



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική διερεύνηση ροής σε ανοικτό αγωγό με μεγάλα
στοιχεία τραχύτητας



ΚΩΣΤΙΔΟΥ ΕΛΕΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανατέθηκε από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος στο πλαίσιο του προβλεπόμενου κύκλου σπουδών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη εναλλακτικών προτάσεων για την αντιμετώπιση της διάβρωσης ανοικτών αγωγών, που προκαλείται από υψηλές ταχύτητες ροής.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν και μου συμπαραστάθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Γ. Χριστοδούλου για την ανάθεση της εργασίας, για την καθοδήγηση που μου παρείχε και για το ευχάριστο κλίμα κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης, ευχαριστώ τους τεχνικούς του εργαστηρίου Μανώλη Λασηθιωτάκη και Γιάννη Πατσέλη για τη διεκπεραίωση του κατασκευαστικού μέρους του πειράματος.

Τέλος, ευχαριστώ του φίλους και συμφοιτητές μου Πέτρο Βασιλάκο, Ζέφη Μπαρίτα, Μαρίλεια Ντόκου και Κώστα Χατζόγλου, που με βοήθησαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Η ροή στους ανοικτούς αγωγούς.....	8
1.2 Η ανάγκη για καταστροφή της κινητικής ενέργειας	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	13
2.1 Γενικά.....	13
2.2 J. B. Herbich – S. Shulits	13
2.3 W. W. Sayre – M. L. Albertson	15
2.4 Π. Βασιλάκος	17
2.5 Γ. Χριστοδούλου – Τ. Παπαθανασιάδης	18
2.6 J. Järvelä	19
2.7 N. Kouwen – T. E. Unny	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	22
3.1 Η πειραματική συσκευή.....	22
3.2 Σειρές μετρήσεων	24
3.2.1 Τύποι και διατάξεις εμποδίων	24
3.3 Διαδικασία εκτέλεσης πειραμάτων	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	33
4.1 Καμπύλες ελεύθερης επιφάνειας	33

4.2	Παρατηρήσεις	44
4.2.1	Γενικά χαρακτηριστικά της ροής	44
4.2.2	Ομοιόμορφα βάθη	47
4.2.3	Μετρήσεις παρειάς και μέσου της διατομής	47
4.2.4	Εύρος παρατηρήσεων	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

5.1	Ο τύπος του Manning	49
5.1.1	Εφαρμογή του τύπου του Manning στα πειραματικά δεδομένα	50
5.2	Υπολογισμός της τραχύτητας	51
5.2.1	Ελάσματα με ημισφαίρια	51
5.2.2	Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα	51
5.2.3	Κύλινδροι	52
5.2.4	Πυκνή διάταξη ράβδων	52
5.2.5	Αραιή διάταξη ράβδων	53
5.3	Διαγράμματα η συναρτήσεως της παροχής	53
5.3.1	Παρατηρήσεις	57
5.3.2	Σύγκριση πυκνών και αραιών διατάξεων	58
5.3.3	Αναγωγή της τραχύτητας σε κλίμακα πρωτοτύπου	59
5.4	Αδιαστατοποίηση των υπό μελέτη παραμέτρων	62
5.4.1	Εκτίμηση της επιρροής των παραμέτρων	72
5.4.2	Ο συντελεστής τριβής f	74

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Πίνακες πειραματικών μετρήσεων και επεξεργασίας αποτελεσμάτων	80
---	----

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης βυθισμένων εμποδίων διαφορετικού σχήματος στη ροή ανοικτού αγωγού υπερκρίσιμης κλίσης. Ειδικότερα, διερευνάται ποια είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τη ροή οδηγώντας σε μεγαλύτερο βάθος ροής και τραχύτητα.

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε εργαστηριακή συσκευή στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η συσκευή απαρτίζεται από μία δεξαμενή τροφοδοσίας και έναν ορθογωνικό αγωγό πλάτους 25 cm. Ο αγωγός αποτελεί ομοίωμα τμήματος του ποταμού Διακονιάρη στην Πάτρα και συνίσταται από τρία τμήματα, εκ των οποίων το ανάντη και το κατάντη τμήμα έχουν κλίση 0.05 και το ενδιάμεσο, μήκους 355 cm, έχει κλίση 0.165. Στο μεσαίο τμήμα του αγωγού, τοποθετήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι εμποδίων-στοιχείων τραχύτητας: ελάσματα με ημισφαίρια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, κύλινδροι και άκαμπτες ράβδοι. Οι ράβδοι τοποθετήθηκαν σε δύο εναλλακτικές διατάξεις. Κάθε τύπος εμποδίου μελετήθηκε για παροχές 15, 30, 45 και 52.5 l/sec.

Για κάθε πειραματική διάταξη, ελήφθησαν μετρήσεις με τη χρήση σταδίας των βαθών ροής στο ενδιάμεσο τμήμα του αγωγού. Τα βάθη ροής μετρήθηκαν σε δύο θέσεις της υδάτινης διατομής, στην παρειά και στο μέσον. Από αυτές τις μετρήσεις προέκυψε το προφίλ της ροής της κάθε διάταξης, το οποίο απεικονίζει το διάγραμμα θέσης και βάθους ροής. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε η θέση από την οποία και μετά η ροή του υπό μελέτη τμήματος του αγωγού θεωρείται προσεγγιστικά ομοιόμορφη και υπολογίστηκε το μέσο βάθος ροής.

Κατόπιν, με υδραυλικούς υπολογισμούς προσδιορίστηκε ο συντελεστής τραχύτητας n του Manning για κάθε πειραματική διάταξη. Καταρτίστηκαν διαγράμματα $n(Q)$ (τραχύτητας – παροχής), στα οποία αποτυπώνεται η αντίσταση στη ροή των εμποδίων και η συμπεριφορά τους σε σχέση με την αύξηση της παροχής. Στα διαγράμματα αυτά συμπεριλήφθησαν και δεδομένα από τη διπλωματική του Π. Βασιλάκου, ο οποίος πραγματοποίησε ανάλογα πειράματα στον αγωγό με διαφορετικά εμπόδια (ελάσματα, οδοντώσεις, κύβοι, ημισφαίρια).

Από τα διαγράμματα αυτά εκτιμήθηκε ότι η τοποθέτηση εμποδίων συμβάλλει στην αύξηση του βάθους ροής και της τραχύτητας.

Ακολούθησε η αναγωγή των βαθών ροής σε κλίμακα του πρωτότυπου αγωγού.

Τέλος, μορφώθηκαν διαγράμματα με αδιάστατες παραμέτρους, οι οποίες εμπεριέχουν την τραχύτητα n , το συντελεστή τριβής f , την κλίση του αγωγού, την ανά μονάδα πλάτους παροχή και τα γεωμετρικά μεγέθη των εμποδίων και των διατάξεων. Συμπεριλήφθησαν δεδομένα και από άλλες εργασίες (Βασιλάκος, Herbach–Shulits, Χριστοδούλου-Παπαθανασιάδης). Τα συμπεράσματα της έρευνας συνοψίζονται ως εξής:

1. Προέκυψε ότι το ύψος και η επιφάνεια προβολής των εμποδίων στο μέτωπο της ροής συνδέονται με την τραχύτητα με ανάλογη σχέση, ενώ η επιφάνεια κατά μήκος της ροής με αντιστρόφως ανάλογη σχέση.
2. Επίσης, όσο πιο υδροδυναμικό είναι το σχήμα των εμποδίων, τόσο μικρότερη είναι η τραχύτητα του αγωγού.
3. Η ελάττωση των αποστάσεων μεταξύ των εμποδίων αυξάνει το συντελεστή Manning. Είναι πιθανό, ωστόσο, η ελάττωση αυτή πέραν κάποιας τιμής να μην οδηγεί σε μεγαλύτερο n .
4. Μεγαλύτερη κλίση του αγωγού στην υποκρίσιμη ροή οδηγεί σε αύξηση του n . Προτείνεται η περαιτέρω έρευνα επί της συγκεκριμένης συμπεριφοράς και στην υπερκρίσιμη ροή.
5. Ο συντελεστής τριβών f των Darcy-Weisbach συνδέεται με λογαριθμική σχέση με το λόγο y_c/h (κρίσιμο βάθος/ύψος εμποδίου) για κάθε τύπο εμποδίου.

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to study the effect of submerged elements of various forms on the flow of open channel of supercritical slope. Particularly, it is determined which factor mainly influences the flow, resulting in higher depth of flow and roughness.

The experiments were conducted in the Laboratory of Applied Hydraulics of the National Technical University of Athens. The experimental set-up consists of a supply tank and a 25 cm wide rectangular flume. The flume is the model of part of Diakoniaris River in Patra and is divided in three parts: the upstream and downstream parts have a slope of 0.05 and the intermediate, which is 355 cm long, has a slope of 0.165. In the intermediate part of the flume, four different types of blocks-roughness elements were placed (blades with hemispheres, cuboids, cylinders and stiff bars). The bars were placed in two different arrangements. These configurations were tested for discharges 15, 30, 45 and 52.5 l/sec.

In each arrangement, measurements of the depth of flow were taken, in the intermediate part of the flume, using a graded ruler. These depths were measured in two positions of the cross-section, one in the middle and one in the side. The flow profile, which is portrayed by flow depth versus position diagrams, was derived based on these measurements. The position downstream of which the flow is considered approximately uniform was determined using the aforementioned diagrams and the average depth of flow was calculated.

Afterwards, by hydraulic calculations the Manning resistance coefficient n was found for each one of the arrangements. The $n(Q)$ diagrams were plotted, that depict the resistance in flow and the behaviour of the blocks in relation to the increase of discharge. Data from the thesis of P. Vassilakos, who conducted similar experiments in the flume with different roughness elements (blades, baffle blocks, cubes, hemispheres), were also taken into consideration.

Studying the diagrams it was deduced that the placement of the blocks contributes to the increase of the flow depth and roughness.

Furthermore, the flow depth measurements were reduced in prototype flume scale.

Concluding, diagrams with dimensionless parameters were plotted. These parameters contain roughness n , resistance coefficient f , flume's slope, discharge q and the geometric characteristics of the blocks and arrangements. Data from other studies were also included (Vassilakos, Herbich-Shulits, Christodoulou-Papathanasiadis). The conclusions of the research are summarized as following:

1. The height and the projected surface of the blocks vertically to the flow are relative to roughness, while the surface along the flow is inversely relative.
2. The more hydrodynamic the shape of the blocks is, the smaller the roughness of the flume.
3. Decreasing the space between the blocks increases the Manning coefficient. It is possible though, decreasing it further than a value that will not result in higher n .
4. Steeper flume slope in subcritical flow results in higher n . It is suggested that a research on this effect for supercritical flow would be beneficial.
5. Darcy-Weisbach resistance coefficient f is related through a logarithmic function to the y_c/h ratio (critical depth/block height) for each type of block.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ροή στους ανοιχτούς αγωγούς

Η ροή στους ανοιχτούς αγωγούς διακρίνεται σε υπερκρίσιμη και υποκρίσιμη. Η παράμετρος που διακρίνει τη ροή σύμφωνα με αυτό το χαρακτηριστικό είναι ο αριθμός Froude, ο οποίος ουσιαστικά εκφράζει την επίδραση της βαρύτητας στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια:

$$Fr = \frac{\text{δυνάμεις αδράνειας}}{\text{δυνάμεις βαρύτητας}} = \frac{V}{\sqrt{g t_{\mu}}}$$

όπου, V : η μέση ταχύτητα χαρακτηριστικής διατομής

t_{μ} : χαρακτηριστικό μήκος(υδραυλικό βάθος) = E/B

Εάν $Fr < 1$ η ροή είναι υποκρίσιμη. Η δύναμη της βαρύτητας είναι σημαντική σε σχέση με τη δύναμη της αδράνειας. Η ροή συναντάται σε μικρές συνήθως κλίσεις και ταχύτητες και καλείται και ήρεμη ή ποτάμια, καθώς ο τύπος αυτός της ροής παρατηρείται στα χαμηλά τμήματα των ποταμών.

Εάν $Fr > 1$ η ροή είναι υπερκρίσιμη. Στην περίπτωση αυτή, οι δυνάμεις αδράνειας κυριαρχούν και η ροή χαρακτηρίζεται από μεγάλες κλίσεις και ταχύτητες. Η ροή καλείται και ταχεία ή χειμαρρώδης, επειδή παρατηρείται σε ρέματα με απότομη κατά μήκος κλίση, τους χειμάρρους.



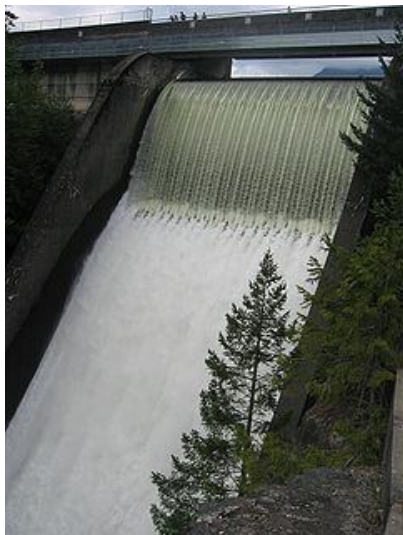
Εικόνα 1.1. Υπερκρίσιμη ροή.

(πηγή: www.flickr.com)

1.2 Η ανάγκη για καταστροφή της κινητικής ενέργειας

Όπως προκύπτει από παραπάνω, σε αγωγούς μεγάλης κλίσης, φυσικούς ή τεχνητούς, αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες ροής με αποτέλεσμα την ύπαρξη του κινδύνου διάβρωσης κατά μήκος του αγωγού.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί, επίσης, και η περίπτωση του πόδα μεγάλων υδραυλικών κατασκευών, όπως υπερχειλιστών φραγμάτων ή θυροφραγμάτων, όπου η ροή είναι υπερκρίσιμη και είναι επιθυμητή η μη συνέχιση της ροής με μεγάλες ταχύτητες κατόντη.



Εικόνα 1.2. Υπερκρίσιμη ροή κατόντη υπερχειλιστή.

(πηγή: www.answers.com)



Εικόνα 1.3. Υδραυλικό άλμα ανάντη υπερχειλιστή.

(πηγή: www.flickr.com)

Επομένως, η καταστροφή της μηχανικής ενέργειας του νερού, είτε αυτή πραγματοποιείται σταδιακά είτε κατά διαστήματα, καθίσταται συχνά απαραίτητη.

Κατά κανόνα, στον πόδα υδραυλικών κατασκευών, η ανάλωση της πλεονάζουσας κινητικής ενέργειας της ροής σε θερμότητα πραγματοποιείται ελεγχόμενα μέσω υδραυλικού άλματος σε ειδικά διαμορφωμένες κατασκευές από σκυρόδεμα, τις

λεκάνες ηρεμίσσεως. Σε περιπτώσεις, ωστόσο, αγωγών σε επικλινή εδάφη, έχουν κατά καιρό εφαρμοστεί και εναλλακτικές μέθοδοι, όπως είναι οι διαδοχικοί αναβαθμοί, οι βαθμιδωτές κατασκευές, η παρεμβολή σειράς εμποδίων ή η τοποθέτηση βλάστησης στον πυθμένα, καθώς και η αύξηση της τραχύτητας των ορίων με λιθορριπές. Ειδικά όταν πρόκειται για αγωγούς που διέρχονται μέσα από αστικές περιοχές, η σταδιακή καταστροφή της ενέργειας αποτελεί μία μάλλον πλεονεκτικότερη τεχνικοοικονομικά εναλλακτική έναντι της λεκάνης ηρεμίσσεως.



Εικόνα 1.4. Ανάλωση ενέργειας μέσα από βλάστηση.
(πηγή: [picasaweb.google.com](https://www.picasaweb.google.com))

Η παρούσα, λοιπόν, εργασία ασχολείται με την πειραματική διερεύνηση της επίδρασης εναλλακτικών διατάξεων στοιχείων τραχύτητας στη ροή αγωγού υπερκρίσιμης κλίσης. Ειδικότερα εστιάζει στη μελέτη-εντοπισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν περισσότερο την αύξηση του βάθους ροής και κατά συνέπεια και την τραχύτητα.

Η έρευνα αυτή ξεκίνησε με αφορμή ένα τεχνικό έργο στο πλαίσιο της αντιπλημμυρικής προστασίας του ποταμού Διακονιάρη στην Πάτρα, όπου προτάθηκε η κατασκευή ενός επικλινούς τμήματος του αγωγού με στόχο την

καταστροφή της ενέργειας, αντί της συμβατικής λύσης του άλματος σε λεκάνη ηρεμίσσεως. Το υπό μελέτη τμήμα του αγωγού έχει μήκος 56 m, ορθογωνική διατομή πλάτους 4 m και κλίση 16.5%. Στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ κατασκευάστηκε ομοίωμα του υπόψη τμήματος του αγωγού, υπό κλίμακα 1:16, στο οποίο διεξήχθησαν τα πειράματα της εργασίας.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γενικά

Η ροή σε αγωγούς με μεγάλα στοιχεία τραχύτητας έχει τύχει περιορισμένης διερεύνησης στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι προηγούμενες έρευνες έχουν κατά κύριο λόγο ασχοληθεί με την επίδραση εμποδίων, βυθισμένων ή εξεχόντων, στη ροή αγωγών υποκρίσιμης κλίσης. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές επισημαίνουν ότι τα βασικά στοιχεία που επηρεάζουν την τραχύτητα του αγωγού είναι η γεωμετρία, το μέγεθος, ο αριθμός και η διάταξη των εμποδίων.

Ακόμη λιγότερο δε, έχει μελετηθεί η βλάστηση ως εναλλακτικός τρόπος αύξησης της τραχύτητας του αγωγού. Σε αυτήν την περίπτωση, σημαντικό χαρακτηριστικό που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της ροής είναι το αν η βλάστηση είναι εύκαμπτη ή δύσκαμπτη.

Ακολουθούν οι σημαντικότερες έρευνες που βρίσκονται σε σχέση με την παρούσα εργασία.

2.2 J. B. Herbich και S. Shulits (1964)

Οι περισσότερο συνήθεις μονάδες μέτρησης της τραχύτητας των ανοιχτών αγωγών, οι συντελεστές n του Manning και C του Chezy, προσδιορίζονται εμπειρικά. Οι Herbich και Shulits επιχείρησαν να προσδιορίσουν την τιμή των παραπάνω μονάδων με μία πιο ποσοτικοποιημένη ανάλυση.

Μελέτησαν τη ροή για διάφορες συμμετρικές διατάξεις κυβικών εμποδίων σε ορθογωνικούς αγωγούς υποκρίσιμης κλίσης. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για δύο κατηγορίες εμποδίων:

- εμπόδια βυθισμένα με λόγο ύψους προς βάθος ροής ίσο με 0.53 έως 1.00 και
- εμπόδια που εξείχαν της ροής.

Η εργαστηριακή έρευνα έδειξε την ύπαρξη μίας συστηματικής συσχέτισης ανάμεσα στο συντελεστή n και στους αριθμούς Reynolds και Froude. Επιπλέον, κατά την πρώτη ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, έγινε εμφανές πως αμφότερα το ύψος των στοιχείων τραχύτητας και ο αριθμός τους επηρεάζουν την αντίσταση στη ροή. Έτσι, προτάθηκε ως αντιπροσωπευτική της τραχύτητας μία παράμετρος θ , η οποία ισούται με το λόγο της συνολικής επιφάνειας προβολής των εμποδίων κατά τη διεύθυνση της ροής προς την επιφάνεια της κοίτης.

Η διαστατική ανάλυση έδειξε ότι:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{1.49 R^{1/6}}{n \sqrt{g}} = \varphi_1(\theta, Re, Fr) \quad (2.1)$$

όπου f ο αδιάστατος συντελεστής τριβής των Darcy-Weisbach και R η υδραυλική ακτίνα.

Τα συμπεράσματα της έρευνας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Όσο μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει η παράμετρος θ , δηλαδή όσο αυξάνει η αντίσταση στη ροή, τόσο αυξάνεται και το βάθος ροής. Επιπλέον, για δεδομένη κλίση, η τραχύτητα n μειώνεται, καθώς ο Re αυξάνει και καθώς η θ μειώνεται.
2. Καθίσταται δυνατή η εκτίμηση του συντελεστή αντίστασης $K = \frac{1.49}{n}$ με συμμετρική, αλλά και σχετικά τυχαία διάταξη ομοιόμορφου και ανομοιόμορφου μεγέθους κυβικών στοιχείων.
3. Η διαφορετική κλίμακα δύο ανοιχτών αγωγών με ομοιότητα ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τον αριθμό Froude δεν επιδρά στις συνθήκες ροής.

4. Προτείνεται η διερεύνηση της επίδρασης στη ροή και άλλων τύπων στοιχείων τραχύτητας (κυλινδρικών, σφαιρικών, ημισφαιρικών, κωνικών ή ακανόνιστων) και για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds.
5. Προτείνεται η επέκταση της έρευνας σε βάθη ροής 10 με 20 φορές μεγαλύτερα από το ύψος των εμποδίων, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε συνθήκες πλημμύρας.

2.3 W. W. Sayre και M. L. Albertson (1961)

Οι μελετητές πραγματοποίησαν πειράματα σε αγωγό υποκρίσιμης κλίσης, πλάτους 2.50 m και μήκους 22 m, στον πυθμένα του οποίου είχαν προσαρτηθεί μεταλλικά ελάσματα σε διάφορες εγκάρσιες και διαμήκεις θέσεις.

Οι Sayre και Albertson επεξεργάστηκαν τα πειραματικά στοιχεία βασιζόμενοι στη θεωρία των von Kármán–Prandtl για τυρβώδη ροή και εφαρμόζοντας το λογαριθμικό νόμο κατανομής των ταχυτήτων, όρισαν ένα χαρακτηριστικό μέγεθος χ για να εκφράσουν την επίδραση του μεγέθους και της διάταξης των εμποδίων.

Από τη θεωρητική ανάλυση της εξίσωσης von Kármán –Prandtl για την κατανομή της ταχύτητας στο στερεό όριο προκύπτει συσχετισμός των συντελεστών C του Chezy και f των Darcy-Weisbach, όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$\frac{V}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}} = \frac{2.30}{\kappa} \log \frac{y}{k} + C_1 \quad (2.2)$$

$$\frac{V}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}} = \frac{V}{\sqrt{R S g}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (2.3)$$

- όπου,
- v : η ταχύτητα σε απόσταση y από το όριο
 - V : η μέση ταχύτητα της διατομής
 - κ : ο συντελεστής τύρβης von Kármán
 - y : η απόσταση από τον πυθμένα
 - k : η τιμή του μεγέθους τραχύτητας
 - C_1 : σταθερά ολοκλήρωσης
 - $\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}$: ταχύτητα οριακού στρώματος

Η σταθερά C_1 θεωρήθηκε ότι θα πρέπει να εξαρτάται από τη διάταξη (εγκάρσια και διαμήκη απόσταση των ελασμάτων) και τη γεωμετρία των στοιχείων τραχύτητας, καθώς επίσης και ο συντελεστής κ εκφράζεται με όρους τραχύτητας. Επομένως, οι μελετητές εισήγαγαν το μέγεθος χ , έτσι ώστε όλα τα επιμέρους χαρακτηριστικά των στοιχείων τραχύτητας να συμπεριληφθούν σε μία και μόνο παράμετρο, όπως αυτή προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{2.30}{\kappa} \log \frac{y_n}{\chi} \quad (2.4)$$

όπου y_n το βάθος ροής.

Τα κύρια συμπεράσματα της έρευνας είναι τα παρακάτω:

1. Ο συντελεστής C συσχετίζεται λογαριθμικά με τη σχετική τραχύτητα.
2. Οι εξισώσεις

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 6.06 \log \frac{y_n}{a} + C_2 \quad (2.5)$$

και

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 6.06 \log \frac{y_n}{X} \quad (2.6)$$

όπου X η τραχύτητα του ορίου, εφαρμόζονται σε όλες τις διατάξεις στοιχείων που εξετάστηκαν. Η σταθερά C_2 εξαρτάται μόνο από τη σχετική απόσταση των στοιχείων ύψους a και η παράμετρος χ είναι συνάρτηση και του σχετικού μεγέθους και της σχετικής απόστασης των ελασμάτων.

3. Ο λόγος $\frac{a b}{x(e+b)}$, όπου a το ύψος και b το πλάτος των ελασμάτων και x , e η διαμήκης και εγκάρσια απόσταση των ελασμάτων αντίστοιχα, θεωρήθηκε επαρκής για τον προσδιορισμό της τιμής της τραχύτητας.

2.4 Π. Βασιλάκος (2010)

Ο Βασιλάκος διερεύνησε την επίδραση στη ροή βυθισμένων στοιχείων τραχύτητας στον αγωγό που πραγματοποιήθηκε και η παρούσα εργασία.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για παροχές $Q= 15, 30, 45, 55$ l/sec και για τέσσερις διαφορετικές διατάξεις εμποδίων:

- Οδοντώσεις ύψους 37.5 mm και τετραγωνικής κάτοψης $(37.5*37.5)$ mm².
- Κύβοι ακμής 37.5 mm.
- Ελάσματα μορφής L ύψους 37.5 mm.
- Ημισφαίρια ακτίνας 18.75 mm.

Οι οδοντώσεις μελετήθηκαν σε δύο διατάξεις, τη βασική με αποστάσεις μεταξύ των σειρών των εμποδίων στα 25 cm και την πυκνή με αποστάσεις μεταξύ στα 12.5 cm. Τα υπόλοιπα εμπόδια μελετήθηκαν για την βασική διάταξη.

Η εργασία καταλήγει στα κάτωθι αποτελέσματα:

1. Στις μικρές παροχές (15 και 30 l/sec) τα εμπόδια εξέχουν της ροής, άρα δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι δρουν ως τραχύτητα.

2. Η μεγαλύτερη πυκνότητα των εμποδίων οδηγεί σε μείωση του εύρους των κυματισμών και σε μεγαλύτερη ομοιομορφία της ροής χωρίς, ωστόσο, να αυξάνεται η τραχύτητα και άρα η καταστροφή κινητικής ενέργειας.
3. Η κατά τη διεύθυνση της ροής διάσταση επηρεάζει την αντίσταση στη ροή με αντιστρόφως ανάλογη σχέση.

2.5 Γ. Χριστοδούλου – Τ. Παπαθανασιάδης (2009)

Η εργασία των Χριστοδούλου και Παπαθανασιάδη συνοψίζεται στην πειραματική μελέτη ροής σε αγωγό μεγάλης κλίσης με βυθισμένα εμπόδια, που διεξήχθη στον ίδιο αγωγό με την παρούσα διπλωματική.

Τα βυθισμένα εμπόδια αποτελούνταν από οδοντώσεις, δηλαδή ξύλινους κύβους με απότμηση στο πίσω μέρος, και μελετήθηκαν για τρεις διατάξεις διαφορετικής πυκνότητας η καθεμία.

Η εργασία μελετά:

- Τη μεταβολή του συντελεστή Manning συναρτήσει της παροχής Q .
- Τη μεταβολή του συντελεστή f των Darcy – Weisbach συναρτήσει του y/χ , όπου χ η παράμετρος που προτάθηκε από τους Sayre – Albertson.
- Την εξάρτηση των ενεργειακών απωλειών ΔH από την παροχή, τη διάταξη των οδοντώσεων και το υποτιθέμενο ποσοστό αέρα.

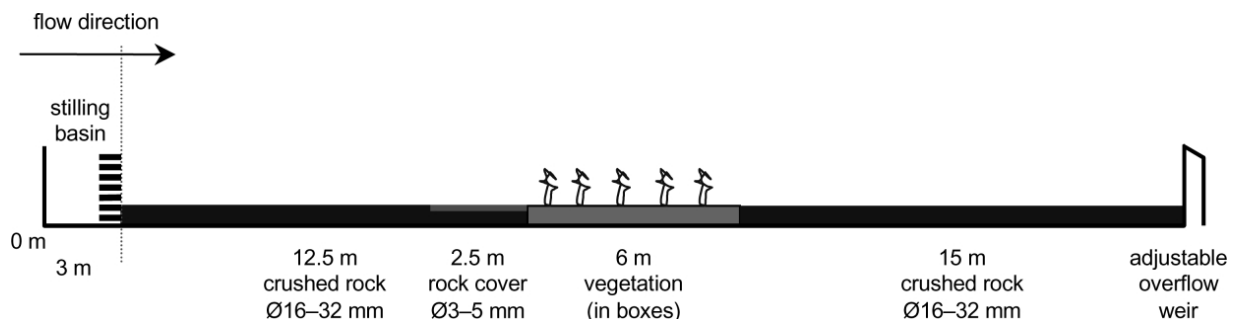
Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προέκυψαν τα εξής:

1. Τα στοιχεία τραχύτητας αυξάνουν σημαντικά την ενεργό τραχύτητα του αγωγού και επομένως το βάθος ροής. Στην πυκνότερη διάταξη και στις μεγαλύτερες παροχές, η ελεύθερη επιφάνεια είναι σχετικά ομαλή. Όταν, ωστόσο, οι αποστάσεις μεταξύ των οδόντων είναι μεγάλες και η παροχή μικρή, παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην ελεύθερη επιφάνεια, το οποίο σημαίνει ότι τα εμπόδια δρουν περισσότερο μεμονωμένα και όχι συνολικά με αύξηση της μέσης τραχύτητας του ορίου.

2. Η απώλεια ενέργειας που επιτυγχάνεται είναι κατά 10-20% μεγαλύτερη από το ύψος πτώσης και ανεξάρτητη από τη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας και το ποσοστό του αέρα.
3. Ο συντελεστής Manning που προέκυψε είναι υπερτριπλάσιος της τιμής του απουσία εμποδίων, το οποίο συνάδει προς προηγούμενες έρευνες για υποκρίσιμη ροή.

2.6 J. Järvelä (2002)

Ο Järvelä μελέτησε την αντίσταση στη ροή που παρουσιάζεται τόσο σε εύκαμπτη όσο και δύσκαμπτη βλάστηση σε αγωγό εργαστηρίου χρησιμοποιώντας φυσική βλάστηση, είτε βυθισμένη είτε εξέχουσα της ροής. Ο αγωγός είχε μήκος 50 m και πλάτος 1.1 m, ο δε πυθμένας του ήταν στρωμένος με θραυσμένο πέτρωμα για τη δημιουργία τυρβώδους ροής. Κατάντη του αγωγού ήταν τοποθετημένο θυρόφραγμα για τη ρύθμιση του επιθυμητού βάθους ροής.



Εικόνα 2.1. Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων περιελάμβανε τον προσδιορισμό των απωλειών ενέργειας h_f από την εξίσωση Bernoulli και του συντελεστή τριβής f :

$$\alpha \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \alpha \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + h_f \quad (2.7)$$

$$f = \frac{h_f}{L} \frac{8gh}{V^2} \quad (2.8)$$

όπου, α : ο συντελεστής συνόρθωσης της κινητικής ενέργειας

($\alpha=1$ για απλές διατομές)

V : η μέση ταχύτητα ροής

$h = z + y$ = γεωγραφικό υψόμετρο + βάθος ροής

Οι δείκτες 1, 2 αναφέρονται σε δύο διατομές ανάντη και κατόντη του υπό μελέτη τμήματος του αγωγού, που απέχουν απόσταση L μεταξύ τους.

Σχετικά με την περισσότερο δύσκαμπτη βλάστηση, η οποία εξείχε εν μέρει της ροής, διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής τριβής μειωνόταν καθώς ο Re και η ταχύτητα ροής αυξάνονταν. Εκτιμήθηκε ωστόσο ότι ο Re μόνο είναι ανεπαρκής για να εξηγηθεί η αντίσταση στη ροή. Τέλος, η ανάλυση έδειξε αδυναμία καλής συσχέτισης του συντελεστή τριβής f με τη σχετική τραχύτητα για τα περισσότερο δύσκαμπτα φυτά, ενώ το αντίθετο παρατηρήθηκε για τα περισσότερο εύκαμπτα φυτά.

2.7 N. Kouwen – T. E. Unny (1973)

Οι μελετητές διεξήγαγαν σειρά πειραμάτων σε αγωγό εργαστηρίου, ο πυθμένας του οποίου είχε καλυφθεί από εύκαμπτες πλαστικές λωρίδες. Οι αρχικές έρευνες έδειξαν ότι οι λωρίδες συμπεριφέρονταν σε μεγάλο βαθμό όμοια με τη χλοώδη βλάστηση των φυσικών αγωγών.

Οι Kouwen – Unny συμπέραναν ότι κάποιες από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της αντίστασης στη ροή από άκαμπτα στοιχεία τραχύτητας σε ανοικτούς αγωγούς μπορούν να επεκταθούν και σε αγωγούς με εύκαμπτα στοιχεία τραχύτητας. Τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν να βοηθήσουν σε καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής σε ανοικτούς αγωγούς με βλάστηση.

