

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ Ε/Υ**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ  
ΑΓΩΓΟΥΣ

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ**  
ΛΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ**  
ΚΑΡΑΟΓΛΑΝΟΓΛΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Α.Μ. 1509  
ΣΠΗΛΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ ΑΝΤΩΝΙΑ Α.Μ. 1526

ΠΑΤΡΑ 29 ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 1996

ΑΡΙΘΜΟΣ  
ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

2202

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### Γενική περιγραφή

Ο διαύλος που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων στα οποία θα αναφερθούμε παρακάτω, αποτελείται από έναν ανοικτό αγωγό ορθογωνικής διατομής και πλάτους 200 mm, τη συλλεκτική δεξαμενή από την οποία αντλείται και στην οποία αποχετεύεται το νερό, τη φέρουσα κατασκευή και το φράγμα στο πέρας του διαύλου (ακρόφραγμα). Το ολικό μήκος της εγκαταστάσεως είναι 12 m, αλλά το ενεργό μήκος του διαύλου μόνο 8 m.

Τα τοιχώματα του διαύλου είναι γυάλινα και η έδρασή του μια σωληνοδοκός ορθογωνικής διατομής από χάλυβα, η οποία είναι αμφιέριστη σε δύο ζεύγη κατακόρυφων αξόνων, που είναι τοποθετημένοι στην αρχή και στο πέρας του διαύλου. Το ζεύγος των αξόνων στο πέρας του διαύλου φέρει έλικες με τη βοήθεια των οποίων επιτυγχάνεται η ανύψωση ή η ταπείνωση του διαύλου στο σημείο αυτό και κατά συνέπεια και η κλίση του. Κατά μήκος αμφοτέρων των χειλέων των γυάλινων τοιχωμάτων, εδράζεται μια σιδερένια ράβδος επάνω στην οποία ολισθαίνουν αλλά και στερεώνονται τα όργανα που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα.

Ο πυθμένας του διαύλου είναι μεταλλικός από ανοξείδωτο χάλυβα και στηρίζεται επί της άνω σωληνοδοκού. Κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του πυθμένα υπάρχουν οπές ανά 25 cm, δηλαδή 32 οπές συνολικά, στις οποίες καταλήγουν εύκαμπτοι πλαστικοί σωλήνες που μεταφέρουν το νερό σε κατακόρυφους, άκαμπτους σωληνίσκους ενός πίνακα και αποτελούν την άρπα του πολυμανομέτρου. Τα ύψη των μηνίσκων του νερού στους κατακόρυφους αυτούς πλαστικούς σωληνίσκους της άρπας, αντιπροσωπεύουν, ως προς κάποιο επίπεδο αναφοράς, τα ύψη πιέσεως ( $p/\gamma$ ) του νερού στα αντίστοιχα σημεία. Με τα κατακόρυφα στοιχεία, τα οποία επίσης στηρίζονται επί της σωληνοδοκού, επιτυγχάνεται η πλευρική στήριξη των γυάλινων τοιχωμάτων.

Η κλίση του πυθμένα μπορεί να ρυθμιστεί με τη βοήθεια ενός χειροτροχού που βρίσκεται στο πέρας του διαύλου, ο αριθμός των στροφών του οποίου καταγράφεται σε εξηρητημένο στροφόμετρο. Το βήμα της έλικας του ανυψωτικού μηχανισμού είναι 104,72 στροφές/°, δηλαδή για γωνία κλίσεως 1°, απαιτούνται 104,72 στροφές με τη βοήθεια του χειροτροχού, οι οποίες θα αναγνωσθούν στο στροφόμετρο.

Ο μηδενισμός του στροφομέτρου είναι σχετικά εύκολος και η οριζοντίωση του πυθμένα του αγωγού θα επιτευχθεί με τη βοήθεια νερού που θα συγκρατείται εντός του διαύλου σε ηρεμία και η επιφάνεια του οποίου θα είναι κατά συνέπεια οριζόντια. Επειδή όμως η κλίση του πυθμένα του διαύλου, όπως εξάλλου συνηθίζεται στην υδραυλική, δεν αναφέρεται σε μοίρες αλλά σε κλάσμα ή καλύτερα σε ποσοστό επί τοις χιλίοις -και μάλιστα ισχύει  $\sin \alpha \equiv J_0$ , όπου  $J_0$  η επί τοις χιλίοις κλίση και  $\alpha^\circ$  η γωνία κλίσεως σε μοίρες και τούτο κατ' εξαίρεση μόνο στην υδραυλική - είναι αναγκαία η μετατροπή της κλίσεως  $J_0$  σε γωνία κλίσεως  $\alpha^\circ$ .

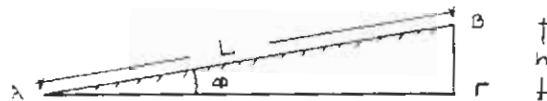
Π.χ. για κλίση  $J_0 = \frac{1}{1000}$  είναι  $\arcsin(0,001) = 0,0573^\circ$  και συνεπώς απαιτούνται  $n = 104,72 \cdot 0,0573 = 6$  στροφές. (\*)

Ο διάυλος τροφοδοτείται με τη βοήθεια ενός κλειστού αγωγού (σωλήνα)  $\Phi 130$ , μέσω του οποίου το αντλούμενο νερό από τη συλλεκτική δεξαμενή οδηγείται και προωθείται στο διάυλο με τη βοήθεια μιας αντλίας τύπου Mysop 125 κινούμενη με ισχύ 5,5 KW.

Η εισαγωγή του νερού γίνεται στο σημείο περί το οποίο στρέφεται ο διάυλος (αρχή του διαύλου) και στο οποίο επίσης βρίσκονται το χειριστήριο, δηλαδή ο χειροτροχός, για τη ρύθμιση της παροχής και τα μανόμετρα υδραργύρου-νερού και νερού-αέρα με τη βοήθεια των οποίων μετράται η παροχή.

Τα άνω μανόμετρα είναι συνδεδεμένα μέσω εύκαμπτων, διαφανών, πλαστικών σωλήνων με τα σημεία υψηλής και χαμηλής πίεσεως. Τα σημεία αυτά είναι πριν και μετά το διάφραγμα, το τελευταίο μάλιστα στη θέση της μικρότερης διατομής του νερού, δηλαδή της συστολής του νερού (vena contracta). Το άνω διάφραγμα βρίσκεται μέσα στο σωλήνα τροφοδοτήσεως και η οπή αυτού έχει διάμετρο 75 mm. Η σταθερά του άνω παροχομέτρου είναι  $C_\Delta = 0,965$  κατά την υπόδειξη του κατασκευαστή.

(\*) Η λεπτομερειακή εξήγηση των άνω έχει ως εξής:



Λόγω μικρής κλίσεως μπορεί να γραφεί:

$$\sin \alpha \approx \alpha \text{ [rad]}$$

Ισχύει επίσης η τριγωνομετρική σχέση  $\sin \alpha = \frac{h}{L}$  όπου  $h$  η μετακίνηση, δηλαδή η ανύψωση του  $\Gamma$  στο  $B$  και  $L$  το μήκος του φορέα.

Εάν  $n$  ο αριθμός των στροφών για την ανύψωση κατά  $h$ , τότε θα ισχύει  $h = \frac{np}{1000}$ , όπου  $p$  το βήμα της έλικας σε mm/περιστροφή. Είναι συνεπώς:

$$\alpha \text{ [rad]} = \sin \alpha = \frac{h}{L} = \frac{np/1000}{L} \quad \eta$$

$$\frac{\varphi^\circ}{180^\circ} = \frac{np/1000}{L} \Rightarrow n = \frac{1000\pi}{180^\circ} \cdot \frac{L}{p} \varphi^\circ, \text{ όπου } \varphi^\circ \text{ η γωνία κλίσεως σε μοίρες.}$$

Θέτοντας ακόμη στη σχέση τη σταθερά της έλικας  $R$  και  $\varphi = 1^\circ$ , παίρνουμε:

$$n = \frac{1000\pi}{180} \cdot \frac{LR}{p} = \frac{1000 \cdot 3,14}{180} \cdot \frac{6 \text{ [m]}}{6 \text{ [mm]}} \cdot 6 = 104,72$$

Η εξίσωση παροχής όπως αυτή προκύπτει από την εξίσωση ενεργειών του Bernoulli στα σημεία υψηλής και χαμηλής πίεσεως είναι:

$$Q = C_{\Delta} \pi \frac{d_2^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{2g\Delta h}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \quad (\text{E.1})$$

όπου  $d_1$  και  $d_2$  οι διάμετροι του σωλήνα και της οπής του διαφράγματος αντιστοίχως και  $\Delta h$  η διαφορική πίεση σε m στήλης νερού.

Στην περίπτωση χρησιμοποίησης του υδραργυρικού μανόμετρου (υδραργύρου-νερού), η αναγνωσθείσα διαφορική πίεση  $\Delta h$  σε m Hg, θα μετατραπεί σε m H<sub>2</sub>O πολλαπλασιάζοντας την άνω ένδειξη  $\Delta h$  με το  $(13,55 - 1,00) = 12,55$ :

$$\Delta h [\text{m H}_2\text{O}] = \Delta h [\text{m Hg}] \cdot 12,55.$$

Κατά συνέπεια η ποσότητα των σταθερών μεγεθών της εξίσωσης (E.1) γράφεται:

$$C_{\Delta} \pi \frac{d_2^2}{4} \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} = 0,965 \pi \frac{(7,5 \cdot 10^{-2})^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81}}{\sqrt{1 - \left(\frac{7,5}{13}\right)^4}} = 2 \cdot 10^{-2} \quad (\text{E.2})$$

και η εξίσωση παροχής είναι για το μεν μανόμετρο νερού-αέρα

$$Q = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1} \sqrt{\Delta h} = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\Delta h} \quad (\text{E.3})$$

όπου  $\Delta h$  η διαφορά στήλης νερού σε cm και  $Q$  η παροχή σε m<sup>3</sup>/sec, για το δε μανόμετρο υδραργύρου-νερού:

$$Q = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{12,55} \cdot \sqrt{\Delta h} = 7,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{\Delta h} \quad (\text{E.4})$$

όπου  $\Delta h$  η διαφορά υδραργυρικής στήλης σε cm και φυσικά η παροχή  $Q$  σε m<sup>3</sup>/sec.

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των τριών πειραμάτων στα οποία θα αναφερθούμε παρακάτω είναι οι εξής:

- Μία κατακόρυφος θυρίδα, εξοπλισμένη με 4 πιεζομετρικούς σωλήνες καθ' ύψος, στο άνω μέρος της οποίας υπάρχουν δύο κοχλίες για τη σταθερή στήριξή της επί των σιδηροτροχιών και άλλοι δύο επίσης για τη ρύθμιση του ανοίγματος που θα αφήνεται ελεύθερο μεταξύ του κάτω άκρου της θυρίδας και του πυθμένα δια μέσω του οποίου θα διέρχεται η ροή. Οι άνω πιεζομετρικοί σωλήνες καθιστούν εφικτό τον προσδιορισμό της πιεσοκατανομής καθ' ύψος της θυρίδας.

- Ένας εκχειλιστής ευρείας στέψεως εξοπλισμένος επίσης με 6 πιεζομετρικούς σωλήνες, εντός των οποίων παρέχεται η ένδειξη της πίεσεως του νερού στις αντίστοιχες οπές επί της οριζόντιας, καμπύλης και κατακορύφου επιφάνειάς του.

Ως βοηθητικά επίσης εξαρτήματα θα χρησιμοποιηθούν το σταθμήμετρο για την ανάγνωση του βάθους ροής και ο Pitot-σωλήνας για την ανάγνωση του ενεργειακού ύψους. Αμφότερα τα εξαρτήματα είναι εφοδιασμένα με κατακόρυφες κλίμακες.

