



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ
ΥΠΟΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΜΕ ΤΕΧΝΗΤΑ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

Κωστίδου Ελένη

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Επιβλέπων: Καθηγητής Γ. Χριστοδούλου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα καταρχήν να εκφράσω τις ευχαριστίες σε όσους βοήθησαν προκειμένου να διεκπεραιωθεί η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται:

Στον καθηγητή μου κ. Γ. Χριστοδούλου για την ανάθεση του θέματος και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για την καθοδήγηση και τις επιστημονικές γνώσεις που μου παρείχε, οι οποίες ήταν καθοριστικές για την εκπόνηση της εργασίας.

Στο Γιάννη Πατσέλη, τεχνικό του εργαστηρίου, για τη διεκπεραίωση του κατασκευαστικού μέρους του πειράματος, καθώς και στο Μανώλη Λασηθιωτάκη για την καθοριστική βοήθειά του σε κρίσιμες στιγμές.

Στον Άρη Μαυρομάτη για την προθυμία του να με βοηθήσει όποτε χρειάστηκε.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στο φίλο μου Κώστα Χατζόγλου, που υπήρξαν για μένα ανεκτίμητο στήριγμα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ABSTRACT.....	iv
EXTENDED ABSTRACT.....	vi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Η συμβολή της βλάστησης στα ποτάμια συστήματα.....	1
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	3
2.1 Γενικά	3
2.2 Έρευνες σε συνθήκες δύσκαμπτης βλάστησης.....	3
2.3 Έρευνες σε συνθήκες εύκαμπτης βλάστησης	5
2.4 Σύγκριση δύσκαμπτου και εύκαμπτου τύπου βλάστησης.....	6
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	9
3.1 Η πειραματική διάταξη.....	9
3.2 Σειρές μετρήσεων	9
3.3 Τύποι και διατάξεις εμποδίων.....	11
3.4 Κωδικοποίηση των πειραμάτων.....	15
3.5 Διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων	16
3.6 Παρατηρήσεις.....	17
3.6.1 Χαρακτηριστικά της ροής	17
3.6.2 Βάθη ροής.....	19
4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	20
4.1 Τραχύτητα ανοικτών αγωγών.....	20
4.2 Συντελεστής τραχύτητας Manning	21
4.2.1 Τραχύτητα <i>plexiglass</i>	22
4.2.2 Τραχύτητα πυθμένα με εμπόδια	23
4.2.3 Παρατηρήσεις	24
4.3 Συντελεστής τριβής f και ισοδύναμη τραχύτητα k_s	26
4.3.1 Σχολιασμός	30

5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	33
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	35
	ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	38
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πειραματικά δεδομένα	39
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Προφίλ Ελεύθερης Επιφάνειας	59
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Καμπύλες M2	64
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Πίνακες αποτελεσμάτων	84
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Φωτογραφίες πειραμάτων	86

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βλάστηση καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τις διεργασίες στα ποτάμια συστήματα, βιομηχανικές και υδραυλικές, και επηρεάζει ιδιαίτερα τις αποφάσεις στη διαχειριστική προσπάθεια για την ελαχιστοποίηση των πλημμυρικών φαινομένων.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση των παραμέτρων που συμβάλλουν στην αύξηση του βάθους ροής σε φυτοκαλυμμένους ανοικτούς αγωγούς υποκρίσιμης ροής, μέσω της πειραματικής μελέτης διαφόρων τύπων τεχνητής βλάστησης.

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε εργαστηριακή συσκευή στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στον πυθμένα του ενδιαμέσου τμήματος του αγωγού τοποθετήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι στοιχείων τραχύτητας, κυλινδρικά στελέχη δύο διαφορετικών υψών (το ένα ήταν βυθισμένο και το άλλο εξείχε της ελεύθερης επιφάνειας), και σφαιρίδια που προσαρτήθηκαν πάνω σε κυλινδρικά στελέχη. Τα στοιχεία τραχύτητας τοποθετήθηκαν σε τρεις εναλλακτικές διατάξεις διαφορετικής πυκνότητας και μελετήθηκαν για έξι διαφορετικές παροχές.

Για κάθε πειραματική διάταξη, ελήφθησαν μετρήσεις των βαθών ροής στο μέσον της διατομής με τη χρήση σταθμήμετρου. Στη συνέχεια, μορφώθηκαν τα διαγράμματα που απεικονίζουν το προφίλ της ροής και με τη βοήθεια της θεωρητικής καμπύλης M2 εκτιμήθηκε η τιμή του συντελεστή n Manning. Ο συντελεστής Manning διορθώθηκε από την επίδραση των τοιχωμάτων και προσδιορίστηκε η τιμή του n_b . Τέλος, υπολογίστηκε ο αδιάστατος συντελεστής τριβής f_b των Darcy – Weisbach και η ισοδύναμη τραχύτητα k_s .

Τα συμπεράσματα της έρευνας δείχνουν ότι η τραχύτητα, ο συντελεστής τριβής και η ισοδύναμη τραχύτητα μεταβάλλονται με διαφορετικό τρόπο με τις μεταβολές της παροχής ανάλογα με το αν τα στοιχεία είναι βυθισμένα ή όχι. Τέλος, εξαρτώνται από το ύψος και τη διάμετρο του εμποδίου και την πυκνότητα της διάταξης.

ABSTRACT

Vegetation plays a significant role in biomechanical and hydraulic stream processes and also determines the engineering decisions in environmental flood management.

The objective of the present thesis is to examine the parameters that result in the increase of the flow depth in vegetated open channels of subcritical slope, through the experimental study of different types of artificial vegetation in a rectangular channel.

The experiments were conducted in the Laboratory of the Applied Hydraulics at the National Technical University of Athens. Three different types of roughness elements were placed at the made of plexiglass bottom of the middle part of the channel, submerged rigid rods, emergent flexible cylindrical tubes and spheres set on the top

of the rods. The elements were put in three different densities and they were tested for six discharges.

For every arrangement, measurements of the depth of flow were taken, along the axis of the flume, using a mechanical water level meter. The flow profile, which is portrayed by flow depth versus position diagrams, was derived based on these measurements. Using the theoretical curve M2 for the non-uniform flow, the Manning coefficient n was estimated and it was corrected by removing the impact of the channel walls. In addition, the dimensionless Darcy friction factor f and the equivalent roughness k_s were calculated.

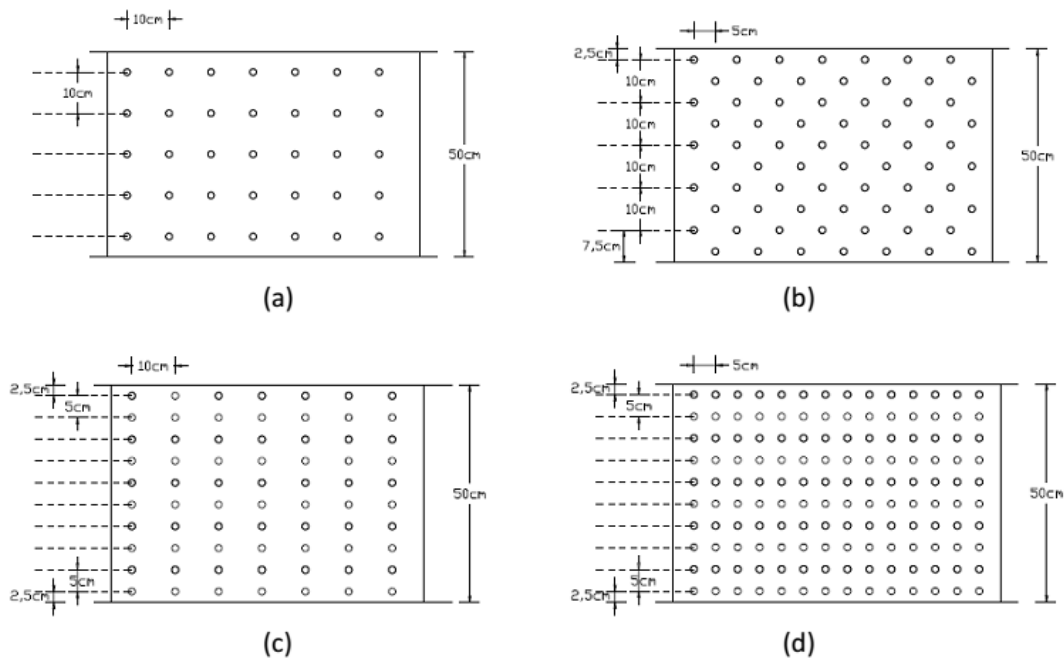
The results of the research point out that depending on whether the elements are fully submerged or not, the roughness, the friction coefficient and the equivalent roughness increase or decrease with the discharge. The specific roughness parameters also depend on the height and diameter of the element and the density of the arrangement.

Extended Abstract

Experimental procedure

In order to simulate the vegetation, three distinct types of elements were used (Type I – Rods, Type 2 – Plastic tubes adjusted on the rods, Type III – Spheres on top of the rods). The elements were set in holes of appropriate diameter that were drilled along 8 m in the middle part of the channel. Upstream and downstream of the elements the channel was uncovered for a length of 3 m.

The first two types of elements (Type I and Type II) were arranged in three different densities, low (100 stems/m^2), intermediate (200 stems/m^2) and high (400 stems/m^2). For the low density the elements were arranged in a 10 cm by 10 cm grid, while in the high density arrangement they were set in a 5 cm by 5 cm grid. For the intermediate density the elements were arranged in a staggered 10 cm by 5 cm grid. On the other hand, Type III was set in two densities, low and intermediate. For the intermediate density two separate arrangements were applied, the 10 cm by 5 cm staggered grid and a 5 cm by 10 cm grid.



Picture 1: Overview of the arrangements (a) 100 stems/m^2 , (b) 200 stems/m^2 – staggered, (c) 200 stems/m^2 , (d) 400 stems/m^2

For each one of the aforementioned types of elements, a series of experiments was carried out. Each series included six discharges (10, 20, 30, 40, 50 and 60 l/s). Furthermore, an extra series of experiments took place in the uncovered channel in order to determine the roughness coefficient n_w of the plexiglass. In each experiment the flow depth was measured along the covered part of the channel. The measurements were taken in the middle of the cross-section, in intervals of about 20 cm.

Flow characteristics

The flow on the channel is non-uniform and the free surface is slightly curved. The flow depth does not reach the value of the uniform depth, due to the short available length of the channel.

The slope of the experiments' channel is subcritical and the free surface corresponds to a M2 curve. Upstream of the elements, it is observed that the flow depth tends to stabilise, without ever being uniform.

Concerning the vegetation, the elements of type I are fully submerged for all the tested discharges, while the elements of type III are submerged for the higher discharges (30 to 60 l/s). Elements of type II for all discharges and elements of type III for the remaining discharges are emergent.

Two indicative photos follow which show the main differences of flow in Type II (Picture 2) and Type III (Picture 3) for different flow rates and densities.



Picture 2: Experiment Type II, density 200 stems/m² (staggered), 40 l/s



Picture 3: Experiment Type III, density 100 stems/m², 60 l/s

Downstream of the elements and mainly for the smaller discharges (10, 20 and 30 l/s), the free surface presents a fluctuation of about 0,1 to 0,35 cm. This is due to the intense change of roughness since there are no vegetation elements downstream.

In this section of the channel, the emergence of crosswaves has been observed. For the greater discharges (40, 50 and 60 l/s), the fluctuation decreases, especially for the elements of type III, which have a more hydrodynamic shape than the other two types.

Furthermore, it is significant that downstream of the covered part of the channel, the presence of waves was observed. The waves are more intense for the lower discharges, with a wave height reaching up to 2 cm. Finally, it was noticed that this phenomenon tends to diminish upstream, where the free surface is much smoother.

Calculation of the roughness coefficients

For every experiment, the roughness coefficient n was calculated according to the Manning equation:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J_o^{1/2}$$

where V is the mean flow velocity, R is the hydraulic radius and J_o is the channel's slope.

The coefficient n was determined by adjusting the theoretical curve M2 to the flow depth – distance diagram that represents the free surface profile. Next, its value was corrected by removing the influence of the sidewalls according to the following relation:

$$n_b^{3/2} = n^2 \left(1 + 2 \frac{y}{b}\right) - n_w^2 \left(\frac{2y}{b}\right)$$

where n_b is the bottom's roughness, n is the overall roughness, n_w is the sidewalls' roughness, y is the flow depth and b is the channel's width.

Also, the dimensionless Darcy – Weisbach friction factor was calculated using the equation that relates it with the Manning coefficient:

$$n_b = \left(\frac{f_b}{8g}\right)^{1/2} R^{1/6}$$

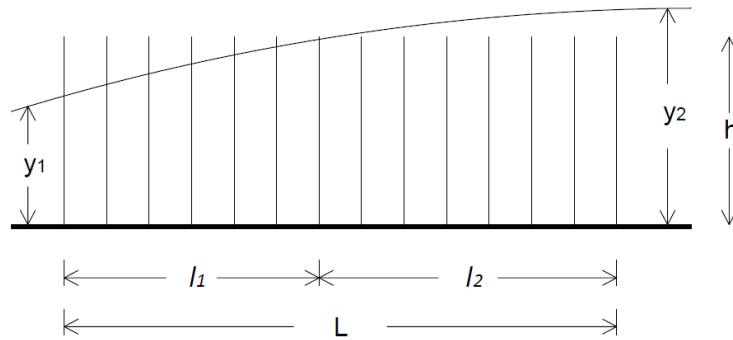
where the hydraulic radius R was replaced by the flow depth y , in order to calculate the f_b that depends only on the roughness of the bottom.

Moreover, the equivalent sand roughness k_s was calculated from the Nikuradse equation, where similarly it was set $R=y$:

$$k_s = 3,7 \cdot 4y 10^{-1/(2\sqrt{f})}$$

The equivalent sand roughness was related to the flow depth y and the elements' height h . For the emergent elements, the weighted mean depth was considered (Picture 4):

$$h = (l_1 * \frac{y_1 + h}{2} + l_2 * h) / L$$



Picture 4: Outline for the calculation of weighted h and l^*

In order to study the impact of the vegetation's characteristics, two dimensionless parameters were used, F and θ , that were proposed by Stone and Shen (2002) and Herbich and Shulits (1964) respectively.

The F parameter is a function of the elements' density N , the diameter d , the dimensionless parameter l^* and the flow depth y :

$$F = (l^{*-1} - \sqrt{Nd^2}) \sqrt{\frac{1}{Ndy}}$$

where l^* = wetted height of element/flow depth.

When all the elements are fully submerged it is $l^*=h/y$ and when the elements are emergent it is $l^*=1$. In the case that some of the elements are submerged, whereas the rest remain emergent (Picture 4), the weighted mean was used:

$$l^* = (l_1 * 1 + l_2 \frac{h}{(h + y_2)/2}) / L$$

Especially for type III, we considered an equivalent diameter of the compound element equal to $d=(d_1 * h_1 + \pi * d_2^2 / 4) / (h_1 + d_2)$, where d_1 , h_1 the diameter and the height of the rod respectively and d_2 the diameter of the sphere.

The parameter θ expresses the density of the projected area of elements normal to the flow per unit bed area.

From the diagrams $n - Q$, $f_b - F$, $k_s/h - \theta$ that follow, useful conclusions can be deduced concerning the influence of the elements' geometry and arrangement in the channel's roughness.

Manning coefficient n_b

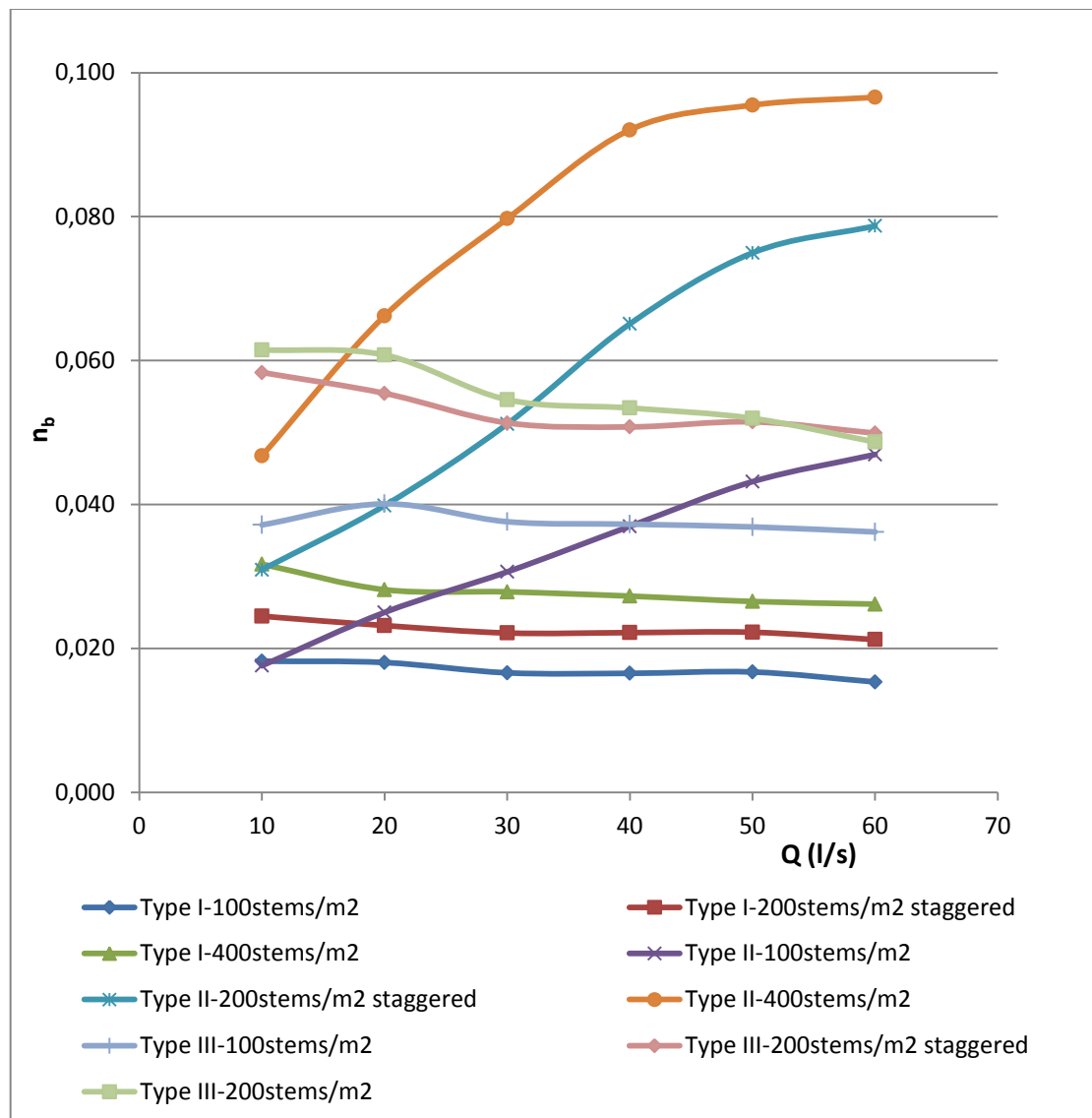


Figure 1: Manning coefficient n_b versus discharge Q

The diagram above indicates that the n_b coefficient is much greater than the natural roughness of the channel. Specifically, n_b has a higher value than n for the range of 9 to 28% for type I, the range of 9 to 49% for type II and the range of 14 to 39% for type III. The smallest change is observed for the lower discharges, which reflects the gradually decreasing impact of the sidewalls as the flow rate increases.

When comparing the same arrangements of type I and III, we notice that the spheres present almost 2,5 higher roughness than the rods for all discharges, which is on one hand due to the greater height of type III elements and on the other hand due to the greater projected to the flow area. The value of n_b is greater for lower discharges and it decreases when the discharge increases.

As expected, an increase of density leads to an increase of the roughness both on submerged and emergent vegetation elements.

Concluding, for the high density of type II the value of n seems to stabilise for the higher discharges. It may be expected that at the specific discharge when all the obstacles are submerged, the roughness will start decreasing and the $n(Q)$ diagram will resemble those of type I and III.

Friction coefficient f_b

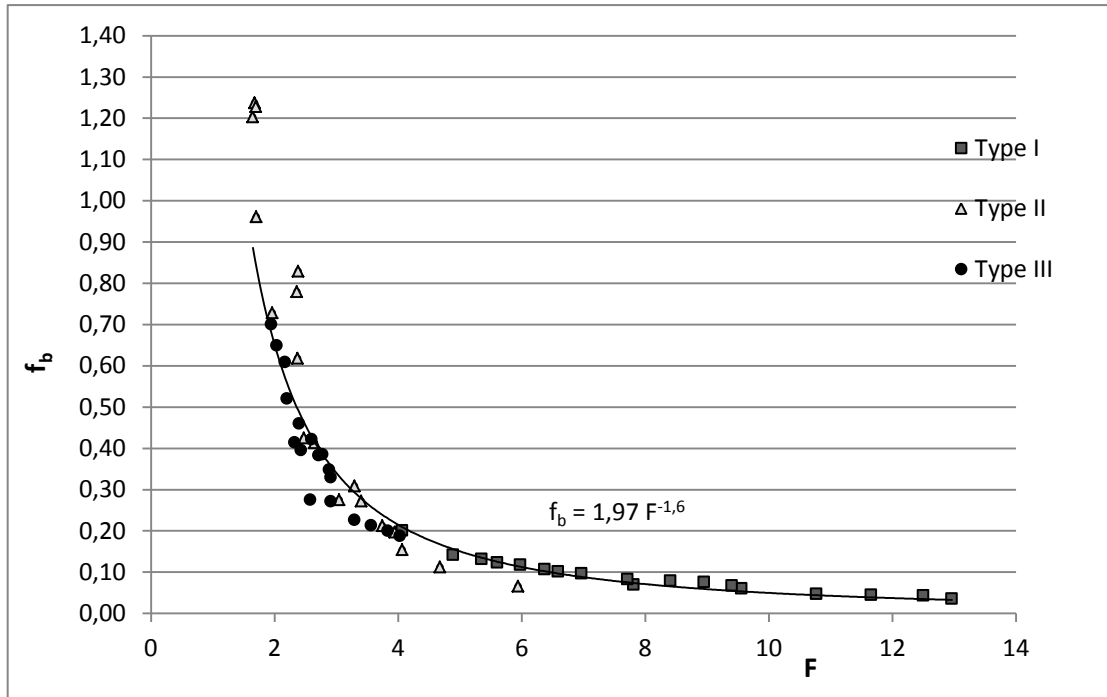


Figure 2: Darcy – Weisbach coefficient f_b versus parameter F

From the above figure, there is a systematic relation between f_b and the arrangement characteristics which is expressed below and is valid for both submerged and emergent elements:

$$f_b = 1,97 F^{-1,6}$$

The specific equation can be used to determine the friction coefficient if the flow depth is known.

Equivalent sand roughness k_s

Figure 3 shows the impact of the elements' height on the equivalent roughness when the parameter θ increases. The following equation is derived:

$$\frac{k_s}{h} = 19,8 \theta$$

which is valid for $\theta < 0,22$. For $\theta > 0,22$, it seems that k_s/h increases by the parameter θ in a slower rate. This relation agrees with previous research, although the rate of change is slightly different.

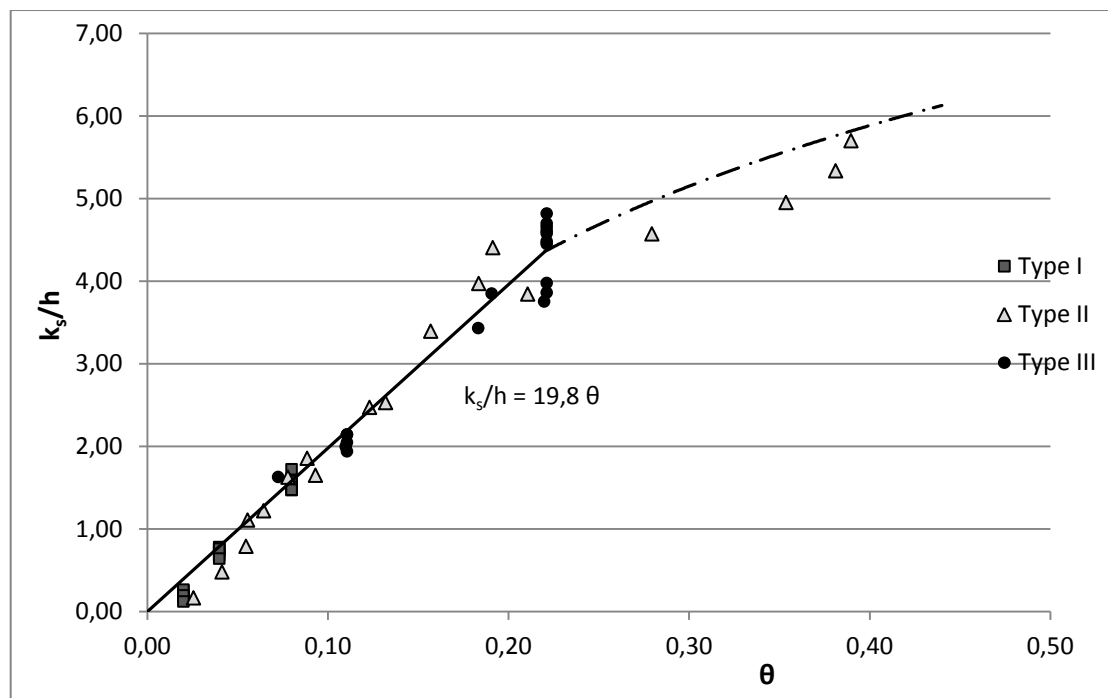


Figure 3: Dimensionless roughness k_s/h versus parameter θ

Conclusions

Manning coefficient changes in a different manner in accordance with the change of the discharge, depending on whether the vegetation elements are submerged or emergent. When the vegetation elements are submerged, Manning's n decreases when the discharge increases, while the exact opposite happens when the elements are emergent. In that case, the increase of the discharge results on the increase of the flow depth, thus the element's height that affects the cross-section is greater. Subsequently, greater emergent elements' height results in greater roughness when the discharge increases up to the point in which all elements are fully submerged and the roughness starts decreasing.

The correlation among the increase of the elements' density and the value of n_b is approximately linear. The spatial distribution of the elements affects the smoothness of the flow (waves, fluctuation), but it does not contribute significantly to the roughness. The geometry of the vegetation element has a major impact on the roughness, since the increase of the projected area correlates to the increase of n_b .

There exists a systematic dependence of the dimensionless friction factor f_b and the equivalent sand roughness k_s on the arrangement's density, the height and the diameter of the element, for both submerged and emergent elements.

Regarding the submerged elements, when comparing arrangements of the same density and geometry, their height has an almost constant impact on the equivalent roughness, with no dependence on the discharge. Provided there is a sufficient number of elements per unit bed area θ ($\theta > 0,05$), the equivalent roughness is larger than the height. For $\theta < 0,22$, the dimensionless roughness k_s/h increases proportionally by θ with a rate of 19,8, while for larger values of θ , the rate is smaller.

Future investigations that would contribute to more systematic results should be conducted in elements of varied geometries, densities and distributions of the arrangements, as well as for different channel slopes.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ανάγκη για την αποκατάσταση των ποταμών και την περιβαλλοντική διαχείριση των πλημμυρών έχει στρέψει τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον της επιστημονικής έρευνας στη μελέτη των ποικίλων υδραυλικών, υδρολογικών, γεωμορφολογικών και οικολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν την ανταπόκριση του ποτάμιου συστήματος σε αυτήν τη διαχειριστική προσπάθεια. Αναμφίβολα, η παρουσία βλάστησης αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των φυσικών ποτάμιων συστημάτων και παίζει σημαντικό ρόλο στη λήψη των εκάστοτε διαχειριστικών μέτρων. Αφενός η βλάστηση έχει τεράστια σημασία για το υδάτινο οικοσύστημα, αφετέρου συμβάλλει στην αύξηση της αντίστασης στη ροή και επιδρά στην στερεομεταφορά. Λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρονται, η χρήση της αποτελεί συχνά ένα μέσο για να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας σε μια περιοχή (Järvelä *et al.* 2006). Συνεπώς, η σωστή κατανόηση των φυσικών νόμων που διέπουν την αντίσταση στη ροή που προβάλλουν οι φυτοκαλυμμένες περιοχές κρίνεται αναγκαία προκειμένου να αναπτυχθούν αξιόπιστα εργαλεία για την αποτελεσματική διαχείριση των πλημμυρών.

Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας έχουν υλοποιηθεί πολλές μελέτες που εξετάζουν τις παραμέτρους της ροής αξιοποιώντας για επαλήθευση την πληθώρα των εργαστηριακών αποτελεσμάτων δοκιμών σε διάφορες συνθήκες βλάστησης που διατίθενται.

1.2 Η συμβολή της βλάστησης στα ποτάμια συστήματα

Η παρουσία υδρόβιας βλάστησης στους ποταμούς συμβάλλει με καθοριστικό τρόπο στην ισορροπία του ποτάμιου συστήματος. Τα φυτά μέσω της ανάληψης των διαφόρων θρεπτικών και της παραγωγής οξυγόνου βοηθούν στη μείωση της θολότητας και στη βελτίωση της ποιότητας του νερού (Wilcock *et al.* 1999). Ειδικότερα, η απομάκρυνση νιτρικών και φωσφορικών ουσιών τυγχάνει τόσο μεγάλης δυναμικότητας, ώστε αρκετοί ερευνητές προτείνουν ευρεία φυτοκάλυψη των ποταμών (Mars *et al.* 1999). Κάποια είδη βλάστησης αποτελούν βασική πηγή τροφοδοσίας της τροφικής αλυσίδας (Green and Short 2003) και λόγω της χωρικής ετερογένειας του πεδίου των ταχυτήτων δημιουργούνται φυσικά καταφύγια, σημαντικά για τη διατήρηση και ανάπτυξη της βιοποικιλότητας (Kemp *et al.* 2000). Επιπροσθέτως, η παρουσία της φυτοκάλυψης συμβάλλει στην αύξηση της ευστάθειας των παρόχθιων πρηνών (Pollen and Simon 2005) και μειώνει την παράκτια διάβρωση μέσω της άμβλυνσης τόσο των κυματισμών όσο και της μετεωρολογικής παλίρροιας που οφείλεται μόνο στον άνεμο (storm surge), (π.χ. Türker *et al.* (2006)).

Από υδραυλική άποψη, η παροχετευτικότητα των ανοικτών αγωγών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα και τις διαστάσεις της βλάστησης με την οποία

είναι καλυμμένος ο πυθμένας τους. Η μερική ή ολοκληρωτική αφαίρεση της μειώνει την αντίσταση στη ροή και την τραχύτητα της διατομής, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της παροχетеυτικής ικανότητας των ποταμών. Από την άλλη πλευρά, η ανεξέλεγκτη ανάπτυξη των υδρόβιων φυτών σε ένα κανάλι δύναται να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της παροχетеυτικότητάς του. Έτσι, για πολλά χρόνια, ακολουθούνταν η πρακτική της εκρίζωσης των φυτών από τον πυθμένα των ανοικτών αγωγών, προκειμένου να διοχетеύεται η μέγιστη παροχή που διέρχεται κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού επεισοδίου, προκαλώντας ωστόσο ποικίλες δυσμενείς επιπτώσεις στο οικολογικό σύστημα (Kouwen and Unny 1973).

Συνεκτιμώντας την επιρροή της βλάστησης στα οικολογικά συστήματα των ποταμών, καθώς επίσης και την επίδρασή της στην τραχύτητα του καναλιού, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι είναι επιθυμητή η επίτευξη της κατάστασης εκείνης στην οποία θα γίνεται εκμετάλλευση των θετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεών της με ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας.

Η εργασία αυτή ασχολείται με την πειραματική διερεύνηση της επίδρασης εναλλακτικών διατάξεων στοιχείων τεχνητής βλάστησης στη ροή ανοικτού αγωγού υποκρίσιμης κλίσης. Ειδικότερα εστιάζει στη μελέτη και στον εντοπισμό των παραμέτρων εκείνων που επηρεάζουν την αύξηση του βάθους ροής και κατά συνέπεια και την τραχύτητα.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γενικά

Η παρουσία βλάστησης στον πυθμένα ανοικτών αγωγών υποκρίσιμης κλίσης τυγχάνει εκτεταμένης διερεύνησης από τους Υδραυλικούς Μηχανικούς τα τελευταία 60 χρόνια. Η διερεύνηση των σχέσεων που διέπουν τη ροή σε φυτοκαλυμμένους αγωγούς αποτελεί το αντικείμενο ποικίλων επιστημονικών μελετών, συμπεριλαμβανομένων πειραματικών, αριθμητικών, αναλυτικών μελετών και ερευνών πεδίου.

Γενικά, η βλάστηση ως αντικείμενο έρευνας στην επίδρασή της στη ροή σε ανοικτούς αγωγούς κατηγοριοποιείται ως φυσική ή τεχνητή, εύκαμπτη ή δύσκαμπτη, βυθισμένη ή μη. Οι έρευνες που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία εστιάζουν κυρίως στη διερεύνηση των νόμων που διέπουν την υδραυλική ροή, των χαρακτηριστικών της τύρβης και της επιπρόσθετης αντίστασης (drag force) που εισάγεται λόγω της φυτοκάλυψης. Επιπλέον, πολλοί ερευνητές ασχολούνται με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών εκείνων της βλάστησης που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή c_D (drag coefficient), ο οποίος εκφράζει τη μέση χωρικά και χρονικά δύναμη αντίστασης παρουσία βλάστησης. Ωστόσο, η μηχανική συμπεριφορά και οι εμβιομηχανικές ιδιότητες της βλάστησης ελάχιστα έχουν διερευνηθεί.

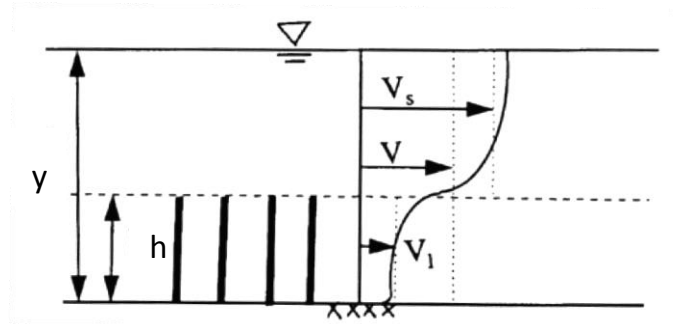
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σημαντικότερες έρευνες που έχουν προσεγγίσει το φαινόμενο πειραματικά και βρίσκονται σε σχέση με την παρούσα εργασία.

2.2 Έρευνες σε συνθήκες δύσκαμπτης βλάστησης

Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν έχουν διεξάγει έρευνες για τη διερεύνηση της ροής σε συνθήκες άκαμπτης βλάστησης, κυρίως λόγω της ευκολίας που παρουσιάζεται στην υλοποίηση των πειραματικών διατάξεων. Εξάλλου, σε πολλές περιπτώσεις στη φύση είναι εύλογη η θεώρηση της αμελητέας κάμψης των στελεχών της βλάστησης, ενώ υπάρχουν και αρκετές μελέτες που προτείνουν μοντέλα που μπορούν να εφαρμοστούν και σε συνθήκες καμπτόμενης βλάστησης, (π.χ. Kutija and Thi Minh Hong (1996)).

Οι Stone and Shen (2002) πραγματοποίησαν μία σειρά πειραμάτων σε βυθισμένα και εξέχοντα της επιφάνειας άκαμπτα κυλινδρικά στελέχη, διαφόρων μεγεθών και πυκνοτήτων σε συνθήκες μόνιμης ομοιόμορφης ροής. Η ροή στα βυθισμένα στοιχεία μπορεί να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους στρώματα, όπου στην κατώτερη στρώση (στρώση τραχύτητας) η ταχύτητα μπορεί να θεωρηθεί περίπου σταθερή, είναι δε αισθητά μικρότερη απ' ότι στο ανώτερο τμήμα λόγω της επιπρόσθετης αντίστασης που εισάγεται εξαιτίας της ύπαρξης των στελεχών, όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 1. Τα εξέχοντα στοιχεία τραχύτητας μπορούν να θεωρηθούν μία οριακή κατάσταση των βυθισμένων στοιχείων χωρίς επιφανειακή στρώση ροής κι επομένως είναι εφικτή και η αντίστοιχη επέκταση μιας σχέσης που θα

μοντελοποιεί τη μέση ταχύτητα V της διατομής συναρτήσει των διάφορων παραμέτρων.



Εικόνα 1: Σκαρίφημα πεδίου ταχυτήτων σε ανοικτό αγωγό με βυθισμένα στοιχεία βλάστησης

Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους συνοψίζονται στη διατύπωση της σχέσης:

$$V = F\sqrt{hJ_v} \quad (1)$$

όπου $J_v = J - J_b$ με J την κλίση του καναλιού και J_b να εξαρτάται από το συντελεστή τριβής f_b του πυθμένα, την ταχύτητα V_1 του στρώματος τραχύτητας, την πυκνότητα των τεμαχίων και την αδιάστατη παράμετρο l^* =βρεχόμενο ύψος στελέχους/βάθος ροής. Ο συντελεστής F εκφράζει τα χαρακτηριστικά της διάταξης της βλάστησης και συγκεκριμένα είναι συνάρτηση της παραμέτρου l^* , της διαμέτρου, του ύψους και της πυκνότητας των στοιχείων τραχύτητας.

Η παραπάνω σχέση λόγω της εξάρτησής της από το l^* έχει ισχύ τόσο σε βυθισμένη όσο και σε μη βυθισμένη βλάστηση, και αναπτύχθηκε βασιζόμενη ελάχιστα σε πειραματικά δεδομένα, το οποίο την καθιστά αξιόπιστη για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών ροής και ταχύτητας.

Οι Tanino and Nepf (2008) διερεύνησαν πειραματικά την αντίσταση για τυχαία κατανομή σταθερής πυκνότητας δύσκαμπτων κυλινδρικών στελεχών που εξέχουν του βάθους ροής. Παρατηρήθηκε ότι για δεδομένο Re , ο c_D αυξάνει καθώς αυξάνεται η συνολική προβαλλόμενη στη ροή επιφάνεια των κυλινδρικών στοιχείων τραχύτητας, η οποία εκφράζεται από την παράμετρο $\varphi = m\pi d^2/4$ (όπου m και d ο αριθμός και η διάμετρος των στελεχών αντίστοιχα). Επίσης, για τα διάφορα φ που εξετάστηκαν, ο c_D αυξάνεται με τη μείωση του αριθμού Re . Αξίζει να σημειωθεί ακόμη ότι για τα φ που εξετάστηκαν, ο συντελεστής c_D είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν που προκύπτει για μεμονωμένο κυλινδρικό στοιχείο, το οποίο ωστόσο έρχεται σε αντίθεση με προηγούμενα ευρήματα της Nepf (1999) για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds.

Ο Fairbanks (1998) πραγματοποίησε πειράματα σε συνθήκες πλήρως και μερικώς βυθισμένων κυλινδρικών πύρων, καθώς και σε ροή με δύο στρώσεις βλάστησης. Ως δύο στρώσεις νοείται η ροή κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν δύο ύψη στοιχείων βλάστησης, εκ των οποίων το χαμηλότερο προσομοίαζε τη χαμηλού ύψους φυτοκάλυψη που συναντάται συχνά στον πυθμένα των ποταμών. Σε πλήρως

βυθισμένες συνθήκες, η ροή παρουσιάζει μεγάλη διατμητική τάση κοντά στην κορυφή των πύλων όπου κι εμφανίζονται τα μεγαλύτερα φαινόμενα τύρβης. Ανάμεσα στην ακμή των πύλων και την ελεύθερη επιφάνεια, η κατά μήκος ταχύτητα ακολουθεί λογαριθμική κατανομή, ενώ η κατακόρυφη ταχύτητα δεν είναι χωρικά ομοιόμορφη, το οποίο υποδεικνύει ότι πραγματοποιούνται δευτερεύουσες κινήσεις ροής. Η ταχύτητες στην πλήρως βυθισμένη και στη μερικώς βυθισμένη κατάσταση ακολουθούν περίπου την ίδια κατανομή και το ίδιο μέγεθος. Επιπλέον, στην πλήρως βυθισμένη περίπτωση βλάστησης, η μέση ταχύτητα και η ένταση της τύρβης διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θέση μέτρησής τους σε σχέση με τους πύλους κι έχουν μία αντίστροφη σχέση, δηλαδή η τύρβη είναι εντονότερη εκεί που η ταχύτητα είναι χαμηλή και αντιστρόφως. Ειδικότερα, η ταχύτητα είναι χαμηλότερη αμέσως κατάντη του πύλου και παίρνει τη μέγιστή τιμή της σε θέση μεταξύ γειτονικών εμποδίων.