1. Ο λογαριθμικός νόμος κατανομής των ταχυτήτων ανταποκρίνεται στα πειραματικά αποτελέσματα, αν και παρατηρήθηκαν μεγάλες διακυμάνσεις στο συντελεστή τύρβης von Kármán.
2. Ο συντελεστής τριβής και ο συντελεστής Manning είναι συναρτήσεις της σχετικής τραχύτητας (=ύψος στοιχείου/βάθος ροής) όταν η ροή γίνεται επί στοιχείων κατακόρυφων ή κυματοειδών («erect and waving regimes»), ενώ εξαρτάται από τον Re για ροή σε επικλινή στοιχεία («prone regimes»).

3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 Η πειραματική συσκευή

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε συσκευή αποτελούμενη από τα εξής τμήματα:

1. Μεταλλική δεξαμενή τροφοδοτούμενη από αγωγό $\Phi 200$, βάσης $2\text{m} \times 1.25\text{m}$ και ύψους 1.30 m . Η δεξαμενή είναι εξοπλισμένη με κινητό κατακόρυφο θυρόφραγμα ελάχιστου ανοίγματος 2.5 cm για να τροφοδοτεί το ανάντη τμήμα του αγωγού, αλλά και για την επίτευξη του επιθυμητού βάθους της ομοιόμορφης υπερκρίσιμης ροής στην αρχή του κεκλιμένου τμήματος.

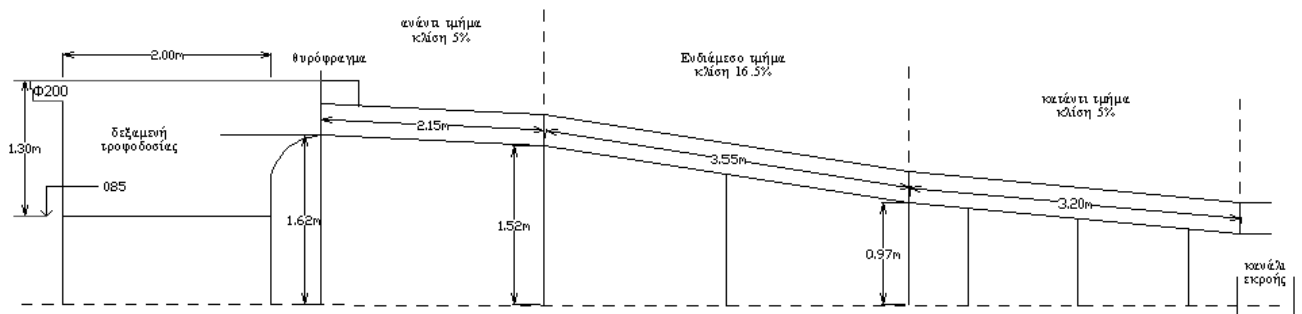


Εικόνα 3.1. Η πειραματική διάταξη.

2. Κεκλιμένο αγωγό κατασκευασμένο από Plexiglas, ο οποίος συνδέεται στο ανάντη τμήμα του με τη δεξαμενή τροφοδοσίας και στηρίζεται στο έδαφος μέσω ενός συστήματος μεταλλικών δοκών και στύλων. Ο αγωγός αποτελείται από τα εξής τρία τμήματα:

- Ανάντη τμήμα μήκους 2.15 m, πλάτους 25 cm, ύψους 30 cm και κλίσης περίπου 5%.
- Ενδιάμεσο τμήμα μήκους 3.55 m, πλάτους 25 cm, ύψους 30 cm και κλίσης 16.5%.
- Κατόντη τμήμα μήκους 3.2 m, πλάτους 25 cm, ύψους 30 cm και κλίσης περίπου 5%.

Το κατόντη τμήμα του αγωγού εκρέει σε κανάλι, το οποίο επιστρέφει το νερό στη δεξαμενή του εργαστηρίου. Στη συνέχεια, μέσω αντλίας ονομαστικής παροχής 55 l/sec, το νερό επανακυκλοφορεί στη δεξαμενή τροφοδοσίας της συσκευής.



Σχήμα 3.1. Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης.

3.2 Σειρές μετρήσεων

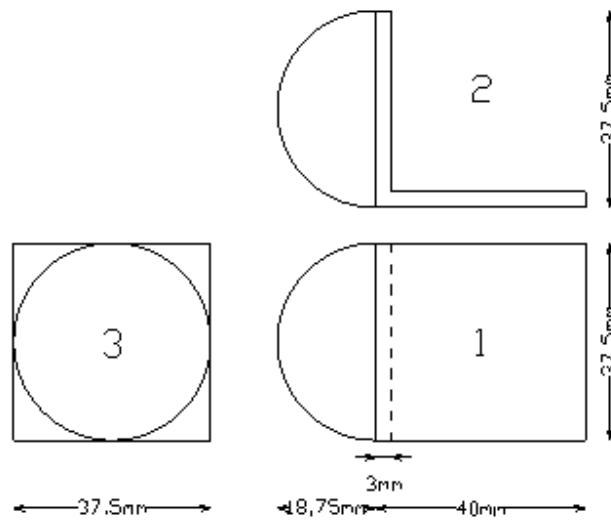
Οι διαφορετικοί τύποι εμποδίων που χρησιμοποιήθηκαν προσαρτήθηκαν στον πυθμένα του ενδιάμεσου τμήματος του αγωγού και στερεώθηκαν σε αυτόν με βίδες για να μην αποκολληθούν με τη ροή.

3.2.1 Τύποι και διατάξεις εμποδίων

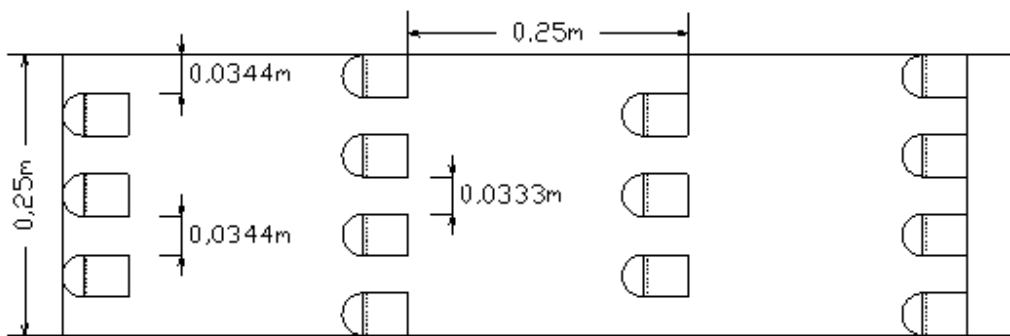
Τύπος I – Ελάσματα με ημισφαίρια

Τα εμπόδια αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από ένα έλασμα μορφής L από αλουμίνιο, στην κατακόρυφη πλευρά του οποίου έχει προσαρτηθεί ημισφαίριο από ελαστικό υλικό. Τα ελάσματα έχουν ύψος $h=37.5$ mm, βάση μήκους 40 mm και πάχος 3 mm. Το ημισφαίριο έχει διάμετρο 37.5 mm. Τα εμπόδια τοποθετήθηκαν σε σειρές των 3 και 4 εμποδίων εναλλάξ με τη μεταξύ τους απόσταση στα 25 cm, δηλαδή όσο το πλάτος του αγωγού.

Στην αρχή του αγωγού τοποθετήθηκε σειρά τριών εμποδίων που αποτελείτο από το $\frac{1}{2}$ του ημισφαιρίου χωρίς τη μεταλλική βάση, με στόχο να μη δημιουργείται «εκτόξευση» της ροής και μεγάλα βάθη ροής με πολύ έντονους κυματισμούς στο ανάντη τμήμα του υπό μελέτη αγωγού για την παροχή των 15 l/sec.



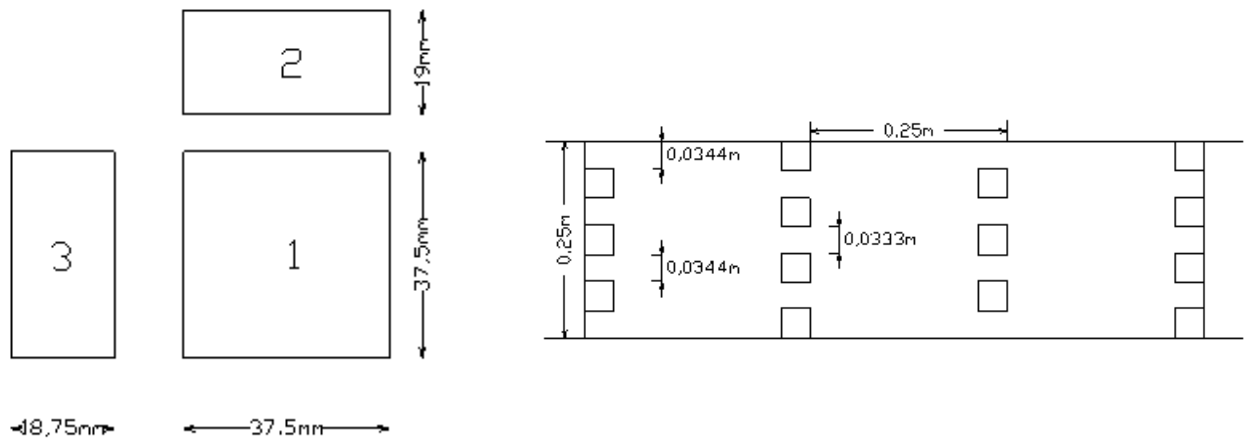
Σχήμα 3.2. Ελασματα με ημισφαίρια. (1)Κάτοψη, (2)τομή κατά μήκος της ροής και (3)όψη στο μέτωπο της ροής.



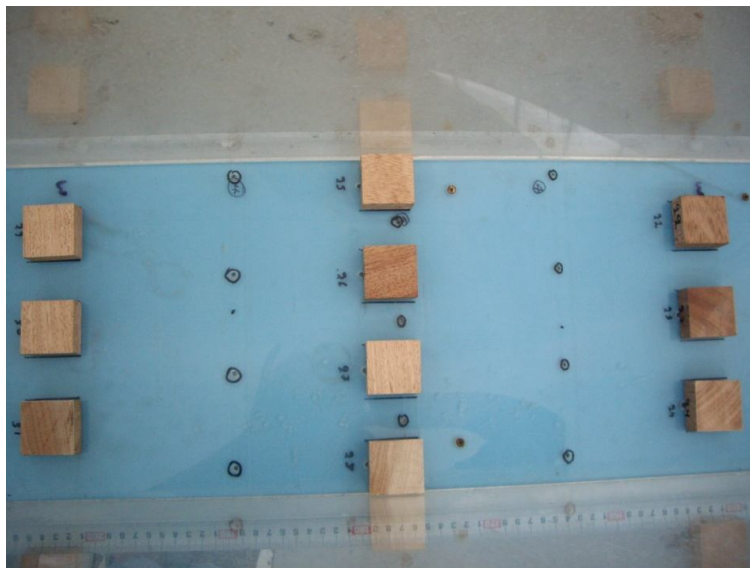
Σχήμα 3.3. Διάταξη ελασμάτων με ημισφαίρια.

Τύπος II – Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα

Η συγκεκριμένη κατηγορία των εμποδίων αποτελείται από ξύλινα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, ύψους 19 mm και τετραγωνικής κάτοψης πλευράς 37.5 mm. Η διάταξή τους είναι όμοια με την προηγούμενη.



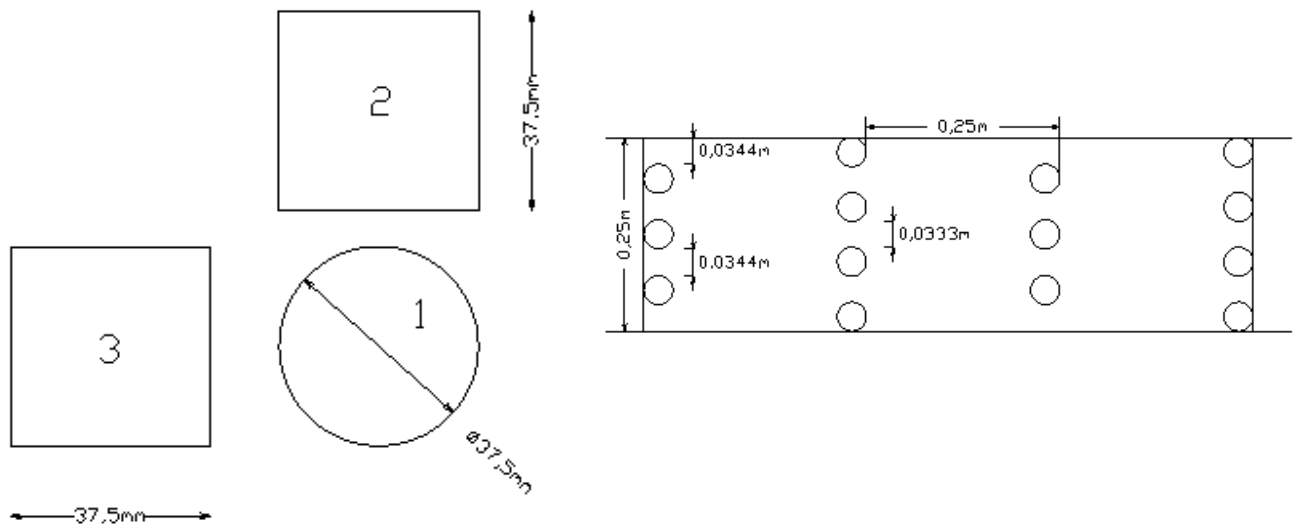
Σχήμα 3.4. Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. (1)Κάτοψη, (2)τομή κατά μήκος της ροής και (3)όψη στο μέτωπο της ροής.



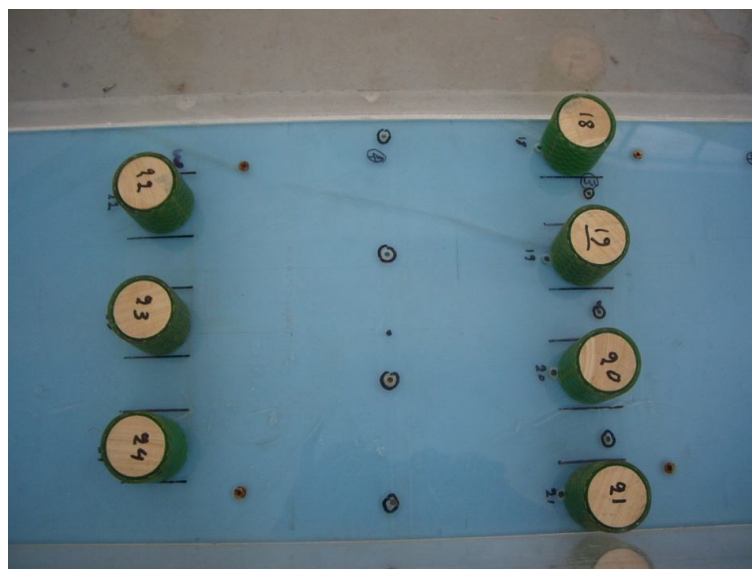
Εικόνα 3.2. Εικόνα από το εργαστήριο.

Τύπος III – Κύλινδροι

Τα εμπόδια αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από ξύλινους κυλίνδρους με λαστιχένιο περίβλημα, ύψους και διαμέτρου 37.5 mm. Η διάταξή τους είναι όμοια τις παραπάνω. Στην αρχή του αγωγού, οι κύλινδροι έχουν το μισό ύψος (19mm) για την αποφυγή της εκτόξευσης της ροής.



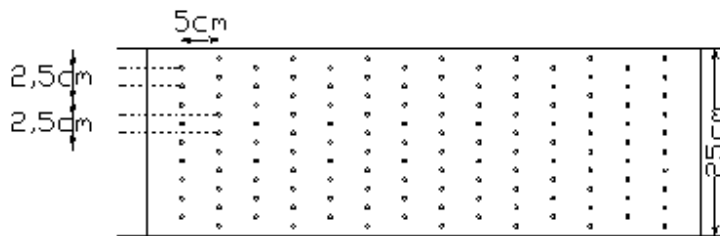
Σχήμα 3.5. Κύλινδροι. (1)Κάτοψη, (2)τομή κατά μήκος της ροής και (3)όψη στο μέτωπο της ροής.



Εικόνα 3.3. Εικόνα από το εργαστήριο.

Τύπος IV – Ράβδοι

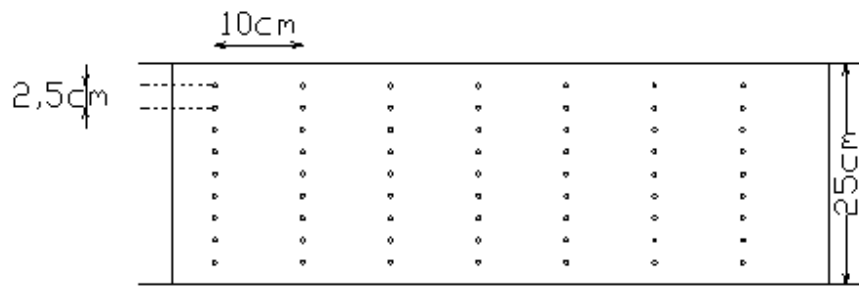
Σε αυτήν την πειραματική διάταξη, χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτα μεταλλικά στοιχεία (ράβδοι) για την προσομοίωση της βλάστησης. Οι ράβδοι έχουν ύψος 40mm, δηλαδή περίπου όσο και οι προηγούμενες διατάξεις, και διάμετρο 5mm. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα εμπόδια, οι ράβδοι τοποθετήθηκαν σε σειρές των 9 και 10 στοιχείων και σε δύο διατάξεις. Η αραιή διάταξη αποτελείται από 9 ράβδους σε κάθε σειρά με τη μεταξύ των σειρών απόσταση στα 10cm και η πυκνή από σειρές των 9 και 10 ράβδων εναλλάξ ανά 5cm.



Σχήμα 3.6α. Πυκνή διάταξη ράβδων.



Εικόνα 3.4α. Εικόνα από το εργαστήριο.



Σχήμα 3.6β. Αραιή διάταξη ράβδων.



Εικόνα 3.4β. Εικόνα από το εργαστήριο.

3.3 Διαδικασία εκτέλεσης πειραμάτων

Για καθένα από τους παραπάνω τύπους εμποδίων πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων. Κάθε σειρά εκτελέστηκε για τέσσερις διαφορετικές παροχές, των 15, 30, 45 και 52.5 l/sec.

Πριν από την εκτέλεση των πειραμάτων, ήταν απαραίτητες:

- η ακριβής ρύθμιση της επιθυμητής παροχής και
- η επίτευξη του επιθυμητού ομοιόμορφου βάθους της υπερκρίσιμης ροής ανάντη του ενδιάμεσου τμήματος του αγωγού.

Η ρύθμιση της παροχής έγινε με τη χρήση μετρητή τύπου Venturi. Με διαδοχικά ανοίγματα της δικλείδας μεταβαλλόταν η υψομετρική διαφορά Δh ανάμεσα σε δύο σωλήνες που περιείχαν υγρό.



Εικόνα 3.5. Δικλείδα.



Εικόνα 3.6. Μανόμετρο.

Συγκεκριμένα, η επιθυμητή παροχή Q καθορίζεται με βάση το Δh που υπάρχει μεταξύ των σωλήνων της συσκευής, σύμφωνα με τη σχέση που ακολουθεί:

$$Q = 2.71714\sqrt{\Delta h} \quad (3.1)$$

όπου, Q σε l/sec και Δh σε mm.

Έτσι, για καθεμία από τις χρησιμοποιηθείσες παροχές προέκυψαν τα παρακάτω Δh :

Πίνακας 3.1. Μανομετρική ένδειξη

Q(l/sec)	ΔH (mm)
15	30,48
30	121,90
45	274,28
52,5	373,33

Η επίτευξη του επιθυμητού ομοιόμορφου βάθους πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα με το θυρόφραγμα που διαθέτει η εργαστηριακή συσκευή. Αυτό ήταν απαραίτητο, διότι οι καμπύλες S που αναπτύσσονται σε αγωγούς υπερκρίσιμης κλίσης απαιτούν μεγαλύτερο μήκος από το διαθέσιμο για να ενώσουν το βάθος της δεξαμενής με το ομοιόμορφο βάθος του ανάντη τμήματος του υπό μελέτη αγωγού.

Επομένως, συνετάχθη ο ακόλουθος πίνακας, ο οποίος περιλαμβάνει όλα τα υδραυλικά μεγέθη για καθεμία από τις παροχές που χρησιμοποιήθηκαν. Ωστόσο, μόνο το ομοιόμορφο υπερκρίσιμο βάθος y_0 χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία ρύθμισης του απαιτούμενου ανοίγματος του θυροφράγματος.

Πίνακας 3.2.

Q(l/sec)	y_0 (cm)	V_0 (m/sec)	F_0	y_c (cm)
15	3,1	1,913	3,55	7,2
30	4,9	2,430	3,51	11,4
45	6,6	2,774	3,41	14,9
52,5	7,3	2,892	3,43	16,5

Το y_0 μετρήθηκε με σταδία σε απόσταση 10cm πριν από το σημείο αλλαγής κλίσης του αγωγού.

Μετά από τη ρύθμιση των παραπάνω δύο εργαστηριακών παραμέτρων ακολούθησε η λήψη των μετρήσεων.

Για κάθε επιμέρους σειρά πειραμάτων, ελήφθησαν με τη χρήση σταδίας τα βάθη ροής σε όλο το μήκος του ενδιάμεσου τμήματος του αγωγού. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 10 cm για τις τρεις πρώτες κατηγορίες εμποδίων και ανά 5 cm για την τελευταία.

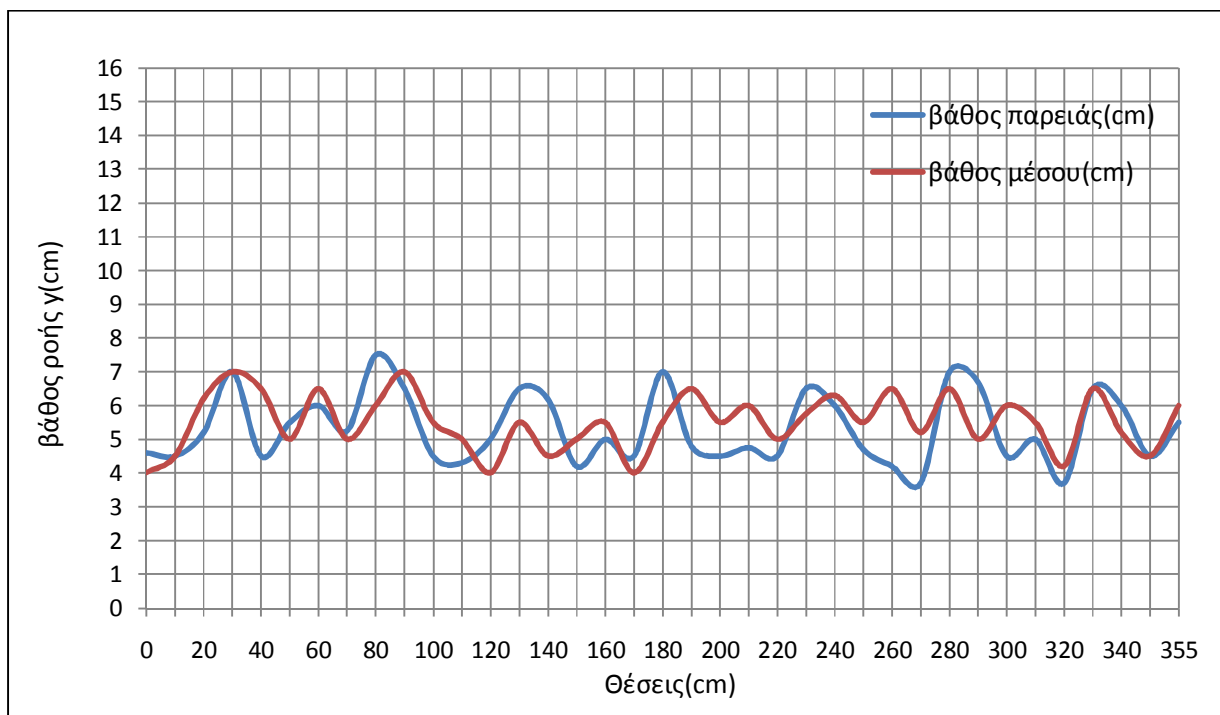
Το βάθος ροής μετρήθηκε κάθετα προς τον πυθμένα του αγωγού. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο σημεία της διατομής, στην παρειά και στο μέσον, καθώς η ελεύθερη επιφάνεια του νερού στην παρειά βρίσκεται ψηλότερα. Επιπλέον, εκτιμήθηκε το εύρος της διακύμανσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις δύο θέσεις με ιδιαίτερη σημασία στις μικρές παροχές των 15 και 30 l/sec.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

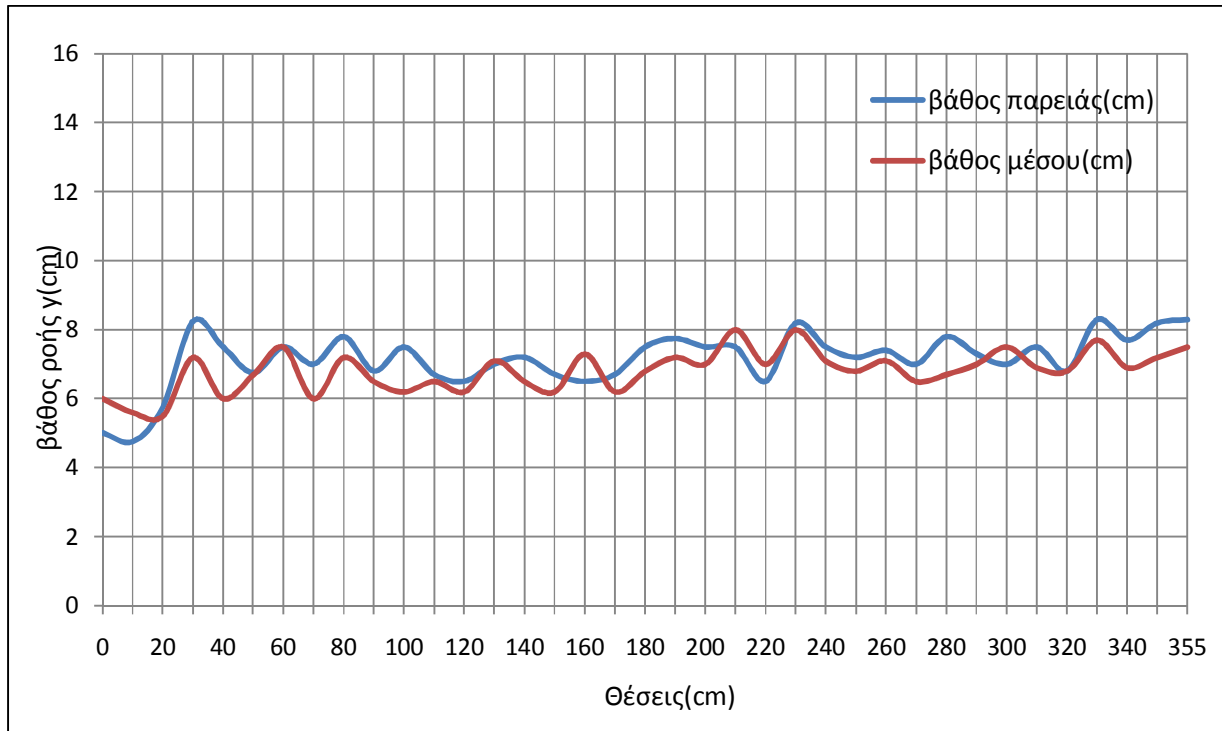
4.1 Καμπύλες ελεύθερης επιφάνειας

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα προφίλ της ροής που προέκυψαν από κάθε διάταξη και για όλες τις παροχές.

