

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ - ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## **ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

---

***Επίδραση των Φυσικών Ιδιοτήτων των Ρευστών  
στη Διφασική Ροή Υγρού-Αερίου σε Οριζόντιους  
και Σχεδόν Οριζόντιους Αγωγούς***

---

**Χριστίνα Τζώτζη**

*Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός, Α.Π.Θ.  
Μ.Δ.Ε., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Π.Θ.*

---

ΒΟΛΟΣ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2009

© 2009 Χριστίνα Τζώτζη

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

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	<b>Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος</b> Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	<b>Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου</b> Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	<b>Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης</b> Καθηγητής Δημήτριος Βαλουγεώργης Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τέταρτος Εξεταστής	<b>Δρ. Νικόλαος Βλάχος</b> Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πέμπτος Εξεταστής	<b>Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής</b> Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Έκτος Εξεταστής	<b>Δρ. Σπυρίδων Παράς</b> Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Χημικών Μηχανικών Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Έβδομος Εξεταστής	<b>Δρ. Μιχαήλ Βλαχογιάννης</b> Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Μηχανολογίας Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου, Αναπληρωτή Καθηγητή Νίκο Ανδρίτσο για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για την υποστήριξη του όλα αυτά τα χρόνια, τόσο σε επιστημονικό επίπεδο όσο και σε προσωπικό, σε όλες τις δυσκολίες που προέκυψαν. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τόσο τον Καθηγητή Βασίλη Μποντόζογλου, όσο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Μιχάλη Βλαχογιάννη για τη βοήθεια που πάντα πρόθυμα μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Το Μιχάλη Βλαχογιάννη θέλω να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα και για τις πολύωρες συζητήσεις που κάναμε, οι οποίες με βοηθούσαν να συνεχίσω με νέα δύναμη.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, τους Καθηγητές Νίκο Βλάχο και Δημήτρη Βαλουγεώργη και τους Αναπληρωτές Καθηγητές Ερρίκο Σταπουντζή και Σπύρο Παρά, για το ενδιαφέρον που έδειξαν για τη διατριβή μου και για τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Επίκουρο Καθηγητή Θεόδωρο Καραπάντσιο για όλες τις μετρήσεις της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης που έκανε κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας.

Τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη θα ήθελα να εκφράσω και απέναντι στους γονείς μου, **Μιχάλη** και **Βάσω** για την πίστη τους σε εμένα, σε όλα μου τα βήματα όλα αυτά τα χρόνια. Σε όλη τη διάρκεια της εργασίας με υποστήριξαν όχι μόνο οικονομικά, χρηματοδοτώντας ουσιαστικά τη διατριβή, αλλά πολύ περισσότερο ηθικά που το χρειάζομαι και πολύ περισσότερο.

Τέλος, θα ήθελα ευχαριστήσω το Δρ. Βλάση Λεοντίδη, ο οποίος ουσιαστικά κατασκεύασε την πειραματική διάταξη, αλλά και αντιμετώπιζε όλα τα τυχόν κατασκευαστικά προβλήματα που εμφανίζονταν κατά καιρούς, με δυσάρεστες συνέπειες κάποια στιγμή για τη σωματική του ακεραιότητα. Κυρίως όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω **το σύντροφό μου Βλάση** για την υποστήριξη του στον αγώνα μας τα δύσκολα χρόνια που περάσαμε στο Βόλο. Ήταν για εμένα πάντα εκεί και αυτό μόνο ήταν αρκετό!

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΗ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΟΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΤΖΩΤΖΗ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2009

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Νικόλαος Ανδρίτσος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η γνώση του καθεστώτος ροής (flow regime) που επικρατεί μέσα σε έναν αγωγό κατά την ταυτόχρονη ροή υγρού και αερίου αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική πληροφορία, καθώς τα χαρακτηριστικά της ροής (πτώση πίεσης, συγκράτηση-holdup, μεταφορά μάζας ή θερμότητας κτλ.) εξαρτώνται από το καθεστώς ροής. Η δημιουργία ενός συγκεκριμένου καθεστώτος ροής εξαρτάται όχι μόνο από τις παροχές των δυο φάσεων και τις φυσικές ιδιότητές τους, αλλά και από την κλίση και τη διάμετρο του αγωγού.

Κατά την πειραματική μελέτη της διφασικής ροής χρησιμοποιείται συνήθως το σύστημα νερού-αέρα, ενώ σε γενικές γραμμές είναι περιορισμένες οι εργασίες που αναφέρονται στην επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στα καθεστώτα ροής, με εξαίρεση ίσως την επίδραση του ιξώδους του υγρού. Επίσης, οι περισσότεροι χάρτες καθεστώτων ροής που συναντώνται στη βιβλιογραφία αναφέρονται σε οριζόντιους ή σε κατακόρυφους αγωγούς. Περιορισμένες είναι σχετικά οι προσπάθειες που έχουν γίνει για την περιγραφή των περιοχών ροής σε κεκλιμένους αγωγούς, παρά την τεράστια σημασία τους, αφού σε όλες σχεδόν τις βιομηχανικές εφαρμογές οι αγωγοί αποκλίνουν, έστω και ελάχιστα, από το οριζόντιο επίπεδο.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συστηματική μελέτη της επίδρασης ορισμένων φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις διάφορες μεταπτώσεις από ένα καθεστώς ροής σε άλλο σε αγωγό διαμέτρου 2.4 cm και μήκους 12 m. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης (με τη χρήση CO<sub>2</sub> με  $\rho=1.81 \text{ kg/m}^3$  και He με  $\rho=0.167 \text{ kg/m}^3$ ) και της επιφανειακής τάσης (χρήση υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης,  $\sigma=35 \text{ mN/m}$ ). Πραγματοποιήθηκαν επίσης ορισμένα πειράματα με χρήση υδατικών διαλυμάτων κανονικής βουτανόλης και ισοπροπανόλης με  $\sigma\sim 50 \text{ mN/m}$ . Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μεταπτώσεις στα διάφορα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής, δηλ. της λείας διαστρωματωμένης ροής, της ροής με διδιάστατα κύματα (2-D) και της ροής με

κύματα Kelvin-Helmholtz (K-H). Η ταυτοποίηση των υποκαθεστώτων της διαστρωματωμένης ροής γίνεται κυρίως οπτικά και, σε ορισμένες περιπτώσεις, με στατιστική ανάλυση της χρονοσειράς του πάχους της υγρής στιβάδας. Παράλληλα, στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης της διαστρωματωμένης ροής. Σε παλαιότερη εργασία (Τζώτση, 2007), είχαν προταθεί ημι-θεωρητικές εξισώσεις για την περιγραφή των μεταπτώσεων σε ροή με 2-D και K-H κύματα, αλλά και συσχετισμοί για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής στη διεπιφάνεια. Στην παρούσα εργασία, με τη βοήθεια των νέων πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν, τόσο οι ημι-θεωρητικές εξισώσεις για την περιγραφή των μεταπτώσεων, όσο και οι συσχετισμοί για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής στη διεπιφάνεια βελτιώθηκαν.

Η πειραματική μελέτη έδειξε ότι η πυκνότητα της αέριας φάσης επηρεάζει έντονα τη μετάπτωση τόσο σε ροή με 2-D κύματα όσο και σε ροή με κύματα K-H. Η αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για τη μετάπτωση σε ροή με 2-D και K-H κύματα. Παράλληλα, μείωση της επιφανειακής τάσης (από 72 mN/m στα 35 mN/m) έχει ως αποτέλεσμα οι μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής να μετατοπίζονται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, με τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα να επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό. Οι μεταπτώσεις αυτές περιγράφονται αρκετά ικανοποιητικά από ημι-θεωρητικές εξισώσεις που προτείνονται στην παρούσα εργασία. Η μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων που προαναφέρθηκαν, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία τόσο με το κλασικό μοντέλο των Taitel and Dukler (1976), όσο και με το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (Andritsos et al, 1989). Η μετάπτωση ωστόσο από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή ακολουθεί την τάση που παρατηρείται στη διαστρωματωμένη ροή.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε επίσης και η επίδραση μικρής ανωφερούς και κατωφερούς κλίσης του αγωγού. Για ανωφερή ροή ακόμα και μια μικρή κλίση προς τα πάνω ευνοεί τη δημιουργία διαλείπουσας ροής, ενώ η διαστρωματωμένη ροή περιορίζεται σημαντικά και στο χάρτη καθεστώτων η περιοχή που παρατηρείται έχει το σχήμα «καμπάνας». Με αύξηση της κλίσης του αγωγού οι μεταπτώσεις σε ψευδο-διαλείπουσα και διαστρωματωμένη ροή μετατοπίζονται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Επίσης, στη διαστρωματωμένη ροή ταυτοποιήθηκαν δύο τύποι κυμάτων, διδιάστατα κύματα και κύματα Kelvin-Helmholtz. Παρατηρήθηκε επίσης ότι το κλασικό μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) είναι ικανό να προβλέψει ποιοτικά το σχήμα «καμπάνας» που αποκτά η διαστρωματωμένη ροή κατά τη ροή σε αγωγούς με ανωφερή κλίση. Παράλληλα, η προσέγγιση των Simmons and Hanratty (2001), η οποία χρησιμοποιεί τη ταχύτητα

αναστροφής, μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά τη μετάπτωση από διαλείπουσα σε διαστρωματωμένη ροή.

Σε αγωγούς με μικρή κλίση προς τα κάτω η μορφή του χάρτη καθεστώτων ροής δε μεταβάλλεται σε σύγκριση με το χάρτη για οριζόντιο αγωγό. Οι μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής είναι μετατοπισμένες σε υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, ενώ η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την κατωφερή ροή το πάχος της υγρής στιβάδας μειώνεται λόγω της δράσης της βαρύτητας και κατά συνέπεια μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης απαιτούνται ώστε να λάβει χώρα η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Δύο τύποι κυμάτων, διδιάστατα και Kelvin-Helmholtz κύματα ταυτοποιήθηκαν και κατά τη διασπαστική ροή σε αγωγό με κατωφερή κλίση. Οι πρώτες διαταραχές στη διεπιφάνεια κατά τη ροή αυτή οφείλονται ωστόσο στη δράση της βαρύτητας και όχι στη διάτμηση της αέριας φάσης. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα μπορεί να περιγραφεί αρκετά ικανοποιητικά από το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986a), αν ληφθεί υπόψη και η επίδραση της βαρύτητας που είχε αγνοηθεί στο αρχικό μοντέλο. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης και της επιφανειακής τάσης κεκλιμένους αγωγούς επηρεάζουν τις μεταπτώσεις με τρόπο παρόμοιο με τη ροή σε οριζόντιο αγωγό.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι η πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής εντοπίζεται αρχικά στη συστηματική μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας της αέριας φάσης, αλλά και της επιφανειακής τάσης στις μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής. Η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης δεν έχει μελετηθεί σχεδόν καθόλου από προηγούμενους ερευνητές, ενώ τα συμπεράσματα για την επίδραση της επιφανειακής τάσης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία είναι συγκεχυμένα, καθώς τις περισσότερες φορές αναφέρονται στη χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών (π.χ. Weisman et al., 1979). Επίσης, πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής αποτελεί και η συστηματική μελέτη της επίδρασης μικρής κλίσης του αγωγού, αλλά και των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στη διαστρωματωμένη ροή και στα χαρακτηριστικά των κυμάτων, αφού είναι περιορισμένες οι εργασίες που αναφέρονται στη διαστρωματωμένη ροή σε κεκλιμένους αγωγούς (Lioumbas et al. 2005 και Lioumbas et al., 2009)

## ABSTRACT

---

Gas-liquid flow in horizontal or near horizontal pipelines is of considerable importance to many industrial applications. When gas and liquid flow cocurrently in a horizontal or near horizontal pipe various flow patterns form depending upon many parameters, such as flow conditions, physical properties, pipe size and pipe inclination. The prediction of flow patterns is a major problem in two-phase flow, since several design parameters, such as pressure drop and liquid holdup, are strongly dependent on the flow pattern. Generally, there is a gradual change from one flow pattern to another with changing flow rates, although the transition from stratified to slug flow is an abrupt one. Within the transitional zones, the flow behaviour exhibits characteristics of the flow patterns on both sides of the transition. Although extensive research on flow patterns has been conducted, most of this research has been concentrated on horizontal pipes with air-water or air-water+glycerol as working fluids and limited work has been reported for inclined pipes.

This study aims at investigating the effect of several fluid properties on flow pattern transitions in horizontal and near-horizontal pipes. The fluids chosen for the experiments were selected in such a way to allow changes in one property without affecting considerably other properties. Experiments have been conducted in a 12.75 m long test loop with inside diameter of 24 mm and pipe inclinations of 0.25°, 0.5° and 1° upward and downward. The effect of gas density was examined using CO<sub>2</sub> (density at room conditions 1.81 kg/m<sup>3</sup>) and He gases ( $\rho=0.166$  kg/m<sup>3</sup>) and the effect of surface tension using an aqueous solution of normal butanol ( $\sigma=35$  mN/m) as liquid phase. The various transitions were identified visually and by statistical analysis of film height and pressure drop measurements. Moreover, in the present study improved semi-theoretical expressions were developed for the transitions in the stratified region. Also, during this study improved relations for the interfacial friction factor were proposed. The transition correlations and the correlations for the interfacial friction factor agree reasonably well with existing and the new data.

It was found that the gas density strongly affects the transition to 2-D (two-dimensional) and K-H (Kelvin-Helmholtz) waves. An increase in gas density (CO<sub>2</sub>-water system) results in the decrease of gas velocities required for the transitions to 2-D and K-H wave regions. Both transitions can be described quite well using semi-theoretical correlations proposed in this work. It is of interest to note that the only unchanged transition in the flow map is that from stratified to slug flow, although the slug-to-pseudo



slug transition is affected by the gas density. The former behaviour is rather consistent with predictions by the Taitel-Dukler model (Taitel and Dukler, 1976) and by a modified Lin-Hanratty model (Andritsos et al, 1989).

A decrease of the surface tension (from 72 mN/m to 35 mN/m) causes the transitions to 2-D and to K-H waves to be shifted to lower superficial gas velocities. The effect seems to be stronger for the 2-D waves. As before, the transition from stratified to slug flow is not affected by a change in surface tension. Both the above transition and the transition to K-H waves are described adequately by the semi-theoretical approach proposed in this work.

The present study deals also with the effect of small upward and downward inclinations on flow pattern transitions. For upward flows, even a small inclination can cause severe slugging and the stratified region takes the form of a bell-shaped area. The transitions to slug, pseudo-slug and stratified regions were shifted to higher gas velocities as the inclination angle increases. In stratified region two different types of waves were identified, which retain the 2-D and K-H wave characteristics observed in horizontal flow. The Taitel-Dukler model was found to describe fairly well the bell-shaped stratified region. In addition, an attempt was made to describe the experimental transition from intermittent to stratified flow using the flow reversal velocity as proposed by Simmons and Hanratty (2001) with rather satisfactory results.

In downward flows, waves are generated not only due to the gas action at the interface, but also due to gravity. The intermittent region shrinks considerably and stratified flow regime expands, since higher liquid flow rates are necessary to establish a critical film height leading to slugging. Two different types of waves (2-D and K-H) can be also identified in this case. It turns out that although the transition to 2-D waves is shifted to lower superficial gas velocities, the transition to K-H wave region is not as strongly affected. It was also observed that the transition to K-H waves and slug flow can be described by Lin and Hanraty (1986) modified model fairly well, when the effect of gravity is taken under consideration.

Moreover the effect of gas density and surface tension was examined using CO<sub>2</sub> and butanol solution ( $\sigma=35$  mN/m) as working fluids. It was found that both gas density and surface tension affect the transitions in inclined pipes in a similar way as in horizontal flow.

Στο Βλάση για τη συμπαράσταση  
του όλα αυτά τα χρόνια...

---

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	v
ABSTRACT .....	viii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	xiv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xxiv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ .....	xxvi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	6
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	6
2.1 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιους αγωγούς.....	6
2.2 Εξισώσεις που διέπουν τη διαστρωματωμένη ροή .....	10
2.3 Μηχανισμοί μετάπτωσης στα διάφορα καθεστώτα ροής .....	13
2.4 Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στα καθεστώτα ροής .....	16
2.5 Επίδραση της κλίσης του αγωγού .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	27
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	27
3.1 Πειραματική διάταξη .....	27
3.2 Μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας .....	29
3.3 Μέτρηση της πτώσης πίεσης .....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	39
4. ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ .....	39
4.1 Εισαγωγή .....	39
4.2 Μέθοδοι ταυτοποίησης καθεστώτων ροής .....	39
4.3 Μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία .....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	53
5. ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ.....	53
5.1 Εισαγωγή .....	53

5.2. Μηχανισμοί μετάπτωσης και σχεδιαστικές εξισώσεις .....	54
5.3 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων .....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>68</b>
<b>6.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ .....</b>	<b>68</b>
6.1 Εισαγωγή .....	68
6.2 Επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης .....	70
6.3 Επίδραση της επιφανειακής τάσης.....	74
6.4 Χαρακτηριστικά κυμάτων κατά τη μετάπτωση σε ροή με κύματα Κ-Η .....	78
6.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	85
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....</b>	<b>89</b>
<b>7. ΚΑΤΩΦΕΡΗΣ ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ .....</b>	<b>89</b>
7.1 Εισαγωγή .....	89
7.2 Επίδραση κατωφερούς κλίσης του αγωγού στους χάρτες καθεστώτων ροής .....	90
7.3 Επίδραση φυσικών ιδιοτήτων .....	96
7.4 Χαρακτηριστικά των κυμάτων.....	99
7.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	108
7.6 Πτώση πίεσης κατά τη διφασική ροή σε αγωγό με κατηφορική κλίση ....	117
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.....</b>	<b>123</b>
<b>8.ΑΝΩΦΕΡΗΣ ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ .....</b>	<b>123</b>
8.1 Εισαγωγή .....	123
8.2 Χάρτες καθεστώτων ροής-Επίδραση ανωφερούς κλίσης του αγωγού .....	124
8.3 Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών .....	130
8.4 Χαρακτηριστικά των κυμάτων.....	134
8.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	143
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.....</b>	<b>152</b>
<b>9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>152</b>
9.1 Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων στις μεταπτώσεις στα καθεστώτα ροής .....	152
9.2 Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων στα χαρακτηριστικά των κυμάτων ....	154
9.3 Ροή με κατωφερή κλίση του αγωγού .....	155
9.4 Ροή με ανωφερή κλίση του αγωγού.....	155
9.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	156

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>158</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>165</b>
<b>Π.1 Βαθμονόμηση Μετρητικών Οργάνων .....</b>	<b>166</b>
<b>Π.2 Πίνακες Αναλυτικών Αποτελεσμάτων .....</b>	<b>173</b>
<b>ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ.....</b>	<b>234</b>

---

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

Σχήμα 2.1. Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό ...	8
Σχήμα 2.2. Είδη κυμάτων στη διαστρωματωμένη ροή νερού αέρα σε αγωγό διαμέτρου 0.024 m.....	10
Σχήμα 2.3. Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό σε συνθήκες απουσίας βαρύτητας.....	11
Σχήμα 2.4 Διαστρωματωμένη διφασική ροή μέσα σε αγωγό .....	12
Σχήμα 2.5 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού προστασίας (Jeffreys, 1925)	15
Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της αστάθειας Kelvin-Helmholtz .....	15
Σχήμα 2.7 Ροή με κλίση του αγωγού .....	19
Σχήμα 3.1 Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης.....	30
Σχήμα 3.2 Μετρητικό στοιχείο ζεύγους παράλληλων συρμάτων και σύνδεση με αναλυτή σήματος.....	32
Σχήμα 3.3 Χρονική εξέλιξη πάχους υγρής στιβάδας για σύστημα νερού-αέρα σε $u_{GS}=1.98$ m/s και $u_{LS}=0.003$ m/s.....	33
Σχήμα 3.4 Χρονική εξέλιξη πάχους υγρής στιβάδας για σύστημα νερού-αέρα σε $u_{GS}=6.6$ m/s και $u_{LS}=0.002$ m/s .....	34
Σχήμα 3.5 Σύγκριση πειραματικών τιμών του συντελεστή τριβής για μονοφασική ροή νερού (γεμάτα σύμβολα) και αέρα (κενά σύμβολα) και σύγκριση με τη σχέση Blasius .....	37
Σχήμα 4.1 Διακυμάνσεις της πτώσης πίεσης σε διάφορα καθεστώτα ροής (Weisman et al, 1979).....	41
Σχήμα 4.2 Σχηματική παράσταση του συστήματος που προτάθηκε από τους Barnea et al. (1980) .....	42
Σχήμα 4.3 Τάση εξόδου κατά τη διαστρωματωμένη ροή από τον αισθητήρα 1C για τρεις ταχύτητες της αέριας φάσης (1.2, 3 και 4.5 m/s) .....	42
Σχήμα 4.4 Τάση εξόδου κατά τη δακτυλιοειδή ροή από τους αισθητήρες 1A (σήμα α) και 1B (σήμα b).....	43
Σχήμα 4.5 Τάση εξόδου κατά τη διαλείπουσα ροή από τον αισθητήρα 1C για δύο ταχύτητες της αέριας φάσης.....	43

Σχήμα 4.6 Πτώση πίεσης κατά τη διαλείπουσα ροή (αριστερά) και ψευδοδιαλείπουσα ροή (δεξιά) .....	44
Σχήμα 4.7 Ύψος και διακύμανση της υγρής στιβάδας στη διαστρωματωμένη ροή .....	45
Σχήμα 4.8 Φωτογραφική και σχηματική απεικόνιση των καθεστώτων ροής στο σύστημα νερού-πετρελαίου (Chakrabarti et al. 2007).....	46
Σχήμα 4.9 Συνάρτηση αυτό-συσχέτισης (α) και έτερο-συσχέτισης (β) για σύστημα νερού-αέρα με $u_{GS}=3$ m/s και $u_{LS}=0.042$ m/s για ροή με 2-D κύματα .....	47
Σχήμα 4.10 Συνάρτηση αυτό-συσχέτισης (α) και έτερο-συσχέτισης (β) για σύστημα νερού-αέρα με $u_{GS}=9.4$ m/s και $u_{LS}=0.042$ m/s για ροή με K- H κύματα .....	48
Σχήμα 4.11 Εξέλιξη των 2-D κυμάτων κατά μήκος του αγωγού για $u_{GS}=3$ m/s και $u_{LS}=0.042$ m/s .....	49
Σχήμα 4.12 Εξέλιξη των K-H κυμάτων κατά μήκος του αγωγού για $u_{GS}=13.92$ m/s και $u_{LS}=0.01168$ m/s.....	49
Σχήμα 4.13 Πάχος της υγρής φάσης κατά τη διαλείπουσα ροή για σύστημα νερού-αέρα με $u_{GS}=2.01$ m/s και $u_{LS}=0.072$ m/s .....	50
Σχήμα 4.14 Συνάρτηση ετεροσυσχέτισης για διαλείπουσα ροή .....	50
Σχήμα 4.15 Πάχος της υγρής φάσης κατά τη ψευδο-διαλείπουσα ροή για σύστημα νερού-αέρα με $u_{GS}=6.7$ m/s και $u_{LS}=0.072$ m/s .....	51
Σχήμα 4.16 Συνάρτηση ετεροσυσχέτισης για ψευδο-διαλείπουσα ροή .....	51
Σχήμα 4.17 Ταχύτητες υγρών μαζών σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή σε σύγκριση με τη φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης για σύστημα νερό-αέρα σε $u_{LS}=0.15$ m/s.....	52
Σχήμα 5.1 Καμπύλη ευστάθειας για σύστημα νερού-αέρα ( $\sigma=0.072$ N/m) και υδατικό διάλυμα βουτανόλης-αέρα ( $\sigma=36$ mN/m) για $h/D=0.2$ .....	56
Σχήμα 5.2 Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με διδιάστατα κύματα .....	57
Σχήμα 5.3. Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με κύματα Kelvin-Helmholtz.....	59
Σχήμα 5.4. Σύγκριση πειραματικών τιμών για το συντελεστή $f_L$ με αυτές που προκύπτουν από το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία .....	61

Σχήμα 5.5. Σύγκριση πειραματικών τιμών για το συντελεστή $f_L$ με αυτές που προκύπτουν από το συσχετισμό των Spedding and Hand (1997) ....	61
Σχήμα 5.6 Σύγκριση των τιμών του λόγου $f_i/f_G$ που υπολογίζονται με του συσχετισμούς που προτείνονται με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> . (Οι διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται σε ακρίβεια $\pm 20\%$ .) .....	62
Σχήμα 5.7 Σύγκριση της πτώσης πίεσης που υπολογίζεται με το μοντέλο που προτείνεται με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> (διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται σε ακρίβεια $\pm 10\%$ ) .....	63
Σχήμα 5.8 Σύγκριση των τιμών του λόγου $f_i/f_G$ που υπολογίζονται με του συσχετισμούς που προτείνονται με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=35$ mN/m)-αέρα .....	64
Σχήμα 5.9 Σύγκριση της πτώσης πίεσης που υπολογίζεται με το μοντέλο που προτείνεται με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=35$ mN/m)-αέρα (διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται σε ακρίβεια $\pm 10\%$ ) .....	64
Σχήμα 5.10 Κατανομή συνάρτησης πιθανότητα Gauss για το σφάλμα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα για το λόγο $f_i/f_G$ .....	65
Σχήμα 5.11 Κατανομή συνάρτησης πιθανότητα Gauss για το σφάλμα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα για την πτώση πίεσης .....	66
Σχήμα 6.1 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> .....	70
Σχήμα 6.2 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-He .....	71
Σχήμα 6.3 Σύγκριση περιοχών ροής για σύστημα νερό-αέρας (συνεχείς γραμμές) και CO <sub>2</sub> -νερό (διακεκομμένες γραμμές) .....	72
Σχήμα 6.4 Σύγκριση περιοχών ροής για σύστημα νερό-αέρας (συνεχείς γραμμές) και He-νερό (διακεκομμένες γραμμές) .....	72
Σχήμα 6.5 Χάρτης περιοχών ροής με τροποποιημένους άξονες για το σύστημα νερό-αέρας και νερό-CO <sub>2</sub> και σύγκριση με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες .....	73
Σχήμα 6.6 Χάρτης περιοχών ροής με τροποποιημένους άξονες για το σύστημα νερό-αέρας και νερό-He και σύγκριση με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες .....	74



Σχήμα 6.7 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα .....	75
Σχήμα 6.8 Σύγκριση περιοχών ροής για σύστημα νερό-αέρας (συνεχείς γραμμές) και υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα (διακεκομμένες γραμμές) .....	75
Σχήμα 6.9 Χρονική εξέλιξη του πάχους της υγρής στιβάδας με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για $u_{LS}=0.00515$ m/s....	77
Σχήμα 6.10 Χάρτης περιοχών ροής με τροποποιημένους άξονες για το σύστημα νερό-αέρας και υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα και σύγκριση με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες.....	78
Σχήμα 6.11 Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα νερού-αέρα για $u_{LS}=0.0116$ m/s .....	79
Σχήμα 6.12 K-H κύματα για σύστημα νερού-αέρα για $u_{GS}=12.4$ m/s και $u_{LS}=0.022$ m/s .....	80
Σχήμα 6.13 Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για $u_{LS}=0.0116$ m/s πριν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα .....	81
Σχήμα 6.14 Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για $u_{LS}=0.0116$ m/s στη ζώνη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα.....	82
Σχήμα 6.15 Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για $u_{LS}=0.0116$ m/s σε ροή με K-H κύματα .....	82
Σχήμα 6.16 Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα CO <sub>2</sub> -νερού για $u_{LS}=0.0097$ m/s.....	83
Σχήμα 6.17 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (αριστερά) και φάσμα πλάτους κύματος (δεξιά) για σύστημα νερού-αέρα .....	84
Σχήμα 6.18 Πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σε συνάρτηση με τη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης.....	85
Σχήμα 6.19 Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σύμφωνα με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) .....	86
Σχήμα 6.20 Σύγκριση των πειραματικών τιμών του πάχους της υγρής φάσης στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες .....	87
Σχήμα 6.21 Ημι-θεωρητική καμπύλη μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα .....	87

Σχήμα 7.1 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$	90
Σχήμα 7.2 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε κλίση $\varphi=1^\circ$	91
Σχήμα 7.3 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$	91
Σχήμα 7.4 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε κλίση $\varphi=1^\circ$	92
Σχήμα 7.5 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$	92
Σχήμα 7.6 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση $\varphi=1^\circ$	93
Σχήμα 7.7 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση $\varphi=1^\circ$ (συνεχείς κόκκινες γραμμές)	94
Σχήμα 7.8 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε οριζόντιο αγωγό (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση $\varphi=1^\circ$ (συνεχείς κόκκινες γραμμές)	94
Σχήμα 7.9 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε οριζόντιο αγωγό (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση $\varphi=1^\circ$ (συνεχείς κόκκινες γραμμές)	95
Σχήμα 7.10 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα (συνεχείς γραμμές) και νερού-CO <sub>2</sub> σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ (διακεκομμένες γραμμές)	96
Σχήμα 7.11 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα (συνεχείς γραμμές) και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση $\varphi=1^\circ$ (διακεκομμένες γραμμές)	97
Σχήμα 7.12 Χάρτης περιοχών ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού-CO <sub>2</sub> με τροποποιημένους άξονες	98
Σχήμα 7.13 Χάρτης περιοχών ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα με τροποποιημένους άξονες	98
Σχήμα 7.14 Τύποι κυμάτων για το σύστημα σε $u_{LS}=0.0116$ m/s νερού-CO <sub>2</sub> και $\varphi=1^\circ$	100

Σχήμα 7.15 Ανάπτυξη των κυμάτων για σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> για $u_{LS}=0.0116$ m/s και κλίση $\varphi=1^\circ$ .....	101
Σχήμα 7.16 Τύποι κυμάτων για το σύστημα σε $u_{LS}=0.0116$ m/s υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα και $\varphi=1^\circ$ .....	102
Σχήμα 7.17 Χρονική εξέλιξη των κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για $u_{LS}=0.0116$ m/s και κλίση $\varphi=1^\circ$ ..	103
Σχήμα 7.18 Χωρική εξέλιξη των κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για $u_{LS}=0.0116$ m/s και κλίση $\varphi=1^\circ$ ..	104
Σχήμα 7.19 Πλάτος των κυμάτων για κλίση $\varphi=1^\circ$ σε $u_{LS}=0.0116$ m/s .....	105
Σχήμα 7.20 Υπολογισμός του πλάτους των κυμάτων για κλίση $\varphi=1^\circ$ σε $u_{GS}=9.43$ m/s και $u_{LS}=0.022$ m/s .....	105
Σχήμα 7.21 Ταχύτητα κυμάτων με αύξηση της κλίσης και της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για νερό-CO <sub>2</sub> για $u_{LS}=0.0116$ m/s ....	106
Σχήμα 7.22 Ταχύτητα κυμάτων με αύξηση της κλίσης και της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα για $u_{LS}=0.0116$ m/s .....	106
Σχήμα 7.23 Μεταβολή του πλάτους των κυμάτων με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Lioumbas et al. 2005) .....	107
Σχήμα 7.24 Αριθμός Reynolds κατά τη δημιουργία των πρώτων κυμάτων στη διεπιφάνεια .....	109
Σχήμα 7.25 Πάχος της υγρής φάσης για το σύστημα νερού-αέρα (α) και νερού-CO <sub>2</sub> (β) κατά τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα .....	109
Σχήμα 7.26 Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα (α) και πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση (β) για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις .....	110
Σχήμα 7.27 Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα (α) και πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση (β) για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε διάφορες κλίσεις .....	110
Σχήμα 7.28 Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα (α) και πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση (β) για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε διάφορες κλίσεις .....	111

Σχήμα 7.29 Πάχος υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή για(α) νερό-αέρα, (β) νερό-CO <sub>2</sub> και (γ) υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα σε διάφορες κλίσεις .....	112
Σχήμα 7.30 Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986) για διάφορες κλίσεις για σύστημα νερού-αέρα .....	113
Σχήμα 7.31 Σύγκριση των πειραματικών τιμών με το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986) για το σύστημα νερού-αέρα σε $\varphi=0.25^\circ$ .	113
Σχήμα 7.32 Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986) για διάφορες κλίσεις για το σύστημα νερού-αέρα λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα των κυμάτων .....	114
Σχήμα 7.33 Σύγκριση των πειραματικών μεταπτώσεων με τις μεταπτώσεις από το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986) για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις .....	115
Σχήμα 7.34 Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H σύμφωνα με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1975) για διάφορες κλίσεις για το σύστημα νερού-αέρα .....	116
Σχήμα 7.35 Πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή με αύξηση της γωνίας κλίσης (Woods et al. 2008).....	117
Σχήμα 7.36 Σύγκριση πειραματικών τιμών λόγου $f_i/f_G$ με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ .....	118
Σχήμα 7.37 Σύγκριση πειραματικών τιμών λόγου $f_i/f_G$ με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση $\varphi=1^\circ$ .....	118
Σχήμα 7.38 Σύγκριση πειραματικών τιμών λόγου $f_i/f_G$ με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ .....	119
Σχήμα 7.39 Σύγκριση πειραματικών τιμών λόγου $f_i/f_G$ με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε κλίση $\varphi=1^\circ$ .....	119

Σχήμα 7.40 Σύγκριση πειραματικών τιμών $dP/dx$ με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ ....	120
Σχήμα 7.41 Σύγκριση πειραματικών τιμών $dP/dx$ με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση $\varphi=1^\circ$ .....	121
Σχήμα 7.42 Σύγκριση πειραματικών τιμών $dP/dx$ με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού- $CO_2$ σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ .....	121
Σχήμα 7.43 Σύγκριση πειραματικών τιμών $dP/dx$ με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού- $CO_2$ σε κλίση $\varphi=1^\circ$ .....	122
Σχήμα 8.1 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε $\varphi=0.25^\circ$ ...	124
Σχήμα 8.2 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε $\varphi=0.55^\circ$ ...	125
Σχήμα 8.3 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε $\varphi=1^\circ$ .....	125
Σχήμα 8.4 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $CO_2$ σε $\varphi=0.25^\circ$ .....	126
Σχήμα 8.5 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $CO_2$ σε $\varphi=0.55^\circ$ .....	126
Σχήμα 8.6 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $CO_2$ σε $\varphi=1^\circ$ .....	127
Σχήμα 8.7 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε $\varphi=0.55^\circ$ .....	127
Σχήμα 8.8 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε $\varphi=1^\circ$ .....	128
Σχήμα 8.9 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση $\varphi=0.55^\circ$ (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση $\varphi=1^\circ$ (συνεχείς κόκκινες γραμμές) .....	129
Σχήμα 8.10 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού- $CO_2$ σε κλίση $\varphi=0.25^\circ$ (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση $\varphi=0.55^\circ$ (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση $\varphi=1^\circ$ (συνεχείς κόκκινες γραμμές) .....	129
Σχήμα 8.10 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση $\varphi=0.55^\circ$ (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση $\varphi=1^\circ$ (συνεχείς κόκκινες γραμμές) .....	130
Σχήμα 8.11 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα (συνεχείς γραμμές) και νερού- $CO_2$ σε κλίση $\varphi=1^\circ$ (διακεκομμένες γραμμές) .	131
Σχήμα 8.12 Χάρτης περιοχών ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $CO_2$ με τροποποιημένους άξονες σε $\varphi=1^\circ$ .....	132

Σχήμα 8.13 Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα (συνεχείς γραμμές) και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση $\varphi=0.55^\circ$ (διακεκομμένες γραμμές) .....	133
Σχήμα 8.14 Χάρτης περιοχών ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα με τροποποιημένους άξονες σε κλίση $\varphi=0.55^\circ$ .....	133
Σχήμα 8.15 2-D κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή σε αγωγό με ανωφερή για το σύστημα υδατικού διαλύματος γλυκερίνης(46 cP)-αέρα σε $u_{LS}=0,0041$ m/s και $u_{GS}=6.48$ m/s σε κλίση $\varphi=1^\circ$ .....	134
Σχήμα 8.16 2-D κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή σε αγωγό με ανωφερή για το σύστημα υδατικού διαλύματος γλυκερίνης (46 cP)-αέρα σε $u_{LS}=0.00101$ m/s και $u_{GS}=13.046$ m/s σε κλίση $\varphi=1^\circ$ .....	135
Σχήμα 8.17 Κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή για το σύστημα νερού-αέρα σε $u_{LS}=0.0078$ m/s και $\varphi=0.25^\circ$ .....	136
Σχήμα 8.18 Χρονική αποτύπωση των 2-D κυμάτων σε δύο διαφορετικές θέσεις μέσα στον αγωγό για το σύστημα νερού-αέρα σε $u_{GS}=6.63$ m/s και $u_{LS}=0.0078$ m/s σε $\varphi=0.25^\circ$ .....	137
Σχήμα 8.19 Κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε $u_{LS}=0.004$ m/s και $\varphi=0.55^\circ$ .....	138
Σχήμα 8.20 Συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης (I) και ετεροσυσχέτισης (II) για 2-D ( $u_{GS}=9.4$ m/s) και K-H κύματα ( $u_{GS}=12.3$ m/s) για σύστημα νερού-αέρα σε $\varphi=0.25^\circ$ και $u_{LS}=0.0078$ m/s .....	139
Σχήμα 8.21 Πλάτος των κυμάτων για σύστημα νερού-αέρα σε $\varphi=0.25^\circ$ με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης .....	139
Σχήμα 8.22 Πλάτος των κυμάτων για σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε $\varphi=0.55^\circ$ με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης .....	140
Σχήμα 8.23 Κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε $u_{LS}=0.0116$ m/s και $\varphi=-0.55^\circ$ .....	141
Σχήμα 8.24 Πλάτος των κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε $\varphi=0.55$ και $1^\circ$ με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης .....	142

Σχήμα 8.25 Ταχύτητες αναστροφής για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις .....	143
Σχήμα 8.26 Ταχύτητες αναστροφής για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε διάφορες κλίσεις .....	144
Σχήμα 8.27 Πειραματικές ταχύτητες μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις .....	144
Σχήμα 8.28 Πάχος της υγρής φάσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις.....	145
Σχήμα 8.29 Μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού-αέρα ...	145
Σχήμα 8.30 Μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> ....	146
Σχήμα 8.31 Πειραματικές ταχύτητες μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε διάφορες κλίσεις .....	146
Σχήμα 8.32 Πάχος της υγρής φάσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε διάφορες κλίσεις .....	147
Σχήμα 8.33 Μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα.....	147
Σχήμα 8.34 Καμπύλες μετάπτωσης για το σύστημα νερού-αέρα από το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986a) .....	148
Σχήμα 8.35 Καμπύλες μετάπτωσης για το σύστημα νερού-αέρα από το κλασσικό μοντέλο των Taitel and Dukler (1976a) .....	149
Σχήμα 8.36 Σύγκριση χάρτη καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση 0.25° με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) και καμπύλη ταχύτητας αναστροφής της ροής .....	150
Σχήμα 8.37 Σύγκριση χάρτη καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση 0.55° με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) και καμπύλη ταχύτητας αναστροφής της ροής .....	150
Σχήμα 8.38 Σύγκριση χάρτη καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση 1° με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) και καμπύλη ταχύτητας αναστροφής της ροής .....	151
Σχήμα Π.1 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R3 (μικρής παροχής) .....	167
Σχήμα Π.2 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R4 (μεσαίας παροχής) .....	167

Σχήμα Π.3 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R5 (μεγάλης παροχής) .....	167
Σχήμα Π.4 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R1 (μικρής παροχής) για αέρα	168
Σχήμα Π.5 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R2 (μεγάλης παροχής) για αέρα .....	168
Σχήμα Π.6 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R1 (μικρής παροχής) για CO <sub>2</sub> .	169
Σχήμα Π.7 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R2 (μεγάλης παροχής) για CO <sub>2</sub>	169
Σχήμα Π.8 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R1 (μικρής παροχής) για He ..	170
Σχήμα Π.9 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R2 (μεγάλης παροχής) για He	170
Σχήμα Π.10 Καμπύλη Βαθμονόμησης Μετρητικού 1-Ζεύγος 1 για μικρά (α) και μεγάλα πάχη υγρής στιβάδας.....	171
Σχήμα Π.11 Καμπύλη Βαθμονόμησης Μετρητικού 1-Ζεύγος 2 για μικρά (α) και μεγάλα πάχη υγρής στιβάδας.....	171
Σχήμα Π.12 Καμπύλη Βαθμονόμησης Μετρητικού 2-Ζεύγος 1 για μικρά (α) και μεγάλα πάχη υγρής στιβάδας.....	171
Σχήμα Π.13 Καμπύλη Βαθμονόμησης Μετρητικού 2-Ζεύγος 2 για μικρά (α) και μεγάλα πάχη υγρής στιβάδας.....	172

---

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

Πίνακας 2.1. Οι κυριότερες μελέτες διφασικής ροής υγρού αερίου σε κεκλιμένους αγωγούς .....	26
Πίνακας 3.1 Φυσικές ιδιότητες συστημάτων σε 20° C και 1 atm .....	37
Πίνακας 3.2 Πειραματικές Μετρήσεις.....	38
Πίνακας 5.1 Πειραματικά δεδομένα .....	67
Πίνακας Π.1 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό.....	174
Πίνακας Π.2 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε οριζόντιο αγωγό.....	181
Πίνακας Π.3 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε οριζόντιο αγωγό.....	186



Πίνακας Π.4 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε ανωφερή κλίση 0.25° .....	190
Πίνακας Π.5 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε ανωφερή κλίση 0.5° .....	194
Πίνακας Π.6 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε ανωφερή κλίση 1° .....	198
Πίνακας Π.7 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε κατωφερή κλίση 0.25° .....	201
Πίνακας Π.8 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε κατωφερή κλίση 1° .....	204
Πίνακας Π.9 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε ανωφερή κλίση 0.25° .....	207
Πίνακας Π.10 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε ανωφερή κλίση 0.5° .....	211
Πίνακας Π.11 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε ανωφερή κλίση 1° .....	214
Πίνακας Π.12 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε κατωφερή κλίση 0.25° .....	218
Πίνακας Π.13 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-CO <sub>2</sub> σε κατωφερή κλίση 1° .....	221
Πίνακας Π.14 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε ανωφερή κλίση 0.5° .....	222
Πίνακας Π.15 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε ανωφερή κλίση 1° .....	225
Πίνακας Π.16 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κατωφερή κλίση 0.25° .....	228
Πίνακας Π.17 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κατωφερή κλίση 1° .....	231

---

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

---

A	: εμβαδόν επιφάνειας που καταλαμβάνει η κάθε φάση ( $m^2$ )
C	: ταχύτητα διάδοσης κύματος ( $m/s$ )
c	: ηλεκτρική αγωγιμότητα (S)
D	: διάμετρος αγωγού (m)
d	: διάμετρος συρμάτων (m)
D <sub>0</sub>	: απόσταση μεταξύ συρμάτων (m)
dP/dx	: πτώση πίεσης ανά μονάδα μήκους του αγωγού (Pa/m)
f	: συντελεστής τριβής
g	: επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ )
h	: ύψος υγρής φάσης στον αγωγό (m)
k	: κυματαριθμός ( $m^{-1}$ )
Q	: ογκομετρική παροχή κάθε φάσης ( $m^3/s$ )
Re	: αριθμός Reynolds
R <sub>xx</sub>	: συντελεστής αυτοσυσχέτισης
R <sub>xy</sub>	: συντελεστής ετεροσυσχέτισης
S	: περίμετρος (m)
s	: συντελεστής «προστασίας»
u	: μέση ταχύτητα ( $m/s$ )
u <sub>s</sub>	: φαινομενική ταχύτητα ( $m/s$ )

### Ελληνικοί Χαρακτήρες

α	: συγκράτηση
γ	: ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (S/m)
φ	: γωνία κλίσης του αγωγού (rad)
μ	: δυναμικό ιξώδες (Pa·s)
ν	: κινηματικό ιξώδες ( $m^2/s$ )
ρ	: πυκνότητα ( $kg/m^3$ )
σ	: επιφανειακή τάση (N/m)
τ	: διατμητική τάση ( $N/m^2$ )

### Δείκτες:

G	: αέρια φάση
i	: διεπιφάνεια
L	: υγρή φάση

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 1

---

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Η διφασική ροή υγρού-αερίου, δηλαδή η ταυτόχρονη ροή δυο φάσεων μέσα σε έναν αγωγό, αποτελεί μια από τις συνηθέστερες μορφές ροής που συναντώνται στη βιομηχανία. Οι διεργασίες συμπύκνωσης και εξάτμισης, η απορρόφηση και η απόσταξη, όπως επίσης και η μεταφορά πετρελαίου, φυσικού αερίου και γεωθερμικών ρευστών είναι ορισμένες από τις πολλές εφαρμογές της διφασικής ροής στη βιομηχανία.

Στη διφασική ροή υγρού-αερίου σημαντικός παράγοντας για την κατανόηση και την περιγραφή των χαρακτηριστικών της είναι η διάκριση των καθεστώτων (ή προτύπων) ροής, δηλαδή των γεωμετρικών μορφών που μπορεί να λάβει η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων μέσα στον αγωγό. Η δημιουργία ενός συγκεκριμένου καθεστώτος ροής σε αδιαβατικές συνθήκες εξαρτάται από τις συνθήκες ροής (παροχές και πίεση), τις φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων (πυκνότητα, ιξώδες, επιφανειακή τάση), καθώς και από τη γεωμετρία του αγωγού (σχήμα διατομής, κλίση, ισοδύναμη διάμετρος). Από την άλλη μεριά, ένα καθεστώς ροής μπορεί να επηρεάσει δραματικά τα χαρακτηριστικά της ροής και να προκαλέσει αξιοσημείωτη μεταβολή στην πτώση πίεσης με μικρή μεταβολή των παροχών. Βασικό ρόλο στη δημιουργία των καθεστώτων ροής σε οριζόντιους αγωγούς και σε αγωγούς με μικρή κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο διαδραματίζει η βαρύτητα, η οποία τείνει να συγκεντρώσει το υγρό στον πυθμένα του αγωγού και την αέρια φάση στο πάνω μέρος του.

Σε χαμηλές παροχές της υγρής και αέριας φάσης σε έναν οριζόντιο αγωγό επικρατεί η διαστρωματωμένη ροή, κατά την οποία η υγρή φάση ρέει στον πυθμένα του αγωγού και η

αέρια στο πάνω μέρος, ενώ στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων είναι δυνατόν να δημιουργηθούν κυματισμοί. Σε μεγάλες παροχές της υγρής φάσης δημιουργείται η διαλείπουσα ροή, η οποία χαρακτηρίζεται από την περιοδική διέλευση υγρών μαζών, ενώ σε αρκετά μεγάλες παροχές της υγρής φάσης κυριαρχεί η ροή με φυσαλίδες αερίου στη συνεχή υγρή φάση. Από την άλλη μεριά, σε μεγάλες παροχές της αέριας φάσης στον αγωγό κυριαρχεί η δακτυλιοειδής ροή, όπου η υγρή φάση κινείται περιφερειακά του αγωγού και η αέρια στο εσωτερικό του. Αναλυτική περιγραφή των καθεστώτων ροής που επικρατούν σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς καθώς και η σχηματική τους αναπαράσταση παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη της διαστρωματωμένης ροής και στα υποκαθεστώτα της.

Η διαστρωματωμένη ροή, αν και αποτελεί την απλούστερη μορφή διφασικής ροής, παρουσιάζει ωστόσο ιδιαιτερότητες και δυσκολίες κατά τη μελέτη της. Η ύπαρξη κυματισμών στη διεπιφάνεια καθώς επίσης η μορφή και το πλήθος αυτών των κυματισμών επηρεάζουν σημαντικά τους συντελεστές μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας μεταξύ των δύο φάσεων, όπως επίσης και την πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι κατά τη διφασική ροή υγρού-αερίου απαιτούνται μεγαλύτερα μήκη αγωγού ώστε η ροή να αναπτυχθεί πλήρως σε σχέση με τη μονοφασική ροή, ενώ όταν το μήκος του αγωγού είναι περιορισμένο αυτό δεν επιτυγχάνεται.

Η διφασική ροή σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς έχει μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία σαράντα χρόνια. Οι μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής, η κατασκευή χαρτών καθεστώτων ροής, όπως επίσης και η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης για αρκετούς ερευνητές, κυρίως σε οριζόντιους αγωγούς, τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά. Συστηματικά εξετάστηκε επίσης και η επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής. Ωστόσο, στην υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν έχει εξεταστεί με συστηματικό τρόπο η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης (ή της πίεσης τους συστήματος) και της επιφανειακής τάσης αναφορικά με τις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής και τη μελέτη των διαταραχών της διεπιφάνειας στη διαστρωματωμένη ροή.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας αλλά και η πρωτοτυπία της είναι η συστηματική πειραματική μελέτη της επίδρασης ορισμένων φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις διάφορες μεταπτώσεις από ένα καθεστώς ροής σε άλλο σε αγωγό διαμέτρου 2.4 cm και μήκους 12.75 m. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης και της επιφανειακής τάσης. Για τη μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας της αέριας φάσης χρησιμοποιήθηκε διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ , με πυκνότητα  $1.81 \text{ kg/m}^3$  στους  $25^\circ\text{C}$  και στη 1 atm) και ήλιο ( $\text{He}$ , με πυκνότητα  $0.167 \text{ kg/m}^3$  στους  $25^\circ\text{C}$  και στη 1 atm), ενώ για τη

μελέτη της επίδρασης της επιφανειακής τάσης χρησιμοποιήθηκε υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=35 \text{ mN/m}$ ). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μεταπτώσεις στα διάφορα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής, δηλαδή της λείας διαστρωματωμένης ροής, της ροής με διδιάστατα κύματα (2-D) και της ροής με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz (K-H). Μελετάται επίσης και η επίδραση της κλίσης του αγωγού στους χάρτες καθεστώτων ροής. Είναι γνωστό ότι με κλίση του αγωγού προς τα πάνω αυξάνεται το εύρος της διαλείπουσας ροής έναντι της διαστρωματωμένης, ενώ με κλίση του αγωγού προς τα κάτω αυξάνεται το εύρος της διαστρωματωμένης. Για το σκοπό αυτό, οι κλίσεις που μελετήθηκαν είναι  $0.25^\circ$ ,  $0.5^\circ$  και  $1^\circ$  προς τα πάνω και προς τα κάτω. Μελετήθηκε επίσης και η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών, αλλά και της κλίσης του αγωγού, στα χαρακτηριστικά των κυμάτων που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια.

Σε παλαιότερη εργασία (Τζώτζη, 2007) προτάθηκαν διαφορετικοί συσχετισμοί του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής για τα τρία υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής, όπως επίσης και ημι-θεωρητικές σχέσεις για τις δύο μεταπτώσεις, από τη λεία διαστρωματωμένη ροή στη ροή με διδιάστατα κύματα, και από την τελευταία στη ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz. Στην παρούσα εργασία διεξήχθησαν πειράματα με σκοπό την αξιολόγηση των παραπάνω συσχετισμών τόσο για τον υπολογισμό του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής, όσο και για την περιγραφή των μεταπτώσεων. Με βάση τα νέα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν το παλαιότερο μοντέλο βελτιώθηκε, ενώ πραγματοποιήθηκε και σύγκριση με διαθέσιμα μοντέλα της βιβλιογραφίας μέσω στατιστικής ανάλυσης.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση σε θέματα που πραγματεύεται αυτή η διατριβή. Αρχικά γίνεται λεπτομερής αναφορά στα καθεστώτα ροής που συναντώνται σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς, καθώς επίσης και οι εξισώσεις που διέπουν τη διαστρωματωμένη διφασική ροή. Ακολουθεί η βιβλιογραφία για την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών και της κλίσης του αγωγού στα χαρακτηριστικά της ροής. Αναφέρονται περιληπτικά οι χάρτες καθεστώτων ροής που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, ενώ γίνεται εκτενής αναφορά στους μηχανισμούς των μεταπτώσεων σε ροή με κύματα και σε διαλείπουσα ροή. Η αναφορά στους μηχανισμούς μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή κρίνεται απαραίτητη καθώς στην παρούσα μελέτη οι μεταπτώσεις σε ροή με κύματα K-H και σε διαλείπουσα ροή αντιμετωπίζονται ενιαία. Γίνεται επίσης αναφορά σε παλαιότερες εργασίες σχετικές με την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις μεταπτώσεις και στα χαρακτηριστικά της ροής. Τέλος, παρουσιάζονται κριτικά εργασίες που αναφέρονται στη ροή σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή τη πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Αναφέρονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά της, τα μετρητικά όργανα αλλά και οι πειραματικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονες μετρήσεις του ύψους της υγρής φάσης σε τέσσερα σημεία μέσα στον αγωγό με την αγωγιμομετρική μέθοδο και της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού με διαφορικό μεταλλάκτη πίεσης. Τα παραπάνω μεγέθη μετρήθηκαν τόσο κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό όσο και κατά τη ροή σε ελαφρά κεκλιμένους αγωγούς.

Ο τρόπος ταυτοποίησης του καθεστώτος ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό παρουσιάζεται στο τέταρτο κεφάλαιο. Καθώς η οπτική ταυτοποίηση του καθεστώτος είναι υποκειμενική, παρουσιάζονται κριτήρια που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί στην βιβλιογραφία, ώστε η ταυτοποίησή τους να είναι όσο το δυνατόν πιο αντικειμενική. Τέλος, παρουσιάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για το μετριασμό του παράγοντα της υποκειμενικότητας κατά την ταυτοποίηση των καθεστώτων ροής που επικρατούν μέσα στον αγωγό.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τελικοί συσχετισμοί, τόσο για την ταυτοποίηση της μετάπτωσης στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής, όσο και για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής στη διεπιφάνεια. Οι συσχετισμοί αυτοί έχουν βελτιωθεί σε σχέση με αυτούς που προτάθηκαν σε παλαιότερη εργασία (Τζώτζη, 2007) με τη βοήθεια των νέων πειραματικών δεδομένων που προέρχονται από την παρούσα διατριβή. Ακολουθεί αξιολόγηση των συσχετισμών αυτών με βάση τα νέα πειραματικά δεδομένα, αλλά και με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Επίσης, συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα του συνολικού μοντέλου που προτείνεται με άλλα διαθέσιμα μοντέλα από τη βιβλιογραφία.

Το έκτο κεφάλαιο περιέχει τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν στην επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης και της επιφανειακής τάσης στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής και στα χαρακτηριστικά των κυμάτων της διαστρωματωμένης ροής. Τονίζεται ότι με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης και μείωση της επιφανειακής τάσης αποσταθεροποιείται η διαστρωματωμένη ροή, ενώ η διαλείπουσα ροή δε φαίνεται να επηρεάζεται. Τέλος, παρουσιάζεται η επίδραση της επιφανειακής τάσης στα χαρακτηριστικά των κυμάτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα διφασικής ροής σε αγωγό με κατηφορική κλίση. Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προκύπτει ότι ακόμη και μία μικρή κλίση του αγωγού επιδρά σημαντικά στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής καθώς επίσης και στα χαρακτηριστικά των κυμάτων της διαστρωματωμένης ροής. Τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης της

μεταβολής των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών κατά τη ροή σε ελαφρά κεκλιμένους αγωγούς προς τα κάτω.

Η επίδραση της ανηφορικής κλίσης του αγωγού στο χάρτη καθεστώτων ροής όπως επίσης και στα χαρακτηριστικά της εξετάζεται στο όγδοο κεφάλαιο. Γίνεται αναφορά στα καθεστώτα ροής που συναντώνται κατά τη συγκεκριμένη ροή και πως αυτά επηρεάζονται με αύξηση της κλίσης του αγωγού και με μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων. Εξετάζονται επίσης και τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που παρατηρούνται κατά τη διαστρωματωμένη ροή.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας συνοψίζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας της αέριας φάσης, της επιφανειακής τάσης και της κλίσης του αγωγού στα χαρακτηριστικά της ροής και στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής. Επίσης προτείνονται ορισμένες κατευθύνσεις για τη διαλεύκανση της επίδρασης κάποιων παραμέτρων (για παράδειγμα η παρουσία τασιενεργών ουσιών) και τη μοντελοποίηση συγκεκριμένων μεταπτώσεων.

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 2

---

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

---

Όπως έχει ήδη τονιστεί, κατά την ταυτόχρονη ροή υγρού-αερίου σε αγωγό κυκλικής διατομής σπουδαίο ρόλο παίζει η πρόβλεψη του καθεστώτος ροής, επειδή ο καθορισμός του καθεστώτος είναι απαραίτητος προκειμένου να γίνει ακριβέστερος ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της ροής. Η μεταφορά ενέργειας, μάζας και ορμής ανάμεσα στις δυο φάσεις εξαρτάται άμεσα από το εμβαδόν της διεπιφάνειας ανά μονάδα όγκου και, κατά συνέπεια, από το καθεστώς ροής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη στη διαλείπουσα ροή, η οποία χαρακτηρίζεται από δραματική αύξηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού.

### 2.1 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιους αγωγούς

Τα κυριότερα και πλέον αποδεκτά καθεστώτα ροής που παρατηρούνται κατά τη διφασική ροή υγρού-αερίου σε οριζόντιους αγωγούς περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω και παρουσιάζονται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.1 (π.χ. Taitel and Dukler, 1976α, Hewitt, 1982):

#### *Διαστρωματωμένη Ροή (Stratified Flow)*

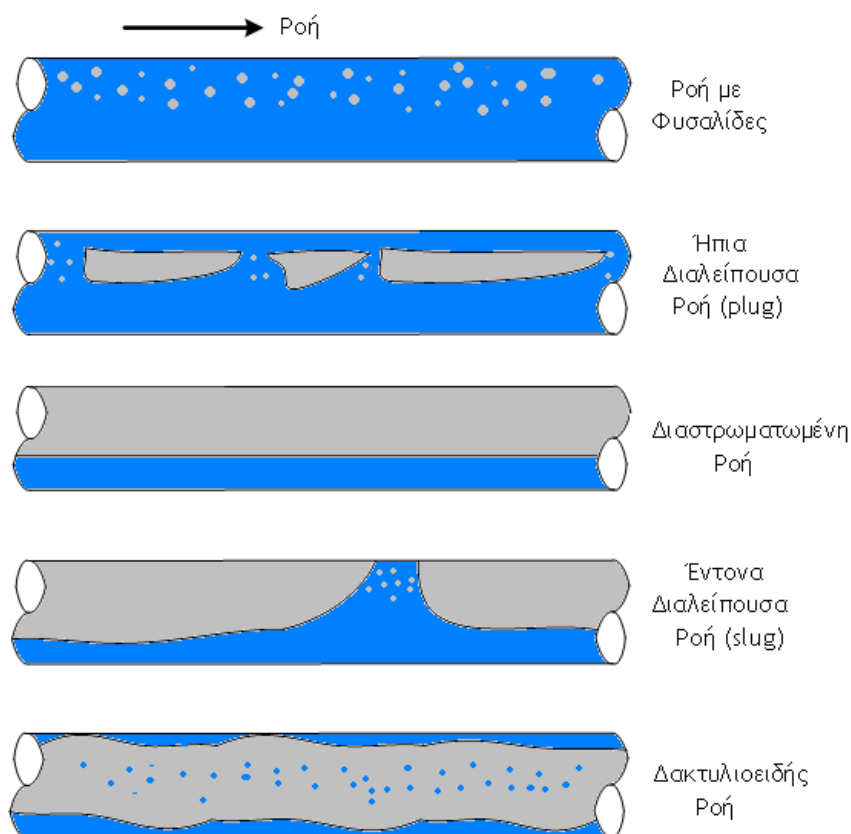
Στη διαστρωματωμένη ροή, κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, το υγρό ρέει στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος. Το καθεστώς αυτό παρατηρείται για σχετικά μικρές παροχές των δύο φάσεων. Η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων μπορεί να είναι λεία ή να καλύπτεται από κύματα, κάτι που εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα της αέριας φάσης. Επιπλέον, με τη σημαντική αύξηση της ταχύτητας του αερίου παρατηρείται



εκνέφωση σταγονιδίων από τις κορυφές των κυμάτων, ενώ η υγρή στιβάδα μπορεί να αρχίσει να αναρριχάται στα τοιχώματα του αγωγού.

#### *Διαλείπουσα Ροή (Intermittent Flow)*

Η διαλείπουσα ροή χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών (slugs ή plugs) στον αγωγό, οι οποίες κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Σε χαμηλές παροχές της αέριας φάσης παρατηρείται η λεγόμενη «ήπια» διαλείπουσα ροή (plug flow ή elongated bubble flow), όπου παρατηρούνται υγρές μάζες μεγάλου μήκους που δεν περιέχουν εγκλωβισμένες φυσαλίδες αερίου. Με αύξηση της παροχής της αέριας φάσης το μήκος των υγρών μαζών περιορίζεται, ενώ εγκλωβίζονται πολυάριθμες φυσαλίδες αερίου. Το καθεστώς αυτό ορίζεται ως «έντονη» διαλείπουσα ροή (slug flow). Η διάκριση μεταξύ ήπιας και έντονης διαλείπουσας ροής είναι μάλλον αυθαίρετη, αν και έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία κάποια κριτήρια (π.χ. Ruder and Hanratty, 1990). Στην εργασία αυτή όταν αναφερόμαστε σε διαλείπουσα ροή εννοείται συνήθως η «έντονη» διαλείπουσα ροή. Η ροή αυτή είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη για τις περισσότερες εφαρμογές, επειδή προκαλεί απότομες αυξήσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να δονούνται οι σωληνώσεις (με επίπτωση στα εξαρτήματα και τα μετρητικά όργανα), να απαιτούνται μεγάλοι διαχωριστές (slug catchers), να επηρεάζεται η αντιδιαβρωτική επικάλυψη των αγωγών κ.α. Έτσι είναι μείζονος βιομηχανικής σημασίας η πρόβλεψη της μετάπτωσης στο καθεστώς αυτό. Κάτω από ορισμένες συνθήκες εμφανίζεται η λεγόμενη *ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug flow)*, όπου παρατηρούνται μεν υγρές μάζες, οι οποίες όμως δεν ρέουν με την ταχύτητα της αέριας φάσης και έτσι δεν προκαλούν μεγάλες και απότομες διαφορές πίεσης. Συνήθως περιορίζονται σε αγωγούς μικρής διαμέτρου και για χαμηλό ιξώδες και πυκνότητα της υγρής φάσης. Η παρουσία σε αυτό το καθεστώς μιας υγρής στιβάδας μεγάλου πάχους στον πυθμένα του αγωγού δίνει οπτικά την εντύπωση διαχωρισμένης ροής με κυματισμούς.



**Σχήμα 2.1.** Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό

#### *Ροή με Φυσαλίδες (Dispersed Bubble Flow)*

Η ροή με φυσαλίδες χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διεσπαρμένων φυσαλίδων στη συνεχή υγρή φάση και παρατηρείται σε σχετικά υψηλές παροχές της υγρής φάσης. Οι φυσαλίδες τείνουν να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού, ενώ σε ιδιαίτερα μεγάλες παροχές των δύο φάσεων η κατανομή τους γίνεται ομοιόμορφη και σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται ως αφρός.

#### *Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)*

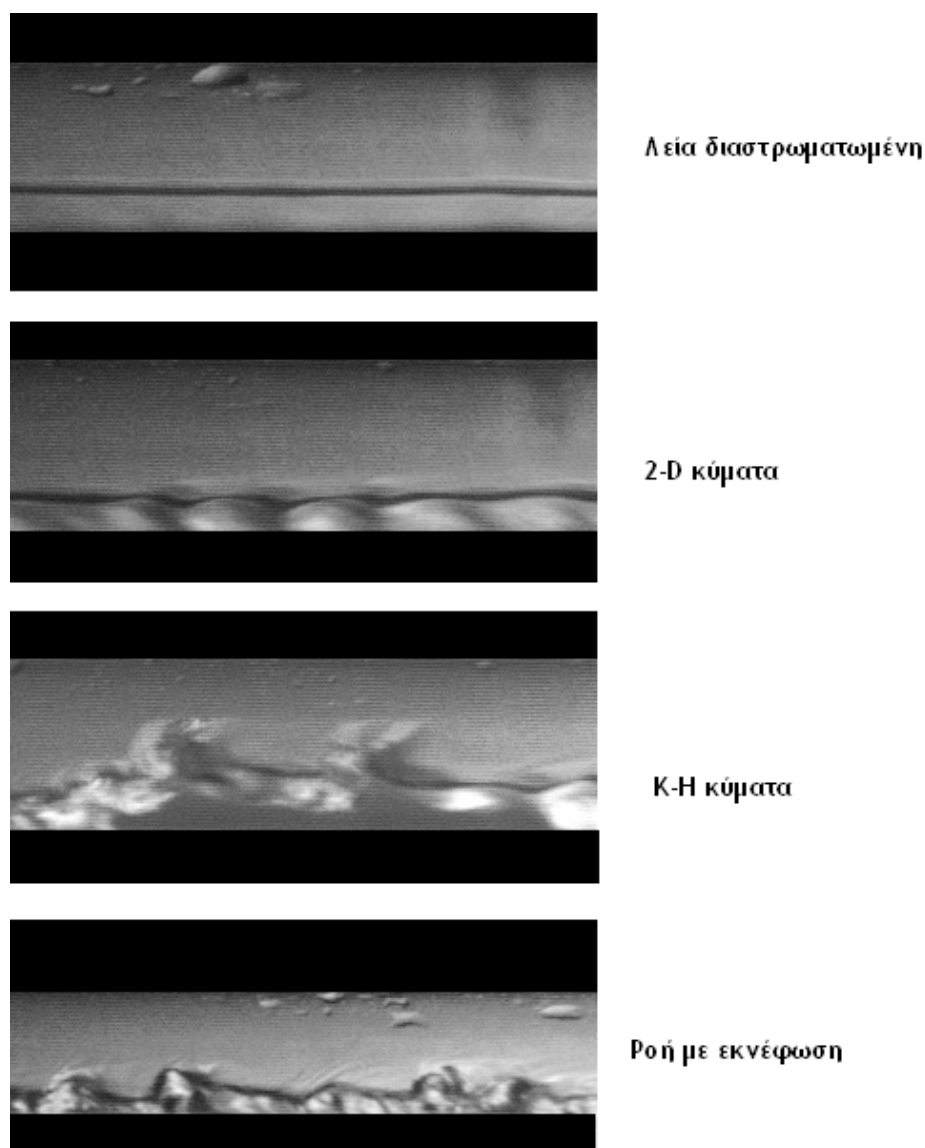
Η δακτυλιοειδής ροή συναντάται σε ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες αερίου (π.χ. για το σύστημα νερό-αέρας σε ατμοσφαιρικές συνθήκες για ταχύτητα μεγαλύτερη από 20 m/s). Σε αυτό το καθεστώς ροής η κύρια μάζα του υγρού ρέει με τη μορφή στιβάδας στα τοιχώματα του αγωγού, ενώ το αέριο ρέει στο κέντρο. Λόγω βαρύτητας, η υγρή στιβάδα δεν είναι συμμετρική γύρω από τον αγωγό και είναι παχύτερη στο κάτω μέρος του αγωγού. Σχεδόν πάντα στη δακτυλιοειδή ροή μέρος του υγρού βρίσκεται συμπαρασυρόμενο από την αέρια φάση με τη μορφή σταγονιδίων.

Στην παρούσα εργασία ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής, τα οποία ορίζονται παρακάτω, ενώ τυπικές φωτογραφίες αυτών των ροών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.

- *Λεία διαστρωματωμένη 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)*. Με μικρή αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης εμφανίζονται στη διεπιφάνεια τα πρώτα κανονικά διδιάστατα κύματα, με μικρό μήκος και πλάτος κύματος, τα οποία παρατηρούνται για σχετικά στενό εύρος ταχυτήτων της αέριας φάσης. Ουσιαστικά, αρχικά παρατηρούνται ως διαταραχές στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων.
- *Διαστρωματωμένη ροή με κύματα μεγάλου πλάτους και μήκους*, η οποία στη συνέχεια θα αναφέρεται ως ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz (K-H). Τα κύματα αυτού του τύπου εμφανίζονται με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης και η διεπιφάνεια μεταξύ των δυο φάσεων είναι αρκετά τραχιά. Στην βιβλιογραφία τα κύματα αυτά βρίσκονται συχνά και με το όνομα κύματα «περιδίνησης» (roll waves).
- *Ροή με εκνέφωση*, όπου λεπτές υγρές δέσμες (liquid filaments) ή σταγονίδια αποκόπτονται από τις κορυφές των κυμάτων K-H και εναποτίθενται στο πάνω μέρος του αγωγού. Ως μετάπτωση σε αυτό το υποκαθεστώς ροής ορίζονται οι συνθήκες παροχής όπου για πρώτη φορά παρατηρούνται σταγονίδια να 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.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η οριζόντια διφασική ροή συναντάται πολύ συχνά σε διαστημικές εφαρμογές, όπου η βαρύτητα είναι σχεδόν μηδενική. Στις περιπτώσεις αυτές τα καθεστώτα ροής διαφοροποιούνται, ενώ τα χαρακτηριστικά του κάθε καθεστώτος, αλλά και οι συνθήκες στις οποίες λαμβάνει χώρα, εξαρτώνται από την κατεύθυνση του αγωγού καθώς και από την κλίση του (Jayawardena et al, 1997).

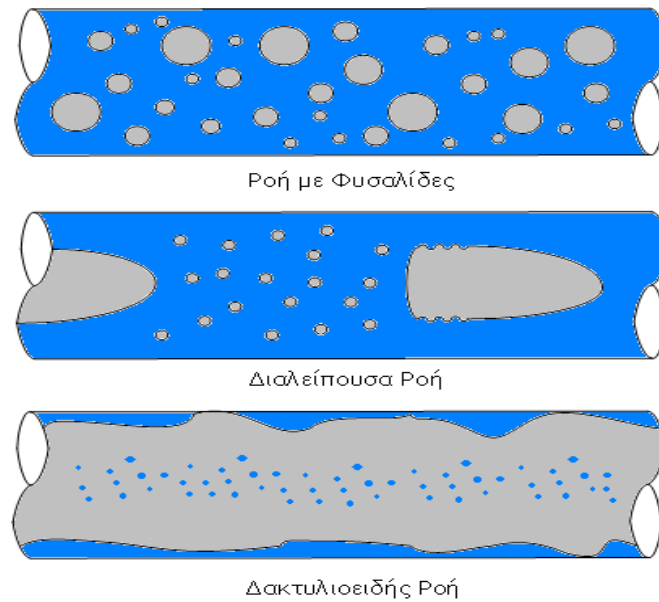
Σε συνθήκες απουσίας βαρύτητας συναντώνται τρία κύρια καθεστώτα ροής, η ροή με φουσαλίδες, η διαλείπουσα και η δακτυλιοειδής ροή, τα καθεστώτα ροής δηλαδή που παρατηρούνται κατά την ανοδική ροή υγρού-αερίου σε κατακόρυφους αγωγούς (Σχήμα 2.3). Η δακτυλιοειδής ροή κυριαρχεί για μεγάλο εύρος ρυθμών ροής υγρής και αέριας φάσης όταν η τιμή της βαρύτητας είναι πολύ μικρή. Η ροή με φουσαλίδες και η δακτυλιοειδής ροή είναι οι ροές που προτιμώνται, καθώς η διαλείπουσα προκαλεί δονήσεις στους αγωγούς.



**Σχήμα 2.2.** Είδη κυμάτων στη διαστρωματωμένη ροή νερού αέρα σε αγωγό διαμέτρου  $0.024\text{ m}$

## 2.2 Εξισώσεις που διέπουν τη διαστρωματωμένη ροή

Η διφασική ροή διέπεται από τις ίδιες εξισώσεις της ρευστομηχανικής που περιγράφουν και τη μονοφασική ροή ρευστών (υγρού ή αερίου), με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις για αυτή τη ροή είναι πιο πολύπλοκες από τις εξισώσεις που αναφέρονται στη μονοφασική ροή.



**Σχήμα 2.3.** Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό σε συνθήκες απουσίας βαρύτητας

Βασικά μεγέθη για την περιγραφή της διφασικής ροής είναι το κλάσμα κενού ( $\alpha_G$ , void fraction), ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το αέριο στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του, η συγκράτηση του υγρού ( $\alpha_L$ , holdup), ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το υγρό στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του, η φαινομενική ταχύτητα της κάθε φάσης  $u_{SG}$  και  $u_{SL}$  (superficial velocity), η ταχύτητα δηλαδή που θα είχε η κάθε φάση αν έρεε μόνη της στον αγωγό, και η πτώση πίεσης ( $\Delta P$ ). Τα μεγέθη αυτά ορίζονται ως εξής:

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A}, \quad \alpha_G = \frac{A_G}{A} \quad (2.1)$$

$$\alpha_G + \alpha_L = 1 \quad (2.2)$$

$$u_{GS} = \frac{Q_G}{A}, \quad u_{LS} = \frac{Q_L}{A} \quad (2.3)$$

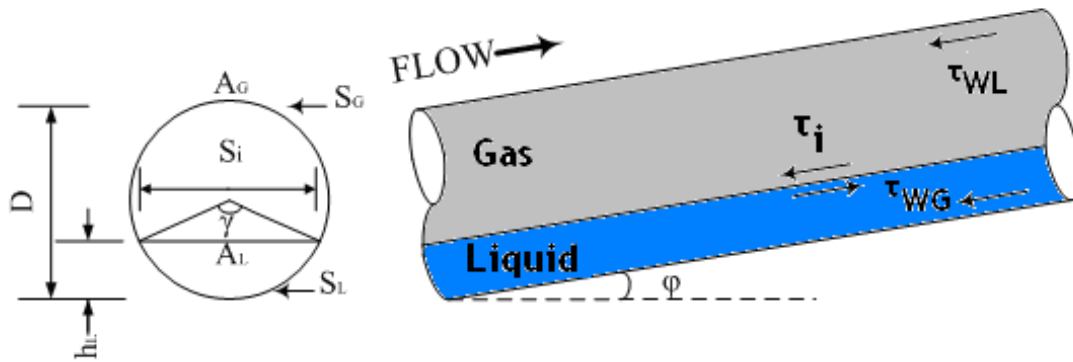
όπου:

$Q_G$  και  $Q_L$  : ογκομετρική παροχή της αέριας και της υγρής φάσης αντίστοιχα

$A$  : εμβαδόν της διατομής του αγωγού

$A_L$  και  $A_G$  : εμβαδόν της διατομής της υγρής και αέριας φάσης αντίστοιχα

Για την περιγραφή της ροής λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι οι δύο φάσεις έχουν διαφορετικές ταχύτητες και φυσικές ιδιότητες, υπάρχει συνεπώς μεταφορά ορμής, ενέργειας και μάζας ανάμεσά τους. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται σχηματικά η διαστρωματωμένη ροή υγρού-αέριου σε αγωγό κυκλικής διατομής, ο οποίος έχει μια κλίση  $\varphi$  σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 2.4 Διαστρωματωμένη διφασική ροή μέσα σε αγωγό

Για την περιγραφή της ροής γίνονται συνήθως οι εξής παραδοχές:

- μόνιμη, μονοδιάστατη, πλήρως ανεπτυγμένη διφασική ροή
- δεν συντελείται μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο φάσεων
- σταθερές φυσικές ιδιότητες
- ισόθερμη ροή
- οι όροι επιτάχυνσης των δύο φάσεων είναι αμελητέοι

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, μπορεί να γραφεί το ισοζύγιο δυνάμεων για κάθε φάση ως εξής:

Υγρή φάση:

$$-A_L \left( \frac{dP}{dL} \right)_L - \tau_{WL} S_L + \tau_i S_i - \rho_L A_L g \sin \varphi = 0 \quad (2.4)$$

Αέρια φάση:

$$-A_G \left( \frac{dP}{dL} \right)_G - \tau_{WG} S_G - \tau_i S_i - \rho_G A_G g \sin \varphi = 0 \quad (2.5)$$

όπου:

$\left( \frac{dP}{dL} \right)_G$  και  $\left( \frac{dP}{dL} \right)_L$  : η πτώση πίεσης της αέριας και της υγρής φάσης, αντίστοιχα

$\tau_{WG, WL}$  : η διατμητική τάση μεταξύ τοιχώματος αέριας και υγρής φάσης, αντίστοιχα

$\tau_i$  : η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων

$\rho_G, \rho_L$  : η πυκνότητα αέριας και υγρής φάσης

$g$  : η επιτάχυνση της βαρύτητας

Για πλήρως αναπτυγμένη ροή η πτώση πίεσης είναι ίδια και για τις δύο φάσεις και με απαλοιφή του όρου της κλίσης της πίεσης από τις εξισώσεις (2.4) και (2.5) μπορεί να προκύψει μία σχέση για τον υπολογισμό της συγκράτησης της υγρής φάσης,  $\epsilon_L$ , του μέσου

χρονικά όγκου που καταλαμβάνει το υγρό στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του, αλλά και για τον υπολογισμό του αδιάστατου πάχους της υγρής στιβάδας  $h/D$  μέσα στον αγωγό.

$$\frac{\tau_{WG}S_G}{A_G} - \frac{\tau_{WL}S_L}{A_L} + \tau_i S_i \left( \frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) - (\rho_L - \rho_G) g \sin \varphi = 0. \quad (2.6)$$

Τέλος, με απαλοιφή της διεπιφανειακής διατμητικής τάσης από τις εξισώσεις (2.4) και (2.5) μπορεί να υπολογιστεί η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού:

$$-\left(\frac{dP}{dx}\right)_{TP} = \frac{1}{A_L + A_G} [\tau_{WL}S_L + \tau_{WG}S_G + (A_L\rho_L + A_G\rho_G)g \sin \varphi]. \quad (2.7)$$

Οι διατμητικές τάσεις, σύμφωνα με τους Taitel and Dukler (1976), μπορούν να περιγραφούν από τις σχέσεις:

$$\tau_{WL} = f_L \frac{\rho_L u_L^2}{2} \quad (2.8)$$

$$\tau_{WG} = f_G \frac{\rho_G u_G^2}{2} \quad (2.9)$$

$$\tau_i = f_i \frac{\rho_L (u_G - u_L)^2}{2} \quad (2.10)$$

όπου:

$u_G$  και  $u_L$  : μέση ταχύτητα αέριας και υγρής φάσης, αντίστοιχα

$f_L$  και  $f_G$  : συντελεστές τριβής της υγρής και της αέριας φάσης στο τοίχωμα, αντίστοιχα

$f_i$  : διεπιφανειακός συντελεστής τριβής.

Όταν το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση και η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη, η πτώση πίεσης και στις δυο φάσεις είναι η ίδια, οπότε για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού και της συγκράτησης είναι απαραίτητη η χρήση αξιόπιστων συσχετισμών για τους συντελεστές τριβής  $f_L$ ,  $f_G$  και  $f_i$ . Πολυάριθμοι συσχετισμοί έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό των παραπάνω συντελεστών τριβής στα τοιχώματα και στη διεπιφάνεια. Εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για τους συντελεστές τριβής στη διαστρωματωμένη ροή γίνεται σε παλαιότερη εργασία (Τζώτζη, 2007).

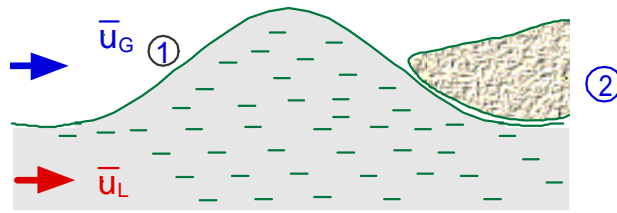
### 2.3 Μηχανισμοί μετάπτωσης στα διάφορα καθεστώτα ροής

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί βασικός παράγοντας κατά τη μελέτη της διφασικής ροής αποτελεί η γνώση του καθεστώτος ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό. Για το λόγο αυτό, προτάθηκαν από πολλούς ερευνητές γενικευμένοι χάρτες καθεστώτων ροής, με σκοπό τον

προσδιορισμό του καθεστώτος ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό με γνώση μόνο των φαινομενικών ταχυτήτων των δύο φάσεων και των φυσικών ιδιοτήτων των δύο φάσεων (π.χ. Baker 1954, Mandhane et al. 1974, Taitel and Dukler 1976 κ.α.). Παράλληλα έγιναν και προσπάθειες διερεύνησης των μηχανισμών που προκαλούν τις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής. Τόσο η δημιουργία των κυμάτων στη λεία διεπιφάνεια της διαστρωματωμένης ροής, όσο και η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης για πολλούς ερευνητές που ασχολήθηκαν με τη διφασική ροή υγρού-αερίου. Αναλυτική παρουσίαση της σχετικής βιβλιογραφίας με χάρτες καθεστώτων ροής, αλλά και με μηχανισμούς μετάπτωσης στα διάφορα καθεστώτα ροής δεν θα γίνει στην παρούσα εργασία, καθώς έχει πραγματοποιηθεί σε παλαιότερη εργασία (Τζώτζη, 2007).

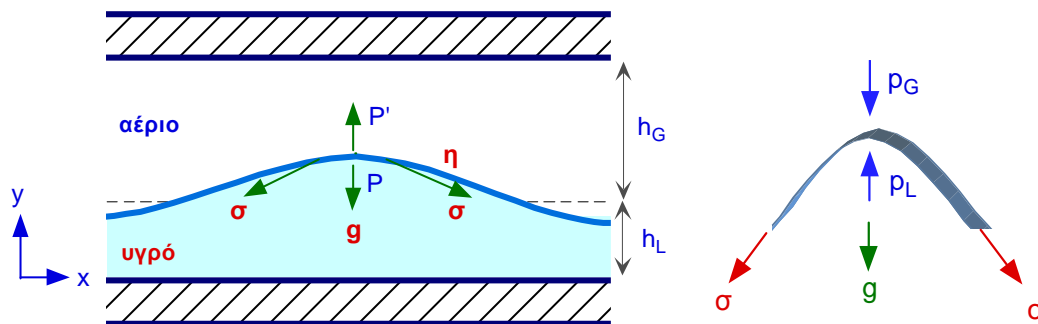
Κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν πειραματικά οι μεταπτώσεις σε ροή με κύματα 2-D και K-H, όπως επίσης και η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα. Παρακάτω αναφέρονται οι μηχανισμοί που προκαλούν τις μεταπτώσεις αυτές σύμφωνα με την παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, η μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα λαμβάνει χώρα όταν στη διεπιφάνεια εμφανιστούν κανονικά διδιάστατα κύματα και το φαινόμενο αυτό ελέγχεται από το μηχανισμό «προστασίας» που προτάθηκε αρχικά από τον Jeffreys (1925, 1926). Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, η αέρια φάση που κινείται πάνω από μία διαταραχή αδυνατεί να ακολουθήσει την παραμορφωμένη επιφάνεια της υγρής φάσης. Για παράδειγμα, όταν νερό ρέει γύρω από μια σφαίρα δε ρέει γύρω από όλη την επιφάνεια της, αλλά τα σωματίδια που χτυπούν στο εμπρόσθιο τμήμα της την εγκαταλείπουν περίπου στη μέση και η περιοχή πίσω από τη σφαίρα καλύπτεται από δίνες νερού. Αναλογικά μπορεί να υποτεθεί ότι μόλις σχηματιστούν τα κύματα οι αέριες μάζες αντί να κινούνται πάνω από τις κορυφές και τα κοίλα του κύματος, γλιστρούν πάνω από την κορυφή και χτυπούν στο επόμενο κύμα σε ύψος περίπου στη μέση της κορυφής και των κοίλων του επόμενου κύματος. Η περιοχή που «προστατεύεται» από την κύρια μάζα της αέριας φάσης περιέχει μία δίνη, ενώ μικρότερες δίνες υπάρχουν στα σύνορα μεταξύ της κύριας αέριας μάζας και της μεγάλης δίνης (Σχήμα 2.5). Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή, η πίεση του αέρα θα είναι μεγαλύτερη στις πλευρές που χτυπά η αέρια φάση και όχι στις άλλες. Η εκτροπή της αέριας φάσης όταν χτυπά στις εκτεθειμένες πλευρές του κύματος υποδηλώνει μια αλληλεπίδραση μεταξύ της αέριας και της υγρής φάσης, η οποία είναι κάθετη στη διεπιφάνεια και ομοιόμορφη σε όλη την προστατευόμενη περιοχή.





Σχήμα 2.5 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού προστάσις (Jeffreys, 1925)

Ύστερα από κάποια κρίσιμη τιμή της ταχύτητας της αέριας φάσης δημιουργούνται στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων κύματα μεγάλου μήκους και πλάτους. Θεωρείται ότι η ρευστοδυναμική αστάθεια Kelvin-Helmholtz είναι υπεύθυνη για αυτή τη μετάπτωση και τα κύματα που δημιουργούνται ονομάζονται κύματα Kelvin-Helmholtz (η K-H κύματα). Πιο συγκεκριμένα, η παρουσία κυμάτων στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου προκαλεί τοπική αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης στην κορυφή του κύματος με συνέπεια τη δημιουργία υποπίεσης (νόμος Bernoulli). Η σχηματική αναπαράσταση της αστάθειας αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Αν αυτές οι αποσταθεροποιητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις σταθεροποιητικές δυνάμεις της βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης (για μικρά μήκη κύματος), τότε το κύμα μεγαλώνει. Η εμφάνιση των κυμάτων K-H συνοδεύεται από μεγάλη αύξηση της επιφανειακής διατμητικής τάσης, αλλά και από δραστική μείωση του πάχους της υγρής στιβάδας μέσα στον αγωγό.



Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της αστάθειας Kelvin-Helmholtz

Σύμφωνα με τους Andritsos et al (1989) η αστάθεια Kelvin-Helmholtz θεωρείται υπεύθυνη τόσο για τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, όσο και για τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή. Ρυθμιστικό ρόλο διαδραματίζει το πάχος της υγρής στιβάδας μέσα στον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα, για μεγάλα πάχη υγρής στιβάδας (το κρίσιμο πάχος μετάπτωσης εξαρτάται από την ταχύτητα της αέριας φάσης) η ροή μεταπίπτει σε διαλείπουσα από διαστρωματωμένη, ενώ για μικρότερα πάχη υγρής στιβάδας στη διεπιφάνεια επικρατούν κύματα K-H.

## 2.4 Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στα καθεστώτα ροής

Η δημιουργία του καθεστώτος ροής που επικρατεί στον αγωγό εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων. Επίσης, με μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων επηρεάζονται και τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων. Για το λόγο αυτό πολλοί ερευνητές μελέτησαν την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής. Επειδή μέρος της παρούσας εργασίας αναφέρεται στη διερεύνηση της επίδρασης των φυσικών ιδιοτήτων στα χαρακτηριστικά της ροής, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των εργασιών πάνω σε αυτό το θέμα.

Οι Hanratty and Hershman (1961) ήταν ίσως οι πρώτοι ερευνητές που μελέτησαν την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων στα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής σε κανάλι ορθογωνικής κατανομής (30 cm × 2,5 cm) και πιο συγκεκριμένα, στη μετάπτωση σε κύματα μεγάλου ύψους με απότομες κορυφές που στροβιλίζονται («κύματα περιδίνησης» ή roll waves). Οι ερευνητές αυτοί διεξήγαγαν πειράματα σε κανάλι ορθογωνικής διατομής μεταβάλλοντας το ιξώδες και την επιφανειακή τάση της υγρής φάσης. Παρατηρήθηκε ότι με αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης μειώνεται ελαφρώς η απαιτούμενη ταχύτητα της αέριας φάσης για την υπό διερεύνηση μετάπτωση, ενώ η μείωση της επιφανειακής τάσης δεν επηρεάζει τα όρια της μετάπτωσης. Μελέτησαν επίσης και την επίδραση επιφανειοδραστικών ουσιών και παρατήρησαν ότι δεν επηρεάζουν σημαντικά τη μετάπτωση σε κύματα «περιδίνησης». Ωστόσο, διαπίστωσαν ότι η μετάπτωση αυτή λαμβάνει χώρα σε λεία διεπιφάνεια μεταξύ των δυο φάσεων, γεγονός που δεν παρατηρήθηκε με τα άλλα εξεταζόμενα συστήματα. Οι ίδιοι ερευνητές ωστόσο τόνισαν ότι για την περίπτωση διφασικής ροής σε κυλινδρικούς αγωγούς τα παραπάνω αποτελέσματα ενδεχομένως να μην βρίσκουν εφαρμογή λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας του συστήματος.

Αρκετά αργότερα, οι Weisman et al (1979) διερεύνησαν την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα της διφασικής ροής σε οριζόντιους αγωγούς. Παρατηρήθηκε ότι με αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης η ροή με διεσπαρμένες φυσαλίδες μετατοπίζεται σε ελαφρώς χαμηλότερες παροχές της υγρής φάσης και η δακτυλιοειδής σε υψηλότερες παροχές της αέριας φάσης. Οι ίδιοι επιχείρησαν να μελετήσουν και την επίδραση της επιφανειακής τάσης στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα της διφασικής ροής. Για τη μεταβολή της επιφανειακής τάσης χρησιμοποίησαν επιφανειοδραστική ουσία, τα αποτελέσματα ωστόσο που προέκυψαν δεν αφορούν στην επίδραση της επιφανειακής τάσης στα χαρακτηριστικά της ροής, αφού με την προσθήκη τέτοιων ουσιών δεν μειώνεται μόνο η επιφανειακή τάση, αλλά αυξάνεται και το επιφανειακό ιξώδες (Hanratty and Hershman, 1961), το οποίο είναι υπεύθυνο για τις μεταβολές που παρατηρούνται. Είναι προφανές εδώ ότι οι προηγούμενοι ερευνητές εννοούν

την επιφανειακή ελαστικότητα. Οι Weisman et al. (1979) παρατήρησαν επίσης ότι με αύξηση της πυκνότητας της υγρής φάσης η μετάπτωση τόσο σε ροή με διεσπαρμένες φυσαλίδες όσο και σε διαλείπουσα ροή από τη διαστρωματωμένη μετατοπίζεται σε υψηλότερες παροχές της υγρής φάσης, ενώ η μετάπτωση σε ροή με κύματα συμβαίνει σε υψηλότερες παροχές της αέριας φάσης. Τα αποτελέσματα αυτά ωστόσο προέκυψαν όχι μόνο με αύξηση της πυκνότητας της υγρής φάσης, αλλά και μείωση της επιφανειακής τάσης από 70 σε 50 mN/m.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει όμως και η επίδραση των επιφανειοδραστικών ουσιών στα χαρακτηριστικά της ροής. Οι Hand et al. (1992) διεξήγαγαν πειράματα με συστήματα νερού-αέρα και νερού+επιφανειοδραστικής ουσίας-αέρα προκειμένου να εξετάσουν την επίδραση της μείωσης της επιφανειακής τάσης στα διάφορα καθεστώτα της διφασικής ροής. Παρατήρησαν ότι το εύρος της λείας διαστρωματωμένης ροής αυξάνεται, αφού καθυστερεί η εμφάνιση των τριχοειδών κυμάτων (ripple waves). Η μετάπτωση ωστόσο σε κύματα μεγάλου ύψους με απότομες κορυφές που στροβιλίζονται δεν επηρεάζεται. Τέλος, η έναρξη της δακτυλιοειδούς ροής συμβαίνει σε χαμηλότερες παροχές της αέριας φάσης. Οι ίδιοι ερευνητές, προκειμένου να εξηγήσουν τη δράση των επιφανειοδραστικών, θεωρούν ότι οι ουσίες αυτές συγκεντρώνονται στη διεπιφάνεια των δυο φάσεων με τη μοριακή τους αλυσίδα προσανατολισμένη κάθετα στη ροή. Η δράση των μοριακών αυτών αλυσίδων είναι να αποσβένουν και να σκεδάζουν τις δίνες που προέρχονται από την κίνηση της αέριας φάσης πάνω από τη διεπιφάνεια της υγρής. Ωστόσο, δεν επηρεάζουν τη δημιουργία των βαρυτικών κυμάτων ή των κυμάτων μεγάλου ύψους με απότομες κορυφές που στροβιλίζονται, τα οποία κινούνται μαζί με τη μάζα της υγρής φάσης και όχι μόνο πάνω στη διεπιφάνεια.

Ο Andritsos and Hanratty (1987a) μελέτησαν την επίδραση του ιξώδους στα καθεστώτα της διφασικής ροής. Παρατήρησαν ότι με αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης αυξάνεται η ταχύτητα της αέριας φάσης που απαιτείται για την έναρξη των διδιάστατων κυμάτων, με παράλληλη μείωση του εύρους της περιοχής όπου επικρατούν. Από την άλλη μεριά παρατηρήθηκε ότι η μετάπτωση σε ροή με κύματα τύπου K-H μένει ουσιαστικά αμετάβλητη. Πιο συγκεκριμένα, όταν το ιξώδες της υγρής φάσης είναι μεγαλύτερο από 20 mPa·s, τότε τα κύματα 2-D δεν εμφανίζονται καθόλου και η ροή από λεία διαστρωματωμένη μεταπίπτει σε ροή με κύματα τύπου K-H. Τέλος, η αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης λειτουργεί σταθεροποιητικά στην έναρξη της διαλείπουσας ροής, με την έννοια ότι αυξάνει το πάχος της κρίσιμης στιβάδας υγρού που απαιτείται για τη μετάπτωση.

Την επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης στη δημιουργία των κυμάτων μελέτησαν και οι Newton et al. (1999). Πραγματοποίησαν πειράματα με συστήματα με διαφορετικά ιξώδη σε χαμηλές ταχύτητες της αέριας φάσης ( $u_G=1.38-6$  m/s). Παρατήρησαν ότι οι

πρώτες διαταραχές που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια σχετίζονται άμεσα με το ύψος της υγρής φάσης μέσα στον αγωγό. Έτσι, όταν το ύψος της υγρής φάσης είναι σχετικά μεγάλο ( $h > 0.015 \text{ m}$ ), τότε στη διεπιφάνεια δημιουργούνται διδιάστατα κύματα με μεγάλο πλάτος, της τάξης των  $0.005\text{-}0.01 \text{ m}$ . Αντίθετα, για μικρότερα ύψη της υγρής φάσης οι πρώτες διαταραχές που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια είναι τριχοειδή κύματα (ripple waves) μικρού πλάτους ( $0.002\text{-}0.003 \text{ m}$ ). Ωστόσο, παρατήρησαν ότι μέσα στα όρια κάθε καθεστώτος ροής η μεταβολή του ιξώδους δεν επηρεάζει τη συχνότητα και το πλάτος των κυμάτων. Τέλος, διαπίστωσαν ότι η αύξηση του ιξώδους καθυστερεί την εμφάνιση των διδιάστατων κυμάτων, ενώ η εμφάνιση των τριχοειδών δεν επηρεάζεται. Κατά συνέπεια, ενώ το ιξώδες της υγρής φάσης διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην έναρξη των διδιάστατων κυμάτων μεγάλου πλάτους, δεν επηρεάζει τόσο έντονα την έναρξη των τριχοειδών κυμάτων, τα οποία πιθανόν να επηρεάζονται έντονα από κάποια άλλη φυσική ιδιότητα, όπως η επιφανειακή τάση.

Οι Funada and Joseph (2001) μελέτησαν θεωρητικά την ευστάθεια της διαστρωματωμένης ροής σε κανάλι, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της επιφανειακής τάσης και του ιξώδους. Για όλες τις περιπτώσεις που εξέτασαν παρατήρησαν ότι η κρίσιμη ταχύτητα επηρεάζεται από την επιφανειακή τάση, ενώ ο ρυθμός ανάπτυξης του κύματος εξαρτάται έντονα από το ιξώδες της υγρής φάσης. Ο λόγος ιξώδους,  $\hat{\mu} = \mu_G / \mu_L$ , και ο λόγος των πυκνοτήτων των δυο ρευστών,  $\hat{\rho} = \rho_G / \rho_L$ , διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της αστάθειας. Επίσης συμπέραναν ότι τα ρευστά μπορούν να ταξινομηθούν σε ρευστά χαμηλού ιξώδους, όταν  $\hat{\mu} < \hat{\rho}$ , και σε ρευστά υψηλού ιξώδους, όταν  $\hat{\mu} > \hat{\rho}$ . Η καμπύλη ευστάθειας για την περίπτωση όπου  $\hat{\mu} = \hat{\rho}$  ταυτίζεται με την καμπύλη που προκύπτει για άτριβα ρευστά. Κατά συνέπεια, η καμπύλη ευστάθειας για συστήματα αέρα-υγρού με ιξώδες μεγαλύτερο από  $15 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  ταυτίζεται με την καμπύλη που προκύπτει για τα άτριβα ρευστά, ενώ είναι ανεξάρτητη από το ιξώδες της υγρής φάσης. Στις περιπτώσεις υγρής φάσης με χαμηλότερο ιξώδες τα όρια της ευστάθειας βρίσκονται αρκετά χαμηλότερα. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία και με τα πειραματικά αποτελέσματα των Andritsos et al. (1989).

