ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ

του

ΓΟΥΜΕΝΟΠΟΥΛΟΥ ΙΩΑΝΝΗ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Π.Θ., 2011

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2016

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

© 2016 Γουμενόπουλος Ιωάννης

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

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής :

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Μιχαήλ Βλαχογιάννης Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Μποντόζογλου Βασίλειο για τη διπλωματική εργασία που μου ανέθεσε και τη βοήθεια που μου παρείχε ώστε να ολοκληρωθεί και να παρουσιαστεί αυτή η εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, κ. Ανδρίτσο Νικόλαο και κ. Βλαχογιάννη Μιχαήλ, για τις συμβουλές που μου δώσανε ώστε να κατανοήσω καλύτερα τη λειτουργία της διάταξης και των πειραμάτων, αλλά και τον κ. Τσιρίκογλου Θεόδωρο για τη συνεχή στήριξη και βοήθεια στα πειράματα και στα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους και συμφοιτητές μου, Μπουρουτζήκα Φώτιο και Αλέξανδρο Τσιμπούκη γιατί ήταν δίπλα μου στα κρίσιμα σημεία, όπως και η φίλη μου Αλεξάνδρα Κοκκίνου, ενώ θα ήθελα να αφιερώσω τη συγκεκριμένη εργασία στην οικογένειά μου, η οποία μου στάθηκε από την αρχή σε αυτόν τον αγώνα που έδωσα μέχρι το τέλος των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Περίληψη

Η διφασική ροή υγρού-αερίου, δηλαδή η ταυτόχρονη ροή δύο φάσεων ενός ή περισσοτέρων ρευστών σε οριζόντιους ή κεκλιμένους αγωγούς, αποτελεί μία από τις συνηθέστερες μορφές ροής που απαντώνται στη βιομηχανία. Η μελέτη της διφασικής ροής δεν έχει μόνο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον αλλά μπορεί να συνεισφέρει στο σχεδιασμό καλύτερων και πιο αποδοτικών συσκευών και διατάξεων, καθώς και στην πρόβλεψη του καθεστώτος της διαλείπουσας ροής που είναι μείζονος βιομηχανικής σημασίας εξαιτίας των απότομων αυξομειώσεων της πίεσης.

Το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της διφασικής ροής υγρού-αερίου και συγκεκριμένα νερού-αέρα, καθώς και η χαρτογράφηση περιοχών ροής διφασικών συστημάτων νερού-αέρα. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε οριζόντιο κυλινδρικό αγωγό μήκους 19,7 m και διαμέτρου 10 cm. Η αναγνώριση των περιοχών ροής έγινε με οπτική παρατήρηση και παράλληλα έγινε λήψη φωτογραφιών και video.

Αρχικά γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σε παλαιότερες μελέτες και πειράματα σχετικά με τη διφασική ροή, ενώ στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα και το φωτογραφικό υλικό από τα πειράματα που διεξήχθησαν, καθώς και οι όποιες παρατηρήσεις και συμπεράσματα δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή 7
1.1 Γενικά 7
1.2 Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών 8
1.3 Σύμβολα - Παράμετροι της διφασικής ροής 8
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση 11
2.1 Καθεστώτα ροής 11
2.2 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιους αγωγούς 11
2.3 Ροή σε κεκλιμένους αγωγούς 14
2.4 Ροή σε κατακόρυφους αγωγούς 15
2.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων 17
2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή 18
2.7 Προσδιορισμός των περιοχών ροής 20
2.8 Χάρτες καθεστώτων ροής και όρια μεταπτώσεων 24
3. Πειραματική διάταξη και διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων 36
3.1 Στοιχεία Πειραματικής Διάταξης 36
3.2 Διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων 42
4. Πειραματικά αποτελέσματα 43
4.1 Χάρτης περιοχών ροής 43
4.2 Υδραυλικό άλμα 68
4.3 Πάχος υγρής στιβάδας 70
4.4 Βαθμονόμηση ροομέτρων νερού 72
4.5 Σύνοψη των καθεστώτων ροής που εμφανίζονται 72
5. Συμπεράσματα και προτάσεις 74
5.1 Συμπεράσματα 74
5.2 Προτάσεις 75
6. Βιβλιογραφία 76
Παράρτημα 80

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα πειράματα της συγκεκριμένης εργασίας εκπονήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Λάρισας και είχαν ως στόχο την πειραματική μελέτη της διφασικής ροής νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό και ειδικότερα τη χαρτογράφηση των καθεστώτων ροής που δημιουργήθηκαν με τη χρήση της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου.

Με τον όρο φάση αναφερόμαστε σε μια από τις καταστάσεις της ύλης και μπορεί να είναι αέρια, υγρή και στερεή. Πολυφασική ροή είναι η ταυτόχρονη ροή διαφόρων φάσεων. Η απλούστερη περίπτωση πολυφασικής ροής είναι η διφασική ροή, δηλαδή η ροή που δημιουργείται εξαιτίας της ταυτόχρονης ροής δυο φάσεων.

Η διφασική ροή υγρού-αερίου εμφανίζεται πολύ συχνά τόσο στη φύση όσο και στη βιομηχανία. Η ταυτόχρονη ροή δύο φάσεων σε οριζόντιο, κεκλιμένο ή κάθετο αγωγό απαντάται σε μεγάλο πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών όπως οι διεργασίες της συμπύκνωσης και της εξάτμισης στις ψυκτικές εγκαταστάσεις, τα συστήματα διακίνησης των γεωθερμικών ρευστών και των προϊόντων του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, σε συσκευές μεταφοράς θερμότητας με αλλαγή φάσης καθώς και στη λειτουργία πυρηνικών και χημικών αντιδραστήρων. Παρόλο που στο παρελθόν έχουν διεξαχθεί πολλές και σημαντικές έρευνες, η κατανόηση της συμπεριφοράς και των μηχανισμών της διφασικής ροής είναι σε στάδιο συνεχούς εξέλιξης.

Στη διφασική ροή υγρού-αερίου οι δύο φάσεις κατανέμονται στον αγωγό με διάφορους τρόπους με αποτέλεσμα την εμφάνιση καθεστώτων ροής, τα οποία μας βοηθούν στην κατανόηση της ροής και στην αξιοποίηση της στις εφαρμογές που μας ενδιαφέρουν. Οι εξισώσεις που προκύπτουν για την περιγραφή των διφασικών ροών είναι πολύπλοκες μιας και η κάθε φάση επηρεάζεται όχι μόνο από τις δικές της ιδιότητες και συνθήκες, αλλά και από της άλλης φάσης. Το κύριο χαρακτηριστικό της ροής διφασικού μίγματος σε αγωγό είναι η μορφή της διεπιφάνειας αερίου-υγρού, η οποία απεικονίζεται στους χάρτες περιοχών ροής (flow map patterns ή flow map regimes). Συγκεκριμένα, στους χάρτες περιοχών ροής απεικονίζονται τα καθεστώτα ή περιοχές ροής (flow patterns ή flow regimes), τα οποία δημιουργούνται όταν αέριο και υγρό ρέουν ταυτόχρονα σε έναν οριζόντιο ή κεκλιμένο αγωγό. Οι χάρτες ροής είναι λογαριθμικά διαγράμματα που στον οριζόντιο άξονα έχουν τη φαινομενική ταχύτητα του αερίου και στον κάθετο άξονα τη φαινομενική ταχύτητα του υγρού. Η κατασκευή ενός τέτοιου χάρτη είναι δύσκολη και απαιτεί προσοχή αφού μία μικρή αλλαγή κυρίως στη διάμετρο, στην κλίση ή στο ιξώδες επιφέρει και αλλαγή στο χάρτη ροής του διφασικού μίγματος.

Το καθεστώς της ροής που προκύπτει εξαρτάται από παράγοντες όπως: η παροχή του υγρού και του αερίου, η πίεση, η μεταφορά θερμότητας, οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών (πυκνότητα, ιξώδες, επιφανειακή τάση), καθώς και η γεωμετρία του αγωγού (κλίση, μορφή διατομής, διάμετρος, τραχύτητα). Οι κυριότερες περιοχές που εμφανίζονται είναι: η διαστρωματωμένη ροή με ή χωρίς κύματα (smooth/wavy stratified flow), η διαλείπουσα ροή (slug flow) και η δακτυλιοειδής ροή (annular flow).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

1.2 Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών

Η ανάλυση της διφασικής ροής στηρίζεται κυρίως σε πειραματικά δεδομένα καθώς και σε απλά ή σύνθετα αναλυτικά μοντέλα τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής (Ανδρίτσος & Μποντόζογλου, 2006):

1. Εμπειρικές Σχέσεις. Στηρίζονται σε πειραματικές μετρήσεις και δίνονται με τη μορφή εξισώσεων. Δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις, επειδή προέκυψαν από πειράματα σε συγκεκριμένες συνθήκες.

2. Απλά Αναλυτικά Μοντέλα. Μοντέλα τα οποία δεν παίρνουν υπόψη τους τις λεπτομέρειες της ροής, αν και μερικές φορές μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στη πρόβλεψη διαφόρων παραμέτρων. Σε αυτά τα μοντέλα γίνεται χρήση των γενικευμένων εξισώσεων συνέχειας, ορμής και ενέργειας. Στο πιο απλό μοντέλο, στο ***μοντέλο ομογενούς ροής*** *(homogeneous flow model)*, τα δύο ρευστά περιγράφονται ως ένα ρευστό με κατάλληλα σταθμισμένες τιμές των φυσικών ιδιοτήτων και το οποίο υπακούει στους νόμους της μονοφασικής ροής. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του είναι μικρή, αφού δεν λαμβάνει υπόψη τη διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δυο φάσεων. Στο ***μοντέλο διαχωρισμένης ροής*** *(separated flow model)* οι δύο φάσεις θεωρούνται ότι ρέουν η μία χωριστά από την άλλη και οι βασικές εξισώσεις γράφονται ξεχωριστά για κάθε φάση.

3. Σύνθετα Μοντέλα. Προσπάθεια για ανάπτυξη σχέσεων για ορισμένες παραμέτρους, όπως η κατανομή της ταχύτητας και της συγκέντρωσης, ή για συγκεκριμένα καθεστώτα ροής ξεκινώντας από κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις. Η περιγραφή του μοντέλου της ροής είναι ακριβής, όμως παρουσιάζεται αυξημένη δυσκολία στην επίλυση των εξισώσεων.

1.3 Σύμβολα - Παράμετροι της διφασικής ροής

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

Συγκράτηση υγρού και Κλάσμα κενού

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

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

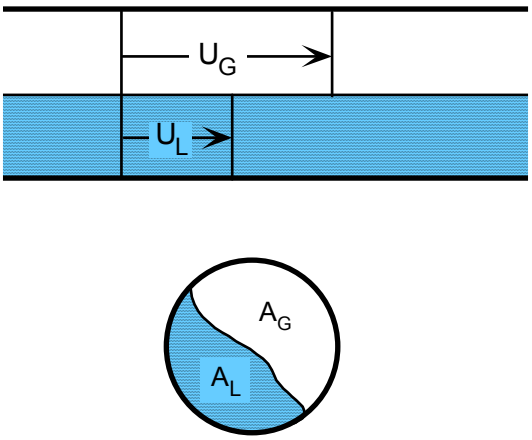
ορισμένο τμήμα του. Εάν το εμβαδόν της διατομής του αγωγού είναι A και τα εμβαδά της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και τη υγρή φάση αντίστοιχα είναι A_G και A_L, τότε:

$$a = \frac{A_G}{A}$$

όπου $A=A_G+A_L$.

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

$R + \alpha = 1$



Σχήμα 1.1 Απλοποιημένη εικόνα της διφασικής ροής υγρού-αερίου σε κυλινδρικό αγωγό.

Μαζικές Ροές (total mass flow)

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

$G=G_L+G_G$

Ποιότητα

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

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

$$x = \frac{\dot{m}_G}{G} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L}$$

όπου $\dot{m}_G$ και $\dot{m}_L$ είναι οι μαζικές παροχές των δύο φάσεων. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι οι δείκτες L και G εκφράζουν την υγρή και την αέρια φάση αντίστοιχα.

Φαινομενικές Ταχύτητες Φάσεων

Σαν μέτρο της παροχής των δυο φάσεων συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία οι **φαινομενικές ταχύτητες** (superficial velocities) που ορίζονται από τις σχέσεις:
Η φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως

$$U_{GS} = \frac{Q_G}{A} = \frac{\dot{m}_G \rho_G}{A}$$

και η φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως

$$U_{LS} = \frac{Q_L}{A} = \frac{\dot{m}_L \rho_L}{A}$$

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

Μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (Average Phase Velocities):

Η μέση πραγματική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$U_G = \frac{Q}{A\alpha} = \frac{G_G}{\rho_G A\alpha} = \frac{U_{GS}}{\alpha}$$

και η μέση πραγματική ταχύτητα υγρής φάσης γράφεται:

$$U_L = \frac{Q}{A\alpha} = \frac{G_L}{\rho_L A\alpha} = \frac{U_{LS}}{\alpha}$$

όπου α είναι το κλάσμα κενού.

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

$$U_M = \frac{Q_G + Q_L}{A} = U_{GS} + U_{LS}$$

Ταχύτητα Ολίσθησης, S (Slip Ratio):

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

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

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Καθεστώτα ροής

Επειδή όπως έχει προαναφερθεί η διφασική ροή υγρού – αερίου χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές, είναι αναγκαίο να προβλέπουμε τα καθεστώτα ροής που παρατηρούνται τόσο στις εκάστοτε περιοχές ροής όσο και στις μεταπτώσεις από τη μία περιοχή ροής στην άλλη.

Η πρόβλεψη του καθεστώτος της ροής σε έναν κυλινδρικό αγωγό, όπου ρέουν δύο διαφορετικά ρευστά, παίζει σημαντικό ρόλο ώστε να γίνεται ακριβέστερος ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της ροής και να αντιμετωπίζονται φαινόμενα όπως η απότομη αυξομείωση της πίεσης λόγω της μεταβολής των καθεστώτων ροής. Η μεταφορά ενέργειας, μάζας και ορμής ανάμεσα στις δύο φάσεις εξαρτάται άμεσα από το εμβαδόν της διεπιφάνειας ανά μονάδα όγκου και κατά συνέπεια από το καθεστώς ροής.

2.2 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιους αγωγούς

Στους οριζόντιους αγωγούς είναι σημαντική η επίδραση της βαρύτητας στα δύο ρευστά, η οποία έχει ως συνέπεια το υγρό να συγκεντρώνεται στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος του. Συνεπώς τα καθεστώτα ροής σε οριζόντια διφασική ροή που έχουν αναγνωριστεί στη βιβλιογραφία είναι αρκετά και σύμφωνα με τους Mandhane et al. (1974), Taitel & Dukler (1976) και Lin & Hanratty (1986) τα πλέον αποδεκτά καθεστώτα ροής είναι τα ακόλουθα και παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2-1.

1. **Διαστρωματωμένη ροή** (stratified flow)

Στη διαστρωματωμένη ροή, η οποία σχηματίζεται για μικρές παροχές των ρευστών, το υγρό ρέει στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος του. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι λεία (smooth) ή να καλύπτεται με κύματα (wavy), το οποίο εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα της αέριας φάσης. Σε χαμηλές ταχύτητες υγρού και αεριού παρατηρούνται δισδιάστατα κύματα μικρού πλάτους, με αδιατάρακτη επιφάνεια, που επεκτείνονται σε όλο το πλάτος του σωλήνα. Αν η ταχύτητα του αερίου αυξηθεί τότε έχουμε την εμφάνιση κυμάτων μεγάλου πλάτους (roll waves ή disturbance ή Kelvin-Helmholtz waves), η επιφάνεια των οποίων γίνεται τραχεία, και το υγρό αρχίζει να αναρριχάται στο σωλήνα. Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας (παροχής) του αεριού, σταγόνες από το υγρό αρχίζουν να κτυπούν στο πάνω μέρος του αγωγού και να έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου της εκνέφωσης (atomization).

2. **Διαλείπουσα ροή ΙΙ** (slug ή intermittent flow)

Η διαλείπουσα ροή χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («slugs») από το σωλήνα, που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Οι υγρές αυτές μάζες μπορεί να εμπεριέχουν και να παρασύρουν πολλές φυσαλίδες αέριου. Η ροή αυτή είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη για τις περισσότερες εφαρμογές,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

διότι προκαλεί απότομες αυξήσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να προκαλούνται δονήσεις στις σωληνώσεις, να απαιτούνται μεγάλοι διαχωριστές, αυξάνει ο ρυθμός μηχανικής διάβρωσης κ.α.

3. **Κλειστή ροή ή Διαλείπουσα ροή Ι** (plug flow)

Κατά την εμφάνιση αυτής της ροής στο εσωτερικό του σωλήνα παρατηρούνται μάζες νερού οι οποίες καταλαμβάνουν όλο το εσωτερικό του σωλήνα και οι οποίες, για σταθερή παροχή νερού και αέρα, εμφανίζονται με σταθερή συχνότητα. Σε μεγάλες παροχές αέρα στο εσωτερικό των μαζών νερού υπάρχουν και πολύ μικρές φυσαλίδες.

4. **Ψευδο-Διαλείπουσα Ροή** («Pseudo-Slug» Flow)

Αμέσως μετά τη διαλείπουσα ροή έχουμε την εμφάνιση της ψευδο-διαλείπουσας ροής, η οποία χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («pseudo-slugs») από το σωλήνα, που κινούνται με ταχύτητα αρκετά μικρότερη από την ταχύτητα της αέριας φάσης και έτσι δεν παρατηρούνται απότομες μεταβολές της πίεσης. Το είδος αυτό της ροής μοιάζει αφενός με την δακτυλιοειδή ροή, στο ότι το υγρό σχηματίζει μια συνεχή στιβάδα στην περιφέρεια του αγωγού και αφετέρου με τη διαλείπουσα ροή, στο ότι παρουσιάζονται υγρές μάζες που μοιάζουν με «slugs», ενώ η αέρια φάση παραμένει μέχρι σε ένα σημείο συνεχής. Η ροή αυτή εμφανίζεται συνήθως σε αγωγούς μικρής διατομής.

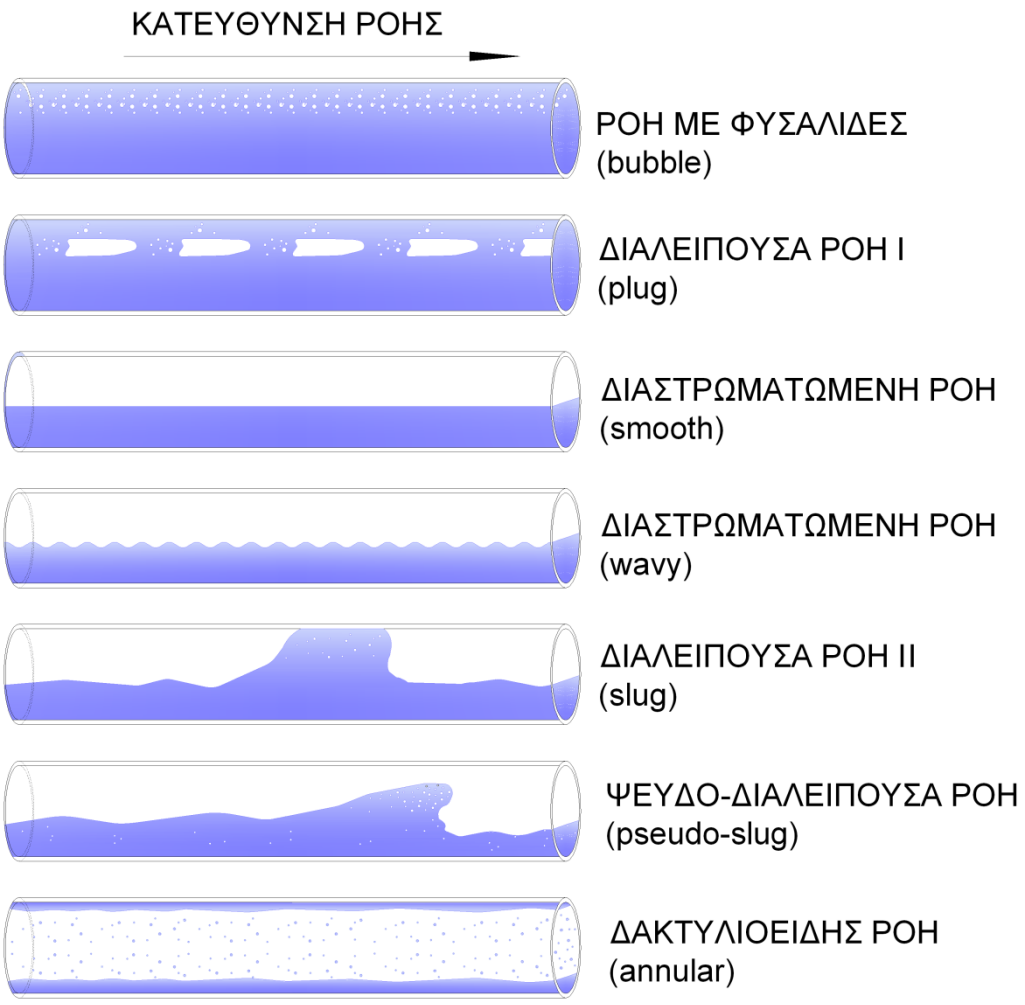
5. **Ροή με φυσαλίδες** (Dispersed Bubble flow)

Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διεσπαρμένων φυσαλίδων αεριού στην συνεχή υγρή φάση, οι οποίες τείνουν να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού και σε ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται σαν αφρός. Αυτό το καθεστώς ροής σχηματίζεται για μεγάλους ρυθμούς παροχής του υγρού.

6. **Δακτυλιοειδής ροή** (Annular flow)

Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός υγρού δακτυλίου που σχηματίζεται στην περιφέρεια του αγωγού, με την αέρια φάση να ρέει στο κέντρο. Συνήθως ένα μέρος της υγρής φάσης εισέρχεται στο χώρο της αέριας φάσης με τη μορφή σταγονιδίων. Η δακτυλιοειδής ροή εμφανίζεται για μεγάλες παροχές αερίου και όσο αυξάνεται η παροχή τόσο μειώνεται η ασυμμετρία του υγρού δακτυλίου, η οποία οφείλεται στην επίδραση της βαρύτητας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 2.1 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό

Στην παρούσα εργασία ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής (Andritsos & Hanratty, 1987a):

- **Λεία διαχωρισμένη ροή**, η οποία εμφανίζεται σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής και της αέριας φάσης και η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων είναι λεία.

- **Διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα** (2-D). Όσο αυξάνουμε λίγο την φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης εμφανίζονται στη διεπιφάνεια τα πρώτα κανονικά δισδιάστατα κύματα, με μικρό μήκος και πλάτος κύματος. Τα κύματα αυτά παρατηρούνται για σχετικά στενό εύρος ταχυτήτων της αέριας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

φάσης. Ουσιαστικά, αρχικά παρατηρούνται ως διαταραχές στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων.

- **Διαστρωματωμένη ροή με κύματα μεγάλου μήκους και πλάτους**, ή αλλιώς ροή με κύματα Kelvin-Helmholtz (K-H). Τα κύματα K-H εμφανίζονται με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης και η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων είναι αρκετά τραχιά. Στη βιβλιογραφία τα κύματα αυτά βρίσκονται συχνά και με το όνομα κύματα περιδίνησης (roll waves).

- **Ροή με εκνέφωση**. Ως μετάπτωση σε αυτό το υποκαθεστώς διαστρωματωμένης ροής ορίζονται οι συνθήκες παροχής όπου για πρώτη φορά παρατηρούνται σταγονίδια, τα οποία αποκόπτονται από τις κορυφές των κυμάτων K-H και εναποτίθενται στο πάνω μέρος του αγωγού. Επίσης για μικρές διαμέτρους παρατηρείται αναρρίχηση της υγρής στιβάδας στα τοιχώματα του αγωγού, η οποία σε συνδυασμό με την απόθεση σταγονιδίων θα οδηγήσει τελικά στη δακτυλιοειδή ροή. Για αγωγούς μεγάλης διαμέτρου ο μηχανισμός της απόθεσης σταγονιδίων είναι ο κύριος μηχανισμός δημιουργίας δακτυλιοειδούς ροής.

2.3 Ροή σε κεκλιμένους αγωγούς

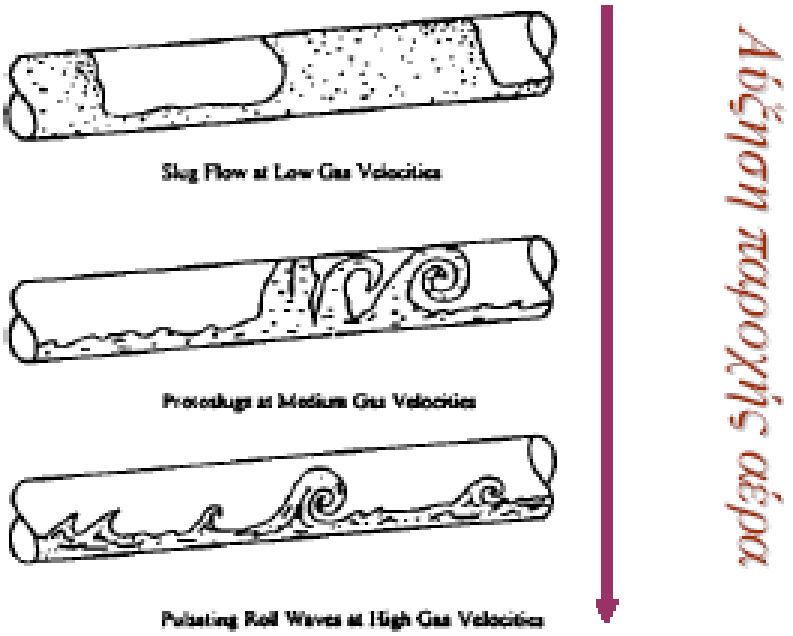
Σε έναν οριζόντιο σωλήνα όσο αυξάνεται η γωνία του τόσο οι δυνάμεις βαρύτητας που ενεργούν στο υγρό γίνονται σημαντικότερες, προκαλώντας αύξηση ή μείωση στην ταχύτητα του υγρού, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής.

Τα κυριότερα συμπεράσματα από μελέτες σε αγωγούς με κλίση είναι:

• Η μετάπτωση από τη διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην κλίση του αγωγού.

• Η μετάπτωση από τη διαλείπουσα στη δακτυλιοειδή ροή και στη ροή με φυσαλίδες επηρεάζονται ελάχιστα από την κλίση του αγωγού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 2.2 Περιοχές ροής σε κεκλιμένο σωλήνα (μεταβάσεις περιοχών ροής που παρατηρούνται καθώς αυξάνεται η αέρια φαινομενική ταχύτητα)

2.4 Ροή σε κατακόρυφους αγωγούς

Για ροή σε κατακόρυφους αγωγούς με κατεύθυνση προς τα πάνω, οι Taitel et al. (1980) περιέγραψαν τους παρακάτω τύπους διφασικής ροής, οι οποίοι παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.3.

I. **Ροή με φυσαλίδες** (Bubble flow)

Κατά τη διφασική ροή με φυσαλίδες η υγρή φάση είναι συνεχής, ενώ η αέρια φάση είναι διασπαρμένη με τη μορφή μικρών φυσαλίδων. Παρατηρείται σε μικρή σχετικά ταχύτητα αερίου με πλήρη ανάμιξη της αέριας στην υγρή φάση και για διάμετρο αγωγού μεγαλύτερη των 5 cm περίπου. Αν αυξήσουμε την παροχή του υγρού αναφέρεται ως Ροή με Διασπαρμένες Φυσαλίδες (Bubbly Dispersed Flow), αν και η διαφοροποίηση των δύο υπο-καθεστώτων είναι συνήθως δύσκολη.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

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

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

III. **Ανάμικτη Ροή** (Churn Flow)

Κατά την ανάμικτη ροή, υπάρχει μια έντονη ακατάστατη ανάμιξη των δυο φάσεων. Η αύξηση της ογκομετρικής παροχής της αέριας φάσης σε σχέση με τη διαλείπουσα ροή έχει ως αποτέλεσμα να παραμορφωθούν και να διασπαστούν οι φυσαλίδες Taylor, οι οποίες γίνονται ακανόνιστες, στενότερες με μεγάλες συγκεντρώσεις κατά φάση. Ύστερα από ορισμένο μήκος σωλήνωσης (αναλόγως της διαμέτρου) η ροή μεταπίπτει σε διαλείπουσα ή δακτυλιοειδή. Κύριο γνώρισμά της είναι η κίνηση ταλάντωσης των τμημάτων της υγρής φάσης.

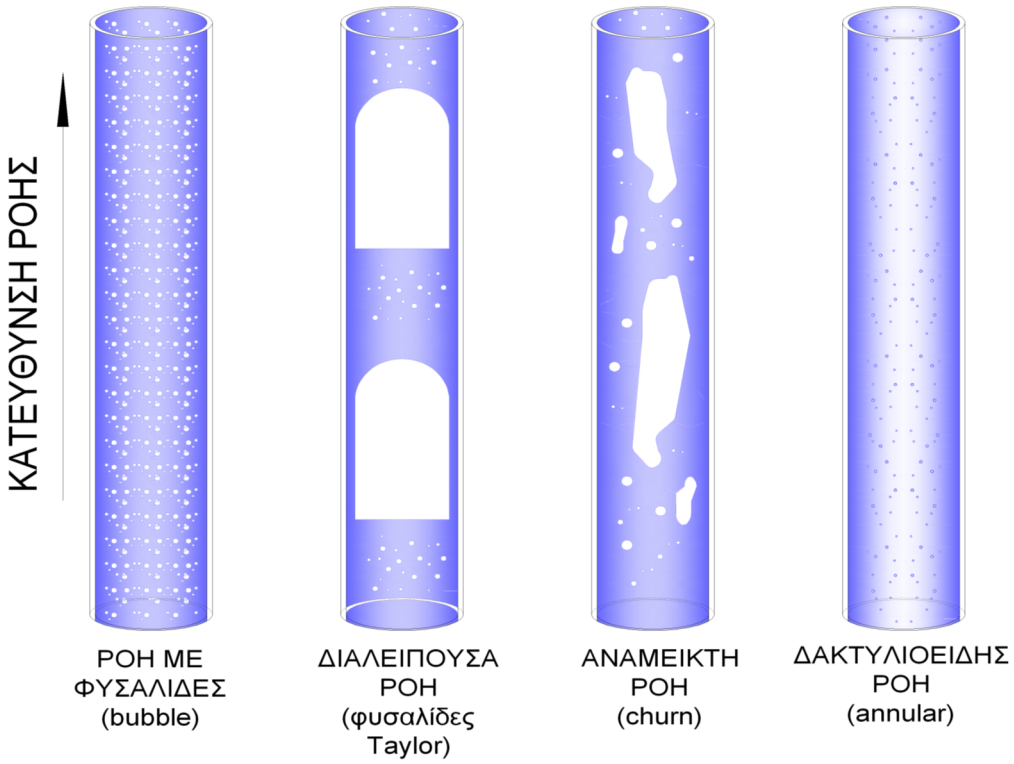
IV. **Δακτυλιοειδής Ροή** (Annular Flow)

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

Η μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο είναι συνήθως σταδιακή με συνέπεια να υπάρχουν περιοχές μεικτών καθεστώτων ροής. Κατά την κατακόρυφη ροή προς τα κάτω, τα καθεστώτα ροής είναι σαφώς διαφορετικά σε σχέση με την κατακόρυφη ροή προς τα πάνω. Το κύριο χαρακτηριστικό της ροής αυτής είναι η

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

τάση δημιουργίας δακτυλιοειδούς ροής, η οποία εξάλλου δημιουργείται ακόμη και με μηδενική ογκομετρική παροχή της αέριας φάσης (falling films).



