



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Βιομηχανίας

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών

Διεργασιών

Διπλωματική Εργασία

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

ΜΕΛΕΤΗΣ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ

υπό

ΣΤΑΘΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

ΒΟΛΟΣ 2007



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

Αριθ. Εισ.: 5241/1
Ημερ. Εισ.: 23-03-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2007
ΣΤΑ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Βιομηχανίας

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών

Διεργασιών



ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

ΜΕΛΕΤΗΣ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ

ΣΤΑΘΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

ΒΟΛΟΣ 2007

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

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

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Βλαχογιάννης Μιχαήλ, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός,
(επιβλέπων) Διδάσκων (Π.Δ. 407/80) Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Μποντόζογλου Βασίλης, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός,
Αναπληρωτής Καθηγητής Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Ανδρίτσος Νικόλαος, Δρ. Χημικός Μηχανικός, Επίκουρος
Καθηγητής Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κλείνοντας αυτό τον κύκλο σπουδών μου θέλω να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες του τμήματός μας για τη γνώση αλλά προπάντων τον τρόπο σκέψης που μου μετέδωσαν, ειδικότερα, τα δύο μέλη ΔΕΠ του εργαστηρίου κ. Β. Μποντόζογλου και κ. Ν. Ανδρίτσο. Βαθειά ευγνωμοσύνη εκφράζω στον καθηγητή μου, τον κ. Μιχάλη Βλαχογιάννη που από το τρίτο έτος με εμπιστεύτηκε για τη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, για την άψογη συνεργασία, για την πάντα φιλική διάθεση, αλλά κυρίως, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ δίπλα του αποκομίζοντας μια σημαντική επαγγελματική και τεχνική εμπειρία που θα αποτελέσει δυνατό εφόδιο για την μελλοντική μου πορεία. Ακόμη, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον τεχνικό του εργαστηρίου μηχανουργικών κατεργασιών κ. Αθανάσιο Βέργο για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε κατά τη διάρκεια της κατασκευής της διάταξης.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ

ΣΤΑΘΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βλαχογιάννης Μιχαήλ, Δρ Μηχανολόγος Μηχανικός ΠΘ
Διδάσκων (Π.Δ. 407/80) Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Η ροή υγρού υμένα είναι ένα φαινόμενο που συναντάται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. Κυριότερο πεδίο εφαρμογής είναι οι συσκευές εναλλαγής θερμότητας ή μάζας. Η μελέτη της συγκεκριμένης ροής αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας για πολλούς επιστήμονες ανά τον κόσμο.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του κ. Μ. Βλαχογιάννη κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η διάταξη απαρτιζόταν από ένα κανάλι ροής μήκους 0,8 m και ενός συστήματος ψηφιακής απεικόνισης. Η δημιουργία και η διάδοση κυμάτων στην επιφάνεια του κινούμενου ρευστού, λόγω βαρύτητας, αποτελεί τον κεντρικό άξονα αυτής της μελέτης. Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων έδειξαν την ανάγκη παρατήρησης της δυναμικής εξέλιξής τους σε ένα μεγάλο μήκος ροή που υπερέβαινε κατά πολύ τις δυνατότητες της συγκεκριμένης συσκευής. Ξεκίνησε έτσι, μια προσπάθεια κατασκευής ενός καναλιού μήκους 3 m στο ίδιο εργαστήριο. Η πειραματική διάταξη βασίζεται σε μεταλλική κατασκευή και πλαισιώνεται από ένα υδραυλικό και ηλεκτρολογικό σύστημα που επιτρέπει τη μελέτη της ροής υδάτινου υμένα πάνω σε επίπεδο τοίχωμα πλάτους 0,52 m και μήκους 3 m. Ο τρόπος ψηφιακής απεικόνισης για τον υπολογισμό του πάχους του υμένα είναι ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο κανάλι. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια λεπτομερής αναφορά στην κατασκευή της συσκευής και τον τρόπο χρήσης της, με αναλυτική έκθεση φωτογραφιών και τεχνικών σχεδίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

• ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	4
• ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: “ΕΙΣΑΓΩΓΗ”	7
• ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: “ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ”	9
○ 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
○ 2.2 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΝΟΜΟΙ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΡΟΗ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ.....	10
○ 2.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΕΙΑ.....	13
○ 2.4 Η ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ.....	14
○ 2.5 ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ: ΘΕΩΡΙΑ.....	15
○ 2.6 Η ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....	18
○ 2.7 Η ΠΡΩΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΧΔ.....	26
▪ 2.7.1 Δημιουργία εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.....	27
▪ 2.7.2 Ιδιότητες ρευστών.....	31
▪ 2.7.3 Παράμετροι του πειράματος.....	32
▪ 2.7.4 Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό.....	33
○ 2.8 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ.....	36
▪ 2.8.1 Εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή.....	37
• ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: “ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ”	42
○ 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	42
○ 3.2 Η ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	42
▪ 3.2.1 Η μεταλλική βάση.....	42
▪ 3.2.2 Μέθοδοι μέτρησης.....	43
▪ 3.2.3 Κατασκευή του ικριώματος.....	44
▪ 3.2.4 Κατασκευή υπερκείμενων εγκαταστάσεων.....	46
▪ 3.2.5 Βαφή μεταλλικών μερών.....	47
▪ 3.2.6 Τεχνικές κατεργασίας διαμορφωμένου σιδήρου.....	47
○ 3.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ PLEXIGLAS.....	48
▪ 3.3.1 Το δοχείο υπερχείλισης και η χοάνη απορροής.....	50
▪ 3.3.2 Οι δεξαμενές απορροής-απάντλησης &	

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

απορροής-υπερχείλισης.....	51
○ 3.4 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ.....	54
○ 3.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ.....	56
○ 3.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	60
▪ 3.6.1 Έλεγχος υδραυλικού κυκλώματος.....	60
▪ 3.6.2 Ρύθμιση κλίσης καναλιού.....	62
▪ 3.6.3 Οριζοντίωση του υμένα.....	66
○ 3.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.....	72
• ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- **Σχήμα 2.1:** Σχηματική απεικόνιση του κεκλιμένου τοιχώματος και του ρέοντος υμένα. Ορισμός του ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, του προφίλ ταχύτητας του υμένα, της κατανομής των τάσεων σε αυτό και του ύψους του
- **Σχήμα 2.2:** Απεικόνιση των τεσσάρων περιοχών του κύματος, κατά την εξέλιξή του, κατά την ροή ενός υγρού υμένα σε ένα κεκλιμένο επίπεδο. Η παράμετρος ω είναι η συχνότητα του κύματος.
- **Σχήμα 2.3:** Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής
- **Σχήμα 2.4:** Η ανάπτυξη σολιτονικών κυμάτων κατάντη της ροής, όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα
- **Σχήμα 2.5:** Η εξάρτηση του μεγέθους των σολιτονικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατάντη της ροής
- **Σχήμα 2.6:** Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη αποστάσεως
- **Σχήμα 2.7:** Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιορισμένα όρια των διαφόρων ασταθειών.
- **Σχήμα 2.8:** Η συγχώνευση μεταξύ δύο σολιτονικών κυμάτων, με τη μορφή εικόνων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.
- **Σχήμα 2.9:** Η ανάπτυξη των δευτερευουσών ασταθειών (subharmonic-sideband) στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με αποτέλεσμα τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων.
- **Σχήμα 2.10:** Ο διαχωρισμός των τρισδιάστατων ασταθειών στο διάγραμμα συχνότητά τους συναρτήσει του αριθμού Reynolds.
- **Σχήμα 2.11:** Το αποτέλεσμα επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία της δομής ψαροκόκαλο (herringbone pattern).
- **Σχήμα 2.12:** Η δημιουργία δομών πλήρους αταξίας (disorder patterns) εξαιτίας της επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών.
- **Σχήμα 2.13:** Η 1^η πειραματική διάταξη
- **Σχήμα 2.14:** Τα κύρια τμήματα της πειραματικής διάταξης: **a.** Το κανάλι ροής **b.** Δοχείο υπερχειλίσης **c.** Δοχείο συλλογής **d.** Δοχείο κατανομής **e.** Χειροκίνητη βάνα **f.** Πλάκα προσαρμογής (κυματοειδές τοίχωμα)
- **Σχήμα 2.15:** Το σύστημα δημιουργίας των εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών και η μορφή της εξαγόμενης διαταραχής
- **Σχήμα 2.16:** Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

- **Σχήμα 2.17:** Η εξέλιξη του πάχους του υμένα κατάντη της ροής για απόσταση $D=28\text{mm}$ από το σημείο σχηματισμού του υμένα. Οι παράμετροι του πειράματος είναι: $Re=37$, $\varphi=5^\circ$, $Ka=1102$ και $t_1=1.0\text{sec}$.
- **Σχήμα 2.18:** Η εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ για $\varphi=7^\circ$, $Ka=3365$ (water) $D=644\text{mm}$, $t_1 = 0.5\text{s}$ και **a)** $Re=36$, **b)** $Re=63$
- **Σχήμα 3.1:** Η μεταλλική βάση που θα «υποδεχθεί» το ικρίωμα.
- **Σχήμα 3.2:** Το μεταλλικό ικρίωμα που αποτελεί τη βάση του καναλιού και της κάμερας.
- **Σχήμα 3.3:** Τρεις μεταλλικοί μεντεσέδες για τη σταθερή αλλαγή της κλίσης του καναλιού σε συνδυασμό με το ηλεκτρικό αναβατόριο
- **Σχήμα 3.4:** Οι μεταλλικές βάσεις της δεξαμενής (αριστερά) και του ηλεκτρικού αναβατορίου (δεξιά), και οι αντληστές ενίσχυσής τους.
- **Σχήμα 3.5:** Το κανάλι από Plexiglas
- **Σχήμα 3.6:** Σύσφιξη του καναλιού με τους κοιλοδοκούς και ρύθμιση της απόστασής του από το ικρίωμα
- **Σχήμα 3.7:** Το δοχείο υπερχείλισης με τις 7 απολήξεις προσαγωγής
- **Σχήμα 3.8:** Η χοάνη απορροής, με τους τρεις σωλήνες $\varnothing 1/2''$ που οδηγούν το νερό στη δεξαμενή απάντλησης
- **Σχήμα 3.9:** Η δεξαμενή απάντλησης με την εμβαπτιζόμενη αντλία για την ανακυκλοφορία του υγρού, και την έξοδο προς την αποχέτευση
- **Σχήμα 3.10:** Η δεξαμενή παροχής του υγρού στο κανάλι με το οποίο έχει υψομετρική διαφορά 3-4m.
- **Σχήμα 3.11:** Ο χρονιστής του συστήματος διαταραχής (αριστερά) και ο γενικός διακόπτης (δεξιά)
- **Σχήμα 3.12:** Οι ηλεκτροβαλβίδες ελεγχόμενες από το χρονιστή δημιουργούν το «υδραυλικό άλμα» στον υμένα
- **Σχήμα 3.13:** Το πάνελ με το συλλέκτη προσαγωγής του νερού
- **Σχήμα 3.14:** ΑΞΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΟΨΗ
- **Σχήμα 3.15:** ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ
- **Σχήμα 3.16:** ΠΡΟΣΟΨΗ
- **Σχήμα 3.17:** Η δίνη Venturi υπεύθυνη για την αναρρόφηση αέρα μέσα στο υδραυλικό κύκλωμα τροφοδοσίας του καναλιού.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμμένα

- **Σχήμα 3.18:** Η συνεχής εμφάνιση φυσαλίδων αέρα στο δοχείο υπερχειλίσης
- **Σχήμα 3.19:** Η μεταλλική βάση με το ηλεκτρικό αναβατόριο για την αλλαγή κλίσης του καναλιού
- **Σχήμα 3.20:** Οριζοντίωση της αφετηρίας του καναλιού από τους ρεγυλατόρους
- **Σχήμα 3.21:** Πέλματα σταθεροποίησης του ικριώματος μετά την οριζοντίωση
- **Σχήμα 3.22:** Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος αλλαγής της κλίσης
- **Σχήμα 3.23:** Διαδικασία οριζοντίωσης του καναλιού
- **Σχήμα 3.24:** Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωσης
- **Σχήμα 3.25:** Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωσης
- **Σχήμα 3.26:** Το οριζοντιωμένο κανάλι ροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην κατασκευή πειραματικής διάταξης για τη μελέτη των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα. Βασικοί στόχοι της εργασίας είναι η κατασκευή μιας νέας συσκευής και ο έλεγχος καλής λειτουργίας αυτής.

Λέγοντας ροή λεπτού υμένα υγρού, εννοούμε την ροή αυτή στην οποία το πάχος του ρευστού είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της. Η ικανότητα των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση είναι αυτή που έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση τους σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι, λεπτοί υμένες υγρού απαντώνται σε σημαντικές συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Το πεδίο ροής στον υμένα συχνά επηρεάζει έντονα τους ρυθμούς μεταφοράς και κατά συνέπεια καθορίζει το βαθμό απόδοσης των συσκευών. Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα παραδείγματα αποτελούν οι συμπυκνωτές ατμού - όπου συνήθως η κύρια αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας προβάλλεται από τον υμένα του συμπυκνώματος. Το προς συμπύκνωση υγρό εισέρχεται κατόπιν προθέρμανσης στο σύστημα των σωλήνων από τη βάση του. Για μικρή απόσταση το υγρό συνεχώς θερμαινόμενο ρέει ακολουθώντας ανοδική πορεία υπό τη μορφή υμένα, που καλύπτει το εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα, έως ότου αρχίσει ο βρασμός του, οπότε οι δημιουργούμενες φυσαλίδες αυξάνουν την ταχύτητα του υγρού και τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας. Το υμένιο του ολοένα συμπυκνούμενου υγρού αναρριχάται ταχύτατα στο τοίχωμα των σωλήνων, το οποίο θερμαίνεται από τον συμπυκνούμενο ατμό που κυκλοφορεί από την εξωτερική πλευρά των σωλήνων. Το μίγμα του συμπυκνούμενου υγρού και του παραγόμενου ατμού εισέρχεται στο διαχωριστή, όπου και διαχωρίζεται. Ο τύπος αυτός ονομάζεται **συμπυκνωτής ανερχόμενης στιβάδας**(ascending-film evaporators).

Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και ο συμπυκνωτής κατερχόμενης στιβάδας (falling-film evaporators), με τη διαφορά ότι το προς συμπύκνωση υγρό εισέρχεται στους σωλήνες από την κορυφή τους και εξέρχεται από τη βάση τους ως μίγμα συμπυκνούμενου υγρού-ατμού, οπότε και εισέρχεται στον διαχωριστή που βρίσκεται συνδεδεμένος στη βάση του εναλλάκτη. Επιπλέον παραδείγματα είναι οι εξατμιστήρες και οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις. Τα ίδια φαινόμενα ροής και ευστάθειας λεπτών υμένων καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και άλλων τεχνολογικών και περιβαλλοντικών συστημάτων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα τη συμπεριφορά

περύγων αεροπλάνων κατά την πτήση υπό συνθήκες βροχόπτωσης. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι επιθυμητή η εντατικοποίηση των φαινομένων αυτών ενώ σε άλλες η ελαχιστοποίησή τους.

Η μελέτη των φαινομένων που δημιουργούνται στη ροή υγρού υμένα πάνω στο επίπεδο τοίχωμα έχει γίνει αντικείμενο ενασχόλησης πολλών ερευνητών, τόσο με πειραματικές, όσο και με αναλυτικές μεθόδους. Η πρώτη πειραματική προσέγγιση της ροής που έγινε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του ΠΘ ήταν η διδακτορική διατριβή του κ. Μ. Βλαχογιάννη (1996-2000). Το αρχικό κομμάτι της εν λόγω διατριβής συνίσταται από την κατασκευή μίας πειραματικής συσκευής για τη μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Στη συνέχεια, αυτή η συσκευή προσαρμόστηκε για τη μελέτη ροής υμένα πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα.

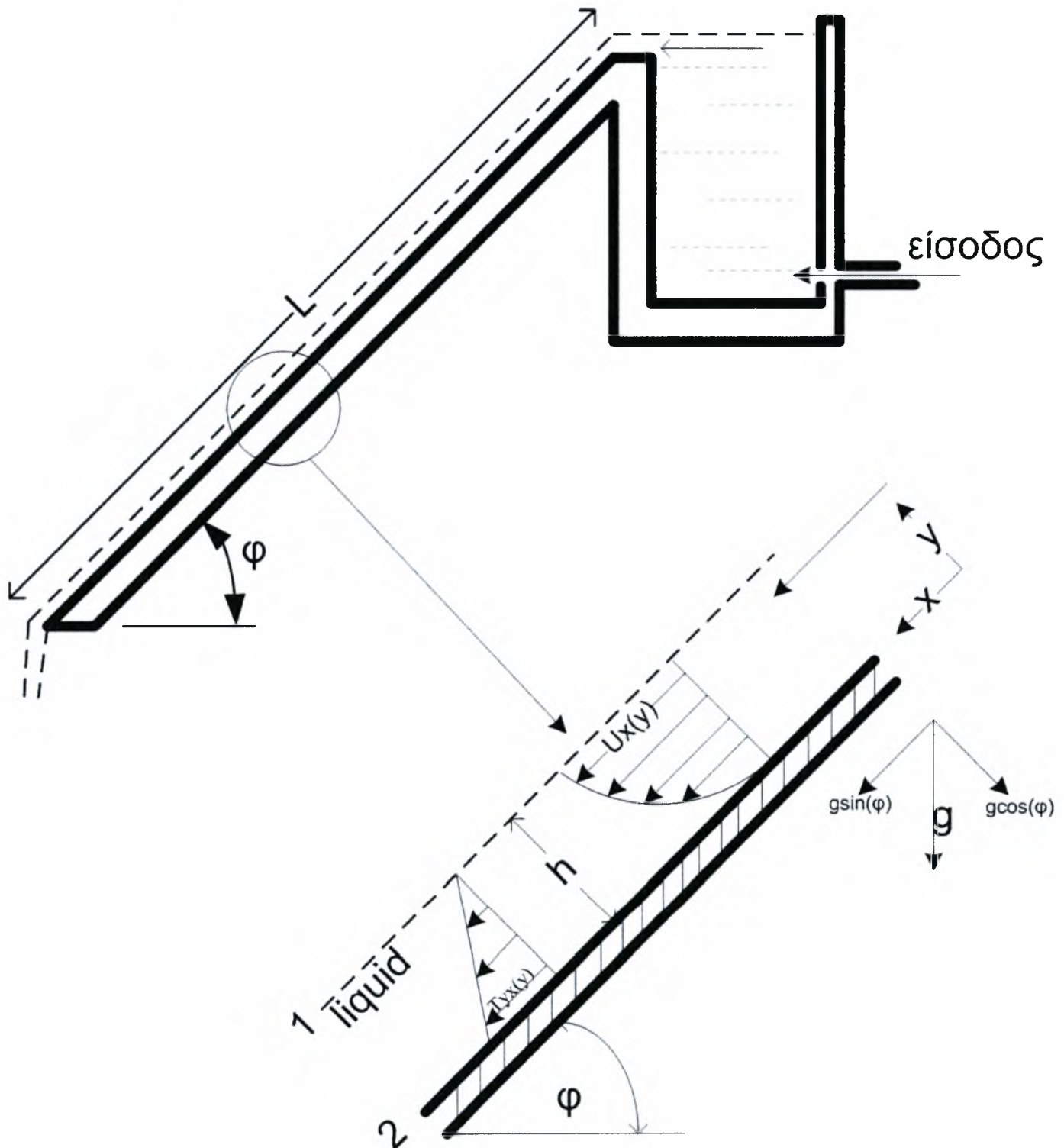
Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων στην υφιστάμενη συσκευή παρατηρήθηκε ότι πολύ ενδιαφέροντα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα σε μεγάλη απόσταση από την αφετηρία της ροής. Κυριότερο αυτών είναι η αλληλεπίδραση των **σολιτονικών κυμάτων** που δημιουργούνται από κάποια διαταραχή. Η ανάγκη παρατήρησης των φαινομένων ήταν εμφανής, όμως το μικρό ενεργό μήκος του καναλιού δεν επέτρεπε κάτι τέτοιο. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην απόφαση για την κατασκευή μίας νέας πειραματικής διάταξης που θα προσφέρει ένα μεγαλύτερο μήκος ροής ώστε να επιτρέπεται η «παρακολούθηση» ενός κύματος από το σημείο δημιουργίας του έως την τελική εξέλιξή του. Είναι σαφές λοιπόν ότι μιλάμε για μία συσκευή που σε γενικές γραμμές θα έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με την προηγούμενη αλλά και μία μεγαλύτερη κλίμακα μεγέθους. Οι εργασίες για την κατασκευή της συσκευής ξεκίνησαν στην αρχή του ακαδημαϊκού έτους 2004-5 σε μία αίθουσα του εργαστηρίου Φυσικών και Χημικών Διεργασιών. Στο κεφάλαιο 3 που ακολουθεί, γίνεται εκτενής περιγραφή όλων των επιμέρους στοιχείων της διάταξης και αναφορά στη βασική χρήση της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται σύντομη ανασκοπήσει της βιβλιογραφίας που αφορά τη ροή υγρού υμένα (falling film flow). Αρχικά, δίδονται οι θεμελιώδεις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν την κίνηση του υμένα και στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στη δημιουργία και εξέλιξη των κυμάτων που δημιουργούνται στον υμένα εξαιτίας των διαφόρων ασταθειών. Το σημαντικότερο σημείο της παρούσας ενότητας είναι η αναφορά στην πρώτη πειραματική συσκευή ροής υγρού υμένα που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο ΦΧΔ στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του κ. Βλαχογιάννη. Η ενασχόληση με αυτή τη συσκευή αποτέλεσε το πρώτο βήμα για την εξοικείωση με την πειραματική μέθοδο και την ερμηνεία των φαινομένων που παρατηρούνται στη ροή.

2.2. ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΝΟΜΟΙ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΡΟΗ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση του κεκλιμένου τοιχώματος και του ρέοντος υμένα. Ορισμός του ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, του προφίλ ταχύτητας του υμένα, της κατανομής των τάσεων σε αυτό και του ύψους του.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

Η ροή μέσα στο κανάλι ταυτίζεται με αυτή σε επίπεδη πλάκα, κεκλιμένη σε γωνία φ από την οριζόντιο. Το υγρό φυσικά πέφτει με το μηχανισμό της διάχυσης λόγω βαρύτητας δημιουργώντας ένα παραβολικό προφίλ ταχύτητας γιατί δεν παρουσιάζει τη νευτώνεια ιδιότητα (γραμμική μεταβολή). Έχοντας το κανάλι ένα μήκος L και πλάτος W τέτοιο ώστε το ύψος h του υμένα να είναι σημαντικά μικρότερο του πλάτους ($W \gg h$) καταστρώνεται το αρχικό **ισοζύγιο μάζας**:

$$(\text{ΕΙΣΡΟΗ}) - (\text{ΕΚΡΟΗ}) + (\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}) + \left(\overbrace{\text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}}^{=0} \right) = 0 \Rightarrow$$

$$\left(\tau_{xy}|_y - \tau_{xy}|_{y+dy} \right) \cdot L \cdot W + \overbrace{g_x \cdot \rho \cdot (W \cdot L \cdot dy)}^{\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}} + 0 = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{d\tau_{yx}}{dy} = \rho \cdot g_x \Rightarrow \int d\tau_{yx} = \int \rho \cdot g_x \cdot dy \Rightarrow \tau_{yx} = \rho \cdot g_x \cdot y + C_1$$

όπου:

ρ : πυκνότητα_υγρώ

g : επιτάχυνση_βαρύτητας_αναλυμένη_στο_Σ.Σ.

μ : ιξώδες_υγρώ

Για την μεταβλητή ολοκλήρωσης C_1 γίνεται χρήση της συνοριακής συνθήκης στη διεπιφάνεια **1** του υγρού και του περιβάλλοντος αέρα, όπου η διατμητική τάση είναι μηδενική και έτσι προκύπτει για $y=h$:

$$\tau_{yx} = \rho \cdot g_x \cdot y + C_1 \xrightarrow{\tau_{yx}|_{y=h}=0} C_1 = -\rho \cdot g_x \cdot h \xrightarrow{N. Newton \quad \tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy}}$$

$$\frac{du_x}{dy} = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot (h - y) \Rightarrow \int du_x = \int \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot (h - y) dx \Rightarrow$$

$$u_x(y) = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h}{\mu} \cdot y - \frac{\rho \cdot g_x}{\mu} \cdot \frac{y^2}{2} + C_2$$

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

Στη δεύτερη διεπιφάνεια (2), όπου $y=0$, η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδενική $U_x=0$ στο τοίχωμα, επομένως ορίζεται η μεταβλητή ολοκλήρωσης C_2 και προκύπτει η τελική συσχέτιση της συνιστώσας της ταχύτητας του ρευστού στον άξονα x για τη μεταβολή της κατά τον άξονα y :

$$U_x(y) = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{\mu} \cdot \left[\left(\frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right]$$

Γνωρίζοντας πια το προφίλ της ταχύτητας μπορεί κάποιος να ορίσει τη **μέγιστη ταχύτητα** που εμφανίζεται στη διεπιφάνεια 1 ($y=h$):

$$U_{x,\max} = U_x \Big|_{y=h} = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{\mu}$$

Άλλο ένα σημαντικό μέγεθος που πρέπει να οριστεί είναι η **μέση τιμή της ταχύτητας**, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της κινητικής κατάστασης του υγρού υμένα στους υπολογισμούς των αδιάστατων μεγεθών **Re**, **Nu**. Υποθέτοντας σταθερή ταχύτητα κατά το πλάτος του καναλιού **W** η $\langle U_x \rangle$ εξαρτάται μόνο από τη μεταβολή της κατά τον y :

$$\langle U_x \rangle = \frac{\int_0^W \int_0^h U_x \cdot dy \cdot dz}{\int_0^W \int_0^h dy \cdot dz} = \frac{1}{h} \int_0^h U_x \cdot dy = \frac{\rho \cdot g_x \cdot h^2}{3\mu} = \frac{2}{3} U_{\max}$$

Ο αδιάστατος αριθμός που περιγράφει τη «ροϊκή» κατάσταση του υμένα είναι ο **αριθμός Reynolds**. Για τον υπολογισμό του θεωρείται κίνηση του ρευστού, ιξώδους μ , πυκνότητας ρ , πάνω σε επίπεδη πλάκα με σταθερή ταχύτητα $\langle U_x \rangle$, δημιουργώντας υμένα ύψους h . Επίσης, q είναι η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους ($q = \langle U_x \rangle \cdot h$) και ν το κινηματικό ιξώδες ως $\nu = \mu/\rho$. Συνεπώς:

$$Re = \frac{\rho \cdot \langle U_x \rangle \cdot h_N}{\mu} = \frac{q}{\nu}$$

Σημειώνεται πως το h_N είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος κατά Nusselt που στην προκειμένη περίπτωση παίρνει τις τιμές $h_N=h$ ή $h_N=4h$ με κρίσιμο αριθμό Reynolds, πάνω από τον οποίο εμφανίζεται **τυρβώδης ροή**, $Re_{cr}=400$ ή $Re_{cr}=1600$ για τις αντίστοιχες τιμές του h_N . Τέλος, σημαντικό ρόλο στην κίνηση του υμένα παίζει η κλίση του καναλιού από την οριζόντιο (γωνία ϕ), η οποία συσχετίζεται με τον Re_{cr} ως:

$$Re_{cr} = \frac{5}{6} \cot \phi$$

Η εξέλιξη των κυμάτων κατά την ροή ενός υγρού υμένα (falling film) αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών. Η μαθηματική ανάλυση της μόνιμης ροής μιας ελεύθερης επιφάνειας είναι αρκετά πολύπλοκη, εξαιτίας του γεγονότος ότι η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας δεν είναι γνωστή και αποτελεί μέρος της επίλυσης του προβλήματος. Έτσι το πρόβλημα γίνεται **μη-γραμμικό**, απαιτώντας περίπλοκες μαθηματικές μεθόδους. Η προαναφερθείσα ροή περιγράφεται και από τον αδιάστατο αριθμό **Kapitza**, ανεξάρτητο του Reynolds:

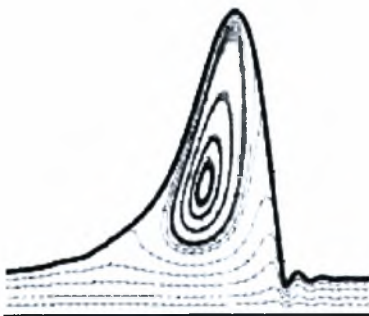
$$Ka = \gamma / (\rho \cdot v^{4/3} \cdot g^{1/3})$$

όπου, ρ η πυκνότητα του ρευστού, γ η επιφανειακή τάση και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Πολλές φορές στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο αριθμός Weber, $We = \gamma / (\rho \cdot \langle U_x \rangle^2 \cdot h_N)$ αντί του αριθμού Kapitza. Εν τούτοις ο αριθμός Kapitza έχει το πλεονέκτημα ότι είναι συνάρτηση μόνο των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και ανεξάρτητος της παροχής του ρευστού.

2.3. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΕΙΑ

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε μια ανάλυση για την κίνηση ενός **επίπεδου και αδιατάρακτου υμένα**. Η θεώρηση αυτή όμως δεν ανταποκρίνεται στο πραγματικό πρόβλημα της ροής υγρού υμένα, έτσι όπως παρουσιάζεται κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Ο λεπτός υμένας που κινείται με τη βαρύτητα είναι ευαίσθητος σε παλμικές διαταραχές του υπερκείμενου αέρα. Αυτές προκαλούνται από τη μετάδοση του ήχου, συνεπώς, είναι κατανοητό ότι οποιοσδήποτε

εξωτερικός θόρυβος (θόρυβος από το δρόμο, ομιλίες, ρεύματα αέρα από το άνοιγμα των θυρών, κλπ) μπορεί να δημιουργήσει διαταραχή στην κίνηση του υγρού και να προκαλέσει κυματισμούς στην ελεύθερη επιφάνεια. Η δυναμική εξέλιξη αυτών κυμάτων και η μεταξύ τους συμπεριφορά είναι δύσκολο να μελετηθεί γιατί είναι ένα



φαινόμενο μη περιοδικό που για την πλήρη εξέλιξη του σε στρωτή ροή απαιτεί πολύ μεγάλο μήκος καναλιού. Τη λύση στο πρόβλημα έρχεται να δώσει η δημιουργία ενός συστήματος «εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών» εντονότερων των φυσικών για να έχουν γρηγορότερη εξέλιξη και να είναι ορατές στο ενεργό μήκος του καναλιού. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει προκαλώντας μια στιγμιαία διακοπή της παροχής υγρού προς το κανάλι, η οποία με τη σειρά της θα υποχρεώσει σε μείωση ή αύξηση της στάθμης του υμένα. Ο έλεγχος της συχνότητας και της έντασης της διαταραχής γίνεται από τη ρύθμιση της λειτουργίας των ηλεκτροβανών.

Δημιουργώντας πια εντονότερες διαταραχές από το φυσικό θόρυβο θα περίμενε κάποιος να διαπιστώσει τότε ο υμένας είναι ευσταθής ή ασταθής. Με την εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή να είναι, τουλάχιστον αρχικά, πολύ μικρή σε μέγεθος και παρακολουθώντας την εξέλιξη της κατάντη της ροής είναι εφικτό να διαχωριστεί η ευστάθεια του υμένα. Αν η διαταραχή αποσβένεται κατάντη της ροής ο υμένας είναι ευσταθής. Σε πολλές περιπτώσεις το μήκος κατάντη της ροής δεν είναι αρκετό για την πλήρη απόσβεση της διαταραχής. Σε αυτές τις περιπτώσεις μας αρκεί η ένδειξη της μείωσης του μεγέθους του σήματος. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή το κύμα ενισχύεται, ο υμένας χαρακτηρίζεται ασταθής.

