

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ (Τ.Ε.Ι.) ΔΥΤΙΚΗΣ  
ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ  
ΔΙΑΤΟΜΩΝ- ΥΛΙΚΩΝ- ...  
COMPUTATION AND STUDY OF OPEN CHANNELS OF VARIOUS  
DIAMETERS- MATERIALS- ETC.*



**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**  
*ΔΡ ΚΑΚΑΒΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Α.*  
*ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Τ.Ε.Ι.*

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ**  
*ΦΙΛΙΚΑΣ ΜΑΡΙΟΣ*  
*ΨΑΡΙΩΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ*  
*ΤΣΑΓΓΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ .....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ- ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο .....	5
Βασικές Εννοιες .....	5
1.1 Γενικά .....	5
1.2 Βασικές Παράμετροι .....	6
1.4 Μέθοδοι Αναλύσεως .....	9
1.5 Ειδική Ενέργεια .....	13
1.6 Διάγραμμα Παροχής .....	16
1.7 Ειδική δύναμη .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο .....	19
2. Απώλειες Ενέργειας .....	19
2.1 Γενικά Περί Απωλειών Ενέργειας .....	19
2.2 Σχέση Chezy .....	19
2.3 Σχέση Kutter .....	20
2.4 Σχέση Bazin .....	21
2.5 Σχέση Powell .....	22
2.6 Σχέση Manning .....	23
2.6.1 Εκτέλεση συντελεστή Manning για φυσικά ρεύματα .....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο .....	38
3. Συνηθείς Διατομές .....	38
3.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	38
3.2 Κυκλική διατομή .....	39
3.3 Δίδυμη κυκλική διατομή .....	42
3.4 Κλειστή ορθογωνική διατομή .....	43
3.5 Ανοικτή ορθογωνική διατομή .....	44
3.6 Δίδυμη κλειστή ορθογωνική διατομή .....	44
3.7 Δίδυμη ανοικτή ορθογωνική διατομή .....	45
3.8 Κλειστή τραπεζοειδής διατομή .....	45
3.9 Ανοικτή τραπεζοειδής διατομή .....	46
3.10 Τριγωνική διατομή .....	47

3.11	Ανεστραμμένη τραπεζοειδής διατομή .....	48
3.12	Πρισματική διατομή .....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο	.....	49
4.	Ειδικες Διατομες .....	49
4.1	Γενικά .....	49
4.2	Ωοειδής Διατομή .....	51
4.3	Πεπλατυσμένη Ωοειδής Διατομή .....	54
4.4	Σκουφοειδής διατομή .....	58
4.5	Απλή στοματοειδής διατομή .....	63
4.6	Κανονική Στοματοειδής Διατομή .....	68
4.8	Κανονική Πεταλοειδής Διατομή .....	72
4.9	Παραβολική Διατομή .....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο	.....	78
5.	Οπες - Θυροφραγματα .....	78
5.1	Γενικά περί οπών – Θυροφραγμάτων.....	78
5.2	Θεμελιώδεις εξισώσεις .....	79
5.3	Τροχιά φλέβας .....	80
5.4	Συντελεστή εκροής .....	81
5.5	Βυθισμένες οπές .....	83
5.6	Μη ελεύθερη συστολή.....	85
5.7	Θυροφράγματα .....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	.....	88
6.	ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΕΣ .....	88
6.1	Γενικά Περί Υπερχειλιστών .....	88
6.2	Βασικές Αρχές Λειτουργίας .....	89
6.3	Ορθογωνικοί υπερχειλιστές λεπτής στέψης .....	92
6.4	Τριγωνικοί υπερχειλιστές .....	93
6.5	Τραπεζοειδείς υπερχειλιστές .....	95
6.6	Βυθισμένοι υπερχειλιστές λεπτής στέψης.....	96
6.7	Υπερχειλιστές ευρείας στέψης .....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο	.....	98
7.	Αποχέτευση οδών.....	98

7.1 Εισαγωγή .....	98
7.2 Επιφανειακή Απορροή.....	99
7.3 Ρείθρα Σε Πεζοδρόμια.....	100
7.3.1. Απλό τριγωνικό ρείθρο.....	100
7.3.2. Σύνθετο ρείθρο.....	101
7.3.3. Παραβολικό ρείθρο.....	102
7.4 Ρείθρα Χωρίς Πεζοδρόμια.....	103
7.4.1. Ρείθρο τύπου "V" .....	103
7.4.2. Ρείθρο νησίδας τύπου "V" .....	105
7.4.3. Κυκλικό ρείθρο.....	106
7.5 Σχεδίαση Υδροσυλλογών Σε Καμπύλες.....	107
7.5.1. Σχάρες.....	108
7.5.2. Στόμια.....	118
7.5.3. Σχάρες με στόμια.....	120
7.5.4. Σχαρωτοί αγωγοί.....	120
7.6 Σχεδίαση υδροσυλλογών σε καμπές.....	121
7.6.1. Σχάρες.....	121
7.6.2. Στόμια.....	123
7.6.3. Σχάρες με στόμια.....	128
7.6.4. Σχαρωτοί αγωγοί.....	129
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 .....	131
8. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ.....	131
(TechnoLogismiki works 2015 demo) .....	131
8.1. Βασικές Αρχές Υδραυλικής .....	131
8.1.1. Ροή με ελεύθερη επιφάνεια.....	131
8.2. Διοδευση Πλημμυρων .....	135
8.2.1. Διόδευση κύματος σε ποτάμι.....	135
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο .....	139
1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	139
1.1. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	139
1.2. ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	139

### **ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ**

Έχοντας ολοκληρώσει πλέον την Πτυχιακή Εργασία μας, αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε τον Εισηγητή και Επιβλέπων της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, Δρ. Παναγιώτη Κακαβά, Αν. Καθηγητή Τ.Ε.Ι. για την πολύτιμη βοήθεια που μας πρόσφερε κατά την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας, τη συνεχή καθοδήγηση του και την υπομονή του.

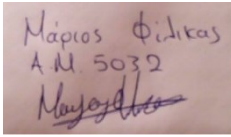
Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Δρ. Διονυσία - Πηνελόπη Κοντονή, Δρ. Πολίτικο Μηχανικό και Αν. καθηγήτρια Τ.Ε.Ι. και τον Δρ. Νικόλαο Φουρνιώτη, Καθηγητή Τ.Ε.Ι. για

Πάτρα, Ιανουάριος 2016  
**Φίλικας Μάριος**  
**Ψαριώτης Αλέξανδρος**  
**Τσάγγος Βασίλης**

**Υπευθινη δήλωση σπουδαστων:** Οι κατωθι υπογεγραμμενοι σπουδαστες εχουν επιγνωση των συνεπειων του Νομου περι λογοκλοπης και δηλωνουν υπευθυνα οτι ειναι συγγραφεις αυτης της Πτυχιακης Εργασιας, αναλαμβανοντας την ευθυνη επι ολοκληρου του κειμενου, εχουν δε αναφερει στην Βιβλιογραφια τους ολες τις πηγες τις οποιες χρησιμοποισαν και ελαβαν ιδεες η δεδομενα. Δηλωνουν επισης οτι, οποιδηποτε στοιχειο η κειμενο το οποιο εχουν ενσωματωσει στην Εργασια τους προερχομενο απο Βιβλια η αλλες Εργασιες η το Διαδικτυο, γραμμενο ακριβως η παραφρασμενο, το εχουν πληρως αναγνωρισει ως πνευματικο εργο αλλου συγγραφεα και εχουν αναφερει ανελλιπως το ονομα του και την πηγη προελευσης.

Οι Σπουδαστές:

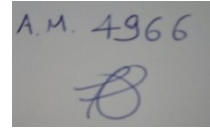
**Φίλικας Μάριος**



**Ψαριώτης Αλεξάνδρος**



**Τσαγγός Βασίλης**



### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ- ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπος της πτυχιακης εργασιας ειναι ο υπολογισμος και μελετη ανοικτων αγωγων διαφορων διατομων- υλικων- ...

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο**

### **1. Βασικές Έννοιες**

#### **1.1 Γενικά**

Η εφαρμοσμένη υδραυλική (ύδωρ και αυλός = αγωγός, σωλήνας), ασχολείται κυρίως με προβλήματα ροής ρευστών σε αγωγούς. Με τον όρο αγωγός νοείται κάθε φυσικός σχηματισμός(για παράδειγμα χείμαρροι ποτάμια) ή τεχνητός όπως για παράδειγμα οι κυκλικοί αγωγοί που χρησιμοποιούνται στην ύδρευση.

Επειδή το μήκος των αγωγών είναι κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερο από οποιαδήποτε άλλη διάστασή τους, η ροή των ρευστών εντός των αγωγών έχει συνήθως γραμμική ανάπτυξη. Έτσι στην πλειονότητα των προβλημάτων αρκεί η μονοδιάστατη ανάλυση της ροής στην οποία χρησιμοποιούμε μέσο μεγέθη, όπως για παράδειγμα μέση ταχύτητα ροής, μέση πίεση κ.ο.

Υπάρχουν δύο είδη ροής: η ροή με ελεύθερη επιφάνεια και η ροή υπό πίεση. Όταν εμφανίζεται ελεύθερη επιφάνεια, τόσο σε ανοικτούς όσο και σε κλειστούς αγωγούς, η ροή πραγματοποιείται πάντα από σημεία με υψηλότερο υψόμετρο προς

σημεία με χαμηλότερο υψόμετρο. Αντίθετο, όταν η ροή πραγματοποιείται υπό πίεση, η κίνηση του ρευστού έχει φορά από θέσεις μεγαλύτερου ενεργειακού υψόμετρου σε μικρότερου.

## 1.2 Βασικές Παράμετροι

Γενικά, αντίσταση στη ροή προκαλείται από την τριβή μεταξύ του ρευστού και των επιφανειών της διατομής που διαβρέχονται. Για την ποσοτικοποίηση των μεγεθών της ροής απαιτείται μόνο η γεωμετρία της διατομής και το βάθος ροής.

Ορίζεται ως *βάθος ροής*  $Y$  η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού και του χαμηλότερου σημείου της διατομής. Το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείεται από την ελεύθερη στάθμη του ρευστού και τα στερεά όρια της διατομής καλείται *επιφάνεια ροής ή υγρή επιφάνεια*  $A$  ενώ το μήκος του βρεχόμενου στερεού περιγράμματος της διατομής, ονομάζεται *βρεχόμενη περίμετρος*  $P$ .

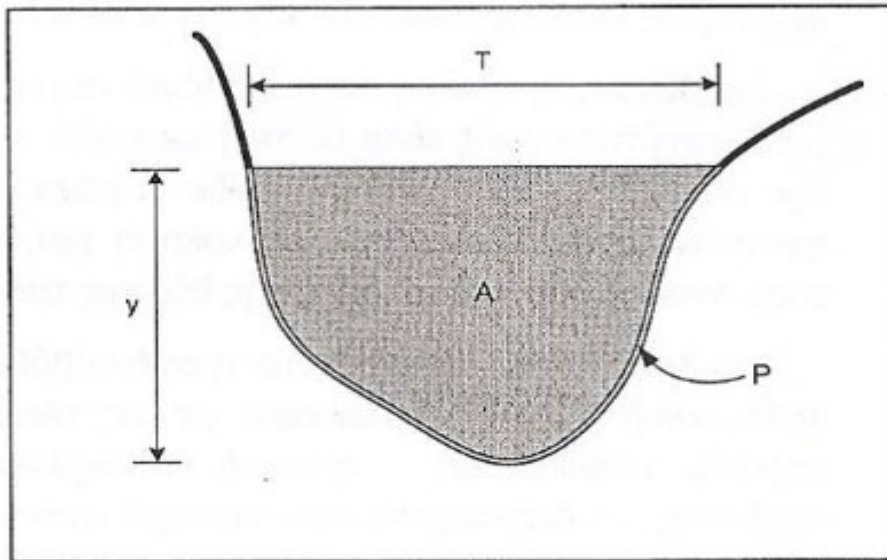
Το εύρος της διατομής στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας ονομάζεται *ελεύθερο πλάτος*  $T$ . Τα μεγέθη αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1.

Η *υδραυλική ακτίνα*  $R$  της διατομής είναι ο λόγος της υγρής επιφάνειας  $A$  προς την βρεχόμενη περίμετρο  $P$ :

$$R = \frac{A}{P}$$

Το υδραυλικό βάθος  $D$  της διατομής είναι ο λόγος της υγρής επιφάνειας  $A$  προς το ελεύθερο πλάτος  $T$ :

$$D = \frac{A}{T}$$



Σχήμα 1.1: Βασικά μεγέθη ροής

Ας θεωρήσουμε μια ανοικτή ορθογωνική διατομή πλάτους  $b$  στην οποία έχουμε ροή με ελεύθερη επιφάνεια και το βάθος ροής είναι  $y$  (Σχήμα 1.2). Τότε είναι:

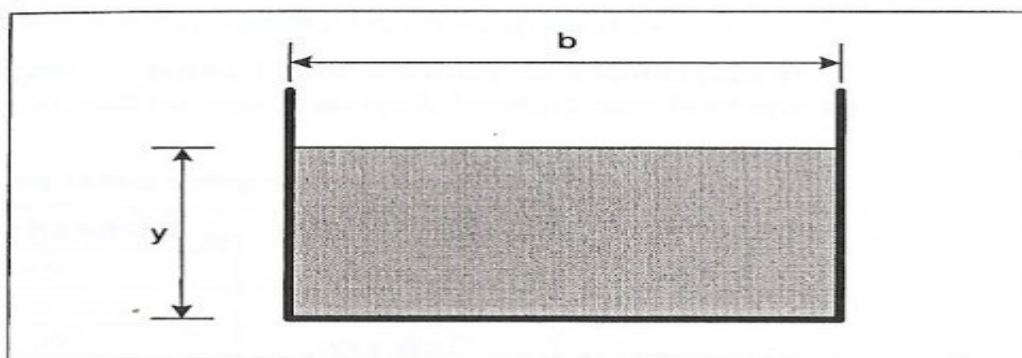
$$A = by$$

$$P = b + 2y$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{by}{b + 2y}$$

Στην περίπτωση που το πλάτος της ορθογωνικής διατομής είναι πολύ μεγαλύτερο από το βάθος ροής ( $b \gg y$ ), ο παρονομαστής της παραπάνω έκφρασης που δίνει την υδραυλική ακτίνα μπορεί να απλοποιηθεί ( $b + 2y \approx b$ ). Συνεπώς η υδραυλική ακτίνα θα είναι περίπου ίση με το βάθος ροής:

$$R \cong y$$



Σχήμα 1.2: Ανοικτή ορθογωνική διατομή

Η μέση ταχύτητα της ροής υπολογίζεται ως το πηλίκο της παροχής προς την επιφάνεια ροής, είναι δηλαδή:

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

Όπου:

$V$ , η μέση ταχύτητα ροής (m/s)

$Q$ , η παροχή (m<sup>3</sup>/s)

$A$ , η επιφάνεια ροής (m<sup>2</sup>)

Ο όρος μέση ταχύτητα υποδηλώνεται το γεγονός ότι στην υπολογιζόμενη από τη σχέση (1.7) ταχύτητα δεν λαμβάνεται υπόψη η διαφοροποίησή της εντός της διατομής που οφείλεται στην ελεύθερη επιφάνεια και στις τριβές που αναπτύσσονται μεταξύ του ρευστού και των τοιχωμάτων της διατομής. Στο ακόλουθο σχήμα 1.3 απεικονίζονται οι κατανομές της ταχύτητας σε διάφορες περιπτώσεις διατομών.



Η ροή μπορεί να χωριστεί από δυναμικής άποψης σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την τιμή του αριθμού Reynolds και το είδος ροής (Πίνακας 1.2).

**Πίνακας 1.2: Διαχωρισμός ροής ανάλογα με τον αριθμό Reynolds**

Κατηγορία	Ελεύθερη Επιφάνεια
Στρωτή	$Re < 500$
Μεταβατική	$500 \leq Re \leq 2000$
Τυρβώδης	$Re > 2000$

Αντίθετα με την επίδραση της συνεκτικότητας που σπάνια είναι υπολογίσιμη για το νερό, η επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια είναι πολύ σημαντική. Αυτή εκφράζεται μέσω του αριθμού Froude που ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Όπου:

Fr, ο αριθμός Froude (-)

V, η μέση ταχύτητα ροής (m/s)

G, η επιτάχυνση της βαρύτητας (=9.81 m/s<sup>2</sup>)

D, το υδραυλικό βάθος της διατομής (m)

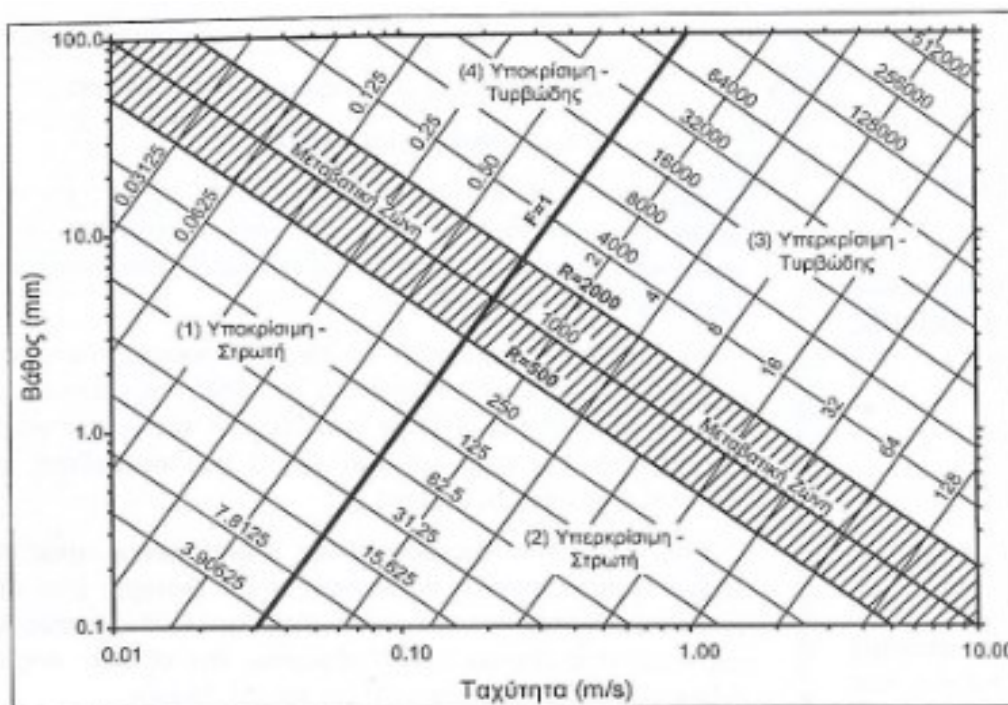
Εάν η τιμή του αριθμού Froude είναι μικρότερη της μονάδας, η ροή καλείται υποκρίσιμη και οι δυνάμεις βαρύτητας είναι σημαντικές σχετικά με τις δυνάμεις αδράνειας. Ως αποτέλεσμα, η ροή έχει σχετικά μικρή ταχύτητα. Αντίθετα αν ο αριθμός Froude έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας, η ροή καλείται υπερκρίσιμη και οι δυνάμεις αδράνειας επικρατούν με αποτέλεσμα η ροή να έχει σχετικά μεγάλη ταχύτητα. Στην περίπτωση που ο αριθμός Froude ισούται με την μονάδα τότε η ροή καλείται κρίσιμη.

Η ποσότητα  $\sqrt{gD}$  έχει διαστάσεις ταχύτητας και στη μηχανική των κυμάτων εκφράζει την ταχύτητα διάδοσης κύματος βαρύτητας μικρού ύψους. Ένα τέτοιο κύμα μπορεί να δημιουργηθεί από π.χ. μεταβολή του βάθους ροής. Επομένως, από φυσικής άποψης μπορεί να λεχθεί ότι ο αριθμός Froude εκφράζει το λόγο της μέσης ταχύτητας κίνησης προς την ταχύτητα μετάδοσης μικρού κυματισμού.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι στην υπερκρίσιμη ροή η μέση ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης κυματισμών και άρα μια

πιθανή διαταραχή μεταδίδεται μόνο κατάντη της θέσεως εμφάνισής της και όχι ανάντη. Αντίθετα στην υποκρίσιμη ροή μια τέτοια διαταραχή θα εμφανίζεται τόσο ανάντη όσο και κατάντη της θέσεως εμφάνισής της.

Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η σχέση βάθους ροής και ταχύτητας για μια πλατιά ορθογωνική διατομή αναφορικά με τις τέσσερις κατηγορίες ροής: υποκρίσιμη-στρωτή, υπερκρίσιμη-στρωτή, υποκρίσιμη-τυρβώδης και υπερκρίσιμη-τυρβώδης. Η διαγραμμισμένη περιοχή αντιστοιχεί στη μεταβατική ροή. Αξίζει να τονισθεί ότι οι δύο πρώτες περιοχές υποκρίσιμης και υπερκρίσιμης στρωτής ροής δεν εμφανίζονται συχνά στη φύση καθώς η ροή είναι γενικά τυρβώδης. Απαντώνται όμως πολλές φορές σε περιπτώσεις διάχυτης ροής πολύ μικρού βάθους όπως αυτή που συμβαίνει στην επιφανειακή απορροή ομβρίων υδάτων, στην οποία το βάθος ροής δεν υπερβαίνει τα 2 με 3 εκατοστά.



Σχήμα 1.4: Σχέση βάθους – ταχύτητας για 4 κατηγορίες ροής.

#### 1.4 Μέθοδοι Αναλύσεως

Παρόλο που η ροή στους ανοικτούς αγωγούς και ιδιαίτερα σε φυσικές διατομές είναι τρισδιάστατη, η ροή πολλές φορές αντιμετωπίζεται ως μονοδιάστατη λόγω της μεγάλης διαφοράς της ταχύτητας κατά τη φορά ροής σε σχέση με τις δευτερεύουσες ταχύτητες που αναπτύσσονται στο επίπεδο μιας διατομής.

Για τη μόνιμη ροή σε κάθε περίπτωση ισχύουν οι εξισώσεις συνέχειας, ποσότητας κίνησης και ενέργειας. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζονται δύο τυχαίες διατομές 1 και 2 κατά μήκος ενός φυσικού καναλιού. Θεωρώντας ότι η ροή μεταξύ των δύο διατομών είναι μόνιμη, η εξίσωση συνέχειας μπορεί να γραφτεί ως εξής:

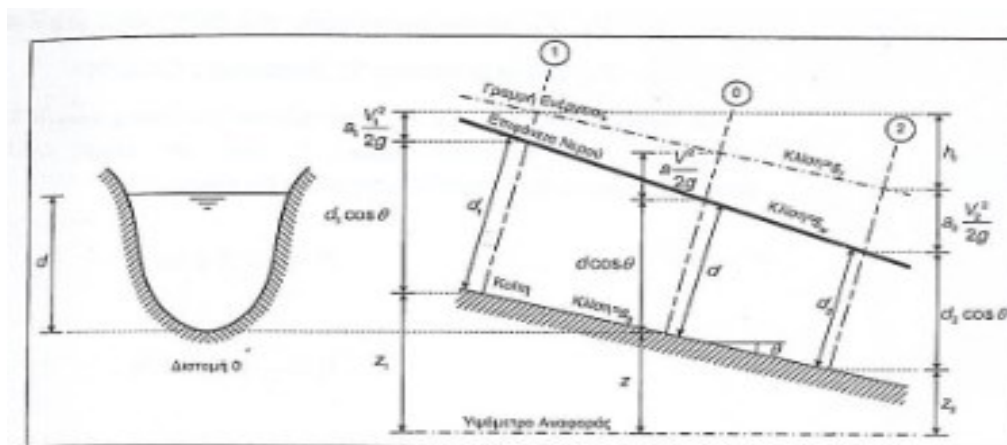
$$Q_1 = A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q_2$$

Όπου:

$Q_1, Q_2$ , οι παροχές στις διατομές 1 και 2 αντίστοιχα ( $m^3/s$ )

$V_1, V_2$ , οι ταχύτητες ροής στις διατομές 1 και 2 αντίστοιχα ( $m/s$ )

$A_1, A_2$ , οι υγρές επιφάνειες στις διατομές 1 και 2 αντίστοιχα ( $m^2$ )



Σχήμα 1.5: Αρχή διατήρησης ενέργειας.

Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Newton, η μεταβολή στην ορμή ανά μονάδα χρόνου στο σώμα του ρευστού που κινείται εντός ενός αγωγού ισούται με τη συνισταμένη όλων των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα αυτό. Αν ο αγωγός έχει μη μηδενική κλίση ως προς ένα οριζόντιο επίπεδο, τότε η εξίσωση ποσότητας κίνησης για τις δύο διατομές 1 και 2 μπορεί να γραφεί:

$$P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_1 = \frac{\omega Q}{g} (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1)$$

Όπου:

$P_1, P_2$ , οι συνισταμένες των πιέσεων στις διατομές 1 και 2 (kg)

$W$ , το βάρος του ρευστού μεταξύ των δυο διατομών (kg)

$\theta$ , η γωνία που σχηματίζει ο πυθμένας με το οριζόντιο επίπεδο ( $^\circ$ )

$F_1$ , η ολική τριβή μεταξύ ρευστού και τοιχωμάτων (kg)

$Q$ , η διερχόμενη παροχή ( $m^3/s$ )

$\Omega$ , το μοναδιαίο βάρος του ρευστού ( $kg/m^3$ )

$g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 m/s^2$ )

$V_1, V_2$ , οι ταχύτητες ροής στις διατομές 1 και 2 αντίστοιχα ( $m/s$ )

$\beta_1, \beta_2$ , οι συντελεστές Boussinesq ή ορμής

Οι συνισταμένες  $P_1$  και  $P_2$  μπορούν να υπολογιστούν υποθέτοντας υδροστατική κατανομή των πιέσεων, αρκεί η ροή να είναι ομοιόμορφη ή βραδέως μεταβαλλόμενη. Στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$P_1 = \frac{1}{2} \omega d_1^2 \cos \theta$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \omega d_2^2 \cos \theta$$

Στην περίπτωση καμπυλόγραμμης ή ταχέως μεταβαλλόμενης ροής η κατανομή της πίεσης σε κάθε διατομή δεν είναι υδροστατική. Έτσι, οι πιέσεις που υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις (1.12) και (1.13) θα πρέπει να αντικατασταθούν από τις ακόλουθες:

$$P'_1 = \frac{1}{2} \beta'_1 \omega d_1^2 \cos \theta$$

$$P'_2 = \frac{1}{2} \beta'_2 \omega d_2^2 \cos \theta$$

Οι συντελεστές  $\beta'_1$  και  $\beta'_2$  ονομάζονται συντελεστές διόρθωσης κατανομής πίεσης και υπολογίζονται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\beta' = \frac{1}{A\bar{z}} \int_0^A h dA$$

Όπου:

$A$ , η επιφάνεια ροής ( $m^2$ )

$\bar{z}$ , το βάθος του κέντρου βάρους της επιφάνειας  $A$  (m)

$H$ , η πίεση στη μοναδιαία επιφάνεια  $dA$  (m)

$dA$ , η μοναδιαία επιφάνεια ( $m^2$ )

Από την εξίσωση (1.16) διαπιστώνεται εύκολα ότι η τιμή του συντελεστή διόρθωσης κατανομής πίεσης  $\beta'$  είναι μεγαλύτερη της μονάδας για κοίλες επιφάνειες, μικρότερη της μονάδας για κυρτές επιφάνειες και ίση με τη μονάδα για παράλληλη (ομοιόμορφη) ροή.

Με βάση τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, ο οποίος αποτελεί έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας μεταξύ δυο τυχαίων διατομών ισούται με το άθροισμα της θερμότητας που προσδόθηκε στο υπό εξέταση σύστημα και του έργου που παράχθηκε κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος μελέτης.

Στις εφαρμογές της υδραυλικής υπεισέρχονται τρεις παράγοντες μέσω των οποίων ποσοτικοποιείται η ενέργεια σε μια διατομή, ήτοι το υψόμετρο αναφοράς, το βάθος

ροής που περιγράφει τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας και το τετράγωνο της ταχύτητας (Σχήμα 1.5). Γράφοντας την εξίσωση της αρχής διατήρησης της ενέργειας μεταξύ των διατομών (1) και (2), έχουμε:

$$z_1 + d_1 \cos \theta + a_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \theta + a_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$$

Όπου:

$z_1, z_2$ , τα υψόμετρα του πυθμένα, μετρώμενα από ένα σταθερό επίπεδο αναφοράς (m)

$V_1, V_2$ , οι μέσες ταχύτητες ροής (m/s)

$d_1, d_2$ , τα βάθη ροής στο επίπεδο της διατομής (m)

$\theta$ , η γωνία που σχηματίζει ο πυθμένας με το οριζόντιο επίπεδο (°)

$\Delta H$ , οι απώλειες ενέργειας κατά μήκος της διαδρομής (1)-(2) (m)

$g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ )

$a_1, a_2$ , οι συντελεστές ενέργειας ή Coriolis

Επειδή στις περισσότερες των περιπτώσεων η γωνία  $\theta$  που σχηματίζει ο πυθμένας με το οριζόντιο επίπεδο είναι μικρή ( $\theta \approx 0$ ) και οι συντελεστές ενέργειας θεωρούνται απλοποιητικά ίσοι με τη μονάδα, η σχέση (1.17) μπορεί να γραφεί με βάση το κατακόρυφο βάθος ροής  $y$ :

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$$

Οι συντελεστές ενέργειας ή Coriolis ποσοτικοποιήσουν την ανομοιομορφία στην κατανομή της ταχύτητας. Για σχετικά ευθύγραμμες πρισματικές διατομές, έχει βρεθεί ότι πειραματικά οι τιμές των συντελεστών αυτών μεταβάλλονται από 1.00 έως 1.40. Το άνω άκρο του διαστήματος μεταβολής αντιστοιχεί σε μικρότερες διατομές με μικρά βάθη ροής ενώ όσο οι διατομές και τα βάθη ροής μεγαλώνουν, τόσο η τιμή του συντελεστή ενέργειας προσεγγίζει τη μονάδα. Πρακτικά, στις περισσότερες των περιπτώσεων οι συντελεστές ενέργειας λαμβάνονται ίσοι με την μονάδα κυρίως λόγω έλλειψης στοιχείων σχετικών με την κατανομή της ταχύτητας. Εάν όμως υπάρχουν τέτοια στοιχεία, τότε η τιμή του συντελεστή ενέργειας μπορεί να προσεγγισθεί από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$a = 1 + 3e^2 - 2e^3$$

$$\beta = 1 + e^2$$

$$e = \frac{V_M}{V} - 1$$

Όπου:

$V_M$ , η μέγιστη ταχύτητα ροής (m/s)

$V$ , η μέση ταχύτητα ροής (m/s)

Η γραμμή που ενώνει το σύνολο των αθροισμάτων υψομέτρων και βαθών ροής αποτελεί την ελεύθερη επιφάνεια της ροής. Η γραμμή που ενώνει το σύνολο των αθροισμάτων και των τριών παραμέτρων ονομάζεται γραμμή ενέργειας. Η γραμμή ενέργειας και η ελεύθερη επιφάνεια της ροής ταυτίζονται μόνο στην περίπτωση που η ταχύτητα είναι μηδενική, όπως συμβαίνει για παράδειγμα σε δεξαμενές και ταμιευτήρες. Ο ρυθμός με τον οποίο χάνεται η ενέργεια κατά μήκος μιας διαδρομής καλείται κλίση γραμμής ενέργειας ή κλίση τριβών.

Όσον αφορά τις χαρακτηριστικές τιμές που λαμβάνουν οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$ , αυτές παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 1.3). Στις περισσότερες πάντως πρακτικές εφαρμογές οι τιμές των συντελεστών αυτών λαμβάνονται ίσες με τη μονάδα, κυρίως λόγω του γεγονότος αδυναμίας υπολογισμού ακριβέστερων τιμών.

Πίνακας 1.3: Τιμές συντελεστών  $\alpha$  και  $\beta$

Κανάλια	Συντελεστής $\alpha$			Συντελεστής $\beta$		
	Ελάχ. τιμή	Μέγ. τιμή	Μέση τιμή	Ελάχ. τιμή	Μέγ. τιμή	Μέση τιμή
Πρισματικοί αγωγοί, υπερχειλιστές	1.10	1.20	1.15	1.03	1.07	1.05
Φυσικά ρέματα, χείμαρροι	1.15	1.50	1.30	1.05	1.17	1.10
Ποτάμια με παγοκάλυψη	1.20	2.00	1.50	1.07	1.33	1.17
Πλημμυρικές πεδιάδες	1.50	2.00	1.75	1.17	1.33	1.25

### 1.5 Ειδική Ενέργεια

Στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια ορίζουμε ως ειδική ενέργεια το μέγεθος που δίνεται από την σχέση (1.22):

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Όπου:

$E$ , η ειδική ενέργεια (m)

$d$ , το βάθος ροής στο επίπεδο της διατομής (m)

$\theta$ , η γωνία που σχηματίζει ο πυθμένας με το οριζόντιο επίπεδο (°)

$\alpha$ , ο συντελεστής ενέργειας

$V$ , η ταχύτητα ροής (m/s)

$g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ )

Επειδή το γινόμενο του βάθους ροής στο επίπεδο της διατομής επί το συνημίτονο της γωνίας  $\theta$  δίνει το κατακόρυφο βάθος της ροής και ο συντελεστής ενέργειας  $\alpha$  γενικά αμελείται (τίθεται ίσος με τη μονάδα), η εξίσωση (1.22) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

Όπου:

$E$ , η ειδική ενέργεια (m)

$y$ , το κατακόρυφο βάθος ροής (m)

$V$ , η ταχύτητα ροής (m/s)

$g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ )

Επειδή ισχύει η εξίσωση (1.7), η εξίσωση (1.23) μπορεί να γραφεί εντελώς ισοδύναμο ως:

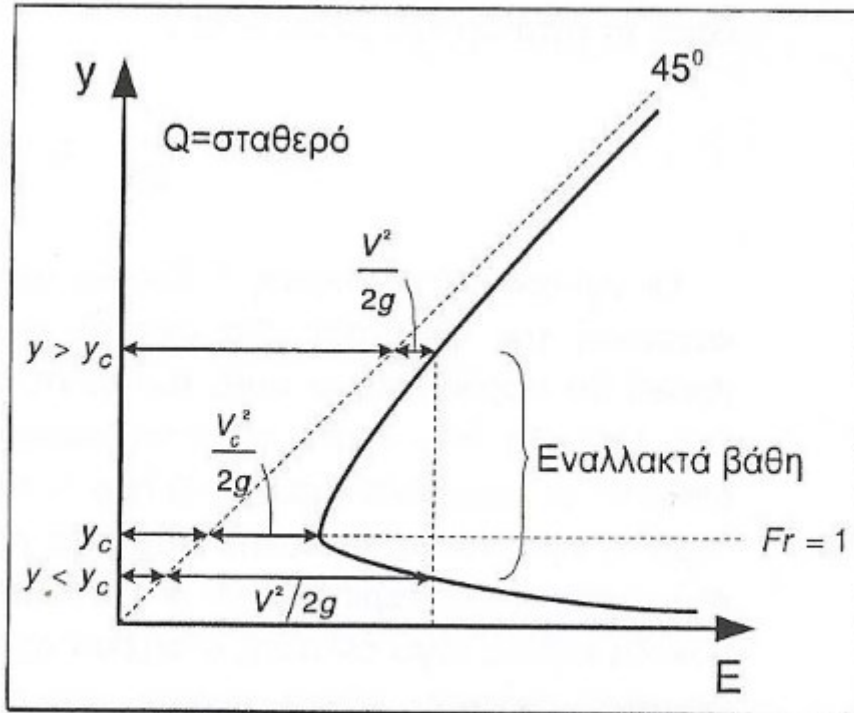
$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα τμήμα ενός αγωγού που είναι εξαιρετικά μικρό (το μήκος του τείνει στο μηδέν), τότε πρακτικά δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας και το υψόμετρο του δεν αλλάζει. Έτσι, για δύο διατομές (1) και (2), με την (2) να βρίσκεται κατάντη της(1), θα ισχύει:

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = E_2$$

Για μια δεδομένη παροχή, η ταχύτητα ροής είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της διατομής και πιο συγκεκριμένα του εμβαδού της. Επειδή το εμβαδόν εξαρτάται μόνο από το βάθος ροής (όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του είναι σταθερά στην ομοιόμορφη ροή), τότε η ειδική ενέργεια εξαρτάται μόνο από το βάθος ροής. Για μια συγκεκριμένη τιμή της ειδικής ενέργειας, μπορούν να εμφανιστούν δύο βάθη ροής, καθώς η σχέση (1.22) μπορεί να έχει δύο πραγματικές ρίζες ως εξίσωση δευτέρου βαθμού. Τα δύο αυτά βάθη ροής ονομάζονται εναλλακτικά βάθη.

Εάν παρασταθεί γραφικά η μεταβολή της ειδικής ενέργειας με το βάθος ροής, τότε λαμβάνεται μια καμπύλη ανάλογη με αυτή που εικονίζεται στο σχήμα 1.6.



**Σχήμα 1.6: Η ειδική ενέργεια**

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.6, υπάρχει ένα βάθος ροής τέτοιο που να ελαχιστοποιείται η τιμή της ειδικής ενέργειας. Το βάθος αυτό ονομάζεται κρίσιμο βάθος. Τα βάθη ροής που είναι μεγαλύτερα από το κρίσιμο βάθος αντιστοιχούν σε υποκρίσιμη ροή, ενώ τα βάθη ροής που είναι μικρότερα από το κρίσιμο βάθος αντιστοιχούν σε υπερκρίσιμη ροή. Εάν το βάθος ροής είναι ίσο με το κρίσιμο βάθος τότε έχουμε κρίσιμη ροή. Στην περίπτωση αυτή η ειδική ενέργεια είναι ελάχιστη και αντιστοιχεί σε τιμή του Froude ίση με τη μονάδα.

Για τον υπολογισμό του κρίσιμου βάθους μιας διατομής, γίνεται χρήση της σχέσης (1.9), στην οποία η τιμή του αριθμού Froude τίθεται ίση με τη μονάδα:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} = 1 \Rightarrow V = \sqrt{g \frac{A}{T}} \Rightarrow \frac{V^2}{g} = \frac{A}{T}$$

Και εάν λάβουμε υπόψη ότι  $Q=VA$  τότε έχουμε:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{T}$$

Ανάλογα με τη μορφή της διατομής, από τη σχέση (1.26) είναι εύκολο να υπολογιστεί το κρίσιμο βάθος. Για την απλούστερη μορφή, την ορθογωνική διατομή πλάτους  $b$ , η σχέση (1.26) γράφεται διαδοχικά:



$$\frac{Q^2}{g} = \frac{b^3 y_c^3}{b} \Rightarrow y_c^3 = \frac{Q^2}{b^2 g} \Rightarrow y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}}$$

Για άλλες γεωμετρίες διατομών (για παράδειγμα για την τραπεζοειδή διατομή), η εύρεση του κρίσιμου βάθους γίνεται με δοκιμές.

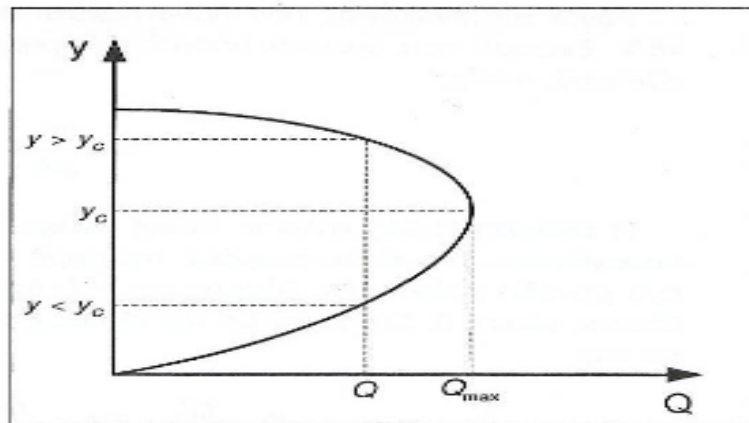
### 1.6 Διάγραμμα Παροχής

Η εξίσωση (1.24) της ειδικής ενέργειας μπορεί να λυθεί ως προς την παροχή  $Q$  οπότε λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση:

$$Q = \sqrt{2gA^2(E - y)}$$

Η σχέση (1.27) υποδηλώνει ότι για δεδομένη τιμή της ειδικής ενέργειας  $E$  και γεωμετρία διατομής, η διερχόμενη παροχή εξαρτάται μόνο από το βάθος ροής  $y$ . Η γραφική παράσταση της παροχής συναρτήσει του βάθους ροής δίνεται στο ακόλουθο σχήμα 1.7.

Σύμφωνα με το διάγραμμα παροχής, η μέγιστη παροχή  $Q_{\max}$  για μια δεδομένη ειδική ενέργεια  $E$  πραγματοποιείται όταν το βάθος ροής θα είναι ίσο με το κρίσιμο βάθος. Για βάθη ροής μικρότερα ή μεγαλύτερα από το κρίσιμο βάθος η διερχόμενη παροχή θα είναι πάντα μικρότερη. Για μια δεδομένη παροχή  $Q$  η ροή μπορεί να είναι είτε υποκρίσιμη είτε υπερκρίσιμη, επιβεβαιώνοντας το συμπέρασμα της προηγούμενης παραγράφου.



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα παροχής

### 1.7 Ειδική δύναμη

Εάν εφαρμοσθεί η εξίσωση ποσότητας κίνησης σε ένα οριζόντιο αγωγό μικρού μήκους, η εξωτερική τριβή και η επίδραση του βάρους του ρευστού μπορούν να

αμεληθούν. Υποθέτοντας επιπρόσθετα ότι ισχύει υδροστατική κατανομή των πιέσεων, θα είναι  $\theta=0$ ,  $F_f=0$  και  $\beta_1=\beta_2=1$ , οπότε οι εξισώσεις (1.11), (1.12) και (1.13) μπορούν να απλοποιηθούν:

$$P_1 - P_2 = \frac{\omega Q}{g}(V_2 - V_1)$$

$$P_1 = \omega \bar{z}_1 A_1$$

$$P_2 = \omega \bar{z}_2 A_2$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1.7), (1.28), (1.29) και (1.30) προκύπτει:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{z}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{z}_2 A_2$$

Λόγω της αναλογίας που παρατηρείται στα δύο μέλη της εξίσωσης (1.31), σε κάθε διατομή του αγωγού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα από τα δύο μέλη της εξίσωσης αυτής:

$$F = \frac{Q^2}{gA} + \bar{z}A$$

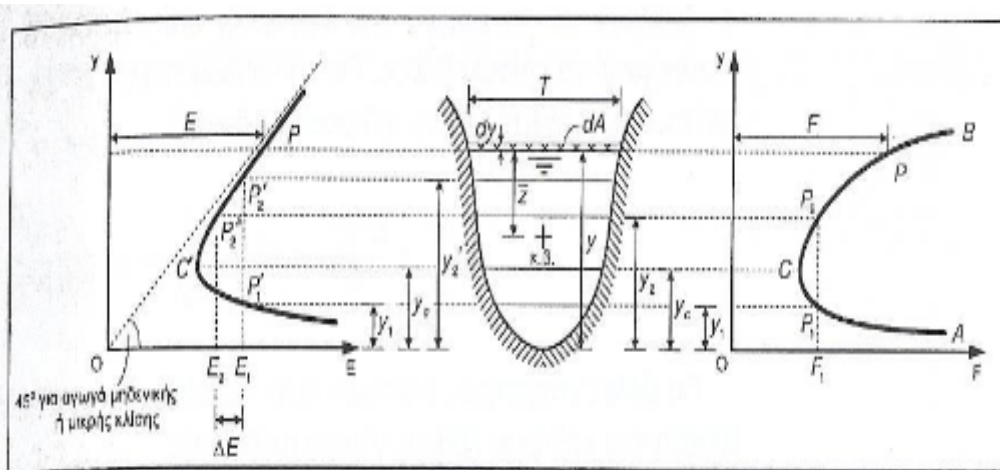
Η εξίσωση (1.32) καλείται ειδική δύναμη και αποτελείται από το άθροισμα δύο παραγόντων. Ο πρώτος εκφράζει την ορμή της ροής που διέρχεται από τη διατομή ανά μονάδα χρόνου και βάρους και ο δεύτερος εκφράζει τη δύναμη ανά μονάδα βάρους ρευστού. Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή, η σχέση (1.31) μπορεί να γραφεί και ως:

$$F_1 = \frac{Q^2}{gA_1} + \bar{z}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{z}_2 A_2 = F_2$$

Η τελευταία σχέση καταδεικνύει ότι οι ειδικές δυνάμεις σε δύο διατομές (1) και (2) είναι ίσες με την προϋπόθεση αγνόησης εξωτερικών δυνάμεων και της επίδρασης του βάρους του ρευστού στον πυθμένα και στα πρανή μεταξύ των διατομών αυτών.

Στο ακόλουθο σχήμα 1.8 έχει σχεδιαστεί η μεταβολή της ειδικής δύναμης σε σχέση με το βάθος σε μια φυσική διατομή (δεξί διάγραμμα), ενώ ταυτόχρονα έχει σχεδιαστεί και η μεταβολή της ειδικής ενέργειας σε σχέση με το βάθος (αριστερό διάγραμμα). Το διάγραμμα της ειδικής δύναμης αποτελείται από δύο κλάδους, τον CB και τον CA. Ο δεύτερος κλάδος CA προσεγγίζει ασυμπτωτικά τον οριζόντιο άξονα. Για μια δεδομένη τιμή της ειδικής δύναμης  $F_1$ , αντιστοιχούν δύο δυνατά βάθη ροής  $y_1$  και  $y_2$  τα οποία και αποτελούν το αρχικό και το συζυγές βάθος του υδραυλικού άλματος.

Η ελάχιστη τιμή της ειδικής δύναμης προκύπτει από την παράγωγο της έκφρασης αυτής ως προς το βάθος ροής. Αποδεικνύεται εύκολα ότι όταν το βάθος ροής ισούται με το κρίσιμο βάθος, τότε η ειδική δύναμη είναι ελάχιστη (σημείο C).