Σχήμα 2.3 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε κατακόρυφο αγωγό για ροή προς τα επάνω

Για την κατακόρυφη ροή και για την οριζόντια διφασική ροή έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία πολυάριθμοι χάρτες καθεστώτων ροής οι περισσότεροι εκ των οποίων έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα σε μικρούς αγωγούς (20-50 mm διάμετρο), για το σύστημα νερό - αέρας και για ατμοσφαιρικές συνθήκες.

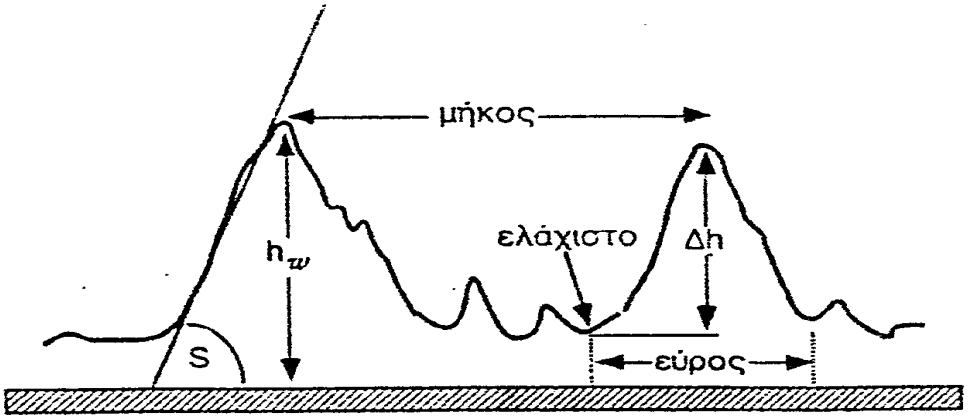
2.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων

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

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι το πλάτος του κύματος (wave amplitude), που ορίζεται ως το μισό της υψομετρικής διαφοράς, Δh, μεταξύ ενός ελάχιστου και του αμέσως επόμενου μέγιστου της υγρής στιβάδας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

(Nencini & Andreussi, 1982). 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 2.4 είναι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών κυμάτων.



Σχήμα 2.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων (Παράς, 1990)

Από την γνωστή σχέση της κινηματικής:

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

όπου f η χαρακτηριστική συχνότητα των κυμάτων, βλέπουμε ότι το μήκος κύματος σχετίζεται με την ταχύτητα του κύματος u_c. Το εύρος του κύματος ΔL είναι η οριζόντια απόσταση δυο διαδοχικών ελαχίστων της υγρής στιβάδας μεταξύ των οποίων ορίζεται το κύμα διαταραχής. Μια ακόμη παράμετρος που περιγράφει το Σχήμα 2.4 των κυμάτων διαταραχής είναι η αιχμηρότητα S που ορίζεται από τη σχέση:

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

2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή

Ο πρωταρχικός στόχος είναι να μπορούμε να προβλέπουμε την περιοχή ροής που εμφανίζεται κάτω από τις αντίστοιχες συνθήκες λειτουργίας (παροχές, ιδιότητες, γεωμετρία κλπ). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή είναι κυρίως οι παροχές των ρευστών, το ιξώδες, η πυκνότητα των ρευστών, η επιφανειακή τάση, η κλίση του αγωγού και η διάμετρος του αγωγού.

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 ανθίσταται στην διάτμηση τους,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

δηλαδή στην κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του. Επίσης, επηρεάζει την αναρρίχηση του υγρού στα τοιχώματα του σωλήνα. Όσο αυξάνεται το ιξώδες, χρειάζεται μεγαλύτερη παροχή αερίου για να ξεκινήσουν τα κανονικά δισδιάστατα κύματα ενώ μικραίνει και η περιοχή των δισδιάστατων κυμάτων. Ο Andritsos (1986), στη διδακτορική του διατριβή, κάνοντας έρευνα στη διφασική ροή σε οριζόντιους σωλήνες διαμέτρων 2,52, 5,08 και 9,53 cm και για υγρά με διαφορετικά ιξώδη έκανε τις παρακάτω παρατηρήσεις: 1) Η αύξηση του ιξώδους επιφέρει αύξηση στο μήκος κύματος των κυμάτων της διεπιφάνειας και 2) για σταθερή διάμετρο η μετάπτωση σε κύματα μεγάλου πλάτος είναι ανεξάρτητη από το ιξώδες.

Η **πυκνότητα** (density) του αερίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μορφή της διεπιφάνειας αερίου 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 αλλάζει σημαντικά και η μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή. Όμως η μετάπτωση από τη διαχωρισμένη σε διαλείπουσα ροή παρατηρείται ότι γίνεται σε μεγάλες παροχές υγρού. Επίσης η μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη με κύματα εμφανίζεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου (Weisman et al. 1979).

Όσο μειώνεται η **επιφανειακή τάση** παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές για μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή και για μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα. Η σημαντική αλλαγή που παρατηρείται είναι από διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη με κύματα και εμφανίζεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου (Weisman et al. 1979).

Η **διάμετρος** του σωλήνα επηρεάζει το βαθμό που το υγρό «αναρριχάται» περιφερειακά στα τοιχώματα του σωλήνα. Μικρή διάμετρος και υγρό με χαμηλό ιξώδες του δίνουν μεγαλύτερη «αναρριχητικότητα» στο υγρό. Αυξάνοντας τη διάμετρο του σωλήνα παρατηρείται ότι η μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή γίνεται σε μεγαλύτερες παροχές αεριού και η μετάπτωση σε διαλείπουσα σε μεγαλύτερες παροχές υγρού. Επιπλέον, η περιοχή ψευτοδιαλείπουσας ροής μικραίνει καθώς μεγαλώνει η διάμετρος του σωλήνα (Lin and Hanratty 1986).

Η **κλίση** του αγωγού επηρεάζει σημαντικά τη ροή, κάτι το οποίο παρατηρείται στη μετάβαση μεταξύ της διαστρωματωμένης και της διαλείπουσας ή δακτυλιοειδούς ροής. Σε έναν κεκλιμένο σωλήνα όταν αυξάνεται η γωνία, οι δυνάμεις βαρύτητας που ενεργούν στο υγρό γίνονται σημαντικότερες προκαλώντας μια αύξηση ή μια μείωση στην ταχύτητα του υγρού, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής. Για κλίση του αγωγού προς τα πάνω παρατηρούμε ότι η υγρή στιβάδα γίνεται λεπτότερη, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται δυσκολότερα τα slugs, ενώ για κλίση του αγωγού προς τα κάτω η υγρή στιβάδα γίνεται παχύτερη.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

2.7 Προσδιορισμός των περιοχών ροής

Οι περιοχές που αναφέραμε δεν εμφανίζονται αποκλειστικά μόνες τους. Υπάρχει για παράδειγμα περίπτωση μαζί με την Κλειστή ροή (Plug flow) να παρατηρήσουμε μέσα στον σωλήνα και την ύπαρξη μιας άλλης περιοχής ροής, όπως για παράδειγμα η Διαλείπουσα ροή (Slug flow). Στην περίπτωση αυτή αν η συχνότητα εμφάνισης μιας περιοχής ροής είναι πολύ μεγαλύτερη από την άλλη, τότε θεωρούμε ότι στη συγκεκριμένη παροχή αέρα και νερού εμφανίζεται μόνο η περιοχή ροής με την μεγαλύτερη συχνότητα. Στην περίπτωση όμως που και οι δυο περιοχές ροή εμφανίζονται με την ίδια συχνότητα τότε χρησιμοποιούμε τα ονόματα και τον δυο περιοχών ροής για να χαρακτηρίσουμε το συγκεκριμένο σημείο στο διάγραμμα ροής.

Η μετάβαση από την μια περιοχή ροής στην άλλη δεν είναι ακαριαία. Για το λόγο αυτό στο διάγραμμα ροής, στα σημεία που βρίσκονται κοντά στα σύνορα μετάβασης από την μια περιοχή στην άλλη, είναι σίγουρο ότι στο σωλήνα εμφανίζονται και τα δυο είδη ροής. Ο χαρακτηρισμός της ροής στα σημεία αυτά είναι καθαρά υποκειμενικός και ίσως το πιο σωστό είναι τα σημεία αυτά να θεωρούνται ότι ανήκουν και στις δυο περιοχές ροής. Η τεκμηρίωση της εμφάνισης μίας ροής μόνο με τη βοήθεια οπτικών μέσων είναι σχετικά δύσκολη. Για το λόγο αυτό ίσως να υπάρχει κάποιο μικρό σχετικά σφάλμα όσο αναφορά τις παροχές στις οποίες αρχίζει να εμφανίζεται αυτή η περιοχή ροής.

Για τον προσδιορισμό των περιοχών ροής χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μέθοδοι (Ανδρίτσος & Παράς, 1991), οι οποίες είναι καλές για χαμηλές παροχές υγρού-αερίου και μακριά από περιοχές μετάπτωσης (π.χ. διαλείπουσα-δακτυλιοειδής). Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται και άλλες μέθοδοι για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της διφασικής ροής.

- **Οπτική παρατήρηση**

Πρόκειται για τον απλούστερο τρόπο ανίχνευσης των μορφών διφασικής ροής, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει διάφανο αγωγό (για όχι υψηλές πιέσεις και για συστήματα που δεν επηρεάζονται από το φως).

Στην περίπτωση που τα φαινόμενα εξελίσσονται με μεγάλη ταχύτητα και η απλή παρατήρηση δεν είναι ακριβής, είναι απαραίτητη η χρήση φωτογραφικής μεθόδου μεγάλης ταχύτητας (high speed photography) ή η φωτογράφιση της αξονικής διατομής (axial view photography) (Hewitt & Roberts, 1969).

- **Αγωγιμομετρική μέθοδος**

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο όταν η υγρή φάση είναι (ή μπορεί να γίνει) αγώγιμη και βασίζεται στη χρήση μετρητικού, το οποίο όταν βρίσκεται σε επαφή με την υγρή φάση δίνει υψηλό σήμα εξόδου, ενώ σε επαφή με την αέρια φάση

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

δίνει σχεδόν μηδενικό. Για τον προσδιορισμό των περιοχών ροής έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές κατάλληλοι συνδυασμοί ηλεκτροδίων.

- **Απορρόφηση ακτινών Χ (ή ακτινών γ)**

Από τη διαφορά της απορρόφησης των ακτινών στις διάφορες φάσεις μετριέται το ποσοστό κενού, δηλαδή ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει η κάθε φάση στον αγωγό. Το σήμα εξόδου του ανιχνευτή αναλύεται στατιστικά και το είδος της ροής εκτιμάται από την κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του σήματος. Δύο μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν έχει εφαρμοστεί σε μεγάλες παροχές, όπου υπάρχει δυσκολία στην ταυτοποίηση των περιοχών ροής και ότι η συσκευή είναι ακριβή και επικίνδυνη λόγω της ακτινοβολίας.

- **Πτώση πίεσης**

Η βαθμίδα της πίεσης σε μια διφασική ροή επηρεάζεται από τις δυνάμεις τριβής, τις δυνάμεις βαρύτητας και τις μεταβολές της ορμής του μίγματος. Επειδή κατά τη διάρκεια μιας διφασικής ροής παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές της πίεσης, οι ροϊκές συνθήκες μεταβάλλονται ταχύτατα εντός της ροής. Έτσι , η μεταβολή της πίεσης του συστήματος δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ακριβώς από μια μόνο βαθμίδα πίεσης, εκτός και αν υπάρχουν χαμηλές παροχές ή το μήκος ροής είναι πολύ μικρό. Στα περισσότερα προβλήματα διφασικής ροής είναι απαραίτητη η παρεμβολή διαφόρων τοπικά μετρημένων βαθμίδων πίεσης κατά το μήκος ροής. Η διφασική ροή υγρών-αερίων είναι η πλέον πολύπλοκη από τα υπόλοιπα είδη διφασικής ροής, διότι συνδυάζει τα χαρακτηριστικά μιας μεταβλητής διαχωριστικής επιφάνειας και τα χαρακτηριστικά συμπιεστότητας της μιας φάσης, δηλ. της αέριας φάσης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά μοντέλα υπολογισμού των βαθμίδων πίεσης σε διφασική ροή υγρών-αερίων, τα οποία βασίζονται λιγότερο ή περισσότερο σε πειραματικά δεδομένα, έχοντας έτσι εμπειρικό χαρακτήρα. Επιπλέον μερικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη το είδος της ροής (flow regime), δίνοντας και διάφορα κριτήρια για την εύρεση του αντίστοιχου είδους. Παρ' όλα αυτά δεν έχουν γενική ισχύ και η αξιοπιστία τους είναι μικρή, στα όρια των διαφόρων περιοχών, οπότε απαιτείται προσεκτική μελέτη των αποτελεσμάτων πριν την εφαρμογή τους.

Η μέτρηση της πτώσης πίεσης μπορεί να γίνει με κλασικά μανόμετρα υγρού ή με ηλεκτρονικούς μετατροπείς διαφορικής πίεσης (differential pressure transducers).

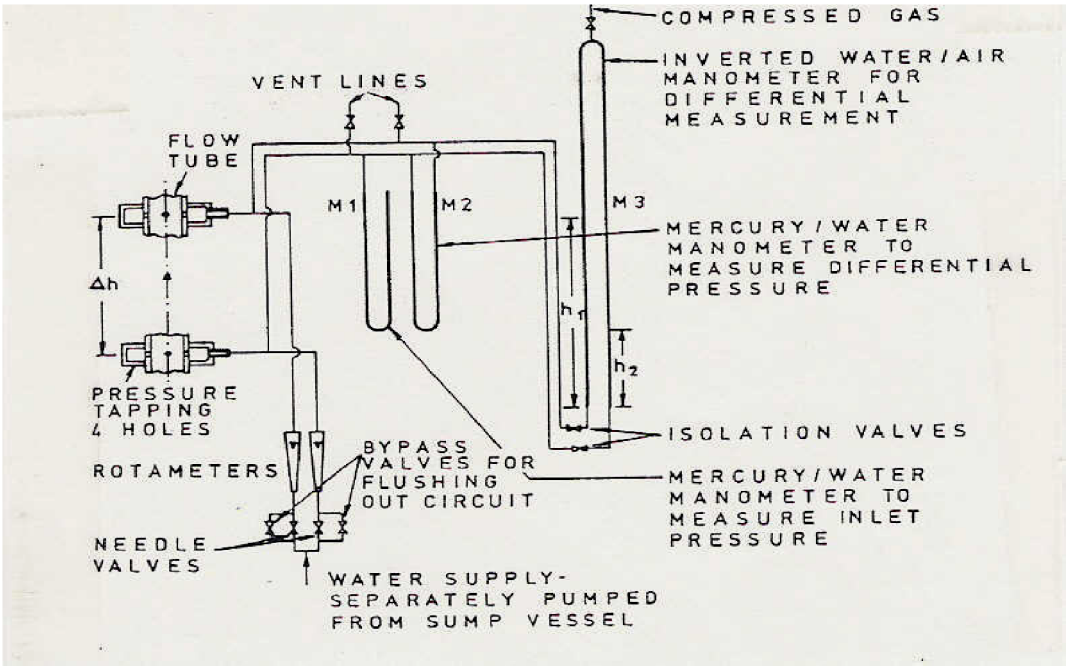
I. Μετρώντας με τα μανόμετρα, τα προβλήματα που συνήθως παρουσιάζονται είναι η αλλοίωση των μετρήσεων (αλλαγή της πυκνότητας του μανομετρικού υγρού) και η δραστική μείωση της απόκρισης του συστήματος μέτρησης που προκαλεί η είσοδος της αντίθετης φάσης από εκείνη που πληροί τις γραμμές σύνδεσης του μετρητικού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

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

σύνδεσης γεμίζονται με την υγρή φάση και πρέπει, αν είναι δυνατόν, να είναι διαφανείς, ώστε να φαίνεται η κατάσταση του ρευστού μέσα σ' αυτές (φυσαλίδες κλπ). Σε αυτή την περίπτωση ένα σύστημα απομάκρυνσης των φυσαλίδων όπως αυτό του Σχήματος 2.5 λύνει το πρόβλημα.

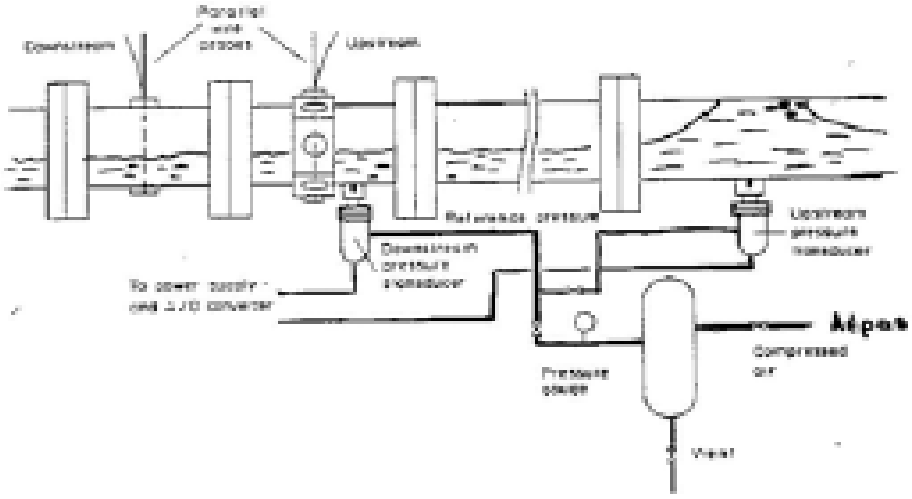
II. Στην περίπτωση των μετατροπέων πίεσης (pressure transducers) τα συνηθέστερα προβλήματα είναι:

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



Σχήμα 2.5 Σύστημα καθαρισμού των γραμμών σύνδεσης για μετρήσεις πτώσης πίεσης (Hewitt et al., 1962).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 2.6 Μέτρηση πτώσης πίεσης διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό

Η ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων των διαταραχών πίεσης προσδιορίζει το είδος ροής (Simpson et al. 1977) : η διαχωρισμένη ροή δίνει 'κορυφή' σε μηδενική συχνότητα, η ροή με φυσαλίδες δίνει ομοιόμορφο φάσμα συχνοτήτων, η διαλείπουσα και η δακτυλιοειδής ροή δίνουν χαρακτηριστική κορυφή στο φάσμα.

Οι Lin & Hanratty (1987) πρότειναν μία απλή μέθοδο κατά την οποία η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή μπορεί να πιστοποιηθεί από την αλληλοσυσχέτιση δύο σημάτων πίεσης από δύο μετρητικά που απέχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους. Αν τα σήματα συσχετίζονται τότε πρόκειται για διαλείπουσα ροή. Η μέθοδος είναι ίσως η καταλληλότερη για βιομηχανική εφαρμογή.

- **Πάχος υγρής στιβάδας**

Το πάχος της υγρής στιβάδας και η κατανομή του στην περιφέρεια του αγωγού είναι μια πολύ σημαντική παράμερος που παίζει μεγάλο ρόλο στη διφασική ροή. Μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της είναι να εκφράζει την ταχύτητα του υγρού ή το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει το κάθε ρευστό μέσα στον σωλήνα. Μπορεί ακόμη να δώσει στοιχεία για την πτώση πίεσης και την συνολική επιφάνεια εναλλαγής του υγρού ή του αεριού μέσα στο σωλήνα της διφασικής ροής.

Οι μέθοδοι και οι τεχνικές μετρήσεων για την μέτρηση πάχους στιβάδας όπως εμφανίζονται στη βιβλιογραφία, χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

i) **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.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

ii) **Έμμεσες μέθοδοι**

Επιγραμματικά αναφέρονται οι παρακάτω μέθοδοι:

→ Μέθοδος αποχέτευσης η κατακράτησης
→ Φωτογραφίες σκιών
→ Ραδιενεργοί ιχνηθέτες
→ Μέθοδος εξισορροπητικού υγρού
→ Φωτομετρικές μέθοδοι-Μέθοδοι οπτικής παρεμβολής

Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης και ηλεκτρικής χωρητικότητας (αγωγιμομετρική μέθοδος)

2.8 Χάρτες καθεστώτων ροής και όρια μεταπτώσεων

Η πρόβλεψη του καθεστώτος ροής που επικρατεί σε έναν αγωγό κατά την ταυτόχρονη ροή υγρού – αερίου παίζει καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό των μεγεθών που διέπουν τη ροή. Το καθεστώς ροής καθορίζεται από το λόγο του εμβαδού της διεπιφάνειας των ρευστών ανά μονάδα όγκου και συνεπώς ρυθμίζει τη μεταφορά ενέργειας, μάζας και ορμής μεταξύ των δύο φάσεων. Η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού που λαμβάνει χώρα κατά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή, καθιστά τη μετάπτωση αυτή ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα.

Προκειμένου να γίνει αντιληπτό σε ποια περιοχή ροής βρισκόμαστε και με ποιο τρόπο γίνεται η μετάπτωση από το ένα καθεστώς στο άλλο ήταν σημαντικό να αναπτυχθούν μοντέλα και να σχεδιαστούν χάρτες καθεστώτων ροής. Οι άξονες των χαρτών αυτών περιλαμβάνουν παροχές ή/και ιδιότητες φάσεων, αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού.

Παρακάτω θα γίνει μία αναφορά κατά χρονολογική σειρά στους διάφορους χάρτες που έχουν εμφανιστεί στη βιβλιογραφία:

Οι Bergelin και Gazley (1949) πρότειναν έναν από τους πρώτους χάρτες καθεστώτων ροής. Το διάγραμμά τους βασίστηκε σε δεδομένα στο σύστημα αέρα-νερού σε σωλήνα 1 in. Ως συντεταγμένες χρησιμοποίησαν τις μαζικές ροές του υγρού και του αερίου, (ML) και (MG), αντίστοιχα.

Οι Johnson και Abou-Sabe (1952) πρότειναν ένα χάρτη ροής που είναι παρόμοιος με αυτόν των Bergelin και Gazley και είναι βασισμένος στο σύστημα αέρα-νερού σε σωλήνα με διάμετρο 0,87 in.

Ο Alves (1954) πρότεινε έναν χάρτη βασισμένο σε παρατηρήσεις για μίγματα αέρα-νερού και αέρα-λαδιού σε σωλήνα διαμέτρου 1 in. Ως συντεταγμένες χρησιμοποίησε τις φαινομενικές ταχύτητες υγρού και αερίου αντίστοιχα, (U_{SL}) και (U_{SG}). Και τα δύο συστήματα μπορούσαν να σχεδιαστούν σε έναν ενιαίο χάρτη.

Από τους πρώτους που προσπάθησαν να περιγράψουν τη μετάπτωση από το ένα είδος ροής στο άλλο σε οριζόντιο αγωγό ήταν ο Baker (1954), ο οποίος

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

κατασκεύασε χάρτες, έχοντας πρώτα διακρίνει τα διάφορα καθεστώτα ροής. Αναγκάστηκε να εισάγει διορθωτικές παραμέτρους, καθώς διέθετε πειραματικά δεδομένα μόνο από μετρήσεις σε συστήματα νερού - αέρα σε ομορροή σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, ώστε ο χάρτης να μπορεί να βρει εφαρμογή και σε διαφορετικά συστήματα και συνθήκες. Επίσης διατύπωσε και τις αντίστοιχες εξισώσεις που περιγράφουν τη μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο στον ακόλουθο χάρτη ο οποίος είχε ως συντεταγμένες Gg/λ ως προς G_L/ψ, (όπου Gg, G_L οι μαζικές ταχύτητες αέριας και υγρής φάσης). Ο Baker έκανε εισαγωγή των ακολούθων παραμέτρων διόρθωσης των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών:

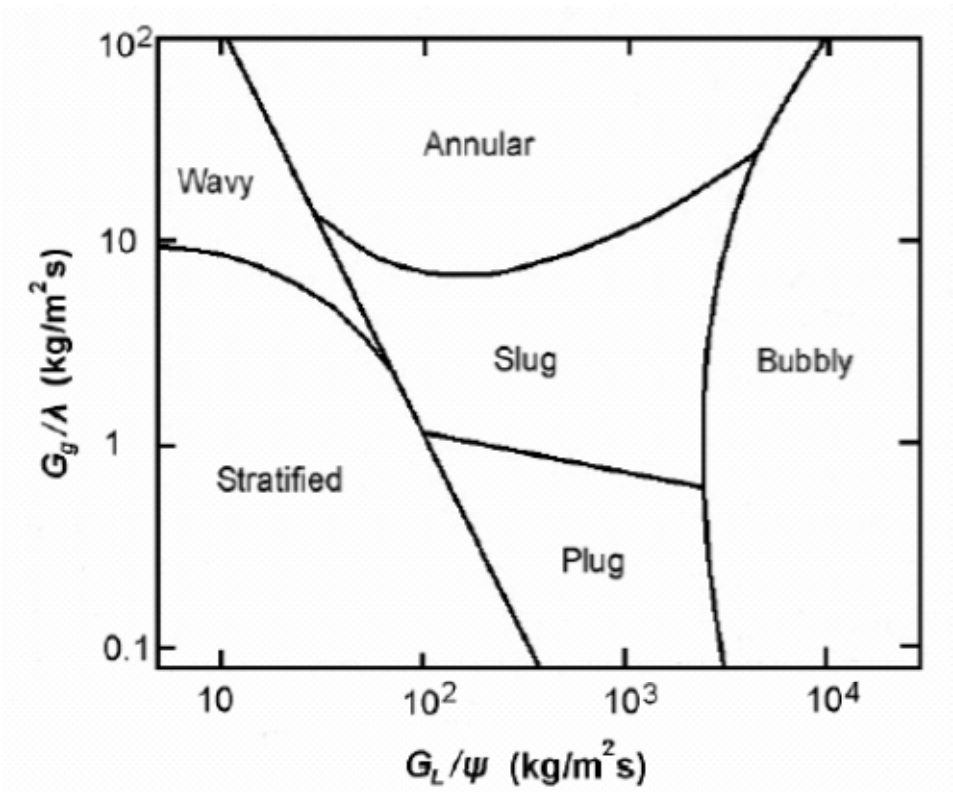
$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\rho_G}{0.075} \cdot \frac{\rho_L}{62.3} \right)} \tag{2.3}$$

$$\psi = \left(\frac{73}{\sigma} \right) \left[\mu_L \left(\frac{62.3}{\rho_L} \right)^2 \right]^{0.333} \tag{2.4}$$

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

Η ψευδο-διαλείπουσα ροή παρατηρείται πάντοτε αμέσως μετά την διαλείπουσα ροή. Χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («pseudo-slugs») από το σωλήνα, που κινούνται με ταχύτητα που η τιμή της είναι αρκετά μικρότερη από την ταχύτητα της αέριας φάσης. Έτσι, καθώς οι μάζες αυτές ρέουν με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του αερίου, η περίμετρος του αγωγού διαβρέχεται περιοδικά από την υγρή φάση αλλά η αέρια φάση παραμένει ως ένα σημείο συνεχής. Κύριο μειονέκτημα του παραπάνω χάρτη είναι ότι συνήθως περιορίζεται σε μικρής διαμέτρου αγωγούς και δεν παίρνει υπόψη του την επίδραση της διαμέτρου του αγωγού, πράγμα που οδήγησε στη δημιουργία άλλων εμπειρικών χαρτών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 2.7 Χάρτης καθεστώτων ροής σύμφωνα με τον Baker (1954)

Οι White και Huntington (1955) πρότειναν ένα χάρτη καθεστώτων ροής βασισμένο στα δεδομένα που πήραν μέσα σε αγωγούς 1, 1$_{1/2}$, και 2 in και για μίγματα όπως φυσικό αέριο-πετρέλαιο, αέρας-πετρέλαιο και αέρας-νερό. Χρησιμοποίησαν τις μαζικές ταχύτητες υγρού και αερίου, L και G, σαν συντεταγμένες.

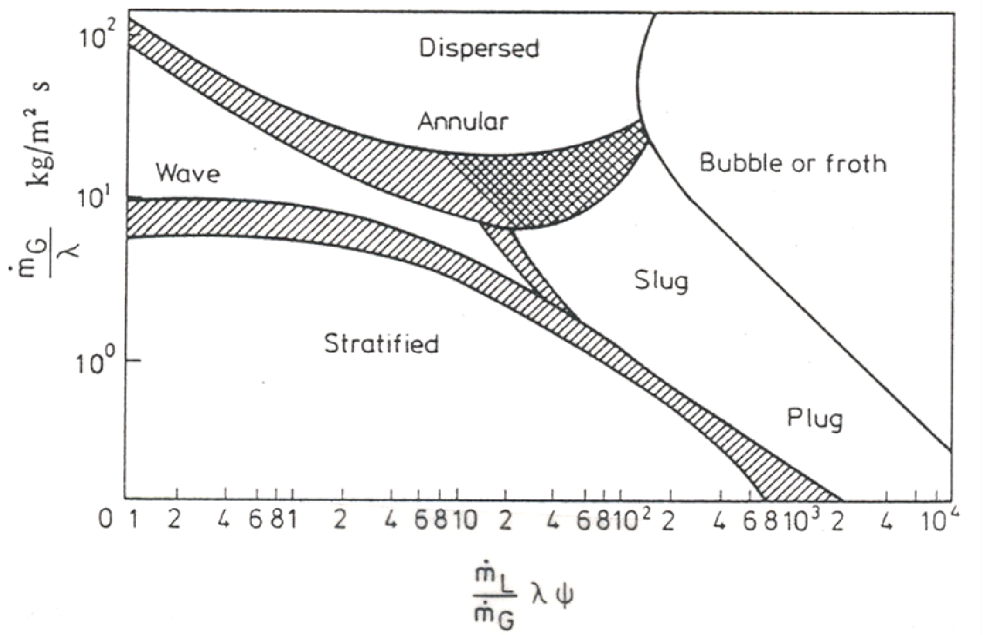
Ο Hoogendoorn (1959) μελέτησε τη διφασική ροή αέρα-νερού και αέρα-διαλυμάτων ελαίων σε λείες οριζόντιες σωληνώσεις με διαμέτρους από 24 έως 140 mm και σε μη λείες σωληνώσεις με εσωτερική διάμετρο 50 mm. Στους χάρτες περιοχών ροής που κατασκεύασε δεν χρησιμοποίησε ως άξονες τις φαινομενικές ταχύτητες των δύο φάσεων αλλά ως άξονα x έθεσε την ταχύτητα του διφασικού μίγματος, V_M και ως άξονα y το κλάσμα όγκου της αέριας φάσης, C_G. Ο Hoogendoorn παρατήρησε μικρές επιδράσεις της διαμέτρου των αγωγών και του ιξώδους του υγρού για ιξώδες μικρότερο από 50 cp.

Οι Govier και Omer (1962) παρουσίασαν ένα χάρτη βασισμένο στα δεδομένα τους για το σύστημα αέρας-νερό σε αγωγό 1,026 in. Οι μαζικές ταχύτητες υγρού και αερίου, L και G, χρησιμοποιήθηκαν ως συντεταγμένες στο χάρτη.

