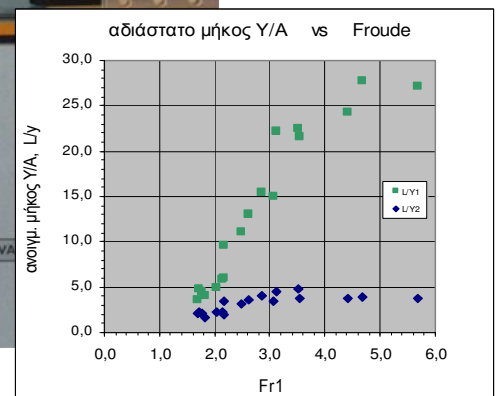
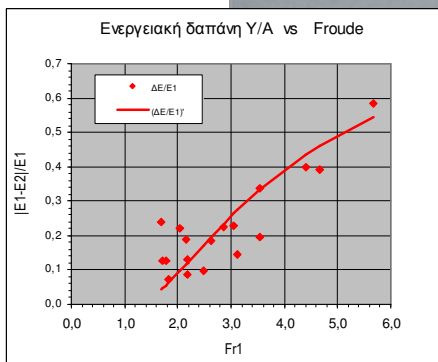
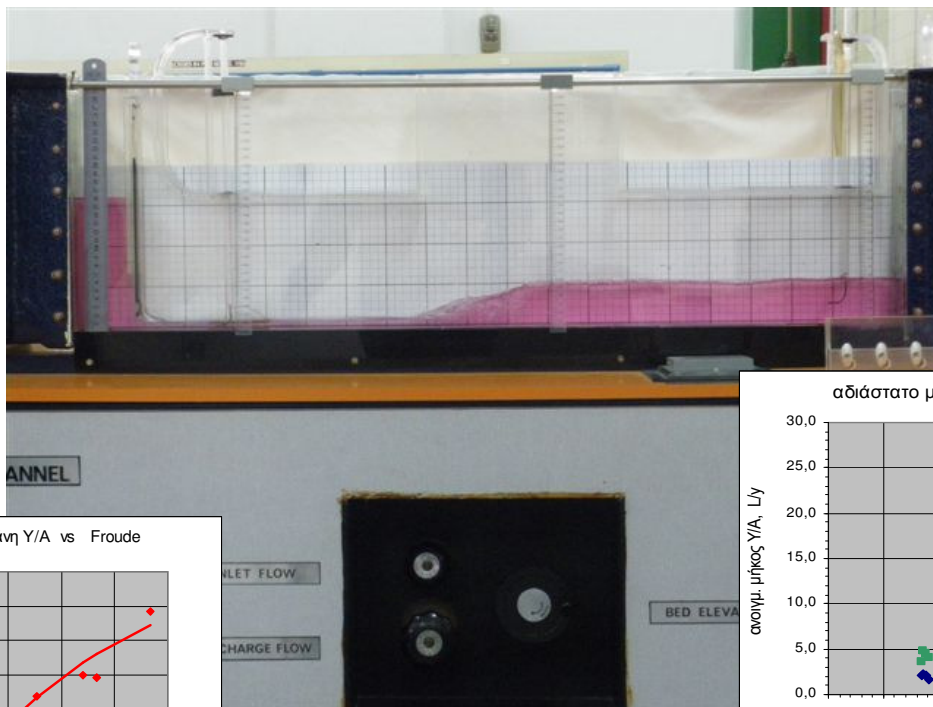


ΤΕΙ ΑΘΗΝΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μετρήσεις υδραυλικών μεγεθών κατά τη ροή σε  
κλειστούς και ανοικτούς αγωγούς –  
Φαινομενολογική Μελέτη Υδραυλικών Αλμάτων»



ΑΛΕΞΑΝΔΡΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ (ΑΜ: 5014)

ΠΑΠΑΔΟΥΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΑΜ: 5039)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Μ. ΒΑΛΑΒΑΝΙΔΗΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010



## Περίληψη - Σύνοψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η βαθμονόμηση συσκευών μέτρησης παροχής του εργαστηρίου Υδραυλικής του Τμήματος Πολιτικών Έργων Υποδομής του ΤΕΙ Αθήνας και η παραγωγή των αντίστοιχων νομογραμμάτων.

Εν γένει σκοπός κάθε μετρητικής συσκευής είναι η μέτρηση της τιμής ενός φυσικού μεγέθους με βάση κάποια κλίμακα μέτρησης. Οι συσκευές μέτρησης δεν μετρούν κατ' ανάγκη αυτό καθαυτό το *μετρούμενο φυσικό μέγεθος (μέτρηση)* αλλά κάποιο άλλο *ενδεικτικό φυσικό μέγεθος (ένδειξη)* το οποίο θα πρέπει να μπορεί να συσχετισθεί με το μετρούμενο με κάποιο προδιαγεγραμμένο τρόπο (ντετερμινιστικό). Ο συσχετισμός αυτός καλείται *νομόγραμμα* ή *συνάρτηση μεταφοράς του οργάνου*. Ο χειριστής του οργάνου 'διαβάζει' την ένδειξη και μέσω του νομογράμματος, το οποίο πρέπει να είναι διαθέσιμο, συσχετίζει την τιμή της ένδειξης με την τιμή του μεγέθους που ενδιαφέρεται να μετρήσει. Κάθε μετρητική συσκευή έχει το δικό της νομόγραμμα. Ακόμα και μετρητικά όργανα του ίδιου τύπου και κατασκευασμένα από τον ίδιο κατασκευαστή μπορεί να έχουν -έως ένα βαθμό και ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια- διαφορετικά νομογράμματα.

Για την παραγωγή του νομογράμματος μιας συσκευής μέτρησης απαιτείται να γίνει η *βαθμονόμηση* της. Η βαθμονόμηση μιας μετρητικής συσκευής απαιτεί την ύπαρξη υλικοτεχνικής υποδομής υψηλής ποιότητας (όργανα διακρίβωσης) και καταρτισμένου προσωπικού και γίνεται από εξειδικευμένες εταιρείες διακρίβωσης οργάνων σύμφωνα με διεθνή πρότυπα και κανονισμούς.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία βαθμονομήθηκαν διάφορες συσκευές μέτρησης ογκομετρικής παροχής οι οποίες είναι μέρος του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Υδραυλικής του τμ. Π.Ε.Υ.. Αυτές οι συσκευές, μετά από πολλά χρόνια λειτουργίας, έπρεπε να συντηρηθούν (αποσυναρμολόγηση, καθαρισμός, επισκευή όπου χρειαζόταν και συναρμολόγηση τους). Μετά την ολοκλήρωση της συντήρησης ήταν απαραίτητο να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία τους και να βαθμονομηθούν εκ νέου προκειμένου να παραχθούν τα νομογράμματα κάθε μίας και να μπορούν να αξιοποιηθούν ως μετρητικά όργανα.

Για τη βαθμονόμηση των συσκευών μέτρησης παροχής χρησιμοποιήθηκε ως όργανο αναφοράς η υδραυλική τράπεζα η οποία διαθέτει ζυγιστικό δοχείο για την άμεση και με ακρίβεια μέτρηση παροχών. Οι συσκευές που βαθμονομήθηκαν είναι: παροχόμετρο πλωτήρα, παροχόμετρο Ventouri, παροχόμετρο διαφράγματος, τριγωνικός εκχειλιστής, εκχειλιστής ΚΥΜΕΟΔ.

Επίσης αναξάρτητα από τις βαθμονομήσεις των συσκευών, πραγματοποιήθηκαν και αναπαραστάσεις διαφόρων τύπων υδραυλικών αλμάτων σε εργαστηριακό κανάλι μήκους 1m και ορθογωνικής διατομής.



## Περιεχόμενα:

	Σελ.
<b>Εισαγωγή – Προοίμιο</b>	7
<b>Κεφ 1 Γενική μεθοδολογία βαθμονόμησης μετρητικών συσκευών</b>	9
<b>Κεφ 2 Παροχόμετρο Αναφοράς – Υδραυλική Τράπεζα (Υ/Τ)</b>	
2.1 Περιγραφή	13
2.2 Λειτουργική ανάλυση της Υ/Τα	16
2.3 Διαδικασία μέτρησης	17
2.4 Επεξεργασία μετρήσεων	17
2.5 Αποτελέσματα	17
<b>Κεφ 3 Βαθμονόμηση συσκευών – Ροές υπό πίεση</b> («ροή σε κλειστούς αγωγούς»)	
3.1 Σύστημα παροχομέτρων Πλωτήρα – Ventouri - Διάφραγμα Οπής	19
3.2 Διαδικασία βαθμονόμησης	25
3.3 Επεξεργασία μετρήσεων	26
3.4 Αποτελέσματα	27
<b>Κεφ 4 Βαθμονόμηση συσκευών – Ροές με ελεύθερη επιφάνεια</b> («ροή σε ανοικτούς αγωγούς»)	
4.1 Ροή πάνω από υπερχειλιστές λεπτής στέγης	41
4.2 Ροή σε καταβαθμούς ελεύθερης υδατόπτωσης	51
<b>Κεφ 5 Μικρό Κανάλι – Ροές με ελεύθερη επιφάνεια</b>	
5.1 Ροή σε εργαστηριακό κανάλι ορθογωνικής διατομής	57
5.2 Περιγραφή & βασικά χαρακτηριστικά υδραυλικού άλματος	59
5.3 Διαδικασία δημιουργίας και μέτρησης χαρακτηριστικών ροής σε Υ/Α	62
5.4 Αποτελέσματα	63
Φωτογραφικά στιγμιότυπα Υδραυλικών Αλμάτων	65
<b>Βιβλιογραφία</b>	79



## Εισαγωγή - Προοίμιο

Το νομόγραμμα ενός μετρητή παροχής είναι πολύ χρήσιμο «εργαλείο» καθώς μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή που διαρρέει κάθε φορά το μετρητή με βάση διάφορες ενδείξεις του (π.χ. πιέσεις, διαφορικές πιέσεις, στάθμες και φορτία κλπ) οι οποίες γενικά δεν αναφέρονται άμεσα στην παροχή. Το νομόγραμμα ενός μετρητή συσχετίζει μέσω ενός διαγράμματος, μιας αριθμητικής σχέσης  $Q(h)$  ή ενός πίνακα τιμών  $(Q_i, h_i)$  τις ενδείξεις του οργάνου,  $h$  ή  $h_i$ , με το μέγεθος που μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε, στις περιπτώσεις που εξετάζουμε εδώ της παροχής,  $Q$  ή  $Q_i$ .

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η βαθμονόμηση διαφόρων παροχόμετρων που διαθέτει το Εργαστήριο Υδραυλικής του τμήματος Πολιτικών Έργων Υποδομής του ΤΕΙ Αθήνας και η παραγωγή των αντίστοιχων νομογραμμάτων.

Η δομή της πτυχιακής εργασίας έχει ως ακολούθως.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η γενική διαδικασία βαθμονόμησης των συσκευών.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η υδραυλική τράπεζα (Y/T) (TQ – H1 s/n:717) η οποία χρησιμοποιήθηκε σε κάθε εργασία βαθμονόμησης. Με την Y/T, μετρούσαμε άμεσα και με ακρίβεια τις παροχές που διοχετεύαμε στα παροχόμετρα που βαθμονομήσαμε.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται η βαθμονόμηση παροχομέτρων που χρησιμοποιούνται σε ροές υπό πίεση («ροές σε κλειστούς αγωγούς»). Ειδικότερα βαθμονομήθηκαν παροχόμετρα με στένωση Ventouri, με πλωτήρα και με διάφραγμα οπής (TQ – H10 s/n:319).

Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται η βαθμονόμηση παροχομέτρων που χρησιμοποιούνται σε ροές με ελεύθερη επιφάνεια («ροές σε ανοικτούς αγωγούς»). Ειδικότερα βαθμονομήθηκαν ένας τριγωνικός εκχειλιστής λεπτής στέψης (TQ – H6 s/n:256) και ένας εκχειλιστής τύπου καταβαθμού μερικά ελεύθερης ορθογωνικής διατομής υδατόπτωσης “KYMEOD” (Armfield), οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παροχόμετρα.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται αναλυτικά η συσκευή του εργαστηριακού καναλιού ορθογωνικής διατομής 1m (Armfield S9094) στην οποία μελετάται η ροή με ελεύθερη επιφάνεια και ειδικότερα οι συνθήκες δημιουργίας υδραυλικού άλματος, οι διάφοροι τύποι υδραυλικών αλμάτων, τα ενεργειακά χαρακτηριστικά τους και η φαινομενολογική συμπεριφορά τους.





# Κεφάλαιο 1

## Γενική μεθοδολογία βαθμονόμησης μετρητικών συσκευών

Σε κάθε συσκευή μέτρησης παροχής υγρού (παροχόμετρο) υπολογίζουμε την παροχή με τη βοήθεια ενδείξεων της τιμής ενός ή περισσοτέρων χαρακτηριστικών μεγεθών τα οποία μεταβάλλονται ανάλογα με την παροχή που περνά μέσα από το παροχόμετρο.

Στα παροχόμετρα που βαθμονομήσαμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη μπορεί να είναι υψόμετρα, υψομετρικές στάθμες ή φορτία, ή η διαφορά μεταξύ δύο σταθμών. Κάθε στάθμη μετριέται με τη βοήθεια μανομετρικού σωλήνα και ενός μετρητικού κανόνα (μεζούρα).

Αν γνωρίζουμε πως συσχετίζεται σε κάθε συσκευή η τιμή των μετρούμενων χαρακτηριστικών μεγεθών (ενδείξεις) της συσκευής με την παροχή, μετρώντας τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά μεγέθη μπορούμε να εκτιμήσουμε την τιμή της άγνωστης παροχής. Αυτός ο συσχετισμός μεταξύ της παροχής και του χαρακτηριστικού μεγέθους δίνεται από τον κατασκευαστή της συσκευής με τη μορφή νομογράμματος (διάγραμμα) ή από το συσχετισμό των τιμών χαρακτηριστικών μεγεθών-παροχής είτε για διακριτά ζεύγη τιμών είτε με τη μορφή αριθμητικής σχέσης.

Ο κατασκευαστής ακολουθεί μια τυποποιημένη διαδικασία βαθμονόμησης για την παραγωγή του νομογράμματος. Μια μετρητική συσκευή είναι άχρηστη αν δε συνοδεύεται από το δικό της νομόγραμμα που να συσχετίζει τις ενδείξεις της με την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Επίσης, σε κάθε συσκευή αντιστοιχεί ένα νομόγραμμα. Στην περίπτωση μάλιστα μετρητικών συσκευών μεγάλης ακρίβειας ακόμα και συσκευές του ίδιου τύπου πρέπει να έχουν βαθμονομηθεί με ξεχωριστή διαδικασία. Επομένως κάθε συσκευή έχει το «δικό της» νομόγραμμα. Στην περίπτωση που δεν έχουμε το νομόγραμμα μιας μετρητικής συσκευής, θα πρέπει πρώτα να τη βαθμονομήσουμε προκειμένου να τη χρησιμοποιήσουμε.

Το Εργαστήριο Υδραυλικής του Τμ. Π.Ε.Υ. έχει μια σειρά παροχόμετρων αλλά τα αντίστοιχα νομογράμματα δεν είναι διαθέσιμα ή οι συσκευές έχουν αλλάξει χαρακτηριστικά λόγω της χρήσης ή της πρόσφατης συντήρησής τους. Επίσης κατά την πρόσφατη ανακαίνιση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Υδραυλικής τέθηκε το ζήτημα του ελέγχου της σωστής λειτουργίας όλων των συσκευών που πέρασαν από επισκευή-συντήρηση-ανακαίνιση, μεταξύ αυτών και τα παροχόμετρα. Ειδικά για τα παροχόμετρα έπρεπε να βαθμονομηθούν και να παραχθούν τα αντίστοιχα νομογράμματα. Επειδή τα παροχόμετρα είναι συσκευές μέτρησης παροχής θα πρέπει να έχουμε τη δυνατότητα να μετράμε με ένα άλλο τρόπο ή με μια άλλη συσκευή αναφοράς απευθείας και με άμεσο τρόπο τις διαφορετικές παροχές που επιβάλλουμε στα παροχόμετρα.

Η τυπική διαδικασία βαθμονόμησης έχει ως εξής:

- 1) Σημειώνουμε τις συνθήκες περιβάλλοντος πχ. Θερμοκρασία.
- 2) Με τη βοήθεια παροχόμετρου αναφοράς επιβάλλουμε σε κάθε παροχόμετρο υπό βαθμονόμηση γνωστές παροχές,  $Q_i$ . Όπου αναφέρονται γνωστές παροχές εννοείται παροχές οι οποίες έχουν μετρηθεί με άλλη διαδικασία και με άμεσο τρόπο με τη βοήθεια του παροχόμετρου αναφοράς. Στην περίπτωσή μας το παροχόμετρο αναφοράς είναι μία από τις

υδραυλικές τράπεζες (Y/T) που διαθέτει το Εργαστήριο όπου η παροχή υπολογίζεται άμεσα με ζύγιση ποσότητας νερού ανά τακτά χρονικά διαστήματα ή με μέτρηση χρονικών διαστημάτων για τη συλλογή συγκεκριμένης ή γνωστής ποσότητας. Για κάθε γνωστή παροχή  $Q_i$ , μετράμε την τιμή των χαρακτηριστικών μεγεθών της συσκευής,  $H_i$ .

3) Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για πολλές και διάφορες παροχές προσπαθώντας να εξαντλήσουμε όλες τις περιοχές παροχών ή χαρακτηριστικών μεγεθών στις οποίες θα κληθεί να λειτουργήσει η μετρητική συσκευή.

4) Τοποθετούμε σε διάγραμμα τα διαφορετικά ζευγάρια τιμών παροχής και χαρακτηριστικού μεγέθους οπότε έχουμε σχεδιάγραμμα ενός “σύννεφου” σημείων ( $Q_i, H_i$ ) από πραγματικές μετρήσεις.

5) Ανάλογα με το σχηματισμό του νέφους των σημείων διαλέγουμε μία χαρακτηριστική καμπύλη (μπορεί να είναι και ευθεία) η οποία φαίνεται να “περνάει” μέσα από το σχηματισμό των σημείων.

Αυτή η καμπύλη που διαλέξαμε έχει μια μαθηματική έκφραση  $Q(H)$  με την οποία συσχετίζεται, με τη βοήθεια παραμέτρων, το  $Q$  με το  $H$ . Για παράδειγμα:

•για την ευθεία έχουμε  $Q(H)=C_1H+C_2$

•για μία εκθετική καμπύλη έχουμε  $Q(H) = C_1e^{C_2H}$

•για μία πολυωνυμική τρίτου βαθμού (κυβική) έχουμε  $Q(H)=C_0+C_1H+C_2H^2+C_3H^3$

•για μία ριζική έχουμε  $Q(H)=C\sqrt{H}$

6. Οι παραπάνω καμπύλες του ίδιου τύπου μοιάζουν μεταξύ τους ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_v$

Προκειμένου να προσδιοριστεί με αντικειμενικότητα η καλύτερα προσαρμοσμένη καμπύλη στο σχηματισμό των σημείων πρέπει να ακολουθήσουμε τη διαδικασία προσαρμογής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Με αυτή τη διαδικασία προσδιορίζουμε τις τιμές των  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_v$  για την καμπύλη με την οποία έχουμε αποφασίσει να προσεγγίσουμε το σχηματισμό των σημείων και με αυτές τις τιμές των παραμέτρων χαράσσουμε την καμπύλη  $Q(H)$  η οποία αποτελεί το νομόγραμμα της συγκεκριμένης συσκευής.

## **Βαθμονόμηση παροχόμετρων**

### **1) Υδραυλική Τράπεζα**

Όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.1, εκτελέστηκε έλεγχος καλής λειτουργίας της Υδραυλικής Τράπεζας (Y/T) η οποία είναι η πιο σημαντική συσκευή στην εκτέλεση των παρακάτω βαθμονομήσεων, καθώς είναι η συσκευή που μας υποδεικνύει την πραγματική παροχή που διέρχεται ανά πάσα στιγμή από την εκάστοτε συσκευή.

### **2) Παροχόμετρα Πλωτήρα – Ventouri – Διαφράγματος Οπής**

Για τη μελέτη της ροής σε κλειστούς αγωγούς βαθμονομήσαμε τη σύνθετη συσκευή του εργαστηρίου που αποτελείται από τις παρακάτω τρεις μετρητικές συσκευές.

*α) Παροχόμετρο πλωτήρα*

Το πλωτόμετρο είναι συσκευή μέτρησης παροχής η οποία βασίζεται στην υψομετρική θέση ενός πλωτήρα ο οποίος αιωρείται υδροδυναμικά σε ένα κατακόρυφο ελαφρά κωνικό αγωγό σε ύψος ανάλογο με την εκάστοτε παροχή

#### *β) Παροχόμετρο Ventouri*

Το παροχόμετρο Ventouri (Βεντουρίμετρο) είναι συσκευή μέτρησης παροχής η οποία βασίζεται στη διαφορά της μανομετρικής πίεσης που αναπτύσσεται μεταξύ της διατομής εισόδου και της στενότερης διατομής σε ένα συγκλίνοντα αποκλίνοντα αγωγό (αγωγός Ventouri).

#### *γ) Διάφραγμα Οπής*

Η συσκευή διαφράγματος με κυκλική οπή είναι συσκευή μέτρησης παροχής η οποία βασίζεται στη διαφορά της μανομετρικής πίεσης που αναπτύσσεται εκατέρωθεν ενός διαφράγματος οπής.

### **3) Τριγωνικός Εκχειλιστής**

Ο τριγωνικός εκχειλιστής που βαθμονομήσαμε χρησιμοποιείται για ροές σε ανοιχτούς αγωγούς για τη μέτρηση της παροχής συναρτήσει του φορτίου της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στο επίπεδο στέψης

### **4) Εκχειλιστής KYMEOΔ**

Ο εκχειλιστής KYMEOΔ που βαθμονομήσαμε χρησιμοποιείται για ροές σε ανοιχτούς αγωγούς για τη μέτρηση της παροχής συναρτήσει της υψομετρικής ένδειξης της ανάντι του καταβαθμού στάθμης.

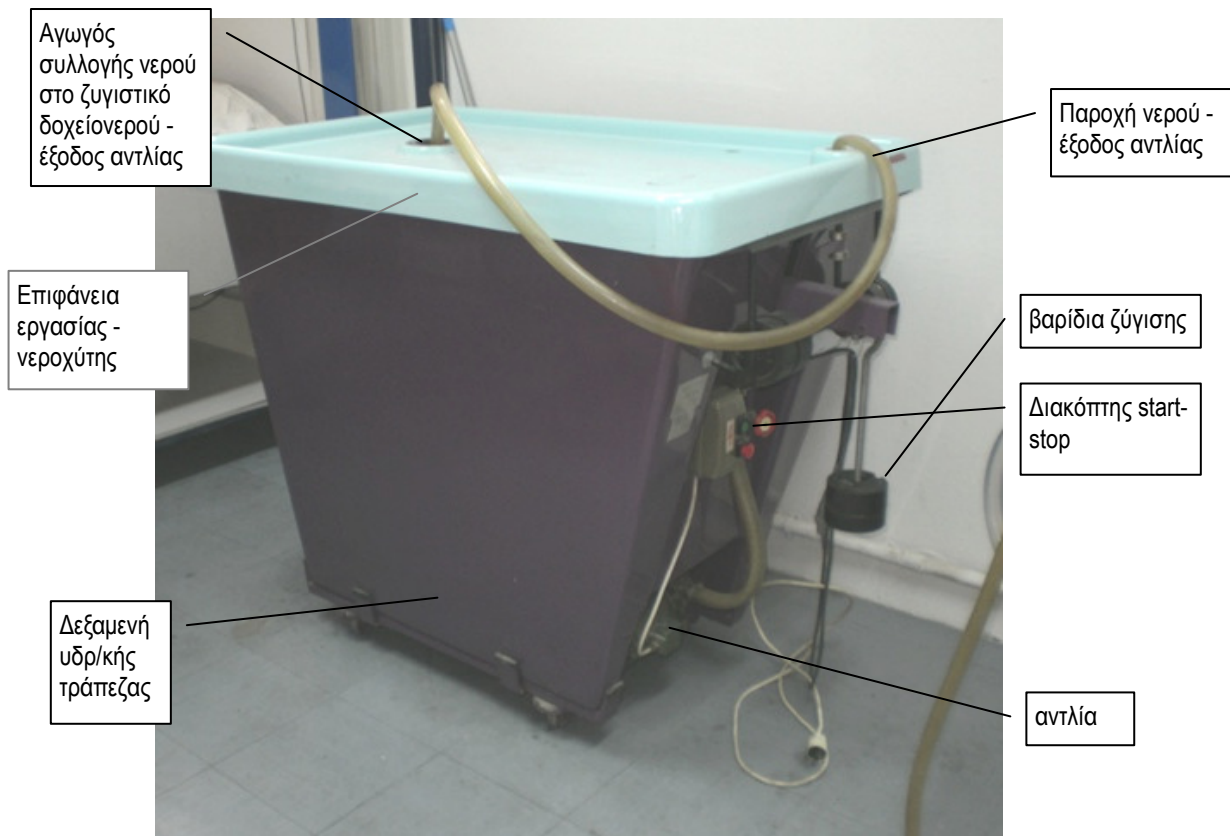


## Κεφάλαιο 2

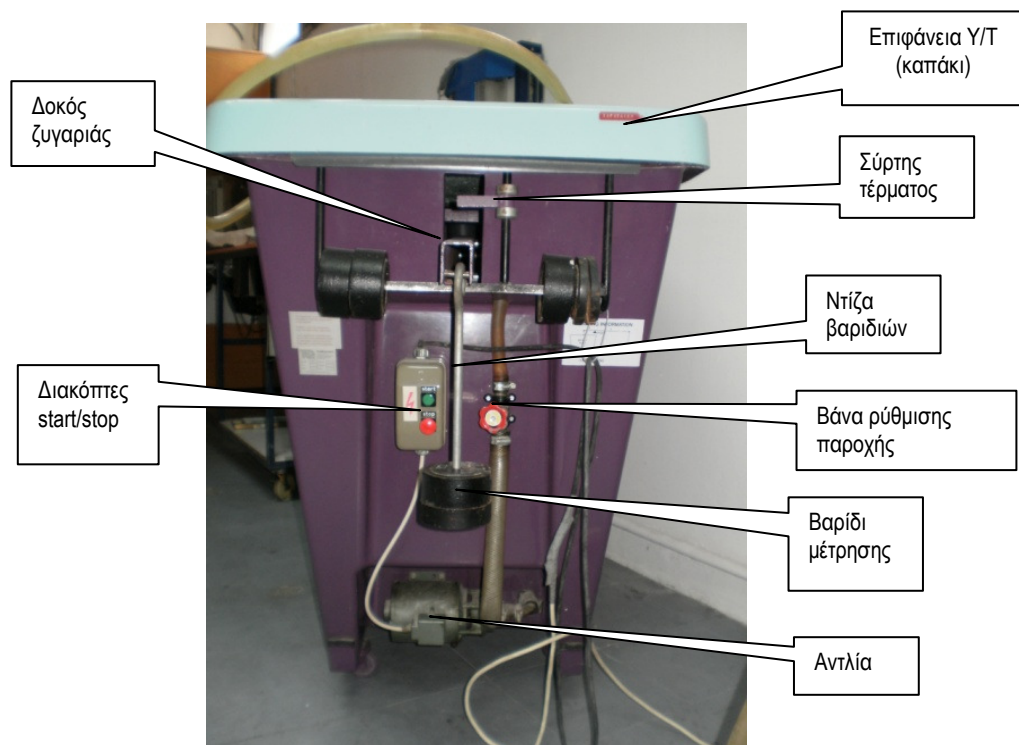
# Παροχόμετρο Αναφοράς – Υδραυλική Τράπεζα (Υ/Τ)

### 2.1 Περιγραφή

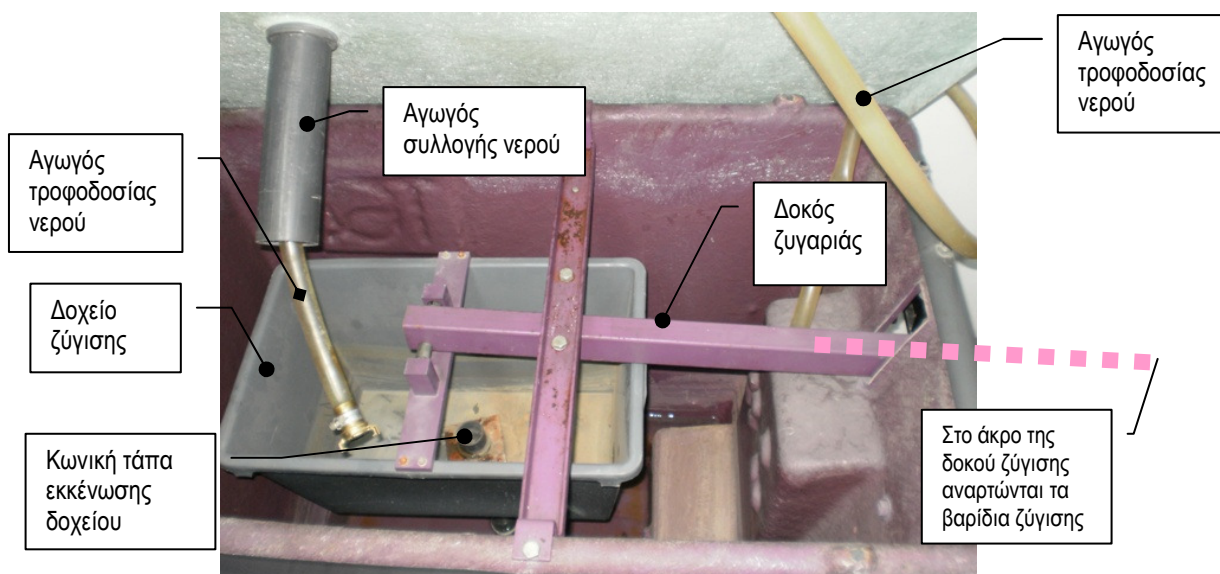
Η υδραυλική τράπεζα (Υ/Τ) είναι μια από τις πιο απλές αλλά και ταυτόχρονα από τις πιο χρήσιμες συσκευές ενός εργαστηρίου υδραυλικής. Χρησιμοποιείται για την άμεση και ακριβή μέτρηση παροχής μάζας. Η λειτουργία της είναι απλή: μετράται το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί για να συσσωρευτεί συγκεκριμένη μάζα υγρού σε ένα ζυγιστικό δοχείο.