2.4. Η ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ

Η αστάθεια λαμβάνει χώρα για εξαιρετικά μεγάλου μήκους κύματα $a < a_c(Re)$, όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή Re_c . Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για την έναρξη της αστάθειας, σύμφωνα με τους Benjamin και Yih, είναι:

$$Re_c = \frac{5}{6} \cot \varphi \quad \text{ή} \quad Re_c = \frac{5}{4} \cot \varphi \quad (2.1)$$

ανάλογα με τον ορισμό του αριθμού Reynolds.

Ο ρυθμός αύξησης (growth rate) και η φασική ταχύτητα (phase velocity) των απειροστών κυμάτων μπορεί να βρεθούν υπολογιστικά ως συνάρτηση του κυματαριθμού για πεπερασμένες τιμές των Re , We και φ . Για πολύ μικρούς κυματαριθμούς, η φασική ταχύτητα c , είναι $c = 2U_0$.

Ο Benjamin (1961), πρώτος διαπίστωσε τη μεταφερόμενη φύση (convective character) της αστάθειας για τη ροή υγρών υμένων. Έδειξε θεωρητικά και πειραματικά ότι μία τοπική, γραμμική διαταραχή αναπτύσσεται κατάντη της ροής. Οι Liu et al. (1993) χρησιμοποίησαν την

εξίσωση του Benney (1966) (long wave expansion equation), για τη μελέτη της έναρξης της αστάθειας. Με τη παραδοχή ότι οι διδιάστατες διαταραχές έχουν μήκος κύματος πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του υμένα ($\lambda \gg h_N$), η εξίσωση 1^{ης} τάξης ως προς a γίνεται:

$$h_t + 2h^2 h_x + \frac{2}{3} \left[\frac{4}{5} \text{Re} h^6 h_x - h^3 h_x \cot \varphi + \text{We} h^3 h_{xxx} \right]_x = 0 \quad (2.2)$$

Η παραπάνω εξίσωση έχει ισχύ μόνο όταν $\text{Re} \sim \text{Re}_c$ και η επιφανειακή τάση να είναι μη-μηδενική. Οι υπολογισμοί της παραπάνω εξίσωσης έδειξαν ότι το σύστημα γίνεται μεταφορικά ασταθές όταν $\text{Re} = \text{Re}_c$, εάν $\gamma \neq 0$. Η ίδια ανάλυση προβλέπει ότι η μετάβαση από μεταφερόμενη σε απόλυτη (convective to absolute) διαταραχή λαμβάνει χώρα για: $\text{Re}_{c/a} = \text{Re}_c + (6.7\text{We})^{1/3}$. Ωστόσο, το παραπάνω όριο δεν είναι ακριβές, εξαιτίας των παραδοχών επίλυσης των εξισώσεων. Οι Joo & Davis (1992) και οι Deissler, Oron & Lee (1991) χρησιμοποίησαν τη παραπάνω εξίσωση (long wave expansion equation) για παρόμοιους υπολογισμούς σε ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, οι Chang et al. (1994), με την υπολογιστική επίλυση των ολοκληρωτικών εξισώσεων του οριακού στρώματος (integral-boundary layer), έδειξαν ότι για ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο επίπεδο τοίχωμα η αστάθεια γίνεται μεταφερόμενη για $\text{Re} \sim 500$.

Ο φυσικός μηχανισμός της δημιουργίας της αστάθειας σε ροή υγρού υμένα και για αριθμούς Reynolds της τάξης $\text{Re} < 300$, αποτελεί το επόμενο βήμα κατανόησης του φαινομένου. Όταν μία επίπεδη ελεύθερη επιφάνεια παραμορφώνεται, δημιουργείται, λόγω του βασικού πεδίου ταχύτητας (2.8a), μία διατμητική τάση στη νέα διεπιφάνεια. Από τη στιγμή που η εφαπτομενική συνιστώσα της τάσης στην αρχική ελεύθερη επιφάνεια είναι μηδέν λόγω της αντίστοιχης συνοριακής συνθήκης, αναπτύσσεται μία διατμητική τάση διαταραχής στην παραμορφωμένη ελεύθερη επιφάνεια. Οι Kelly et al. (1989) και ο Smith (1990) έδειξαν ότι η παραπάνω διατμητική τάση αποτελεί την αιτία έναρξης της επιφανειακής αστάθειας.

Μετά την έναρξη της αστάθειας, ο ρυθμός αύξησης του πλάτους της εξαρτάται από τις αδρανειακές δυνάμεις (inertial effects) του συστήματος. Εξαιτίας της αδράνειας, η απόκριση της μεταβολής της ταχύτητας στην παραμορφωμένη επιφάνεια είναι αργή. Αυτή η καθυστέρηση (phase lag) οδηγεί στη δημιουργία μίας αδρανειακής πίεσης (inertial pressure), η οποία τείνει να οδηγήσει ποσότητες του ρευστού από την κοιλότητα στην κορυφή της παραμορφωμένης επιφάνειας και έτσι να αποσταθεροποιήσει τη ροή. Από την άλλη μεριά, η τριχοειδής πίεση και η υδροστατική πίεση εξαιτίας της συνιστώσας της βαρύτητας, αποτελούν τους παράγοντες σταθεροποίησης. Για παράδειγμα, η τριχοειδής πίεση αποσβένει τα μικρού μήκους κύματα.

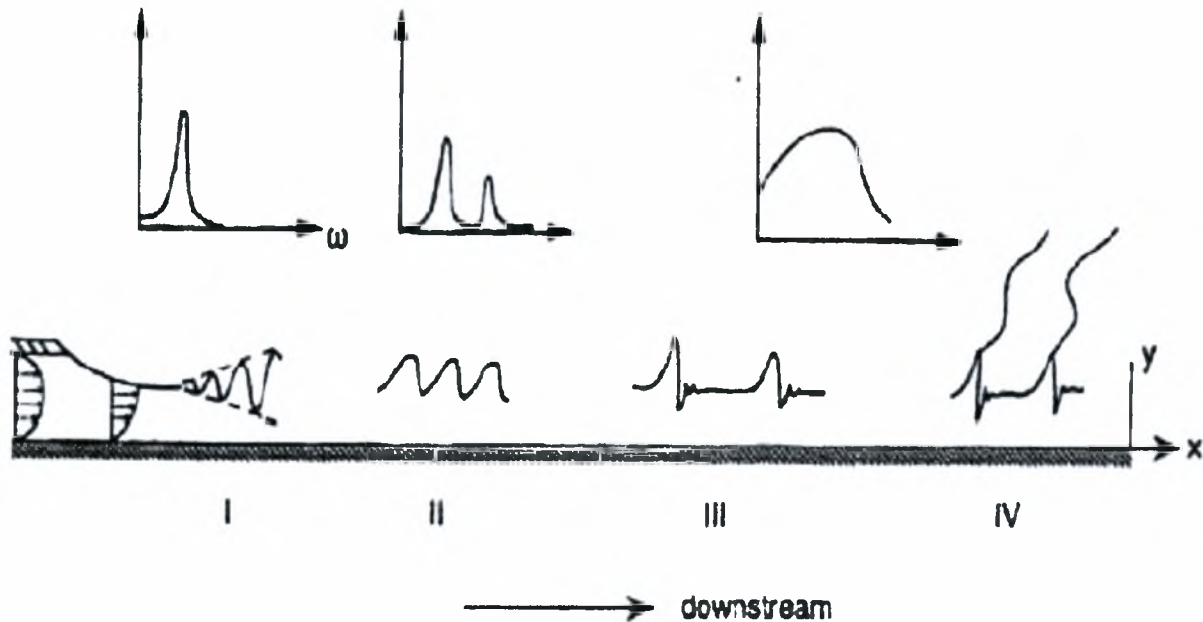
2.5. ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ: ΘΕΩΡΙΑ

Η περιγραφή των φαινομένων που διέπουν την εξέλιξη των κυμάτων σε ένα επίπεδο τοίχωμα παρουσιάζεται με συγκροτημένο τρόπο στην ανασκόπηση του Chang (1994). Έτσι λοιπόν, σε υψηλούς αριθμούς Reynolds ($Re > 1000$) παρατηρούνται κύματα οφειλόμενα στη διάτμηση (shear wave) με μήκος κύματος συγκρίσιμο (ή μικρότερο) με το πάχος του υμένα h . Συνεπώς, συνθήκες υψηλού ρυθμού ροής προκαλούν τυρβώδεις υμένες, όπου επικρατούν εσωτερικές διαταραχές κατά Tollmien-Schlichting. Σε μέσους αριθμούς Reynolds ($300 < Re < 1000$) αρχίζουν να εμφανίζονται διαμήκη διεπιφανειακά κύματα, χαρακτηριστικά των ασταθειών λόγω βαρύτητας ή/και επιφανειακής τάσης (gravity-capillary instabilities). Εν τούτοις, η δυναμική των κυμάτων είναι εξαιρετικά μη-μόνιμη (nonstationary), ειδικά για τα διατηρούμενα μικρά κύματα, τα οποία φαίνεται ότι παρήχθησαν από τα μεγαλύτερα κύματα, εξαιτίας μηχανισμών αποκόλλησης (shedding) των δινών. Σε εξαιρετικά χαμηλούς αριθμούς Reynolds ($Re \ll 1$) ο υμένας γίνεται πολύ λεπτός, οι ενδομοριακές δυνάμεις και η δυναμική της γραμμής επαφής υγρού-τοιχώματος (contact line dynamics) καθίστανται σημαντικές και ο υμένας αρχίζει να διασπάται κατά μήκος της ροής.

Η εξέλιξη των κυμάτων, εξαιτίας φυσικής διέγερσης, για αριθμούς Reynolds μεταξύ $1 < Re < 300$ παριστάνεται στο σχήμα 2.2, όπου παρατηρούνται τέσσερις διαφορετικές περιοχές. Στην περιοχή I, απειροελάχιστες διαταραχές στην επιφάνεια του ρευστού επεκτείνονται κατά μήκος της ροής και σχηματίζουν 'μονοχρωματικά' κύματα (προς το τέλος της περιοχής), αποδεικνύοντας ότι η προκαλούμενη αστάθεια είναι μεταφερόμενη (convective). Εάν η συχνότητα της διαταραχής είναι 'μονοχρωματική', το εμφανιζόμενο κύμα παραλαμβάνει την συχνότητα της διαταραχής. Εάν η διαταραχή έχει μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων, όπως συμβαίνει με τον φυσικό θόρυβο, μια διεργασία γραμμικού φιλτραρίσματος υψηλής επιλεκτικότητας (highly selective linear filtering process) παράγει ένα μοναδικό 'μονοχρωματικό' πεδίο κύματος, για όλο το εύρος των διαταραχών. Ειδικότερα οι εγκάρσιες διαταραχές αποσβένονται επιλεκτικά, στην περιοχή I. Σε αυτή την περιοχή, το μέγεθος του 'μονοχρωματικού' κύματος αυξάνει εκθετικά κατά μήκος της ροής, όπως σε όλα τα φαινόμενα γραμμικής διέγερσης ασταθών συστημάτων. Με το ξεκίνημα της περιοχής II η εκθετική αύξηση ανακόπτεται από ασθενή μη γραμμικά φαινόμενα, καθώς το μέγεθος του 'μονοχρωματικού' κύματος προσεγγίζει μια πεπερασμένη τιμή, η οποία εξαρτάται από τους αριθμούς Reynolds, Kapitza και το μήκος του διεγερμένου κύματος. Εξαιτίας μιας ασθενούς μη γραμμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της ασταθούς βασικής συχνότητας και της $2^{\text{ης}}$ αρμονικής, το

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

‘μονοχρωματικό’ κύμα της περιοχής I αρχίζει και αποκτά μια περισσότερο πολύπλοκη μορφή καθώς η δημιουργούμενη ημιτονοειδής μορφή μεταδίδεται κατά μήκος της ροής.



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των τεσσάρων περιοχών του κύματος, κατά την εξέλιξή του, κατά την ροή ενός υγρού υμένα σε ένα κεκλιμένο επίπεδο. Η παράμετρος ω είναι η συχνότητα του κύματος.

Από τη σύνοψη διαφόρων πειραματικών αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι ο αριθμός κύματος του κορεσμένου-περιοδικού κύματος που διατηρείται στην περιοχή II (όπου το πεδίο κυμάτων είναι εξαιρετικά ομοιόμορφο) είναι διαφορετικός από αυτόν του ‘μονοχρωματικού’ κύματος που εμφανίζεται στην περιοχή I. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι όταν οι επιβαλλόμενες εξωτερικές διαταραχές έχουν μεγάλο μέγεθος, τα δημιουργούμενα κύματα αποκτούν συχνότητα που πλησιάζει την συχνότητα της διαταραχής. Για εξωτερικές διαταραχές μικρού μεγέθους, τα εμφανιζόμενα πεδία κυμάτων (των περιοχών I & II) είναι ανεξάρτητα των διαταραχών. Τα ομοιόμορφα πεδία κύματος που εμφανίζονται στη περιοχή II, διανύουν μια μεγάλη απόσταση (περίπου 10 μήκη κύματος), χωρίς να αλλάζει η μορφή και το μέγεθός τους έως ότου περάσουν στην περιοχή III.

Στην περιοχή III παρατηρήθηκαν δύο κυρίαρχες μορφές αστάθειας των κυμάτων πεπερασμένου μεγέθους. Κοντινά κύματα ενώνονται ανά διαστήματα εξαιτίας της ‘υποαρμονικής αστάθειας’ (sub harmonic instability) (Prokopiou et al 1991) ή λόγω των πλευρικών ασταθειών (sideband instabilities) (Cheng & Chang 1992). Αυτές οι δύο αστάθειες δημιουργούν -στη κατά τα

άλλα ομοιόμορφη ροή- ελαττωματικές περιοχές, κατά μήκος της ροής. Στο εσωτερικό των ελαττωματικών περιοχών τα παραμορφωμένα κύματα αυξάνονται σε μήκος κύματος, μέγεθος και ταχύτητα και αναπτύσσονται σ' ένα περιορισμένο χώρο με την μορφή 'εξογκωμάτων'. Αυτά τα εξογκώματα έχουν απότομες κορυφές, οι οποίες ομαλοποιούνται στη συνέχεια σε μια σειρά μικρών κυμάτων (με μήκος κύματος κοντά σ' αυτό του 'μονοχρωματικού' κύματος της περιοχής I). Τα εξογκώματα είναι μεγάλα, δημιουργούνται και επεκτείνονται ταχύτατα κατά μήκος της ροής καθώς προσπερνούν τα χαμηλότερα και βραδυκίνητα κύματα τα οποία, τελικά, εξαφανίζονται. Το δημιουργούμενο φάσμα συχνοτήτων και μηκών κύματος γίνεται όλο και πιο ευρύ, σε αντίθεση με αυτό των περιοχών I & II. Βέβαια αυτό δεν υποδηλώνει την επικράτηση των διασκορπισμένων κυμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα αυτοδύναμα εξογκώματα έχουν ένα χαρακτηριστικό μήκος πολύ μικρότερο σε σχέση με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών εξογκωμάτων. Ονομάζονται σολιτονικά κύματα (solitary waves) και συνήθως παραμένουν αναλλοίωτα καθώς πλησιάζουν την περιοχή IV.

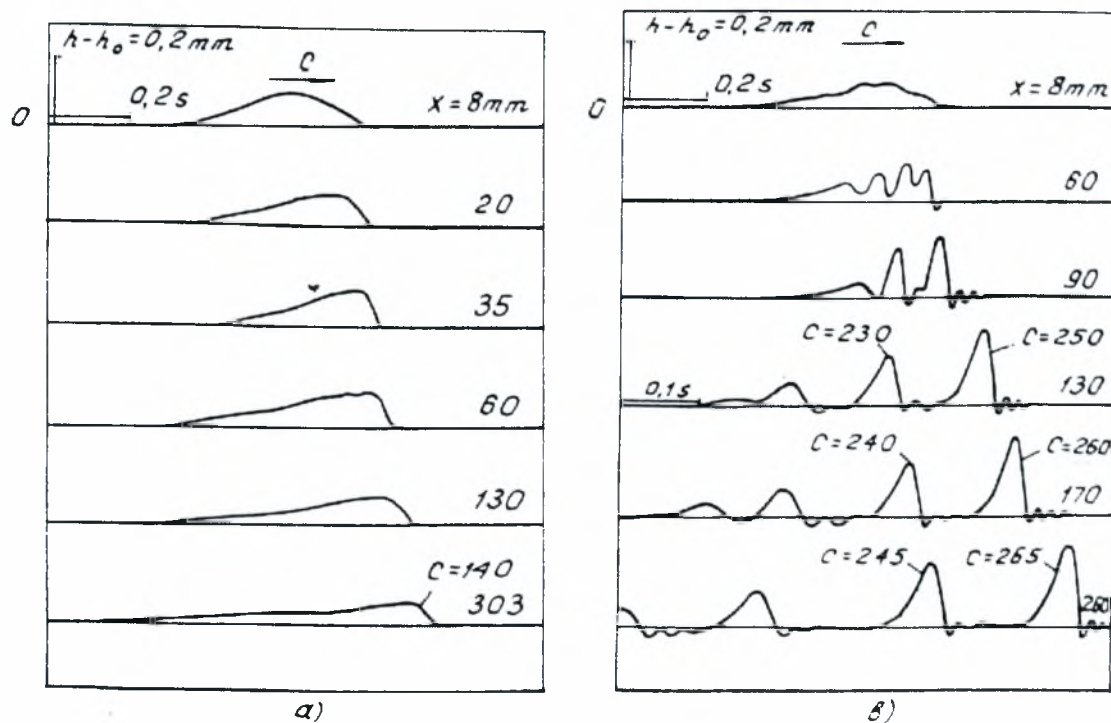
Τελικά στην περιοχή IV αρχίζουν να αναπτύσσονται εγκάρσιες μεταβολές των μετώπων των 'σολιτονικών κυμάτων'. Οι εγκάρσιες μεταβολές είναι μη μόνιμες και αυξάνονται με τέτοιο τρόπο, κατά την παράλληλη με το τοίχωμα κατεύθυνση, ώστε να συγχωνεύονται συνεχόμενες κορυφές σε διαφορετικά σημεία και τελικά να περιορίζονται. Ενδεικτικά, για ροή νερού σε κάθετο τοίχωμα, με χαμηλό αριθμό Reynolds, κάθε περιοχή καταλαμβάνει περίπου 10 μήκη κύματος (το μήκος κύματος του νερού σε χαμηλούς αριθμούς Re είναι 1cm).

2.6. Η ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Η μη-γραμμική εξέλιξη της ροής υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα έχει διερευνηθεί πειραματικά από πολλές ερευνητικές ομάδες. Από τις πολυάριθμες εργασίες διακρίνονται δύο κλασσικές μελέτες, που έχουν κεντρική σπουδαιότητα για τη παρούσα εργασία και για το λόγο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά. Μία από τις εργασίες, που αποτελεί σημείο αναφοράς στη ροή υγρού υμένα και στις ιδιότητες των σολιτονικών κυμάτων, είναι αυτή των Alekseenko et al. (1985). Η χρησιμοποίηση ενός ξεχωριστού είδους διαταραχής στην είσοδο του καναλιού ροής, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ομάδας σολιτονικών κυμάτων διαφορετικού μεγέθους. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται η εξέλιξη της επιβαλλόμενης διαταραχής κατάντη της ροής. Η μέτρηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων, δηλαδή της ταχύτητας και του μήκους κύματός τους, συναρτήσει

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

του μεγέθους αυτών αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της προαναφερθείσας εργασίας. Η πειραματική διαπίστωση της εξάρτησης της ταχύτητας των παραγόμενων σολιτονικών κυμάτων από το μέγεθός τους φαίνεται στο *σχήμα 2.3*. Το είδος της εισερχόμενης διαταραχής είναι τέτοιο που δίδει τη δυνατότητα δημιουργίας σολιτονικών κυμάτων διαφορετικού ύψους, καθώς αυτά διαχωρίζονται μεταξύ τους κατάντη της ροής.



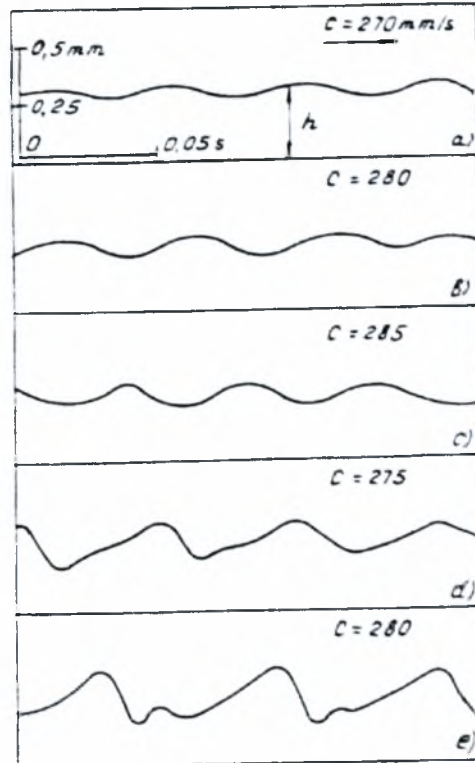
Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη της εισερχόμενης διαταραχής κατάντη της ροής

Επιπρόσθετα, η εισαγωγή διαταραχής σε υψηλότερη συχνότητα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διδιάστατων περιοδικών κυμάτων, η εξέλιξη των οποίων επιφέρει τη δημιουργία των σολιτονικών κυμάτων, με βάση τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα. Αυτή η εξέλιξη απεικονίζεται στο *σχήμα 2.4*, σε διαδοχικές αποστάσεις κατάντη της ροής.

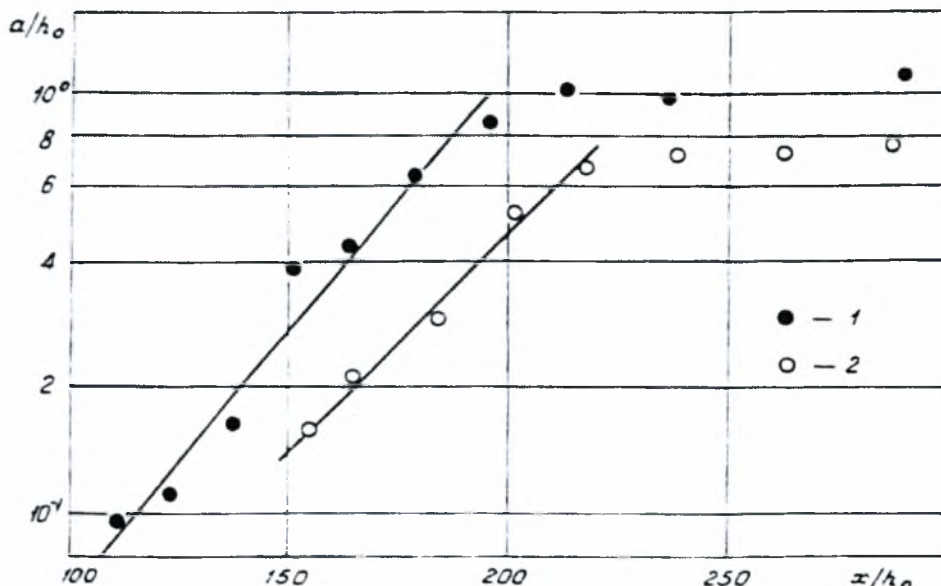
Η εύρεση της εξάρτησης του μεγέθους των παραγόμενων κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατάντη της ροής, αποτελεί το επόμενο βήμα της παρούσας εργασίας. Στο *σχήμα 2.5* απεικονίζεται η εξάρτηση του αδιάστατου μεγέθους του κύματος $a = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_N}$, ως συνάρτηση της αδιάστατης κατάντη αποστάσεως x/h_N . Όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.5*, η αύξηση της κατάντη αποστάσεως έχει ως αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση του μεγέθους του κύματος. Από μία

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

απόσταση και μετέπειτα, το μέγεθος του σολιτονικού κύματος δε μεταβάλλεται, επιβεβαιώνοντας ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως. Αυτή η απόσταση, για ροή υγρού υμένα σε κατακόρυφο επίπεδο τοίχωμα, είναι $\sim 225h_N$

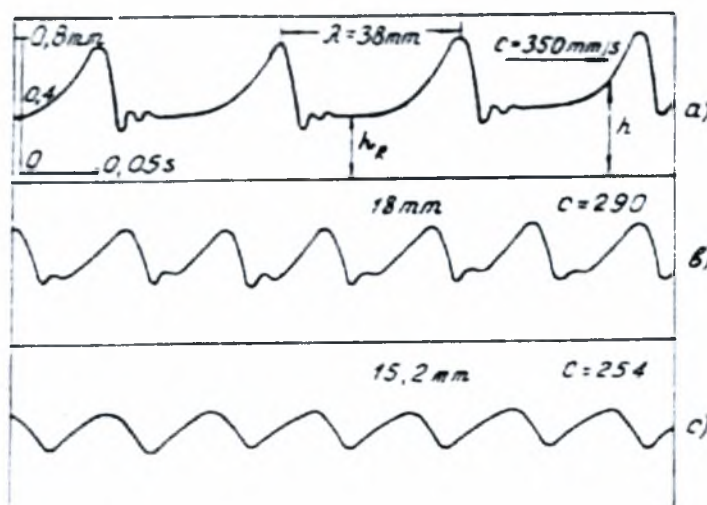


Σχήμα 2.4: Η ανάπτυξη σολιτονικών κυμάτων κατάντη της ροής, όταν η εισερχόμενη διαταραχή παράγει περιοδικά κύματα



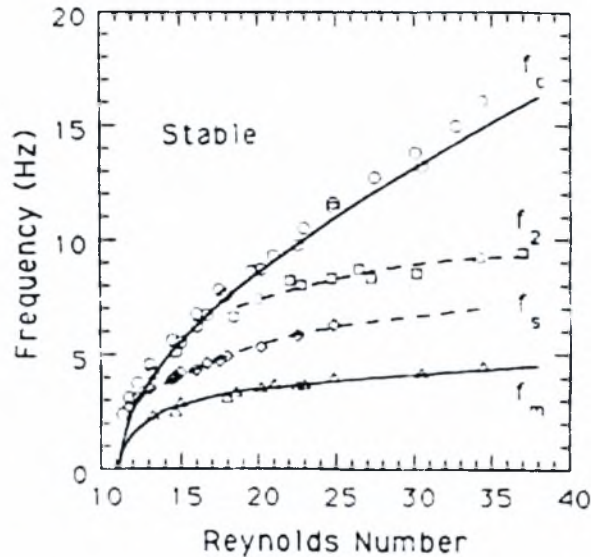
Σχήμα 2.5: Η εξάρτηση του μεγέθους των σολιτονικών κυμάτων ως συνάρτηση της αποστάσεως κατάντη της ροής

Στο σχήμα 2.6 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά των πλήρως αναπτυγμένων σολιτονικών κυμάτων. Το μήκος κύματος των σολιτονικών κυμάτων είναι περίπου 38mm, ενώ κάθε κύμα με μεγαλύτερο μήκος κύματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως σολιτονικό. Η ταχύτητά τους είναι της τάξης των 350mm/sec και διαφέρει από τη ταχύτητα των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων (280mm/sec).



Σχήμα 2.6: Τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων κυμάτων (μήκος κύματος, ταχύτητα) ως συνάρτηση της κατάντη αποστάσεως

Η δεύτερη αντιπροσωπευτική πειραματική εργασία, η οποία αποτέλεσε τη βάση της διδακτορικής διατριβής, είναι αυτή των Liu et all (1993, 1994). Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό και τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνητών αποτέλεσαν το σημαντικότερο σημείο αναφοράς. Αρχικά μελέτησαν πειραματικά τη πρωταρχική αστάθεια (primary instability) ενός λεπτού υγρού υμένα, ο οποίος ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Στα αποτελέσματα παρουσιάζεται η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ του κρίσιμου, για την εμφάνιση αστάθειας, αριθμού Re_c και της γωνίας κλίσης του καναλιού, όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.7*. Η απεικόνιση του διαγράμματος ευστάθειας σχετίζεται με την εξάρτηση της συχνότητας των διαταραχών από τον αριθμό Reynolds. Επιβεβαιώθηκαν και προσδιορίστηκαν πειραματικά τα περισσότερα θεωρητικά προβλεπόμενα όρια της γραμμικής ευστάθειας, όπως αυτά περιγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα. Όταν ο αριθμός Reynolds βρίσκεται στην ασταθή περιοχή απέδειξαν πειραματικά ότι η αρχική αστάθεια μετακινείται στην κατεύθυνση της ροής και συνεχώς μεγαλώνει (convective instability). Η συχνότητα της διαταραχής, ή ισοδύναμα το μήκος κύματός της, είτε είναι αποτέλεσμα της φυσικής διέγερσης ή τεχνητά επιβαλλόμενη, επηρεάζει τη μη γραμμική ανάπτυξη των κυμάτων. Έτσι, τα χαρακτηριστικά των κυμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την συχνότητα της διαταραχής, η οποία όταν είναι επιβαλλόμενη δημιουργεί περιοδικά κύματα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η επιβολή μιας εξωτερικής διαταραχής αποτέλεσε τη μέθοδο προσδιορισμού των περιοχών αστάθειας της ροής, αφού οδηγεί στην απευθείας μετάβαση από τη γραμμική περιοχή ανάπτυξης (linear incertion region) στη περιοχή των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων. Στη τελευταία περιοχή αναπτύσσονται οι ουσιαστικότερες αστάθειες της ροής υγρού υμένα.

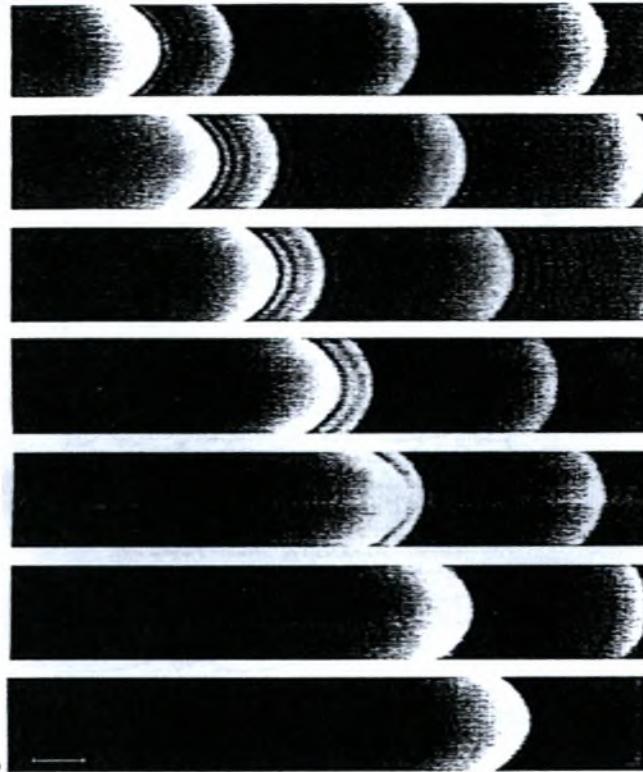


Σχήμα 2.7: Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιορισμένα όρια των διαφόρων ασταθειών.

Στο σχήμα 2.7 η καμπύλη που χαρακτηρίζεται ως f_c διαχωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή του υμένα (πρωταρχική αστάθεια). Μεταξύ αυτής και της καμπύλης f_2 παρατηρείται η πλευρική αστάθεια, ενώ η υποαρμονική αστάθεια είναι αυτή που χαρακτηρίζει την περιοχή μεταξύ των καμπύλων f_2 και f_s . Μεταξύ των ορίων f_s και f_m αρχίζουν να σχηματίζονται τα μοναχικά κύματα και κάτω από την καμπύλη f_m η δομή των κυμάτων οδηγεί τελικά σε χαοτική δομή (spatiotemporal chaos).