Τα πειράματα με τις δύο στρώσεις βλάστησης έδειξαν ότι η τραχύτητα του πυθμένα τείνει να αυξήσει την κατά μήκος ταχύτητα κοντά σε αυτόν, η μέση ταχύτητα της διατομής μειώνεται και το βάθος ροής αυξάνεται. Ειδικότερα στην περίπτωση που οι πύλοι εξείχαν της ροής, η διπλή αυτή τραχύτητα μείωνε την ταχύτητα με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η απόθεση των ιζημάτων, ενώ όταν και οι δύο στρώσεις ήταν βυθισμένες ουσιαστικά λειτουργούσαν όπως στην ενιαία στρώση ροής.

2.3 Έρευνες σε συνθήκες εύκαμπτης βλάστησης

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η τάση όλο και περισσότεροι ερευνητές να ασχολούνται με τη διερεύνηση των συνθηκών ροής σε εύκαμπτους τύπους φυτών, καθώς αυτή είναι η κατάσταση που παρουσιάζεται πιο συχνά στα φυσικά ποτάμια.

Τα άκαμπτα στοιχεία αντιδρούν παθητικά στη ροή των υγρών, και σε υψηλές τιμές Reynolds, η δύναμη αντίστασης είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 A \quad (2)$$

Τα εύκαμπτα φυτά, προκειμένου να επιβιώσουν στις δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της ροής του ποταμού, χρειάζεται να αναπροσαρμόσουν το σχήμα τους για να αντέξουν την επιπρόσθετη δύναμη αντίστασης που εισάγεται. Αυτός ο ανασχηματισμός (reconfiguration) οδηγεί σε μετασχηματισμό της σχέσης αντίσταση – ταχύτητα, η οποία εκφράζεται ως $\text{drag} \sim u^\alpha$, με $\alpha \neq 2$ (Puijalon *et al.* (2005), Boller and Carrington (2007), Bal *et al.* (2011)).

Οι Siniscalchi and Nikora (2013) ασχολήθηκαν με τη συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στη ροή, στις κυμαινόμενες δυνάμεις αντίστασης και στο δυναμικό ανασχηματισμό (dynamic reconfiguration) μεμονωμένων φυτών σε τυρβώδεις συνθήκες ροής. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους έδειξαν ότι η δυναμική αντίδραση των φυτών σχετίζεται με την ανάντη ταχύτητα σε συγκεκριμένες συχνότητες τύρβης μόνο, και κατ' αντίστοιχο τρόπο επιδρά και στην κατάντη ταχύτητα. Τα φυτά παρουσιάζουν χωρική κίνηση που μοιάζει με την κίνηση των

πτερυγίων, με την ταχύτητα προώθησης των διακυμάνσεων να είναι σχεδόν σταθερή κατά μήκος του φυτού. Αυτή η κίνηση, επίσης, δεν έχει τυχαίο χαρακτήρα, αντιθέτως πραγματοποιείται με συγκεκριμένο βαθμό περιοδικότητας και κανονικότητας. Επιπροσθέτως, ο ανασχηματισμός τους επιδρά άμεσα στην αντίσταση που ασκείται στα φυτά μειώνοντάς την, το οποίο μάλιστα δε φαίνεται να προκαλείται από την περιβάλλουσα τύρβη, αλλά να είναι ένα πραγματικά άμεσο αποτέλεσμα της κίνησης τους. Από οικολογικής πλευράς, θα πρέπει να επισημανθεί πως αυτός ο περιοδικός ανασχηματισμός συνδράμει το φυτό να έχει μία καλύτερη έκθεση στο φως και μπορεί να αυξήσει την ανάληψη των θρεπτικών και την ανταλλαγή οξυγόνου τροποποιώντας το πάχος των στρωμάτων που αναπτύσσονται γύρω του λόγω μίξης και διάχυσής τους.

2.4 Σύγκριση δύσκαμπτου και εύκαμπτου τύπου βλάστησης

Ποικίλες μελέτες ασχολούνται με τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση των άκαμπτων τεχνητών στοιχείων βλάστησης με τη φυσική καμπτόμενη βλάστηση, εστιάζοντας έτσι στην καταλληλότητα των πρώτων ως προσομοίωμα της φυσικής κατάστασης. Επιπλέον, μέσα από αυτήν την προσπάθεια επιχειρείται η εύρεση ή και επέκταση των νόμων που διέπουν τη ροή μέσα από τα άκαμπτα στοιχεία τραχύτητας στην περίπτωση των εύκαμπτων τύπων βλάστησης.

Η Nepf (2012) ασχολήθηκε με το πρόβλημα εξετάζοντας τη συμπεριφορά του οριακού στρώματος σε διάφορους τύπους βλάστησης που διέφεραν ως προς την ευλυγισία των φυτών. Τα καμπτόμενα φυτά λόγω της ώθησής τους από τη ροή αλλάζουν τη γεωμετρία του οριακού στρώματος. Ο μετασχηματισμός της γεωμετρίας της βλάστησης μειώνει την εγκάρσια προς τη ροή επιφάνεια του φυτού και το σχήμα που προκύπτει είναι περισσότερο υδροδυναμικό καθώς αυτό ακολουθεί τις γραμμές ροής. Αυτός ο μετασχηματισμός έχει ως συνέπεια η δύναμη αντίστασης να αυξάνει με αργότερο ρυθμό σε σχέση με την ταχύτητα, από αυτό που θα προβλέπαμε με βάση τη σχέση (2).

Προτείνει να συνεχιστεί η έρευνα σε αυτήν την κατεύθυνση για να διερευνηθεί η συμπεριφορά της βλάστησης σε ένα πεδίο ροής και η επίδρασή της στη μορφή του οριακού στρώματος της μόνιμης ροής. Επίσης, θεωρεί χρήσιμη τη διερεύνηση των επιπτώσεων της τυρβώδους ροής και των κυματισμών σε συνάρτηση με την κίνηση της βλάστησης.

Καταλήγει ότι το ποσοστό επικάλυψης της βρεχόμενης διατομής από τη βλάστηση συσχετίζεται με το συντελεστή τραχύτητας Manning με μη γραμμική συσχέτιση, το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα των Ree (1949) και Wu *et al.* (1999). Για την εύκαμπτη βλάστηση το ποσοστό επικάλυψης είναι συνάρτηση της παροχής και χρίζει περαιτέρω πειραματικής μελέτης.

Τα ευρήματα των Aberle and Järvelä (2013) επιβεβαιώνουν τη Nepf. Με αφορμή την ανόμοια συμπεριφορά που παρουσιάζεται ανάμεσα σε τεχνητά άκαμπτα στοιχεία και στη φυσική φυλλώδη βλάστηση, παραμετροποίησαν τη σχέση της ταχύτητας και

της χαρακτηριστικής επιφάνειας του φυτού που επιδρά στη ροή με το συντελεστή σύρσης. Στόχος ήταν η εύρεση μιας φόρμουλας με τη οποία θα εκτιμάται ο συντελεστής τριβής f των Darcy - Weisbach, ο οποίος συνδυάζει την επίδραση της τριβής στα επιμέρους στρώματα της ροής (f') και την επίδραση της συρτικής δύναμης αντίστασης (f''). Κατέληξαν ότι η εύρεση των χαρακτηριστικών υδραυλικών αναλογιών, της γεωμετρίας και της ευλυγισίας, είναι ουσιαστικότερη στη μελέτη της συμπεριφοράς στην αντίσταση στη ροή από την απλή αναλογία που χρησιμοποιείται για κυλινδρικά στοιχεία. Συλλέγοντας και αναλύοντας δεδομένα που έχουν δημοσιευτεί σε παρόμοιες έρευνες, βρίσκουν ότι ο συντελεστής τριβής f'' λόγω της συρτικής δύναμης, μειώνεται μη γραμμικά καθώς η ταχύτητα αυξάνει, τόσο σε φυσική όσο και σε τεχνητή βλάστηση. Επιπλέον, ο f'' είναι συνάρτηση ενός δείκτη LAI , ο οποίος εκφράζει την πυκνότητα του φυλλώματος της βλάστησης σε συνδυασμό με την ικανότητα του φυτού να προσαρμόζει το σχήμα του στη ροή. Αντιθέτως, ο f'' είναι σχεδόν σταθερός για κυλινδρικά στοιχεία. Τελικά, κατέληξαν στην πρόταση της σχέσης:

$$f'' = 4 C_{D\chi} LAI \left(\frac{u_m}{u_\chi}\right)^\chi \quad (3)$$

όπου u_m η μέση ταχύτητα, $C_{D\chi}$ ο συντελεστής σύρσης ανάλογα με το είδος της βλάστησης και χ παράμετρος που προκύπτει από εμπειρικά δεδομένα και διατίθεται σε πίνακες, αλλά η οποία μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από μελέτη πεδίου.

Οι Valyrakis *et al.* (2014) διεξήγαγαν μία συγκριτική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν ανάμεσα σε στοιχεία διαφορετικής ελαστικότητας και πορώδους. Κατέληξαν ότι όσο πιο πορώδες κι ελαστικό είναι το φυτό τόσο περισσότερα φαινόμενα τύρβης εμφανίζονται και τόσο περισσότερο μεταβάλλεται η γεωμετρία του πεδίου ροής με την ταχύτητα να μειώνεται αισθητά κατάντη του στοιχείου.

Η έρευνα των Chen *et al.* (2011) εστιάζει στη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς δύσκαμπτης βλάστησης, κυλινδρικής διατομής με καθ' ύψος μεταβαλλόμενη διάμετρο που εξέχει της ελεύθερης επιφάνειας. Μέσα από την έρευνα, επιχειρείται η διατύπωση αξιόπιστων εργαλείων για την εκτίμηση της αντίστασης, καθώς και των κρίσιμων συνθηκών ροής για τις οποίες μπορεί να επέλθει η ρήξη των στοιχείων τραχύτητας. Εφαρμόστηκε στατική ανάλυση για άκαμπτη βλάστηση και δυναμική ανάλυση για την περίπτωση της καμπτόμενης βλάστησης. Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το σημείο στο οποίο ασκείται η μέγιστη εφελκυστική δύναμη (σημείο θραύσης) επηρεάζεται από τη γεωμετρία των κωνικών στελεχών (k = ελάχιστη διάμετρος στην επιφάνεια/μέγιστη διάμετρος) και τον αριθμό Reynolds. Όσο πιο κυλινδρικό είναι το στοιχείο ($k \rightarrow 1$), τόσο πιο κοντά στη βάση γίνεται η θραύση. Επιπλέον το σημείο θραύσης μετακινείται προς τα κάτω με τον αριθμό Reynolds, για τις δυναμικές συνθήκες λυγισμού των στελεχών. Η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής τάσης εξαρτάται από τη μέγιστη διάμετρο τόσο στην εύκαμπτη όσο και στη δύσκαμπτη βλάστηση. Ωστόσο, στη δύσκαμπτη περίπτωση, ο λόγος k επηρεάζει σε μικρό βαθμό τη μέγιστη εφελκυστική τάση. Όσον αφορά στην αδιάστατη αντίσταση, αυτή μειώνεται

σημαντικά καθώς ο Reynolds αυξάνει, εκτός από τα πολύ έντονα κωνικά στελέχη (μικρές τιμές k). Από αυτήν την παρατήρηση εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι συντελεστές αντίστασης, όπως ο n (Manning) και ο f (Darcy – Weisbach), μάλλον μειώνονται με τον Re . Επίσης, η αντίσταση σε υψηλές τιμές Re είναι αξιοσημείωτα χαμηλότερη σε σχέση με αυτήν της δύσκαμπτης βλάστησης, το οποίο υποδηλώνει πως ο λυγισμός των φυτών μειώνει την αντίσταση που προβάλλεται. Τέλος, η αδιάστατη δύναμη αντίστασης αυξάνει καθώς ο Re αυξάνεται, λόγω του ότι μεγαλύτερη δύναμη απαιτείται για να λυγίσει το φυτό σε μεγαλύτερο βαθμό.

Σημειώνεται, τέλος, ότι μικρή έρευνα έχει πραγματοποιηθεί στο πεδίο της μικτής βλάστησης, καθώς δεν είναι ακόμη ξεκάθαρος ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα διάφορα στοιχεία βλάστησης. Ομοίως, ελάχιστες είναι οι μελέτες που ασχολούνται με τη διερεύνηση της ροής σε συνθήκες δύο στρώσεων βλάστησης, όπου δηλαδή υπάρχουν δύο ύψη φυτών, κατάσταση που συναντάται πολλάκις στη φύση, καθώς ο πυθμένας των ποταμών είναι συνήθως καλυμμένος με χορτάρι χαμηλού ύψους. Άλλωστε, η προκειμένη περίπτωση είναι εξαιρετικής σημασίας, αφού μειώνεται σημαντικά η ταχύτητα και βοηθείται η απόθεση των φερτών υλικών.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Η πειραματική διάταξη

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε συσκευή στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος. Η πειραματική συσκευή αποτελείται από εργαστηριακή διώρυγα – κανάλι, ορθογωνικής διατομής κατασκευασμένης από Plexiglass, η οποία στηρίζεται στο έδαφος μέσω ενός συστήματος μεταλλικών δοκών και στύλων. Το κανάλι έχει πλάτος 0,50 m, μήκος 14 m και κλίση η οποία μπορεί να μεταβάλλεται μέσω ενός μηχανισμού. Για την παρούσα εργασία, η κλίση ρυθμίστηκε σταθερή για όλα τα πειράματα σε 1‰. Στο ανάντη τμήμα της η διώρυγα συνδέεται με μεταλλική δεξαμενή ιδίου πλάτους 0,50 m και μήκους 3 m, από την οποία εισρέει το νερό από τον αγωγό τροφοδοσίας του εργαστηρίου. Το κατάντη τμήμα του αγωγού εκρέει σε κανάλι, το οποίο επιστρέφει το νερό στην υπόγεια δεξαμενή του εργαστηρίου. Στη συνέχεια, μέσω των αντλιών του εργαστηρίου, το νερό επανακυκλοφορεί στη δεξαμενή τροφοδοσίας της συσκευής.



Εικόνα 2: Η Πειραματική Συσκευή

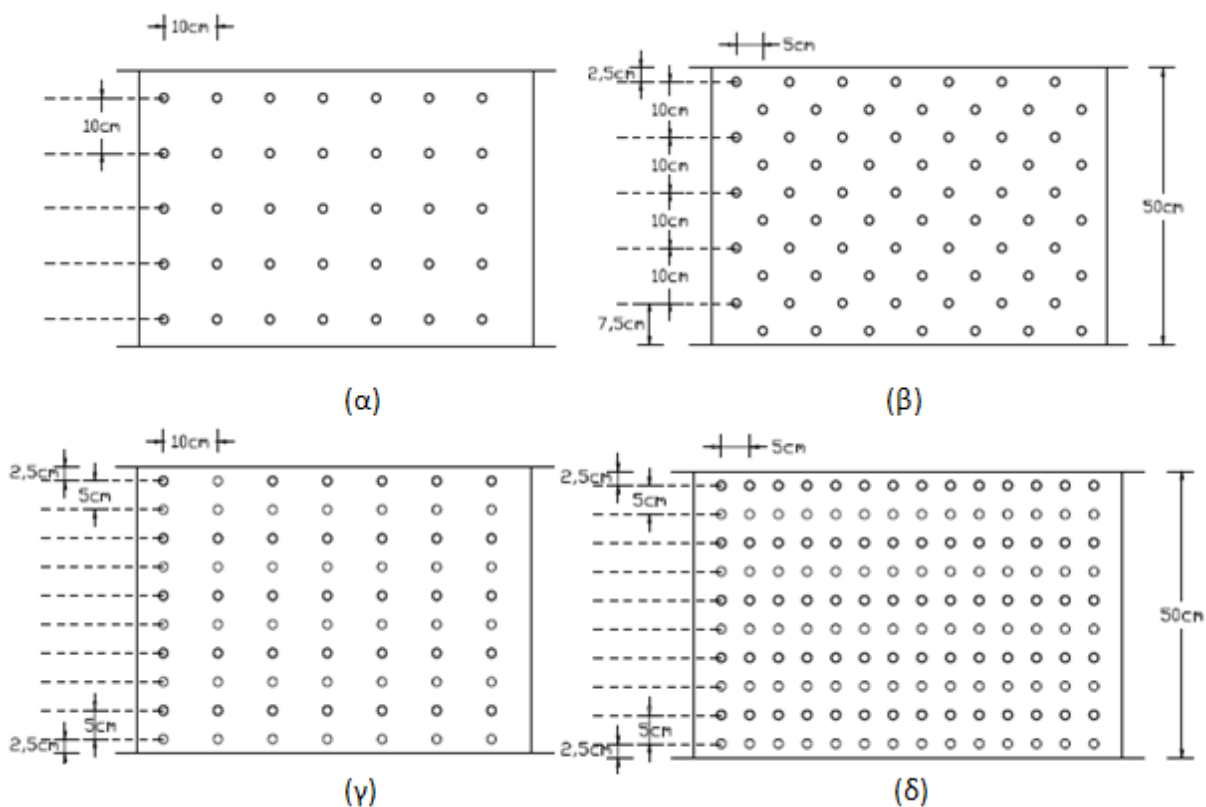
3.2 Σειρές μετρήσεων

Για την προσομοίωση της βλάστησης χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι εμποδίων (Τύπος I – Πιράκια , Τύπος II – Καλαμάκια, και Τύπος III – Σφαιρίδια σε

κορμό). Τα εμπόδια προσαρτήθηκαν σε οπές κατάλληλου μεγέθους που διανοίχθηκαν σε μήκος 8 m στο ενδιάμεσο τμήμα του πυθμένα του αγωγού. Το ανάντη τμήμα μήκους 3 m και το κατάντη τμήμα μήκους 3 m έμειναν ακάλυπτα από εμπόδια.

Οι δύο πρώτοι τύποι εμποδίων (Τύπος I και Τύπος II) τοποθετήθηκαν σε τρεις διαφορετικές πυκνότητες, μικρή (100 stems/m^2), μεσαία (200 stems/m^2) και μεγάλη (400 stems/m^2). Στην αραιή διάταξη τα εμπόδια τοποθετήθηκαν σε κάρναβο 10 cm X 10 cm και στην πυκνή διάταξη σε κάρναβο 5 cm X 5 cm. Στη μεσαίας πυκνότητας διάταξη, τα εμπόδια τοποθετήθηκαν έκκεντρα σε κάρναβο 10 cm X 5 cm, δηλαδή πέντε τεμάχια ανά 10 cm στη σειρά, με τη μεταξύ των σειρών απόσταση στα 5 cm. Εναλλακτικά, ο τύπος III τοποθετήθηκε σε δύο διατάξεις, μικρής και μεσαίας πυκνότητας. Η μεσαία πυκνότητα του τύπου III μελετήθηκε για δύο κατανομές των εμποδίων, έκκεντρο κάρναβο 10 cm X 5 cm όπως περιγράφηκε παραπάνω, και κάρναβο 5 cm X 10 cm.

Παρακάτω δίνονται σε σκαρίφημα οι διατάξεις των εμποδίων στον πυθμένα του αγωγού.



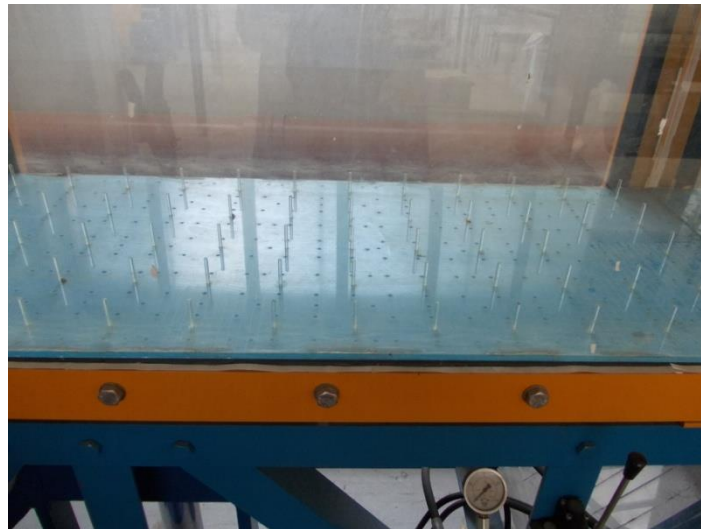
Εικόνα 3: Κάτοψη των διατάξεων (α) 100 stems/m^2 , (β) 200 stems/m^2 – έκκεντρα, (γ) 200 stems/m^2 , (δ) 400 stems/m^2

3.3 Τύποι και διατάξεις εμποδίων

Τύπος I – Πιράκια

Τα εμπόδια αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από κυλινδρικά πιράκια από υλικό Plexiglass ύψους 4 cm και διαμέτρου 0,5 cm, η χρήση των οποίων επιλέχθηκε για την προσομοίωση της ροής σε συνθήκες άκαμπτης βλάστησης.

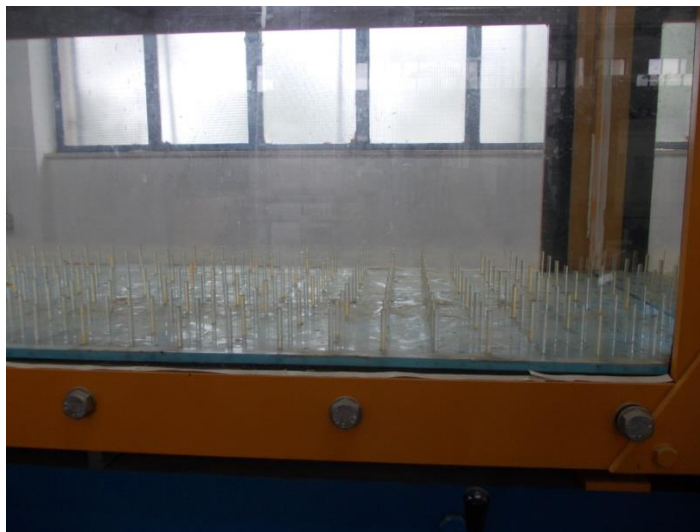
Τα εμπόδια τοποθετήθηκαν σε τρεις διαφορετικές διατάξεις, αραιή (100 stems/m^2), μεσαία (200 stems/m^2) και πυκνή (400 stems/m^2).



Εικόνα 4: Τύπος I – Αραιή διάταξη (1)



Εικόνα 5: Τύπος I – Μεσαία διάταξη (2)



Εικόνα 6: Τύπος I – Πυκνή διάταξη (3)

Τύπος II - Καλαμάκια

Τα εμπόδια αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από καλαμάκια τα οποία προσαρτήθηκαν στο κάτω τμήμα τους στα πιράκια της προηγούμενης κατηγορίας εμποδίων. Τα εμπόδια αυτού του τύπου έχουν συνολικό ύψος 20 cm και διάμετρο 0,5 cm. Ο τύπος αυτός των εμποδίων μπορεί να θεωρηθεί μικτός, καθότι το κατώτερο τμήμα των 4 cm είναι άκαμπτο και το υπόλοιπο τμήμα μήκους 16 cm εύκαμπτο.

Ομοίως με προηγουμένως, τα εμπόδια τοποθετήθηκαν σε τρεις διαφορετικές διατάξεις, αραιή (100 stems/m^2), μεσαία (200 stems/m^2) και πυκνή (400 stems/m^2).



Εικόνα 7: Τύπος II – Αραιή διάταξη (1)



Εικόνα 8: Τύπος II – Μεσαία διάταξη (2)



Εικόνα 9: Τύπος II – Πυκνή διάταξη (3)

Τύπος III – Σφαιρίδια σε κορμό

Σε αυτήν την κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτα κυλινδρικά τεμάχια ύψους 5 cm και διαμέτρου 8 mm, στην απόληξη των οποίων προσαρτήθηκαν σφαιρίδια διαμέτρου 3 cm.

Τα εμπόδια τοποθετήθηκαν σε δύο διαφορετικές πυκνότητες, μικρή (100 stems/m^2) και μεσαία (200 stems/m^2). Η μεσαία πυκνότητα μελετήθηκε για δύο διαφορετικές κατανομές των εμποδίων. Η πρώτη κατανομή είναι ίδια με τη μεσαία πυκνότητας διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω, δηλαδή έκκεντρη τοποθέτηση των εμποδίων σε σειρές των πέντε τεμαχίων με απόσταση μεταξύ των σειρών 5 cm. Η δεύτερη κατανομή έγινε σε κάρναβο 5 cm X 10 cm, δηλαδή τοποθετήθηκαν δέκα εμπόδια ανά 5 cm σε σειρά και η απόσταση μεταξύ των σειρών ήταν 10 cm.



Εικόνα 10: Τύπος III – Αραιή διάταξη (1)



Εικόνα 11: Τύπος III – Μεσαία διάταξη (2α)



Εικόνα 12: Τύπος III – Μεσαία διάταξη (2β)

3.4 Κωδικοποίηση των πειραμάτων

Για καθέναν από τους παραπάνω τύπους εμποδίων πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων. Κάθε σειρά εκτελέστηκε για έξι διαφορετικές παροχές, των 10, 20, 30, 40, 50 και 60 l/s. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μία ακόμη σειρά πειραμάτων για τον αγωγό χωρίς εμπόδια, έτσι ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής τραχύτητας του μη φυτοκαλυμμένου αγωγού.

Προκειμένου να διευκολυνθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις και η εξαγωγή συμπερασμάτων, ακολουθείται η παρακάτω κωδικοποίηση των σειρών πειραμάτων που εκτελέστηκαν. Η κωδικοποίηση πραγματοποιείται με βάση τρεις παραμέτρους, τον τύπο του εμποδίου, την πυκνότητα και την παροχή εκτέλεσης του πειράματος.

Πίνακας 1: Κωδικοποίηση πειραμάτων - 1

ΣΕΙΡΑ	Τύπος	Περιγραφή
1	I	Πιράκια
2	II	Καλαμάκια
3	III	Σφαιρίδια σε κορμό
0	-	Χωρίς εμπόδια

Πίνακας 2: Κωδικοποίηση πειραμάτων - 2

ΔΙΑΤΑΞΗ	Κάναβος	Πυκνότητα
1	10X10	Μικρή (100 stems/m ²)
2α	10X5 - έκκεντρος	Μεσαία (200 stems/m ²)
2β	5X10	Μεσαία (200 stems/m ²)
3	5X5	Μεγάλη (400 stems/m ²)

Πίνακας 3: Κωδικοποίηση πειραμάτων - 3

ΠΕΙΡΑΜΑ	Παροχή (l/s)
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50
6	60

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι κωδικοί για όλους τους συνδυασμούς τύπου εμποδίου – πυκνότητας – παροχής που εξετάστηκαν. Για τα πειράματα που διεξήχθησαν στον ακάλυπτο από τα τεχνητά στοιχεία βλάστησης πυθμένα, οι κωδικοί που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τιμή από 0.1 έως 0.6 (για παροχές από 10 έως 60 l/s αντίστοιχα).

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων

Πυκνότητα Παροχή (l/s)	ΤΥΠΟΣ I			ΤΥΠΟΣ II			ΤΥΠΟΣ III		
	100 st./m ²	200 st./m ² έκκεντρα	400 st./m ²	100 st./m ²	200 st./m ² έκκεντρα	400 st./m ²	100 st./m ²	200 st./m ² έκκεντρα	200 st./m ²
10	1.1.1	1.2α.1	1.3.1	2.1.1	2.2α.1	2.3.1	3.1.1	3.2α.1	3.2β.1
20	1.1.2	1.2α.2	1.3.2	2.1.2	2.2α.2	2.3.2	3.1.2	3.2α.2	3.2β.2
30	1.1.3	1.2α.3	1.3.3	2.1.3	2.2α.3	2.3.3	3.1.3	3.2α.3	3.2β.3
40	1.1.4	1.2α.4	1.3.4	2.1.4	2.2α.4	2.3.4	3.1.4	3.2α.4	3.2β.4
50	1.1.5	1.2α.5	1.3.5	2.1.5	2.2α.5	2.3.5	3.1.5	3.2α.5	3.2β.5
60	1.1.6	1.2α.6	1.3.6	2.1.6	2.2α.6	2.3.6	3.1.6	3.2α.6	3.2β.6

3.5 Διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων

Πριν από την εκτέλεση των πειραμάτων, ήταν απαραίτητη η ακριβής ρύθμιση της επιθυμητής παροχής, η οποία έγινε με τη χρήση μετρητή τύπου Venturi.



Εικόνα 13: Μανόμετρο (αριστερά) και Δικλείδα (δεξιά)

Ειδικότερα, με διαδοχικά ανοίγματα της δικλείδας μεταβαλλόταν η υψομετρική διαφορά Δh ανάμεσα σε δύο σωλήνες που περιείχαν υγρό, η οποία καθόριζε και την επιτυγχανόμενη παροχή. Η διαδικασία του καλιμπραρίσματος του μανόμετρου πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια διεξαγωγής προγενέστερης μεταπτυχιακής εργασίας που εκπονήθηκε από το Μαυρομάτη Α. (2011), ο οποίος κατέληξε στην παρακάτω σχέση σύμφωνα με την οποία συνδέονται η παροχή και η υψομετρική διαφορά στο μανόμετρο:

$$Q = 2,2887 \sqrt{\Delta h} \quad (4)$$

όπου, Q σε l/s και Δh σε mm.

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

Πίνακας 5: Μανομετρικές ενδείξεις

Q (l/s)	Δh (mm)
10	19,1
20	76,4
30	171,8
40	305,5
50	477,3
60	687,3

Τα βάθη ροής για κάθε επιμέρους σειρά πειραμάτων μετρήθηκαν σε όλο το μήκος του καλυμμένου από εμπόδια πυθμένα, καθώς επίσης και σε απόσταση 1 m ανάντη και 1 m κατάντη του υπό μελέτη τμήματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση σταθμήμετρου κάθετα στο μέσον της διατομής σε αποστάσεις που απείχαν μεταξύ τους περίπου 20 cm. Στο παράρτημα Α παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του βάθους ροής. Ακολουθεί σε σκαρίφημα η απεικόνιση του μήκους του αγωγού μέσα στο οποίο καταγράφηκαν οι μετρήσεις.



Εικόνα 14: Σκαρίφημα απεικόνισης περιοχής καταγραφής των μετρήσεων

Σημειώνουμε ότι στις μετρήσεις εκτιμάται ότι έχει υπεισέλθει ένα σφάλμα της τάξης των 3 mm, αφενός λόγω της ροής καθότι ήταν αρκετά δύσκολη η διατήρηση σταθερής παροχής κυρίως όταν αυτή ήταν μεγαλύτερη από 40 l/s, αφετέρου η ελεύθερη επιφάνεια στις μικρές κυρίως παροχές (10, 20 και 30 l/s) παρουσίαζε διακυμάνσεις. Εξάλλου, και ο ίδιος ο παρατηρητής εισάγει σφάλμα στη διαδικασία λήψης της μέτρησης.

3.6 Παρατηρήσεις

3.6.1 Χαρακτηριστικά της ροής

Η ροή στον αγωγό είναι βαθμιαία μεταβαλλόμενη (BMP), καθότι το βάθος ροής μεταβάλλεται με μικρό ρυθμό από θέση σε θέση προκαλώντας μικρή καμπύλωση της ελεύθερης επιφάνειας. Εξάλλου, το μήκος του καλυμμένου πυθμένα είναι αρκετά μικρό, με αποτέλεσμα το βάθος ροής να μη φτάνει την τιμή του ομοιόμορφου βάθους.

Για τη διώρυγα του πειράματος, όπου η κλίση είναι υποκρίσιμη και επειδή προκύπτει $y_o > y > y_k$ σε όλο το διαθέσιμο μήκος, η ελεύθερη επιφάνεια αντιστοιχεί σε καμπύλη κατάπτωσης μορφής M2. Ανάντη του καλυμμένου πυθμένα, παρατηρείται ότι το βάθος ροής αρχίζει να σταθεροποιείται, χωρίς ωστόσο να φτάνει την τιμή του ομοιόμορφου βάθους.

Από την πλευρά της βλάστησης, η ροή γίνεται σε συνθήκες βυθισμένης φυτοκάλυψης για τη σειρά 1 σε όλες τις παροχές και τη σειρά 3 στις μεγάλες παροχές (30 έως 60 l/s), και σε συνθήκες εξέχουσας του βάθους φυτοκάλυψης για τη σειρά 2 και τις υπόλοιπες διατάξεις και πυκνότητες της σειράς 3. Ακόμη, τα εμπόδια τύπου II μπορούν να θεωρηθούν εύκαμπτα για το μεγαλύτερο μήκος τους, ενώ οι άλλοι δύο τύποι προσομοιάζουν άκαμπτη βλάστηση. Σημειώνεται δε ότι στον τύπο II, στις μεγάλες παροχές τα εμπόδια εμφανίζουν λυγισμό έως και 1,5 cm για αρκετά μεγάλη απόσταση στα ανάντη, ενώ το φαινόμενο αυτό τείνει να μειωθεί στα κατάντη. Η παρατήρηση αυτή οφείλεται στην εμφάνιση του “shelter effect”, φαινόμενο κατά το οποίο τα ανάντη εμπόδια λειτουργούν ως προστατευτικό «τείχος» για τα κατάντη.

Στο τμήμα εξόδου στον ανεπένδυτο πυθμένα και για τις μικρότερες κυρίως παροχές (10, 20 και 30 l/s), η ελεύθερη επιφάνεια παρουσιάζει διακύμανση με τη μέγιστη τιμή της να κυμαίνεται από 0,1 έως 0,35 cm. Αυτό, ενδεχομένως, οφείλεται στο γεγονός της έντονης αλλαγής της τραχύτητας κατάντη λόγω απουσίας εμποδίων. Στο τμήμα αυτό παρατηρείται, επίσης, η εμφάνιση κροσσών, οι οποίοι ορίζονται ουσιαστικά από την ακμή των εμποδίων για τους τύπους I και II των εμποδίων. Στις μεγαλύτερες παροχές (40, 50 και 60 l/s) τα εύρη των παρατηρήσεων παρουσιάζουν σχετική μείωση, ειδικά στην περίπτωση των σφαιριδίων που έχουν και πιο υδροδυναμικό σχήμα σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους, όπου είναι πρακτικά μηδέν και η ελεύθερη επιφάνεια ιδιαίτερα ομαλή.

Επιπλέον, αξίζει να παρατηρηθεί η εμφάνιση κυματισμών σε αρκετά μεγάλο μήκος στα κατάντη του καλυμμένου με εμπόδια πυθμένα. Οι κυματισμοί παρουσιάζονται πιο έντονα στις μικρές παροχές με ύψος κύματος που φτάνει έως και τα 2 cm στο πείραμα 3.2β.2. Μάλιστα, στο πείραμα 3.2α.2, όπου η πυκνότητα των εμποδίων είναι ίδια αλλά μεταβάλλεται η χωρική κατανομή τους, οι κυματισμοί έχουν ύψος 1,5 cm. Αυτό πιθανώς εξηγείται λόγω ακριβώς αυτής της διαφορετικής κατανομής στο χώρο των εμποδίων, τα οποία σχηματίζουν στη Διάταξη 2β ξεκάθαρα οριοθετημένα μέτωπα αντίστασης στη ροή. Τέλος, σημειώνουμε ότι καθώς αυξάνει η πυκνότητα των εμποδίων, το φαινόμενο της εμφάνισης κυματισμών τείνει να εξαλειφθεί, κυρίως προς τα ανάντη του καλυμμένου τμήματος, όπου η ροή καθίσταται αισθητά πιο ομαλή και ήρεμη.

Για τον εποπτικό έλεγχο και τη διεξαγωγή των προαναφερόμενων ποιοτικών συμπερασμάτων ελήφθησαν κάποιες φωτογραφίες κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων. Στο Παράρτημα Ε δίνεται μία χαρακτηριστική φωτογραφία για κάθε πείραμα. Η λήψη του στιγμιότυπου έγινε σε θέση κατάντη της ροής, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο αλλαγής της τραχύτητας λόγω μετάβασης από καλυμμένο σε μη καλυμμένο από εμπόδια πυθμένα. Επιπλέον, σε ορισμένες

φωτογραφίες αποτυπώνεται και η καμπυλότητα της ελεύθερης επιφάνειας λόγω της ανομοιόμορφης ροής.

3.6.2 Βάθη ροής

Τα βάθη ροής έχουν αυξηθεί σε σχέση με τα αντίστοιχα βάθη που μετρήθηκαν στον ανεπένδυτο αγωγό. Ακολουθούν σε πίνακα οι μέγιστες τιμές της μεταβολής των βαθών:

Πίνακας 6: Ποσοστιαία μεταβολή βάθους ροής

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	Max $\Delta y/y$	Min $\Delta y/y$
Διάταξη 1.1	34% (Q=10 l/s)	19% (Q=60 l/s)
Διάταξη 1.2α	46% (Q=10 l/s)	30% (Q=60 l/s)
Διάταξη 1.3	62% (Q=10 l/s)	39% (Q=60 l/s)
Διάταξη 2.1	71% (Q=60 l/s)	32% (Q=10 l/s)
Διάταξη 2.2α	112% (Q=50 l/s)	61% (Q=10 l/s)
Διάταξη 2.3	134% (Q=50 l/s)	96% (Q=10 l/s)
Διάταξη 3.1	81% (Q=20 l/s)	54% (Q=60 l/s)
Διάταξη 3.2α	116% (Q=10 l/s)	74% (Q=60 l/s)
Διάταξη 3.2β	120% (Q=10 l/s)	75% (Q=60 l/s)

Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται για τις διατάξεις του τύπου II (καλαμάκια), ενώ οι μικρότερες για αυτές των τύπων I (πίροι) και II (σφαιρίδια).

Ακόμη, παρατηρούμε ότι η σχετική αύξηση του βάθους μειώνεται καθώς αυξάνεται η διοχετευόμενη παροχή για τους τύπους I και III, όπου όλα τα εμπόδια σχεδόν είναι βυθισμένα. Στον τύπο II, ωστόσο, τα βάθη ροής μεγαλώνουν περισσότερο καθώς αυξάνει η παροχή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα καλαμάκια εξέχουν σε όλες σχεδόν τις διατάξεις για το μεγαλύτερο μήκος του καλυμμένου πυθμένα και κατά συνέπεια κάθε φορά ενεργεί μεγαλύτερο ύψος εμποδίου στη διατομή. Επίσης, η μεγαλύτερη μεταβολή παρατηρείται για την παροχή των 50 l/s στην πυκνότερη διάταξη των καλαμακίων, και στη συνέχεια σταθεροποιείται σχετικά, αφού πλέον στις μεγάλες αυτές παροχές, το βάθος αυξάνει και οι σειρές των εμποδίων αρχίζουν να βρίσκονται σταδιακά κάτω από την επιφάνεια.

4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

4.1 Τραχύτητα ανοικτών αγωγών

Στους ανοικτούς αγωγούς, η εκτίμηση της τραχύτητας, λόγω του τρόπου με τον οποίο εμφανίζεται, είναι ιδιαίτερα δυσχερής και βασίζεται κατά κύριο λόγο στην επεξεργασία εμπειρικών και πειραματικών δεδομένων. Συνεπώς, η εκτίμηση των συντελεστών αντίστασης τριβής και των απωλειών ενέργειας γίνεται με εμπειρικό τρόπο.

Πολλοί μελετητές έχουν διατυπώσει με επιτυχία καθαρά εμπειρικούς τύπους, οι οποίοι εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται καθότι περικλείουν μεγάλη εμπειρία, διακρίνονται δε για την απλότητα και την αξιοπιστία κατά την εφαρμογή τους.

Η πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη σχέση διεθνώς για την εκτίμηση των απωλειών ενέργειας κατά μήκος ανοικτών αγωγών είναι αυτή που δίνεται από τον τύπο του Manning (Manning *et al.* 1890):

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J_o^{1/2} \quad (5)$$

όπου V : μέση ταχύτητα της ροής θεωρούμενη κάθετα στη διατομή (m/s)

R : υδραυλική ακτίνα (m)

J_o : κλίση του αγωγού

Η εξίσωση του Manning είναι η πιο κατάλληλη για τους ανοικτούς αγωγούς λόγω της απλότητάς της, υπάρχει δε σημαντική εμπειρία στη βιβλιογραφία σχετικά με τις τιμές του n για μεγάλη ποικιλία επιφανειών και συνθηκών. Ο συντελεστής Manning και περιγράφει ουσιαστικά την τραχύτητα της επιφάνειας. Ισχύει δε για τυρβώδη ροή ($Re_{kp} = V \cdot 4R/\nu \approx 3.000$) και πολύ τραχεία υδραυλική λειτουργία σε συνθήκες ομοιόμορφης ροής. Η εξίσωση εφαρμόζεται και στην περίπτωση ανομοιόμορφης ροής χωρίς να εισάγεται σημαντικό σφάλμα στο αποτέλεσμα, εάν γίνει αντικατάσταση της κλίσης J_o του πυθμένα με την κλίση της γραμμής ενέργειας.

