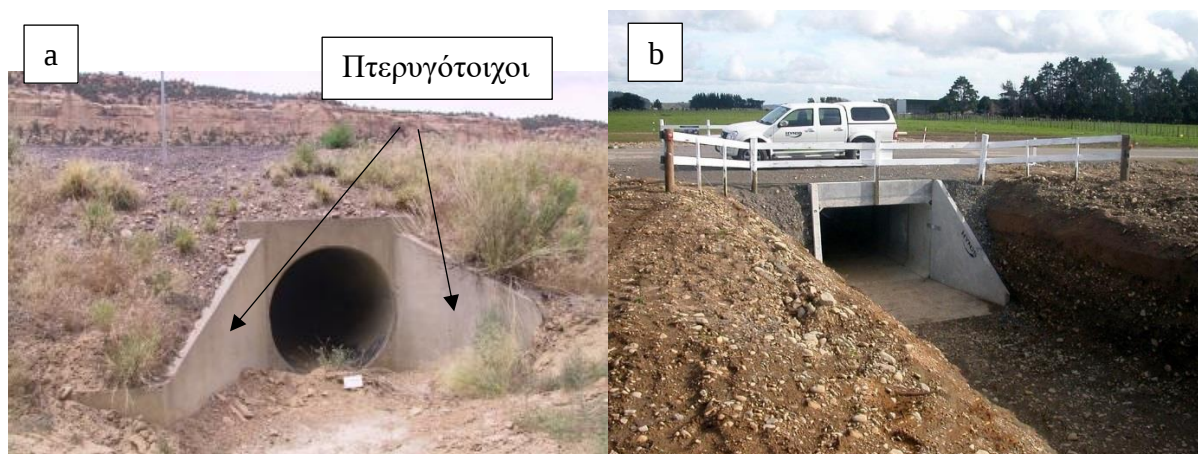


Μεθοδολογία για τον έλεγχο και σχεδιασμό οχετών

Ευάγγελος Π. Φινδανής
Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός ΑΠΘ
ΜΔΕ Υδραυλικής Μηχανικής ΔΠΘ
Υποψήφιος Διδάκτορας ΤΑΤΜ ΑΠΘ
Θεσσαλονίκη, 03/2021
vangelisfindanis@gmail.com, vfindanis.com

Εισαγωγή

Οι οχετοί είναι αγωγοί απλής κατασκευής οι οποίοι κατασκευάζονται συνήθως όταν ένα φυσικό υδατόρευμα τέμνεται με μία οδό. Ο σκοπός τους είναι να μεταφέρουν το νερό του υδατορεύματος στην απέναντι πλευρά της οδού, χωρίς να προκληθεί υπερύψωση της στάθμης της ροής στην είσοδο τους. Τις περισσότερες φορές, έχουν κυκλική ή ορθογωνική διατομή ενώ για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται είτε προκατασκευασμένοι τσιμεντοσωλήνες είτε ορθογώνια πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος. Επίσης, είναι δυνατή η επιτόπου σκυροδέτηση τους. Στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη μεταφοράς μεγάλης παροχής κατά πλάτος της οδού, μπορούν να τοποθετηθούν παράλληλοι οχετοί ώστε να αυξηθεί η υδραυλική διατομή (εικόνα 2). Το πλάτος ενός μεμονωμένου οχετού δεν ξεπερνάει τα 6 m. Μεγαλύτερο πλάτος κατατάσσει το έργο στην κατηγορία των γεφυρών.



Εικόνα 1: (a) Ένας οχετός κυκλικής διατομής από σκυρόδεμα. (b) Ένας κιβωτοειδής οχετός πάνω από τον οποίο διέρχεται μία οδός. Και στις δύο εικόνες διακρίνονται οι πτερυγότοιχοι.

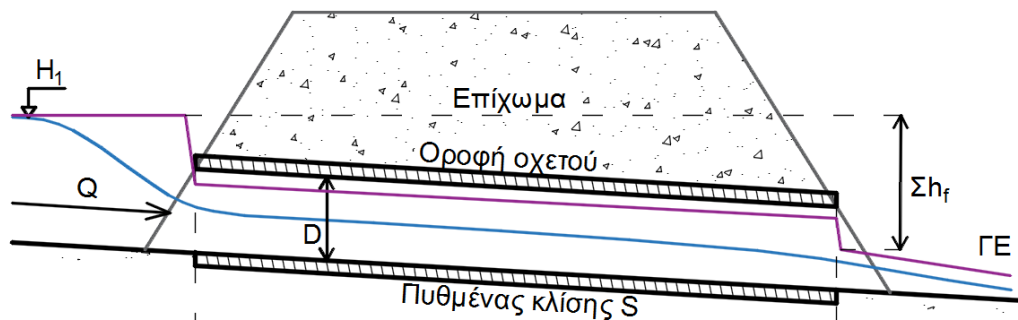
Τμήματα ενός οχετού

Ένας οχετός αποτελείται από τρία τμήματα: το **στόμιο εισόδου**, τον **λαιμό** και το **στόμιο εξόδου**. Δεδομένου ότι αυτοί τοποθετούνται στο εσωτερικό επιχώματος, στα στόμια εισόδου και εξόδου του οχετού κατασκευάζονται πτερυγότοιχοι ή κεφαλότοιχοι (εικόνες 1 και 3) ώστε να συγκρατείται το υλικό του επιχώματος και να εξασφαλίζεται ομαλή είσοδος και έξοδος των όμβριων σε αυτόν. Στην εικόνα 3 έχει σχεδιαστεί ένας κιβωτοειδής οχετός (δηλαδή οχετός με ορθογωνική διατομή) του οποίου ο λαιμός έχει διαστάσεις $B \times D$ με B το πλάτος του και D το ύψος του. Το μήκος του λαιμού είναι L και οι συνολικές απώλειες φορτίου της ροής (τοπικές και ολικές) κατά την διέλευση της από τον οχετό είναι Σh_f . Οι οχετοί που κατασκευάζονται στις τομές υδατορευμάτων με οδούς έχουν μικρό μήκος L της τάξης των μερικών μέτρων. Τέλος, με H_1 συμβολίζουμε την στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της ροής ανάντη της εισόδου του οχετού.

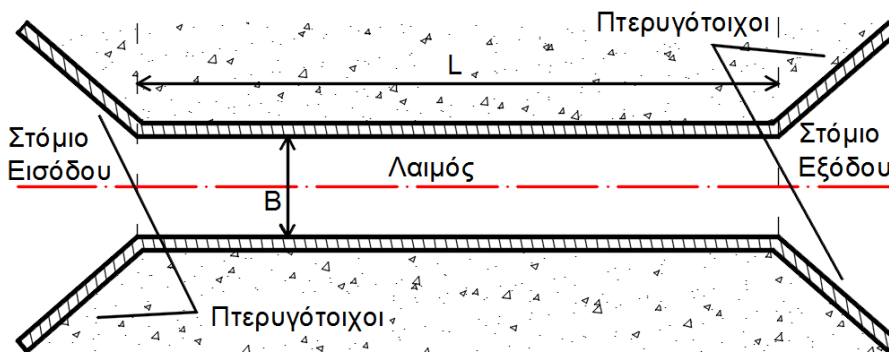


Εικόνα 2: Οχετοί παράλληλα τοποθετημένοι (τετράδυμοι κυκλικοί οχετοί).

(a) Μηκοτομή Οχετού



(b) Κάτοψη Οχετού



Εικόνα 3: (a) Μηκοτομή ενός κιβωτοειδούς (ορθογωνικού) οχετού όπου διακρίνονται η οροφή και ο πυθμένας του. Με μοβ γραμμή παριστάνεται η γραμμή ενέργειας ενώ με μπλε έχει σχεδιαστεί η επιφάνεια της ροής. (b) Κάτοψη του οχετού. Ο λαιμός του οχετού έχει διαστάσεις $B \times D$ και μήκος L .

Υδραυλικές και σχεδιαστικές παράμετροι ενός οχετού

Αν και ένας οχετός είναι απλή κατασκευή, η υδραυλική συμπεριφορά του είναι πολυσύνθετη. Για αυτό τον λόγο είναι αναγκαίο να μελετηθεί διεξοδικά η κατασκευή ώστε να προσδιοριστούν οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού. Ο σκοπός της υδραυλικής μελέτης είναι

ο υπολογισμός των διαστάσεων του λαιμού και της κλίσης του οχετού ώστε αυτός να μεταφέρει την απαιτούμενη παροχή Q_{des} όταν η στάθμη της ροής ανάντη του είναι ίση με την στάθμη σχεδιασμού H_{des} . Δηλαδή θέλουμε να υπολογίσουμε τα B, D και S ώστε όταν $H_1=H_{des}$ να ισχύει $Q=Q_{des}$. Ταυτοχρόνως, οι διαστάσεις B, D και η κλίση S πρέπει να εξασφαλίζουν τις κατάλληλες υδραυλικές συνθήκες λειτουργίας του οχετού. Αυτές είναι:

1. Η ροή στον λαιμό του οχετού πρέπει να γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή ο οχετός να μην είναι υπό πίεση (κλειστός) αγωγός.
2. Δεν πρέπει να εμφανίζονται υδραυλικά άλματα στο εσωτερικό του οχετού
3. Η ταχύτητα της ροής εντός του οχετού δεν πρέπει να υπερβαίνει μία δεδομένη τιμή V_{max} για να αποφεύγεται η διάβρωση των τοιχωμάτων αυτού.
4. Η ροή στο εσωτερικό του οχετού πρέπει να ελέγχεται (εξαρτάται) από τις συνθήκες στα ανάντη του οχετού και όχι από τις συνθήκες στα κατάντη του.

Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τα ακόλουθα κατά τον σχεδιασμό ενός οχετού:

1. Είναι επιθυμητό ο οχετός να σχεδιαστεί ευθύγραμμος και όχι καμπύλος ώστε να μην ασκούνται έντονες υδροδυναμικές δυνάμεις σε αυτόν από την αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής.
2. Ο άξονας του οχετού πρέπει να ταυτίζεται με τον άξονα του υδατορεύματος
3. Κατά μήκος του οχετού, είναι αναγκαίο να μην μεταβάλλονται έντονα οι παράμετροι της ροής σε σχέση με τις τιμές τους στην φυσική κοίτη του υδατορεύματος.
4. Η στάθμη του νερού ανάντη του οχετού δεν πρέπει να αυξάνεται εξαιτίας της παρουσίας αυτού.

Περιπτώσεις προφίλ ροής

Για να υπολογίσουμε τα B, D και S του οχετού συναρτήσει των Q_{des} και H_{des} πρέπει να εξετάσουμε τις διάφορες περιπτώσεις προφίλ ροής που είναι δυνατόν να εμφανιστούν. Στην συνέχεια για να είναι ευκολότερη η ανάλυση μας θεωρούμε τις διατομές 1, 2, 3 και 4 (εικόνες 4 και 5). Η διατομή 1 βρίσκεται σε μικρή απόσταση ανάντη του οχετού και η στάθμη σε αυτή είναι ίση με H_1 σε σχέση με κάποιο επίπεδο αναφοράς. Η διατομή 2 έχει τοποθετηθεί ακριβώς στην είσοδο του οχετού. Η διατομή 3 βρίσκεται ακριβώς στην έξοδο του οχετού ενώ η διατομή 4 τοποθετείται σε μικρή απόσταση κατάντη της διατομής 3. Με y και z συμβολίζουμε κατ' αντιστοιχία το βάθος ροής και το υψόμετρο του πυθμένα σε αυτές τις διατομές.

Τα προφίλ ροής σε έναν οχετό είναι συνολικά οκτώ και εμπίπτουν σε δύο κύριες κλάσεις:

- a. Στην κλάση A, η είσοδος του οχετού είναι ελεύθερη (μη βυθισμένη), δηλαδή $y_2 < D$, και η ροή στον λαιμό αυτού γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια.
- b. Στην κλάση B, η είσοδος του οχετού είναι βυθισμένη, δηλαδή $y_2 = D$, και η ροή στον λαιμό αυτού μπορεί να γίνεται είτε με ελεύθερη επιφάνεια είτε να είναι υπό πίεση.

Βάσει πειραματικών δεδομένων προκύπτει πως τα προφίλ της κλάσης A εμφανίζονται όταν ισχύει η συνθήκη

$$\frac{H_1 - z_2}{D} \leq 1.2 \quad (1)$$

Αντίθετα, εάν δεν ισχύει η παραπάνω συνθήκη, εμφανίζονται τα προφίλ της κλάσης B. Το σύνολο των οκτώ προφίλ ροής παρουσιάζονται στις εικόνες 4 και 5. Στην εικόνα 4, όπου έχουν

σχεδιαστεί τα προφίλ της κλάσης A, με κόκκινο φαίνεται η γραμμή του κρίσιμου βάθους, ενώ στην εικόνα 5, με τα προφίλ της κλάσης B, με πράσινο φαίνεται η γραμμή του ομοιόμορφου βάθους.

Στην συνέχεια κάθε κλάση χωρίζεται σε δύο υπο-κλάσεις αναλόγως του εάν η ροή στον οχετό ελέγχεται από τις ανάντη ή κατάντη συνθήκες. Όταν η ροή ελέγχεται από τα ανάντη (περιπτώσεις A3, A4, B1 και B2) λέμε πως ο οχετός βρίσκεται υπό **έλεγχο εισόδου** ενώ όταν ελέγχεται από τα κατάντη (περιπτώσεις A1, A2, B3 και B4) βρίσκεται υπό **έλεγχο εξόδου**. Στην περίπτωση της A κλάσης, η ροή ελέγχεται από τα ανάντη όταν η κλίση του οχετού είναι απότομη ενώ ελέγχεται από τα κατάντη όταν η κλίση είναι ήπια. Στην ροή A1, το βάθος ροής στην διατομή ελέγχου 3 είναι κρίσιμο, ενώ στις ροές A3 και A4 κρίσιμο είναι το βάθος στην διατομή ελέγχου 2. Υπενθυμίζεται πως η κλίση ενός αγωγού είναι απότομη εάν ισχύει $S > S_c$ και $y_0 < y_c$ και ήπια εάν ισχύει $S < S_c$ και $y_0 > y_c$ (όπου S_c η κρίσιμη κλίση του αγωγού, y_0 το ομοιόμορφο βάθος και y_c το κρίσιμο βάθος).

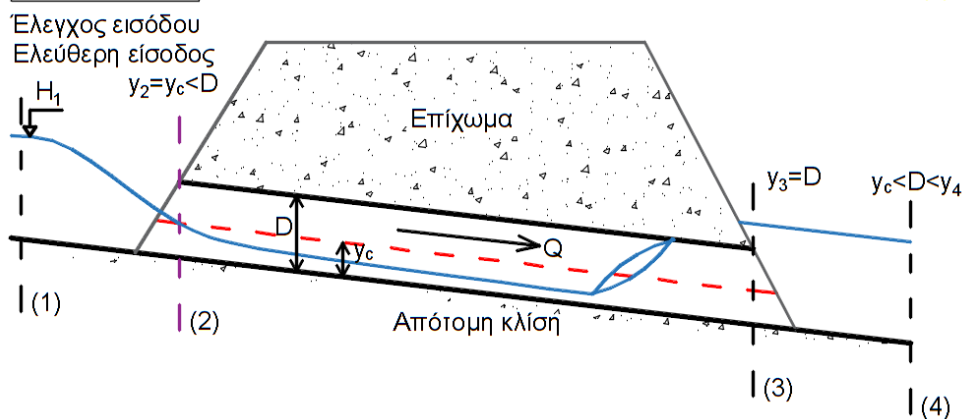
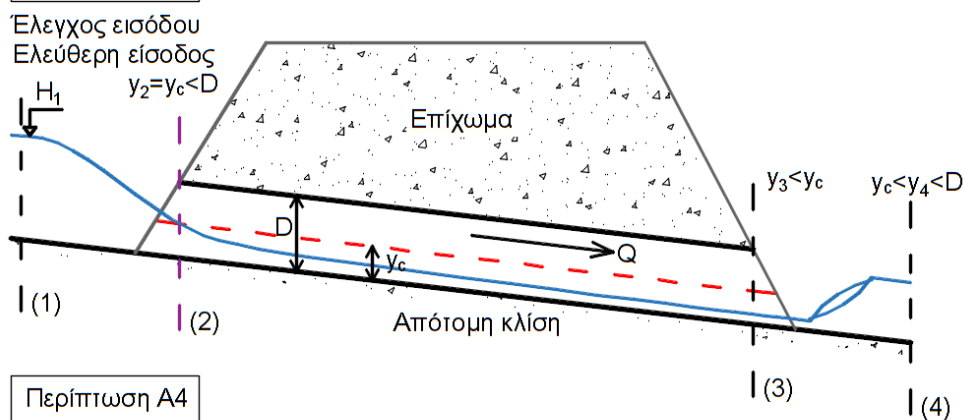
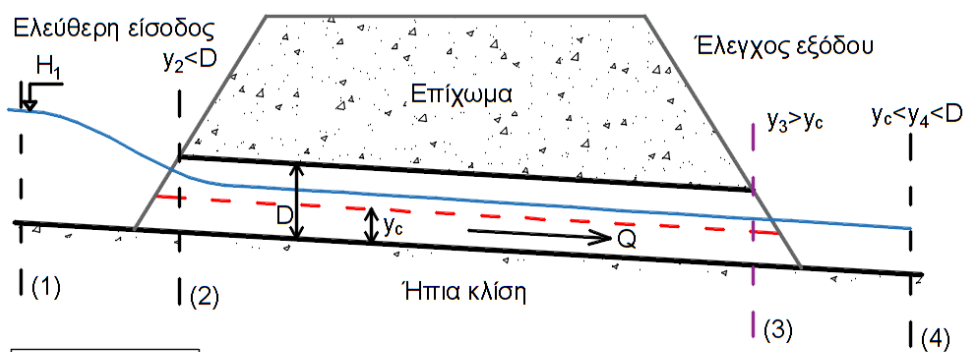
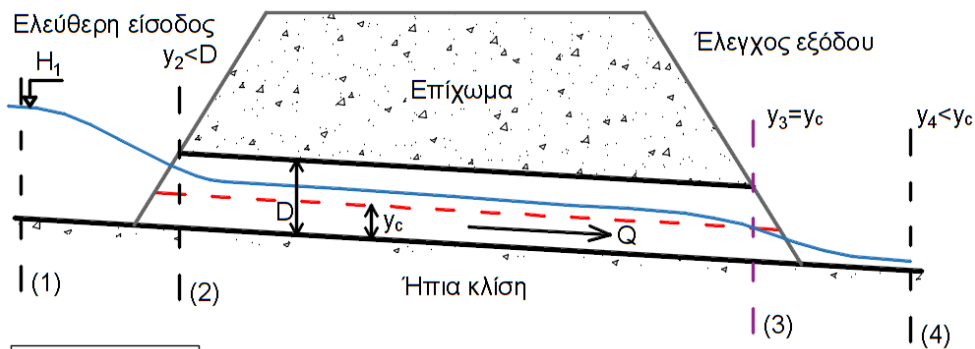
Στην B κλάση των προφίλ, η ροή συνήθως βρίσκεται υπό έλεγχο εισόδου όταν το ομοιόμορφο βάθος y_0 είναι μικρότερο του ύψους D του οχετού ($y_0 < D$). Στις περιπτώσεις αυτές (B1 και B2), η ροή στον λαιμό του οχετού γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια ασχέτως του ότι η είσοδος είναι βυθισμένη. Αντίθετα, εάν το ομοιόμορφο βάθος είναι μεγαλύτερο του ύψους D ($y_0 > D$), η ροή ελέγχεται από την έξοδο και στον λαιμό δεν υφίσταται ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή ο οχετός είναι κλειστός αγωγός (περιπτώσεις B3 και B4). Η τελευταία παράμετρος που παίζει ρόλο στην κατηγοριοποίηση των προφίλ είναι το βάθος κατάντη του οχετού στην διατομή 4. Ειδικότερα η σύγκριση του y_4 με το y_c διακρίνει την περίπτωση A1 έναντι της A2 και την B1 έναντι της B2. Ομοίως, η σύγκριση του y_4 με το ύψος D διακρίνει την περίπτωση A3 έναντι της A4 και την B3 έναντι της B4. Τα όσα περιεγράφηκαν παραπάνω συνοψίζονται στον πίνακα 1 όπου ως λ ορίζεται ο λόγος $(H_1 - z_2)/D$. Για να εμφανιστεί μία συγκεκριμένη περίπτωση προφίλ από τις οκτώ σε έναν οχετό πρέπει να ισχύουν ταυτοχρόνως και οι τρεις συνθήκες του πίνακα 1.