Σχήμα 1.8: Διάγραμμα ειδικής δύναμης και παροχής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

### 2. Απώλειες Ενέργειας

#### 2.1 Γενικά Περί Απωλειών Ενέργειας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός των απωλειών ενέργειας  $\Delta H$  που εμφανίζονται στη σχέση (I.I7). Υπάρχουν πολλές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των απωλειών λόγω τριβής. Οι περισσότερες έχουν την ακόλουθη γενική μορφή (εκφρασμένες ως προς την μέση ταχύτητα ροής):

$$V = aCR^bS^c \quad (2.1)$$

όπου:

$V$ , η μέση ταχύτητα της ροής ( $m/s$ )

$C$ , συντελεστής τριβής (μονάδες ανάλογα με τον τύπο) ο  $R$ , η υδραυλική ακτίνα της διατομής ( $m$ )

$S$ , η κλίση της γραμμής ενέργειας ( $m/m$ )

$a, b, c$  συντελεστές

Η τελική τιμή του συντελεστή  $C$  της σχέσης; (2.1) εξαρτάται από το χαρακτηριστικά του υλικού του πυθμένα και των πρανών της διατομής στην οποία κινείται το ρευστό, αλλά και από το σχήμα, το βάθος και την ταχύτητα της ροής.

#### 2.2 Σχέση Chezy

Η σχέση του Chezy (1769) ήταν η πρώτη απόπειρα να εκφραστούν οι απώλειες, ενέργειας μέσω μιας εύχρηστης εμπειρικής σχέσης. Ωστόσο σήμερα δεν χρησιμοποιείται, κυρίως λόγω έλλειψης τιμών για τα συντελεστή του Chezy. Η σχέση του Chezy για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας είναι:

$$V = C \sqrt{RS} \quad (2.2)$$

όπου:

$V$ , η μέση ταχύτητα της ροής ( $m/s$ )

$C$ , ο συντελεστής τριβής Chezy ( $m^{1/2}/s$ )

$R$ , η υδραυλική ακτίνα της διατομής ( $m$ )

$S$ , η κλίση της γραμμής ενέργειας ( $m/m$ )

Βασική παραδοχή της σχέσης αυτής είναι ότι η αντίσταση στη ροή ανά μονάδα επιφανείας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας,  $V^2$ . Η επιφάνεια επαφής της ροής με τον πυθμένα και τα πρανή είναι το γινόμενο της βρεχόμενης περιμέτρου  $P$  επί

το μήκος L, επομένως η ολική αντίσταση είναι ανάλογη με  $KV^2PL$ , όπου K ο συντελεστής αναλογίας.

Η δεύτερη παραδοχή είναι η ύπαρξη ομοιόμορφης ροής ή αλλιώς η θεώρηση ότι η ενεργή συνιστώσα της βαρύτητας που προκαλεί την κίνηση είναι ίση με την ολική αντίσταση. Αν  $\theta$  η κλίση του πυθμένα ως προς το οριζόντιο επίπεδο, η ενεργή συνιστώσα της βαρύτητας που είναι παράλληλη προς τον πυθμένα ισούται με  $\omega ALS \sin\theta$  ή  $\omega ALS$ , όπου  $\omega$  το μοναδιαίο βάρος του ρευστού και S η κλίση του πυθμένα. Σύμφωνα με τα παραπάνω θα είναι:

$$\omega ALS = KV^2PL \Rightarrow RS = (K/\omega)V^2 \Rightarrow V = C\sqrt{RS}$$

όπου:

C, ο συντελεστής Chezy ίσος με  $\sqrt{\omega/K}$

R, η υδραυλική ακτίνα ίση με A/P (m)

$\omega$ , το μοναδιαίο βάρος του ρευστού ( $\text{kg/m}^3$ )

A, η επιφάνεια ροής ( $\text{m}^2$ )

S, η κλίση του πυθμένα (m/m)

Στην σχέση του Chezy βασίζονται πολλοί εμπειρικοί τύποι αλλά η ίδια η σχέση του Chezy δεν χρησιμοποιείται πλέον.

### 2.3 Σχέση Kutter

Ο Ελβετός μηχανικός Kutter πρότεινε την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή Chezy:

$$V = \frac{100R\sqrt{S}}{m + \sqrt{R}}$$

Όπου:

V, η μέση ταχύτητα της ροής (m/s)

R, η υδραυλική ακτίνα της διατομής (m)

S, η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/m)

m, ο εμπειρικός συντελεστής τριβής του Kutter

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για καθαρό νερό ο συντελεστής τριβής του Kutter λαμβάνει την τιμή 0.25 ενώ στην περίπτωση των υπονόμων η τιμή αυτή γίνεται 0.35. Ο τύπος τριβών του Kutter, αν και αναφέρεται στους ελληνικούς κανονισμούς (Π.Δ. 696/74), εντούτοις συνίσταται να αποφεύγεται.

Στη βιβλιογραφία απαντάται και ο μεγάλος τύπος του Kutter ή ο τύπος των Ganguillet και Kutter (1869):

$$V = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left(23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \sqrt{RS}$$

Όπου:

V, η μέση ταχύτητα της ροής (m/s)

n, ο συντελεστής τριβής Kutter (s/m<sup>1/3</sup>)

R, η υδραυλική ακτίνα της διατομής (m)

S, η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/m)

Ο τύπος αυτός προέκυψε μετά από πειράματα μετρήσεων παροχής σε διάφορους τεχνητούς αγωγούς, φυσικά ρέματα και ποτάμια σε Ευρώπη και Αμερική, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων του Γάλλου μηχανικού Bazin.

Παρόλο που στο παρελθόν έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά και έχουν κατασκευαστεί διάφορα διαγράμματα για την ευκολότερη εφαρμογή της, σήμερα η χρήση της σχέσης αυτής είναι πολύ περιορισμένη.

Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής τριβής που Kutter έχει επικρατήσει σήμερα να ονομάζεται συντελεστής τριβής του Manning λόγω του γεγονότος ότι χρησιμοποιείται αυτούσιος στην κατά πολύ δημοφιλέστερη σχέση του Manning. Περισσότερα για το συντελεστή αναφέρονται στη συνέχεια.

#### 2.4 Σχέση Bazin

Ο Γάλλος μηχανικός Bazin (1897) θεώρησε ότι στη σχέση του Chezy (2.2) ο συντελεστής τριβής κατά Chezy είναι συνάρτηση μόνο της υδραυλικής ακτίνας και όχι κατά μήκος κλίσης του πυθμένα. Πρότεινε τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής C σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}$$

Τότε η σχέση (2.2) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή, η οποία είναι γνωστή ως σχέση Bazin:

$$V = \frac{87R\sqrt{S}}{\sqrt{R} + \gamma}$$

Όπου:

V, η μέση ταχύτητα της ροής (m/s)

R, η υδραυλική ακτίνα της διατομής (m)

S, η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/m)

γ, ο αδιάστατος συντελεστής τριβής κατά Bazin

Οι ενδεικτικές τιμές του συντελεστή τριβής κατά Bazin φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Επιφάνεια/Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
Τραχύ σκυρόδεμα	0.5	0.4	0.46
Λείο σκυρόδεμα	0.08	0.04	0.06
Λεία λιθοδομή	0.018	0.014	0.016
Φυσικά ρέματα σε καλή κατάσταση	1.10	2.00	1.54
Φυσικά ρέματα υπό κανονικές συνθήκες	2.00	2.80	2.36
Φυσικά ρέματα σε κακή κατάσταση	2.80	3.60	3.17
Μπάζα, τούβλο	0.80	0.90	0.83
Αγωγοί ακαθάρτων	0.25	0.25	0.25
Αγωγοί ομβρίων	0.46	0.46	0.46

## 2.5 Σχέση Powell

Η σχέση Powell αποτελεί μια λογαριθμική πεπλεγμένη σχέση ως προς τον συντελεστή τριβής C κατά Chezy και δεν χρησιμοποιείται σήμερα κυρίως λόγω έλλειψης πειραματικών αποτελεσμάτων και τιμών ταχύτητας κατά Powell. Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, ο συντελεστής τριβής θα εξαρτάται τόσο από τον αριθμό Reynolds, όσο και από την υδραυλική ακτίνα και την τραχύτητα κατά Powell:

$$C = -23.2 \log\left(\frac{C}{4Re} + \frac{\varepsilon}{R}\right)$$

Όπου:

C, ο συντελεστής τριβής κατά Chezy

Re, ο αριθμός του Reynolds

R, η υδραυλική ακτίνα (m)

ε, η τραχύτητα κατά Powell (m)

Επιφάνεια/Υλικό	Νέο	Παλιό
Λείο σκυρόδεμα	0,061	0,122
Τραχύ σκυρόδεμα	0,305	0,519
Κανάλια από τραχύ σκυρόδεμα	1,222	1,832

Φυσικό έδαφος με ομοιόμορφη κλίση	12,216	
Φυσικό έδαφος με ακανόνιστα κανάλια	30,540	

Σε φυσικά κανάλια, στα οποία η ροή είναι γενικά τυρβώδης και ο αριθμός Reynolds πολύ μεγάλος, η σχέση (2,9) απλοποιείται και προσεγγίστηκα αντικαθίσταται από την ακόλουθη σχέση:

$$C = 23.2 \log(R + \varepsilon)$$

Για λείους τεχνητούς αγωγούς στους οποίους η τραχύτητα  $\varepsilon$  είναι πολύ μικρή, ο αριθμός Reynolds κατέχει πρωταγωνιστικά ρόλο και η σχέση (2.9) απλοποιείται και προσεγγιστικά αντικαθίσταται από την ακόλουθη σχέση:

$$C = 23.2 \log\left(\frac{4Re}{C}\right)$$

Η σχέση του Powell αναπτύχθηκε με χρήση περιορισμένων εργαστηριακών πειραμάτων σε λείους και τραχείς αγωγούς και με βάση τη θεωρητική κατανομή ταχυτήτων του Keulegan. Η πρακτική εφαρμογή της σχέσης αυτής είναι περιορισμένη κυρίως λόγω της έλλειψης κατάλληλων και ορθά τεκμηριωμένων τιμών για το συντελεστή τριβής  $\varepsilon$ .

## 2.6 Σχέση Manning

Η σχέση του Ιρλανδού μηχανικού Manning είναι ιδιαίτερα δημοφιλής και διαδεδομένη σε εφαρμογές ροής με ελεύθερη επιφάνεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ροή υπό πίεση. Ο λόγος διάδοσης της έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχει αρκετά καλή γνώση των τιμών του συντελεστή τριβής κατά Manning για πολλά διαφορετικά υλικά και επιφάνειες. Η σχέση του Manning είναι:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S}$$

Όπου:

$V$ , η μέση ταχύτητα της ροής (m/s)

$n$ , ο συντελεστής τριβής Manning (s/m)

$R$ , η υδραυλική ακτίνα της διατομής (m)

$S$ , η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/m)

Εύκολα προκύπτει η σχέση μεταξύ των συντελεστών τριβής του Manning και του Chezy:



$$n = \frac{R^{\frac{1}{5}}}{C}$$

Ενδεικτικές τιμές για τον συντελεστή Manning δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Επιφάνεια/Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
Μπρούντζος, ορείχαλκος	0,009	0,013	0,010
Ατσάλι (συγκολλημένο)	0,010	0,014	0,012
Ατσάλι (με κοχλίες)	0,013	0,017	0,016
Χυτοσίδηρος με επικάλυψη	0,010	0,014	0,013
Χυτοσίδηρος άνευ επικάλυψης	0,011	0,016	0,014
Σφυρήλατος σίδηρος (μαύρος)	0,012	0,015	0,014
Σφυρήλατος σίδηρος (γαλβανισμένος)	0,013	0,017	0,016
Μέταλλο με αυλακώσεις	0,017	0,021	0,019
Μέταλλο με αυλακώσεις (ομβρίων)	0,021	0,030	0,024
Αλουμίνιο	0,020	0,029	0,024

Συντελεστές Manning για κλειστές μη μεταλλικές διατομές.

Επιφάνεια/Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
-----------------	---------------	--------------	-----------

Lucite	0.008	0.010	0.009
Γυαλί	0.009	0.013	0.010
Τσιμέντο λείο	0.010	0.013	0.011
Τσιμέντο με ασβέστη	0.011	0.015	0.013
Σκυρόδεμα οχετών χωρίς μπάζα	0.010	0.013	0.011
Σκυρόδεμα οχετών γενικά	0.011	0.014	0.013
Σκυρόδεμα λείο	0.011	0.014	0.012
Σκυρόδεμα υπονόμων	0.013	0.017	0.015
Σκυρόδεμα (μεταλλότυπος)	0.012	0.014	0.013
Σκυρόδεμα (ξυλότυπος, λείος)	0.012	0.016	0.014
Σκυρόδεμα (ξυλότυπος, τραχύς)	0.015	0.020	0.017
Εύλο (βαρελοσανίδες)	0.010	0.014	0.012
Εύλο (από συμπιεσμένα στρώματα)	0.015	0.020	0.017
Άργιλος (συνήθη πλακίδια υπονόμων)	0.011	0.017	0.013
Άργιλος (υαλοποιημένος υπόνομος-ΥΥ)	0.011	0.017	0.014
Άργιλος (ΥΥ με φρεάτια, είσοδος, κλπ)	0.013	0.017	0.015
Άργιλος (ΥΥ με ανοικτές συνδέσεις)	0.014	0.018	0.016
Οπτόπλινθοι	0.011	0.015	0.013
Οπτόπλινθοι με ασβεστοκονίαμα	0.012	0.017	0.015
Υπόνομοι καλυμμένοι με ιλύ	0.012	0.016	0.013
Υπόνομοι επενδεδυμένα άντυγα, λείο πυθμένα	0.016	0.020	0.019
PVC	0.009	0.012	0.010

Συντελεστές Manningγια ευθύγραμμο ή τεχνητά κανάλια

Επιφάνεια/Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
-----------------	---------------	--------------	-----------

Λεία άβαφη ατσάλινη επιφάνεια	0,011	0,014	0,012
Λεία βαμμένη επιφάνεια	0,012	0,017	0,013
Αυλακωμένη μεταλλική επιφάνεια	0,021	0,030	0,025
Τσιμέντο λείο	0,010	0,013	0,011
Τσιμέντο με ασβέστη	0,011	0,015	0,013
Εύλο (ανεπεξέργαστο αλλά επίπεδο)	0,010	0,014	0,012
Εύλο (επίπεδο)	0,011	0,015	0,012
Εύλο (όχι επίπεδο)	0,011	0,015	0,013
Εύλο (σανίδες, μαδέρια)	0,012	0,018	0,015
Σκυρόδεμα (μυστρί)	0,011	0,015	0,013
Σκυρόδεμα (χωρίς επεξεργασμένη επιφάνεια)	0,013	0,016	0,015
Σκυρόδεμα με εμφανή χαλίκια	0,015	0,020	0,017
Σκυρόδεμα τραχύ	0,014	0,020	0,017
Gunite ομοιόμορφη διάστρωση	0,016	0,023	0,019
Gunite με κυματισμούς	0,018	0,025	0,022
Σκυρόδεμα επί ομαλού βράχου	0,017	0,030	0,020
Σκυρόδεμα επί ανώμαλου βράχου	0,022	0,035	0,027
Σκυρόδεμα πυθμένας και πρανή με ασβέστη	0,015	0,020	0,017
Λεία άσφαλτος	0,013	0,013	0,013
Τραχεία άσφαλτος	0,016	0,016	0,016
Οπτόπλινθοι	0,011	0,015	0,013
Οπτόπλινθοι με ασβεστοκονίαμα	0,012	0,018	0,015
Πυθμένας χαλίκια και πρανή σκυρόδεμα	0,017	0,025	0,020
Πυθμένας χαλίκια και πρανή πέτρες	0,020	0,026	0,023
Πυθμένας χαλίκια και πρανή χαλίκια	0,023	0,036	0,033

Συντελεστές Manning για κανάλια με εκσκαφή ή εκβάθυνση

Επιφάνεια/Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
Γαϊώδες έδαφος, ομοιογενές και επίπεδο			

Καθαρό, πρόσφατα τελειωμένο	0,016	0,020	0,018
Καθαρό, μετά από διάβρωση	0,018	0,025	0,022
Χαλίκια στον πυθμένα, ομοιόμορφη διατομή	0,022	0,030	0,025
Με γρασίδι και αγριόχορτο	0,022	0,033	0,027
Γαιώδες με μαιάνδρους			
Χωρίς φυτοκάλυψη	0,023	0,030	0,025
Με γρασίδι και λίγα αγριόχορτα	0,025	0,033	0,030
Πυκνά χόρτα ή υδρόφιλα φυτά	0,030	0,040	0,035
Λιθόστρωτος πυθμένας και καθαρά πρηνή	0,030	0,050	0,040
Με εκβάθυνση			
Χωρίς φυτοκάλυψη	0,025	0,033	0,028
Με χαμόκλαδα στα πρηνή	0,035	0,050	0,040
Βραχώδες έδαφος			
Λείο και ομοιόμορφο	0,025	0,040	0,035
Με οξείες γωνίες και ακανόνιστα	0,035	0,050	0,040
Χωρίς συντήρηση με άκοπα χόρτα			
Πυκνή βλάστηση μέχρι το βάθος ροής	0,050	0,120	0,080
Καθαρός πυθμένας και βλάστηση στα πρηνή	0,040	0,050	0,050
Καθαρός πυθμένας, βλάστηση έως τη ροή	0,045	0,0110	0,070
Πυκνή βλάστηση και πάνω από τη ροή	0,080	0,140	0,100

Συντελεστές Manningγια πλημμυρικές πεδιάδες

Επιφάνεια/Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
Βοσκοτόπια χωρίς θάμνους			
Κοντό γρασίδι	0,025	0,035	0,030
Ψηλό γρασίδι	0,030	0,050	0,035
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις			
Χωρίς καλλιέργεια	0,020	0,040	0,030
Ωριμες καλλιέργειες	0,025	0,045	0,035

(σειρές)			
Ωριμες καλλιέργειες (αγροτεμάχιο)	0,030	0,050	0,040
Θάμνοι			
Διάσπαρτοι θάμνοι, πολλά χόρτα	0,035	0,070	0,050
Λίγοι θάμνοι και δέντρα (χειμώνας)	0,035	0,060	0,050
Λίγοι θάμνοι και δέντρα (καλοκαίρι)	0,040	0,080	0,060
Πολλοί θάμνοι (χειμώνας)	0,045	0,110	0,070
Πολλοί θάμνοι (καλοκαίρι)	0,070	0,160	0,100
Δέντρα			
Πυκνές ιτιές, καλοκαίρι	0,110	0,200	0,150
Καθαρισμένη γη, κομμένοι κορμοί	0,030	0,050	0,040
Όπως παραπάνω αλλά με πολλά βλαστάρια	0,050	0,080	0,060
Πολλά δέντρα, με τη ροή κάτω από τα κλαδιά	0,080	0,120	0,100
Όπως παραπάνω, ροή στο ύψος των κλαδιών	0,100	0,160	0,120

Συντελεστής Manningγια φυσικό ρέματα με  $B \geq 30$  m.

Επιφάνεια/Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
Συνήθεις διατομές χωρίς θάμνους ή βράχους	0,025	0,060	0,045
Ασύμμετρες διατομές με θάμνους και βράχο	0,035	0,100	0,065

Συντελεστές Manningγια φυσικά ρέματα με  $B < 30$  m.

Επιφάνεια/Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
Ρέμα ή πεδιάδα			
Καθαρά, ευθύγραμμο χωρίς βυθίσεις	0,025	0,033	0,030
Όπως παραπάνω αλλά με πέτρες και χόρτα	0,030	0,040	0,035
Καθαρά, με μαιάνδρους, μερικές ξέρες (ΚΜΕ)	0,033	0,045	0,040
ΚΜΕ με πέτρες και χόρτα	0,035	0,050	0,045
ΚΜΕ, πέτρες και χόρτα, αρνητικές κλίσεις	0,040	0,055	0,048
ΚΜΕ, με πολλές πέτρες	0,045	0,060	0,050
Πρανή με αργή ροή, πολλά χόρτα και λακκούβες	0,050	0,080	0,070
Πρανή με πολλά χόρτα, βυθίσεις, βλάστηση	0,075	0,150	0,100
Ρέμα στα ορεινά, χωρίς βλάστηση, απότομα πρανή, δένδρα – θάμνοι βυθισμένοι			
Χαλίκια και μερικοί βράχοι στον πυθμένα	0,030	0,050	0,040
Μεγάλοι βράχοι στον πυθμένα	0,040	0,070	0,050

### 2.6.1 Εκτέλεση συντελεστή Manning για φυσικά ρεύματα

Για φυσικά ρέματα και κανάλια στα οποία ο συντελεστής τριβής του Manning δεν είναι γνωστός, είναι δυνατή η εκτίμηση του με βάση τις συνθήκες που επικρατούν στο ρέμα ή το κανάλι χρησιμοποιώντας τη σχέση :

$$n = (n_c + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m$$

Όπου:

$n_c$ , ο συντελεστής υλικού

$n_1$ , συντελεστής ανομοιομορφίας επιφάνειας

$n_2$ , συντελεστής μεταβλητότητας διατομών

$n_3$ , συντελεστής επίδρασης εμποδίων

$n_4$ , συντελεστής φυτοκάλυψης

$m$ , συντελεστής μονονδρισμών

Συντελεστής υλικού  $n_0$

Υλικό	Τιμή $n_0$
Γαιώδες έδαφος	0,020
Βραχώδες έδαφος	0,025
Μικρά χαλίκια	0,024
Μεγάλα χαλίκια, κροκάλες	0,028

Για την επιλογή του βαθμού ανομοιομορφίας, θεωρείται κανένας όταν η επιφάνεια είναι κατά το δυνατόν λεία για τα δεδομένα του υλικού από το οποίο αποτελείται, μικρός όταν εμφανίζονται περιοχές με περιορισμένη διάβρωση, μέτριος όταν ο πυθμένας ή και τα πρανή είναι αρκετά διαβρωμένα ή υπάρχει υπολογίσιμη εναπόθεση φερτών υλικών και μεγάλος όταν υπάρχει έντονη διάβρωση και εναπόθεση, μεγάλες κοιλότητες και ασυνέχειες στον πυθμένα ή και στα πρανή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ενδιάμεσες τιμές από αυτές που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα στην περίπτωση που κατά την κρίση του μηχανικού η υφιστάμενη κατάσταση εμπίπτει μεταξύ δύο κατηγοριών.

Συντελεστής ανομοιομορφίας επιφάνειας  $n_1$

Βαθμός ανομοιομορφίας	Τιμή $n_1$
Κανένας (λεία, ομοιόμορφη επιφάνεια)	0,000
Μικρός (μικρές λακκούβες και εξάρσεις)	0,005
Μέτριος (μέτριες λακκούβες και εξάρσεις)	0,010
Μεγάλος: το έδαφος είναι πλήρως ανομοιόμορφο	0,020

Η μεταβλητότητα των διατομών αναφέρεται σε αλλαγές στη γεωμετρία της βρεχόμενης περιμέτρου των διατομών (σχήμα, μέγεθος ή μήκος). Κάθε τέτοια απότομη μεταβολή που δεν συνοδεύεται από συναρμογή αυξάνει το συντελεστή τριβής.

Συντελεστής μεταβλητότητας διατομών  $n_2$

Μεταβλητότητα διατομών	Τιμή $n_2$
Ομαλές μεταβολές με συναρμογές	0,000
Περιστασιακές απότομες μεταβολές	0,005
Συνεχείς απότομες μεταβολές, έλλειψη συναρμογών	0,010~0,015

Η ύπαρξη εμποδίων αυξάνει γενικά το συντελεστή τριβής. Εμπόδια θεωρούνται οι κορμοί δέντρων που παρεμποδίζουν τη ροή του ρευστού, τα ακρόβαθρα ή τα μεσόβαθρα γεφυρών που βρίσκονται εντός της κοίτης του ποταμού και διάφορες άλλες συναφείς κατασκευές ή φυσικά εμπόδια. Η αύξηση του συντελεστή τριβής εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα, τον αριθμό και την κατανομή των εμποδίων. Επειδή όμως δεν υπάρχει κάποιος αποδεκτός τρόπος ορισμού του βαθμού επιρροής

των εμποδίων, η εκτίμηση της αύξησης του συντελεστή τριβής εναπόκειται στην κρίση του μηχανικού. Ο ακόλουθος πίνακας περιλαμβάνει τυπικές τιμές σχετικής επίδρασης των εμποδίων στη ροή, ανάλογα με το μέγεθος της επίδρασης αυτής.

Συντελεστής σχετικής επίδρασης εμποδίων  $n_3$

Επίδραση εμποδίων	Τιμή $n_3$
Αμελητέα	0,000
Ελάχιστη, πολύ μικρή	0,010-0,015
Σημαντική	0,020-0,030
Πολύ μεγάλη	0,040-0,060

Η φυτοκάλυψη αν και μπορεί να αντιμετωπισθεί ως επιφανειακή τραχύτητα, μειώνει σημαντικά την παροχτευτικότητα της διατομής και επιβραδύνει τη ροή. Η επίδραση αυτή εξαρτάται κυρίως από το ύψος, την πυκνότητα, την κατανομή και τον τύπο της φυτοκάλυψης.

Συντελεστής φυτοκάλυψης  $n_4$

Συντελεστής φυτοκάλυψης	Τιμή $n_4$
Χαμηλός (γρασίδι)	0,005-0,010
Μέτριος (χαμηλοί θάμνοι)	0,010-0,025
Υψηλός (θάμνοι, σποραδικά δένδρα)	0,025-0,050
Πολύ υψηλός (πλήρης βλάστηση)	0,050-0,100

Ο συντελεστής μαιανδρισμών λαμβάνεται υπόψη ως ποσοστό που αυξάνει όλες τις τιμές των υπολοίπων συνιστωσών του συντελεστή τριβής. Σε απόλυτες τιμές πειράματα έχουν δείξει αύξηση του συντελεστή τριβής κατά 0.001 για κάθε 20 μοίρες στροφή στο επίπεδο και για μήκος αγωγού 30 m. Παρόλα αυτά δεν έχει αποδειχθεί ακόμα αν μπορεί η οριζοντιογραφική καμπύλωση να αυξήσει το συντελεστή τριβής περισσότερο από 0.003.

Επεκτείνοντας το εργαστηριακά πειράματα σε φυσικά ποτάμια, γενικά η ύπαρξη πολλών μαιάνδρων κατά μήκος ενός ποταμού μπορεί να αυξήσει το συντελεστή τριβής έως και 30%. Σε συνήθεις περιπτώσεις μαιάνδρων, το μεγαλύτερο πλήθος των οποίων έχουν καμπυλότητα από 25 έως 45 μοίρες, μια αύξηση της τάξεως του 15% θεωρείται λογική.

Συντελεστής μαιάνδρων  $m$

Συντελεστής μαιανδρισμών	Τιμή $m$
Δεν υπάρχουν μαιάνδροι, ευθύγραμμη κοίτη	1,000
Αρκετοί μαιάνδροι	1,150
Σχεδόν καθόλου ευθύγραμμα τμήματα	1,300



## Μεταβαλλόμενος συντελεστής Manning

Έχει αποδειχθεί μέσα από πολλές πειραματικές διατάξεις και μετρήσεις πεδίου, ότι ο συντελεστής τριβής κατά Manning δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται κυρίως από το ποσοστό πλήρωσης, δηλαδή το λόγο βάθους ροής προς μέγιστο βάθος ροής. Οι ακόλουθοι τύποι υπολογίζουν την τιμή του συντελεστή Manning συναρτήσει του συντελεστή που αντιστοιχεί στη ροή για πλήρωση 100% και 50% καθώς και του ποσοστού πλήρωσης σε κυκλικούς αγωγούς.

### A' ΜΕΘΟΔΟΣ

$$n = n_0 \left( 1 + 0.62 \left( \frac{y}{D} \right)^{0.4} \left( 1 - \frac{y}{D} \right)^{0.9} \right)$$

Όπου:

$n$ , ο συντελεστής τριβής κατά Manning ( $s/m^{\frac{1}{2}}$ )

$n_0$ , ο συντελεστής Manning όταν η πλήρωση είναι 100% ( $s/m^{\frac{1}{3}}$ )

$D$ , η διάμετρος του αγωγού (m)

$y$ , το βάθος ροής (m)

### B' ΜΕΘΟΔΟΣ

$$\frac{n}{n_{0.5}} = 1 - 0.9 \left| \frac{y}{D} - 0.5 \right|^{2.4} \left( \frac{D}{y} \right)^{0.8}$$

Όπου:

$n$ , συντελεστής τριβής κατά Manning ( $s/m^{\frac{1}{3}}$ )

$n_{0.5}$ , ο συντελεστής Manning όταν η πλήρωση είναι 50% ( $s/m^{1/3}$ )

$D$ , η διάμετρος του αγωγού (m)

$y$ , το βάθος ροής (m)

Οι παραπάνω σχέσεις έχουν εκφρασθεί για κυκλικούς αγωγούς, εύκολα όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιοδήποτε γεωμετρία, αντικαθιστώντας τη διάμετρο  $D$  με την υδραυλική ακτίνα  $R$ .

$$D=4R$$

## Ισοδύναμος συντελεστής Manning

Στις περισσότερες φυσικές ή τεχνητές διατομές ο συντελεστής τριβής δεν είναι ίδιος καθ' όλο το μήκος της υγρής περιμέτρου τους. Στις φυσικές διατομές αυτό είναι προφανές καθώς ο πυθμένας είναι συνήθως επικαλυμμένος από χαλίκια, άργιλο, άμμο ή ιλύ, ενώ τα πρανή έχουν σημαντικό ποσοστό φυτοκάλυψης, γρασίδι ή χόρτα, θάμνους ακόμα και δέντρα. Στις τεχνητές διατομές, όπως για παράδειγμα στην κυκλική, στα σημεία που η ροή δεν είναι συνεχής εμφανίζονται βρύα που μεταβάλλουν το συντελεστή τριβής. Επιπλέον στον πυθμένα καθιζάνουν και επικολλώνται φερτά που εισέρχονται στους αγωγούς και δεν μπορούν να παρασυρθούν από τη ροή.

Έχουν προταθεί πολλοί τρόποι για τον υπολογισμό ενός ισοδύναμου συντελεστή τριβής Manning για χρήση στις εξισώσεις ομοιόμορφης ροής χωρίς να είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός σε διατομές με ενιαίο συντελεστή τριβής. Αν υποθεθεί ότι μια διατομή έχει περισσότερους από ένα συντελεστές τριβής κατά μήκος της υγρής περιμέτρου, τότε ο ισοδύναμος συντελεστής Manning μπορεί να υπολογιστεί με βάση μια από τις ακόλουθες μεθόδους.

Μέθοδος Morton, με την οποία γίνεται η παραδοχή ότι οι μέσες ταχύτητες σε κάθε τμήμα με διαφορετικό συντελεστή τριβής είναι ίσες μεταξύ τους και αριθμητικά ίσες με τη μέση ταχύτητα ροής στη διατομή. Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται συνήθως σε κλειστές διατομές που έχουν ένα ή περισσότερα τόξα (όπως η σκουφοειδής) ή σε ανοικτές διατομές με απότομα πρανή.

$$n_E = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^{1.5})}{P} \right)^{2/3}$$

Μέθοδος Pavlovskii, με την οποία γίνεται η παραδοχή ότι η ολική δύναμη αντίστασης στη ροή σε όλη τη διατομή είναι ίση με το άθροισμα των δυνάμεων αντίστασης σε κάθε τμήμα της διατομής που έχει σταθερό συντελεστή τριβής. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη τόσο για ανοικτές όσο και για κλειστές διατομές.

$$n_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^2)}{P}}$$

Μέθοδος Lotter, σύμφωνα με την οποία η ολική παροχή σε μια διατομή ισούται με το άθροισμα των παροχών σε κάθε τμήμα αυτής που έχει σταθερό συντελεστή τριβής. Η μέθοδος αυτή συνίσταται για ανοικτές διατομές και πλημμυρικές πεδιάδες.

$$n_E = \frac{PR^{5/3}}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i R_i^{5/3}}{n_i} \right)}$$

Μέθοδος Colebatch, η οποία συνίσταται για ανοικτές διατομές και πλημμυρικές πεδιάδες. Η μέθοδος αυτή όπως και η μέθοδος Cox που αναφέρεται παρακάτω, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κλειστές διατομές που έχουν ένα ή περισσότερα κατακόρυφα πρανή. Ωστόσο σε συνήθεις ανοικτές φυσικές διατομές δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

$$n_E = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (A_i n_i^{1.5})}{A} \right)^{2/3}$$

Μέθοδος Cox, η οποία συνίσταται για ανοικτές διατομές και πλημμυρικές πεδιάδες. Για τη μέθοδο Cox ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στη μέθοδο του Colebatch.

$$n_E = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i n_i)}{A}$$

Όπου:

$n_E$ , ο ισοδύναμος συντελεστής Manning ( $s/m^{1/3}$ )

R, η ολική υδραυλική ακτίνα της διατομής (m)

P, η ολική βρεχόμενη περίμετρος της διατομής (m)

A, η ολική υγρή επιφάνεια της διατομής ( $m^2$ )

$n_i$ , ο συντελεστής Manning που αντιστοιχεί σε βρεχόμενη περίμετρο ή υγρή επιφάνεια ή υδραυλική ακτίνα ( $s/m^{1/3}$ )

N, το πλήθος των πλευρών της διατομής με διαφορετικό συντελεστή τριβής Manning

### Σχέση Hazen-Williams

Η σχέση αυτή τυγχάνει ευρείας εφαρμογής στην Αμερική, σε προβλήματα ροής υπό πίεση. Σε ελάχιστες όμως περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε προβλήματα ροής με ελεύθερη επιφάνεια. Σύμφωνα με την σχέση αυτή, η μέση ταχύτητα ροής δίνεται ως εξής:

$$V = 0.849 C_0 R^{0.63} S^{0.54}$$

Όπου:

V, η μέση ταχύτητα της ροής (m/s)

R, η υδραυλική ακτίνα της διατομής (m)

S, η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/m)

$C_0$ , ο συντελεστής τριβής κατά Hazen-Williams (-)

Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή τριβής κατά Hazen-Williams φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Επιφάνεια/Υλικό	Μέση τιμή
Σκυρόδεμα με ασβέστη	140
Χυτοσίδηρος (νέος)	130
Σκυρόδεμα καλής ποιότητας	150
Σκυρόδεμα προκατασκευασμένο	135
Σκυρόδεμα (ξυλότυπος)	120
Σκυρόδεμα (μεταλλότυπος)	140
Χαλκός	135
Ελατός σίδηρος	130
Γαλβανισμένος σίδηρος	120
Γυαλί	140
PVC	150
Ατσάλι με ηλώσεις (νέα, τραχύ)	80
Ατσάλι με ηλώσεις (νέα, λεία)	110
Ατσάλι	100
Ξύλο (νέο)	140

### Σχέση Scimemi

Η σχέση Scimemi ισχύει μόνο για αμιαντοτσιμεντοσωλήνες. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχει συντελεστής τριβής στην σχέση και η διατύπωσή της ισχύει μόνο για κυκλικές διατομές:

$$V = 61.5D^{0.68}S^{0.56}$$

Όπου:

V, η μέση ταχύτητα της ροής (m/s)

D, η διάμετρος (mm)

S, η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/km)

### Σχέση Darcy-Weisbach

Η σχέση των Darcy και Weisbach, αντίθετα με τις προηγούμενες εμπειρικές σχέσεις, είναι θεωρητικά τεκμηριωμένη σε προβλήματα ροής υπό πίεση με ασυμπίεστα ρευστά. Λόγω των υπολογιστικών δυσχερειών που παρουσιάζει η εφαρμογή της έχει περιοριστεί σε προβλήματα ροής υπό πίεση, μπορεί ωστόσο να χρησιμοποιηθεί με την ίδια επιτυχία και σε προβλήματα ροής με ελεύθερη επιφάνεια καθώς κατορθώνει να προσομοιώσει επιτυχώς τη μεταβλητότητα της τριβής ως συνάρτηση του υλικού

της διατομής, της γεωμετρίας της και της ταχύτητας ροής. Ο συντελεστής τριβής είναι συνάρτηση του υλικού της διατομής και του αριθμού Reynolds, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την υδραυλική ακτίνα της διατομής και την ταχύτητα της ροής.

Σύμφωνα με τους Darcy και Weisbach:

$$V = \sqrt{\frac{8gRS}{f}}$$

Όπου:

V, η μέση ταχύτητα της ροής (m/s)

R, η υδραυλική ακτίνα (m)

S, η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/m)

f, ο αδιάστατος συντελεστής τριβής κατά Darcy-Weisbach

g, η επιτάχυνση της βαρύτητας (=9.81 m/s<sup>2</sup>)

Η δυσκολία της εφαρμογής της μεθόδου αυτής έγκειται στον προσδιορισμό της τιμής του αδιάστατου συντελεστή τριβής κατά Darcy-Weisbach. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλοί τύποι για την εκτίμηση της τιμής του συντελεστή ανάλογα με τον τύπο της ροής και του υλικού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότεροι από αυτούς:

Για στρωτή ροή ισχύει ο ακόλουθος τύπος:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Για τυρβώδη ροή και σωλήνες του εμπορίου ισχύουν οι ακόλουθοι τύποι:

Σχέση Prandtlγια υδραυλικούς λείους σωλήνες:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re \sqrt{f}) - 0.8$$

Σχέση Colebrookγια υδραυλικούς τραχείς σωλήνες:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log\left(\frac{K_S}{D} + \frac{9.35}{Re \sqrt{f}}\right)$$

Σχέση Nikuradseγια υδραυλικούς πλήρως τραχείς σωλήνες:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log\left(\frac{K_S}{D}\right)$$

Επειδή οι σχέσεις απαιτούν δοκιμές για την εύρεση του συντελεστή τριβής, έχουν προταθεί νεότερες προσεγγιστικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως με επιτυχία. Τέτοιες σχέσεις είναι:

Σχέση Whiteγια λείους σωλήνες:

$$f = \frac{1.02}{(\log Re)^{2.5}}$$

Σχέση Millerγια τραχείς σωλήνες:

$$f = 0.25 \left[ \log \left( \frac{k_s}{14.8 \cdot R} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2}$$

Σχέση Swamee-Jainγια κυκλικούς σωλήνες:

$$f = \frac{1.325}{\left[ \ln \left( \frac{k_s}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Στον πίνακα φαίνονται ενδεικτικές τιμές ισοδύναμης τραχύτητας  $k_s$  κατά Darcy-Weisbach:

<b>Επιφάνεια/Υλικό</b>	<b>Μέση τιμή</b>
Αλουμίνιο	0.300
Σκυρόδεμα με ασβέστη	0.002
Χυτοσίδηρος (νέος)	0.120
Σκυρόδεμα πολύ καλής ποιότητας	0.366
Τούβλα με ασβεστοκονίαμα	0.610
Τούβλα υπόνομων	0.610
CMP	0.305
Σκυρόδεμα	0.122
Προκατασκευασμένοι σωλήνες	0.366
Σκυρόδεμα (μεταλλότυπος)	1.829
Σκυρόδεμα (ξυλότυπος)	0.610
Χαλκός	0.002
Γαλβανισμένος σίδηρος	1.520
Γυαλί	0.001
PVC	0.122
HDPE	0.150

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

### 3. Συνηθείς Διατομές

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στη γεωμετρία συνήθων κλειστών και ανοικτών διατομών που χρησιμοποιούνται σε υδραυλικά έργα και κατασκευές όπως έργα υποδομής (όμβρια, ακάθαρτα, ύδρευση), οχετούς, αγωγούς μεταφοράς, κλπ.

Τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από ακριβείς αναλυτικές σχέσεις σύμφωνα με την παρακάτω σημειολογία:

b, το μέγιστο πλάτος

d, το μέγιστο ύψος

y, το βάθος ροής ( $0 \leq y \leq d$ )

T, το ελεύθερο πλάτος

A, το εμβαδόν της υγρής επιφάνειας της διατομής

P, το μήκος της βρεχόμενης περιμέτρου

$\bar{y}$ , το βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια ως το κέντρο βάρους της υγρής επιφάνειας.

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να προκύψουν με απλή αντικατάσταση τα παρακάτω επιπλέον στοιχεία:

$R=A/P$ , η υδραυλική ακτίνα

$D_m=A/T$ , το μέσο βάθος

$Z_c=A\sqrt{D_m}$ , ο συντελεστής της διατομής για κρίσιμη ροή

$Z_u=AR^{2/3}$ , ο συντελεστής της διατομής για ομοιόμορφη ροή

Σε κάθε περίπτωση θεωρείται ότι η αρχή των αξόνων συμπίπτει με το βαθύ σημείο της διατομής. Επιπλέον, στις σχέσεις χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τριγωνομετρικές συναρτήσεις:

$\sin (-)$ , το ημίτονο

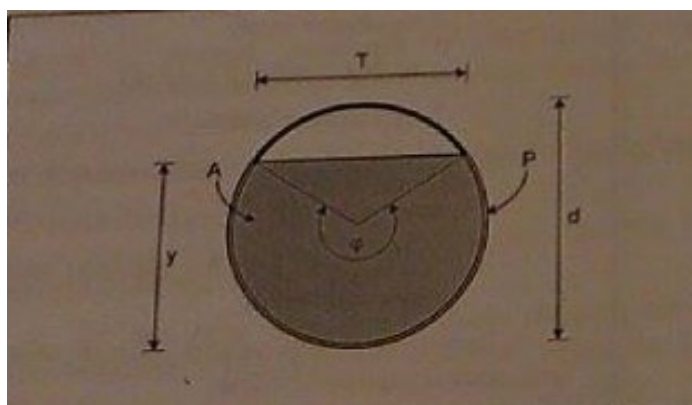
$\cos (-)$ , το συνημίτονο

$\operatorname{asin} (-)$ , το τόξο ημιτόνου

$\operatorname{acos} (-)$ , το τόξο συνημίτονου.

### 3.2 Κυκλική διατομή

Η κυκλική διατομή είναι σήμερα η πλέον συνηθισμένη διατομή κυρίως λόγω ύπαρξης προκατασκευασμένων τυποποιημένων τεμαχίων ποικίλων διαστάσεων που μειώνουν τόσο το κόστος όσο και τη διάρκεια κατασκευής του έργου. Σχεδόν όλα τα δίκτυα ύδρευσης ακαθάρτων, ομβρίων και πολλοί οχετοί κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μόνο κυκλικές διατομές. Ωστόσο για μεγάλες παροχές ή πολύ μικρές κατά μήκος κλίσεις, οι κυκλικές διατομές δεν συνίστανται λόγω του μεγαλύτερου κόστους που συνεπάγεται η χρήση τους σε σχέση με άλλες μορφές διατομών όπως για παράδειγμα η ωοειδής ή η ορθογωνική.



Σχήμα 3.1: Κυκλική διατομή

Έστω  $b=d$  η διάμετρος της κυκλικής διατομής,  $y$  το βάθος ροής και  $\varphi$  η επίκεντρη γωνία που αντιστοιχεί στα άκρα του ελεύθερου πλάτους, όπως στο σχήμα 3.1. Τότε ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\varphi = 2 \arccos \left( 1 - \frac{2y}{d} \right)$$

$$T = \left( \sin \frac{\varphi}{2} \right) d$$

$$A = \frac{1}{8} (\varphi - \sin \varphi) d^2$$

$$P = \varphi \frac{d}{2}$$

$$\bar{y} = y - \frac{d}{2} + \frac{2d \sin \left( \frac{\varphi}{2} \right)^3}{3(\varphi - \sin(\varphi))}$$



Όταν το βάθος ροής ισούται με τη διάμετρο της διατομής, τότε τα γεωμετρικά στοιχεία προκύπτουν από τις εξισώσεις (3.2) έως (3.5) θέτοντας  $\varphi=2\pi$  :

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$P = \pi d$$

$$T = 0$$

$$\bar{y} = \frac{d}{2}$$

Καθώς το βάθος ροής  $y$  μεταβάλλεται από 0 έως  $d$ , η παροχή αυξάνεται έως το σημείο που το βάθος ροής ισούται περίπου με το 93.8% της διαμέτρου. Στο σημείο αυτό η διερχόμενη παροχή είναι μέγιστη ενώ στη συνέχεια μειώνεται. Αυτή η παράδοση συμπεριφορά απαντάται σε όλες τις κλειστές διατομές των οποίων η άνω πλευρά είναι καμπύλη. Οφείλεται στο γεγονός ότι η υγρή περίμετρος αυξάνεται πολύ πιο γρήγορα απ' ό,τι η υγρή επιφάνεια, με αποτέλεσμα να μειώνεται η υδραυλική ακτίνα και συνεπώς η παροχή.

Αν θέσουμε ως  $r=y/d$  τον λόγο πλήρωσης, τότε η μέγιστη παροχή προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $A\left(\frac{A}{P}\right)^{2/3}$  :

$$\frac{\partial \left( A\left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} \right)}{\partial r} = 0 \Rightarrow r = \frac{y}{d} = 0.938$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ταχύτητα προκύπτει με ικανοποίηση της παράστασης  $\left(\frac{A}{P}\right)^{2/3}$  :

$$\frac{\partial \left[ \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} \right]}{\partial r} = 0 \Rightarrow r = \frac{y}{d} = 0.813$$

Στο παράρτημα προστίθενται σε πινακοποιημένη μορφή τα γεωμετρικά στοιχεία της κυκλικής διατομής.

