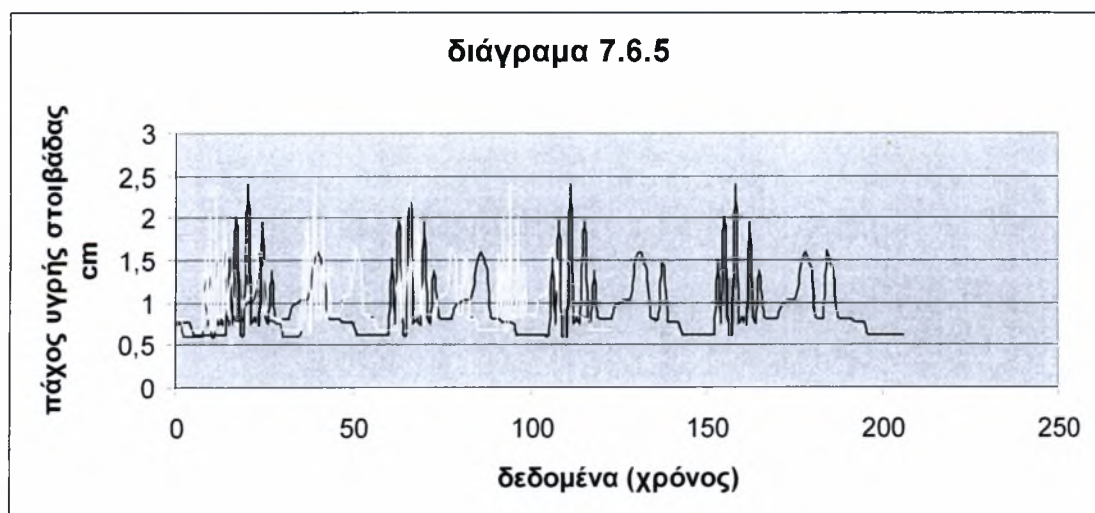
Σχήμα 7.6.3.Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα.Η συχνότητα δείγματος είναι 25ΚΗ και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0.030\text{m/s}$ και $U_{GS}=5,634\text{m/s}$.Οι τρεις διαφορετικές γραμμές απεικονίζουν τα τρία ζεύγη συρμάτων.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ



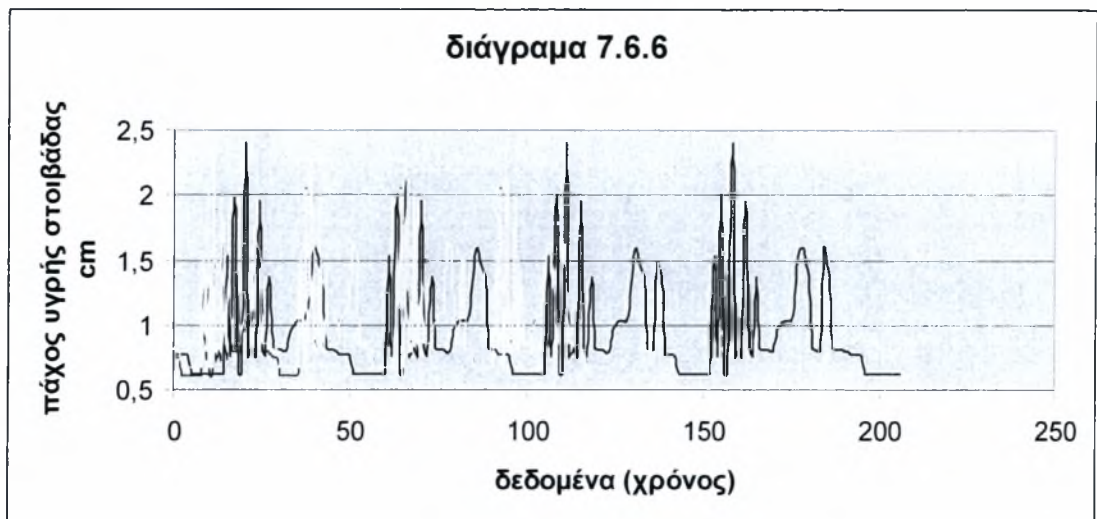
Σχήμα 7.6.4.Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα.Η συχνότητα δείγματος είναι 25ΚΗ και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0.030\text{m/s}$ και $U_{GS}=5,634\text{m/s}$

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον η στρωματωμένη ροή που συνοδεύεται από ακανόνιστα κύματα μεγάλου μήκους και πλάτους.Το πάχος της υγρής στοιβάδας σε αυτή τη περίπτωση φτάνει εως και στο ύψος της εσωτερικής διαμέτρου κατι το οποίο σημαίνει ότι το στάδιο αυτό είναι μεταβατικό αφού η στρωματωμένη ροή τείνει να εξελιχθεί σε διαλείπουσα.Επίσης για μεγάλες παροχές αέρα παρατηρούνται φαινόμενα εκνέφωσης. Ενώ το πάχος του υγρού είναι πολύ μικρό μόλις 0,2cm, σταγονίδια υγρού παρασύρονται στο πάνω μέρος του αγωγού.Λόγω του μικρού πάχους το διάγραμμα μπορεί να μην είναι ακριβές και για αυτό δε παρατίθεται.Για τη μελέτη αυτού του είδους της ροής απαιτούνται εφαπτομενικά συρματάκια.



Σχήμα 7.6.5.Στρωματωμένη ροή με τρισδιάστατα κύματα-διαλείπουσα ροή.Η συχνότητα δείγματος είναι 25ΚΗ και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0,061\text{m/s}$ και $U_{GS}=6,872\text{m/s}$.

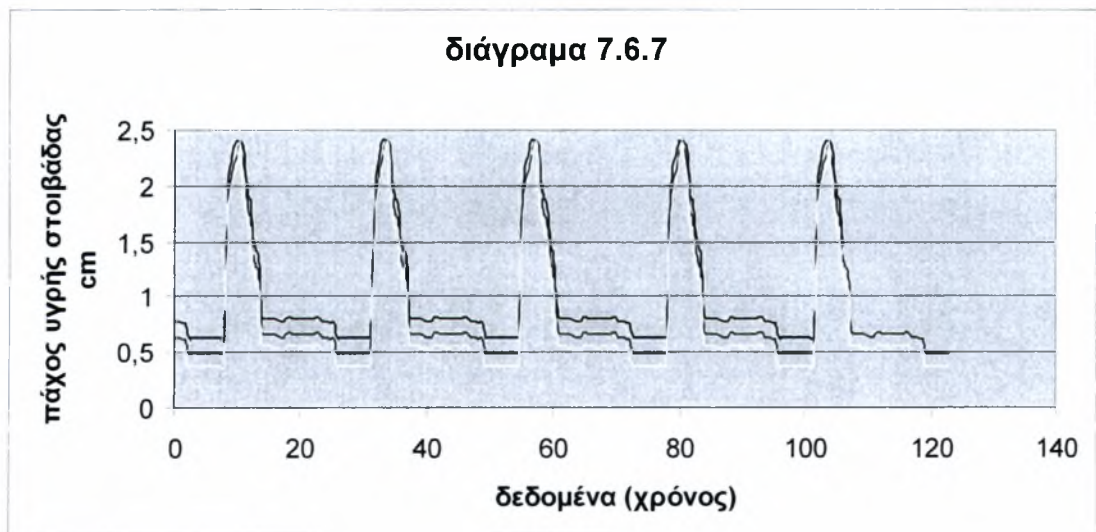
7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ



Σχήμα 7.6.6. Στρωματωμένη ροή με τρισδιάστατα κύματα με τάση προς διαλείπουσα ροή. Η συχνότητα δείγματος είναι 25KHz και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0,061\text{m/s}$ και $U_{GS}=6,872\text{m/s}$.

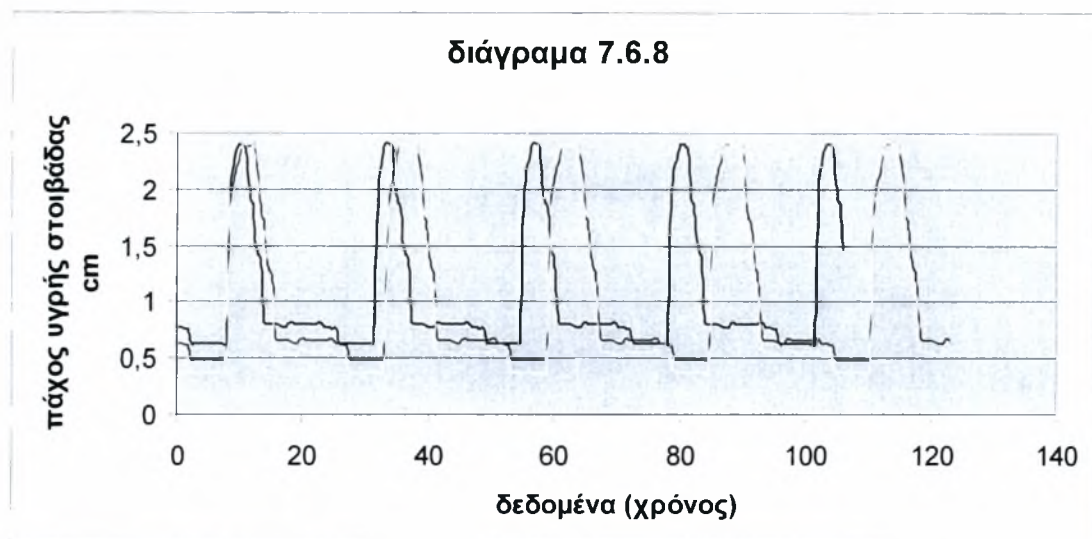
7.6.2 Διαλείπουσα ροή.

Κατά τη διαλείπουσα ροή υγρές μάζες κλείνουν τον αγωγό δηλαδή καταλαμβάνουν ολόκληρη τη διατομή του έχοντας μάλιστα μήκος που σε πολλές περιπτώσεις φτάνει αρκετά εκατοστά. Μετά την διέλευση των slugs ακολουθεί πτώση του πάχους της στοιβάδας αλλά βαθμιαία σε σχέση με τον σχηματισμό τους που είναι απότομος.