Περίπτωση	1 ^η συνθήκη	2 ^η συνθήκη	3 ^η συνθήκη	Είσοδος	Λαιμός	Έλεγχος	Άλμα;
A1	$\lambda \leq 1.2$	$y_0 > y_c$	$y_4 < y_c$	Ελεύθερη	Ελεύθερος	Έξοδος	Όχι
A2	$\lambda \leq 1.2$	$y_0 > y_c$	$y_4 > y_c$			Είσοδος	Ναι
A3	$\lambda \leq 1.2$	$y_0 < y_c$	$y_4 < D$				
A4	$\lambda \leq 1.2$	$y_0 < y_c$	$y_4 > D$				Όχι
B1	$\lambda > 1.2$	$y_0 < D$	$y_4 < y_c$	Βυθισμένη	Βυθισμένος	Έξοδος	Ναι
B2	$\lambda > 1.2$	$y_0 < D$	$y_4 > y_c$				Όχι
B3	$\lambda > 1.2$	$y_0 > D$	$y_4 < D$				Ναι
B4	$\lambda > 1.2$	$y_0 > D$	$y_4 > D$				

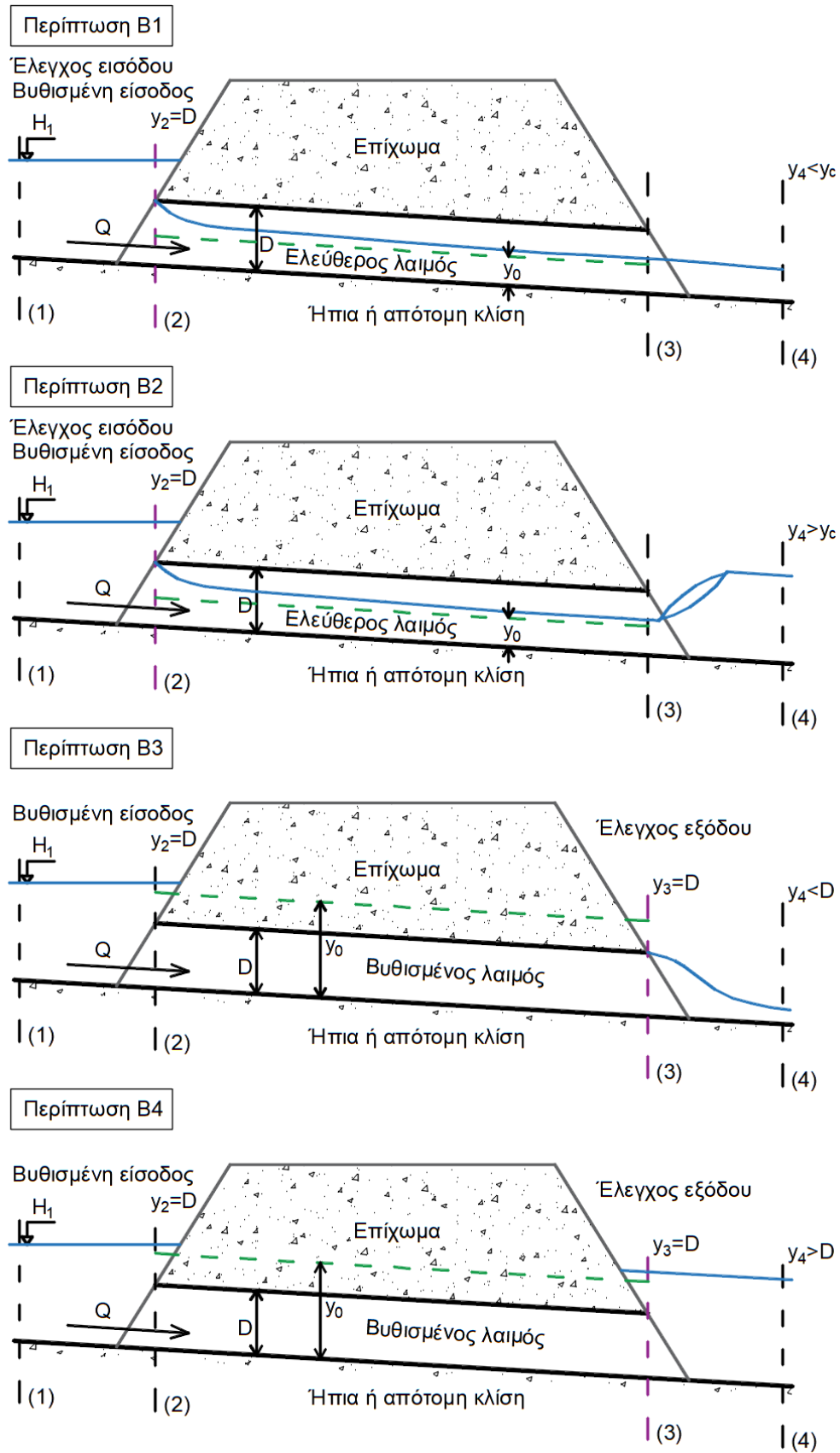
Πίνακας 1

Τέλος, πρέπει να προστεθούν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Στις περιπτώσεις A1 και A2, η ροή στον λαιμό του οχετού είναι υποκρίσιμη. Αντίθετα στις περιπτώσεις A3, A4, B1 και B2, η ροή στον λαιμό είναι υπερκρίσιμη.
2. Στις ροές A3 και A4 εμφανίζεται υδραυλικό άλμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ροή στην διατομή 4 εξαναγκάζεται να είναι υποκρίσιμη (ίσως από κάποιο τεχνικό ή εμπόδιο κατάντη της διατομής αυτής). Αν στην διατομή 4 των ροών A3 και A4 το βάθος ροής είναι υπερκρίσιμο ($y_4 < y_c$), το υδραυλικό άλμα δεν συμβαίνει ενώ τότε τα προφίλ αυτά γίνονται μεταξύ τους ίδια.
3. Ομοίως, στην περίπτωση B2 δημιουργείται υδραυλικό άλμα στην έξοδο του οχετού διότι η κατάντη ροή υποχρεώνεται να γίνει υποκρίσιμη ($y_4 > y_c$).