Ένα άλλο μέτρο εκτίμησης της τραχύτητας είναι η ισοδύναμη τραχύτητα k_s , η οποία αποτελεί βασικά ένα μέτρο των προεξοχών της τραχύτητας (σε μονάδα μέτρησης μήκους), έχει δε ιδιαίτερη αξία, αφού ο n δίνεται συνήθως σε πίνακες με περιγραφικό τρόπο και δεν είναι άμεσα μετρήσιμος χωρίς ροή. Η ισοδύναμη τραχύτητα βρίσκεται από τη σχέση Nikuradse (1950):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3,7 \cdot 4R} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

Στην πλήρως τραχεία περιοχή, όπου δεν εξαρτόμαστε από τον αριθμό Reynolds, η προηγούμενη σχέση μεταπίπτει ως εξής:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3,7 \cdot 4R} \right) \quad (7)$$

Παρακάτω, δίνεται η σχέση με την οποία γίνεται η εκτίμηση του αδιάστατου συντελεστή τριβής f των Darcy - Weisbach από τις απώλειες ενέργειας:

$$h_f = f \frac{L}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

στην οποία εάν θέσουμε $J_o = J_E = h_f/L$, προκύπτει:

$$V = \sqrt{\frac{8}{f}} g \cdot \sqrt{R J_o} \quad (9)$$

Ο συντελεστής f στους ανοικτούς αγωγούς εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds ($Re=V \cdot 4R/\nu$) και από τη σχετική τραχύτητα $k_s/4R$, ενώ από τις μέχρι σήμερα έρευνες συμπεραίνεται ότι η γεωμετρία της διατομής δεν επιδρά ιδιαίτερα. Ωστόσο, δεν έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη και συστηματική μελέτη για το συσχετισμό των χαρακτηριστικών των στοιχείων τραχύτητας (π.χ. διαστάσεις, αποστάσεις) με τους συντελεστές f και k_s . Συνεπώς, προτείνεται η χρήση του f και της ισοδύναμης τραχύτητας k_s να γίνεται όταν τα όρια της διατομής είναι σχετικά λεία και η γεωμετρία της δεν απέχει σημαντικά της κυκλικής, σε περιπτώσεις δηλαδή που ο αγωγός προσομοιάζει σε επαρκή βαθμό κλειστό αγωγό.

4.2 Συντελεστής τραχύτητας Manning

Για κάθε σειρά πειραμάτων που εκτελέστηκε, προσδιορίστηκε ο συντελεστής τραχύτητας σύμφωνα με τη σχέση του Manning που περιγράφηκε παραπάνω. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε συνοψίζεται παρακάτω:

- Για κάθε τύπο εμποδίου που χρησιμοποιήθηκε, μορφώθηκε το διάγραμμα βάθους ροής – απόστασης από το σημείο εκροής, το οποίο απεικονίζει το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας. Το διάγραμμα απεικονίζει την ελεύθερη επιφάνεια για όλο το καλυμμένο τμήμα του πυθμένα και σε απόσταση 1 m ανάντη και κατάντη αυτού. Οι καμπύλες της ελεύθερης επιφάνειας, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις των πειραμάτων παρατίθενται στο Παράρτημα Β.
- Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στο καλυμμένο τμήμα του αγωγού, η ροή είναι βαθμιαία μεταβαλλόμενη και αντιστοιχεί σε καμπύλη κατάπτωσης μορφής M2. Λόγω απουσίας εμποδίων στο κατάντη τμήμα μήκους 3 m, η M2 αλλάζει καμπυλότητα και γι' αυτό το λόγο υπολογίστηκε η θεωρητική καμπύλη M2 μόνο για το καλυμμένο τμήμα του αγωγού. Ο υπολογισμός της BMP έγινε με τη μέθοδο της άμεσης βήμα προς βήμα ολοκλήρωσης, η οποία εφαρμόζεται σε πρισματικούς αγωγούς, όπως στην προκειμένη περίπτωση.
- Με επαναληπτική διαδικασία, βρέθηκε η τιμή του συντελεστή n για την οποία η θεωρητική καμπύλη M2 τείνει στη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις.
- Αφού προσδιορίστηκε η τιμή του n , έγινε διόρθωσή του αφαιρώντας την επίδραση της τραχύτητας των τοιχωμάτων. Συγκεκριμένα, το n που εκτιμήθηκε εκφράζει τη συνολική τραχύτητα της διατομής, ενώ η τραχύτητα του πυθμένα αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των

τοιχωμάτων του αγωγού. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη προσέγγιση της επίδρασης των εμποδίων στην αύξηση του n , υπολογίστηκε μία διορθωμένη τιμή της τραχύτητας n_b , σύμφωνα με τη σχέση του Chow (1959):

$$n_b^{3/2} = n^2 \left(1 + 2 \frac{y}{b}\right) - n_w^2 \left(\frac{2y}{b}\right) \quad (10)$$

όπου, n_b : τραχύτητα του πυθμένα

n : ολική τραχύτητα διατομής

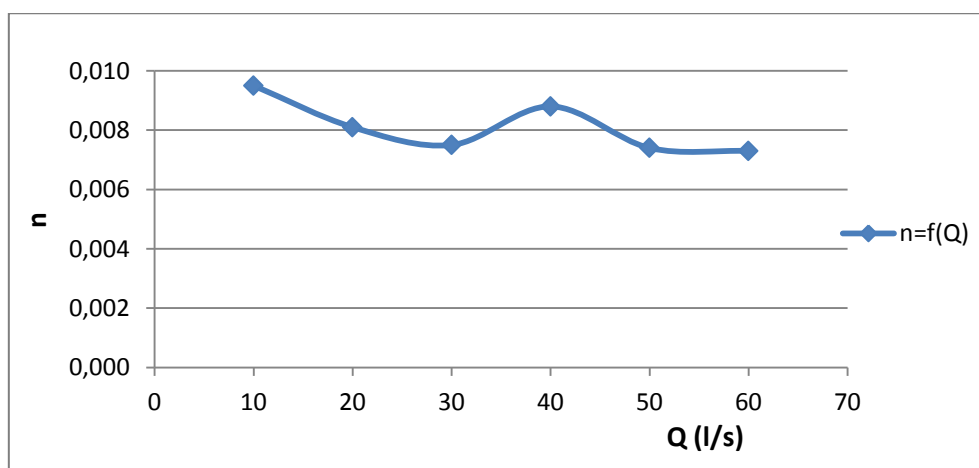
n_w : τραχύτητα των τοιχωμάτων

Ως n_w λήφθηκε η μέση τιμή του n που εκτιμήθηκε για τη μηδενική διάταξη (ακάλυπτος πυθμένας καναλιού), θεωρώντας ότι τα τοιχώματα και ο πυθμένας της διατομής έχουν την ίδια τραχύτητα, αφού και τα δύο είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό (plexiglass). Επιπλέον, ως βάθος y στην παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή της μέγιστης και ελάχιστης παρατήρησης που σημειώθηκε στο μήκος των 8 m.

Στο Παράρτημα Γ δίνονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη θεωρητική μορφή της καμπύλης M2 που προσαρτήθηκε στα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων του βάθους ροής και από τα οποία προέκυψε η εκτίμηση των συντελεστών Manning για κάθε ένα πείραμα.

4.2.1 Τραχύτητα plexiglass

Στο διάγραμμα που δίνεται παρακάτω συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την εκτίμηση του n του ακάλυπτου καναλιού.



Διάγραμμα 1: Τραχύτητα plexiglass

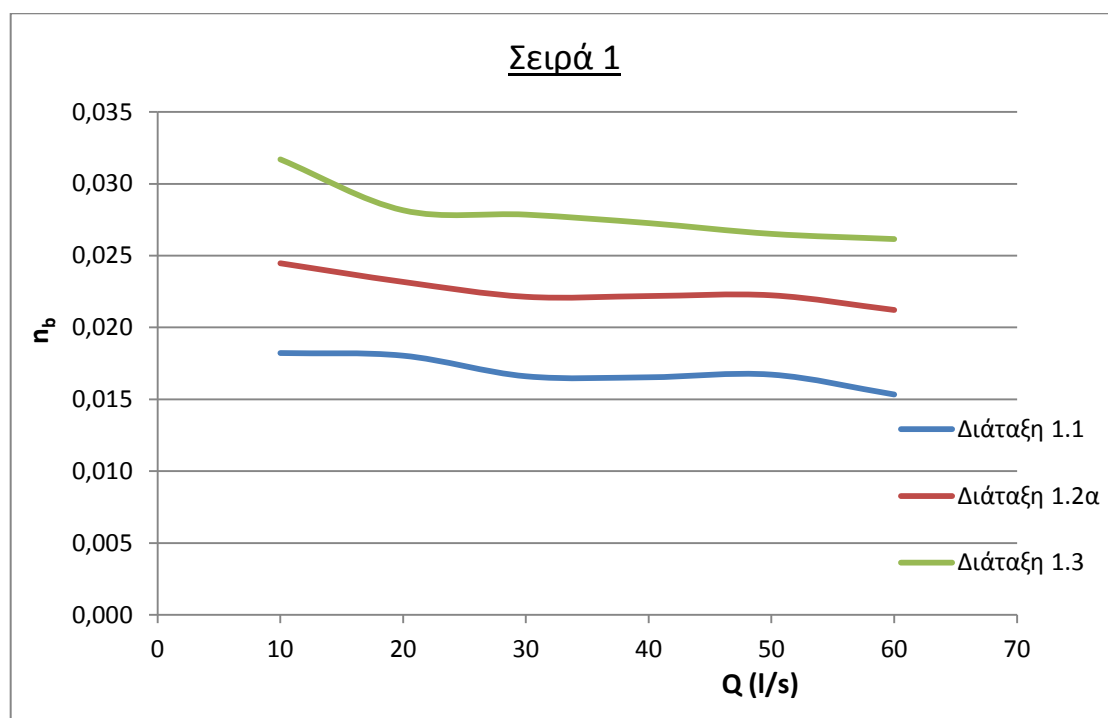
Ειδικά για την περίπτωση του ανεπένδυτου καναλιού, για τον προσδιορισμό της τραχύτητας, η μορφή της M2 συγκρίθηκε με τη γραμμή τάσης των μετρημένων βαθών ροής, λόγω μεγάλης διακύμανσης της ελεύθερης επιφάνειας. Στο

Παράρτημα Γ βρίσκονται τα διαγράμματα από τα οποία προέκυψε η τιμή των συντελεστών Manning για όλες τις παροχές που μελετήθηκαν.

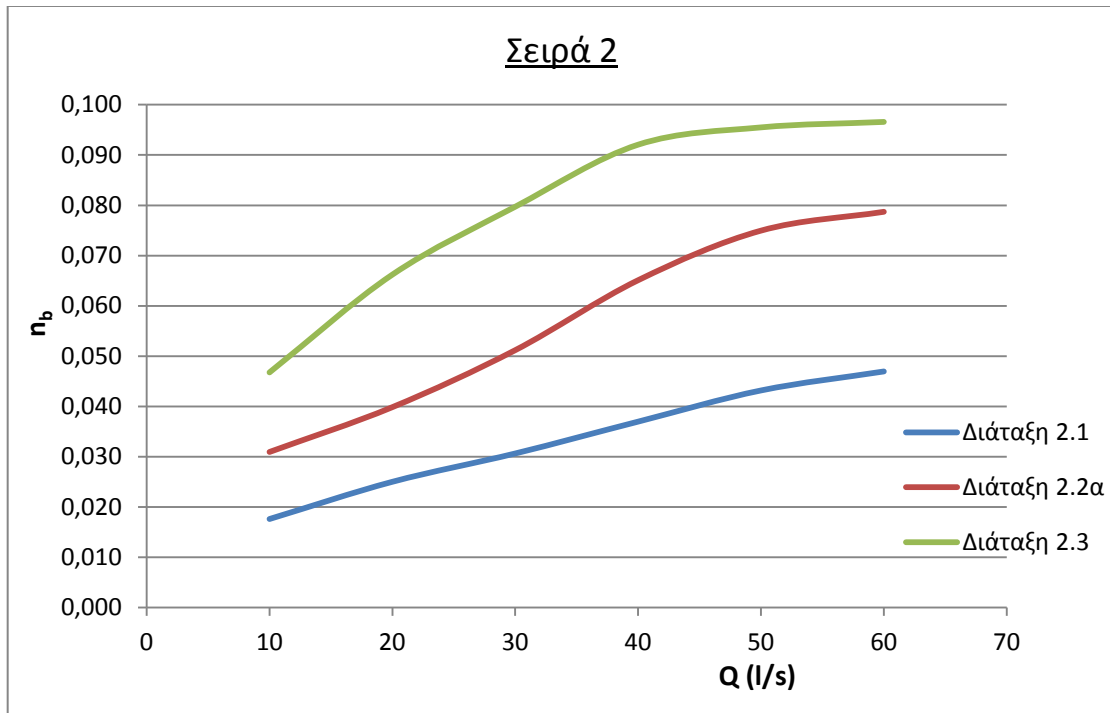
Ο μέσος όρος του n προέκυψε ίσος με 0,0081, δηλαδή 10% μικρότερος σε σχέση με την τιμή 0,009 που δίνεται από τη βιβλιογραφία για πλαστικούς αγωγούς. Το n που εκτιμήθηκε χρησιμοποιείται στη συνέχεια σύμφωνα με τη σχέση (10) για τη διόρθωση της ολικής τραχύτητας της διατομής από την επίδραση των τοιχωμάτων, και καθώς στην προκειμένη περίπτωση η διώρυγα είναι ακάλυπτη, το n των τοιχωμάτων λαμβάνεται ίσο με αυτό του πυθμένα, δηλ. 0,0081.

4.2.2 Τραχύτητα πυθμένα με εμπόδια

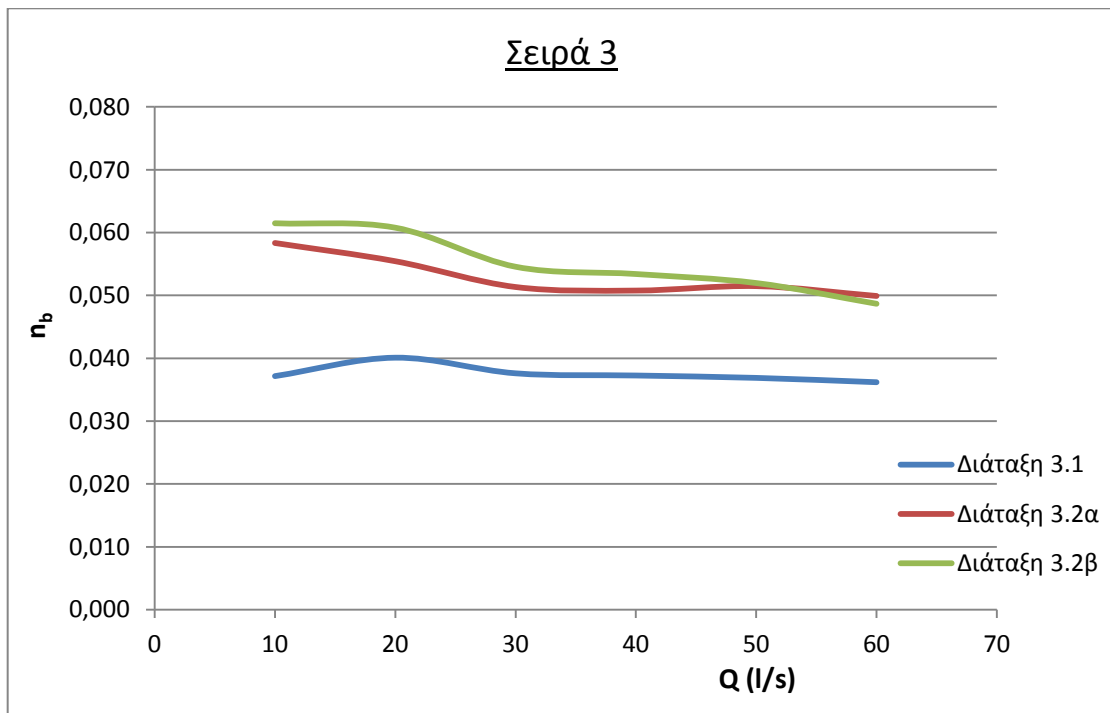
Στους πίνακες που βρίσκονται στο Παράρτημα Δ, δίνεται η τραχύτητα για κάθε τύπο εμποδίων, διάταξης και παροχής, όπως υπολογίστηκε (βλ. Παράρτημα Γ), αφαιρώντας την επίδραση της τραχύτητας των τοιχωμάτων της διατομής. Στη συνέχεια μορφώνονται τα διαγράμματα $n_b(Q)$ για κάθε τύπο εμποδίων σύμφωνα με τους προαναφερόμενους πίνακες. Στα διαγράμματα αποτυπώνεται η συμπεριφορά των εμποδίων ως προς την αύξηση της παροχής.



Διάγραμμα 2: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα $n_b(Q)$ Σειράς 1



Διάγραμμα 3: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα η_b (Q) Σειράς 2



Διάγραμμα 4: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα η_b (Q) Σειράς 3

4.2.3 Παρατηρήσεις

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως ο συντελεστής η_b είναι πολλαπλάσιος της φυσικής τραχύτητας του αγωγού από Plexiglass ($n \approx 0,008$) από 2 έως 4 φορές για τα πιράκια, από 2 έως 12 φορές για τα καλαμάκια και από 4 έως 8

φορές για τα σφαιρίδια. Επιπλέον, αγνοώντας την επίδραση των τοιχωμάτων του αγωγού, τα οποία ως ανεπένδυτα προκαλούν μειωμένη τιμή της ολικής τραχύτητας, διακρίνουμε ότι ο n_b έχει αυξημένη τιμή σε σχέση με το ολικό n από 9 έως 28% για τον τύπο I, από 9 έως 49% για τον τύπο II και από 14 έως 39% για τον τύπο III. Η μικρότερη μεταβολή παρατηρείται στις χαμηλές παροχές, το οποίο δείχνει την σταδιακά μειούμενη επίδραση των πλευρικών τοιχωμάτων καθώς η παροχή αυξάνει.

Συγκρίνοντας τις όμοιες από άποψη βύθισης διατάξεις μεταξύ των τύπων I και III, παρατηρούμε ότι τα σφαιρίδια παρουσιάζουν σχεδόν 2,5 φορές μεγαλύτερη τραχύτητα σε σχέση με τα πιράκια για όλες τις παροχές, το οποίο αφενός οφείλεται στο μεγαλύτερο ύψος του τύπου III, αφετέρου στη μεγαλύτερη προβαλλόμενη στη ροή επιφάνεια των στοιχείων τραχύτητας. Επίσης, η τιμή του n_b είναι μεγαλύτερη για τις μικρές παροχές και μειώνεται όσο η παροχή μεγαλώνει, το οποίο συμφωνεί με τα ευρήματα του Christodoulou (2013) που αφορούν πειραματικά αποτελέσματα σε συνθήκες υπερκρίσιμης ροής, απεικονίζει δε τη μεγαλύτερη επίδραση που έχουν τα στοιχεία τραχύτητας όταν είναι λίγο βυθισμένα σε σχέση με το βάθος ροής, ανεξαρτήτως της κλίσης, υπερκρίσιμης ή υποκρίσιμης.

Ακόμα, ανάμεσα στις διατάξεις 2α και 2β που χρησιμοποιήθηκαν στα εμπόδια του τύπου III, η τραχύτητα είναι μεγαλύτερη για τη διάταξη 2β στις μικρές παροχές, ενώ από την παροχή των 50 l/s και άνω δείχνει να σταθεροποιείται. Αυτή η τάση εξηγείται κατά πάσα πιθανότητα από το γεγονός ότι στις μικρές παροχές η ροή αντλαμβάνεται τα εμπόδια της 2α λιγότερο έντονα, αφού είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένα στο χώρο. Επίσης, στην αραιή διάταξη για την παροχή 10 l/s το βάθος ροής είναι χαμηλότερα από τη στάθμη στην οποία επιδρά το ανώτερο τμήμα του εμποδίου που είναι το σφαιρίδιο, δηλαδή η προβαλλόμενη στην ροή επιφάνεια αντίστασης είναι μικρότερη, και συνεπώς η τραχύτητα είναι μικρότερη απ' ό,τι στις υπόλοιπες παροχές.

Όπως είναι αναμενόμενο, η μεγαλύτερη πυκνότητα επιδρά αυξητικά στην τραχύτητα τόσο στα βυθισμένα όσο και στα εξέχοντα στοιχεία βλάστησης. Οι καμπύλες $n_b(Q)$ είναι σχεδόν παράλληλες για ίδιου τύπου εμπόδια αλλά διαφορετικές πυκνότητες και μάλιστα παρατηρούμε ότι η καμπύλη της μεσαίας πυκνότητας – που έχει διπλάσια και μισή τιμή της αραιής και μεγάλης πυκνότητας αντίστοιχα – σχεδόν ισαπέχει από τις άλλες δύο. Συνεπώς, η μεταβολή του n_b είναι ανάλογη με τη μεταβολή της πυκνότητας.

Τέλος, στη μεγάλη πυκνότητα του τύπου II (καλαμάκια ύψους 20 cm), η τραχύτητα φαίνεται να αρχίζει να σταθεροποιείται στις μεγάλες παροχές (από 40 l/s και άνω). Μπορούμε, ακόμη, να υποθέσουμε ότι εάν η παροχή αυξηθεί περαιτέρω, το βάθος ροής ομοίως θα μεγαλώσει, οπότε τα εμπόδια θα αρχίζουν σταδιακά να βυθίζονται όλα κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια. Στην παροχή εκείνη που όλα τα εμπόδια θα είναι βυθισμένα, αναμένεται ότι η τραχύτητα θα αρχίσει να μειώνεται και το διάγραμμα $n_b(Q)$ θα εμφανίζει κλάδο παρόμοιας συμπεριφοράς με αυτούς που προέκυψαν για τους τύπους I και III. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σχετικό ύψος των στοιχείων βλάστησης ως προς το βάθος ροής είναι καθοριστικής

σημασίας για τη συμπεριφορά των στοιχείων σε σχέση με την αύξηση ή μείωση της τραχύτητας με τη διοχετευόμενη παροχή.

4.3 Συντελεστής τριβής f και ισοδύναμη τραχύτητα k_s

Στη συνέχεια, εκτιμήθηκε ο αδιάστατος συντελεστής τριβής f των Darcy – Weisbach. Ο f_b υπολογίστηκε από την εξίσωση που τον συνδέει με το συντελεστή Manning, η οποία προκύπτει συνδυάζοντας τις σχέσεις (5) και (9):

$$n_b = \left(\frac{f_b}{8g}\right)^{1/2} R^{1/6} \quad (11)$$

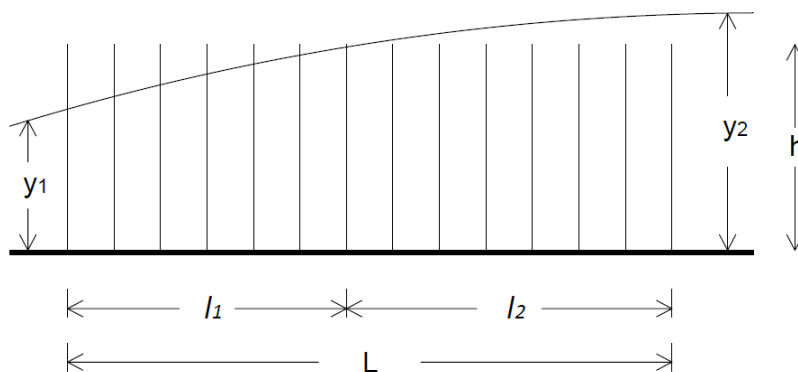
Στην εξίσωση (11), η υδραυλική ακτίνα R αντικαταστάθηκε με το μέσο βάθος ροής y , για να εκτιμηθεί ο f_b που προκύπτει από τη συμβολή του πυθμένα μόνο, καθώς έχει ήδη αφαιρεθεί η επίδραση των τοιχωμάτων.

Επίσης, εκτιμήθηκε η ισοδύναμη τραχύτητα άμμου k_s από την εξίσωση Nikuradse (εξίσωση 7), όπου ομοίως τέθηκε $R=y$, και τελικά χρησιμοποιήθηκε ως εξής:

$$k_s = 3,7 \cdot 4y \cdot 10^{-1/(2\sqrt{f})} \quad (12)$$

Για την ισοδύναμη τραχύτητα βρέθηκε ο συσχετισμός της με το βάθος ροής k_s/y και με το ύψος των στοιχείων k_s/h για όλες τις σειρές εμποδίων. Για τις περιπτώσεις που τα εμπόδια εξέχουν της ροής σε όλον τον πυθμένα ή σε ένα τμήμα αυτού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15, ως ύψος θεωρήθηκε ο σταθμισμένος μέσος όρος:

$$h = (l_1 \cdot \frac{y_1+h}{2} + l_2 \cdot h) / L \quad (13)$$



Εικόνα 15: Σκαρίφημα για τον υπολογισμό του σταθμισμένου βρεχόμενου ύψους στοιχείου τραχύτητας και της παραμέτρου l^*

Τέλος, υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds, που εκφράζει την επίδραση της συνεκτικότητας στη ροή σύμφωνα με τη σχέση:

$$Re = \frac{V \cdot 4y}{\nu} \quad (14)$$

με κινηματική συνεκτικότητα $\nu=1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$ σε θερμοκρασία 15°C .

Για τη μελέτη της επίδρασης των επιμέρους χαρακτηριστικών της βλάστησης, χρησιμοποιήθηκαν δύο αδιάστατες παράμετροι, η F και η θ , οι οποίες έχουν προταθεί από τους Stone and Shen (2002) και Herbich and Shulits (1964) αντίστοιχα.

Η παράμετρος F είναι συνάρτηση της πυκνότητας των εμποδίων N , της διαμέτρου d , της αδιάστατης παραμέτρου l^* και του βάθους ροής y :

$$F = 1,385(l^{*-1} - \sqrt{Nd^2}) \sqrt{\frac{g}{Ndy}} \quad (15)$$

όπου l^* = βρεχόμενο ύψος στελέχους/βάθος ροής.

Η F χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του συσχετισμού ανάμεσα στην ταχύτητα και τα χαρακτηριστικά της διάταξης και του τύπου βλάστησης σύμφωνα με τη σχέση (1) $V=F\sqrt{gJ_v}$ που έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, και γι' αυτό το λόγο εμπεριέχει την επιτάχυνση της βαρύτητας g . Επιπλέον, ο συντελεστής 1,385 οφείλεται στο ότι η F προέκυψε από επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία η F χρησιμοποιείται για το συσχετισμό των χαρακτηριστικών της βλάστησης με τον αδιάστατο συντελεστή f_b κι έτσι κρίθηκε περιττή η εισαγωγή αυτών των δύο σταθερών συντελεστών. Τελικά, εφαρμόστηκε η κάτωθι σχέση:

$$F = (l^{*-1} - \sqrt{Nd^2}) \sqrt{\frac{1}{Ndy}} \quad (16)$$

Στις διατάξεις που όλα τα εμπόδια είναι βυθισμένα είναι $l^*=h/y$ και στα εμπόδια που εξέχουν της ελεύθερης επιφάνειας είναι $l^*=1$. Στην ενδιάμεση περίπτωση (βλ. Εικόνα 15), χρησιμοποιήθηκε ο σταθμισμένος μέσος όρος:

$$l^* = (l_1 * 1 + l_2 \frac{h}{(h+y_2)/2})/L \quad (17)$$

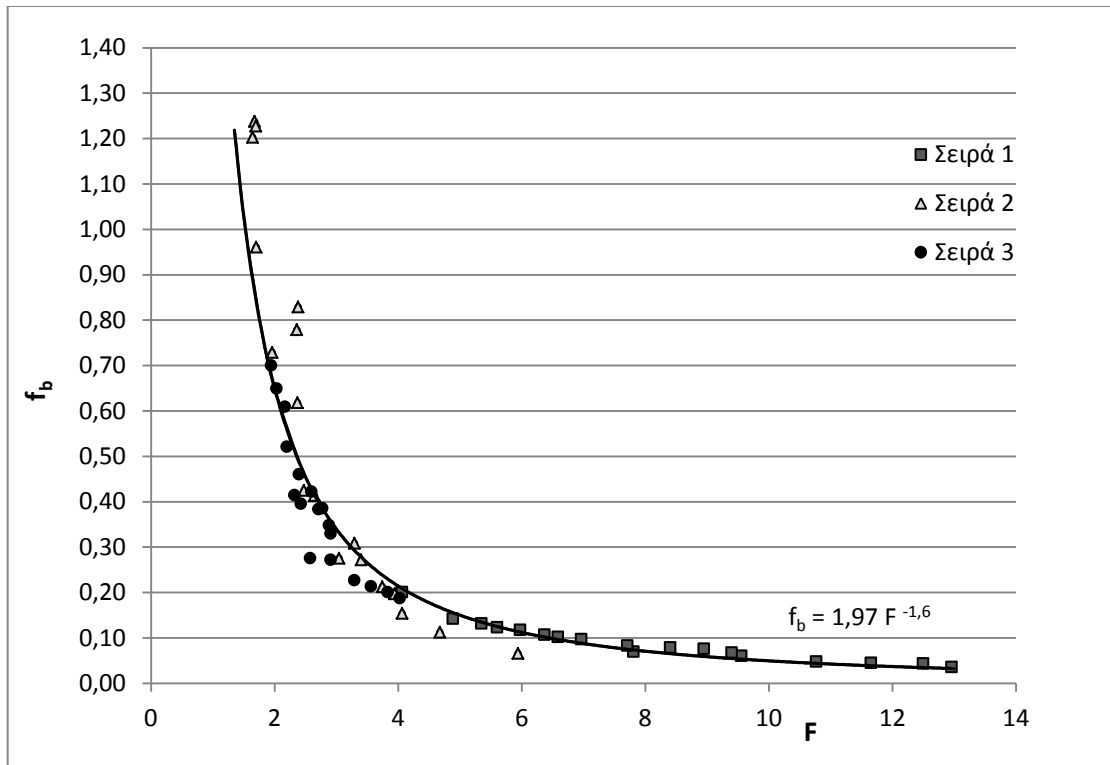
Ομοίως, ειδικά για τα εμπόδια τύπου III που αποτελούνται από δύο τμήματα διαφορετικής διαμέτρου, θεωρήθηκε μία ισοδύναμη διάμετρος του σύνθετου εμποδίου ίση με $d=(d_1*h_1+\pi*d_2^2/4)/(h_1+d_2)$, όπου $d_1=0,008$ m, $h_1=0,05$ m η διάμετρος και το ύψος του κυλινδρικού στελέχους αντίστοιχα και $d_2=0,03$ m η διάμετρος του σφαιριδίου.

Η παράμετρος θ εκφράζει την πυκνότητα της προβαλλόμενης στη ροή επιφάνειας των στοιχείων βλάστησης ανά μονάδα επιφάνειας πυθμένα:

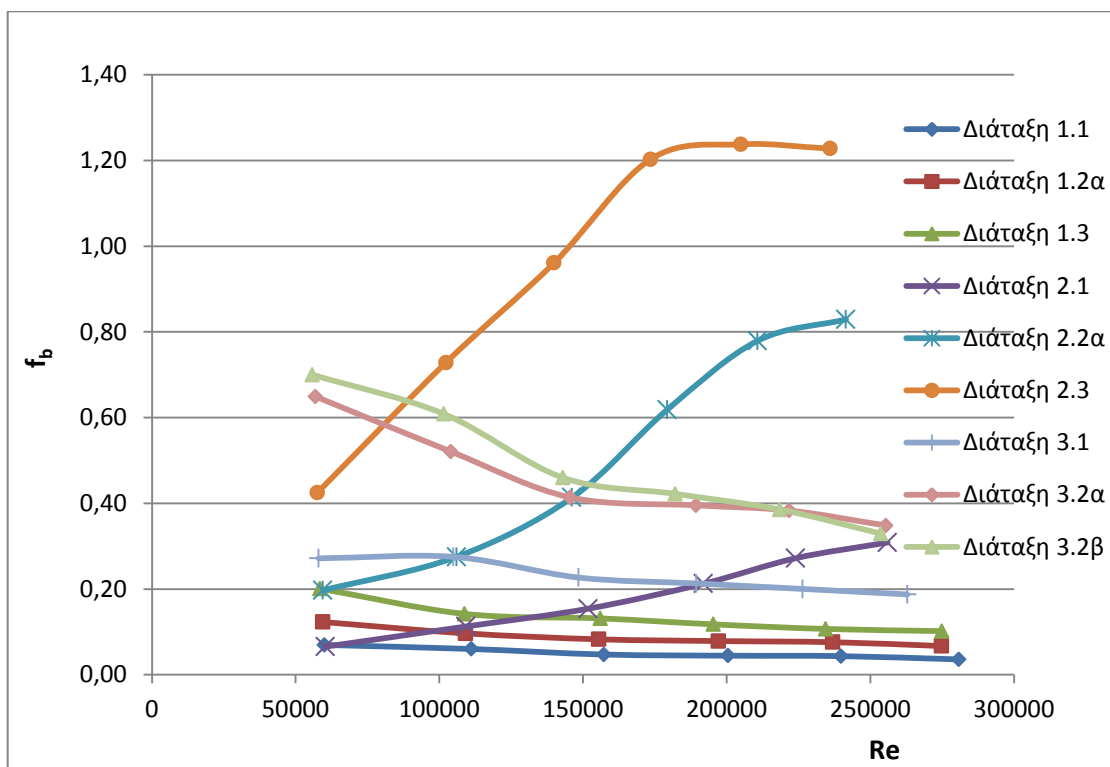
$$\theta = \frac{\text{επιφάνεια στοιχείων στη διεύθυνση της ροής}}{\text{επιφάνεια φυτοκαλυμμένου πυθμένα}} \quad (18)$$

Τα παραπάνω αποτελέσματα βρίσκονται συγκεντρωτικά στο Παράρτημα Δ.

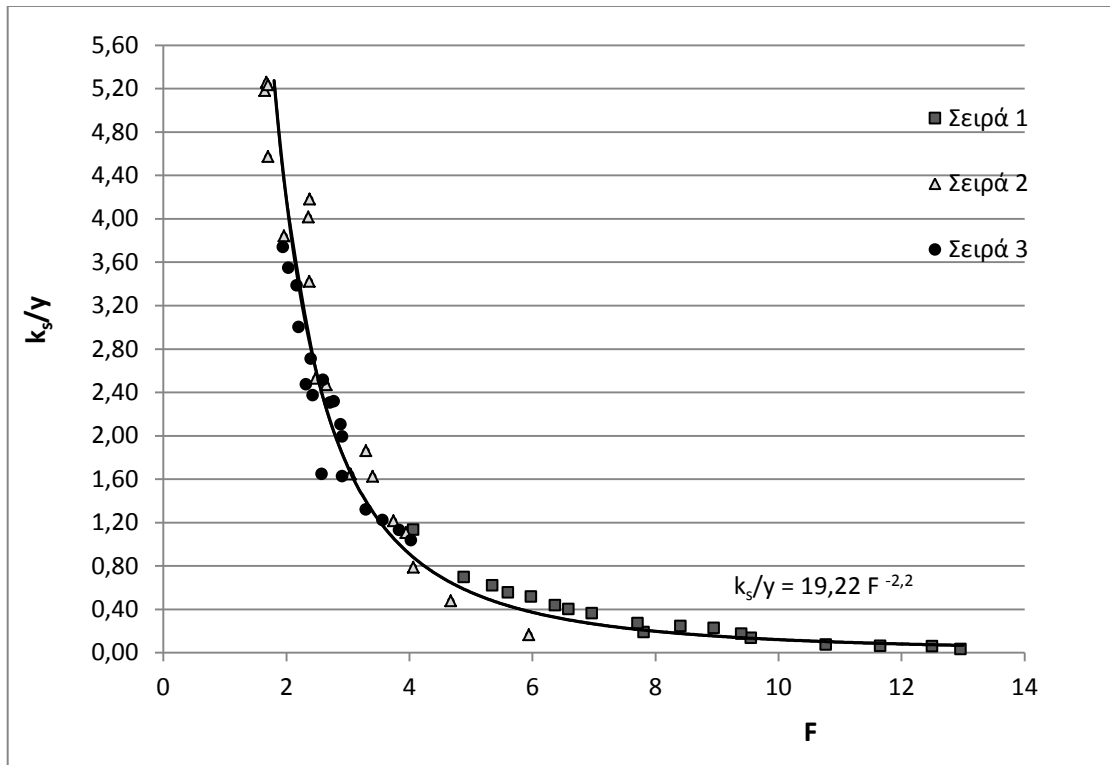
Ακολουθούν τα διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη σχέση ανάμεσα στο συντελεστή Darcy – Weisbach και τη σχετική τραχύτητα k_s/h και k_s/y με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης των στοιχείων βλάστησης όπως εκφράζονται μέσω των παραμέτρων F και θ .



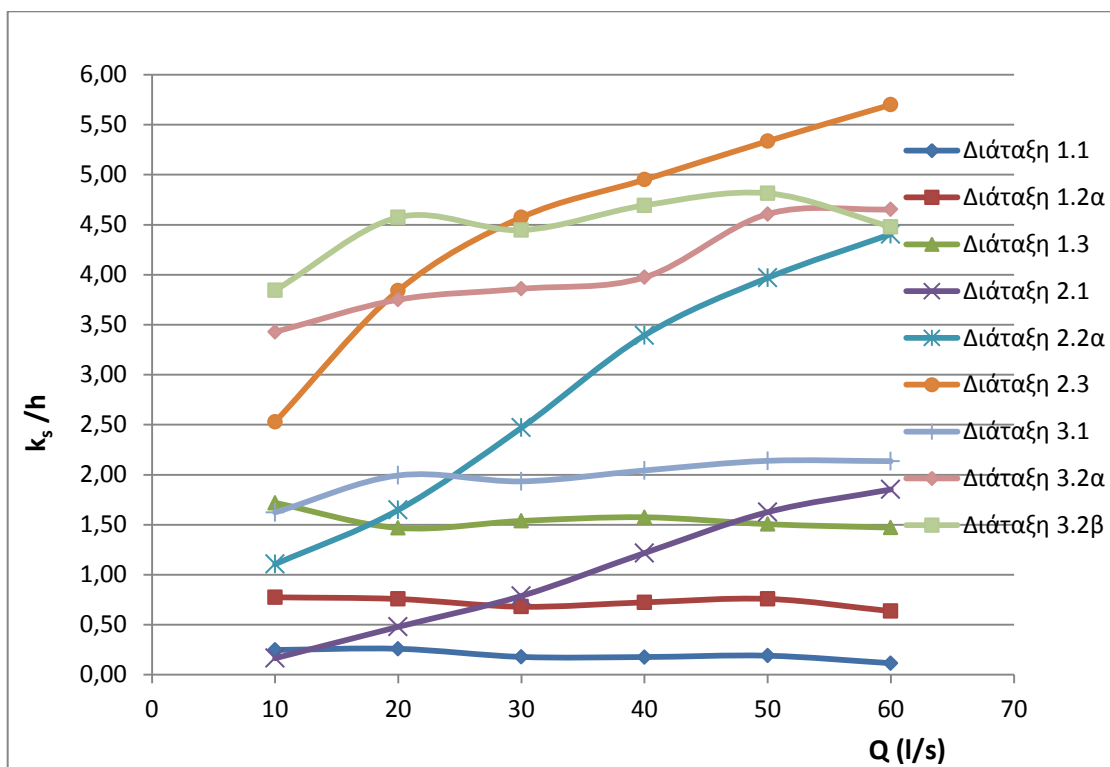
Διάγραμμα 5: Μεταβολή του f_b με την αδιάστατη παράμετρο F



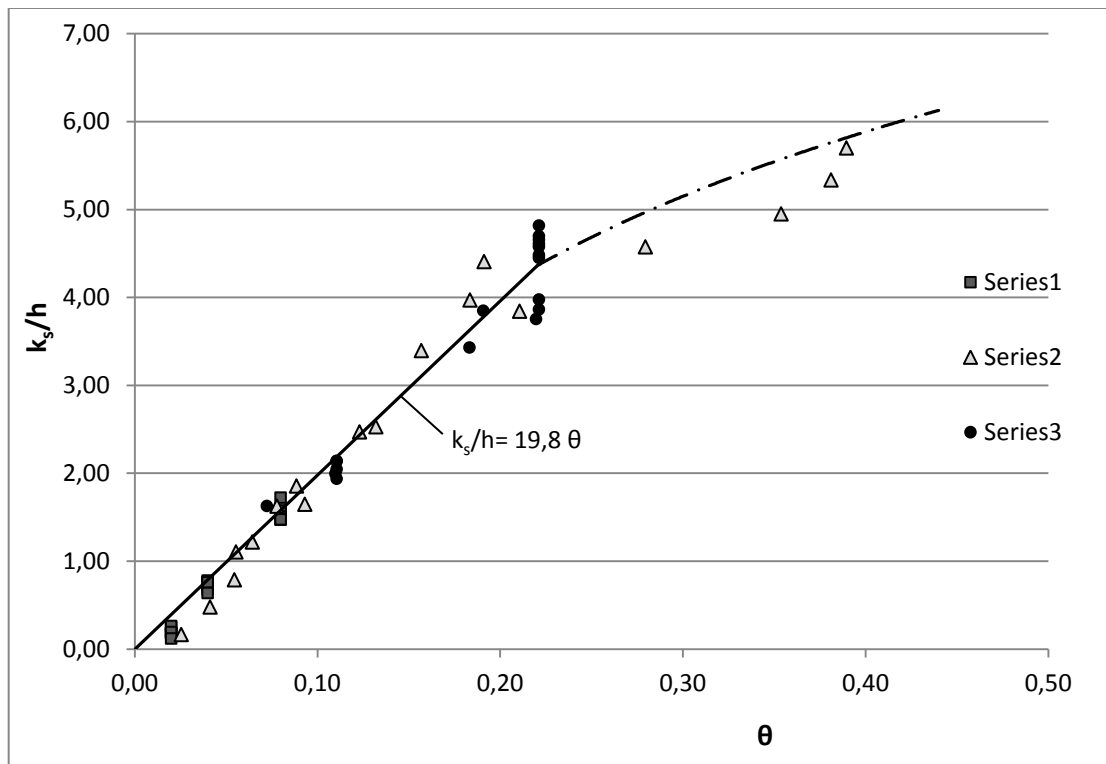
Διάγραμμα 6: Μεταβολή του f_b με τον αριθμό Reynolds



Διάγραμμα 7: Μεταβολή του k_s/γ με την παράμετρο F



Διάγραμμα 8: Μεταβολή του k_s/h με την παροχή Q



Διάγραμμα 9: Μεταβολή της σχετικής τραχύτητας k_s/h με τη θ

4.3.1 Σχολιασμός

Συντελεστής τριβής f_b

Από το Διάγραμμα 5 φαίνεται να υπάρχει μία συστηματική συσχέτιση ανάμεσα στον f_b και στα χαρακτηριστικά της διάταξης, η οποία εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$f_b = 1,97 F^{-1,6} \quad (19)$$

και η οποία ισχύει για τα βυθισμένα και μη στοιχεία βλάστησης. Επίσης, είναι ευδιάκριτες οι περιοχές στις οποίες λειτουργούν οι διαφορετικοί τύποι εμποδίων. Για τα εμπόδια τύπου I, ο f_b έχει τις χαμηλότερες τιμές του, ενώ στα εμπόδια τύπου III, που αφενός έχουν μεγαλύτερο ύψος κατά 10 mm, αφετέρου έχουν το πρόσθετο σφαιρίδιο στο άνω τμήμα, ο f_b αυξάνει. Για τα εμπόδια τύπου II που το στέλεχος εξέχει της ελεύθερης επιφάνειας σε όλο σχεδόν το καλυμμένο κομμάτι, ο f_b παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή για όλα τα εξεταζόμενα εμπόδια.