Παράδειγμα 3-1: Να βρεθεί η μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει από κυκλική διατομή διαμέτρου 0.40m με  $\pi=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Η μέγιστη παροχή επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} = 0.938$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$Z_u = 0.335d^{8/2} = 0.029m^{8/3}$$

Η μέγιστη παροχή προκύπτει από την σχέση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} Z_u J^{1/2} = 0.137 \frac{m^3}{s}$$

Παράδειγμα 3-2: Να βρεθεί η μέγιστη ταχύτητα ροής που μπορεί να επιτευχθεί σε κυκλική διατομή διαμέτρου 0.40m με  $\pi=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} = 0.813$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$R = 0.304d = 0.122m$$

Η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την σχέση Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} = 1.160 \frac{m}{s}$$

Παράδειγμα 3-3: Να βρεθεί η ελάχιστη διάμετρος κυκλικής διατομής που μπορεί να παροχετεύσει 0.5 m/s με μέγιστο λόγο πλήρωσης 60%,  $\pi < 0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει για λόγο πλήρωσης 60% ότι:

$$Z_u = 0.2094d^{8/3}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο το ύψος της διατομής:

$$Q = \frac{1}{n} Z_u J^{1/2} \Rightarrow 0.5 = \frac{1}{0.015} 0.2094d^{8/3} \sqrt{0.005} \Rightarrow d = 0.77m$$

Παράδειγμα 3-4: Να βρεθεί το ποσοστό πλήρωσης κυκλικής διατομής με διάμετρο  $d=1.00m$  που παροχετεύει  $0.5m^3/s$  με  $\pi=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει με εξίσωση με μόνο άγνωστο τον συντελεστή  $Z_u$ :

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} J^{1/2} = \frac{1}{n} Z_u J^{1/2} \Rightarrow Z_u = \frac{0.015 \cdot 0.5}{\sqrt{0.005}} m^{8/3} \Rightarrow Z_u = 0.10607 m^{8/3}$$

Συνεπώς , ο αδιάστατος λόγος  $Z_u/d^{8/3}$  θα είναι ίσος με:

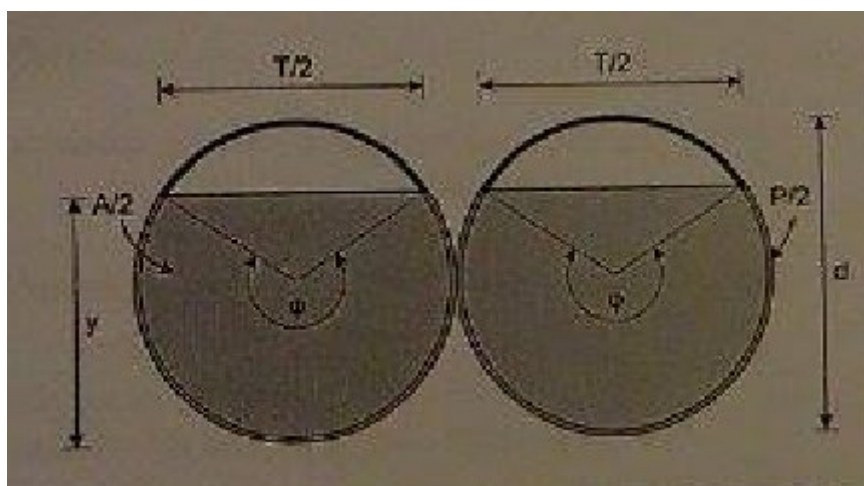
$$\frac{Z_u}{d^{8/3}} = 0.10607$$

Με βάση την παραπάνω τιμή, προκύπτει από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων ο λόγος πλήρωσης:

$$\frac{y}{d} = 0.402$$

### 3.3 Δίδυμη κυκλική διατομή

Εάν χρησιμοποιούνται δύο κυκλικές διατομές της ίδιας διαμέτρου η μια δίπλα στην άλλη, τότε σχηματίζεται μια δίδυμη κυκλική διατομή. Η μορφή αυτή απαντάται συνήθως σε οχετούς όταν το ύψος επίχωσης είναι μικρό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μόνο κυκλική διατομή για την παραλαβή της παροχής σχεδιασμού.



Σχήμα 3.2: Δίδυμη κυκλική διατομή

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη γεωμετρία της διατομής αυτής είναι παρόμοιες με αυτές της απλής κυκλικής διατομής:

$$\varphi = 2\arccos\left(1 - \frac{2y}{d}\right)$$

$$T = 2\left(\sin\frac{\varphi}{2}\right)d$$

$$A = \frac{1}{4}(\varphi - \sin\varphi)d^2$$

$$P = \varphi d$$

$$\bar{y} = y - \frac{d}{2} + \frac{2d \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)^3}{3(\varphi - \sin(\varphi))}$$

### 3.4 Κλειστή ορθογωνική διατομή

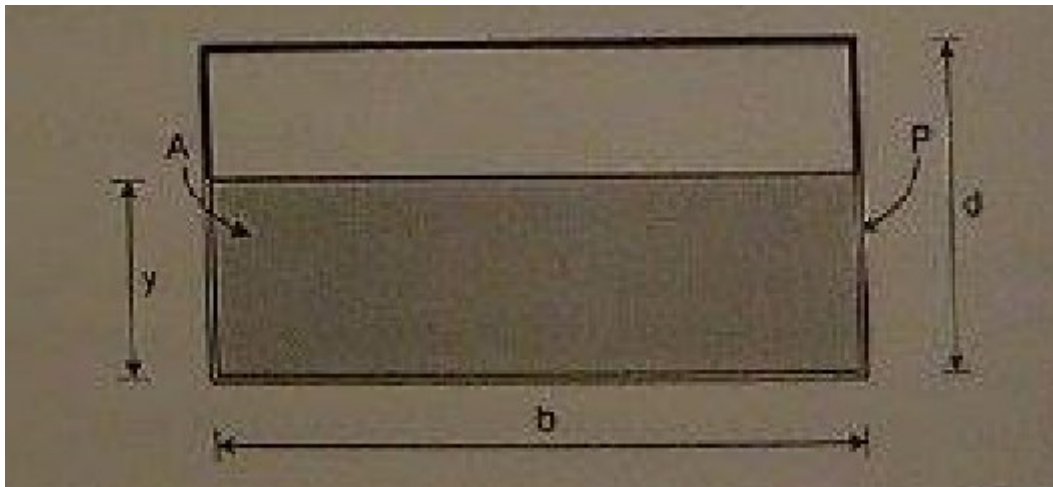
Η κλειστή ορθογωνική διατομή καθαρού πλάτους  $b$  και καθαρού ύψους  $d$  με βάθος ροής  $y$  διέπεται από τις εξισώσεις:

$$T = b$$

$$A = b \cdot y$$

$$P = b + 2y$$

$$\bar{y} = y/2$$



**Σχήμα 3.3: Κλειστή ορθογωνική διατομή**

Οι εξισώσεις ισχύουν όταν το βάθος ροής  $y$  είναι μικρότερο από το καθαρό ύψος  $d$ . Όταν η διατομή λειτουργεί με πλήρη πλήρωση ( $y=d$ ) τότε χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

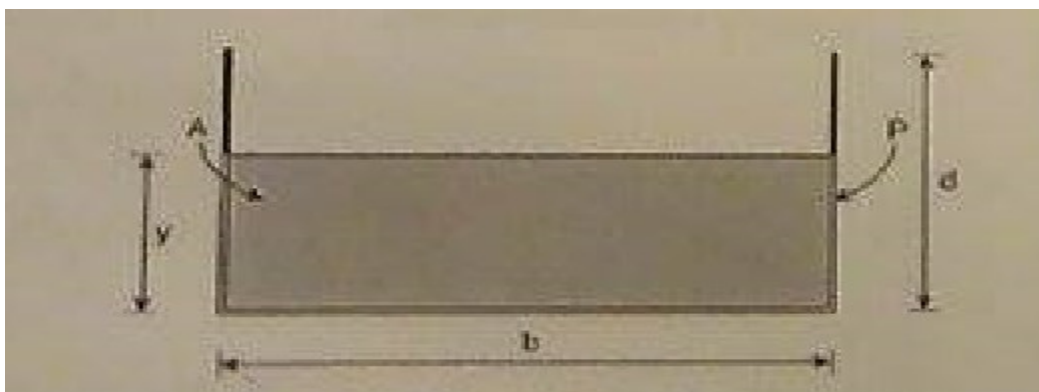
$$T = 0$$

$$P = 2(b + d)$$

Κλειστές ορθογωνικές διατομές χρησιμοποιούνται σε οχετούς και σε δίκτυα ομβρίων όταν οι αντίστοιχες κυκλικές διατομές είναι οικονομικά ασύμφορες για την παραλαβή των παροχών σχεδιασμού ή όταν το διαθέσιμο ύψος επίχωσης δεν επιτρέπει τη χρήση μεγάλων διαμέτρων κυκλικών διατομών.

### 3.5 Ανοικτή ορθογωνική διατομή

Τα γεωμετρικά στοιχεία της ανοικτής ορθογωνικής διατομής καθαρού πλάτους  $b$  και καθαρού ύψους  $d$  υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις για όλα τα δυνατά βάθη ροής  $y$ .



Σχήμα 3.4: Ανοικτή ορθογωνική διατομή

Οι ανοικτές ορθογωνικές διατομές καλούνται και ορθογωνικές τάφροι και χρησιμοποιούνται σε έργα απαγωγής ομβρίων υδάτων και κανάλια μεταφοράς νερού.

### 3.6 Δίδυμη κλειστή ορθογωνική διατομή

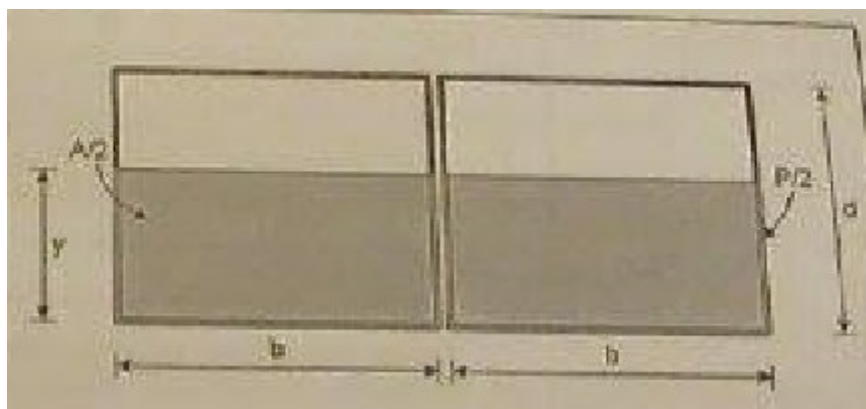
Η δίδυμη κλειστή ορθογωνική διατομή χρησιμοποιείται σε οχετούς όταν το άνοιγμα της διατομής είναι τέτοια που να υπάρχει στατικό πρόβλημα λειτουργίας μιας ισοδύναμης απλής κλειστής ορθογωνικής διατομής. Εάν το καθαρό πλάτος κάθε μιας εκ των ορθογωνικών διατομών είναι  $b$  και το καθαρό ύψος είναι  $d$  τότε ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις ( $0 \leq y \leq d$ ):

$$T = 2b$$

$$A = 2by$$

$$P = 2b + 4y$$

$$\bar{y} = y/2$$



### Σχήμα 3.5: Δίδυμη κλειστή ορθογωνική διατομή

Στην πλήρη πλήρωση ισχύουν οι σχέσεις:

$$T = 0$$

$$P = 4(b + d)$$

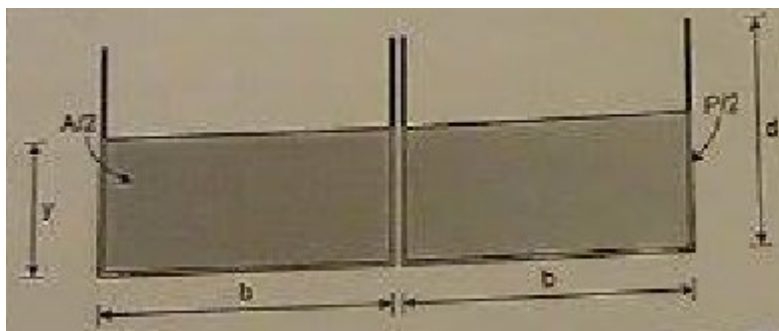
### 3.7 Δίδυμη ανοικτή ορθογωνική διατομή

Η δίδυμη ανοικτή ορθογωνική διατομή χρησιμοποιείται σπάνια. Τα διάφορα γεωμετρικά μεγέθη της για βάθος ροής  $y$  ( $0 \leq y \leq d$ ) δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$T = 2b$$

$$P = 2b + 4y$$

$$\bar{y} = y/2$$



Σχήμα 3.6: Δίδυμη ανοικτή ορθογωνική διατομή

### 3.8 Κλειστή τραπεζοειδής διατομή

Η κλειστή τραπεζοειδής διατομή δεν χρησιμοποιείται συχνά. Στη γενικότερη μορφή της έχει καθαρό πλάτος πυθμένα  $b$ , αριστερή κλίση πρανών  $z_L$ , δεξιά κλίση πρανών  $z_R$  και καθαρό ύψος  $d$ . Οι κλίσεις δίνονται ως λόγοι οριζόντιας προς κατακόρυφης απόστασης.



Σχήμα 3.7: Κλειστή τραπεζοειδής διατομή

Τα υδραυλικά στοιχεία της διατομής υπολογίζονται για βάθη ροής  $y$  ( $0 \leq y \leq d$ ) από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$T = b + (z_L + z_R)y$$

$$A = \left( b + \frac{z_L + z_R}{2} y \right) y$$

$$P = b + y(\sqrt{1 + z_L^2} + \sqrt{1 + z_R^2})$$

$$\bar{y} = \frac{y}{3} \left( 1 + \frac{b}{2b + y(z_L + z_R)} \right)$$

Σε περίπτωση πλήρους πλήρωσης ( $y=d$ ) τότε αντί των εξισώσεων ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

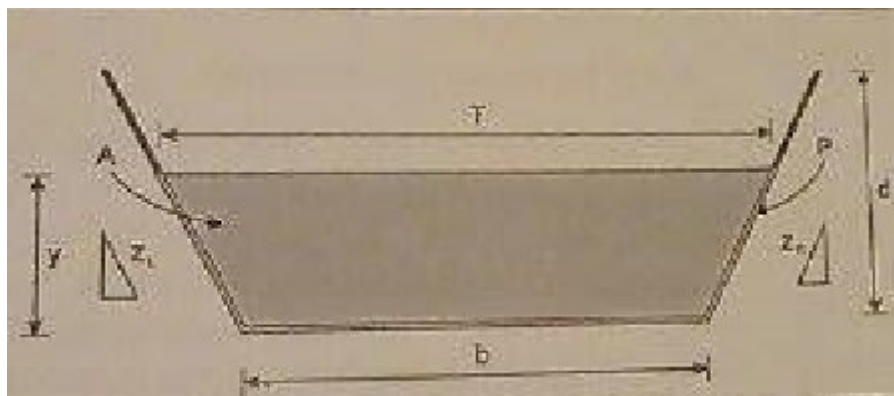
$$T = 0$$

$$P = 2b + d \left( \sqrt{1 + z_L^2} + \sqrt{1 + z_R^2} \right) + d(z_L + z_R)$$

Στο παράρτημα παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή τα γεωμετρικά στοιχεία ανοικτών τραπεζοειδών διατομών με διάφορες κλίσεις πρανών  $z_L = z_R$ . Τα στοιχεία αυτά ισχύουν και για κλειστές τραπεζοειδείς διατομές για βάθη ροής  $0 \leq y \leq d$ .

### 3.9 Ανοικτή τραπεζοειδής διατομή

Η ανοικτή τραπεζοειδής διατομή ή τραπεζοειδής τάφρος είναι πολύ συνηθισμένη σε έργα απαγωγής ομβρίων υδάτων (τάφροι). Έχει το πλεονέκτημα ότι προσαρμόζεται καλύτερα στη φυσική μορφή του εδάφους καθόσον σπάνια τα πρανή μπορούν να σταθούν κατακόρυφα χωρίς υποστήριξη. Η ανοικτή τραπεζοειδής διατομή μπορεί να είναι επενδεδυμένη (συνήθως με σκυρόδεμα) μπορεί όμως και να χρησιμοποιείται χωρίς επένδυση.



Σχήμα 3.8: Ανοικτή τραπεζοειδής διατομή

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των υδραυλικών στοιχείων της διατομής για βάθη ροής  $y$  ( $0 \leq y \leq d$ ).

Στο παράρτημα παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή το γεωμετρικό στοιχείο ανοικτών τραπεζοειδών διατομών με διάφορες κλίσεις πρανών  $z_L = z_R$ .

Παράδειγμα 3-5: Με θεώρηση ομοιόμορφης ροής, να βρεθεί η παροχή που διέρχεται από τραπεζοειδή διατομή με πλάτος πυθμένα  $b=15m$ , κλίση πρανών 1:1, κατά μήκος κλίση  $J=0.00001$  και  $n=0.020$ .

Από την γεωμετρία της διατομής είναι:

$$\frac{y}{b} = 0.100$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων της τραπεζοειδούς διατομής με κλίση πρανών 1:1 προκύπτει ότι:

$$Z_U = 0.02138b^{8/3} = 29.272m^{8/3}$$

Η παροχή προκύπτει από την σχέση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} = 4,63 \frac{m^3}{s}$$

Παράδειγμα 3-6: Με θεώρηση ομοιόμορφης ροής, να βρεθεί το βάθος ροής τραπεζοειδούς διατομής που παροχετεύει  $5.5m^3/s$  με πλάτος πυθμένα  $b=15m$ , κλίση πρανών 1:1, κατά μήκος κλίση  $J=0.00001$  και  $n=0.020$ .

Από την σχέση Manning:

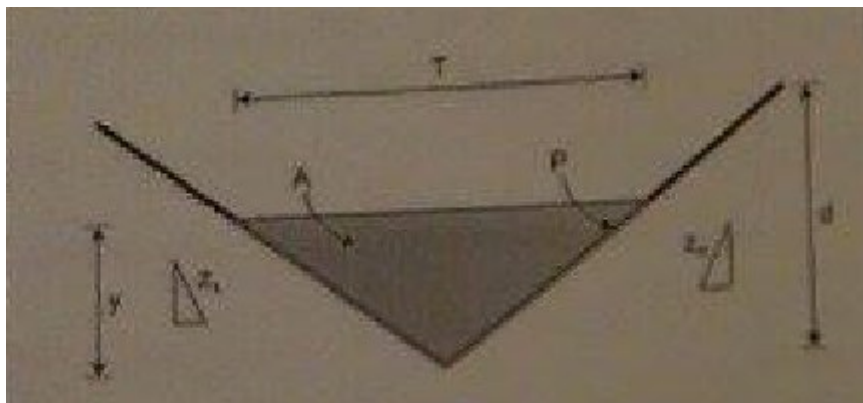
$$\frac{Z_U}{b^{8/3}} - \frac{\pi Q}{J^{1/2} b^{8/3}} = 0.02542$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων της τραπεζοειδούς διατομής με κλίση πρανών 1:1 προκύπτει ότι:

$$y = 0.11b = 1.65m$$

### 3.10 Τριγωνική διατομή

Ειδική περίπτωση της τραπεζοειδούς διατομής είναι η τριγωνική διατομή, στην οποία το πλάτος του πυθμένα είναι ( $b=0$ ). Τέτοιες διατομές απαντώνται συνηθέστερα σε υδραυλικά έργα οδοποιίας, όπως για παράδειγμα στα τριγωνικά ρείθρα.



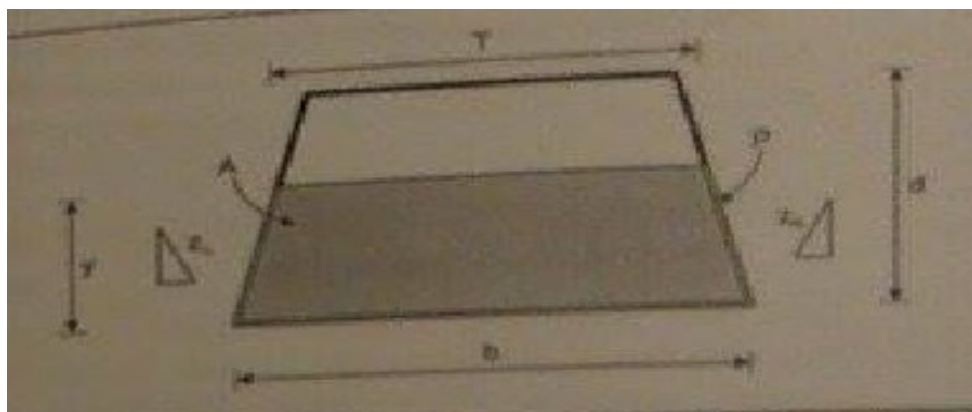


### Σχήμα 3.9: Ανοικτή τριγωνική διατομή

Οι εξισώσεις που διέπουν τη γεωμετρία της ροής σε τριγωνικές διατομές είναι όμοιες με τις αντίστοιχες εξισώσεις των τραπεζοειδών διατομών αν τεθεί πλάτος πυθμένα  $b=0$ .

#### 3.11 Ανεστραμμένη τραπεζοειδής διατομή

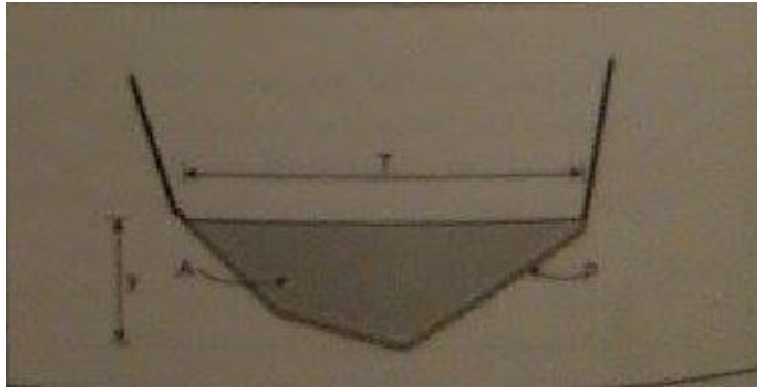
Η ανεστραμμένη τραπεζοειδής διατομή σπάνια χρησιμοποιείται στην πράξη και έχει κυρίως θεωρητική αξία. Μπορεί να είναι κλειστή ή ανοικτή όπως ακριβώς συμβαίνει και με την κανονική τραπεζοειδή διατομή, ωστόσο οι κλίσεις των πρανών της διατομής είναι αρνητικές. Οι εξισώσεις που παρέχουν τα υδραυλικά στοιχεία σε κλειστές ανεστραμμένες τραπεζοειδής διατομές είναι οι όμοιες με τις αντίστοιχες των κανονικών τραπεζοειδών διατομών, στις οποίες όμως οι κλίσεις των πρανών παίρνουν αρνητικές τιμές.



Σχήμα 3.10: Ανεστραμμένη κλειστή τραπεζοειδής διατομή

#### 3.12 Πρισματική διατομή

Οι πρισματικές διατομές απαντώνται σε φυσικά ρέματα και ποτάμια και αποτελούνται από καμπυλόγραμμα τμήματα με διαφορετική εν γένει τραχύτητα. Απλουστευτικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα καμπυλόγραμμα τμήματα είναι ευθύγραμμα και η τραχύτητα είναι ενιαία σε όλο το πλάτος της διατομής. Οι παραδοχές αυτές απλοποιούν σημαντικά την ανάλυση που απαιτείται για τον προσδιορισμό του βάθους ροής, ο οποίος γίνεται συνήθως με διατομές.



**Σχήμα 3.11: Τυχαία πρισματική διατομή**

Για δεδομένη παροχή, επιλέγεται ένα τυχαίο βάθος ροής για το οποίο και υπολογίζονται η υγρή επιφάνεια  $A$  και η βρεχόμενη περίμετρος  $P$ . Σύμφωνα με την εξίσωση του Manning, η ταχύτητα  $V$  ή η παροχή  $Q=VA$  υπολογίζονται με βάση την κατά μήκος κλίση, την υδραυλική ακτίνα  $R=A/P$  και το συντελεστή τριβής Manning. Εάν δεν επαληθευτεί η τιμή της γνωστής παροχής, επιλέγεται άλλο βάθος ροής και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η απόκλιση της υπολογιζόμενης παροχής σε σχέση με την πραγματική να είναι ίση ή μικρότερη από κάποιο προκαθορισμένο όριο.

Εάν η τραχύτητα στις πλευρές δεν είναι η ίδια, τότε η εξίσωση συνεχίζει και ισχύει, αλλά χρησιμοποιείται ένας σταθμισμένος συντελεστής τριβής Manning με βάση μια εκ των σχέσεων ολοκλήρωσης που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.6.3.

Λόγω του αυξημένου υπολογιστικού φόρτου κατά την υδραυλική επίλυση των πρισματικών διατομών, στην πράξη χρησιμοποιούνται εξελιγμένα προγράμματα  $H/Y$ . Σε ορισμένα από αυτά είναι δυνατή και η απευθείας χρήση καμπυλών για την περιγραφή της γεωμετρίας της διατομής.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο**

### **4. Ειδικές Διατομές**

#### **4.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά σε ακριβείς αναλυτικές εξισώσεις

Για την εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών καμπυλόγραμμων διατομών που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα αποχέτευσης ομβρίων και σπανιότερα ακαθάρτων. Οι διατομές αυτές ήταν ιδιαίτερα δημοφιλείς στο παρελθόν, κυρίως λόγω της πολύ

καλής τους υδραυλικής συμπεριφοράς όσον αφορά τη ροή σε μικρές κλίσεις. Αν και σήμερα η χρήση των διατομών αυτών σπανίζει, εντούτοις είναι πολύ χρήσιμη η υδραυλική τους επίλυση σε περιπτώσεις ελέγχου υφισταμένων δικτύων ή μελέτης επεισάσεών τους.

Τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από ακριβείς αναλυτικές σχέσεις, σύμφωνα με την παρακάτω σημειολογία:

b, το μέγιστο πλάτος.

d , το μέγιστο ύψος.

y, το βάθος ροής ( $0 \leq y \leq d$ ).

T, το ελεύθερο πλάτος.

A, τα εμβαδόν της υγρής επιφάνειας της διατομής.

P, το μήκος της βρεχόμενης περιμέτρου.

$\bar{Y}$ , το βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια ως το κέντρο βάρους της υγρής επιφάνειας.

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη, μπορούν να προκύψουν με απλή αντικατάσταση τα Παρακάτω επιπλέον στοιχεία:

$R = A/P$ , η υδραυλική ακτίνα.

$D_m = A/T$ , το μέσο βάθος.

$Z_c = A \sqrt{D_m}$  συντελεστής της διατομής για κρίσιμη ροή.

$Z_u = A P^{2/3}$ , ο συντελεστής της διατομής για ομοιόμορφη ροή.

Σε κάθε περίπτωση θεωρείται ότι η αρχή των αξόνων συμπίπτει με το βαθύ σημείο της διατομής. Επιπλέον, στις σχέσεις χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τριγωνομετρικές συναρτήσεις:

### **Σχεδιασμός Υδραυλικών Έργων**

$\sin(\cdot)$ , το ημίτονο.

$\cos(\cdot)$  το συνημίτονο.

$\tan(\cdot)$ , η εφαπτομένη.

$\text{asin}(\cdot)$ . Το Τόξο ημιτόνου.

$\text{acos}(\cdot)$  Το Τόξο συνημιτόνου.

$\text{atan}(\cdot)$ , Το Τόξο εφαπτομένης.

$\text{acot}(\cdot)$ , Το Τόξο συνεφαπτομένης.

$\text{acsc}(\cdot)$  Το Τόξο αντίστροφου ημιτόνου.

$\text{asec}(\cdot)$ , Το Τόξο αντίστροφου συνημιτόνου.

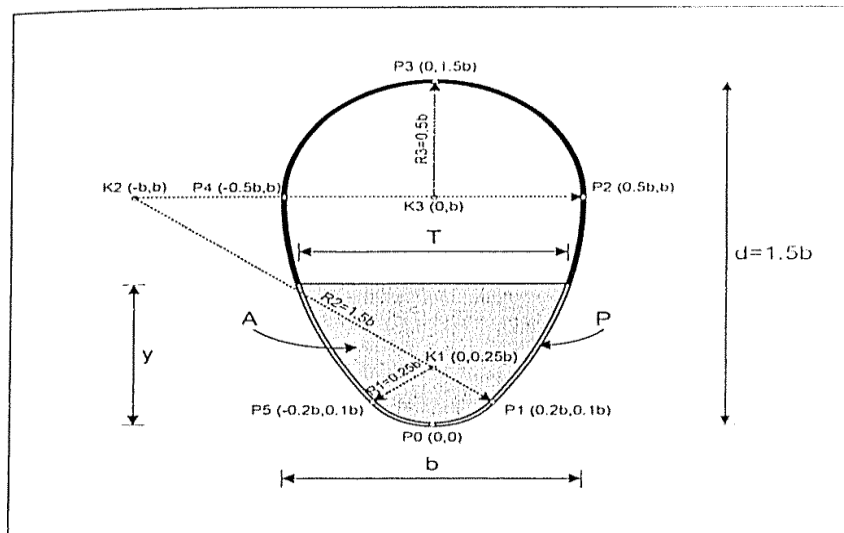
$\text{asinh}(\cdot)$ . Το Τόξο υπερβολικού ημιτόνου.

Σε όλες τις ειδικές διατομές (Πλην Της παραβολικής), το συνολικό ύψος της διατομής εξαρτάται από το πλάτος  $b$ . Για λόγους συνοπτικότητας, όλα τα μεγέθη θα εξαρτηθούν από τον λόγο πλήρωσης  $r = y/d$ . Στην περίπτωση της παραβολικής διατομής, το συνολικό πλάτος και ύψος της διατομής μπορούν να μεταβάλλονται ανεξάρτητα.

#### 4.2 Ωοειδής Διατομή

Η ωοειδής διατομή παρουσιάζει καλύτερη υδραυλική συμπεριφορά από την κυκλική σε πολύ μικρές κατά μήκος κλίσεις του εδάφους, αλλά σπάνια χρησιμοποιείται στην πράξη καθώς δεν υπάρχουν προκατασκευασμένα τεμάχια και πρέπει να χρησιμοποιηθούν καμπύλοι ξυλότυποι ή μεταλλότυποι.

Η διατομή αποτελείται από τμήματα κυκλικών τόξων με κατάλληλα κέντρα και ακτίνες (**Σχήμα 4.1**). Το ύψος και το πλάτος της συνδέονται με την σχέση  $d=3b/2$ .



**Σχήμα 4.1** Ωοειδής Διατομή

Τα γεωμετρικά στοιχεία της ωοειδούς διατομής για λόγο πλήρωσης  $0 \leq r \leq 1/15$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{01=d} = d \sqrt{\frac{r - 3r^2}{3}} = d C_{T01}$$

$$A_{01} = d^2 \frac{3C_{T01}(6r - 1) + a \cos(1 - 6r)}{36}$$

$$P_{01} = d \left( \frac{2}{3} a \sin(\sqrt{3r}) \right)$$

$$\bar{Y}_{01=d} = d \frac{3C_{T01}(12r^2 - 4r + 1) + (6r - 1)a \cos(1 - 6r)}{6(3C_{T01}(6r - 1) + a \cos(1 - 6r))}$$

Για λόγο πλήρωσης  $1/15 \leq r \leq 2/3$ , τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{12} = d \frac{2(\sqrt{5+3r(4-3r)} - 2)}{3} = dC_{T12}$$

$$A_{12} = d^2 \frac{4 + 6C_{T12}(3r - 2) - 24r + 36a \cos(\frac{2}{3} - r) - 35a \cos(\frac{3}{5})}{3}$$

$$P_{12} = d \frac{2}{3} (a \cot(2) + 6a \sin(\sqrt{\frac{1-6C_{T12}+9r}{30}}))$$

$$\bar{Y}_{12} = d \frac{1}{18} (6(3r - 2) + \frac{9a \cos(\frac{3}{5}) + 24C_{T12}(5 + 12r - 9r^2) + 48r(3r - 4) - 28}{4 + 6C_{T12}(3r - 2) - 24r - 35a \cos(3/5) + 36a \cos(2/3 - r)})$$

Για λόγο πλήρωσης  $2/3 \leq r \leq 1$ , το γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{23} = d(2\sqrt{\frac{r(4-3r)-1}{3}}) = dC_{T23}$$

$$A_{23} = d^2 \frac{70a \sin(3/5) - 8a \sin(2-3r) + 12C_{T23}(3r-2) + \pi - 24}{72}$$

$$P_{23} = d \frac{2}{3} (a \cot(2) + 6a \cot(3) + 2a \sin(\sqrt{(2-3C_{T23})/4}))$$

$$\bar{Y}_{23} = d(r + \frac{32a \sin(2-3r) - 286a \sin(\frac{3}{5}) + 120 + 48C_{T23} - \pi - 32r\sqrt{3-3r}(3r-1)^{3/2}}{6(70\sin(3/5) - 8a \sin(2-3r) + 12C_{T23}(3r-2) + \pi - 24)})$$

Τέλος, για πλήρη πλήρωση ( $\rho = 1$ ), τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_3 = 0$$

$$A_3 = d^2 \frac{70a \sin(3/5) + 5\pi - 24}{72} \cong 0.510d^2$$

$$P^3 = d \frac{1}{3} (2a \cot(2) + 12a \cot(3) + \pi) \cong 2.643d$$

$$\bar{Y}_3 = d \frac{12 - 40\pi + 67a \cos(3/5)}{210a \cos(3/5) - 120\pi + 72} \cong 0.467d$$

ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη παροχή προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $A((A/P)^{2/3})$  :

$$\frac{\partial(A(A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.953$$

ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ταχύτητα προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $(A/P)^{2/3}$  :

$$\frac{\partial((A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.584$$

Στο παράρτημα παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή τα γεωμετρικά στοιχεία Της ωοειδούς διατομής (**Πίνακας 8.14**).

### Ειδικές Διατομές

#### Σχεδιασμός Υδραυλικών Έργων

**Παράδειγμα 4-1:** Να βρεθεί η μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει από ωοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$ .

Η μέγιστη παροχή επιτυγχάνεται για :

$$\frac{y}{d} \cong 0.953$$

Για την ωοειδή διατομή είναι:

$$d = \frac{3}{2}b = 1.125 \text{ m}$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$Z_U \cong 0.182d^{8/3} = 0.249m^{8/3}$$

Η μέγιστη παροχή προκύπτει από την σχέση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \cong 0.492 \frac{m^3}{s}$$

**Παράδειγμα 4-2:** Να βρεθεί η μέγιστη ταχύτητα ροής που μπορεί να επιτευχθεί σε ωοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$

Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.854$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$R \cong 0.228d = 0.257m$$

Η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την σχέση Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \cong 0.799 \frac{m}{s}$$

**4-3:** Να βρεθεί η ελάχιστη διάσταση ωοειδούς διατομής που μπορεί να παροχετεύσει  $1 \text{ m}^3/s$  με μέγιστο λόγο πλήρωσης 60%,  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$

Η μέγιστη παροχή επιτυγχάνεται για:  $J=0.001$ .

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων Προκύπτει για λόγο πλήρωσης 60% ότι :

$$Z_U = 0.0995 d^{8/3}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο το πλάτος της διατομής:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \Rightarrow 1 = \frac{1}{0.016} 0.0995 d^{8/3} \sqrt{0.001} \Rightarrow d = 1.84 \text{ m}$$

**Παράδειγμα 4-4:** Να βρεθεί το ποσοστό πλήρωσης ωοειδούς διατομής που παροχετεύει  $0.5 \text{ m}^3 / \text{s}$  με πλάτος  $b=1.00\text{m}$ ,  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$ .

Για την ωοειδή διατομή είναι:

$$d = \frac{3}{2} b = 1.50 \text{ m}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο το  $Z_U$ :

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} J^{1/2} = \frac{1}{n} Z_u J^{1/2} \Rightarrow Z_U = \frac{0.016 \times 0.5}{\sqrt{0.001}} m^{8/3} \Rightarrow Z_u = 0.253 m^{8/3}$$

Συνεπώς ο αδιάστατος λόγος  $Z_U/d^{8/3}$  θα είναι ίσος με :

$$\frac{Z_u}{d^{8/3}} = 0.08581$$

Με βάση την παραπάνω τιμή, προκύπτει από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων ο λόγος πλήρωσης:

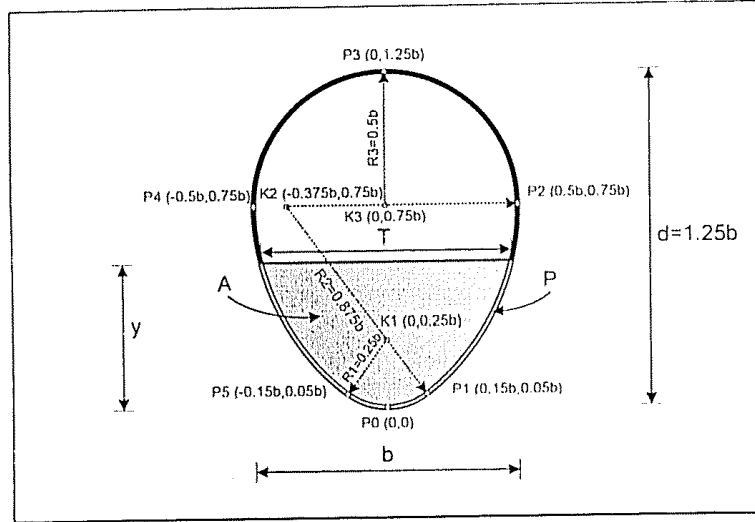
$$\frac{y}{d} \cong 0.55$$

### **Σχεδιασμός Υδραυλικών Έργων**

#### **4.3 Πεπλατυσμένη Ωοειδής Διατομή**

Η πεπλατυσμένη ωοειδής διατομή αποτελείται από τμήματα κυκλικών τόξων με κατάλληλα κέντρα και ακτίνες (Σχήμα 4.2).

Το ύψος και το πλάτος της συνδέονται με την σχέση  $d' = 5b/4$ .



Σχήμα 4.2: Πεπλατυσμένη ωοειδής διατομή

Τα γεωμετρικά στοιχεία της πεπλατυσμένης ωοειδούς διατομής για λόγο πλήρωσης  $0 \leq r \leq 1/16$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{01} = d \frac{2\sqrt{r(2-5r)}}{\sqrt{5}} = dC_{T01}$$

$$A_{01} = d^2 \frac{5C_{T01}(5r-1) + 2a \cos(1-5r)}{50}$$

$$P_{01} = d \frac{4}{5} a \sin(\sqrt{5r/2})$$

$$\bar{Y}_{01} = d \frac{(5/2)C_{T01}(25r^2 - 10r + 3) + 3(5r-1)a \cos(1-5r)}{15((5/2)C_{T01}(5r-1) + a \cos(1-5r))}$$

Για λόγο πλήρωσης  $1/16 < r \leq 15/16$  τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις :

$$T_{12} = d \left( \frac{\sqrt{(13-10r)(1+10r)} - 3}{5} \right) = dC_{T12}$$

$$A_{12} = d^2 \left( \frac{49a \cos\left(\frac{6-10r}{7}\right) - 45a \cos\left(\frac{4}{5}\right) + 10C_{T12}(5r-3) - 30r + 6}{100} \right)$$

$$P_{12} = d \left( \frac{4}{5} a \cot(3) + \frac{14}{5} a \sin\left(\sqrt{\frac{40r - 15C_{T12} + 2}{70}}\right) \right)$$

$$\bar{Y}_{12} = d \left( r - \frac{9}{15} + \frac{C_{T12}(65 + 100(6-5r)) + 150r^2 - 180r - 24 + 24a \cos\left(\frac{4}{5}\right)}{15(49a \cos\left(\frac{6-10r}{7}\right) - 45a \cos\left(\frac{4}{5}\right) + 10C_{T12}(5r-3) - 30r + 6)} \right)$$

Για λόγο πλήρωσης  $15/16 < r \leq 1$  τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις :



$$T_{23} = d \frac{2\sqrt{r(6-5r)}-1}{\sqrt{5}} = dC_{T23}$$

$$A_{23} = d^2 \frac{45a \sin\left(\frac{4}{5}\right) - 16a \sin\left(\frac{3-5r}{2}\right) + 10C_{T23}(5r-3) + 2\pi - 12}{100}$$

$$P_{23} = d \frac{2}{5} \left( 2a \cot(3) + 7a \sin\left(\frac{\sqrt{5}}{5}\right) + 4a \sin\left(\frac{\sqrt{(4-5C_{T23})}/2}{2}\right) \right)$$

$$\bar{Y}_{23} = d \left( r - \frac{9}{15} + \frac{24a \cos\left(\frac{4}{5}\right) + C_{T23}(-100 + 600r - 500r^2) + 54}{15(45a \sin\left(\frac{4}{5}\right) - 16a \sin\left(\frac{3-5r}{2}\right) + 10C_{T23}(5r-3) + 2\pi - 12)} \right)$$

Τέλος, για πλήρη πλήρωση ( $r=1$ ), τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_3=0$$

$$A_3 = d^2 \frac{45a \sin(4/5) + 10\pi - 12}{100} \cong 0.611d^2$$

$$P_3 = d \frac{2}{5} \left( 2a \cot(3) + 7a \sin\left(\frac{\sqrt{5}}{5}\right) + \pi \right) \cong 2.812d$$

$$\bar{Y}_3 = d \frac{2(41a \sin(4/5) + 12\pi - 3)}{225a \sin(4/5) + 50\pi - 60} \cong 0.476d$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη παροχή προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $A(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial(A(A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.947$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ταχύτητα προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial((A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.836$$

Στο παράρτημα παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή Τα γεωμετρικά στοιχεία της πεπλατυσμένης ωοειδούς διατομής (**Πίνακας 8.15**).

**Παράδειγμα 4-5:** Να βρεθεί η μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει πεπλατυσμένη ωοειδή διατομή

πλάτους 0.75m με  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$ .

Η μέγιστη παροχή επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.947$$

Για την πεπλατυσμένη ωοειδή διατομή είναι:

$$d = \frac{5}{4}b = 0.9375m$$

Η μέγιστη παροχή προκύπτει από την σχέση Manning :

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \cong 0.394 \frac{m^3}{s}$$

**Παράδειγμα 4-6:** Να βρεθεί η μέγιστη ταχύτητα ροής που μπορεί να επιτευχθεί σε πεπλατυσμένη ωοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$

Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται για

$$\frac{y}{d} \cong 0.836$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$R \cong 0.261d = 0.245m$$

Η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την σχέση Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \cong 0.774 m/s$$

**Παράδειγμα 4-7:** Να βρεθεί η ελάχιστη διάσταση πεπλατυσμένης ωοειδούς διατομής που μπορεί να παροχετεύσει  $1 m^3 / s$  με μέγιστο λόγο πλήρωσης 60%,  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$ .

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει για λόγο πλήρωσης 60% ότι:

$$Z_U = 0.13577d^{8/3}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο το πλάτος της διατομής:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \Rightarrow 1 = \frac{1}{0.016} 0.13577d^{8/3} \sqrt{0.001} \Rightarrow d = 1.637m$$

**Παράδειγμα 4-8:** Να βρεθεί το ποσοστό πλήρωσης πεπλατυσμένης ωοειδούς διατομής που παροχετεύει  $0.5 m^3 / s$  με πλάτος  $b=1.00 m$ ,  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$ .

Για την πεπλατυσμένη ωοειδή διατομή είναι:

$$d = \frac{5}{4}b = 1.25m$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο τον συντελεστή  $Z_u$ :

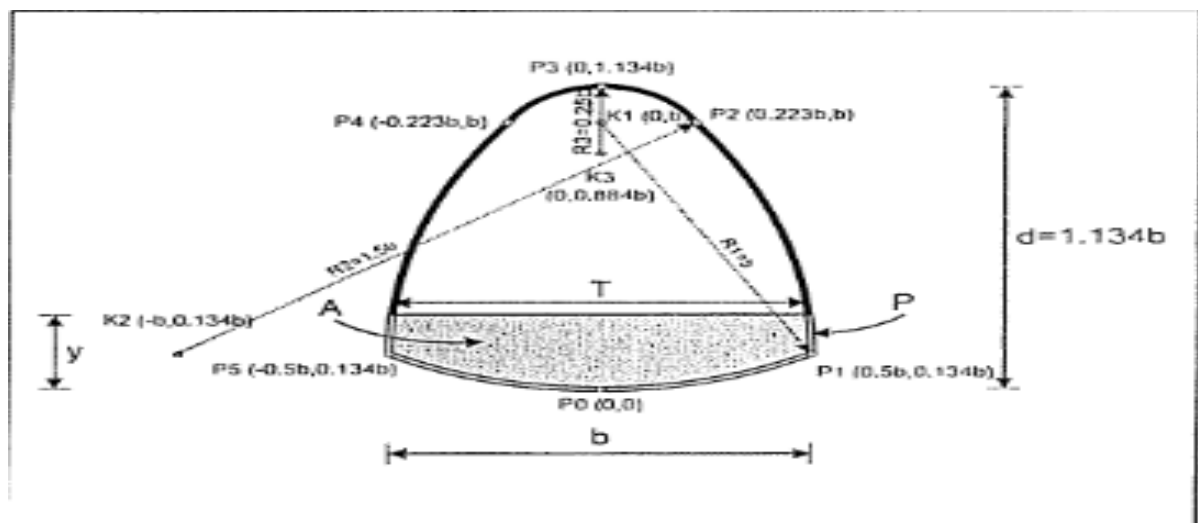
$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} J^{1/2} \Rightarrow Z_u = \frac{0.016 \cdot 0.5}{\sqrt{0.001}} m^{8/3} \Rightarrow Z_u = 0.253 m^{8/3}$$

Συνεπώς, ο αδιάστατος λόγος  $Z_u/d^{8/3}$  Θα είναι ίσος με:

$$\frac{Z_u}{d^{8/3}} = 0.13954$$

#### 4.4 Σκουφοειδής διατομή

Η σκουφοειδής διατομή αποτελείται από τμήματα κυκλικών τόξων με κατάλληλα κέντρα και ακτίνες (σχήμα 4.3). Το ύψος και το πλάτος της συνδέονται με την σχέση  $d = (4 - \sqrt{3})b/2$ .