Εικόνα 4: Τα τέσσερα προφίλ της κλάσης Α. Οι περιπτώσεις Α1 και Α2 αφορούν τους σχετούς με ήπια κλίση υπό καθεστώς ελέγχου εξόδου. Στις περιπτώσεις Α3 και Α4 οι σχετοί έχουν απότομη κλίση και ελέγχονται από την είσοδο. Με μοβ έχουν σχεδιαστεί οι διατομές ελέγχου.



Εικόνα 5: Τα τέσσερα προφίλ της κλάσης B. Οι περιπτώσεις B1 και B2 αφορούν τις ροές με ομοιόμορφο βάθος μικρότερο του D , και τα προφίλ τους έχουν σχεδιαστεί για την συνήθη περίπτωση που η κλίση του οχετού είναι απότομη. Στις περιπτώσεις B3 και B4 οι οχετοί ενεργούν ως κλειστοί αγωγοί και ελέγχονται από την έξοδο. Με μωβ έχουν σχεδιαστεί οι διατομές ελέγχου.

4. Η σύγκριση του ομοιόμορφου βάθους y_0 με το ύψος D απαιτείται μόνο στα προφίλ της κλάσης B. Παρ' όλα αυτά είναι σημαντικό η σχέση των y_0 και D να εξετάζεται σε οποιαδήποτε περίπτωση ροής σε οχετό διότι ομοιόμορφο βάθος μεγαλύτερου του ύψους D συνεπάγεται πως η ροή στον οχετό τείνει να γίνει υπό πίεση. Κατά τον σχεδιασμό ενός οχετού, πρέπει να επιδιώκεται λόγος y_0/D μικρότερος του 70%.
5. Οι περιπτώσεις B1 και B2 εμφανίζονται συνήθως σε οχετούς απότομης κλίσης. Βέβαια οι ίδιες περιπτώσεις μπορούν να υπάρξουν και για ήπιες κλίσεις με παρόμοια προφίλ, όταν το φαινόμενο της vena contracta στην είσοδο του οχετού είναι έντονο και επιβάλλει υπερκρίσιμο καθεστώς ροής ακριβώς κατάντη της εισόδου.
6. Όταν το υδραυλικό άλμα της περίπτωσης B2 κινηθεί προς τα ανάντη και συμβεί στον λαιμό του οχετού, το προφίλ B2 μετατρέπεται στο προφίλ B4 ανεξαρτήτως του ότι ισχύει $y_0 < D$.
7. Στις περιπτώσεις A3 και A4, ο οχετός συμπεριφέρεται ως εκχειλιστής ευρείας στέψης διότι στην διατομή ελέγχου 2 το βάθος είναι κρίσιμο. Στις περιπτώσεις B1 και B2, ο οχετός μπορεί να αντιμετωπιστεί ως οπή μέσω της οποίας εκρέει νερό από μία δεξαμενή ενώ στις περιπτώσεις B3 και B4 ο οχετός είναι υπό πίεση αγωγός.

Σχέση Φορτίου-Παροχής για τις περιπτώσεις A3 και A4

Η τελευταία παρατήρηση έχει ιδιαίτερη αξία ώστε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε την σχέση φορτίου - παροχής του οχετού συναρτήσει του προφίλ της ροής. Όπως προαναφέρθηκε, στις περιπτώσεις A3 και A4 ο οχετός ενεργεί ως εκχειλιστής διότι στην διατομή ελέγχου η ροή είναι κρίσιμη. Έτσι, για τις ροές αυτές, υποθέτοντας πως το ολικό φορτίο στην διατομή 1 ισούται με την στάθμη H_1 και αγνοώντας τις απώλειες φορτίου μεταξύ των διατομών 1 και 2, προκύπτει πως η ειδική ενέργεια στην διατομή 2 είναι ίση με $H_1 - z_2$. Αυτή η τιμή της ειδικής ενέργειας είναι το φορτίο του υποθετικού εκχειλιστή. Συνεπώς, εάν ο οχετός έχει ορθογωνική διατομή πλάτους B , έχουμε

$$Q = C \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} g B (H_1 - z_2)^{1.5} \quad (2)$$

Ομοίως, αν ο οχετός έχει κυκλική διατομή διαμέτρου D , ισχύουν οι εξισώσεις

$$Q = 0.432 C \sqrt{g} D^{0.6} (H_1 - z_2)^{1.9} \quad (3)$$

$$Q = 0.438 C \sqrt{g} D (H_1 - z_2)^{1.5} \quad (4)$$

Η σχέση (3) εφαρμόζεται σε έναν κυκλικό οχετό όταν $0 < \lambda < 0.8$ ενώ η (4) εφαρμόζεται όταν $0.8 < \lambda \leq 1.2$. Οι εξισώσεις (3) και (4) είναι έγκυρες για τιμές κλίσης S μεγαλύτερες του 2.5%.

Ο συντελεστής C προστέθηκε στις εξισώσεις (2), (3) και (4) ώστε να ληφθούν υπόψιν οι τοπικές απώλειες φορτίου της ροής στην είσοδο του οχετού (τις οποίες αρχικά αγνοήσαμε). Στην ιδεατή περίπτωση όπου δεν υπάρχουν απώλειες φορτίου $C=1$ ενώ σε πραγματικές εφαρμογές $C < 1$. Ειδικότερα, η τιμή του C εξαρτάται από την γεωμετρία του στομίου εισροής.

Έπειτα, μία εναλλακτική μορφή της σχέσης (2), για κιβωτοειδείς οχετούς, είναι η εξίσωση

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} g B \left(H_1 - z_2 - k_{in} \frac{V_2^2}{2g} \right)^{1.5} \quad (2B)$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει θεωρώντας πως οι τοπικές απώλειες φορτίου μεταξύ των διατομών 1 και 2 μπορούν να εκφραστούν ως το γινόμενο του κινητικού φορτίου στην διατομή 2 επί έναν συντελεστή k_{in} . Ο συντελεστής k_{in} είναι μικρότερος της μονάδας και σε ένα ιδανικό στόμιο έχουμε $k_{in}=0$. Άρα, οι συντελεστές C και k_{in} εκφράζουν την ίδια παράμετρο, δηλαδή την γεωμετρία του στομίου εισόδου, και οι τιμές αυτών συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$C = \left(1 + \frac{k_{in}}{3}\right)^{-1.5}$$

Η εξίσωση αυτή έχει εξαχθεί συγκρίνοντας τις εξισώσεις (2) και (2B) και λαμβάνοντας υπόψη πως η ροή στην διατομή 2 είναι κρίσιμη (όπου ισχύει $H_1 - z_2 = E_2$, $y_c = 2E_2/3$, $V_2^2/2g = E_2/3$ και $y_c^3 B^2 = Q^2/g$). Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για κιβωτοειδείς οχετούς, παρ' όλα αυτά μπορεί να εφαρμοστεί προσεγγιστικά και σε κυκλικούς οχετούς για να εκτιμηθεί η σχέση των C και k_{in} .

Σχέση Φορτίου-Παροχής για τις περιπτώσεις A1 και A2

Στην περίπτωση A2, ο οχετός δεν μπορεί να προσομοιωθεί ως εκχειλιστής και οι σχέσεις (2), (3) και (4) δεν ισχύουν. Έτσι για να προκύψει μία σχέση μεταξύ των H_1 και Q , εφαρμόζουμε την εξίσωση Bernoulli για το στόμιο εισόδου, τον λαιμό και το στόμιο εξόδου του οχετού, ήτοι

$$H_1 = H_2 + k_{in} \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (5)$$

$$H_2 = H_3 + L\bar{S}_{f(2-3)} \quad (6)$$

$$H_3 = H_4 + k_{out} \frac{Q^2}{2gA_3^2} \quad (7)$$

όπου $\bar{S}_{f(2-3)}$ είναι η μέση υδραυλική κλίση μεταξύ των διατομών 2 και 3, δηλαδή

$$\bar{S}_{f(2-3)} = \frac{S_{f2} + S_{f3}}{2} \quad (8)$$

Η υδραυλική κλίση στις διατομές 2 και 3 δίνεται από εξισώσεις τις

$$Q = \frac{1}{n} A_2 R_2^{2/3} \sqrt{S_{f2}} \quad (9)$$

$$Q = \frac{1}{n} A_3 R_3^{2/3} \sqrt{S_{f3}} \quad (10)$$

όπου $A_2=A(y_2)$, $R_2=R(y_2)$, $A_3=A(y_3)$, $R_3=R(y_3)$ και n ο συντελεστής Manning. Ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους της εξίσωσης (5) εκφράζει τις τοπικές απώλειες φορτίου στην είσοδο ως κλάσμα του κινητικού φορτίου στην διατομή 2. Ομοίως, στην εξίσωση (7), η τιμή των τοπικών απωλειών φορτίου στην έξοδο του οχετού είναι ίση με το κινητικό φορτίο στην διατομή 3 επί τον συντελεστή k_{out} . Ο συντελεστής k_{out} , όπως και ο k_{in} , είναι μικρότερος της μονάδας και σε μία ιδανική εκροή $k_{out}=0$. Στο τεύχος των ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ (και ειδικότερα στα σχήματα 9.2-1, 9.2-2 και 9.2-3) δίνονται οι τιμές του k_{in} συναρτήσει της γεωμετρίας του στομίου εισόδου ενώ στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές του k_{out} βάσει της γεωμετρίας στην έξοδο του οχετού.