Σχήμα 7.6.7. Διαλείπουσα ροή. Η συχνότητα δείγματος είναι 25KHz και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0,154\text{m/s}$ και $U_{GS}=1,474\text{m/s}$.

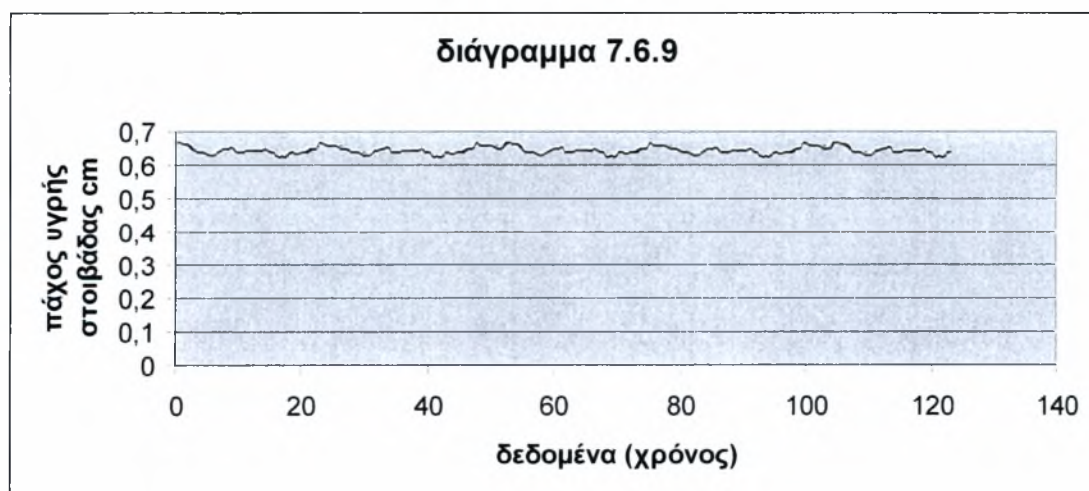
7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ



Σχήμα 7.6.8. Διαλείπουσα ροή. Η συχνότητα δείγματος είναι 25KHz και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0,154\text{m/s}$ και $U_{GS}=1,474\text{m/s}$. Είναι φανερό από αυτό το διάγραμμα το μήκος ενός slug.

7.6.3. Πάχος υγρής στοιβάδας στη ροή προς τα κάτω ($\theta=-0,7$).

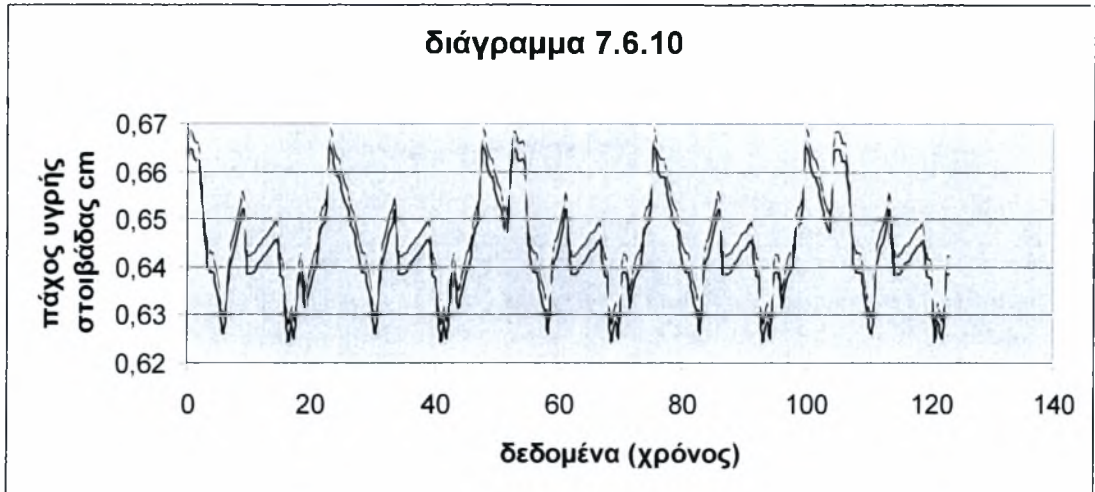
Στη ροή προς τα κάτω όπως φαίνεται παρακάτω και από τα διαγράμματα για τις ίδιες τιμές φαινομενικών ταχυτήτων σε σχέση με την οριζόντια ροή το πάχος της υγρής στοιβάδας είναι μικρότερο με αισθητή τη διαφορά για μικρές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης και καθώς αυτή μεγαλώνει μετά τα $9,0\text{m/s}$ δεν έχει διαφορά.



Σχήμα 7.6.9. Στρωματομένη ροή με διδιάστατα κύματα. Η συχνότητα δείγματος είναι 25KHz και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0,043\text{m/s}$ και $U_{GS}=2,385\text{m/s}$.

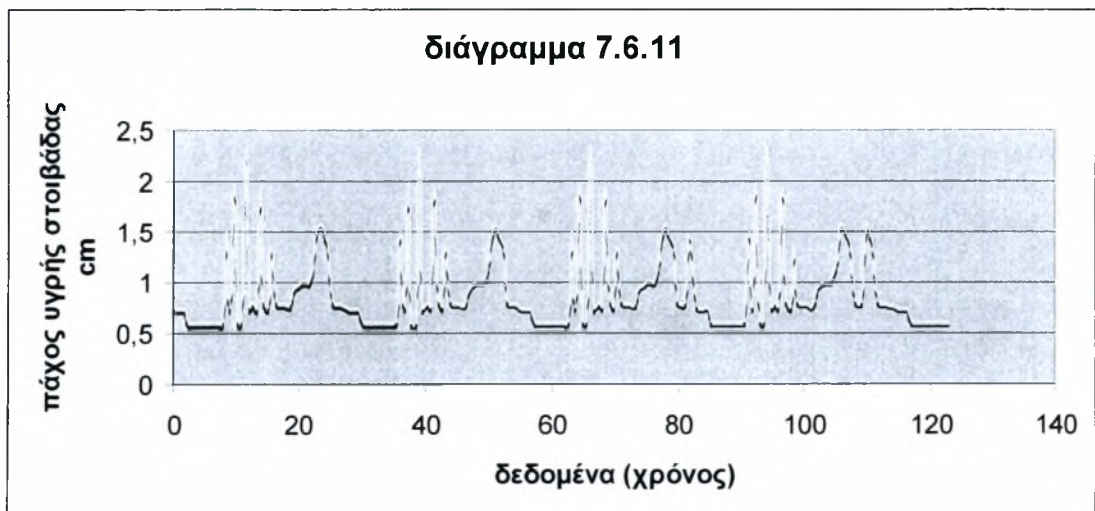
Όπως φαίνεται και από το άνωθι διάγραμμα στην ίδια περιοχή ροής και παίρνοντας μέτρηση υπό της ίδιες φαινομενικές ταχύτητες με την οριζόντια ροή το πάχος της υγρής στοιβάδας σε αυτή τη περίπτωση είναι μικρότερο.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ



Σχήμα 7.6.10.Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα.Η συχνότητα δείγματος είναι 25KH και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0.043\text{m/s}$ και $U_{GS}=2,385\text{m/s}$.

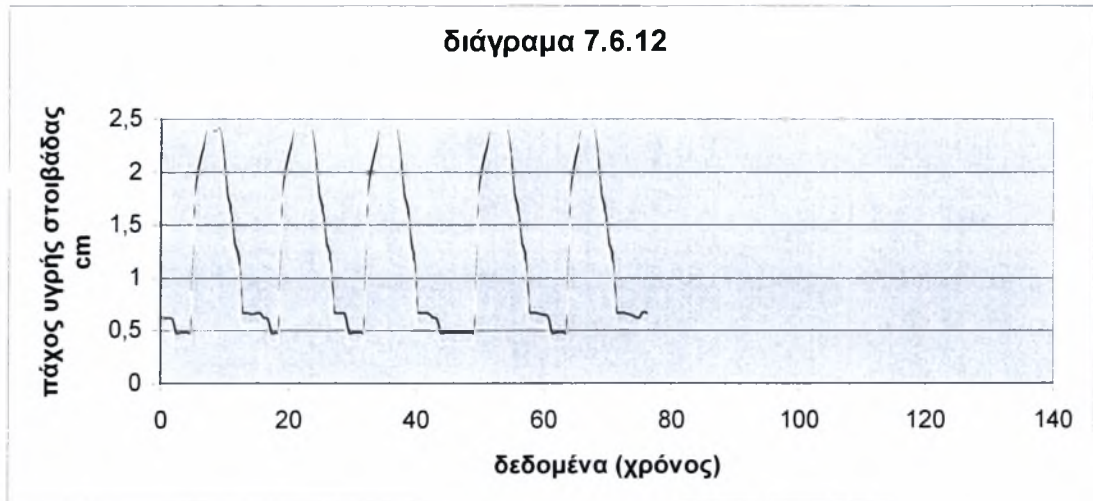
Όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα το οποίο είναι για περιοχή ροής στρωματωμένη με τρισδιάστατα κύματα μεγάλου μήκους και για φαινομενικές ταχύτητες ίδιες με εκείνες στην οριζόντια ροή, το γράφημα είναι πανομοιότυπο με το αντίστοιχο που προέκυψε από τις μετρήσεις στην οριζόντια ροή με τη διαφορά στο ύψος της υγρής στοιβάδας που σε αυτή την περίπτωση είναι μικρότερο χωρίς η διαφορά να είναι ιδιαίτερα αισθητή αφού η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φασής είναι $U_{GS}=6,872\text{m/s}$ που είναι σχετικά μεγάλη και όπως αναφέρθηκε καθώς αυτή πλησιάζει τα $9,0\text{m/s}$ δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην οριζόντια και την υπό κλίση ροή.