Ο Scott (1963) τροποποίησε το χάρτη του Baker χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των Hoogendoorn (1959) και Govier et al (1962) οι οποίοι μελέτησαν τη διφασική

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

ροή αέρα- νερού και αέρα διαλυμάτων ελαίων σε οριζόντιους αγωγούς. Δεν υπάρχει ακριβής θέση των συνόρων της μιας περιοχής ροής από την άλλη, στη θέση τους υπάρχει μια ευρεία «ταινία» ανάμεσα στις διάφορες περιοχές ροής.



Σχήμα 2.8 Χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό του Baker (1954) όπως τροποποιήθηκε από τον Scott (1963).

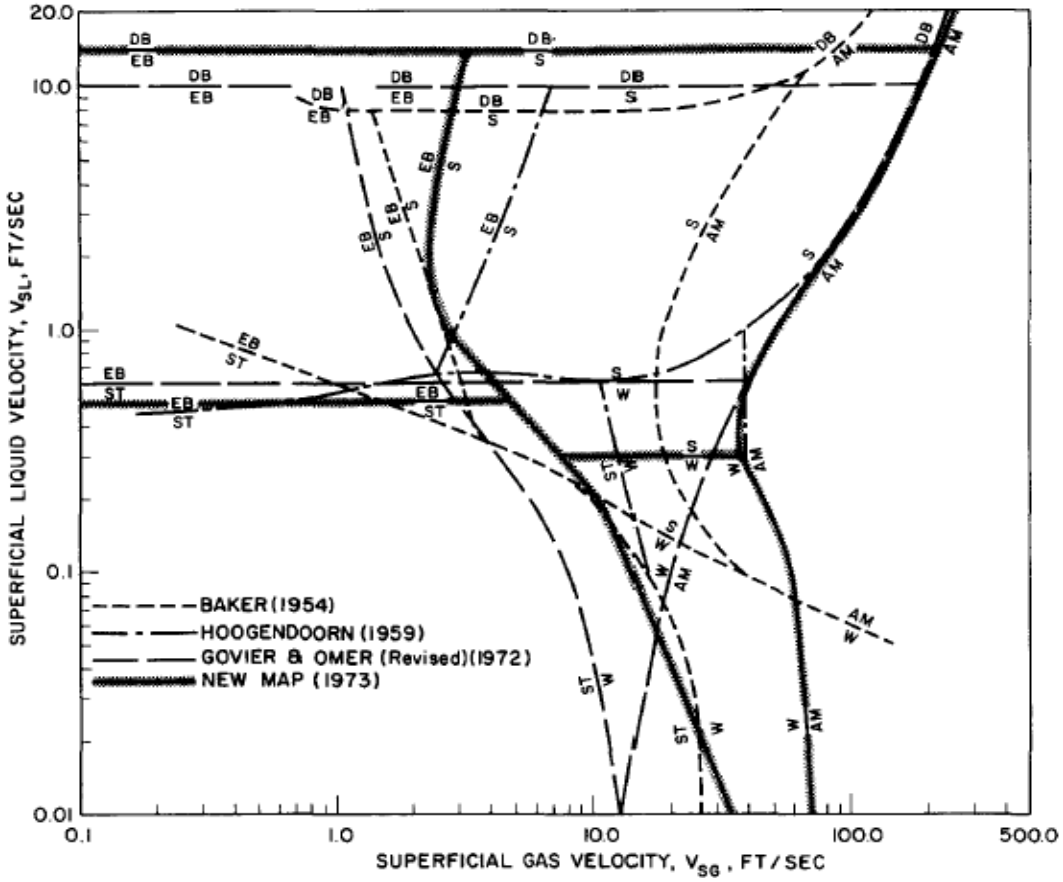
Οι Kordyban and Ranov (1970) πρότειναν ότι η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα σε κλειστό αγωγό οφείλεται στην αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz, η οποία ενισχύεται από την επαφή με το επάνω τοίχωμα του αγωγού και εξαρτάται από το πλάτος του κύματος.

Η αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που η κίνηση του κύματος μετατρέπεται από περιοδική σε εκθετική καθώς η ταχύτητα της αέριας φάσης είναι αρκετά μεγάλη και η συνισταμένη της πίεσης που βρίσκεται σε φάση με το ύψος του κύματος είναι τέτοιου μεγέθους, ώστε η αναρρόφηση που δημιουργείται να είναι μεγαλύτερη από την αντιτιθέμενη δύναμη. Παρατηρήθηκε ότι για συγκεκριμένη γεωμετρία αγωγού και φυσικές ιδιότητες, οι τέσσερις βασικές μεταβλητές που επιδρούν στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή είναι η ταχύτητα του αερίου, το ύψος της υγρής στιβάδας, το μήκος και το πλάτος του κύματος. Ωστόσο, από την πειραματική μελέτη προέκυψε ότι οι μεταβλητές που επηρεάζουν τη μετάπτωση είναι μόνο η ταχύτητα του αερίου και το ύψος της υγρής στιβάδας.

Οι Wallis & Dodson, (1973) υποστήριξαν ότι ο χάρτης του Baker είναι εύχρηστος μόνο για αρχικές εκτιμήσεις καθώς δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής. Αρχικά, η τεταγμένη του χάρτη δεν είναι αδιάστατη με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ευρεία εφαρμογή του. Συνυπολογίζοντας δε τις πολυάριθμες παραμέτρους που

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

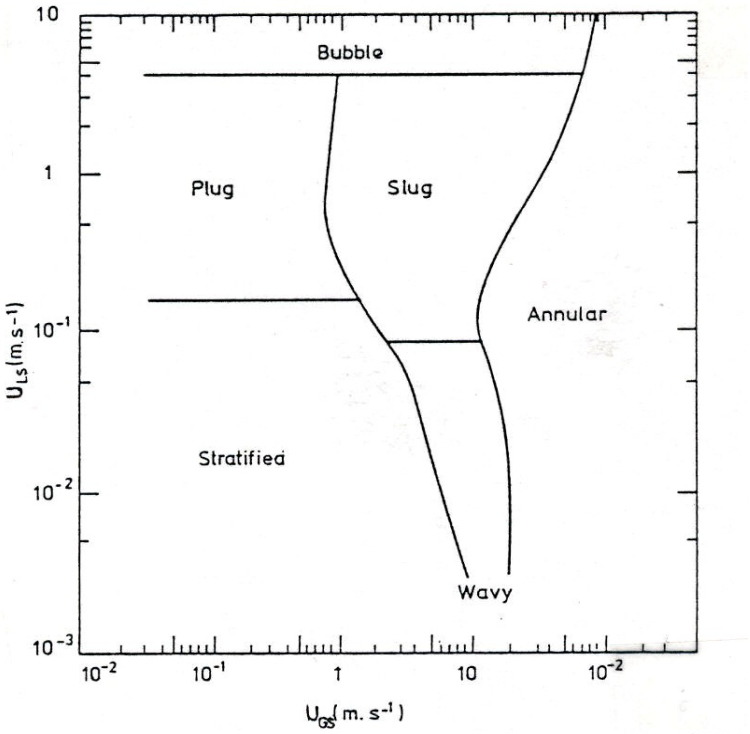
επιδρούν στη διφασική ροή (αδρανειακές και ιξώδεις δυνάμεις στις δυο φάσεις, επιφανειακή τάση και άνωση), γίνεται αντιληπτό ότι είναι αδύνατο να περιγράφεται η μετάπτωση στα διάφορα καθεστώτα ροής από τις ίδιες παραμέτρους. Συνεπώς, η μετάπτωση σε κάθε καθεστώς ροής θα έπρεπε να ερευνηθεί υπολογίζοντας τα καθεστώτα ξεχωριστά. Έτσι ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή σε ήπια («plug») ή έντονα («slug») διαλείπουσα ροή διεξάγοντας πειράματα σε αγωγούς ορθογωνικής διατομής. Διαπίστωσαν ότι και τα δύο καθεστώτα διαλείπουσας ροής δημιουργούνται εξαιτίας της παρουσίας ενός μεγάλου κύματος στη διεπιφάνεια υγρού - αερίου. Υποστήριξαν ότι η μετάπτωση και στα δυο αυτά καθεστώτα προκαλείται από την αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz και τα αντιμετώπισαν σαν ένα καθεστώς. Η διαφορά στην προσέγγιση αυτή σε σχέση με τις υπόλοιπες έγκειται στο γεγονός ότι δεν στηρίζεται στην ανάλυση μικρών διεπιφανειακών διαταραχών, αλλά στο δεδομένο ότι δημιουργείται ένα μεγάλο κύμα που κλείνει τον αγωγό, υπό την επίδραση δυνάμεων Bernoulli που αναπτύσσονται από την αέρια φάση.



Σχήμα 2.9 Σύγκριση του προτεινόμενου χάρτη καθεστώτων ροής των Mandhane et al (1974) με άλλους που χρησιμοποιήθηκαν από πολλούς ερευνητές όπως, Baker, Hoogenoorn και Gover & Omer (revised). Όπου EB Bubble, elongated bubble flow; ST Stratified flow; W Wave flow; S Slug flow; AM Annular, annular-mist flow; DB Dispersed bubble flow.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Οι Mandhane et al. (1974), εξετάζοντας τους μέχρι τότε διαθέσιμους χάρτες ροής (Σχήμα 2.9), διαπίστωσαν ότι ήταν δυνατές αρκετές βελτιώσεις, ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι πιο ακριβή. Μελέτησαν το σύστημα νερού - αέρα σε οριζόντιους αγωγούς διαμέτρου από 1,3 cm έως 15 cm σκοπεύοντας να εντοπίσουν τα εμφανιζόμενα καθεστώτα ροής που εμφανίζονται και να κατασκευάσουν ένα γενικευμένο χάρτη αυτών. Χρησιμοποίησαν ως συντεταγμένες τις φαινομενικές ταχύτητες u_{GS} και u_{LS} ώστε ο χάρτης να είναι απλός στην χρήση. Ισχυρίστηκαν ότι η επίδραση της διαμέτρου και των φυσικών ιδιοτήτων των δύο φάσεων μπορεί να αγνοηθεί. Εκτός της ικανοποιητικής ακρίβειας που παρουσιάζει, πλεονέκτημα του χάρτη αυτού είναι ότι καθιστά δυνατή την αναπαράσταση του καθεστώτος ροής με φυσαλίδες (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 Εμπειρικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Mandhane et al (1974).

Ο Gould (1974) μελέτησε τα καθεστώτα ροής σε έναν αγωγό με κλίση $+45^{o}$ καθώς επίσης και στις οριζόντιες και κατακόρυφες θέσεις. Σχεδίασε τα αποτελέσματά χρησιμοποιώντας τους αριθμούς ταχύτητας υγρού και αερίου όπως προτείνονται από τους Duns και Ros (1963). Καθόρισαν τρία καθεστώτα ροής που αντιστοιχούν στη φυσαλίδα (υγρό συνεχής), διαλείπουσα ροή (και οι δύο φάσεις συνεχείς) και δακτυλιοειδή ροή (φάση αερίου συνεχής).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Οι Taitel & Dukler (1976) διαπίστωσαν ότι για οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 2-5 cm η μετάπτωση δεν επηρεάζεται σημαντικά από μεταβολές της διαμέτρου και για το λόγο αυτό, οι χάρτες σαν των Mandhane et al. (1974), είναι αρκετά ακριβείς, καθώς τα περισσότερα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους προήλθαν από αγωγούς μικρής διαμέτρου. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι χάρτες αυτοί δεν αναπαριστούν σωστά την περιοχή όπου αναπτύσσονται τα καθεστώτα ροής όταν διαφοροποιηθεί το εξεταζόμενο σύστημα, π.χ. πετρέλαιο - φυσικό αέριο, ενώ η διάμετρος του αγωγού επηρεάζει σημαντικά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή. Έτσι πρότειναν τη χρήση αδιάστατων αριθμών, αναλόγως της περιοχής ροής, για την περιγραφή της μετάπτωσης. Στην προσέγγισή τους προσπάθησαν να λάβουν υπόψη την επίδραση της διαμέτρου, των φυσικών ιδιοτήτων και της κλίσης του αγωγού στη μετάπτωση και στις εξισώσεις που ανέπτυξαν όλα τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη είναι συνάρτηση μόνο του αδιάστατου όρου h/D.

Ο Mukherjee (1979) παρουσίασε χάρτες καθεστώτων ροής για ολόκληρη σειρά κλίσεων ενός αγωγού και πρότεινε εμπειρικούς συσχετισμούς για τα όρια μετάβασης. Μια παρόμοια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε από τους Spedding και Nguyen (1980). οποίοι καθόρισαν τους χάρτες καθεστώτων ροής για πειράματα αέρα-νερού σε έναν σωλήνα διαμέτρου 40 mm.

Οι Barnea et al (1979) κατασκεύασαν πειραματικά χάρτες περιοχών ροής μόνο για το σύστημα αέρα-νερού σε αγωγούς διαμέτρου 1,95 cm και 2,55 cm και μήκους 3 m. Η μελέτη έγινε για οριζόντιους αγωγούς καθώς επίσης και για αγωγούς με κλίση μέχρι και -10ο , +10ο.

Από τους ορισμούς που χρησιμοποιήθηκαν για τις διάφορες περιοχές ροής, απουσιάζει αυτός της ψευδοδιαλείπουσας. Αντίθετα στους χάρτες που παρουσιάζουν υπάρχει η δακτυλιοειδής με κύματα περιοχή. Η διάκριση των περιοχών μετάπτωσης έγινε με μοναδικό κριτήριο την οπτική παρατήρηση. Στο άρθρο τους συγκρίνουν τα πειραματικά τους αποτελέσματα με το θεωρητικό μοντέλο των Taitel & Dukler (1976).

Οι Weisman et al (1979) ύστερα από πειράματα κατασκευάζουν χάρτες περιοχών ροής σε αγωγούς διαμέτρου από 1,2 έως 5 cm. Οι φυσικές ιδιότητες των υγρών μεταβάλλονται με συστηματικό τρόπο, έτσι ώστε να εξεταστούν εκτενώς οι επιδράσεις του ιξώδους, της επιφανειακής τάσης και της πυκνότητας του υγρού και

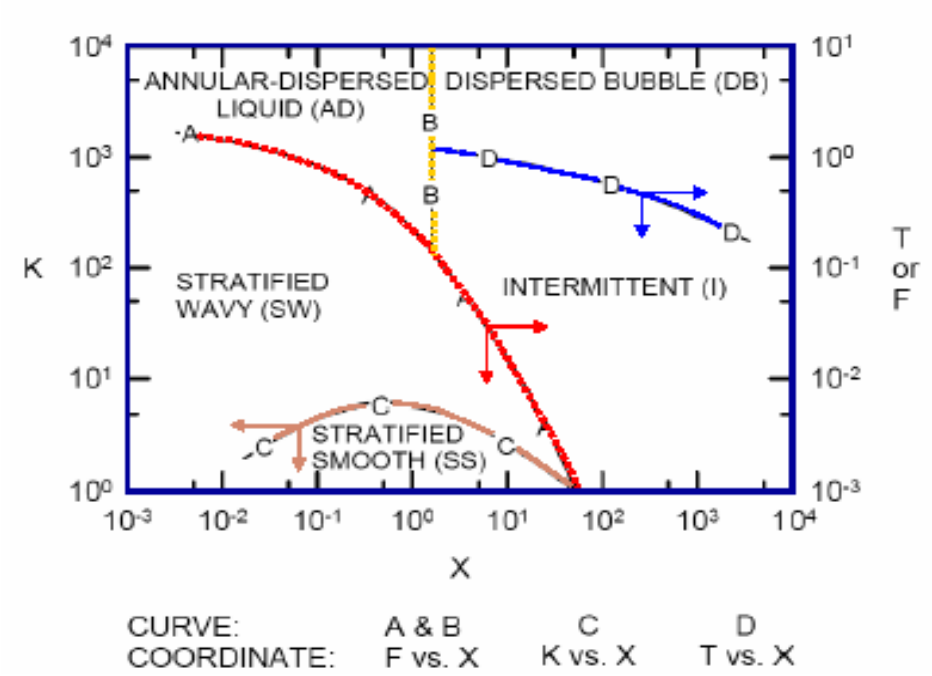
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

του αερίου στη διαμόρφωση των περιοχών ροής. Οι οπτικές τους παρατηρήσεις ενισχύθηκαν και από μία ανάλυση της πτώσης πίεσης. Έτσι τα δικά τους αποτελέσματα ήταν λιγότερο υποκειμενικά από τα αντίστοιχα άλλων ερευνητών. Στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν σοβαρές διαφοροποιήσεις των πειραματικών τους αποτελεσμάτων στις περιοχές μετάπτωσης από τα αντίστοιχα άλλων ερευνητών ή μοντέλων που είχαν προταθεί παλιότερα.

Οι Mishima & Ishii (1980) μελέτησαν τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή και προσπάθησαν να επεκτείνουν τη θεωρία των Kordyban & Ranov (1970). Θεωρώντας ότι τα κύματα είναι μικρού πλάτους, ότι το κύμα που αυξάνεται με το μεγαλύτερο ρυθμό, το «πιο επικίνδυνο κύμα», παρατηρείται τη στιγμή της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή και έχει μία μέγιστη τιμή πλάτους, συμπέραναν ότι η επιφανειακή τάση μπορεί να αγνοηθεί εάν θεωρηθεί συνολική συμπεριφορά του κύματος.

Οι Weisman και Kang (1981) παρουσίασαν δεδομένα για τα συστήματα αέρας-νερό και αέρας-γλυκερίνη σε ελαφρώς κεκλιμένους σωλήνες και για ένα σύστημα ενός συστατικού (φρέον) για μεγαλύτερες γωνίες. Εμπειρικές εξισώσεις προτάθηκαν για όλες τις μεταπτώσεις. Πειράματα πραγματοποιήθηκαν επίσης σε οριζόντιο και ελαφρώς κεκλιμένο σωλήνα στο σύστημα αέρας-νερό από τους Barnea et al (1980). Για τις μεταπτώσεις καθεστώτων ροής σε κεκλιμένους σωλήνες προτάθηκε ένα μοντέλο από τους Barnea et al. (1982) (προς τα κάτω κεκλιμένοι σωλήνες) και Barnea et al. (1985) (ανοδικοί κεκλιμένοι σωλήνες). Αυτά τα μοντέλα είναι επεκτάσεις των προηγουμένως αναπτυγμένων μοντέλων των Taitel και Dukler (1976) για τους οριζόντιους και ελαφρώς κεκλιμένους σωλήνες και των Taitel et al (1980) για την κατακόρυφη προς τα πάνω ροή. Επίσης έγινε σύγκριση πειραματικών δεδομένων στο σύστημα αέρα-νερού με τις προβλέψεις των μοντέλων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



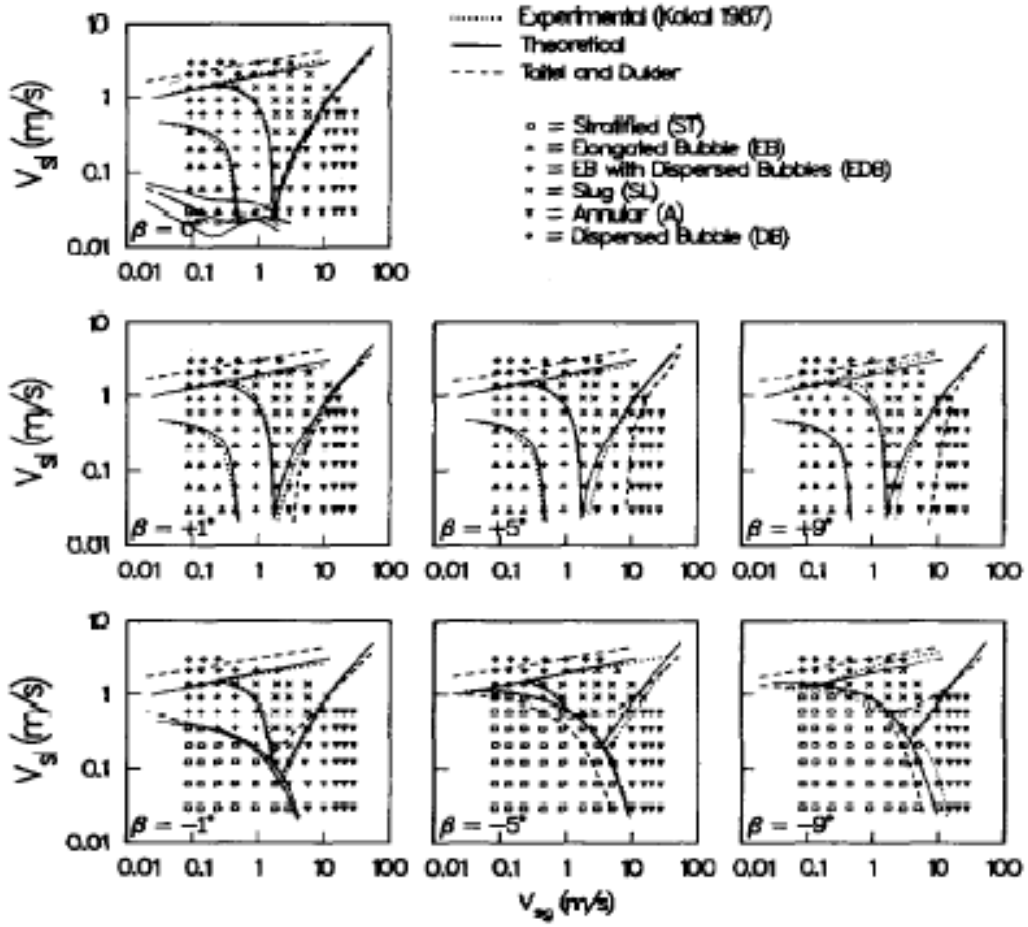
Σχήμα 2.11 Μηχανιστικός χάρτης περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό των Taitel & Dukler (1976),

όπου L-M parameter: $X = \left[\frac{\left|\left(dP/dx\right)_L\right|}{\left|\left(dP/dx\right)_G\right|} \right]^{1/2}$, $K = \left[\frac{\rho_G u_{SG}^2 u_{SL}}{(\rho_L - \rho_G) g v_L \cos\alpha} \right]^{1/2}$

$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)}} \frac{u_{SG}}{\sqrt{Dg\cos\alpha}}$, $T = \left[\frac{\left|\left(dP/dx\right)_L\right|}{(\rho_L - \rho_G) g \cos\alpha} \right]^{1/2}$

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται χάρτες καθεστώτων ροής για διάφορες κλίσεις του αγωγού όσον αφορά τον οριζόντιο αγωγό.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 2.12 Χάρτης σχεδίων ροής για διάφορες κλίσεις του σωλήνα σε διάμετρο 25,8 mm

Ο Kordyban (1985) παρατήρησε ότι η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή λαμβάνει χώρα εξαιτίας μιας τοπικής αστάθειας Kelvin - Helmholtz, στην κορυφή του κύματος. Έπειτα από πειράματα, διαπίστωσε ότι πριν από τη μετάπτωση εμφανίζονται πάντα μικρά κύματα στην κορυφή των μεγάλων. Η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή οφείλεται στην απότομη αύξηση του μεγέθους αυτών των μικρών κυμάτων. Πρότεινε ότι η εμφάνιση των κυμάτων αυτών αποτελεί την έναρξη της αστάθειας Kelvin - Helmholtz, αλλά ισχυρίζεται ότι η δημιουργία των κυμάτων στη διαστρωματωμένη ροή οφείλεται στον ακόλουθο μηχανισμό. Για ταχύτητες της αέριας φάσης μεγαλύτερες από της υγρής, δημιουργούνται κύματα στη διεπιφάνεια εξαιτίας της συνιστώσας της πίεσης που βρίσκεται σε φάση με την κλίση του κύματος. Τα κύματα αυτά αναπτύσσονται σχετικά αργά, αλλά σταδιακά κλείνουν μέρος του αγωγού, προκαλώντας μεγάλη μεταβολή στην πίεση. Με τον τρόπο αυτό τα κύματα προσεγγίζουν την αστάθεια Kelvin - Helmholtz. Ωστόσο, πριν λάβει χώρα αστάθεια ολόκληρου του κύματος, συμβαίνουν τοπικές αστάθειες στην κορυφή του κύματος εξαιτίας της μεγάλης κλίσης της πίεσης στο σημείο αυτό και της μικρής κλίσης του κύματος. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται μικρά κύματα στην κορυφή των μεγάλων και αναπτύσσονται μέχρι να αγγίξουν το πάνω μέρος του αγωγού.

Αργότερα, οι Lin & Hanratty (1986) λόγω της αδυναμίας της μη ιξώδους Kelvin - Helmholtz θεωρίας να προβλέψει σωστά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή σε χαμηλά ιξώδη της υγρής φάσης, καθώς αγνοεί τους

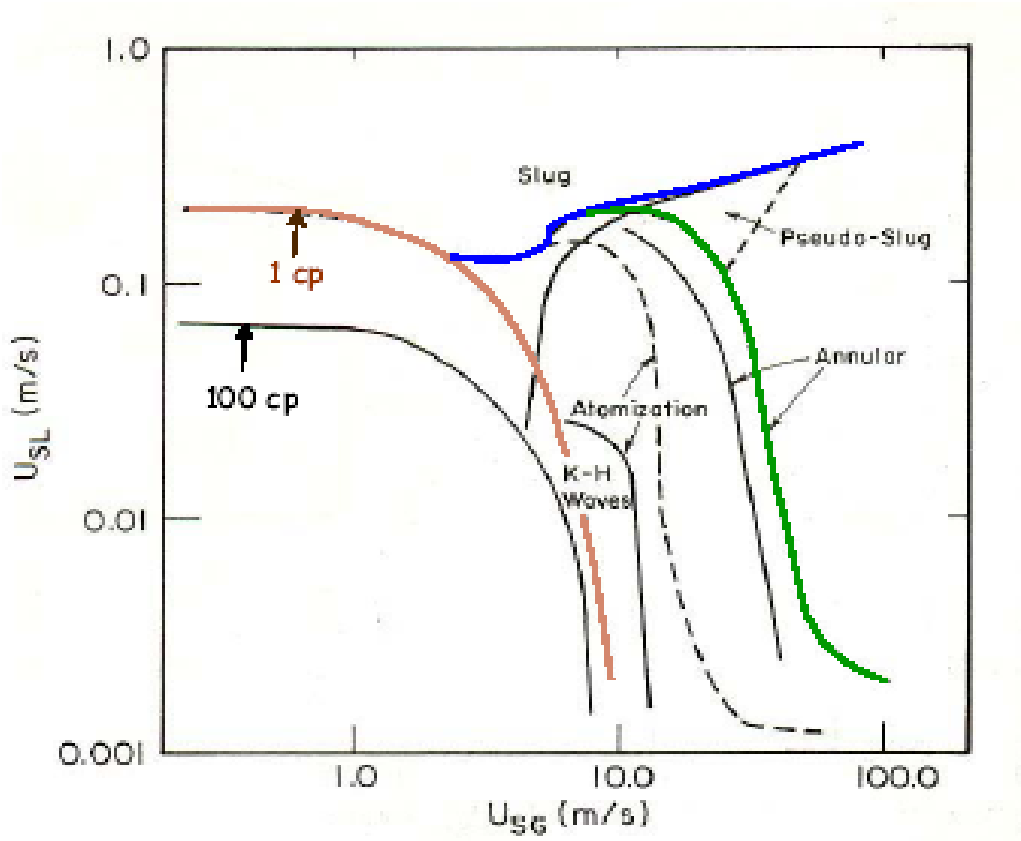
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

αδρανειακούς όρους που αποσταθεροποιούν τη ροή, προσπάθησαν να αναπτύξουν μια θεωρία, όπου να λαμβάνονται υπόψη οι ιξώδεις και οι αδρανειακοί όροι, με αποτέλεσμα η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή να επέρχεται σε χαμηλότερες ταχύτητες αέριας φάσης, από αυτές που προβλέπονταν από την μη ιξώδη Kelvin - Helmholtz θεωρία. Έτσι παρατήρησαν ότι για τιμές ιξώδους από 1 έως 100 cP, δεν παρουσιάζεται έντονη επίδραση στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, ενώ για τιμές μεγαλύτερες από 500 cP οι όροι των αδρανειακών δυνάμεων τείνουν να εξαφανιστούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα για μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή. Στόχος της ανάλυσης τους ήταν η πρόβλεψη των συνθηκών, όπου μια ημιτονοειδής διαταραχή μικρού πλάτους και μεγάλου μήκους κύματος στη διεπιφάνεια υγρού - αερίου, είναι ασταθής και πρότειναν κριτήρια μετάπτωσης για αγωγούς ορθογωνικής και κυκλικής διατομής.

Η θεωρία που ανέπτυξαν για το σύστημα νερό - αέρας οι Lin & Hanratty (1986) προβλέπει ότι οι δυνάμεις αδράνειας της υγρής φάσης δρουν αποσταθεροποιητικά, με αποτέλεσμα η εμφάνιση διαταραχών μεγάλου πλάτους στη διεπιφάνεια να επέρχεται σε παροχές αερίου μικρότερες από αυτές που προβλέπει η μη ιξώδης Kelvin - Helmholtz θεωρία (Andritsos et al., 1989). Ακόμη, προβλέπει ότι η αύξηση του ιξώδους δρα σταθεροποιητικά κατά τη μετάπτωση στα διάφορα καθεστώτα ροής. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για σταθερό λόγο h/D και το αυξανόμενο ιξώδες, η ταχύτητα της υγρής φάσης μειώνεται για δεδομένη φαινομενική ταχύτητα αερίου και οι δυνάμεις αδράνειας του υγρού δρουν λιγότερο αποσταθεροποιητικά. Ωστόσο, για πολύ μεγάλες τιμές του ιξώδους, η δράση αυτή σχεδόν εξαφανίζεται και τα αποτελέσματα της μη ιξώδους Kelvin - Helmholtz ανάλυσης είναι πιο αξιόπιστα. Τέλος, ήταν οι πρώτοι οι οποίοι απέδειξαν ότι η μη ιξώδης Kelvin - Helmholtz θεωρία δεν είναι ικανή να περιγράψει σωστά την ευστάθεια της διαστρωματωμένης ροής.

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. Μελέτησαν τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα σε αγωγό κυκλικής διατομής, ορίζοντας τρεις επιμέρους περιοχές της διαστρωματωμένης ροής: δισδιάστατα κύματα, κύματα μεγάλου πλάτους ή Kelvin - Helmholtz κύματα και τέλος την εκνέφωση σταγονιδίων υγρού, όπου το υγρό αναρριχάται στο σωλήνα. Στα τέλη της δεκαετίας του '80 οι Andritsos et al. (1989) εξέτασαν την επίδραση του ιξώδους στις μεταβολές από διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πέρα από τους ιξώδεις όρους, για αρκετά μεγάλο μήκος κύματος λ χρησιμοποίησαν την ανάλυση των Lin & Hanratty. Επίσης, παρατήρησαν ότι για υγρά μεγάλου ιξώδους το φαινόμενο ελέγχεται από τον μηχανισμό Kelvin - Helmholtz. Τέλος, παρατήρησαν ότι κύρια επίδραση του ιξώδους είναι η αύξηση της ταχύτητας του αερίου που απαιτείται για την έναρξη της δημιουργίας των δισδιάστατων κυμάτων και η μείωση του εύρους των συνθηκών ροής όπου αυτά εμφανίζονται.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 2.13 Χάρτης των Andritsos et al (1989) για τα καθεστώτα ροής σε σύστημα νερό + γλυκερίνη-αέρας σε αγωγό διαμέτρου 9,5 cm.