Γεωμετρία στομίου εξόδου	k_{out}
Οχετός με έξοδο χωρίς πτερυγότοιχους	0.82
Οχετός με πτερυγότοιχους εξόδου υπό γωνία $\theta = 45^\circ$ (1/1)	0.87
Οχετός με πτερυγότοιχους εξόδου υπό γωνία $\theta = 26^\circ$ (1/2)	0.68
Οχετός με πτερυγότοιχους εξόδου υπό γωνία $\theta = 18^\circ$ (1/3)	0.41
Οχετός με πτερυγότοιχους εξόδου υπό γωνία $\theta = 14^\circ$ (1/4)	0.27

Πίνακας 2: Οι τιμές του k_{out} συναρτῆσει της διαμόρφωσης του στομίου εξόδου

Για να υπολογισθεί το H_1 , η φορά των υπολογισμών γίνεται από τα κατάντη προς τα ανάντη. Για δεδομένες τιμές H_4 , y_4 και Q , είναι δυνατόν μέσω της εξίσωσης (7) να υπολογιστεί το y_3 . Έτσι ο μόνος άρρητος άγνωστος της εξίσωσης (6) είναι το y_2 , διότι τα H_2 , Sf_2 , A_2 και R_2 είναι γνωστές συναρτήσεις αυτού, ενώ το Sf_3 προκύπτει από την σχέση (10). Όταν το y_2 εκτιμηθεί από την σχέση (6) με δοκιμές, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε το H_1 μέσω της εξίσωσης (5)

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία για διάφορες τιμές παροχής, εκτιμώνται οι αντίστοιχες τιμές του ολικού φορτίου στην διατομή 1 και με αυτόν τον τρόπο προκύπτει έμμεσα η καμπύλη $Q=Q(H_1)$. Η χρήση απλών υπολογιστικών λογισμικών (όπως το MS Excel) ενδείκνυται για την υλοποίηση των παραπάνω υπολογισμών. Παρατηρούμε πως στις εξισώσεις (5), (6), (7), (8), (9) και (10), μέσω των οποίων χαράσσεται η καμπύλη $Q=Q(H_1)$, εμπλέκονται παράμετροι που αφορούν όλα τα τμήματα του οχετού. Αυτό επαληθεύει το ότι η ροή A2 ελέγχεται από την έξοδο.

Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται για την ροή A1 με την διαφορά πως αντί της σχέσης (7) εφαρμόζεται η σχέση (11) εάν ο οχετός έχει ορθογωνική διατομή ή η σχέση (12) εάν έχει κυκλική διατομή. Αυτό συμβαίνει διότι, στην περίπτωση A1, το βάθος ροής στην διατομή 3 είναι κρίσιμο ($y_3=y_c$) και συνεπώς,

$$y_3 = y_c = \sqrt[3]{q^2/g} \quad (11)$$

$$y_3 = y_c = D(0.77a^{-3} + 1)^{-0.085} \quad (12)$$

με

$$a = \frac{Q^2}{gD^5}$$

Σχέση Φορτίου-Παροχής για τις περιπτώσεις B1 και B2

Όσον αφορά την κλάση B, ο οχετός λειτουργεί ως οπή σε δεξαμενή όταν η ροή στον λαιμό είναι ελεύθερη και ως κλειστός αγωγός όταν η ροή στον λαιμό είναι βυθισμένη. Στην πρώτη περίπτωση, το ολικό φορτίο ανάντη της υποθετικής οπής υπολογίζεται ως το ύψος νερού πάνω από την οροφή της εισόδου του οχετού με αποτέλεσμα να ισούται με $H_1 - z_2 - D$. Άρα στην περίπτωση των ροών B1 και B2 έχουμε

$$Q = CA\sqrt{2g(H_1 - z_2 - D)} \quad (13)$$

Σε κιβωτοειδή οχετό ύψους D ισχύει $A=BD$ ενώ σε οχετό κυκλικής διατομής διαμέτρου D έχουμε $A=\pi D^2/4$. Ο συντελεστής C της σχέσης (13) εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία του στομίου εισόδου και σχετίζεται με το k_{in} σύμφωνα με την σχέση:

$$C = (1 + k_{in})^{-1/2}$$

Σχέση Φορτίου-Παροχής για τις περιπτώσεις B3 και B4

Στην περίπτωση των ροών B3 και B4, όπου ο οχετός είναι υπό πίεση αγωγός, ισχύει η εξίσωση Bernoulli μεταξύ των διατομών 1 και 4, ήτοι

$$H_1 = H_4 + \Sigma h_f$$

όπου H_4 το ολικό φορτίο στην διατομή 4 και Σh_f οι συνολικές απώλειες φορτίου της ροής. Το Σh_f είναι το άθροισμα τριών όρων: των γραμμικών απωλειών h_f μεταξύ των διατομών 2 και 3 που προκύπτουν από την εξίσωση Manning, των τοπικών απωλειών h_{L2} στην είσοδο και των τοπικών απωλειών h_{L3} στην έξοδο. Άρα

$$\Sigma h_f = h_f + h_{L2} + h_{L3} = \frac{n^2 Q^2 L}{R^{4/3} A^2} + k_{in} \frac{Q^2}{2gA^2} + k_{out} \frac{Q^2}{2gA^2} = \frac{Q^2}{2gA^2} \left(\frac{2gn^2 L}{R^{4/3}} + k_{in} + k_{out} \right)$$

όπου L το μήκος του λαιμού του οχετού, R η υδραυλική ακτίνα, A το εμβαδόν της διατομής, n ο συντελεστής τριβής Manning ενώ k_{in} και k_{out} είναι οι συντελεστές που περιγράφουν κατ'αντιστοιχία τις τοπικές απώλειες φορτίου στα στόμια εισόδου και εξόδου. Τα R και A υπολογίζονται για $y=D$.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως για τις ροές B3 και B4, η σχέση των H_1 και Q δίνεται από την εξίσωση

$$Q = A \sqrt{2g \frac{(H_1 - H_4)}{K}} \quad (14)$$

όπου

$$K = \frac{2gLn^2}{R^{4/3}} + k_{in} + k_{out}$$

Παρατηρούμε πως στην εξίσωση (14) οι παράμετροι H_4 , L , n , k_{in} και k_{out} αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε όλο το μήκος του οχετού. Αυτό συμβαίνει διότι οι ροές B3 και B4 ελέγχονται από την έξοδο του.

Συνοψίζοντας, η συνάρτηση $Q=Q(H_1)$ δεν εξαρτάται από τις συνθήκες κατάντη του στομίου εισροής όταν η ροή ελέγχεται από την είσοδο (ροές A3, A4, B1, B2). Αντιθέτως, όταν η ροή ελέγχεται από την έξοδο (ροές A1, A2, B3, B4), η συνάρτηση $Q=Q(H_1)$ επηρεάζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε ολόκληρο το μήκος του οχετού. Για αυτό τον λόγο, κατά τον σχεδιασμό των οχετών, είναι θεμιτό να επιδιώκεται έλεγχος εισόδου της ροής.

Αλγόριθμος για τον έλεγχο της παροχευτικότητας οχετού

Έχοντας μελετήσει τις διάφορες εξισώσεις $Q=Q(H_1)$ συναρτήσει του προφίλ της ροής, σειρά έχει η παρουσίαση ενός αλγόριθμου μέσω του οποίου ελέγχεται η επάρκεια της διατομής ενός οχετού. Ειδικότερα, με τον αλγόριθμο αυτόν ελέγχεται εάν ένας οχετός με δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (διατομή, κλίση και τραχύτητα) επαρκεί ώστε να παροχευτεί μία ελάχιστη τιμή παροχής Q_{min} όταν η στάθμη της ροής ανάντη του είναι ίση με την στάθμη σχεδιασμού H_{des} . Τα δεδομένα εισόδου του αλγόριθμου αυτού είναι:

- α) Η ελάχιστη αποδεκτή τιμή $Q_{\min}$ της παροχής,
- β) Το υψόμετρο σχεδιασμού H_{des} της στάθμης ανάντη του οχετού,
- γ) Η κατά μήκος κλίση S του οχετού,
- δ) Το ύψος D και το πλάτος B της διατομής εάν ο οχετός είναι κιβωτοειδής ή η διάμετρος D αν ο οχετός είναι κυκλικής διατομής,
- ε) Ο συντελεστής Manning n στον λαιμό του οχετού και το μήκος L του λαιμού
- στ) Η γεωμετρία των στομιών εισόδου και εξόδου
- ζ) Τα υψόμετρα του πυθμένα σε οποιαδήποτε διατομή
- η) Το ολικό φορτίο H_4 και το βάθος ροής y_4 κατάντη του οχετού. Εάν δεν είναι γνωστά, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν από την εξίσωση του Manning θεωρώντας πως η ροή στην διατομή 4 είναι ομοιόμορφη.