Σχήμα 7.6.11.Στρωματωμένη ροή με τρισδιάστατα κύματα.Η συχνότητα δείγματος είναι 25KH και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0,061\text{m/s}$ και $U_{GS}=6,872\text{m/s}$.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στη διαλείπουσα ροή όπως φαίνεται και από το διάγραμμα δε παρατηρείται διαφορά στο πάχος του υγρού. Αυτό που είναι φανερό και είναι χαρακτηριστικό της ροής υπό κλίση είναι ότι εδώ παρατηρούμε ότι οι υγρές μάζες σχηματίζονται γρηγορότερα και σε κοντινότερη απόσταση από το τμήμα ανάμιξης για ίδιες φαινομενικές ταχύτητες φάσεων των δύο ροών.



Σχήμα 7.6.12. Διαλείπουσα ροή. Η συχνότητα δείγματος είναι 25ΚΗ και οι φαινομενικές ταχύτητες είναι $U_{LS}=0,154\text{m/s}$ και $U_{GS}=1,474\text{m/s}$.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό τη βελτιστοποίηση της κατασκευής της πειραματικής διάταξης ώστε να εξετάσει τα φαινόμενα της διαφασικής ροής και τα καθεστώτα ροής καθώς και την επίδραση της μικρής κλίσης του αγωγού στα καθεστώτα με τη χρήση της αγωγιμομετρικής διάταξης και με οπτική παρατήρηση, για διαφασική ροή αέρα-νερού, με όσο το δυνατό λιγότερες ανεπιθύμητες επιδράσεις στη ροή από εξωτερικούς παράγοντες.

Για κάθε κλίση (0 και 0.7) του αγωγού κατασκευάστηκαν χάρτες καθεστώτων ροής και διαγράμματα του πάχους του υγρού σε σχέση με την αγωγιμότητα του υγρού και το σήμα που λαμβάνουμε.

Τα πρώτα συμπεράσματα που μπορούν να συναχθούν από το χάρτη καθεστώτων ροής για την οριζόντια ροή είναι: όσο αυξάνεται η ταχύτητα του νερού χρειάζεται μικρότερη παροχή αέρα για να αρχίσουν τα δισδιάστατα κύματα. Σε χαμηλές παροχές νερού απαιτείται μεγάλη παροχή του αέρα για να παρατηρηθούν τα δισδιάστατα κύματα και κύματα μεγάλου πλάτους. Ακόμη, στη διαστρωματωμένη ροή και για μικρές αέριες φαινομενικές ταχύτητες, η διαφασική ροή δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη και τα κύματα αυξάνουν συνεχώς σε πλάτος και μήκος κύματος όσο απομακρύνονται από το σημείο έναρξής τους.

Σύμφωνα με το χάρτη καθεστώτων ροής και τα διαγράμματα του πάχους της υγρής στοιβάδας, για την κλίση του αγωγού προς τα κάτω το πάχος υγρού είναι λεπτότερο απ' ότι στην οριζόντια ροή στις ίδιες φαινομενικές ταχύτητες υγρού. Η ανύψωση διαταραχών της διεπιφάνειας προς το πάνω μέρος του σωλήνα γίνεται όλο και πιο δύσκολη (και επομένως και η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή) καθώς αυξάνει η υγρή παροχή. Ο λόγος του πάχους της υγρής στοιβάδας προς την κορυφή του σωλήνα είναι φθίνουσα συνάρτηση της υγρής παροχής. Για τη ροή προς τα κάτω, η φυσική αστάθεια της διεπιφάνειας εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της ροής λόγω της βαρύτητας ακόμη και εάν δεν υπάρχει αέρια φάση. Κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην οριζόντια ροή και στις ανοδικές κλίσεις του αγωγού. Η μετάβαση από διαχωρισμένη ροή σε διαλείπουσα πραγματοποιείται σε μεγάλες ταχύτητες υγρού, ενώ η μετάπτωση μεταξύ διαχωρισμένης και δακτυλιοειδούς παρατηρείται στις ίδιες υψηλές ταχύτητες όπως και στην οριζόντια ροή. Επίσης για φαινομενικές ταχύτητες του αερίου πάνω από $UGS=9\text{m/s}$ δεν έχουμε καμμία διαφοροποίηση με την οριζόντια ροή. Η μετάπτωση από τη διαλείπουσα ροή στη δακτυλιοειδή ροή επηρεάζεται ελάχιστα από την κλίση του αγωγού. Για τη μετάπτωση από τη λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

με κύματα δεν μπορεί να καθορισθεί όπως στην οριζόντια ροή, γιατί τα κύματα ανάλογα την κλίση μπορεί να αποκτήσουν ταχύτητες μεγάλες με αποτέλεσμα να σχηματίσουν κύματα χωρίς τη δύναμη της αέριας φάσης.

Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στοιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διάφορες ταχύτητες τόσο του αέρα όσο και του νερού καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα περοχών ροής. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διαλείπουσα ροή η οποία παρουσιάζει απότομες μεταβολές του πάχους της υγρής στοιβάδας και της πίεσης.

Η αγωγιμομετρική μέθοδος ήταν κατάλληλη για όλες της περιοχές ροής εκτός της δακτυλιοειδούς όπου απαιτείται η χρήση αλλης μορφής συρμάτων. η ευαισθησία της μεθόδου ήταν αρκετά ικανοποιητική ακόμα και για μικρά πάχη όπου συνίσταται η χρήση εφαπτομενικών συρμάτων.

Με τη χρήση της αγωγιμομετρικής διάταξης επιβεβαιώθηκε η γραμμικότητα που συνδέει την αγωγή του ρεύματος μεταξύ των συρμάτων με το πάχος της υγρής στοιβάδας ενώ καταγάφηκαν οι μεταβολές του που χαρακτηρίζουν αντίστοιχα πρότυπα ροής. Έτσι διακρίνονται τα διάφορα είδη ροής και οι μεταπτώσεις των περιοχών και οι διαταραχές που δημιουργούνται από τις αυξομειώσεις των ταχυτήτων φασεων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε να γίνουν ταυτόχρονες μετρήσεις για το ύψος της υγρής στοιβάδας και τις μεταβολές της πίεσης όπως και εξέταση των slugs ως προς τη δυναμική συμπεριφορά τους. Ακόμη συνίσταται μέτρηση του πάχους της δακτυλιοειδούς ροής όπου απαιτείται η χρήση ειδικών συρμάτων. Επίσης να γίνει μέτρηση της πτώσης πίεσης για διάφορες κλίσεις του αγωγού. Μία άλλη πρόταση για μελλοντική διπλωματική εργασία θα ήταν να γίνει η μελέτη της επίδρασης του ιξώδους στα καθεστώτα ροής για διάφορες κλίσεις του αγωγού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ανδρίτσος Ν. και Μποντόζογλου Β., «Σημειώσεις: Διφασική Ροή και Μετάδοση Θερμότητας», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 2006.
2. Αστερήs Γ. Θ. «Μελέτη διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό με χρήση αγωγιμομετρικής διάταξης». Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 1998.
3. Καραμάνος Κ. «Διφασική ροή αέρα-νερού σε οριζόντιο αγωγό». Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 1996.
- Παράς Σ.Β. «Μελέτη δακτυλιοειδούς διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό». Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημ. Μηχ. Α.Π.Θ., 1991.
4. Πλιάτσος Π. «Μελέτη της επίδρασης του ιξώδους στα χαρακτηριστικά της οριζόντιας διφασικής ροής». Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 2004.
5. A.E. Dukler, M. Wicks and R. G. Cleveland, *AIChE J.*, 10 (1964) 44.
6. Agrawal, S.S., G.A. Gregory and G.W. Govier, *Can.J. Chem. Eng.*, **51**, 280, 1973.
- Al-Sheikh, J.N., Prediction of Flow Patterns in Horizontal Two-Phase Pipe Flow. *Can.J. Chem. Engng.*, **48**, pp 21-29, 1970.
7. Alves, G.E. Concurrent Liquid-Gas Flow in a Pipeline Contractor. *Chem. Eng.*, **50**,pp 449-456, 1954.
8. Andritsos N., and T.J. Hanratty, Interfacial or interfacial waves in stratified gas-liquid flow. *AIChE J.*, **33**, 444-454, 1987.
9. Andritsos N., "Effect of pipe diameter and liquid viscosity on horizontal stratified flow", Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1986.
10. Baker, O. Simultaneous Flow in Oil and Gas. *Oil and Gas J.*, **53**, 185-195, 1954.
11. Barnea, D. "Transition from annular flow and from dispersed bubble flow-unified models for the whole range of pipe inclinations", *Int. J. Multiphase Flow* **12**, pp. 733-744, 1986.
12. Barnea, D., O. Shoham, Y. Taitel "Flow pattern Characterization in two phase flow by electrical conductance probe", *Int. J. Multiphase Flow* **6**, pp. 387-397, 1980.
13. Barnea, D., O. Shoham, and Taitel, Y., "Flow pattern transition for downward inclined two phase flow; Horizontal to Vertical", *Chemical Engineering Science*, **37**, pp. 735-740, 1982.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

14. Barnea, D., O. Shoham, Taitel, Y., and Dukler A.E. "Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes". *Int. J. Multiphase Flow*, **6**, pp. 217-225, 1979.
15. Bergelin, O.P. and C. Gazley, Concurrent Gas-Liquid Flow, I.Flow in Horizontal Tubes. Proc Heat Transfer and Fluid Mech. Inst., pp. 5-18 Berkeley CA, 1949.
16. Bonnecaze, R.H., W. Erskine, JR., and E.J. Greskovich, "Hold up and Pressure Drop for Two-Phase Slug Flow in Inclined Pipelines", *AIChE J.*, **17**, pp 1109-1113, 1971.
17. Friedel, L. Improved Friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow. European Two Phase Flow Group Meet., Ispra, Italy, paper E2, 1979.
18. Govier, G. W. and Omer, M. M. Horizontal Pipeline Flow of Air-Water Mixture. *Can. J. Chemical Engineering*, 40 (3), pp. 93-104, 1962.
19. Govier, G. W. and Aziz, K. "The Flow of Complex Mixtures in Pipes," Van Nostrand, 1972.
20. Gregory, G. A., Nicholson, M.K. and Aziz, K. Correlation of the Liquid Volume Fraction in the Slug for Horizontal Gas-Liquid Slug Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, **4**, pp. 33-39, 1978.
21. Hewitt, G.F., and D.N. Roberts (1969) "Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flash photography." Rept AERE-M2159, UKAEA, Harwell, 1969.
22. Hoogedoorn, C.J. Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. *Chem Engng Sci*, **9**, pp 205-217, 1959.
23. Hubbard, M.G. and A.E. Dukler, paper presented at 65th Nat. Mtg. of A.I.Ch.E., Tampa, Fla., May 1968.
24. Johnson, H.A. and A.H. Abou-Sabe. Heat Transfer and Pressure Drop for Turbulent Flow of Air-Water Mixtures in a Horizontal Pipe. *Trans ASME*, **74**, pp. 977-987, 1952.
25. Kokal, S.L. and Stanislav, J.F. An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes – I.Flow patterns", *Chem. Eng. Sci*, **44**, pp. 681-693, 1989.
26. Kosterin , S.I. An Investigation of the Influence of Diameter and Inclination of a Tube on the Hydraulic Resistance and Flow Structure of Gas-Liquid Mixtures. *Izvest. Akad. Nauk. USSR*, 12, pp 1824-1830, 1949.