Σχήμα 4.3: Σκουφοειδής διατομή

Τα γεωμετρικά στοιχεία της σκουφοειδούς διατομής για λόγο πλήρωσης  $0 < r \leq (5 - 2\sqrt{3})/13$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{01} = d \left( 2\sqrt{r(4(4 + \sqrt{3})/13 - r)} \right) = dC_{T01}$$

$$A_{01} = d^2 \left( \frac{C_{T01} \left( (19 - 8\sqrt{3})r + 2\sqrt{3} - 8 \right) + 8 \arccos \left( 1 + \frac{(\sqrt{3}-4)r}{2} \right)}{2(\sqrt{3} - 4)^2} \right)$$

$$P_{01} = d \left( \frac{8}{13} (\sqrt{3} + 4) \operatorname{asin} \left( \frac{\sqrt{(4 - \sqrt{3})r}}{2} \right) \right)$$

$$\bar{y}_{01} = d \frac{NOM_{\bar{y}_{01}}}{DEN_{\bar{y}_{01}}}$$

$$NOM_{\bar{y}_{01}} = C_{r01} (12(\sqrt{3} - 4) + (76 - 32\sqrt{3})r + (51\sqrt{3} - 100)r^2) + 24(2 + (\sqrt{3} + 4)r) \operatorname{acos}(1 + (\sqrt{3} - 4)r/2)$$

$$DEN_{\bar{y}_{01}} = 3C_{T01} (38 - 16\sqrt{3} + (51\sqrt{3} - 100)r) + 24(\sqrt{3} - 4) \operatorname{acos}(1 + (\sqrt{3} - 4)r/2)$$

Για λόγο πλήρωσης  $(5 - 2\sqrt{3})/13 < r \leq 2(4 + \sqrt{3})/13$ , τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{12} = d \left( 2 \frac{2 - \sqrt{2 + 4\sqrt{3} + r(22 - 12\sqrt{3} + (8\sqrt{3} - 19)r)}}{\sqrt{3} - 4} \right) - dC_{T12}$$

$$A_{12} = d^2 \frac{NOM_{A12}}{6(\sqrt{3} - 4)^5}$$

$$NOM_{A12} = 4(51\sqrt{3} - 100)\pi + 6(504\sqrt{3} - 859 + 2(553 - 304\sqrt{3})r) + C_{T12}(6054 - 3483\sqrt{3} + (5307\sqrt{3} - 9372)r) + 54(100 - 51\sqrt{3}) \operatorname{asin} \left( (2 - \sqrt{3} + (\sqrt{3} - 4)r)/3 \right)$$

$$P_{12} = d \left( 2 \frac{18 \operatorname{asinh} \left( \sqrt{-\frac{2 + (\sqrt{3} - 4)C_{T12}}{2\sqrt{3}}} \right) i - \pi}{3(\sqrt{3} - 4)} \right)$$

$$\bar{y}_{12} = d \left( \frac{NOM_{\bar{y}_{12}}}{DEN_{\bar{y}_{12}}} \right)$$

$$NOM_{\bar{y}_{12}} = 2(44396 - 25542\sqrt{3}) + 2r(62668\sqrt{3} - 108361 + (71212 - 40800\sqrt{3})r) + 4\pi(1106 - 608\sqrt{3} + (1769\sqrt{3} - 3124)r) + C_{T12}(56721\sqrt{3} - 99328 + r(132412 - 76406\sqrt{3} + (58603\sqrt{3} - 101812))) - 54(2018 - 1161\sqrt{3} + (1769\sqrt{3} - 3124)r) \operatorname{asin}((2 - \sqrt{3} + (\sqrt{3} - 4)r)/3)$$

$$DEN_{\bar{y}_{12}} = (\sqrt{3} - 4)^2 (4(51\sqrt{3} - 100)\pi) + 6(504\sqrt{3} - 859 + 2(553 - 304\sqrt{3})r) \\ + C_{T_{12}}(6054 - 3483\sqrt{3} + (5307\sqrt{3} - 9372)r) \\ + 54(100 - 51\sqrt{3})asin\left(\frac{(2 - \sqrt{3} + (\sqrt{3} - 4)r)}{3}\right)$$

Για λόγο πλήρωσης  $2(4 + \sqrt{3})/13 < r \leq 1$ , τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{23} = d \frac{2\sqrt{(r-1)(15-7\sqrt{3}+(8\sqrt{3}-19)r)}}{4-\sqrt{3}} = dC_{T_{23}}$$

$$A_{23} = d^2 \frac{NOM_{A_{23}}}{12(\sqrt{3}-4)^8}$$

$$NOM_{A_{23}} = 62(17803 - 10200\sqrt{3})\pi + 3C_{T_{23}}(613845\sqrt{3} - 1064302 + \\ 2(583057 - 336224\sqrt{3})r) + 3(229218\sqrt{3\sqrt{3}-5} - 132412\sqrt{9\sqrt{3}-15}) + \\ 4(153000 + 53409\sqrt{2} - 89015\sqrt{3} - 30600\sqrt{6}) + \\ 36(10200\sqrt{3} - 17803)asec(\sqrt{3}) + \\ (17803 - 10200\sqrt{3})asin(3 - 2\sqrt{3}) + (30600\sqrt{3} - 53409)asin(7 - 2\sqrt{3} + \\ 2(\sqrt{3} - 4)r)$$

$$P_{23} \\ = d \frac{2}{3(\sqrt{3}-4)} \left( 3asin((\sqrt{3} - 4)) \sqrt{\left(r - \frac{2(\sqrt{3}-4)}{13}\right)^2 + \frac{\left(2 - \sqrt{6} + \sqrt{(r-1)(15-7\sqrt{3}+(8\sqrt{3}-19)r)}\right)^2}{(\sqrt{3}-4)^2}} \right. \\ \left. - 18asin\left(\sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}}}\right) - \pi \right)$$

$$\bar{y}_{23} = d \left( r + \frac{NOM_{\bar{y}_{23}}}{DEN_{\bar{y}_{23}}} \right)$$

$$NOM_{\bar{y}_{23}} = -1137186400 - 506834208\sqrt{2} + 656438240\sqrt{3} + 292739664\sqrt{6} - \\ 282850220\sqrt{3\sqrt{3}-5} + 163309072\sqrt{9\sqrt{3}-15} - 525365653\pi + \\ 303266462\sqrt{3}\pi + 2C_{T_{23}}(372424752 - 215006239\sqrt{3} + (400696970 - \\ 231327804\sqrt{3})r + 8(63358307\sqrt{3} - 109747972)r^2) + 36592458acos(3 - \\ 2\sqrt{3}) - 21118092\sqrt{3}acos(3 - 2\sqrt{3}) + 939507552asec(\sqrt{3}) - \\ 542378160\sqrt{3}asec(\sqrt{3}) - 6(3519682\sqrt{3} - 6098743)asin(7 - 2\sqrt{3} + \\ 2r(\sqrt{3} - 4))$$

$$\begin{aligned}
DEN_{\bar{y}_{23}} = & 4(\sqrt{3} - 4)^3 (-1836000 - 640908\sqrt{2} + 1068180\sqrt{3} + 367200\sqrt{6} \\
& - 687654\sqrt{3\sqrt{3} - 5} + 397236\sqrt{9\sqrt{3} - 15} - 1103786\pi \\
& + 632400\sqrt{3}\pi \\
& + 3C_{T23}(1064302 - 613845\sqrt{3} - 1166114r + 672448\sqrt{3}r) \\
& + 1922724 \operatorname{asec}(\sqrt{3}) - 1101600\sqrt{3} \operatorname{asec}(\sqrt{3}) \\
& - 53409 \operatorname{asin}(3 - 2\sqrt{3}) + 30600\sqrt{3} \operatorname{asin}(3 - 2\sqrt{3}) \\
& + (53409 - 30600\sqrt{3}) \operatorname{asin}(7 - 2\sqrt{3} + 2r(\sqrt{3} - 4))
\end{aligned}$$

Τέλος, για πλήρη πλήρωση ( $r=1$ ), τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_3=0$$

$$A_3 = d^2 \frac{NOM_{A23}}{12(\sqrt{3} - 4)^8}$$

$$\begin{aligned}
NOM_{A23} = & 62(17803 - 10200\sqrt{3})\pi \\
& + 3C_{T23} (613845\sqrt{3} - 1064302 + 2(583057 - 336224\sqrt{3})) \\
& + 3 \left( 229218\sqrt{3\sqrt{3} - 5} - 132412\sqrt{9\sqrt{3} - 15} \right. \\
& + 4(153000 + 53409\sqrt{2} - 89015\sqrt{3} - 30600\sqrt{6}) \\
& + 36(10200\sqrt{3} - 17803) \operatorname{asec}(\sqrt{3}) \\
& \left. + (17803 - 10200\sqrt{3}) \operatorname{asin}(3 - 2\sqrt{3}) \right) \\
& + (30600\sqrt{3} - 53409) \operatorname{asin}(7 - 2\sqrt{3} + 2(\sqrt{3} - 4)) \cong 0.658d^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_3 = & d \frac{2}{3(\sqrt{3}-4)} \left( 3\operatorname{asin}((\sqrt{3} - 4) + \sqrt{\left(1 - \frac{2(\sqrt{3}+4)}{13}\right)^2 + \left(\frac{2-\sqrt{6}}{\sqrt{3}-4}\right)^2} - 18\operatorname{asin}\left(\left(\sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}}}\right) - \right. \right. \\
& \left. \left. \pi \right) \cong 3.037d
\end{aligned}$$

$$\bar{y}_3 = d \left( 1 + \frac{NOM_{\bar{y}_{23}}}{DEN_{\bar{y}_{23}}} \right) \cong 0.560d$$

$$\begin{aligned}
NOM_{\bar{y}_{23}} = & -1137186400 - 506834208\sqrt{2} + 656438240\sqrt{3} + 292739664\sqrt{6} - \\
& 282850220\sqrt{3\sqrt{3} - 5} + 163309072\sqrt{9\sqrt{3} - 15} - 525365653\pi + \\
& 303266462\sqrt{3}\pi + 2C_{T23} \left( 372424752 - 215006239\sqrt{3} + (400696970 - \right. \\
& \left. 231327804\sqrt{3}) + 8(63358307\sqrt{3} - 109747972) \right) + 36592458\operatorname{acos}(3 - 2\sqrt{3}) - \\
& 21118092\sqrt{3} \operatorname{acos}(3 - 2\sqrt{3}) + 939507552 \operatorname{asec}(\sqrt{3}) - 542378160\sqrt{3} \operatorname{asec}(\sqrt{3}) - \\
& 6(3519682\sqrt{3} - 6098743)(-\pi/2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
DEN_{\bar{y}_{23}} = & 4(\sqrt{3} - 4)^3 \left( -1836000 - 640908\sqrt{2} + 1068180\sqrt{3} + 367200\sqrt{6} \right. \\
& - 687654\sqrt{3\sqrt{3} - 5} + 397236\sqrt{9\sqrt{3} - 15} - 1103786\pi \\
& \left. + 632400\sqrt{3}\pi + 3C_{T23}(58603\sqrt{3} - 101812) \right) + 1922724 \operatorname{asec}(\sqrt{3}) \\
& - 1101600\sqrt{3} \operatorname{asec}(\sqrt{3}) - 53409 \operatorname{asin}(3 - 2\sqrt{3}) \\
& + 30600\sqrt{3} \operatorname{asin}(3 - 2\sqrt{3}) + (53409 - 30600\sqrt{3})(-\pi/2)
\end{aligned}$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη παροχή προκύπτει μεγιστοποίηση της παράστασης  $A(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial(A(A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.945$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ταχύτητα προκύπτει μεγιστοποίηση της παράστασης  $A(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial(A(A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.740$$

Στο παράρτημα παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή τα γεωμετρικά στοιχεία της σκαφοειδούς διατομής.

Παράδειγμα 4-9: Να βρεθεί η μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει από σκουφοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $\pi=0.016$  και κλίση  $J=0.001$ .

Η μέγιστη παροχή επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.945$$

Για την σκουφοειδή διατομή είναι:

$$d = \frac{(4 - \sqrt{3})}{2} b \cong 0.85m$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$Z_U \cong 0.249d^{8/3} = 0.161m^{8/3}$$

Η μέγιστη παροχή προκύπτει από την σχέση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \cong 0.319 \frac{m^3}{s}$$

Παράδειγμα 4-10: Να βρεθεί η μέγιστη ταχύτητα ροής που μπορεί να επιτευχθεί σε σκουφοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $\pi=0.016$  και κλίση  $J=0.001$ .

Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.740$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$R \cong 0.251d = 0.213m$$

Η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την σχέση Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \cong 0.705 \frac{m}{s}$$

Παράδειγμα 4-11: Να βρεθεί η ελάχιστη διάσταση σκουφοειδούς διατομής που μπορεί να παροχετεύσει  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  με μέγιστο λόγο πλήρωσης 60%,  $n=0.016$  και κλίση  $J=0.001$ .

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει για λόγο πλήρωσης 60% ότι:

$$Z_U = 0.182342d^{8/3}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο το πλάτος της διατομής:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \Rightarrow 1 = \frac{1}{0.016} 0.182342d^{8/3} \sqrt{0.001} \Rightarrow d = 1.466m$$

Παράδειγμα 4-12: Να βρεθεί το ποσοστό πλήρωσης σκουφοειδούς διατομής που παροχετεύει  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  με πλάτος  $b=1.00m$ ,  $n=0.016$ , και κλίση  $J=0.001$ .

Για την σκουφοειδή διατομή είναι:

$$d = \frac{(4 - \sqrt{3})}{2} b \cong 1.134m$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο τον συντελεστή  $Z_U$ :

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} J^{1/2} = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \Rightarrow Z_U = \frac{0.016 \cdot 0.5}{\sqrt{0.001}} m^{8/3} \Rightarrow Z_U = 0.253m^{8/3}$$

Συνεπώς, ο αδιάστατος λόγος  $Z_U/d^{8/3}$  θα είναι ίσος με:

$$\frac{Z_U}{d^{8/3}} = 0.18093$$

Με βάση την παραπάνω τιμή, προκύπτει από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων ο λόγος πλήρωσης:

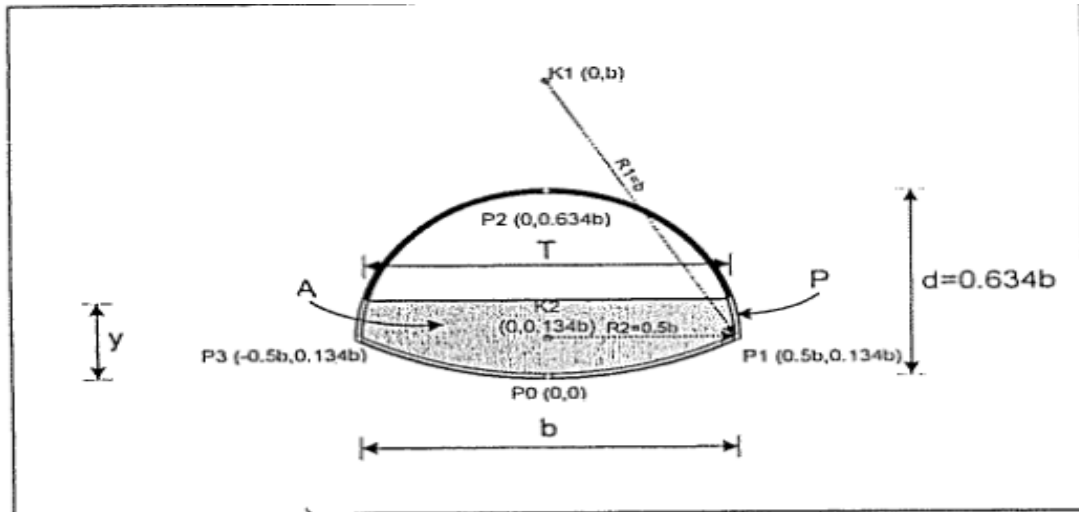
$$\frac{y}{d} \cong 0.60$$

#### 4.5 Απλή στοματοειδής διατομή

Η απλή στοματοειδής διατομή αποτελείται από τμήματα κυκλικών τόξων με κατάλληλα κέντρα και ακτίνες. Το ύψος και το πλάτος της συνδέονται με την σχέση

$$d = (3 - \sqrt{3})b/2.$$





Σχήμα 4.4: Απλή στοματοειδής διατομή

Τα γεωμετρικά στοιχεία της απλής στοματοειδούς διατομής για λόγο πλήρωσης  $0 < r \leq (2 - \sqrt{3})/2$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{01} = d \left( 2 \sqrt{r \left( 2 + \frac{2}{\sqrt{3}} - r \right)} \right) = d C_{T01}$$

$$A_{01} = d^2 \left( \frac{C_{T01}(3r - 3 - \sqrt{3})}{6} + \frac{2(2 + \sqrt{3})}{3} \operatorname{acos} \left( 1 - \frac{3 - \sqrt{3}}{2} r \right) \right)$$

$$P_{01} = d \left( \frac{4}{3} (3 + \sqrt{3}) \operatorname{asin} \left( \frac{\sqrt{(3 - \sqrt{3})r}}{2} \right) \right)$$

$$\bar{y}_{01} = d \left( r - \frac{NOM_{\bar{y}_{01}}}{DEN_{\bar{y}_{01}}} \right)$$

$$NOM_{\bar{y}_{01}} = 2C_{T01} (15 - 9\sqrt{3} + r(12 - 7\sqrt{3} + (33\sqrt{3} - 57)r)) + 8(2\sqrt{3} - 3) \operatorname{acos}(1 + (\sqrt{3} - 3)r/2)$$

$$DEN_{\bar{y}_{01}} = 3C_{T01} (24 - 14\sqrt{3} + (33\sqrt{3} - 57)r) + 12(3\sqrt{3} - 5) \operatorname{acos}(1 + (\sqrt{3} - 3)r/2)$$

Για λόγο πλήρωσης  $(2 - \sqrt{3})/2 < r \leq 1$  τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{12} = d^2 \left( \frac{NOM_{A12}}{3(\sqrt{3} - 3)^3} \right)$$

$$NOM_{A_{12}} = 9(\sqrt{3} - 1) + 2(\sqrt{3} - 3)\pi + 9C_{T_{12}}(7 - 4\sqrt{3} + (5\sqrt{3} - 9)r) - 3(\sqrt{3} - 3)\text{asin}(2 - \sqrt{3} + (\sqrt{3} - 3)r)$$

$$P_{12} = d \frac{3 + \sqrt{3}}{9} \left( \pi - 6\text{acsch} \left( \frac{2}{\sqrt{(3 - \sqrt{3})C_{T_{12}} - 2}} \right) r \right)$$

$$\bar{y}_{12} = d \left( \frac{NOM_{\bar{y}_{12}}}{DEN_{\bar{y}_{12}}} \right)$$

$$NOM_{\bar{y}_{12}} = 2(2\pi(3 - \sqrt{3} + 3(\sqrt{3} - 2)r) + 9(1 - \sqrt{3} + (2\sqrt{3} - 3)r)) + 3C_{T_{12}}(17\sqrt{3} - 30 + 2r(33 - 19\sqrt{3} + 3(4\sqrt{3} - 7)r)) + 3(5\sqrt{3} - 9 - 6(\sqrt{3} - 2)r)\text{asin}(2 - \sqrt{3} + (\sqrt{3} - 3)r)$$

$$DEN_{\bar{y}_{12}} = 3(2(6\sqrt{3} - 9 + 2(\sqrt{3} - 2)\pi) + 3C_{T_{12}}(33 - 19\sqrt{3} + 6(4\sqrt{3} - 7)r)) - 18(\sqrt{3} - 2)\text{asin}(2 - \sqrt{3} + (\sqrt{3} - 3)r)$$

Τέλος, για πλήρη πλήρωση ( $r=1$ ), τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_2=0$$

$$A_2 = d^2 \left[ \frac{7(\sqrt{3}-3)\pi+18(\sqrt{3}-1)}{6(\sqrt{3}-3)^3} \right] \cong 1.202d^2$$

$$P_2 = d \frac{5(3 + \sqrt{3})\pi}{18} \cong 4.129d$$

$$\bar{y}_2 = d \frac{72 - 36\sqrt{3} + 33\pi - 19\sqrt{3}\pi}{108 - 72\sqrt{3} + 42(2 - \sqrt{3})\pi} \cong 0.533d$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη παροχή προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $A(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial(A(A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.929$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ταχύτητα προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial((A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.796$$

Στο παράρτημα παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή τα γεωμετρικά στοιχεία της απλής στοματοειδούς διατομής (Πίνακας 8.17).

Παράδειγμα 4-13: Να βρεθεί η μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει από απλή στοματοειδή διατομή πλάτους 0.75mm με  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Η μέγιστη παροχή επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.929$$

Για την απλή στοματοειδή διατομή είναι:

$$d = \frac{(3-\sqrt{3})}{2} b \cong 0.475m$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$Z_u \cong 0.569d^{8/3} = 0.078m^{8/3}$$

Η μέγιστη παροχή προκύπτει από την σχέση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} Z_u J^{1/2} \cong 0.368 \frac{m^3}{s}$$

Παράδειγμα 4-14: Να βρεθεί η μέγιστη ταχύτητα ροής που μπορεί να επιτευχθεί σε απλή στοματοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.796$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$R \cong 0.355d = 0.169m$$

Η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την σχέση Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \cong 1.441 \frac{m}{s}$$

Παράδειγμα 4-15: Να βρεθεί η ελάχιστη διάσταση απλής στοματοειδούς διατομής που μπορεί να παροχετεύσει  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  με μέγιστο λόγο πλήρωσης 60%,  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει για λόγο πλήρωσης 60% ότι:

$$Z_u = 0.38785d^{8/3}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο το πλάτος της διατομής:

$$Q = \frac{1}{n} Z_u J^{1/2} \Rightarrow 1 = \frac{1}{0.015} 0.38785d^{8/3} \sqrt{0.005} \Rightarrow d = 0.797m$$

Παράδειγμα 4-16: Να βρεθεί το ποσοστό πλήρωσης απλής στοματοειδούς διατομής που παροχετεύει  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  με πλάτος  $b=1.00m$ ,  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Για την απλή στοματοειδή διατομή είναι:

$$d = \frac{(3-\sqrt{3})}{2} b \cong 0.634m$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο τον συντελεστή  $Z_u$ :

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} J^{1/2} = \frac{1}{n} Z_u J^{1/2} \Rightarrow Z_u = \frac{0.015 \cdot 0.5}{\sqrt{0.005}} m^{8/3} \Rightarrow$$

$$Z_u = 0.106m^{8/3}$$

Συνεπώς, ο αδιάστατος λόγος  $Z_u/d^{8/3}$  θα είναι ίσος με:

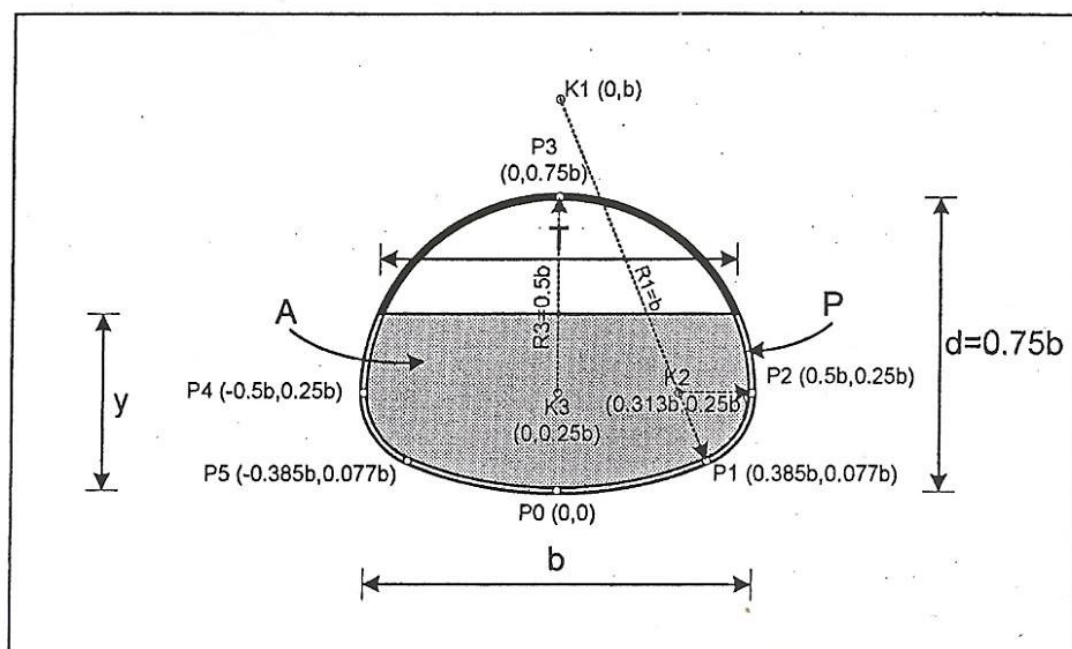
$$\frac{Z_u}{d^{8/3}} = 0.35732$$

Με βάση την παραπάνω τιμή, προκύπτει από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων ο λόγος πλήρωσης:

$$\frac{y}{d} = 0.56$$

#### 4.6 Κανονική Στοματοειδής Διατομή

Η κανονική στοματοειδής διατομή αποτελείται από τμήματα κυκλικών τόξων με κατάλληλα κέντρα και ακτίνες (Σχήμα 4.5). Το ύψος και το πλάτος της συνδέονται με την σχέση  $d = 3b/4$ .



**Σχήμα 4.5: Κανονική στοματοειδής διατομή**

Για λόγο πλήρωσης  $0 < r < 4/39$  τα γεωμετρικά στοιχεία της κανονικής στοματοειδής διατομής δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{01} = d \left( \frac{2\sqrt{r(8-3r)}}{\sqrt{3}} \right) = dC_{T01}$$

$$A_{01} = d^2 \left( \frac{C_{T01}(3r-4)}{6} + \frac{16}{9} a \cos \left( 1 - \frac{3}{4}r \right) \right)$$

$$P_{01} = d \left( \frac{16}{3} a \sin \left( \sqrt{\frac{3r}{8}} \right) \right)$$

$$\bar{y}_{01} = d \left( \frac{3C_{T01}(3r^2 - 8r + 16) + 32(32r - 4)\text{acos}(1 - 3r/4)}{9C_{T01}(3r - 4) + 96\text{acos}(1 - 3r/4)} \right)$$

Για λόγο πλήρωσης  $4/39 < r < 1/3$  τα γεωμετρικά στοιχεία της κανονικής στοματοειδούς διατομής δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{12} = d \left( \frac{5 + \sqrt{48r(2 - 3r) - 7}}{6} \right) = dC_{T12}$$

$$A_{12} = d^2 \left( \frac{60r - 80 + 24C_{T12}(3r - 1) + 247\text{acos}\left(\frac{12}{13}\right) + 9\text{cos}\left(\frac{4}{3} - 4r\right)}{144} \right)$$

$$P_{12} = d \left( \frac{16}{3} \text{acot}(5) + \text{asin} \left( \sqrt{\frac{8 - 15C_{T12} + 72r}{39}} \right) \right)$$

$$\bar{y}_{12} = d \left( r - \frac{1}{3} + \frac{\text{NOM}_{\bar{y}_{12}}}{\text{DEN}_{\bar{y}_{12}}} \right)$$

$$\text{NOM}_{\bar{y}_{12}} = -3C_{T12}(7 + 48r(3r - 2)) + 4 \left( 230 + 15r(2 - 3r) - 576\text{acos}\left(\frac{12}{13}\right) \right)$$

$$\text{DEN}_{\bar{y}_{12}} = 9 \left( 60r - 80 + 24C_{T12}(3r - 1) + 247\text{acos}\left(\frac{12}{13}\right) + 9\text{acos}\left(\frac{4}{3} - 4r\right) \right)$$

Για λόγο πλήρωσης  $1/3 < r \leq 1$  τα γεωμετρικά στοιχεία της κανονικής στοματοειδούς διατομής δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{23} = d \frac{2\sqrt{1 + r(2 - 3r)}}{\sqrt{3}} = dC_{T23}$$

$$A_{23} = d^2 \frac{494\text{acos}\left(\frac{12}{13}\right) - 128\text{asin}\left(\frac{1-3r}{2}\right) + 48C_{T23}(Er - 1) + 9\pi - 120}{288}$$

$$P_{23} = d \frac{8}{3} \left( 2 \operatorname{acot}(5) + \frac{3}{8} \operatorname{atan} \left( \frac{2}{3} \right) + a \sin \left( \frac{\sqrt{2 - \frac{3C_{T23}}{2}}}{2} \right) \right)$$

$$\bar{y}_{23} = d \left( r - \frac{1}{3} + \frac{16 \left( C_{T23}(r-1)(3r-1) - 5 + 16a \cos \left( \frac{12}{13} \right) \right)}{60 - 128\pi + 24C_{T23}(1-4r) + 247a \sin \left( \frac{12}{13} \right) + 64a \sin \left( \frac{1-3r}{2} \right)} \right)$$

Τέλος, για πλήρη πλήρωση ( $r=1$ ), τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_3 = 0$$

$$A_3 = d^2 \left( \frac{73\pi - 120 + 494a \cos \left( \frac{12}{13} \right)}{288} \right) \cong 1.057d^2$$

$$P_3 = d \frac{16 \operatorname{acot}(5) + 3 \operatorname{atan} \left( \frac{2}{3} \right) + 2\pi}{3} \cong 3.735d$$

$$T_3=0$$

$$A_3 = d^2 \left( \frac{2 - 2\sqrt{7} + \pi + 8a \sec(4/\sqrt{7})}{8} \right) \cong 0.829d^2$$

$$P_3 = d \frac{\pi + 8a \sin((\sqrt{7}-1)/4)}{2} \cong 3.267d$$

$$\bar{Y}_3 = d \left[ 1 - \frac{1 - 3\sqrt{7} + \pi + 16a \cos \left( \frac{\sqrt{7}+1}{4} \right) - 8a \sin \left( \frac{1-\sqrt{7}}{4} \right)}{2(2 - 2\sqrt{7} + \pi + 8a \sec(4/\sqrt{7}))} \right] \cong 0.519d$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη παροχή προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $A(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial(A(A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.938$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ταχύτητα προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial((A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.811$$

Στο παράρτημα παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή τα γεωμετρικά στοιχεία της απλής πεταλοειδούς διατομής (Πίνακας 8.19).

**Παράδειγμα 4-21:** Να βρεθεί η μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει από απλή πεταλοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Η μέγιστη παροχή επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.938$$

Για την απλή πεταλοειδή διατομή είναι:

$$d=b \cong 10.75m$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$Z_U \cong 0.358d^{8/3} = 0.166^{8/3}$$

Η μέγιστη παροχή προκύπτει από την σχέση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \cong 0.783 \frac{m^3}{s}$$

**Παράδειγμα 4-22:** Να βρεθεί η μέγιστη ταχύτητα ροής που μπορεί να επιτευχθεί σε απλή πεταλοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.811$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι :

$$R \cong 0.307d = 0.230m$$

Η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την σχέση Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \cong 1.770 \frac{m}{s}$$

**Παράδειγμα 4-23:** Να βρεθεί η ελάχιστη διάσταση απλής πεταλοειδούς διατομής που μπορεί να παροχετεύσει  $1 m^3/s$  με μέγιστο λόγο πλήρωσης 60%,  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει για λόγο πλήρωσης 60% ότι:

$$Z_U = 0.230724d^{8/3}$$



Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \Rightarrow 1 = \frac{1}{0.015} 0.230724 d^{8/3} \sqrt{0.005} \Rightarrow d = 0.969 \text{m}$$

**Παράδειγμα 4-24:** Να βρεθεί το ποσοστό πλήρωσης απλής πεταλοειδούς διατομής που παροχετεύει  $0.5 \text{ m}^3 / \text{s}$  με πλάτος  $b=1.0\text{m}$ ,  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Για την απλή πεταλοειδή διατομή είναι:

$$d=b=1.00\text{m}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο τον συντελεστή  $Z_U$ :

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} J^{1/2} = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \Rightarrow \frac{0.015 \cdot 0.5}{\sqrt{0.005}} \text{m}^{8/3} \Rightarrow Z_U = 0.106 \text{m}^{8/3}$$

Συνεπώς, ο αδιάστατος λόγος  $Z_U/d^{8/3}$  θα είναι ίσος με:

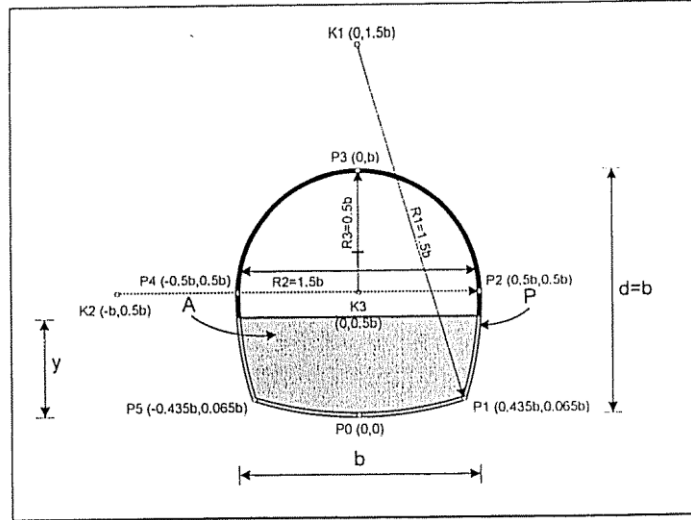
$$\frac{Z_U}{d^{8/3}} = 0.106$$

Με βάση την παραπάνω τιμή, προκύπτει από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων ο λόγος πλήρωσης:

$$\frac{y}{d} \equiv 0.36$$

#### 4.8 Κανονική Πεταλοειδής Διατομή

Η κανονική πεταλοειδής διατομή αποτελείται από τμήματα κυκλικών τόξων μεκατάλληλα κέντρα και ακτίνες (**Σχήμα 4.7**). Το ύψος και το πλάτος της είναι ίσα.



Σχήμα 4.7: Κανονική πεταλοειδής διατομή

Για λόγο πλήρωσης  $0 < r \leq (2 - \sqrt{7/2})/2$ , τα γεωμετρικά στοιχεία της κανονικής πεταλοειδούς διατομής δίνονται από τις σχέσεις :

$$T_{01} = d(2\sqrt{r(3-r)}) = dC_{T01}$$

$$A_{01} = d^2 \left( \frac{C_{T01}(2r-3) + 9 \cos(1-2r/3)}{4} \right)$$

$$P_{01} = d \left( 6a \sin \left( \sqrt{\frac{r}{3}} \right) \right)$$

$$\bar{Y}_{01} = d \left( \frac{C_{T01}(4r-12r+27) + 27(2r-3)a \cos(1-2r/3)}{6(C_{T01}(2r-3) + 9a \cos(1-2r/3))} \right)$$

Για λόγο πλήρωσης  $(2 - \sqrt{7/2})/2 < r \leq 1/2$ , τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις :

$$T_{12} = d(2(\sqrt{2+r-r^2} - 1)) = dC_{T12}$$

$$A_{12} = d^2 \left( \frac{6 - 2\sqrt{14} + 2r(C_{T12} - 2) + 9a \cos\left(\frac{2\sqrt{14}}{9}\right) - 9a \sin\left(\frac{1-2r}{3}\right)}{4} \right)$$

$$P_{12} = d \left( 6a \sin \left( \sqrt{\frac{1}{6}} \left( 2 - \sqrt{\frac{7}{2}} \right) \right) \right) + 6a \csc \left( \frac{6}{\sqrt{16 - 3\sqrt{14}} - (2 + \sqrt{14})C_{T12} + 2r(\sqrt{14} - 2)} \right)$$

$$\bar{Y}_{12} = \bar{Y}_{12} = d \left( r - \frac{NOM_{y_{12}}}{DEN_{y_{12}}} \right)$$

$$NOM_{\bar{Y}_{12}} =$$

$$12\sqrt{14} - 38 + 19C_{T_{12}} + 2r(C_{T_{12}} + 2) - 8r^2(C_{T_{12}} - 1) - 81a \cos\left(\frac{2 + \sqrt{14}}{6}\right) + 27a \sin\left(\frac{1 - 2r}{3}\right)$$

$$DEN_{\bar{Y}_{12}} = 6 \left( 2\sqrt{14} - 6 + C_{T_{12}} + 4r - 2rC_{T_{12}} - 9a \cos\left(\frac{2\sqrt{14}}{9}\right) + 9a \sin\left(\frac{1 - 2r}{3}\right) \right)$$

Για λόγο πλήρωσης  $\frac{1}{2} < r \leq 1$ , τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{23} = d(2\sqrt{r(r-1)}) = dC_{T_{23}}$$

$$A_{23} = d^2 \frac{4 - 2\sqrt{14} + C_{T_{23}}(2r - 1) + 9a \cos\left(\frac{2\sqrt{14}}{9}\right) - a \sin(1 - 2r)}{4}$$

$$P_{23} = d \left( 6a \sin\left(\frac{\sqrt{14} - 2}{6}\right) + 2a \sin\left(\sqrt{\frac{1 - C_{T_{23}}}{2}}\right) \right)$$

$$\bar{Y}_{23} = d \left( r + \frac{NOM_{Y_{23}}}{DEN_{Y_{23}}} \right)$$

$$NOM_{\bar{Y}_{23}} = 18 - 12$$

$$\sqrt{14} + C_{T_{23}}(8r^2 - 2r - 3) + 81a \cos\left(\frac{2 + \sqrt{14}}{6}\right) - 27a \sin\left(\frac{2 - \sqrt{14}}{6}\right) - 3a \sin(1 - 2r)$$

$$DEN_{\bar{Y}_{23}} = 6 \left( 2\sqrt{14} - 4 + C_{T_{23}}(1 - 2r) - 9a \cos\left(\frac{2\sqrt{14}}{9}\right) + a \sin(1 - 2r) \right)$$

Τέλος, για πλήρη πλήρωση ( $r=1$ ), τα γεωμετρικά στοιχεία δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_3 = 0$$

$$A_3 = d^2 \left( \frac{8 - 4\sqrt{14} + \pi + 18a \cos(2\sqrt{14}/9)}{8} \right) \cong 0.847d^2$$

$$P_3 = d \frac{\pi + 12a \sin((\sqrt{14} - 2)/6)}{2} \cong 3.338d$$

$$\bar{Y}_3 = d$$

$$\frac{4 + \pi}{16 - 8\sqrt{14} + 2\pi + 36a \cos(2\sqrt{14}/9)} \cong 0.527d$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη παροχή προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $A(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial(A(A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.938$$

Ο λόγος πλήρωσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ταχύτητα προκύπτει με μεγιστοποίηση της παράστασης  $(A/P)^{2/3}$ :

$$\frac{\partial((A/P)^{2/3})}{\partial r} = 0 \Rightarrow r \cong 0.812$$

Στο παράρτημα παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή τα γεωμετρικά στοιχεία της κανονικής πεταλοειδούς διατομής (Πίνακας 8.20).

**Παράδειγμα 4-25:** Να βρεθεί η μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει από κανονική πεταλοειδή διατομή πλάτους 0.75m με  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Η μέγιστη παροχή επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.938$$

Για κανονική πεταλοειδή διατομή είναι:

$$d=b \cong 0.75m$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$Z_U \cong 0.364d^{8/3} = 0.169m^{8/3}$$

Η μέγιστη παροχή προκύπτει από την σχέση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \cong 0.797 \frac{m^3}{s}$$

**Παράδειγμα 4-26:** Να βρεθεί η μέγιστη ταχύτητα ροής που μπορεί να επιτευχθεί σε κανονική πεταλοειδή διατομή πλάτους 0.75 με  $n=0.015$  και κλίση  $J=0.005$ .

Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται για:

$$\frac{y}{d} \cong 0.812$$

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει ότι:

$$R \cong 0.305d = 0.229m$$

Η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την σχέση Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \cong 1.764 \frac{m}{s}$$

**Παράδειγμα 4-27:** Να βρεθεί η ελάχιστη διάσταση κανονικής πεταλοειδούς διατομής που μπορεί να παροχετεύσει  $1 \text{ m}^3 / \text{s}$  με μέγιστο λόγο πλήρωσης 60%,  $n = 0.015$  και κλίση  $J = 0.005$ .

Από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων προκύπτει για λόγο πλήρωσης 60% ότι:

$$Z_U = 0.23779d^{8/3}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο το πλάτος της διατομής:

$$Q = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \Rightarrow 1 = \frac{1}{0.015} 0.23779d^{8/3} \sqrt{0.005} \Rightarrow d = 0.958m$$

**Παράδειγμα 4-28:** Να βρεθεί το ποσοστό πλήρωσης κανονικής πεταλοειδούς διατομής που παροχετεύει  $0.5 \text{ m}^3 / \text{s}$  με πλάτος  $b = 1.00m$ ,  $n = 0.015$  και κλίση  $J = 0.005$ .

Για την κανονική πεταλοειδή διατομή είναι:

$$d = b = 1.00 \text{ m}$$

Με εφαρμογή της σχέσης Manning προκύπτει μια εξίσωση με μόνο άγνωστο τον συντελεστή  $Z_U$ :

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} J^{1/2} = \frac{1}{n} Z_U J^{1/2} \Rightarrow Z_U = \frac{0.015 \cdot 0.5}{\sqrt{0.005}} m^{8/3} \Rightarrow Z_U = 0.106m^{8/3}$$

Συνεπώς, ο αδιάστατος λόγος  $Z_U / d^{8/3}$  θα είναι ίσος με:

$$\frac{Z_U}{d^{8/3}} = 0.106$$

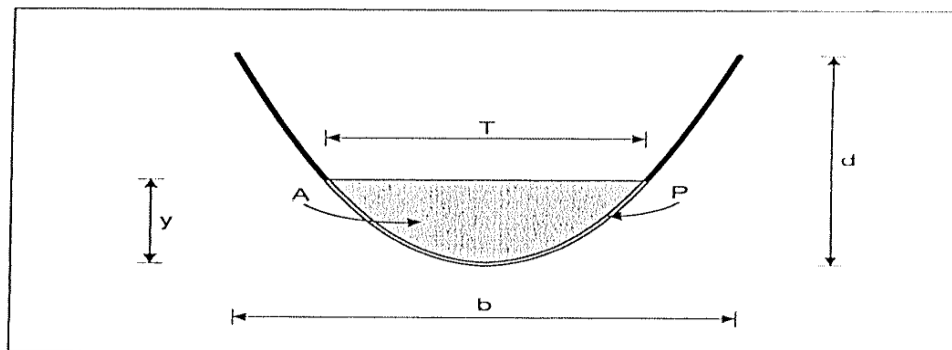
Με βάση την παραπάνω τιμή, προκύπτει από τον πίνακα γεωμετρικών στοιχείων ο λόγος πλήρωσης:

$$\frac{y}{d} \cong 0.35$$

#### 4.9 Παραβολική Διατομή

Η παραβολική διατομή (**Σχήμα 4.8**) συνήθως χρησιμοποιείται σε ρείθρα αυτοκινητοδρόμων και γενικότερα υπεραστικών οδών όταν υπάρχει φυτευόμενη νησίδα. Λόγω της δυσκολίας κατασκευής της αλλά και του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν προκατασκευασμένα τεμάχια στο εμπόριο που θα διευκόλυναν τη χρήση

της μειώνοντας τόσο το κόστος όσο και το χρόνο κατασκευής, η παραβολική διατομή δεν χρησιμοποιείται συχνά και αντ' αυτής χρησιμοποιούνται ημικυκλικές τριγωνικές και σύνθετες τριγωνικές διατομές όπως παρουσιάζονται στην παράγραφο 7.4.



**Σχήμα 4.8: Παραβολική διατομή**

Τα γεωμετρικά στοιχεία της παραβολικής διατομής με πλάτος  $b$  και ύψος  $d$  για βάθη ροής  $0 < y \leq d$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$T = b\sqrt{\frac{y}{d}}$$

$$A = \frac{2by}{3} \sqrt{\frac{y}{d}}$$

$$P = \frac{4\sqrt{dy(b^2 + 16dy)} + b^2 \operatorname{arsinh}(4\sqrt{dy}/b)}{8d}$$

$$\bar{Y} = \frac{2}{5}y$$

Στο παράρτημα παρατίθεται σε πινακοποιημένη μορφή τα γεωμετρικά στοιχεία της παραβολικής διατομής για διάφορες τιμές του λόγου  $d/b$ .

### 5. Οπες - Θυροφραγματα

#### 5.1 Γενικά περί οπών – Θυροφραγμάτων

Οι οπές είναι υδραυλικές κατασκευές που φράσσουν τη ροή, επιτρέποντας τη διέλευση αυτής μόνο μέσω ενός ανοίγματος με κλειστή περίμετρο. Εάν παρατηρείται ελεύθερη επιφάνεια εντός της οπής, τότε αυτή λειτουργεί σαν υπερχειλιστής και δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης αυτού του κεφαλαίου.

Το πάχος της οπής είναι κατά κανόνα αμελητέο σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις. Για παράδειγμα, εάν η οπή είναι κυκλική τότε το πάχος της είναι συνήθως ίσο με το 1/10 της ακτίνας της. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που το πάχος της είναι σημαντικό, της τάξεως των 2 ή 3 διαμέτρων για κυκλικές οπές όπως στις περιπτώσεις που το άνοιγμα γίνεται σε τοίχο μη αμελητέου πάχους. Στην περίπτωση αυτή, η οπή καλείται σωλήνας.

Εάν η οπή συνδυάζεται με μια κινητή υδραυλική κατασκευή που μετακινεί κάθετα στον άξονα της χειροκίνητα ή αυτόματα, τότε το σύστημα καλείται θυρόφραγμα.

Και στις τρεις προαναφερόμενες περιπτώσεις (οπή, σωλήνας και θυρόφραγμα) εφαρμόζονται οι ίδιες θεμελιώδεις αρχές υδραυλικής. Η μόνη διαφορά έγκειται στην επιλογή διαφορετικών παραμέτρων που ορίζουν την παροχή που διέρχεται μέσα του ανοίγματος.

Η δέσμη του νερού που δημιουργείται ακριβώς κατάντη του ανοίγματος καλείται φλέβα και το βάθος του νερού που προκαλεί την εκροή ονομάζεται υδραυλικό φορτίο. Εάν η ροή στη κατάντη πραγματοποιείται στην ατμόσφαιρα η υδάτινη φλέβα υφίσταται την επίδραση της βαρύτητας, ενώ εάν η φλέβα είναι βυθισμένη οπή ονομάζεται βυθισμένη.