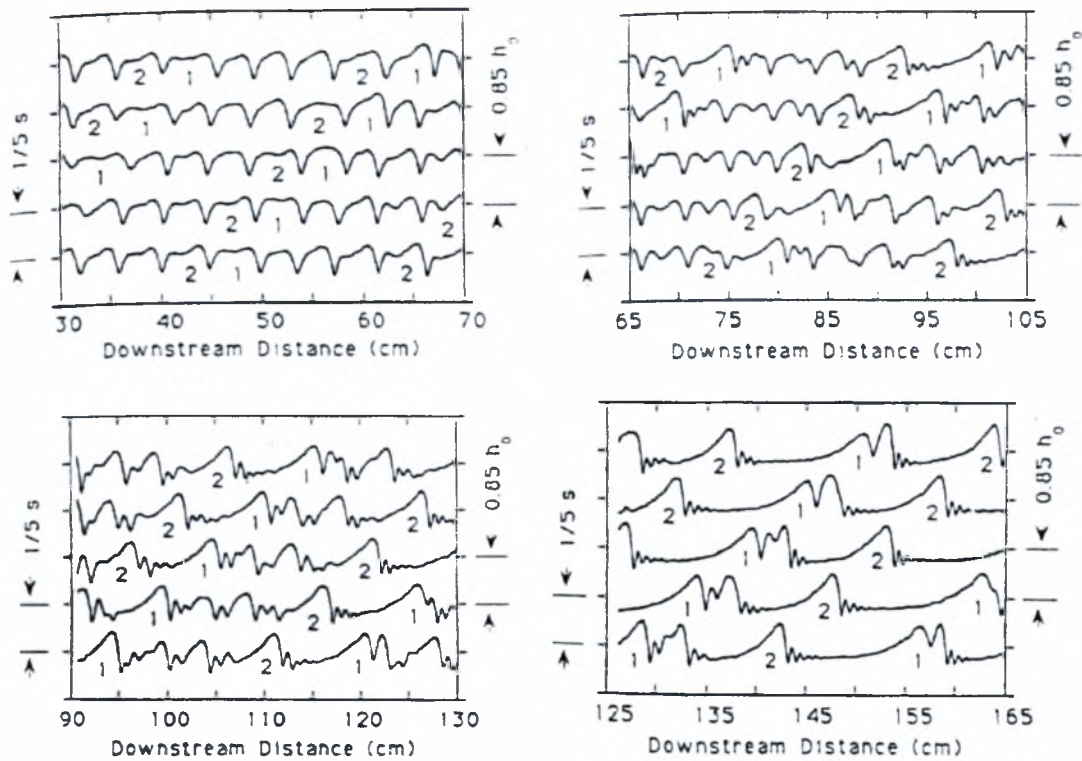
Η δημιουργία των σολιτονικών κυμάτων και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασής τους δεν εξετάστηκαν λεπτομερώς από τους προαναφερθέντες ερευνητές. Ωστόσο, διαπίστωσαν πειραματικά τη συγχώνευση μεταξύ δύο σολιτονικών κυμάτων, με το κύμα που ακολουθεί να έχει πολύ μεγαλύτερο μέγεθος από το προπορευόμενο. Το μεγαλύτερο κύμα, εξαιτίας του μεγέθους του, κινείται γρήγορα και απορροφά το μικρότερο, που βρίσκεται μπροστά του. Στο σχήμα 2.8 απεικονίζεται ένα παράδειγμα συγχώνευσης, της παραπάνω μορφής.

Στο σχήμα 2.9 απεικονίζεται η εξέλιξη του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα, με την δημιουργία των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων και την μετατροπή τους σε μοναχικά σολιτονικά κύματα. Η επίδραση των δευτερευόντων ασταθειών (subharmonic & sideband) έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της μορφής των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων και τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων κατάντη της ροής.

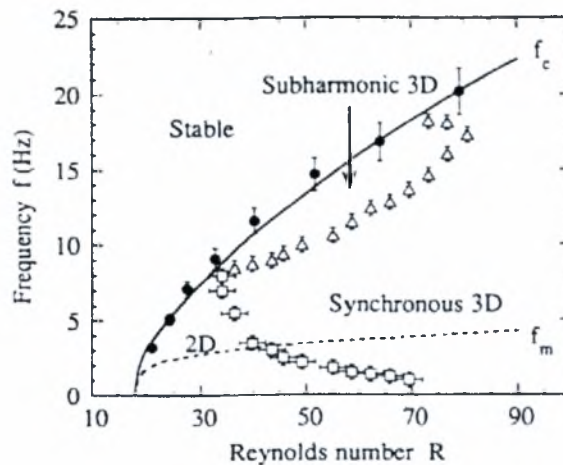


Σχήμα 2.8: Η συγχώνευση μεταξύ δύο σολιτονικών κυμάτων, με τη μορφή εικόνων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

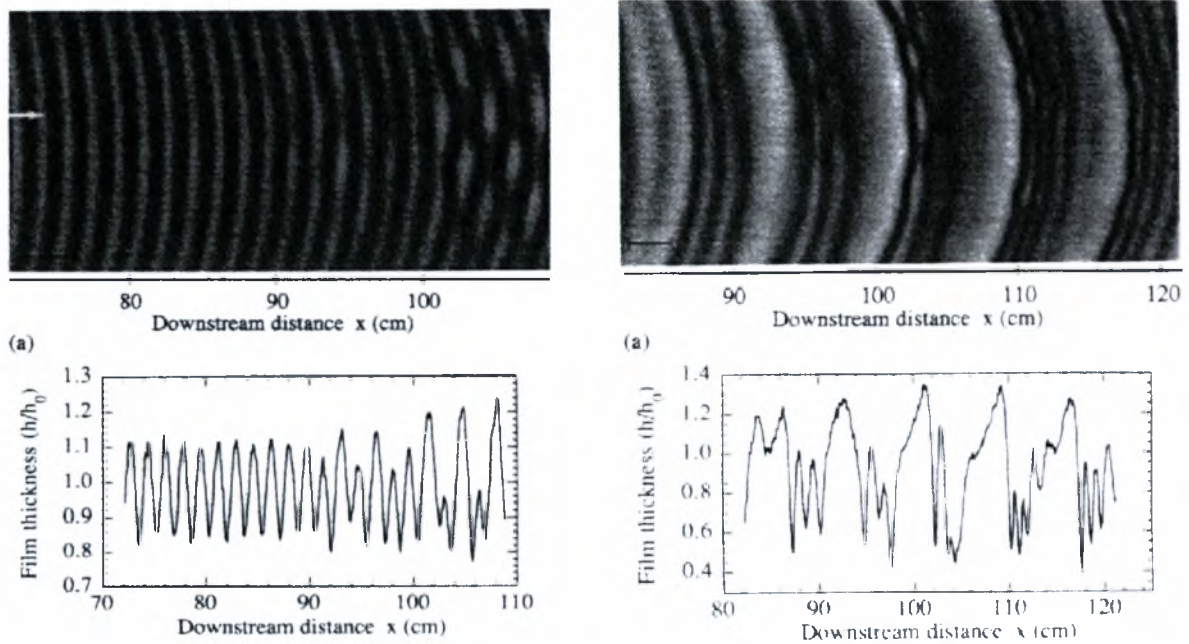
Σε πολλές περιπτώσεις, οι αστάθειες του υμένα μετατρέπονται από διδιάστατες σε τρισδιάστατες. Για παράδειγμα, η συγχρονισμένη αστάθεια (synchronous instability), η οποία εμφανίζεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, και η τρισδιάστατη υποαρμονική αστάθεια (3-D subharmonic instability) οδηγούν στην αλλαγή της δομής. Τα όρια δημιουργίας αυτών των ασταθειών απεικονίζονται στο *σχήμα 2.10*. Τα αποτελέσματα εφαρμογής αυτών των ασταθειών φαίνονται στο *σχήμα 2.11*, όπου η εμφάνισή τους σε κορεσμένα περιοδικά κύματα οδηγεί στη δομή ψαροκόκαλο (herringbone patterns). Αντιθέτως, όταν εφαρμόζονται σε σολιτονικά κύματα, ή σε κύματα που τείνουν να γίνουν σολιτονικά, έχουν ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό των μετώπων του κύματος και τη δημιουργία εγκάρσιων τρισδιάστατων βαθουλωμάτων σε αυτά. Αναφορικά με τη δομή ψαροκόκαλο, οι συγχρονισμένοι εγκάρσιοι σχηματισμοί, με τη μορφή βαθουλωμάτων, διατηρούν την περιοδικότητα που έχουν τα διδιάστατα κύματα στην κατεύθυνση της ροής. Το μήκος κύματος των βαθουλωμάτων κάθετα στην κατεύθυνση ροής είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πάχος του υμένα.



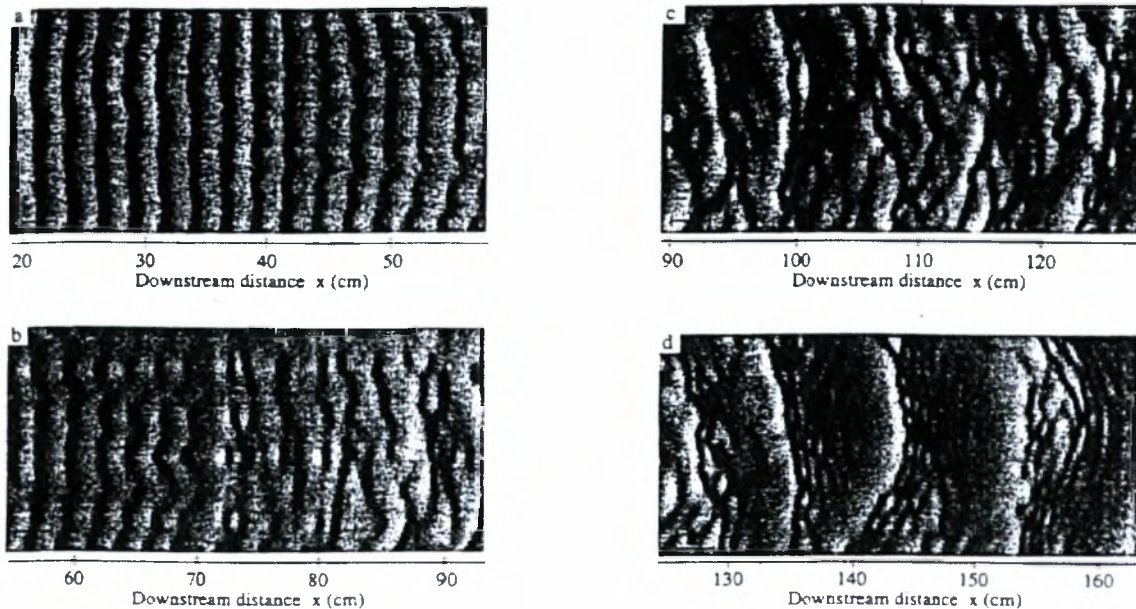
Σχήμα 2.9: Η ανάπτυξη των δευτερευουσών ασταθειών (subharmonic-sideband) στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα με αποτέλεσμα τη δημιουργία σολιτονικών κυμάτων.



Σχήμα 2.10: Ο διαχωρισμός των τρισδιάστατων ασταθειών στο διάγραμμα συχνότητά τους συναρτήσει του αριθμού Reynolds.



Σχήμα 2.11: Το αποτέλεσμα επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία της δομής ψαροκόκαλο (herringbone pattern).



Σχήμα 2.12: Η δημιουργία δομών πλήρους αταξίας (disorder patterns) εξαιτίας της επίδρασης των τρισδιάστατων ασταθειών.

Τελικά, η σύζευξη όλων των παραπάνω ασταθειών οδηγεί σε πλήρως τρισδιάστατες δομές, με κύρια χαρακτηριστικά τις αλλαγές κατεύθυνσης του μετώπου του κύματος, το διαχωρισμό του σε περισσότερα μέτωπα και τη δημιουργία μίας χαοτικής δομής. Στο σχήμα 2.12 απεικονίζεται η μετάβαση από διδιάστατη σε τρισδιάστατη δομή.

2.7. Η ΠΡΩΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΧΔ

η μελέτη της ροής υγρού υμένα σε πειραματική διάταξη αποτέλεσε το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής του κ. Βλαχογιάννη. Θεωρείται απαραίτητη η αναφορά στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της εν λόγω διάταξης και της πειραματικής μεθοδολογίας καθώς αποτελεί τη πηγή έμπνευσης του σχεδιασμού και της κατασκευής του δεύτερου μεγαλύτερου καναλιού που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Σημειώνεται ότι η πρώτη πειραματική συσκευή προσέφερε τη δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων ροής τόσο σε επίπεδο όσο και σε διαμορφωμένο, κάτι που ακόμα τουλάχιστον δεν είναι δυνατό στη νέα διάταξη. Τα κύρια τμήματα της πειραματικής διάταξης, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2.13, είναι κατασκευασμένα από Plexiglas. Η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού θα γίνει κατανοητή στη συνέχεια με την ανάλυση της πειραματικής μεθόδου. Το πλάτος του καναλιού είναι 25cm και το μήκος του 80cm. Η επιλογή του τοιχώματος, πάνω από το οποίο πραγματοποιείται η ροή, γίνεται με την προσαρμογή κατάλληλης πλάκας. Η πλάκα προσαρμογής καθορίζει το είδος του τοιχώματος και οι διαστάσεις της είναι 25 cm πλάτος και 50 cm μήκος. Με την βοήθεια ενός ατέρμονα κοχλία είναι δυνατή η δημιουργία έως και 67° γωνίας κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν το εύρος της γωνίας κλίσης κυμαίνεται από $0-15^\circ$.

Με τη βοήθεια κατάλληλης αντλίας το ρευστό οδηγείται από το δοχείο συλλογής (No 8) σε ένα υπερυψωμένο δοχείο υπερχειλίσσης (No 3). Λόγω υψομετρικής διαφοράς, το ρευστό ρέει προς το δοχείο κατανομής, απ' όπου υπερχειλίζει και ρέει ομοιόμορφα πάνω από το τμήμα μετρήσεων του καναλιού. Η παροχή του ρευστού στο κυρίως κανάλι ρυθμίζεται με τη βοήθεια μιας χειροκίνητης βαλβίδας και ο καθορισμός της πραγματοποιείται με τη μέτρηση του όγκου (ή του βάρους) που συλλέγεται σε βαθμονομημένο δοχείο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια το ρευστό, αφού εξέλθει από το κυρίως κανάλι (No 2), οδηγείται στο δοχείο συλλογής και ανακυκλώνεται συνεχώς μέσω της εμβαπτιζόμενης αντλίας (No 9). Η χρησιμοποίηση τέτοιου είδους αντλίας βοηθά στη μείωση των ταλαντώσεων, αφού ο όγκος του νερού στο δοχείο συλλογής απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό των ταλαντώσεων.

Γενικότερα, για την συνολική αποφυγή των ταλαντώσεων, η επιρροή των οποίων στην εξέλιξη της ροής είναι καθοριστική, εκτός από την εμβαπτιζόμενη αντλία, το κύριο τμήμα του καναλιού συνδέεται με τα υπόλοιπα τμήματα μέσω ελαστικών σωλήνων (μεγάλης παραμορφωσιμότητας). Η πειραματική διάταξη είναι τοποθετημένη πάνω σε ελαστικά ελάσματα (καουτσούκ) για την αποφυγή ακόμα και των ταλαντώσεων του περιβάλλοντος χώρου.

Τα διάφορα τμήματα της πειραματικής διάταξης απεικονίζονται οπτικά στο σχήμα 2.14 Τα περισσότερα τμήματα της πειραματικής συσκευής είναι κατασκευασμένα από Plexiglas, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα οπτικής παρακολούθησης της ροής. Για την αποφυγή προσμίξεων από το περιβάλλον αλλά και για τον καθαρισμό του ρευστού, τοποθετήθηκαν ειδικά φίλτρα σε διάφορα σημεία του καναλιού. Στο δοχείο κατανομής είναι τοποθετημένο κατάλληλο θερμοστοιχείο για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του ρευστού, ώστε να είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων. Ειδικότερα στο σχήμα 2.14α απεικονίζεται το κυρίως κανάλι ροής ενώ στο σχήμα 2.14b φαίνεται το δοχείο υπερχειλίσης. Στα σχήματα 2.14c και d απεικονίζονται το δοχείο συλλογής και το δοχείο κατανομής, από το οποίο το ρευστό υπερχειλίζει και ρέει στο κυρίως κανάλι. Στο σχήμα 2.14f φαίνεται η πλάκα προσαρμογής για την περίπτωση της ροής πάνω από περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα.

Η ανάγκη οπτικοποίησης της ροής, για την εφαρμογή της πειραματικής μεθόδου, αλλά και ο οπτικός έλεγχος των διαφόρων τμημάτων της συσκευής επιβάλουν τη χρησιμοποίηση του Plexiglas ως υλικού κατασκευής των κυριότερων τμημάτων της πειραματικής διάταξης.

2.7.1. Δημιουργία εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Η ροή υγρού υμένα πάνω από επίπεδο τοίχωμα υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών αποτελεί έναν από τους στόχους της διδακτορικής διατριβής. Το διαθέσιμο μήκος του καναλιού δεν επιτρέπει την μελέτη της εξέλιξης των φυσικά δημιουργούμενων κυμάτων (natural unforced waves). Έτσι, η επιβολή εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών αποτελεί επιτακτική ανάγκη.

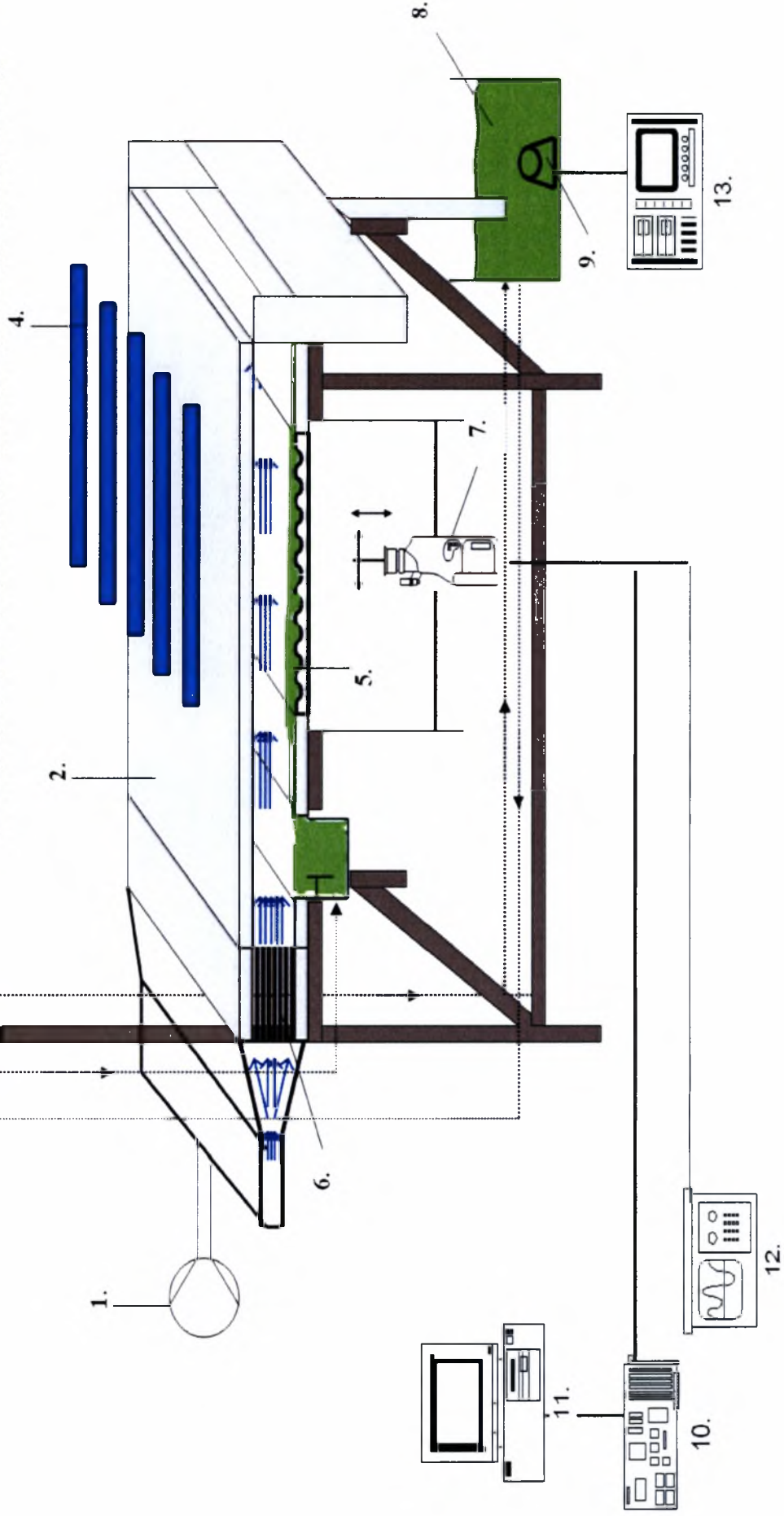
Η επίδραση των εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών σε συχνότητες μεγαλύτερες από 1.5Hz, για την μελέτη εξέλιξης των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων αλλά και των σολιτονικών κυμάτων, έχει αναλυθεί εκτενώς από τους Liu et al. (1993). Η μελέτη των μη-γραμμικών δυναμικών φαινομένων αλλά και της αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφόρων ειδών κυμάτων, απαιτεί την εισαγωγή ξεχωριστής εξωτερικής διαταραχής. Επομένως, πρωταρχικός στόχος είναι η

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

δημιουργία κυμάτων (διαφορετικού μεγέθους) σε σχετικά κοντινές αποστάσεις από το σημείο δημιουργίας του λεπτού υγρού υμένα.

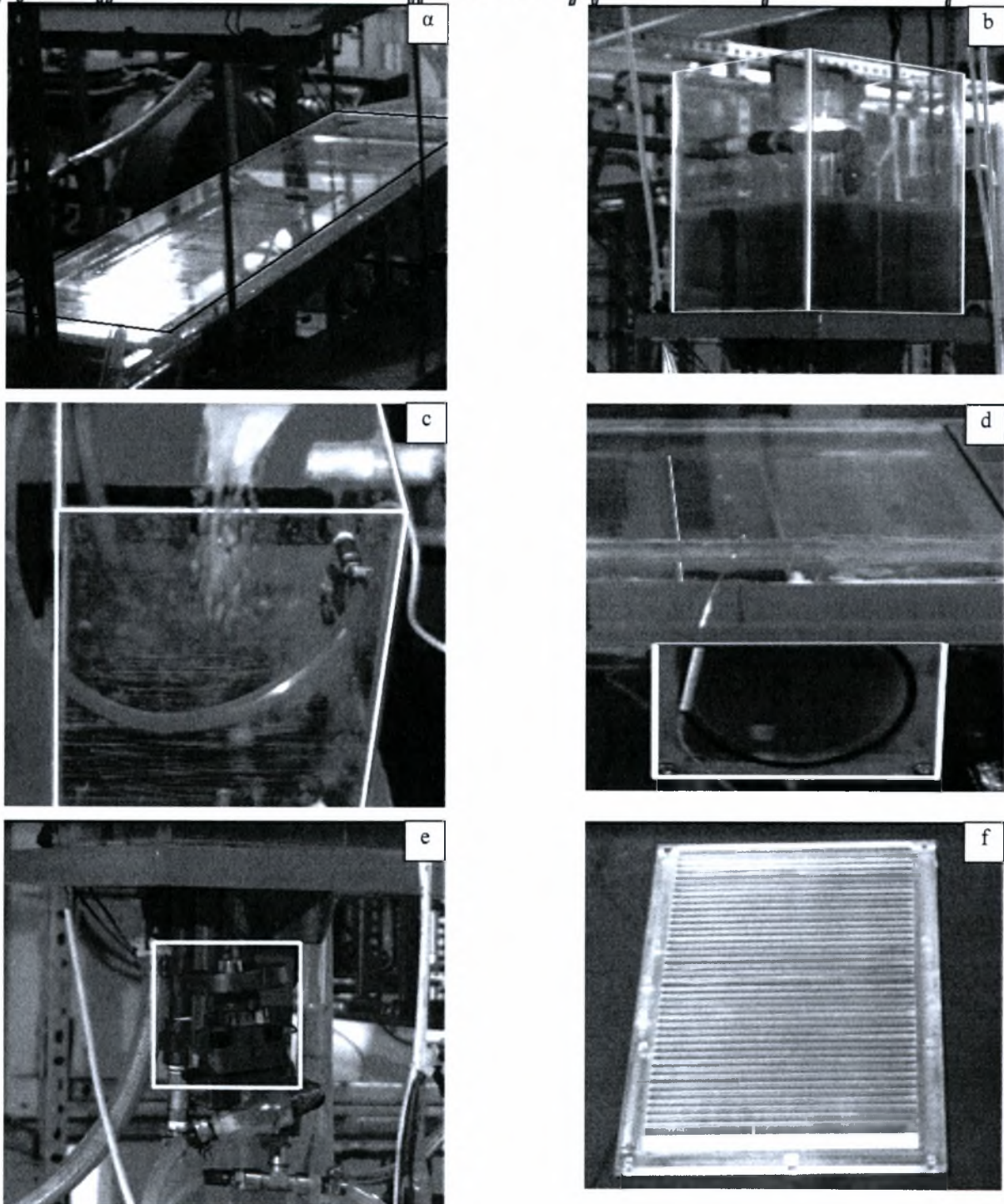
Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή Υγρού Υμένα

1. Συμπίεστης,
2. Κανάλι Plexiglas,
3. Δοχείο Υπεριώδους Φωτός,
4. Πηγή Υπεριώδους Φωτός,
5. Κυματοειδές Τοίχωμα,
6. Ομιοποίησης της Ροής της αέριος φάσης,
7. Ψηφιακή Κάμερα CCD,
8. Δοχείο Συλλογής και ανάμιξης με την Χρωστική ουσία,
9. Αντλία,
10. DT3155 Κάρτα Συλλογής Εικόνων (Frame Grabber Board),
11. Compaq 166MMx 12. Προφοδοτικό μεταβαλλόμενης έντασης ρεύματος και τάσης
13. Παλμογράφος,



Σχήμα 2.13: Η 1^η πειραματική διάταξη

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

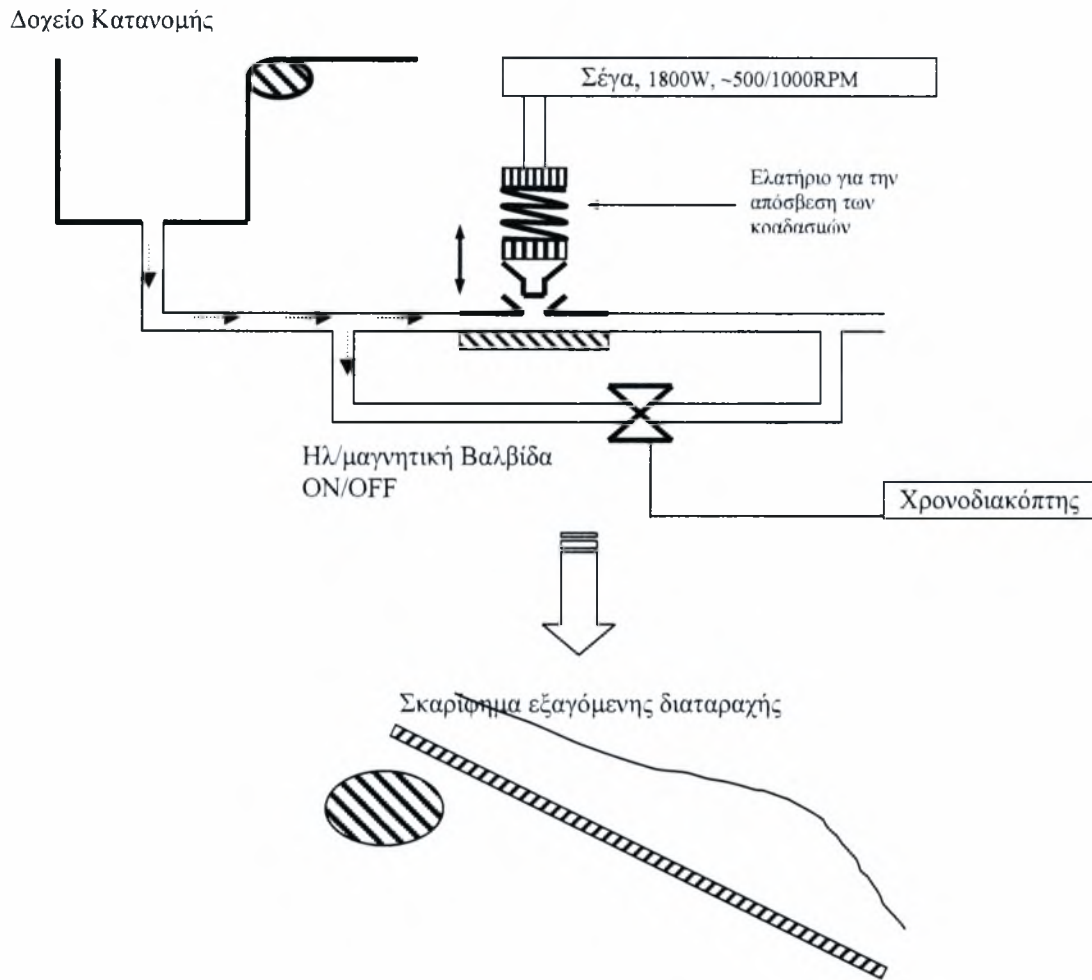


Σχήμα 2.14: Τα κύρια τμήματα της πειραματικής διάταξης: **a.** Το κανάλι ροής **b.** Δοχείο υπερχειλίσης **c.** Δοχείο συλλογής **d.** Δοχείο κατανομής **e.** Χειροκίνητη βάνα **f.** Πλάκα προσαρμογής (κυματοειδές τοίχωμα)

Η επίτευξη εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών είναι εφικτή με τη προσθήκη μιας χρονιζόμενης ηλεκτροβαλβίδας (ON/OFF), η οποία τοποθετείται στο κάτω μέρος του δοχείου κατανομής, σε μία παράκαμψη εξόδου προς το δοχείο συλλογής. Το ρευστό με το άνοιγμα της ηλεκτροβαλβίδας οδηγείται από την παράκαμψη εξόδου στο δοχείο συλλογής. Έτσι, επιτυγχάνεται η εξωτερικά επιβαλλόμενη αυξομείωση του πάχους του υμένα με το χρόνο.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

Επιπλέον, δίδεται η δυνατότητα ελέγχου του μεγέθους της διαταραχής ρυθμίζοντας το χρονικό διάστημα κατά το οποίο επιπλέον ρευστό εισάγεται στο κανάλι (με το κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας). Το παραπάνω σύστημα διαταραχής της ροής (χρονδιακόπτης-ηλεκτροβαλβίδα) επιφέρει διαταραχές σε εύρος συχνοτήτων από 0.1 έως 1Hz. Με τη χρήση του παραπάνω συστήματος υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας διαταραχών μεγάλου πλάτους. Με την εξέλιξη τέτοιων διαταραχών κατάντη της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα, επιτυγχάνεται η παραγωγή σολιτονικών κυμάτων διαφόρου μεγέθους, Alekseenko et al. (1985).