Αυτό άλλωστε εξάγεται και από τη σχέση (16), όπου διαφαίνεται ότι η αύξηση της τιμής της πυκνότητας της διάταξης, της διαμέτρου ή του ύψους των εμποδίων προκαλεί μείωση στην F , και από την παραπάνω σχέση (19) συνεπάγεται ότι ο f_b αυξάνεται.

Η εν λόγω σχέση μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση του οφειλόμενου στην τραχύτητα του πυθμένα συντελεστή τριβών f_b δεδομένου ότι γνωρίζουμε το βάθος ροής.

Επιπροσθέτως, το Διάγραμμα 6 και το Διάγραμμα 8 παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά με τα διαγράμματα $n_b(Q)$, το οποίο είναι εύλογο να συμβαίνει καθότι ο f_b και η k_s/h μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο καθώς μεταβάλλεται η παροχή, από την οποία εξαρτάται και ο Re . Επιπλέον, η υπόθεση ότι ο αγωγός λειτουργεί σε συνθήκες υδραυλικώς πλήρως τραχείες ισχύει, όπως βλέπουμε από τις υψηλές τιμές Re , το οποίο μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ως σωστή τη χρήση της απλουστευμένης εξίσωσης (7) για τον υπολογισμό της k_s .

Ο f_b μεταβάλλεται πολύ λίγο σε σχέση με τον Re για τη Σειρά 1, ενώ για τη Σειρά 3 μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό καθώς η παροχή μεγαλώνει. Αντιθέτως, στη Σειρά 2 αυξάνει με μεγάλο ρυθμό καθώς η παροχή αυξάνει, και στις μεγάλες παροχές για τις πιο πυκνές διατάξεις τείνει να σταθεροποιηθεί.

Ισοδύναμη τραχύτητα άμμου τριβής k_s

Όσον αφορά στην αδιάστατη τραχύτητα k_s/y , αυτή παρουσιάζει ομοίως με τον f_b συσχέτιση με την παράμετρο F της μορφής:

$$\frac{k_s}{y} = 19,22 F^{-2,2} \quad (20)$$

Από το Διάγραμμα 8 διακρίνεται ότι η k_s/h παραμένει σχεδόν σταθερή για τα βυθισμένα εμπόδια (σειρές 1 και 3), ενώ για τη σειρά 2 που τα εμπόδια εξέχουν σε όλο σχεδόν το μήκος για όλες τις παροχές αυξάνει με την παροχή. Παρατηρείται επίσης ότι η k_s είναι υποπολλαπλάσια του ύψους h του εμποδίου για τις διατάξεις 1.1 και 1.2α κατά μέσο όρο 5 και 1,4 φορές αντίστοιχα, ενώ στη μεγαλύτερης πυκνότητας διάταξη 1.3 και στη σειρά 3 η k_s είναι πολλαπλάσια του ύψους έως και 5 φορές. Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σημαντικό ρόλο παίζει και η πυκνότητα των εμποδίων πέρα από το ύψος τους, δηλαδή θα πρέπει να ικανοποιείται κάποια ελάχιστη πυκνότητα εμποδίων για να έχουν απόδοση στην αύξηση της τραχύτητας. Αυτό φαίνεται και από το Διάγραμμα 9, όπου για αδιάστατη πυκνότητα $\theta < 0,05$ είναι $k_s/h < 1$. Για τη σειρά 2, η k_s μεγαλώνει με την αύξηση της παροχής, το οποίο οφείλεται όπως έχει προαναφερθεί στην αύξηση του ενεργού ύψους του εμποδίου.

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις μπορούν να συνοψιστούν στο Διάγραμμα 9, το οποίο αποτυπώνει τη συμπεριφορά του ύψους του εμποδίου στην ισοδύναμη τραχύτητα με τη μεταβολή της πυκνότητας θ . Προκύπτει έτσι μία συσχέτιση της μορφής:

$$\frac{k_s}{h} = 19,8 \theta \quad (21)$$

για $\theta < 0,22$. Για $\theta > 0,22$, από τα υπάρχοντα δεδομένα, διακρίνουμε μία τάση για αύξηση του k_s/h με μικρότερο ρυθμό. Λόγω της έλλειψης στοιχείων για μεγαλύτερες τιμές της θ , ενδέχεται εάν πραγματοποιηθεί έρευνα σε μεγαλύτερη ποικιλία πυκνοτήτων να διευκρινιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η συσχέτιση της k_s/h με τη θ .

Επισημαίνεται ότι στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει επαρκής έρευνα σχετικά με την ισοδύναμη τραχύτητα άμμου. Η παραπάνω σχέση ωστόσο, συμφωνεί με τα αποτελέσματα του Schröder (1990), ο οποίος προτείνει τη σχέση $k_s/h=m*\theta$, όπου το m είναι μία μέση τιμή χαρακτηριστική του σχήματος του εμποδίου. Ο Schröder προτείνει την τιμή $m=27$ για κυλινδρικά στοιχεία και για $\theta < 0,15$.

Με επεξεργασία που έγινε στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από το Christodoulou (2013), βρέθηκε επίσης ότι $k_s/h\approx 27*\theta$ για πυκνότητα $0,07 < \theta < 0,152$. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αφορούν πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε δύο πυκνότητες λεπτών ράβδων σε υπερκρίσιμη ροή. Αφενός, το δείγμα των πυκνοτήτων κρίνεται μικρό, αφετέρου αφορά εμπόδια σε υπερκρίσιμη ροή το οποίο σημαίνει ότι η ροή αντιλαμβάνεται τα στοιχεία τραχύτητας εντονότερα λόγω του μικρότερου βάθους ροής που συναντάμε στην υποκρίσιμη ροή. Επιπλέον, κρίνεται αναγκαία η επέκταση της έρευνας σε περισσότερες κλίσεις του καναλιού.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων έδωσε μία σειρά από σημαντικά αποτελέσματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της ύπαρξης βλάστησης κυλινδρικής διατομής στην αλλαγή της τραχύτητας της διατομής αγωγού υποκρίσιμης κλίσης.

Κατ' αρχήν, ο συντελεστής Manning n είναι αρκετά μεγαλύτερος της τραχύτητας της ανεπένδυτης επιφάνειας έως και 12 φορές για τα συγκεκριμένα εμπόδια και παροχές που εκτελέστηκαν τα πειράματα. Η τιμή του μεταβάλλεται με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις μεταβολές της παροχής ανάλογα με το αν τα στοιχεία βλάστησης είναι βυθισμένα ή όχι της ελεύθερης επιφάνειας. Όταν τα στοιχεία βλάστησης είναι βυθισμένα, ο Manning μειώνεται με την αύξηση της παροχής, αφού καθώς αυτή αυξάνει, το βάθος ροής αυξάνει με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της επιρροής των στοιχείων βλάστησης. Το αντίθετο συμβαίνει για τα μη βυθισμένα στοιχεία, όπου η αύξηση της παροχής συνεπάγεται μεγαλύτερο βάθος ροής άρα και το ύψος του εμποδίου που επιδρά στη διατομή είναι μεγαλύτερο. Επομένως, τα μεγαλύτερα ύψη των μη βυθισμένων στοιχείων οδηγούν σε μεγαλύτερες τραχύτητες με την αύξηση της παροχής μέχρι την παροχή εκείνη που τα στοιχεία θα αρχίσουν να βρίσκονται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια, οπότε και η τραχύτητα θα μειώνεται.

Η σχέση μεταξύ της αύξησης της πυκνότητας των εμποδίων και της αύξησης της τιμής του n είναι κατά προσέγγιση γραμμική. Η κατανομή των εμποδίων στο χώρο επηρεάζει την ομαλότητα της ροής (κυματισμοί, διακύμανση ελεύθερης επιφάνειας), δεν επιδρά όμως σημαντικά στην τραχύτητα. Ακόμη, η γεωμετρία του στοιχείου βλάστησης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τραχύτητα με την αύξηση της προβαλλόμενης στη ροή επιφάνειας να προκαλεί αύξηση του n .

Υπάρχει συστηματική εξάρτηση του αδιάστατου συντελεστή τριβής f_b και τη ισοδύναμη τραχύτητα άμμου k_s με την πυκνότητα της διάταξης, του ύψους και της διαμέτρου του στοιχείου είτε πρόκειται για βυθισμένα είτε για εξέχοντα στοιχεία τραχύτητας.

Στα βυθισμένα στοιχεία, ανάμεσα σε διατάξεις ίδιας πυκνότητας και γεωμετρίας, το ύψος τους επιδρά σχεδόν σταθερά στην ισοδύναμη τραχύτητα ανεξάρτητα από την παροχή που διοχετεύεται, αρκεί να υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός στοιχείων ανά μονάδα επιφάνειας του πυθμένα ($\theta > 0,05$). Εάν ικανοποιείται αυτή η πυκνότητα, η ισοδύναμη τραχύτητα είναι πολλαπλάσια του ύψους ή ισοδύναμα $k_s/h > 1$, δηλαδή το ενεργό ύψος είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό. Τέλος, για $\theta < 0,22$ η k_s/h αυξάνει αναλογικά με τη θ με ρυθμό μεταβολής 19,8, ενώ για μεγαλύτερες θ ο ρυθμός μεταβολής μειώνεται και ενδεχομένως να τείνει να μηδενιστεί.

Τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία έχουν εξαχθεί από τη διερεύνηση σε περιορισμένο αριθμό στοιχείων βλάστησης και διατάξεών τους και σε μία μόνο κλίση πυθμένα. Προτείνεται η επέκταση της έρευνας για περισσότερους τύπους εμποδίων με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (π.χ. κωνικά), σε διατάξεις με διαφορετικές πυκνότητες και τρόπο τοποθέτησης των

εμποδίων, καθώς και σε ποικίλες κλίσεις αγωγού, έτσι ώστε να βελτιωθεί η συστηματικοποίηση των αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Δημητρίου, Ι., (2007) *Εφαρμοσμένη Υδραυλική*, Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- Μαυρομμάτης, Α., (2011) *Πειραματική προσομοίωση βλάστησης σε ανοιχτό αγωγό*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Νουτσόπουλος, Γ., Χριστοδούλου, Γ., Παπαθανασιάδης, Τ. (2007) *Υδραυλική ανοικτών αγωγών*, Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- Aberle, J. and J. Järvelä (2013). "Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation." *Journal of Hydraulic Research* 51(1): 33-45.
- Bal, K. D., T. J. Bouma, K. Buis, E. Struyf, S. Jonas, H. Backx and P. Meire (2011). "Trade-off between drag reduction and light interception of macrophytes: comparing five aquatic plants with contrasting morphology." *Functional Ecology* 25(6): 1197-1205.
- Boller, M. L. and E. Carrington (2007). "Interspecific comparison of hydrodynamic performance and structural properties among intertidal macroalgae." *Journal of Experimental Biology* 210(11): 1874-1884.
- Chen, L., M. C. Stone, K. Acharya and K. A. Steinhaus (2011). "Mechanical analysis for emergent vegetation in flowing fluids." *Journal of Hydraulic Research* 49(6): 766-774.
- Chow, V. T. (1959). "Open channel hydraulics." *NY etc.: McGraw Hill*.
- Christodoulou, G. C. (2013). "Equivalent Roughness of Submerged Obstacles in Open-Channel Flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 140(2): 226-230.
- Fairbanks, J. D. (1998). Velocity and turbulence characteristics in flows through rigid vegetation, Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Green, E. P. and F. T. Short (2003). World atlas of seagrasses, Univ of California Press.
- Herbich, J. B. and S. Shulits (1964). "Large-scale roughness in open-channel flow." *Journal of the Hydraulics Division* 90(11): 203-230.
- Järvelä, J., J. Aberle, A. Dittrich, H. Rauch and I. Schnauder (2006). Flow-vegetation-sediment interaction: Research challenges. *River Flow*.
- Kemp, J. L., D. M. Harper and G. A. Crosa (2000). "The habitat-scale ecohydraulics of rivers." *Ecological Engineering* 16(1): 17-29.
- Kouwen, N. and T. E. Unny (1973). "Flexible roughness in open channels." *Journal of the Hydraulics Division* 99(5): 713-728.
- Kutija, V. and H. Thi Minh Hong (1996). "A numerical model for assessing the additional resistance to flow introduced by flexible vegetation." *Journal of Hydraulic Research* 34(1): 99-114.

- Manning, R., J. P. Griffith, T. Pigot and L. F. Vernon-Harcourt (1890). On the flow of water in open channels and pipes.
- Mars, R., K. Mathew and G. Ho (1999). "The role of the submergent macrophyte *Triglochin huegelii* in domestic greywater treatment." *Ecological Engineering* 12(1): 57-66.
- Nepf, H. (1999). "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation." *Water Resources Research* 35(2): 479-489.
- Nepf, H. M. (2012). "Hydrodynamics of vegetated channels." *Journal of Hydraulic Research* 50(3): 262-279.
- Nikuradse, J. (1950). Laws of flow in rough pipes, National Advisory Committee for Aeronautics Washington.
- Pollen, N. and A. Simon (2005). "Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model." *Water Resources Research* 41(7).
- Puijalón, S., G. Bornette and P. Sagnes (2005). "Adaptations to increasing hydraulic stress: morphology, hydrodynamics and fitness of two higher aquatic plant species." *Journal of Experimental Botany* 56(412): 777-786.
- Ree, W. (1949). "Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways." *Agricultural Engineering* 30(4): 184-189.
- Schröder, R. C. M. (1990). "Hydraulic methods of roughness determination." *DVWK Schriften* 92.
- Siniscalchi, F. and V. Nikora (2013). "Dynamic reconfiguration of aquatic plants and its interrelations with upstream turbulence and drag forces." *Journal of Hydraulic Research* 51(1): 46-55.
- Stone, B. M. and H. T. Shen (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *Journal of Hydraulic Engineering* 128(5): 500-506.
- Türker, U., O. Yagci and M. Kabdaşlı (2006). "Analysis of coastal damage of a beach profile under the protection of emergent vegetation." *Ocean Engineering* 33(5): 810-828.
- Tanino, Y. and H. M. Nepf (2008). "Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders." *Journal of Hydraulic Engineering* 134(1): 34-41.
- Valyrakis, M., O. Yaggi and S. Watt (2014). Experimental investigation of the effects of different types of aquatic vegetation on the flow field. *7th International Symposium on Environmental Hydraulics*.
- Wilcock, R. J., P. D. Champion, J. W. Nagels and G. F. Croker (1999). "The influence of aquatic macrophytes on the hydraulic and physico-chemical properties of a New Zealand lowland stream." *Hydrobiologia* 416: 203-214.

Wu, F.-C., H. W. Shen and Y.-J. Chou (1999). "Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering* 125(9): 934-942.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

V	μέση ταχύτητα διατομής
Q	παροχή
R	υδραυλική ακτίνα
J_0	κλίση πυθμένα
J_E	κλίση γραμμής ενέργειας
L	συνολικό μήκος φυτοκάλυψης
l_1	μήκος με εξέχοντα στοιχεία βλάστησης
l_2	μήκος με βυθισμένα στοιχεία βλάστησης
y	βάθος ροής
y_1	βάθος ροής κατάντη των εμποδίων
y_2	βάθος ροής ανάντη των εμποδίων
y_0	ομοιόμορφο βάθος
y_c	κρίσιμο βάθος
b	πλάτος αγωγού
h	ύψος στοιχείου τραχύτητας
d	διάμετρος στοιχείου τραχύτητας
N	συγκέντρωση στοιχείων τραχύτητας ανά μονάδα επιφάνειας
l^*	βρεχόμενο ύψος προς βάθος ροής
θ	προβαλλόμενη στη ροή επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας πυθμένα
A	συνολική προβαλλόμενη στη ροή επιφάνεια αντίστασης
n_b	συντελεστής τραχύτητας πυθμένα
n_w	συντελεστής τραχύτητας τοιχωμάτων
n	ολικός συντελεστής τραχύτητας διατομής
f_b	συντελεστής τριβών για τον πυθμένα
c_D	συντελεστής αντίστασης
Re	αριθμός Reynolds
k_s	ισοδύναμη τραχύτητα άμμου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πειραματικά δεδομένα

Σειρά 0

Πίνακας 7: Πειραματικά δεδομένα για ανεπένδυτο πυθμένα

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
197,15	4,15	6,40	7,70	9,80	10,70	12,00
217,15	4,00	5,90	8,20	9,20	10,35	11,70
237,15	3,85	6,70	7,30	9,50	10,95	12,75
257,15	4,10	6,00	8,50	10,10	10,95	12,25
277,15	4,30	6,40	7,80	9,38	10,85	12,15
297,15	4,13	6,25	8,40	9,75	11,05	12,60
317,15	4,23	6,60	8,53	9,85	11,00	12,75
337,15	4,23	6,15	8,32	9,70	11,15	12,30
357,15	4,20	6,05	8,60	9,85	11,00	12,60
377,15	4,20	6,38	8,18	9,80	11,00	12,60
397,15	4,18	5,95	7,95	9,60	11,00	12,30
417,15	4,23	6,35	7,90	9,85	10,70	12,10
437,15	4,10	6,35	8,10	9,50	10,95	12,65
457,15	3,95	5,90	8,10	9,95	11,20	12,50
477,15	4,03	6,60	8,20	9,65	10,85	12,30
497,15	4,01	5,90	8,50	9,75	11,00	12,70
520,75	4,23	6,40	8,30	9,80	11,20	12,60
537,15	4,30	6,10	8,19	9,80	11,10	12,55
557,15	4,25	6,25	8,15	10,05	11,00	12,45
577,15	4,30	6,40	8,20	9,90	11,20	12,70
597,15	4,24	6,00	8,20	10,10	11,17	12,55
617,15	4,30	6,40	8,10	9,95	11,10	12,75
637,15	4,40	6,10	8,20	9,98	11,18	12,50
657,15	4,45	6,30	8,20	10,30	11,20	12,70
677,15	4,55	6,70	8,10	10,10	11,35	12,80
697,15	4,55	6,40	8,30	10,50	11,50	12,80
717,15	4,61	6,50	8,65	10,20	11,50	12,80
737,15	4,60	6,50	8,75	10,40	11,50	13,20
757,15	4,50	6,40	8,55	10,35	11,35	12,70
777,15	4,55	6,70	8,35	10,45	11,55	12,90
797,15	4,65	6,70	8,70	10,67	11,60	13,20
817,15	4,63	6,50	8,40	10,45	11,53	12,75

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
837,15	4,65	6,50	8,40	10,50	11,60	12,75
857,15	4,53	6,50	8,45	10,38	11,35	13,05
877,15	4,50	6,30	8,20	10,40	11,35	12,60
897,15	4,45	6,30	8,40	10,35	11,30	12,85
917,15	4,60	6,50	8,40	10,73	11,30	13,10
937,15	4,55	6,70	8,40	10,35	11,58	12,80
957,15	4,55	6,50	8,28	10,73	11,25	13,00
977,15	4,50	6,50	8,45	10,30	11,60	13,00
997,15	4,60	6,80	8,40	10,73	11,40	12,80
1020,35	4,65	6,80	8,40	10,60	11,75	13,30
1037,15	4,70	6,80	8,60	11,15	11,90	13,35
1057,15	4,80	7,01	8,75	10,85	11,70	13,25
1077,15	4,80	7,20	8,75	11,20	12,20	13,28
1097,15	4,90	7,20	8,80	10,95	11,80	13,35
1117,15	4,90	7,10	8,65	11,05	12,30	13,30
1137,15	4,80	6,85	8,90	11,10	11,55	13,60
1157,15	4,90	7,00	8,85	11,00	12,30	13,10
1177,15	5,00	7,20	8,80	11,50	12,20	13,90
1197,15	5,05	7,50	9,30	11,25	12,00	13,85

Σειρά 1

Πίνακας 8: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 1.1

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.1.4	1.1.5	1.1.6
197,15	4,10	6,25	7,87	9,80	10,60	11,55
217,15	3,95	6,03	8,40	9,15	10,35	11,70
237,15	3,85	6,70	7,60	9,50	11,35	12,10
257,15	4,15	6,15	8,53	9,65	10,85	11,55
277,15	4,20	6,32	7,75	9,60	10,40	11,50
297,15	4,40	6,50	8,62	9,70	11,05	11,90
317,15	4,65	6,65	8,35	9,80	11,30	11,95
337,15	4,70	6,70	8,50	10,00	11,25	12,30
357,15	4,70	6,80	8,50	10,00	11,60	12,30
377,15	4,75	6,85	8,70	10,20	11,60	12,30
397,15	4,65	6,90	8,70	10,35	11,65	12,75
417,15	4,80	7,15	8,90	10,52	11,60	12,90
437,15	4,90	7,23	9,00	10,65	11,90	12,80
457,15	4,85	7,43	9,00	10,70	11,80	13,35
477,15	4,85	7,40	8,75	10,80	12,15	13,60
497,15	4,80	7,30	9,10	10,83	12,23	13,73
519,25	4,90	7,57	9,35	11,05	12,53	13,50
537,15	5,10	7,65	9,50	11,15	12,70	13,67
557,15	5,20	7,73	9,70	11,25	12,80	13,75
577,15	5,20	7,70	9,67	11,20	12,90	13,90
597,15	5,15	7,73	9,62	11,29	12,80	13,90
617,15	5,20	7,80	9,70	11,32	12,90	14,00
637,15	5,25	7,90	9,80	11,50	12,95	14,10
657,15	5,30	8,10	9,90	11,57	13,15	14,23
677,15	5,55	8,17	10,05	11,70	13,30	14,40
697,15	5,60	8,20	10,10	11,75	13,40	14,50
717,15	5,65	8,15	10,12	11,75	13,40	14,50
737,15	5,50	8,17	10,10	11,77	13,45	14,60
757,15	5,65	8,15	10,07	11,85	13,50	14,70
777,15	5,65	8,23	10,20	11,95	13,60	14,72
797,15	5,70	8,30	10,30	12,00	13,70	14,73
817,15	5,75	8,30	10,30	12,00	13,70	14,83

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.1.4	1.1.5	1.1.6
837,15	5,70	8,30	10,28	12,02	13,70	14,80
857,15	5,70	8,30	10,30	12,00	13,70	14,83
877,15	5,65	8,25	10,30	12,00	13,73	14,83
897,15	5,50	8,30	10,30	12,12	13,75	14,85
917,15	6,05	8,45	10,33	12,17	13,80	15,00
937,15	6,10	8,45	10,43	12,20	13,90	15,10
957,15	6,05	8,45	10,50	12,20	13,95	15,10
977,15	5,83	8,40	10,50	12,25	14,00	15,15
997,15	5,70	8,50	10,50	12,45	14,05	15,20
1020,35	5,95	8,60	10,65	12,53	14,30	15,35
1037,15	6,00	8,75	10,75	12,70	14,40	15,50
1057,15	6,10	8,85	10,90	12,75	14,55	15,60
1077,15	6,10	8,90	11,00	12,80	14,70	15,70
1097,15	6,15	8,90	11,00	12,83	14,75	15,78
1117,15	6,15	8,85	11,00	12,85	14,70	15,90
1137,15	6,15	8,90	10,95	12,85	14,70	15,90
1157,15	6,20	8,95	11,00	12,95	14,80	15,80
1177,15	6,25	9,10	11,20	13,05	14,90	15,90
1197,15	6,25	9,10	11,20	13,15	14,90	16,00

Πίνακας 9: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 1.2α

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	1.2α.1	1.2α.2	1.2α.3	1.2α.4	1.2α.5	1.2α.6
197,15	3,85	5,80	7,70	9,20	10,05	11,55
217,15	3,70	6,80	8,20	8,70	10,30	12,10
237,15	3,60	5,90	7,25	9,60	11,15	12,12
257,15	3,70	6,45	8,60	9,75	10,40	11,25
277,15	3,95	6,35	7,55	8,83	10,00	11,25
297,15	4,25	6,85	8,05	9,60	10,82	12,05
317,15	4,25	7,05	8,65	10,05	11,45	12,60
337,15	4,70	7,20	8,80	10,35	11,60	12,90
357,15	4,90	7,40	9,05	10,55	11,80	13,20
377,15	5,00	7,70	9,20	10,70	12,10	13,35
397,15	5,14	7,80	9,20	11,00	12,15	13,53
417,15	5,35	7,90	9,50	11,05	12,60	13,85
437,15	5,40	7,95	9,70	11,30	12,68	14,10
457,15	5,51	7,99	9,75	11,30	12,82	14,30
477,15	5,60	8,25	10,00	11,60	12,95	14,35
497,15	5,62	8,20	9,92	11,70	13,05	14,50
520,75	5,75	8,25	10,20	11,90	13,30	14,70
537,15	5,85	8,35	10,30	12,00	13,50	14,82
557,15	5,98	8,50	10,38	12,20	13,60	15,10
577,15	5,90	8,50	10,45	12,20	13,68	15,20
597,15	5,97	8,50	10,50	12,23	13,72	15,15
617,15	6,00	8,64	10,55	12,30	13,85	15,38
637,15	6,10	8,68	10,65	12,40	13,95	15,35
657,15	6,23	8,80	10,80	12,50	14,15	15,60
677,15	6,33	8,92	10,97	12,80	14,30	15,80
697,15	6,35	9,00	11,00	12,90	14,35	15,85
717,15	6,32	9,00	10,95	12,80	14,35	15,85
737,15	6,30	8,98	11,00	12,83	14,45	15,85
757,15	6,35	9,10	11,10	12,90	14,50	15,98
777,15	6,40	9,10	11,10	13,03	14,57	16,15
797,15	6,42	9,20	11,18	13,15	14,70	16,20
817,15	6,50	9,20	11,22	13,15	14,72	16,25

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	1.2α.1	1.2α.2	1.2α.3	1.2α.4	1.2α.5	1.2α.6
837,15	6,45	9,20	11,20	13,10	14,70	16,28
857,15	6,40	9,10	11,18	13,15	14,73	16,25
877,15	6,35	9,10	11,20	13,18	14,70	16,30
897,15	6,48	9,20	11,25	13,20	14,83	16,35
917,15	6,52	9,25	11,35	13,25	14,95	16,50
937,15	6,60	9,30	11,37	13,40	15,05	16,60
957,15	6,55	9,30	11,40	13,43	15,10	16,55
977,15	6,55	9,30	11,40	13,40	15,00	16,70
997,15	6,60	9,30	11,50	13,50	15,15	16,70
1020,35	6,70	9,50	11,70	13,70	15,35	16,90
1037,15	6,80	9,70	11,80	13,82	15,50	17,10
1057,15	6,90	9,80	11,93	14,00	15,70	17,20
1077,15	6,85	9,80	12,00	14,10	15,93	17,30
1097,15	6,85	9,80	12,10	14,15	15,90	17,35
1117,15	6,83	9,85	12,05	14,15	15,80	17,50
1137,15	6,85	9,90	12,00	14,18	15,85	17,55
1157,15	6,95	9,90	12,13	14,25	15,95	17,50
1177,15	7,00	10,00	12,30	14,30	16,00	17,70
1197,15	7,08	10,10	12,30	14,32	16,05	17,70

Πίνακας 10: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 1.3

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	1.3.1	1.3.2	1.3.3	1.3.4	1.3.5	1.3.6
197,15	4,10	6,35	8,20	8,70	10,30	10,82
217,15	3,85	5,45	7,20	9,15	10,00	10,71
237,15	4,00	6,85	7,50	9,50	9,70	10,40
257,15	4,30	5,75	8,45	8,20	9,10	10,19
277,15	4,70	5,90	6,90	8,10	9,30	10,60
297,15	4,40	6,25	6,80	9,35	10,70	10,80
317,15	5,05	6,90	8,00	10,15	11,45	12,70
337,15	5,25	7,25	8,75	10,50	11,95	13,10
357,15	5,35	7,60	9,10	10,80	12,20	13,60
377,15	5,55	7,70	9,40	11,10	12,60	13,80
397,15	5,70	7,80	9,70	11,30	12,60	14,00
417,15	5,85	8,10	10,05	11,50	13,10	14,20
437,15	5,90	8,25	10,20	11,80	13,20	14,60
457,15	6,00	8,35	10,30	11,95	13,40	14,80
477,15	6,10	8,45	10,50	12,18	13,55	14,90
497,15	6,15	8,50	10,59	12,20	13,70	15,10
520,75	6,32	8,73	10,80	12,50	14,05	15,38
537,15	6,50	8,90	11,00	12,70	14,20	15,60
557,15	6,60	9,05	11,12	12,80	14,35	15,70
577,15	6,65	9,10	11,15	12,90	14,45	15,75
597,15	6,62	9,10	11,25	12,90	14,50	15,80
617,15	6,70	9,20	11,30	13,10	14,60	16,02
637,15	6,75	9,25	11,50	13,15	14,70	16,18
657,15	6,92	9,40	11,68	13,35	15,00	16,32
677,15	7,05	9,60	11,80	13,60	15,10	16,55
697,15	7,10	9,68	11,80	13,65	15,20	16,65
717,15	7,05	9,70	11,80	13,70	15,20	16,70
737,15	7,08	9,70	11,90	13,70	15,25	16,70
757,15	7,10	9,72	12,00	13,70	15,30	16,75
777,15	7,15	9,80	12,00	13,80	15,50	16,88
797,15	7,22	9,85	12,08	13,90	15,60	17,00
817,15	7,22	9,90	12,10	14,00	15,60	17,15

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	1.3.1	1.3.2	1.3.3	1.3.4	1.3.5	1.3.6
837,15	7,20	9,88	12,10	14,00	15,60	17,20
857,15	7,15	9,90	12,15	14,00	15,60	17,20
877,15	7,18	9,85	12,10	14,00	15,70	17,20
897,15	7,20	9,90	12,19	14,10	15,80	17,25
917,15	7,30	9,95	12,30	14,22	15,85	17,30
937,15	7,33	10,00	12,30	14,30	15,95	17,50
957,15	7,32	10,00	12,30	14,30	16,00	17,60
977,15	7,30	10,00	12,35	14,30	16,00	17,60
997,15	7,33	10,07	12,40	14,35	16,10	17,70
1020,35	7,45	10,20	12,58	14,60	16,25	17,90
1037,15	7,60	10,32	12,72	14,80	16,50	17,95
1057,15	7,70	10,50	12,90	14,90	16,65	18,30
1077,15	7,73	10,55	13,00	15,05	16,80	18,50
1097,15	7,73	10,60	13,10	15,10	16,85	18,55
1117,15	7,73	10,60	13,10	15,20	16,90	18,50
1137,15	7,80	10,65	13,10	15,20	17,00	18,70
1157,15	7,88	10,68	13,20	15,30	17,10	18,70
1177,15	7,90	10,70	13,28	15,35	17,12	18,70
1197,15	7,90	10,80	13,30	15,35	17,15	18,70

Σειρά 2

Πίνακας 11: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 2.1

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.1.4	2.1.5	2.1.6
197,15	3,65	5,88	7,35	9,41	10,26	11,10
217,15	3,50	5,62	8,15	8,70	9,57	11,14
237,15	3,60	6,50	7,15	8,80	11,06	13,03
257,15	3,80	5,71	8,20	9,83	10,96	11,84
277,15	3,86	5,98	7,50	8,55	9,81	11,10
297,15	3,86	6,12	7,96	9,47	11,03	12,35
317,15	4,15	6,91	8,72	10,13	11,75	13,25
337,15	4,60	6,85	8,92	10,70	12,19	13,85
357,15	4,25	7,17	9,15	10,90	12,69	14,05
377,15	4,30	7,35	9,42	11,25	13,10	14,57
397,15	4,35	7,29	9,85	11,45	13,46	15,07
417,15	4,45	7,51	10,00	11,76	13,81	15,56
437,15	4,55	7,75	9,50	12,15	14,09	15,86
457,15	4,55	7,73	10,15	12,22	14,31	16,25
477,15	4,60	7,80	10,45	12,40	14,49	16,37
497,15	4,55	7,70	10,51	12,44	14,77	16,45
521,25	4,90	8,20	11,10	12,80	14,95	16,75
537,15	4,78	7,90	10,93	13,20	15,40	17,12
557,15	4,95	8,00	11,10	13,40	15,74	17,53
577,15	4,98	8,20	11,20	13,70	15,97	17,95
597,15	4,98	8,21	11,45	13,75	16,15	18,01
617,15	5,09	8,23	11,45	13,83	16,30	18,10
637,15	5,10	8,35	11,67	14,05	16,50	18,80
657,15	5,20	8,58	11,85	14,20	16,86	18,96
677,15	5,30	8,85	12,00	14,55	17,07	19,10
697,15	5,20	8,90	12,00	14,55	17,16	19,36
717,15	5,20	9,00	12,00	14,85	17,32	19,59
737,15	5,20	8,94	12,02	14,90	17,49	19,75
757,15	5,30	9,00	11,95	14,94	17,65	19,75
777,15	5,40	9,15	12,15	15,20	17,80	20,05
797,15	5,49	9,20	12,12	15,35	18,03	20,29
817,15	5,50	9,18	12,30	15,40	18,03	20,57

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.1.4	2.1.5	2.1.6
837,15	5,50	9,20	12,30	15,50	18,33	20,83
857,15	5,47	9,18	12,37	15,56	18,40	20,88
877,15	5,63	9,15	12,40	15,57	18,52	20,92
897,15	5,45	9,25	12,50	15,65	18,65	21,15
917,15	5,60	9,30	12,62	15,65	18,75	21,35
937,15	5,65	9,40	12,70	15,75	18,90	21,45
957,15	5,61	9,45	12,80	15,80	19,15	21,65
977,15	5,65	9,45	13,00	15,85	19,20	21,77
997,15	5,75	9,45	13,01	15,81	19,30	21,86
1021,05	5,95	9,95	13,45	16,35	19,30	22,09
1037,15	6,01	9,80	13,40	16,20	19,80	22,37
1057,15	6,05	9,95	13,42	16,41	19,97	22,57
1077,15	6,36	10,02	13,60	16,65	20,15	22,64
1097,15	6,16	10,40	13,90	16,80	20,07	22,87
1117,15	6,07	10,36	13,87	16,80	20,03	22,85
1137,15	6,17	10,38	13,85	16,82	20,10	22,88
1157,15	6,20	10,42	13,96	16,85	20,18	22,96
1177,15	6,33	10,45	13,95	16,92	20,27	22,90
1197,15	6,30	10,45	14,00	16,95	20,26	22,95

Πίνακας 12: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 2.2α

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	2.2α.1	2.2α.2	2.2α.3	2.2α.4	2.2α.5	2.2α.6
197,15	3,74	5,77	7,03	9,56	10,06	10,53
217,15	3,83	4,96	8,34	7,89	9,26	10,78
237,15	3,81	6,69	6,64	8,96	11,49	13,26
257,15	3,93	5,26	8,47	9,76	10,94	11,71
277,15	4,62	5,46	6,81	8,17	9,44	10,44
297,15	3,34	5,97	7,69	9,56	11,20	12,67
317,15	4,14	7,03	8,76	10,84	12,73	13,99
337,15	4,28	6,90	9,16	11,70	13,60	15,15
357,15	4,38	7,49	9,76	12,16	14,12	16,49
377,15	4,64	7,51	10,11	12,48	14,64	17,00
397,15	4,62	7,54	10,59	12,97	15,41	18,20
417,15	4,81	7,86	11,21	13,61	16,05	18,42
437,15	5,03	8,23	11,37	14,17	16,84	18,74
457,15	5,25	8,40	11,37	14,33	17,04	19,17
477,15	5,21	8,59	11,52	14,77	17,65	19,61
497,15	5,21	8,64	11,51	14,66	17,59	20,30
521,25	5,26	9,48	12,61	15,36	18,50	20,81
537,15	5,54	9,25	12,31	15,35	18,54	21,28
557,15	5,71	9,37	12,52	15,57	19,27	22,12
577,15	5,84	9,66	12,75	15,96	19,78	22,34
597,15	5,90	9,81	13,05	16,26	20,01	22,66
617,15	5,92	9,92	13,41	16,48	20,09	23,06
637,15	6,01	10,10	13,70	16,71	20,45	23,20
657,15	6,26	10,26	13,85	17,06	20,91	23,40
677,15	6,41	10,54	13,95	17,38	21,15	23,70
697,15	6,52	10,66	14,03	17,55	21,36	23,96
717,15	6,60	10,77	14,18	17,76	21,56	24,15
737,15	6,62	10,87	14,33	18,07	21,77	24,32
757,15	6,70	10,93	14,43	18,21	22,05	24,55
777,15	6,84	11,05	14,56	18,43	22,36	24,70
797,15	6,83	11,14	14,71	18,63	22,56	24,88
817,15	6,83	11,27	14,95	18,83	22,76	25,16

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	2.2α.1	2.2α.2	2.2α.3	2.2α.4	2.2α.5	2.2α.6
837,15	6,91	11,27	14,91	18,81	22,90	25,30
857,15	6,94	11,29	14,98	19,11	23,06	25,39
877,15	6,95	11,36	15,35	19,22	23,16	25,55
897,15	7,13	11,36	15,36	19,39	23,37	25,71
917,15	7,17	11,46	15,46	19,73	23,61	25,96
937,15	7,23	11,47	15,65	19,93	23,76	26,11
957,15	7,26	11,63	15,67	20,06	23,89	26,25
977,15	7,26	11,74	15,85	20,16	23,97	26,40
997,15	7,30	11,81	15,96	20,30	24,13	26,54
1021,05	7,50	12,24	16,32	20,90	24,41	26,79
1037,15	7,57	12,07	16,33	20,94	24,61	27,08
1057,15	7,65	12,29	16,57	21,15	24,82	27,23
1077,15	7,73	12,29	16,67	21,35	24,97	27,45
1097,15	7,75	12,64	16,93	21,56	25,07	27,66
1117,15	7,73	12,60	16,86	21,44	25,11	27,66
1137,15	7,76	12,65	16,95	21,57	25,21	27,67
1157,15	7,81	12,71	16,97	21,65	25,28	27,75
1177,15	7,86	12,76	17,04	21,64	25,34	27,76
1197,15	7,70	12,76	17,05	21,67	25,30	27,77