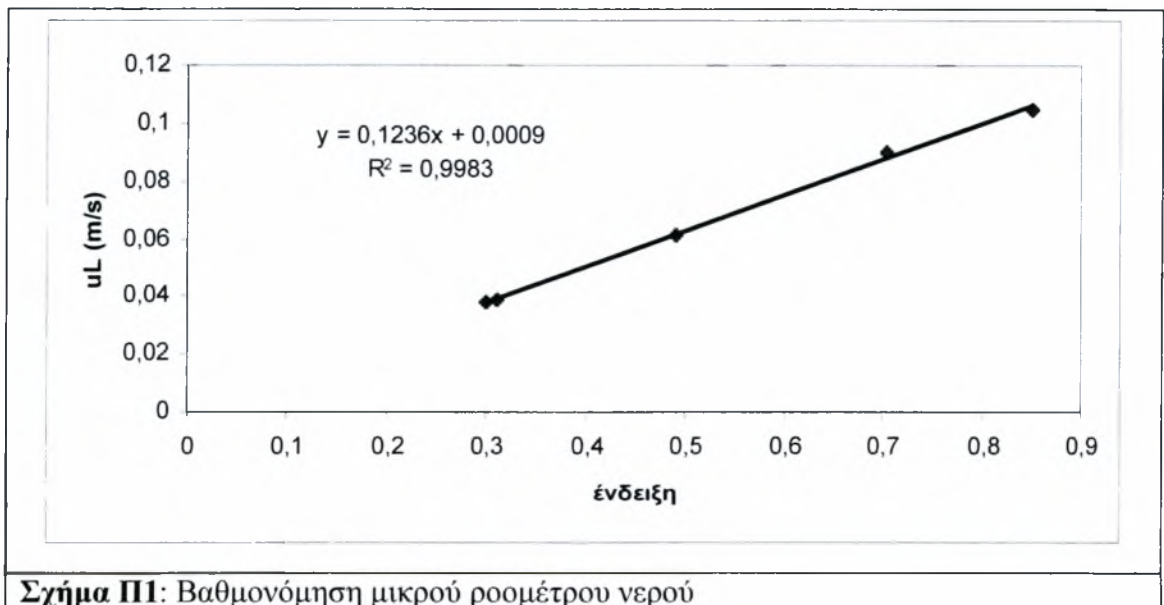
27. Laurinat, J.E. "Studies of the effect of pipe size on horizontal annular two-phase flows", Ph. D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1982.
Laurinat, J.E., Hantratty, T.J., and J.C. Dallman, Pressure drop and film height measurements for annular gas-liquid flow. *Int. J. Multiphase Flow*, **10**, 341-356, 1984.
28. Lin, P.Y., and T.J., Hantratty Effects of pipes diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, **13**, 549-563, 1987.
Lin, P.Y., and T.J., Hantratty Detection of slug flow from pressure measurements *Int. J. Multiphase Flow*, **13**, 13-21, 1987.
29. Lockhart, R.W. and R.C. Martinelli. Proposed correlation of data for isothermal two phase, two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Progr.*, **45**, pp. 39-48, 1949.
30. Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K. "A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, **1**, 537-553, 1974.
31. Nencini, F., and Andreussi, P. Studies of the behaviour of disturbance waves in annular two-phase flow. *Can. J. Chem. Eng.*, **60** (4), pp. 459-465, 1982.
32. Oliemans, R. V. A., Pots, B. F., and Trope, N. Modeling of Annular Dispersed Two-Phase Flow in Vertical Pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, **12**, 711-732, 1986.
33. Ouyangand , L-B, and Aziz, K. A mechanistic model for gas-liquid flow in horizontal wells with radial influx or outflux. *Petroleum Science and Technology*, 20(1&2), 191-222, 2002.
34. Petalas, N. and Aziz, K., "A mechanistic model for multiphase flow in pipes", *J. Can. Pet. Technol.*, 39, pp. 43-55, 2000.
35. Sanchez, F. and J.M. Alvarez . Developments in geothermal energy in Mexico part twenty-four: Two-Phase flow-pressure dropin inclined pipes for geothermal applications. *Heat Recovery Systems & CHP*, 9, pp. 343-355, 1989.
36. Scott, D.S. "Properties of co-current gas liquid flow." In *Advances in Chemical Engineering*, Vol. 4, Academic Press, New York, p. 200, 1963.
37. Spedding, P.L., Chen J.J.J. and Nguyen., "Pressure drop in two phase gas-liquid flow in inclined pipes.", *Int. J. Multiphase Flow*, 8, pp. 407-431, 1982.
38. Taitel, Y and Dukler, A.E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near-horizontal gas-liquid flow". *AIChE J*, 26, 47-55, 1976.
Wallis, G.B. *One-dimensional Two-phase Flow*. McGraw-Hill, New York, 1969.

39. Weber, M. E., "Drift in Intermittent Two-Phase Flow in Horizontal Pipes," *Can. J. Chem. Eng.*, **59**, pp. 398-399, June 1981.
40. Weisman J. and Kang, S. Y. "Flow Pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines." *Int. J. Multiphase Flow*, **7**, 271-291, 1981.
41. Weisman J. Dunkan, D., Gibson, J. and Crawford, Z. Effect of fluid properties and pipe diameter on two phase flow patterns in horizontal lines. *Int. J. Multiphase Flow*, **5**, 437-461, 1979.
42. Whalley, P.B. "Two-Phase Flow and Heat Transfer", Oxford University, 1996.
- Wong T.N. and Yau, Y.K. Flow patterns in two-phase air-water flow. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, **24**, pp. 111-118, 1997.
43. White, P.D. and R.L. Huntington, Horizontal Co-Current Two-Phase Flow of Fluid in Pipe Lines. *The Petroleum Engineer* , 27(9), p 40, 1958.
44. Xiao, J.J., Shoham, O., Brill, J. P. A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Pipelines. Paper SPE 20631, 65th ATC&E of SPE, New Orleans, September 23-26, 1990.
45. Zuber, N., and Findlay, J.A., "Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems. *J. Heat Transfer, Trans. ASME, Ser. C*, **87**, pp. 453-468 (1965).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ ΝΕΡΟΥ

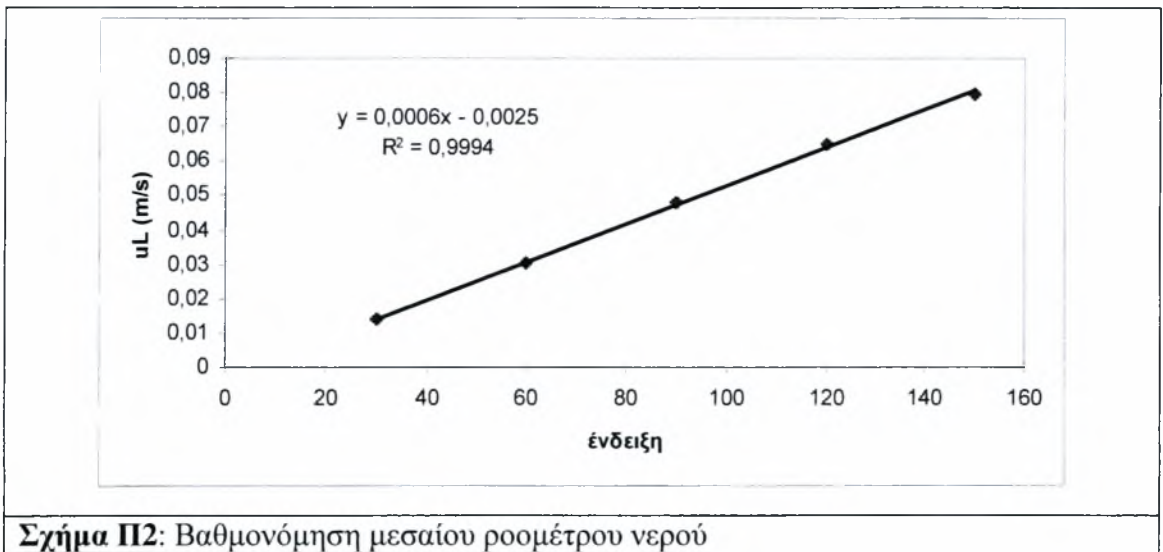
ΜΙΚΡΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΝΕΡΟΥ					
Ένδειξη	Χρόνος (s)	Μάζα (Kg)	Όγκος (m ³)	Q (m ³ /s)	U _{LS} (m/s)
0,3	120	2,305	0,00231	1,925E-05	0,0379
0,31	120	2,345	0,00235	1,958E-05	0,0386
0,49	90	2,795	0,0028	3,112E-05	0,0614
0,705	60	2,73	0,0027	4,559E-05	0,0899
0,85	60	3,17	0,0032	5,294E-05	0,1045