Οι Wu et al. (1987) έπειτα από πειράματα σε αγωγό διαμέτρου 20,3 cm, αξιολόγησαν τα μοντέλα που πρότειναν οι Taitel & Dukler (1976) και ο Wallis (1969). Διαπίστωσαν ότι για κυλινδρικό αγωγό διαμέτρου 2,45 cm σε ατμοσφαιρικές συνθήκες τα δυο παραπάνω μοντέλα σχεδόν ταυτίζονται, ενώ στην περίπτωση αγωγού διαμέτρου 20,3 cm και πίεση 75 bar, το μοντέλο του Wallis (1969) προβλέπει μεγαλύτερες παροχές της υγρής φάσης στις οποίες επέρχεται η μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν και από τα πειραματικά αποτελέσματα.

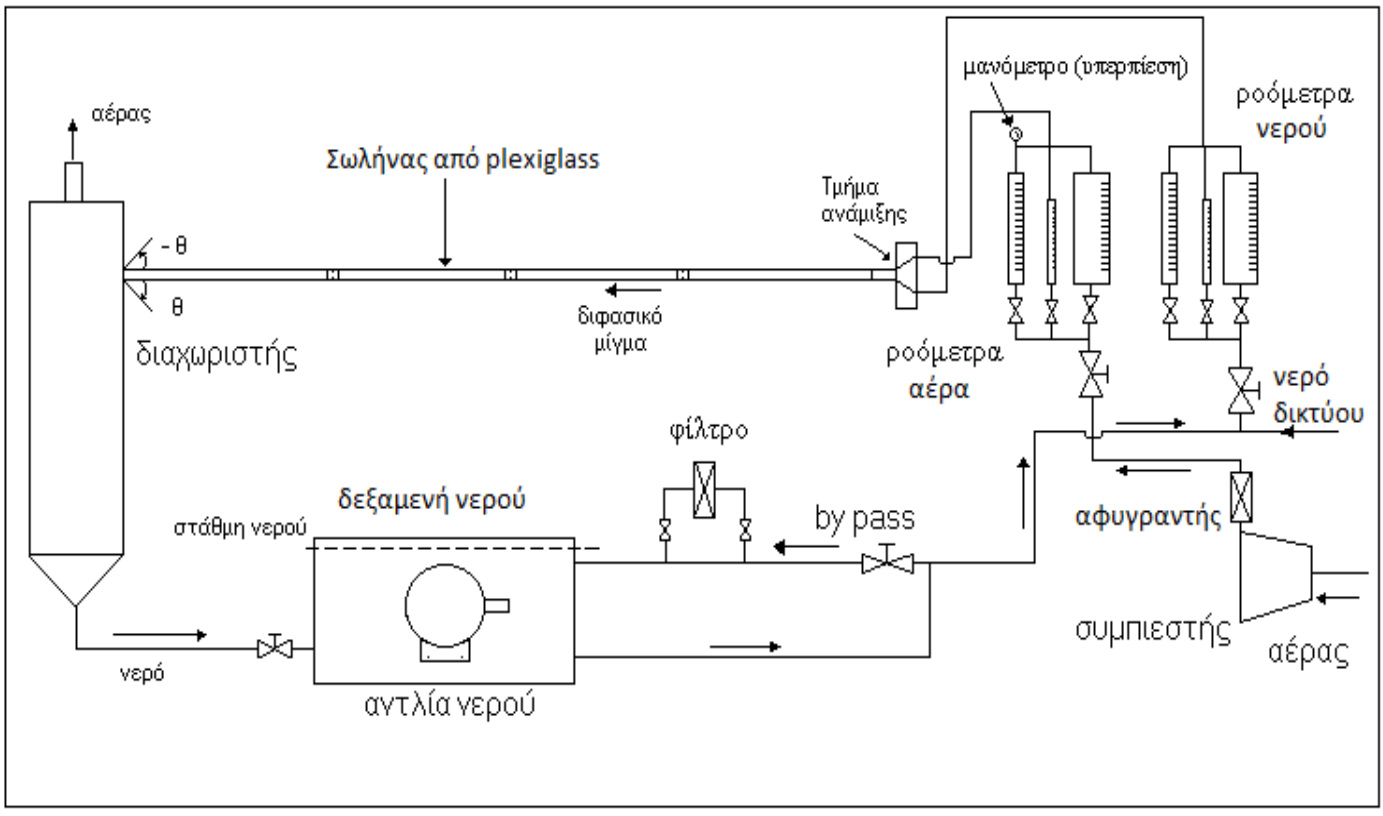
Τέλος, σύμφωνα με τους (Fan et al., 1993), οι συνθήκες που επικρατούν στη είσοδο και στην έξοδο καθώς και το μήκος του αγωγού, επιδρούν στην εμφάνιση της διαλείπουσας ροής. Όπως παρατηρήθηκε το μήκος του αγωγού παρουσιάζει πολύ πιο έντονη επίδραση στην εξέλιξη του καθεστώτος ροής συγκριτικά με τις συνθήκες στην είσοδο και έξοδο του αγωγού. Σε αγωγούς μεγαλύτερου μήκους, η απόσταση του σημείου όπου εμφανίζεται το «slug» και του σημείου όπου εξέρχεται από τον αγωγό είναι μεγαλύτερη από αυτήν σε αγωγούς μικρότερου μήκους, κατά συνέπεια, τη στιγμή της εξόδου του «slug» από τον αγωγό, το ύψος της υγρής στιβάδας είναι μεγαλύτερο στο σημείο όπου εμφανίζεται.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

3. Πειραματική διάταξη και διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων

3.1 Στοιχεία Πειραματικής Διάταξης

Η πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων στη διφασική ροή νερού-αέρα, προϋπήρχε στο Εργαστήριο Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Λάρισας και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 και στις φωτογραφίες 1 και 2. Η διάταξη αποτελείται από έναν οριζόντιο αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 10,1 cm κατασκευασμένο από Plexiglass, ο οποίος απαρτίζεται από 8 επιμέρους τμήματα μήκους 2,06 m και 2 τμήματα μήκους 1,6 m περίπου. Η επιλογή του Plexiglass έγινε προκειμένου να επιτρέπεται η οπτική παρατήρηση και η λήψη φωτογραφιών. Το συνολικό μήκος του αγωγού είναι 19,70 m και περιλαμβάνει το τμήμα εισόδου, το τμήμα ανάπτυξης της ροής, στο οποίο έγινε και η χρήση των φωτογραφικών μηχανών και το τμήμα εξόδου. Το πάχος του αγωγού (4,5 mm) είναι ικανό ώστε να διασφαλίζεται η μηχανική αντοχή του, ενώ τα άκρα των επιμέρους τμημάτων είναι συνδεδεμένα με φλάντζες και με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές στη ροή, αλλά να είναι εύκολη και η όποια προσθαφαίρεση τμημάτων του αγωγού θέλουμε. Ιδιαίτερη φροντίδα δόθηκε στις ενώσεις των τμημάτων του σωλήνα, για να μην υπάρχει ανωμαλία στη ροή. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ελαστικά δαχτυλίδια (o-rings), τοποθετημένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το διάκενο μεταξύ των τμημάτων του αγωγού. Ο αγωγός είναι τοποθετημένος σε 20 κατάλληλα υποστηρίγματα (2 για κάθε τμήμα αγωγού) σε μεταλλικό πλαίσιο ώστε να είναι δυνατή η ευθυγράμμιση του με το οριζόντιο επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο μας δίνεται η δυνατότητα να δώσουμε σχετικά μικρές κλίσεις στον αγωγό, τόσο προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω, σε σχέση με την οριζόντια θέση.



Σχήμα 3.1: Πειραματική διάταξη

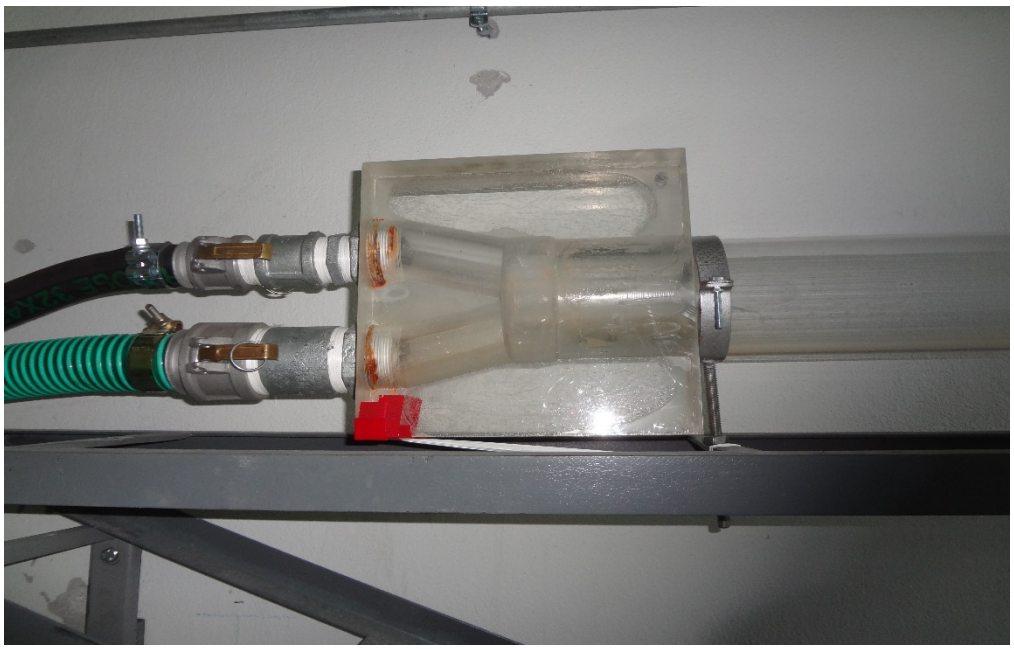
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 1: Πειραματική διάταξη

Φωτογραφία 2: Πειραματική διάταξη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Το τμήμα ανάμιξης (Φωτογραφία 3) των δύο φάσεων είναι τύπου «Y», ώστε να μειώνονται οι διαταραχές κατά την επαφή των δύο ρευστών και είναι κατασκευασμένο από Plexiglass. Η υγρή φάση εισάγεται υπό γωνία -15^{o} και η αέρια φάση υπό γωνία +15^{o}, ως προς τον οριζόντιο αγωγό. Η απόσταση μεταξύ του σημείου εισόδου και των σημείων όπου οι φωτογραφικές μηχανές ήταν τοποθετημένες είναι στα 6,5 m και στα 17,5 m, ενώ σε κάποια πειράματα ήταν και στα 12,5 m. Ταυτόχρονα, τα σημεία στα οποία έγιναν οι μετρήσεις για το πάχος της υγρής στιβάδας, με τη χρήση αλφαδιού και κανόνα, είναι στα 3, 9 και 17m.



Φωτογραφία 3: Τμήμα ανάμιξης

Στο τέλος του αγωγού η διφασική ροή εισάγεται σε ένα κυλινδρικό, πλαστικό δοχείο διαχωρισμού φάσεων, διαμέτρου 0,5 m και ύψους 1,1 m (Φωτογραφία 4). Η αέρια φάση εξέρχεται στο περιβάλλον από την κορυφή του διαχωριστή, ενώ η υγρή φάση συγκεντρώνεται στον πυθμένα του και στη συνέχεια, μέσω ενός σωλήνα από PVC, επιστρέφει στη δεξαμενή νερού, χωρητικότητας 500 lt και από εκεί ανακυκλώνεται με τη βοήθεια μίας ανοξείδωτης υποβρύχιας αντλίας, μοντέλου Pedrollo (Φωτογραφία 5).

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε στην διάταξη ήταν νερό του δικτύου ύδρευσης. Στην είσοδο του νερού από το δίκτυο είναι τοποθετημένο ένα μανόμετρο γλυκερίνης που μας δείχνει την πίεση του δικτύου. Η ρύθμιση της παροχής της υγρής φάσης γίνεται με τη βοήθεια μίας βάνας διαφράγματος και η μέτρηση της παροχής της υγρής φάσης επιτυγχάνεται με μία συστοιχία τριών ροομέτρων με πλωτήρα (Φωτογραφία 6), διαφορετικής παροχής το καθένα, τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα και των οποίων οι καμπύλες βαθμονόμησης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρατίθενται στο Παράρτημα. Η μέγιστη ογκομετρική παροχή που μπορεί να περάσει από το μικρό ροόμετρο είναι 1,2 m^3/hr νερού, από το μεσαίο είναι 2,4 m^3/hr νερού και από το μεγάλο είναι 9,5 m^3/hr νερού. Για την αποφυγή στραγγαλισμού της αντλίας βυθού, στην έξοδο της υπάρχει ένα by-pass που οδηγεί το επιπλέον νερό στη δεξαμενή νερού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 4: Διαχωριστής φάσεων

Φωτογραφία 5: Υποβρύχια αντλία

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 6: Ροόμετρα υγρής φάσης

Η τροφοδοσία του αέρα (Φωτογραφία 7) γίνεται από συμπιεστή μοντέλου ABAC,AIR COMPRESSORS-MODEL:FORMULA 56, ισχύος 55 kW και παροχής αέρα 510 m^3/hr, ο οποίος διατηρεί σταθερή την πίεση μεταξύ 9 και 10 bar . Στη συνέχεια υφίσταται μερική ξήρανση, μέσω ενός αφυγραντή μοντέλου MTA SPA-MODEL DE 080, αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης αέρα σταθερής πίεσης 10 bar και μέσω ενός εξωτερικού δικτύου ο αέρας φτάνει στην πειραματική διάταξη. Η παροχή του αέρα, που εισέρχεται από το εξωτερικό δίκτυο, περνάει πρώτα μέσα από ένα μανόμετρο γλυκερίνης που μας δείχνει την εξωτερική πίεση και στη συνέχεια ρυθμίζεται από μια βάνα βαρέως τύπου με χερούλι. Η μέτρηση της παροχής γίνεται από τρία ροόμετρα με πλωτήρα (Φωτογραφία 8), ένα μικρό, ένα μεσαίο και ένα μεγάλο. Η μέγιστη ογκομετρική παροχή αέρα που μπορεί να περάσει από το μικρό ροόμετρο είναι 60 m^3/hr αέρα, από το μεσαίο 150 m^3/hr αέρα και από το μεγάλο 510 m^3/hr αέρα.

Φωτογραφία 7: Συμπιεστής-αφυγραντής-δοχείο αποθήκευσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 8: Ροόμετρα αέριας φάσης

Επίσης, σε τακτά χρονικά διαστήματα ελεγχόταν η ευθυγράμμιση του αγωγού με νερό περίπου μέχρι τη μέση και την αυξομείωση του ύψους των στηριγμάτων των τμημάτων του αγωγού, ώστε η κατανομή του νερού να είναι ομοιόμορφη κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι προτού ξεκινήσουν τα πειράματα ήταν επιβεβλημένο να καθαριστεί τόσο εξωτερικά ολόκληρη η διάταξη όσο και εσωτερικά, όπου είχαν συσσωρευτεί υπολείμματα σκουριάς και πλαστικού. Προκειμένου να καθαριστεί η δεξαμενή νερού και τα τμήματα του αγωγού χρειάστηκε να γίνει αλλαγή του σιδερένιου σωλήνα επιστροφής του νερού με έναν πλαστικό. Έπειτα, έγινε χρήση υπεροξείδιου του υδρογόνου (<50%), του Peritrol, το οποίο δεν επηρεάζει ούτε τα πλαστικά μέρη του αγωγού ούτε την αντλία, με σκοπό ύστερα από αρκετές επαναλήψεις να καθαριστεί πλήρως το εσωτερικό μέρος των τμημάτων της διάταξης. Σημαντική ήταν η ευθυγράμμιση όλου του αγωγού που έγινε με τη χρήση αλφαδιού, ρυθμίζοντας ταυτόχρονα να είναι παντού ίδιο το ύψος από τις ντίζες των μεταλλικών στηριγμάτων των τμημάτων του αγωγού, ενώ συγχρόνως το πάχος της υγρής στιβάδας να είναι ομοιόμορφο. Τέλος, κατέστη αναγκαία η μετατροπή της στήριξης του διαχωριστή φάσεων, όπως και της απομόνωσής του από το σύστημα της επιστροφής. Αυτό συνέβη για δύο λόγους: 1) όταν είχαμε εμφάνιση διαλείπουσας ροής με slugs ή με plugs, τα κύματα χτυπούσαν με δύναμη στο οπίσθιο τοίχωμα του διαχωριστή με συνέπεια να κουνιέται ολόκληρο το δοχείο και ταυτόχρονα επηρεαζόταν, από τα κύματα που επέστρεφαν μετά την κρούση, το τελευταίο τμήμα του αγωγού το οποίο εισερχόταν για 10 cm περίπου μέσα στο διαχωριστή. 2) λόγω της απότομης και δυνατής μετακίνησης του διαχωριστή από τη θέση του παρατηρήθηκε βλάβη στη σύνδεση του με το σωλήνα επιστροφής. Για αυτό το λόγο το δοχείο στηρίχτηκε στον τοίχο, με σχοινιά και κομμάτια πολυστερίνης, ενώ ταυτόχρονα τοποθετήθηκε ένα κυλινδρικό δοχείο ύψους 20 cm, κάτω ακριβώς από το διαχωριστή, το οποίο συνδεόταν με το σωλήνα επιστροφής του νερού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Όσον αφορά τις φωτογραφικές μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, η μία ήταν μάρκας Sony, μοντέλου Cyber-Shot DSC-WX7, που τοποθετήθηκε σε τρίποδο στα 12,5 m και 17,5 m και η άλλη ήταν μάρκας Nikon, μοντέλου AF-S DX Zoom-Nikkor 18-55mm, που τοποθετήθηκε σε τρίποδο στα 6,5 m.

3.2 Διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων

Αφού καθαρίστηκε η διάταξη, ευθυγραμμίστηκε ο αγωγός και έγινε η βαθμονόμηση των ροομέτρων του νερού ήρθε η σειρά να πραγματοποιηθούν τα πειράματα. Για τη διαδικασία των πειραμάτων ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια με τη σειρά που αναφέρονται:

- Ανοίγουμε την τροφοδοσία νερού από το δίκτυο ύδρευσης ώστε να γεμίσει η δεξαμενή νερού μέχρι τη μέση περίπου και κατόπιν βάζουμε σε λειτουργία την υποβρύχια αντλία. Κλείνουμε εντελώς τη βάνα επιστροφής του νερού, ώστε όλο το νερό να περνάει κατευθείαν από τα ροόμετρα του νερού. Αυτό γίνεται επειδή θέλουμε να αυξήσουμε τις περιοχές ροής στο χάρτη καθεστώτων ροής που θέλουμε να δημιουργηθεί. Στην αρχή, ανοίγουμε πλήρως τη ροή του νερού ώστε να έχουμε πλήρωση του αγωγού και να αποφευχθούν φαινόμενα υγροποίησης στα τοιχώματά του. Αφού σιγουρευτούμε ότι έχει «καθαρίσει» ο αγωγός από σταγονίδια, χαμηλώνουμε τη ροή και την πάμε στο επιθυμητό σημείο του μικρού ροομέτρου νερού για να ξεκινήσουμε την πρώτη μέτρηση.
- Ταυτόχρονα με την τροφοδοσία του νερού ανοίγουμε και την τροφοδοσία του αέρα και το μικρό ροόμετρο αέρα και το ρυθμίζουμε στο σημείο για την πρώτη μέτρηση που θέλουμε.
- Έχουμε προκαθορισμένα τα ζεύγη φαινομενικών ταχυτήτων που καλύπτουν την περιοχή ροών που μας ενδιαφέρει. Ξεκινάμε κρατώντας σταθερή την τιμή που θέλουμε στην παροχή του αέρα και αυξάνουμε σταδιακά την παροχή του νερού που θέλουμε. Αφού σταθεροποιηθεί η ροή του διφασικού μίγματος κάνουμε λήψη φωτογραφιών και video μέσω των 2 φωτογραφικών μηχανών, παρατηρώντας κάθε φορά το καθεστώς της ροής που βρισκόμαστε, όπως και άλλες πληροφορίες που θα μας βοηθήσουν να εξάγουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα. Παράλληλα, σε κάθε μέτρηση που κάνουμε, μετράμε το πάχος της υγρής στιβάδας σε 3 σημεία του αγωγού.
- Όταν καλυφθούν όλες οι περιοχές που μας ενδιαφέρουν για σταθερή παροχή αέρα και αυξανόμενη παροχή νερού, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία αυξάνοντας κατά μία θέση την παροχή του αέρα και αυξάνοντας πάλι σταδιακά την παροχή του νερού. Ο προσδιορισμός των καθεστώτων ροής γίνεται οπτικά. Αφού έχουμε όλα τα ζεύγη φαινομενικών ταχυτήτων, μπορούμε να δημιουργήσουμε τους χάρτες καθεστώτων ροής.
- Οι παροχές του νερού που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα κυμαίνονται από 2 l/min (ή U_{LS}=0,004 m/s) μέχρι 158,33 l/min (ή U_{LS}=0,336 m/s). Οι παροχές του αέρα που χρησιμοποιήσαμε κυμαίνονται από 100 l/min (ή U_{GS}=0,21 m/s) μέχρι 4.474,5 l/min (ή U_{GS}=9,5 m/s).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

4. Πειραματικά αποτελέσματα

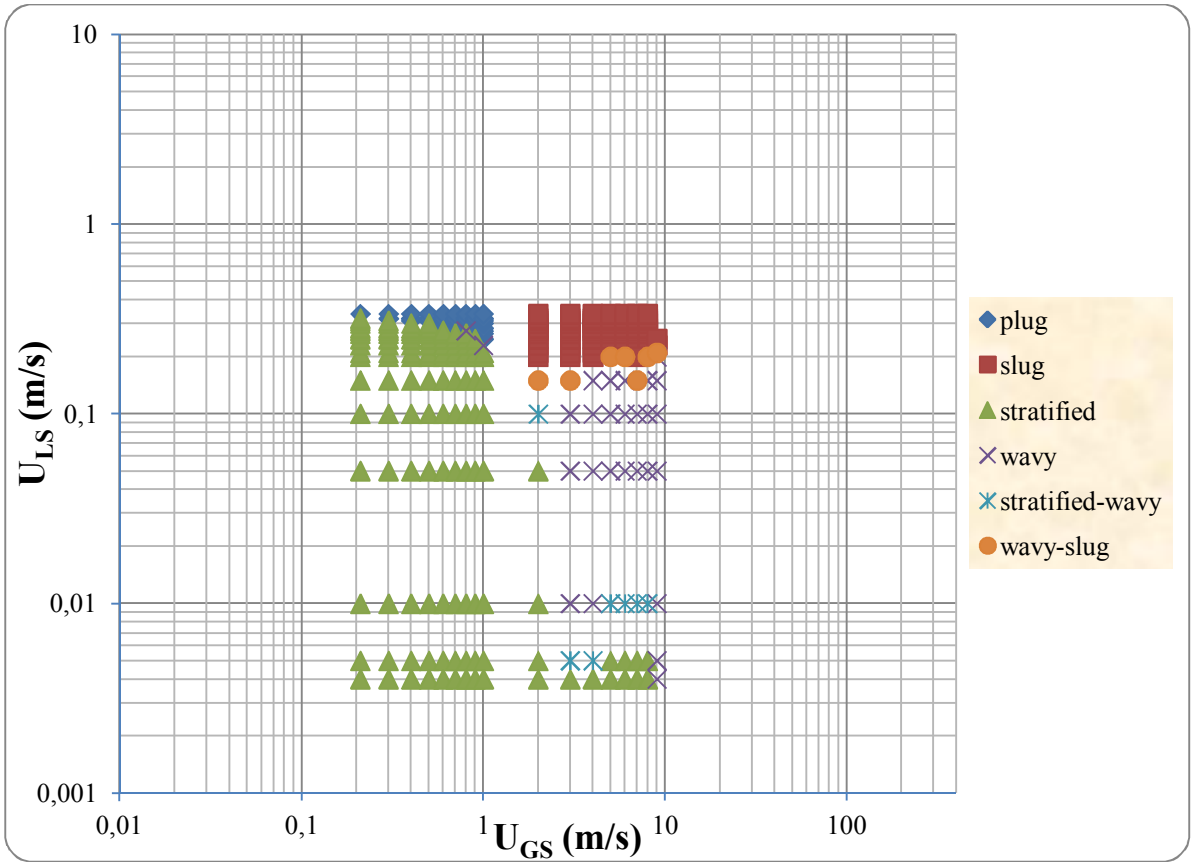
4.1 Χάρτης περιοχών ροής

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν να δημιουργήσουμε το χάρτη των περιοχών ροής, για σωλήνα με εσωτερική διάμετρο 10 cm. Για το λόγο αυτό ο στόχος ήταν να μελετήσουμε 272 (από τα 306) σημεία που το καθένα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο συνδυασμό παροχών του νερού και του αέρα. Η επιλογή του συγκεκριμένου αριθμού των σημείων προέκυψε από τις δυνατότητες τόσο των ροομέτρων όσο και του συμπιεστή. Στα ροόμετρα του νερού η παροχή που μπορούσαμε να δώσουμε κυμαίνεται μεταξύ 2 l/min (ή U_{LS}=0,004 m/s) και 158,33 l/min (ή U_{LS} =0,336 m/s), ενώ στα ροόμετρα του αέρα η παροχή κυμαίνεται μεταξύ 100 l/min (ή U_{GS} =0,21 m/s) και 4.239 l/min (ή U_{GS} =9 m/s). Όσον αφορά τον αεροσυμπιεστή, στις τελευταίες πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν, δεν μπορούσε να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις για ογκομετρική παροχή αέρα 4.239 l/min (ή U_{GS} =9 m/s), ειδικά όσο ανεβάζαμε την παροχή του νερού, οπότε ήταν αδύνατη και η λήψη πειραματικών δεδομένων. Αποτέλεσμα αυτών των περιορισμών ήταν να μειώσουμε το εύρος των τιμών στο χάρτη καθεστώτων ροής που θέλαμε να δημιουργήσουμε. Τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών παρουσιάζονται με τη μορφή χάρτη καθεστώτων οριζόντιας ροής για διφασικό μίγμα νερού αέρα. Ο χάρτης καθεστώτων ροής είναι τύπου Mandhane, έχει σαν άξονες τις φαινομενικές ταχύτητες της αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα, και οι άξονες είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Η αναγνώριση των καθεστώτων ροής έγινε οπτικά. Οι εξισώσεις που συνδέουν τις παροχές του νερού και του αέρα που καταγράψαμε με τις ταχύτητες του νερού και του αέρα που χρησιμοποιήσαμε στο χάρτη των περιοχών ροής είναι οι εξής:

$$U_{GS} = \frac{Q_g}{A} \qquad U_{LS} = \frac{Q_l}{A} \quad (4.1)$$

όπου Q_g και Q_l είναι οι ογκομετρικές παροχές του αέρα και του νερού αντίστοιχα που τις γνωρίζουμε από τις ενδείξεις των ροόμετρων, ενώ Α είναι η διατομή του αγωγού. Στον επόμενο χάρτη φαίνονται όλα τα σημεία τα οποία μελετήσαμε και τις περιοχές ροής που παρατηρήσαμε σε κάθε παροχή. Ο χάρτης καθεστώτων ροής που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία για οριζόντια διφασική ροή αέρα-νερού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 4.1: Χάρτης καθεστώτων ροής για εσωτερική διάμετρο 0,1 m

Οι φαινομενικές ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στο Σχήμα 4.2:

Ugs(m/s)	Uls(m/s)
0,21	0,004
0,3	0,005
0,4	0,01
0,5	0,05
0,6	0,1
0,7	0,15
0,8	0,2
0,9	0,21
1	0,23
2	0,248
3	0,2654
4	0,274
5	0,283
6	0,3
7	0,31
8	0,318
9	0,336

Σχήμα 4.2: Φαινομενικές ταχύτητες των ρευστών

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Εκτός από την δημιουργία των χαρτών περιοχών ροής, έγινε και μια προσπάθεια να καταγραφεί ο τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται οι ροές αυτές, ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται καθώς επίσης και ο τρόπος μετάβασης από την μια περιοχή ροής στην άλλη. Οι παρατηρήσεις που έγιναν παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

- Για **U_{GS} = 0,21 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Στη συγκεκριμένη περιοχή μετρήσεων η ταχύτητα του αέρα είναι πολύ χαμηλή και έγιναν δύο παρατηρήσεις καθώς αυξάναμε την ταχύτητα του νερού. Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι αυξανόταν αρκετά το πάχος της υγρής στιβάδας, καταλαμβάνοντας ένα μεγάλο κομμάτι του αγωγού. Η δεύτερη παρατήρηση είναι ότι η ροή ήταν λεία διαστρωματωμένη καθώς αυξάναμε την ταχύτητα του νερού με εξαίρεση την τελευταία μέτρηση, όπου είχαμε την εμφάνιση μεγάλων plugs, από την αρχή της διάταξης, τα οποία είχανε μικρή ταχύτητα.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
0.21	0.004	Stratified
0.21	0.005	Stratified
0.21	0.01	Stratified
0.21	0.05	Stratified
0.21	0.1	Stratified
0.21	0.15	Stratified
0.21	0.2	Stratified
0.21	0.21	Stratified
0.21	0.23	Stratified
0.21	0.248	Stratified
0.21	0.2654	Stratified
0.21	0.274	Stratified
0.21	0.283	Stratified
0.21	0.3	Stratified
0.21	0.31	Stratified
0.21	0.318	Stratified
0.21	0.336	Plug

Σχήμα 4.3: Μετρήσεις για U_{GS} = 0,21 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 9: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 0,21 m/s και U_{LS} = 0,3 m/s

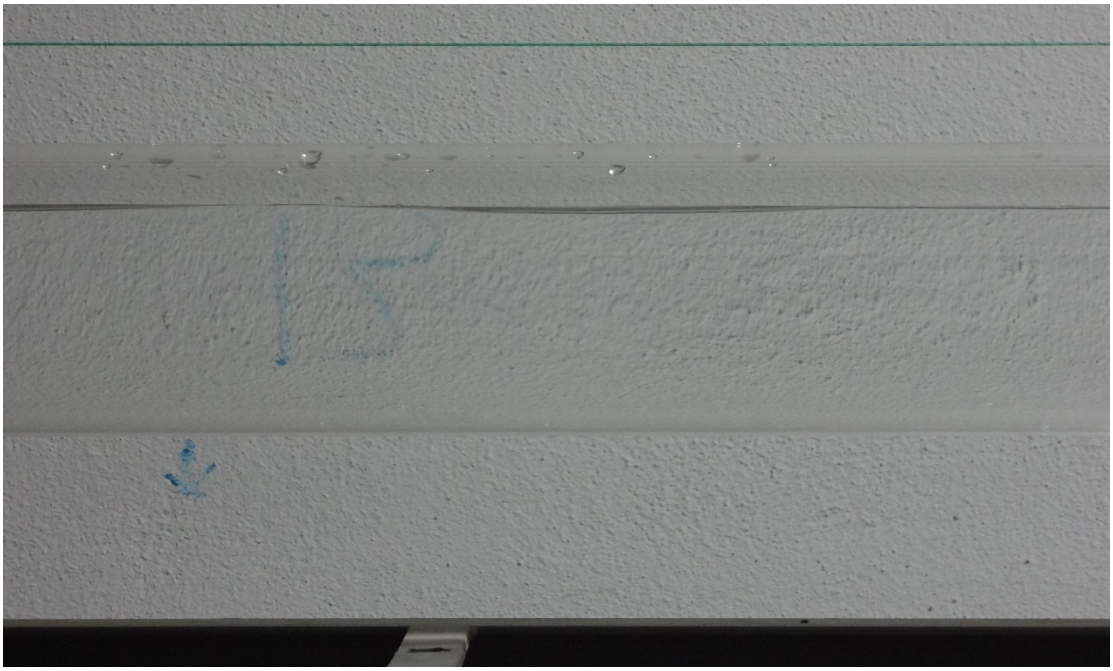
- Για **U_{GS} = 0,3 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα αποτελέσματα έχουμε και για U_{GS} = 0,3 m/s μόνο που εδώ παρατηρούνται plugs στις δύο τελευταίες μετρήσεις και είναι λίγο μικρότερα σε μήκος. Στις δύο μετρήσεις για U_{LS} = 0,3 m/s, U_{LS} = 0,31 m/s παρατηρήθηκαν μικροί κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, δεν ήταν όμως αρκετοί για να χαρακτηριστεί διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα. Τα plugs για U_{LS} = 0,318 m/s ξεκινούσαν από τα 2-3 m ενώ για U_{LS} = 0,336 m/s από τα 15 m.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
0.3	0.004	Stratified
0.3	0.005	Stratified
0.3	0.01	Stratified
0.3	0.05	Stratified
0.3	0.1	Stratified
0.3	0.15	Stratified
0.3	0.2	Stratified
0.3	0.21	Stratified
0.3	0.23	Stratified
0.3	0.248	Stratified
0.3	0.2654	Stratified
0.3	0.274	Stratified
0.3	0.283	Stratified
0.3	0.3	Stratified
0.3	0.31	Stratified
0.3	0.318	Plug
0.3	0.336	Plug