Έπειτα, τα βήματα του αλγόριθμου είναι τα παρακάτω:

Βήμα Α

Ελέγχεται εάν η είσοδος του οχετού είναι βυθισμένη για $H_1 = H_{\text{des}}$. Αν $(H_{\text{des}} - z_2)/D \leq 1.2$, η είσοδος είναι ελεύθερη και προχωράμε στο βήμα Β1. Αλλιώς, η είσοδος είναι βυθισμένη και συνεχίζουμε στο βήμα Β2.

Βήμα Β1

Γίνεται η υπόθεση πως η κλίση του οχετού είναι απότομη και πως ο έλεγχος της ροής γίνεται από την είσοδο. Στην συνέχεια, γίνεται υπολογισμός της παροχής $Q^{(0)}$ του οχετού για $H_1 = H_{\text{des}}$ χρησιμοποιώντας την κατάλληλη από τις εξισώσεις (2), (3) και (4). Συνεχίζουμε στο βήμα Γ1.

Βήμα Γ1

Βάσει του $Q^{(0)}$ υπολογίζεται το κρίσιμο $y_c^{(0)}$ και το ομοιόμορφο $y_0^{(0)}$ βάθος. Εάν $y_c^{(0)} > y_0^{(0)}$, η υπόθεση της απότομης κλίσης επαληθεύεται και οι τιμές των $Q^{(0)}$, $y_0^{(0)}$ και $y_c^{(0)}$ που υπολογίστηκαν στα βήματα Β1 και Γ1 είναι ορθές. Προχωράμε στο βήμα Δ1-1. Αντίθετα, αν $y_c^{(0)} < y_0^{(0)}$, η κλίση είναι ήπια και η ροή ελέγχεται από την έξοδο της. Σε αυτή την περίπτωση οι τιμές των $Q^{(0)}$, $y_0^{(0)}$ και $y_c^{(0)}$ είναι εσφαλμένες με αποτέλεσμα να τις απορρίπτουμε και να προχωράμε στο βήμα Δ1-2.

Βήμα Δ1-1

Εάν $y_4 < D$, το προφίλ της ροής είναι το Α3 και ένα υδραυλικό άλμα θα συμβεί στα κατάντη του οχετού. Αυτή η περίπτωση είναι η πιο επιθυμητή. Αλλιώς αν $y_4 > D$, το προφίλ της ροής είναι το Α4 και ένα πιθανό υδραυλικό άλμα θα συμβεί εντός του λαιμού του οχετού. Σε κάθε περίπτωση προχωράμε στο βήμα Ζ1.

Βήμα Δ1-2

Υποθέτουμε πως η παροχή Q του οχετού ισούται με μία τιμή $Q^{(1)}$ και υπολογίζουμε το αντίστοιχο $y_c^{(1)}$. Αν $y_4 > y_c^{(1)}$ τότε το προφίλ είναι το Α2 και το βάθος y_3 προκύπτει από την σχέση (7). Αλλιώς εάν $y_4 < y_c^{(1)}$, ισχύει $y_3 = y_c^{(1)}$, το προφίλ είναι το Α1 και το y_3 προκύπτει από την εξίσωση (11) ή (12) αναλόγως του σχήματος της διατομής. Σε κάθε περίπτωση προχωράμε στο βήμα Ε1.

Βήμα Ε1

Υπολογίζουμε, μέσω των σχέσεων (5) και (6), το $H_1^{(1)}$ που αντιστοιχεί στην παροχή $Q^{(1)}$. Αν $H_1^{(1)} > H_{\text{des}}$, τότε επιστρέφουμε στο βήμα Δ1-2 όπου δοκιμάζουμε μία νέα τιμή $Q^{(2)}$ της παροχής μικρότερη της $Q^{(1)}$ (δηλαδή στο βήμα Δ1-2 θέτουμε $Q^{(1)} \leftarrow Q^{(2)}$). Εάν $H_1^{(1)} < H_{\text{des}}$, επιστρέφουμε και πάλι στο βήμα Δ1-2 όπου η νέα τιμή $Q^{(2)}$ της παροχής που δοκιμάζουμε είναι μεγαλύτερη της $Q^{(1)}$. Τέλος, αν $H_1^{(1)} = H_{\text{des}}$, οι τιμές της παροχής $Q^{(1)}$ και του κρίσιμου βάθους $y_c^{(1)}$ είναι ορθές με αποτέλεσμα να προχωράμε στο βήμα ΣΤ1.

Βήμα ΣΤ1

Το ορθό προφίλ είναι αυτό που εκτιμήθηκε κατά την τελευταία εκτέλεση του βήματος Δ1-2. Δηλαδή, αν $y_4 < y_c^{(1)}$, το προφίλ είναι το A1 (όπου το $y_c^{(1)}$ αντιστοιχεί στην ορθή τιμή παροχής $Q^{(1)}$). Αλλιώς είναι το A2. Επιπλέον, πρέπει να ισχύει $y_0^{(1)} > y_c^{(1)}$ αφού η κλίση είναι ήπια. Προχωράμε στο βήμα Z1.

Βήμα Z1

Εάν $Q > Q_{\min}$ και ταυτόχρονα $y_0 < 0.7D$, η διατομή του κιβωτοειδούς οχετού ύψους D και πλάτους B (ή διαμέτρου D) είναι επαρκής για τις δεδομένες τιμές κατά μήκους κλίσης S και τραχύτητας n . Διαφορετικά απαιτούνται μεγαλύτερες διαστάσεις B και D για τα συγκεκριμένα S και n ώστε ο οχετός να παραλάβει την ελάχιστη απαιτούμενη παροχή $Q_{\min}$ όταν $H_1 = H_{\text{des}}$. Ο αλγόριθμος τερματίζει.

Βήμα Β2

Κάνουμε την υπόθεση πως $y_0 < D$, δηλαδή θεωρούμε πως ο λαιμός του οχετού είναι ελεύθερος και η ροή ελέγχεται από την είσοδο. Έτσι υπολογίζουμε την παροχή του οχετού $Q^{(0)}$ από την εξίσωση (13) για $H_1 = H_{\text{des}}$ και τις αντίστοιχες τιμές του ομοιόμορφου και κρίσιμου βάθους $y_0^{(0)}$ και $y_c^{(0)}$. Προχωράμε στο βήμα Γ2.

Βήμα Γ2

Αν $y_0^{(0)} < D$, όντως ο λαιμός του οχετού είναι ελεύθερος και οι τιμές των $Q^{(0)}$, $y_0^{(0)}$ και $y_c^{(0)}$ είναι ορθές. Συνεχίζουμε στο βήμα Δ2-1. Αντίθετα, εάν $y_0^{(0)} > D$, ο λαιμός του οχετού είναι εν τέλει βυθισμένος και η ροή ελέγχεται από την έξοδο. Έτσι οι τιμές $Q^{(0)}$, $y_0^{(0)}$ και $y_c^{(0)}$ απορρίπτονται. Σε αυτή την περίπτωση, η ορθή τιμή της παροχής $Q^{(1)}$ υπολογίζεται από την σχέση (14) για $H_1 = H_{\text{des}}$ ενώ από την εξίσωση Manning προκύπτει η ορθή τιμή του ομοιόμορφου βάθους $y_0^{(1)}$. Πρέπει να ισχύει $y_0^{(1)} > D$ (διαφορετικά έγινε κάποιο λάθος) και συνεχίζουμε στο βήμα Δ2-2.

Βήμα Δ2-1

Εάν $y_4 < y_c^{(0)}$, δημιουργείται το προφίλ της περίπτωσης B1. Αλλιώς αν $y_4 > y_c^{(0)}$, εμφανίζεται το προφίλ B2 και υδραυλικό άλμα σχηματίζεται στην έξοδο του οχετού. Σε κάθε περίπτωση, προχωράμε στο βήμα E2.