Σχήμα Π1: Βαθμονόμηση μικρού ροομέτρου νερού

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

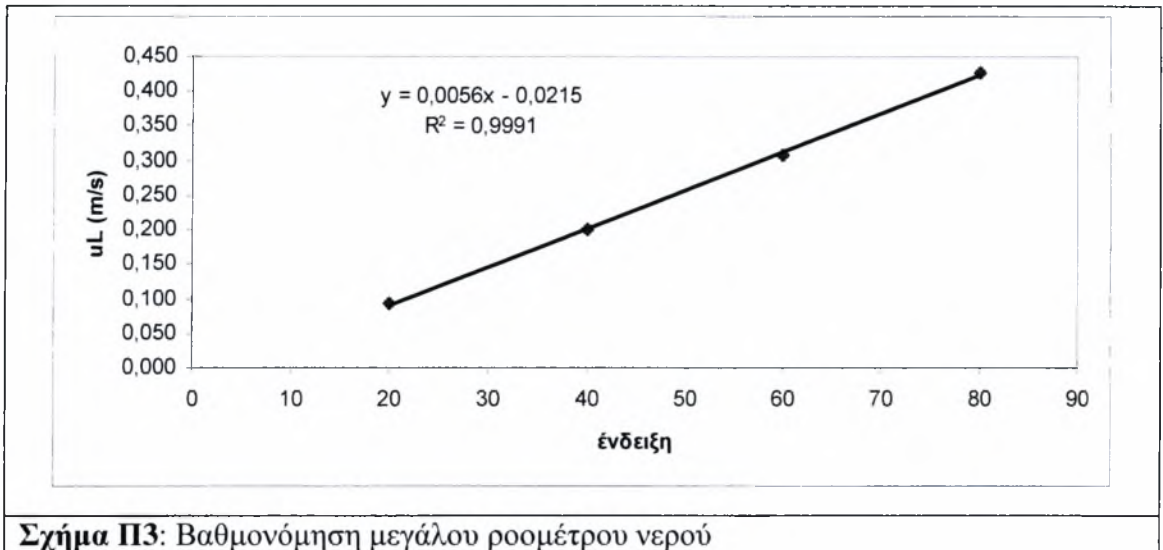
ΜΕΣΑΙΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΝΕΡΟΥ					
Ένδειξη	Χρόνος (s)	Μάζα (Kg)	Όγκος (m ³)	Q (m ³ /s)	U _{LS} (m/s)
30	60	0,420	4,21E-04	7,01E-06	0,014
60	60	0,923	9,24E-04	1,54E-05	0,030
90	60	1,455	1,46E-03	2,43E-05	0,048
120	60	1,960	1,96E-03	3,27E-05	0,065
150	60	2,420	2,42E-03	4,04E-05	0,080



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΕΓΑΛΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΝΕΡΟΥ

Ένδειξη	Χρόνος (s)	Μάζα (Kg)	Όγκος (m ³)	Q (m ³ /s)	U _{LS} (m/s)
20	30	1,395	1,398E-03	4,660E-05	0,092
40	30	3,050	3,056E-03	1,019E-04	0,201
60	30	4,650	4,660E-03	1,553E-04	0,307
80	30	6,491	6,504E-03	2,168E-04	0,428

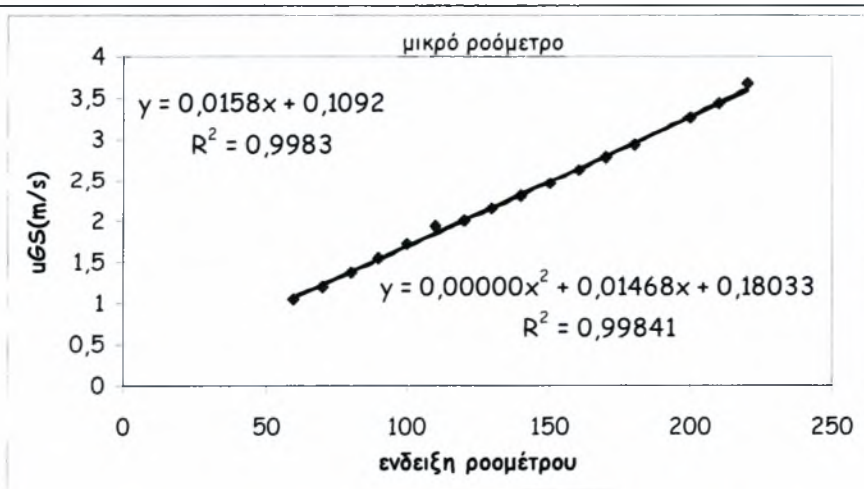


Σχήμα Π3: Βαθμονόμηση μεγάλου ροομέτρου νερού

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ ΑΕΡΑ

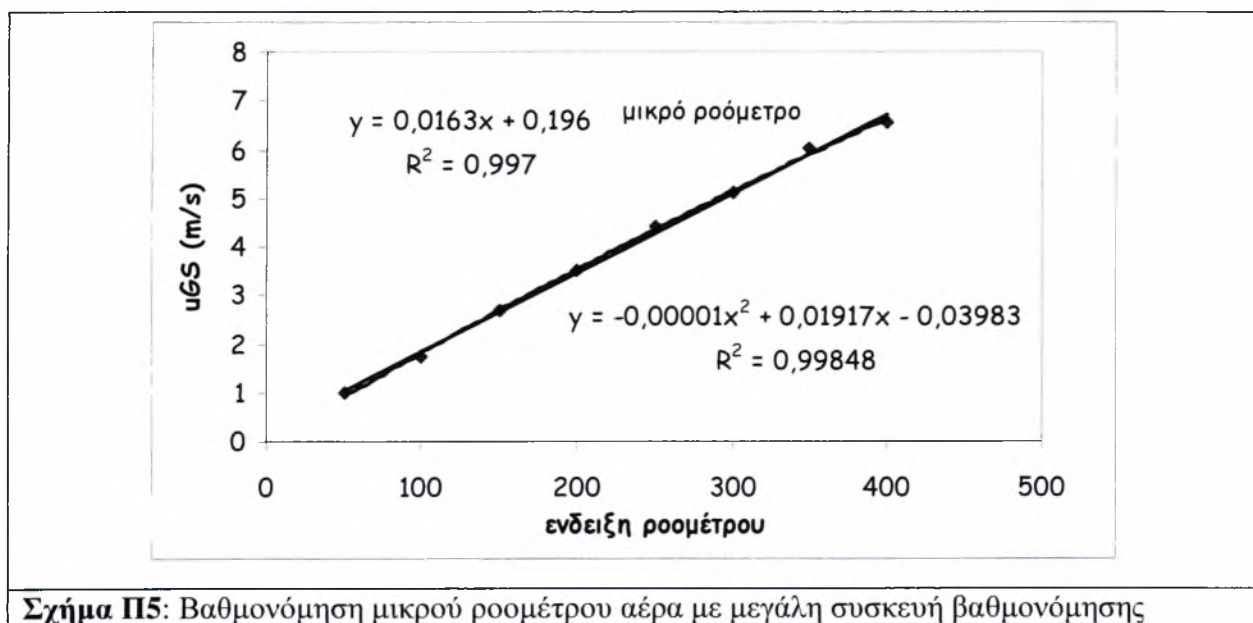
ΜΙΚΡΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΑΕΡΑ										
Ενδειξη	P (bar)	Όγκος (m ³)	t(sec)			t _{aver} (sec)	Q (m ³ /s)	U _{GS} (m/s)	ΔΙΟΡΘΩΣΗ	
			1	2	3				Q _{act} (m ³ /s)	U _{GS} (m/s)
60	0	0,02	38,69	37,38	40,60	38,89	0,00051	1,04766	0,000514	1,04766
70	0	0,02	33,37	33,93	34,34	33,88	0,00059	1,20259	0,000590	1,20259
80	0	0,02	29,16	29,59	30	29,58	0,00068	1,37725	0,000676	1,37725
90	0	0,02	25,94	26,15	26,60	26,23	0,00076	1,55332	0,000762	1,55332
100	0	0,02	23,07	23,69	24,25	23,67	0,00084	1,72132	0,000845	1,72132
110	0	0,02	20,93	21,19	21,28	21,13	0,00095	1,92793	0,000946	1,92793
120	0,05	0,02	19,25	19,94	20,22	19,80	0,00101	2,05741	0,000986	2,00783
130	0,1	0,02	17,79	18,22	18,41	18,14	0,0011	2,24607	0,001051	2,14154
140	0,12	0,02	16,47	16,78	17	16,75	0,00119	2,43246	0,001128	2,29846
150	0,15	0,02	15,19	15,47	15,71	15,46	0,00129	2,63599	0,001207	2,45808
160	0,16	0,02	14,16	14,44	14,59	14,40	0,00139	2,83008	0,001290	2,62766
170	0,18	0,02	13,19	13,53	13,84	13,52	0,00148	3,01358	0,001362	2,77423
180	0,20	0,02	12,5	12,66	12,87	12,68	0,00158	3,21407	0,001440	2,93403
200	0,25	0,02	11,1	11,07	11,31	11,31	0,00179	3,65087	0,001603	3,26543
210	0,27	0,02	10,41	10,57	10,66	10,66	0,0019	3,86318	0,001683	3,42802
220	0,32	0,02	9,65	9,56	9,82	9,82	0,00207	4,21051	0,001799	3,66478