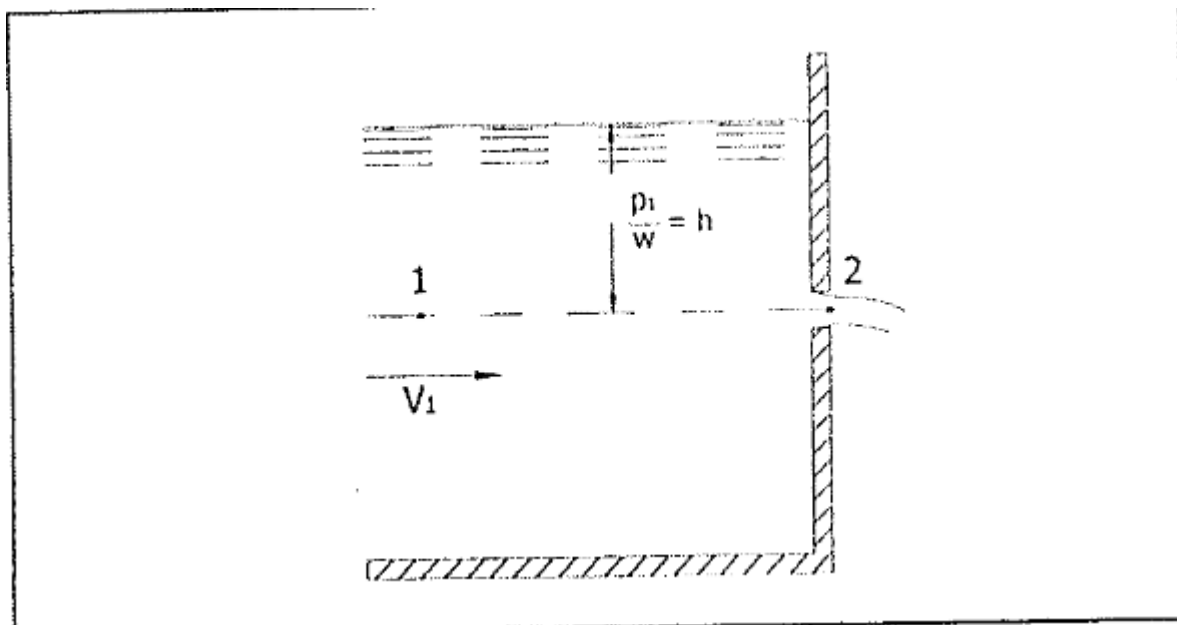
Όσον αφορά τον προσανατολισμό της οπής, αυτός μπορεί να είναι κατακόρυφος ή οριζόντιος. Ο προσανατολισμός ορίζεται συγκρίνοντας τον άξονα της ροής και τον άξονα της οπής. Εάν οι δύο άξονες είναι παράλληλοι τότε η οπή έχει οριζόντιο προσανατολισμό και εάν είναι κάθετοι η οπή έχει κάθετο προσανατολισμό.

Μια οπή με οξεία ανάντη πλευρά ονομάζεται οπή λεπτής στέψης. Εάν σε μια οπή λεπτής στέψης η φλέβα του νερού εκρέει στην ατμόσφαιρα, τότε η διατομή της φλέβας θα μειώνεται μέχρι μιας οριακής τιμής που ονομάζεται διατομή πλήρης συστολής.

Το φαινόμενο της συστολής μπορεί να περιοριστεί με λείανση (στρογγύλευση) της ανάντη παρειάς της οπής ή να σταματήσει να υφίσταται εάν το σχήμα της οπής πάρει εκείνο της προκύπτουσας φλέβας νερού.

## 5.2 Θεμελιώδεις εξισώσεις

Για την ανάλυση της ροής σε οπές γίνεται χρήση των εξισώσεων Bernoulli μεταξύ μιας τυχαίας διατομής 1 στα ανάντη της οπής και της διατομής πλήρους συστολής 2:



Σχήμα 5.1: Εξίσωση Bernoulli σε μια βυθισμένη οπή.

$$z_1 + \frac{p_1}{2g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$$

Όπου:

$z_1, z_2$  τα υψόμετρα του πυθμένα, μετρημένα από ένα σταθερό επίπεδο αναφοράς (m)

$V_1, V_2$  οι μέσες ταχύτητες ροής (m/s)

$\gamma$ , το ειδικό βάρος του ρευστού ( $\text{N/m}^3$ )

$\nu$ , η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$p_1, p_2$  οι πιέσεις ( $\text{N/m}^2$ )

$\Delta H$ , οι απώλειες ενέργειας κατά μήκος της διαδρομής (1)-(2) (m)

$g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ )

Ως σταθερό επίπεδο αναφοράς λαμβάνεται συνήθως ο άξονας της οπής, οπότε στην παραπάνω σχέση θα είναι  $z_1=z_2=0$ . Εάν η ροή θεωρηθεί ότι πραγματοποιείται με ελεύθερη επιφάνεια τότε  $p_2=0$ . Στα ανάντη της οπής, η ταχύτητα προσαγωγής  $V_1$  μπορεί να αμεληθεί. Με βάση τις παραδοχές αυτές, η σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_2 = \sqrt{2g \left( \frac{p_1}{\gamma} - \Delta H \right)}$$



Η πίεση  $p_1/\gamma$  στα ανάντη μπορεί να αντικατασταθεί από το υδραυλικό φορτίο  $H$ , οπότε η τελική μορφή της γίνεται:

$$V_2 = \sqrt{2g(H - \Delta H)}$$

Οι απώλειες ενέργειας  $\Delta H$  της εξίσωσης είναι πιο εύκολο να αντιμετωπίζονται με τη χρήση ενός συντελεστή ταχύτητας  $C_V$ , οπότε η σχέση γράφεται:

$$V_2 = C_V \sqrt{2gH}$$

Η διερχόμενη παροχή υπολογίζεται ως το γινόμενο της ταχύτητας  $V_2$  στην έξοδο επί το εμβαδόν της διατομής πλήρους συστολής  $A_\Sigma$ :

$$Q = A_\Sigma V_2$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις, η διερχόμενη παροχή από την οπή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Q = A_\Sigma C_V \sqrt{2gH}$$

Το εμβαδόν της διατομής πλήρους συστολής  $A_\Sigma$  σχετίζεται με το εμβαδόν της οπής  $A$  με τη βοήθεια του συντελεστή συστολής  $C_C$ :

$$A_\Sigma = C_C A$$

Με βάση τις δύο παραπάνω εξισώσεις:

$$Q = C_C C_V A \sqrt{2gH}$$

Το γινόμενο του συντελεστή συστολής  $C_C$  και του συντελεστή ταχύτητας  $C_V$  είναι ο συντελεστής εκροής  $C$  και η εξίσωση λαμβάνει την ακόλουθη τελική μορφή:

$$Q = CA \sqrt{2gH}$$

Οι απώλειες ενέργειας υπολογίζονται εξισώνοντας τις σχέσεις:

$$\sqrt{2g(H - \Delta H)} = C_V \sqrt{2gH} \Rightarrow \Delta H = (1 - C_V^2)H$$

### 5.3 Τροχιά φλέβας

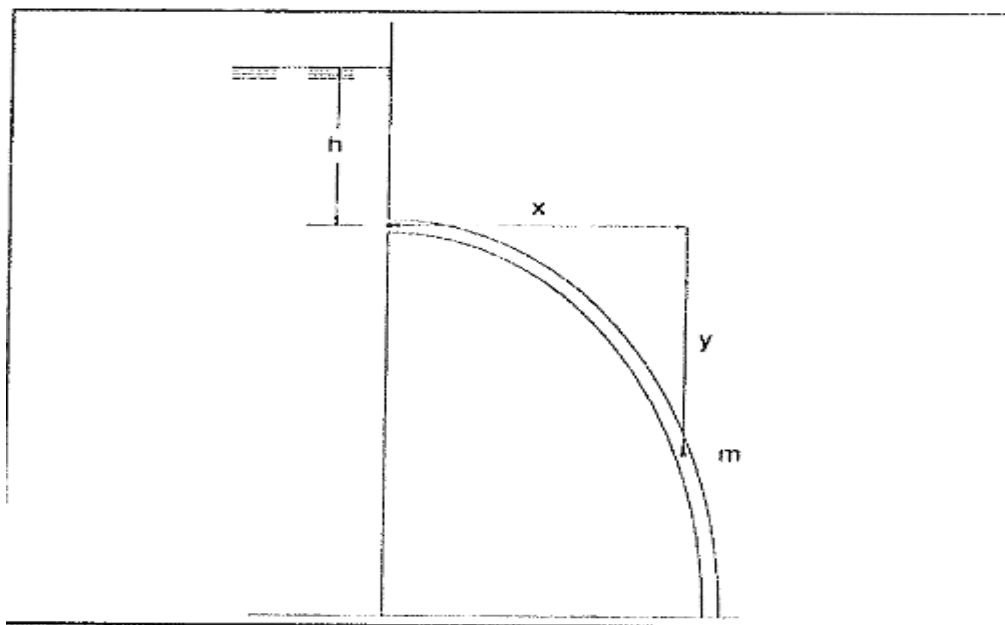
Η τροχιά μιας φλέβας που εκρέει στην ατμόσφαιρα μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της ομαλά επιταχυνόμενης κίνησης. Θεωρώντας ως αρχή των αξόνων  $(0,0)$  το κέντρο βάρους της διατομής πλήρους συστολής, η τεταγμένη  $x$  και η τεταγμένη  $y$  ενός σημείου της τροχιάς της φλέβας που αντιστοιχούν σε χρόνο  $t$  θα δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$x = Vt$$

$$y = \frac{1}{2}gt^2$$

Για τον προσδιορισμό της τροχιάς της φλέβας, απαλείφεται ο χρόνος μεταξύ των εξισώσεων:

$$y = \frac{1}{2} g \frac{x^2}{V^2}$$



**Σχήμα 5.2: Τροχιά φλέβας υπό την επίδραση της βαρύτητας.**

Η εξίσωση μπορεί να γραφεί:

$$y = \frac{1}{4C_v^2 h x^2}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση , η τροχιά που διαγράφει η φλέβα του νερού είναι παραβολική με κορυφή το κέντρο βάρους της διατομής πλήρους συστολής.

#### 5.4 Συντελεστή εκροής

Η εκτίμηση της τιμής του συντελεστή εκροής  $C$ , έχει αποτελέσει κατ επανάληψη στο παρελθόν το αντικείμενο πολλών πειραματικών διατάξεων και ερευνών. Όλα τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής εκροής είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της οπής, του υδραυλικού φορτίου  $H$  και των συνθηκών ροής. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποια πειραματική διάταξη μέσω της οποίας να μπορεί να προσδιοριστεί η ακριβής τιμή του συντελεστή εκροής, τότε λαμβάνεται συνήθως τιμή 0.6.

Ένας από τους πρώτους ερευνητές που ασχολήθηκε με την εκτίμηση του συντελεστή εκροής στις περιπτώσεις που εμφανίζεται διατομή πλήρους συστολής και η οπή είναι κυκλική ή τετραγωνική, ήταν ο SmithHamilton, το 1886. Έκτοτε έχουν γίνει πειράματα από διάφορους ερευνητές, χωρίς ωστόσο να υπάρξουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα.

Ο πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Smith σε κυκλικές οπές λεπτής στέψης, στις οποίες εμφανιζόταν διατομή πλήρους συστολής για διάφορες διαμέτρους και υδραυλικά φορτία. Για ενδιάμεσες τιμές διαμέτρων και υδραυλικών φορτίων, μπορεί να γίνει γραμμική παρεμβολή, αλλά δεν είναι δυνατή η επέκταση του πίνακα (για παράδειγμα στις περιπτώσεις μεγαλύτερων διαμέτρων). Ο πίνακας 5.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Smith για τετραγωνικές οπές διαφόρων ανοιγμάτων.

**Πίνακας 5.1: Τιμές συντελεστή εκροής σε κυκλικές οπές με πλήρη συστολή.**

Υδραυλικό φορτίο (m)	Διάμετρος κυκλικής οπής (cm)						
	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	15.0	30.0
0.1		0.642	0.627	0.606			
0.2	0.657	0.637	0.618	0.604	0.598	0.595	
0.3	0.648	0.630	0.613	0.603	0.598	0.596	0.591
0.4	0.643	0.627	0.611	0.601	0.598	0.597	0.592
0.5	0.638	0.623	0.608	0.601	0.599	0.597	0.594
1	0.629	0.616	0.604	0.600	0.599	0.598	0.597
2	0.619	0.610	0.602	0.599	0.598	0.597	0.596
3	0.612	0.606	0.599	0.597	0.597	0.596	0.595
4	0.609	0.604	0.599	0.597	0.596	0.596	0.595
5	0.606	0.603	0.598	0.596	0.596	0.596	0.594
10	0.599	0.598	0.596	0.595	0.595	0.595	0.594
20	0.595	0.594	0.593	0.593	0.593	0.593	0.593
30	0.593	0.592	0.592	0.592	0.592	0.592	0.592

**Πίνακας 5.2: Τιμές συντελεστή εκροής σε τετραγωνικές οπές με πλήρη συστολή**

Υδραυλικό φορτίο (m)	Μήκος πλευράς (cm)						
	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	15.0	30.0
0.1		0.649	0.631	0.606			
0.2	0.661	0.642	0.623	0.609	0.603	0.601	
0.3	0.651	0.635	0.619	0.608	0.604	0.602	0.599
0.4	0.647	0.631	0.617	0.606	0.604	0.603	0.600
0.5	0.642	0.627	0.614	0.606	0.604	0.603	0.602
1	0.634	0.621	0.609	0.605	0.605	0.604	0.603
2	0.624	0.615	0.607	0.604	0.604	0.603	0.602
3	0.617	0.611	0.605	0.603	0.603	0.602	0.601
4	0.614	0.609	0.604	0.603	0.602	0.602	0.601
5	0.611	0.608	0.603	0.602	0.602	0.602	0.600

<b>10</b>	0.605	0.603	0.602	0.601	0.601	0.600	0.600
<b>20</b>	0.601	0.600	0.600	0.599	0.599	0.599	0.599
<b>30</b>	0.599	0.598	0.598	0.598	0.598	0.598	0.598

Οι ενδεικτικές τιμές του συντελεστή εκροής που αναφέρονται στους δύο παραπάνω πίνακες δεν εξαρτώνται μόνο από τη γεωμετρία της οπής και το διαθέσιμο φορτίο. Παράγοντες όπως η τραχύτητα του υλικού της οπής, το πόσο οξεία ή όχι είναι η ακμή της και η θερμοκρασία του νερού (που σχετίζεται άμεσα με τις φυσικές του ιδιότητες) είναι μερικοί μόνο από τους συντελεστές που καθορίζουν την τελική τιμή του C.

Παράδειγμα 5-1: Να υπολογιστεί η διάσταση τετραγωνικής οπής μέσω της οποίας μπορούν να περάσουν 100 L/s, όταν ανάντη η στάθμη του νερού είναι στα +100m, κατάντη στο +0m και ο άξονας της οπής είναι στο +95.0m.

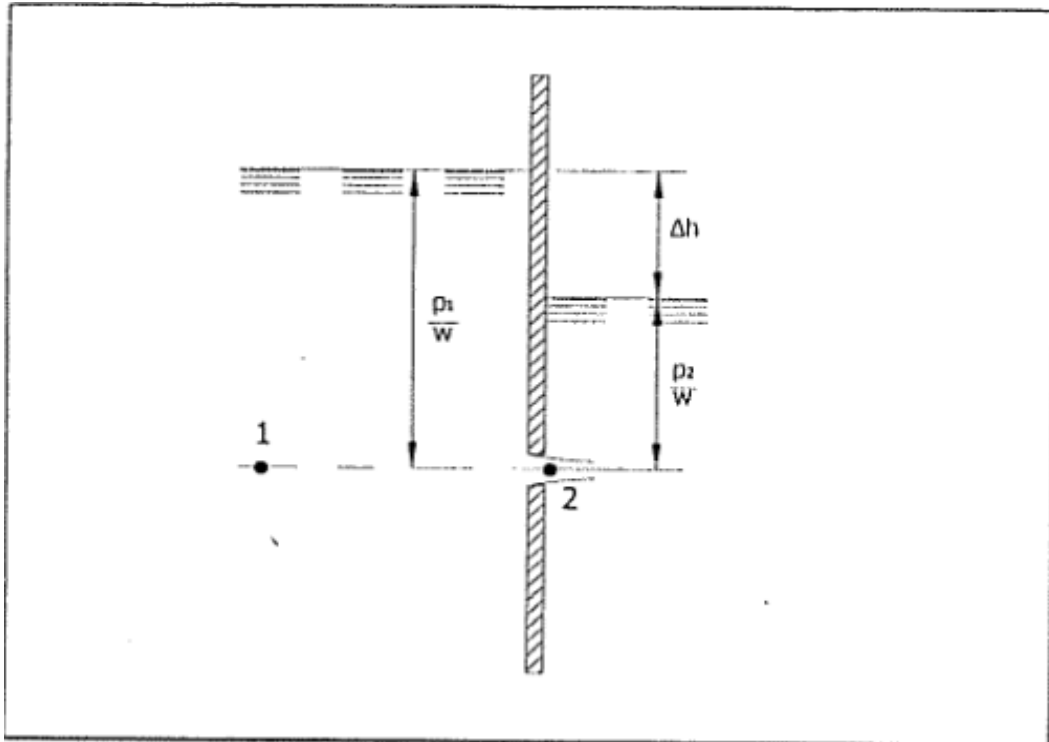
Υποθέτουμε ότι η διάσταση της οπής είναι μεταξύ 10 και 15 cm. Τότε από τον παραπάνω πίνακα (πίνακας 5.2) ο συντελεστής εκροής μπορεί να ληφθεί ίσος με 0.602 για υδραυλικό φορτίο 100-95=5 m. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση έχουμε:

$$A = \frac{Q}{C\sqrt{2g\Delta H}} = \frac{0.1}{0.602\sqrt{2 \times 9.81 \times 5}} = 0.017$$

Επειδή όμως η οπή είναι τετραγωνική με πλευρά μήκους έστω a, έπεται ότι  $a^2=0.017$  ή  $a=0.13\text{m}$ , που επαληθεύει την αρχική υπόθεση.

### 5.5 Βυθισμένες οπές

Εάν η οπή είναι βυθισμένη τόσο ανάντη όσο και κατάντη, η εξίσωση τροποποιείται ως προς το υδραυλικό φορτίο.



Σχήμα 5.3: Βυθισμένη οπή.

Στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$Q = CA\sqrt{2g\Delta H}$$

Όπου  $\Delta H$  η διαφορά σε μέτρα της στάθμης του νερού ανάντη και κατόντη. Η φορά κίνησης του νερού θα είναι από τη μεγαλύτερη στάθμη προς τη μικρότερη, έως ότου αυτές εξισωθούν οπότε η κίνηση σταματάει.

Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής εκροής  $C$  στην περίπτωση των βυθισμένων οπών είναι διαφορετικές από αυτές των μη βυθισμένων. Ωστόσο δεν έχουν γίνει μέχρι σήμερα πολλά πειράματα για την περίπτωση αυτή. Ο πίνακας 5.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα μερικών τέτοιων πειραμάτων.

Πίνακας 5.3: Τιμές συντελεστή εκροής σε βυθισμένες οπές

Γεωμετρία οπής (cm)	Υδραυλικό φορτίο (m)							
	0.10	0.15	0.30	0.60	1.20	1.80	3.00	5.50
Κυκλική, d=1.5		0.599	0.597	0.595	0.595			
Κυκλική, d=3.0	0.600	0.600	0.600	0.599	0.598			
1.5×1.5		0.609	0.607	0.605	0.604			
3.0×3.0	0.607	0.605	0.604	0.603	0.604			

<b>90×1.5</b>		0.621			0.620	0.620	0.618	
<b>Κυκλική, d=30</b>				0.608	0.602	0.603	0.600	0.601
<b>30×30</b>				0.601	0.601	0.603	0.605	0.600
<b>120×120</b>	0.614							

Παράδειγμα 5-2: Να υπολογιστεί η διερχόμενη παροχή σε βυθισμένη κυκλική οπή διαμέτρου 3 εκατοστών, όταν το υψόμετρο του νερού ανάντη είναι στο +52.5m και κατάντη στα +51.9m. Ο άξονας της οπής βρίσκεται στο +51.3m.

Καταρχήν υπολογίζεται το εμβαδόν της κυκλικής οπής:

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = 3.14 \frac{0.03^2}{4} = 0.0007m^2$$

Η διαφορά της στάθμης ανάντη και κατάντη της κυκλικής οπής θα είναι:

$$\Delta H = 52.5 - 51.9 = 0.6m$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, για κυκλική οπή d=3cm και με υδραυλικό φορτίο 52.5-51.3=1.2m θα είναι c=0.598. Επομένως από την εξίσωση θα είναι:

$$Q = 0.598 \times 0.0007 \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.6} = 0.0014m^3/s$$

### 5.6 Μη ελεύθερη συστολή

Η ύπαρξη διατομής πλήρους συστολής εξαρτάται καταρχήν από τη δυνατότητα ανάπτυξής της. Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η φλέβα που δημιουργείται δεν είναι ελεύθερη να διαμορφωθεί λόγω ύπαρξης τοιχωμάτων, όπως για παράδειγμα στη ροή κάτω από θυρόφραγμα (βλέπε επόμενη παράγραφο).

Πειραματικές διατάξεις κατέδειξαν ότι ο συντελεστής εκροής λαμβάνει μεγαλύτερες εν γένει τιμές από αυτές που θα του αποδίδονταν εάν δεν υπήρχαν οι οριακές συνθήκες που εμποδίζουν την ελεύθερη διαμόρφωση της φλέβας. Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τα αποτελέσματα σχετικών πειραμάτων για ορθογωνικές οπές πλάτους 20cm.

**Πίνακας 5.4: Συντελεστές εκροής οπών με φλέβες περιορισμένης συστολής.**

Περιγραφή	Ύψος(cm)	Υδραυλικό φορτίο(m)		
		0.5	1.0	1.5
Πλήρης συστολή	<b>20</b>	0.600	0.604	0.603
	<b>10</b>	0.616	0.614	0.611
	<b>5</b>	0.630	0.626	0.620
	<b>3</b>	0.631	0.627	0.623
	<b>1</b>	0.646	0.632	0.620
Περιορισμός στον πυθμένα	<b>20</b>	0.621	0.624	0.625
	<b>10</b>	0.648	0.645	0.634
	<b>5</b>	0.670	0.668	0.666

	<b>3</b>	0.679	0.677	0.677
	<b>1</b>	0.708	0.704	0.696

**Συντελεστές εκροής οπών με φλέβες περιορισμένης συστολής . (συν.)**

Περιγραφή	Ύψος (cm)	Υδραυλικό φορτίο (m)		
		0.5	1.0	1.5
Περιορισμός στις πλευρές	<b>20</b>	0.631	0.628	0.628
	<b>10</b>	0.635	0.630	0.630
	<b>5</b>	0.639	0.634	0.635
	<b>3</b>	0.650	0.642	0.639
	<b>1</b>	0.677	0.665	0.655
Περιορισμός στον πυθμένα και μερικός περιορισμός στη μια πλευρά	<b>20</b>	0.634	0.636	0.637
	<b>10</b>	0.657	0.656	0.654
	<b>5</b>	0.675	0.673	0.672
	<b>3</b>	0.682	0.683	0.681
	<b>1</b>	0.707	0.704	0.695
Περιορισμός στον πυθμένα και μερικός περιορισμός στις δύο πλευρές	<b>20</b>	0.674	0.664	0.663
	<b>10</b>	0.678	0.675	0.672
	<b>5</b>	0.685	0.679	0.673
	<b>3</b>	0.692	0.687	0.683
	<b>1</b>	0.707	0.704	0.698
Περιορισμός στον πυθμένα και στις δυο πλευρές	<b>20</b>	0.686	0.676	0.672
Περιορισμός παντού	<b>20</b>		0.950	

**5.7 Θυροφράγματα**

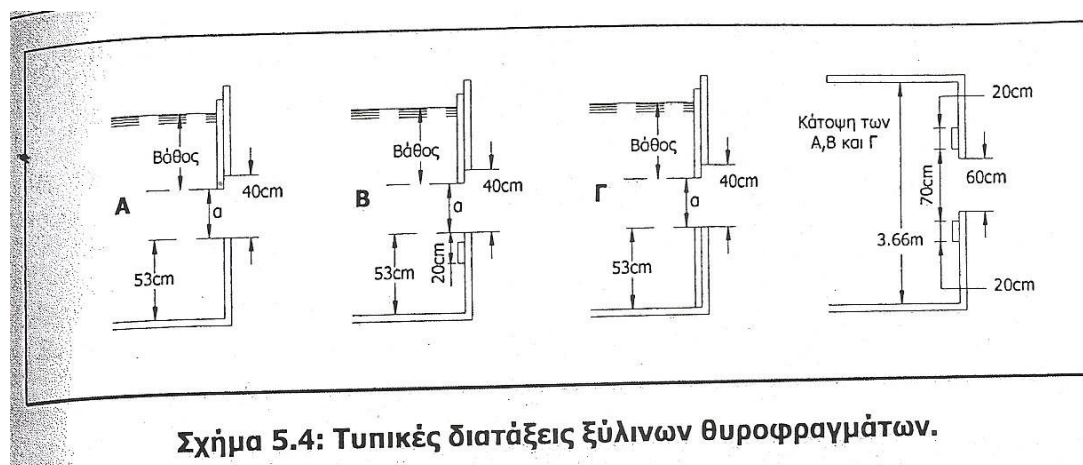
Τα θυροφράγματα είναι οπές που συνοδεύονται από κινητές θύρες, με σκοπό τη ρύθμιση της παροχής που διέρχεται. Η παροχή που διέρχεται από ένα θυροφράγμα

δίνεται από τη σχέση (5.9) όπως και στην περίπτωση των απλών οπών. Η έλλειψη συγκεκριμένων προδιαγραφών για την κατασκευή των θυροφραγμάτων έχει ως αποτέλεσμα την μη ύπαρξη γενικών συντελεστών εκροής που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση.

Κατά το παρελθόν έχουν γίνει διάφορα πειράματα για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκροής σε πειραματικές διατάξεις ξύλινων θυροφραγμάτων (Σχήμα 5.4), ορισμένα εκ των αποτελεσμάτων των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια.

**Πίνακας 5.5: Τιμές συντελεστή εκροής για ξύλινο θυρόφραγμα (Περίπτωση 1).**

Υδραυλικό φορτίο (m)	Ύψος ανοίγματος (cm)			
	3	5	20	40
0.10	0.709	0.691	0.633	0.598
0.15	0.700	0.688	0.638	0.604
0.20	0.695	0.684	0.640	0.610
0.30	0.692	0.683	0.641	0.616
0.60	0.688	0.678	0.640	0.618
1.00	0.681	0.674	0.638	0.610
1.50	0.677	0.672	0.637	0.608
2.00	0.675	0.670	0.636	0.594
3.00	0.672	0.668	0.634	0.592



**Σχήμα 5.4: Τυπικές διατάξεις ξύλινων θυροφραγμάτων.**

**Πίνακας 5.6: Τιμές συντελεστή εκροής για ξύλινο θυρόφραγμα (Περίπτωση 2).**

Υδραυλικό φορτίο (m)	Ύψος ανοίγματος (cm)			
	3	5	20	40
0.10	0.694	0.665	0.665	0.644



<b>0.15</b>	0.700	0.681	0.670	0.650
<b>0.20</b>	0.705	0.688	0.674	0.654
<b>0.30</b>	0.708	0.693	0.675	0.656
<b>0.60</b>	0.710	0.695	0.676	0.649
<b>1.00</b>	0.704	0.694	0.674	0.634
<b>1.50</b>	0.699	0.692	0.673	0.620
<b>2.00</b>	0.695	0.691	0.671	0.615
<b>3.00</b>	0.693	0.689	0.669	0.611

**Πίνακας 5.7: Τιμές συντελεστή εκροής για ξύλινο θυρόφραγμα (Περίπτωση 3).**

Υδραυλικό φορτίο (m)	Ύψος ανοίγματος (cm)			
	3	5	20	40
<b>0.10</b>	0.696	0.667	0.668	0.649
<b>0.15</b>	0.702	0.682	0.673	0.654
<b>0.20</b>	0.707	0.690	0.676	0.658
<b>0.30</b>	0.710	0.695	0.678	0.660
<b>0.60</b>	0.712	0.697	0.679	0.652
<b>1.00</b>	0.705	0.696	0.677	0.635
<b>1.50</b>	0.699	0.693	0.674	0.622
<b>2.00</b>	0.695	0.692	0.672	0.616
<b>3.00</b>	0.693	0.690	0.670	0.612

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6. ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΕΣ

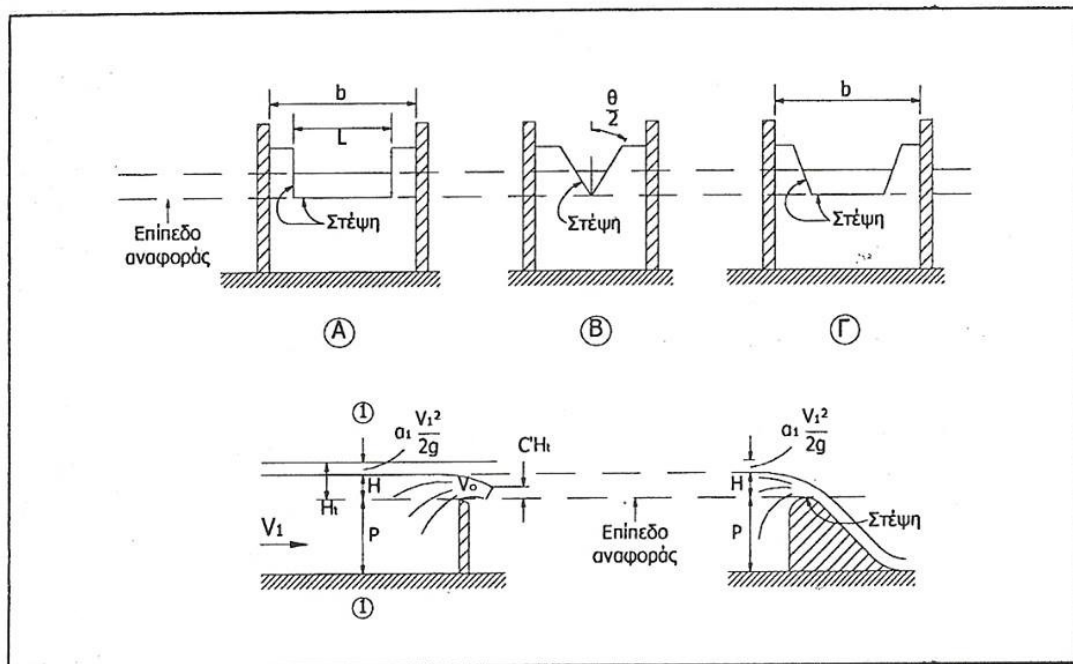
#### 6.1 Γενικά Περί Υπερχειλιστών

Οι υπερχειλιστές (ή εκχειλιστές) είναι υδραυλικές κατασκευές που τοποθετούνται κάθετα και σπανιότερα λοξά στη ροή προκαλώντας την έμφραξη της. Στα ανάντη του υπερχειλιστή και ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους ή του αγωγού, δημιουργείται μια λεκάνη κατάκλισης στην οποία αποθηκεύεται όσο νερό δεν διαφεύγει από τον υπερχειλιστή.

Αν και στην αγγλική ορολογία υπάρχει διαφορά μεταξύ του υπερχειλιστή που τοποθετείται εντός ενός ανοικτού αγωγού (weir) και αυτού που χρησιμοποιείται σε φράγματα (spillway), εντούτοις στην ελληνική ορολογία δεν γίνεται τέτοια διάκριση.

Οι υδραυλικές αρχές για την επίλυση και των δυο κατηγοριών υπερχειλιστών είναι ωστόσο όμοιες.

Από πλευράς μορφής διατομής οι υπερχειλιστές διακρίνονται σε ορθογωνικούς, τριγωνικούς και τραπεζοειδείς (Cipoletti) όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Ένας υπερχειλιστής μπορεί να δουλεύει βυθισμένος ή μη βυθισμένος. Εάν δουλεύει μη βυθισμένος τότε μπορεί να έχει λεπτή στέψη, εφόσον το κάτω μέρος της φλέβας του νερού απομακρύνεται επαρκώς από το σώμα του υπερχειλιστή. Υπερχειλιστές λεπτής στέψης απαντώνται συνηθέστερα στο εργαστήριο και χρησιμοποιούνται για την ακριβή μέτρηση της διερχόμενης παροχής.



Σχήμα 6.1: Τυπικές μορφές υπερχειλιστών.

Η κάτω πλευρά ενός υπερχειλιστή καλείται στέψη (crest). Το βάθος του νερού μετρημένο από τη στέψη του υπερχειλιστή αποτελεί το υδραυλικό του φορτίο και παρόλο που η ροή είναι τρισδιάστατη, μπορεί να θεωρηθεί ότι παραμένει σταθερό κατά μήκος της στέψης.

## 6.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας

Η ακριβής εύρεση της παροχής που διέρχεται μέσω του σώματος ενός υπερχειλιστή είναι αδύνατη. Αυτό οφείλεται στο ότι η ροή είναι τρισδιάστατη και εξαρτάται,

μεταξύ άλλων, από την μορφή του υπερχειλιστή αλλά και την ίδια την παροχή. Εξάλλου, οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο πρόβλημα εύρεσης της παροχής είναι τόσες πολλές που καθίσταται πρακτικά αδύνατη η συμπερίληψη τους σε μια εξίσωση.

Στην διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές εξισώσεις που δεν λαμβάνουν υπόψη διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν τη διερχόμενη παροχή όπως το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, το υλικό του υπερχειλιστή, την επιφανειακή τάση, κλπ. Όπως και στην περίπτωση των θυροφραγμάτων, έτσι και στους υπερχειλιστές χρησιμοποιείται ένας συντελεστής εκροής που περιλαμβάνει τις επιδράσεις όλων των προαναφερόμενων παραγόντων και προσδιορίζεται πειραματικά.

Γράφεται η εξίσωση ενέργειας Bernoulli μεταξύ μιας ανάντη του υπερχειλιστή διατομής 1 και του κέντρου βάρους της διατομής πλήρους συστολής 2:

$$H_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} = H_2 + a_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (6.1)$$

Εάν το αριστερό μέλος θεωρηθεί ότι είναι ίσο με  $H_T$ , και το ενεργειακό ύψος  $H_2$  θεωρηθεί ότι είναι ίσο με  $C'H_T$ , τότε η εξίσωση (6.1) γράφεται ως εξής:

$$H_T = C'H_T + a_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (6.2)$$

Λύνοντας την εξίσωση (6.2) ως προς  $V_2$  προκύπτει:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g}{a_2} [C'(1 - H_T) - \Delta H]} \quad (6.3)$$

Εισάγεται ένας νέος συντελεστής  $C''$  τέτοιος ώστε:

$$C'' = \sqrt{\frac{1}{H_T a_2} [C'(1 - H_T) - \Delta H]} \quad (6.4)$$

Με τη βοήθεια της σχέσης (6.4), η σχέση (6.3) γράφεται:

$$V_2 = C'' \sqrt{2gH_T} \quad (6.5)$$

Η παροχή  $Q$  είναι το γινόμενο της ταχύτητας  $V_2$  επί το εμβαδόν της διατομής πλήρους συστολής  $A_c$ :

$$Q = A_c V_2 \quad (6.6)$$

Χρησιμοποιώντας την έκφραση της ταχύτητας από την εξίσωση (6.5) λαμβάνεται:

$$Q = A_c C'' \sqrt{2gH_T} \quad (6.7)$$

Το εμβαδόν της διατομής πλήρους συστολής  $A_c$  είναι ίσο με το γινόμενο του εμβαδού  $A$  του ανοίγματος του υπερχειλιστή επί έναν συντελεστή συστολής  $C_c$ :

$$A_c = C_c A \quad (6.8)$$

Οπότε η εξίσωση (6.7) γίνεται:

$$Q = C_c A C'' \sqrt{2gH_T} \quad (6.9)$$

Θεωρώντας το γινόμενο των όρων  $C_c$ ,  $C''$  και  $\sqrt{2g}$  σταθερό και ίσο με  $C$ , η σχέση (6.9) παίρνει την τελική μορφή της:

$$Q = CA\sqrt{H_T} \quad (6.10)$$

Η σχέση (6.10) μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω για συγκεκριμένες μορφές διατομών υπερχειλιστών. Για την ορθογωνική διατομή, μήκους  $L$  και ύψους νερού  $H$ , το εμβαδόν της υγρής διατομής του υπερχειλιστή θα είναι:

$$A = LH$$

Οπότε η εξίσωση γράφεται:

$$Q = CLH\sqrt{H_T}$$

Εάν αμεληθεί η επίδραση της ταχύτητας του νερού καθώς προσεγγίζει τον υπερχειλιστή, το ύψος  $H_T$  ταυτίζεται με το βάθος ροής στην ορθογωνική υγρή διατομή του υπερχειλιστή  $H$ , οπότε η σχέση γράφεται:

$$Q = CLH^{3/2}$$

Για τριγωνική διατομή γωνίας  $\varphi$  το εμβαδόν  $A$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$A = H^2 \tan \frac{\varphi}{2}$$

Οπότε η εξίσωση γράφεται:

$$Q = CH^2 \tan \frac{\varphi}{2} \sqrt{H_T}$$

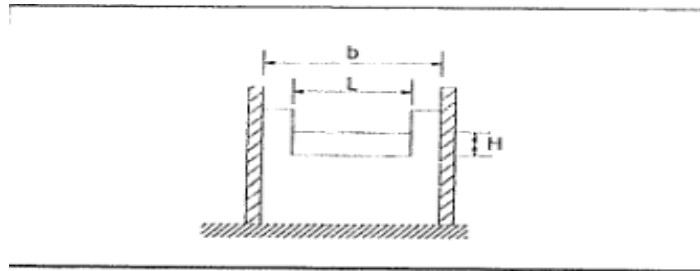
Εάν και πάλι αμεληθεί η επίδραση της ταχύτητας του νερού καθώς προσεγγίζει τον υπερχειλιστή, το ύψος  $H_T$  ταυτίζεται με το βάθος ροής στην τριγωνική υγρή διατομή του υπερχειλιστή  $H$ , οπότε η σχέση γράφεται:

$$Q = CH^{5/2} \tan \frac{\varphi}{2}$$

Ομοίως για άλλες μορφές διατομών υπερχειλιστών όπως η παραβολική και η τραπεζοειδής, μπορούν να γίνουν περαιτέρω απλοποιήσεις της γενικής σχέσης. Ο συντελεστής εκροής  $C$  εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων όπως οι αριθμοί Reynolds και Weber, οι λόγοι υδραυλικού φορτίου προς ύψος και τριβής προς υδραυλικό φορτίο κλπ. Ειδικότερες εκφράσεις και τιμές για τους συντελεστές εκροής ανά περίπτωση δίνονται στη συνέχεια.

### 6.3 Ορθογωνικοί υπερχειλιστές λεπτής στέψης

Ο υπολογισμός του συντελεστή εκροής σε ορθογωνικούς υπερχειλιστές λεπτής στέψης αποτέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνητών στο παρελθόν. Έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή εκροής. Κατά γενική ομολογία, αυτός εξαρτάται από την ταχύτητα προσέγγισης του νερού στον υπερχειλιστή, τις διαστάσεις του υπερχειλιστή και το διαθέσιμο υδραυλικό φορτίο.



Σχήμα 6.2: Ορθογωνικός υπερχειλιστής λεπτής στέψης.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών μαζί με τις υδραυλικές συνθήκες και τις γεωμετρίες υπερχειλιστών που χρησιμοποιήθηκαν. Στους τύπους του πίνακα χρησιμοποιείται το σύμβολο  $H_V$  για το ύψος του υπερχειλιστή,  $V$  για την ταχύτητα προσέγγισης,  $H$  για το υδραυλικό φορτίο,  $L$  για το μήκος του υπερχειλιστή και  $C$  για τον συντελεστή εκροής.

Ερευνητής	Τύπος
<b>Francis</b>	$C = 1.84 \left[ \left( 1 + \frac{V^2}{2gH} \right)^{3/2} - \left( \frac{V^2}{2gH} \right)^{3/2} \right] \quad (6.17)$
	$0.18 \leq H \leq 0.50 \text{ (m)}$ $2.4 \leq L \leq 3.0 \text{ (m)}$ $0.60 \leq H_v \leq 1.5 \text{ (m)}$ $0.06 \leq V \leq 0.3 \text{ (m/s)}$
<b>Fteley και Stearns</b>	$C = 1.84 \left( 1 + 1.5 \frac{V^2}{2gH} \right)^{3/2} + \frac{0.00065}{H^{3/2}} \quad (6.18)$
	$H=0.24 \text{ \& } H=0.48 \text{ (m)}$ $L=1.5 \text{ \& } L=5.8 \text{ (m)}$ $H_v=1 \text{ \& } H_v=2 \text{ (m)}$ $V \leq 0.3 \text{ (m/s)}$
<b>Bazin</b>	$C = \left( 1.794 + \frac{0.013}{H} \right) \left( 1 + 0.55 \frac{H^2}{(H + H_v)^2} \right) \quad (6.19)$
	$0.09 \leq H \leq 0.52 \text{ (m)}$ $L=0.50, 1, 2 \text{ (m)}$ $0.24 \leq H_v \leq 1.13 \text{ (m)}$
<b>Frese</b>	$C = \left( 1.817 + \frac{0.006}{H} \right) \left( 1 + 0.55 \frac{H^2}{(H + H_v)^2} \right) \quad (6.20)$
<b>King</b>	$C = \frac{1.84}{H^{0.03}} \left( 1 + 0.56 \frac{H^2}{(H + H_v)^2} \right) \quad (6.21)$
<b>Rehbock</b>	$C = 1.787 + \frac{1}{357H - 1.01} + 0.236 \frac{H}{H + H_v} \quad (6.22)$
<b>Swiss Society</b>	$C = \left( 1.817 + \frac{1}{551H + 0.89} \right) \left( 1 + 0.5 \frac{H^2}{(H + H_v)^2} \right) \quad (6.23)$

Παράδειγμα 6-1: Να υπολογιστεί η διερχόμενη παροχή σε ορθογωνικό υπερχειλιστή λεπτής στέγης ανοίγματος 10 μέτρων. Η στέγη του είναι τοποθετημένη στο +48 m, η ανάντη στάθμη βρίσκεται 2 μέτρα ψηλότερα και το ύψος του υπερχειλιστή είναι 1 μέτρο. Να χρησιμοποιηθεί ο τύπος του King για τον υπολογισμό του συντελεστή εκροής.

Καταρχήν υπολογίζεται ο συντελεστής εκροής δεδομένου ότι  $H_v=1\text{m}$  και  $H=2\text{m}$ :

$$C = \frac{1.84}{H^{0.03}} \left( 1 + 0.56 \frac{H^2}{(H + H_v)^2} \right) = 2.25$$

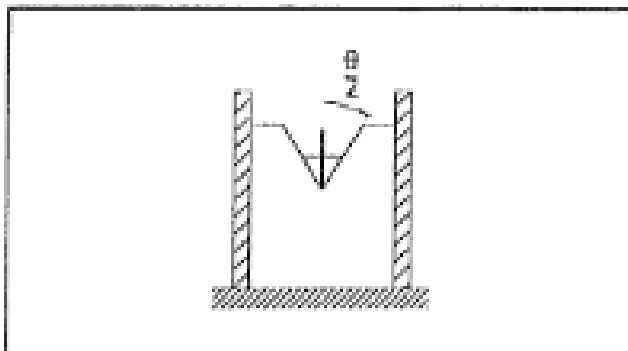
Από τη σχέση λαμβάνεται η διερχόμενη παροχή:

$$Q = CLH^{3/2} = 2.25 \times 10 \times 2^{3/2} = 63.64 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### 6.4 Τριγωνικοί υπερχειλιστές

Οι τριγωνικοί υπερχειλιστές ή υπερχειλιστές σχήματος V χρησιμοποιούνται για την ακριβή μέτρηση πολύ μικρότερων παροχών από αυτές που μπορούν να μετρηθούν με βάση τους ορθογωνικούς υπερχειλιστές. Αυτό οφείλεται στη γεωμετρία τους που

προκαλεί την κατά πολύ μεγαλύτερη αύξηση του βάθους ροής με την αύξηση της παροχής απ' ότι συμβαίνει στις ορθογωνικές διατομές.



**Σχήμα 6.3: Τριγωνικός υπερχειλιστής (σχήματος V).**

Στους τριγωνικούς υπερχειλιστές έχει ήδη αποδειχθεί ότι ισχύει η σχέση για τον υπολογισμό της εκροής. Η ταχύτητα προσέγγισης μπορεί να αγνοηθεί στην περίπτωση των τριγωνικών υπερχειλιστών. Οι περισσότερες πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για την εκτίμηση της παροχής εκτελούνταν με σταθερή γεωμετρία (άρα ο συντελεστής εκροής παρέμενε σταθερός) και διαφορετικά υδραυλικά φορτία. Με βάση τα ζεύγη (Q, H) των πειραμάτων γινόταν προσπάθεια να προσδιοριστούν οι συντελεστές C, n της παρακάτω σχέσης:

$$Q = CH^n$$

Σημειώνεται ότι η γωνία των υπερχειλιστών ήταν 90 μοίρες ώστε η εφαπτομένη της σχέσης να ισούται με τη μονάδα. Από τα αποτελέσματα πειραμάτων που εκτελέστηκαν στο πανεπιστήμιο του Michigan για διαθέσιμα υδραυλικά φορτία από 0.06 έως 0.55 m προσδιορίστηκαν οι συντελεστές της σχέσης ως εξής:

$$Q = 1.34H^{2.47}$$

Πειράματα που έγιναν μεταγενέστερα από τον Baig επιβεβαίωσαν τη σχέση. Επομένως σε τριγωνικούς υπερχειλιστές με γωνία 90 μοιρών, ο συντελεστής εκροής μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 1.34, εάν φυσικά δεν γίνεται πειραματική εκτίμηση αυτού. Για διαφορετικές γεωμετρίες, παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών C, n στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 6.2: Συντελεστής εκροής τριγωνικών υπερχειλιστών.**

Ερευνητής	$\Phi$	C	n
Πανεπιστήμιο Michigan	22.5°	0.25	2.43
Πανεπιστήμιο Michigan	60°	0.82	2.51
Hertzer	120°	2.35	2.48

Από τα παραπάνω πειράματα γίνεται σαφές ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γενική σχέση με πολύ μικρό σφάλμα (έως 5%) για τις πλέον συνήθεις περιπτώσεις:

$$Q = 1.34 \tan \frac{\varphi}{2} H^{2.5}$$

Παράδειγμα 6-2: Να υπολογιστεί η διερχόμενη παροχή σε τριγωνικού υπερχειλιστή γωνίας 60 μοιρών με υδραυλικό φορτίο 1 m.