**Εικόνα 2.1** Γενική άποψη της υδραυλικής τράπεζας (Υ/Τ) (TQ - H1 s/n:717). Η Υ/Τ μεταφέρεται εύκολα με ροδάκια.

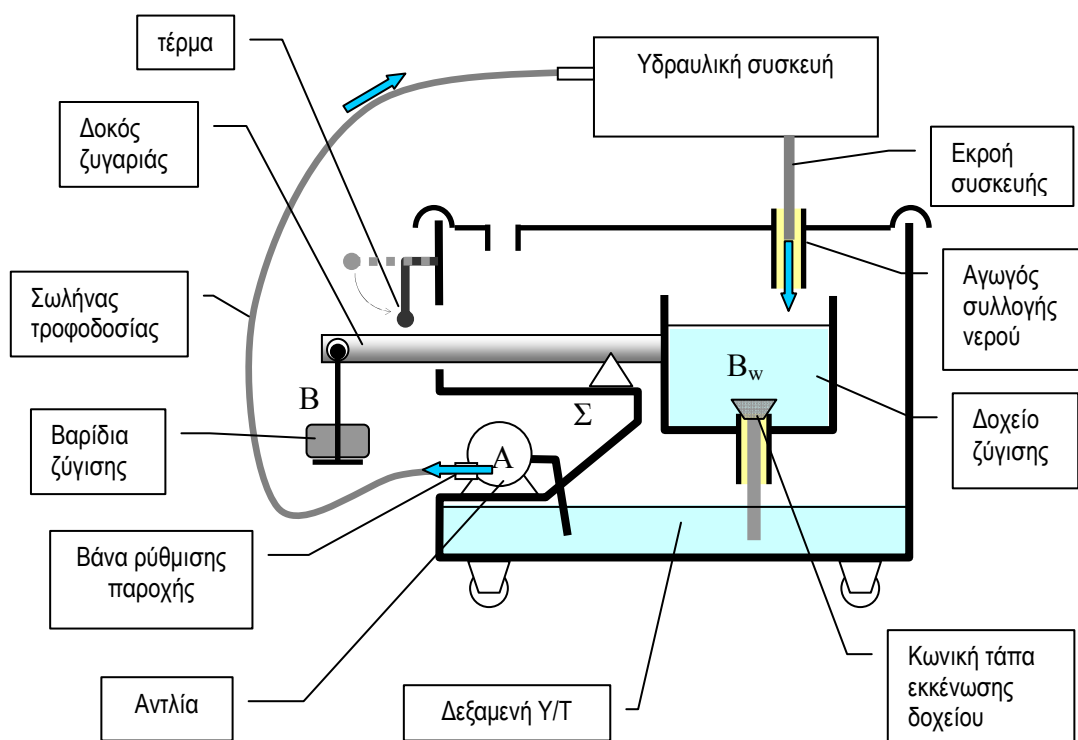


**Εικόνα 2.2:** Πλάγια όψη της τράπεζας με τα βασικά εξαρτήματα χειρισμού της.



**Εικόνα 2.3:** Εσωτερική άποψη της υδραυλικής τράπεζας. Ο αγωγός συλλογής του νερού στο δοχείο ζύγισης φαίνεται κεκλιμένος ως προς την κατακόρυφο επειδή η επιφάνεια της τράπεζας (καπάκι) στην οποία είναι προσαρτημένος έχει ανασηκωθεί για τις ανάγκες της φωτογράφισης. Μέσα από τον αγωγό συλλογής του νερού διακρίνεται ο σωλήνας τροφοδοσίας νερού από την αντλία στον οποίο συνδέονται διάφορες υδραυλικές συσκευές. Όταν λειτουργεί η Υ/Τ ο σωλήνας τροφοδοσίας παρέχει νερό στη συσκευή. Η εκροή της συσκευής συλλέγεται διαμέσου του αγωγού συλλογής στο δοχείο ζύγισης.

Στην υδραυλική τράπεζα (Υ/Τ) υπάρχει μια ζυγαριά για τη ζύγιση της συλλεγόμενης ποσότητας νερού. Η ζυγαριά είναι μια συμβατική ζυγαριά τύπου πλάστιγγας. Διαθέτει μια δοκό στα άκρα της οποίας αναρτώνται από τη μία πλευρά ένα δοχείο συλλογής νερού και από την άλλη ένας δίσκος τοποθέτησης ζυγιστικού έρματος (βαρίδια). Το δοχείο ζύγισης συλλέγει το νερό που παροχετεύεται από μια υδραυλική συσκευή δια της οποίας ζητείται να μετρηθεί με ακρίβεια η παροχή (Εικόνες 2.3, 2.4 & 2.5). Η μέτρηση της παροχής γίνεται με άμεσο τρόπο. Μετράται το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται για να συλλεχθεί συγκεκριμένη μάζα νερού στο δοχείο. Η συλλεγόμενη μάζα προσδιορίζεται με τη ζυγαριά, με τρόπο που περιγράφεται παρακάτω στη λειτουργική ανάλυση της συσκευής.



**Εικόνα 2.4:** Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της υδραυλικής τράπεζας (Υ/Τ). Η υδραυλική συσκευή τροφοδοτείται με παροχή η οποία μετρείται με την Υ/Τ. Στη θέση που απεικονίζεται η δοκός ζύγισης, η κωνική τάπα κλείνει την εκκένωση του δοχείου ζύγισης, με αποτέλεσμα νερό να συσσωρεύεται στο δοχείο. Μόλις το δοχείο βαρύνει αρκετά, η δοκός ζύγισης γυρίζει ωρολογιακά γύρω από το υπομόχλιο Σ, το δοχείο κατεβαίνει και η απόληξη της κωνικής τάπας ακουμπά στον πυθμένα της δεξαμενής, με αποτέλεσμα το δοχείο να εκκενωθεί από το νερό που έχει συσσωρευθεί σε αυτό. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί εάν η δοκός εμποδιστεί να γυρίσει ανθωρολογιακά με τη βοήθεια ενός κατάλληλου τέρματος.

## 2.2 Λειτουργική ανάλυση της Υ/Τ

Ζύγιση του νερού που συλλέγεται στο δοχείο.

Για να ισορροπεί η δοκός πρέπει η συνισταμένη ροπή να είναι ίση με το μηδέν. Η αναλογία μηκών είναι  $L_1/L_2$  ως προς το άκρο που τοποθετούνται τα βαρίδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5. Από την επίλυση της εξίσωσης ισορροπίας προκύπτει ότι η μάζα του υγρού που εισέρχεται στον κάδο είναι  $(L_1/L_2)$ -φορές αυτής του βαριδίου που τοποθετήσαμε. Στις Υ/Τ που διαθέτει το Εργ/ριο Υδραυλικής  $(L_1/L_2)=3$ .

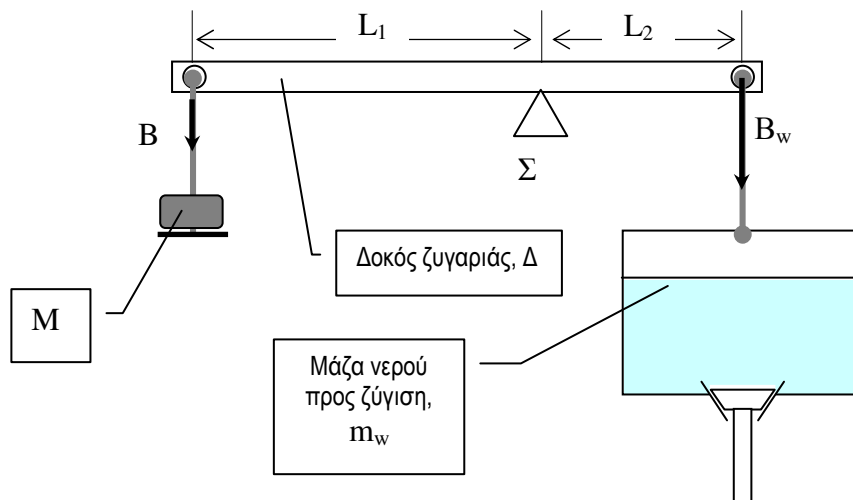
Η παροχή μάζας υγρού που δίνει η αντλία της τράπεζας είναι ίση με τον λογο της μάζας του υγρού που μετρήσαμε δια τον χρόνο που μετρήσαμε μέχρι να ισορροπήσει η δοκός της τράπεζας.

$$BL_1 = B_w L_2 \Leftrightarrow B_w = B \frac{L_1}{L_2} \Leftrightarrow m_w g = B \frac{L_1}{L_2} \Leftrightarrow m_w = M \frac{L_1}{L_2} \quad 2.1$$

Επειδή στην Υ/Τ που εξετάζουμε,  $L_1 = 3L_2$ , προκύπτει ότι

$$m_w = 3M$$

$$\dot{m} = \frac{\Delta m_w}{\Delta t} \Rightarrow Q = \frac{m}{\rho} \quad 2.2$$



**Εικόνα 2.5:** Στατική ισορροπία της ζυγαριάς για τη ζύγιση του συλλεγόμενου νερού (μάζας  $m_w$ ) στο δοχείο ζύγισης της υδραυλικής τράπεζας (Υ/Τ)



### 2.3 Διαδικασία Μέτρησης

- 1) Τοποθετούμε το σωλήνα παροχής στην οπή συλλογής, η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια της υδραυλικής τράπεζας πάνω από το δοχείο ζύγισης ώστε να πέφτει το νερό μέσα σε αυτό. Με τη ρυθμιστική βάνα ρυθμίζουμε την παροχή της Υ/Τ.
- 2) Έχοντας ανοιχτό το σύρτη κρατάμε το άκρο της ζυγιστικής δοκού από την μεριά των βαριδίων ψηλά, ώστε να κατέβει το δοχείο ζύγισης χαμηλά και να ακουμπήσει το κάτω μέρος της κωνικής τάπας εκκένωσης στον πυθμένα της Υ/Τ (Εικόνα 2.4). Έτσι ανοίγει η βαλβίδα εκροής του δοχείου και τυχόν συσσωρευμένο νερό εκρέει.
- 3) Μόλις αδειάσει το δοχείο ζύγισης αφήνουμε ελεύθερη τη δοκό, το δοχείο ανασηκώνεται γιατί είναι ελαφρύτερο από το έρμα, κλείνει η βαλβίδα και συσσωρεύεται νερό σε αυτό. Επίσης κλείνουμε το σύρτη τερματισμού ώστε το δοχείο να μην κατέβει ξανά χαμηλά και να μην ανοίξει η βαλβίδα εκροής.
- 4) Το νερό που συλλέγεται στο δοχείο (αφού η κωνική τάπα εκκένωσης είναι κλειστή) κλίνει τη ζυγαριά προς το δοχείο, οπότε το άλλο άκρο της δοκού ζύγισης ακουμπά στο σύρτη τέρματος. Εκείνη τη στιγμή αρχίζουμε τη χρονομέτρηση. Αμέσως μετά τοποθετούμε το πρώτο βαρίδι (2kg), το οποίο κλίνει τη ζυγαριά προς αυτό. Περιμένουμε να συλλεχθεί ποσότητα νερού στο δοχείο τέτοια ( $3 \times 2\text{kg} = 6\text{kg}$ ) ώστε να επαναφέρει την ισορροπία προς το δοχείο και να ακουμπήσει η δοκός πάλι στο σύρτη. Εκείνη τη στιγμή μετράμε το χρονικό διάστημα που απαιτήθηκε για τη συλλογή των 6kg νερού. Στη συνέχεια τοποθετούμε το επόμενο βαρίδι, η ζυγαριά κλίνει προς τα βαρίδια κ.ο.κ.
- 5) Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία με προσθέτοντας και τα 4 βαρίδια (δηλαδή μέχρι να συλλεχθούν στο δοχείο  $3 \times (2\text{kg} + 2\text{kg} + 2\text{kg} + 2\text{kg}) = 24\text{kg}$  νερού) και σημειώνουμε σε πίνακα τις μάζες των βαριδίων που τοποθετήσαμε (όλες είναι ίσες μάζες 2kg) και τους αντίστοιχους χρόνους που απαιτήθηκαν για να γεμίσει το δοχείο ζύγισης με νερό του οποίου η μάζα (6kg) αντιστοιχεί σε 3-πλάσια μάζα κάθε 2kg βαριδιού ( $3 \times 2\text{kg} = 6\text{kg}$ ).

### 2.4 Επεξεργασία Μετρήσεων

- 1) Καταγράφουμε τις μετρήσεις σε πίνακα παροχής (βλέπε πίνακα 2.1).
- 2) Για κάθε άγνωστη παροχή (ανά μία σειρά) καταγράφουμε τα χρονικά διαστήματα,  $\Delta t_i$ , που μεσολαβούν για τη συλλογή μάζας νερού 6kg (που αντιστοιχεί στην προσθήκη βαριδιού 2 kg στη δοκό εξισορρόπησης του ζυγιστικού δοχείου). Υπολογίζουμε την μέση τιμή των παροχών μάζας,  $q_i = 6\text{kg}/\Delta t_i$ , και της αντίστοιχης μέση τιμής της παροχής μάζας  $q_m = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 q_i$ .
- 3) Διαιρούμε τη μέση τιμή της παροχής μάζας,  $q_m$ , με την πυκνότητα του νερού,  $\rho = 1,0\text{kg/l}$ , ώστε να προκύψει η ογκομετρική παροχή σε λίτρα ανά δευτερόλεπτο (l/s).

### 2.5 Αποτελέσματα

Η υδραυλική τράπεζα χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις βαθμονομήσεις που εκτελέσαμε. Ενδεικτική μορφή ενός πίνακα μετρήσεων παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1. Τα νούμερα αντιστοιχούν σε μετρήσεις βαθμονόμησης μιας συσκευής μέτρησης.

**Πίνακας 2.1** Τυπικές μετρήσεις άγνωστης παροχής με υδραυλική τράπεζα. Κάθε σειρά του πίνακα αντιστοιχεί σε διαφορετική ρύθμιση της άγνωστης παροχής. Στις 4 πρώτες στήλες καταγράφονται τα χρονικά διαστήματα,  $\Delta t$  (s), που διήρκτησε η συλλογή συλλογή νερού μάζας 6kg στο ζυγιστικό δοχείο της υδραυλικής τράπεζας. Στις επόμενες 4 στήλες υπολογίζονται οι αντίστοιχες παροχές μάζας,  $q$  (kg/s). Στις 2 τελευταίες στήλες υπολογίζεται η μέση τιμή της παροχής μάζας,  $q_m$  (kg/s), και της ογκομετρικής παροχής,  $Q$  (l/s).

$\Delta t_1$ s	$\Delta t_2$ s	$\Delta t_3$ s	$\Delta t_4$ s	$q_{m1}$ kg/s	$q_{m2}$ kg/s	$q_{m3}$ kg/s	$q_{m4}$ kg/s	$q_m$ kg/s	$Q$ l/s
Συλλογή μάζας νερού: 6 kg									
90,50	90,70	90,80	91,10	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,0220
51,30	50,50	49,80	50,00	0,039	0,040	0,040	0,040	0,040	0,0397
34,50	34,50	34,60	34,30	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,0580
26,20	26,20	26,40	26,20	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,0762
20,90	20,90	20,90	21,20	0,096	0,096	0,096	0,094	0,095	0,0954
17,50	17,11	17,10	17,10	0,114	0,117	0,117	0,117	0,116	0,1163
14,50	14,40	14,70	14,40	0,138	0,139	0,136	0,139	0,138	0,1379
12,60	12,30	12,50	12,50	0,159	0,163	0,160	0,160	0,160	0,1603
11,00	11,00	10,90	10,90	0,182	0,182	0,183	0,183	0,183	0,1827
9,90	9,70	9,70	9,90	0,202	0,206	0,206	0,202	0,204	0,2041
90,42	90,80	90,90	90,32	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,0221
71,37	71,37	71,11	72,23	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,0280
58,32	58,43	58,38	58,61	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,0342
50,63	51,05	51,80	51,90	0,040	0,039	0,039	0,039	0,039	0,0390
43,25	43,33	43,75	43,67	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,0460
38,45	38,25	37,95	37,95	0,052	0,052	0,053	0,053	0,052	0,0524
34,25	33,78	34,05	34,30	0,058	0,059	0,059	0,058	0,059	0,0587
30,40	30,70	30,40	30,30	0,066	0,065	0,066	0,066	0,066	0,0657
28,20	28,40	28,60	28,70	0,071	0,070	0,070	0,070	0,070	0,0702
25,40	25,80	25,80	25,90	0,079	0,078	0,078	0,077	0,078	0,0777
23,90	23,80	23,80	24,00	0,084	0,084	0,084	0,083	0,084	0,0838
22,30	22,50	22,40	22,40	0,090	0,089	0,089	0,089	0,089	0,0893
20,60	20,70	20,60	20,70	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,0969
19,20	19,50	19,70	19,10	0,104	0,103	0,102	0,105	0,103	0,1032
18,30	18,10	18,40	18,30	0,109	0,110	0,109	0,109	0,109	0,1094
17,10	17,00	17,10	17,10	0,117	0,118	0,117	0,117	0,117	0,1171
16,40	16,30	16,10	16,20	0,122	0,123	0,124	0,123	0,123	0,1231
14,90	14,90	14,70	14,90	0,134	0,134	0,136	0,134	0,135	0,1347
14,40	14,30	14,40	14,20	0,139	0,140	0,139	0,141	0,140	0,1396
13,80	13,70	13,90	13,60	0,145	0,146	0,144	0,147	0,145	0,1455
13,00	13,10	13,00	13,00	0,154	0,153	0,154	0,154	0,154	0,1536

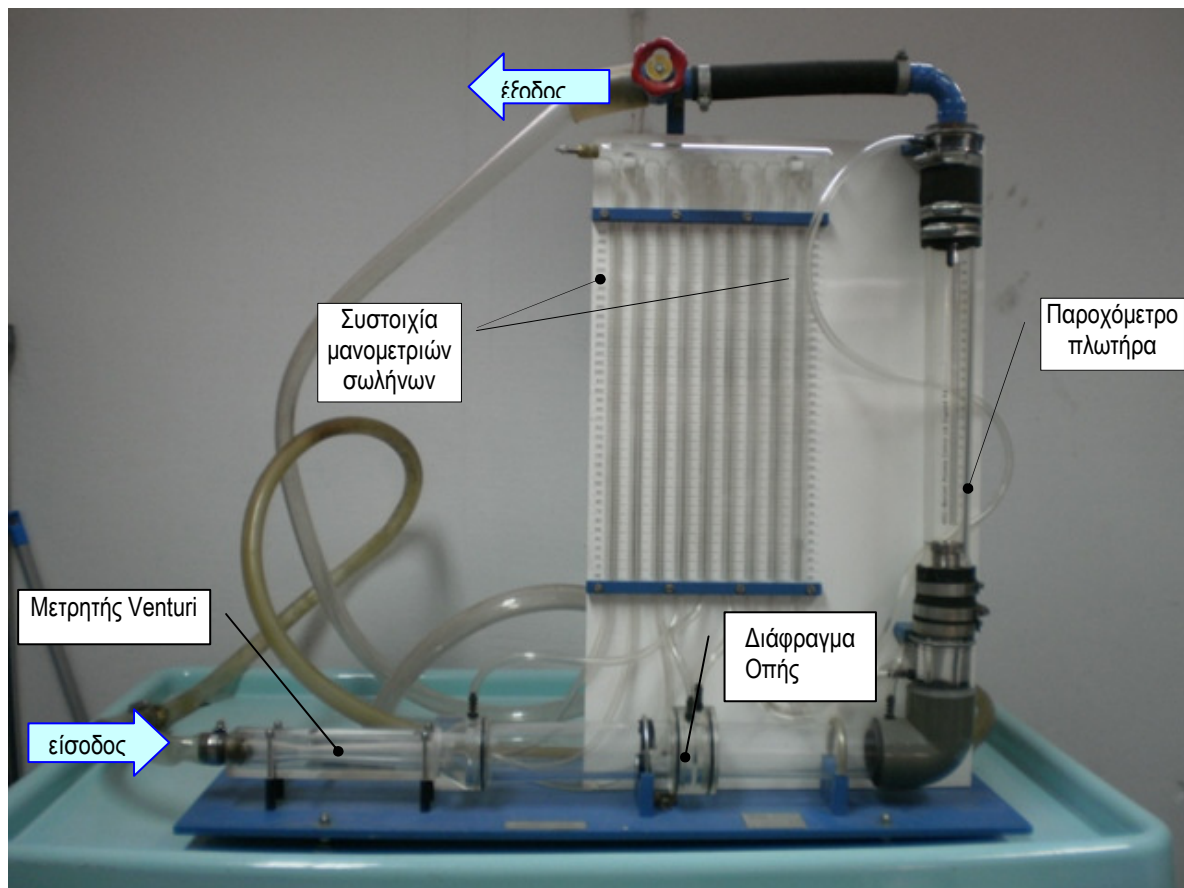
## Κεφάλαιο 3

# Βαθμονόμηση συσκευών – Ροές υπό πίεση («ροή σε κλειστούς αγωγούς»)

### 3.1 Σύστημα παροχομέτρων Πλωτήρα – Ventouri - Διάφραγμα Οπής

#### Γενική περιγραφή

Η συσκευή της Εικόνας 3.1 είναι μια σύνθετη συσκευή μέτρησης παροχής με συνδυασμένη χρήση ενός παροχομέτρου πλωτήρα, ενός μετρητή Ventouri και ενός παροχομέτρου με διάφραγμα οπής. Πρόκειται ουσιαστικά για 3 εν σειρά μετρητές παροχής σε μια συσκευή.

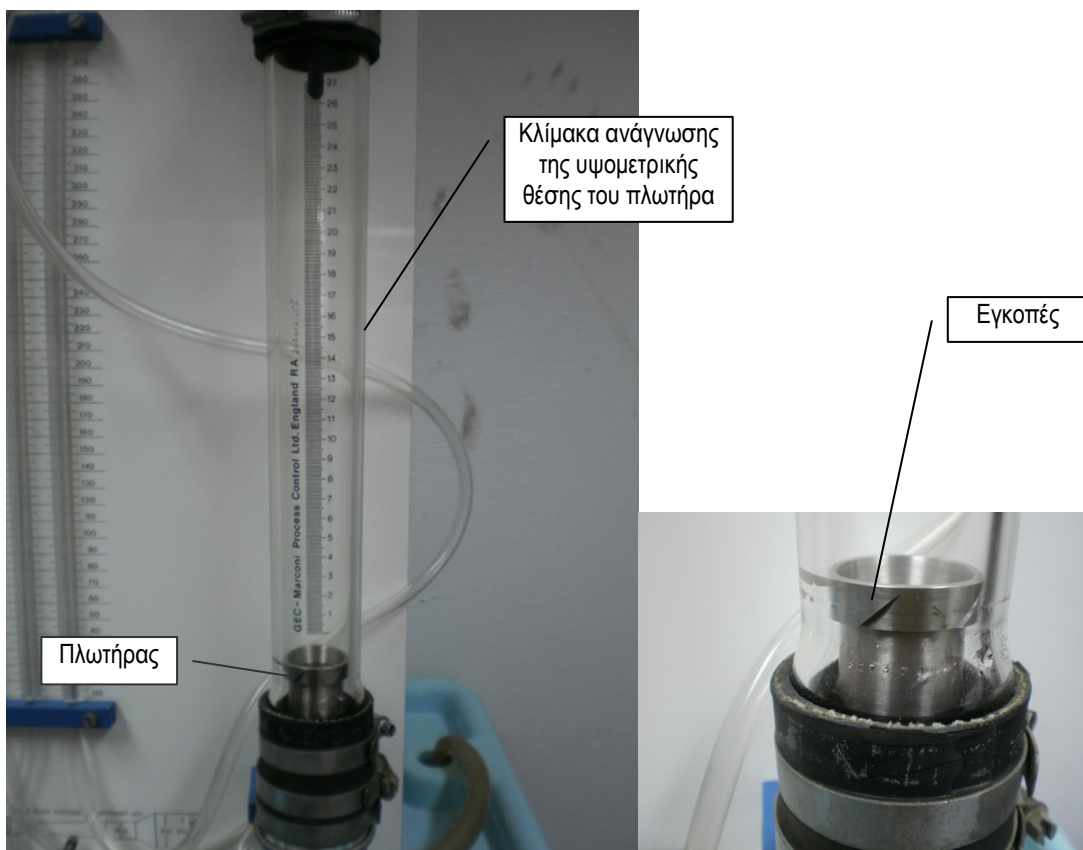


**Εικόνα 3.1** Πλάγια όψη του συστήματος με εν σειρά συνδεδεμένα παροχόμετρα Βεντούρι – διαφράματος οπής και πλωτήρα, τοποθετημένου πάνω στην υδραυλική τράπεζα. Η ροή του νερού πραγματοποιείται από την κάτω αριστερή είσοδο προς την πάνω αριστερή έξοδο. Η έξοδος του νερού οδηγείται στο ζυγιστικό δοχείο της υδραυλικής τράπεζας.

### \* Παροχόμετρο πλωτήρα

#### Περιγραφή

Το παροχόμετρο πλωτήρα είναι μια απλή συσκευή μέτρησης παροχής η οποία αποτελείται από έναν κατακόρυφο κυλινδρικό (ελαφρά κωνικό) διάφανο γυάλινο σωλήνα, μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένος ένας μεταλλικός κυλινδρικός πλωτήρας με κατάλληλα διαμορφωμένο υδροδυναμικό σχήμα (ανεστραμμένου κώνου). Το νερό που παροχετεύεται μέσα από το σωλήνα (από κάτω προς τα επάνω) παρασύρει υδροδυναμικά τον πλωτήρα ο οποίος ισορροπεί (υδροδυναμική ισορροπία) σε συγκεκριμένο ύψος μέσα στο σωλήνα, ανάλογα με την παροχή του νερού. Ο άξονας του πλωτήρα ευθυγραμμίζεται υδροδυναμικά με τον άξονα του κωνικού σωλήνα και έτσι δημιουργείται ένας κυκλικός δακτύλιος μεταξύ πλωτήρα και τοιχωμάτων σωλήνα διαμέσου του οποίου περνάει το νερό και του οποίου το πλάτος (άρα και το εμβαδό) αυξάνει όσο ο πλωτήρας ισορροπεί σε υψηλότερη θέση μέσα στο σωλήνα. Ο πλωτήρας ισορροπεί όταν η υδροδυναμική αντίσταση του στο ανερχόμενο ρεύμα του νερού (η οποία εξαρτάται από την επιφάνεια του δακτυλιοειδούς διακένου) γίνει ίση και αντίθετη με το βάρος του πλωτήρα. Διατηρώντας σταθερή παροχέτευση νερού από το σωλήνα, ανάλογα με τη θέση του πλωτήρα στο σωλήνα, ο οποίος έχει επισημασμένη κατάλληλη κλίμακα μέτρησης, και με τη βοήθεια του νομογράμματος του παροχομέτρου μπορεί κάποιος να υπολογίσει την παροχή.

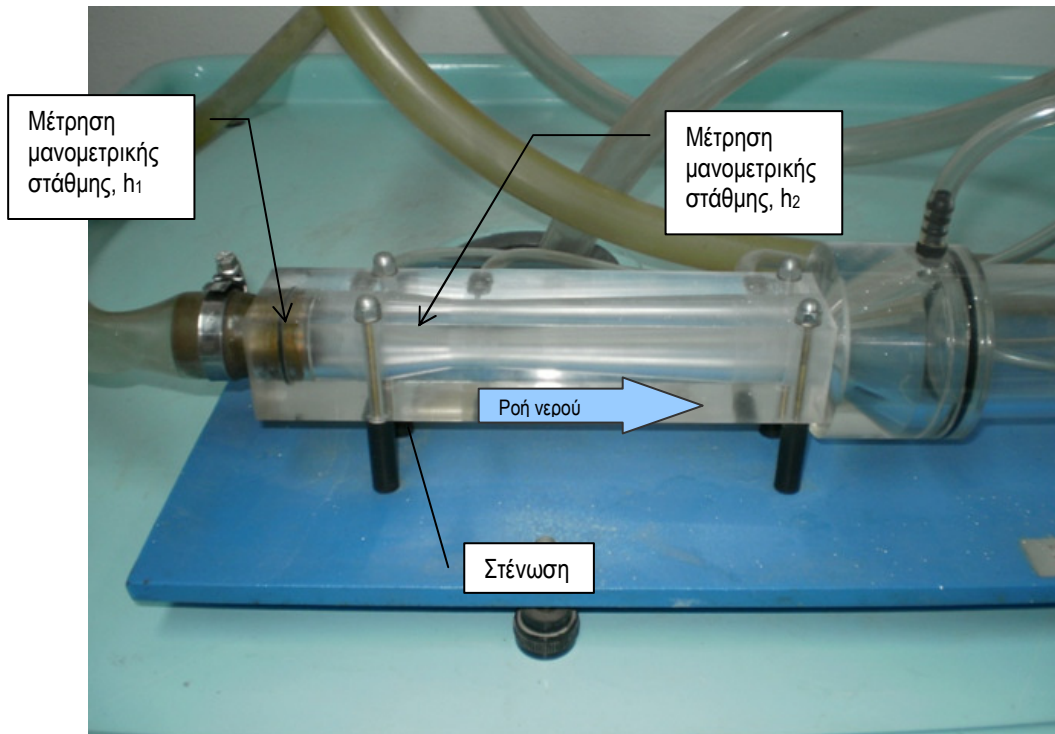


**Εικόνα 3.2** Πλάγια όψη του παροχομέτρου πλωτήρα και λεπτομέρεια του πλωτήρα. Οι λοξές εγκοπές με κατάλληλο υδροδυναμικό σχήμα θέτουν τον πλωτήρα σε περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονά του και τον διατηρούν σε πλήρη ευθυγράμμιση με τον άξονα του σωλήνα.

### \* *Μετρητής Ventouri*

#### Περιγραφή

Ο μετρητής Ventouri («Βεντουρίμετρο»), παρεμβαλλόμενος σε έναν αγωγό, χρησιμοποιείται ως όργανο μέτρησης της ογκομετρικής παροχής από τον αγωγό. Στην περίπτωση ασυμπίεστης & ιδανικής ροής (υγρό χωρίς ιξώδες) υπάρχει μία απλή σχέση που συνδέει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού Ventouri με την πυκνότητα του υγρού και την ογκομετρική παροχή δια μέσου του Ventouri. Όμως, στις πρακτικές εφαρμογές οι ροές δεν είναι ιδανικές (τα ρευστά έχουν ιξώδες) και η προαναφερθείσα σχέση δεν είναι ακριβής. Έτσι, κάθε μετρητής Ventouri χρειάζεται βαθμονόμηση.