Σχήμα 4.4: Μετρήσεις για U_{GS} = 0,3 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Φωτογραφία 10: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 0,3 m/s και U_{LS} = 0,31 m/s

- Για **U_{GS} = 0,4 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή είναι διαστρωματωμένη εκτός από τις τρεις τελευταίες μετρήσεις, όπου παρουσιάζονται plugs τα οποία για U_{LS} = 0,31 m/s ξεκινούσαν από τα 3 m περίπου και για U_{LS} = 0,318 m/s και U_{LS} = 0,336 m/s ξεκινούσαν από τα 13-15 m. Για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι U_{LS} = 0,3 m/s παρατηρήθηκαν μικροί κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, αλλά η ροή δε χαρακτηρίζεται διαστρωματωμένη με δισδιάστατα κύματα.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
0.4	0.004	Stratified
0.4	0.005	Stratified
0.4	0.01	Stratified
0.4	0.05	Stratified
0.4	0.1	Stratified
0.4	0.15	Stratified
0.4	0.2	Stratified
0.4	0.21	Stratified
0.4	0.23	Stratified
0.4	0.248	Stratified
0.4	0.2654	Stratified
0.4	0.274	Stratified
0.4	0.283	Stratified
0.4	0.3	Stratified
0.4	0.31	Plug
0.4	0.318	Plug
0.4	0.336	Plug

Σχήμα 4.5: Μετρήσεις για U_{GS} = 0,4 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 11: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 0,4 m/s και U_{LS} = 0,283 m/s

- Για **U_{GS} = 0,5 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή είναι διαστρωματωμένη εκτός από τις τρεις τελευταίες μετρήσεις, όπου παρουσιάζονται plugs τα οποία για U_{LS} = 0,31 m/s ξεκινούσαν από τα 3 m περίπου και για U_{LS} = 0,318 m/s και U_{LS} = 0,336 m/s ξεκινούσαν από τα 13-15 m. Για U_{LS} = 0,2654 m/s - U_{LS} = 0,3 m/s παρατηρήθηκαν μικροί κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, αλλά η ροή δε χαρακτηρίζεται διαστρωματωμένη με δισδιάστατα κύματα.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
0.5	0.004	Stratified
0.5	0.005	Stratified
0.5	0.01	Stratified
0.5	0.05	Stratified
0.5	0.1	Stratified
0.5	0.15	Stratified
0.5	0.2	Stratified
0.5	0.21	Stratified
0.5	0.23	Stratified
0.5	0.248	Stratified
0.5	0.2654	Stratified
0.5	0.274	Stratified
0.5	0.283	Stratified
0.5	0.3	Stratified
0.5	0.31	Plug
0.5	0.318	Plug
0.5	0.336	Plug

Σχήμα 4.6: Μετρήσεις για U_{GS} = 0,5 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 12: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 0,5 m/s και U_{LS} = 0,283 m/s

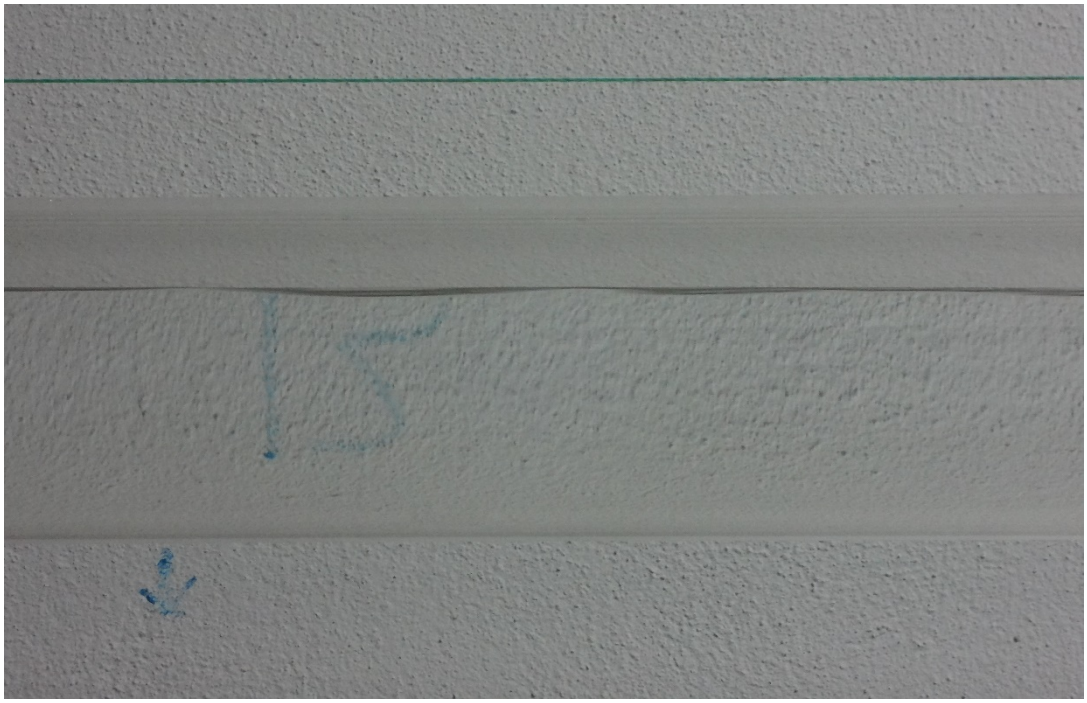
- Για **U_{GS} = 0,6 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή είναι διαστρωματωμένη εκτός από τις πέντε τελευταίες μετρήσεις, όπου παρουσιάζονται plugs τα οποία ξεκινούσαν από τα 13-15 m σε όλες τις μετρήσεις. Για U_{LS} = 0,283 m/s παρατηρήθηκε μία περιοδικότητα στα plugs κάθε 1,5 min, για U_{LS} = 0,3 m/s τα plugs εμφανίζονται κάθε 1 min περίπου, ενώ για U_{LS} = 0,31 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s εμφανίζονται κάθε 30 sec. Είναι ενδιαφέρουσα η παρατήρηση ότι λίγο πριν από κάθε plug το πάχος της υγρής στιβάδας αυξάνεται λίγο, ενώ παράλληλα οι κυματισμοί πάνω στην επιφάνεια του νερού είναι λίγο πιο έντονοι. Για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι και U_{LS} = 0,274 m/s παρατηρήθηκαν μικροί κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, αλλά η ροή δε χαρακτηρίζεται διαστρωματωμένη με δισδιάστατα κύματα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
0.6	0.004	Stratified
0.6	0.005	Stratified
0.6	0.01	Stratified
0.6	0.05	Stratified
0.6	0.1	Stratified
0.6	0.15	Stratified
0.6	0.2	Stratified
0.6	0.21	Stratified
0.6	0.23	Stratified
0.6	0.248	Stratified
0.6	0.2654	Stratified
0.6	0.274	Stratified
0.6	0.283	Plug
0.6	0.3	Plug
0.6	0.31	Plug
0.6	0.318	Plug
0.6	0.336	Plug

Σχήμα 4.7: Μετρήσεις για U_{GS} = 0,6 m/s



Φωτογραφία 13: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 0,6 m/s και U_{LS} = 0,2654 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

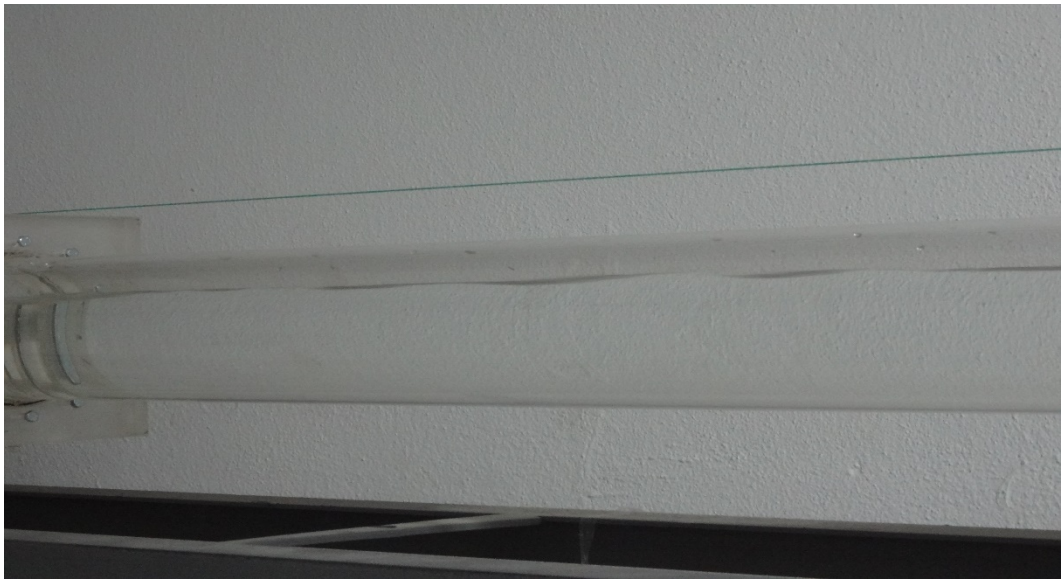
- Για **U_{GS} = 0,7 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή είναι διαστρωματωμένη εκτός από τις έξι τελευταίες μετρήσεις, όπου παρουσιάζονται plugs τα οποία ξεκινούσαν από τα 13-15 m σε όλες τις μετρήσεις. Για U_{LS} = 0,274 m/s παρατηρήθηκε μία περιοδικότητα στα plugs κάθε 50 sec περίπου, για U_{LS} = 0,283 m/s κάθε 40 sec περίπου, ενώ για U_{LS} = 0,3 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s τα plugs εμφανίζονται κάθε 30 sec περίπου. Λίγο πριν από κάθε plug το πάχος της υγρής στοιβάδας αυξάνεται λίγο, ενώ παράλληλα οι κυματισμοί πάνω στην επιφάνεια του νερού είναι λίγο πιο έντονοι. Για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι και U_{LS} = 0,2654 m/s παρατηρήθηκαν μικροί κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, αλλά η ροή δε χαρακτηρίζεται διαστρωματωμένη με δισδιάστατα κύματα.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
0.7	0.004	Stratified
0.7	0.005	Stratified
0.7	0.01	Stratified
0.7	0.05	Stratified
0.7	0.1	Stratified
0.7	0.15	Stratified
0.7	0.2	Stratified
0.7	0.21	Stratified
0.7	0.23	Stratified
0.7	0.248	Stratified
0.7	0.2654	Stratified
0.7	0.274	Plug
0.7	0.283	Plug
0.7	0.3	Plug
0.7	0.31	Plug
0.7	0.318	Plug
0.7	0.336	Plug

Σχήμα 4.8: Μετρήσεις για U_{GS} = 0,7 m/s

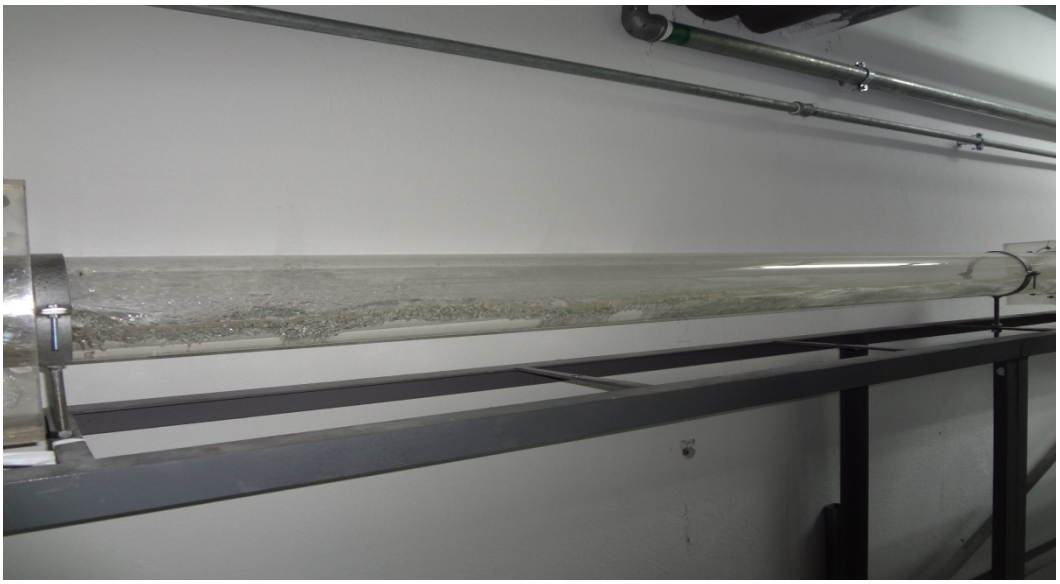
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Φωτογραφία 14: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 0,7 m/s και U_{LS} = 0,283 m/s

- Για **U_{GS} = 0,8 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή είναι διαστρωματωμένη εκτός από τις πέντε τελευταίες μετρήσεις, όπου παρουσιάζονται plugs τα οποία ξεκινούσαν από τα 13-15 m σε όλες τις μετρήσεις. Για U_{LS} = 0,283 m/s παρατηρήθηκε μία περιοδικότητα στα plugs κάθε 1 min, για U_{LS} = 0,3 m/s τα plugs εμφανίζονται κάθε 40sec περίπου, ενώ για U_{LS} = 0,31 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s εμφανίζονται κάθε 30 sec περίπου. Κάτι ακόμα που παρατηρήθηκε είναι η περιοδική εμφάνιση δύο plugs με περίπου 1 m διαφορά μεταξύ τους για U_{LS} = 0,336 m/s. Λίγο πριν από κάθε plug το πάχος της υγρής στιβάδας αυξάνεται λίγο, ενώ παράλληλα οι κυματισμοί πάνω στην επιφάνεια του νερού είναι λίγο πιο έντονοι. Για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι και U_{LS} = 0,2654 m/s παρατηρήθηκαν μικροί κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, αλλά η ροή δε χαρακτηρίζεται διαστρωματωμένη με κύματα, σε αντίθεση με τη ροή για U_{LS} = 0,274 m/s. Ακόμη, παρατίθεται μία φωτογραφία (Φωτογραφία 15) από το φαινόμενο του υδραυλικού άλματος, το οποίο λαμβάνει χώρα στην αρχή του τμήματος εισόδου και θα συζητηθεί εκτενέστερα αργότερα.

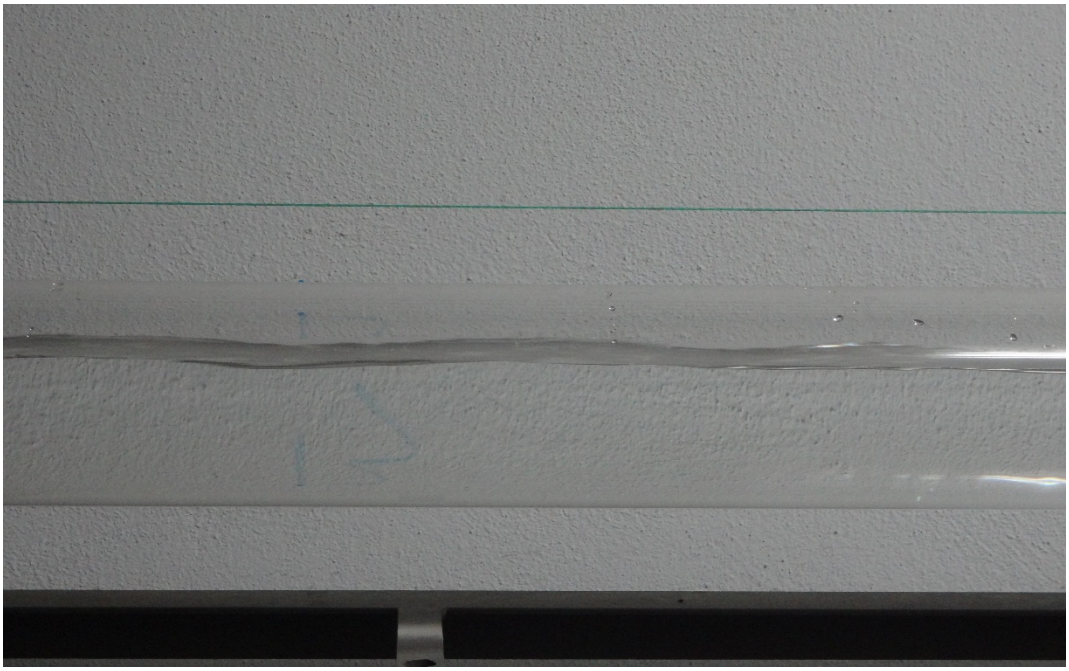


Φωτογραφία 15: Ροή στην αρχή του τμήματος εισόδου

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
0.8	0.004	Stratified
0.8	0.005	Stratified
0.8	0.01	Stratified
0.8	0.05	Stratified
0.8	0.1	Stratified
0.8	0.15	Stratified
0.8	0.2	Stratified
0.8	0.21	Stratified
0.8	0.23	Stratified
0.8	0.248	Stratified
0.8	0.2654	Stratified
0.8	0.274	WAVY
0.8	0.283	Plug
0.8	0.3	Plug
0.8	0.31	Plug
0.8	0.318	Plug
0.8	0.336	Plug

Σχήμα 4.9: Μετρήσεις για U_{GS} = 0,8 m/s



Φωτογραφία 16: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 0,8 m/s και U_{LS} = 0,274 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

- Για **U_{GS} = 0,9 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή είναι διαστρωματωμένη εκτός από τις επτά τελευταίες μετρήσεις, όπου παρουσιάζονται plugs τα οποία ξεκινούσαν από τα 15-17 m σε όλες τις μετρήσεις. Για U_{LS} = 0,2654 m/s παρατηρήθηκε μία περιοδικότητα στα plugs κάθε 1,5 min περίπου, για U_{LS} = 0,274 m/s κάθε 1 min περίπου, ενώ για U_{LS} = 0,283 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s τα plugs εμφανίζονται κάθε 30 sec περίπου. Ακόμα παρατηρήθηκε η εμφάνιση δύο plugs με κάποια περιοδικότητα με περίπου 1 m διαφορά μεταξύ τους για U_{LS} = 0,3 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s. Ένα ακόμη στοιχείο που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι από αυτές τις μετρήσεις και έπειτα τα plugs δεν είναι τόσο συμπαγή όσο στις προηγούμενες μετρήσεις, δηλαδή πλέον βλέπουμε ότι στη μάζα του νερού είναι πολύ πιθανό να παρατηρηθούν και φυσαλίδες αέρα που συμπαρασύρονται από τα plugs. Λίγο πριν από κάθε plug το πάχος της υγρής στιβάδας αυξάνεται λίγο, ενώ παράλληλα οι κυματισμοί πάνω στην επιφάνεια του νερού είναι λίγο πιο έντονοι. Για U_{LS} = 0,2 m/s μέχρι και U_{LS} = 0,248 m/s παρατηρήθηκαν μικροί κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, αλλά η ροή δε χαρακτηρίζεται διαστρωματωμένη με δισδιάστατα κύματα.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
0.9	0.004	Stratified
0.9	0.005	Stratified
0.9	0.01	Stratified
0.9	0.05	Stratified
0.9	0.1	Stratified
0.9	0.15	Stratified
0.9	0.2	Stratified
0.9	0.21	Stratified
0.9	0.23	Stratified
0.9	0.248	Stratified
0.9	0.2654	Plug
0.9	0.274	Plug
0.9	0.283	Plug
0.9	0.3	Plug
0.9	0.31	Plug
0.9	0.318	Plug
0.9	0.336	Plug

Σχήμα 4.10: Μετρήσεις για U_{GS} = 0,9 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 17: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 0,9 m/s και U_{LS} = 0,248 m/s

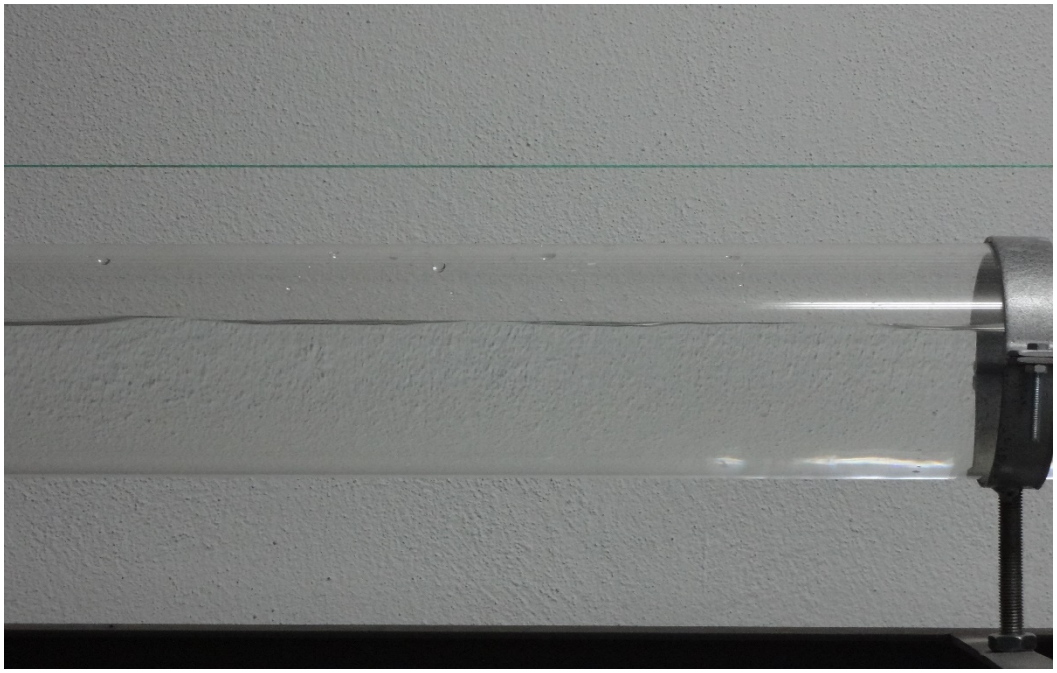
- Για **U_{GS} = 1 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m**/s μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή είναι διαστρωματωμένη εκτός από τις οκτώ τελευταίες μετρήσεις, όπου παρουσιάζονται plugs τα οποία ξεκινούσαν μεταξύ 14 και 17 m σε όλες τις μετρήσεις. Για U_{LS} = 0,248 m/s παρατηρήθηκε μία περιοδικότητα στα plugs κάθε 1,5 min περίπου, για U_{LS} = 0,2654 m/s και U_{LS} = 0,274 m/s κάθε 1 min περίπου, ενώ για U_{LS} = 0,283 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s τα plugs εμφανίζονται κάθε 30 sec περίπου. Ακόμα παρατηρήθηκε η εμφάνιση δύο συνεχόμενων plugs με κάποια περιοδικότητα για U_{LS} = 0,31 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s. Επιπλέον, ισχύει για τα plugs ότι και στην προηγούμενη μέτρηση όσον αφορά τις φυσαλίδες αέρα, χωρίς όμως να έχουμε ακόμα την εμφάνιση slugs. Λίγο πριν από κάθε plug το πάχος της υγρής στιβάδας αυξάνεται λίγο, ενώ παράλληλα οι κυματισμοί πάνω στην επιφάνεια του νερού είναι λίγο πιο έντονοι. Για U_{LS} = 0,1 m/s μέχρι και U_{LS} = 0,21 m/s παρατηρήθηκαν μικροί κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, αλλά η ροή δε χαρακτηρίζεται διαστρωματωμένη με κύματα, κάτι που ενδεχομένως να συμβαίνει για U_{LS} = 0,23m/s.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
1	0.004	Stratified
1	0.005	Stratified
1	0.01	Stratified
1	0.05	Stratified
1	0.1	Stratified
1	0.15	Stratified
1	0.2	Stratified
1	0.21	Stratified
1	0.23	WAVY
1	0.248	Plug
1	0.2654	Plug
1	0.274	Plug
1	0.283	Plug
1	0.3	Plug
1	0.31	Plug
1	0.318	Plug
1	0.336	Plug

Σχήμα 4.11: Μετρήσεις για U_{GS} = 1 m/s



Φωτογραφία 18: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 1 m/s και U_{LS} = 0,23 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

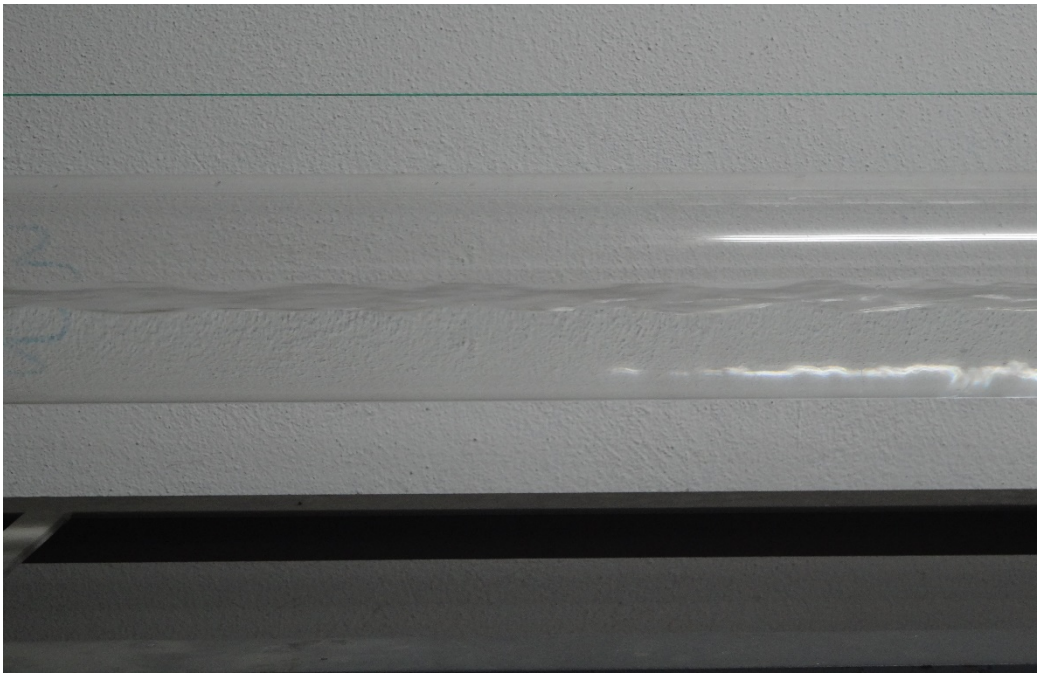
- Για **U_{GS} = 2 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m/s** μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή είναι διαστρωματωμένη στις τέσσερις πρώτες μετρήσεις, ενώ για U_{LS} = 0,1 m/s (Φωτογραφία 19) η ροή παρουσιάζει κύματα σταθερού μικρού μήκους και πλάτους με αποτέλεσμα να μπορεί να χαρακτηριστεί ως διαστρωματωμένη με δισδιάστατα κύματα (wavy). Για U_{LS} = 0,15 m/s υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν slugs στο τέλος της διάταξης, στα 19 m περίπου και βλέπουμε τα κύματα να αποκτούνε μεγαλύτερη ορμή. Για U_{LS} = 0,2 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 11 μέχρι 19 m (κυρίως στα 15 m). Για U_{LS} = 0,21 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 7 μέχρι 16 m (κυρίως στα 15 m). Για U_{LS} = 0,23 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 3 μέχρι 10 m. Για U_{LS} = 0,248 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 14 μέχρι 18 m. Για U_{LS} = 0,2654 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 10 μέχρι 16 m. . Για U_{LS} = 0,274 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 8 μέχρι 15 m. Για U_{LS} = 0,283 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 7 μέχρι 17 m. Για U_{LS} = 0,3 m/s, U_{LS} = 0,31 m/s, U_{LS} = 0,318 m/s, U_{LS} = 0,336 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 7 μέχρι 15 m. Στις μετρήσεις με ταχύτητες από U_{LS} = 0,2 m/s μέχρι U_{LS} = 0,2654 m/s είναι συχνή η εμφάνιση δύο ή τριών διαδοχικών slugs, ενώ για U_{LS} = 0,274 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s είναι συχνή η εμφάνιση τριών ή τεσσάρων διαδοχικών slugs. Η περιοδικότητα των slugs είναι 30 sec περίπου για U_{LS} = 0,2 m/s μέχρι U_{LS} = 0,2654 m/s, 20 sec περίπου για U_{LS} = 0,274 m/s μέχρι U_{LS} = 0,283 m/s και 15 sec για U_{LS} = 0,3 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
2	0.004	Stratified
2	0.005	Stratified
2	0.01	Stratified
2	0.05	Stratified
2	0.1	STRATIFIED->WAVY
2	0.15	WAVY->SLUG
2	0.2	SLUG
2	0.21	SLUG
2	0.23	SLUG
2	0.248	SLUG
2	0.2654	SLUG
2	0.274	SLUG
2	0.283	SLUG
2	0.3	SLUG
2	0.31	SLUG
2	0.318	SLUG
2	0.336	SLUG

Σχήμα 4.12: Μετρήσεις για U_{GS} = 2 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Φωτογραφία 19: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 2 m/s και U_{LS} = 0,1 m/s

