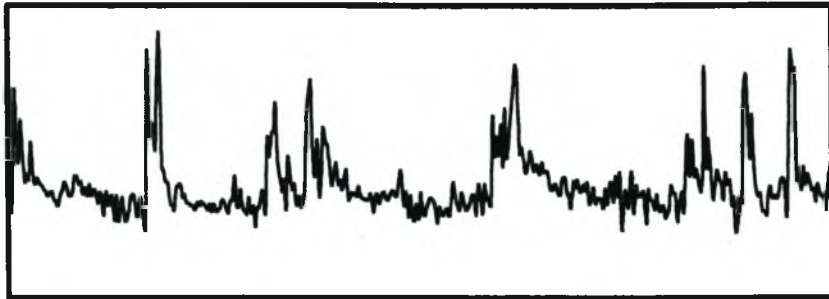


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**



**ΘΕΜΑ:**

**ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:  
ΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ Θ. ΑΣΤΕΡΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΠΟΝΤΟΖΟΓΛΟΥ**

αρ. εισ. ... ΛΒ/Π.Α.....



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
  
004000050791



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

Αριθ. Εισ.: 1512/1  
Ημερ. Εισ.: 21-07-1998  
Δωρεά:  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
1998  
ΑΣΤ

*Στους γονείς μου*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στον καθηγητή μου κ. Β. Μποντόζογλου, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της παρούσας εργασίας, την συνετή καθοδήγηση, την αδιάκοπη παρότρυνση και τις σωστές και χρήσιμες συμβουλές του.

Για μια σειρά πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές, ευχαριστώ επίσης τον Δρ. κ. Θ. Καραπάντσιο καθώς και τον τελειόφοιτο Κ. Καραμάνο που με βοήθησε στα πρώτα βήματα αυτής της διπλωματικής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της διφασικής ροής με την χρήση αγωγιμομετρικής διάταξης σε οριζόντιο αγωγό.

Αρχικά παρουσιάζονται τα πρότυπα (περιοχές ροής) που συναντήθηκαν κατά την διεξαγωγή πειραμάτων σε οριζόντιο σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 2.4cm σε διάφορες παροχές αέρα και νερού. Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά σε σημαντικές έννοιες όπως το πάχος της υγρής στοιβάδας , ο συμπαρασυρμός και αναλύονται τα κύρια μοντέλα περιγραφής δηφασικής ροής.

Το τέταρτο κεφάλαιο διαπραγματεύεται την χρήση της αγωγιμομετρικής διάταξης καθώς και την συλλογή-επεξεργασία των δεδομένων.

Έπεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των διαγραμμάτων του πάχους της υγρής στοιβάδας σε διάφορες περιοχές ροής. Τα στατιστικά μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του πάχους της υγρής στοιβάδας καθώς και το μέσο πάχος αυτής. Κάνοντας χρήση διαγραμμάτων ετεροσυσχέτισης υπολογίστηκε η ταχύτητα των κυμάτων διαταραχής στην στρωματωμένη ροή μια αρκετά σημαντική παράμετρος της διφασικής ροής.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>3</b>
2.1	Περιοχές ροής.....	3
2.2	Πάχος υγρής στοιβάδας.....	8
2.3	Μέθοδοι και τεχνικές πειραματικών μετρήσεων πάχους υγρής στοιβάδας.....	11
2.4	Διασπορά σταγονιδίων στην αέρια φάση.....	11
<b>3</b>	<b>ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....</b>	<b>13</b>
3.1	Ομογενές μοντέλο.....	13
3.2	Διαχωρισμένο μοντέλο.....	16
3.3	Μοντελοποίηση της στρωματωμένης ροής.....	18
3.4	Μοντελοποίηση της δακτυλιοειδούς ροής.....	19
<b>4.1</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>23</b>
4.1.1	Πειραματική διάταξη και τμήμα μετρήσεων.....	23
4.1.2	Μετρήσεις πάχους στοιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο.....	26
4.1.3	Σχόλια.....	30
<b>4.2</b>	<b>ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>32</b>
4.2.1	Εγκατάσταση κάρτας συλλογής δεδομένων.....	32
4.2.2	Συλλογή δεδομένων.....	33
4.2.3	Επεξεργασία μετρήσεων.....	33
<b>5</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....</b>	<b>36</b>
5.1	Στρωματωμένη ροή α) με διδιάστατα κύματα.....	37
	β) με τρισδιάστατα κύματα-εκνέφωση.....	41
5.2	Διαλείπουσα ροή.....	43
5.3	Σύνοψη συμπερασμάτων-προτάσεις.....	51
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>52</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	
	α) βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων.....	53
	β) ανάλυση του προγράμματος για A/D μετατροπή, αυτοσυσχέτιση ετεροσυσχέτιση ημιτονοειδούς σήματος..	60

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

Όταν αέριο και υγρό ρέουν ταυτόχρονα σε οριζόντιο αγωγό σχηματίζονται διάφορα **πρότυπα ή περιοχές ροής** εξαρτώμενα από τις συνθήκες της ροής. Σε χαμηλές παροχές αερίου και υγρού εμφανίζεται η στρωματωμένη ροή στην οποία το υγρό ρέει στο πάτο του σωλήνα και ακριβός από πάνω το αέριο. Αυξάνοντας την παροχή του αερίου στη διεπιφάνεια αερίου/υγρού έχουμε τον σχηματισμό των πρώτων δισδιάστατων κυμάτων. Περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του αερίου προκαλεί κύματα μεγάλου πλάτους και σιγά-σιγά σταγόνες αποσπώνται από τη διεπιφάνεια και συμπαρασύρονται από την αέρια φάση ή αποτίθενται στα πλευρικά τοιχώματα του σωλήνα, όποτε έχει αρχίσει και το φαινόμενο της εκνέφωσης. Τελικά σε ακόμα υψηλότερες ταχύτητες του αερίου έχουμε τον σχηματισμό της δακτυλιοειδούς ροής όπου ένας κυματιστός υγρός υμένας καλύπτει όλη την περιφέρεια του σωλήνα. Ωστόσο το πάχος της υγρής στοιβάδας στο πυθμένα είναι μεγαλύτερο απ'ότι στην κορυφή του σωλήνα. Σε υψηλές παροχές υγρού σχηματίζεται η διαλείπουσα ροή. Αυτή η ροή χαρακτηρίζεται από την περιοδική διέλευση υγρών μαζών (slugs) που κλίνουν την διατομή του αγωγού και κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα του αερίου. Η περιοχή όπου στρωματωμένη, δακτυλιοειδής και διαλείπουσα ροή συναντώνται μπορεί να ονομαστεί ως ψευδοδιαλείπουσα ροή. Σε αυτή την περιοχή η πτώση πίεσης δεν είναι τόσο μεγάλη όπως στην διαλείπουσα ροή.

Η γνώση των χαρακτηριστικών της οριζόντιας διφασικής ροής είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό των προαναφερθέντων συστημάτων ως και άλλων συσκευών διεργασιών. Τα κυριότερα από αυτά είναι το πάχος της υγρής στοιβάδας (film), η πτώση πίεσης και ο συμπαρασυρμός (entrainment), δηλαδή το κλάσμα του υγρού που μεταφέρεται από την αέρια φάση, με την μορφή των σταγονιδίων.

Οι βασικοί τρόποι προσέγγισης των προβλημάτων της διφασικής ροής είναι οι ακόλουθοι:

α) χρήση εμπειρικών σχέσεων οι οποίες όμως είναι αξιόπιστες μόνο για εφαρμογές σε συνθήκες παρόμοιες με εκείνες των πειραμάτων από τις οποίες προέκυψαν.

β) εφαρμογή ολοκληρωτικών ισοζυγίων ορμής, ενέργειας και μάζας σε μια προσπάθεια βαθύτερης κατανόησης των μηχανισμών που επικρατούν στη διφασική ροή. Η δυσκολία των σχετικών διαφορικών εξισώσεων αίρεται με την εφαρμογή είτε απλοποιητικών παραδοχών είτε πειραματικών συσχετισμών.

γ) χρήση αποκλειστικά των γενικευμένων εξισώσεων της ρευστομηχανικής και των οριακών εξισώσεων που επιβάλλει η γεωμετρία της ροής, η επίλυση των οποίων όμως είναι αρκετά δύσκολη και απαιτεί την χρήση ιδιαίτερα γρήγορων υπολογιστικών συστημάτων.

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

$$U_g = m_g / \rho_g A \quad \text{και} \quad U_l = m_l / \rho_l A$$

όπου  $A$  η διατομή του αγωγού,  $m$  και  $\rho$  η παροχή μάζας και η πυκνότητα των δύο φάσεων. Οι δείκτες  $g$  και  $l$  εκφράζουν αντίστοιχα την αέρια και την υγρή φάση.

Στόχος αυτής της διπλωματικής είναι η μέτρηση του πάχους της υγρής στοιβάδας το οποίο έγινε με τη χρήση ειδικών παράλληλων λεπτών συρμάτων (αγωγιμομετρική μέθοδο). Από την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε το μέσο πάχος της υγρής στοιβάδας, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του, καθώς και η τυπική απόκλιση. Υπολογίστηκε η ταχύτητα κίνησης των κυμάτων στη στρωματωμένη ροή και πάρθηκε ένας σημαντικός αριθμός μετρήσεων στη διαλείπουσα ροή προς την κατανόηση του σχηματισμού και διέλευση των slugs.

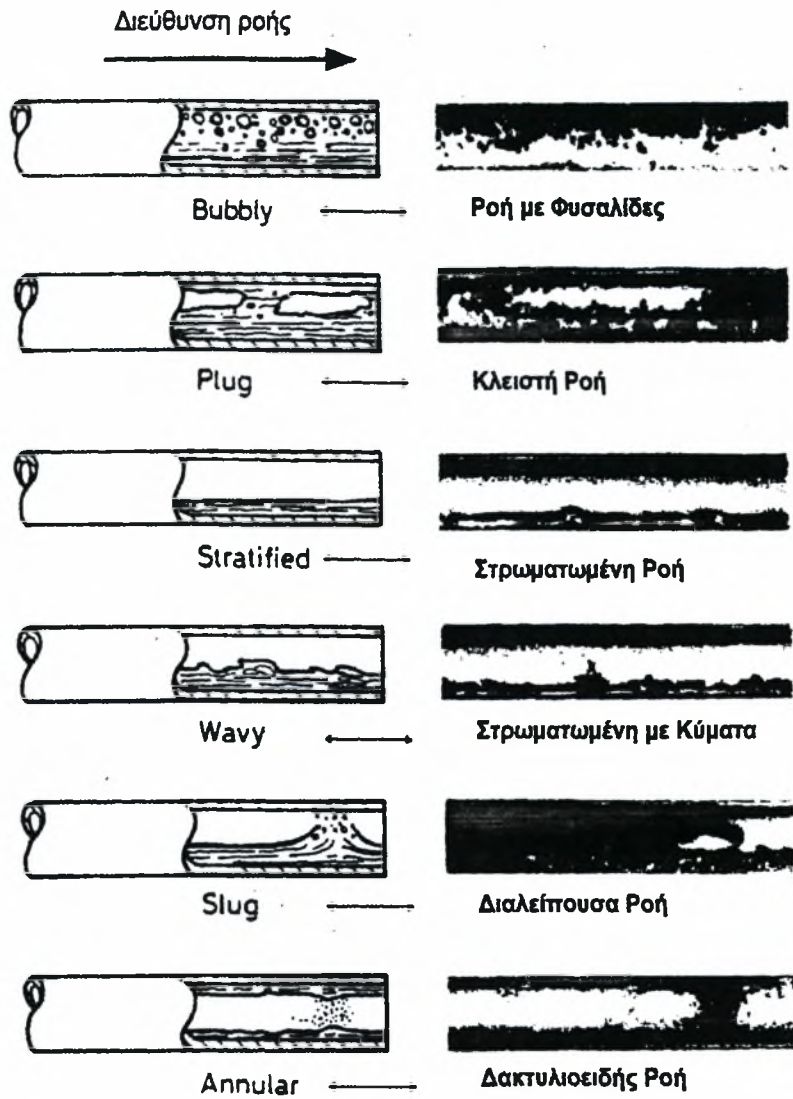


## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΡΟΗΣ

Ένα από τα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής είναι ότι η διεπιφάνεια υγρού/αερίου μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό μορφών που είναι γνωστές σαν περιοχές ή πρότυπα ροής (flow regimes ή patterns) και εξαρτώνται από η γεωμετρία του συστήματος, τις παροχές και τις ιδιότητες των δύο φάσεων (Σχήμα 2.1). Οι περιοχές αυτές είναι περισσότερο σύνθετες σε οριζόντιους από ότι σε κατακόρυφους αγωγούς, σαν συνέπεια της επίδρασης της βαρύτητας, η οποία τείνει να συγκεντρώνει το υγρό στον πυθμένα του αγωγού. Οι κυριότερες περιοχές ροής που παρατηρούνται είναι:

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



Σχήμα 2.1 Περιοχές ροής σε οριζόντια διφασική ροή υγρού/αερίου

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

**3. Ροή με φυσαλίδες** (Dispersed Bubble Flow): Χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διεσπαρμένων φυσαλίδων αερίου στη συνεχή υγρή φάση, οι οποίες τείνουν να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού και σε ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται σαν αφρός. Αυτή η περιοχή ροής δεν παρατηρήθηκε στα πειραματά μας γιατί απαιτεί μεγάλη παροχή του υγρού.

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

**5. Ψευδο-διαλείπουσα** (pseudo-slug): Το είδος αυτό της ροής μοιάζει αφενός με τη δακτυλιοειδή ροή, στο ότι το υγρό σχηματίζει μία συνεχή στοιβάδα στην περιφέρεια του αγωγού και αφετέρου με τη διαλείπουσα ροή, στο ότι παρουσιάζονται υγρές μάζες που μοιάζουν με 'slugs'. Οι τελευταίες δεν ρέουν με την ταχύτητα του αερίου και έτσι δεν προκαλούν απότομες μεταβολές πίεσης. Η παρουσία μιας υγρής στοιβάδας μεγάλου πάχους στον πυθμένα του σωλήνα δίνει την εντύπωση διαχωρισμένης ροής με κυματισμούς.

Για την μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα και στη δακτυλιοειδή θεωρείται ότι είναι υπεύθυνη η ρευστοδυναμική αστάθεια Kelvin-Helmholtz. Συγκεκριμένα, η παρουσία κυμάτων στη διεπιφάνεια αερίου/υγρού προκαλεί τοπική αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης στην κορυφή του κύματος με συνέπεια τη δημιουργία υποπίεσης. Αν οι δημιουργημένες κατ'αυτόν τον τρόπο αποσταθεροποιητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης, τότε το κύμα τείνει να μεγαλώνει και η υγρή μάζα να καταλάβει τη διατομή του αγωγού. Ακολουθώντας

την κλασσική θεωρία των Kelvin-Helmholtz οι Taitel & Dukler (1976) [Παράς-1991] προτείνουν ότι η μετάπτωση αρχίζει όταν:

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

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

Οι Taitel & Dukler υποστηρίζουν ότι, αν η υγρή στοιβάδα είναι μεγαλύτερη από το μισό της διαμέτρου, τότε υπάρχει μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η μετάπτωση οδηγεί στη δακτυλιοειδή ροή. Αν και η προσπάθεια των Taitel και Dukler είναι αρκετά αξιόλογη, αρκετά πειραματικά δεδομένα δεν συμφωνούν με τις προβλέψεις τους, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι το μοντέλο:

**α)** προβλέπει σημαντική επίδραση του ιξώδους του υγρού στη μετάπτωση από τη διαχωρισμένη στη διαλείπουσα ροή, πράγμα που δεν έχει επαληθευτεί από πειράματα άλλων ερευνητών (Andritsos 1989).

**β)** προβλέπει ότι η μετάπτωση στη δακτυλιοειδή ροή εξαρτάται έντονα από τη διάμετρο του αγωγού, σε αντίθεση με τα πειραματικά δεδομένα που δείχνουν μικρή ή καθόλου εξάρτηση (Lin 1985).

Ο Andritsos 1986 στη διδακτορική του διατριβή κάνοντας έρευνα στη διαφασική ροή σε οριζόντιους σωλήνες διαμέτρων 2.52, 5.08 και 9.53cm και για υγρά με διαφορετικά ιξώδη έκανε τις παρακάτω παρατηρήσεις:

Η αύξηση του ιξώδους επιφέρει αύξηση στην ταχύτητα του αερίου που απαιτείται για την εισαγωγή των κανονικών διδιάστατων κυμάτων και μειώνεται και η περιοχή ροής που αυτά υπάρχουν. Σε πολύ παχύρρευστα υγρά δεν παρατηρούνται καθόλου διδιάστατα κύματα, τα πρώτα κύματα που εμφανίζονται είναι ακανόνιστα κύματα μεγάλου πλάτους. Η αύξηση του ιξώδους επιφέρει αύξηση στο μήκος κύματος των κυμάτων της διεπιφάνειας. Για σταθερή διάμετρο η μετάπτωση σε κύματα μεγάλου πλάτους είναι ανεξάρτητη από το ιξώδες.

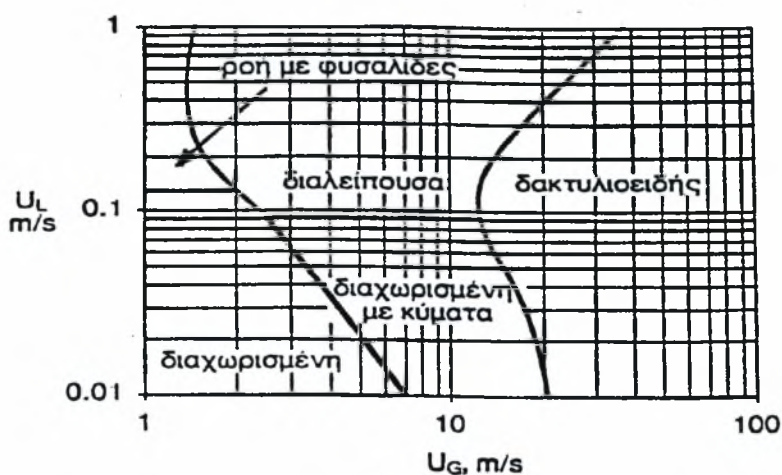
Ο βαθμός που το υγρό σκαρφλώνει περιφερειακά στα τοιχώματα του σωλήνα εξαρτάται από την διάμετρο του σωλήνα. Μικρή διάμετρο και υγρό με χαμηλό ιξώδες δίνουν μεγαλύτερη αναρριχητικότητα στο υγρό.

Η πυκνότητα του αερίου παίζει σημαντικό ρόλο στη μορφή της διεπιφάνειας υγρού/αερίου. Όσο πιο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο ισχυρότερα επηρεάζει τη μεταφορά των κυμάτων και περισσότερο αυτών που έχουν μεγάλο πλάτος. Σε μεγάλες πυκνότητες αερίου τα πρώτα κύματα που θα παρατηρηθούν, θα είναι τα ακανόνιστα μεγάλου πλάτους κύματα κάτι που όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω συμβαίνει και στα υγρά μεγάλου ιξώδους.

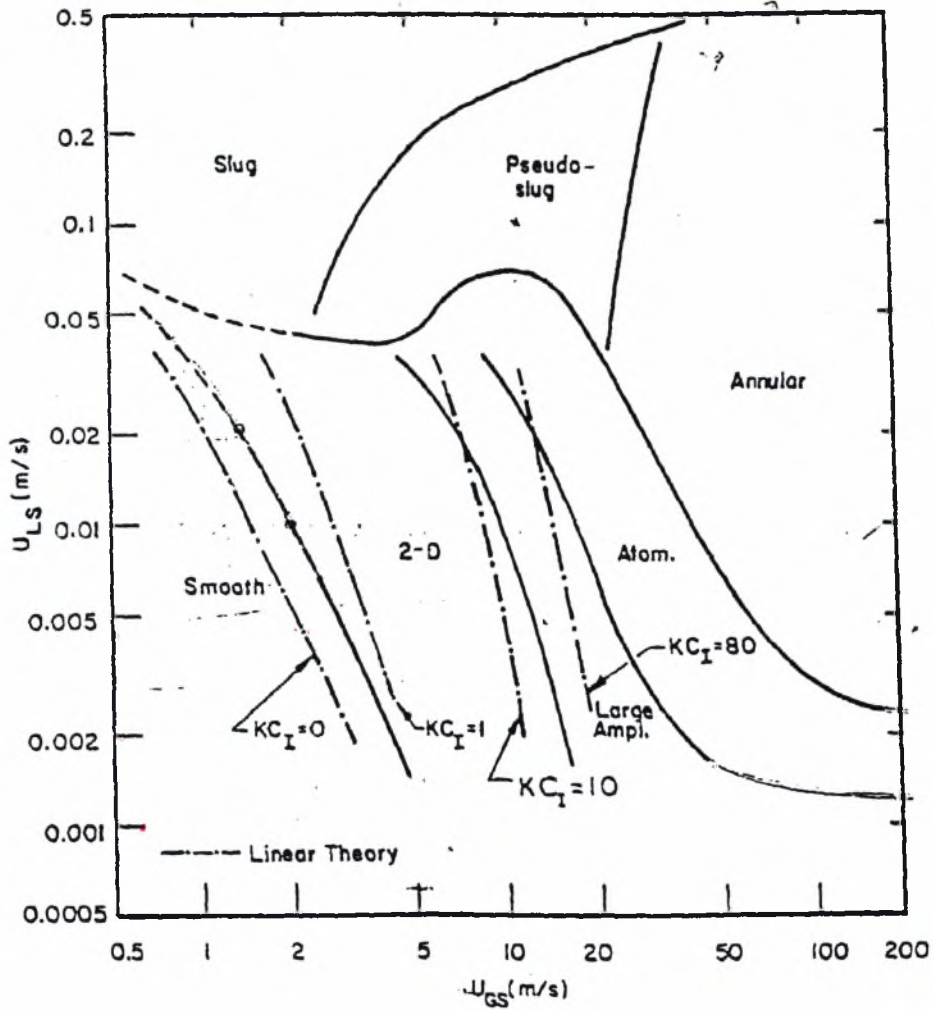
Οι πρώτες εργασίες για τον προσδιορισμό των περιοχών ροής βασίζονταν κυρίως σε οπτικές παρατηρήσεις, αλλά αργότερα χρησιμοποιήθηκε η κινηματογράφηση και άλλες πειραματικές μέθοδοι (Hewitt 1978) [Παράς-1991]. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί για την οριζόντια διφασική ροή αρκετοί χάρτες περιοχών ροής (Baker 1954, Mandhane et al. 1975, Taitel and Dukler 1976, Lin 1985 κτλπ.). Οι περισσότεροι έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα σε αγωγούς διαμέτρου 20-95mm, για το σύστημα νερό/αέρα κοντά στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Στο **Σχήμα 2.2** παρουσιάζεται ο χάρτης περιοχών ροής των Mandhane et al. 1975, ο οποίος διαχωρίζει τη στρωματωμένη ροή σε ομαλή και κυματώδη χωρίς να κάνει παραπέρα διαχωρισμό των κυμάτων, κάτι που έκανε πρώτη φορά ο Andritsos (1986).