Σχήμα Π4: Βαθμονόμηση μικρού ροομέτρου αέρα με μικρή συσκευή βαθμονόμησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΙΚΡΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΑΕΡΑ							
Ένδειξη	P (bar)	Όγκος (m ³)	t _{aver} (sec)	Q (m ³ /s)	U _{GS} (m/s)	ΔΙΟΡΘΩΣΗ	
						Qact (m ³ /s)	U _{GS} (m/s)
50	0	0,01	20,72	0,00048	0,9832	0,000483	0,9832
100	0	0,01	11,90	0,00084	1,71192	0,000840	1,71192
150	0	0,02	15,19	0,00132	2,68227	0,001317	2,68227
200	0	0,02	11,59	0,00173	3,51542	0,001726	3,51542
250	0,05	0,02	9,00	0,00222	4,52707	0,002169	4,41797
300	0,1	0,03	11,40	0,00263	5,36101	0,002509	5,11152
350	0,15	0,03	9,47	0,00317	6,45359	0,002954	6,018
400	0,18	0,03	8,60	0,00349	7,10645	0,003211	6,54202

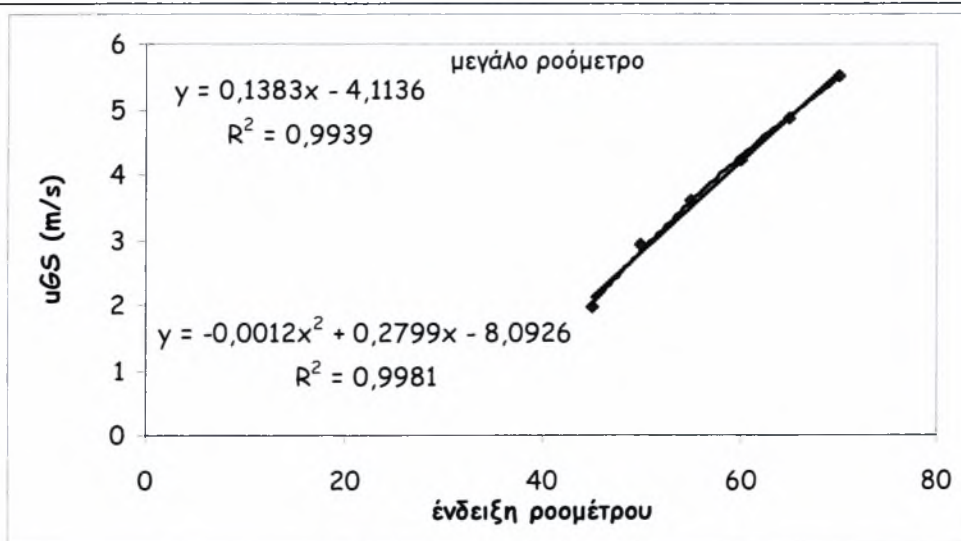


Σχήμα Π5: Βαθμονόμηση μικρού ροομέτρου αέρα με μεγάλη συσκευή βαθμονόμησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΕΓΑΛΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΑΕΡΑ

Ένδειξη	P (bar)	Όγκος (m ³)	t(sec)			t _{aver} (sec)	Q (m ³ /s)	U _{GS} (m/s)	ΔΙΟΡΘΩΣΗ	
			1	2	3				Q _{act} (m ³ /s)	U _{GS} (m/s)
45	0,05	0,02	20,54	20,29	20,15	20,327	0,00098	2,00444	0,000960	1,95614
50	0,15	0,02	13,12	13,12	12,90	13,047	0,00153	3,12292	0,001429	2,91214
55	0,25	0,02	10,19	10,19	10,06	10,147	0,00197	4,01547	0,001763	3,59155
60	0,35	0,02	8,28	8,28	8,37	8,310	0,00241	4,90297	0,002071	4,2198
65	0,48	0,02	6,87	6,87	6,93	6,890	0,00290	5,91345	0,002386	4,86083
70	0,60	0,02	5,81	5,87	5,88	5,853	0,00342	6,96076	0,002701	5,50297

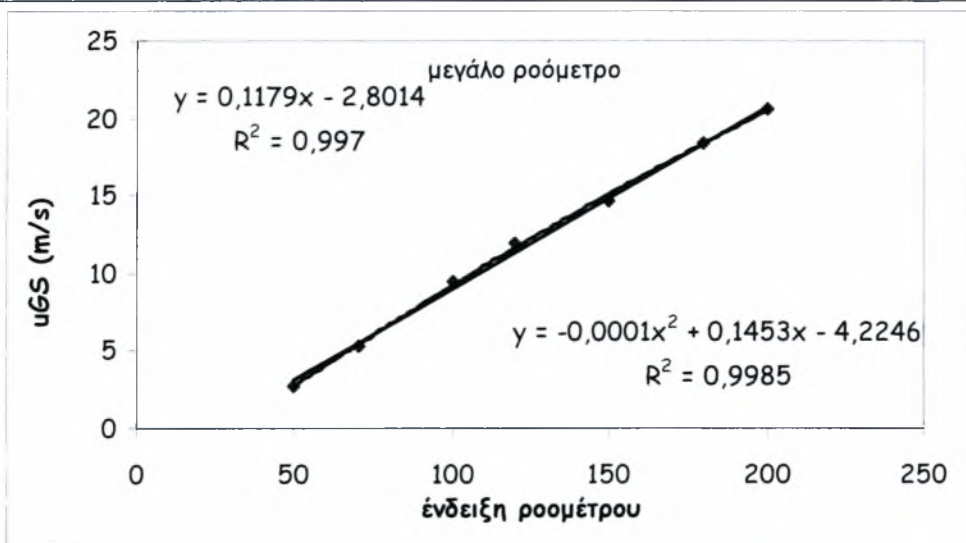


Σχήμα Π6: Βαθμονόμηση μεγάλου ροομέτρου αέρα με μικρή συσκευή βαθμονόμησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΕΓΑΛΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΑΕΡΑ

Ένδειξη	P (bar)	Όγκος (m ³)	t _{aver} (sec)	Q (m ³ /s)	U _{GS} (m/s)	ΔΙΟΡΘΩΣΗ	
						Q _{act} (m ³ /s)	U _{GS} (m/s)
50	0	0,01	7,5	0,00133	2,71624	0,001333	2,71624
70	0	0,02	7,7	0,00260	5,29139	0,002597	5,29139
100	0	0,03	6,44	0,00466	9,48998	0,004658	9,48998
120	0	0,03	5,15	0,00583	11,8671	0,005825	11,8671
150	0	0,04	5,56	0,00719	14,656	0,007194	14,656
180	0	0,04	4,44	0,00901	18,353	0,009009	18,353
200	0	0,05	4,94	0,01012	20,6193	0,010121	20,6193



Σχήμα Π7: Βαθμονόμηση μεγάλου ροομέτρου αέρα με μεγάλη συσκευή βαθμονόμησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ ΝΕΡΟΥ

Μικρο Ροομετρο	
ΕΝΔΕΙΞΗ	uL
0,1	0,01325
0,15	0,019425
0,2	0,0256
0,25	0,031775
0,3	0,03795
0,35	0,044125
0,4	0,0503
0,45	0,056475
0,5	0,06265
0,55	0,068825
0,6	0,075
0,65	0,081175
0,7	0,08735
0,75	0,093525
0,8	0,0997
0,85	0,105875
0,9	0,11205
0,95	0,118225
1	0,1244

Μεσαίο Ροομετρο			
ΕΝΔΕΙΞΗ	uL	ΕΝΔΕΙΞΗ	uL
20	0,0095	110	0,0635
21	0,0101	111	0,0641
22	0,0107	112	0,0647
23	0,0113	113	0,0653
24	0,0119	114	0,0659
25	0,0125	115	0,0665
26	0,0131	116	0,0671
27	0,0137	117	0,0677
28	0,0143	118	0,0683
29	0,0149	119	0,0689
30	0,0155	120	0,0695
31	0,0161	121	0,0701
32	0,0167	122	0,0707
33	0,0173	123	0,0713
34	0,0179	124	0,0719
35	0,0185	125	0,0725
36	0,0191	126	0,0731
37	0,0197	127	0,0737
38	0,0203	128	0,0743
39	0,0209	129	0,0749
40	0,0215	130	0,0755
41	0,0221	131	0,0761
42	0,0227	132	0,0767

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

43	0,0233	133	0,0773
44	0,0239	134	0,0779
45	0,0245	135	0,0785
46	0,0251	136	0,0791
47	0,0257	137	0,0797
48	0,0263	138	0,0803
49	0,0269	139	0,0809
50	0,0275	140	0,0815
51	0,0281	141	0,0821
52	0,0287	142	0,0827
53	0,0293	143	0,0833
54	0,0299	144	0,0839
55	0,0305	145	0,0845
56	0,0311	146	0,0851
57	0,0317	147	0,0857
58	0,0323	148	0,0863
59	0,0329	149	0,0869
60	0,0335	150	0,0875
61	0,0341	151	0,0881
62	0,0347	152	0,0887
63	0,0353	153	0,0893
64	0,0359	154	0,0899
65	0,0365	155	0,0905
66	0,0371	156	0,0911
67	0,0377	157	0,0917
68	0,0383	158	0,0923
69	0,0389	159	0,0929
70	0,0395	160	0,0935
71	0,0401		
72	0,0407		
73	0,0413		
74	0,0419		
75	0,0425		
76	0,0431		
77	0,0437		
78	0,0443		
79	0,0449		
80	0,0455		
81	0,0461		
82	0,0467		
83	0,0473		
84	0,0479		
85	0,0485		
86	0,0491		
87	0,0497		
88	0,0503		
89	0,0509		
90	0,0515		
91	0,0521		
92	0,0527		
93	0,0533		
94	0,0539		

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

95	0,0545
96	0,0551
97	0,0557
98	0,0563
99	0,0569
100	0,0575
101	0,0581
102	0,0587
103	0,0593
104	0,0599
105	0,0605
106	0,0611
107	0,0617
108	0,0623
109	0,0629