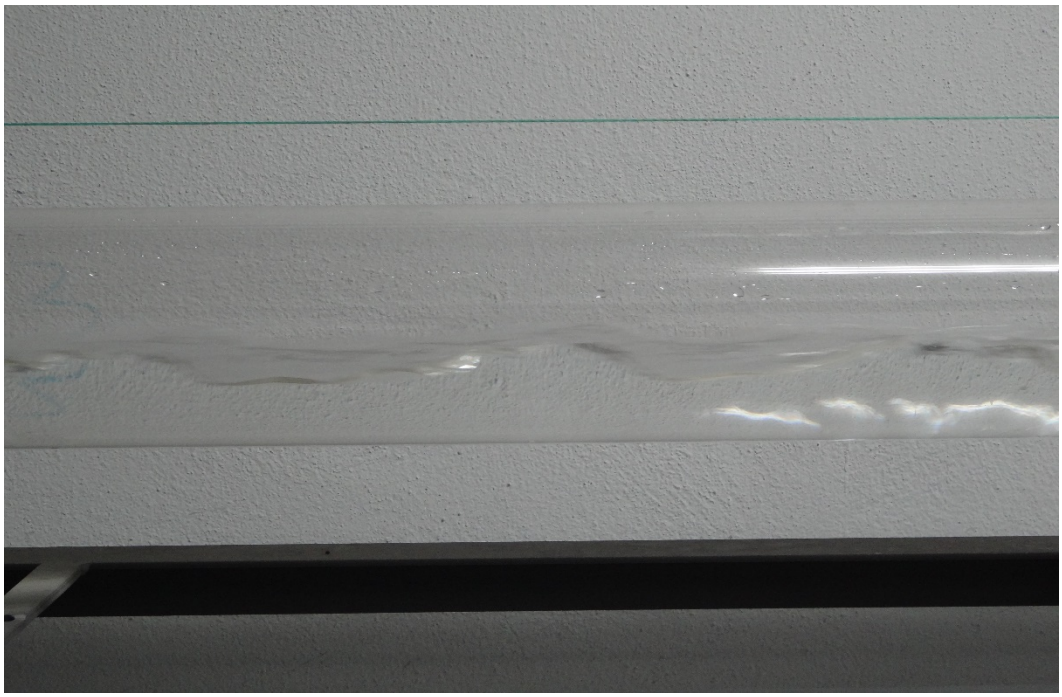
- Για **U_{GS} = 3 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m/s** μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Στην πρώτη μέτρηση, για U_{LS} = 0,004 m/s, μετά τα 1,1 m από το σημείο εισόδου παρατηρείται μία μικρή μείωση στο πάχος στοιβάδας του νερού, το οποίο μένει σταθερό μέχρι τα 4,2-4,3 m όπου εκεί αυξάνεται λίγο μέχρι να φτάσουμε στα 7-9 m που ξεκινάνε μικροί κυματισμοί. Η ροή στην πρώτη μέτρηση μπορεί να χαρακτηριστεί διαστρωματωμένη με μικρά κύματα, ενώ αρχίζει και γίνεται wavy για U_{LS} = 0,005 m/s, όπου οι κυματισμοί εμφανίζονται από την αρχή του σημείου εισόδου, ενώ όσο προχωράμε στις μετρήσεις αρχίζει και αυξάνεται τόσο το πλάτος όσο και το μήκος των κυμάτων. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι ροές με U_{LS} = 0,01 m/s μέχρι U_{LS} = 0,1 m/s είναι διαστρωματωμένες με ακανόνιστα κύματα (wavy). Για U_{LS} = 0,15 m/s υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν μικρά slugs στο τέλος της διάταξης, στα 19 m περίπου και βλέπουμε τα κύματα να αποκτούνε μεγαλύτερη ορμή σε όλο το μήκος του αγωγού. Για U_{LS} = 0,2 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 12 μέχρι 17 m (συχνά και στα 7 m). Για U_{LS} = 0,21 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 9 μέχρι 14 m (κυρίως στα 10 m). Για U_{LS} = 0,23 m/s παρατηρούνται συχνά και μεγάλα slugs σε μία περιοχή από 8 μέχρι 14 m (κυρίως 8-9 m). Για U_{LS} = 0,248 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 4 μέχρι 6 m και από 8 μέχρι 14 m. Για U_{LS} = 0,2654 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 5 μέχρι 14 m (κυρίως 5-7 m). Για U_{LS} = 0,274 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 7 μέχρι 13 m (κυρίως 7-9 m).Για U_{LS} = 0,283 m/s, U_{LS} = 0,3 m/s, U_{LS} = 0,31 m/s, U_{LS} = 0,318 m/s, U_{LS} = 0,336 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 8 μέχρι 14 m (κυρίως 8-10 m). Στις μετρήσεις με ταχύτητες από U_{LS} = 0,23 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s είναι συχνή η εμφάνιση δύο διαδοχικών slugs. Η περιοδικότητα των slugs είναι 30 sec περίπου για U_{LS} = 0,2 m/s, 15-20 sec περίπου για U_{LS} = 0,21 m/s μέχρι U_{LS} = 0,23 m/s και 10 sec για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s. Αξίζει να σημειωθεί πως για τις μετρήσεις με U_{LS} = 0,248 m/s και έπειτα ήταν συχνό το φαινόμενο του σχηματισμού slugs από νωρίς αλλά περίπου στα 13-15 m να «κόβονται», ενώ παρατηρήθηκε ότι το μήκος των slugs ήταν 1-2 m περίπου και είχανε μεγάλη ορμή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
3	0.004	Stratified
3	0.005	STRATIFIED->WAVY
3	0.01	WAVY
3	0.05	WAVY
3	0.1	WAVY
3	0.15	WAVY->SLUG
3	0.2	SLUG
3	0.21	SLUG
3	0.23	SLUG
3	0.248	SLUG
3	0.2654	SLUG
3	0.274	SLUG
3	0.283	SLUG
3	0.3	SLUG
3	0.31	SLUG
3	0.318	SLUG
3	0.336	SLUG

Σχήμα 4.13: Μετρήσεις για U_{GS} = 3 m/s



Φωτογραφία 20: Διαστρωματωμένη ροή με κύματα για U_{GS} = 3 m/s, U_{LS} = 0,1 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

- Για **U_{GS} = 4 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m/s** μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή στην πρώτη μέτρηση μπορεί να χαρακτηριστεί διαστρωματωμένη με μικρά κύματα, καθώς τα κύματα δεν έχουν αποκτήσει ακόμα σταθερό πλάτος και μήκος, κάτι που αρχίζει να συμβαίνει για U_{LS} = 0,005 m/s, όπου αρχίζει και αυξάνεται τόσο το πλάτος όσο και το μήκος των κυμάτων, ενώ η ροή έχει την ίδια μορφή σε όλη τη διάταξη. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι ροές με U_{LS} = 0,01 m/s μέχρι U_{LS} = 0,15 m/s είναι διαστρωματωμένες με ακανόνιστα κύματα (wavy), ενώ ειδικά στις ροές με U_{LS} = 0,1 m/s και U_{LS} = 0,15 m/s, τα κύματα έχουν μεγάλη ταχύτητα. Για U_{LS} = 0,2 m/s και U_{LS} = 0,21 m/s παρατηρούνται πρώιμα slugs είτε στο τέλος της διάταξης είτε στη μέση (ελάχιστα), τα οποία δεν παρουσιάζουν κάποια περιοδικότητα, αλλά έχουν μεγάλη ταχύτητα. Για U_{LS} = 0,23 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 5 μέχρι 7 m και 10 μέχρι 12 m. Για U_{LS} = 0,248 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 4 μέχρι 5 m και από 9 μέχρι 10 m. Για U_{LS} = 0,2654 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 5 μέχρι 8 m. Για U_{LS} = 0,274 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 2 μέχρι 5 m και 8 μέχρι 10 m. Για U_{LS} = 0,283 m/s, U_{LS} = 0,3 m/s, U_{LS} = 0,31 m/s, U_{LS} = 0,318 m/s, U_{LS} = 0,336 m/s παρατηρούνται slugs σε μία περιοχή από 8 μέχρι 12 m (κυρίως 9-11 m). Στις μετρήσεις με ταχύτητες από U_{LS} = 0,2654 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s είναι συχνή η εμφάνιση δύο διαδοχικών slugs. Η περιοδικότητα των slugs είναι 1,5 min περίπου για U_{LS} = 0,2 m/s και U_{LS} = 0,21 m/s, 40 sec περίπου για U_{LS} = 0,23 m/s μέχρι U_{LS} = 0,248 m/s, 20-30 sec για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι U_{LS} = 0,283 m/s και 15-20 sec για U_{LS} = 0,3 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s. Αξίζει να σημειωθεί πως για τις μετρήσεις με U_{LS} = 0,2654 m/s και έπειτα παρατηρήθηκε ότι το μήκος των slugs ήταν αρκετά μεγάλο και είχανε μεγάλη ταχύτητα η οποία αυξανόταν όσο ανεβάζαμε την παροχή του νερού.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
4	0.004	Stratified
4	0.005	STRATIFIED->WAVY
4	0.01	WAVY
4	0.05	WAVY
4	0.1	WAVY
4	0.15	WAVY
4	0.2	SLUG
4	0.21	SLUG
4	0.23	SLUG
4	0.248	SLUG
4	0.2654	SLUG
4	0.274	SLUG
4	0.283	SLUG
4	0.3	SLUG
4	0.31	SLUG
4	0.318	SLUG
4	0.336	SLUG

Σχήμα 4.14: Μετρήσεις για U_{GS} = 4 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Φωτογραφία 21: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 4 m/s και U_{LS} = 0,05 m/s

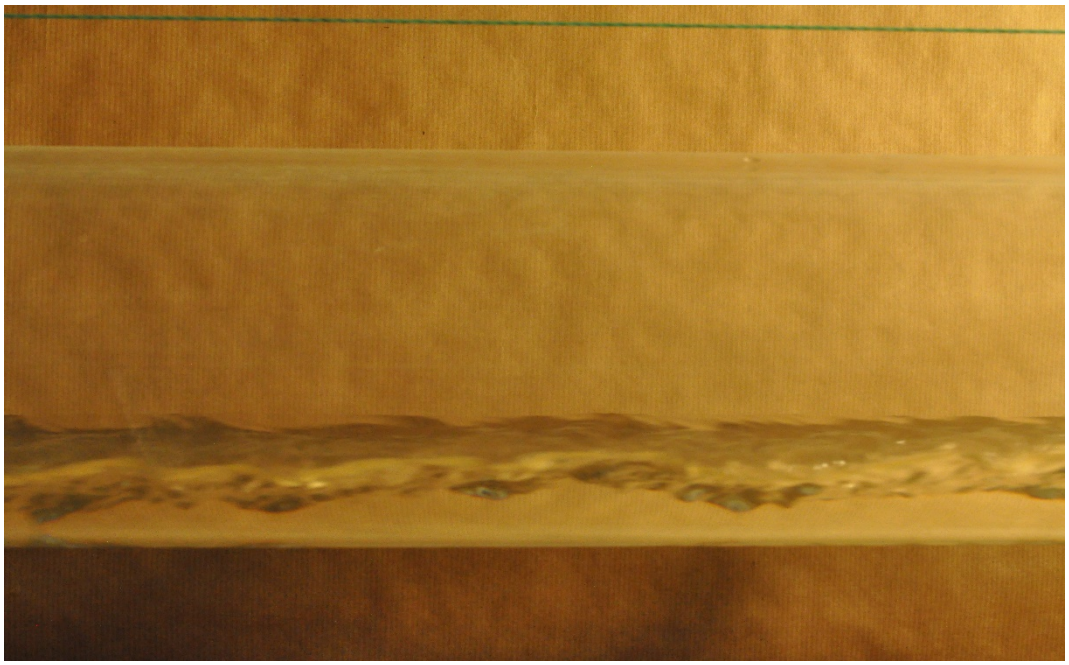
- Για **U_{GS} = 5 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m/s** μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή στις δύο πρώτες μετρήσεις μπορεί να χαρακτηριστεί διαστρωματωμένη με μικρά κύματα, καθώς τα κύματα δεν έχουν αποκτήσει ακόμα σταθερό πλάτος και μήκος, κάτι που αρχίζει να συμβαίνει για U_{LS} = 0,01 m/s, όπου αρχίζει και αυξάνεται τόσο το πλάτος όσο και το μήκος των κυμάτων, ενώ η ροή έχει την ίδια μορφή σε όλη τη διάταξη. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι ροές με U_{LS} = 0,05 m/s μέχρι U_{LS} = 0,15 m/s είναι διαστρωματωμένες με ακανόνιστα κύματα (wavy), ενώ ειδικά στη ροή με U_{LS} = 0,15 m/s, πολλά από τα κύματα είναι ενισχυμένα και συμπαρασέρνουν κάποια μικρότερα που προηγούνται. Για U_{LS} = 0,2 m/s παρατηρούνται πρώιμα slugs στο τέλος της διάταξης είτε στη μέση (ελάχιστα). Για U_{LS} = 0,21 m/s και U_{LS} = 0,23 m/s παρατηρούνται slugs στην περιοχή από 11 μέχρι 14 m. Για U_{LS} = 0,248 m/s παρατηρούνται slugs στην περιοχή από 14 μέχρι 17 m. Για U_{LS} = 0,2654 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 8 μέχρι 9 m και από 11 μέχρι 14 m. Για U_{LS} = 0,274 m/s και για U_{LS} = 0,283 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 8 μέχρι 9 m και 10 μέχρι 14 m (σπάνια). Για U_{LS} = 0,3 m/s, U_{LS} = 0,31 m/s, U_{LS} = 0,318 m/s, U_{LS} = 0,336 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 6 μέχρι 9 m και από 11 μέχρι 14 m. Στις μετρήσεις με ταχύτητες από U_{LS} = 0,3 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s είναι συχνή η εμφάνιση δύο διαδοχικών slugs. Η περιοδικότητα των slugs είναι 1 min περίπου για U_{LS} = 0,21 m/s και U_{LS} = 0,23 m/s, 40 sec περίπου για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι U_{LS} = 0,2654 m/s, 20-30 sec για U_{LS} = 0,274 m/s μέχρι U_{LS} = 0,283 m/s και 10-20 sec για U_{LS} = 0,3 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s. Στις μετρήσεις για U_{LS} = 0,3 m/s και έπειτα πήραμε video τόσο από τα 12,5 m όσο και από τα 17,5 m.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
5	0.004	STRATIFIED
5	0.005	STRATIFIED
5	0.01	STRATIFIED->WAVY
5	0.05	WAVY
5	0.1	WAVY
5	0.15	WAVY
5	0.2	WAVY->SLUG
5	0.21	SLUG
5	0.23	SLUG
5	0.248	SLUG
5	0.2654	SLUG
5	0.274	SLUG
5	0.283	SLUG
5	0.3	SLUG
5	0.31	SLUG
5	0.318	SLUG
5	0.336	SLUG

Σχήμα 4.15: Μετρήσεις για U_{GS} = 5 m/s



Φωτογραφία 22: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 5 m/s και U_{LS} = 0,05 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

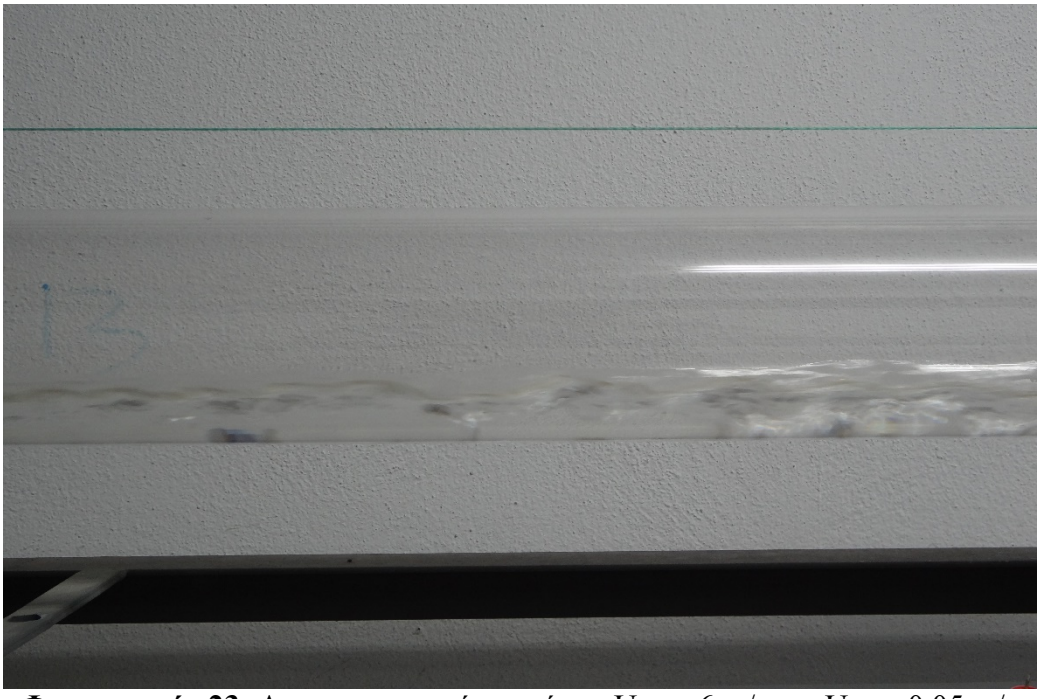
- Για **U_{GS} = 6 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m/s** μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή στις δύο πρώτες μετρήσεις μπορεί να χαρακτηριστεί διαστρωματωμένη με μικρά κύματα, καθώς τα κύματα δεν έχουν αποκτήσει ακόμα σταθερό πλάτος και μήκος, κάτι που αρχίζει να συμβαίνει για U_{LS} = 0,01 m/s, όπου αρχίζει και αυξάνεται τόσο το πλάτος όσο και το μήκος των κυμάτων, ενώ η ροή έχει την ίδια μορφή σε όλη τη διάταξη. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι ροές με U_{LS} = 0,05 m/s μέχρι U_{LS} = 0,15 m/s είναι διαστρωματωμένες με ακανόνιστα (wavy). Για U_{LS} = 0,2 m/s παρατηρούνται πρώιμα slugs στα 4-7 m, αλλά και γενικότερα σε όλη τη διάταξη, χωρίς όμως να έχουν κάποια περιοδικότητα. Για U_{LS} = 0,21 m/s μέχρι U_{LS} = 0,248 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 4 μέχρι 6 m και από 10 μέχρι 12 m. Για U_{LS} = 0,2654 m/s μέχρι και U_{LS} = 0,318 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 3 μέχρι 6 m και από 11 μέχρι 14 m. Για U_{LS} = 0,336 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 3 μέχρι 7 m και από 9 μέχρι 12 m. Στις μετρήσεις με ταχύτητες από U_{LS} = 0,2654 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s είναι συχνή η εμφάνιση δύο διαδοχικών slugs. Η περιοδικότητα των slugs είναι 40 sec περίπου για U_{LS} = 0,21 m/s και U_{LS} = 0,23 m/s, 20 sec περίπου για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι U_{LS} = 0,2654 m/s και 10-15 sec για U_{LS} = 0,274 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s. Στις μετρήσεις για U_{LS} = 0,2654 m/s και U_{LS} = 0,274 m/s τα slugs που ξεκινάνε από τα 3-6 m είναι πολύ μεγάλα και με μεγάλη ταχύτητα, ενώ συχνά συμπαρασέρνουν τα μικρότερα slugs που προπορεύονται. Στις μετρήσεις για U_{LS} = 0,283 m/s και έπειτα πήραμε video τόσο από τα 12,5 m όσο και από τα 17,5 m.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
6	0.004	STRATIFIED
6	0.005	STRATIFIED
6	0.01	STRATIFIED->WAVY
6	0.05	WAVY
6	0.1	WAVY
6	0.15	WAVY
6	0.2	WAVY->SLUG
6	0.21	SLUG
6	0.23	SLUG
6	0.248	SLUG
6	0.2654	SLUG
6	0.274	SLUG
6	0.283	SLUG
6	0.3	SLUG
6	0.31	SLUG
6	0.318	SLUG

Σχήμα 4.16: Μετρήσεις για U_{GS} = 6 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Φωτογραφία 23: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 6 m/s και U_{LS} = 0,05 m/s

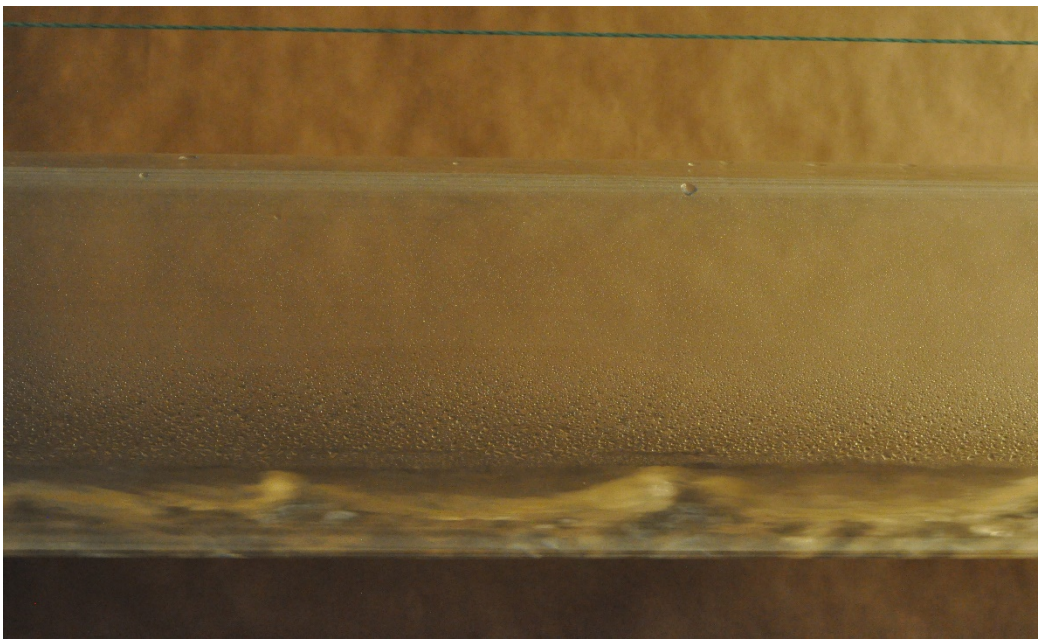
- Για **U_{GS} = 7 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m/s** μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή στις δύο πρώτες μετρήσεις μπορεί να χαρακτηριστεί διαστρωματωμένη με μικρά κύματα, καθώς τα κύματα δεν έχουν αποκτήσει ακόμα σταθερό πλάτος και μήκος, κάτι που αρχίζει να συμβαίνει για U_{LS} = 0,01 m/s, όπου αρχίζει και αυξάνεται τόσο το πλάτος όσο και το μήκος των κυμάτων, ενώ η ροή έχει την ίδια μορφή σε όλη τη διάταξη. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι ροές με U_{LS} = 0,05 m/s μέχρι U_{LS} = 0,15 m/s είναι διαστρωματωμένες με ακανόνιστα κύματα (wavy), παρόλο που για U_{LS} = 0,15 m/s έχουμε την παρουσία αραιών και μικρών slugs στο τέλος της διάταξης. Για U_{LS} = 0,2 m/s τα slugs κάνουν πιο συχνή την εμφάνιση τους στα 15-18 m. Για U_{LS} = 0,21 m/s παρατηρούνται slugs στην περιοχή από 14 μέχρι 17 m και είναι ενδιαφέρον το ότι συχνά ξεκινάνε σαν μεγάλα κύματα, τα οποία στην πορεία ενισχύονται και μετά από κάποια μέτρα εξελίσσονται σε slugs. Για U_{LS} = 0,23 m/s παρατηρούνται μικρά slugs στις περιοχές από 3 μέχρι 7 m και από 11 μέχρι 14 m. Για U_{LS} = 0,248 m/s και U_{LS} = 0,2654 m/s παρατηρούνται slugs στην περιοχή από 6 μέχρι 12 m (κυρίως 7-10 m). Για U_{LS} = 0,274 m/s παρατηρούνται μικρά slugs στις περιοχές από 5 μέχρι 9 m και από 14 μέχρι 17 m. Για U_{LS} = 0,283 m/s μέχρι και U_{LS} = 0,336 m/s παρατηρούνται slugs στις περιοχές από 5 μέχρι 9 m και από 10 μέχρι 13 m. Στις μετρήσεις με ταχύτητες από U_{LS} = 0,2654 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s είναι συχνή η εμφάνιση δύο διαδοχικών slugs. Η περιοδικότητα των slugs είναι 40 sec περίπου για U_{LS} = 0,2 m/s και U_{LS} = 0,21 m/s, 30 sec περίπου για U_{LS} = 0,23 m/s μέχρι U_{LS} = 0,2654 m/s και 10-15 sec για U_{LS} = 0,274 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s. Κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις που έγιναν είναι: 1)στις πρώτες πέντε μετρήσεις η ροή ήταν ομοιόμορφη σε όλο τον αγωγό, ενώ παράλληλα υπήρχαν αρκετοί υδρατμοί στον αγωγό και ειδικότερα από τα 3 μέχρι τα 8 m. 2) Για U_{LS} = 0,274 m/s πολλά slugs αρχίζουν να σχηματίζονται στα 10-12 m και δημιουργούνται πλήρως στα 15-16 m. 3) Για U_{LS} = 0,3 m/s και για U_{LS} = 0,336 m/s τα πολύ μεγάλα slugs γίνονται λίγο πιο αραιά αλλά πιο έντονα, ενώ τα πιο μικρά slugs είναι περισσότερα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
7	0.004	STRATIFIED
7	0.005	STRATIFIED
7	0.01	STRATIFIED->WAVY
7	0.05	WAVY
7	0.1	WAVY
7	0.15	WAVY->SLUG
7	0.2	SLUG
7	0.21	SLUG
7	0.23	SLUG
7	0.248	SLUG
7	0.2654	SLUG
7	0.274	SLUG
7	0.283	SLUG
7	0.3	SLUG
7	0.31	SLUG
7	0.318	SLUG
7	0.336	SLUG

Σχήμα 4.17: Μετρήσεις για U_{GS} = 7 m/s



Φωτογραφία 24: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 7 m/s και U_{LS} = 0,05 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

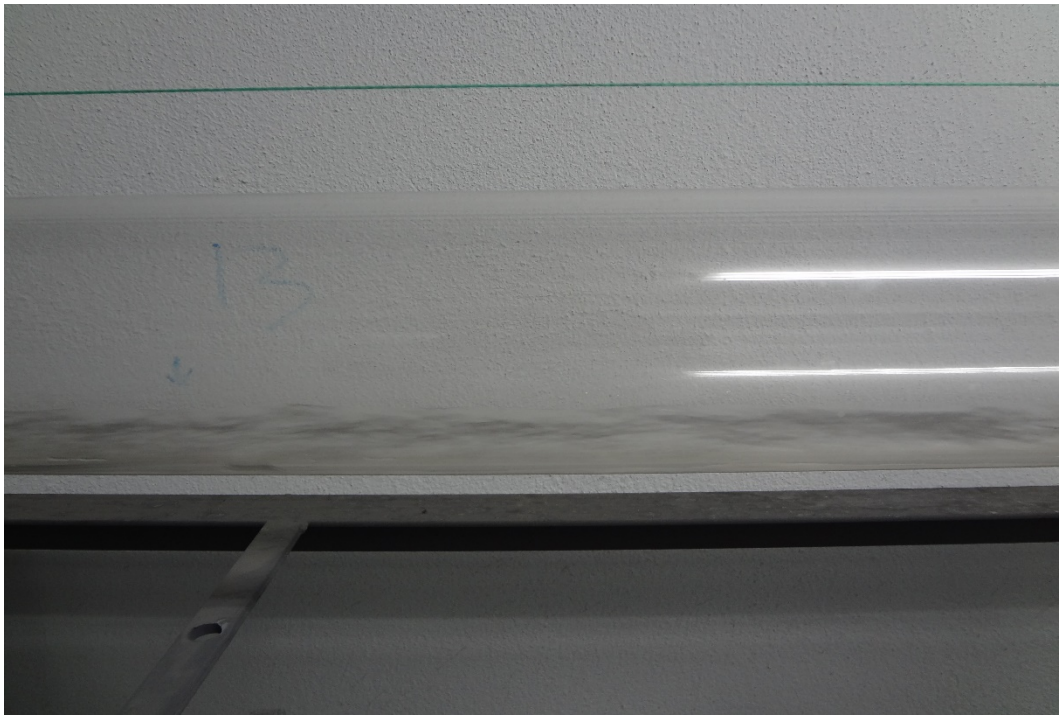
- Για **U_{GS} = 8 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m/s** μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Η ροή στις δύο πρώτες μετρήσεις μπορεί να χαρακτηριστεί διαστρωματωμένη με μικρά κύματα, καθώς τα κύματα δεν έχουν αποκτήσει ακόμα σταθερό πλάτος και μήκος, κάτι που αρχίζει να συμβαίνει για U_{LS} = 0,01 m/s, όπου αρχίζει και αυξάνεται τόσο το πλάτος όσο και το μήκος των κυμάτων, ενώ η ροή έχει την ίδια μορφή σε όλη τη διάταξη. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι ροές με U_{LS} = 0,05 m/s μέχρι U_{LS} = 0,15 m/s είναι διαστρωματωμένες με ακανόνιστα κύματα (wavy). Για U_{LS} = 0,2 m/s έχουμε την παρουσία αραιών και μικρών slugs στο τέλος της διάταξης. Για U_{LS} = 0,21 m/s τα slugs έχουν μικρή περιοδικότητα και ξεκινάνε να σχηματίζονται από τα 8-10 m για να ολοκληρωθεί η μορφή τους στα 13-16 m. Για U_{LS} = 0,23 m/s παρατηρούνται μικρά slugs στις περιοχές από 7 μέχρι 9 m και από 11 μέχρι 14 m. Για U_{LS} = 0,248 m/s παρατηρούνται μεγάλα slugs στις περιοχές από 4 μέχρι 7 m και από 13 μέχρι 16 m. Για U_{LS} = 0,2654 m/s μέχρι και U_{LS} = 0,336 m/s παρατηρούνται μικρά slugs στις περιοχές από 4 μέχρι 8 m και από 12 μέχρι 16 m. Στις μετρήσεις με ταχύτητες από U_{LS} = 0,274 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s είναι συχνή η εμφάνιση δύο διαδοχικών slugs. Η περιοδικότητα των slugs είναι 1min περίπου για U_{LS} = 0,21 m/s, 50 sec περίπου για U_{LS} = 0,23 m/s, 40 sec για U_{LS} = 0,248 m/s μέχρι U_{LS} = 0,2654 m/s, 30 sec για U_{LS} = 0,274 m/s μέχρι U_{LS} = 0,283 m/s και 15-20 sec για U_{LS} = 0,3 m/s μέχρι U_{LS} = 0,336 m/s. Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του νερού τόσο αυξάνεται και η επιφάνεια του νερού που «γλύφει» τον αγωγό στο τμήμα εισόδου του.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
8	0.004	STRATIFIED
8	0.005	STRATIFIED
8	0.01	STRATIFIED->WAVY
8	0.05	WAVY
8	0.1	WAVY
8	0.15	WAVY->SLUG
8	0.2	SLUG
8	0.21	SLUG
8	0.23	SLUG
8	0.248	SLUG
8	0.2654	SLUG
8	0.274	SLUG
8	0.283	SLUG
8	0.3	SLUG
8	0.31	SLUG
8	0.318	SLUG
8	0.336	SLUG

Σχήμα 4.18: Μετρήσεις για U_{GS} = 8 m/s

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Φωτογραφία 25: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 8 m/s και U_{LS} = 0,01 m/s

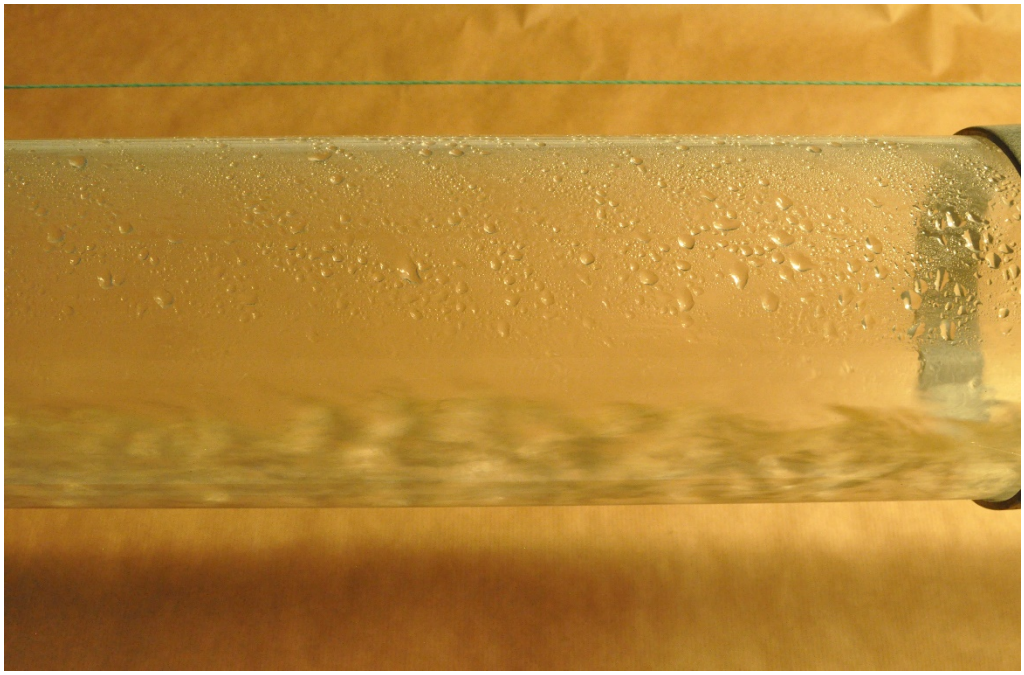
- Για **U_{GS} = 9 m/s** και για **U_{LS} = 0,004 m/s** μέχρι **U_{LS} = 0,336 m/s**

Οι πρώτες επτά μετρήσεις δείχνουν ότι η ροή είναι διαστρωματωμένη με ακανόνιστα κύματα. Για U_{LS} = 0,21 m/s αρχίζουν και εμφανίζονται αραιά κάποια μικρά slugs χωρίς όμως να χαρακτηρίζεται η ροή διαλείπουσα. Για U_{LS} = 0,23 m/s έχουμε slugs στην περιοχή 15-18 m με συχνότητα εμφάνισης 40-50 sec. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν η ύπαρξη σταγονιδίων σε όλη τη διάταξη και ειδικά στην αρχή, λόγω της μεγάλης παροχής του αέρα. Ακόμη, η ταχύτητα ροής του διφασικού μίγματος ήταν πολύ μεγάλη. Η συνέχιση των πειραμάτων δεν κατέστη εφικτή καθώς ο αεροσυμπιεστής δεν μπορούσε να ανταπεξέλθει στη ζητούμενη παροχή του αέρα και πάθαινε βλάβη.