Παρατήρησε στη στρωματωμένη ροή τρεις μορφές κυμάτων: κανονικά διδιάστατα κύματα, ακανόνιστα μεγάλου πλάτους και κύματα που προσδίδουν υγρές σταγόνες στην αέρια φάση (εκνέφωση) όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.3**.

Ο χάρτης περιοχών διφασικής ροής, της πειραματικής μας συσκευής, παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α Σχήμα Α.5 όπως σχεδιάστηκε από τον Καραμάνο 1997.



**Σχήμα 2.2** Χάρτης περιοχών διφασικής ροής (Mandhane)



Σχήμα 2.3 Χάρτης περιοχών διφασικής ροής για 2.52cm διάμετρο σωλήνα και υγρό νερό (Andritsos)

## 2.2 ΠΑΧΟΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ

Στα προηγούμενα χρόνια έγινε μια σοβαρή προσπάθεια να ερευνηθούν οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της ροής υγρής στοιβάδας πάνω σε οριζόντιο στερεό τοίχωμα. Ιστορικά οι ερευνητικές προσπάθειες ξεκίνησαν με τη δημιουργία εμπειρικών συσχετισμών, αλλά σύντομα στράφηκαν στη μελέτη των φαινομένων που έχουν σαν αποτέλεσμα των σχηματισμό κυμάτων και των μηχανισμών που τροφοδοτούν την υγρή στοιβάδα αντισταθμίζοντας τις απώλειες υγρού λόγω βαρύτητας. Είναι βέβαια προφανές ότι η ικανοποιητική εφαρμογή ενός

εμπειρικού συσχετισμού περιορίζεται στις συνθήκες των πειραμάτων από όπου προέκυψε και συνεπώς δεν μπορεί να προβλέψει την επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως είναι η διάμετρος του αγωγού και οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών.

Όπως αναφέρει ο Laurinat(1982) ο πρώτος εμπειρικός συσχετισμός που προτάθηκε για την κατανομή του πάχους της υγρής στοιβάδας, είναι αυτός του McManus το 1961. Ο συσχετισμός αυτός προέκυψε από μετρήσεις σε οριζόντιους αγωγούς διαμέτρου 2.54, 5.08 και 7.62 cm για τα διφασικά μίγματα νερού και διαλυμάτων νερού/γλυκερίνης με αέρα και είχε την γενική μορφή:

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

όπου  $\text{Re}_s$  ο αριθμός Reynolds που βασίζεται στη φαινόμενη ταχύτητα. Οι εκθέτες  $k, a, b, c$  και  $d$  προσδιορίζονται εμπειρικά και εξαρτώνται από τις παροχές των δυο φάσεων.

Από την μαθηματική έκφραση των Henstock & Hanratty(1976) [Καραπάντσιος-1987] οι οποίοι δούλεψαν κυρίως για διφασική ροή σε κατακόρυφο αγωγό:

$$h = \frac{(\gamma\mu/\rho)^{2/3}}{(2/3 * g)^{1/3}}$$

$$\text{όπου } \gamma = [(0,707\text{Re}_L^{0.5})^5 + (0,031\text{Re}_L^{0.9})^5]^{0.2}$$

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

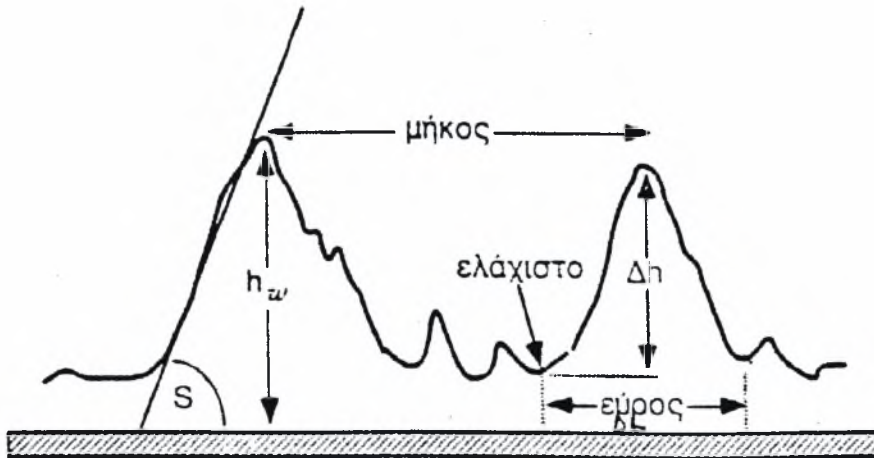
$$\frac{\langle h \rangle}{D} = \frac{6.59 F_H}{[2.3^5 + (90 F_H)^5]^{0.2}}$$

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

## β) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυμάτων

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

επόμενου μεγίστου της υγρής στοιβάδας (Nencini & Andreussi, 1983).



**Σχήμα 2.4** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κυμάτων διαταραχής

Σαν ύψος του κύματος  $h_w$  ορίζεται η απόσταση της κορυφής του από το τοίχωμα του αγωγού. Το μήκος κύματος  $\lambda$  όπως φαίνεται και στο **σχήμα 2.4** είναι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών κυμάτων. Από την γνωστή σχέση της κινηματικής :

$$\lambda = \frac{u_c}{f}$$

όπου  $f$  η χαρακτηριστική συχνότητα των κυμάτων μπορούμε να συνδέσουμε το μήκος κύματος με την ταχύτητα του κύματος  $u_c$ .

Μία ακόμη χρήσιμη παράμετρος που περιγράφει το σχήμα των κυμάτων διαταραχής είναι η αιχμηρότητα  $S$  που ορίζεται από την σχέση:

$$S = \arctan\left(\frac{\Delta L}{2\Delta h}\right)$$



### 2.3 Μέθοδοι και τεχνικές πειραματικών μετρήσεων πάχους υγρής στοιβάδας

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

#### α) Άμεσες μέθοδοι

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

Μια επιφύλαξη που υπάρχει για τις άμεσες μεθόδους είναι η επίδραση που ασκείται από την μεσολάβηση ενός μετρητικού όπως π.χ. μια βελόνα που έρχεται σε επαφή με το υγρό διαταράσσοντας έτσι τη φυσιολογική ροή της στοιβάδας.

#### β) Έμμεσες μέθοδοι

Επιγραμματικά αναφέρουμε της παρακάτω μεθόδους:

- 1) Μέθοδος αποχέτευσης ή κατακράτησης
- 2) Φωτογραφίες σκιών
- 3) Ραδιενεργοί ιχνοθέτες
- 4) Μέθοδος εξισορροπητικού πύργου
- 5) Μέθοδοι ηλεκτρικής χωρητικότητας και ηλεκτρικής αντίστασης
- 6) Φωτομετρικές μέθοδοι-Μέθοδοι οπτικής παρεμβολής.

### 2.4 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΤΑΓΟΝΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της διφασικής ροής είναι ο συμπαρασυρμός, **E**. Ο συμπαρασυρμός είναι το κλάσμα της παροχής του υγρού που βρίσκεται στον αέριο πυρήνα με μορφή μικρών σταγόνων δια τη συνολική υγρή παροχή και ορίζεται ως:

$$E = \frac{W_{LE}}{W_L} = \frac{W_L - W_{LF}}{W_L}$$

όπου  $W_L$  η συνολική παροχή του υγρού,  $W_{LE}$  η παροχή της διασπαρμένης υγρής φάσης και  $W_{LF}$  η παροχή της υγρής στοιβάδας. Ο συμπαρασυρμός επηρεάζεται από δύο βασικές διεργασίες, την εκνέφωση, δηλαδή την παραγωγή σταγονιδίων από την επιφάνεια των κυμάτων, και την εναπόθεση των σταγονιδίων στην υγρή στοιβάδα. Ο υπολογισμός του συμπαρασυρμού μπορεί να γίνει άμεσα από μετρήσεις της υγρής στοιβάδας. Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται τρεις πειραματικές μέθοδοι μέτρησης:

**α)** Ισοκινητική δειγματοληψία των σταγονιδίων σε διάφορα σημεία της διατομής του αγωγού με σωλήνα 'pitot'. Η τιμή του συμπαρασυρμού προκύπτει από ολοκλήρωση των τιμών της πυκνότητας ροής στη διατομή του αγωγού (Andreussi et al 1978, Williams 1986).

**β)** Απομάκρυνση με εφαρμογή κενού της υγρής στοιβάδας μέσω ειδικής διάταξης (π.χ. τμήμα αγωγού με πορώδες τοίχωμα). Ο συμπαρασυρμός προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ της συνολικής παροχής του υγρού και της παροχής της υγρής στοιβάδας που απομακρύνεται (Whalley et al 1973, Dallman 1978, Laurinat 1982).

**γ)** Συνεχής ιχνοθέτηση της υγρής στοιβάδας (π.χ. με αλάτι) και μέτρηση της συγκέντρωσης του ιχνοθέτη στο υγρό σε μία απόσταση από το σημείο έγχυσης. Ο συμπαρασυρμός υπολογίζεται με την εφαρμογή ισοζυγίου μάζας (Schadel 1988).

Θα πρέπει επίσης να επισημάνουμε πως έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει ένα όριο στην παροχή της υγρής στοιβάδας,  $W_{LFC}$  (critical film flow rate) κάτω από το οποίο δεν προκαλείται εκνέφωση, ανεξάρτητα από την αύξηση της ταχύτητας του αερίου (Dallman 1978) [Παράς-1991].

### 3 ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

#### Εισαγωγή

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

#### 3.1 ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ

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

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

- α) ίσες ταχύτητες υγρού και αερίου
- β) θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των δυο φάσεων του διφασικού μίγματος και
- γ) χρήση κατάλληλου συντελεστή τριβής για τη διφασική ροή

Από όσα έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 2.1-Περιοχές ροής αναμένεται πως το ομογενές μοντέλο θα είναι κατάλληλο για ροή με φουσαλίδες και στις περιοχές της δακτυλιοειδούς ροής. Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν την μονοδιάστατη ομογενή ροή έχουν την παρακάτω φόρμα:

$$\text{συνέχειας: } m = A\bar{\rho}\bar{u} = \text{σταθ.} \quad (3.1)$$

$$\text{ορμής: } m \frac{du}{dz} = -A \frac{dp}{dz} - P\tau_w - A\bar{\rho}g \cos\theta \quad (3.2)$$

$$\text{ενέργειας: } \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} = m \frac{d}{dz} \left( h + \frac{\bar{u}^2}{2} + gz_g \right) \quad (3.3)$$

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

Ο μέσος ειδικός όγκος  $\bar{v}$  [ $m^3/kg$ ] ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ογκομετρικής παροχής  $Q$  [ $m^3/s$ ] προς την συνολική μαζική παροχή  $m$  [ $kg/s$ ]. Έτσι έχουμε:

$$\bar{v} = \frac{Q}{m} = [xv_G + (1-x)v_L] = [v_L + xv_{LG}] = \frac{j}{G} = \frac{1}{\rho} \quad (3.4)$$

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

$$G = \frac{m}{A} = \rho u = \frac{u}{v} \quad [kg/m^2s] \quad (\text{mass velocity}) \quad (3.5)$$

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

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

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

οπότε

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

και

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

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

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

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

$$\tau_w = f_{TP} \left( \frac{\bar{\rho} \bar{u}^2}{2} \right) \quad (3.6)$$

Η εξίσωση 3.2 μπορεί να γραφεί ως προς την πτώση πίεσης:

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

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

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

Από την εξίσωση 3.5 έχουμε:

$$-\left( \frac{dp}{dz} \right)_F = \frac{2 f_{TP} G \bar{u}}{D} \quad (3.7)$$

Από την εξίσωση (3.4), (3.5) και (3.7) έχουμε:

$$-\left( \frac{dp}{dz} \right)_F = \frac{2 f_{TP} G^2}{D} (x v_G + (1-x) v_L) \quad (3.8)$$

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

Ένας τρόπος για να καθορίσουμε τον  $f_{TP}$  είναι να τον συσχετίσουμε με τον συντελεστή τριβής του υγρού  $f_{fo}$  όταν έχει μαζική παροχή (G) που είναι ίση με αυτή του ψευδορευστού. Έτσι η 3.8 γίνεται:

$$-\left( \frac{dp}{dz} \right)_F = \frac{2 f_{TP} G^2}{D} (x v_G + (1-x) v_L) = \frac{2 f_{fo} G^2 v_L}{D} \Phi_{fo}^2 = -\left( \frac{dp}{dz} \right)_{fo} \Phi_{fo}^2 \quad (3.9)$$

όπου ο  $\Phi_{fo}^2$  ονομάζεται πολλαπλασιαστής.

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

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \quad \text{Mc Adams} \quad (3.10)$$

$$\bar{\mu} = x\mu_G + (1-x)\mu_L \quad \text{Cicchitti} \quad (3.11)$$

$$\bar{\mu} = \bar{\rho}[x\nu_G\mu_G + (1-x)\nu_L\mu_L] \quad \text{Dukler} \quad (3.12)$$

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

$$f_{TP} = 0.079(GD/\bar{\mu})^{-1/4} \quad (3.13)$$

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

$$f_{TP} = 0.079(GD/\mu_L)^{-1/4} \quad (3.14)$$

Στη συνέχεια κάνοντας χρήση των εξισώσεων (3.10), και (3.13-14) στην (3.9) θα έχουμε:

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

### 3.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

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

Οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται είναι:

**α)** σταθερές αλλά όχι υποχρεωτικά ίσες ταχύτητες για την υγρή και αέρια φάση

**β)** θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των φάσεων του διφασικού μίγματος και

γ) χρήση εμπειρικών σχέσεων που συσχετίζουν τους πολλαπλασιαστές ( $\Phi^2$ ) και το κλάσμα κενού ( $\alpha$ ) με τις ανεξάρτητες μεταβλητές ροής.

Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν τη μονοδιάστατη διφασική ροή είναι:

$$\text{συνέχειας: } m = m_G + m_L = \text{σταθ.} \quad (3.15)$$

$$\text{ορμής: } -\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau_w}{D} + G \frac{d}{dz} [xu_G + (1-x)u_L] + [a\rho_G + (1-a)\rho_L] \cos \theta \quad (3.16)$$

$$\text{ενέργειας: } \frac{1}{m} \left( \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} \right) = \frac{d}{dz} [xh_G + (1-x)h_L] + \frac{d}{dz} \left[ x \frac{u_G^2}{2} + (1-x) \frac{u_L^2}{2} \right] \quad (3.17)$$

Για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων απαιτούνται επιπλέον σχέσεις για τη διατμητική δύναμη του τοιχώματος και το κλάσμα κενού. Ένας εναλλακτικός τρόπος επίλυσης είναι οι ημ εμπειρικές σχέσεις που ανέπτυξαν οι Lockhart-Martinelli (1949). Βασιζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα που καλύπτουν σχεδόν όλες τις περιοχές ροής που εμφανίζονται στην οριζόντια διφασική ροή όρισαν του πολλαπλασιαστές  $\Phi_G^2$  και  $\Phi_L^2$  που εκφράζουν το λόγο της πτώσης πίεσης του μίγματος στο σωλήνα ως προς την πτώση πίεσης κάθε ρευστού όταν ρέει μόνο του.

$$\Phi_G^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_G}, \quad \Phi_L^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_L} \quad \text{και} \quad X^2 = \frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \quad (3.18-19-20)$$

Οι πολλαπλασιαστές  $\Phi_G^2$  και  $\Phi_L^2$  μπορούν να συσχετιστούν με την παράμετρο  $X^2$  με βάση της παρακάτω σχέσεις:

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

όπου η σταθερά  $C$  μπορεί να πάρει τις παρακάτω τιμές:

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

3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

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

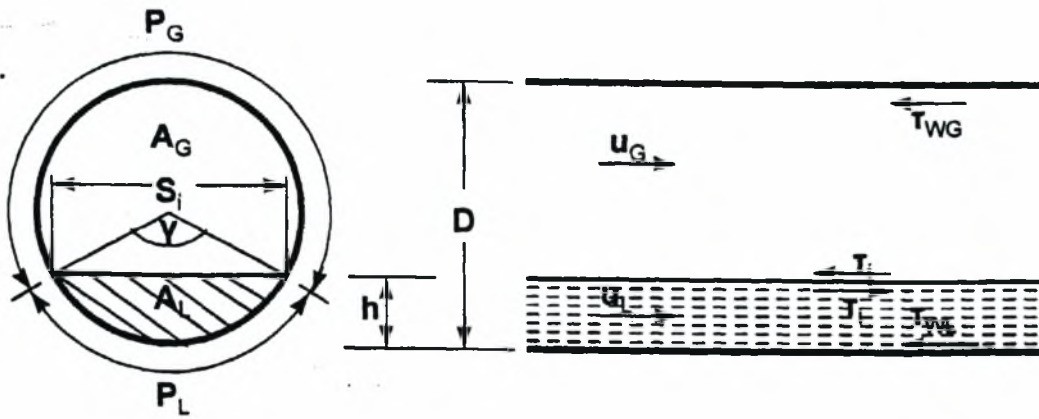
Το 1972 ο Johannessen ήταν ο πρώτος που παρουσίασε μια θεωρία για χρήση των παραμέτρων L-M στη στρωματωμένη ροή.

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

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ορμής για οριζόντιο αγωγό και για της δυο φάσεις ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις (σχήμα 3.1):

$$-A_L(dp/dl)_L - \tau_{wL}P_L + \tau_i S_i = 0 \tag{3.21}$$

$$-A_G(dp/dl)_G - \tau_{wG}P_L + \tau_i S_i = 0 \tag{3.22}$$



Σχήμα 3.1 Στρωματωμένη ροή

Όπου A η επιφάνεια κάθε φάσης,  $\tau_w$  η διατμητική τάση, P, το μήκος της περιμέτρου και  $\tau_i$  η διεπιφανειακή διατμητική τάση. Οι Taitel & Dukler για της παραπάνω ποσότητες πρότειναν της εξής σχέσεις

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



### Κεφάλαιο 3-Βασικά Μοντέλα

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

$$f_{(G \text{ ή } L)} = 16/Re \quad \text{για } Re_{(G \text{ ή } L)} < 2000 \quad (3.23)$$

$$f_{(G \text{ ή } L)} = 0.046Re^{-0.2} \quad \text{για } Re_{(G \text{ ή } L)} > 2000 \quad (3.24)$$

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

Σε χαμηλές πιέσεις

$$f_i = f_g \quad \text{για } u_{GS} \leq 5 \text{ m/s} \quad (3.25)$$

$$f_i = f_g [1 + 15(h/D)^{0.5}(-1 + u_{GS}/5)] \quad \text{για } u_{GS} > 5 \text{ m/s} \quad (3.26)$$

και σε υψηλές πιέσεις

$$f_i = f_g \quad \text{για } \left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_L}\right)^{0.5} u_{GS} \leq 1 \quad (3.27)$$

$$\frac{f_i}{f_g} = 1 + 15\left(\frac{h}{D}\right)^{0.5} \left[\left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_L}\right)^{0.5} u_{GS} - 1\right] \quad \text{για } \left(\frac{k_m \rho_g}{g \rho_L}\right)^{0.5} u_{GS} > 1 \quad (3.28)$$

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

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

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

και έτσι από την εξίσωση (3.21 ή 3.22) υπολογίζουμε την πτώση πίεσης του διφασικού μίγματος.

#### 3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΡΟΗΣ

Από της προσπάθειες των Hewitt και Hall-Taylor το 1970 (John Collier and John Thome) για την κατανόηση των φαινομένων του συμπαρασυρμού και της εναπόθεσης υγρών σταγονιδίων προέκυψε

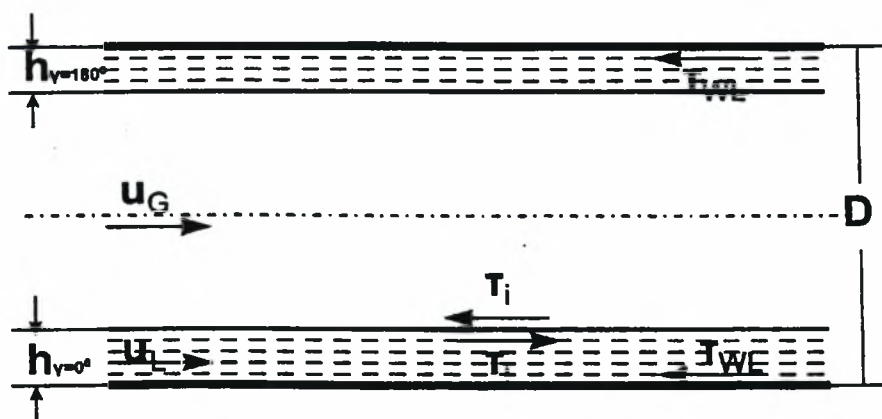
μια μέθοδο μοντελοποίησης της δακτυλιοειδούς ροής η οποία παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω.