**Εικόνα 3.3** Πλάγια όψη του μετρητή Ventouri, με το χαρακτηριστικό συγκλίνοντα-αποκλίνοντα τμήμα. Η ροή του νερού γίνεται από το βραχύτερο τμήμα (συγκλίνον) προς το μακρύτερο τμήμα (αποκλίνον).

#### Λειτουργική ανάλυση

Ο μετρητής Ventouri αποτελείται από ένα συγκλίνοντα-αποκλίνοντα κυλινδρικό αγωγό δια μέσου του οποίου ρέει κάποιο υγρό με σταθερή παροχή όγκου,  $q$ . Η γεωμετρία του μετρητή Ventouri είναι παρόμοια σε όλους τους μετρητές και τυποποιείται με βάση τις δύο διαμέτρους (εισόδου και στενότερης διατομής). Κατά μήκος μιας γενέτειρας του κυλινδρικού αγωγού συνδέονται δύο μανομετρικοί σωλήνες, ένας στην ονομαστική διατομή (στην είσοδο) του μετρητή και ένας στη στενότερη διατομή. Τα άνω άκρα των μανομετρικών σωλήνων καταλήγουν σε ένα κοινό στεγανό αεροθάλαμο, η πίεση του οποίου ελέγχεται με μια βαλβίδα.

Για τη βαθμονόμηση του μετρητή Ventouri του εργαστηρίου, στην είσοδό του συνδέεται η έξοδος της αντλίας της υδραυλικής τράπεζας. Στην έξοδο του μετρητή συνδέεται μια στραγγαλιστική βάνα και ένας σωλήνας για την παροχέτευση του νερού στο δοχείο ζύγισης

τη Y/T. Η ρύθμιση της παροχής μέσα από τον μετρητή γίνεται είτε με τη ρυθμιστική βάνα της Y/T (ανάντι) είτε με τη στραγγαλιστική βάνα στην έξοδό του (κατάντι).

Η υδραυλική ανάλυση ενός μετρητή Ventouri είναι απλή (βλέπε παρακάτω, σχέση 3.8) για την περίπτωση ιδανικής ροής, δηλαδή ροής χωρίς απώλειες λόγω τριβών (εξιδανικευμένο υγρό με μηδενικό ιξώδες) και καταλήγει σε μια σχετικά απλή έκφραση που δίνει τη (θεωρητική) ογκομετρική παροχή,  $Q_{th}$ , δια μέσου του μετρητή συναρτήσει της διαφοράς των ελεύθερων σταθμών στους μανομετρικούς σωλήνες ( $h_1-h_2$ ) και της γεωμετρίας του αγωγού (διατομές  $A_1$  και  $A_2$ ).

$$Q_{th} = C_{b,th} \sqrt{(h_1 - h_2)} \quad (3.1)$$

όπου

$$C_{b,th} = A_1 \sqrt{\frac{2g}{(A_1/A_2)^2 - 1}}$$

είναι ο *συντελεστής σχήματος* του μετρητή Ventouri η τιμή του

οποίου εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετρητή.

Στις πραγματικές (μη ιδανικές) ροές ιξωδών υγρών η πραγματική παροχή,  $Q_r$ , δεν προσδιορίζεται από την 3.1. αλλά από μια έκφραση της μορφής

$$Q_r = CQ_{th} = CC_{b,th} \sqrt{(h_1 - h_2)} = K\sqrt{\Delta h} \quad (3.2)$$

όπου

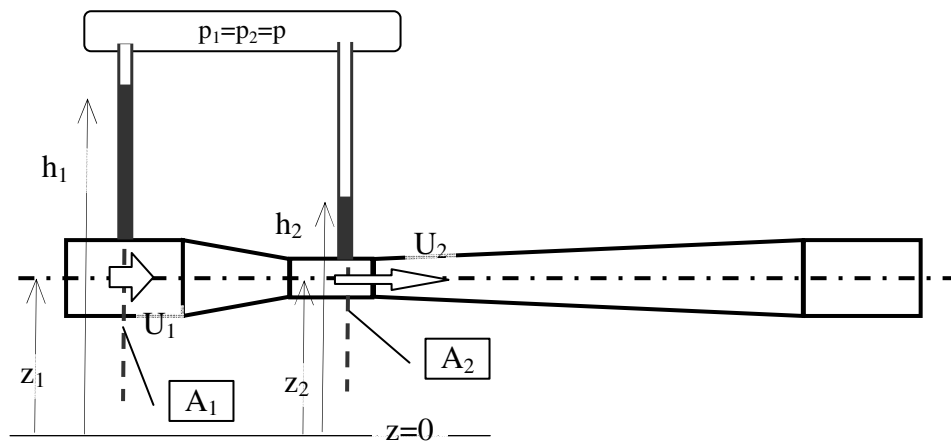
$C$  είναι ο *συντελεστής συσχέτισης* μεταξύ πραγματικής και ιδανικής παροχής του μετρητή Ventouri, και

$K$  είναι ο *συντελεστής του μετρητικού οργάνου*.

Και οι δύο συντελεστές εξαρτώνται από τη γεωμετρία και το υλικό κατασκευής του μετρητή, τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του υγρού αλλά και από τις ίδιες τις συνθήκες ροής. Η τιμή (ή οι περιοχές τιμών του  $K$  ανάλογα με τις συνθήκες ροής) προκύπτει από τη βαθμονόμηση του μετρητή Ventouri.

#### Υπολογισμός ογκομετρικής παροχής ιδανικής ροής, $Q_{th}$ , σε αγωγό Ventouri

Ο μετρητής Ventouri αποτελείται από ένα συγκλίνοντα-αποκλίνοντα κυλινδρικό αγωγό δια μέσου του οποίου ρέει νερό με σταθερή παροχή όγκου,  $q$ . Η γεωμετρία του μετρητή Ventouri είναι γνωστή και δεδομένη (βλέπε Εικόνα 3.4).



### Εικόνα 3.4 Βασικά στοιχεία της γεωμετρίας ενός αγωγού Ventouri

Κατά μήκος μιας γενέτειρας του κυλινδρικού αγωγού συνδέονται δύο μανόμετρα στήλης νερού. Τα άνω άκρα όλων των μανομέτρων καταλήγουν σε ένα αεροστεγή θάλαμο, που περιέχει αέρα και η πίεση του οποίου ελέγχεται με μια βαλβίδα. Στην είσοδο του μετρητή Ventouri συνδέεται η προς μέτρηση παροχή νερού.

#### Διατύπωση ισοζυγίου ενέργειας σε φλέβα ροής (Bernoulli)

Από τη διατήρηση συνολικής ενέργειας ανά μονάδα βάρους του νερού (στην περίπτωση ιδανικής ροής) έχουμε για τις δύο διατομές 1 & 2, με εμβαδό  $A_1$  &  $A_2$  αντίστοιχα:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{U_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{U_2^2}{2g} \Rightarrow \frac{p_1 + \gamma h_1}{\gamma} + z_1 + \frac{U_1^2}{2g} = \frac{p_2 + \gamma h_2}{\gamma} + z_2 + \frac{U_2^2}{2g} \quad (3.3)$$

και, αφού  $z_1 = z_2$  (οριζόντιος μετρητής) και  $p_1 = p_2$  (όλοι οι μανομετρικοί σωλήνες καταλήγουν σε ένα κοινό κλειστό θάλαμο όπου επικρατεί η ίδια πίεση  $p$ ), τότε

$$h_1 + \frac{U_1^2}{2g} = h_2 + \frac{U_2^2}{2g} \quad (3.4)$$

Έτσι η θεωρητική ογκομετρική παροχή στην περίπτωση ιδανικής ροής προκύπτει ως εξής:

$$h_1 + \frac{U_1^2}{2g} = h_2 + \frac{U_2^2}{2g} \Rightarrow (h_1 - h_2) = \frac{U_1^2}{2g} \left( \frac{U_2^2}{U_1^2} - 1 \right) \Rightarrow 2g(h_1 - h_2) = U_1^2 \left( \frac{U_2^2}{U_1^2} - 1 \right) \quad (3.5)$$

και επειδή -από το νόμο της συνέχειας- ισχύει  $Q = U_1 A_1 = U_2 A_2 \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{A_1}{A_2}$ , τότε

$$2g(h_1 - h_2) = U_1^2 \left( \frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right) \Rightarrow 2g(h_1 - h_2) = U_1^2 A_1^2 \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \Rightarrow$$
$$2g(h_1 - h_2) = Q_{th}^2 \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \quad (3.7)$$

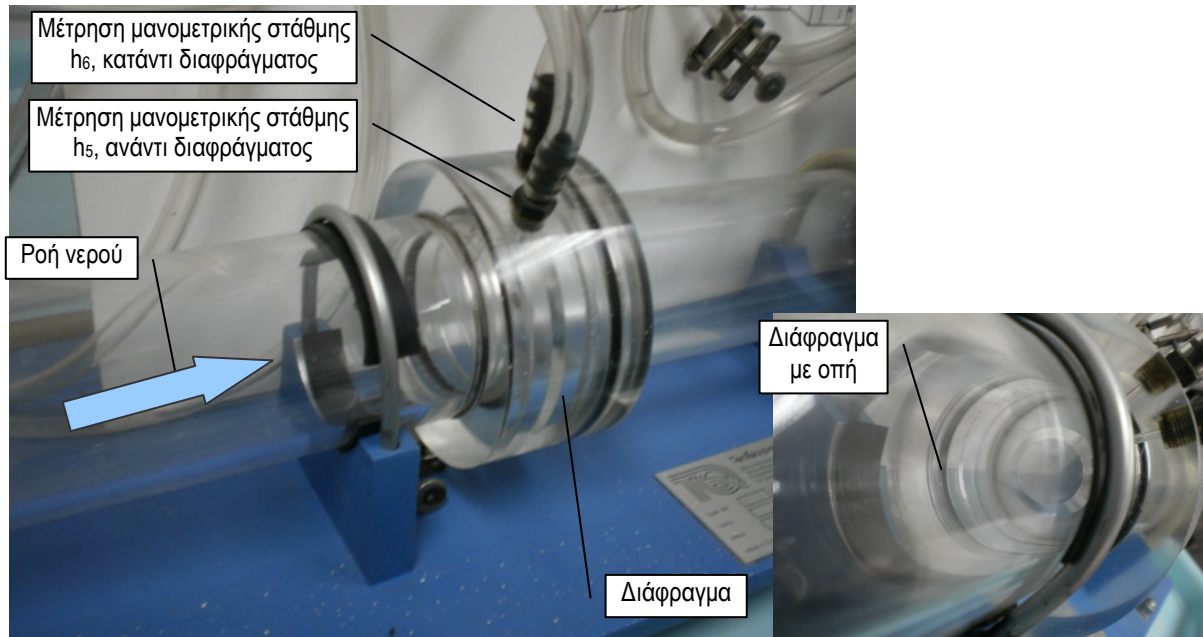
απ' όπου προκύπτει η ογκομετρική παροχή για ιδανική ροή όπως είδαμε στην σχέση 3.1

$$Q_{th} = A_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{(h_1 - h_2)} = A_1 \sqrt{\frac{2g}{(A_1/A_2)^2 - 1}} \sqrt{(h_1 - h_2)} \quad (3.8)$$

### \* Διάφραγμα με οπή

#### Περιγραφή

Το διάφραγμα οπής είναι ένας ακόμα τύπος παροχόμετρου. Συνδεδεμένο σε αγωγό μας βοηθά να υπολογίσουμε την παροχή που τον διαρρέει. Μετρώντας τη διαφορά των μανομετρικών υψών στους μανομετρικούς σωλήνες, πριν και μετά το διάφραγμα (ανάντι και κατάντι του διαφράγματος), και χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο νομόγραμμα, μπορούμε να υπολογίζουμε ανά πάσα στιγμή την παροχή διαμέσου του διαφράγματος.



**Εικόνα 3.5** Εξωτερική όψη του διαφράγματος με οπή, η ροή γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά, τα σωληνάκια οδηγούν στην ανάγνωση των μανομετρικών πιέσεων  $h_5$  και  $h_6$  και λεπτομερής εσωτερική όψη της οπής.

#### Λειτουργική ανάλυση

Το παροχόμετρο διαφράγματος οπής αποτελείται από έναν ευθύγραμμο κυλινδρικό αγωγό δια μέσου του οποίου ρέει κάποιο υγρό με σταθερή παροχή όγκου,  $q$ . Στη μέση του σωλήνα παρεμβάλλεται ένα διάφραγμα με ομόκεντρη κυκλική οπή λεπτής στέψης. Η γεωμετρία του είναι παρόμοια σε όλα τα διαφράγματα και τυποποιείται με βάση τις δύο διαμέτρους (του σωλήνα και της οπής του διαφράγματος). Εκατέρωθεν του διαφράγματος συνδέονται δύο μανομετρικοί σωλήνες, ένας ανάντι κι ένας κατάντι. Τα άνω άκρα των μανομετρικών σωλήνων καταλήγουν σε ένα κοινό στεγανό αεροθάλαμο, η πίεση του οποίου ελέγχεται με μια βαλβίδα.

Για τη βαθμονόμηση του μετρητή διαφράγματος οπής του εργαστηρίου, στην είσοδό του συνδέεται η έξοδος της αντλίας της υδραυλικής τράπεζας. Στην έξοδο του μετρητή συνδέεται μια στραγγαλιστική βάνα και ένας σωλήνας για την παροχέτευση του νερού στο δοχείο ζύγισης τη Y/T. Η ρύθμιση της παροχής μέσα από τον μετρητή γίνεται είτε με τη ρυθμιστική βάνα της Y/T (ανάντι) είτε με τη στραγγαλιστική βάνα στην έξοδό του (κατάντι).

Η υδραυλική ανάλυση ενός διαφράγματος οπής είναι παρόμοια με αυτή του μετρητή Ventouri για την περίπτωση ιδανικής ροής, δηλαδή ροής χωρίς απώλειες λόγω τριβών (εξιδανικευμένο υγρό με μηδενικό ιξώδες) και καταλήγει σε μια σχετικά απλή έκφραση που



δίνει τη (θεωρητική) ογκομετρική παροχή,  $Q_{th}$ , δια μέσου του μετρητή συναρτήσει της διαφοράς των ελεύθερων σταθμών στους μανομετρικούς σωλήνες ( $h_1-h_2$ ) και της γεωμετρίας του αγωγού. Στις πραγματικές (μη ιδανικές) ροές ιξωδών υγρών η πραγματική παροχή,  $Q_r$ , προσδιορίζεται από μια έκφραση της μορφής (Τερζίδης 1996, 1)

$$Q_r = K\sqrt{\Delta h} \quad (3.2)$$

όπου

$K$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης του μετρητικού οργάνου, ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία και το υλικό κατασκευής του μετρητή, τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του υγρού αλλά και από τις ίδιες τις συνθήκες ροής.

Η τιμή (ή οι περιοχές τιμών του  $K$  ανάλογα με τις συνθήκες ροής) προκύπτει από τη βαθμονόμηση του μετρητή διαφράγματος οπής.

### 3.2 Διαδικασία βαθμονόμησης:

#### \* Παροχόμετρο πλωτήρα

- 1) Τοποθετούμε τη συσκευή πάνω στην υδραυλική τράπεζα (Y/T), την ρυθμίζουμε ώστε ο διαμήκης άξονας να είναι κατακόρυφος, συνδέουμε τον αγωγό εισροής με τον αγωγό παροχής της Y/T και τον αγωγό εκροής στον αγωγό πλήρωσης του δοχείου της Y/T.
- 2) Θέτουμε σε λειτουργία την Y/T και αφήνουμε το σύστημα να σταθεροποιηθεί.
- 3) Μετράμε την παροχή της υδραυλικής τράπεζας και καταγράφουμε το ύψος  $H$  στο οποίο σταθεροποιείται ο πλωτήρας.
- 4) Επαναλαμβάνουμε το πείραμα για πολλές παροχές και σημειώνουμε τα ύψη του πλωτήρα,  $H$ .

#### \* Παροχόμετρο Ventouri

- 1) Τοποθετούμε το παροχόμετρο πάνω στην υδραυλική τράπεζα (Y/T), το οριζοντιώνουμε, συνδέουμε τον αγωγό εισροής με τον αγωγό παροχής της Y/T και τον αγωγό εκροής στον αγωγό πλήρωσης του δοχείου της Y/T.
- 2) Θέτουμε σε λειτουργία την Y/T και ρυθμίζουμε τα μανομετρικά ύψη στη μέση περίπου των μανομετρικών σωλήνων του παροχόμετρου απομακρύνοντας αέρα που έχει εγκλωβιστεί στο συλλέκτη /αεροθάλαμο των μανομετρικών σωλήνων ανοίγοντας την βαλβίδα του. Εάν οι στάθμες στους μανομετρικούς σωλήνες είναι πολύ ψηλά θα πρέπει να τις υποβιβάσουμε προσθέτοντας αέρα στον αεροθάλαμο με τη βοήθεια μιας χειροκίνητης τρόμπας. (Η αφαίρεση ή/και πρόσθεση αέρα και η αντίστοιχη ανύψωση ή/και υποβιβασμός των σταθμών στους μανομετρικούς σωλήνες δεν επιδρά στις μετρήσεις γιατί αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η διαφορά των υψών.)
- 3) Μετράμε την παροχή της Y/T και καταγράφουμε το ζευγάρι τιμών  $h_1 - h_2$  ( ανάντι και κατάντι του διαφράγματος)
- 4) Επαναλαμβάνουμε το πείραμα για πολλές παροχές και σημειώνουμε τις ενδείξεις των μανομέτρων  $h_1$  και  $h_2$ .

#### \* Παροχόμετρο διαφράγματος οπής

- 1) Τοποθετούμε το παροχόμετρο πάνω στην υδραυλική τράπεζα (Y/T), το οριζοντιώνουμε, συνδέουμε τον αγωγό εισροής με τον αγωγό παροχής της Y/T και τον αγωγό εκροής στον αγωγό πλήρωσης του δοχείου της Y/T.

2) Θέτουμε σε λειτουργία την Υ/Τ και ρυθμίζουμε τα μανομετρικά ύψη στη μέση περίπου των μανομετρικών σωλήνων του παροχόμετρου απομακρύνοντας αέρα που έχει εγκλωβιστεί στο συλλέκτη /αεροθάλαμο των μανομετρικών σωλήνων ανοίγοντας την βαλβίδα του. Εάν οι στάθμες στους μανομετρικούς σωλήνες είναι πολύ ψηλά θα πρέπει να τις υποβιβάσουμε προσθέτοντας αέρα στον αεροθάλαμο με τη βοήθεια μιας χειροκίνητης τρόμπας. (Η αφαίρεση ή/και πρόσθεση αέρα και η αντίστοιχη ανύψωση ή/και υποβιβασμός των σταθμών στους μανομετρικούς σωλήνες δεν επιδρά στις μετρήσεις γιατί αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η διαφορά των υψών.)

3) Μετράμε την παροχή της Υ/Τ και καταγράφουμε το ζευγάρι τιμών  $h_5$ -  $h_6$  ( ανάντι και κατάντι του διαφράγματος)

4) Επαναλαμβάνουμε το πείραμα για πολλές παροχές και σημειώνουμε τις ενδείξεις των μανομέτρων  $h_5$  και  $h_6$ .

### 3.3 Επεξεργασία Μετρήσεων

#### \* Παροχόμετρο πλωτήρα

- 1) Τοποθετούμε τα ζεύγη τιμών ( $Q_{ri}$ ,  $H_i$ ) σε διάγραμμα και προκύπτει ένας σχηματισμός σημείων με όλα τα σημεία να παρατάσσονται σε ευθεία.
- 2) Είναι εμφανές ότι η συνάρτηση που παρεμβάλλεται καλύτερα είναι η γραμμική,  $Q_r = A + BH$ . Με εφαρμογή μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζουμε τις τιμές των παραμέτρων A & B:

$$A = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N Q_{ri} - b \sum_{i=1}^N H_i \right), \quad B = \frac{N \sum_{i=1}^N (H_i Q_{ri}) - \left( \sum_{i=1}^N H_i \right) \left( \sum_{i=1}^N Q_{ri} \right)}{N \sum_{i=1}^N (H_i^2) - \left( \sum_{i=1}^N H_i \right)^2}$$

και σχεδιάζουμε την αντίστοιχη γραφική παράσταση (ευθεία), η οποία αποτελεί το νομόγραμμα του παροχόμετρου πλωτήρα.

#### \* Παροχόμετρο Ventouri (Βεντουρίμετρο)

- 1) Από τα γεωμετρικά στοιχεία του μετρητή Ventouri υπολογίζουμε το συντελεστή σχήματος του μετρητή,  $C_{b,th}$ ,

$$C_{b,th} = A_1 \sqrt{\frac{2g}{(A_1/A_2)^2 - 1}}$$

- 2) Έτσι, για κάθε παροχή μετρημένη,  $Q_{ri}$ , από την Υ/Τ, και για τα αντίστοιχα μανομετρικά ύψη,  $h_{1i}$  &  $h_{2i}$ , του μετρητή Ventouri, υπολογίζουμε τη θεωρητική παροχή (για ιδανική ροή),  $Q_{thi}$ .

$$Q_{thi} = C_{b,th} \sqrt{\Delta h_i}$$

- 3) Τοποθετούμε τις δύο ομάδες με τα ζεύγη τιμών ( $Q_{ri}$ ,  $\Delta h_i$ ) και [ $Q_{ri}$ ,  $Q_{thi}(\Delta h_i)$ ] σε διαγράμματα και έχουμε τους αντίστοιχους σχηματισμούς σημείων ώστε να δοκιμάσουμε να παρεμβάλλουμε σε αυτά κατάλληλες συναρτήσεις.

- 4) Από τις σχέσεις (3.1) και (3.2) η μορφή της συνάρτησης που θα πρέπει να παρεμβάλλεται καλύτερα στα ζεύγη μετρήσεων ( $Q_i, \Delta h_i$ ) είναι η  $Q_r = K\sqrt{\Delta h}$ . Αυτό επαληθεύεται και από τη μορφή του νέφους των αντίστοιχων σημείων απεικόνισης των ζευγών σε διάγραμμα  $Q(\Delta h)$ .
- 5) Από τη μορφή του νέφους των σημείων που αναπαριστούν τα ζεύγη  $Q_{ri}Q_{thi}$  φαίνεται ότι μια ευθεία γραμμή, της μορφής  $Q_r=A+BQ_{th}$ , θα αποτελέσει μια πολύ καλή προσαρμογή
- 6) Με εφαρμογή μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζουμε τις τιμές των παραμέτρων  $A, B$  &  $C_{b,r}$ :

$$A = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N Q_{ri} - b \sum_{i=1}^N \Delta h_i \right), \quad B = \frac{N \sum_{i=1}^N (\Delta h_i Q_{ri}) - \left( \sum_{i=1}^N \Delta h_i \right) \left( \sum_{i=1}^N Q_{ri} \right)}{N \sum_{i=1}^N (\Delta h_i^2) - \left( \sum_{i=1}^N \Delta h_i \right)^2} \quad \&$$

$$K = \left( \sum_i Q_{ri} \sqrt{\Delta h_i} \right) \left( \sum_i \Delta h_i \right)^{-1}$$

και σχεδιάζουμε τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις, οι οποίες αποτελούν τα νομογράμματα του παροχόμετρου Ventouri.

#### **\* Παροχόμετρο διαφράγματος οπής**

- 1) Τοποθετούμε τα ζεύγη τιμών ( $Q_{ri}, H_i$ ) σε διάγραμμα και προκύπτει ένας σχηματισμός σημείων παρόμοιος με αυτών του παροχόμετρου Ventouri.
- 2) Είναι εμφανές ότι η συνάρτηση που παρεμβάλλεται καλύτερα είναι της μορφής  $Q_r = K\sqrt{\Delta h}$ . Με εφαρμογή μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζουμε τις παραμέτρους

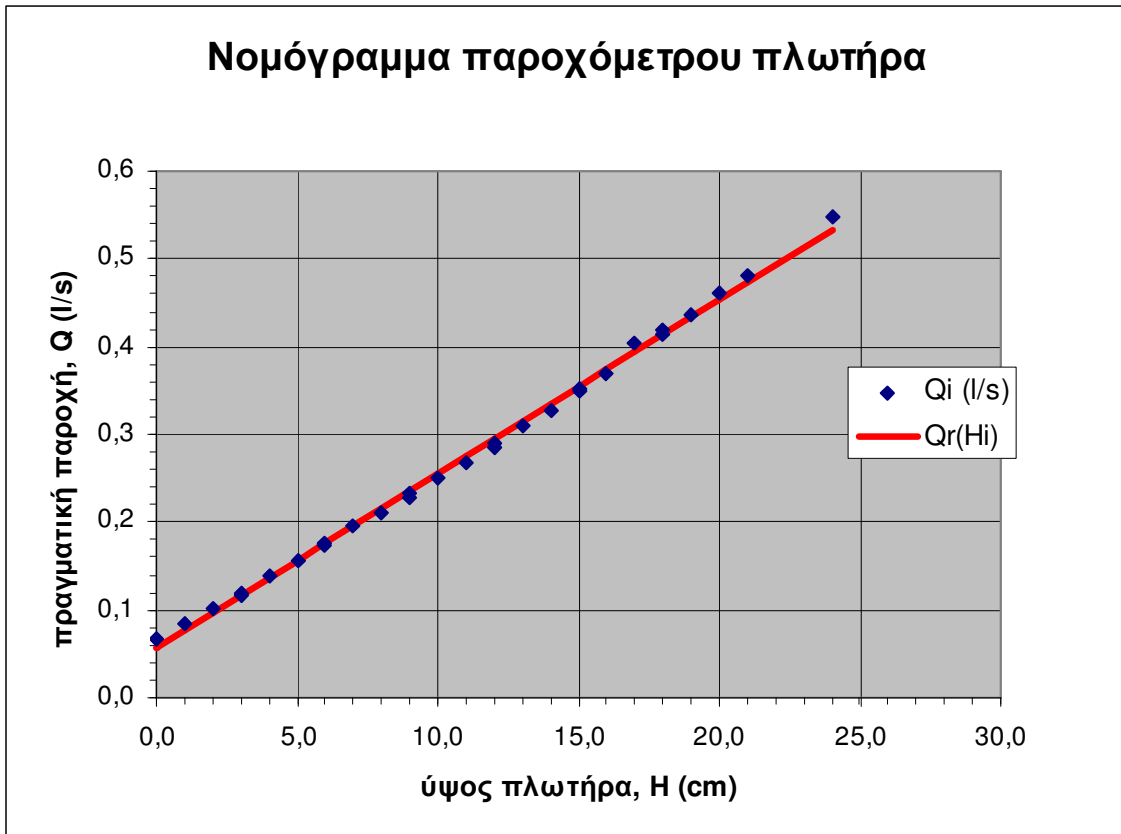
$$K = \left( \sum_i Q_{ri} \sqrt{\Delta h_i} \right) \left( \sum_i \Delta h_i \right)^{-1}, \quad \text{και σχεδιάζουμε την αντίστοιχη καμπύλη, η οποία αποτελεί το νομόγραμμα του παροχόμετρου διαφράγματος οπής.}$$

### **3.4 Αποτελέσματα**

Ακολουθούν τα νομογράμματα κάθε μετρητή, του παροχόμετρου πλωτήρα (Εικόνα 3.7), του παροχόμετρου Ventouri (Εικόνα 3.8) μαζί με το νομόγραμμα της σχέσης που συνδέει την πραγματική παροχή  $Q_r$  (για ροή με ενεργειακές απώλειες) με τη θεωρητική παροχή  $Q_{th}$  (για ιδανική ροή χωρίς ενεργειακές απώλειες), και του παροχόμετρου με διάφραγμα οπής (Εικόνα 3.11).

Επίσης, παρατίθενται και οι αντίστοιχοι πίνακες (Πίνακες 3.1, 3.2 & 3.4) με τις πρωτογενείς μετρήσεις και την αριθμητική επεξεργασία τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων κλπ)





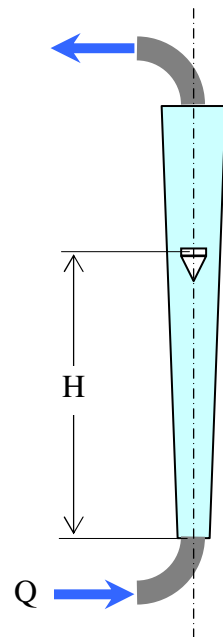
**Εικόνα 3.7** Το νομόγραμμα του παροχόμετρου πλωτήρα (TQ-H10 s/n:319). Τα σημεία αναπαριστούν τις μετρήσεις ύψους πλωτήρα – παροχής κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης. Η συνεχής γραμμή είναι το νομόγραμμα του παροχόμετρου που προσεγγίζει καλύτερα (μέθοδος ‘ελαχίστων τετραγώνων’) τις μετρήσεις.