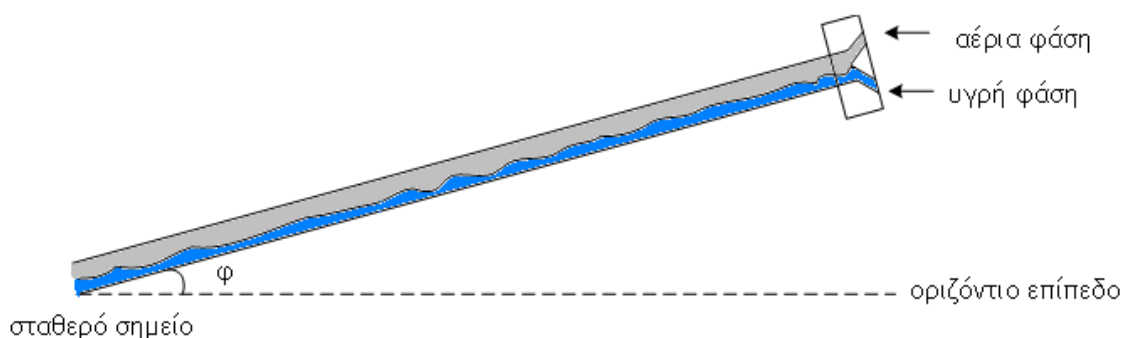
Την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων στην ευστάθεια της ροής μελέτησαν θεωρητικά και οι Guo et al (2002), οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της επιφανειακής τάσης έχει σταθεροποιητικό ρόλο. Από τα αποτελέσματα τους προέκυψε ότι κύματα με μικρό μήκος κύματος επηρεάζονται έντονα από την επιφανειακή τάση, ενώ για μεγάλο μήκος κύματος η επιφανειακή τάση δεν επηρεάζει την ευστάθεια της ροής

Τέλος, η επίδραση της επιφανειακής τάσης αλλά και επιφανειοδραστικών ουσιών στις μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής με κλίση του αγωγού προς τα κάτω μελετήθηκε

και από τους Lioumbas et al. (2006). Διεξάγοντας πειράματα με σύστημα υδατικού διαλύματος οξικού οξέος-αέρα ( $\sigma=45 \text{ mN/m}$ ) διαπίστωσαν ότι τα κύματα μεγάλου πλάτους έχουν ακόμα μεγαλύτερο πλάτος και μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ καταγράφεται, όπως είναι αναμενόμενο, μεγαλύτερη πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Όταν όμως χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα επιφανειοδραστικού, που έχει επίσης χαμηλή επιφανειακή τάση ( $\sigma=45 \text{ mN/m}$ ), παρατηρείται ότι τα κύματα μεγάλου πλάτους εμφανίζονται σε μεγαλύτερες παροχές της υγρής και της αέριας φάσης και έχουν μικρότερο πλάτος και ταχύτητα. Κατ' αναλογία, η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού είναι μειωμένη κατά 30% περίπου σε σχέση με αυτή που παρατηρείται για το σύστημα νερού-αέρα.

## 2.5 Επίδραση της κλίσης του αγωγού

Οι περισσότεροι χάρτες καθεστώτων ροής που συναντώνται στη βιβλιογραφία αναφέρονται σε οριζόντιους ή κατακόρυφους αγωγούς, ενώ λιγότερες προσπάθειες έχουν γίνει για την περιγραφή των καθεστώτων σε κεκλιμένους αγωγούς. Ακόμα και μία μικρή απόκλιση του αγωγού από το οριζόντιο επίπεδο αλλάζει σημαντικά τη μορφή του χάρτη καθεστώτων ροής. Πιο συγκεκριμένα, σε κατωφερή κλίση του αγωγού, η υγρή φάση κινείται με μεγαλύτερες ταχύτητες εξαιτίας της βαρυτικής δύναμης και, κατά συνέπεια, απαιτούνται μεγαλύτερες παροχές των δύο φάσεων για τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή στη διαλείπουσα. Όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης αυξάνεται και το εύρος της περιοχής της διαστρωματωμένης ροής. Αντίθετα, σε αγωγοί με ανωφερή κλίση το εύρος της διαστρωματωμένης ροής μειώνεται και είναι ευκολότερη η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή. Σχηματική απεικόνιση της ροής σε κεκλιμένους αγωγούς παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



**Σχήμα 2.7** Ροή με κλίση του αγωγού

Από τους πρώτους που μελέτησαν τη διφασική ροή σε κεκλιμένο αγωγό ήταν οι Beggs and Brill (1973), οι οποίοι αφού διαπίστωσαν την αδυναμία των συσχετισμών που υπήρχαν μέχρι τότε για τον υπολογισμό της συγκράτησης της υγρής φάσης και της πτώσης πίεσης σε

κεκλιμένους αγωγούς, διεξήγαγαν πειράματα για την κατανόηση της ροής σε κεκλιμένους αγωγούς και την περιγραφή των χαρακτηριστικών της. Μελέτησαν το σύστημα νερό-αέρας και παρατήρησαν την σημαντική εξάρτηση της συγκράτησης της υγρής φάσης αλλά και της πτώσης πίεσης από την κλίση του αγωγού. Πρότειναν τέλος τη χρήση ημι-εμπειρικών συσχετισμών για την εύρεση του καθεστώτος ροής που επικρατεί μέσα σε κεκλιμένους αγωγούς και τέλος προτείνουν και συσχετισμό για τον υπολογισμό του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής.

Τη ροή σε αγωγούς με κλίση μελέτησαν διεξοδικά και οι Barnea et al (1980a). Στα πειράματά τους παρατήρησαν ότι για ροή σε αγωγό με κατηφορική κλίση επηρεάζονται δραματικά τα όρια μετάπτωσης μεταξύ διαστρωματωμένης ροής και διαλείπουσας ή δακτυλιοειδούς ροής. Στη ροή αυτή η υγρή φάση κινείται γρηγορότερα και το πάχος της υγρής στιβάδας είναι μικρότερο εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας. Αντίθετα, σε αγωγούς με ανωφερή κλίση το εύρος της διαστρωματωμένης περιοχής ροής μειώνεται και είναι ευκολότερη η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή. Η καμπύλη μετάπτωσης ανάμεσα σε αυτά τα δύο καθεστώτα ροής εξαρτάται από τη γωνία κλίσης του αγωγού, ακόμη και για κλίσεις μικρότερες από  $1^\circ$  η διαστρωματωμένη περιοχή ροής συρρικνώνεται σε μια μικρή περιοχή σε σχήμα καμπάνας. Προσπάθησαν επίσης να αξιολογήσουν την απόδοση του μοντέλου που προτάθηκε από τους Taitel and Dukler (1976a) για την περίπτωση ροών σε αγωγούς με κλίση. Παρατήρησαν ότι για κλίσεις μέχρι  $\pm 10^\circ$  η ακρίβεια του μοντέλου είναι αρκετά ικανοποιητική, ενώ για μεγαλύτερες κλίσεις πρόβλεψη μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο ποιοτικά, ενώ διαπιστώθηκε αδυναμία του μοντέλου στην πρόβλεψη της έναρξης της διαστρωματωμένης ροής με κύματα σε αγωγό με κατηφορική κλίση. Σύμφωνα με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976a) τα κύματα δημιουργούνται εξαιτίας της ύπαρξης της αέριας φάσης ως αποτέλεσμα της μεταφοράς ενέργειας μεταξύ των δύο φάσεων. Στην περίπτωση όμως της ροής σε αγωγό με κατηφορική κλίση οι διαταραχές δημιουργούνται λόγω της αστάθειας της διεπιφάνειας εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας. Συμπερασματικά, για την περίπτωση της ροής προς τα κάτω και σε αρκετά χαμηλές παροχές της αέριας φάσης, η μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα εξαρτάται μόνο από την παροχή της υγρής φάσης και τη γωνία κλίσης του αγωγού.

Λίγο αργότερα, τόσο η ανωφερής ροή (Barnea et al, 1982) όσο και η ροή με κατηφορική κλίση (Barnea et al, 1985) διερευνήθηκαν με μεγαλύτερη συστηματικότητα. Πρότειναν τροποποιήσεις των μοντέλων Taitel and Dukler (1976a) και Barnea et al (1980) για την περιγραφή των μεταπτώσεων στα διάφορα καθεστώτα ροής, έτσι ώστε τα πειραματικά αποτελέσματα να περιγράφονται με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Η ροή σε αγωγούς με ανωφερή κλίση μελετήθηκε και από τους Andreussi and Persen (1987), οι οποίοι ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τον υπολογισμό των παραμέτρων της που λαμβάνει υπόψη και το καθεστώς ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό. Με οπτικές παρατηρήσεις διέκριναν τρία διαφορετικά είδη ροής που εμφανίζονται στη διαστρωματωμένη περιοχή ροής, ενώ ο χάρτης ροής που πρότειναν παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τους χάρτες των Taitel and Dukler (1976) και Mandhane et al (1974). Παρατήρησαν ότι κατά τη μετάπτωση σε ροή με διδιάστατα κύματα λαμβάνουν χώρα έντονες αλλαγές στα χαρακτηριστικά της ροής. Σε μεγάλες παροχές της υγρής φάσης η μετάπτωση αυτή συμπίπτει αλλά και καθορίζει τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Επίσης, διαπιστώθηκε για ακόμη μια φορά η επέκταση της διαστρωματωμένης περιοχής ροής σε αγωγούς με κατηφορική κλίση σε σχέση με τους οριζόντιους αγωγούς.

Πειράματα σε κεκλιμένους αγωγούς πραγματοποιήσαν και οι Andreussi and Bendiksen (1989). Διαπίστωσαν ότι τόσο η διάμετρος του αγωγού όσο και η κλίση του επηρεάζουν σημαντικά το κλάσμα κενού. Στο συσχετισμό που πρότειναν για τον υπολογισμό του κλάσματος κενού συμπεριέλαβαν και την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών (πυκνότητας της αέριας φάσης και επιφανειακή τάση), η οποία παρατηρήθηκε ότι είναι αρκετά ισχυρή.

Με τη μελέτη της ροής σε κεκλιμένους αγωγούς ασχολήθηκαν και οι Kokal and Stanislav (1989a). Διαπίστωσαν ότι η μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή στη διαλείπουσα επηρεάζεται πολύ έντονα από την κλίση του αγωγού, αφού ακόμα και μία ελάχιστη κλίση (π.χ.  $+0.03^\circ$ ) αλλάζει πολύ σημαντικά τα όρια αυτής της μετάπτωσης. Επίσης παρατήρησαν ότι και η διάμετρος του αγωγού επηρεάζει τις μεταπτώσεις σε όλα τα καθεστώτα ροής. Για την περιγραφή των μεταπτώσεων στα διάφορα καθεστώτα ροής χρησιμοποίησαν το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976a) έχοντας κάνει κάποιες τροποποιήσεις για βελτίωση των αποτελεσμάτων τους. Ταυτόχρονα οι ίδιοι ερευνητές μελέτησαν την εξάρτηση από το καθεστώς ροής των παραμέτρων που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής, αλλά και πως αυτές επηρεάζονται από τη γωνία κλίσης του αγωγού. Όπως και οι Barnea et al. (1980) διαπίστωσαν ότι κατωφερής κλίση του αγωγού ευνοεί τη διαλείπουσα ροή, ενώ ανωφερής κλίση τη διαστρωματωμένη. Κατά συνέπεια, για περιπτώσεις διαστρωματωμένης ροής προς τα κάτω, η συγκράτηση της υγρής φάσης είναι μικρότερη. Επίσης, βρέθηκε ότι η συγκράτηση είναι ανεξάρτητη της φαινομενικής ταχύτητας του αερίου για μεγάλο εύρος ρυθμού ροής της αέριας φάσης και εξαρτάται μόνο από το ρυθμό ροής της υγρής. Αντίστοιχα για ροή προς τα πάνω, όπου κυριαρχεί η διαλείπουσα ροή, η συγκράτηση είναι μεγαλύτερη, ενώ εξαρτάται ασθενώς από την κλίση του αγωγού. Τέλος, μελετήθηκε και η πτώση πίεσης σε συνάρτηση με την κλίση

του αγωγού. Όπως ήταν αναμενόμενο, διαπιστώθηκε ότι είναι πολύ μεγαλύτερη σε αγωγούς με ανηφορική κλίση.

Οι Brauner and Maron (1992) μελέτησαν θεωρητικά τις μεταπτώσεις στα διάφορα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής σε κεκλιμένους αγωγούς. Διαπίστωσαν ότι κατά τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα εμφανίζεται μια «ζώνης μετάπτωσης» (buffer zone), της οποίας το κατώτερο όριο ορίζεται από την ανάλυση ευστάθειας του συστήματος, ενώ το ανώτερο όριο προκύπτει όταν ικανοποιείται η απαίτηση του «καλώς τιθέμενου προβλήματος» (well-posed) για τις εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα. Πριν από το κατώτερο όριο η ροή είναι πάντα λεία διαστρωματωμένη, ενώ μετά το ανώτερο όριο η ροή μεταπίπτει από διαστρωματωμένη ροή με κύματα σε άλλο είδος ροής, ενώ μέσα στη ζώνη μετάπτωσης το καθεστώς που θα επικρατήσει έχει άμεση εξάρτηση από το ύψος της υγρής φάσης μέσα στον αγωγό. Παράλληλα μελέτησαν και την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις μεταπτώσεις αυτές. Σε γενικές γραμμές παρατήρησαν ότι με αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης περιορίζεται η επίδραση της κλίσης του αγωγού. Με μείωση της πυκνότητας της υγρής φάσης δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στα όρια των μεταπτώσεων. Αντίθετα, με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης τα όρια αυτά επηρεάζονται σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα παρατηρείται σε μεγαλύτερες παροχές της υγρής φάσης, ενώ η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε δακτυλιοειδή λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες παροχές της αέριας φάσης. Τέλος, διαπίστωσαν ότι με τη χρήση τροποποιημένων αξόνων στους χάρτες καθεστώτων ροής  $((\rho_G/\Delta\rho)^{0.5}u_{GS}$  και  $(\rho_L/\Delta\rho)^{0.5}u_{LS}$ ), η επίδραση της αύξησης της πυκνότητας της αέριας φάσης περιορίζεται σημαντικά.

Η ροή σε αγωγούς με κατωφερή κλίση μελετήθηκε και από τους Grolman et al. (1996), οι οποίοι δεχόμενοι το γεγονός ότι το κριτήριο Kelvin-Helmholtz αδυνατεί να προβλέψει σωστά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, προσπάθησαν να αναπτύξουν ένα συσχετισμό που να περιγράφει ικανοποιητικότερα τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή με κύματα σε διαλείπουσα. Ταυτόχρονα, κατασκεύασαν χάρτες περιοχών ροής για κεκλιμένους αγωγούς. Από τα αποτελέσματά τους γίνεται φανερό ότι η τιμή της συγκράτησης της υγρής φάσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο για την μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα, ενώ επεσήμαναν ότι για τιμές της συγκράτησης μικρότερες από 0.07 δεν είναι δυνατή η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, παρά μόνο σε δακτυλιοειδή. Τέλος, πρότειναν μία εμπειρική σχέση για την κρίσιμη συγκράτηση κατά την οποία συμβαίνει η μετάπτωση μεταξύ διαστρωματωμένης και διαλείπουσας ροής. Οι τιμές της συγκράτησης υπολογίζονται με τη βοήθεια του μοντέλου «MARS» (Grolman and Fortuin, 1997).



Πρόσφατα, οι Woods et al. (2000) διερεύνησαν πειραματικά την επίδραση που διαδραματίζει η κατωφερής κλίση του αγωγού στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Διαπίστωσαν ότι για χαμηλές τιμές της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης η απαιτούμενη παροχή της υγρής φάσης για τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή αυξάνεται με αύξηση της κλίσης του αγωγού, εξαιτίας της έντονης επίδρασης των βαρυτικών δυνάμεων. Για τιμές της φαινομενικής ταχύτητας μεγαλύτερες από 5 m/s η μετάπτωση δεν εξαρτάται σημαντικά από την κλίση του αγωγού, αφού η δράση των αδρανειακών δυνάμεων της αέριας φάσης είναι μεγαλύτερη από τη σταθεροποιητική δράση των βαρυτικών. Σε χαμηλές παροχές της αέριας φάσης η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα μια τοπικής αστάθειας που αναπτύσσεται στην κορυφή ενός κύματος μεγάλου πλάτους. Από τη μελέτη των Woods et al (2000) προκύπτει ότι η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σχετίζεται με την εμφάνιση κυμάτων μεγάλου μήκους ( $\lambda \approx 5\text{-}10\text{ cm}$ ), ενώ η συχνότητα διέλευσης των υγρών μαζών που προσδιορίζουν τη διαλείπουσα ροή είναι η ίδια με τη συχνότητα αυτών των κυμάτων. Από την πειραματική διερεύνηση έγινε φανερό ότι τόσο τα μεγάλα μήκους κύματα όσο και τα μικρού μήκους παίζουν σημαντικό ρόλο στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Η φωτογραφική μελέτη κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή ενισχύει την πρόταση του Kordyban (1985), σύμφωνα με την οποία η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή λαμβάνει χώρα εξαιτίας τοπικών Kelvin-Helmholtz ασταθειών κυμάτων μικρού μήκους που αναπτύσσονται στις κορυφές κυμάτων μεγάλου μήκους.

Μελετώντας τα διαθέσιμα πειρατικά δεδομένα της βιβλιογραφίας, αλλά και μετά από πειράματα που πραγματοποίησε ο Abdul-Majeed (2000), πρότεινε ένα συσχετισμό για τον υπολογισμό της συγκράτησης της υγρής φάσης σε διαλείπουσα ροή, ο οποίος μπορεί να βρει εφαρμογή τόσο σε οριζόντιους όσο και σε κεκλιμένους αγωγούς. Από την ανάλυση των δεδομένων της βιβλιογραφίας διαπίστωσε ότι η διάμετρος του αγωγού και η επιφανειακή τάση δεν επηρεάζουν την τιμή της συγκράτησης της υγρής φάσης, ενώ η τιμή της αυξάνεται με αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης. Διαπιστώθηκε τέλος ότι αν και κατηφορική κλίση του αγωγού επηρεάζει έντονα την τιμή της συγκράτησης, η ανηφορική κλίση δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο, αφού οι αποκλίσεις από τις τιμές για οριζόντιο αγωγό είναι ελάχιστες.

Οι Ottens et al. (2001) ασχολήθηκαν με την εύρεση κατάλληλου συσχετισμού για τον υπολογισμό του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής. Παρατήρησαν ότι η τιμή του συντελεστή τριβής στη διεπιφάνεια εξαρτάται από την ταχύτητα των κυμάτων τόσο σε οριζόντιους όσο και σε κεκλιμένους αγωγούς. Η εξάρτηση μάλιστα του λόγου του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής και του συντελεστή τριβής μεταξύ τοιχώματος και αέριας φάσης με την ταχύτητα των κυμάτων είναι ανάλογη.

Σχεδόν ταυτόχρονα, έγιναν προσπάθειες από τους Simmons and Hanratty (2001) να μελετηθεί πειραματικά η επίδραση της ανωφερούς κλίσης του αγωγού στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, όπου η απαραίτητη παροχή της υγρής φάσης για τη μετάπτωση μειώνεται καθώς αυξάνεται η κλίση του αγωγού. Προκειμένου να διατηρηθεί η διαστρωματωμένη ροή σε αγωγό με ανωφερή κλίση είναι απαραίτητο η αέρια φάση να ασκεί την απαιτούμενη δύναμη στην υγρή, μέσω της διεπιφανειακής τάσης, ώστε να αποφευχθεί η κίνηση της υγρής φάσης προς τα κάτω εξαιτίας της βαρύτητας. Υπάρχει δηλαδή μία κρίσιμη ταχύτητα της αέριας φάσης κάτω από την οποία η υγρή φάση κινείται αντίθετα από την αέρια, αφού η δύναμη της βαρύτητας δεν εξισορροπείται από τη διεπιφανειακή τάση. Στην περιοχή αυτή η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή λαμβάνει χώρα όταν το ύψος της υγρής φάσης έχει αυξηθεί τόσο στην είσοδο του αγωγού, ώστε η ταχύτητα της αέριας φάσης να είναι αρκετή για να δημιουργηθεί αστάθεια τύπου Kelvin-Helmholtz. Η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή έξω από την περιοχή όπου λαμβάνει χώρα αναστροφή της ροής προκαλείται πάνω στη στάσιμη διεπιφάνεια της διαστρωματωμένης ροή από την ανάπτυξη των κυμάτων και ορίζεται από την αστάθεια Kelvin-Helmholtz ή από την αστάθεια διαταραχών μεγάλου μήκους. Οι συνθήκες για την έναρξη των κυμάτων μεγάλου μήκους προκύπτουν με τη βοήθεια της ανάλυσης των Lin and Hanratty (1986a), ενώ το απαραίτητο ύψος της υγρής φάσης ώστε η αστάθεια Kelvin-Helmholtz να λάβει χώρα προκύπτει από την ανάλυση των Andritsos et al (1989).

Τη διαστρωματωμένη ροή σε ροή με κατηφορική κλίση του αγωγού διερεύνησαν και οι Lioumbas et al. (2005), οι οποίοι με οπτικές παρατηρήσεις και μετρώντας το πάχος της υγρής φάσης μέσα στον αγωγό ταυτοποίησαν τρία υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης περιοχής ροής. Σε χαμηλές ταχύτητες της αέριας και υγρής φάσης επικρατεί διαστρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα μικρού πλάτους. Η ταχύτητα και η συχνότητα των κυμάτων αυτών αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης. Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης εμφανίζονται τα πρώτα μοναχικά κύματα. Η συχνότητα των κυμάτων αυτών αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης, ενώ το πλάτος τους μειώνεται. Τέλος, σε μεγαλύτερες ταχύτητες της αέριας φάσης εμφανίζονται κύματα μεγάλου πλάτους και μικρού μήκους. Η εμφάνιση των κυμάτων αυτών είναι συνέπεια της διάτμησης της αέριας φάσης, ενώ τόσο το πλάτος, όσο και η συχνότητα τους αυξάνεται με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Ωστόσο, με αύξηση της κλίσης του αγωγού το πλάτος των κυμάτων αυτών μειώνεται. Πραγματοποίησαν πειράματα με σύστημα νερού-αέρα σε κλίσεις μέχρι και  $-9^\circ$  και παρατήρησαν ότι η λεία διαστρωματωμένη δεν εμφανίζεται για την περίπτωση ροής σε αγωγούς με κλίση. Διαπίστωσαν επίσης ότι η μετάπτωση σε ροή με μοναχικά κύματα λαμβάνει χώρα σε ένα στενό εύρος του  $Re_L$  και οφείλεται στην μετάπτωση σε τυρβώδη ροή της υγρής φάσης. Αργότερα, μελέτησαν

πειραματικά και την επίδραση προσθήκης μικρών ποσοτήτων επιφανειοδραστικών ουσιών στα χαρακτηριστικά των κυμάτων που δημιουργούνται κατά τη διφασική ροή σε αγωγούς με κατηφορική (Lioumbas et al., 2006), αλλά και ανηφορική κλίση (Lioumbas et al., 2009).

**Πίνακας 2.1. Οι κυριότερες μελέτες διφασικής ροής υγρού αερίου σε κεκλιμένους αγωγούς**

Ερευνητής	Έτος	Κλίση	Αντικείμενο Μελέτης
Beggs and Brill	1973	0 έως $\pm 90^\circ$	Ημι-εμπειρικοί συσχετισμοί για $f_i$ , συγκράτηση και πτώση πίεσης
Barnea et al.	1980	-10 έως $5^\circ$	Χάρτες περιοχών ροής και έλεγχος του μοντέλου Taitel and Dukler (1976a) για την περιγραφή των μεταπτώσεων
Barnea et al.	1982	0 έως $+90^\circ$	Μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής
Barnea et al.	1985	-90 έως $0^\circ$	Χάρτες καθεστώτων ροής
Andreussi and Persen	1987	+0.05 και $2.1^\circ$	Συσχετισμός για τον υπολογισμό του συντελεστή $f_i$
Andreussi and Bendkinsen	1989	-3 έως $-0.3^\circ$	Συσχετισμός για τον υπολογισμό του κλάσματος κενού
Kokal and Stanislav	1989	0, $\pm 5$ και $\pm 9^\circ$	Περιγραφή των μεταπτώσεων στα διάφορα καθεστώτα ροής και κατασκευή χαρτών καθεστώτων ροής
Kokal and Stanislav	1989	0, $\pm 5$ και $\pm 9^\circ$	Υπολογισμός πτώσης πίεσης και συγκράτησης
Brauner and Maron	1992	Θεωρητική μελέτη	Ανάλυση ευστάθειας και μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα. Επίδραση φυσικών ιδιοτήτων
Grolman et al.	1996	-0.1 έως $-0.6^\circ$	Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή
Grolman and Fortuin	1997	Θεωρητική μελέτη	Υπολογισμός πτώσης πίεσης και συγκράτησης (MARS model)
Woods et al.	2000	+0.2, +0.5, και $+0.8^\circ$	Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή
Adbul-Majeed	2000	-10 έως $+9^\circ$	Συσχετισμός για υπολογισμό συγκράτησης στη διαλείπουσα ροή
Ottens et al.	2001	-5 έως $6^\circ$	Συσχετισμός για τον υπολογισμό του $f_i$
Simmons and Hanratty	2001	-0.05, -0.2, -0.4 και $-1.2^\circ$	Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή
Lioumbas et al.	2005	1 έως $8^\circ$	Διερεύνηση δημιουργίας κυμάτων και των χαρακτηριστικών τους
Lioumbas et al.	2009	1 έως $8^\circ$	Διερεύνηση δημιουργίας κυμάτων και των χαρακτηριστικών τους

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 3

---

---

## 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

---

### 3.1 Πειραματική διάταξη

Για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων της διατριβής χρησιμοποιήθηκε διάταξη οριζόντιου αγωγού για τη μελέτη διφασικής ροής υγρού-αερίου που προϋπήρχε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών. Η διάταξη αυτή επανασχεδιάστηκε και τροποποιήθηκε σε σημαντικό βαθμό ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στους στόχους που είχαν τεθεί για την παρούσα μελέτη. Η κυριότερη τροποποίηση αφορούσε στη δυνατότητα μεταβολής της κλίσης του αγωγού κατά  $\pm 3^\circ$ . Σχηματική παράσταση της διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Το κύριο μέρος της διάταξης είναι ένας διαφανής (από Plexiglas) ευθύγραμμος αγωγός διαμέτρου 0.024 m, ο οποίος απαρτίζεται από 8 επιμέρους τμήματα μήκους 0.25 m, 1 m και 2 m. Το συνολικό μήκος του αγωγού είναι 12.75 m ( $L/d=531$ ) και περιλαμβάνει το τμήμα εισόδου, το τμήμα ανάπτυξης της ροής, το τμήμα μετρήσεων και το τμήμα εξόδου. Το πάχος του αγωγού είναι περίπου 7.5 mm, ενώ τα άκρα των επιμέρους τμημάτων ενώνονται μεταξύ τους με κατάλληλες φλάντζες (από συμπαγές Plexiglas) και είναι κατάλληλα επεξεργασμένα ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές στη ροή. Για τη στεγανοποίηση της ροής χρησιμοποιούνται ειδικά ελαστικά δακτυλίδια (o-rings) στις φλάντζες. Ο αγωγός είναι τοποθετημένος σε κατάλληλα υποστηρίγματα πάνω σε μεταλλικό πλαίσιο ώστε να είναι δυνατή η ευθυγράμμιση του με το οριζόντιο επίπεδο και ολόκληρο το σύστημα του μεταλλικού στηρίγματος μπορεί να πάρει κλίση  $\pm 3^\circ$ .

Με στόχο τη μείωση των διαταραχών κατά την επαφή των δύο φάσεων, το τμήμα ανάμιξης των δυο φάσεων είναι ουσιαστικά ένα τμήμα αγωγού τύπου «Υ», κατασκευασμένο από συμπαγές Plexiglas, με το οποίο οι δύο φάσεις εισάγονται υπό γωνία  $-35^\circ$  και  $+35^\circ$  ως

προς τον ευθύγραμμο αγωγό. Η απόσταση μεταξύ του σημείου εισόδου και του πρώτου τμήματος μετρήσεων είναι 2.2 m ( $L/d=92$ ), ενώ ένα δεύτερο τμήμα μετρήσεων βρίσκεται σε απόσταση 8.5 m ( $L/d=354$ ) από την είσοδο του αγωγού. Οι μετρήσεις του πάχους της υγρής στιβάδας, καθώς επίσης και οι οπτικές παρατηρήσεις για τη ταυτοποίηση του καθεστώτος ροής πραγματοποιήθηκαν στο δεύτερο τμήμα μετρήσεων. Το συνολικό μήκος του αγωγού παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς όταν το μήκος του αγωγού δεν είναι αρκετό, τότε επηρεάζονται οι μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής. Συγκεκριμένα, η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης όταν το συνολικό μήκος του αγωγού είναι περιορισμένο (Taitel and Dukler, 1987).

Στο τέλος του αγωγού η ροή εισάγεται σε ένα πλαστικό δοχείο διαχωρισμού φάσεων διαμέτρου 0.5 m και ύψους 1.1 m. Η αέρια φάση εξέρχεται από την κορυφή του διαχωριστή, ενώ η υγρή φάση ανακυκλοφορεί στο σύστημα με τη βοήθεια ανοξείδωτης φυγοκεντρικής αντλίας. Στο εσωτερικό του δοχείου διαχωρισμού και στο κάτω μέρος του βρίσκεται ψυκτική σπείρα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της υγρής φάσης που ανακυκλοφορεί στο σύστημα. Η θερμοκρασία της υγρής φάσης ελέγχεται με τη βοήθεια θερμομέτρου έτσι ώστε σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων να παραμένει σταθερή. Όλα τα τμήματα αγωγών της διάταξης, εκτός βεβαίως από το ευθύγραμμο τμήμα παρατηρήσεων και μετρήσεων, είναι κατασκευασμένα από PVC ή είναι από εύκαμπτο αγωγό PE.

Ως υγρή φάση για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε συστηματικά νερό δικτύου και υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης. Ειδικά για την παρατήρηση των υποκαθεστώτων της διαστρωματωμένης ροής σε οριζόντιο αγωγό χρησιμοποιήθηκε επίσης διάλυμα 5% κ.β. ισοπροπυλικής αλκοόλης, ενώ για την παρατήρηση των καθεστώτων σε ανωφερή ροή χρησιμοποιήθηκαν δύο διαλύματα γλυκερίνης-νερού 60% κ.β. και 74% κ.β. Η μέτρηση της επιφανειακής τάσης των διαλυμάτων έγινε με τη τεχνική της πλάκας Wilhelmy (Kruss Tensiometer). Η επιφανειακή τάση του νερού τους 20°C ήταν πολύ κοντά στη βιβλιογραφική τιμή, ενώ η τιμή της επιφανειακής τάσης του διαλύματος (2.5% κ.β.) της κανονικής βουτανόλης στην ίδια θερμοκρασία προσδιορίστηκε στα 35 mN/m. Η ρύθμιση της παροχής της υγρής φάσης γίνεται με τη βοήθεια βάνας διαφράγματος και η μέτρηση της παροχής επιτυγχάνεται με μία συστοιχία τριών ροόμετρα με πλωτήρα, διαφορετικής παροχής, των οποίων οι καμπύλες βαθμονόμησης παρατίθενται στο Παράρτημα Α. Για την αποφυγή «στραγγαλισμού» της φυγοκεντρικής αντλίας στην έξοδο της υπάρχει αγωγός παράκαμψης (by-pass) που οδηγεί το επιπλέον νερό στη δεξαμενή.

Ως αέρια φάση χρησιμοποιήθηκε αέρας και εμπορικής ποιότητας  $\text{CO}_2$  και He. Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται από τον κεντρικό συμπιεστή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών (AIRCO M529, 4 hp), του  $\text{CO}_2$  από συστοιχία 9 φιαλών (Air Liquide), οι οποίες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους ώστε η παροχή του  $\text{CO}_2$  να παραμένει σταθερή, και του He

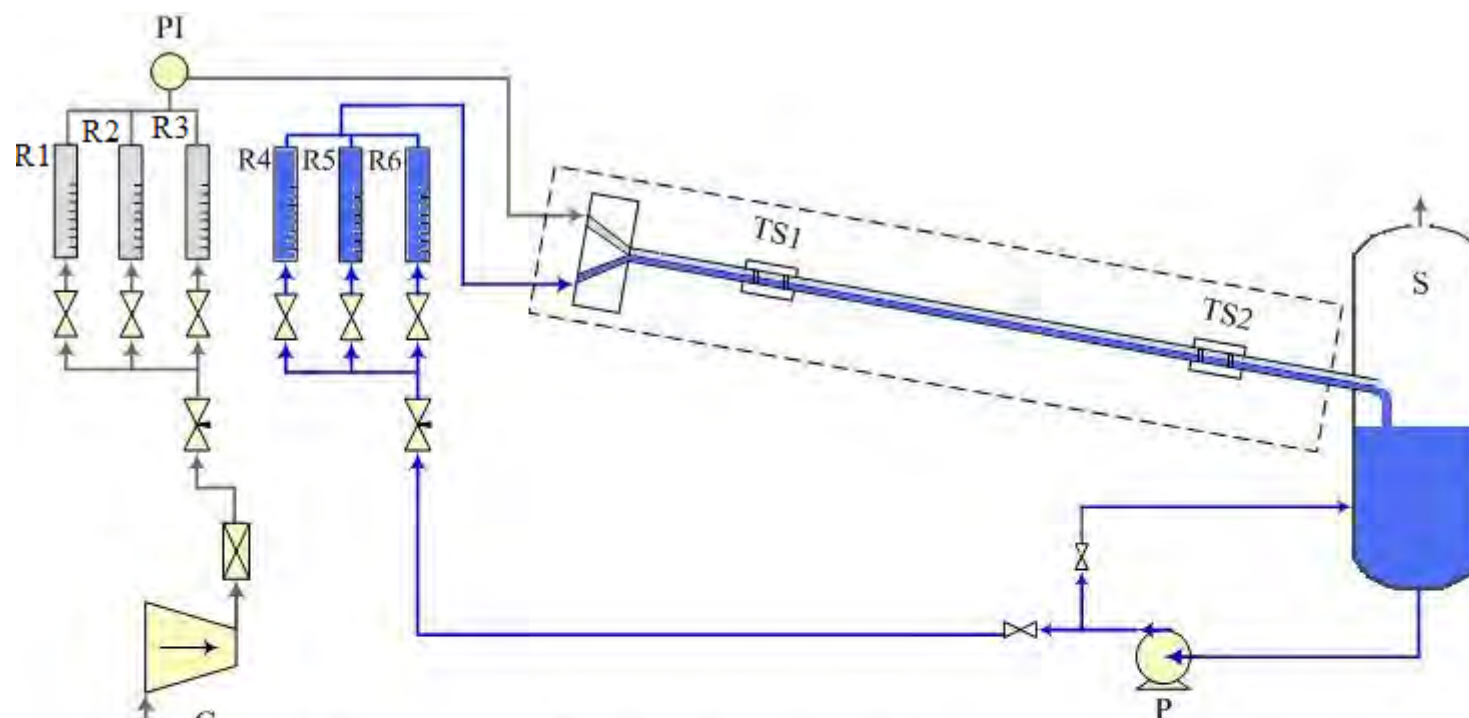
από φιάλες (Air Liquide). Το CO<sub>2</sub> στην έξοδο της συστοιχίας θερμαίνεται με τη βοήθεια θερμαντικού στοιχείου και ηλεκτρικής αντίστασης σε μορφή ταινίας περιτυλιγμένης σε μεταλλικό αγωγό σε μεγαλύτερες παροχές. Η θερμοκρασία του CO<sub>2</sub> μετρείται με τη βοήθεια θερμομέτρου, το οποίο είναι τοποθετημένο πριν από την είσοδο στον αγωγό και ρυθμίζεται με τη βοήθεια της παραπάνω διάταξης. Η θερμοκρασία του CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρέμενε σχεδόν σταθερή στους 20±3°C, ενώ η θερμοκρασία του He και του αέρα δεν χρειαζόταν ρύθμιση αφού παρέμενε σταθερή στους 22±1°C. Η παροχή της αέριας φάσης ρυθμίζεται με τη βοήθεια βάνας διαφράγματος και μετράται με τρία ροόμετρα με πλωτήρα διαφορετικής δυναμικότητας. Η βαθμονόμηση αυτών των ροομέτρων και για τις τρεις αέριες φάσεις έγινε με το μετρητικό αέριας παροχής τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου Ritter BG 40. Η ελάχιστη παροχή του μετρητικού αυτού 0.4 m<sup>3</sup>/h και η μέγιστη 65 m<sup>3</sup>/h.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το τμήμα ανάμιξης στην είσοδο του αγωγού βρίσκεται πάντα ελαφρώς υπερυψωμένο σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων. Επίσης, σε τακτά χρονικά διαστήματα ελεγχόταν η ευθυγράμμιση του αγωγού ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η ευθυγράμμιση ελεγχόταν με την πλήρωση του αγωγού με νερό περίπου μέχρι της μέση και την κατάλληλη ανύψωση ή το κατέβασμα τμημάτων του αγωγού ώστε η κατανομή του νερού να είναι ομοιόμορφη κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού.

### 3.2 Μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας

Το πάχος της υγρής στιβάδας μετρείται σε δύο θέσεις κατά μήκος του αγωγού (88 D και 336 D) με την αγωγιμομετρική τεχνική (conductance technique), η οποία στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δυο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσα τους.

Η αγωγιμομετρική τεχνική με ζεύγος παράλληλων συρμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν η υγρή φάση είναι (ή μπορεί να γίνει) αγωγίμη και, σύμφωνα με τον Laurinat (1982), χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε διφασικές ροές υγρού-αερίου από τον Swanson (1966). Ουσιαστικά μετρείται η σύνθετη αντίσταση (impedance) μεταξύ των δύο παραλλήλων συρμάτων-ηλεκτροδίων. Το μέγεθος αυτό σε ένα αγωγίμο μέσο (π.χ. νερό με συγκεκριμένη ηλεκτρική αγωγιμότητα) τείνει σε μία συγκεκριμένη τιμή και η γωνία φάσης (της τάσης της πηγής σε σχέση με το ρεύμα) τείνει στο μηδέν όταν η συχνότητα του σήματος είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Έτσι η σύνθετη αγωγιμότητα (αντίστροφη σύνθετη αντίσταση) που μετρείται είναι ουσιαστικά η ωμική αγωγιμότητα του συστήματος, η οποία συνήθως είναι ανάλογη με το ύψος του νερού ανάμεσα από τα δύο ηλεκτρόδι



- C: Κεντρικός συμπιεστής  
 P: Αντλία  
 S: Δοχείο διαχωρισμού  
 R1, R2, R3: Ροόμετρα αέριας φάσης  
 R3, R4, R5: Ροόμετρα υγρής φάσης  
 TS1, TS2: Μετρητικά πάχους υγρής στιβάδας  
 PI: Μανόμετρο

Σχήμα 3.1 Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης



Για τον καθορισμό των καθεστώτων ροής κατά τη διφασική ροή σε έναν αγωγό μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλος συνδυασμός ηλεκτροδίων-αισθητήρων (π.χ. Barnea et al., 1980b), οι οποίοι βασίζονται είτε στη μέτρηση της ωμικής αγωγιμότητας (conductance probes) ή της χωρητικής αγωγιμότητας (capacitance probes).

Η θεωρία για τη χρήση της αγωγιμομετρικής τεχνικής με ζεύγος παράλληλων συρμάτων βασίζεται στην ανάλυση του ηλεκτρικού δυναμικού. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάμεσα σε δυο τέλεια αγωγίμους μεταλλικούς κυλίνδρους που βρίσκονται βυθισμένοι σε ένα λιγότερο αγωγίμο υγρό, δίνεται από την ακόλουθη σχέση (όπως αναφέρεται από τον Laurinat, 1982):

$$c = \frac{\pi \gamma h}{\ln \left( \frac{D_0 + (D_0^2 - d^2)^{0.5}}{d} \right)} \quad (3.11)$$

όπου:

$c$  : ωμική αγωγιμότητα

$h$  : πάχος της υγρής στιβάδας

$\gamma$  : ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος

$D_0$ : απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων

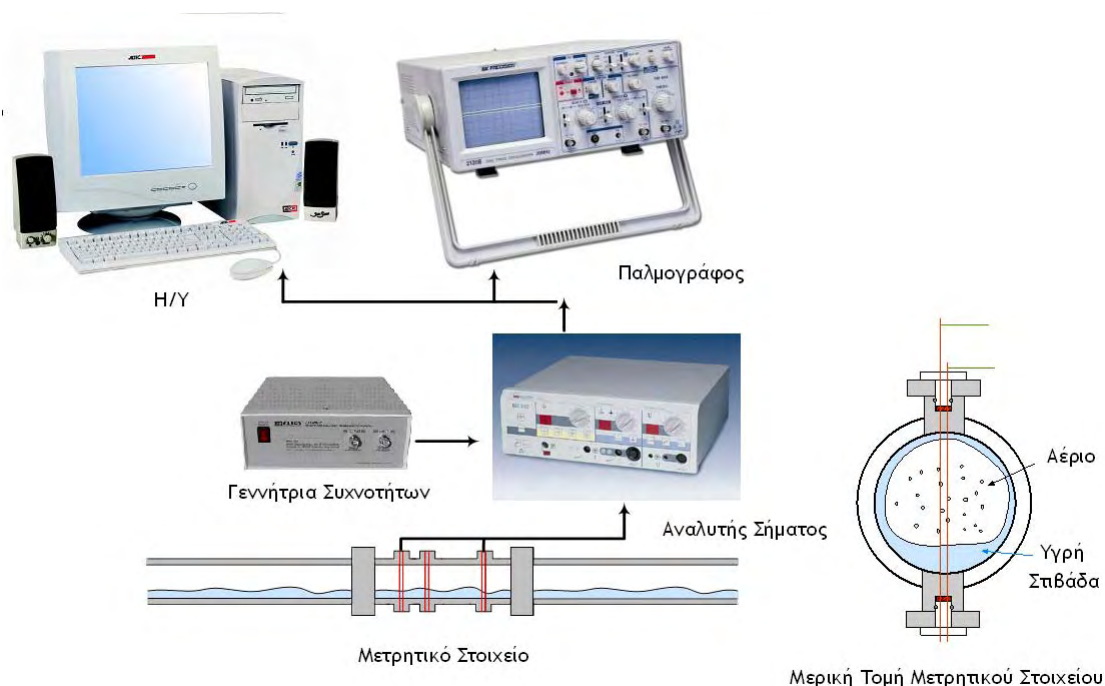
$d$  : διάμετρος των κυλίνδρων

Για λεπτά πάχη της υγρής στιβάδας προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ της αγωγιμότητας που μετρείται και τους πάχους είναι γραμμική. Η σχέση μεταξύ αγωγιμότητας και πάχους της στιβάδας βρίσκεται ύστερα από κατάλληλη βαθμονόμηση της μετρητικής διάταξης.

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας με τη αγωγιμομετρική τεχνική, ενώ σε κάθε μετρητικό υπάρχουν 3 ζεύγη παράλληλων συρμάτων που μετράνε το ύψος της υγρής στιβάδας κάθε φορά. Κάθε ζεύγος συρμάτων είναι κατασκευασμένο από μεταλλικά ανοξείδωτα σύρματα (chromel) διαμέτρου 0.4 mm που απέχουν μεταξύ τους 3 mm.

Ο αισθητήρας (probe) τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz ώστε να αποφεύγεται ηλεκτρόλυση του νερού) από γεννήτρια συχνοτήτων (HAMEG HM 8030, 5 MHz). Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές, οι οποίες μετρούνται στα άκρα μιας μικρής αντίστασης (50 Ω), τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή. Ο αναλυτής αποτελείται από ένα διαφορικό ενισχυτή, που ενισχύει τις πολύ μικρές μεταβολές της τάσης, καθώς και από το τμήμα αναδιαμόρφωσης και φιλτραρίσματος

του σήματος. Η εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 25 kHz, που τροφοδοτείται στον αναλυτή, είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, δηλαδή η μεταβολή του πλάτους της αντιστοιχεί στις μεταβολές της τάσης στα άκρα της αντίστασης. (Ουσιαστικά στο εναλλασσόμενο σήμα από το ηλεκτρόδιο γίνεται δειγματοληψία και παίρνουμε την τιμή στο μέγιστο πλάτος του κύματος. Η τιμή αυτή παραμένει σταθερή για όλο το υπόλοιπο μήκος κύματος μέχρι να γίνει δειγματοληψία στο επόμενο μέγιστο. Η συνεχής αυτή τάση με τη βοήθεια μιας κάρτας ATD ψηφιοποιείται και αποθηκεύεται στον υπολογιστή. Ηλεκτρικό κύκλωμα εξασφαλίζει στην έξοδό του συνεχή τάση απαλλαγμένη από την υψηλή συχνότητα του φορέα και ανάλογη των μεταβολών του πάχους της υγρής στιβάδας. Η αγωγιμότητα της υγρής φάσης μετριέται με αγωγιμόμετρο METROHM 712 στην αρχή και στο τέλος κάθε σειράς πειραμάτων, ώστε τυχόν μεταβολές της θερμοκρασίας ή και της σύστασης του νερού που χρησιμοποιείται και, κατά συνέπεια, της αγωγιμότητας να ληφθούν υπόψη στη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας.

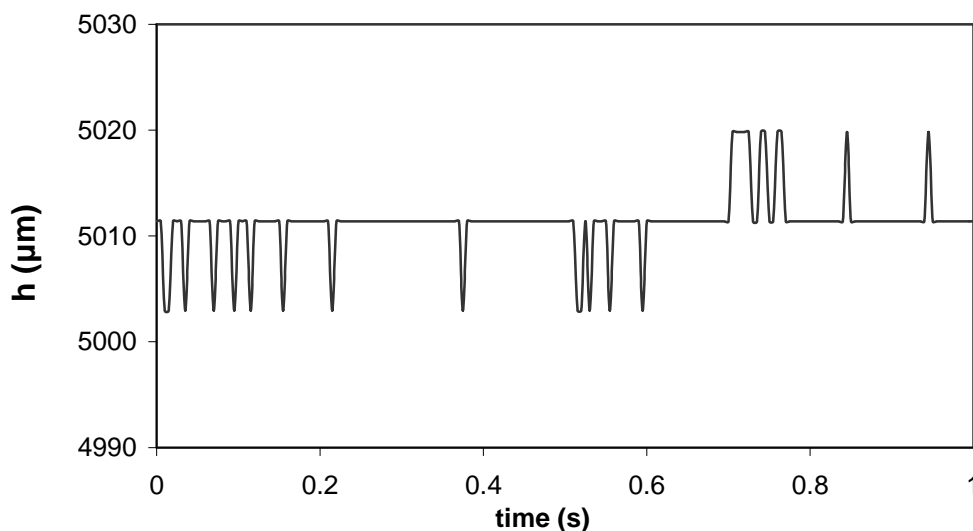


**Σχήμα 3.2** Μετρητικό στοιχείο ζεύγους παράλληλων συρμάτων και σύνδεση με αναλυτή σήματος

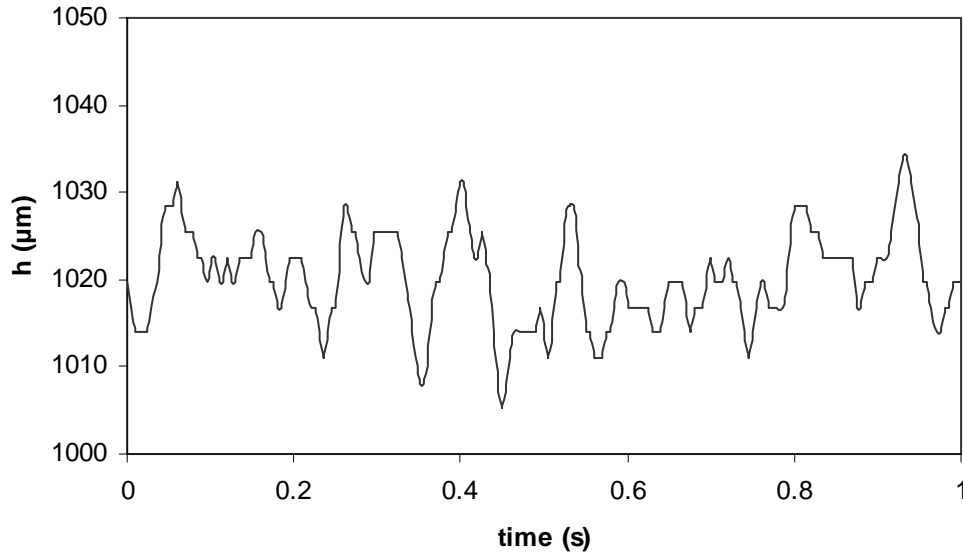
Η βαθμονόμηση του μετρητικού στοιχείου πάχους της υγρής στιβάδας πραγματοποιείται με απόσπασή του από την πειραματική διάταξη. Το μετρητικό, αφού αφαιρεθεί από την πειραματική διάταξη τοποθετείται σε κατάλληλη βάση και κλείνονται τα δυο άκρα του. Από το πάνω μέρος εισάγονται γνωστές ποσότητες υγρού και με τον τρόπο αυτό αντιστοιχίζεται η τάση εξόδου του αναλυτή με το πάχος της υγρής στιβάδας, σε συνάρτηση με την αγωγιμότητα του νερού που χρησιμοποιείται. Η εξάρτηση του πάχους της

υγρής στιβάδας και της αγωγιμότητας είναι σχεδόν γραμμική. Κάθε μέτρηση διαρκεί 30 s και γίνεται με συχνότητα δειγματοληψίας 200 Hz, ενώ όταν επικρατεί διαλείπουσα ροή η μετρήσεις διαρκούν 100 s.

Η ακρίβεια της μεθόδου (accuracy) επηρεάζεται από τη βαθμονόμηση του συστήματος, τον ηλεκτρονικό θόρυβο και τις μεταβολές της θερμοκρασίας ή/και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υγρού. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πάχους της υγρής στιβάδας όταν μέσα στον αγωγό επικρατεί λεία διαστρωματωμένη ροή. Οι διαταραχές που εμφανίζονται (θόρυβος) οφείλονται στο σφάλμα ψηφιοποίησης της μεθόδου (digitization error) και όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.3 είναι περίπου 10  $\mu\text{m}$ . Το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να επιφέρει η ψηφιοποίηση της μεθόδου είναι της τάξης του  $\pm 5\%$ , για περιπτώσεις χαμηλής φαινομενικής ταχύτητας της υγρής φάσης και υψηλής της αέριας, όταν το πάχος της υγρής στιβάδας είναι περίπου 200  $\mu\text{m}$ . Μετρήσεις σε χαμηλότερα πάχη υγρής φάσης δεν πραγματοποιήθηκαν κατά την παρούσα εργασία. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η χρονική απεικόνιση του πάχους της υγρής στιβάδας όταν στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων δημιουργηθούν οι πρώτες διαταραχές. Κατά συνέπεια με τη χρήση της αγωγιμομετρικής τεχνικής μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια τα πρώτα κύματα που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια με πλάτος περίπου 25  $\mu\text{m}$ . Τέλος, η επαναληψιμότητα της μεθόδου (accuracy) είναι καλύτερα του  $\pm 2\%$ .



**Σχήμα 3.3** Χρονική εξέλιξη πάχους υγρής στιβάδας για σύστημα νερού-αέρα σε  $u_{GS}=1.98 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.003 \text{ m/s}$



**Σχήμα 3.4** Χρονική εξέλιξη πάχους υγρής στιβάδας για σύστημα νερού-αέρα σε  $u_{GS}=6.6 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.002 \text{ m/s}$

Από τη χρονική εξέλιξη του πάχους της υγρής στιβάδας κατά τη ροή με κύματα, αλλά και τη διαλείπουσα ροή και με τη βοήθεια των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά των κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η κορυφή (time delay) που προκύπτει από τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης δίνει τη συχνότητα των κυμάτων, ενώ η κορυφή που προκύπτει από τη συνάρτηση της ετεροσυσχέτισης δίνει την ταχύτητα που κινούνται μέσα στον αγωγό, εφόσον είναι γνωστή η απόσταση μεταξύ δυο σημείων μέτρησης του πάχους της υγρής στιβάδας. Η αυτοσυσχέτιση ουσιαστικά δεν διαφέρει από την ετεροσυσχέτιση, αφού στην αυτοσυσχέτιση συσχετίζεται η ίδια χρονοσειρά του πάχους της υγρής στιβάδας, ενώ στην ετεροσυσχέτιση χρονοσειρές σε δύο διαφορετικά σημεία μέσα στον αγωγό. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις αντίστοιχα (Bendat and Persol, 1971:

$$R_{xx} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=k}^{N-(k+1)} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} (x_t - \bar{x})^2} \quad (3.12)$$

$$R_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=k}^{N-(k+1)} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})} \quad (3.13)$$

όπου:

$x_t$ : χρονοσειρά του πάχους της υγρής στιβάδας στη 1<sup>η</sup> θέση

$y_t$ : χρονοσειρά του πάχους της υγρής στιβάδας στη 1<sup>η</sup> θέση

$N$ : διάσταση της χρονοσειράς (αριθμός σημείων)

Παράλληλα από τη χρονική εξέλιξη του πάχους της υγρής φάσης μπορεί να υπολογιστεί το φάσμα ισχύος της κάθε χρονοσειράς μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform ή FFT). Ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier είναι ένας κατάλληλος αλγόριθμος για τον υπολογισμό του διακριτού μετασχηματισμού Fourier και δεν αποτελεί ξεχωριστό μετασχηματισμό. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην επεξεργασία εικόνων καθώς και για την ανάλυση συχνοτήτων σήματος.

Κάθε περιοδική συνάρτηση  $f(x)$  μπορεί να αναπαρασταθεί με τη βοήθεια των σειρών Fourier, με άθροισμα ημιτόνων και συνημιτόνων ως εξής:

$$f(x) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \alpha_n \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) + \beta_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \right] \quad (3.14)$$

Στην περίπτωση των μη-περιοδικών συναρτήσεων οι σειρές Fourier αντικαθίστανται από το μετασχηματισμό Fourier ως εξής:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \exp(-i\xi x) dx \right] \exp(i\xi x) d\xi \quad (3.15)$$

Οι συντελεστές της σχέσης (3.15) ονομάζονται συντελεστές Fourier και δίνονται από τις σχέσεις κατά Euler:

$$\alpha_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \quad (3.16)$$

$$\beta_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \quad (3.17)$$

Κάθε όρος της σχέσης (3.17) ( $n=1,2,3...N$ ) ονομάζεται αρμονική και η συχνότητα του είναι πολλαπλάσιο μιας βασικής αρμονικής, η οποία έχει την ίδια περίοδο με αυτή της συνάρτησης  $f(x)$ . Για τη χρονοσειρά  $x_t$  που αναφέρθηκε και παραπάνω με διάσταση  $N$ , δηλαδή  $x(i)$  με  $i=1..N$ , το αποτέλεσμα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier είναι ένα διάνυσμα  $X$  διάστασης  $N$  και δίνεται από τη σχέση:

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) \exp\left[-j2\pi(k-1)\frac{n-1}{N}\right] \quad (3.18)$$

Τόσο οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης, ετεροσυσχέτισης αλλά και του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier υπολογίζονται με τη βοήθεια κωδίκων MATLAB.

### 3.3 Μέτρηση της πτώσης πίεσης

Η μέτρηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού πραγματοποιείται με διαφορικό μεταλλάκτη πίεσης (ABB model 2600T, 265D) με εύρος 50-1000 Pa. Η πειραματική διάταξη διαθέτει τέσσερα σημεία μέτρησης στον πυθμένα και τέσσερα στην κορυφή του αγωγού, τα οποία είναι μικρές οπές διαμέτρου 1 mm (pressure taps). Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα η πτώση πίεσης να μετρηθεί τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια φάση. Επίσης, η πτώση πίεσης μπορεί να μετρηθεί σε διάφορα μήκη του αγωγού, δηλ. 0.5, 2 και 8 m, ανάλογα με την περιοχή ροής και την πτώση πίεσης που παρατηρείται.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων της πτώσης πίεσης απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι γραμμές σύνδεσης του οργάνου με τον αγωγό είναι γεμάτες με υγρό και δεν υπάρχουν παγιδευμένες φυσαλίδες αέρα, όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στην υγρή φάση. Αντίστοιχα, όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στην αέρια φάση γίνεται έλεγχος ώστε στις γραμμές σύνδεσης του οργάνου με τον αγωγό δεν υπάρχουν τμήματα ή σταγονίδια της υγρής φάσης.

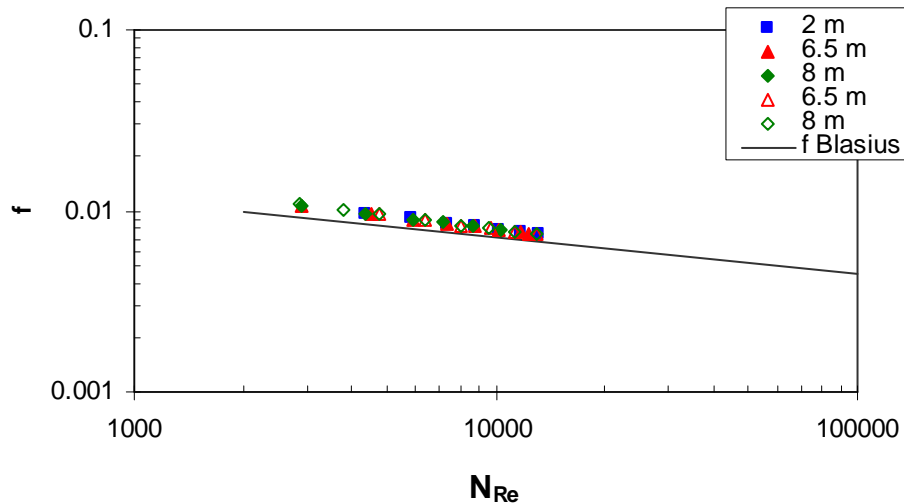
Για να ελεγχθεί η τραχύτητα και η ομοιομορφία της διαμέτρου του αγωγού έγιναν μετρήσεις της πτώσης πίεσης μέσα στον αγωγό για μονοφασική ροή νερού και αέρα. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή τριβής,  $f$ , που προκύπτουν με τη βοήθεια μετρήσεων και της εξίσωσης που δίνει την πτώση πίεσης λόγω τριβών σε κυλινδρικό αγωγό (εξ.(3.19)) για διάφορες παροχές μονοφασικής ροής νερού και αέρα και για διαφορετικές αποστάσεις μέτρησης στον αγωγό,

$$\left( \frac{\Delta P}{L} \right) = 2f \frac{\rho u^2}{D} \quad (3.19)$$

Οι πειραματικά προσδιοριζόμενες τιμές του συντελεστή τριβής,  $f$ , συγκρίνονται με την εξίσωση Blasius (3.20), η οποία αποτελεί μία εμπειρική προσαρμογή των τιμών του συντελεστή τριβής κατά τη διάρκεια τυρβώδους μονοφασικής ροής μέσα σε οριζόντιο αγωγό.

$$f = 0.0791 \text{Re}_L^{-0.25} \quad (3.20)$$

Στο Σχήμα 3.5 παρατηρείται ότι υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων της τιμής του συντελεστή τριβής και των τιμών που υπολογίζονται με τη βοήθεια της εξίσωσης του Blasius.



**Σχήμα 3.5** Σύγκριση πειραματικών τιμών του συντελεστή τριβής για μονοφασική ροή νερού (γεμάτα σύμβολα) και αέρα (κενά σύμβολα) και σύγκριση με τη σχέση Blasius

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και οι παράμετροι που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

**Πίνακας 3.1** Φυσικές ιδιότητες συστημάτων σε 20° C και 1 atm

Σύστημα	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_G$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_L$ (P.s)	$\mu_G$ (P.s)	$\sigma$ (mN/m)
Νερό-Αέρας	1000	1.2	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$1.48 \cdot 10^{-5}$	72
Υδ. Διάλυμα κ-Βουτανόλης-αέρα	995	1.2	$1.23 \cdot 10^{-3}$	$1.48 \cdot 10^{-5}$	35
Νερό-CO <sub>2</sub>	1000	1.81	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$1.81 \cdot 10^{-5}$	70 (Pallas and Pethica, 1983)
Νερό-He	1000	0.167	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	72 (Massoudi and King, 1974)
Υδ. Διάλυμα γλυκερίνης 60% κ.β.-αέρα	1150	1.2	$14.8 \cdot 10^{-3}$	$1.48 \cdot 10^{-5}$	68
Υδ. Διάλυμα γλυκερίνης 75% κ.β.-αέρα	1195	1.2	$41 \cdot 10^{-3}$	$1.48 \cdot 10^{-5}$	67

**Πίνακας 3.2 Πειραματικές Μετρήσεις**

α/α	Σύστημα	Αρ. Μετρήσεων	Κλίση	Παράμετροι
1	Νερό-Αέρας	349	Οριζόντια	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
2	CO <sub>2</sub> -Νερό	204	Οριζόντια	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
3	Υδ. διαλυμα βουτανόλης-Αέρας	165	Οριζόντια	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
4	He-Νερό	49	Οριζόντια	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
5	Νερό-Αέρας	148	-0.25°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
6	Νερό-Αέρας	175	-0.5°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
7	Νερό-Αέρας	146	-1°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
8	CO <sub>2</sub> -Νερό	157	-0.25°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
9	CO <sub>2</sub> -Νερό	140	-0.55°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
10	CO <sub>2</sub> -Νερό	140	-1°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
11	Νερό-Αέρας	118	+0.25°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
12	Νερό-Αέρας	111	+1°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
13	CO <sub>2</sub> -Νερό	92	+0.25°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
14	CO <sub>2</sub> -Νερό	61	+1°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
15	Υδ. διαλυμα βουτανόλης-Αέρας	119	-0.5°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
16	Υδ. διαλυμα βουτανόλης-Αέρας	114	-1°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
17	Υδ. διαλυμα βουτανόλης-Αέρας	125	+0.25°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
18	Υδ. διαλυμα βουτανόλης-Αέρας	122	+1°	Κατασκευή Χάρτη Περιοχών Ροής $dP/dx$ , h/d
19	Υδ. διαλυμα βουτανόλης	13	+0.25°	Μελέτη Ευστάθειας
20	Υδ. διαλυμα βουτανόλης	13	+1°	Μελέτη Ευστάθειας
19	Νερό	13	+0.25°	Μελέτη Ευστάθειας
20	Νερό	13	+1°	Μελέτη Ευστάθειας

\*Το πρόσημο "+" δηλώνει κατωφερή κλίση του αγωγού, ενώ το πρόσημο "-" ανωφερή κλίση του αγωγού



---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 4

---

---

## 4. ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ

---

### 4.1 Εισαγωγή

Η ταυτοποίηση του καθεστώτος ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί με οπτικές παρατηρήσεις σε ένα διαφανές τμήμα του αγωγού. Στην περίπτωση όμως ταχύτατα εξελισσόμενων φαινομένων, όπου η απλή παρατήρηση δεν είναι επαρκής, η χρήση της φωτογραφικής μεθόδου μεγάλης ταχύτητας (high speed photography) ή η φωτογράφιση αξονικής διατομής (axial view photography) είναι επιβεβλημένη. Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που είναι αδύνατη η οπτική επαφή με το εσωτερικό του αγωγού.

Ωστόσο, η ανίχνευση του καθεστώτος ροής με οπτικές παρατηρήσεις αποτελεί μια υποκειμενική μέθοδο και για το λόγο αυτό πολλοί ερευνητές έχουν επιχειρήσει να προσδιορίσουν με «αντικειμενικό» τρόπο το καθεστώς ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό με τη βοήθεια διαφόρων μεθόδων. Μερικές από αυτές τις τεχνικές είναι η αγωγιμομετρική τεχνική, η απορρόφηση ακτίνων Χ (ή ακτίνων γ) και η ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων των διαταραχών πίεσης ή του πάχους της υγρής στιβάδας.

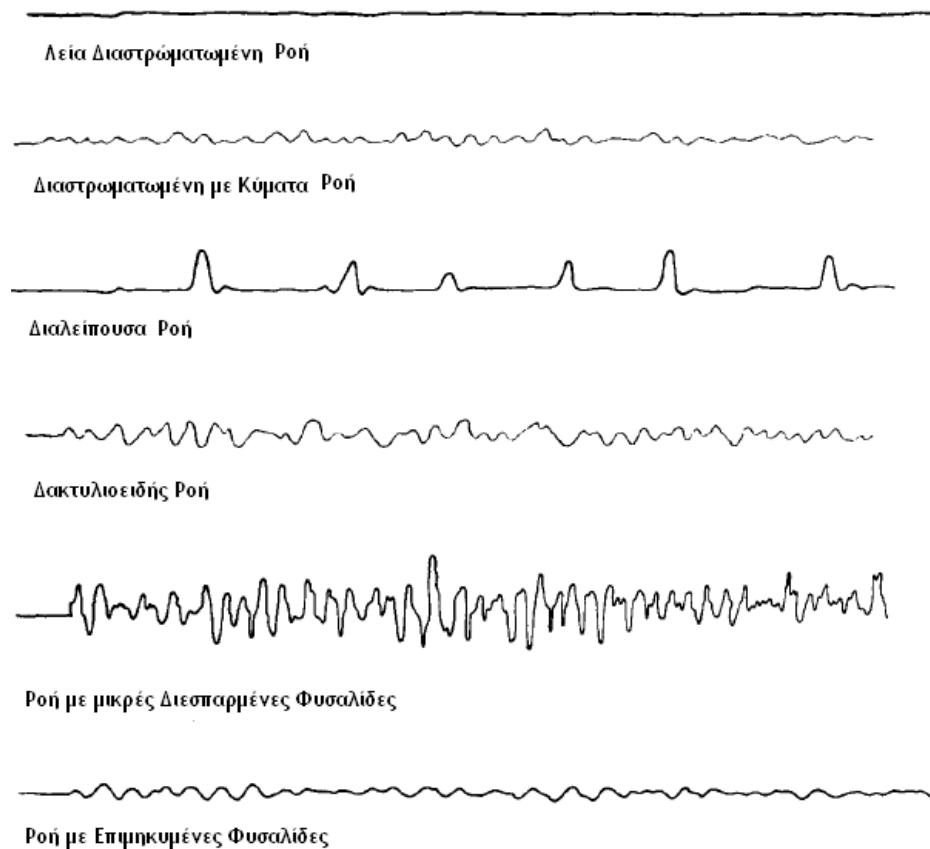
### 4.2 Μέθοδοι ταυτοποίησης καθεστώτων ροής

Η προσπάθεια για την εύρεση μιας «αντικειμενικής» τεχνικής για τον προσδιορισμό των καθεστώτων ροής ξεκίνησε στη δεκαετία του 1960. Οι Hubbard and Dukler (1966) πρότειναν τη στατιστική ανάλυση (φασματική κατανομή) των διαταραχών της πτώσης

πίεσης σε δύο διαφορετικές θέσεις στον αγωγό. Με την τεχνική αυτή μπορούσε να γίνει διάκριση ανάμεσα σε διαλείπουσα και διατρωματωμένη ροή, όχι όμως ανάμεσα σε διαστρωματωμένη και δακτυλιοειδή ροή.

Μερικά χρόνια αργότερα, οι Jones and Zuber (1975) έδειξαν ότι μπορεί να γίνει αξιόπιστη διάκριση ανάμεσα στα καθεστώτα ροής με τη φασματική ανάλυση της συγκράτησης του υγρού. Η μέτρηση της συγκράτησης για κατακόρυφη ροή σε κανάλι ορθογωνικής διατομής γινόταν με τη βοήθεια ακτίνων Χ. Είναι προφανές ότι μία τέτοια τεχνική είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε ένα κοινό ερευνητικό εργαστήριο. Σημειώνεται επίσης ότι η φασματική ανάλυση σημάτων εκείνη την εποχή δεν ήταν τόσο εύκολη υπόθεση όπως είναι σήμερα.

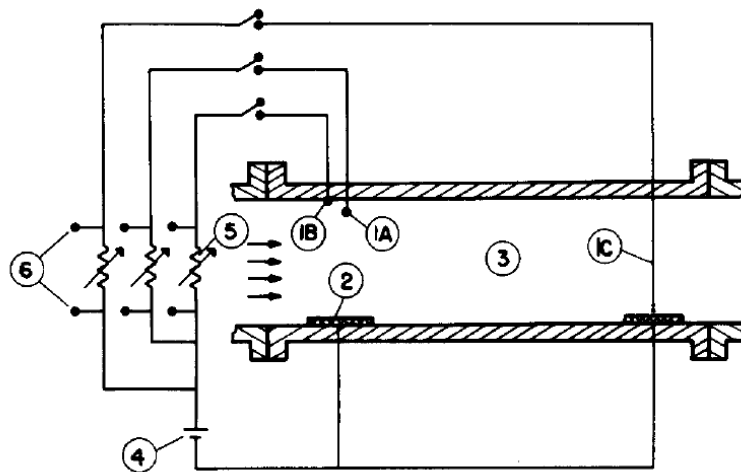
Οι Weisman et al (1979), αντιλαμβανόμενοι τη δυσκολία της στατιστικής ανάλυσης σημάτων, πρότειναν συγκεκριμένα κριτήρια που βασίζονται στις καταγραφές (traces) της πτώσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου. Οι χρονοσειρές της πτώσης πίεσης που αποτυπώνονται είναι χαρακτηριστικές για ένα συγκεκριμένο καθεστώς ροής. Τυπικές καταγραφές της πτώσης πίεσης για διάφορα καθεστώτα ροής παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Συγκεκριμένα, κατά τη διαλείπουσα ροή οι ερευνητές αυτοί παρατήρησαν ότι εμφανίζονται έντονες κορυφές ανάμεσα σε ήρεμες περιοχές. Το μήκος των ήρεμων αυτών περιοχών είναι τουλάχιστον διπλάσιο από το μήκος που καταλαμβάνουν οι κορυφές που εμφανίζονται στη χρονοσειρά. Κατά τη λεία διαστρωματωμένη ροή δεν παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις, με το γεγονός αυτό να αποτελεί κριτήριο για το διαχωρισμό της λείας από την κυματοειδή διαστρωματωμένη ροή. Καθώς αυξάνεται η παροχή της αέριας φάσης, η συχνότητα των διαταραχών αυτών αυξάνεται, αν και το πλάτος τους παραμένει μικρό. Κατά την μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή το πλάτος των διαταραχών αυξάνεται και με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή με κύματα στη δακτυλιοειδή ροή. Ακόμη παρατηρήθηκε ότι πλάτος των διαταραχών της πτώσης πίεσης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παροχή της αέριας φάσης. Ωστόσο, κατά τη μετάπτωση σε ροή με διεσπαρμένες μικρές φυσαλίδες εμφανίζεται έντονη αύξηση του πλάτους αυτού. Σε πολύ υψηλές παροχές της αέριας φάσης οι διαταραχές αυτές έχουν μεγάλη συχνότητα και πλάτος.



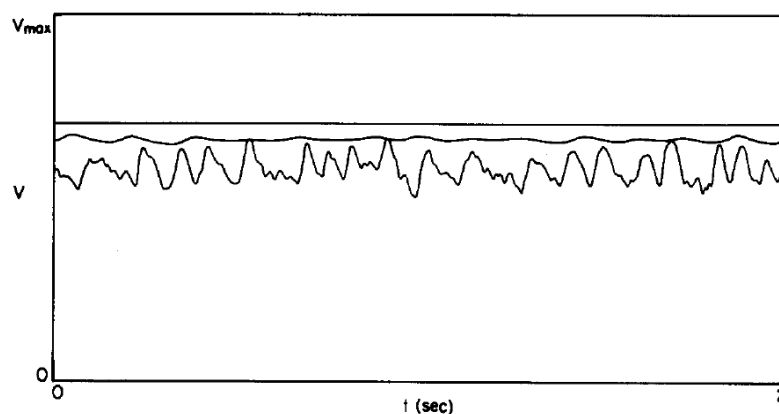
**Σχήμα 4.1** Διακυμάνσεις της πτώσης πίεσης σε διάφορα καθεστώτα ροής (Weisman et al, 1979)

Για την ταυτοποίηση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιους (αλλά και σε κατακόρυφους αγωγούς) οι Barnea et al (1980) πρότειναν τη χρήση ενός συστήματος τριών αισθητήρων επαφής. Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής στηρίζεται στη διαφορετική ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού από την αγωγιμότητα του αέρα. Τα τρία ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία του αγωγού, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Ο πρώτος αισθητήρας (1A), από ανοξείδωτο σύρμα διαμέτρου 0.25 mm, μπορεί να ανιχνεύσει τη διέλευση φυσαλίδων και τοποθετείται περίπου 3 mm πιο κάτω από την πάνω πλευρά του αγωγού. Εκτός από το ελεύθερο άκρο του, το υπόλοιπο τμήμα του σύρματος είναι καλυμμένο με τεφλόν. Ο δεύτερος αισθητήρας-σύρμα (1B) τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του αγωγού, ως συνέχεια του τοιχώματος του αγωγού (flush mounted), και μπορεί να ανιχνεύσει τη διαβροχή της περιφέρειας του αγωγού. Αντιδιαμετρικά από τα δύο αυτά ηλεκτρόδια τοποθετείται ένα επίπεδο ηλεκτρόδιο από χαλκό. Ο τρίτος αισθητήρας (1C), ουσιαστικά μία μη-μονωμένη μεταλλική βελόνα που απέχει 3 mm από ένα επίπεδο ηλεκτρόδιο από χαλκό, μπορεί να προσδιορίσει χοντρικά το πάχος της υγρής φάσης στη διαστρωματωμένη ροή.

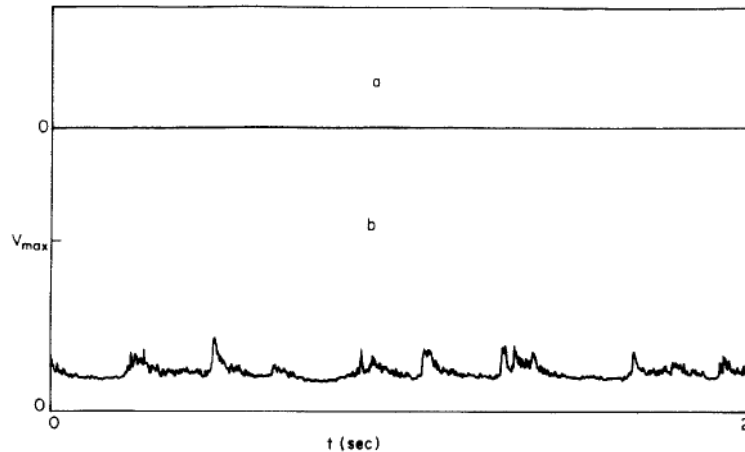
Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την ταυτοποίηση του καθεστώτος ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό περιγράφεται συνοπτικά ως εξής. Όταν η τάση εξόδου είναι μηδενική από τα ηλεκτρόδια 1A και 1B, τότε στον αγωγό επικρατεί διαστρωματωμένη ροή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Η δακτυλιοειδής ροή ανιχνεύεται όταν υπάρχει σήμα από τον αισθητήρα 1B, όχι όμως από τον 1A (Σχήμα 4.4). Τάση εξόδου τόσο από τον 1A, αλλά και από το αισθητήρα 1B, υποδηλώνει διαλείπουσα ροή ή ροή με διεσπαρμένες φυσαλίδες, ενώ με τη βοήθεια του σήματος από τον 1A μπορεί να γίνει η διάκριση ανάμεσα στα δυο παραπάνω καθεστώτα ροής. Κατά τη ροή με διεσπαρμένες φυσαλίδες το σήμα χαρακτηρίζεται από διαταραχές υψηλής συχνότητας που το πλάτος τους κυμαίνεται από μηδέν μέχρι τη μέγιστη τάση που προκύπτει κατά τη μονοφασική ροή υγρής φάσης μέσα στον αγωγό. Κατά τη διαλείπουσα ροή το σήμα εξόδου χαρακτηρίζεται από ορθογώνιους παλμούς, που ανάμεσά τους η τάση είναι μηδενική (Σχήμα 4.5).



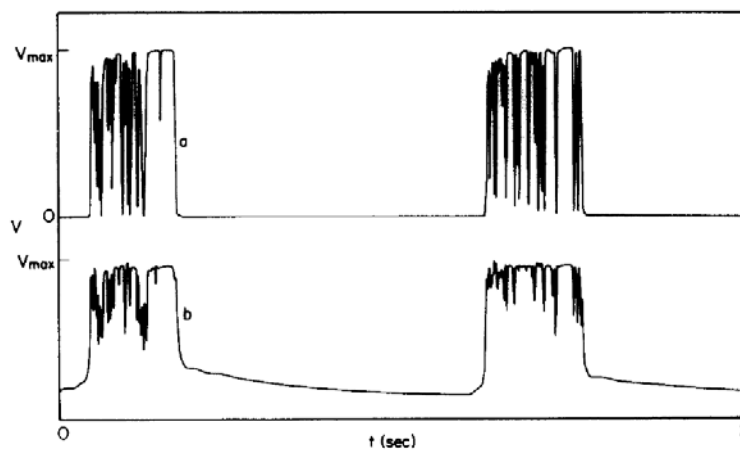
**Σχήμα 4.2** Σχηματική παράσταση του συστήματος που προτάθηκε από τους Barnea et al. (1980)



**Σχήμα 4.3** Τάση εξόδου κατά τη διαστρωματωμένη ροή από τον αισθητήρα 1C για τρεις ταχύτητες της αέριας φάσης (1.2, 3 και 4.5 m/s)

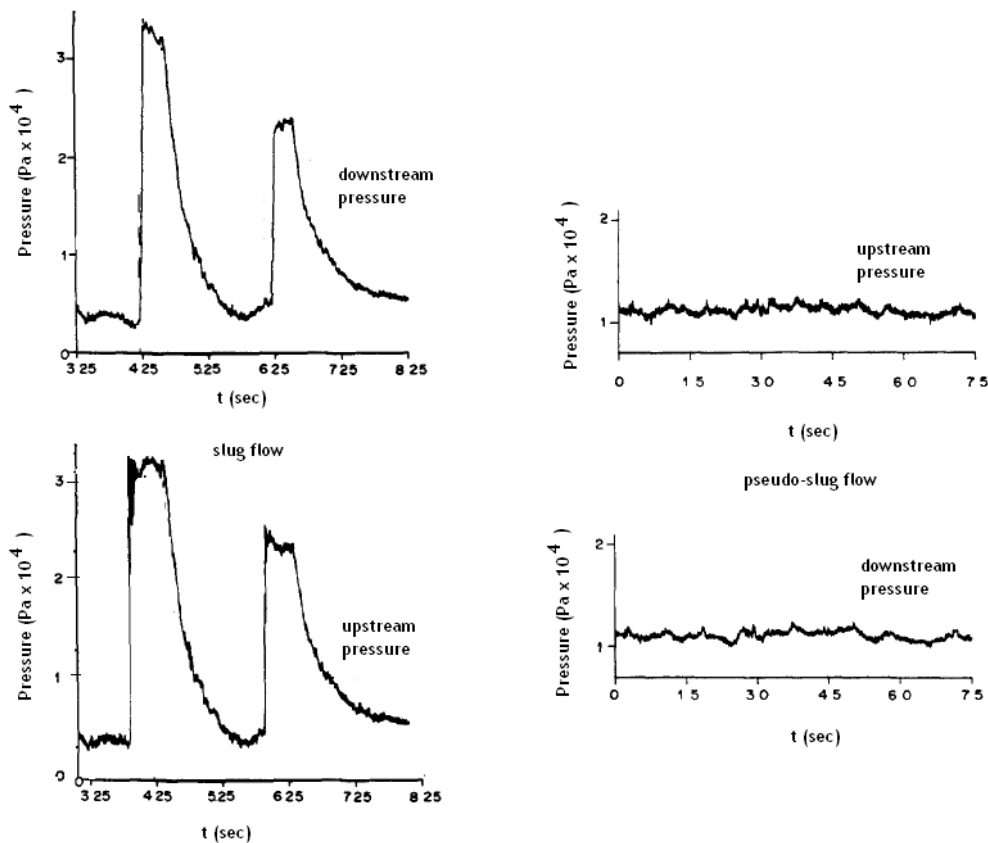


**Σχήμα 4.4** Τάση εξόδου κατά τη δακτυλιοειδή ροή από τους αισθητήρες 1A (σήμα *a*) και 1B (σήμα *b*)



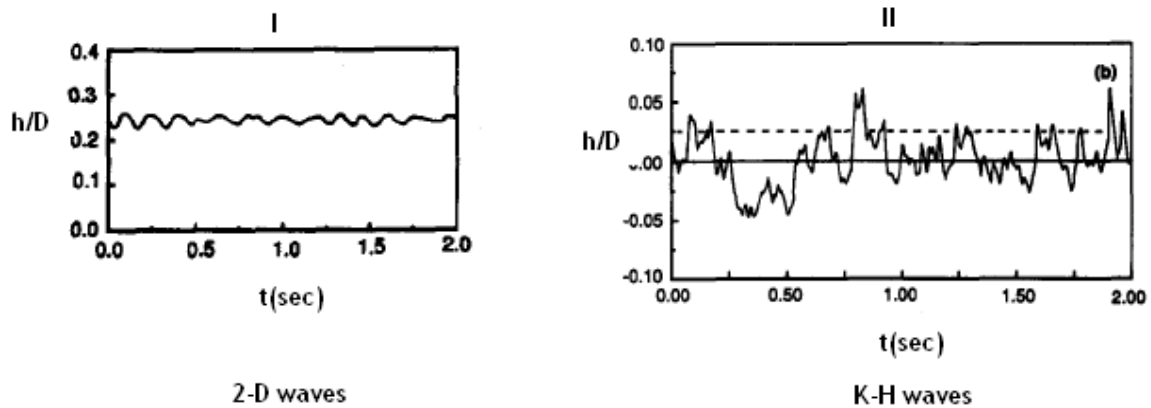
**Σχήμα 4.5** Τάση εξόδου κατά τη διαλείπουσα ροή από τον αισθητήρα 1C για δύο ταχύτητες της αέριας φάσης

Οι Lin and Hanratty (1987a) πρότειναν τη μέτρηση της στατικής πίεσης σε δύο διαφορετικά σημεία κατά μήκος του αγωγού για τη διάκριση ανάμεσα στη διαλείπουσα και τη ψευδο-διαλείπουσα. Η διαλείπουσα ροή χαρακτηρίζεται από τη περιοδική διέλευση υγρών μαζών, που φράσσουν τη διατομή του αγωγού, κινούνται περίπου με την ταχύτητα της αέριας φάσης και προκαλούν μεγάλη πτώση πίεσης. Κατά τη ψευδο-διαλείπουσα ροή, η οποία οπτικά μοιάζει αρκετά με τη διαλείπουσα, οι υγρές μάζες δεν κινούνται με την ταχύτητα της αέριας φάσης, με αποτέλεσμα να μη προκαλείται ιδιαίτερα μεγάλη πτώση πίεσης. Κατά συνέπεια από τη μελέτη της πίεσης κατά μήκος του αγωγού και τη σχετική ταχύτητα των υγρών μαζών μπορεί να ταυτοποιηθεί το καθεστώς ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό. Από τη στατιστική ανάλυση των χρονοσειρών της πίεσης που φαίνονται στο Σχήμα 4.5 μπορούν να προκύψουν χρήσιμες πληροφορίες για την συχνότητα των φαινομένων που παρατηρούνται.



**Σχήμα 4.6** Πτώση πίεσης κατά τη διαλείπουσα ροή (αριστερά) και ψευδοδιαλείπουσα ροή (δεξιά)

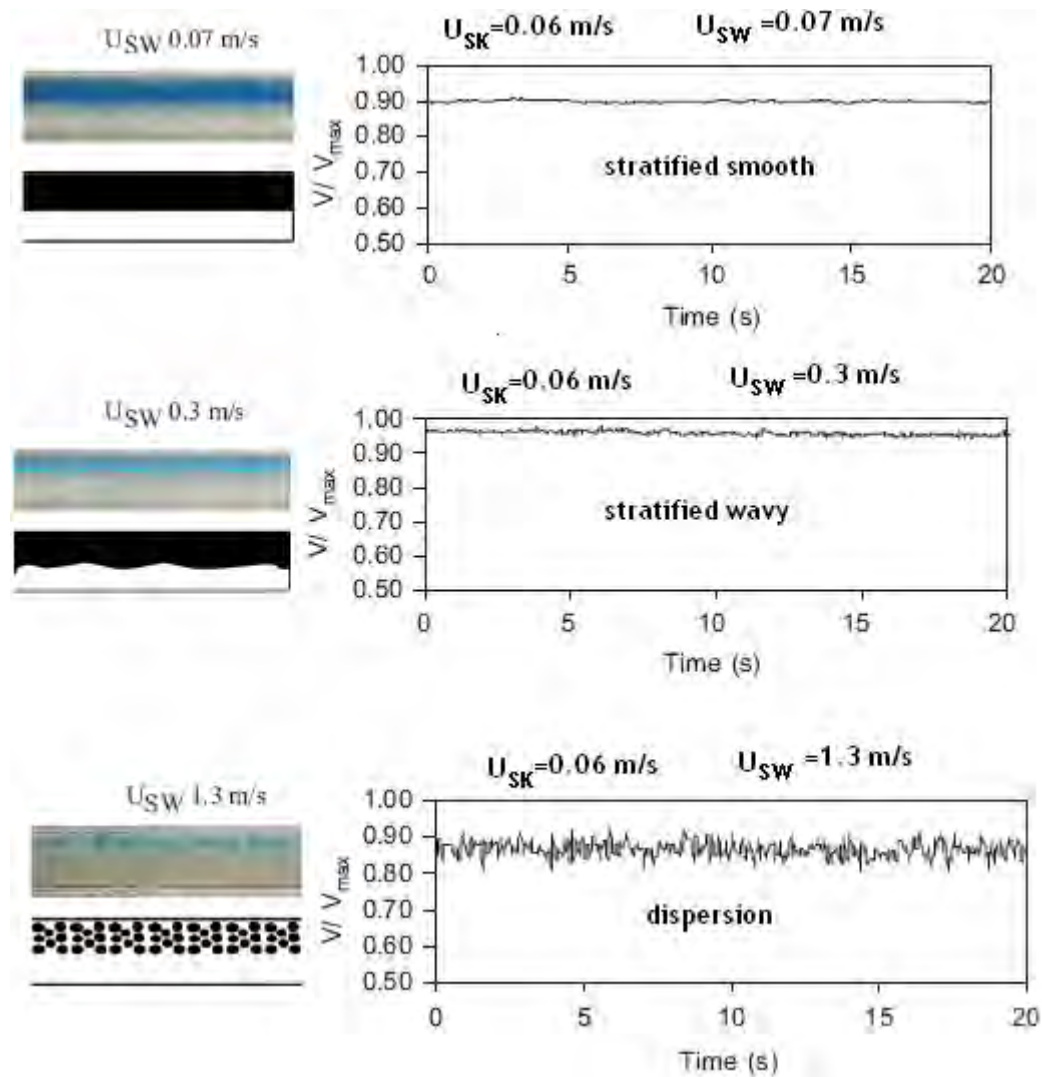
Η μέτρηση του πάχους της υγρής φάσης με την αγωγιμομετρική μέθοδο μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για το καθεστώς ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό. Η στατιστική ανάλυση του σήματος που προκύπτει μπορεί επίσης να βοηθήσει στη μελέτη των χαρακτηριστικών της ροής και, ιδιαίτερα, των διαφόρων τύπων κυμάτων που παρατηρούνται στη διαστρωματωμένη ροή, όπως έχει δειχθεί από τον Andritsos (1992). Για την περίπτωση ροής με διδιάστατα κύματα, το σήμα εξόδου από τον αναλυτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7(I), είναι περιοδικό, συμμετρικό ως προς τη μέση τιμή του πάχους της υγρής στιβάδας. Όταν μέσα στον αγωγό επικρατεί διαστρωματωμένη ροή με κύματα τύπου Kelvin-Helmholtz, τότε, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό και από το Σχήμα 4.7(II), η αποτύπωση του σήματος εξόδου είναι εντελώς διαφορετική από την αντίστοιχη με τα διδιάστατα κύματα. Τα κύματα K-H δεν παρουσιάζουν καμία περιοδικότητα, ενώ μεταβάλλονται καθώς κινούνται κατά μήκος του αγωγού, είτε επειδή συγχωνεύονται μεταξύ τους, είτε επειδή διαιρούνται σε επιμέρους κύματα. Σημαντικές πληροφορίες επίσης προκύπτουν και από τη στατιστική επεξεργασία των σημάτων αυτών. Από το φάσμα συχνοτήτων, τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης αλλά και ετεροσυσχέτισης μπορεί να βρεθεί η συχνότητα και ταχύτητα των κυμάτων αυτών.



**Σχήμα 4.7** Ύψος και διακύμανση της υγρής στιβάδας στη διαστρωματωμένη ροή

Αν και με την αγωγιμομετρική μέθοδο μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτοποίηση του καθεστώτος ροής με σχετική ακρίβεια σε συστήματα υγρής-αέριας φάσης, ωστόσο η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα όταν χρησιμοποιείται σε συστήματα νερού-πετρελαίου. Για την ανίχνευση του καθεστώτος ροής σε συστήματα νερού-πετρελαίου προτάθηκε από τους Chakrabarti et al. (2007) η χρήση μιας οπτικής μεθόδου, η οποία μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα σε τέτοιου είδους συστήματα. Η μέθοδος στηρίζεται στις διαφορετικές οπτικές ιδιότητες των δυο ρευστών, ενώ η ταυτοποίηση του καθεστώτος ροής πραγματοποιείται με βάση την εξασθένηση της αρχικής δέσμης της ακτινοβολίας ή τη διάθλασή της, ανάλογα με τη μορφή της διεπιφάνειας των δυο φάσεων. Στο Σχήμα 4.8 καταδεικνύεται ότι το σήμα εξόδου για το κάθε καθεστώς ροής μπορεί να αποτελέσει κριτήριο ταυτοποίησης του καθεστώτος ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό. Για πλήρη διάκριση των καθεστώτων ροής οι ίδιοι ερευνητές προτείνουν και τη στατιστική ανάλυση του σήματος εξόδου.

Τέλος, αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι αρκετοί ερευνητές (Ottens et al., 1999, Lioumbas et al., 2005) χρησιμοποιούν τη φωτογραφική μέθοδο για την ταυτοποίηση του καθεστώτος ροής μέσα στον αγωγό. Η μέθοδος αυτή δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα για σχετικά χαμηλές παροχές των δύο φάσεων, ενώ αδυνατεί δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μεγαλύτερες παροχές των δυο φάσεων. Επίσης, με τη μέθοδο αυτή είναι αρκετά δύσκολη η ταυτοποίηση της μετάπτωσης από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο.



**Σχήμα 4.8** Φωτογραφική και σχηματική απεικόνιση των καθεστώτων ροής στο σύστημα νερού-πετρελαίου (Chakrabarti et al. 2007)

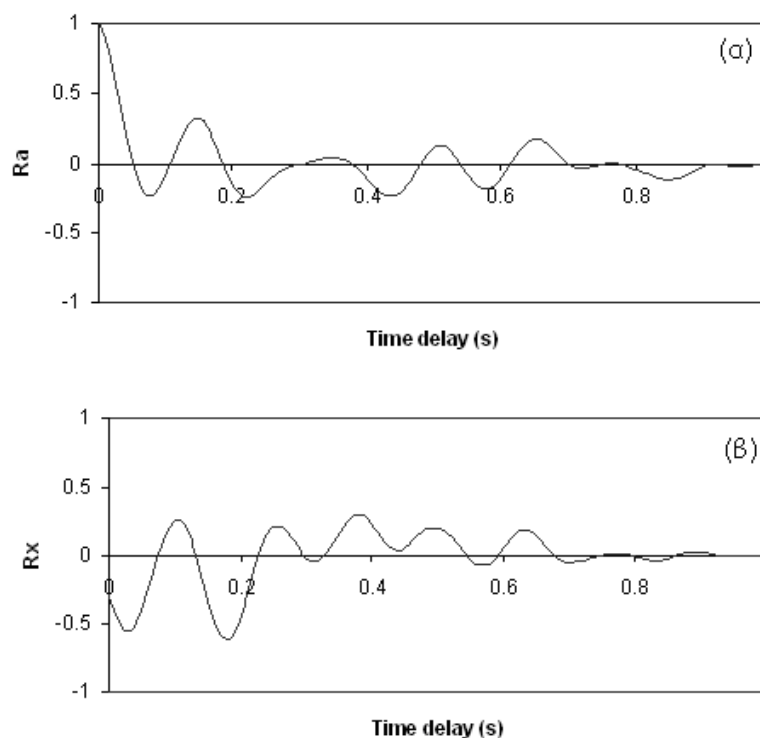
#### 4.3 Μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

Η ταυτοποίηση της μετάπτωσης από λεία διαστρωματωμένη σε ροή με 2-D αλλά και κύματα K-H στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με οπτική παρατήρηση, αλλά και με στατιστική ανάλυση της χρονοσειράς του πάχους της υγρής φάσης μέσα στον αγωγό, όπως προτάθηκε από τον Andritsos (1992).

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως το είδος των κυμάτων που επικρατεί μέσα στον αγωγό μπορεί να ταυτοποιηθεί από τη μορφή της χρονοσειράς του πάχους της υγρής φάσης μέσα στον αγωγό. Ωστόσο, χρήσιμες πληροφορίες μπορούν να προκύψουν και από τα διαγράμματα αυτό- και ετερο-συσχέτισης. Στο Σχήμα 4.9. παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτό-συσχέτισης (α) και ετεροσυσχέτισης (β) για μία τυπική περίπτωση ροής με 2-D κύματα. Και στις δύο συναρτήσεις ο συντελεστής συσχέτισης πλησιάζει τη μονάδα. Η συχνότητα των κυμάτων μπορεί να εκτιμηθεί από τη συνάρτηση αυτο-συσχέτισης, ενώ η

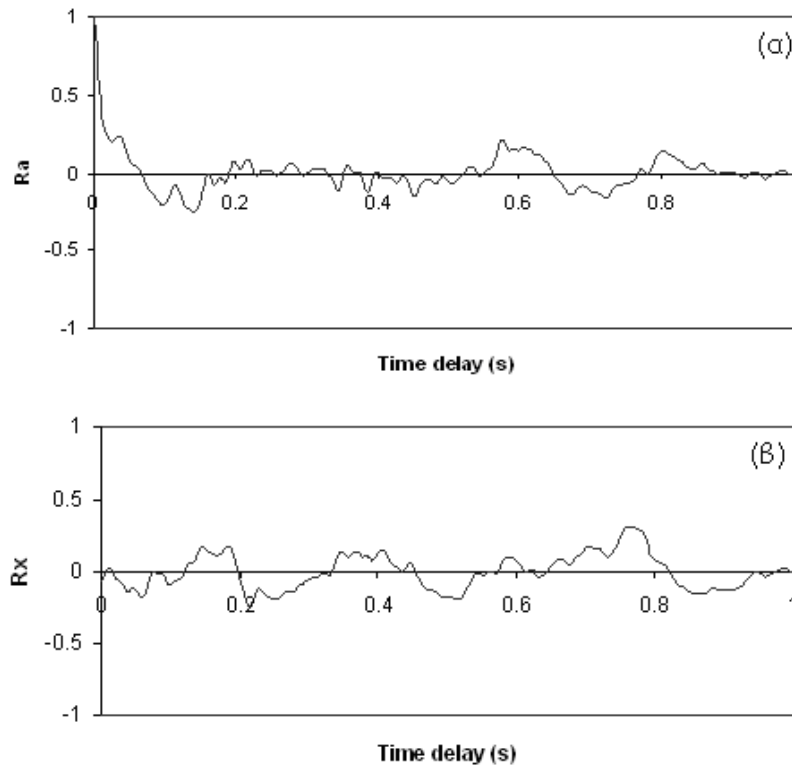


ταχύτητα των κυμάτων από τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης (ή καλύτερα από φασματική ανάλυση του πάχους της στιβάδας).



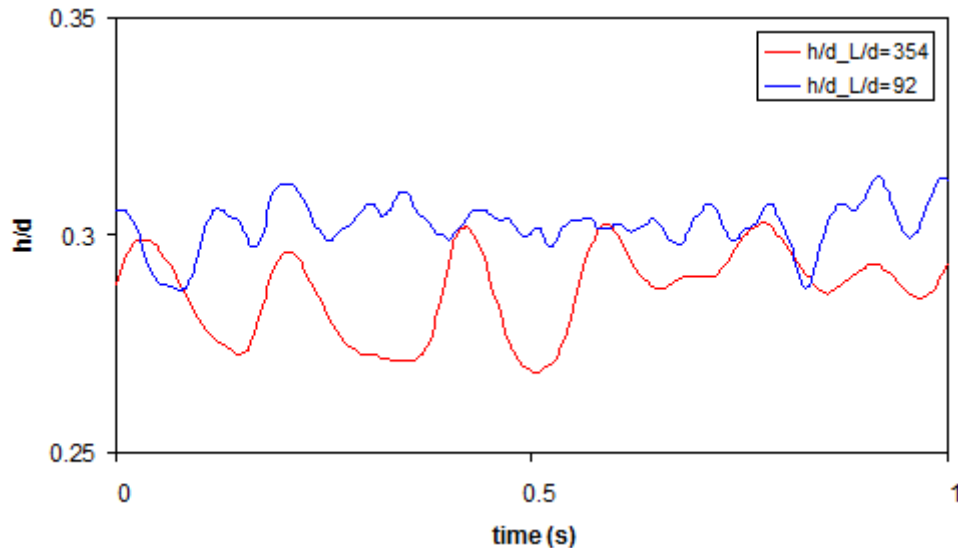
**Σχήμα 4.9** Συνάρτηση αυτό-συσχέτισης (α) και έτερο-συσχέτισης (β) για σύστημα νερού-αέρα με  $u_{GS}=3 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.042 \text{ m/s}$  για ροή με 2-D κύματα

Για την περίπτωση ροής με κύματα K-H οι συναρτήσεις αυτο- και ετερο-συσχέτισης είναι τελείως διαφορετικές, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.10. Η μορφή των συναρτήσεων γίνεται ακανόνιστη και καμιά πληροφορία δεν μπορεί να προκύψει για τη συχνότητα και την ταχύτητα των κυμάτων.