Σχήμα 2.15: Το σύστημα δημιουργίας των εξωτερικά επιβαλλόμενων διαταραχών και η μορφή της εξαγόμενης διαταραχής

Για την επίτευξη διαταραχών υψηλής συχνότητας, κατάλληλη 'σέγα' προσαρμόσθηκε στην παράκαμψη εξόδου. Η σέγα λειτουργεί υπό την επίδραση ενός κινητήρα με ρυθμιστική μεταβλητή τη συχνότητά του. Έτσι, η συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής σε εύρος από 1-10Hz επιτυγχάνεται με την κατάλληλη ρύθμιση της συχνότητας του κινητήρα. Στο σχήμα 2.15 απεικονίζονται τα συστήματα παραγωγής έντονα μη-γραμμικών διαταραχών, για τα διάφορα εύρη συχνοτήτων.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

Η δημιουργία διαφόρων ειδών κυμάτων και κυρίως μοναχικών κυμάτων (solitary waves), στηρίζεται στον άμεσο διαχωρισμό της εισαγόμενης διαταραχής εξαιτίας της βαρύτητας αλλά και του ιξώδους του ρευστού. Η μορφή της εισαγόμενης διαταραχής θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα είδος στιγμιαίου υδραυλικού άλματος, το οποίο διαχωρίζεται κατάντη της ροής και δημιουργεί μια σειρά μοναχικών κυμάτων, εξαιτίας των έντονα μη-γραμμικών αλληλεπιδράσεων.

2.7.2. Ιδιότητες των ρευστών

Καθαρό νερό καθώς και διαλύματα γλυκερίνης-νερού (20-35% κ.β. γλυκερίνη) χρησιμοποιήθηκαν στη πλειοψηφία των πειραμάτων, ώστε να είναι δυνατή η χρησιμοποίηση ρευστών διαφορετικού ιξώδους. Η αλλαγή του ιξώδους επιτυγχάνεται με την αλλαγή της συγκέντρωσης της γλυκερίνης στο νερό. Στη περίπτωση των διαλυμάτων νερού-γλυκερίνης είναι εφικτή η απόσβεση τρισδιάστατων ασταθειών και η δημιουργία διδιάστατης δομής σε υψηλούς αριθμούς Reynolds και γωνίες κλίσης. Ταυτόχρονα, δίδεται η δυνατότητα δημιουργίας μοναχικών κυμάτων σε μεγαλύτερο εύρος μεγεθών. Το χρησιμοποιούμενο ρευστό αλλάζει σε κάθε σειρά πειραμάτων για την αποφυγή προσμίξεων με το περιβάλλον. Η μέτρηση του ιξώδους του διαλύματος πραγματοποιείται μέσω της μέτρησης του συντελεστή διάθλασης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ειδικό διαθλασίμετρο υψηλής ακρίβειας (Abbe-refractometer, Krüss Optronic GmbH). Ο συντελεστής διάθλασης εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας (γλυκερίνη) στο διάλυμα (νερό). Έτσι, με τη χρήση κατάλληλου εγχειριδίου υπολογίζεται η συγκέντρωση του διαλύματος, άρα και οι φυσικές του ιδιότητες.

Οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος γλυκερίνης-νερού σε θερμοκρασία δωματίου ($25^{\circ}\text{C} \pm 1$) είναι: κινηματικό ιξώδες $\nu = 2.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, επιφανειακή τάση $\sigma = 70 \pm 1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ και πυκνότητα $\rho = 1066.4 \text{ Kg/m}^3$. Η επιφανειακή τάση του νερού, χωρίς προσμίξεις, είναι $\sigma = 72 \pm 1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$. Έτσι, ορίζεται ο αδιάστατος αριθμός Kapitza, $Ka = \sigma / \rho g^{1/3} \nu^{4/3}$, ο οποίος χαρακτηρίζει το χρησιμοποιούμενο ρευστό. Είναι $Ka=3365$ για νερό και $Ka=1102$ για διάλυμα γλυκερίνης-νερού (28% κ.β.). Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως εξής: $Re = q / \nu = \langle u \rangle h_N / \nu$, όπου q είναι η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους, h_N είναι το πάχος του υμένα κατά Nusselt και $\langle u \rangle$ είναι η μέση ταχύτητα. Η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί επίσης από τον αριθμό Weber, ο οποίος ορίζεται ως εξής: $We = \sigma / \rho \langle u \rangle^2 h_N$.

Η μέτρηση του ιξώδους πραγματοποιείται σε συχνή βάση και πάντοτε στην αρχή και στο τέλος κάθε σειράς μετρήσεων, για δύο λόγους. Ο προσδιορισμός της ακριβούς συγκέντρωσης διαλυμάτων μεγάλης ποσότητας (30-50 liters) απαιτεί τη σωστή ανάμειξη των διαφόρων συστατικών. Επιπλέον, η τάση ατμών του νερού είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από αυτή της γλυκερίνης με αποτέλεσμα ο ρυθμός εξάτμισης του νερού να είναι υψηλότερος (η γλυκερίνη

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

είναι υγροσκοπική). Έτσι, μετά τη πάροδο μεγάλου χρονικού διαστήματος, η σύσταση του διαλύματος αλλάζει καθώς η ροή υγρού υμένα συνίσταται από εξαιρετικά μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής.

Με την έναρξη του πειράματος, ο εγκλωβισμός του αέρα δημιουργεί ατέλειες στη ροή (φουσαλίδες κ.α.) με αποτέλεσμα να απαιτείται η πάροδος κάποιου χρονικού διαστήματος (περίπου 20-30 λεπτά) για την σταθεροποίηση της ροής. Το πρόβλημα της διάσπασης του υμένα λόγω κακής διαβροχής της επιφάνειας του τοιχώματος επιλύεται με την εξ ολοκλήρου επάλειψη του καναλιού με το κολλοειδές ρευστό Sodium Silicate. Το κολλοειδές ρευστό δεν επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες του διαλύματος αλλά ούτε και την διαφανή επιφάνεια μέτρησης του καναλιού (Plexiglas). Επιπρόσθετα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αλλαγή του διαλύματος προϋποθέτει όσο το δυνατόν καλύτερο καθαρισμό της συσκευής - χρησιμοποιείται υπεροξείδιο του υδρογόνου (Peridrol), το οποίο δεν επηρεάζει το υλικό κατασκευής (Plexiglas).

2.7.3. Παράμετροι του πειράματος

Η μελέτη γραμμικών και μη-γραμμικών κυμάτων καθώς και η διαδικασία μη-γραμμικής μετάβασης σε τρισδιάστατες δομές προϋποθέτει τη συλλογή μετρήσεων στο χώρο και στο χρόνο. Επίσης, η ροή υγρού υμένα πάνω από κυματοειδές τοίχωμα απαιτεί τη διεξοδική μελέτη επιρροής των παραμέτρων της ροής, καθώς τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας είναι ελάχιστα έως αμελητέα.

Ο αριθμός Reynolds, ο οποίος χαρακτηρίζει τη ροή και εκφράζει το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους, υπολογίζεται με βάση τη μέτρηση της ογκομετρικής παροχής ανά μονάδα πλάτους του τοιχώματος. Στις περισσότερες πειραματικές μετρήσεις, το χρησιμοποιούμενο εύρος των αριθμών Re κυμαίνεται από 5 έως 450 (ανάλογα με το είδος ρευστού).

Η γωνία κλίσης του καναλιού ρυθμίζει την ταχύτητα εξέλιξης των φαινομένων και το εύρος της, τόσο για ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα όσο και για ροή πάνω από κυματοειδές τοίχωμα, κυμαίνεται από 1 έως 15°.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη ρευστών, καθαρό νερό και διάλυμα γλυκερίνης-νερού με συγκεντρώσεις έως και 35% κ.β σε γλυκερίνη. Το είδος του διαλύματος χαρακτηρίζεται από τον αριθμό Karitza, ο οποίος υπολογίζεται άμεσα, αφού πρώτα μετρηθούν οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος. Η θερμοκρασία λειτουργίας συμπίπτει με αυτή του περιβάλλοντος χώρου, η οποία παραμένει σταθερή και ίση με 22 έως 25°C. Μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας λειτουργίας του πειράματος δεν επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου ρευστού, κάτι το οποίο ελέγχθηκε συστηματικά κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου μετρήσεων.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

Στη περίπτωση της ροής λεπτού υγρού υμένα κάτω από την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, η συχνότητα της διαταραχής αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικά της ροής. Συνήθως κυμαίνεται από 0.1 έως 1Hz και όποτε είναι αναγκαίο θα αναφέρεται στη ροή του κειμένου. Εκτός από τη συχνότητα της διαταραχής, το χρονικό διάστημα εισαγωγής επιπλέον ρευστού στο κανάλι αποτελεί μία επιπρόσθετη παράμετρο. Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με το είδος των δημιουργούμενων μοναχικών κυμάτων και συμβολίζεται με t_1 ($t_1=0.2-1\text{sec}$). Ο προσδιορισμός όλων των παραμέτρων πραγματοποιείται σε κάθε σειρά πειραμάτων και αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επεξεργασία τους.

2.7.4. Μέθοδος Απεικόνισης με Φθορισμό

Η μέτρηση του πάχους του υμένα στο χώρο αλλά και η εξάρτησή του με τον χρόνο αποτελεί τον κύριο στόχο για τη μελέτη της δυναμικής των μη-γραμμικών κυμάτων. Συνεπώς, είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση μιας τεχνικής η οποία να αποφέρει ποσοτικές μετρήσεις του στιγμιαίου πάχους του υμένα στο χώρο. Η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό (fluorescence imaging method), η οποία χρησιμοποιήθηκε σε παρεμφερή εφαρμογή από τους Liu et. al. (1993), είναι η πειραματική τεχνική μέτρησης του πάχους του υμένα χώρο-χρονικά.

Η προσθήκη μικρής ποσότητας (100-300ppm) κατάλληλης χρωστικής ουσίας στο διάλυμα έχει ως αποτέλεσμα τον φθορισμό του διαλύματος κάτω από την επίδραση υπεριώδους φωτός. Η επιλεγείσα χρωστική ουσία είναι η *ουρανίνη* (Sodium Salt of Fluorescein- $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$), η οποία εκπέμπει πράσινο-κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 525-580nm όταν απορροφά το υπεριώδες φως. Οι ιδιότητες του ρευστού δεν επηρεάζονται με τη διάλυση της χρωστικής ουσίας, Liu et. al. (1993).

Ως πηγή υπεριώδους φωτός χρησιμοποιήθηκαν δύο λαμπτήρες υψηλής έντασης (Phillips, TL20/05) με εξαρτήματα τροφοδοσίας (ballast, starter) για την ελάττωση των ταλαντώσεων της έντασης του υπεριώδους φωτός. Οι λαμπτήρες είναι τοποθετημένοι συμμετρικά ως προς τις άκρες του καναλιού σε συγκεκριμένη απόσταση από το επίπεδο τοίχωμα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατό καλύτερη κατανομή της έντασης του υπεριώδους φωτός. Η ένταση του υπεριώδους φωτός είναι αντίστροφα ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ των λαμπτήρων και του επιπέδου τοιχώματος. Συνεπώς, οποιαδήποτε μεταβολή της απόστασης επηρεάζει ανάλογα την εκπομπή του ορατού πλέον φωτός από τον φθορίζοντα υμένα. Η απόσταση των λαμπτήρων από το επίπεδο τοίχωμα, η συγκέντρωση της χρωστικής ουσίας, το είδος των λαμπτήρων φθορισμού και της χρωστικής ουσίας αποτελούν τις κύριες παραμέτρους της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό, οι οποίες πρέπει να διατηρούνται σταθερές για κάθε σειρά πειραματικών μετρήσεων.

Μια ψηφιακή κάμερα CCD (Sony XC-77/77CE) είναι τοποθετημένη κάτω από το κανάλι ροής (σχήμα 2.13) και χρησιμοποιείται για την συλλογή εικόνων. Η συγκεκριμένη κάμερα έχει

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

πολύ καλή ευαισθησία στο φως (0.5lux) και αναλογία σήματος-θορύβου (50dB), ενώ λαμβάνει 50 εικόνες ανά δευτερόλεπτο. Με τον κατάλληλο φακό εστίασης η περιοχή παρατήρησης αναμένεται να είναι 10x12cm. Η συλλογή και αποθήκευση των εικόνων πραγματοποιείται μέσω μιας κάρτας συλλογής εικόνων (DT3155 Frame Grabber Board – Data Translation) και του κατάλληλου λογισμικού. Η κάρτα επιτυγχάνει μεταφορά 30 εικόνων/δευτ. για συχνότητα 60Hz ή 25εικ./δευτ. για συχνότητα 50Hz. Η ικανότητα αποθήκευσης των εικόνων (χωρητικότητα 454Kbytes) είναι συνάρτηση της διαθέσιμης μνήμης του υπολογιστή και της ταχύτητας του σκληρού δίσκου. Οι εισερχόμενες εικόνες ψηφιοποιούνται σε 640 x 480 pixels ή 768 x 576 pixels με ανάλυση 8bits. Οι δυνατότητες αποθήκευσης της κάρτας συλλογής εικόνων, ανάλογα με τη διαθέσιμη μνήμη του υπολογιστή, είναι 75 εικόνες – 24MB – 640x480pix. ή 50 εικόνες – 24MB – 768x576pix.

Έτσι, εισάγοντας στο ρευστό κατάλληλη ποσότητα χρωστικής ουσίας, το ρευστό φθορίζει και εκπέμπει ορατό φως σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Με τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό επιτυγχάνεται η συλλογή εικόνων, οι οποίες δίδουν πληροφορίες σχετικά με την ένταση του φωτός που εκπέμπεται από τον υμένα.

Αναφορικά με το είδος των εικόνων, κάθε pixel της εικόνας αντιστοιχεί σε μία διακριτή τιμή η οποία με τη σειρά της αποτελεί το μέγεθος μέτρησης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τον υμένα. Ρυθμίζοντας τα επίπεδα ‘λευκού’ και ‘μαύρου’ (White/Black Level) σε μVolts είναι δυνατή η ψηφιοποίηση της εικόνας με την μετατροπή των διακριτών τιμών σε μVolts . Δεδομένου ότι ο αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας (A/D Converter) είναι διακριτικής ικανότητας 8-bit, κάθε σήμα χωρίζεται σε 255 διακριτές τιμές. Περιορίζοντας τα επίπεδα του λευκού και μαύρου επιπέδου (White-Black Level), η ακρίβεια της μέτρησης του συγκεκριμένου πάχους είναι της τάξης των 4 μm , όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Σε κάθε ψηφιακό σύστημα η ύπαρξη και η επιρροή του θερμικού θορύβου είναι αναπόφευκτη. Η διαπίστωση του θερμικού θορύβου γίνεται με την παράλληλη σύνδεση της κάμερας με ψηφιακό παλμογράφο και την εύρεση των μVolts που αντιστοιχούν όταν ο φακός της κάμερας είναι καλυμμένος (‘Black Level’). Ταυτόχρονα, είναι δυνατή η εύρεση της μέγιστης τάσης που λαμβάνει η κάμερα (ανάλογα με τον φωτισμό), η οποία αντιστοιχεί στο μέγιστο επίπεδο ‘White Level’.

Σύμφωνα με τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, το τοπικό πάχος υμένα $h(x,y,t)$ είναι γραμμικά ανάλογο με την ένταση του φωτός $I(x,y,t)$ που εκπέμπεται από τον φθορίζοντα υμένα. Έτσι:

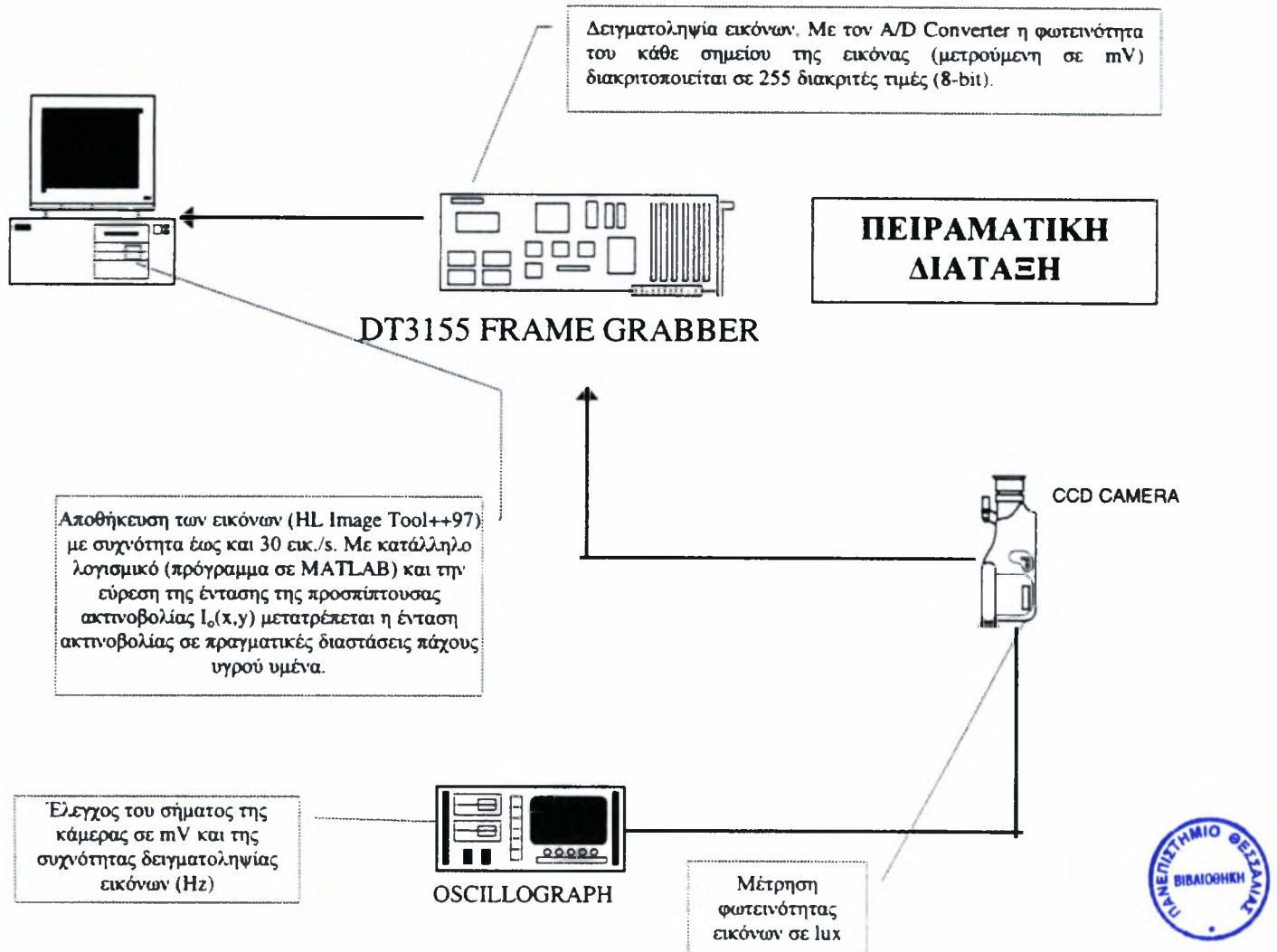
$$I(x,y,t) = \alpha(x,y) h(x,y,t) + \beta(x,y) \quad (3.1)$$

Όπου: $I(x,y,t)$ είναι η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, $h(x,y,t)$ είναι το στιγμιαίο τοπικό πάχος του υμένα και $\alpha(x,y)$, $\beta(x,y)$ είναι οι δύο συντελεστές της γραμμικής σχέσης. Διαπιστώθηκε ότι οι συντελεστές $\alpha(x,y)$ & $\beta(x,y)$ εξαρτώνται από το είδος του ρευστού, την

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

απόσταση των λαμπτήρων από το επίπεδο τοίχωμα, τη συγκέντρωση της χρωστικής ουσίας, το είδος των λαμπτήρων φθορισμού και το είδος της χρωστικής ουσίας. Επίσης, οι γραμμικοί συντελεστές εξαρτώνται από τη θέση μέτρησης διότι η κατανομή της υπεριάδους ακτινοβολίας, άρα και η εκπεμπόμενη από τον υμένα ακτινοβολία, δεν είναι ομοιόμορφη. Έτσι, σε κάθε σημείο-*pixel* της εικόνας αντιστοιχούν δύο ανεξάρτητες τιμές των συντελεστών $\alpha(x,y)$ & $\beta(x,y)$. Στο *σχήμα 2.16* φαίνεται ένα διάγραμμα που περιγράφει τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό καθώς και τα διάφορα όργανα μέτρησης.

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η εύρεση των δύο συντελεστών $\alpha(x,y)$ και $\beta(x,y)$ ώστε μετρώντας την ένταση του εκπεμπόμενου φωτός να είναι δυνατή η απευθείας μετατροπή σε πάχος υμένα. Ωστόσο, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, η οποία συλλέγεται μέσω της ψηφιακής κάμερας, είναι αυτή που εκπέμπεται λόγω φθορισμού του υμένα. Συνεπώς, κάθε είδος δευτερεύουσας ακτινοβολίας, είτε λόγω φυσικού φωτός είτε λόγω άλλων πηγών φωτισμού, πρέπει να απομονωθεί. Η χρησιμοποίηση κατάλληλων οπτικών φίλτρων, προσαρμοσμένων στο φακό της κάμερας, αποτελεί τη λύση του παραπάνω προβλήματος. Αποδείχθηκε ότι ο συνδυασμός δύο οπτικών φίλτρων (*yellow subtractive – green corrector*) επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα, που είναι ο περιορισμός του λαμβανόμενου φωτός σε εύρος μήκους κύματος εκπομπής μεταξύ 500-580nm. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως οι εικόνες που λαμβάνονται δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμες, αλλά χρήζουν ιδιαίτερης επεξεργασίας και μαθηματικής ανάλυσης, διαδικασία που ξεπερνά τους στόχους της παρούσας διπλωματικής.



Σχήμα 2.16: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

2.8. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΙΧΩΜΑ

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη μία λεπτομερής περιγραφή των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που διεξήχθησαν στην πρώτη συσκευή του εργαστηρίου, στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου του κ. Βλαχογιάννη. Αρχικά, δίδεται έμφαση στη περιγραφή της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, με τη βοήθεια της οποίας είναι δυνατή η μελέτη των μη-γραμμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ κυμάτων διαφορετικού μεγέθους. Η *συγχώνευση* (*coalescence*) μεταξύ δύο μοναχικών κυμάτων καθώς και διάφορα μεταβατικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μετά το πέρας της μη-γραμμικής αλληλεπίδρασης, περιγράφονται λεπτομερώς. Ειδικότερα, βρέθηκε ότι η επίτευξη της συγχώνευσης μεταξύ δύο κυμάτων εξαρτάται από τη διαφορά του ύψους μεταξύ των κυμάτων που αλληλεπιδρούν. Επιπλέον, η επιτυχής συγχώνευση έχει ως αποτέλεσμα τη

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

δημιουργία μιας σειράς μεταβατικών φαινομένων. Η δημιουργία ενός *υπερυψωμένου υποστρώματος* (*elevated back substrate*) στη πλάτη του διεγερμένου κύματος, η δημιουργία της *αστάθειας της ουράς* (*tail instability*), η απόσβεση και η επανεμφάνιση των κυματισμών που προηγούνται του μοναχικού κύματος (*front running ripples*), η γένεση – σχηματισμός νέων κυμάτων (*wave nucleation*) αλλά και ο διαχωρισμός τους (*splitting*) αποτελούν τα σημαντικότερα μεταβατικά φαινόμενα που πραγματεύεται το παρόν κεφάλαιο.

2.8.1. Εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή

Η μελέτη της ροής υγρού υμένα υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο έχει μελετηθεί διεξοδικά. Η εξέλιξη της ροής υγρού υμένα συναρτήσει της κατάντη αποστάσεως, χωρίς την επιβολή εξωτερικής διαταραχής, συνίσταται από τέσσερις περιοχές. Αρχικά, το μέγεθος των κυματισμών αυξάνεται εκθετικά (*linear inception region*) με αποτέλεσμα τη δημιουργία των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων (*saturated periodic waves*) εξαιτίας της πρωταρχικής αστάθειας αλλά και των ασθενών μη-γραμμικών μηχανισμών. Η επίδραση δευτερευουσών ασταθειών, όπως η υποαρμονική (*subharmonic*) και η πλευρική (*sideband*) αστάθεια, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μοναχικών κυμάτων (*solitary waves*) μεγάλου μήκους κύματος. Τέλος, οι κορυφές των μοναχικών κυμάτων, εξαιτίας τρισδιάστατων ασταθειών, διαχωρίζονται με αποτέλεσμα τη δημιουργία τρισδιάστατης δομής. Η επιβολή μιας εξωτερικής διαταραχής έχει ως στόχο την προσπέλαση ορισμένων περιοχών και την απ' ευθείας μελέτη συγκεκριμένων περιοχών της ροής. Για παράδειγμα, η επιβολή διαταραχής υψηλής συχνότητας δίδει τη δυνατότητα προσεκτικής μελέτης της δημιουργίας των κορεσμένων περιοδικών κυμάτων και της εξέλιξής τους.

Ωστόσο, η δημιουργία ενός είδους 'υδραυλικού άλματος' στην είσοδο του καναλιού, δηλαδή στο σημείο έναρξης του δημιουργούμενου υμένα, δεν αποτελεί συνηθισμένο τρόπο διαταραχής της ροής. Πρόκειται για μία έντονα μη-γραμμική διαταραχή, η οποία καταλήγει στη δημιουργία μιας σειράς σολιτονικών-μοναχικών κυμάτων σε σχετικά κοντινές αποστάσεις από το σημείο έναρξης σχηματισμού του υμένα. Εξαιτίας του είδους της διαταραχής, δίδεται η δυνατότητα μελέτης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ σολιτονικών κυμάτων διαφορετικού μεγέθους ή ύψους.

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, τοποθετώντας μια παράκαμψη εξόδου από το δοχείο υπερχειλίσης, δηλαδή το χώρο σχηματισμού του υμένα, προς το δοχείο συλλογής και συνδέοντας μια ηλεκτροβαλβίδα (ON/OFF) στο μεσοδιάστημα διαταράσσεται η ροή, με την εισαγωγή επιπλέον ποσότητας ρευστού στο δοχείο υπερχειλίσης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η παροχή ανά μονάδα πλάτους του καναλιού, της κύριας ροής υγρού υμένα, q_0 , είναι πάνω από το όριο της γραμμικής ευστάθειας. Η ροή διαταράσσεται περιοδικά με την εισαγωγή μιας πρόσθετης

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

ποσότητας ρευστού ανά μονάδα χρόνου, $\Delta q = q_1 - q_0$, αφού κλείσει η παράκαμψη εξόδου στο δοχείο συλλογής. Διατηρώντας κλειστή την παράκαμψη εξόδου για ένα χρονικό διάστημα t_1 , επιπλέον ποσότητα ρευστού συνεχίζει να εισέρχεται στο κανάλι δημιουργώντας μια πρόσθετη υπερχειλίση και αυξάνοντας τη παροχή εισόδου κατά Δq .

Η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής είναι χαμηλή ($f = 0.1667\text{Hz}$, ή $T = 6\text{sec}$), διότι θα πρέπει η επιπρόσθετη ποσότητα ρευστού να εξελίσσεται ανεξάρτητα για κάθε περίοδο της διαταραχής. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η ποσότητα ρευστού που εισέρχεται στο σημείο σχηματισμού του υμένα διαχωρίζεται και δημιουργεί μια σειρά μοναχικών κυμάτων, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η επιβεβαίωση της περιοδικότητας των φαινομένων αλλά και ο ξεκάθαρος διαχωρισμός μεταξύ των κυμάτων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια μίας περιόδου, επιβάλλουν την εισαγωγή διαταραχών με συχνότητα μικρότερη των 0.2 Hz .

Η χρονική διάρκεια t_1 , κατά την οποία εισάγεται πρόσθετη παροχή στο σημείο έναρξης σχηματισμού του υμένα, κυμαίνεται μεταξύ 0.2 έως 1.0 sec . Ο χρόνος t_1 εξαρτάται από την κλίση του καναλιού αλλά και τον μέσο αριθμό Reynolds. Σε μεγάλες γωνίες κλίσης του καναλιού, εξαιτίας της βαρύτητας, ο διαχωρισμός του υπερυψωμένου υμένα σε μια σειρά σολιτονικών κυμάτων είναι ταχύτατος. Σε τέτοιες περιπτώσεις η αύξηση του χρονικού διαστήματος t_1 έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερου αριθμού σολιτονικών κυμάτων, κάτι το οποίο, όπως θα φανεί στη συνέχεια, είναι επιθυμητό.

Στη περίπτωση της ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο τοίχωμα, η ροή χαρακτηρίζεται από τον αδιάστατο αριθμό Reynolds, ο οποίος, χρησιμοποιώντας τη μέση παροχή ανά μονάδα πλάτους, ορίζεται ως εξής:

$$\text{Re} = \frac{\langle q \rangle}{\nu} = \frac{(t_0 q_0 + t_1 q_1) / (t_0 + t_1)}{\nu} \quad (2.8)$$

όπου: $\langle q \rangle$ είναι η μέση παροχή ανά μονάδα πλάτους, ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού και $t_0 = T - t_1$ είναι η χρονική διάρκεια της κύριας ροής (χωρίς την εισαγωγή της διαταραχής) ανά περίοδο T .

Αν H είναι το θεωρητικά υπολογισμένο ύψος του υμένα κατά Nusselt, που αντιστοιχεί στην κυρίως ροή με παροχή q_0 , κατά τη διάρκεια εισαγωγής της επιπρόσθετης παροχής, η ανύψωση του υμένα στο σημείο σχηματισμού του είναι της τάξης του 5% του ύψους H . Έτσι, διαμορφώνεται ένα επιμηκυμένο κύρτωμα-καμπούρα (hump), το ύψος του οποίου δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο, συγκρινόμενο με το πάχος του υμένα κατά Nusselt. Το παραπάνω κύρτωμα διαχωρίζεται, κατάντη της ροής, σε μία σειρά κυμάτων, τα οποία αποκτούν τη μορφή των σολιτονικών κυμάτων μέσα από μη-γραμμικούς μηχανισμούς και αλληλεπιδράσεις. Το ύψος της επιβαλλόμενης διαταραχής δεν εξαρτάται από την χρονική διάρκεια t_1 , αν και η εξέλιξη μιας περισσότερο επιμηκυμένης διαταραχής οδηγεί στον στιγμιαίο σχηματισμό μεγαλύτερων

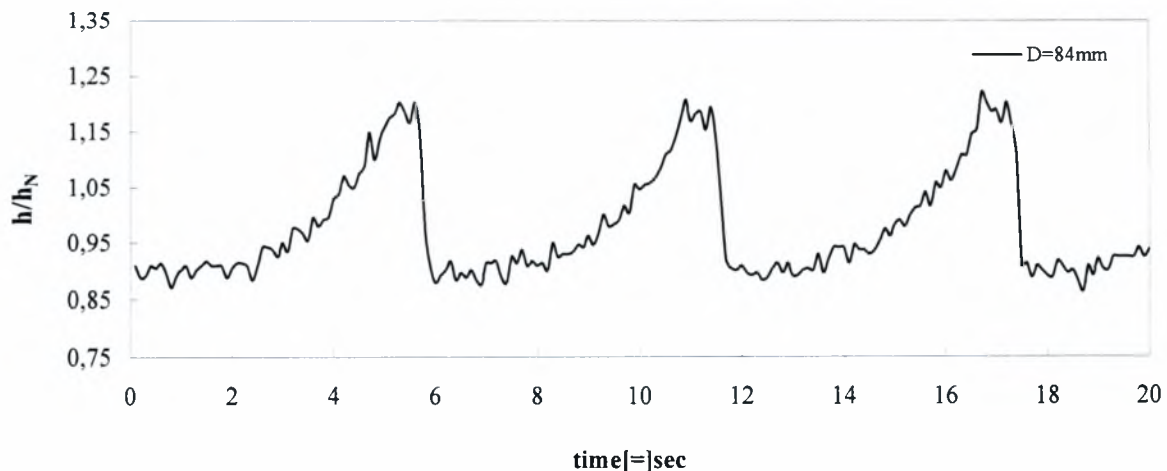
Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

μοναχικών κυμάτων. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, αυτό οφείλεται στη δυναμική των φαινομένων, που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ή και περισσότερων κυμάτων.