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής
9	0.004	WAVY
9	0.005	WAVY
9	0.01	WAVY
9	0.05	WAVY
9	0.1	WAVY
9	0.15	WAVY
9	0.2	WAVY
9	0.21	WAVY->SLUG
9	0.23	SLUG
9	0.248	SLUG

Σχήμα 4.19: Μετρήσεις για U_{GS} = 9 m/s

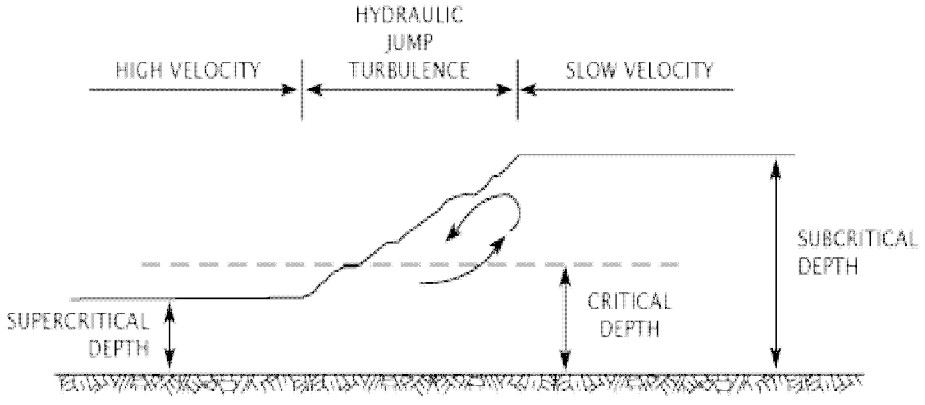
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Φωτογραφία 26: Διαστρωματωμένη ροή για U_{GS} = 9 m/s και U_{LS} = 0,05 m/s

4.2 Υδραυλικό άλμα

Ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε στις χαμηλές ταχύτητες αέρα και στις υψηλές ταχύτητες του νερού είναι το υδραυλικό άλμα (Φωτογραφία 27). Στις πρώτες μετρήσεις όπου έχουμε χαμηλή ταχύτητα αερίου, όσο αυξάνουμε την ταχύτητα του νερού, παρατηρούμε ότι το πάχος του νερού που εισέρχεται από το τμήμα ανάμιξης στην περιοχή εισόδου έχει ένα σταθερό πάχος, το οποίο έπειτα από μία απόσταση αυξάνεται απότομα. Αυτό συμβαίνει διότι το νερό από κάποιες μετρήσεις και έπειτα εισέρχεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι ο αέρας και έχει ένα συγκεκριμένο υπερκρίσιμο βάθος. Στην πορεία όμως, λόγω της τριβής μειώνεται η ταχύτητά του και αρχίζει και αυξάνεται το βάθος, το οποίο μετά το υδραυλικό άλμα γίνεται υποκρίσιμο. Στις μετρήσεις με πιο μεγάλη ταχύτητα αέρα δεν εμφανίζεται το φαινόμενο αυτό αφού η μεγάλη ροή του αέρα δεν το επιτρέπει και η ροή είναι ομοιόμορφη σε όλο τον αγωγό. Παρατίθεται ο πίνακας με τα αναλυτικά δεδομένα για τις μετρήσεις όπου εμφανίστηκε το υδραυλικό άλμα (Σχήμα 4.20).



Φωτογραφία 27: Υδραυλικό άλμα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Αέρας (m/s)	Νερό (m/s)	Απόσταση από σημείο εισόδου (m)
0.4	0.318	1.53
0.4	0.336	1.3
0.5	0.31	0.7
0.5	0.318	0.7
0.5	0.336	1.4
0.6	0.31	0.3
0.6	0.318	0.85
0.6	0.336	1.4
0.7	0.274	0.7
0.7	0.283	0.7
0.7	0.3	0.7
0.7	0.31	0.8
0.7	0.318	0.9
0.7	0.336	0.9
0.8	0.3	0.4
0.8	0.31	1
0.8	0.318	1.2
0.8	0.336	1.9
0.9	0.3	0.5
0.9	0.31	0.8
0.9	0.318	1.35
0.9	0.336	1.85
1	0.3	0.8
1	0.31	1.2
1	0.318	1.55
1	0.336	2.3
2	0.248	0.5
2	0.2654	1.55
2	0.274	1.65
2	0.283	1.85
2	0.3	2.5
2	0.31	3.35
2	0.318	3.95
2	0.336	4.45

Σχήμα 4.20: Μετρήσεις για υδραυλικό άλμα

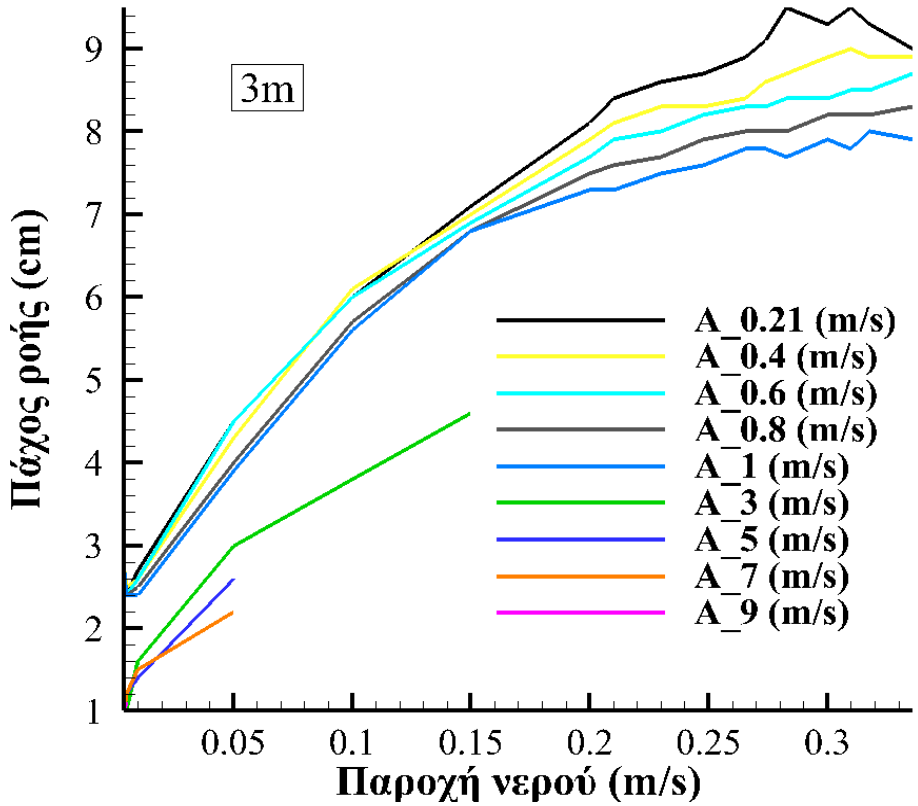
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

4.3 Πάχος υγρής στιβάδας

Όπως αναφέραμε στα πρώτα κεφαλαία, το ύψος της υγρής στιβάδας και η κατανομή του στην περιφέρεια του αγωγού είναι μια πολύ σημαντική παράμερος που παίζει μεγάλο ρόλο στη διφασική ροή. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα τρία διαγράμματα στα οποία φαίνεται πώς εξελίσσεται το πάχος της υγρής στιβάδας, όσο αυξάνουμε την ταχύτητα του αέρα, σε τρία διαφορετικά σημεία. Στο Παράρτημα παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα δεδομένα των μετρήσεων, στον οποίο βρίσκονται και τα δεδομένα των σχημάτων αναλυτικά.

- **Για τα 3m**

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι στις πρώτες μετρήσεις, το πάχος της ροής δε διαφέρει πολύ για διαφορετικές ταχύτητες αέρα. Όσο όμως αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα παρατηρείται ότι το πάχος αρχίζει και μειώνεται. Ένα ακόμη ενδιαφέρον στοιχείο είναι ότι μέχρι την τιμή U_{LS} = 0,13 m/s περίπου, οι διάφορες ροές έχουν το ίδιο πάχος και οι καμπύλες έχουν την ίδια περίπου κλίση, ενώ από εκείνη την ταχύτητα και έπειτα υπάρχει διαφορά στη συμπεριφορά των καμπυλών και στο πάχος της κάθε ροής.

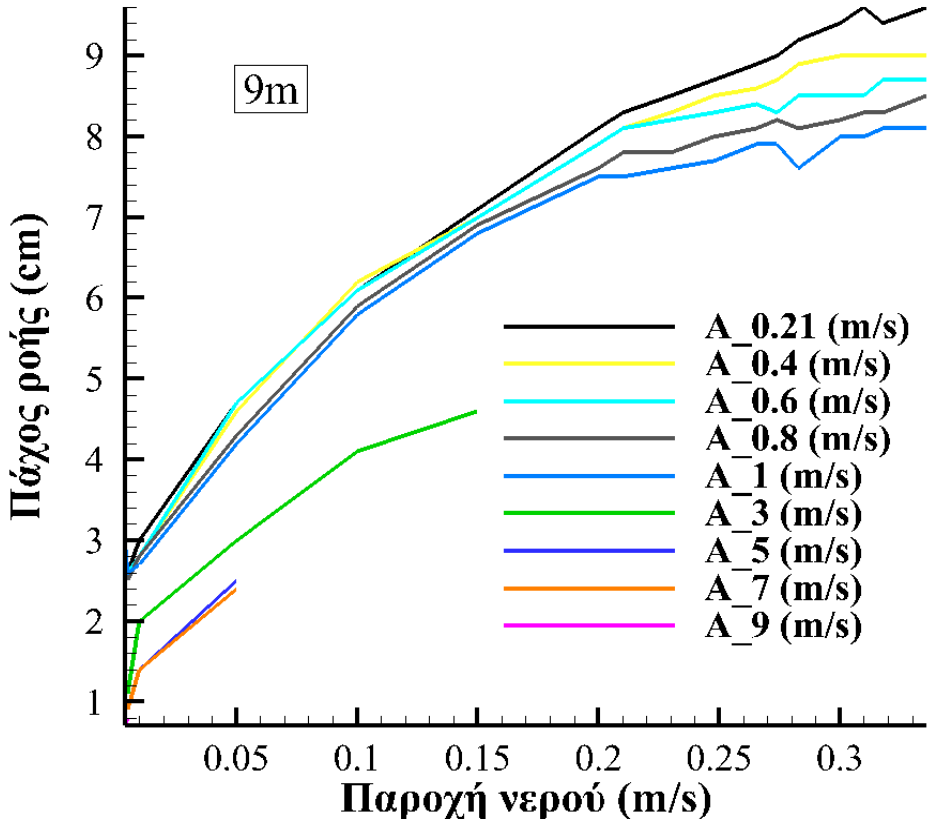


Σχήμα 4.21: Πάχος υγρής στιβάδας στα 3m

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

- **Για τα 9m**

Τα ίδια ισχύουν και για το πάχος της ροής στα 9 m με μόνη διαφορά ίσως, ότι οι καμπύλες των ροών ξεκινάνε λίγο πιο απότομα.

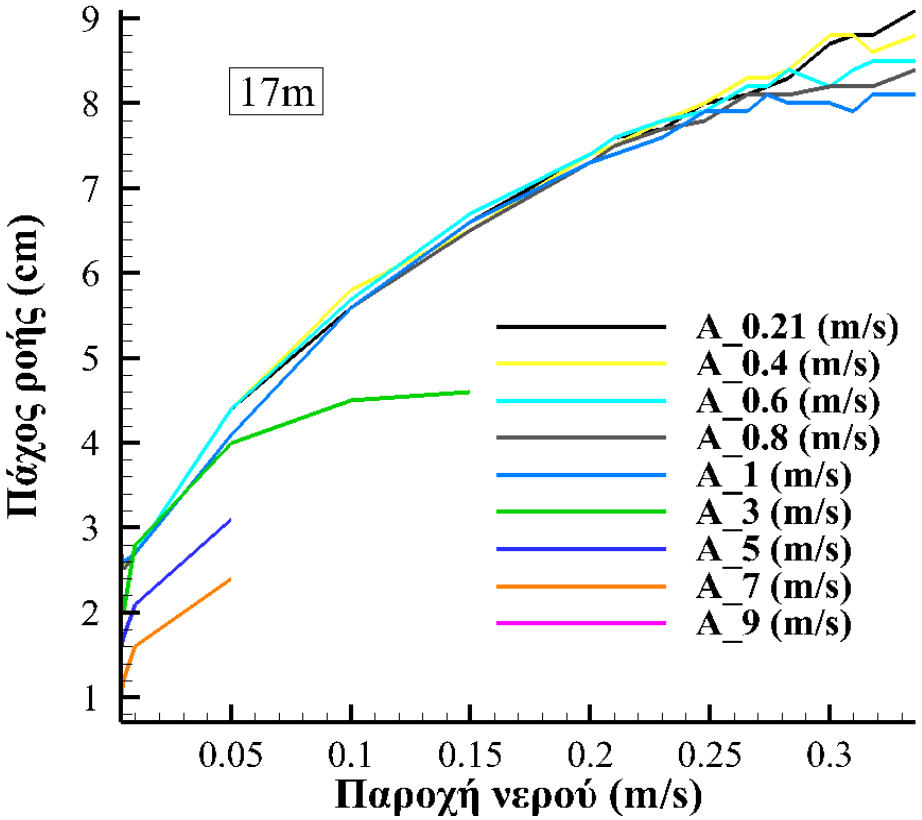


Σχήμα 4.22: Πάχος υγρής στιβάδας στα 9m

- **Για τα 17m**

Στο συγκεκριμένο σημείο παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των ροών ξεκινάνε το ίδιο απότομα όπως και στα 9 m, ενώ παράλληλα όσο αυξάνουμε την ταχύτητα του αέρα, μέχρι U_{GS} = 1 m/s και U_{LS} = 0,27 m/s περίπου, οι ροές έχουν περίπου το ίδιο πάχος σε αντίθεση με τα πρώτα δύο σημεία. Βεβαία ισχύει και εδώ ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα μειώνεται και το πάχος της υγρής στιβάδας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 4.23: Πάχος υγρής στιβάδας στα 17m

4.4 Βαθμονόμηση ροομέτρων νερού

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την βαθμονόμηση των ροόμετρων του νερού είναι η εξής: Για κάθε ροόμετρο παίρνουμε πέντε παροχές νερού. Για κάθε μια από τις από παροχές αυτές παίρνουμε χρονομετρημένο δείγμα. Στη συνέχεια το δείγμα ζυγίζεται οπότε υπολογίζεται η παροχή σε kg/sec. Συγκεντρώνουμε τις πέντε μετρήσεις για κάθε ροόμετρο και δημιουργούμε ένα χάρτη που στον ένα του άξονα δείχνει τον αριθμό των μετρήσεων και στον άλλο άξονα φαίνεται το εύρος των παροχών που εμείς υπολογίσαμε με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα αποτελέσματα που πήραμε παρουσιάζονται στο Παράρτημα. Από τους βαθμούς συσχέτισης των γραφικών παραστάσεων, οι οποίοι δεν ήταν πολύ καλοί, δεν μπορούμε να βγάλουμε σωστά συμπεράσματα καθώς δεν έγινε πολύ σωστά η βαθμονόμηση και δεν υπήρχε χρόνος να διορθωθεί.

4.5 Σύνοψη των καθεστώτων ροής που εμφανίζονται

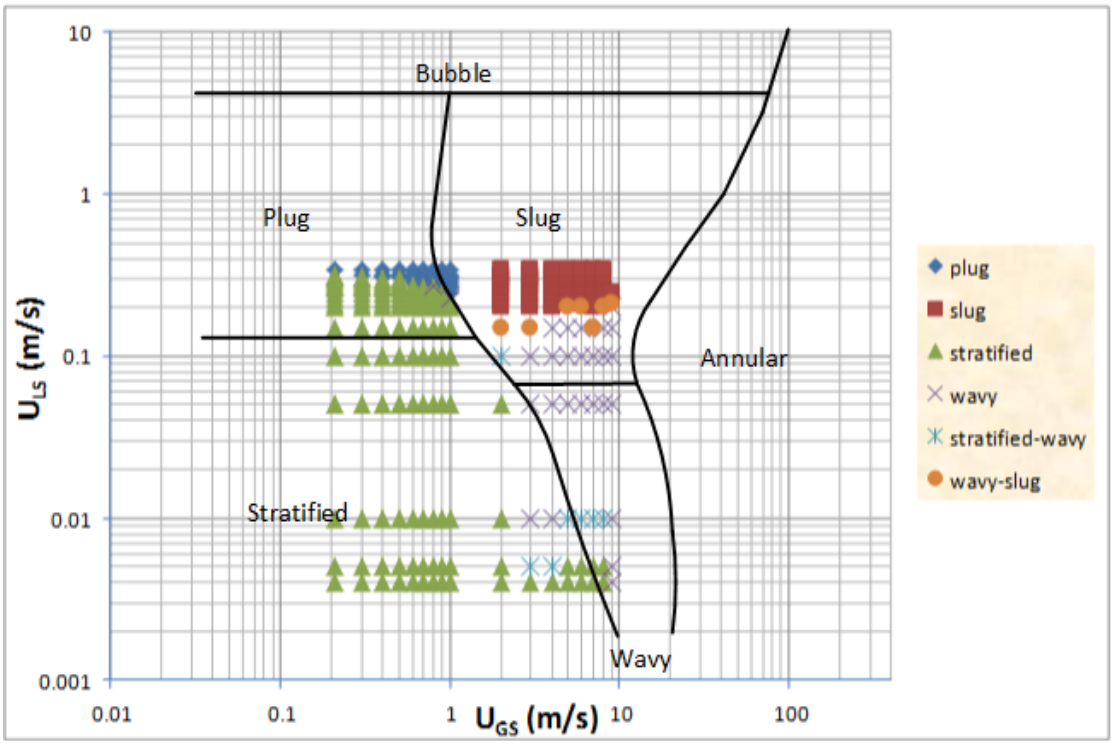
Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων παρατηρήθηκαν τέσσερα κύρια καθεστώτα ροής στο εσωτερικό του αγωγού : κλειστή ροή (plug flow), διαλείπουσα ροή (slug flow), διαστρωματωμένη ροή και ενδεχομένως ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug flow).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Η διαστρωματωμένη ροή διαχωρίζεται, σύμφωνα με τη θεωρία, σε 4 υποκαθεστώτα: τη λεία διαστρωματωμένη ροή (smooth) όπου εμφανίστηκε σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής και της αέριας φάσης, τη διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D) που εμφανίζεται ως κανονικές διαταραχές στην διεπιφάνεια των δύο φάσεων για μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, τη ροή με κύματα τύπου K-H που εμφανίζεται ως κύματα με πιο τραχιά επιφάνεια για περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης και ροή με εκνέφωση όπου εμφανίζεται με την εναπόθεση σταγονιδίων που αποκόπτονται από τις κορυφές των κυμάτων στο πάνω μέρος του αγωγού.

Η διαλείπουσα ροή άρχισε να εμφανίζεται για υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες του νερού. Αρχικά σε χαμηλές παροχές της αέριας φάσης παρατηρείται μια μικρή εμφάνιση ήπιας διαλείπουσας ροής (plug) ενώ με την αύξηση της αέριας φάσης κάνει την εμφάνισή της η έντονη διαλείπουσα ροή (slug). Με περαιτέρω αύξηση της αέριας φάσης ίσως να εμφανίζεται και η ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug).

Τα καθεστώτα ροής που εμφανίζονται στην εργασία σε συνδυασμό με τα καθεστώτα ροής από Mandhane et al. (1974) δημιουργούν το χάρτη καθεστώτων ροής του Σχήματος 4.24.



Σχήμα 4.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων με χάρτη καθεστώτων ροής σύμφωνα με Mandhane et al (1974)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

5. Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας. Το αντικείμενο της πειραματικής μελέτης ήταν η προσπάθεια χαρτογράφησης της πειραματικής διάταξης του Εργαστηρίου Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Λάρισας, καθώς και η σύγκριση του συγκεκριμένου χάρτη με τον εμπειρικό χάρτη καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό των Mandhane et al (1974). Ακόμη, είχε σαν σκοπό την παρατήρηση των περιοχών ροής που εμφανίζονται και την καταγραφή των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τις μεταπτώσεις από μια περιοχή σε άλλη. Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρατίθενται παρακάτω:

- Το πάχος της υγρής στιβάδας μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα, λόγω της δύναμης που ασκείται από την αέρια φάση στην υγρή, ενώ μέσα στον αγωγό είναι πολύ μικρή η διαφορά που παρατηρείται στο πάχος ροής στα τρία διαφορετικά σημεία μέτρησης, παρατηρώντας όμως μία πολύ μικρή μείωση του πάχους όσο προχωράει η ροή προς το τέλος της διάταξης.
- Παρατηρήθηκε το φαινόμενο του υδραυλικού άλματος, το οποίο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αξίζει να μελετηθεί εκτενέστερα αν και πόσο επηρεάζει τη ροή.
- Η ταξινόμηση των περιοχών ροής είναι ορισμένες φορές ιδιαίτερα αμφισβητούμενη και οι διαφορές στην ερμηνεία από τους ερευνητές έχουν οδηγήσει σε μια ευρεία σειρά ονομάτων περιοχών ροής. Για τον λόγο αυτό στη παρούσα μελέτη έγινε μια προσπάθεια να παρουσιαστούν όλες οι περιοχές ροής που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία και να εντοπιστούν αυτές οι οποίες εμφανίζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι περιοχές ροής που ταυτοποιήθηκαν τελικά είναι οι εξής : Διαστρωματωμένη ροή (Stratified flow), Κλειστή ροή (Plug flow), Διαλείπουσα ροή (Slug flow), Ροή με κύματα (Wavy flow), Εκνέφωση (atomization) και ενδεχομένως Ψευδο-διαλείπουσα ροή (Pseudo-slug flow).
- Για την κατασκευή του χάρτη περιοχών ροής παρατηρήθηκαν οι περιοχές ροής σε 272 σημεία που το καθένα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο συνδυασμό παροχών αέρα και νερού. Από την σύγκριση του χάρτη αυτού περιοχών ροής με τον εμπειρικό χάρτη του Mandhane (Σχήμα 4.24) καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία. Παρόλο δηλαδή το γεγονός ότι οι παροχές στις οποίες εμφανίζονται οι διάφορες περιοχές ροής δεν συμπίπτουν πάντα ακριβώς, η ακολουθία με την οποία εμφανίζονται οι περιοχές ροής είναι σχεδόν η ίδια. Το βασικό συμπέρασμα αυτής της παρατήρησης είναι ότι η συσκευή την οποία κατασκευάσαμε είναι σε θέση να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Τέλος, έγινε προσπάθεια να καταγραφεί ο τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται οι διάφορες περιοχές ροής. Παράλληλα έγινε μια πρώτη προσπάθεια να καταγράφουν διάφορες χαρακτηριστικές παράμετροι των περιοχών ροής, όπως για παράδειγμα το πάχος υγρής στιβάδας και η συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

5.2 Προτάσεις

Υπάρχουνε κάποια σημεία που θα μπορούσαν να βελτιωθούν και κάποιες νέες παράμετροι να ληφθούν υπόψη. Οι προτάσεις είναι οι εξής :

- Προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης με κάποιο μετρητικό όργανο πέρα από τη βιβλιογραφία για μεγαλύτερη ακρίβεια των συμπερασμάτων.
- Μεγαλύτερο εύρος μετρήσεων κατά την πειραματική διαδικασία τόσο για τις ταχύτητες του αέρα όσο και του υγρού για καλύτερη προσέγγιση των καθεστώτων των ροών.
- Πραγματοποίηση πειραμάτων με τη χρήση και άλλων ουσιών που μειώνουν την επιφανειακή τάση με σκοπό την επέκταση της μελέτης της επιφανειακής τάσης στη διφασική ροή.
- Μελέτη για την επιρροή του ιξώδους στο σχηματισμό των καθεστώτων ροής στη διφασική ροή όταν χρησιμοποιούνται επιφανειοδραστικές ουσίες.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε να γίνουν μετρήσεις για τον ύψος της υγρής στιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο για διάφορες κλίσεις του αγωγού.
- Επίσης να γίνει η μέτρηση της πτώσης πίεσης για διάφορες κλίσεις του αγωγού.
- Προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στη χαρτογράφηση της πειραματικής διάταξης και κατά συνέπεια στην ακριβέστερη εύρεση των περιοχών που γίνεται η αλλαγή των καθεστώτων ροής, είναι απαραίτητη η σωστή βαθμονόμηση των ροομέτρων τόσο του νερού όσο και του αέρα, τα οποία επηρεάζονταν αρκετά από τη διακύμανση της αλλαγής της πίεσης του αεροσυμπιεστή. Ειδικά τα ροόμετρα του αέρα επηρέασαν ενδεχομένως σε ένα βαθμό τα αποτελέσματα των πειραμάτων, καθώς δεν ήταν λίγες οι φορές που όταν ανέβαινε η πίεση του αεροσυμπιεστή από τα 9 στα 10 bar, δημιουργούνταν ευνοϊκότερες συνθήκες για την παραγωγή plugs ή slugs, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερος χρόνος στη μελέτη της εκάστοτε ροής. Βέβαια, αυτό το πρόβλημα ενδέχεται να λυθεί, αν ρυθμιστεί ο αεροσυμπιεστής με τέτοιο τρόπο ώστε να κυμαίνεται μεταξύ μικρότερης διαφοράς πίεσης από ότι 9-10 bar. Ακόμη, η αλλαγή των ροομέτρων ή έστω η προσθήκη επιπλέον ροομέτρων νερού και αέρα θα βοηθούσε στην παρατήρηση περισσοτέρων περιοχών ροής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

6. Βιβλιογραφία

Αναστασιάδης, Α. «Διφασική ροή σε σωλήνες μικρής διαμέτρου». Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, Βόλος, 2002.

Ανδρίτσος Ν. και Μποντόζογλου Β., «Σημειώσεις: Διφασική Ροή και Μεταφορά Θερμότητας», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 2006.

Ανδρίτσος, Ν., Παράς Σ. «Διφασική ροή υγρού-αερίου σε αγωγούς». Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών, Πρόγραμμα Επιμόρφωσης Επιστημόνων Ευτέρπη (Μέτρο 2.1), 1991.

Καραμάνος, Κ. «Διφασική ροή αέρα-νερού σε οριζόντιο αγωγό». Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, 1996.

Ρούκας, Λ. «Επίδραση της επιφανειακής τάσης στη διφασική ροή αέρα-υγρού σε οριζόντιο αγωγό». Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, Βόλος, 2010.

Τζώτζη, Χ. «Επίδραση των Φυσικών Ιδιοτήτων των Ρευστών στη Διφασική Ροή Υγρού-Αερίου σε Οριζόντιους και Σχεδόν Οριζόντιους Αγωγούς». Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, Βόλος, 2009.

A.E. Dukler, M. Wicks and R.G. Cleveland, AIChE J., 10 (1964) 44.

Al-Sheikh, J.N., "Prediction of Flow Patterns in Horizontal Two-Phase Pipe Flow". Can J Chem Engng, 48, pp 21-29, 1970.

Alves, G.E. "Cocurrent Liquid-Gas Flow in a Pipeline Contractor". Chem Engng Prog, 50, pp 449-456, 1954.

Andritsos, N, and T.J. Hanratty, "Interfacial of interfacial waves in stratified gas-liguid flow". AIChE J, 33 ,444-454, 1987.

Andritsos, N. "Effect of pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow". PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, 1986.

Andritsos, N. and Hanratty, T.J. "Interfacial Instabilities for Horizontal Gas-Liquid Flows in Pipelines". Int. J. Multiphase Flow, Vol 13, pp 583-603, 1987b.

Andritsos, N., Williams, L. and Hanratty, T.J. "Effect of Liquid Viscosity in the Stratified-Slug Transition in Horizontal Pipe Flow". Int. J. Multiphase Flow, Vol 15, pp 877-892, 1989.

Baker, D. "Simultaneous Flow of Oil and Gas". Oil and Gas Journal, Vol 53, pp 185-195, 1954.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Barnea, D. “On the Effect of Viscosity on Stability of Stratified Gas-Liquid Flow-Application to Flow Pattern Transition at Various Pipe Inclinations”. Chem. Engineering Science, Vol 46, pp 2123-2131, 1991.

Barnea, D., Taitel, Y. “Flow Pattern transition in two phase Gas-Liquid Flow”. Encyclopedia of Fluid mechanics, 3, 403-473, 1986.

Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E. “Flow Pattern Transition for Downward Inclined Two Phase Flow: Horizontal to Vertical”. Chem. Engineering Science, Vol 5, pp 735-740, 1982.

Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E. “Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes”. Int. J. Multiphase Flow, Vol 6, pp 217-225, 1980.

Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E. “Gas-Liquid Flow in Inclined Tubes: Flow pattern Transitions for Upward Flow”. Chem. Engineering Science, Vol 40, pp 131-136, 1985.

Barnea, D. “Transition from annular flow and from dispersed bubble flow-unified models for the whole range of pipe inclinations”, Int. J. Multiphase Flow 12, pp. 733-744, 1986.

Barnea, D., O. Shoham, Y. Taitel “Flow pattern Characterization in to two phase flow by electrical conductance probe”. Int. J. Multiphase Flow, 6, 387-397, 1980.

Bergelin, O.P. and C. Gazley, “Cocurrent Gas-Liquid Flow”, I. Flow in Horizontal Tubes. Proc Heat Transfer and Fluid Mech. Inst., pp 5-18, Berkeley CA, 1949.