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

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_L - \frac{4\tau_{WL}}{D} = 0 \quad (3.29)$$

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_G - \frac{4\tau_i}{(D-2\bar{h})} = 0 \quad (3.30)$$

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



Σχήμα 3.2 Δακτυλιοειδή ροή

Για την υγρή φάση ο πολλαπλασιαστής  $\Phi_L^2$  θα είναι ίσος με την τιμή της πτώσης πίεσης που έχει το υγρό στο μίγμα προς αυτήν που έχει το υγρό όταν ρέει μόνο του στο σωλήνα, από τις εξισώσεις (3.19) και (3.29) θα έχουμε:

$$\Phi_L^2 = \frac{\tau_{WL}}{\tau_L} \quad (3.31)$$

Όπου  $\tau_L$  είναι η διατμητική δύναμη του τοιχώματος όταν το υγρό ρέει μόνο του στον αγωγό και  $\tau_{WL}$  είναι η διατμητική δύναμη του τοιχώματος στο υγρό όταν έχουμε διφασικό μίγμα.

$$\tau_L = f_L \left( \frac{\rho_L u_L^2}{2} \right) \quad \tau_{WL} = f_{TP} \left( \frac{\rho_L u_{LS}^2}{2} \right) \quad (3.32-33)$$

Αν στην εξίσωση (3.31) αντικαταστήσουμε τις (3.32-33) και από την εξίσωση  $u_L = u_{LS} / (1-a)$  θα έχουμε:

$$\Phi_L^2 = \frac{1}{(1-a)^2} \left( \frac{f_{TP}}{f_L} \right) \quad (3.34)$$

Αφού η τραχύτητα του σωλήνα είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις τότε αναμένεται να είναι  $f_L = f_{TP}$  και η εξίσωση (3.34) που μας δίνει την τιμή του πολλαπλασιαστή  $\Phi_L^2$  παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\Phi_L^2 = \frac{1}{(1-a)^2} \quad (3.35)$$

Ο συντελεστής τριβής  $f_L$  ορίζεται από την εξίσωση του Blasius.

Για την αέρια φάση ο πολλαπλασιαστής  $\Phi_G^2$  θα είναι ίσος με την τιμή της πτώσης πίεσης που έχει το αέριο στο μίγμα προς αυτήν που έχει το αέριο όταν ρέει μόνο του στο σωλήνα, από τις εξισώσεις (3.30) και (3.18) θα έχουμε:

$$\Phi_G^2 = \frac{\tau_i}{\tau_g} \frac{D}{(D-2h)} = \frac{\tau_i}{\tau_g} \frac{1}{a^{1/2}} \quad (3.36)$$

Όπου  $\tau_g$  είναι η διατμητική δύναμη που ασκεί το τοίχωμα στο αέριο όταν ρέει μόνο του στο σωλήνα και  $\tau_i$  είναι η διατμητική δύναμη του τοιχώματος όταν έχουμε μίγμα.

$$\tau_g = f_g \left( \frac{\rho_G u_G^2}{2} \right) \quad \tau_i = f_i \left( \frac{\rho_G (u_G - u_i)^2}{2} \right) \quad (3.37-38)$$

όπου  $f_i$  είναι ο διεπιφανειακός συντελεστής τριβής,  $u_g$  η μέση ταχύτητα του αερίου και  $u_i$  η ταχύτητα του υγρού στη διεπιφάνεια, που συνήθως είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ταχύτητα του αερίου και αγνοείται. Με αντικατάσταση των εξισώσεων (3.37-38) στην (3.36) θα έχουμε:

$$\Phi_G^2 = \frac{1}{a^{5/2}} \frac{f_i}{f_g} \quad (3.39)$$

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

$$\Phi_G^2 = \frac{1}{a^{5/2}} \quad (3.40)$$

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

$$\frac{f_i}{f_G} = 1 + 300 \frac{\delta}{D} \quad (3.41)$$

Για μικρές τιμές του πάχους της υγρής στοιβάδας η σχέση 3.41 γίνεται:

$$\frac{f_i}{f_G} = 1 + 75(1 - a) \quad (3.42)$$

Η εξίσωση 3.39 με αντικατάσταση της 3.42 γίνεται:

$$\Phi_G^2 = \left( \frac{1 + 75(1 - a)}{a^{5/2}} \right) \quad (3.42)$$

## 4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

### 4.1.1 Πειραματική διάταξη και τμήμα μετρήσεων

#### A) Πειραματική διάταξη

Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 4.1.1 .Ο οριζόντιος σωλήνας αποτελείται από 4 τμήματα plexiglas με εσωτερική διάμετρο 2.4cm. Το συνολικό μήκος είναι 6.88m και περιλαμβάνει το τμήμα εισόδου, το τμήμα ανάπτυξης της ροής, το τμήμα μετρήσεων και το τμήμα εξόδου. Τα τμήματα συνδέονται με φλάντζες και έτσι μας δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης και εναλλαγής των διαφόρων μετρητικών διατάξεων στο σύστημα. Ιδιαίτερη φροντίδα δόθηκε στις ενώσεις των τμημάτων του σωλήνα, για να μην υπάρχει ανωμαλία στην ροή. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ελαστικά δακτυλίδια (o-rings), τοποθετημένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το διάκενο μεταξύ δύο σωληνών.

Η επιλογή του plexiglas έγινε για δύο λόγους:

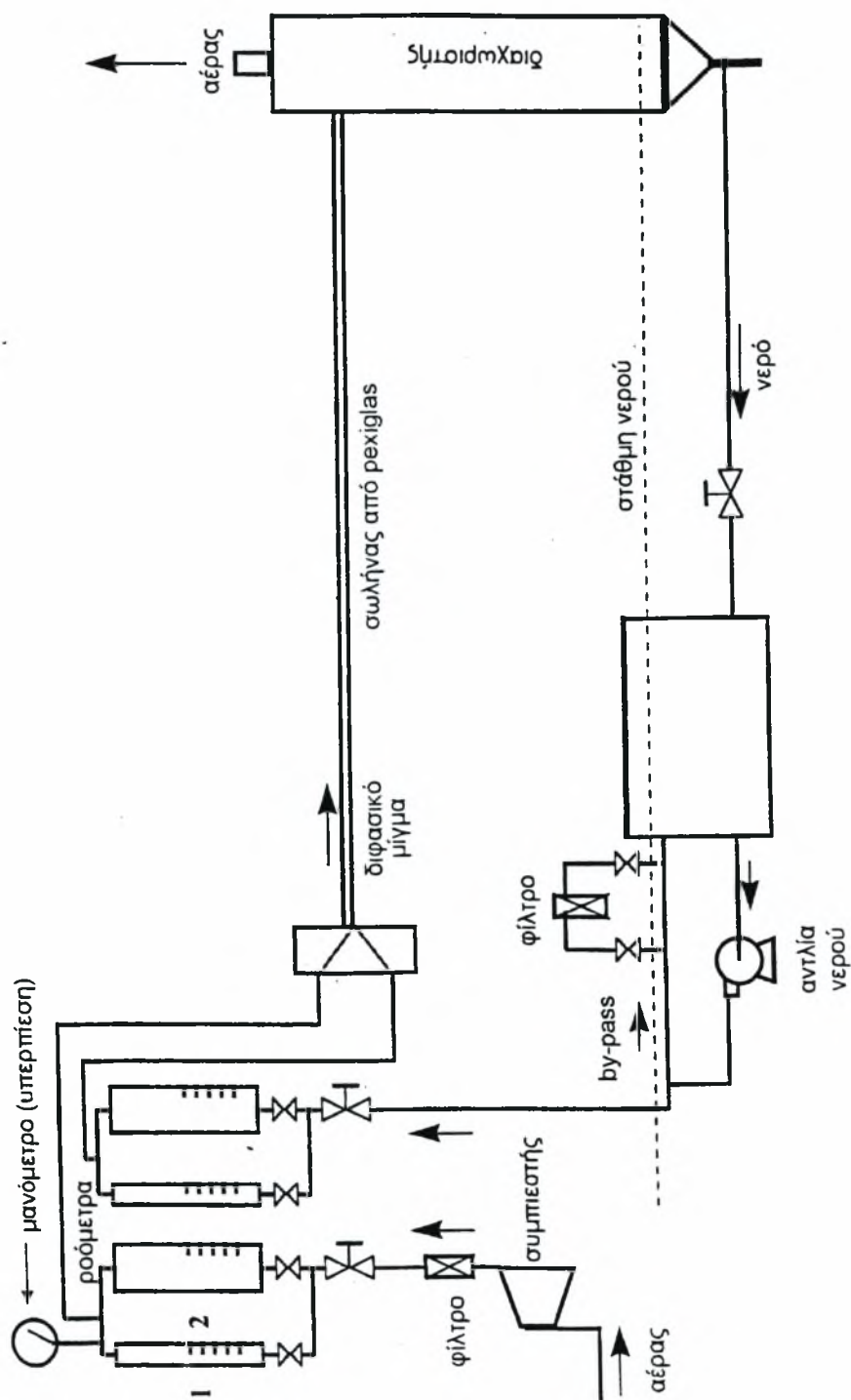
α) επιτρέπει οπτικές παρατηρήσεις και λήψη φωτογραφιών και

β) επεξεργάζεται αρκετά καλά στον τόρνο και κολλάει εύκολα με χλωροφόρμιο.

Επιπλέον, είναι αρκετά σκληρό και για πειράματα με όχι δραστικά υγρά δεν αλλοιώνεται.

Το τμήμα ανάμιξης των δύο φάσεων είναι ένα απλό 'ταφ' όπου οι δύο φάσεις αέρας-νερό εισάγονται υπό γωνία  $-35^{\circ}$ ,  $+35^{\circ}$  ως προς την οριζόντια. Η απόσταση μεταξύ του τμήματος ανάμιξης και του τμήματος μετρήσεων είναι 4.78m, δηλαδή περίπου 200 διαμέτροι.

Στο τέλος του σωλήνα η ροή εισάγεται εφαιπτομενικά σε δοχείο διαχωρισμού φάσεων κατασκευασμένο από φύλλο ανοξείδωτου χάλυβα. Ο αέρας εκρέει στην ατμόσφαιρα από την κορυφή του διαχωριστή και το νερό από τον πάτο του



Σχήμα 4.1.1 Πειραματική συσκευή

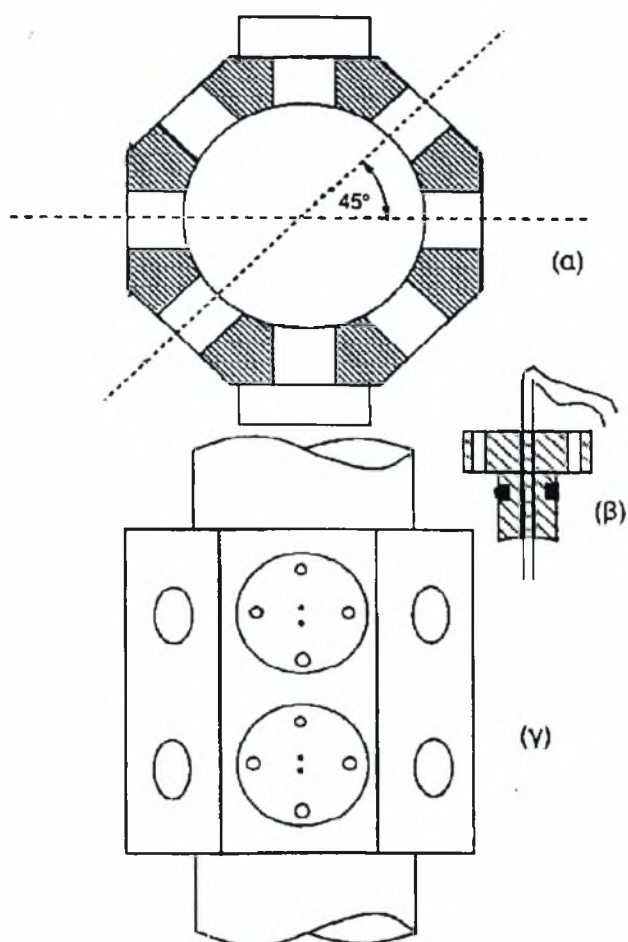
διαχωριστή για ανακύκλωση στη δεξαμενή νερού. Το νερό από το διαχωριστή ανακυκλώνεται με τη βοήθεια φυγοκεντρικής αντλίας.

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε στην διάταξη ήταν νερό του δικτύου ύδρευσης. Η χρήση κοινού νερού έγινε με βάση την ευκολία στην αναπληρωσή του και την σχετικά καλή του αγωγιμότητα, η οποία εξασφάλιζε ικανοποιητικό επίπεδο σήματος της αγωγιμομετρικής μετρητικής διάταξης. Η ρύθμιση της παροχής του νερού γίνεται από μία βάννα και η μέτρηση της παροχής γίνεται από δύο ροόμετρα ένα μικρό με εύρος [20-160]l/h για μικρές παροχές και ένα μεγάλο με εύρος [500-2000]l/h για μεγάλες παροχές. Για αποφυγή στραγγαλισμού της αντλίας στην έξοδο της υπάρχει ένα by-pass που οδηγεί το επιπλέον νερό στη δεξαμενή νερού.

Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται από συμπιεστή και στη συνέχεια υφίσταται μερική ξήρανση και καθαρισμό. Η παροχή του αέρα ρυθμίζεται από μια βάννα διαφράγματος. Η μέτρηση της παροχής γίνεται από δύο ροόμετρα ένα μικρό και ένα μεγάλο (με ενδεικτικό αριθμό 1 και 2 αντίστοιχα) στα οποία έχει τοποθετηθεί ένα μανόμετρο που μετράει την πίεση του αέρα μέσα στο ροόμετρο. Η μέγιστη ογκομετρική παροχή αέρα (με  $P=1\text{bar}$  και  $T=0^{\circ}\text{C}$ ) που μπορεί να περάσει από το ροόμετρο 1 και 2 αντίστοιχα είναι  $14\text{m}^3/\text{h}$  και  $84\text{m}^3/\text{h}$ .

## B) Τμήμα μετρήσεων

Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στοιβάδας χρησιμοποιήθηκε μια πειραματική διάταξη από plexiglas η μορφή της οποίας φαίνεται στο **Σχήμα 4.1.2**. Τα καθαυτά μετρητικά στοιχεία (β) έχουν τη μορφή βύσματος (plug) και μπορούν να τοποθετούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές. Κάθε ζεύγος συρμάτων είναι κατασκευασμένο από μεταλλικά ανοξειδωτά σύρματα (chromel) διαμέτρου 0.5mm που απέχουν μεταξύ τους 2mm. Στο **σχήμα 4.1.2** φαίνεται ένα μετρητικό στοιχείο με ζεύγος παράλληλων συρμάτων.



Σχήμα 4.1.2 Ειδική διάταξη για μετρήσεις πάχους υγρής  
στοιβάδας α) Τομή του τμήματος μετρήσεων  
β) Τομή του ειδικού βύσματος με  
τα παράλληλα σύρματα  
γ) Κάτοψη του τμήματος μετρήσεων

#### 4.1.2 Μετρήσεις πάχους στοιβάδας με την αγωγιμομετρική μέθοδο

Η αγωγιμομετρική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί πολύ συχνά για μετρήσεις πάχους στοιβάδας. Για πολύ μικρές στοιβάδες (<0.5mm) χρησιμοποιούνται τα 'εφαπτόμενα' στοιχεία (flush



mounted probes). Αυτή η μέθοδος στηρίζεται στο ότι η αγωγή ρεύματος μεταξύ δύο συρμάτων, τοποθετημένα εφαπτομενικά πάνω στο τοίχωμα όπου ρέει μια υγρή στοιβάδα εξαρτάται από το πάχος της στοιβάδας. Η ηλεκτρική συμπεριφορά αυτού του είδους των στοιχείων μελετήθηκε από τον Coney (1973) [Καραπάντσιος - 1987], ο οποίος τόνισε ότι η μέθοδος χάνει την ευαισθησία της για μεγάλα πάχη υγρού. Δηλαδή η απόκριση των στοιχείων δεν είναι ικανοποιητική για πάχη μεγαλύτερα κάποιας συγκεκριμένης τιμής που εξαρτάται κυρίως από την απόσταση των δύο ηλεκτροδίων. Αλλά αύξηση της απόστασης αυτής δεν δίνει πια τοπικές μετρήσεις. Η σχέση που συνδέει την αγωγή του ρεύματος με το πάχος του υγρού προσδιορίζεται συνήθως πειραματικά. Καθώς η υγρή στοιβάδα ξεπερνά κάποια τιμή, χάνεται η γραμμικότητα μεταξύ αγωγής και πάχους στοιβάδας και η αγωγή τείνει προς μια σταθερή τιμή ρεύματος.

Τα αγωγιμομετρικά σύρματα για μεγαλύτερο πάχος στοιβάδας χρησιμοποιήθηκαν από τον Swanson (1966) και κυρίως από τον Hanratty και τους συνεργάτες του (Miya et al 1971, Tatterson 1975, Dalman 1978, Laurinat 1979, Andritsos 1986). Αυτή η τεχνική χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία.

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

Η ηλεκτρική αντίσταση ανάμεσα σε δύο παράλληλα σύρματα που είναι κάθετα στη διεύθυνση της ροής δίνεται από τη σχέση : (Miya 1970)

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

όπου:

$R_f$  η αντίσταση, ohm

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

$D_e$  η απόσταση μεταξύ των συρμάτων, m

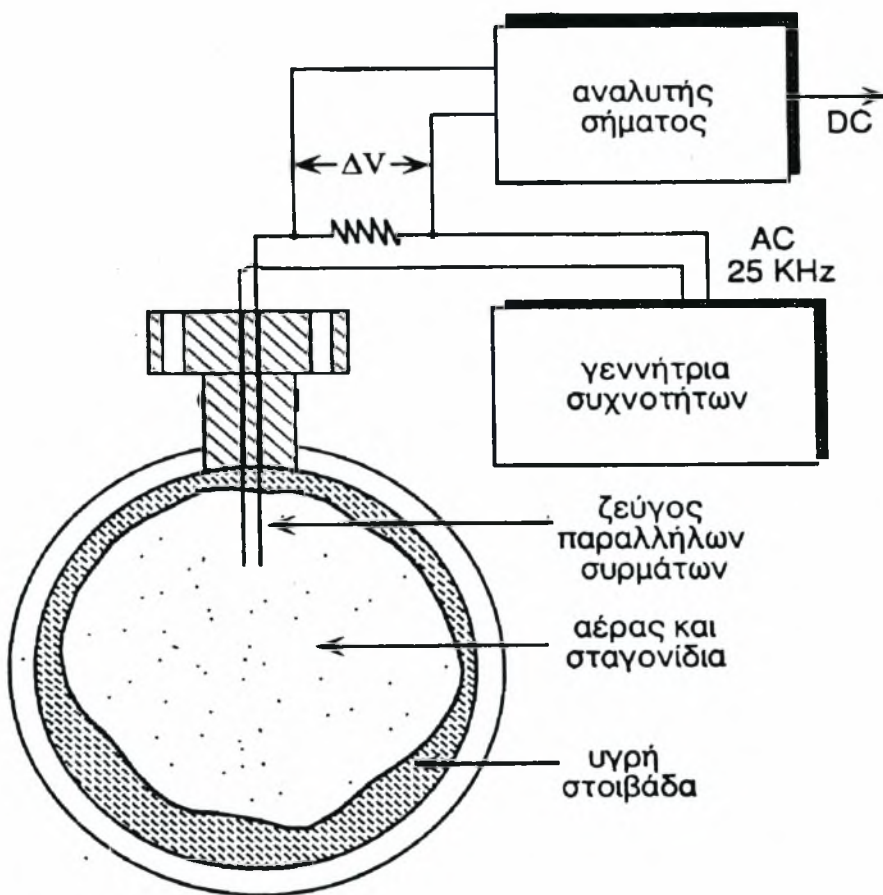
$d_w$  η διάμετρος των συρμάτων, m

$h$  πάχος της αγωγίμης στοιβάδας, m

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

Το μετρητικό τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 KHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στοιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρέει το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές, οι οποίες μετρούνται στα άκρα μιας μικρής αντίστασης (50 Ω), τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή (Σχήμα 4.1.3).

Ο αναλυτής αυτός, σχεδιάστηκε αρχικά στο Πανεπιστήμιο του Illinois (Andritsos 1986), αποτελείται από ένα διαφορικό ενισχυτή, ο οποίος ενισχύει τις πολύ μικρές μεταβολές της τάσης (μερικά mV), και το τμήμα αποδιαμόρφωσης και φιλτραρίσματος του σήματος. Η εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 25KHz, που τροφοδοτείται στον αναλυτή, είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, δηλαδή η μεταβολή



Σχήμα 4.1.3 Μετρητικό στοιχείο ζεύγους παράλληλων συρμάτων και η σύνδεση με τον αναλυτή σήματος

του πλάτους της αντιστοιχεί στις μεταβολές της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Επομένως, η πληροφορία που μας ενδιαφέρει βρίσκεται στη μορφή της περιβάλλουσας των κορυφών της εναλλασσόμενης τάσης. Το κύκλωμα του Σχήματος X εξασφαλίζει στην έξοδο του συνεχή τάση απαλλαγμένη από την υψηλή συχνότητα του φορέα και ανάλογη των μεταβολών του πάχους της υγρής στοιβάδας.