Σύμφωνα με το πείραμα του πανεπιστημίου του Michigan, ο συντελεστής εκροής σε τριγωνικό υπερχειλιστή γωνίας 60 μοιρών είναι ίσος με 0.82 και εκθέτης n της σχέσης ίσος με 2.51. Επομένως η σχέση γράφεται:

$$Q = CH^n = 0.82 \times 2^{2.51} = 4.67 \text{ m}^3/\text{s}$$

Αν χρησιμοποιηθεί η απλοποιητική σχέση:

$$Q = 1.34 \tan \frac{\varphi}{2} H^{2.5} = 1.34 \times 0.577 \times 2^{2.5} = 4.38 \text{ m}^3/\text{s}$$

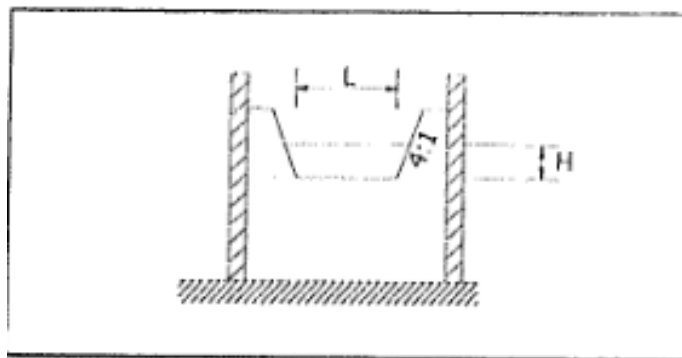
Παρατηρείται ότι η διαφορά των αποτελεσμάτων είναι μικρή (<10%).

### 6.5 Τραπεζοειδείς υπερχειλιστές

Οι τραπεζοειδείς υπερχειλιστές που έχουν κλίση πρηνών δεξιά και αριστερά ίση με 4:1, καλούνται υπερχειλιστές Cipoletti. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μορφές τραπεζοειδών υπερχειλιστών με ποικίλες κλίσεις πρηνών που μπορεί να μην είναι ίδιες (αριστερά και δεξιά). Λόγω όμως της μη ύπαρξης αξιόπιστων πειραματικών τιμών για το συντελεστή εκροής έχει καθιερωθεί η μορφή Cipoletti με κλίσεις πρηνών 4:1.

Στην περίπτωση του υπερχειλιστή Cipoletti, η τιμή του συντελεστή εκροής είναι περίπου ίση με 1.86 και η σχέση που δίνει την εκροή σε συνάρτηση με τον υδραυλικό φορτίο είναι η (6.13).





**Σχήμα 6.4: Τραπεζοειδής υπερχειλιστής Cipolletti**

Παράδειγμα 6-3: Να υπολογιστεί η διερχόμενη παροχή σε τραπεζοειδή υπερχειλιστή Cipolletti ανοίγματος 5m. Το υδραυλικό φορτίο είναι ίσο με 2 μέτρα και το ύψος του υπερχειλιστή είναι 1 μέτρο.

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, ο συντελεστής εκροής είναι ίσος με 1.86.

$$Q = CLH^{3/2} = 1.86 \times 5 \times 2^{3/2} = 26.30 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 6.6 Βυθισμένοι υπερχειλιστές λεπτής στέψης

Η διαδικασία υπολογισμού της εκροής σε βυθισμένους υπερχειλιστές γίνεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο συνίσταται στην αγνόηση της βύθισης και εκτέλεση των υπολογισμών όπως ακριβώς έγινε στις προηγούμενες παραγράφους. Η παροχή που προκύπτει με αγνόηση της βύθισης, έστω  $Q_1$ , διορθώνεται στο δεύτερο στάδιο ως εξής:

$$\frac{Q}{Q_1} = \left[ 1 - \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^n \right]^{0.385}$$

Όπου:

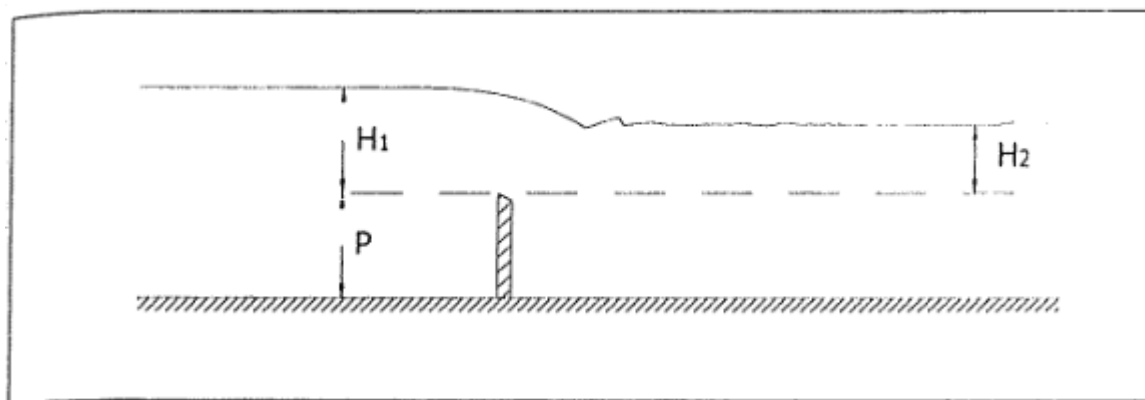
$Q$ , η εκροή πάνω από τον υπερχειλιστή ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_1$ , η εκροή πάνω από τον υπερχειλιστή αγνοώντας τη βύθιση ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$H_1$ , το ανάντη υδραυλικό φορτίο (m)

$H_2$ , η κατάντη στάθμη του νερού (m)

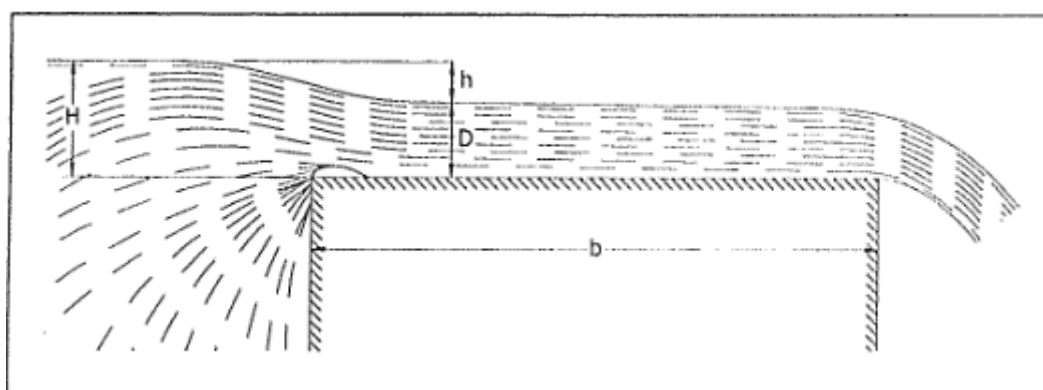
$n$ , ο εκθέτης του υδραυλικού φορτίου που ισούται με αυτόν της εκάστοτε σχέσης υπολογισμού του  $Q_1$



Σχήμα 6.5: Βυθισμένος υπερχειλιστής.

### 6.7 Υπερχειλιστές ευρείας στέψης

Στην περίπτωση που ο υπερχειλιστής δεν έχει λεπτή στέψη, τότε οι τιμές των συντελεστών εκροής μεταβάλλονται σημαντικά. Οι τύποι υπολογισμού της εκροής δεν αλλάζουν. Οι ακόλουθοι πίνακες παρουσιάζουν ενδεικτικές τιμές των συντελεστών εκροής σε ορθογωνικούς υπερχειλιστές με σημαντικό πλάτος στέψης.



Σχήμα 6.6: Υπερχειλιστής ευρείας στέψης.

Πίνακας 6.3: Συντελεστής εκροής ορθογωνικών υπερχειλιστών (W)

Υδραυλικό φορτίο (m)	Πλάτος στέψης υπερχειλιστή (m)					
	0.15	0.20	0.30	0.45	0.60	0.75
0.10	1.61	1.55	1.50	1.46	1.44	1.44
0.20	1.70	1.60	1.52	1.46	1.44	1.44
0.30	1.83	1.73	1.65	1.52	1.47	1.46
0.40	1.83	1.80	1.77	1.61	1.53	1.48
0.50	1.83	1.82	1.81	1.70	1.60	1.52
0.60	1.83	1.83	1.82	1.67	1.57	1.52
0.80	1.83	1.83	1.83	1.81	1.70	1.60
0.90	1.83	1.83	1.83	1.83	1.77	1.69
1.00	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.76

<b>1.20</b>	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
<b>1.40</b>	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
<b>1.50</b>	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
<b>1.70</b>	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83

**Πίνακας 6.4: Συντελεστής εκροής ορθογωνικών υπερχειλιστών ( $W>0.75$ ).**

<b>Υδραυλικό φορτίο (m)</b>	<b>Πλάτος στέψης υπερχειλιστή (m)</b>				
	<b>0.90</b>	<b>1.20</b>	<b>1.50</b>	<b>3.00</b>	<b>4.50</b>
<b>0.10</b>	1.43	1.40	1.38	1.41	1.49
<b>0.20</b>	1.48	1.49	1.49	1.49	1.49
<b>0.30</b>	1.46	1.48	1.48	1.48	1.45
<b>0.40</b>	1.46	1.46	1.46	1.48	1.46
<b>0.50</b>	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45
<b>0.60</b>	1.50	1.48	1.46	1.46	1.45
<b>0.80</b>	1.55	1.50	1.48	1.46	1.45
<b>0.90</b>	1.61	1.51	1.47	1.46	1.45
<b>1.00</b>	1.64	1.52	1.48	1.46	1.45
<b>1.20</b>	1.70	1.54	1.49	1.46	1.45
<b>1.40</b>	1.83	1.59	1.51	1.46	1.45
<b>1.50</b>	1.83	1.70	1.54	1.46	1.45
<b>1.70</b>	1.83	1.83	1.59	1.46	1.45

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο**

### **7. Αποχέτευση οδών**

#### **7.1 Εισαγωγή**

Η ορθή αποχέτευση των ομβρίων υδάτων από καταστρώματα οδών, γεφυρών, χώρων στάθμευσης και άλλων επιφανειών έχει μεγάλη σημασία για την εξασφάλιση

της απρόσκοπτης και ασφαλούς εξυπηρέτησης οχημάτων και πεζών. Η συγκέντρωση ομβρίων υδάτων μπορεί να παρεμποδίσει την κίνηση των οχημάτων,

να μειώσει τις τριβές, να αυξήσει τον κίνδυνο ολίσθησης, να μειώσει την ορατότητα λόγω πιτσιλίσματος των ανεμοθωράκων και πλευρικών παραθύρων των οχημάτων και να δυσκολέψει την οδήγηση των οχημάτων όταν οι εμπρός τροχοί του συναντούν λακκούβες με νερό.

Η επιτυχής αποχέτευση των οδοστρωμάτων απαιτεί συνδυασμένη μελέτη του συστήματος επιφανειακής αποστράγγισης, ροής στα ρείθρα των οδών και υδροσυλλογής των ομβρίων υδάτων. Ο σχεδιασμός των στοιχείων αυτών εξαρτάται

κυρίως από την σημαντικότητα των έργων που προστατεύονται με πιο αυστηρές προδιαγραφές στους αυτοκινητόδρομους και πιο ελαστικές σε αγροτικές οδούς.

Όσον αφορά την επιφανειακή αποστράγγιση και τη ροή στα ρείθρα των οδών, αυτές συνήθως εκφράζονται με την επιλογή μιας κατάλληλης περιόδου επαναφοράς της καταγιγίδας σχεδιασμού και με την υιοθέτηση του μέγιστου επιτρεπόμενου πλάτους κατάληψης των ομβρίων υδάτων. Οι δυο αυτές παράμετροι είναι αλληλένδετες και δεν μπορούν να εξεταστούν χωριστά. Για παράδειγμα η κατάληψη μισής λωρίδας κυκλοφορίας από όμβρια ύδατα αντιστοιχεί σε καταγιγίδα σχεδιασμού συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς και αντίστροφα.

## **7.2 Επιφανειακή Απορροή**

Καθώς η βροχή προσκρούει σε μια κεκλιμένη επενδεδυμένη (ασφαλτοστρωμένη, πλακοστρωμένη, κλπ) επιφάνεια, εμφανίζεται μια διάχυτη επιφανειακή ροή, το βάθος της οποίας αυξάνεται όσο πλησιάζει προς το πεζοδρόμιο. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το βάθος ροής είναι η υφή της επένδυσης, η ένταση της βροχόπτωσης, η κλίση της επιφάνειας και το μήκος της διαδρομής.

Όσο το βάθος ροής αυξάνεται, τόσο μεγαλώνει ο κίνδυνος υδρολίσθησης των διερχόμενων οχημάτων. Ας θεωρηθεί ένα περιστρεφόμενο και μετακινούμενο ελαστικό οχήματος το οποίο συναντάει μια επιφανειακή στρώση νερού. Το νερό αυτό εισέρχεται στα αυλάκια του πέλματος του ελαστικού και τα γεμίζει, όπως επίσης γεμίζει και τις αυλακώσεις της επιφάνειας επί της οποίας ρέει. Στην περίπτωση που η παροχτευτικότητα των αυλακίων του πέλματος του ελαστικού δεν επαρκεί και αρχίζει να συσσωρεύεται ποσότητα ύδατος μπροστά από αυτό, τότε δημιουργούνται συνθήκες υδρολίσθησης του οχήματος.

Οι συνθήκες αυτές γίνονται ολοένα πιο δυσμενείς με την περαιτέρω συγκέντρωση υδάτων, τα οποία δημιουργούν μια σφήνα που ασκεί υδροστατική πίεση στο ελαστικό και μπορεί να το ανυψώσει απομακρύνοντας το από την επιφάνεια κίνησής του. Καθώς το νερό έχει ελάχιστη συνάφεια, το ελαστικό χάνει την πρόσφυσή του λόγω έλλειψης τριβής και ο οδηγός χάνει με τη σειρά του τον έλεγχο του οχήματος. Έχει διαπιστωθεί ότι υδρολίσθηση μπορεί να συμβεί όταν ένα όχημα κινείται με ταχύτητα 90 km/h σε βάθος νερού 2mm .

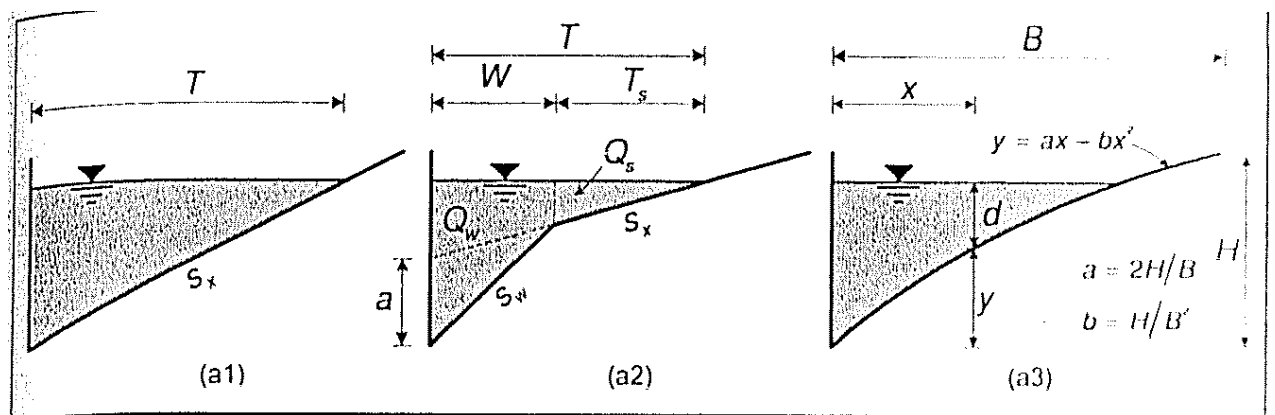
Η υδρολίσθηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το βάθος νερού, η γεωμετρία του καταστρώματος της οδού, η ταχύτητα κίνησης του οχήματος, το βάθος των αυλακώσεων του πέλματος του ελαστικού, η πίεσή του και η υφή της επιφάνειας κίνησης. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μείωσης του κινδύνου εμφάνισης της υδρολίσθησης κατά το σχεδιασμό της οδού, όπως για παράδειγμα η χρήση αντιολισθητικής στρώσης, αλλά ο κυριότερος παράγοντας παραμένει η αποστράγγιση και η απαγωγή των επιφανειακών ομβρίων υδάτων.

### 7.3 Ρείθρα Σε Πεζοδρόμια

Τα πεζοδρόμια αποτελούν φυσικά εμπόδια για την Κίνηση των οχημάτων αλλά και του επιφανειακού νερού. Μεταξύ των πεζοδρομίων και του οδοστρώματος, παρεμβάλλονται τα ρείθρα, τα οποία και κατασκευάζονται με στόχο την απομάκρυνση του επιφανειακού νερού (βλ.  $a_1, a_2$  και  $a_3$  στο Σχήμα 7.1).

Το ελεύθερο πλάτος της ροής του νερού στα ρείθρα  $T$  είναι το μέγεθος που ενδιαφέρει στο σχεδιασμό της αποστράγγισης των ομβρίων υδάτων. Το ελεύθερο πλάτος της ροής  $T$  ονομάζεται και πλάτος κατάληψης και θα πρέπει να περιορίζεται κατά το δυνατόν έτσι ώστε να μην παρεμποδίζεται ή να μειώνεται η ασφάλεια των διερχόμενων οχημάτων.

Οι υδραυλικοί υπολογισμοί για τον προσδιορισμό του πλάτους κατάληψης είναι σύνθετοι και πολύπλοκοι, λόγω του γεγονότος ότι υπάρχουν δυο κλίσεις που μεταβάλλονται συνεχώς κατά μήκος μιας οδού, δηλαδή η κλίση της μηκοτομής και η επίκλιση (κατά πλάτος κλίση) του οδοστρώματος. Η φορά κίνησης του νερού υπαγορεύεται από τη συνισταμένη των δυο αυτών κλίσεων.



Σχήμα 7.1: Συνηθισμένες γεωμετρίες ρείθρων σε πεζοδρόμια.

#### 7.3.1 Απλό Τριγωνικό Ρείθρο

Για την απλή διατομή του τριγωνικού ρείθρου  $a_1$  που φαίνεται στο Σχήμα 7.1, η παροχευτικότητα βρίσκεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση του Manning με βάση την επίκλιση, οπότε λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση:

$$Q = \frac{0.376}{n} S_x^{5/3} T^{8/3} \sqrt{S} \quad (7.1)$$

όπου:

- $Q$ , η μέση παροχή ( $m^3/s$ )

- $n$ , ο συντελεστής τριβής Manning ( $s/m^{1/3}$ )
- $S_x$ , η επίκλιση του οδοστρώματος ( $m/m$ )
- $T$ , το πλάτος κατάληψης ( $m$ )
- $S$ , η κατά μήκος κλίση της οδού ( $m/m$ )

**Παράδειγμα 7-1:** Να βρεθεί το πλάτος κατάληψης σε τριγωνικό ρύθρο με πλάτος κλίση 2%, κατά μήκος κλίση 1% και παροχή σχεδιασμού 50 L/s. Ο συντελεστής τριβής κατά Manning να ληφθεί ίσος προς 0.016.

Επιλύοντας τη σχέση (7.1) ως προς  $T$  λαμβάνεται:

$$T = \left( \frac{Qn}{0.376S_x^{5/3} \sqrt{S}} \right)^{3/8} \quad (7.2)$$

Οπότε με απλή αντικατάσταση τιμών είναι:

$$T = \left( \frac{0.05 \times 0.016}{0.376 \times 0.02^{5/3} \sqrt{0.01}} \right)^{3/8} = 2.72m$$

### 7.3.2 Σύνθετο Ρείθρο

Για τη σύνθετη διατομή του ρείθρου  $a_2$  που φαίνεται στο Σχήμα 7.1, η παροχετευτικότητα της  $Q$  προκύπτει από το άθροισμα της παροχής του ταπεινωμένου τμήματος της διατομής  $Q_w$  και του άνωθεν τμήματος  $Q_s$ :

$$Q = Q_s + Q_w \quad (7.3)$$

Το σύνθετο ρείθρο παρουσιάζει έως και 70% μεγαλύτερη παροχετευτικότητα σε σχέση με το απλό τριγωνικό ρείθρο όταν όλες οι παράμετροι σχεδιασμού είναι ίδιες.

Ο λόγος της παροχής στο ταπεινωμένο τμήμα  $Q_w$  ως προς την ολική παροχή  $Q$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_0 = \frac{Q_w}{Q} = \frac{1}{1 + \frac{S_w / S_x}{\left[ 1 + \frac{S_w / S_x}{\frac{T}{W} - 1} \right]^{8/2}} - 1} \quad (7.4)$$

όπου:

- $E_0$ , ο λόγος της παροχής στο ταπεινωμένο μέρος προς την ολική παροχή (-)
- $Q_w$ , η παροχή στο ταπεινωμένο μέρος ( $m^3 / s$ )
- $Q$ , η ολική παροχή της διατομής ( $m^3 / s$ )
- $S_w$  η επίκλιση του ταπεινωμένου τμήματος ( $m/m$ )
- $S_x$  η επίκλιση της διατομής ( $m/m$ )

- $T$ , το πλάτος κατάληψης (m)
- $W$ , το πλάτος του ταπεινωμένου τμήματος (m)

**Παράδειγμα 7-2.** Να βρεθεί η παροχή που μπορεί να διέλθει από σύνθετο ρεΐθρο, κατά πλάτος κλίση 2%, κατά μήκος κλίση 1% και πλάτος κατάληψης 2.5 m. Το πλάτος του ταπεινωμένου τμήματος είναι 0.6m και το βάθος κατάπτωσης 0.05m. Ο συντελεστής τριβής κατά Manning να ληφθεί ίσος προς 0.016.

Από τη γεωμετρία της διατομής του σύνθετου ρεΐθρου (Σχήμα 7.1, a<sub>2</sub>) υπολογίζεται η επίκλιση του ταπεινωμένου τμήματος της διατομής:

$$S_w = \frac{a}{w} + S_x = \frac{0.05}{0.6} + 0.02 = 0.103m/m \quad (7.5)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το πλάτος κατάληψης  $T_s$  που αναφέρεται στο μη ταπεινωμένο τμήμα της διατομής:

$$T_s = T - W = 2.5 - 0.6 = 1.9m \quad (7.6)$$

Υπολογίζεται η παροχή που διέρχεται από το μη ταπεινωμένο τμήμα της διατομής χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7.1):

$$Q_s = \frac{0.376}{0.016} 0.02^{5/3} 1.9^{8/3} \sqrt{0.01} = 0.0192m^3/s \quad (7.7)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7.4) υπολογίζεται ο λόγος  $E_0$ :

$$E_0 = 1 / \left( 1 + \frac{0.103/0.02}{\left[ 1 + \frac{0.103/0.02}{(2.5/0.6) - 1} \right] - 1} \right) = 0.702 \quad (7.8)$$

Οπότε η ολική παροχή θα είναι από τη σχέση (7.3):

$$Q = Q_s + Q_w = Q_s + QE_0 \Rightarrow Q = \frac{Q_s}{1 - E_0} = \frac{0.0192}{1 - 0.702} = 0.064m^3/s \quad (7.9)$$

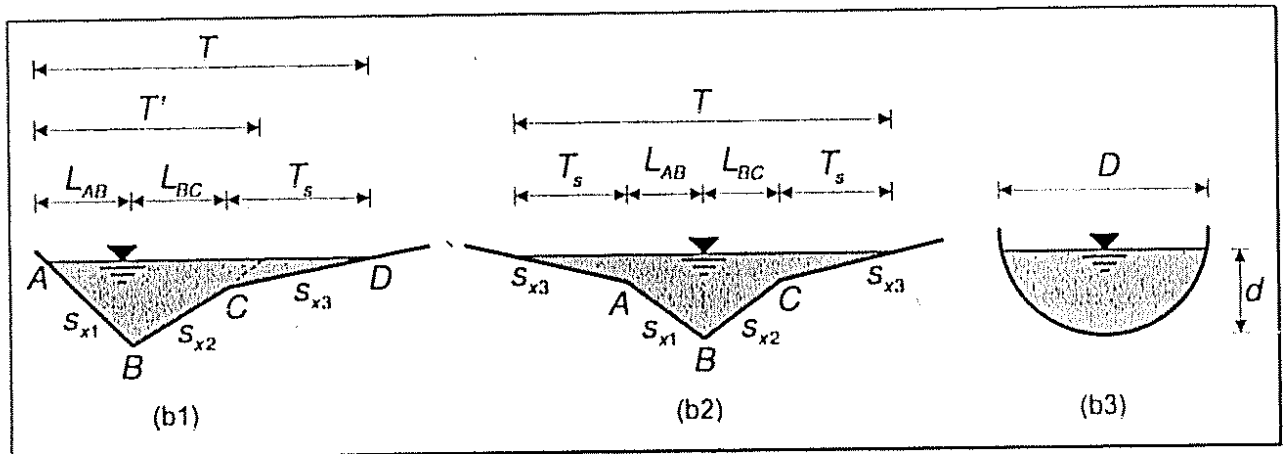
### 7.3.3 Παραβολικό Ρεΐθρο

Το παραβολικό ρεΐθρο (Σχήμα 7.1, a<sub>3</sub>) δεν χρησιμοποιείται συχνά τουλάχιστον στην Ελλάδα. Σε κάθε περίπτωση, η παροχετευτικότητα του ρεΐθρου εξαρτάται από τη γεωμετρία της παραβολικής πλευράς του. Επειδή δεν υπάρχουν τυποποιημένες γεωμετρίες, Θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να κατασκευάζονται καμπύλες βάθους ροής και παροχής με βάση τις οποίες να γίνεται η διαστασιολόγηση του παραβολικού ρεΐθρου.

## 7.4 Ρείθρα Χωρίς Πεζοδρόμια

Ανάλογα με τη γεωμετρία της οδού και ιδιαίτερα στην περίπτωση αυτοκινητοδρόμων, τα ρείθρα κατασκευάζονται στο άκρο της οδού ή στη διαχωριστική νησίδα μεταξύ των δυο κατευθύνσεων της οδού χωρίς πεζοδρόμια.

Τέτοια παραδείγματα ρείθρων δίνονται στο Σχήμα 7.2 (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> και b<sub>3</sub>). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες επίλυσης ρείθρων χωρίς πεζοδρόμια.



Σχήμα 7.2: Συνηθισμένες γεωμετρίες ρείθρων χωρίς πεζοδρόμια.

### 7.4.1 Ρείθρο Τύπου “V”

Η περίπτωση του ρείθρου τύπου “V” μοιάζει αρκετά με αυτή του απλού τριγωνικού ρείθρου με πεζοδρόμιο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 7.3.1. Η μοναδική τους διαφορά έγκειται στην ύπαρξη μιας δεύτερης εγκάρσιας κλίσης η οποία είναι εν γένει διαφορετική από την πρώτη εγκάρσια κλίση. Στην γενικότερη περίπτωση, το ρείθρο τύπου “V” μπορεί να είναι σύνθετο όπως αυτό στην παράγραφο 7.3.2, οπότε πλέον συνδυάζονται τρεις διαφορετικές εγκάρσιες κλίσεις. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαστασιολόγηση των ρείθρων με πεζοδρόμιο ισχύουν και στην περίπτωση των ρείθρων χωρίς πεζοδρόμιο με την απαραίτητη εισαγωγή της έννοιας της μέσης σταθμισμένης εγκάρσιας κλίσης:

$$S_x = \frac{S_{x1}S_{x2}}{S_{x1} + S_{x2}} \quad (7.10)$$

**Παράδειγμα 7-3:** Να υπολογιστεί το πλάτος κατάληψης σε τριγωνικό ρείθρο τύπου “V” χωρίς πεζοδρόμιο, όταν οι εγκάρσιες κλίσεις είναι  $S_{x1}=25\%$ ,  $S_{x2}=4\%$  και  $S_{x3}=2\%$ . Δίνονται η κατά μήκος κλίση 1%, η διερχόμενη παροχή 50 L/s, το πλάτος του ταπεινωμένου τμήματος BC είναι 0.6 m και ο συντελεστής τριβής Manning 0.016. Υπολογίζεται η μέση σταθμισμένη κλίση από την εξίσωση (7.10):

$$S_x = \frac{S_{x1}S_{x2}}{S_{x1} + S_{x2}} = \frac{0.25 \times 0.04}{0.25 + 0.04} = 0.0345 \quad (7.11)$$



Υπολογίζεται το υποθετικό πλάτος κατάληψης  $T'$ . θεωρώντας ότι όλη η παροχή εξυπηρετείται από το ρείθρο με βάση τη σχέση (7.2):

$$T' = \left[ \frac{(0.05 \times 0.016)}{0.376(0.0345)^{5/3} (0.01)^{0.5}} \right]^{3/8} = 1.936 \quad (7.12)$$

Επειδή ακριβώς δεν είναι γνωστή η θέση της ελεύθερης επιφάνειας, θα πρέπει να εξακριβωθεί εάν η παροχή εξυπηρετείται από το τριγωνικό τμήμα του ρείθρου ή εκείνεται και πέρα από αυτό. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται το οριζόντιο μήκος AC και συγκρίνεται με το ελεύθερο πλάτος  $T'$ :

$$L_{AC} = L_{AB} + L_{BC} = \frac{d_B}{S_{X1}} + L_{BC} = \frac{0.6 \times 0.04}{0.25} + 0.6 = 0.696m \quad (7.13)$$

Επειδή  $L_{AC} < T'$  έπεται ότι η παροχή δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί υπό το τριγωνικό τμήμα του ρείθρου. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να βρεθεί η λύση με δοκιμές.

Το βάθος ροής στο σημείο C υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d_c = d_B - L_{BC} S_{X2} \quad (7.14)$$

Επειδή όμως το βάθος ροής στο σημείο B ορίζεται από τη γεωμετρία του τριγώνου που σχηματίζεται από τις δυο πλευρές με κλίσεις  $S_{X1}$  και  $S_{X2}$ , μπορεί να υπολογιστεί εύκολα:

$$T' = \frac{d_B}{S_{X1}} + \frac{d_B}{S_{X2}} \Rightarrow 1.94 = \frac{d_B}{0.25} + \frac{d_B}{0.04} = 4d_B + 25d_B \Rightarrow 0.067m \quad (7.15)$$

Οπότε το βάθος ροής στο σημείο C μπορεί να υπολογιστεί πλέον από τη σχέση (7.14):

$$d_c = 0.067 - 0.6 \times 0.04 = 0.043m \quad (7.16)$$

Το ελεύθερο πλάτος κατάληψης από το σημείο B ως το σημείο D θα είναι:

$$T_{BD} = T_s + L_{BC} = \frac{d_c}{S_{X3}} + L_{BC} = \frac{0.043}{0.02} + 0.6 = 2.75m \quad (7.17)$$

Θα υπολογιστεί εκ νέου το  $T_{BD}$  σύμφωνα με την εξίσωση (7.2), βάζοντας σε αυτή μια μέση εγκάρσια κλίση. Η  $S_{X2}$  κλίση είναι σταθερή για μήκος 0.6 μέτρων ενώ η  $S_{X3}$  κλίση είναι σταθερή για  $2.75 - 0.6 = 2.15$  μέτρα. Ως εκ τούτου για τα 2.75 μέτρα η μέση κλίση βρίσκεται ως εξής:

$$\frac{0.6 \times 0.04 + 2.15 \times 0.02}{0.6 + 2.15} = 0.0244 \quad (7.18)$$

Η μέση κλίση και η κλίση  $S_{X1}$  δίνουν την μέση σταθμισμένη κλίση  $S_X$  με βάση την σχέση (7.10):

$$S_X = \frac{0.25 \times 0.0244}{0.25 + 0.0244} = 0.0222 \quad (7.19)$$

Το πλάτος κατάληψης σύμφωνα με την εξίσωση (7.2) θα είναι:

$$T = \left[ \frac{0.05 \times 0.016}{0.376(0.0222)^{5/3} \sqrt{0.01}} \right]^{3/8} = 2.55m \quad (7.20)$$

Το υπολογιζόμενο πλάτος κατάληψης ( $T=2.55$ ) είναι σημαντικά διαφορετικό από το αρχικά επιλεγμένο ( $T_{BD}=2.75$ ) και επομένως δεν μπορεί να γίνει δεκτό.

Υποθέτοντας ότι  $T_{BD}=2.50$ , βρίσκεται εκ νέου η μέση κλίση και η νέα μέση σταθμισμένη κλίση:

$$\frac{0.6 \times 0.04 + 1.9 \times 0.02}{0.6 + 1.9} = 0.0248 \quad (7.21)$$

$$S_X = \frac{0.25 \times 0.0248}{0.25 + 0.0248} = 0.0226 \quad (7.22)$$

Το νέο πλάτος κατάληψης σύμφωνα με την εξίσωση (7.2) θα είναι:

$$T = \left[ \frac{0.05 \times 0.016}{0.376(0.0226)^{5/3} \sqrt{0.01}} \right]^{3/8} = 2.53m \quad (7.23)$$

#### 7.4.2 Ρείθρο Νησίδας Τύπου “V”

Το ρείθρο νησίδας τύπου “V” παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2 και επιλύεται με όμοιοτρόπο με το ρείθρο τύπου “V” της παραγράφου 7.4.1., αρκεί να είναι ίδιες στις κλίσεις του μη ταπεινωμένου τμήματος αριστερά και δεξιά.

Παράδειγμα 7-4.: Να υπολογιστεί η διερχόμενη παροχή σε ρείθρο νησίδας τύπου “V” όταν το πλάτος κατάληψης είναι 7m, οι εγκάρσιες κλίσεις είναι  $S_{X1}=25\%$ ,  $S_{X2}=25\%$  και  $S_{X3}=4\%$ . Δίνονται η κατά μήκος κλίση 1%, τα πλάτη του ταπεινωμένου τμήματος  $BC=AB=1m$  και ο συντελεστής τριβής Manning 0.016.

Καταρχήν υπολογίζεται το ελεύθερο πλάτος εκτός του τριγώνου  $T_s$ :

$$T_s = \frac{T}{2} - L_{BC} = \frac{7}{2} - 1 = 2.5m \quad (7.24)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διερχόμενη παροχή από το μη ταπεινωμένο τμήμα της διατομής  $Q_s$  με βάση την εξίσωση (7.1):

$$Q_s = (0.376/0.016)(0.04)^{5/3} (2.5)^{8/3} \sqrt{0.01} = 0.127 m^3 / s \quad (7.25)$$

Τέλος υπολογίζεται ο λόγος της παροχής στο ταπεινωμένο τμήμα  $Q_w$  ως προς την ολική παροχή  $Q$  με τη βοήθεια της σχέσης (7.4):

$$E_0 = 1 / \left\{ 1 + (0.25/0.04) / \left[ 1 + (0.25/0.04) / ((3.5/1) - 1) \right]^{8/3} - 1 \right\} = 0.813 \quad (7.26)$$

Επομένως η μισή παροχή θα είναι :

$$Q_{1/2} = \frac{0.127}{1 - 0.813} = 0.679 m^3 / s \quad (7.27)$$

### 7.4.3 Κυκλικό Ρείθρο

Η ροή σε ρηγά κυκλικό ρείθρο υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{y}{D} = 1.179 \left[ \frac{Q_n}{D^{8/3} \sqrt{S}} \right]^{0.488} \quad (7.28)$$

όπου:

- ο  $y$ , το βάθος ροής (m)
- ο  $D$ , η διάμετρος του ρείθρου (m)
- ο  $Q$ , η ολική παροχή του ρείθρου ( $m^3 / s$ )
- ο  $n$ , συντελεστής τριβής Manning ( $s / m^{1/3}$ )
- ο,  $S$  η κατά μήκος κλίση της οδού (m/m) .

Αντίστοιχα το πλάτος κατάληψης  $\theta$  α δίνεται από τη σχέση υπολογισμού χορδής κυκλικού τόξου:

$$T = 2 \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - y\right)^2} \quad (7.29)$$

Όπου:

- $T$ , το πλάτος κατάληψης (m)
- $y$ , το βάθος ροής (m)
- $D$ , η διάμετρος του ρείθρου (m)

Παράδειγμα 7-5: Να υπολογιστεί το βάθος ροής και το ελεύθερο πλάτος σε κυκλικό ρηγά ρείθρο διαμέτρου 1.5m όταν η κάτω μήκος κλίση ,είναι 1% , η διερχόμενη παροχή 500 L/s και ο συντελεστής τριβής Manning 0.016, Από τη σχέση (7.28) υπολογίζεται το βάθος ροής:

$$y = 1.179 \times 1.5 \times \left[ \frac{0.5 \times 0.016}{1.5^{8/3} \sqrt{0.01}} \right]^{0.488} = 0.304 m \quad (7.30)$$

Και από τη σχέση (7.29) υπολογίζεται το πλάτος κατάληψης ή αλλιώς το ελεύθερο πλάτος ροής:

$$T = 2 \sqrt{\frac{1.5^2}{4} - \left(\frac{1.5}{2} - 0.304\right)^2} = 1.206 m \quad (7.31)$$

## 7.5 Σχεδίαση Υδροσυλλογών Σε Καμπύλες

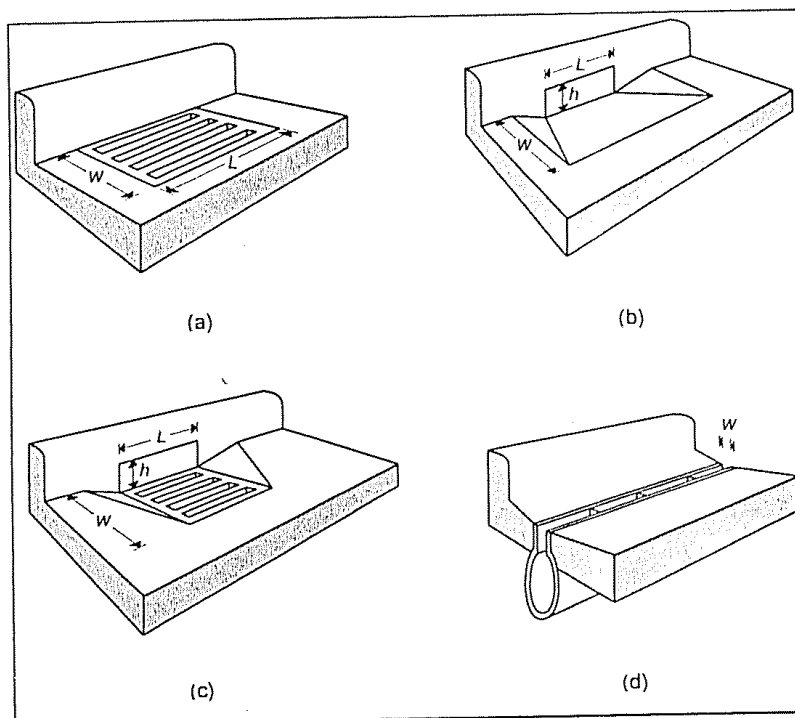
Η παροχτευτικότητα ενός φρεατίου υδροσυλλογής ομβρίων εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του ρείθρου που οδηγεί τη ροή των ομβρίων σ αυτό, όσο και από τη γεωμετρία του.

Η ακριβής προσομοίωση της λειτουργίας ενός φρεατίου υδροσυλλογής έχει μεγάλη σημασία γιατί η παροχή που απομακρύνεται από το ρείθρο φορτίζει το δίκτυο ομβρίων που συνήθως κινείται υπόγεια παράλληλα με τη ροή.

Συνεπώς η σχεδίαση των υδροσυλλογών με μικρή παροχτευτικότητα εκτός των άμεσων πλημμυρικών προβλημάτων που μπορεί να προκαλέσει στην κίνηση των οχημάτων, εμποδίζει τη ροή να φτάσει στο υπόγειο δίκτυο ομβρίων, γεγονός που υποβαθμίζει τη σημασία του δευτέρου.

Τα φρεάτια υδροσυλλογής συνήθως βρίσκονται επί των διατομών των ρείθρων ή σε νησίδες, χωρίς όμως αυτό να είναι απαγορευτικό. Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες φρεατίων υδροσυλλογής (Σχήμα 7.3):

- a. Σχάρες
- b. Στόμια
- c. Σχάρες με στόμια
- d. Σχαρωτοί αγωγοί



Σχήμα 7.3: Κατηγορίες φρεατίων υδροσυλλογής.

### 7.5.1. Σχάρες

Οι σχάρες έχουν ικανοποιητική απόδοση για διάφορες κατά μήκος κλίσεις ρείθρων. Γενικά όμως, η απόδοσή τους μειώνεται όσο η κλίση αυξάνεται. Η μείωση αυτή είναι μικρότερη από την αντίστοιχη που συμβαίνει στην περίπτωση των στομιών. Το βασικότερο πλεονέκτημά τους είναι ότι η εγκατάστασή τους γίνεται ακριβώς στο σημείο της ροής. Πολλές δε φορές τοποθετούνται κάθετα στον άξονα μιας οδού για να παραλαμβάνουν τα επιφανειακά όμβρια ύδατα που ρέουν εκτός ρείθρου.

Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η έμφραξη από σκουπίδια, γεγονός που μειώνει την απόδοσή τους με το χρόνο και δημιουργεί απαίτηση συχνών καθαρισμών. Επιπρόσθετα οι σχάρες δημιουργούν θέματα ασφαλείας όταν τοποθετούνται σε σημεία που διέρχεται κυκλοφορία οχημάτων, δικύκλων ή πεζών επ' αυτών.

Εξαιτίας της πολύπλοκης γεωμετρίας των σχαρών, έχουν γίνει πειράματα όσον αφορά την υδραυλική τους συμπεριφορά μόνο για περιορισμένες γεωμετρίες σχαρών από την *FHWA (Federal Highway Administration)* των ΗΠΑ. Οι γεωμετρίες των οκτώ τύπων σχαρών που έχουν μελετηθεί παρουσιάζονται στον σχετικό πίνακα (Πίνακας 7.1).

Ανεξάρτητα από τον τύπο της σχάρας, ορίζεται ως απόδοση  $E$  μιας σχάρας, ο λόγος της παροχής που απομακρύνεται  $Q_i$ , προς την ολική παροχή  $Q$ .

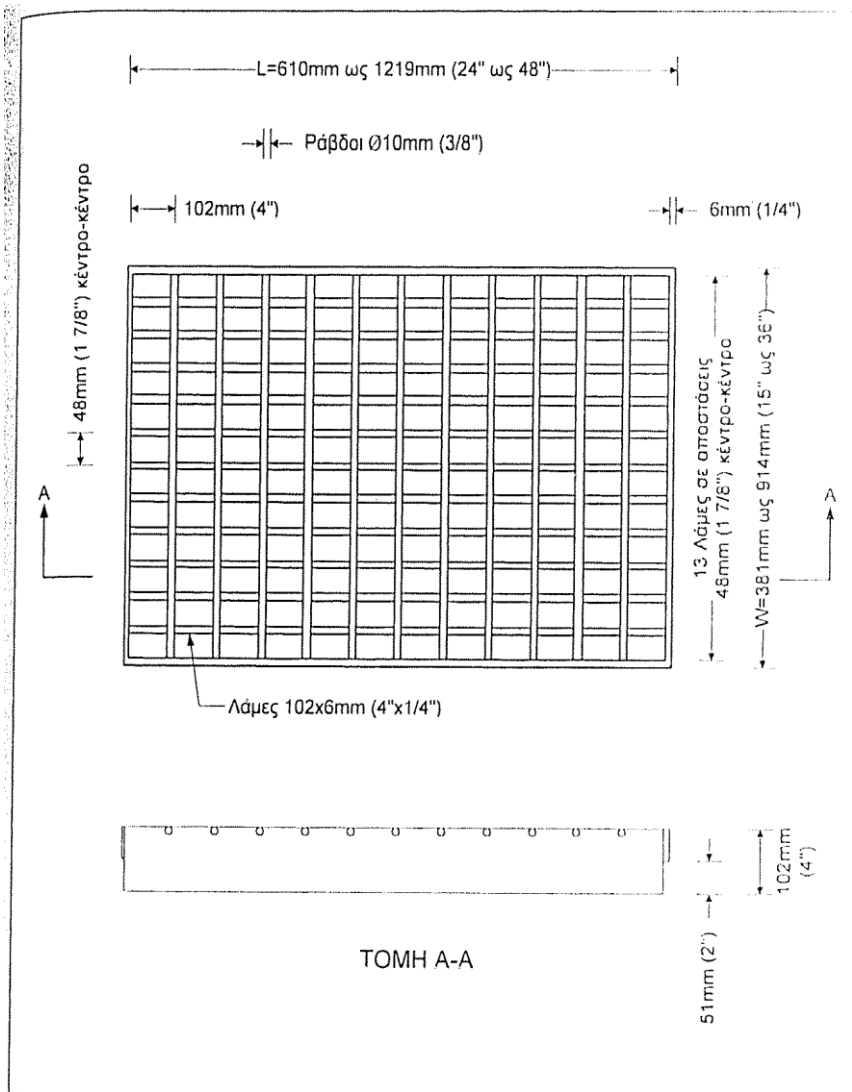
$$E = \frac{Q_i}{Q} \quad (7.32)$$

Η υπόλοιπη παροχή που δεν απομακρύνεται ονομάζεται απομένουσα ή παραμένουσα παροχή και συμβολίζεται με  $Q_b$ .