Η εξέλιξη της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, η εξάρτησή της από το χρονικό διάστημα επιβολής της, t_1 , αλλά και από το είδος του χρησιμοποιούμενου ρευστού αποτελεί το πρώτο βήμα χαρακτηρισμού της ροής υγρού υμένα υπό την επίδραση μιας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Στο σχήμα 2.17 απεικονίζεται η εξέλιξη, κατάντη της ροής, της εισαγόμενης διαταραχής, για την περίπτωση διαλύματος νερού-γλυκερίνης (28% κ.β.) σε αριθμό Reynolds $Re=37$, γωνία κλίσης $\varphi=5^\circ$ και $t_1=1.0\text{sec}$. Και στα έξι διαγράμματα απεικονίζεται η εξάρτηση του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$, σε ένα σημείο (x_o, y_o) του οπτικού πεδίου, για απόσταση $D=84\text{mm}$ από το σημείο σχηματισμού του υμένα στο κανάλι.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ο διαχωρισμός της εισαγόμενης διαταραχής σε μια σειρά σολιτονικών κυμάτων, σε ιδιαίτερα κοντινές αποστάσεις από το σημείο σχηματισμού του υμένα αλλά και εισαγωγής της διαταραχής. Η αρχική διαταραχή διαχωρίζεται σε, περίπου, έξι μοναχικά κύματα (solitary waves), με το πρώτο εξ' αυτών να αποτελεί το κύμα με το μεγαλύτερο ύψος. Η συνεχής αλληλεπίδραση μεταξύ των δημιουργούμενων κυμάτων αλλά και το γεγονός ότι η ταχύτητά τους είναι συνάρτηση του μεγέθους τους, αποτελούν τις βασικές αιτίες που το 1^ο μοναχικό κύμα έχει πάντοτε το μεγαλύτερο ύψος.

Ο αριθμός των δημιουργούμενων σολιτονικών κυμάτων είναι εξάρτηση της γωνίας κλίσης και του χρονικού διαστήματος t_1 , για συγκεκριμένο αριθμό Reynolds. Η επίδραση της βαρύτητας στον διαχωρισμό της αρχικής διαταραχής αλλά και στην εξέλιξή της είναι ιδιαίτερα σημαντική. Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού Reynolds επιταχύνει τον διαχωρισμό αλλά και την δημιουργία νέων κυμάτων (σολιτονικών ή μη) εξαιτίας των πρωταρχικών και δευτερευουσών ασταθειών, οι οποίες εντατικοποιούνται με την, ολοένα και μεγαλύτερη, απόκλιση από το όριο της γραμμικής ευστάθειας.



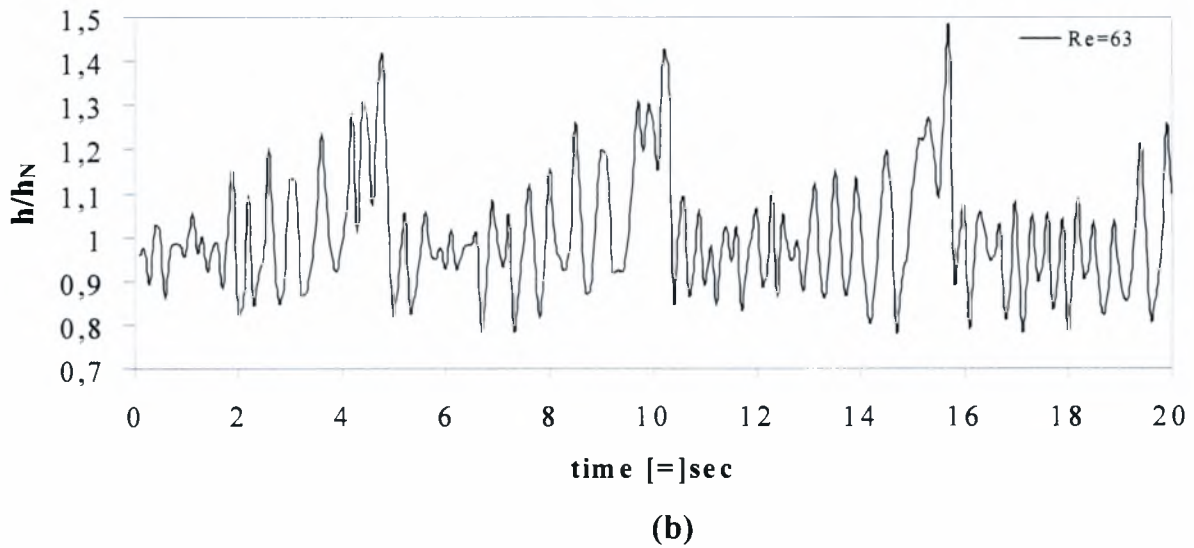
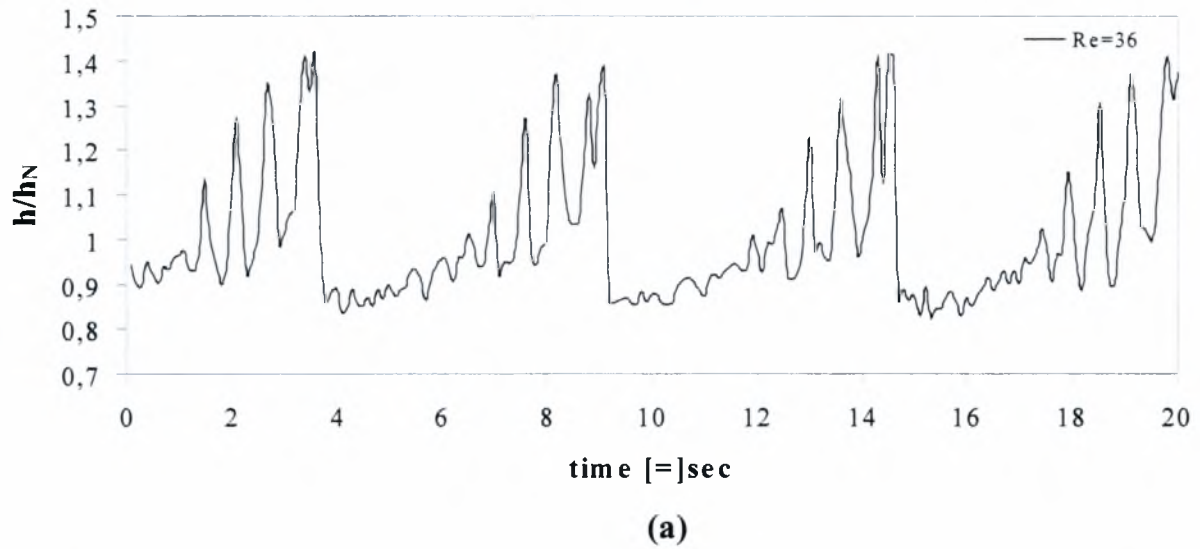
Σχήμα 2.17: Η εξέλιξη του πάχους του υμένα κατάντη της ροής για απόσταση $D=28\text{mm}$ από το σημείο σχηματισμού του υμένα. Οι παράμετροι του πειράματος είναι: $Re=37$, $\varphi=5^\circ$, $Ka=1102$ και $t_1=1.0\text{sec}$.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

Είναι, ακόμη, εφικτός και ο προσδιορισμός της επίδρασης του ιξώδους στην εξέλιξη της εισαγόμενης διαταραχής. Διατηρώντας και πάλι τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές και αυξάνοντας το ιξώδες του ρευστού, με την προσθήκη ανάλογης ποσότητας γλυκερίνης στο διάλυμα, διαπιστώνεται η μείωση του αριθμού των σχηματιζόμενων σολιτονικών κυμάτων. Η επίδραση των ιξωδών δυνάμεων, σε συνάρτηση πάντα με τις αδρανειακές δυνάμεις -δηλαδή τη γωνία κλίσης του καναλιού-, στη ροή υγρού υμένα υπό την επίδραση εξωτερικής διαταραχής, έγκειται στη μείωση της ταχύτητας εξέλιξης των φαινομένων με την αύξηση του ιξώδους του ρευστού. Έτσι, ο διαχωρισμός της εισαγόμενης διαταραχής σε μία σειρά σολιτονικών κυμάτων - αλλά και η δημιουργία νέων κυμάτων λόγω της αστάθειας του υμένα - επιβραδύνεται λόγω αύξησης του ιξώδους του ρευστού.

Αναφορικά με την επίδραση του μέσου αριθμού Reynolds στην εξέλιξη της εισαγόμενης διαταραχής, στο *σχήμα 2.18* απεικονίζεται η εξάρτηση του τοπικού πάχους του υμένα για δύο διαφορετικούς αριθμούς Re, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους της ροής. Είναι προφανές ότι ο διαχωρισμός της εισαγόμενης διαταραχής επιταχύνεται, με άμεσο αποτέλεσμα την δημιουργία μιας σειράς σολιτονικών κυμάτων. Ο υμένας, μεταξύ δύο διαταραχών, είναι εξαιρετικά ασταθής σε υψηλούς αριθμούς Re και η επίδραση της πρωταρχικής αστάθειας αρχικά και των δευτερευουσών ασταθειών στη συνέχεια, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών σολιτονικών κυμάτων. Το μέγεθος των κυμάτων διαφέρει ανάλογα και με την εξέλιξη των μη-γραμμικών φαινομένων, δηλαδή των αλληλεπιδράσεων που παρατηρούνται όταν δύο κύματα πλησιάσουν σε κοντινή απόσταση. Η ταχύτητα ενός σολιτονικού κύματος, η οποία είναι εξάρτηση του ύψους του (Alekseenko et al. 1985), είναι η αιτία προσέγγισης μεταξύ δύο κυμάτων διαφορετικού μεγέθους. Η επίτευξη μιας πλήρως ασυμπτωτικής κατάστασης, δηλαδή η δημιουργία μιας δομής όπου τα σολιτονικά κύματα θα έχουν αποκτήσει τη τελική τους μορφή, είναι αδύνατη στη προκειμένη περίπτωση. Και αυτό διότι, το είδος της επιβαλλόμενης διαταραχής είναι τέτοιο που οι συνεχείς μη-γραμμικές αλληλεπιδράσεις, μεταξύ των χωρικά άμεσα δημιουργούμενων σολιτονικών κυμάτων, επιφέρουν μία πλήρως δυναμική συμπεριφορά του υμένα. Κατάντη της ροής, η εξαγόμενη δομή της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα υπόκειται σε έντονες τρισδιάστατες αστάθειες, με αποτέλεσμα την μετάβαση στο λεγόμενο χώρο-χρονικό χάος (spatio-temporal chaos).

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα



Σχήμα 2.18: Η εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ για $\varphi=7^\circ$, $K\alpha=3365$ (water) $D=644\text{mm}$, $t_1 = 0.5\text{s}$ και **a)** $Re=36$, **b)** $Re=63$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: **“ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ”**

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διενέργεια πειραμάτων στο υφιστάμενο κανάλι ανέδειξε την ανάγκη δημιουργίας μιας πειραματικής διάταξης με μεγαλύτερο μήκος ροής που θα έδινε τη δυνατότητα στον ερευνητή να «παρακολουθήσει» ένα κύμα περισσότερη ώρα. Οι ομοιότητες των δύο συσκευών είναι πολλές. Ωστόσο, μία πρωτοποριακή λύση για το πρόβλημα δίνεται με το νέο τρόπο στήριξης της ψηφιακής κάμερας, η οποία ποια μπορεί να μετακινείται. Ανώτερος στόχος για την αξιοποίηση αυτής της δυνατότητας είναι η προσθήκη ενός μηχανισμού που θα επιτρέπει την κίνηση της κάμερας κατάντη της ροής με αποτέλεσμα ο ερευνητής να έχει στη διάθεσή του πολύ περισσότερα δεδομένα για ένα μονάχα κύμα. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αρχική κατασκευή του καναλιού. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται όλη η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Το εγχείρημα περιλάμβανε 3 στάδια:

1. Τη «βαριά» κατασκευή, αποτελούμενη από τα μεταλλικά μέρη και το κανάλι
2. Τα περιφερειακά κομμάτια της διάταξης (σωληνώσεις, αντλίες και ηλεκτρολογικά)
3. Τις πρώτες μετρήσεις για τον έλεγχο καλής λειτουργίας της συσκευής.

3.2 Η ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

3.2.1 Η μεταλλική βάση

Πριν την κατασκευή ελέγχθηκε η επιφάνεια του βιομηχανικού δαπέδου αν παρέκλινε πολύ από την οριζόντιο, γιατί αν αυτό συνέβαινε οι διορθώσεις θα ήταν προτιμότερο να γίνουν στη βάση της κατασκευής παρά στην τελική επιφάνεια. Δύο από τα βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του σκελετού έπρεπε να είναι τόσο η μικρή παρέκκλιση των δοκών από την οριζόντιο, την κατακόρυφο και τη μεταξύ τους παραλληλία όσο και η μηχανική σταθερότητα του συνόλου. Σημαντική βοήθεια στην επίτευξη αυτών των ιδιοτήτων αποτέλεσε το αρχικό συγκολλητό πλαίσιο (τελάρο) από UPN 100×50×5mm, πάνω στο οποίο εδράζονται οι κατακόρυφοι κοιλοδοκοί, τελικών διαστάσεων 3480×1130mm. Οι ανομοιομορφίες του δαπέδου διορθώθηκαν με την προσθήκη λεπτών μεταλλικών ελασμάτων σε κατάλληλα σημεία της περιμέτρου. Η πάκτωση της κατασκευής στο δάπεδο γίνεται με ειδικά βύσματα για σκυρόδεμα που στην επάνω πλευρά τους καταλήγουν σε σπείρωμα M10.

Πάνω στο πλαίσιο-οδηγό συγκολλούνται οι 6 βασικοί κοιλοδοκοί SHS 80×4mm , ύψους 1000mm. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ορθή τοποθέτησή τους αλλά και στη συγκόλλησή τους αφού αυτοί είναι οι βασικοί φορείς του ικριώματος και η σταθερότητά τους είναι αυτή που θα

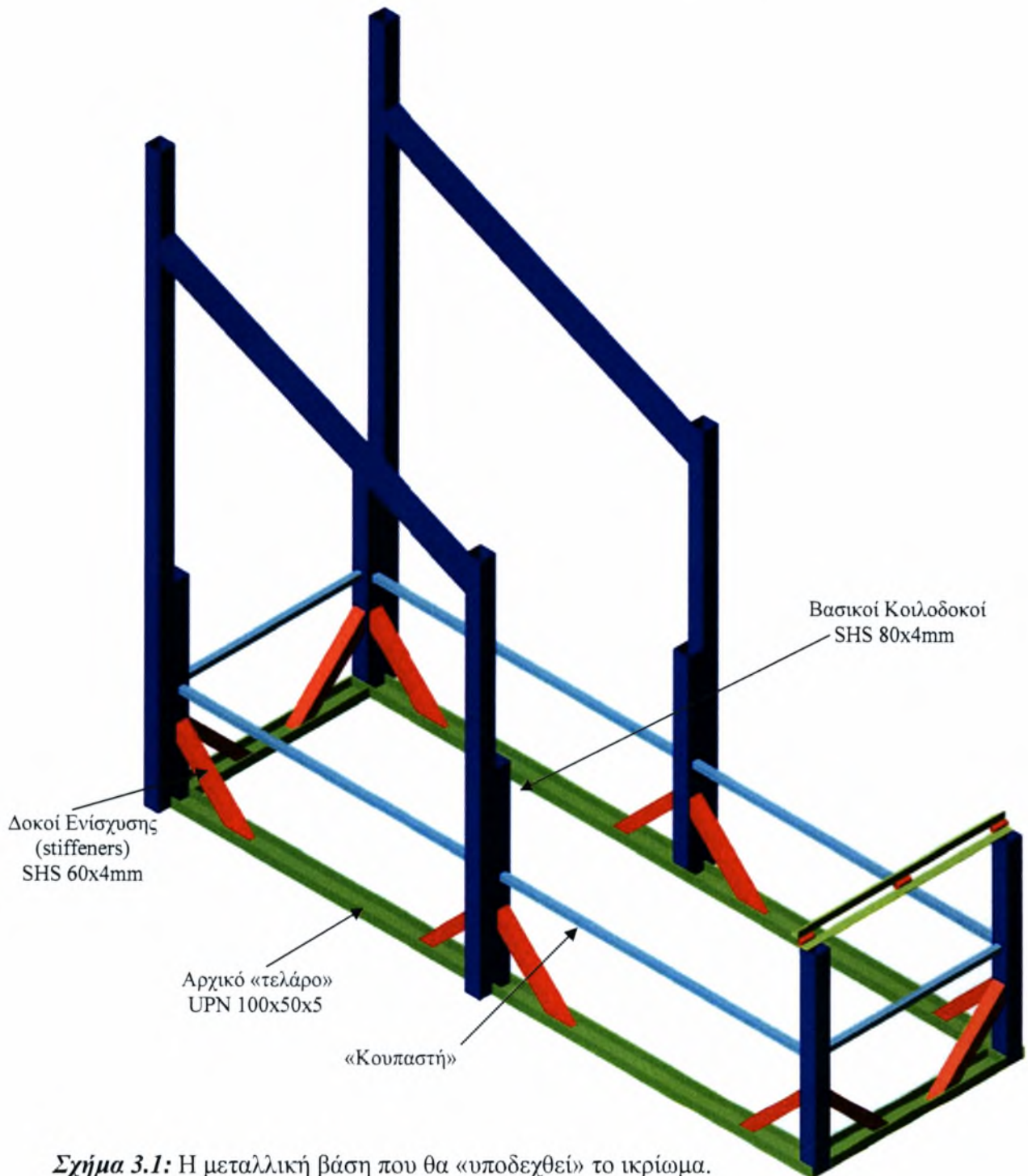
Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

προσέδιδε στιβαρότητα στο σύνολο. Για τη σημαντική αυτή ιδιότητα συγκολλούνται πλάγιες ενισχυτικές δοκοί πάνω στις υφιστάμενες διατομές SHS 80×4mm αλλά και μία μικρή «κουπαστή» περιμετρικά, αποτελούμενη από στραντζαριστό τετραγωνικής διατομής 30×2mm. Η ολοκλήρωση του πρώτου σκέλους γίνεται με την προσάρτηση, στην πίσω πλευρά του υφιστάμενου σκελετού, των δύο υπερυψωμένων πλαισίων που θα αποτελέσουν τη στήριξη των σωληνώσεων από και προς τη δεξαμενή. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως τα δύο πλαίσια προοριζόνταν, σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό, για τη στήριξη του ηλεκτρικού συστήματος ανύψωσης. Η ιδέα αυτή εγκαταλείφθηκε γιατί ο οποιοσδήποτε κραδασμός θα μεταφερόταν στο κανάλι θα προκαλούσε σύγχυση στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Με βάση τον προαναφερόμενο τεχνικό προβληματισμό καταργήθηκε και το μεταλλικό βάθρο που ήταν τοποθετημένο περιμετρικά του σκελετού. Προέκυψε με τη λογική αυτή μία στιβαρή μεταλλική κατασκευή έτοιμη να παραλάβει το φορτίο του ικριώματος.

3.2.2 Μέθοδοι μέτρησης

Όπως προαναφέρθηκε, η διασφάλιση των ορθών διαστάσεων και η μη παρέκκλιση από την οριζόντιο ή την κατακόρυφο αποτέλεσε ένα μόνιμο πρόβλημα κατά τη διάρκεια της κατασκευής και οδήγησε στη χρήση διάφορων μετρητικών μεθόδων όπως:

1. Αλφαδολάστιχο
2. Αλφάδι (με ακτίνα laser) στηριζόμενο πάνω σε τρίποδο
3. Χωροβάτη (ή θεοδόλιχο) μόνο για οριζοντίωση



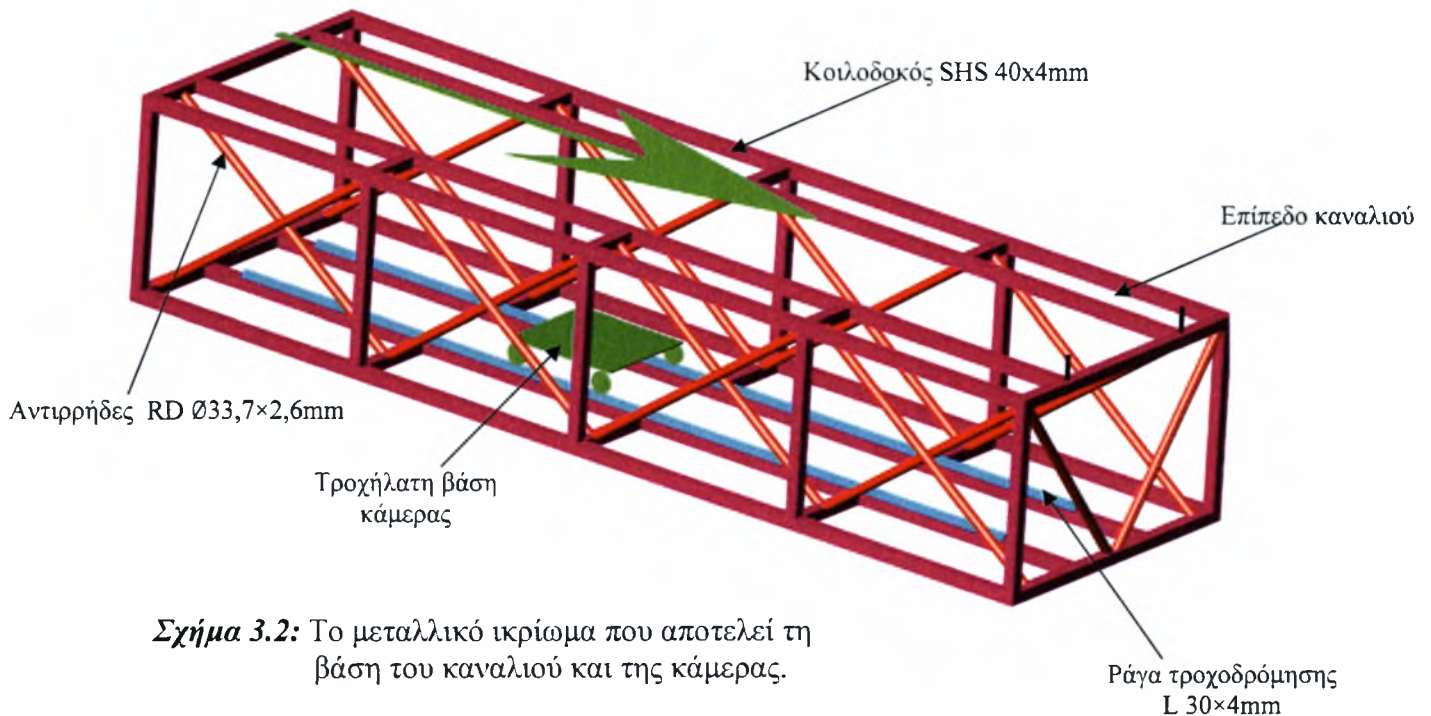
Σχήμα 3.1: Η μεταλλική βάση που θα «υποδεχθεί» το ικρίωμα.

3.2.3 Κατασκευή του ικρίωματος

Ο ρόλος που θα επιτελέσει το ικρίωμα είναι η βάση του καναλιού και ο χώρος κίνησης της ψηφιακής συσκευής κάτω απ' αυτό. Άρα μπορεί να θεωρηθεί ότι η κατασκευή θα αποτελείται από δύο επίπεδα **απολύτως παράλληλα** μεταξύ τους. Το ικρίωμα είναι ένα συγκολλητό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο τελικών διαστάσεων 3480×1040×680mm. Αυτές οι ακμές αποτελούνται από μονοκόμματες κοιλοδοκούς SHS 40×4, ενώ εσωτερικά η διάσταση του μήκους (3480) χωρίζεται σε 4 ζώνες ενίσχυσης όπου κοιλοδοκοί ίδιας διατομής συγκολλήθηκαν με τρόπο τέτοιο που να επιτρέπεται η απρόσκοπτη κίνηση της κάμερας κατά τον άξονα της ροής αλλά και η τοποθέτηση

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου ομένα

του καναλιού στο υπερκείμενο επίπεδο. Βασική προϋπόθεση για την ακαμψία του ικρίωματος ήταν η τοποθέτηση αντιρρήδων συμμετρικά της μέλλουσας ροής διατομής RD 33,7×2,6 , όπου ήταν λειτουργικά δυνατόν. Ακολούθησε η τοποθέτηση των ραγών τροχοδρόμησης του «βαγονέτου» της κάμερας. Το δεύτερο βασικό σκέλος της κατασκευής αποπερατώνεται με τη μεταφορά και τοποθέτηση το ικρίωματος πάνω στη μεταλλική βάση. Ταυτόχρονα, γίνεται η τοποθέτηση των μεντεσέδων στο μπροστινό μέρος που σε συνδυασμό με το αναβατήριο στο πίσω θα δημιουργούν την επιθυμητή κλίση της ροής. Για ακόμη μια φορά η χρήση προσθηκών για την ευθυγράμμιση των κομματιών ήταν απαραίτητη.



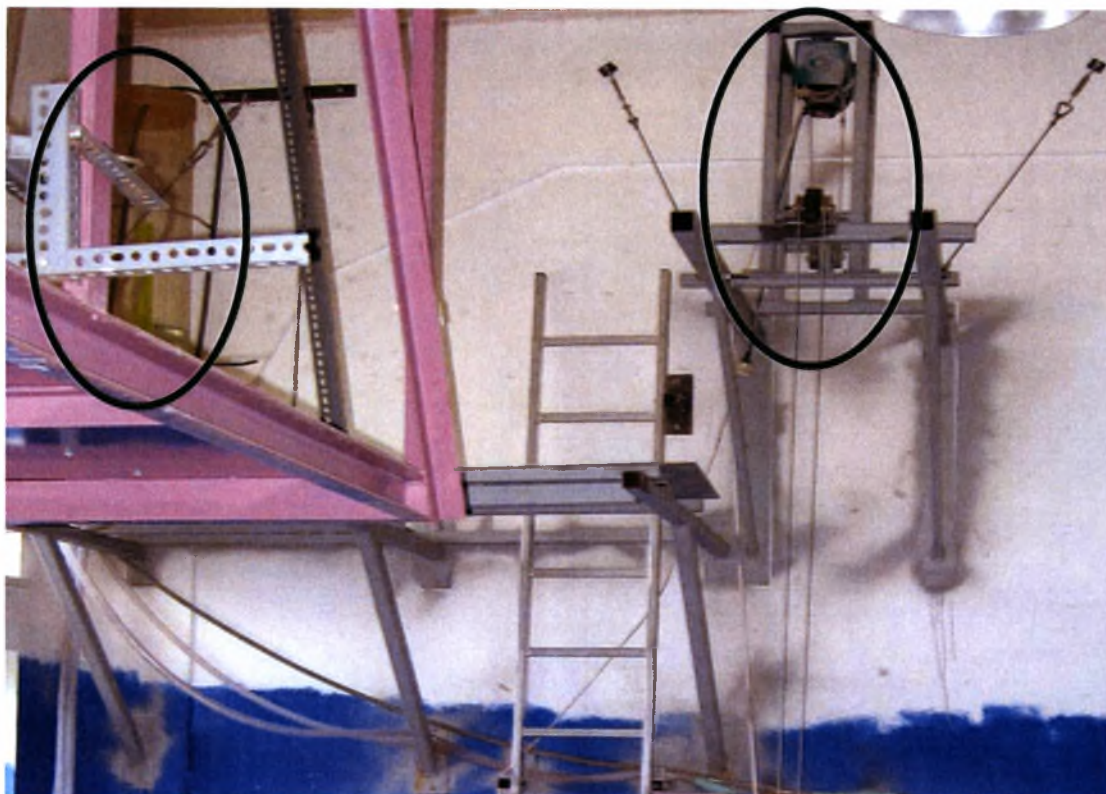
Σχήμα 3.2: Το μεταλλικό ικρίωμα που αποτελεί τη βάση του καναλιού και της κάμερας.



Σχήμα 3.3: Τρεις μεταλλικοί μεντεσέδες για τη σταθερή αλλαγή της κλίσης του καναλιού σε συνδυασμό με το ηλεκτρικό αναβατόριο

3.2.4 Κατασκευή υπερκείμενων εγκαταστάσεων

Επόμενο βήμα είναι η κατασκευή των βάσεων της δεξαμενής παροχής και του ηλεκτρικού αναβατορίου. Αυτές πακτώθηκαν στον κατακόρυφο τοίχο με βύσματα αλλά χρησιμοποιήθηκαν και αντιρρήδες από συρματόσχοινο για την επιπλέον σταθεροποίησή τους.



Σχήμα 3.4: Οι μεταλλικές βάσεις της δεξαμενής (αριστερά) και του ηλεκτρικού αναβατορίου (δεξιά), και οι αντιρρήδες ενίσχυσής τους.

3.2.5 Βαφή των μεταλλικών μερών

Είναι γνωστή η ευαισθησία των άβαφων μεταλλικών επιφανειών στην ατμοσφαιρική υγρασία και λαμβανομένου υπόψη του γεγονότος ότι το περιβάλλον του εργαστηρίου είναι αρκούτος «υγρό» κρίθηκε απαραίτητη η βαφή όλων των μεταλλικών μερών με αντισκωριακή βαφή με αστάρωμα και ένα χέρι ακόμα. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα βαφής με συμπιεστή αέρα.

3.2.6 Τεχνικές κατεργασίας του διαμορφωμένου σιδήρου

Κλείνοντας ένα μεγάλο κύκλο «βαρειών» εργασιών που είχαν να κάνουν στη συντριπτική τους πλειοψηφία με τη μεταλλική κατασκευή της πειραματικής διάταξης κρίνεται σκόπιμη μια «ανακεφαλαίωση» της μέχρι τώρα εμπειρίας και κυρίως της τεχνογνωσίας που αποκτήθηκε από τον γράφοντα.

1. Κοπή μετάλλου:

Για την κοπή των κοιλοδοκών χρησιμοποιήθηκε **κόφτης οξυγόνου – ασετιλίνης**, μέθοδος αρκετά γρήγορη αλλά με πολλή κακή τελική επιφάνεια με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η λείανση των επιφανειών που θα συγκολλούνταν με ηλεκτρικό τροχό. Ο τελευταίος χρησιμοποιήθηκε και για κοπή μικρών διατομών.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου ομένα

2. Συγκόλληση μετάλλων:

Τσως και η σημαντικότερη εμπειρία αφού τόσο το ικρίωμα όσο και ο βασικός σκελετός είχαν αρκετές συγκολλήσεις. Χρησιμοποιήθηκε μέθοδος ηλεκτροδίου (E111) και απλά βασικά ηλεκτρόδια διατομών $\varnothing 2,5$ και $\varnothing 4\text{mm}$. Η θέση συγκόλλησης ήταν κυρίως οριζόντια («πλάκα»), όπου ήταν δυνατό, και «ανεβατό».