Η βαθμονόμηση του αναλυτή έγινε χρησιμοποιώντας γνωστές ωμικές αντιστάσεις αντί των συρμάτων που κάλυπταν όλο το εύρος των μετρούμενων τιμών πάχους υγρού (από 232 Ω μέχρι 37800 Ω). Η τάση βρέθηκε να είναι γραμμική σχεδόν σε όλο το εύρος τιμών των αντιστάσεων. Μία χαρακτηριστική καμπύλη βαθμονόμησης του αναλυτή φαίνεται στο Παράρτημα Α Σχήμα Α.1.

Για την βαθμονόμηση του ζεύγους των παράλληλων συρμάτων, δηλαδή τον προσδιορισμό της σχέσης ανάμεσα στο πάχος της υγρής στοιβάδας και τη μετρούμενη αγωγιμότητα ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία.

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

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

και

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

Έτσι προέκυψε η γραμμική σχέση, που συνδέει το πάχος της υγρής στοιβάδας με την αγωγή ρεύματος μέσα από την στοιβάδα, παρατηρώντας ότι στον αέρα (άπειρη αντίσταση) η τάση εξόδου είναι μηδέν. Η βαθμονόμηση των συρμάτων δίνεται σχηματικά στο Παράρτημα Α Σχήμα Α.2.

Η αναγωγή των καμπυλών βαθμονόμησης στις συνθήκες του πειράματος εξασφαλίζεται με την μέτρηση της αγωγιμότητας του νερού πριν από κάθε πείραμα. Τελικά οι μετρήσεις της τάσης εξόδου του αναλυτή μετατρέπονται σε πάχος υγρής στοιβάδας χρησιμοποιώντας:

α) την καμπύλη βαθμονόμησης του αναλυτή, η οποία

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

Η ακρίβεια της τεχνικής αυτής εκτιμάται ότι είναι της τάξης του  $\pm 5\%$ , συνυπολογιζόμενης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στη διαδικασία βαθμονόμησης (π.χ. μεταβολές θερμοκρασίας, ηλεκτρονικός θόρυβος κ.λ.π.). Επιπλέον για υγρές στοιβάδες πάχους μικρότερου των  $0.050\text{mm}$  τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται αξιόπιστα.

#### 4.1.3 Σχόλια

Είναι δυνατόν να διατυπωθεί αντίρρηση ως προς την καταλληλότητα των συρμάτων (probes) για την μέτρηση του πάχους της στοιβάδας κατ'αναλογία με τις άλλες άμεσες μεθόδους, διότι μπαίνοντας μέσα στη ροή εισάγουν διαταραχές στο υγρό και ταυτόχρονα σχηματίζεται μηνίσκος από την διαβροχή τους. Οι διαταραχές στη ροή από τα σταθερά σύρματα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση πολύ λεπτών συρμάτων  $\sim 0.5\text{mm}$  όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Χρήση ακόμα λεπτότερων συρμάτων ( $< 0.05\text{mm}$ ), όπως αυτά που χρησιμοποίησε ο Zabarás (1985), δίνουν πολύ μικρά σήματα εξόδου, απαιτώντας μεγάλη ενίσχυση και αυξάνοντας την επίδραση του ηλεκτρονικού θορύβου. Ο μηνίσκος στην περίπτωση ροής νερού είναι ασύγκριτα μικρότερος από αυτόν που παρατηρείται σε στάσιμο νερό. Εντούτοις, όταν κατά την εξέλιξη της ροής το ύψος του υγρού ελαττωθεί απότομα (πίσω πλευρά κύματος) ένα μέρος υγρού παραμένει πάνω στα σύρματα προκαλώντας ανίχνευση μεγαλύτερου πάχους από το πραγματικό. Δηλαδή, ένα ποσοστό καθυστέρησης εισάγεται στη δυναμική συμπεριφορά των συρμάτων. Αυτό το φαινόμενο μελετήθηκε πειραματικά από τον Pearlman (1963) [όπως αναφέρεται στον Zabarás (1985)] ο οποίος παρατήρησε ότι αυτά τα σφάλματα είναι μηδαμικά και θεώρησε την απόκριση των συρμάτων στιγμιαία.

Ο Hanratty και οι συνεργάτες του (Dalman 1978, Laurinat 1979) για τα μικρά πάχη υγρού ( $< 0.5\text{mm}$ ) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο των εφαιπτομενικά τοποθετημένων στο σωλήνα συρμάτων, όπως αυτή περιγράφηκε στην αρχή του κεφαλαίου. Η μέθοδος αυτή έχει γραμμική απόκριση μόνο σε πολύ μικρά πάχη υγρού

και για την βαθμονόμηση της μετρητικής διάταξης απαιτούνται πολύ λεπτές στοιβάδες.

Κατά τον μεγαλύτερο αριθμό πειραμάτων για την μετατροπή της τάσης εξόδου του αναλυτή σε πάχος υγρής στοιβάδας ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία.

Ρυθμίζοντας την παροχή του νερού σε μεγάλες τιμές (>400l/h) και έχοντας κλειστή την παροχή του αέρα γεμίζαμε τον σωλήνα (διαμέτρου 2.4cm) με νερό και σημειώναμε την τάση εξόδου του αναλυτή. Δεδομένου της γραμμικότητας που συνδέει τα μεγέθη V-H και του γεγονότος ότι για μηδενικό ύψος υγρής στοιβάδας η τάση είναι μηδέν, με απλή αναγωγή μετατρέπαμε πλέον όλες τις ενδείξεις σε ύψος υγρής στοιβάδας αφού γνωρίζαμε την αγωγή του ρεύματος μέσα από την στοιβάδα νερού όταν το ύψος της τελευταίας ήταν 2.4cm. Αύτη η τακτική παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται καθημερινός έλεγχος της συμπεριφοράς του αναλυτή καθώς και μέτρηση της αγωγιμότητας του νερού στην αρχή και στο τέλος κάθε πειράματος αφού η επίδραση αυτών των παραγόντων λαμβάνεται άμεσα υπ' όψιν με την παραπάνω τεχνική.

Κατά την ταυτόχρονη χρησιμοποίηση δύο μετρητικών, μετρήσεις έδειξαν ότι υπάρχει αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών πεδίων δύο γειτονικών μετρητικών, με αποτέλεσμα την μείωση του ηλεκτρικού σήματος. Για το λόγο αυτό ταυτόχρονες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μόνο στην περίπτωση συλλογής δεδομένων για τον υπολογισμό της ετεροσυσχέτισης δύο σημάτων.

## 4.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

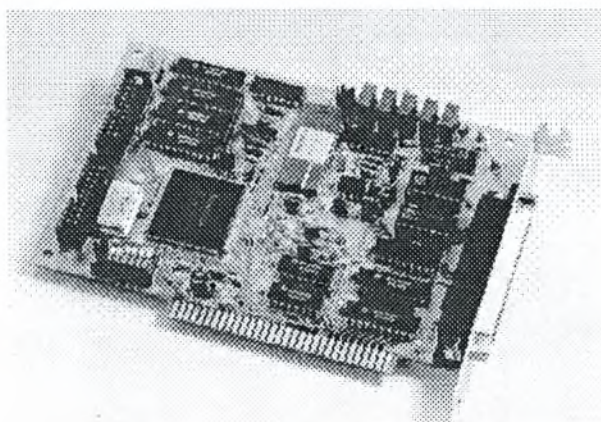
### 4.2.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΡΤΑΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Πριν τοποθετήσουμε την κάρτα σε κάποιο από τα ελεύθερα ISA Slots του υπολογιστή ήταν απαραίτητη η ρύθμιση κάποιων jumper που βρίσκονται πάνω στην κάρτα. Συγκεκριμένα επιλέξαμε με τον JP2 την εσωτερική συχνότητα του ρολογιού της PCL-8181 σε 1MHz (μας δίνεται και η επιλογή συχνότητας 10MHz), μια από τις βασικές ρυθμίσεις αφού η συχνότητα δειγματοληψίας μας (pacer rate) καθορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Pacer rate} = \text{Fclk} / (\text{Div1} * \text{Div2})$$

όπου Fclk είναι 1MHz όπως θέσαμε παραπάνω και Div1, Div2 μεταβλητές η τιμή των οποίων δίνεται από τον χρήστη κατά την εκτέλεση του προγράμματος Adcon.exe το οποίο αναλαμβάνει την δειγματοληψία σε συνεργασία με την κάρτα.

Στη συνέχεια γνωρίζοντας ότι η τάση εξόδου του αναλυτή κυμαίνεται από 0 ως 8V με τον JP7 θέσαμε την κλίμακα της εσωτερικής τάσης στα +/- 10V. Στο σχήμα 4.2.1 φαίνεται η κάρτα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήσαμε καθώς και η διάταξη των διακοπών και των jumper πάνω σ' αυτήν.



Σχήμα 4.2.1

Εγκαθιστώντας πλέον την κάρτα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ήταν απαραίτητη η τροποποίηση του προγράμματος που συνόδευε αυτήν για την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Ο κώδικας (source) του προγράμματος γραμμένος σε Turbo C/C++ βρίσκεται στο Παράρτημα Β και αναλύεται διεξοδικά.

#### 4.2.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το αναλογικό σήμα εξόδου του αναλυτή που εκφράζει της μετρήσεις του πάχους της υγρής στοιβάδας μετατρέπεται σε ψηφιακό και αποθηκεύεται στο αρχείο Results.dat.

Η συχνότητα δειγματοληψίας στα περισσότερα πειράματα ήταν 25Hz και είχε διάρκεια 16sec(400 δειγματοληψίες)αφού διαπιστώσαμε ότι μας έδινε πλήρη περιγραφή των φαινομένων.Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως όπου η μεταβολές του ύψους της υγρής στοιβάδας ήταν απότομες και η απαίτηση για ακρίβεια μεγάλη ,όπως π.χ. στην στρωματωμένη ροή με τρισδιάστατα κύματα ,πραγματοποιήσαμε μετρήσεις και με 100Hz.Αντίθετα στην περιοχή της κλειστής-διαλείπουσας ροής δειγματοληψίες ακόμα και με 20Hz έδιναν αξιόπιστα αποτελέσματα.

#### 4.2.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ανοίγοντας με το Excel το αρχείο Results.dat και με τη χρήση των αντιστοιχών καμπύλων βαθμονόμησης μετατρέπαμε τις τιμές τάσης(Volt) σε ύψος υγρής στοιβάδας.Ακολούθως τα δεδομένα υποβάλλονται σε στατιστική επεξεργασία.

Τα στατιστικά μεγέθη που υπολογίζονται είναι η μέση τιμή του δείγματος των μετρήσεων,  $\bar{x}$ , η τυπική απόκλιση(RMS) και οι ακραίες τιμές(μέγιστη και ελάχιστη).

Οι παραπάνω ποσότητες υπολογίζονται είτε με τη χρήση των εξισώσεων που παρέχει το πρόγραμμα Excel είτε από τις εξισώσεις(Press et al. 1986):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}\right)^2 N}{N-1}}$$

όπου N ο συνολικός αριθμός των τιμών του δείγματος.

Η εκτιμήτρια της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης για  $N$  τιμές ενός στοχαστικού σήματος με μηδενική μέση τιμή υπολογίζεται από την σχέση:

$$\hat{R}_x(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n x_{n+r}, \quad r=0, 1, 2, \dots, m$$

όπου  $r$  ο δείκτης χρονικής μετατόπισης (lag number),  $m$  ο μέγιστος δείκτης χρονικής μετατόπισης της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και  $\Delta t$  ο χρόνος μεταξύ δύο σημείων της δειγματοληψίας. Αποδεδεικνύεται ότι:

$$\hat{R}_x(0) = \overline{x^2}$$

δηλαδή ο πρώτος όρος της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης είναι η μεταβλητότητα της κατανομής των τιμών του δείγματος. Οι τιμές της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κανονικοποιούνται με την τιμή  $\hat{R}_x(0)$  και δίνουν τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης.

Ισχύει ότι:

$$-1 \leq \frac{\hat{R}_r}{\hat{R}_x(0)} \leq 1$$

Για τον υπολογισμό της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης (cross-correlation function) δύο σημάτων  $x(t)$  και  $y(t)$  που έχουν μετρηθεί σε διαφορετικά σημεία στο χώρο, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\hat{R}_{xy}(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n y_{n+r}, \quad r=0, 1, 2, \dots, m$$

όπου  $r$  ο δείκτης καθυστέρησης (lag number) και  $m$  ο μέγιστος δείκτης χρονικής μετατόπισης της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης. Οι τιμές της συνάρτησης κανονικοποιούνται με την παράσταση  $\sqrt{\hat{R}_x(0)}$   $\sqrt{\hat{R}_y(0)}$  και δίνουν τους συντελεστές ετεροσυσχέτισης.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι η διαδικασία αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης για τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας διπλωματικής έγινε με την χρήση της συνάρτησης `correl` του Excel. Στην περίπτωση της αυτοσυσχέτισης είχαμε το ίδιο σήμα



## Κεφάλαιο 4.2-Συλλογή και επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

σε δύο διπλανές στήλες, ενώ κατά την περίπτωση της ετεροσυσχέτισης η μία στήλη περιείχε τα δεδομένα του πρώτου ζεύγους των μετρητικών συρμάτων και η δεύτερη στήλη της μετρήσεις από το άλλο ζεύγος.

Στο Παράρτημα Β απεικονίζεται η αυτοσυσχέτιση-ετεροσυσχέτιση ημιτονοειδούς σήματος.

## 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

### Εισαγωγή

Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στοιβάδας χρησιμοποιήθηκε η τεχνική που περιγράφεται με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 4. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες ταχύτητες τόσο του αέρα όσο και του νερού καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα περιοχών ροής. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην διαλείπουσα ροή η οποία παρουσιάζει απότομες μεταβολές του πάχους της υγρής στοιβάδας καθώς και της πίεσης γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ανεπιθύμητη στις περισσότερες εφαρμογές.

Η αγωγιμομετρική μέθοδο με τα παράλληλα λεπτά σύρματα τοποθετημένα κάθετα στη διεύθυνση της ροής ήταν κατάλληλη για όλες τις περιοχές εκτός της δακτυλιοειδούς ροής όπου απαιτείται η χρήση άλλης μορφής συρμάτων. Η ευαισθησία της μεθόδου που ακολουθήσαμε ήταν αρκετά ικανοποιητική και για μικρά πάχη (0,2cm) όπου συνίσταται η χρήση των εφαιπτομενικών συρμάτων όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες.

Στα σχήματα που ακολουθούν η Σειρά1 αντιστοιχεί στο ύψος της υγρής στοιβάδας που μετρούταν από το πρώτο ζεύγος των παράλληλων συρμάτων, αντίστοιχα η Σειρά2 στις τιμές του δεύτερου μετρητικού.

Η τιμή της ταχύτητας των κυμάτων διαταραχής,  $U_c$ , προκύπτει από τον υπολογισμό της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης των δύο σημάτων που ελήφθησαν ταυτόχρονα από τα μετρητικά 1 και 2 που απέχουν  $\Delta x = 41\text{mm}$ . Το σήμα από το μετρητικό που είναι κατάντι (downstream) 'καθυστερεί' έναντι του σήματος από το δεύτερο μετρητικό. Η χρονική καθυστέρηση,  $\Delta t$ , που αντιστοιχεί στον καλλίτερο συσχετισμό των δύο σημάτων, θεωρείται σαν

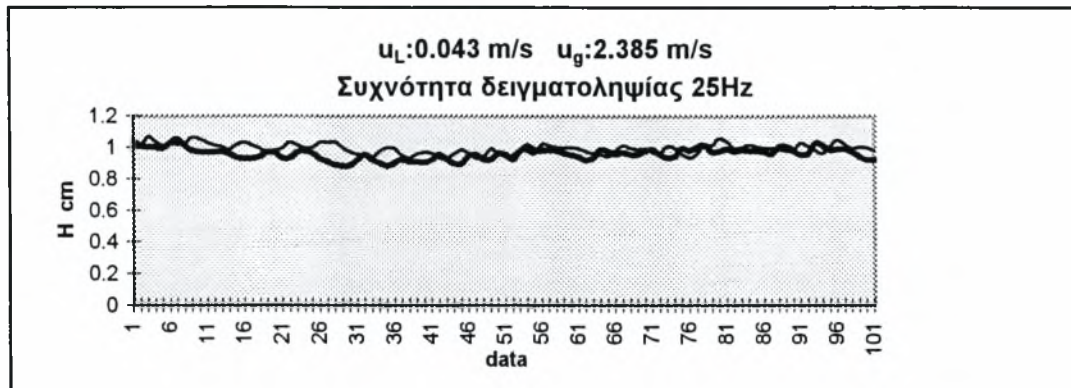
χρόνος μετάβασης του κύματος από το ένα μετρητικό στο άλλο.Επομένως:

$$U_c = \Delta x / \Delta t$$

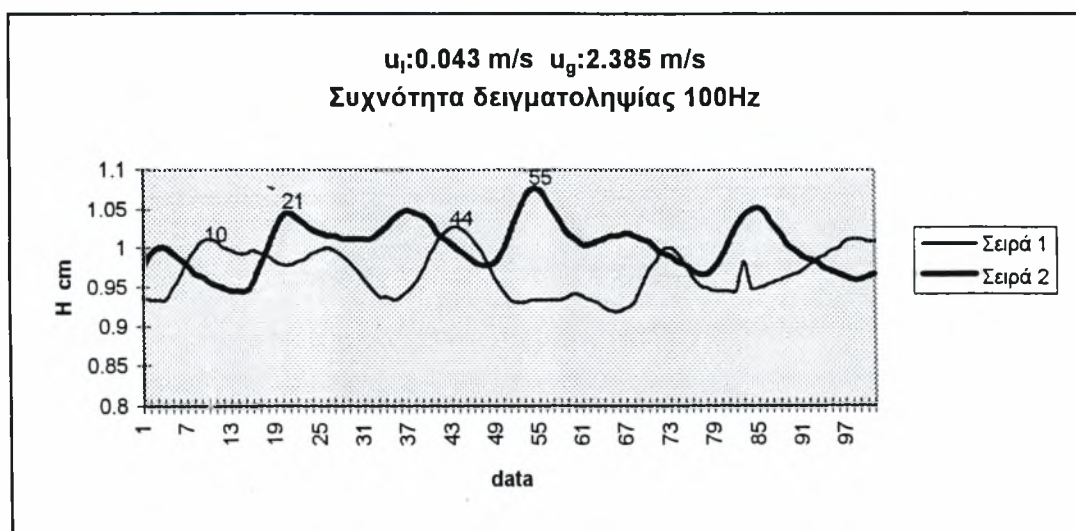
### 5.1 Στρωματωμένη ροή

α) με διδιάστατα κύματα

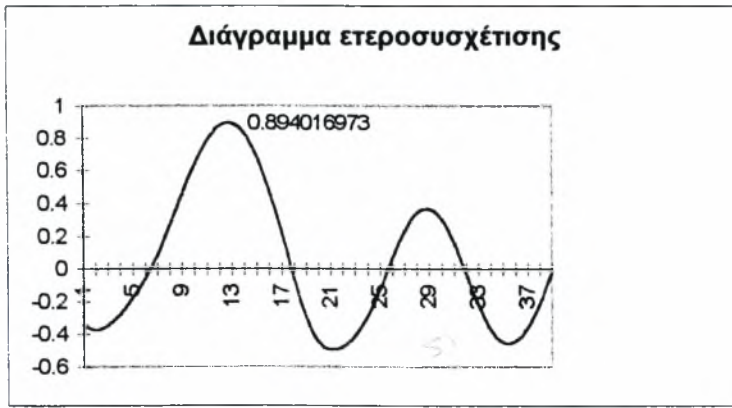
Στην περιοχή της στρωματωμένης ροής σε μικρές ταχύτητες και των δύο φάσεων έχουμε την εμφάνιση διδιάστατων κυμάτων όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα



Σχήμα 5.2α Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα



**Σχήμα 5.2β** Διάγραμμα ετεροσυσχέτισης του Σχήματος 5.2α

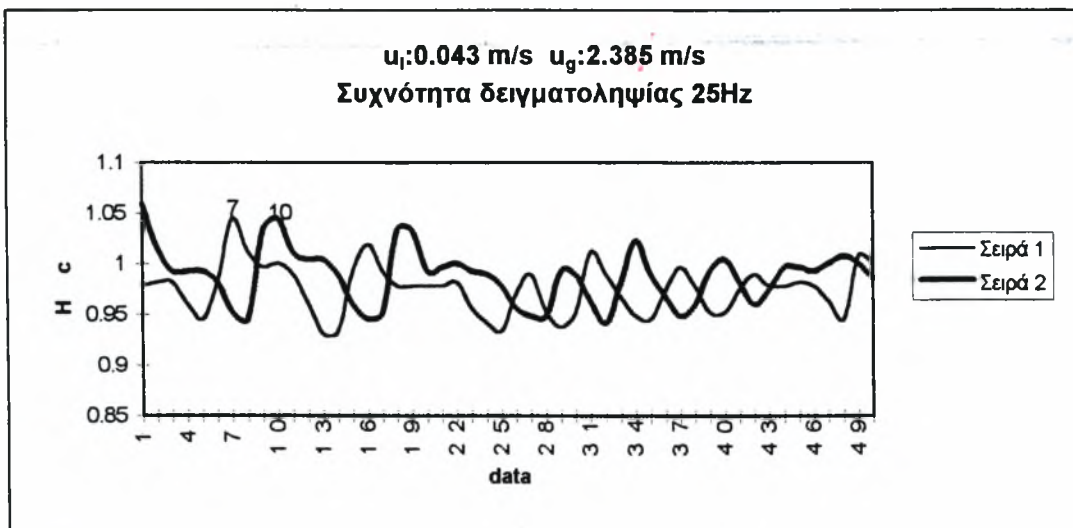
Από το παραπάνω σχήμα (**Σχήμα 5.2β**) για ταχύτητες νερού-αέρα 0.043–2.385 m/sec αντίστοιχα και για συχνότητα δειγματοληψίας (σ.δ.) 100Hz προκύπτει η ταχύτητα των κυμάτων διαταραχής:

$$U_c = 41 \cdot 10^{-3} / (12 \cdot 10^{-2}) = 0.342 \text{ m/s}$$

Για της ίδιες συνθήκες ροής αλλά με σ.δ. 25Hz (**Σχήμα 5.3**) έχουμε:

$$U_c = 41 \cdot 10^{-3} / 3 \cdot 0.04 = 0.342 \text{ m/s}$$

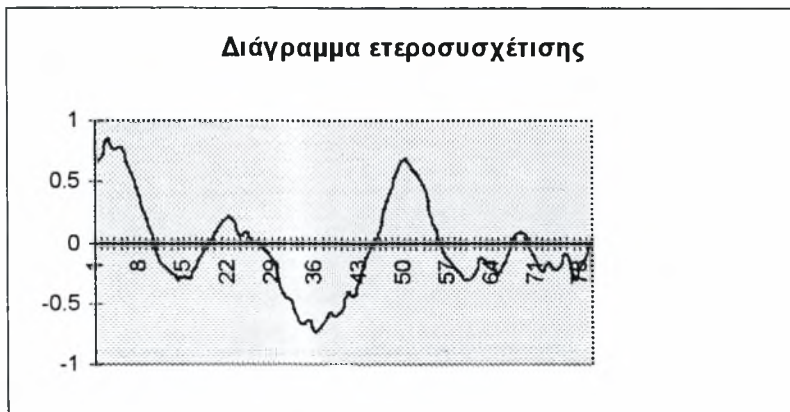
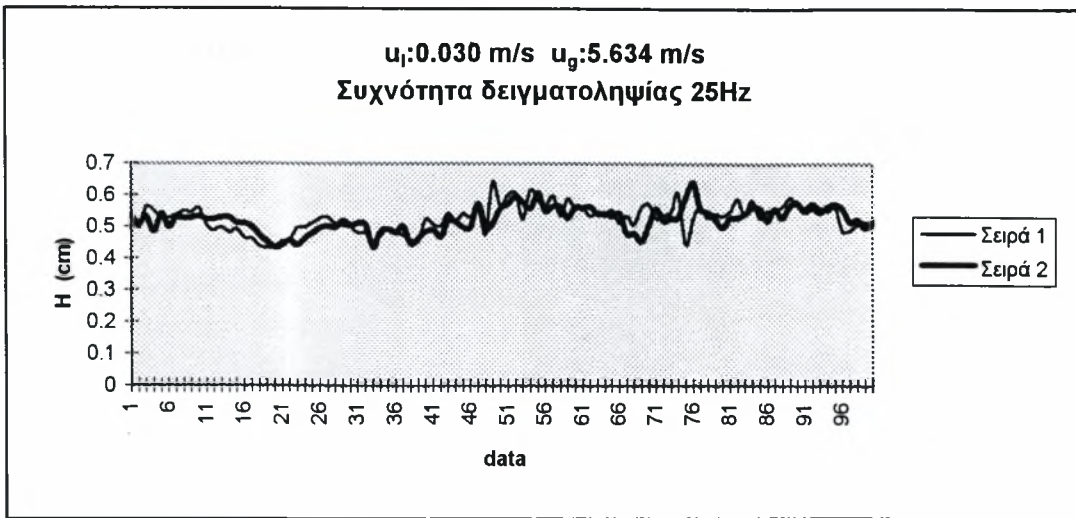
όποτε η συχνότητα των 25Hz μας παρέχει ακριβή περιγραφή του φαινομένου, προλαβαίνουμε δηλαδή να καταγράψουμε όλες της μεταβολές. Βέβαια με μεγαλύτερη σ.δ. η καταγραφή του πάχους της υγρής στοιβάδας γίνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Οι στατιστικές ιδιότητες (μέσο πάχος υγρής στοιβάδας-μέγιστη και ελάχιστη τιμή του  $h$  και η τυπική απόκλιση) για της προαναφερθείσες παροχές δίνονται στον τελικό **Πίνακα Π5.1**.



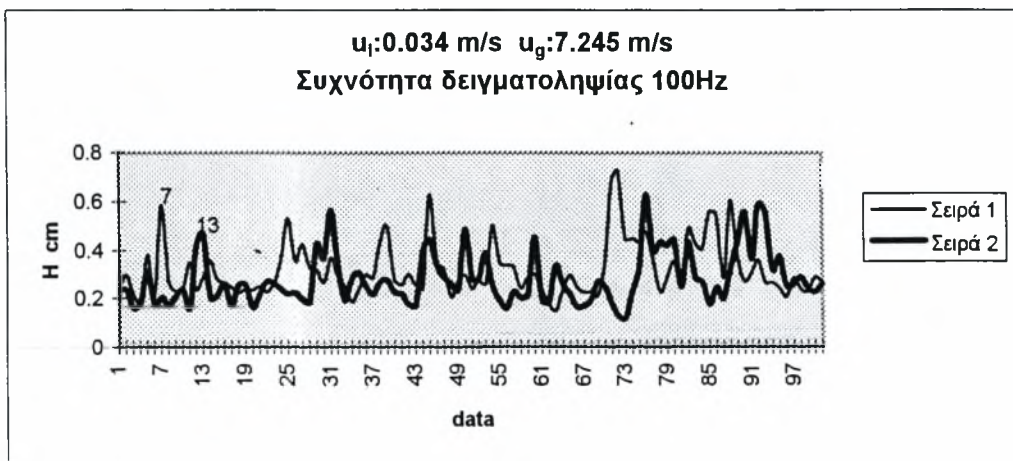
Σχήμα 5.3 Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα-ετεροσυσχέτιση

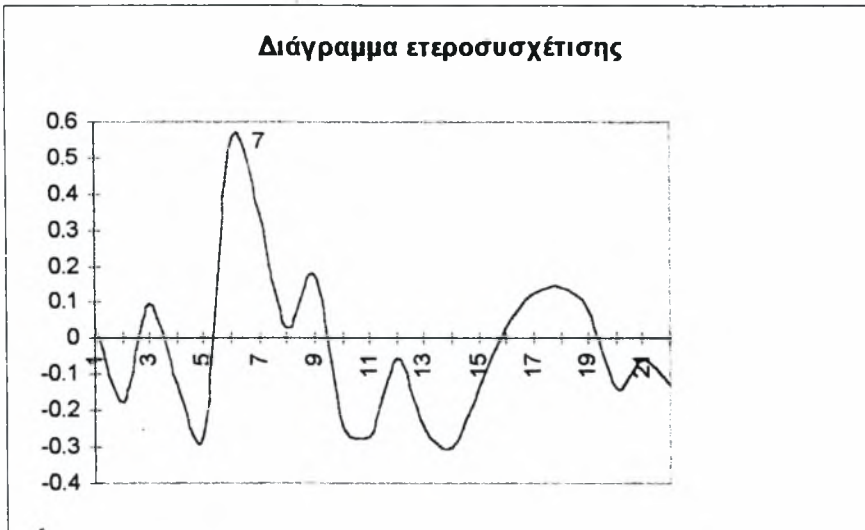
Στο επόμενο στάδιο πάρθηκαν μετρήσεις του ύψους της υγρής στοιβάδας σε περιοχές της στρωματωμένης ροής ,με σκοπό να εξετάσουμε την επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη διεπιφάνεια υγρού/αέρα.

Συγκρίνοντας έτσι τα Σχήματα 5.4 και 5.5 παρατηρούμε ότι με αύξηση της ταχύτητας του αέρα(ενώ η ταχύτητες του νερού είναι περίπου ίσες) οι διαταραχές είναι εντονότερες ,κάτι που αποδεικνύεται στατιστικά και με τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις.Οι ταχύτητες  $U_c$  είναι αντίστοιχα 0.5125 m/s και 0.683 m/s κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού η ταχύτητα του αέρα στην δεύτερη περίπτωση( $u_0=7.245$  m/s) είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 5.4 Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα-ετεροσυσχέτιση



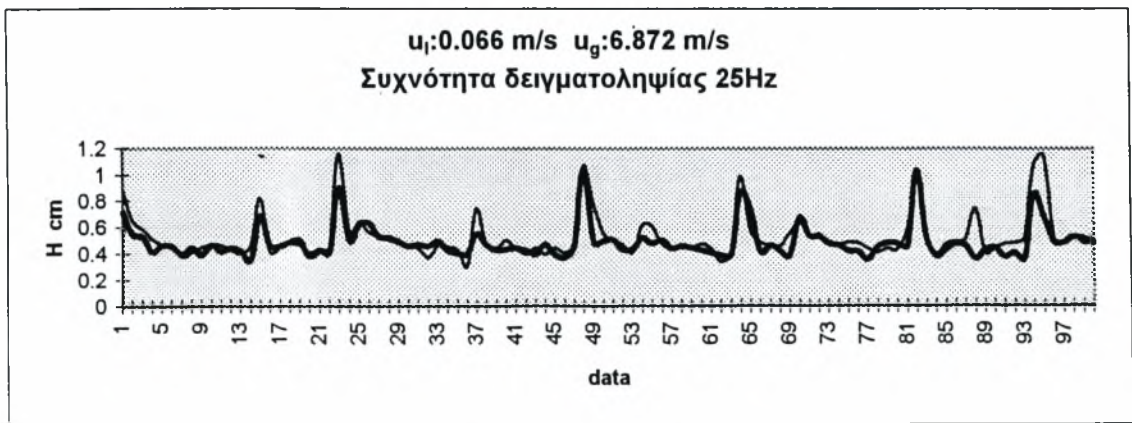
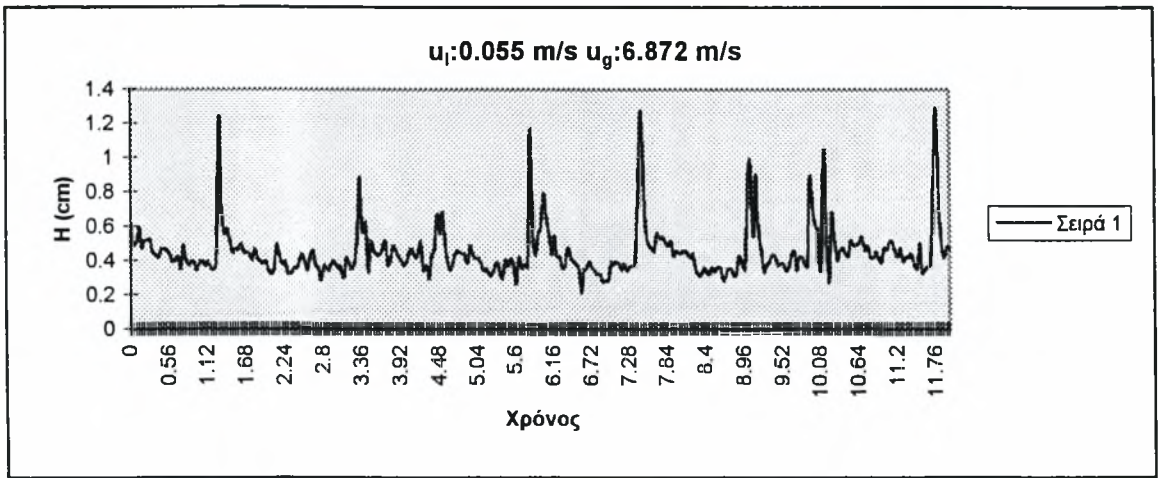
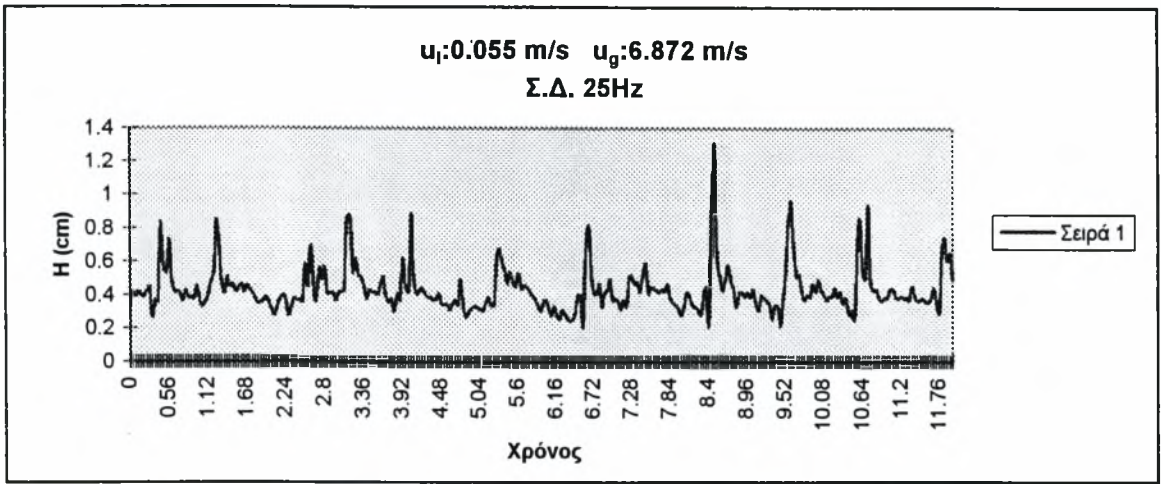


Σχήμα 5.5 Στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα-ετεροσυσχέτιση

### β) με τρισδιάστατα κύματα-εκνέφωση

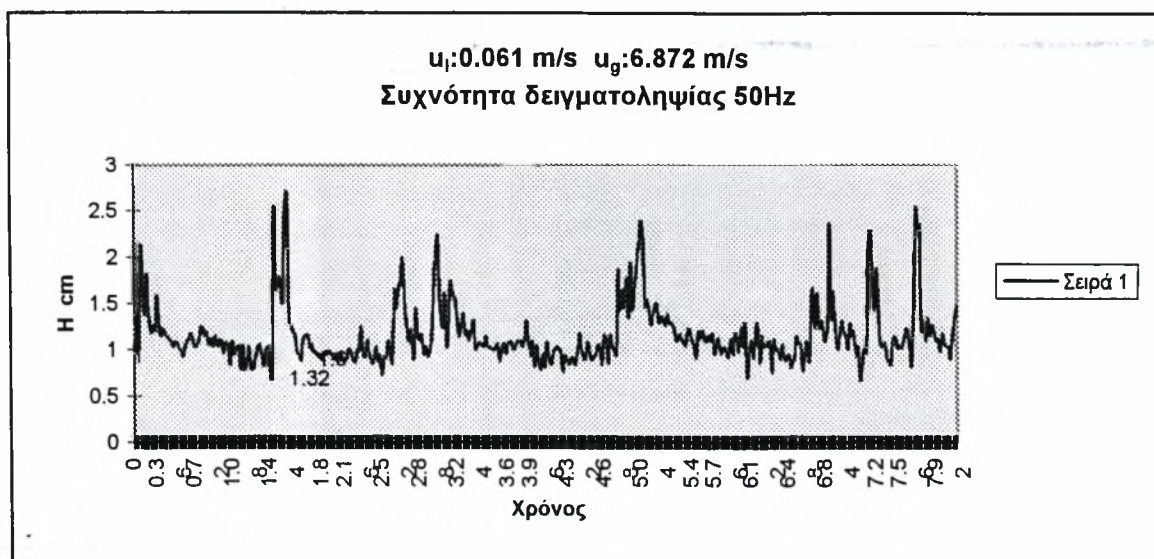
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η στρωματωμένη ροή που συνοδεύεται από ακανόνιστα κύματα μεγάλου πλάτους. Τέτοια τρισδιάστατα κύματα απεικονίζονται στα επόμενα σχήματα για διάφορες παροχές. Στο **Σχήμα 5.9** παρατηρούμε ότι το ύψος της υγρής στοιβάδας φτάνει την τιμή 2.4cm (εσωτερική διάμετρο αγωγού) όποτε βρισκόμαστε σε ένα μεταβατικό στάδιο της στρωματωμένης ροής που τείνει να εξελιχθεί σε διαλείπουσα. Φαινόμενα εκνέφωσης παρατηρούμε για μεγάλες παροχές αέρα όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.10** όπου παρόλο του μικρού πάχους της υγρής στοιβάδας, μόλις 0.2cm, σταγονίδια νερού παρασύρονται και φτάνουν στο πάνω μέρος του αγωγού.

Για την περιοχή αυτή δεν σχηματίστηκαν διαγράμματα ετεροσυσχέτισης αφού η ιδιαίτερα κοντινή θέση των μετρητικών και η γρήγορη εξέλιξη του φαινομένου είχαν σαν αποτέλεσμα ελάχιστη χρονική διαφορά σήματος. Ωστόσο αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί μετακινώντας το ένα από τα δύο μετρητικά ώστε να μεγαλώσει η μεταξύ τους απόσταση.