Βήμα Δ2-2

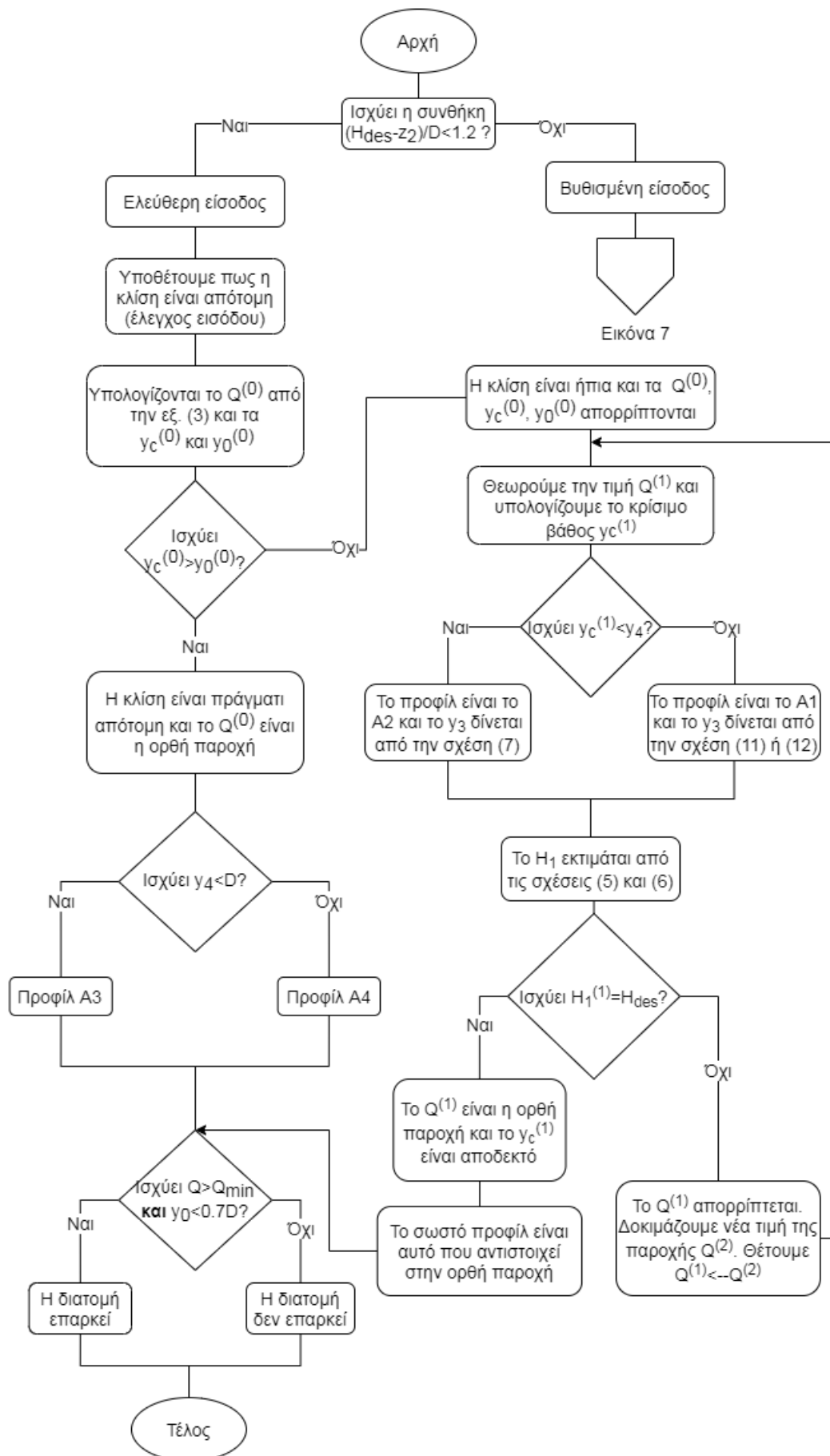
Εάν $y_4 < D$, δημιουργείται το προφίλ B3. Αλλιώς αν $y_4 > D$, εμφανίζεται το προφίλ B4 και η έξοδος του οχετού είναι βυθισμένη. Σε κάθε περίπτωση, προχωράμε στο βήμα E2. Σημειώνεται πως οι περιπτώσεις B3 και B4 πρέπει να αποφεύγονται στον σχεδιασμό οχετών.

Βήμα E2

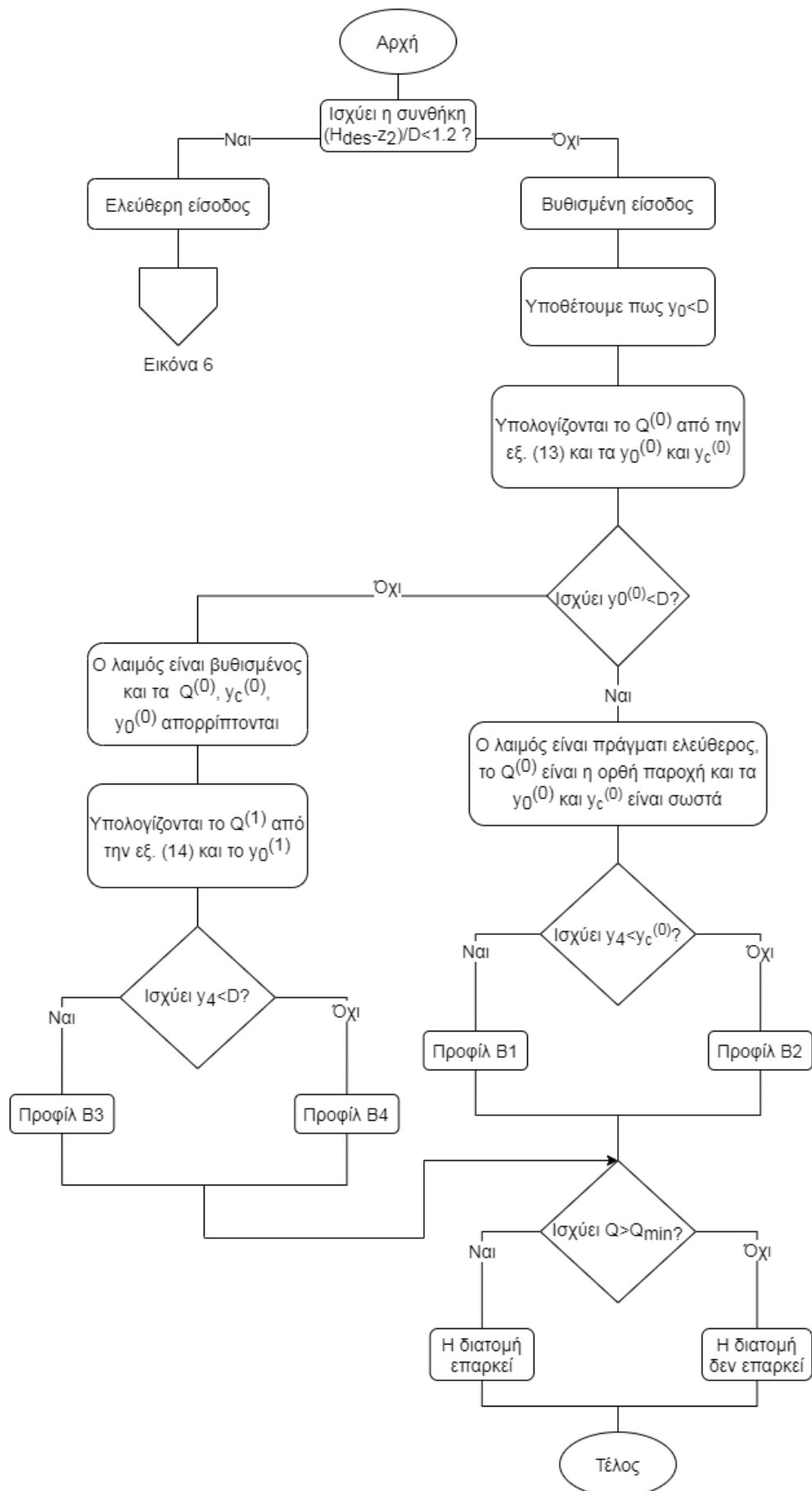
Αν $Q > Q_{\min}$, η διατομή του κιβωτοειδούς οχετού ύψους D και πλάτους B (ή διαμέτρου D) είναι επαρκής. Δηλαδή για $H_1 = H_{\text{des}}$, ο οχετός μεταφέρει παροχή Q μεγαλύτερη της ελάχιστης απαιτούμενης. Διαφορετικά απαιτείται μεγαλύτερη διατομή για να παραλάβει την ελάχιστη απαιτούμενη παροχή $Q_{\min}$ όταν $H_1 = H_{\text{des}}$. Ο αλγόριθμος τερματίζει.

Σχόλιο

Με τον παραπάνω αλγόριθμο είναι δυνατόν είτε να ελεγχθεί η επάρκεια ενός υφιστάμενου οχετού είτε να ελεγχθεί εάν ένας νέος προς κατασκευή οχετός έχει τα κατάλληλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για να μεταφέρει την επιθυμητή παροχή $Q_{\min}$ χωρίς να υπερβεί η ανάντη στάθμη ένα δεδομένο όριο H_{des} . Τέλος, η παροχή του οχετού δεν πρέπει να υπερβαίνει κατά πολύ το $Q_{\min}$ γιατί κάτι τέτοιο σημαίνει υπερδιαστασιόλογηση του οχετού.