3. Μέθοδος τετραγωνισμού («γώνιασμα»):

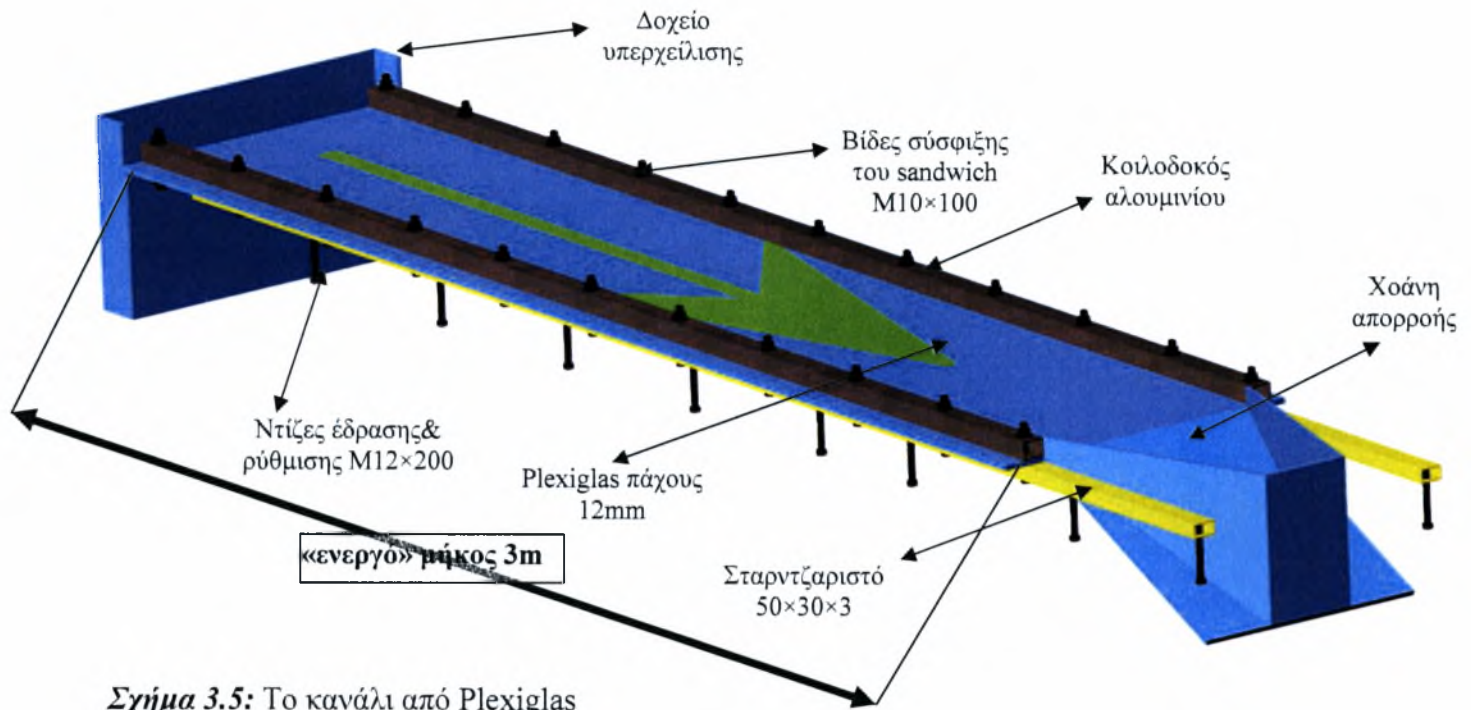
Το ικρίωμα αποτέλεσε το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου η διαστασιολόγηση των μεταλλικών πλαισίων απαιτούσε μεγάλη ακρίβεια. Για να εξασφαλιστεί η καθετότητα των πλευρών ενός παραλληλογράμμου μετρούνταν όχι μόνο η παραλληλία των πλευρών ανά δύο αλλά και οι δύο διαγώνιές τους. Σε συνδυασμό με τις συγκολλήσεις στο εν λόγω κομμάτι εμφανίστηκε το πρόβλημα της παραμόρφωσης λόγω τοπικής υπερθέρμανσης. Η λύση αυτού ήταν οι συγκολλήσεις να ακολουθούσαν μια αντισυμμετρική διαδοχή. Τέλος, στα πλαίσια του διαστατικού ελέγχου έγινε εκτεταμένη χρήση του χωροβατικού οργάνου.

3.3 Η ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ PLEXIGLAS

Όλες οι εργασίες που έγιναν μέχρι αυτό το σημείο αποτέλεσαν την υποδομή της πειραματικής διάταξης. «Καρδιά» της τελευταίας είναι, όπως είναι αναμενόμενο το διάφανο κανάλι πάνω στο οποίο θα εξελίσσεται η ροή. Η επιλογή του υλικού ήταν ουσιαστικά μονόδρομος αφού το Plexiglas συγκεντρώνει όλες τις ιδιότητες που απαιτούνταν:

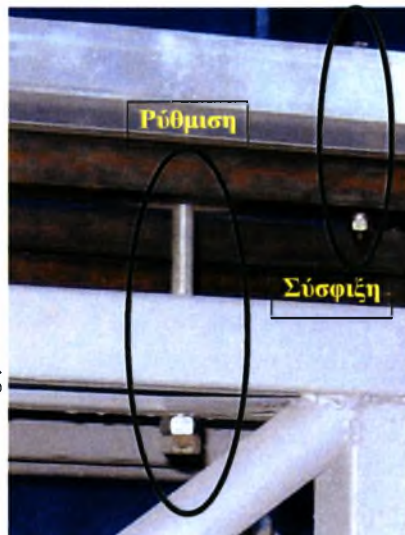
- Διαύγεια – (ο δείκτης διάθλασης είναι παρόμοιος με του γυαλιού).
- Μηχανική αντοχή σε κρουστικά φορτία σε αντίθεση με την ψαθυρότητα του γυαλιού.
- Ελαστικότητα (εξαρτώμενη από το πάχος του κομματιού).
- Ποικιλία διαστάσεων.
- Ευκολία στην εφαρμογή (κοπή, διάτρηση, σπειροτόμηση, φρεζάρισμα, συγκόλληση) χωρίς την απαίτηση ειδικών εργαλείων ή εξειδικευμένων τεχνικών.
- Η επιφάνεια επαφής του με το νερό είναι λεία και στυλπνή όσο και αυτή του γυαλιού.

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα



Σχήμα 3.5: Το κανάλι από Plexiglas

Το κεντρικό κομμάτι του καναλιού που θα όριζε και το ενεργό μήκος της ροής έχει διαστάσεις $3000 \times 700 \times 12\text{mm}$. Το πάχος των 12mm είναι αρκετά μεγάλο αλλά στην προκειμένη περίπτωση χρειαζόταν η ακαμψία. Για να συγκρατηθεί στην υφιστάμενη κατασκευή χρησιμοποιήθηκε για κάθε πλευρά μία αλουμινένια κοιλοδοκός ($50 \times 40 \times 4\text{mm}$) και ένα σταρντζαριστό ($50 \times 30 \times 3\text{mm}$) τοποθετημένα από πάνω και από κάτω αντίστοιχα. Αυτή η διάταξη “sandwich” συσφίγγεται με 11 περαστές βίδες M10 σε κάθε πλευρά, όπως φαίνεται στο σχήμα. Άλλες 8 ντίζες M12×200mm εκατέρωθεν του άξονα του καναλιού συνδέουν το σταρντζαριστό με την πάνω πλευρά του ικριώματος με τρόπο τέτοιο ώστε το κανάλι να μην έχει βέλος κάμψης αλλά και να μεταβάλλεται η απόστασή του από τη βάση του. Μετά την προσθήκη των τεσσάρων δοκών η ροή θα «περιοριστεί» στο πλάτος των 520mm με μήκος 3000mm .

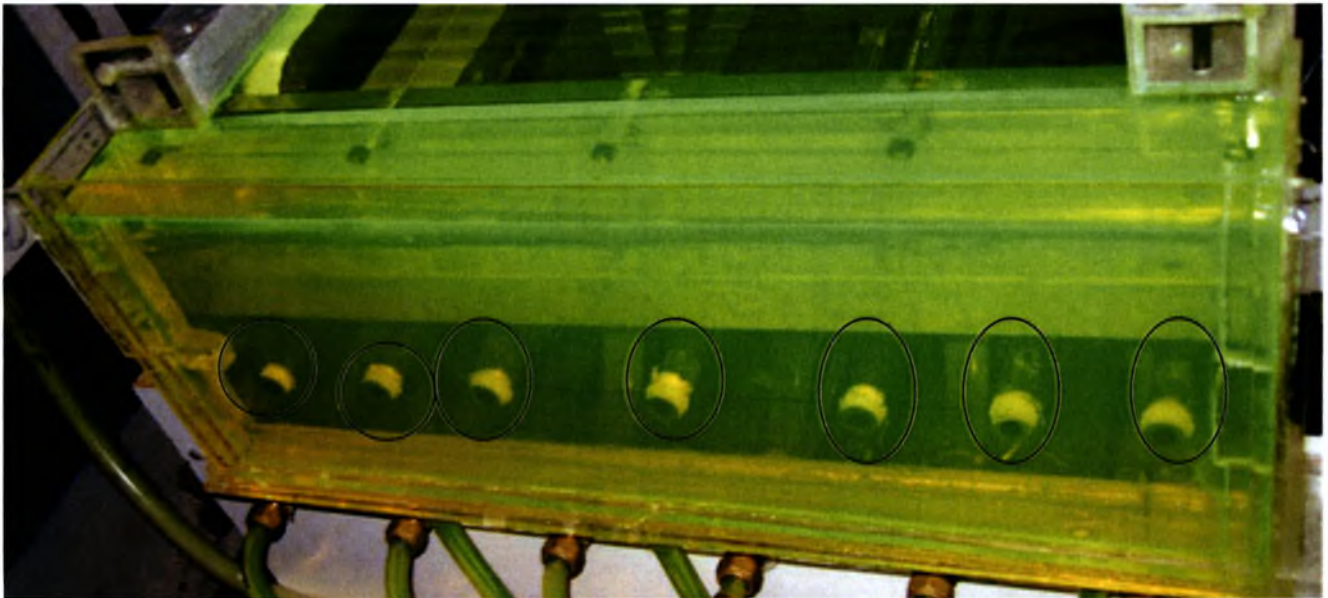


Σχήμα 3.6: Σύσφιξη του καναλιού με τους κοιλοδοκούς και ρύθμιση της απόστασής του από το ικριώμα

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

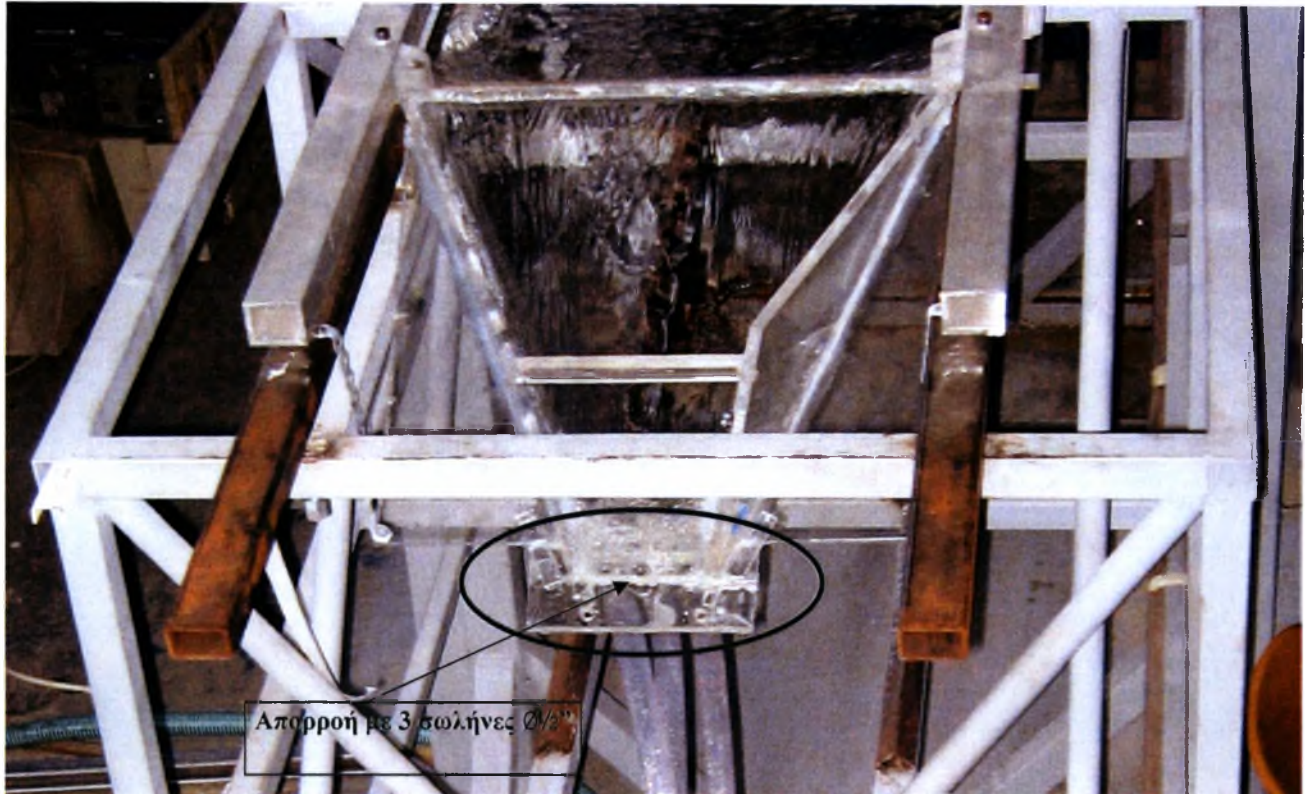
3.3.1 Το δοχείο υπερχειλίσης και η χοάνη απορροής

Παράλληλα με το κανάλι κατασκευάζεται και το δοχείο υπερχειλίσης που θα δίνει την παροχή του νερού σε αυτό. Αποτελείται βέβαια από λεπτότερα κομμάτια Plexiglas 8 και 12mm. Συγκολλούνται μεταξύ τους με «υγρό Plexiglas», κόλλα που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο αποτελούμενη από διαλυμένα ρινίσματα υλικού Plexiglas σε χλωροφόρμιο έπειτα από καλή ανάδευση. Το παραλληλεπίπεδο που δημιουργήθηκε, διαστάσεων 700×100×400mm, ελέγχθηκε για τη στεγανότητά του και μονώθηκε στους αρμούς του με διάφανη σιλικόνη. Για την προσαγωγή του νερού διατρήθηκε η εσωτερική κατακόρυφη πλευρά του πάχους 12mm. Έγιναν 7 τρύπες με χειροκίνητο δράπανο και τρυπάνι $\varnothing 19\text{mm}$ ώστε να ακολουθήσει σπειροτόμος (κολαούζο) για υδραυλικό σωλήνα εσωτερικής διατομής $\varnothing 1/2''$. Στη συνέχεια, αντίστοιχης διατομής πλαστική σωλήνα κόπηκε και σπειροτομήθηκε ώστε να δημιουργηθούν 7 απολήξεις μήκους 100mm.



Σχήμα 3.7: Το δοχείο υπερχειλίσης με τις 7 απολήξεις προσαγωγής

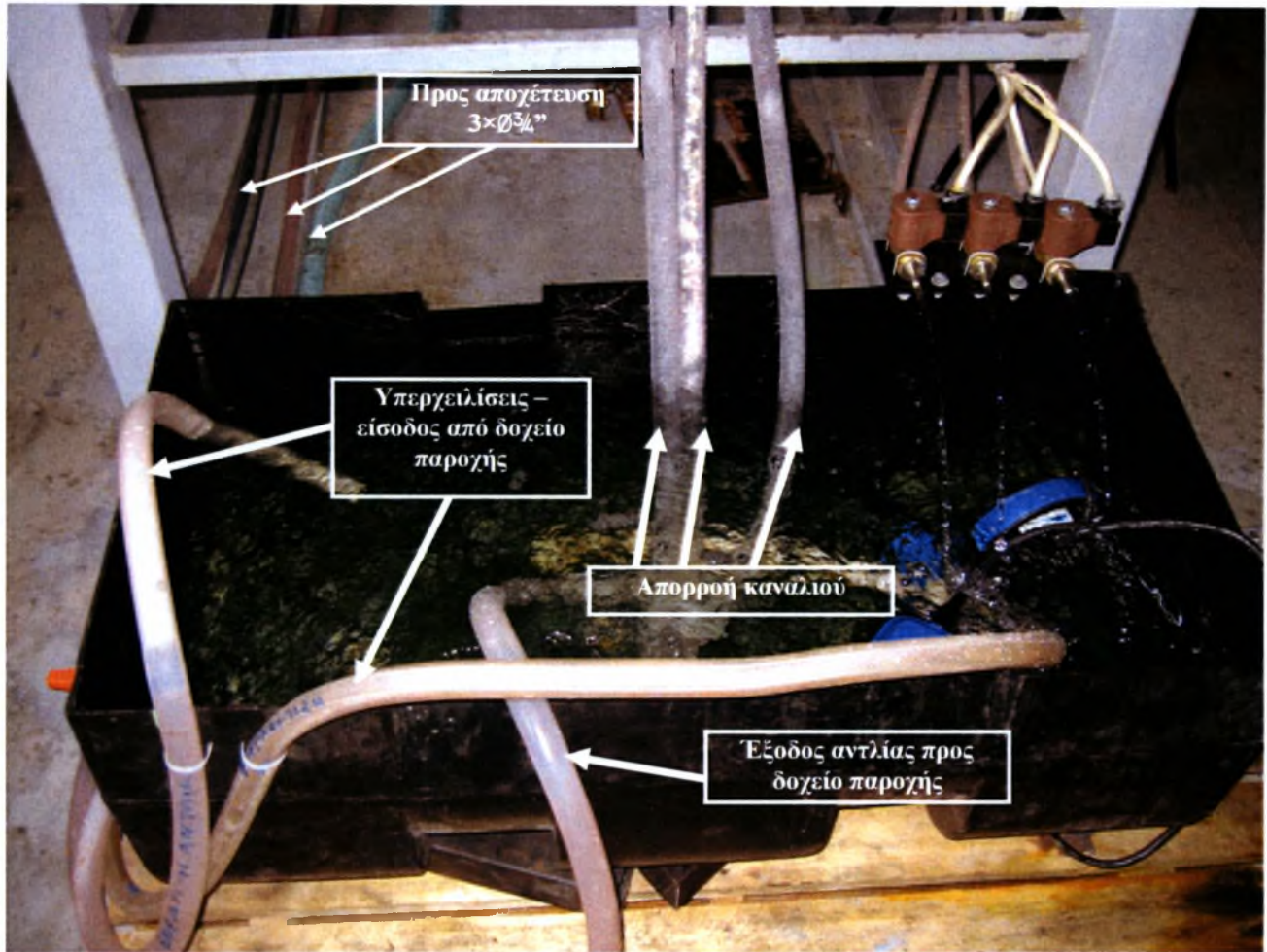
Το τελευταίο κομμάτι που προσαρτήθηκε στο κανάλι είναι η χοάνη απορροής που αποτελείται επίσης από φύλλα Plexiglas πάχους 12mm. Συγκολλήθηκε και στεγανοποιήθηκε με την ίδια τεχνική, όμως εδώ τοποθετήθηκαν μόνο 3 απολήξεις με συνέπεια την ανεπάρκεια απορρόφησης όλης την παροχής και την υπερχειλίσή της. Κάπου εδώ ολοκληρώνεται το δεύτερο σκέλος των εργασιών για να ακολουθήσει ο κύκλος της κατασκευής των περιφερειακών κομματιών και των απαραίτητων σωληνώσεων για τη διοχέτευση νερού στο κανάλι.



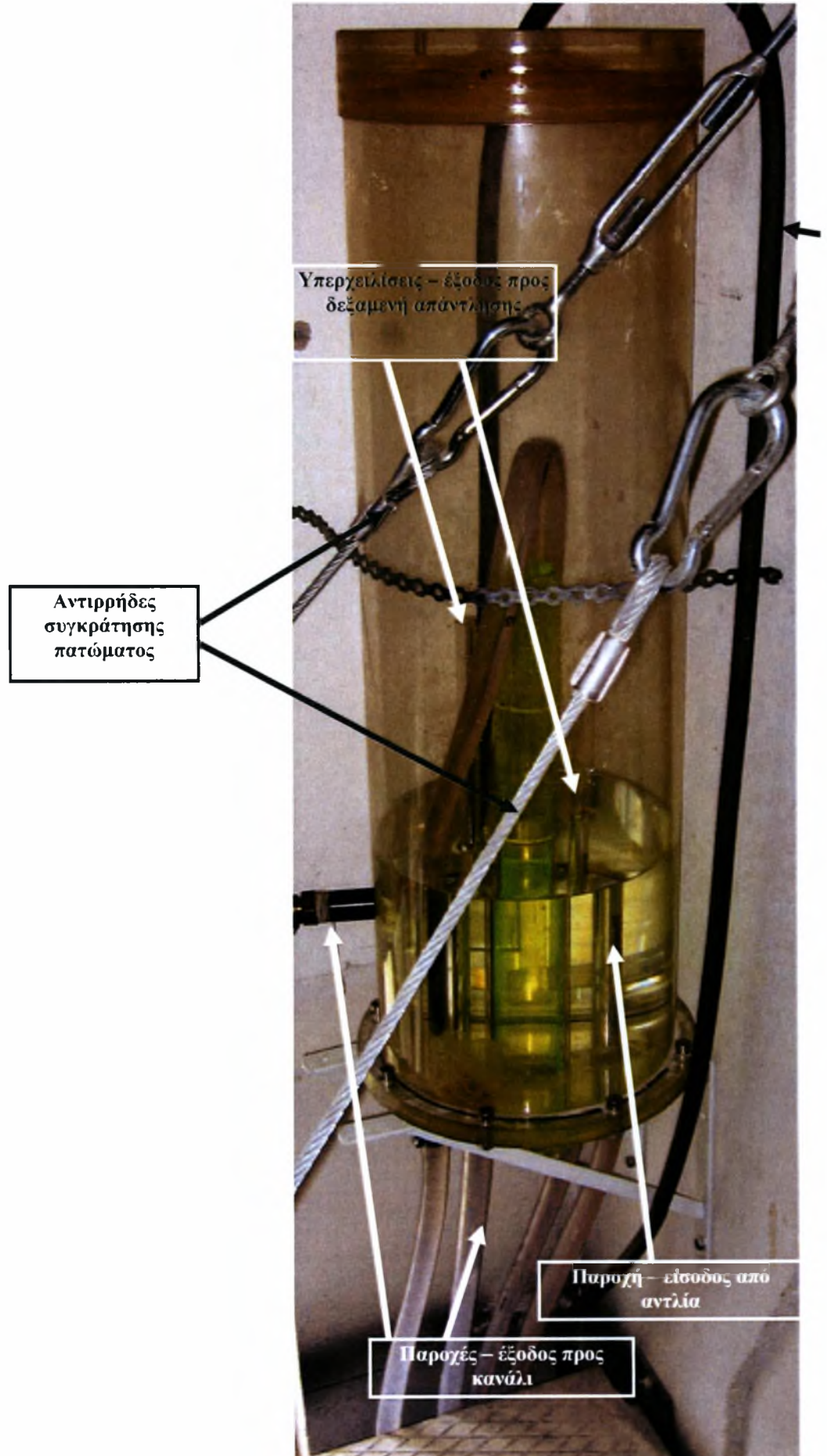
Σχήμα 3.8: Η χοάνη απορροής, με τους τρεις σωλήνες $\text{\O}1/2''$ που οδηγούν το νερό στη δεξαμενή απάντλησης

3.3.2 Οι δεξαμενές απορροής – απάντλησης & παροχής - υπερχείλισης

Μία πλαστική δεξαμενή χωρητικότητας $1,5\text{m}^3$ κόπηκε από πάνω για να αποτελέσει το στεγανό εκείνο χώρο που θα συγκεντρώνεται το νερό, εξερχόμενο από το κανάλι, και να αντλείται από την εμβαπτιζόμενη ηλεκτρική αντλία μανομετρικού ύψους $h=10\text{m}$ έως τη δεξαμενή υπερχείλισης και παροχής για την ανακυκλοφορία του. Στην εν λόγω δεξαμενή, εκτός από τη σωλήνα της αντλίας, καταλήγουν και δύο υπερχειλίσεις από το δοχείο παροχής που βρίσκεται σε ύψος 5m από το δάπεδο. Οι τελευταίες έχουν βοηθητικό ρόλο και αποτρέπουν την υπερχείλιση του δοχείου παροχής γιατί κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων η παροχή που έχει το κανάλι είναι υποπολλαπλάσια αυτής της αντλίας με άμεση συνέπεια τη συγκέντρωση του νερού του κυκλώματος επάνω σε βαθμό που η αντλία κάποια στιγμή θα αποστράγγιζε τη δεξαμενή και θα καταστρεφόταν αντλώντας αέρα. Μετά τη διεκπεραίωση των πειραμάτων κάθε φορά είναι απαραίτητη η αποστράγγιση του υδραυλικού κυκλώματος από το νερό με τη χρωστική και η έκπλυσή του με καθαρό νερό για την αποφυγή επικαθίσεων. Είναι σαφές πως πρέπει σε κάποιο σημείο να υπάρχει παροχή δικτύου και άλλο ένα συνδεδεμένο με την αποχέτευση. Αυτά είναι στο δοχείο παροχής και στη δεξαμενή απορροής αντίστοιχα.



Σχήμα 3.9: Η δεξαμενή απάντλησης με την εμβολιζόμενη αντλία για την ανακυκλοφορία του υγρού, και την έξοδο προς την αποχέτευση



Σχήμα 3.10: Η δεξαμενή παροχής του υγρού στο κανάλι με το οποίο έχει υψομετρική διαφορά 3-4m.

3.4 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ

Η αρχή λειτουργίας του και ο λόγος ύπαρξής του αναλύθηκε διεξοδικά στο 2^ο κεφάλαιο. Ομοίως με την πρώτη διάταξη, έτσι και εδώ σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα «υδραυλικό άλμα» στην αφετηρία της ροής του υμένα ώστε να μελετηθεί η δυναμική εξέλιξή του κατάντι της ροής. Τρεις σωλήνες διαμέτρου Ø10mm τοποθετημένες στο κάτω μέρος του δοχείου υπερχειλίσης οδηγούνται σε τρεις ηλεκτροβαλβίδες ON/OFF και καταλήγουν απ' ευθείας στη δεξαμενή απορροής. Οι ηλεκτροβαλβίδες είναι παράλληλα συνδεδεμένες σε έναν ηλεκτρονικό χρονοστή που ελέγχει το ρυθμό που ανοίγουν και κλείνουν. Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου που η βαλβίδα θα είναι κλειστή και χωριστά του χρόνου που θα είναι ανοιχτή. Συνολικά η διαταραχή που προκαλείται μπορεί να φτάσει τη συχνότητα των 10 Hz (0.1sec NO-0.1sec NC). Τροφοδοτείται με τάση 220 Volt και δίνει στις ηλεκτροβαλβίδες επίσης 220 Volt, οι οποίες όταν δεν έχουν τάση είναι κλειστές. Έχοντας πια τη δυνατότητα να προκληθεί μία, στιγμιαία ή μη, αύξηση της παροχής του ρευστού στο κανάλι μπορεί να δημιουργηθεί μία διαταραχή στη ροή του επίπεδου υμένα που θα οδηγήσει στη γένεση ενός «σολιτονικού» κύματος ή μιας οικογένειας τέτοιων κυμάτων που η συχνότητα εμφάνισής τους θα ελέγχεται άμεσα από το χειριστή της συσκευής. Σημειώνεται πως η ελάχιστη υψομετρική διαφορά του δοχείου υπερχειλίσης από τη δεξαμενή απορροής είναι 1m, ενώ αυξάνοντας την κλίση του καναλιού αυξάνεται και αυτή με συνέπεια την εντατικοποίηση του φαινομένου του «υδραυλικού άλματος».

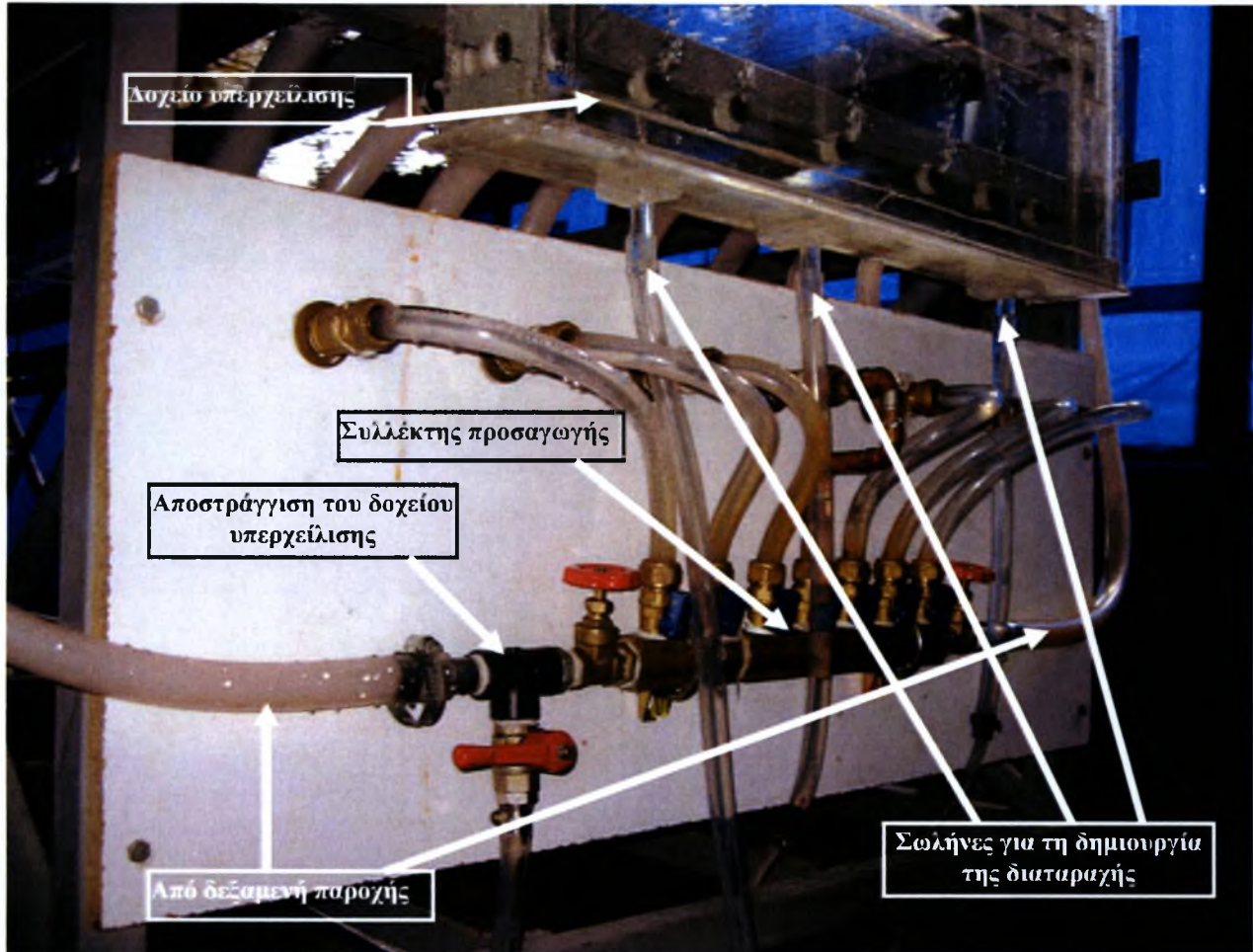


Σχήμα 3.11: Ο χρονιστής του συστήματος διαταραχής (αριστερά) και ο γενικός διακόπτης (δεξιά)



Σχήμα 3.12:

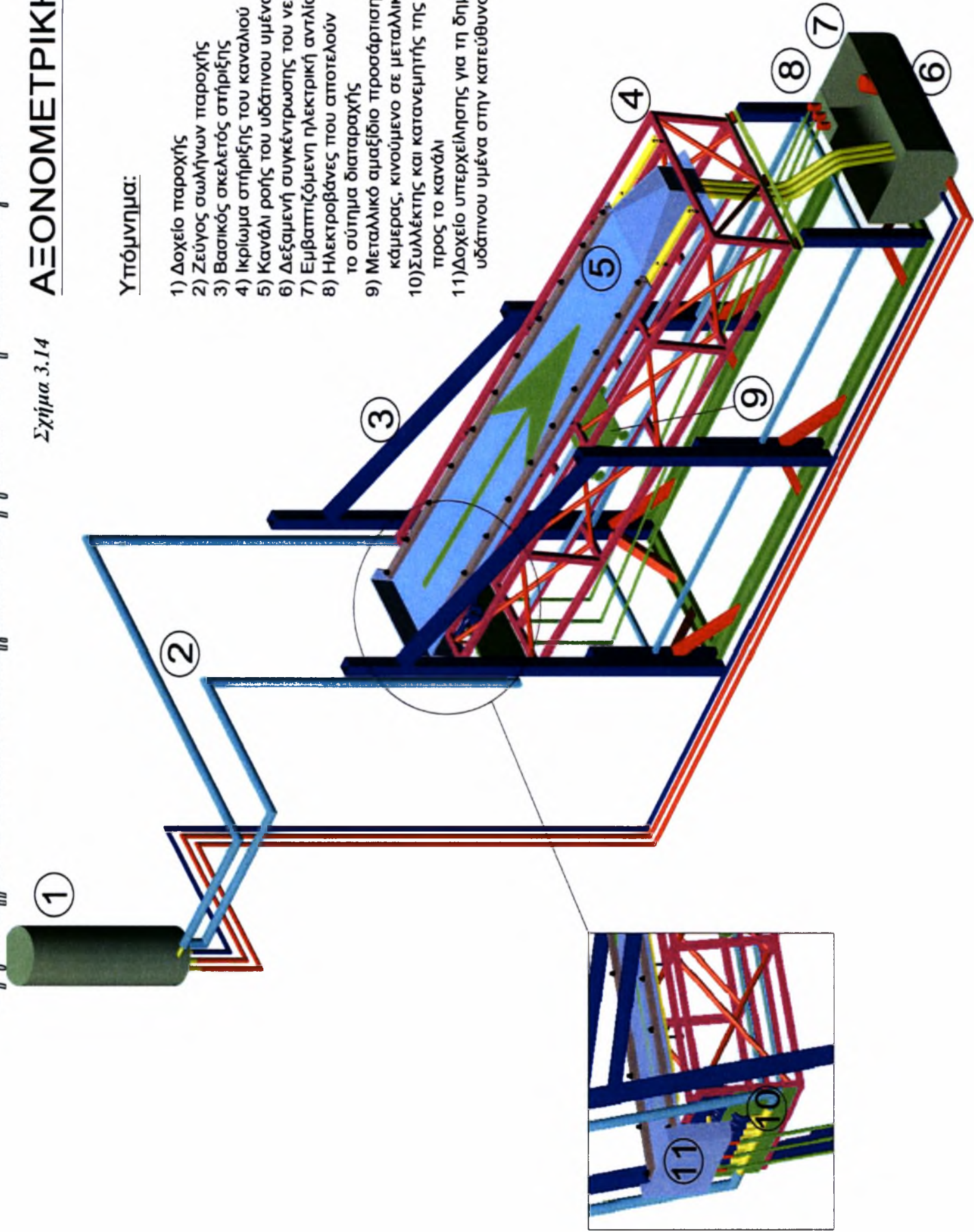
Οι ηλεκτροβαλβίδες ελεγχόμενες από το χρονιστή δημιουργούν το «υδραυλικό άλμα» στον υμένα



Σχήμα 3.13: Το πάνελ με το συλλέκτη προσαγωγής του νερού

3.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ

Στην παρούσα παράγραφο επισυνάπτονται τα κατασκευαστικά σχέδια της πειραματικής συσκευής. Ο σχεδιασμός έγινε με τη μέθοδο CAD (Computer Aided Software) και συγκεκριμένα με τη δημοφιλή σχεδιαστική βάση της Autodesk AUTOCAD 2005. Αρχικά δημιουργήθηκε ένα μοντέλο τριών διαστάσεων σε κλίμακα 1:1 από το οποίο παράχθηκαν οι επιμέρους όψεις του. Σημειώνεται ότι η σκίαση και ο χρωματισμός έγιναν για εποπτικούς λόγους και δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.