Πίνακας 13: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 2.3

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	2.3.1	2.3.2	2.3.3	2.3.4	2.3.5	2.3.6
197,15	3,73	6,07	7,41	8,83	9,03	10,97
217,15	4,12	4,74	7,14	7,55	9,58	13,04
237,15	4,25	5,91	6,56	9,71	12,31	11,72
257,15	4,11	5,86	8,50	9,27	9,76	9,85
277,15	4,01	4,97	6,16	7,45	8,90	9,96
297,15	3,84	5,95	7,70	9,44	11,12	12,47
317,15	4,61	7,06	9,45	11,28	13,29	15,06
337,15	4,95	7,71	10,25	12,47	14,46	16,46
357,15	5,27	8,19	10,90	13,35	15,65	17,76
377,15	5,31	8,65	11,45	14,05	16,48	18,61
397,15	5,43	8,88	11,98	14,66	17,18	19,72
417,15	5,74	9,42	12,47	14,96	18,03	20,60
437,15	5,88	9,85	12,86	15,78	18,95	21,19
457,15	6,09	9,91	13,12	16,10	19,36	21,85
477,15	6,25	10,25	13,38	16,66	19,87	22,25
497,15	6,35	10,41	13,66	16,95	20,40	22,85
521,25	6,89	11,10	14,41	17,68	20,96	23,45
537,15	6,83	10,85	14,52	18,06	21,38	23,90
557,15	6,95	11,05	14,89	18,37	21,87	24,26
577,15	7,14	11,35	15,16	18,90	22,32	24,65
597,15	7,17	11,54	15,43	19,19	22,63	24,96
617,15	7,27	11,54	15,56	19,58	22,91	25,19
637,15	7,39	11,80	16,02	19,70	23,30	25,47
657,15	7,73	12,05	16,30	20,20	23,65	25,95
677,15	7,86	12,29	16,45	20,68	24,05	26,20
697,15	7,93	12,50	16,62	20,86	24,20	26,51
717,15	7,97	12,60	16,77	21,09	24,36	26,70
737,15	7,98	12,72	16,97	21,26	24,56	26,85
757,15	8,12	12,87	17,20	21,63	24,81	26,96
777,15	8,25	13,05	17,42	21,77	25,03	27,17
797,15	8,36	13,25	17,74	21,97	25,25	27,39
817,15	8,35	13,45	17,80	22,23	25,37	27,57

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	2.3.1	2.3.2	2.3.3	2.3.4	2.3.5	2.3.6
837,15	8,46	13,48	17,83	22,34	25,49	27,75
857,15	8,41	13,50	17,97	22,47	25,65	27,85
877,15	8,51	13,65	18,24	22,62	25,74	27,92
897,15	8,64	13,90	18,36	22,75	25,92	28,13
917,15	8,68	13,98	18,54	22,95	26,06	28,30
937,15	8,75	14,05	18,71	23,13	26,16	28,47
957,15	8,83	14,24	18,82	23,25	26,30	28,62
977,15	8,83	14,25	18,97	23,36	26,43	28,81
997,15	8,87	14,30	19,23	23,48	26,55	28,93
1021,05	9,05	14,67	19,43	23,71	26,81	29,18
1037,15	9,15	14,68	19,73	23,87	26,98	29,37
1057,15	9,25	14,85	19,98	24,10	27,25	29,64
1077,15	9,32	15,03	20,05	24,25	27,36	29,76
1097,15	9,36	15,12	20,25	24,37	27,56	29,95
1117,15	9,33	15,12	20,19	24,39	27,64	30,05
1137,15	9,35	15,13	20,24	24,41	27,59	30,05
1157,15	9,37	15,17	20,27	24,49	27,66	30,16
1177,15	9,45	15,25	20,32	24,55	27,75	30,25
1197,15	9,46	15,24	20,36	24,58	27,73	30,20

Σειρά 3

Πίνακας 14: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 3.1

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	3.1.1	3.1.2	3.1.3	3.1.4	3.1.5	3.1.6
197,15	-	6,50	8,60	10,50	10,85	12,50
217,15	-	6,85	9,10	9,85	11,30	13,40
237,15	-	8,00	8,60	10,30	12,00	12,45
257,15	-	7,00	9,10	9,80	10,45	11,05
277,15	-	6,40	8,10	8,50	10,00	11,10
297,15	4,50	7,10	8,70	9,95	11,30	12,45
317,15	4,65	7,35	9,85	11,20	12,50	13,80
337,15	4,71	7,95	9,70	11,10	12,65	13,90
357,15	4,95	8,37	10,00	11,65	13,15	14,31
377,15	4,95	8,38	10,40	12,00	13,53	14,80
397,15	5,06	8,90	10,66	12,29	13,73	15,47
417,15	5,16	9,30	10,90	12,40	14,25	15,48
437,15	5,30	9,40	11,16	12,73	14,40	15,68
457,15	5,36	9,57	11,38	13,00	14,70	16,08
477,15	5,41	9,65	11,52	13,19	14,83	16,34
497,15	5,50	9,66	11,68	13,50	14,98	16,51
521,25	5,95	9,90	11,90	13,58	15,32	16,71
537,15	5,88	10,05	12,06	13,72	15,55	16,99
557,15	5,91	10,22	12,22	13,97	15,71	17,21
577,15	6,11	10,35	12,40	14,16	15,96	17,40
597,15	6,15	10,45	12,49	14,26	16,10	17,55
617,15	6,16	10,40	12,51	14,30	16,05	17,58
637,15	6,25	10,50	12,70	14,42	16,30	17,72
657,15	6,47	10,71	12,90	14,71	16,50	18,00
677,15	6,66	10,90	13,17	14,81	16,72	18,16
697,15	6,69	11,00	13,20	14,93	16,81	18,30
717,15	6,70	11,03	13,21	15,01	16,90	18,46
737,15	6,72	11,06	13,26	15,10	16,92	18,48
757,15	6,84	11,14	13,37	15,16	17,00	18,58
777,15	6,99	11,30	13,41	15,24	17,20	18,64
797,15	7,01	11,30	13,51	15,38	17,24	18,79
817,15	7,08	11,31	13,59	15,45	17,31	18,80

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	3.1.1	3.1.2	3.1.3	3.1.4	3.1.5	3.1.6
837,15	7,10	11,32	13,60	15,46	17,41	18,91
857,15	7,12	11,41	13,63	15,49	17,42	18,98
877,15	7,12	11,43	13,71	15,56	17,50	19,01
897,15	7,28	11,40	13,78	15,62	17,60	19,11
917,15	7,38	11,50	13,96	15,88	17,70	19,33
937,15	7,49	11,57	13,99	15,90	17,88	19,40
957,15	7,51	11,58	14,01	15,97	17,88	19,50
977,15	7,51	11,74	14,10	15,94	18,00	19,68
997,15	7,60	11,70	14,17	16,11	18,08	19,72
1021,05	7,95	11,95	14,29	16,24	18,18	20,00
1037,15	7,91	11,93	14,42	16,32	18,40	20,01
1057,15	8,08	12,00	14,57	16,60	18,62	20,21
1077,15	8,12	12,10	14,70	16,69	18,80	20,41
1099,65	8,21	12,20	14,76	16,81	19,00	20,55
1117,15	8,21	12,30	14,76	16,82	19,00	20,72
1137,15	8,22	12,30	14,80	16,82	18,95	20,70
1157,15	8,29	12,30	14,82	16,90	19,00	20,74
1177,15	8,30	12,33	14,91	16,96	19,08	20,74
1197,15	8,31	12,33	14,97	16,99	19,02	20,75

Πίνακας 15: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 3.2α

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	3.2α.1	3.2α.2	3.2α.3	3.2α.4	3.2α.5	3.2α.6
197,15	4,00	7,60	7,20	10,00	10,60	10,20
217,15	4,30	5,95	8,50	9,38	9,40	10,10
237,15	4,20	5,75	7,00	8,70	8,75	9,75
257,15	4,00	7,50	8,65	8,30	8,60	9,75
277,15	3,62	7,75	7,50	8,30	9,00	10,60
297,15	3,75	6,00	8,25	7,80	10,80	12,25
317,15	4,75	7,80	10,30	9,65	12,75	14,30
337,15	5,20	8,70	10,75	11,50	13,57	15,13
357,15	5,39	9,20	11,15	12,98	14,30	15,70
377,15	5,50	9,51	11,53	13,17	14,77	16,30
397,15	5,71	9,73	12,00	13,62	15,20	16,72
417,15	5,76	10,14	12,29	14,01	15,63	17,30
437,15	6,03	10,32	12,56	14,34	15,97	17,52
457,15	6,26	10,60	12,79	14,56	16,27	17,90
477,15	6,64	10,80	13,01	14,80	16,59	18,21
497,15	7,22	10,82	13,10	15,01	16,81	18,46
521,25	7,32	11,11	13,48	15,31	17,10	18,87
537,15	7,40	11,38	13,71	15,43	17,38	19,06
557,15	7,61	11,42	13,95	15,69	17,76	19,40
577,15	7,96	11,56	14,10	15,91	17,89	19,60
597,15	8,02	11,64	14,20	16,04	18,56	19,72
617,15	8,07	11,64	14,20	16,16	17,98	19,83
637,15	8,20	11,97	14,39	16,39	18,29	20,00
657,15	8,55	12,09	14,65	16,70	18,59	20,40
677,15	8,72	12,27	14,83	16,90	18,80	20,61
697,15	8,72	12,38	14,95	17,00	18,91	20,70
717,15	8,90	12,40	15,02	17,13	19,01	20,90
737,15	8,99	12,45	15,07	17,11	19,11	20,92
757,15	9,08	12,51	15,14	17,19	19,15	20,92
777,15	9,12	12,60	15,20	17,32	19,29	21,09
797,15	9,20	12,72	15,35	17,45	19,46	21,19
817,15	9,30	12,79	15,41	17,52	19,54	21,30

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	3.2α.1	3.2α.2	3.2α.3	3.2α.4	3.2α.5	3.2α.6
837,15	9,31	12,81	15,43	17,54	19,57	21,35
857,15	9,32	12,85	15,40	17,60	19,59	21,38
877,15	9,35	12,89	15,49	17,80	19,62	21,47
897,15	9,42	12,91	15,56	17,82	19,80	21,60
917,15	9,49	13,00	15,71	17,99	19,89	21,70
937,15	9,59	13,10	15,78	18,04	20,00	21,89
957,15	9,65	13,15	15,80	18,06	20,06	21,96
977,15	9,74	13,17	15,89	18,16	20,16	21,99
997,15	9,76	13,21	15,98	18,29	20,30	22,09
1021,05	9,96	13,30	16,14	18,40	20,54	22,30
1037,15	10,00	13,51	16,31	18,60	20,76	22,61
1057,15	10,10	13,69	16,50	18,77	20,95	22,80
1077,15	10,18	13,80	16,66	18,94	21,06	23,07
1099,65	10,16	13,90	16,73	19,01	21,19	23,15
1117,15	10,31	13,80	16,80	19,01	21,25	23,22
1137,15	10,26	13,91	16,81	19,18	21,30	23,26
1157,15	10,23	13,97	16,89	19,16	21,34	23,50
1177,15	10,36	14,00	16,91	19,20	21,40	23,45
1197,15	10,38	14,01	16,94	19,22	21,44	23,47

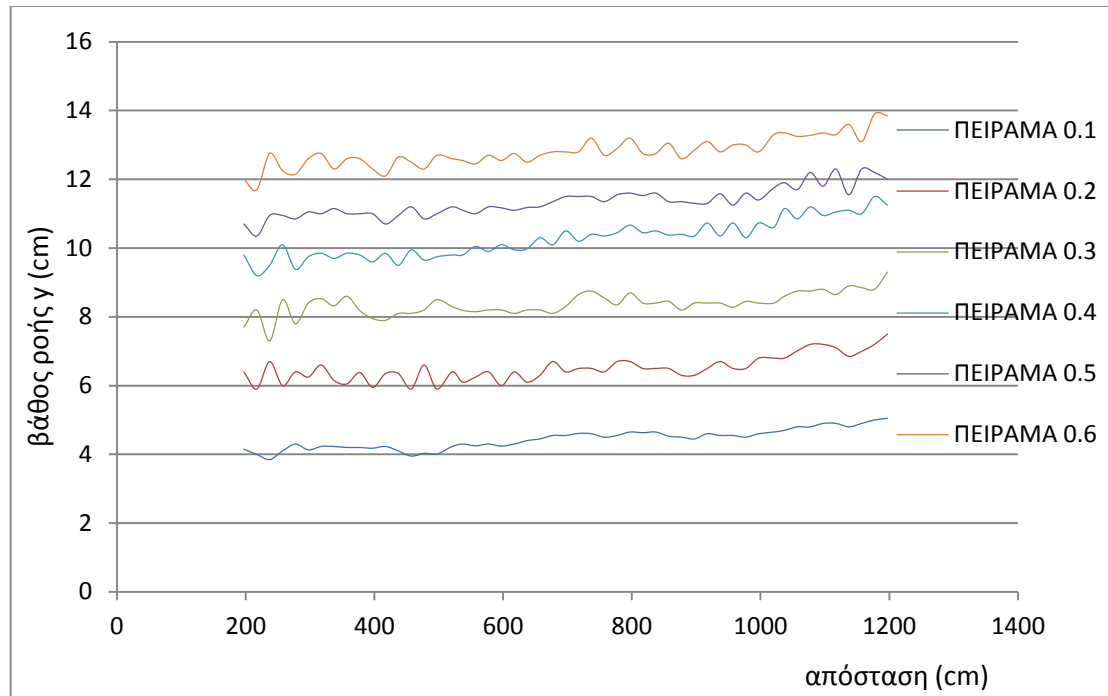
Πίνακας 16: Πειραματικά δεδομένα για Διάταξη 3.2β

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	3.2β.1	3.2β.2	3.2β.3	3.2β.4	3.2β.5	3.2β.6
197,15	4,40	7,25	8,75	10,90	9,10	9,80
217,15	4,70	7,30	9,60	9,20	9,10	10,00
237,15	5,00	6,00	7,20	8,10	8,75	9,75
257,15	5,00	6,15	8,85	7,60	8,80	9,50
277,15	4,40	7,50	7,00	7,78	9,00	10,25
297,15	4,80	7,40	9,00	10,35	11,60	12,75
317,15	5,20	8,50	10,65	12,15	13,50	14,60
337,15	4,92	8,95	10,99	12,52	14,02	15,10
357,15	5,30	9,36	11,54	13,07	14,57	15,81
377,15	5,51	9,74	11,85	13,56	15,01	16,22
397,15	5,75	9,88	12,26	13,98	15,53	16,86
417,15	5,91	10,25	12,56	14,20	15,92	17,22
437,15	6,10	10,50	12,90	14,64	16,31	17,54
457,15	6,31	10,73	13,17	14,86	16,56	17,91
477,15	6,50	11,00	13,38	15,07	16,80	18,38
497,15	6,70	11,12	13,50	15,30	17,01	18,50
521,25	7,39	11,44	13,72	15,65	17,42	19,00
537,15	7,31	11,61	13,91	15,97	17,70	19,10
557,15	7,59	11,80	14,16	16,18	17,92	19,50
577,15	7,70	11,99	14,31	16,32	18,21	19,67
597,15	8,00	12,02	14,48	16,48	18,31	19,71
617,15	7,90	12,10	14,52	16,60	18,44	19,81
637,15	8,20	12,26	14,76	16,80	18,60	20,16
657,15	8,60	12,50	15,01	17,02	18,80	20,38
677,15	8,76	12,69	15,20	17,21	19,03	20,61
697,15	8,75	12,71	15,37	17,31	19,20	20,71
717,15	8,90	12,75	15,41	17,41	19,31	20,70
737,15	9,08	12,81	15,47	17,49	19,31	20,88
757,15	9,10	12,95	15,52	17,58	19,47	21,00
777,15	9,20	13,01	15,69	17,68	19,60	21,20
797,15	9,29	13,12	15,76	17,78	19,76	21,31
817,15	9,39	13,18	15,87	17,91	19,82	21,39

Απόσταση από αρχή (cm)	Βάθος ροής γ (cm)					
	Πείραμα					
	3.2β.1	3.2β.2	3.2β.3	3.2β.4	3.2β.5	3.2β.6
837,15	9,40	13,20	15,90	17,92	19,93	21,47
857,15	9,41	13,20	15,90	17,92	19,93	21,53
877,15	9,48	13,22	15,92	17,97	19,93	21,60
897,15	9,60	13,38	16,05	18,11	20,11	21,63
917,15	9,66	13,45	16,13	18,24	20,20	21,97
937,15	9,72	13,49	16,19	18,30	20,30	22,00
957,15	9,81	13,60	16,22	18,42	20,40	22,09
977,15	9,90	13,59	16,30	18,49	20,49	22,14
997,15	9,81	13,57	16,37	18,58	20,56	22,19
1021,05	10,13	13,81	16,62	18,80	20,91	22,42
1037,15	10,10	13,90	16,76	19,01	21,03	22,71
1057,15	10,21	14,03	16,91	19,20	21,21	23,01
1077,15	10,26	14,19	17,10	19,33	21,45	23,25
1099,65	10,42	14,22	17,26	19,51	21,64	23,26
1117,15	10,40	14,22	17,30	19,50	21,66	23,39
1137,15	10,45	14,26	17,30	19,40	21,64	23,42
1157,15	10,45	14,30	17,32	19,48	21,65	23,50
1177,15	10,50	14,35	17,39	19,52	21,66	23,60
1197,15	10,50	14,30	17,30	19,56	21,70	23,56

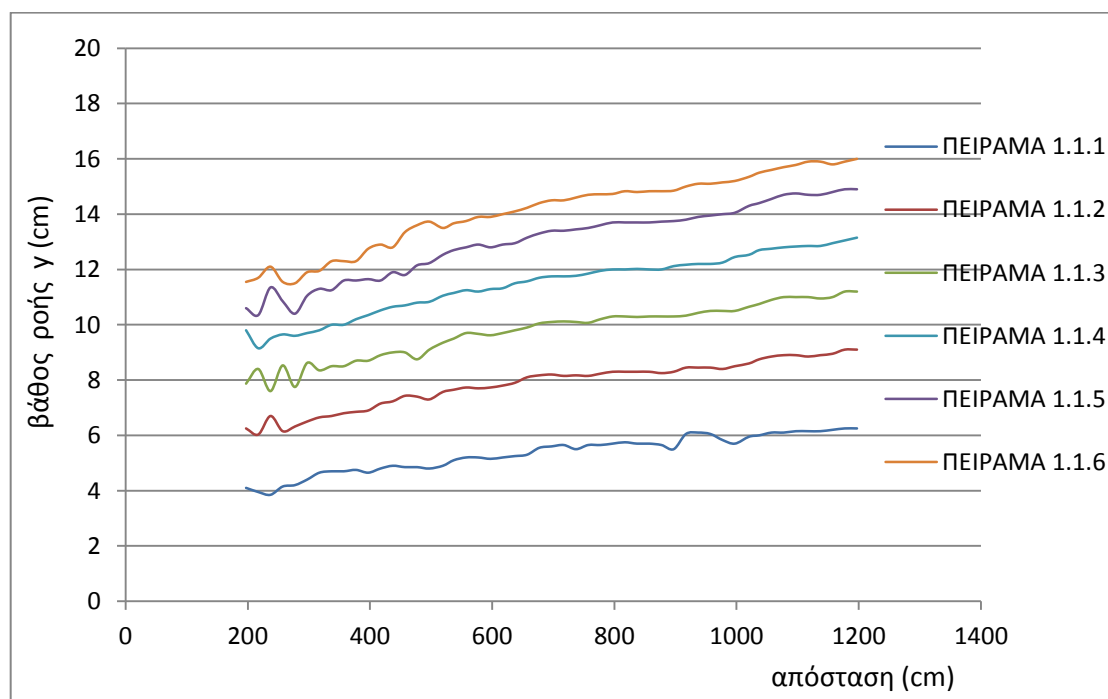
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Προφίλ Ελεύθερης Επιφάνειας

Σειρά 0

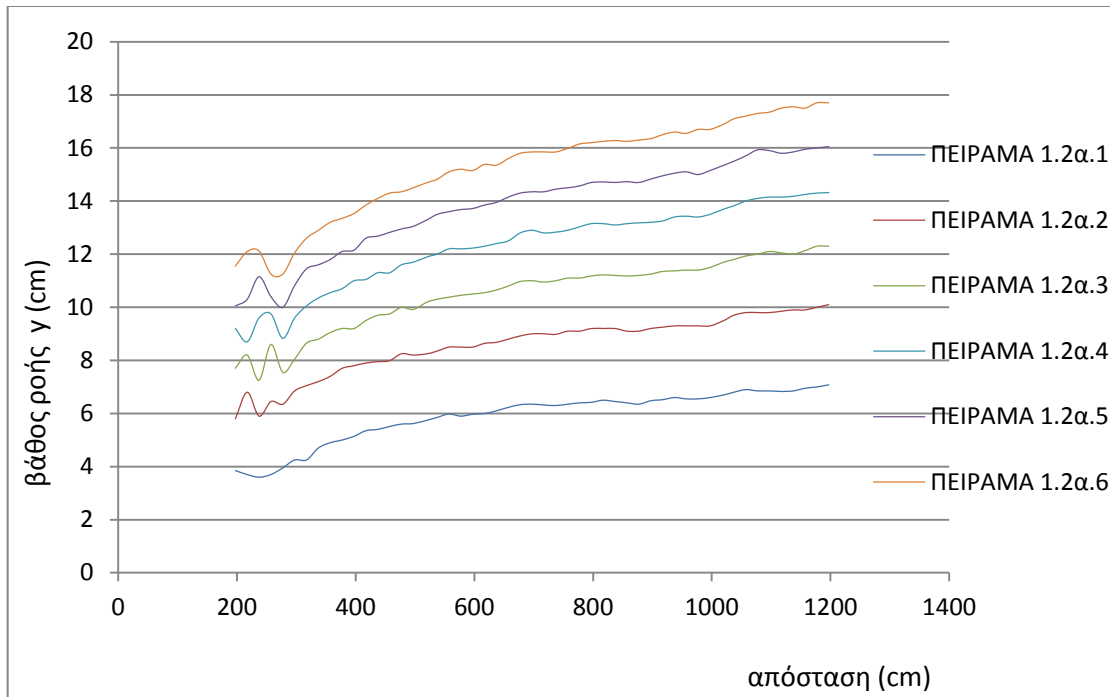


Διάγραμμα 10: Ανεπένδυτος πυθμένας

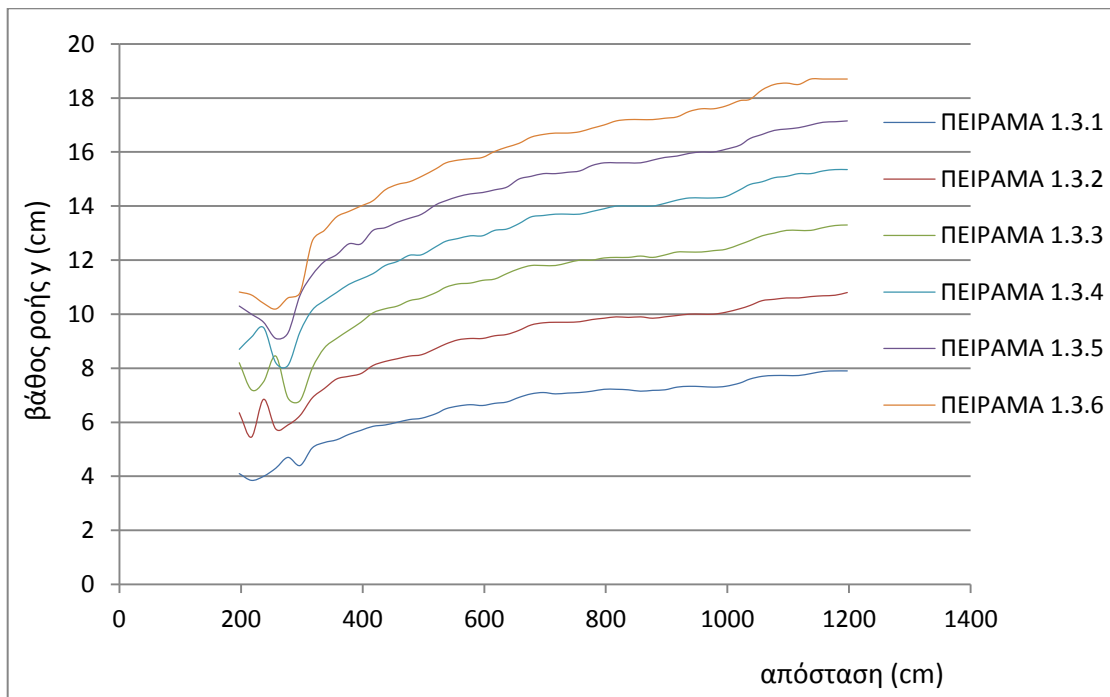
Σειρά 1



Διάγραμμα 11: Αραιή διάταξη 1.1 (100 stems/m²)

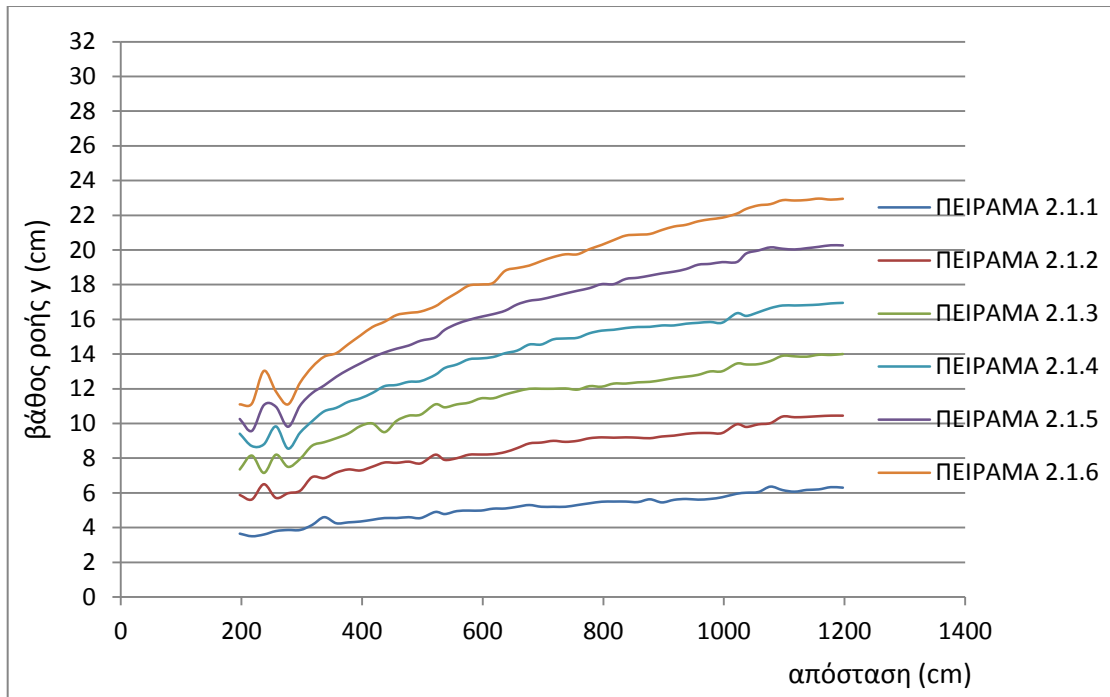


Διάγραμμα 12: Μεσαία διάταξη 1.2α (200 stems/m²)

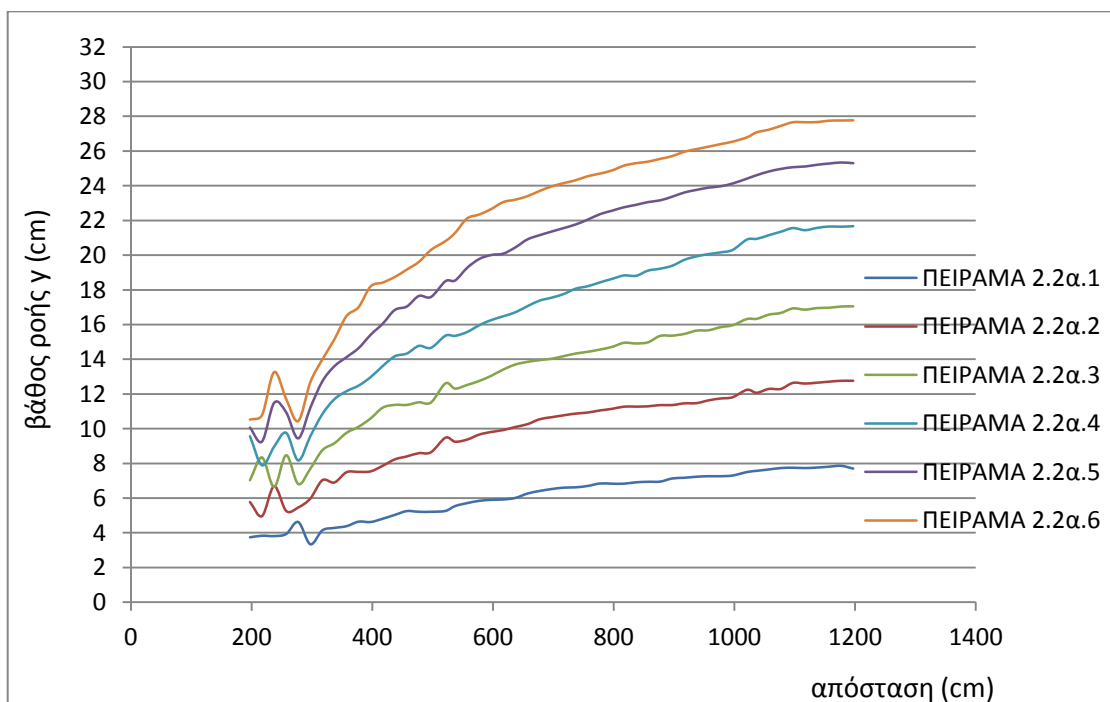


Διάγραμμα 13: Πυκνή διάταξη 1.3 (400 stems/m²)

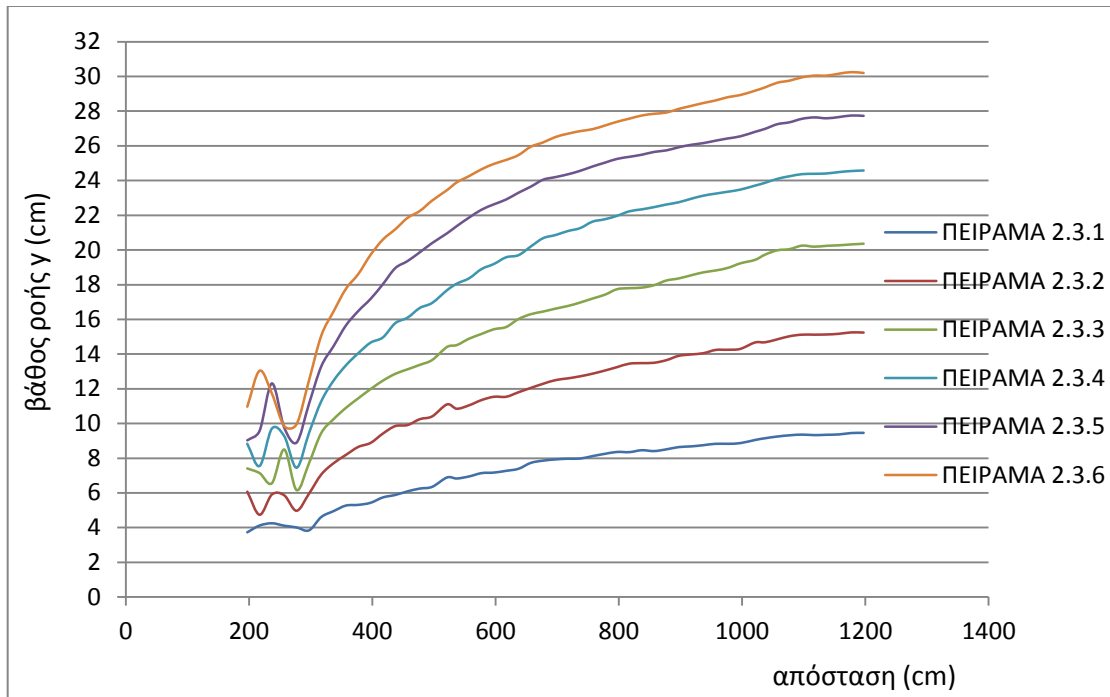
Σειρά 2



Διάγραμμα 14: Αραιή διάταξη 2.1 (100 stems/m²)

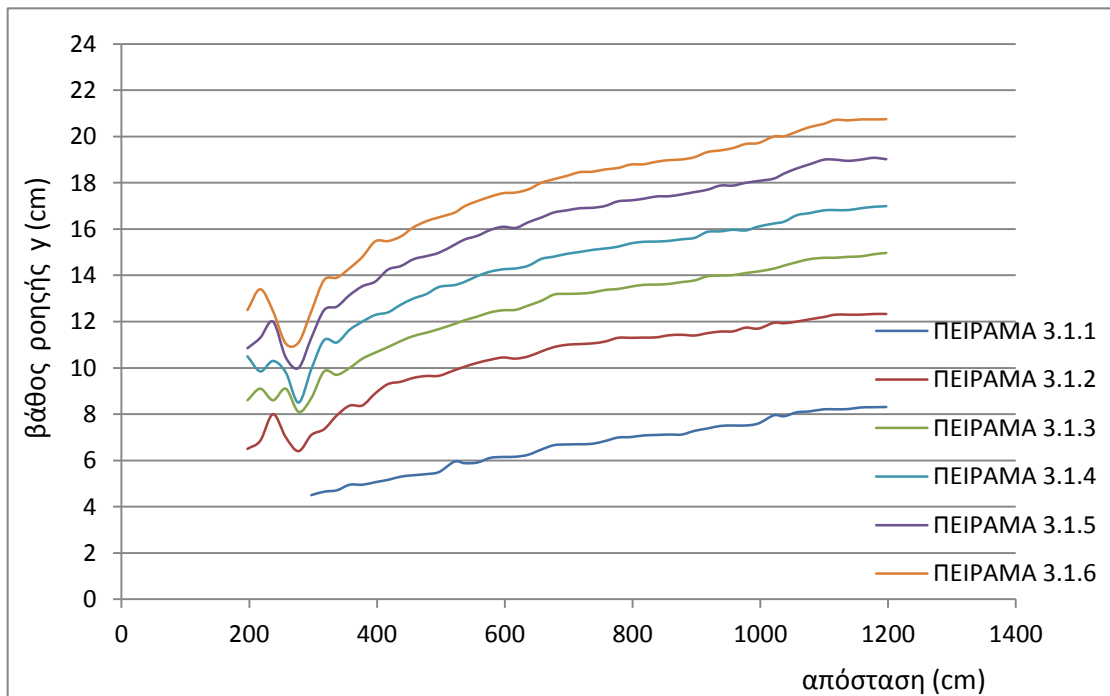


Διάγραμμα 15: Μεσαία διάταξη 2.2α (200 stems/m²)

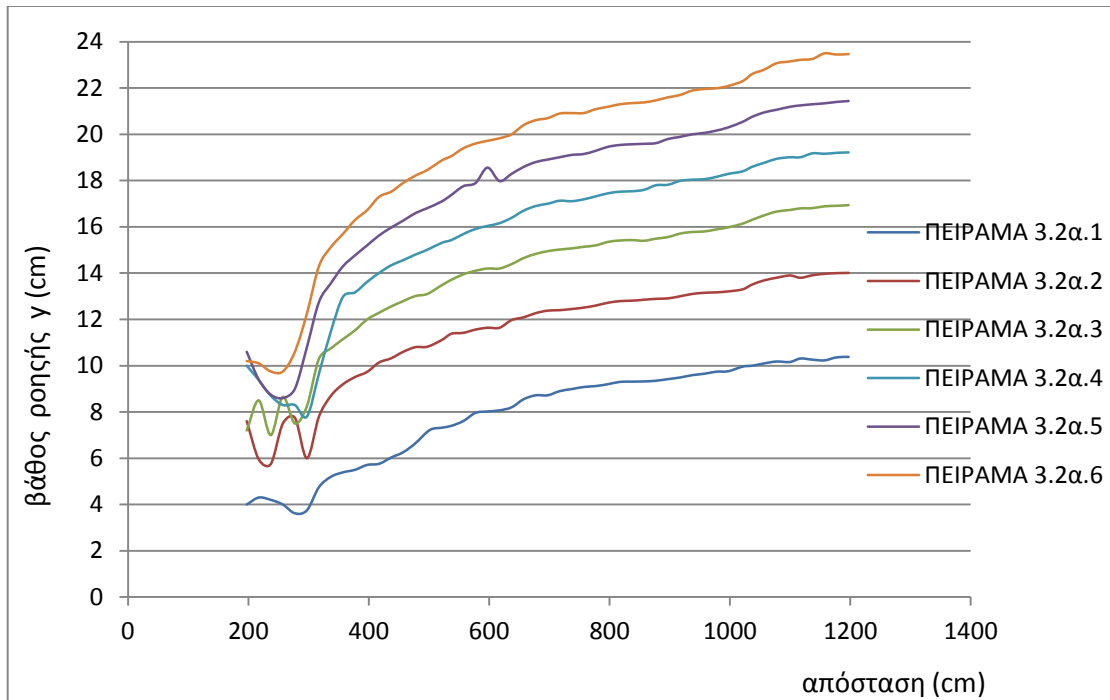


Διάγραμμα 16: Πυκνή διάταξη 2.3 (400 stems/m²)

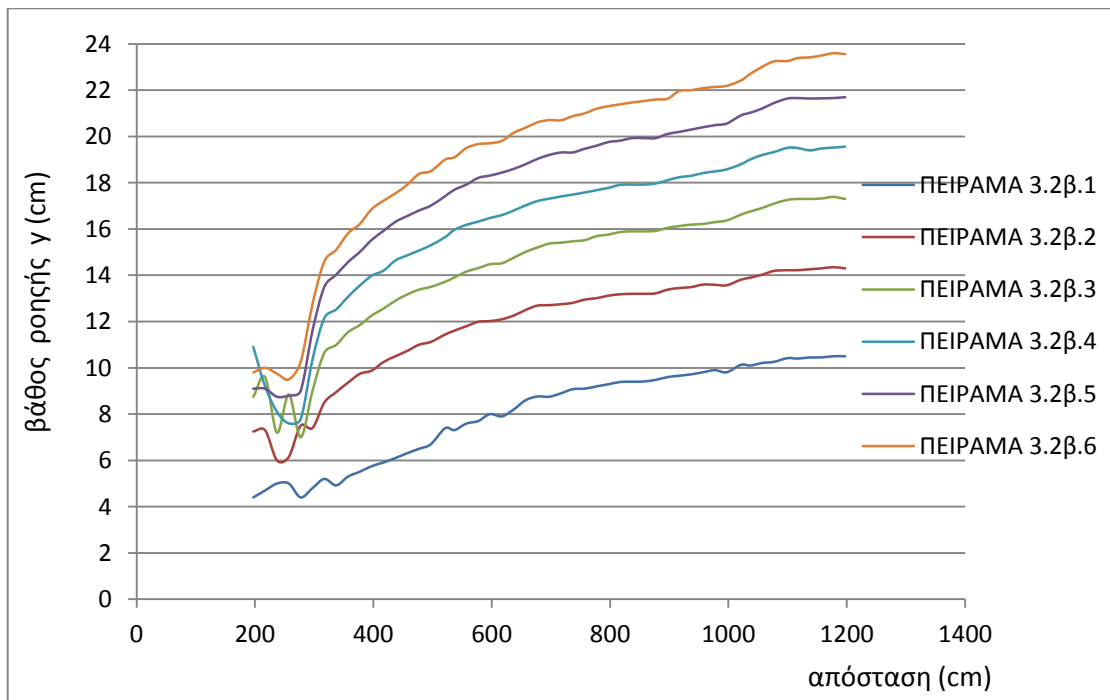
Σειρά 3



Διάγραμμα 17: Αραιή διάταξη 3.1 (100 stems/m²)