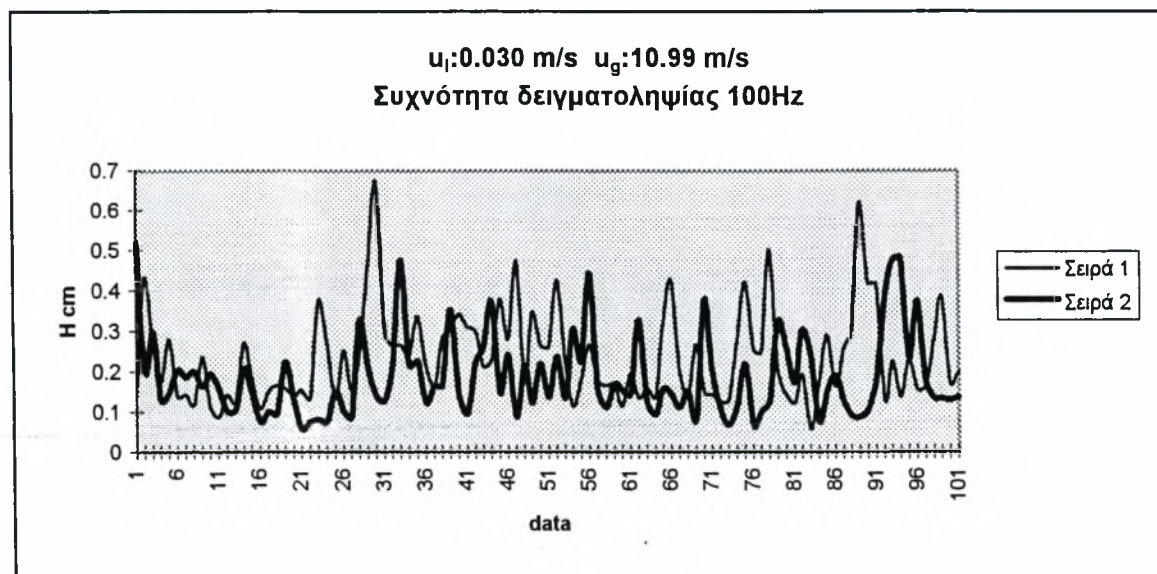


Σχήματα 5.6-7-8 Στρωματωμένη ροή με τρισδιάστατα κύματα





Σχήμα 5.9 Στρωματωμένη ροή με τρισδιάστατα κύματα-διαλείπουσα



Σχήμα 5.10 Στρωματωμένη ροή με έντονα τα φαινόμενα εκνέφωσης

## 5.2 Διαλείπουσα ροή

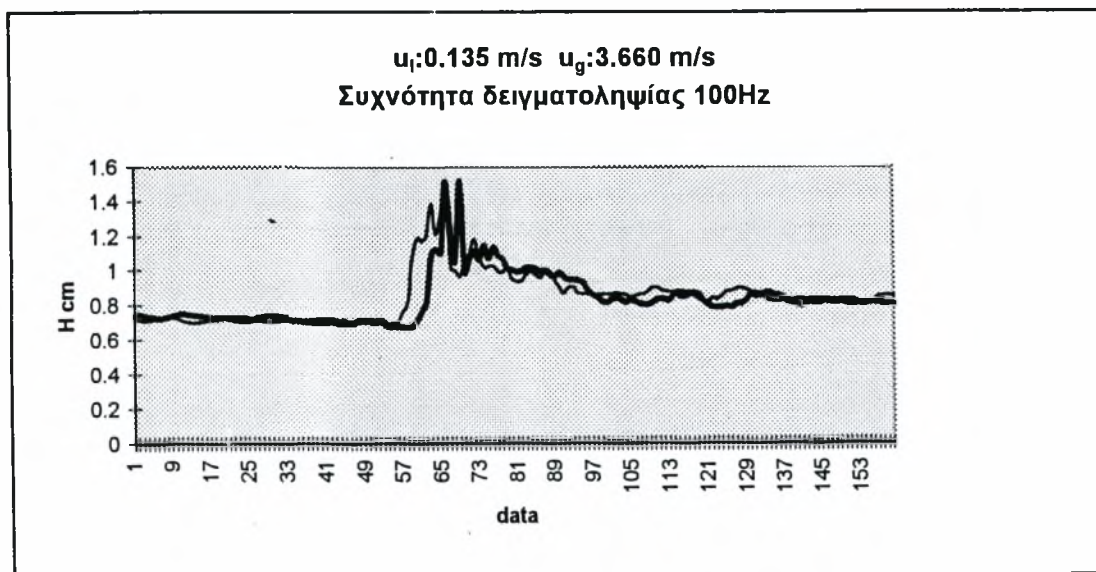
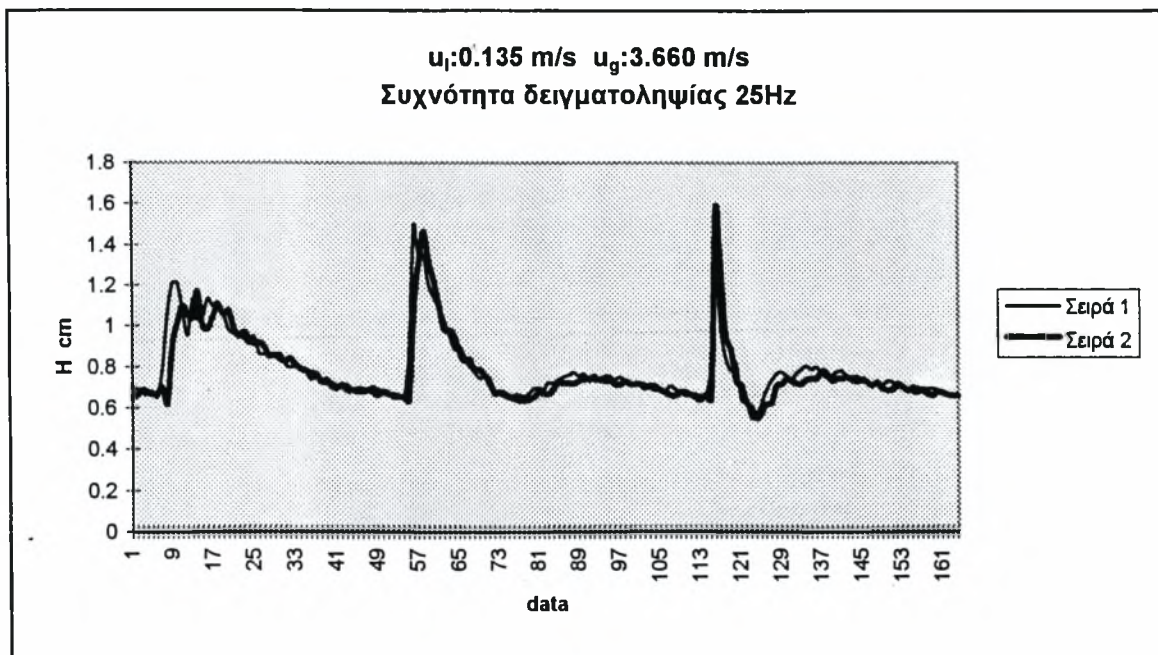
Η απεικόνιση της διαλείπουσας ροής είναι αρκετά παραστατική σε όλα τα επόμενα σχήματα. Υγρές μάζες (slugs) κλίνουν την διατομή του αγωγού έχοντας μήκος που μερικές φορές έφτανε σε αρκετά cm. Μετά την διέλευση των υγρών μαζών παρατηρείται μια βαθμιαία πτώση του πάχους της υγρής στοιβάδας κάτι το οποίο δεν γίνεται κατά το σχηματισμό τους που είναι ιδιαίτερα απότομος. Παρόλο που η εμφάνιση των slugs φαίνεται να είναι εντελώς τυχαία βλέπουμε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις τα slugs εμφανίζονται κατά ζεύγη. Στη συνέχεια μπορεί να έχουμε

την ένωση ενός ζεύγους υγρών μαζών προς τον σχηματισμό ενός slug μεγάλου μήκους το οποίο αργότερα χωρίζετε σε δύο η και τρία slug. Φαίνεται δηλαδή σαν 'τάξη' και 'χάος' να μετατρέπονται το ένα στο άλλο. Η 'τάξη' μπορεί να εκφυλιστεί σε 'χάος' και αντίστροφα από το 'χάος' να προκύψει 'τάξη'.

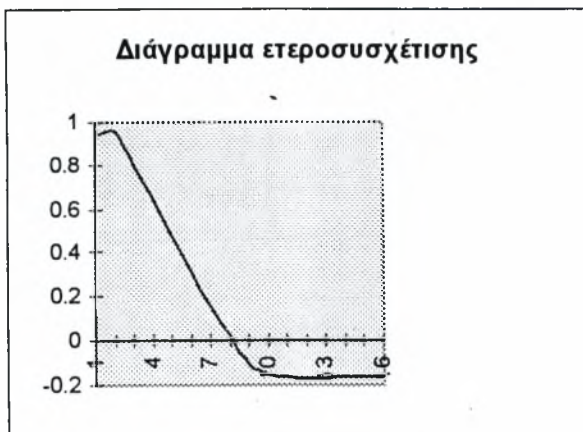
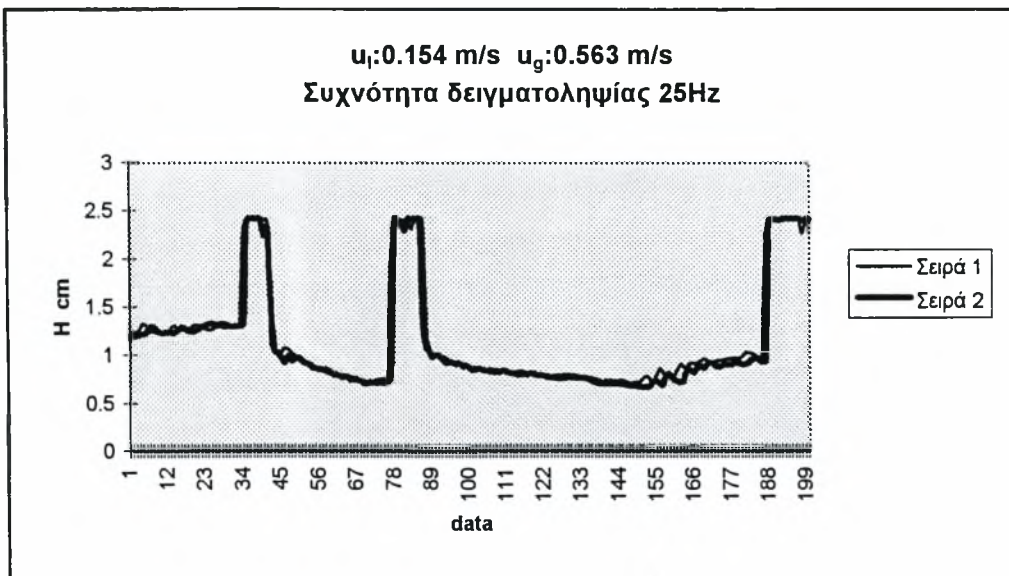
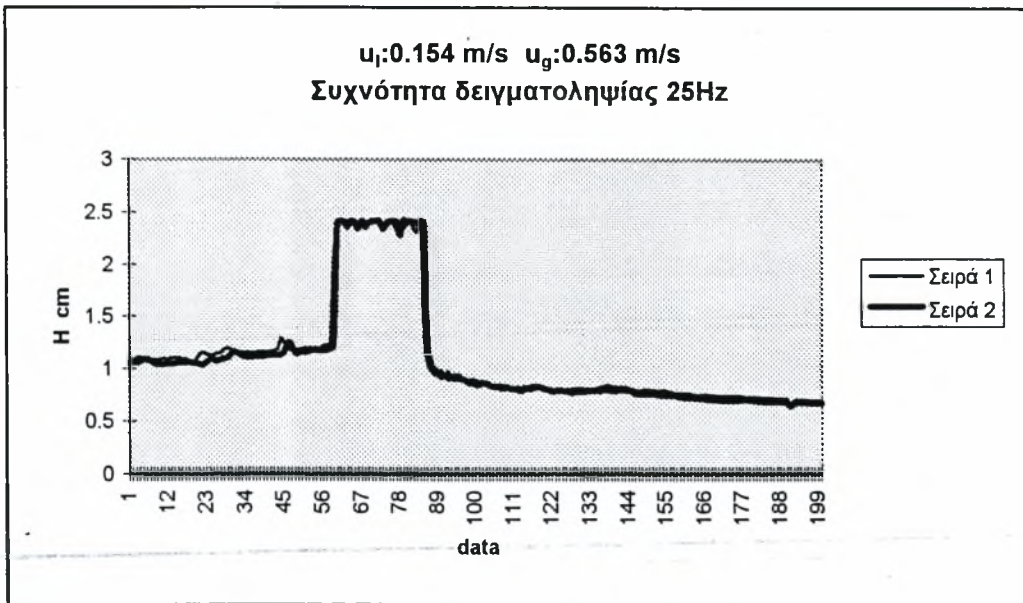
Οι στατιστικές ιδιότητες των πειραμάτων εμφανίζονται στον Πίνακα Π5.1.

Ταχύτητα νερού-αέρα (m/s)	Στατιστικά αποτελέσματα			
	Μέσο ύψος υγρής στοιβάδας (cm)	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τυπική απόκλιση
$u_L=0.043 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=2.385 \text{ m/s}$	0.975	1.060	0.901	0.034
$u_L=0.030 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=5.634 \text{ m/s}$	0.526	0.643	0.435	0.042
$u_L=0.034 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=7.245 \text{ m/s}$	0.302	0.677	0.136	0.111
$u_L=0.055 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=6.872 \text{ m/s}$	0.435	1.301	0.212	0.145
$u_L=0.066 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=6.872 \text{ m/s}$	0.508	1.096	0.331	0.148
$u_L=0.061 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=6.872 \text{ m/s}$	1.165	2.400	0.680	0.324
$u_L=0.030 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=10.99 \text{ m/s}$	0.212	0.595	0.060	0.108
$u_L=0.135 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=3.660 \text{ m/s}$	0.784	1.528	0.554	0.165
$u_L=0.154 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=0.563 \text{ m/s}$	1.098	2.400	0.653	0.526
$u_L=0.154 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=1.474 \text{ m/s}$	0.852	2.371	0.583	0.390
$u_L=0.184 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=0.563 \text{ m/s}$	1.114	2.400	0.739	0.556
$u_L=0.184 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=1.474 \text{ m/s}$	0.886	2.274	0.581	0.329
$u_L=0.246 \text{ m/s} \text{ --- } u_G=0.927 \text{ m/s}$	0.878	2.400	0.609	0.505

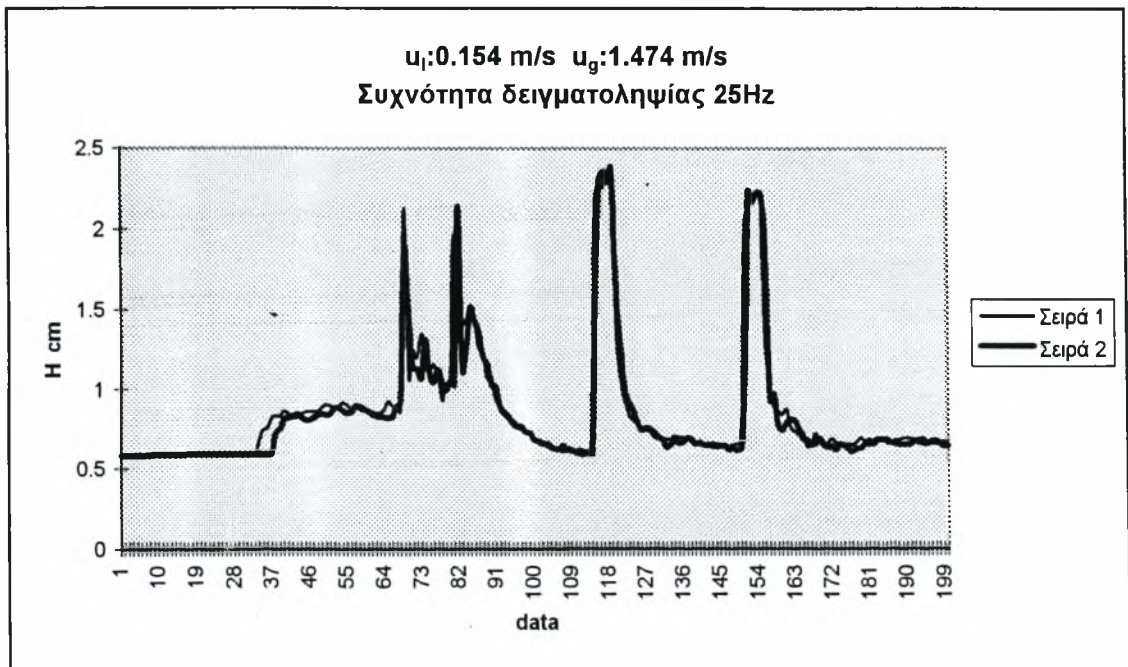
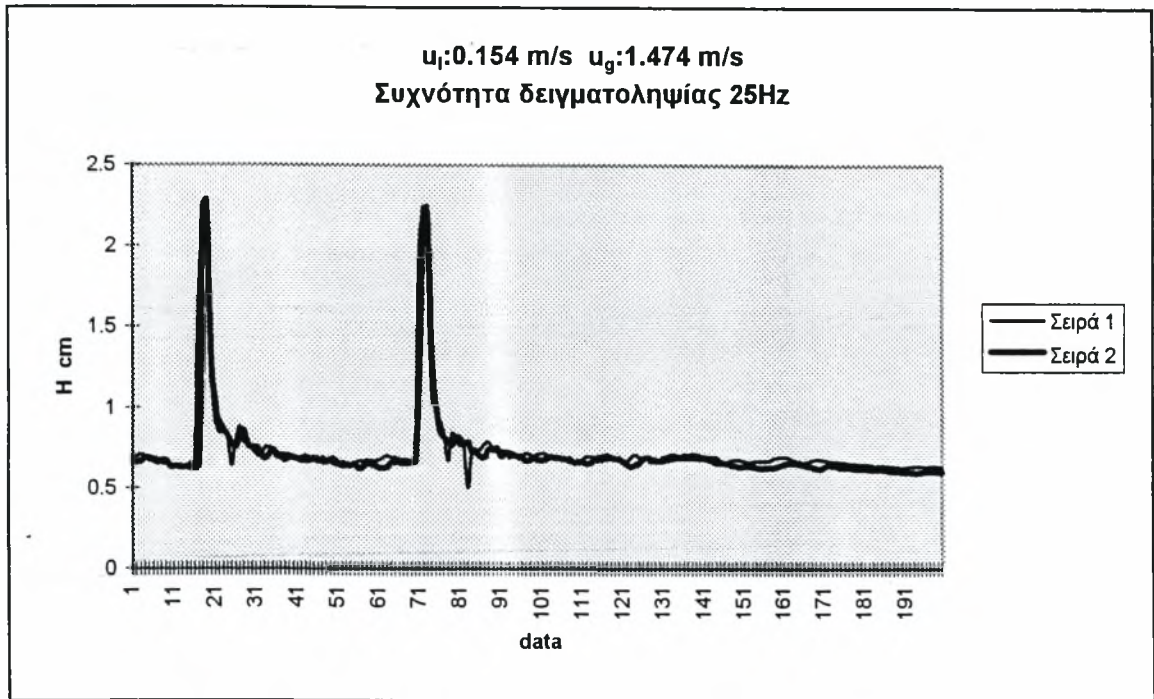
Πίνακας Π5.1 Στατιστικά αποτελέσματα



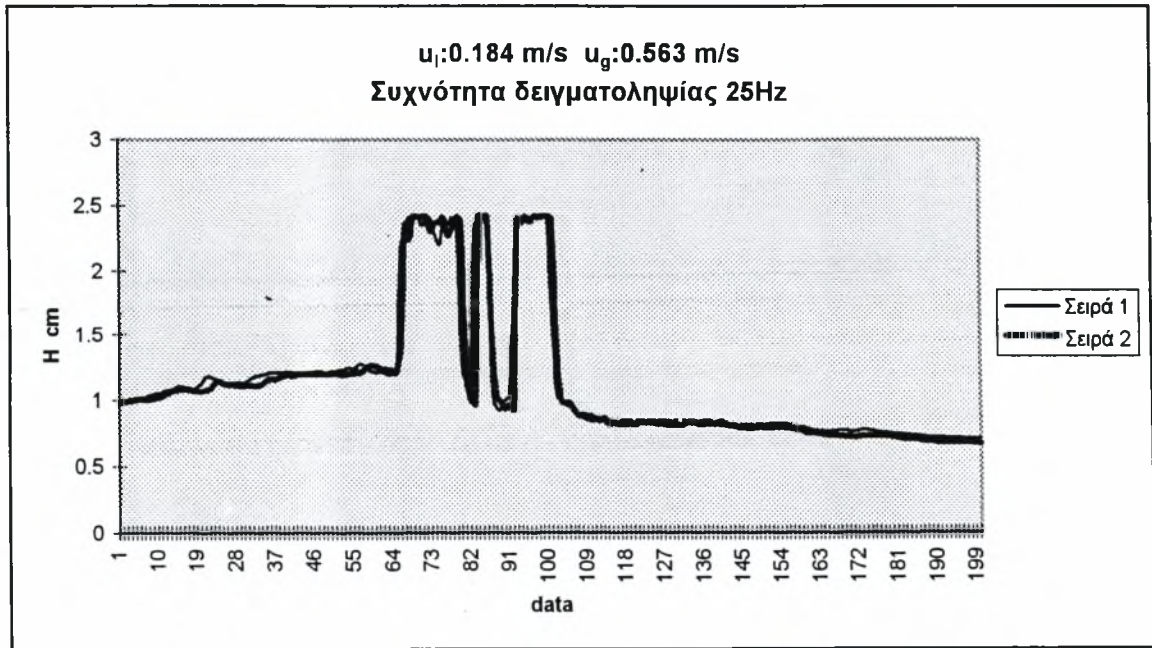
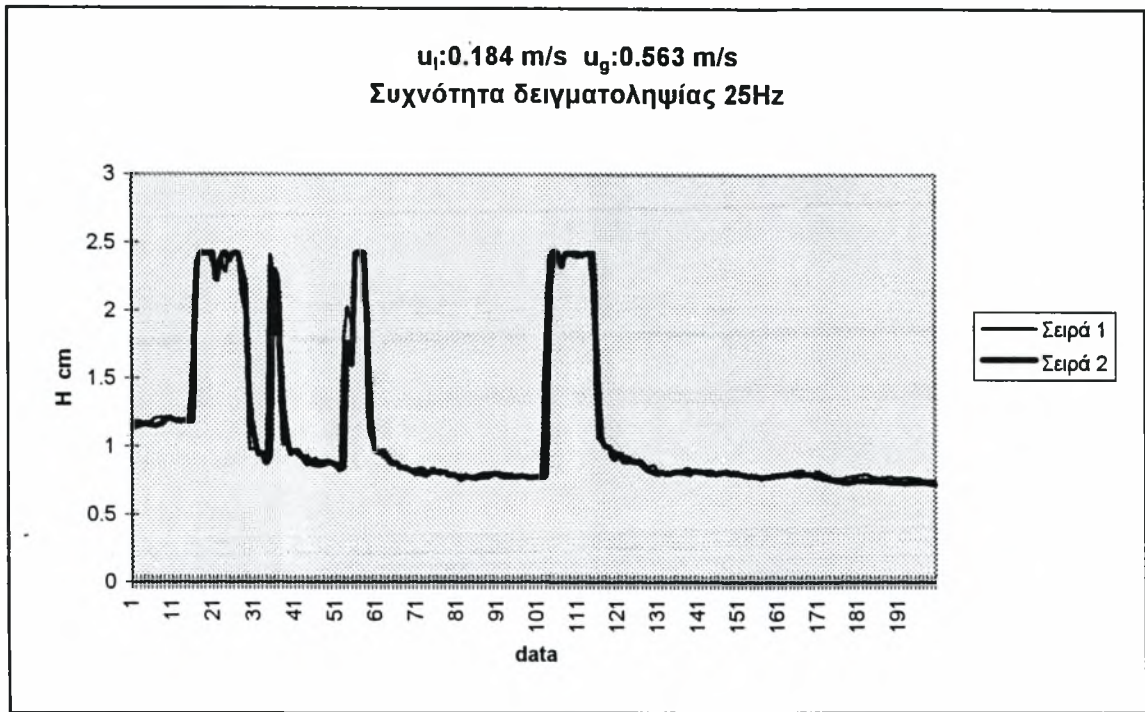
Σχήμα 5.11 Ψευδοδιαλείπουσα ροή-ετεροσυσχέτιση