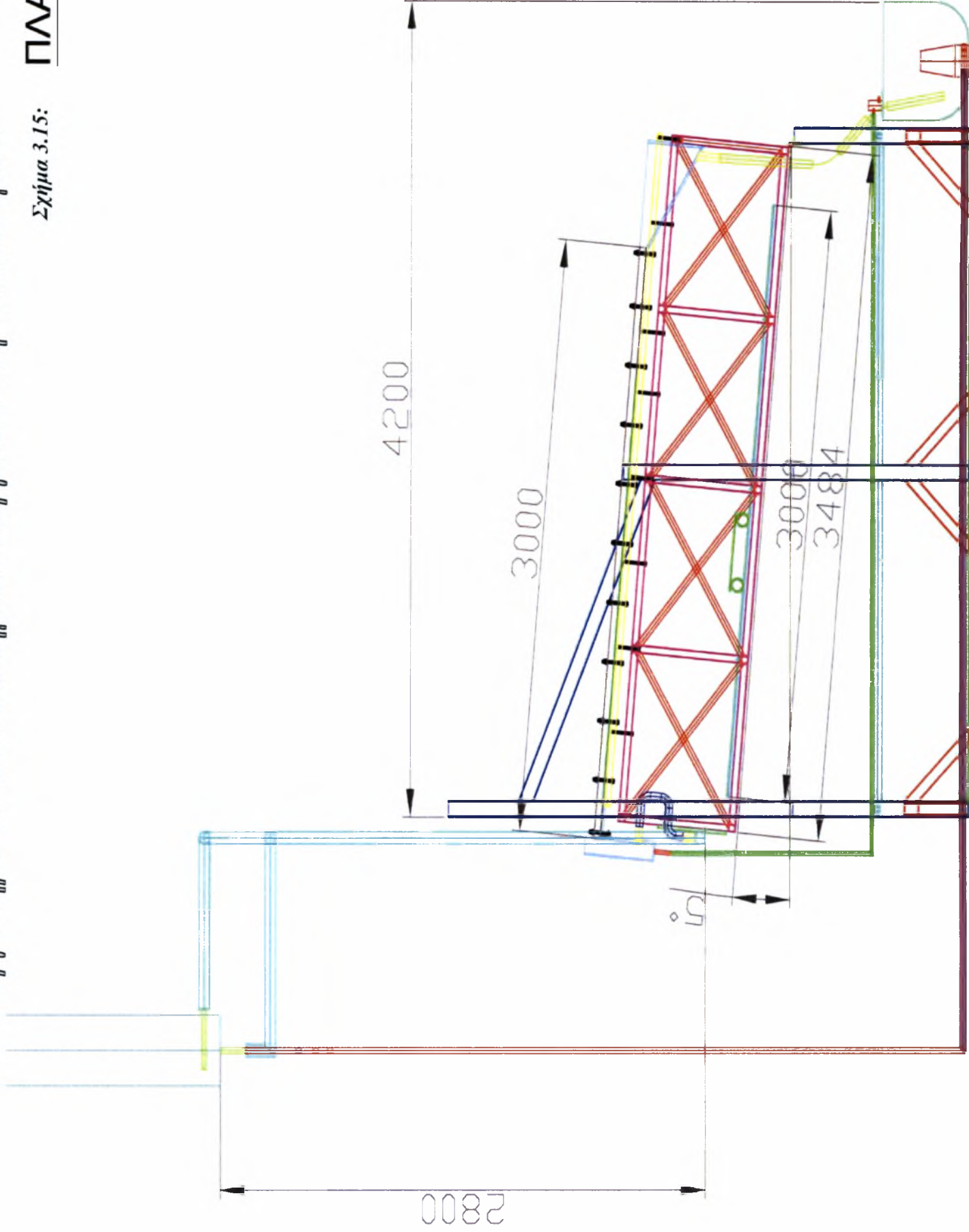
Υπόμνημα:

- 1) Δοχείο παροχής
- 2) Ζεύγος σωλήνων παροχής
- 3) Βασικός σκελετός στήριξης
- 4) Ικρίωμα στήριξης του καναλιού
- 5) Κανάλι ροής του οδάτινου υμένα
- 6) Δεξαμενή συγκέντρωσης του νερού
- 7) Εμβαπτίζόμενη ηλεκτρική αντλία ανακύκλωσης
- 8) Ηλεκτροβάνες που αποτελούν το σύστημα διασφαχής
- 9) Μεταλλικό αμείβιο προσάρτισης της ψηφιακής κάμερας, κινούμενο σε μεταλλικές ράγες
- 10) Συλλέκτης και κατανεμητής της παροχής προς το κανάλι
- 11) Δοχείο υπερχειλήσης για τη δημιουργία του λεπτού οδάτινου υμένα στην κατεύθυνση της ροής

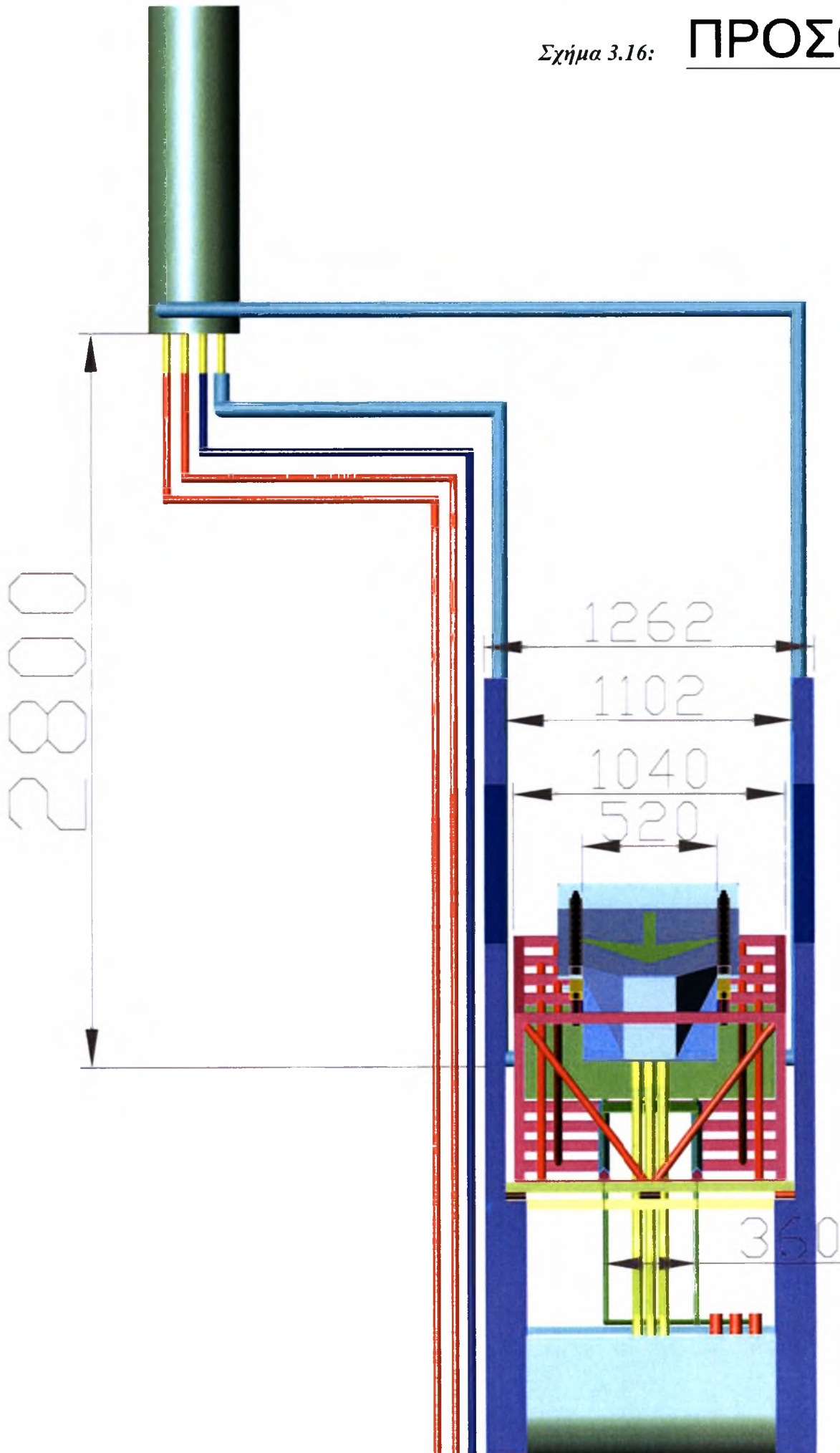
Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή οδάτνου ομμένα

Σχήμα 3.15:

ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ



Σχήμα 3.16: ΠΡΟΣΟΨΗ



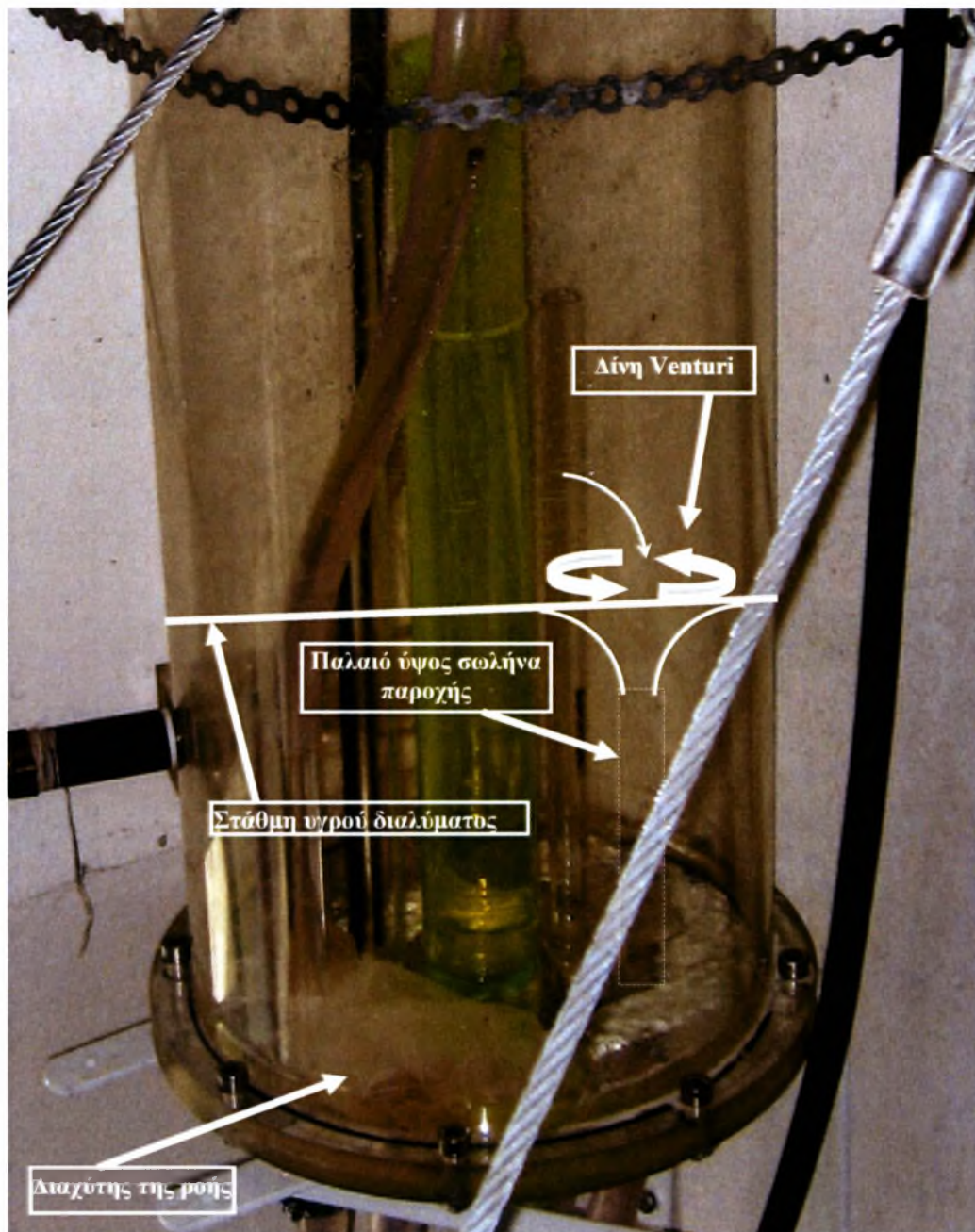
3.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όπως κάθε νέα συσκευή έτσι και εδώ απαιτήθηκε αρκετός χρόνος και πολλές δοκιμές για να βεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του καναλιού. Σε αυτή την παράγραφο γίνεται μια ανασκόπηση των πρώτων δοκιμών και των προβλημάτων που ανέκυψαν αλλά και το πως λύθηκαν.

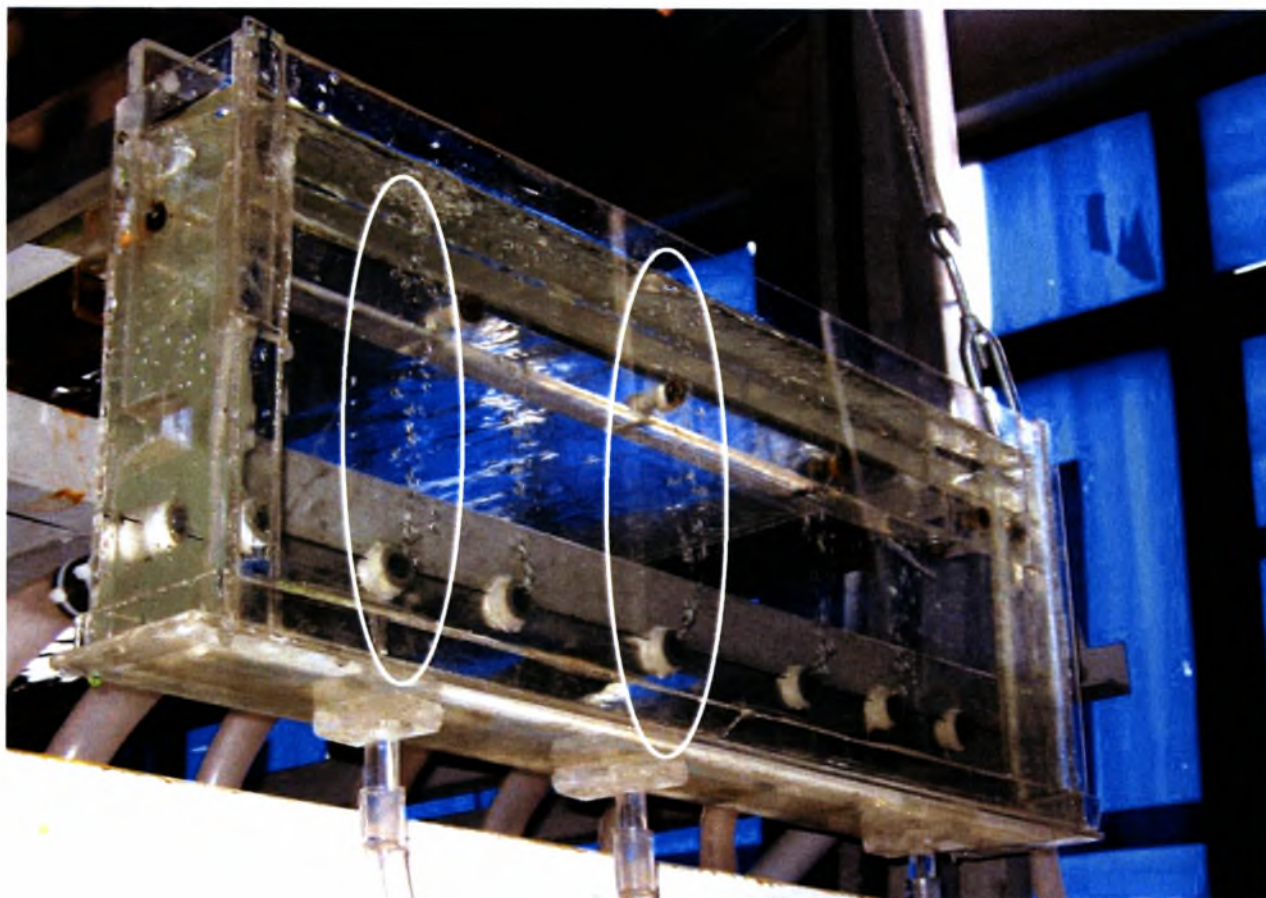
3.6.1 Έλεγχος υδραυλικού κυκλώματος

Η πειραματική διάταξη εμπεριέχει μεγάλο αριθμό υδραυλικών συνδέσεων που έπρεπε να είναι στεγανές. Η δοκιμή όλων αυτών των συνδέσεων έγινε με την πλήρη λειτουργία του καναλιού. Όσες συνδέσεις παρουσίασαν απώλειες υγρού επιδιορθώθηκαν με χρήση ταινίας Teflon.

Κατά τη ροή του υμένα είναι σημαντική η καθαρότητα του διαλύματος νερού-γλυκερίνης-χρωστικής ουσίας. Ένα σοβαρό ζήτημα που προέκυψε ήταν η εμφάνιση φυσαλίδων αέρα που προέχονταν από το κύκλωμα των σωληνώσεων και προσκολλούνταν πάνω στα τοιχώματα του καναλιού δημιουργώντας φυσικά εμπόδια στη ροή. Η ύπαρξη φυσαλίδων είναι ένα φυσιολογικό φαινόμενο, που συναντήθηκε και στην πρώτη διάταξη, κατά τα πρώτα λεπτά λειτουργίας του καναλιού καθώς ο εγκλωβισμένος αέρας των σωληνώσεων οδηγείται προς το κανάλι. Η λύση σε αυτό είναι η αύξηση της ροής νερού κάθε φορά που ξεκινά η λειτουργία του καναλιού. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, ο αριθμός των φυσαλίδων δε μειωνόταν με το χρόνο αλλά υπήρχε μία συνεχής ροή. Αιτία του προβλήματος ήταν η δημιουργία μιας δίνης Venturi στο στόμιο του σωλήνα παροχής προς το κανάλι μέσα στη δεξαμενή παροχής-υπερχείλισης. Αυτό συνέβαινε γιατί η συνήθης στάθμη μέσα στη δεξαμενή βρισκόταν περίπου στο ίδιο ύψος με το στόμιο της παροχής του καναλιού με αποτέλεσμα τη μόνιμη αναρρόφηση αέρα. Το φαινόμενο εξαλείφθηκε ελαττώνοντας το ύψος του συγκεκριμένου στομίου. Επίσης, τοποθετήθηκε μία υφασμάτινη σίτα (τούλι) στην είσοδο από την αντλία ανακυκλοφορίας και της παροχής δικτύου για να διαχέεται η ροή και να αποφεύγεται η δημιουργία δινών.



Σχήμα 3.17: Η δίνη Venturi υπεύθυνη για την αναρρόφηση αέρα μέσα στο υδραυλικό κύκλωμα τροφοδοσίας του καναλιού.



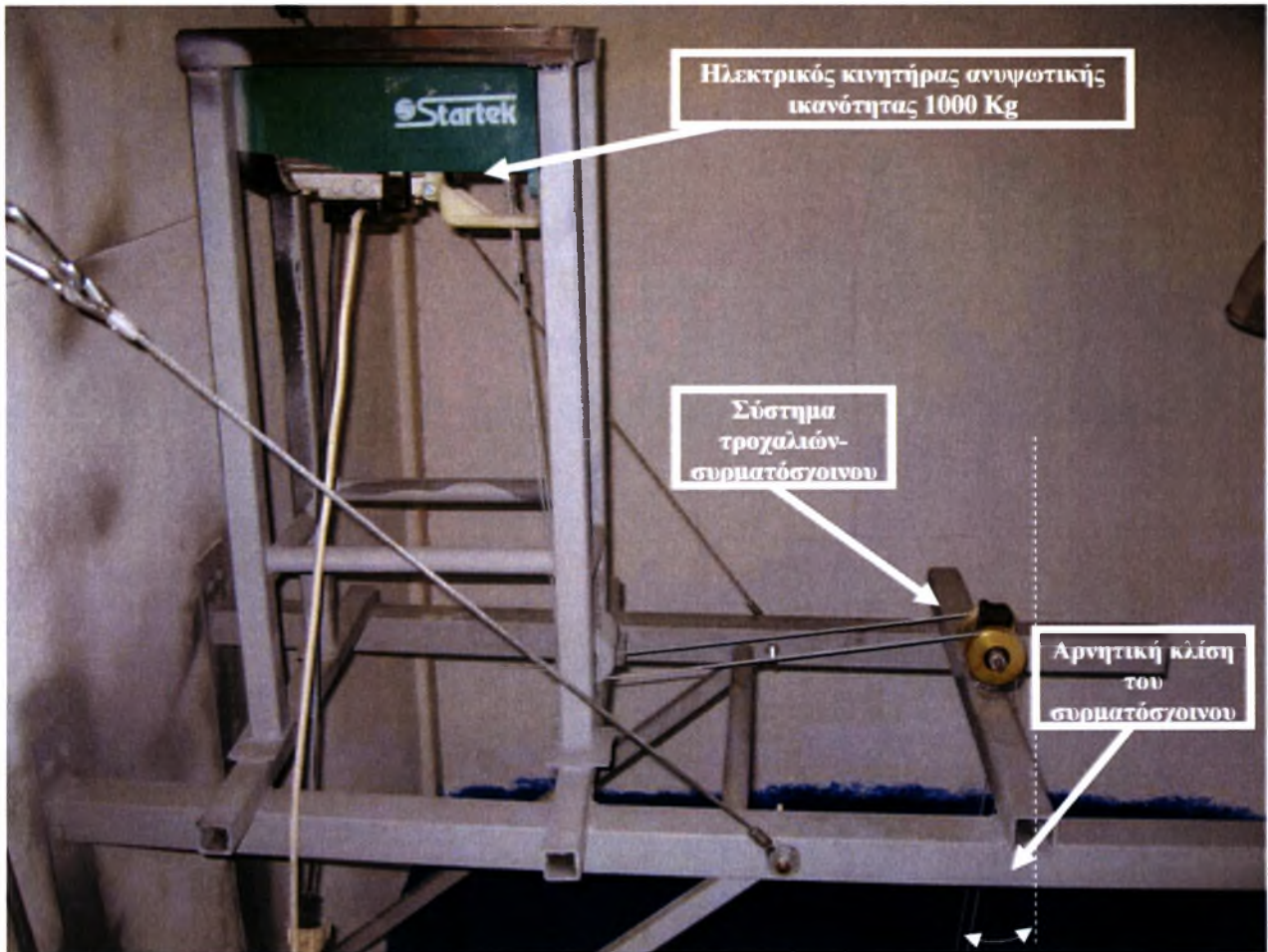
Σχήμα 3.18: Η συνεχής εμφάνιση φυσαλίδων αέρα στο δοχείο υπερχειλίσσης

3.6.2 Ρύθμιση κλίσης του καναλιού

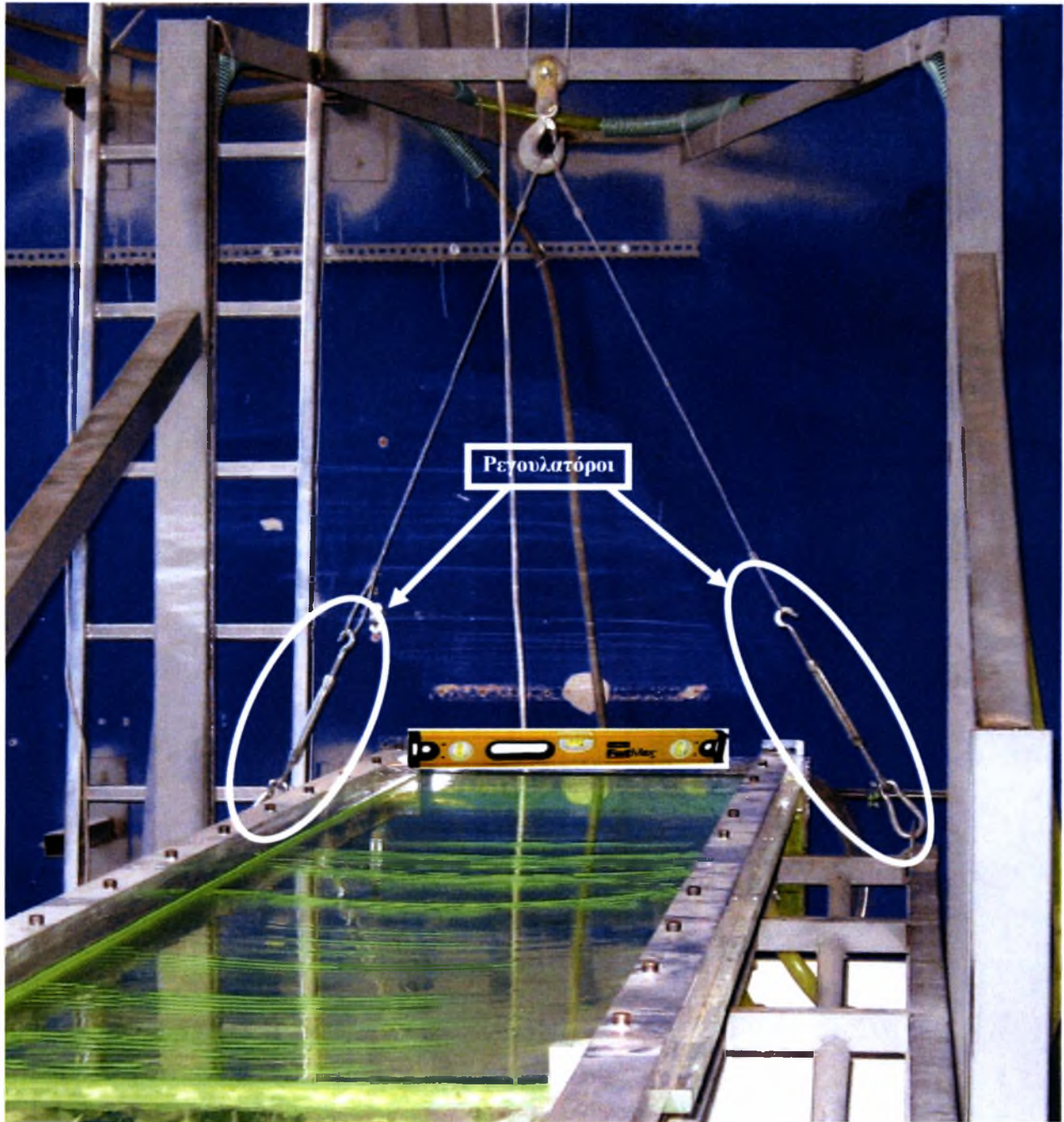
Το κανάλι είναι σταθερά τοποθετημένο πάνω στο μεταλλικό ικρίωμα. Τα δυο κομμάτια αποτελούν ένα σύστημα που αναρτάται με τρεις συνδέσμους άρθρωσης (μεντεσέδες βλ. **Σχήμα 3.1**) στο μπροστινό μέρος της μεταλλικής βάσης. Εξαιτίας αυτής της άρθρωσης το κανάλι μπορεί να έρθει σε κλίση ως προς την οριζόντιο με γωνία από 0° έως 45° . Για την αλλαγή της κλίσης το κανάλι πρέπει να «τραβηχτεί» προς τα πάνω. Το βάρος όμως του ικρίωματος είναι τέτοιο που δεν επέτρεπε τη χειροκίνητη μετακίνησή του. Αυτό το έργο εκτελείται από το ηλεκτρικό αναβατόριο με τη βοήθεια ενός συστήματος τροχαλιών και ενός συρματόσχοινου. Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ανυψωτική ικανότητα 1000 Kg. Βρίσκεται τοποθετημένος στη μεταλλική βάση έτσι ώστε το συρματόσχοινο έλξης να είναι κατακόρυφο στο σημείο της μέγιστης κλίσης του καναλιού, ενώ σε οποιοδήποτε άλλο κατώτερο σημείο να αποκτά μία αρνητική κλίση ως προς την κατακόρυφο ασκώντας επιπλέον μια τάση προς την εμπρόσθια πλευρά της κατασκευής και προσδίδοντάς της σταθερότητα, ελαχιστοποιώντας το φορτίο των τάσεων στο συρματόσχοινο (βλ. **Σχήμα 3.20**). Για την επίτευξη μέγιστης σταθερότητας προστέθηκαν στους δύο κατακόρυφους κοιλοδοκούς πέλματα συγκράτησης των οποίων η θέση ρυθμίζεται κατά το μήκος των δοκών. Προτού βέβαια

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή οδάτινου υμένα

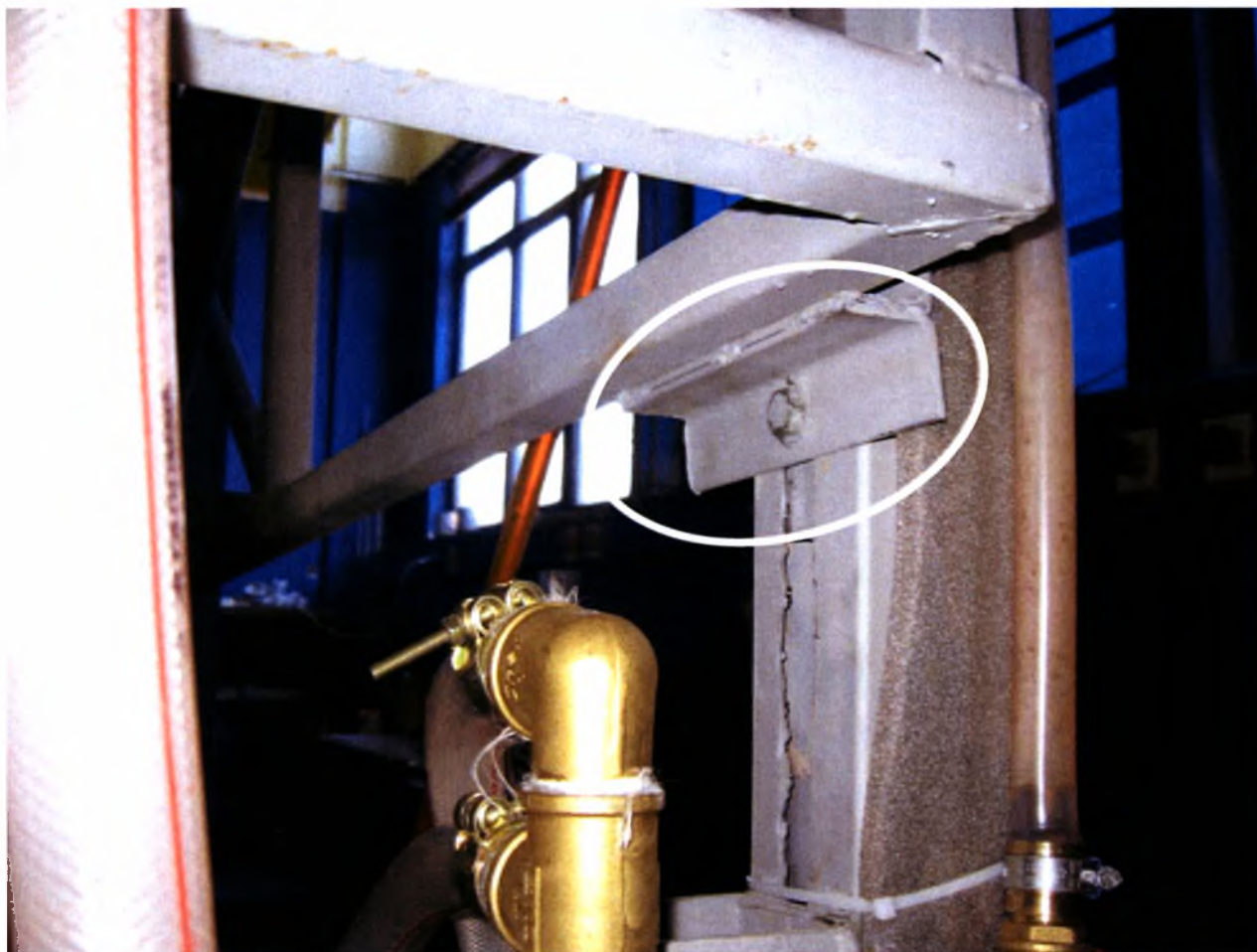
από τη σταθεροποίηση των τελευταίων πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η ακμή του καναλιού, που είναι κάθετη στη ροή και αφετηρία της, είναι **απολύτως οριζοντιωμένη**. Αυτό γίνεται με το αλφάδι και οποιαδήποτε διόρθωση χρειάζεται γίνεται με τις δύο αμφίδρομες ντίζες ρύθμισης (ρεγουλατόρι) στην άκρη των δυο συρματόσχοινων που συγκρατούν το ικρίωμα.