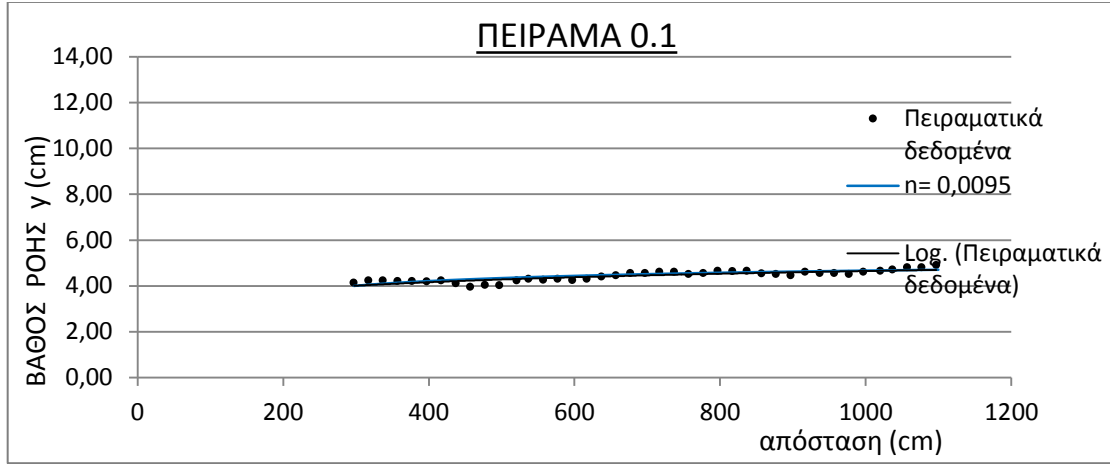
Διάγραμμα 18: Μεσαία διάταξη 3.2α – έκκεντρη (200 stems/m²)



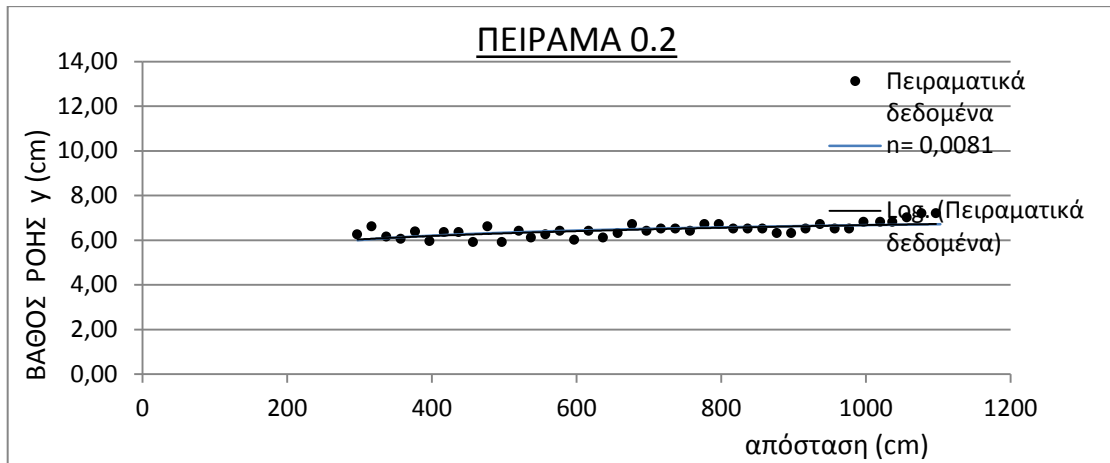
Διάγραμμα 19: Μεσαία διάταξη 3.2β (200 stems/m²)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Καμπύλες M2

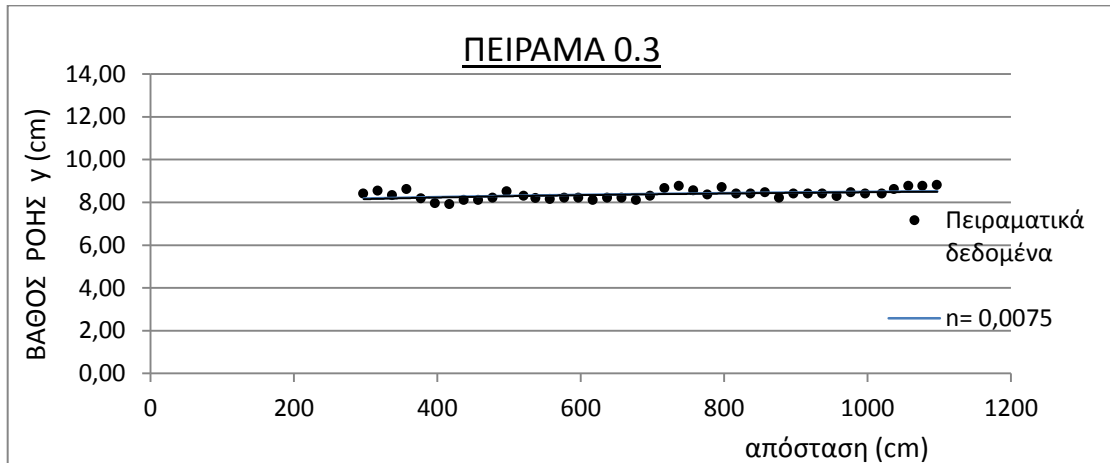
Ανεπένδυτος πυθμένας



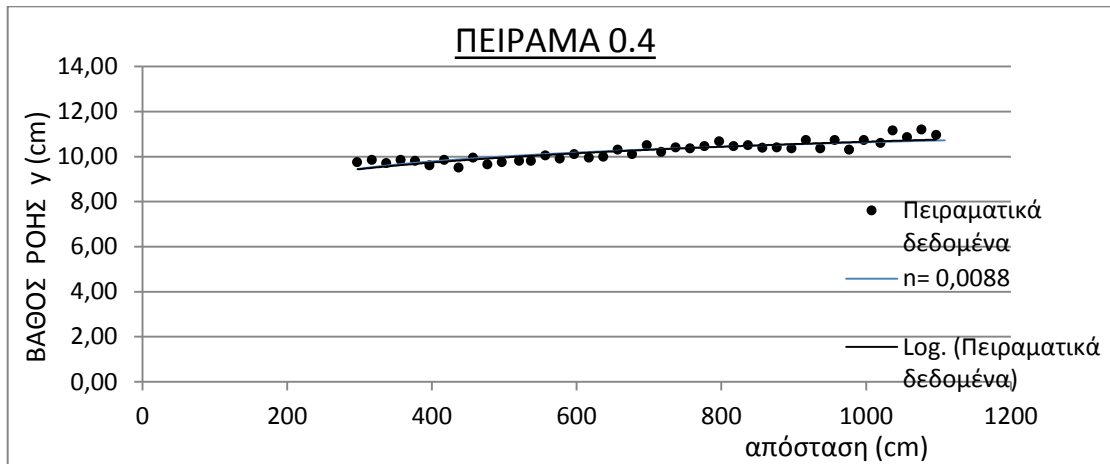
Διάγραμμα 20: $Q=10$ l/s



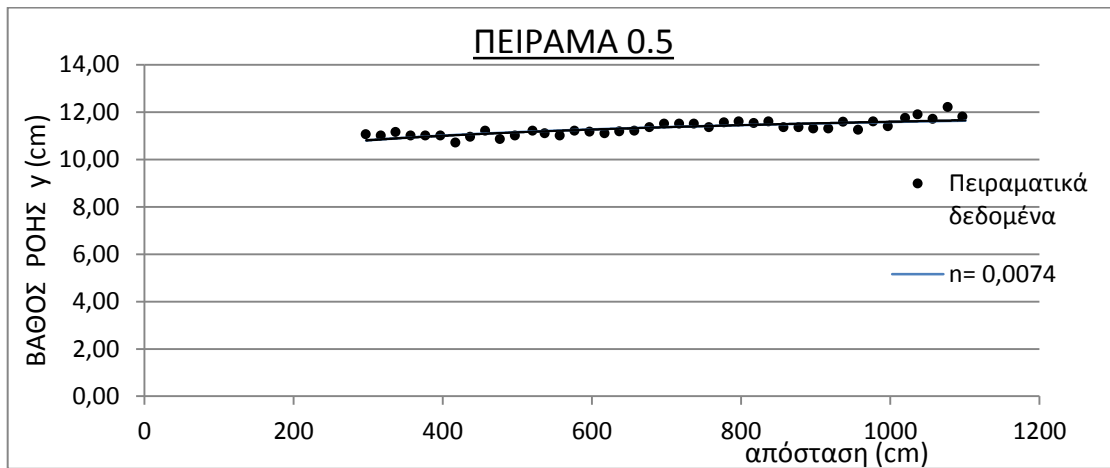
Διάγραμμα 21: $Q=20$ l/s



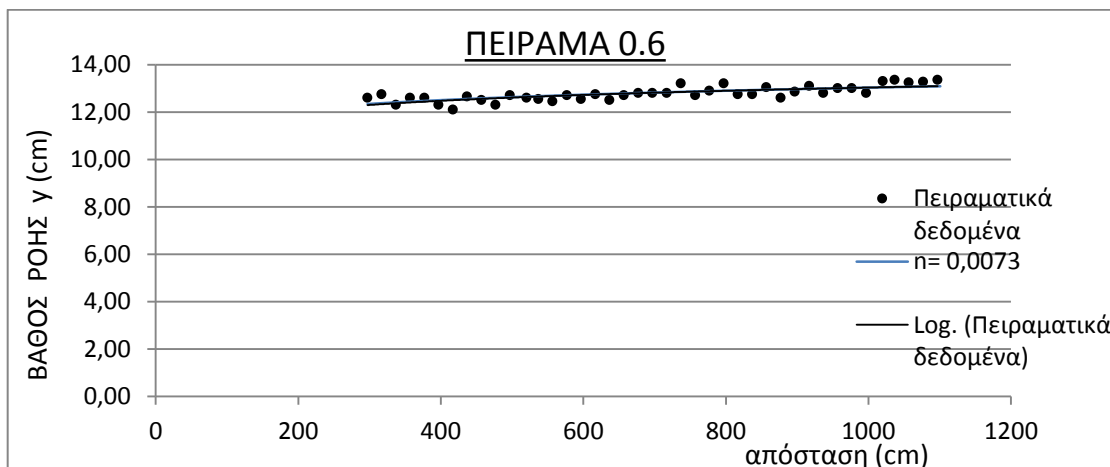
Διάγραμμα 22: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 23: $Q=40$ l/s

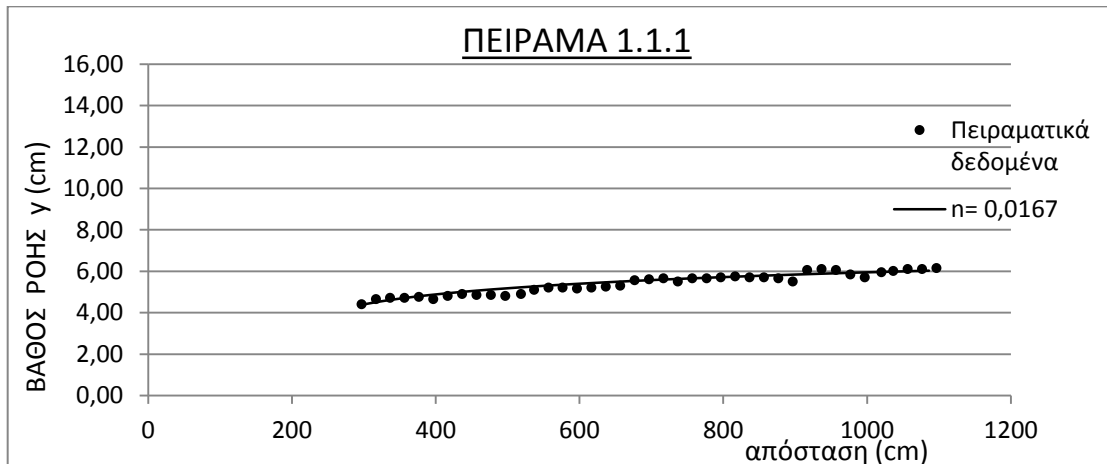


Διάγραμμα 24: $Q=50$ l/s

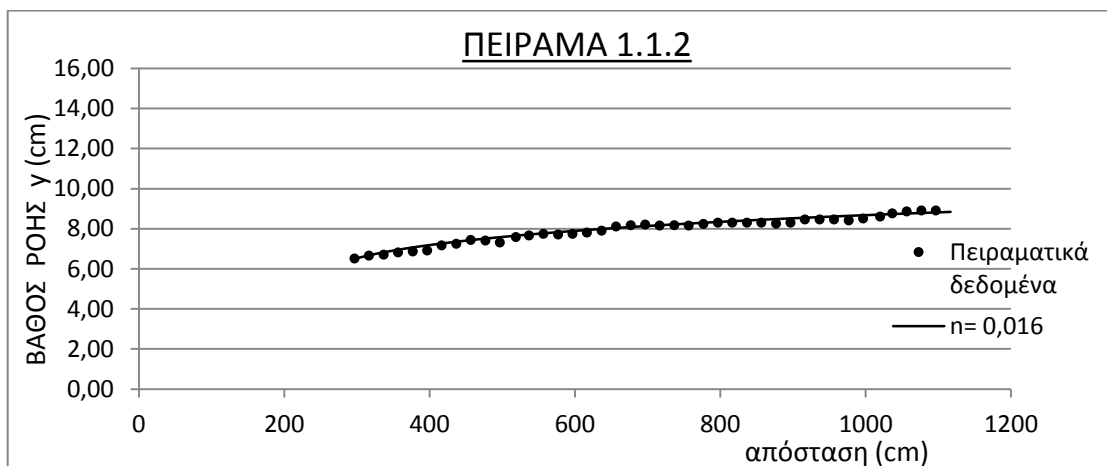


Διάγραμμα 25: $Q=60$ l/s

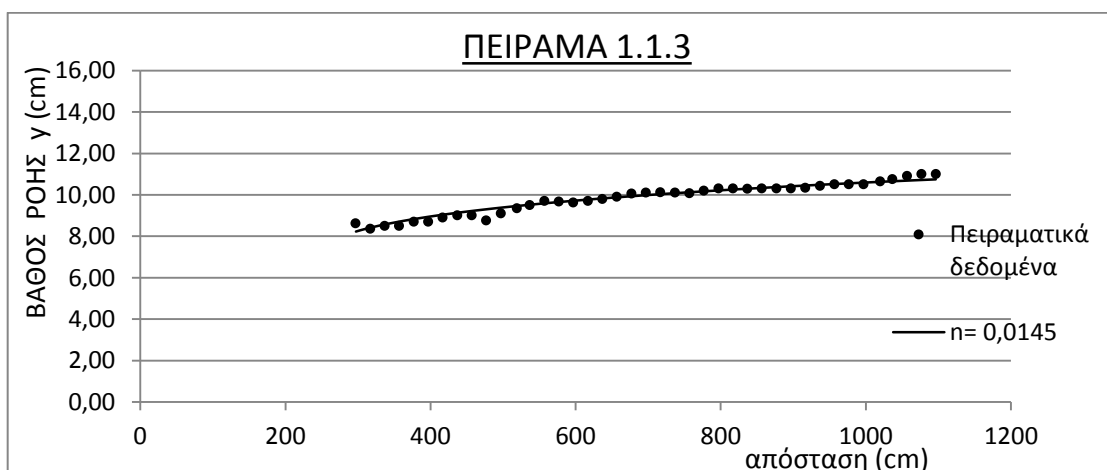
Διάταξη 1.1



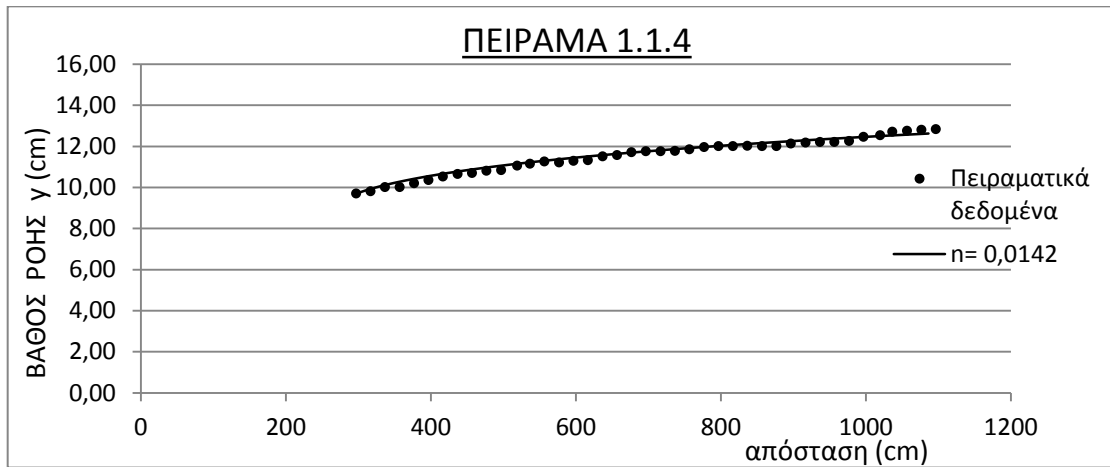
Διάγραμμα 26: $Q=10$ l/s



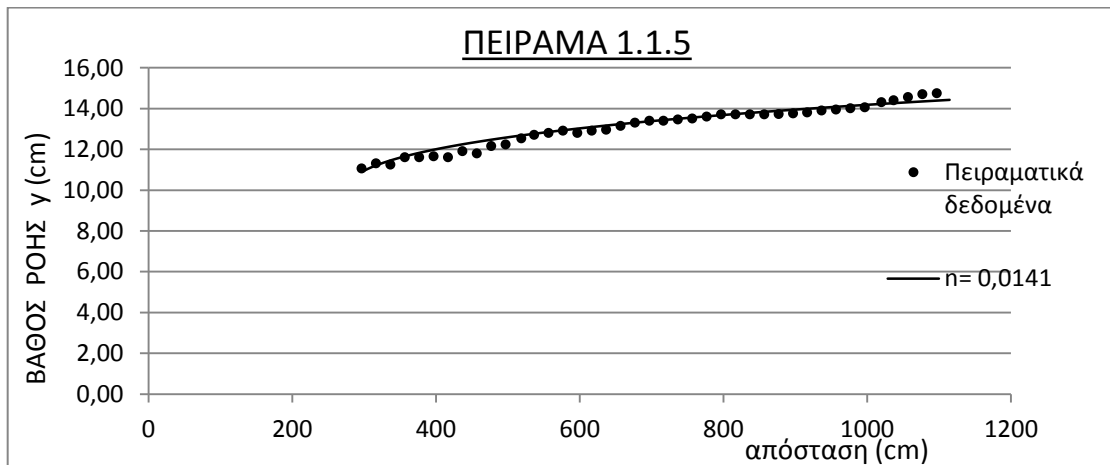
Διάγραμμα 27: $Q=20$ l/s



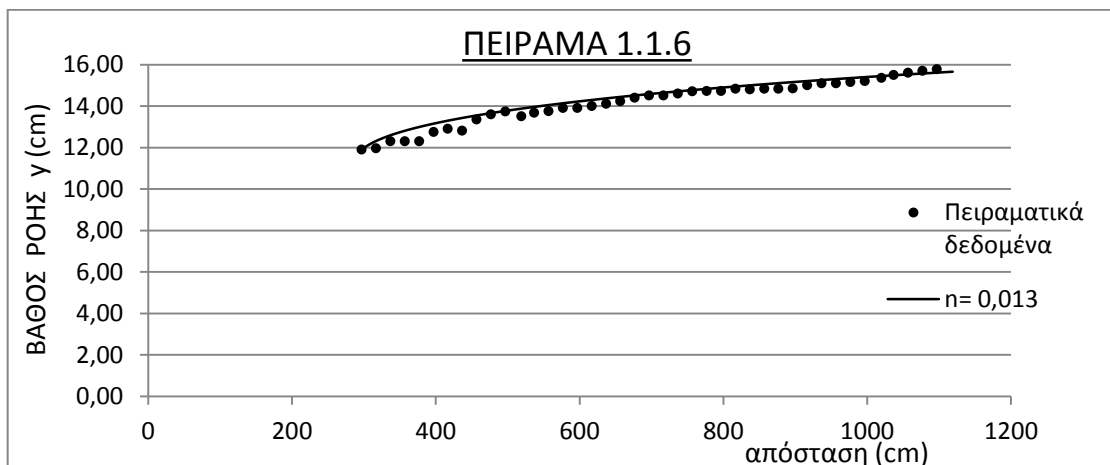
Διάγραμμα 28: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 29: $Q=40$ l/s

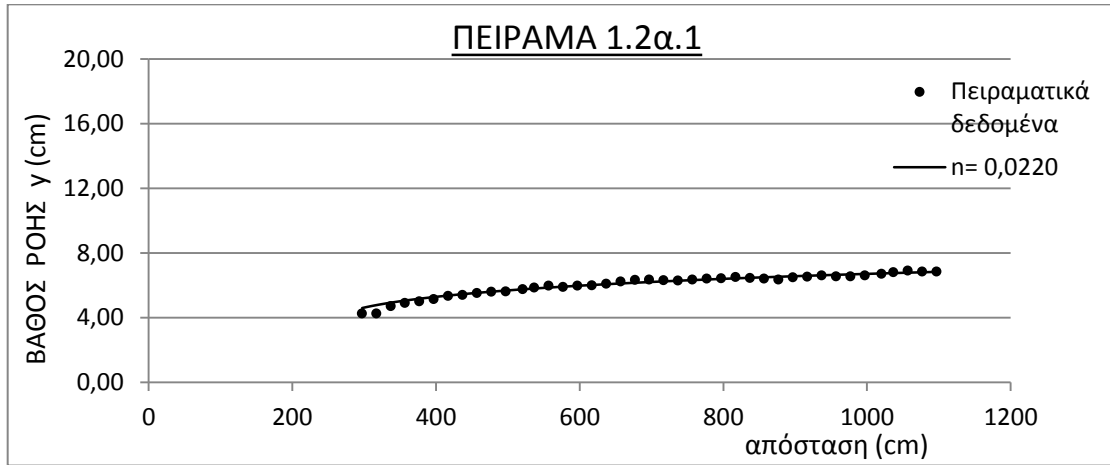


Διάγραμμα 30: $Q=50$ l/s

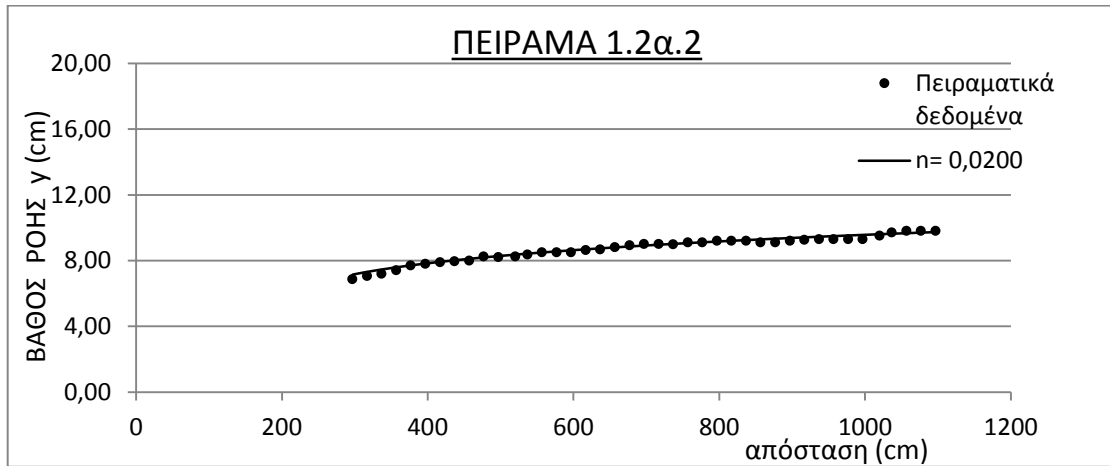


Διάγραμμα 31: $Q=60$ l/s

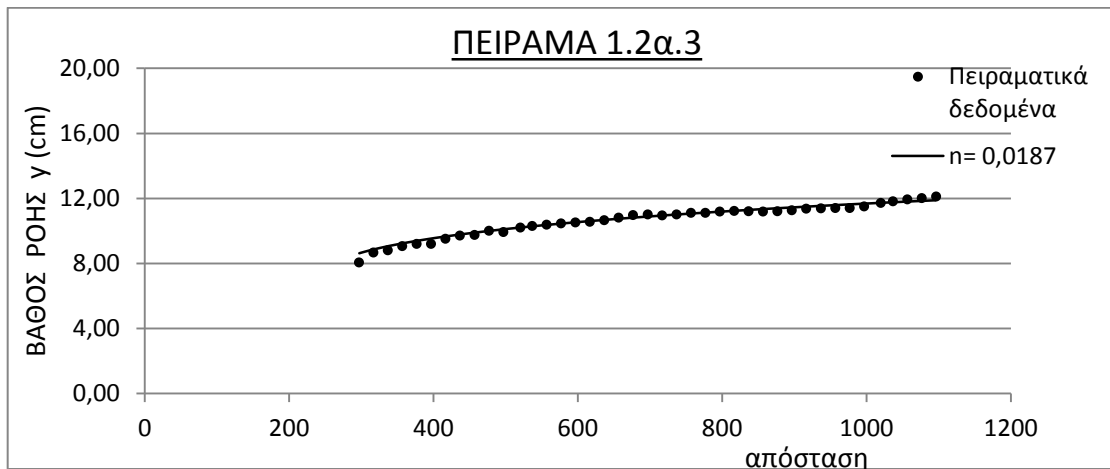
Διάταξη 1.2α



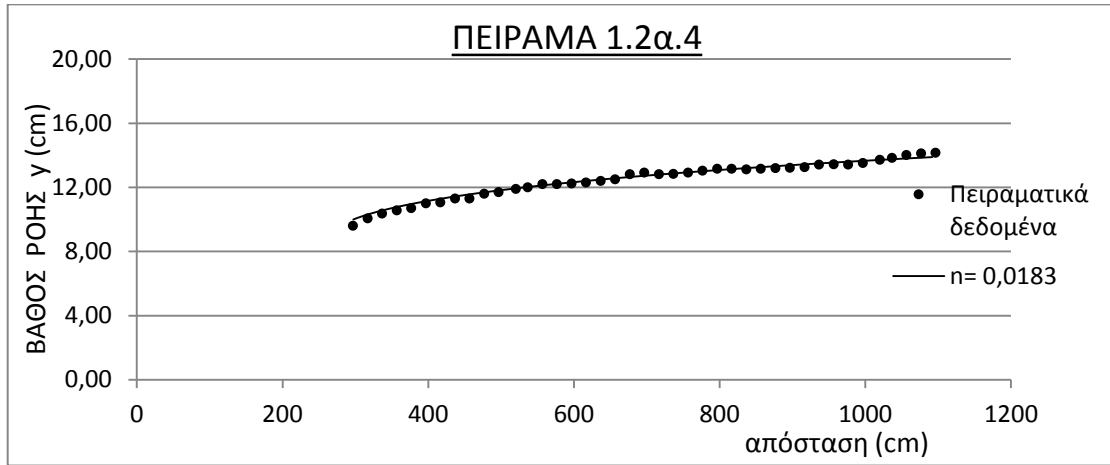
Διάγραμμα 32: $Q=10$ l/s



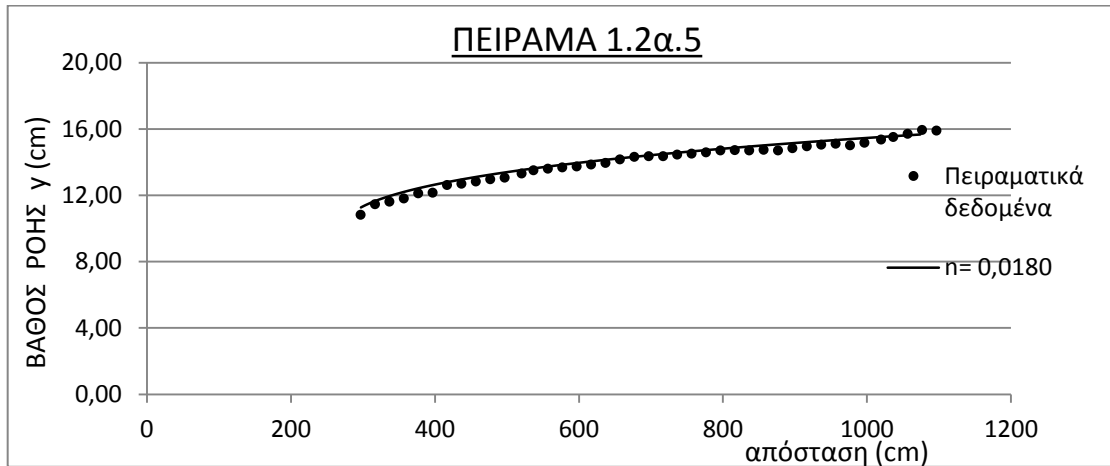
Διάγραμμα 33: $Q=20$ l/s



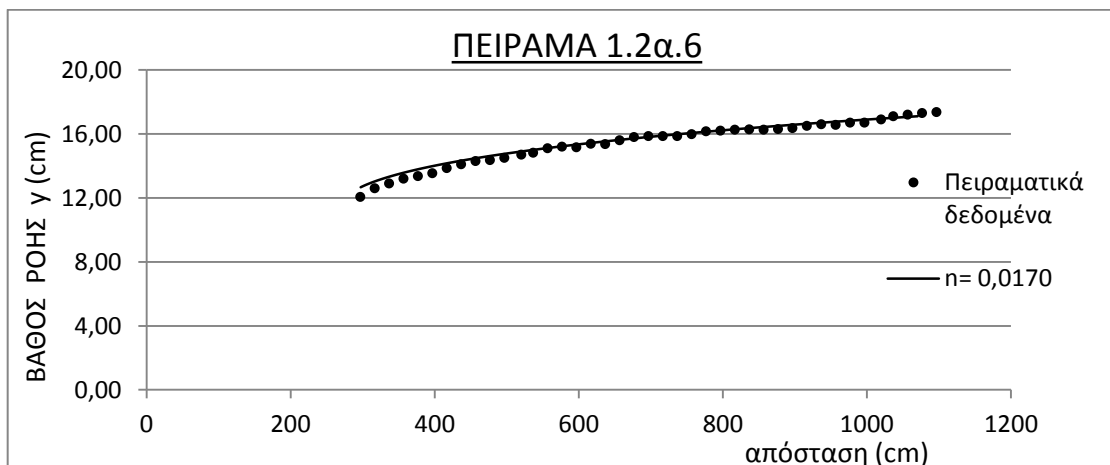
Διάγραμμα 34: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 35: $Q=40$ l/s

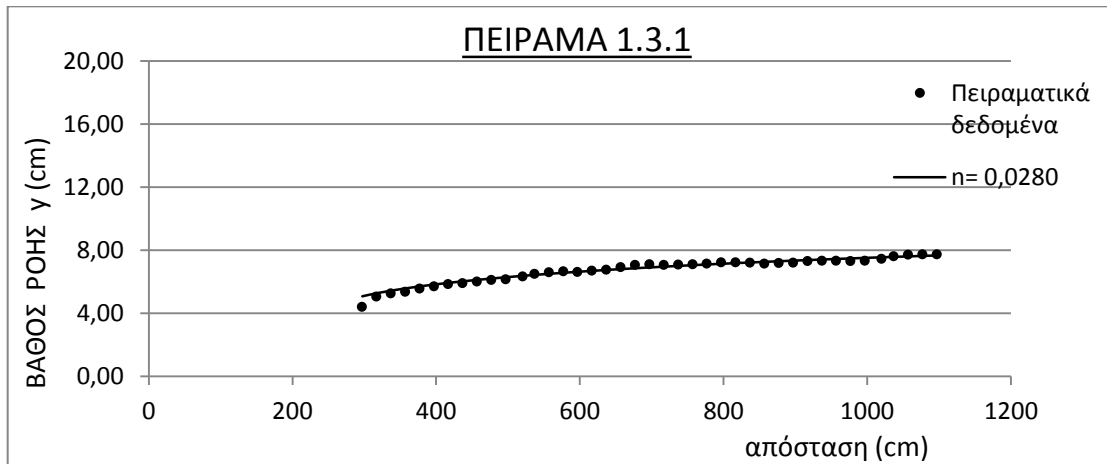


Διάγραμμα 36: $Q=50$ l/s

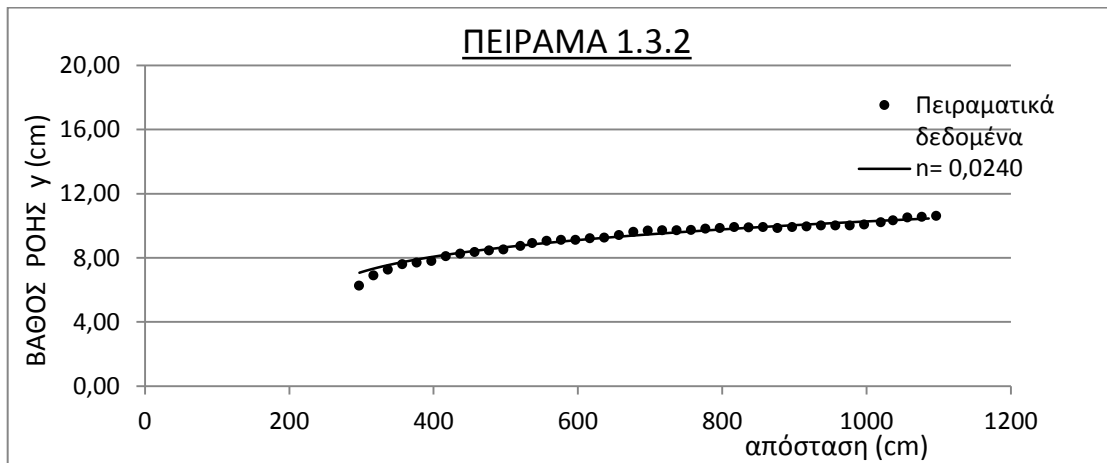


Διάγραμμα 37: $Q=60$ l/s

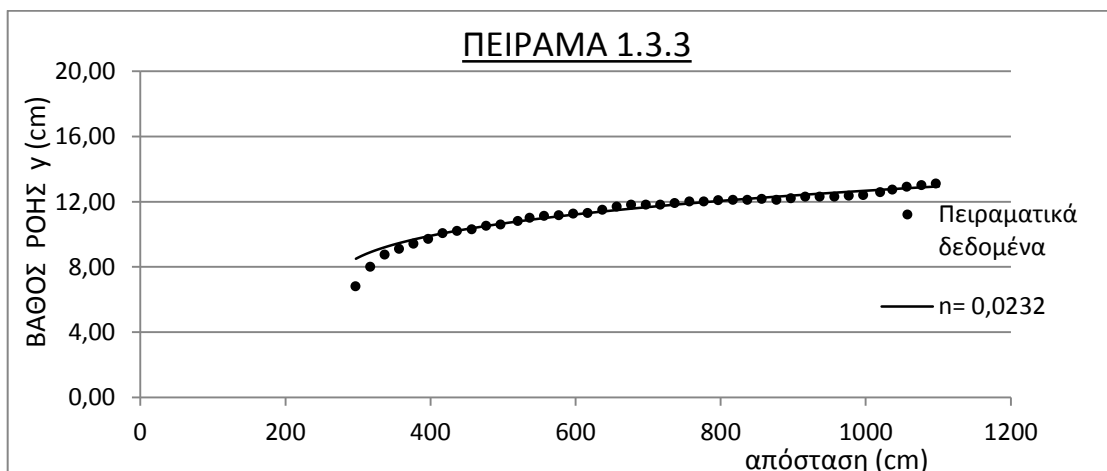
Διάταξη 1.3



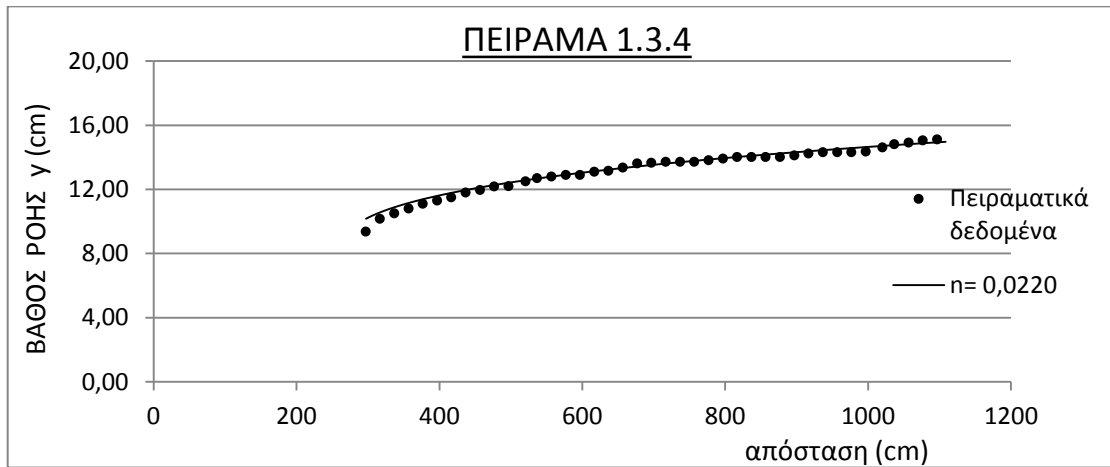
Διάγραμμα 38: $Q=10$ l/s



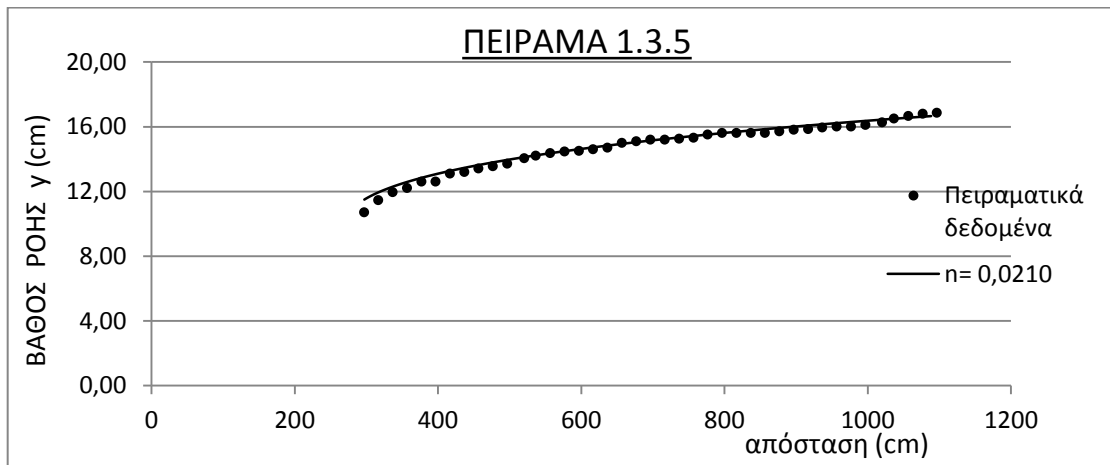
Διάγραμμα 39: $Q=20$ l/s



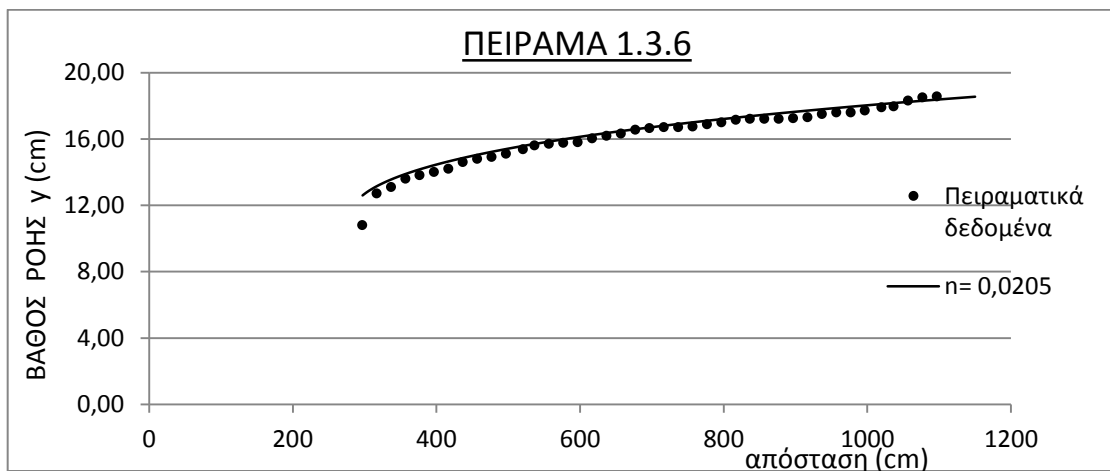
Διάγραμμα 40: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 41: $Q=40$ l/s