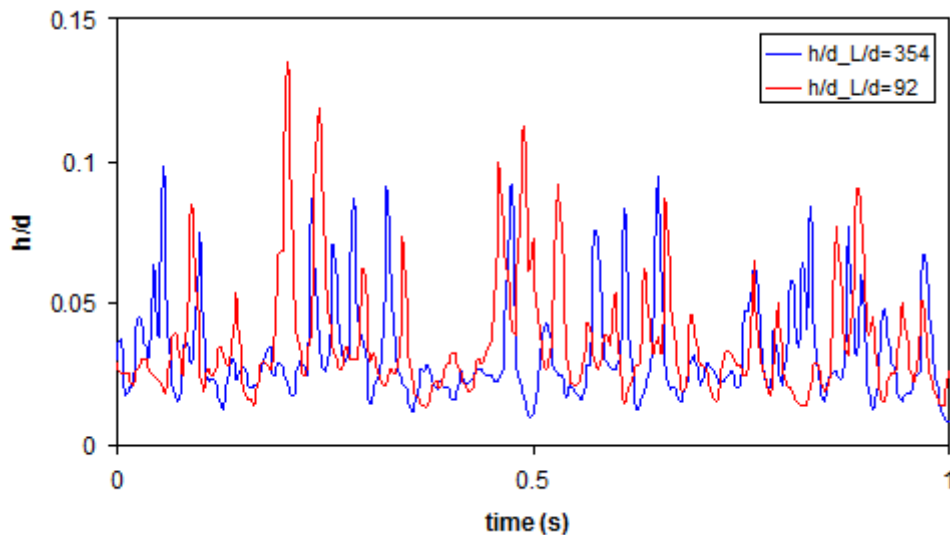


**Σχήμα 4.10** Συνάρτηση αυτό-συσχέτισης (α) και έτερο-συσχέτισης (β) για σύστημα νερού-αέρα με  $u_{GS}=9.4 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.042 \text{ m/s}$  για ροή με K-H κύματα

Οι δύο αυτοί τύποι κυμάτων διαφέρουν επίσης και ως προς την εξέλιξη τους στο χώρο. Τα κανονικά 2-D κύματα καθώς μεταφέρονται κατά μήκος του αγωγού δε συγχωνεύονται και διατηρούν την κανονικότητά τους, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Ωστόσο, καθώς μεταφέρονται κατά μήκος του αγωγού μειώνεται η συχνότητά τους και αυξάνεται το μήκος και το πλάτος κύματος. Οπτικά φαίνεται τα κύματα αυτά να «μεγαλώνουν», όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 4.11. Αντίθετα, η εξέλιξη των K-H κυμάτων είναι τελείως διαφορετική, αφού τα κύματα αυτά καθώς κινούνται με κατά μήκος του αγωγού, συγχωνεύονται, διασπώνται και διαρκώς μεταβάλλονται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πολύ καθαρά και οπτικά. Ωστόσο, από την παρατήρηση της εξέλιξης του πάχους της υγρής στιβάδας σε συνάρτηση με το χρόνο σε δύο διαφορετικές θέσεις, φαίνεται τα κύματα αυτά να διατηρούν αναλλοίωτα τα χαρακτηριστικά τους, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.12.



**Σχήμα 4.11** Εξέλιξη των 2-D κυμάτων κατά μήκος του αγωγού για  $u_{GS}=3 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.042 \text{ m/s}$

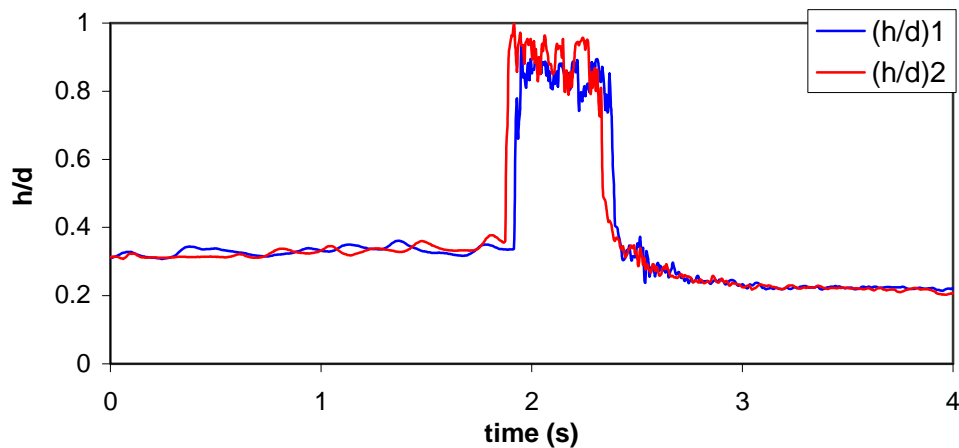


**Σχήμα 4.12** Εξέλιξη των K-H κυμάτων κατά μήκος του αγωγού για  $u_{GS}=13.92 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.01168 \text{ m/s}$

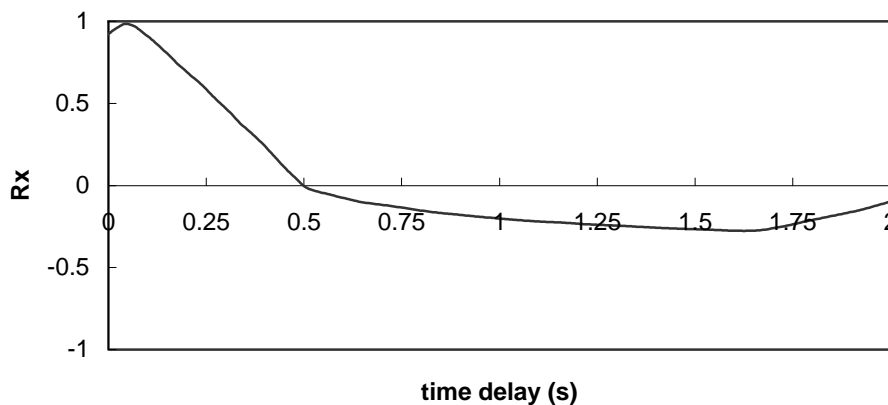
Στην παρούσα εργασία η ταχύτητα των υγρών μαζών που εμφανίζονται κατά τη διαλείπουσα ή ψευδο-διαλείπουσα ροή αποτέλεσε το κριτήριο για την ανίχνευση της μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή. Θεωρήθηκε ότι όταν η ταχύτητα αυτή είναι μικρότερη από 75% της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης τότε, μέσα στο στον αγωγό επικρατεί ψευδο-διαλείπουσα ροή.

Ο υπολογισμός της ταχύτητας των υγρών μαζών γίνεται μέσω της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης του πάχους της υγρής φάσης σε δύο διαδοχικές θέσεις μέσα στον αγωγό. Η κορυφή που προκύπτει από τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης δίνει το μέσο χρόνο που χρειάστηκε το κύμα να διανύσει την απόσταση μεταξύ των δύο σημείων μέτρησης και κατά

συνέπεια τη ταχύτητα των υγρών μαζών που κινούνται μέσα στον αγωγό. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται το πάχος της υγρής φάσης κατά τη διαλείπουσα ροή, ενώ η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης των ίδιων σημάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.14. Στο σχήμα αυτό εμφανίζεται μία χαρακτηριστική κορυφή στο χρόνο 0.045 s. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει το μέσο χρόνο που χρειάστηκε το «slug» για να διανύσει την απόσταση μεταξύ των δυο μετρητικών, 0.12 m. Σε αυτή την περίπτωση η μέση ταχύτητα των υγρών μαζών  $u_{slug}=2.67$  m/s.



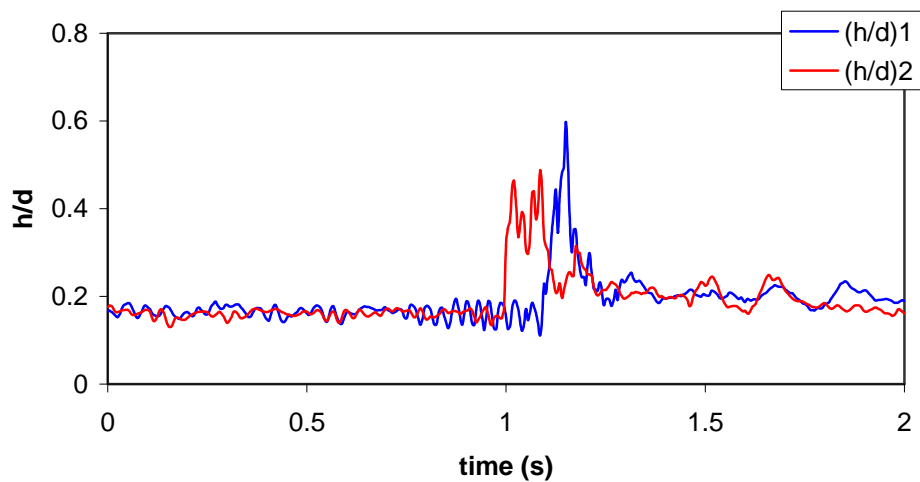
**Σχήμα 4.13** Πάχος της υγρής φάσης κατά τη διαλείπουσα ροή για σύστημα νερού-αέρα με  $u_{GS}=2.01$  m/s και  $u_{LS}=0.072$  m/s



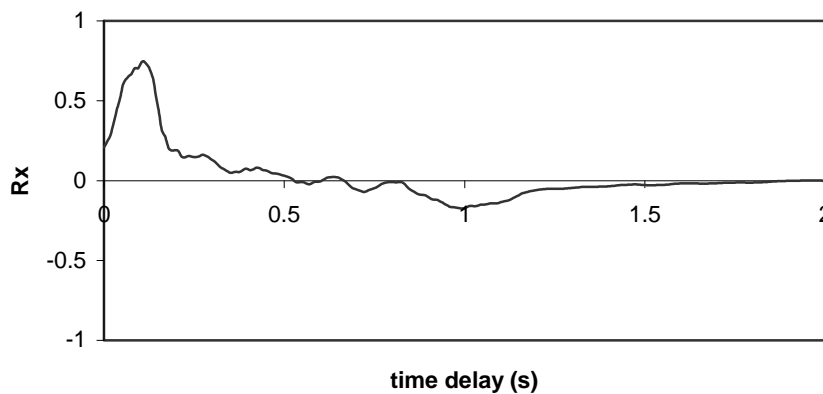
**Σχήμα 4.14** Συνάρτηση ετεροσυσχέτισης για διαλείπουσα ροή

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το πάχος της υγρής φάσης για μία τυπική περίπτωση ψευδο-διαλείπουσας ροής, ενώ στο Σχήμα 4.16 δίνεται η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης για την ίδια περίπτωση. Στο διάγραμμα ετεροσυσχέτισης εμφανίζεται μία κορυφή, για χρόνο 0.12 s. Η ταχύτητα που υπολογίζεται είναι  $u_{slug}=1$  m/s, δηλαδή μία ταχύτητα αισθητά χαμηλότερη από τη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης. Επίσης, η κορυφή που εμφανίζεται στο διάγραμμα της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης δεν είναι τόσο έντονη όπως

στο Σχήμα 4.14 για την περίπτωση της διαλείπουσας ροής.

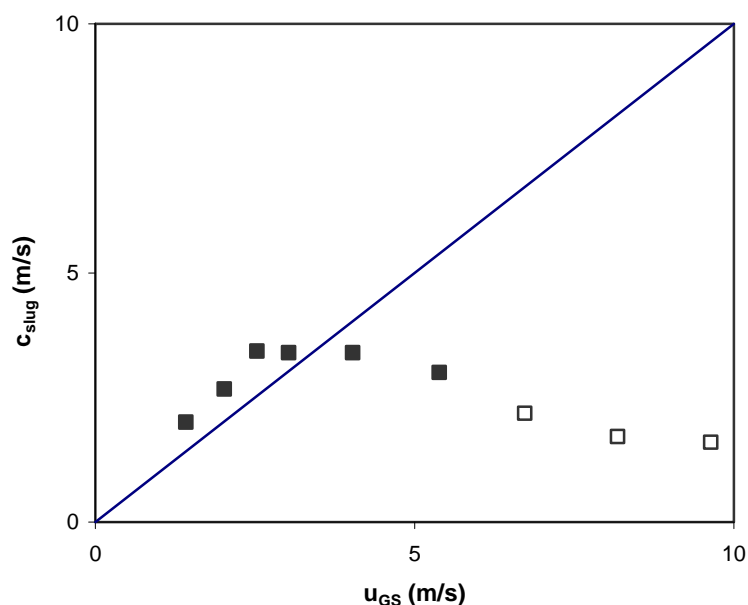


**Σχήμα 4.15** Πάχος της υγρής φάσης κατά τη ψευδο-διαλείπουσα ροή για σύστημα νερού-αέρα με  $u_{GS}=6.7 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.072 \text{ m/s}$



**Σχήμα 4.16** Συνάρτηση ετεροσυσχέτισης για ψευδο-διαλείπουσα ροή

Οι ταχύτητες των υγρών μαζών κατά τη διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή για σύστημα νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό, που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των συναρτήσεων ετεροσυσχέτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.17. Είναι φανερό ότι στη περίπτωση της διαλείπουσας ροής μέσα στον αγωγό οι ταχύτητα των υγρών μαζών είναι σχεδόν ίση με τη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης. Αντίθετα, όταν μέσα στο αγωγό επικρατεί ψευδο-διαλείπουσα ροή τότε οι ταχύτητες που υπολογίζονται είναι αρκετά χαμηλότερες από τις φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, αφού μετά τα μετάρπωση σε ψευδο-διαλείπουσα ροή η ταχύτητα των υγρών μαζών μειώνεται σημαντικά σε σχέση με τη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης. Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν για όλα τα συστήματα που εξετάστηκαν ( $\text{CO}_2$ -νερό, υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα).



**Σχήμα 4.17** Ταχύτητες υγρών μαζών σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή σε σύγκριση με τη φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης για σύστημα νερό-αέρα σε  $u_{LS}=0.15$  m/s

Η ανίχνευση της μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή πραγματοποιήθηκε με τον τρόπο αυτό για όλα τα συστήματα ρευστών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, όπως επίσης και για όλες τις γωνίες κλίσης.

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 5

---

## 5. ΜΕΤΑΠΤΩΞΕΙΣ ΣΤΑ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ

---

### 5.1 Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση της διαστρωματωμένης ροής, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ίσως ως η απλούστερη ροή σε διφασικά συστήματα, δεν είναι εύκολη, κάτι που αποδεικνύεται από το γεγονός ότι παρά την εκτενή (πειραματική και υπολογιστική) μελέτη της, οι προβλέψεις για την πτώση πίεσης και για τη συγκράτηση δεν είναι πάντα αξιόπιστες. Μέρος της δυσκολίας αποδίδεται προφανώς στην ύπαρξη των κυμάτων στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου, η οποία αυξάνει σημαντικά το διεπιφανειακό συντελεστή τριβής με αποτέλεσμα την αύξηση της πτώσης πίεσης και τη μείωση της συγκράτησης.

Το 1987 προτάθηκε από τους Andritsos and Hanratty (1987a) ένα μοντέλο για τη διαστρωματωμένη ροή, βασικό στοιχείο του οποίου αποτελεί μία ημιεμπειρική σχέση για τον διεπιφανειακό συντελεστή τριβής. Αν και το μοντέλο αυτό αποδείχτηκε ικανοποιητικό για πολλές περιπτώσεις, για παράδειγμα οι Shi and Kocamustafaogullari (1994), Spedding and Hand (1997) και Ottens et al. (2001) αναφέρουν εξαιρετική συμφωνία με τα πειραματικά τους αποτελέσματα, ήταν προφανές ότι είχε ορισμένες αδυναμίες. Για παράδειγμα το μοντέλο θεωρούσε ότι ουσιαστική αύξηση του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής γινόταν με την έναρξη των κυμάτων K-H και ότι αυτή η μετάπτωση σε αυτόν το τύπον των κυμάτων για ατμοσφαιρικές συνθήκες μπορούσε να περιγραφεί από μία απλή σχέση ( $u_{GS,t}=5$  m/s). Παράλληλα, ήταν προφανές ότι το μοντέλο προέβλεπε μεγάλες τιμές του επιφανειακού συντελεστή τριβής για πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής.

Σε παλαιότερη εργασία (Τζώτζη, 2007), αφού αναλύθηκε μεγάλος αριθμός πειραματικών δεδομένων της βιβλιογραφίας, προτάθηκε η βελτίωση του παραπάνω μοντέλου με στόχο να αμβλυνθούν οι προαναφερόμενες αδυναμίες. Το μοντέλο αυτό βασίστηκε στην ανάπτυξη δύο ημι-θεωρητικών σχέσεων για τις μεταπτώσεις σε ροή με δισδιάστατα κύματα και κύματα K-H. Επίσης, προτάθηκαν και διαφορετικές εμπειρικές συσχετίσεις του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής για τα τρία υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής (λεία διεπιφάνεια, 2-D κύματα και κύματα K-H). Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένα πειράματα μέτρησης της πτώσης πίεσης και του πάχους της υγρής στιβάδας για διάφορα συστήματα υγρού-αερίου σε όλα τα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων οδήγησε στην ελαφρά τροποποίηση των συσχετίσεων που είχαν προταθεί από την Τζώτζη (2007), όπως περιγράφεται παρακάτω. Στην παραπάνω εργασία μπορεί να ανατρέξει κανείς για μια αναλυτική περιγραφή των υφιστάμενων μοντέλων της διαστρωματωμένης ροής.

## 5.2. Μηχανισμοί μετάπτωσης και σχεδιαστικές εξισώσεις

Η μετάπτωση από τη λεία διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα ουσιαστικά αναφέρεται στην έναρξη της δημιουργίας κυμάτων σε μία διεπιφάνεια υγρού-αερίου με ταυτόχρονη ροή των δύο φάσεων. Σύμφωνα με την κλασική εργασία των Taitel and Dukler (1976), η δημιουργία των πρώτων διαταραχών σε μια διεπιφάνεια υγρού-αερίου μπορεί να περιγραφεί από το λεγόμενο μηχανισμό «προστασίας» που προτάθηκε από τον Jeffreys (1925, 1926). Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, η ταχύτητα της αέριας φάσης που απαιτείται για την έναρξη των κυμάτων αυτών δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$(u_G - C)^2 C > \frac{4\nu_L(\rho_L - \rho_G)}{s\rho_G} \quad (5.21)$$

όπου  $\nu_L$  είναι το κινηματικό ιξώδες της υγρής φάσης,  $\rho_L$  και  $\rho_G$  η πυκνότητα της υγρής και της αέριας φάσης,  $u_G$  η (πραγματική) μέση ταχύτητα της αέριας φάσης,  $u_L$  η ταχύτητα της υγρής φάσης,  $C$  η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $s$  ο λεγόμενος συντελεστής προστασίας. Η σχέση (5.21) προτάθηκε από τον Jeffreys (1925, 1926), για τις περιπτώσεις μεγάλου πάχους υγρής στιβάδας. Πιο συγκεκριμένα, η σχέση (5.21) βρίσκει εφαρμογή όταν  $kh > 1.5$  ( $k$  είναι ο κυματαριθμός της διαταραχής).

Με την παραδοχή ότι η ταχύτητα της αέριας φάσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα της διαταραχής, οπότε  $u_G - C \approx u_G$  και ότι η ταχύτητα της διαταραχής  $C$  μπορεί να αντικατασταθεί από τη ταχύτητα της υγρής φάσης  $u_L$  χωρίς σημαντικό σφάλμα οι Taitel and Dukler (1976) κατέληξαν στην παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας της αέριας φάσης για τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα



$$u_G \geq \sqrt{\frac{4v_L(\rho_L - \rho_G)g}{s\rho_G u_L}} \quad (5.22)$$

Η τιμή του συντελεστή προστασίας ορίστηκε στο 0.01, ωστόσο μεταγενέστερες εργασίες (Andritsos Hanratty, 1987a, Spedding and Spence, 1993) έδειξαν ότι μια τιμή κοντά στο 0.06 δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Είναι προφανές από την εξ. (5.22) ότι τόσο το ιξώδες όσο και η πυκνότητα της υγρής φάσης έχουν σταθεροποιητικό ρόλο στη δημιουργία διαταραχών, δηλ. απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα της αέριας φάσης για τη δημιουργία κυμάτων καθώς αυξάνει η πυκνότητα και το ιξώδες του υγρού (απόσβεση διαταραχών λόγω ιξώδους). Από την άλλη μεριά, η αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης (ή η αύξηση της πίεσης του συστήματος) έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της κρίσιμης ταχύτητας της αέριας φάσης για τη δημιουργία κυμάτων. Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, η επιφανειακή τάση δεν φαίνεται να παίζει ρόλο σε αυτή τη μετάπτωση. Κατά τους Andritsos and Hanratty (1987a) η σχέση (5.22) δε βρίσκει εφαρμογή όταν το ιξώδες της υγρής φάσης ξεπεράσει την τιμή των 20 mPa·s, καθώς προβλέπει ότι η μετάπτωση σε ροή με διδιάστατα κύματα συμβαίνει σε ταχύτητες αερίου υψηλότερες από αυτές που απαιτούνται για τη μετάπτωση σε κύματα K-H.

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκαν πειράματα με συστήματα νερού-αέρα, νερού-CO<sub>2</sub>, νερού-He και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης (σ=35 mN/m)-αέρα στη διαστρωματωμένη ροή. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού και του πάχους της υγρής στιβάδας σε δύο σημεία στον αγωγό, σε L/d=92 L/d=354. Αντίστοιχες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα παραπάνω συστήματα και για ελαφρώς κεκλιμένους αγωγούς.

Αρχικά παρατηρήθηκε ότι η εξ. (5.22) αδυνατεί να περιγράψει ικανοποιητικά τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή σε ροή με 2-D κύματα, κυρίως σε χαμηλές ταχύτητες της αέριας φάσης, όπως είχε διαπιστωθεί και από τους Andritsos and Hanratty (1987a). Αυτό μάλλον οφείλεται στην υπόθεση ότι  $kh > 1.5$ , δηλαδή σε στιβάδες με μεγάλο πάχος, πρακτικά μικρότερες από 2 cm. Προφανώς, η καμπύλη μετάπτωσης επηρεάζεται από το πάχος του υγρού. Για το λόγο αυτό η εξίσωση (5.22) τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να υπάρχει καλύτερη συμφωνία και με τα νέα πειραματικά δεδομένα. Η σχέση που προτείνεται είναι η ακόλουθη:

$$U_G \geq \sqrt{\frac{4v_L(\rho_L - \rho_G)g}{s\left(\frac{h}{d}\right)^{0.5} \rho_G u_L}} \quad (5.23)$$

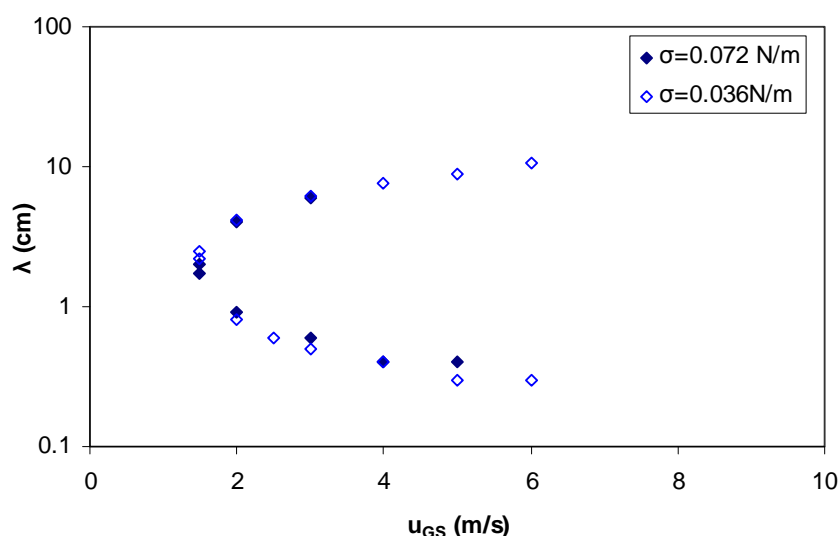
Η αδυναμία της εξίσωσης (5.22) να περιγράψει ικανοποιητικά τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα πιθανόν να οφείλεται στις παραδοχές που έγιναν από τους Taitel and Dukler (1976)

προκειμένου να καταλήξουν στην εξίσωση αυτή, ώστε να είναι πιο εύκολη στην εφαρμογή από την (5.21), που αρχικά προτάθηκε από τον Jeffreys (1926). Η αντικατάσταση του όρου  $C$  με  $u_L$  προφανώς επιφέρει σφάλματα. Επίσης, η αδυναμία της εξ. (5.22) στην περιγραφή της μετάπτωσης σε ροή με 2-D κύματα, για μικρά πάχη υγρής στιβάδας οφείλεται και στο γεγονός ότι η εξίσωση αυτή προτάθηκε αρχικά από τον Jeffreys (1925, 1926) για μεγάλα πάχη υγρής στιβάδας. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η τροποποίηση της εξίσωσης

(5.22) με την προσθήκη του όρου  $\left(\frac{h}{D}\right)^{0.5}$  στον παρανομαστή, ώστε να μπορεί να περιγραφεί

πιο ικανοποιητικά η μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα σε χαμηλά πάχη υγρής στιβάδας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, από την εξ. (5.23) υποδηλώνεται ότι η επιφανειακή τάση δεν επηρεάζει τη δημιουργία των πρώτων κυματισμών σε μία διεπιφάνεια υγρού-αερίου. Η ίδια διαπίστωση προκύπτει και από πιο ακριβείς προσεγγίσεις στη μελέτη της δημιουργίας των πρώτων διαταραχών. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης γραμμικής ευστάθειας των Andritsos and Hanratty (1987a) για δύο διαφορετικές τιμές της επιφανειακής τάσης. Παρατηρείται ότι δεν προκύπτει ιδιαίτερη επίδραση της επιφανειακής τάσης κατά την έναρξη των 2-D. Παρόλα αυτά, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=35$  mN/m)-αέρα παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη επίδραση της επιφανειακής τάσης στη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα, όπως παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε και κατά τα προκαταρκτικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα υδατικού διαλύματος ισοπροπυλικής αλκοόλης.

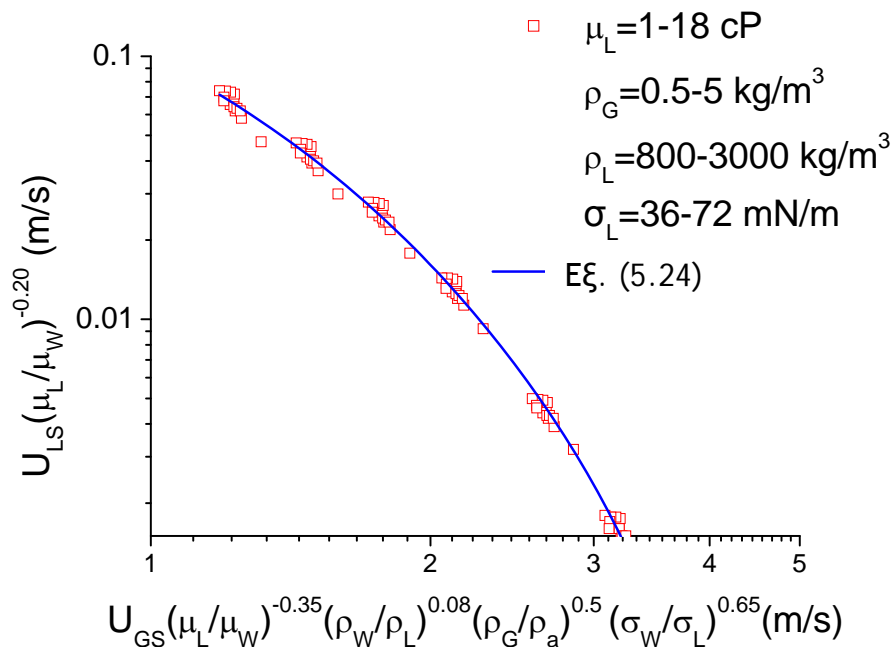


**Σχήμα 5.1** Καμπύλη ευστάθειας για σύστημα νερού-αέρα ( $\sigma=0.072$  N/m) και υδατικό διάλυμα βουτανόλης-αέρα ( $\sigma=36$  mN/m) για  $h/D=0.2$

Η εφαρμογή της εξίσωσης (5.23) για συστήματα με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και με κατάλληλη τροποποίηση των αξόνων με τη βοήθεια αδιάστατων λόγων των φυσικών ιδιοτήτων του συστήματος σε σχέση με τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος νερού-αέρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Από το σχήμα αυτό γίνεται φανερό ότι η μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από μία λογαριθμική εξίσωση. Συγχρόνως, στη σχέση αυτή μπορεί να προστεθεί και μια προσεγγιστική επίδραση της επιφανειακής τάσης, η οποία προκύπτει πειραματικά από τη διερεύνηση του συστήματος διαλύματος βουτανόλης-αέρα. Είναι προφανές ότι αυτή η διόρθωση θα πρέπει να εξεταστεί και με άλλα συστήματα με μικρή επιφανειακή τάση, εξαιρουμένων των επιφανειοδραστικών ουσιών. Η σχέση που προκύπτει από την ανάλυση της θεωρητικής ανάλυσης και των πειραμάτων είναι:

$$U_{GS,2-D} \geq \frac{1}{1.90} \left( \frac{\rho_w}{\rho_L} \right)^{-0.1} \left( \frac{\sigma_w}{\sigma_L} \right)^{-0.5} \left( \frac{\rho_G}{\rho_a} \right)^{-0.5} \left( \frac{\mu_L}{\mu_w} \right)^{0.35} \ln \left[ \frac{0.70}{U_{LS,2-D}} \left( \frac{\mu_L}{\mu_w} \right)^{0.2} \right] \quad (5.24)$$

Η επίδραση της επιφανειακής τάσης στο Σχήμα 5.2 προέκυψε από την ανάλυση των διαθέσιμων πειρατικών δεδομένων, ώστε να υπάρχει συμφωνία μεταξύ της καμπύλης μετάπτωσης σε ροή με 2-D που παρατηρείται πειραματικά και αυτής που προκύπτει από την εφαρμογή της εξ. (5.23).



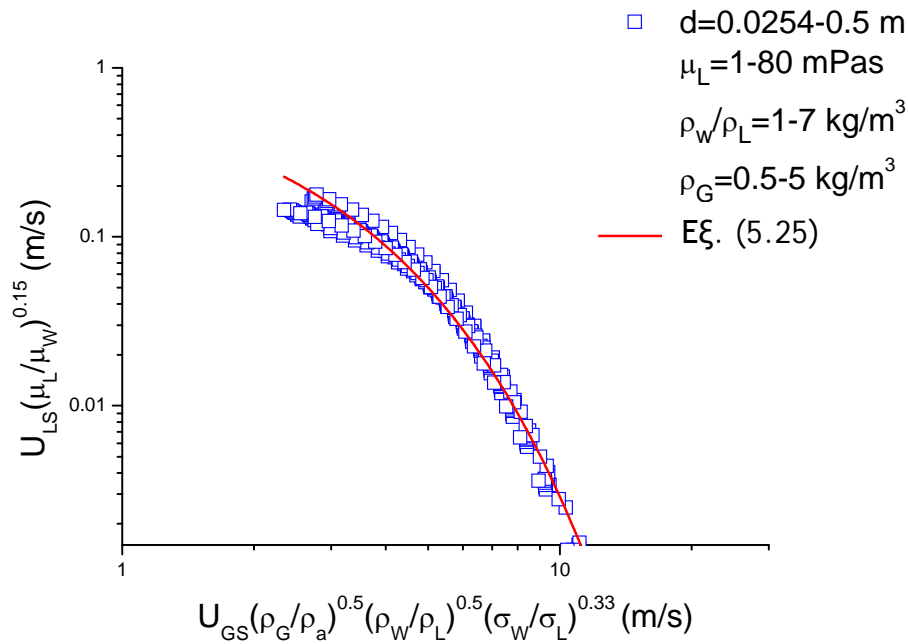
**Σχήμα 5.2** Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με διδιάστατα κύματα

Η μετάπτωση σε ροή με ακανόνιστα κύματα μεγάλου μήκους και πλάτους αποδίδεται στην αστάθεια Kelvin-Helmholtz (π.χ. Hanratty 1983, Lin and Hanratty, 1986). Τα κύματα στην περίπτωση αυτή αναπτύσσονται όταν η αποσταθεροποιητική δράση των δυνάμεων αδράνειας της υγρής φάσης και οι διακυμάνσεις της πίεσης, οι οποίες είναι σε φάση με το ύψος του κύματος, υπερνικήσουν τη σταθεροποιητική δράση των βαρυτικών δυνάμεων. Για την ανάλυση της επίδρασης των ιδιοτήτων των δύο φάσεων στην μετάπτωση σε κύματα K-H χρησιμοποιήθηκε η θεωρητική προσέγγιση των Lin and Hanratty (1986), όπως τροποποιήθηκε από τους Andritsos et al. (1989), ώστε να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι προδρομικά κύματα μικρού μήκους προηγούνται της δημιουργίας των κυμάτων K-H σε υγρά με μεγάλο ιξώδες ( $>20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ). Σημειώνεται ότι για μεγάλες τιμές του ιξώδους του υγρού, η θεωρητική μετάπτωση σε 2-D κύματα προβλέπεται σε πολύ υψηλές ταχύτητες της αέριας φάσης λόγω της ιξώδους απόσβεσης.

Από την ανάλυση του μοντέλου αυτού συνάγεται ότι η διάμετρος του αγωγού, δεν επηρεάζει σημαντικά την καμπύλη μετάπτωσης (αν και η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή επηρεάζεται), ενώ η επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης μπορεί να ληφθεί υπόψη με κατάλληλη τροποποίηση του άξονα του  $U_{LS}$ . Οι διάφορες καμπύλες του σχήματος μπορούν να περιγραφούν από μια σχέση λογαριθμικής μορφής (Τζώτζη, 2007), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Έτσι για τη μετάπτωση σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα K-H προτείνεται η ακόλουθη σχέση:

$$U_{GS,K-H} \geq \frac{1}{0.57} \left( \frac{\rho_G}{\rho_a} \right)^{-0.5} \left( \frac{\rho_W}{\rho_L} \right)^{-0.5} \left( \frac{\sigma_W}{\sigma_L} \right)^{-0.33} \ln \left[ \frac{0.84}{U_{LS,K-H}} \left( \frac{\mu_L}{\mu_W} \right)^{-0.15} \right] \quad (5.25)$$

Η παραπάνω σχέση είναι συνεπής με την ανάλυση γραμμικής ευστάθειας της διαστρωματωμένης ροής των Andritsos and Hanratty (1987b), όπου διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα της αέριας φάσης που απαιτείται για τη μετάβαση σε ροή με κύματα K-H είναι ανάλογη του όρου  $\rho_G^{-0.5}$ . Επίσης, οι Funada and Joseph (2001), κατά την ανάλυση ευστάθειας αναγνωρίζουν την έντονη επίδραση του λόγου  $\mu_G/\mu_L$  και  $\rho_G/\rho_L$ . Παρατήρησαν ότι όταν οι παραπάνω λόγοι είναι ίσοι, τότε η καμπύλη μετάπτωσης ταυτίζεται με αυτή που προκύπτει για άτριβα ρευστά, ενώ η ταχύτητα μετάπτωσης της αέριας φάσης είναι μέγιστη σε σχέση με αυτή που προκύπτει για διαφορετικούς λόγους. Γενικά, συνάγεται ότι για συστήματα όπου η αέρια φάση είναι αέρας και το ιξώδες της υγρής φάσης είναι μικρότερο από  $15 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  οι καμπύλες μετάπτωσης είναι ανεξάρτητες του ιξώδους, ενώ όταν  $\mu_L > 15 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  οι καμπύλες αυτές βρίσκονται χαμηλότερα στο χάρτη καθεστώτων ροής.



**Σχήμα 5.3.** Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με κύματα Kelvin-Helmholtz

Πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει (π.χ. Andritsos and Hanratty, 1987α, Andritsos, 1992) ότι με την έναρξη των διδιάστατων κυμάτων ο λόγος  $f_i/f_G$  αυξάνεται και παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 3. Παράλληλα με την εμφάνιση των K-H κυμάτων ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια αυξάνεται απότομα και παίρνει πολύ μεγαλύτερες τιμές, σε σχέση με τις τιμές κατά τη ροή με 2-D κύματα.

Μία σχέση που μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά μία βάση πειραματικών μετρήσεων (Πίνακας 5.1) για τον υπολογισμό του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής σε ροή με 2-D κύματα είναι η ακόλουθη:

$$\frac{f_i}{f_G} = 1 + 0.35 \left( \frac{h}{d} \right)^{0.5} (U_{GS} - U_{GS,2-D}) \quad (5.26)$$

ενώ για την περιοχή με K-H κύματα προτείνεται ο παρακάτω συσχετισμός:

$$\frac{f_i}{f_G} = 2 \left( \frac{h}{d} \right)^{0.1} \left( \frac{\mu_L}{\mu_w} \right)^{0.1} + 4 \left( \frac{h}{d} \right)^{0.5} (U_{GS} - U_{GS,2-D}) \quad (5.27)$$

Στην εξίσωση (5.27) που προτείνεται για τον υπολογισμό του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής κατά τη ροή με K-H κύματα προτείνεται η χρήση του όρου

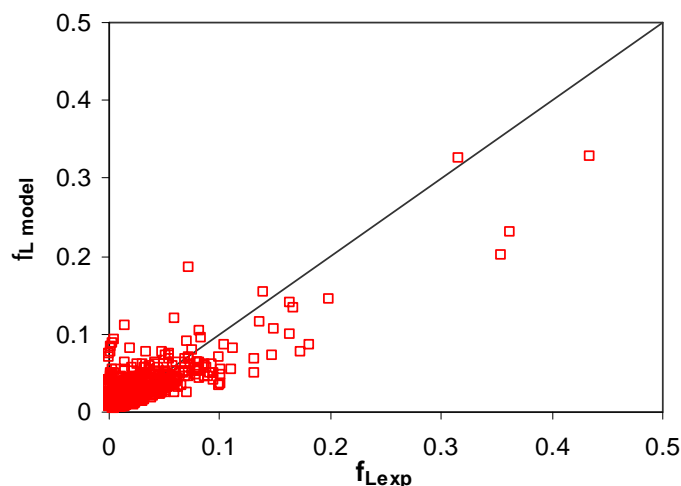
$2 \left( \frac{h}{d} \right)^{0.1} \left( \frac{\mu_L}{\mu_w} \right)^{0.1}$  προκειμένου να ληφθεί υπόψη η απότομη αύξηση της τιμής του συντελεστή

κατά την έναρξη των K-H κυμάτων για τις περιπτώσεις όπου το ιξώδες της υγρής φάσης είναι μεγαλύτερο από 20 mPa·s. Στα συστήματα με αυξημένο ιξώδες, όπως έχει προαναφερθεί, δε δημιουργούνται 2-D κύματα στη διεπιφάνεια, αλλά η ροή μεταπίπτει από λεία διαστρωματωμένη σε ροή με K-H κύματα. Έτσι και η τιμή του λόγου  $f_i/f_G$  πρέπει κατά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα να αυξηθεί απότομα από την τιμή 1 που έχει περίπου κατά τη λεία διαστρωματωμένη ροή. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά με τον όρο  $\left(\frac{h}{d}\right)^{0.1}$ , καθώς

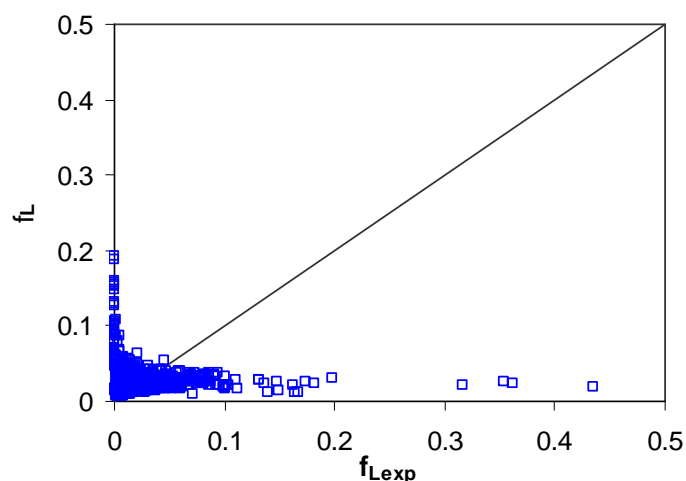
το πάχος της υγρής φάσης αυξάνεται με αύξηση του ιξώδους, αλλά και με τον όρο  $\left(\frac{\mu_L}{\mu_w}\right)^{0.1}$ .

Για τα συστήματα με ιξώδες χαμηλότερο από 20 mPa·s οι τιμές και των δυο παραπάνω όρων μειώνονται σημαντικά και έτσι δεν παρουσιάζεται απότομη αύξηση της τιμής του λόγου  $f_i/f_G$ .

Συχνά αναφέρεται ότι η τιμή του συντελεστή  $f_i$  (αλλά και των  $f_G$  και  $f_L$ ) μπορεί να συσχετιστεί με τον αριθμό Reynolds της υγρής φάσης ή/και της αέριας φάσης (π.χ Ouyang and Aziz 1996, Spedding and Hand, 1997, Vlachos et al, 1999). Οι Andritsos and Hanratty (1987a) αναφέρουν ότι η χρήση του αριθμού Reynolds για τον υπολογισμό των συντελεστών τριβής μπορεί να επιφέρει σημαντικό σφάλμα κατά τους υπολογισμούς, κυρίως όταν τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από αγωγούς με μεγάλη διάμετρο ή και ιξώδες. Αυτό συμβαίνει επειδή η μετάπτωση στη ροή με κύματα K-H (με την οποία παρατηρείται σημαντική αύξηση του  $f_i$ ) δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη τόσο στην αλλαγή της διαμέτρου του αγωγού, όσο και στο ιξώδες του υγρού. Τα Σχήματα 5.4 και 5.5 παρουσιάζουν τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών τιμών  $f_L$  και των τιμών που προκύπτουν από το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και των τιμών που προκύπτουν από τον συσχετισμό που έχει προταθεί από Spedding and Hand (1997), αντίστοιχα. Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκρίσεις αυτές αναφέρονται στον Πίνακα 5.1. Είναι προφανές ότι αν και στο Σχήμα 5.4 τα δεδομένα παρουσιάζουν κάποια διασπορά, εμφανίζουν όμως μια σωστή τάση σε αντίθεση με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5.



**Σχήμα 5.4.** Σύγκριση πειραματικών τιμών για το συντελεστή  $f_L$  με αυτές που προκύπτουν από το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία



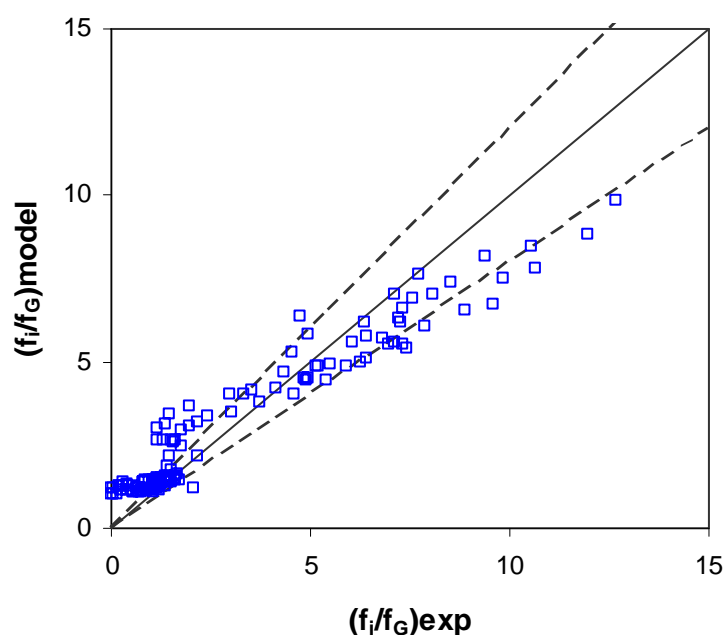
**Σχήμα 5.5.** Σύγκριση πειραματικών τιμών για το συντελεστή  $f_L$  με αυτές που προκύπτουν από το συσχετισμό των Spedding and Hand (1997)

### 5.3 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του λόγου  $f_i/f_G$  που υπολογίζονται με τη βοήθεια των συσχετισμών που έχουν προταθεί προηγουμένως με τα νέα πειραματικά αποτελέσματα για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$ . Παρά την κάποια σκέδαση των πειραματικών τιμών, η σύγκριση θεωρείται ικανοποιητική, επειδή οι πειραματικές τιμές του  $f_i/f_G$  είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες με μικρές αποκλίσεις των πειραματικών συνθηκών. Μάλιστα, παρατηρείται στο Σχήμα 5.6 ότι σε σχετικά χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης οι τιμές για το λόγο  $f_i/f_G$  που προκύπτουν από το μοντέλο είναι υψηλότερες από αυτές που υπολογίζονται πειραματικά. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η

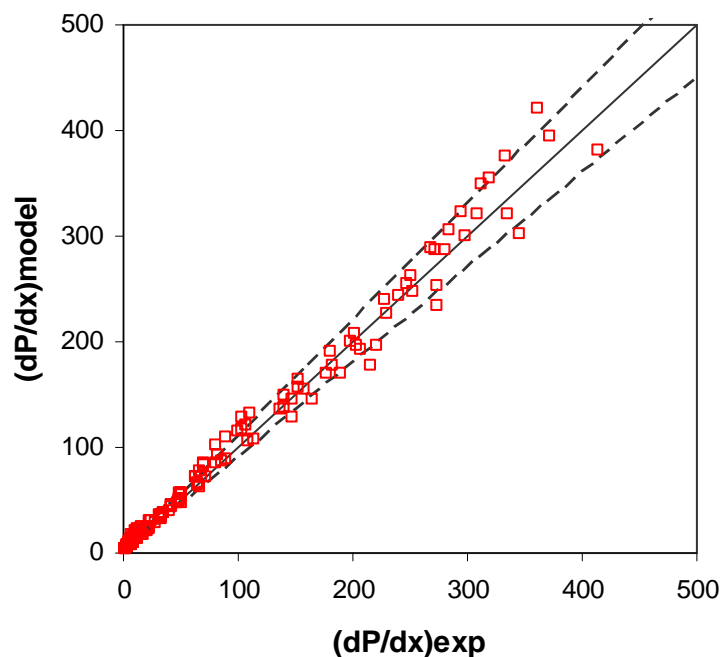
ροή για τις συνθήκες αυτές δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται προέρχονται αποκλειστικά από τη διαστρωματωμένη ροή.

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών της πτώσης πίεσης που υπολογίζονται με τη βοήθεια του μοντέλου που προτείνεται σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα για το ίδιο σύστημα. Συνάγεται ότι η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μοντέλου είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, καθώς η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού υπολογίζεται με μικρή απόκλιση. Το μεγαλύτερο μέρος των τιμών της πτώσης πίεσης (περίπου 90%) βρίσκεται σε μια περιοχή απόκλισης  $\pm 10\%$  από τις προβλεπόμενες τιμές.



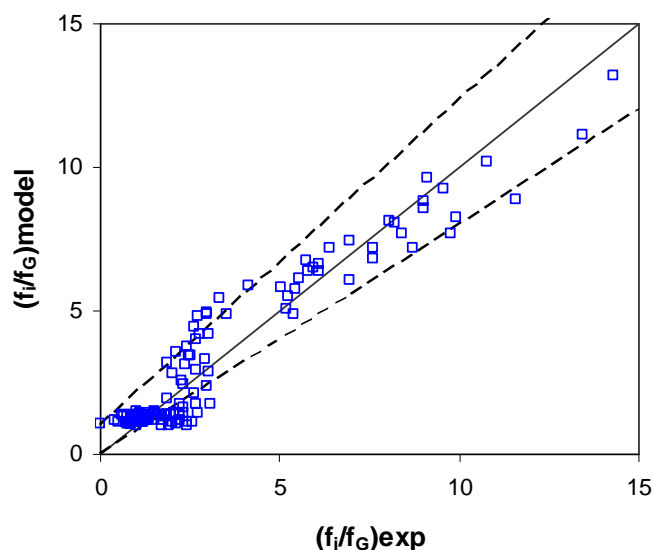
**Σχήμα 5.6** Σύγκριση των τιμών του λόγου  $f_i/f_G$  που υπολογίζονται με του συσχετισμούς που προτείνονται με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα νερού- $CO_2$ . (Οι διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται σε ακρίβεια  $\pm 20\%$ .)





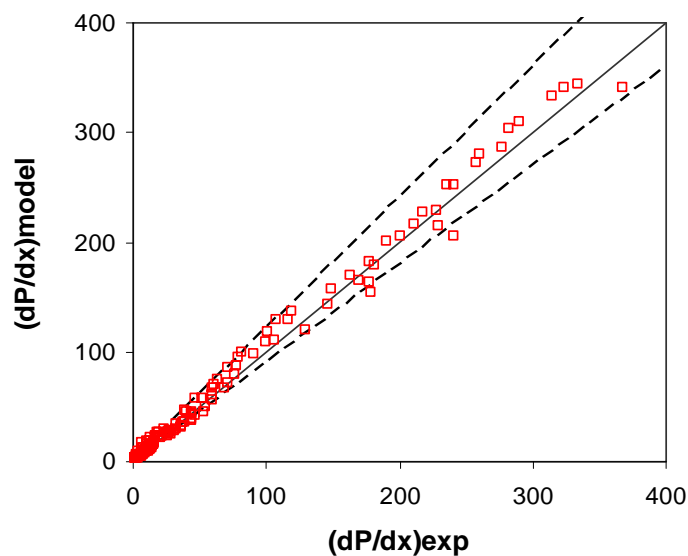
**Σχήμα 5.7** Σύγκριση της πτώσης πίεσης που υπολογίζεται με το μοντέλο που προτείνεται με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  (διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται σε ακρίβεια  $\pm 10\%$ )

Η αποτελεσματικότητα των εξισώσεων που προτείνονται για τον υπολογισμό του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής ελέγχθηκε και για την περίπτωση των πειραματικών δεδομένων του συστήματος υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=35 \text{ mN/m}$ )-αέρα, που παρουσιάζει μειωμένη επιφανειακή τάση σε σχέση με το σύστημα νερού-αέρα. Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του λόγου  $f_i/f_G$  που υπολογίζονται με τη βοήθεια των συσχετισμών που προτείνονται παραπάνω, με τα πειραματικά αποτελέσματα ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται σε ακρίβεια  $\pm 20\%$ . Για το σύστημα αυτό ο συντελεστής τριβής που υπολογίζεται στη λεία διαστρωματωμένη ροή, αλλά και στη ροή με 2-D κύματα είναι χαμηλότερος από τις πειραματικές τιμές, γιατί η προτεινόμενη σχέση για τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα υποεκτιμά το εύρος της περιοχής με 2-D κύματα.



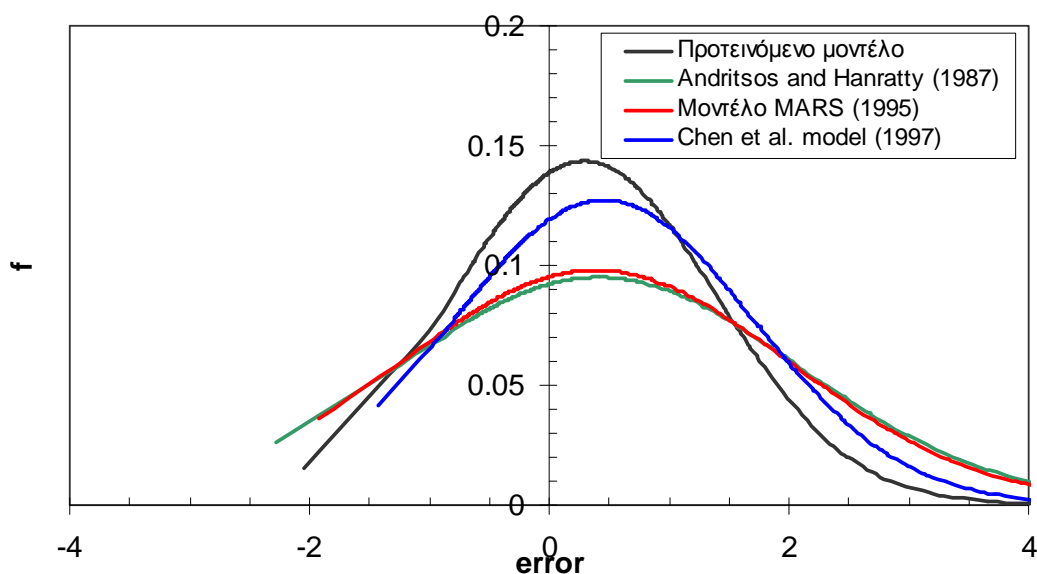
**Σχήμα 5.8** Σύγκριση των τιμών του λόγου  $f_i/f_G$  που υπολογίζονται με του συσχετισμούς που προτείνονται με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=35 \text{ mN/m}$ )-αέρα

Η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού και το συγκεκριμένο σύστημα υπολογίζεται ικανοποιητικά, ανεξάρτητα από την αδυναμία του μοντέλου να προσδιορίσει με ακρίβεια τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 5.9, καθώς και για την περίπτωση αυτή 90% των τιμών της πτώσης πίεσης υπολογίζεται με ακρίβεια καλύτερη από  $\pm 90\%$ .

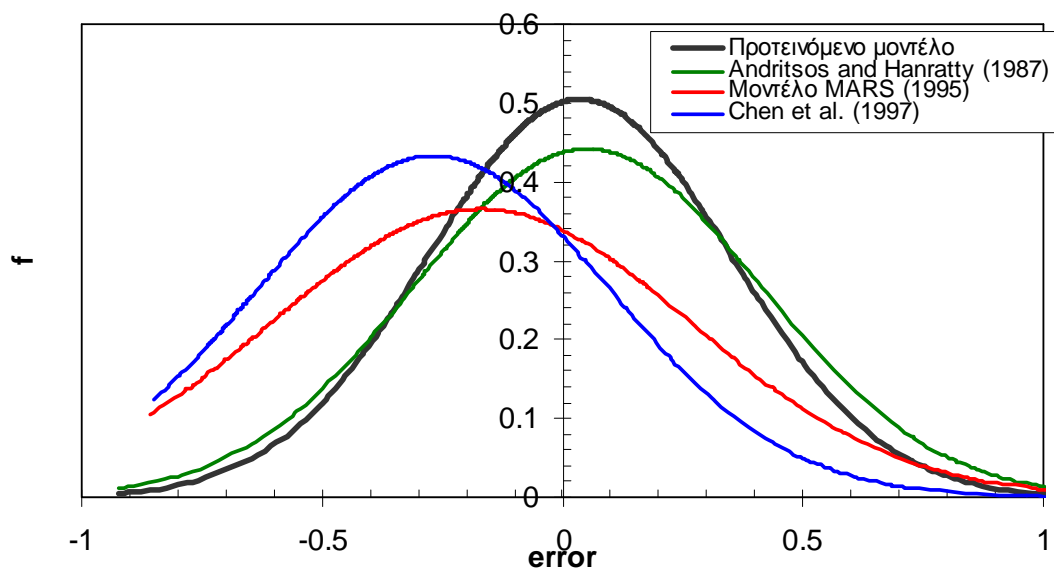


**Σχήμα 5.9** Σύγκριση της πτώσης πίεσης που υπολογίζεται με το μοντέλο που προτείνεται με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=35 \text{ mN/m}$ )-αέρα (διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται σε ακρίβεια  $\pm 10\%$ )

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, το αρχικό μοντέλο των Andritsos and Hanratty (1987a), αποτέλεσε τη βάση και για άλλους ερευνητές να προτείνουν αντίστοιχους συσχετισμούς για τον υπολογισμό του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής. Ωστόσο, προτάθηκαν και μοντέλα και με εντελώς διαφορετική νοοτροπία (π.χ. Grolman and Fortuin, 1995) για τον υπολογισμό του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής και κατά συνέπεια και της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Στα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης και του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής με τα μοντέλα των Chen et al. (1997), Grolman and Fortuin (1995) και του μοντέλου που προτείνεται στην παρούσα εργασία, με μια σειρά πειραματικών δεδομένων (Πίνακας 5.1). Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέρχονται μόνο από τη διαστρωματωμένη ροή για πάχος υγρής στιβάδας μικρότερο από 0.2 της διαμέτρου του αγωγού. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πειραματικά αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν, ο ερευνητής από τον οποίο προέρχονται, ο αριθμός τους καθώς και οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν για τα διεξαγωγή των πειραμάτων.



**Σχήμα 5.10** Κατανομή συνάρτησης πιθανότητα *Gauss* για το σφάλμα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα για το λόγο  $f_i/f_G$



**Σχήμα 5.11** Κατανομή συνάρτησης πιθανότητα *Gauss* για το σφάλμα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα για την πτώση πίεσης

Από τα αποτελέσματα που παρατίθενται παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η αποτελεσματικότητα του μοντέλου που προτείνεται στην παρούσα εργασία είναι αισθητά βελτιωμένη σε σχέση με τα άλλα μοντέλα που εξετάστηκαν. Τα μοντέλα που επιλέχθηκαν για τις συγκρίσεις είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα στη βιβλιογραφία. Το μοντέλο των Chen et al. (1997), αν και χρησιμοποιεί παρόμοια σχέση με αυτή των Andritsos and Hanratty (1987α) για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής στη διεπιφάνεια, ωστόσο προτείνει διαφορετικό τρόπο προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Το μοντέλο «MARS» των Grolman and Fortuin (1995) θεωρεί ότι η ύπαρξη της υγρής φάσης μέσα στον αγωγό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τραχύτητας του αγωγού κατά τη ροή της αέριας φάσης.

Πίνακας 5.1 Πειραματικά δεδομένα

Ερευνητής	Αριθμός πειραματικ. αποτελεσμ.	d (m)	$\mu_G$ ( $10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	$\rho_G$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\mu_L$ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	$\rho_L$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\sigma$ ( $\text{mN}/\text{m}$ )
Hoogendorn (1959)	25	0.14	1.81	1.204	1.02	1000	73
Andritsos (1986)	51	0.0254	1.81	1.204	1.02	1000	73
Andritsos (1986)	15	0.0254	1.81	1.204	4.5	1100	71
Andritsos (1986)	13	0.0254	1.81	1.204	16	1160	68
Andritsos (1986)	10	0.0254	1.81	1.204	70	1220	66
Andritsos (1986)	80	0.0952	1.81	1.204	1.02	1000	73
Andritsos (1986)	24	0.0952	1.81	1.204	12	1160	68
Andritsos (1986)	14	0.0952	1.81	1.204	80	1220	66
Vlachos (1997)	37	0.0508	1.81	1.204	1.02	1000	73
Chen et al. (1997)	48	0.079	1.81	1.204	2.65	865	25
Badie et al. (2000)	35	0.079	1.81	1.204	1.02	1000	73
Badie et al. (2000)	25	0.079	1.81	1.204	4.65	865	70
Παρούσα εργασία	278	0.024	1.81	1.204	1.02	1000	70
Παρούσα εργασία	134	0.024	1.48	1.81	1.02	1000	70
Παρούσα εργασία	120	0.024	1.81	1.204	1.02	1000	35

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 6

---

---

## 6.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

---

### 6.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί το καθεστώς ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό επηρεάζεται τις παροχές των δύο φάσεων, τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών, τη γεωμετρία του αγωγού και τις συνθήκες που επικρατούν (πίεση και θερμοκρασία). Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις μεταπτώσεις στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης και της επιφανειακής τάσης. Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία είναι τέτοια που μόνο η εξεταζόμενη ιδιότητα (πυκνότητα της αέριας φάσης ή επιφανειακή τάση) αλλάζουν σημαντικά, ενώ οι υπόλοιπες φυσικές ιδιότητες παραμένουν σχετικά σταθερές, με εξαίρεση το ιξώδες της αέριας φάσης. Οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.

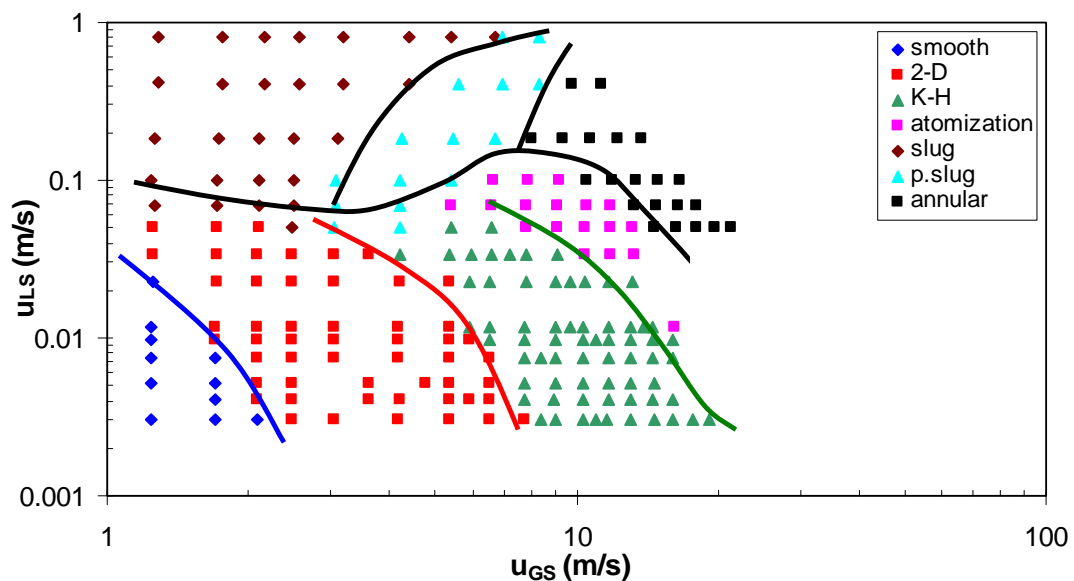
Η μεταβολή της πίεσης σε ένα διφασικό σύστημα υγρού-αερίου επηρεάζει βασικά την πυκνότητα της αέριας φάσης. Σε ένα εργαστηριακό σύστημα δεν είναι εύκολο να διατηρηθεί η πίεση λειτουργίας σταθερή σε μία τιμή μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία επιλέγεται να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας της αέριας φάσης στα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής, που αναμένεται να είναι αντίστοιχη της επίδρασης της πίεσης. Ωστόσο, είναι γεγονός ότι ούτε η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης ούτε και η επίδραση της πίεσης του συστήματος στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα και στα χαρακτηριστικά της ροής έχουν μελετηθεί επαρκώς στην βιβλιογραφία. Οι Andritsos and Hanratty (1987b) διαπίστωσαν μέσω της

ανάλυσης αστάθειας τύπου Kelvin-Helmholtz ότι η αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης έχει αποσταθεροποιητικό ρόλο στο σύστημα και μετατοπίζει τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Μάλιστα, η γραμμική ανάλυση έδειξε ότι η απαιτούμενη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης για τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα είναι σχεδόν αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας της αέριας φάσης. Μια τέτοια εξάρτηση άλλωστε συνάγεται και από την κλασική θεωρία Kelvin-Helmholtz. Από την άλλη μεριά οι παραπάνω ερευνητές ότι η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης δεν επηρεάζει στον ίδιο βαθμό τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα. Οι παραπάνω διαπιστώσεις κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας ελέγχονται και πειραματικά. Πρόσφατα, οι Jonhson et al. (2009) μελέτησαν πειραματικά τις μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής και τα χαρακτηριστικά των κυμάτων σε συστήματα σε υψηλές πιέσεις. Ταυτοποίησαν τέσσερα διαφορετικά είδη κυμάτων στη διαστρωματωμένη ροή, ενώ πραγματοποίησαν πειράματα σε υψηλές πιέσεις και σε ελαφρώς κεκλιμένο αγωγό. Παρατήρησαν ότι όπως και σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι και σε υψηλές πιέσεις με την εμφάνιση των κυμάτων «περιδίνησης» (roll waves) αυξάνει ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια, ενώ η ταχύτητα των κυμάτων αυτών είναι μεγαλύτερη σε υψηλές πιέσεις σε σχέση με τη ροή σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Η επίδραση της επιφανειακής τάσης έχει μελετηθεί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία από αρκετούς ερευνητές. Ωστόσο διαπιστώθηκε μια σύγχυση, αφού ορισμένοι από τους αυτούς, προκειμένου να μελετήσουν την επίδραση της μείωσης της επιφανειακής τάσης (για παράδειγμα οι Weisman et al. 1976, Hart et al. 1989 και Hand et al. 1992) χρησιμοποίησαν επιφανειοδραστικές ουσίες με αποτέλεσμα να καταλήγουν πολλές φορές σε αντιφατικά συμπεράσματα. Οι Hanratty and Hershman (1961) είχαν επισημάνει το γεγονός ότι η χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών όχι μόνο μειώνει την επιφανειακή τάση, αλλά αυξάνει και το επιφανειακό ιξώδες και σε αυτήν την αύξηση οφείλονται τα φαινόμενα που παρατηρούνται με τη χρήση τους. Οι ίδιοι πραγματοποίησαν πειράματα και με επιφανειοδραστικές ουσίες αλλά και με υδατικά διαλύματα βουτανόλης. Προφανώς οι ερευνητές αυτοί με τον όρο «επιφανειακό ιξώδες» εννοούν την επιφανειακή ελαστικότητα, η οποία μεταβάλλεται με προσθήκη επιφανειοδραστικών ουσιών, όπως έχει προκύψει από πιο σύγχρονες εργασίες (Warszynski et al., 2001). Πιο πρόσφατα οι Lioumbas et al. (2005) μελέτησαν συστηματικά την επίδραση της μείωσης της επιφανειακής τάσης αλλά και της χρήσης επιφανειοδραστικών σε αγωγό με κλίση προς τα κάτω αλλά και με κλίση προς τα πάνω (Lioumbas et al., 2009). Η μελέτη της επίδρασης της επιφανειακής τάσης δεν έχει εξεταστεί επαρκώς στη διαθέσιμη βιβλιογραφία και για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η μελέτη της επίδρασης της μείωσης της επιφανειακής τάσης στα χαρακτηριστικά της ροής.

## 6.2 Επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης

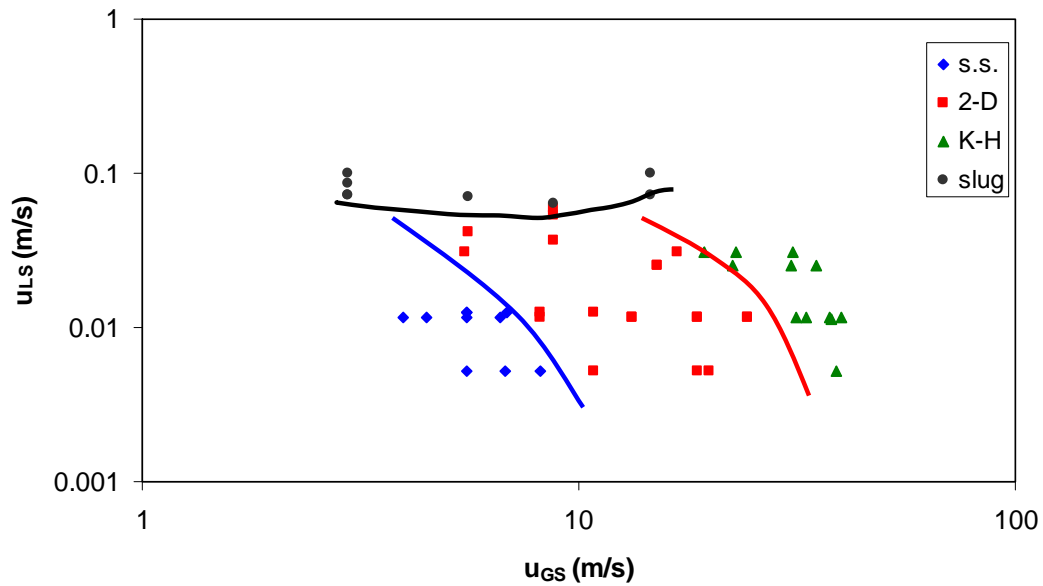
Για τη μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας της αέριας φάσης στα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής (σε σχέση με το σύστημα νερό-αέρας) χρησιμοποιήθηκε  $\text{CO}_2$  ( $\rho=1.81 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta=20^\circ\text{C}$  και  $1 \text{ atm}$ ) και  $\text{He}$  ( $\rho=0.167 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta=20^\circ\text{C}$  και  $1 \text{ atm}$ ). Στα Σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται οι χάρτες καθεστώτων ροής για τα συστήματα νερό- $\text{CO}_2$  και νερό- $\text{He}$ , αντίστοιχα. Όπως είναι αναμενόμενο δημιουργούνται τα ίδια καθεστώτα ροής με αυτά του συστήματος νερού-αέρα, δηλαδή λεία διαστρωματωμένη ροή, ροή με 2-D και K-H κύματα, ροή με εκνέφωση, δακτυλιοειδής ροή και διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή.



Σχήμα 6.1 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $\text{CO}_2$

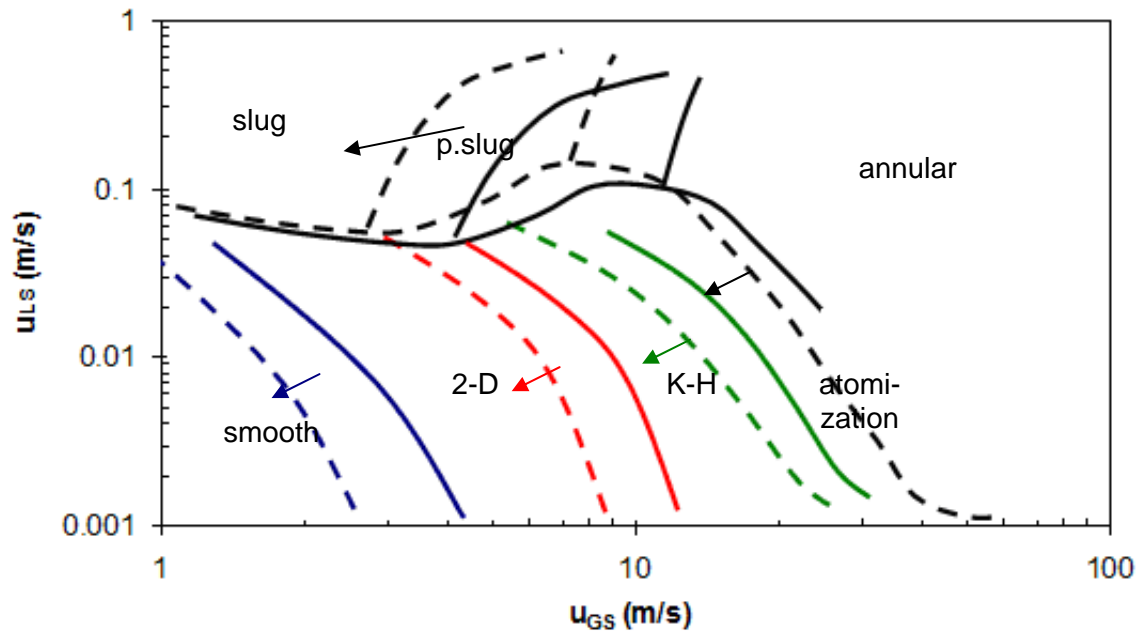
Καθώς η πραγματοποίηση πειραμάτων με το σύστημα νερού- $\text{He}$  ήταν ιδιαίτερος δαπανηρή και δύσκολη πραγματοποιήθηκαν περιορισμένες μετρήσεις προκείμενου να προσδιοριστούν οι μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής, αλλά και η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Αν και δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα υπόλοιπα καθεστώτα ροής είναι σχεδόν βέβαιο ότι και με μείωση της πυκνότητας της αέριας φάσης δεν μεταβάλλεται η μορφή του χάρτη, παρά μόνο τα όρια των μεταπτώσεων.



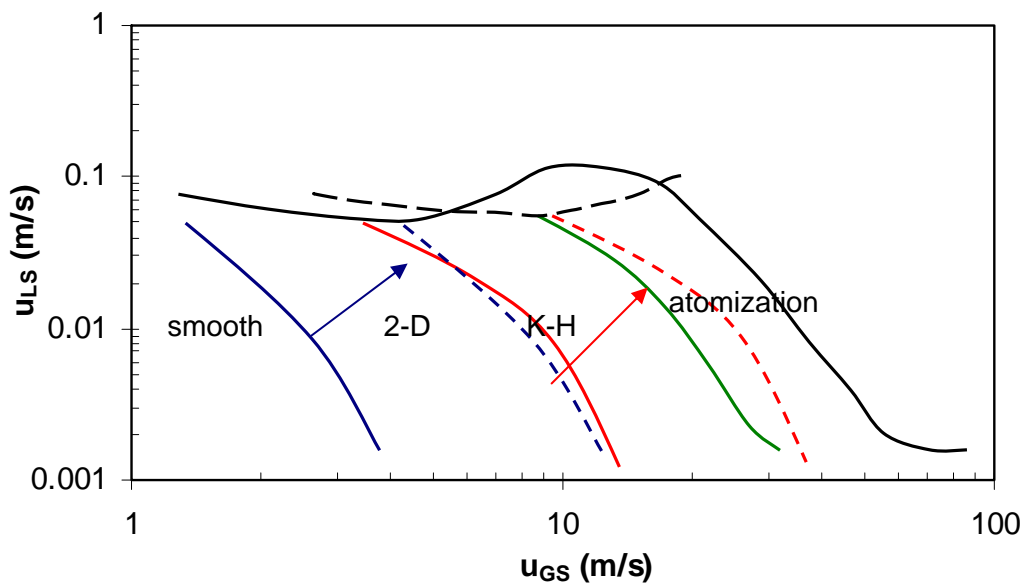


**Σχήμα 6.2** Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-He

Προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα από τη μεταβολή της πυκνότητας της αέριας φάσης στα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής οι χάρτες καθεστώτων ροής που προέκυψαν συγκρίνονται με το χάρτη του συστήματος νερού-αέρα που αποτελεί και το σύστημα αναφοράς στην παρούσα εργασία. Ο χάρτης αυτός προέκυψε ύστερα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας και η εγκυρότητα του ελέγχθηκε ύστερα από σύγκριση με διαθέσιμους χάρτες της βιβλιογραφίας που αναφέρονται στο ίδιο σύστημα (Andritsos, 1986). Η σύγκριση για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3 ενώ για το σύστημα νερού-He στο Σχήμα 6.4. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς νερού-αέρα και οι διακεκομμένες στο εκάστοτε εξεταζόμενο σύστημα.



**Σχήμα 6.3** Σύγκριση περιοχών ροής για σύστημα νερό-αέρας (συνεχείς γραμμές) και CO<sub>2</sub>-νερό (διακεκομμένες γραμμές)

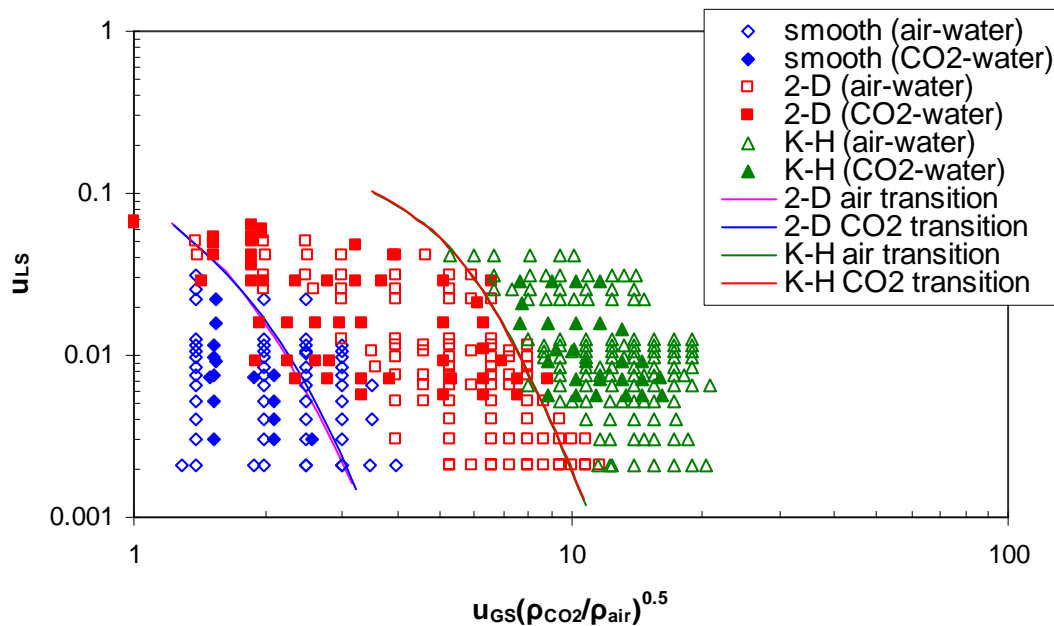


**Σχήμα 6.4** Σύγκριση περιοχών ροής για σύστημα νερό-αέρας (συνεχείς γραμμές) και He-νερό (διακεκομμένες γραμμές)

Από την παρατήρηση των Σχημάτων 6.3 και 6.4 γίνεται φανερό ότι η μεταβολή της πυκνότητας της αέριας φάσης επηρεάζει τις μεταπτώσεις των καθεστώτων ροής. Πιο αναλυτικά, με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης οι μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής μετατοπίζονται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, ενώ σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης λαμβάνει χώρα και η μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή και ψευδο-διαλείπουσα ροή. Οι μετατοπίσεις αυτές δεν είναι ιδιαίτερα έντονες καθώς με τη χρήση του CO<sub>2</sub> δε μεταβλήθηκε σε μεγάλο βαθμό η

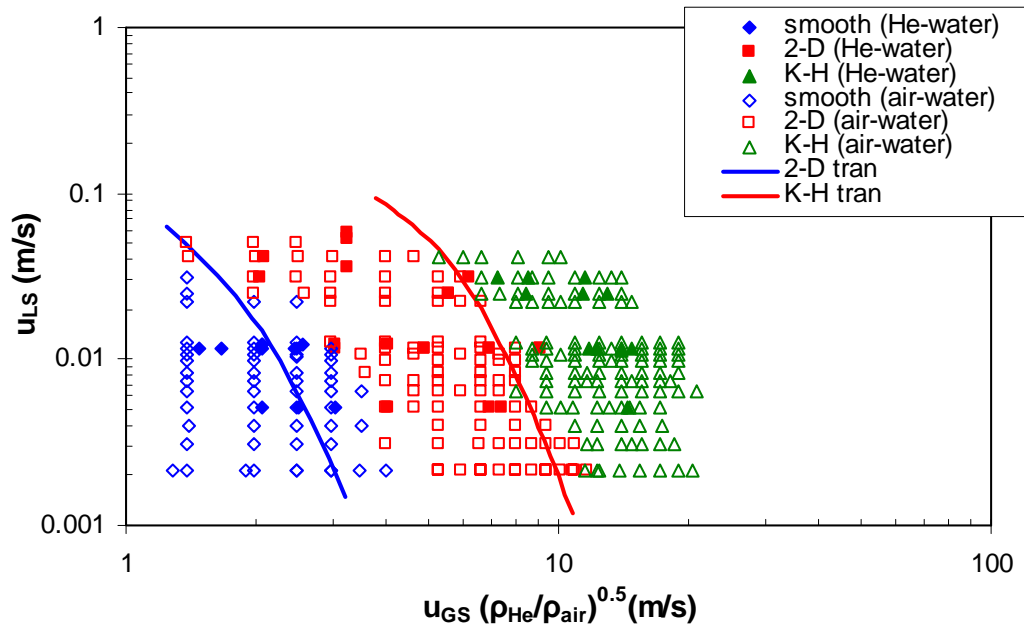
πυκνότητα της αέριας φάσης (από  $1.2 \text{ kg/m}^3$  για τον αέρα σε  $1.81 \text{ kg/m}^3$  για το  $\text{CO}_2$ ). Με τη χρήση όμως του He ως αέρια φάση, όπου η πυκνότητα της αέριας φάσης μεταβάλλεται σημαντικά ( $\rho_{\text{He}}=0.167 \text{ kg/m}^3$ ) και οι μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής επηρεάζονται έντονα και μετακινούνται σε σημαντικά χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Το γεγονός αυτό εξάλλου είναι αναμενόμενο καθώς με μεταβολή της πυκνότητας της αέριας φάσης μεταβάλλεται το ποσό της ορμής της αέριας φάσης που μεταφέρεται στην υγρή για τις ίδιες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Τέλος, και για τα δύο συστήματα που εξετάστηκαν η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δεν φαίνεται να επηρεάζεται.

Οι πειραματικές μεταπτώσεις στα καθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής συγκρίνονται με τις βελτιωμένες ημι-θεωρητικές εξισώσεις που προτείνονται στην παρούσα εργασία και φαίνεται από τα Σχήματα 6.5 και 6.6 ότι προβλέπονται αρκετά ικανοποιητικά και για τα δύο συστήματα που εξετάστηκαν.



**Σχήμα 6.5** Χάρτης περιοχών ροής με τροποποιημένους άξονες για το σύστημα νερό-αέρας και νερό- $\text{CO}_2$  και σύγκριση με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες

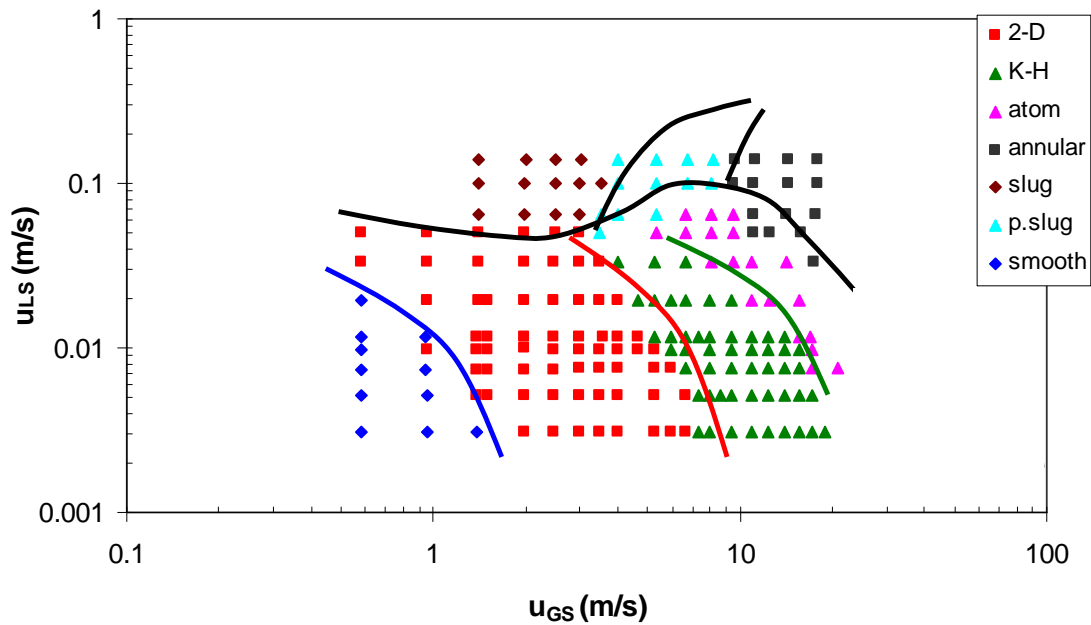
Στα Σχήματα 6.5 και 6.6 παρατηρείται ότι η καμπύλη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα αδυνατεί να περιγράψει ικανοποιητικά τη συγκεκριμένη μετάπτωση σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης. Το φαινόμενο αυτό πιθανόν οφείλεται το γεγονός ότι στις δεδομένες συνθήκες η ροή δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη η ροή και το πάχος της υγρής στιβάδας είναι χαμηλότερο. Κατά συνέπεια η μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης από αυτές που υπολογίζονται από την ημι-θεωρητική καμπύλη.



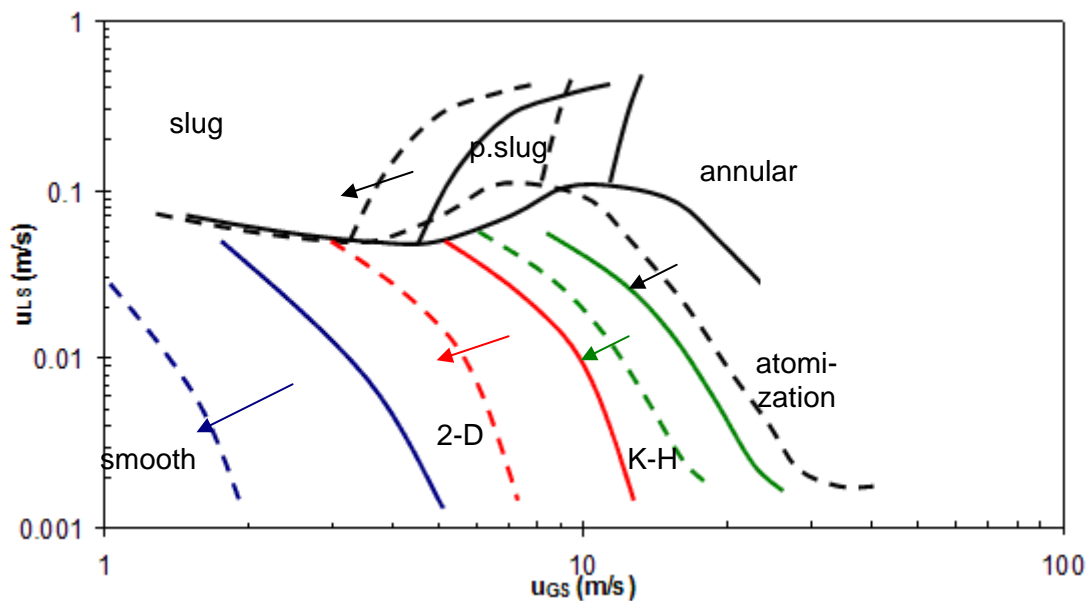
Σχήμα 6.6 Χάρτης περιοχών ροής με τροποποιημένους άξονες για το σύστημα νερό-αέρας και νερό-He και σύγκριση με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες

### 6.3 Επίδραση της επιφανειακής τάσης

Ο χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα ( $\sigma=0.04$  N/m) παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7. Και για την περίπτωση αυτού του συστήματος ταυτοποιήθηκαν τα ίδια καθεστώτα ροής. Η σύγκριση με το σύστημα νερού-αέρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8. Παρατηρείται ότι το εύρος της λείας διαστρωματωμένης ροής μειώνεται σημαντικά και οι πρώτες διαταραχές στη διεπιφάνεια εμφανίζονται σε σχετικά αρκετά χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης ( $u_{GS} \approx 1$  m/s). Οι διαταραχές αυτές είναι πολύ μικρού μήκους και πλάτους σε όλο το μήκος του αγωγού και προκειμένου να γίνουν αντιληπτές με οπτική παρατήρηση, πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά η διεπιφάνεια υπό συγκεκριμένη οπτική γωνία. Η ανάκλαση του φωτός είναι αυτή που βοηθάει για την οπτική εξακρίβωση των διαταραχών αυτών. Με τη εμφάνιση των διαταραχών αυτών η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων μοιάζει να «αναπνέει» και στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι μέσα στον αγωγό επικρατεί ακόμα λεία διαστρωματωμένη ροή με «παλλόμενη» διεπιφάνεια. Η δημιουργία των 2-D κυμάτων λαμβάνει χώρα σε ελαφρώς μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης ( $u_{GS} \approx 2$  m/s) και τότε θεωρείται ότι η ροή μεταπίπτει από λεία διαστρωματωμένη σε ροή με 2-D κύματα.



Σχήμα 6.7 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα

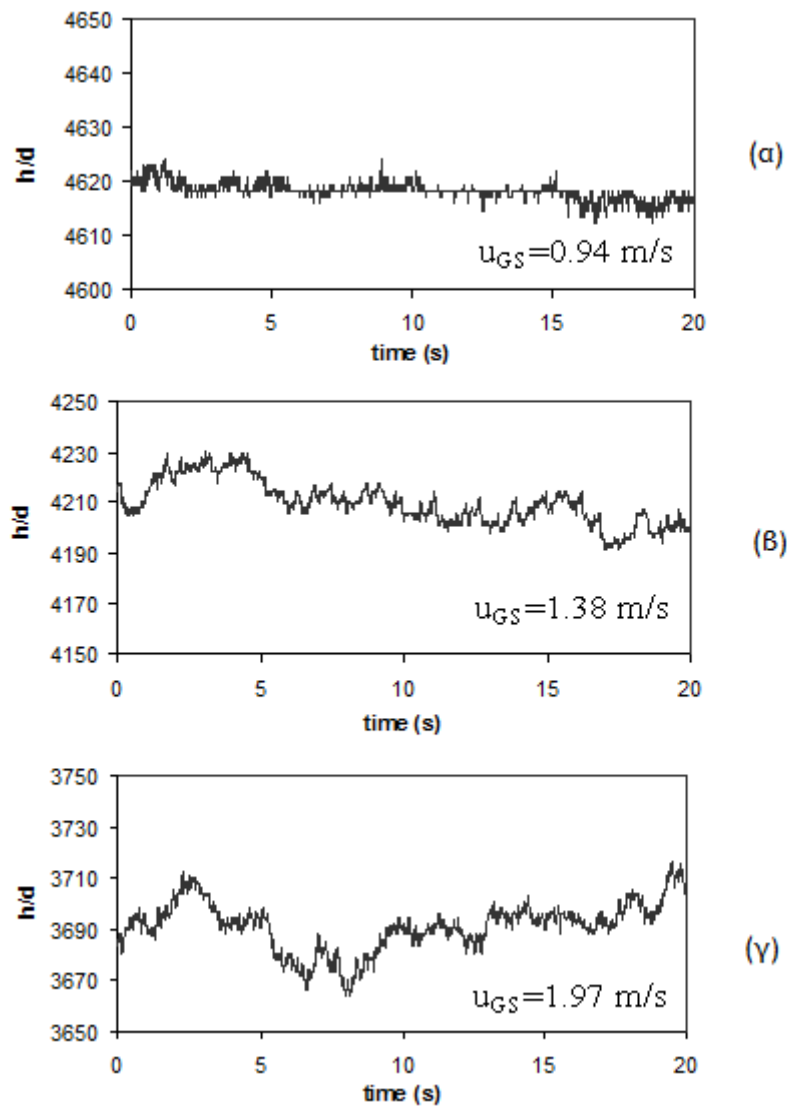


Σχήμα 6.8 Σύγκριση περιοχών ροής για σύστημα νερό-αέρας (συνεχείς γραμμές) και υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα (διακεκομμένες γραμμές)

Παρατηρείται ότι με μείωση της επιφανειακής τάσης (από 0.072 N/m σε 0.04 N/m) η μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα επηρεάζεται εντονότερα σε σχέση με τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, αφού η συγκεκριμένη καμπύλη μετάπτωσης μετατοπίζεται πιο έντονα προς μικρότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης σε σχέση με την καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα. Επίσης και η μετάπτωση σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και δακτυλιοειδή ροή συμβαίνει σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, ενώ

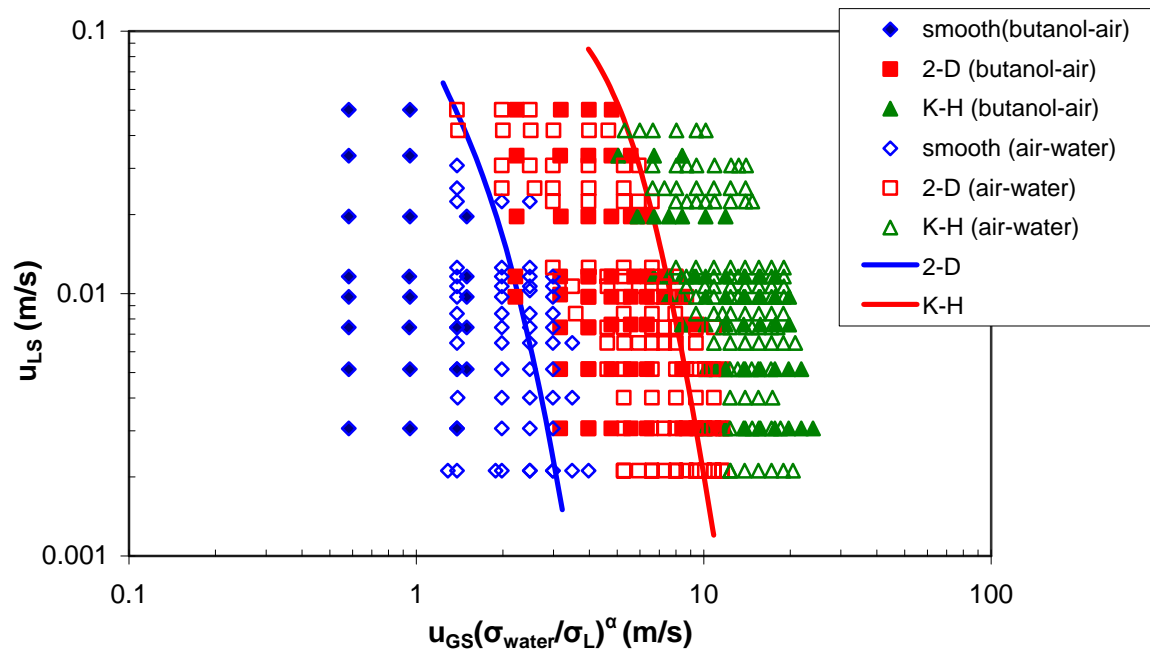
η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δε φαίνεται να επηρεάζεται από τη μεταβολή της επιφανειακής τάσης, γεγονός που παρατηρήθηκε και με τη μεταβολή της πυκνότητας της αέριας φάσης. Η μετατόπιση των μεταπτώσεων της διαστρωματωμένης ροής σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης σχετίζεται με το γεγονός ότι κατά την ανάλυση ευστάθειας Kelvin-Helmholtz (κεφ. 2) η επιφανειακή τάση αποτελεί σταθεροποιητική δύναμη του συστήματος. Κατά συνέπεια, η μείωση της οδηγεί στην ανάπτυξη κυματισμών στη διεπιφάνεια σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης.

Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται οι χρονικές αποτυπώσεις του πάχους της υγρής στιβάδας σε σχετικά χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης κατά τη λεία διαστρωματωμένη ροή. Στο Σχήμα 6.9α παρουσιάζεται η αποτύπωση της λείας διαστρωματωμένης ροής σε  $u_{GS} \approx 1$  m/s. Οι «θόρυβος» που παρατηρείται οφείλεται στο σφάλμα της ψηφιοποίησης της μεθόδου (digitization error, κεφ. 3), είναι της τάξης των  $\pm 5$   $\mu\text{m}$  και δεν οφείλεται σε διαταραχές στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων. Άλλωστε η συχνότητά τους είναι αρκετά υψηλή για ένα φυσικό φαινόμενο σε χαμηλές ταχύτητες. Με μικρή αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Σχήμα 6.9β) εμφανίζονται στη διεπιφάνεια πολύ μικρές διαταραχές, οι οποίες οπτικά ανιχνεύονται όπως προαναφέρθηκε μόνο με την ανάκλαση του φωτός στη διεπιφάνεια. Με την αγωγιμομετρική τεχνική καταγράφονται ως διαταραχές της τάξης των  $\pm 15$   $\mu\text{m}$ . Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Σχήμα 6.9γ) εμφανίζονται πλέον στη διεπιφάνεια τα πρώτα 2-D κύματα της τάξης των  $\pm 25$   $\mu\text{m}$ . Σημειώνεται ότι οι πρόδρομες αυτές διαταραχές που εμφανίζονται στο σύστημα αυτό (Σχήμα 6.9β) είναι εντελώς απούσες για το σύστημα νερού-αέρα, όπου μετά τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή δημιουργούνται τα πρώτα 2-D κύματα.



**Σχήμα 6.9** Χρονική εξέλιξη του πάχους της υγρής στιβάδας με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για  $u_{LS}=0.00515 \text{ m/s}$

Στο Σχήμα 6.10 συγκρίνονται οι μεταπτώσεις που παρατηρήθηκαν πειραματικά (Σχήμα 6.8) με αυτές που προβλέπονται από τις ημι-θεωρητικές εξισώσεις που προτείνονται στην παρούσα εργασία (κεφ. 5). Τόσο η μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα, όσο και η μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα περιγράφονται αρκετά ικανοποιητικά από τις ημι-θεωρητικές εξισώσεις. Η τιμή του εκθέτη  $\alpha$  είναι 0.6 για την περίπτωση της μετάπτωσης σε ροή με 2-D κύματα και 0.33 για την περίπτωση της μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Βεβαίως απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της επιφανειακής τάσης και με άλλα διαλύματα ή υγρά με μικρότερη επιφανειακή τάση από αυτή του νερού.



