

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΛΙΑΤΣΙΟΣ ΠΑΣΧΑΛΗΣ

**ΘΕΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΑΝΔΡΙΤΣΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2005



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 3190/1
Ημερ. Εισ.: 03-07-2005
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2005
ΠΛΙ

Στους γονείς μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την μελέτη της επίδρασης του ιξώδους στα χαρακτηριστικά της διφασικής οριζόντιας ροής, και την πληρέστερη κατανόηση των περιοχών ροής και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα.

Για την υλοποίηση των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη, με αγωγό ροής των δυο φάσεων από plexiglas διαμέτρου 2,4cm. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά μίγματα υγρού, 1, 5, 11 και 19cP. Για την αλλαγή του ιξώδους του υγρού χρησιμοποιήθηκε γλυκερίνη. Το διφασικό μίγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι αέρας –νερό/ γλυκερίνη.

Τα καθεστώτα ροής που παρουσιάστηκαν είναι : στρωματωμένη ροή με ή χωρίς κύματα, διαλείπουσα, ψευδοδιαλείπουσα και δακτυλιοειδής ροή. Για κάθε σύστημα αέρα – υγρού κατασκευάστηκαν χάρτες καθεστώτων ροής και έγινε σχολιασμός των μηχανισμών που διέπουν τις μεταπτώσεις του διφασικού μίγματος από περιοχή σε περιοχή. Η ταυτοποίηση των καθεστώτων ροή έγινε με οπτική παρατήρηση και τεκμηριώθηκε με φωτογράφιση. Επιπρόσθετα, έγινε μέτρηση της υγρής στοιβάδας με άμεση μέθοδο, αλλά και με την αγωγιμομετρική μέθοδο.

Στην αρχή περιγράφονται οι ορισμοί των καθεστώτων ροής και παρουσιάζονται κάποιοι προτεινόμενοι χάρτες. Επίσης γίνεται αναφορά για κάποια χαρακτηριστικά της ροής όπως η διασπορά σταγονιδίων στην αέρια φάση, το πάχος της υγρής στοιβάδας καθώς επίσης οι μηχανισμοί για τη μετάβαση σε κάθε καθεστώς ροής, περιγραφή των βασικών μοντέλων της διφασικής ροής και μοντελοποίηση κάποιων καθεστώτων ροή, όπως η διαχωρισμένη και η δακτυλιοειδής ροή.

Στη συνέχεια γίνεται η περιγραφή του πειραματικού εξοπλισμού και διαδικασίας μετρήσεων καθώς επίσης η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη της διφασικής ροής καθώς επίσης και η βιβλιογραφία. Στο παράρτημα που υπάρχει στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται οι βαθμονομήσεις των οργάνων.

Συμφωνά με τους χάρτες καθεστώτων ροής το πρώτο βασικό συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι υγρά με χαμηλό ιξώδες χρειάζονται μεγαλύτερες παροχές υγρού για να ξεκινήσει η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, όταν η παροχή του αερίου είναι μικρή και μικρότερη παροχή υγρού, όταν μεγαλώνει η παροχή του αερίου. Μια άλλη σημαντική επίδραση του ιξώδους είναι το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται το ιξώδες, χρειάζεται μεγαλύτερη παροχή αερίου για να ξεκινήσουν τα κανονικά δισδιάστατα κύματα. Επιπλέον, με αύξηση πάλι του ιξώδους, μικραίνει η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων.

Στις περιοχές αυτές που παρατηρούνται αλλαγές με την αύξηση του ιξώδους μετρήθηκε το ύψος της υγρής στοιβάδας με την άμεση μέθοδο και παρατηρήθηκε η ευστάθεια που δίνει το ιξώδες στη διασπαστική ροή. Με την αγωγιμομετρική μέθοδο βρέθηκε το ύψος της υγρής στοιβάδας για διάφορες περιοχές ροής σε σύστημα αέρα-υγρού(1cP).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα από' όλα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Ανδρίτσο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του για κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Βασίλη Μποντόζογλου για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές και παροτρύνσεις .

Πολλά ευχαριστώ χρωστάω στην υποψήφια διδάκτωρ Κατερίνα Αργυριάδη και στον Καθηγητή Μιχάλη Βλαχογιάννη καθώς επίσης και στους Τάσο Δαφερέρα και Νίκο Χολέβα για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την αλληλοϋποστήριξη, τη βοήθεια και τις όμορφες στιγμές που περάσαμε στο Βόλο.

Πάνω απ' όλα είμαι ευγνώμον στους γονείς μου, Ανδρέα και Βούλα Πλιάτσιου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους, ηθική και οικονομική, όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στη μητέρα μου και τον πατέρα μου καθώς και στα αδέρφια μου Αντώνη και Τριαντάφυλλο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	1
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i>	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	4
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ (περιοχές ροής)	4
2.2 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΤΑΓΟΝΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ	7
2.3 ΠΑΧΟΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ	7
2.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ	8
2.5 ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	9
2.5.1 Μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα και δακτυλιοειδή	9
2.5.2 Μετάπτωση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με κύματα	10
2.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΡΟΗ	13
2.7 ΧΑΡΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΡΟΗΣ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	19
<i>ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ</i>	19
3.1 Εισαγωγή	19
3.2 ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ	19
3.3 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	22
3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ	24
3.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΡΟΗΣ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	29
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	29
4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	29
4.2 ΤΜΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	31
4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΧΟΥΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ	31
Α) Άμεσες μέθοδοι	32
Β) Έμμεσες μέθοδοι	32
4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ	32
4.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟ	37
4.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	38
4.7 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ	39
4.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΞΩΔΟΥΣ	41
4.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΙΞΩΔΕΣ ΥΓΡΟΥ	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο 44	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ	44
5.1 ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ	44
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	45
5.2.1 ΥΓΡΟ ΜΕ ΧΑΜΗΛΟ ΙΞΩΔΕΣ	45
5.2.2 ΥΓΡΟ ΜΕ ΥΨΗΛΟ ΙΞΩΔΕΣ	46
5.3 ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗ ΡΟΗ	47
5.4 ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΚΑΙ ΨΕΥΔΟ-ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΡΟΗ	48
5.6 ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ	54
5.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	61
5.8 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο	78
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διφασική ροή αερίου/ υγρού σε οριζόντιους ή σχεδόν οριζόντιους αγωγούς έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία 30 χρόνια. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πλήθος των εφαρμογών στις οποίες συναντάται, όπως σε συστήματα διακίνησης γεωθερμικών ρευστών και των προϊόντων πετρελαίου, στην λειτουργία πυρηνικών και χημικών αντιδραστήρων σε εναλλάκτες θερμότητας όπου έχουμε αλλαγή φάσης. Έτσι εντάθηκε το ενδιαφέρον των επιστημόνων για την εύρεση σχεδιαστικών εξισώσεων, οι οποίες να προβλέπουν τις διάφορες παραμέτρους της διφασικής ροής .

Το κύριο χαρακτηριστικό της ροής διφασικού μίγματος σε οριζόντιους κυλινδρικούς αγωγούς είναι η μορφή της διεπιφάνειας αερίου/ υγρού. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό ταξινομείται η διφασική ροή σε διάφορα **καθεστώτα ή περιοχές ροής** (flow patterns ή regimes). Σε οριζόντιο αγωγό οι κυριότερες περιοχές που εμφανίζονται είναι : η **στρωματομένη** ροή με ή χωρίς κύματα, (smooth/wavy stratified flow) η **διαλείπουσα** ροή (slugflow) και η **δακτυλιοειδής** ροή (annular flow).

Σε χαμηλές παροχές αερίου και υγρού εμφανίζεται η στρωματομένη ροή στην οποία το υγρό ρέει στον πάτο του σωλήνα και ακριβώς από πάνω το αέριο. Αυξάνοντας την παροχή του αερίου στη διεπιφάνεια αερίου/ υγρού έχουμε τον σχηματισμό των πρώτων δισδιάστατων κυμάτων. Περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του αερίου προκαλεί ακανόνιστα κύματα μεγάλου πλάτους που όμως δεν διαβρέχουν την κορυφή του σωλήνα. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου το υγρό αρχίζει να σκαρφalώνει στα τοιχώματα του αγωγού και σιγά-σιγά σταγόνες αποσπώνται από την διεπιφάνεια και συμπαρασύρονται από την αέρια φάση ή αποτίθενται στα πλευρικά τοιχώματα του σωλήνα, οπότε αρχίζει το φαινόμενο της **εκνέφωσης**. Τελικά σε ακόμα υψηλότερες ταχύτητες του αερίου έχουμε το σχηματισμό της δακτυλιοειδούς ροής όπου ένας κυματιστός υγρός υμένας καλύπτει όλη την

περιφέρεις του σωλήνα. Ωστόσο το πάχος της υγρής στοιβάδας στον πυθμένα του σωλήνα είναι μεγαλύτερο απ' ό τι στην κορυφή.

Σε υψηλές παροχές υγρού σχηματίζεται η διαλείπουσα ροή. Αυτή η ροή χαρακτηρίζεται από την περιοδική διέλευση υγρών μαζών (slugs) που κλείνουν τη διατομή του σωλήνα και κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα του αερίου. Στις βιομηχανικές εφαρμογές η διαλείπουσα ροή είναι προτιμότερο να αποφεύγεται γιατί ακολουθείται από μεγάλη πτώση πίεσης. Η περιοχή όπου στρωματωμένη, δακτυλιοειδής και διαλείπουσα ροή συναντώνται μπορεί να ονομαστεί ως **ψευδοδιαλείπουσα** ροή η οποία μοιάζει οπτικά με τη διαλείπουσα ροή. Σε αυτή την περιοχή όμως η πτώση πίεσης δεν είναι τόσο μεγάλη όπως στην περιοχή της διαλείπουσας ροής .

Σαν μέτρο της παροχής των δυο φάσεων συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία οι **φαινόμενες ταχύτητες** (superficial velocities) που ορίζονται από τις σχέσεις :

$$u_{GS} = \frac{\dot{m}_G \rho_G}{A} \quad (1.1)$$

$$u_{LS} = \frac{\dot{m}_L \rho_L}{A} \quad (1.2)$$

όπου A είναι η διατομή του αγωγού , \dot{m} και ρ η παροχή μάζας και η πυκνότητα των δυο φάσεων. Οι δείκτες G και L εκφράζουν την αέρια και υγρή φάση αντίστοιχα.

Ο γενικός τρόπος εξέτασης των καθεστώτων ροής γίνεται με την κατασκευή χαρτών ροής . Οι χάρτες ροής είναι διπλά λογαριθμικά διαγράμματα που στον άξονα X έχουν την φαινόμενη ταχύτητα του αερίου και στον άξονα Ψ τη φαινόμενη ταχύτητα του υγρού. Οι περισσότεροι έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα σε αγωγούς 20-95 mm και για διφασικό μείγμα αέρα/ υγρού κοντά στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η κατασκευή ενός τέτοιου χάρτη περιοχών ροής είναι δύσκολή αφού αλλαγή κυρίως στη διάμετρό, στο ιξώδες, στην κλίση και στη μορφή της διατομής επιφέρει και αλλαγή στο χάρτη ροής που έχει το διφασικό μείγμα.

Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην μελέτη της επίδρασης του ιξώδους στα χαρακτηριστικά της οριζόντιας διφασικής ροής αέρα-υγρού, αγνοώντας τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας, που καθιστούν το πρόβλημα της διφασικής ροής πιο σύνθετο. Χρησιμοποιήθηκαν συστήματα γλυκερίνης και νερού δημιουργώντας μίγματα υγρών 1, 5, 11 και 19 cP σε οριζόντιο

αγωγό μήκους 7,44m. Δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχοι χάρτες καθεστώτων ροής για κάθε σύστημα αέρα-υγρού και μετρήθηκε το ύψος της υγρής στοιβάδας στις περιοχές της μετάβασης από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με δισδιάστατα κύματα και σε διαλείπουσα ροή. Η αναγνώριση της κάθε περιοχής ροή γίνεται οπτικά. Βέβαια ο υποκειμενικός παράγοντας στη διάκριση των περιοχών ροής παίζει μεγάλο ρόλο και γι' αυτό άλλωστε γίνεται ακριβής περιγραφή της κάθε περιοχής ροής.

Στην αρχή περιγράφονται οι ορισμοί των καθεστώτων ροής και παρουσιάζονται κάποιοι προτεινόμενοι χάρτες. Επίσης γίνεται αναφορά για κάποια χαρακτηριστικά της ροής όπως η διασπορά σταγονιδίων στην αέρια φάση, το πάχος της υγρής στοιβάδας καθώς επίσης οι μηχανισμοί για τη μετάβαση σε κάθε καθεστώς ροής, περιγραφή των βασικών μοντέλων της διφασικής ροής και μοντελοποίηση κάποιων καθεστώτων ροή, όπως η διαχωρισμένη και η δακτυλιοειδής ροή.

Στη συνέχεια γίνεται η περιγραφή του πειραματικού εξοπλισμού και διαδικασίας μετρήσεων καθώς επίσης η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη της διφασικής ροής καθώς επίσης και η βιβλιογραφία. Στο παράρτημα που υπάρχει στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται οι βαθμονομήσεις των οργάνων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ (περιοχές ροής)

Η οριζόντια διφασική ροή έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές για τη μελέτη της. Ένα από τα χαρακτηριστικά της είναι ότι η διεπιφάνεια υγρού/ αερίου.

Μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό μορφών που είναι γνωστές σαν περιοχές ή καθεστώτα ροής (flow regimes ή patterns) και εξαρτώνται από τη γεωμετρία του συστήματος, τις παροχές και τις ιδιότητες των δυο φάσεων. Οι περιοχές αυτές είναι περισσότερο σύνθετες σε οριζόντιους απ' ότι σε κατακόρυφους αγωγούς ,σαν συνέπεια της επίδρασης της βαρύτητας, η οποία τείνει να συγκεντρώσει το υγρό στον πυθμένα του αγωγού. Οι κυριότερες περιοχές που παρατηρούνται είναι :

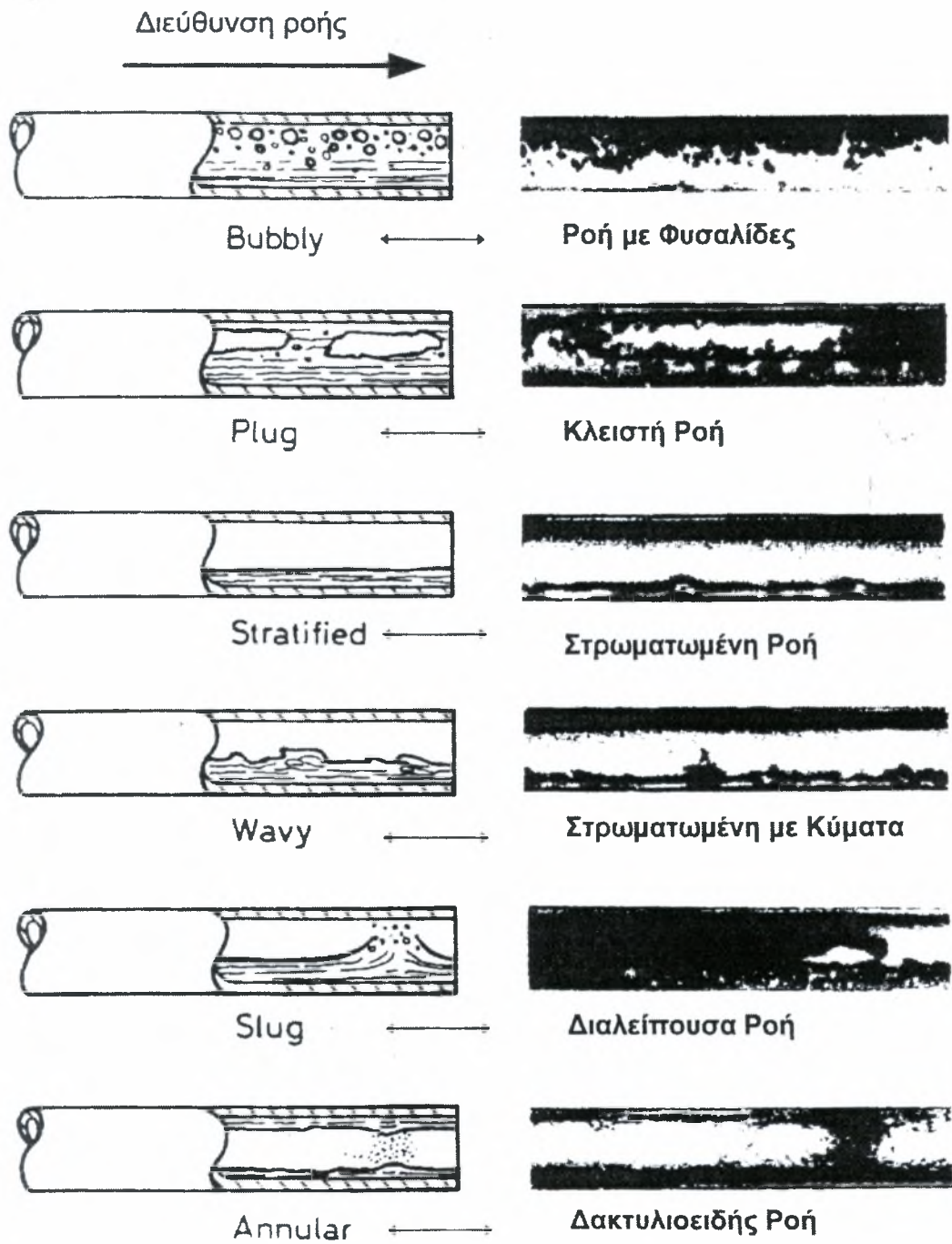
1. **Διαχωρισμένη ροή (stratified flow):** Σχηματίζεται για μικρές σχετικά παροχές των ρευστών. Το υγρό ρέει στην πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος του. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι λεία (smooth) ή να καλύπτεται με κύματα (wavy), κάτι που εξαρτάται κυρίως από την παροχή της αέριας φάσης. Σε χαμηλές ταχύτητες αερίου και υγρού παρατηρούνται δισδιάστατα κύματα μικρού πλάτους ,με αδιατάρακτη επιφάνεια, που επεκτείνονται σε όλο το πλάτος του σωλήνα. Με την αύξηση της παροχής του αερίου, εμφανίζονται κύματα μεγάλου πλάτους (roll waves ή disturbance waves ή Kelvin – Helmholtz waves) , η επιφάνεια των κυμάτων γίνεται τραχιά, και το υγρό μπορεί να αναρριχάται στα τοιχώματα του αγωγού, χωρίς να διαβρέχει ολόκληρη την περίμετρό του. Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας (παροχής) του αερίου σταγόνες από το υγρό αρχίζουν να κτυπούν στο πάνω μέρος του αγωγού, χαρακτηριστικό του φαινομένου που είναι γνωστό σαν ροή με εκνέφωση (atomization) .

2. **Διαλείπουσα ροή (slug ή intermittent flow):** Χαρακτηρίζεται από την *περιοδική διέλευση υγρών μαζών (slugs)* στον αγωγό, που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Οι υγρές αυτές μάζες μπορεί να περιέχουν και να παρασύρουν πολυάριθμες φυσαλίδες αερίου. Βασικό χαρακτηριστικό του είδους της ροής αυτής αποτελούν οι απότομες μεταβολές της πίεσης στον αγωγό, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ανεπιθύμητη στις περισσότερες εφαρμογές .

3. **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 αγωγού και σε ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται σαν αφρός. Αυτή η περιοχή ροής δεν εμφανίστηκε δεν παρατηρήθηκε στα πειράματά μας γιατί απαιτεί μεγάλη παροχή υγρού.

4. **Δακτυλιοειδής ροή (annular flow):** Χαρακτηρίζεται από την *ύπαρξη ενός υγρού δακτυλίου* που σχηματίζεται στην περιφέρεια του αγωγού και δεν είναι γενικά συμμετρικός λόγω βαρύτητας. Μέρος του υγρού συμπαρασύρεται από την αέρια φάση με την 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.

5. **Ψευδοδιαλείπουσα ροή (pseudo-slug flow):** το είδος αυτό της ροής μοιάζει αφενός με την δακτυλιοειδή ροή, στο ότι *το υγρό σχηματίζει μια συνεχή στοιβάδα* στην περιφέρεια του αγωγού και αφετέρου με την 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 μιας υγρής στοιβάδας μεγάλου πάχους στον πυθμένα του σωλήνα δίνει την εντύπωση διαχωρισμένης ροής με κυματισμούς .



Σχήμα 2.1. Χάρτης περιοχών ροής

6. **Κλειστή ροή (plug flow)** : Αυτό το είδος της ροής μοιάζει με τη ροή με φυσαλίδες , προηγείται αυτής και εμφανίζεται σε μεγάλες παροχές υγρού και μικρές αέρα. Χαρακτηρίζεται από διαδοχική διέλευση θυλακίων αέρα που ρέουν ομοιόμορφα πάνω στην κορυφή του σωλήνα. Τα θυλάκια του αέρα έχουν για σταθερές παροχές σχεδόν τον ίδιο όγκο. Και αυτό το είδος ροής δεν επιτεύχθηκε επειδή ήταν έξω από τις πειραματικές δυνατότητες .

2.2 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΤΑΓΟΝΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ

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 δια τη συνολική υγρή παροχή και ορίζεται ως :

$$E = \frac{W_{LE}}{W_L} = \frac{W_L - W_{LF}}{W_L} \quad (2.1)$$

όπου W_L η συνολική παροχή υγρού, W_{LE} η παροχή της διασπαρμένης υγρής φάσης και W_{LF} η παροχή της υγρής στοιβάδας. Ο συμπαρασυρμός επηρεάζεται από δυο βασικές διεργασίες, την **εκνέφωση** (Ra), δηλαδή την παραγωγή σταγονιδίων από την επιφάνεια των κυμάτων, και την **εναπόθεση** (Rd) 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 η εκνέφωση γίνεται ίση με της εναπόθεση ($Ra=Rd$).

Θα πρέπει επίσης να επισημάνουμε πως έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει ένα όριο παροχής της υγρής στοιβάδας W_{LFC} (critical film flow rate) κάτω από το οποίο δεν προκαλείται εκνέφωση, ανεξάρτητα από την αύξηση της ταχύτητας του αερίου (Dallman 1978)

2.3 ΠΑΧΟΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ

Το πάχος της υγρής στοιβάδας και η κατανομή του στην περιφέρεια του αγωγού είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος 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 στον σωλήνα. Ακόμα μπορεί 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 συσχετισμός αυτός προέκυψε από μετρήσεις σε οριζόντιους αγωγούς διαμέτρου 2,54 5,08 και 7,62cm για μίγματα νερού και διαλυμάτων γλυκερίνης / νερού με αέρα και είχε τη μορφή :

$$\frac{h}{D} = e^k \frac{(Re_{sL})^a}{(Re_{sG})^b} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^c \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^d \quad (2,2)$$

όπου Re_s είναι ο αριθμός Reynolds και βασίζεται στη φαινόμενη ταχύτητα. Οι εκθέτες k , a , b , c , d προσδιορίζονται εμπειρικά και εξαρτώνται από τις παροχές των δυο φάσεων .

Σημαντικός είναι ο εμπειρικός συσχετισμός του Martinelli για χαμηλές πιέσεις και οριζόντια διφασική ροή. Η εξίσωση που παρουσίασε είναι :

$$a = \left(1 + x^{0.8} \right)^{-0.378} \quad (2,3)$$

όπου a το κλάσμα κενού και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνει το αέριο μέσα στον σωλήνα προς τον συνολικό όγκο του σωλήνα και X κάποιος παράγοντας ροής . Ανάλογα με το είδος της ροής, το κλάσμα κενού μπορεί να συσχετιστεί με το πάχος της υγρής στοιβάδας.