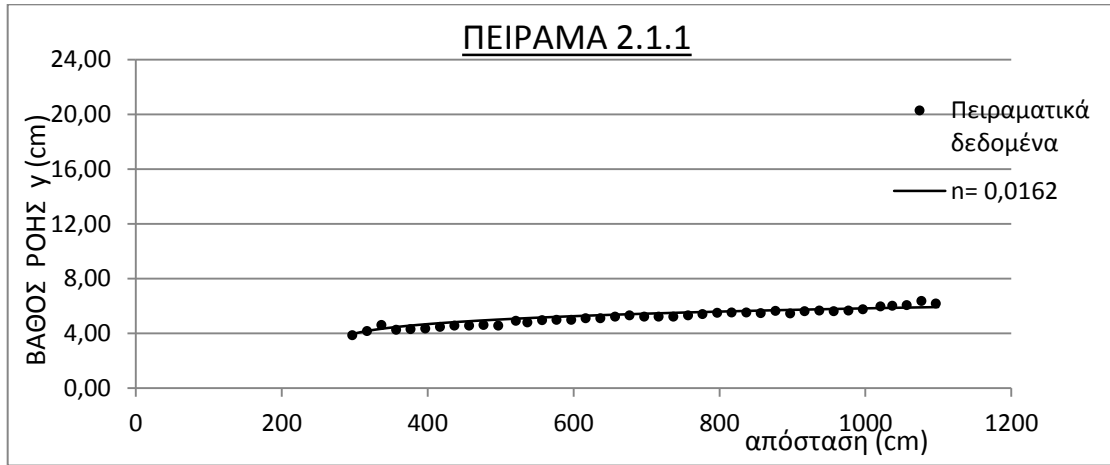


Διάγραμμα 42: $Q=50$ l/s

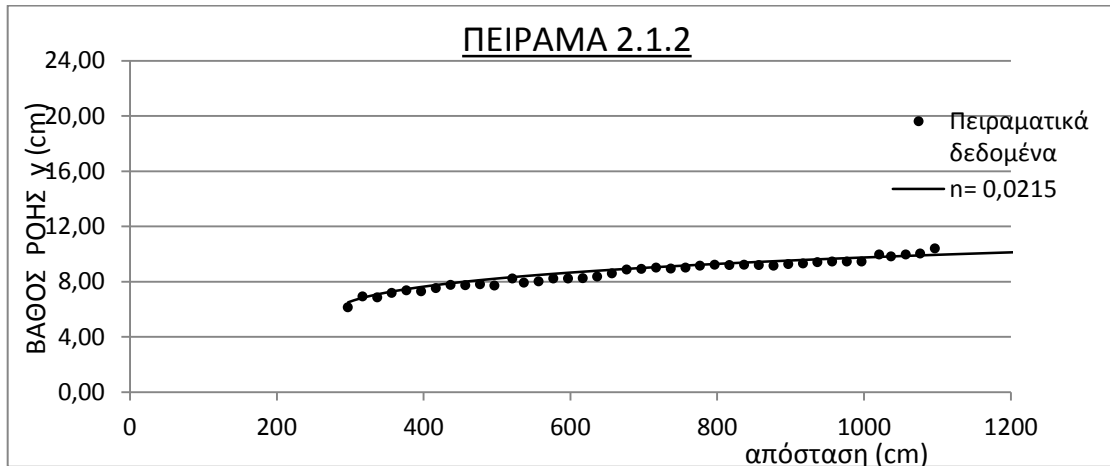


Διάγραμμα 43: $Q=60$ l/s

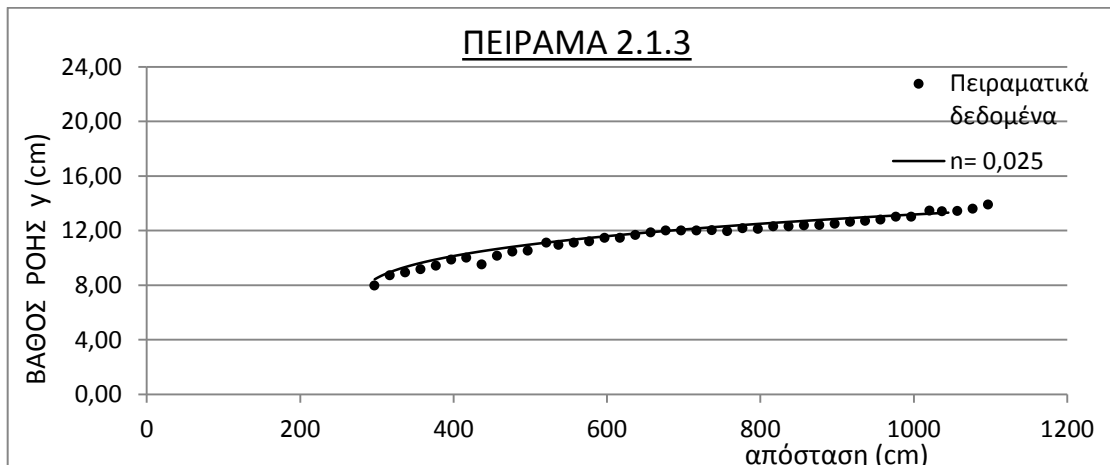
Διάταξη 2.1



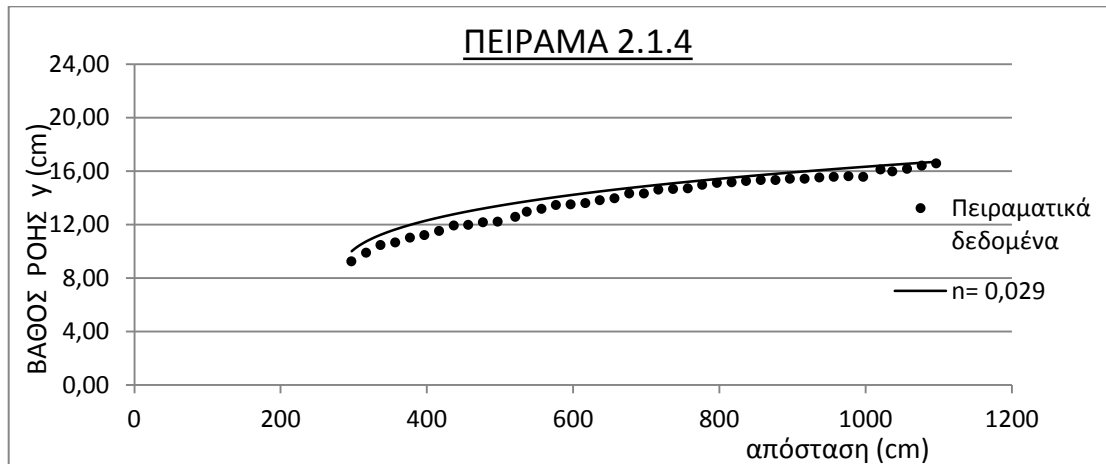
Διάγραμμα 44: $Q=10$ l/s



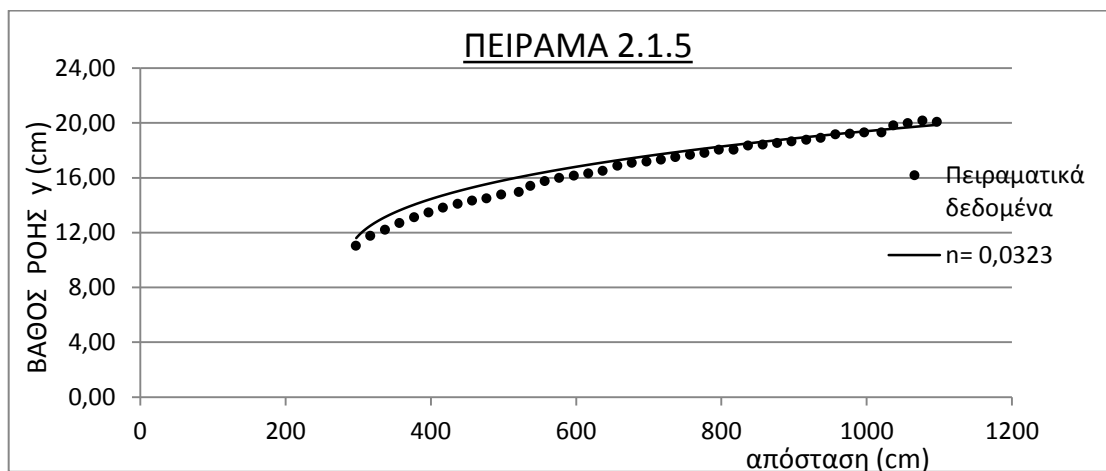
Διάγραμμα 45: $Q=20$ l/s



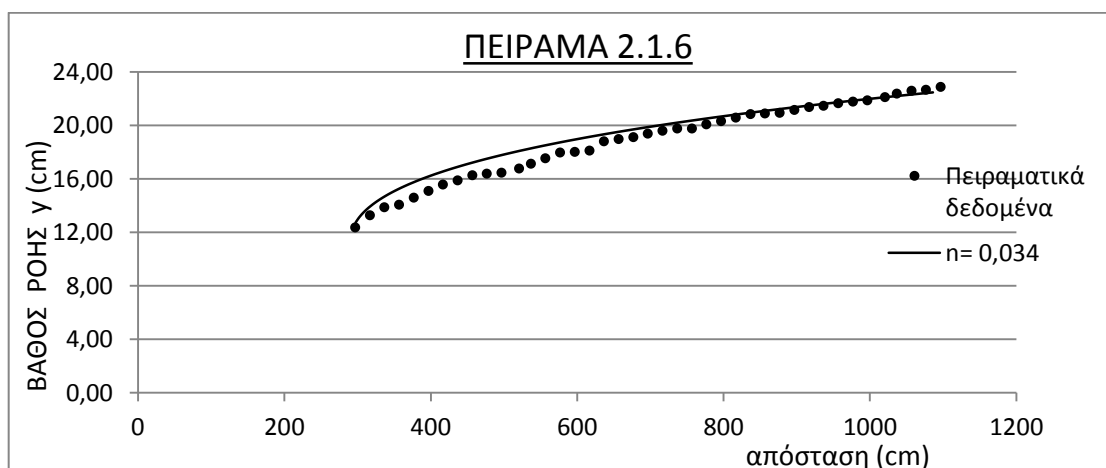
Διάγραμμα 46: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 47: $Q=40$ l/s

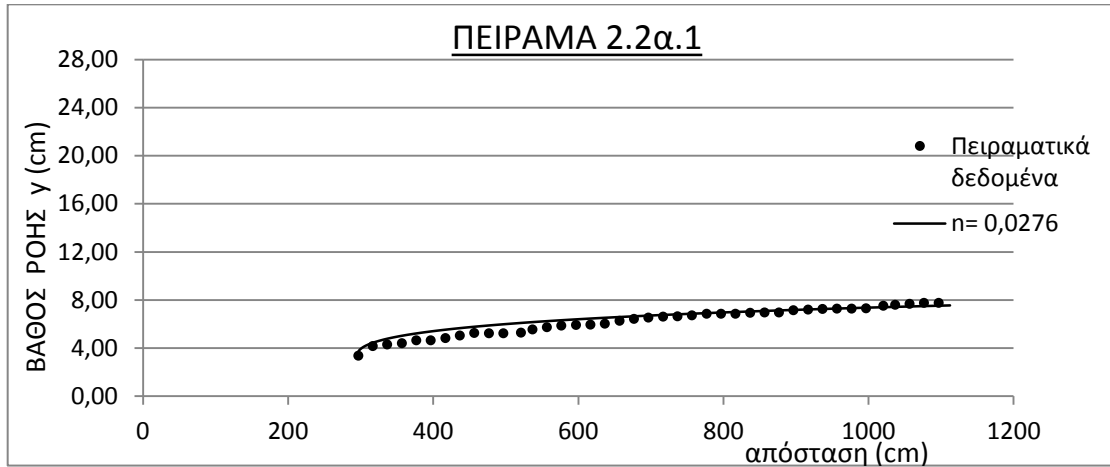


Διάγραμμα 48: $Q=50$ l/s

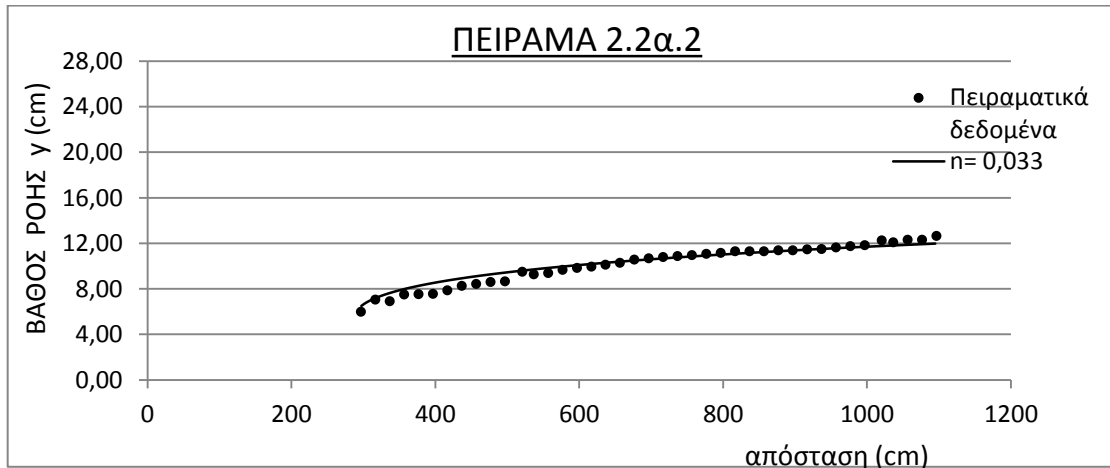


Διάγραμμα 49: $Q=60$ l/s

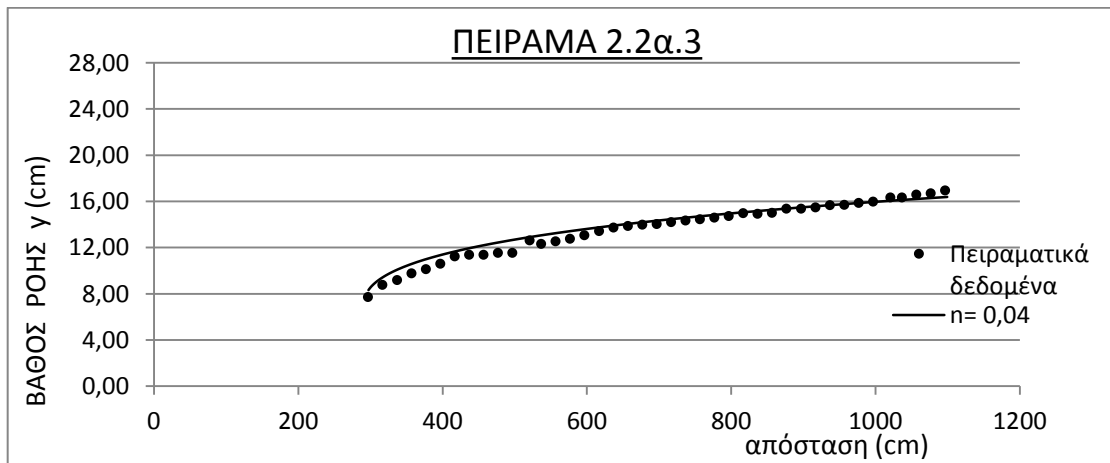
Διάταξη 2.2α



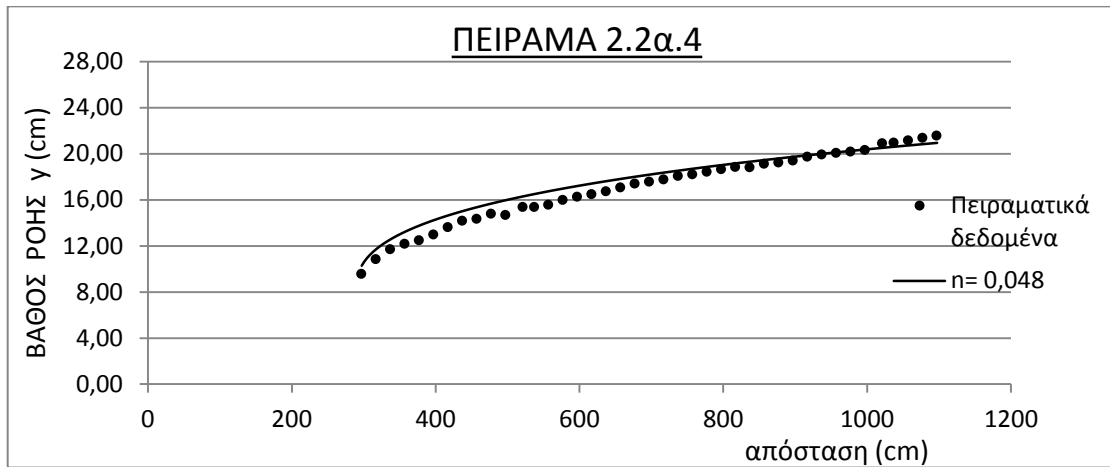
Διάγραμμα 50: $Q=10$ l/s



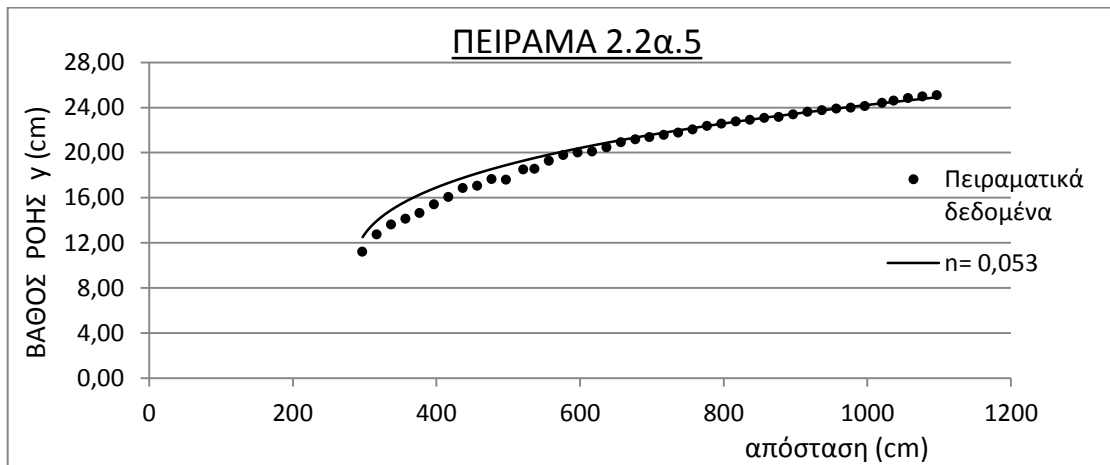
Διάγραμμα 51: $Q=20$ l/s



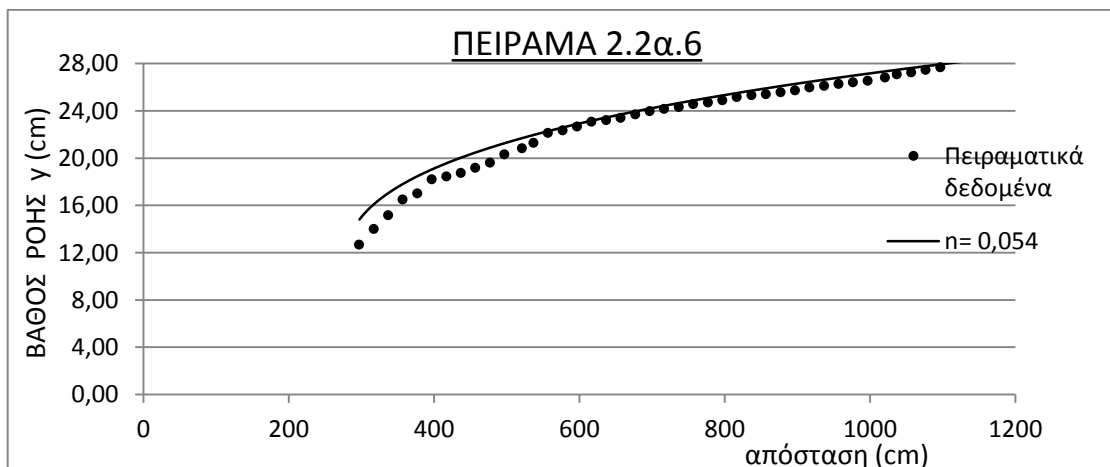
Διάγραμμα 52: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 53: $Q=40$ l/s

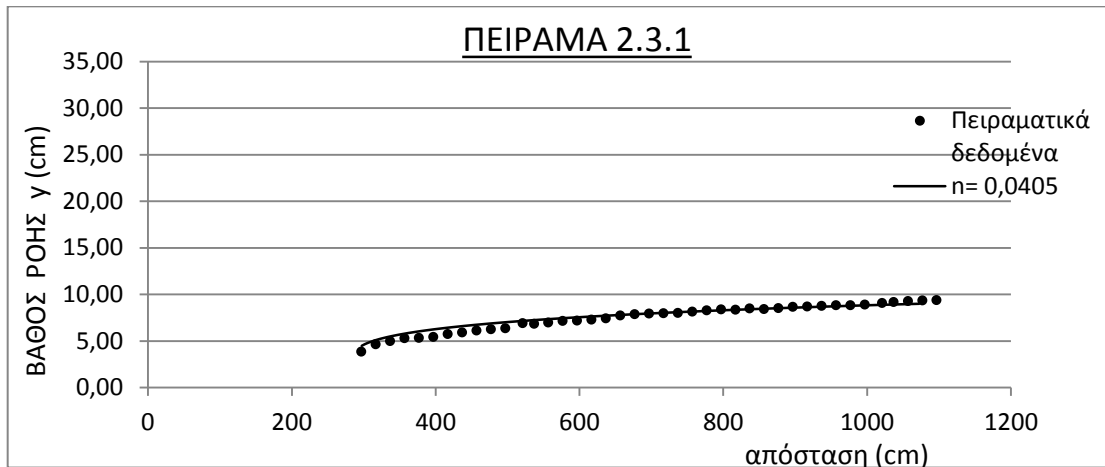


Διάγραμμα 54: $Q=50$ l/s

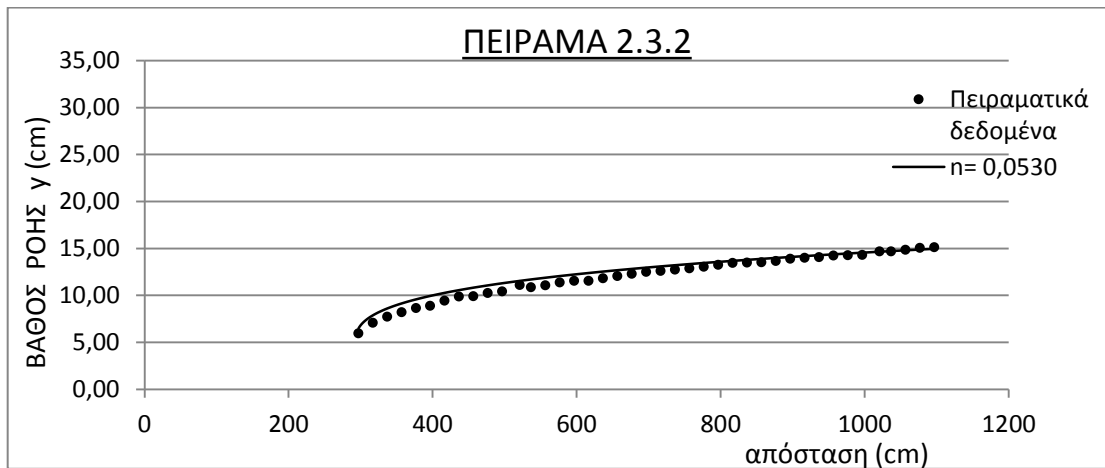


Διάγραμμα 55: $Q=60$ l/s

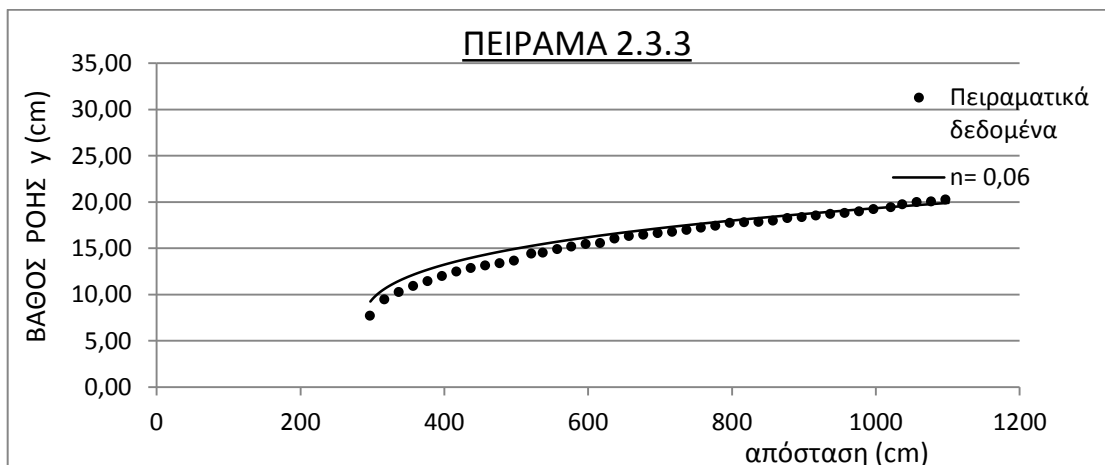
Διάταξη 2.3



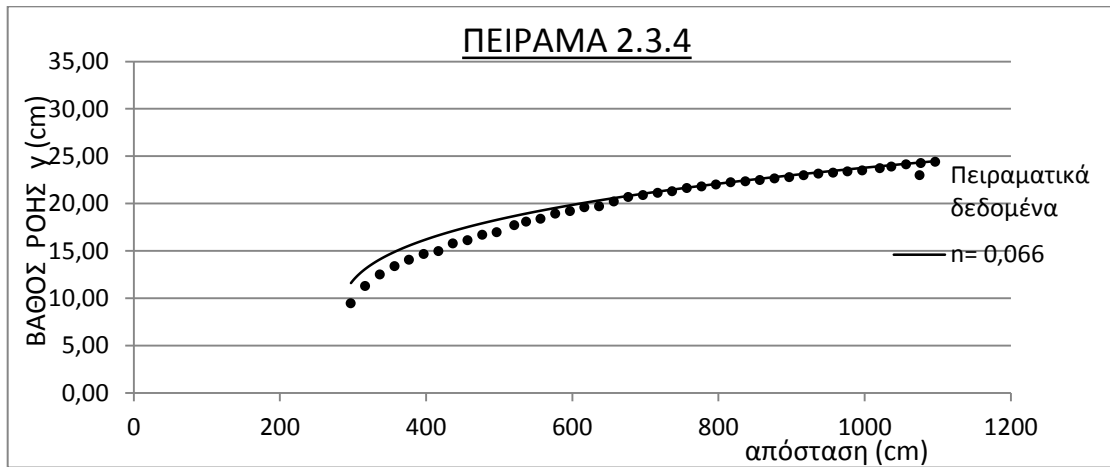
Διάγραμμα 56: $Q=10$ l/s



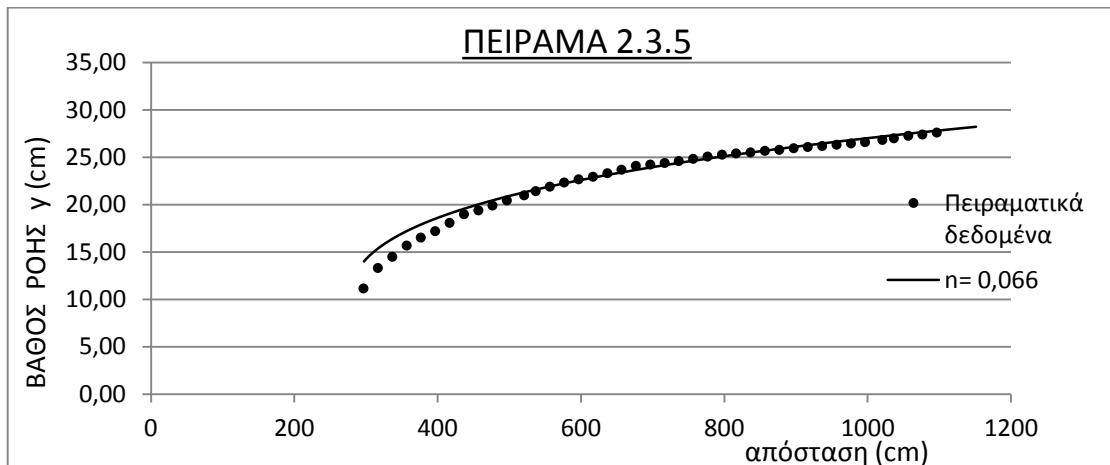
Διάγραμμα 57: $Q=20$ l/s



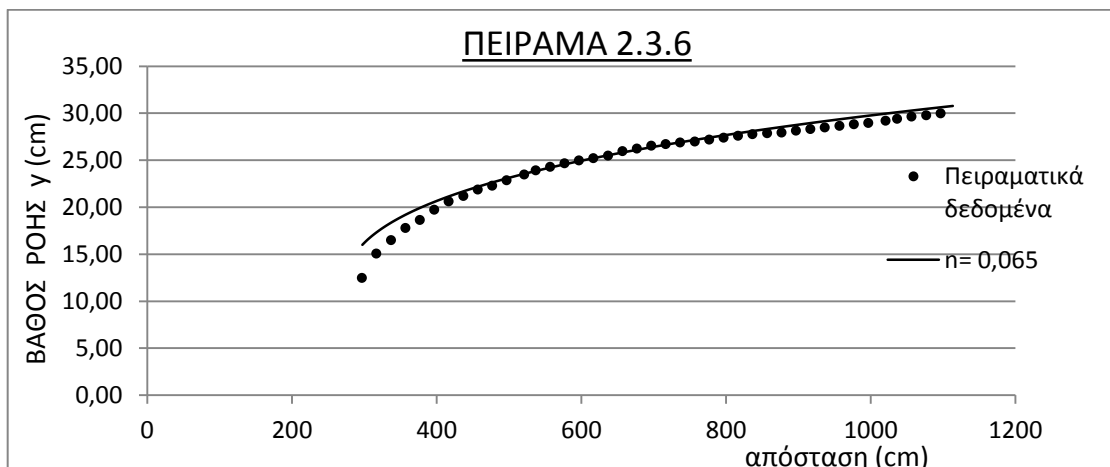
Διάγραμμα 58: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 59: $Q=40$ l/s

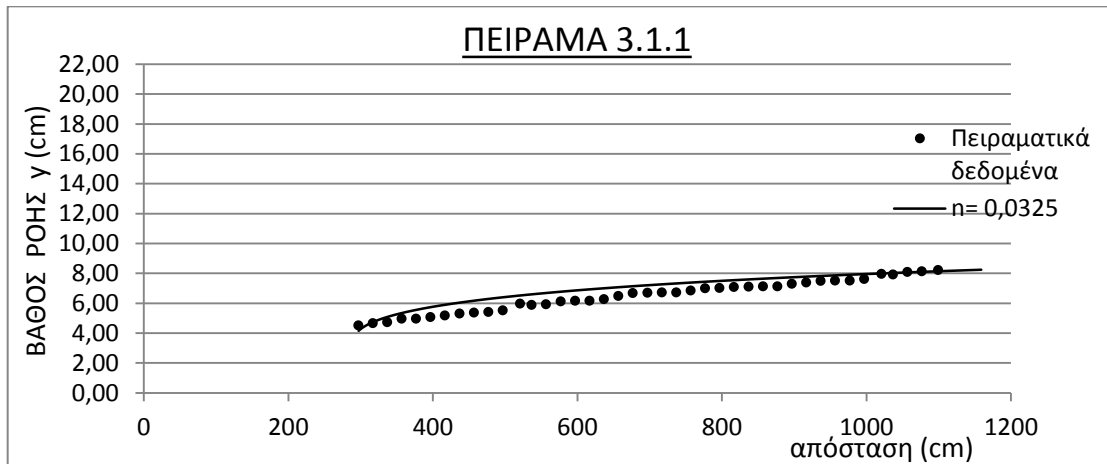


Διάγραμμα 60: $Q=50$ l/s

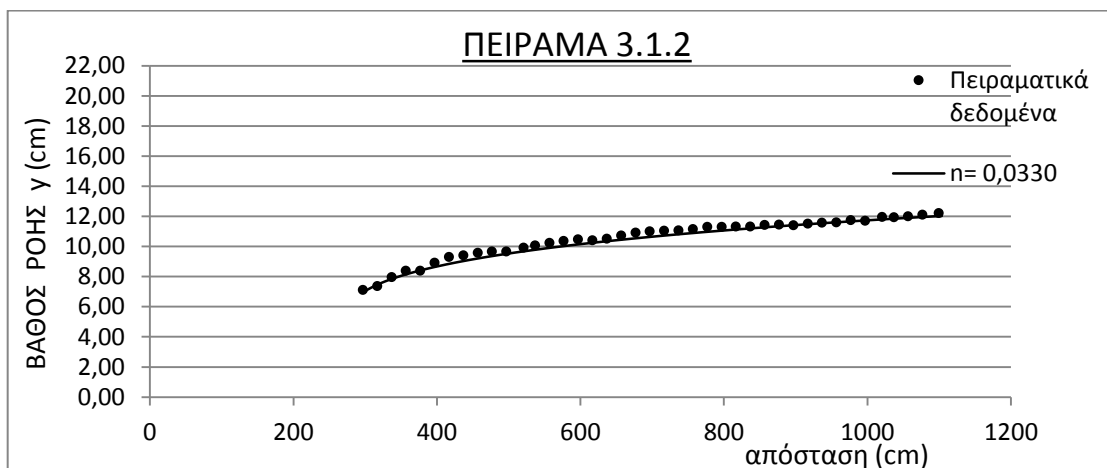


Διάγραμμα 61: $Q=60$ l/s

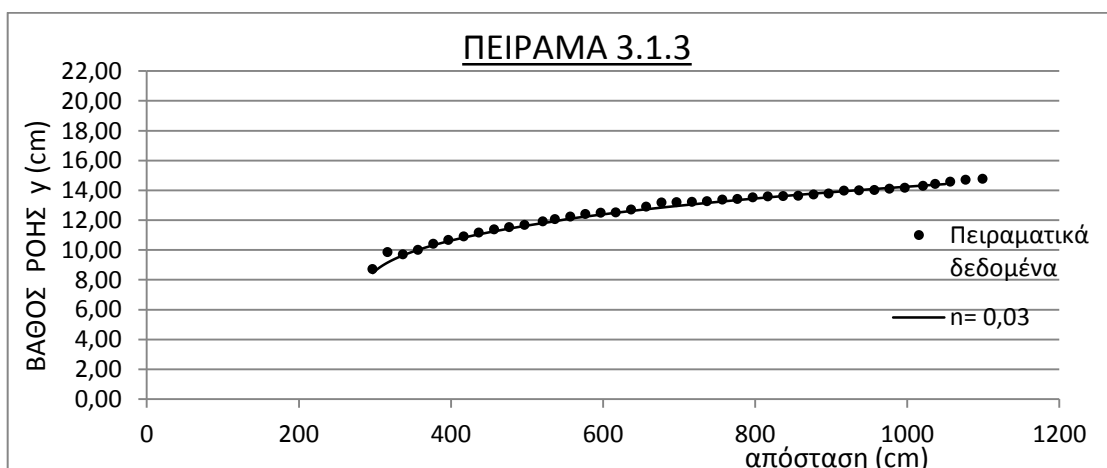
Διάταξη 3.1



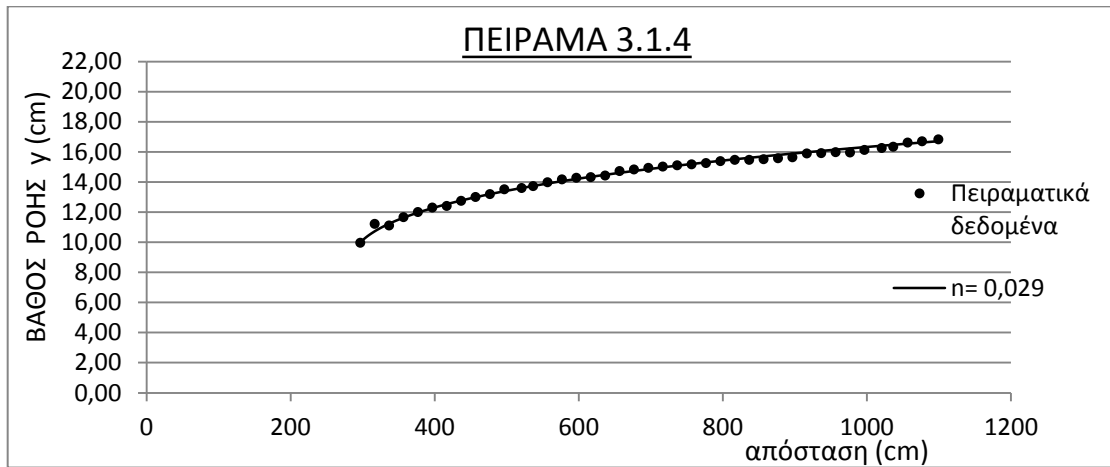
Διάγραμμα 62: $Q=10$ l/s



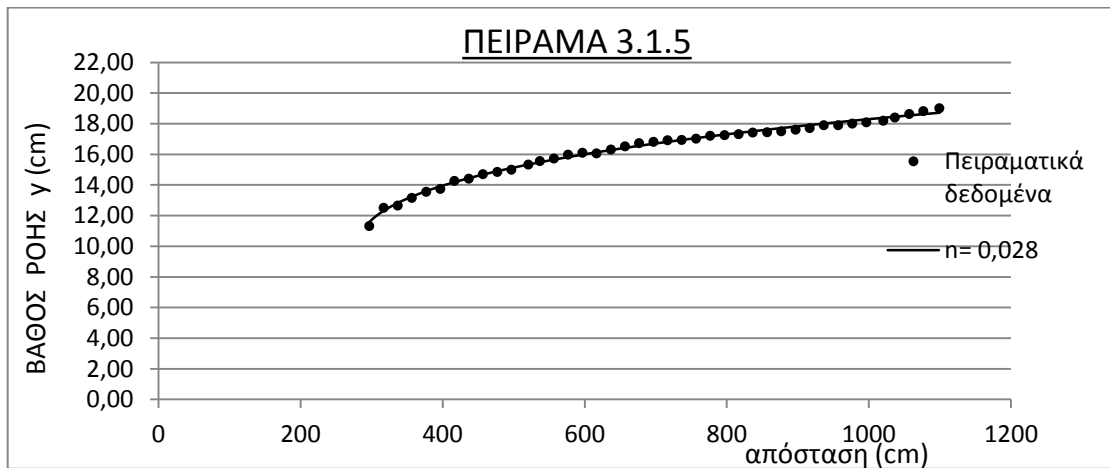
Διάγραμμα 63: $Q=20$ l/s



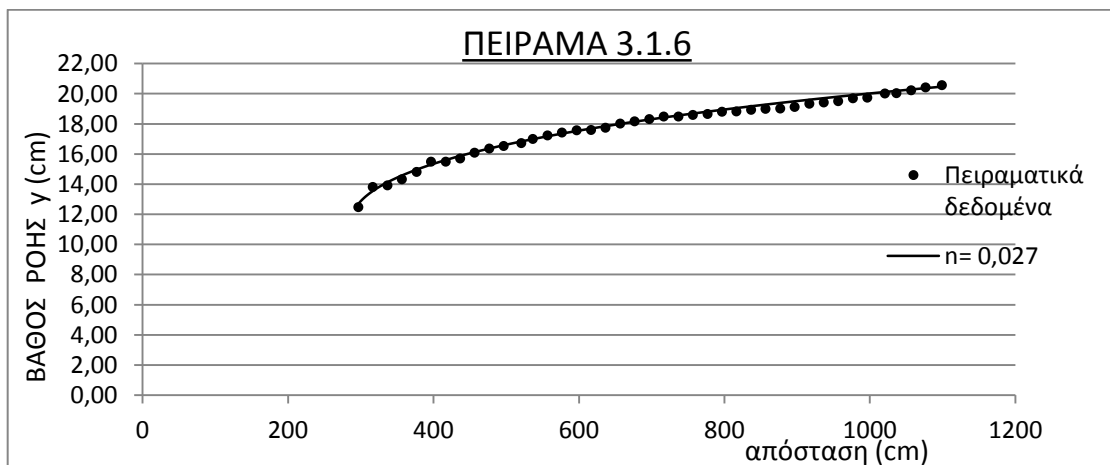
Διάγραμμα 64: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 65: $Q=40$ l/s