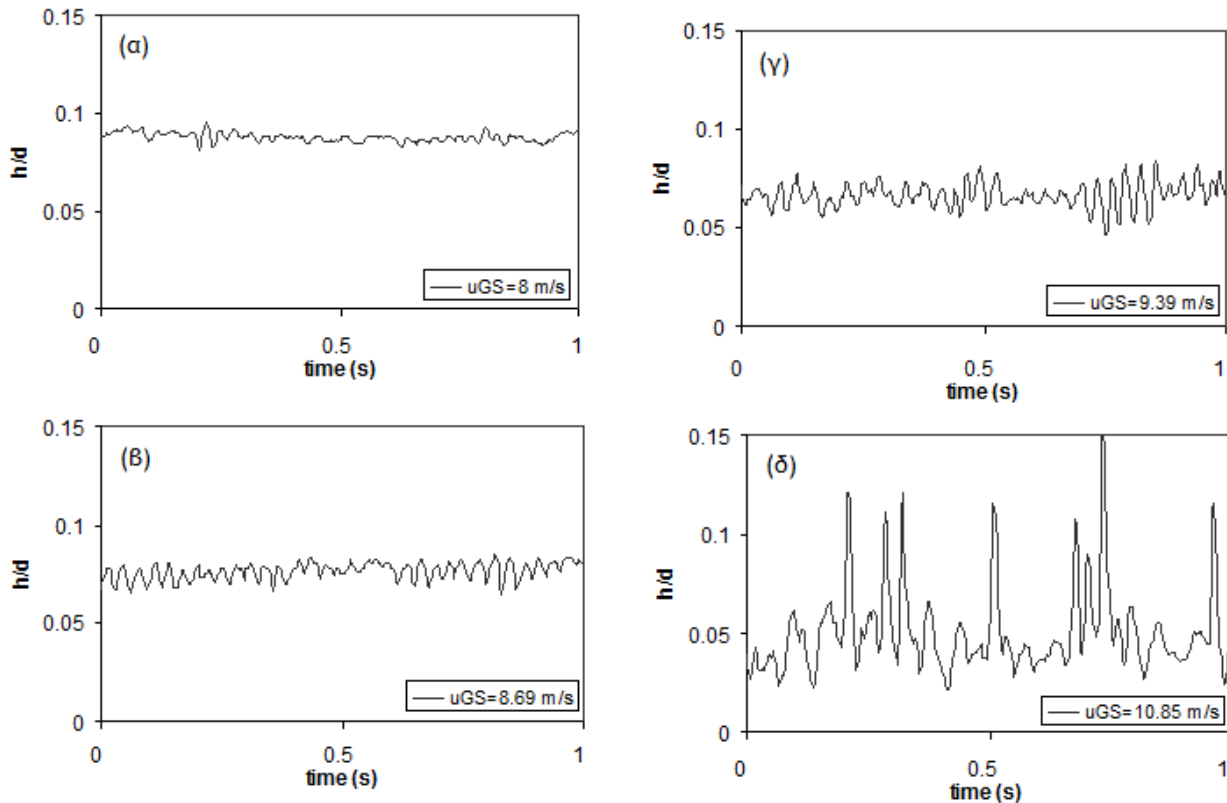
**Σχήμα 6.10** Χάρτης περιοχών ροής με τροποποιημένους άξονες για το σύστημα νερό-αέρας και υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα και σύγκριση με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες

#### 6.4 Χαρακτηριστικά κυμάτων κατά τη μετάπτωση σε ροή με κύματα K-H

Είναι γνωστό ότι η μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο δε συμβαίνει ακαριαία, αλλά υπάρχει μια ζώνη όπου η ροή παρουσιάζει χαρακτηριστικά και από τα δύο καθεστώτα εκατέρωθεν της μετάπτωσης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι πλάτος της ζώνης μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα ήταν μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό που παρατηρήθηκε στα συστήματα νερού-αέρα και νερού-CO<sub>2</sub>. Επιπλέον, τα κύματα που παρατηρούνται για το σύστημα αυτό έχουν ορισμένα διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η εξέλιξη των κυμάτων πριν και μετά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού-αέρα, ενώ το Σχήμα 6.12 είναι η φωτογραφική απεικόνιση των K-H κυμάτων για το σύστημα νερού-αέρα.





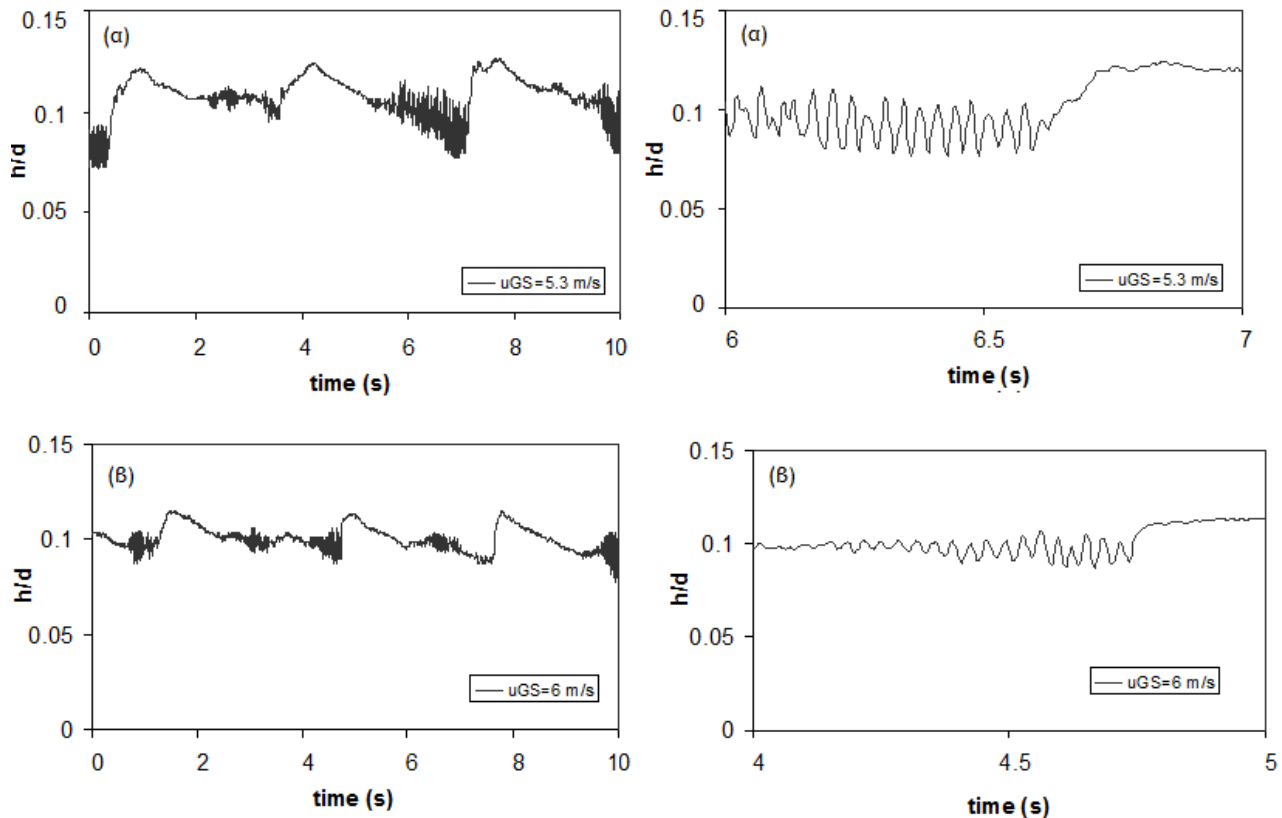
**Σχήμα 6.11** Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα νερού-αέρα για  $u_{LS}=0.0116$  m/s

Για το σύστημα νερού-αέρα και για τη δεδομένη φαινομενική ταχύτητα της υγρής φάσης ( $u_{LS}=0.0116$  m/s) η απαιτούμενη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης για τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα είναι περίπου 9.4 m/s. Για μικρότερη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης  $u_{GS}=8$  m/s, στη διεπιφάνεια παρατηρούνται κανονικά 2-D κύματα μικρού πλάτους. Για μια ενδιάμεση φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης ( $u_{GS}=8.69$  m/s), τα κύματα παραμένουν 2-D αν και το πλάτος τους αυξάνεται. Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης ( $u_{GS}=9.39$  m/s) τα κύματα αρχίζουν να χάνουν την κανονικότητά τους, οι κορυφές τους γίνονται πιο απότομες, το πλάτος τους αυξάνεται, ενώ η συχνότητά τους παραμένει αμετάβλητη. Οι συνθήκες αυτές βρίσκονται μέσα στη ζώνη μετάπτωσης, όπου τα κύματα αν και δεν έχουν αποκτήσει ακόμα τα χαρακτηριστικά των κυμάτων K-H, ωστόσο έχουν αρχίσει να χάνουν το χαρακτήρα των 2-D κυμάτων. Τέλος, για  $u_{GS}=10.85$  m/s K-H εμφανίζονται παντού μέσα στον αγωγό. Οπότε από το Σχήμα 6.11 παρατηρείται ότι για τη δεδομένη φαινομενική ταχύτητα υγρής φάσης και για το σύστημα νερού-αέρα η ζώνη μετάπτωσης πριν τη ροή με κύματα K-H εκτείνεται από 9.4 έως 10.85 m/s.



**Σχήμα 6.12** K-H κύματα για σύστημα νερού-αέρα για  $u_{GS}=12.4 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.022 \text{ m/s}$

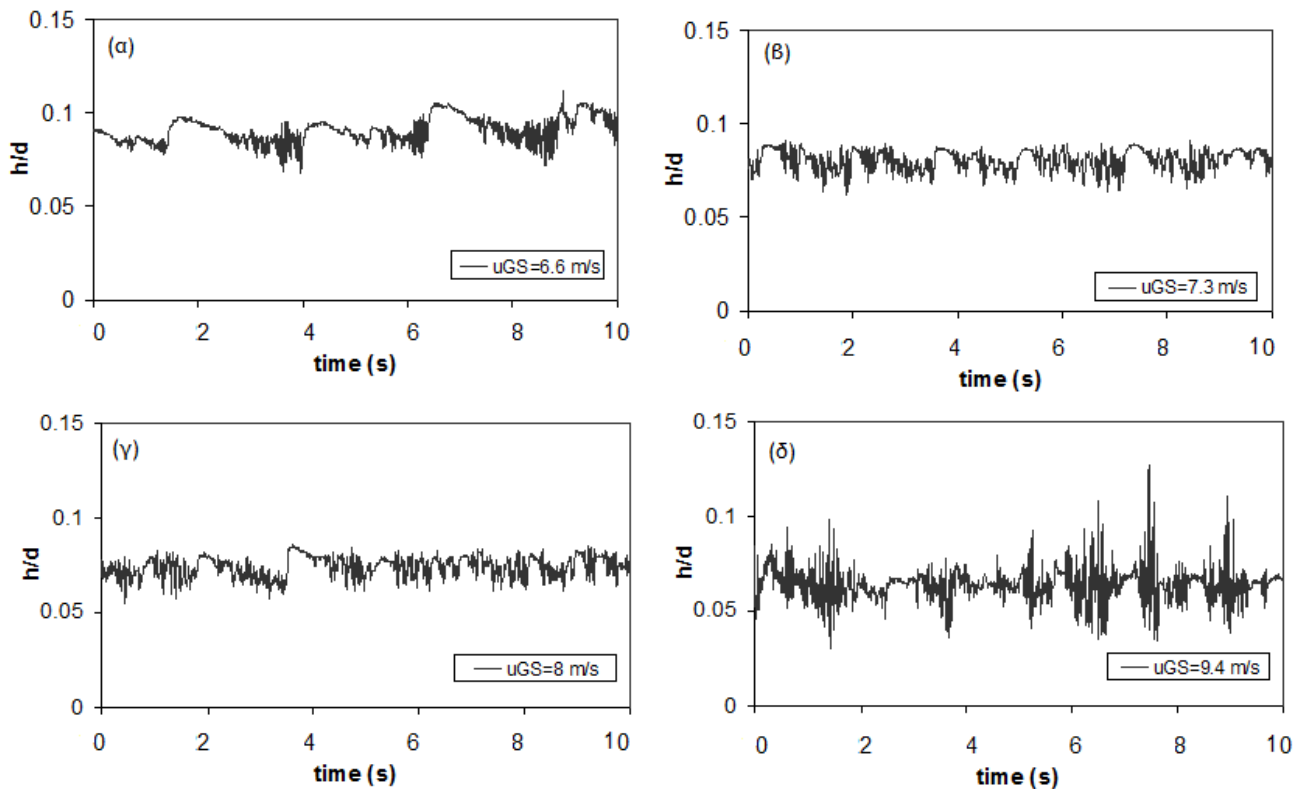
Για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα και για τη την ίδια φαινομενική ταχύτητα της υγρής φάσης ( $u_{LS}=0.0116 \text{ m/s}$ ) η απαιτούμενη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης για τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα είναι περίπου  $7 \text{ m/s}$ . Η επιφανειακή τάση επηρεάζει πολύ έντονα τα χαρακτηριστικά των κυμάτων πριν από τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, αφού στη διεπιφάνεια δε δημιουργούνται κανονικά 2-D κύματα, αλλά ένα είδος «μοναχικών» κυμάτων. Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζονται οι χρονικές αποτυπώσεις των κυμάτων στην περιοχή αυτή. Αρχικά (Σχήμα 6.13α), στη διεπιφάνεια δημιουργούνται μοναχικά κύματα μεγάλου πλάτους και μικρής συχνότητας (περίπου  $0.3 \text{ Hz}$ ) με τριχοειδή κύματα μπροστά από το μέτωπο του κύματος. Με μικρή αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 6.13β, το πλάτος των μοναχικών κυμάτων μειώνεται (από  $1200$  σε  $700 \mu\text{m}$ ), ενώ αντίστοιχα μειώνεται και το πλάτος των τριχοειδών κυμάτων.



**Σχήμα 6.13** Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής Βουτανόλης-αέρα για  $u_{LS}=0.0116 \text{ m/s}$  πριν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα

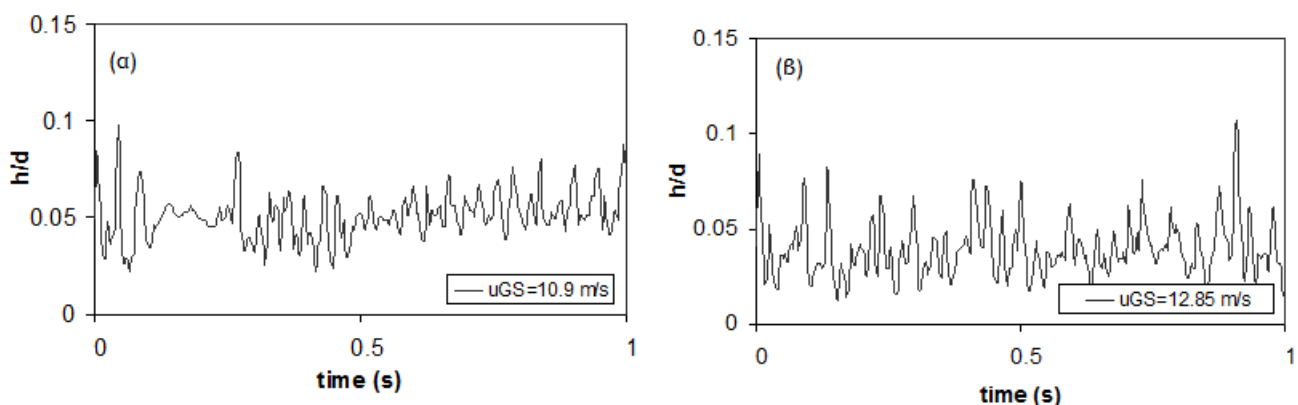
Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης το πλάτος των κυμάτων παραμένει σχεδόν σταθερό (Σχήμα 6.14α), ενώ αυξάνεται ελαφρώς η συχνότητα τους (περίπου 0.4 Hz). Κοντά στην ταχύτητα μετάπτωσης ( $u_{GS}=7.3 \text{ m/s}$ ) η συχνότητα των κυμάτων αυξηθεί (0.6 Hz), ενώ το πλάτος τους έχει μειωθεί, η μετάπτωση δηλαδή σε ροή με κύματα K-H πραγματοποιείται ουσιαστικά μέσω της συγχώνευσης των κυμάτων αυτών

Με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης το πλάτος των κυμάτων αυτών μειώνεται και αυξάνεται η συχνότητα τους. Κοντά στην ταχύτητα μετάπτωσης ( $u_{GS}=7.3 \text{ m/s}$ ) η συχνότητα των κυμάτων αυτών έχει αυξηθεί και το πλάτος τους έχει μειωθεί, η μετάπτωση δηλαδή σε ροή με κύματα K-H πραγματοποιείται ουσιαστικά μέσω της συγχώνευσης των μοναχικών κυμάτων. Η συγχώνευση των μοναχικών κυμάτων πραγματοποιείται σταδιακά, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 6.14γ. Σε ακόμα μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης (Σχήμα 6.14δ) αρχίζουν στη διεπιφάνεια μεταξύ των δυο φάσεων να δημιουργούνται τα πρώτα K-H κύματα, ενώ εξακολουθούν να υπάρχουν περιοχές μέσα στον αγωγό (ανάμεσα σε ομάδες K-H κυμάτων) όπου υπάρχουν ακόμα μοναχικά κύματα.



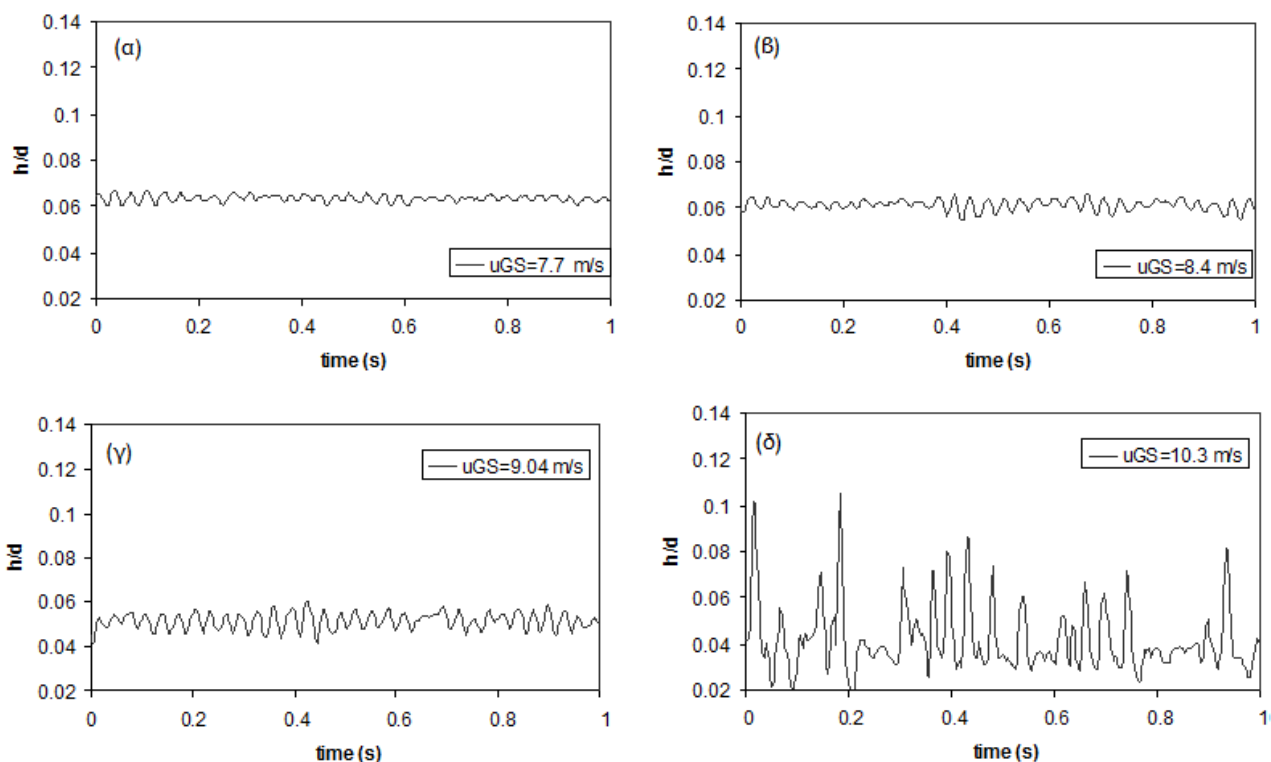
**Σχήμα 6.14** Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για  $u_{LS}=0.0116$  m/s στη ζώνη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα

Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Σχήμα 6.15) στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων δημιουργούνται κύματα K-H μεγάλου πλάτους. Από τη συνολική αποτύπωση της μορφής της διεπιφάνειας που παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.13-6.15 γίνεται φανερό ότι το εύρος της ζώνης μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα είναι σαφώς μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό του συστήματος νερού-αέρα.



**Σχήμα 6.15** Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για  $u_{LS}=0.0116$  m/s σε ροή με K-H κύματα

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα χαρακτηριστικά των κυμάτων πριν από τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για την περίπτωση του συστήματος CO<sub>2</sub>-νερού είναι όμοια με τα χαρακτηριστικά των κυμάτων του συστήματος νερού-αέρα. Οι χρονικές αποτυπώσεις του πάχους της υγρής στιβάδας για το σύστημα CO<sub>2</sub>-νερού παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.16 σε  $u_{LS}=0.0097$  m/s. Η ταχύτητα μετάπτωσης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 9 m/s. Κοντά στην ταχύτητα αυτή (Σχήμα 6.16β) τα κύματα αρχίζουν και χάνουν την κανονικότητα τους ενώ οι κορυφές τους γίνονται πιο απότομες, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του συστήματος νερού-αέρα. Τελικά με περεταίρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης ( $u_{GS}=10.3$  m/s) τα κύματα αποκτούν τα χαρακτηριστικά των κυμάτων K-H (Σχήμα 6.16δ).

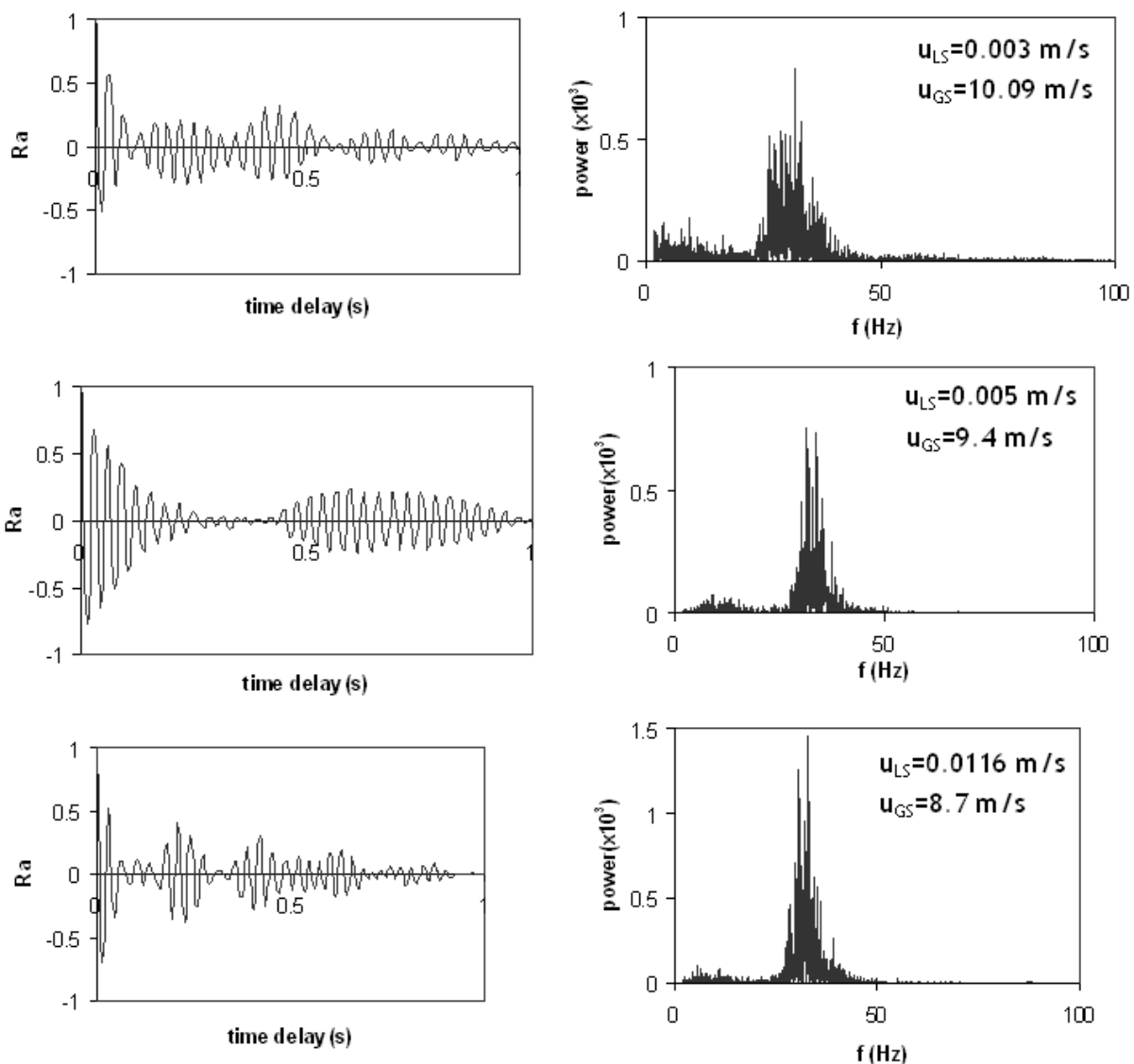


**Σχήμα 6.16** Εξέλιξη κυμάτων για σύστημα CO<sub>2</sub>-νερού για  $u_{LS}=0.0097$  m/s

Από τα Σχήματα 6.11 και 6.16 γίνεται φανερό ότι πριν από τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων εμφανίζονται κανονικά 2-D κύματα μεγάλου πλάτους και μικρού μήκους κύματος. Η συχνότητα των κυμάτων αυτών παραμένει σταθερή (30 Hz) για όλες τις φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Στο Σχήμα 6.17 που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και το φάσμα του πλάτους κύματος για διάφορες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης πριν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα. Ο υπολογισμός της

συνάρτησης αυτοσυσχέτισης αλλά και του φάσματος ισχύος παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

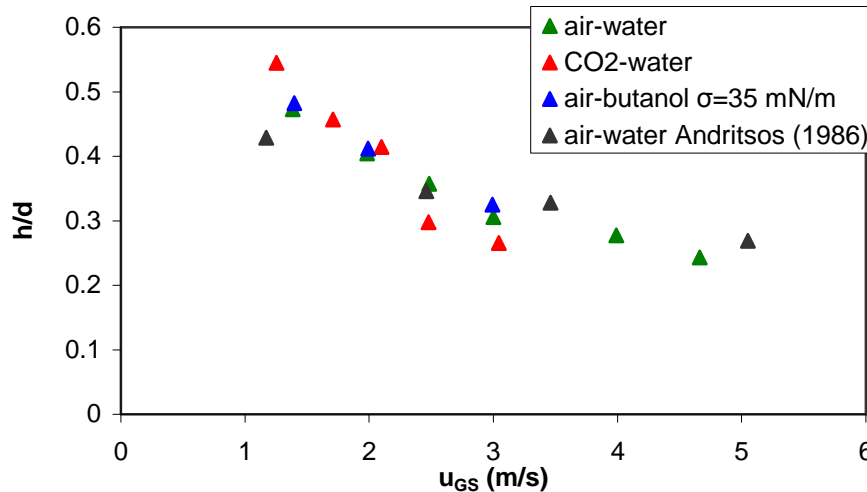
Η εμφάνιση των κυμάτων αυτών θα μπορούσε να αποτελέσει ένα πιο αντικειμενικό κριτήριο από την οπτική παρατήρηση για τη ταυτοποίηση της μετάπτωσης σε ροή με Κ-Η κύματα, εφόσον είναι ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε συστηματικά για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα της παρούσας εργασίας, όταν η επιφανειακή τάση παρέμενε σταθερή. Αξίζει να αναφερθεί ότι τέτοιου είδους κανονικά 2-D κύματα ταυτοποιήθηκαν και από τους Andritsos and Hanratty (1987a) για σύστημα υδατικού διαλύματος γλυκερίνης (4.5 mPa·s)-αέρα με μικρότερη όμως συχνότητα, περίπου 20 Hz. Η μείωση αυτή στη συχνότητα των κυμάτων οφείλεται πιθανόν στο μεγαλύτερο ιξώδες της υγρής φάσης.



**Σχήμα 6.17** Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (αριστερά) και φάσμα πλάτους κύματος (δεξιά) για σύστημα νερού-αέρα

### 6.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων

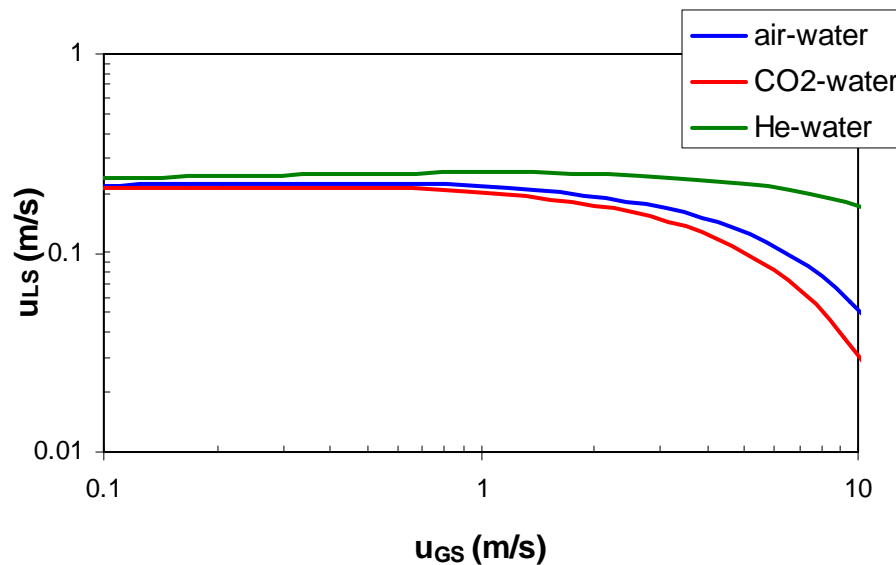
Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δεν επηρεάζεται από τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος όταν το ιξώδες της υγρής φάσης παραμένει σταθερό. Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται το πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή για συστήματα με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες.



**Σχήμα 6.18** Πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σε συνάρτηση με τη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης

Από το Σχήμα 6.18 γίνεται φανερό ότι το κρίσιμο πάχος της υγρής στιβάδας που απαιτείται για τη δημιουργία της διαλείπουσας ροής παραμένει σταθερό για τα συστήματα με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες. Από τα πειραματικά δεδομένα του Σχήματος 6.18 προκύπτει ότι όταν το αδιάστατο πάχος της υγρής στιβάδας είναι μεγαλύτερο από 0.3 τότε η ροή μεταπίπτει από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ανεξάρτητα των φυσικών ιδιοτήτων της υγρής και της αέριας φάσης. Η τιμή αυτή φαίνεται να αυξάνεται με αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης, όπως διαπιστώθηκε από τους Andritsos et al. (1989). Για χαμηλότερες τιμές του πάχους της υγρής στιβάδας με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης η ροή μεταπίπτει σε ροή με K-H κύματα.

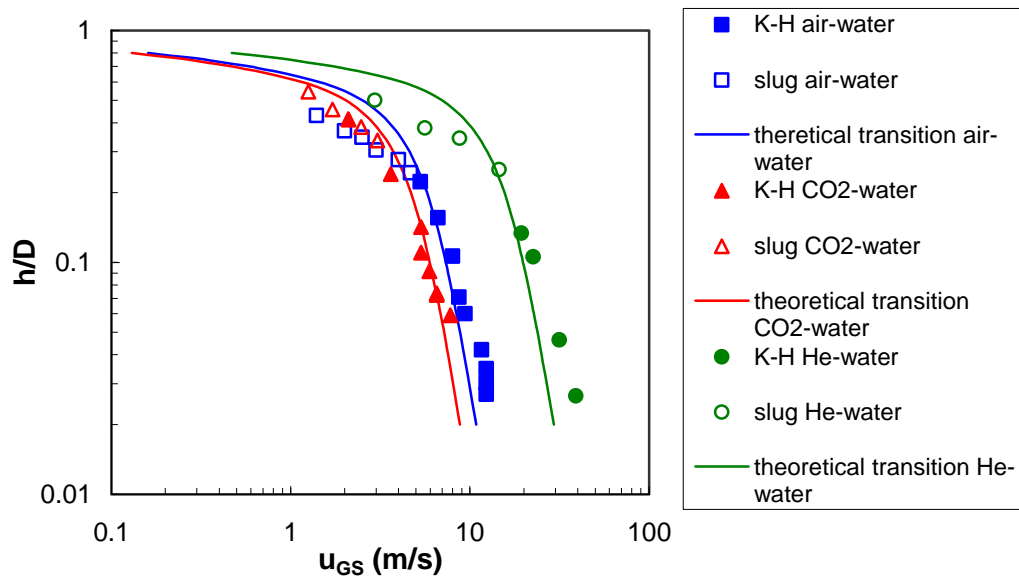
Η παραπάνω διαπίστωση έρχεται σε συμφωνία και με το κλασικό θεωρητικό μοντέλο των Taitel and Dukler (1976), το οποίο όταν το ιξώδες της υγρής φάσης παραμένει σταθερό δεν προβλέπει εξάρτηση της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή από τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 6.18. Αν και οι τιμές της φαινομενικής ταχύτητας της υγρής φάσης για τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή που προκύπτουν από το μοντέλο αυτό είναι μεγαλύτερες από τις πειραματικές, ωστόσο παρουσιάζουν την ίδια τάση με τα πειραματικά δεδομένα. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το μοντέλο αυτό δε λαμβάνει υπόψη της επίδραση της επιφανειακής τάσης.



**Σχήμα 6.19** Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σύμφωνα με το μοντέλο των *Taitel and Dukler* (1976)

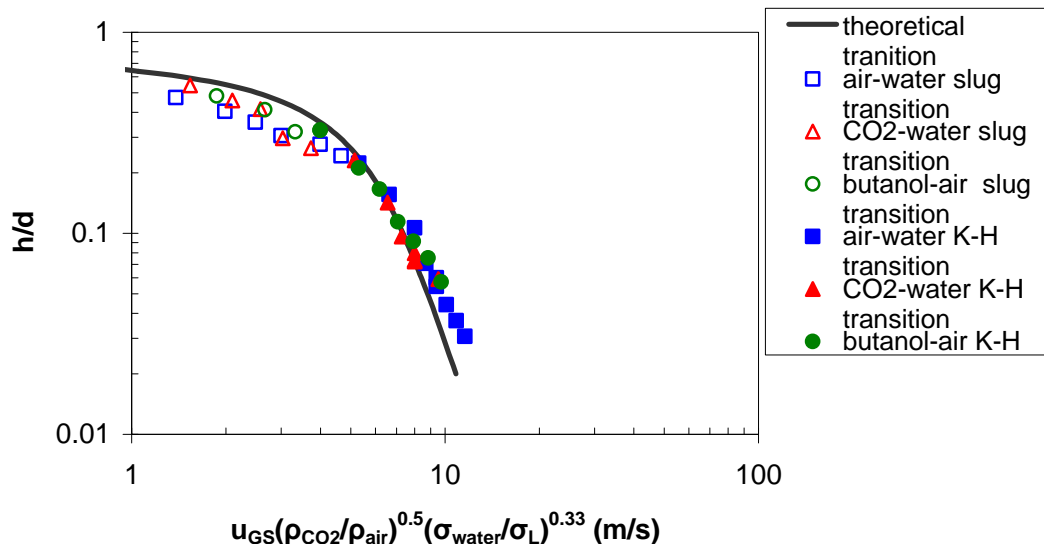
Οι Andritsos et al. (1989) αναφέρουν ότι ο ίδιος μηχανισμός αστάθειας είναι υπεύθυνος τόσο για τη δημιουργία των K-H κυμάτων όσο και για τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία και με πιο σύγχρονες εργασίες (Jonhson et al., 2009). Σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης όπου δεν είναι δυνατή η δημιουργία K-H κυμάτων στη διεπιφάνεια η ροή μεταπίπτει σε διαλείπουσα εξαιτίας της ανάπτυξης μικρών διαταραχών που υπάρχουν στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων, όταν το πάχος της υγρής φάσης είναι το απαιτούμενο. Σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης η δημιουργία της διαλείπουσας ροής οφείλεται στη συγχώνευση των κυμάτων περιδίνησης που προϋπάρχουν στη διεπιφάνεια (Lin and Hanratty, 1986 ?). Με βάση την παραπάνω θεώρηση το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986b), όπως έχει αναφερθεί και στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την περιγραφή της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή. Οι καμπύλες που προκύπτουν για την περιγραφή της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή και ροή με K-H κύματα από το μοντέλο αυτό παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.20 για συστήματα με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες. Παρατηρείται ότι για τα εξεταζόμενα συστήματα η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δε μεταβάλλεται με τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών. Στο Σχήμα 6.20 παρουσιάζεται και η σύγκριση των ημι-θεωρητικών καμπύλων που προκύπτουν από το παραπάνω μοντέλο για το πάχος της υγρής φάσης, με τα πειραματικά δεδομένα τόσο για τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή όσο και για τη μετάπτωση σε ροή με κύματα K-H.





**Σχήμα 6.20** Σύγκριση των πειραματικών τιμών του πάχους της υγρής φάσης στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες

Τέλος παρατηρείται ότι αν άξονες του συστήματος τροποποιηθούν όπως έχει προαναφερθεί (κεφ. 5) τότε οι παραπάνω μεταπτώσεις για τα συστήματα με τις διαφορετικές φυσικές ιδιότητες συμπίπτουν και μπορούν να περιγραφούν αρκετά ικανοποιητικά από μία μόνο καμπύλη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.21.



**Σχήμα 6.21** Ημι-θεωρητική καμπύλη μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε ωστόσο ότι η μετάπτωση από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή επηρεάζεται από τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών με τρόπο όμοιο με αυτό της διαστρωματωμένη ροής. Το φαινόμενο αυτό πιθανόν

να οφείλεται στο γεγονός ότι η δημιουργία της ψευδο-διαλείπουσα ροής οφείλεται στον ίδιο μηχανισμό με αυτόν της δημιουργίας των K-H κυμάτων. Η ψευδο-διαλείπουσα ροή ουσιαστικά είναι K-H κύματα με μεγαλύτερο πλάτος και η εμφάνιση της εξαρτάται και από τη διατομή του αγωγού. Σε αγωγούς με μεγαλύτερη διάμετρο υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης θα ήταν απαραίτητες για τη δημιουργία της ψευδο-διαλείπουσας ροής ενώ θα παρατηρούνταν επέκταση της περιοχής με K-H κύματα. Η ψευδο-διαλείπουσα ροή ίσως θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί σαν συνέχεια της ροής με K-H κύματα μέχρι το σημείο εκείνο που το επιτρέπει η διάμετρος του αγωγού.

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 7

---

---

## 7. ΚΑΤΩΦΕΡΗΣ ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

---

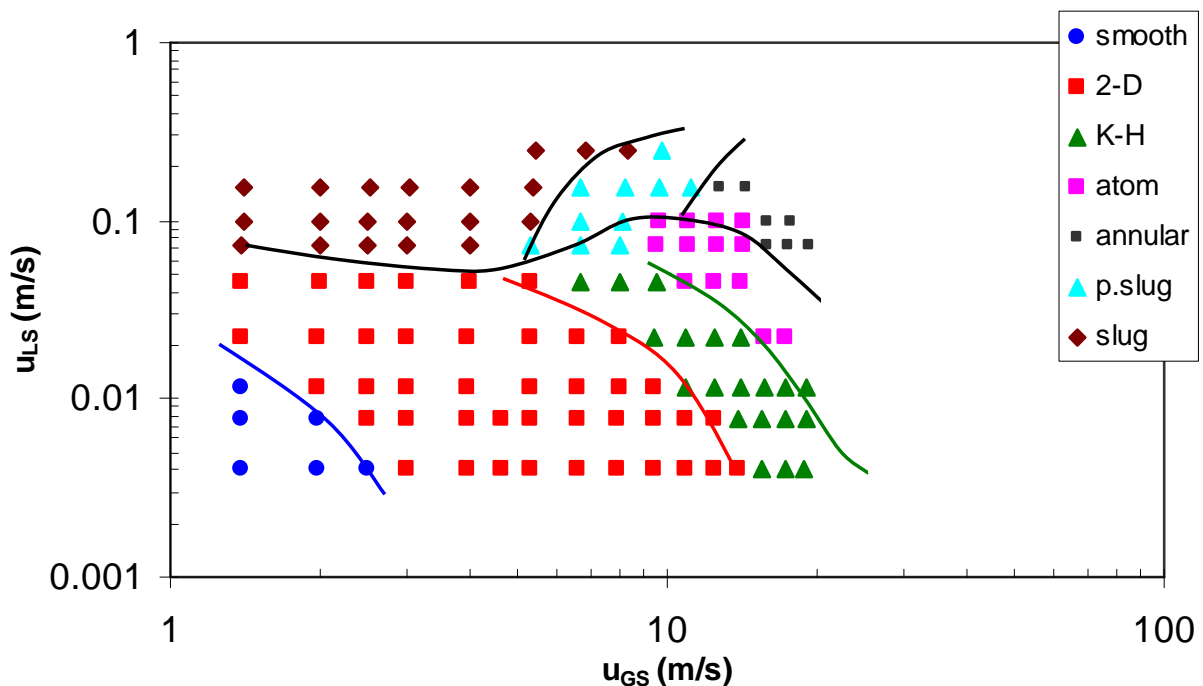
### 7.1 Εισαγωγή

Κατά τη ροή με κατηφορική κλίση του αγωγού η υγρή φάση κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με τις ίδιες συνθήκες ροής σε οριζόντιο αγωγό και το πάχος της υγρής στιβάδας είναι μικρότερο εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας. Κατά συνέπεια, ευνοείται η διαστρωματωμένη ροή, ενώ η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερες παροχές της υγρής. Ακόμη ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ροής σε αγωγούς με κατωφερή κλίση είναι το γεγονός ότι η λεία διαστρωματωμένη ροή υφίσταται μόνο σε αρκετά χαμηλές παροχές της υγρής φάσης (και σε ιδιαίτερα μικρές κλίσεις), ενώ σε ελαφρά μεγαλύτερες παροχές εμφανίζονται κύματα στη διεπιφάνεια. Σε αντίθεση με τη ροή σε οριζόντιο αγωγό, όπου οι πρώτες διαταραχές στη διεπιφάνεια δημιουργούνται λόγω των διατμητικών δυνάμεων στη διεπιφάνεια από την αέρια φάση, σε ροή με κατωφερή κλίση διαταραχές παρουσιάζονται στη διεπιφάνεια ακόμα και απουσία της αέριας φάσης εξαιτίας ασταθειών που είναι αποτέλεσμα της βαρύτητας.

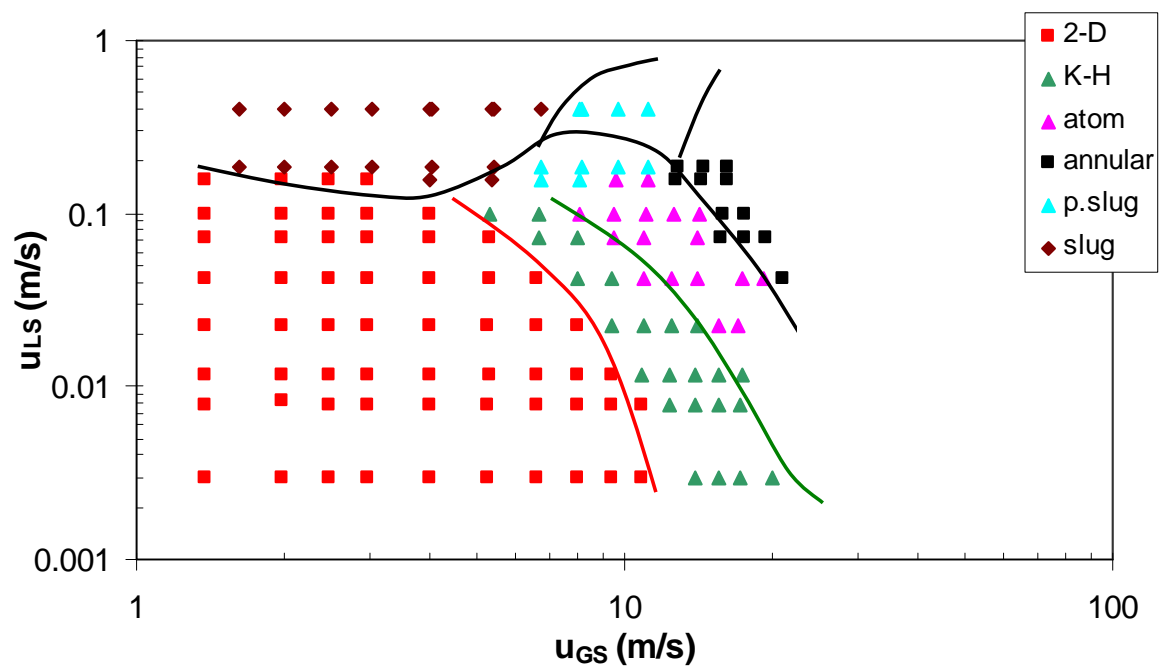
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σε αγωγό με μικρή κλίση προς τα κάτω ταυτοποιήθηκαν τα ίδια καθεστώτα ροής με αυτά που εμφανίζονται σε οριζόντιους αγωγούς, αν και τα όριά τους είναι σημαντικά μετατοπισμένα. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση μικρής κλίσης του αγωγού προς τα κάτω, ενώ εξετάζεται και η επίδραση ορισμένων φυσικών ιδιοτήτων. Τα διφασικά συστήματα που εξετάστηκαν είναι νερό-αέρας, νερό-CO<sub>2</sub> και υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=35$  mN/m)-αέρα σε γωνίες +0.25 και +1°.

## 7.2 Επίδραση κατωφερούς κλίσης του αγωγού στους χάρτες καθεστώτων ροής

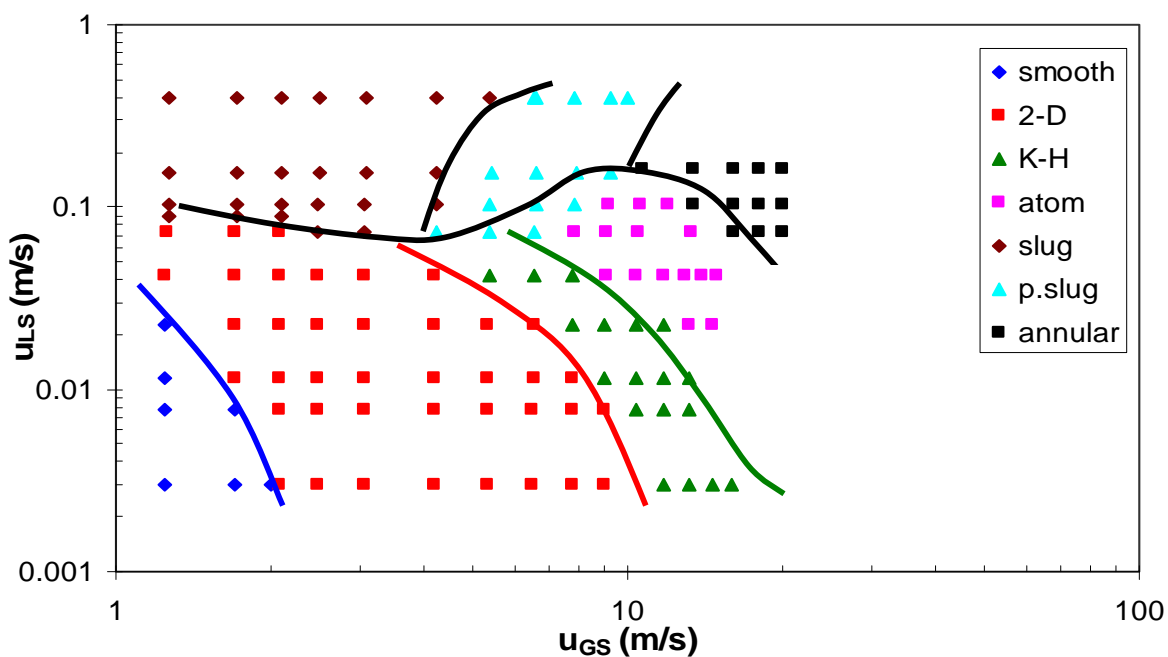
Στα Σχήματα 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται οι χάρτες καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα και για κλίση  $0.25^\circ$  και  $1^\circ$ , αντίστοιχα. Οι αντίστοιχοι χάρτες για το σύστημα νερό- $\text{CO}_2$  παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.3 και 7.4. Ο χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  για αγωγό με κλίση  $1^\circ$  προς τα κάτω δεν στάθηκε δυνατό να ολοκληρωθεί, καθώς για την ολοκλήρωση του πειράματος ήταν απαραίτητοι αρκετά μεγάλοι ρυθμοί ροής  $\text{CO}_2$ . Τέλος, η επίδραση της μειωμένης επιφανειακής τάσης με τη χρήση υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης στους χάρτες καθεστώτων ροής με ελαφρά κλίση προς τα κάτω παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.5 και 7.6.



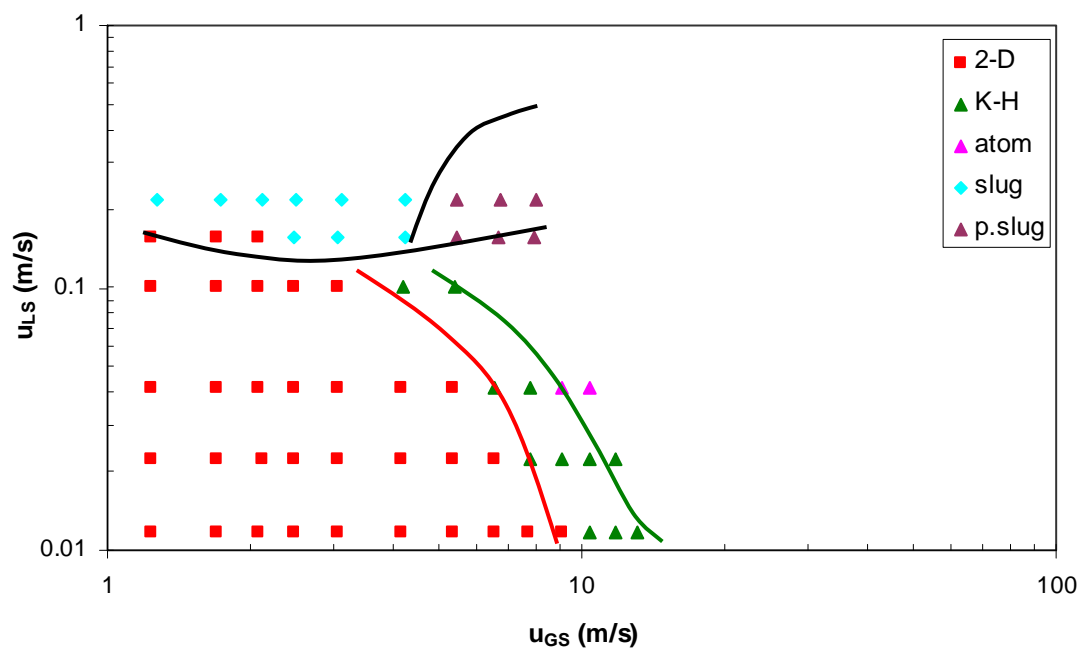
Σχήμα 7.1 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$



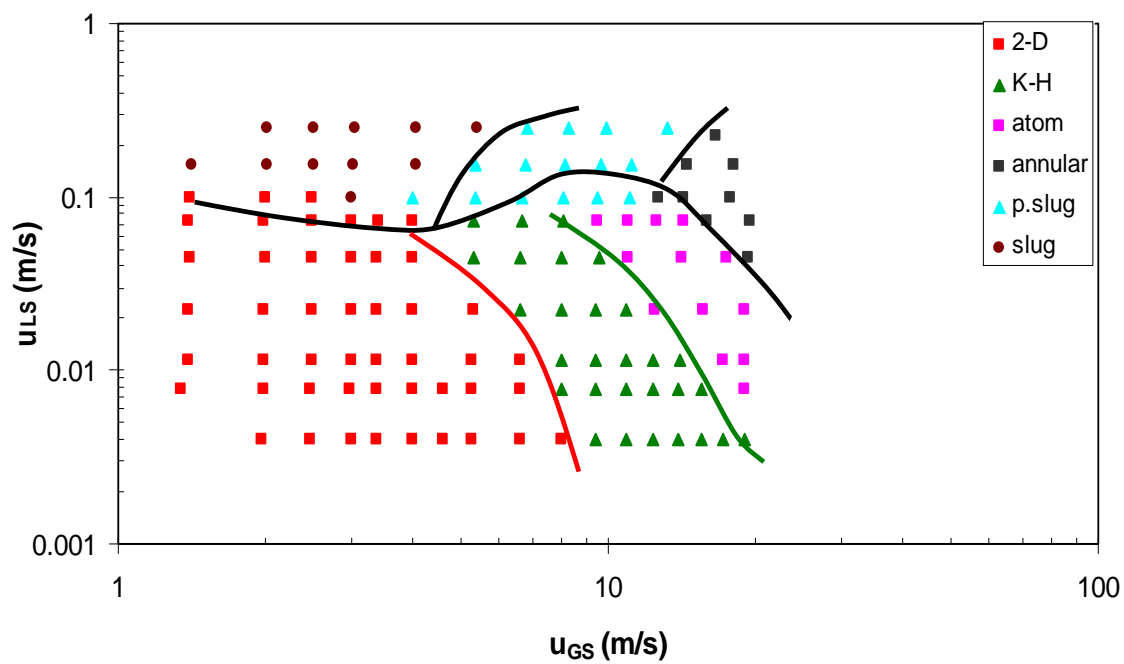
Σχήμα 7.2 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $\varphi=7^\circ$



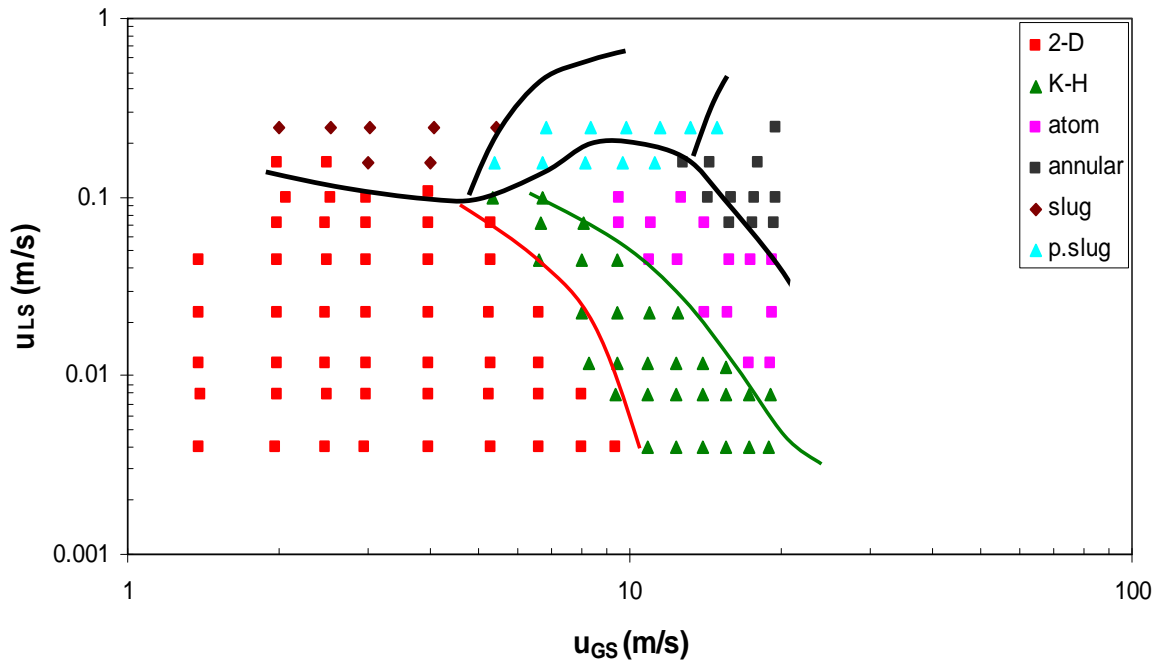
Σχήμα 7.3 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $CO_2$  σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$



Σχήμα 7.4 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $CO_2$  σε κλίση  $\varphi=1^\circ$



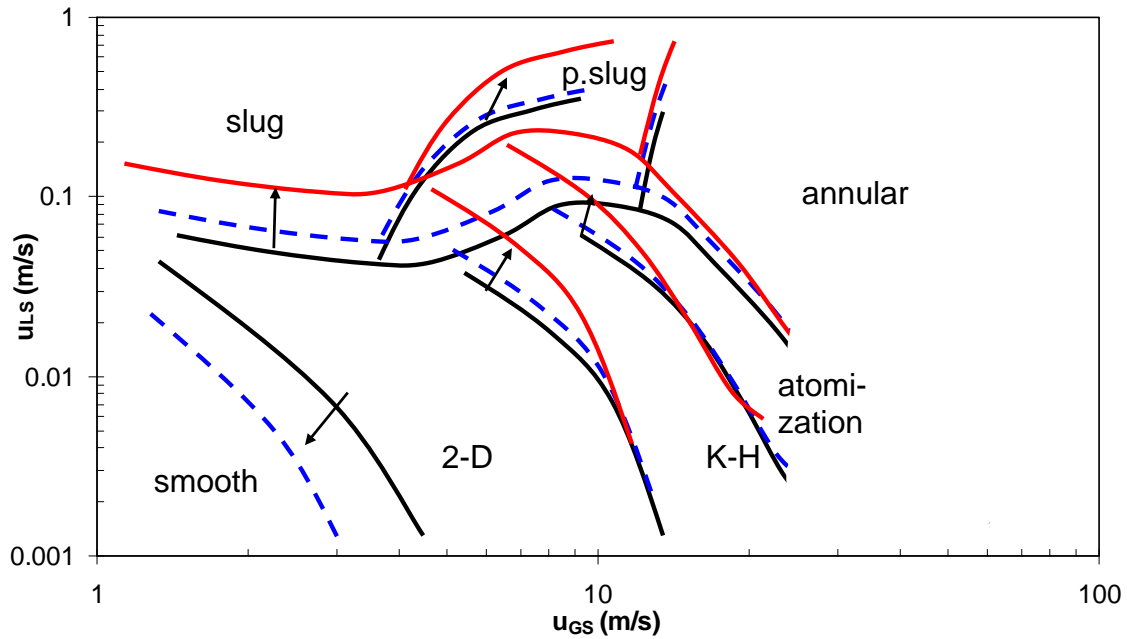
Σχήμα 7.5 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$



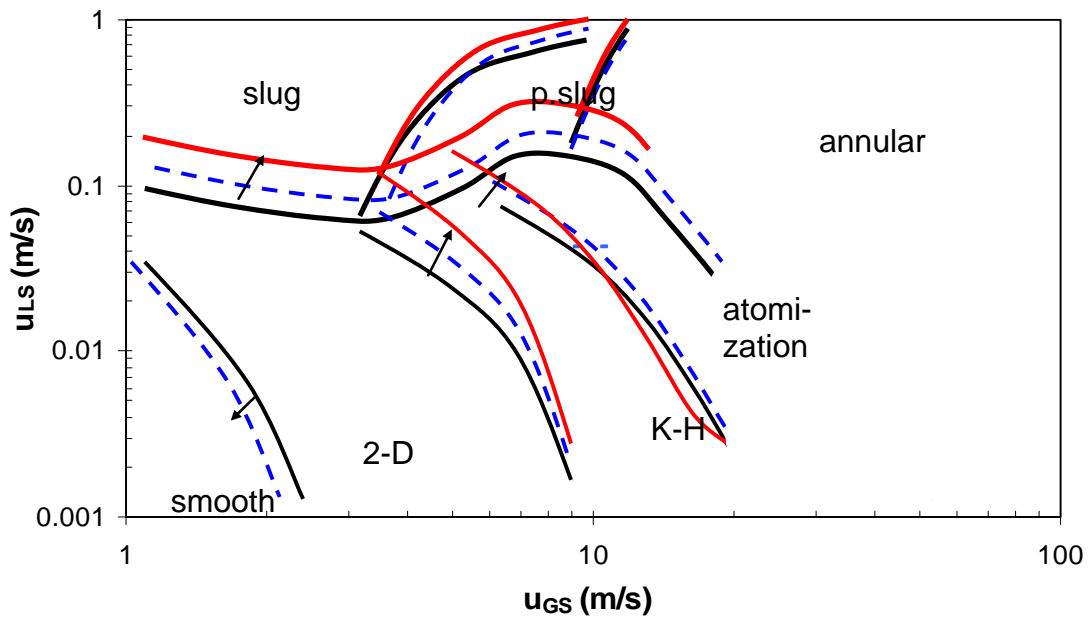
**Σχήμα 7.6** Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση  $\varphi=1^\circ$

Από όλους τους χάρτες καθεστώτων ροής που παρουσιάστηκαν παρατηρείται ότι με μικρή κλίση του αγωγού προς τα κάτω η μορφή τους δεν επηρεάζεται σημαντικά (σε σχέση με αντίστοιχους χάρτες για οριζόντιο αγωγό). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα και σε όλες τις κλίσεις που εξετάστηκαν ταυτοποιήθηκαν η λεία διαστρωματωμένη ροή, η ροή με 2-D και K-H κύματα, η ροή με εκνέφωση, καθώς και η διαλείπουσα, η ψευδο-διαλείπουσα και η δακτυλιοειδής ροή. Επίσης, παρατηρείται ότι η λεία διαστρωματωμένη ροή εξαλείφεται πλήρως από το χάρτη καθεστώτων ροής για κλίση  $1^\circ$  για φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης μεγαλύτερες από 1 m/s για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $\text{CO}_2$ . Για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=0.04$  mN/m) λεία διαστρωματωμένη ροή δεν παρατηρείται ακόμα και σε κλίση  $0.25^\circ$ . Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς για τις φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης που εξετάστηκαν κατά τη ροή σε αγωγό με κλίση προς τα κάτω ( $u_{GS}>1$  m/s), δεν παρατηρείται λεία διαστρωματωμένη ροή ούτε σε οριζόντιο αγωγό (κεφ. 6).

Στα Σχήματα 7.7, 7.8 και 7.9 παρουσιάζονται οι χάρτες καθεστώτων ροής για τα συστήματα νερού-αέρα, νερού- $\text{CO}_2$  και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα αντίστοιχα με αύξηση της κλίσης του αγωγού.

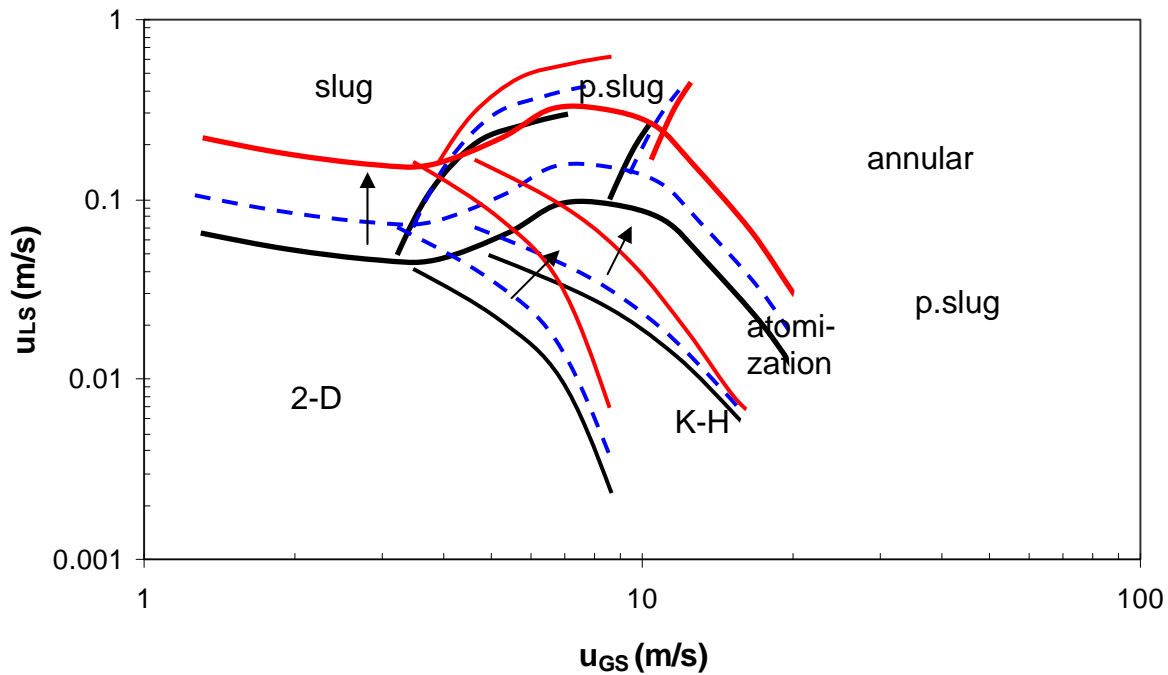


**Σχήμα 7.7** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$  (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση  $\varphi=1^\circ$  (συνεχείς κόκκινες γραμμές)



**Σχήμα 7.8** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε οριζόντιο αγωγό (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$  (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση  $\varphi=1^\circ$  (συνεχείς κόκκινες γραμμές)





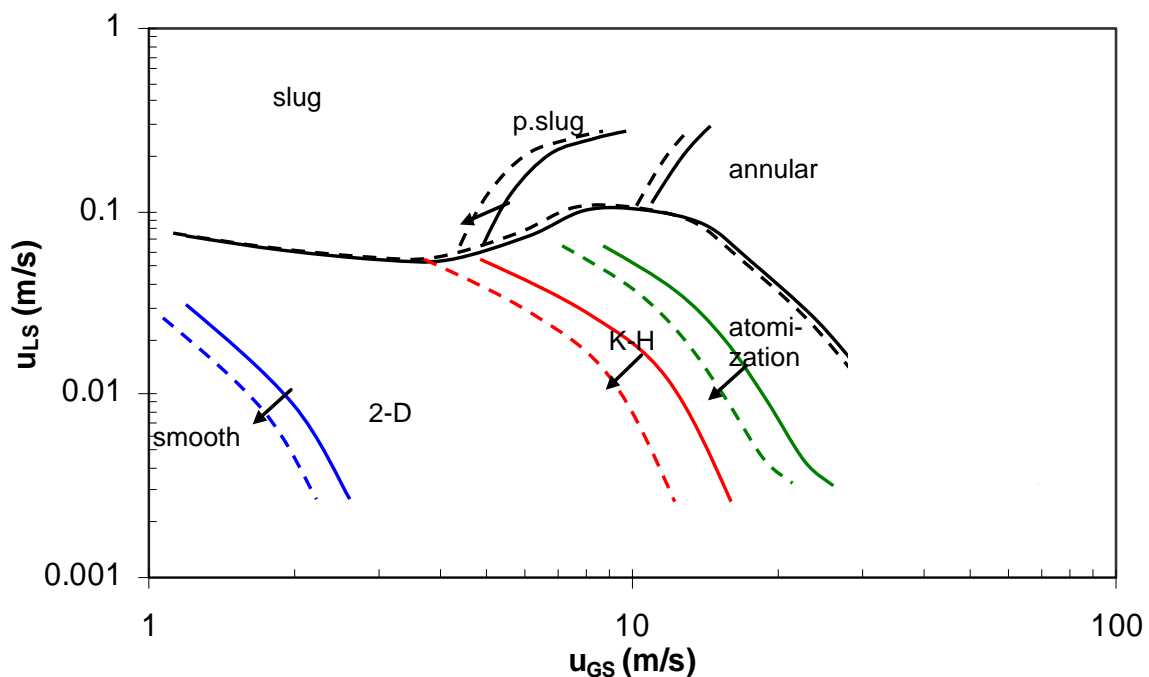
**Σχήμα 7.9** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε οριζόντιο αγωγό (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$  (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση  $\varphi=1^\circ$  (συνεχείς κόκκινες γραμμές)

Από τα Σχήματα 7.7, 7.8 και 7.9 παρατηρείται ότι με αύξηση τα κλίσης του αγωγού η έναρξη της δημιουργίας των 2-D κυμάτων λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας. Παράλληλα, οι μεταπτώσεις σε διαλείπουσα, ψευδο-διαλείπουσα, δακτυλιοειδή ροή, καθώς και οι μεταπτώσεις σε ροή με εκνέφωση και K-H κύματα μετατοπίζονται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται επίσης στη δράση της βαρύτητας η οποία, κατά τη ροή σε αγωγούς με κατηφορική κλίση, μειώνει το πάχος της υγρής στιβάδας μέσα στον αγωγό. Κατά συνέπεια απαιτούνται μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης ώστε το πάχος της υγρής στιβάδας να είναι ίσο με αυτό κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό. Παρατηρείται δηλαδή αύξηση του εύρους της διαστρωματωμένης ροής έναντι της διαλείπουσας, γεγονός που έχει τονισθεί και στη βιβλιογραφία (Barnea et al. 1980) και το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο με αύξηση της κλίσης του αγωγού.

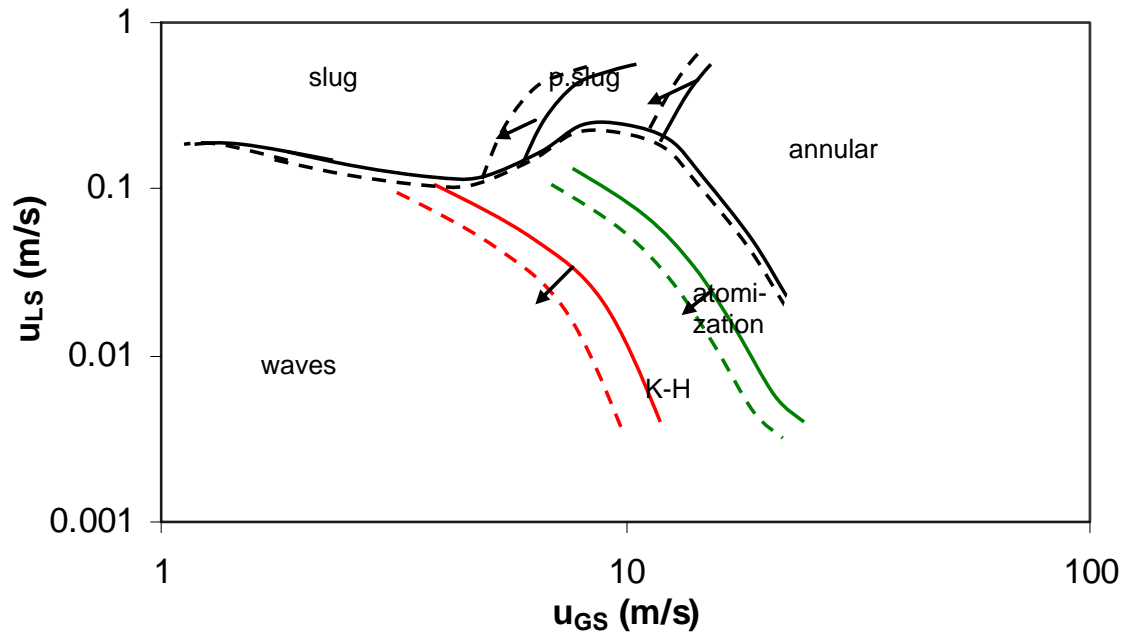
### 7.3 Επίδραση φυσικών ιδιοτήτων

Η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στα χαρακτηριστικά της ροής κατά τη ροή σε οριζόντιους αγωγούς μελετήθηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών μελετήθηκε και στην περίπτωση κατηφορικής κλίσης του αγωγού, όπου διαπιστώθηκε ότι οι μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής σε ελαφρά κεκλιμένους αγωγούς προς τα κάτω επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο με τη ροή σε οριζόντιους αγωγούς.

Στο Σχήμα 7.10 παρουσιάζεται η σύγκριση του χάρτη περιοχών ροής για το σύστημα νερού-αέρα και νερού- $\text{CO}_2$  σε γωνία κλίσης  $\varphi=0.25^\circ$ , ενώ στο Σχήμα 7.11 η σύγκριση του χάρτη περιοχών ροής για το σύστημα νερού-αέρα και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε γωνία κλίσης  $\varphi=1^\circ$ .



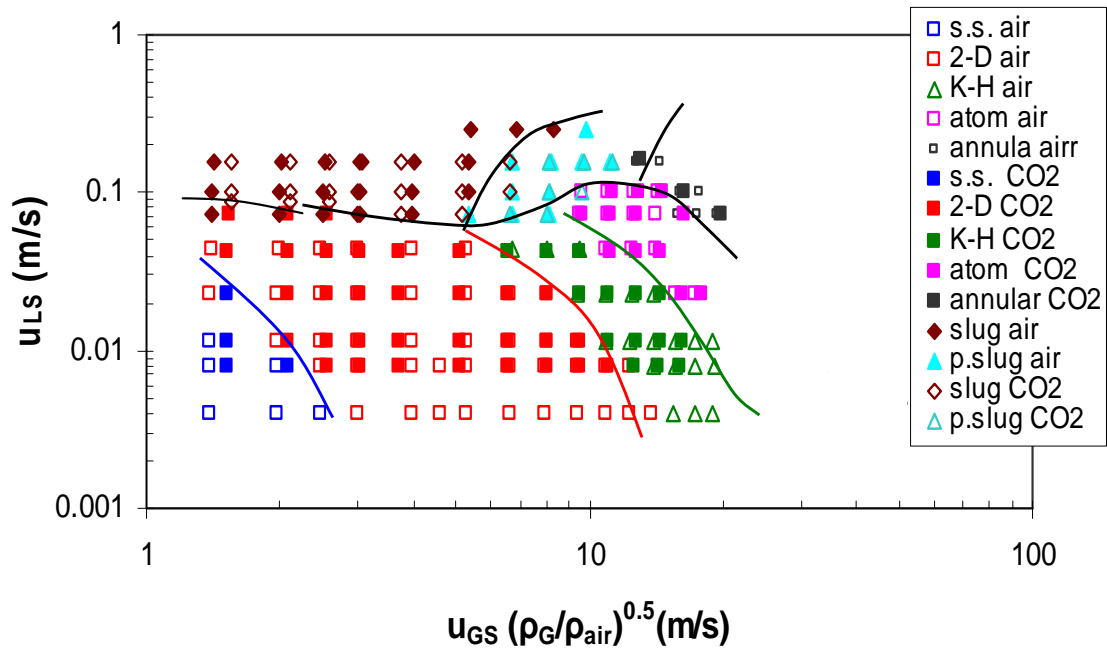
**Σχήμα 7.10** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα (συνεχείς γραμμές) και νερού- $\text{CO}_2$  σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$  (διακεκομμένες γραμμές)



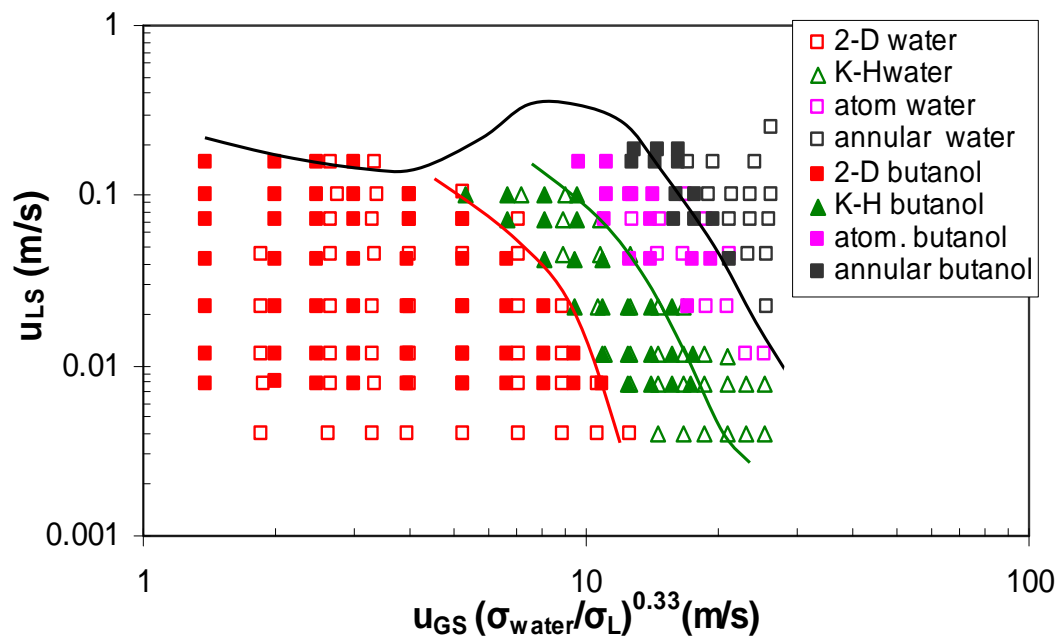
**Σχήμα 7.11** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα (συνεχείς γραμμές) και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση  $\varphi = 1^\circ$  (διακεκομμένες γραμμές)

Με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης (χρήση  $\text{CO}_2$ ), αλλά και με μείωση της επιφανειακής τάσης (χρήση υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης), οι μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης περιοχής ροής, καθώς και η μετάπτωση σε ψευδο-διαλείπουσα ροή μετατοπίζονται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων του συστήματος. Τα ίδια φαινόμενα παρατηρήθηκαν και κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό, γεγονός που υποδηλώνει ότι η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στα χαρακτηριστικά της ροής δεν μεταβάλλεται από την κατηφορική κλίση του αγωγού.

Επίσης διαπιστώθηκε ότι όταν οι άξονες του συστήματος τροποποιηθούν κατάλληλα (όπως προτείνεται στο κεφ. 5), τότε οι μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής συγκλίνουν. Στην περίπτωση αυτή η περιγραφή των μεταπτώσεων στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί με μία μόνο καμπύλη ανά περίπτωση (κεφ.5). Ο τροποποιημένοι χάρτες καθεστώτων ροής για τα συστήματα νερού- $\text{CO}_2$  και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.12 και 7.13 αντίστοιχα.



Σχήμα 7.12 Χάρτης περιοχών ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού-CO<sub>2</sub> με τροποποιημένους άξονες



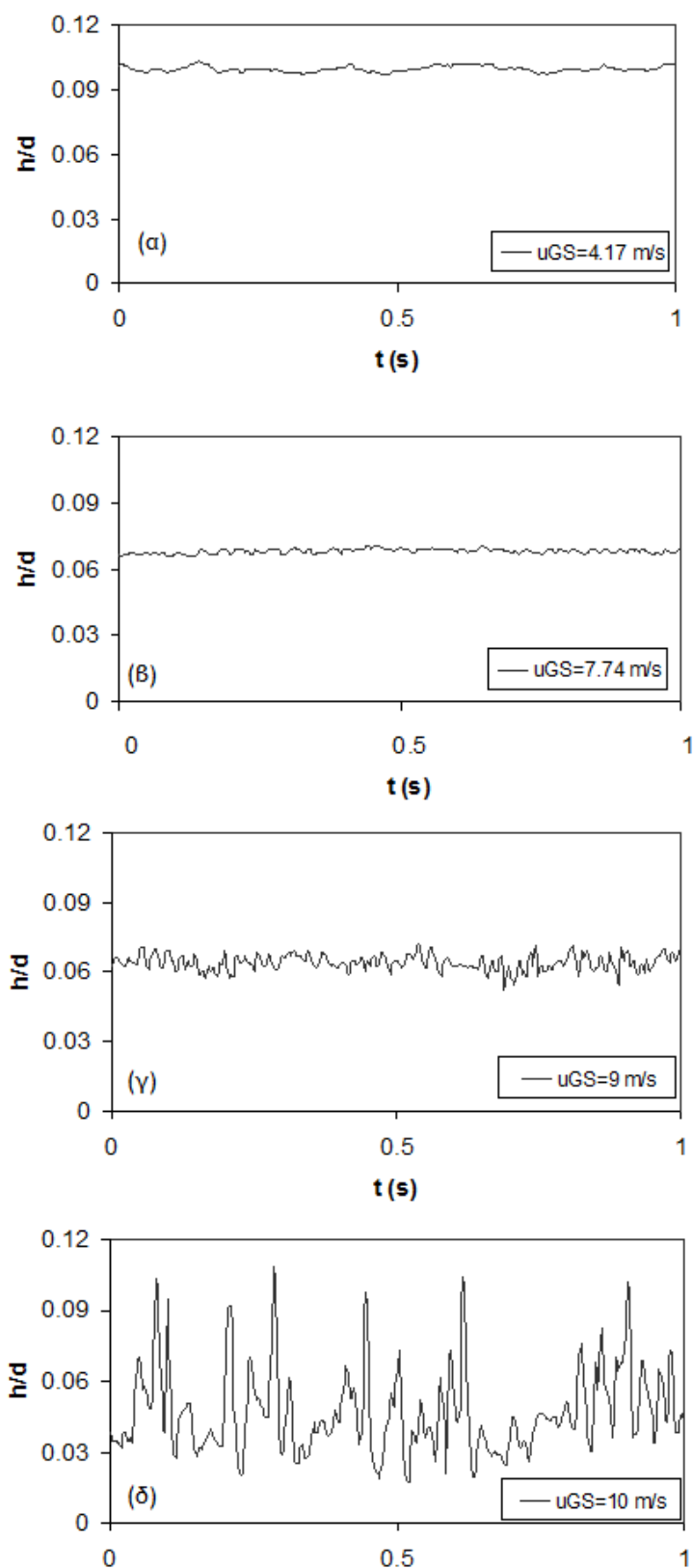
Σχήμα 7.13 Χάρτης περιοχών ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα με τροποποιημένους άξονες

Η αποτελεσματικότητα των ημι-θεωρητικών εξισώσεων που προτάθηκαν στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας εργασίας είναι αρκετά ικανοποιητική και κατά τη ροή σε αγωγούς με κατωφερή κλίση, όπως παρατηρείται στα Σχήματα 7.12 και 7.13.

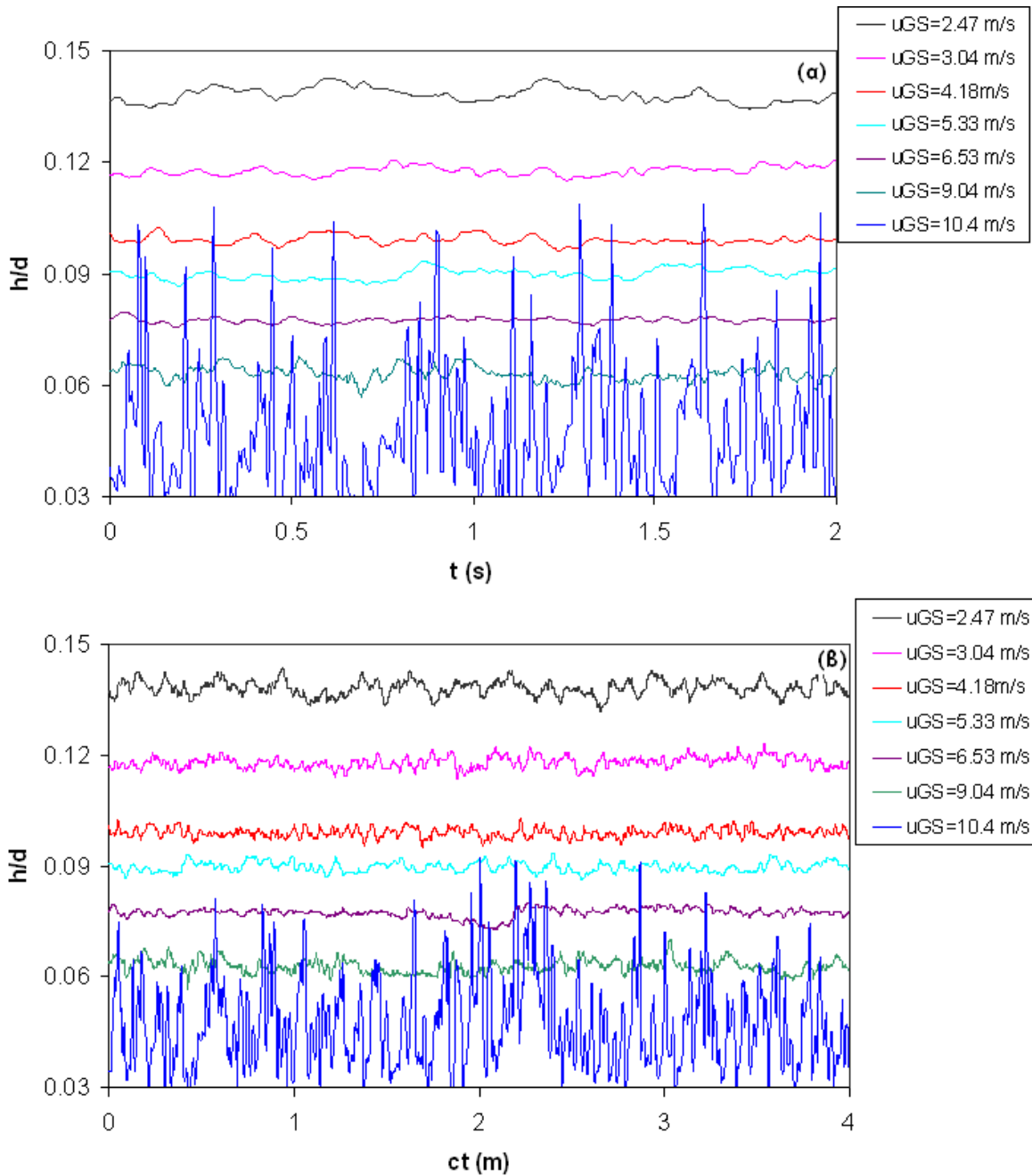
#### 7.4 Χαρακτηριστικά των κυμάτων

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σε αγωγό με κατωφερή κλίση για όλα τα συστήματα που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία ταυτοποιήθηκαν δύο είδη κυμάτων, δηλ. κάποια αρχικά κύματα που θυμίζουν τα 2-D κύματα που συναντώνται κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό και τα K-H κύματα. Πιο συγκεκριμένα σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης για το σύστημα νερού-CO<sub>2</sub> στη διεπιφάνεια δημιουργούνται κανονικά 2-D κύματα (Σχήμα 7.14α), τα οποία δε διαφέρουν στη μορφή με αυτά που εμφανίζονται σε ροή σε οριζόντιους αγωγούς, αν και ο μηχανισμός δημιουργίας τους είναι διαφορετικός. Σε οριζόντιο αγωγό τα κύματα αυτά δημιουργούνται εξαιτίας των διαταραχών της πίεσης που είναι σε φάση με την κλίση του κύματος (μηχανισμός «προστασίας» Jeffreys, 1926), ενώ σε αγωγό με κλίση προς τα κάτω δημιουργούνται εξαιτίας της δράσης της βαρύτητας. Καθώς η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης αυξάνεται, το πλάτος των κυμάτων μειώνεται ενώ αυξάνεται η συχνότητα τους (Σχήμα 7.13β). Με μικρή αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Σχήμα 7.14γ) το πλάτος των κυμάτων αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με αυτό στο Σχήμα 7.14β αν και η αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης δεν ήταν τόσο έντονη. Επίσης τα κύματα στην περίπτωση αυτή αρχίζουν να χάνουν την κανονικότητά τους, οι κορυφές τους γίνονται πιο απότομες και τείνουν να αποκτήσουν τα χαρακτηριστικά των K-H κυμάτων. Η εξέλιξη των κυμάτων που παρατηρούνται μέσα στην περιοχή αυτή δεν διαφέρει με αυτή που παρατηρείται κατά τη ροή σε οριζόντιους αγωγούς (κεφ.6). Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης στη διεπιφάνεια δημιουργούνται K-H κύματα (Σχήμα 7.17δ). Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων αυτών είναι αντίστοιχα με αυτά που παρατηρούνται και σε ροή σε οριζόντιο αγωγό και δεν επηρεάζονται από την κλίση του αγωγού. Παρόμοια είναι η εξέλιξη των κυμάτων με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης και για το σύστημα νερού-αέρα.

Στο Σχήμα 7.15 παρουσιάζεται αναλυτικά η ανάπτυξη των κυμάτων που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια για το σύστημα νερού-CO<sub>2</sub> σε  $u_{LS}=0.0116$  m/s και κλίση  $\varphi=1^\circ$  με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης στο χρόνο (Σχήμα 7.15α), αλλά και στο χώρο (Σχήμα 7.15β). Στο τελευταίο σχήμα ο άξονας του χρόνου πολλαπλασιάζεται με την ταχύτητα των κυμάτων σε κάθε περίπτωση και απεικονίζεται η κυματοειδής διεπιφάνεια για μήκος 4 m. Στο Σχήμα 7.15β μπορεί να παρατηρηθεί καλύτερα η μείωση του πλάτους των κυμάτων και του μήκους κύματος με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης. Το πλάτος των κυμάτων μειώνεται, ωστόσο πριν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα να αυξάνεται ( $u_{GS}=9.04$  m/s) και τα κύματα γίνονται ακανόνιστα, μέχρι να δημιουργηθούν τα K-H κύματα στη διεπιφάνεια.

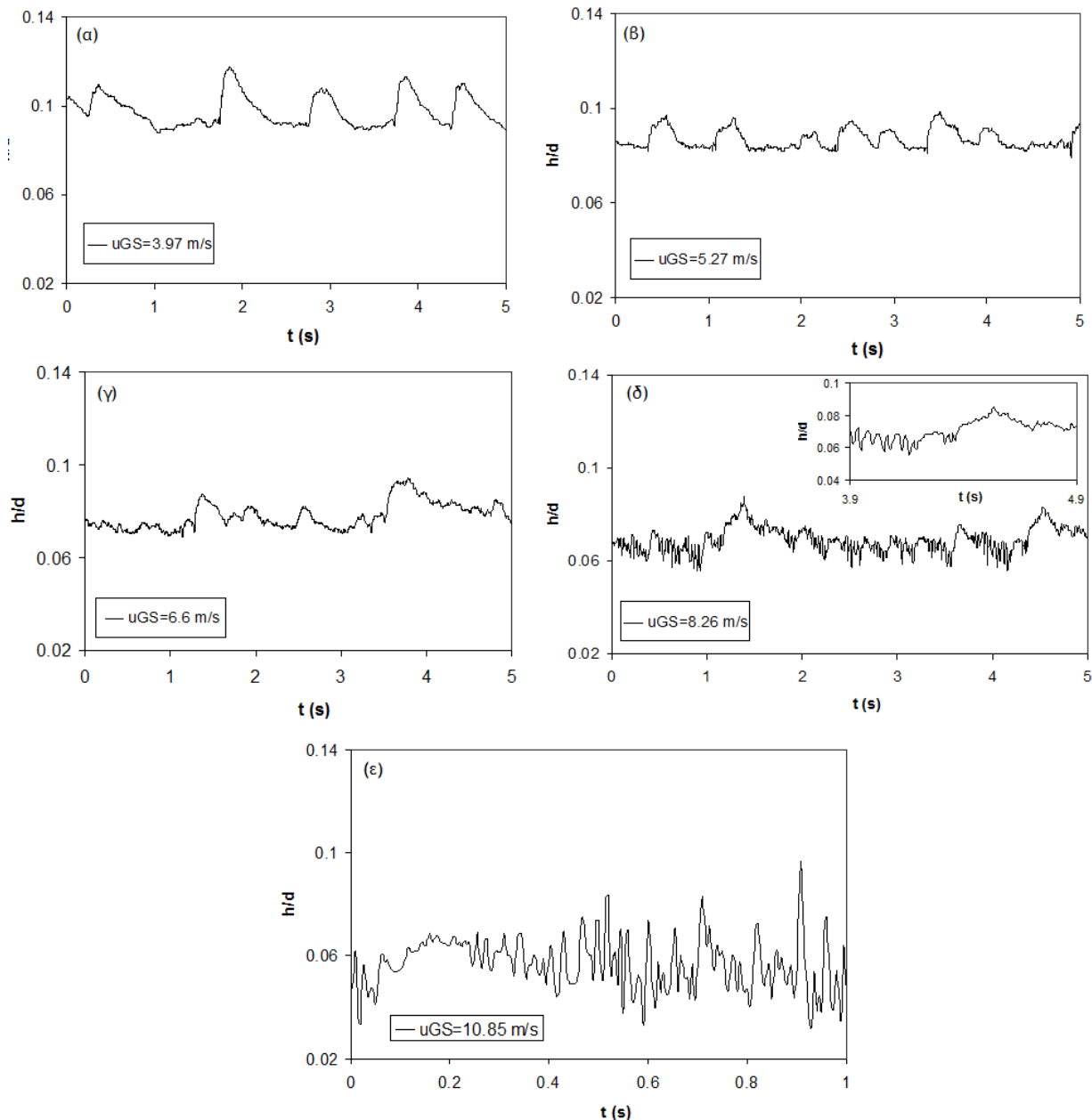


Σχήμα 7.14 Τύποι κυμάτων για το σύστημα σε  $u_{LS}=0.0116 \text{ m/s}$  νερού- $\text{CO}_2$  και  $\varphi=1^\circ$



**Σχήμα 7.15** Ανάπτυξη των κυμάτων για σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  για  $u_{LS}=0.0116 \text{ m/s}$  και κλίση  $\varphi=1^\circ$

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε οριζόντιους αγωγούς στη διεπιφάνεια δεν εμφανίζονται 2-D κύματα, αλλά ένα είδος «μοναχικών» κυμάτων, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 6. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο σε αγωγούς με μικρή κατηφορική κλίση. Στο Σχήμα 7.16 παρουσιάζονται τα κύματα που εμφανίζονται για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για  $u_{LS}=0.0116 \text{ m/s}$  και κλίση  $\varphi=1^\circ$ .



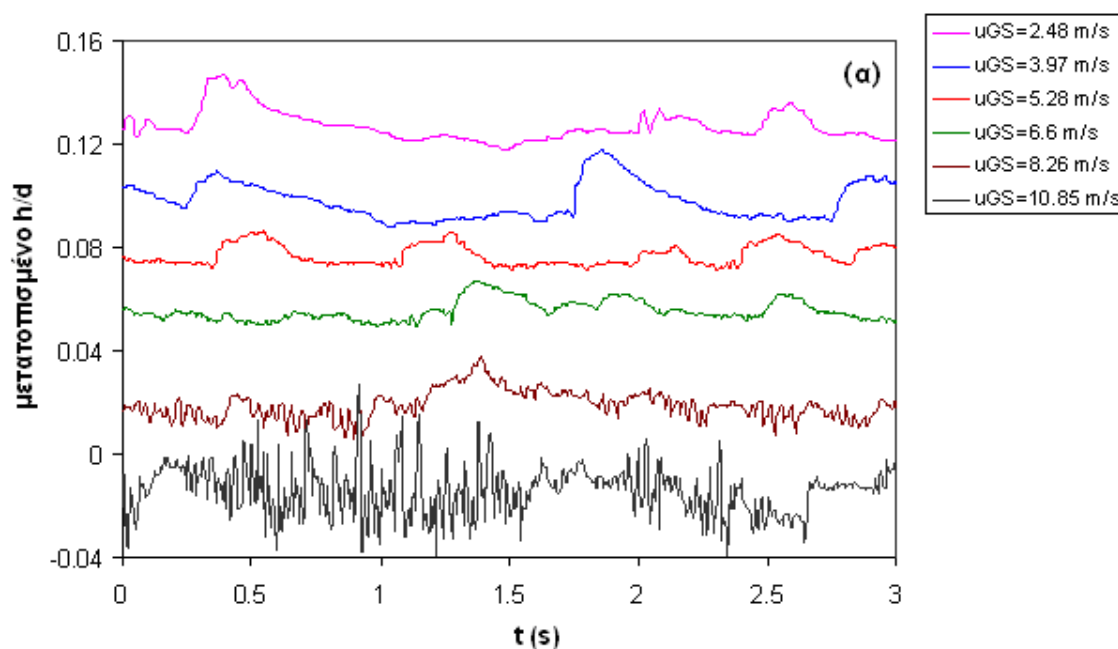
**Σχήμα 7.16** Τύποι κυμάτων για το σύστημα σε  $u_{LS}=0.0116$  m/s υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα και  $\varphi=1^\circ$

Σε σχετικά χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης (Σχήμα 7.16α) στη διεπιφάνεια εμφανίζονται «μοναχικά» κύματα μεγάλου πλάτους. Με μικρή αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης το πλάτος των κυμάτων αυτών μειώνεται από περίπου 410  $\mu\text{m}$  σε 350  $\mu\text{m}$ , ενώ αυξάνεται η συχνότητα τους (Σχήμα 7.15β). Το πλάτος των κυμάτων παραμένει σταθερό με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Σχήμα 7.15γ), ενώ η συχνότητα τους μειώνεται. Επίσης, φαίνεται να δημιουργούνται μικρές διαταραχές τόσο ανάμεσα στα «μοναχικά» κύματα, όσο και πάνω στις κορυφές των κυμάτων. Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Σχήμα



7.15δ), οι μικρές διαταραχές που εμφανίστηκαν σε μικρότερη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης μεταξύ των κυμάτων, αλλά και πάνω στις κορυφές των κυμάτων ενισχύονται σημαντικά. Η συχνότητα των μοναχικών κυμάτων παραμένει σχεδόν αμετάβλητη, ενώ το πλάτος τους μειώνεται. Η δημιουργία των K-H κυμάτων (Σχήμα 7.16ε) οφείλεται στην ανάπτυξη των διαταραχών αυτών με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, καθώς και στη συγχώνευση των μοναχικών κυμάτων. Τα μοναχικά κύματα, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 7.16ε, έχουν χάσει τα χαρακτηριστικά τους, η συχνότητα τους έχει αυξηθεί σημαντικά και αποκτούν σταδιακά τα χαρακτηριστικά των K-H κυμάτων.