2.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ

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

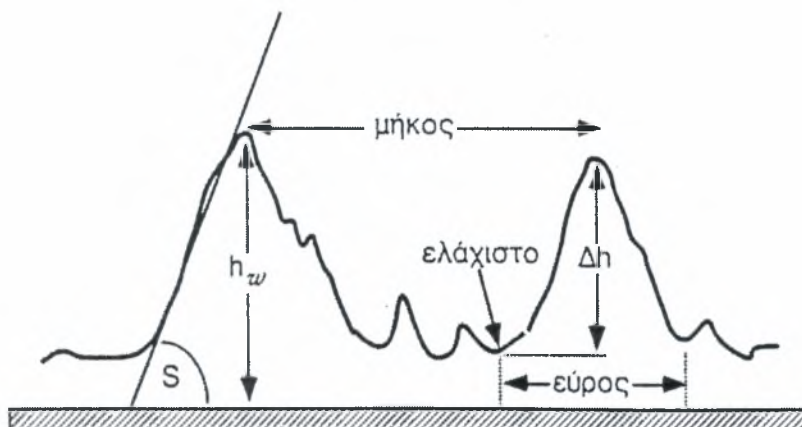
Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι το *πλάτος κύματος* (wave amplitude) που ορίζεται ως το μισό της υψομετρικής διαφοράς, Δ*h*, μεταξύ ενός ελάχιστου και του αμέσως επόμενου μεγίστου της υγρής στοιβάδας (Nencini & Andreussi, 1983). Σαν *ύψος* του κύματος h_w ορίζεται η απόσταση της κορυφής του από το τοίχωμα του αγωγού. Το *μήκος κύματος* λ όπως φαίνεται και στο σχήμα είναι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών κυμάτων. Από τη γνωστή σχέση της κινηματικής :

$$\lambda = \frac{u_c}{f} \quad (2,4)$$

όπου f η χαρακτηριστική συχνότητα των κυμάτων , μπορούμε να συνδέσουμε το μήκος κύματος με την ταχύτητα του κύματος u_c . Το *εύρος του κύματος* ΔL είναι η οριζόντια απόσταση δυο διαδοχικών ελαχίστων της υγρής στοιβάδας μεταξύ των οποίων ορίζεται

το κύμα διαταραχής. Μια ακόμη χρήσιμη παράμετρος που περιγράφει το σχήμα των κυμάτων διαταραχής είναι η αιχμηρότητα S που ορίζεται από τη σχέση :

$$S = \arctan \frac{\Delta L}{2\Delta h} \quad (2.5)$$



σχήμα 1 : γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων

2.5 ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

2.5.1 Μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα και δακτυλιοειδή

Για την μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα και τη δακτυλιοειδή θεωρείται ότι είναι υπεύθυνη η ρευστοδυναμική αστάθεια kelvin – Helmholtz. Συγκεκριμένα, η παρουσία κυμάτων στη διεπιφάνεια αερίου/ υγρού προκαλεί τοπική αύξηση της ταχύτητας της αέρας στην κορυφή του κύματος με συνέπεια τη δημιουργία υποπίεσης. Αν οι δημιουργημένες κατ' αυτόν τον τρόπο ασταθεροποιητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης, τότε το κύμα τείνει να μεγαλώσει και η υγρή μάζα να καταλάβει τη διατομή του αγωγού. Ακολουθώντας την κλασική θεωρία των kelvin – Helmholtz οι Taitel & Dukler (1976) προτείνουν ότι η μετάπτωση αρχίζει όταν

$$U_G = \left(1 - \frac{h}{D}\right) \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G) \alpha}{\rho_G Si} \right]^{0.5} \quad (2,6)$$

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

Οι Taitel & Dukler υποστηρίζουν ότι, αν η υγρή στοιβάδα είναι μεγαλύτερη από το μισό της διαμέτρου, τότε υπάρχει μετάπτωση από τη διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η μετάπτωση οδηγεί στη δακτυλιοειδή ροή. Αν και η προσπάθεια των Taitel & Dukler είναι αρκετά αξιολογή, 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 καθόλου εξάρτηση (Lin 1985).

2.5.2 Μετάπτωση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με κύματα

Αναφορές στη βιβλιογραφία σχετικά με την παραγωγή των κυμάτων παρουσιάζονται αρχικά από τους Hershman (1960) και Cohen (1964). Ο δεύτερος στην εργασία του παρουσιάζει με λεπτομέρειες το μοντέλο των Miles και Benjamin (Miles, 1957, 1959a, 1962a, 1962b, Benjamin 1959), το οποίο εστιάζεται σε αποτελέσματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της ταχύτητας του αερίου και της κυματισμένης επιφάνειας ενός υγρού με χαμηλό ιξώδες.

Ο Miles (1959b) πρότεινε ότι η παραγωγή των κυμάτων σε πολύ παχύρρευστα υγρά είναι αποτέλεσμα 'στατικής' αστάθειας, λόγω διακυμάνσεων της πίεσης στην επιφάνεια των κυμάτων. Τροποποίησε την Kelvin – Helmholtz ανάλυση για να συμπεριλάβει διακυμάνσεις στην ταχύτητα του αερίου και το ιξώδες του υγρού. Τόνισε ότι το τροποποιημένο K-H μοντέλο εξηγεί ικανοποιητικά τις αστάθειας σε παχύρρευστα υγρά.

Ο Cohen (1964) ερεύνησε θεωρητικά και πειραματικά την ανάπτυξη των δισδιάστατων και τρισδιάστατων κυμάτων. Ο Craik (1968) προέκτεινε τη δουλειά του Cohen για να συμπεριλάβει μεγάλες στοιβάδες υγρού. Ο Tatterson (1975) τροποποίησε την ανάλυση του Craik στο να μην καθορίσει λεπτομερώς το κύριο προφίλ της ταχύτητας. Ο Frederick (1982) επανεξέτασε τα πειραματικά αποτελέσματα του Cohen, Gottifredi και Jameson (1970) χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα για την επιφανειακή τάση.

Στην περίπτωση της διαχωρισμένης ροής η ταχύτερη αέρια φάση μεταφέρει ενέργεια στη βραδύτερη υγρή φάση. Η μετάπτωση από λεία σε διαχωρισμένη με κύματα ροή συμβαίνει όταν η ταχύτητα του αερίου είναι ικανή να προκαλέσει ανάπτυξη των κυμάτων, αλλά χαμηλότερη απ' ότι απαιτείται για την ταχύτερη ανάπτυξη τους που θα προκαλούσε μετάβαση στη διαλείπουσα ή την δακτυλιοειδή ροή.

Το φαινόμενο της ανάπτυξης των κυμάτων είναι σύνθετο και όχι απόλυτα κατανοητό. Είναι γενικά παραδεκτό ότι το κύμα αναπτύσσεται όταν η πίεση που ενεργεί σ' αυτό μπορεί να τις δυνάμεις λόγω ιξώδους. Παρόλα αυτά υπάρχει αμφιβολία σχετικά με τον τρόπο που γίνεται η μεταφορά της ενέργειας.

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

$$U_G > \left[\frac{4v_L (\rho_L - \rho_G) g \cos b}{s \rho_G U_L} \right]^{1/2} \quad (2,7)$$

Οπού v_L = κινηματικό ιξώδες
 s = συντελεστής 'προστασίας' ($s=0.01$)

$$K \geq \frac{2}{\sqrt{\tilde{U}_L} \sqrt{\tilde{U}_G} \sqrt{s}} \quad (2,8)$$

U_G, U_L = πραγματική ταχύτητα αερίου υγρού.

Η συσχέτιση αυτή μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή ως :

Όπου : $\tilde{U}_G^0 - \tilde{U}_L^0$ = αδιάστατοι όροι που ορίζονται από συνδιασμό σχέσεων του θεωρητικού μοντέλου Taitel & Dunker

K = τροποποιημένου αριθμού Froude και της τετραγωνικής ρίζας του φαινομενικού αριθμού Reynolds για το υγρό.

Με :

$$K^2 = F^2 Re_{Ls} = \frac{\rho_G (U_{GS})}{(\rho_L - \rho_G) D g \cos \beta} \cdot \frac{DU_{LS}}{\nu} \quad (2,9)$$

Η ανίσωση των Taitel & Dukker είναι ασήμαντη για υγρά με υψηλό ιξώδες και κυρίως για υγρά με μεγαλύτερο από 20 cp από την στιγμή που τα 2-D κύματα δεν εμφανίζονται στην περίπτωση αυτή. Όπως έχει αναφερθεί η K-H εξίσωση είναι μια καλή πρώτη προσέγγιση για την ταχύτητα του αερίου που απαιτείται για το ξεκίνημα των ακανόνιστων κυμάτων μεγάλου πλάτους. Αυτή αναφέρεται ως U_{K-H} και ορίζεται για ροές υγρού αερίου ως :

$$(U_{K-H} - U_L)^2 \geq \left[\frac{kb}{\rho_G} + \frac{\rho_L g}{\rho_G k} \right] \tanh(kH) \quad (2,10)$$

Για το εύρος του H που χρησιμοποιείται στα πειράματα, η K-H θεωρία λει οτι η μικρότερη τιμή της U_{K-H} επιτυγχάνεται για αριθμό κυμάτων :

$$k_m = \sqrt{\frac{\rho_L g}{\sigma}} \quad (2,11)$$

Ένα καλύτερο κριτήριο από την προηγούμενη εξίσωση για το ξεκίνημα των ακανόνιστων κυμάτων μεγάλου πλάτους και το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν μικρή επίδραση του ύψους της υγρής στοιβάδας και του ιξώδους του υγρού είναι:

$$u_{GS} = U_{K-H} \left(\frac{\theta_w}{\theta} \right)^{0.025} \left(\frac{1}{\tan \left(\frac{k_m h}{10} \right)} \right)^{0.1} \cdot \alpha \quad (2,12)$$

Ένας αδιαστατοποιημένος αριθμός θ χρησιμοποιήθηκε από τον Taylor (1963) που λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του ιξώδους και ορίζεται ως :

$$\theta = \frac{\rho_L}{\rho_G} \cdot \frac{\sigma^2}{\mu^2 U_G^2} \quad (2,13)$$

Ο θ_w είναι η τιμή του θ εάν το υγρό είναι νερό. Η ταχύτητα U_{GS} είναι η φαινόμενη ταχύτητα του αερίου για το ξεκίνημα των κυμάτων μεγάλου πλάτους και α το κλάσμα

κενού. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση (2,10) λαμβάνει υπόψη την επίδραση της πυκνότητας του αερίου. Ένα καλό κριτήριο για το ξεκίνημα της εκνέφωσης είναι :

$$U_{GS}=1,8 (U_{GS} \text{ από εξίσωση (2,12)})$$

2.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΡΟΗ

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

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

Με μείωση της επιφανειακής τάσης παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές 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).

Ο βαθμός που το υγρό σκαρφαλώνει περιφερειακά στα τοιχώματα του σωλήνα εξαρτάται από τη διάμετρο του σωλήνα. μικρή διάμετρος και υγρό με χαμηλό ιξώδες 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 & Hantatty 1986).

Η επίδραση του ιξώδους θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.

2.7 ΧΑΡΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΡΟΗΣ

Η πιο συνηθισμένη πρακτική για την παρουσίαση των καθεστώτων ροής είναι να σχεδιαστούν τα δεδομένα στους λεγόμενους χάρτες περιοχών ροής (flow regime maps), με άξονες όρους που περιλαμβάνουν παροχές ή και ιδιότητες φάσεων, καθώς και τη διάμετρο ή και γεωμετρία αγωγού.

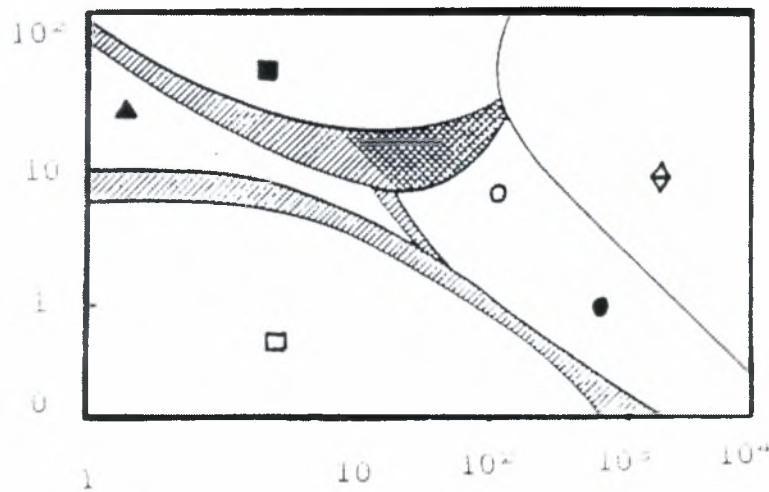
Έναν από τους πλέον γνωστούς και πρωτοποριακούς γενικευμένους χάρτες ροής σε οριζόντιο αγωγό πρότεινε ο Baker (1954). Βασισμένος στα δεδομένα παλαιότερων ερευνητών που αναφέρονταν στο σύστημα νερό – αέρας, σχεδίασε τον όρο G/λ ως προς τον όρο $L\psi/G$. Για το σύστημα αέρας-νερό ο παραπάνω σχεδιασμός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

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_G}{0.075} \cdot \frac{\rho_L}{62.3} \right)^{0.5} \right] \quad (2,14)$$

$$\psi = \left(\frac{73}{\sigma} \cdot \frac{\mu_L}{1.0} \cdot \frac{62.8}{\rho_L} \right)^{1/3} \quad (2,15)$$

Όπου ρ_G, ρ_L οι πυκνότητες του αερίου και του υγρού αντίστοιχα, μ_L το ιξώδες του υγρού και σ η επιφανειακή τάση.

Μειονέκτημα του παραπάνω χάρτη είναι ότι δεν παίρνει υπόψη του την επίδραση της διαμέτρου του αγωγού.

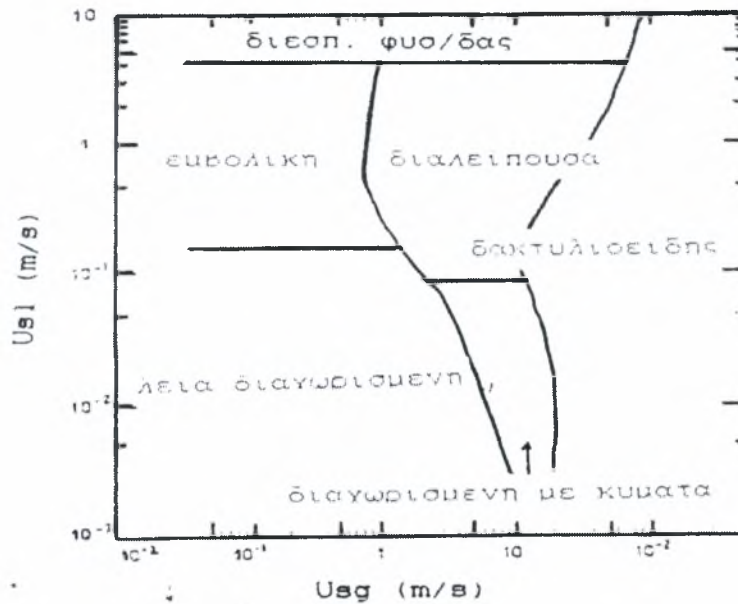


σχήμα 2 : χάρτης Baker

Αργότερα ο Scott (1963) τροποποιεί το χάρτη του Baker χρησιμοποιώντας τα πιο πρόσφατα δεδομένα του Hoogendoorn (1959) ο οποίος μελέτησε τη διαφασική ροή αέρα-νερού και αέρα διαλυμάτων ελαίων σε οριζόντιες σωληνώσεις. Δεν υπάρχει ακριβής θέση των συνόρων της μιας περιοχής ροής από την άλλη, αλλά στη θέση τους μια ευρεία ταινία ανάμεσα στις διάφορες περιοχές ροής .

Στα μέσα της δεκαετίας του '70 ο Manhane (1974) μελέτησε τη διαφασική ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους αγωγούς και παρουσίασε ένα γενικευμένο χάρτη καθεστώτων ροής. Οι συντεταγμένες του χάρτη είναι οι φαινομενικές ταχύτητες υγρού και αερίου και αναφέρονται στο σύστημα αέρας- νερό.

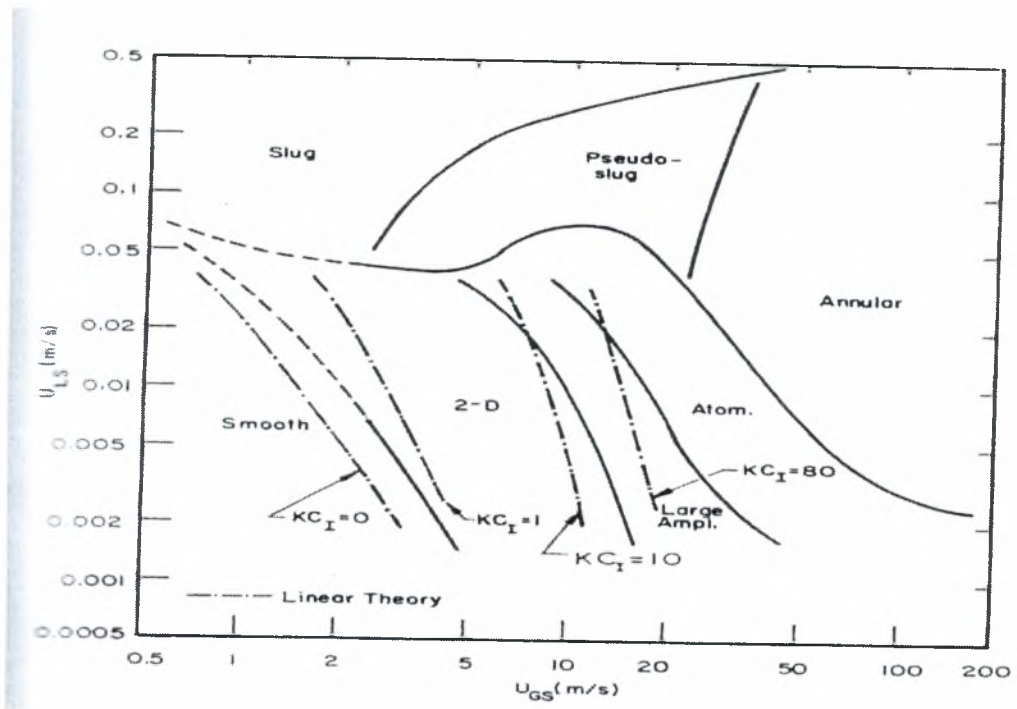
Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε τράπεζα δεδομένων με αποτέλεσμα παλαιότερων εργασιών. Αυτά προήλθαν από συστήματα με παρόμοιες ιδιότητες (ιξώδες, πυκνότητα, επιφανειακή τάση) και εύρος φαινομενικών ταχυτήτων, όπως του συστήματος αέρας - νερό. Τα πειράματα έγιναν σε πλήθος διαμέτρων αγωγού κι έτσι ο χάρτης του αναφέρεται σε κάθε οριζόντιο αγωγό.



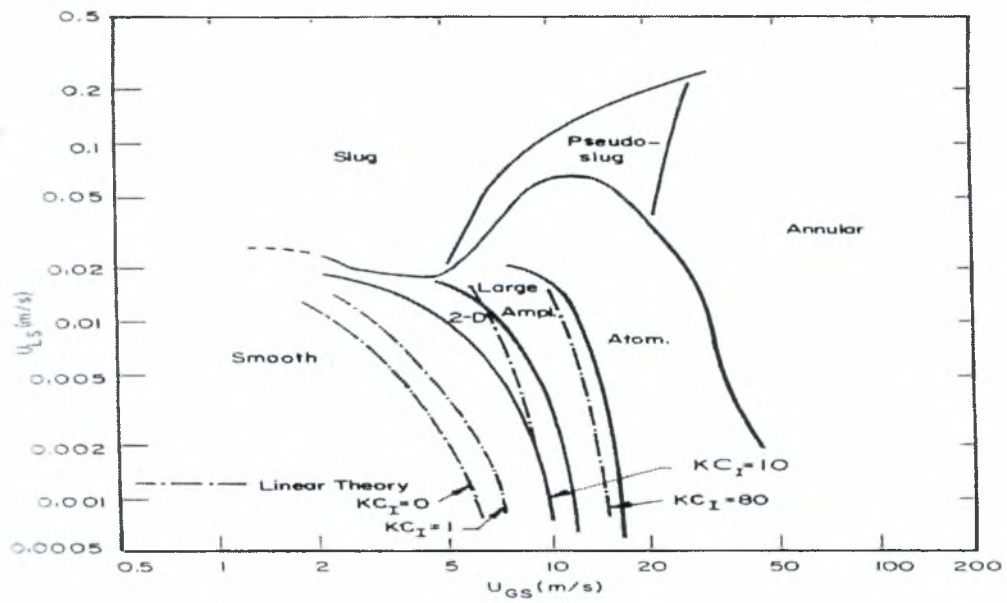
σχήμα 3: χάρτης Mandhane

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 με αυτά του Mandhane (1974)

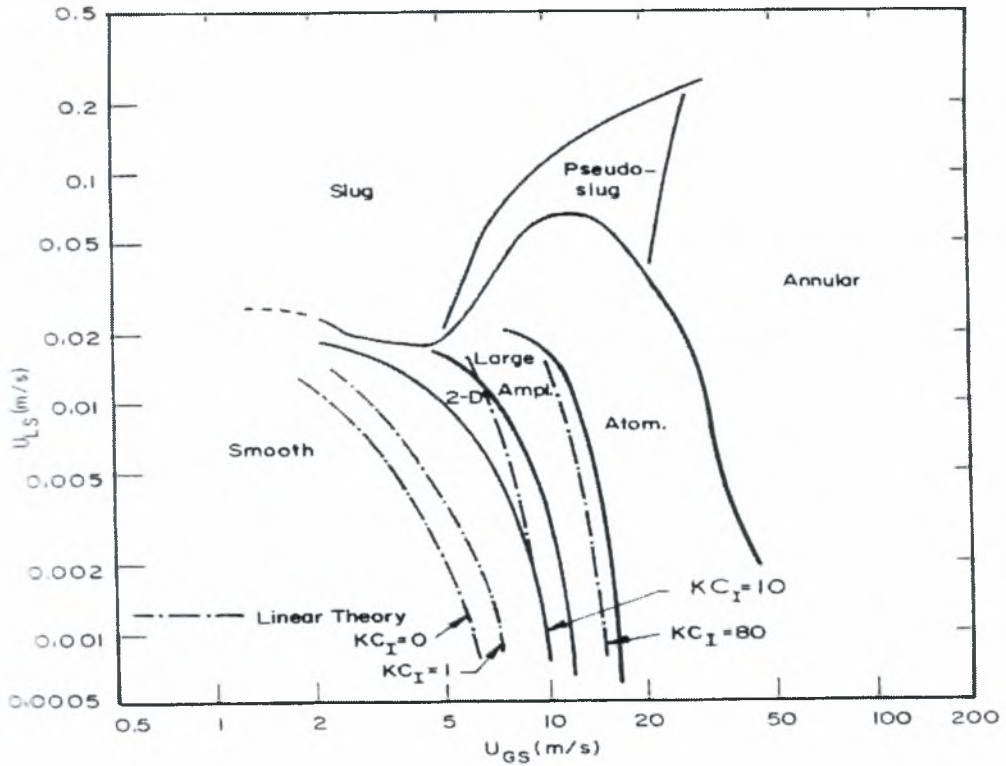
Οι Andritsos & Hanratty (1987) έδειξαν ότι η θεωρία της γραμμικής ευστάθειας μπορεί να δώσει φυσική ερμηνεία στο φαινόμενο της δημιουργίας των κυμάτων, καθώς και να προβλέψει τις συνθήκες όπου παρατηρείται η πρώτη δημιουργία κυμάτων. Στα τέλη της δεκαετίας του '80 ο Andritsos (1989) εξετάζει την επίδραση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



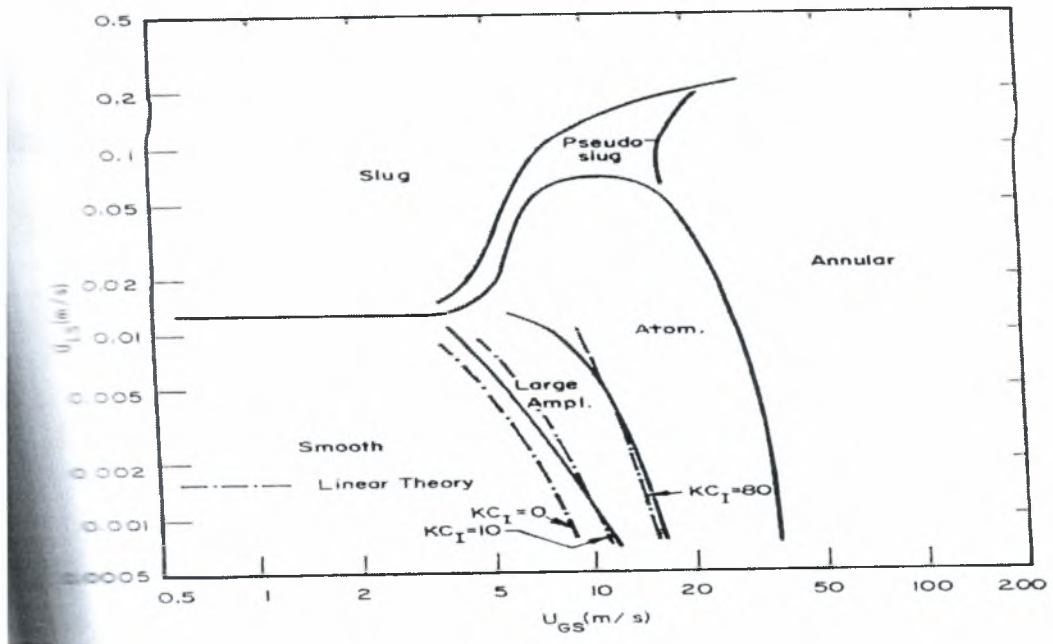
σχήμα 4 χάρτης Andritsos (1cp)



σχήμα 5: χάρτης Andritsos (4,5cp)



σχήμα 6: χάρτης Andritsos (16cp)



σχήμα 7: χάρτης Andritsos (20cp)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

3.1 Εισαγωγή

Στα τελευταία σαράντα χρόνια εκτεταμένα στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται μοντέλα περιγραφής διφασικής ροής. Αμέσως παρακάτω θα αναπτύξουμε τα κυριότερα από αυτά όπως το ομογενές και το διαχωρισμένο μοντέλο, ενώ θα γίνει αναφορά για την μοντελοποίηση συγκεκριμένων περιοχών ροής όπως της στρωματωμένης και της δακτυλιοειδής.