Η αριθμητική σχέση που συνδέει την παροχή, Q, με το ύψος στάθμης του πλωτήρα H [cm] είναι:

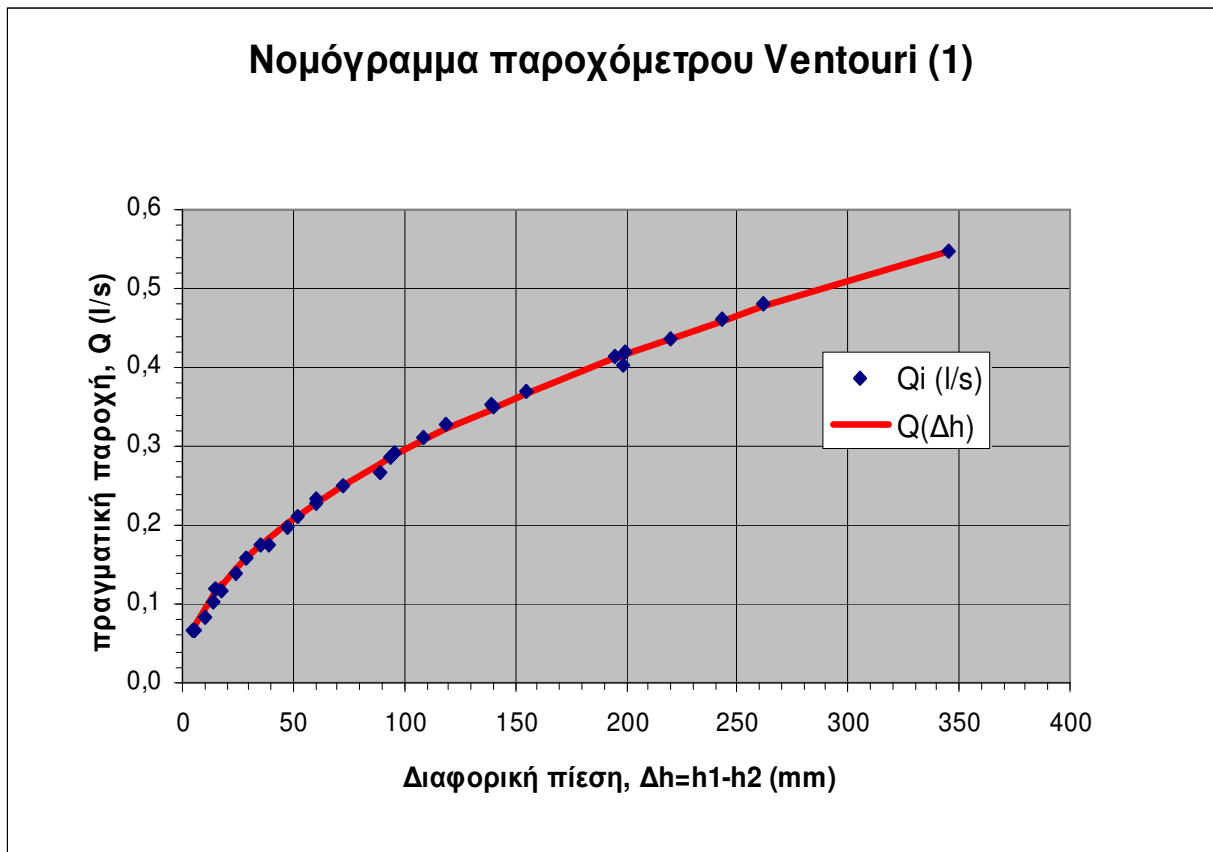
$$Q(H) = 19,85 \times 10^{-3} H + 57,43 \times 10^{-3}$$

Q: παροχή σε [l/s]

H: ύψος στάθμης πλωτήρα σε [cm]







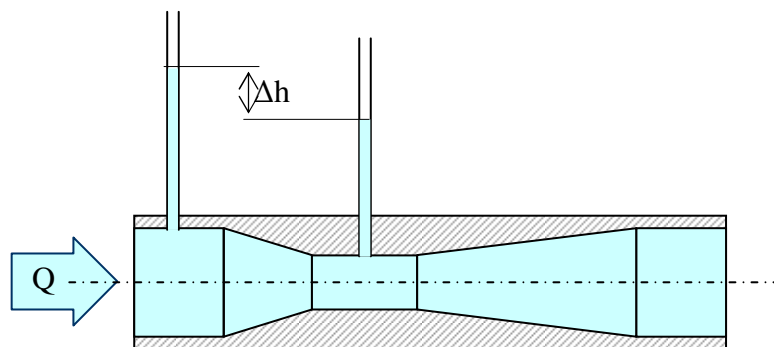
**Εικόνα 3.8** Το νομόγραμμα του παροχόμετρου Ventouri (TQ-H10 s/n:319). Τα σημεία αναπαριστούν τις μετρήσεις διαφορικής μανομετρικής πίεσης – παροχής κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης. Η συνεχής γραμμή είναι το νομόγραμμα του παροχόμετρου που προσεγγίζει καλύτερα (μέθοδος ‘ελαχίστων τετραγώνων’) τις μετρήσεις.

Η αριθμητική σχέση που συνδέει την παροχή,  $Q$ , με τη διαφορά των μανομετρικών πιέσεων,  $\Delta h$ , είναι:

$$Q_r(\Delta h) = 29,44 \times 10^{-3} \sqrt{\Delta h}$$

$Q$ : παροχή σε [l/s]

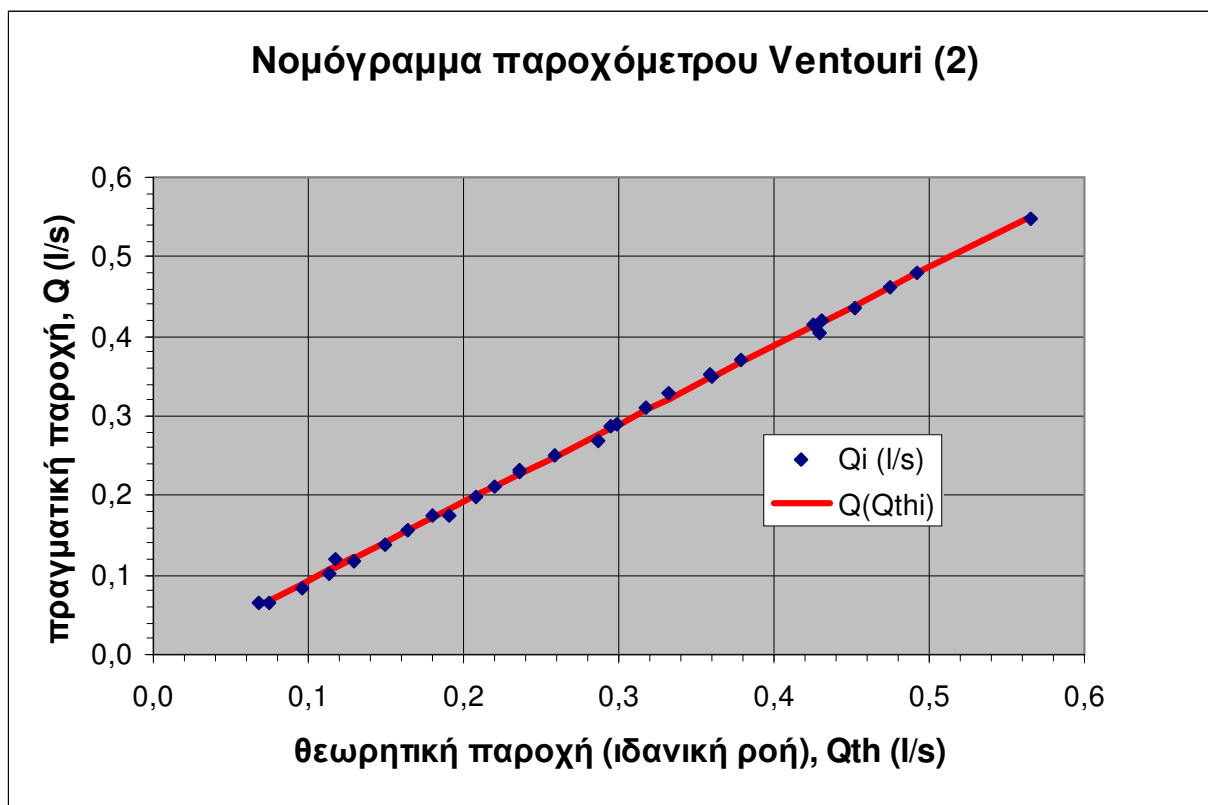
$\Delta h$ : διαφορά μανομετρικών πιέσεων σε [mm]



**Εικόνα 3.9** Σκαρίφημα παροχόμετρου Ventouri







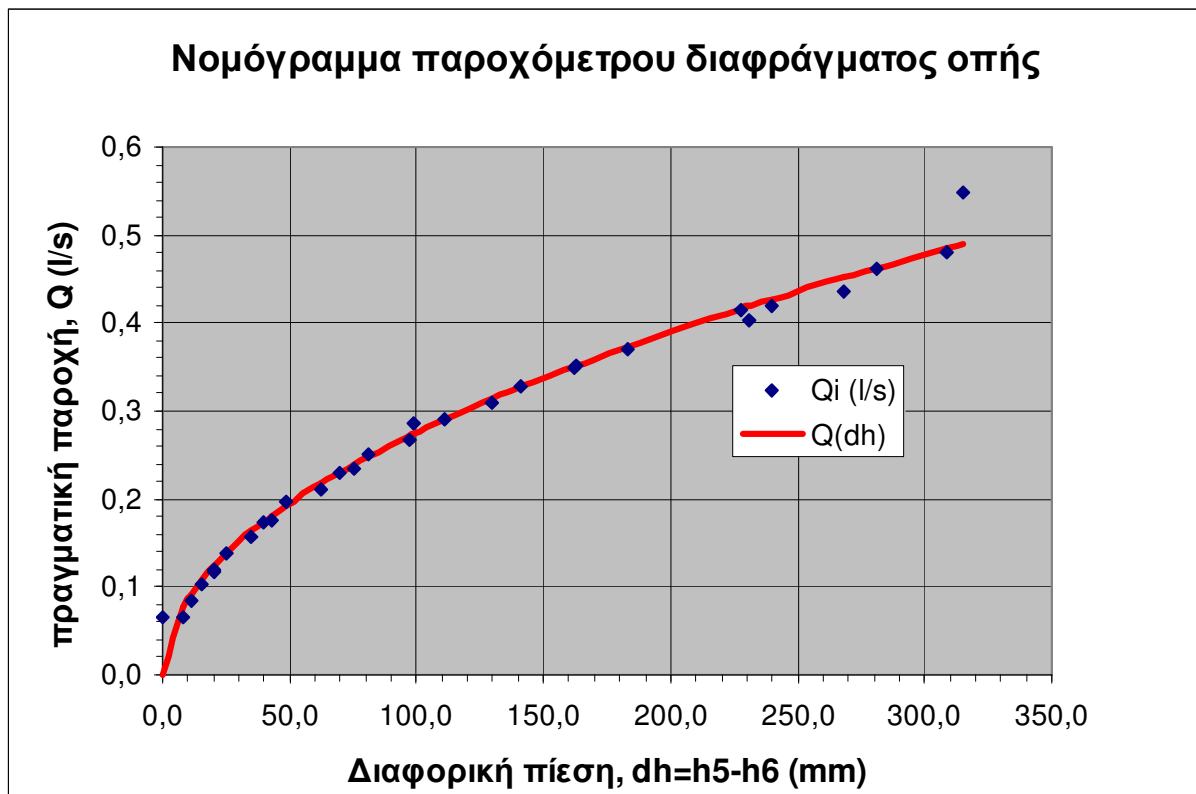
**Εικόνα 3.10** Το νομόγραμμα του παροχόμετρου Ventouri (TQ-H10 s/n:319). Τα σημεία αναπαριστούν τους υπολογισμένες τιμές της παροχής ιδανικής ροής,  $Q_{th}$ , έναντι των μετρήσεων της πραγματικής παροχής  $Q$ . Η συνεχής γραμμή είναι το νομόγραμμα του παροχόμετρου που συσχετίζει καλύτερα (με μέθοδο ‘ελαχίστων τετραγώνων’) την πραγματική παροχή με την παροχή ιδανικής ροής.

Η αριθμητική σχέση που συνδέει την παροχή ιδανικής ροής,  $Q_{th}$ , με την πραγματική παροχή,  $Q$ , είναι:

$$Q(Q_{th}) = 0,982Q_{th} - 0,0050$$

$Q$  &  $Q_{th}$ : παροχή σε [l/s]





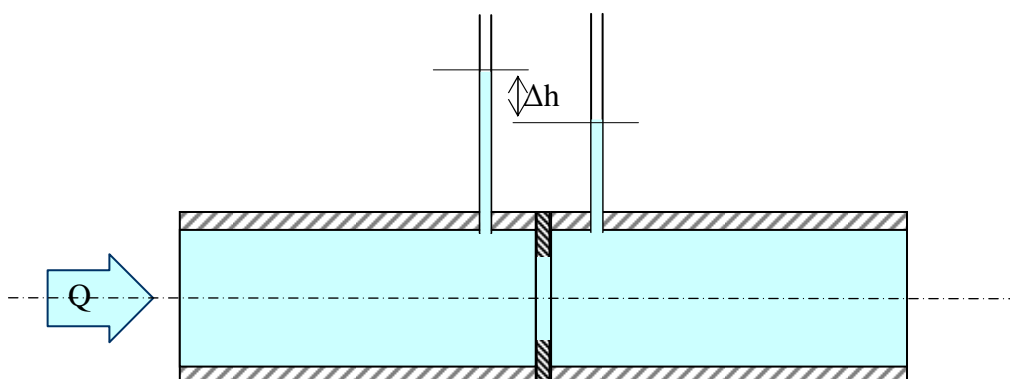
**Εικόνα 3.11** Το νομόγραμμα του παροχόμετρου διαφράγματος οπής (TQ-H10 s/n:319). Τα σημεία αναπαριστούν τις μετρήσεις διαφορικής μανομετρικής πίεσης – παροχής κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης. Η συνεχής γραμμή είναι το νομόγραμμα του παροχόμετρου που προσεγγίζει καλύτερα (με μέθοδο ‘ελαχίστων τετραγώνων’) τις μετρήσεις.

Η αριθμητική σχέση που συνδέει την παροχή,  $Q$ , με τη διαφορά των μανομετρικών πιέσεων,  $\Delta h$ , είναι:

$$Q(\Delta h) = 2,76 \times 10^{-2} \sqrt{\Delta h}$$

$Q$ : παροχή σε [l/s]

$\Delta h$ : διαφορά μανομετρικών πιέσεων σε [mm]





**Πίνακας 3.1** Μετρήσεις χρονικών διαστημάτων συλλογής μάζας 6kg και υπολογισμός μέσης ογκομετρικής παροχής, Q (l/s) στην υδραυλική τράπεζα (Y/T). Κάθε μέτρηση, με αύξοντα αριθμό α/α (i), χρησιμοποιήθηκε ως παροχή αναφοράς στη βαθμονόμηση και των τριών παροχομέτρων (πλωτήρα, Ventouri, διαφράγματος οπής)

Παροχή υδραυλικής τράπεζας									
α/α	Διάρκεια πλήρωσης 6kg, sec				ενδιάμεσες παροχές μάζας (kg/s)				μέση παροχή
i	δt1	δt2	δt3	δt4	m1	m2	m3	m4	Qi (l/s)
1	90,5	90,7	90,8	91,1	6,63E-02	6,62E-02	6,61E-02	6,59E-02	6,61E-02
2	90,42	90,8	90,9	90,32	6,64E-02	6,61E-02	6,60E-02	6,64E-02	6,62E-02
3	71,37	71,37	71,11	72,23	8,41E-02	8,41E-02	8,44E-02	8,31E-02	8,39E-02
4	58,32	58,43	58,38	58,61	1,03E-01	1,03E-01	1,03E-01	1,02E-01	1,03E-01
5	50,63	51,05	51,8	51,9	1,19E-01	1,18E-01	1,16E-01	1,16E-01	1,17E-01
6	51,3	50,5	49,8	50	1,17E-01	1,19E-01	1,20E-01	1,20E-01	1,19E-01
7	43,25	43,33	43,75	43,67	1,39E-01	1,38E-01	1,37E-01	1,37E-01	1,38E-01
8	38,45	38,25	37,95	37,95	1,56E-01	1,57E-01	1,58E-01	1,58E-01	1,57E-01
9	34,5	34,5	34,6	34,3	1,74E-01	1,74E-01	1,73E-01	1,75E-01	1,74E-01
10	34,25	33,78	34,05	34,3	1,75E-01	1,78E-01	1,76E-01	1,75E-01	1,76E-01
11	30,4	30,7	30,4	30,3	1,97E-01	1,95E-01	1,97E-01	1,98E-01	1,97E-01
12	28,2	28,4	28,6	28,7	2,13E-01	2,11E-01	2,10E-01	2,09E-01	2,11E-01
13	26,2	26,2	26,4	26,2	2,29E-01	2,29E-01	2,27E-01	2,29E-01	2,29E-01
14	25,4	25,8	25,8	25,9	2,36E-01	2,33E-01	2,33E-01	2,32E-01	2,33E-01
15	23,9	23,8	23,8	24	2,51E-01	2,52E-01	2,52E-01	2,50E-01	2,51E-01
16	22,3	22,5	22,4	22,4	2,69E-01	2,67E-01	2,68E-01	2,68E-01	2,68E-01
17	20,9	20,9	20,9	21,2	2,87E-01	2,87E-01	2,87E-01	2,83E-01	2,86E-01
18	20,6	20,7	20,6	20,7	2,91E-01	2,90E-01	2,91E-01	2,90E-01	2,91E-01
19	19,2	19,5	19,7	19,1	3,13E-01	3,08E-01	3,05E-01	3,14E-01	3,10E-01
20	18,3	18,1	18,4	18,3	3,28E-01	3,31E-01	3,26E-01	3,28E-01	3,28E-01
21	17,5	17,11	17,1	17,1	3,43E-01	3,51E-01	3,51E-01	3,51E-01	3,49E-01
22	17,1	17	17,1	17,1	3,51E-01	3,53E-01	3,51E-01	3,51E-01	3,51E-01
23	16,4	16,3	16,1	16,2	3,66E-01	3,68E-01	3,73E-01	3,70E-01	3,69E-01
24	14,9	14,9	14,7	14,9	4,03E-01	4,03E-01	4,08E-01	4,03E-01	4,04E-01
25	14,5	14,4	14,7	14,4	4,14E-01	4,17E-01	4,08E-01	4,17E-01	4,14E-01
26	14,4	14,3	14,4	14,2	4,17E-01	4,20E-01	4,17E-01	4,23E-01	4,19E-01
27	13,8	13,7	13,9	13,6	4,35E-01	4,38E-01	4,32E-01	4,41E-01	4,36E-01
28	13	13,1	13	13	4,62E-01	4,58E-01	4,62E-01	4,62E-01	4,61E-01
29	12,6	12,3	12,5	12,5	4,76E-01	4,88E-01	4,80E-01	4,80E-01	4,81E-01
30	11	11	10,9	10,9	5,45E-01	5,45E-01	5,50E-01	5,50E-01	5,48E-01
									8,04E+00
		m=	6	kg					
		ρ=	1	kg/l					

**Πίνακας 3.2** Μετρήσεις και αποτελέσματα κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης του παροχόμετρου Ventouri.

Υ/Τ		παροχόμετρο Ventouri											
α/α	μέση παροχή	μανομετρικά ύψη (mm)			m <sup>3</sup> /s				l/s			l/s	
i	Qi (l/s)	h1i	h2i	Δhi=h1i-h2i	Qthi	Qri	Qthi	Qthi <sup>2</sup>	counter	Q(Qthi)	sqrt(Δhi)	Qri sqrt(Δhi)	Q(Δhi)
1	0,0661	265,0	260,0	5,0	6,80E-02	4,50E-03	4,63E-03	1	6,18E-02	7,07E-02	1,48E-01	6,58E-02	
2	0,0662	35,0	29,0	6,0	7,45E-02	4,94E-03	5,56E-03	1	6,82E-02	7,75E-02	1,62E-01	7,21E-02	
3	0,0839	36,0	26,0	10,0	9,62E-02	8,07E-03	9,26E-03	1	8,95E-02	1,00E-01	2,65E-01	9,31E-02	
4	0,1027	34,0	20,0	14,0	1,14E-01	1,17E-02	1,30E-02	1	1,07E-01	1,18E-01	3,84E-01	1,10E-01	
5	0,1169	39,0	21,0	18,0	1,29E-01	1,51E-02	1,67E-02	1	1,22E-01	1,34E-01	4,96E-01	1,25E-01	
6	0,1191	270,0	255,0	15,0	1,18E-01	1,40E-02	1,39E-02	1	1,11E-01	1,22E-01	4,61E-01	1,14E-01	
7	0,1379	41,0	17,0	24,0	1,49E-01	2,06E-02	2,22E-02	1	1,41E-01	1,55E-01	6,76E-01	1,44E-01	
8	0,1573	86,0	57,0	29,0	1,64E-01	2,58E-02	2,69E-02	1	1,56E-01	1,70E-01	8,47E-01	1,59E-01	
9	0,1740	275,0	240,0	35,0	1,80E-01	3,13E-02	3,24E-02	1	1,72E-01	1,87E-01	1,03E+00	1,74E-01	
10	0,1760	79,0	40,0	39,0	1,90E-01	3,34E-02	3,61E-02	1	1,82E-01	1,97E-01	1,10E+00	1,84E-01	
11	0,1970	103,0	56,0	47,0	2,09E-01	4,11E-02	4,35E-02	1	2,00E-01	2,17E-01	1,35E+00	2,02E-01	
12	0,2107	110,0	58,0	52,0	2,19E-01	4,62E-02	4,81E-02	1	2,10E-01	2,28E-01	1,52E+00	2,12E-01	
13	0,2286	285,0	225,0	60,0	2,36E-01	5,39E-02	5,56E-02	1	2,26E-01	2,45E-01	1,77E+00	2,28E-01	
14	0,2332	112,0	52,0	60,0	2,36E-01	5,50E-02	5,56E-02	1	2,26E-01	2,45E-01	1,81E+00	2,28E-01	
15	0,2513	114,0	42,0	72,0	2,58E-01	6,49E-02	6,67E-02	1	2,49E-01	2,68E-01	2,13E+00	2,50E-01	
16	0,2679	118,0	29,0	89,0	2,87E-01	7,69E-02	8,24E-02	1	2,77E-01	2,98E-01	2,53E+00	2,78E-01	
17	0,2861	298,0	204,0	94,0	2,95E-01	8,44E-02	8,70E-02	1	2,85E-01	3,07E-01	2,77E+00	2,85E-01	
18	0,2906	209,0	113,0	96,0	2,98E-01	8,66E-02	8,89E-02	1	2,88E-01	3,10E-01	2,85E+00	2,88E-01	
19	0,3097	215,0	106,0	109,0	3,18E-01	9,84E-02	1,01E-01	1	3,07E-01	3,30E-01	3,23E+00	3,07E-01	
20	0,3283	213,0	94,0	119,0	3,32E-01	1,09E-01	1,10E-01	1	3,21E-01	3,45E-01	3,58E+00	3,21E-01	
21	0,3488	316,0	176,0	140,0	3,60E-01	1,26E-01	1,30E-01	1	3,49E-01	3,74E-01	4,13E+00	3,48E-01	
22	0,3514	220,0	81,0	139,0	3,59E-01	1,26E-01	1,29E-01	1	3,47E-01	3,73E-01	4,14E+00	3,47E-01	
23	0,3692	224,0	69,0	155,0	3,79E-01	1,40E-01	1,44E-01	1	3,67E-01	3,94E-01	4,60E+00	3,67E-01	
24	0,4041	332,0	133,0	199,0	4,29E-01	1,73E-01	1,84E-01	1	4,17E-01	4,46E-01	5,70E+00	4,15E-01	
25	0,4138	336,0	141,0	195,0	4,25E-01	1,76E-01	1,81E-01	1	4,12E-01	4,42E-01	5,78E+00	4,11E-01	
26	0,4189	334,0	134,0	200,0	4,30E-01	1,80E-01	1,85E-01	1	4,18E-01	4,47E-01	5,92E+00	4,16E-01	
27	0,4364	335,0	115,0	220,0	4,51E-01	1,97E-01	2,04E-01	1	4,38E-01	4,69E-01	6,47E+00	4,37E-01	
28	0,4607	347,0	104,0	243,0	4,74E-01	2,19E-01	2,25E-01	1	4,61E-01	4,93E-01	7,18E+00	4,59E-01	
29	0,4810	362,0	100,0	262,0	4,93E-01	2,37E-01	2,43E-01	1	4,79E-01	5,12E-01	7,79E+00	4,77E-01	
30	0,5480	364,0	19,0	345,0	5,65E-01	3,10E-01	3,19E-01	1	5,50E-01	5,87E-01	1,02E+01	5,47E-01	
	8,0357			3,09E+03	8,34E+00	2,77E+00	2,86E+00	30		8,66E+00	9,10E+01		
						b= 9,82E-01					cd= 0,02944		
						a= -0,00503971							

**Πίνακας 3.3** Μετρήσεις και αποτελέσματα κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης του παροχόμετρου διαφράγματος οπής

α/α i	Υ/Τ	παροχόμετρο διαφράγματο οπής				
	μέση παροχή Qi (l/s)	(mm)		(mm)		
		h5i	h6i	dhi=h5-h6	Qi sqrt(dhi)	Q(dhi)
1	0,0661	259,0	259,0	0,0	0,00E+00	0,0000
2	0,0662	34,0	26,0	8,0	1,87E-01	0,0780
3	0,0839	35,0	24,0	11,0	2,78E-01	0,0915
4	0,1027	31,0	16,0	15,0	3,98E-01	0,1068
5	0,1169	36,0	16,0	20,0	5,23E-01	0,1233
6	0,1191	270,0	250,0	20,0	5,32E-01	0,1233
7	0,1379	38,0	13,0	25,0	6,90E-01	0,1379
8	0,1573	84,0	49,0	35,0	9,30E-01	0,1631
9	0,1740	270,0	230,0	40,0	1,10E+00	0,1744
10	0,1760	77,0	34,0	43,0	1,15E+00	0,1808
11	0,1970	101,0	52,0	49,0	1,38E+00	0,1930
12	0,2107	107,0	45,0	62,0	1,66E+00	0,2171
13	0,2286	280,0	210,0	70,0	1,91E+00	0,2307
14	0,2332	110,0	35,0	75,0	2,02E+00	0,2388
15	0,2513	107,0	26,0	81,0	2,26E+00	0,2482
16	0,2679	112,0	15,0	97,0	2,64E+00	0,2716
17	0,2861	279,0	180,0	99,0	2,85E+00	0,2744
18	0,2906	200,0	89,0	111,0	3,06E+00	0,2905
19	0,3097	207,0	77,0	130,0	3,53E+00	0,3144
20	0,3283	205,0	64,0	141,0	3,90E+00	0,3275
21	0,3488	301,0	139,0	162,0	4,44E+00	0,3510
22	0,3514	210,0	47,0	163,0	4,49E+00	0,3521
23	0,3692	213,0	30,0	183,0	5,00E+00	0,3730
24	0,4041	316,0	85,0	231,0	6,14E+00	0,4191
25	0,4138	318,0	90,0	228,0	6,25E+00	0,4164
26	0,4189	321,0	81,0	240,0	6,49E+00	0,4272
27	0,4364	325,0	57,0	268,0	7,14E+00	0,4514
28	0,4607	329,0	48,0	281,0	7,72E+00	0,4623
29	0,4810	341,0	32,0	309,0	8,46E+00	0,4847
30	0,5480	335,0	20,0	315,0	9,73E+00	0,4894
	8,0357			3.512,0	9,68E+01	

a= 2,76E-02

**Πίνακας 3.4** Μετρήσεις και αποτελέσματα κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης του παροχόμετρου πλωτήρα.

α/α i	Υ/Τ	Ροόμετρο πλωτήρα				
	μέση παροχή Qi (l/s)	cm Hi	Hi*Qi	Hi^2	counter	l/s Q(Hi)
1	0,0661	0,0	0,000E+00	0,0	1	0,0574
2	0,0662	0,0	0,000E+00	0,0	1	0,0574
3	0,0839	1,0	8,390E-02	1,0	1	0,0773
4	0,1027	2,0	2,054E-01	4,0	1	0,0971
5	0,1169	3,0	3,506E-01	9,0	1	0,1170
6	0,1191	3,0	3,572E-01	9,0	1	0,1170
7	0,1379	4,0	5,517E-01	16,0	1	0,1368
8	0,1573	5,0	7,864E-01	25,0	1	0,1567
9	0,1740	6,0	1,044E+00	36,0	1	0,1765
10	0,1760	6,0	1,056E+00	36,0	1	0,1765
11	0,1970	7,0	1,379E+00	49,0	1	0,1964
12	0,2107	8,0	1,686E+00	64,0	1	0,2162
13	0,2286	9,0	2,057E+00	81,0	1	0,2361
14	0,2332	9,0	2,099E+00	81,0	1	0,2361
15	0,2513	10,0	2,513E+00	100,0	1	0,2559
16	0,2679	11,0	2,946E+00	121,0	1	0,2758
17	0,2861	12,0	3,433E+00	144,0	1	0,2956
18	0,2906	12,0	3,487E+00	144,0	1	0,2956
19	0,3097	13,0	4,026E+00	169,0	1	0,3155
20	0,3283	14,0	4,597E+00	196,0	1	0,3354
21	0,3488	15,0	5,232E+00	225,0	1	0,3552
22	0,3514	15,0	5,271E+00	225,0	1	0,3552
23	0,3692	16,0	5,908E+00	256,0	1	0,3751
24	0,4041	17,0	6,869E+00	289,0	1	0,3949
25	0,4138	18,0	7,449E+00	324,0	1	0,4148
26	0,4189	18,0	7,540E+00	324,0	1	0,4148
27	0,4364	19,0	8,291E+00	361,0	1	0,4346
28	0,4607	20,0	9,213E+00	400,0	1	0,4545
29	0,4810	21,0	1,010E+01	441,0	1	0,4743
30	0,5480	24,0	1,315E+01	576,0	1	0,5339
	8,036	318,0	1,117E+02	4706,0	30	

b= 0,01985125  
a= 0,05743381



# Κεφάλαιο 4

## Βαθμονόμηση συσκευών – Ροές με ελεύθερη επιφάνεια («ροή σε ανοικτούς αγωγούς»)

### 4.1 Ροή πάνω από υπερχειλιστές λεπτής στέψης

Οι υπερχειλιστές είναι υδραυλικές τεχνικές κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση και μέτρηση της ροής του νερού στους ανοικτούς αγωγούς. Στις περιπτώσεις μετρήσεως μικρών παροχών στα υδραυλικά εργαστήρια ή στις μικρές αρδευτικές διάρρυγες, οι υπερχειλιστές έχουν απλή μορφή και αποτελούνται συνήθως από μία λεία, επίπεδη και κατακόρυφη πλάκα με λεπτή την πάνω παρειά ή στέψη. Οι υπερχειλιστές αυτοί ονομάζονται *υπερχειλιστές λεπτής στέψεως* και έχουν ποικιλία γεωμετρικών σχημάτων.

#### 4.1.1 Χαρακτηρισμός υπερχειλιστών λεπτής στέψης.

Ανάλογα με την γεωμετρική μορφή της στέψεως, δηλαδή με τη μορφή της διατομής από την οποία περνά το νερό, οι υπερχειλιστές διακρίνονται σε ορθογωνικούς, τριγωνικούς, τραπεζοειδείς, παραβολικούς.

Ανάλογα με την έκταση της στέψης του υπερχειλιστή στο πλάτος του αγωγού,

- εάν η στέψη του υπερχειλιστή εκτείνεται σε ολόκληρο το πλάτος του αγωγού οι υπερχειλιστές χαρακτηρίζονται ως *καθολικοί* ή *υπερχειλιστές χωρίς πλευρική συστολή*, ενώ,
- εάν η στέψη του υπερχειλιστή εκτείνεται σε μέρος μόνο του πλάτους του αγωγού οι υπερχειλιστές χαρακτηρίζονται ως *μερικοί* ή *υπερχειλιστές με πλευρική συστολή*.