## Πείραμα 1ο

### Ροή υπό θυρίδα και Υδραυλικό άλμα

Σκοπός των δύο πειράματων που θα περιγραφούν, είναι η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με εκείνα της θεωρίας, τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή του νόμου της μεταβολής της ορμής και της εξισώσεως των ενεργειών.

Η προκαταρκτική ενέργεια για τη διενέργεια των πειραμάτων συνίσταται στην οριζοντίωση του πειραματικού διαύλου. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται η επίδραση της βαρύτητας ή η εισαγωγή της δυναμικής ενέργειας στην εξίσωση των ενεργειών του Bernoulli, που ούτως ή άλλως θα ήταν αμφότερες αμελητέες, λόγω του μικρού μήκους ροής στο οποίο εξετάζονται τα δύο πειράματα και της σχετικώς μικρής κλίσεως. Οι μετρήσεις θα λάβουν χώρα στις θέσεις των διατομών 1-1, 2-2 για το πείραμα της ροής υπό θυρίδα και 3-3, 4-4 για το πείραμα του υδραυλικού άλματος, στις οποίες, λόγω παραλλήλου και ευθυγράμμου ροής (μη καμπυλογράμμου ροής), η κατανομή των πιέσεων θα είναι οπωσδήποτε υδροστατική, δηλαδή τριγωνική και τούτο βέβαια καθ' όλη την έννοια του πλάτους της διατομής του διαύλου.

Η ταχύτητα θα θεωρηθεί ότι είναι σχεδόν ομοιομόρφως κατανεμημένη σε όλο το πλάτος της διατομής και θα υπολογισθεί ως μέση ταχύτητα από τη σχέση:

$$V = \frac{Q}{A}$$

όπου A το εμβαδόν της διατομής.

## A. Ροή υπό θυρίδα

Η εγκυρότητα των άνω παραδοχών, δηλαδή τόσο της ομοιομόρφως κατανεμημένης ταχύτητας όσο και της υδροστατικής πιεσοκατανομής, δύναται να ελεγχθεί με τη βοήθεια του Pitot-σωλήνα και του πιεζομετρικού σωλήνα αντιστοίχως.

Το πείραμα “Ροή υπό θυρίδα” θα διεξαχθεί με σταθερή παροχή. Στην προκαταρκτική διαδικασία τοποθετείται η θυρίδα μέσα στο δίαυλο λίγο μετά την είσοδο του νερού, αποφράσσοντας εν μέρη τη ροή και επιτρέποντας τη διέξοδό αυτής στο άνοιγμα των 27mm, που παραμένει επίσης σταθερό. Το φράγμα στο πέρασ του διαύλου είναι εξ ολοκλήρου κατεβασμένο και αφήνει ελεύθερη τη διοχέτευση της ροής στη δεξαμενή.

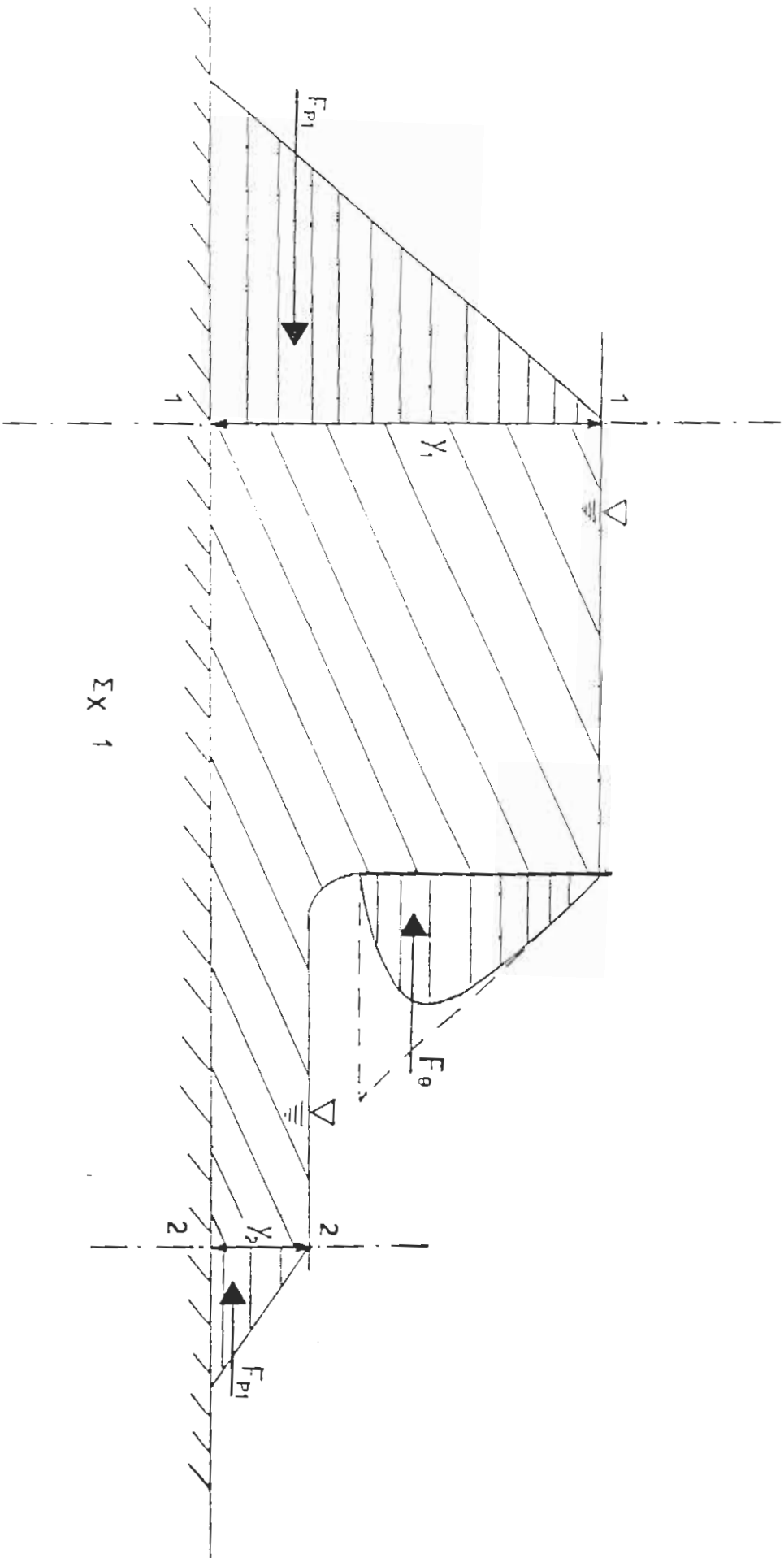
Η κατανομή της πίεσεως καθ’ ύψος της θυρίδας δεν είναι όμως υδροστατικώς κατανεμημένη. Τούτο φυσικά οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό αμέσως μετά την αιχμή της θυρίδας έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα και συνεπώς σε εκείνο το σημείο, δηλαδή στην αιχμή εκπηδήσεως, η πίεση ξαναγίνεται ίση με μηδέν. Ως εκ τούτου η εν λόγω κατανομή θα λαμβάνει χώρα κατά την ένδειξη στο σχήμα I, χωρίς να είναι εντελώς γνωστή η ακριβής κατανομή της πίεσεως καθ’ ύψος, δηλαδή από πιο σημείο και έπειτα θα αρχίσει η πίεση ( $P/\gamma$ ) να φθίνει ως προς την υδροστατική πίεση αντιστοίχου ύψους. Αυτό όμως θα καταστεί γνωστό με τη βοήθεια των πιεζομετρικών σωλήνων με τους οποίους είναι εξοπλισμένη η θυρίδα και κατόπιν ολοκλήρωσεως, δηλαδή υπολογισμού της επιφάνειας που σχηματίζεται από την κατανομή των εν λόγω πιέσεων, θα υπολογισθεί η ασκούμενη δύναμη  $F_{\theta}$  πάνω στη θυρίδα. Η κατανομή των πιέσεων καταχωρήθηκε στον πίνακα II (Πιν. II) και ο γραφικός υπολογισμός της δυνάμεως φαίνεται στο διάγραμμα I (Διαγρ. I). Εκτός αυτού με τη βοήθεια της εξίσωσης της μεταβολής της ορμής, η οποία λαμβάνει χώρα στον ελεγχόμενο υδάτινο όγκο του σχήματος I, καθίσταται επίσης δυνατός ο υπολογισμός της ολικής πιεσοδυνάμεως  $F_{\theta}$ , όπως αυτή ασκείται από το νερό στη θυρίδα ή τ’ ανάπαλιν από τη θυρίδα στο νερό, ίση φυσικά με την προηγούμενη δύναμη κατά το αξίωμα: δράση ίσον αντίδραση. Εκτός από τη δύναμη  $F_{\theta}$  ως δύναμη αντιδράσεως δύναται να χαρακτηριστεί και η υδροστατική πιεσοδύναμη  $F_{P_2}$  επί της διατομής 2-2, κατάντη του ελεγχόμενου όγκου. Συγκεκριμένα κατά τη μνημονευθύσα εξίσωση θα ισχύει:

$$\rho Q(V_2 - V_1) = F_{P_1} - F_{P_2} - F_{\theta} - T \quad (1.1)$$

όπου  $F_{P_1}$ ,  $F_{P_2}$  οι υδροστατικές πιεσοδυνάμεις στις επιφάνειες 1-1 και 2-2,  $F_{\theta}$  η άνω πιεσοδύναμη το μέγεθος της οποίας θα υπολογισθεί και  $T$  η δύναμη τριβής κατά μήκος των τοιχωμάτων και του πυθμένα του αγωγού από 1-1 έως 2-2 η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως αμελητέα.

Επιλύοντας την εξίσωση (1.1) ως προς  $F_{\theta}$  και αντικαθιστώντας τις πιεσοδυνάμεις  $F_{P_1}$  και  $F_{P_2}$  καθώς επίσης και τις ταχύτητες  $V_1$  και  $V_2$  με τα ίσα τους





$$F_{P1} = \frac{1}{2} \rho g B y_1^2 \quad (1.2)$$

$$F_{P2} = \frac{1}{2} \rho g B y_2^2 \quad (1.3)$$

$$V_1 = \frac{Q}{B y_1} \quad (1.4)$$

$$V_2 = \frac{Q}{B y_2} \quad (1.5)$$

προκύπτει:

$$F_{\Theta} = \rho B Q^2 \left( \frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) - \frac{1}{2} \rho g B (y_1^2 - y_2^2) \quad (1.6)$$

Οι μετρήσεις των βαθών ροής στις θέσεις 1 και 2 έγιναν με τη βοήθεια σταθμημέτρου και καταχωρήθηκαν μαζί με άλλα υπολογιστικά μεγέθη στον πίνακα III. Προηγουμένως ελέγξαμε τη μεταβολή ή μη της παροχής στις διάφορες χρονικές φάσεις του πειράματος και καταχωρήθηκε στον πίνακα I.