Dukler, A.E., Hubbard M.G. “A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near-Horizontal Tubes”. Int. Eng. Chem. Fundamentals, 14, 337, 1975.

Dukler, A.E., Taitel Y. “Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems: Measurement and Modeling”. Multiphase science and technology, 2, Hemisphere Publishing Corporation, USA,1986.

Fan, Z., Lusseyran, F. and Hanratty, T.J. “Initiation of Slugs in Horizontal Gas-Liquid Flows”. AIChE Journal, Vol 39, pp 1741-1753, 1993.

Feng Dong, Xiaoping Liu, Xiang Deng, Lijun Xu and Ling-an Xu ‘’Identification of two phase flow regimes in horizontal, inclined and vertical pipes’’ Department of Automation, Tianjin University (2001).

Govier, G. W. and Omer, M. M. “Horizontal Pipeline Flow of Air-Water Mixture”. Can. J. Chemical Engineering, 40 (3), pp. 93-104, 1962.

Hanrraty, T.J. and Hershman, A. “Initiation Of Roll Waves”. AIChE Journal, Vol 7, pp 488-497, 1961.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Hoogendoorn, C.J. “Gas liquid flow in horizontal pipes”. Chem. Enqnq. Sci., 9, 205-217, 1959.

Johnson, H.A. and A.H. Abou-Sabe. “Heat Transfer and Pressure Drop for Turbulent Flow of Air-Water Mixtures in a Horizontal Pipe”. Trans ASME, 74, pp 977-987, 1952.

Kokal, S.L. and Stanislav, J.F. “An Experimental Study of Two-Phase Flow Patterns in Slightly Inclined Pipes-I. Flow Patterns”. Chem. Eng. Science, Vol 44, pp 665-679, 1989.

Kordyban, E.S. “Some Details of Developing Slugs in Horizontal Two-Phase Flow”. AIChE Journal, Vol 31, pp 802-806, 1985.

Kordyban, E.S. and Ranov, T. “Mechanism of Slug Formation in Horizontal Two-Phase Flow”. Journal of Basic Engineering, pp 857-864, December 1970.

Lin, P.Y. and Hanratty, T.J . “Prediction of the Initiation of Slugs with Linear Stability Theory”. Int. J. Multiphase Flow, Vol 12, pp 79-98, 1986.

Lin, P.Y. and T.J. Hanratty “Effects of pipes diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes”. Int. J. Multiphase Flow, 13, 549-563 1987.

Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C. “Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes”. Chem. Eng. Prog.,Vol. 45, pp 39-48,1949.

Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K. “A Flow Pattern Map for Gas-Liquid in Horizontal Pipes”. Int. J. Multiphase Flow, Vol 1, pp 537-553, 1974.

Mishima, K. and Ishii, M. “Theoretical Prediction of Onset of Horizontal Slug Flow”. Journal of Fluids Engineering, Vol 102, pp 441-445, 1980.

Nencini, F., and Andreussi, P. “Studies of the behaviour of disturbance waves in annular two-phase flow”. Can. J. Chem. Eng., 60 (4), pp. 459-465, 1982.

Petalas, N. and Aziz, K., “A mechanistic model for multiphase flow in pipes”, J. Can. Pet. Technol., 39, pp. 43-55, 2000.

Scott, D.S. “ Properties of co-current gas liquid flow.” In Advances in Chemical Engineering, Vol. 4, Academic Press, New York, p. 200, 1963.

Spedding, P. L., Chen, J. J. J. and Nguyen, V.T., “Pressure drop in two phase gas-liquid flow in inclined pipes.”, Int. J. Multiphase Flow, 8, pp. 407-431, 1982.

Taitel, Y. and Dukler, A.E. “A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow”. AIChE Journal, Vol 22, pp 47-55, 1976.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Taitel, Y., Barnea, D. and Dukler, A.E. “Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical Tube”. AIChE Journal, Vol 26, pp 345-354, 1980.

Wallis, G.,B. “One Dimensional two-phase flow”. McGraw-Hill, New York 1969.

Wallis, G.B. and Dodson, J.E. “The Onset of Slugging in Horizontal Stratified Air-Water Flow”. Int. J. Multiphase Flow, Vol 1, pp 173-193, 1973.

Weisman, J. and Kang, S. Y. “Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines”. Int. J. Multiphase Flow 7, 271-291, 1981.

Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J. and Crawford, T. “Effects of Fluids Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines”. Int. J. Multiphase Flow, Vol 5, pp 437-462, 1979

Whalley, P. B. “Two-Phase Flow and Heat Transfer”, Oxford University, 1996.

White, P.D. and R.L. Huntington, “Horizontal Co-Current Two-Phase Flow of Fluid in Pipe Lines”. The Petroleum Engineer, 27(9), p 40, 1958.

Wong, T.N. and Yau, Y.K. “Flow patterns in two-phase air-water flow”. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 24, pp. 111-118, 1997.

Wu, H.L., Pots, B.F.M., Hollenberg, J.F. and Meerhoff, R. “Flow Pattern Transitions in Two-Phase Gas/Condensate Flow at High Pressure in an 8-inch Horizontal Pipe”. Conference of Multiphase Flow, pp 13-21, The Hague, Netherlands, May 1987.

Xiao, J. J., Shoham, O., Brill, J. P. “A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Pipelines”. Paper SPE 20631, 65th ATC&E of SPE, New Orleans, September 23-26, 1990.

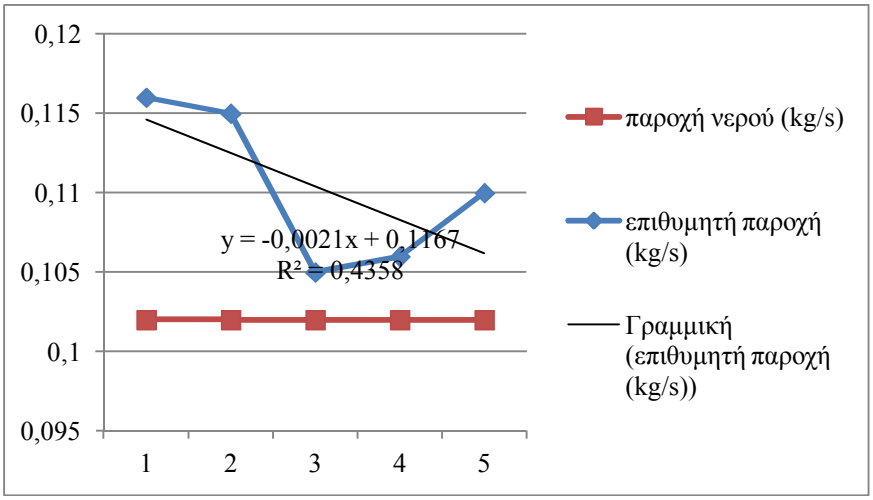
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Παράρτημα

Βαθμονόμηση ροομέτρων

- **Για το μικρό ροόμετρο**

επιθυμητή παροχή(kg/s)	μέτρηση (kg/sec)
0.102	0.116
0.102	0.115
0.102	0.105
0.102	0.106
0.102	0.11

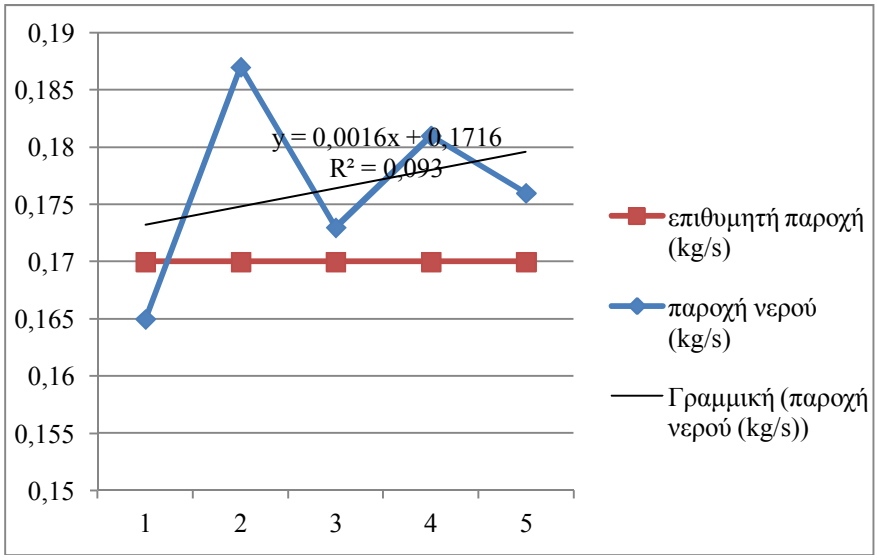


Γράφημα 1: Βαθμονόμηση μικρού ροόμετρου νερού

- **Για το μεσαίο ροόμετρο**

επιθυμητή παροχή(kg/s)	μέτρηση (kg/sec)
0.17	0.165
0.17	0.187
0.17	0.173
0.17	0.181
0.17	0.176

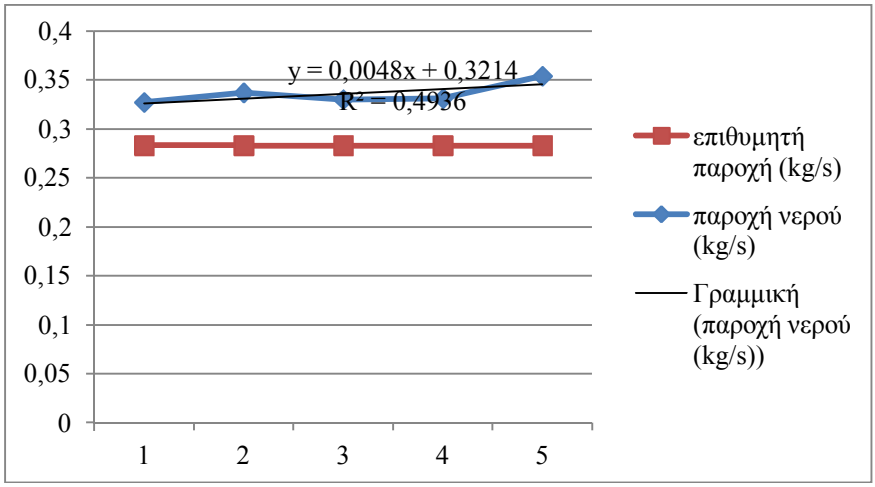
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38



Γράφημα 2: Βαθμονόμηση μεσαίου ροόμετρου νερού

- **Για το μεγάλο ροόμετρο**

επιθυμητή παροχή(kg/s)	μέτρηση (kg/sec)
0.283	0.327
0.283	0.337
0.283	0.33
0.283	0.331
0.283	0.354



Γράφημα 3: Βαθμονόμηση μεγάλου ροόμετρου νερού

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

Συνοπτικός πίνακας δεδομένων των μετρήσεων

Αέρας (m/s)	Νερό(m/s)	Καθεστώς ροής	Περιοχή Εμφάνισης από την αρχή (m)	Περιοδικότητα (sec)	3(cm)	9(cm)	17(cm)
0.21	0.004	Stratified	-	-	2.4	2.6	2.5
0.21	0.005	Stratified	-	-	2.4	2.6	2.5
0.21	0.01	Stratified	-	-	2.7	3	2.7
0.21	0.05	Stratified	-	-	4.5	4.7	4.4
0.21	0.1	Stratified	-	-	6	6.1	5.6
0.21	0.15	Stratified	-	-	7.1	7.1	6.6
0.21	0.2	Stratified	-	-	8.1	8.1	7.4
0.21	0.21	Stratified	-	-	8.4	8.3	7.6
0.21	0.23	Stratified	-	-	8.6	8.5	7.7
0.21	0.248	Stratified	-	-	8.7	8.7	8
0.21	0.2654	Stratified	-	-	8.9	8.9	8.1
0.21	0.274	Stratified	-	-	9.1	9	8.2
0.21	0.283	Stratified	-	-	9.5	9.2	8.3
0.21	0.3	Stratified	-	-	9.3	9.4	8.7
0.21	0.31	Stratified	-	-	9.5	9.6	8.8
0.21	0.318	Stratified	-	-	9.3	9.4	8.8
0.21	0.336	Plug	3 έως 5	90	9	9.6	9.1
0.3	0.004	Stratified	-	-	2.5	2.6	2.6
0.3	0.005	Stratified	-	-	2.4	2.6	2.6
0.3	0.01	Stratified	-	-	2.8	3	2.9
0.3	0.05	Stratified	-	-	4.4	4.6	4.4
0.3	0.1	Stratified	-	-	5.9	6	5.7
0.3	0.15	Stratified	-	-	7	7.1	6.6
0.3	0.2	Stratified	-	-	8.1	8.1	7.6
0.3	0.21	Stratified	-	-	8.3	8.3	7.7
0.3	0.23	Stratified	-	-	8.5	8.5	7.9
0.3	0.248	Stratified	-	-	8.5	8.7	8
0.3	0.2654	Stratified	-	-	9	9	8.3
0.3	0.274	Stratified	-	-	9	9	8.3
0.3	0.283	Stratified	-	-	9	9.1	8.4
0.3	0.3	Stratified	-	-	9.2	9.3	8.8
0.3	0.31	Stratified	-	-	9.3	9.3	8.9
0.3	0.318	Plug	2 έως 3	90	8.7	9.2	8.8
0.3	0.336	Plug	15	90	9.4	9.5	9
0.4	0.004	Stratified	-	-	2.7	2.8	2.7
0.4	0.005	Stratified	-	-	2.5	2.5	2.5
0.4	0.01	Stratified	-	-	2.6	2.8	2.7
0.4	0.05	Stratified	-	-	4.3	4.6	4.4
0.4	0.1	Stratified	-	-	6.1	6.2	5.8
0.4	0.15	Stratified	-	-	7	7	6.5

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

0.4	0.2	Stratified	-	-	7.9	7.9	7.4
0.4	0.21	Stratified	-	-	8.1	8.1	7.5
0.4	0.23	Stratified	-	-	8.3	8.3	7.8
0.4	0.248	Stratified	-	-	8.3	8.5	8
0.4	0.2654	Stratified	-	-	8.4	8.6	8.3
0.4	0.274	Stratified	-	-	8.6	8.7	8.3
0.4	0.283	Stratified	-	-	8.7	8.9	8.4
0.4	0.3	Stratified	-	-	8.9	9	8.8
0.4	0.31	Plug	3	90	9	9	8.8
0.4	0.318	Plug	13 έως 15	90	8.9	9	8.6
0.4	0.336	Plug	13 έως 15	60	8.9	9	8.8
0.5	0.004	Stratified	-	-	2.7	2.9	2.6
0.5	0.005	Stratified	-	-	2.5	2.7	2.7
0.5	0.01	Stratified	-	-	2.6	2.7	2.7
0.5	0.05	Stratified	-	-	4.2	4.4	4.2
0.5	0.1	Stratified	-	-	6.1	6.1	5.9
0.5	0.15	Stratified	-	-	7.2	7.1	6.8
0.5	0.2	Stratified	-	-	8.4	8.1	7.7
0.5	0.21	Stratified	-	-	8.3	8.1	7.6
0.5	0.23	Stratified	-	-	8.2	8.2	7.7
0.5	0.248	Stratified	-	-	8.5	8.4	8
0.5	0.2654	Stratified	-	-	8.5	8.6	8.1
0.5	0.274	Stratified	-	-	8.5	8.6	8.3
0.5	0.283	Stratified	-	-	8.6	8.6	8.4
0.5	0.3	Stratified	-	-	8.7	8.8	8.7
0.5	0.31	Plug	3	90	8.8	8.7	8.5
0.5	0.318	Plug	13 έως 15	70	8.8	8.8	8.9
0.5	0.336	Plug	13 έως 15	50	8.7	8.9	8.7
0.6	0.004	Stratified	-	-	2.6	2.7	2.5
0.6	0.005	Stratified	-	-	2.4	2.6	2.5
0.6	0.01	Stratified	-	-	2.6	2.8	2.7
0.6	0.05	Stratified	-	-	4.5	4.7	4.4
0.6	0.1	Stratified	-	-	6	6.1	5.7
0.6	0.15	Stratified	-	-	6.9	7	6.7
0.6	0.2	Stratified	-	-	7.7	7.9	7.4
0.6	0.21	Stratified	-	-	7.9	8.1	7.6
0.6	0.23	Stratified	-	-	8	8.2	7.8
0.6	0.248	Stratified	-	-	8.2	8.3	7.9
0.6	0.2654	Stratified	-	-	8.3	8.4	8.2
0.6	0.274	Stratified	-	-	8.3	8.3	8.2
0.6	0.283	Plug	13 έως 15	90	8.4	8.5	8.4
0.6	0.3	Plug	13 έως 15	60	8.4	8.5	8.2
0.6	0.31	Plug	13 έως 15	30	8.5	8.5	8.4
0.6	0.318	Plug	13 έως 15	30	8.5	8.7	8.5

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

0.6	0.336	Plug	13 έως 15	30	8.7	8.7	8.5
0.7	0.004	Stratified	-	-	2.3	2.5	2.5
0.7	0.005	Stratified	-	-	2.4	2.5	2.5
0.7	0.01	Stratified	-	-	2.6	2.7	2.7
0.7	0.05	Stratified	-	-	4.3	4.5	4.2
0.7	0.1	Stratified	-	-	5.8	6	5.6
0.7	0.15	Stratified	-	-	6.8	6.9	6.5
0.7	0.2	Stratified	-	-	7.4	7.6	7.2
0.7	0.21	Stratified	-	-	7.7	7.8	7.4
0.7	0.23	Stratified	-	-	7.8	7.9	7.7
0.7	0.248	Stratified	-	-	8	8	7.9
0.7	0.2654	Stratified	-	-	8.1	8.2	8.1
0.7	0.274	Plug	13 έως 15	50	8.2	8.4	8
0.7	0.283	Plug	13 έως 15	40	8.2	8.4	8
0.7	0.3	Plug	13 έως 15	30	8.3	8.2	8.1
0.7	0.31	Plug	13 έως 15	30	8.3	8.3	8.2
0.7	0.318	Plug	13 έως 15	30	8.4	8.5	8.2
0.7	0.336	Plug	13 έως 15	30	8	8.5	7.5
0.8	0.004	Stratified	-	-	2.5	2.6	2.6
0.8	0.005	Stratified	-	-	2.4	2.5	2.5
0.8	0.01	Stratified	-	-	2.5	2.8	2.7
0.8	0.05	Stratified	-	-	4	4.3	4.1
0.8	0.1	Stratified	-	-	5.7	5.9	5.6
0.8	0.15	Stratified	-	-	6.8	6.9	6.5
0.8	0.2	Stratified	-	-	7.5	7.6	7.3
0.8	0.21	Stratified	-	-	7.6	7.8	7.5
0.8	0.23	Stratified	-	-	7.7	7.8	7.7
0.8	0.248	Stratified	-	-	7.9	8	7.8
0.8	0.2654	Stratified	-	-	8	8.1	8.1
0.8	0.274	WAVY	-	-	8	8.2	8.1
0.8	0.283	Plug	13 έως 15	60	8	8.1	8.1
0.8	0.3	Plug	13 έως 15	40	8.2	8.2	8.2
0.8	0.31	Plug	13 έως 15	30	8.2	8.3	8.2
0.8	0.318	Plug	13 έως 15	30	8.2	8.3	8.2
0.8	0.336	Plug	13 έως 15	30	8.3	8.5	8.4
0.9	0.004	Stratified	-	-	2.3	2.5	2.5
0.9	0.005	Stratified	-	-	2.2	2.5	2.5
0.9	0.01	Stratified	-	-	2.3	2.5	2.5
0.9	0.05	Stratified	-	-	4	4.4	4.1
0.9	0.1	Stratified	-	-	5.6	5.8	5.5
0.9	0.15	Stratified	-	-	6.5	6.5	6.2
0.9	0.2	Stratified	-	-	6.8	7	7.2
0.9	0.21	Stratified	-	-	7.5	7.7	7.5
0.9	0.23	Stratified	-	-	7.6	7.7	7.6

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

0.9	0.248	Stratified	-	-	7.7	7.9	7.8
0.9	0.2654	Plug	15 έως 17	90	7.8	8	7.9
0.9	0.274	Plug	15 έως 17	60	8	8.1	7.9
0.9	0.283	Plug	15 έως 17	30	8	7.9	7.9
0.9	0.3	Plug	15 έως 17	30	8	8	8
0.9	0.31	Plug	15 έως 17	30	8.2	8	8.1
0.9	0.318	Plug	15 έως 17	30	8.2	8	8.1
0.9	0.336	Plug	15 έως 17	30	8.3	8.3	8.1
1	0.004	Stratified	-	-	2.7	2.9	2.7
1	0.005	Stratified	-	-	2.4	2.6	2.6
1	0.01	Stratified	-	-	2.4	2.7	2.7
1	0.05	Stratified	-	-	3.9	4.2	4.1
1	0.1	Stratified	-	-	5.6	5.8	5.6
1	0.15	Stratified	-	-	6.8	6.8	6.6
1	0.2	Stratified	-	-	7.3	7.5	7.3
1	0.21	Stratified	-	-	7.3	7.5	7.4
1	0.23	WAVY	-	-	7.5	7.6	7.6
1	0.248	Plug	14 έως 17	90	7.6	7.7	7.9
1	0.2654	Plug	14 έως 17	60	7.8	7.9	7.9
1	0.274	Plug	14 έως 17	60	7.8	7.9	8.1
1	0.283	Plug	14 έως 17	30	7.7	7.6	8
1	0.3	Plug	14 έως 17	30	7.9	8	8
1	0.31	Plug	14 έως 17	30	7.8	8	7.9
1	0.318	Plug	14 έως 17	30	8	8.1	8.1
1	0.336	Plug	14 έως 17	30	7.9	8.1	8.1
2	0.004	Stratified	-	-	1.5	2	2.2
2	0.005	Stratified	-	-	1.7	2	2.3
2	0.01	Stratified	-	-	1.8	2.6	3
2	0.05	Stratified	-	-	3.6	4.1	4.6
2	0.1	STRATIFIED->WAVY	-	-	4.6	5.1	5.7
2	0.15	WAVY->SLUG	19	-	5.1	5.3	6
2	0.2	SLUG	11 έως 19 (κυρίως 15)	30	5.6	5.3	6
2	0.21	SLUG	7 έως 16 (κυρίως 15)	30	5.6	5.4	6
2	0.23	SLUG	3 έως 10	30	5.6	5.7	6
2	0.248	SLUG	14 έως 18	30	5.7	6	6.5
2	0.2654	SLUG	10 έως 16	30	5.9	6	6.4
2	0.274	SLUG	8 έως 15	20	6	6.4	6.6
2	0.283	SLUG	7 έως 17	20	6.1	6.3	6.4
2	0.3	SLUG	7 έως 15	15	6.2	6.6	6.7
2	0.31	SLUG	7 έως 15	15	5.1	6.5	6.7
2	0.318	SLUG	7 έως 15	15	5	6.5	6.4
2	0.336	SLUG	7 έως 15	15	5.1	6.2	6.5
3	0.004	Stratified	-	-	1	1.2	2.2
3	0.005	STRATIFIED->WAVY	-	-	1	1.1	2

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

3	0.01	WAVY	-	-	1.6	2	2.8
3	0.05	WAVY	-	-	3	3	4
3	0.1	WAVY	-	-	3.8	4.1	4.5
3	0.15	WAVY->SLUG	19	-	4.6	4.6	4.6
3	0.2	SLUG	7, 12 έως 17	30	-	-	-
3	0.21	SLUG	9 έως 14 (κυρίως 10)	15-20	-	-	-
3	0.23	SLUG	8 έως 14 (κυρίως 8-9)	15-20	-	-	-
3	0.248	SLUG	4 έως 6, 8 έως 14	10	-	-	-
3	0.2654	SLUG	5 έως 14 (κυρίως 5-7)	10	-	-	-
3	0.274	SLUG	7 έως 13 (κυρίως 7-9)	10	-	-	-
3	0.283	SLUG	8 έως 14 (κυρίως 8-10)	10	-	-	-
3	0.3	SLUG	8 έως 14 (κυρίως 8-10)	10	-	-	-
3	0.31	SLUG	8 έως 14 (κυρίως 8-10)	10	-	-	-
3	0.318	SLUG	8 έως 14 (κυρίως 8-10)	10	-	-	-
3	0.336	SLUG	8 έως 14 (κυρίως 8-10)	10	-	-	-
4	0.004	Stratified	-	-	1.1	0.8	1
4	0.005	STRATIFIED->WAVY	-	-	1.1	0.8	1
4	0.01	WAVY	-	-	1.4	1.2	1.6
4	0.05	WAVY	-	-	-	-	-
4	0.1	WAVY	-	-	-	-	-
4	0.15	WAVY	-	-	-	-	-
4	0.2	SLUG	(κυρίως στην αρχή)	90	-	-	-
4	0.21	SLUG	(κυρίως στην αρχή)	90	-	-	-
4	0.23	SLUG	5 έως 7, 10 έως 12	40	-	-	-
4	0.248	SLUG	4 έως 5, 9 έως 10	40	-	-	-
4	0.2654	SLUG	5 έως 8	20-30	-	-	-
4	0.274	SLUG	2 έως 5, 8 έως 10	20-30	-	-	-
4	0.283	SLUG	8 έως 12 (κυρίως 9-11)	20-30	-	-	-
4	0.3	SLUG	8 έως 12 (κυρίως 9-11)	15-20	-	-	-
4	0.31	SLUG	8 έως 12 (κυρίως 9-11)	15-20	-	-	-
4	0.318	SLUG	8 έως 12 (κυρίως 9-11)	15-20	-	-	-
4	0.336	SLUG	8 έως 12 (κυρίως 9-11)	15-20	-	-	-
5	0.004	STRATIFIED	-	-	1.1	0.9	1.6
5	0.005	STRATIFIED	-	-	1.2	0.9	1.7
5	0.01	STRATIFIED->WAVY	-	-	1.4	1.4	2.1
5	0.05	WAVY	-	-	2.6	2.5	3.1
5	0.1	WAVY	-	-	-	-	-
5	0.15	WAVY	-	-	-	-	-
5	0.2	WAVY->SLUG	τέλος	-	-	-	-
5	0.21	SLUG	11 έως 14	60	-	-	-
5	0.23	SLUG	11 έως 14	60	-	-	-
5	0.248	SLUG	14 έως 17	40	-	-	-
5	0.2654	SLUG	8 έως 9, 11 έως 14	40	-	-	-
5	0.274	SLUG	8 έως 9, 10 έως 14	20-30	-	-	-

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

5	0.283	SLUG	8 έως 9, 10 έως 14	20-30	-	-	-
5	0.3	SLUG	6 έως 9, 11 έως 14	10 έως 20	-	-	-
5	0.31	SLUG	6 έως 9, 11 έως 14	10 έως 20	-	-	-
5	0.318	SLUG	6 έως 9, 11 έως 14	10 έως 20	-	-	-
5	0.336	SLUG	6 έως 9, 11 έως 14	10 έως 20	-	-	-
6	0.004	STRATIFIED	-	-	1	0.9	1.1
6	0.005	STRATIFIED	-	-	1.1	1	1.5
6	0.01	STRATIFIED->WAVY	-	-	1.4	1.3	2
6	0.05	WAVY	-	-	2.7	2.6	3
6	0.1	WAVY	-	-	-	-	-
6	0.15	WAVY	-	-	-	-	-
6	0.2	WAVY->SLUG	παντού (κυρίως 4-7)	-	-	-	-
6	0.21	SLUG	4 έως 6, 10 έως 12	40	-	-	-
6	0.23	SLUG	4 έως 6, 10 έως 12	40	-	-	-
6	0.248	SLUG	4 έως 6, 10 έως 12	20	-	-	-
6	0.2654	SLUG	3 έως 6, 11 έως 14	20	-	-	-
6	0.274	SLUG	3 έως 6, 11 έως 14	10 έως 15	-	-	-
6	0.283	SLUG	3 έως 6, 11 έως 14	10 έως 15	-	-	-
6	0.3	SLUG	3 έως 6, 11 έως 14	10 έως 15	-	-	-
6	0.31	SLUG	3 έως 6, 11 έως 14	10 έως 15	-	-	-
6	0.318	SLUG	3 έως 6, 11 έως 14	10 έως 15	-	-	-
6	0.336	SLUG	3 έως 7, 9 έως 12	10 έως 15	-	-	-
7	0.004	STRATIFIED	-	-	1	0.9	1
7	0.005	STRATIFIED	-	-	1.2	0.9	1.2
7	0.01	STRATIFIED->WAVY	-	-	1.5	1.4	1.6
7	0.05	WAVY	-	-	2.2	2.4	2.4
7	0.1	WAVY	-	-	-	-	-
7	0.15	WAVY->SLUG	τέλος	-	-	-	-
7	0.2	SLUG	15 έως 18	40	-	-	-
7	0.21	SLUG	14 έως 17	40	-	-	-
7	0.23	SLUG	3 έως 7, 11 έως 14	30	-	-	-
7	0.248	SLUG	6 έως 12 (κυρίως 7-10)	30	-	-	-
7	0.2654	SLUG	6 έως 12 (κυρίως 7-10)	30	-	-	-
7	0.274	SLUG	5 έως 9, 14 έως 17	10 έως 15	-	-	-
7	0.283	SLUG	5 έως 9, 10 έως 13	10 έως 15	-	-	-
7	0.3	SLUG	5 έως 9, 10 έως 13	10 έως 15	-	-	-
7	0.31	SLUG	5 έως 9, 10 έως 13	10 έως 15	-	-	-
7	0.318	SLUG	5 έως 9, 10 έως 13	10 έως 15	-	-	-
7	0.336	SLUG	5 έως 9, 10 έως 13	10 έως 15	-	-	-
8	0.004	STRATIFIED	-	-	1	0.9	0.7
8	0.005	STRATIFIED	-	-	1.1	0.9	0.7
8	0.01	STRATIFIED->WAVY	-	-	1.6	1.5	1.2
8	0.05	WAVY	-	-	2.2	2.3	2.4
8	0.1	WAVY	-	-	-	-	-

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38

8	0.15	WAVY	-	-	-	-	-
8	0.2	WAVY->SLUG	τέλος	-	-	-	-
8	0.21	SLUG	8 έως 10	60	-	-	-
8	0.23	SLUG	7 έως 9, 11 έως 14	50	-	-	-
8	0.248	SLUG	4 έως 7, 13 έως 16	40	-	-	-
8	0.2654	SLUG	4 έως 8, 12 έως 16	40	-	-	-
8	0.274	SLUG	4 έως 8, 12 έως 16	30	-	-	-
8	0.283	SLUG	4 έως 8, 12 έως 16	30	-	-	-
8	0.3	SLUG	4 έως 8, 12 έως 16	15 έως 20	-	-	-
8	0.31	SLUG	4 έως 8, 12 έως 16	15 έως 20	-	-	-
8	0.318	SLUG	4 έως 8, 12 έως 16	15 έως 20	-	-	-
8	0.336	SLUG	4 έως 8, 12 έως 16	15 έως 20	-	-	-
9	0.004	WAVY	-	-	1	0.7	0.7
9	0.005	WAVY	-	-	1.1	0.8	0.7
9	0.01	WAVY	-	-	-	-	-
9	0.05	WAVY	-	-	-	-	-
9	0.1	WAVY	-	-	-	-	-
9	0.15	WAVY	-	-	-	-	-
9	0.2	WAVY	-	-	-	-	-
9	0.21	WAVY->SLUG	παντού	-	-	-	-
9	0.23	SLUG	15 έως 18	40-50	-	-	-
9	0.248	SLUG	-	-	-	-	-

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
02/05/2026 08:02:07 EEST - 216.73.217.38