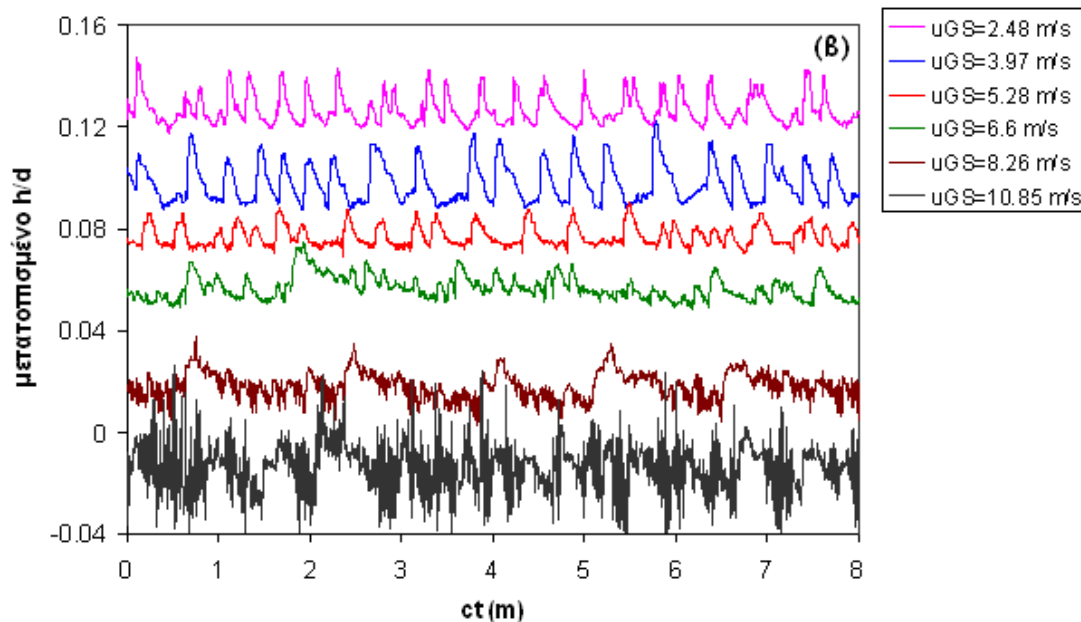
Η χρονική εξέλιξη των κυμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.17, ενώ η χωρική εξέλιξή τους στο Σχήμα 7.17, όπου μπορεί να παρατηρηθεί καλύτερα η εξέλιξη των μικρών διαταραχών και η συγχώνευση των κυμάτων που οδηγούν στη δημιουργία των κυμάτων K-H. Τόσο κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό, όσο και κατά τη ροή με κατηφορική κλίση η ζώνης μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα είναι διευρυμένη σε σχέση με τα άλλα εξεταζόμενα συστήματα.



**Σχήμα 7.17** Χρονική εξέλιξη των κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για  $u_{LS}=0.0116 \text{ m/s}$  και κλίση  $\varphi=1^\circ$

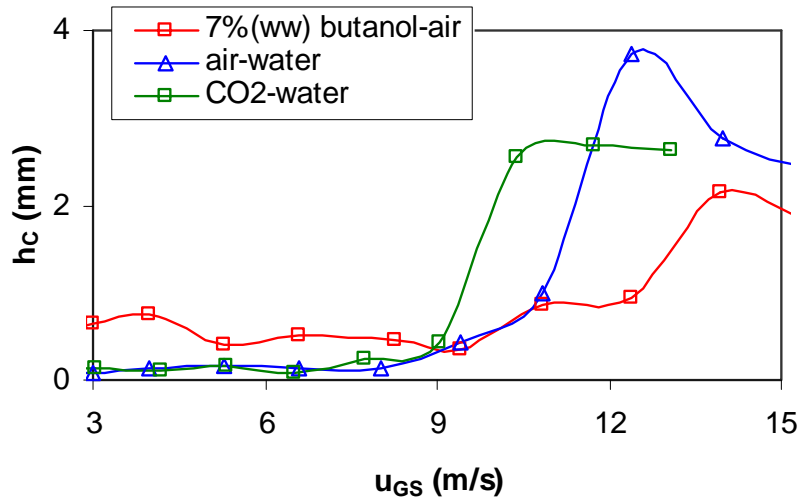
Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι με μείωση της επιφανειακής τάσης του συστήματος όχι μόνο μετατοπίστηκαν οι μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, αλλά τροποποιήθηκαν και τα χαρακτηριστικά των 2-D κυμάτων, ενώ αυτά των K-H κυμάτων παρέμειναν αναλλοίωτα. Το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα έχει την τάση να δημιουργεί «μοναχικά» κύματα στη διεπιφάνεια και το φαινόμενο αυτό έγινε εντονότερο με αύξηση της

κλίσης του αγωγού. Επίσης, φαίνεται ότι τροποποιείται και ο εξέλιξη των κυμάτων κατά τη δημιουργία των K-H κυμάτων. Στα συστήματα νερού-αέρα και νερού-CO<sub>2</sub> τα K-H κύματα προέρχονται από την ανάπτυξη των 2-D κυμάτων, τα οποία με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας έχαναν την κανονικότητά τους, ενώ στο σύστημα υδατικού διαλύματος βουτανόλης τα K-H προέρχονται από τη συγχώνευση «μοναχικών» κυμάτων και από την ανάπτυξη των διαταραχών μεταξύ των μοναχικών κυμάτων.



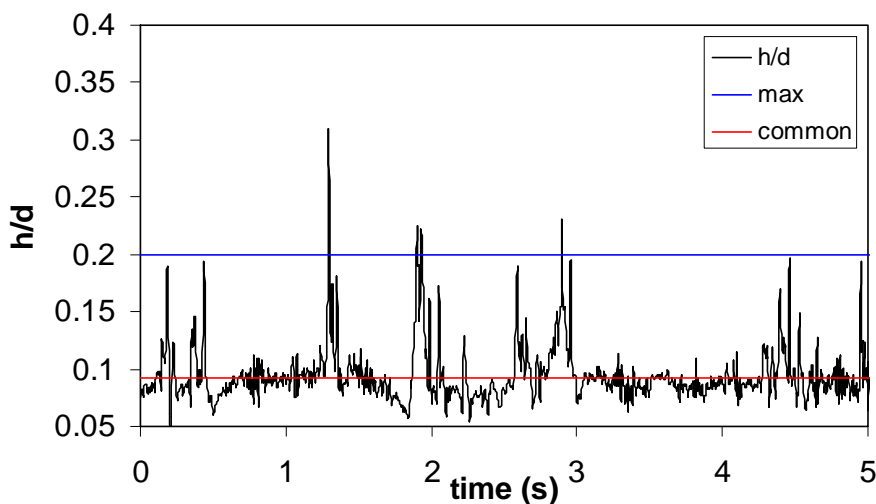
**Σχήμα 7.18** Χωρική εξέλιξη των κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για  $u_{LS}=0.0116 \text{ m/s}$  και κλίση  $\varphi=1^\circ$

Για κατηφορική κλίση του αγωγού παρατηρείται ότι με το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης το πλάτος των κυμάτων «μοναχικών» κυμάτων να είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο πλάτος των 2-D κυμάτων που παρατηρούνται με τα συστήματα του νερού-αέρα και νερού-CO<sub>2</sub> (Σχήμα 7.19). Ωστόσο, κατά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα το πλάτος των κυμάτων αυξάνεται απότομα για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού-CO<sub>2</sub>. Η απότομη αυτή αύξηση του πλάτους, μπορεί να αποτελέσει και ένα ποιοτικό κριτήριο για την ανίχνευση της μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο έντονο όμως για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα. Επίσης και μετά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα το πλάτος των κυμάτων είναι χαμηλότερο σε σχέση με αυτό των άλλων εξεταζόμενων συστημάτων. Αυτό το γεγονός πιθανόν συνδέεται τόσο με την εμφάνιση των «μοναχικών» κυμάτων όσο όμως και με τη διευρυμένη ζώνης μετάπτωσης που παρατηρήθηκε για το συγκεκριμένο σύστημα.



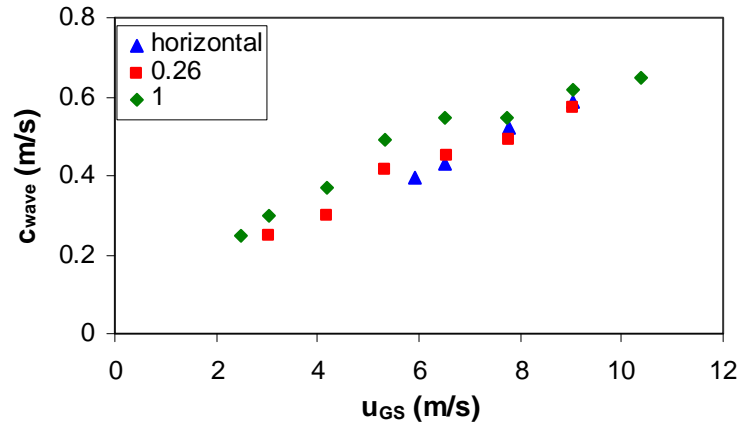
Σχήμα 7.19 Πλάτος των κυμάτων για κλίση  $\varphi=1^\circ$  σε  $u_{LS}=0.0116$  m/s

Το πλάτος των κυμάτων υπολογίζεται με αφαίρεση της μέσης τιμής του πάχους της υγρής στιβάδας που μετρήθηκε πειραματικά, από τη μέση τιμή των μεγίστων τιμών και παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.20.



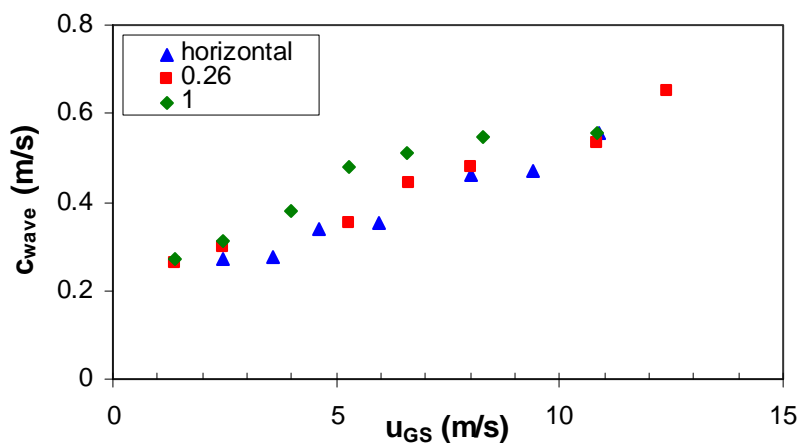
Σχήμα 7.20 Υπολογισμός του πλάτους των κυμάτων για κλίση  $\varphi=1^\circ$  σε  $u_{GS}=9.43$  m/s και  $u_{LS}=0.022$  m/s

Διαπιστώθηκε επίσης ότι η ταχύτητα των κυμάτων κατά τη διαστρωματωμένη ροή με 2-D αυξάνεται με αύξηση της κλίσης του αγωγού, καθώς η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης αυξάνεται. Ωστόσο, μετά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, η ταχύτητα των κυμάτων δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την κλίση του αγωγού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το σύστημα νερού-CO<sub>2</sub> παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.21.



**Σχήμα 7.21** Ταχύτητα κυμάτων με αύξηση της κλίσης και της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για νερό- $CO_2$  για  $u_{LS}=0.0116$  m/s

Για την περίπτωση του συστήματος νερού- $CO_2$  και για  $u_{LS}=0.0116$  m/s K-H κύματα σχηματίζονται όταν η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης είναι μεγαλύτερη από 7 m/s. Στο Σχήμα 7.22 παρατηρείται ότι για φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης μεγαλύτερες από 7 m/s η ταχύτητα των κυμάτων φαίνεται να μην επηρεάζεται από την αύξηση της κλίσης του αγωγού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.22. Για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε  $u_{LS}=0.0116$  m/s, σε φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης μεγαλύτερες από 8 m/s μέσα στον αγωγό επικρατεί ροή με K-H κύματα.

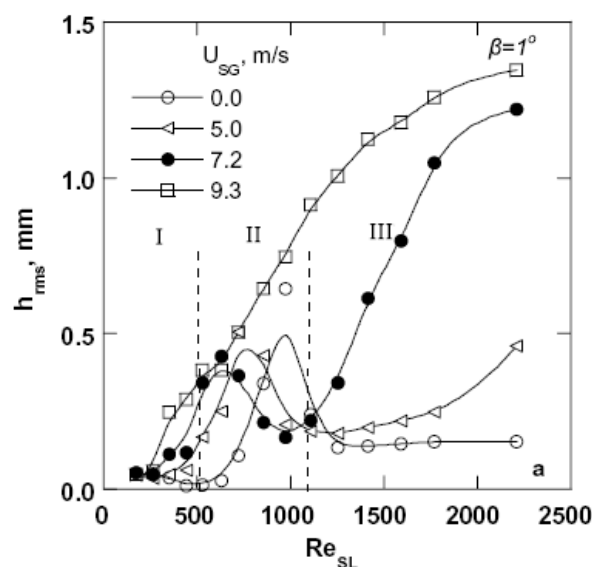


**Σχήμα 7.22** Ταχύτητα κυμάτων με αύξηση της κλίσης και της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα για  $u_{LS}=0.0116$  m/s

Η αύξηση της ταχύτητας των κυμάτων κατά τη ροή με 2-D κύματα με αύξηση της κλίσης του αγωγού και για τα τρία εξεταζόμενα συστήματα και η σταθεροποίηση της μετά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, υποδηλώνει ότι η τα 2-D και τα «μοναχικά» κύματα

επηρεάζονται αποκλειστικά από τη δράση της βαρύτητας. Αντίθετα, μετά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, η βαρύτητα δεν έχει βαρύνουσα σημασία και η διάτμηση της αέριας φάσης πάνω στην επιφάνεια της υγρής φάσης παίζει καθοριστικό ρόλο.

Οι τύποι των κυμάτων που παρατηρούνται κατά τη διφασική ροή σε αγωγούς με κατωφερή κλίση μελετήθηκαν και από τους Lioumbas et al. (2005) οι οποίοι παρατήρησαν τρεις διαφορετικούς τύπους κυμάτων ανεξάρτητα των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών. Σε χαμηλές παροχές της υγρής φάσης ( $Re_L < 500$ ) παρατήρησαν 2-D κύματα μικρού πλάτους. Ο «πραγματικός» αριθμός Reynolds της υγρής φάσης ορίζεται ως  $Re_L = u_L D_L / \nu_L$ , όπου  $u_L$  είναι η μέση ταχύτητα του υγρού,  $\nu_L$  το κινηματικό ιξώδες του υγρού,  $D_L$  η υδραυλική διάμετρος που ορίζεται ως  $4A_L/S_L$ ,  $A_L$  η διατομή της υγρής φάσης και  $S_L$  η περιβρεχόμενη περίμετρος. Σε μεγαλύτερες παροχές της υγρής φάσης ( $500 < Re_L < 1500$ ) διαπίστωσαν την ύπαρξη μεμονωμένων κυμάτων μεγάλου πλάτους. Η συχνότητα των κυμάτων αυτών αυξάνεται με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, ενώ το πλάτος τους μειώνεται. Σε μεγαλύτερες παροχές της υγρής φάσης ( $Re_{SL} > 1500$ ) παρατήρησαν στη διεπιφάνεια κύματα «περιδήνησης» «μεγάλου πλάτους και μικρής συχνότητας μικρού μήκους κύματος, αποτέλεσμα της συγχώνευσης των μεμονωμένων κυμάτων που αναφέρονται παραπάνω. Επίσης, διαπίστωσαν ότι η συχνότητα των κυμάτων αυτών αυξάνεται με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της υγρής ή της αέριας φάσης. Τέλος, αναφέρουν ότι για την περίπτωση συστήματος με χαμηλή επιφανειακή τάση η συχνότητα των κυμάτων αυτών αυξάνεται. Η μεταβολή του της τυπικής απόκλισης των διαταραχών της υγρής στιβάδας που παρατήρησαν για κλίση  $\phi = +1^\circ$  με αύξηση της παροχής της υγρής φάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.23.



**Σχήμα 7.23** Μεταβολή του πλάτους των κυμάτων με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Lioumbas et al. 2005)

### 7.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η κατωφερής κλίση του αγωγού επηρεάζει έντονα τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή σε ροή με κύματα. Πιο συγκεκριμένα η μετάπτωση αυτή για γωνίες κλίσης  $\phi < 1^\circ$  μετατοπίζεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, ενώ σε μεγαλύτερες κλίσεις η λεία διαστρωματωμένη ροή απαλείφεται πλήρως από το χάρτη καθεστώτων ροής. Η δημιουργία των κυμάτων αυτών στη διεπιφάνεια οφείλεται κυρίως στη δράση της βαρύτητας και όχι στη διάτμηση της αέριας φάσης πάνω στην υγρή. Το γεγονός αυτό επισημάνθηκε και από τους Barnea et al. (1980), οι οποίοι διαπίστωσαν την αδυναμία του κλασικού μοντέλου των Taitel and Dukler (1976α) να περιγράψει τη δημιουργία των πρώτων διαταραχών στη διεπιφάνεια των δυο φάσεων. Παράλληλα, διαπιστώνεται ότι και η κλασική εξίσωση του κρίσιμου αριθμού Reynolds (Benjamin, 1957, Yih, 1963), η εξ. (7.28)), για την περιγραφή της μετάπτωσης από την ευσταθή σε ασταθή περιοχή αδυνατεί να περιγράψει την προαναφερθείσα μετάπτωση,

$$Re_{critical} = \frac{5}{6} \cot \phi \quad (7.28)$$

Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds υπολογίζεται με βάση το πάχος της υγρής στιβάδας και δίνεται από την εξίσωση (7.29).

$$Re_{critical} = \frac{hu}{\nu} \quad (7.29)$$

όπου:

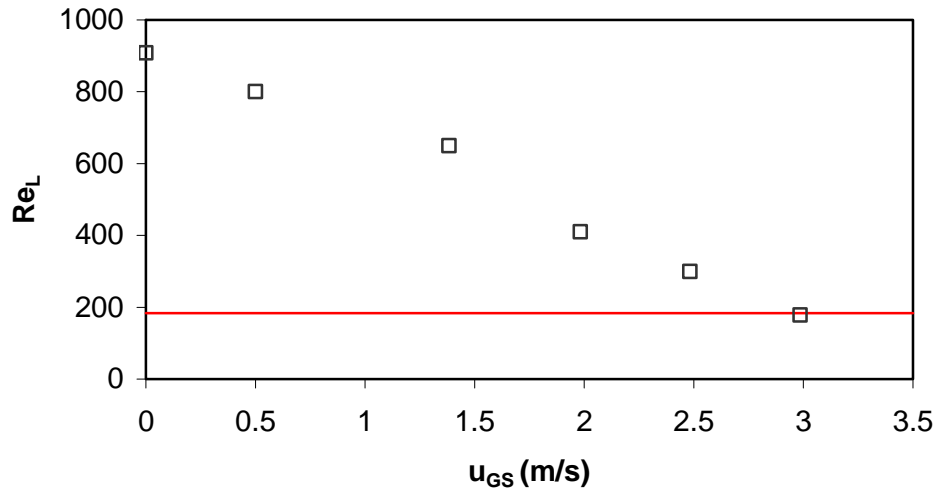
h: πάχος της υγρής στιβάδας

u: μέση ταχύτητα της υγρής φάσης (m/s)

$\nu$ : κινηματικό ιξώδες ( $m^2/s$ )

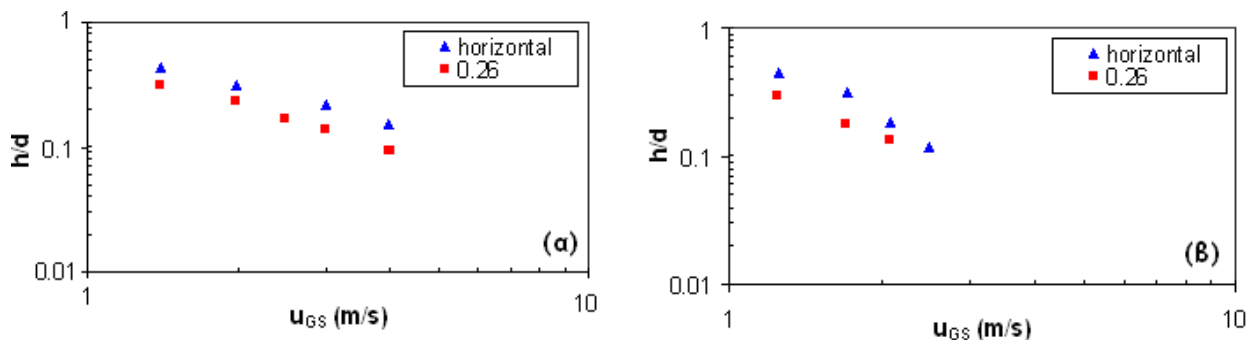
Η εξίσωση (7.29) αν και προορίζεται για ροή σε κανάλι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και κατά τη ροή σε αγωγό. Για την περίπτωση της ροής σε αγωγό για το πάχος της υγρής στιβάδας χρησιμοποιείται το μέσο πειραματικό πάχος της υγρής στιβάδας μετρημένο στην κατακόρυφη διάμετρο.

Στο Σχήμα 7.24 παρουσιάζεται ο αριθμός Reynolds κατά τη δημιουργία των πρώτων κυμάτων στη διεπιφάνεια σε συνάρτηση με τη φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης για κλίση  $\phi = 0.25^\circ$ , όπου παρατηρείται και λεία διαστρωματωμένη ροή. Από το σχήμα φαίνεται ότι η μετάπτωση αυτή συμβαίνει σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds από τον κρίσιμο ( $Re_{critical} = 183$ ). Κατά συνέπεια η εξίσωση αυτή δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της μετάπτωσης αυτής.



**Σχήμα 7.24** Αριθμός *Reynolds* κατά τη δημιουργία των πρώτων κυμάτων στη διεπιφάνεια

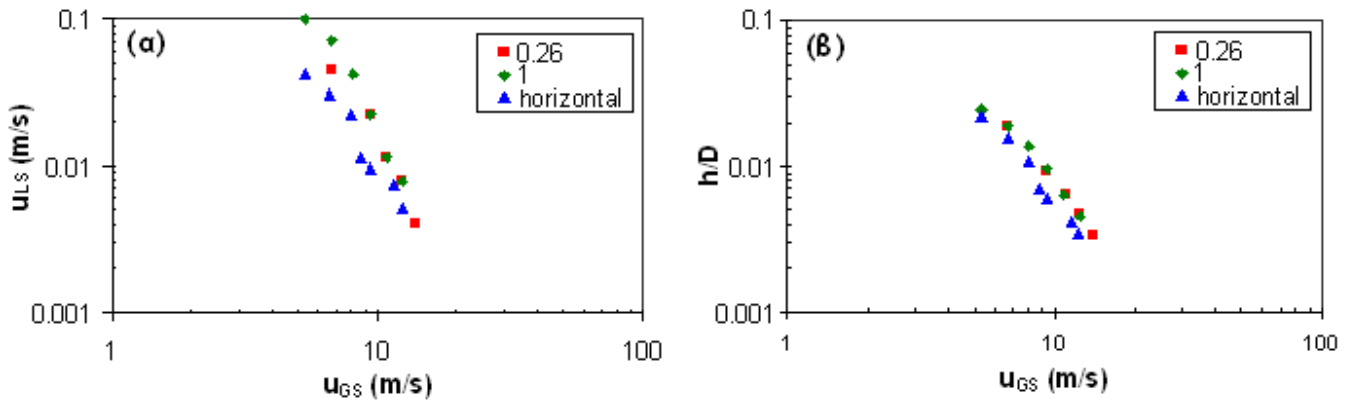
Κατά τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή σε ροή με 2-D κύματα και το πάχος της υγρής φάσης είναι χαμηλότερο σε σχέση με τη ροή σε οριζόντιο αγωγό και για το σύστημα νερού-αέρα αλλά και νερού- $CO_2$ . Το πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.25.



**Σχήμα 7.25** Πάχος της υγρής φάσης για το σύστημα νερού-αέρα (a) και νερού- $CO_2$  (b) κατά τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα

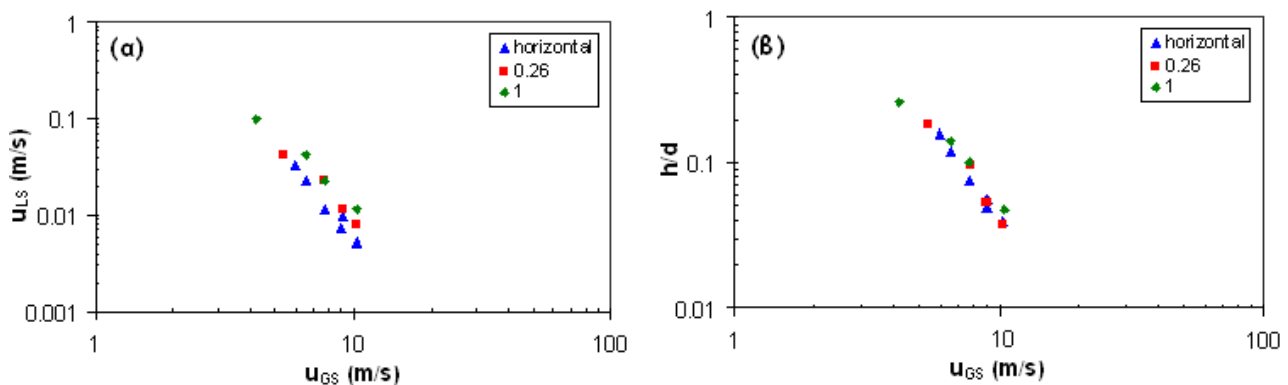
Αν και η δημιουργία των πρώτων κυμάτων στη διεπιφάνεια μετατοπίζεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης με αύξηση της κλίσης του αγωγού η μετάπτωση σε ροή με K-H μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης. Στο Σχήμα 7.26 παρουσιάζεται η καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα (α) καθώς και το πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση (β) για το σύστημα νερού-αέρα. Η μετατόπιση της καμπύλης μετάπτωσης σε ροή με K-H σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας οφείλεται στη δράση της βαρύτητας, η οποία μειώνει το πάχος της υγρής φάσης μέσα στον αγωγό. Ωστόσο, το κρίσιμο πάχος της υγρής φάσης για τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από τη γωνία

κλίσης του αγωγού και παραμένει σχεδόν σταθερό για τις γωνίες που εξετάστηκαν. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στα υπόλοιπα συστήματα ρευστών που εξετάστηκαν (νερό- $\text{CO}_2$  και υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρας). Τα αποτελέσματα για το σύστημα νερό- $\text{CO}_2$  παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.27, ενώ για το σύστημα υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα στο Σχήμα 7.28.



**Σχήμα 7.26** Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα (α) και πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση (β) για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις

Για το σύστημα υδατικού-διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα παρατηρείται μια μικρή μετατόπιση της καμπύλης μετάπτωσης σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης με αύξηση του κλίσης του αγωγού. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός για το συγκεκριμένο σύστημα με αύξηση της κλίσης του αγωγού αυξάνεται και το πλάτος των κυμάτων που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια και κατά συνέπεια αυξάνεται και το μέσο πάχος της υγρής στιβάδας κατά τη μετάπτωση σε ροή με κύματα τύπου K-H.

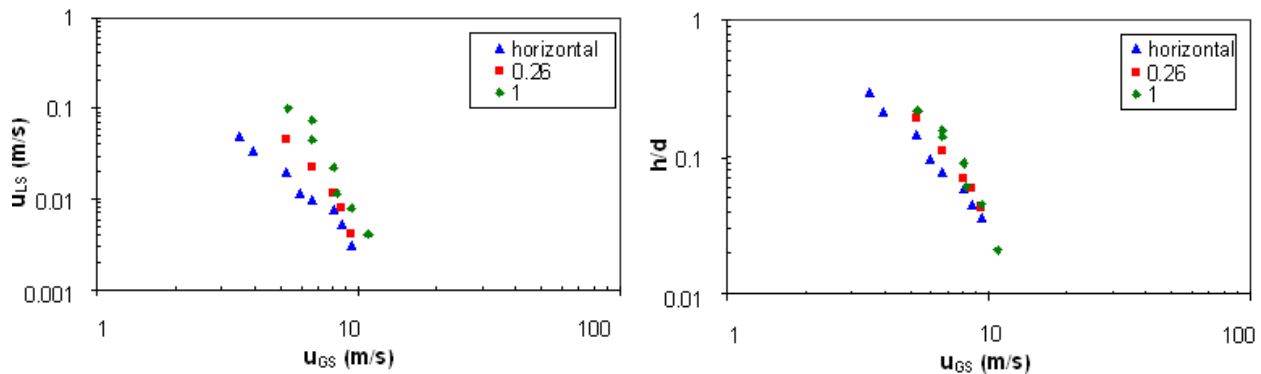


**Σχήμα 7.27** Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα (α) και πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση (β) για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  σε διάφορες κλίσεις

Από τη μελέτη της καμπύλης μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα για τα συστήματα που προαναφέρθηκαν γίνεται φανερό ότι η δημιουργία των κυμάτων αυτών δεν επηρεάζεται από την κλίση του αγωγού. Σε αντίθεση με τα πρώτα κύματα που εμφανίζονται στη



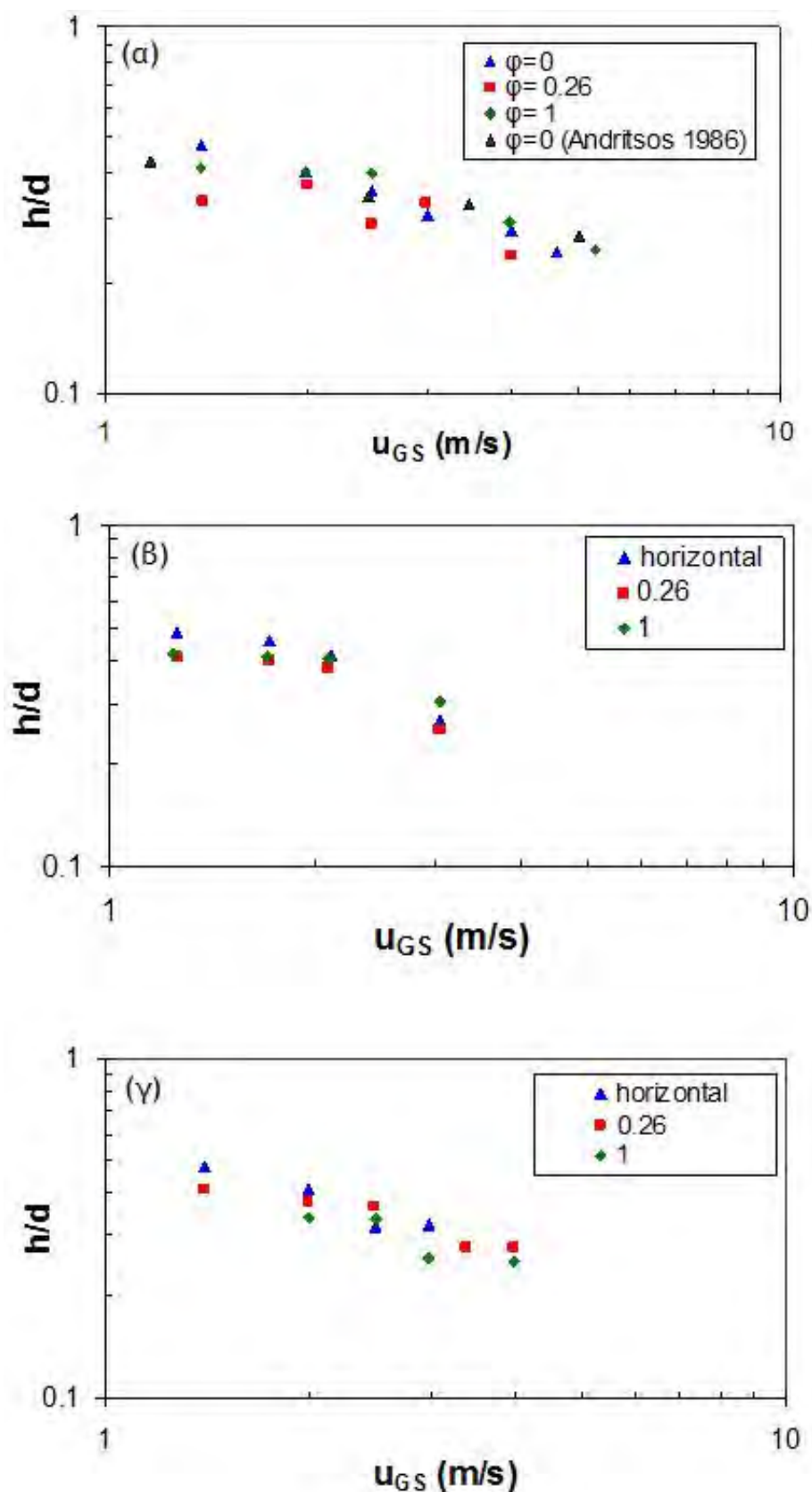
διεπιφάνεια των δυο φάσεων, η δημιουργία των Κ-Η κυμάτων οφείλεται αποκλειστικά στη διάτμηση της αέριας φάσης.



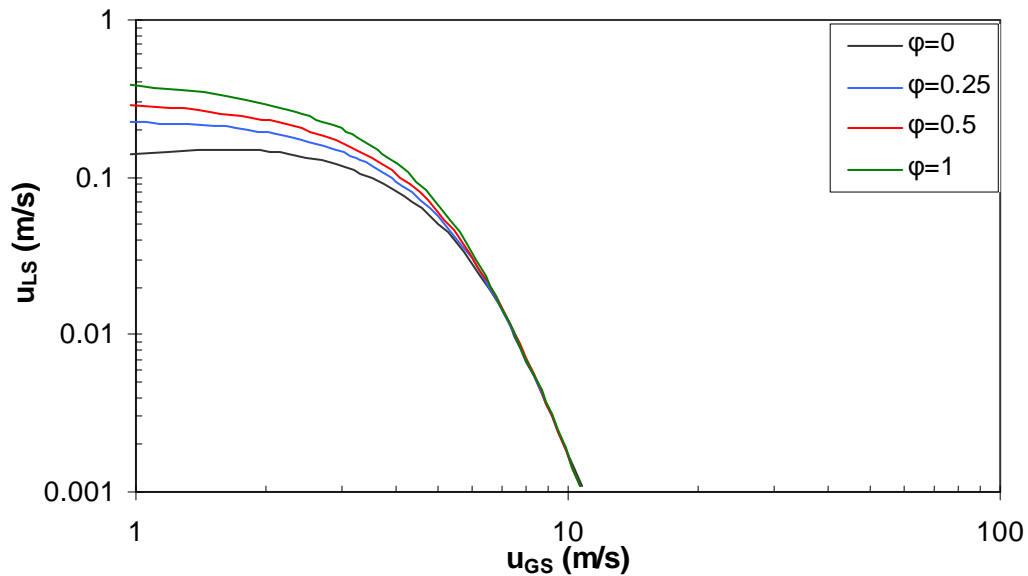
**Σχήμα 7.28** Καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με Κ-Η κύματα (α) και πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση (β) για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε διάφορες κλίσεις

Η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή με αύξηση της κλίσης του αγωγού μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ωστόσο, το πάχος της υγρής φάσης δε μεταβάλλεται, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 7.29 για το σύστημα (α) νερού-αέρα, (β) για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  και (γ) για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρας. Το γεγονός αυτό ενισχύει τη διαπίστωση, ότι για τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή η τιμή του πάχους της υγρής φάσης πρέπει να ξεπεράσει μία ~~μέγιστη~~ κρίσιμη τιμή, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα της υγρής φάσης. Όσο μικρότερη είναι η αέρια παροχή, τόσο μεγαλύτερη είναι η κρίσιμη αυτή τιμή. Ωστόσο, για αδιάστατο πάχος μικρότερο από περίπου 0.3 δεν είναι δυνατό να δημιουργηθεί διαλείπουσα ροή και η διαστρωμένη ροή μεταπίπτει σε ροή με Κ-Η κύματα. Τα πάχη της υγρής στιβάδας που απεικονίζονται στο Σχήμα 7.29 αναφέρονται σε τιμές ταχυτήτων των δύο φάσεων για τις οποίες στον αγωγό επικρατούσε ροή με 2-D κύματα και αντιστοιχούν σε συνθήκες κατά προσέγγιση λίγο πριν από τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ή σε ροή με κύματα Κ-Η.

Η παρατηρούμενη πειραματικά αύξηση της απαιτούμενης φαινομενικής ταχύτητας της υγρής φάσης για τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή με αύξηση της κλίσης του αγωγού έρχεται σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986). Το μοντέλο αυτό μετά από κατάλληλες τροποποιήσεις, αφού αρχικά αναφερόταν μόνο σε ροή σε οριζόντιους αγωγούς χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή και ροή με Κ-Η όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το σύστημα νερού-αέρα από το μοντέλο αυτό παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.30.

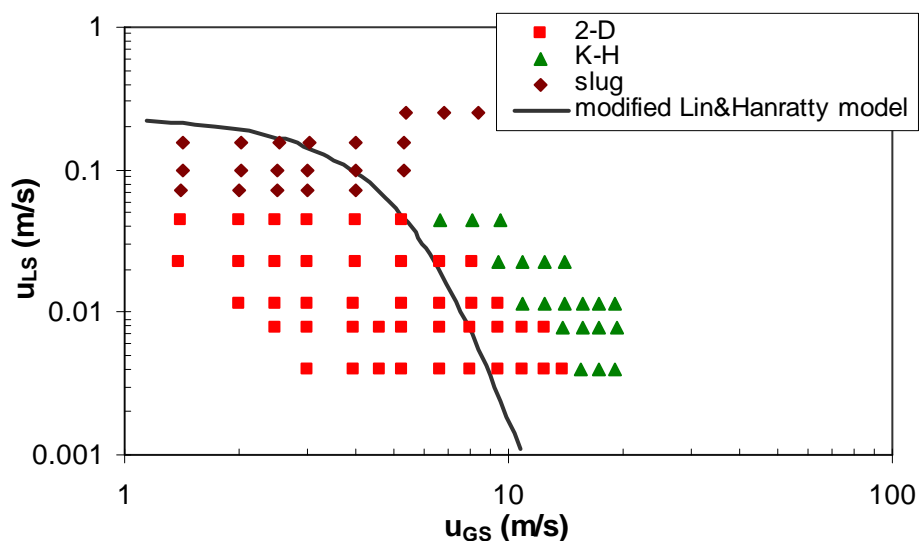


**Σχήμα 7.29** Πάχος υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή για (α) νερό-αέρα, (β) νερό- $CO_2$  και (γ) υδατικό διάλυμα κανονικής βουτανόλης-αέρα σε διάφορες κλίσεις



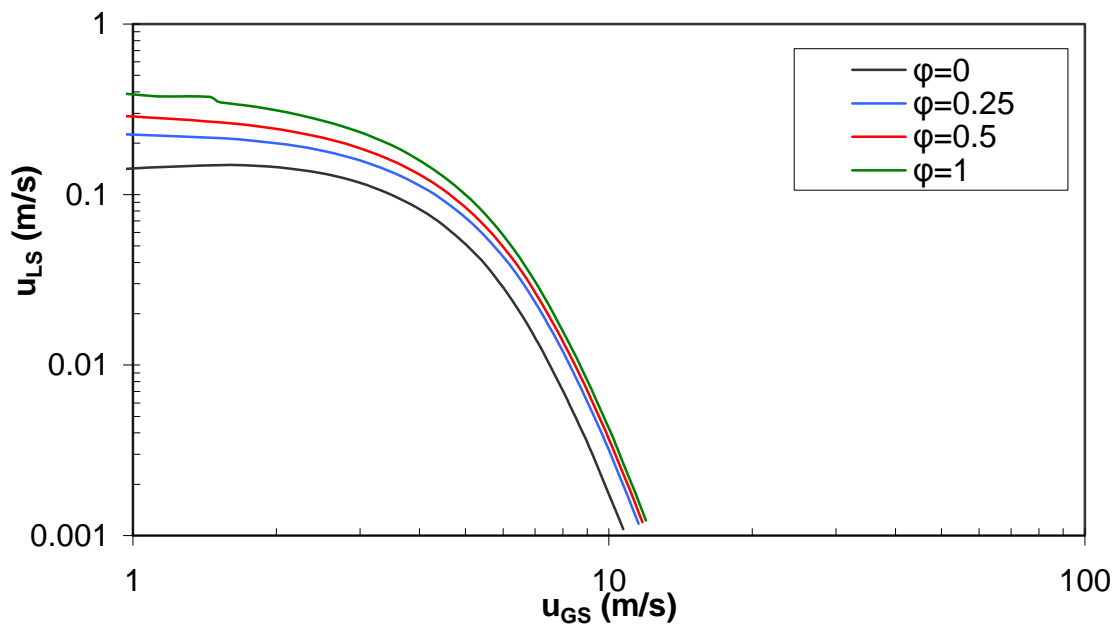
**Σχήμα 7.30** Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986) για διάφορες κλίσεις για σύστημα νερού-αέρα

Οι καμπύλες που προκύπτουν με χρήση του μοντέλου αυτού υπερεκτιμούν τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, καθώς υπολογίζεται να λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης και υποεκτιμούν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα. Η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα για το σύστημα νερού-αέρα σε γωνία κλίσης  $\phi=0.25^\circ$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.31.



**Σχήμα 7.31** Σύγκριση των πειραματικών τιμών με το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986) για το σύστημα νερού-αέρα σε  $\phi=0.25^\circ$

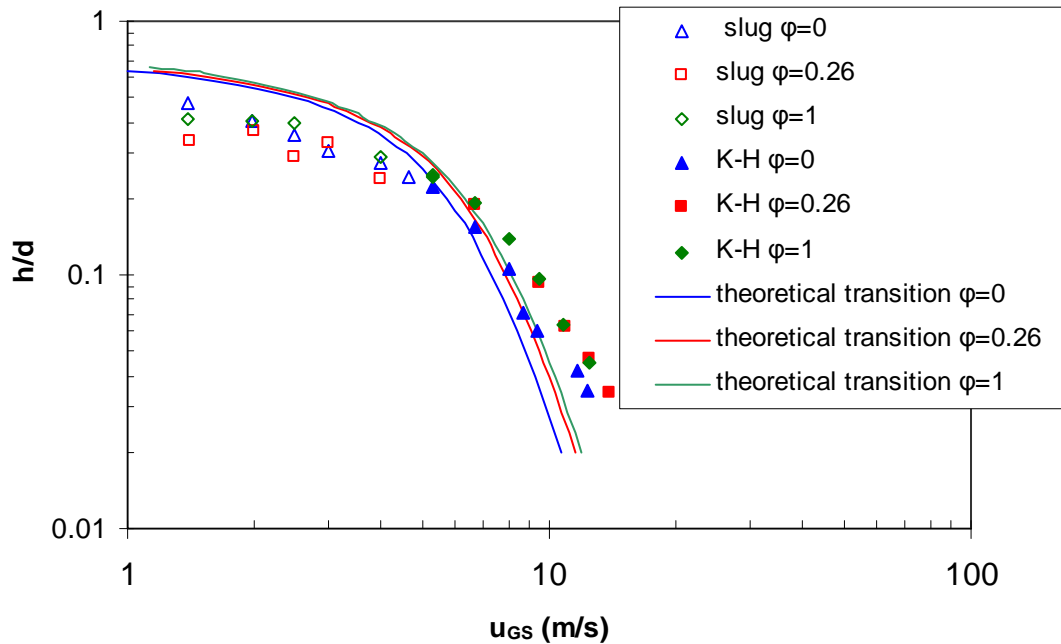
Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για κλίση  $\varphi=1^\circ$ , καθώς επίσης και για τα υπόλοιπα εξεταζόμενα συστήματα. Η υποεκτίμηση της μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τον υπολογισμό των θεωρητικών καμπύλων, η ταχύτητα των κυμάτων θεωρείται αμελητέα σε σχέση με αυτή της αέριας φάσης. Η παραδοχή αυτή αν και δεν είναι λανθασμένη στις περιπτώσεις ροής σε οριζόντιο αγωγό, για τη ροή σε αγωγό με κατωφερή κλίση είναι δυνατόν να επιφέρει σφάλματα κατά τους υπολογισμούς, καθώς η ταχύτητα της υγρής φάσης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη για ροή σε οριζόντιο αγωγό. Από τη μελέτη της ταχύτητας των κυμάτων κατά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα σε κεκλιμένους αγωγούς διαπιστώθηκε ότι σε κλίση  $0.25^\circ$  η ταχύτητα των κυμάτων είναι περίπου 8% της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, ενώ είναι περίπου 12% σε κλίση  $1^\circ$ . Αν οι τιμές αυτές συμπεριληφθούν στο θεωρητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια τότε προκύπτουν οι καμπύλες μετάπτωσης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.32.



**Σχήμα 7.32** Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986) για διάφορες κλίσεις για το σύστημα νερού-αέρα λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα των κυμάτων

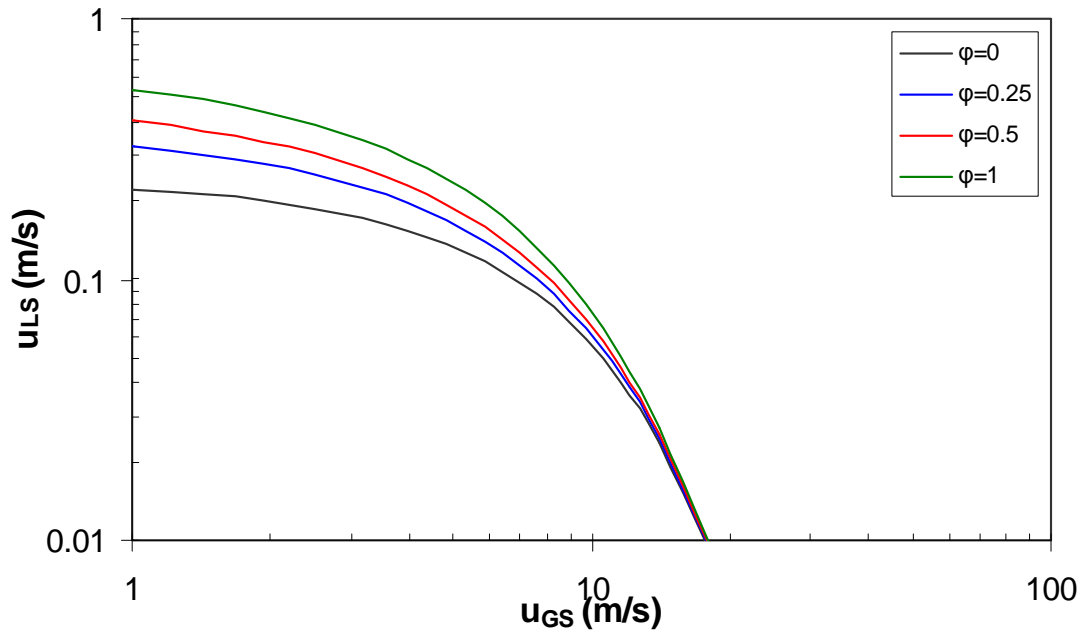
Οι καμπύλες που υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα των κυμάτων περιγράφουν περισσότερο ικανοποιητικά τις μεταπτώσεις για διάφορες κλίσεις του αγωγού σε συνάρτηση με το πάχος της υγρής στιβάδας. Για τη μετάπτωση σε ροή με K-H παρατηρείται μια μικρή μόνο αύξηση απαιτούμενου πάχους της υγρής στιβάδας με αύξηση της κλίσης του αγωγού, ενώ η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δεν επηρεάζεται από την αύξηση της κλίσης

του αγωγού. Οι μεταπτώσεις για διάφορες κλίσεις του αγωγού για το σύστημα νερού-αέρα παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.33.



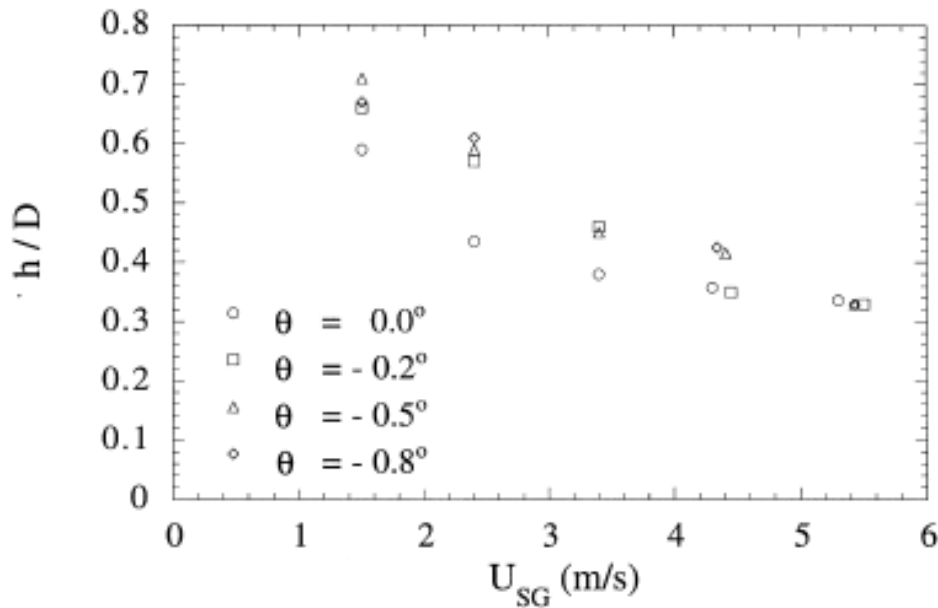
**Σχήμα 7.33** Σύγκριση των πειραματικών μεταπτώσεων με τις μεταπτώσεις από το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986) για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις

Για την περιγραφή της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή και για κλίσεις μέχρι  $+10^\circ$  οι Barnea et al. (1980) προτείνουν τη χρήση του κλασικού μοντέλου των Taitel and Dukler (1976), καθώς διαπίστωσαν καλή συμφωνία με τα πειραματικά τους αποτελέσματα. Ωστόσο και με τη χρήση του μοντέλου αυτού διαπιστώνεται η ίδια τάση υπερεκτίμησης της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή. Οι καμπύλες που προκύπτουν παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.34. Τόσο το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976), όσο και το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986), όπως προτείνεται στην παρούσα διατριβή προβλέπουν σωστά τη μορφή της καμπύλης μετάπτωσης, έχουν ωστόσο ορισμένες αδυναμίες. Η αποτελεσματικότητα όμως του τροποποιημένου μοντέλου των Lin and Hanratty (1986) σε σχέση με αυτή του μοντέλου των Taitel and Dukler (1976) είναι αδιαμφισβήτητα καλύτερη.



**Σχήμα 7.34** Μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα K-H σύμφωνα με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1975) για διάφορες κλίσεις για το σύστημα νερού-αέρα

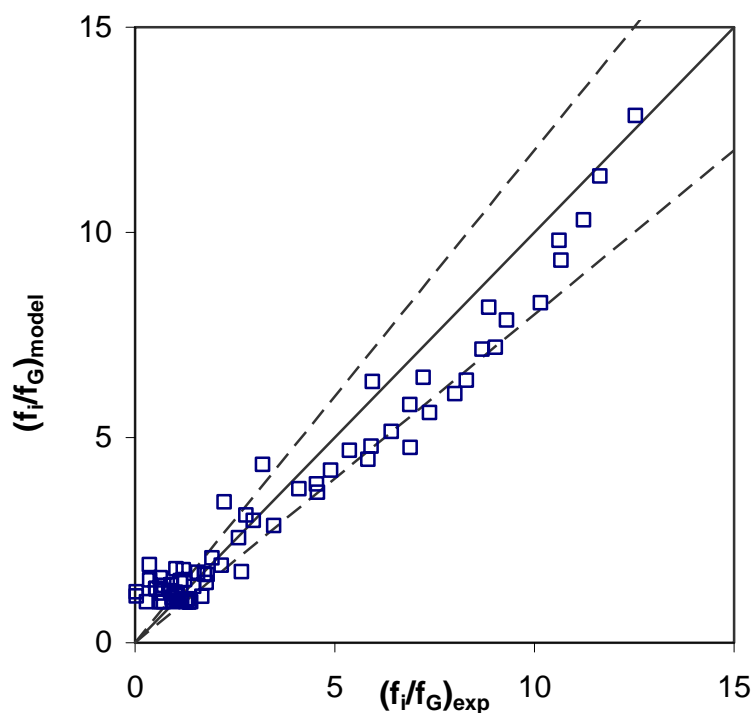
Η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σε αγωγούς με κλίση προς τα κάτω μελετήθηκε και από τους Woods et al. (2000), οι οποίοι παρατήρησαν αύξηση του πάχους της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή (Σχήμα 7.35) με αύξηση της κλίσης του αγωγού για φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης μικρότερες από 5 m/s. Επίσης, οι ίδιοι παρατήρησαν ότι σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης η μετάπτωση δεν επηρεάζεται από την κλίση του αγωγού και υπέθεσαν ότι η επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων είναι πιο έντονη από τη δράση της βαρύτητας. Στο Σχήμα 7.34 παρατηρείται μία μικρή αύξηση του πάχους της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή με αύξηση της κλίσης του αγωγού, αυτή ωστόσο δεν είναι έντονη και τείνει να σταθεροποιηθεί, ενώ πιο έντονη είναι η διαφορά του πάχους κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σε σχέση με τη ροή σε οριζόντιο επίπεδο. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία αφού οι μετρήσεις του πάχους της υγρής φάσης έγιναν στις τελευταίες τιμές της φαινομενικής ταχύτητας της υγρής φάσης για τις οποίες στον αγωγό επικρατούσε ροή με 2-D κύματα. Κατά συνέπεια το πάχος της υγρής φάσης στο συγκεκριμένο καθεστώς ροής μειώνεται με αύξηση της κλίσης του αγωγού.



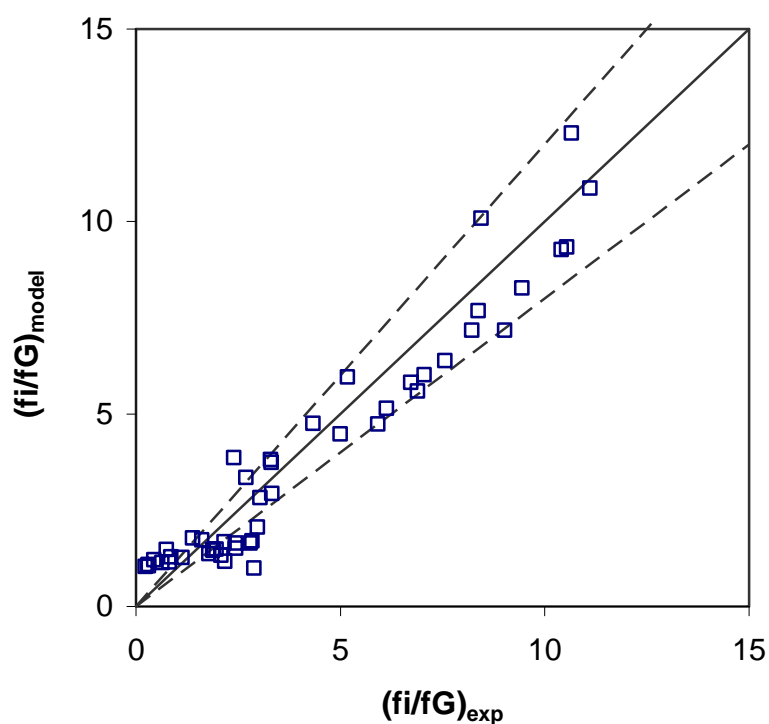
**Σχήμα 7.35** Πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή με αύξηση της γωνίας κλίσης (Woods et al. 2008)

#### 7.6 Πτώση πίεσης κατά τη διφασική ροή σε αγωγό με κατηφορική κλίση

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $\text{CO}_2$  πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού στη διαστρωματωμένη ροή. Οι πειραματικές τιμές του λόγου  $f_i/f_G$  συγκρίνονται με αυτές που προκύπτουν από το μοντέλο που προτείνεται στην παρούσα εργασία (κεφ. 5) και παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.36, 7.37, 7.38 και 7.39 για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $\text{CO}_2$  για κλίσεις  $0.25^\circ$  και  $1^\circ$  αντίστοιχα. Οι διακεκομμένες γραμμές στα Σχήματα 7.36, 7.37, 7.38 και 7.39 αναφέρονται σε απόκλιση της τάξης του  $\pm 20\%$  και είναι προφανές ότι μεγάλο ποσοστό των τιμών του λόγου  $f_i/f_G$  υπολογίζονται με αυτή την ακρίβεια. Υπάρχουν ωστόσο και περιπτώσεις που το μοντέλο αδυνατεί να προβλέψει σωστά την τιμή του λόγου  $f_i/f_G$ , κυρίως στην περιοχή με χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Για τις ταχύτητες αυτές σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή του λόγου υπερεκτιμάται. Τα σημεία αυτά προέρχονται κυρίως από τη λεία διαστρωματωμένη ροή, όπου η τιμή του λόγου  $f_i/f_G$  είναι χαμηλότερη εξαιτίας της δράσης της βαρύτητας. Η υπερεκτίμηση της τιμής του λόγου  $f_i/f_G$  οφείλεται στ γεγονός ότι σύμφωνα με τις εξισώσεις για τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα προβλέπεται λεία διαστρωματωμένη ροή, ενώ εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας στη διεπιφάνεια έχουν δημιουργηθεί οι πρώτες διαταραχές, που αυξάνουν την τιμή του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής.

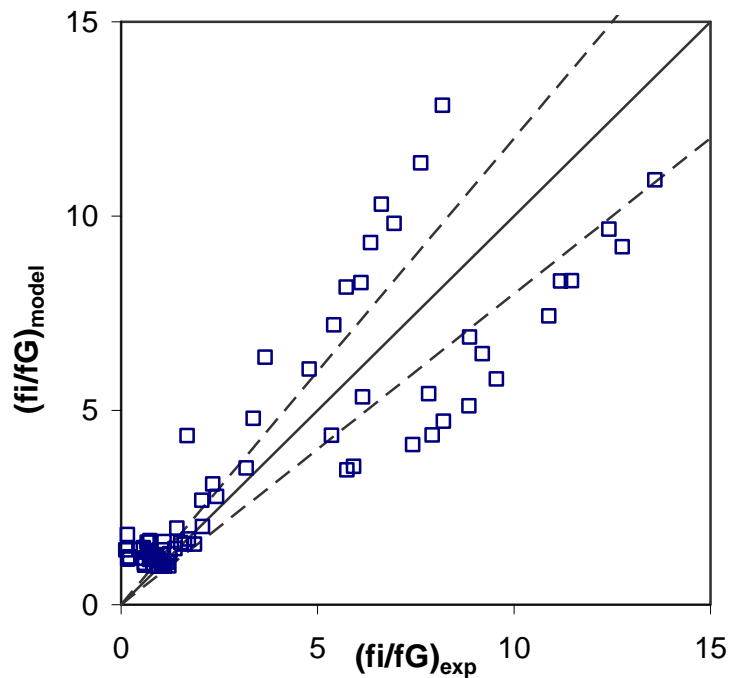


**Σχήμα 7.36** Σύγκριση πειραματικών τιμών λόγου  $f_i/f_G$  με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$

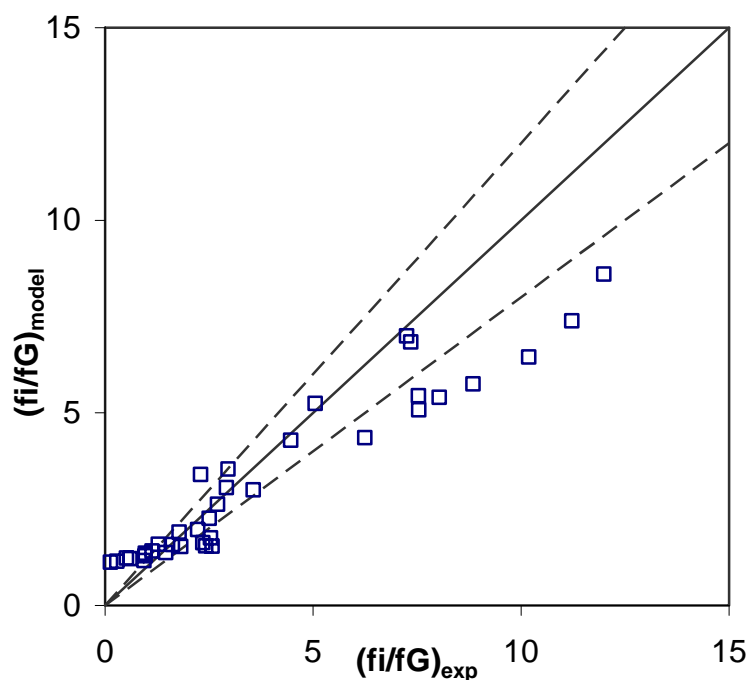


**Σχήμα 7.37** Σύγκριση πειραματικών τιμών λόγου  $f_i/f_G$  με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $\varphi=1^\circ$





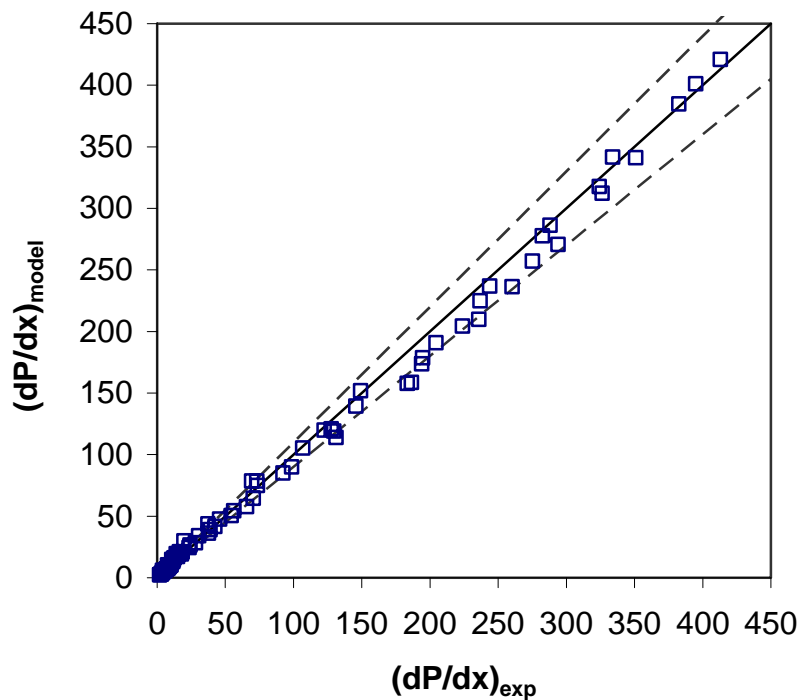
**Σχήμα 7.38** Σύγκριση πειραματικών τιμών λόγου  $f_i/f_G$  με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$



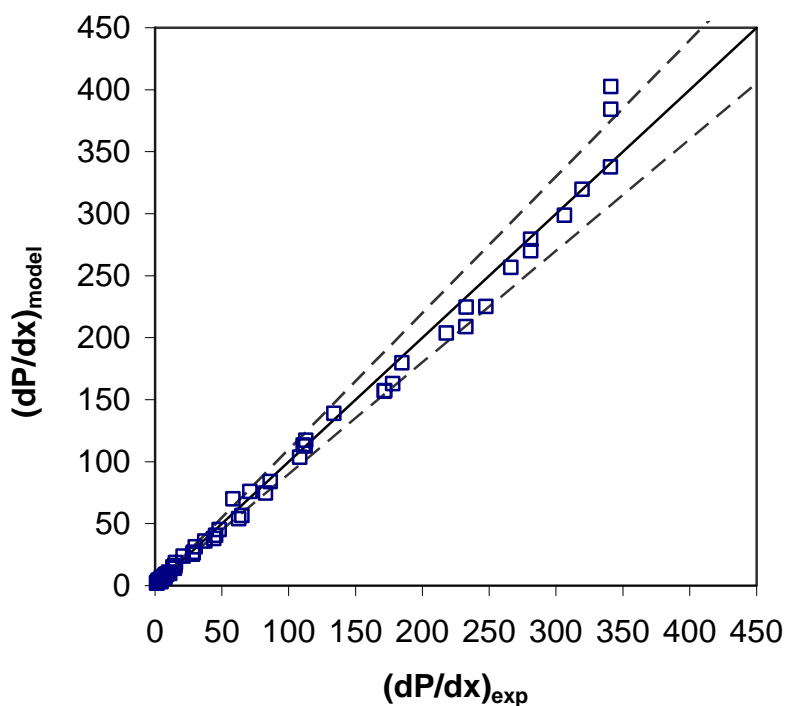
**Σχήμα 7.39** Σύγκριση πειραματικών τιμών λόγου  $f_i/f_G$  με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε κλίση  $\varphi=1^\circ$

Αν και οι τιμές του λόγου  $f_i/f_G$  δεν προβλέπονται αρκετά ικανοποιητικά από το μοντέλο που προτείνεται, γεγονός αναμενόμενο, καθώς οι ημι-θεωρητικές εξισώσεις που προτείνονται προορίζονται για τη ροή σε οριζόντιο αγωγό, η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης είναι αρκετά

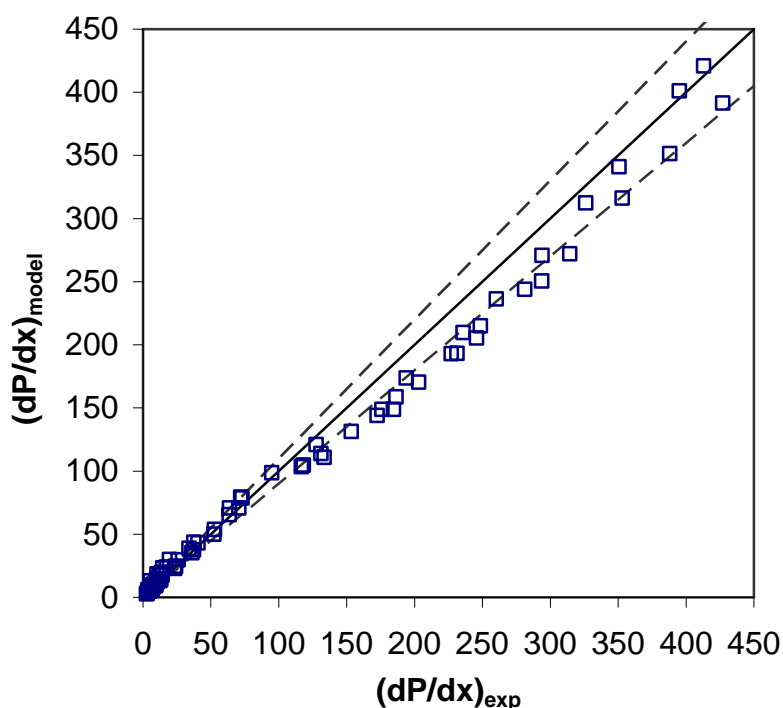
ικανοποιητική, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.40, 7.41, 7.42 και 7.43 για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $\text{CO}_2$  σε κλίση  $0.25^\circ$  και  $1^\circ$  αντίστοιχα. Η ικανοποιητική πρόβλεψη της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού υποδηλώνει ότι για μικρές κλίσεις του αγωγού προς τα κάτω, η πτώση πίεσης κατά τη διαστρωματωμένη ροή με κύματα, αυξάνεται με την δημιουργία των κυμάτων στη διεπιφάνεια και δεν επηρεάζεται έντονα από την κλίση του αγωγού.



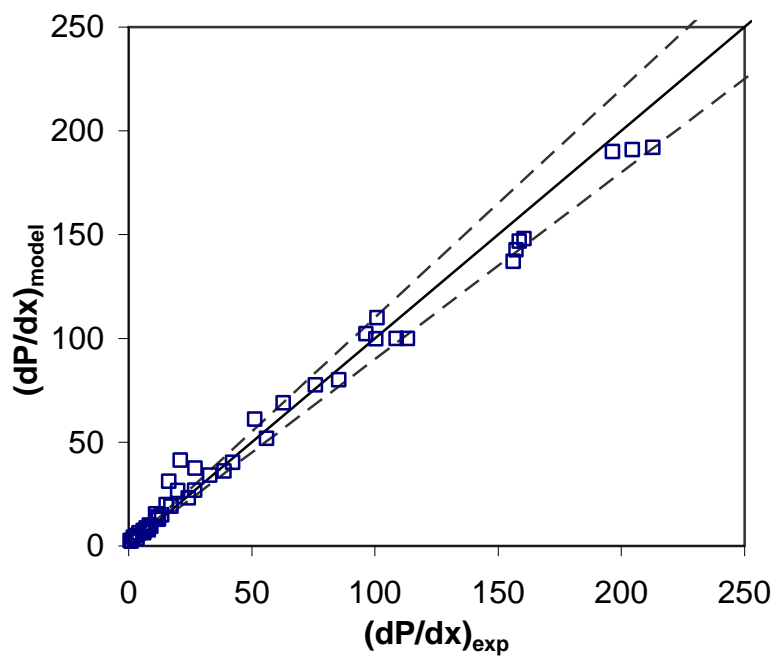
**Σχήμα 7.40** Σύγκριση πειραματικών τιμών  $dP/dx$  με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$



**Σχήμα 7.41** Σύγκριση πειραματικών τιμών  $dP/dx$  με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $\varphi=1^\circ$



**Σχήμα 7.42** Σύγκριση πειραματικών τιμών  $dP/dx$  με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε κλίση  $\varphi=0.25^\circ$



**Σχήμα 7.43** Σύγκριση πειραματικών τιμών  $dP/dx$  με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε κλίση  $\varphi=1^\circ$

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 8

---

---

## 8.ΑΝΩΦΕΡΗΣ ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

---

### 8.1 Εισαγωγή

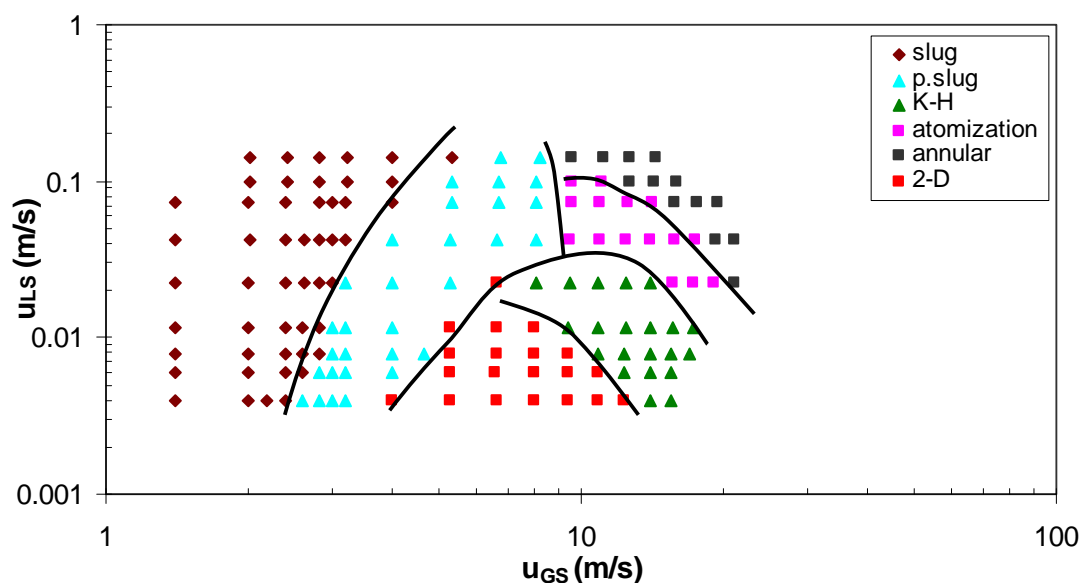
Χαρακτηριστικό της ροής σε αγωγό με ανωφερή κλίση είναι η επικράτηση της διαλείπουσας ροής έναντι της διαστρωματωμένης, ενώ η καμπύλη μετάπτωσης ανάμεσα σε αυτές τις δύο περιοχές εξαρτάται έντονα από την κλίση του αγωγού, ενώ ακόμα και για κλίσεις μικρότερες από  $1^\circ$  η διαστρωματωμένη ροή περιορίζεται σε μια περιοχή με σχήμα καμπάνας.

Ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι η αντιστροφή της ροής σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Οι Simmons and Hanratty (2001) παρατήρησαν ότι σε χαμηλές ταχύτητες της αέριας φάσης η υγρή κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση και συγκεντρώνεται στην είσοδο του αγωγού, έως ότου το ύψος της υγρής στιβάδας αυξηθεί τόσο ώστε λόγω της αστάθειας Kelvin-Helmholtz να δημιουργηθεί ένα «slug». Ανάμεσα σε δυο διαδοχικά «slugs» μέσα στον αγωγό επικρατεί διαστρωματωμένη περιοχή ροής με την υγρή φάση να κινείται αντίθετα. Η αντιστροφή της ροής της υγρής φάσης συνεχίζεται μέχρι η ταχύτητα της αέριας φάσης να αυξηθεί τόσο, ώστε η διάτμηση της να είναι αρκετή για να κινήσει την υγρή φάση προς την έξοδο του αγωγού. Έξω από την περιοχή όπου λαμβάνει χώρα αντιστροφή της ροής της υγρής φάσης η έναρξη της διαλείπουσας ροής μπορεί να προβλεφτεί από τη ανάλυση ευστάθειας διαταραχών μεγάλου μήκους των Lin and Hanratty (1986a) ή από την ανάλυση ευστάθειας των Woods and Hanratty (1996) ακόμα και από την ανάλυση Kelvin-Helmholtz των Andritsos et al (1989).

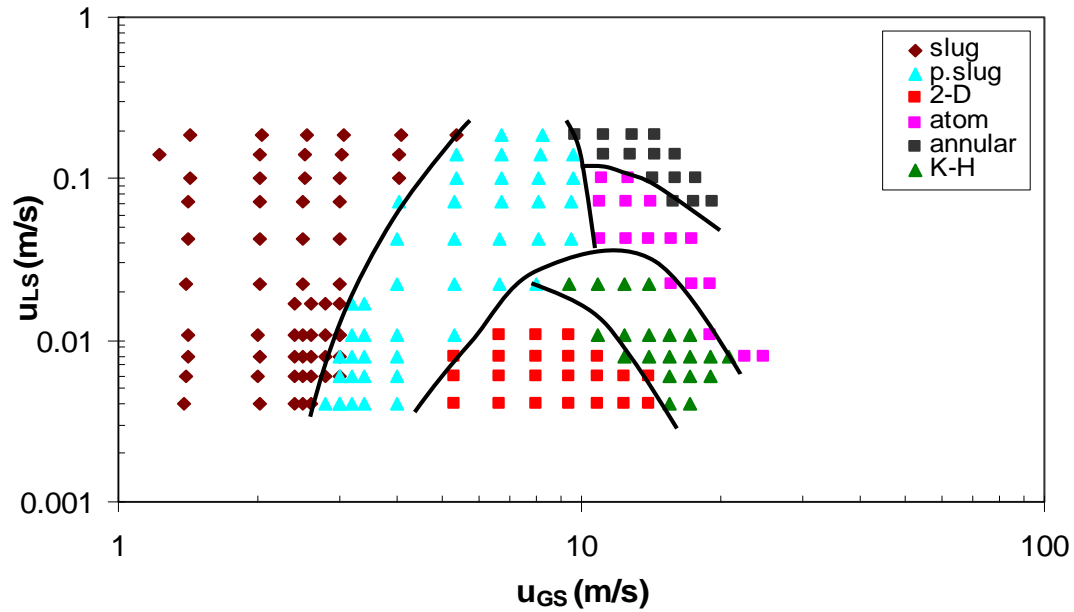
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση ανωφερούς κλίσης του αγωγού και των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στα χαρακτηριστικά της ροής. Για το λόγο αυτό μελετήθηκαν τα συστήματα νερού-αέρα, νερού- $\text{CO}_2$  και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα ( $\sigma=0.04 \text{ N/m}$ ) σε κλίσεις  $\varphi=-0.25^\circ$ ,  $-0.55^\circ$  και  $-1^\circ$ .

## 8.2 Χάρτες καθεστώτων ροής-Επίδραση ανωφερούς κλίσης του αγωγού

Στο Σχήμα 8.1, 8.2 και 8.3 παρουσιάζονται οι χάρτες καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίσεις  $0.25^\circ$ ,  $0.55^\circ$  και  $1^\circ$  αντίστοιχα. Στα Σχήματα 8.1, 8.2 και 8.3 παρουσιάζονται οι χάρτες καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίσεις  $0.25^\circ$ ,  $0.55^\circ$  και  $1^\circ$  αντίστοιχα.

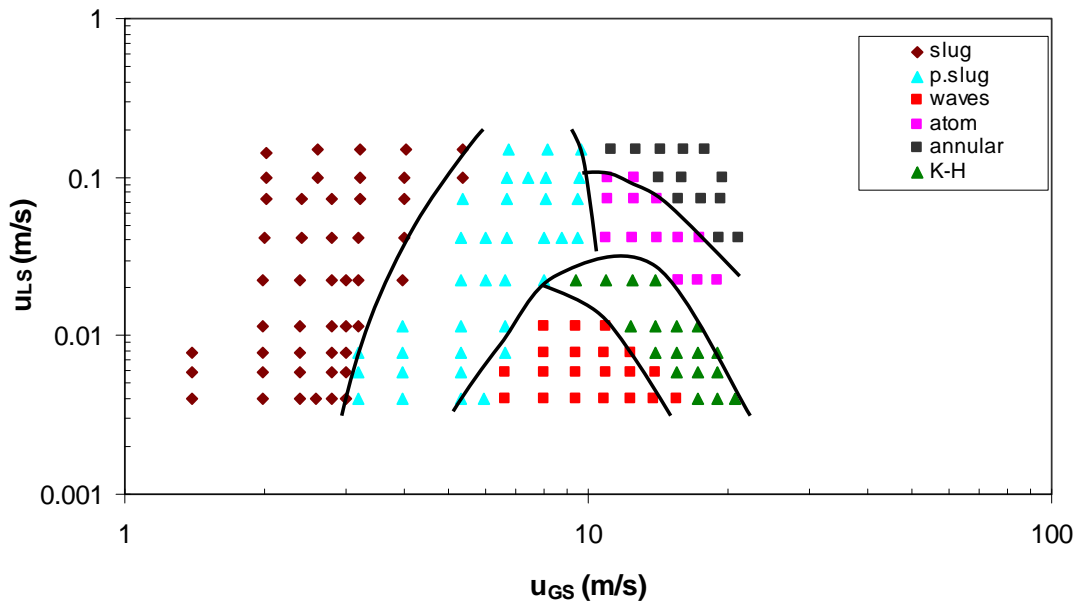


Σχήμα 8.1 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε  $\varphi=0.25^\circ$



Σχήμα 8.2 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε  $\varphi=0.55^\circ$

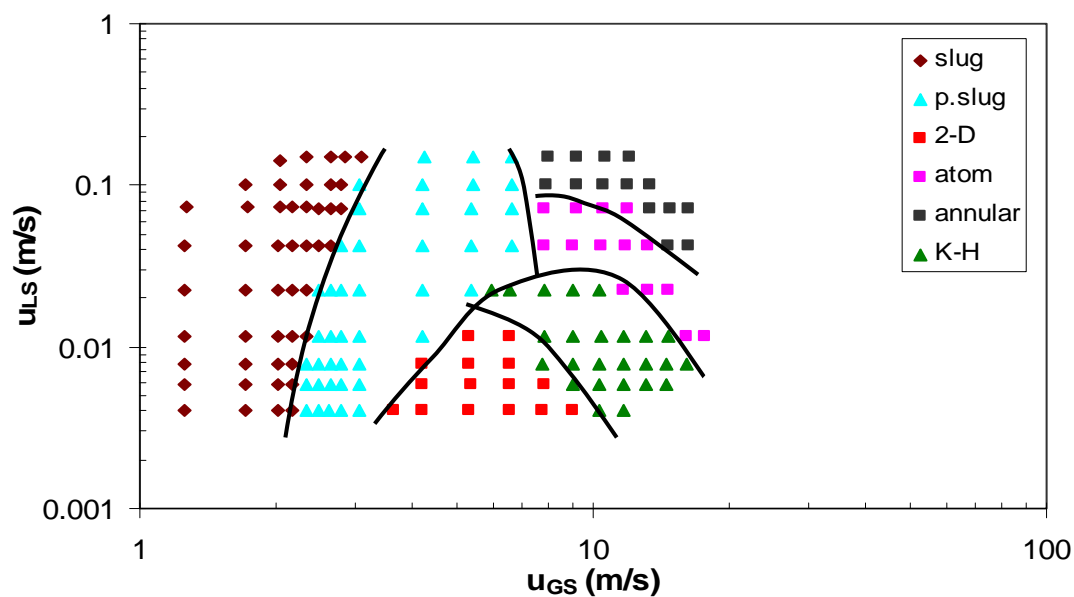
Από τα Σχήματα 8.1 και 8.2 γίνεται φανερό ότι ακόμα και με μικρή κλίση του αγωγού προς τα πάνω ο χάρτης καθεστώτων ροής τροποποιείται και δεν έχει κοινά σημεία με το χάρτη για οριζόντια ροή. Για το λόγο αυτό δεν έχει νόημα να γίνει σύγκριση ανάμεσα στους χάρτες κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό και κατά τη ροή σε αγωγό με ανηφορική κλίση.



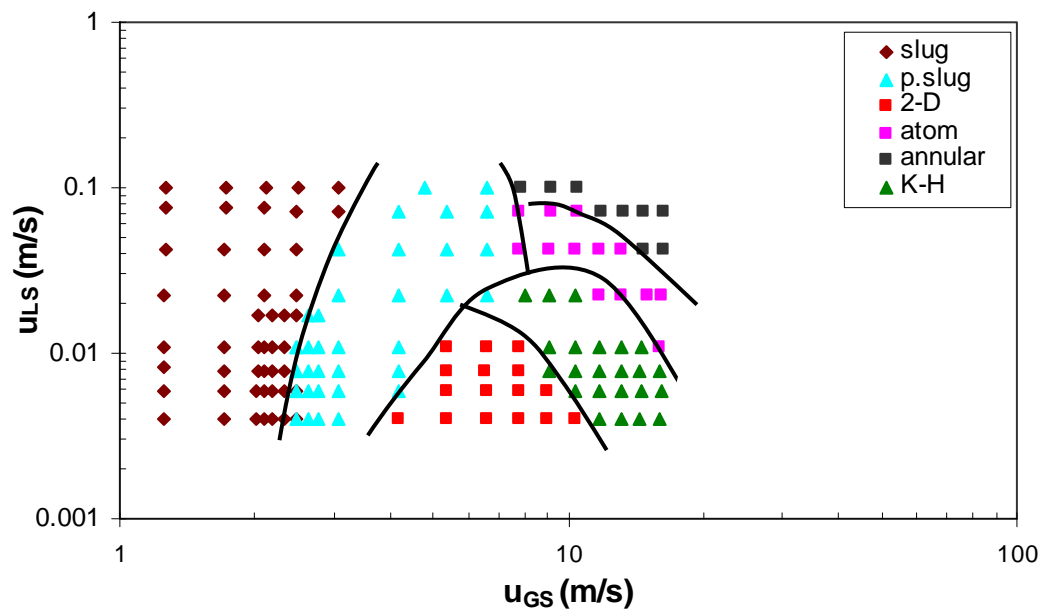
Σχήμα 8.3 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού-αέρα σε  $\varphi=1^\circ$

Στα Σχήματα 8.4, 8.5 και 8.6 παρουσιάζονται οι χάρτες καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  σε κλίσεις 0.25, 0.55 και  $1^\circ$  αντίστοιχα. Τέλος, στα Σχήματα 8.7 και 8.8

παρουσιάζονται οι χάρτες καθεστώτων ροής για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίσεις  $0.55^\circ$  και  $1^\circ$  αντίστοιχα.

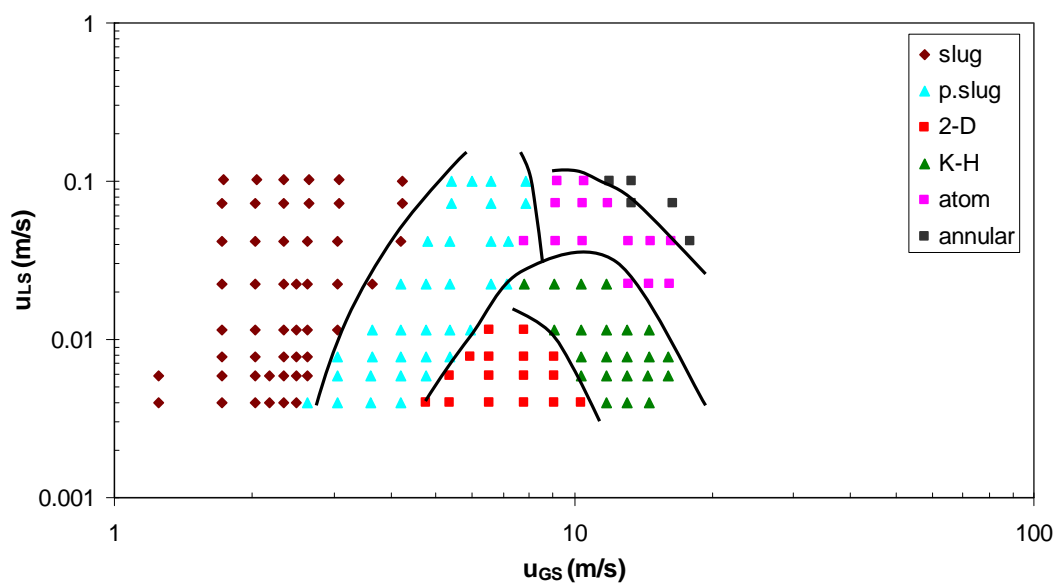


Σχήμα 8.4 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $CO_2$  σε  $\varphi=0.25^\circ$

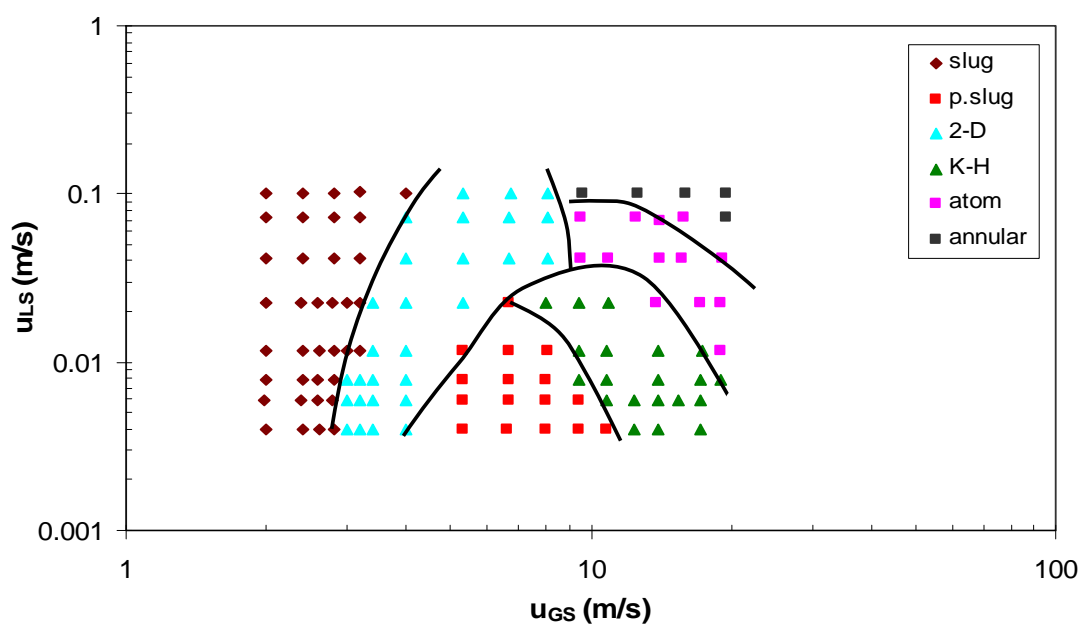


Σχήμα 8.5 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $CO_2$  σε  $\varphi=0.55^\circ$

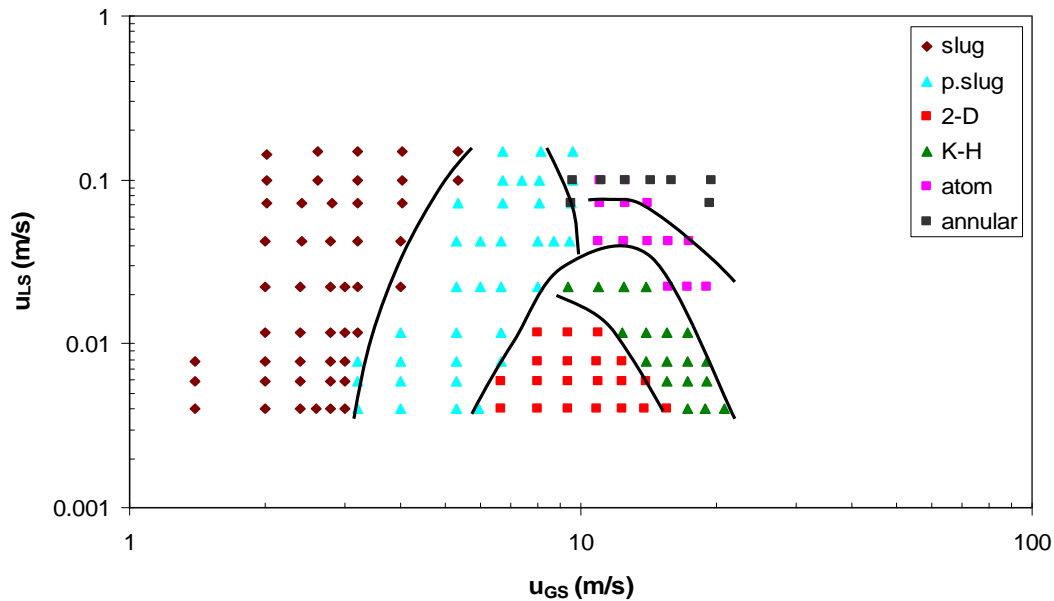




Σχήμα 8.6 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα νερού- $CO_2$  σε  $\phi=1^\circ$



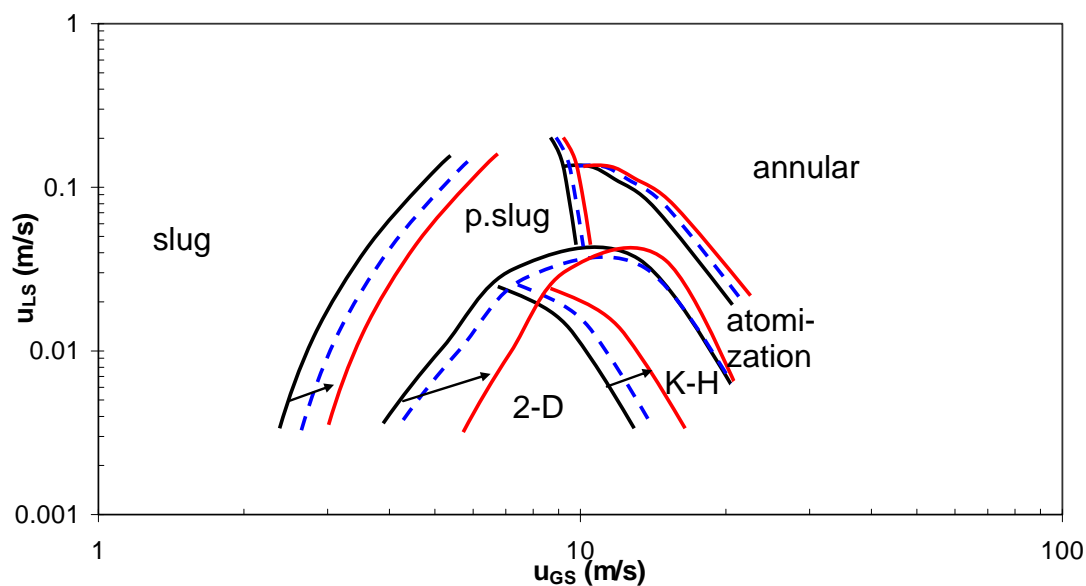
Σχήμα 8.7 Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε  $\phi=0.55^\circ$



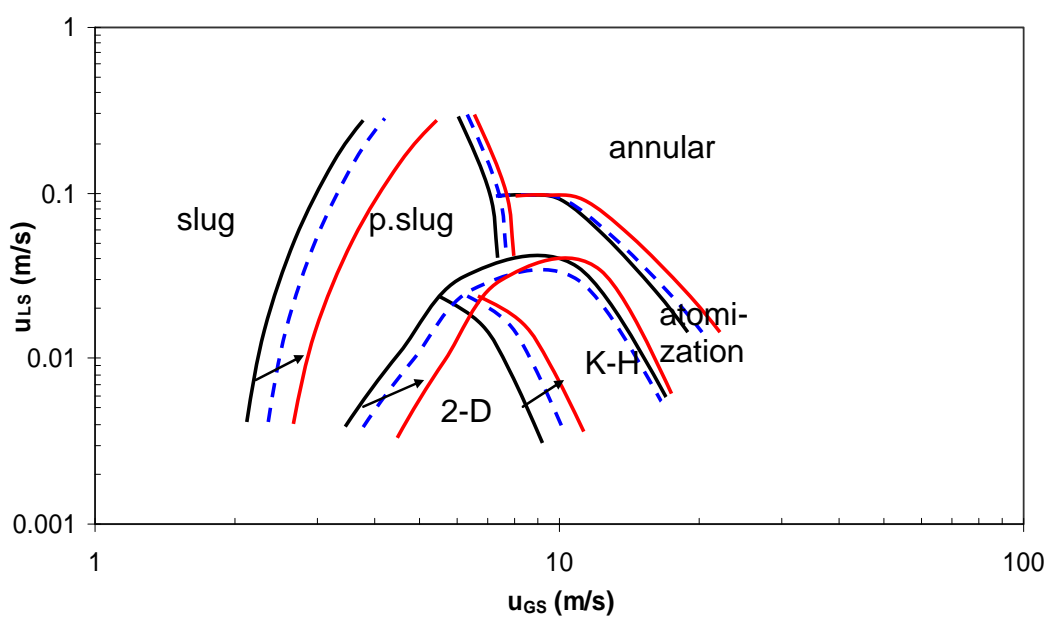
**Σχήμα 8.8** Χάρτης καθεστώτων ροής για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε  $\varphi=1^\circ$

Από όλους αυτούς τους χάρτες καθεστώτων ροής παρατηρείται ότι με μικρή κλίση του αγωγού προς τα πάνω η μορφή του χάρτη αλλάζει δραματικά σε σχέση με αυτόν κατά τη ροή σε οριζόντιους αγωγούς. Σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες των δύο φάσεων μέσα στον αγωγό επικρατεί διαλείπουσα ροή, η οποία με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης μεταπίπτει σε ψευδο-διαλείπουσα ροή. Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης μέσα στον αγωγό δημιουργείται διαστρωματωμένη ροή με κύματα. Τα πρώτα κύματα που δημιουργούνται είναι κανονικά 2-D κύματα και ακολουθούνται από K-H κύματα, ενώ και ροή με εκνέφωση δημιουργείται για μεγαλύτερες τιμές της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης. Τόσο τα 2-D κύματα, όσο και τα K-H διατηρούν τα χαρακτηριστικά που έχουν και κατά τη ροή σε οριζόντιους αγωγούς. Τέλος, σε σχετικά υψηλές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης δημιουργείται και δακτυλιοειδής ροή μέσα στον αγωγό.

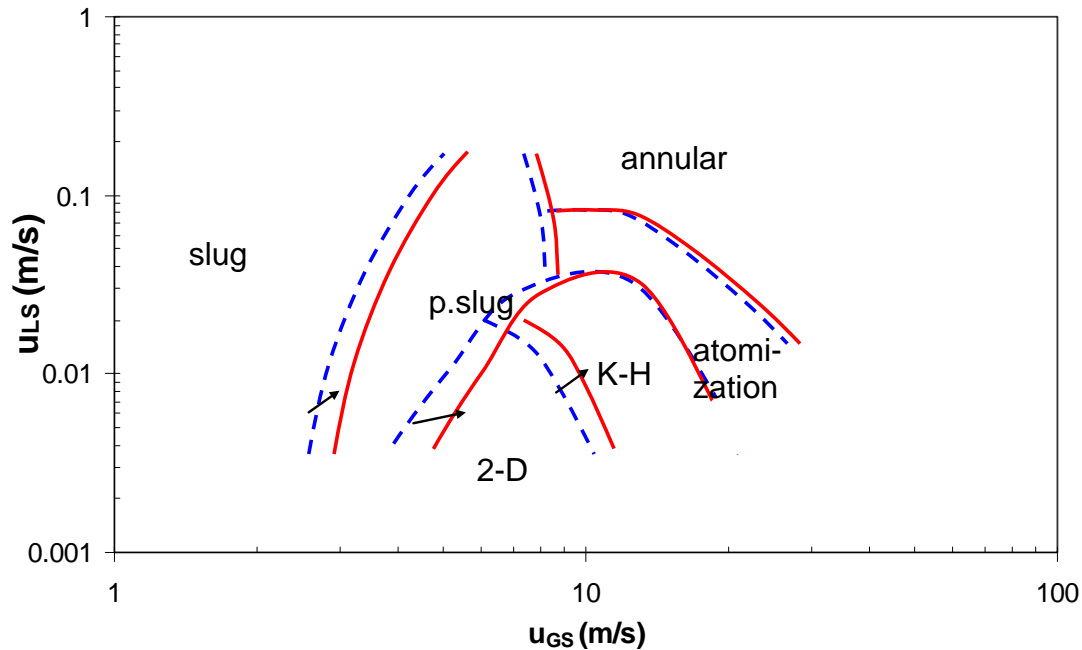
Η επίδραση της κλίσης του αγωγού στους χάρτες καθεστώτων ροής παρουσιάζεται παρουσιάζεται στα Σχήματα 8.9, 8.10 και 8.11 για τα συστήματα νερού-αέρα, νερού- $\text{CO}_2$  και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα, αντίστοιχα.