Κατόπιν αντικατάστασης των τιμών:

Σταθερά Παροχής (Q)	$6,74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$
Πλάτος (B)	0,2 m
Βάθη Ροής $y_1$	0,2040 m
$y_2$	0,0175 m

προκύπτει θεωρητικώς η τιμή της  $F_{\Theta}$ :

$$F_{\Theta} = 28,96 \text{ N}$$

Πειραματικώς, δηλαδή κατά τον άνω περιγραφέντα γραφικό τρόπο, η ίδια δύναμη  $F_{\Theta}$  υπολογίζεται

$$F_{\Theta} = \int p b dz = b \int p dz = 200 \text{ mm} \cdot 143 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} = 28,6 \text{ N}$$

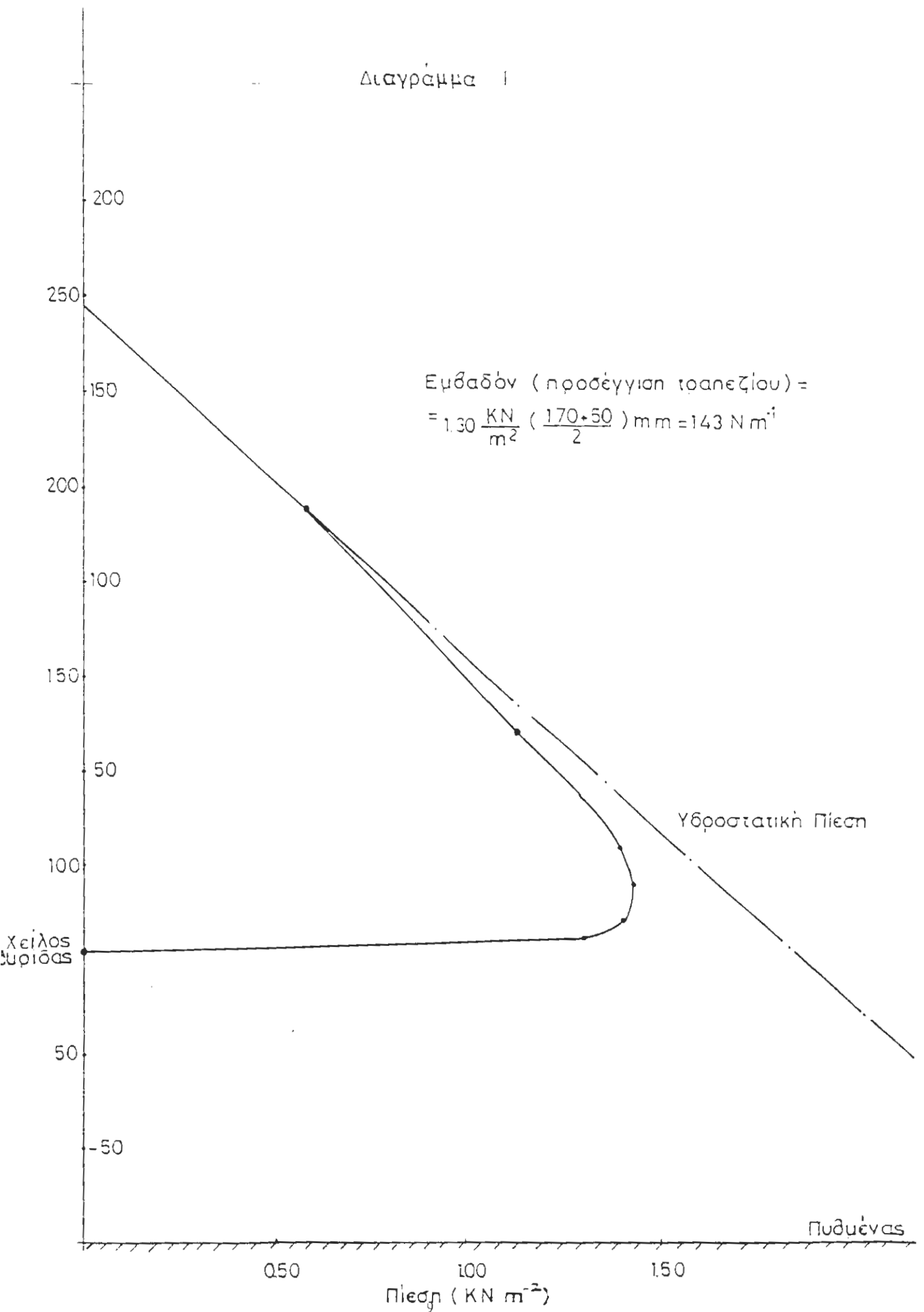
Η ελάχιστη διαφορά η οποία προέκυψε μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής τιμής της δύναμης  $F_{\Theta}$  οφείλεται στην ύπαρξη διατμητικών τάσεων ( $\tau$ ), που ανθίστανται στη ροή και οι οποίες συνίστανται στη δύναμη τριβής  $T$ , δηλαδή είναι:

$$T = 28,96 - 28,6 = 0,36 \text{ N}$$

Η εξίσωση της ορμής στη διεύθυνση της ροής μπορεί επίσης να γραφεί και ως εξίσωση στατικής ισορροπίας:

$$(F_{P1} + \rho Q V_1) - (F_{P2} + \rho Q V_2) + F_{\Theta} = 0 \quad (1.7)$$

Διαγράμμα 1



όπου οι ποσότητες  $(F_{p1} + \rho QV_1)$  και  $(F_{p2} + \rho QV_2)$ , δηλαδή το άθροισμα της υδροστατικής δύναμews και της δύναμews της ορμής στις διατομές 1-1 και 2-2, ορίζονται ως δυνάμεις στηρίζεως  $K_1$  και  $K_2$  στις αντίστοιχες διατομές κατά τις εξισώσεις :

$$K_1 = F_{p1} + \rho QV_1 \quad (1.8)$$

$$K_2 = F_{p2} + \rho QV_2 \quad (1.9)$$

Συνεπώς η εξίσωση (1.7) γράφεται:

$$K_1 - K_2 - F_\Theta = 0 \quad (1.10)$$

και είναι:

$$K_1 = 41,94 \text{ N}$$

$$K_2 = 13,28 \text{ N}$$

και η προαναφερθείσα δύναμη  $F_\Theta$ :

$$F_\Theta = 28,66 \text{ N}$$

Οι τιμές των ειδικών ενεργειών στις θέσεις 1-1 και 2-2 υπολογίζονται ως εξής:

$$H_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 204 + \frac{(0,165)^2}{2 \cdot 9,81} = 205,4 \text{ mm} \quad (1.11)$$

$$H_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = 17,5 + \frac{(1,93)^2}{2 \cdot 9,81} = 206,5 \text{ mm} \quad (1.12)$$

Οι αντίστοιχες μετρήσεις με τον Pitot-σωλήνα είναι :

$$H_{p1} = 210 \text{ mm}$$

$$H_{p2} = 209 \text{ mm}$$

Η διαφορά των τιμών οφείλεται στο ότι με τον υπολογιστικό τρόπο μετράμε τη μέση ειδική ενέργεια της διατομής, ενώ με τον Pitot-σωλήνα μετράμε την ενέργεια στο σημείο που βρίσκεται το στόμιό του, δηλαδή την ειδική ενέργεια τοπικώς. Οι τιμές αυτές των ενεργειακών υψών καταχωρήθηκαν στον πίνακα III.

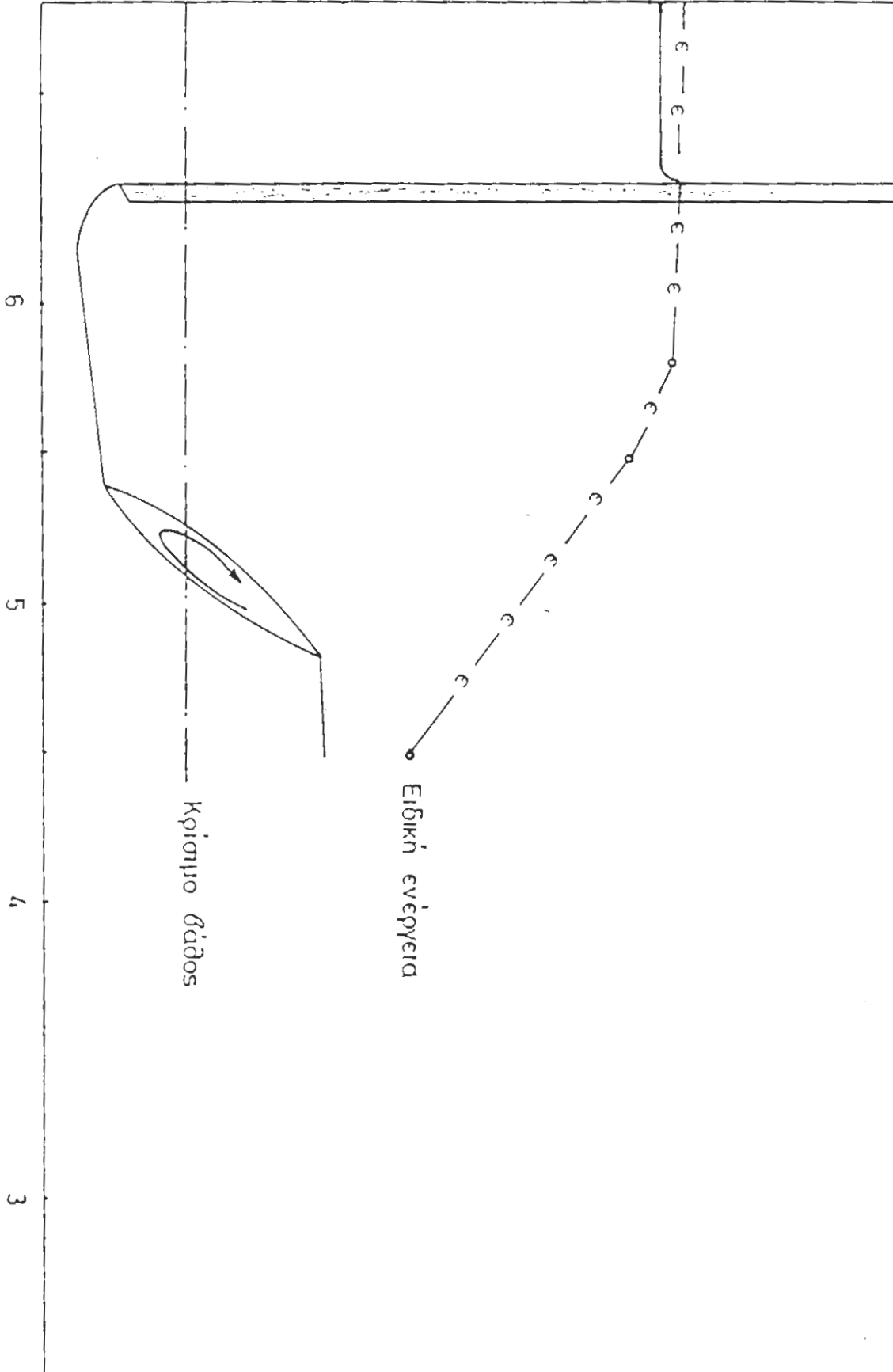
Η ενεργειακή απώλεια που έλαβε χώρα από τη θέση 1-1 έως τη θέση 2-2 είναι, συνεπώς, ίση με :

$$\Delta H_{\text{εν}} = 205,4 - 206,5 = 1,1 \text{ mm} \quad (\text{Βλ. Διαγρ. II})$$

Βάθος και ειδική Ενέργεια (mm)

100

200



Διάγραμμα II

και με τη βοήθεια του Pitot-σωλήνα:

$$\Delta H = 210 - 209 = 1 \text{ mm}$$

δηλαδή είναι της τάξεως του 5‰ με την πρώτη μέθοδο και με τη δεύτερη μέθοδο, οπωσδήποτε σε αμφότερες τις περιπτώσεις αμελητέα.

Ο συντελεστής παροχής  $C_Q$  της θυρίδας προκύπτει από το λόγο της πειραματικώς μετρουμένης παροχής  $Q_{\pi}$  προς τη θεωρητική παροχή  $Q_{\theta}$  η οποία θα είναι ίση με:

$$Q_{\theta} = Bs \sqrt{2gH_1} = 10,8 \cdot 10^{-3} \quad (1.13)$$

όπου  $s = 27 \text{ mm}$  το άνοιγμα της θυρίδας.