Ανάλογα με την κατάσταση ροής και της υπερχειλίζουσας φλέβας του νερού οι υπερχειλιστές διακρίνονται στις ακόλουθες κυρίες κατηγορίες:

- *Ελεύθεροι υπερχειλιστές με ελεύθερη φλέβα*, όταν η φλέβα του νερού αποκολλάται από τη στέψη και ρέει με μορφή κρουνού με πίεση ίση με την ατμοσφαιρική στην κάτω επιφάνειά της. Η στάθμη του νερού κατάντη του υπερχειλιστή είναι σαφώς χαμηλότερη από τη στάθμη στέψεως. Η κατάσταση αυτή της ροής πάνω από τον υπερχειλιστή, που είναι και η πιο επιθυμητή για τις μετρήσεις παροχής, απαιτεί σημαντικό φορτίο ανάντη και ειδική διάταξη αερισμού του χώρου που βρίσκεται κάτω από την φλέβα του νερού.
- *Ελεύθεροι υπερχειλιστές με προσκολλημένη φλέβα*. Για μικρά υδραυλικά φορτία ανάντη και χωρίς αερισμό του χώρου κάτω από την φλέβα, αυτή προσκολλάται στην κατάντη παρειά του υπερχειλιστή. Η κατάσταση αυτή της ροής πάνω από υπερχειλιστή δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις παροχής.

- **Βυθισμένοι υπερχειλιστές.** Όταν η στάθμη του νερού κατάντη του υπερχειλιστή είναι πάνω από την στάθμη της στέψεως ο υπερχειλιστής ονομάζεται βυθισμένος.

Σημαντικοί **παράγοντες που επηρεάζουν την ροή πάνω από έναν υπερχειλιστή** είναι:

- α) το ύψος ή «φορτίο»,  $H$ , από το επίπεδο στέψης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μακριά και ανάντι από τον υπερχειλιστή.
- β) το ύψος του υπερχειλιστή  $H_0$  από τον πυθμένα έως τη στέψη.
- γ) η πίεση κάτω από την φλέβα του νερού. Τυχόν κυματισμοί επηρεάζουν κατά απρόβλεπτο τρόπο τη ροή.

Η **μοντελοποίηση της ροής πάνω από υπερχειλιστή λεπτής στέψης**, δηλαδή της παροχής  $Q$  συναρτήσει της στάθμης στέψης,  $H$ , δίνεται από την έκφραση (Τερζίδης, 1996-1):

$$Q(H) = C_d A \sqrt{2gH^B} \quad (4.1)$$

όπου  $A$  είναι μια έκφραση που διαμορφώνεται ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του υπερχειλιστή και  $B$  η δύναμη στην οποία υψώνεται το φορτίο του υπερχειλιστή και εξαρτάται από τον τύπο (και τη μορφή) του υπερχειλιστή. Για την παραγωγή της προηγούμενης σχέσης έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

- α) η κατανομή της ταχύτητας ανάντη του υπερχειλιστή είναι ομοιόμορφη
- β) όλα τα σωματίδια νερού κινούνται
- γ) η πίεση στη φλέβα του νερού είναι ατμοσφαιρική
- δ) αγνοούμε την επίδραση του ιξώδους και της τύρβης

#### 4.1.2 Τριγωνικοί υπερχειλιστές (τριγωνικοί εκχειλιστές)

Ειδικά για τη **μοντελοποίηση της ροής πάνω από τριγωνικό υπερχειλιστή**, δηλαδή της παροχής  $Q$  συναρτήσει της στάθμης στέψης  $H$ , η σχέση (4.1) παίρνει τη μορφή (Τερζίδης, 1996-1):

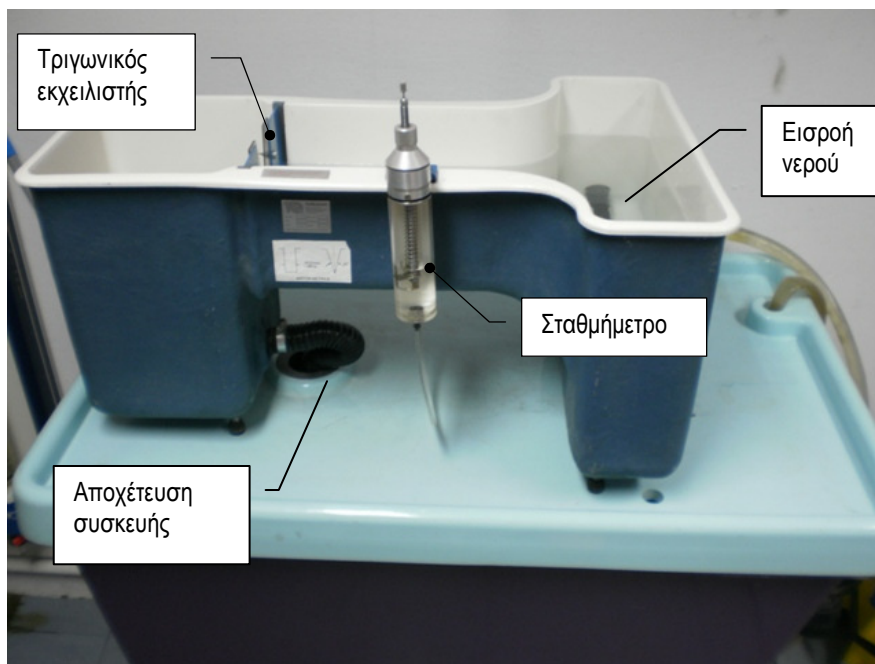
$$Q(H) = C_d \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g} (H)^{5/2} \quad (4.2)$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία του τριγωνικού υπερχειλιστή.

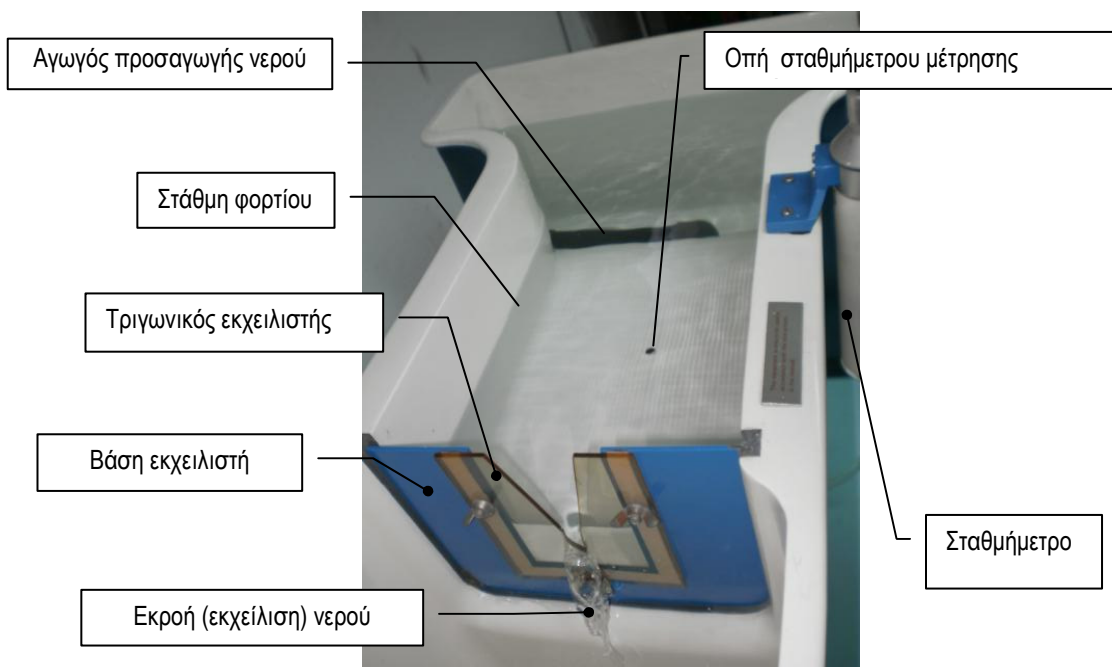
Όπως και προηγουμένω, για την παραγωγή της προηγούμενης σχέσης είναι απαραίτητες οι εξής παραδοχές:

- α) η κατανομή της ταχύτητας ανάντη του υπερχειλιστή είναι ομοιόμορφη
- β) όλα τα σωματίδια νερού κινούνται
- γ) η πίεση στη φλέβα του νερού είναι ατμοσφαιρική
- δ) αγνοούμε την επίδραση του ιξώδους και της τύρβης

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε και βαθμονομήθηκε ένας εργαστηριακός τριγωνικός εκχειλιστής που απεικονίζεται στις Εικόνες 4.1, 4.2 & 4.3.

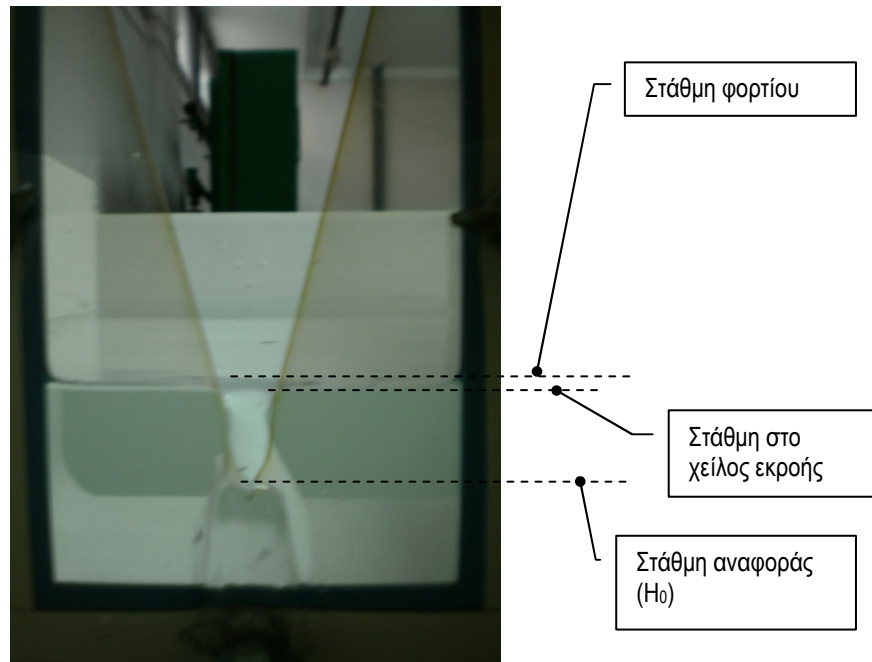


**Εικόνα 4.1** Εξωτερική πλάγια όψη του συστήματος λεκάνης-εκχειλιστή τοποθετημένου πάνω στην υδραυλική τράπεζα. Η ροή του νερού πραγματοποιείται από το δεξί δοχείο στο αριστερό. Η έξοδος του νερού οδηγείται στο ζυγιστικό δοχείο της υδραυλικής τράπεζας.



**Εικόνα 4.2** Κάτοψη του συστήματος λεκάνης-εκχειλιστή. Η ροή του νερού γίνεται από δεξιά προς τα αριστερά. Υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης εκχειλιστών διαφορετικής γεωμετρίας (ορθογώνιοι, παραβολικοί κλπ) σε κατάλληλη βάση.

Η οπή στο κάτω μέρος του ανάντι δοχείου συνδέεται με μονομετρικό σωλήνα με το θάλαμο του σταθμήμετρου



**Εικόνα 4.3** Κατάντη άποψη του εκχειλιστή. Στο εμπρόσθιο μέρος της εικόνας διακρίνεται η φλέβα εκροής του νερού. Επίσης, στην κάτω κορυφή του τριγωνικού εκχειλιστή επισημαίνεται η στάθμη αναφοράς για τη μέτρηση των σταθμών φορτίου.

#### 4.1.3 Διαδικασία βαθμονόμησης τριγωνικού εκχειλιστή

Για να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση του τριγωνικού εκχειλιστή ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία.

- 1) Οριζοντιώσαμε τη συσκευή (λεκάνη) πάνω στην υδραυλική τράπεζα (Y/T).
- 2) Τοποθετήσαμε στην κατάλληλη υποδοχή (αναμονή) της συσκευής τον τριγωνικό εκχειλιστή και τον ευθυγραμμίσαμε.
- 3) Συνδέσαμε την παροχή της Y/T στη λεκάνη και τοποθετήσαμε την εκροή της λεκάνης στην οπή εισροής του ζυγιστικού δοχείου της Y/T.
- 4) Με τη ρυθμιστική βάνα της Y/T ρυθμίζουμε τη στάθμη του νερού μέσα στη λεκάνη ακριβώς μέχρι το κατώτερο σημείο της γωνίας του τριγωνικού εκχειλιστή. Η διαδικασία αυτή παίρνει λίγη ώρα μέχρι να σταθεροποιηθεί η στάθμη εκεί που πρέπει.
- 5) Μηδενίσαμε το σταθμήμετρο ως εξής: τοποθετώντας την κορυφή της αντίγας του σταθμήμετρου στην επιφάνεια του νερού στο θάλαμο (που συγκοινωνεί υδραυλικά με το νερό της λεκάνης) και μηδενίζοντας την ένδειξη του βερνιέρου. Γενικά, προσπαθούμε να μηδενίσουμε την ένδειξη του βερνιέρου και αν δεν είναι δυνατό σημειώνουμε μια ένδειξη που βολεύει – καλύτερα ακέραιη- ώστε να την αφαιρούμε από τις μετρήσεις που θα πάρουμε. Η θέση αυτή είναι η αφετηρία μέτρησης του ύψους  $h_0$

της στάθμης του νερού ανάντη του εκχειλιστή (φορτίο του υπερχειλιστή). Στη δική μας περίπτωση επιλέχθηκε βολικό ύψος στάθμης αναφοράς  $h_0=7\text{mm}$ .

- 6) Ρυθμίζουμε με τη βοήθεια της βάνας της Y/T διαφορετικές κάθε φορά παροχές ( $i, i=1,9$ ) και περιμένουμε για κάθε ρύθμιση της βάνας να σταθεροποιηθεί η στάθμη του νερού ανάντη του υπερχειλιστή.
- 7) Από τη στιγμή που θα σταθεροποιηθεί κάθε στάθμη ( $i$ ) μετράμε με τη βοήθεια του βερνιέρου του σταθμήμετρου το αντίστοιχο ύψος ( $h_i$ ) της στάθμης του νερού από τη στάθμη αναφοράς. Επομένως το αντίστοιχο ύψος στέψης ανάντη του εκχειλιστή είναι  $H_i=(h_i-h_0)$ . Επίσης με τη συνηθισμένη διαδικασία μέτρησης της παροχής μέσω του ζυγιστικού δοχείου της Y/T μετράμε την αντίστοιχη παροχή  $Q_i$ .
- 8) Καταγράφουμε σε πίνακα τα ζεύγη ( $H_i, Q_i$ ) των μετρήσεων.
- 9) Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 6-8 για αρκετές παροχές.
- 10) Από τις ενδείξεις που πήραμε αφαιρούμε λόγω αδυναμίας αρχικού μηδενισμού, 7mm ώστε να προκύψουν οι τιμές  $H_i$  που θα χρησιμοποιήσουμε.
- 11) Δημιουργούμε πίνακα μετρήσεων  $H_i$  και παροχών  $Q_i, i=1,9$ , και αποτυπώνουμε σε ορθογώνιο διάγραμμα (H-Q) τα αντίστοιχα σημεία ( $H_i, Q_i$ ).
- 12) Δημιουργούμε το νομόγραμμα (H-Q) της συγκεκριμένης συσκευής χαράσσοντας την ιδανική καμπύλη που διέρχεται από αυτά τα σημεία, όπως περιγράφεται παρακάτω

#### 4.1.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Όπως προαναφέρθηκε, (Σχέση 4.1) η παροχή  $Q$  συναρτίζεται της στάθμης στέψης (φορτίου),  $H$ , δηλαδή το νομόγραμμα του συγκεκριμένου συστήματος λεκάνης-υπερχειλιστή είναι

$$Q(H) = C_d \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g} (H)^{5/2}$$

όπου

$C_d$  ο συντελεστής αντίστασης της συσκευής (του συστήματος λεκάνης-υπερχειλιστή), και

$\theta$  η γωνία του ανοίγματος του υπερχειλιστή - στην περίπτωση μας  $\theta=30^\circ$

Για να βρούμε την τιμή του  $C_d$  (ώστε να κατασκευάσουμε το νομόγραμμα), εργαζόμαστε ως εξής:

Υπολογίζουμε τη σταθερά

$$A = \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g} \quad (4.3)$$

Σε κάθε μέτρηση  $H_i$  αντιστοιχεί μια μέτρηση  $Q_i$ , αλλά και η τιμή  $Q(H_i)$  μιας καμπύλης

$$Q = C_d A (H)^{5/2} \quad (4.4)$$

που προσαρμόζεται στα ζεύγη ( $H_i, Q_i$ ).

Ορίζουμε τα σφάλματα

$$e_i = Q(H_i) - Q_i \quad (4.5)$$

Από όλες τις καμπύλες  $Q = C_d A(H)^{5/2}$  (κάθε μια για διαφορετική τιμή του  $C_d$ ) που μπορούμε να περάσουμε από τα σημεία που αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις ( $H_i, Q_i$ ) μία είναι η ιδανική (βέλτιστη), αυτή που συνολικά έχει τα μικρότερα σφάλματα από τα ζεύγη μετρήσεων.

Ένα καλό μέτρο της συνολικής ποσοτικής αξιολόγησης των σφαλμάτων είναι η παρακάτω νόρμα:

$$y = F(C_d) = \sum_{i=1}^N e_i^2 = \sum_{i=1}^N [Q(H_i) - Q_i]^2 \quad (4.6)$$

Όσο μικρότερη τιμή έχει η παραπάνω συνάρτηση  $F(C_d)$  τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή της καμπύλης στα σημεία. Επομένως η ιδανική καμπύλη θα προκύψει για εκείνη την τιμή του  $C_d$  για την οποία η συνάρτηση  $F(C_d)$  γίνεται ελάχιστη, δηλαδή όταν η παράγωγος της  $F$  ως προς  $C_d$  μηδενίζεται και η δεύτερη παράγωγος είναι θετική, δηλαδή:

A) Παίρνουμε μια εξίσωση ως προς  $C_d$  που θα μας δώσει εκείνη την τιμή του  $C_d$  που αντιστοιχεί στην ιδανική καμπύλη

$$\frac{dy}{d(C_d)} = \frac{d}{d(C_d)} F(C_d) = F'(C_d) = 0 \quad (4.7)$$

B) Ελέγχουμε εάν για τη δεύτερη παράγωγο ισχύει

$$\frac{d^2 y}{d(C_d)^2} = \frac{d}{d(C_d)} \frac{d}{d(C_d)} F(C_d) = F''(C_d) > 0 \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dC_d} &= \frac{dF(C_d)}{dC_d} = \frac{d}{dC_d} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{d}{dC_d} \sum_{i=1}^N [Q(H_i) - Q_i]^2 = \sum_{i=1}^N \frac{d}{dC_d} [Q(H_i) - Q_i]^2 = \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{d}{dC_d} [Q(H_i)^2 - 2Q(H_i)Q_i + Q_i^2] = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{d}{dC_d} [Q(H_i)^2] - 2 \frac{dQ(H_i)}{dC_d} Q_i + \frac{dQ_i^2}{dC_d} \right] \\ &= \sum_{i=1}^N \left[ \frac{d}{dC_d} [C_d^2 A^2 H_i^5] - 2 \frac{d[C_d A(H_i)^{5/2}]}{dC_d} Q_i + \frac{dQ_i^2}{dC_d} \right] \\ &= \sum_{i=1}^N [2C_d A^2 H_i^5 - 2A(H_i)^{5/2} Q_i] = \\ &= 2C_d A^2 \sum_{i=1}^N H_i^5 - 2A \sum_{i=1}^N [(H_i)^{5/2} Q_i] \end{aligned} \quad (4.9)$$

Έτσι,

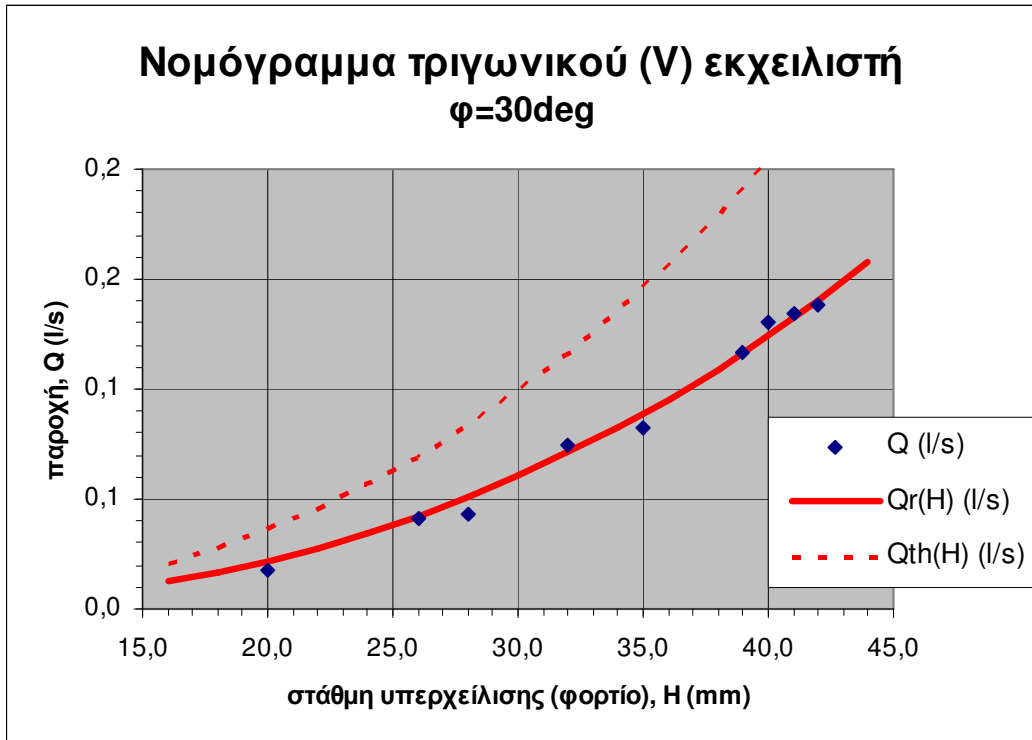
$$\frac{dy}{dC_d} = \frac{dF(C_d)}{dC_d} = 0 \Rightarrow 2C_d A^2 \sum_{i=1}^N H_i^5 - 2A \sum_{i=1}^N [(H_i)^{5/2} Q_i] = 0 \Rightarrow C_d = \frac{\sum_{i=1}^N [(H_i)^{5/2} Q_i]}{A \sum_{i=1}^N H_i^5} \quad (4.10)$$

και









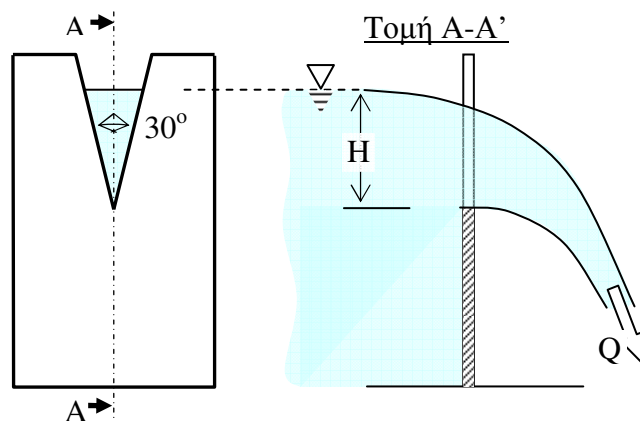
**Εικόνα 4.4** Το νομόγραμμα του συστήματος λεκάνης-εκχειλιστή (TQ-H6 s/n:256) που βαθμονομήθηκε. Οι κουκίδες αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης. Η συνεχής γραμμή είναι το νομόγραμμα του εκχειλιστή σε πραγματικές συνθήκες ροής, που προσεγγίζει καλύτερα τις μετρήσεις.. Η διακεκομμένη καμπύλη  $Q_{th} = 2,0017 \times 10^{-5} \sqrt{H^5}$  είναι η θεωρητική καμπύλη του εκχειλιστή για ιδανική ροή (H σε mm &  $Q_{th}$  σε l/s).

Η αριθμητική σχέση που συνδέει την παροχή Q [l/s] με το φορτίο H [mm] του τριγωνικού εκχειλιστή:

$$Q = 1,228 \times 10^{-5} \sqrt{H^5}$$

Q: παροχή σε [l/s]

H: φορτίο εκχειλιστή σε [mm]





## 4.2 Ροή σε καταβαθμούς ελεύθερης υδατόπτωσης

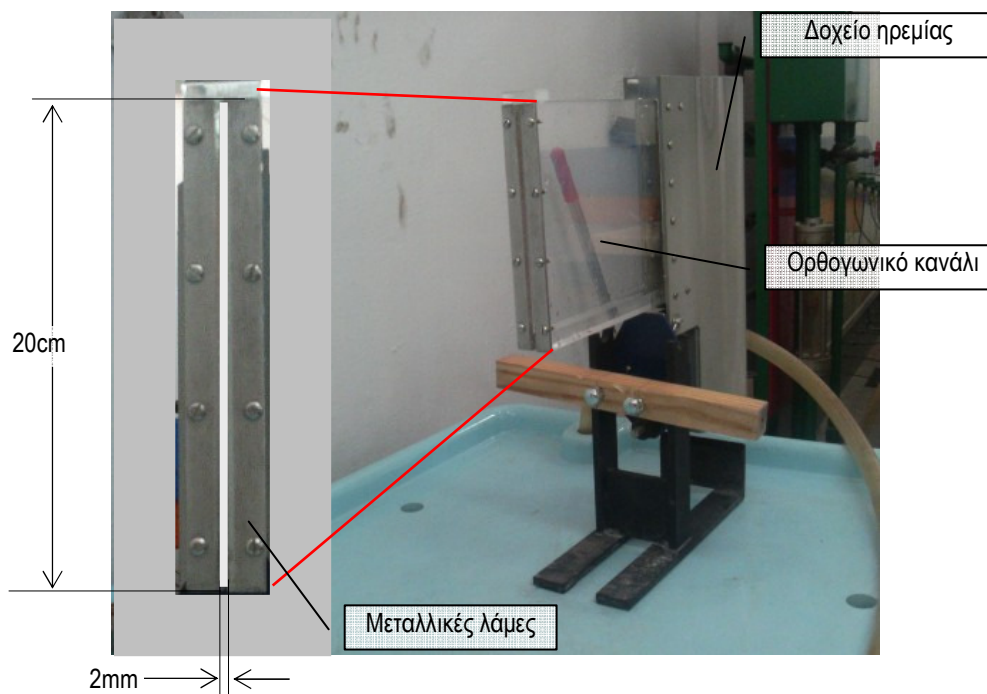
### 4.2.1 Βαθμονόμηση εκχειλιστή τύπου καταβαθμού υδατόπτωσης μερικά ελεύθερης ορθογωνικής διατομής - ΚΥΜΕΟΔ

Ο εκχειλιστής τύπου καταβαθμού υδατόπτωσης μερικά ελεύθερης ορθογωνικής διατομής, για συντομία «εκχειλιστής ΚΥΜΕΟΔ», είναι μια συσκευή που βοηθά να μετρήσουμε το μέγεθος της παροχής όγκου,  $Q$ , σε μια ροή υγρού με ελεύθερη επιφάνεια (ροή σε ανοικτούς αγωγούς) ανάλογα με την υψομετρική ένδειξη της ανάντι του καταβαθμού στάθμης,  $H$ , και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εκχειλιστή και του παρέχοντος αγωγού.

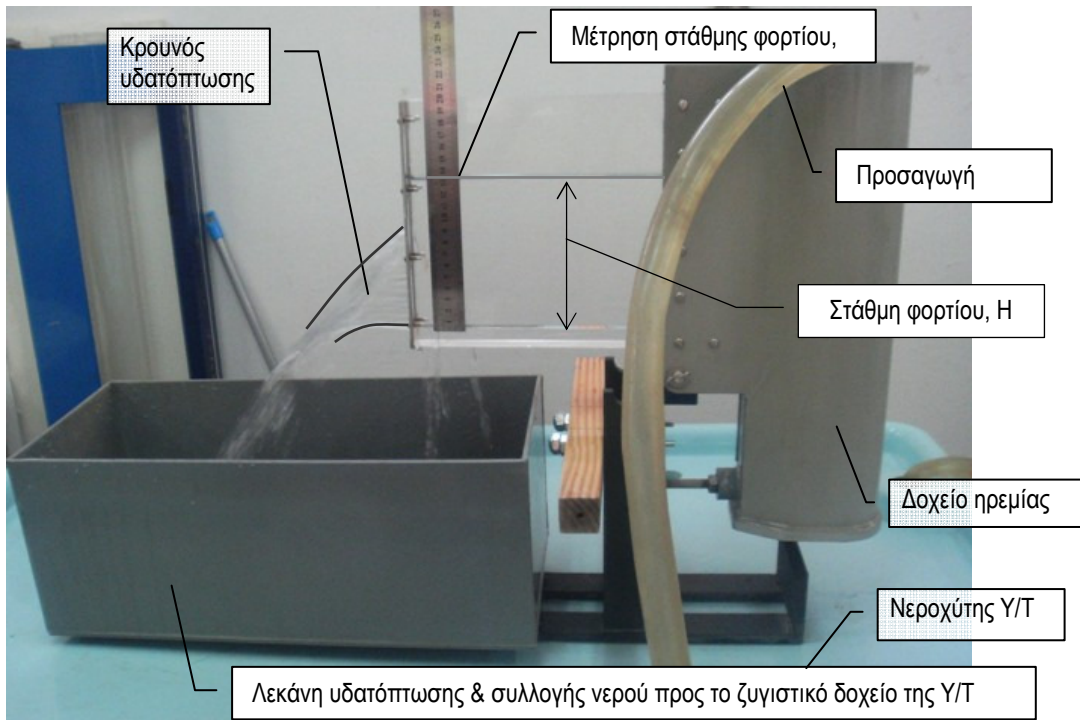
### 4.2.2 Περιγραφή του συστήματος

Η συσκευή που βαθμονομήσαμε αποτελείται από ένα δοχείο ηρεμίας το οποίο καταλήγει σε ένα διαφανή αγωγό ορθογωνικής διατομής και μικρού πλάτους ( $M \times \Pi \times Y$ )=(23cm×1,5cm×20cm). Ο αγωγός καταλήγει σε καταβαθμό. Η διατομή του αγωγού στο άκρο του (στο χείλος του καταβαθμού) περιορίζεται από δύο κατακόρυφες (παράλληλες μεταξύ τους) μεταλλικές λάμες, οι οποίες αφήνουν ένα διάκενο  $\delta=2$ mm. Έτσι η διαθέσιμη ορθογωνική διατομή εκροής του νερού έχει διαστάσεις ( $\Pi \times Y$ )=(0,2cm×20cm)

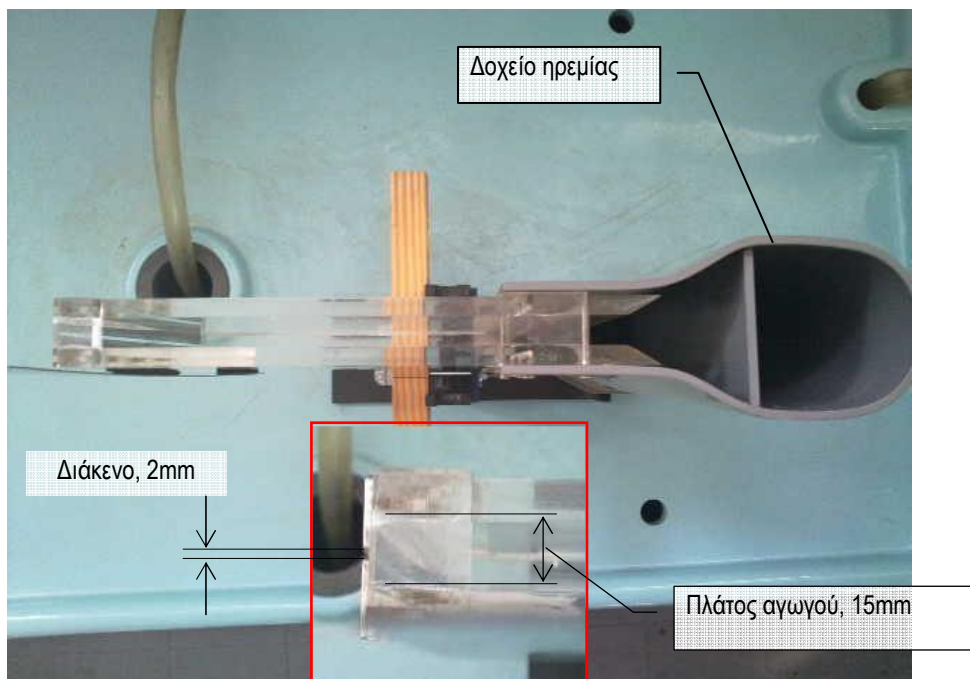
Για να πραγματοποιηθεί το πείραμα χρησιμοποιήθηκε δοχείο του εργαστηρίου που συνέλεγε το νερό που εκχυνόταν και μετά από την κατάλληλη έξοδο διοχετευόταν στην υδραυλική τράπεζα.