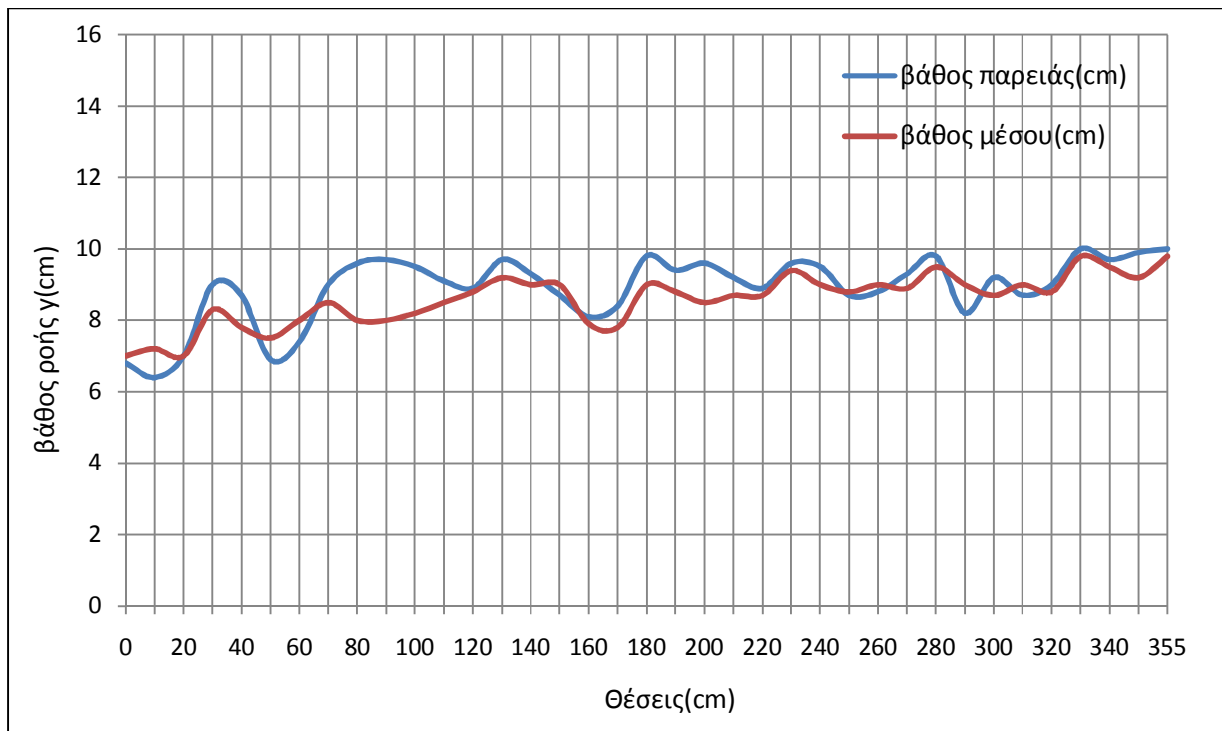
Τύπος I – Ελάσματα με ημισφαίρια



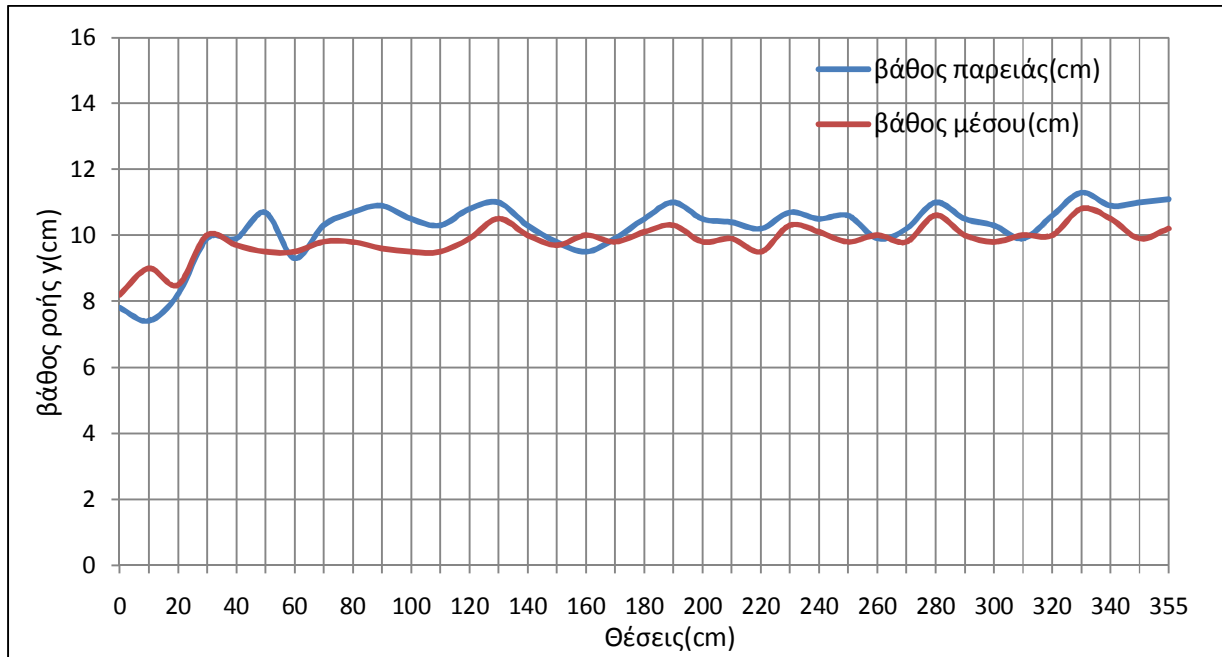
Σχήμα 4.1α. $Q=15$ l/sec



Σχήμα 4.1β. $Q=30$ l/sec

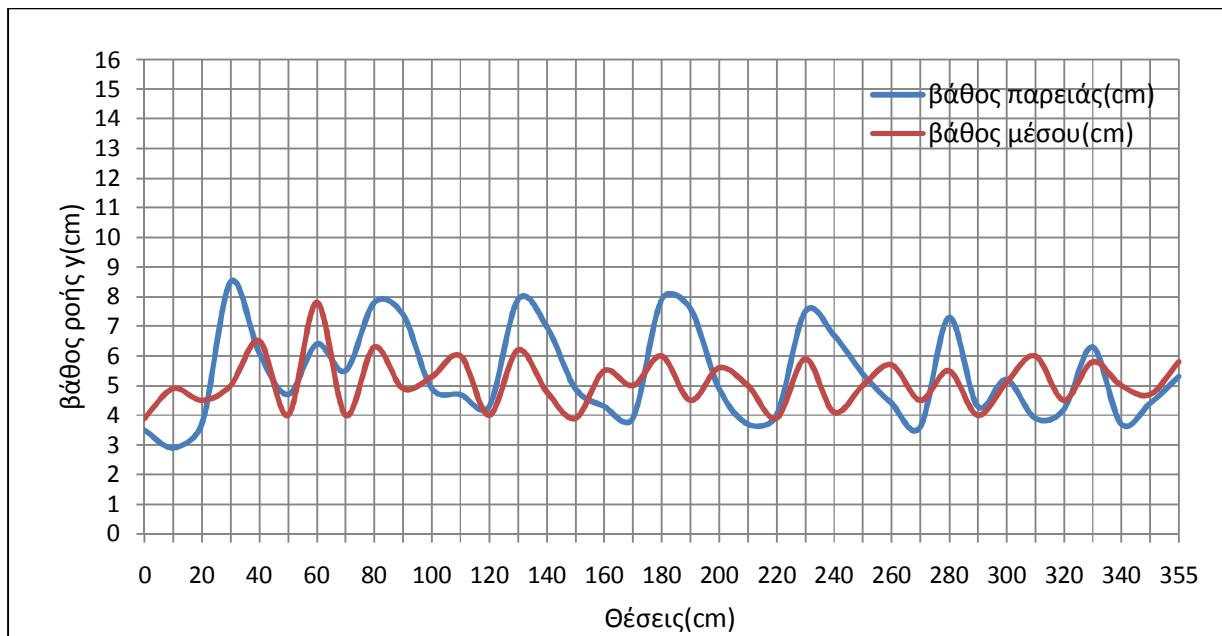


Σχήμα 4.1γ. $Q=45$ l/sec

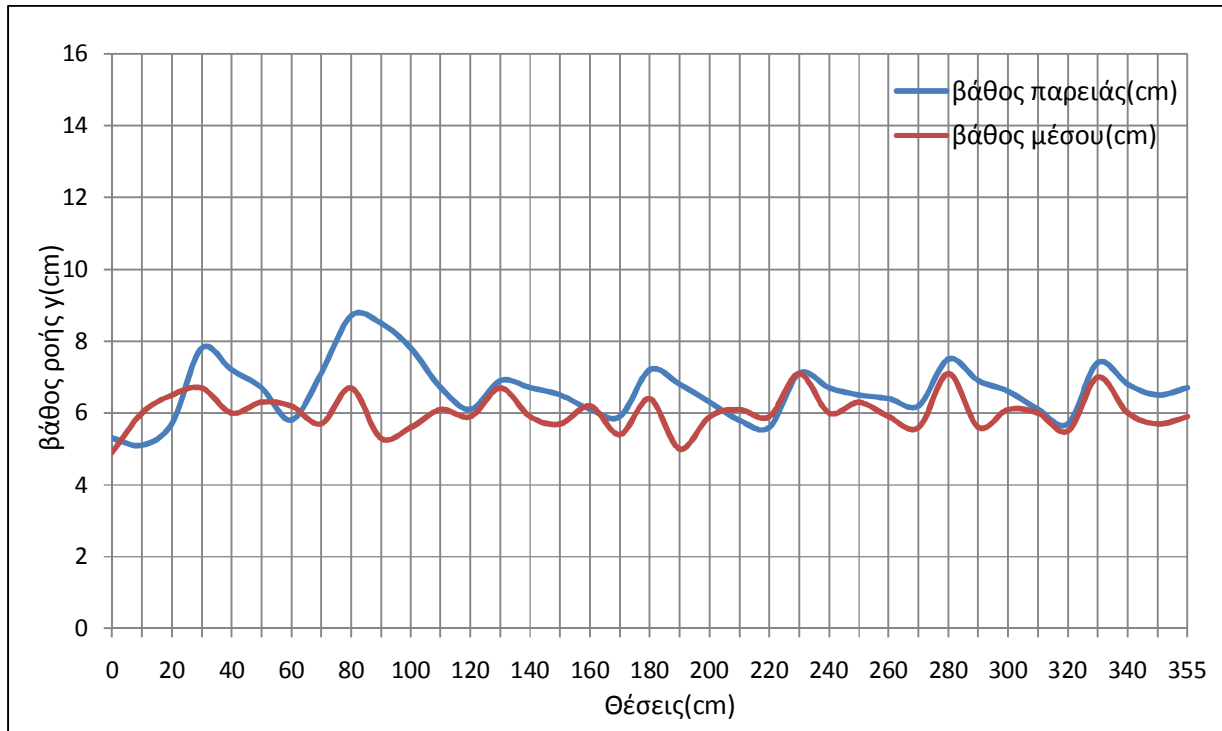


Σχήμα 4.1δ. Q=52.5 l/sec

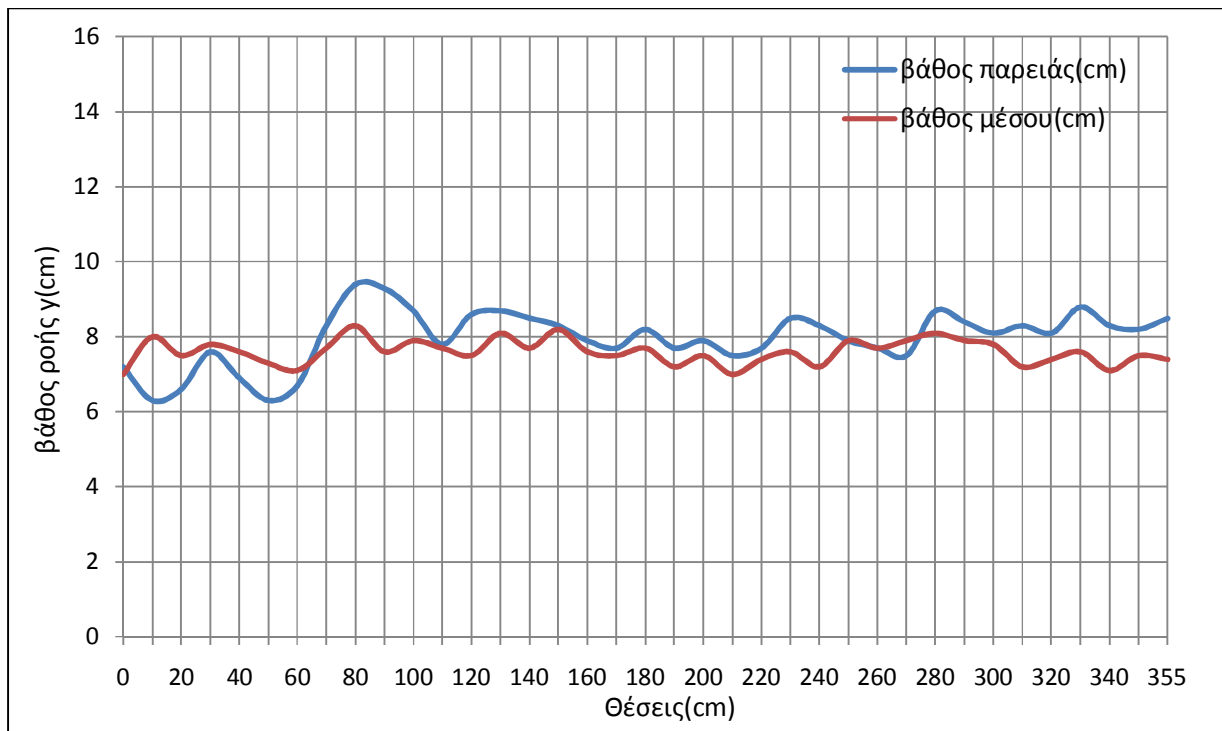
Τύπος II – Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα



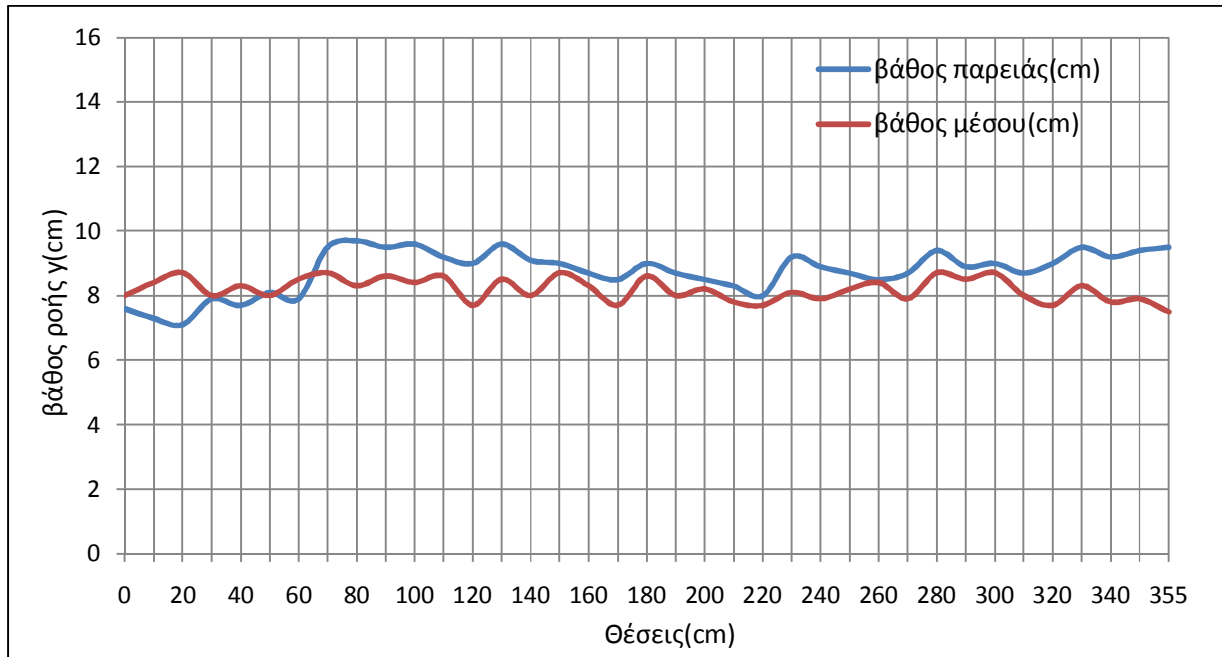
Σχήμα 4.2α. Q=15 l/sec



Σχήμα 4.2β. Q=30 l/sec

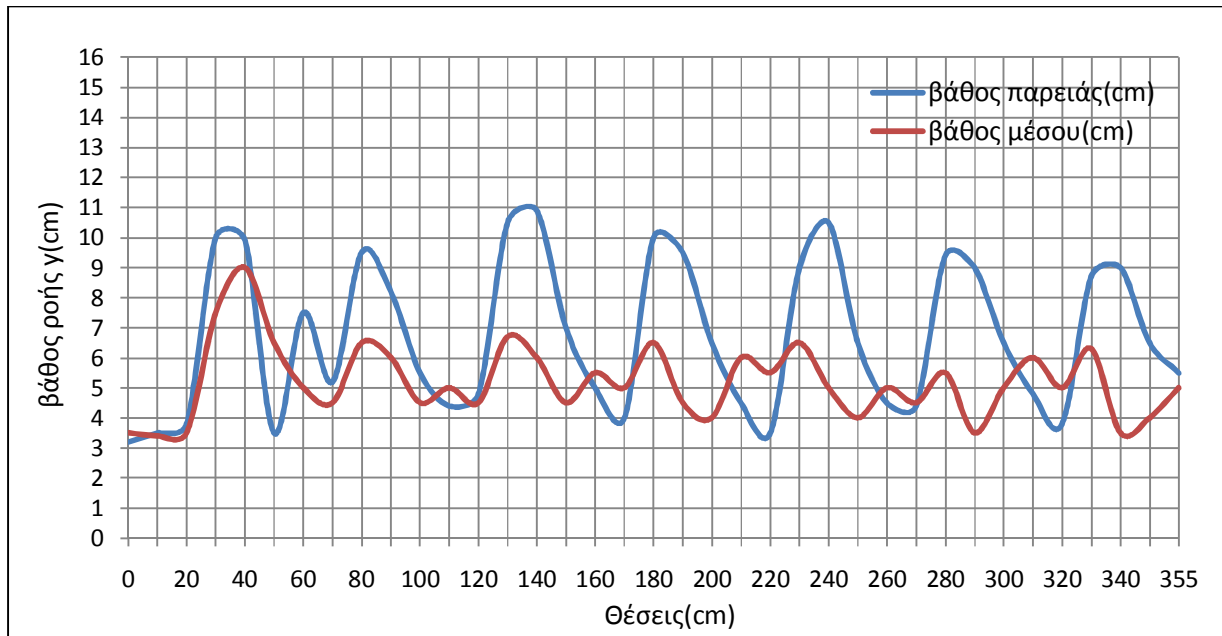


Σχήμα 4.2γ. Q=45 l/sec

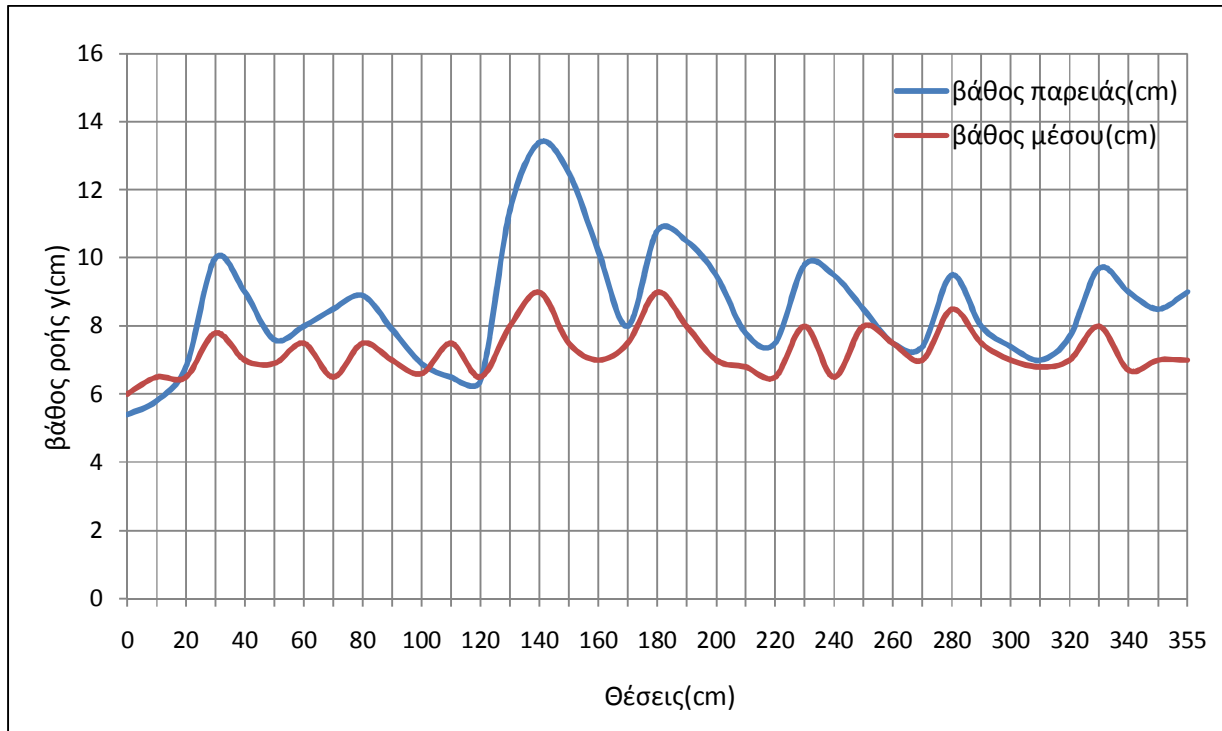


Σχήμα 4.2δ. $Q=52.5$ l/sec

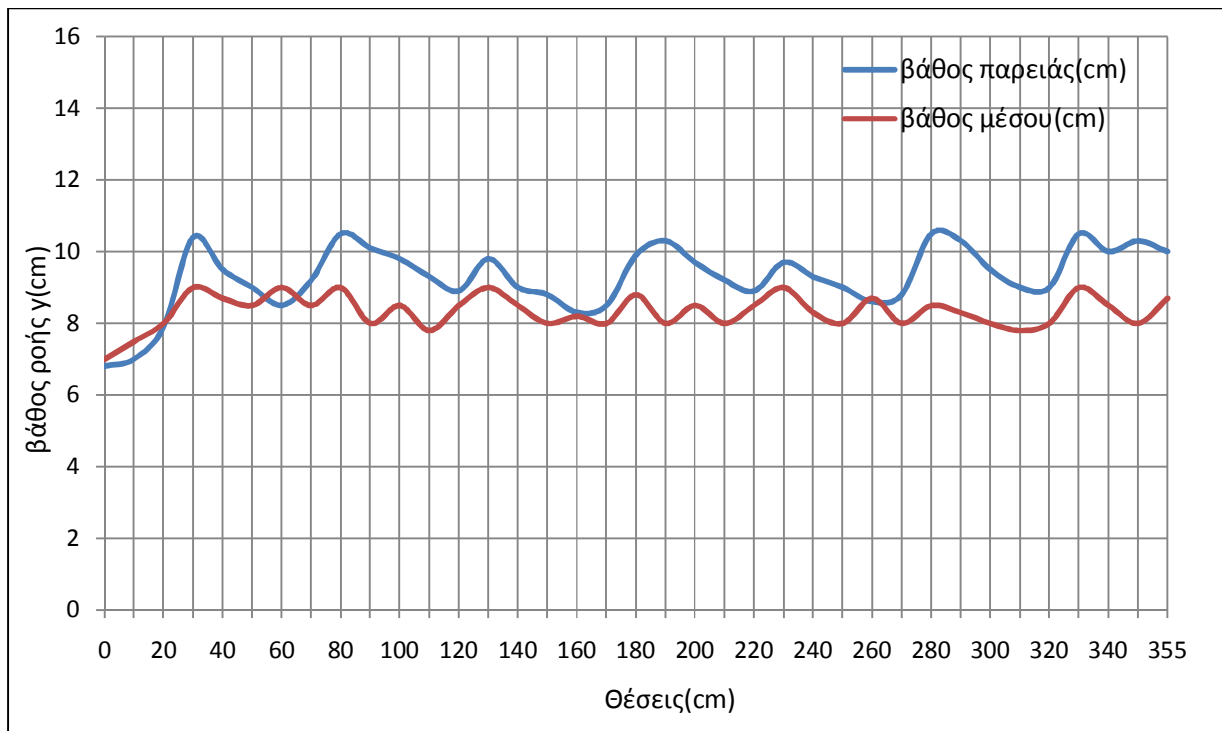
Τύπος III – Κύλινδροι



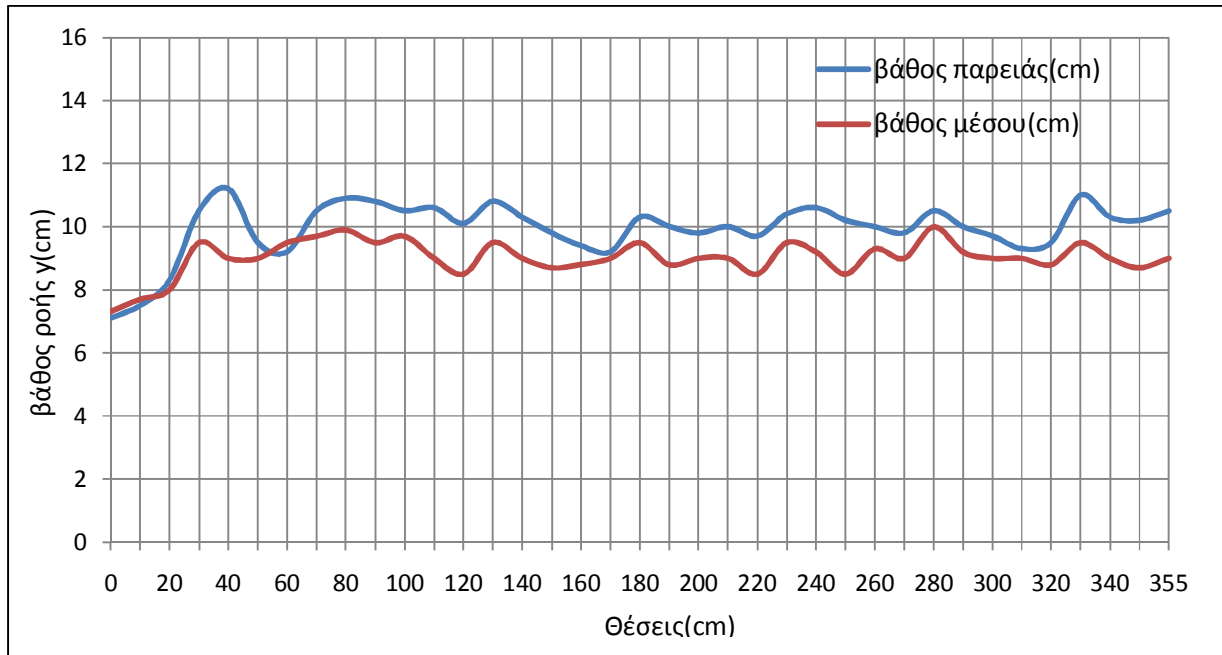
Σχήμα 4.3α. $Q=15$ l/sec



Σχήμα 4.3β. Q=30 l/sec

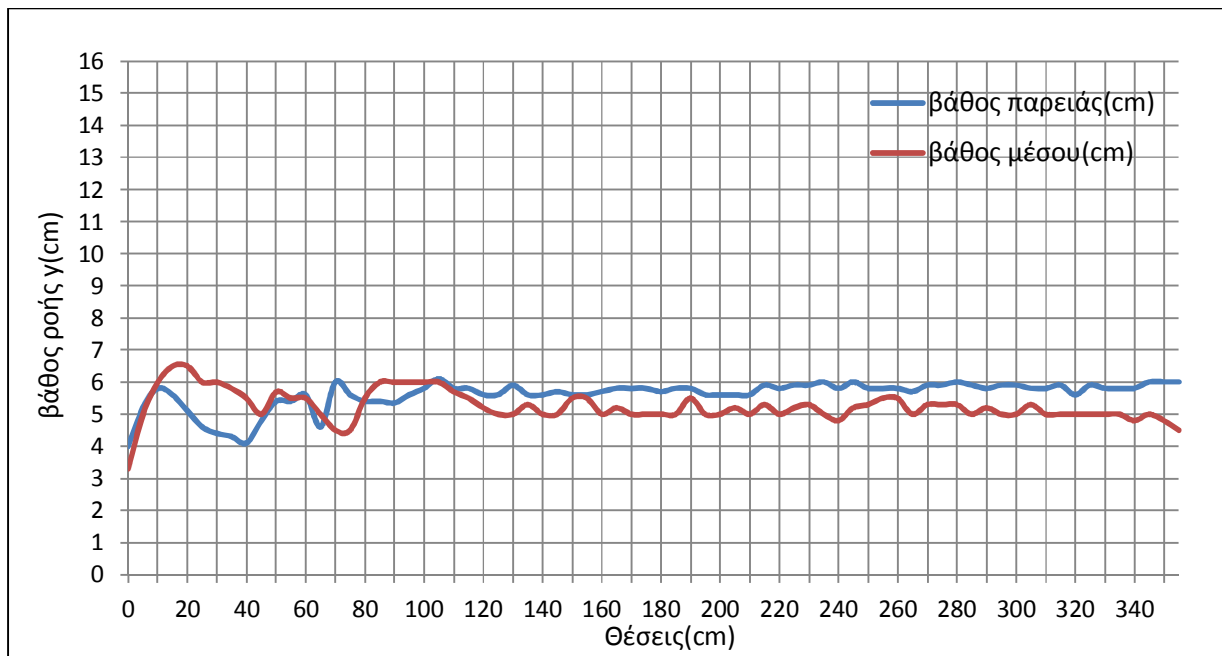


Σχήμα 4.3γ. Q=45 l/sec

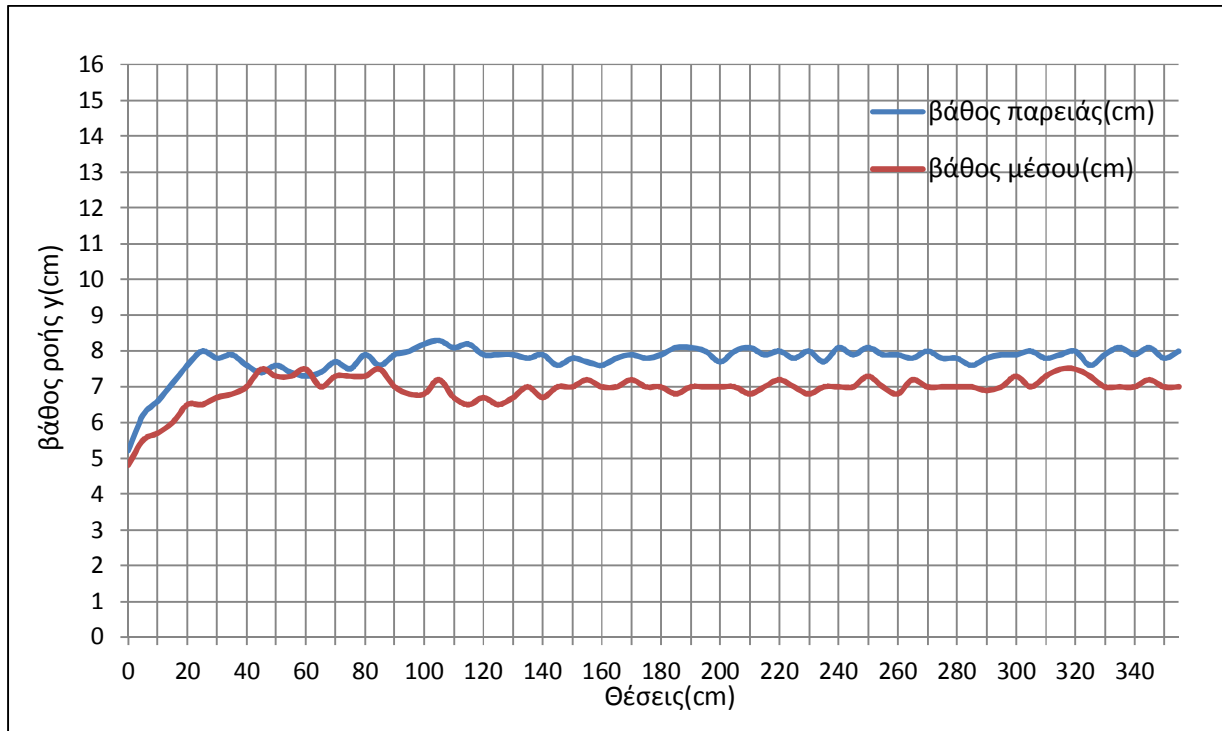


Σχήμα 4.3δ. $Q=52.5$ l/sec

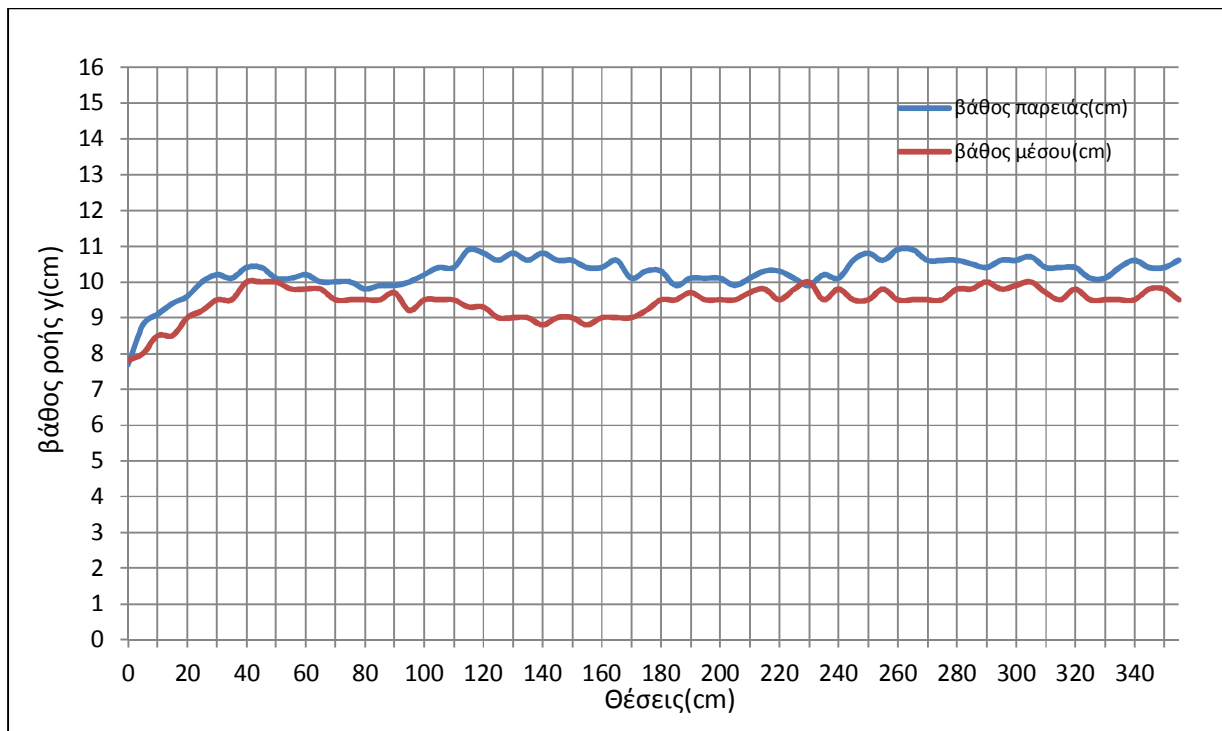
Τύπος IVα – Πυκνή διάταξη ράβδων



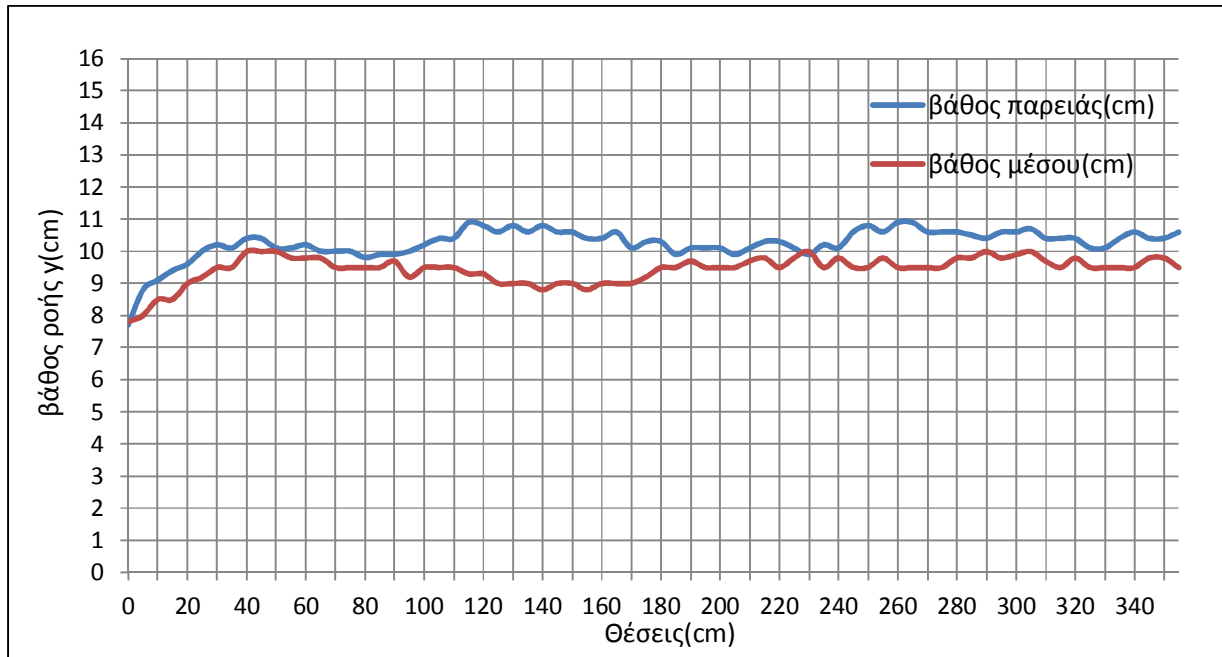
Σχήμα 4.4α. $Q=15$ l/sec



Σχήμα 4.4β. Q=30 l/sec

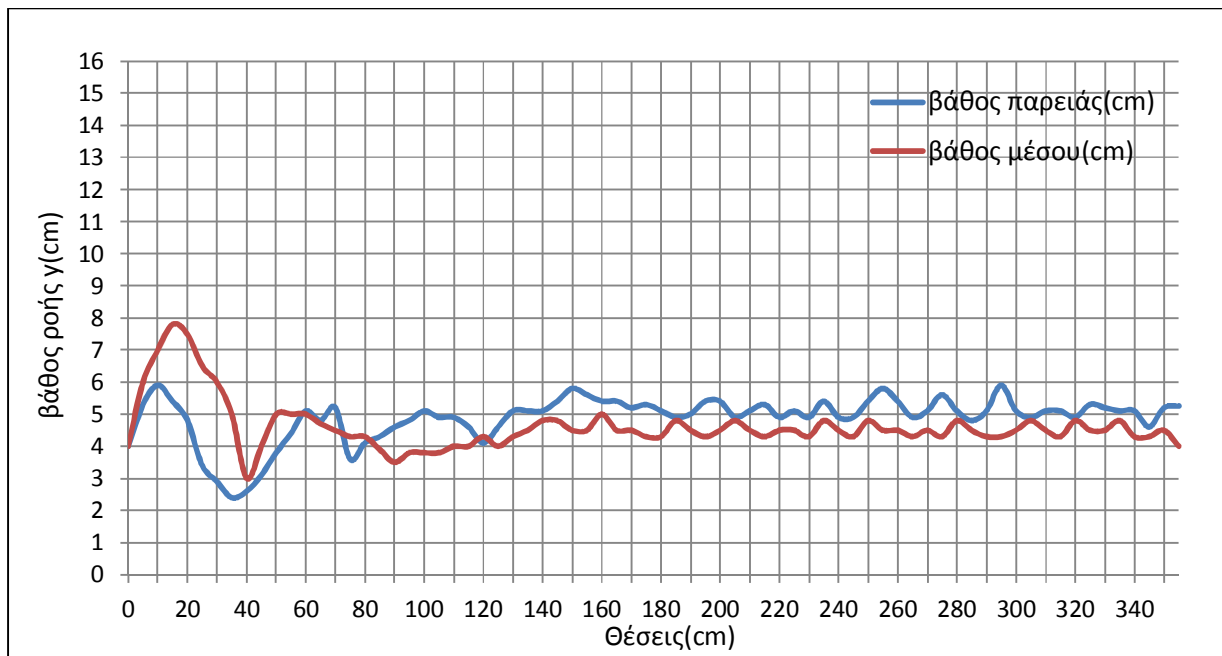


Σχήμα 4.4γ. Q=45 l/sec

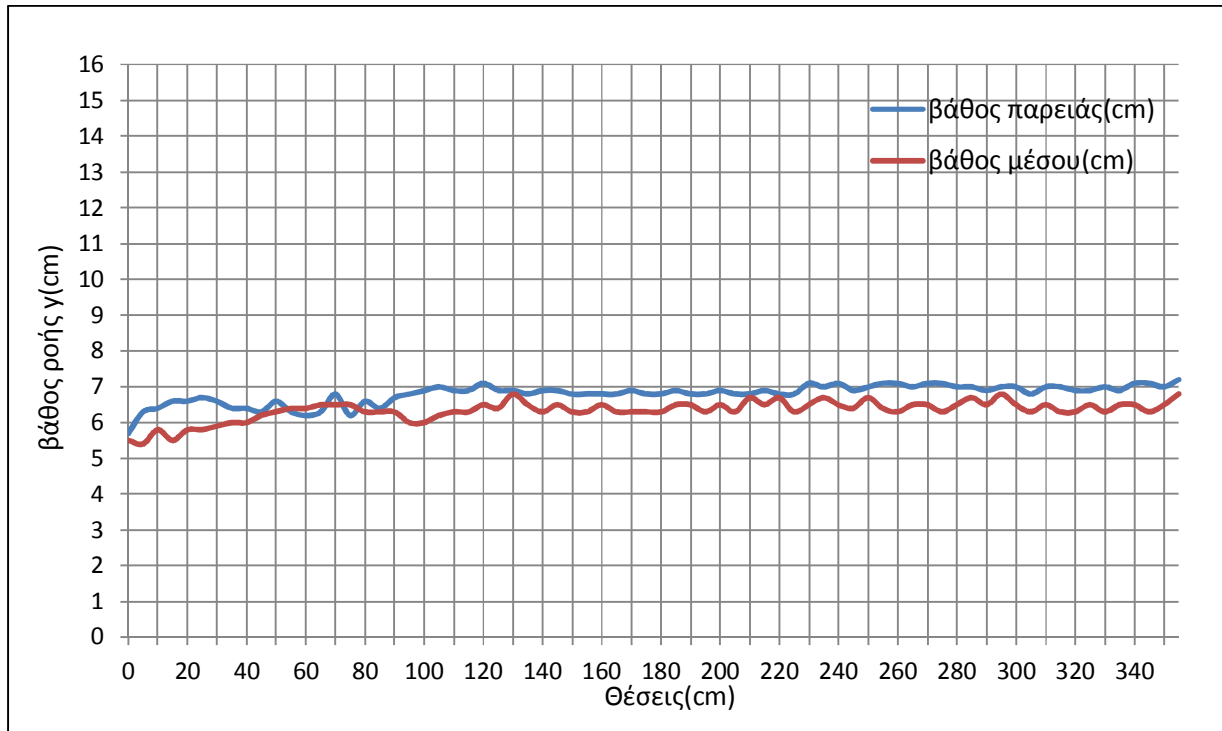


Σχήμα 4.4δ. $Q=52.5$ l/sec

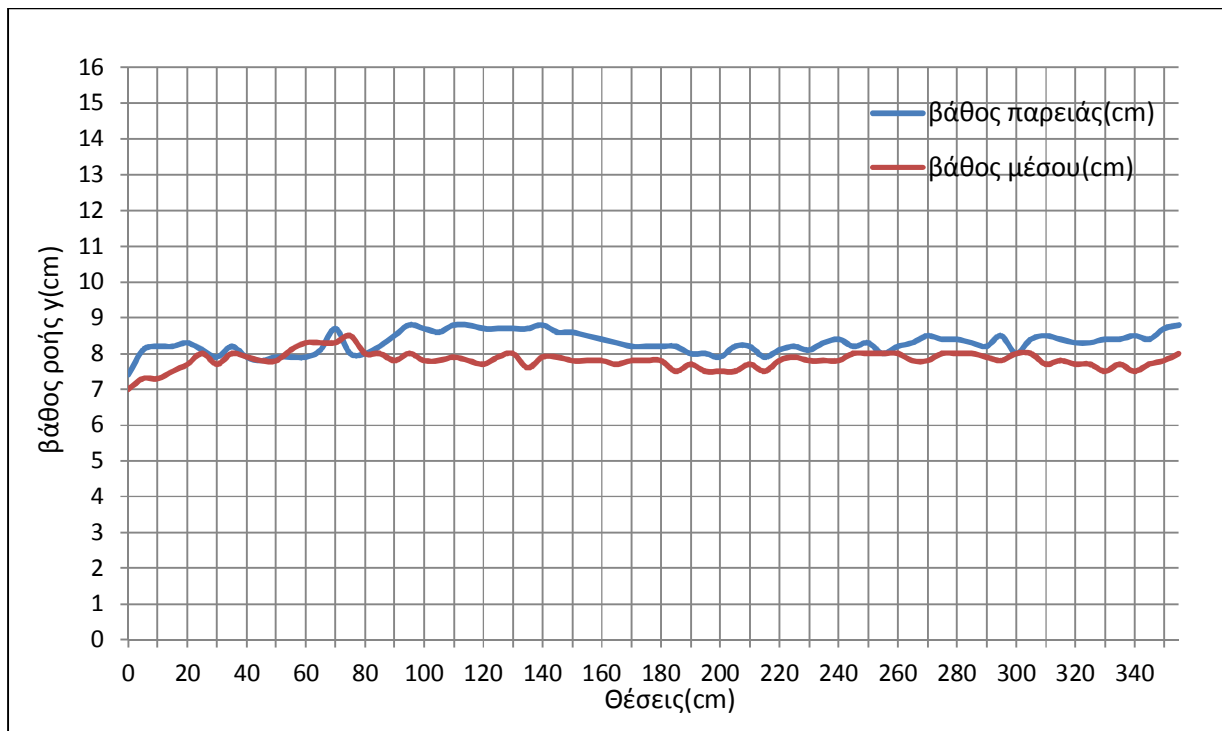
Τύπος IVβ – Αραιές ράβδοι



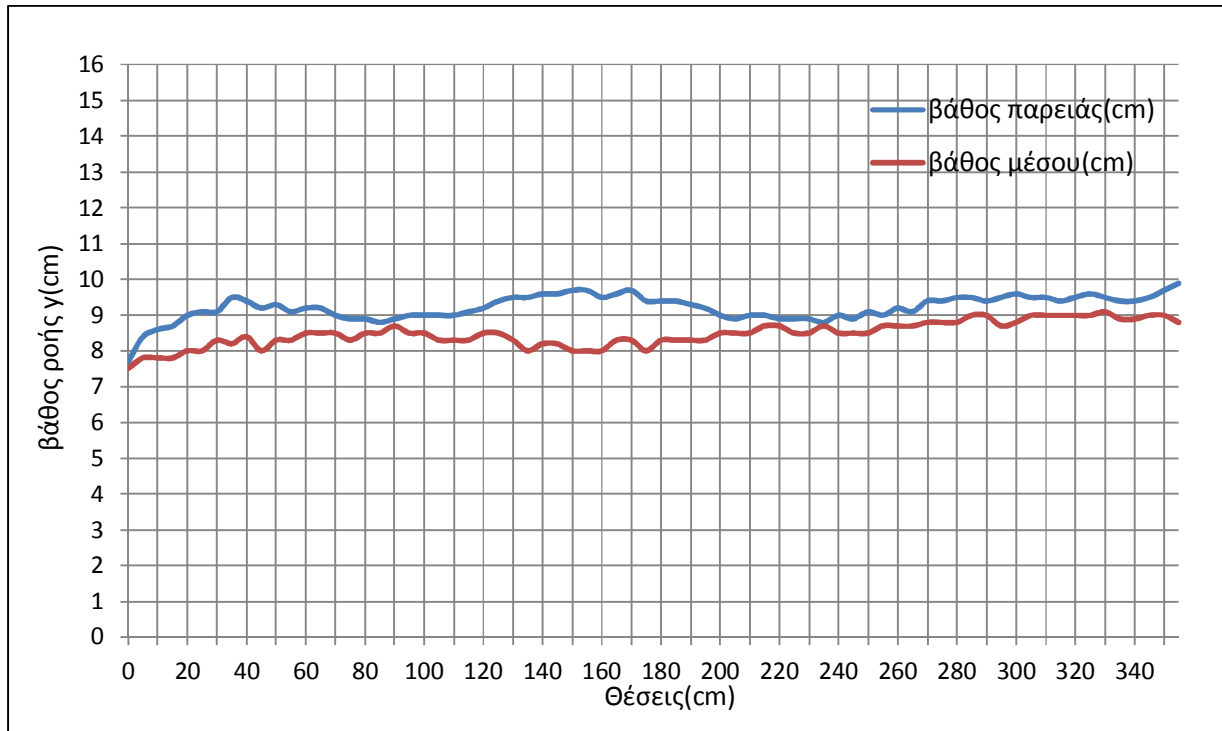
Σχήμα 4.5α. $Q=15$ l/sec



Σχήμα 4.5β. $Q=30$ l/sec



Σχήμα 4.5γ. $Q=45$ l/sec



Σχήμα 4.5δ. $Q=52.5 \text{ l/sec}$

4.2 Παρατηρήσεις

4.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά της ροής

Το βάθος ροής για την παροχή των 15 l/sec έχει έντονες διακυμάνσεις σε όλο το μήκος του ενδιάμεσου τμήματος. Αντιθέτως, στις υπόλοιπες παροχές, στα κατάντη του αγωγού, μπορεί να θεωρηθεί ότι σταθεροποιείται σε σημαντικό βαθμό, γεγονός που επιτρέπει να θεωρηθεί η ροή κατά προσέγγιση ομοιόμορφη.



Εικόνα 4.1. Ελεύθερη επιφάνεια με κυλίνδρους για $Q=15$ l/sec.



Εικόνα 4.2. Ελεύθερη επιφάνεια με ορθογώνια παραλληλεπίπεδα για $Q=45$ l/sec.

Η ροή είναι γενικά τυρβώδης και με παρατεταμένο αερισμό. Επίσης, παρατηρείται αποκόλληση της ροής από το στερεό όριο λόγω των στοιχείων τεχνητής τραχύτητας και εκτόξευσή της στο πρώτο μέτωπο των εμποδίων, ειδικά για την παροχή των 15 l/sec.



Εικόνα 4.3. Αποκόλληση της ροής και φαινόμενα τύρβης.



Εικόνα 4.4. Αποκόλληση από το στερεό όριο και εκτόξευση της ροής.

Εξαίρεση παρουσιάζεται στην κατηγορία των ράβδων και ειδικά στην αραιή διάταξη και για $Q=30, 45$ και 52.5 l/sec, όπου η ελεύθερη επιφάνεια είναι ιδιαίτερα ομαλή.



Εικόνα 4.5. Αραιή διάταξη ράβδων για $Q=45$ l/sec.

4.2.2 Ομοιόμορφα βάθη

Με μία πρώτη ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων παρατηρείται πως τα βάθη ροής αυξήθηκαν κατά 17 έως 92% σε σχέση με τα ομοιόμορφα βάθη χωρίς εμπόδια. Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται για τις διατάξεις των κυλίνδρων και των πυκνών ράβδων, ενώ οι μικρότερες για αυτές των ορθογωνίων παραλληλεπίπεδων και των αραιών ράβδων. Επιπλέον, η σχετική αύξηση του βάθους μειώνεται καθώς αυξάνεται η διοχετευόμενη παροχή.

4.2.3 Μετρήσεις παρειάς και μέσου της διατομής

Το βάθος ροής που μετρήθηκε στην παρειά του αγωγού είναι μεγαλύτερο από αυτό του μέσου από 0.2 έως 5.5 cm. Οι ελάχιστες τιμές της διαφοράς αυτής παρατηρούνται για τις μεγαλύτερες παροχές (30, 45, 52.5 l/sec) και για τη διάταξη των ράβδων, ενώ οι μέγιστη για την παροχή των 15 l/sec και για τη διάταξη των κυλίνδρων. Η διαφορά αυτή οφείλεται στους κυματισμούς που ανακλώνται στα τοιχώματα του αγωγού.

4.2.4 Εύρος παρατηρήσεων

Παρατηρείται ότι οι διακυμάνσεις που παρουσιάζουν τα βάθη ροής είναι γενικά μικρότερες για το μέσον της διατομής σε σχέση με την παρειά. Αυτό είναι δυνατόν να οφείλεται σε μειονέκτημα λόγω κατασκευής, καθώς πολλά από τα εμπόδια βρίσκονται σε επαφή με το τοίχωμα.

Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, πως σε μεγαλύτερες παροχές (45 και 52.5 l/sec) τα εύρη των παρατηρήσεων παρουσιάζουν σχετική μείωση, ειδικά στην περίπτωση των ράβδων, όπου είναι πρακτικά μηδέν και η ελεύθερη επιφάνεια ιδιαίτερα

ομαλή. Οι μεγαλύτερες τιμές του εύρους παρατηρούνται για τα ελάσματα με ημισφαίρια στην παροχή των $Q=15$ l/sec.

5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

5.1 Ο τύπος του Manning

Το 1889 ο Robert Manning διατύπωσε την ακόλουθη σχέση προκειμένου να συνδέσει τα υδραυλικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ομοιόμορφη ροή:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J_o^{1/2} \leftrightarrow \quad (5.1)$$

$$n = \frac{1}{Q} E R^{2/3} J_o^{1/2} \quad (5.2)$$

- όπου,
- V : η μέση ταχύτητα της ροής θεωρούμενη κάθετα στη διατομή (m/sec)
 - Q : η παροχή (m³/sec)
 - E : το εμβαδόν της υδάτινης διατομής = b y (m³)
 - R : η υδραυλική ακτίνα = $\frac{E}{\Pi} = \frac{b y}{b+2y}$ (m)
 - J_o : η κλίση του αγωγού
 - b : το πλάτος του αγωγού (m)
 - y : το βάθος ροής (m)

Λόγω της μαθηματικής απλότητας και των ικανοποιητικών αποτελεσμάτων τα οποία δίνει, ο τύπος του Manning αποτελεί τον πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο τύπο για τον υπολογισμό απωλειών ενέργειας σε ανοικτούς αγωγούς. Θα πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί πως ισχύει μόνο για τυρβώδη ροή και μάλιστα πολύ τραχεία υδραυλική λειτουργία.

Ο συντελεστής n περιγράφει ουσιαστικά την τραχύτητα της επιφάνειας και είναι διαστατός αριθμός με διαστάσεις (sec/m^{1/3}).

Η εξίσωση του Manning μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση ανομοιόμορφης ροής, εάν η κλίση J_0 αντικατασταθεί από την κλίση της γραμμής ενέργειας, χωρίς να εισάγεται σημαντικό σφάλμα στο αποτέλεσμα.

5.1.1 Εφαρμογή του τύπου του Manning στα πειραματικά δεδομένα

Η χρήση της εξίσωσης του Manning στα πειραματικά δεδομένα και η εύρεση του συντελεστή τραχύτητας n προϋποθέτει τον προσδιορισμό των υδραυλικών μεγεθών E και R . Καθώς τα μεγέθη αυτά είναι συναρτήσεις του βάθους ροής, το οποίο έχει προκύψει πειραματικά, θα πρέπει να γίνει μία σωστή προσέγγιση του υπολογιστικού βάθους ροής.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του υπολογιστικού βάθους ροής είναι η εξής:

- Για κάθε παροχή επισημαίνεται η θέση από την οποία και μετά η μέση κλίση της ελεύθερης επιφάνειας γίνεται περίπου ίση με την κλίση του πυθμένα, έτσι ώστε να μπορεί η ροή να θεωρηθεί προσεγγιστικά ομοιόμορφη.
- Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο μέσος όρος των βαθών που μετρήθηκαν ξεχωριστά για την παρειά και το μέσον της διατομής για το ομοιόμορφο τμήμα της ροής.
- Τέλος, το ημίθροισμα των δύο αυτών μέσων όρων αποτελεί το υπολογιστικό βάθος ροής που θα χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση του Manning.

5.2 Υπολογισμός της τραχύτητας

5.2.1 Ελάσματα με ημισφαίρια

Πίνακας 5.1

Q(m³/s)	y(m)	E(m²)	Π(m)	R(m)	Jo	n
0,015	0,054	0,01349	0,35788	0,03768	0,165	0,041
0,030	0,073	0,01828	0,39627	0,04614	0,165	0,032
0,045	0,091	0,02285	0,4328	0,05280	0,165	0,029
0,0525	0,103	0,02578	0,45624	0,05650	0,165	0,029

Το βάθος ροής για κάθε παροχή υπολογίστηκε για τις εξής θέσεις:

Q=15 l/sec : θέση 200 και κατάντη

Q=30 l/sec : θέση 220 και κατάντη

Q=45 l/sec : θέση 170 και κατάντη

Q=52.5 l/sec : θέση 200 και κατάντη

5.2.2 Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα

Πίνακας 5.2

Q(m³/s)	y(m)	E(m²)	Π(m)	R(m)	Jo	n
0,015	0,053	0,01331	0,35646	0,03733	0,165	0,040
0,030	0,063	0,0157	0,37556	0,04179	0,165	0,026
0,045	0,078	0,01957	0,40658	0,04814	0,165	0,023
0,0525	0,085	0,02136	0,42088	0,05075	0,165	0,023

Το βάθος ροής για κάθε παροχή υπολογίστηκε για τις εξής θέσεις:

Q=15 l/sec : θέση 120 και κατάντη

Q=30 l/sec : θέση 120 και κατάντη

Q=45 l/sec : θέση 190 και κατάντη

Q=52.5 l/sec : θέση 220 και κατάντη

5.2.3 Κύλινδροι

Πίνακας 5.3

Q(m ³ /s)	y(m)	E(m ²)	Π(m)	R(m)	Jo	n
0,015	0,060	0,01489	0,36911	0,04034	0,165	0,047
0,030	0,078	0,01958	0,40667	0,04816	0,165	0,035
0,045	0,090	0,02239	0,42911	0,05218	0,165	0,028
0,0525	0,096	0,02395	0,44159	0,05423	0,165	0,027

Το βάθος ροής για κάθε παροχή υπολογίστηκε για τις εξής θέσεις:

Q=15 l/sec : θέση 180 και κατάντη

Q=30 l/sec : θέση 220 και κατάντη

Q=45 l/sec : θέση 190 και κατάντη

Q=52.5 l/sec : θέση 200 και κατάντη

5.2.4 Πυκνή διάταξη ράβδων

Πίνακας 5.4

Q(m ³ /s)	y(m)	E(m ²)	Π(m)	R(m)	Jo	n
0,015	0,055	0,01362	0,35898	0,03795	0,165	0,042
0,030	0,075	0,01863	0,39904	0,04669	0,165	0,033
0,045	0,090	0,02257	0,43057	0,05242	0,165	0,029
0,0525	0,100	0,0251	0,45078	0,05568	0,165	0,028

Το βάθος ροής για κάθε παροχή υπολογίστηκε για τις εξής θέσεις:

Q=15 l/sec : θέση 120 και κατάντη

Q=30 l/sec : θέση 120 και κατάντη

Q=45 l/sec : θέση 200 και κατάντη

Q=52.5 l/sec : θέση 200 και κατάντη

5.2.5 Αραιή διάταξη ράβδων

Πίνακας 5.5

Q(m ³ /s)	y(m)	E(m ²)	Π(m)	R(m)	Jo	n
0,015	0,048	0,01205	0,34643	0,03479	0,165	0,035
0,030	0,067	0,01676	0,38405	0,04363	0,165	0,028
0,045	0,081	0,02022	0,41179	0,04911	0,165	0,024
0,0525	0,091	0,02276	0,43208	0,05268	0,165	0,025

Το βάθος ροής για κάθε παροχή υπολογίστηκε για τις εξής θέσεις:

Q=15 l/sec : θέση 190 και κατάντη

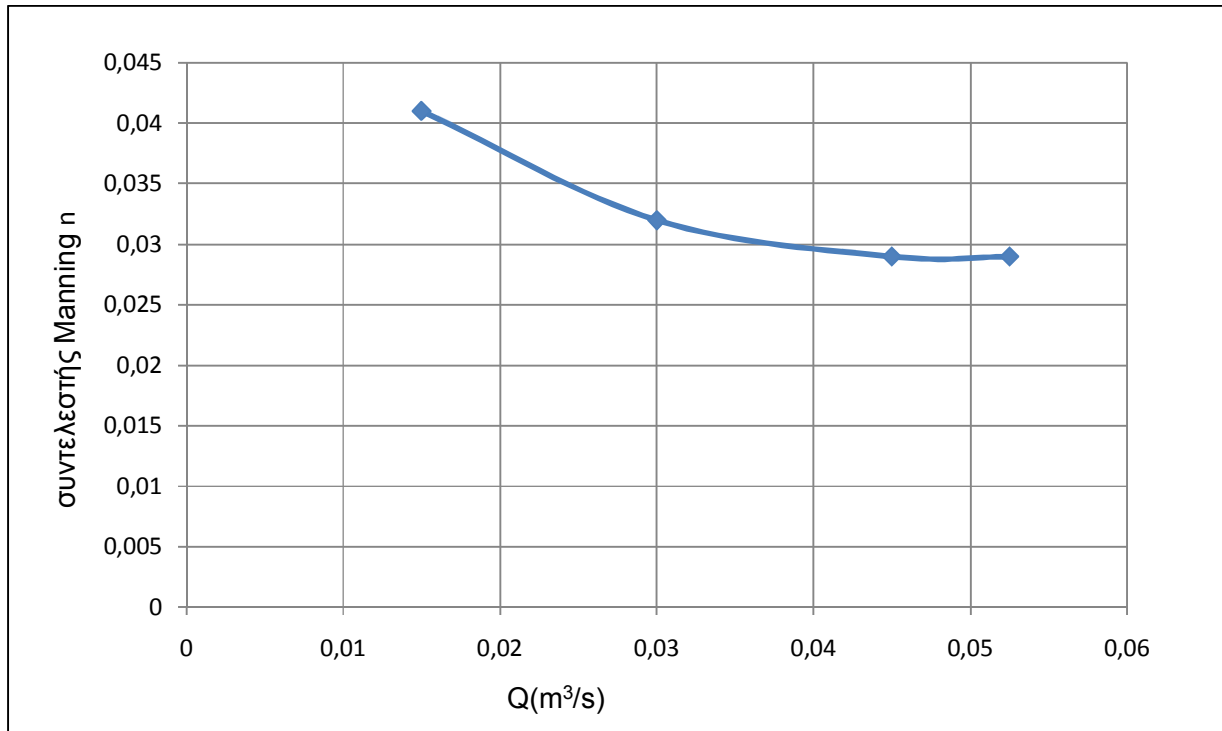
Q=30 l/sec : θέση 155 και κατάντη

Q=45 l/sec : θέση 220 και κατάντη

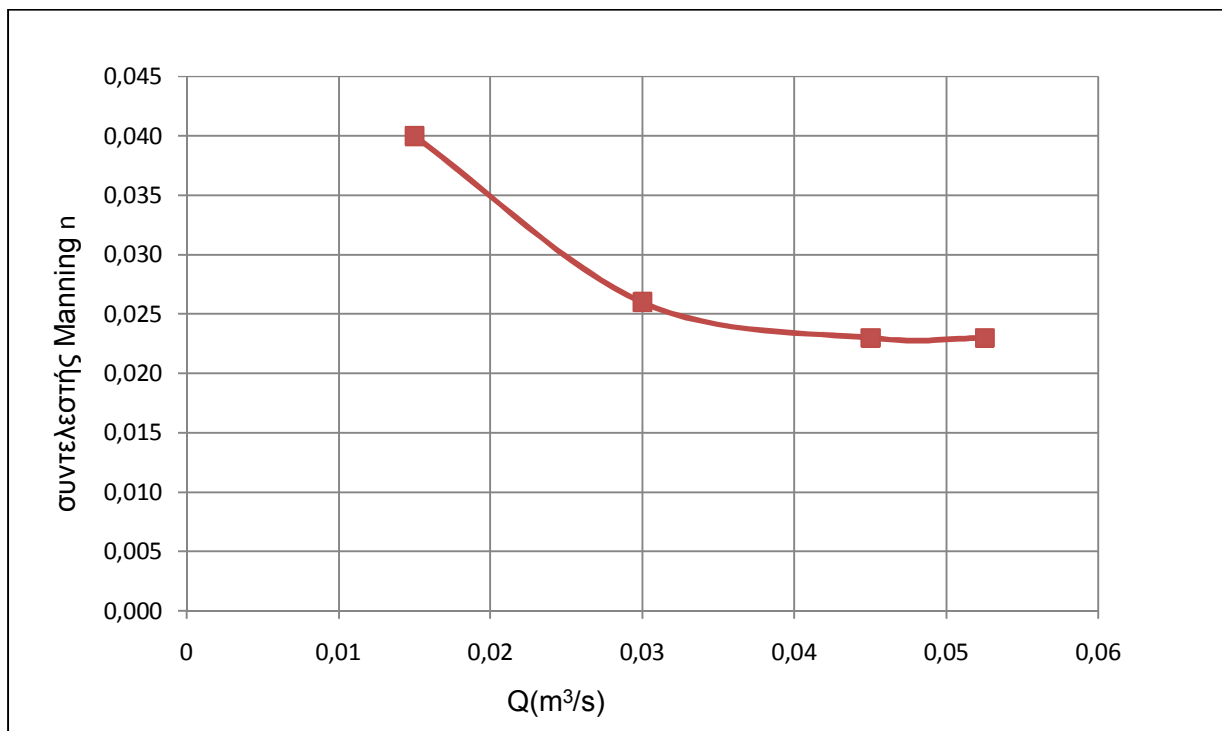
Q=52.5 l/sec : θέση 235 και κατάντη

5.3 Διαγράμματα η συναρτήσει της παροχής

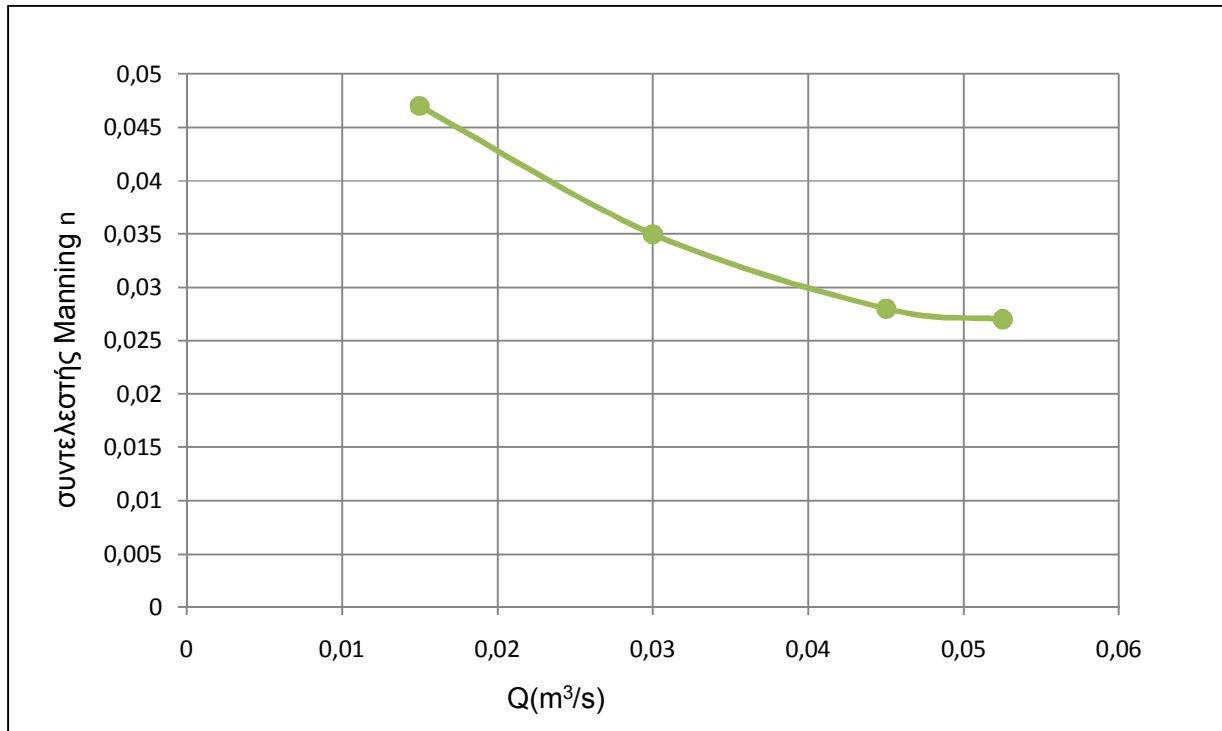
Στη συνέχεια μορφώνονται τα διαγράμματα $\eta(Q)$ για κάθε τύπο εμποδίων σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες. Στα διαγράμματα αποτυπώνεται η συμπεριφορά των εμποδίων ως προς την αύξηση της παροχής. Στο τέλος, παρατίθενται συγκεντρωτικά διαγράμματα για όλες τις διατάξεις συμπεριλαμβανομένων και αυτών που μελετήθηκαν από τον Βασιλάκο (2010).