Η τελευταία εξίσωση προκύπτει από την εξίσωση των ενεργειών στις θέσεις 1-1 και 2-2 δηλαδή πριν και μετά τη θυρίδα. Συνεπώς είναι:

$$C_Q = \frac{Q_{\pi}}{Q_{\theta}} = \frac{6,74 \cdot 10^{-3}}{10,8 \cdot 10^{-3}} = 0,624$$

και

$$C_C = \frac{y_2}{s} = \frac{17,5}{27} = 0,648$$

με σχετικά ικανοποιητική ταύτιση των τιμών αυτών με τις αντίστοιχες τιμές που λαμβάνονται από το Διάγραμμα III για την τιμή του λόγου :

$$\frac{s}{y_1} = \frac{27}{204} = 0,13$$

## B. Υδραυλικό Άλμα

Το πείραμα του υδραυλικού άλματος επιτεύχθει σηκώνοντας το φράγμα στο πέρας του διαύλου (ακρόφραγμα) και οδηγώντας το υδραυλικό άλμα, που εξεδιόκετο προηγουμένως από τη ροή μέσα στο δίαυλο, σε μια απόσταση ασφαλείας από τη θυρίδα.

Σκοπός του πειράματος είναι να καταδειχθεί η σπουδαιότητα της ενεργειακής απώλειας  $\Delta H$  που προκαλείται κατά το υδραυλικό άλμα και η οποία δεν οφείλεται σε εξωτερικά αίτια, δηλαδή σε δυνάμεις τριβής με τα τοιχώματα κλπ, αλλά σε εσωτερικές δυνάμεις κρούσεως που αναπτύσσονται μεταξύ των στροβιλιζομένων του νερού μορίων και οι οποίες τελικώς αλληλοαναιρούνται. Η ασημαντότις της αναπτυσσομένης τριβής  $T$ , πρόκειται να καταδειχθεί επίσης κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Στην περίπτωση του υδραυλικού άλματος που λαμβάνει χώρα στις διατομές 3-3, 4-4, η εξίσωση της μεταβολής της ορμής γράφεται :

$$\rho Q(V_4 - V_3) = F_{p3} - F_{p4} - T_{(3-4)} \quad (1.11)$$

όπου

$$F_{p3} = \frac{1}{2} \rho g B y_3^2 \quad (1.12)$$

$$F_{p4} = \frac{1}{2} \rho g B y_4^2 \quad (1.13)$$

$$V_3 = \frac{Q}{B y_3} \quad (1.14)$$

$$V_4 = \frac{Q}{B y_4} \quad (1.15)$$

Η δύναμη τριβής  $T$  υπολογίζεται συνεπώς από την εξίσωση 1.11

$$T = (\rho Q V_4 + F_{p4}) - (\rho Q V_3 + F_{p3}) \quad (1.16)$$

ή κατά τις προγενέστερες αντικαταστάσεις :

$$T = K_4 - K_3 \quad (1.17)$$

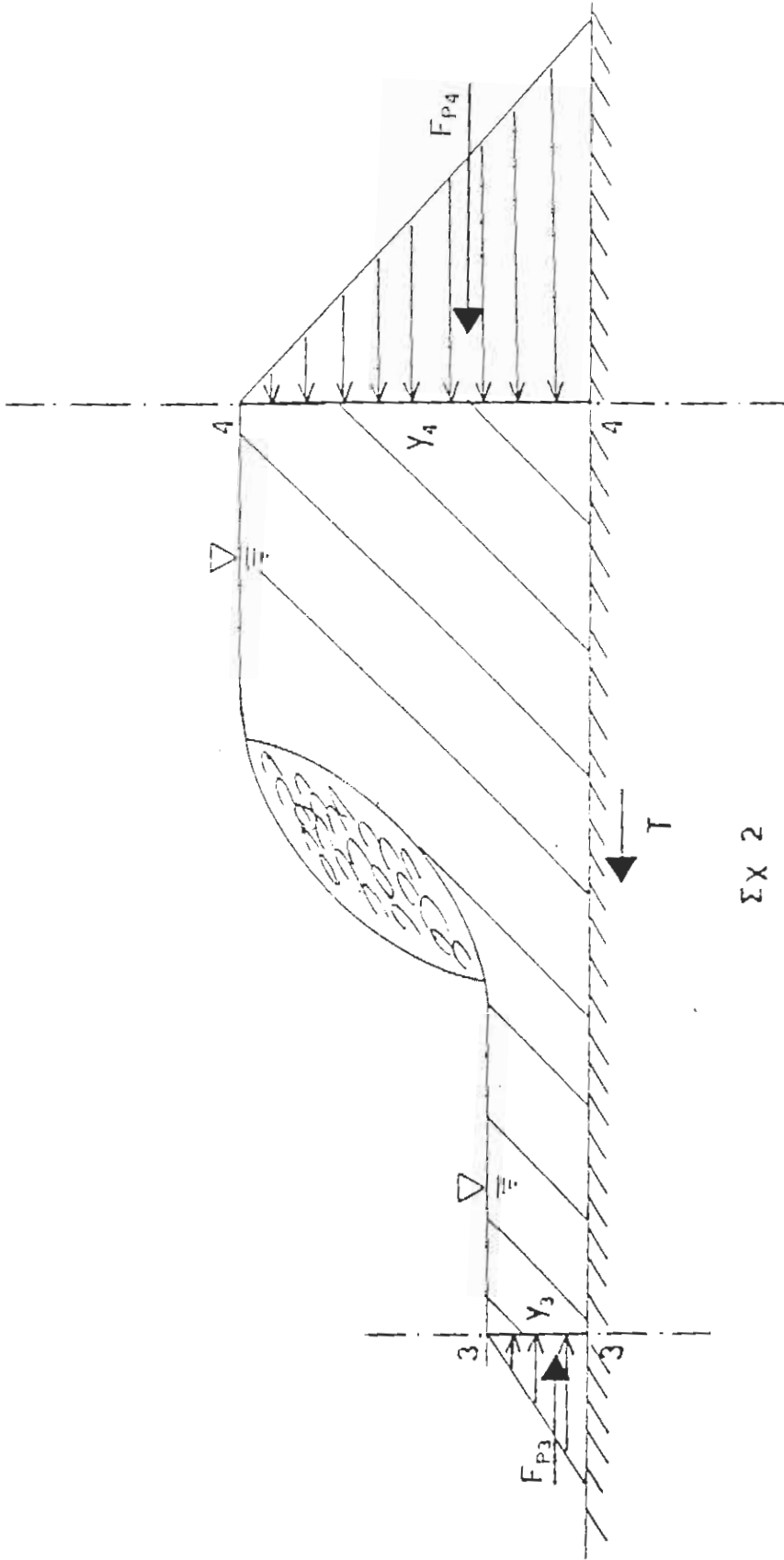
Αντικαθιστώντας τα  $K_3$  και  $K_4$  με τα ίσα τους από τον πίνακα III προκύπτει :

$$K_3 = F_{p3} + \rho Q V_3 = 11,08 \text{ N}$$

$$K_4 = F_{p4} + \rho Q V_4 = 11,43 \text{ N}$$

και συνεπώς

$$T = 0,35 \text{ N}$$



Σ X 2



και πιστοποιείται πράγματι το αμελητέο της άνω δυνάμεως.

Κατόπιν τούτου αγνοουμένης της δυνάμεως τριβής  $T$  και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 1.11 τις υδροστατικές δυνάμεις  $F_{p3}$ ,  $F_{p4}$  και τις ταχύτητες  $V_3$  και  $V_4$  κατά τις εξισώσεις 1.12 έως 1.15, προκύπτει κατόπιν καταλλήλων αλγεβρικών μετασχηματισμών η εξίσωση του λόγου των συζυγών βαθών  $\frac{y_4}{y_3}$  του υδραυλικού άλματος, όπως ονομάζονται τα βάθη αυτά πριν και μετά το υδραυλικό άλμα :

$$\frac{y_4}{y_3} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_3^2} - 1) \quad (1.18)$$

όπου

$$Fr_3^2 = \frac{V_3^2}{gy_3} \quad (1.19)$$

Η άνω εξίσωση μπορεί να ισχύσει και για το αντίστροφο του λόγου των συζυγών βαθών, δηλαδή για το  $\frac{y_3}{y_4}$  κατόπιν κυκλικής εναλλαγής των δεικτών 3 και 4.

Από τη μέτρηση του βάθους  $y_3$  και της αντιστοίχου ταχύτητας  $V_3$  προέκυψε :

$$Fr_3^2 = \frac{V_3^2}{gy_3} = 14,47 [-]$$

Συνεπώς κατά την εξίσωση 1.18 :

$$\frac{y_4}{y_3} = 4,9 \Leftrightarrow y_4 = 4,9 \cdot 20 = 98 \text{ mm}$$

Το βάθος  $y_4$  μετρήθηκε:

$$y_4 = 94 \text{ mm}$$

με ικανοποιητική προσέγγιση προς το άνω θεωρητικό βάθος.

Οι ειδικές ενέργειες στις θέσεις 3-3 και 4-4 υπολογίζονται ως εξής :

$$H_3 = y_3 + \frac{V_3^2}{2g} = 164,7 \text{ mm}$$

$$H_4 = y_4 + \frac{V_4^2}{2g} = 100,5 \text{ mm}$$

Οι αντίστοιχες τιμές των ενεργειών που μετρήθηκαν με τη βοήθεια του Pitot-σωλήνα είναι :

$$H_{p3} = 196 \text{ mm}$$

$$H_{p4} = 120 \text{ mm}$$

Συνεπώς η ενεργειακή απώλεια που προκλήθηκε από το υδραυλικό άλμα υπολογίζεται θεωρητικώς ως εξής :

$$\Delta H = H_3 - H_4 = 64,2 \text{ mm}$$

(βλ. Διάγραμμα II)

και πειραματικώς

$$\Delta H_p = 196 - 120 = 76 \text{ mm}$$

Η ενεργειακή απώλεια μπορεί επίσης να εκφραστεί και ως ρυθμός μεταβολής της ενέργειας. Επομένως χρησιμοποιώντας το  $\Delta H$  που βρέθηκε με τον θεωρητικό τρόπο έχουμε :

$$P = \rho Q \Delta H = 10^3 \cdot 6,74 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0642 = 4,24 \text{ W}$$

ενώ χρησιμοποιώντας το  $\Delta H_p$  που βρέθηκε με τον πειραματικό τρόπο έχουμε :

$$P_p = \rho Q \Delta H_p = 10^3 \cdot 6,74 \cdot 10^{-3} \cdot 0,076 = 5,02 \text{ W}$$

Συνεπώς η ενεργειακή απώλεια αντιπροσωπεύει το σχετικώς υψηλό ποσοστό του 38,9% ή 38,7% αντιστοίχως, της αρχικής ενέργειας.

## ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Συντελεστής παροχόμετρου  $C=7,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1/2}$

Χρόνος πειράματος	Στάθμη υδραργυρικού μανομέτρου			Παροχή $Q=C \cdot h^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$
	$h_1$ (mm)	$h_2$ (mm)	$h_3$ (mm)	
Αρχή	+6	-3	+9	$6,74 \cdot 10^{-3}$
Μέση	+6	-3	+9	$6,74 \cdot 10^{-3}$
Τέλος	+6	-3	+9	$6,74 \cdot 10^{-3}$
<b>Μέση Παροχή</b>				<b><math>6,74 \cdot 10^{-3}</math></b>

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ

Πιεσοκατανομή στη θυρίδα

Υψος πιεζομέτρων από πυθμένα $z$ (mm)	5	10	20	30	60	120
Στάθμες πιεζομέτρων $y$ (mm)	137	153	166	172	175	178
$P=\rho g(y-z)$ (N)	1,29	1,40	1,43	1,39	1,13	0,57

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ

Βάθη ροής και ενεργειακά ύψη

Επιφάνεια ελέγχου		1	2	3	4
Οριζόντια απόσταση	$l$ (m)	6,70	5,805	5,51	4,50
Υψος από πυθμένα	$y_\pi$ (mm)	0	0	0	0
Υψος σταθμήμετρου	$y_\sigma$ (mm)	204	18	22	94
Υψος	$y = (y_\sigma - y_\pi)$ (mm)	204	18	22	94
$H_p$	(mm)	210	209	196	120
$H$	(mm)	205,4	197,2	163,6	100,5
$M$	(N)	42	14,425	11,88	11,10
$F$	(N)	$F_0=28,96$		$T=0,35$	

## ΠΕΙΡΑΜΑ 2ο

### Ροή υπεράνω εκχειλιστή ευρείας στέψεως

Οι εκχειλιστές είναι γενικώς συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της παροχής καθώς επίσης και για τον έλεγχο της ροής στους ανοιχτούς αγωγούς. Τοποθετούνται καθέτως προς τη διεύθυνση της ροής με αποτέλεσμα να προκαλείται ανύψωση του νερού προς τα ανάντη προκειμένου να εξασφαλισθεί η διέλευσή του.