**Εικόνα 4.6** Η συσκευή με τον εκχειλιστή ΚΥΜΕΟΔ. Στην ένθετη εικόνα λεπτομέρεια από τις μεταλλικές λάμες συστολής της ελεύθερης υδατόπτωσης.



**Εικόνα 4.7** Η συσκευή με τον εκχειλιστή ΚΥΜΕΟΔ, σε τυπική κατάσταση λειτουργίας. Διακρίνεται η ανάντι του καταβαθμού στάθμη του νερού (φορτίο) και ο κατάντι του καταβαθμού κρουνός υδατόπτωσης.



**Εικόνα 4.8** Η συσκευή με τον εκχειλιστή ΚΥΜΕΟΔ, σε κάτοψη. Στην ένθετη εικόνα λεπτομέρεια από τις μεταλλικές παρειές συστολής της ελεύθερης υδατόπτωσης οι οποίες τη διαμορφώνουν σε μερικά ελεύθερη υδατόπτωση.

#### 4.2.3 Διαδικασία βαθμονόμησης

Για να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση του εκχειλιστή ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία.

- 1) Επειδή ο εκχειλιστής ΚΥΜΕΟΔ αποτελούσε εξάρτημα μιας μεγάλης εργαστηριακής συσκευής (Armfield Hydrology S12) τοποθετήθηκε σε μια βάση αυτόνομης στήριξης, σταθεροποίησης & οριζοντίωσης (ιδιοκατασκευή). Επίσης για ευκολία ανάγνωσης της στάθμης προσαρμόσαμε μόνιμα πάνω στον εκχειλιστή με ακρίβεια, μεταλλικό εργαστηριακό χάρακα. Ελέγχουμε οι μεταλλικές λάμες στη διατομή του καταβαθμού να είναι παράλληλες μεταξύ τους ώστε το διάκενο να είναι σταθερό (2mm) σε όλο το ύψος του καναλιού.
- 2) Στη συνέχεια τοποθετούμε τον εκχειλιστή ΚΥΜΕΟΔ στην υδραυλική τράπεζα (Υ/Τ). Στην πλευρά κατάντι του καταβαθμού τοποθετήθηκε λεκάνη υδατόπτωσης για τη συλλογή του νερού και την παροχέτευσή του στο ζυγιστικό δοχείο της Υ/Τ. Επίσης ο σωλήνας παροχής νερού από την Υ/Τ σταθεροποιήθηκε στο δοχείο ηρεμίας του εκχειλιστή ΚΥΜΕΟΔ.
- 3) Με τη ρυθμιστική βάνα της τράπεζας ρυθμίζουμε παροχή τροφοδοσίας νερού στον εκχειλιστή. Περιμένουμε τη σταθεροποίηση της στάθμης στο ορθογωνικό κανάλι (φορτίο) του εκχειλιστή.
- 4) Μετράμε με τη γνωστή διαδικασία υπολογισμού την παροχή  $Q_i$
- 5) Μετράμε το ύψος τη στάθμης  $H_i$  του νερού στο ορθογωνικό κανάλι (φορτίο) με τη βοήθεια του μεταλλικού χάρακα που προσαρμόσαμε στα τοιχώματα του καναλιού.
- 6) Καταγράφουμε σε πίνακα το ζεύγος ( $H_i, Q_i$ ).
- 7) Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3 έως 6 για διαφορετικές παροχές.
- 8) Προαιρετικά, εάν θέλουμε μπορούμε να μεταβάλλουμε το διάκενο στη διατομή του καταβαθμού του αγωγού και να επαναλάβουμε τη διαδικασία (3, 6) – Δεν πραγματοποιήθηκε.

#### 4.2.4 Επεξεργασία μετρήσεων

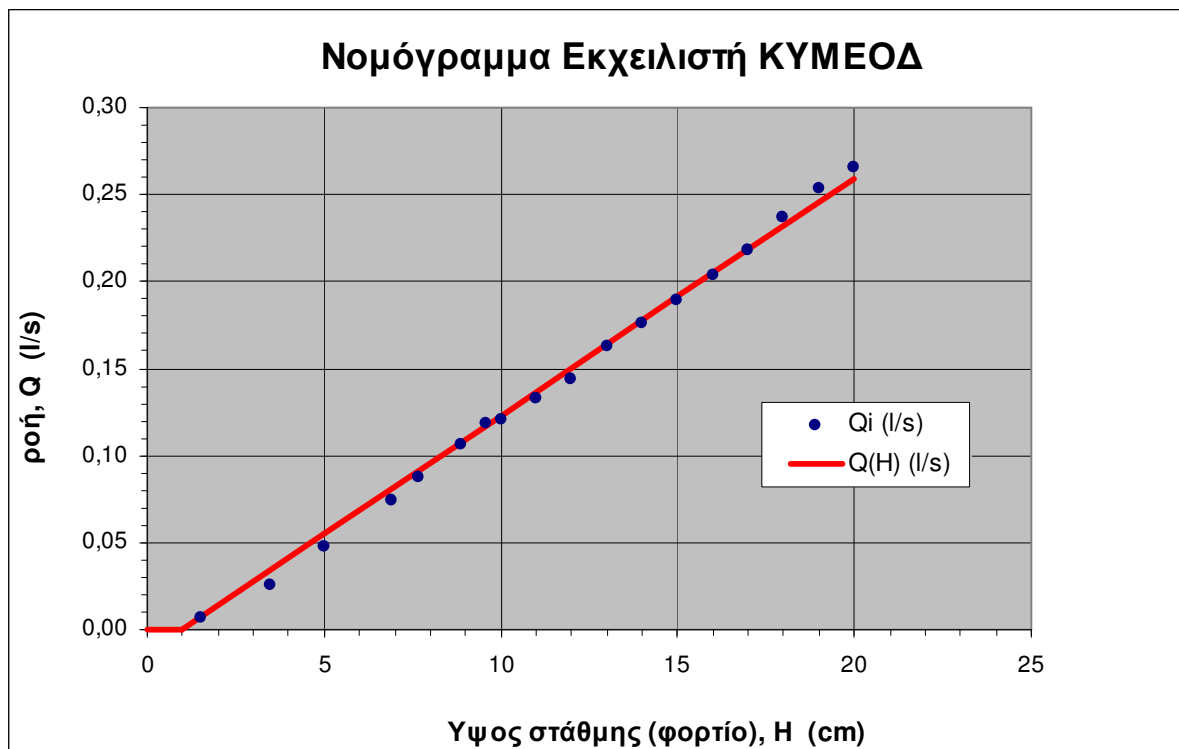
- 1) Δημιουργούμε πίνακα μετρήσεων  $H_i$  και παροχών  $Q_i$ , και αποτυπώνουμε σε ορθογώνιο διάγραμμα (H-Q) τα αντίστοιχα σημεία ( $H_i, Q_i$ ).
- 2) Δημιουργούμε το νομόγραμμα  $Q(H)$  του συγκεκριμένου εκχειλιστή ΚΥΜΕΟΔ προσδιορίζοντας με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και χαράσσοντας την ιδανική καμπύλη (ευθεία  $Q=a+bH$ ) που διέρχεται από αυτά τα σημεία.

#### 4.2.5 Αποτελέσματα

Στις επόμενες σελίδες το διάγραμμα – νομόγραμμα του εκχειλιστή ΚΥΜΕΟΔ (Εικόνα 4.9). καθώς και ο πίνακας μετρήσεων και αποτελεσμάτων κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης (Πίνακας 4.2)

**Πίνακας 4.2** Μετρήσεις και αποτελέσματα κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης του εκχειλιστή ΚΥΜΕΟΔ

Προσδιορισμός παροχής από Υ/Τ													
a/a	t1	t2	t3	t4	m1	m2	m3	m4	Qi (l/s)	Hi (cm)	Hi^2	HiQi	
	(s)				(kgr/s)								
1	22,56	22,46	22,63	22,66	2,66E-01	2,67E-01	2,65E-01	2,65E-01	2,66E-01	20,00	400,0	5,3151	
2	23,65	23,56	23,7	23,57	2,54E-01	2,55E-01	2,53E-01	2,55E-01	2,54E-01	19,00	361,0	4,8264	
3	25,11	25,34	25,14	25,5	2,39E-01	2,37E-01	2,39E-01	2,35E-01	2,37E-01	18,00	324,0	4,2736	
4	27,81	27,55	27,62	27,25	2,16E-01	2,18E-01	2,17E-01	2,20E-01	2,18E-01	17,00	289,0	3,7016	
5	29,32	29,45	29,34	29,55	2,05E-01	2,04E-01	2,04E-01	2,03E-01	2,04E-01	16,00	256,0	3,2637	
6	31,67	32,06	31,71	31,62	1,89E-01	1,87E-01	1,89E-01	1,90E-01	1,89E-01	15,00	225,0	2,8334	
7	34,32	33,71	33,93	34,19	1,75E-01	1,78E-01	1,77E-01	1,75E-01	1,76E-01	14,00	196,0	2,4680	
8	36,74	36,9	36,6	36,81	1,63E-01	1,63E-01	1,64E-01	1,63E-01	1,63E-01	13,00	169,0	2,1217	
9	41,74	41,73	41,55	42,1	1,44E-01	1,44E-01	1,44E-01	1,43E-01	1,44E-01	12,00	144,0	1,7234	
10	45,5	44,72	44,88	45,5	1,32E-01	1,34E-01	1,34E-01	1,32E-01	1,33E-01	11,00	121,0	1,4619	
11	49,95	49,52	50,04	50,22	1,20E-01	1,21E-01	1,20E-01	1,19E-01	1,20E-01	10,00	100,0	1,2017	
12	51	50,9	50,4	50,8	1,18E-01	1,18E-01	1,19E-01	1,18E-01	1,18E-01	9,60	92,2	1,1344	
13	56,4	56,6	56,7	56,7	1,06E-01	1,06E-01	1,06E-01	1,06E-01	1,06E-01	8,90	79,2	0,9435	
14	68,2	68,4	68,7	68,9	8,80E-02	8,77E-02	8,73E-02	8,71E-02	8,75E-02	7,70	59,3	0,6740	
15	80,5	81	81	80,1	7,45E-02	7,41E-02	7,41E-02	7,49E-02	7,44E-02	6,90	47,6	0,5133	
16	126,2	124,94	125,8	126,3	4,75E-02	4,80E-02	4,77E-02	4,75E-02	4,77E-02	5,00	25,0	0,2385	
17													
18	235,03	238,3	240,73	238,73	2,55E-02	2,52E-02	2,49E-02	2,51E-02	2,52E-02	3,50	12,3	0,0882	
19	841,63	840,55	842,44	842,3	7,13E-03	7,14E-03	7,12E-03	7,12E-03	7,13E-03	1,50	2,3	0,0107	
									Σ	2,57E+00	208	2902,8	36,7929
		m=	6	kg					b=	-0,0133018			
		ρ=	1	kg/lt					a=	0,0136287			



**Εικόνα 4.9** Το νομόγραμμα του συστήματος εκχειλιστή “ΚΥΜΕΟΔ” (Armfield S12) που βαθμονομήθηκε. Οι κουκίδες αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης. Η συνεχής γραμμή είναι το νομόγραμμα βαθμονόμησης  $Q(H) = 0,0000136H - 0,0000133$  που προσεγγίζει καλύτερα (μέθοδος ‘ελαχίστων τετραγώνων’) τις μετρήσεις.

Η αριθμητική σχέση που συνδέει την παροχή Q [l/s] με το ύψος στάθμης H [cm] είναι:

$$Q(H) = 1,36 \times 10^{-2} H - 1,33 \times 10^{-2}$$





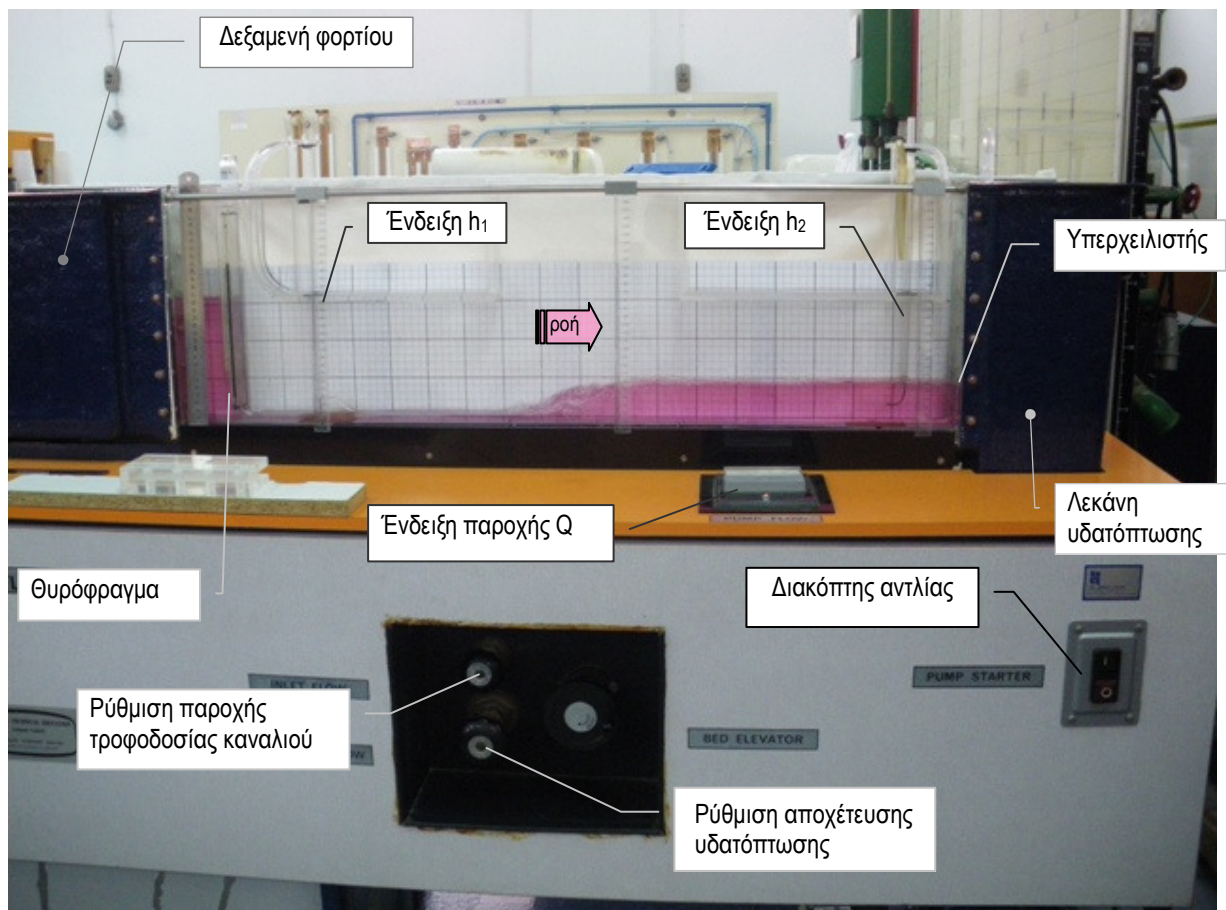
# Κεφάλαιο 5

## Μικρό Κανάλι – Ροές με ελεύθερη επιφάνεια

### 5.1 Ροή σε εργαστηριακό κανάλι ορθογωνικής διατομής

#### 5.1.1 Παρουσίαση συσκευής (κανάλι 1 m – Armfield S9094)

Το εργαστηριακό κανάλι είναι μια συσκευή που μας επιτρέπει να παρατηρήσουμε τη ροή ενός υγρού σε ανοιχτούς αγωγούς. Κατά την λειτουργία του παρατηρούμε τα είδη της ροής που διαμορφώνονται (π.χ. ποτάμια, χειμαρρώδης, υδραυλικά άλματα, ροή σε αναβαθμούς ή καταβαθμούς κλπ), καθώς και τις μεταβολές αυτών όταν αλλάζουν με ελεγχόμενο τρόπο οι συνθήκες ροής στο κανάλι.



**Εικόνα 5.1** Το μικρό ορθογωνικό κανάλι μεταβαλλόμενου πυθμένα του Εργαστηρίου Υδραυλικής. Το νερό είναι χρωματισμένο. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες ροής, στο μέσο του καναλιού σχηματίζεται ένα υδραυλικό άλμα.

Η ροή του νερού γίνεται απο αριστερά προς τα δεξιά (Εικόνα 5.1) και το νερό ανακυκλοφορεί μέσα στη συσκευή. Στα δύο άκρα του καναλιού υπάρχουν μια δεξαμενή

φόρτισης του καναλιού (αριστερά) και μια λεκάνη υδατόπτωσης /συλλογής νερού (δεξιά), οι οποίες επικοινωνούν με σύστημα αγωγών ρυθμιστικών διακοπών και αντλίας με την κεντρική δεξαμενή, ώστε να ρυθμίζεται η επιθυμητή παροχή στο κανάλι. Το κανάλι έχει ορθογωνική διατομή εκτείνεται σε μήκος ενός μέτρου (1m) και διάφανα τοιχώματα από plexiglass ώστε να μπορούμε να παρακολουθούμε την ροή. Αριστερά, στην είσοδο του καναλιού υπάρχει ένα θυρόφραγμα με το οποίο ελέγχουμε την ροή του νερού στο κανάλι, ανάλογα και με το φορτίο στη δεξαμενή φόρτισης. Δεξιά και στο τέλος του καναλιού βρίσκεται ένας υπερχειλιστής που ρυθμίζει τη ροή του νερού στη λεκάνη υδατόπτωσης. Ανάμεσα και πλησίον του θυροφράγματος και του υπερχειλιστή τοποθετούνται δύο μανομετρικά σωλήνες μέτρησης της μανομετρικής και της δυναμικής πίεσης στις διατομές (1) & (2).

### 5.1.2 Γεωμετρικά στοιχεία του καναλιού

- Μήκος του καναλιού  $L = 1000 \text{ mm}$
- Πλάτος καναλιού  $b = 40 \text{ mm}$
- Μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος ροής  $y = 300 \text{ mm}$
- Μέγιστη παροχή αντλίας  $Q = 100 \text{ l/min}$

## 5.2 Περιγραφή & βασικά χαρακτηριστικά υδραυλικού άλματος (Y/A)

### 5.2.1 Ειδική ενέργεια ροής

Η **ολική υδραυλική ενέργεια** ανά μονάδα βάρους υγρού (Ο.Υ.Ε. α.μ.β.υ.) σε μια διατομή φλέβας υγρού δίνεται από την έκφραση

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{U^2}{2g} = Y + z + \frac{U^2}{2g} \quad (5.1)$$

όπου

$Y=p/\gamma$ : το βάθος της ροής που ισούται με τη μανομετρική πίεση του νερού αναφερόμενη στον πυθμένα του αγωγού,

$z$ : η υψομετρική στάθμη του πυθμένα του αγωγού ως προς κάποια οριζόντια στάθμη αναφοράς,

$$U = \frac{Q}{by} \quad \text{η μέση ταχύτητα της ροής} \quad (5.2)$$

Η **ειδική ενέργεια (ειδικό φορτίο)** παριστάνει την υδραυλική ενέργεια ανά μονάδα βάρους υγρού σε σχέση με τον πυθμένα του αγωγού και ορίζεται από την έκφραση

$$E = Y + \frac{U^2}{2g} \quad (5.3)$$

Στο μικρό κανάλι ο πυθμένας είναι οριζόντιος, οπότε μπορούμε να θέσουμε παντού  $z=0$  και, επομένως,  $E=H$ .

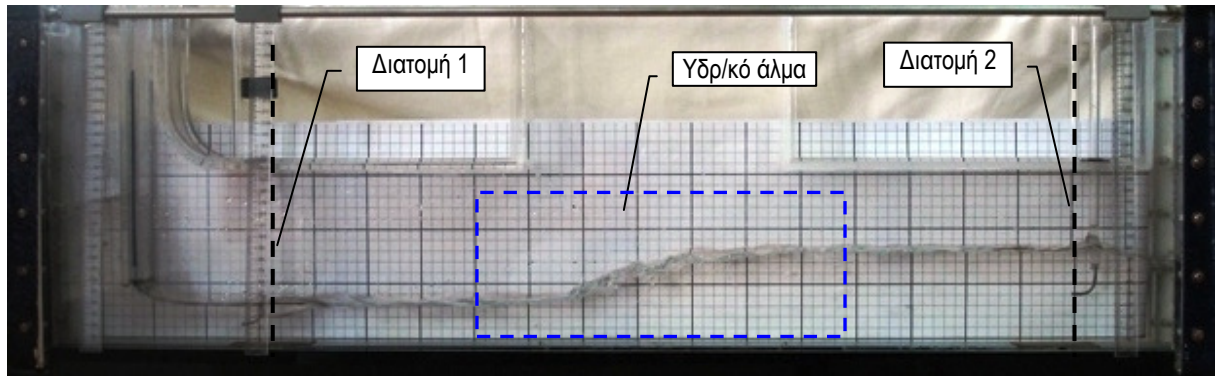
### 5.2.2 Υδραυλικό άλμα

Η μετάβαση από τη χειμαρρώδη (υπερκρίσιμη) ροή στην ποτάμια (υποκρίσιμη) γίνεται κατά τρόπο θεαματικό με δημιουργία στροβίλων (βλέπε Εικόνα 5.2), ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζεται ως **υδραυλικό άλμα**.

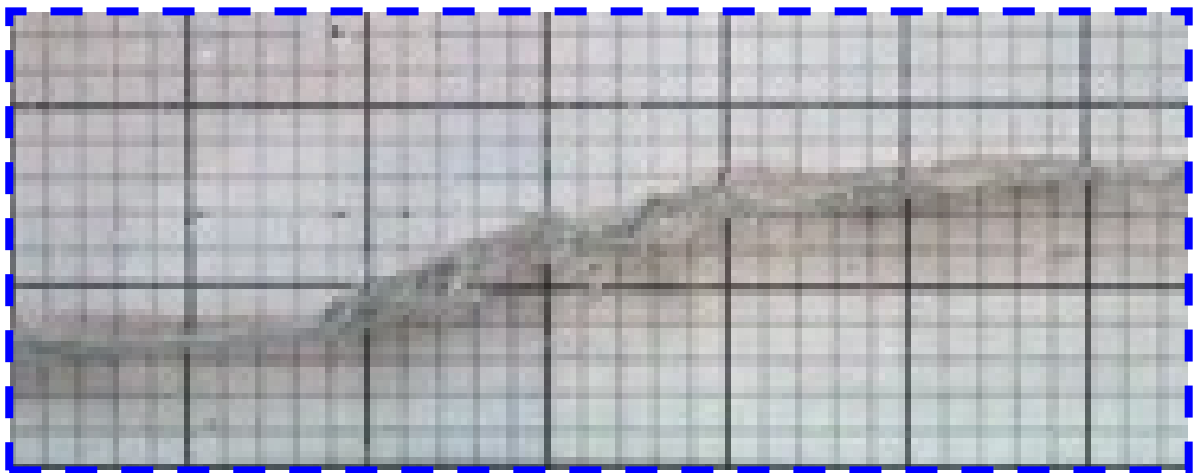
Το υδραυλικό άλμα σε ανοιχτούς αγωγούς αποτελεί τοπικό φαινόμενο όπου, κάτω από ορισμένες συνθήκες ροής, η ελεύθερη επιφάνεια μιας γρήγορης ροής, η οποία επιβραδύνεται, ανεβαίνει απότομα σε μεγαλύτερο ύψος ενώ ταυτοχρόνως δημιουργούνται ισχυροί στροβιλισμοί, με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας. Υδραυλικό άλμα δημιουργείται όταν η ροή από υπερκρίσιμη (χειμαρρώδης) μετατρέπεται σε υποκρίσιμη (ποτάμια). Αυτό γίνεται όταν, μια χειμαρρώδης ροή εξ αιτίας εμποδίου, π.χ. υπερχειλιστή (βλέπε Εικόνα 5.2), ή αυξημένων τριβών με τα τοιχώματα του αγωγού, επιβραδύνεται (μειώνεται η μέση ταχύτητα της) και, λόγω συνέχειας, αυξάνεται το βάθος της. Αποτέλεσμα αυτού είναι η 'υπερχειλίση' της ανυψωμένης στάθμης του νερού (λόγω ανακοπής της ροής) ανάντι της ροής και της κάλυψης της κατα πολύ ταχύτερης χειμαρρώδους φλέβας, φαινόμενο το οποίο συνοδεύεται από τοπικά ισχυρούς στροβιλισμούς και αναταράξεις στην περιοχή του υδραυλικού άλματος.

Οι ισχυροί στροβιλισμοί αναπτύσσονται σε όλη τη μάζα του Υ/Α και όχι μόνο πλησίον των βρεχόμενων τοιχωμάτων του αγωγού και έχουν ως αποτέλεσμα τη σημαντική μετατροπή κινητικής ενέργειας σε θερμότητα. Έτσι η υδραυλική ενέργεια στη διατομή κατάντι του Υ/Α είναι μειωμένη από αυτήν ανάντι του Υ/Α κατά το ποσό της εκλυόμενης θερμότητας. Η απώλεια ενέργειας λόγω τριβών με τα τοιχώματα του αγωγού είναι -συγκριτικά- αμελητέα.

Στο μικρό κανάλι, με παροχή σταθερή, δημιουργήσαμε με ένα θυρόφραγμα χειμαρρώδη ροή η οποία μεταπίπτει με διαφορετικούς τρόπους και συσκευές ελέγχου (controls) σε ποτάμια με φυσικό επακόλουθο τη δημιουργία υδραυλικού άλματος. Ειδικότερα, η θέση και το μήκος του Υ/Α ελέγχονται είτε μεταβάλλοντας το άνοιγμα του ανάντι θυροφράγματος, επηρεάζοντας έτσι το τμήμα της χειμαρρώδους ροής, είτε αυξομειώνοντας το ύψος του κατάντι υπερχειλιστή (στο τέλος του καναλιού), επηρεάζοντας έτσι το τμήμα της ποτάμιας ροής.



(α)



(β)

**Εικόνα 5.2** (α) Γενική όψη του καναλιού με τα διαφανή τοιχώματα και τη ροή από αριστερά προς τα δεξιά στην οποία δημιουργείται ένα σταθερό υδραυλικό άλμα (Υ/Α). Οι θέσεις (1) και (2) ανάντι και κατάντι του Υ/Α επισημαίνουν τις διατομές στις οποίες μετρήθηκαν γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής και υπολογίστηκαν διάφορα ροϊκά μεγέθη. (β) Το υδραυλικό άλμα σε μεγέθυνση. Είναι το άλμα που παρουσιάζεται με (α/α ροής 18) και τα χαρακτηριστικά 90/48/20 στον Πίνακα 5.1. Οι στροβιλισμοί που αναπτύσσονται γενικά σε όλο το ‘σώμα’ ενός Υ/Α, σε αυτό το ασθενές άλμα ( $Fr=1,828$ ) είναι ευδιάκριτοι μόνο στην ελεύθερη επιφάνεια.

### 5.2.3 Αριθμός Froude

Ένας πολύ βασικός αδιάστατος αριθμός, η τιμή του οποίου χαρακτηρίζει μια ροή με ελεύθερη επιφάνεια είναι ο αριθμός Froude.

Ο λόγος της ταχύτητας ροής προς την ταχύτητα των κυμάτων ονομάζεται **αριθμός Froude** και εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις δυνάμεις βαρύτητας.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gy}}$$

Επί της ουσίας, ο αριθμός Froude εκφράζει τη σχέση της κινητικής ενέργειας προς τη δυναμική, όπως εκφράζεται από το βάθος  $y$ .