3.2 ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το ομογενές μοντέλο (homogeneous model) θεωρεί την ροή των δύο φάσεων σαν ένα ψευδορευστό το οποίο έχει τις μέσες ιδιότητες του μίγματος και υπακούει στις εξισώσεις που διέπουν μια μονοφασική ροή.

Οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται το μοντέλο είναι οι παρακάτω:

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

Από όσα έχουμε αναφέρει περιοχές ροής αναμένεται πως το ομογενές μοντέλο θα είναι κατάλληλο για ροή με φυσαλίδες και στις περιοχές της δακτυλιοειδούς ροής.

Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν την μονοδιάστατη ομογενή ροή έχουν την παρακάτω φόρμα:

$$\text{Συνέχειας : } m = A \bar{\rho} \bar{u} = \sigma \tau \alpha \theta. \quad (3,1)$$

$$\text{ορμής: } m \frac{du}{dz} = -A \frac{dp}{dz} - P \tau_w - A \bar{\rho} g \cos \theta \quad (3,2)$$

$$\text{ενέργειας: } \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} = m \frac{d}{dz} \left(h + \frac{\bar{u}^2}{2} + g z_g \right) \quad (3,3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις $\bar{\rho}$ και \bar{u} είναι η μέση πυκνότητα και ταχύτητα του ομογενούς ρευστού, A και P η διατομή και η περίμετρος του σωλήνα τ_w η μέση τιμή της διατμητικής τάσης του τοιχώματος, θ η κλίση του σωλήνα ως προς την οριζόντιο και z_g η κατακόρυφη απόσταση των άκρων του σωλήνα. Για οριζόντιο σωλήνα $\theta = z_g = 0$.

Ο μέσος ειδικός όγκος \bar{u} (m^3/kg) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ογκομετρικής περιοχής Q (m^3/s) προς την συνολική μαζική παροχή m (kg/s). Έτσι έχουμε:

$$\bar{u} = \frac{Q}{m} = [x v_G + (1-x) v_L] = [v_L + x v_{LG}] = \frac{J}{G} = \frac{1}{\rho} \quad (3,4)$$

Όπου $x = \frac{m_G}{m_G + m_L}$, η ποιότητα μάζας (mass quality)

$$G = \frac{m}{A} = \rho u = \frac{u}{v} \text{ [Kg/m}^2\text{s]} \text{ (mass velocity)} \quad (3,5)$$

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

Με βάση την υπόθεση ότι η ταχύτητα του αερίου είναι ίση με την ταχύτητα του υγρού στο ομογενές μοντέλο έχουμε:

$$u_f = u_g = \bar{u}$$

οπότε

$$\bar{u} = G \bar{v} = j$$

και

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

Όπου ως α ορίζουμε το κλάσμα κενού ($\alpha = \frac{A_G}{A}$ και $(1-\alpha) = \frac{A_L}{A}$)

και β volumetric quality ($\beta = \frac{Q_G}{Q}$ και $(1-\beta) = \frac{Q_L}{Q}$)

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

$$\tau_w = f_{TP} \left(\frac{\bar{\rho} \bar{u}}{2} \right)^{-2} \quad (3,6)$$

Η εξίσωση 3,2 μπορεί να γραφεί ως προς την πτώση πίεσης:

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

Οι πρώτοι όροι προς τα δεξιά εκφράζουν την πτώση πίεσης λόγω τριβής, επιτάχυνσης και βαρύτητας. Η πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης θεωρείται αμελητέα όπως και η πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας για οριζόντιο σωλήνα. Έτσι για κυκλική διατομή σωλήνα όπου $P/A=4/D$ η πτώση πίεσης λόγω τριβής είναι:

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

Από την εξίσωση 5 έχουμε:

$$-\left(\frac{dp}{dz} \right)_F = \frac{2 f_{TP} G \bar{u}}{D} \quad (3,7)$$

Από την εξίσωση 4, 5 και 7 έχουμε:

$$-\left(\frac{dp}{dz} \right)_F = \frac{2 f_{TP} G^2}{D} (x v_G + (1-x) v_L) \quad (3,8)$$

Από την παραπάνω εξίσωση όλοι οι όροι είναι καθορισμένοι εκτός από τον συντελεστή τριβής των δύο φάσεων f_{TP} . Για να χρησιμοποιηθεί το ομογενές μοντέλο είναι απαραίτητο να καθοριστεί ένας μονοφασικός συντελεστής τριβής για το διαφασικό μίγμα.

Ένας τρόπος για να καθορίσουμε τον f_{TP} είναι να τον συσχετίσουμε με τον συντελεστή τριβής του υγρού f_{fo} όταν έχει μαζική παροχή (G) που είναι ίση με αυτή του ψευδορευστού. Έτσι η 8 γίνεται:

$$-\left(\frac{dp}{dz} \right)_F = \frac{2 f_{TP} G^2}{D} (x v_G + (1-x) v_L) = \frac{2 f_{fo} G^2 v_L}{D} \Phi^2_{fo} = -\left(\frac{dp}{dz} \right)_{fo} \Phi^2_{fo} \quad (3,9)$$

όπου ο Φ^2_{fo} ονομάζεται πολλαπλασιαστής.

Το ιξώδες του μίγματος θα πρέπει να είναι $\bar{\mu} = \mu_L$ όταν $x=0$ και $\bar{\mu} = \mu_G$ όταν $x=1$. Μερικές προτεινόμενες εκφράσεις για το ιξώδες του ψευδορευστού είναι:

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \quad \text{Mc Adams} \quad (3,10)$$

$$\bar{\mu} = x\mu_G + (1-x)\mu_L \quad \text{Cicchitti} \quad (3,11)$$

$$\bar{\mu} = \bar{\rho}[x\nu_G\mu_G + (1-x)\nu_L\mu_L] \quad \text{Dukler} \quad (3,12)$$

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

$$f_{TP} = 0.079(GD/\bar{\mu})^{-1/4} \quad (3,13)$$

(13)

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

$$f_{TP} = 0.079(GD/\bar{\mu}_L)^{-1/4} \quad (3,14)$$

Στη συνέχεια κάνοντας χρήση των εξισώσεων (10), και (13-14) στην (9) θα έχουμε :

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{f_0} \left[1 + x\left(\frac{\nu_G + \nu_L}{\nu_L}\right)\right] \left[1 + x\left(\frac{\mu_G - \mu_L}{\mu_L}\right)\right]$$

3.3 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το διαχωρισμένο μοντέλο μετά από το 1944 όπου οι Lockhart & Martinelli δημοσίευσαν την μελέτη τους σε διφασική ροή εξελίσσεται συνεχώς. Η διαφορά του με το ομογενές είναι πως δέχεται την ύπαρξη δυο φάσεων όπου υγρό και αέριο ρέουν ξεχωριστά έχοντας σταθερή ταχύτητα. Στην περίπτωση όμως όπου οι ταχύτητες είναι ίσες το μοντέλο μας απλοποιείται σ' αυτό του ομογενούς.

Οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται είναι :

- σταθερές αλλά όχι υποχρεωτικά ίσες ταχύτητες για την υγρή και αέρια φάση

- 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 :

$$\text{συνέχειας : } m = m_G + m_L = \sigma \alpha \theta. \quad (3,15)$$

$$\text{ορμής : } -\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau_w}{D} + G \frac{d}{dz} [xu_G + (1-x)u_L] + [\alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L] \cos \theta \quad (3,16)$$

$$\text{ενέργειας : } \frac{1}{m} \left(\frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} \right) = \frac{d}{dz} [xh_g + (1-x)h_L] + \frac{d}{dz} \left[x \frac{v_G^2}{2} + (1-x) \frac{u_L^2}{2} \right] \quad (3,17)$$

Για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων απαιτούνται επιπλέον σχέσεις για τη διατμητική δύναμη του τοιχώματος και το κλάσμα κενού. 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.

$$\Phi_G^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_G}, \quad \Phi_L^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_L} \quad \text{και} \quad X^2 = \frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \quad (3,18-19-20)$$

Οι πολλαπλασιαστές Φ_G^2 και Φ_L^2 μπορούν να συσχετιστούν με την παράμετρο X^2 με βάση της παρακάτω σχέσεις :

$$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2 \quad \text{και} \quad \Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

όπου η σταθερά C μπορεί να πάρει τις παρακάτω τιμές :

<u>υγρό</u>	<u>αέριο</u>	<u>C</u>
τυρβώδης	τυρβώδης	20
στρωτή	τυρβώδης	12
τυρβώδης	στρωτή	10
στρωτή	στρωτή	5

3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

Στα τέλη της δεκαετίας του εξήντα πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την μοντελοποίηση της στρωματωμένης ροής.

Το 1972 ο Johannessen ήταν ο πρώτος που παρουσίασε μια θεωρία για χρήση των παραμέτρων L-M στη στρωματωμένη ροή.

Το κύριο μειονέκτημα της ανάλυσής του ήταν ότι δεν έλαβε υπ' όψιν την διεπιφανειακή διατμητική τάση. Αργότερα το 1976 οι Taitel & Dukler επέκτειναν το μοντέλο του Johannessen εισάγοντας και την διεπιφανειακή διατμητική τάση αυτή την φορά.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ορμής για οριζόντιο αγωγό και για της δυο φάσεις ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$- A_L (dp/dl)_L - \tau_{wL} P_L + \tau_i S_i = 0 \quad (3,21)$$

$$- A_G (dp/dl)_G - \tau_{wG} P_L + \tau_i S_i = 0 \quad (3,22)$$

Όπου A η επιφάνεια κάθε φάσης, τ_w η διατμητική τάση, P, το μήκος της περιμέτρου και τ_i η διεπιφανειακή διατμητική τάση. Οι Taitel & Dukler για τις παραπάνω ποσότητες πρότειναν της εξής σχέσεις :

$$\tau_{wG} = f_G \frac{\rho_G U_G^2}{2}, \quad \tau_{wL} = f_L \frac{\rho_L U_L^2}{2}, \quad \tau_i = f_i \frac{\rho_G (U_G - U_L)^2}{2}$$

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

$$F_{(G \dot{\eta} L)} = 16/Re \quad \text{για} \quad Re_{(G \dot{\eta} L)} < 2000 \quad (3,23)$$

$$F_{(G \dot{\eta} L)} = 0.046 Re^{-0.2} \quad \text{για} \quad Re_{(G \dot{\eta} L)} > 2000 \quad (3,24)$$

Η δυσκολία έγκειται στον προσδιορισμό του διεπιφανειακού συντελεστή f_i . Στην βιβλιογραφία προτείνεται μεγάλος αριθμός σχέσεων ωστόσο εμείς θα αναφέρουμε τον προσδιορισμό του Andritsos (1986).

- Σε χαμηλές πιέσεις

$$f_i = f_g \quad \text{για } u_{GS} \leq 5 \text{ m/s} \quad (3,25)$$

$$f_i = f_g [1 + 15(h/D)^{0.5}(-1 + u_{GS}/5)] \quad \text{για } u_{GS} > 5 \text{ m/s} \quad (3,26)$$

- Και σε υψηλές πιέσεις

$$f_i = f_g \quad \text{για } \left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_L}\right)^{0.5} u_{GS} \leq 1 \quad (3,27)$$

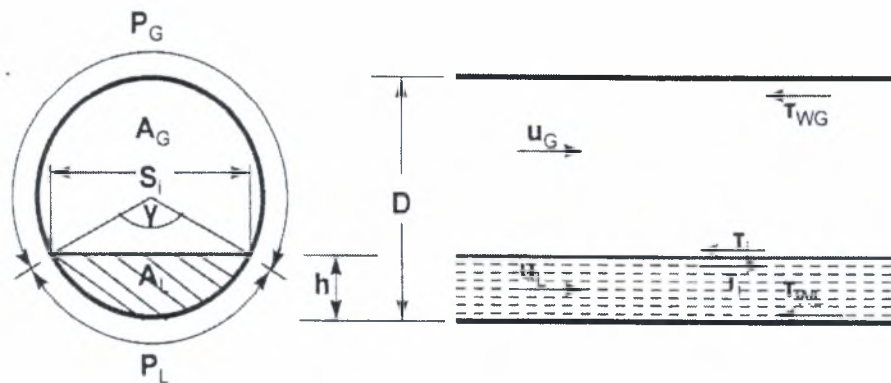
$$\frac{f_i}{f_g} = 1 + 15\left(\frac{h}{D}\right)^{0.5} \left[\left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_L}\right)^{0.5} u_{GS} - 1\right] \quad \text{για } \left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_L}\right)^{0.5} u_{GS} > 1 \quad (3,28)$$

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

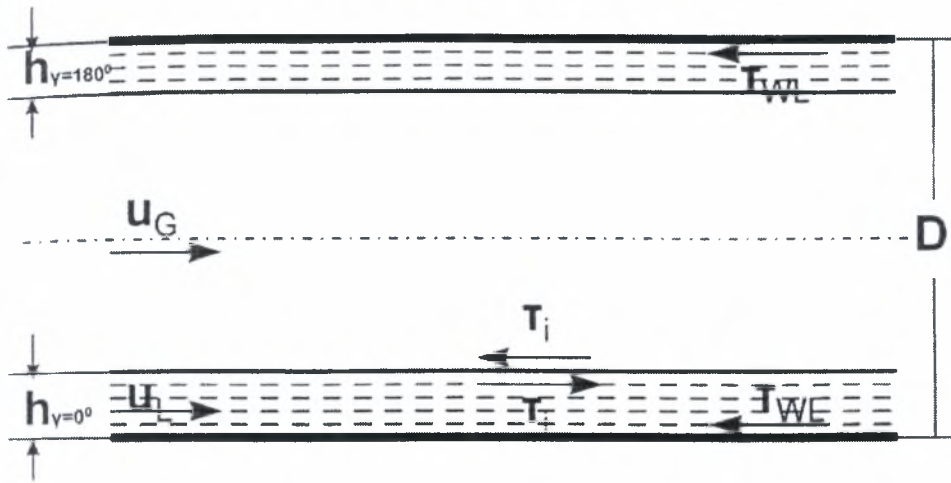
$$\gamma = 2\cos^{-1} [1 - 2(h/D)]$$

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

και έτσι από την εξίσωση (3,21 ή 3,22) υπολογίζουμε την πτώση πίεσης του διαφασικού μίγματος.



σχήμα 1: στρωματωμένη ροή



σχήμα 2: δακτυλιοειδής ροή

3.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΡΟΗΣ

Από τις προσπάθειες των Hewitt και Hall-Taylor το 1970 (John Collier and John Thome) για την κατανόηση των φαινομένων του συμπαρασυρμού και της εναπόθεσης υγρών σταγονιδίων προέκυψε μια μέθοδο μοντελοποίησης της δακτυλιοειδούς ροής η οποία παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω.

Από την εξίσωση διατήρησης της ορμής για τις δυο φάσεις έχουμε :

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_L - \frac{4\tau_{WL}}{D} = 0 \quad (3,29)$$

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_G - \frac{4\tau_i}{(D-2h)} = 0 \quad (3,30)$$

Όπου \bar{h} είναι η μέση τιμή του πάχους της υγρής στοιβάδας όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

Για την υγρή φάση ο πολλαπλασιαστής $\Phi 2L$ θα είναι ίσος με την τιμή της πτώσης πίεσης που έχει το υγρό στο μίγμα προς αυτήν που έχει το υγρό όταν ρέει μόνο του στο σωλήνα, από τις εξισώσεις (3,19) και (3,29) θα έχουμε :

$$\Phi_L^2 = \frac{\tau_{WL}}{\tau_L} \quad (3,31)$$

Όπου τ_L είναι η διατμητική δύναμη του τοιχώματος όταν το υγρό ρέει μόνο του στον αγωγό και τ_{WL} είναι η διατμητική δύναμη του τοιχώματος στο υγρό όταν έχουμε διαφασικό μίγμα.

$$\tau_L = f_L \left(\frac{\rho_L u_L^2}{2} \right) \quad \tau_{WL} = f_{TP} \left(\frac{\rho_L u_{LS}^2}{2} \right) \quad (3,32-33)$$

Αν στην εξίσωση (3,31) αντικαταστήσαμε τις (3,32-33) και από την εξίσωση $u_L = u_{LS} / (1-a)$ θα έχουμε :

$$\Phi_L^2 = \frac{1}{(1-a)^2} \left(\frac{f_{TP}}{f_L} \right) \quad (3,34)$$

Αφού η τραχύτητα του σωλήνα είναι ίδια και στις δυο περιπτώσεις τότε αναμένοντο να είναι $f_L = f_{TP}$ και η εξίσωση (3,34) που μας δίνει την τιμή του πολλαπλασιαστή Φ_{2L} παίρνει την παρακάτω μορφή :

$$\Phi_L^2 = \frac{1}{(1-a)^2} \quad (3,35)$$

Ο συντελεστής τριβής f_L ορίζεται από την εξίσωση του Blaussius.

Για την αέρια φάση ο πολλαπλασιαστής Φ_G^2 θα είναι ίσος με την τιμή της πτώσης πίεσης που έχει το αέριο στο μίγμα προς αυτήν που έχει το αέριο όταν ρέει μόνο του στο σωλήνα, από τις εξισώσεις (3,30) και (3,18) θα έχουμε :

$$\Phi_G^2 = \frac{\tau_i}{\tau_G} \frac{D}{(D-2h)} = \frac{\tau_i}{\tau_G} \frac{1}{a^{1/2}} \quad (3,36)$$

Όπου τ_G είναι η διατμητική δύναμη που ασκεί το τοίχωμα στο αέριο όταν ρέει μόνο του στο σωλήνα και τ_i είναι η διατμητική δύναμη του τοιχώματος όταν έχουμε μίγμα.

$$\tau_G = f_G \left(\frac{\rho_G u_G^2}{2} \right) \quad \tau_i = f_i \left(\frac{\rho_G (u_G - u_i)^2}{2} \right) \quad (3,37-38)$$

Όπου f_i είναι ο διεπιφανειακός συντελεστής τριβής, u_G η μέση ταχύτητα του αερίου και u_i η ταχύτητα του υγρού στη διεπιφάνεια, που συνήθως είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ταχύτητα του αερίου και αγνοείται. Με αντικατάσταση των εξισώσεων (3,37-38) στην (3,36) θα έχουμε :

$$\Phi_G^2 = \frac{1}{a^{5/2}} \frac{f_i}{f_G} \quad (3,39)$$

Αν η διεπιφανειακή είναι ομαλή κάτι που συμβαίνει όμως στις πολύ χαμηλές φαινόμενες ταχύτητες υγρού ($Re_L < 100$) τότε ο λόγος (f_i/f_g) θα είναι σχεδόν ίσος με το ένα και θα έχουμε :

$$\Phi_G^2 = \frac{1}{a^{5/2}} \quad (3,40)$$

Η τιμή του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής f_i ή η τραχύτητα της διεπιφάνειας εξαρτάται άμεσα από το αδιάστατο πάχος υγρής στοιβάδας. Η απλούστερη σχέση που έχει δοθεί είναι αυτή του Wallis(1969) όπου αγνοείται τελείως η ταχύτητα της διεπιφάνειας.

$$\frac{f_i}{f_G} = 1 + 300 \frac{\delta}{D} \quad (3,41)$$

Για μικρές τιμές του πάχους της υγρής στοιβάδας η σχέση 3,41 γίνεται:

$$\frac{f_i}{f_G} = 1 + 75(1-a) \quad (3,42)$$

Η εξίσωση 39 με αντικατάσταση της 42 γίνεται.

$$\Phi_G^2 = \left(\frac{1 + 75(1-a)}{a^{5/2}} \right) \quad (3,42)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

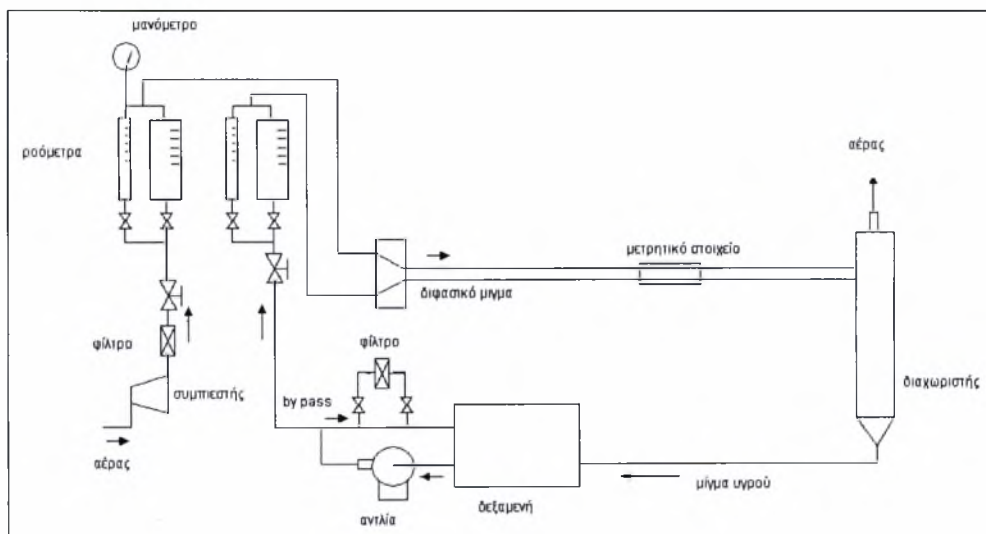
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη που έγιναν οι μετρήσεις και οι παρατηρήσεις φαίνονται στο σχήμα 4.1. Ο οριζόντιος σωλήνας μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η διασπαστική ροή αποτελείται από 4 τμήματα plexiglas συνολικού μήκους 7m περίπου και εσωτερικής διαμέτρου 2,4cm. Περιλαμβάνει το τμήμα είσοδο, το τμήμα ανάμιξης της ροής, το τμήμα μετρήσεων και το τμήμα εξόδου. Τα τμήματα συνδέονται με φλάντζες και έτσι μας δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης και εναλλαγής των διαφόρων μετρητικών διατάξεων στο σύστημα. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ελαστικά δακτυλίδια (o-rings), τοποθετημένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το διάκενο μεταξύ δυο σωλήνων.

Η επιλογή plexiglas έγινε για 2 λόγους :

- Επιτρέπει οπτικές παρατηρήσεις και λήψη φωτογραφιών
- Επεξεργάζεται αρκετά καλά με τον τόρνο και κολλάει εύκολα με χλωροφόρμιο. Επιπλέον είναι αρκετά σκληρό και για πειράματα με όχι δραστικά υγρά δεν αλλοιώνεται.



σχήμα 1: πειραματική διάταξη

Το τμήμα ανάμιξης των δυο φάσεων είναι ένα απλό ‘ταφ’ όπου οι δυο φάσεις εισάγονται υπό γωνία -35° και 35° ως προς την οριζόντια. Η απόσταση μεταξύ του τμήματος ανάμιξης και του τμήματος μετρήσεων είναι 4,78m, δηλαδή περίπου 200 διαμέτροι. Στο τέλος του σωλήνα η ροή εισάγεται εφαπτομενικά σε δοχείο διαχωρισμού φάσεων κατασκευασμένο από φύλλο ανοξείδωτου χάλυβα. Ο αέρας εκρέει στην ατμόσφαιρα από την κορυφή του διαχωριστή και το υγρό από τον πάτο του διαχωριστή για ανακύκλωση στη δεξαμενή που περιέχει το διάλυμα γλυκερίνης και νερού. Το υγρό από το διαχωριστή ανακυκλώνεται με τη βοήθεια φυγοκεντρικής αντλίας .

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη ήταν νερό του δικτύου ύδρευσης. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης 100 μπουκάλια 1Kg γλυκερίνης. Η ρύθμιση της παροχής του υγρού γίνεται από μια βάνα και η μέτρησή της παροχής γίνεται από δυο

ροόμετρα, ένα μικρό και ένα μεγάλο. Για την αποφυγή στραγγαλισμού της αντλίας στην έξοδο της υπάρχει ένα by-pass που οδηγεί το επιπλέον υγρό πίσω στη δεξαμενή.

Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται από συμπιεστή και στη συνέχεια υφίσταται μερική ξήρανση και καθαρισμό. Η παροχή του αέρα ρυθμίζεται από μια βάνια διαφράγματος. Η μέτρηση της παροχής γίνεται από 2 ροόμετρα ένα μικρό και ένα μεγάλο (με ενδεικτικό αριθμό 1 και 2 αντίστοιχα) στα οποία έχει τοποθετηθεί ένα μανόμετρο που μετράει την πίεση του αέρα μέσα στα ροόμετρα. Η μέγιστη ογκομετρική παροχή αέρα που μπορεί να περάσει από το ροόμετρο 1 και 2 είναι 14m³/h και 84m³/h.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην πλήρως οριζοντιοποίηση του σωλήνα. Αυτό έγινε κλείνοντας το σωλήνα στο τέλος, γεμίζοντας λίγο νερό στο σωλήνα, παρατηρώντας τη στάθμη του νερού σε κάθε σημείο του σωλήνα και ρυθμίζοντας κάθε σημείο των στηριγμάτων του σωλήνα. Πρόβλημα εμφανίστηκε στο σημείο που υπάρχει το μετρητικό στοιχείο. Λόγω του βάρους του τομέα αυτού ο σωλήνας έκανε καμπύλη και χρειάστηκε να τοποθετηθούν κάποια επιπλέον στηρίγματα για την οριζοντιοποίηση του τομέα αυτού.