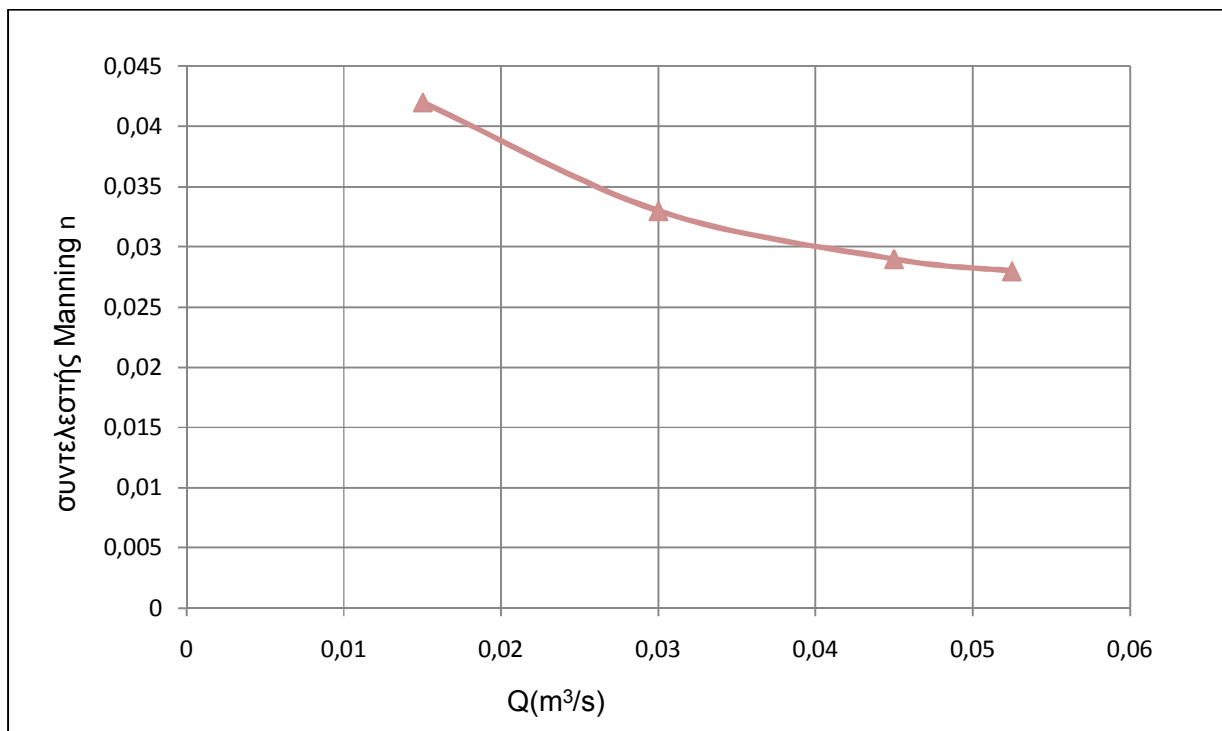
Σχήμα 5.1. Ελάσματα με ημισφαίρια



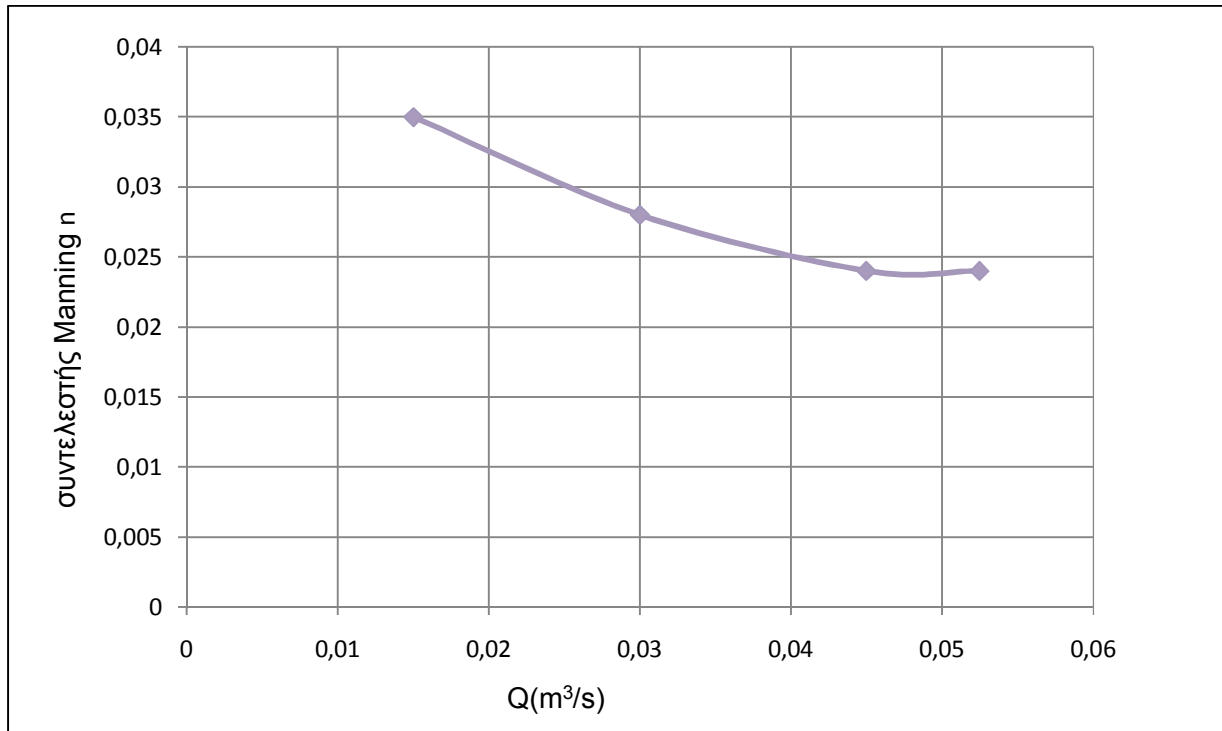
Σχήμα 5.2. Ορθογώνια



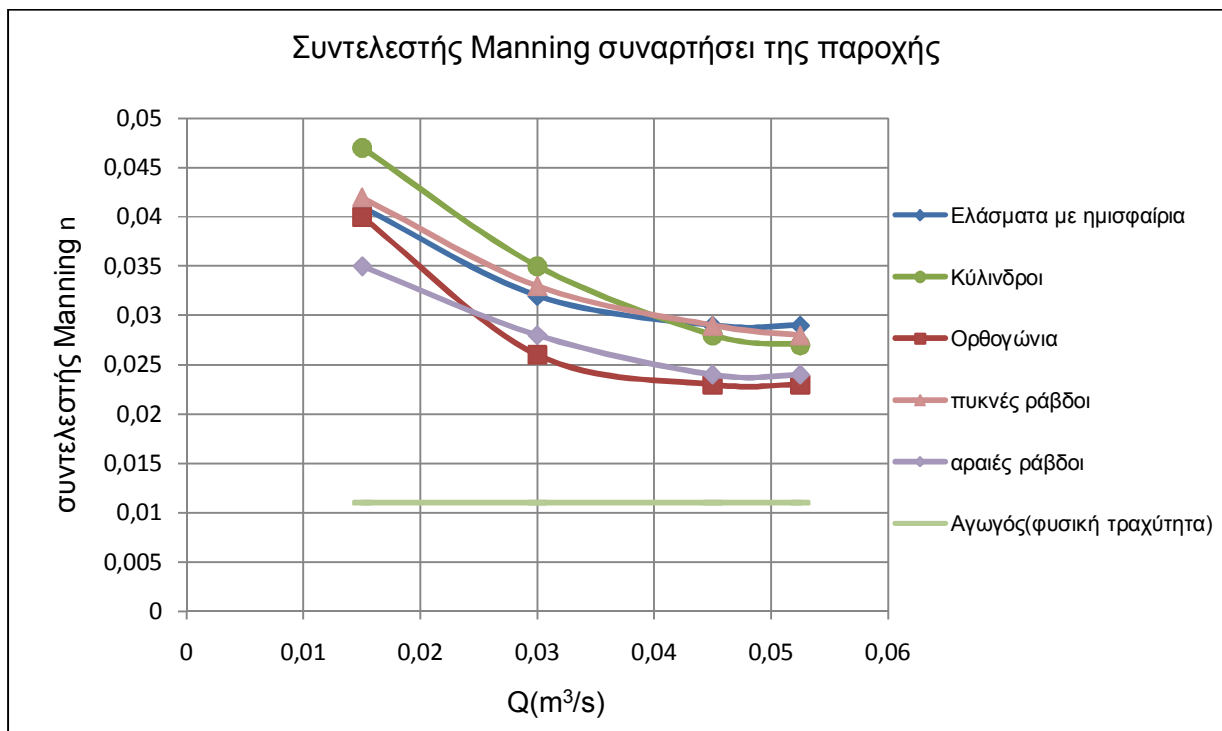
Σχήμα 5.3. Κύλινδροι



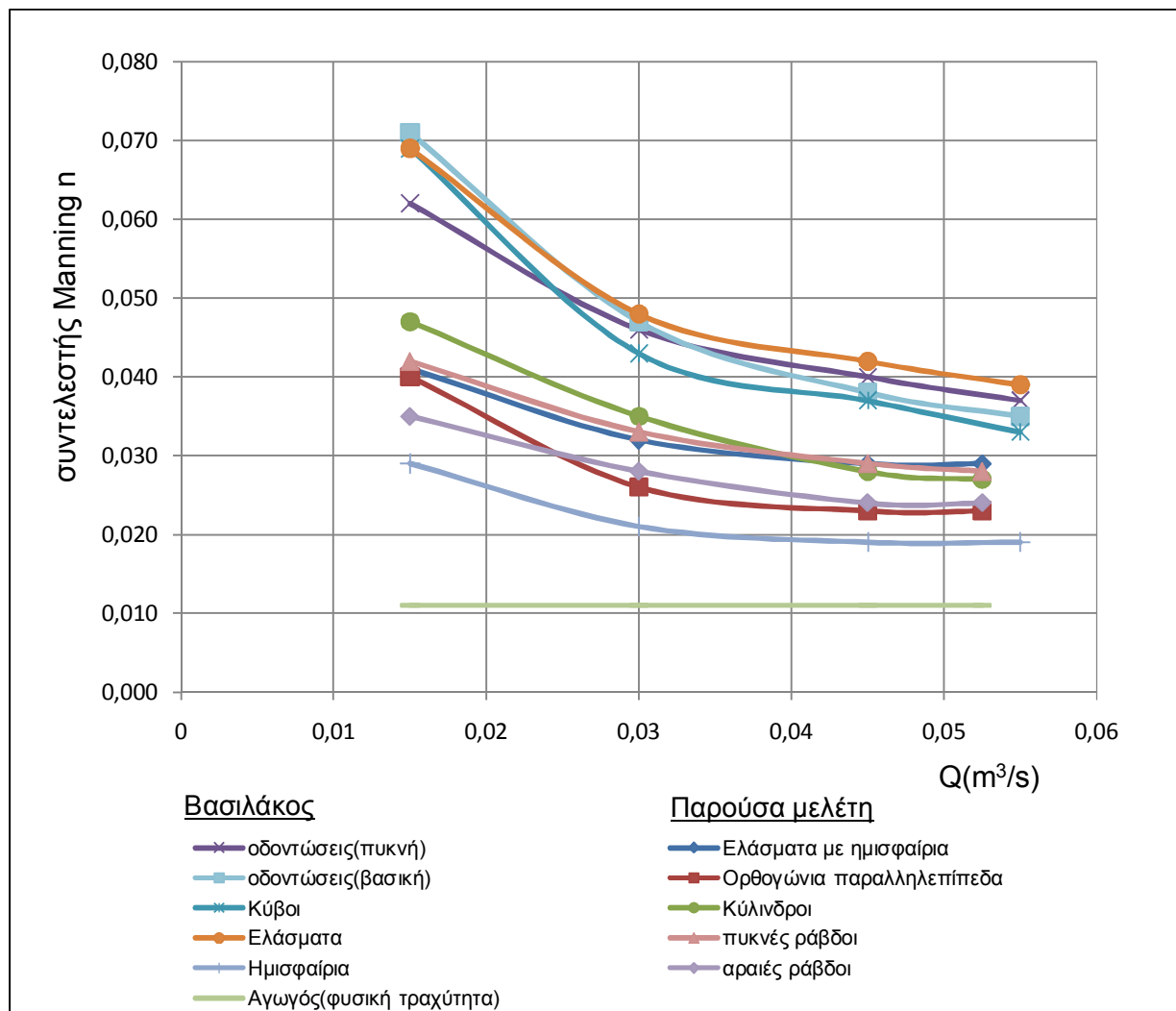
Σχήμα 5.4. Πυκνή διάταξη ράβδων



Σχήμα 5.5. Αραιή διάταξη ράβδων



Σχήμα 5.6. Συγκεντρωτικό διάγραμμα n(Q)



Σχήμα 5.7. Συγκεντρωτικό διάγραμμα $n(Q)$

5.3.1 Παρατηρήσεις

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως ο συντελεστής n είναι πολλαπλάσιος της φυσικής τραχύτητας του αγωγού από Plexiglas ($n \approx 0.011$) από 2-7 φορές.

Τα ελάσματα, οι δύο διατάξεις των οδοντώσεων, οι κύβοι, οι κύλινδροι, και τα ελάσματα με ημισφαίρια έχουν τα εξής κοινά γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- ύψος 37.5 mm.
- εμβαδόν τετραγώνου στο μέτωπο της ροής = $3.75^2 = 14.06 \text{ cm}^2$.

Παρατηρείται ότι οι οδοντώσεις, τα ελάσματα και οι κύβοι εμφανίζουν αισθητά μεγαλύτερες τραχύτητες από τα υπόλοιπα στοιχεία. Αυτό είναι πιθανόν να οφείλεται στην απουσία υδροδυναμικού σχήματος, το οποίο χαρακτηρίζει το μέτωπο των κυλίνδρων και των ελασμάτων με ημισφαίρια.

Η παραπάνω παρατήρηση μπορεί να επαληθευτεί και για τα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα και τα ημισφαίρια. Οι διατάξεις αυτές έχουν μικρότερο ύψος (19 mm) και κατ' επέκταση παρουσιάζουν μικρότερη αντίσταση στη ροή. Ωστόσο, τα βάθη ροής για τα ημισφαίρια είναι από 11 έως 25% μικρότερα από αυτά των ορθογωνίων παραλληλεπιπέδων και ομοίως και οι τραχύτητες από 21 έως 38%.

5.3.2 Σύγκριση πυκνών και αραιών διατάξεων

Όσον αφορά στις δύο διατάξεις των ράβδων, κι εφ' όσον η μόνη διαφορά μεταξύ τους έγκειται στην πυκνότητα των εμποδίων, είναι λογικό οι καμπύλες $n(Q)$ να είναι παράλληλες, καθώς επίσης και η πυκνή διάταξη να παρουσιάζει μεγαλύτερη τραχύτητα σε σχέση με την αραιή. Συγκεκριμένα, η τραχύτητα είναι έως και 21% μεγαλύτερη για την πυκνή διάταξη και τα βάθη ροής μεγαλύτερα από 9.9-14.6%, με μειούμενη ποσοστιαία αύξηση όσο η παροχή αυξάνει. Τέλος, η μεγαλύτερη πυκνότητα των εμποδίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εντονότερων φαινομένων τύρβης και μεγαλύτερων κυματισμών, κυρίως για την παροχή των 15 l/sec. Εν τούτοις, τα φαινόμενα αυτά είναι πολύ μικρότερης κλίμακας σε σχέση με των υπόλοιπων διατάξεων, και η ελεύθερη επιφάνεια του αγωγού αισθητά ομαλότερη.

Παρατηρώντας, ωστόσο, τις δύο διατάξεις των οδοντώσεων γίνεται εμφανές ότι και στην περίπτωση αυτή η πυκνότερη διάταξη μειώνει σημαντικά το εύρος των κυματισμών χωρίς παρ' όλ' αυτά την επίτευξη σημαντικά μεγαλύτερης τραχύτητας και ειδικά στις μεγάλες παροχές.

5.3.3 Αναγωγή της τραχύτητας σε κλίμακα πρωτοτύπου

Λόγω της διεξαγωγής των πειραμάτων σε αγωγό γεωμετρικά όμοιο προς τον πραγματικό, αλλά μικρότερων διαστάσεων, τα βάθη ροής και τα υδραυλικά μεγέθη θα έχουν διαφορετικές τιμές στον πρωτότυπο αγωγό.

Καθώς στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια η επίδραση της βαρύτητας είναι εξαιρετικά σημαντική, παραβλέπεται η ομοιότητα κατά Reynolds και εφαρμόζεται ομοιότητα κατά Froude. Η συνθήκη του Froude είναι η ακόλουθη:

$$F_r = 1 = \frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} \quad (5.3)$$

όπου, r : $\frac{\text{μέγεθος ομοιώματος(m)}}{\text{μέγεθος πρωτότυπου(p)}}$.

Συγκεκριμένα, για την εύρεση της τραχύτητας n σε φυσική κλίμακα, τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται μετατρέπονται στα αντίστοιχα του πρωτότυπου σύμφωνα με τις εξής σχέσεις:

$$\text{Μήκος : } L_p = \lambda L_m \quad (5.4)$$

$$\text{Παροχή : } Q_p = \lambda^{5/2} Q_m \quad (5.5)$$

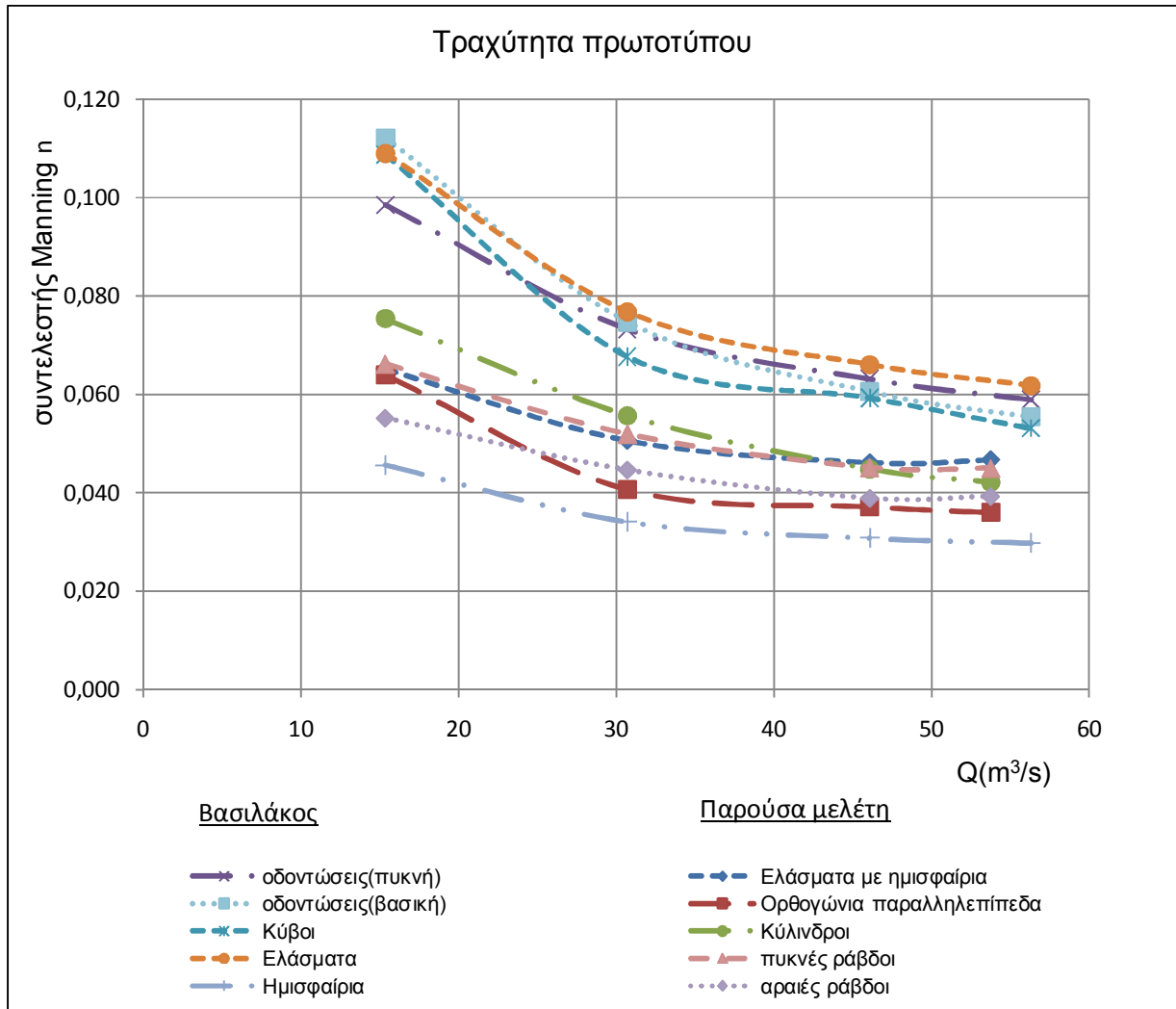
όπου λ η γεωμετρική κλίμακα και p, m οι δείκτες για το πρωτότυπο και το ομοίωμα αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας τη σχέση του Manning, προκύπτει η σχέση των συντελεστών τραχύτητας:

$$n_p = \lambda^{1/6} n_m \quad (5.6)$$

Στον ακόλουθο πίνακα, συνοψίζονται τα βάθη ροής και οι τραχύτητες των πειραμάτων σε στοιχεία πρωτοτύπου:

Πίνακας 5.6

Τύπος εμποδίου	$Q_p(m^3/s)$	$y_p(m)$	n_p
οδοντώσεις(πυκνή)	15,36	1,149	0,098
	30,72	1,525	0,073
	46,08	1,842	0,063
	56,32	2,032	0,059
οδοντώσεις(βασική)	15,36	1,259	0,112
	30,72	1,547	0,075
	46,08	1,786	0,061
	56,32	1,939	0,055
κύβοι	15,36	1,232	0,109
	30,72	1,440	0,068
	46,08	1,757	0,059
	56,32	1,878	0,053
ελάσματα	15,36	1,234	0,109
	30,72	1,578	0,077
	46,08	1,904	0,066
	56,32	2,106	0,062
ημισφαίρια	15,36	0,678	0,046
	30,72	0,890	0,034
	46,08	1,098	0,031
	56,32	1,235	0,030
ελάσματα με ημισφαίρια	15,36	0,863	0,065
	30,72	1,170	0,051
	46,08	1,462	0,046
	53,76	1,650	0,047
ορθογώνια παραλληλεπίπεδα	15,36	0,852	0,064
	30,72	1,004	0,041
	46,08	1,253	0,037
	53,76	1,367	0,036
κύλινδροι	15,36	0,954	0,075
	30,72	1,253	0,056
	46,08	1,434	0,045
	53,76	1,533	0,042
πυκνές ράβδοι	15,36	0,872	0,066
	30,72	1,192	0,052
	46,08	1,440	0,045
	53,76	1,606	0,045
αραιές ράβδοι	15,36	0,771	0,055
	30,72	1,072	0,045
	46,08	1,294	0,039
	53,76	1,456	0,039



Σχήμα 5.8. Τραχύτητα σε μεγέθη πρωτοτύπου.

Από τον πίνακα 5.6 και το διάγραμμα 5.8, προκύπτει ότι η τραχύτητα σε κλίμακα πρωτοτύπου είναι κατά 60% μεγαλύτερη σε σχέση με του ομοιώματος, σύμφωνα και με τη σχέση (5.6) για $\lambda = 16$.

5.4 Αδιαστατοποίηση των υπό μελέτη παραμέτρων

Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν τη μεταβολή της τραχύτητας σε συνάρτηση με την παροχή Q . Ωστόσο, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση-πρόβλεψη του συντελεστή Manning και κατ' επέκταση του βάθους ροής y για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων του προβλήματος, όπως είναι ο τύπος και οι διαστάσεις των εμποδίων, το πλάτος του αγωγού, η πυκνότητα της εκάστοτε διάταξης κ.τ.λ., καθώς εξαρτώνται από τη διοχετευόμενη παροχή.

Έτσι, στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια για αδιαστατοποίηση των μεταβλητών του προβλήματος. Η αδιαστατοποίηση των μεταβλητών οδηγεί στην εμφάνιση αδιάστατων αριθμών που ελέγχουν το πρόβλημα και μειώνουν την πολύ-παραμετρικότητά του. Επιπλέον, επιτρέπει την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε εύχρηστη μορφή και την εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων σχετικά με τη σημασία των πειραματικών παραμέτρων του προβλήματος.

Οι παράμετροι που δοκιμάστηκαν για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε αδιαστατοποιημένη μορφή είναι οι ακόλουθες:

- Ομοιόμορφο βάθος ροής y .
- Κρίσιμο βάθος ροής y_c .
- Ύψος h και πλάτος a εμποδίου στο μέτωπο της ροής.
- Εμβαδόν εμποδίου στο μέτωπο της ροής $E = h \cdot a$.
- Εμβαδόν εμποδίου κατά μήκος της ροής $E_{\text{διαμ}}$.
- Εγκάρσια s και διαμήκης δ απόσταση μεταξύ των εμποδίων.
- Εμβαδόν κενού ανάμεσα στα εμπόδια $E' = s \cdot \delta$.
- Κλίση J του αγωγού.
- Παροχή ανά μονάδα πλάτους $q = Q/b$.
- Συντελεστής Manning n .
- Παράμετρος $\theta = \frac{\text{συνολική προβολή των εμποδίων στη διεύθυνση της ροής}}{\text{συνολική οριζόντια επιφάνεια καναλιού}}$ των Herbich – Shulits.
- Αδιάστατος συντελεστής τριβής f των Darcy-Weisbach.

Παρακάτω, παρατίθενται τα διαγράμματα με τις αδιάστατες, πλέον, μεταβλητές. Για τη μόρφωση των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, αλλά και αυτά των Π. Βασιλάκου, Herbach–Shulits και Χριστοδούλου –Παπαθανασιάδη, ούτως ώστε να είναι δυνατό να προκύψει ένα πιο σφαιρικό συμπέρασμα.

Αναλυτικότερα, από του Βασιλάκου παρατίθενται όλες οι διατάξεις και τύποι εμποδίων (βασική και πυκνή διάταξη οδοντώσεων, κύβοι, ελάσματα, ημισφαίρια).

Από τους Herbach – Shulits, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα για κύβους ακμής 15cm και για:

Πίνακας 5.7

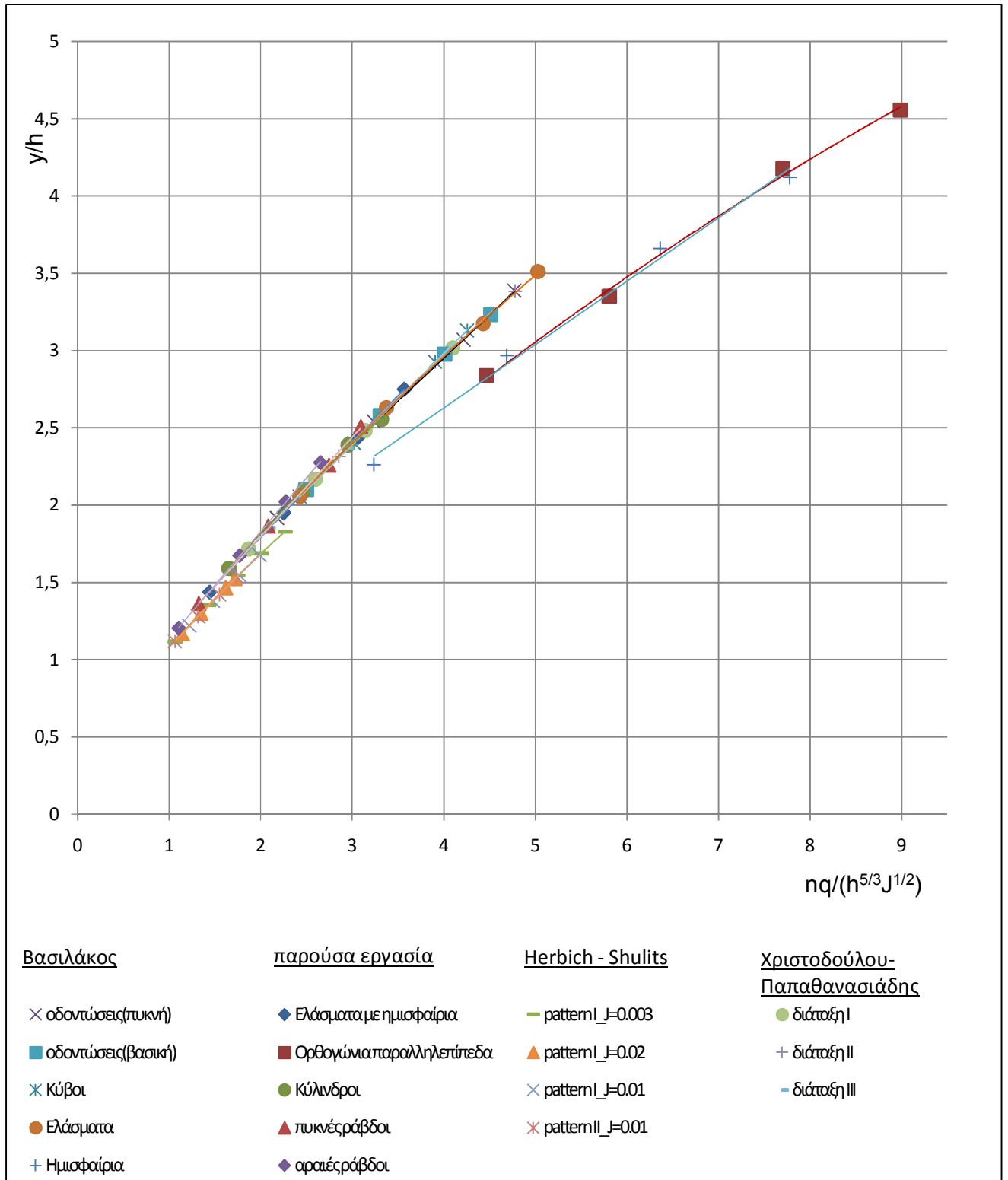
Κλίση J	εγκάρσια απόσταση s(m)	διαμήκης απόσταση δ(m)
0,003	0,30	0,30
0,020	0,30	0,30
0,010	0,30	0,30
0,010	0,38	0,38

Από τους Χριστοδούλου – Παπαθανασιάδη χρησιμοποιήθηκαν τα μεγέθη που προέκυψαν από την αναγωγή των πειραματικών δεδομένων στο πρωτότυπο για τις οδοντώσεις (κύβοι ακμής 60cm με απότμηση στο πίσω μέρος):

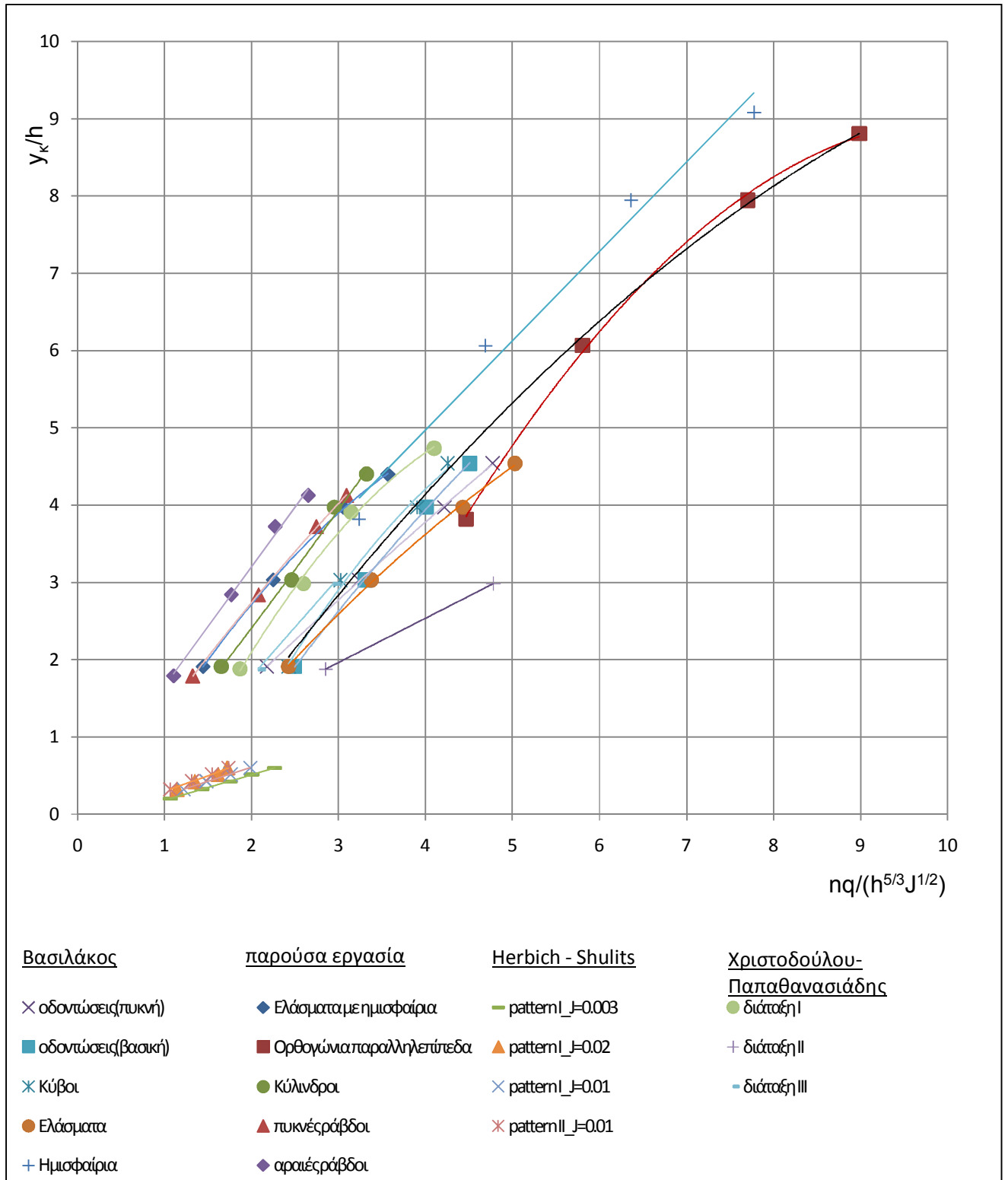
Πίνακας 5.8

Διάταξη	εγκάρσια απόσταση s(m)	διαμήκης απόσταση δ(m)
I_βασική	4	0,536
II_αραιή	8	0,536
III_πυκνή	2	0,536

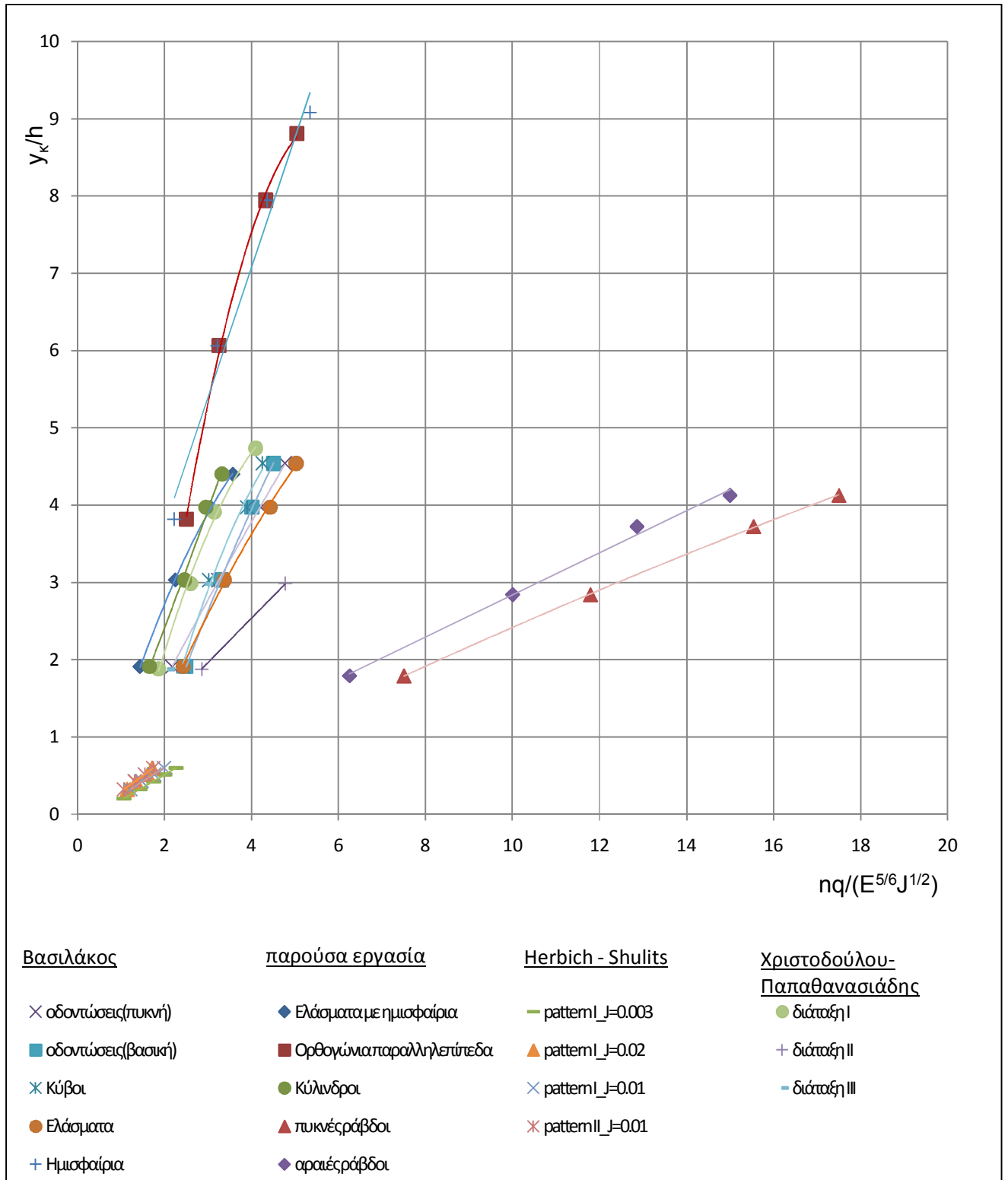
Στο παράρτημα βρίσκεται συγκεντρωτικός πίνακας με όλα τα αδιάστατα μεγέθη που μελετήθηκαν.