Το τετράγωνο του αριθμού Froude καλείται κινητικός παράγων ροής:  $\lambda = Fr_1^2 = \frac{q^2}{gy_1^3}$ . (5.3)

Για τις τιμές του Froude ως προς το είδος της ροής ισχύει:

- $Fr < 1$  ποτάμια ροή
- $Fr = 1$  κρίσιμη ροή
- $Fr > 1$  χειμαρρώδης ροή

Για διάφορες τιμές του Froude τα υδραυλικά άλματα κατατάσσονται σε πέντε κατηγορίες (Τερζίδης, 1996-3):

1. Κυματοειδή άλματα  $Fr < 1,7$
2. Ασθενή ασταθή άλματα  $1,7 < Fr < 4,5$
3. Ισχυρά μόνιμα άλματα  $4,5 < Fr < 9$
4. Ισχυρότερα μόνιμα άλματα  $9 < Fr < 13$
5. Ισχυρότατα άλματα  $13 < Fr$

#### 5.2.4 Χαρακτηριστικά του υδραυλικού άλματος

Έστω ένα σταθερό (μη κινούμενο) υδραυλικό άλμα το οποίο λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα οριζόντιο ορθογωνικό αγωγό, πλάτους  $b$ . Στη μάζα του ρευστού που περιέχεται μεταξύ των εγκάρσιων προς τη ροή κατακόρυφων επιπέδων, στα σημεία 1 και 2, όπως επιδεικνύονται στην Εικόνα 5.2 πριν και μετά το άλμα, από όπου και διέρχονται, παραδεχόμαστε ότι ενεργούν μόνο οι δυνάμεις των υδροστατικών πιέσεων:

$$P_1 = \rho g \frac{y_1}{2} y_1 b = \rho g \frac{y_1^2}{2} b, \quad P_2 = \rho g \frac{y_2}{2} y_2 b = \rho g \frac{y_2^2}{2} b \quad (5.4)$$

Υποθέτουμε ότι η κατανομή της ταχύτητας στις διατομές 1 και 2 είναι ομοιόμορφη και σύμφωνα με το ισοζύγιο ροής γραμμικής ορμής σε όγκο ελέγχου που περιβάλλει το  $Y/A$  έχουμε:

$$\sum F = P_1 + F_1 - P_2 - F_2 - \int_{\Delta A} \tau dA = 0 \Rightarrow \rho g \frac{y_1^2}{2} b - \rho g \frac{y_2^2}{2} b + \frac{Q(U_1 - U_2)\gamma}{g} - \int_{x_1}^{x_2} \tau(b + 2y) dx = 0$$

όπου  $\int_{\Delta A} \tau dA$  είναι η συνισταμένη των τριβών του νερού με το τοίχωμα του αγωγού και  $\tau$

είναι οι διατμητικές τάσεις στο τοίχωμα. Θεωρώντας  $\int_{\Delta A} \tau dA \rightarrow 0$  κάτι που είναι συνεπές και

με την προηγούμενη υπόθεση ότι η κατανομή της ταχύτητας στις διατομές 1 και 2 είναι ομοιόμορφη, δηλαδή θεωρούμε αμελητέα τη δαπάνη ενέργειας λόγω τριβών στο τοίχωμα του αγωγού, το προηγούμενο ισοζύγιο γίνεται:

$$\sum F = P_1 + F_1 - P_2 - F_2 = 0 \Rightarrow \rho g \frac{y_1^2}{2} b - \rho g \frac{y_2^2}{2} b = \frac{Q(U_2 - U_1)\gamma}{g} \quad (5.5)$$

Από την εξίσωση της συνέχειας έχουμε:

$$Q = U_2 y_2 b = \frac{Q}{y_2 b} \quad (5.6)$$

Άρα η σχέση (5.5) γίνεται

$$\frac{y_1^2 - y_2^2}{2} = \frac{\rho Q^2}{b^2} \left( \frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) \quad (5.7)$$

Ορίζουμε την ειδική παροχή (παροχή ανά μονάδα πλάτους),  $q$ , ως

$$q = \frac{Q}{b} = \frac{ybU}{b} = yU$$

Οπότε η σχέση 5.7 γίνεται:

$$\frac{(y_1 - y_2)(y_1 + y_2)}{2} = \frac{q^2}{g} \left( \frac{y_1 - y_2}{y_1 y_2} \right) \Leftrightarrow \boxed{\frac{q^2}{g} = y_1 y_2 \left( \frac{y_1 + y_2}{2} \right)} \quad (5.8)$$

Η παραπάνω εξίσωση (5.8), είναι γνωστή ως εξίσωση του υδραυλικού άλματος σε ορθογωνικούς ανοιχτούς αγωγούς. Τη διαιρούμε με  $y^3$  και αφού  $Fr_1^2 = \frac{q^2}{gy_1^3}$  έχουμε

$$\frac{y_2}{y_1} + \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2 - 2Fr_1^2 = 0 \text{ λύνοντας ως προς } \frac{y_2}{y_1} \text{ έχουμε}$$

$$\boxed{\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2})} \quad (5.9)$$

Η παραπάνω εξίσωση (5.9) είναι ο αδιάστατος τύπος του υδραυλικού άλματος και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βάθους  $y_2$  όταν είναι γνωστές οι συνθήκες ανάντη του υδραυλικού άλματος.

Για το αντίστροφο, δηλαδή για τον προσδιορισμό του βάθους  $y_1$  όταν είναι γνωστές οι συνθήκες κατόντι του υδραυλικού άλματος, διαιρούμε την σχέση (5.9) δια  $y_2^3$  και παίρνουμε την αντίστοιχη σχέση:

$$\boxed{\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_2^2})} \quad (5.10)$$

### 5.2.5 Απώλειες ενέργειας στο υδραυλικό άλμα

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli με απώλειες μεταξύ των σημείων 1 και 2, όπου στον οριζόντιο πυθμένα του αγωγού έχουμε  $z_1 = z_2$ ,  $p_1 = \gamma y_1$  και  $p_2 = \gamma y_2$ , διαπιστώνουμε:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{U_1^2}{2g} - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{U_2^2}{2g}.$$

Επειδή  $z_1 = z_2$ ,  $p_1 = \gamma y_1$  &  $p_2 = \gamma y_2$  προκύπτει

$$y_1 + \frac{U_1^2}{2g} - h_L = y_2 + \frac{U_2^2}{2g}$$

Θέτοντας  $q = yU = Q/b$

$$h_L = y_1 - y_2 + \frac{q^2}{2g} \left( \frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2} \right) \leftrightarrow \text{όπου } \frac{q^2}{g} = \left( y_1 y_2 \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \leftrightarrow$$

$$h_L = y_1 - y_2 + \frac{1}{2} \left( y_1 y_2 \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \left( \frac{y_2^2 - y_1^2}{y_1^2 y_2^2} \right) \leftrightarrow$$

$$\boxed{h_L = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2}} \quad (5.11)$$

Ο τελικός τύπος μας δείχνει ότι η απώλεια φορτίου, εξ αιτίας των στροβιλισμών του υδραυλικού άλματος, είναι ανάλογη προς τον κύβο της διαφοράς των δυο βαθών του άλματος.

Οι ανοιγμένες απώλειες, δηλαδή οι απώλειες ως προς την υδραυλική ενέργεια ανάντι του άλματος (στη διατομή 1) δίνονται από τη σχέση

$$\frac{h_L}{E_1} = \frac{1}{E_1} \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} = \frac{1}{y_1 + \frac{U_1^2}{2g}} \frac{y_1^3 \left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4y_1 y_2} = \frac{1}{1 + \frac{U_1^2}{2gy_1}} \frac{y_1^3 \left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4y_1^2 y_2} = \frac{1}{1 + \frac{Fr_1^2}{2}} \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4 \frac{y_2}{y_1}} \Rightarrow$$

$$\boxed{\frac{h_L}{E_1} = \frac{1}{2 + Fr_1^2} \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{2 \frac{y_2}{y_1}}} \quad (5.12)$$

$$\text{Από την έκφραση } \frac{\Delta E}{y_1} = \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4 \frac{y_2}{y_1}} \quad (\text{εξ. 6.7.37 Τερζίδης, 1996/3}) \quad (5.13)$$

Μετατρέπουμε την αναγωγή της διαφοράς ενεργειακής δαπάνης στο  $Y/A$ ,  $\Delta E = E_1 - E_2$ , από  $y_1$  σε  $E_1$  και παίρνουμε:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4 \frac{y_2}{y_1}} y_1 \frac{1}{y_1 + \frac{q^2}{2gy_1}} = \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4 \frac{y_2}{y_1} \left( 1 + \frac{q^2}{2gy_1^3} \right)} = \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4 \frac{y_2}{y_1} \left( 1 + \frac{1}{2} Fr^2 \right)} \Rightarrow$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{\left(\frac{y_2}{y_1} - 1\right)}{2 \frac{y_2}{y_1} (2 + Fr^2)} \quad (5.14)$$

### 5.3 Διαδικασία δημιουργίας και μέτρησης χαρακτηριστικών ροής σε Y/A

- 1) Θέτουμε σε λειτουργία την αντλία του «μικρού» καναλιού μήκους 1m του Εργαστηρίου Υδραυλικής.
- 2) Ρυθμίζουμε την παροχή Q της αντλίας στη δεξαμενή φόρτισης ανάντι του θυροφράγματος.
- 3) Ρυθμίζουμε το άνοιγμα του θυροφράγματος,  $H_g$ , στην αρχή του καναλιού και το ύψος του χείλους του υπερχειλιστή,  $H_w$ , στο τέλος του καναλιού πριν την υδατόπτωση, ώστε να δημιουργηθεί υδραυλικό άλμα (βλέπε αντίστοιχες στήλες Πίνακα 5.1). Οι ρυθμίσεις πρέπει να γίνονται με αργό ρυθμό ώστε να δοθεί επαρκής χρόνος στη ροή να προσαρμοστεί.
- 4) Περιμένουμε λίγη ώρα να σταθεροποιηθεί η ροή και να ακινητοποιηθεί το δημιουργούμενο υδραυλικό άλμα σε θέση όσο γίνεται ενδιάμεση των διατομών (1) & (2).
- 5) Αφού σταθεροποιηθεί η ροή, το Y/A κλπ., και για κάθε μία από τις θέσεις προδιαγεγραμμένες θέσεις (1) & (2) στο κανάλι, μετράμε: (α) το βάθος ροής Y με τη βοήθεια κανόνα και (β) το μανομετρικό ύψος της δυναμικής πίεσης της γραμμής ροής στο μέσο της διατομής της ροής με το μανομετρικό σωλήνα, e. Επίσης μετράμε τη θέση έναρξης του Y/A ( $L_s$ ) και τη θέση πέρατος του Y/A ( $L_f$ ) ως προς το θυρόφραγμα.
- 6) Σημειώνουμε όλες τις παραπάνω τιμές των βημάτων 2-5 σε μία σειρά του Πίνακα 5.1.
- 7) Φωτογραφίζουμε τη γενική εικόνα της ροής σε όλο το μήκος του καναλιού, τη ροή στην περιοχή της θέσης (1) και τη ροή στην περιοχή της θέσης (2). Φροντίζουμε τα σημεία ληψης, η σκόπευση κλπ. να είναι σταθερά και σημειωμένα.
- 8) Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 2-7 για διαφορετικού συνδυασμούς τιμών Q,  $H_g$ ,  $H_w$ , ενώ παράλληλα βιντεοσκοπούμε με την εργαστηριακή βιντεοκάμερα, διάφορες αντιπροσωπευτικές ροές για μελλοντική ανάλυση ή επίδειξη. Μερικά από αυτά τα βίντεο αναρτήθηκαν στο διαδίκτυο (<http://www.youtube.com/watch?v=3rCkmFU7wbg>).

### 5.4 Αποτελέσματα

Οι ρυθμίσεις του καναλιού, οι μετρήσεις διαφόρων μεγεθών της ροής και υπολογισμοί χαρακτηριστικών ροϊκών μεγεθών για διαφορετικές ρυθμίσεις της ροής στο ορθογωνικό μικρό κανάλι του Εργ. Υδραυλικής, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1

Κάθε σειρά του Πίνακα 5.1 αναφέρεται σε διαφορετική ροή, δηλαδή ροή με διαφορετική ρύθμιση των controls του καναλιού. Η στήλη 1 («α/α ροής») δηλώνει τη χρονική σειρά με



την οποία ρυθμίστηκαν και μετρήθηκαν οι ροές. Όμως, τελικά οι ροές έχουν ταξινομηθεί στον Πίνακα 5.1 κατά αύξουσα τιμή του αριθμού Froude (στήλη 18).

Οι επιβαλλόμενες συνθήκες σε κάθε ροή καθορίζονται από τρεις τιμές:

- της παροχής (στήλη 2),
- του ανοίγματος του θυροφράγματος – θ/φ (στήλη 5) και
- του ύψους του υπερχειλιστή – υ/χ (στήλη 6).

Οι στήλες 7-13 (κίτρινη ομάδα στηλών με την ένδειξη ‘Μετρήσεις’) αναφέρονται στις μετρημένες τιμές:

- του φορτίου ανάντι του θ/φ (στήλη 7),
- του βάθους ροής στις διατομές (1) & (2) ανάντι και κατάντι του υδραυλικού άλματος (στήλες 8 & 12),
- της θέσης έναρξης και πέρατος του Y/A (στήλες 10 & 11) και
- της ειδικής ενέργειας,  $e=y+u^2/(2g)$ , των γραμμών ροής (streamlines) που διέρχονται στο μέσο περίπου της φλέβας ροής του καναλιού ανάντι και κατάντι του Y/A (στήλες 9 & 13). Οι τελευταίες μετρώνται με τους ειδικούς μανομετρικούς σωλήνες ανακοπής γραμμών ροής.

Οι στήλες 14-18 (γαλάζια ομάδα στηλών με την ένδειξη ‘Υπολογισμοί’) αναφέρονται στις υπολογισμένες τιμές διαφόρων χαρακτηριστικών της ροής και ειδικότερα: της μέσης ταχύτητας και της ειδικής ενέργειας όλης της φλέβας ροής του καναλιού στις διατομές (1) & (2), δηλ. ανάντι και κατάντι του Y/A, (στήλες 14-17), καθώς και του αριθμού Froude ανάντι του Y/A (στήλη 18), με βάση την τιμή του οποίου έγινε η κατάταξη κάθε ροής (με αύξοντα Fr).

Οι τελευταίες 3 γραμμές ροής (ροές με α/α 18, 20 & 21) δεν έδωσαν Y/A και δεν αναλύονται σε αυτήν την εργασία.

Τα στοιχεία του Πίνακα 5.1 αποτελούν πρωτογενείς μετρήσεις και βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των ροών που μελετήθηκαν. Θα αποτελέσουν τα δεδομένα για παραιτέρω επεξεργασία σε ακόλουθη Πτυχιακή Εργασία.

### ***Φωτογραφίες υδραυλικών αλμάτων με αυξανόμενο Froude***

Στι επόμενες σελίδες έχουν ταξινομηθεί οι φωτογραφίες όλων των υδραυλικών αλμάτων του Πίνακα 5.1 κατά αύξουσα τιμή του Froude.

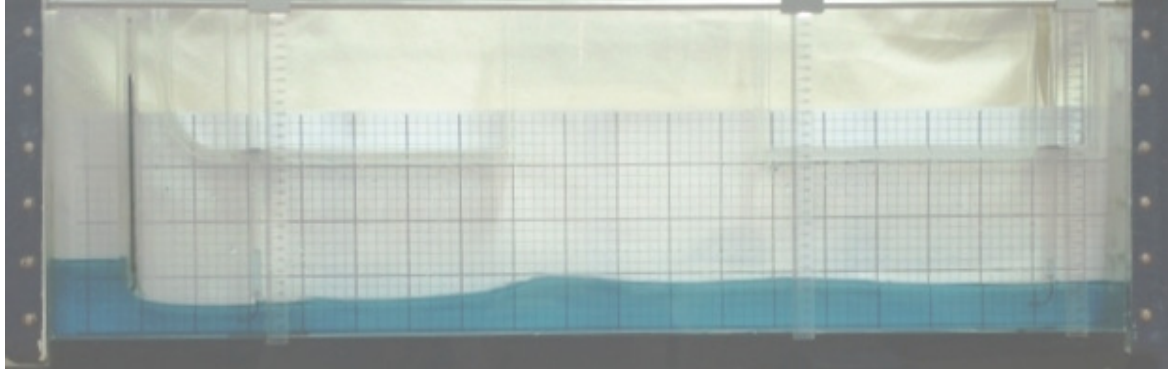
**Πίνακας 5.1** Ρυθμίσεις ροής, μετρήσεις μεγεθών και υπολογισμοί ροϊκών χαρακτηριστικών για τις ροές που δημιουργήθηκαν στο κανάλι, στις περισσότερες από τις οποίες δημιουργείται υδραυλικό άλμα.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ρύθμιση καναλιού						Μετρήσεις						Υπολογισμοί					
α/α ροής	Παροχή		Διακ ύ- μανσ η Q	Υψος Θ/Φ	Υψος Υ/Χ	Φορτίο Θ/Φ	Διατομή 1		Υδραυλικό Άλμα		Διατομή 2		Διατομή 1		Διατομή 2		Αριθμός Fr
							Βάθος ροής	Ειδική ενέργεια streamline	Αρχή	Πέρασ	Βάθος ροής	Ειδική ενέργεια streamline	Μέση ταχύτης	Ειδική ενέργεια	Μέση ταχύτης	Ειδική ενέργεια	
	Q	ΔQ	Hg	Hw	Ht	Y1	e1	Ls	Lf	Y2	e2	U1 =Q/A1	E1=Y1+ U1 <sup>2</sup> /2g	U2 =Q/A2	E2=Y2+ U2 <sup>2</sup> /2g	Fr1=U1 /sqrt(gy1)	
	(lt/min)	lt/s	±lt/min	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(mm)	(mm)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	
10	50	0,833		34	8	70	25	77	41	50	42	65	0,833	0,060	0,271	0,046	1,683
8	45	0,750		21	12,5	95	23	102	69	80	48	70	0,815	0,057	0,184	0,050	1,716
16	80	1,333		48	15	113	33	115	30	45	70	95	1,010	0,085	0,290	0,074	1,775
18	90	1,500		48	20	131	35	138	48	62	83	109	1,071	0,094	0,272	0,087	1,828
9	50	0,833		30	14	81	22	90	42	53	50	69	0,947	0,068	0,231	0,053	2,038
12	60	1,000		30	21	112	24	117	52	66	62	81	1,042	0,079	0,214	0,064	2,147
4	30	0,500		17	16,5	87	15	92	53	62	45	57	0,833	0,050	0,136	0,046	2,172
17	85	1,417		41	21	146	30	150	34	63	85	112	1,181	0,101	0,236	0,088	2,176
7	45	0,750		19	23	130	18	132	47	67	65	77	1,042	0,073	0,142	0,066	2,479
6	40	0,667		9	31,5	281	16	260	56	77	58	70	1,042	0,071	0,064	0,058	2,629
14	70	1,167		28	33,5	170	22	170	26	60	85	105	1,326	0,112	0,172	0,087	2,854
13	65	1,083		22	38	225	20	227	59	89	87	110	1,354	0,113	0,119	0,088	3,057
1	20	0,333		5	29	275	9	265	29	49	45	57	0,926	0,053	0,031	0,045	3,116
15	75	1,250		21	46	271	20	278	48	93	95	115	1,563	0,144	0,112	0,096	3,528
5	35	0,583		10	35	233	12	235	38	64	70	74	1,215	0,087	0,062	0,070	3,542
11	55	0,917		16	42	269	14	267	53	87	90	102	1,637	0,151	0,086	0,090	4,417
3	30	0,500		11	34	245	9	246	38	63	65	72	1,389	0,107	0,051	0,065	4,674
2	25	0,417		4	29	276	7	265	36	55	50	54	1,488	0,120	0,039	0,050	5,679
18	95	1,5833		41	21	224	70	230	/	/	135	153	0,565	0,086	0,172	0,137	0,682
20	50	0,8333		37	0	54	60	73	/	/	39	65	0,347	0,066	0,285	0,043	0,453
21	50	0,8333		50	0	60	60	72	/	/	39	66	0,347	0,066	0,289	0,043	0,453

## Φωτογραφικά στιγμιότυπα Υ/Α

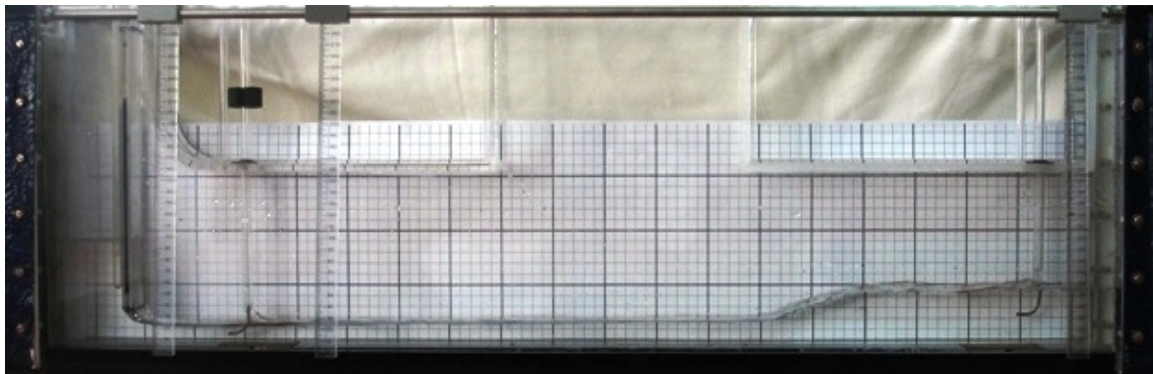
### α) Κυματοειδή άλματα $Fr_1 < 1,7$

α/α ροής: 10  $Q=50\text{l/s}$   $H_g=34\text{mm}$   $H_w=8\text{mm}$   $Fr_1=1,683$

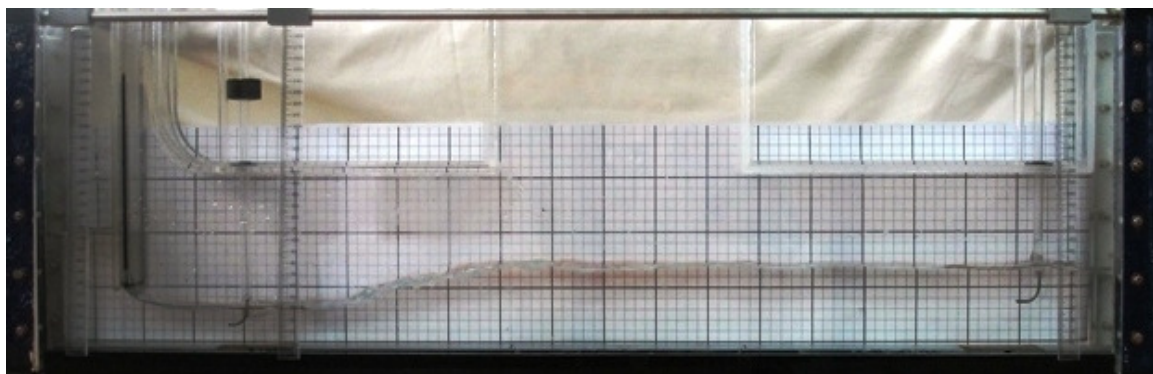


### β) Ασθενή ασταθή άλματα $1,7 < Fr_1 < 4,5$

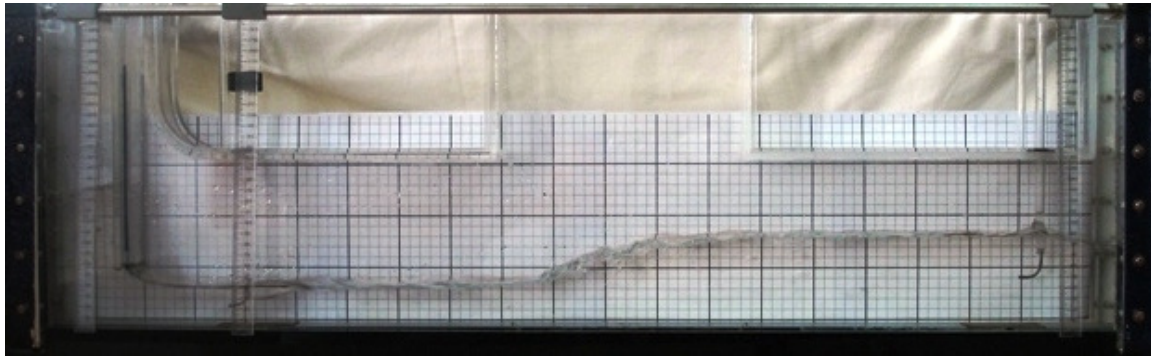
α/α ροής: 8  $Q=45\text{l/min}$   $H_g=21\text{mm}$   $H_w=12,5\text{mm}$   $Fr_1=1,716$



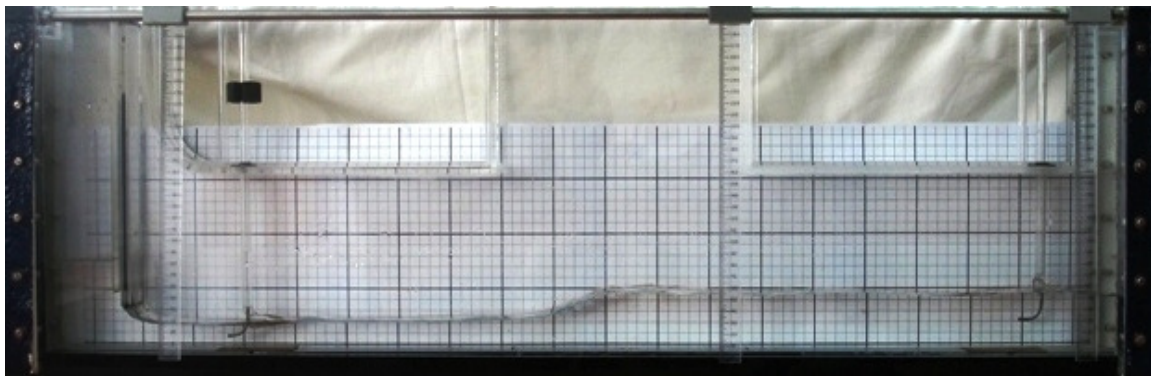
α/α ροής: 16  $Q=80\text{ l/min}$   $H_g=48\text{mm}$   $H_w=15\text{mm}$   $Fr_1=1,775$



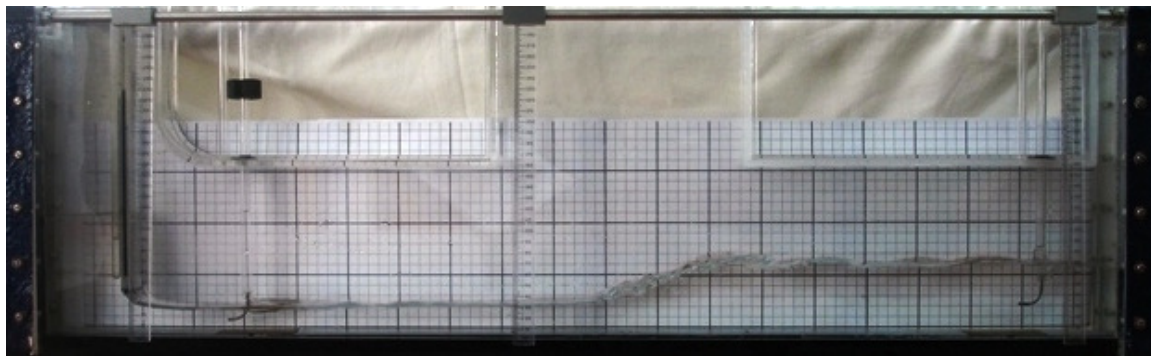
$\alpha/\alpha$  ροής: 18  $Q=90$  l/min  $H_g=48$ mm  $H_w=20$ mm  $Fr_1=1,828$



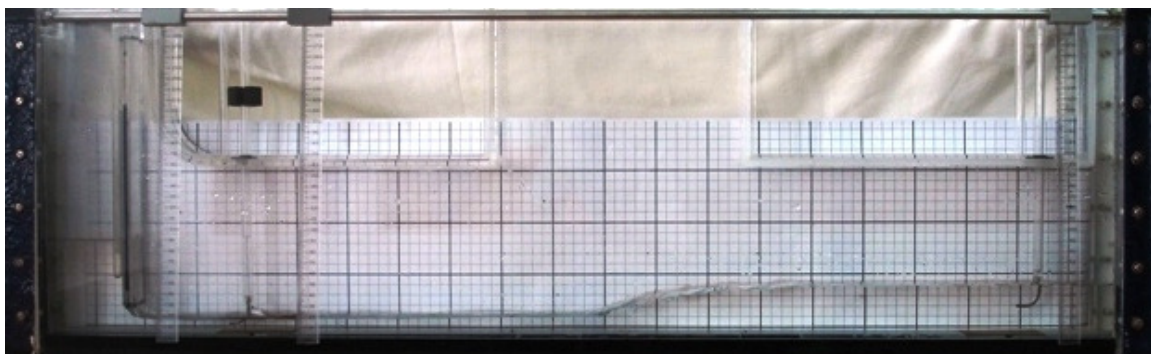
$\alpha/\alpha$  ροής: 9  $Q=50$  l/min  $H_g=30$ mm  $H_w=14$ mm  $Fr_1=2,038$



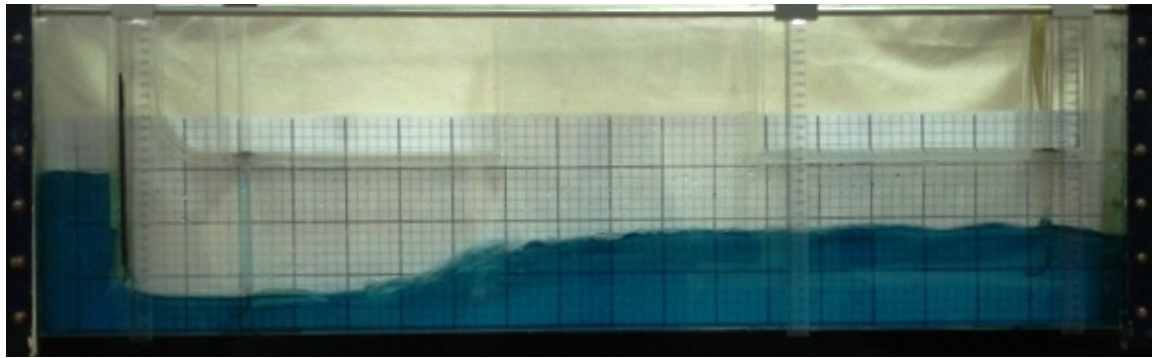
$\alpha/\alpha$  ροής: 12  $Q=60$  l/min  $H_g=30$ mm  $H_w=21$ mm  $Fr_1=2,147$