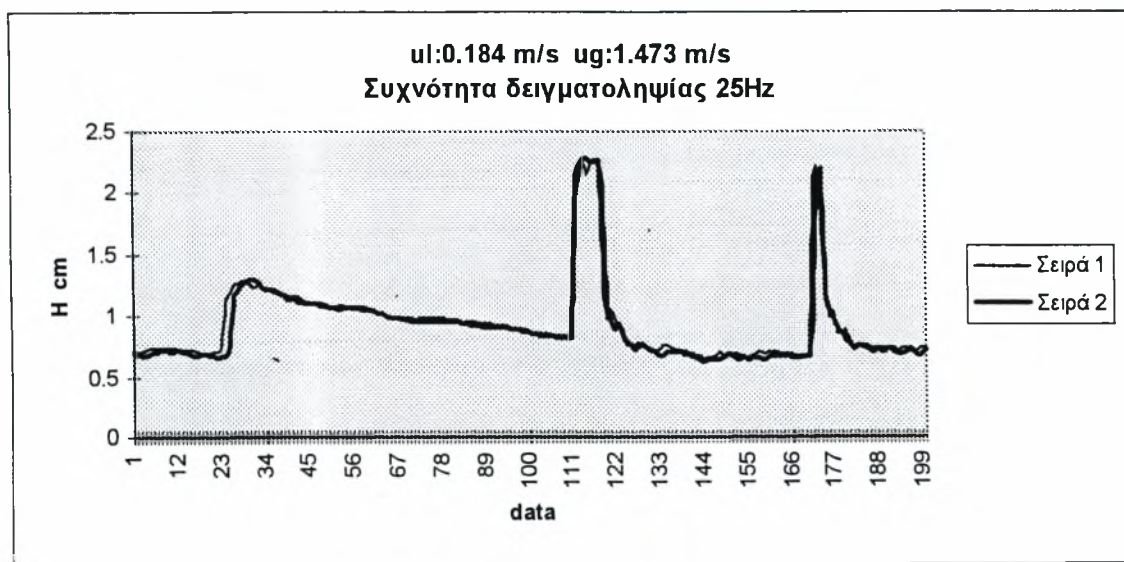
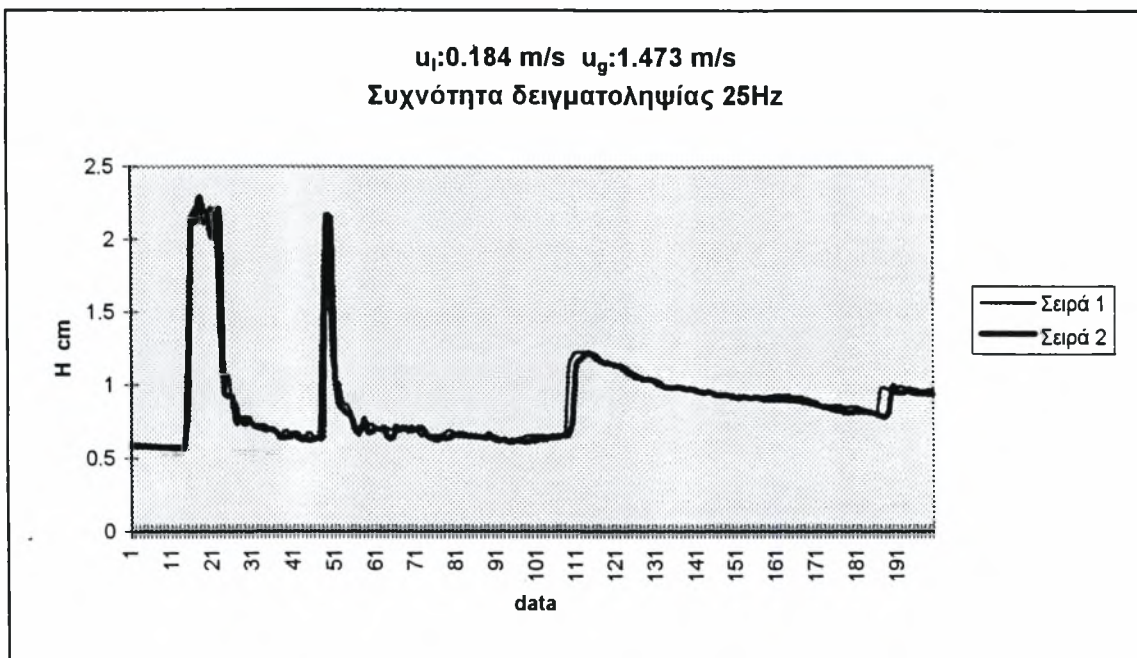
Σχήμα 5.12 Διαλείπουσα ροή-ετεροσυσχέτιση



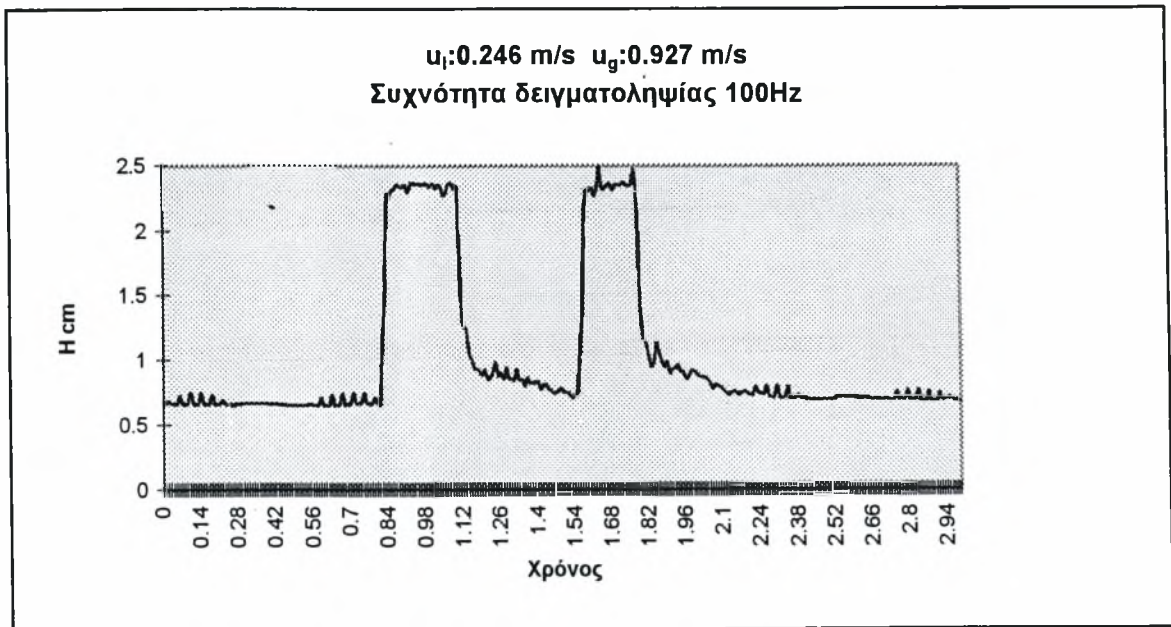
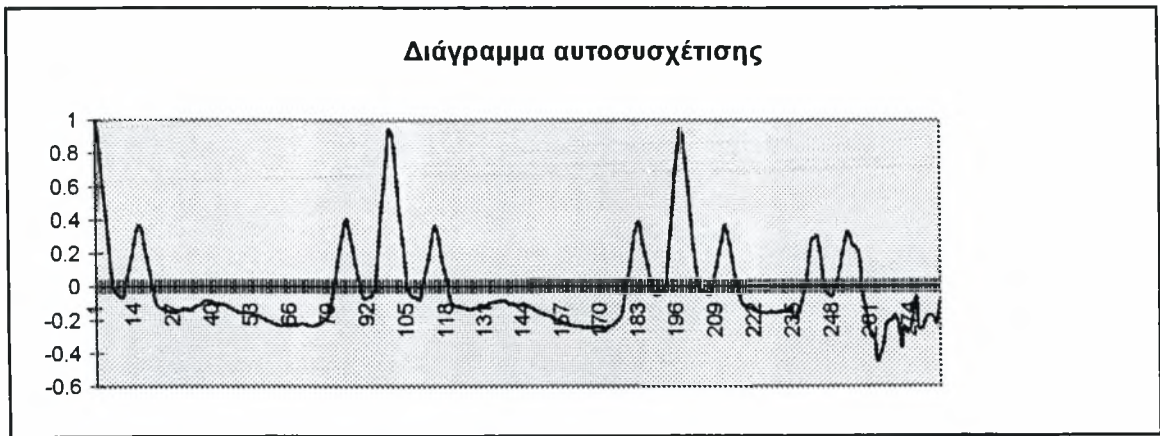
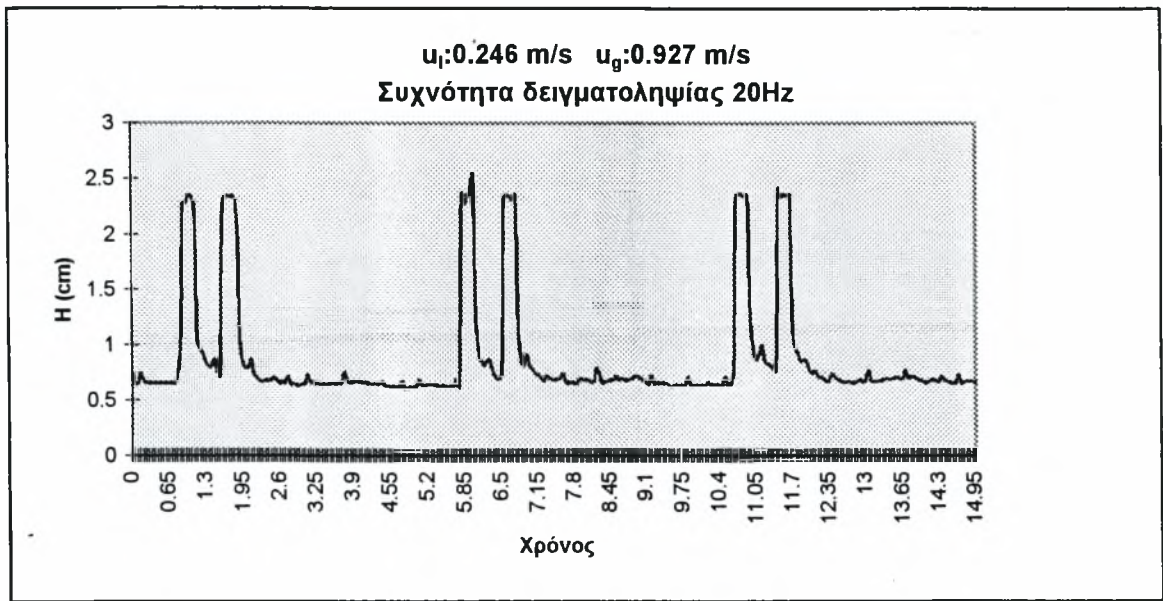
Σχήμα 5.13 Διαλείπουσα ροή



Σχήμα 5.14 Διαλείπουσα ροή



Σχήμα 5.15 Διαλείπουσα ροή



Σχήμα 5.16 Διαλείπουσα ροή



### 5.3 Σύνοψη συμπερασμάτων-προτάσεις

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η πληρέστερη κατανόηση της διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό με την χρήση της αγωγιμομετρικής διάταξης.Οι μετρήσεις των διαφόρων χαρακτηριστικών μεγεθών μαζί με τις οπτικές παρατηρήσεις συμπληρώνουν την εικόνα της διφασικής ροής σε διάφορες περιοχές.

Με τη χρήση της αγωγιμομετρικής διάταξης επιβεβαιώθηκε η γραμμικότητα που συνδέει την αγωγή ρεύματος μεταξύ των συρμάτων με το πάχος της στοιβάδας.Καταγράφηκαν οι μεταβολές του πάχους της υγρής φάσης που χαρακτηρίζουν αντίστοιχα πρότυπα ροής.Έτσι διακρίνουμε την στρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα όπου αύξηση της ταχύτητας του αερίου είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας των κυμάτων διαταραχής.Κατά τον σχηματισμό των τρισδιάστατων κυμάτων η εξέλιξη του φαινομένου ήταν πιο γρήγορη και οι τυπικές αποκλίσεις μεγαλύτερες από ότι στα διδιάστατα κύματα.Στη διαλείπουσα ροή η εμφάνιση-μορφή των *slugs* (πολλές φορές μεγάλου μήκους) φαίνεται να μην μπορεί να προβλεφθεί ακριβώς παρόλα αυτά όπως αναφέραμε ακολουθούν μια κανονικότητα.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρον θα είχε η ταυτόχρονη μέτρηση των μεταβολών της πίεσης και του πάχους της υγρής στοιβάδας προς την πληρέστερη κατανόηση της διφασικής ροής καθώς και για τον σχηματισμό μιας ποιοτικής η ακόμα καλύτερα ποσοτικής σχέσης των δύο μεγεθών.Άλλη μια πρόταση για μελλοντική διπλωματική εργασία θα ήταν η εξέταση των *slugs* ως προς την δυναμική τους συμπεριφορά και κατασκευή διαγραμμάτων ετεροσυσχέτισης- αυτοσυσχέτισης στην διαλείπουσα ροή για την μέτρηση του πάχους τους.Συνίσταται επίσης η μέτρηση του πάχους της δακτυλιοειδούς ροής όπου απαιτείται η χρήση ειδικών συρμάτων.

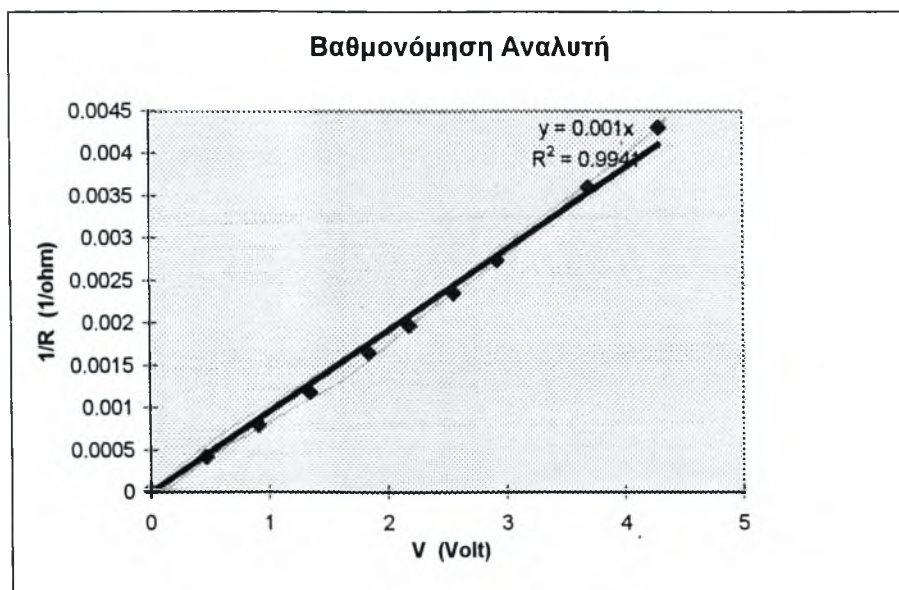
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Nikolaos Andritsos 'Effect of pipe diameter and liquid viscosity n horizontal flow-1986'
- John G Collier and John R Thome 'Convective boiling and condensation-1994'
- H.C. Kang and M.H. Kim 'The development of a flush-wire probe calibration method for measuring liquid film thickness-1991'
- J.Shi  
G Kocamustafaogullari 'Interfacial measurements in horizontal stratified flow patterns-1994'
- A.Pagliant,M.Giona and A.Soldati 'Characteriztion of subregimes in two-phase slug flow-1996'
- Nencini,R.M. Andreussi 'Study of the behavior of large disturbance wave in annular two phase flow-1983'
- Hewitt,G.F. ,Jayanti,S. Hope,C.B. 'Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow-1990'
- Θοδωρής Καραπάντσιος 'Μελέτη των χαρακτηριστικών ροής λεπτής στοιβάδας υγρού σε κατακόρυφο σωλήνα-1987'
- Σπύρου Β. Παρά 'Μελέτη δακτυλιειδούς διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό-1991'
- Κωνσταντίνος Καραμάνος 'Διφασική ροή αέρα-νερού σε οριζόντιο αγωγό-1997'

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α  
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

## Βαθμονόμηση αναλυτή:

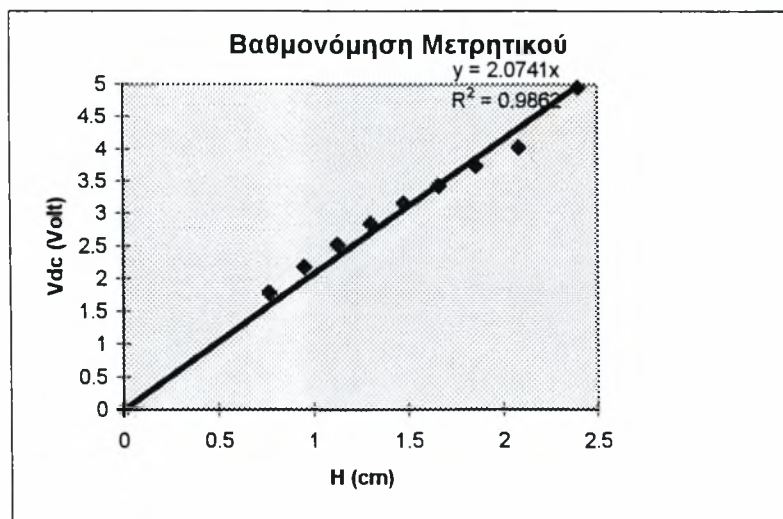
V	1/R	R (ohm)
0	2.64550E-04	37800
0.47	0.000416667	2400
0.91	0.000792393	1262
1.34	0.001180638	847
1.84	0.001650165	606
2.18	0.001972387	507
2.55	0.002352941	425
2.92	0.002739726	365
3.69	0.003597122	278
4.29	0.004310345	232



Σχήμα Α.1 Διάγραμμα βαθμονόμησης του αναλυτή

## Βαθμονόμηση Μετρητικού στοιχείου:

V (ml)	H (cm)	Vdc \	19C-2.35ΠS
0	0	0	
30	0.768	1.78	
40	0.95	2.18	
50	1.125	2.51	
60	1.299	2.84	
70	1.475	3.15	
80	1.657	3.43	
90	1.854	3.74	
100	2.08	4.03	
	2.4	4.95	



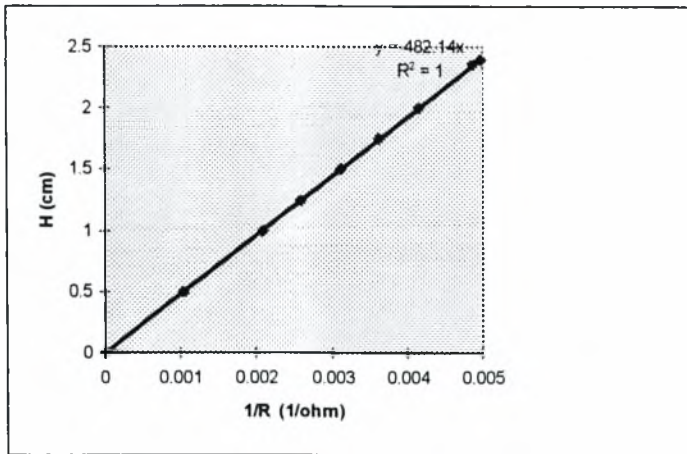
Σχήμα Α.2 Βαθμονόμηση μετρητικού στοιχείου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Βαθμονόμηση:

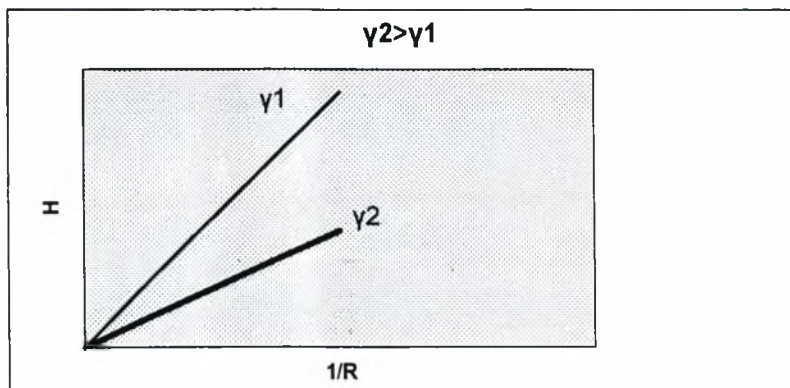
1/R (1/ohm)	H (cm)
0	0
0.001037	0.5
0.002074	1
0.002593	1.25
0.003111	1.5
0.00363	1.75
0.004148	2
0.004874	2.35
0.004978	2.4

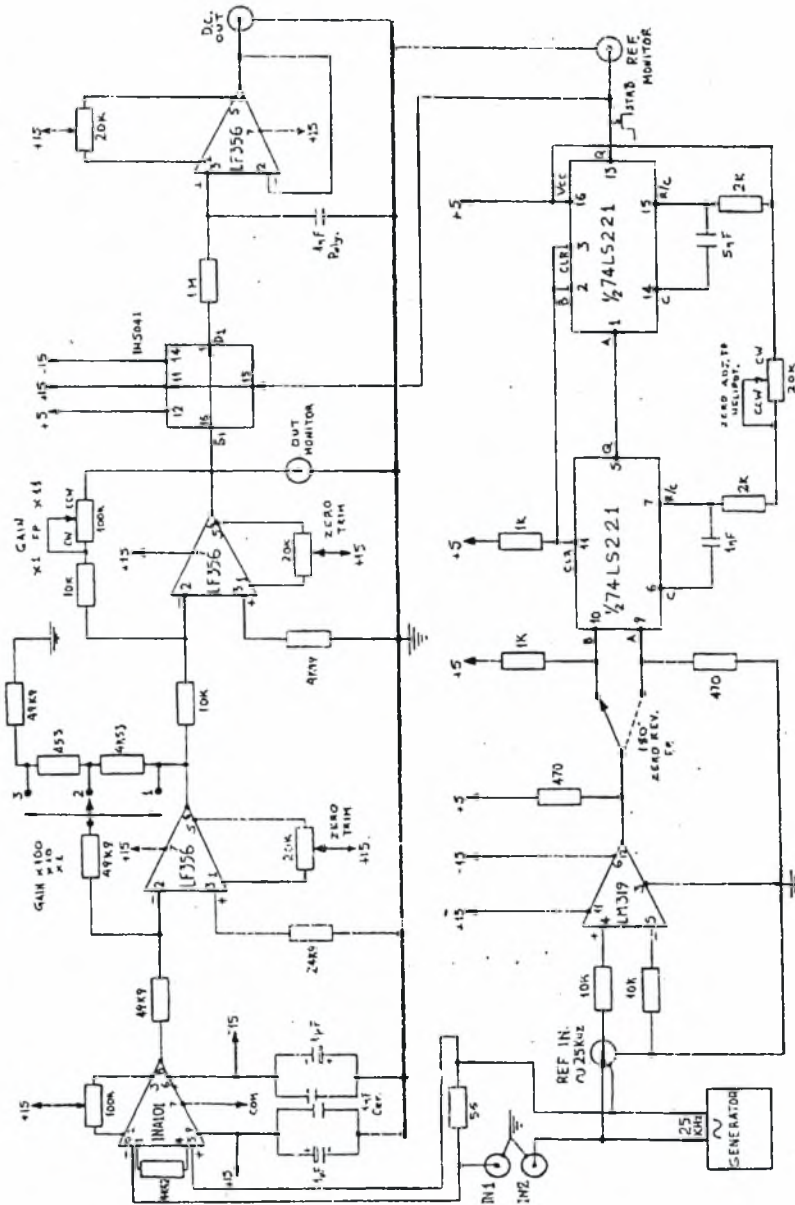
$$1/R = 0.001 * 2.0741 * H \quad \text{ή} \quad H = \frac{1}{0.001 * 2.0741 * R}$$