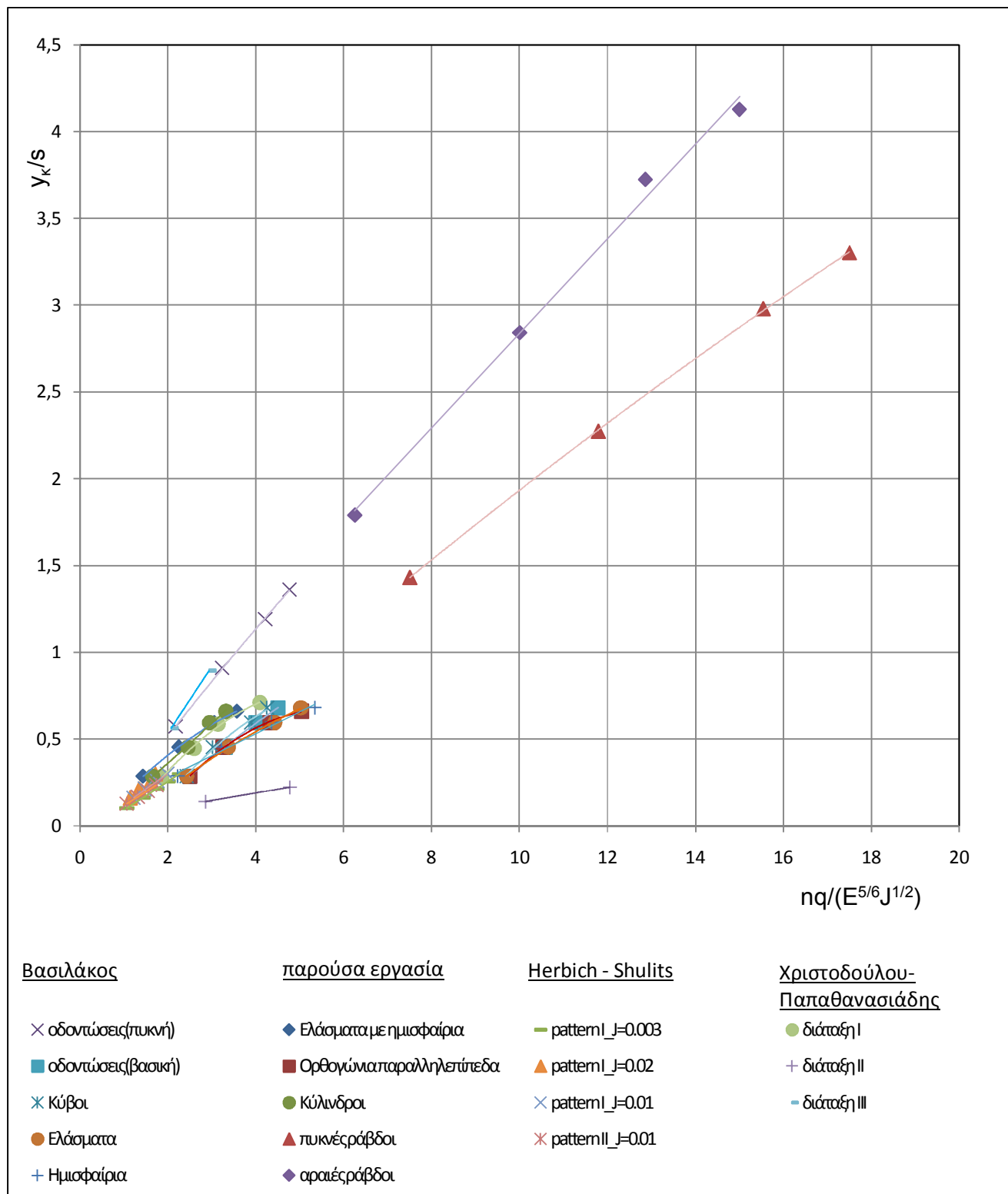
Σχήμα 5.9.



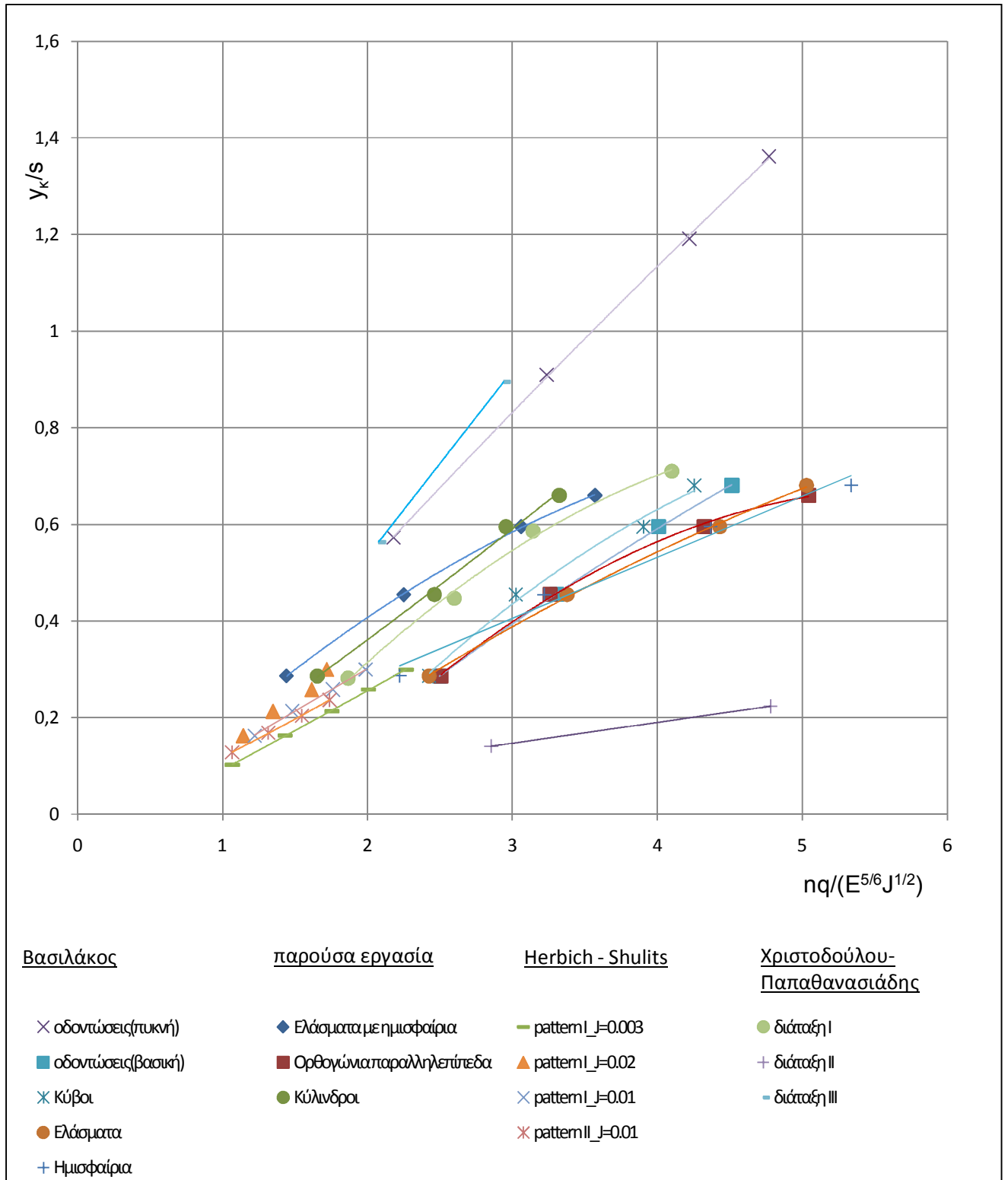
Σχήμα 5.10.



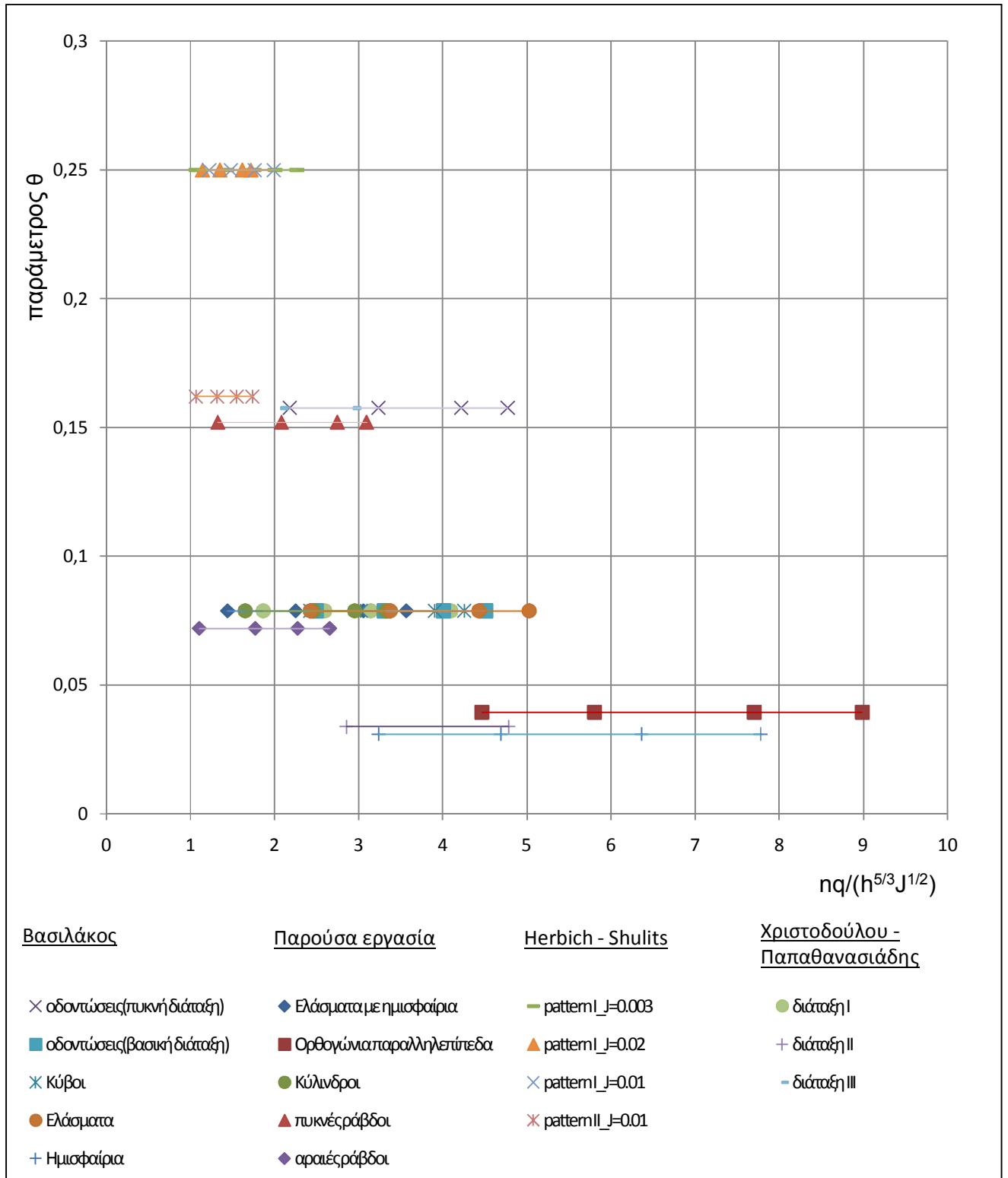
Σχήμα 5.11.



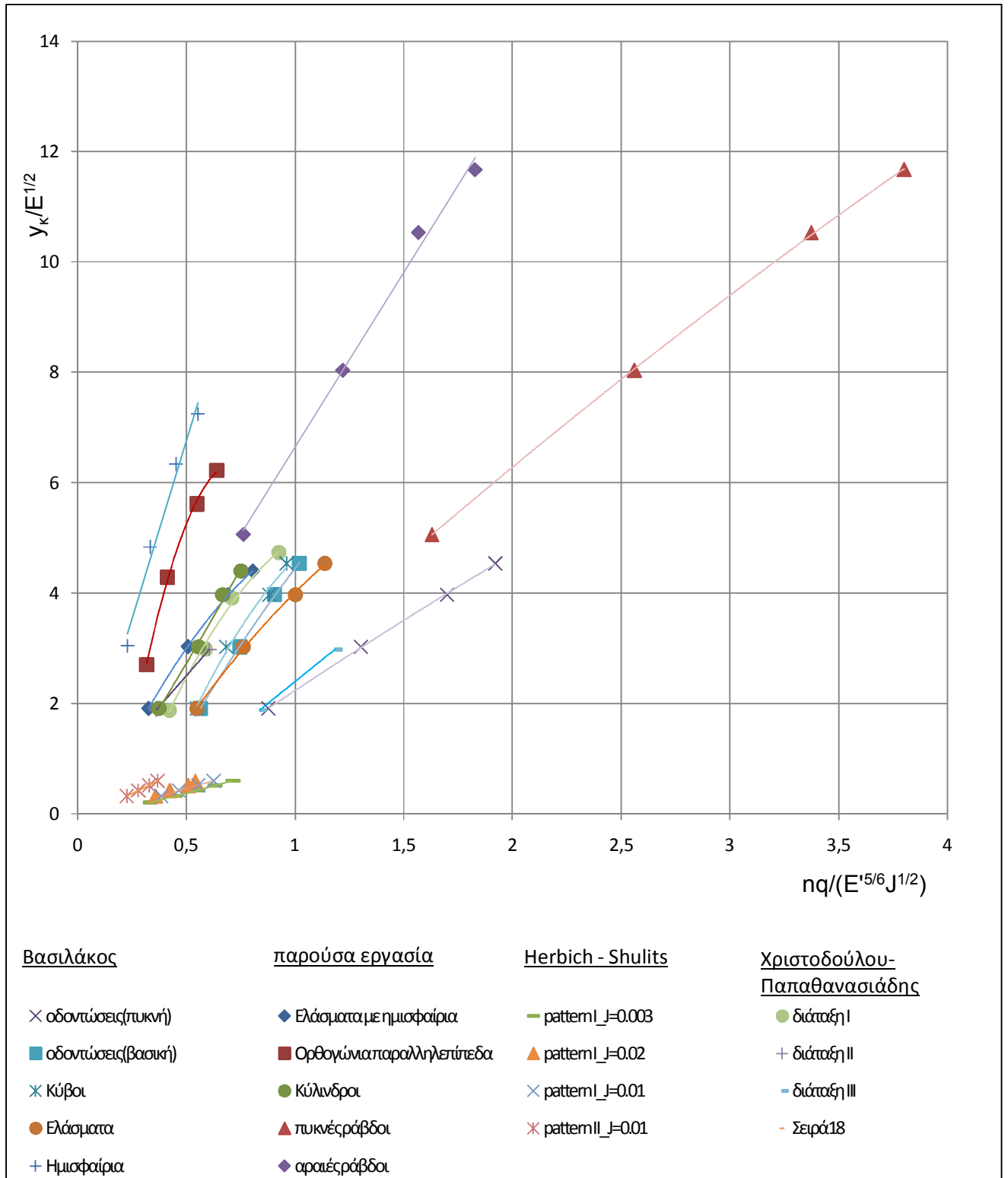
Σχήμα 5.12.



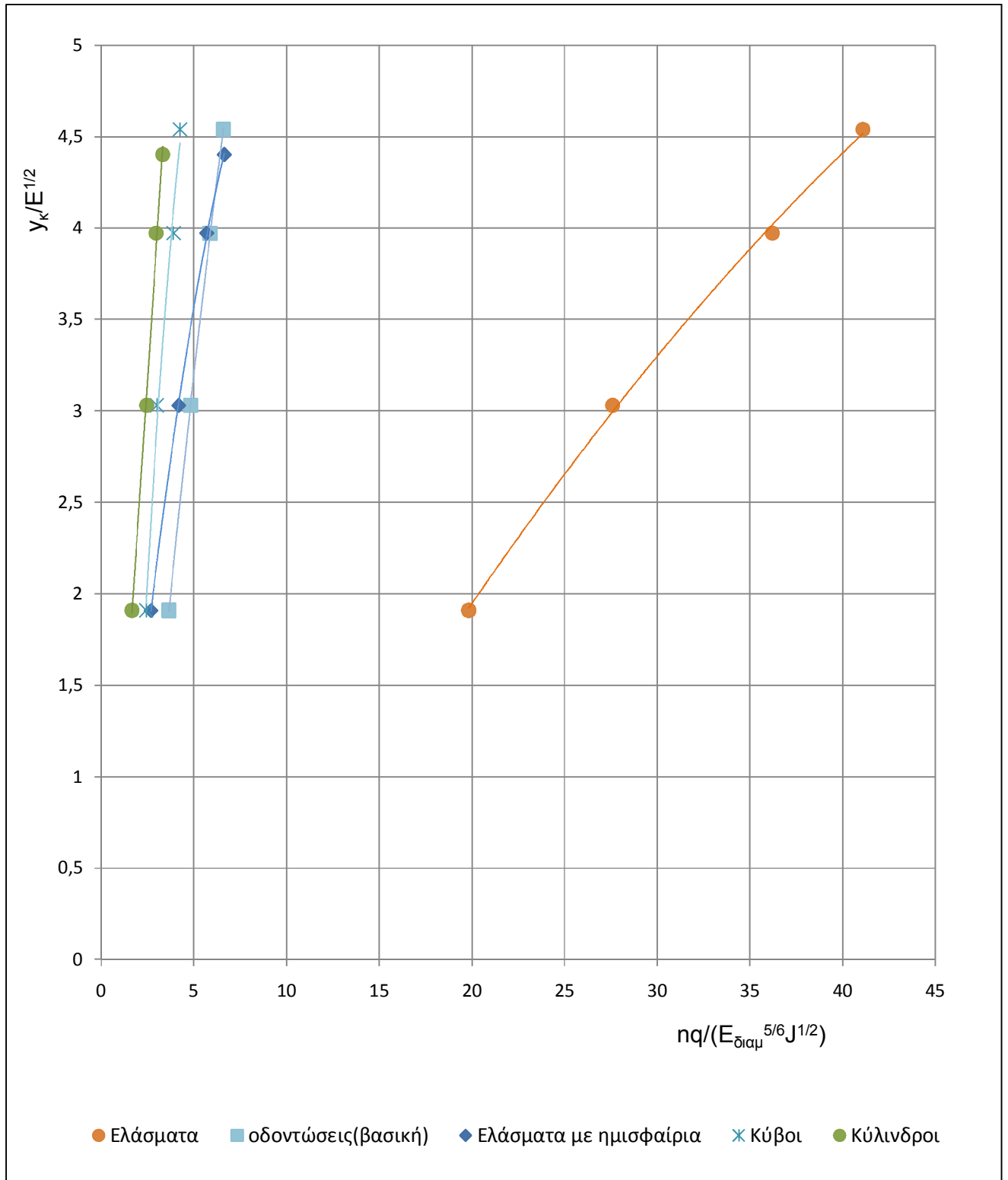
Σχήμα 5.13. Μεγέθυνση του σχ. 12 χωρίς τις ράβδους.



Σχήμα 5.14.



Σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.16.

5.4.1 Εκτίμηση της επιρροής των παραμέτρων

Το διάγραμμα 5.9 φανερώνει την ύπαρξη μιας συστηματικότητας για όλα τα εμπόδια και γίνεται εμφανής η σπουδαιότητα του ύψους του εμποδίου ως προς το βάθος ροής. Ωστόσο, το διάγραμμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση του βάθους ροής, καθώς και τα δύο αδιάστατα μεγέθη που περιλαμβάνει περιέχουν την ίδια άγνωστη παράμετρο (το y και το n , που εξαρτάται από το y).

1. Σχήμα 5.10.

Στο διάγραμμα αυτό εμφανίζονται οι παρακάτω τρεις ομάδες γραφημάτων με κοινό χαρακτηριστικό το ύψος h :

- i. Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα και ημισφαίρια ($h=19\text{mm}$).
- ii. Οδοντώσεις, κύβοι, ελάσματα με και χωρίς ημισφαίρια, κύλινδροι, ράβδοι ($h=37.5/40\text{mm}$).
- iii. Κύβοι σε υποκρίσιμη ροή ($h=150\text{mm}$).

Το ύψος του εμποδίου είναι μία βασική παράμετρος που επηρεάζει την τραχύτητα n με ανάλογη σχέση. Τα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα μάλιστα, τα οποία αποτελούν ουσιαστικά τους μισούς κύβους του Βασιλάκου, φαίνεται να είναι προέκταση των κύβων (μαύρη γραμμή πάνω στο διάγραμμα). Επομένως υπάρχει συσχέτιση μεταξύ ίδιου σχήματος εμποδίων με διαφορετικό ύψος.

Ωστόσο, οι ράβδοι, αν και έχουν μεγαλύτερο ύψος (40 mm) από τα υπόλοιπα στοιχεία (37.5 mm) της υπερκρίσιμης ροής, εμφανίζουν μικρότερο n . Η παρατήρηση αυτή επιτρέπει να διατυπωθεί η υπόθεση ότι θα πρέπει να εξασφαλιστεί μία ελάχιστη τιμή της συνολικής προβαλλόμενης επιφάνειας του εμποδίου στο μέτωπο της ροής, δηλαδή του αριθμού των εμποδίων, η οποία εκφράζεται και μέσα από την παράμετρο θ .

2. Σχήμα 5.11.

Αντίστοιχα με προηγουμένως, εμφανίζονται τέσσερις ομάδες εμποδίων με κοινή επιφάνεια προβολής στο μέτωπο της ροής. Είναι εμφανές πως όσο μεγαλύτερο το E , τόσο μεγαλύτερη η τραχύτητα.

3. Σχήματα 5.12 και 5.13

Στα συγκεκριμένα διαγράμματα, ενδιαφέρον παρουσιάζει το ότι οι καμπύλες για τα ελάσματα, τα ημισφαίρια και τα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα σχεδόν ταυτίζονται. Εν τούτοις, δεν προκύπτει κάποιο συμπέρασμα, αφού δεν υπάρχει κάποιο γεωμετρικό στοιχείο που να είναι κοινό και για τα τρία εμπόδια.

Μεταξύ των διατάξεων I, II και III των οδοντώσεων συμπεραίνεται ότι η αύξηση της εγκάρσιας απόστασης s συνεπάγεται μεγαλύτερη τραχύτητα, ενώ η μείωση του s κάτω από το πλάτος b δεν επιφέρει σημαντική μεταβολή στην τραχύτητα. Στις ράβδους, όμως, και στους κύβους των Herbich – Shulits όσο αυξάνει η απόσταση s μειώνεται η τραχύτητα n .

4. Σχήμα 5.14

Ουσιαστικά δείχνει το εύρος της παραμέτρου θ . Αυτή διατηρείται σταθερή για κάθε διαφορετικό τύπο στοιχείου τραχύτητας, καθώς εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του εμποδίου και του καναλιού και την πυκνότητα της διάταξης.

Η παράμετρος θ λαμβάνει τιμές από 0.031 έως και 0.16, ενώ για τα πειράματα των Herbich – Shulits από 0.050 έως 0.25 για τα βυθισμένα δοκίμια. Επομένως, η θ βρίσκεται μέσα στο εύρος τιμών που προέκυψε από την προηγούμενη έρευνα, παρ' όλο που πρόκειται για υπερκρίσιμη ροή στην προκειμένη περίπτωση.

5. Σχήματα 5.15 και 5.16

Στο διάγραμμα αυτό οι βασικές μεταβλητές που ενδιαφέρουν είναι η επιφάνεια E και το κενό E' μεταξύ των εμποδίων.

Στην υποκρίσιμη ροή, η αύξηση της πυκνότητας μεταξύ των εμποδίων ή η αύξηση της κλίσης του αγωγού συνοδεύονται από αύξηση της τραχύτητας. Συγκεκριμένα, αύξηση της κλίσης κατά 6 φορές δίνει τραχύτητα έως και 200% μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση της κλίσης το βάθος ροής μειώνεται, επομένως ο λόγος y/h μειώνεται. Έτσι, διαφαίνεται η επίδραση του ύψους του στοιχείου στην αντίσταση στη ροή.

Στην υπερκρίσιμη ροή, για τις οδοντώσεις παρατηρείται πως μεταξύ της βασικής (I) και πυκνής (III) διάταξης δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές ως προς την τραχύτητα που επιτυγχάνεται, σε αντίθεση με αυτήν της αραιής διάταξης (II), η οποία είναι έως και 67% μεγαλύτερη των προηγούμενων διατάξεων. Μπορεί, επομένως, να θεωρηθεί ότι η αραιή διάταξη των οδοντώσεων δρα περισσότερο ως μεμονωμένα εμπόδια παρά ως συνολική τραχύτητα.

Για τις ράβδους, η αύξηση της πυκνότητας συνεπάγεται αύξηση του n .

Για τα υπόλοιπα στοιχεία, παρατηρείται ότι τα εμπόδια με ακμές και γωνίες εμφανίζουν μεγαλύτερη τραχύτητα απ' ό,τι τα στοιχεία με στρογγυλές επιφάνειες. Ειδικότερα, η μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζεται για τα ελάσματα και ακολουθούν με φθίνουσα σειρά οι οδοντώσεις, οι κύβοι, τα ελάσματα με ημισφαίρια και οι κύλινδροι.

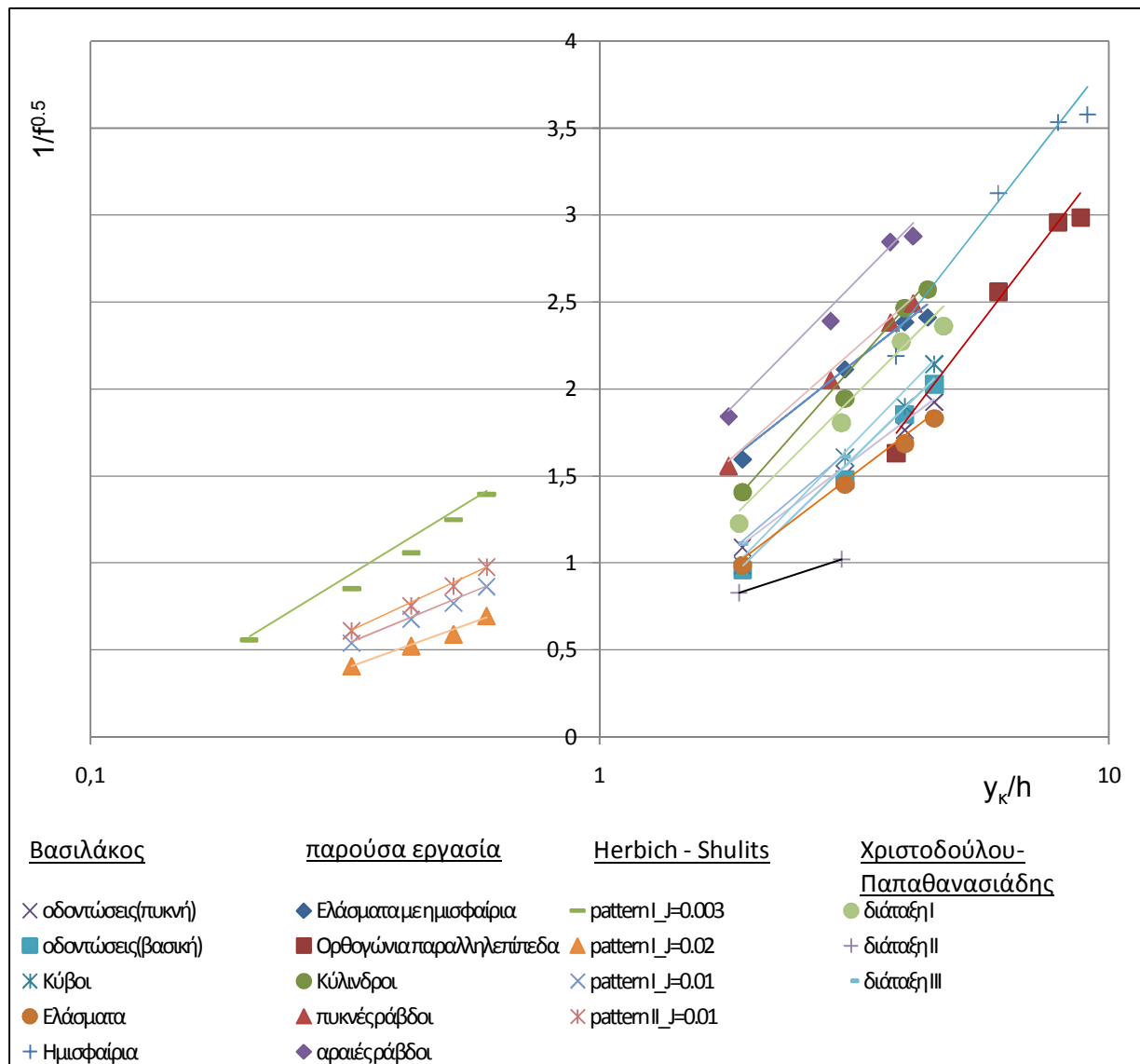
Επειδή τα παραπάνω στοιχεία έχουν την ίδια ακριβώς διάταξη και το ίδιο μέτωπο προβολής στη ροή, συνετάχθη το διάγραμμα 5.16, το οποίο εισάγει μία ακόμη παράμετρο, την επιφάνεια κατά μήκος της ροής ($E_{\text{διαμ}}$):

- i. Από το σχήμα 5.16 συνάγεται το συμπέρασμα ότι και η κατά μήκος της ροής επιφάνεια των στοιχείων επιδρά στην επιτευχθείσα τραχύτητα με αντιστρόφως ανάλογη σχέση.
- ii. Ωστόσο, τα ελάσματα με ημισφαίρια αν και έχουν μικρότερη $E_{\text{διαμ}}$ από τις οδοντώσεις, εμφανίζουν μικρότερη τραχύτητα από αυτές, λόγω υδροδυναμικού σχήματος.