Ο χρησιμοποιούμενος εκχειλιστής είναι εκχειλιστής ολικής εκχειλίσεως, δηλαδή το νερό ρέει καθ' όλο το πλάτος της στέψεώς του και είναι εξοπλισμένος με 6 πιεζομετρικούς σωλήνες όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή.

Σκοπός του πειράματος είναι ο υπολογισμός της σταθεράς  $C_Q$  δια της οποίας θα είναι δυνατός ο υπολογισμός της παροχής  $Q$  στο εκάστοτε ενεργειακό ύψος  $H$  ή ύψος υπερχειλίσεως  $h$ .

Η χρησιμοποιούμενη εξίσωση παροχής προκύπτει από τη θεωρία του κρισίμου βήθους σε διάυλο ορθογωνικής διατομής. Συγκεκριμένα ισχύει:

$$H_{\min} = \frac{3}{2} y_{\kappa\rho} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} \quad (2.1)$$

Από την εξίσωση προκύπτει η θεωρητική παροχή  $Q$ :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} B H_{\min}^2 \quad (2.2)$$

Επειδή όμως δεν είναι γνωστή η ακριβής θέση στην οποία η ειδική ενέργεια υπεράνω του εκχειλιστή γίνεται ελάχιστη, (βλ. Διάγραμμα IV), το ενεργειακό ύψος  $H$  θα μετρηθεί λίγο πριν από τον εκχειλιστή, συγκεκριμένα σε απόσταση 3 έως 4h προς τα ανάντη αυτού, και θα υπολογισθεί κατά την εξίσωση:

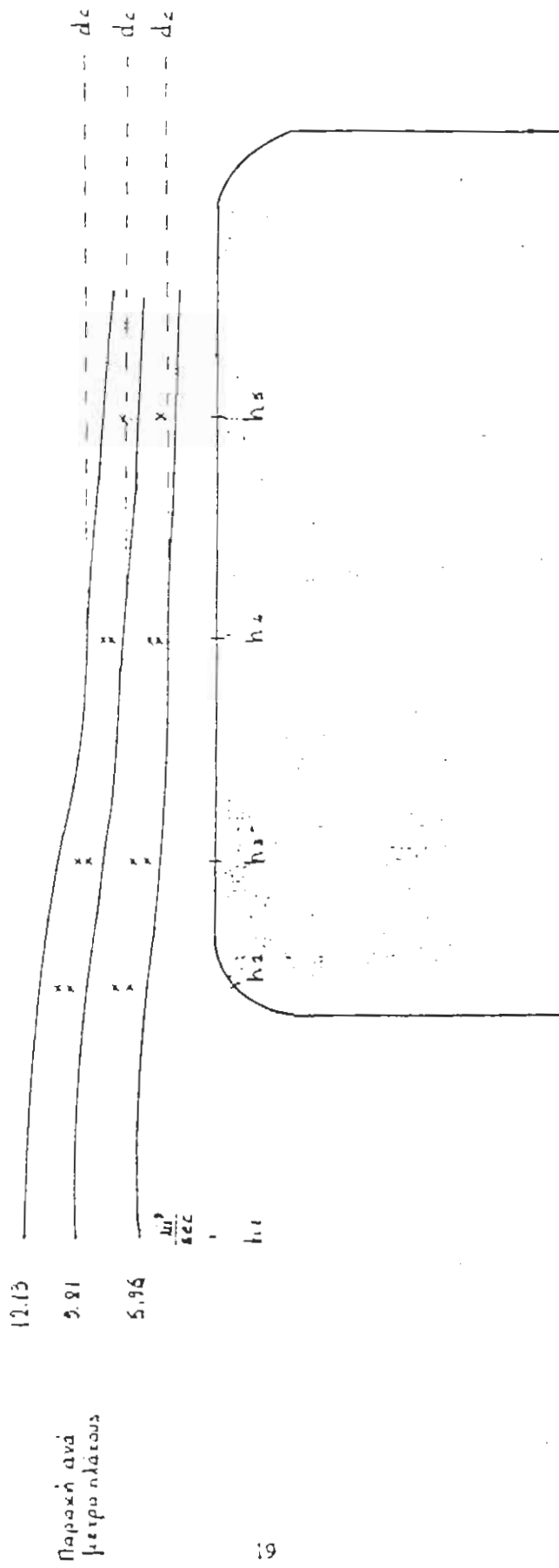
$$H_{\min} = y_{\kappa\rho} + \frac{V_{\kappa\rho}^2}{2g} \quad (2.3)$$

όπου το  $y_{\kappa\rho}$  είναι το ύψος του νερού λίγο πριν τον εκχειλιστή στην υποτιθέμενη δηλαδή θέση της ελάχιστης ειδικής ενέργειας και το  $\frac{V_{\kappa\rho}^2}{2g}$  θα υπολογισθεί από τον τύπο της πειραματικής παροχής:

$$Q_2 = 7,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{\delta h} \quad (2.4)$$

και τη σχέση:  $V = \frac{Q}{A}$

Διαγράμμα κατατομών επιφανείας νερού (Διαγρ. IV)



όπου  $A$  το εμβαδόν της υγράς διατομής στη θέση του μετρομένου ύψους εκχειλίσεως:

$$A = Bh_1$$

Προς αντιμετώπιση σχετικών ανακρίβειών και εξιδανικεύσεων η εξίσωση (2.2) θα διευρυνθεί με έναν συντελεστή  $C_Q$ , δηλαδή θα είναι:

$$Q_{\pi\rho} = C_Q \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g} \cdot B \cdot H_{\min}^{\frac{3}{2}} \quad (2.5)$$

Κατά συνέπεια ο υπολογισμός του τελικού συντελεστή παροχής  $C$  του εκχειλιστή ανάγεται στον υπολογισμό του γινομένου  $C_Q \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g} \cdot B$ , δηλαδή θα είναι:

$$C = C_Q \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g} \cdot B \quad (2.6)$$

και η τελική εξίσωση της παροχής του εκχειλιστού είναι:

$$Q_{\pi\rho} = C \cdot H_{\min}^{\frac{3}{2}} \quad (2.7)$$

Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί που έλαβαν χώρα καταχωρήθηκαν στον πίνακα IV.

Λογαριθμίζοντας την εξίσωση (2.7) προκύπτει:

$$\log Q_{\pi\rho} = \log C + \frac{3}{2} \log H \quad (2.8)$$

Από την άνω εξίσωση προκύπτει ότι η καμπύλη  $Q = f(h)$ , (βλ. Διάγραμμα V), σε γραφική απεικόνιση με χρησιμοποίηση λογαριθμικών αξόνων, δηλαδή για μεν τον άξονα των τετμημένων τον  $\log Q$  αντί του  $Q$ , για δε τον άξονα των τεταγμένων τον  $\log H$  αντί του  $H$ , θα μετατραπεί σε ευθεία κλίσεως  $\frac{1}{1,5}$ , η οποία θα τμήσει τον άξονα του  $\log Q$  σε απόσταση από το μηδέν ίση με  $C$ . Ο γραφικός αυτός τρόπος υπολογισμός του τελικού συντελεστή  $C$  εικονίζεται στα διαγράμματα VI και VII από τα οποία τελικώς προέκυψε  $C=0,316$ .

Η τιμή του ενδιαμέσου συντελεστή  $C_Q$  προκύπτει συνεπώς ίση με:

$$C_Q = \frac{C}{\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} B \sqrt{g}} = \frac{0,316}{0,314} \approx 0,93$$

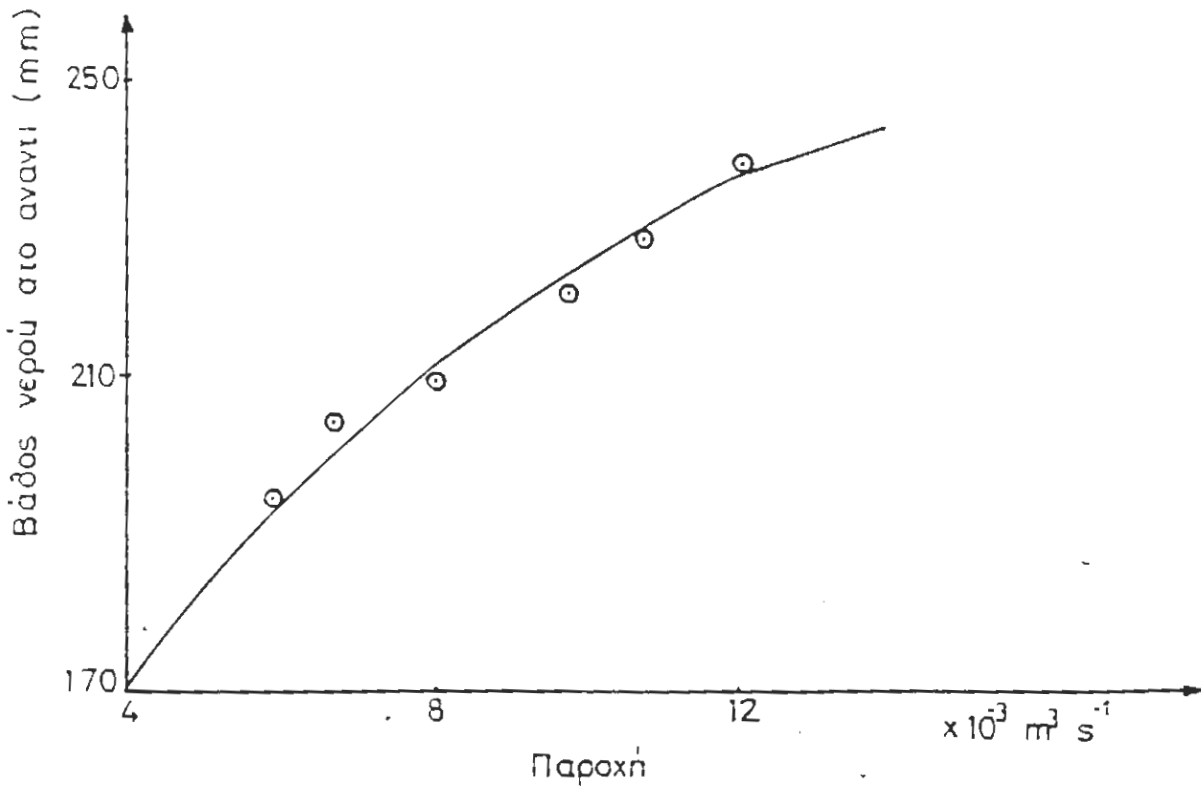
### ΠΙΝΑΚΑΣ IV

Υψη νερού						Υψη στήλης Hg			Q	γκρ	h	H <sub>min</sub>
h <sub>1</sub> mm	h <sub>2</sub> mm	h <sub>3</sub> mm	h <sub>4</sub> mm	h <sub>5</sub> mm	h <sub>6</sub> mm	h <sub>1</sub> cm	h <sub>2</sub> cm	δh cm	10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s	mm	m	m
196	194	183	174	168	158	+0.5	-0.2	0.7	5.96	44.9	0.0705	0.072
206	194	190	184	176	164	+0.6	-0.3	0.9	6.75	48.7	0.0830	0.084
212	194	194	190	182	170	+0.8	-0.5	1.3	8.12	55.1	0.0905	0.092
223	214	202	198	190	177	+1.1	-0.8	1.92	9.81	62.6	0.101	0.103
231	220	206	202	198	184	+1.3	-1.0	2.3	10.8	66.7	0.109	0.112
240	234	214	212	202	188	+1.6	-1.3	2.9	12.13	72.1	0.117	0.120