**Σχήμα 8.9** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $\phi=0.25^\circ$  (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση  $\phi=0.55^\circ$  (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση  $\phi=1^\circ$  (συνεχείς κόκκινες γραμμές)



**Σχήμα 8.10** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε κλίση  $\phi=0.25^\circ$  (συνεχείς μαύρες γραμμές), σε κλίση  $\phi=0.55^\circ$  (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση  $\phi=1^\circ$  (συνεχείς κόκκινες γραμμές)



**Σχήμα 8.10** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα υδατο διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση  $\varphi=0.55^\circ$  (διακεκομμένες μπλε γραμμές) και σε κλίση  $\varphi=1^\circ$  (συνεχείς κόκκινες γραμμές)

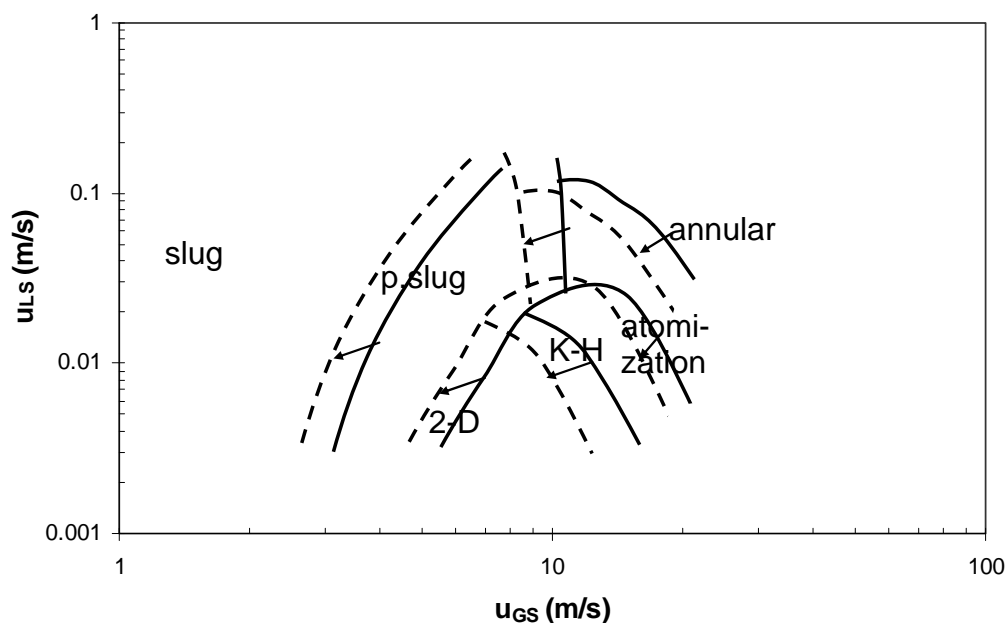
Με αύξηση της κλίσης του αγωγού η μεταπτώσεις σε ψευδο-διαλείπουσα ροή, καθώς και οι μεταπτώσεις σε ροή με 2-D και K-H κύματα μετατοπίζονται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, ενώ οι μεταπτώσεις σε δακτυλιοειδή ροή και ροή με εκνέφωση δε φαίνεται να επηρεάζονται έντονα με αύξηση της κλίσης του αγωγού. Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη ροή σε αγωγούς με ανωφερή κλίση και σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, παρατηρείται αντιστροφή της ροής της υγρής φάσης εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας. Με αύξηση της γωνίας κλίσης η ποσότητα της ενέργειας της αέριας φάσης που απαιτείται για να υπερνικήσει τη δράση της βαρύτητας ώστε να μη λάβει χώρα η αντιστροφή της ροής αυξάνεται. Το γεγονός αυτό στο χάρτη καθεστώτων ροής παρουσιάζεται με μετατόπιση των μεταπτώσεων στα διάφορα καθεστώτα σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Η αύξηση της κλίσης του αγωγού επηρεάζει τα καθεστώτα ροής με ίδιο τρόπο για όλα τα συστήματα που εξετάστηκαν χωρίς να μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά των καθεστώτων ροής που επικρατούν μέσα στον αγωγό. Ωστόσο, παρατηρείται και επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις καμπύλες μετάπτωσης η οποία εξετάζεται αναλυτικά παρακάτω.

### 8.3 Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών

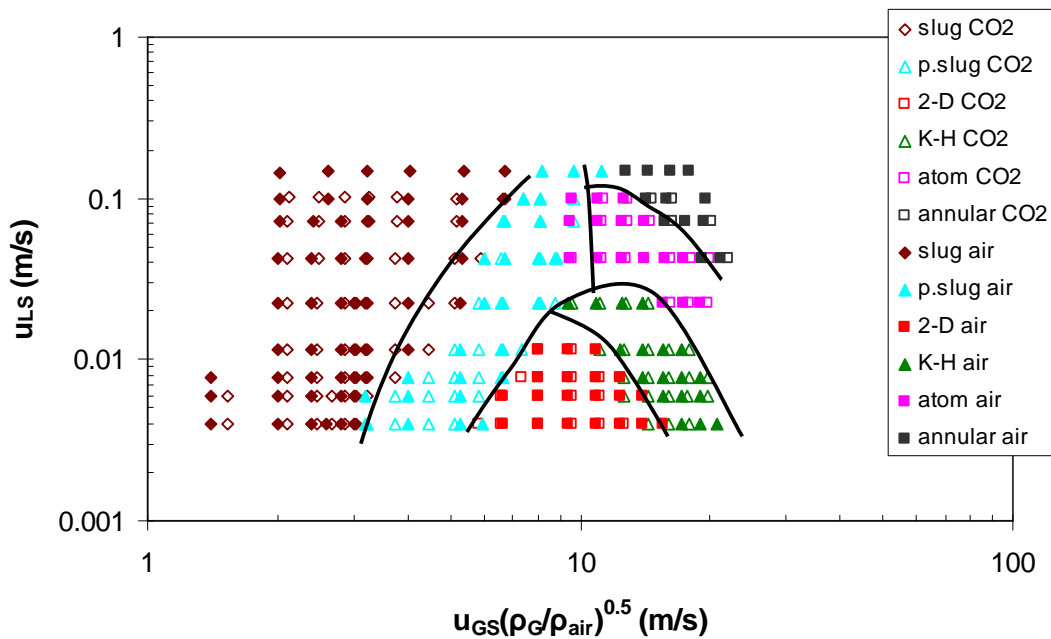
Με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης αλλά και με μείωση της επιφανειακής τάσης οι μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής λαμβάνουν χώρα σε χαμηλότερες

φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, τόσο για ροή σε οριζόντιο αγωγό, όσο και σε αγωγό με κατωφερή κλίση. Η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών μελετήθηκε και για την περίπτωση της ροής σε αγωγούς με αρνητική κλίση.

Στο σχήμα 8.11 παρουσιάζεται η σύγκριση του χάρτη καθεστώτων ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $\text{CO}_2$  σε γωνία κλίσης  $\varphi=1^\circ$ . Με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης μεγαλύτερη ορμή μεταφέρεται από την αέρια στη υγρή φάση. Κατά συνέπεια απαιτούνται χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης ώστε να λάβουν χώρα οι μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής και για το λόγο αυτό όλες οι καμπύλες μετάπτωσης είναι μετατοπισμένες σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Το γεγονός ότι όλες οι μεταπτώσεις στο χάρτη καθεστώτων ροής επηρεάστηκαν υποδηλώνει ότι στις μεταπτώσεις αυτές διαδραματίζει σημαντικό ρόλο η ορμή της αέριας φάσης. Διαπιστώθηκε επίσης ότι όταν αν οι άξονες του συστήματος τροποποιηθούν κατάλληλα (όπως προτείνεται στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο), τότε οι μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής συμπίπτουν (Σχήμα 8.12). Στην περίπτωση αυτή μία μετάπτωση μπορεί να παρασταθεί από μία μόνο καμπύλη.

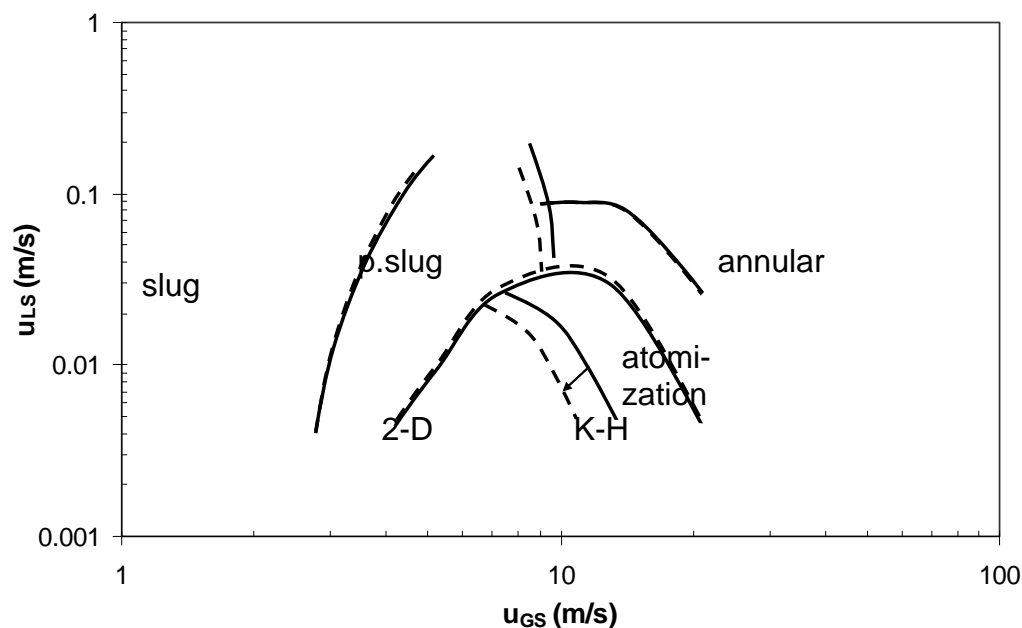


**Σχήμα 8.11** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα (συνεχείς γραμμές) και νερού- $\text{CO}_2$  σε κλίση  $\varphi=1^\circ$  (διακεκομμένες γραμμές)



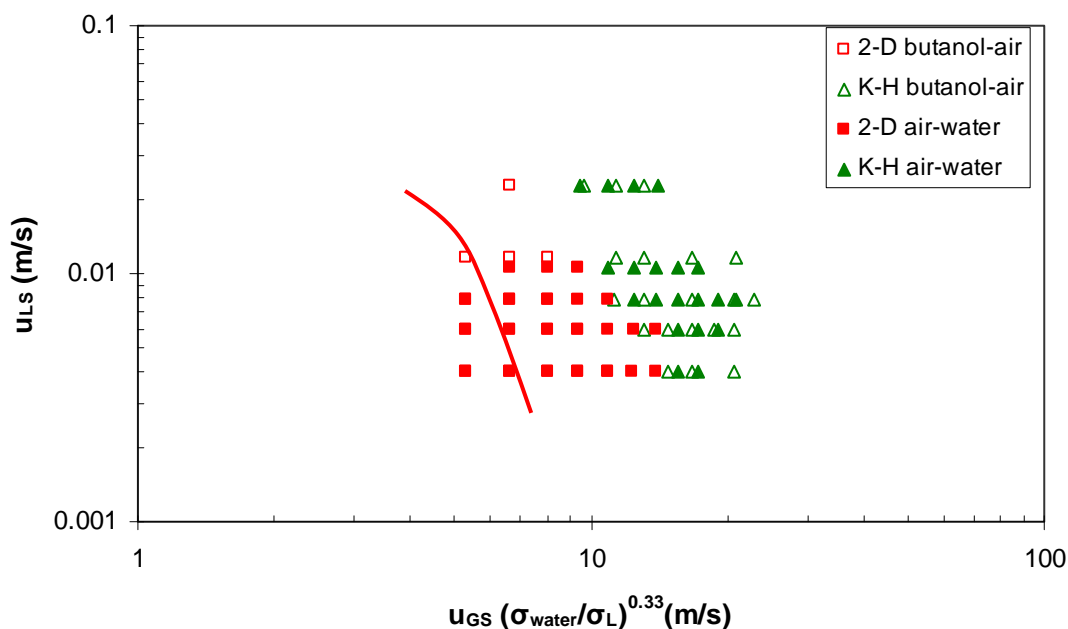
**Σχήμα 8.12** Χάρτης περιοχών ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $\text{CO}_2$  με τροποποιημένους άξονες σε  $\phi=1^\circ$

Ο χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα με μειωμένη επιφανειακή τάση και για γωνία κλίσης  $\phi=0.55^\circ$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.13. Εύκολα διακρίνεται στο χάρτη ότι με μείωση της επιφανειακής τάσης επηρεάζεται μόνο η μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, η οποία μετατοπίζεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Με βάση τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη μετάπτωση από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα και διαστρωματωμένη ροή αποτελεί η ορμή της αέριας φάσης και η δυνατότητα της να αποτρέψει την αναστροφή της ροής. Με μείωση της επιφανειακής τάσης ο παράγοντας αυτός δεν επηρεάζεται και για το λόγο αυτό δεν παρατηρείται μετατόπιση των καμπύλων μετάπτωσης σε ψευδο-διαλείπουσα και διαστρωματωμένη ροή. Αντίστοιχα, η μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα επηρεάζεται τόσο από τη μεταβολή της ορμής της αέριας φάσης (μεταβολή πυκνότητας αέριας φάσης), όσο και από τη μεταβολή της επιφανειακής τάσης, η οποία αποτελεί σταθεροποιητικό μηχανισμό στην αστάθεια Kelvin-Helmholtz (κεφ. 2).



**Σχήμα 8.13** Σύγκριση χαρτών ροής για το σύστημα νερού-αέρα (συνεχείς γραμμές) και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κλίση  $\varphi=0.55^\circ$  (διακεκομμένες γραμμές)

Παρατηρείται ότι με κατάλληλη τροποποίηση των αξόνων, όπως πραγματοποιήθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα συμπίπτει και για τα δύο συστήματα και μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από μία μόνο καμπύλη (Σχήμα 8.14).

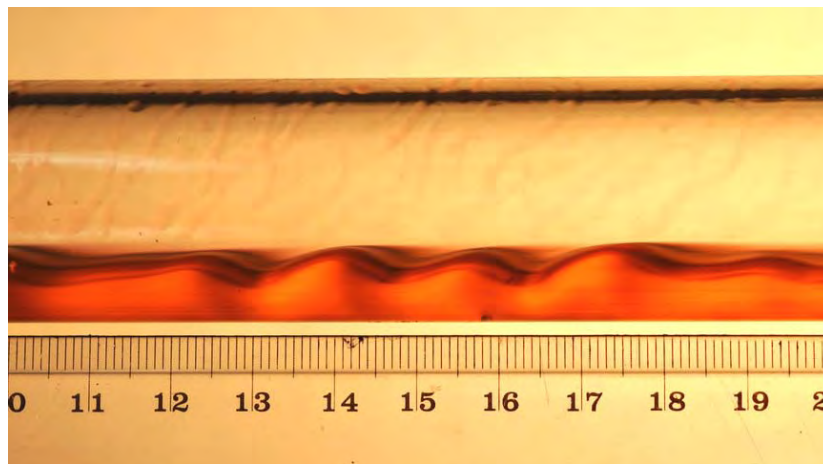


**Σχήμα 8.14** Χάρτης περιοχών ροής για τα συστήματα νερού-αέρα και υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα με τροποποιημένους άξονες σε κλίση  $\varphi=0.55^\circ$

#### 8.4 Χαρακτηριστικά των κυμάτων

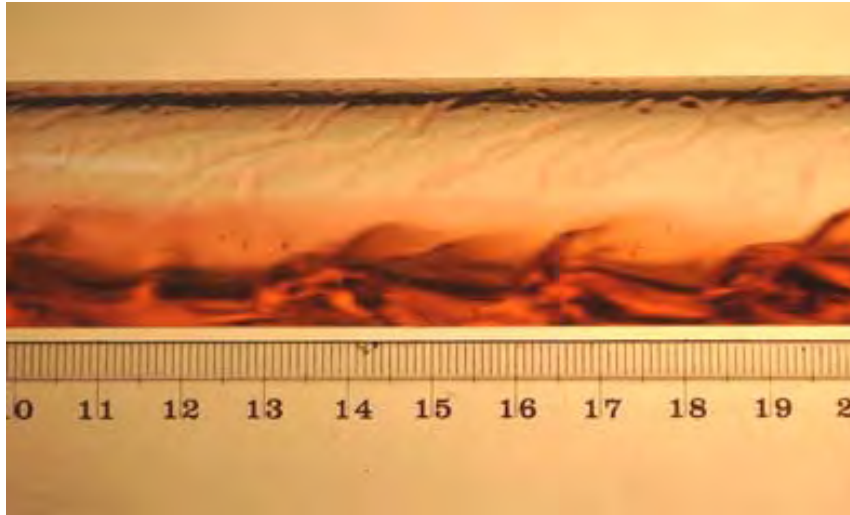
Σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες των δύο φάσεων κατά τη διφασική ροή σε αγωγούς με ανωφερή κλίση επικρατεί διαλείπουσα ροή η οποία με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης μεταπίπτει σε ψευδο-διαλείπουσα ροή. Η ταυτοποίηση της μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροής πραγματοποιήθηκε με μέτρηση της ταχύτητας των υγρών μαζών, όπως αναφέρεται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης λαμβάνει χώρα η διαστρωματωμένη ροή (ροή με 2-D και K-H κύματα και ροή με εκνέφωση), ενώ σε σχετικά υψηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης μέσα στον αγωγό επικρατεί δακτυλιοειδής ροή.

Κατά τη διαστρωματωμένη ροή ταυτοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη κυμάτων. Αρχικά, μετά τη μετάπτωση από τη ψευδο-διαλείπουσα ροή στη διεπιφάνεια εμφανίζονται κανονικά δισδιάστατα κύματα, ενώ με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης δίνουν τη θέση τους στα K-H κύματα. Οι δύο αυτοί τύποι κυμάτων παρατηρήθηκαν και κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών πειραμάτων με τα συστήματα υδατικών διαλυμάτων γλυκερίνης-αέρα 14 και 46 cP. Στο Σχήμα 8.15 παρατηρούνται τα κανονικά 2-D κύματα, το μήκος κύματος των οποίων είναι περίπου 1.5 cm για τις δεδομένες φαινομενικές ταχύτητες των δύο φάσεων για το σύστημα υδατικού διαλύματος γλυκερίνης-αέρα 46 cP. Στο Σχήμα 8.16 παρουσιάζονται K-H κύματα, τα οποία έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των κυμάτων αυτών μπορούν να ταυτοποιηθούν και οπτικά, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 8.15 και 8.16.



**Σχήμα 8.15** 2-D κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή σε αγωγό με ανωφερή για το σύστημα υδατικού διαλύματος γλυκερίνης(46 cP)-αέρα σε  $u_{LS}=0,0041$  m/s και  $u_{GS}=6.48$  m/s σε κλίση  $\varphi=1^\circ$

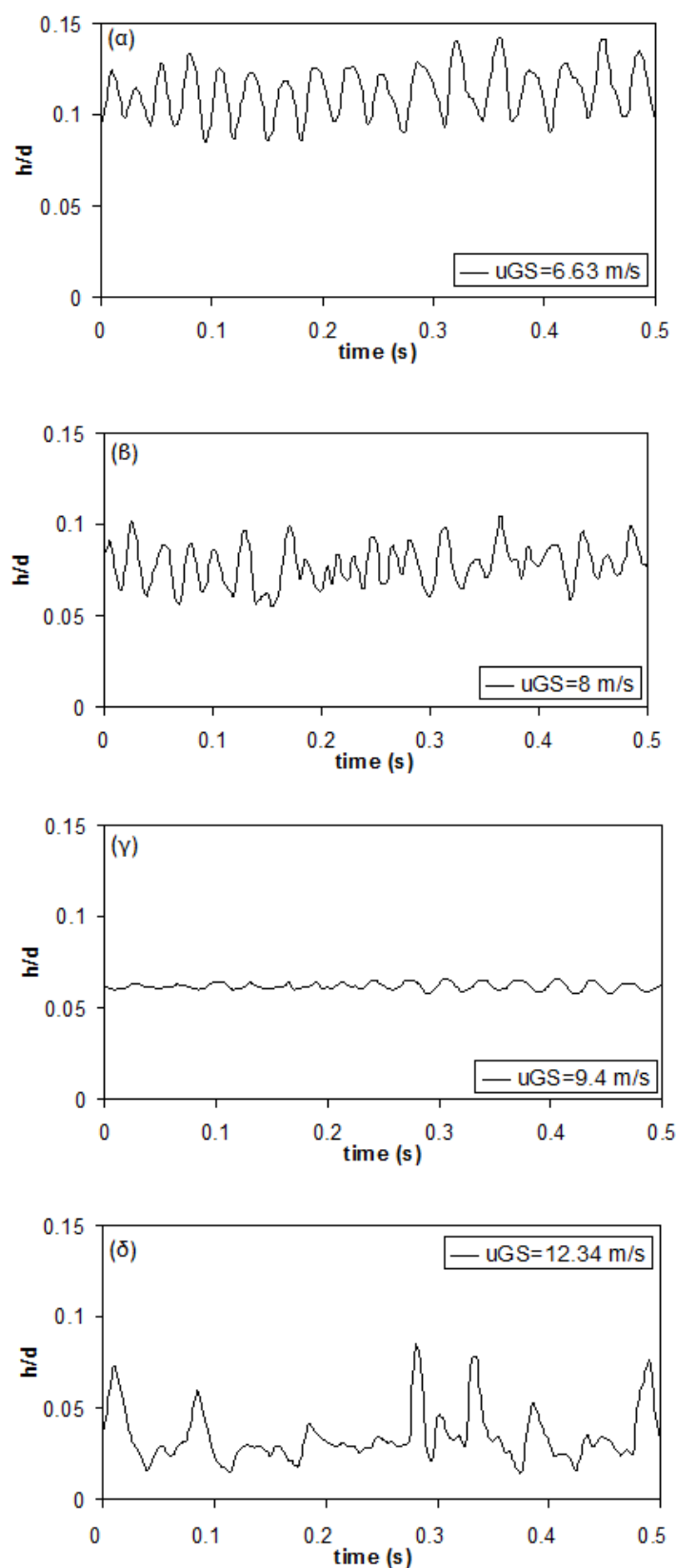




**Σχήμα 8.16** 2-D κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή σε αγωγό με ανωφερή για το σύστημα υδατικού διαλύματος γλυκερίνης (46 cP)-αέρα σε  $u_{LS}=0.00101$  m/s και  $u_{GS}=13.046$  m/s σε κλίση  $\varphi=7^\circ$

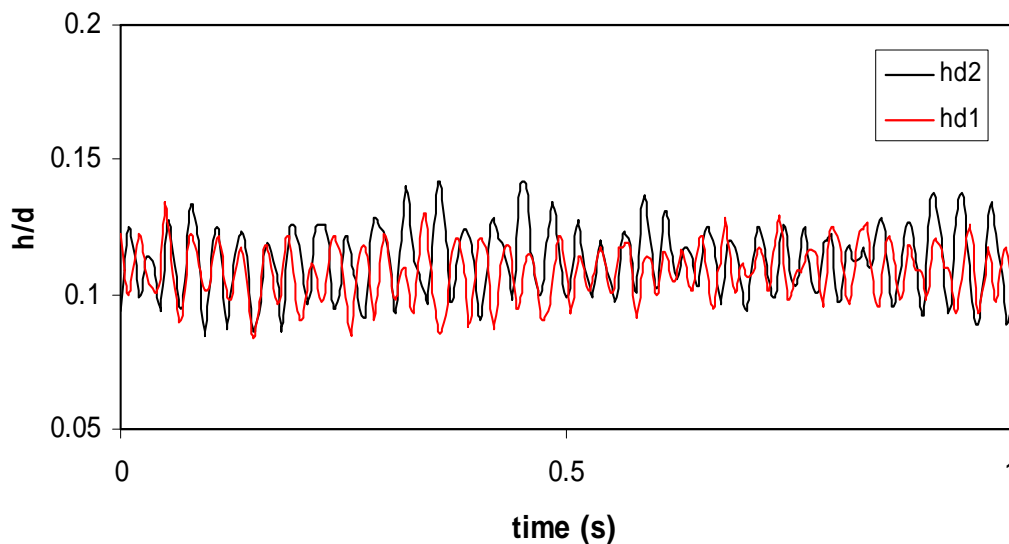
Στο Σχήμα 8.17 παρουσιάζεται αναλυτικά η εξέλιξη των κυμάτων μέσα στη διαστρωματωμένη περιοχή ροής για μικρή κλίση του αγωγού προς τα πάνω. Αμέσως μετά τη μετάπτωση σε διαστρωματωμένη ροή ( $u_{GS}=6.63$  m/s), μέσα στο αγωγό δημιουργούνται κανονικά 2-D κύματα, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 8.17α. Καθώς αυξάνεται η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης ( $u_{GS}=8$  m/s) το πλάτος των κυμάτων αυτών μειώνεται και η συχνότητα τους αυξάνεται (Σχήμα 8.17β), αφού κάποια από τα αρχικά κύματα διαιρούνται σε περισσότερα και μικρότερου πλάτους κύματα. Παράλληλα τα κύματα αρχίζουν να χάνουν την κανονικότητά τους και οι κορυφές του γίνονται πιο απότομες. Με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης ( $u_{GS}=9.4$  m/s), το πλάτος των κυμάτων μειώνεται ακόμα περισσότερο (Σχήμα 8.17γ), παίρνοντας την ελάχιστη τιμή του πριν από τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα. Αμέσως μετά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα ( $u_{GS}=12.34$  m/s), μέσα στον αγωγό δημιουργούνται ακανόνιστα κύματα μεγάλου πλάτους. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι πριν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα το πλάτος των 2-D κυμάτων γίνεται ελάχιστο, ενώ αυξάνεται ξαφνικά αμέσως μετά τη μετάπτωση.

Κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών πειραμάτων με τα υδατικά διαλύματα γλυκερίνης 14 και 46 cP παρατηρήθηκε ότι η συχνότητα των 2-D κυμάτων μειώνεται καθώς αυξάνεται το ιξώδες του συστήματος.



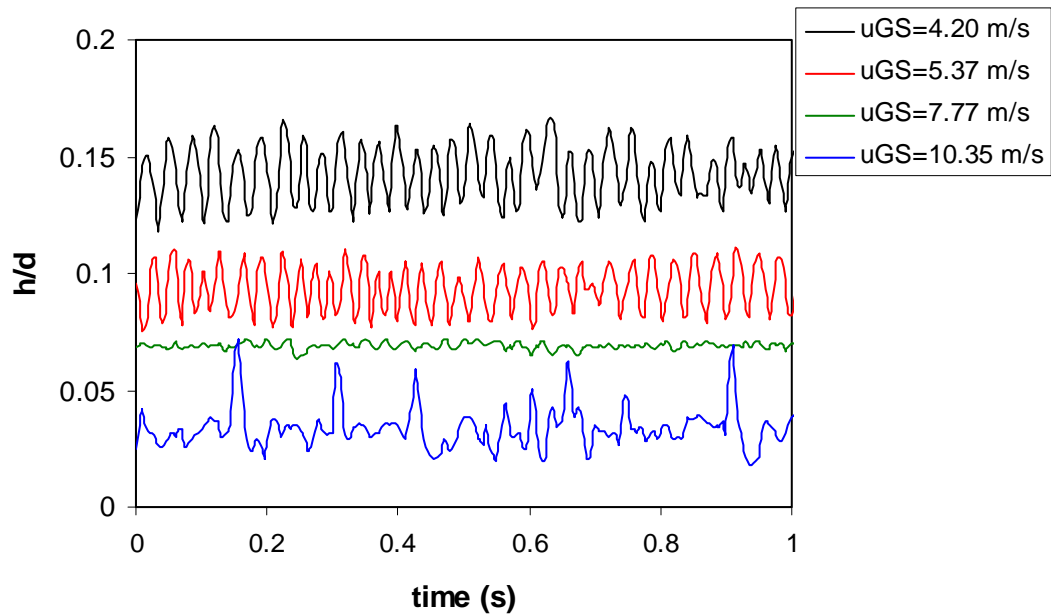
**Σχήμα 8.17** Κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή για το σύστημα νερού-αέρα σε  $u_{LS}=0.0078 \text{ m/s}$  και  $\varphi=0.25^\circ$

Ένα ακόμα ιδιαίτερα χαρακτηριστικό των 2-D κυμάτων είναι πως τα χαρακτηριστικά (πλάτος κύματος και συχνότητα) τους παραμένουν σταθερά καθώς αυτά μεταφέρονται κατά μήκος του αγωγού. Στο Σχήμα 8.18 παρουσιάζεται η χρονική αποτύπωση των κυμάτων αυτών σε δύο διαφορετικά σημεία μέσα στον αγωγό που απέχουν 6.3 m. Η θέση 1 είναι κοντά στην είσοδο του αγωγού (2.2 m από την είσοδο) και η θέση 2 κοντά στην έξοδο του αγωγού (8.5 m από την είσοδο του αγωγού).



**Σχήμα 8.18** Χρονική αποτύπωση των 2-D κυμάτων σε δύο διαφορετικές θέσεις μέσα στον αγωγό για το σύστημα νερού-αέρα σε  $u_{GS}=6.63 \text{ m/s}$  και  $u_{LS}=0.0078 \text{ m/s}$  σε  $\phi=0.25^\circ$

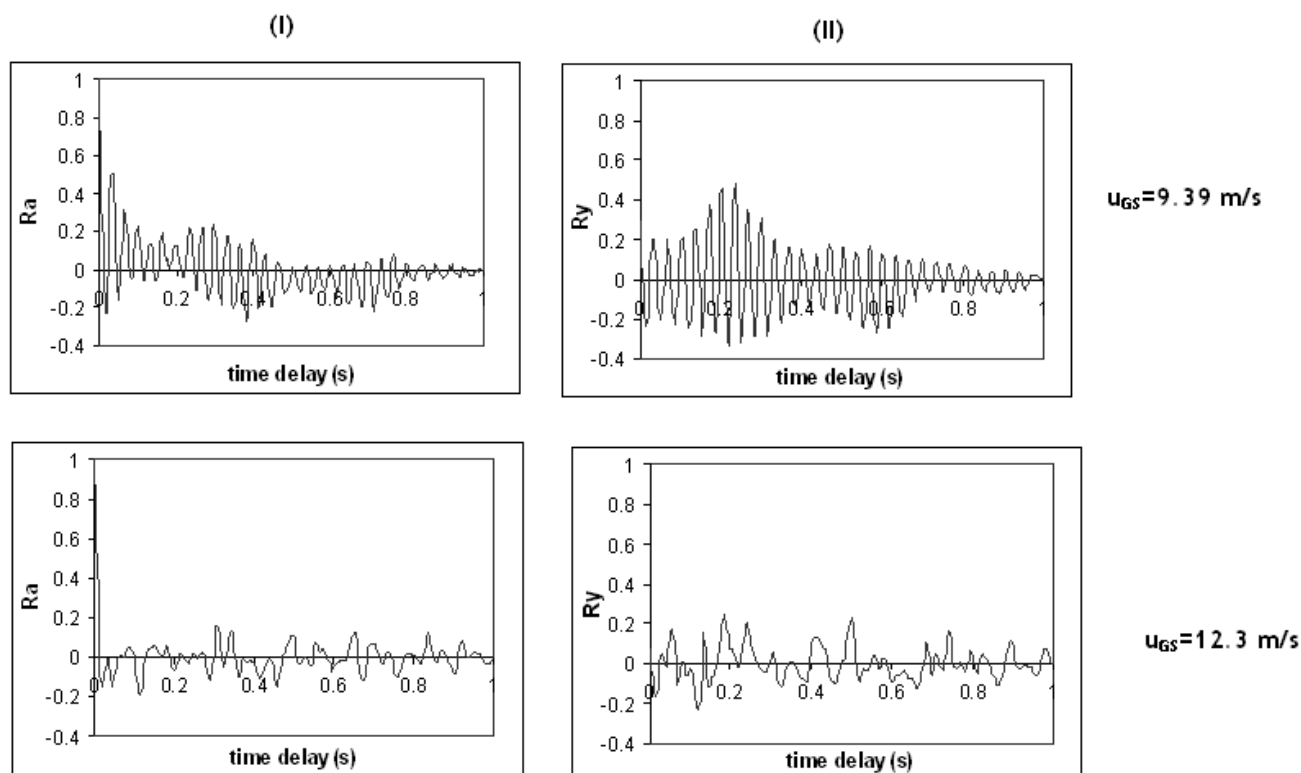
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι και για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  παρατηρήθηκε η ίδια ακολουθία κατά την εξέλιξη των κυμάτων σε όλες τις κλίσεις που μελετήθηκαν. Επίσης, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 8.19 αρχικά μέσα στον αγωγό δημιουργούνται κανονικά 2-D κύματα, το πλάτος των οποίων μειώνεται καθώς αυξάνεται η φαινομενική ταχύτητα της αέριας φάσης. Η τιμή του πλάτους αποκτά την ελάχιστη τιμή της ακριβώς πριν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα. Αμέσως μετά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα το πλάτος των κυμάτων αυξάνεται απότομα.



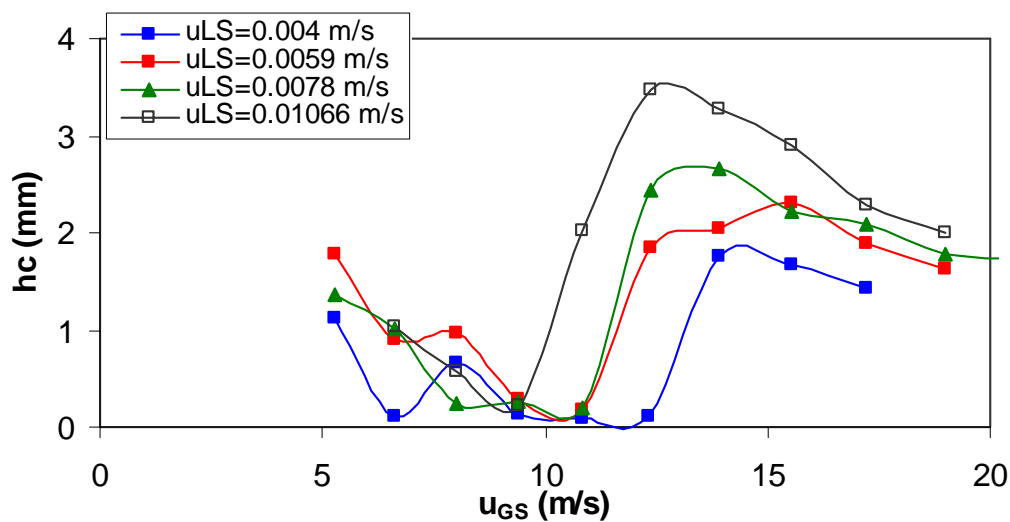
**Σχήμα 8.19** Κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  σε  $u_{LS}=0.004 \text{ m/s}$  και  $\phi=0.55^\circ$

Στο Σχήμα 8.20 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης για τα κύματα 2-D και K-H που ταυτοποιήθηκαν κατά τη ροή σε αγωγό με ανωφερή κλίση. Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης για τα 2-D κύματα είναι μεγάλος, γεγονός που δηλώνει ότι τα κύματα αυτά διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους καθώς κινούνται κατά μήκος του αγωγού. Παράλληλα από τους συντελεστές αυτούς μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την συχνότητα και την ταχύτητα των κυμάτων. Αντίθετα, για τα κύματα K-H από τις συναρτήσεις αυτές δεν προκύπτει καμία πληροφορία, αφού τα κύματα αυτά εξελίσσονται κατά μήκος του αγωγού, δηλαδή το ένα κύμα καθώς κινείται μέσα στον αγωγό προλαβαίνει το άλλο, συγχωνεύονται, έπειτα διασπώνται κ.ο.κ.

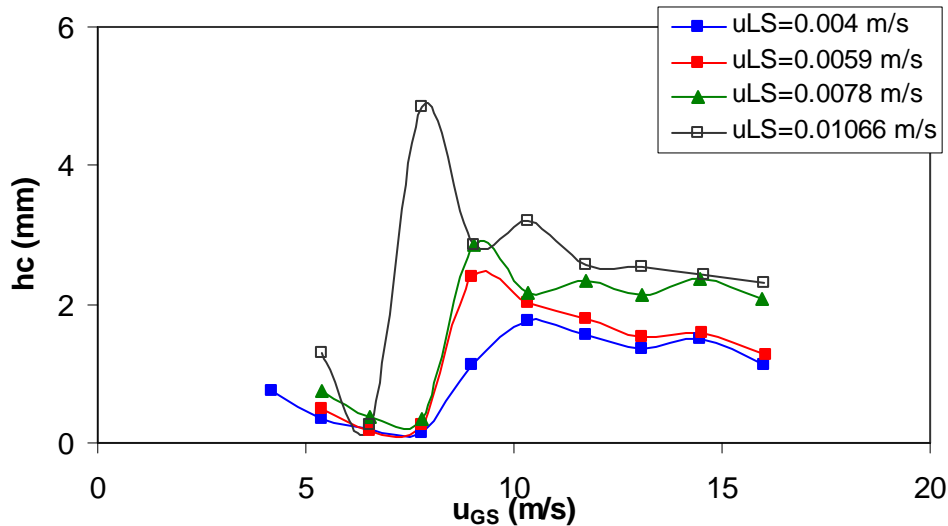
Οι μεταβολές στο πλάτος των 2-D κυμάτων με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, καθώς επίσης και η απότομη αύξηση του πλάτους των κυμάτων μετά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $\text{CO}_2$  παρουσιάζεται πιο αναλυτικά στα Σχήματα 8.21 και 8.22 αντίστοιχα για τέσσερις φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης. Ξεκάθαρα επίσης παρατηρείται και το γεγονός ότι το πλάτος των 2-D κυμάτων γίνεται ελάχιστο πριν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, όπου αυξάνεται απότομα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποτελέσει και ένα αντικειμενικό κριτήριο για την ταυτοποίηση της μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα, πέρα από την οπτική παρατήρηση, που αποτελεί έναν αντικειμενικό τρόπο ταυτοποίησης της μετάπτωσης.



Σχήμα 8.20 Συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης (I) και ετεροσυσχέτισης (II) για 2-D ( $u_{GS}=9.4 \text{ m/s}$ ) και K-H κύματα ( $u_{GS}=12.3 \text{ m/s}$ ) για σύστημα νερού-αέρα σε  $\varphi=0.25^\circ$  και  $u_{LS}=0.0078 \text{ m/s}$

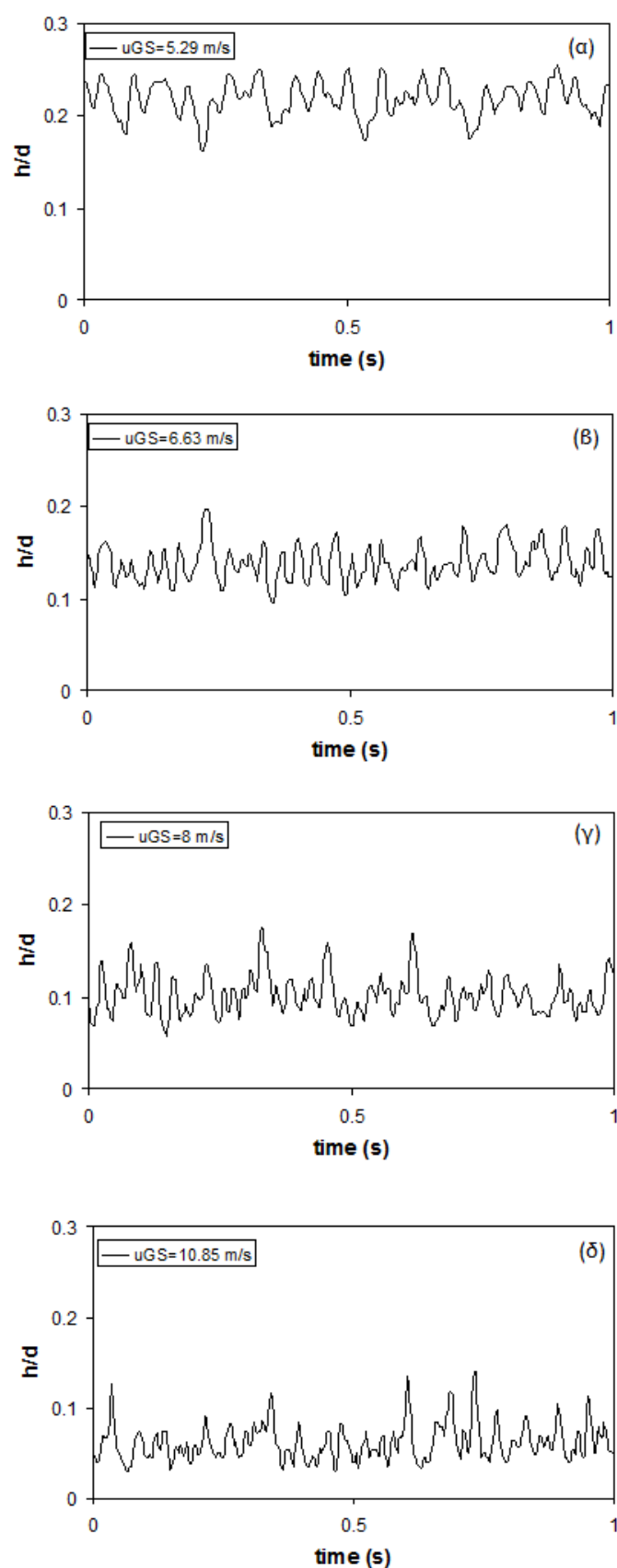


Σχήμα 8.21 Πλάτος των κυμάτων για σύστημα νερού-αέρα σε  $\varphi=0.25^\circ$  με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης



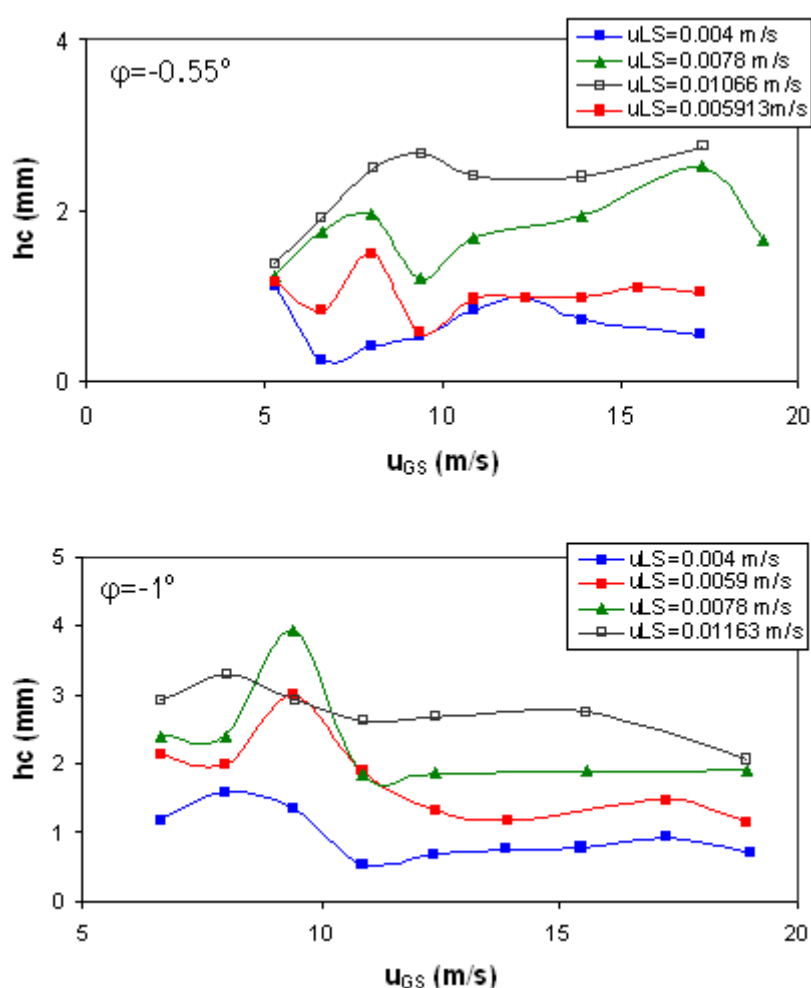
**Σχήμα 8.22** Πλάτος των κυμάτων για σύστημα νερού- $CO_2$  σε  $\varphi=0.55^\circ$  με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα και ταυτοποιήθηκαν και σε αυτή την περίπτωση δύο διαφορετικά είδη κυμάτων 2-D και K-H. Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και για το σύστημα αυτό είναι δε διαφέρουν από αυτά που παρατηρούνται κατά τη ροή σε οριζόντιους αγωγούς. Ωστόσο, η εξέλιξη των 2-D κυμάτων για το σύστημα αυτό είναι διαφορετική από αυτή που παρατηρήθηκε με τα άλλα δύο εξεταζόμενα συστήματα. Αμέσως μετά τη μετάπτωση από ψευδο-διαλείπουσα ροή σε διαστρωματωμένη ροή (Σχήμα 8.23α) παρατηρούνται 2-D κύματα, τα οποία όμως δεν παρουσιάζουν την έντονη κανονικότητα όπως αυτά που παρατηρούνται για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού- $CO_2$  αμέσως μετά τη μετάπτωση. Οι κορυφές τους είναι απότομες και το γεγονός αυτό γίνεται εντονότερο με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Σχήμα 8.23β). Επίσης, το πλάτος τους δε φαίνεται να επηρεάζεται με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας τη αέριας φάσης, ενώ η συχνότητα τους φαίνεται να αυξάνεται. Κοντά στην ταχύτητα μετάπτωσης ( $u_{GS}=8$  m/s, Σχήμα 8.23γ), τα κύματα έχουν χάσει τα χαρακτηριστικά των 2-D κυμάτων και αρχίζουν να αποκτούν αυτά των K-H κυμάτων. Τελικά με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης (Σχήμα 8.23δ) μέσα στον αγωγό δημιουργούνται K-H κύματα. Πρέπει να τονιστεί ότι για ο συγκεκριμένο σύστημα, με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, όχι μόνο δεν παρατηρούνται οι μεταβολές στο πλάτος των κυμάτων που παρατηρήθηκαν για τα άλλα δύο εξεταζόμενα συστήματα, αλλά δεν παρατηρείται επίσης και η απότομη αύξηση του πλάτους των κυμάτων κατά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα.



**Σχήμα 8.23** Κύματα κατά τη διαστρωματωμένη ροή για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε  $u_{LS}=0.0116 \text{ m/s}$  και  $\varphi=-0.55^\circ$

Αναλυτική παρουσίαση του πλάτους των κυμάτων με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα για τέσσερις διαφορετικές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.24 για κλίσεις  $0.55^\circ$  και  $1^\circ$ . Σε καμία κλίση δεν παρατηρείται η συστηματική μείωση του πλάτους των κυμάτων μέχρι την ελάχιστη τιμή του, πριν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, γεγονός που παρατηρήθηκε τόσο για το σύστημα νερού-αέρα όσο και για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$ . Το φαινόμενο αυτό πιθανόν συνδέεται με τη μείωση της επιφανειακής τάσης, οπότε το σύστημα αποσταθεροποιείται και οι διαταραχές ενισχύονται ευκολότερα. Κάτι ανάλογο είχε παρατηρηθεί και κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό, αλλά και κατά η ροή σε αγωγό με κατηφορική κλίση, όπου στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων δημιουργήθηκαν «μοναχικά» κύματα μεγάλου πλάτους.

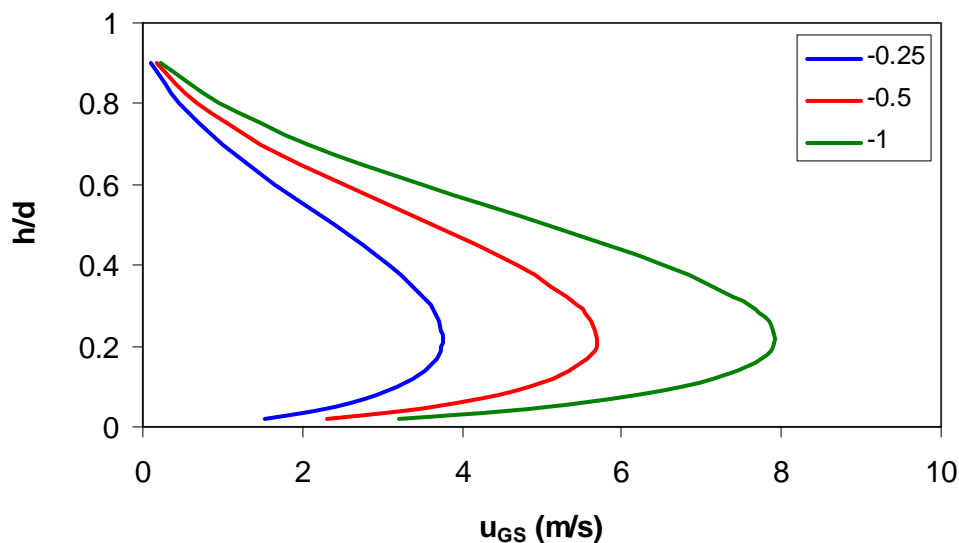


**Σχήμα 8.24** Πλάτος των κυμάτων για σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε  $\phi=0.55$  και  $1^\circ$  με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης



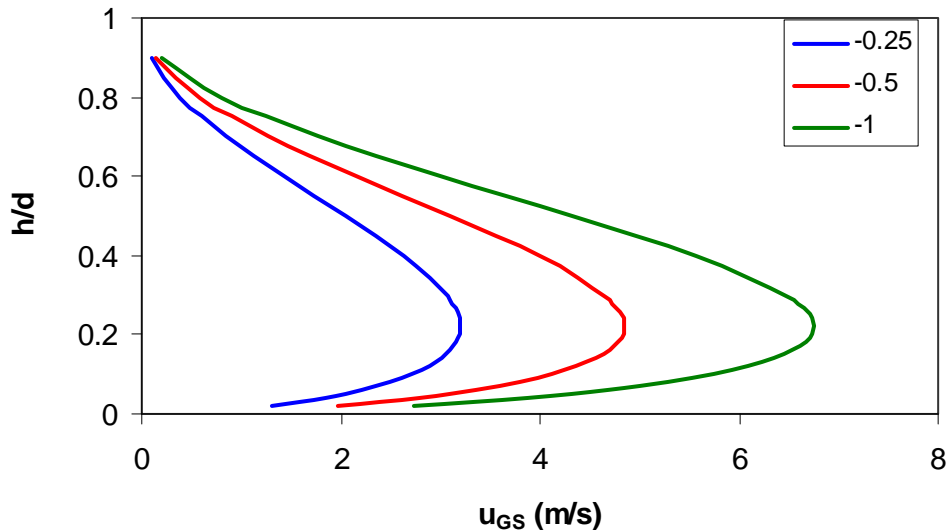
### 8.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Έχει ήδη αναφερθεί ότι κατά τη ροή σε αγωγούς με ανωφερή κλίση προκειμένου να διατηρηθεί η ροή της υγρής φάσης και να μην παρατηρείται αντιστροφή της ροής, ένα μέρος της ενέργειας της αέριας φάσης μεταδίδεται στην υγρή μέσω της διάτμησης στη διεπιφάνεια. Η ταχύτητα της αέριας φάσης κάτω από την οποία η επίδραση της βαρύτητας δεν αντισταθμίζεται από τη διάτμηση της αέριας φάσης και η υγρή φάση συγκεντρώνεται στην είσοδο του αγωγού ονομάζεται ταχύτητα αναστροφής. Στο Σχήμα 8.25 παρουσιάζονται οι ταχύτητες αναστροφής για το σύστημα νερού-αέρα για όλες τις κλίσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης.



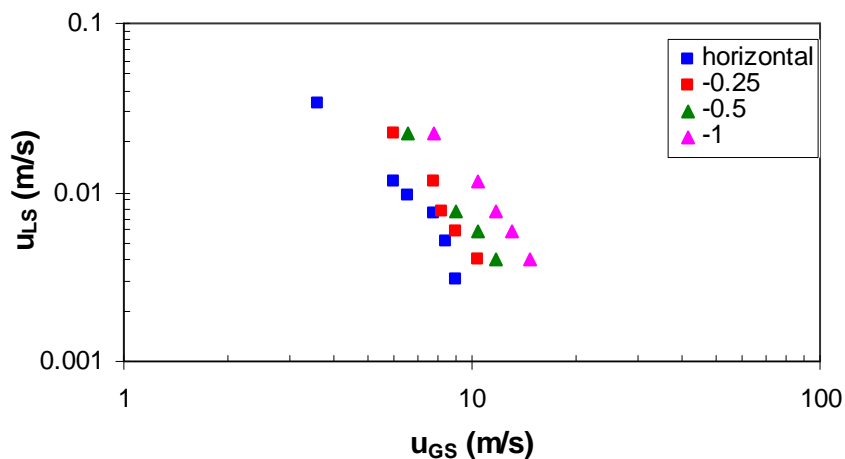
**Σχήμα 8.25** Ταχύτητες αναστροφής για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις

Ο υπολογισμός της ταχύτητας αναστροφής γίνεται από το ισοζύγιο δυνάμεων των δύο φάσεων, ενώ θεωρείται ότι η διατμητική τάση μεταξύ τοιχώματος και υγρής φάσης είναι ίση με το μηδέν ( $\tau_{WL}=0$ ), σύμφωνα με τους Simmons and Hanratty (2001). Κατά συνέπεια με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης μεταβάλλεται και η ταχύτητα αναστροφής, εφόσον μεταβάλλεται η ορμή της αέριας φάσης, ενώ δε μεταβάλλεται με μείωση της επιφανειακής τάσης. Οι ταχύτητες αναστροφής για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.26.



**Σχήμα 8.26** Ταχύτητες αναστροφής για το σύστημα νερού- $\text{CO}_2$  σε διάφορες κλίσεις

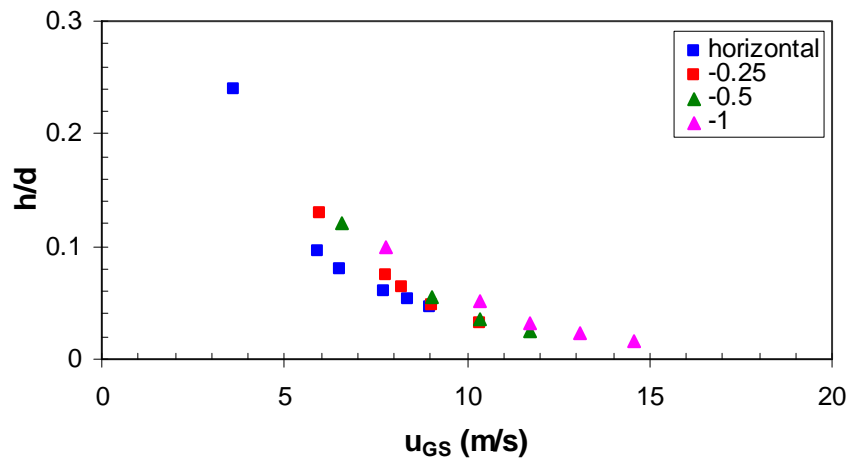
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με όλα τα εξεταζόμενα συστήματα κατά τη ροή σε αγωγό με ανηφορική κλίση παρατηρήθηκε ότι η καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης με αύξηση της κλίσης του αγωγού. Οι πειραματικές τιμές της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης για τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.27, ενώ το πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση στο Σχήμα 8.28.



**Σχήμα 8.27** Πειραματικές ταχύτητες μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις

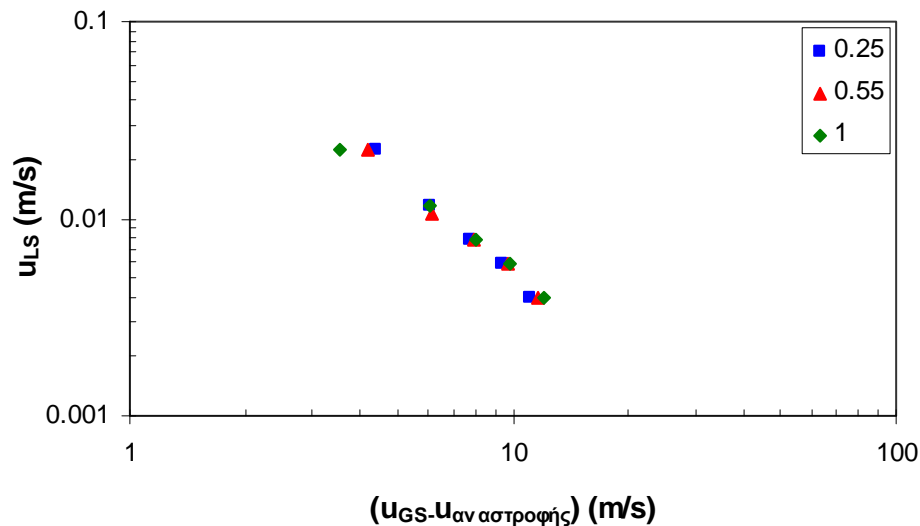
Το πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα φαίνεται να αυξάνεται ελαφρώς με αύξηση της κλίσης του αγωγού. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο

καθώς κατά τη ροή σε αγωγό με ανωφερή κλίση το πάχος της υγρής φάσης αυξάνεται εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας.



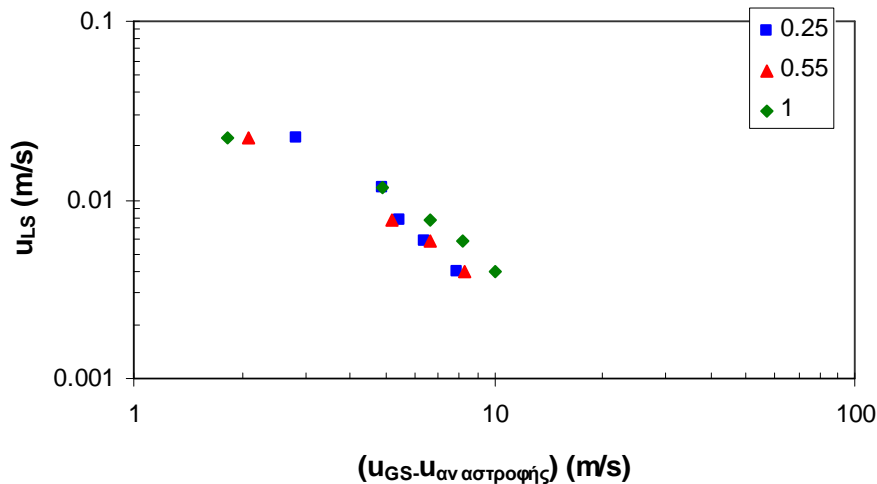
**Σχήμα 8.28** Πάχος της υγρής φάσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις

Παρατηρήθηκε ωστόσο ότι αν υπολογιστεί η ταχύτητα αναστροφής της ροής για την κάθε κλίση και αφαιρεθεί από τη φαινομενική ταχύτητα μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα, τότε οι μεταπτώσεις για κάθε κλίση ταυτίζονται (Σχήμα 8.29).



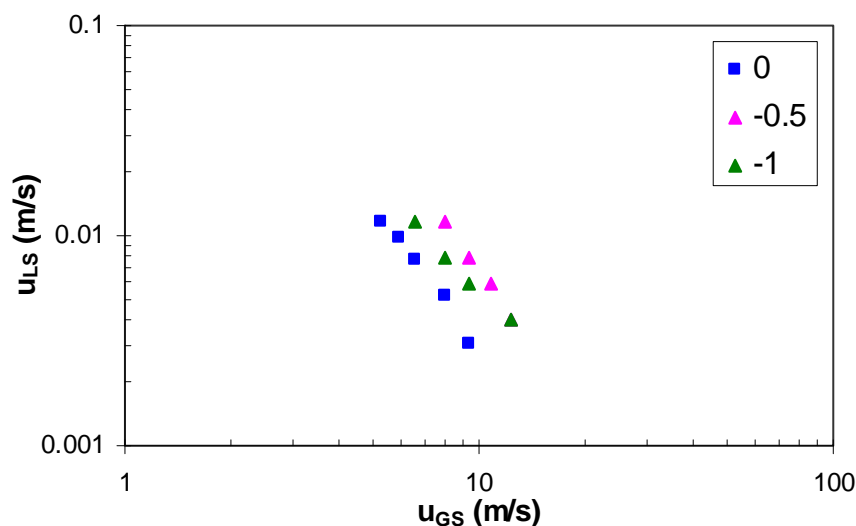
**Σχήμα 8.29** Μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού-αέρα

Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν και για το σύστημα νερού-CO<sub>2</sub> και στο Σχήμα 8.30 παρουσιάζονται οι τροποποιημένες ταχύτητες μετάπτωσης για το σύστημα αυτό.



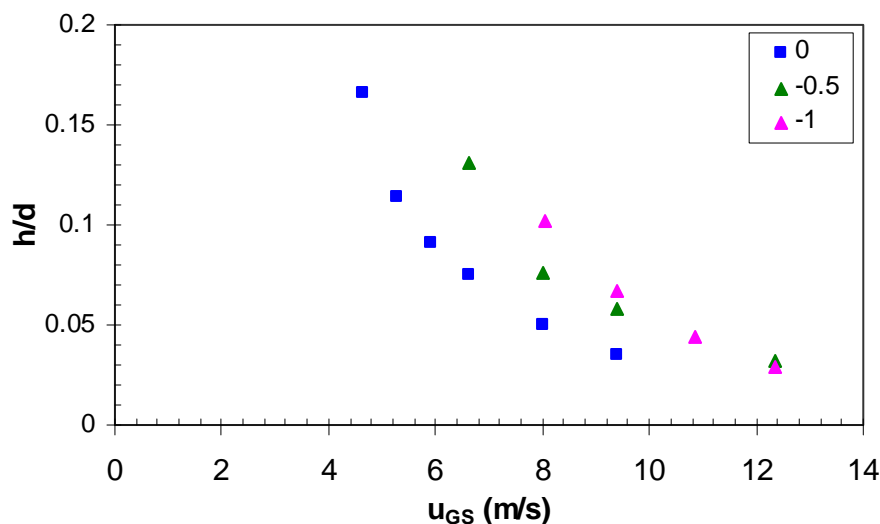
Σχήμα 8.30 Μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα νερού- $CO_2$

Η μετατόπιση της καμπύλης μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης με αύξηση της κλίσης του αγωγού παρατηρείται και για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα. Οι πειραματικές τιμές της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης κατά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.31 ενώ το πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση στο Σχήμα 8.32.



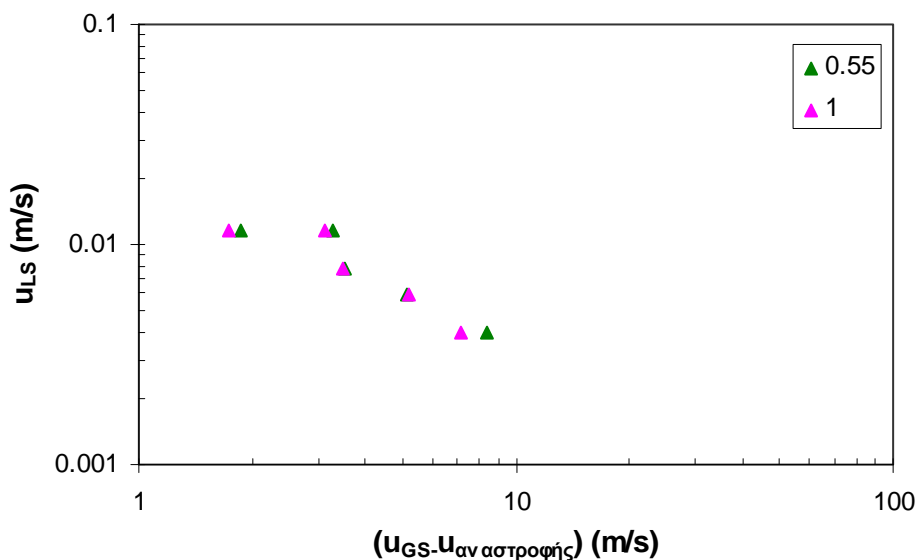
Σχήμα 8.31 Πειραματικές ταχύτητες μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε διάφορες κλίσεις

Με αύξηση της κλίσης του αγωγού αυξάνεται το πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση και για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα.



**Σχήμα 8.32** Πάχος της υγρής φάσης σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε διάφορες κλίσεις

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι αν υπολογιστεί η ταχύτητα αναστροφής της ροής για την κάθε κλίση και αφαιρεθεί από τη φαινομενική ταχύτητα μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα, τότε οι μεταπτώσεις για κάθε κλίση ταυτίζονται (Σχήμα 8.33) και για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα.

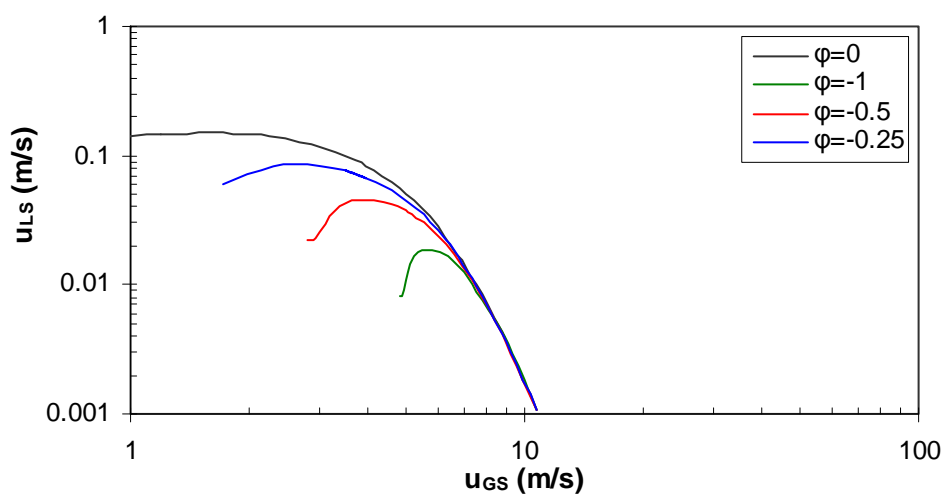


**Σχήμα 8.33** Μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα

Από το γεγονός που επισημάνθηκε παραπάνω, ότι δηλαδή όταν η ταχύτητα αναστροφής αφαιρεθεί από την ταχύτητα μετάπτωσης για ροή με K-H κύματα, τότε οι καμπύλες μεταπτώσεις για όλες τις κλίσεις ταυτίζονται για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα, γίνεται κατανοητό ότι κατά τη ροή σε αγωγό με κλίση προς τα πάνω καθοριστικό ρόλο

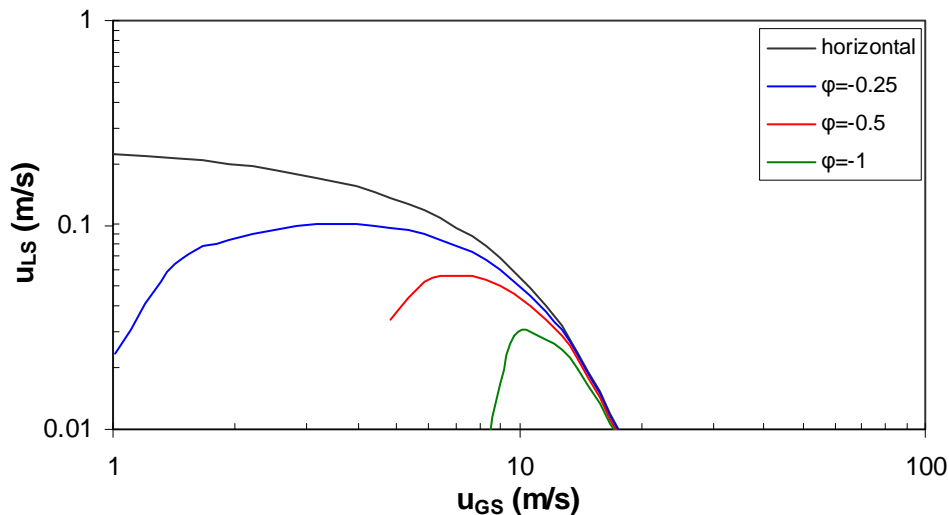
διαδραματίζει η ταχύτητα αναστροφής και κατά συνέπεια η ορμή της αέριας φάσης. Με αύξηση της κλίσης του αγωγού αυξάνεται όπως προαναφέρθηκε η απαιτούμενη από την αέρια φάση ενέργεια, ώστε να μη λάβει χώρα αντιστροφή της ροής. Για το λόγο αυτό παρατηρείται μετατόπιση των καμπύλων μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα και διαστρωματωμένη ροή σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης με αύξηση της κλίσης του αγωγού. Η δημιουργία των K-H κυμάτων στη διεπιφάνεια φαίνεται να επηρεάζεται όχι μόνο από τη γωνία κλίσης του αγωγού, αλλά και από την επιφανειακή τάση, καθώς ήταν η μοναδική καμπύλη μετάπτωσης που επηρεάστηκε με τη μεταβολή της.

Τέλος, στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια περιγραφής της καμπύλης μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα με βάση το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986), όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια. Οι καμπύλες που προκύπτουν για το σύστημα νερού-αέρα για διάφορες κλίσεις του αγωγού παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.34. Αν και οι καμπύλες που προκύπτουν παρουσιάζουν αδυναμία να περιγράψουν σωστά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα, δίνουν ωστόσο σωστή ποιοτική περιγραφή καθώς προσδιορίζουν σωστά το σχήμα «καμπάνας» της διαστρωματωμένης περιοχής με κύματα για ροή σε αγωγούς με ανωφερή κλίση. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.34 το εύρος της διαστρωματωμένης ροής περιορίζεται με αύξηση της κλίσης του αγωγού, πρόβλημα ωστόσο αποτελεί το γεγονός ότι οι καμπύλες δε μετατοπίζονται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αύξησης της κλίσης του αγωγού, γεγονός που παρατηρήθηκε πειραματικά. Αυτό πιθανόν οφείλεται και σε αυτή την περίπτωση ότι η πραγματική ταχύτητα της υγρής φάσης δεν υπολογίζεται σωστά εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας, η οποία αντιστρέφει τη ροή σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης.



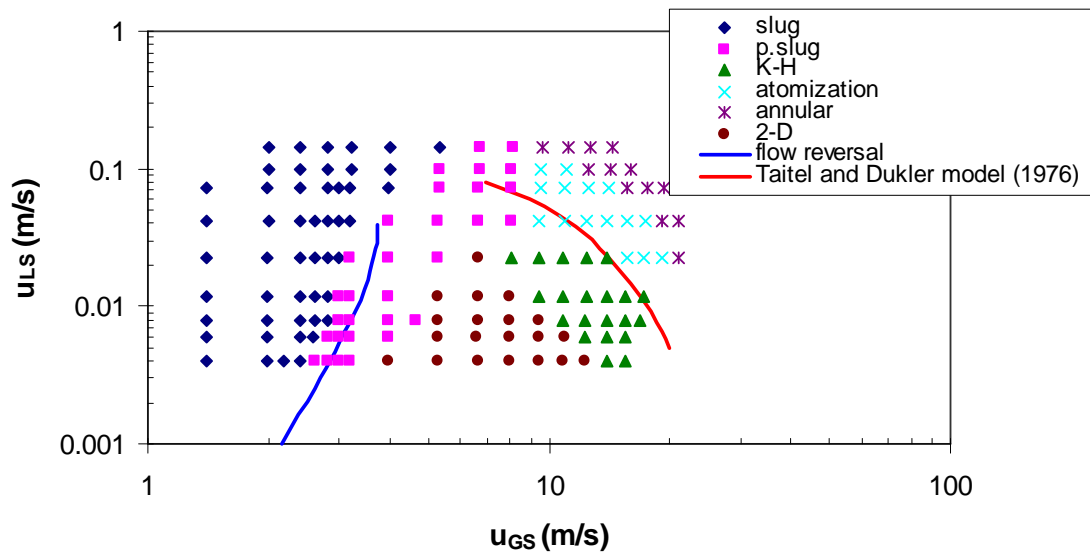
**Σχήμα 8.34** Καμπύλες μετάπτωσης για το σύστημα νερού-αέρα από το τροποποιημένο μοντέλο των Lin and Hanratty (1986a)

Για την περιγραφή της προαναφερθείσας μετάπτωσης οι Barnea et al. (1980a) προτείνουν τη χρήση του κλασσικού μοντέλου των Taitel and Dukler (1976). Οι καμπύλες που προκύπτουν για το σύστημα νερού-αέρα σε διάφορες κλίσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.35. Γίνεται αντιληπτό ότι το μοντέλο αυτό περιγράφει πιο ικανοποιητικά τη διαστρωματωμένη ροή, αφού και πειραματικά διαπιστώθηκε ότι τα όρια της διαστρωματωμένης ροής από τη δεξιά πλευρά του χάρτη καθεστώτων ροής δε μεταβάλλονται με αύξηση της κλίσης του αγωγού.

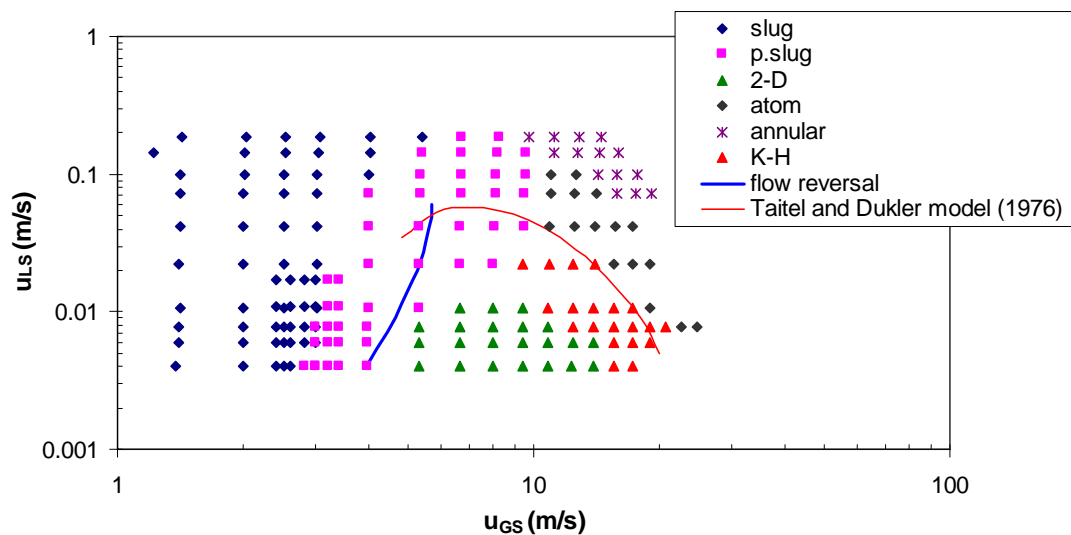


**Σχήμα 8.35** Καμπύλες μετάπτωσης για το σύστημα νερού-αέρα από το κλασσικό μοντέλο των Taitel and Dukler (1976a)

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι αν καμπύλες μετάπτωσης που προκύπτουν από το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά με την καμπύλη για τον υπολογισμό της ταχύτητας αναστροφής, τότε οι πειραματικές μεταπτώσεις σε διαστρωματωμένη ροή μπορούν να περιγραφούν αρκετά ικανοποιητικά. Στα Σχήμα 8.36, 8.37 και 8.38 παρουσιάζονται οι χάρτες καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίσεις  $0.25^\circ$ ,  $0.55^\circ$  και  $1^\circ$  αντίστοιχα.

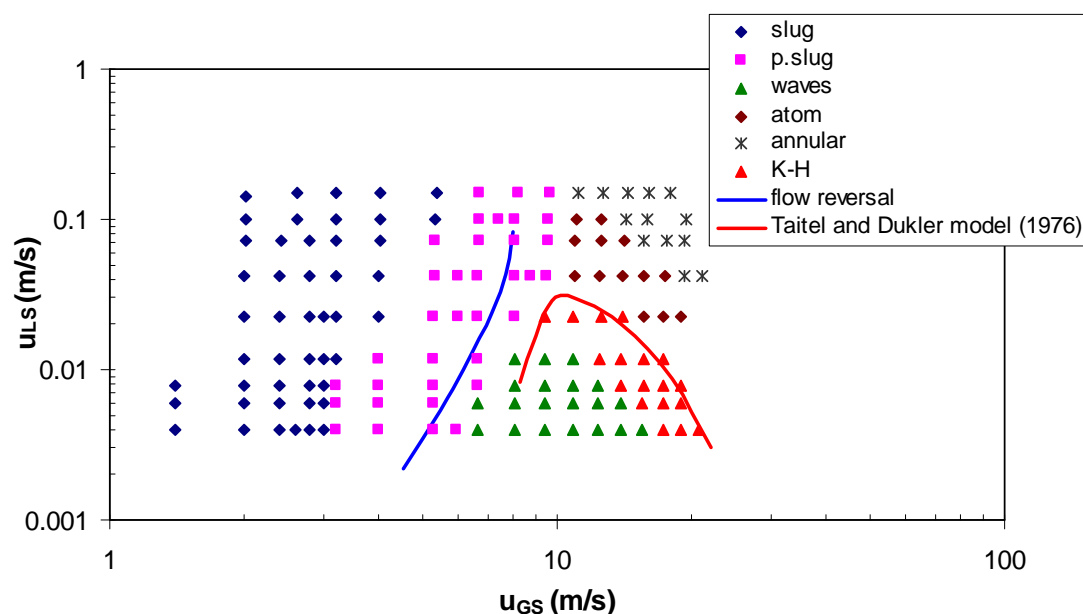


Σχήμα 8.36 Σύγκριση χάρτη καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $0.25^\circ$  με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) και καμπύλη ταχύτητας αναστροφής της ροής



Σχήμα 8.37 Σύγκριση χάρτη καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $0.55^\circ$  με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) και καμπύλη ταχύτητας αναστροφής της ροής





**Σχήμα 8.38** Σύγκριση χάρτη καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού-αέρα σε κλίση  $1^\circ$  με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976) και καμπύλη ταχύτητας αναστροφής της ροής

Από τα Σχήματα 8.36, 8.37 και 8.38 γίνεται φανερό ότι με τη βοήθεια των καμπύλων αυτών μπορούν να περιγραφεί σχετικά ικανοποιητικά η μετάπτωση σε διαστρωματωμένη ροή. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου των Taitel and Dukler (1976) είναι αρκετά ικανοποιητική, ενώ αν και η καμπύλη για τον υπολογισμό της αντιστροφής της ροής δεν περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά τη μετάπτωση σε διαστρωματωμένη ροή, δίνει ωστόσο μια σωστή τάση.

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 9

---

---

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

### 9.1 Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων στις μεταπτώσεις στα καθεστώτα ροής

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις μεταπτώσεις στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής. Μελετήθηκε η επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης (με τη χρήση  $\text{CO}_2$  και He) και της επιφανειακής τάσης με τη χρήση υδατικού διαλύματος βουτανόλης.

Η μεταβολή των ιδιοτήτων αυτών αποδείχθηκε ότι επηρεάζει τις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής με παρόμοιο τρόπο τόσο για ροή σε οριζόντιους αγωγούς, όσο και για αγωγούς με αρνητική κλίση. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώθηκε πειραματικά ότι η αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης μετατοπίζει τις μεταπτώσεις της διαστρωματωμένης ροής σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Μείωση της πυκνότητας της αέριας φάσης είχε ακριβώς τα αντίθετα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό εξάλλου είναι αναμενόμενο, καθώς με μεταβολή της πυκνότητας της αέριας φάσης μεταβάλλεται η ποσότητα της ορμής που μεταφέρεται από την αέρια φάση στην υγρή για τις ίδιες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η μείωση της επιφανειακής τάσης αποσταθεροποιεί το εξεταζόμενο σύστημα μετακινώντας τις καμπύλες μετάπτωσης της διαστρωματωμένης ροής σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η επιφανειακή τάση αποτελεί σταθεροποιητική δύναμη κατά την ανάλυση ευστάθειας K-H.

Με τη βοήθεια των νέων πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν για την επίδραση της πυκνότητας της αέριας φάσης και της επιφανειακής τάσης οι βελτιώθηκαν οι ημι-

θεωρητικές εξισώσεις που είχαν προταθεί σε παλιότερη εργασία (Τζώτση, 2007) για την περιγραφή της μετάπτωσης σε ροή με 2-D και K-H κύματα. Από τη σύγκριση των πειραματικών καμπύλων μετάπτωσης με τις ημι-θεωρητικές καμπύλες που προτείνονται στην παρούσα εργασία (Κεφ. 5) διαπιστώθηκε πολύ καλή συμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα με τις προτεινόμενες καμπύλες για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα για τη ροή σε οριζόντιο αλλά και κεκλιμένο αγωγό. Ύστερα από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν στην παρούσα εργασία, αλλά και δεδομένων της βιβλιογραφίας, προτάθηκε μία νέα συσχέτιση για την έναρξη των διδιάστατων κυμάτων που έχει ως βάση την προσέγγιση των Taitel & Dukler (1976). Η ημι-θεωρητική αυτή συσχέτιση λαμβάνει υπόψη της και την επίδραση της επιφανειακής τάσης, καθώς προέκυψε πειραματικά ότι η ιδιότητα αυτή επηρεάζει έντονα τη μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα. Τέλος, προτάθηκαν και βελτιωμένοι συσχετισμοί για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής στη διεπιφάνεια και έγινε αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συνολικού μοντέλου της παρούσας εργασίας, καθώς και σύγκριση με άλλα μοντέλα που προτείνονται στη βιβλιογραφία (π.χ. Chen et al. 1997). Διαπιστώθηκε ότι το συνολικό μοντέλο που προτείνεται στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο καλύτερη αποτελεσματικότητα.

Αναφορικά με τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σε όλα τα εξεταζόμενα συστήματα παρατηρήθηκε ότι η μετάπτωση αυτή δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων που εξετάστηκαν. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία και με το μοντέλο των Taitel and Dukler (1976α) και το τροποποιημένο μοντέλο των Lin-Hanratty, τα οποία, για σταθερό ιξώδες του υγρού, δεν προβλέπουν εξάρτηση της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή από τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών. Διαπιστώθηκε επίσης ότι το πάχος της υγρής φάσης κατά τη μετάπτωση αυτή παραμένει σχεδόν σταθερό για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα, γεγονός που φανερώνει ότι καθοριστικός παράγοντας για τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή είναι το «κρίσιμο» πάχος της υγρής φάσης. Οι υγρές μάζες (slugs) σχηματίζονται όταν το ύψος της υγρής φάσης υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, έτσι ώστε το πλάτος των διαταραχών που υπάρχουν στη διεπιφάνεια να αυξηθεί τόσο που να φράξει στιγμιαία η διατομή του αγωγού.

Παράλληλα η μετάπτωση από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή μετατοπίζεται με μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων με τρόπο παρόμοιο με αυτό της διαστρωματωμένης ροής. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι τόσο με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης όσο και με μείωση της επιφανειακής τάσης η μετάπτωση σε ψευδο-διαλείπουσα ροή μετατοπίζεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις μεταπτώσεις στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η μετάπτωση αυτή επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα. Η ψευδο-διαλείπουσα ροή

ουσιαστικά είναι K-H κύματα με μεγαλύτερο πλάτος και η εμφάνιση της εξαρτάται και από τη διατομή του αγωγού. Με αύξηση της διαμέτρου του αγωγού αναμένεται η περιοχή της ψευδο-διαλείπουσας ροής να συρρικνωθεί σημαντικά, επειδή το μεγαλύτερο ύψος της αέριας φάσης δεν θα επιτρέπει τις μεγάλες διαταραχές να φτάνουν μέχρι το πάνω μέρος του αγωγού και να φράζουν στιγμιαία της διατομή του αγωγού. Η ψευδο-διαλείπουσα ροή ίσως θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί ως συνέχεια της ροής με K-H κύματα μέχρι το σημείο εκείνο που το επιτρέπει η διάμετρος του αγωγού.

Για τα συστήματα νερού-αέρα και νερού-CO<sub>2</sub> διαπιστώθηκε ότι πριν από τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα στη διεπιφάνεια σχηματίζονται 2-D κύματα μικρού σχετικά πλάτους με χαρακτηριστικές συχνότητες περίπου 30 Hz, ενώ τα ακανόνιστα K-H κύματα που ακολουθούν έχουν αρχικά αρκετά μεγαλύτερο πλάτος. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει ένα αντικειμενικό κριτήριο για την ανίχνευση της μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα. Η παρουσία των κυμάτων αυτών δεν ήταν έντονη για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα, καθώς τα χαρακτηριστικά τους είναι διαφοροποιημένα σε σχέση με αυτά των κυμάτων για τα άλλα δύο εξεταζόμενα συστήματα.

## 9.2 Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων στα χαρακτηριστικά των κυμάτων

Σε όλα τα εξεταζόμενα συστήματα και για όλες τις κλίσεις του αγωγού που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε ότι τα χαρακτηριστικά των 2-D κυμάτων δε μεταβάλλονται με αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης. Ωστόσο, παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη μεταβολή των χαρακτηριστικών των κυμάτων αυτών με τη μείωση της επιφανειακής τάσης για τη ροή τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κεκλιμένο αγωγό. Για το σύστημα χαμηλής επιφανειακής τάσης στην οριζόντια ροή δεν παρατηρήθηκαν κανονικά 2-D κύματα, αλλά «μοναχικά» κύματα, το πλάτος των οποίων μειώνεται με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, η συχνότητα τους αυξάνεται και συγχωνεύσεις λαμβάνουν χώρα.

Η τροποποίηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων με τη μείωση της επιφανειακής τάσης είναι εντονότερη στην κατωφερή ροή. Στη ροή αυτή, το πλάτος των 2-D κυμάτων που παρατηρούνται στο σύστημα διαλύματος βουτανόλης-αέρα είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το πλάτος των αντίστοιχων κυμάτων στα άλλα δύο εξεταζόμενα συστήματα, ενώ το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει με τα K-H κύματα.

Κατά τη ροή σε αγωγό με ανωφερή κλίση η μείωση της επιφανειακής τάσης είχε ως συνέπεια τα 2-D κύματα που εμφανίζονται να μην είναι τόσο κανονικά όσο για τις περιπτώσεις των συστημάτων νερού-αέρα και νερού-CO<sub>2</sub>, ενώ με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης, αν και αυξάνεται η συχνότητα τους, δε μειώνεται το πλάτος τους και οι κορυφές τους γίνονται πιο απότομες.

Τέλος, σημειώνεται ότι τα κύρια χαρακτηριστικά των K-H κυμάτων παρέμειναν αμετάβλητα για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα και για όλες τις κλίσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

### 9.3 Ροή με κατωφερή κλίση του αγωγού

Κατά την κατωφερή ροή ο χάρτης καθεστώτων ροής είναι αντίστοιχος με αυτόν για ροή σε οριζόντιους αγωγούς με μετατοπισμένα τα όρια ορισμένων καθεστώτων ροής. Με αύξηση της κλίσης του αγωγού η μετάπτωση σε ροή με 2-D κύματα γίνεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, ενώ για κλίση  $\varphi=1^\circ$  (και για τις παροχές της υγρής φάσης που εξετάστηκαν) δεν παρατηρείται η λεία διαστρωματωμένη ροή. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη δράση της βαρύτητας, καθώς τα πρώτα κύματα που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια οφείλονται στη δράση της βαρύτητας και όχι στη διάτμηση της αέριας φάσης. Η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης, γεγονός που επίσης οφείλεται στη δράση της βαρύτητας, καθώς για ροή σε αγωγούς με κατωφερή κλίση το ύψος της υγρής φάσης μειώνεται και κατά συνέπεια μεγαλύτερες παροχές της υγρής φάσης απαιτούνται για τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Τέλος, η μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα δε μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης και το πάχος της υγρής στιβάδας φάσης κατά τη μετάπτωση παραμένει σταθερό για όλες τις κλίσεις που εξετάστηκαν. Ωστόσο, μετατοπίζεται σε ελαφρώς μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της υγρής φάσης.

Η μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών κατά τη ροή σε αγωγούς με κλίση προς τα κάτω επηρεάζει τις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής με τρόπο παρόμοιο με αυτό κατά τη ροή σε οριζόντιο αγωγό όπως έχει ήδη προαναφερθεί. Η μεταπτώσεις σε ροή με K-H κύματα περιγράφεται και για την περίπτωση αυτή με επιτυχία με τις ημι-θεωρητικές συσχετίσεις που προτείνονται στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Παράλληλα, έγινε προσπάθεια περιγραφής της μετάπτωσης από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα με την επέκταση του τροποποιημένου μοντέλου των Lin and Hanratty (1986) για μικρές κατωφερείς κλίσεις.

### 9.4 Ροή με ανωφερή κλίση του αγωγού

Η μορφή του χάρτη καθεστώτων σε ανωφερή ροή τροποποιείται σημαντικά σε σχέση με τη ροή σε οριζόντιο αγωγό. Για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης η επίδραση της βαρύτητας τείνει να συγκεντρώνει την υγρή φάση στην είσοδο του αγωγού, με αποτέλεσμα να επικρατεί η διαλείπουσα ροή. Η μετάπτωση στη διαστρωματωμένη ροή λαμβάνει χώρα σταδιακά, αφού προηγηθεί μια περιοχική ψευδο-διαλείπουσας ροή, ενώ όπως

έχει ήδη αναφερθεί η διαστρωματωμένη ροή περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή παροχών σε σχήμα καμπάνας. Σε αυτή τη μικρή περιοχή ταυτοποιήθηκαν πάλι δύο διαφορετικοί τύποι κυμάτων, τα 2-D και τα K-H κύματα, τα οποία διατηρούν εν γένει τα περισσότερα χαρακτηριστικά των αντίστοιχων κυμάτων που δημιουργούνται σε οριζόντια ροή. Με αύξηση της κλίσης του αγωγού οι μεταπτώσεις σε όλα τα καθεστώτα ροής μετατοπίζονται σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, ενώ καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει και η ταχύτητα αναστροφής, η απαιτούμενη δηλαδή ταχύτητα της αέριας φάσης ώστε να μην πραγματοποιείται αναστροφή της υγρής φάσης. Παρατηρήθηκε ότι αν η ταχύτητα αναστροφής αφαιρεθεί από τις ταχύτητες μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα, τότε οι μεταπτώσεις αυτές συμπίπτουν για όλες τις κλίσεις που εξετάστηκαν.

Τέλος, τόσο η αύξηση της πυκνότητας της αέριας φάσης όσο και η μείωση της επιφανειακής τάσης μετατοπίζουν τις μεταπτώσεις σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Κατά τη μελέτη των μεταπτώσεων για το σύστημα υδατικού διαλύματος κανονικής βουτανόλης-αέρα γίνεται ξεκάθαρη η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων στη μετατόπιση των μεταπτώσεων, καθώς για το σύστημα αυτό δεν επηρεάζεται η ταχύτητα αναστροφής της ροής και, κατά συνέπεια, δε μετατοπίζεται η μετάπτωση από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή. Μετατοπίζεται μόνο η καμπύλη μετάπτωσης σε ροή με K-H κύματα. Οι ημι-θεωρητικές σχέσεις που προτείνονται στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο βρίσκουν εφαρμογή και για τη ροή σε αγωγό με ανωφερή κλίση περιγράφοντας ικανοποιητικά τη μετάπτωση σε ροή με K-H κύματα.

### 9.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με την παρούσα διατριβή επιχειρήθηκε η διαλεύκανση της επίδρασης ορισμένων φυσικών ιδιοτήτων στο χάρτη των καθεστώτων ροής και στα χαρακτηριστικά των κυμάτων στη διαστρωματωμένη ροή σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς. Επίσης, επιχειρήθηκε η βελτίωση υφιστάμενου μοντέλου για την πρόβλεψη της πτώσης πίεσης και της συγκράτησης στη διαστρωματωμένη ροή, η οποία έγινε δυνατή με τη βοήθεια των δεδομένων που συλλέχθηκαν σε αυτήν τη διατριβή. Είναι προφανές ότι καμία ερευνητική μελέτη δε μπορεί να θεωρηθεί ότι «ολοκληρώνεται» πλήρως, ενώ κατά τη διάρκεια μιας ερευνητικής εργασίας είναι σίγουρο ότι θα γεννηθούν σχεδόν πάντα νέα ερωτήματα που αναζητούν απαντήσεις. Ορισμένες προτάσεις για πιθανή ενασχόληση με θέματα που άπτονται της παρούσας διατριβής είναι οι ακόλουθες:

- Συστηματικότερη μελέτη της επίδρασης της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης με χρήση διαλυμάτων που θα κάλυπταν μεγάλο εύρος τιμών της (από 25 έως 60

mN/m), ώστε να διαπιστωθεί με μεγαλύτερη σαφήνεια και ακρίβεια η επίδραση της ιδιότητας αυτής στα χαρακτηριστικά των κυμάτων και στις διάφορες μεταπτώσεις.

- Μελέτη της επίδρασης των τριβομειωτικών ουσιών (διαλυμάτων πολυμερών), οι οποίες όχι μόνο οδηγούν στη μείωση της πτώσης πίεσης του συστήματος, αλλά μετατοπίζουν σημαντικά και ορισμένες μεταπτώσεις στα χαρακτηριστικά των κυμάτων και στις διάφορες μεταπτώσεις κατά τη ροή σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς.
- Η μελέτη της επίδρασης επιφανειοδραστικών ουσιών στα χαρακτηριστικά των κυμάτων και στις διάφορες μεταπτώσεις κατά τη ροή σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς, αφού είναι γνωστό ότι λόγω της αυξημένης επιφανειακής ελαστικότητας αναστέλλεται η δημιουργία διδιάστατων κυμάτων. Στην ίδια κατεύθυνση θα μπορούσε να γίνει η χρήση τριβομειωτικών ουσιών (διαλυμάτων πολυμερών), οι οποίες όχι μόνο οδηγούν στη μείωση της πτώσης πίεσης του συστήματος, αλλά μετατοπίζουν σημαντικά και ορισμένες μεταπτώσεις.
- Η μελέτη της επίδρασης της διαμέτρου του αγωγού, πηγαίνοντας κυρίως προς μικρότερες διαμέτρους. Οι μικρές διαμέτροι ευνοούν τη δημιουργία διαλείπουσας και ψευδο-διαλείπουσας ροής.
- Η χρήση μη παρεμβατικών τεχνικών στη μέτρηση των χαρακτηριστικών της υγρής στρώδας, όπως για παράδειγμα με τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, αφού βεβαίως λυθεί το πρόβλημα της εναρμόνισης του δείκτη διάθλασης του νερού με το δείκτη του υλικού του αγωγού, και με τη μέθοδο της ταχυμετρίας σωματιδίων (PIV).

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Andritsos, N., Tzotzi, C. and Hanratty, T.J

*'Interfacial shear stress in wavy stratified gas-liquid two-phase flow'*

5th European Thermal-Sciences Conference, 18-22 May 2008, Eindhoven, The Netherlands.

Andritsos, N., Williams, L. and Hanratty, T.J.

*'Effect of Liquid Viscosity on the Stratified-Slug Transition in Horizontal Pipe Flow'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 15, p.p. 877-892, 1989

Abdul-Majeed, G.H.

*'Liquid Slug Holdup in Horizontal and Slightly Inclined Two-Phase Slug Flow'*

Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol 27, p.p. 27-32, 2000

Andreussi, P. and Bendiksen, K.

*'An Investigation of Void Fraction in Liquid Slugs for Horizontal and Inclined Gas-Liquid Pipe flow'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 15, p.p. 937-946, 1989

Andreussi, P. and Persen, L.N.

*'Stratified Gas-Liquid Flow in Downwardly Inclined Pipes'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 13, p.p. 565-575, 1987

Andritsos, N. and Hanratty, T.J.

*'Influence of Interfacial Waves in Stratified Gas-Liquid Flow'*

A.I.Ch.E Journal, Vol 33, pp 444-454, 1987b

Andritsos, N. and Hanratty, T.J.

*'Interfacial Instabilities for Horizontal Gas-Liquid Flows in Pipelines'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 13, pp 583-603, 1987a

Andritsos, N.

*'Effect of pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow'*

Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1986

Andritsos, N.

*'Statistical analysis of waves in horizontal stratified gas-liquid flow'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol. 18, p.p. 465-473, 1992

Badie, S., Hale C.P, Lawrence, C.J and Hewitt, G.F

*'Pressure gradient and holdup in horizontal two-phase gas-liquid flows with low liquid loading'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 26, p.p.1525-1543, 2000



**Baker, O.**

*'Simultaneous Flow of Oil and Gas'*

Oil and Gas Journal, Vol 53, pp 185-195, 1954

**Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y.**

*'Flow Pattern Characterization in Two-Phase Flow by Electrical Conductance Probe'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol. 6, p.p. 387-397, 1980b

**Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E.**

*'Flow Pattern Transition for Downward Inclined Two Phase Flow; Horizontal to Vertical'*

Chemical Engineering Science, Vol 5, p.p. 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, p.p. 217-225, 1980a

**Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E.**

*'Gas-Liquid Flow in Inclined Tubes: Flow Pattern Transitions for Upward Flow'*

Chemical Engineering Science, Vol 40, p.p. 131-136, 1985

**Beggs, H.D. and Brill, J.P.**

*'A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes'*

Journal of Petroleum Technology, Vol 25, p.p. 607-617, 1973

**Bendat J.S. and Piersol A.J.**

*'Random Data: Analysis and Measurements Procedures'*

Wiley and Sons, Inc., New York, 1971

**Benjamin T.B .**

*'Wave formation in laminar flow down an inclined plane'*

J. Fluid Mech., 2, 554-574, 1957

**Brauner, N. and Maron, M.**

*'Analysis of Stratified/Non Stratified Transitional Boundaries in Inclined Gas-Liquid Flows'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 18, p.p. 541-557, 1992

**Chakrabarti, D.P., Das, G. and Das, P.K.**

*'Identification of Stratified Liquid-Liquid Flow Through Horizontal Pipes by a Non-Intrusive Optical Probe'*

Chem. Engineering Science, Vol. 62, p.p. 1861-1876, 2007

Chen, T., Cai, X.D., Brill, J.P.

*'Gas-Liquid Stratified-Wavy Flow in Horizontal Pipelines'*

Journal of Energy Resources Technology, Vol 119, pp 209-216, 1997

Dukler, A.E. and Hubbard, M.G.

*'The Characterization of Flow Regimes for Horizontal Two-Phase Flow'*

Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics Inst. P.p. 100-121, Stanford, CA, 1966

Funada, T. and Joseph, D.D.

*'Viscous Potential Flow Analysis of Kelvin-Helmholtz Instability in a Channel'*

J. Fluid Mech. Vol 445, p.p. 263-283, 2001

Johnson, G.W., Bertelsen, A.F. and Nossen, J

*'An Experimental Investigation of Roll Waves in High Pressure Two-Phase Inclined Pipes'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol. 35, p.p. 924-932, 2009

Grolman, E. and Fortuin, M.H.