5.4.2 Ο συντελεστής τριβής f

Ακολουθεί το διάγραμμα με τον αδιάστατο συντελεστή τριβής f των Darcy-Weisbach συναρτήσεως του λόγου y_c/h . Ο f υπολογίστηκε από την εξίσωση που τον συνδέει με το συντελεστή Manning:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{8g}} \quad (5.7)$$



Σχήμα 5.17. Μεταβολή του f με το y_{κ}/h .

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι ο συντελεστής f συνδέεται με το λόγο y_{κ}/h με τη σχέση:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = a \log \frac{y_{\kappa}}{h} + b \quad (5.8)$$

Επομένως, γνωρίζοντας την κλίση a και τη σταθερά b που αντιστοιχεί σε κάθε τύπο εμποδίου είναι δυνατή η εκτίμηση του αδιάστατου συντελεστή f και κατ' επέκταση και της τραχύτητας n .

Παρατίθεται πίνακας με τους συντελεστές a και b έτσι όπως προέκυψαν για κάθε τύπο εμποδίου:

Πίνακας 5.9

	a	b
οδοντώσεις(πυκνή)	0,3158	0,5098
οδοντώσεις(βασική)	0,4090	0,2041
κύβοι	0,4310	0,2095
ελάσματα	0,3186	0,4169
ημισφαίρια	0,2963	1,2951
ελάσματα με ημισφαίρια	0,3357	1,0083
ορθογώνια παρ/πίπεδα	0,2772	0,6886
κύλινδροι	0,4830	0,4898
πυκνές ράβδοι	0,4026	0,8648
αραιές ράβδοι	0,4639	1,0426
pattern I $J=0,003$	2,1270	0,1394
pattern I $J=0,02$	1,0322	0,0704
pattern I $J=0,01$	1,1683	0,1660
pattern II $J=0,01$	1,3285	0,1803
Διάταξη I(βασική)	0,4132	0,5213
Διάταξη II(αραιή)	0,1767	0,4959
Διάταξη III(πυκνή)	0,4525	0,2609

Η κλίση a αυξάνει με τη μείωση της πυκνότητας των εμποδίων, με την αύξηση του h και με την αύξηση της κλίσης του αγωγού. Η σταθερά b σημειώνει αντίθετη συμπεριφορά από της a σε σχέση με τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Επίσης η b μεγαλώνει όσο πιο τετραγωνικό είναι το σχήμα του εμποδίου.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων για τις παραπάνω εναλλακτικές διατάξεις μεγάλων στοιχείων τραχύτητας προκύπτει, κατ' αρχάς, ότι ο συντελεστής Manning αποκτά αισθητά μεγαλύτερη τιμή που κυμαίνεται από 2-7 φορές του n του ανεπένδυτου πυθμένα. Η τραχύτητα αυτή μειώνεται καθώς η παροχή αυξάνει, διότι τότε η ροή αντιλαμβάνεται τα εμπόδια περισσότερο ως προεξοχές του πυθμένα και όχι ως μεμονωμένα εμπόδια. Γι' αυτό ακριβώς, εμφανίζονται μικρότεροι κυματισμοί και εξομαλύνεται η ελεύθερη επιφάνεια.

Σημαντικό ρόλο στην αύξηση της τραχύτητας, ανεξάρτητα της παροχής, παίζει και η γεωμετρία των εμποδίων και τα χαρακτηριστικά της διάταξης. Ειδικότερα, οι παράγοντες αυτοί είναι:

- το ύψος,
- η επιφάνεια προβολής κάθετα στη ροή,
- η επιφάνεια κατά τη διεύθυνση της ροής και
- το σχήμα του εμποδίου,
- η πυκνότητα της διάταξης και
- η κλίση του πυθμένα.

Το ύψος και η επιφάνεια προβολής κάθετα στη ροή επηρεάζουν τη μεταβολή της τραχύτητας ανάλογα, ενώ η επιφάνεια κατά τη διεύθυνση της ροής αντιστρόφως ανάλογα. Ακόμη, ανάμεσα σε εμπόδια με ίδια τα προηγούμενα χαρακτηριστικά, τη μεγαλύτερη τραχύτητα προσδίδει αυτό με το λιγότερο υδροδυναμικό σχήμα (έντονα γωνιώδες, χωρίς καμπύλες και στρογγυλές επιφάνειες).

Η μεγαλύτερη πυκνότητα των εμποδίων φαίνεται να οδηγεί σε αύξηση του n (ράβδοι, κύβοι των Herbich-Shulits). Εν τούτοις, είναι πιθανό η αύξηση της πυκνότητας πέρα από κάποιο όριο να μη δίνει μεγαλύτερες τραχύτητες, όπως στην περίπτωση των οδοντώσεων.

Από τη μελέτη των στοιχείων στην υποκρίσιμη ροή, μεγαλύτερες κλίσεις δίνουν και μεγαλύτερες τραχύτητες.

Τέλος, ο συντελεστής τριβής f συσχετίζεται λογαριθμικά με το λόγο y_w/h για κάθε τύπο εμποδίου, επομένως είναι δυνατή η εύρεση της τραχύτητας και του βάθους ροής.

Προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση της αντίστασης στη ροή για περισσότερες πυκνότητες των στοιχείων τραχύτητας, ούτως ώστε να αποσαφηνιστεί ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η συγκεκριμένη μεταβλητή. Ακόμη, η μελέτη θα πρέπει να επεκταθεί και σε διαφορετικές κλίσεις της υπερκρίσιμης ροής για την παρουσίαση πιο συστηματοποιημένων αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Νουτσόπουλος Γ. – Χριστοδούλου Γ. – Παπαθανασιάδης Τ., *Υδραυλική ανοικτών αγωγών*, Αθήνα 2007.
2. Νουτσόπουλος Γ. – Χριστοδούλου Γ., *Μαθήματα μηχανικής των ρευστών*, Αθήνα 1996.
3. Δημητρίου Ι., *Εφαρμοσμένη Υδραυλική*, Τεύχος Α', Αθήνα 2007.
4. Βασιλάκος Π., *Πειραματική διερεύνηση ροής ανοικτού αγωγού μεγάλης κλίσης με βυθισμένα εμπόδια*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
5. Χριστοδούλου Γ. – Παπαθανασιάδης Τ., *Flow in a steep channel with large roughness elements*, Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ & ΕΕΔΥΠ, «Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών», Βόλος 2009, σελ. 419-426.

Ξένη

6. Herbich J. B. - Shulits S., *Large-scale roughness in open-channel flow*, J. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 90, 1964, pp. 203-229.
7. Sayre W. W. – Albertson M. L., *Roughness spacing in rigid open channels*, J. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 87, 1961, pp. 121-149.
8. Kouwen N. – Unny T.E., *Flexible roughness in open channels*, J. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, 1973, pp.713-728.
9. Järvelä J., *Flow resistance of flexible and stiff vegetation: A flume study with natural plants*, J. of Hydrology, Vol. 269, 2002, pp. 44-54.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακες πειραματικών μετρήσεων και επεξεργασίας αποτελεσμάτων

Πίνακας 8.1. Ελάσματα με ημισφαίρια με $Q=15$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	4,6	0,25	4	0,25
10	4,5	0,25	4,5	0,25
20	5,2	0,5	6,2	0,5
30	7	0,5	7	0,5
40	4,5	0,5	6,5	1
50	5,5	0,5	5	1
60	6	1	6,5	1,5
70	5,25	0,75	5	1,5
80	7,5	1	6	1,5
90	6,5	1	7	1,5
100	4,5	1,5	5,5	1
110	4,3	0,5	5	1
120	5	1	4	1
130	6,5	1	5,5	1,5
140	6,2	1,25	4,5	1
150	4,2	0,5	5	1,5
160	5	1,5	5,5	1,5
170	4,5	1,5	4	1,5
180	7	1	5,5	1
190	4,8	1,5	6,5	1,5
200	4,5	0,5	5,5	1
210	4,75	1	6	1,5
220	4,5	1,5	5	1,5
230	6,5	1,5	5,75	1
240	6	1,5	6,3	1,5
250	4,7	1	5,5	1
260	4,2	0,75	6,5	1,5
270	3,7	1	5,2	1,5
280	7	1	6,5	1,5
290	6,7	1	5	1,5
300	4,5	1	6	1
310	5	0,5	5,5	1
320	3,7	1,5	4,2	1
330	6,5	1,5	6,5	1
340	6	1	5,2	1
350	4,5	1	4,5	1
355	5,5	1	6	1

Πίνακας 8.2. Ελάσματα με ημισφαίρια με $Q=30$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	5	0,5	6	0,5
10	4,75	0,25	5,6	0,5
20	5,75	0,25	5,5	0,5
30	8,25	0,5	7,2	0,5
40	7,5	0,5	6	1
50	6,75	0,5	6,7	1
60	7,5	1	7,5	1
70	7	1,5	6	1,5
80	7,8	1,5	7,2	1
90	6,8	1,5	6,5	1
100	7,5	1	6,2	1
110	6,7	1	6,5	1
120	6,5	1	6,2	1
130	7	1,5	7,1	1,5
140	7,2	1,5	6,5	1
150	6,7	1	6,2	1
160	6,5	1	7,3	1
170	6,7	1	6,2	1
180	7,5	1	6,8	1,5
190	7,75	1	7,2	1,5
200	7,5	1	7	1
210	7,5	1	8	1,5
220	6,5	1	7	1
230	8,2	1,5	8	1
240	7,5	1,5	7,1	1
250	7,2	1,5	6,8	1
260	7,4	1,5	7,1	1
270	7	1,5	6,5	1
280	7,8	1	6,7	1
290	7,3	1	7	1
300	7	1	7,5	1
310	7,5	1	6,9	1
320	6,8	1	6,8	1
330	8,3	1,5	7,7	1,5
340	7,7	1,5	6,9	1,5
350	8,2	1,5	7,2	1
355	8,3	1	7,5	1

Πίνακας 8.3. Ελάσματα με ημισφαίρια με $Q=45$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	6,8	0,5	7	0,5
10	6,4	0,5	7,2	0,5
20	7	0,5	7	0,5
30	9	0,75	8,3	0,75
40	8,7	1	7,8	1
50	6,9	1	7,5	1
60	7,4	1	8	1
70	9	0,5	8,5	1
80	9,6	0,5	8	0,5
90	9,7	1	8	0,5
100	9,5	1	8,2	1
110	9,1	0,75	8,5	1
120	8,9	1	8,8	1
130	9,7	0,5	9,2	1
140	9,3	1	9	1
150	8,7	1	9	1,5
160	8,1	1	7,9	1
170	8,4	1,5	7,8	1,5
180	9,8	1	9	1
190	9,4	1,5	8,8	1,5
200	9,6	1,5	8,5	1,5
210	9,2	1,5	8,7	1,5
220	8,9	1,5	8,7	1,5
230	9,6	1	9,4	1
240	9,5	1	9	1
250	8,7	1	8,8	1
260	8,8	1	9	1
270	9,3	1,5	8,9	1
280	9,8	1	9,5	0,5
290	8,2	0,75	9	1
300	9,2	1	8,7	1
310	8,7	1,5	9	1
320	9	1	8,8	1
330	10	0,75	9,8	0,75
340	9,7	1	9,5	1
350	9,9	1,5	9,2	1
355	10	0,75	9,8	0,5

Πίνακας 8.4. Ελάσματα με ημισφαίρια με $Q=52.5$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	7,8	0,25	8,2	0,25
10	7,4	0,25	9	0,5
20	8,2	0,25	8,5	0,5
30	9,9	0,25	10	0,5
40	9,9	0,25	9,7	0,25
50	10,7	0,5	9,5	0,5
60	9,3	0,5	9,5	0,5
70	10,3	0,25	9,8	0,5
80	10,7	0,5	9,8	0,5
90	10,9	1	9,6	0,5
100	10,5	1,5	9,5	1
110	10,3	1	9,5	0,5
120	10,8	1	9,9	1
130	11	1	10,5	1
140	10,3	1	10	1
150	9,8	1	9,7	1
160	9,5	1	10	1
170	9,9	1	9,8	1
180	10,5	1	10,1	1
190	11	1,5	10,3	1,5
200	10,5	1	9,8	1
210	10,4	1	9,9	1
220	10,2	1	9,5	1
230	10,7	1	10,3	1
240	10,5	1	10,1	1,5
250	10,6	1	9,8	1
260	9,9	1	10	1
270	10,2	1	9,8	1
280	11	1,5	10,6	1,5
290	10,5	1	10	1
300	10,3	1	9,8	1
310	9,9	1,5	10	1,5
320	10,6	1,5	10	1
330	11,3	1	10,8	1
340	10,9	1,5	10,5	1
350	11	1,5	9,9	1,5
355	11,1	1,5	10,2	1,5

Πίνακας 8.5. Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα με $Q=15$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	3,5	0	3,9	0,25
10	2,9	0	4,9	0,5
20	3,7	0	4,5	0,5
30	8,5	0	5	0,5
40	6,1	0,25	6,5	0,5
50	4,7	0,25	4	1
60	6,4	0,5	7,8	0,5
70	5,5	0,25	4	1
80	7,8	0,25	6,3	1
90	7,4	0,25	4,9	1
100	4,9	0	5,3	0,5
110	4,7	0,25	6	0,5
120	4,3	0,25	4	0,5
130	7,9	0,5	6,2	0,5
140	7	1	4,8	1
150	4,9	1	3,9	0,5
160	4,3	0,5	5,5	1
170	3,9	0,5	5	1
180	7,9	1	6	1
190	7,6	1	4,5	1
200	4,9	1	5,6	1
210	3,7	0,25	5	1
220	4	0,5	3,9	1
230	7,5	0,5	5,9	0,5
240	6,7	0,5	4,1	0,5
250	5,4	0,5	5	0,5
260	4,4	0,5	5,7	1
270	3,6	0,5	4,5	1
280	7,3	0,5	5,5	0,5
290	4,3	0,5	4	0,5
300	5,2	0,5	5,1	0,5
310	3,9	0,5	6	0,5
320	4,2	1	4,5	0,5
330	6,3	1	5,8	0,5
340	3,7	0,5	5	1
350	4,4	0,5	4,7	1
355	5,3	0,5	5,8	1

Πίνακας 8.6. Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα με $Q=30$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσων (cm)	εύροςμέσου
0	5,3	0	4,9	0
10	5,1	0	6	0,5
20	5,7	0,25	6,5	0,5
30	7,8	0,25	6,7	0,5
40	7,2	0,5	6	0,5
50	6,7	0,25	6,3	0,25
60	5,8	0,25	6,2	0,25
70	7,1	0,25	5,7	0,25
80	8,7	0,25	6,7	0,25
90	8,5	0,5	5,3	0,25
100	7,8	0,25	5,6	0,25
110	6,7	0,5	6,1	0,25
120	6,1	0,25	5,9	0,25
130	6,9	0,25	6,7	0,25
140	6,7	0,25	5,9	0,25
150	6,5	0,25	5,7	0,25
160	6,1	0,25	6,2	0,25
170	5,9	0,25	5,4	0,25
180	7,2	0,25	6,4	0,25
190	6,8	0,25	5	0,25
200	6,3	0,25	5,9	0,25
210	5,8	0,25	6,1	0,25
220	5,6	0,25	5,9	0,25
230	7,1	0,25	7,1	0,25
240	6,7	0,25	6	0,25
250	6,5	0,25	6,3	0,25
260	6,4	0,25	5,9	0,25
270	6,2	0,25	5,6	0,25
280	7,5	0,25	7,1	0,25
290	6,9	0,25	5,6	0,25
300	6,6	0,25	6,1	0,25
310	6,1	0,5	6	0,25
320	5,7	0,5	5,5	0,25
330	7,4	0,25	7	0,25
340	6,8	0,25	6	0,5
350	6,5	0,25	5,7	0,25
355	6,7	0,25	5,9	0,25

Πίνακας 8.7. Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα με $Q=45$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	7,2	0	7	0,25
10	6,3	0	8	0,25
20	6,6	0	7,5	0,25
30	7,6	0,25	7,8	0,25
40	6,9	0,25	7,6	0,25
50	6,3	0,25	7,3	0,25
60	6,7	0,25	7,1	0,25
70	8,3	0,25	7,7	0,25
80	9,4	0,25	8,3	0,25
90	9,3	0,25	7,6	0,25
100	8,7	0,25	7,9	0,25
110	7,8	0,25	7,7	0,25
120	8,6	0,25	7,5	0,25
130	8,7	0,25	8,1	0,25
140	8,5	0,25	7,7	0,25
150	8,3	0,25	8,2	0,25
160	7,9	0,25	7,6	0,25
170	7,7	0,25	7,5	0,25
180	8,2	0,25	7,7	0,25
190	7,7	0,25	7,2	0,25
200	7,9	0,25	7,5	0,25
210	7,5	0,25	7	0,25
220	7,7	0,25	7,4	0,25
230	8,5	0,25	7,6	0,25
240	8,3	0,25	7,2	0,25
250	7,9	0,25	7,9	0,25
260	7,7	0,25	7,7	0,25
270	7,5	0,25	7,9	0,25
280	8,7	0,25	8,1	0,25
290	8,4	0,25	7,9	0,25
300	8,1	0,25	7,8	0,25
310	8,3	0,25	7,2	0,25
320	8,1	0,25	7,4	0,25
330	8,8	0,25	7,6	0,25
340	8,3	0,25	7,1	0,25
350	8,2	0,25	7,5	0,25
355	8,5	0,25	7,4	0,25

Πίνακας 8.8. Ορθογώνια παραλληλεπίπεδα με $Q=52.5$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	7,6	0,25	8	0
10	7,3	0,25	8,4	0
20	7,1	0,25	8,7	0
30	7,9	0,25	8	0
40	7,7	0,5	8,3	0
50	8,1	0,25	8	0,25
60	7,9	0,25	8,5	0,25
70	9,5	0,25	8,7	0,25
80	9,7	0,25	8,3	0,25
90	9,5	0,5	8,6	0,25
100	9,6	0,25	8,4	0,25
110	9,2	0,25	8,6	0,25
120	9	0,25	7,7	0,25
130	9,6	0,25	8,5	0,25
140	9,1	0,25	8	0,25
150	9	0,25	8,7	0,25
160	8,7	0,25	8,3	0,25
170	8,5	0,25	7,7	0,25
180	9	0,25	8,6	0,25
190	8,7	0,25	8	0,25
200	8,5	0,25	8,2	0,25
210	8,3	0,25	7,8	0,25
220	8	0,25	7,7	0,5
230	9,2	0,25	8,1	0,5
240	8,9	0,25	7,9	0,5
250	8,7	0,5	8,2	0,5
260	8,5	0,5	8,4	0,5
270	8,7	0,5	7,9	0,5
280	9,4	0,25	8,7	0,5
290	8,9	0,5	8,5	0,5
300	9	0,25	8,7	0,5
310	8,7	0,5	8	0,5
320	9	0,5	7,7	0,5
330	9,5	0,5	8,3	0,5
340	9,2	0,5	7,8	0,5
350	9,4	0,5	7,9	0,5
355	9,5	0,5	7,5	0,5

Πίνακας 8.9. Κύλινδροι με $Q=15$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	3,2	0	3,5	0
10	3,5	0	3,4	0
20	3,8	0	3,5	0
30	10	0,25	7,5	0,25
40	9,9	0,5	9	1
50	3,5	0,25	6,5	1
60	7,5	0,5	5	1
70	5,2	0,25	4,5	0,5
80	9,5	0,5	6,5	0,5
90	8,2	0,5	6	0,5
100	5,5	0,5	4,5	0,5
110	4,4	0,5	5	0,5
120	4,8	0,25	4,5	0,5
130	10,5	0,5	6,7	0,5
140	10,9	0,5	6	0,5
150	7	0,5	4,5	0,5
160	5	0,5	5,5	0,5
170	4	0,5	5	0,5
180	10	1	6,5	0,5
190	9,5	0,5	4,5	1
200	6,5	0,5	4	0,5
210	4,5	1	6	1
220	3,5	0,5	5,5	1
230	9	1	6,5	0,5
240	10,5	1	5	1
250	6,5	0,5	4	1
260	4,5	0,5	5	1
270	4,4	0,5	4,5	0,5
280	9,4	0,5	5,5	0,5
290	9	1	3,5	0,5
300	6,5	0,5	5	1
310	4,8	1	6	1
320	3,8	1	5	1
330	8,7	1,5	6,3	1
340	9	1,5	3,5	0,5
350	6,5	1	4	1
355	5,5	1	5	1

Πίνακας 8.10. Κύλινδροι με $Q=30$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	y παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	y μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	5,4	0	6	0
10	5,8	0	6,5	0
20	6,8	0	6,5	0
30	10	0	7,8	0
40	9	0,5	7	0
50	7,6	0	6,9	0
60	8	0,25	7,5	0
70	8,5	0,25	6,5	0
80	8,9	0,25	7,5	0
90	7,9	0,25	7	0,25
100	6,9	0,25	6,6	0,25
110	6,5	0,25	7,5	0,5
120	6,4	0,25	6,5	0,5
130	11,4	0,5	8	0,5
140	13,4	0,5	9	0,5
150	12,5	0,5	7,5	0,5
160	10,2	0,5	7	0,5
170	8	0,5	7,5	0,5
180	10,8	0,5	9	1
190	10,5	0,5	8	0,5
200	9,5	0,5	7	0,5
210	7,8	1	6,8	0,5
220	7,5	0,5	6,5	0,5
230	9,8	1	8	0,5
240	9,5	0,5	6,5	1
250	8,5	0,5	8	1
260	7,5	0,5	7,5	1
270	7,4	0,5	7	0,5
280	9,5	0,5	8,5	0,5
290	8	0,5	7,5	0,5
300	7,4	0,5	7	0,5
310	7	1	6,8	0,5
320	7,7	1	7	0,5
330	9,7	0,5	8	0,5
340	9	0,5	6,7	0,5
350	8,5	0,5	7	1
355	9	0,5	7	0,5

Πίνακας 8.11. Κύλινδροι με $Q=45$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	y παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	y μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	6,8	0,25	7	0
10	7	0,25	7,5	0
20	7,9	0,25	8	0
30	10,4	0,5	9	0
40	9,5	1	8,7	0
50	9	0,5	8,5	0
60	8,5	0,5	9	0
70	9,2	0,25	8,5	0
80	10,5	0,5	9	0
90	10,1	0,5	8	0
100	9,8	0,5	8,5	0
110	9,3	0,5	7,8	0
120	8,9	0,25	8,5	0,25
130	9,8	0,5	9	0,25
140	9	0,5	8,5	0,25
150	8,8	0,25	8	0,25
160	8,3	0,5	8,2	0,25
170	8,5	0,25	8	0,25
180	9,9	0,5	8,8	0,25
190	10,3	0,5	8	0,25
200	9,7	0,5	8,5	0,25
210	9,2	0,5	8	0,25
220	8,9	0,25	8,5	0,25
230	9,7	0,5	9	0,25
240	9,3	0,25	8,3	0,25
250	9	0,5	8	0,25
260	8,6	0,5	8,7	0,25
270	8,8	0,5	8	0,25
280	10,5	0,25	8,5	0,25
290	10,3	0,5	8,3	0,25
300	9,5	0,25	8	0,25
310	9	0,5	7,8	0,25
320	9	0,25	8	0,25
330	10,5	0,5	9	0,25
340	10	0,5	8,5	0,25
350	10,3	0,25	8	0,25
355	10	0,5	8,7	0,25

Πίνακας 8.12. Κύλινδροι με $Q=52.5$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	y παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	y μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	7,1	0	7,3	0
10	7,5	0	7,7	0
20	8,3	0,25	8	0
30	10,5	0,5	9,5	0,5
40	11,2	1	9	0,25
50	9,5	0,5	9	0,25
60	9,2	0,5	9,5	0,25
70	10,5	0,25	9,7	0,5
80	10,9	0,25	9,9	0,25
90	10,8	0,25	9,5	0,5
100	10,5	0,5	9,7	0,25
110	10,6	0,5	9	0,25
120	10,1	0,5	8,5	0,25
130	10,8	0,25	9,5	0,25
140	10,3	0,5	9	0,25
150	9,8	0,25	8,7	0,25
160	9,4	0,25	8,8	0,25
170	9,2	0,25	9	0,25
180	10,3	0,5	9,5	0,25
190	10	0,5	8,8	0,25
200	9,8	0,25	9	0,25
210	10	0,5	9	0,25
220	9,7	0,5	8,5	0,25
230	10,4	0,5	9,5	0,25
240	10,6	0,25	9,2	0,25
250	10,2	0,5	8,5	0,25
260	10	0,25	9,3	0,25
270	9,8	0,25	9	0,25
280	10,5	0,5	10	0,25
290	10	0,25	9,2	0,25
300	9,7	0,25	9	0,25
310	9,3	0,25	9	0,25
320	9,5	0,5	8,8	0,25
330	11	0,5	9,5	0,25
340	10,3	0,5	9	0,25
350	10,2	0,5	8,7	0,25
355	10,5	0,5	9	0,25

Πίνακας 8.13. Πυκνή διάταξη ράβδων με $Q=15$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	4	0	3,3	0
5	5,2	0	5	0,25
10	5,8	0,25	6	0,5
15	5,6	0,25	6,5	0,5
20	5,1	0,25	6,5	0,5
25	4,6	0,25	6	0,5
30	4,4	0,25	6	0,5
35	4,3	0,25	5,8	0,5
40	4,1	0,5	5,5	0,5
45	4,8	0,5	5	0,5
50	5,4	0,25	5,7	0,5
55	5,4	0,25	5,5	0,25
60	5,6	0,25	5,5	0,25
65	4,6	0,25	5	0,25
70	6	0,5	4,5	0,25
75	5,6	0,25	4,5	0,25
80	5,4	0,25	5,5	0,25
85	5,4	0,25	6	0,25
90	5,35	0,25	6	0,25
95	5,6	0,25	6	0,25
100	5,8	0,25	6	0,25
105	6,1	0,25	6	0,25
110	5,8	0,25	5,7	0,25
115	5,8	0,25	5,5	0,25
120	5,6	0,25	5,2	0,25
125	5,6	0,25	5	0,25
130	5,9	0,25	5	0,25
135	5,6	0,25	5,3	0,25
140	5,6	0,25	5	0,25
145	5,7	0,25	5	0,25
150	5,6	0,25	5,5	0,25
155	5,6	0,25	5,5	0,25
160	5,7	0,25	5	0,25
165	5,8	0,25	5,2	0,25
170	5,8	0,25	5	0,25
175	5,8	0,25	5	0,25
180	5,7	0,25	5	0,25
185	5,8	0,25	5	0,25

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
190	5,8	0,25	5,5	0,25
195	5,6	0,25	5	0,25
200	5,6	0,25	5	0,25
205	5,6	0,25	5,2	0,25
210	5,6	0,25	5	0,25
215	5,9	0,25	5,3	0,25
220	5,8	0,25	5	0,25
225	5,9	0,25	5,2	0,25
230	5,9	0,25	5,3	0,25
235	6	0,25	5	0,25
240	5,8	0,25	4,8	0,25
245	6	0,25	5,2	0,25
250	5,8	0,25	5,3	0,25
255	5,8	0,25	5,5	0,25
260	5,8	0,25	5,5	0,25
265	5,7	0,25	5	0,25
270	5,9	0,25	5,3	0,25
275	5,9	0,25	5,3	0,25
280	6	0,25	5,3	0,25
285	5,9	0,25	5	0,25
290	5,8	0,25	5,2	0,25
295	5,9	0,25	5	0,25
300	5,9	0,25	5	0,25
305	5,8	0,25	5,3	0,25
310	5,8	0,25	5	0,25
315	5,9	0,25	5	0,25
320	5,6	0,25	5	0,25
325	5,9	0,25	5	0,25
330	5,8	0,25	5	0,25
335	5,8	0,25	5	0,25
340	5,8	0,25	4,8	0,25
345	6	0,25	5	0,25
350	6	0,25	4,8	0,25
355	6	0,25	4,5	0,25

Πίνακας 8.14. Πυκνή διάταξη ράβδων με $Q=30$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	5,2	0	4,8	0
5	6,2	0	5,5	0
10	6,6	0	5,7	0
15	7,1	0,25	6	0
20	7,6	0,25	6,5	0
25	8	0,25	6,5	0
30	7,8	0,25	6,7	0
35	7,9	0,25	6,8	0
40	7,6	0,25	7	0
45	7,4	0,25	7,5	0
50	7,6	0,25	7,3	0
55	7,4	0,25	7,3	0
60	7,3	0,25	7,5	0
65	7,4	0,25	7	0
70	7,7	0,25	7,3	0
75	7,5	0,25	7,3	0
80	7,9	0,25	7,3	0
85	7,6	0,25	7,5	0
90	7,9	0,25	7	0
95	8	0,25	6,8	0
100	8,2	0,25	6,8	0
105	8,3	0,25	7,2	0
110	8,1	0,5	6,7	0
115	8,2	0,5	6,5	0
120	7,9	0,25	6,7	0
125	7,9	0,25	6,5	0
130	7,9	0,25	6,7	0,25
135	7,8	0,25	7	0
140	7,9	0,25	6,7	0,25
145	7,6	0,25	7	0
150	7,8	0,25	7	0
155	7,7	0,25	7,2	0,25
160	7,6	0,25	7	0,25
165	7,8	0,25	7	0,25
170	7,9	0,25	7,2	0,25
175	7,8	0,25	7	0,25
180	7,9	0,25	7	0,25
185	8,1	0,5	6,8	0,25

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσων (cm)	εύρος μέσου
190	8,1	0,5	7	0,25
195	8	0,5	7	0
200	7,7	0,25	7	0
205	8	0,5	7	0
210	8,1	0,25	6,8	0
215	7,9	0,25	7	0,25
220	8	0,25	7,2	0
225	7,8	0,25	7	0
230	8	0,25	6,8	0,25
235	7,7	0,25	7	0
240	8,1	0,25	7	0
245	7,9	0,25	7	0,25
250	8,1	0,25	7,3	0
255	7,9	0,25	7	0,25
260	7,9	0,25	6,8	0
265	7,8	0,5	7,2	0,25
270	8	0,5	7	0,25
275	7,8	0,25	7	0,25
280	7,8	0,5	7	0,25
285	7,6	0,5	7	0,25
290	7,8	0,25	6,9	0,25
295	7,9	0,25	7	0,25
300	7,9	0,25	7,3	0,25
305	8	0,5	7	0,25
310	7,8	0,25	7,3	0,25
315	7,9	0,25	7,5	0,25
320	8	0,25	7,5	0,25
325	7,6	0,25	7,3	0,25
330	7,9	0,25	7	0,5
335	8,1	0,5	7	0,5
340	7,9	0,5	7	0,25
345	8,1	0,5	7,2	0,5
350	7,8	0,5	7	0,25
355	8	0,5	7	0,25

Πίνακας 8.15. Πυκνή διάταξη ράβδων με $Q=45$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	6,5	0	6,2	0
5	7,5	0	6,7	0
10	7,7	0	7,4	0
15	8,3	0	7,7	0
20	8,8	0	7,5	0,25
25	9,1	0,25	8,4	0,25
30	9,4	0,25	8,7	0,25
35	9,5	0,25	9,2	0,25
40	9,6	0,25	9,2	0,25
45	9,5	0,25	9,2	0,25
50	9,5	0,25	9	0,25
55	9,1	0,25	9,2	0,25
60	9,1	0,25	9	0,25
65	9,1	0,25	8,7	0,25
70	9,4	0,25	8,5	0,25
75	8,6	0,25	8,7	0,25
80	8,6	0,25	8,2	0,25
85	8,5	0,25	8,5	0,25
90	8,7	0,25	8,2	0,25
95	8,8	0,5	7,7	0,25
100	8,8	0,5	8	0,25
105	8,9	0,5	8,2	0,25
110	8,7	0,25	8	0,25
115	8,9	0,25	7,7	0,25
120	9,1	0,25	7,7	0,25
125	8,8	0,25	8,2	0,25
130	9,1	0,25	8,5	0,25
135	9,3	0,5	8,7	0,25
140	9,6	0,5	8,5	0,25
145	9,6	0,5	8,2	0,25
150	9,6	0,5	8,5	0,25
155	9,5	0,25	8,2	0,25
160	9,7	0,25	8,5	0,25
165	9,6	0,25	8,5	0,25
170	9,6	0,5	8,5	0,25
175	9,7	0,5	8,4	0,25
180	9,3	0,5	8,6	0,25
185	9,2	0,5	8,4	0,25