Υψος εκχειλιστή : 150mm

Πλάτος καναλιού : B=200mm

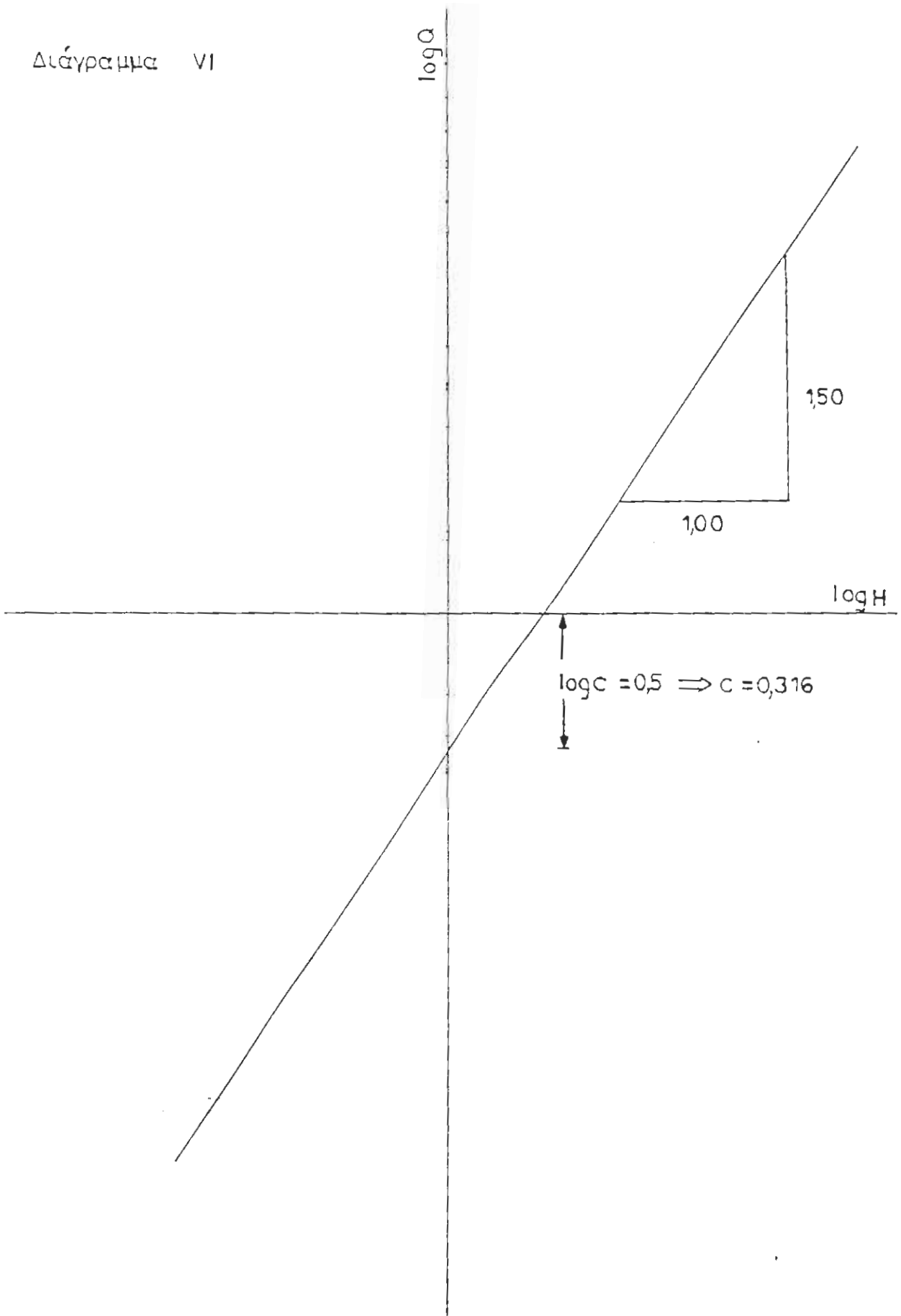
Διάγραμμα V



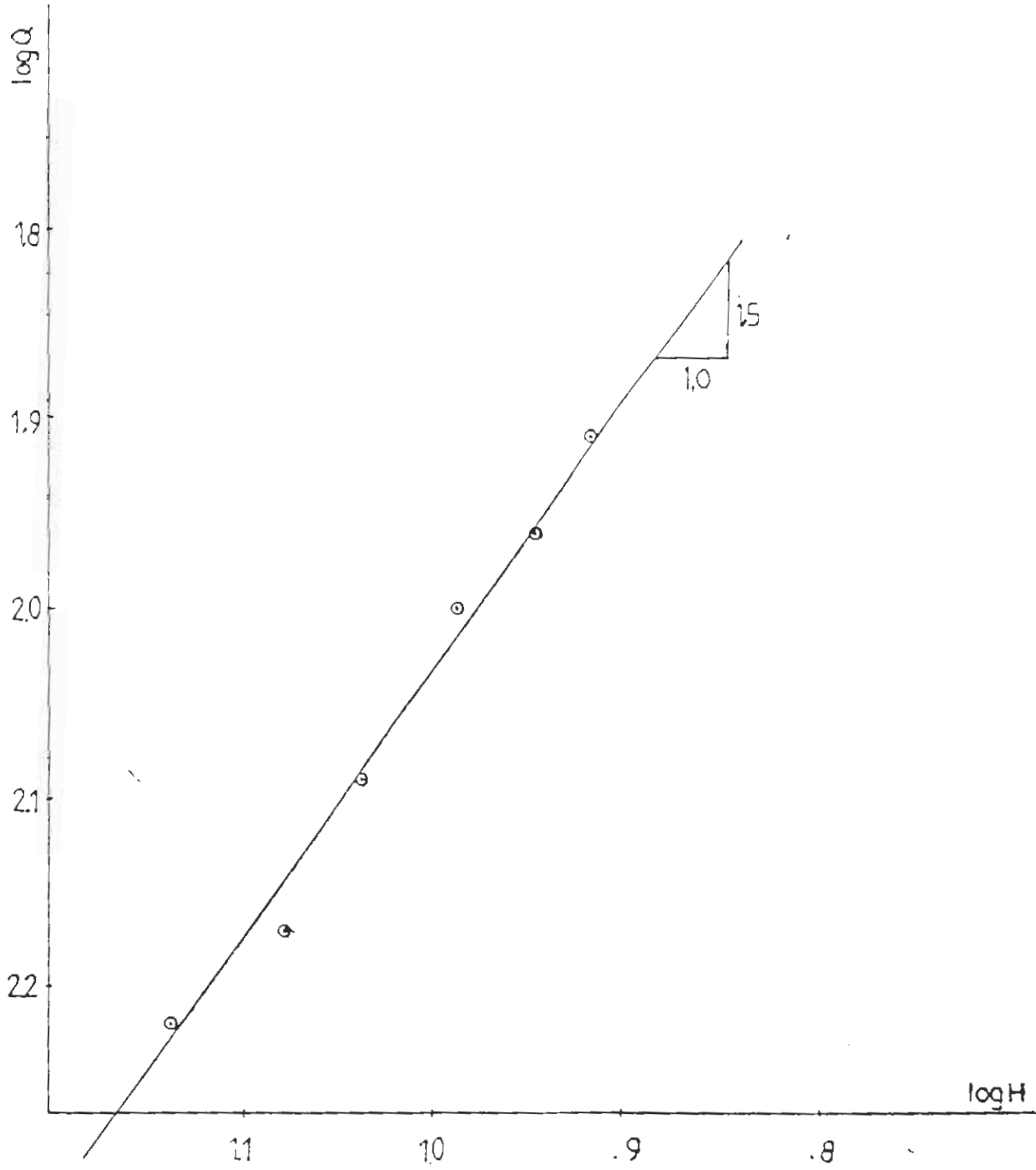
και τούτο καταδεικνύει πως δεν υπήρξαν σημαντικές αποκλίσεις από την θεωρία. Πάντως για τον υπολογισμό των παροχών θα χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.7) με συντελεστή  $C=0,316$ .



Διάγραμμα VI



Διάγραμμα VII



## Αδιάστατο Ενεργοδιάγραμμα

Από τις μετρήσεις του βάθους ροής που έγιναν στο 1ο πείραμα πριν και μετά τη θυρίδα καθώς επίσης πριν και μετά το υδραυλικό άλμα, υπολογίζονται τα αντίστοιχα ενεργειακά ύψη  $H_1, H_2, H_3, H_4$ . Τόσο τα βάθη ροής όσο και τα ενεργειακά ύψη, ανάγονται στο κρίσιμο βάθος  $y_{κρ}$  που αντιστοιχεί στην παροχή  $Q = 6,74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$  :

$$y_{κρ} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} = 48,7 \text{ mm}$$

όπου  $B = 200 \text{ mm}$ .

Οι άνω μετρήσεις και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί καταχωρήθηκαν στον Πίνακα V.

### ΠΙΝΑΚΑΣ V

$Q = 6,74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$

$y_{κρ} = 48,7 \text{ mm}$

		1	2	3	4
$y$	(mm)	204	17,5	20	94
$H$	(mm)	205,4	206,5	167,4	100,5
$y/y_{κρ}$	[-]	4,19	0,36	0,41	1,93
$H/y_{κρ}$	[-]	4,22	4,24	3,38	2,06

Ομοίως από το 2ο Πείραμα υπολογίζονται τα ενεργειακά ύψη τα οποία αντιστοιχούν στα σημεία 5 και 6 στις παροχές  $Q = 5,96 \cdot 10^{-3}, 9,81 \cdot 10^{-3}, 12,13 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{cm]}$ , τα οποία επίσης ανάγονται στα αντίστοιχα κρίσιμα βάθη. Οι άνω μετρήσεις καταχωρήθηκαν στους Πίνακες VI, VII, VIII.