Μεγάλο Ροομετρο

ΕΝΔΕΙΞΗ	uL	ΕΝΔΕΙΞΗ	uL
10	0,0345	60	0,3145
11	0,0401	61	0,3201
12	0,0457	62	0,3257
13	0,0513	63	0,3313
14	0,0569	64	0,3369
15	0,0625	60	0,3145
16	0,0681	61	0,3201
17	0,0737	62	0,3257
18	0,0793	63	0,3313
19	0,0849	64	0,3369
20	0,0905	65	0,3425
21	0,0961	66	0,3481
22	0,1017	67	0,3537
23	0,1073	68	0,3593
24	0,1129	69	0,3649
25	0,1185	70	0,3705
26	0,1241	71	0,3761
27	0,1297	72	0,3817
28	0,1353	73	0,3873
29	0,1409	74	0,3929
30	0,1465	75	0,3985
31	0,1521	76	0,4041
32	0,1577	77	0,4097
33	0,1633	78	0,4153
34	0,1689	79	0,4209
35	0,1745	80	0,4265
36	0,1801	81	0,4321
37	0,1857	82	0,4377
38	0,1913	83	0,4433
39	0,1969	84	0,4489
40	0,2025	85	0,4545
41	0,2081	86	0,4601
42	0,2137	87	0,4657

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

43	0,2193	88	0,4713
44	0,2249	89	0,4769
45	0,2305	90	0,4825
46	0,2361	91	0,4881
47	0,2417	92	0,4937
48	0,2473	93	0,4993
49	0,2529	94	0,5049
50	0,2585	95	0,5105
51	0,2641	96	0,5161
52	0,2697	97	0,5217
53	0,2753	98	0,5273
54	0,2809	99	0,5329
55	0,2865	100	0,5428
56	0,2921		
57	0,2977		
58	0,3033		
59	0,3089		

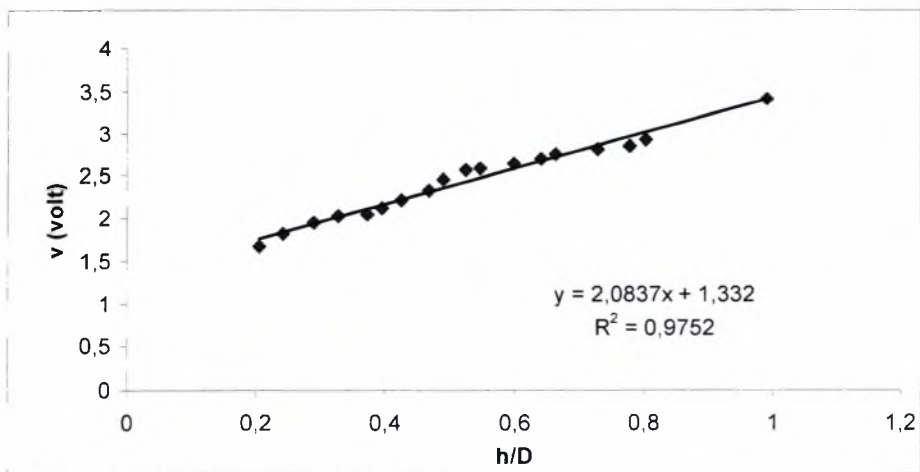
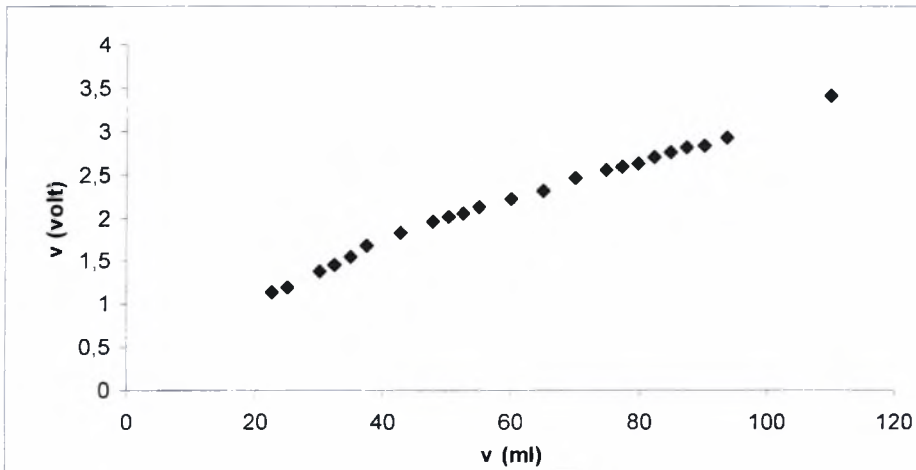
ΒΑΘΜΟΝΟΜΙΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ

L=	0,24	m
D=	0,024	m
A=	0,00045	m ²
V=	0,00011	m ³
ρ=	1000	kg/m ³
m=	0,11	kg

Ζεύγος I		3,710			
offset	0,1				
v (ml)	V (v)	V (v)	A _L	A _L /A	h/D
22,6	1,231	1,131	9,4167E-05	0,2082	
25,1	1,289	1,189	0,00010458	0,2312	
30,1	1,482	1,382	0,00012542	0,2772	
32,5	1,544	1,444	0,00013542	0,2993	
35	1,646	1,546	0,00014583	0,3224	
37,50	1,767	1,667	0,00015625	0,3454	0,2039
42,60	1,918	1,818	0,0001775	0,3924	0,2422
47,7	2,045	1,945	0,00019875	0,4393	0,2904
50,1	2,113	2,013	0,00020875	0,4614	0,328
52,5	2,141	2,041	0,00021875	0,4835	0,3719
55	2,213	2,113	0,00022917	0,5066	0,3943

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

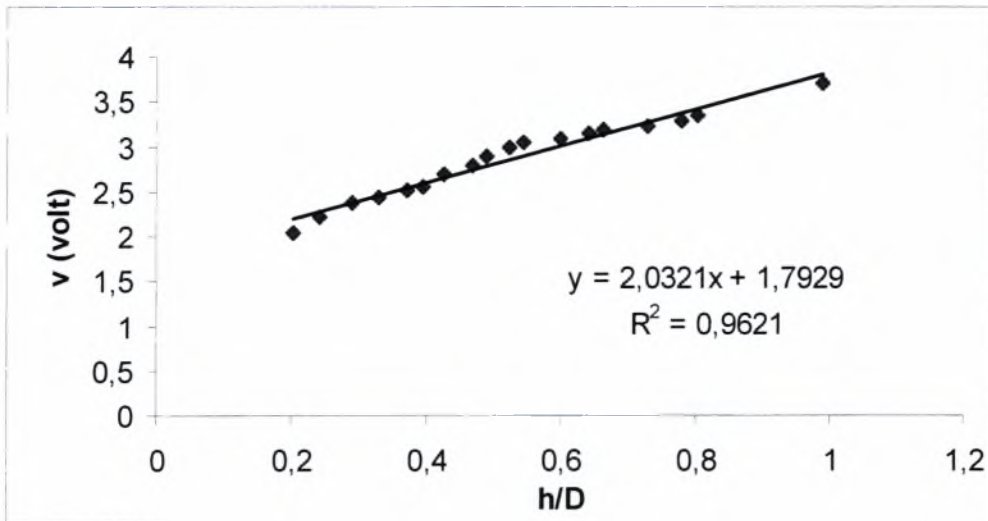
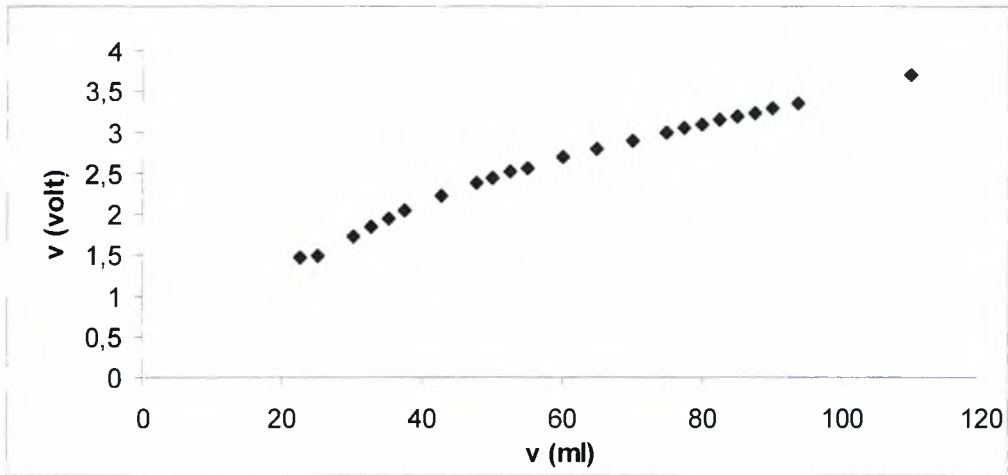
60	2,306	2,206	0,00025	0,5526	0,4252
65	2,409	2,309	0,00027083	0,5987	0,4674
70	2,549	2,449	0,00029167	0,6447	0,489
74,9	2,658	2,558	0,00031208	0,6899	0,5245
77,3	2,686	2,586	0,00032208	0,7120	0,5455
79,8	2,732	2,632	0,0003325	0,7350	0,5989
82,3	2,8	2,7	0,00034292	0,7580	0,6421
84,8	2,85	2,75	0,00035333	0,7810	0,6641
87,4	2,904	2,804	0,00036417	0,8050	0,7295
90	2,932	2,832	0,000375	0,8289	0,7782
93,7	3,02	2,92	0,00039042	0,8630	0,8031
110	3,504	3,404	0,00045833	1,0131	0,99



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ζεύγος II		3,750	
offset	0,092		
v (ml)	V (v)	V (v)	
22,6	1,56	1,468	-0,02
25,1	1,58	1,488	-0,243
30,1	1,823	1,731	-0,112
32,5	1,935	1,843	-0,1
35	2,035	1,943	-0,095
37,50	2,13	2,038	-0,177
42,60	2,307	2,215	-0,161
47,70	2,468	2,376	-0,069
50,10	2,537	2,445	-0,067
52,50	2,604	2,512	-0,05
55,00	2,654	2,562	-0,126
60,00	2,78	2,688	-0,105
65,00	2,885	2,793	-0,102
70,00	2,987	2,895	-0,098
74,90	3,085	2,993	-0,049
77,30	3,134	3,042	-0,048
79,80	3,182	3,09	-0,049
82,3	3,231	3,139	-0,053
84,8	3,284	3,192	-0,044
87,4	3,328	3,236	-0,049
90	3,377	3,285	-0,064
93,7	3,441	3,349	-0,354
110	3,795	3,703	3,795