4.2 ΤΜΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στοιβάδας χρησιμοποιήθηκε μια πειραματική διάταξη από plexiglas η μορφή της οποίας φαίνεται στο σχήμα 4.1. Τα καθαυτά μετρητικά στοιχεία (β) έχουν τη μορφή βύσματος (plug) και μπορούν να τοποθετούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές. Κάθε ζεύγος συρμάτων είναι κατασκευασμένο από μεταλλικά ανοξείδωτα σύρματα (chromel) διαμέτρου 0.5mm που απέχουν μεταξύ τους 2mm. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται ένα μετρητικό στοιχείο με ζεύγος παράλληλων συρμάτων.

4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΧΟΥΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ

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

A) Άμεσες μέθοδοι

Ως άμεσες μέθοδοι χαρακτηρίζονται αυτές που χρησιμοποιούν κατάλληλα μικρόμετρα σε απευθείας επαφή με το υγρό. Τέτοια μέθοδο χρησιμοποίησε στο παρελθόν ο Kirkdride (1934) και άλλοι. Όταν εφαρμόζεται προσεκτικά και με ακρίβεια είναι χρήσιμη για τιμές πάχους σε στρωτή ροή χωρίς κύματα, όταν όμως αρχίσουν οι κυματισμοί τότε εισάγει σφάλμα. Μια τροποποιημένη εφαρμογή είναι αυτή που μια λεπτή βελόνα στηριγμένη με μικρόμετρο τοποθετείται κατάλληλα έτσι ώστε να αγγίζει το υγρό.

B) Έμμεσες μέθοδοι

Επιγραμματικά αναφέρουμε τις παρακάτω μεθόδους :

- Μεθοδος αποχέτευσης ή κατακράτησης
- Φωτογραφίες σκιών
- Ραδιενεργοί ιχνοθέτες
- Μέθοδος εξισορροπητικού υγρού
- Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης και ηλεκτρικής χωρητικότητας (αγωγιμομετρική μέθοδος)
- Φωτομετρικές μέθοδοι – Μέθοδοι οπτικής παρεμβολής

4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

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 δυο συρμάτων, τοποθετημένα εφαπτομενικά πάνω στο τοίχωμα οπού ρέει μια υγρή στοιβάδα εξαρτάται από το πάχος της στοιβάδας. Η ηλεκτρική συμπεριφορά αυτού του είδους των στοιχείων μελετήθηκε από τον Coney (1973), ο οποίος τόνισε ότι η μέθοδος χάνει τη 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 απόσταση των δυο ηλεκτροδίων, αλλά αύξηση της απόστασης αυτής δεν δίνει πια τοπικές μετρήσεις. Η σχέση που συνδέει την αγωγή του ρεύματος με το πάχος του υγρού προσδιορίζεται πειραματικά. Καθώς η υγρή στοιβάδα ξεπερνά κάποια τιμή, χάνεται η γραμμικότητα μεταξύ αγωγής και πάχους στοιβάδας και η αγωγή τείνει προς μια σταθερή τιμή ρεύματος.

Τα αγωγιμομετρικά σύρματα για μεγαλύτερο πάχος στοιβάδας χρησιμοποιήθηκαν από τον Swatson (1966) και κυρίως από τον Hanratty και τους συνεργάτες του (Miya et al 1971, Tatterson 1975, Dalman 1978, Laurinat 1979, Andritsos 1986). Η ηλεκτρική συμπεριφορά αυτών των συρμάτων παρουσιάζεται από τον Brown (1978). Αυτή η τεχνική απαιτεί δυο λεπτά παράλληλα σύρματα τοποθετημένα δίπλα-δίπλα στο σωλήνα, κάθετα στη διεύθυνση της ροής. Χρησιμοποιώντας το υγρά σαν αγωγό είναι δυνατόν να μετρηθεί η αντίσταση μεταξύ των δυο συρμάτων και να μετατραπεί σε πάχος υγρής στοιβάδας. Η ηλεκτρική αντίσταση ανάμεσα σε δυο παράλληλα σύρματα που είναι κάθετα στη ροή δίνεται από τη σχέση :

$$R_f = \frac{1}{\pi \gamma_m h} \ln \frac{D_c + (D_c^2 - d_w^2)^{0.5}}{d_w} \quad (4,1)$$

όπου :

R_f η αντίσταση, ohm

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

D_c η απόσταση μεταξύ των συρμάτων, m

d_w η διάμετρος των συρμάτων, m

h το 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.

Το μετρητικό στοιχείο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25KHz) για να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του υγρού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του ύψους του υγρού, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει

το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές, οι οποίες μετρούνται στα άκρα μιας μικρής αντίστασης (50 Ω), τροφοδοτούνται σε ειδικό αναλυτή.

Ο αναλυτής αυτός 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 σε 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 εξασφαλίζει την έξοδο του συνεχή τάση απαλλαγμένη από την υψηλή συχνότητα του φορέα και ανάλογη των μεταβολών του πάχους της υγρής στοιβάδας.

Η βαθμονόμηση του αναλυτή γίνεται χρησιμοποιώντας γνωστές ωμικές αντιστάσεις αντί των συρμάτων που καλύπτουν όλο το εύρος των μετρούμενων τιμών πάχους υγρού (από 232 Ω μέχρι 37500 Ω). Η τάση βρέθηκε να είναι καμπύλη δευτέρου βαθμού.

Για τη βαθμονόμηση των παράλληλων συρμάτων, δηλαδή τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ του πάχους της υγρής στοιβάδας και της μετρούμενης αγωγιμότητας ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία:

Απομονώνουμε το μετρητικό στοιχείο από την πειραματική διάταξη, το τοποθετούμε με προσοχή οριζόντια και σφραγίζουμε τα άκρα του με φλάντζες. Ρίχνοντας κάθε φορά γνωστή ποσότητα νερού, σημειώνουμε την τάση εξόδου του αναλυτή. Στη συνέχεια γνωρίζοντας τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του μετρητικού στοιχείου (κύλινδρος) μετατρέπουμε την ποσότητα του υγρού σε ύψος υγρής στοιβάδας χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις :

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{h}{D} \right) \quad (4,2)$$

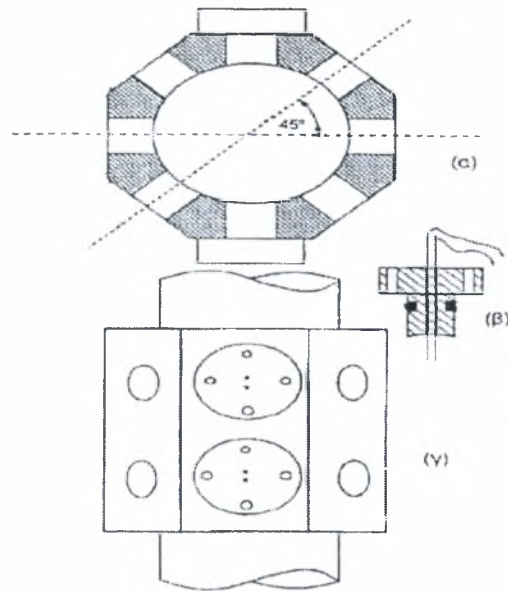
και

$$V_L = \frac{LD^2}{8} (\gamma - \sin \gamma) \quad (4,3)$$

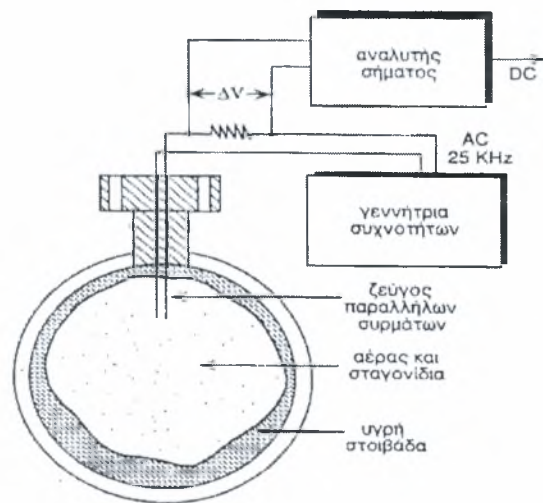
Έτσι προκύπτει μια σχέση που συνδέει το πάχος της υγρής στοιβάδας με την αγωγή του ρεύματος μέσα από τη στοιβάδα, παρατηρώντας ότι στον αέρα (άπειρη

αντίσταση η τάση εξόδου είναι μηδέν. Η βαθμονόμηση των συρμάτων φαίνεται στο παράρτημα. Η σχέση μεταξύ του πάχους της υγρής στοιβάδας και αγωγή ρεύματος όταν τα σύρματα είναι παράλληλα πρέπει να είναι γραμμική. Όμως μια μικρή απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι τα σύρματα δεν είναι απολύτως παράλληλα.

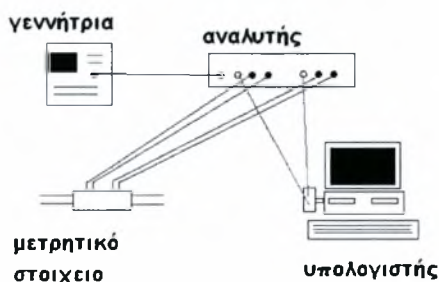
Η ακρίβεια της τεχνικής αυτής εκτιμάται ότι είναι της τάξης του +/- 5%, συνυπολογιζόμενης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στη διαδικασία της βαθμονόμησης (π.χ. μεταβολές θερμοκρασίας, ηλεκτρονικός θόρυβος κ.α.). Επιπλέον για υγρές στοιβάδες πάχους μικρότερο των 0,05mm τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται αξιόπιστα. Επίσης, όταν κατά την εξέλιξη της ροής το ύψος του υγρού ελαττωθεί απότομα, ένα μέρος του υγρού παραμένει πάνω στα σύρματα προκαλώντας ανίχνευση μεγαλύτερου πάχους από το πραγματικό.



σχήμα 2: μετρητικό στοιχείο



σχήμα 3



σχήμα 4 συνδεσμολογία μετρητικού στοιχείου

4.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟ

Για τη μέτρηση της υγρής στοιβάδας, εκτός από την αγωγιμομετρική μέθοδο, χρησιμοποιήθηκε μια κατάλληλα βαθμονομημένη ‘μεζούρα’ για τις περιοχές όπου έχουμε λεία διαχωρισμένη ροή, μετάπτωση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη ροή και μετάπτωση από λεία σε διαχωρισμένη ροή. Αφού μετρήσαμε την υγρή περιφέρεια του αγωγού, μετατρέψαμε τα αποτελέσματα σε ύψος υγρής στοιβάδας με τους παρακάτω τύπους :

$$P_L = D \left(\frac{\gamma}{2} \right) = D \cos^{-1} \left(1 - 2 \left(\frac{h}{D} \right) \right) \quad (4,4)$$

$$\cos \left(\frac{P_L}{D} \right) = \left(1 - 2 \frac{h}{D} \right) \quad (4,5)$$

$$\frac{h'}{D} = \frac{1 - \cos \left(\frac{P_L}{D} \right)}{2} \quad (4,6)$$

$$\frac{h}{d} = \frac{(h' - t)}{d} = \frac{\left[\left(\frac{h'}{D} \right) D - t \right]}{d} \quad (4,7)$$

4.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στα πειράματα κατασκευάζονται χάρτες περιοχών ροής για τα ακόλουθα συστήματα : νερό(1cp) -αέρας, νερό/ γλυκερίνη 70% (18,5 cp)-αέρας , νερό/ γλυκερίνη 60% (10 cp)-αέρας, νερό/ γλυκερίνη 35% (3,5 cp)-αέρας. Εξετάζεται η επίδραση του ιξώδους στη διαμόρφωσή καθεστώτων ροής .

Πριν αλλά και κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ελέγχεται η θερμοκρασία του υγρού διότι μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί σημαντική μεταβολή στο ιξώδες άρα και σφάλμα στις παρατηρήσεις και τις μετρήσεις . Επίσης ελέγχεται πριν και μετά από κάθε πείραμα αν υπάρχει μεταβολή της σύστασης των υδατικών διαλυμάτων λόγω εξάτμισης του νερού (πιο πτητική από τη βουτανόλη. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με την μέτρηση του ιξώδους και στη συνέχεια προσθέτουμε λίγο νερό στο υδατικό διάλυμα αν χρειάζεται.

Για κάθε σύστημα ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια με τη σειρά που αναφέρονται :

- Γίνεται πρώτα η βαθμονόμηση των δυο ροόμετρων του υγρού που καλύπτουν την περιοχή των φαινομενικών ταχυτήτων που ενδιαφέρουν. Πρέπει να τονιστεί ότι τα ροόμετρα του αέρα είναι βαθμονομημένα και δεν χρειάζεται να βαθμονομηθούν για κάθε διαφορετική σύσταση του υγρού. Αυτό διότι η φαινομενική ταχύτητα του αέρα δεν εξαρτάται από το υδατικό διάλυμα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα.
- Γίνεται μέτρηση του ιξώδους και της θερμοκρασίας του υδατικού διαλύματος αφού ληφθεί δείγμα από τη δεξαμενή του υγρού.
- Αφού ανοίξουμε την αντλία του υγρού, ανοίγουμε τις βάνες τροφοδοσίας του νερού και του αερίου. Το υγρό και το αέριο περνάνε πρώτα από τα ροόμετρα. Η περιοχή των φαινομενικών ταχυτήτων που μας ενδιαφέρει, καλύπτεται από δυο ροόμετρα αέρα και δυο ροόμετρα νερού τα οποία λειτουργούν ανεξάρτητα το ένα από τα άλλα και τα οποία είναι μόνιμα συνδεδεμένα με το δίκτυο. Πρέπει η τιμή της υπερπίεσης στα ροόμετρα του αέρα να μην ξεπερνάει τα 2bar.
- Καθορίζονται τα ζεύγη των ταχυτήτων που καλύπτουν την περιοχή που μας ενδιαφέρει. Κρατάμε σταθερή την παροχή του υγρού και αυξάνουμε σταδιακά

την παροχή του αέρα παρατηρώντας και σημειώνοντας κάθε φορά το καθεστώς ροής στο οποίο βρισκόμαστε. Αφού καλύψουμε αρκετές παροχές του αέρα στο ένα ροόμετρο κάνουμε το ίδιο και για το δεύτερο ροόμετρο.

Στη συνέχεια αυξάνουμε την υγρή παροχή και επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία. Αφού καλύψουμε αρκετές παροχές του υγρού επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και για το δεύτερο ροόμετρο του υγρού. Πρέπει να τονιστεί ότι απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα 2-10min – 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.

- Την ίδια διαδικασία ακολουθούμε κρατώντας την παροχή του αέρα σταθερή και μεταβάλλοντας την παροχή του υγρού. Έτσι καλύπτουμε και αλλαγές καθεστώτων ροής που ίσως να μην αντιλαμβανόμαστε καλά έχοντας μόνο την παροχή του υγρού σταθερή (π.χ. στην μετάβασή από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή). Αφού έχουμε όλα τα ζεύγη φαινομενικών ταχυτήτων για όλα τα μίγματα νερού γλυκερίνης, είμαστε έτοιμοι να δημιουργήσουμε τους χάρτες καθεστώτων ροής. Ο προσδιορισμός των καθεστώτων ροής γίνεται οπτικά σε τμήμα που απέχει 5 m από το σημείο εισόδου αέρα – υγρού. Η μεγαλύτερη δυσκολία υπήρξε στην μετάβαση από διαλείπουσα σε ψευδοδιαλείπουσα ροή λόγω της ομοιότητας των δυο αυτών καθεστώτων.
- Στην περιοχή που έχουμε μετάβαση από λεία διαχωρισμένη ροή σε διαχωρισμένη με κύματα και σε διαλείπουσα ροή μετράμε το ύψος του υγρού στην αρχή, στη μέση και στο τέλος του σωλήνα και κατασκευάζουμε διαγράμματα της φαινόμενης ταχύτητες του αερίου σε σχέση με το ύψος της υγρής στοιβάδας για την αρχή, τη μέση και το τέλος του σωλήνα.

4.7 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ

Για κάθε σύστημα νερού /γλυκερίνης πρέπει να γίνεται βαθμονόμηση των ροόμετρων υγρού. Για τη διαδικασία αυτή απομονώνεται ο αγωγός από το διαχωριστή στο τέλος του σωλήνα και οδηγείται στη δεξαμενή με λάστιχο που εφαρμόζεται στο τέλος του σωλήνα. Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα να μετράμε το βάρος του υγρού και το χρόνο. Για κάθε σύστημα νερού/ γλυκερίνης μετράμε την πυκνότητα του διαλύματος, αφού πρώτα γνωρίζουμε την αναλογία νερού/ γλυκερίνης

στο διάλυμα. Η αναλογία αυτή γίνεται γνωστή εφόσον υπολογιστεί το ιξώδες του διαλύματος και στη συνέχεια από τον πίνακα των ιδιοτήτων του διαλύματος νερού γλυκερίνης υπολογίζεται η πυκνότητα του διαλύματος.

Η ογκομετρική παροχή του υγρού υπολογίζεται ως :

$$Q = V/1000t \quad (4,8)$$

Όπου Q σε m³/s V σε lt και t σε sec.

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

$$U_{SL} = \frac{Q \cdot 4}{\pi R^2} \quad (4,9)$$

Όπου U_{SL} σε m/s , Q σε m³/s και R σε m.

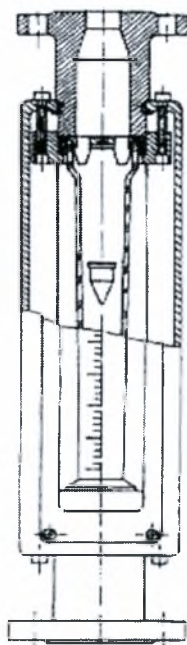
Στη συνέχεια σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων παριστάνεται η φαινομενική ταχύτητα του υγρού ως προς την ένδειξη του ροόμετρου. Συνήθως η σχέση μεταξύ της φαινομενικής ταχύτητας και της ένδειξης του ροόμετρου είναι πρώτου βαθμού. Για τα ροόμετρα της αέριας φάσης δεν χρειάστηκε να γίνει βαθμονόμηση γιατί ήταν ήδη βαθμονομημένα. Η βαθμονόμηση όλων των ροόμετρων, για κάθε σύστημα, φαίνονται στο παράρτημα.

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

$$\rho_b g V_b = \rho g V_b + F_d$$



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. Χρησιμοποιούνται δυο ροόμετρα για το υγρό και δυο



για τον αέρα, για μικρές και μεγάλες παροχές αντίστοιχά. Στο σχήμα φαίνεται ο τύπος του ροόμετρου που χρησιμοποιήθηκε.

4.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΞΩΔΟΥΣ

Για την αλλαγή του ιξώδους του υγρού χρησιμοποιούμε γλυκερίνη. Χρησιμοποιούμε γλυκερίνη διότι έχει την ιδιότητα να αυξάνει το ιξώδες του διαλύματος κρατώντας σχεδόν σταθερές κάποιες ιδιότητες του διαλύματος όπως η επιφανειακή τάση και η πυκνότητα του διαλύματος, οι οποίες αν δεν είναι σταθερές επηρεάζουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν 100 δοχεία γλυκερίνης 1Kg γλυκερίνης το καθένα.

Το ιξώδες ή συνεκτικότητα (viscosity) είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των ρευστών και είναι το αίτιο εμφάνισης της διατμητικής εντατικής κατάστασης στη μάζα τους. 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 δυο στερεών σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή και κινούνται σχετικά. Γι' αυτό το λόγο ονομάζεται και εσωτερική τριβή. Η φύση όμως των δυο δυνάμεων είναι τελείως διαφορετική. Επίσης γι' αυτό το λόγο

παρατηρείται γρηγορότερη αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη ροή υγρών με μεγάλο ιξώδες.

Πριν από κάθε πείραμα πρέπει να γίνεται μέτρηση του ιξώδους. Αυτό γίνεται με μια συσκευή στην οποία τοποθετούμε ένα μικρό δείγμα του διαλύματός και μετράμε τον δείκτη διάθλασης του διαλύματος. Στη συνέχεια από τον πίνακα των ιδιοτήτων του διαλύματος νερού και γλυκερίνης υπολογίζεται το ιξώδες αλλά και η αναλογία νερού και γλυκερίνης στο διάλυμα

4.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΙΞΩΔΕΣ ΥΓΡΟΥ

Πριν την μέτρηση του ιξώδους πρέπει να γίνεται μέτρηση της θερμοκρασίας, διότι η θερμοκρασία επηρεάζει το ιξώδες. Πιο συγκεκριμένα το ιξώδες του υγρού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε μια μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών πάνω από το σημείο πήξης και κάτω από το σημείο βρασμού, η εξάρτηση του λογαρίθμου του ιξώδους από το αντίστροφο της απόλυτης θερμοκρασίας $1/T$, είναι γραμμική. Το παραπάνω είναι αποτέλεσμα της συσχέτισης Andrade :

$$\mu = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (4,10)$$



Έχουν προταθεί επίσης και άλλες συσχετίσεις του ιξώδους βάσει της θερμοκρασίας. Η γενική μορφή στην οποία καταλήγουν είναι η ακόλουθη :

$$\mu \cdot f_1(V) = A \cdot \exp \frac{Bf_2(V)}{T} \quad (4,11)$$

Οι συναρτήσεις f_1 και f_2 ποικίλουν ανάλογα με τον ερευνητή που προτείνει την κάθε συσχέτιση.

Για χαμηλές θερμοκρασίες η ακόλουθη σχέση έδωσε αρκετά ακριβής συσχετίσεις :

$$\mu = A \exp \frac{B}{(T+C)} \quad (4,12)$$

Παρ' όλες τις πολυάριθμες προτεινόμενες συσχετίσεις, η συσχέτιση Andrade είναι αυτή που χρησιμοποιείται περισσότερο, αν και σε πάρα πολύ χαμηλές θερμοκρασίες

δεν είναι η κατάλληλη, μια και το ιξώδες αυξάνεται απότομα πλησιάζοντας το σημείο πήξης του υγρού. Στην εξίσωση Andrade έγιναν πολλές όχι πετυχημένες προσπάθειες συσχέτισης των σταθερών A, B με την τάση ατμών του υγρού, την ενθαλπία εξάτμισης ή άλλες φυσικές ιδιότητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

5.1 ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ

Τα αποτελέσματα ως αναφορά τα καθεστώτα ροής παρουσιάζονται σε χάρτες καθεστώτων ροής (τύπου Mandhane) όπως φαίνονται στα σχήματα.

Για την αναγνώριση των καθεστώτων ροής έγινε οπτικά. Η μεγαλύτερη δυσκολία παρουσιάστηκε στην αναγνώριση της ψευδοδιαλείπουσας ροής λόγω της ομοιότητας της με την διαλείπουσα στα αριστερά, με τη δακτυλιοειδή στα δεξιά και με τη διαχωρισμένη με κύματα στο κάτω μέρος της περιοχής της ψευδοδιαλείπουσας ροής. Επίσης, η ροή σε χαμηλές ταχύτητες αερίου δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη με αποτέλεσμα την ύπαρξη υδραυλικής κλίσης.

Συμφωνά με τους χάρτες καθεστώτων ροής το πρώτο βασικό συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι υγρά με χαμηλό ιξώδες χρειάζονται μεγαλύτερες παροχές υγρού για να ξεκινήσει η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, όταν η παροχή του αερίου είναι μικρή και μικρότερη παροχή υγρού, όταν μεγαλώνει η παροχή του αερίου. Αυτός είναι ο πρωταρχικός λόγος για την αλλαγή στο σχήμα της ψευδοδιαλείπουσας ροής που φαίνεται να μικραίνει με την αύξηση του ιξώδους του υγρού.

Μια άλλη σημαντική επίδραση του ιξώδους είναι το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται το ιξώδες, χρειάζεται μεγαλύτερη παροχή αερίου για να ξεκινήσουν τα κανονικά δισδιάστατα κύματα. Επιπλέον, με αύξηση πάλι του ιξώδους, μικραίνει η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων. Άλλωστε, όπως έχει παρατηρηθεί, η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων παύει να υπάρχει για πολύ μεγάλο ιξώδες (Andritsos 1986).

Μια άλλη περιοχή που φαίνεται να επηρεάζεται από την αύξηση του ιξώδους είναι η δακτυλιοειδής. Το ιξώδες επηρεάζει το σκαρφάλωμα του υγρού στα

αραιά. Επίσης, κάποια κύματα έχουν μεγαλύτερο ύψος από κάποια άλλα. Μετά από κάποιο κύμα με μεγάλο ύψος ακολουθούν 3-4 κύματα πολύ μικρού ύψους. Με αύξηση της ταχύτητας του αερίου το μήκος των κυμάτων μικραίνει σε όλο το μήκος του σωλήνα.

Όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα του υγρού το ύψος των κυμάτων είναι μεγαλύτερο. Σε καταστάσεις κοντά σε ψευδοδιαλείπουσα ροή κάποια από τα ‘μεγάλου πλάτους’ κύματα κολλάνε και παρασύρονται μεταξύ του δημιουργώντας ένα κύμα μεγάλου ύψους που τείνει να ακουμπήσει το πάνω μέρος του σωλήνα. Το μήκος των κυμάτων αυτών μπορεί να φτάνει και το 1m. Αυτά τα κύματα έχουν την ονομασία ‘roll waves’ από τους Hanratty & Engen (1957).

Πάνω από συγκεκριμένη ταχύτητα αερίου το υγρό αρχίζει να σκαρφαλώνει πάνω στα τοιχώματα του σωλήνα. Τα κύματα που εμφανίζονται είναι πολύ μικρού μήκους και ύψους αλλά και μεγάλης ταχύτητας τα οποία έχουν καμπυλοειδή μορφή. Επιπρόσθετα σταγόνες του υγρού δραπετεύουν από την αέρια φάση και επικάθονται στα τοιχώματα του σωλήνα. Η αρχή της εκνέφωσης ορίζεται σε ταχύτητες αερίου που παρατηρούνται οι πρώτες σταγόνες στην κορυφή του σωλήνα, παρόλο που η διαδικασία της εκνέφωσης αρχίζει σε χαμηλότερες ταχύτητες αερίου. Καθώς μεγαλώνει η ταχύτητα του υγρού χρειάζεται μικρότερη ταχύτητα αερίου για την αρχή της εκνέφωσης.

5.2.2 ΥΓΡΟ ΜΕ ΥΨΗΛΟ ΙΞΩΔΕΣ

Η μορφή της διεπιφάνειας σε αυτήν την περίπτωση, δηλαδή για υγρό με ιξώδες 11cp και 19cp διαφέρει από αυτή με χαμηλό ιξώδες στο ότι η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων είναι μικρότερη και ότι η διεπιφάνεια φαίνεται να είναι λιγότερο εκτραχυνσμένη. Για μεγαλύτερο ιξώδες υγρού (π.χ. 80cp) έχει παρατηρηθεί ότι η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων δεν υπάρχει.

Οι πρώτες διαταραχές που παρατηρούνται καθώς μεγαλώνει η ταχύτητα του αερίου είναι δισδιάστατα κύματα μικρού πλάτους, μήκους και ύψους. Καθώς μεγαλώνει η ταχύτητα του αερίου, το μήκος των κυμάτων γίνεται μεγαλύτερο. Σε γενικές γραμμές το μήκος των κυμάτων είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση αυτή απ’ ότι στα υγρά με χαμηλότερο ιξώδες. Η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων στην περίπτωση με υγρό 11cp είναι μεγαλύτερη απ’ αυτήν με υγρό 19cp.

Με μικρή αύξηση της ταχύτητας του αερίου εμφανίζονται τα ακανόνιστα μεγάλου πλάτους κύματα. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται ότι υπάρχουν κύματα πολύ μεγάλου μήκους και ύψους και κάποια μικρού μήκους και ύψους. Πιο συγκεκριμένα μετά από κάθε μεγάλο κύμα υπάρχουν δυο με τρία δισδιάστατα κύματα μικρού μήκους και ύψους. Με αύξηση της ταχύτητας του αερίου το μήκος των κυμάτων μικραίνει και οι κορυφές γίνονται πιο καμπύλες. Η απόσταση των κυμάτων γίνεται 1-2 cm. Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας υπάρχει μια συνεχή ένωση και διαχωρισμός των κυμάτων.

Καθώς η κορυφή των κυμάτων γίνεται πιο καμπυλοειδής αρχίζει το σκαρφάλωμα του υγρού γύρω από τον αγωγό και η εκνέφωση. Οι σταγόνες που δημιουργούνται φαίνεται να είναι πιο μικρές απ' ό τι στην περίπτωση του υγρού με χαμηλό ιξώδες. Οι σταγόνες αυτές σχηματίζονται από την κορυφή ενός 'μεγάλου πλάτους' κύματος και όχι από τη μετακίνηση κάποιου κύματος όπως γίνεται σε ροές με νερό. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου η εκνέφωση γίνεται πιο έντονη και λουρίδες υγρού σχηματίζονται πάνω στον αγωγό. Αυτές οι λουρίδες 'ταξιδεύουν' μικρότερες αποστάσεις απ' ό τι όταν έχουμε σε υγρά με μικρό ιξώδες, πριν αυτές ενωθούν με τη υγρή στοιβάδα. Η εμφάνιση αυτών των λουρίδων εξαρτάται από το χαρακτηριστικά του υλικού του αγωγού και την ιστορία του αγωγού. Σε αγωγούς από plexiglas αυτές οι λουρίδες παρατηρούνται μόνο σε περιοχές του αγωγού που έχουν καθαριστεί προηγουμένως, αλλιώς οι περιοχές αυτές καλύπτονται από ένα λεπτό υγρό στρώμα όταν αρχίζει η εκνέφωση. Αυτό το στρώμα μπορεί εύκολα να εξαφανιστεί από αυτό της δακτυλιοειδούς ροής.

5.3 ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗ ΡΟΗ

Για τη μετάβαση από διαχωρισμένη ροή σε δακτυλιοειδή ροή οφείλεται στην εναπόθεση των σταγονιδίων και η δημιουργία αυτών των λουρίδων υγρού, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, στην περιφέρεια του σωλήνα. Ένας επιπρόσθετος μηχανισμός για το ξεκίνημα της δακτυλιοειδούς ροής, ιδιαίτερα για αγωγούς μικρής διατομής είναι βρέξιμο των κυμάτων πάνω στην περιφέρεια του αγωγού. Τα κύματα είναι πολύ πιο μεγάλα και εμφανίζονται να σκαρφαλώνουν γύρω από την περιφέρεια του αγωγού. Σε μεγάλες ταχύτητες αερίου αυτά τα κύματα ή αλλιώς οι διαταραχές αυτές εξαφανίζονται

Η δακτυλιοειδής ροή σε υγρά με μεγαλύτερο ιξώδες έχει κάποιες διαφορές με αυτή των χαμηλότερων ιξωδών. τα κύματα που εμφανίζονται στο ξεκίνημα της δακτυλιοειδούς ροής έχουν πιο φαρδιές κορυφές και το μήκος τους είναι μεγαλύτερο. Στην πραγματικότητα κάποια από αυτά τα κύματα σκαρφαλώνουν στην περιφέρεια του σωλήνα.

Η μετάπτωση από ψευδοδιαλείπουσα σε δακτυλιοειδή περιοχή γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο :

Η ψευδοδιαλείπουσα ροή σχηματίζεται αρχικά από την ένωση κυμάτων μεγάλου πλάτους. Σε μεγάλες ταχύτητες αερίου τα κύματα αυτά αυξάνονται και η υγρή στοιβάδα μειώνεται λόγω της εκνέφωσης αλλά και της αντίστασης του αερίου και τα κύματα αυτά τείνουν να κινηθούν ψηλότερα γύρω από την περιφέρεια του αγωγού. Αυτοί οι παράγοντες κάνουν τα κύματα πιο λεπτά και κάνουν την ένωσή τους για το σχηματισμό της ψευδο-διαλείπουσας ροής πιο δύσκολη. Έτσι, σε καταστάσεις όπου δεν σχηματίζεται ψευδοδιαλείπουσα ροή τα κύματα τυλίγουν την περιφέρεια του αγωγού και σχηματίζουν δακτυλιοειδή ροή.

5.4 ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΚΑΙ ΨΕΥΔΟ-ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΡΟΗ

Για χαμηλές ταχύτητες αερίου και καθώς το ιξώδες του υγρού αυξάνεται, χρειάζεται χαμηλότερες ταχύτητες υγρού για τη μετάβαση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή. Για μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου (μεγαλύτερες από αυτές που χρειάζονται για το ξεκίνημα των ακανόνιστων κυμάτων μεγάλου πλάτους) η μετάβαση σε ψευδο-διαλείπουσα ροή φαίνεται να είναι ανεπηρέαστη από την αλλαγή του ιξώδους. Ωστόσο, η περιοχή της ψευδο-διαλείπουσας ροής φαίνεται να μικραίνει με την αύξηση του ιξώδους του υγρού.

Τα ‘slugs’ σε όλες τις περιπτώσεις δημιουργούνται στην αρχή του σωλήνα, σε απόσταση 100 διαμέτρους περίπου από την είσοδο του υγρού και του αερίου, σε αντίθεση με άλλους ερευνητές οι οποίοι παρατήρησαν ξεκίνημα της διαλείπουσας ροής σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις από την αρχή του σωλήνα. Όταν η ταχύτητα του αερίου είναι μικρή και του υγρού σχετικά μικρή, οι υγρές μάζες που δημιουργούνται έχουν μεγάλο μήκος και εμφανίζονται με μικρή συχνότητα. Όσο μεγαλώνει η ταχύτητα του αερίου οι υγρές μάζες έχουν μικρότερο μήκος, ενώ όσο

μεγαλώνει η ταχύτητα του υγρού οι υγρές μάζες γίνονται πιο συχνές. Αυτές οι παρατηρήσεις ισχύουν ανεξάρτητα από το ιξώδες του υγρού.

Ο μηχανισμός για τη μετάβαση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή για $U_{SG} < 4$ m/s είναι περισσότερο καθαρός σε ροές με μεγάλο ιξώδες (19 cp). Στην περίπτωση αυτή η διεπιφάνεια διαχωρισμένης ροής είναι ομαλή. Όταν το ύψος της υγρής στοιβάδας σταθεροποιηθεί, δημιουργούνται κάποιες ‘ημιτονοειδείς’ διαταραχές με μήκος περίπου 2-3 cm. Αυτές εμφανίζονται για ένα δευτερόλεπτο και στη συνέχεια δίνουν τη θέση τους κύμα μεγάλου πλάτους το οποίο μεγαλώνει πολύ γρήγορα και καταλαμβάνει όλη τη διάμετρο του σωλήνα. Οι διαταραχές αυτές δημιουργούνται διότι η υγρή στοιβάδα στραγγαλίζει το αέριο. Όσο αυξάνεται το U_{SG} η στάθμη της υγρής στοιβάδας μειώνεται λόγω της αντίστασης του αερίου και γίνεται τόσο λεπτή που τα κύματα που υπάρχουν δεν είναι ικανά να καταλάβουν όλη τη διάμετρο του αγωγού.

Για υγρά με μικρότερο ιξώδες (11cp) και για ταχύτητες < 3 m/s δημιουργούνται πάλι ‘ημιτονοειδείς’ διαταραχές. Όταν το ύψος του υγρού είναι αρκετά ψηλό για την εμφάνιση των slugs για κάποιο μικρό μήκος του υγρού εμφανίζονται οι διαταραχές αυτές για μερικά δευτερόλεπτα και αφού προχωρήσουν για 1m περίπου δημιουργούν κύμα μεγάλου πλάτους και στη συνέχεια μετατρέπεται σε διαλείπουσα ροή. Για λίγο μεγαλύτερο U_{SG} (3-4,5 m/s) υπάρχουν κύματα μικρού μήκους σε όλο το μήκος του σωλήνα. Αυτά με μικρή αύξηση της ταχύτητας του υγρού μετατρέπονται σε κύματα μεγάλου πλάτους ένα από αυτά μετατρέπεται σε slug.

Για υγρά με χαμηλό ιξώδες κατά τη μετάβαση από στρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή υπάρχουν δισδιάστατα κύματα και η μετατροπή γίνεται με το μηχανισμό που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Σε μεγάλες ταχύτητες του αερίου, δηλαδή στην περιοχή όπου έχουμε ακανόνιστα κύματα μεγάλου πλάτους, με αύξηση της ταχύτητας του υγρού πολλά από τα κύματα αυτά ενώνονται και δημιουργούν ένα μεγάλο κύμα που καταλαμβάνει όλη τη διατομή του αγωγού. Η μετάβαση αυτή δε φαίνεται να επηρεάζεται από την αλλαγή του ιξώδους του υγρού.

Σε όλες τις περιπτώσεις για μεγάλες ταχύτητες υγρού οι διαταραχές εμφανίζονται σε όλο το μήκος του σωλήνα. Επίσης, οι υγρές μάζες λειτουργούν σαν σκούπα η οποία παρασύρει μεγάλη μάζα υγρού και έτσι αφήνουν ένα λεπτό υγρό στρώμα πίσω τους. Για μικρές ταχύτητες αερίου οι υγρές μάζες έχουν μεγάλο μήκος

και έτσι παρασύρουν μεγάλη ποσότητα υγρού. αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αργούν να σχηματιστούν οι επόμενες υγρές μάζες διότι πρέπει η υγρή στοιβάδα να φτάσει το κατάλληλο επίπεδο. Για μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου και εφόσον το ύψος της υγρής στοιβάδας είναι κατάλληλο σχηματίζονται δυο ή και τρία slugs.

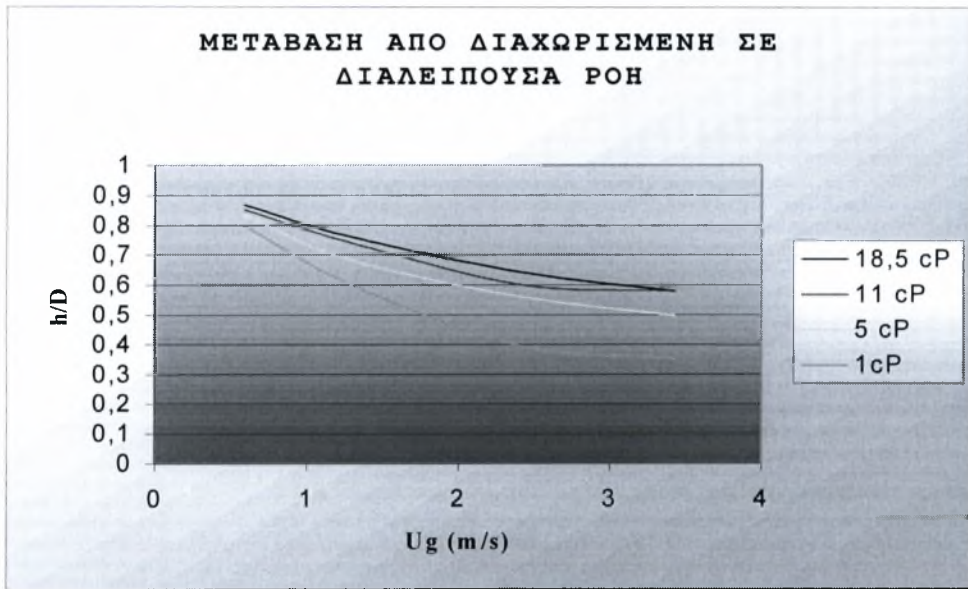
Η πιο δύσκολη περίπτωση είναι η μετάβαση από διαλείπουσα σε ψευδοδιαλείπουσα ροή. Κατά τη διάρκεια της διαλείπουσας ροής οι υγρές μάζες έχουν περίπου την ταχύτητα του αέρα. Έτσι είναι δύσκολο με οπτική παρατήρηση να διακρίνει κανείς την ακριβή μετάβαση σε ψευδοδιαλείπουσα ροή. Γενικά η ψευδοδιαλείπουσα ροή μοιάζει με διαλείπουσα για χαμηλές παροχές αέρα, με δακτυλιοειδή για υψηλές παροχές αέρα και με την περιοχή των ακανόνιστων κυμάτων μεγάλου πλάτους για χαμηλότερες παροχές υγρού.

Για να καταλάβουμε έναν μηχανισμό για την μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή είναι χρήσιμο να κάνουμε ένα διάγραμμα με το ύψος της υγρής στοιβάδας h_L/D , και της ταχύτητας του αερίου. Αυτού του είδους το διάγραμμα έχει και το πλεονέκτημα ότι είναι λιγότερο ευαίσθητο στο αν η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη ή όχι. Το διάγραμμα δείχνει το ύψος της υγρής στοιβάδας στο σημείο που αρχίζει η διαλείπουσα ροή στην αρχή του σωλήνα. Η σημαντικότερη παρατήρηση είναι ότι όσο πιο υψηλό είναι το ιξώδες του υγρού, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ύψος της υγρής στοιβάδας που απαιτείται για την μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Αυτό σημαίνει ότι το ιξώδες δίνει ευστάθεια στη ροή από τη στιγμή που μεγαλύτερες τιμές h_L/D χρειάζονται καθώς αυξάνεται το ιξώδες.

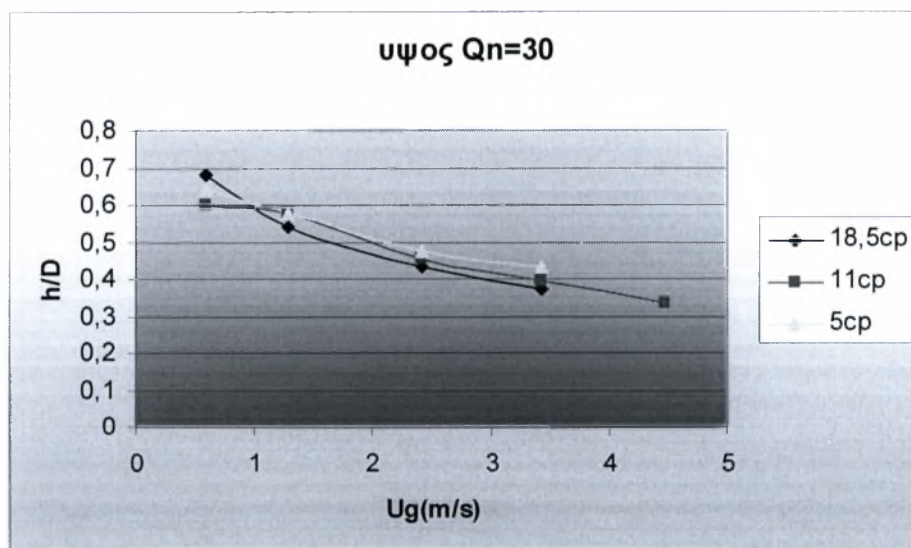
Στα διαγράμματα 4-12 απεικονίζεται το ύψος της υγρής στοιβάδας σε σχέση με το χρόνο, με την αγωγομετρική μέθοδο. Το ιξώδες του υγρού στα διαγράμματα αυτά είναι 1cP. Η συλλογή των δεδομένων έγινε με το πρόγραμμα DMA. Η επιλογή των σημείων της δειγματοληψίας είναι 200 σημεία σε 2sec. Έτσι το data στον άξονα x αντιστοιχεί σε 2sec. Στα διαγράμματα 4,5 απεικονίζεται διαλείπουσα ροή και φαίνεται ότι το μήκος των υγρών μαζών που καλύπτουν όλο το μήκος του σωλήνα μικραίνει με την άνοδο της ταχύτητας του αερίου. Τα επόμενα διαγράμματα (6-9) απεικονίζεται ψευδοδιαλείπουσα ροή στα οποία παρατηρούμε την ομοιότητα με την διαλείπουσα ροή. Στα διαγράμματα 10,11 απεικονίζεται διαχωρισμένη ροή με κύματα μεγάλου πλάτους.

Στα διαγράμματα 12-20 απεικονίζεται το ύψος της υγρής στοιβάδας στην αρχή, τη μέση και το τέλος του σωλήνα, τη στιγμή που έχουμε τη μετάβαση σε

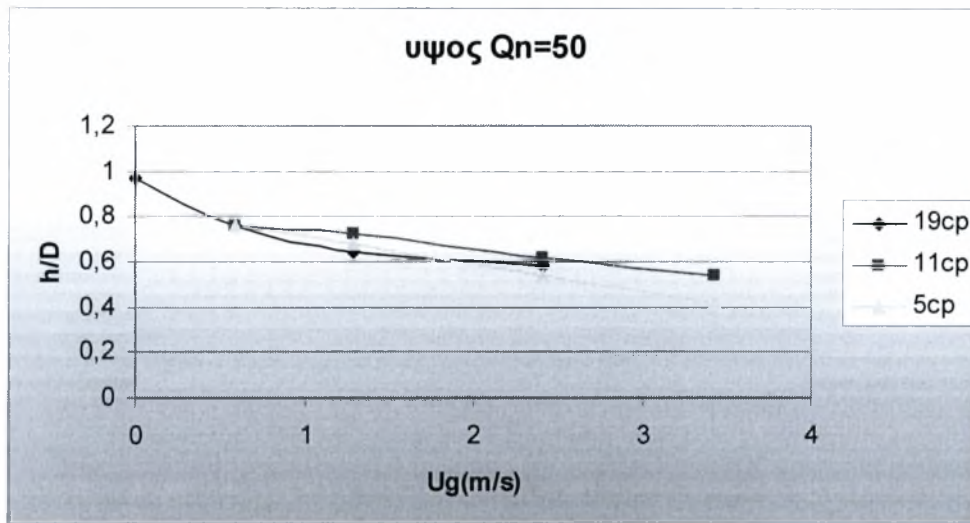
διαχωρισμένη ροή με δισδιάστατα κύματα. Παρατηρούμε ότι το ύψος της υγρής στοιβάδας είναι μεγαλύτερο όσο πλησιάζουμε στην αρχή του σωλήνα. Επίσης όσο μεγαλώνει η ταχύτητα του αερίου μικραίνει το ύψος της υγρής στοιβάδας λόγω της δύναμης που ασκεί η αέρια φάση στην υγρή. Τέλος στα διαγράμματα 21-25 απεικονίζεται το ύψος της υγρής στοιβάδας τη στιγμή της μετάβασης από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή.