*'Gas-Liquid Flow in Slightly Inclined Pipes'*

Chemical Engineering Science, Vol 52, p.p. 4461-4471, 1997

Grolman, E., Commandeur, N.C.J., de Baat, E.C. and Fortuin, J.M.H.

*'Wavy-to-Slug Flow Transition in Slightly Inclined Gas-Liquid Pipe Flow'*

A.I.Ch.E Journal, Vol 42, p.p. 901-909, 1996

Guo, L.J., Li, G.J. and Chen X.J.

*'A Linear and Non-Linear Analysis on Interfacial Instability Of Gas-Liquid Two-Phase Flow Through a Circular Pipe, International'*

Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 45, p.p. 1525-1534, 2002

Hand, N.P., Spedding, P.L. and Ralph, S.J.

*'The Effect of Surface Tension on Flow Pattern, Holdup and Pressure drop During Horizontal Air-Water Pipe Flow at Atmospheric Conditions'*

Chemical Engineering Journal, Vol 48, p.p. 197-210, 1992

Hanratty, T.J. and Hershman, A.

*'Initiation of Roll Waves'*

A.I.Ch.E Journal, Vol 7, p.p. 488-497, 1961

Hanratty, T. J.

*'Interfacial instabilities caused by air flow. In Waves on Fluid Interfaces'*

(Edited by Meyer, R. E.). Academic Press, New York

Hart, J., Hamersa, P.J., Fortuin, M.H.

*'Correlations Predicting frictional Pressure Drop and liquid Holdup during Horizontal Gas-Liquid Pipe Flow With a Small Liquid Holdup'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 15, pp 947-964, 1989

Hewitt, G.

*'Liquid-gas systems. In Handbook of Multiphase Systems (ed. By G. Herstroni)'* McGraw-Hill, pp. 2.3-2.129, 1982

Hoogendoorn, C.J.

*'Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes'*

Chem. Eng. Pro., Vol 9, pp 205-217, 1959

Jayawardena, S.S., Balakotaiah, V. and Witte, L.

*'Flow Pattern Transition Maps for Microgravity Two-Phase Flows'*

A.I.Ch.E Journal, Vol 43, pp 1637-1640, 1997

Jeffreys, H.

*'On the Formation of Water Waves by Wind'*

Proc. Royal Soc. A., 107, pp 189-206, 1925

Jeffreys, H.

*'On the Formation of Water Waves by Wind'*

Proc. Royal Soc. A., 110, pp 341-347, 1926

Jones, O.C. and Zuber, N.

*'Use of a Hot-Film Anemometer for Measurement of Two-Phase Void and Volume Flux Profiles in a Narrow Rectangular Channel'*

A.I.Ch.E Sym., Ser. 74, 191, 1978

Kokal, S.L. and Stanislav, J.F.

*'An Experimental Study of Two-Phase in Slightly Inclined Pipes-I. Flow Patterns'*

Chemical Engineering Science, Vol 44, p.p. 665-679, 1989a

Kokal, S.L. and Stanislav, J.F.

*'An Experimental Study of Two-Phase in Slightly Inclined Pipes-II. Liquid Holdup and Pressure Drop'*

Chemical Engineering Science, Vol 44, p.p. 681-693, 1989b

Kordyban, E.

*'Some Details of Developing Slugs in Horizontal Two-Phase Flow'*

A.I.Ch.E Journal, Vol 31, pp 802-806, 1985

Laurinat, J.E.

*'Studies of the Effects of Pipe Size on Horizontal Annular Two-Phase Flows'*

Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1982

Lin, P.Y. and Hanratty, T.J.

*'Detection of Slug Flow from Pressure Measurements'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol. 13, p.p. 13-21, 1987

Lin, P.Y. and Hanratty, T.J.

*'Prediction of the Initiation of Slugs with Linear Stability Theory'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 12, p.p. 79-98, 1986

Lioumbas, J.S., Mouza, A.A. and Paras, S.V.,

*'Effect of surfactant additives on co-current gas-liquid downflow'*

Chemical Engineering Science, Vol. 61, p.p. 4605-4616, 2006

Lioumbas, J.S., Paras, S.V. and Karabelas, A.J.

*'Co-Current Stratified Gas-Liquid Downflow-Influence of the Liquid Flow Field on Interfacial Structure'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 31, p.p. 869-896, 2005

Lioumbas J.S., Koliménos, C. and Paras S.V.

*'Liquid Layer Characteristics in Gas-Liquid Flow in Slightly Inclined Pipes: Effect of Non-Ionic Surfactant Additives'*

Chem. Engineering Science, Vol. 64, p.p. 5162-5172, 2009

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

Newton, C.H., Behnia, M. and Reizes, J.A.

*'The Effect of Liquid Viscosity on Gas Wall and Interfacial Shear Stress in Horizontal Two-Phase Pipe Flow'*

Chemical Engineering Science, Vol 54, p.p. 1071-1079, 1999

Ottens, M., Hoesflood, C.J. and Hamersma, P.J.

*'Correlation Predicting Liquid Hold-Up and Pressure Gradient in Steady-State (nearly) Horizontal Co-Current Gas-Liquid Pipe Flow'*

Trans IChemE, Vol 79, p.p. 581-592, 2001

Ottens, M., Klinkspoor, K., Hoesflood, H.C.J. and Hamersma, P.J.

*'Wave Characteristics During Co-Current Gas-Liquid Pipe Flow'*

Exp. Thermal and Fluid Science, Vol 19, p.p. 140-150, 1999

Ruder, Z. and Hanratty T.J.

*'A definition of Gas-Liquid Plug Flow in Horizontal Pipes'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol. 16, p.p. 233-242, 1990

Shi, J and Kocamustafaogullari, G.

*'Interfacial measurements in Horizontal Stratified Flow Patterns'*

Nuclear Eng. And Design, Vol 149, p.p. 81-96, 1994

Simmons, M.J.H. and Hanratty, T.J.

*'Transition from Stratified to Intermittent Flows in Small Angle Upflows'*

Int. J. Multiphase Flow, ol 27, p.p. 599-616, 2001

Spedding, P.L. and Hand, N.P.

*'Prediction in Stratified Gas-Liquid Co-Current Flow in Horizontal Pipelines'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol. 40, p.p. 1923-1935, 1997

Spedding, P.L. and Spence D.R.

*'Flow Regimes in Two-Phase Gas-Liquid Flow'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 19, pp 245-280, 1993

Swanson, R.W.

*'Characteristics of Gas-Liquid Interface in Two-Phase Annular Flow'*

Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1966

Taitel, Y. and Dukler, A.E.

*'A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow'*

A.I.Ch.E Journal, Vol 22, pp 47-55, 1976

Taitel, Y. and Dukler, A.E.

*'Effect of Pipe Length on the Transition Boundaries for High Viscosity Liquids'*

In. J. Multiphase Flow, Vol. 13, p.p. 557-581, 1987

Vlachos, N.A., Paras, S.V., Karabelas, A.J.

*'Prediction of Holdup, Axial Pressure Gradient and Wall Shear Stress in Wavy Stratified and Stratified/Atomization Gas-Liquid Flow'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 25, pp 365-376, 1999

Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J. and Crawford, T.

*'Effects of Fluid Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 5, p.p. 437-462, 1979

Warszynski, P, Wantke, K.D. and Fruhner, H

*'Theoretical Description of Surface Elasticity of Ionic Surfactants'*

Colloids and Surfaces, Vol. 189, p.p. 29-53, 2001

Woods, B.D., Hulburt, E.T. and Hanratty, T.J.

*'Mechanism of Slug Formation in Downwardly Inclined Pipes'*

Int. J. Multiphase Flow, Vol 26, p.p. 977-998, 2000

Yih C.S.

*'Stability of liquid flow down an inclined plane'*

Phys. Fluids, 6, 321-334, 1963

Τζώτση, Χ.

*'Μοντελοποίηση της Διεπιφανειακής Διατμητικής Τάσης Κατά την Οριζόντια Διαστρωματωμένη Ροή Υγρού-Αερίου'*

Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2007

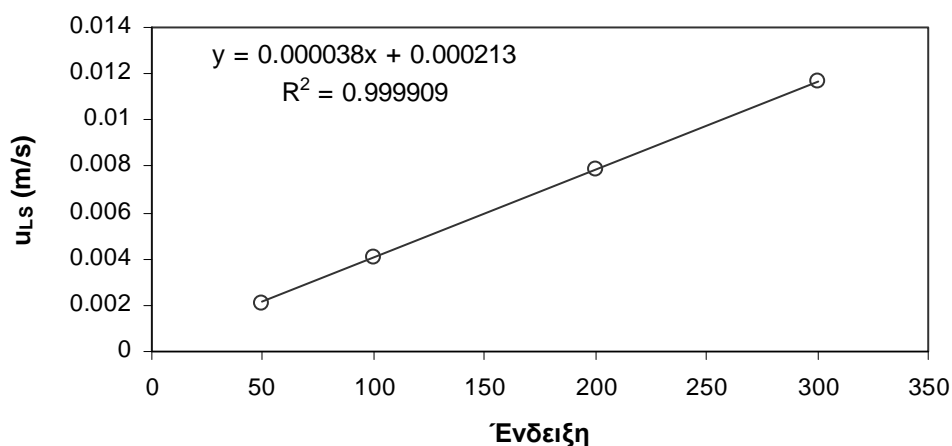
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## Π.1 Βαθμονόμηση Μετρητικών Οργάνων

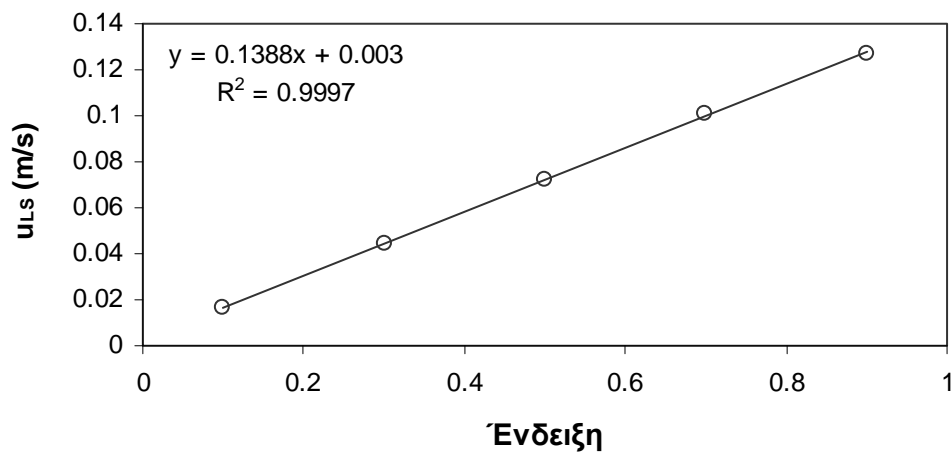
---



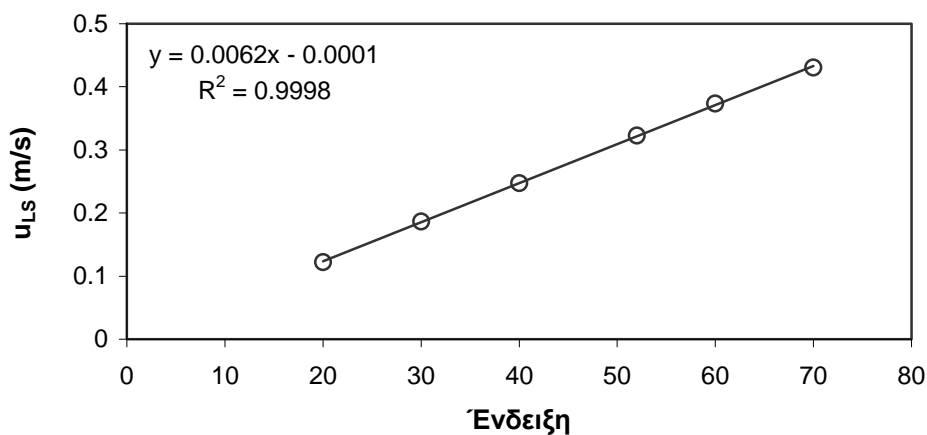
### Π.1.1 Καμπύλες Βαθμονόμησης Ροομέτρων Υγρής φάσης



Σχήμα Π. 1 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R4 (μικρής παροχής)

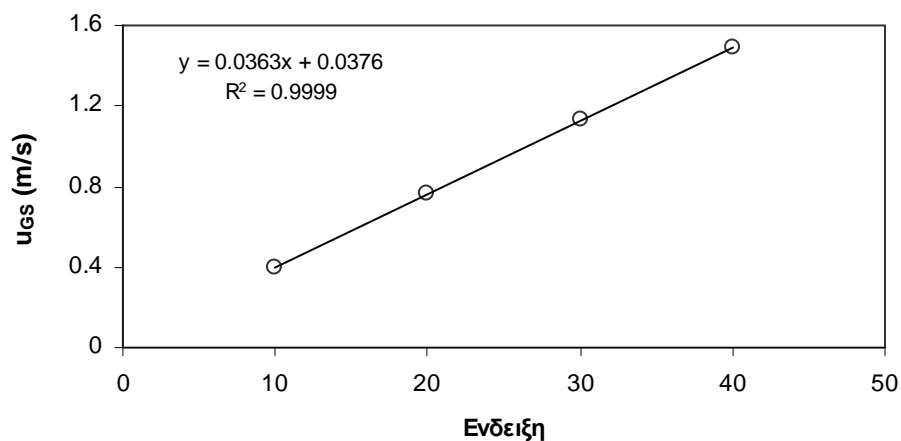


Σχήμα Π. 2 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R5 (μεσαίας παροχής)

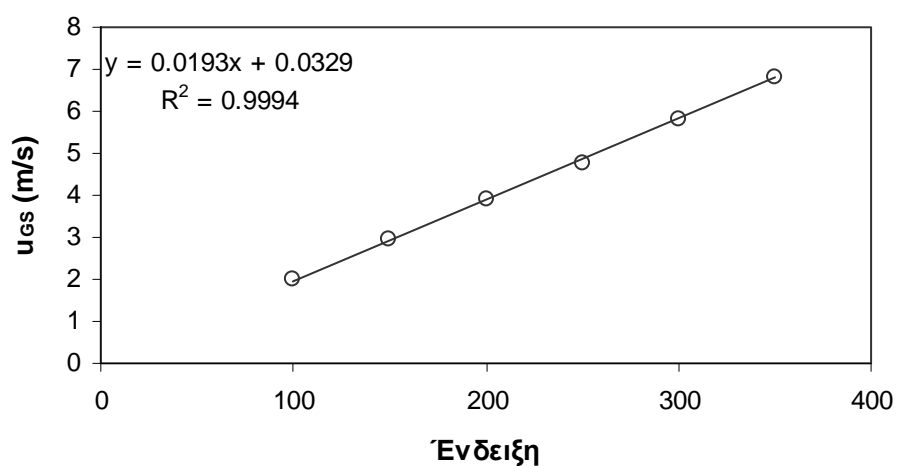


Σχήμα Π. 3 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R6 (μεγάλης παροχής)

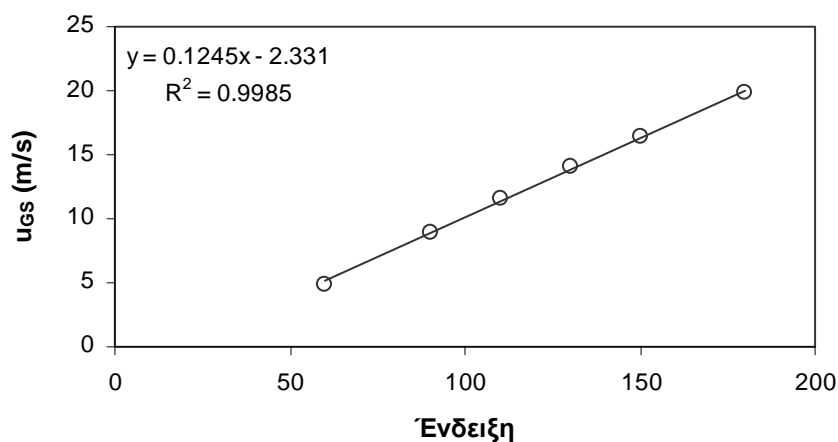
## Π.1.2 Καμπύλες Βαθμονόμησης Ροομέτρων Αέριας Φάσης



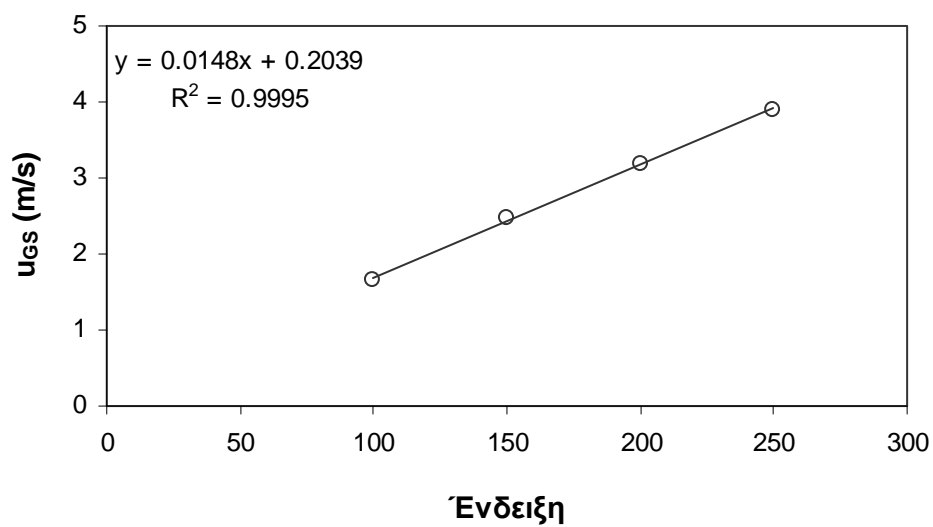
Σχήμα Π.4 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R1 (μικρής παροχής) για αέρα



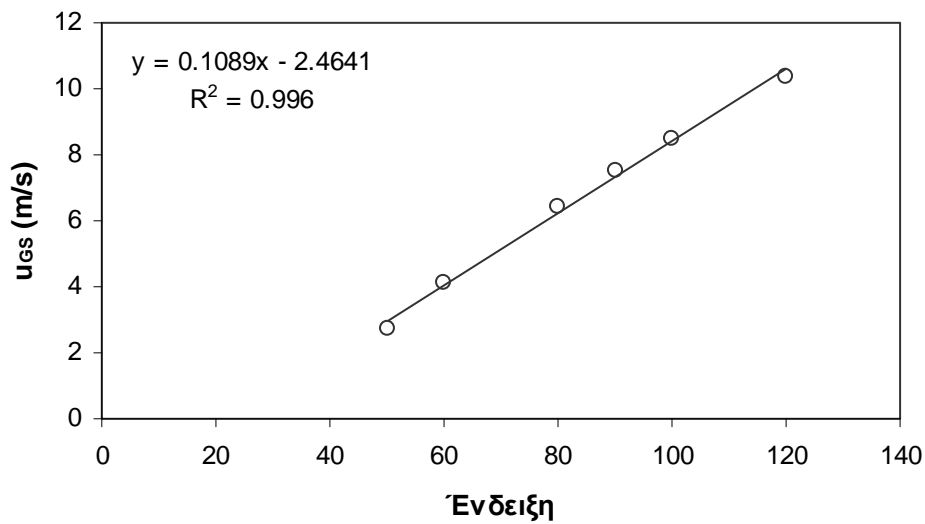
Σχήμα Π.5 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R2 (μεσαίας παροχής) για αέρα



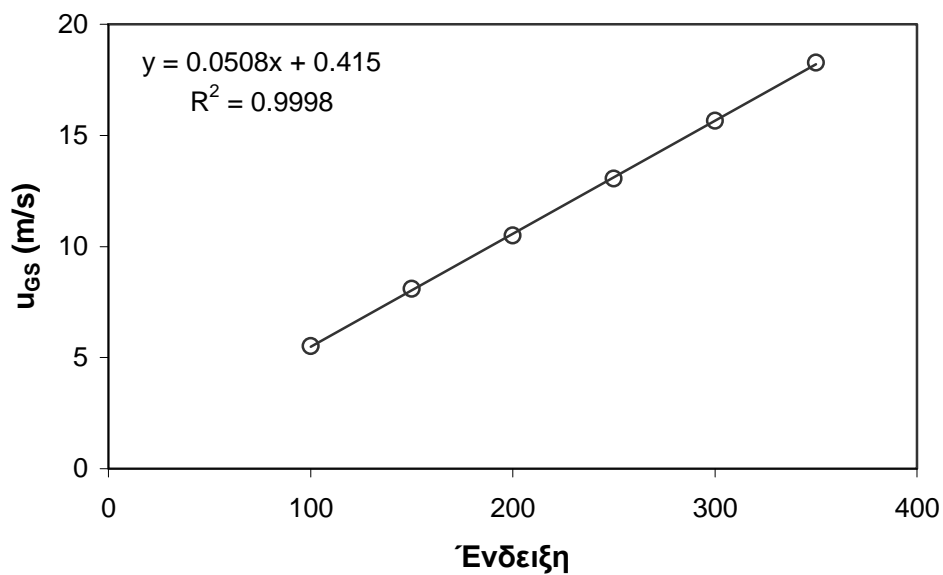
Σχήμα Π.6 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R3 (μεγάλης παροχής) για αέρα



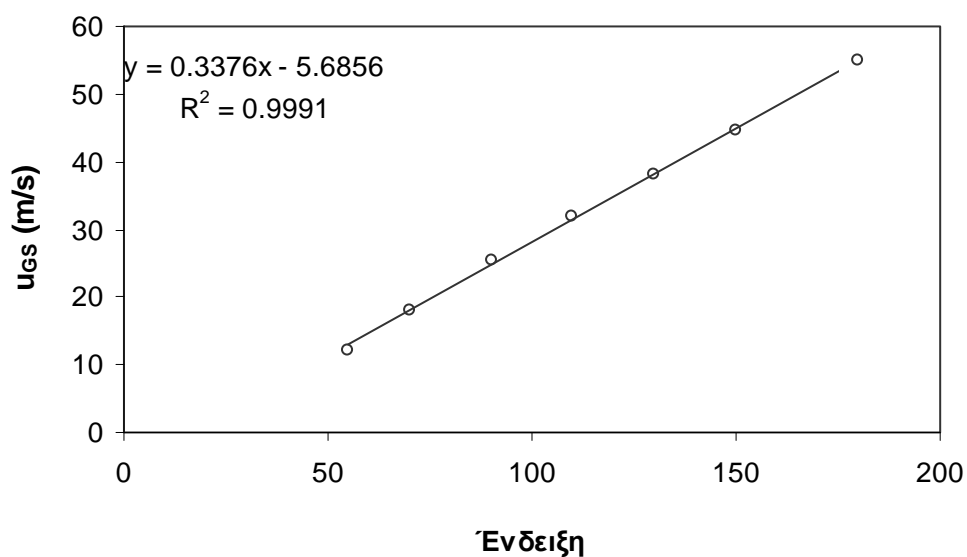
Σχήμα Π.7 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R2 (μεσαίας παροχής) για  $CO_2$



Σχήμα Π.8 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R3 (μεγάλης παροχής) για  $CO_2$

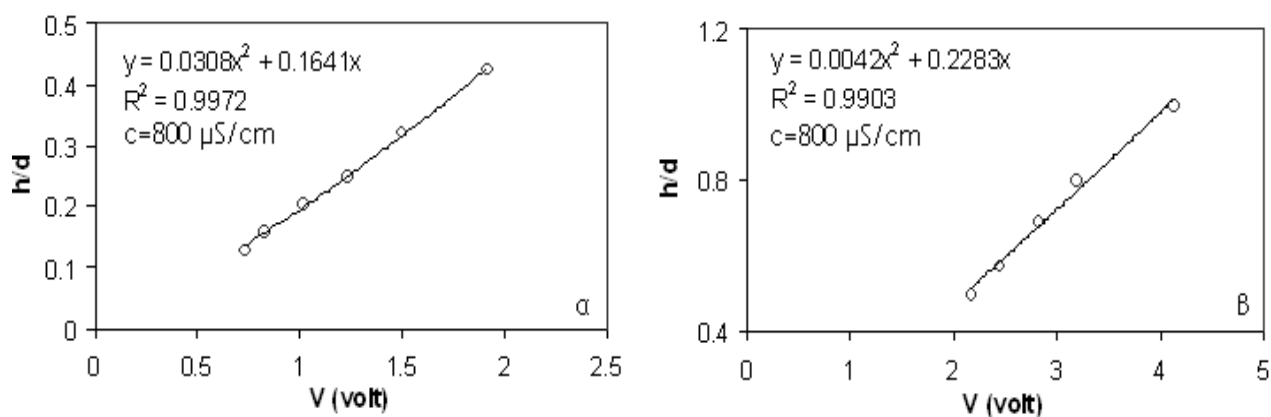


Σχήμα Π. 9 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R2 (μεσαίας παροχής) για He

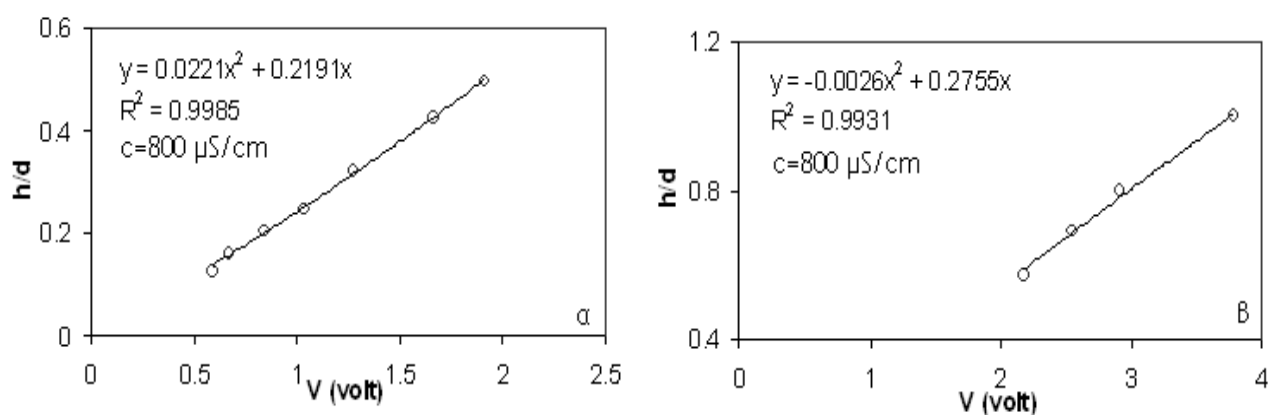


Σχήμα Π. 10 Καμπύλη Βαθμονόμησης ροομέτρου R3 (μεγάλης παροχής) για He

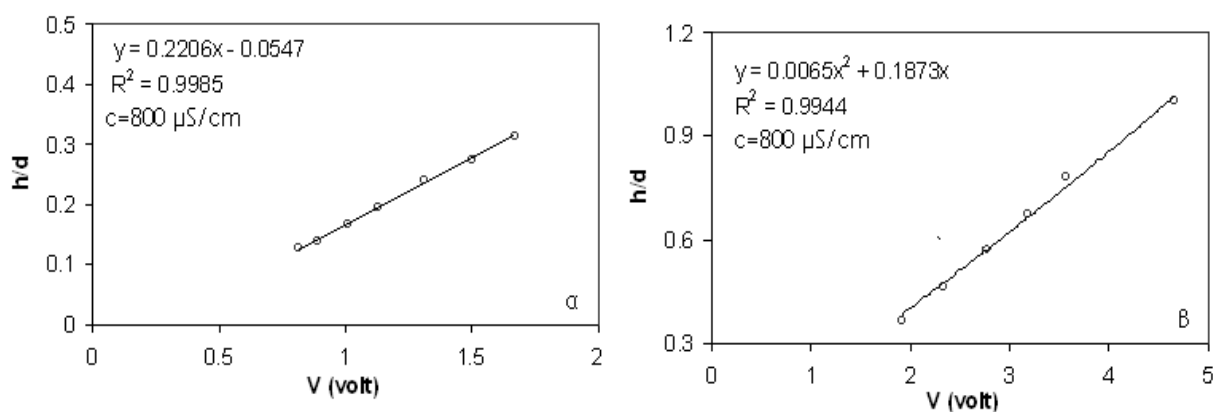
### Π.1.3 Καμπύλες Βαθμονόμησης Μετρητικών Παράλληλων Συρμάτων



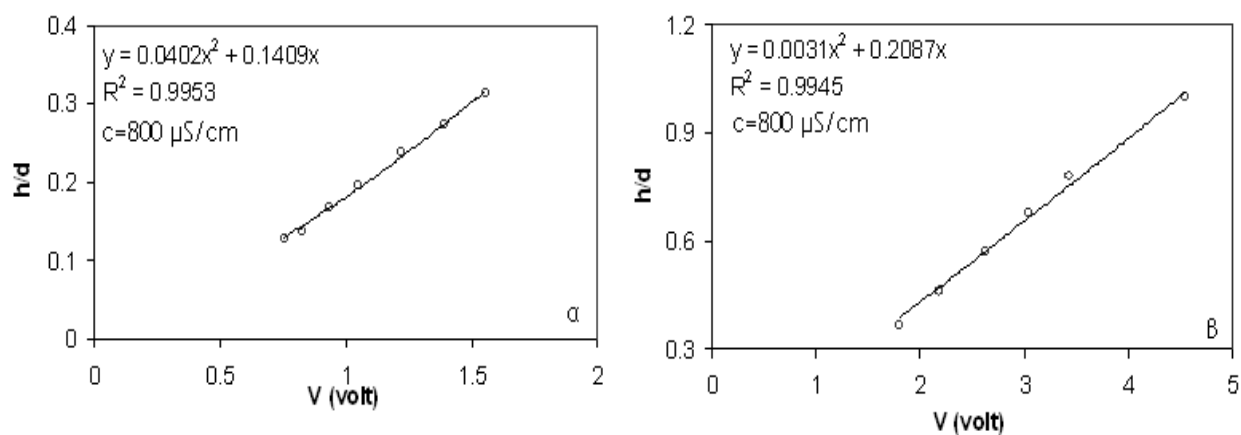
**Σχήμα Π.10** Καμπύλη Βαθμονόμησης Μετρητικού 1-Ζεύγος 1 για μικρά (α) και μεγάλα (β) πάχη υγρής στιβάδας



**Σχήμα Π.11** Καμπύλη Βαθμονόμησης Μετρητικού 2-Ζεύγος 2 για μικρά (α) και μεγάλα (β) πάχη υγρής στιβάδας



**Σχήμα Π.12** Καμπύλη Βαθμονόμησης Μετρητικού 2-Ζεύγος 1 για μικρά (α) και μεγάλα (β) πάχη υγρής στιβάδας



**Σχήμα Π. 13** Καμπύλη Βαθμονόμησης Μετρητικού 2-Ζεύγος 2 για μικρά (α) και μεγάλα (β) πάχη υγρής στιβάδας

## Π.2 Πίνακες Αναλυτικών Αποτελεσμάτων

---

**Πίνακας Π. 1 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό**

$\alpha/\alpha$	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$dP/dx$ (m)	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.384	0.002	ss	0.163	2.802	20	20	1
2	1.982	0.002	ss	0.111	4.777	20	20	1
3	2.482	0.002	ss	0.095	7.131	20	20	1
4	2.986	0.002	ss	0.084	9.257	20	20	1
5	3.971	0.002	ss	0.078	11.536	20	20	1
6	5.266	0.002	tran 2-D	0.062	22.395	20	20	1
7	6.604	0.002	2-D	0.054	35.078	20	20	1
8	8.001	0.002	2-D	0.048	50.950	20	20	1
9	8.693	0.002	2-D	0.045	59.303	20	20	1
10	9.391	0.002	2-D	0.042	66.897	20	20	1
11	10.095	0.002	2-D	0.038	81.941	20	20	1
12	10.828	0.002	2-D	0.035	82.845	20	20	1
13	11.569	0.002	tran K-H	0.031	94.996	20	20	1
14	12.344	0.002	tran K-H	0.027	105.628	20	20	1
15	13.870	0.002	K-H	0.023	135.556	20	20	1
16	15.489	0.002	K-H	0.019	161.597	20	20	1
17	17.216	0.002	K-H	0.015	201.225	20	20	1
18	18.920	0.002	K-H	0.013	240.853	20	20	1
19	20.444	0.002	K-H	0.011	269.159	20	20	1
20	1.384	0.003	ss	0.191	2.954	20	20	1
21	1.982	0.003	ss	0.126	5.505	20	20	1
22	2.482	0.003	ss	0.106	7.055	20	20	1
23	2.986	0.003	ss	0.096	9.789	20	20	1
24	3.971	0.003	tran 2-D	0.084	12.751	20	20	1
25	5.266	0.003	2-D	0.070	23.534	20	20	1
26	6.573	0.003	2-D	0.063	35.457	20	20	1
27	7.281	0.003	2-D	0.060	44.115	20	20	1
28	7.965	0.003	2-D	0.057	52.468	20	20	1
29	8.693	0.003	2-D	0.052	65.233	20	20	1
30	9.391	0.003	2-D	0.046	68.416	20	20	1
31	10.095	0.003	2-D	0.041	76.010	20	20	1
32	10.851	0.003	2-D	0.037	85.123	20	20	1
33	11.594	0.003	tran K-H	0.033	94.996	20	20	1
34	12.344	0.003	K-H	0.030	106.387	20	20	1
35	13.927	0.003	K-H	0.026	136.971	20	20	1
36	14.734	0.003	K-H	0.023	154.521	20	20	1
37	15.551	0.003	K-H	0.019	178.581	20	20	1
38	17.216	0.003	K-H	0.016	209.717	20	20	1
39	18.487	0.003	K-H	0.014	232.361	20	20	1
40	1.384	0.005	ss	0.199	3.258	20	20	1
41	1.982	0.005	ss	0.148	5.460	20	20	1
42	2.482	0.005	ss	0.126	7.663	20	20	1
43	2.986	0.005	ss	0.114	10.245	20	20	1
44	3.971	0.005	tran 2-D	0.104	13.282	20	20	1
45	4.617	0.005	2-D	0.092	18.674	20	20	1
46	5.266	0.005	2-D	0.087	23.610	20	20	1
47	6.604	0.005	2-D	0.080	36.369	20	20	1
48	8.001	0.005	2-D	0.063	52.468	20	20	1
49	8.693	0.005	2-D	0.054	61.581	20	20	1
50	9.391	0.005	2-D	0.049	69.176	20	20	1



51	10.095	0.005	2-D	0.044	77.529	20	20	1
52	10.804	0.005	tran K-H	0.041	87.402	20	20	1
53	12.344	0.005	K-H	0.035	110.184	20	20	1
54	13.131	0.005	K-H	0.031	130.461	20	20	1
55	13.927	0.005	K-H	0.025	158.200	20	20	1
56	14.674	0.005	K-H	0.023	175.750	20	20	1
57	15.489	0.005	K-H	0.021	192.733	20	20	1
58	17.149	0.005	K-H	0.018	226.700	20	20	1
59	1.384	0.007	ss	0.225	3.334	20	20	1
60	1.982	0.007	ss	0.174	5.536	20	20	1
61	2.482	0.007	ss	0.149	8.118	20	20	1
62	2.986	0.007	ss	0.134	10.548	20	20	1
63	3.971	0.007	tran 2-D	0.124	13.662	20	20	1
64	4.617	0.007	2-D	0.112	19.585	20	20	1
65	5.266	0.007	2-D	0.106	24.750	20	20	1
66	6.604	0.007	2-D	0.089	37.736	20	20	1
67	7.281	0.007	2-D	0.076	45.254	20	20	1
68	8.001	0.007	2-D	0.065	53.987	20	20	1
69	9.391	0.007	2-D	0.054	72.973	20	20	1
70	10.851	0.007	tran K-H	0.047	89.680	20	20	1
71	11.619	0.007	K-H	0.042	115.742	20	20	1
72	12.344	0.007	K-H	0.034	144.614	20	20	1
73	13.927	0.007	K-H	0.028	178.581	20	20	1
74	14.734	0.007	K-H	0.025	198.395	20	20	1
75	15.551	0.007	K-H	0.023	215.378	20	20	1
76	17.216	0.007	K-H	0.020	257.836	20	20	1
77	18.063	0.007	K-H	0.019	271.989	20	20	1
78	1.384	0.010	ss	0.250	3.714	20	20	1
79	1.982	0.010	ss	0.196	6.068	20	20	1
80	2.482	0.010	ss	0.169	8.422	20	20	1
81	2.986	0.010	ss	0.147	11.004	20	20	1
82	3.971	0.010	tran 2-D	0.138	14.042	20	20	1
83	5.266	0.010	2-D	0.121	24.825	20	20	1
84	6.604	0.010	2-D	0.090	39.254	20	20	1
85	7.281	0.010	2-D	0.080	45.406	20	20	1
86	8.001	0.010	2-D	0.075	62.341	20	20	1
87	8.693	0.010	tran K-H	0.065	69.176	20	20	1
88	9.391	0.010	K-H	0.060	74.492	20	20	1
89	10.851	0.010	K-H	0.052	96.515	20	20	1
90	12.397	0.010	K-H	0.037	154.521	20	20	1
91	13.185	0.010	K-H	0.033	172.919	20	20	1
92	13.927	0.010	K-H	0.030	189.903	20	20	1
93	15.551	0.010	K-H	0.026	226.700	20	20	1
94	17.216	0.010	K-H	0.022	271.989	20	20	1
95	18.990	0.010	K-H	0.019	317.278	20	20	1
96	1.384	0.012	ss	0.265	3.865	20	20	1
97	1.982	0.012	ss	0.206	6.372	20	20	1
98	2.482	0.012	ss	0.179	8.498	20	20	1
99	2.986	0.012	ss	0.162	11.232	20	20	1
100	3.971	0.012	2-D tran	0.153	13.966	20	20	1
101	4.617	0.012	2-D	0.146	20.193	20	20	1
102	5.266	0.012	2-D	0.129	25.889	20	20	1
103	6.604	0.012	2-D	0.096	38.951	20	20	1
104	8.001	0.012	2-D	0.077	60.822	20	20	1

105	8.693	0.012	tran K-H	0.071	67.657	20	20	1
106	9.391	0.012	K-H	0.065	76.010	20	20	1
107	10.851	0.012	K-H	0.051	115.500	20	20	1
108	12.397	0.012	K-H	0.039	166.126	20	20	1
109	13.185	0.012	K-H	0.035	184.242	20	20	1
110	13.927	0.012	K-H	0.033	204.056	20	20	1
111	15.551	0.012	K-H	0.028	243.684	20	20	1
112	17.216	0.012	K-H	0.024	288.973	20	20	1
113	18.990	0.012	K-H	0.021	348.415	20	20	1
114	1.384	0.022	ss	0.301	4.625	20	20	1
115	1.982	0.022	ss	0.250	7.663	20	20	1
116	2.482	0.022	ss	0.228	9.865	20	20	1
117	2.986	0.022	tran 2-D	0.221	12.903	20	20	1
118	3.971	0.022	2-D	0.199	15.864	20	20	1
119	5.266	0.022	2-D	0.145	28.319	20	20	1
120	5.932	0.022	2-D	0.133	35.989	20	20	1
121	6.604	0.022	2-D	0.127	45.330	20	20	1
122	8.001	0.022	K-H tran	0.106	69.935	20	20	1
123	8.733	0.022	K-H	0.092	92.718	20	20	1
124	9.433	0.022	K-H	0.078	116.260	20	20	1
125	10.139	0.022	K-H	0.069	152.707	20	20	1
126	10.898	0.022	K-H	0.062	178.112	20	20	1
127	12.397	0.022	K-H	0.051	229.541	20	20	1
128	13.984	0.022	K-H	0.043	279.111	20	20	1
129	14.764	0.022	K-H/atom	0.040	310.092	20	20	1
130	15.613	0.022	atom	0.038	353.466	20	20	1
131	17.347	0.022	atom	0.035	409.233	20	20	1
132	19.060	0.022	atom	0.032	480.490	20	20	1
133	1.384	0.031	ss	0.357	5.455	20	20	1
134	1.982	0.031	ss/tran 2-D	0.311	8.810	20	20	1
135	2.482	0.031	2-D	0.284	11.776	20	20	1
136	2.986	0.031	2-D	0.255	14.663	20	20	1
137	3.971	0.031	2-D	0.217	18.174	20	20	1
138	5.266	0.031	2-D	0.178	36.903	20	20	1
139	5.946	0.031	2-D	0.168	44.785	20	20	1
140	6.634	0.031	tran K-H	0.156	56.256	20	20	1
141	8.038	0.031	K-H	0.115	96.054	20	20	1
142	8.733	0.031	K-H	0.104	118.685	20	20	1
143	9.433	0.031	K-H	0.094	156.115	20	20	1
144	10.898	0.031	K-H	0.078	214.050	20	20	1
145	12.449	0.031	K-H	0.066	266.718	20	20	1
146	13.240	0.031	K-H	0.061	300.798	20	20	1
147	14.041	0.031	K-H/atom	0.057	331.779	20	20	1
148	15.674	0.031	atom	0.050	399.938	20	20	1
149	17.347	0.031	atom	0.041	480.490	20	20	1
150	1.398	0.042	2-D tran	0.430	4.830	20	20	1
151	2.002	0.042	2-D	0.369	9.356	20	20	1
152	2.500	0.042	2-D	0.346	12.790	20	20	1
153	3.000	0.042	2-D	0.306	16.848	20	20	1
154	3.990	0.042	2-D	0.277	22.388	20	20	1
155	4.661	0.042	2-D/K-H tran	0.243	32.845	20	20	1
156	5.303	0.042	K-H tran	0.223	40.259	20	20	1
157	5.988	0.042	K-H	0.184	54.695	20	20	1
158	6.650	0.042	K-H	0.171	74.204	20	20	1

159	8.038	0.042	K-H	0.132	113.222	20	20	1
160	9.433	0.042	K-H	0.110	183.069	20	20	1
161	10.162	0.042	K-H	0.098	217.148	20	20	1
162	10.898	0.042	atom	0.090	248.130	20	20	1
163	11.693	0.042	atom	0.082	282.209	20	20	1
164	12.449	0.042	atom	0.078	319.387	20	20	1
165	13.240	0.042	atom	0.071	344.172	20	20	1
166	14.041	0.042	atom	0.066	384.448	20	20	1
167	14.852	0.042	atom	0.061	415.429	20	20	1
168	15.674	0.042	atom/annular	0.057	449.508	20	20	1
169	16.506	0.042	annular	0.054	489.784	20	20	1
170	1.287	0.000	ss	0.194	2.407	22	22	1
171	1.885	0.000	ss	0.148	4.758	22	22	1
172	2.482	0.000	ss	0.129	7.158	22	22	1
173	2.986	0.000	ss	0.108	9.654	22	22	1
174	3.481	0.000	ss	0.096	12.344	22	22	1
175	5.291	0.000	2-D	0.073	22.329	22	22	1
176	6.085	0.000	2-D	0.064	29.521	22	22	1
177	6.855	0.000	2-D	0.060	36.006	22	22	1
178	7.626	0.001	2-D	0.057	44.096	22	22	1
179	8.368	0.001	2-D	0.055	52.572	22	22	1
180	9.858	0.001	2-D	0.050	68.445	22	22	1
181	11.360	0.001	2-D	0.042	86.820	22	22	1
182	12.120	0.001	2-D	0.038	96.893	22	22	1
183	12.893	0.001	K-H	0.033	108.598	22	22	1
184	1.391	0.000	ss	0.218	2.408	22	22	1
185	1.982	0.000	ss	0.183	5.545	22	22	1
186	2.482	0.000	ss	0.159	7.743	22	22	1
187	2.986	0.000	ss	0.146	9.879	22	22	1
188	3.486	0.000	ss	0.129	12.732	22	22	1
189	5.318	0.000	2-D tran	0.101	23.445	22	22	1
190	6.822	0.000	2-D	0.088	36.609	22	22	1
191	8.319	0.001	2-D	0.076	52.075	22	22	1
192	9.811	0.001	2-D	0.060	70.591	22	22	1
193	11.269	0.001	2-D	0.047	90.589	22	22	1
194	12.713	0.001	K-H	0.041	110.945	22	22	1
195	14.243	0.001	K-H	0.036	165.283	22	22	1
196	15.850	0.001	K-H	0.028	211.026	22	22	1
197	17.393	0.001	K-H	0.024	251.700	22	22	1
198	1.384	0.000	ss	0.258	3.469	22	22	1
199	1.982	0.000	ss	0.204	5.835	22	22	1
200	2.482	0.000	ss	0.182	8.273	22	22	1
201	2.986	0.000	ss	0.165	10.777	22	22	1
202	3.486	0.000	ss	0.152	13.402	22	22	1
203	4.552	0.000	2-D tran	0.134	18.430	22	22	1
204	5.344	0.000	2-D	0.124	23.883	22	22	1
205	6.115	0.000	2-D	0.119	29.864	22	22	1
206	6.888	0.000	2-D	0.101	38.178	22	22	1
207	7.645	0.001	2-D	0.097	47.751	22	22	1
208	8.380	0.001	2-D	0.078	65.611	22	22	1
209	9.905	0.001	tran K-H	0.065	70.159	22	22	1
210	11.360	0.001	K-H	0.058	88.867	22	22	1
211	12.833	0.001	K-H	0.047	119.835	22	22	1
212	14.323	0.001	K-H	0.037	213.699	22	22	1

213	15.850	0.001	K-H	0.030	246.881	22	22	1
214	17.393	0.001	K-H	0.026	282.570	22	22	1
215	19.022	0.001	K-H	0.023	333.639	22	22	1
216	20.680	0.001	K-H	0.020	409.543	22	22	1
217	1.384	0.000	ss	0.288	4.390	22	22	1
218	1.982	0.000	ss	0.233	8.173	22	22	1
219	2.482	0.000	ss	0.211	11.053	22	22	1
220	2.986	0.000	ss	0.192	14.563	22	22	1
221	3.585	0.000	tran 2-D	0.172	19.028	22	22	1
222	5.291	0.000	2-D	0.145	33.878	22	22	1
223	6.822	0.000	2-D	0.118	51.587	22	22	1
224	8.319	0.001	2-D	0.087	71.745	22	22	1
225	9.811	0.001	tran K-H	0.070	72.950	22	22	1
226	11.269	0.001	K-H	0.064	91.468	22	22	1
227	12.007	0.001	K-H	0.059	108.232	22	22	1
228	12.833	0.001	K-H	0.046	166.013	22	22	1
229	14.376	0.001	K-H	0.039	204.694	22	22	1
230	15.993	0.001	K-H	0.033	242.663	22	22	1
231	17.625	0.001	K-H	0.028	288.877	22	22	1
232	19.187	0.001	K-H	0.025	344.080	22	22	1
233	1.384	0.000	ss	0.314	3.721	22	22	1
234	1.982	0.000	ss	0.256	6.254	22	22	1
235	2.482	0.000	ss	0.231	8.698	22	22	1
236	2.986	0.000	ss	0.217	11.405	22	22	1
237	3.486	0.000	2-D	0.197	14.249	22	22	1
238	4.552	0.000	2-D	0.165	26.317	22	22	1
239	6.085	0.000	2-D	0.133	35.774	22	22	1
240	7.590	0.001	2-D	0.101	48.319	22	22	1
241	9.088	0.001	K-H tran	0.083	67.131	22	22	1
242	10.554	0.001	K-H tran	0.074	82.971	22	22	1
243	11.296	0.001	K-H	0.069	101.879	22	22	1
244	12.803	0.001	K-H	0.050	178.588	22	22	1
245	14.323	0.001	K-H	0.042	238.627	22	22	1
246	15.922	0.001	K-H	0.036	276.349	22	22	1
247	17.471	0.001	K-H	0.031	326.469	22	22	1
248	19.022	0.001	K-H	0.027	372.377	22	22	1
249	1.384	0.000	ss	0.322	4.106	22	22	1
250	1.982	0.000	ss	0.272	7.008	22	22	1
251	2.482	0.000	ss	0.247	9.004	22	22	1
252	2.986	0.000	tran 2-D	0.227	11.793	22	22	1
253	4.425	0.000	2-D	0.213	14.091	22	22	1
254	5.291	0.000	2-D	0.171	26.115	22	22	1
255	6.822	0.000	2-D	0.122	42.670	22	22	1
256	8.319	0.001	K-H	0.096	60.608	22	22	1
257	9.811	0.001	K-H	0.085	77.742	22	22	1
258	11.269	0.001	K-H	0.066	144.187	22	22	1
259	12.713	0.001	K-H	0.053	187.859	22	22	1
260	14.243	0.001	K-H	0.045	229.199	22	22	1
261	15.850	0.001	K-H	0.038	275.175	22	22	1
262	17.409	0.001	K-H	0.033	330.072	22	22	1
263	19.022	0.001	K-H	0.028	393.652	22	22	1
264	1.384	0.195	ss	0.386	5.345	22	22	1
265	1.982	0.278	tran 2-D	0.330	8.155	22	22	1
266	2.580	0.361	2-D	0.310	11.655	22	22	1

267	2.986	0.417	2-D	0.285	14.170	22	22	1
268	4.425	0.617	2-D	0.267	16.411	22	22	1
269	5.291	0.737	2-D	0.178	28.774	22	22	1
270	6.822	0.950	K-H tran	0.161	46.228	22	22	1
271	7.590	1.056	K-H	0.150	57.186	22	22	1
272	8.360	1.163	K-H	0.135	72.658	22	22	1
273	9.834	1.368	K-H	0.099	152.485	22	22	1
274	11.296	1.571	K-H	0.081	176.681	22	22	1
275	12.893	1.793	K-H	0.066	231.967	22	22	1
276	14.343	1.994	K-H	0.058	283.983	22	22	1
277	15.922	2.213	atom	0.050	344.082	22	22	1
278	17.471	2.428	atom	0.044	411.275	22	22	1
279	1.384	0.050	2-D	0.473	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
280	1.982	0.050	2-D	0.404	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
281	2.482	0.050	2-D/slug	0.357	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
282	2.986	0.050	2-D/slug	0.327	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
283	3.990	0.050	slug	0.258	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
284	5.316	0.050	p.slug	0.211	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
285	6.665	0.050	p.slug/atom	0.173	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
286	8.038	0.050	atom/p.slug	0.136	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
287	9.475	0.050	atom	0.108	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
288	10.945	0.050	atom	0.091	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
289	14.097	0.050	atom	0.068	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
290	15.796	0.050	atom/annular	0.059	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
291	17.413	0.050	annular	0.050	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
292	19.200	0.050	annular	0.043	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
293	1.405	0.072	plug	0.488	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
294	2.011	0.072	plug	0.261	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
295	2.518	0.072	plug&slug	0.269	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
296	3.014	0.072	slug	0.289	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
297	4.009	0.072	slug	0.259	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
298	5.341	0.072	slug/p.slug	0.221	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
299	6.696	0.072	p.slug	0.187	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
300	8.074	0.072	p.slug/atom	0.153	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
301	9.516	0.072	atom	0.127	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
302	10.992	0.072	atom	0.108	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
303	12.552	0.072	atom	0.096	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
304	14.154	0.072	atom/annular	0.083	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
305	15.796	0.072	annular	0.072	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
306	17.543	0.072	annular	0.063	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
307	19.407	0.072	annular	0.054	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
308	1.411	0.100	plug	0.260	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
309	2.002	0.100	plug	0.263	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
310	2.506	0.100	plug	0.275	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
311	3.014	0.100	slug&plug	0.287	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
312	4.009	0.100	slug	0.276	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
313	5.316	0.100	slug	0.232	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
314	6.696	0.100	slug/p.slug	0.199	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
315	8.110	0.100	p.slug	0.170	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
316	9.516	0.100	atom	0.143	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
317	11.039	0.100	atom	0.125	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
318	12.603	0.100	atom/annular	0.109	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
319	14.210	0.100	annular	0.097	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
320	15.917	0.100	annular	0.085	Δεν μετρήθηκε	22	22	1

321	17.673	0.100	annular	0.074	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
322	19.545	0.100	annular	0.064	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
323	1.418	0.155	plug	0.305	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
324	2.021	0.155	plug	0.281	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
325	2.530	0.155	plug	0.270	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
326	3.029	0.155	slug&plug	0.291	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
327	4.028	0.155	slug	0.285	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
328	5.390	0.155	slug	0.252	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
329	6.726	0.155	slug/p.slug	0.223	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
330	8.181	0.155	p.slug	0.195	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
331	9.640	0.155	p.slug/atom	0.172	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
332	11.223	0.155	atom	0.155	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
333	12.756	0.155	atom/annular	0.136	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
334	14.432	0.155	annular	0.119	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
335	16.156	0.155	annular	0.108	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
336	17.993	0.155	annular	0.093	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
337	1.418	0.248	plug	0.313	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
338	2.030	0.248	plug	0.299	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
339	2.553	0.248	plug	0.283	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
340	3.057	0.248	plug&slug	0.288	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
341	4.065	0.248	slug	0.302	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
342	5.439	0.248	slug	0.270	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
343	6.816	0.248	slug	0.244	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
344	8.287	0.248	slug/p.slug	0.217	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
345	9.882	0.248	p.slug	0.190	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
346	11.359	0.248	p.slug/annular	0.172	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
347	13.056	0.248	annular	0.158	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
348	14.758	0.248	annular	0.141	Δεν μετρήθηκε	22	22	1
349	16.509	0.248	annular	0.125	Δεν μετρήθηκε	22	22	1

**Πίνακας Π.2 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε οριζόντιο αγωγό**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	h/d	dP/dx (m)	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.240	0.005	ss	0.223	1.904	20	20	1.005
2	1.701	0.005	ss	0.163	4.101	20	20	1.005
3	2.084	0.005	ss/tran 2-D	0.133	6.575	20	20	1.005
4	2.472	0.005	tran 2-D	0.120	9.488	20	20	1.005
5	3.617	0.005	2-D	0.104	17.903	20	20	1.005
6	4.756	0.005	2-D	0.096	28.667	20	20	1.005
7	5.342	0.005	2-D	0.093	35.581	20	20	1.005
8	6.530	0.005	2-D/ tran K-H	0.072	52.019	20	20	1.005
9	7.737	0.005	tran K-H	0.054	67.868	20	20	1.005
10	9.005	0.005	K-H	0.044	86.532	20	20	1.005
11	10.345	0.005	K-H	0.039	108.716	20	20	1.005
12	11.675	0.005	K-H	0.029	160.429	20	20	1.005
13	13.085	0.005	K-H	0.021	212.586	20	20	1.005
14	14.642	0.005	K-H	0.017	264.594	20	20	1.005
15	16.071	0.005	K-H	0.014	309.449	20	20	1.005
16	1.240	0.007	ss	0.255	2.160	20	20	1.005
17	1.701	0.007	ss	0.199	4.196	20	20	1.005
18	2.084	0.007	ss/tran 2-D	0.160	6.668	20	20	1.005
19	2.472	0.007	tran 2-D	0.145	9.435	20	20	1.005
20	3.044	0.007	tran 2-D	0.132	13.247	20	20	1.005
21	4.175	0.007	2-D	0.118	24.050	20	20	1.005
22	5.342	0.007	2-D	0.107	35.847	20	20	1.005
23	6.530	0.007	2-D/tran K-H	0.074	52.516	20	20	1.005
24	7.737	0.007	K-H	0.060	67.309	20	20	1.005
25	8.368	0.007	K-H	0.056	73.447	20	20	1.005
26	9.005	0.007	K-H	0.050	85.151	20	20	1.005
27	10.345	0.007	K-H	0.038	147.629	20	20	1.005
28	11.675	0.007	K-H	0.029	191.853	20	20	1.005
29	13.085	0.007	K-H	0.022	241.550	20	20	1.005
30	14.586	0.007	K-H	0.018	285.795	20	20	1.005
31	16.071	0.007	K-H	0.016	328.950	20	20	1.005
32	1.240	0.010	ss	0.284	2.061	20	20	1.005
33	1.701	0.010	ss/tran 2-D	0.224	4.376	20	20	1.005
34	2.084	0.010	2-D	0.183	6.790	20	20	1.005
35	2.472	0.010	2-D	0.165	9.547	20	20	1.005
36	3.044	0.010	2-D	0.153	12.864	20	20	1.005
37	4.175	0.010	2-D	0.141	23.646	20	20	1.005

38	5.342	0.010	2-D	0.110	36.131	20	20	1.005
39	5.933	0.010	2-D/tran K-H	0.092	43.549	20	20	1.005
40	6.530	0.010	2-D/tran K-H	0.080	51.415	20	20	1.005
41	7.772	0.010	tran K-H	0.066	70.148	20	20	1.005
42	9.044	0.010	K-H	0.057	94.482	20	20	1.005
43	10.301	0.010	K-H	0.043	154.687	20	20	1.005
44	11.030	0.010	K-H	0.036	186.720	20	20	1.005
45	11.723	0.010	K-H	0.031	217.392	20	20	1.005
46	13.085	0.010	K-H	0.026	252.229	20	20	1.005
47	14.530	0.010	K-H	0.022	299.295	20	20	1.005
48	16.071	0.010	K-H	0.019	350.722	20	20	1.005
49	1.240	0.012	ss	0.312	2.226	21.2	20	1.005
50	1.701	0.012	ss/tran 2-D	0.249	4.394	21.5	20	1.005
51	2.084	0.012	2-D	0.206	6.838	21.7	20	1.005
52	2.472	0.012	2-D	0.185	9.888	21.7	20	1.005
53	3.044	0.012	2-D	0.174	12.624	21.7	20	1.005
54	4.175	0.012	2-D	0.156	24.590	21.5	20	1.005
55	5.342	0.012	2-D/tran K-H	0.110	36.733	21	20	1.005
56	5.933	0.012	tran K-H	0.097	44.861	20.3	20	1.005
57	6.530	0.012	K-H	0.087	53.070	19.7	20	1.005
58	7.772	0.012	K-H	0.074	73.033	18.7	20	1.005
59	9.044	0.012	K-H	0.060	108.149	18	20	1.005
60	9.712	0.012	K-H	0.053	144.904	19.2	20	1.005
61	10.345	0.012	K-H	0.046	166.270	19.3	20	1.005
62	11.675	0.012	K-H	0.036	209.517	19.1	20	1.005
63	13.085	0.012	K-H	0.029	260.432	18.3	20	1.005
64	13.857	0.012	K-H	0.026	294.556	17	20	1.005
65	14.586	0.012	K-H	0.024	324.306	15	20	1.005
66	16.130	0.012	K-H/atom	0.020	391.461	13	20	1.005
67	1.252	0.022	ss	0.388	3.205	21.5	20	1.005
68	1.709	0.022	tran 2-D	0.316	5.343	21.6	20	1.005
69	2.095	0.022	2-D	0.282	7.959	21.7	20	1.005
70	2.478	0.022	2-D	0.266	11.005	21.7	20	1.005
71	3.044	0.022	2-D	0.233	15.415	21.7	20	1.005
72	4.195	0.022	2-D	0.167	26.535	21.5	20	1.005
73	5.342	0.022	tran K-H	0.142	44.240	21.1	20	1.005
74	5.947	0.022	K-H	0.133	53.221	20.7	20	1.005
75	6.560	0.022	K-H	0.120	65.569	20.1	20	1.005
76	7.807	0.022	K-H	0.087	114.888	19	20	1.005
77	9.044	0.022	K-H	0.072	174.339	18.8	20	1.005



78	9.712	0.022	K-H	0.065	198.596	18.3	20	1.005
79	10.389	0.022	K-H	0.058	231.827	17.5	20	1.005
80	11.723	0.022	K-H	0.048	288.071	16.2	20	1.005
81	13.137	0.022	K-H	0.042	352.252	15.1	20	1.005
82	1.252	0.034	tran 2-D	0.446	4.771	21.1	20	1.005
83	1.709	0.034	2-D	0.383	7.213	21.4	20	1.005
84	2.095	0.034	2-D	0.346	9.881	21.5	20	1.005
85	2.478	0.034	2-D	0.298	12.273	21.5	20	1.005
86	3.044	0.034	2-D	0.265	16.528	21.5	20	1.005
87	3.617	0.034	2-D/tran K-H	0.240	24.773	21.3	20	1.005
88	4.195	0.034	K-H	0.231	33.966	21	20	1.005
89	5.367	0.034	K-H	0.197	51.422	20.5	20	1.005
90	5.961	0.034	K-H	0.158	72.751	19.7	20	1.005
91	6.589	0.034	K-H	0.135	94.084	18.9	20	1.005
92	7.196	0.034	K-H	0.127	120.349	19.8	20	1.005
93	7.807	0.034	K-H	0.110	155.964	19.5	20	1.005
94	9.123	0.034	K-H/atom	0.087	227.497	18.7	20	1.005
95	10.433	0.034	atom	0.073	288.048	17.3	20	1.005
96	11.819	0.034	atom	0.062	363.948	15.9	20	1.005
97	13.241	0.034	atom	0.053	435.854	12.8	20	1.005
98	1.240	0.003	ss	0.229	1.731	21.9	20	1.005
99	1.701	0.003	ss	0.168	3.946	22.1	20	1.005
100	2.084	0.003	ss	0.136	6.306	22.2	20	1.005
101	2.472	0.003	ss/tran 2-D	0.120	9.182	22.2	20	1.005
102	3.044	0.003	2-D	0.108	12.253	22.1	20	1.005
103	4.175	0.003	2-D	0.092	22.676	22	20	1.005
104	5.342	0.003	2-D	0.084	35.232	21.3	20	1.005
105	6.530	0.003	2-D	0.078	50.720	20.5	20	1.005
106	7.772	0.003	2-D	0.059	67.654	19	20	1.005
107	8.386	0.003	tran K-H	0.052	75.805	18	20	1.005
108	9.005	0.003	K-H	0.046	85.360	17.3	20	1.005
109	10.301	0.003	K-H	0.037	105.638	16.7	20	1.005
110	10.984	0.003	K-H	0.034	115.668	16.2	20	1.005
111	11.627	0.003	K-H	0.035	147.504	18.8	20	1.005
112	13.085	0.003	K-H	0.026	190.465	17.9	20	1.005
113	14.586	0.003	K-H	0.018	239.524	15.1	20	1.005
114	16.071	0.003	K-H	0.015	283.073	21.4	20	1.005
115	17.653	0.003	K-H	0.013	335.653	10.6	20	1.005
116	19.208	0.003	K-H	0.011	380.963	9	20	1.005
117	1.252	0.050	2-D	0.545	7.122	21.8	20	1.005

118	1.709	0.050	2-D	0.457	10.245	22	20	1.005
119	2.100	0.050	2-D	0.414	12.716	22	20	1.005
120	2.478	0.050	slug	0.383	23.154	22.1	20	1.005
121	3.051	0.050	p.slug	0.336	40.366	22.1	20	1.005
122	4.215	0.050	p.slugK-H	0.243	56.788	22	20	1.005
123	5.392	0.050	p.slugK-H	0.191	83.733	21.9	20	1.005
124	6.589	0.050	p.slugK-H	0.154	143.285	21.1	20	1.005
125	7.841	0.050	atom	0.122	212.110	19.7	20	1.005
126	9.123	0.050	atom	0.102	275.409	18.7	20	1.005
127	10.433	0.050	atom	0.091	345.090	17.5	20	1.005
128	11.819	0.050	atom	0.076	425.569	16	20	1.005
129	13.189	0.050	atom /annular	0.071	636.353	19	20	1.005
130	14.698	0.050	atom /annular	0.058	740.409	19	20	1.005
131	16.309	0.050	annular	0.045	896.908	17.2	20	1.005
132	17.967	0.050	annular	0.039	1021.251	14.2	20	1.005
133	19.672	0.050	annular	0.033	1163.408	12	20	1.005
134	21.354	0.050	annular	0.030	1321.796	10.2	20	1.005
135	1.258	0.070	slug	0.456	75.836	21.5	20	1.005
136	1.717	0.070	slug	0.364	74.214	21.8	20	1.005
137	2.105	0.070	slug	0.351	59.504	21.9	20	1.005
138	2.501	0.070	slug/p.slug	0.336	84.164	22	20	1.005
139	3.073	0.070	p.slug	0.330	70.649	22.1	20	1.005
140	4.215	0.070	p.slug	0.272	91.000	22.1	20	1.005
141	5.392	0.070	p.slug/atom	0.224	127.743	22	20	1.005
142	6.589	0.070	atom	0.176	189.788	21.6	20	1.005
143	7.807	0.070	atom	0.145	265.958	20.7	20	1.005
144	9.123	0.070	atom	0.121	348.630	19	20	1.005
145	10.519	0.070	atom	0.104	440.189	16.8	20	1.005
146	11.819	0.070	atom/annular	0.096	674.234	18.8	20	1.005
147	13.292	0.070	annular	0.081	806.570	17.9	20	1.005
148	14.809	0.070	annular	0.068	930.024	16.5	20	1.005
149	16.426	0.070	annular	0.057	1086.879	14	20	1.005
150	18.030	0.070	annular	0.048	1307.302	11.2	20	1.005
151	1.242	0.100	slug	0.341	80.396	21.6	20	1.005
152	1.713	0.100	slug	0.321	82.509	21.7	20	1.005
153	2.110	0.100	slug	0.339	118.377	21.9	20	1.005
154	2.496	0.100	slug	0.330	107.595	22.1	20	1.005
155	3.066	0.100	p.slug	0.340	105.219	22.2	20	1.005
156	4.215	0.100	p.slug	0.279	149.613	22.1	20	1.005
157	5.392	0.100	p.slug	0.239	199.763	21.9	20	1.005

158	6.619	0.100	atom/p.slug	0.201	269.692	20.5	20	1.005
159	7.876	0.100	atom	0.168	362.016	19.5	20	1.005
160	9.200	0.100	atom	0.146	454.226	18.2	20	1.005
161	10.519	0.100	annular	0.130	764.720	19.5	20	1.005
162	11.961	0.100	annular	0.110	934.113	18	20	1.005
163	13.446	0.100	annular	0.096	1090.602	16.1	20	1.005
164	14.974	0.100	annular	0.082	1275.258	13.6	20	1.005
165	16.543	0.100	annular	0.071	1501.350	10.5	20	1.005
166	1.267	0.186	slug	0.391	162.125	16.5	20	1.005
167	1.730	0.186	slug	0.360	198.607	17.3	20	1.005
168	2.115	0.186	slug	0.367	230.545	18.4	20	1.005
169	2.507	0.186	slug	0.366	249.727	19.1	20	1.005
170	3.088	0.186	slug	0.362	276.315	20.4	20	1.005
171	4.254	0.186	p.slug	0.322	316.827	21.7	20	1.005
172	5.466	0.186	p.slug	0.292	388.451	22.7	20	1.005
173	6.707	0.186	p.slug	0.256	502.370	22.8	20	1.005
174	8.011	0.186	p.slug/annular	0.220	1014.805	22	20	1.005
175	9.354	0.186	annular	0.197	1205.421	21.2	20	1.005
176	10.733	0.186	annular	0.170	1406.188	19.6	20	1.005
177	12.194	0.186	annular	0.153	1594.447	18	20	1.005
178	13.698	0.186	annular	0.135	1729.709	15.4	20	1.005
179	1.289	0.415	slug	0.484	692.203	20	20	1.005
180	1.766	0.403	slug	0.418	829.712	20.3	20	1.005
181	2.164	0.403	slug	0.396	965.654	20.5	20	1.005
182	2.565	0.403	slug	0.392	1012.860	20.8	20	1.005
183	3.173	0.403	slug	0.375	1126.293	20.9	20	1.005
184	4.407	0.403	slug	0.343	1348.727	21.1	20	1.005
185	5.610	0.403	p.slug	0.306	1673.813	21.2	20	1.005
186	6.964	0.403	p.slug	0.281	1933.963	20.9	20	1.005
187	8.309	0.403	p.slug/annular	0.257	2025.793	19.5	20	1.005
188	9.763	0.403	annular	0.227	2046.987	19	20	1.005
189	11.269	0.403	annular	0.205	2048.668	18.6	20	1.005

**Πίνακας Π.3 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε οριζόντιο αγωγό**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$dP/dx$ (m)	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.384	0.003	ss/2-D	0.175	5.653	28	28	1.0085
2	1.982	0.003	2-D	0.126	8.297	28	28	1.0085
3	2.482	0.003	2-D	0.104	10.727	28	28	1.0085
4	2.986	0.003	2-D	0.093	13.232	28	28	1.0085
5	3.486	0.003	2-D	0.085	15.764	28	28	1.0085
6	3.971	0.003	2-D	0.083	16.915	28	28	1.0085
7	5.266	0.003	2-D	0.071	28.688	28	28	1.0085
8	5.932	0.003	2-D	0.068	34.958	28	28	1.0085
9	6.604	0.003	2-D	0.062	41.442	28	28	1.0085
10	7.281	0.003	tran K-H	0.054	48.965	28	28	1.0085
11	8.001	0.003	tran K-H	0.045	57.623	28	28	1.0085
12	9.391	0.003	K-H	0.035	73.559	28	28	1.0085
13	10.851	0.003	K-H	0.028	93.900	28	28	1.0085
14	12.397	0.003	K-H	0.024	119.765	28	28	1.0085
15	13.927	0.003	K-H	0.019	172.620	28	28	1.0085
16	15.551	0.003	K-H	0.017	204.171	28	28	1.0085
17	17.216	0.003	K-H	0.014	243.324	28	28	1.0085
18	18.920	0.003	K-H	0.012	284.902	28	28	1.0085
19	1.384	0.005	ss/2-D	0.212	6.563	28	28	1.0085
20	1.982	0.005	2-D	0.161	9.538	28	28	1.0085
21	2.482	0.005	2-D	0.132	12.108	28	28	1.0085
22	2.986	0.005	2-D	0.118	14.844	28	28	1.0085
23	3.486	0.005	2-D	0.109	17.659	28	28	1.0085
24	3.971	0.005	2-D	0.107	18.697	28	28	1.0085
25	5.266	0.005	2-D	0.095	31.268	28	28	1.0085
26	6.604	0.005	2-D	0.068	46.919	28	28	1.0085
27	7.281	0.005	2-D/tran K-H	0.057	55.495	28	28	1.0085
28	8.001	0.005	tran K-H/K-H	0.050	63.049	28	28	1.0085
29	8.693	0.005	K-H	0.045	71.872	28	28	1.0085
30	9.391	0.005	K-H	0.042	79.974	28	28	1.0085
31	10.851	0.005	K-H	0.036	102.035	28	28	1.0085
32	12.397	0.005	K-H	0.030	149.733	28	28	1.0085
33	13.927	0.005	K-H	0.025	180.041	28	28	1.0085
34	15.551	0.005	K-H	0.021	219.922	28	28	1.0085
35	17.216	0.005	K-H	0.018	263.753	28	28	1.0085
36	1.384	0.007	ss/2-D	0.246	4.833	28	28	1.0085
37	1.982	0.007	2-D	0.187	7.893	28	28	1.0085
38	2.482	0.007	2-D	0.158	10.498	28	28	1.0085
39	2.986	0.008	2-D	0.141	13.363	28	28	1.0085
40	3.486	0.008	2-D	0.133	16.455	28	28	1.0085
41	3.971	0.008	2-D	0.129	18.312	28	28	1.0085
42	5.266	0.008	2-D	0.106	30.778	28	28	1.0085
43	5.932	0.008	2-D/tran K-H	0.086	39.227	28	28	1.0085
44	6.619	0.008	tran K-H	0.075	47.621	28	28	1.0085
45	8.001	0.008	K-H	0.060	62.691	28	28	1.0085
46	9.391	0.008	K-H	0.051	80.501	28	28	1.0085
47	10.851	0.008	K-H	0.044	104.043	28	28	1.0085
48	12.397	0.008	K-H	0.035	151.954	28	28	1.0085
49	13.984	0.008	K-H	0.028	193.574	28	28	1.0085
50	15.613	0.008	K-H	0.022	238.071	28	28	1.0085
51	17.282	0.008	K-H	0.019	293.363	28	28	1.0085

52	20.886	0.008	K-H	0.014	411.325	28	28	1.0085
53	1.384	0.010	2-D	0.263	4.920	25	25	1
54	1.982	0.010	2-D	0.200	8.221	25	25	1
55	2.482	0.010	2-D	0.169	10.833	25	25	1
56	2.986	0.010	2-D	0.153	13.541	25	25	1
57	3.486	0.010	2-D	0.145	16.545	25	25	1
58	3.971	0.010	2-D	0.144	17.963	25	25	1
59	4.617	0.010	2-D	0.131	23.998	25	25	1
60	5.266	0.010	2-D/tran K-H	0.110	30.449	25	25	1
61	5.932	0.010	tran K-H	0.091	39.211	25	25	1
62	6.604	0.010	K-H	0.078	47.580	25	25	1
63	8.001	0.010	K-H	0.065	62.554	25	25	1
64	9.391	0.010	K-H	0.057	81.468	25	25	1
65	10.851	0.010	K-H	0.049	110.088	25	25	1
66	12.397	0.010	K-H	0.036	165.645	25	25	1
67	13.956	0.010	K-H	0.028	214.302	25	25	1
68	15.613	0.010	K-H	0.024	261.043	25	25	1
69	17.282	0.010	K-H/tran atom	0.021	317.067	25	25	1
70	1.384	0.012	2-D	0.277	5.130	25	25	1
71	1.982	0.012	2-D	0.214	8.404	25	25	1
72	2.482	0.012	2-D	0.181	11.049	25	25	1
73	2.986	0.012	2-D	0.166	14.410	25	25	1
74	3.585	0.012	2-D	0.163	17.642	25	25	1
75	3.971	0.012	2-D	0.159	18.961	25	25	1
76	4.628	0.012	2-D/tran K-H	0.131	25.366	25	25	1
77	5.291	0.012	tran K-H	0.114	33.807	25	25	1
78	5.946	0.012	K-H	0.097	40.037	25	25	1
79	6.604	0.012	K-H	0.086	46.960	25	25	1
80	7.281	0.012	K-H	0.078	54.190	25	25	1
81	8.001	0.012	K-H	0.073	63.305	25	25	1
82	9.391	0.012	K-H	0.063	83.951	25	25	1
83	10.898	0.012	K-H	0.052	121.552	25	25	1
84	12.397	0.012	K-H	0.037	184.808	25	25	1
85	13.984	0.012	K-H	0.031	230.415	25	25	1
86	15.613	0.012	K-H/tran atom	0.027	279.751	25	25	1
87	16.997	0.012	atom	0.024	326.703	25	25	1
88	1.398	0.020	2-D	0.335	5.342	25	25	1
89	1.992	0.020	2-D	0.266	8.865	25	25	1
90	2.482	0.020	2-D	0.240	11.922	25	25	1
91	2.986	0.020	2-D	0.213	14.902	25	25	1
92	3.486	0.020	2-D	0.188	18.666	25	25	1
93	3.971	0.020	2-D/tran K-H	0.183	19.224	25	25	1
94	4.628	0.020	tran K-H	0.166	28.452	25	25	1
95	5.291	0.020	K-H	0.148	35.898	25	25	1
96	5.960	0.020	K-H	0.129	42.523	25	25	1
97	6.634	0.020	K-H	0.118	50.065	25	25	1
98	8.001	0.020	K-H	0.100	74.435	25	25	1
99	9.391	0.020	K-H	0.073	132.976	25	25	1
100	10.898	0.020	K-H/tran atom	0.057	180.573	25	25	1
101	12.449	0.020	atom	0.048	232.333	25	25	1
102	15.674	0.020	atom	0.036	337.524	25	25	1
103	1.398	0.034	2-D	0.396	7.009	25	25	1
104	1.982	0.034	2-D	0.317	10.647	25	25	1
105	2.482	0.034	2-D	0.279	13.615	25	25	1
106	2.986	0.034	2-D	0.245	16.549	25	25	1
107	3.486	0.034	2-D/tran K-H	0.232	20.197	25	25	1

108	3.971	0.034	K-H	0.212	22.811	25	25	1
109	5.291	0.034	K-H	0.195	41.747	25	25	1
110	6.634	0.034	K-H	0.143	67.057	25	25	1
111	8.038	0.034	atom	0.114	109.589	25	25	1
112	9.475	0.034	atom	0.090	182.044	25	25	1
113	10.945	0.034	atom	0.075	243.393	25	25	1
114	14.097	0.034	atom/tran annular	0.054	371.065	25	25	1
115	17.413	0.034	annular	0.042	510.855	25	25	1
116	1.398	0.050	2-D	0.483	9.620	25	25	1
117	1.992	0.050	2-D	0.412	13.551	25	25	1
118	2.494	0.050	2-D	0.320	16.462	25	25	1
119	2.993	0.050	2-D/tran K-H	0.325	20.653	25	25	1
120	3.495	0.050	K-H	0.293	26.668	25	25	1
121	5.316	0.050	atom/p.slug	0.200	70.088	25	25	1
122	6.665	0.050	atom/p.slug	0.163	97.270	25	25	1
123	8.038	0.050	atom	0.129	172.070	25	25	1
124	9.475	0.050	atom	0.107	237.197	25	25	1
125	10.992	0.050	tran annular	0.090	312.459	25	25	1
126	12.552	0.050	annular	0.078	399.548	25	25	1
127	15.796	0.050	annular	0.058	512.203	25	25	1
128	1.405	0.064	slug	0.500	14.196	26	26	1
129	1.992	0.064	slug	0.319	81.308	26	26	1
130	2.494	0.064	slug	0.326	55.246	26	26	1
131	3.000	0.064	slug	0.295	82.954	26	26	1
132	3.511	0.064	p.slug	0.284	74.685	26	26	1
133	4.009	0.064	p.slug	0.279	86.033	26	26	1
134	5.316	0.064	p.slug	0.213	105.426	26	26	1
135	6.665	0.064	p.slug	0.179	142.512	26	26	1
136	8.074	0.064	p.slug	0.142	209.554	26	26	1
137	9.516	0.064	p.slug/annular	0.123	277.861	26	26	1
138	10.992	0.064	annular	0.103	368.193	26	26	1
139	14.097	0.064	annular	0.080	512.172	26	26	1
140	17.608	0.064	annular	0.057	512.198	26	26	1
141	1.405	0.100	slug	0.314	117.187	26	26	1
142	1.992	0.100	slug	0.279	123.180	26	26	1
143	2.494	0.100	slug	0.322	128.729	26	26	1
144	3.000	0.100	slug	0.293	181.204	26	26	1
145	3.511	0.100	slug	0.282	181.200	26	26	1
146	4.009	0.100	slug/p.slug	0.290	135.111	26	26	1
147	5.316	0.100	p.slug	0.241	181.794	26	26	1
148	6.726	0.100	p.slug	0.205	233.421	26	26	1
149	8.110	0.100	p.slug/annular	0.173	306.171	26	26	1
150	9.558	0.100	tran annular	0.151	396.906	26	26	1
151	11.085	0.100	annular	0.126	512.104	26	26	1
152	14.321	0.100	annular	0.097	512.084	26	26	1
153	17.801	0.100	annular	0.071	512.208	26	26	1
154	1.411	0.140	slug	0.324	128.767	26	26	1
155	2.021	0.140	slug	0.302	173.482	26	26	1
156	2.518	0.140	slug	0.295	184.357	26	26	1
157	3.014	0.140	slug	0.324	212.919	26	26	1
158	4.009	0.140	slug/p.slug	0.295	227.298	26	26	1
159	5.341	0.140	p.slug	0.261	278.340	26	26	1
160	6.726	0.140	p.slug	0.223	335.492	26	26	1
161	8.146	0.140	tran annular	0.192	439.059	26	26	1
162	9.640	0.140	annular	0.170	512.204	26	26	1

163	11.177	0.140	annular	0.149	512.187	26	26	1
164	14.432	0.140	annular	0.108	512.171	26	26	1
165	17.993	0.140	annular	0.079	512.185	26	26	1
166	0.582	0.003	smooth	0.198	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
167	0.950	0.003	smooth	0.187	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
168	0.582	0.005	smooth	0.224	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
169	0.950	0.005	Διαταραχές	0.215	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
170	1.497	0.005	Διαταραχές	0.196	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
171	0.582	0.007	smooth	0.244	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
172	0.945	0.007	smooth	0.233	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
173	1.497	0.007	Διαταραχές	0.212	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
174	0.582	0.010	smooth	0.262	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
175	0.950	0.010	Διαταραχές	0.254	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
176	1.497	0.010	2-D	0.236	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
177	0.582	0.012	smooth	0.277	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
178	0.945	0.012	Παλλόμενη Διεπιφάνεια	0.271	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
179	1.497	0.012	2-D/Διαταραχές	0.251	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
180	0.582	0.020	Παλλόμενη Διεπιφάνεια	0.326	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
181	0.950	0.020	2-D/Διαταραχές	0.321	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
182	1.497	0.020	2-D/Διαταραχές	0.295	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
183	0.582	0.034	Διαταραχές	0.385	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
184	0.950	0.034	2-D	0.376	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
185	0.582	0.050	2-D	0.465	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1
186	0.950	0.050	2-D	0.449	Δεν Μετρήθηκε	26	26	1

**Πίνακας Π.4 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε ανωφερή κλίση 0.25°**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.398	0.004	slug	0.201	22	20	1.005
2	1.992	0.004	slug	0.191	22	20	1.005
3	2.188	0.004	slug	0.259	22	20	1.005
4	2.395	0.004	slug	0.221	22	20	1.005
5	2.598	0.004	slug/p.slug	0.234	22	20	1.005
6	2.802	0.004	slug/p.slug	0.218	22	20	1.005
7	3.000	0.004	p.slug	0.243	22	20	1.005
8	3.198	0.004	p.slug	0.224	22	20	1.005
9	3.990	0.004	p.slug/K-H	0.217	22	20	1.005
10	5.291	0.004	K-H	0.124	22	20	1.005
11	6.634	0.004	K-H	0.083	22	20	1.005
12	8.001	0.004	K-H	0.063	22	20	1.005
13	9.391	0.004	K-H	0.053	22	20	1.005
14	10.851	0.004	K-H	0.041	22	20	1.005
15	12.344	0.004	K-H	0.032	22	20	1.005
16	13.927	0.004	K-H	0.024	22	20	1.005
17	15.489	0.004	K-H	0.019	22	20	1.005
18	1.398	0.006	slug	0.243	22	20	1.005
19	1.992	0.006	slug	0.222	22	20	1.005
20	2.395	0.006	slug	0.263	22	20	1.005
21	2.592	0.006	slug	0.266	22	20	1.005
22	2.802	0.006	slug	0.249	22	20	1.005
23	3.000	0.006	slug/p.slug	0.247	22	20	1.005
24	3.198	0.006	slug/p.slug	0.239	22	20	1.005
25	3.990	0.006	p.slug	0.222	22	20	1.005
26	5.291	0.006	K-H	0.120	22	20	1.005
27	6.604	0.006	K-H	0.094	22	20	1.005
28	8.001	0.006	K-H	0.067	22	20	1.005
29	9.391	0.006	K-H	0.055	22	20	1.005
30	10.898	0.006	K-H	0.043	22	20	1.005
31	12.344	0.006	K-H	0.036	22	20	1.005
32	13.927	0.006	K-H	0.026	22	20	1.005
33	15.489	0.006	K-H	0.021	22	20	1.005
34	1.398	0.008	slug	0.236	22	20	1.005
35	1.992	0.008	slug	0.206	22	20	1.005
36	2.395	0.008	slug	0.256	22	20	1.005
37	2.598	0.008	slug	0.260	22	20	1.005



38	2.802	0.008	slug	0.216	22	20	1.005
39	3.000	0.008	slug/p.slug	0.246	22	20	1.005
40	3.198	0.008	slug/p.slug	0.234	22	20	1.005
41	3.990	0.008	p.slug	0.211	22	20	1.005
42	4.650	0.008	p.slug	0.162	22	20	1.005
43	5.291	0.008	K-H	0.139	22	20	1.005
44	6.634	0.008	K-H	0.114	22	20	1.005
45	8.001	0.008	K-H	0.081	22	20	1.005
46	9.391	0.008	K-H	0.059	22	20	1.005
47	10.851	0.008	K-H	0.046	22	20	1.005
48	12.344	0.008	K-H	0.035	22	20	1.005
49	13.927	0.008	K-H	0.028	22	20	1.005
50	15.489	0.008	K-H	0.023	22	20	1.005
51	16.932	0.008	K-H	0.019	22	20	1.005
52	1.398	0.012	slug	0.210	22	20	1.005
53	1.992	0.012	slug	0.218	22	20	1.005
54	2.395	0.012	slug	0.240	22	20	1.005
55	2.598	0.012	slug	0.258	22	20	1.005
56	2.802	0.012	slug	0.246	22	20	1.005
57	3.000	0.012	slug/p.slug	0.239	22	20	1.005
58	3.198	0.012	p.slug	0.246	22	20	1.005
59	3.990	0.012	p.slug	0.218	22	20	1.005
60	5.291	0.012	K-H	0.162	22	20	1.005
61	6.634	0.012	K-H	0.124	22	20	1.005
62	8.001	0.012	K-H	0.085	22	20	1.005
63	9.391	0.012	K-H	0.067	22	20	1.005
64	10.851	0.012	K-H	0.050	22	20	1.005
65	12.397	0.012	K-H	0.043	22	20	1.005
66	13.927	0.012	K-H	0.034	22	20	1.005
67	15.551	0.012	K-H	0.028	22	20	1.005
68	17.216	0.012	K-H	0.023	22	20	1.005
69	1.398	0.022	slug	0.248	22	20	1.005
70	1.992	0.022	slug	0.283	22	20	1.005
71	2.395	0.022	slug	0.272	22	20	1.005
72	2.605	0.022	slug	0.241	22	20	1.005
73	2.802	0.022	slug	0.281	22	20	1.005
74	3.000	0.022	slug	0.261	22	20	1.005
75	3.198	0.022	slug/p.slug	0.258	22	20	1.005
76	3.990	0.022	p.slug	0.238	22	20	1.005
77	5.291	0.022	p.slug	0.201	22	20	1.005
78	6.650	0.022	K-H	0.147	22	20	1.005

79	8.038	0.022	K-H	0.117	22	20	1.005
80	9.433	0.022	K-H	0.082	22	20	1.005
81	10.851	0.022	K-H	0.065	22	20	1.005
82	12.397	0.022	K-H	0.053	22	20	1.005
83	13.984	0.022	K-H/atom	0.042	22	20	1.005
84	15.613	0.022	atom	0.037	22	20	1.005
85	17.216	0.022	atom	0.033	22	20	1.005
86	19.060	0.022	atom	0.027	22	20	1.005
87	20.960	0.022	annular	0.022	22	20	1.005
88	1.405	0.042	slug	0.236	22	20	1.005
89	2.002	0.042	slug	0.301	22	20	1.005
90	2.395	0.042	slug	0.262	22	20	1.005
91	2.605	0.042	slug	0.280	22	20	1.005
92	2.802	0.042	slug	0.263	22	20	1.005
93	3.000	0.042	slug	0.265	22	20	1.005
94	3.198	0.042	slug/p.slug	0.272	22	20	1.005
95	3.990	0.042	slug/p.slug	0.249	22	20	1.005
96	5.291	0.042	p.slug	0.208	22	20	1.005
97	6.650	0.042	p.slug	0.162	22	20	1.005
98	8.074	0.042	p.slug/atom	0.127	22	20	1.005
99	9.433	0.042	atom	0.103	22	20	1.005
100	10.945	0.042	atom	0.084	22	20	1.005
101	12.449	0.042	atom	0.072	22	20	1.005
102	13.984	0.042	atom	0.061	22	20	1.005
103	15.674	0.042	atom	0.053	22	20	1.005
104	17.347	0.042	atom/annular	0.043	22	20	1.005
105	19.200	0.042	annular	0.037	22	20	1.005
106	20.960	0.042	annular	0.031	22	20	1.005
107	1.405	0.072	slug	0.267	22	20	1.005
108	1.992	0.072	slug	0.221	22	20	1.005
109	2.395	0.072	slug	0.274	22	20	1.005
110	2.802	0.072	slug	0.254	22	20	1.005
111	3.000	0.072	slug	0.247	22	20	1.005
112	3.198	0.072	slug	0.270	22	20	1.005
113	3.990	0.072	slug/p.slug	0.252	22	20	1.005
114	5.341	0.072	slug/p.slug	0.219	22	20	1.005
115	6.696	0.072	p.slug	0.183	22	20	1.005
116	8.074	0.072	p.slug/atom	0.147	22	20	1.005
117	9.516	0.072	atom	0.121	22	20	1.005
118	10.945	0.072	atom	0.107	22	20	1.005
119	12.500	0.072	atom	0.088	22	20	1.005

120	14.097	0.072	atom/annular	0.080	22	20	1.005
121	15.674	0.072	annular	0.069	22	20	1.005
122	17.543	0.072	annular	0.057	22	20	1.005
123	19.338	0.072	annular	0.049	22	20	1.005
124	2.011	0.100	slug	0.250	22	20	1.005
125	2.407	0.100	slug	0.278	22	20	1.005
126	2.802	0.100	slug	0.277	22	20	1.005
127	3.213	0.100	slug	0.286	22	20	1.005
128	4.009	0.100	slug	0.272	22	20	1.005
129	5.341	0.100	slug/p.slug	0.238	22	20	1.005
130	6.726	0.100	p.slug	0.201	22	20	1.005
131	8.074	0.100	p.slug	0.170	22	20	1.005
132	9.516	0.100	atom	0.143	22	20	1.005
133	11.085	0.100	atom	0.124	22	20	1.005
134	12.603	0.100	annular	0.108	22	20	1.005
135	14.210	0.100	annular	0.094	22	20	1.005
136	15.917	0.100	annular	0.082	22	20	1.005
137	2.011	0.143	slug	0.278	22	20	1.005
138	2.407	0.143	slug	0.285	22	20	1.005
139	2.802	0.143	slug	0.313	22	20	1.005
140	3.213	0.143	slug	0.299	22	20	1.005
141	4.009	0.143	slug	0.289	22	20	1.005
142	5.341	0.143	slug	0.249	22	20	1.005
143	6.756	0.143	slug/p.slug	0.219	22	20	1.005
144	8.181	0.143	p.slug/annular	0.186	22	20	1.005
145	9.599	0.143	annular	0.167	22	20	1.005
146	11.177	0.143	annular	0.145	22	20	1.005
147	12.705	0.143	annular	0.124	22	20	1.005
148	14.376	0.143	annular	0.110	22	20	1.005

**Πίνακας Π.5 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε ανωφερή κλίση 0.5°**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.384	0.004	slug	0.261	21.3	20	0.99
2	2.011	0.004	slug	0.247	21.3	20	0.99
3	2.506	0.004	slug	0.275	21.3	20	0.99
4	3.000	0.004	p.slug	0.283	21.3	20	0.99
5	3.990	0.004	p.slug	0.254	21.3	20	0.99
6	5.291	0.004	K-H	0.170	21.3	20	0.99
7	6.634	0.004	K-H	0.087	21.3	20	0.99
8	8.001	0.004	K-H	0.071	21.3	20	0.99
9	9.391	0.004	K-H	0.067	21.3	20	0.99
10	10.851	0.004	K-H/2-D	0.052	21.3	20	0.99
11	12.344	0.004	K-H/2-D	0.042	21.3	20	0.99
12	13.927	0.004	K-H	0.035	21.3	20	0.99
13	15.551	0.004	K-H	0.026	21.3	20	0.99
14	17.216	0.004	K-H	0.021	21.3	20	0.99
15	1.398	0.006	slug	0.226	21.3	20	0.99
16	2.002	0.006	slug	0.274	21.3	20	0.99
17	2.506	0.006	slug	0.274	21.3	20	0.99
18	3.000	0.006	slug	0.286	21.3	20	0.99
19	3.990	0.006	p.slug	0.259	21.3	20	0.99
20	5.291	0.006	K-H	0.201	21.3	20	0.99
21	6.634	0.006	K-H	0.124	21.3	20	0.99
22	8.001	0.006	K-H	0.089	21.3	20	0.99
23	9.391	0.006	K-H	0.076	21.3	20	0.99
24	10.851	0.006	K-H	0.057	21.3	20	0.99
25	12.397	0.006	K-H /2-D	0.045	21.3	20	0.99
26	13.927	0.006	K-H	0.033	21.3	20	0.99
27	15.551	0.006	K-H	0.027	21.3	20	0.99
28	17.216	0.006	K-H	0.025	21.3	20	0.99
29	18.990	0.006	K-H	0.021	21.3	20	0.99
30	1.408	0.008	slug	0.243	21.3	20	0.99
31	2.011	0.008	slug	0.212	21.3	20	0.99
32	2.506	0.008	slug	0.316	21.3	20	0.99
33	3.000	0.008	slug	0.278	21.3	20	0.99
34	3.990	0.008	slug/p.slug	0.253	21.3	20	0.99
35	5.291	0.008	K-H	0.176	21.3	20	0.99
36	6.634	0.008	K-H	0.120	21.3	20	0.99
37	8.001	0.008	K-H	0.105	21.3	20	0.99
38	9.391	0.008	K-H	0.078	21.3	20	0.99
39	10.851	0.008	K-H	0.058	21.3	20	0.99

40	12.397	0.008	K-H	0.043	21.3	20	0.99
41	13.927	0.008	K-H	0.035	21.3	20	0.99
42	15.551	0.008	K-H	0.030	21.3	20	0.99
43	17.216	0.008	K-H	0.028	21.3	20	0.99
44	18.990	0.008	K-H	0.024	21.3	20	0.99
45	20.812	0.008	K-H	0.019	21.3	20	0.99
46	22.679	0.008	K-H	0.016	21.3	20	0.99
47	24.673	0.008	K-H	0.013	21.3	20	0.99
48	1.411	0.011	slug	0.260	21.3	20	0.99
49	2.007	0.011	slug	0.268	21.3	20	0.99
50	2.506	0.011	slug	0.270	21.3	20	0.99
51	3.007	0.011	slug	0.281	21.3	20	0.99
52	4.000	0.011	slug/p.slug	0.262	21.3	20	0.99
53	5.303	0.011	slug/p.slug	0.190	21.3	20	0.99
54	6.634	0.011	K-H	0.142	21.3	20	0.99
55	8.001	0.011	K-H	0.111	21.3	20	0.99
56	9.391	0.011	K-H	0.087	21.3	20	0.99
57	10.851	0.011	K-H	0.071	21.3	20	0.99
58	12.397	0.011	K-H	0.048	21.3	20	0.99
59	13.927	0.011	K-H	0.039	21.3	20	0.99
60	15.551	0.011	K-H	0.035	21.3	20	0.99
61	17.216	0.011	K-H	0.029	21.3	20	0.99
62	18.990	0.011	K-H	0.023	21.3	20	0.99
63	1.405	0.022	slug	0.275	21.3	20	0.99
64	2.011	0.022	slug	0.281	21.3	20	0.99
65	2.506	0.022	slug	0.317	21.3	20	0.99
66	3.014	0.022	slug	0.283	21.3	20	0.99
67	4.000	0.022	slug	0.261	21.3	20	0.99
68	5.316	0.022	slug/p.slug	0.217	21.3	20	0.99
69	6.634	0.022	p.slug	0.178	21.3	20	0.99
70	8.001	0.022	p.slug/K-H	0.129	21.3	20	0.99
71	9.433	0.022	K-H	0.106	21.3	20	0.99
72	10.898	0.022	K-H	0.083	21.3	20	0.99
73	12.397	0.022	K-H	0.069	21.3	20	0.99
74	14.041	0.022	K-H/atom	0.057	21.3	20	0.99
75	15.613	0.022	atom	0.048	21.3	20	0.99
76	17.282	0.022	atom	0.040	21.3	20	0.99
77	19.060	0.022	atom	0.035	21.3	20	0.99
78	1.415	0.042	slug	0.277	21.3	20	0.99
79	2.011	0.042	slug	0.289	21.3	20	0.99
80	2.512	0.042	slug	0.290	21.3	20	0.99
81	3.007	0.042	slug	0.302	21.3	20	0.99

82	4.000	0.042	slug	0.273	21.3	20	0.99
83	5.316	0.042	slug/p.slug	0.237	21.3	20	0.99
84	6.634	0.042	slug/p.slug	0.188	21.3	20	0.99
85	8.038	0.042	p.slug	0.151	21.3	20	0.99
86	9.475	0.042	p.slug/K-H	0.122	21.3	20	0.99
87	10.945	0.042	K-H/atom	0.098	21.3	20	0.99
88	12.500	0.042	atom	0.086	21.3	20	0.99
89	14.041	0.042	atom	0.076	21.3	20	0.99
90	15.674	0.042	atom	0.064	21.3	20	0.99
91	17.347	0.042	atom	0.055	21.3	20	0.99
92	1.415	0.072	slug	0.282	21.3	20	0.99
93	2.011	0.072	slug	0.267	21.3	20	0.99
94	2.512	0.072	slug	0.291	21.3	20	0.99
95	3.014	0.072	slug	0.316	21.3	20	0.99
96	4.028	0.072	slug	0.305	21.3	20	0.99
97	5.341	0.072	slug	0.254	21.3	20	0.99
98	6.726	0.072	slug/p.slug	0.208	21.3	20	0.99
99	8.110	0.072	p.slug	0.170	21.3	20	0.99
100	9.516	0.072	p.slug	0.141	21.3	20	0.99
101	10.992	0.072	p.slug/atom	0.123	21.3	20	0.99
102	12.552	0.072	atom	0.108	21.3	20	0.99
103	14.154	0.072	atom/annular	0.095	21.3	20	0.99
104	15.796	0.072	annular	0.084	21.3	20	0.99
105	17.543	0.072	annular	0.071	21.3	20	0.99
106	19.200	0.072	annular	0.063	21.3	20	0.99
107	1.421	0.100	slug	0.293	21.3	20	0.99
108	2.021	0.100	slug	0.280	21.3	20	0.99
109	2.518	0.100	slug	0.283	21.3	20	0.99
110	3.014	0.100	slug	0.319	21.3	20	0.99
111	4.028	0.100	slug	0.318	21.3	20	0.99
112	5.365	0.100	slug	0.261	21.3	20	0.99
113	6.726	0.100	slug/p.slug	0.223	21.3	20	0.99
114	8.110	0.100	p.slug	0.189	21.3	20	0.99
115	9.599	0.100	p.slug	0.163	21.3	20	0.99
116	11.039	0.100	annular	0.142	21.3	20	0.99
117	12.603	0.100	annular	0.126	21.3	20	0.99
118	14.265	0.100	annular	0.110	21.3	20	0.99
119	15.917	0.100	annular	0.097	21.3	20	0.99
120	17.673	0.100	annular	0.085	21.3	20	0.99
121	1.220	0.143	slug	0.314	21.3	20	0.99
122	2.021	0.143	slug	0.293	21.3	20	0.99
123	2.530	0.143	slug	0.320	21.3	20	0.99