### ΠΙΝΑΚΑΣ VI

$Q = 5,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$

$y_{κρ} = 44,9 \text{ mm}$

		5	6
$y$	(mm)	168	158
$H$	(mm)	169,6	159,8
$y/y_{κρ}$	[-]	3,74	3,52
$H/y_{κρ}$	[-]	3,77	3,56

### ΠΙΝΑΚΑΣ VII

$$Q = 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$y_{\text{κρ}} = 62,6 \text{ mm}$$

		5	6
y	(mm)	190	177
H	(mm)	193,4	180,9
$y/y_{\text{κρ}}$	[-]	3,035	2,83
$H/y_{\text{κρ}}$	[-]	4,93	4,34

### ΠΙΝΑΚΑΣ VIII

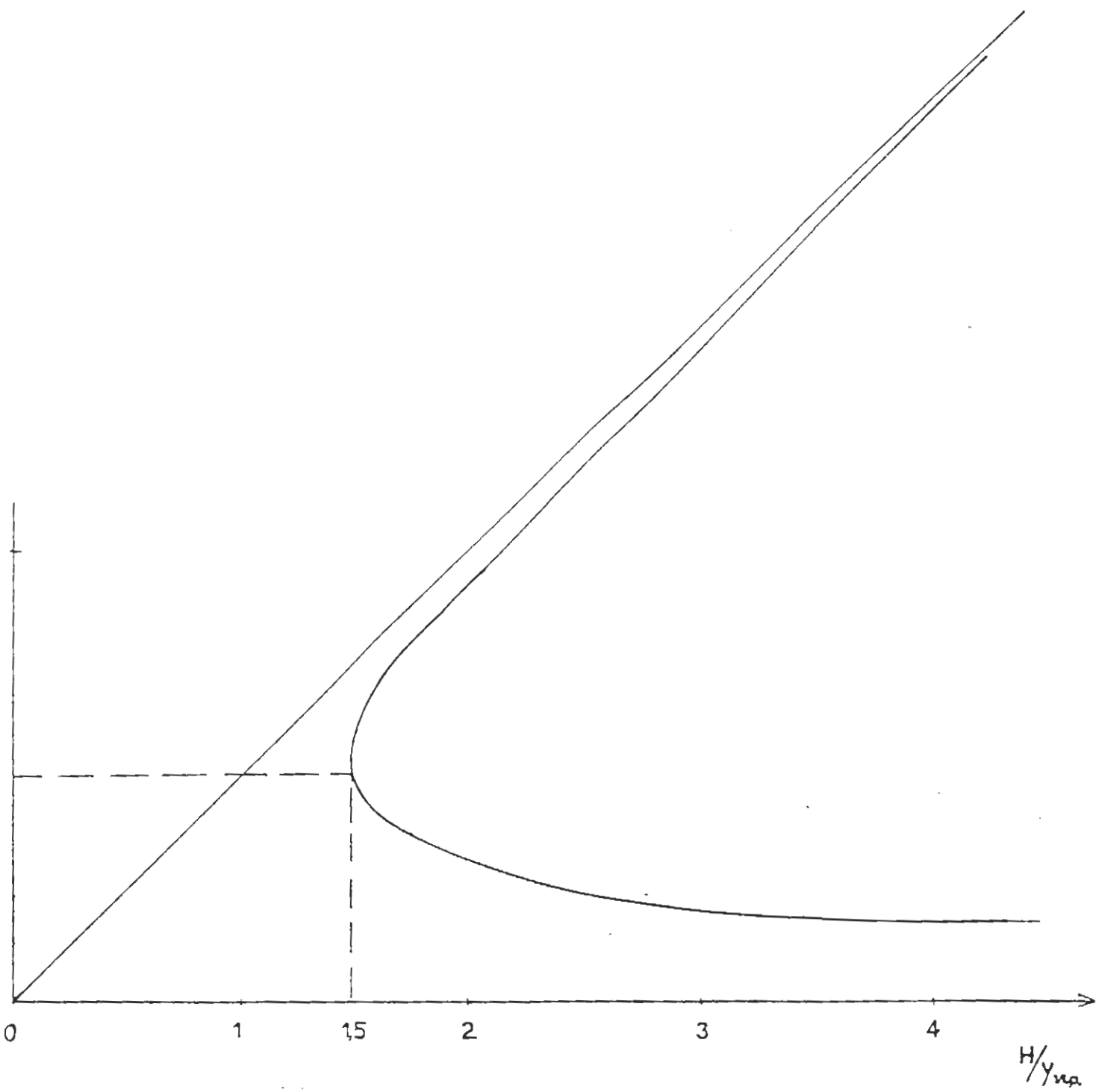
$$Q = 12,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$y_{\text{κρ}} = 72,1 \text{ mm}$$

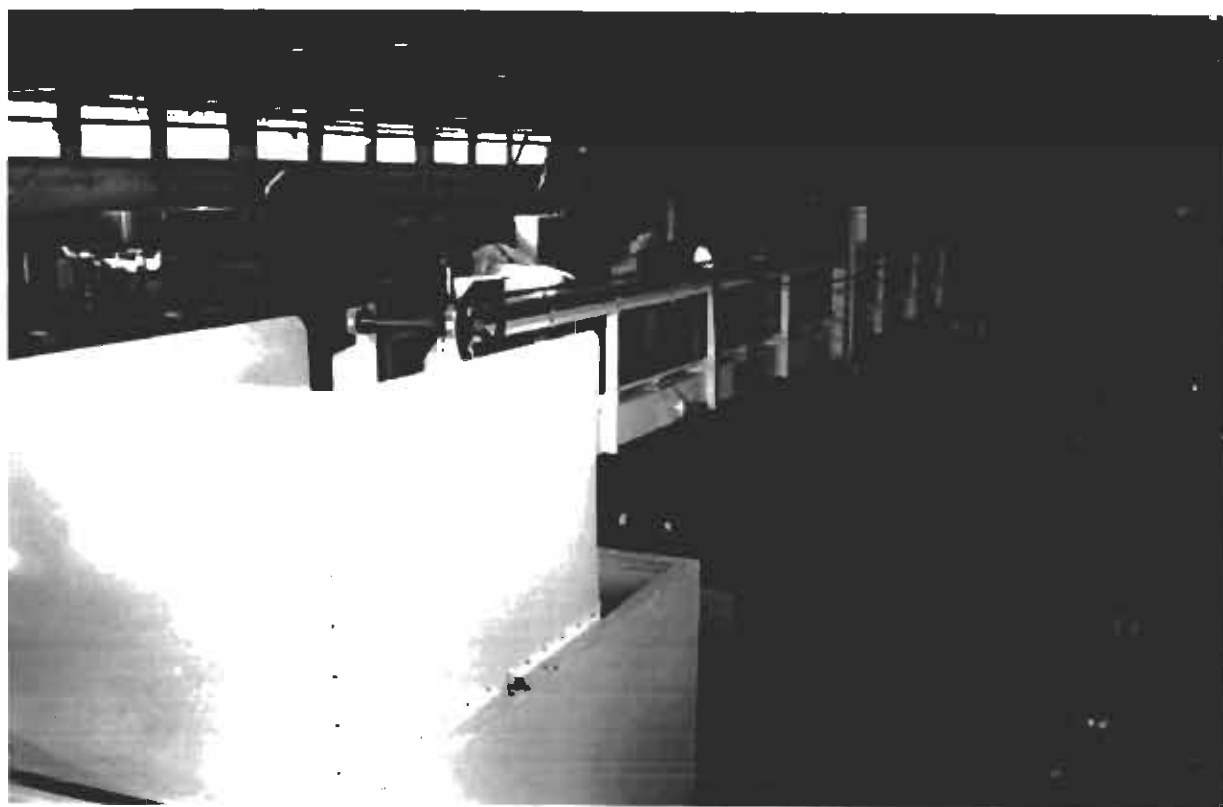
		5	6
y	(mm)	202	188
H	(mm)	208,64	193,3
$y/y_{\text{κρ}}$	[-]	2,8	2,61
$H/y_{\text{κρ}}$	[-]	2,89	2,68

Οι ανηγμένες τιμές τόσο των βαθών ροής όσο και των ενεργειακών υψών στο κρίσιμο βάθος, παρέχουν επαρκή σημεία για την αδιάστατη γραφική παράσταση (Διάγραμμα VIII)

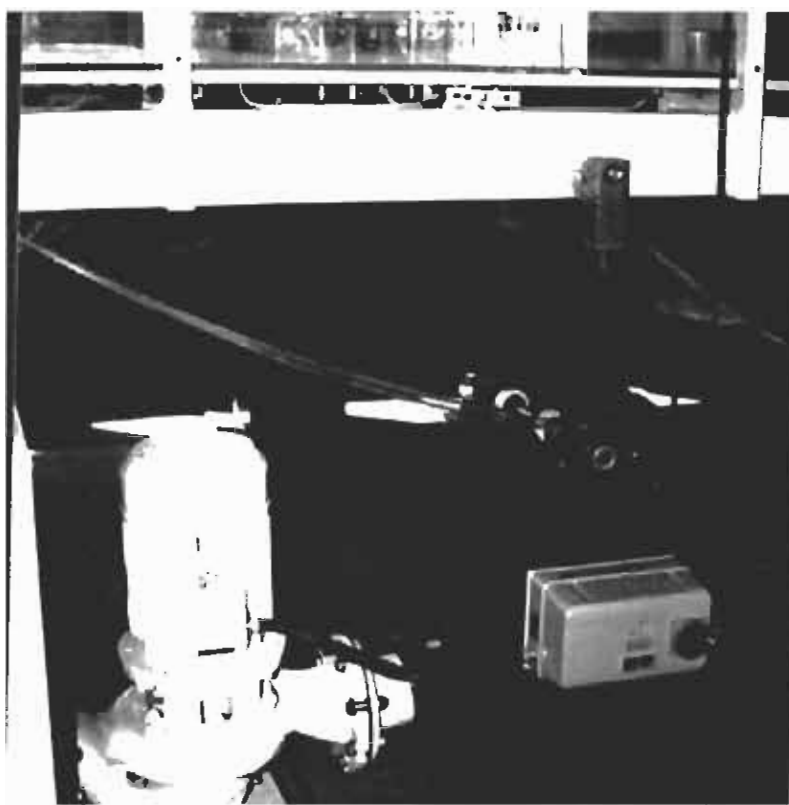
$$y/y_{\text{κρ}} = f(H/y_{\text{κρ}})$$