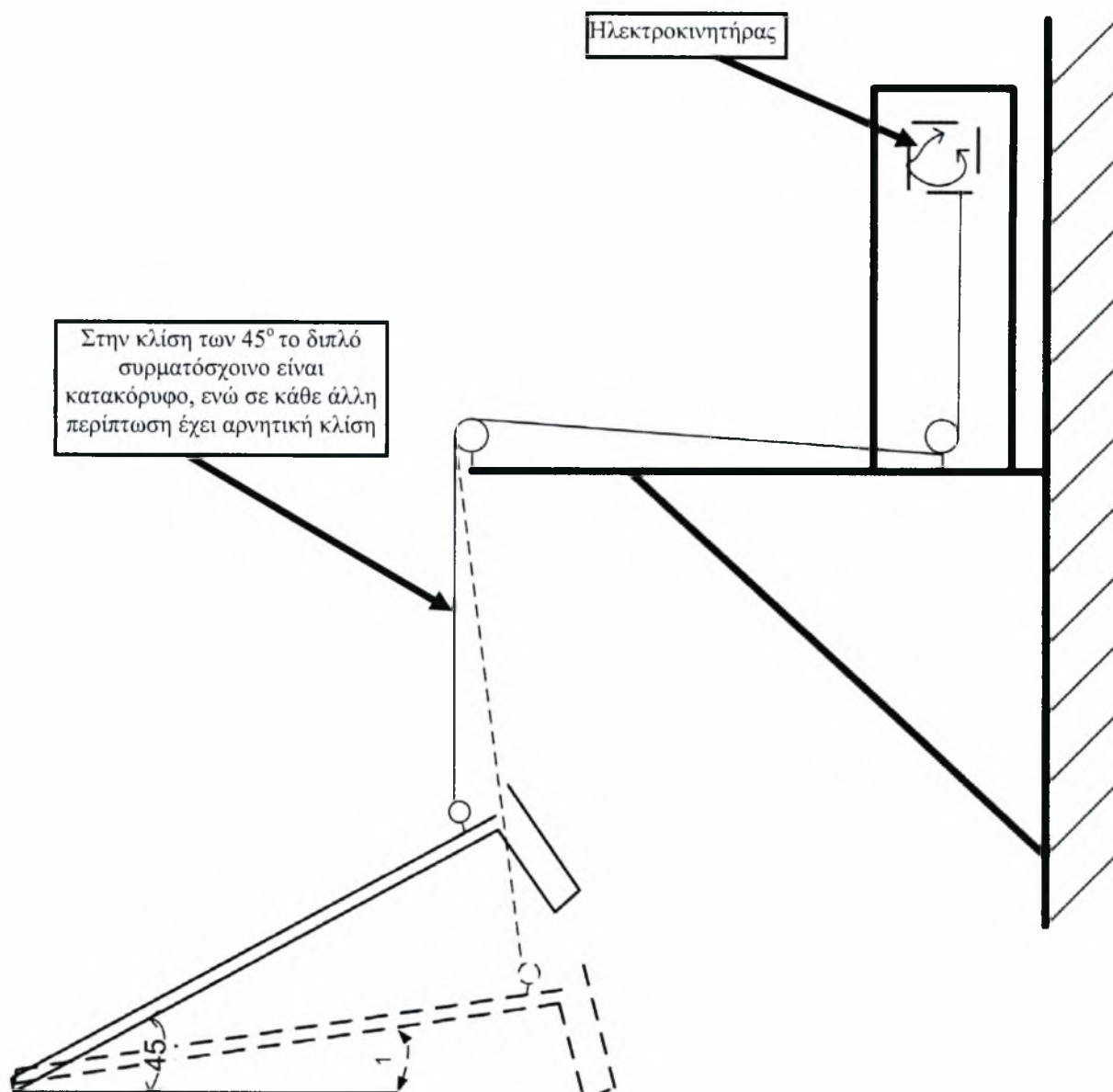
Σχήμα 3.19: Η μεταλλική βάση με το ηλεκτρικό αναβατόριο για την αλλαγή κλίσης του καναλιού



Σχήμα 3.20: Οριζοντίωση της αφετηρίας του καναλιού από τους ρεγουλατόρους



Σχήμα 3.21: Πέλματα σταθεροποίησης του ικρίωματος μετά την οριζοντίωση



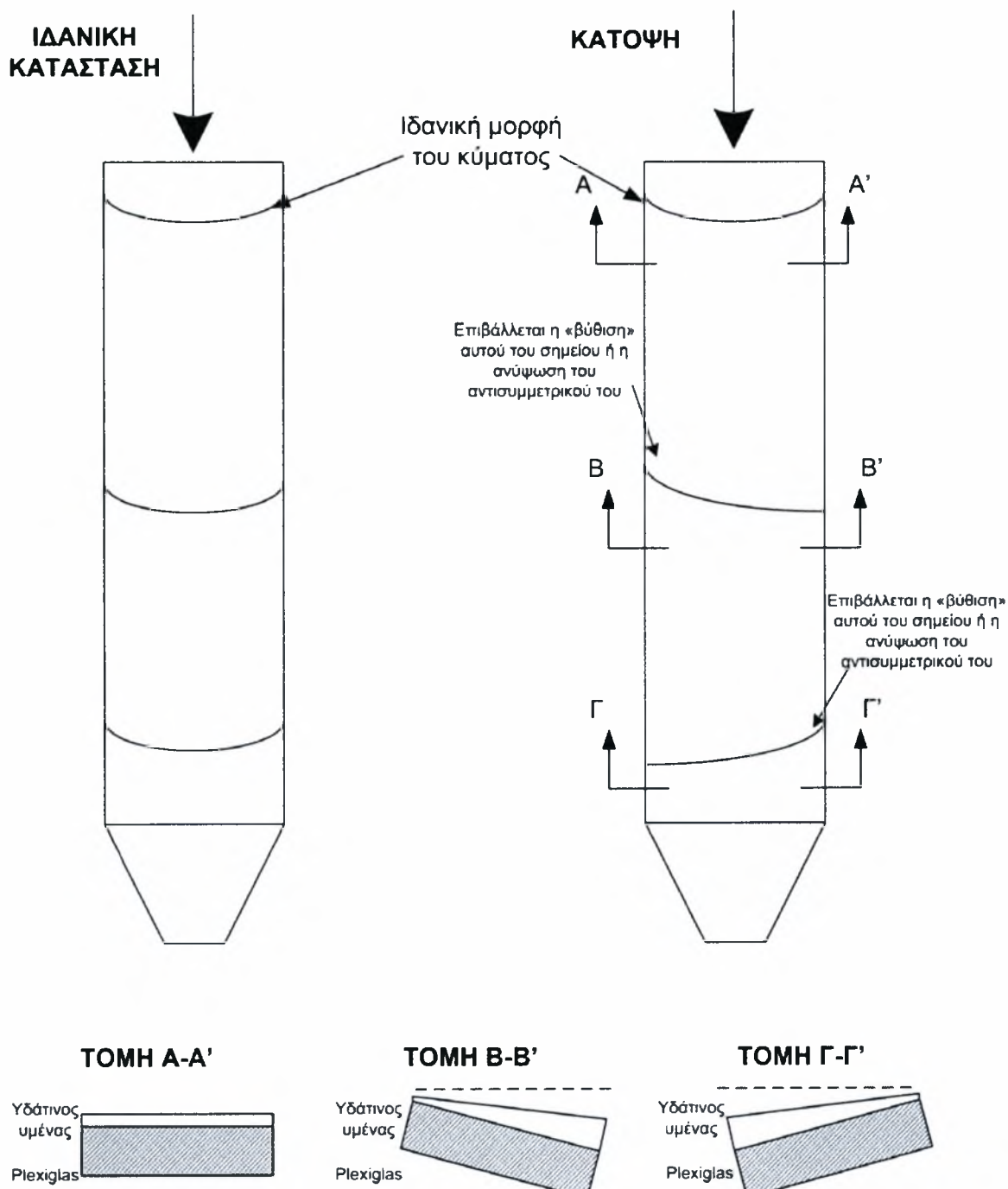
Σχήμα 3.22: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος αλλαγής της κλίσης

3.6.3 Οριζοντίωση του υμένα

Μετά την ευθυγράμμιση του της αφετηρίας της ροής δεν εξασφαλίζεται η ορθή ροή του υμένα στο τοίχωμα. Το τελευταίο πρέπει να είναι ένα επίπεδο που δε θα στρεβλώνεται καθόλου και παντού θα έχει την κλίση που ορίζεται εξ' αρχής. Ο έλεγχος αυτός διεξάγεται στην έναρξη του κάθε πειράματος. Αρχικά ρυθμίζεται η ροή στα 12lt/min περίπου, ώστε η ροή να είναι στρωτή αλλά να μην είναι τόσο αργή που να κινδυνεύει να σπάσει ο υμένας. Θέτοντας μία σχετικά έντονη αλλά με μικρή συχνότητα διαταραχή (1 sec NC – 5 sec NO) δημιουργείται ένας εμφανής κυματισμός (σολιτονικό κύμα) στην επιφάνεια του υμένα, εμφανιζόμενος κάθε 5 sec. Κατά τη ροή, ο κυματισμός ακολουθεί ακριβώς τη ροή του υμένα. Όταν ο υμένας δεν είναι οριζοντιωμένος κατά τον άξονα του πλάτους περισσότερο υγρό συγκεντρώνεται στη χαμηλότερη πλευρά του

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή υδάτινου υμένα

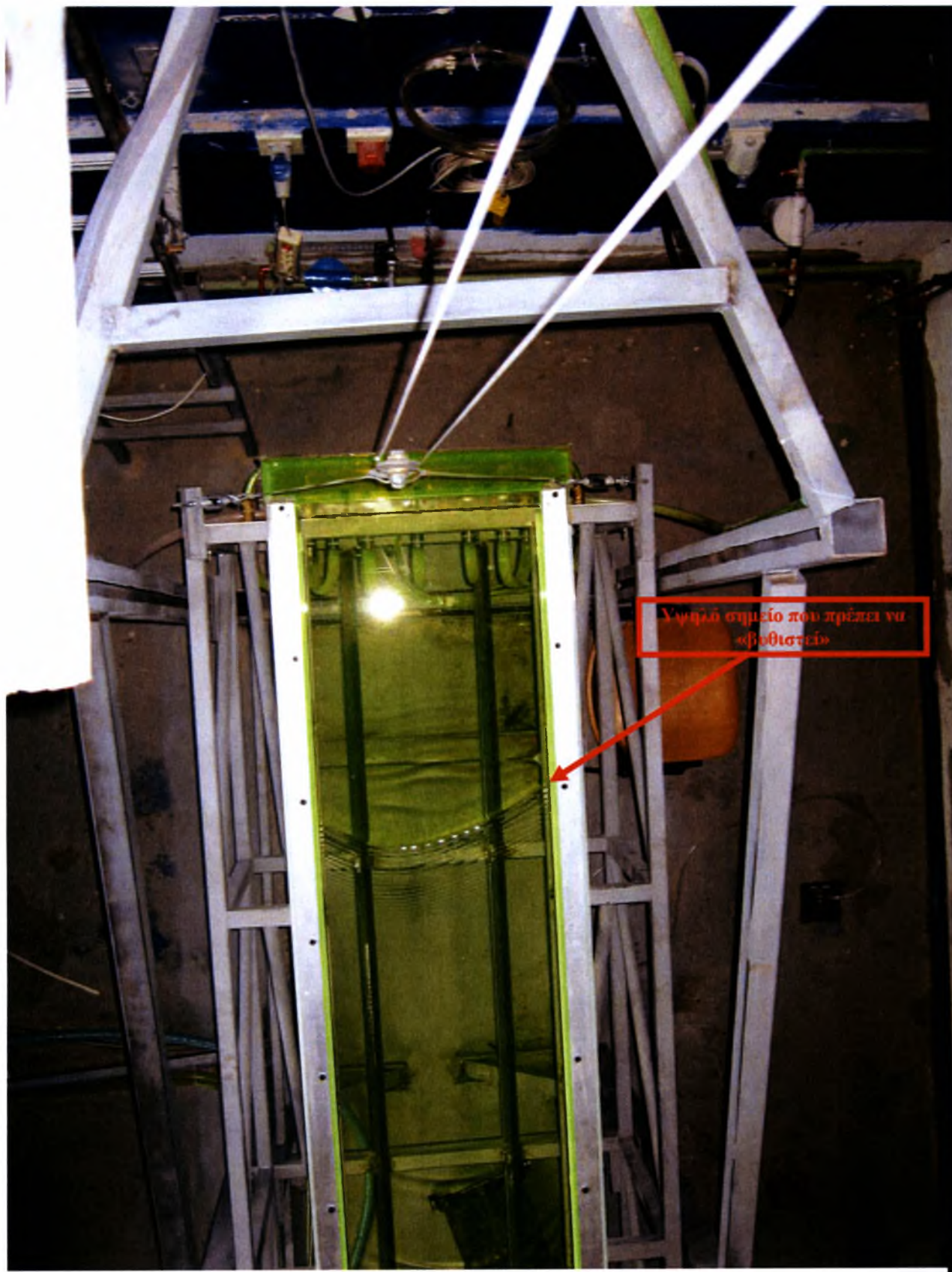
καναλιού (Σχήμα 3.23-ΤΟΜΗ Β-Β' & Γ-Γ') με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του παραβολικού σχήματος του κυματισμού (Σχήμα 3.23-ΚΑΤΟΨΗ) από την ιδανική του μορφή. Το αποτέλεσμα της ροής φυσικά δεν είναι αποδεκτό γιατί το πάχος του υμένα επηρεάζεται από την παρέκκλιση του καναλιού από την οριζόντιο. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έχει προβλεφθεί στο σχεδιασμό η δυνατότητα «τοπικής» ρύθμισης της σχετικής θέσης του καναλιού από το ικρίωμα γυρνώντας με την κατάλληλη φορά τη ντίζα ρύθμισης (Σχήμα 3.6). Από την άλλη πλευρά η τοπική διόρθωση σε ένα σημείο του καναλιού επηρεάζει και τα γειτονικά του με συνέπεια η διαδικασία να απαιτεί πληθώρα επαναληπτικών διορθώσεων και δοκιμών.



Σχήμα 3.23: Διαδικασία οριζοντίωσης του καναλιού.

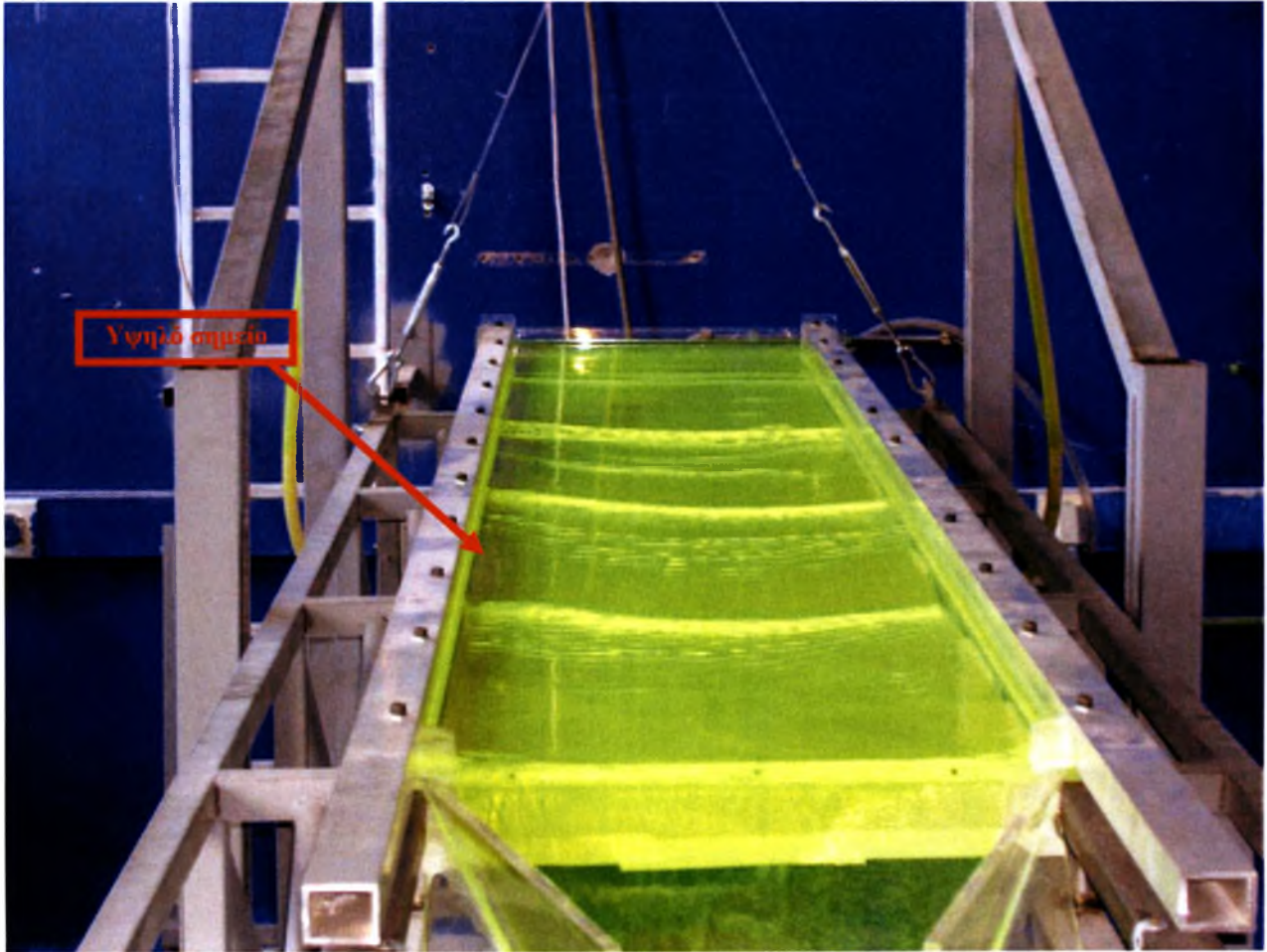
Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή οδάτινου υμένα

Ακολουθούν φωτογραφίες από τη διαδικασία οριζοντίωσης. Το υγρό που χρησιμοποιήθηκε ήταν καθαρό νερό με χρωστική. Για τη διευκόλυνση της οπτικής παρατήρησης του υμένα προστέθηκε στην κάτω πλευρά του Plexiglas και σε όλο το μήκος του καναλιού λεπτό ριζόχαρτο. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η επιφάνεια του καναλιού προετοιμάστηκε πριν την έναρξη της ροής. Η καθαρότητα της επιφάνειας (από σκόνες, άλατα κλπ) είναι απαραίτητη. Πέρα όμως από τον απλό καθαρισμό της, επαλείφθηκε με ένα σιλικονούχο υγρό (Sodium Silicate), το οποίο δημιουργεί ένα προστατευτικό φιλμ σε όλη την επιφάνεια της ροής που εξομαλύνει την τραχύτητα επιφάνειας του Plexiglas και των αλουμινένιων κοιλοδοκών ελαχιστοποιώντας την υδραυλική τους αντίσταση. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε και στην προηγούμενη πειραματική διάταξη με ικανοποιητικά αποτελέσματα ειδικά σε ροές με πολύ χαμηλούς αριθμούς Reynolds όπου το μικρό πάχος υμένα οδηγούσε σε διακοπές της ροής του («σπάσιμο» του υμένα).

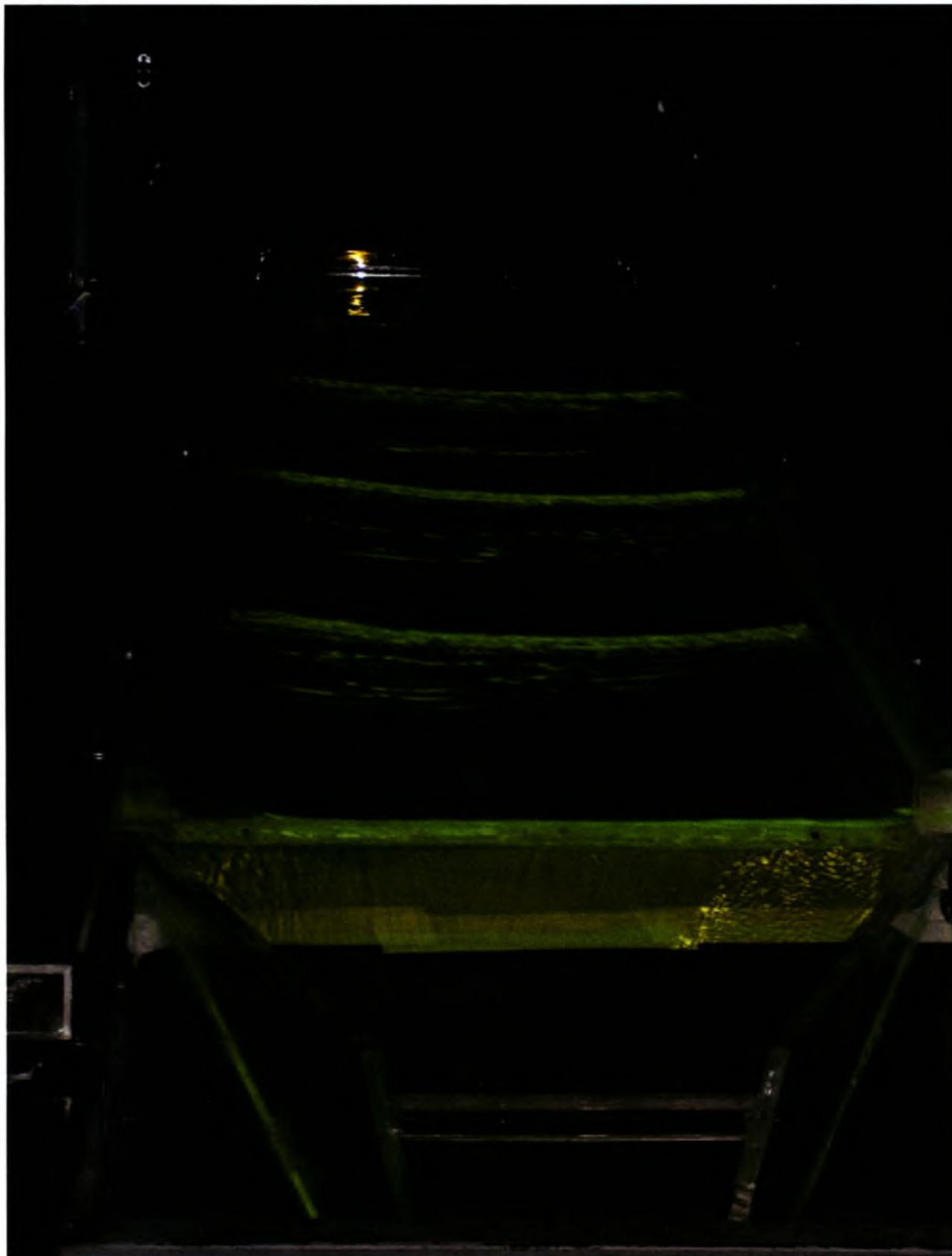


Σχήμα 3.24: Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωσης

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών-Ροή οδάτνου υμένα



Σχήμα 3.25: Σημείο του καναλιού που χρήζει διόρθωσης



Σχήμα 3.26: Το οριζοντιωμένο κανάλι ροής

3.7 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας έγινε κατανοητό ότι η κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης απαιτεί την ύπαρξη τόσο τεχνικών δεξιοτήτων όσο και ενός θεωρητικού υποβάθρου σε αρκετούς τομείς της μηχανολογίας. Οι δυσκολίες που ανέκυψαν έδωσαν την αφορμή για εμβάθυνση σε πολλά θέματα, την ανάπτυξη πολλών τεχνικών δεξιοτήτων και τη διερεύνηση της αγοράς για την επίλυση αυτών των προβλημάτων. Ωστόσο, η πειραματική διάταξη που παραδόθηκε χρήζει πολλών βελτιώσεων για την επίτευξη όσο το δυνατόν πληρέστερων πειραμάτων.

Η λειτουργικότητα και η αποδοτικότητα στο χρόνο διεξαγωγής ενός πειράματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο μέτρησης του αριθμού Reynolds της εκάστοτε ροής. Για τον υπολογισμό του εν λόγω αδιάστατου μεγέθους είναι απαραίτητη η εκτίμηση της παροχής, από την οποία θα εξαχθεί ο όρος της ταχύτητας. Στην παρούσα κατάσταση η παροχή του υγρού διαλύματος μετράται με βάση τον αρχικό ορισμό της. Συλλέγεται, δηλαδή, μία ποσότητα νερού σε φορητό δοχείο για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, ζυγίζεται η ποσότητα και με την παραδοχή ότι η πυκνότητα του υγρού διαλύματος πλησιάζει αυτή του καθαρού νερού αντιστοιχίζεται σε μια παροχή με μονάδες lt/min. Η μέτρηση μπορεί να αλλοιωθεί από αστάθμητους παράγοντες όπως τα αντανακλαστικά του εφαρμοστή. Η προσθήκη ενός ροόμετρου, πριν την είσοδο της παροχής του συλλέκτη στο ξύλινο πάνελ, θα δώσει τη δυνατότητα άμεσης μέτρησης και ελέγχου της ροής όχι μόνο στιγμιαία αλλά σε όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής του πειράματος με μηδενικό χρονικό κόστος.

Ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα που προέκυψε μετά από τη λειτουργία του καναλιού για ένα μήνα είναι οι επικαθήσεις που δημιουργήθηκαν σε διάφορα σημεία του υδραυλικού κυκλώματος με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη μόνιμη βλάβη του διαφράγματος των ηλεκτροβαλβίδων. Δεδομένης της πολύ κακής ποιότητας του νερού του δικτύου των εγκαταστάσεων του τμήματος πρέπει να γίνεται ενδελεχής και τακτικός καθαρισμός του κυκλώματος, ιδιαίτερος των ευαίσθητων τμημάτων του (ηλεκτροβαλβίδες, αντλία), με το γνωστό καυστικό διάλυμα υπεροξειδίου το υδρογόνου (Peridrol). Η χρήση κάποιου αποσκληρυντικού νερού από αυτά που διατίθενται στην αγορά ενδέχεται να περιορίσει την καταστροφική δράση των επικαθήσεων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **N. Malamataris, M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou** 2002 *Solitary waves on inclined films: Flow structure and binary interactions*. Phys. Fluids, 14, 1082-1094.
- **Μ. Βλαχογιάννης** 2001 Διδακτορική Διατριβή, «Πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο και σε κυματοειδές τοίχωμα»
- **M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou** 2001 *Observations of solitary wave dynamics of film flows*. J. Fluid Mech., 435, 191-215
- **Μ. Βλαχογιάννης & Β. Μποντόζογλου**, Πειραματική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μοναχικών κυμάτων σε ροή υγρού υμένα. *3ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής*, Αθήνα, Μάιος 2001
- **Μ. Βλαχογιάννης & Β. Μποντόζογλου**, Πειραματική μελέτη των αλληλεπιδράσεων σολιτονικών κυμάτων σε ιξώδη ροή υγρού υμένα. *“Ημερίδα: Ερευνητικές δραστηριότητες στα φαινόμενα ροής ρευστών στην Ελλάδα*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μάιος 2000



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085855