124	3.043	0.143	slug	0.331	21.3	20	0.99
125	4.047	0.143	slug	0.308	21.3	20	0.99
126	5.390	0.143	slug	0.272	21.3	20	0.99
127	6.726	0.143	slug	0.242	21.3	20	0.99
128	8.181	0.143	p.slug	0.212	21.3	20	0.99
129	9.599	0.143	p.slug	0.184	21.3	20	0.99
130	11.177	0.143	p.slug/annular	0.157	21.3	20	0.99
131	12.705	0.143	annular	0.141	21.3	20	0.99
132	14.376	0.143	annular	0.130	21.3	20	0.99
133	16.037	0.143	annular	0.114	21.3	20	0.99
134	1.425	0.186	slug	0.327	21.3	20	0.99
135	2.030	0.186	slug	0.312	21.3	20	0.99
136	2.541	0.186	slug	0.316	21.3	20	0.99
137	3.057	0.186	slug	0.324	21.3	20	0.99
138	4.065	0.186	slug	0.315	21.3	20	0.99
139	5.390	0.186	slug	0.287	21.3	20	0.99
140	6.726	0.186	slug	0.258	21.3	20	0.99
141	8.252	0.186	slug	0.220	21.3	20	0.99
142	9.721	0.186	annular	0.198	21.3	20	0.99
143	11.223	0.186	annular	0.174	21.3	20	0.99
144	12.857	0.186	annular	0.155	21.3	20	0.99
145	14.487	0.186	annular	0.143	21.3	20	0.99

**Πίνακας Π.6 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε ανωφερή κλίση 1°**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	h/d	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.398	0.004	slug	0.186	22	20	1
2	1.992	0.004	slug	0.210	22	20	1
3	2.395	0.004	slug	0.238	22	20	1
4	2.592	0.004	slug	0.240	22	20	1
5	2.796	0.004	slug	0.273	22	20	1
6	3.000	0.004	slug	0.260	22	20	1
7	3.198	0.004	slug/p.slug	0.245	22	20	1
8	3.990	0.004	p.slug	0.222	22	20	1
9	5.291	0.004	p.slug	0.168	22	20	1
10	5.960	0.004	2-D/p.slug	0.148	22	20	1
11	6.634	0.004	2-D	0.115	22	20	1
12	8.001	0.004	2-D	0.078	22	20	1
13	9.391	0.004	2-D	0.057	22	20	1
14	10.851	0.004	2-D	0.044	22	20	1
15	12.344	0.004	2-D	0.034	22	20	1
16	13.870	0.004	2-D	0.028	22	20	1
17	15.489	0.004	2-D	0.024	22	20	1
18	17.216	0.004	K-H	0.018	22	20	1
19	18.920	0.004	K-H	0.014	22	20	1
20	20.737	0.004	K-H	0.011	22	20	1
21	1.398	0.006	slug	0.225	22	20	1
22	1.992	0.006	slug	0.252	22	20	1
23	2.395	0.006	slug	0.257	22	20	1
24	2.796	0.006	slug	0.250	22	20	1
25	3.000	0.006	slug	0.255	22	20	1
26	3.198	0.006	slug/p.slug	0.249	22	20	1
27	3.990	0.006	p.slug	0.240	22	20	1
28	5.291	0.006	p.slug	0.180	22	20	1
29	6.634	0.006	2-D	0.129	22	20	1
30	8.001	0.006	2-D	0.093	22	20	1
31	9.391	0.006	2-D	0.066	22	20	1
32	10.898	0.006	2-D	0.047	22	20	1
33	12.344	0.006	2-D	0.037	22	20	1
34	13.927	0.006	2-D	0.032	22	20	1
35	15.489	0.006	K-H	0.025	22	20	1
36	17.216	0.006	K-H	0.019	22	20	1
37	18.990	0.006	K-H	0.015	22	20	1
38	1.398	0.008	slug	0.220	22	20	1
39	1.992	0.008	slug	0.225	22	20	1
40	2.395	0.008	slug	0.293	22	20	1
41	2.796	0.008	slug	0.280	22	20	1
42	3.000	0.008	slug	0.257	22	20	1
43	3.198	0.008	slug	0.242	22	20	1
44	3.990	0.008	slug/p.slug	0.231	22	20	1
45	5.291	0.008	p.slug	0.184	22	20	1
46	6.634	0.008	p.slug/2-D waves	0.142	22	20	1
47	8.001	0.008	2-D waves	0.109	22	20	1
48	9.391	0.008	2-D waves	0.079	22	20	1
49	10.851	0.008	2-D waves	0.063	22	20	1
50	12.344	0.008	2-D waves	0.051	22	20	1



51	13.927	0.008	tran K-H	0.042	22	20	1
52	15.551	0.008	K-H	0.032	22	20	1
53	17.216	0.008	K-H	0.026	22	20	1
54	18.990	0.008	K-H	0.021	22	20	1
55	1.992	0.012	slug	0.265	22	20	1
56	2.395	0.012	slug	0.270	22	20	1
57	2.796	0.012	slug	0.243	22	20	1
58	3.000	0.012	slug	0.263	22	20	1
59	3.198	0.012	slug	0.260	22	20	1
60	3.990	0.012	slug	0.240	22	20	1
61	5.291	0.012	slug/p.slug	0.195	22	20	1
62	6.634	0.012	p.slug	0.141	22	20	1
63	8.001	0.012	2-D	0.105	22	20	1
64	9.391	0.012	2-D	0.087	22	20	1
65	10.898	0.012	2-D	0.066	22	20	1
66	12.397	0.012	tran K-H	0.049	22	20	1
67	13.927	0.012	K-H	0.039	22	20	1
68	15.551	0.012	K-H	0.029	22	20	1
69	17.216	0.012	K-H	0.023	22	20	1
70	1.992	0.022	slug	0.283	22	20	1
71	2.395	0.022	slug	0.274	22	20	1
72	2.796	0.022	slug	0.274	22	20	1
73	3.000	0.022	slug	0.260	22	20	1
74	3.198	0.022	slug	0.257	22	20	1
75	3.990	0.022	slug	0.255	22	20	1
76	5.291	0.022	slug	0.251	22	20	1
77	5.988	0.022	slug/p.slug	0.206	22	20	1
78	6.634	0.022	p.slug	0.179	22	20	1
79	8.020	0.022	p.slug	0.123	22	20	1
80	9.391	0.022	K-H	0.089	22	20	1
81	10.898	0.022	K-H	0.071	22	20	1
82	12.500	0.022	K-H	0.057	22	20	1
83	13.984	0.022	K-H/atom	0.047	22	20	1
84	15.613	0.022	atom	0.045	22	20	1
85	17.282	0.022	atom	0.036	22	20	1
86	18.990	0.022	atom	0.029	22	20	1
87	2.002	0.042	slug	0.281	22	20	1
88	2.401	0.042	slug	0.261	22	20	1
89	2.796	0.042	slug	0.264	22	20	1
90	3.198	0.042	slug	0.261	22	20	1
91	4.000	0.042	slug	0.263	22	20	1
92	5.316	0.042	slug	0.218	22	20	1
93	5.988	0.042	slug/p.slug	0.196	22	20	1
94	6.665	0.042	p.slug	0.177	22	20	1
95	8.038	0.042	p.slug	0.133	22	20	1
96	8.733	0.042	p.slug	0.120	22	20	1
97	9.475	0.042	p.slug/atom	0.109	22	20	1
98	10.945	0.042	atom	0.091	22	20	1
99	12.475	0.042	atom	0.074	22	20	1
100	14.041	0.042	atom	0.065	22	20	1
101	15.674	0.042	atom	0.054	22	20	1
102	17.347	0.042	atom/annular	0.046	22	20	1
103	19.200	0.042	annular	0.039	22	20	1
104	21.033	0.042	annular	0.032	22	20	1

105	2.011	0.072	slug	0.279	22	20	1
106	2.407	0.072	slug	0.288	22	20	1
107	2.802	0.072	slug	0.278	22	20	1
108	3.213	0.072	slug	0.282	22	20	1
109	4.009	0.072	slug	0.266	22	20	1
110	5.341	0.072	slug	0.239	22	20	1
111	6.696	0.072	slug/p.slug	0.195	22	20	1
112	8.074	0.072	p.slug	0.163	22	20	1
113	9.516	0.072	p.slug/atom	0.132	22	20	1
114	10.992	0.072	atom	0.114	22	20	1
115	12.552	0.072	atom	0.097	22	20	1
116	14.097	0.072	atom/annular	0.086	22	20	1
117	15.674	0.072	annular	0.074	22	20	1
118	17.543	0.072	annular	0.065	22	20	1
119	19.338	0.072	annular	0.055	22	20	1
120	2.011	0.100	slug	0.282	22	20	1
121	2.617	0.100	slug	0.295	22	20	1
122	3.213	0.100	slug	0.296	22	20	1
123	4.009	0.100	slug	0.299	22	20	1
124	5.341	0.100	slug	0.247	22	20	1
125	6.696	0.100	slug	0.209	22	20	1
126	7.415	0.100	slug/p.slug	0.198	22	20	1
127	8.074	0.100	p.slug	0.178	22	20	1
128	9.599	0.100	atom	0.151	22	20	1
129	11.039	0.100	atom	0.131	22	20	1
130	12.603	0.100	atom/annular	0.116	22	20	1
131	14.210	0.100	annular	0.101	22	20	1
132	15.917	0.100	annular	0.089	22	20	1
133	19.476	0.100	annular	0.066	22	20	1
134	2.011	0.143	slug	0.325	22	20	1
135	2.617	0.149	slug	0.316	22	20	1
136	3.213	0.149	slug	0.314	22	20	1
137	4.028	0.149	slug	0.316	22	20	1
138	5.365	0.149	slug	0.265	22	20	1
139	6.726	0.149	slug	0.234	22	20	1
140	8.181	0.149	slug/p.slug	0.207	22	20	1
141	9.640	0.149	p.slug	0.178	22	20	1
142	11.177	0.149	p.slug/annular	0.157	22	20	1
143	12.705	0.149	annular	0.140	22	20	1
144	14.376	0.149	annular	0.122	22	20	1
145	16.097	0.149	annular	0.109	22	20	1
146	17.865	0.149	annular	0.094	22	20	1

**Πίνακας Π. 7 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε κατωφερή κλίση 0.25°**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	h/d	dP/dx (m)	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.384	0.004	ss	0.123	1.789	22	22	1.005
2	1.982	0.004	ss	0.117	4.024	22	22	1.005
3	2.482	0.004	ss	0.110	6.355	22	22	1.005
4	2.986	0.004	ss	0.103	8.974	22	22	1.005
5	3.971	0.004	ss	0.101	11.881	22	22	1.005
6	4.628	0.004	ss	0.094	17.869	22	22	1.005
7	5.291	0.004	tran 2-D	0.087	23.309	22	22	1.005
8	6.604	0.004	2-D	0.079	37.814	22	22	1.005
9	7.965	0.004	2-D	0.070	54.351	22	22	1.005
10	9.391	0.004	2-D	0.062	70.499	22	22	1.005
11	10.851	0.004	2-D	0.066	98.683	22	22	1.005
12	12.397	0.004	2-D	0.041	122.465	22	22	1.005
13	13.870	0.004	2-D/tran K-H	0.034	149.281	22	22	1.005
14	15.489	0.004	K-H	0.027	204.446	22	22	1.005
15	17.216	0.004	K-H	0.021	243.752	22	22	1.005
16	18.920	0.004	K-H	0.017	288.032	22	22	1.005
17	1.384	0.008	ss	0.189	2.253	22	22	1.005
18	1.982	0.008	ss	0.149	4.388	22	22	1.005
19	2.482	0.008	ss	0.143	7.118	22	22	1.005
20	2.986	0.008	tran 2-D	0.138	9.408	22	22	1.005
21	3.971	0.008	2-D	0.133	12.416	22	22	1.005
22	4.628	0.008	2-D	0.128	18.371	22	22	1.005
23	5.291	0.008	2-D	0.122	24.186	22	22	1.005
24	6.604	0.008	2-D	0.109	38.997	22	22	1.005
25	7.965	0.008	2-D	0.081	56.108	22	22	1.005
26	9.391	0.008	2-D	0.065	73.518	22	22	1.005
27	10.898	0.008	2-D	0.057	106.914	22	22	1.005
28	12.397	0.008	tran K-H	0.046	145.699	22	22	1.005
29	13.927	0.008	K-H	0.034	194.741	22	22	1.005
30	15.551	0.008	K-H	0.028	236.895	22	22	1.005
31	17.216	0.008	K-H	0.024	282.574	22	22	1.005
32	19.060	0.008	K-H	0.020	334.090	22	22	1.005
33	1.384	0.012	ss	0.177	2.933	22	22	1.005
34	1.982	0.012	ss	0.172	5.356	22	22	1.005
35	2.482	0.012	ss/tran 2-D	0.167	7.951	22	22	1.005
36	2.986	0.012	2-D	0.163	10.374	22	22	1.005
37	3.971	0.012	2-D	0.159	14.967	22	22	1.005
38	5.291	0.012	2-D	0.144	28.020	22	22	1.005
39	6.604	0.012	2-D	0.106	42.379	22	22	1.005
40	8.001	0.012	2-D	0.088	65.605	22	22	1.005
41	9.391	0.012	tran K-H	0.074	92.234	22	22	1.005
42	10.898	0.012	tran K-H	0.063	129.649	22	22	1.005
43	12.397	0.012	K-H	0.046	183.337	22	22	1.005
44	13.984	0.012	K-H	0.038	223.942	22	22	1.005
45	15.613	0.012	K-H	0.031	275.212	22	22	1.005
46	17.282	0.012	K-H	0.026	324.290	22	22	1.005
47	18.990	0.012	K-H	0.022	382.469	22	22	1.005
48	1.384	0.022	ss	0.227	3.433	22	22	1.005
49	1.982	0.022	2-D	0.235	6.440	22	22	1.005
50	2.482	0.022	2-D	0.228	8.994	22	22	1.005

51	2.986	0.022	2-D	0.235	11.548	22	22	1.005
52	3.981	0.022	2-D	0.210	16.402	22	22	1.005
53	5.291	0.022	2-D	0.166	30.348	22	22	1.005
54	6.604	0.022	2-D	0.145	45.968	22	22	1.005
55	8.038	0.022	tran K-H	0.124	69.381	22	22	1.005
56	9.433	0.022	K-H	0.093	131.190	22	22	1.005
57	10.945	0.022	K-H	0.073	186.391	22	22	1.005
58	12.449	0.022	K-H	0.061	235.908	22	22	1.005
59	14.041	0.022	K-H	0.050	294.002	22	22	1.005
60	15.674	0.022	atom	0.043	350.797	22	22	1.005
61	17.347	0.022	atom	0.037	413.009	22	22	1.005
62	1.398	0.045	2-D	0.317	3.930	22	22	1.005
63	1.992	0.045	2-D	0.291	7.683	22	22	1.005
64	2.482	0.045	2-D	0.286	10.786	22	22	1.005
65	2.986	0.045	2-D	0.289	13.951	22	22	1.005
66	3.990	0.045	2-D	0.267	19.632	22	22	1.005
67	5.291	0.045	2-D	0.244	37.347	22	22	1.005
68	6.665	0.045	p.slug	0.188	73.068	22	22	1.005
69	8.038	0.045	p.slug	0.152	127.605	22	22	1.005
70	9.475	0.045	atom/p.slug	0.120	193.966	22	22	1.005
71	10.945	0.045	atom	0.101	260.293	22	22	1.005
72	12.500	0.045	atom	0.086	326.226	22	22	1.005
73	14.097	0.045	atom	0.073	395.066	22	22	1.005
74	1.398	0.072	plug	0.373	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
75	1.992	0.072	plug	0.422	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
76	2.494	0.072	plug	0.329	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
77	3.000	0.072	slug	0.344	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
78	3.990	0.072	slug/p.slug	0.313	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
79	5.316	0.072	slug/p.slug	0.258	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
80	6.726	0.072	p.slug	0.216	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
81	8.074	0.072	atom/p.slug	0.178	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
82	9.516	0.072	atom	0.150	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
83	11.039	0.072	atom	0.128	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
84	12.552	0.072	atom	0.108	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
85	14.154	0.072	atom/annular	0.099	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
86	15.857	0.072	annular/atom	0.085	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
87	17.543	0.072	annular	0.072	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
88	19.407	0.072	annular	0.062	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
89	1.411	0.100	plug	0.349	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
90	2.002	0.100	plug	0.321	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
91	2.500	0.100	slug/plug	0.329	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
92	3.000	0.100	slug/plug	0.339	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
93	3.990	0.100	slug	0.329	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
94	5.316	0.100	slug/p.slug	0.284	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
95	6.726	0.100	p.slug	0.238	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
96	8.110	0.100	p.slug	0.202	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
97	9.599	0.100	atom	0.171	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
98	11.039	0.100	atom	0.150	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
99	12.603	0.100	atom	0.131	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
100	14.210	0.100	atom/annular	0.118	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
101	15.917	0.100	annular	0.103	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
102	17.673	0.100	annular	0.088	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
103	1.415	0.155	plug	0.367	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
104	2.011	0.155	plug	0.336	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005

105	2.518	0.155	plug	0.340	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
106	3.029	0.155	plug/slug	0.344	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
107	4.009	0.155	slug	0.335	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
108	5.353	0.155	slug	0.309	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
109	6.726	0.155	slug/p.slug	0.269	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
110	8.181	0.155	p.slug/atom	0.231	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
111	9.640	0.155	atom	0.203	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
112	11.177	0.155	atom/annular	0.184	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
113	12.756	0.155	annualr	0.162	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
114	14.376	0.155	annualr	0.143	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
115	5.414	0.248	slug	0.333	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
116	6.816	0.248	slug	0.294	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
117	8.322	0.248	slug	0.260	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005
118	9.802	0.248	p.slug	0.230	Δε μετρήθηκε	22	22	1.005

**Πίνακας Π.8 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού-αέρα σε κατωφερή κλίση 1°**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	h/d	dP/dx (m)	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.384	0.008	2-D	0.121	1.195	22	21	1
2	1.982	0.008	2-D	0.145	2.444	22	21	1
3	2.482	0.008	2-D	0.169	4.796	22	21	1
4	2.986	0.008	2-D	0.217	7.769	22	21	1
5	3.971	0.008	2-D	0.273	13.339	22	21	1
6	5.266	0.008	2-D	0.312	28.184	22	21	1
7	6.604	0.008	2-D	0.402	43.982	22	21	1
8	8.001	0.008	2-D	0.297	62.721	22	21	1
9	9.412	0.008	2-D	0.120	82.627	22	21	1
10	10.851	0.008	2-D	0.144	108.327	22	21	1
11	12.397	0.008	tran K-H	0.165	133.803	22	21	1
12	13.984	0.008	K-H	0.212	184.769	22	21	1
13	15.551	0.008	K-H	0.267	232.728	22	21	1
14	17.282	0.008	K-H	0.304	280.960	22	21	1
15	1.384	0.012	2-D	0.393	1.721	22	21	1
16	1.982	0.012	2-D	0.288	3.126	22	21	1
17	2.482	0.012	2-D	0.118	5.840	22	21	1
18	2.986	0.012	2-D	0.143	8.800	22	21	1
19	3.971	0.012	2-D	0.161	14.724	22	21	1
20	5.278	0.012	2-D	0.209	28.616	22	21	1
21	6.604	0.012	2-D	0.261	45.310	22	21	1
22	8.001	0.012	2-D	0.300	65.015	22	21	1
23	9.391	0.012	2-D	0.386	86.210	22	21	1
24	10.851	0.012	tran K-H	0.307	112.913	22	21	1
25	12.397	0.012	K-H	0.118	171.721	22	21	1
26	13.984	0.012	K-H	0.139	217.950	22	21	1
27	15.613	0.012	K-H	0.155	266.272	22	21	1
28	17.347	0.012	K-H	0.205	319.621	22	21	1
29	1.384	0.022	2-D	0.258	1.355	22	21	1
30	1.982	0.022	2-D	0.293	4.000	22	21	1
31	2.482	0.022	2-D	0.379	6.960	22	21	1
32	2.986	0.022	2-D	0.302	10.291	22	21	1
33	3.971	0.022	2-D	0.115	15.362	22	21	1
34	5.266	0.022	2-D	0.118	30.069	22	21	1
35	6.604	0.022	2-D	0.147	48.118	22	21	1
36	8.001	0.022	2-D	0.200	71.026	22	21	1
37	9.433	0.022	K-H	0.249	112.266	22	21	1
38	10.922	0.022	K-H	0.286	171.524	22	21	1
39	12.449	0.022	K-H	0.292	232.506	22	21	1
40	14.041	0.022	K-H	0.290	280.998	22	21	1
41	15.613	0.022	tran atom	0.103	340.795	22	21	1
42	16.997	0.022	atom	0.137	341.014	22	21	1
43	1.384	0.042	2-D	0.101	4.592	22	21	1
44	1.982	0.042	2-D	0.185	7.508	22	21	1
45	2.482	0.042	2-D	0.230	10.892	22	21	1
46	2.986	0.042	2-D	0.243	14.633	22	21	1
47	3.971	0.042	2-D	0.262	20.983	22	21	1
48	5.278	0.042	2-D	0.264	37.229	22	21	1
49	6.604	0.042	2-D	0.081	58.312	22	21	1
50	8.038	0.042	K-H	0.091	110.947	22	21	1

51	9.433	0.042	K-H	0.124	177.717	22	21	1
52	10.945	0.042	atom	0.169	247.533	22	21	1
53	12.500	0.042	atom	0.191	306.419	22	21	1
54	14.097	0.042	atom	0.202	341.070	22	21	1
55	17.478	0.042	atom	0.231	341.078	22	21	1
56	19.200	0.042	atom/annular	0.232	341.069	22	21	1
57	21.107	0.042	annualr	0.070	341.065	22	21	1
58	1.384	0.072	2-D	0.079	7.046	22	21	1
59	1.982	0.072	2-D	0.112	10.805	22	21	1
60	2.482	0.072	2-D	0.140	14.463	22	21	1
61	2.986	0.072	2-D	0.159	18.533	22	21	1
62	3.981	0.072	2-D	0.171	25.140	22	21	1
63	5.291	0.072	2-D	0.197	48.441	22	21	1
64	6.665	0.072	atom/p.slug	0.209	110.089	22	21	1
65	8.038	0.072	atom	0.070	178.035	22	21	1
66	9.516	0.072	atom	0.058	261.392	22	21	1
67	10.992	0.072	atom	0.096	338.875	22	21	1
68	14.097	0.072	atom	0.111	341.085	22	21	1
69	15.796	0.072	atom/annular	0.132	341.065	22	21	1
70	17.543	0.072	annualr	0.149	341.071	22	21	1
71	19.476	0.072	annualr	0.174	341.065	22	21	1
72	1.384	0.100	2-D	0.184	9.170	22	21	1
73	1.982	0.100	2-D	0.052	14.882	22	21	1
74	2.482	0.100	2-D	0.064	19.531	22	21	1
75	2.986	0.100	2-D	0.073	24.366	22	21	1
76	3.981	0.100	2-D	0.092	31.926	22	21	1
77	5.316	0.100	p.slug	0.114	Δε μετρήθηκε	22	21	1
78	6.665	0.100	p.slug	0.130	Δε μετρήθηκε	22	21	1
79	8.074	0.100	p.slug/atom	0.153	Δε μετρήθηκε	22	21	1
80	9.516	0.100	atom	0.167	Δε μετρήθηκε	22	21	1
81	11.085	0.100	atom	0.045	Δε μετρήθηκε	22	21	1
82	12.603	0.100	atom	0.047	Δε μετρήθηκε	22	21	1
83	14.210	0.100	atom/annular	0.058	Δε μετρήθηκε	22	21	1
84	15.917	0.100	annular	0.081	Δε μετρήθηκε	22	21	1
85	17.673	0.100	annular	0.115	Δε μετρήθηκε	22	21	1
86	1.384	0.155	2-D	0.137	Δε μετρήθηκε	22	21	1
87	1.982	0.155	2-D	0.148	Δε μετρήθηκε	22	21	1
88	2.482	0.155	2-D	0.035	Δε μετρήθηκε	22	21	1
89	2.986	0.155	2-D	0.039	Δε μετρήθηκε	22	21	1
90	3.990	0.155	slug	0.050	Δε μετρήθηκε	22	21	1
91	5.341	0.155	slug/p.slug	0.067	Δε μετρήθηκε	22	21	1
92	6.726	0.155	p.slug	0.086	Δε μετρήθηκε	22	21	1
93	8.110	0.155	p.slug	0.100	Δε μετρήθηκε	22	21	1
94	9.599	0.155	atom	0.124	Δε μετρήθηκε	22	21	1
95	11.131	0.155	atom/annular	0.130	Δε μετρήθηκε	22	21	1
96	12.705	0.155	annualr	0.028	Δε μετρήθηκε	22	21	1
97	14.432	0.155	annualr	0.033	Δε μετρήθηκε	22	21	1
98	16.156	0.155	annualr	0.042	Δε μετρήθηκε	22	21	1
99	1.616	0.186	plug	0.075	Δε μετρήθηκε	22	21	1
100	2.011	0.186	plug	0.088	Δε μετρήθηκε	22	21	1
101	2.518	0.186	slug&plug	0.110	Δε μετρήθηκε	22	21	1
102	3.029	0.186	slug	0.118	Δε μετρήθηκε	22	21	1
103	4.028	0.186	slug	0.038	Δε μετρήθηκε	22	21	1
104	5.390	0.186	slug	0.023	Δε μετρήθηκε	22	21	1

105	6.756	0.186	slug/p.slug	0.027	Δε μετρήθηκε	22	21	1
106	8.181	0.186	p.slug	0.049	Δε μετρήθηκε	22	21	1
107	9.680	0.186	p.slug	0.065	Δε μετρήθηκε	22	21	1
108	11.223	0.186	p.slug/annular	0.077	Δε μετρήθηκε	22	21	1
109	12.857	0.186	annular	0.042	Δε μετρήθηκε	22	21	1
110	14.487	0.186	annular	0.055	Δε μετρήθηκε	22	21	1
111	16.216	0.186	annular	0.034	Δε μετρήθηκε	22	21	1



**Πίνακας Π.9 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε ανωφερή κλίση  $0.25^\circ$** 

$\alpha/\alpha$	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$\theta_G$ ( $^\circ C$ )	$\theta_L$ ( $^\circ C$ )	P (atm)
1	1.252	0.004	slug	0.215	22	22	1
2	1.709	0.004	slug	0.202	22	22	1
3	2.009	0.004	slug	0.191	22	22	1
4	2.170	0.004	slug	0.163	22	22	1
5	2.321	0.004	slug/p.slug	0.232	22	22	1
6	2.472	0.004	p.slug	0.240	22	22	1
7	2.623	0.004	p.slug	0.223	22	22	1
8	2.780	0.004	p.slug	0.215	22	22	1
9	3.051	0.004	p.slug/K-H	0.209	22	22	1
10	3.617	0.004	K-H	0.165	22	22	1
11	4.195	0.004	K-H	0.129	22	22	1
12	5.342	0.004	K-H	0.083	22	22	1
13	6.530	0.004	K-H	0.086	22	22	1
14	7.737	0.004	K-H	0.062	22	22	1
15	9.044	0.004	K-H	0.046	22	22	1
16	10.345	0.004	K-H	0.031	22	22	1
17	11.675	0.004	K-H	0.029	22	22	1
18	1.252	0.006	slug	0.211	22	22	1
19	1.709	0.006	slug	0.196	22	22	1
20	2.019	0.006	slug	0.211	22	22	1
21	2.170	0.006	slug	0.230	22	22	1
22	2.321	0.006	slug/p.slug	0.246	22	22	1
23	2.472	0.006	slug/p.slug	0.231	22	22	1
24	2.629	0.006	p.slug	0.245	22	22	1
25	2.780	0.006	p.slug	0.238	22	22	1
26	3.051	0.006	p.slug	0.213	22	22	1
27	4.195	0.006	K-H	0.130	22	22	1
28	5.355	0.006	K-H	0.101	22	22	1
29	6.560	0.006	K-H	0.084	22	22	1
30	7.772	0.006	K-H	0.063	22	22	1
31	9.044	0.006	K-H	0.047	22	22	1
32	10.345	0.006	K-H	0.032	22	22	1
33	11.675	0.006	K-H	0.031	22	22	1
34	13.032	0.006	K-H	0.025	22	22	1
35	14.474	0.006	K-H	0.019	22	22	1
36	1.252	0.008	slug	0.214	22	22	1
37	1.709	0.008	slug	0.214	22	22	1
38	2.019	0.008	slug	0.229	22	22	1
39	2.170	0.008	slug	0.238	22	22	1
40	2.321	0.008	slug	0.258	22	22	1
41	2.478	0.008	slug/p.slug	0.237	22	22	1
42	2.629	0.008	slug/p.slug	0.234	22	22	1
43	2.780	0.008	p.slug	0.232	22	22	1
44	3.059	0.008	p.slug	0.229	22	22	1
45	4.195	0.008	tran K-H	0.150	22	22	1
46	5.342	0.008	K-H	0.126	22	22	1
47	6.530	0.008	K-H	0.088	22	22	1
48	7.737	0.008	K-H	0.064	22	22	1
49	9.044	0.008	K-H	0.048	22	22	1

50	10.345	0.008	K-H	0.035	22	22	1
51	11.651	0.008	K-H	0.030	22	22	1
52	13.058	0.008	K-H	0.022	22	22	1
53	14.530	0.008	K-H	0.017	22	22	1
54	16.130	0.008	K-H	0.012	22	22	1
55	1.252	0.012	slug	0.239	22	22	1
56	1.709	0.012	slug	0.225	22	22	1
57	2.019	0.012	slug	0.253	22	22	1
58	2.170	0.012	slug	0.229	22	22	1
59	2.321	0.012	slug	0.245	22	22	1
60	2.478	0.012	slug/p.slug	0.250	22	22	1
61	2.629	0.012	slug/p.slug	0.237	22	22	1
62	2.780	0.012	p.slug	0.243	22	22	1
63	3.059	0.012	p.slug	0.219	22	22	1
64	4.195	0.012	tran K-H	0.152	22	22	1
65	5.342	0.012	K-H	0.129	22	22	1
66	6.560	0.012	K-H	0.095	22	22	1
67	7.772	0.012	K-H	0.074	22	22	1
68	9.044	0.012	K-H	0.052	22	22	1
69	10.389	0.012	K-H	0.042	22	22	1
70	11.675	0.012	K-H	0.033	22	22	1
71	13.085	0.012	K-H	0.026	22	22	1
72	14.586	0.012	K-H	0.019	22	22	1
73	16.130	0.012	K-H/atom	0.015	22	22	1
74	17.716	0.012	atom	0.012	22	22	1
75	1.252	0.022	slug	0.296	22	22	1
76	1.709	0.022	slug	0.238	22	22	1
77	2.019	0.022	slug	0.244	22	22	1
78	2.170	0.022	slug	0.243	22	22	1
79	2.321	0.022	slug	0.251	22	22	1
80	2.478	0.022	slug	0.244	22	22	1
81	2.629	0.022	slug/p.slug	0.234	22	22	1
82	2.780	0.022	p.slug	0.232	22	22	1
83	3.059	0.022	p.slug	0.241	22	22	1
84	4.205	0.022	p.slug	0.197	22	22	1
85	5.367	0.022	p.slug/K-H	0.150	22	22	1
86	5.961	0.022	K-H	0.130	22	22	1
87	6.560	0.022	K-H	0.111	22	22	1
88	7.772	0.022	K-H	0.083	22	22	1
89	9.044	0.022	K-H	0.069	22	22	1
90	10.345	0.022	K-H	0.054	22	22	1
91	11.723	0.022	atom	0.045	22	22	1
92	13.189	0.022	atom	0.037	22	22	1
93	14.698	0.022	atom	0.030	22	22	1
94	1.252	0.042	slug	0.261	22	22	1
95	1.717	0.042	slug	0.271	22	22	1
96	2.024	0.042	slug	0.260	22	22	1
97	2.180	0.042	slug	0.270	22	22	1
98	2.332	0.042	slug	0.256	22	22	1
99	2.484	0.042	slug	0.243	22	22	1
100	2.635	0.042	slug	0.246	22	22	1
101	2.787	0.042	slug	0.255	22	22	1
102	3.059	0.042	slug/p.slug	0.253	22	22	1

103	4.215	0.042	p.slug	0.208	22	22	1
104	5.392	0.042	p.slug	0.164	22	22	1
105	6.589	0.042	p.slyg/atom	0.125	22	22	1
106	7.807	0.042	atom	0.103	22	22	1
107	9.044	0.042	atom	0.085	22	22	1
108	10.389	0.042	atom	0.070	22	22	1
109	11.771	0.042	atom	0.058	22	22	1
110	13.241	0.042	atom/annular	0.050	22	22	1
111	14.698	0.042	annular	0.044	22	22	1
112	16.250	0.042	annular	0.035	22	22	1
113	1.264	0.074	slug	0.266	22	22	1
114	1.725	0.074	slug	0.279	22	22	1
115	2.029	0.074	slug	0.267	22	22	1
116	2.180	0.074	slug	0.257	22	22	1
117	2.332	0.074	slug	0.289	22	22	1
118	2.484	0.072	slug	0.306	22	22	1
119	2.635	0.072	slug	0.280	22	22	1
120	2.787	0.072	slug	0.266	22	22	1
121	3.059	0.072	slug	0.275	22	22	1
122	4.215	0.072	slug/p.slug	0.219	22	22	1
123	5.392	0.072	p.slug	0.197	22	22	1
124	6.589	0.072	p.slug/atom	0.157	22	22	1
125	7.807	0.072	atom	0.127	22	22	1
126	9.162	0.072	atom	0.107	22	22	1
127	10.476	0.072	atom	0.094	22	22	1
128	11.866	0.072	atom/annular	0.079	22	22	1
129	13.292	0.072	annular	0.072	22	22	1
130	14.754	0.072	annular	0.059	22	22	1
131	16.309	0.072	annular	0.050	22	22	1
132	1.717	0.100	slug	0.265	22	22	1
133	2.029	0.100	slug	0.251	22	22	1
134	2.332	0.100	slug	0.283	22	22	1
135	2.635	0.100	slug	0.302	22	22	1
136	2.787	0.102	slug/p.slug	0.298	22	22	1
137	3.059	0.100	slug/p.slug	0.278	22	22	1
138	4.215	0.100	p.slug	0.237	22	22	1
139	5.417	0.100	p.slug	0.206	22	22	1
140	6.619	0.100	p.slug	0.171	22	22	1
141	7.876	0.100	p.slug/annular	0.143	22	22	1
142	9.162	0.100	annular	0.124	22	22	1
143	10.562	0.100	annular	0.113	22	22	1
144	11.866	0.100	annular	0.096	22	22	1
145	13.344	0.100	annular	0.084	22	22	1
146	2.038	0.143	slug	0.287	22	22	1
147	2.343	0.149	slug	0.296	22	22	1
148	2.648	0.149	slug	0.291	22	22	1
149	2.827	0.149	slug	0.316	22	22	1
150	3.088	0.149	slug	0.297	22	22	1
151	4.254	0.149	slug	0.266	22	22	1
152	5.441	0.149	slug/p.slug	0.231	22	22	1
153	6.648	0.149	p.slug	0.198	22	22	1
154	7.944	0.149	annular	0.171	22	22	1
155	9.239	0.149	annular	0.150	22	22	1

156	10.648	0.149	annular	0.133	22	22	1
157	12.055	0.149	annular	0.117	22	22	1

**Πίνακας Π. 10 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε ανωφερή κλίση  $0.5^\circ$**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	h/d	$\theta_G$ ( $^\circ C$ )	$\theta_L$ ( $^\circ C$ )	P (atm)
1	1.252	0.004	slug	0.190	21	22	1.006
2	1.709	0.004	slug	0.195	21	22	1.006
3	2.095	0.004	slug	0.186	21	22	1.006
4	2.484	0.004	slug/p.slug	0.240	21	22	1.006
5	3.059	0.004	p.slug	0.240	21	22	1.006
6	4.195	0.004	K-H	0.147	21	22	1.006
7	5.367	0.004	K-H	0.092	21	22	1.006
8	6.560	0.004	K-H	0.091	21	22	1.006
9	7.772	0.004	K-H	0.068	21	22	1.006
10	9.005	0.004	K-H	0.051	21	22	1.006
11	10.345	0.004	K-H	0.033	21	22	1.006
12	11.723	0.004	K-H	0.025	21	22	1.006
13	13.085	0.004	K-H	0.020	21	22	1.006
14	14.474	0.004	K-H	0.024	21	22	1.006
15	16.011	0.004	K-H	0.018	21	22	1.006
16	1.252	0.006	slug	0.240	21	22	1.006
17	1.717	0.006	slug	0.238	21	22	1.006
18	2.095	0.006	slug	0.253	21	22	1.006
19	2.484	0.006	slug	0.261	21	22	1.006
20	3.059	0.006	slug/p.slug	0.236	21	22	1.006
21	4.195	0.006	K-H/p.slug	0.170	21	22	1.006
22	5.367	0.006	K-H	0.116	21	22	1.006
23	6.560	0.006	K-H	0.092	21	22	1.006
24	7.772	0.006	K-H	0.072	21	22	1.006
25	9.005	0.006	K-H	0.054	21	22	1.006
26	10.345	0.006	K-H	0.036	21	22	1.006
27	11.723	0.006	K-H	0.027	21	22	1.006
28	13.085	0.006	K-H	0.022	21	22	1.006
29	14.530	0.006	K-H	0.018	21	22	1.006
30	16.071	0.006	K-H	0.015	21	22	1.006
31	1.258	0.008	slug	0.210	21	22	1.006
32	1.717	0.008	slug	0.255	21	22	1.006
33	2.105	0.008	slug	0.233	21	22	1.006
34	2.484	0.008	slug	0.243	21	22	1.006
35	3.059	0.008	slug	0.227	21	22	1.006
36	4.195	0.008	p.slug	0.164	21	22	1.006
37	5.367	0.008	K-H	0.127	21	22	1.006
38	6.530	0.008	K-H	0.101	21	22	1.006
39	7.772	0.008	K-H	0.077	21	22	1.006

40	9.044	0.008	K-H	0.054	21	22	1.006
41	10.345	0.008	K-H	0.041	21	22	1.006
42	11.723	0.008	K-H	0.030	21	22	1.006
43	13.085	0.008	K-H	0.024	21	22	1.006
44	14.474	0.008	K-H	0.029	21	22	1.006
45	15.950	0.008	K-H	0.024	21	22	1.006
46	1.258	0.011	slug	0.248	21	22	1.006
47	1.717	0.011	slug	0.241	21	22	1.006
48	2.100	0.011	slug	0.254	21	22	1.006
49	2.484	0.011	slug	0.241	21	22	1.006
50	3.059	0.011	slug	0.246	21	22	1.006
51	4.195	0.011	p.slug	0.180	21	22	1.006
52	5.367	0.011	K-H	0.149	21	22	1.006
53	6.560	0.011	K-H	0.114	21	22	1.006
54	7.772	0.011	K-H	0.080	21	22	1.006
55	9.044	0.011	K-H	0.058	21	22	1.006
56	10.345	0.011	K-H	0.048	21	22	1.006
57	11.723	0.011	K-H	0.039	21	22	1.006
58	13.085	0.011	K-H	0.033	21	22	1.006
59	14.586	0.011	K-H	0.028	21	22	1.006
60	16.011	0.011	K-H/atom	0.023	21	22	1.006
61	1.258	0.022	slug	0.259	21	22	1.006
62	1.717	0.022	slug	0.252	21	22	1.006
63	2.105	0.022	slug	0.257	21	22	1.006
64	2.484	0.022	slug	0.259	21	22	1.006
65	3.059	0.022	slug	0.259	21	22	1.006
66	4.195	0.022	slug	0.205	21	22	1.006
67	5.367	0.022	slug/p.slug	0.164	21	22	1.006
68	6.560	0.022	p.slug/K-H	0.121	21	22	1.006
69	8.003	0.022	K-H	0.092	21	22	1.006
70	9.044	0.022	K-H	0.075	21	22	1.006
71	10.389	0.022	K-H	0.060	21	22	1.006
72	11.675	0.022	atom	0.052	21	22	1.006
73	13.085	0.022	atom	0.045	21	22	1.006
74	14.959	0.022	atom	0.036	21	22	1.006
75	16.130	0.022	atom	0.031	21	22	1.006
76	1.264	0.042	slug	0.272	21	22	1.006
77	1.717	0.042	slug	0.292	21	22	1.006
78	2.105	0.042	slug	0.302	21	22	1.006
79	2.484	0.042	slug	0.294	21	22	1.006
80	3.059	0.042	slug	0.286	21	22	1.006
81	4.205	0.042	slug	0.229	21	22	1.006
82	5.380	0.042	slug	0.184	21	22	1.006

83	6.574	0.042	slug/p.slug	0.146	21	22	1.006
84	7.807	0.042	atom	0.114	21	22	1.006
85	9.084	0.042	atom	0.099	21	22	1.006
86	10.389	0.042	atom	0.087	21	22	1.006
87	11.747	0.042	atom	0.075	21	22	1.006
88	13.189	0.042	atom	0.062	21	22	1.006
89	14.698	0.042	annular/atom	0.052	21	22	1.006
90	16.250	0.042	annular/atom	0.043	21	22	1.006
91	1.264	0.075	slug	0.308	21	22	1.006
92	1.725	0.075	slug	0.283	21	22	1.006
93	2.105	0.075	slug	0.282	21	22	1.006
94	2.484	0.072	slug	0.309	21	22	1.006
95	3.059	0.072	slug	0.303	21	22	1.006
96	4.205	0.072	slug	0.269	21	22	1.006
97	5.380	0.072	slug	0.208	21	22	1.006
98	6.589	0.072	slug/p.slug	0.169	21	22	1.006
99	7.807	0.072	p.slug	0.144	21	22	1.006
100	9.123	0.072	p.slug/atom	0.126	21	22	1.006
101	10.433	0.072	atom/annular	0.107	21	22	1.006
102	11.866	0.072	annular	0.096	21	22	1.006
103	13.241	0.072	annular	0.082	21	22	1.006
104	14.754	0.072	annular	0.071	21	22	1.006
105	16.309	0.072	annular	0.062	21	22	1.006
106	1.264	0.100	slug	0.316	21	22	1.006
107	1.725	0.100	slug	0.304	21	22	1.006
108	2.115	0.100	slug	0.323	21	22	1.006
109	2.496	0.100	slug	0.324	21	22	1.006
110	3.088	0.100	slug	0.315	21	22	1.006
111	4.812	0.100	slug	0.241	21	22	1.006
112	6.619	0.100	slug/p.slug	0.191	21	22	1.006
113	7.876	0.100	annular/p.slug	0.160	21	22	1.006
114	9.162	0.100	annular	0.143	21	22	1.006
115	10.519	0.100	annular	0.125	21	22	1.006

Πίνακας Π. 11 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε ανωφερή κλίση 1°

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.252	0.004	slug	0.240	23	21	0.99
2	1.709	0.004	slug	0.235	23	21	0.99
3	2.019	0.004	slug	0.262	23	21	0.99
4	2.175	0.004	slug	0.277	23	21	0.99
5	2.332	0.004	slug	0.307	23	21	0.99
6	2.484	0.004	slug	0.290	23	21	0.99
7	2.635	0.004	slug/p.slug	0.270	23	21	0.99
8	3.059	0.004	slug/p.slug	0.273	23	21	0.99
9	3.626	0.004	p.slug	0.216	23	21	0.99
10	4.195	0.004	p.slug	0.195	23	21	0.99
11	4.767	0.004	tran 2-D waves	0.175	23	21	0.99
12	5.367	0.004	2-D	0.122	23	21	0.99
13	6.560	0.004	2-D	0.088	23	21	0.99
14	7.772	0.004	2-D	0.076	23	21	0.99
15	9.025	0.004	2-D	0.060	23	21	0.99
16	10.345	0.004	2-D	0.042	23	21	0.99
17	11.723	0.004	tran K-H	0.029	23	21	0.99
18	13.032	0.004	K-H	0.020	23	21	0.99
19	14.586	0.004	K-H	0.015	23	21	0.99
20	1.252	0.006	slug	0.251	23	21	0.99
21	1.709	0.006	slug	0.269	23	21	0.99
22	2.019	0.006	slug	0.274	23	21	0.99
23	2.175	0.006	slug	0.284	23	21	0.99
24	2.327	0.006	slug	0.296	23	21	0.99
25	2.484	0.006	slug	0.292	23	21	0.99
26	2.635	0.006	slug	0.282	23	21	0.99
27	3.059	0.006	slug/p.slug	0.276	23	21	0.99
28	3.626	0.006	p.slug	0.240	23	21	0.99
29	4.195	0.006	p.slug	0.206	23	21	0.99
30	4.767	0.006	p.slug	0.171	23	21	0.99
31	5.367	0.006	2-D	0.147	23	21	0.99
32	6.560	0.006	2-D	0.105	23	21	0.99
33	7.772	0.006	2-D	0.084	23	21	0.99
34	9.044	0.006	2-D	0.059	23	21	0.99
35	10.345	0.006	tran K-H	0.039	23	21	0.99
36	11.723	0.006	K-H	0.029	23	21	0.99
37	13.085	0.006	K-H	0.023	23	21	0.99
38	14.474	0.006	K-H	0.018	23	21	0.99



39	16.071	0.006	K-H	0.014	23	21	0.99
40	1.717	0.008	slug	0.267	23	21	0.99
41	2.019	0.008	slug	0.276	23	21	0.99
42	2.327	0.008	slug	0.282	23	21	0.99
43	2.484	0.008	slug	0.296	23	21	0.99
44	2.635	0.008	slug	0.299	23	21	0.99
45	3.059	0.008	slug	0.271	23	21	0.99
46	3.634	0.008	slug/p.slug	0.239	23	21	0.99
47	4.195	0.008	p.slug	0.204	23	21	0.99
48	4.779	0.008	p.slug	0.195	23	21	0.99
49	5.367	0.008	p.slug	0.145	23	21	0.99
50	5.961	0.008	2-D waves	0.119	23	21	0.99
51	6.560	0.008	2-D waves	0.107	23	21	0.99
52	7.772	0.008	2-D	0.087	23	21	0.99
53	9.044	0.008	2-D	0.059	23	21	0.99
54	10.345	0.008	K-H	0.041	23	21	0.99
55	11.723	0.008	K-H	0.032	23	21	0.99
56	13.085	0.008	K-H	0.025	23	21	0.99
57	14.586	0.008	K-H	0.019	23	21	0.99
58	16.071	0.008	K-H	0.016	23	21	0.99
59	1.709	0.012	slug	0.270	23	21	0.99
60	2.019	0.012	slug	0.276	23	21	0.99
61	2.327	0.012	slug	0.286	23	21	0.99
62	2.484	0.012	slug	0.307	23	21	0.99
63	2.635	0.012	slug	0.317	23	21	0.99
64	3.059	0.012	slug	0.301	23	21	0.99
65	3.634	0.012	slug	0.236	23	21	0.99
66	4.195	0.012	slug/p.slug	0.219	23	21	0.99
67	4.779	0.012	p.slug	0.189	23	21	0.99
68	5.367	0.012	p.slug	0.154	23	21	0.99
69	5.961	0.012	p.slug	0.136	23	21	0.99
70	6.560	0.012	2-D	0.127	23	21	0.99
71	7.772	0.012	2-D/tran K-H	0.091	23	21	0.99
72	9.044	0.012	K-H	0.066	23	21	0.99
73	10.345	0.012	K-H	0.051	23	21	0.99
74	11.723	0.012	K-H	0.040	23	21	0.99
75	13.085	0.012	K-H	0.032	23	21	0.99
76	14.586	0.012	K-H	0.024	23	21	0.99
77	1.709	0.022	slug	0.283	23	21	0.99
78	2.019	0.022	slug	0.304	23	21	0.99
79	2.327	0.022	slug	0.293	23	21	0.99
80	2.484	0.022	slug	0.288	23	21	0.99

81	2.635	0.022	slug	0.282	23	21	0.99
82	3.059	0.022	slug	0.276	23	21	0.99
83	3.634	0.022	slug	0.247	23	21	0.99
84	4.205	0.022	slug	0.234	23	21	0.99
85	4.779	0.022	p.slug	0.204	23	21	0.99
86	5.367	0.022	p.slug	0.180	23	21	0.99
87	6.574	0.022	p.slug	0.130	23	21	0.99
88	7.163	0.022	p.slug tran K-H	0.114	23	21	0.99
89	7.790	0.022	K-H	0.099	23	21	0.99
90	9.044	0.022	K-H	0.083	23	21	0.99
91	10.389	0.022	K-H	0.065	23	21	0.99
92	11.747	0.022	K-H/atom	0.053	23	21	0.99
93	13.137	0.022	atom	0.046	23	21	0.99
94	14.614	0.022	atom	0.038	23	21	0.99
95	16.130	0.022	atom	0.030	23	21	0.99
96	1.717	0.042	slug	0.321	23	21	0.99
97	2.024	0.042	slug	0.317	23	21	0.99
98	2.327	0.042	slug	0.310	23	21	0.99
99	2.635	0.042	slug	0.326	23	21	0.99
100	3.059	0.042	slug	0.307	23	21	0.99
101	4.205	0.042	slug	0.243	23	21	0.99
102	4.801	0.042	slug	0.236	23	21	0.99
103	5.380	0.042	p.slug	0.201	23	21	0.99
104	6.589	0.042	p.slug	0.155	23	21	0.99
105	7.196	0.042	p.slug	0.136	23	21	0.99
106	7.807	0.042	atom	0.122	23	21	0.99
107	9.123	0.042	atom	0.101	23	21	0.99
108	10.433	0.042	atom	0.085	23	21	0.99
109	13.189	0.042	atom	0.065	23	21	0.99
110	14.698	0.042	atom	0.053	23	21	0.99
111	16.250	0.042	atom/annular	0.044	23	21	0.99
112	17.905	0.042	annular	0.034	23	21	0.99
113	1.717	0.072	slug	0.319	23	21	0.99
114	2.029	0.072	slug	0.310	23	21	0.99
115	2.332	0.072	slug	0.354	23	21	0.99
116	2.648	0.072	slug	0.343	23	21	0.99
117	3.073	0.072	slug	0.320	23	21	0.99
118	4.215	0.072	slug	0.283	23	21	0.99
119	5.392	0.072	slug/p.slug	0.231	23	21	0.99
120	6.589	0.072	p.slug	0.185	23	21	0.99
121	7.859	0.072	p.slug/atom	0.148	23	21	0.99
122	9.162	0.072	atom	0.133	23	21	0.99

123	10.476	0.072	atom	0.113	23	21	0.99
124	11.866	0.072	annular/atom	0.097	23	21	0.99
125	13.344	0.072	annular	0.084	23	21	0.99
126	16.368	0.072	annular	0.058	23	21	0.99
127	1.725	0.102	slug	0.338	23	21	0.99
128	2.038	0.102	slug	0.349	23	21	0.99
129	2.343	0.102	slug	0.339	23	21	0.99
130	2.648	0.102	slug	0.352	23	21	0.99
131	3.073	0.102	slug	0.342	23	21	0.99
132	4.235	0.100	slug	0.291	23	21	0.99
133	5.417	0.100	slug	0.245	23	21	0.99
134	6.015	0.100	slug/p.slug	0.228	23	21	0.99
135	6.619	0.100	p.slug	0.206	23	21	0.99
136	7.876	0.100	p.slug/atom	0.172	23	21	0.99
137	9.200	0.100	atom	0.150	23	21	0.99
138	10.519	0.100	atom/annular	0.129	23	21	0.99
139	11.961	0.100	annular	0.112	23	21	0.99
140	13.395	0.100	annular	0.097	23	21	0.99

**Πίνακας Π. 12 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε κατωφερή κλίση  $0.25^\circ$**

$\alpha/\alpha$	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$dP/dx$ (m)	$\theta_G$ ( $^\circ C$ )	$\theta_L$ ( $^\circ C$ )	P (atm)
1	1.240	0.008	ss	0.142	2.613	23	23	1
2	1.701	0.008	ss	0.138	4.646	23	23	1
3	2.084	0.008	tran 2-D	0.133	6.728	23	23	1
4	2.472	0.008	2-D	0.128	9.173	23	23	1
5	3.044	0.008	2-D	0.125	12.584	23	23	1
6	4.175	0.008	2-D	0.117	23.216	23	23	1
7	5.342	0.008	2-D	0.105	35.934	23	23	1
8	6.530	0.008	2-D	0.078	52.304	23	23	1
9	7.772	0.008	2-D	0.063	70.607	23	23	1
10	9.044	0.008	2-D/tran K-H	0.055	94.868	23	23	1
11	10.345	0.008	K-H	0.037	153.406	23	23	1
12	11.723	0.008	K-H	0.029	203.087	23	23	1
13	13.137	0.008	K-H	0.023	248.517	23	23	1
14	1.240	0.012	ss	0.165	2.957	23	23	1
15	1.701	0.012	ss/disturbances	0.161	5.031	23	23	1
16	2.084	0.012	2-D	0.157	7.107	23	23	1
17	2.472	0.012	2-D	0.155	9.444	23	23	1
18	3.044	0.012	2-D	0.152	13.233	23	23	1
19	4.185	0.012	2-D	0.143	24.106	23	23	1
20	5.342	0.012	2-D	0.102	37.245	23	23	1
21	6.560	0.012	2-D	0.086	52.619	23	23	1
22	7.772	0.012	2-D/tran K-H	0.071	72.097	23	23	1
23	9.044	0.012	K-H	0.053	133.535	23	23	1
24	10.389	0.012	K-H	0.041	184.601	23	23	1
25	11.771	0.012	K-H	0.033	231.406	23	23	1
26	13.189	0.012	K-H	0.027	281.175	23	23	1
27	1.240	0.022	ss	0.242	3.396	23	23	1
28	1.701	0.022	waves	0.241	5.595	23	23	1
29	2.084	0.022	2-D	0.225	7.960	23	23	1
30	2.472	0.022	2-D	0.205	10.284	23	23	1
31	3.044	0.022	2-D	0.195	14.147	23	23	1
32	4.195	0.022	2-D	0.165	25.810	23	23	1
33	5.342	0.022	2-D	0.139	40.543	23	23	1
34	6.560	0.022	tran K-H/K-H	0.118	63.706	23	23	1
35	7.807	0.022	K-H	0.095	118.208	23	23	1
36	9.044	0.022	K-H	0.072	172.424	23	23	1
37	10.389	0.022	K-H	0.059	227.033	23	23	1

38	11.771	0.022	K-H	0.048	293.747	23	23	1
39	13.189	0.022	atom	0.041	353.092	23	23	1
40	14.642	0.022	atom	0.034	427.069	23	23	1
41	1.240	0.042	2-D	0.296	3.870	23	23	1
42	1.701	0.042	2-D	0.296	6.589	23	23	1
43	2.084	0.042	2-D	0.277	9.601	23	23	1
44	2.472	0.042	2-D	0.283	12.589	23	23	1
45	3.051	0.042	2-D	0.251	17.287	23	23	1
46	4.195	0.042	2-D	0.223	33.799	23	23	1
47	5.367	0.042	K-H/p.slug	0.179	63.614	23	23	1
48	6.589	0.042	K-H/p.slug	0.144	116.791	23	23	1
49	7.807	0.042	K-H/atom	0.113	176.090	23	23	1
50	9.103	0.042	atomization	0.092	245.806	23	23	1
51	10.433	0.042	atomization	0.078	314.324	23	23	1
52	11.819	0.042	atomization	0.066	387.991	23	23	1
53	1.252	0.072	2-D	0.409	5.382	23	23	1
54	1.709	0.072	2-D	0.398	10.336	23	23	1
55	2.095	0.072	2-D	0.378	14.553	23	23	1
56	2.478	0.072	slug	0.357	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
57	3.059	0.072	slug	0.291	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
58	4.215	0.072	slug/p.slug	0.244	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
59	5.392	0.072	p.slug	0.205	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
60	6.589	0.072	p.slug/atom	0.165	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
61	7.876	0.072	atom	0.135	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
62	9.123	0.072	atom	0.120	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
63	10.476	0.072	atom	0.103	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
64	13.344	0.072	atom/annular	0.077	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
65	16.130	0.072	annular	0.065	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
66	1.264	0.089	plug	0.326	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
67	1.725	0.089	plug	0.291	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
68	2.105	0.089	plug	0.305	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
69	1.267	0.103	plug	0.336	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
70	1.725	0.103	plug	0.302	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
71	2.105	0.103	plug	0.321	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
72	2.484	0.103	slug	0.321	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
73	3.059	0.103	slug	0.311	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
74	4.235	0.103	slug	0.265	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
75	5.392	0.103	slug/p.slug	0.223	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
76	6.619	0.103	p.slug	0.186	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
77	7.876	0.103	p.slug/atom	0.163	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
78	9.162	0.103	atom	0.139	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
79	10.562	0.103	atom	0.122	Δε Μετρήθηκε	23	23	1

80	11.961	0.103	atom/annular	0.109	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
81	13.446	0.103	annular	0.094	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
82	1.264	0.155	plug	0.373	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
83	1.725	0.155	plug	0.317	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
84	2.115	0.155	plug	0.299	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
85	2.496	0.155	slug&plug	0.312	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
86	3.073	0.155	slug	0.317	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
87	4.235	0.155	slug	0.280	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
88	5.441	0.155	slug/p.slug	0.247	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
89	6.648	0.155	p.slug	0.217	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
90	7.944	0.155	p.slug	0.187	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
91	9.239	0.155	p.slug/annular	0.166	Δε Μετρήθηκε	23	23	1
92	10.648	0.161	annular	0.149	Δε Μετρήθηκε	23	23	1

**Πίνακας Π. 13 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα νερού- $CO_2$  σε κατωφερή κλίση  $1^\circ$**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$dP/dx$ (m)	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.240	0.012	2-D	0.150	1.000	22	22	1
2	1.701	0.012	2-D	0.146	1.929	22	22	1
3	2.084	0.012	2-D	0.143	4.247	22	22	1
4	2.472	0.012	2-D	0.138	7.160	22	22	1
5	3.044	0.012	2-D	0.118	11.651	22	22	1
6	4.175	0.012	2-D	0.099	24.202	22	22	1
7	5.330	0.012	2-D	0.090	38.761	22	22	1
8	6.530	0.012	2-D	0.078	56.043	22	22	1
9	7.737	0.012	2-D	0.070	75.891	22	22	1
10	9.044	0.012	2-D/tran K-H	0.063	100.826	22	22	1
11	10.389	0.012	K-H	0.047	160.525	22	22	1
12	11.723	0.012	K-H	0.037	204.547	22	22	1
13	13.085	0.012	K-H	0.031	255.672	22	22	1
14	1.240	0.022	2-D	0.165	0.593	22	22	1
15	1.701	0.022	2-D	0.159	3.070	22	22	1
16	2.115	0.022	2-D	0.158	5.948	22	22	1
17	2.472	0.022	2-D	0.153	8.372	22	22	1
18	3.044	0.022	2-D	0.143	13.545	22	22	1
19	4.175	0.022	2-D	0.131	26.881	22	22	1
20	5.330	0.022	2-D	0.122	42.298	22	22	1
21	6.560	0.022	2-D	0.112	62.788	22	22	1
22	7.772	0.022	K-H	0.099	96.399	22	22	1
23	9.044	0.022	K-H	0.073	157.300	22	22	1
24	10.389	0.022	K-H	0.060	212.815	22	22	1
25	11.723	0.022	K-H	0.051	262.465	22	22	1
26	1.240	0.042	2-D	0.211	3.482	22	22	1
27	1.701	0.042	2-D	0.209	6.234	22	22	1
28	2.084	0.042	2-D	0.206	9.046	22	22	1
29	2.472	0.042	2-D	0.203	12.144	22	22	1
30	3.044	0.042	2-D	0.198	17.197	22	22	1
31	4.175	0.042	2-D	0.184	32.907	22	22	1
32	5.342	0.042	2-D	0.170	51.257	22	22	1
33	6.560	0.042	K-H	0.142	100.424	22	22	1
34	7.807	0.042	K-H	0.116	158.548	22	22	1
46	1.240	0.155	2-D	0.099	11.081	22	22	1
47	1.701	0.155	2-D	0.084	16.305	22	22	1
48	2.084	0.155	2-D	0.369	20.957	22	22	1
49	2.472	0.155	slug	0.334	108.645	22	22	1
50	3.059	0.155	slug	0.339	113.210	22	22	1
51	4.235	0.155	slug	0.348	196.446	22	22	1
55	1.240	0.100	2-D	0.333	8.002	22	22	1
56	1.701	0.100	2-D	0.300	11.674	22	22	1
57	2.084	0.100	2-D	0.268	15.350	22	22	1
58	2.472	0.100	2-D	0.237	19.991	22	22	1
59	3.044	0.100	2-D	0.214	26.912	22	22	1
60	4.195	0.100	p.slug/K-H	0.419	85.291	22	22	1
61	5.392	0.100	K-H/atom	0.410	156.064	22	22	1

**Πίνακας Π. 14 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε ανωφερή κλίση 0.5°**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.992	0.004	slug	0.338	20	20	1
2	2.395	0.004	slug	0.309	20	20	1
3	2.605	0.004	slug	0.326	20	20	1
4	2.802	0.004	slug/p.slug	0.299	20	20	1
5	3.000	0.004	slug/p.slug	0.276	20	20	1
6	3.198	0.004	p.slug	0.278	20	20	1
7	3.396	0.004	p.slug	0.262	20	20	1
8	3.990	0.004	p.slug	0.269	20	20	1
9	5.291	0.004	2D	0.143	20	20	1
10	6.619	0.004	2D	0.102	20	20	1
11	8.001	0.004	2D	0.067	20	20	1
12	9.391	0.004	2D	0.051	20	20	1
13	10.851	0.004	2D	0.040	20	20	1
14	12.344	0.004	K-H	0.032	20	20	1
15	13.927	0.004	K-H	0.026	20	20	1
16	17.216	0.004	K-H	0.018	20	20	1
17	1.987	0.006	slug	0.287	20	20	1
18	2.384	0.006	slug	0.308	20	20	1
19	2.580	0.006	slug	0.290	20	20	1
20	2.789	0.006	slug	0.285	20	20	1
21	2.986	0.006	slug/p.slug	0.273	20	20	1
22	3.198	0.006	slug/p.slug	0.263	20	20	1
23	3.396	0.006	p.slug	0.252	20	20	1
24	3.990	0.006	p.slug	0.260	20	20	1
25	5.291	0.006	2-D	0.165	20	20	1
26	6.634	0.006	2-D	0.094	20	20	1
27	8.001	0.006	2-D	0.077	20	20	1
28	9.391	0.006	2-D/K-H	0.058	20	20	1
29	10.851	0.006	K-H	0.048	20	20	1
30	12.344	0.006	K-H	0.036	20	20	1
31	13.927	0.006	K-H	0.029	20	20	1
32	15.489	0.006	K-H	0.023	20	20	1
33	17.216	0.006	K-H	0.019	20	20	1
34	1.992	0.008	slug	0.276	20	20	1
35	2.395	0.008	slug	0.309	20	20	1
36	2.592	0.008	slug	0.296	20	20	1
37	2.802	0.008	slug	0.298	20	20	1
38	3.000	0.008	slug	0.263	20	20	1
39	3.198	0.008	slug/p.slug	0.293	20	20	1
40	3.396	0.008	p.slug	0.275	20	20	1
41	3.990	0.008	p.slug	0.239	20	20	1
42	5.291	0.008	2-D	0.182	20	20	1
43	6.634	0.008	2-D	0.109	20	20	1



44	8.001	0.008	2-D/K-H	0.076	20	20	1
45	9.391	0.008	K-H	0.064	20	20	1
46	10.851	0.008	K-H	0.049	20	20	1
47	13.927	0.008	K-H	0.031	20	20	1
48	17.282	0.008	K-H	0.022	20	20	1
49	18.990	0.008	K-H	0.019	20	20	1
50	2.002	0.012	slug	0.309	20	20	1
51	2.395	0.012	slug	0.299	20	20	1
52	2.605	0.012	slug	0.310	20	20	1
53	2.802	0.012	slug	0.293	20	20	1
54	3.000	0.012	slug	0.287	20	20	1
55	3.198	0.012	slug/p.slug	0.271	20	20	1
56	3.396	0.012	slug/p.slug	0.303	20	20	1
57	3.990	0.012	p.slug	0.290	20	20	1
58	5.291	0.012	2-D	0.226	20	20	1
59	6.634	0.012	2-D	0.131	20	20	1
60	8.038	0.012	2-D/K-H	0.094	20	20	1
61	9.433	0.012	K-H	0.073	20	20	1
62	10.851	0.012	K-H	0.059	20	20	1
63	13.927	0.012	K-H	0.040	20	20	1
64	17.347	0.012	K-H/atom	0.029	20	20	1
65	18.990	0.012	atom	0.025	20	20	1
66	1.992	0.022	slug	0.330	20	20	1
67	2.384	0.022	slug	0.316	20	20	1
68	2.580	0.022	slug	0.303	20	20	1
69	2.789	0.022	slug	0.314	20	20	1
70	3.000	0.022	slug	0.316	20	20	1
71	3.198	0.022	slug	0.296	20	20	1
72	3.396	0.022	slug/p.slug	0.292	20	20	1
73	3.990	0.022	p.slug	0.279	20	20	1
74	5.316	0.022	p.slug	0.211	20	20	1
75	6.634	0.022	2-D/K-H	0.164	20	20	1
76	8.001	0.022	K-H	0.122	20	20	1
77	9.433	0.022	K-H	0.093	20	20	1
78	10.898	0.022	K-H/atom	0.076	20	20	1
79	13.812	0.022	atom	0.063	20	20	1
80	17.282	0.022	atom	0.040	20	20	1
81	19.060	0.022	atom	0.034	20	20	1
82	2.002	0.042	slug	0.309	20	20	1
83	2.395	0.042	slug	0.341	20	20	1
84	2.802	0.042	slug	0.327	20	20	1
85	3.198	0.042	slug	0.310	20	20	1
86	3.990	0.042	slug/p.slug	0.316	20	20	1
87	5.291	0.042	p.slug	0.241	20	20	1
88	6.634	0.042	p.slug	0.186	20	20	1
89	8.038	0.042	p.slug/atom.	0.154	20	20	1
90	9.475	0.042	atom.	0.125	20	20	1
91	10.898	0.042	atom.	0.109	20	20	1

92	14.041	0.042	atom.	0.077	20	20	1
93	15.674	0.042	atom.	0.066	20	20	1
94	19.200	0.042	atom./annular	0.046	20	20	1
95	2.002	0.072	slug	0.360	20	20	1
96	2.395	0.072	slug	0.361	20	20	1
97	2.802	0.072	slug	0.347	20	20	1
98	3.198	0.072	slug	0.344	20	20	1
99	3.990	0.072	slug/p.slug	0.337	20	20	1
100	5.291	0.072	p.slug	0.270	20	20	1
101	6.665	0.072	p.slug	0.219	20	20	1
102	8.074	0.072	p.slug	0.188	20	20	1
103	9.516	0.072	atom	0.159	20	20	1
104	12.552	0.072	atom	0.117	20	20	1
105	14.097	0.070	atom	0.099	20	20	1
106	15.796	0.072	atom/annular	0.087	20	20	1
107	19.476	0.072	annular	0.061	20	20	1
108	2.002	0.100	slug	0.359	20	20	1
109	2.407	0.100	slug	0.363	20	20	1
110	2.802	0.100	slug	0.370	20	20	1
111	3.198	0.103	slug	0.350	20	20	1
112	4.009	0.100	slug	0.330	20	20	1
113	5.316	0.100	slug/p.slug	0.282	20	20	1
114	6.696	0.100	p.slug	0.247	20	20	1
115	8.074	0.100	p.slug/atom.	0.210	20	20	1
116	9.558	0.100	atom.	0.180	20	20	1
117	12.603	0.100	atom./annular	0.133	20	20	1
118	15.977	0.100	annular	0.096	20	20	1
119	19.545	0.100	annular	0.070	20	20	1

**Πίνακας Π. 15 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε ανωφερή κλίση 1°**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.992	0.004	slug	0.299	20	19	1
2	2.384	0.004	slug	0.302	20	19	1
3	2.789	0.004	slug	0.359	20	19	1
4	2.986	0.004	slug/p.slug	0.315	20	19	1
5	3.183	0.004	slug/p.slug	0.319	20	19	1
6	3.380	0.004	p.slug	0.278	20	19	1
7	3.990	0.004	p.slug	0.280	20	19	1
8	5.291	0.004	p.slug	0.187	20	19	1
9	6.619	0.004	2-D	0.101	20	19	1
10	8.001	0.004	2-D	0.064	20	19	1
11	9.391	0.004	2-D	0.051	20	19	1
12	10.851	0.004	2-D/K-H	0.041	20	19	1
13	12.344	0.004	K-H	0.029	20	19	1
14	13.870	0.004	K-H	0.021	20	19	1
15	15.458	0.004	K-H	0.018	20	19	1
16	17.216	0.004	K-H	0.013	20	19	1
17	18.990	0.004	K-H	0.010	20	19	1
18	1.992	0.006	slug	0.302	20	19	1
19	2.395	0.006	slug	0.303	20	19	1
20	2.789	0.006	slug	0.316	20	19	1
21	3.198	0.006	slug	0.304	20	19	1
22	3.396	0.006	slug/p.slug	0.288	20	19	1
23	3.990	0.006	p.slug	0.289	20	19	1
24	5.291	0.006	p.slug	0.213	20	19	1
25	6.634	0.006	2-D	0.132	20	19	1
26	8.001	0.006	2-D	0.075	20	19	1
27	9.391	0.006	2-D	0.057	20	19	1
28	10.851	0.006	2-D/K-H	0.044	20	19	1
29	12.397	0.006	2-D/K-H	0.037	20	19	1
30	13.927	0.006	K-H	0.030	20	19	1
31	17.216	0.006	K-H	0.020	20	19	1
32	18.920	0.006	K-H	0.016	20	19	1
33	1.992	0.008	slug	0.326	20	19	1
34	2.395	0.008	slug	0.311	20	19	1
35	2.789	0.008	slug	0.351	20	19	1
36	3.198	0.008	slug	0.335	20	19	1
37	3.396	0.008	slug	0.316	20	19	1
38	3.990	0.008	slug/p.slug	0.314	20	19	1
39	5.291	0.008	p.slug	0.213	20	19	1
40	6.634	0.008	2-D	0.118	20	19	1
41	8.001	0.008	2-D	0.081	20	19	1
42	9.391	0.008	2-D/K-H	0.067	20	19	1
43	10.851	0.008	K-H	0.054	20	19	1

44	12.397	0.008	K-H	0.040	20	19	1
45	15.551	0.008	K-H	0.026	20	19	1
46	18.920	0.008	K-H	0.017	20	19	1
47	1.992	0.012	slug	0.324	20	19	1
48	2.395	0.012	slug	0.315	20	19	1
49	2.789	0.012	slug	0.350	20	19	1
50	3.198	0.012	slug	0.312	20	19	1
51	3.396	0.012	slug	0.310	20	19	1
52	3.990	0.012	slug/p.slug	0.340	20	19	1
53	5.291	0.012	p.slug	0.224	20	19	1
54	6.650	0.012	2-D	0.157	20	19	1
55	8.038	0.012	2-D	0.102	20	19	1
56	9.433	0.012	K-H	0.079	20	19	1
57	10.898	0.012	K-H	0.060	20	19	1
58	12.397	0.012	K-H	0.048	20	19	1
59	15.551	0.012	K-H/atom	0.032	20	19	1
60	18.920	0.012	K-H/atom	0.024	20	19	1
61	2.002	0.022	slug	0.335	20	19	1
62	2.395	0.022	slug	0.361	20	19	1
63	2.802	0.022	slug	0.332	20	19	1
64	3.198	0.022	slug	0.343	20	19	1
65	3.990	0.022	slug/p.slug	0.313	20	19	1
66	5.316	0.022	p.slug	0.253	20	19	1
67	6.650	0.022	p.slug	0.170	20	19	1
68	8.038	0.022	K-H	0.133	20	19	1
69	9.433	0.022	K-H	0.103	20	19	1
70	10.898	0.022	K-H	0.082	20	19	1
71	12.449	0.022	K-H/atom	0.066	20	19	1
72	15.613	0.022	atom	0.048	20	19	1
73	19.060	0.022	atom	0.034	20	19	1
74	22.757	0.022	atom/annular	0.023	20	19	1
75	2.002	0.042	slug	0.354	20	19	1
76	2.002	0.042	slug	0.357	20	19	1
77	2.407	0.042	slug	0.341	20	19	1
78	2.802	0.042	slug	0.307	20	19	1
79	3.198	0.042	slug	0.307	20	19	1
80	3.990	0.042	slug	0.299	20	19	1
81	5.316	0.042	p.slug	0.237	20	19	1
82	6.665	0.042	p.slug	0.180	20	19	1
83	8.038	0.042	p.slug	0.147	20	19	1
84	9.475	0.042	atom	0.121	20	19	1
85	12.500	0.042	atom	0.086	20	19	1
86	15.735	0.042	atom	0.063	20	19	1
87	19.200	0.042	atom/annular	0.045	20	19	1
88	2.002	0.072	slug	0.327	20	19	1
89	2.395	0.072	slug	0.327	20	19	1
90	2.802	0.072	slug	0.331	20	19	1
91	3.213	0.072	slug	0.334	20	19	1

92	4.009	0.072	Slug	0.314	20	19	1
93	5.341	0.072	slug/p.slug	0.264	20	19	1
94	6.696	0.072	p.slug	0.212	20	19	1
95	8.074	0.072	p.slug	0.176	20	19	1
96	9.558	0.072	p.slug	0.151	20	19	1
97	11.039	0.072	p.slug/atom	0.128	20	19	1
98	14.154	0.072	atom	0.096	20	19	1
99	15.857	0.072	atom/annular	0.081	20	19	1
100	19.407	0.072	annular	0.056	20	19	1
101	2.011	0.100	slug	0.323	20	19	1
102	2.407	0.100	slug	0.338	20	19	1
103	2.802	0.100	slug	0.331	20	19	1
104	3.213	0.100	slug	0.328	20	19	1
105	4.009	0.100	slug	0.323	20	19	1
106	5.341	0.100	slug	0.272	20	19	1
107	6.696	0.100	slug/p.slug	0.227	20	19	1
108	8.110	0.100	pslug	0.199	20	19	1
109	9.599	0.100	pslug	0.172	20	19	1
110	11.085	0.100	pslug	0.148	20	19	1
111	12.603	0.100	pslug	0.128	20	19	1
112	14.265	0.100	annular	0.110	20	19	1
113	15.917	0.100	annular	0.093	20	19	1
114	19.545	0.100	annular	0.066	20	19	1

**Πίνακας Π. 16 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κατωφερή κλίση 0.25°**

α/α	u <sub>GS</sub> (m/s)	u <sub>LS</sub> (m/s)	Καθεστώς Ροής	h/d	θ <sub>G</sub> (°C)	θ <sub>L</sub> (°C)	P (atm)
1	1.963	0.004	2-D/Διαταραχές	0.101	20	19	1.005
2	2.470	0.004	2-D/Διαταραχές	0.097	20	19	1.005
3	2.986	0.004	2-D/Διαταραχές	0.095	20	19	1.005
4	3.380	0.004	2-D/Διαταραχές	0.093	20	19	1.005
5	3.971	0.004	2-D/Διαταραχές	0.091	20	19	1.005
6	4.606	0.004	2-D/Διαταραχές	0.087	20	19	1.005
7	5.266	0.004	2-D	0.083	20	19	1.005
8	6.604	0.004	2-D	0.074	20	19	1.005
9	8.001	0.004	2-D	0.054	20	19	1.005
10	9.391	0.004	tran K-H	0.043	20	19	1.005
11	10.851	0.004	K-H	0.035	20	19	1.005
12	12.344	0.004	K-H	0.030	20	19	1.005
13	13.927	0.004	K-H	0.026	20	19	1.005
14	15.551	0.004	K-H	0.021	20	19	1.005
15	17.216	0.004	K-H	0.018	20	19	1.005
16	18.920	0.004	K-H	0.015	20	19	1.005
17	1.345	0.008	Διαταραχές	0.131	20	19	1.005
18	1.982	0.008	Διαταραχές	0.125	20	19	1.005
19	2.470	0.008	Διαταραχές	0.122	20	19	1.005
20	2.971	0.008	tran 2-D	0.119	20	19	1.005
21	3.380	0.008	tran 2-D	0.118	20	19	1.005
22	3.971	0.008	2-D	0.118	20	19	1.005
23	4.606	0.008	2-D	0.113	20	19	1.005
24	5.278	0.008	2-D	0.104	20	19	1.005
25	6.604	0.008	2-D	0.077	20	19	1.005
26	8.001	0.008	2-D/tran K-H	0.060	20	19	1.005
27	9.391	0.008	K-H	0.052	20	19	1.005
28	10.851	0.008	K-H	0.046	20	19	1.005
29	12.397	0.008	K-H	0.039	20	19	1.005
30	13.927	0.008	K-H	0.030	20	19	1.005
31	15.551	0.008	K-H	0.023	20	19	1.005
32	18.990	0.008	K-H	0.016	20	19	1.005
33	1.384	0.012	tran 2-D	0.147	20	19	1.005
34	1.982	0.012	tran 2-D	0.144	20	19	1.005
35	2.482	0.012	tran 2-D	0.142	20	19	1.005
36	2.986	0.012	tran 2-D	0.138	20	19	1.005
37	3.380	0.012	2-D	0.135	20	19	1.005
38	3.971	0.012	2-D	0.131	20	19	1.005
39	5.266	0.012	2-D	0.098	20	19	1.005
40	6.619	0.012	2-D	0.082	20	19	1.005
41	8.001	0.012	2-D/tran K-H	0.070	20	19	1.005
42	9.391	0.012	K-H	0.063	20	19	1.005
43	10.851	0.012	K-H	0.054	20	19	1.005
44	12.397	0.012	K-H	0.040	20	19	1.005
45	13.984	0.012	K-H	0.032	20	19	1.005
46	17.216	0.012	tran atom	0.023	20	19	1.005
47	18.990	0.012	atom	0.020	20	19	1.005
48	1.384	0.022	Διαταραχές	0.187	20	19	1.005
49	1.982	0.022	Διαταραχές	0.178	20	19	1.005
50	2.482	0.022	2-D	0.171	20	19	1.005
51	2.986	0.022	2-D	0.161	20	19	1.005

52	3.380	0.022	2-D	0.153	20	19	1.005
53	3.971	0.022	2-D	0.149	20	19	1.005
54	5.291	0.022	2-D	0.121	20	19	1.005
55	6.634	0.022	tran K-H	0.111	20	19	1.005
56	8.001	0.022	K-H	0.099	20	19	1.005
57	9.433	0.022	K-H	0.075	20	19	1.005
58	10.898	0.022	K-H	0.059	20	19	1.005
59	12.449	0.022	K-H/atom	0.050	20	19	1.005
60	15.674	0.022	atom	0.038	20	19	1.005
61	19.060	0.022	atom	0.029	20	19	1.005
62	1.398	0.045	2-D	0.236	20	19	1.005
63	1.992	0.045	2-D	0.225	20	19	1.005
64	2.494	0.045	2-D	0.217	20	19	1.005
65	2.986	0.045	2-D	0.203	20	19	1.005
66	3.380	0.045	2-D	0.202	20	19	1.005
67	3.971	0.045	2-D	0.196	20	19	1.005
68	5.291	0.045	2-D/tran K-H	0.189	20	19	1.005
69	6.634	0.045	K-H/pslug	0.151	20	19	1.005
70	8.056	0.045	K-H	0.121	20	19	1.005
71	9.558	0.045	K-H/atom	0.097	20	19	1.005
72	10.945	0.045	atom	0.083	20	19	1.005
73	14.154	0.045	atom	0.062	20	19	1.005
74	17.413	0.045	atom	0.047	20	19	1.005
75	19.269	0.045	atom/annular	0.039	20	19	1.005
76	1.384	0.072	2-D	0.306	20	19	1.005
77	1.982	0.072	2-D	0.290	20	19	1.005
78	2.482	0.072	2-D	0.290	20	19	1.005
79	2.986	0.072	2-D	0.285	20	19	1.005
80	3.388	0.072	2-D	0.277	20	19	1.005
81	3.981	0.072	2-D	0.277	20	19	1.005
82	5.316	0.072	p.slug	0.206	20	19	1.005
83	6.665	0.072	p.slug	0.171	20	19	1.005
84	8.074	0.072	pslug/atom	0.142	20	19	1.005
85	9.516	0.072	pslug/atom	0.120	20	19	1.005
86	10.992	0.072	atom	0.105	20	19	1.005
87	12.552	0.072	atom	0.092	20	19	1.005
88	14.210	0.072	atom/annular	0.080	20	19	1.005
89	15.857	0.072	atom/annular	0.070	20	19	1.005
90	19.407	0.072	annular	0.052	20	19	1.005
91	1.398	0.100	2-D	0.413	20	19	1.005
92	1.992	0.100	2-D	0.380	20	19	1.005
93	2.482	0.100	2-D	0.365	20	19	1.005
94	2.986	0.100	slug	0.273	20	19	1.005
95	3.990	0.100	slug	0.271	20	19	1.005
96	5.341	0.100	slug/p.slug	0.220	20	19	1.005
97	6.696	0.100	p.slug	0.192	20	19	1.005
98	8.074	0.100	p.slug	0.164	20	19	1.005
99	9.516	0.100	p.slug	0.143	20	19	1.005
100	11.085	0.100	p.slug	0.126	20	19	1.005
101	12.654	0.100	p.slug/annular	0.107	20	19	1.005
102	14.265	0.100	annular	0.093	20	19	1.005
103	17.737	0.100	annular	0.069	20	19	1.005
104	1.418	0.155	slug/plug	0.305	20	19	1.005
105	2.021	0.155	slug/plug	0.286	20	19	1.005
106	2.518	0.155	slug/plug	0.304	20	19	1.005
107	3.014	0.155	slug/plug	0.295	20	19	1.005

108	4.047	0.155	slug	0.277	20	19	1.005
109	5.365	0.155	slug/p.slug	0.243	20	19	1.005
110	6.756	0.155	p.slug	0.212	20	19	1.005
111	8.181	0.155	p.slug	0.186	20	19	1.005
112	9.680	0.155	p.slug	0.164	20	19	1.005
113	11.177	0.155	p.slug/annular	0.140	20	19	1.005
114	14.487	0.155	annular	0.105	20	19	1.005
115	18.119	0.155	annular	0.079	20	19	1.005
116	2.011	0.248	slug	0.280	20	19	1.005
117	2.518	0.248	slug	0.289	20	19	1.005
118	3.043	0.248	slug	0.272	20	19	1.005
119	4.047	0.248	slug	0.279	20	19	1.005
120	5.390	0.248	slug	0.227	20	19	1.005
121	6.816	0.248	slug	0.202	20	19	1.005
122	8.287	0.248	slug/p.slug	0.175	20	19	1.005
123	9.921	0.248	p.slug	0.148	20	19	1.005
124	13.155	0.248	p.slug/annular	0.112	20	19	1.005
125	16.625	0.223	annular	0.088	20	19	1.005



**Πίνακας Π. 17 Πειραματικές μετρήσεις για το σύστημα υδατ. δ/τος κανονικής βουτανόλης-αέρα σε κατωφερή κλίση 1°**

α/α	$u_{GS}$ (m/s)	$u_{LS}$ (m/s)	Καθεστώς Ροής	$h/d$	$\theta_G$ (°C)	$\theta_L$ (°C)	P (atm)
1	1.384	0.004	tran 2-D	0.055	20	19	1
2	1.963	0.004	tran 2-D	0.054	20	19	1
3	2.470	0.004	tran 2-D	0.052	20	19	1
4	2.971	0.004	tran 2-D	0.051	20	19	1
5	3.971	0.004	2-D	0.049	20	19	1
6	5.291	0.004	2-D	0.047	20	19	1
7	6.604	0.004	2-D	0.040	20	19	1
8	8.001	0.004	2-D	0.032	20	19	1
9	9.391	0.004	2-D	0.026	20	19	1
10	10.851	0.004	2-D	0.021	20	19	1
11	12.397	0.004	2-D	0.018	20	19	1
12	13.927	0.004	2-D	0.016	20	19	1
13	15.551	0.004	2-D tran K-H	0.014	20	19	1
14	17.216	0.004	K-H	0.011	20	19	1
15	18.920	0.004	K-H	0.009	20	19	1
16	1.398	0.008	2-D	0.101	20	19	1
17	1.992	0.008	2-D	0.098	20	19	1
18	2.494	0.008	2-D	0.096	20	19	1
19	2.986	0.008	2-D	0.093	20	19	1
20	3.971	0.008	2-D	0.088	20	19	1
21	5.266	0.008	2-D	0.069	20	19	1
22	6.604	0.008	2-D	0.059	20	19	1
23	8.001	0.008	2-D	0.051	20	19	1
24	9.391	0.008	2-D	0.045	20	19	1
25	10.851	0.008	2-D	0.040	20	19	1
26	12.397	0.008	2-D	0.036	20	19	1
27	13.927	0.008	2-D/tran K-H	0.029	20	19	1
28	15.551	0.008	K-H	0.025	20	19	1
29	17.216	0.008	K-H	0.019	20	19	1
30	18.990	0.008	K-H	0.017	20	19	1
31	1.384	0.012	2-D	0.106	20	19	1
32	1.982	0.012	2-D	0.102	20	19	1
33	2.482	0.012	2-D	0.099	20	19	1
34	2.986	0.012	2-D	0.095	20	19	1
35	3.971	0.012	2-D	0.089	20	19	1
36	5.278	0.012	2-D	0.078	20	19	1
37	6.604	0.012	2-D	0.070	20	19	1
38	8.263	0.012	2-D	0.061	20	19	1
39	9.412	0.012	2-D	0.056	20	19	1
40	10.851	0.012	2-D/tran K-H	0.051	20	19	1
41	12.397	0.012	K-H	0.044	20	19	1
42	13.927	0.012	K-H	0.032	20	19	1
43	15.551	0.011	K-H	0.026	20	19	1

44	17.216	0.012	K-H/atom	0.022	20	19	1
45	18.990	0.012	atom	0.019	20	19	1
46	1.384	0.022	2-D	0.124	20	19	1
47	1.982	0.022	2-D	0.122	20	19	1
48	2.482	0.022	2-D	0.121	20	19	1
49	2.986	0.022	2-D	0.118	20	19	1
50	3.971	0.022	2-D	0.115	20	19	1
51	5.266	0.022	2-D	0.105	20	19	1
52	6.619	0.022	2-D	0.097	20	19	1
53	8.001	0.022	2-D	0.090	20	19	1
54	9.412	0.022	2-D/tran K-H	0.084	20	19	1
55	10.898	0.022	K-H	0.060	20	19	1
56	12.449	0.022	K-H	0.048	20	19	1
57	14.041	0.022	atom	0.041	20	19	1
58	15.613	0.022	atom	0.036	20	19	1
59	19.165	0.022	atom	0.027	20	19	1
60	1.384	0.045	2-D	0.182	20	19	1
61	1.982	0.045	2-D	0.177	20	19	1
62	2.494	0.045	2-D	0.175	20	19	1
63	2.986	0.045	2-D	0.171	20	19	1
64	3.971	0.045	2-D	0.164	20	19	1
65	5.278	0.045	2-D	0.152	20	19	1
66	6.619	0.045	2-D/K-H	0.141	20	19	1
67	8.038	0.045	K-H/p/slug	0.114	20	19	1
68	9.433	0.045	atom	0.096	20	19	1
69	10.945	0.045	atom	0.078	20	19	1
70	12.500	0.045	atom	0.068	20	19	1
71	15.735	0.045	atom	0.050	20	19	1
72	17.478	0.045	atom	0.044	20	19	1
73	19.269	0.045	atom	0.039	20	19	1
74	1.982	0.072	2-D	0.210	20	19	1
75	2.482	0.072	2-D	0.208	20	19	1
76	2.986	0.072	2-D	0.205	20	19	1
77	3.971	0.072	2-D	0.200	20	19	1
78	5.291	0.072	2-D	0.189	20	19	1
79	6.665	0.072	p.slug	0.159	20	19	1
80	8.074	0.072	p.slug	0.133	20	19	1
81	9.496	0.072	p.slug	0.113	20	19	1
82	11.015	0.072	p.slug	0.097	20	19	1
83	14.097	0.072	p.slug	0.074	20	19	1
84	15.796	0.072	p.slug/annular	0.066	20	19	1
85	17.608	0.072	annular	0.059	20	19	1
86	19.338	0.072	annular	0.049	20	19	1
87	2.060	0.100	2-D	0.255	20	19	1
88	2.533	0.100	2-D	0.251	20	19	1
89	2.986	0.100	2-D	0.250	20	19	1
90	3.971	0.106	2-D	0.245	20	19	1
91	5.316	0.100	p.slug	0.215	20	19	1

92	6.696	0.100	p.slug	0.176	20	19	1
93	9.558	0.100	p.slug/atom	0.132	20	19	1
94	12.654	0.100	atom	0.103	20	19	1
95	14.265	0.100	atom/annular	0.090	20	19	1
96	15.917	0.100	annular	0.078	20	19	1
97	17.673	0.100	annular	0.067	20	19	1
98	19.545	0.100	annular	0.058	20	19	1
99	1.992	0.155	2-D	0.331	20	19	1
100	2.494	0.155	2-D	0.328	20	19	1
101	3.014	0.155	slug	0.259	20	19	1
102	4.009	0.155	slug	0.258	20	19	1
103	5.365	0.155	slug	0.220	20	19	1
104	6.726	0.155	slug/p.slug	0.196	20	19	1
105	8.163	0.155	p.slug	0.169	20	19	1
106	9.640	0.155	p.slug	0.150	20	19	1
107	11.177	0.155	p.slug	0.133	20	19	1
108	12.807	0.155	p.slug/annular	0.116	20	19	1
109	14.487	0.155	annular	0.100	20	19	1
110	17.993	0.155	annular	0.074	20	19	1
111	2.002	0.248	slug	0.057	20	19	1
112	2.530	0.248	slug	0.308	20	19	1
113	3.043	0.248	slug	0.269	20	19	1
114	4.065	0.248	slug	0.266	20	19	1
115	5.439	0.248	slug	0.272	20	19	1
116	6.816	0.248	slug	0.236	20	19	1
117	8.322	0.248	slug	0.206	20	19	1
118	9.802	0.248	slug/p.slug	0.174	20	19	1
119	11.493	0.248	p.slug	0.153	20	19	1
120	13.204	0.248	p.slug	0.124	20	19	1
121	14.866	0.248	p.slug	0.108	20	19	1
122	19.573	0.248	annular	0.096	20	19	1

## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

### ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Επώνυμο	:	ΤΖΩΤΖΗ
Όνομα	:	ΧΡΙΣΤΙΝΑ
Όνομα πατρός	:	ΜΙΧΑΗΛ
Διεύθυνση μόνιμης κατοικίας	:	ΑΡΧ. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ 15, ΦΛΩΡΙΝΑ
Οικογενειακή κατάσταση	:	ΑΓΑΜΗ
Ημερομηνία γέννησης	:	19/04/1981
Τηλέφωνο επικοινωνίας	:	2385025062 6948740375
Διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου	:	chtzotzi@mie.uth.gr

### ΣΠΟΥΔΕΣ

ΕΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΤΙΤΛΟΥ	ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΟΥ
• Ιούλιος 2004	Α.Π.Θ. Τμήμα Χημικών Μηχανικών	ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ
• Ιούλιος 2007	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών	ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ Ειδίκευση: Σύγχρονες Μέθοδοι Συστημάτων Ενέργειας, Διεργασιών και Αντιρρύπανσης

### ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

ΑΓΓΛΙΚΑ:	Κάτοχος διπλώματος First Certificate in English (FCE)
	Κάτοχος διπλώματος Certificate of Proficiency in English (CPE)
ΑΛΛΗ:	Μέτρια Γνώση Γερμανικών

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

Η/Υ:	Γνώση Microsoft Office (Word, Excel, Power Point, Access, Visio)
	MathCad, Origin, Adobe Photoshop, LabVIEW, Matlab, Fortran

## ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗΣ	ΕΡΓΟΔΟΤΗΣ	ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ
• 28/03/05-31/12/06	Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας	Ερευνητικό Έργο και Εργαστηριακή Υποστήριξη
• 01/05/07-31/10/07	Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας	Ερευνητικό Έργο και Εργαστηριακή Υποστήριξη
• 01/11/07-31/10/08	Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας	Ερευνητικό Έργο και Εργαστηριακή Υποστήριξη
• 01/09/09-Σήμερα	Επιτροπή Ερευνών Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας	Διοικητική Οργάνωση και Υποστήριξη Ερευνητικών Έργων και Έργων Υποδομής

## ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ

- Βράβευση από το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας για άριστη επίδοση σπουδών κατ'ακαδημαϊκό έτος 2003-2004.
- Υποτροφία από το Κοινωνικό Φιλάνθρωπο Ίδρυμα Αλέξανδρος Ωνάσης για το ακαδημαϊκό έτος 2006-2007. Υποτροφία του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για το ακαδημαϊκό έτος 2007-2008.

## ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

- Pahiadaki, T., Tzotzi, C., Andritsos, N., Yiantsios, S.G. and Karabelas, A.J.  
'An Experimental Study of  $\text{CaCO}_3$  Scaling of RO and NF Membranes'  
IDA World Congress on Desalination and Water Sciences, Singapore, Sept. 11-16, 2005
- Χ, Τζώτζη. και. Ν., Ανδρίτσος  
'Μοντελοποίηση Διαστρωματωμένης Ροής Υγρού-Αερίου σε Οριζόντιους Αγωγούς'  
ΡΟΗ 2006, Πάτρα 06/11/2006
- Χ, Τζώτζη. και. Ν., Ανδρίτσος  
'Επίδραση των Διεπιφανειακών Κυμάτων στη Μοντελοποίηση της Διαστρωματωμένης Ροής Υγρού Αερίου σε Οριζόντιους Αγωγούς'  
6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής Αθήνα-Ελλάδα, 31/05-02/06/07

- Β. Λεοντίδης, Χ. Τζώτζη, Μ. Βλαχογιάννης, Ν. Ανδρίτσος, Β. Μποντόζογλου  
*‘Ανάλυση Ευστάθειας Ροής Υγρού Υμένα σε Κεκλιμένο Κανάλι με Περιοδικά Διαμορφωμένο Τοίχωμα’*  
6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Αθήνα-Ελλάδα, 31/05-02/06/2007
- Andritsos, N., Tzotzi, C. and Hanratty, T.J.  
*‘Interfacial shear stress in wavy stratified gas-liquid two-phase flow’*  
5<sup>th</sup> European Thermal-Sciences Conference, 18-22 May 2008, Eindhoven, The Netherlands.
- Χ, Τζώτζη. Μ. Βλαχογιάννης και. Ν., Ανδρίτσος  
*‘Επίδραση των Φυσικών Ιδιοτήτων των Ρευστών στα Καθεστώτα Ροής σε Διφασική Ροή Υγρού-Αερίου*  
ΡΟΗ 2008, Κοζάνη 28/11/08
- Χ, Τζώτζη. Μ. Βλαχογιάννης και. Ν., Ανδρίτσος  
*‘Επίδραση των Φυσικών Ιδιοτήτων των Ρευστών και της Κλίσης του Αγωγού στα Καθεστώτα Ροής σε Διφασική Ροή Υγρού-Αερίου’*  
7<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα-Ελλάδα, 03-05/06/2009
- Tzotzi, C., Vlachogiannis, M. and Andritsos, N.  
*‘Effect of Fluid Properties and Pipe Inclination on Flow Pattern in Two-Phase Gas-Liquid Flows’*  
7<sup>th</sup> World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Krakow-Poland, June 28-July 03, 2009
- Tzotzi, C., Vlachogiannis, M., Bontozoglou V. and Andritsos, N.  
*‘Effect of Fluid Properties and Pipe Inclination on Flow Pattern in Two-Phase Gas-Liquid Flows’*  
5<sup>th</sup> European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, Spoleto-Italy, 20-25 September, 2009

---

#### ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΕΓΚΡΙΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

---

- C. Tzotzi, T. Pahiadaki, S. G. Yiantsios, A. J. Karabelas, and N. Andritsos  
*‘A study of CaCO<sub>3</sub> scale formation and inhibition in RO and NF membrane processes’*  
Journal of Membranes Science, Vol 296, 2007, pp 171-184
- Andritsos, N., Tzotzi, C. and Hanratty, T.J.  
*‘Interfacial shear stress in wavy stratified gas-liquid two-phase flow’*  
To be published in International Journal of Multiphase Flow

### **ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ**

---

Υποβοήθηση διδασκαλίας στο παρακάτω μάθημα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας:

- Εμβάθυνση στα Φαινόμενα Μεταφοράς (Αναπλ. Καθ. Ν. Ανδρίτσος)
- Τεχνολογία Βιομηχανικής Αντιρρύπανσης (Επικ. Καθ. Ν. Ανδρίτσος)
- Φαινόμενα Μεταφοράς (Επικ. Καθ. Ν. Ανδρίτσος)
- Ενεργειακή Οικονομία (Επικ. Καθ. Ν. Ανδρίτσος)
- Μετάδοση Θερμότητας (Καθ. Β. Μποντόζογλου)
- Θεωρία Ευστάθειας Θερμοϋδραυλικών Συστημάτων (Καθ. Β. Μποντόζογλου)

Εργαστηριακός Συνεργάτης στο Τ.Ε.Ι. Κοζάνης, Τμήμα Εμπορίας και Ποιοτικού Ελέγχου Αγροτικών Προϊόντων στο Μάθημα Γεωργική Χημεία για το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010

### **ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ**

---

Μέλος Τ.Ε.Ε. (Μάρτιος 2005)

---

Ελεύθερος Επαγγελματίας

---