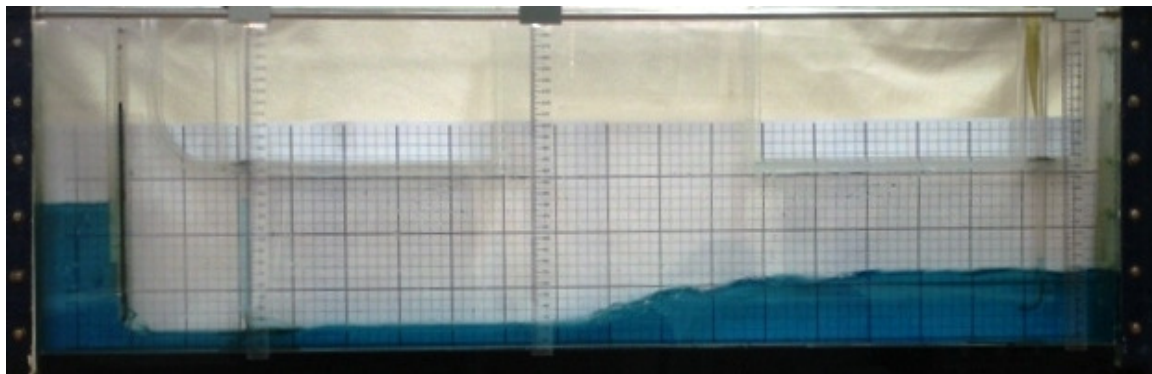
$\alpha/\alpha$  ροής: 4  $Q=30$  l/min  $H_g=17$ mm  $H_w=16,5$ mm  $Fr_1=2,172$



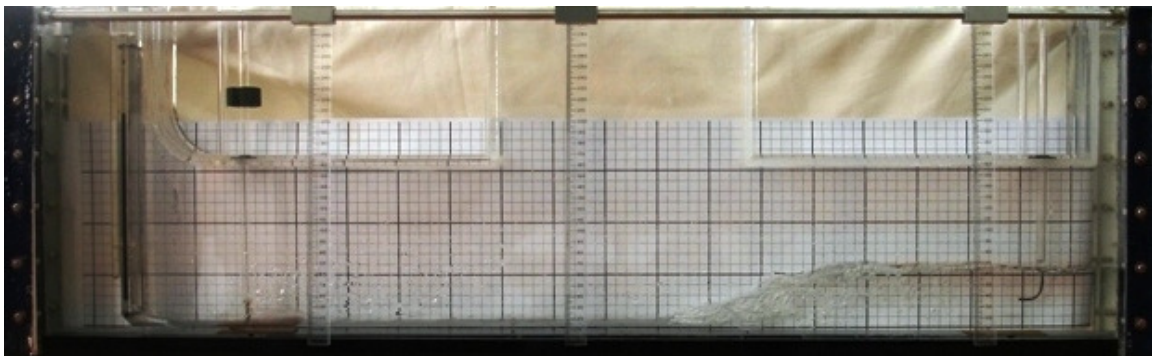
$\alpha/\alpha$  ροής: 17  $Q=85$  l/min  $H_g=41$ mm  $H_w=21$ mm  $Fr_1=2,176$



$\alpha/\alpha$  ροής: 7  $Q=45$  l/min  $H_g=19$ mm  $H_w=23$ mm  $Fr_1=2,479$



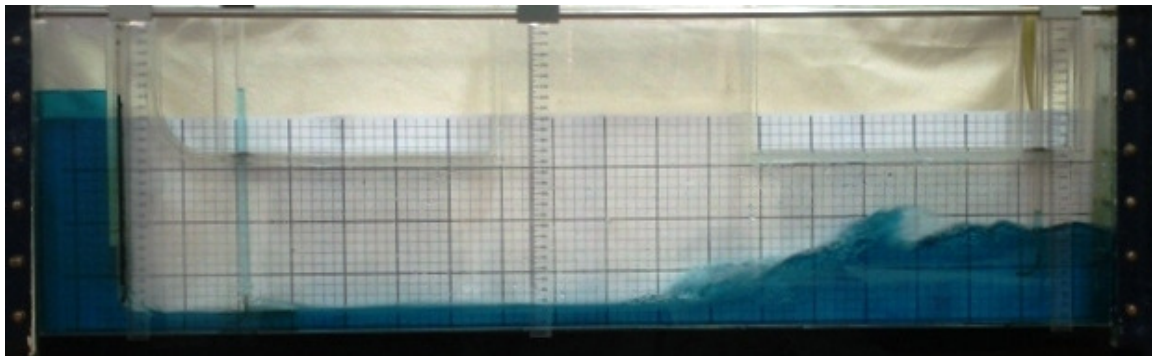
$\alpha/\alpha$  ροής: 6  $Q=40$  l/min  $H_g=9$ mm  $H_w=31,5$ mm  $Fr_1=2,629$



$\alpha/\alpha$  ροής: 14  $Q=70$  l/min  $H_g=28$ mm  $H_w=33,5$ mm  $Fr_1=2,854$



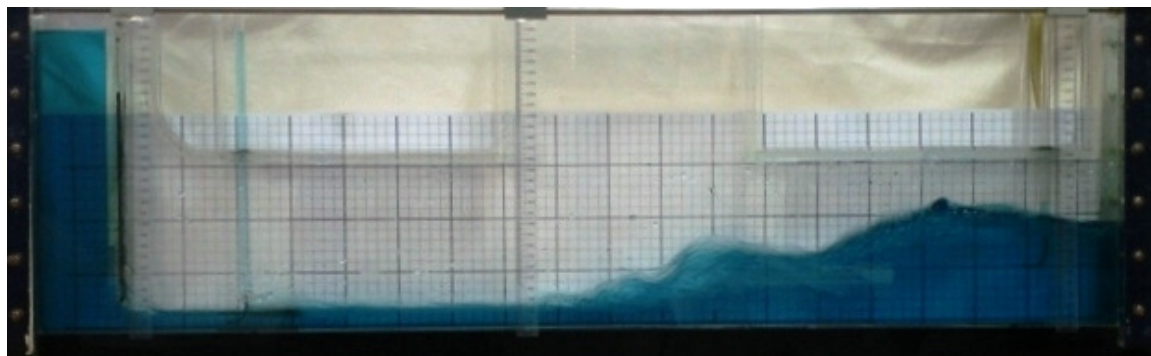
$\alpha/\alpha$  ροής: 13  $Q=65$  l/min  $H_g=22$ mm  $H_w=38$ mm  $Fr_1=3,057$



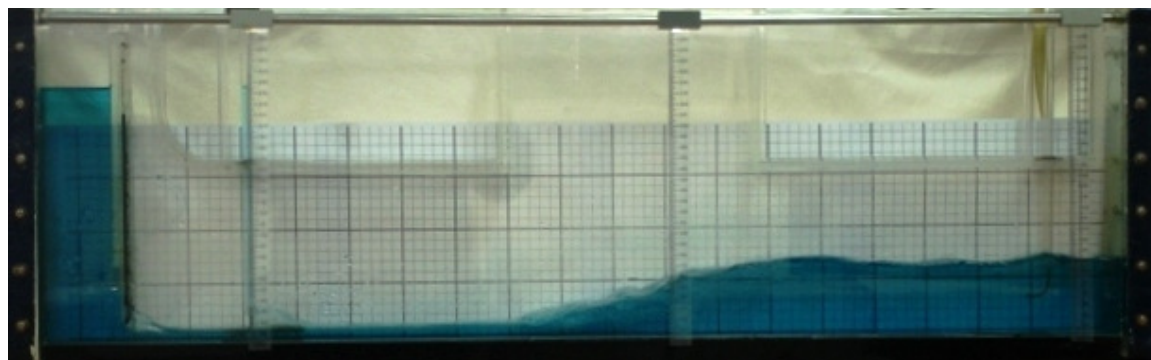
$\alpha/\alpha$  ροής: 1  $Q=20$  l/min  $H_g=5$ mm  $H_w=29$ mm  $Fr_1=3,116$



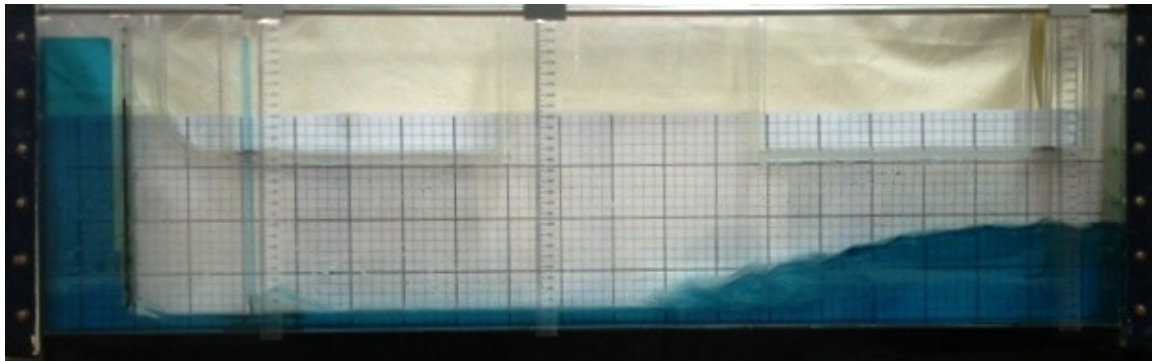
$\alpha/\alpha$  ροής: 15  $Q=75$  l/min  $H_g=21$ mm  $H_w=46$ mm  $Fr_1=3,528$



$\alpha/\alpha$  ροής: 5  $Q=35$  l/min  $H_g=10$ mm  $H_w=35$ mm  $Fr_1=3,542$

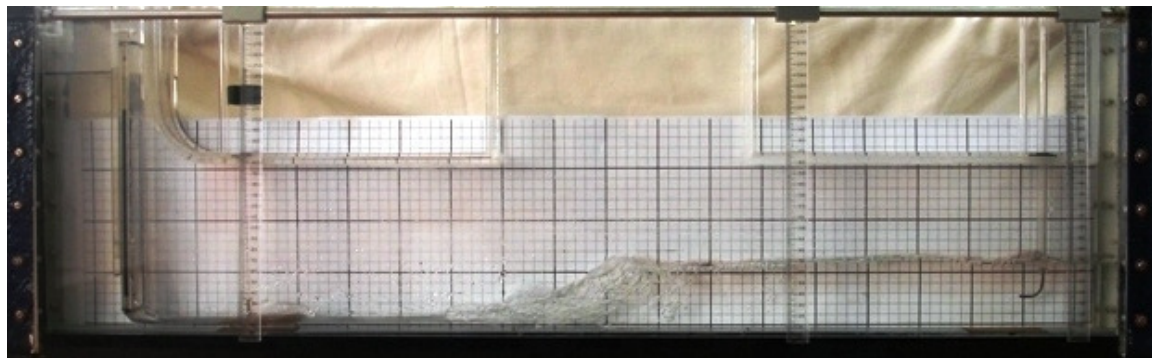


α/α ροής: 11    $Q=55$  l/min    $H_g=16$ mm    $H_w=42$ mm    $Fr_1=4,417$

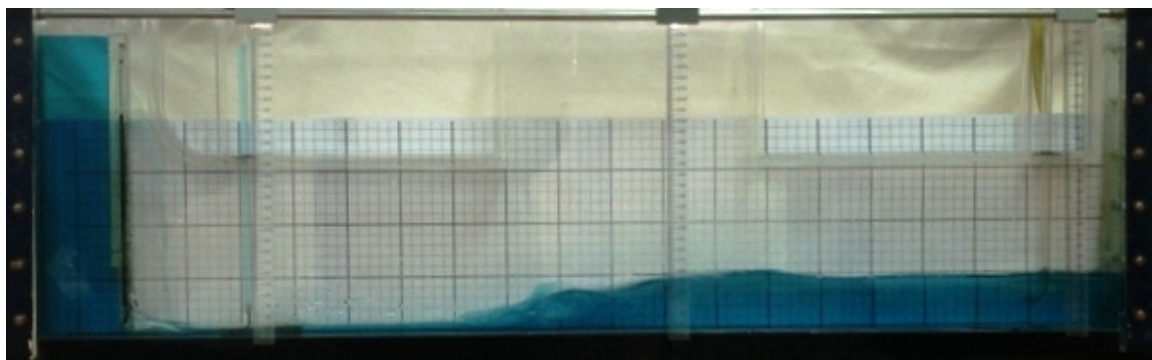


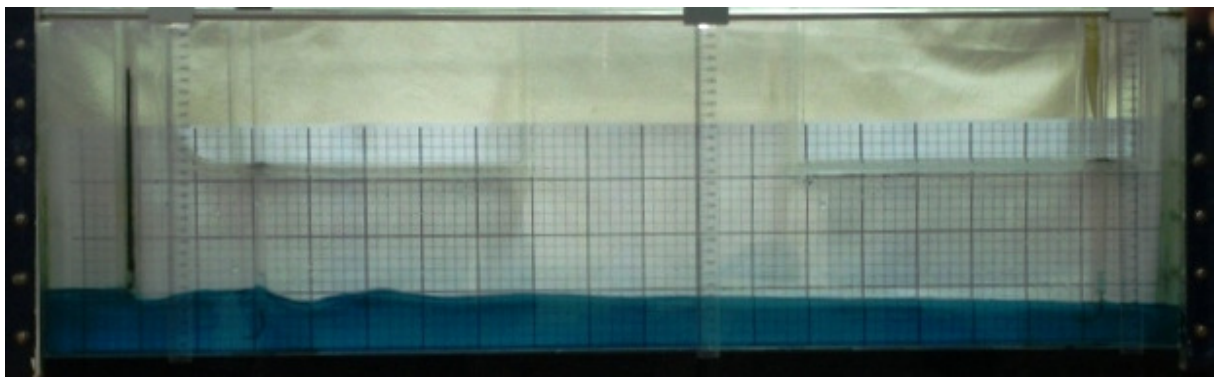
γ) Ισχυρά μόνιμα άλματα  $4,5 < Fr_1 < 9$

α/α ροής: 3    $Q=30$  l/min    $H_g=11$ mm    $H_w=34$ mm    $Fr_1=4,674$



α/α ροής: 2    $Q=25$  l/min    $H_g=4$ mm    $H_w=29$ mm    $Fr_1=5,679$





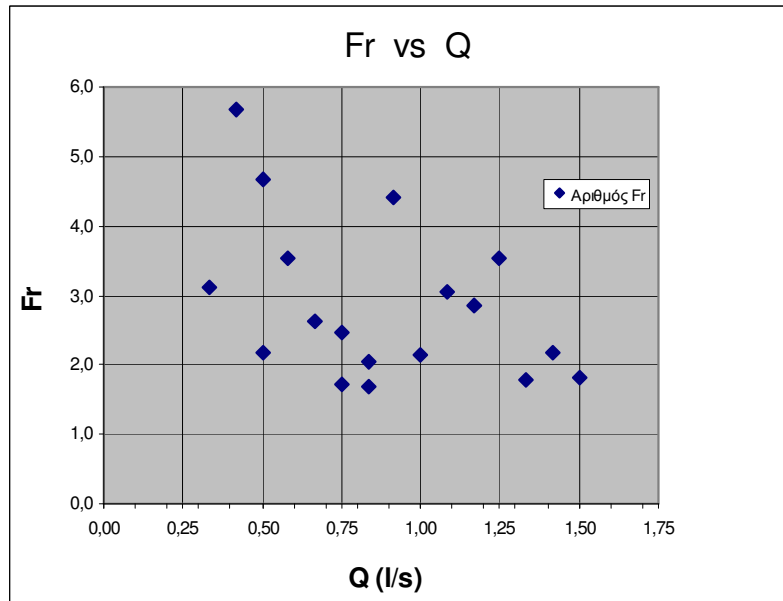


**Πίνακας 5.2** Υπολογισμοί θεωρητικού και πραγματικού λόγου των συζυγών βαθών, θεωρητικής και πραγματικής ενεργειακής δαπάνης και υπολογισμοί ανηγμένου μήκους των υδραυλικών αλμάτων που σχηματίστηκαν στο μικρό ορθογωνικό κανάλι του Εργ/ρίου Υδραυλικής

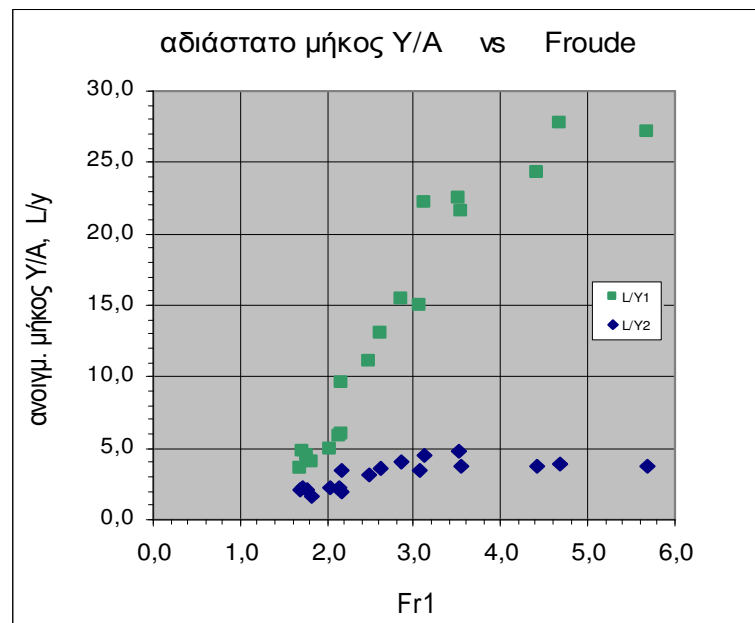
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	#REF!	#REF!
Ρύθμιση καναλιού					Μετρήσεις								Υπολογισμοί					Υπολογισμοί II					
α/α ροής	Παροχή				Διακ ύ- μανσ η Q	Ύψος Θ/Φ	Ύψος Υ/Χ	Διατομή 1		Υδραυλικό Άλμα		Διατομή 2		Διατομή 1		Διατομή 2		Αριθμός Fr	Στοιχεία Υδραυλικού άλματος (Υ/Α)				
								Φορτίο Θ/Φ	Βάθος ροής	Ειδική ενέργεια streamline	Αρχή	Πέρασ	Βάθος ροής	Ειδική ενέργεια streamline	Μέση ταχύτης	Ειδική ενέργεια	Μέση ταχύτης		Ειδική ενέργεια	Θεωρητικό Υ/Α Υ2'/Υ1= sqrt(- 1+8F1^2)/2	πραγματικό Υ/Α Υ2/Υ1	Ενεργειακή δαπάνη στο Υ/Α	
	Q	ΔQ	Hg	Hw	Ht	Υ1	e1	Ls	Lf	Υ2	e2	U1 =Q/A1	E1=Υ1+ U1^2/2g	U2 =Q/A2	E2=Υ2+ U2^2/2g	Fr1=U1 /sqrt(gy1)	Υ2'/Υ1	Υ2/Υ1	ΔΕ/Ε1	(ΔΕ/Ε1)'	L/Υ1	L/Υ2	
	(lt/min)	lt/s	elt/min	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(mm)	(mm)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)							
10	50	0,833		34	8	70	25	77	41	50	42	65	0,833	0,060	0,271	0,046	1,683	1,932	1,680	0,238	0,043	3,60	2,14
8	45	0,750		21	12,5	95	23	102	69	80	48	70	0,815	0,057	0,184	0,050	1,716	1,978	2,087	0,126	0,048	4,78	2,29
16	80	1,333		48	15	113	33	115	30	45	70	95	1,010	0,085	0,290	0,074	1,775	2,060	2,121	0,126	0,056	4,55	2,14
18	90	1,500		48	20	131	35	138	48	62	83	109	1,071	0,094	0,272	0,087	1,828	2,134	2,371	0,072	0,064	4,00	1,69
9	50	0,833		30	14	81	22	90	42	53	50	69	0,947	0,068	0,231	0,053	2,038	2,426	2,273	0,221	0,097	5,00	2,20
12	60	1,000		30	21	112	24	117	52	66	62	81	1,042	0,079	0,214	0,064	2,147	2,577	2,583	0,189	0,115	5,83	2,26
4	30	0,500		17	16,5	87	15	92	53	62	45	57	0,833	0,050	0,136	0,046	2,172	2,613	3,000	0,088	0,119	6,00	2,00
17	85	1,417		41	21	146	30	150	34	63	85	112	1,181	0,101	0,236	0,088	2,176	2,618	2,833	0,131	0,120	9,67	3,41
7	45	0,750		19	23	130	18	132	47	67	65	77	1,042	0,073	0,142	0,066	2,479	3,041	3,611	0,099	0,172	11,11	3,08
6	40	0,667		9	31,5	281	16	260	56	77	58	70	1,042	0,071	0,064	0,058	2,629	3,252	3,625	0,184	0,197	13,13	3,62
14	70	1,167		28	33,5	170	22	170	26	60	85	105	1,326	0,112	0,172	0,087	2,854	3,567	3,864	0,225	0,234	15,45	4,00
13	65	1,083		22	38	225	20	227	59	89	87	110	1,354	0,113	0,119	0,088	3,057	3,852	4,350	0,227	0,265	15,00	3,45
1	20	0,333		5	29	275	9	265	29	49	45	57	0,926	0,053	0,031	0,045	3,116	3,935	5,000	0,145	0,274	22,22	4,44
15	75	1,250		21	46	271	20	278	48	93	95	115	1,563	0,144	0,112	0,096	3,528	4,514	4,750	0,338	0,333	22,50	4,74
5	35	0,583		10	35	233	12	235	38	64	70	74	1,215	0,087	0,062	0,070	3,542	4,534	5,833	0,196	0,335	21,67	3,71
11	55	0,917		16	42	269	14	267	53	87	90	102	1,637	0,151	0,086	0,090	4,417	5,767	6,429	0,400	0,437	24,29	3,78
3	30	0,500		11	34	245	9	246	38	63	65	72	1,389	0,107	0,051	0,065	4,674	6,129	7,222	0,393	0,462	27,78	3,85
2	25	0,417		4	29	276	7	265	36	55	50	54	1,488	0,120	0,039	0,050	5,679	7,546	7,143	0,582	0,543	27,14	3,80
18	95	1,5833		41	21	224	70	230	/	/	135	153	0,565	0,086	0,172	0,137	0,682		1,929				
20	50	0,8333		37	0	54	60	73	/	/	39	65	0,347	0,066	0,285	0,043	0,453		0,650				
21	50	0,8333		50	0	60	60	72	/	/	39	66	0,347	0,066	0,289	0,043	0,453		0,650				73

b (cm) = 4                      g(m/s2)= 9,81

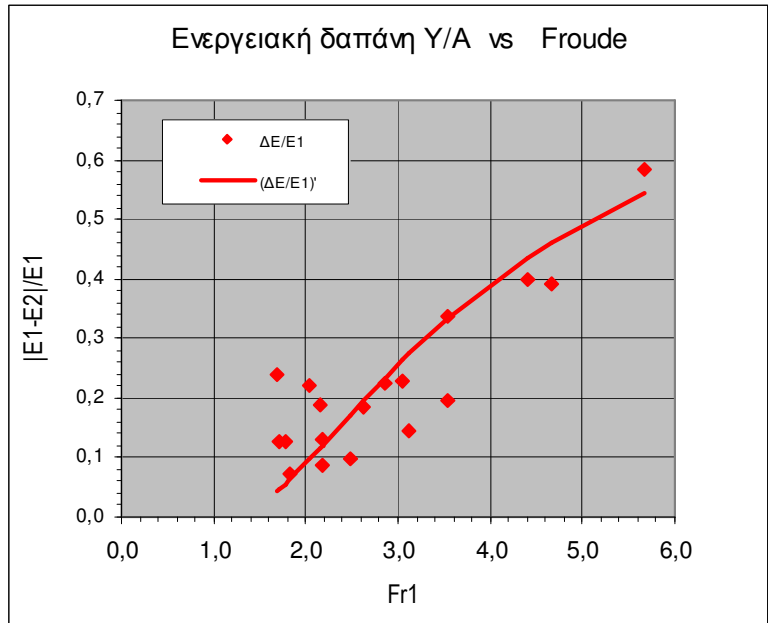




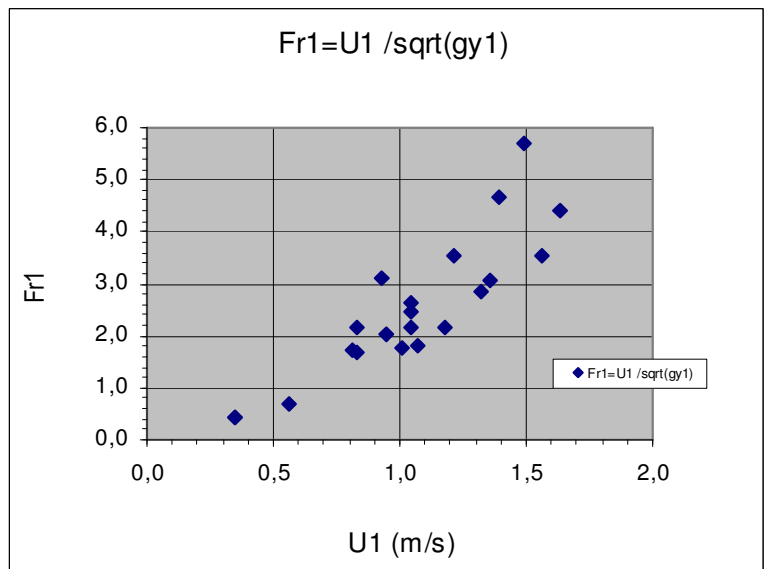
**Εικόνα 5.3** Οι συνδυασμοί παροχής  $Q$  και τιμών του αριθμού  $Fr$  που μελετήθηκαν πειραματικά. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει συσχετισμός μεταξύ  $Q$  &  $Fr$ .



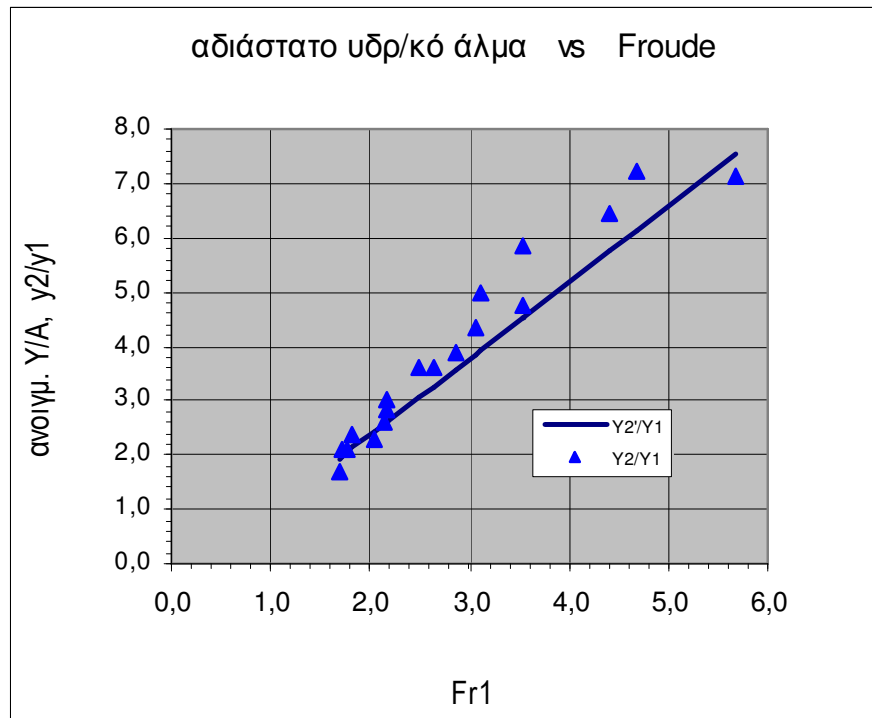
**Εικόνα 5.4** Συσχετισμός ανηγμένου μήκους  $Y/A$  έναντι του αριθμού  $Fr$ . Τα σημεία ■ συμβολίζουν την αναγωγή του μήκους του  $Y/A$  ( $L$ ) ως προς το κατάντι βάθος ροής  $y_2$  ( $L/y_2$ ). Τα σημεία ◊ συμβολίζουν την αναγωγή του μήκους του  $Y/A$  ως προς το κατάντι βάθος ροής  $y_1$  ( $L/y_1$ ). Αναφορικά με τα σημεία ( $L/y_2$ ), η συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα των Bakhtmeteff & Matzke (Τερζίδης 1996 /3) είναι εμφανής.



**Εικόνα 5.5** Συσχέτιση της ανηγμένης ενεργειακής δαπάνης ( $\Delta E/E_1$ ) με τις τιμές του αριθμού Fr. Τα διακριτά σημεία αντιστοιχούν στις μετρημένες τιμές του  $\Delta E$  &  $E_1$  έναντι του Fr, ενώ η καμπύλη αντιστοιχεί στην αναλυτική έκφραση  $(\Delta E/E_1)(Fr)$ , βλέπε εξίσωση (5.14)



**Εικόνα 5.6** Μεταβολή της τιμής του αριθμού Froude έναντι του Υ/Α συναρτήσει της μέσης ταχύτητας



**Εικόνα 5.7** Ο πραγματικός λόγος των συζυγών βαθών του  $Y/A$  για διαφορετικές τιμές του αριθμού Froude. Με σημεία απεικονίζονται οι πραγματικές μετρήσεις και με την ευθεία η γραμμική προσαρμογή τους.



## Βιβλιογραφία

- 1) ΤΕΡΖΙΔΗΣ, Γ. (1996) «Μαθήματα Υδραυλικής: 1. Γενική Υδραυλική», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη ISBN 960-431-261-8
- 2) ΤΕΡΖΙΔΗΣ, Γ. (1996) «Μαθήματα Υδραυλικής: 2. Κλειστοί Αγωγοί», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη ISBN 960-431-261-8
- 3) ΤΕΡΖΙΔΗΣ, Γ. (1996) «Μαθήματα Υδραυλικής: 3. Ανοικτοί Αγωγοί», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη ISBN 960-431-261-8
- 4) Chanson, H (2004) “The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction” Elsevier Butterworth-Heinemann, ISBN 0 7506 5978 5
- 5) Chow, V.T. (1973) Open Channel Hydraulics. (McGraw-Hill International: New York, USA).

### Διαδικτυακές πηγές

- [www.armfield.co.uk](http://www.armfield.co.uk)
- [www.discoverarmfield.co.uk/data/flumes](http://www.discoverarmfield.co.uk/data/flumes)
- [www.tecquipment.com](http://www.tecquipment.com)
- [https://education.teiath.gr/HYDRAUL\\_II/index.php](https://education.teiath.gr/HYDRAUL_II/index.php)
- <https://education.teiath.gr/CIE-HYDRO-I/index.php>