διάγραμμα 1: ύψος υγρής στοιβάδας κατά τη μετάβαση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή

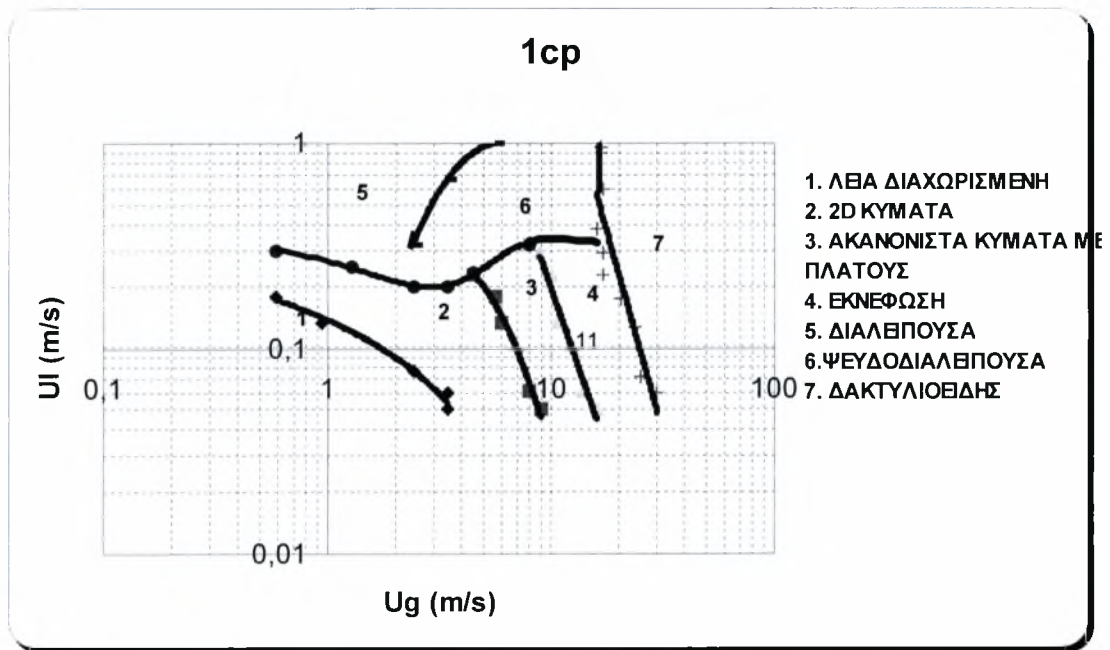


διάγραμμα 2: ύψος υγρής στοιβάδας στη μετάβαση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με κύματα

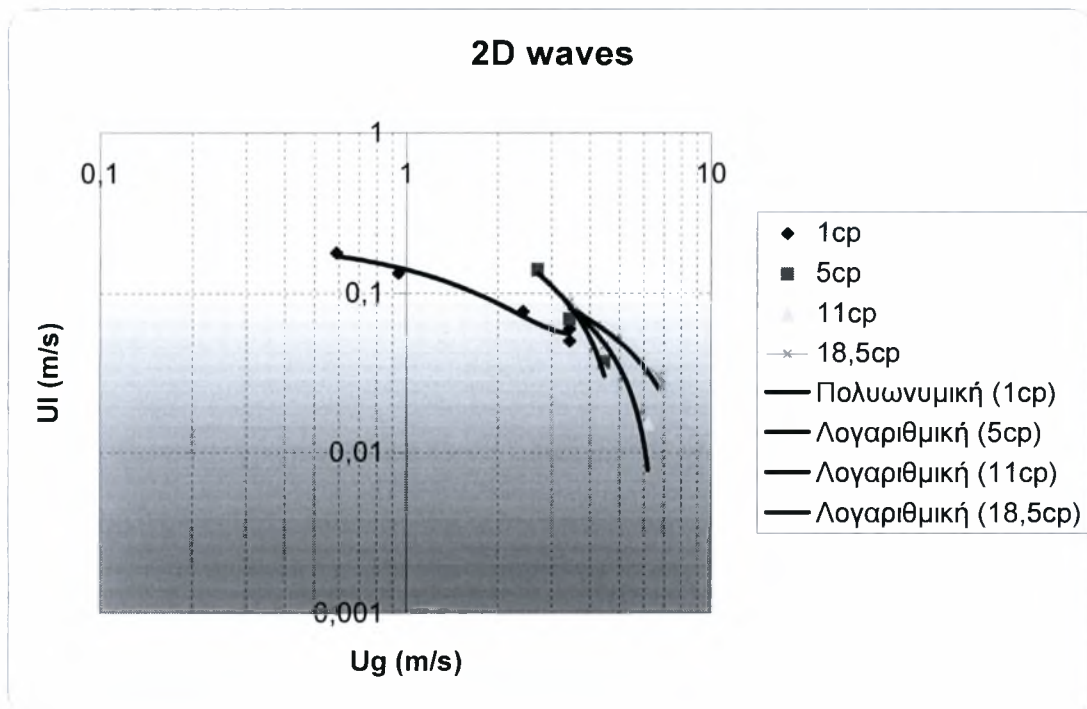


διάγραμμα 3: ύψος υγρής στοιβάδας στη μετάβαση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με κύματα

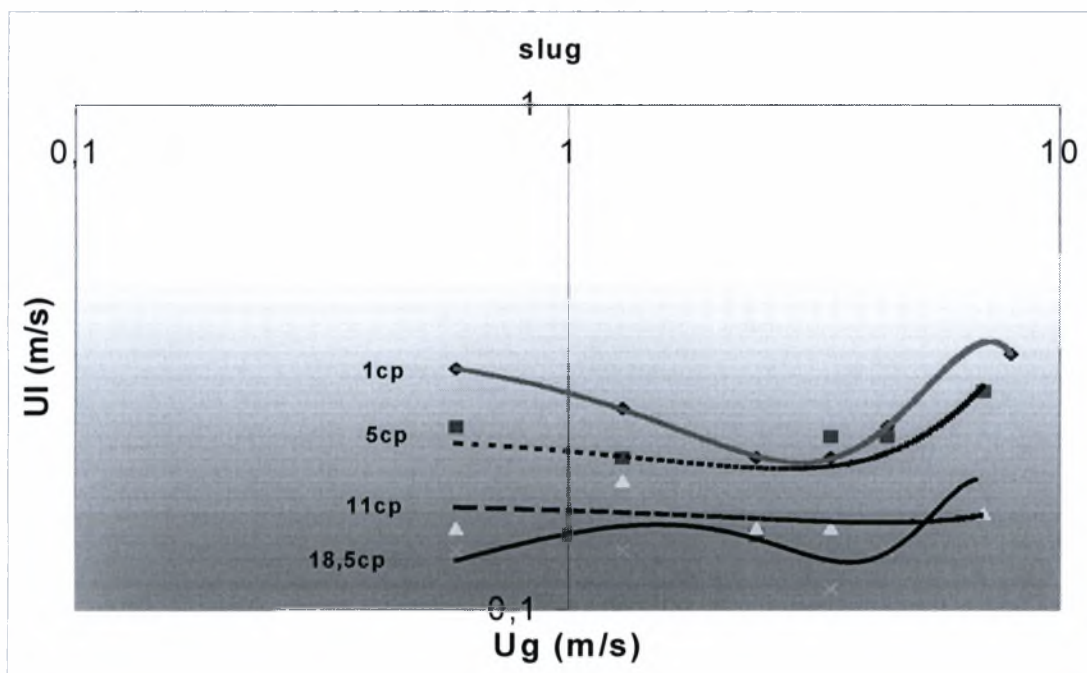
5.6 ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ



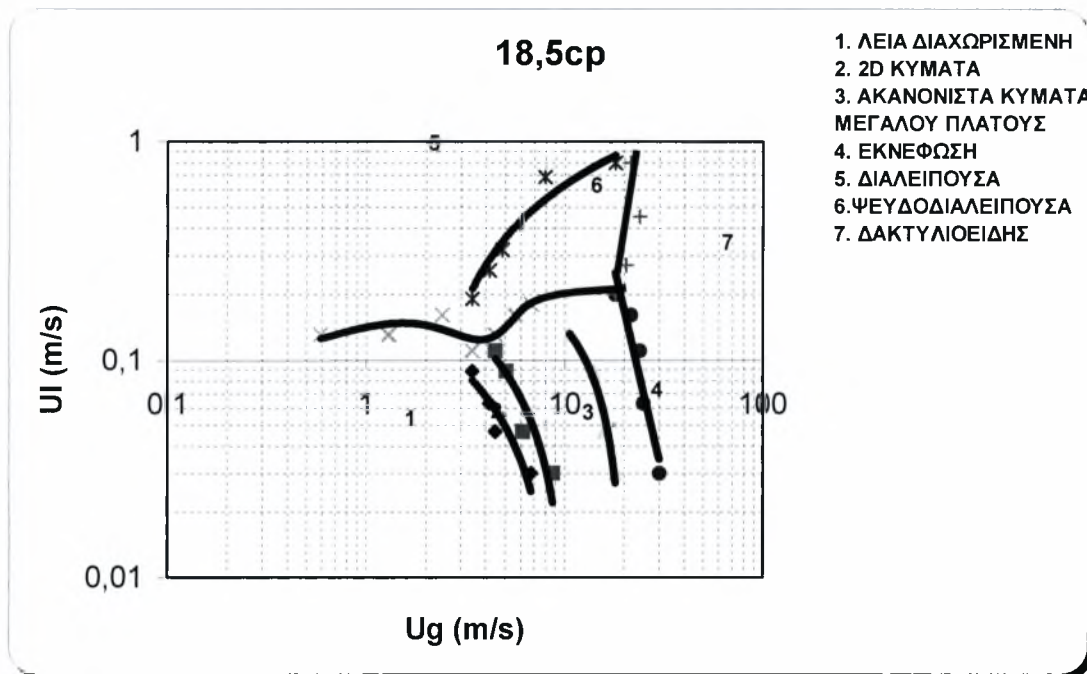
χάρτης 1: 1cp



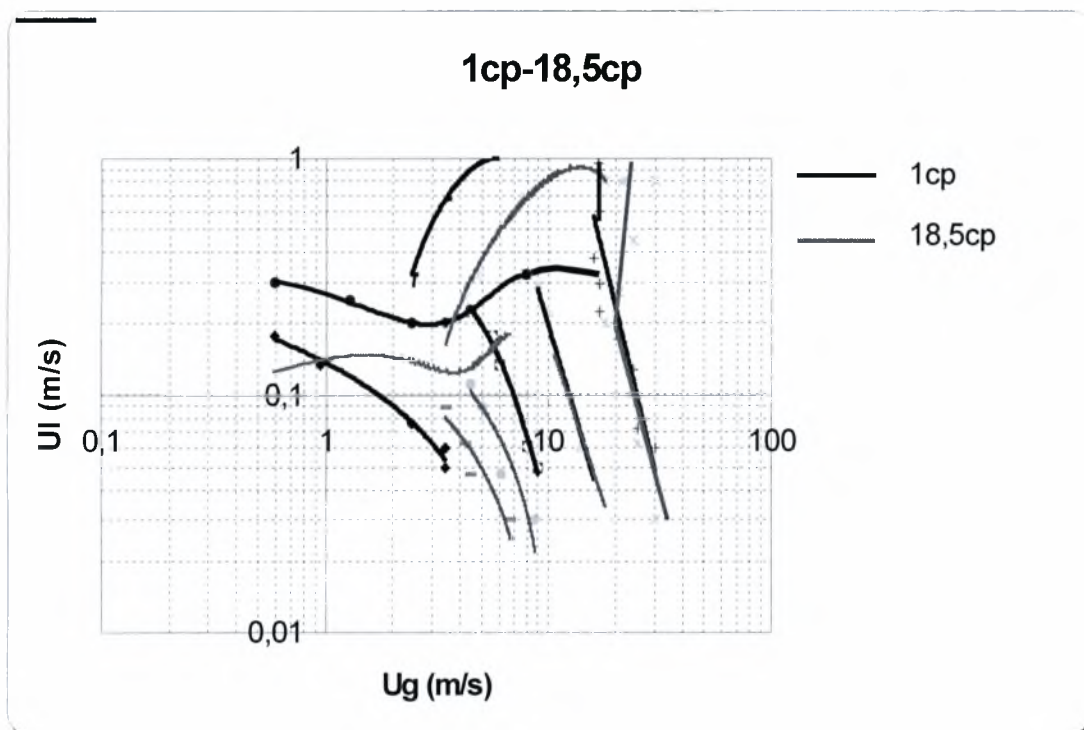
χάρτης 2: 5cp



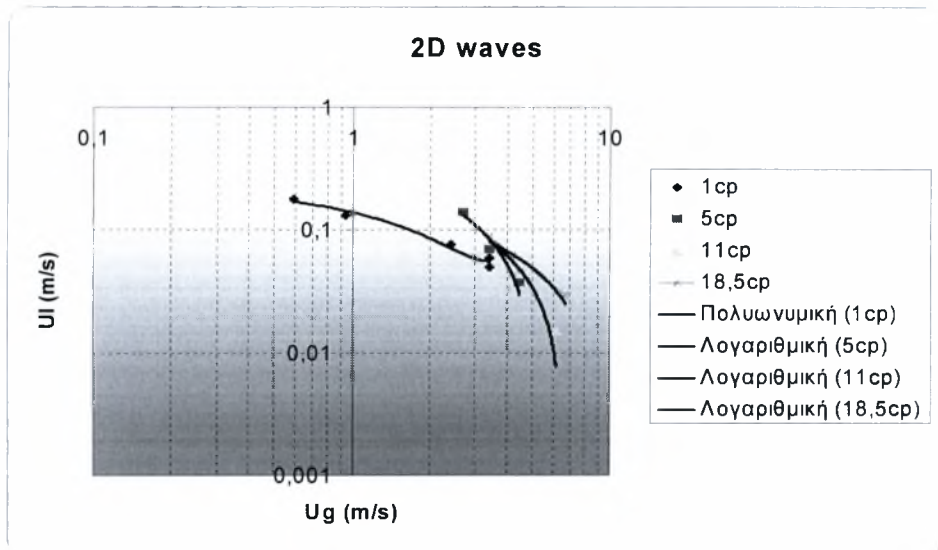
χάρτης 3: 11cp



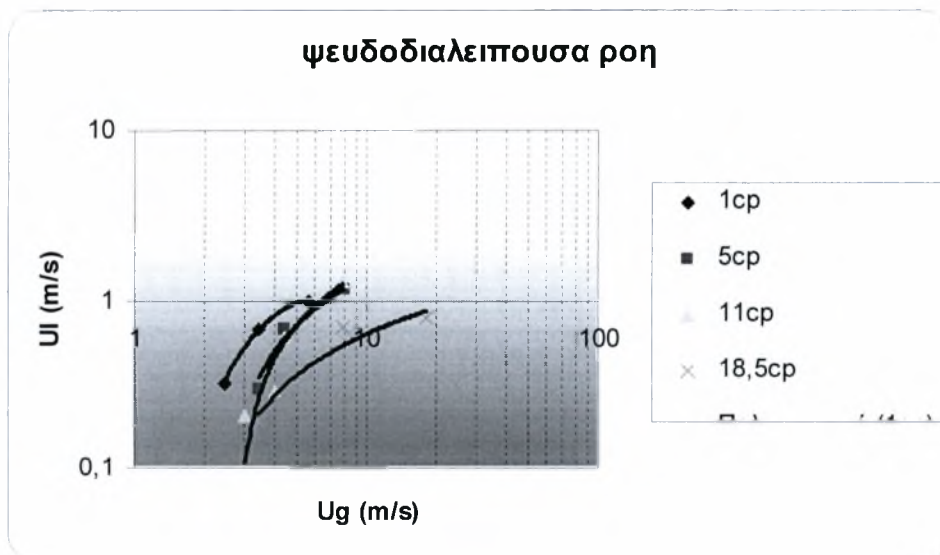
χάρτης 4: 18,5cp



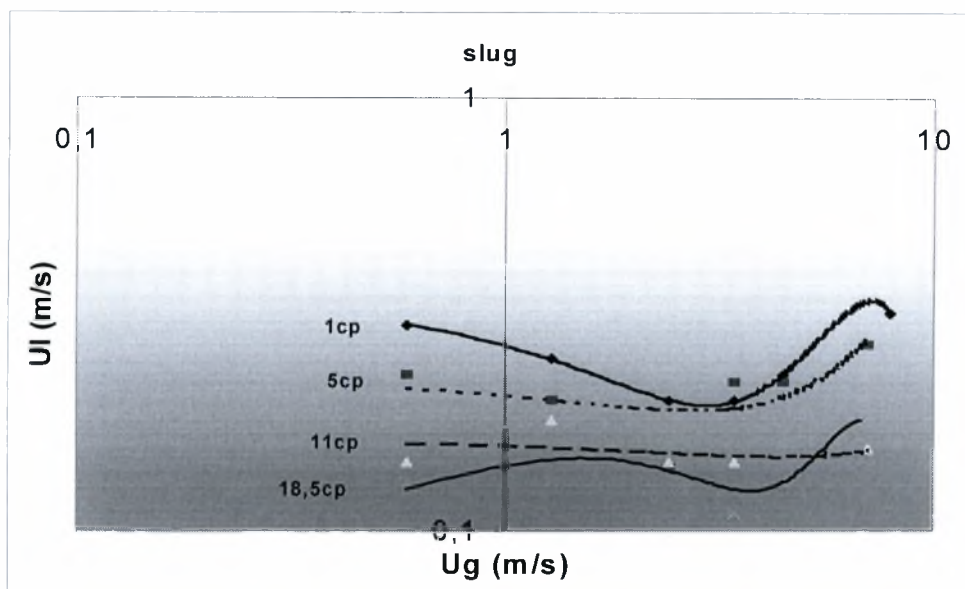
χάρτης 5: συγκριτικός χάρτης 1cp-18,5cp



διάγραμμα 4 : σύγκριση της μετάπτωσης από λεία διαχωρισμένη σε δισδιάστατα κύματα.



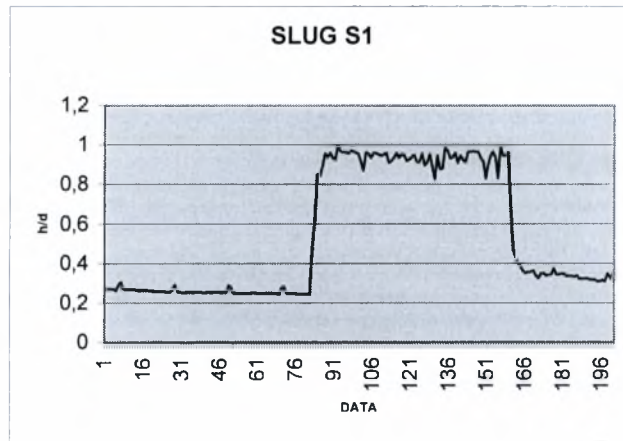
διάγραμμα 5: σύγκριση της μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδοδιαλείπουσα ροή



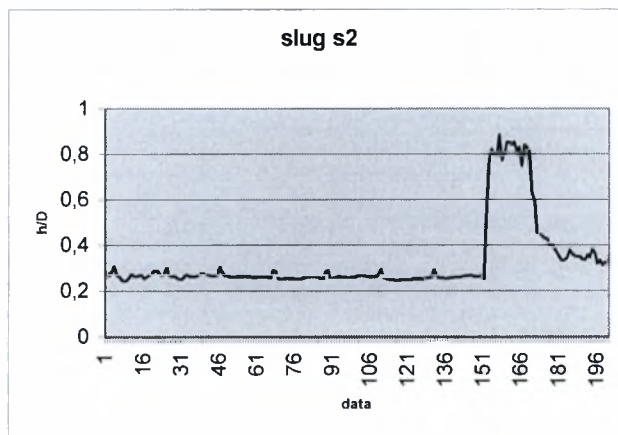
διάγραμμα 6 : σύγκριση της μετάπτωσης από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή.

5.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

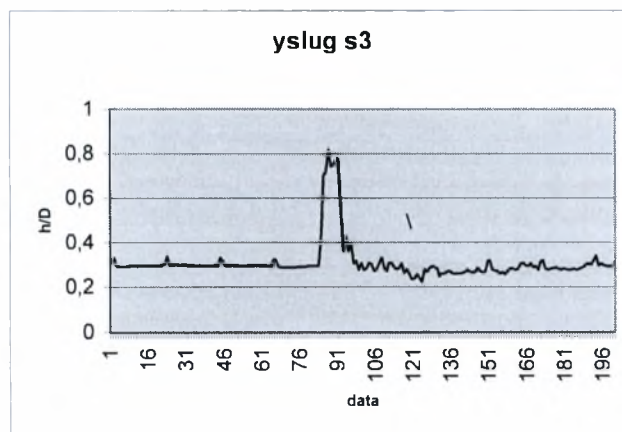
Διαγράμματα ύψους υγρής στοιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο



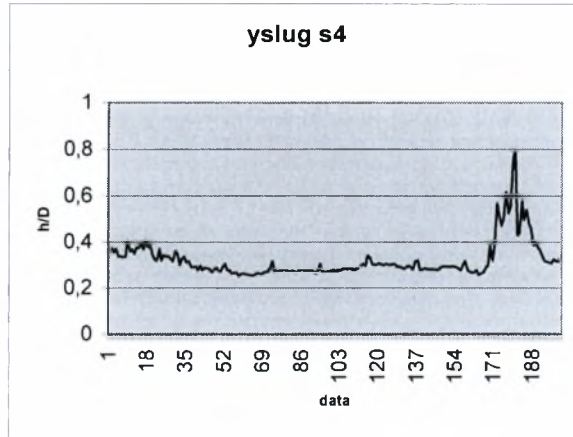
διάγραμμα 7: $U_g=0,59\text{m/s}$ $U_l=0,44\text{m/s}$



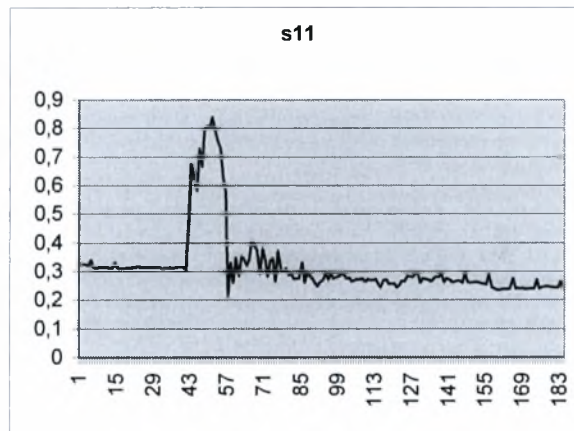
διάγραμμα 8: $U_g=1,29\text{m/s}$ $U_l=0,44\text{m/s}$



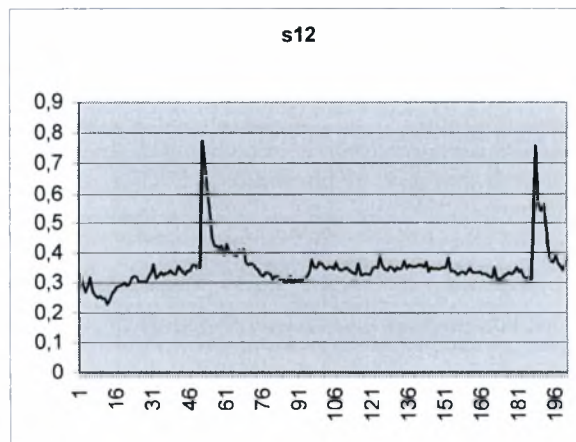
διάγραμμα 9: $U_g=2,42\text{m/s}$ $U_l=0,44\text{m/s}$



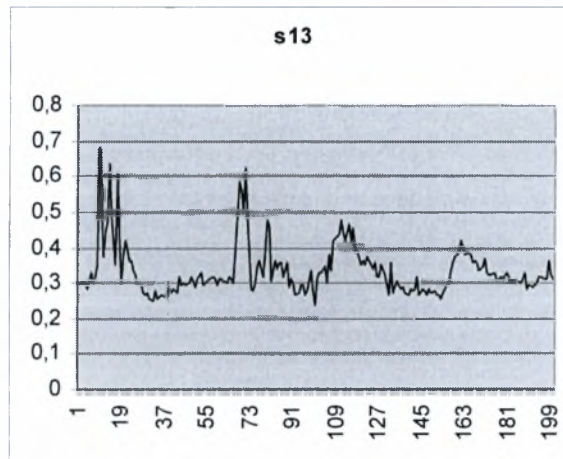
διάγραμμα 10: $U_g=3,43\text{m/s}$ $U_l=0,44\text{m/s}$



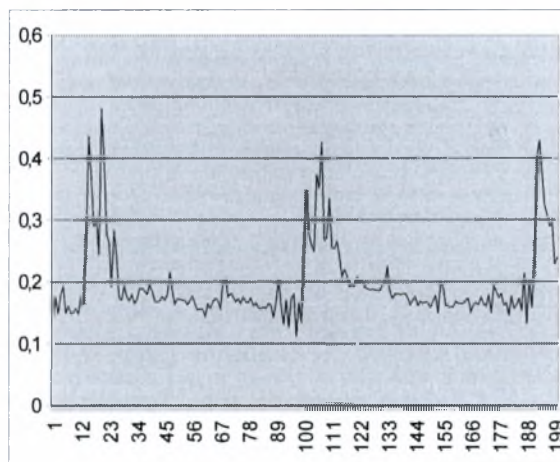
διάγραμμα 11: $U_g=2,42\text{m/s}$ $U_l=0,87\text{m/s}$



διάγραμμα 12: $U_g=3,43\text{m/s}$ $U_l=0,87\text{m/s}$

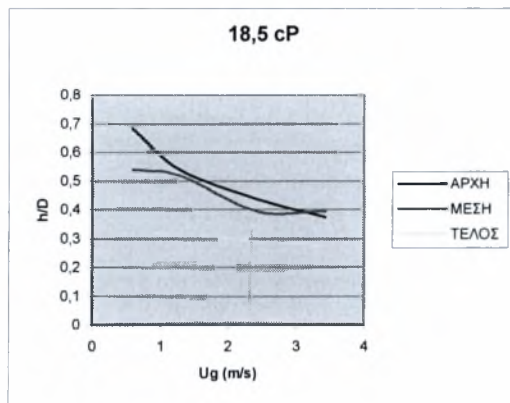


διάγραμμα 13: $U_g=4,47\text{m/s}$ $U_l=0,87\text{m/s}$

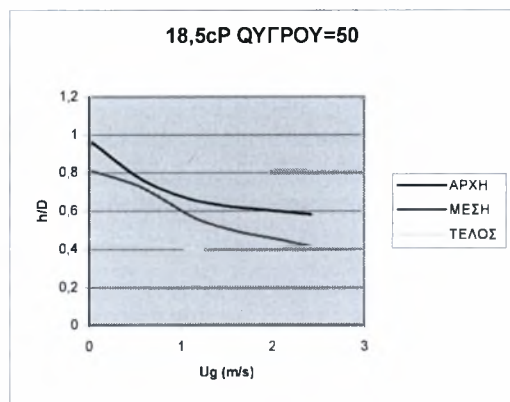


διάγραμμα 14: $U_g=5,6\text{m/s}$ $U_l=0,18\text{m/s}$

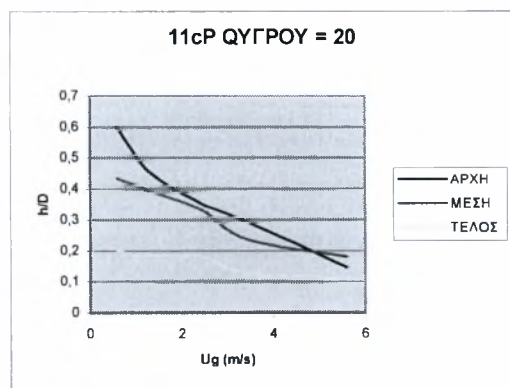
Διαγράμματα ύψους υγρής στοιβάδας στο ξεκίνημα της διαχωρισμένης ροής με κύματα