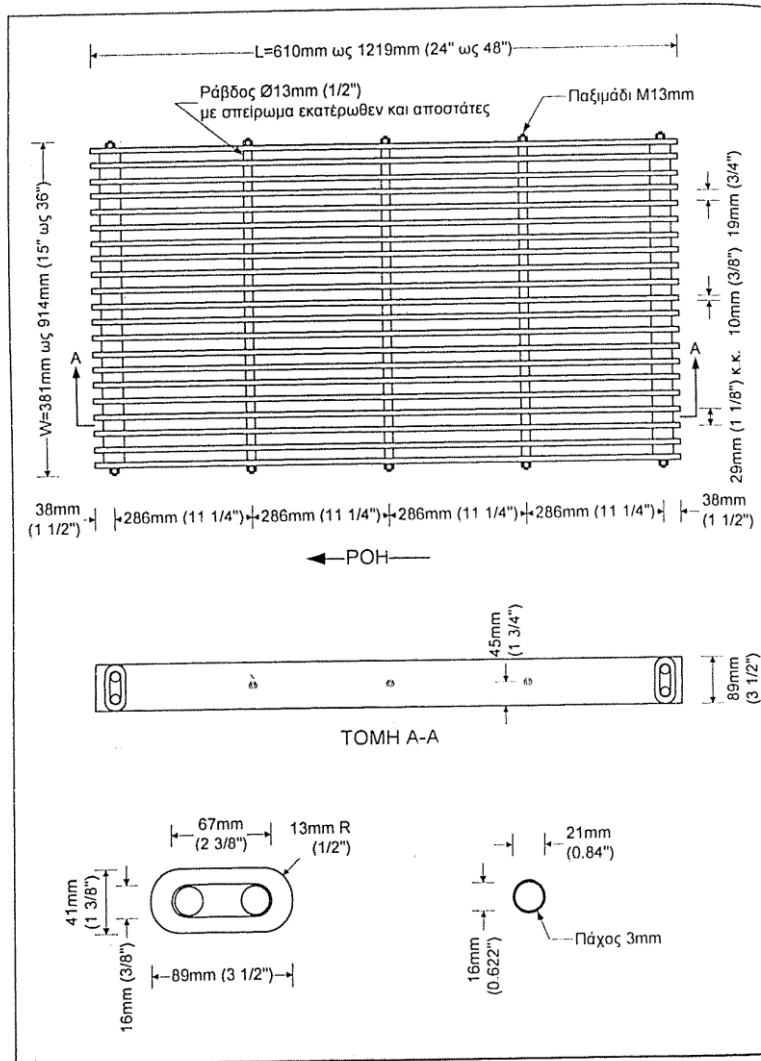
$$Q_b = Q - Q_i \quad (7.33)$$

**Πίνακας 7.1: Τύποι σχαρών μελετημένων από τη FHWA.**

Τύπος	Περιγραφή	Σχήμα
P-50	Παράλληλες ράβδοι με ισαποστάσεις 48 mm.	Σχήμα 7.4
P-50x100	Παράλληλες ράβδοι με ισαποστάσεις 48 mm και εγκάρσιες ράβδοι 10 mm ανά 102 mm.	Σχήμα 7.4
P-30	Παράλληλες ράβδοι με ισαποστάσεις 28 mm.	Σχήμα 7.5
EKP	Καμπύλες ράβδοι με ισαποστάσεις 83 mm και εγκάρσιες ανά 108 mm.	Σχήμα 7.6
45/60TB-45	Λοξές ράβδοι με ισαποστάσεις 57 mm και εγκάρσιες ανά 102 mm.	Σχήμα 7.7
45/85TB-45	Λοξές ράβδοι με ισαποστάσεις 83 mm και εγκάρσιες ανά 102 mm.	Σχήμα 7.7
30/85TB-30	Λοξές ράβδοι με ισαποστάσεις 83 mm και εγκάρσιες ανά 102 mm.	Σχήμα 7.8
Κυψελωτή	Οι ράβδοι σχηματίζουν κυψέλες.	Σχήμα 7.9

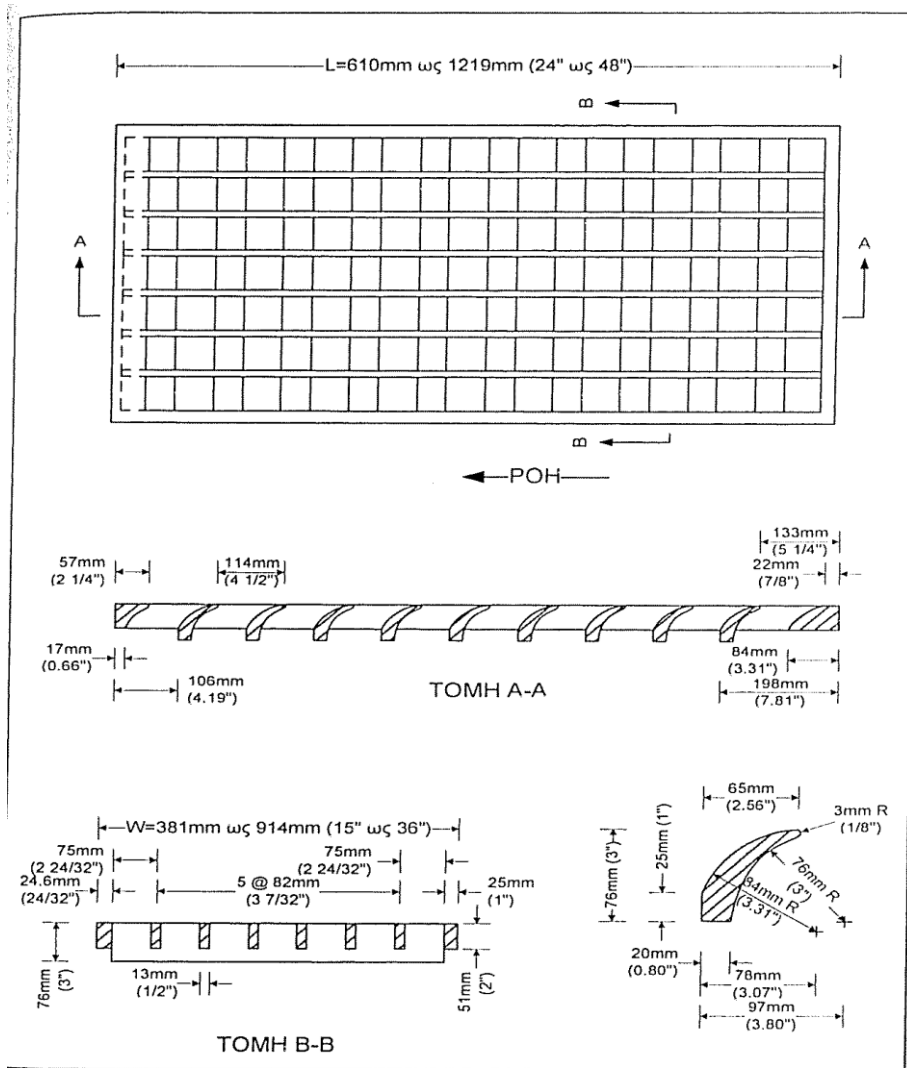


Σχήμα 7.4: Σχάρες P-50 (χωρίς τις  $\varnothing 10$  ράβδους) και P-50x100.

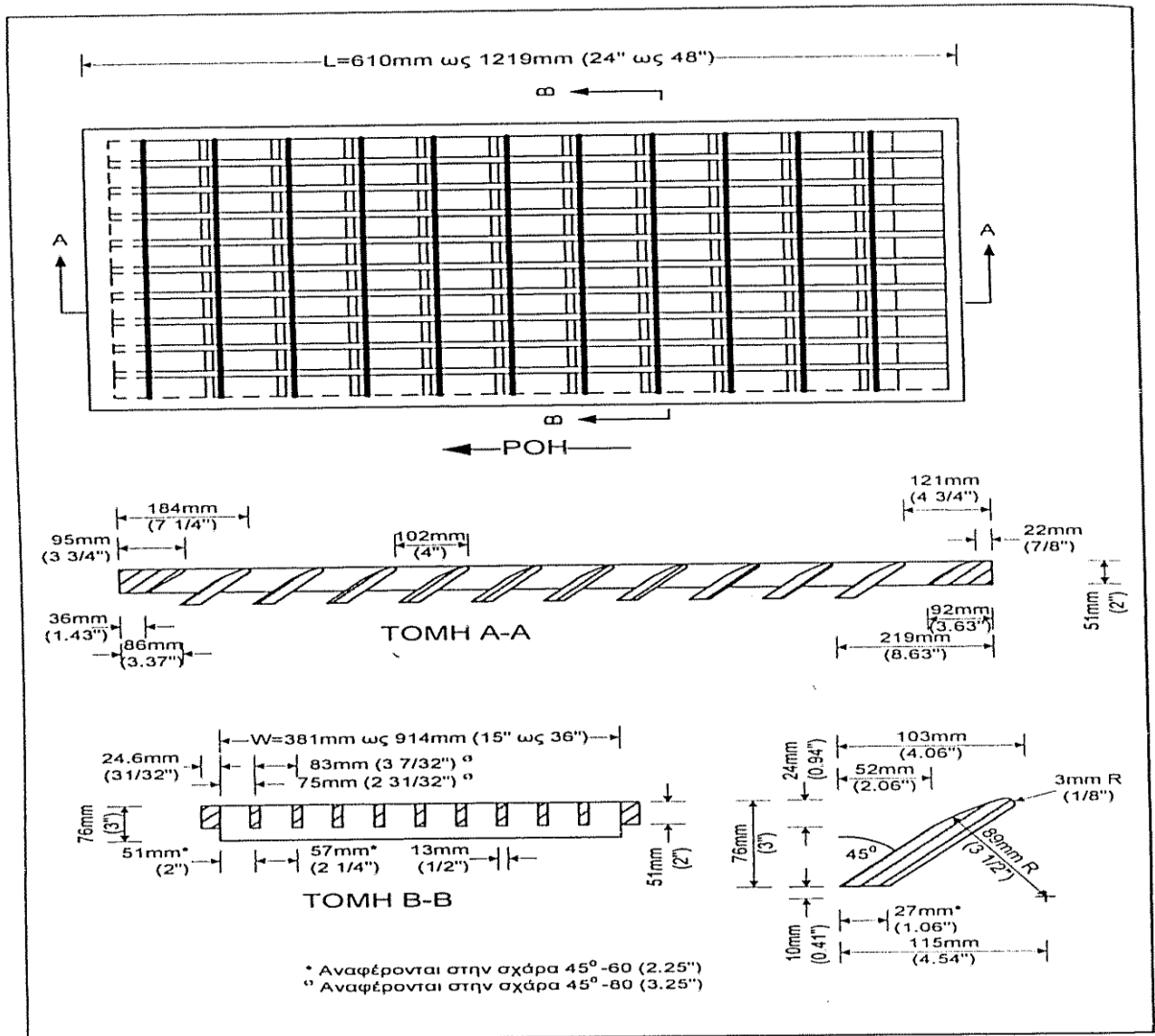


Σχήμα 7.5: Σχάρα P-30.

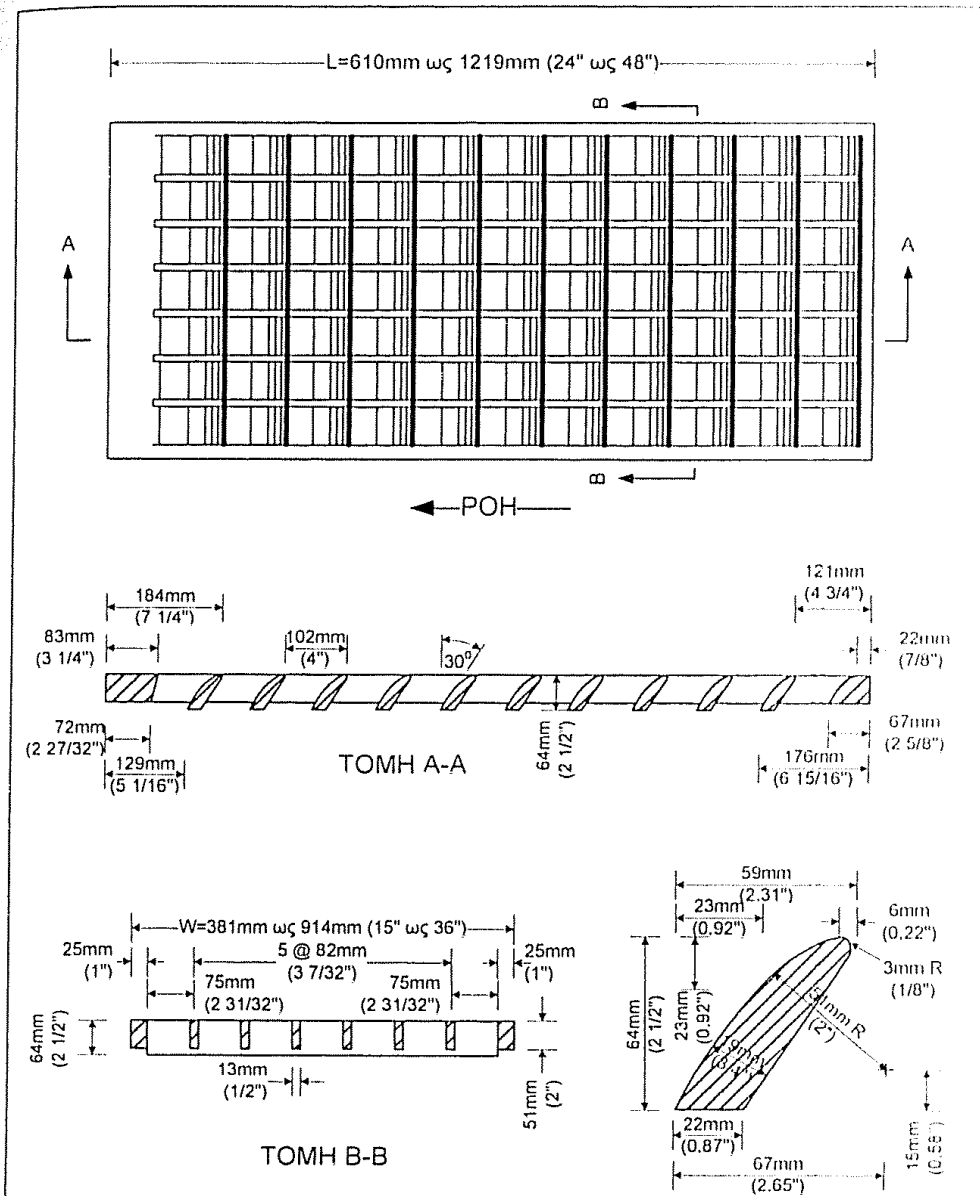




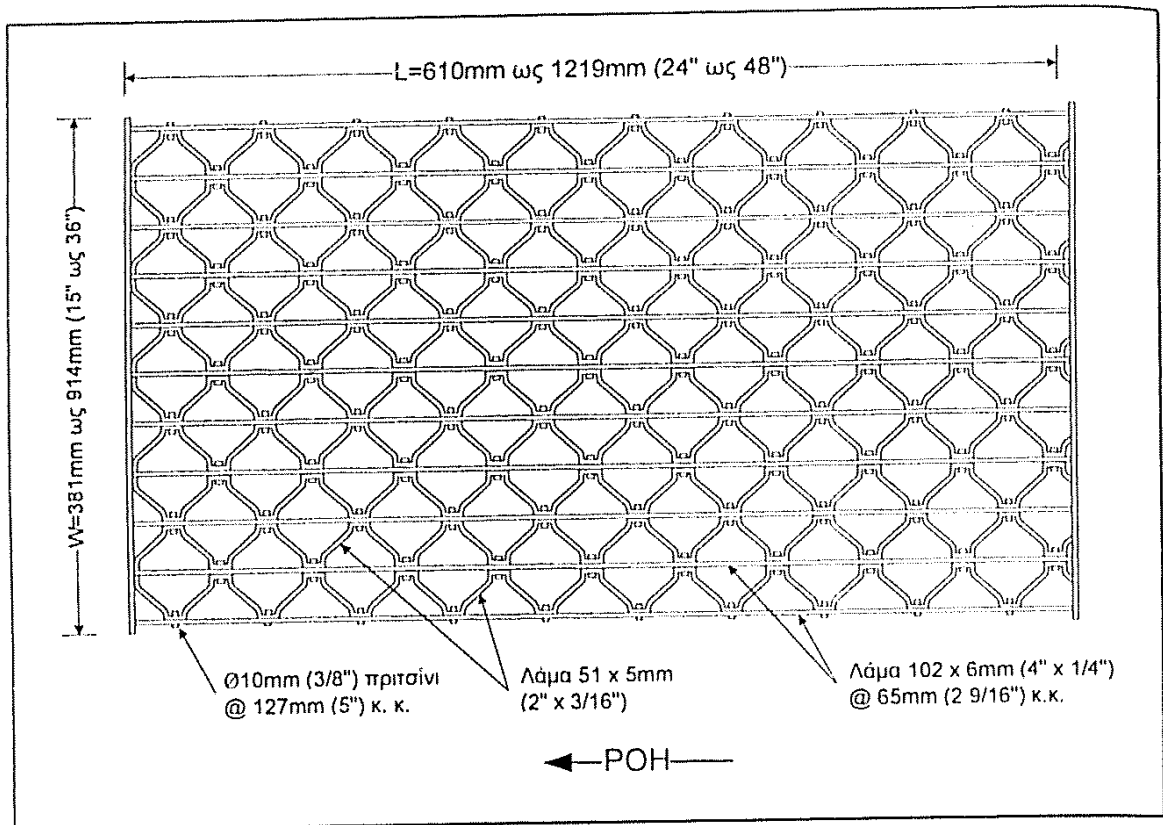
Σχήμα 7.6: Σχάρα τύπου ΕΚΡ.



Σχήμα 7.7: Σχάρα τύπου 45/60TB-45 και 45/85TB-45.



Σχήμα 7.8: Σχάρα τύπου 30/85TB-30.



**Σχήμα 7.9: Κυψελωτή σχάρα.**

Το ενεργό μήκος της σχάρας θα ισούται με το ολικό μήκος της απομειωμένο Κατά το ποσοστό έμφραξης της:

Οι σχάρες χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτοκινητοδρόμους γιατί τα σκουπίδια και γενικότερα τα φερτά που φράζουν τις σχισμές τους είναι λιγότερα απ' ότι σε ένα αστικό περιβάλλον.

Σε κάθε περίπτωση, όταν η ταχύτητα προσέγγισης της ροής είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την ταχύτητα προσπέρασης, η σχάρα θα απομακρύνει όλη την ποσότητα της ροής ή

ισοδύναμα η αποδοτικότητά της θα είναι ίση με τη μονάδα. Σε αντίθετη περίπτωση θα απομακρυνθεί μόνο ένα ποσοστό της ροής που εξαρτάται από την επίκλιση του οδοστρώματος, το μήκος της σχάρας και την ταχύτητα ροής.

Η τιμή του λόγου της ροής που γίνεται κατά το πλάτος  $W$  της σχάρας (βλ. Σχήμα 7.3a) προς της ολική παροχή κατά μήκος οδοστρώματος με ενιαία επίκλιση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_0 = \frac{Q_W}{Q} = 1 - \left(1 - \frac{W}{T}\right)^{8/3} \quad (7.34)$$

$E_0$ , ο λόγος της ροής κατά πλάτος της σχάρας προς την ολική (-)

$Q_w$ , η ροή κατά πλάτος της σχάρας  $W$  ( $m^3/s$ )

$Q$ , η ολική παροχή του ρείθρου ( $m^3/s$ )

$W$ , το πλάτος του καταβιβασμένου ρείθρου ή σχάρας (m)

$T$ , το πλάτος κατάληψης (m)

Το τμήμα της ολικής ροής που δεν πραγματοποιείται κατά πλάτος της σχάρας ονομάζεται πλευρική ροή. Είναι:

$$Q = Q_s + Q_w$$

Όπου:

$Q$ , η ολική παροχή του ρείθρου ( $m^3/s$ )

$Q_s$ , η πλευρική ροή ( $m^3/s$ )

$Q_w$ , η ροή κατά πλάτος της σχάρας  $W$  ( $m^3/s$ )

Συνδυάζοντας τις σχέσεις λαμβάνεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{Q_s}{Q} = 1 - \frac{Q_w}{Q} = 1 - E_0$$

Ο λόγος της ροής κατά πλάτος της σχάρας που απομακρύνεται προς την ολική ροή κατά πλάτος της σχάρας δίνεται από τη σχέση:

$$R_f = 1 - 0.295(V - V_0) \leq 1$$

Όπου:

$R_f$ , ο λόγος της ροής κατά πλάτος της σχάρας που απομακρύνεται (-)

$V$ , η ταχύτητα ροής στο ρείθρο (m/s)

$V_0$ , η ταχύτητα προσπέρασης (m/s)

Το ενεργό μήκος της σχάρας θα ισούται με το ολικό μήκος της απομειωμένο κατά το ποσοστό έμφραξης της:

$$L_{off} = L \left( \frac{100 - P_{CLOG}}{100} \right)$$

Όπου:

$L_{off}$ , το ενεργό μήκος της σχάρας (m)

$L$ , το μήκος της σχάρας (m)

$P_{CLOG}$ , το ποσοστό έμφραξης (%)

Η ταχύτητα προσπέρασης υπολογίζεται με βάση το ενεργό μήκος της σχάρας και τον τύπο της. Οι τύποι που παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα είναι προσεγγιστικοί και έχουν προκύψει από εργαστηριακά πειράματα της FHWA.

**Πίνακας 7.2: Υπολογισμός ταχύτητας προσπέρασης.**

Σχάρα	Τύπος υπολογισμού
P-50/P-50×100	$V_0=0.676+4.031L_{\text{off}}-2.13L_{\text{off}}^2+0.598L_{\text{off}}^3$
P-30	$V_0=0.537+3.117L_{\text{off}}-1.478L_{\text{off}}^2+0.358L_{\text{off}}^3$
EKP	$V_0=0.421+2.78L_{\text{off}}-0.984L_{\text{off}}^2+0.215L_{\text{off}}^3$
45/60TB-45	$V_0=0.224+2.437L_{\text{off}}-0.869L_{\text{off}}^2+0.192L_{\text{off}}^3$
45/85TB-45	$V_0=0.301+2.625L_{\text{off}}-1.117L_{\text{off}}^2+0.311L_{\text{off}}^3$
30/85TB-30	$V_0=0.154+2.344L_{\text{off}}-0.656L_{\text{off}}^2+0.155L_{\text{off}}^3$
Κυψελωτή	$V_0=0.009+2.278L_{\text{off}}-0.587L_{\text{off}}^2+0.108L_{\text{off}}^3$

Ο λόγος της πλευρικής ροής που απορροφάται ως προς την ολική πλευρική ροή δίνεται από τη σχέση:

$$R_S = \frac{1}{1 + \frac{0.0828V^{1.8}}{S_X L^{2.3}}}$$

Όπου:

$R_S$ , ο λόγος της πλευρικής ροής που απομακρύνεται (-)

$V$ , η ταχύτητα ροής στο ρεϊθρο (m/s)

$S_X$ , η κατά πλάτος κλίση (m/m)

$L$ , το μήκος της σχάρας (m)

Η απόδοση της σχάρας  $E$ , η οποία εκφράζει πρακτικά το ποσοστό απορροφημένης παροχής ως προς την ολική παροχή, υπολογίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα της εμπρόσθιας και πλευρικής απορρόφησης:

$$E = R_f E_0 + R_S (1 - E_0)$$

Στην περίπτωση σύνθετων διατομών ρεϊθρων, ο λόγος  $E_0$  υπολογίζεται για πλάτος ροής μπροστά από τη σχάρα ίσο με το καταβιβασμένο πλάτος του ρεϊθρου. Εάν το πραγματικό πλάτος της σχάρας  $W$  είναι μικρότερο από το καταβιβασμένο πλάτος του ρεϊθρου, τότε ο λόγος  $E_0$  θα πρέπει να τροποποιηθεί για να λάβει υπόψη του την ιδιαιτερότητα αυτή:

$$E'_0 = E_0 \frac{A'_W}{A_W}$$

Όπου:

$E'_0$ , ο τροποποιημένος λόγος (-)

$A_W$ , η επιφάνεια ροής στο καταβιβασμένο πλάτος ρεϊθρου (m<sup>2</sup>)

$A'_W$ , η επιφάνεια ροής για πλάτος ίσο με αυτό της σχάρας (m<sup>2</sup>)

Η παροχή του ρεϊθρου που απομακρύνεται θα δίνεται ανάλογα με την περίπτωση από την εξίσωση:

$$Q_I = Q[R_f E_0 + R_S(1 - E_0)]$$

$$Q_I = Q[R_f E'_0 + R_S(1 - E'_0)]$$

Παράδειγμα 7-6: Να υπολογιστεί η απορροφητικότητα σχάρας τύπου “ΕΚΡ” διαστάσεως 0.6×0.6m, όταν τοποθετείται σε σύνθετο τριγωνικό ρείθρο με πεζοδρόμιο και είναι T=2.5m, W=0.6m, π=0.016, S=0.01 και S<sub>X</sub>=0.02. Ο συνεχής καταβιβασμός του ρείθρου είναι a=0.05m.

Από το παράδειγμα 7-2 έχουν υπολογιστεί για το ρείθρο S<sub>w</sub>=0.103 m/m, E<sub>0</sub>=0.702 και Q=0.064 m<sup>3</sup>/s. Υπολογιστεί η μέση ταχύτητα στο ρείθρο με βάση την υγρή επιφάνεια και την παροχή:

$$A = 0.5T^2 S_X + 0.5aW = 0.5 \times 2.5^2 \times 0.02 + 0.5 \times 0.05 \times 0.6 = 0.078m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.064}{0.078} = 0.82m/s$$

Επίσης δεν αναφέρεται έμφραξη στη σχάρα, το ενεργό μήκος της θα είναι ίσο με το ολικό, οπότε:

$$V_0 = 0.421 + 2.78L_{off} - 0.984L_{off}^2 + 0.215L_{off}^3 = 1.78 \text{ m/s}$$

$$R_f = 1 - 0.295(V - V_0) = 1 - 0.295(0.82 - 1.78) = 1.28 \Rightarrow R_f = 1.0$$

Όσον αφορά την πλευρική απορρόφηση, αυτή θα υπολογιστεί με βάση τη σχέση:

$$R_S = \frac{1}{1 + \frac{0.0828 \times 0.82^{1.8}}{0.02 \times 0.6^{2.3}}} = 0.096$$

Συνεπώς η απορροφώμενη παροχή θα είναι:

$$Q_f = 0.064[1.0 \times 0.702 + 0.096(1 - 0.702)] = 0.047m^3/s$$

### 7.5.2 Στόμια

Τα φρεάτια υδροσυλλογής τύπου στομίου δεν επηρεάζονται τόσο πολύ από τα σκουπίδια και τα φερτά όπως γίνεται με τις σχάρες. Επίσης αποτελούν καλύτερη λύση στην περίπτωση που τα ρείθρα και κατ' επέκταση και οι σχάρες τοποθετούνται σε λωρίδες κυκλοφορίας λόγω έλλειψης χώρου, καθώς είναι ασφαλέστερα για τα οχήματα, τους πεζούς και τους ποδηλάτες.

Αν και τα ανοίγματα των στομίων ποικίλουν όσον αφορά το ύψος τους, εντούτοις στην πράξη έχει βρεθεί ότι ένα μέγιστο ύψος μεταξύ 10 και 15 εκατοστών είναι το βέλτιστο όσον αφορά την υδραυλική τους λειτουργία και την αντοχή τους από στατικής άποψης. Το μήκος των στομίων υπολογίζεται με βάση την απόδοση που θα έχουν και το θεωρητικό μήκος τους που απαιτείται για την απορρόφηση όλης της παροχής του ρείθρου η οποία ρέει σε επιφάνεια ομοιόμορφης κλίσης:

$$L_T = 0.817Q^{0.42} S^{0.3} \frac{1}{(\pi S_X)^{0.6}}$$

Όπου:

$L_T$ , το μήκος ανοίγματος του στομίου για 100% απορροφητικότητα (m)

$Q$ , η ολική παροχή του ρείθρου ( $m^3/s$ )

$\pi$ , ο συντελεστής τριβής Manning ( $s/m^{1/3}$ )

$S$ , η κατά μήκος κλίση της οδού (m/m)

$S_X$ , η κατά πλάτος κλίση της διατομής (m/m)

Αν επιλέγει μήκος ανοίγματος στομίου  $L$  τότε η απόδοση του μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μήκος αυτό  $L$  και το θεωρητικό μήκος  $L_T$  ως εξής:

$$E = 1 - \left(1 - \frac{L}{L_T}\right)^{1.8}$$

Όπου:

$E$ , η απόδοση του στομίου (-)

$L_T$ , το μήκος ανοίγματος του στομίου για 100% απορροφητικότητα (m)

$L$ , το πραγματικό μήκος ανοίγματος του στομίου

Στην περίπτωση που το φρεάτιο έχει καταβιβασμό ή σε σύνθετα ρείθρα, η σχέση θα πρέπει να εφαρμόζεται με τη σύνθετη κατά πλάτος κλίση της διατομής:

$$S_e = S_X + S'_W E_0$$

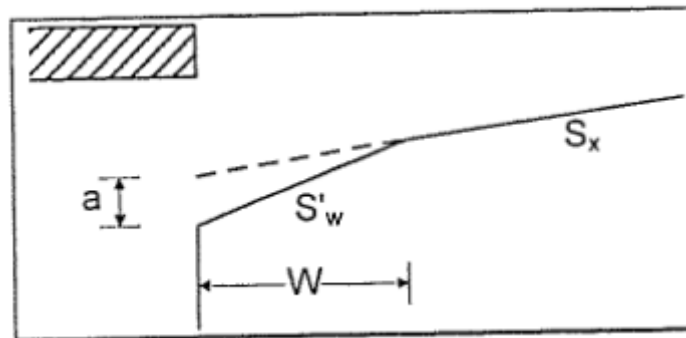
Όπου:

$E$ , η απόδοση του στομίου (-)

$S_X$ , η κατά πλάτος κλίση της διατομής (m/m)

$S'_W$ , η επίκλιση του ρείθρου από την επίκλιση του πεζοδρομίου (m/m)

$E_0$ , ο λόγος της ροής στο καταβιβασμένο τμήμα προς το ολικό (-)



**Σχήμα 7.10: Λεπτομέρεια ανοίγματος στομίου με καταβιβασμό.**

Ανάλογα με το ύψος καταβιβασμού και το πλάτος του ρείθρου υπολογίζεται το  $S_W$ :

$$S_W = \frac{a}{W}$$

Όπου:



$S_w'$ , η επίκλιση του ρείθρου από την επίκλιση του πεζοδρομίου (m/m)

a, το ύψος του καταβιβασμού (m)

W, το πλάτος του ρείθρου (m)

Παράδειγμα 7-7: Να υπολογιστεί η απορροφώμενη παροχή για στόμια ανοίγματος 3 μέτρων με ρείθρο που έχει κατά μήκος κλίση 1%, επίκλιση 2%, μεταφέρει παροχή 50 L/s και συντελεστή τριβής Manning 0.016.

Υπολογίζεται το θεωρητικό μήκος  $L_T$  του στομίου για την απορρόφηση όλης της παροχής από τη σχέση:

$$L_T = 0.817 \times 0.05^{0.42} \times 0.01^{0.3} \frac{1}{(0.016 \times 0.02)^{0.6}} = 7.29m$$

Υπολογίζεται η απόδοση του στομίου από την εξίσωση:

$$E = 1 - \left(1 - \frac{3}{7.29}\right)^{1.8} = 0.615$$

Η απορροφώμενη παροχή θα είναι:

$$Q_f = EQ = 0.615 \times 0.05 = 0.031 m^3/s$$

### 7.5.3 Σχάρες με στόμια

Στην περίπτωση που υπάρχει φρεάτιο υδροσυλλογής το οποίο αποτελείται από σχάρα και από στόμιο, τότε στην ανάλυσή του αγνοείται πλήρως το στόμιο και διαστασιολογείται όπως ακριβώς τα φρεάτια με σχάρες μόνο.

Εξαίρεση αποτελεί το φρεάτιο στο οποίο το μήκος ανοίγματος του στομίου είναι μεγαλύτερο από το μήκος της σχάρας. Η απορροφώμενη παροχή θα ισούται με το άθροισμα του φρεατίου υδροσυλλογής τύπου στομίου με μήκος ανοίγματος ίσο με το επιπρόσθετο μήκος του στομίου και του φρεατίου υδροσυλλογής τύπου σχάρας μόνο.

Για παράδειγμα εάν το φρεάτιο υδροσυλλογής αποτελείται από σχάρα 0.6×0.6m και στόμιο μήκους 0.6m, τότε αυτό είναι ισοδύναμο με μια σχάρα 0.6×0.6. Αν αποτελείται από σχάρα 0.6×0.6m και από στόμιο μήκους 3m, τότε αυτό είναι ισοδύναμο με μια σχάρα 0.6×0.6m και με ένα στόμιο μήκους 2.4m.

### 7.5.4 Σχαρωτοί αγωγοί

Οι σχαρωτοί αγωγοί αποτελούν την πλέον πρόσφατη τάση στα φρεάτια υδροσυλλογής. Δεν έχουν πραγματοποιηθεί πολλά εργαστηριακά πειράματα για την προσομοίωση της λειτουργίας τους, αλλά από τη χρήση τους στο ύπαιθρο έχει βρεθεί ότι το μεγαλύτερό τους πρόβλημα είναι η κατακάλιση των φερτών στους αγωγούς. Για την αντιμετώπιση του θέματος αυτού, η διάταξη των σχισμών στους σχαρωτούς αγωγούς είναι τέτοια ώστε αυτοί να μπορούν να καθαριστούν με μια εκτοξευόμενη

φλέβα πεπεισμένου νερού. Οι σχαρωτοί αγωγοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε θέσεις με πεζοδρόμια όσο και σε θέσεις χωρίς πεζοδρόμια. Η διερχόμενη κίνηση των οχημάτων, πεζών και ποδηλάτων επ' αυτών δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου εξαιτίας της γεωμετρίας τους (στένεμα στο άνω μέρος τους).

Η απορρόφηση της ροής από τους σχαρωτούς αγωγούς είναι παρόμοια με αυτή των στομιών καθώς και τα δύο δρουν ως πλευρικοί υπερχειλιστές. Επομένως κατά την υδραυλική τους επίλυση ισχύουν οι σχέσεις.

## 7.6 Σχεδίαση υδροσυλλογών σε καμπές

Αντίθετα με την περίπτωση που οι υδροσυλλογές τοποθετούνται σε καμπύλες, οπότε η ροή έχει ταχύτητα και ένα μέρος της απορροφάται από το φρεάτιο ενώ άλλο μέρος της το προσπερνά, όταν οι υδροσυλλογές τοποθετούνται σε χαμηλά σημεία (σημεία καμπών) το νερό λιμνάζει μέχρι να απορροφηθεί πλήρως από το φρεάτιο.

Από υδραυλικής άποψης μπορεί να λεχθεί ότι η συμπεριφορά του φρεατίου υδροσυλλογής είναι σύνθετη και δρα ως υπερχειλιστής σε μικρά βάθη λιμνάζοντας νερού και ως θυρόφραγμα σε μεγαλύτερα βάθη. Κατά τη μετάβαση από συμπεριφορά θυροφράγματος σε συμπεριφορά υπερχειλιστή, υπάρχει μια μεταβατική περιοχή στην οποία η υδραυλική συμπεριφορά του φρεατίου μπορεί να μεταβάλλεται μεταξύ υπερχειλιστή και θυροφράγματος.

Επειδή ο όγκος του νερού που βρίσκεται πάνω από το φρεάτιο υδροσυλλογής σε σημείο καμπής είναι παγιδευμένος και πρέπει να διέλθει εξ' ολοκλήρου μέσα από αυτό, η μερική ή ολική έμφραξη αυτών των φρεατίων είναι κρίσιμη γιατί μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στη διερχόμενη κίνηση των οχημάτων. Για το λόγο αυτό συνίσταται σε τέτοιες θέσεις να χρησιμοποιούνται φρεάτια τύπου σχάρας και στομίου που έχουν καλύτερη συμπεριφορά στην έμφραξη.

### 7.6.1 Σχάρες

Όταν οι σχάρες λειτουργούν ως υπερχειλιστές, τότε η απορροφώμενη ποσότητα ομβρίων υδάτων υπολογίζεται ως εξής:

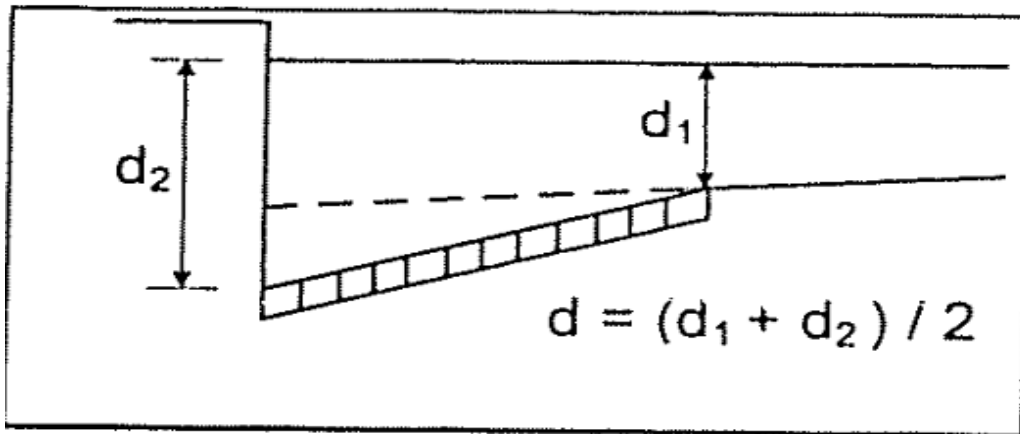
$$Q_i = 1.66Pd^{1.5}$$

Όπου:

$Q_i$ , η απορροφώμενη παροχή ( $m^3/s$ )

$P$ , η περίμετρος της σχάρας αγνοώντας την πλευρά στο πεζοδρόμιο (m)

$d$ , το μέσο βάθος του νερού κατά πλάτος της σχάρας (m)



Σχήμα 7.11: Μέσο βάθος νερού σε σχάρα σε καμπή.

Από το σχήμα 7.11 προκύπτει ότι:

$$d = \frac{1}{2}(d_1 + d_2)$$

Όταν η σχάρα λειτουργεί ως θυρόφραγμα, η απορροφώμενη ποσότητα ομβρίων υδάτων δίνεται από τη σχέση:

$$Q_i = 0.67A_g\sqrt{2gd}$$

Όπου:

$Q_i$ , η απορροφώμενη παροχή ( $m^3/s$ )

$A_g$ , η καθαρή επιφάνεια των ανοιγμάτων της σχάρας ( $m^2$ )

$d$ , το μέσο βάθος του νερού κατά πλάτος της σχάρας ( $m$ )

$g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 m/s^2$ )

Παράδειγμα 7-8: Να υπολογιστεί το μήκος της σχάρας πλάτους 0.6m και το βάθος του νερού στο πεζοδρόμιο για έμφραξη 50%, με ρείθρο που έχει κατά μήκος κλίση 5%, επίκλιση 5%, μεταφέρει παροχή 190 L/s και συντελεστή τριβής Manning 0.016. Το μέγιστο επιτρεπόμενο πλάτος κατάκλισης είναι 3m.

Υπολογίζεται η βρεχόμενη περίμετρος της σχάρας από την εξίσωση. Επειδή το μέσο βάθος νερού είναι άγνωστο, θα πρέπει να βρεθούν τα δύο βάθη  $d_1$  και  $d_2$ , προτού εφαρμοστεί η (7.64).

$$d_2 = TS_x = 3 \times 0.05 = 0.15m$$

$$d = d_2 - \frac{W}{2}S_w = 0.15 - \frac{0.6}{2}0.05 = 0.135m$$

Επομένως λύνοντας την σχέση ως προς P:

$$P = \frac{Q_i}{1.66d^{1.5}} = \frac{0.19}{1.66 \times 0.135^{1.5}} = 2.31m$$

Επειδή η σχάρα παρουσιάζει έμφραξη 50%, η ενεργή περίμετρος της θα είναι μειωμένη. Κατά τον υπολογισμό της περιμέτρου P στις σχάρες σε σημεία καμπής δεν λαμβάνεται υπόψη η πλευρά της σχάρας που είναι πλησίον του πεζοδρομίου. Ας θεωρηθεί μια σχάρα 0.6×1.2m η οποία έχει περίμετρο πριν την έμφραξη 0.6+1.2+0.6=2.4m. Μετά την έμφραξη, το μισό πλάτος θα είναι ανενεργό, επομένως η ενεργή περίμετρος της θα είναι 0.3+1.2+0.3=1.8m ή αλλιώς θα έχει επέλθει μείωση της τάξεως του 25%.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η ενεργή περίμετρος της σχάρας θα πρέπει να είναι 2.31m μετά την έμφραξη της τάξεως του 50%. Επειδή το πλάτος της σχάρας είναι γνωστό και ίσο με 0.6m, τότε το μήκος της σχάρας θα πρέπει να είναι:

$$0.5 \times 0.6 \times L + 0.5 \times 0.6 > 2.31 \Rightarrow L > 1.71m$$

Στο εμπόριο όμως δεν υπάρχουν τόσο μακρόστενες σχάρες, άρα επιλέγεται διπλή σχάρα 0.6×0.9 με συνολικό μήκος 1.8m > 1.71m.

Η ενεργή περίμετρος της σχάρας θα είναι: 0.5×0.6+1.8+0.5×0.6=2.4m, οπότε εφαρμόζοντας τη σχέση ως προς το βάθος ροής λαμβάνεται:

$$d = \left( \frac{Q_i}{1.66P} \right)^{2/3} = \left( \frac{0.19}{1.66 \times 2.4} \right)^{2/3} = 0.132m$$

### 7.6.2 Στόμια

Η απορροφητικότητα στομίων σε σημείων καμπών εξαρτάται από το μήκος και το ύψος του ανοίγματος του στομίου και το βάθος του νερού στο πεζοδρόμιο.

$$d_2 = TS_x = 3 \times 0.05 = 0.15m$$

$$d = d_2 - \frac{W}{2} S_W = 0.15 - \frac{0.6}{2} 0.05 = 0.135m$$

Επομένως λύνοντας την (7.64) ως προς P:

$$P = \frac{Q_i}{1.66d^{1.5}} = \frac{0.19}{1.66 \times 0.135^{1.5}} = 2.31m \quad (7.69)$$

Επειδή η σχάρα παρουσιάζει έμφραξη 50%, η ενεργή περίμετρος της θα είναι μειωμένη. Κατά τον υπολογισμό της περιμέτρου P στις σχάρες σε σημεία καμπής δεν λαμβάνεται υπόψη η πλευρά της σχάρας που είναι πλησίον του πεζοδρομίου. Ας θεωρηθεί μια σχάρα 0.6x1.2m η οποία έχει περίμετρο πριν την έμφραξη 0.6+1.2+0.6=2.4m. Μετά την έμφραξη, το μισό πλάτος θα είναι ανενεργό, επομένως η ενεργή περίμετρος της θα είναι 0.3+1.2+0.3=1.8m ή αλλιώς θα έχει επέλθει μείωση της τάξεως του 25%.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η ενεργή περίμετρος της σχάρας θα πρέπει να είναι 2.31m μετά την έμφραξη της τάξεως του 50%. Επειδή το πλάτος της σχάρας είναι γνωστό και ίσο με 0.6m, τότε το μήκος της σχάρας θα πρέπει να είναι:

$$0.5 \times 0.6 + L + 0.5 \times 0.6 > 2.31 \Rightarrow L > 1.71\text{m} \quad (7.70)$$

Στο εμπόριο όμως δεν υπάρχουν τόσο μακρόστενες σχάρες, άρα επιλέγεται διπλή σχάρα 0.6x0.9 με συνολικό μήκος 1.8m > 1.71m.

Η ενεργή περίμετρος της σχάρας θα είναι:  $0.5 \times 0.6 + 1.8 + 0.5 \times 0.6 = 2.4\text{m}$ , οπότε εφαρμόζοντας τη σχέση (7.64) ως προς το βάθος ροής λαμβάνεται:

$$d = \left( \frac{Q_i}{1.66P} \right)^{2/3} = \left( \frac{0.19}{1.66 \times 2.4} \right)^{2/3} = 0.132\text{m} \quad (7.71)$$

### 7.6.2 Στόμια

Η απορροφητικότητα στομίων σε σημείων καμπών εξαρτάται από το μήκος και το ύψος του ανοίγματος του στομίου και το βάθος του νερού στο πεζοδρόμιο. Το φρεάτιο συμπεριφέρεται ως υπερχειλιστής για βάθη νερού που κυμαίνονται από μηδέν έως το ύψος του ανοίγματος του στομίου και ως θυρόφραγμα για βάθη ροής 1.4 φορές μεγαλύτερα από το ύψος του ανοίγματος. Για ενδιάμεσα βάθη ροής, η ροή είναι μεταβατική.

Η εξίσωση που δίνει την απορροφητικότητα στομίου σε καμπή όταν υπάρχει καταβιβασμός είναι η ακόλουθη:

$$Q_i = 1.25(L + 1.8W)d^{1.5} \quad (7.72)$$

όπου:

- $Q_i$ , η απορροφώμενη παροχή ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $L$ , το μήκος του στομίου (m)
- $W$ , το πλάτος του στομίου (m)
- $d$ , το μέσο βάθος του νερού κατά πλάτος του στομίου (m)

Επειδή η εξίσωση (7.72) ισχύει για βάθη νερού  $d$  μικρότερα ή ίσα με το ύψος του ανοίγματος του στομίου, στην περίπτωση καταβιβασμού θα είναι:

$$d \leq h + a \quad (7.73)$$

όπου:

- $d$ , το μέσο βάθος του νερού κατά πλάτος του στομίου (m)
- $h$ , το ύψος του ανοίγματος του στομίου (m)
- $a$ , το ύψος του καταβιβασμού (m)

Εάν δεν υπάρχει καταβιβασμός του φρεατίου, τότε η εξίσωση (7.72) γίνεται:

$$Q_i = 1.6Ld^{1.5} \quad (7.74)$$

Στην περίπτωση αυτή ο περιορισμός (7.73) ισχύει με  $a=0$ . Για ανοίγματα στομιών μεγαλύτερα από 3.6m, η εξίσωση (7.74) παράγει αποτελέσματα μεγαλύτερα από αυτά που λαμβάνονται από την (7.72). Επειδή όμως τα καταβιβασμένα φρεάτια συμπεριφέρονται τουλάχιστον το ίδιο καλά με τα μη καταβιβασμένα, στην περίπτωση ανοιγμάτων μεγαλύτερων των 3.6m θα πρέπει να χρησιμοποιείται η σχέση (7.74) ανεξάρτητα από την ύπαρξη καταβιβασμού ή μη στο φρεάτιο στομίου.