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
190	9,2	0,5	8,5	0,25
195	9,2	0,5	8,7	0,25
200	9,4	0,5	8,2	0,25
205	9,3	0,5	8,5	0,25
210	9,3	0,5	8,5	0,25
215	9,3	0,5	8,4	0,25
220	9,1	0,5	8,7	0,25
225	9,1	0,5	8,4	0,25
230	9,5	0,25	8,5	0,25
235	9,1	0,25	8,5	0,25
240	9,6	0,25	8,2	0,25
245	9,6	0,25	8,5	0,25
250	9,5	0,25	8,5	0,25
255	9,6	0,25	8,5	0,25
260	9,3	0,5	8,2	0,25
265	9,6	0,25	8,5	0,25
270	9,6	0,25	8,7	0,25
275	9,8	0,25	8,7	0,25
280	9,6	0,5	8,7	0,25
285	9,3	0,5	8,2	0,25
290	9,5	0,5	8,7	0,25
295	9,3	0,5	8,7	0,25
300	9,6	0,5	8,5	0,25
305	9,3	0,5	8,5	0,25
310	9,6	0,5	8,7	0,25
315	9,4	0,5	8,7	0,25
320	9,3	0,5	8,7	0,25
325	9,2	0,5	8,9	0,25
330	9,7	0,25	9,2	0,25
335	9,3	0,5	9,2	0,25
340	9,3	0,5	9,2	0,25
345	9,6	0,5	9,2	0,25
350	9,5	0,5	9,4	0,25
355	9,8	0,5	9,2	0,25

Πίνακας 8.16. Πυκνή διάταξη ράβδων με $Q=52.5$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	7,7	0	7,8	0
5	8,8	0	8	0
10	9,1	0	8,5	0
15	9,4	0	8,5	0
20	9,6	0	9	0
25	10	0	9,2	0
30	10,2	0	9,5	0
35	10,1	0	9,5	0
40	10,4	0	10	0
45	10,4	0	10	0
50	10,1	0	10	0
55	10,1	0	9,8	0
60	10,2	0	9,8	0
65	10	0	9,8	0
70	10	0	9,5	0
75	10	0	9,5	0
80	9,8	0	9,5	0
85	9,9	0	9,5	0
90	9,9	0	9,7	0
95	10	0	9,2	0
100	10,2	0	9,5	0
105	10,4	0	9,5	0
110	10,4	0	9,5	0
115	10,9	0	9,3	0
120	10,8	0	9,3	0
125	10,6	0	9	0
130	10,8	0	9	0
135	10,6	0	9	0
140	10,8	0,25	8,8	0
145	10,6	0,25	9	0
150	10,6	0,25	9	0
155	10,4	0,25	8,8	0
160	10,4	0,25	9	0
165	10,6	0,25	9	0
170	10,1	0,25	9	0
175	10,3	0,25	9,2	0
180	10,3	0,25	9,5	0
185	9,9	0,25	9,5	0

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
190	10,1	0,25	9,7	0
195	10,1	0,25	9,5	0
200	10,1	0,25	9,5	0
205	9,9	0,25	9,5	0
210	10,1	0,25	9,7	0
215	10,3	0,5	9,8	0
220	10,3	0,5	9,5	0
225	10,1	0,25	9,8	0
230	9,9	0,25	10	0
235	10,2	0,25	9,5	0
240	10,1	0,25	9,8	0
245	10,6	0,5	9,5	0
250	10,8	0,5	9,5	0
255	10,6	0,5	9,8	0
260	10,9	0,25	9,5	0
265	10,9	0,25	9,5	0
270	10,6	0,25	9,5	0
275	10,6	0,25	9,5	0
280	10,6	0,25	9,8	0
285	10,5	0,25	9,8	0
290	10,4	0,25	10	0
295	10,6	0,25	9,8	0
300	10,6	0,25	9,9	0
305	10,7	0,25	10	0
310	10,4	0,25	9,7	0
315	10,4	0,25	9,5	0
320	10,4	0,25	9,8	0
325	10,1	0,25	9,5	0
330	10,1	0,25	9,5	0
335	10,4	0,25	9,5	0
340	10,6	0,25	9,5	0
345	10,4	0,25	9,8	0
350	10,4	0,25	9,8	0
355	10,6	0,25	9,5	0

Πίνακας 8.17. Αραιή διάταξη ράβδων με $Q=15$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	4	0	4	0
5	5,3	0	6	0,25
10	5,9	0,25	7	0
15	5,4	0,25	7,8	0
20	4,8	0,25	7,5	0
25	3,4	0,25	6,5	0
30	2,9	0,25	6	0
35	2,4	0,25	5	0
40	2,6	0,25	3	0
45	3,1	0,25	4	0
50	3,8	0,25	5	0
55	4,4	0,25	5	0
60	5,1	0,25	5	0
65	4,8	0,25	4,7	0
70	5,2	0,25	4,5	0
75	3,6	0,25	4,3	0
80	4,1	0,25	4,3	0
85	4,3	0,25	3,9	0
90	4,6	0,25	3,5	0
95	4,8	0,25	3,8	0
100	5,1	0,25	3,8	0
105	4,9	0,25	3,8	0
110	4,9	0,25	4	0
115	4,6	0,25	4	0
120	4,1	0,25	4,3	0
125	4,6	0,25	4	0
130	5,1	0,25	4,3	0
135	5,1	0,25	4,5	0
140	5,1	0,25	4,8	0
145	5,4	0,25	4,8	0
150	5,8	0,25	4,5	0
155	5,6	0,25	4,5	0
160	5,4	0,25	5	0
165	5,4	0,25	4,5	0
170	5,2	0,25	4,5	0
175	5,3	0,25	4,3	0
180	5,1	0,25	4,3	0
185	4,9	0,25	4,8	0

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
190	5	0,25	4,5	0
195	5,4	0,25	4,3	0
200	5,4	0,25	4,5	0
205	4,9	0,25	4,8	0
210	5,1	0,25	4,5	0
215	5,3	0,25	4,3	0
220	4,9	0,25	4,5	0
225	5,1	0,25	4,5	0
230	4,9	0,25	4,3	0
235	5,4	0,25	4,8	0
240	4,9	0,25	4,5	0
245	4,9	0,25	4,3	0
250	5,4	0,25	4,8	0
255	5,8	0,25	4,5	0
260	5,4	0,25	4,5	0
265	4,9	0,25	4,3	0
270	5,1	0,25	4,5	0
275	5,6	0,25	4,3	0
280	5,1	0,25	4,8	0
285	4,8	0,25	4,5	0
290	5,1	0,25	4,3	0
295	5,9	0,25	4,3	0
300	5,1	0,25	4,5	0
305	4,9	0,25	4,8	0
310	5,1	0,25	4,5	0
315	5,1	0,25	4,3	0
320	4,9	0,25	4,8	0
325	5,3	0,25	4,5	0
330	5,2	0,25	4,5	0
335	5,1	0,25	4,8	0
340	5,1	0,25	4,3	0
345	4,6	0,25	4,3	0
350	5,2	0,25	4,5	0
355	5,25	0,25	4	0

Πίνακας 8.18. Αραιή διάταξη ράβδων με $Q=30$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	5,7	0	5,5	0
5	6,3	0	5,4	0
10	6,4	0	5,8	0
15	6,6	0	5,5	0
20	6,6	0	5,8	0
25	6,7	0	5,8	0
30	6,6	0	5,9	0
35	6,4	0	6	0
40	6,4	0	6	0
45	6,3	0	6,2	0
50	6,6	0	6,3	0
55	6,3	0	6,4	0
60	6,2	0	6,4	0
65	6,3	0	6,5	0
70	6,8	0	6,5	0
75	6,2	0	6,5	0
80	6,6	0	6,3	0
85	6,4	0	6,3	0
90	6,7	0	6,3	0
95	6,8	0	6	0
100	6,9	0	6	0
105	7	0	6,2	0
110	6,9	0,25	6,3	0
115	6,9	0,25	6,3	0
120	7,1	0,25	6,5	0
125	6,9	0,25	6,4	0
130	6,9	0,25	6,8	0
135	6,8	0,25	6,5	0
140	6,9	0,25	6,3	0
145	6,9	0,25	6,5	0
150	6,8	0,25	6,3	0
155	6,8	0,25	6,3	0
160	6,8	0,25	6,5	0
165	6,8	0,25	6,3	0
170	6,9	0,25	6,3	0
175	6,8	0,25	6,3	0
180	6,8	0,25	6,3	0
185	6,9	0,25	6,5	0

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
190	6,8	0,25	6,5	0
195	6,8	0,25	6,3	0
200	6,9	0,25	6,5	0
205	6,8	0,25	6,3	0
210	6,8	0,25	6,7	0
215	6,9	0,25	6,5	0
220	6,8	0,25	6,7	0
225	6,8	0,25	6,3	0
230	7,1	0,25	6,5	0
235	7	0,25	6,7	0
240	7,1	0,25	6,5	0
245	6,9	0,25	6,4	0
250	7	0,25	6,7	0
255	7,1	0,25	6,4	0
260	7,1	0,25	6,3	0
265	7	0,25	6,5	0
270	7,1	0,25	6,5	0
275	7,1	0,25	6,3	0
280	7	0,25	6,5	0
285	7	0,25	6,7	0
290	6,9	0,25	6,5	0
295	7	0,25	6,8	0
300	7	0,25	6,5	0
305	6,8	0,25	6,3	0
310	7	0,25	6,5	0
315	7	0,25	6,3	0
320	6,9	0,25	6,3	0
325	6,9	0,25	6,5	0
330	7	0,25	6,3	0
335	6,9	0,25	6,5	0
340	7,1	0,25	6,5	0
345	7,1	0,25	6,3	0
350	7	0,25	6,5	0
355	7,2	0,25	6,8	0

Πίνακας 8.19. Αραιή διάταξη ράβδων με $Q=45$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	7,4	0	7	0
5	8,1	0	7,3	0
10	8,2	0	7,3	0
15	8,2	0	7,5	0
20	8,3	0	7,7	0
25	8,1	0	8	0
30	7,9	0	7,7	0
35	8,2	0	8	0
40	7,9	0	7,9	0
45	7,8	0	7,8	0
50	7,9	0	7,8	0
55	7,9	0	8,1	0
60	7,9	0	8,3	0
65	8,1	0	8,3	0
70	8,7	0	8,3	0
75	8	0	8,5	0
80	8	0	8	0
85	8,2	0	8	0
90	8,5	0	7,8	0
95	8,8	0	8	0
100	8,7	0	7,8	0
105	8,6	0	7,8	0
110	8,8	0	7,9	0
115	8,8	0	7,8	0
120	8,7	0	7,7	0
125	8,7	0	7,9	0
130	8,7	0	8	0
135	8,7	0	7,6	0
140	8,8	0	7,9	0
145	8,6	0	7,9	0
150	8,6	0	7,8	0
155	8,5	0	7,8	0
160	8,4	0	7,8	0
165	8,3	0	7,7	0
170	8,2	0	7,8	0
175	8,2	0	7,8	0
180	8,2	0	7,8	0
185	8,2	0	7,5	0

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
190	8	0	7,7	0
195	8	0	7,5	0
200	7,9	0	7,5	0
205	8,2	0	7,5	0
210	8,2	0	7,7	0
215	7,9	0	7,5	0
220	8,1	0	7,8	0
225	8,2	0	7,9	0
230	8,1	0	7,8	0
235	8,3	0	7,8	0
240	8,4	0	7,8	0
245	8,2	0	8	0
250	8,3	0	8	0
255	8	0	8	0
260	8,2	0	8	0
265	8,3	0	7,8	0
270	8,5	0	7,8	0
275	8,4	0	8	0
280	8,4	0	8	0
285	8,3	0	8	0
290	8,2	0	7,9	0
295	8,5	0	7,8	0
300	8	0	8	0
305	8,4	0	8	0
310	8,5	0	7,7	0
315	8,4	0	7,8	0
320	8,3	0	7,7	0
325	8,3	0	7,7	0
330	8,4	0	7,5	0
335	8,4	0	7,7	0
340	8,5	0	7,5	0
345	8,4	0	7,7	0
350	8,7	0	7,8	0
355	8,8	0	8	0

Πίνακας 8.20. Αραιή διάταξη ράβδων με $Q=52.5$ l/sec.

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
0	7,7	0	7,5	0
5	8,4	0	7,8	0
10	8,6	0	7,8	0
15	8,7	0	7,8	0
20	9	0	8	0
25	9,1	0	8	0
30	9,1	0	8,3	0
35	9,5	0	8,2	0
40	9,4	0	8,4	0
45	9,2	0	8	0
50	9,3	0	8,3	0
55	9,1	0	8,3	0
60	9,2	0	8,5	0
65	9,2	0	8,5	0
70	9	0	8,5	0
75	8,9	0	8,3	0
80	8,9	0	8,5	0
85	8,8	0	8,5	0
90	8,9	0	8,7	0
95	9	0	8,5	0
100	9	0	8,5	0
105	9	0	8,3	0
110	9	0	8,3	0
115	9,1	0	8,3	0
120	9,2	0	8,5	0
125	9,4	0	8,5	0
130	9,5	0	8,3	0
135	9,5	0	8	0
140	9,6	0	8,2	0
145	9,6	0	8,2	0
150	9,7	0	8	0
155	9,7	0	8	0
160	9,5	0	8	0
165	9,6	0	8,3	0
170	9,7	0	8,3	0
175	9,4	0	8	0
180	9,4	0	8,3	0
185	9,4	0	8,3	0

ΘΕΣΗ (cm)	γ παρειάς (cm)	εύρος παρειάς	γ μέσον (cm)	εύρος μέσου
190	9,3	0	8,3	0
195	9,2	0	8,3	0
200	9	0	8,5	0
205	8,9	0	8,5	0
210	9	0	8,5	0
215	9	0	8,7	0
220	8,9	0	8,7	0
225	8,9	0	8,5	0
230	8,9	0	8,5	0
235	8,8	0	8,7	0
240	9	0	8,5	0
245	8,9	0	8,5	0
250	9,1	0	8,5	0
255	9	0	8,7	0
260	9,2	0	8,7	0
265	9,1	0	8,7	0
270	9,4	0	8,8	0
275	9,4	0	8,8	0
280	9,5	0,25	8,8	0
285	9,5	0	9	0
290	9,4	0	9	0
295	9,5	0	8,7	0
300	9,6	0	8,8	0
305	9,5	0	9	0
310	9,5	0	9	0
315	9,4	0	9	0
320	9,5	0	9	0
325	9,6	0	9	0
330	9,5	0	9,1	0
335	9,4	0	8,9	0
340	9,4	0	8,9	0
345	9,5	0	9	0
350	9,7	0	9	0
355	9,9	0	8,8	0

Πίνακας 8.21. Αδιαστατοποιημένες μεταβλητές

Τύπος εμποδίου	n	q(m ³ /s/m)	y(m)	y _κ (m)	h(m)	α(m)	E=h*α (m ²)	J	s(m)	δ(m)	E'=s*δ (m ²)
ελάσματα με ημισφαίρια	0,041	0,06	0,0539	0,0716	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,032	0,12	0,0731	0,1136	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,029	0,18	0,0914	0,1489	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,029	0,21	0,1031	0,165	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
ορθογώνια παραλληλεπίπεδα	0,040	0,06	0,0532	0,0716	0,0188	0,0375	0,0007	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,026	0,12	0,0628	0,1136	0,0188	0,0375	0,0007	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,023	0,18	0,0783	0,1489	0,0188	0,0375	0,0007	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,023	0,21	0,0854	0,165	0,0188	0,0375	0,0007	0,165	0,25	0,0335	0,0084
κύλινδροι	0,047	0,06	0,0596	0,0716	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,035	0,12	0,0783	0,1136	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,028	0,18	0,0896	0,1489	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,027	0,21	0,0958	0,165	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
πυκνές ράβδοι	0,042	0,06	0,0545	0,0716	0,04	0,005	0,0002	0,165	0,05	0,0025	0,0001
	0,033	0,12	0,0745	0,1136	0,04	0,005	0,0002	0,165	0,05	0,0025	0,0001
	0,029	0,18	0,0903	0,1489	0,04	0,005	0,0002	0,165	0,05	0,0025	0,0001
	0,028	0,21	0,1004	0,165	0,04	0,005	0,0002	0,165	0,05	0,0025	0,0001
αραιές ράβδοι	0,035	0,06	0,0482	0,0716	0,04	0,005	0,0002	0,165	0,1	0,0025	0,0003
	0,028	0,12	0,067	0,1136	0,04	0,005	0,0002	0,165	0,1	0,0025	0,0003
	0,024	0,18	0,0809	0,1489	0,04	0,005	0,0002	0,165	0,1	0,0025	0,0003
	0,024	0,21	0,091	0,165	0,04	0,005	0,0002	0,165	0,1	0,0025	0,0003

Τύπος εμποδίου	y/h	y _κ /h	y _κ /s	y/E ^{1/2}	θ	nq/(E ^{5/6} J ^{1/2})	nq/(h ^{5/3} J ^{1/2})	nq/(E ^{5/6} J ^{1/2})	f
ελάσματα με ημισφαίρια	1,437	1,909	0,286	1,909	0,079	0,3258661	1,44147691	1,4414769	0,3936
	1,949	3,031	0,455	3,031	0,079	0,508669	2,25011029	2,2501103	0,2241
	2,437	3,971	0,596	3,971	0,079	0,6914719	3,05874368	3,0587437	0,1759
	2,749	4,401	0,66	4,401	0,079	0,8067172	3,56853429	3,5685343	0,172
ορθογώνια παραλληλεπίπεδα	2,837	3,818	0,286	2,700	0,039	0,3179181	4,4647843	2,5057755	0,3758
	3,349	6,061	0,455	4,286	0,039	0,4132935	5,8042196	3,2575081	0,1529
	4,176	7,943	0,596	5,616	0,039	0,5484087	7,70175293	4,3224627	0,1141
	4,555	8,802	0,66	6,224	0,039	0,6398102	8,98537841	5,0428731	0,1121
κύλινδροι	1,589	1,909	0,286	1,909	0,079	0,3735538	1,65242475	1,6524247	0,5054
	2,088	3,031	0,455	3,031	0,079	0,5563567	2,46105813	2,4610581	0,2643
	2,389	3,971	0,596	3,971	0,079	0,667628	2,95326976	2,9532698	0,1646
	2,555	4,401	0,66	4,401	0,079	0,7510815	3,32242848	3,3224285	0,1511
πυκνές ράβδοι	1,363	1,79	1,432	5,062	0,152	11,097715	1,32604598	7,5012488	0,4119
	1,863	2,841	2,273	8,036	0,152	17,439266	2,08378654	11,787677	0,2374
	2,258	3,723	2,978	10,53	0,152	22,988123	2,74680953	15,538301	0,1763
	2,51	4,126	3,301	11,67	0,152	25,894668	3,09410729	17,502914	0,1611
αραιές ράβδοι	1,205	1,79	0,716	5,062	0,072	5,1903182	1,10503832	6,2510407	0,2945
	1,675	2,841	1,136	8,036	0,072	8,3045091	1,76806131	10,001665	0,1748
	2,023	3,723	1,489	10,53	0,072	10,677226	2,27322168	12,859284	0,1234
	2,275	4,126	1,65	11,67	0,072	12,456764	2,65209196	15,002498	0,1206

Τύπος εμποδίου	n	q(m ³ /s/m)	y(m)	y _κ (m)	h(m)	α(m)	E=h*α(m ²)	J	s(m)	δ(m)	E'=s*δ (m ²)
Βασιλάκος											
Πυκνή διάταξη οδοντώσεων	0,062	0,06	0,0718	0,0716	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,13	0,0335	0,0042
	0,046	0,12	0,0953	0,1136	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,13	0,0335	0,0042
	0,040	0,18	0,1151	0,1489	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,13	0,0335	0,0042
	0,037	0,22	0,127	0,1702	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,13	0,0335	0,0042
Βασική διάταξη οδοντώσεων	0,071	0,06	0,0787	0,0716	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,047	0,12	0,0967	0,1136	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,038	0,18	0,1116	0,1489	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,035	0,22	0,1212	0,1702	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
Κύβοι	0,069	0,06	0,077	0,0716	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,043	0,12	0,09	0,1136	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,037	0,18	0,1098	0,1489	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,033	0,22	0,1174	0,1702	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
Ελάσματα	0,069	0,06	0,0771	0,0716	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,048	0,12	0,0986	0,1136	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,042	0,18	0,119	0,1489	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,039	0,22	0,1316	0,1702	0,0375	0,0375	0,0014	0,165	0,25	0,0335	0,0084
Ημισφαίρια	0,029	0,06	0,0424	0,0716	0,0188	μεταβλητό	0,0006	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,021	0,12	0,0556	0,1136	0,0188		0,0006	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,019	0,18	0,0686	0,1489	0,0188		0,0006	0,165	0,25	0,0335	0,0084
	0,019	0,22	0,0772	0,1702	0,0188		0,0006	0,165	0,25	0,0335	0,0084

Τύπος εμποδίου	y/h	y _κ /h	y _κ /s	y _κ /E ^{1/2}	θ	nq/(E ^{5/6} J ^{1/2})	nq/(h ^{5/3} J ^{1/2})	nq/(E ^{5/6} J ^{1/2})	f
Βασιλάκος									
Πυκνή διάταξη οδοντώσεων	1,915	1,909	0,573	1,909	0,158	0,8780218	2,17979434	2,1797943	0,8444
	2,541	3,031	0,909	3,031	0,158	1,302871	3,23453354	3,2345335	0,4391
	3,069	3,971	1,191	3,971	0,158	1,699397	4,2189568	4,2189568	0,3209
	3,387	4,54	1,362	4,54	0,158	1,9212627	4,76976505	4,769765	0,27
Βασική διάταξη οδοντώσεων	2,099	1,909	0,286	1,909	0,079	0,5643046	2,4962161	2,4962161	1,0864
	2,579	3,031	0,455	3,031	0,079	0,7471075	3,30484949	3,3048495	0,4572
	2,976	3,971	0,596	3,971	0,079	0,9060666	4,00800896	4,008009	0,2912
	3,232	4,54	0,681	4,54	0,079	1,0199872	4,51193991	4,5119399	0,2435
Κύβοι	2,053	1,909	0,286	1,909	0,079	0,5484087	2,42590016	2,4259002	1,0306
	2,4	3,031	0,455	3,031	0,079	0,6835239	3,0235857	3,0235857	0,388
	2,928	3,971	0,596	3,971	0,079	0,8822227	3,90253504	3,902535	0,2768
	3,131	4,54	0,681	4,54	0,079	0,9617023	4,25411477	4,2541148	0,2177
Ελάσματα	2,056	1,909	0,286	1,909	0,079	0,5484087	2,42590016	2,4259002	1,0304
	2,629	3,031	0,455	3,031	0,079	0,7630034	3,37516544	3,3751654	0,4751
	3,173	3,971	0,596	3,971	0,079	1,001442	4,42990464	4,4299046	0,3518
	3,509	4,54	0,681	4,54	0,079	1,1365572	5,02759018	5,0275902	0,2983
Ημισφαίρια	2,261	3,818	0,286	3,047	0,031	0,2304906	3,23696862	2,2218015	0,2086
	2,965	6,061	0,455	4,836	0,031	0,333814	4,68802352	3,2177815	0,1025
	3,659	7,943	0,596	6,337	0,031	0,4530333	6,36231763	4,3669892	0,0801
	4,117	9,079	0,681	7,244	0,031	0,5537074	7,776166	5,3374312	0,0781

Τύπος εμποδίου	n	q(m ³ /s/m)	y(m)	y _κ (m)	h(m)	α(m)	E=h*α(m ²)	J	s(m)	δ(m)	E'=s*δ(m ²)
ΚΥΒΟΙ (Herbich-Shulits)											
b=1,68m											
Pattern I	0,146	0,02	0,1677	0,0308	0,15	0,15	0,0225	0,003	0,3	0,3	0,09
	0,098	0,03	0,2027	0,0489	0,15	0,15	0,0225	0,003	0,3	0,3	0,09
	0,080	0,05	0,2317	0,064	0,15	0,15	0,0225	0,003	0,3	0,3	0,09
	0,069	0,07	0,253	0,0775	0,15	0,15	0,0225	0,003	0,3	0,3	0,09
	0,062	0,08	0,2744	0,0899	0,15	0,15	0,0225	0,003	0,3	0,3	0,09
Pattern I	0,202	0,03	0,1753	0,0489	0,15	0,15	0,0225	0,02	0,3	0,3	0,09
	0,159	0,05	0,1951	0,064	0,15	0,15	0,0225	0,02	0,3	0,3	0,09
	0,143	0,07	0,2195	0,0775	0,15	0,15	0,0225	0,02	0,3	0,3	0,09
	0,122	0,08	0,2287	0,0899	0,15	0,15	0,0225	0,02	0,3	0,3	0,09
Pattern I	0,153	0,03	0,1829	0,0489	0,15	0,15	0,0225	0,01	0,3	0,3	0,09
	0,124	0,05	0,2073	0,064	0,15	0,15	0,0225	0,01	0,3	0,3	0,09
	0,110	0,07	0,2323	0,0775	0,15	0,15	0,0225	0,01	0,3	0,3	0,09
	0,100	0,08	0,2515	0,0899	0,15	0,15	0,0225	0,01	0,3	0,3	0,09
Pattern II	0,133	0,03	0,1677	0,0489	0,15	0,15	0,0225	0,01	0,38	0,38	0,1444
	0,110	0,05	0,1921	0,064	0,15	0,15	0,0225	0,01	0,38	0,38	0,1444
	0,097	0,07	0,2134	0,0775	0,15	0,15	0,0225	0,01	0,38	0,38	0,1444
	0,087	0,08	0,2302	0,0899	0,15	0,15	0,0225	0,01	0,38	0,38	0,1444
Τύπος εμποδίου	n	q(m ³ /s/m)	y(m)	y _κ (m)	h(m)	α(m)	E=h*α(m ²)	J	s(m)	δ(m)	E'=s*δ(m ²)
Χριστοδούλου-Παπαθανασιάδης											
Διάταξη I(βασική)	0,086	3,75	1,03	1,1275	0,6	0,6	0,36	0,165	4	0,536	2,144
	0,060	7,5	1,3	1,7899	0,6	0,6	0,36	0,165	4	0,536	2,144
	0,048	11,3	1,49	2,3454	0,6	0,6	0,36	0,165	4	0,536	2,144
	0,047	15	1,81	2,8412	0,6	0,6	0,36	0,165	4	0,536	2,144
Διάταξη II(αραιή)	0,132	3,75	1,39	1,1275	0,6	0,6	0,36	0,165	8	0,536	4,288
	0,110	7,5	2,03	1,7899	0,6	0,6	0,36	0,165	8	0,536	4,288
Διάταξη III(πυκνή)	0,096	3,75	1,11	1,1275	0,6	0,6	0,36	0,165	2	0,536	1,072
	0,068	7,5	1,42	1,7899	0,6	0,6	0,36	0,165	2	0,536	1,072

Τύπος εμποδίου	y/h	y _κ /h	y _κ /s	y _κ /E ^{1/2}	θ	nq/(E ^{5/6} J ^{1/2})	nq/(h ^{5/3} J ^{1/2})	nq/(E ^{5/6} J ^{1/2})	f
ΚΥΒΟΙ (Herbich-Shulits)									
b=1,68m									
Pattern I	1,118	0,205	0,103	0,205	0,25	0,3359306	1,0665132	1,0665132	3,2334
	1,352	0,326	0,163	0,326	0,25	0,450587	1,43052457	1,4305246	1,3808
	1,545	0,426	0,213	0,426	0,25	0,5527128	1,75475387	1,7547539	0,8946
	1,687	0,517	0,258	0,517	0,25	0,6317785	2,0057716	2,0057716	0,642
	1,829	0,6	0,3	0,6	0,25	0,7137953	2,26615877	2,2661588	0,5136
Pattern I	1,169	0,326	0,163	0,326	0,25	0,3599508	1,14277249	1,1427725	6,1115
	1,301	0,426	0,213	0,426	0,25	0,4247825	1,34860044	1,3486004	3,6872
	1,463	0,517	0,258	0,517	0,25	0,5089532	1,61582581	1,6158258	2,8825
	1,524	0,6	0,3	0,6	0,25	0,541673	1,71970447	1,7197045	2,0661
Pattern I	1,22	0,326	0,163	0,326	0,25	0,3844885	1,22067502	1,220675	3,446
	1,382	0,426	0,213	0,426	0,25	0,4662911	1,48038185	1,4803818	2,1856
	1,549	0,517	0,258	0,517	0,25	0,5549287	1,76178872	1,7617887	1,688
	1,677	0,6	0,3	0,6	0,25	0,6260302	1,98752212	1,9875221	1,3462
Pattern II	1,118	0,326	0,129	0,326	0,162	0,2265404	1,0665132	1,0665132	2,6945
	1,28	0,426	0,168	0,426	0,162	0,2795875	1,31624967	1,3162497	1,7637
	1,423	0,517	0,204	0,517	0,162	0,3287413	1,54765749	1,5476575	1,3321
	1,535	0,6	0,237	0,6	0,162	0,3690031	1,73720309	1,7372031	1,0524
Τύπος εμποδίου	y/h	y _κ /h	y _κ /s	y _κ /E ^{1/2}	θ	nq/(E ^{5/6} J ^{1/2})	nq/(h ^{5/3} J ^{1/2})	nq/(E ^{5/6} J ^{1/2})	f
Χριστοδούλου-Παπαθανασιάδης									
Διάταξη I(βασική)	1,717	1,879	0,282	1,879	0,079	0,4217933	1,86581338	1,8658134	0,6642
	2,167	2,983	0,447	2,983	0,079	0,5873482	2,59814992	2,5981499	0,3065
	2,483	3,909	0,586	3,909	0,079	0,7102744	3,14191725	3,1419172	0,194
	3,017	4,735	0,71	4,735	0,079	0,9265033	4,09841143	4,0984114	0,1791
Διάταξη II(αραιή)	2,317	1,879	0,141	1,879	0,034	0,3619922	2,85315992	2,8531599	1,459
	3,383	2,983	0,224	2,983	0,034	0,6064072	4,77959699	4,779597	0,9557
Διάταξη III(πυκνή)	1,85	1,879	0,564	1,879	0,158	0,8366729	2,07714087	2,0771409	0,8099
	2,367	2,983	0,895	2,983	0,158	1,1839159	2,93921316	2,9392132	0,3855

Πίνακας 8.22. Δεδομένα διαγράμματος 5.16.

Τύπος εμποδίου	n	$q(m^3/s/m)$	$y_k(m)$	J	$E_{μετ}(m^2)$	$E_{διαμ}(m^2)$	$nq/(E_{διαμ}^{5/6} J^{1/2})$	$y_k/E^{1/2}$
οδοντώσεις (βασική διάταξη)	0,071	0,06	0,0716	0,165	0,00141	0,0008906	0,4118757	1,9091786
	0,047	0,12	0,1136	0,165	0,00141	0,0008906	0,5453002	3,0306322
	0,038	0,18	0,1489	0,165	0,00141	0,0008906	0,6613215	3,9712516
	0,035	0,22	0,1702	0,165	0,00141	0,0008906	0,7444701	4,5397038
κύβοι	0,069	0,06	0,0716	0,165	0,00141	0,0014063	0,4002735	1,9091786
	0,043	0,12	0,1136	0,165	0,00141	0,0014063	0,4988916	3,0306322
	0,037	0,18	0,1489	0,165	0,00141	0,0014063	0,6439183	3,9712516
	0,033	0,22	0,1702	0,165	0,00141	0,0014063	0,7019289	4,5397038
ελάσματα	0,069	0,06	0,0716	0,165	0,00141	0,0001155	0,4002735	1,9091786
	0,048	0,12	0,1136	0,165	0,00141	0,0001155	0,5569023	3,0306322
	0,042	0,18	0,1489	0,165	0,00141	0,0001155	0,7309343	3,9712516
	0,039	0,22	0,1702	0,165	0,00141	0,0001155	0,8295524	4,5397038
ελάσματα με ημισφαίρια	0,041	0,06	0,0716	0,165	0,00141	0,0006677	0,2378437	1,9091786
	0,032	0,12	0,1136	0,165	0,00141	0,0006677	0,3712682	3,0306322
	0,029	0,18	0,1489	0,165	0,00141	0,0006677	0,5046927	3,9712516
	0,029	0,21	0,1650	0,165	0,00141	0,0006677	0,5888082	4,4010732
κύλινδροι	0,047	0,06	0,0716	0,165	0,00141	0,0014063	0,2726501	1,9091786
	0,035	0,12	0,1136	0,165	0,00141	0,0014063	0,4060746	3,0306322
	0,028	0,18	0,1489	0,165	0,00141	0,0014063	0,4872895	3,9712516
	0,027	0,21	0,1650	0,165	0,00141	0,0014063	0,5482007	4,4010732