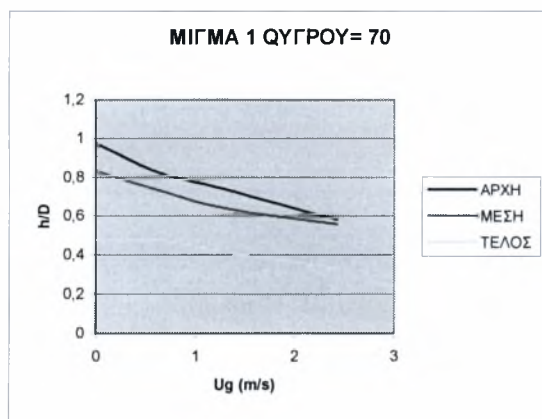
διάγραμμα 15



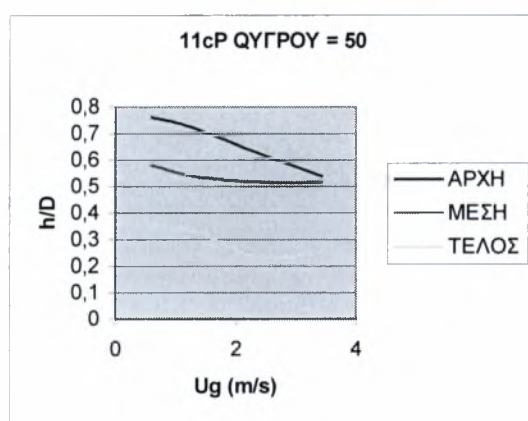
διάγραμμα 16



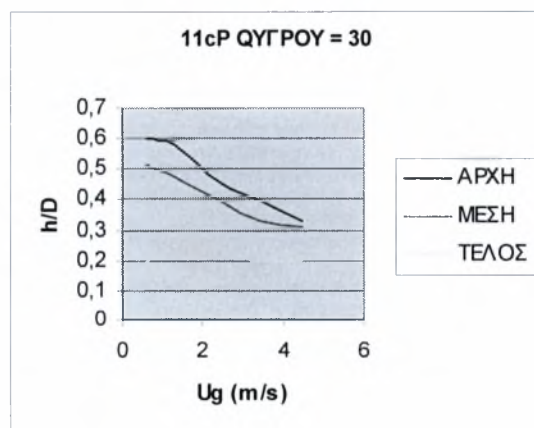
διάγραμμα 17



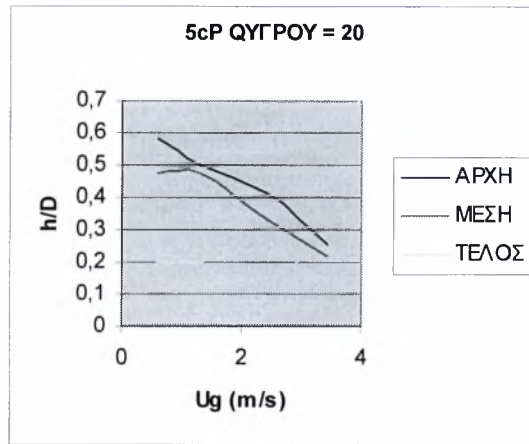
διάγραμμα 18



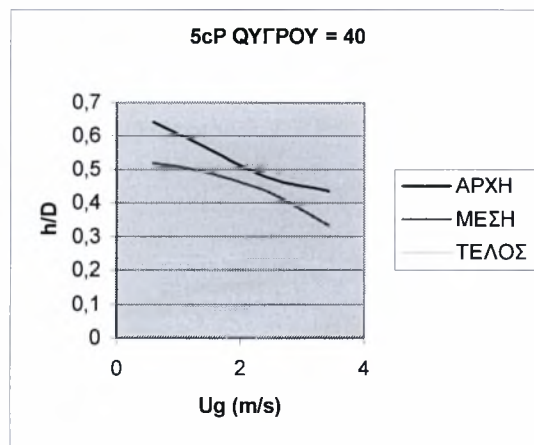
διάγραμμα 19



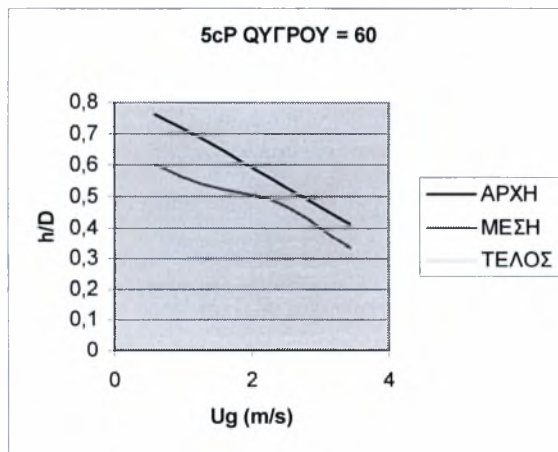
διάγραμμα 20



διάγραμμα 21

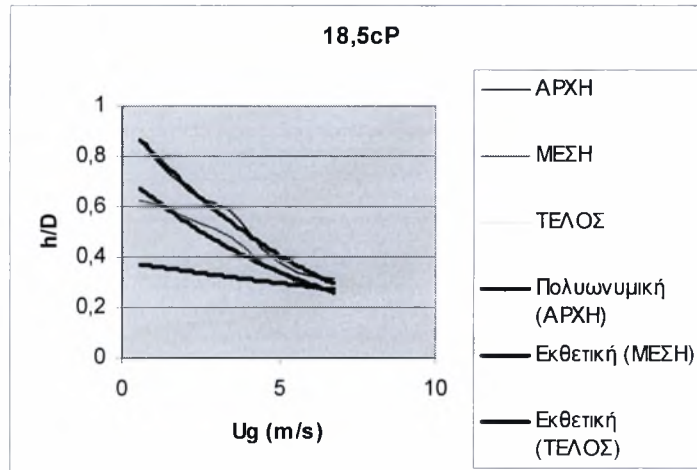


διάγραμμα 22

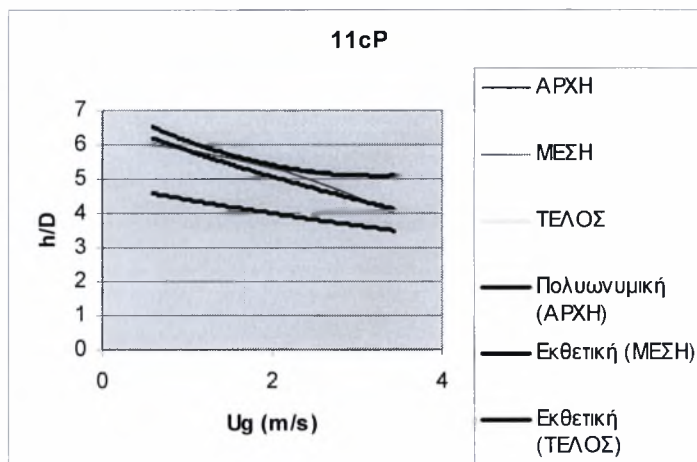


διάγραμμα 23

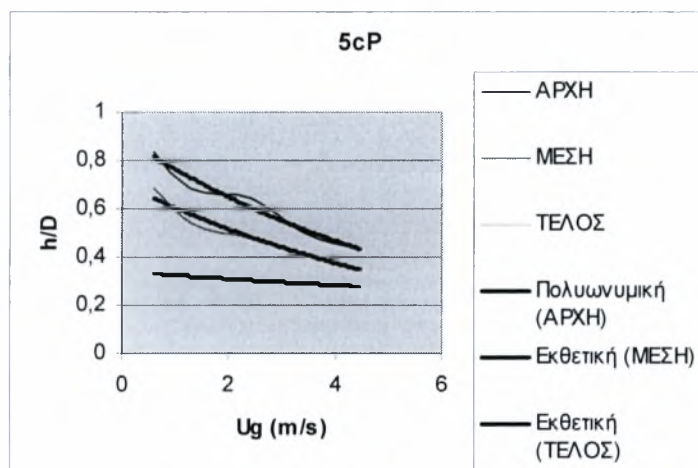
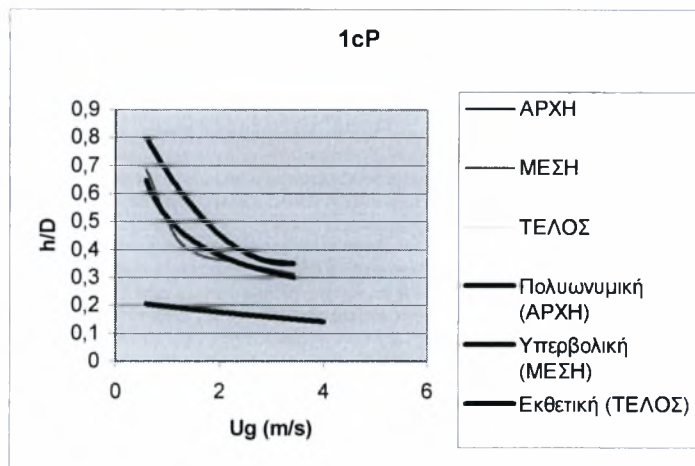
Διαγράμματα ύψους υγρής στοιβάδας στο ξεκίνημα της μετάπτωσης από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή



διάγραμμα 24

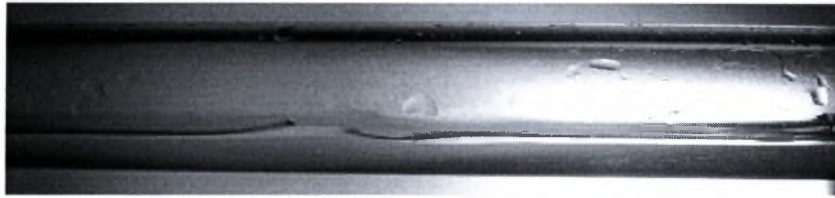


διάγραμμα 25



5.8 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ

1cp



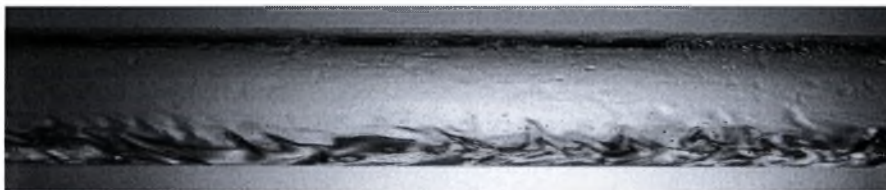
Εικόνα 1

2D waves $U_g=5.04\text{m/s}$ $U_l=0.11\text{m/s}$



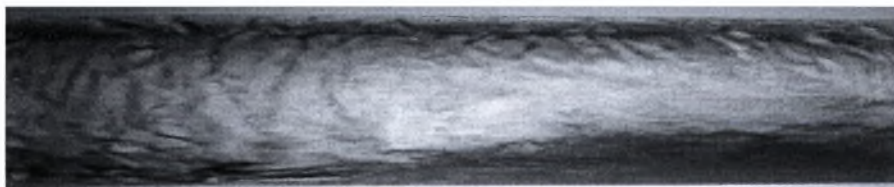
Εικόνα 2

L.A. waves $U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.11\text{m/s}$



Εικόνα 3

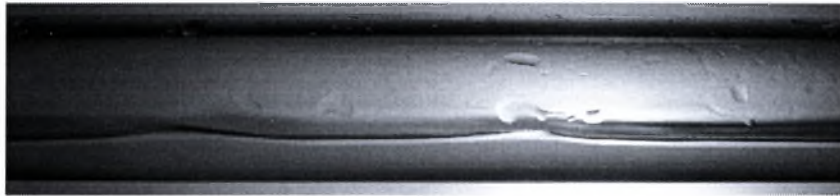
εκνεφ-σκαρφ $U_g=14\text{m/s}$ $U_l=0.11\text{m/s}$



Εικόνα 4

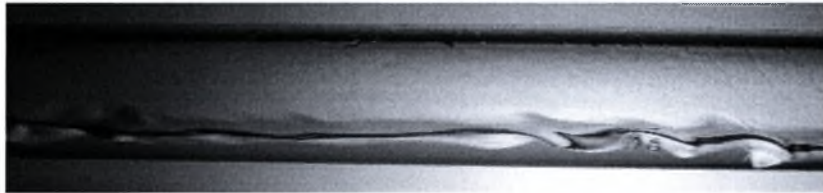
annular $U_g=20.5\text{m/s}$ $U_l=0.16\text{m/s}$

5cp



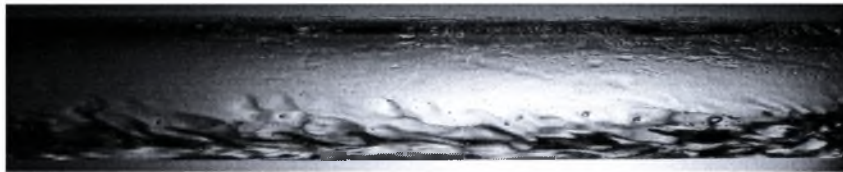
Εικόνα 5

2D waves $U_g=5.04\text{m/s}$ $U_l=0.13\text{m/s}$



Εικόνα 6

L.A. waves $U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.13\text{m/s}$



Εικόνα 7

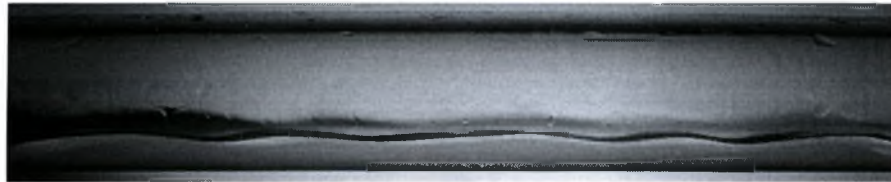
εκνεφ-σκαρφ $U_g=14\text{m/s}$ $U_l=0.13\text{m/s}$



Εικόνα 8

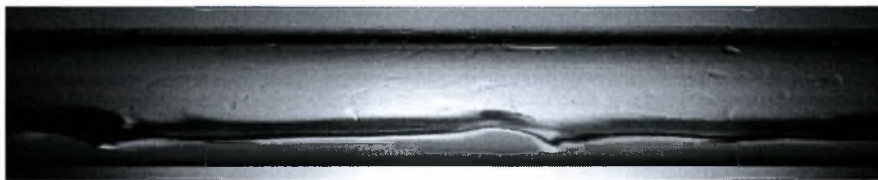
annular $U_g=20.5\text{m/s}$ $U_l=0.17\text{m/s}$

11cp



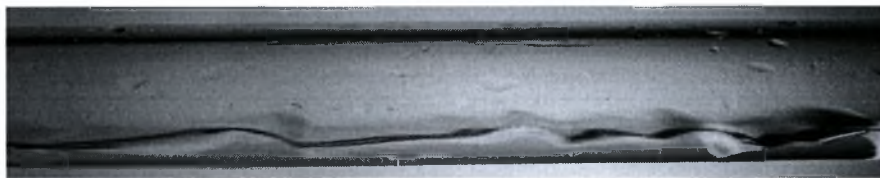
Εικόνα 9

2D waves $U_g=5.6\text{m/s}$ $U_l=0.08\text{m/s}$



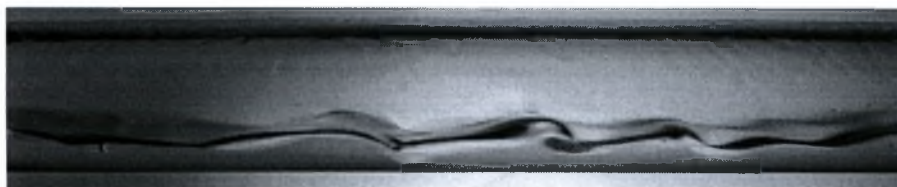
Εικόνα 10

L.A. waves $U_g=6.75\text{m/s}$ $U_l=0.11\text{m/s}$



Εικόνα 11

L.A.waves $U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.11\text{m/s}$

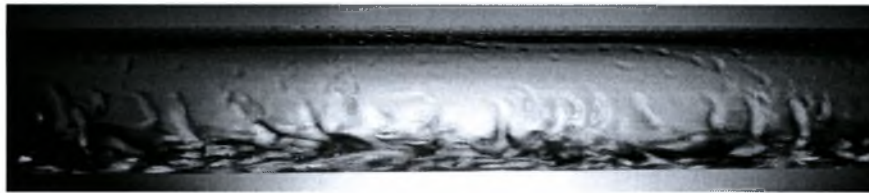


Εικόνα 12

L.A. $U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.18\text{m/s}$



Εικόνα 13
annular $U_g=23.85\text{m/s}$ $U_l=0.08\text{m/s}$

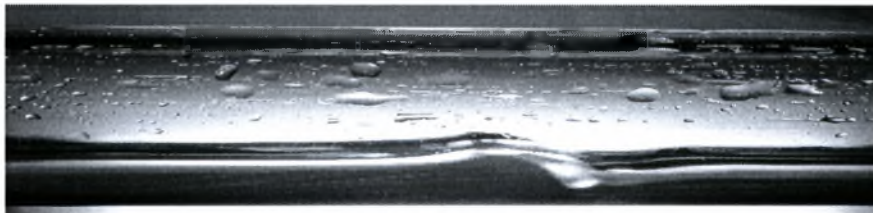


Εικόνα 14
eknef-skarfal $U_g=20.5\text{m/s}$ $U_l=0.13\text{m/s}$

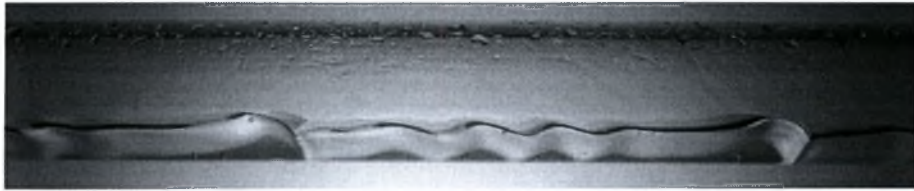
18,5cp



Εικόνα 15
2D waves

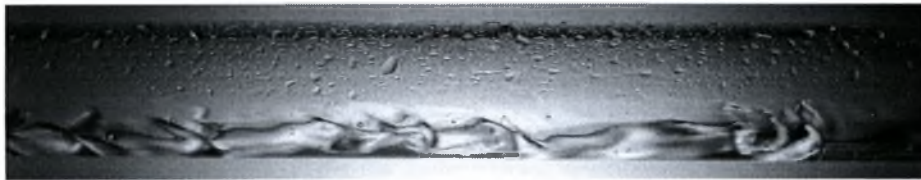


Εικόνα 16
2Dwaves



Εικόνα 17

L.A. waves $U_g=8.7\text{m/s}$ $U_l=0.06\text{m/s}$



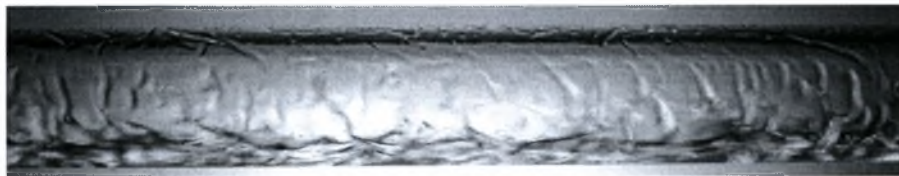
Εικόνα 18

$U_g=14\text{m/s}$ $U_l=0.1\text{m/s}$



Εικόνα 19

$U_g=17.5\text{m/s}$ $U_l=0.1\text{m/s}$



Εικόνα 20

$U_g=23\text{m/s}$ $U_l=0.1\text{m/s}$

Slug

5cP



Εικόνα 21

$U_g=0.59\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$



Εικόνα 22

$U_g=0.59\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$



Εικόνα 23

$U_g=0.59\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$

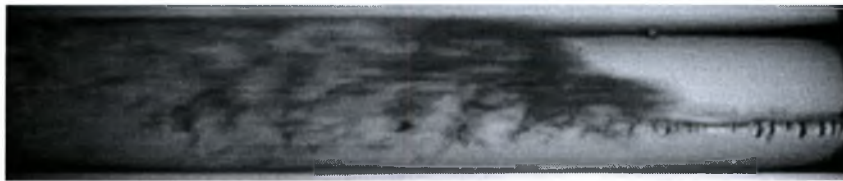
1cP



Εικόνα 24

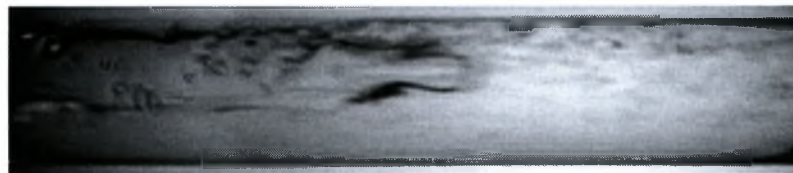
$U_g=0.59\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$

11cP



Εικόνα 25

$U_g=0.59\text{m/s}$ $U_l=0.25\text{m/s}$



Εικόνα 26

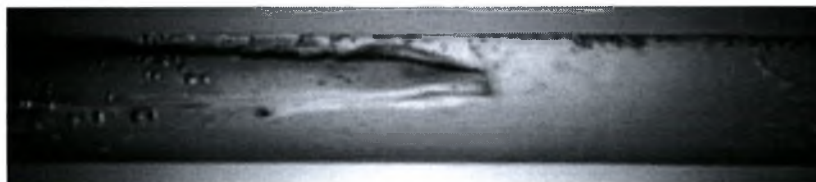
$U_g=0.59\text{m/s}$ $U_l=0.25\text{m/s}$

19cp



Εικόνα 27

$U_g=0.59\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$

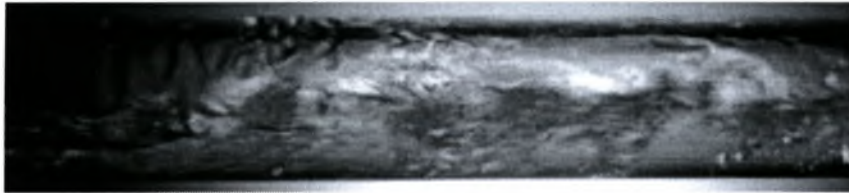


Εικόνα 28

$U_g=0.59\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$

Yslugs

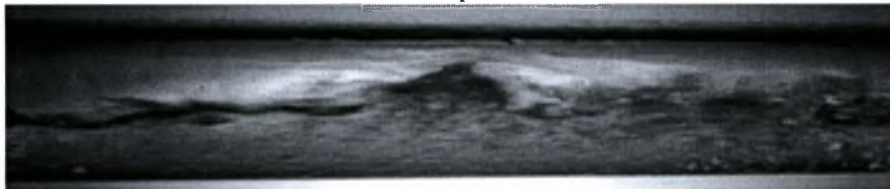
11cP



Εικόνα 29

$U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$

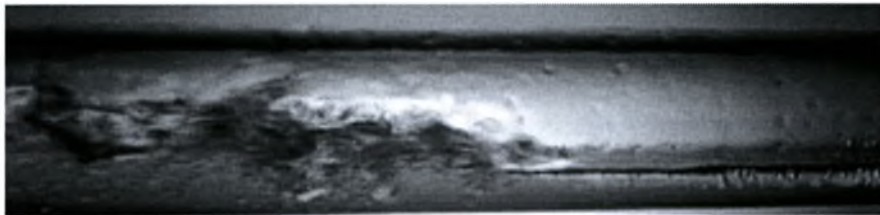
5cP



Εικόνα 30

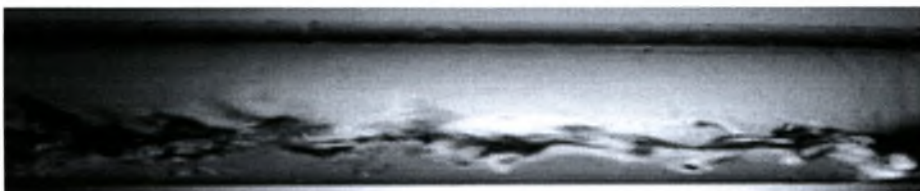
$U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.13\text{m/s}$

1cP



Εικόνα 31

$U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$



Εικόνα 32

$U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$

19cP



Εικόνα 33

$U_g=7.95\text{m/s}$ $U_l=0.2\text{m/s}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σκοπός της διπλωματικής ήταν η μελέτη της επίδρασης του ιξώδους στα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής, και την πληρέστερη κατανόηση των περιοχών ροής και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα.

Για την υλοποίηση των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη, με αγωγό ροής των δυο φάσεων από plexiglas διαμέτρου 2,4cm. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά μίγματα υγρού, 1, 5, 11 και 19cP. Για την αλλαγή του ιξώδους του υγρού χρησιμοποιήθηκε γλυκερίνη. Το διφασικό μίγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι αέρας –νερό/ γλυκερίνη.

Τα καθεστώτα ροής που παρουσιάστηκαν είναι : στρωματωμένη ροή με ή χωρίς κύματα, διαλείπουσα, ψευδοδιαλείπουσα και δακτυλιοειδής ροή. Για κάθε σύστημα αέρα – υγρού κατασκευάστηκαν χάρτες καθεστώτων ροής και έγινε σχολιασμός των μηχανισμών που διέπουν τις μεταπτώσεις του διφασικού μίγματος από περιοχή σε περιοχή. Η ταυτοποίηση των καθεστώτων ροή έγινε με οπτική παρατήρηση και τεκμηριώθηκε με φωτογράφιση. Επιπρόσθετα, έγινε μέτρηση της υγρής στοιβάδας με άμεση μέθοδο, αλλά και με την αγωγιμομετρική μέθοδο.

Συμφωνά με τους χάρτες καθεστώτων ροής το πρώτο βασικό συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι υγρά με χαμηλό ιξώδες χρειάζονται μεγαλύτερες παροχές υγρού για να ξεκινήσει η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, όταν η παροχή του αερίου είναι μικρή και μικρότερη παροχή υγρού, όταν μεγαλώνει η παροχή του αερίου. Μια άλλη σημαντική επίδραση του ιξώδους είναι το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται το ιξώδες, χρειάζεται μεγαλύτερη παροχή αερίου για να ξεκινήσουν τα κανονικά δισδιάστατα κύματα. Επιπλέον, με αύξηση πάλι του ιξώδους, μικραίνει η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων.