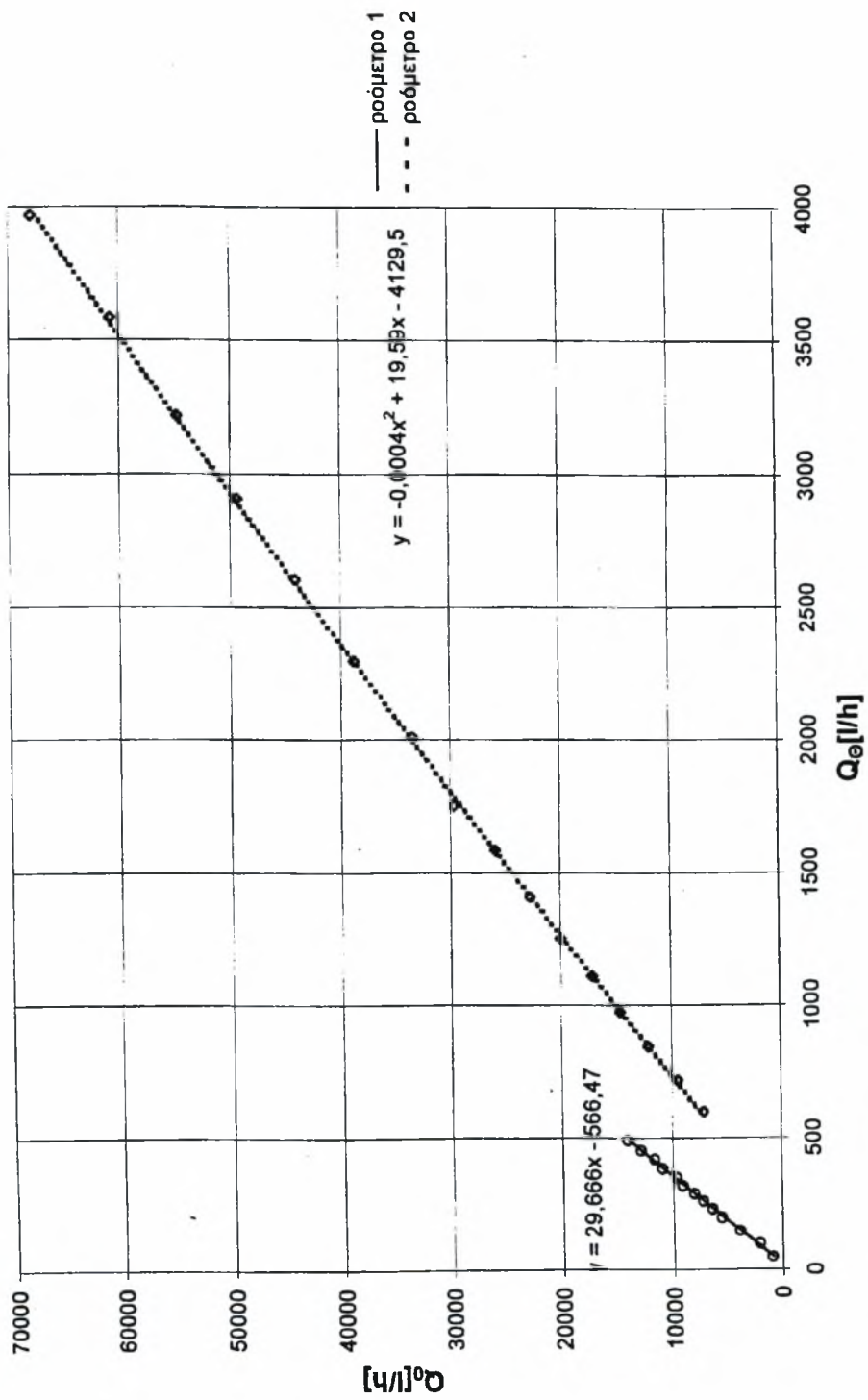
Σχόλια:

Αύξηση της θερμοκρασίας  $T$  οδηγεί σε αύξηση της αγωγιμότητας  $\gamma$  κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή της γραμμικής σχέσης  $H-1/R$  που προκύπτει πειραματικά.



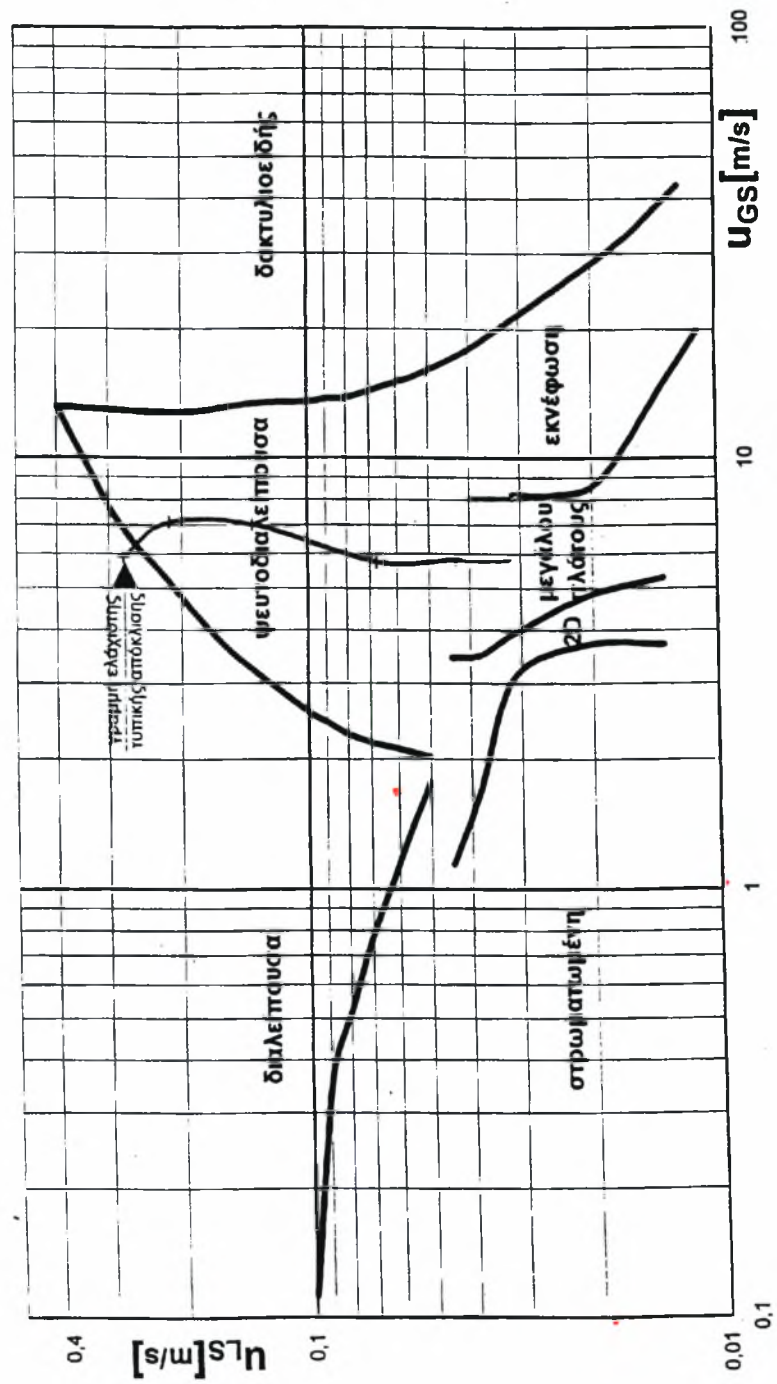


Σχήμα Α.3 Κύκλωμα αναλυτή



Σχήμα Α.4 Βαθμονόμηση ροόμετρων





Σχήμα Α.5 Χάρτης περιοχών ροής διφασικού μίγματος νερού/αέρα σε οριζόντια σωλήνα διαμέτρου 2.4cm

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β  
ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΙΑ Α/D ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ  
ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗ-ΕΤΕΡΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗ  
ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΟΥΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```
/*
*****
* Πρόγραμμα:      ADCON.C                               *
* Περιγραφή : πρόγραμμα για την PCL-818L για A/D μετατροπή *
*                σήματος                                *
*                                                        *
*                                                        *
*****
*/
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>

extern pcl818L(int, unsigned int *);
unsigned int param[60];
unsigned int data[100];
unsigned int far * dat;
main()
{
    FILE *fp;
    unsigned int i;
    int loop = -1;
    float    DataBuf, pacer;

    clrscr() ;

    printf("Pacer rate(Hz) = 1M / (param5 * param6)\n");
    printf("Give the value of param5\n");

    scanf("%u", &param[5]);

    printf("Give the value of param6\n");

    scanf("%u", &param[6]);

    printf("Give me the number of A/D conversion\n");

    scanf("%u", &param[14]);

    printf("Give the overall gain code:\n");
    printf("0 for +-10V Input range\n");
    printf("1 for +-5V      "  "\n");

    scanf("%u", &param[17]);

    dat = data;
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```

param[0] = 0;          /* Board number          */
param[1] = 0x300;     /* Base I/O address     */
/* param[5] = 20;      Pacer rate = 1M / (500 * 100) = 20 Hz
param[6] = 10;       */
param[7] = 0;        /* Trigger mode, 0 : pacer trigger */
param[10] = FP_OFF(dat); /* Offset of A/D data buffer A */
param[11] = FP_SEG(dat); /* Segment of A/D data buffer A */
param[12] = 0;       /* Data buffer B address, if not used, */
param[13] = 0;       /* must set to 0. */
/* param[14] = 50;    A/D conversion number */
param[15] = 0;       /* A/D conversion start channel */
param[16] = 1;       /* A/D conversion stop channel */
/* param[17] = 0;     Overall gain code, 0 : +/- 10V */

/* param[18] = FP_OFF(gain_array);
   param[19] = FP_SEG(gain_array); */

/* param[45] : Error code
   param[46] : Return value 0
   param[47] : Return value 1 */

pcl818L(3, param);    /* Func 3 : Hardware initialization */
if (param[45] != 0) {
    printf(" DRIVER INITIALIZATION FAILED !");
    exit(1);
}

pcl818L(100, param);  /* Func 4 : A/D initialization */
if (param[45] != 0) {
    printf(" A/D INITIALIZATION FAILED !");
    exit(1);
}

pcl818L(101, param); /* Func 5 : "N" times of A/D trigger */
if (param[45] != 0) {
    printf(" A/D SOFTWARE DATA TRANSFER FAILED !");
    exit(1);
}

fp= fopen("results", "a+");
pacer=1000000/(param[5]*param[6]);
fprintf(fp , "\nNumber of A/D conversion=%3d,Pacer rate=%5.2f\n",
param[14],pacer);
for (i = 0; i < param[14]; i++) /* Display data */
{
    DataBuf = data[i] & 0xFFF;
    DataBuf =( (10 - (-10)) * DataBuf / 4096) + (-10);
    /*
       (10 - (-10)) : A/D input range (-10V to 10V)
       4096      : Full scale 12 bit A/D data
       DataBuf   : A/D input data
    */
}

```

```

        (-10)      : A/D input range "-10" V
        */
        loop=loop+1;
        if( loop == 1 )
        {
        fprintf(fp , "data[%3d] = % 1.2f V \n", i, DataBuf);
        loop=-1;
        }
        else
        fprintf(fp , "data[%3d] = % 1.2f V ", i, DataBuf);

        }
        fclose(fp);
}

```

### ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ADCON.C

Το παραπάνω πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα μετατροπής ψηφιακού σήματος σε αναλογικό σε συνεργασία με την κάρτα συλλογής δεδομένων PCL-818L.

Πρέπει να τονίσουμε ότι πριν εκτελέσουμε το παραπάνω πρόγραμμα απαιτείται η έναρξη του οδηγού(driver) κάτι το οποίο γίνεται τυπώνοντας σε DOS περιβάλλον το όνομα του οδηγού δηλαδή PCL-818L. Σε αυτό το σημείο πλέον είμαστε έτοιμοι να τρέξουμε το πρόγραμμα με βάση της παραμέτρους που του έχουμε καθορίσει.

Συγκεκριμένα η παράμετρος 15 (param[15]) καθορίζει τον αριθμό του καναλιού από το οποίο θα αρχίσει να διαβάζει δεδομένα η κάρτα. Αντίστοιχα η παράμετρος 16 δηλώνει τον αριθμό του καναλιού στο οποίο σταματάει η συλλογή δεδομένων. Αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε μόνο ένα κανάλι τότε η παράμετρος 16 θα πρέπει να έχει την ίδια τιμή με αυτή της 15.

Μια άλλη σημαντική επίσης ρύθμιση είναι το Channel gain δηλαδή η παράμετρος 17. Θέτοντας την τιμή 0 το εύρος τιμών θα είναι +/- 10V. Αν βάλουμε την τιμή 1 το εύρος περιορίζεται στα +/- 5V.

Ο αριθμός των δειγματοληψιών καθορίζεται από την παράμετρο 24 και μπορεί να πάρει τιμές από 1 ως 32767. Επίσης σημαντικό είναι η συχνότητα δειγματοληψίας(pacer rate) η οποία καθορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Pacer rate} = (\text{card base frequency}) / C1 * C2$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

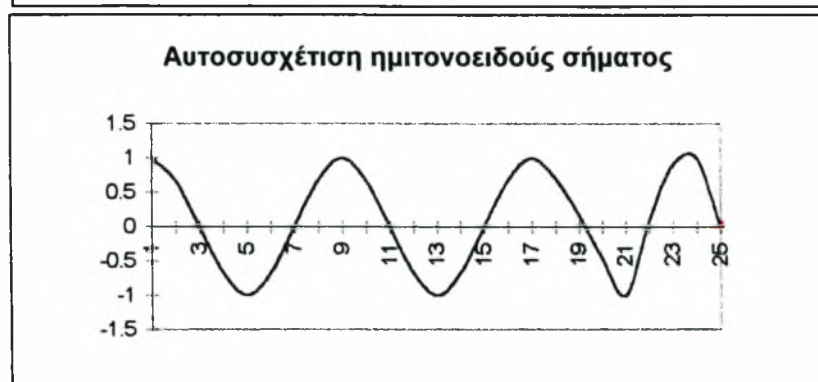
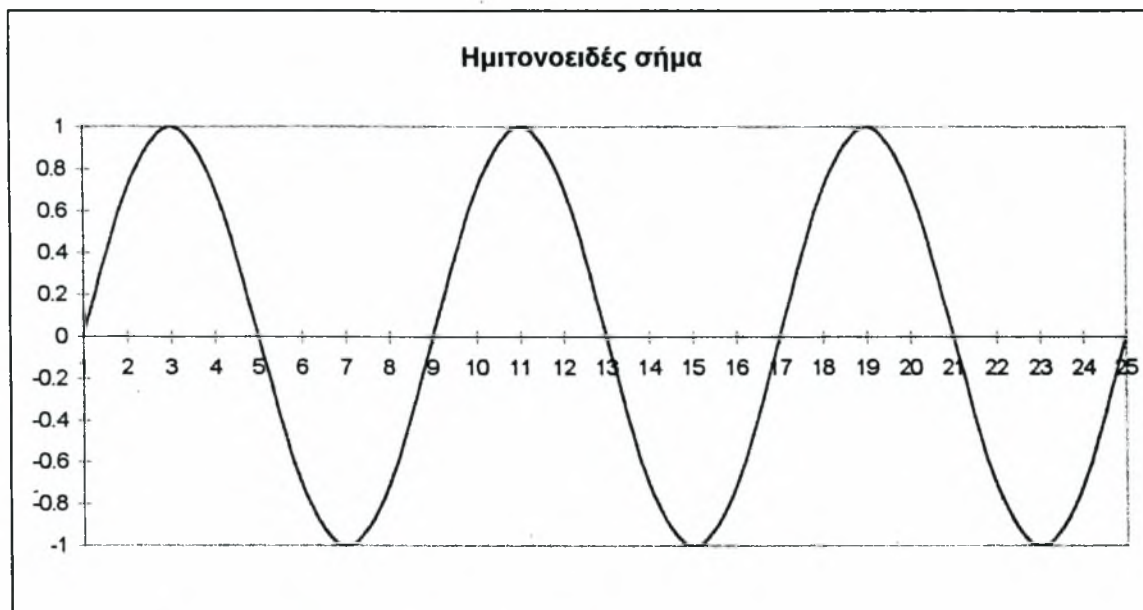
Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο X η τιμή της συχνότητας της κάρτας ρυθμίζεται από τον JP2 και έχει προεπιλεχθεί η συχνότητα των 1MHz. Η σταθερές C1 και C2 δηλώνονται αντίστοιχα από τις παραμέτρους 5-6 και οι αποδεκτές τιμές αυτών είναι από 0 ως 65535.

Επειδή κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες συχνότητες καθώς και αριθμός δειγματοληψιών, κρίθηκε σκόπιμο η διαμόρφωση της δομής του προγράμματος με τέτοιο τρόπο ώστε η παράμετροι 5-6 και 14 να δηλώνονται κάθε φορά από τον χρήστη κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Έτσι αποφεύχθηκε η χρονοβόρα επέμβαση στον κώδικα καθώς και στην μεταγλώττιση (compiling).

Στη συνέχεια το πρόγραμμα καλώντας την συνάρτηση 3 (Func 3) ελέγχει για το αν έχουμε φορτώσει τον οδηγό και σε περίπτωση σφάλματος λαμβάνουμε το μήνυμα 'Hardware initialization'.

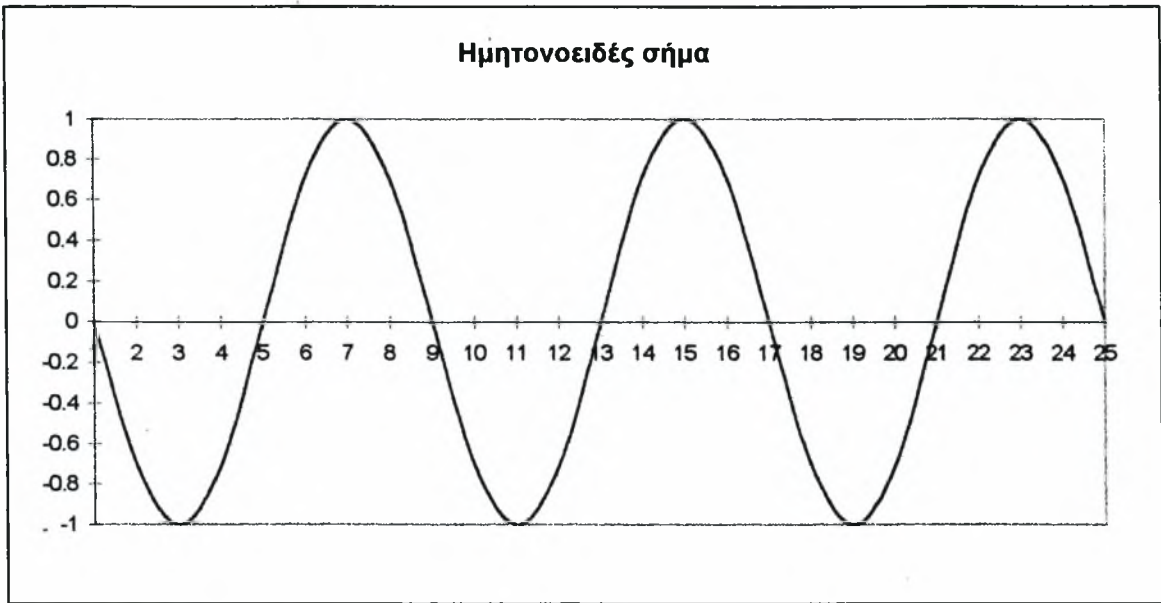
Οι συναρτήσεις 100 και 101 αναλαμβάνουν την ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων από ένα σύνολο καναλιών μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός των A/D μετατροπών.

Τα αποτελέσματα τυπώνονται στο αρχείο Results.dat το οποίο μπορούμε στη συνέχεια να επεξεργαστούμε.



Από το διάγραμμα της αυτοσυσχέτισης προκύπτει ότι μετά από εννέα σημεία έχουμε επανάληψη του σήματος (τιμή 1 στον άξονα του Y) κάτι το οποίο επαληθεύετε και από το διάγραμμα του ημιτονοειδούς σήματος.

Για τον σχηματισμό του διαγράμματος της ετεροσυσχέτισης θα χρησιμοποιήσουμε και το παρακάτω ημιτονοειδές σήμα το οποίο παρουσιάζει διαφορά φάσης από εκείνο του **Σχήματος Β1** κατά  $\pi$ .



Αυτή η διαφορά φάσης αντιστοιχεί σε πέντε σημεία του άξονα των Χ.Απο το παρακάτω διάγραμμα διαπιστώνεται η παραπάνω παρατήρηση καθώς επίσης και η πλήρη 'εφαρμογή' των δύο σημάτων (τιμή 1 του άξονα των Υ).