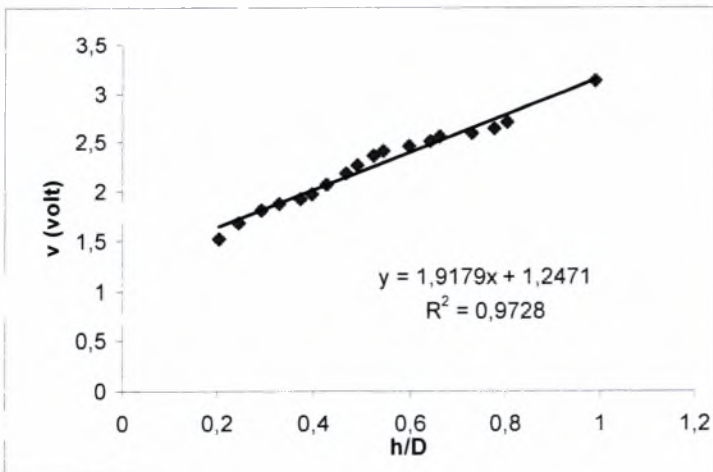
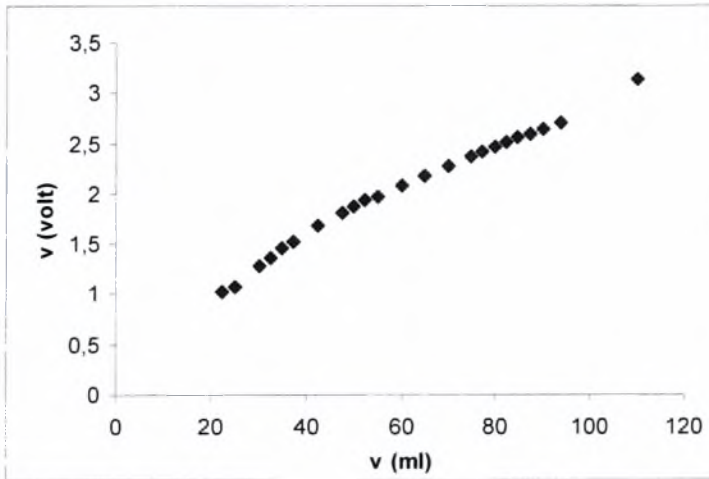
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Ζεύγος III		3,091	
offset	0,01575		
v (ml)	V (v)	V (v)	
22,6	1,038	1,02225	-0,052
25,1	1,09	1,07425	-0,197
30,1	1,287	1,27125	-0,084
32,5	1,371	1,35525	-0,106
35	1,477	1,46125	-0,06
37,50	1,537	1,52125	-0,153
42,60	1,69	1,67425	-0,13
47,7	1,82	1,80425	-0,067
50,10	1,887	1,87125	-0,056

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

52,50	1,943	1,92725	-0,04
55,00	1,983	1,96725	-0,107
60,00	2,09	2,07425	-0,105
65,00	2,195	2,17925	-0,09
70,00	2,285	2,26925	-0,098
74,90	2,383	2,36725	-0,044
77,30	2,427	2,41125	-0,048
79,80	2,475	2,45925	-0,042
82,30	2,517	2,50125	-0,051
84,80	2,568	2,55225	-0,041
87,40	2,609	2,59325	-0,048
90,00	2,657	2,64125	
93,70	2,713	2,69725	
110,00	3,149	3,13325	



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

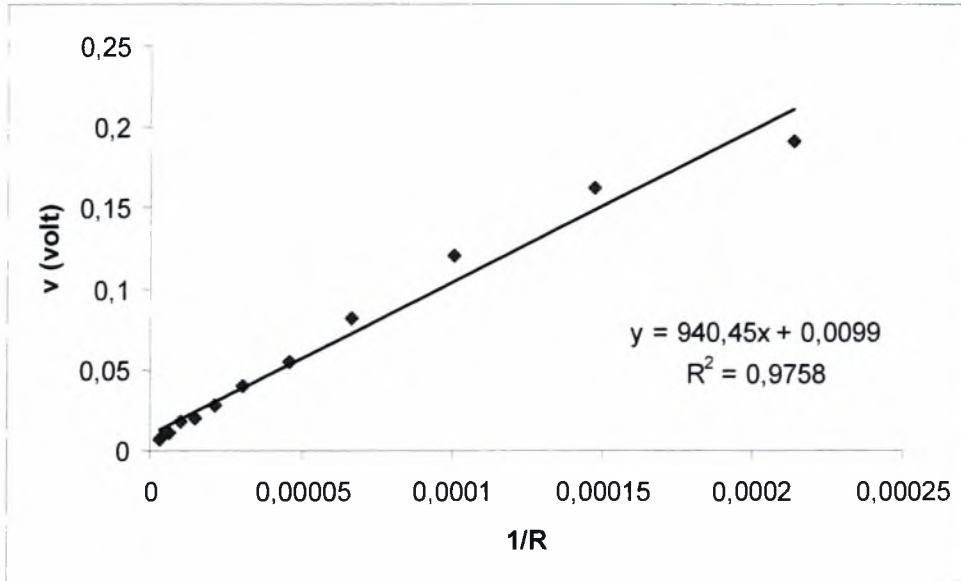
Ζευγος	V	V	h/D	γ	sL
1	1,385	1,285	0,35231493	2,54190681	0,03050288
2	1,538	1,446	0,33472256	2,46780977	0,02961372
3	0,792	0,77625	0,74792907	4,17923813	0,05015086

si	si'	γ'	sL
0,02293	0,03213	2,56113781	0,03841707

ΒΑΘΜΟΝΟΜΙΣΗ ΑΝΑΛΥΤΗ

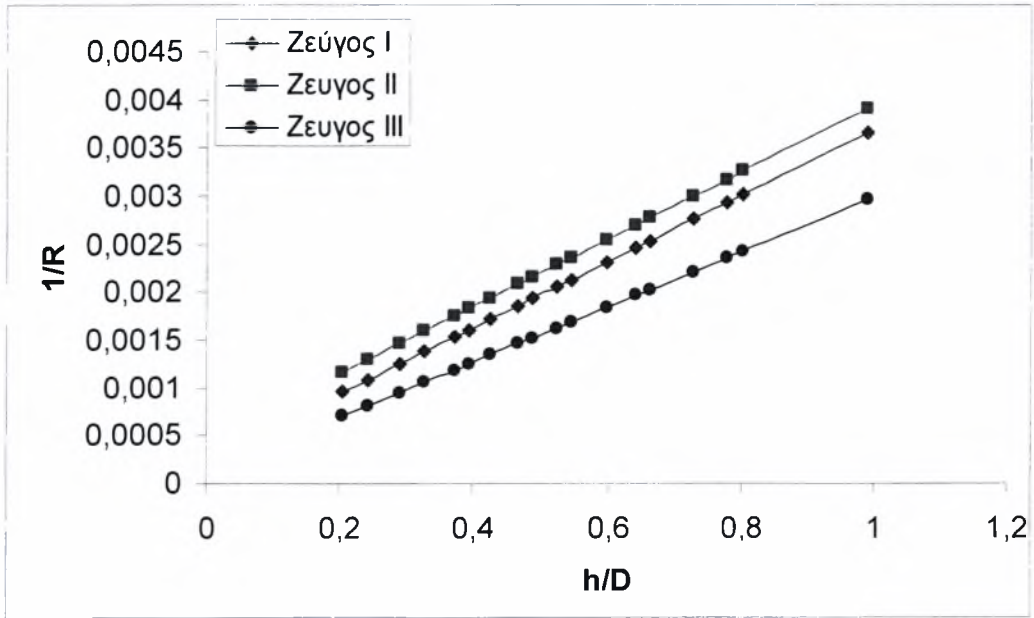
				offset	0,1		
	1 (k Ω)	2 (k Ω)		R (Ω)	1/R (S)	V (volt)	V (volt)
1	4,679	393,3	1	4679	0,00021	0,291	0,191
2	6,782	468,3	2	6782	0,00015	0,262	0,162
3	9,976	681,6	3	9976	0,0001	0,221	0,121
4	15,15	999	4	15150	6,6E-05	0,182	0,082
5	21,87	1506,3	5	21870	4,6E-05	0,155	0,055
6	32,88	2205	6	32880	3E-05	0,14	0,04
7	46,89	3384	7	46890	2,1E-05	0,1275	0,0275
8	67,97	4602	8	67970	1,5E-05	0,12	0,02
9	100,27	5864	9	100270	1E-05	0,118	0,018
10	149,99	6853	10	149990	6,7E-06	0,111	0,011
11	220,8	8495	11	220800	4,5E-06	0,109	0,009
12	327,9	9780	12	327900	3E-06	0,107	0,007

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



	Ζευγος I	Ζευγος II	Ζευγος III
h/D	1/R	1/R	1/R
0,2039	0,00095	0,00116759	0,000703235
0,2422	0,00108	0,001301462	0,000813478
0,2904	0,00125	0,001469938	0,000952217
0,328	0,00138	0,001601363	0,001060446
0,3719	0,00153	0,001754809	0,001186808
0,3943	0,00161	0,001833104	0,001251284
0,4252	0,00171	0,001941111	0,001340227
0,4674	0,00186	0,002088614	0,001461696
0,489	0,00193	0,002164114	0,001523869
0,5245	0,00205	0,002288199	0,001626053
0,5455	0,00213	0,002361601	0,0016865
0,5989	0,00231	0,002548253	0,001840207
0,6421	0,00246	0,002699252	0,001964554
0,6641	0,00253	0,002776149	0,002027879
0,7295	0,00276	0,003004745	0,002216127
0,7782	0,00293	0,003174968	0,002356305
0,8031	0,00301	0,003262003	0,002427978
0,99	0,00365	0,003915283	0,002965952

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091560