Στις περιοχές αυτές που παρατηρούνται αλλαγές με την αύξηση του ιξώδους μετρήθηκε το ύψος της υγρής στοιβάδας με την άμεση μέθοδο και παρατηρήθηκε η ευστάθεια που δίνει το ιξώδες στη διφασική ροή. Με την αγωγιμομετρική μέθοδο βρέθηκε το ύψος της υγρής στοιβάδας για διάφορες περιοχές ροής σε σύστημα αέρα-υγρού(1cP).

Ιδιαίτερα ενδιαφέρον θα είχε η ταυτόχρονη μέτρηση των μεταβολών της πίεσης και του πάχους της υγρής στοιβάδας προς την πληρέστερη κατανόηση της διφασικής ροής καθώς και για το σχηματισμό μιας ποιοτικής η ακόμα καλύτερα ποσοτικής σχέσης των δυο μεγεθών. Μια άλλη πρόταση θα ήταν η εξέταση της μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδοδιαλείπουσα ροή με την αγωγιμομετρική μέθοδο και την κατασκευή διαγραμμάτων αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης, διότι η μετάπτωση αυτή είναι πολύ δύσκολο να παρατηρηθεί οπτικά λόγω της ομοιότητας τους.

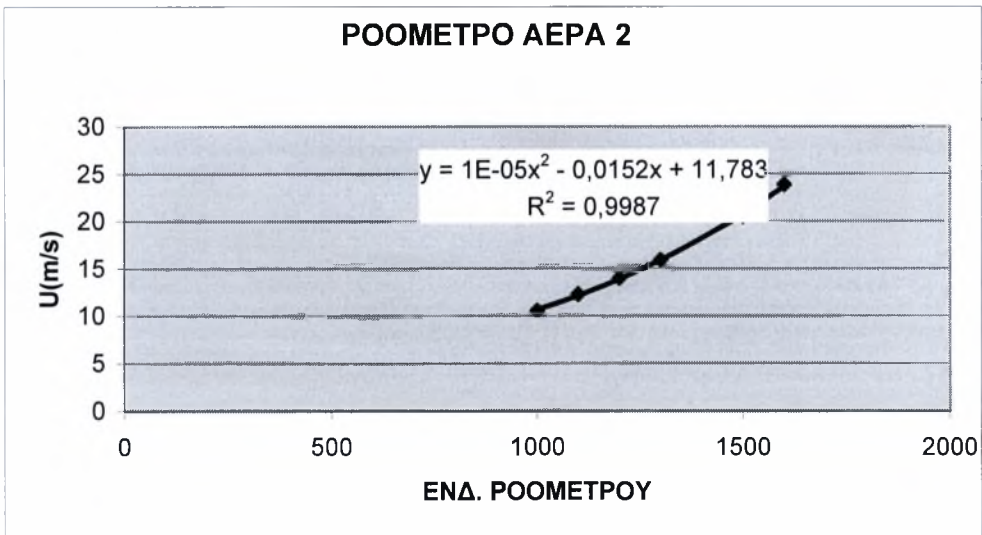
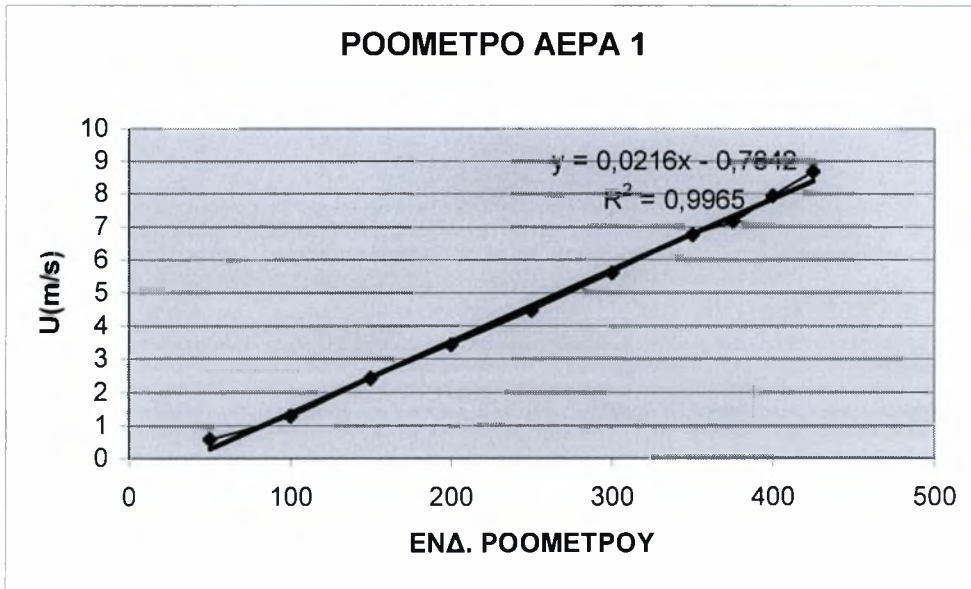
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γεώργιος Θ. Αστερής, “ Μελέτη διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό με χρήση αγωγιμομετρικής διάταξης. ”, 1998
- Λάζαρος Ν. Σαμουηλίδης, “ Μελέτη επίδρασης της επιφανειακής τάσης στη διαμόρφωση περιωχών ροής σε οριζόντιο αγωγό για διφασικής ροή αέρα – υγρών. ”, 1992
- Κωνσταντίνος Καραμάνος, “ διφασική ροή αέρα – νερού σε οριζόντιο αγωγό.” , 1997
- Βασίλης Μποντόζογλου, “ Σημειώσεις : Συσκευές θερμικών διεργασιών. ” , 1998
- Ανδρίτσος Νικόλαος, “Σημειώσεις διφασικής ροής. ”
- N. Andritsos, “Effect of pipe diameter and liquid viscosity on horizontal stratified flow.” 1987
- N. Andritsos, “Statistical analysis of waves in horizontal stratified gas – liquid flow.” 1991
- N. Andritsos , T.J. Hanratty, “Interfacial instabilities for horizontal gas – liquid flows in pipelines.” 1986
- N. Andritsos, L. Williams, T. J. Hanratty, “Effect of liquid viscosity on the stratified – slug transition in horizontal pipe flow.” 1988
- J. Weisman, D. Dunkan, J. Gibson, T. Crawford, “Effects of fluid properties and pipe diameter on two phase flow patterns in horizontal lines.” 1979
- S. L. Kokal, J. F. Stanislav, “An experimental study of two phase flow in slightly inclined pipes – I. Flow patterns.” 1988
- G.W. Govier, Sc.D., K. Aziz, Ph.D., “The flow of complex mixtures in pipes.” 1972
- P. Y. Lin, T. J. Hanratty, “Detection of slug flow fromm pressure measurments.” 1986
- O. Barker, “New pipeline techniques, designing for simultaneous flow of oil and gas, full report on Magnolia’s research on tow phase pipeline design.”
- P. Y. Lin, T. J. Hanratty, “Effects of pipe diameter on flow patterns for air – water flow in horizontal pipes.” 1986
- J. M. Mandhane, G. A. Gregory, K. Aziz, “A flow pattern map for gas - liquid flow in horizontal pipes.” 1973

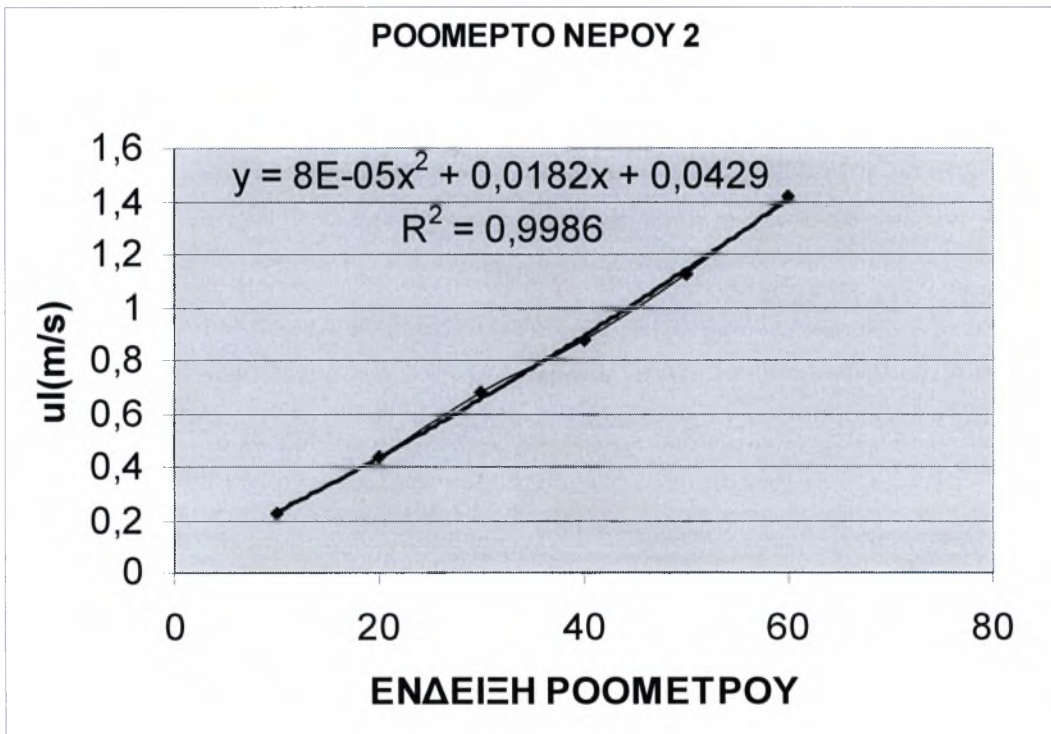
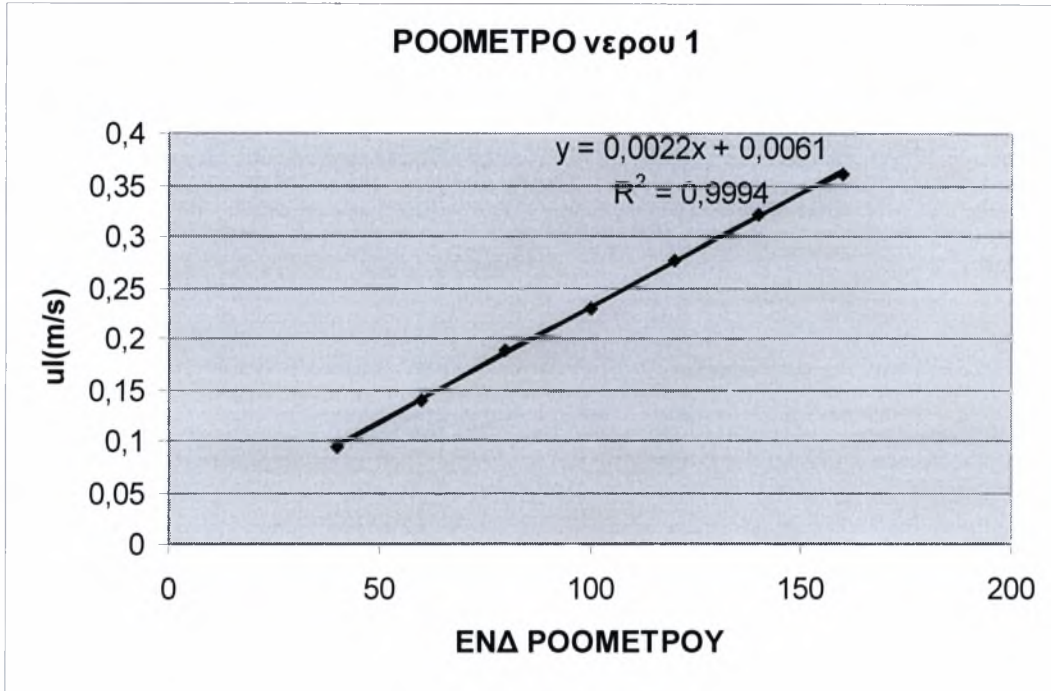
K. C. Ng, K. O. Lau, “flow patterns and pressure drop studies in a horizontal pipe.”

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

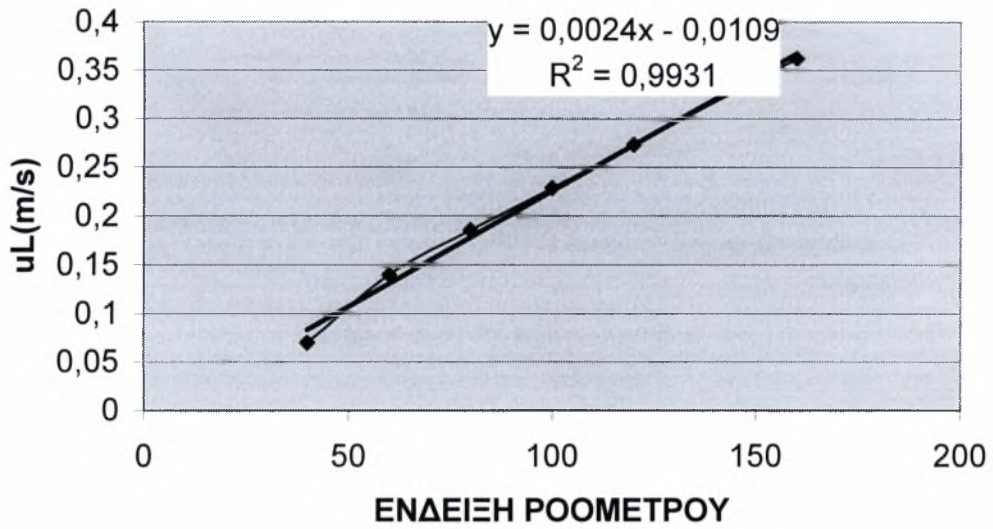
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ ΑΕΡΑ



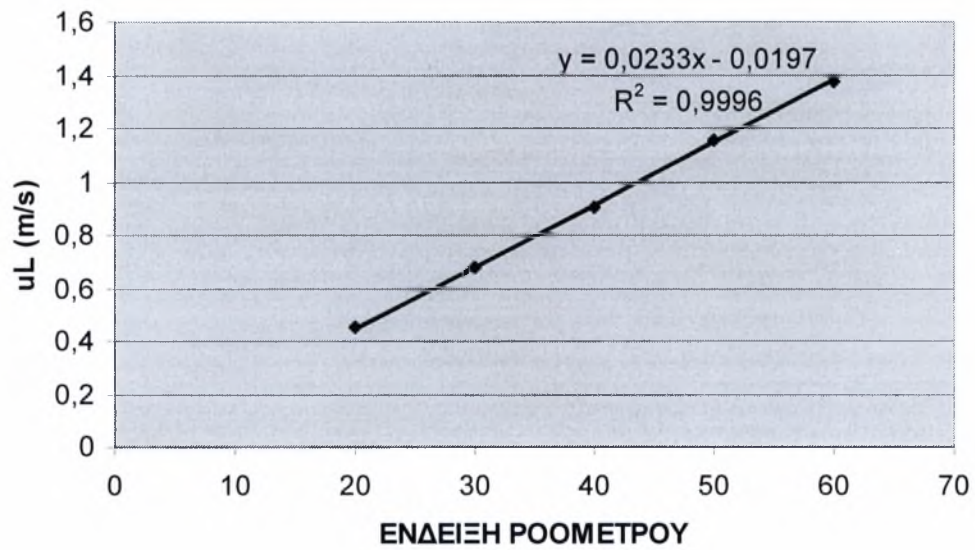
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ ΥΓΡΟΥ



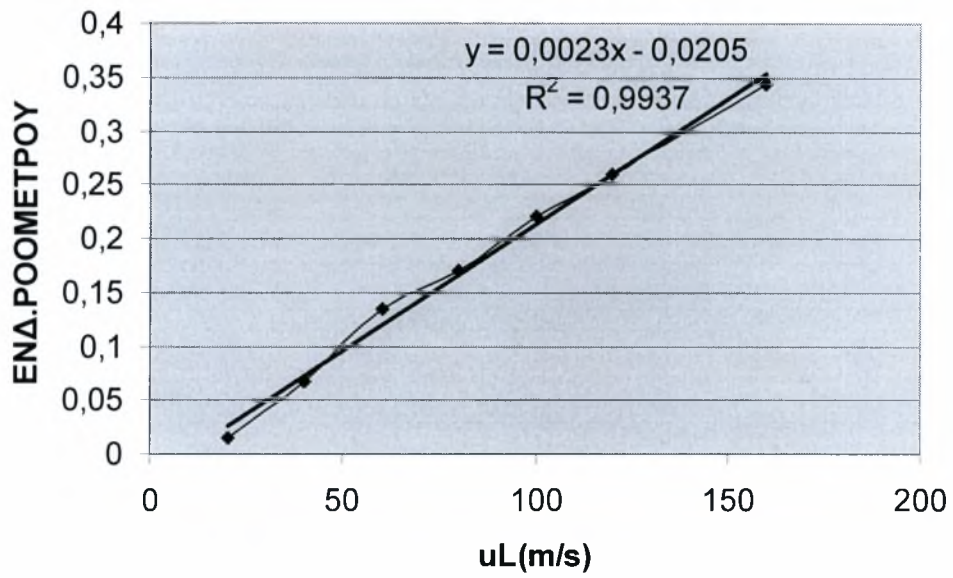
ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΥΓΡΟΥ 1 5cp



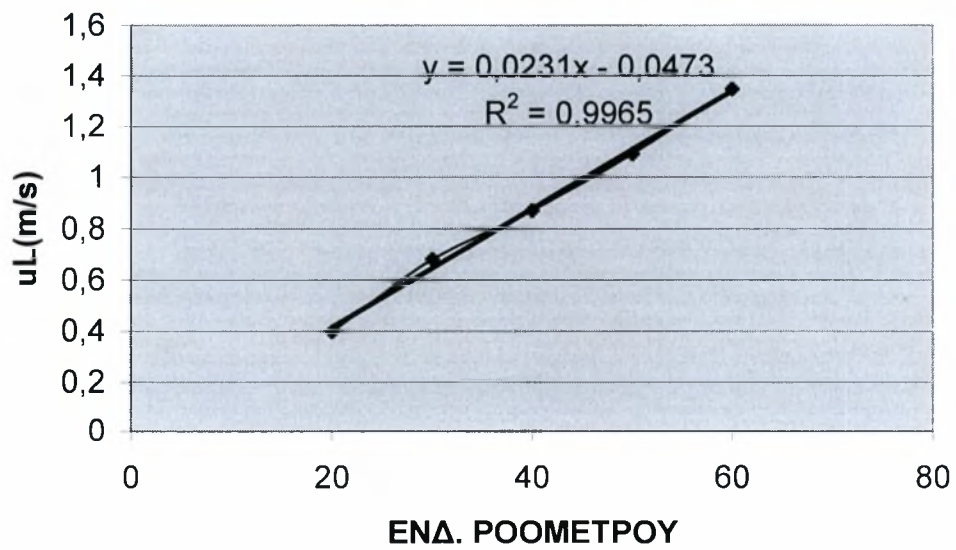
ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΥΓΡΟΥ 2 5cp



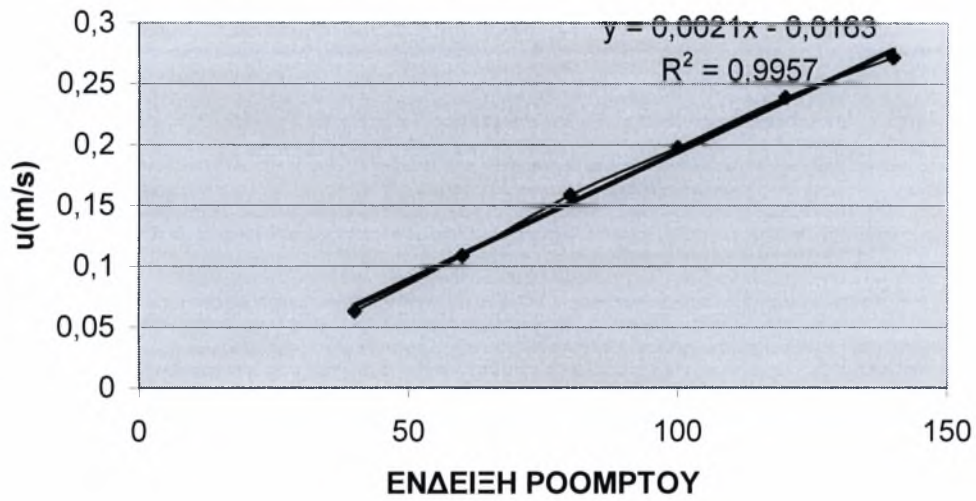
ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΥΓΡΟΥ 1 11cp



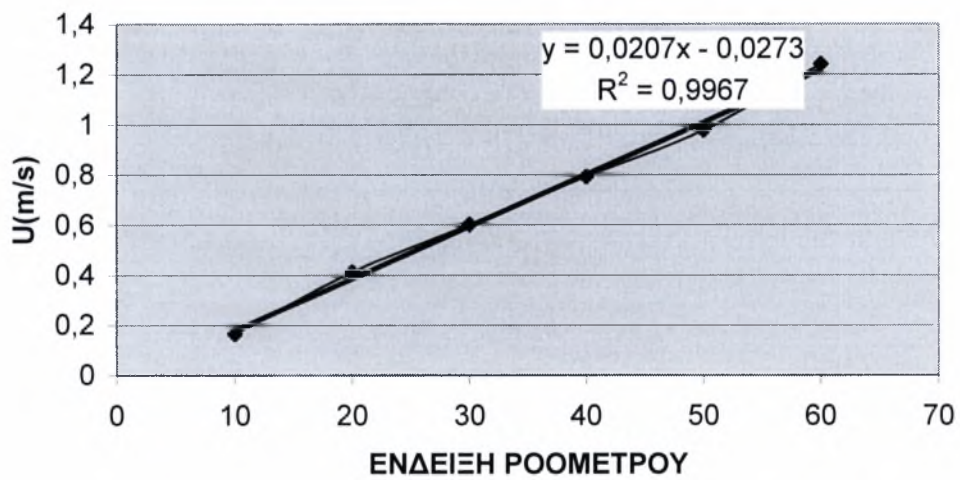
ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΝΕΡΟΥ 2 11cp



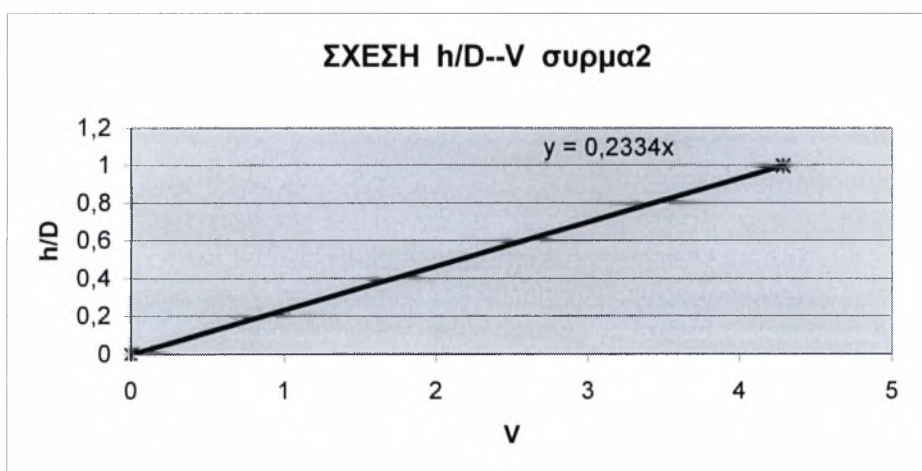
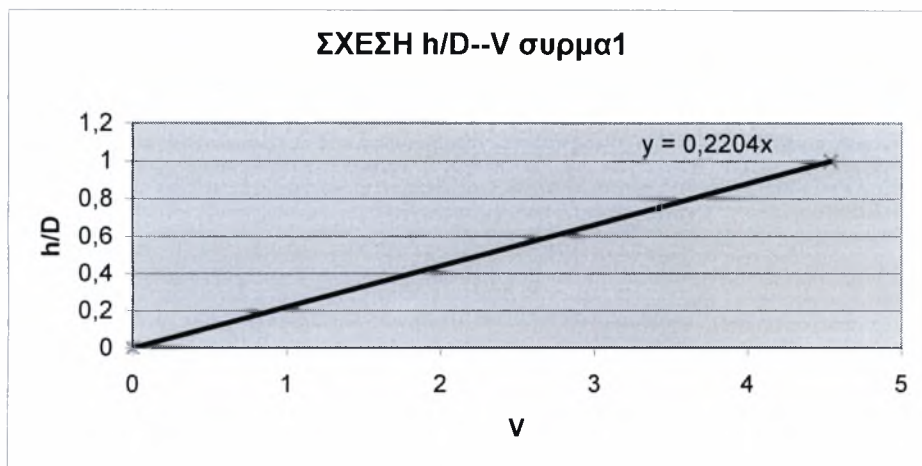
ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΥΓΡΟΥ 1 ΜΕ ΙΞΩΔΕΣ 18,5 cp



ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΥΓΡΟΥ 2 ΜΕ ΙΞΩΔΕΣ 18,5 cp



ΣΧΕΣΗ ΥΨΟΥΣ-VOLT



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074517