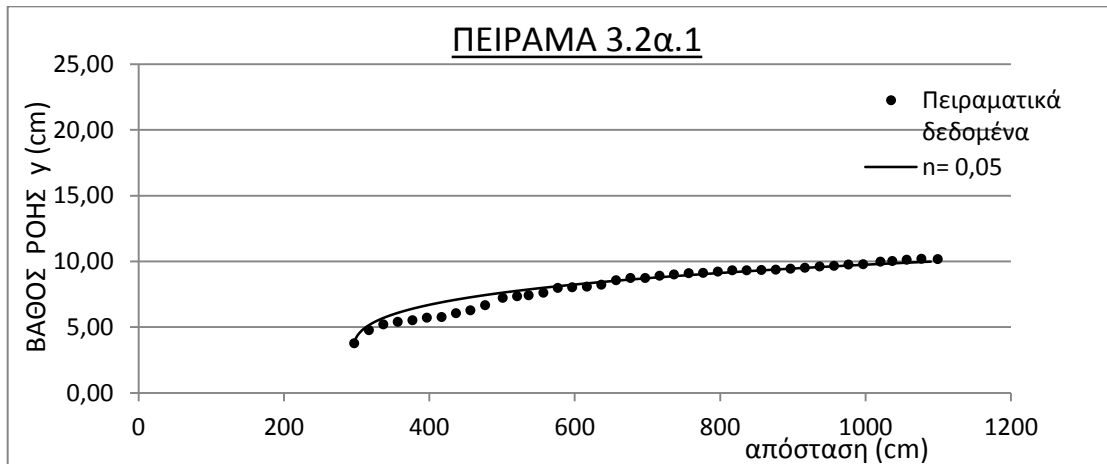


Διάγραμμα 66: $Q=50$ l/s

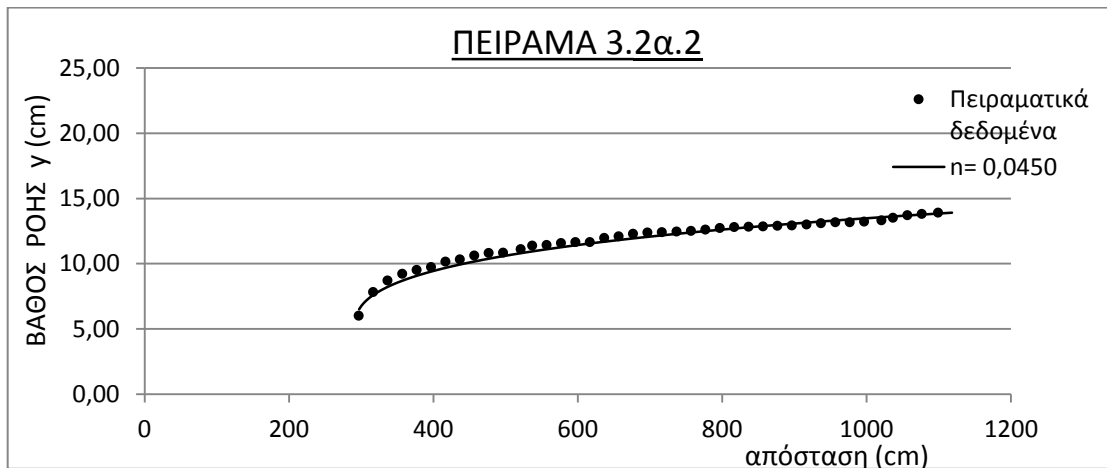


Διάγραμμα 67: $Q=60$ l/s

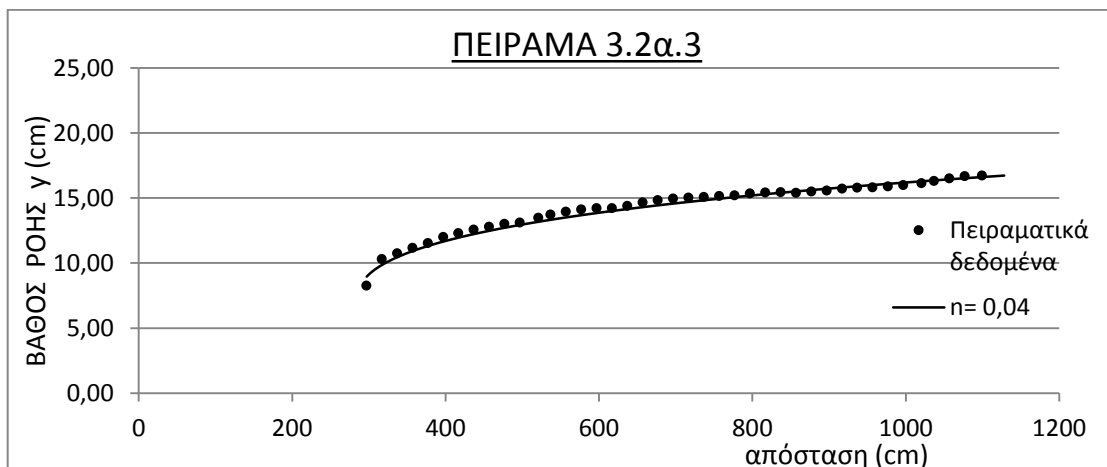
Διάταξη 3.2α



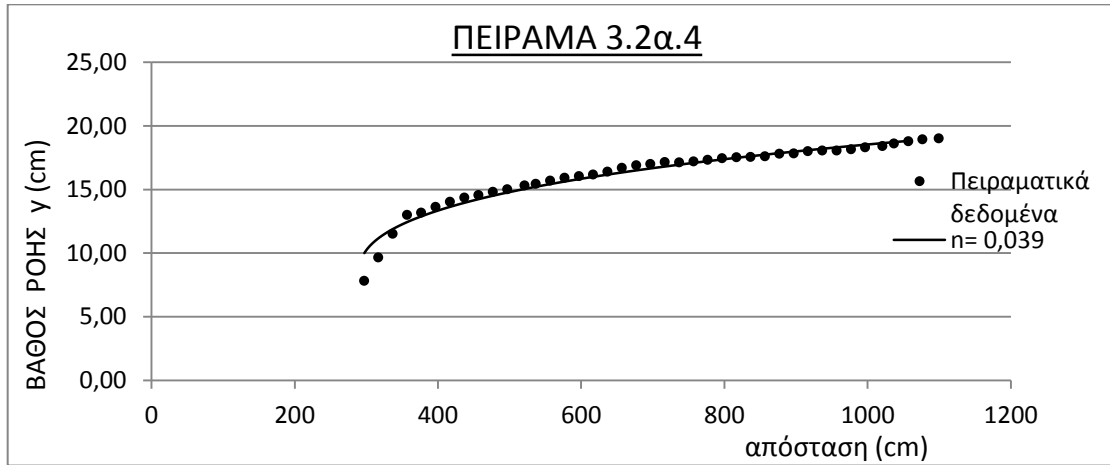
Διάγραμμα 68: $Q=10$ l/s



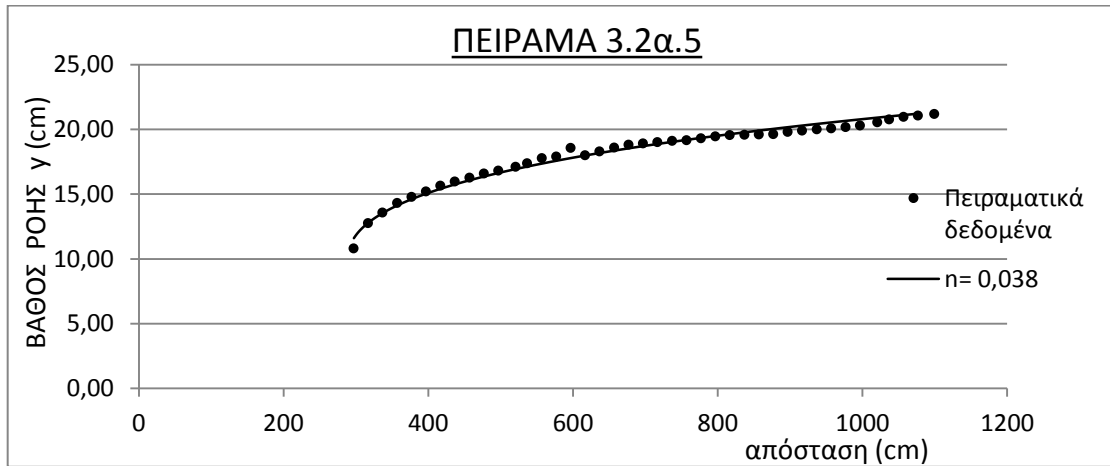
Διάγραμμα 69: $Q=20$ l/s



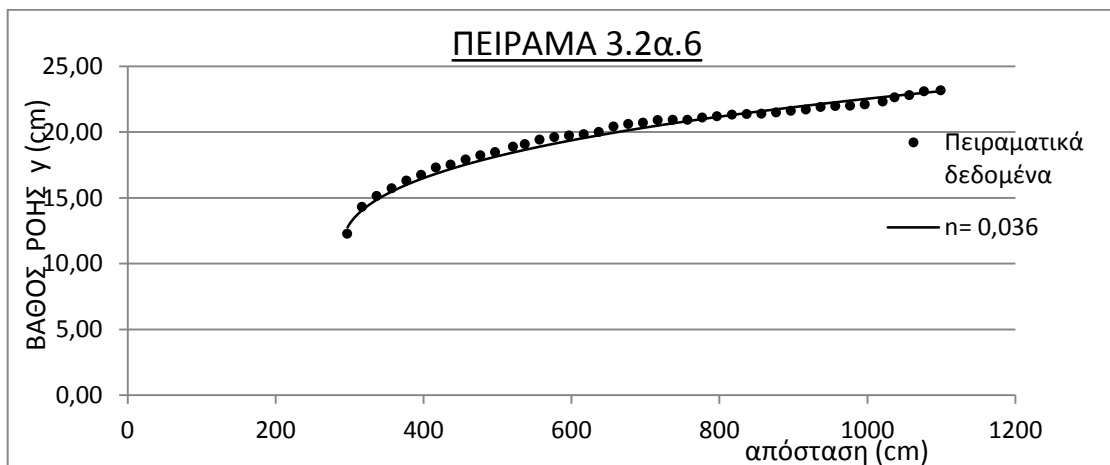
Διάγραμμα 70: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 71: $Q=40$ l/s

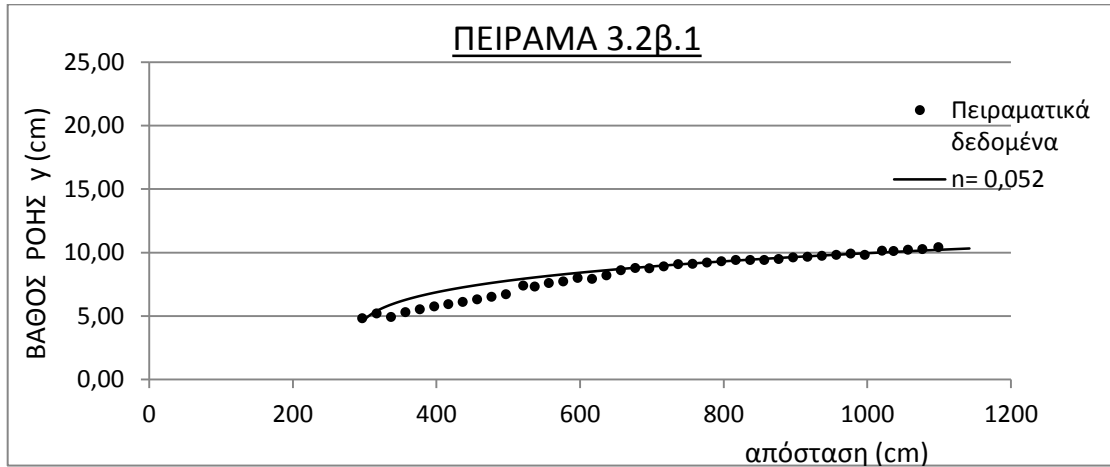


Διάγραμμα 72: $Q=50$ l/s

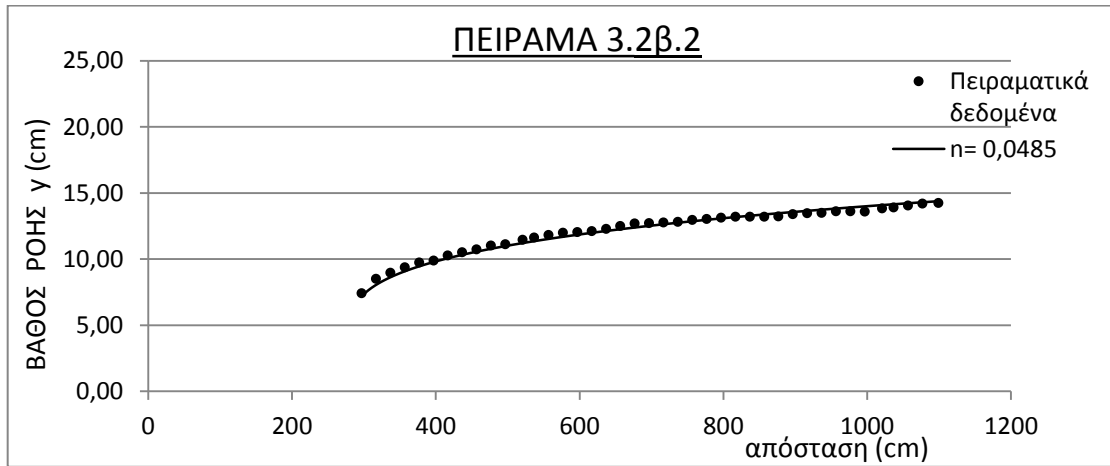


Διάγραμμα 73: $Q=60$ l/s

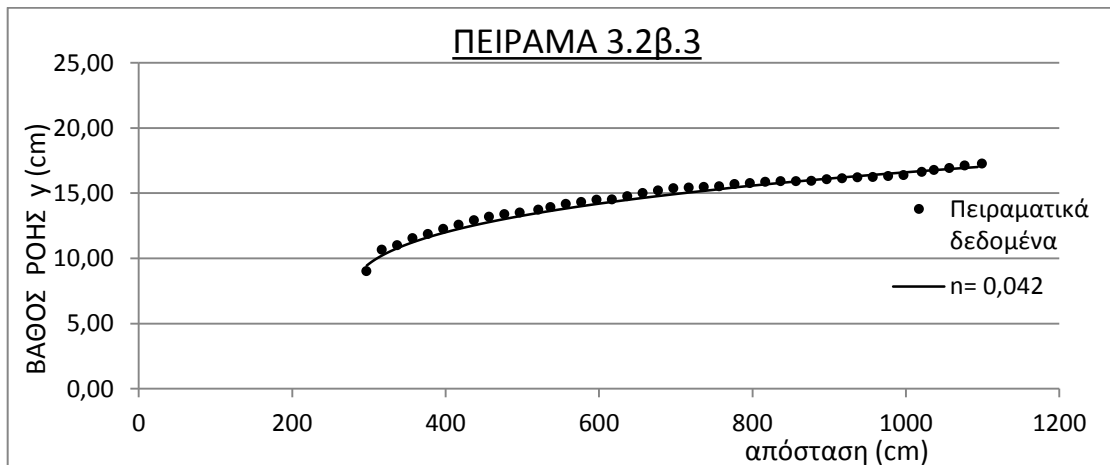
Διάταξη 3.2β



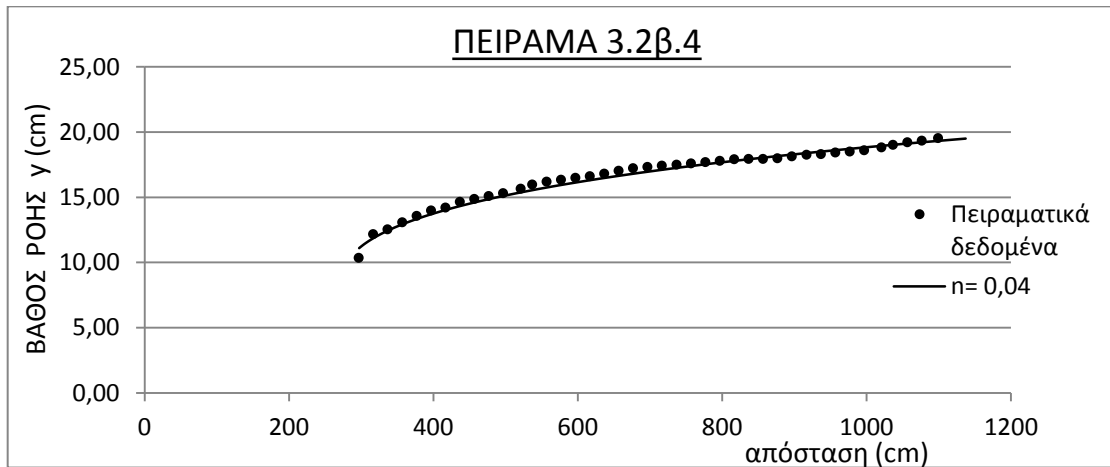
Διάγραμμα 74: $Q=10$ l/s



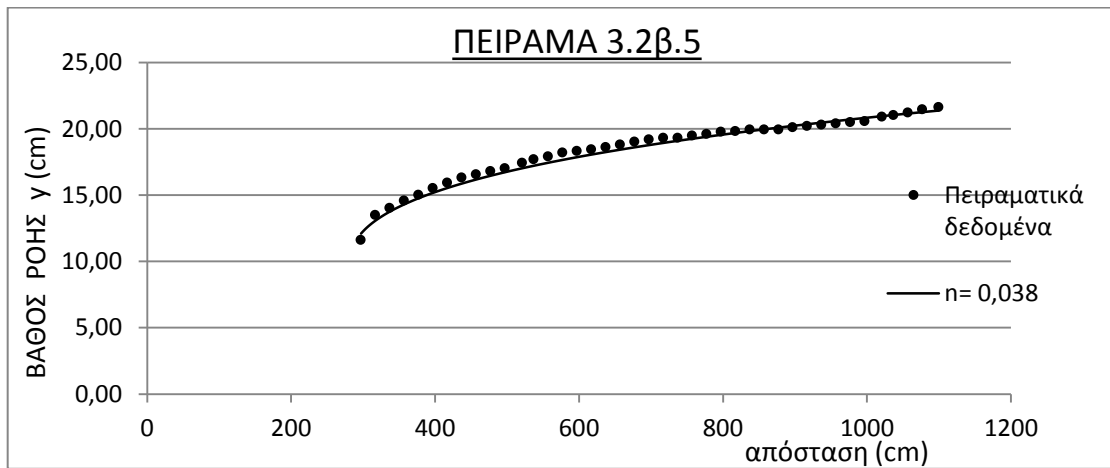
Διάγραμμα 75: $Q=20$ l/s



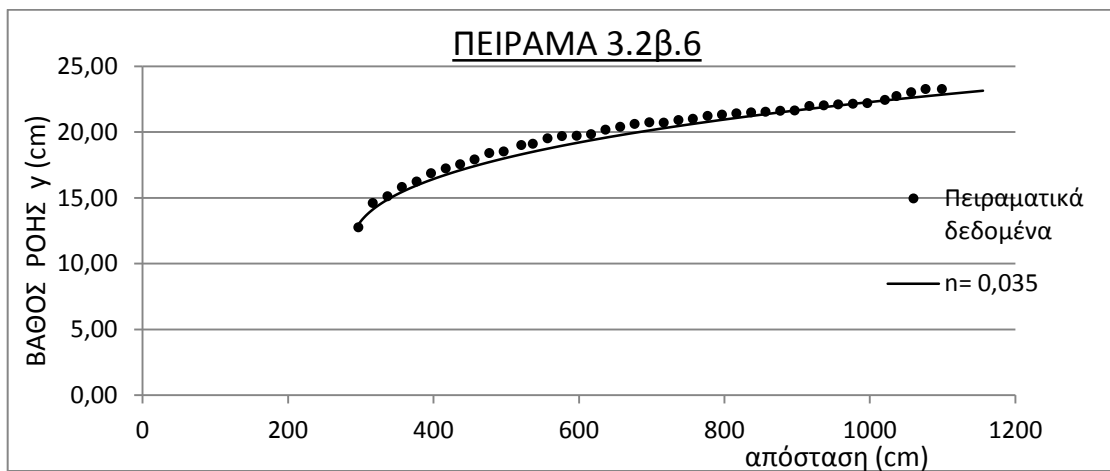
Διάγραμμα 76: $Q=30$ l/s



Διάγραμμα 77: $Q=40$ l/s



Διάγραμμα 78: $Q=50$ l/s



Διάγραμμα 79 : $Q=60$ l/s

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Πίνακες αποτελεσμάτων

Πίνακας 17: Υπολογιζόμενα μεγέθη

	Q (l/s)	μέσο γ (m)	γ _ο (m)	n _b	Re	f _b	k _s (mm)	F	I*	θ
Διάταξη 1.1	10	0,053	0,072	0,018	60056	0,069	9,9	7,81	0,76	0,020
	20	0,077	0,112	0,018	111204	0,060	10,4	9,56	0,52	0,020
	30	0,097	0,138	0,017	157305	0,047	7,1	10,77	0,41	0,020
	40	0,113	0,167	0,017	200544	0,044	7,1	11,66	0,36	0,020
	50	0,129	0,195	0,017	239866	0,043	7,6	12,50	0,31	0,020
	60	0,138	0,210	0,015	280873	0,036	4,6	12,96	0,29	0,020
Διάταξη 1.2α	10	0,056	0,086	0,024	59466	0,123	31,0	5,60	0,72	0,040
	20	0,083	0,130	0,023	109118	0,097	30,3	6,97	0,48	0,040
	30	0,101	0,165	0,022	155511	0,083	27,2	7,71	0,40	0,040
	40	0,119	0,200	0,022	197227	0,079	28,9	8,41	0,34	0,040
	50	0,134	0,233	0,022	236897	0,076	30,3	8,95	0,30	0,040
	60	0,147	0,256	0,021	274788	0,067	25,4	9,40	0,27	0,040
Διάταξη 1.3	10	0,061	0,102	0,032	58528	0,201	68,7	4,07	0,66	0,080
	20	0,084	0,148	0,028	108792	0,142	58,7	4,89	0,47	0,080
	30	0,100	0,193	0,028	156067	0,131	61,5	5,35	0,40	0,080
	40	0,122	0,229	0,027	195372	0,118	63,0	5,98	0,33	0,080
	50	0,138	0,262	0,027	234453	0,107	60,2	6,37	0,29	0,080
	60	0,147	0,295	0,026	274961	0,102	58,8	6,59	0,27	0,080
Διάταξη 2.1	10	0,051	0,071	0,018	60385	0,065	8,4	5,94	1,00	0,026
	20	0,083	0,137	0,025	109331	0,113	39,6	4,67	1,00	0,041
	30	0,109	0,204	0,031	151810	0,154	86,1	4,06	1,00	0,055
	40	0,129	0,282	0,037	191969	0,212	156,8	3,74	1,00	0,064
	50	0,156	0,365	0,043	223969	0,272	253,5	3,40	1,00	0,078
	60	0,176	0,439	0,047	256022	0,309	328,0	3,29	0,97	0,089
Διάταξη 2.2α	10	0,055	0,102	0,031	59525	0,197	61,3	3,95	1,00	0,055
	20	0,093	0,148	0,040	106001	0,275	153,3	3,05	1,00	0,093
	30	0,123	0,193	0,051	146195	0,413	304,0	2,65	1,00	0,123
	40	0,156	0,229	0,065	179308	0,618	532,6	2,37	0,99	0,157
	50	0,181	0,262	0,075	210755	0,779	728,3	2,36	0,93	0,184
	60	0,202	0,295	0,079	241539	0,829	842,8	2,38	0,88	0,191

	Q (l/s)	μέσο γ (m)	γ _ο (m)	n _b	Re	f _b	k _s (mm)	F	I*	θ
Διάταξη 2.3	10	0,066	0,132	0,047	57537	0,425	166,9	2,48	1,00	0,132
	20	0,105	0,263	0,066	102332	0,728	404,6	1,96	1,00	0,211
	30	0,140	0,397	0,080	139950	0,961	639,1	1,70	1,00	0,280
	40	0,169	0,542	0,092	173553	1,203	875,7	1,65	0,94	0,354
	50	0,193	0,653	0,095	205027	1,238	1016,9	1,68	0,87	0,381
	60	0,212	0,752	0,097	236076	1,228	1110,5	1,70	0,83	0,390
Διάταξη 3.1	10	0,064	0,101	0,037	57987	0,272	103,25	2,909	0,999	0,073
	20	0,097	0,186	0,040	104946	0,275	158,98	2,578	0,802	0,110
	30	0,117	0,233	0,038	148504	0,227	154,68	3,296	0,682	0,111
	40	0,134	0,282	0,037	189493	0,213	163,43	3,566	0,598	0,111
	50	0,152	0,326	0,037	226424	0,200	171,13	3,834	0,528	0,111
	60	0,165	0,365	0,036	262870	0,187	170,85	4,027	0,485	0,111
Διάταξη 3.2α	10	0,07	0,152	0,058	56880	0,649	246,98	2,036	0,926	0,183
	20	0,100	0,233	0,055	104045	0,521	298,62	2,2	0,804	0,220
	30	0,125	0,289	0,051	145493	0,414	308,72	2,323	0,641	0,221
	40	0,134	0,354	0,051	189369	0,395	317,9	2,43	0,597	0,221
	50	0,160	0,415	0,051	221757	0,383	368,54	2,711	0,5	0,221
	60	0,177	0,46	0,050	255482	0,348	372,3	2,882	0,452	0,221
Διάταξη 3.2β	10	0,076	0,156	0,061	55755	0,700	284,49	1,948	0,918	0,191
	20	0,108	0,246	0,061	101546	0,609	365,74	2,169	0,74	0,221
	30	0,131	0,300	0,055	143051	0,460	355,69	2,398	0,609	0,221
	40	0,149	0,362	0,053	182137	0,422	375,49	2,599	0,536	0,221
	50	0,166	0,415	0,052	218426	0,386	385,14	2,775	0,481	0,221
	60	0,180	0,449	0,049	253670	0,329	358,35	2,911	0,444	0,221

Πίνακας 18: Κρίσιμα βάρη ροής

γ _κ (cm)	Q (l/sec)
3,4	10
5,5	20
7,2	30
8,7	40
10,1	50
11,4	60

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Φωτογραφίες πειραμάτων

Διάταξη 1.1



Εικόνα 16: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.1.1



Εικόνα 17: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.1.2



Εικόνα 18: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.1.3



Εικόνα 19: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.1.4



Εικόνα 20: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.1.5



Εικόνα 21: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.1.6

Διάταξη 1.2α



Εικόνα 22: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.2α.1



Εικόνα 23: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.2α.2



Εικόνα 24: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.2α.3



Εικόνα 25: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.2α.4



Εικόνα 26: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.2α.5



Εικόνα 27: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.2α.6

Διάταξη 1.3



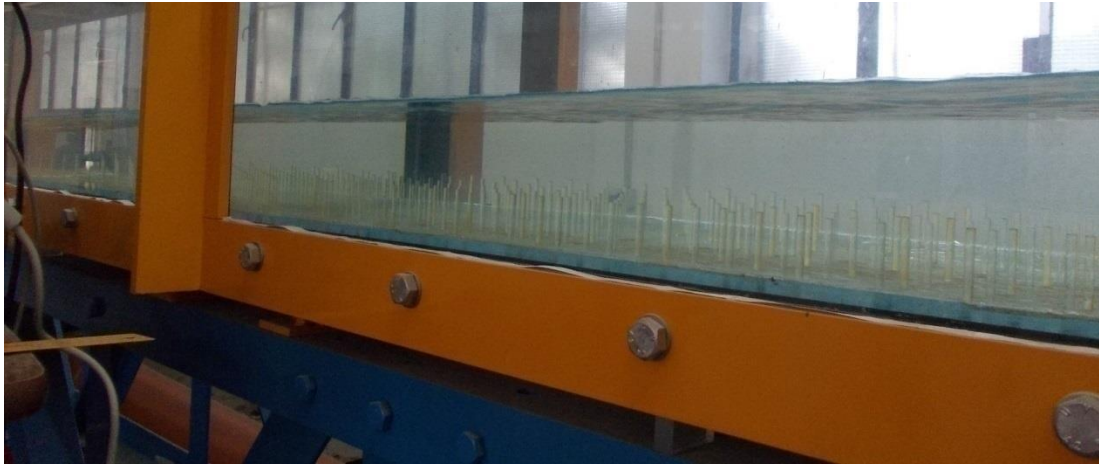
Εικόνα 28: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.3.1



Εικόνα 29: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.3.2



Εικόνα 30: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.3.3



Εικόνα 31: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.3.4

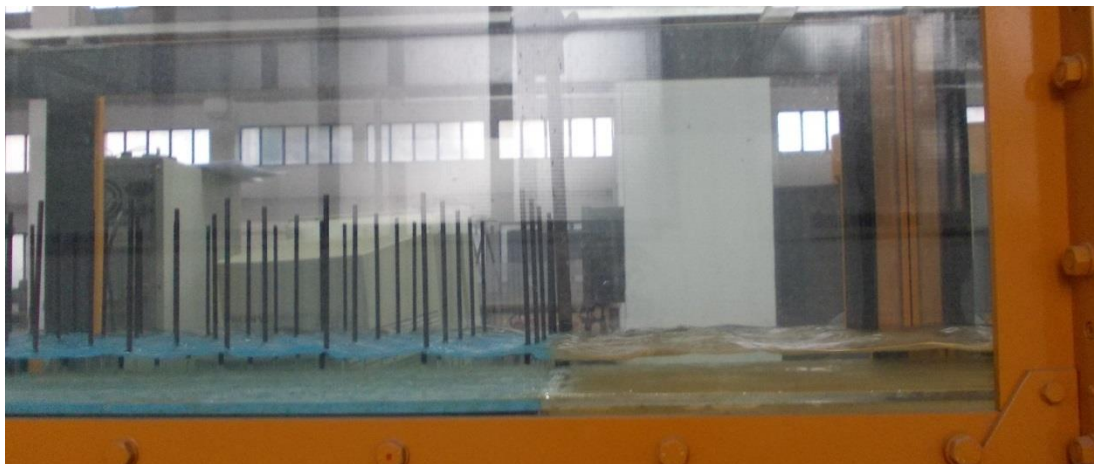


Εικόνα 32: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.3.5



Εικόνα 33: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 1.3.6

Διάταξη 2.1



Εικόνα 34: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.1.1



Εικόνα 35: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.1.2



Εικόνα 36: : Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.1.3



Εικόνα 37: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.1.4

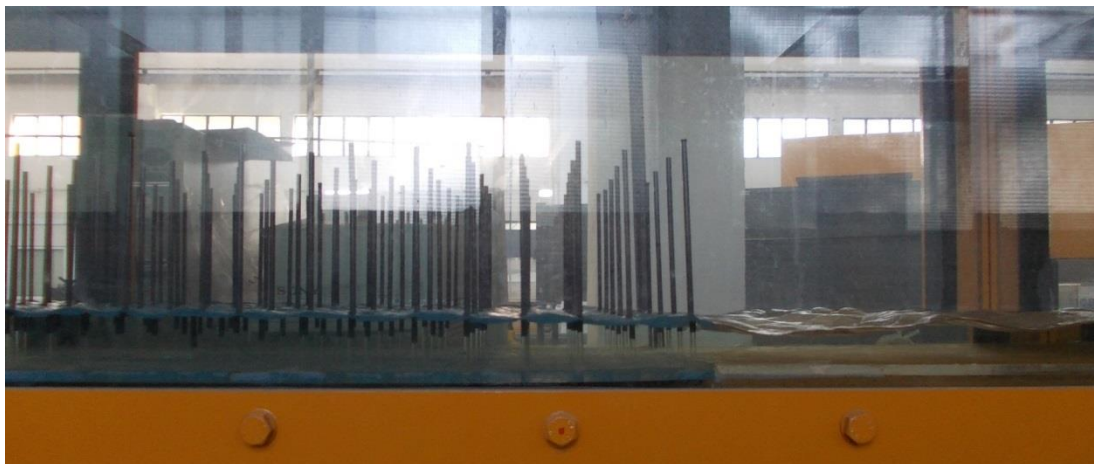


Εικόνα 38: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.1.5



Εικόνα 39: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.1.6

Διάταξη 2.2α



Εικόνα 40: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.2α.1



Εικόνα 41: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.2α.2



Εικόνα 42: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.2α.3



Εικόνα 43: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.2α.4

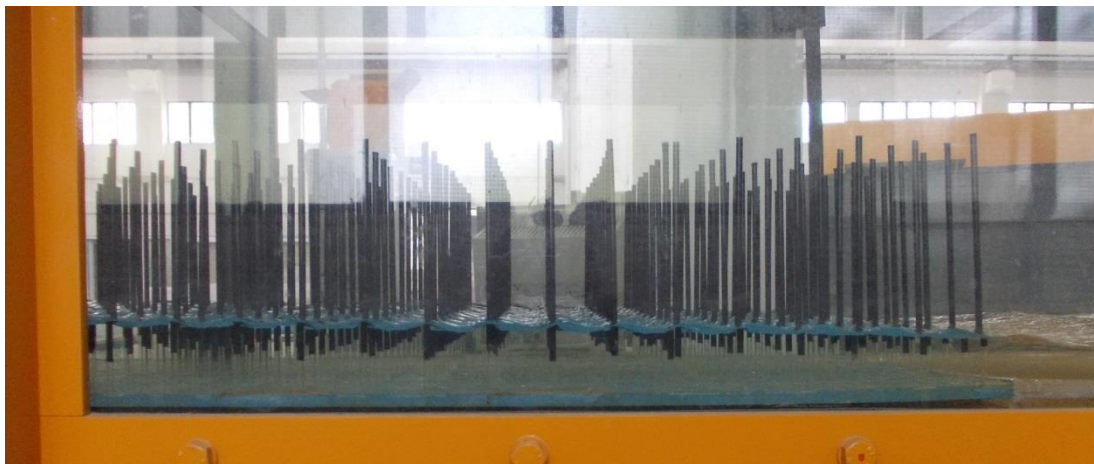


Εικόνα 44: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.2α.5



Εικόνα 45: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.2α.6

Διάταξη 2.3



Εικόνα 46: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.3.1



Εικόνα 47: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.3.2



Εικόνα 48: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.3.3



Εικόνα 49: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.3.4



Εικόνα 50: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.3.5



Εικόνα 51: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 2.3.6

Διάταξη 3.1



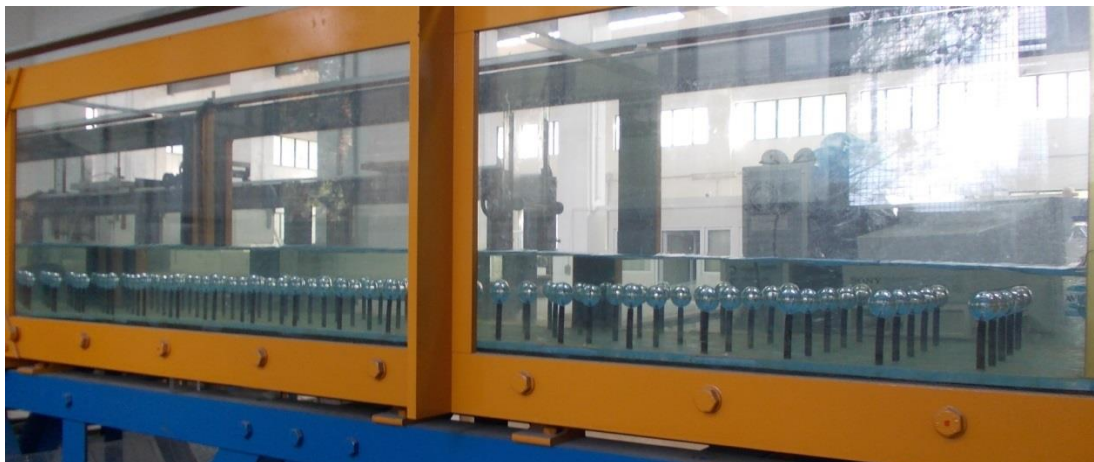
Εικόνα 52: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.1.1



Εικόνα 53: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.1.2



Εικόνα 54: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.1.3



Εικόνα 55: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.1.4



Εικόνα 56: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.1.5

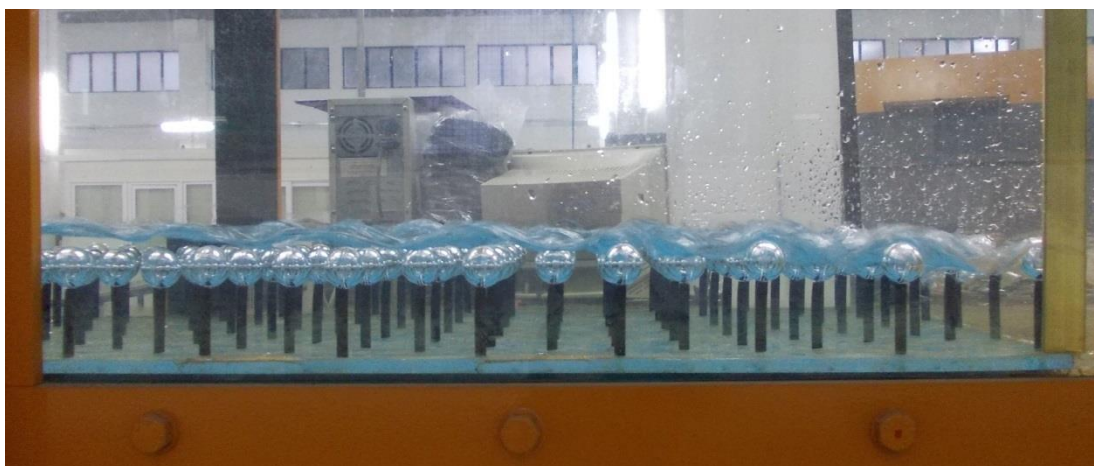


Εικόνα 57: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.1.6

Διάταξη 3.2α



Εικόνα 58: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2α.1



Εικόνα 59: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2α.2



Εικόνα 60: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2α.3



Εικόνα 61: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2α.4

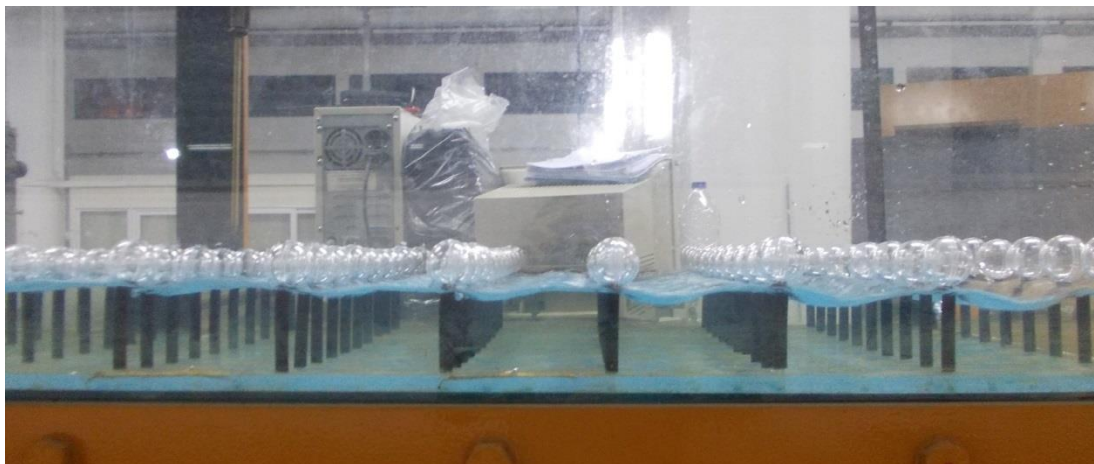


Εικόνα 62: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2α.5



Εικόνα 63: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2α.6

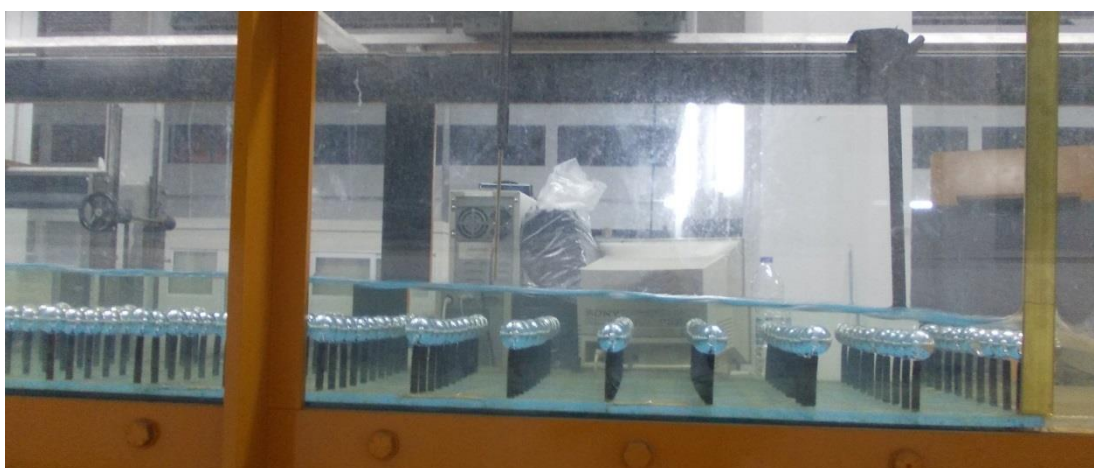
Διάταξη 3.2β



Εικόνα 64: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2β.1



Εικόνα 65: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2β.2



Εικόνα 66: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2β.3



Εικόνα 67: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2β.4



Εικόνα 68: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2β.5



Εικόνα 69: Φωτογραφική λήψη του πειράματος 3.2β.6