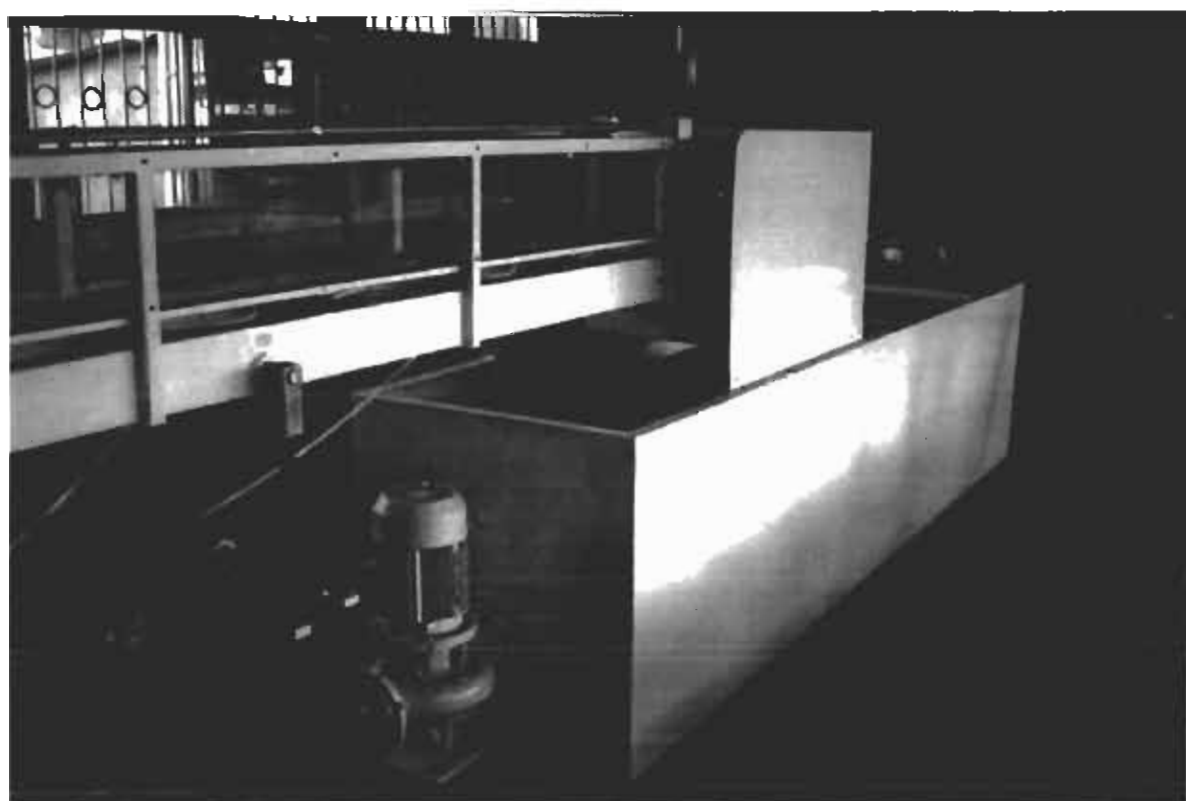
Διάγραμμα VIII



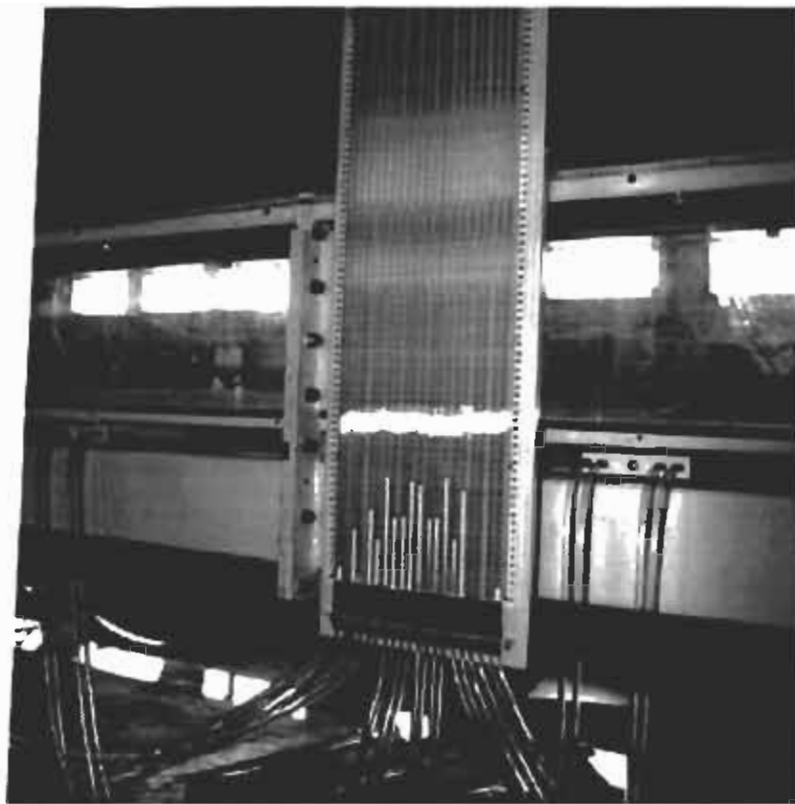
## ΔΙΑΥΛΟΣ



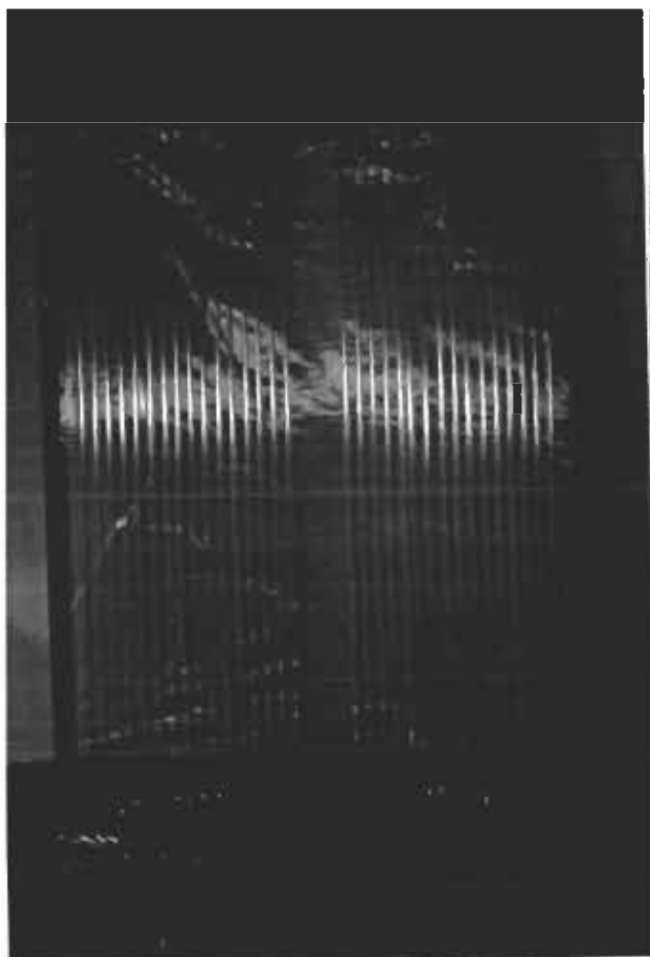
**ΑΝΤΛΙΑ**



**ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ**



**ΠΟΛΥΜΑΝΟΜΕΤΡΟ Α**

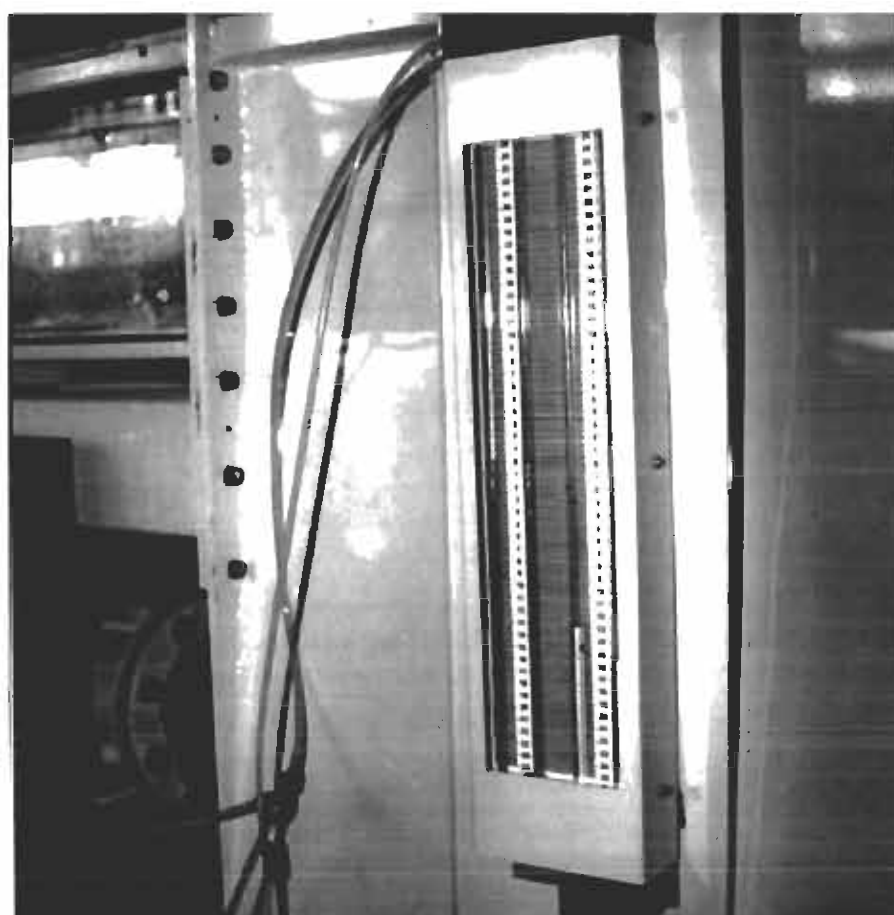


**ΠΟΛΥΜΑΝΟΜΕΤΡΟ Β**



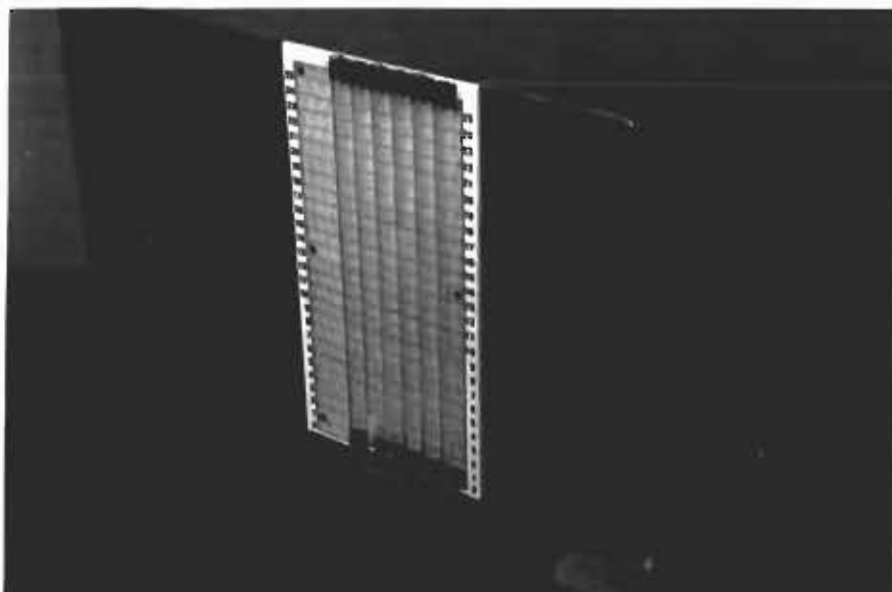


**ΣΤΑΘΜΗΜΕΤΡΟ / ΡΙΤΟΤ-ΣΩΛΗΝΑΣ**

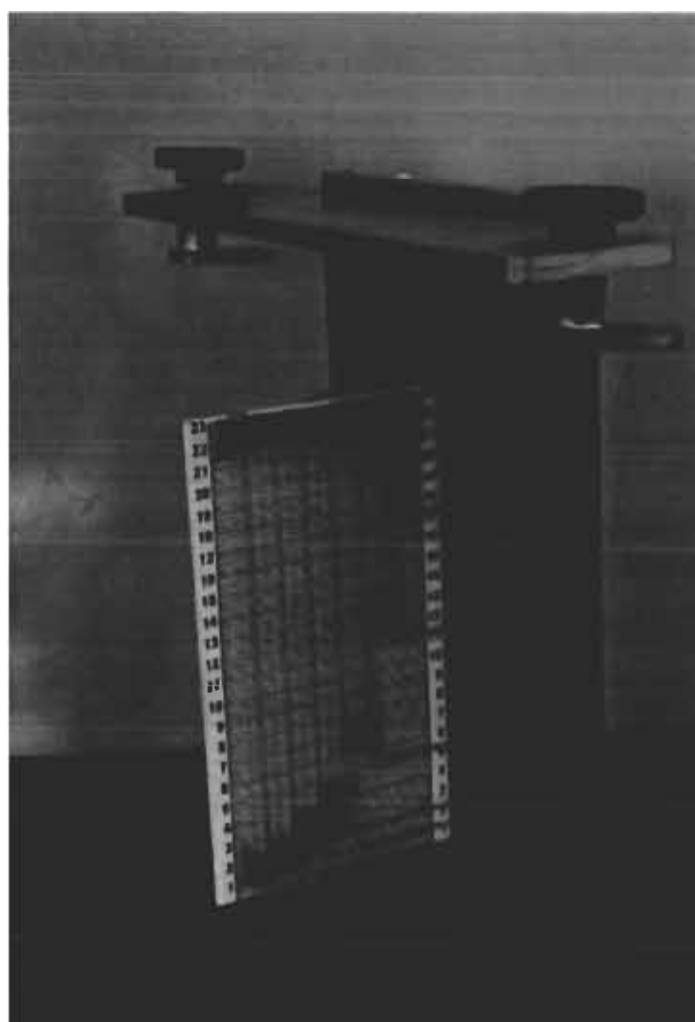


**ΜΑΝΟΜΕΤΡΑ**

**ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ-ΝΕΡΟΥ  
ΝΕΡΟΥ-ΑΕΡΑ**



**ΕΚΧΕΙΛΙΣΤΗΣ ΕΥΡΕΙΑΣ ΣΤΕΨΕΩΣ**



**ΘΥΡΙΑ**