Για βάθη νερού μεγαλύτερα από 1.4 φορές το ύψος του ανοίγματος του στομίου, η υδραυλική συμπεριφορά του φρεατίου προσομοιάζει αυτή του θυροφράγματος. Στην περίπτωση ύπαρξης καταβιβασμού θα ισχύει η σχέση:

$$Q_i = 0.67hL\sqrt{2gd_0} \quad (7.75)$$

όπου:

- $Q_i$ , η απορροφώμενη παροχή ( $m^3/s$ )
- $h$ , το ύψος του ανοίγματος του στομίου (m)
- $L$ , το μήκος του στομίου (m)
- $d_0$ , το ενεργό βάθος νερού στο κέντρο του θυροφράγματος (m)
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 m/s^2$ )

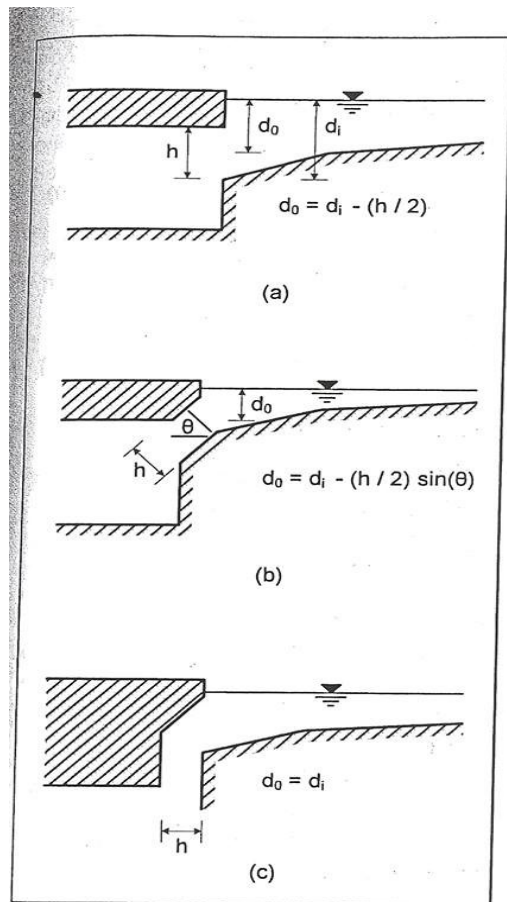
Ενώ για φρεάτια χωρίς καταβιβασμό:

$$Q_i = 0.67A_g\sqrt{2g\left(d_i - \frac{h}{2}\right)} \quad (7.76)$$

όπου:

- $Q_i$ , η απορροφώμενη παροχή ( $m^3/s$ )
- $h$ , το ύψος του ανοίγματος του στομίου (m)
- $A_g$ , το εμβαδόν του ανοίγματος ( $m^2$ )
- $d_i$ , το βάθος νερού στο χείλος του ανοίγματος (m)
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 m/s^2$ )

Το ύψος του ανοίγματος του στομίου στις σχέσεις (7.75) και (7.76) αναφέρεται στο κατακόρυφο άνοιγμα του θυροφράγματος. Αν το άνοιγμα αυτό δεν είναι κατακόρυφο όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 7.12 τότε αλλάζει ο τρόπος μέτρησης ή υπολογισμού του ενεργού βάθους. Αν και τα σκαριφήματα που παρατίθενται στο Σχήμα 7.12 δεν είναι οι μοναδικές περιπτώσεις διάταξης εισόδου στομίου, εντούτοις είναι οι πλέον συνήθεις και χαρακτηριστικές.



Σχήμα 7.12: Διατάξεις στομιών.

Στα διπλανά σκαριφήματα a, b και c (Σχήμα 7.12), περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των βαθών  $d_0$  και  $d_i$  ανάλογα με τη διάταξη της εισόδου του στομίου. Στην πρώτη περίπτωση, ένα σύνθετο ρείθρο καταλήγει σε ένα στόμιο που έχει μη στρογγυλεμένο κάτω άκρο. Στην περίπτωση αυτή:

$$d_0 = d_i - \frac{h}{2} \quad (7.77)$$

ενώ το  $d_i$  μετράται από τη στάθμη του νερού έως το κατώτερο σημείο του σύνθετου ρείθρου.

Στη δεύτερη περίπτωση, το άνω του στομίου είναι στρογγυλεμένο και η ακμή του είναι παράλληλη προς το ρείθρο και σχηματίζει γωνία  $\theta$  ως προς την οριζόντιο, το ενεργό βάθος θα είναι:

$$d_0 = d_i - \frac{h}{2} \sin \theta \quad (7.78)$$

Τέλος στην περίπτωση που σχηματίζεται λαιμός στην είσοδο του στομίου θα είναι  $d_0 = d_i$  και το ύψος του ανοίγματος του στομίου θα είναι ίσο με το πλάτος του λαιμού.

Παράδειγμα 7-9: Να υπολογιστεί η απορροφώμενη παροχή στομίου σε καμπή, μήκους 2.5m με ύψος ανοίγματος 0.13m για δυο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση αφορά μη καταβίβασμό, με επίκλιση 2% και επιτρεπόμενο πλάτος κατάληψης 2.5m. Η δεύτερη περίπτωση αφορά καταβίβασμό με ύψος καταβίβασμού 0.025m και πλάτος 0.6 m. Η επίκλιση και το επιτρεπόμενο πλάτος κατάληψης παραμένουν τα ίδια με την πρώτη περίπτωση.

A' ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ: Υπολογίζεται το βάθος νερού στο πεζοδρόμιο:

$$d = TS_x = 2.5 \times 0.02 = 0.05 \leq 0.13 = h \quad (7.79)$$

Επομένως συνάγεται ότι το στόμιο λειτουργεί ως υπερχειλιστής και όχι ως θυρόφραγμα. Η απορροφώμενη παροχή υπολογίζεται εφαρμόζοντας τη σχέση (7.74):

$$Q_i = 1.6 \times 2.5 \times 0.05^{1.5} = 0.045 \text{ m}^3/\text{s} \quad (7.80)$$

B' ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ: Υπολογίζεται το βάθος νερού στο πεζοδρόμιο:

$$d_i = d + a = S_x T + a = 0.02 \times 2.5 + 0.025 = 0.075 \leq 0.13 = h \quad (7.81)$$

Επομένως συνάγεται ότι το στόμιο λειτουργεί ως υπερχειλιστής και όχι ως θυρόφραγμα. Η απορροφώμενη παροχή υπολογίζεται εφαρμόζοντας τη σχέση (7.82):

$$Q_i = 1.25(2.5 + 1.8 \times 0.6) 0.05^{1.5} = 0.050 \text{ m}^3/\text{s} \quad (7.82)$$

Συγκρίνοντας το φρεάτιο με καταβιβασμό με την απλή περίπτωση διαπιστώνεται ότι το πρώτο έχει 10% μεγαλύτερη απορροφητικότητα.



### 7.6.3 Σχάρες Με Στόμια

Η χρήση φρεατίων υδροσυλλογής τύπου σχάρας με στόμιο συνίσταται σε περιπτώσεις χαμηλών σημείων στα οποία υπάρχει απαίτηση απρόσκοπτης αποστράγγισης των ομβρίων υδάτων για να αποφεύγεται το λίμνασμα. Διακρίνονται δυο περιπτώσεις φρεατίων σχαρών με στόμια. Κατά την πρώτη περίπτωση, το μήκος της σχάρας είναι ίσο με το μήκος του ανοίγματος του στομίου, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το μήκος του ανοίγματος του στομίου είναι μεγαλύτερο από το μήκος της σχάρας. Τα φρεάτια της δεύτερης περίπτωσης έχουν μεγαλύτερη παροχετευτικότητα από αυτά της πρώτης περίπτωσης.

Για τα φρεάτια της πρώτης περίπτωσης που λειτουργούν ως υπερχειλιστές, η παροχετευτικότητα τους ισούται με αυτής της απλής σχάρας, αμελώντας το στόμιο. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η παροχετευτικότητα των φρεατίων θα υπολογίζεται ως το άθροισμα των αντίστοιχων παροχών που απορροφώνται από τη σχάρα και από το στόμιο όπως αυτές ισχύουν για μεμονωμένες κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα θα είναι:

$$Q_i = 0.67A_g\sqrt{2gd} + 0.67hL\sqrt{2gd_0} \quad (7.83)$$

όπου:

- $Q_i$ , η απορροφώμενη παροχή ( $m^3/s$ )
- $A_g$ , η καθαρή επιφάνεια των ανοιγμάτων της σχάρας ( $m^2$ )
- $d$ , το μέσος βάθος του νερού κατά πλάτος της σχάρας (m)
- $h$ , το ύψος του ανοίγματος του στομίου (m)
- $L$ , το μήκος του στομίου (m)
- $d_0$ , το ενεργό βάθος νερού στο κέντρο του θυροφράγματος (m)
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 m/s^2$ )

*Παράδειγμα 7-10: Να υπολογιστεί η απορροφώμενη παροχή σχάρας και στομίου σε καμπή και το βάθος ροής χωρίς έμφραξη. Η σχάρα έχει διαστάσεις 0.6x1.2m και είναι τύπου P-50 ενώ το στόμιο έχει άνοιγμα 1.2m και ύψος 0.1m. Η παροχή είναι 0.15m<sup>3</sup>/s, η επίκλιση 3%. Επίσης, να γίνουν οι υπολογισμοί για πλήρη έμφραξη ( $P_{CLOG}=100\%$ ) της σχάρας.*

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει έμφραξη, γίνεται η υπόθεση ότι το συνδυασμένο φρεάτιο λειτουργεί ως υπερχειλιστής. Επειδή το μήκος της σχάρας ισούται με το μήκος του στομίου, έπεται ότι κατά τον υπολογισμό της παροχετευτικότητάς αμελείται η ύπαρξη του στομίου. Για να επαληθευτεί η αρχική υπόθεση θα πρέπει το υπολογιζόμενο βάθος νερού να είναι περίπου ίσο ή μικρότερο από το ύψος του ανοίγματος του στομίου. Έχουμε:

$$P = 2W + L = 2 \times 0.6 + 1.2 = 2.4\text{m} \quad (7.84)$$

$$d = \left( \frac{Q_i}{1.66P} \right)^{2/3} = \left( \frac{0.15}{1.66 \times 2.4} \right)^{2/3} = 0.11\text{m} \quad (7.85)$$

Το μέσο βάθος ροής είναι 0.11m και βρίσκεται κοντά στο όριο για συμπεριφορά υπερχειλιστή και πάντως πιο μακριά από το όριο για συμπεριφορά θυροφράγματος που είναι ίσο με  $1.4 \times 0.1 = 0.14\text{m}$ . Ως εκ τούτου η αρχική υπόθεση επαληθεύεται.

Υπολογίζεται το πλάτος κατάληψης ως εξής:

$$T = \frac{d}{S_x} + \frac{W}{2} = \frac{0.11}{0.03} + \frac{0.6}{2} = 3.97\text{m} \quad (7.86)$$

Στην περίπτωση πλήρους έμφραξης της σχάρας υπολογίζεται το βάθος του νερού από τη σχέση (7.76):

$$d = \frac{\left( \frac{Q}{0.67hL} \right)^2}{2g} + \frac{h}{2} = \frac{\left( \frac{0.15}{0.67 \times 0.10 \times 1.2} \right)^2}{2 \times 9.81} + \frac{0.1}{2} = 0.23\text{m} \quad (7.87)$$

Το νέο πλάτος κατάληψης από το λιμνάζον νερό θα είναι διπλάσιο απ' ότι στην περίπτωση μη έμφραξης της σχάρας:

$$T = \frac{d}{S_x} = \frac{0.24}{0.03} = 8\text{m} \quad (7.88)$$

#### 7.6.4 Σχαρωτοί Αγωγοί

Γενικά η χρήση σχαρωτών αγωγών δεν συνίσταται σε χαμηλά σημεία, λόγω των προβλημάτων έμφραξης αυτών από καθίζηση φερτών υλών. Οι σχαρωτοί αγωγοί που έχουν τοποθετηθεί σε καμπές λειτουργούν ως υπερχειλιστές σε βάθη ροής περίπου 0.06m, ανάλογα και με το πλάτος των σχισμών. Σε βάθη μεγαλύτερα από 0.12m λειτουργούν ως θυροφράγματα ενώ για ενδιάμεσα βάθη η ροή έχει μεταβατικό χαρακτήρα. Η απορροφητικότητα ενός σχαρωτού αγωγού που λειτουργεί ως υπερχειλιστής μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_i = 1.4Ld^{1.5} \quad (7.89)$$

όπου:

- $Q_i$ , η απορροφώμενη παροχή ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

- $L$ , το μήκος του σχαρωτού αγωγού (m)
- $d$ , το βάθος νερού στο πεζοδρόμιο (m)

Στην περίπτωση που ο σχαρωτός αγωγός λειτουργεί ως θυρόφραγμα, η απορροφητικότητα του θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_i = 0.8LW\sqrt{2gd}(7.90)$$

όπου:

- $Q_i$ , η απορροφώμενη παροχή ( $m^3/s$ )
- $L$ , το μήκος του σχαρωτού αγωγού (m)
- $W$ , το πλάτος του σχαρωτού αγωγού (m)
- $d$ , το βάθος του νερού στο σχαρωτό αγωγό (m)
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ )

*Παράδειγμα 7-11: Να υπολογιστεί το απαιτούμενο μήκος σχαρωτού αγωγού για να εμφανίζεται μέγιστο βάθος νερού 0.09m. Το πλάτος του είναι 45mm και η παροχή στο ρείθρο ανάντη είναι 140 L/s. Δεν εμφανίζεται έμφραξη στο σχαρωτό αγωγό.*

Για μέγιστο βάθος νερού 0.09 η υδραυλική λειτουργία του σχαρωτού αγωγού είναι μεταβατική. Εάν θεωρηθεί ότι λειτουργεί ως υπερχειλιστής, τότε από τη σχέση (7.89) έχουμε:

$$L = \frac{Q_i}{1.4d^{1.5}} = \frac{0.14}{1.4 \times 0.09^{1.5}} = 3.70\text{m} \quad (7.91)$$

Αν θεωρηθεί ότι λειτουργεί ως θυρόφραγμα, από τη σχέση (7.90) έχουμε:

$$L = \frac{Q_i}{0.8W\sqrt{2gd}} = \frac{0.14}{0.8 \times 0.045\sqrt{2 \times 9.81 \times 0.09}} = 2.93\text{m} \quad (7.92)$$

Επομένως η δυσμενέστερη περίπτωση είναι τα 3.70m και αυτό θα πρέπει να είναι το μήκος του σχαρωτού αγωγού για να εμφανίζεται μέγιστο βάθος ροής ίσο με 0.09m.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

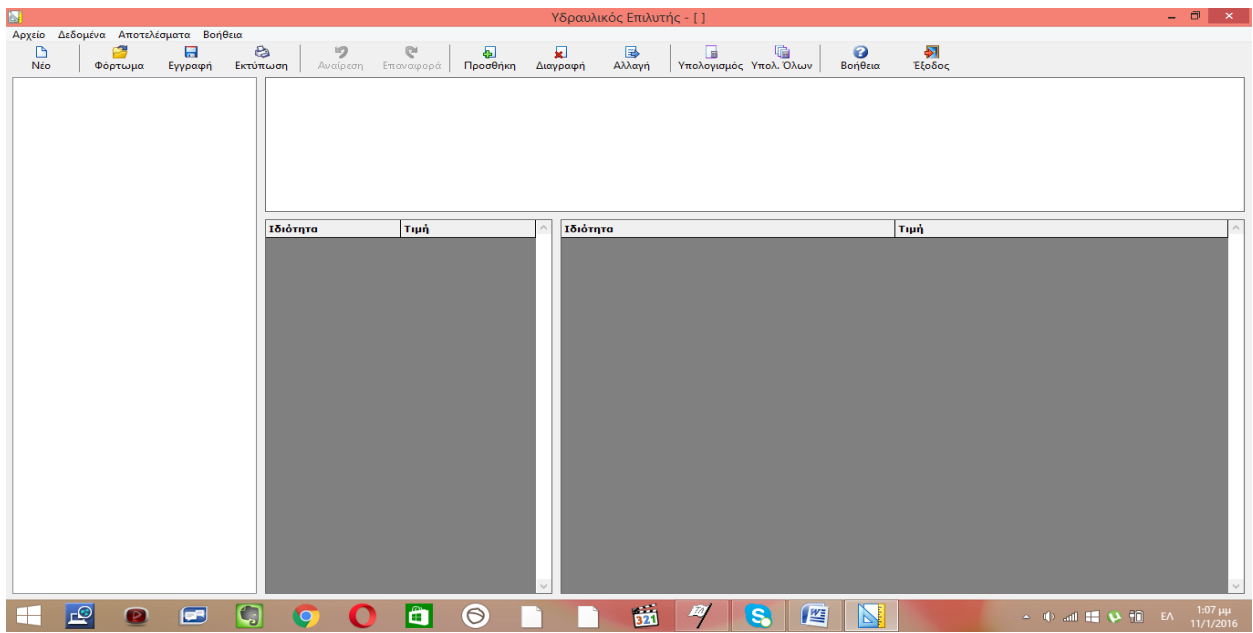
### 8. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

(TechnoLogismiki works 2015 demo)

#### 8.1. Βασικές Αρχές Υδραυλικής

##### 8.1.1. Ροή με ελευθερή επιφανεία

Βημα 1ο



## Βημα 2ο

Υδραυλικός Επιλυτής - [ ]

Αρχείο Δεδομένα Αποτελέσματα Βοήθεια

Νέο Φόρτωμα Εγγραφή Εκτύπωση Αναιρέση Επανάφορά Προσθήκη Διαγραφή Αλλαγή Υπολογισμός Υπολ. Όλων Βοήθεια Εξόδος

ΔΕΕ Ροή με ελεύθερη επιφάνεια

Ιδιότητα	Τιμή
Άγνωστο μέγεθος	Βάθος ροής (m)
Παροχή (m³/s)	10
Κλίση	0
Κινηματική συνεκτικότητα	0
Συντελεστής τριβής	0.013
Διαστομή	

1:10 μμ  
11/1/2016

## Βημα 2ο

Υδραυλικός Επιλυτής - [ ]

Αρχείο Δεδομένα Αποτελέσματα Βοήθεια

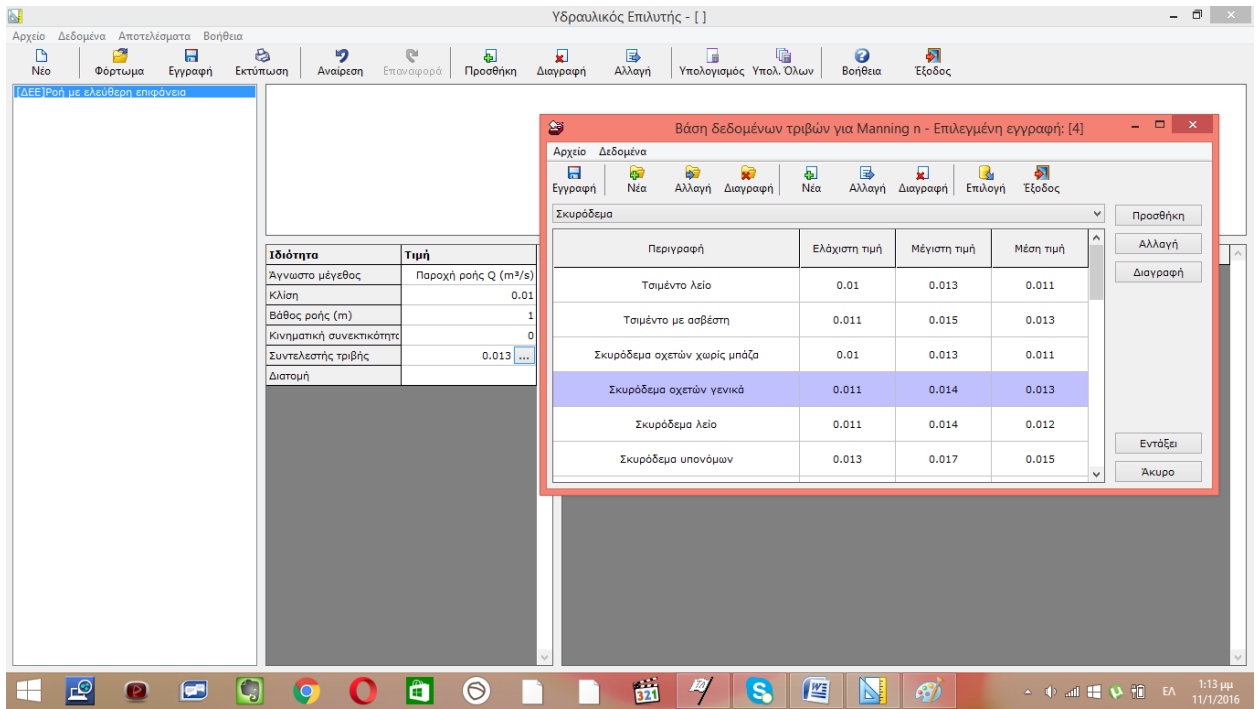
Νέο Φόρτωμα Εγγραφή Εκτύπωση Αναιρέση Επανάφορά Προσθήκη Διαγραφή Αλλαγή Υπολογισμός Υπολ. Όλων Βοήθεια Εξόδος

ΔΕΕ Ροή με ελεύθερη επιφάνεια

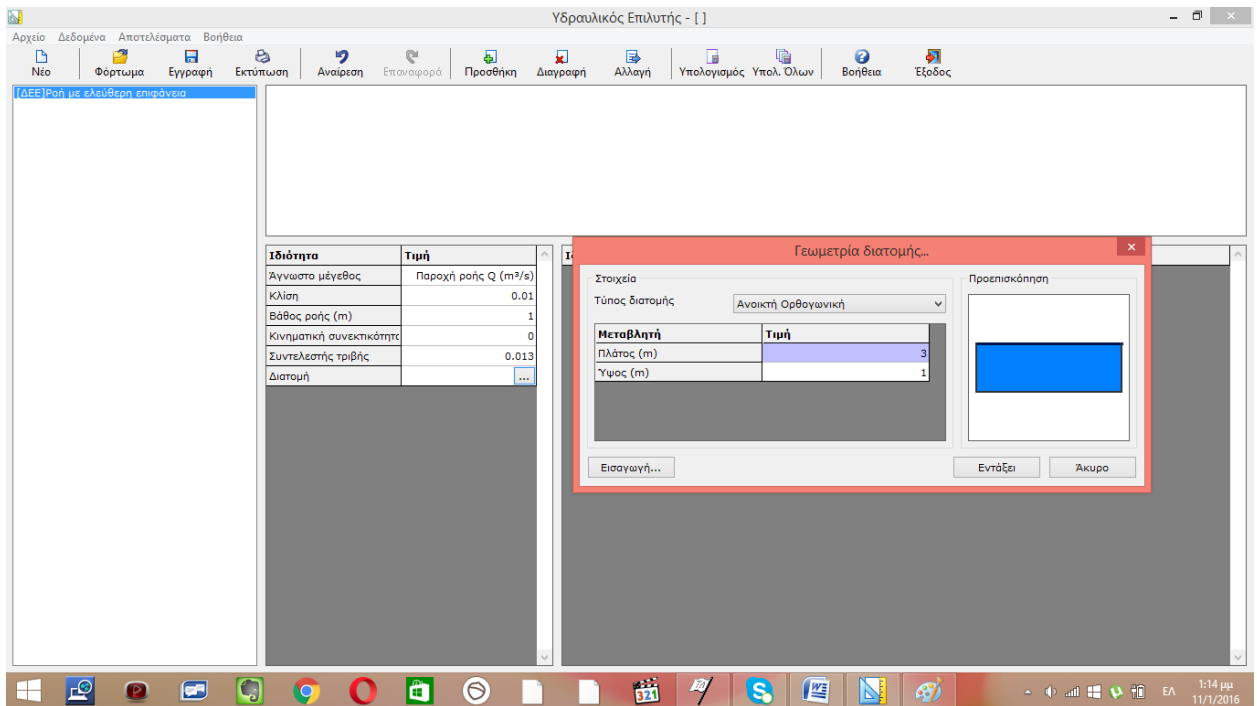
Ιδιότητα	Τιμή
Άγνωστο μέγεθος	Βάθος ροής (m)
Παροχή (m³/s)	10
Κλίση	0
Κινηματική συνεκτικότητα	0
Συντελεστής τριβής	0.013
Διαστομή	

1:10 μμ  
11/1/2016

### Βημα 3ο



### Βημα 4ο



# Βημα 5ο

Υδραυλικός Επιλυτής - [ ]

Αρχείο Δεδομένα Αποτελέσματα Βοήθεια

Νέο Φορτίωμα Εγγραφή Εκτύπωση Αφαίρεση Επαναφορά Προσθήκη Διαγραφή Αλλαγή Υπολογισμός Υπολ. Όλων Βοήθεια Εξόδος

[(ΔΕ)] ροή με ελεύθερη επιφάνεια

Ιδιότητα	Τιμή
Άγνωστο μέγεθος	Παροχή ροής Q (m³/s)
Κλίση	0.01
Βάθος ροής (m)	1
Κινηματική συνεκτικότητα	0
Συντελεστής τριβής	0.013
Διατομή	ΟΒΗ 3.000x1.000 ...

Ιδιότητα	Τιμή
Ροή	
Βάθος ροής (m)	1.000
Συντελεστής τριβής	0.0130
Ταχύτητα ροής V (m/s)	5.47
Παροχή ροής Q (m³/s)	16.415
Ποσοστό πλήρωσης διατομής	1.00
Κρίσιμο βάθος (m)	N/A
Ύψος ταχύτητας (m)	1.526
Ειδική ενέργεια (m)	2.526
Αριθμός Froude	1.7471
Τύπος ροής	Υπερκρίσιμη
Γεωμετρία	
Ύψος διατομής (m)	1.000
Ολική επιφάνεια διατομής (m²)	3.0000
Ολική περίμετρος διατομής (m)	5.000
Ολική υδραυλική ακτίνα (m)	0.600
Ελεύθερο πλάτος πλήρους πλήρωσης (m)	3.000
Υγρή επιφάνεια διατομής (m²)	3.0000
Βρεχόμενη περίμετρος (m)	5.000
Υδραυλική ακτίνα (m)	0.600

1:16 μμ 11/1/2016

Υδραυλικός Επιλυτής - [ ]

Αρχείο Δεδομένα Αποτελέσματα Βοήθεια

Νέο Φορτίωμα Εγγραφή Εκτύπωση Αφαίρεση Επαναφορά Προσθήκη Διαγραφή Αλλαγή Υπολογισμός Υπολ. Όλων Βοήθεια Εξόδος

[(ΔΕ)] ροή με ελεύθερη επιφάνεια

Ιδιότητα	Τιμή
Άγνωστο μέγεθος	Παροχή ροής Q (m³/s)
Κλίση	0.01
Βάθος ροής (m)	1
Κινηματική συνεκτικότητα	0
Συντελεστής τριβής	0.013
Διατομή	ΟΒΗ 3.000x1.000 ...

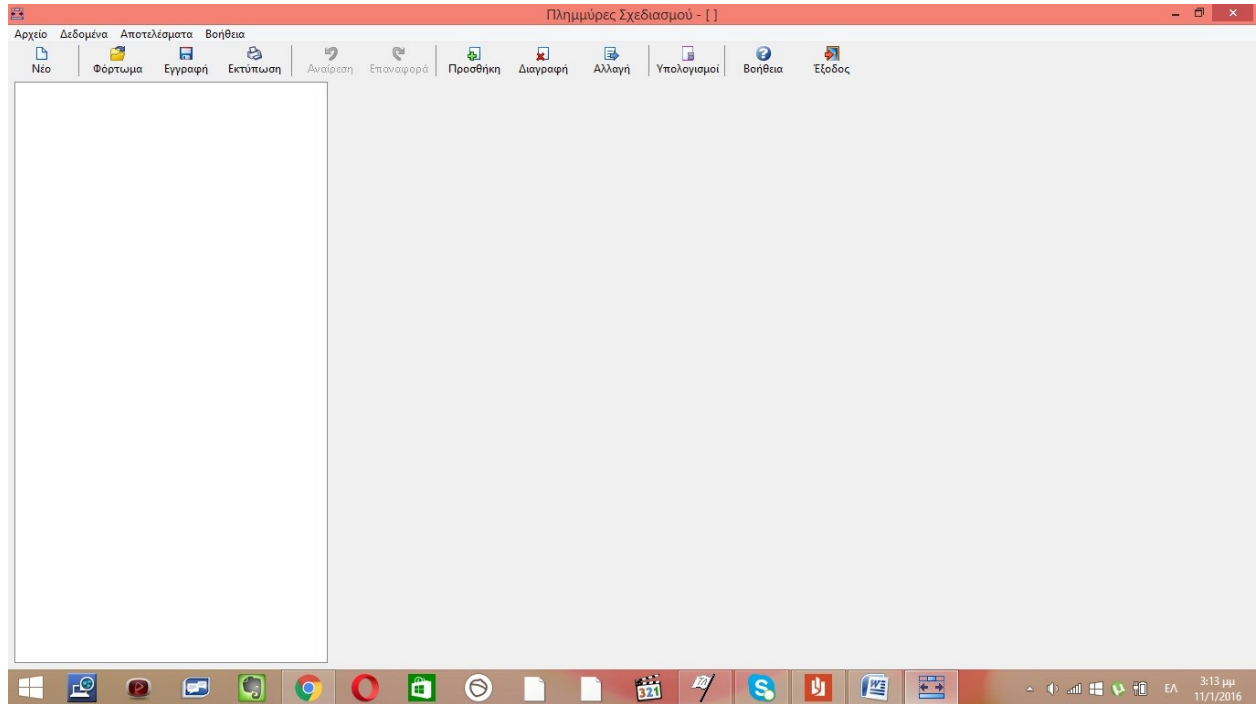
Ιδιότητα	Τιμή
Ολική περίμετρος διατομής (m)	5.000
Ολική υδραυλική ακτίνα (m)	0.600
Ελεύθερο πλάτος πλήρους πλήρωσης (m)	3.000
Υγρή επιφάνεια διατομής (m²)	3.0000
Βρεχόμενη περίμετρος (m)	5.000
Υδραυλική ακτίνα (m)	0.600
Ελεύθερο πλάτος (m)	3.000
Κλίση	0.01000
Πλήρης πλήρωση	
Συντελεστής τριβής πλήρους πλήρωσης	0.0130
Παροχή πλήρους πλήρωσης Qf (m³/s)	16.416
Ταχύτητα πλήρους πλήρωσης Vf (m/s)	5.47
Λόγος παροχών Q/Qf	0.9999
Λόγος ταχυτήτων V/Vf	1.0000
Κλίση για πλήρη πλήρωση	0.01000
Χωματομετρικά	
Εκκαθάρες (m³)	0.000
Επιχώσεις (m³)	0.000
Σύνολο χωμασιμών (m³)	0.000

1:16 μμ 11/1/2016

## 8.2. Διοδευση Πλημμυρων

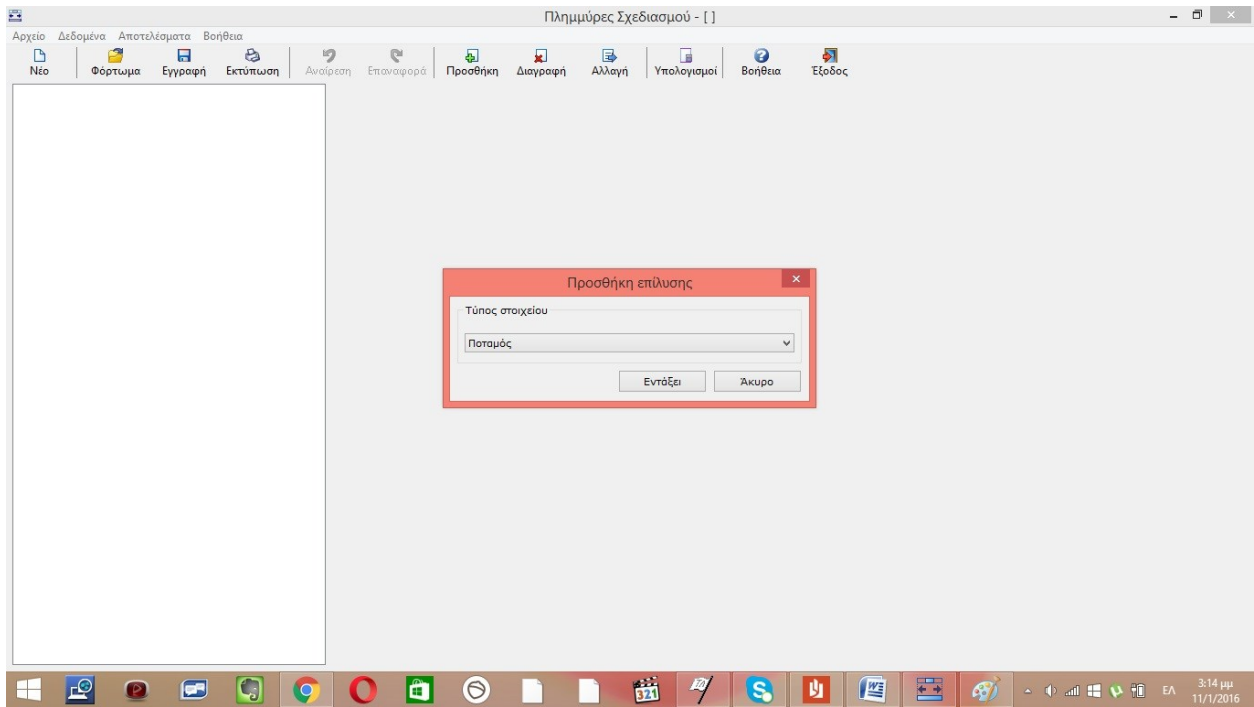
### 8.2.1. Διοδευση κυματος σε ποταμι

Βημα 1ο

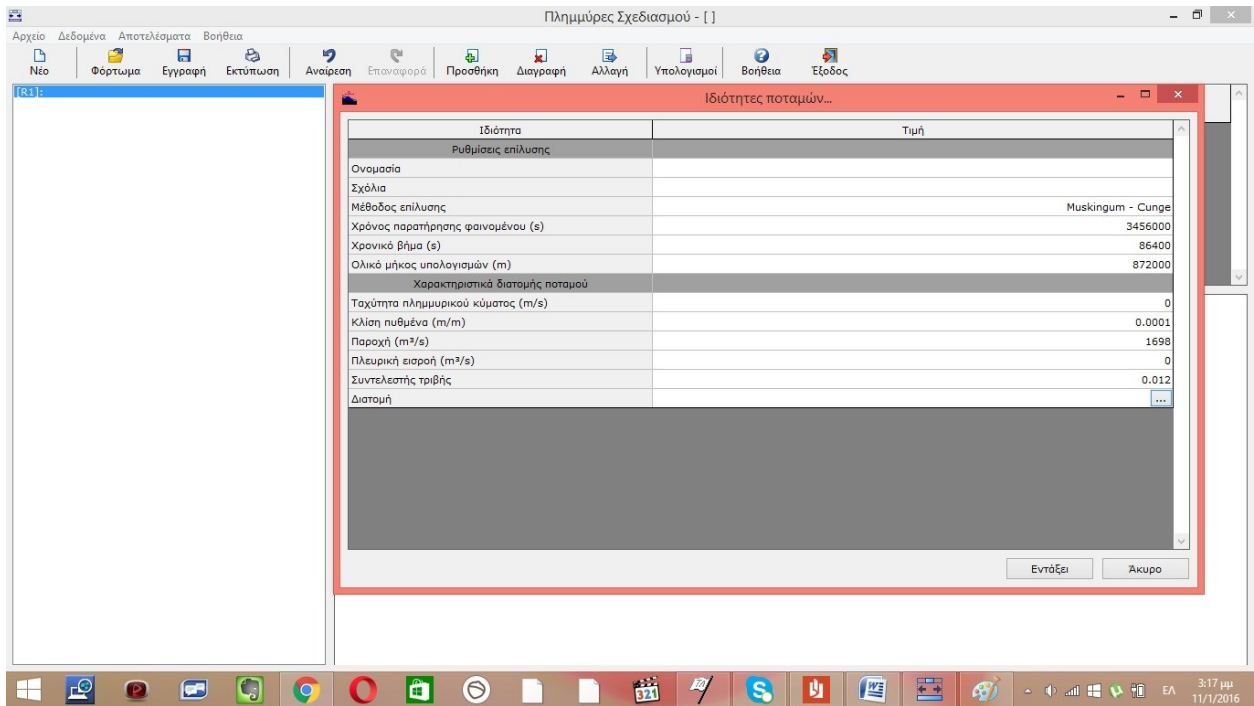




## Βημα 2ο

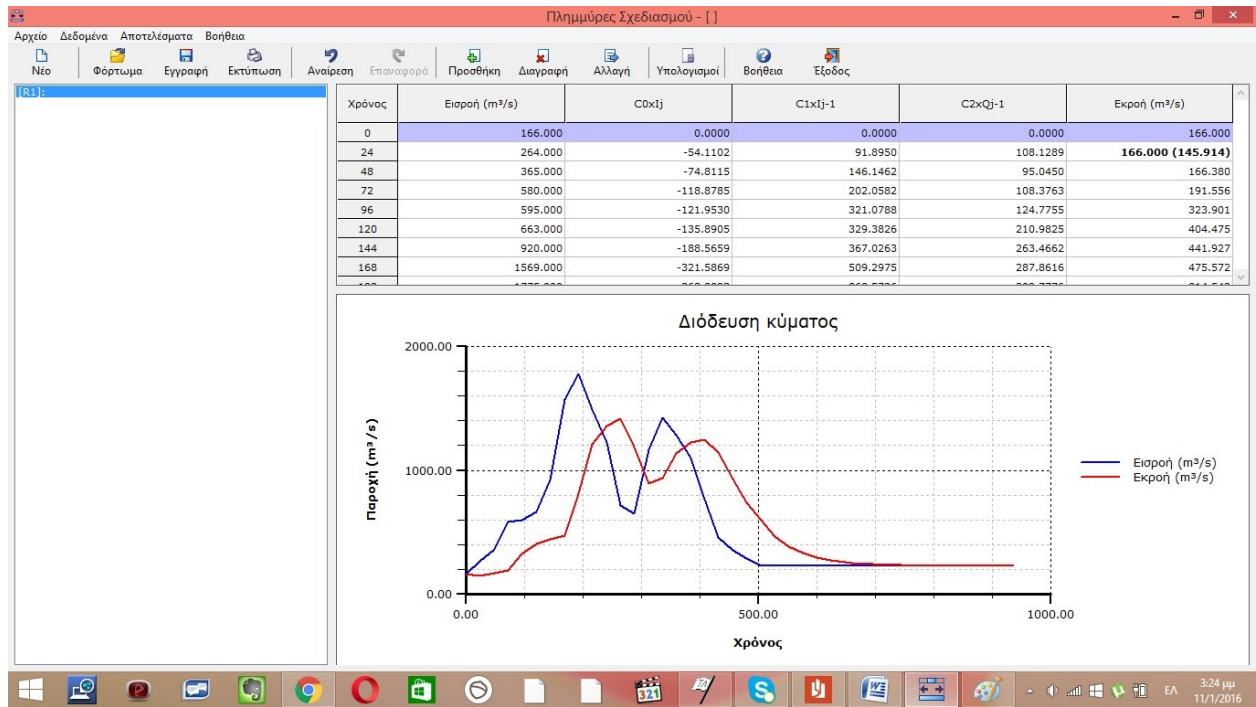


## Βημα 3ο

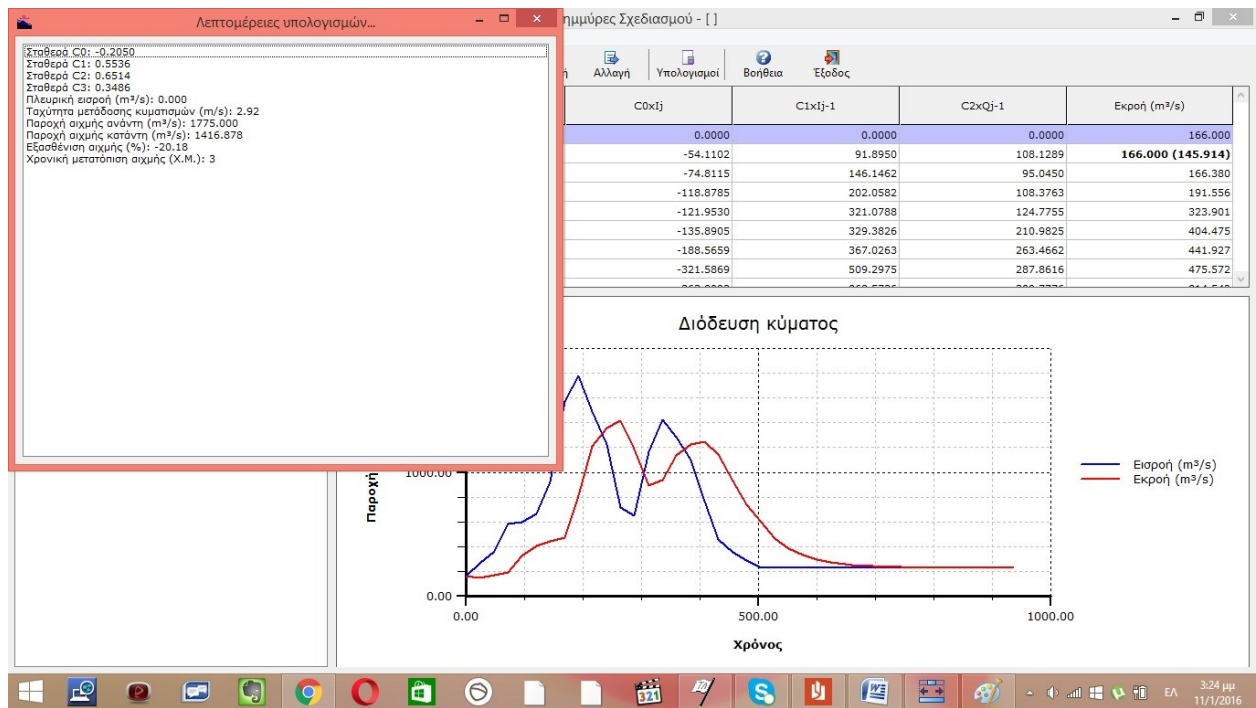




## Βημα 6ο



## Βημα 7ο



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο

### 1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

#### 1.1. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.1.1. Νουτσοπουλου, Γ. Μη Μόνιμη Ροη σε Κλειστούς Αγωγούς, ΕΜΠ, Αθήνα, 1977.
- 1.1.2. Παπαδανηλ, Ε. και Λαζαριδη, Λ. Υδραυλικές Εγκαταστάσεις, Ίδρυμα Ευγενιδου, 1954
- 1.1.3. Δημητριου, Ι., Αντωνοπουλου, Α. και Δημητριου, Δ. Συντελεστής Τραχύτητας των Κυκλικών Αγωγών Υπονόμων, Τεχνικά Χρονικά, Τόμος 20, Τεύχος 3, 2000
- 1.1.4. Κουτσογιαννη, Δ. Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης. ΕΜΠ, Έκδοση 3.1, 1999
- 1.1.5. Δημητριου, Ι. Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Τεύχος Α, ΕΜΠ, Αθήνα, 1995
- 1.1.6. Χριστοδουλου, Γ., και Νουτσοπουλου, Γ. Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών, Α εκδοση, ΕΜΠ, Αθήνα 1996
- 1.1.7. Δημητριου Ι. και Παπαθανασιαδης, Τ. Ο Εκχειλιστής Τριγωνικής Κατατομής Crump, Τεχνικά Χρονικά, Τεύχος 1, 2000, ΤΕΕ.
- 1.1.8. Νουτσοπουλου, Γ. Ροη με Ελεύθερη Επιφάνεια - Ανοικτοί Αγωγοί, ΕΜΠ, Αθήνα, 1979.

#### 1.2. ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.1.9. Chow V. T. Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
- 1.1.10. Tritton, D.J. Physical Fluid Dynamics, 2<sup>nd</sup> Edition, Oxford Press, 1988.
- 1.1.11. Batchelor, G. K. An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 1970.
- 1.1.12. Henderson, R.J. Hydraulic Rougness of Used Sewers, Planning, Construction, Maintenance and Operation of Sewerage Systems, BHRA fluid engineering services, UK, 1984.
- 1.1.13. Brater, E.F., King, H.W., Lindell, J. E. and Wei, C. Y. Handbook of Hydraulics, 7<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1996.
- 1.1.14. HEC-RAS River Analysis System, version 3.1, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, USA, November 2002.
- 1.1.15. American Association of State Highway and Transportation Officials A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, AASHTO, Washington D.C., 1990.

- 1.1.16. American Association of State Highway and Transportation Officials Model Drainage Manual, AASHTO, Washington D.C., 1999.
- 1.1.17. Federal Highway Administration Urban Drainage Design Manual, US Department of Transportation, August 2001.
- 1.1.18. USACE Engineering and Design - River Hydraulics, US American Corps of Engineers EM 1110-2-1416, 1993.
- 1.1.19. US Army Corps of Engineers, Hydrological Modelling System HEC-HMS Technical Reference Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA, 2000.
- 1.1.20. Walski, T.M. Sanitary Sewer Modelling, Haestad Methods, Waterbury, CT, USA, 2002.