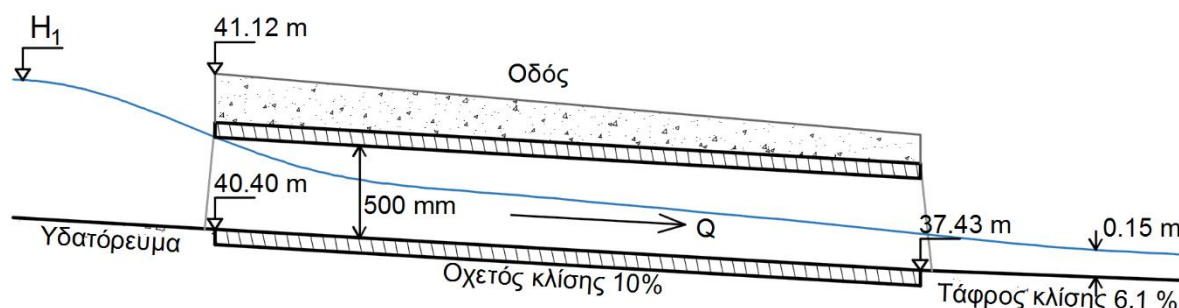
Εικόνα 6: Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου όταν η είσοδος είναι ελεύθερη.



Εικόνα 7: Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου όταν η είσοδος είναι βυθισμένη.

Αριθμητικό παράδειγμα 1

Υδατόρευμα στην περιοχή «Κουμκό» της Μυτιλήνης διασταυρώνεται με οδό (εικόνα 8). Για αυτό τον λόγο, οχετός παραλαμβάνει την ροή του υδατορεύματος και την μεταφέρει υπογείως κάτω από την οδό. Ο οχετός αποτελείται από τσιμεντοσωλήνα ($n=0.015$) εσωτερικής διαμέτρου 500 mm και εκβάλλει σε μία τάφρο με επένδυση από σκυρόδεμα κλίσης 6.1% η οποία έχει ορθογωνική διατομή βάθους 90 cm και πλάτους 85 cm. Η κλίση του οχετού εκτιμάται σε 10% διότι ο πυθμένας του στα άκρα του έχει υψόμετρο 40.40 m και 37.43 m ενώ το μήκος του υπολογίζεται στα 29.5 m. Στην είσοδο και στην έξοδο του οχετού δεν έχουν διαμορφωθεί πτερυγότοιχοι και επομένως η μετάβαση της ροής από το υδατόρευμα στον οχετό και από αυτόν στην τάφρο γίνεται απότομα. Έπειτα, από την υδρολογική μελέτη προκύπτει πως η παροχή του υδατορεύματος για $T=50$ έτη είναι $Q=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Το υψόμετρο της οδού πάνω από το ανάντη άκρο του οχετού είναι 41.12 m. Να εκτιμηθεί εάν ο οχετός με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω επαρκεί για να μεταφέρει την παροχή των $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ χωρίς η ροή του υδατορεύματος να υπερχειλίζει πάνω στην οδό.



Εικόνα 8: Η μηκοτομή του προβλήματος. Τα μήκη δεν είναι υπό κλίμακα. Η υψομετρική αφετηρία είναι η στάθμη της θάλασσας. Το προφίλ της ροής εντάσσεται στην περίπτωση B1.

Επίλυση

Για να εξετάσουμε εάν ο οχετός αναγκάζει την ανάντη ροή να κινηθεί πάνω στην οδό υποθέτουμε την δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή πως $H_{des}=41.12 \text{ m}$. Κάνοντας χρήση του αλγόριθμου που παρουσιάστηκε παραπάνω, θα υπολογίσουμε την παροχή Q που προκύπτει για $H_1=H_{des}=41.12 \text{ m}$ και θα ελέγξουμε εάν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη των $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Αν $Q \geq 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, ο οχετός επαρκεί και η ροή δεν κινείται πάνω στην οδό. Διαφορετικά, απαιτείται επανασχεδιασμός του οχετού. Εκτελούνται, λοιπόν, τα εξής βήματα:

Βήμα Α

Έχουμε $\lambda=(H_{des}-z_2)/D=(41.12-40.40)/0.5=1.44$ και επομένως η είσοδος είναι βυθισμένη.

Βήμα Β2

Υποθέτουμε πως το ομοιόμορφο βάθος στον οχετό είναι μικρότερο του D και άρα η παροχή υπολογίζεται από την σχέση (13). Αφού δεν υπάρχουν πτερυγότοιχοι, θεωρούμε πως $C=0.7$ και συνεπώς ισχύει

$$\begin{aligned} Q &= C \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2g(H_1 - z_2 - D)} = \\ &= 0.7 \frac{\pi \cdot 0.5^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot (41.12 - 40.40 - 0.5)} = 0.29 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Έπειτα, από την εξίσωση του Manning, για κυκλική διατομή με $Q=0.29 \text{ m}^3/\text{s}$, $n=0.015$, $S=0.1$ και $D=0.5 \text{ m}$, προκύπτει πως το ομοιόμορφο βάθος y_0 είναι 0.18 m . Επιπλέον από την εξίσωση

$$y_c = D(0.77a^{-3} + 1)^{-0.085}$$

το κρίσιμο βάθος y_c στον οχετό προκύπτει ίσο με 0.37 m .

Βήμα Γ2

Επομένως, ισχύει πράγματι $y_0 < D$. Άρα για την δεδομένη τιμή παροχής ο λαιμός είναι ελεύθερος και η ροή ελέγχεται από την είσοδο. Επιπλέον, επαληθεύεται πως, για $H_1=41.12 \text{ m}$, η τιμή της παροχής στον οχετό είναι $0.29 \text{ m}^3/\text{s}$.

Βήμα Δ2-1

Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Manning στην τάφρο προκύπτει πως το ομοιόμορφο βάθος για ορθογωνική διατομή με $Q=0.29 \text{ m}^3/\text{s}$, $n=0.015$, $S=0.061$ και $B=0.85 \text{ m}$ είναι 0.11 m . Άρα $y_4=0.11 \text{ m} < y_c=0.37 \text{ m}$ με αποτέλεσμα στον οχετό για $Q=0.29 \text{ m}^3/\text{s}$ να παρουσιάζεται η ροή B1.

Βήμα Ε2

Έχουμε $Q < 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και συνεπώς ο οχετός χρειάζεται επανασχεδιασμό. Με άλλα λόγια, όταν η στάθμη ανάντη του οχετού έχει φτάσει στην μέγιστη αποδεκτή τιμή της, η παροχή σε αυτόν είναι μόλις $0.29 \text{ m}^3/\text{s}$, πολύ μικρότερη της απαιτούμενης τιμής. Άρα εάν η παροχή του υδατορεύματος γίνει ίση με $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, η ροή υπερπηδά τον οχετό και μεγάλο μέρος της κινείται πάνω στην οδό.

Σχόλιο

Εάν επιθυμούμε να υπολογίσουμε την στάθμη H_1 ανάντη του οχετού όταν $Q=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, θεωρούμε πως από το οχετό διέρχεται παροχή Q_1 και πάνω από την οδό διέρχεται παροχή Q_2 . Η παροχή Q_2 δίνεται από την σχέση του ορθογωνικού εκχειλιστή, ήτοι

$$Q_2 = cb(H_1 - z_0)^{3/2} \quad (15)$$

όπου c είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό επένδυσης της οδού και από την τιμή της διαφοράς $H_1 - z_0$. Ισχύει $c \approx 1.65$. Έπειτα, στην σχέση (15) z_0 είναι το υψόμετρο της οδού πάνω από την είσοδο του οχετού (στο παρόν πρόβλημα $z_0=41.12 \text{ m}$) και b είναι το πλάτος της όχθης του υδατορεύματος στο σημείο συμβολής του με την οδό. Έτσι για διάφορες τιμές του H_1 , υπολογίζουμε από τον παραπάνω αλγόριθμο τα αντίστοιχα Q_1 και από την σχέση (15) τα αντίστοιχα Q_2 . Η τιμή του H_1 για την οποία έχουμε $Q_1 + Q_2 = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ είναι το υψόμετρο της στάθμης που θα εμφανιστεί ανάντη του οχετού όταν $Q=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Αριθμητικό παράδειγμα 2

Έστω πως ο κυκλικός οχετός του προηγούμενου παραδείγματος αντικαθίσταται από οχετό ορθογωνικής διατομής. Εάν το ύψος της διατομής αυτής παραμείνει $D=0.5 \text{ m}$, υπολογίστε το πλάτος της ώστε η ροή να μην υπερχειλίζει πάνω στην οδό όταν $Q=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Υποθέστε πως ο νέος οχετός είναι από σκυρόδεμα και η κλίση του παραμένει 10%.

Επίλυση

Ο υπολογισμός του πλάτους B θα γίνει με δοκιμές. Η τιμή του B για την οποία έχουμε $Q=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ είναι η κατάλληλη τιμή. Υποθέτουμε αρχικά πως $B=4 \text{ m}$. Ο αριθμός λ δεν μεταβάλλεται

και επομένως ξεκινάμε από το βήμα B2 γνωρίζοντας πως η είσοδος του οχετού είναι βυθισμένη.

Βήμα B2

Υποθέτουμε πως $y_0 < D$ και από την σχέση (13) λαμβάνουμε

$$Q = CBD\sqrt{2g(H_1 - z_2 - D)} = \\ = 0.7 \cdot 0.5 \cdot 4\sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot (41.12 - 40.40 - 0.5)} = 2.91 \text{ m}^3/\text{s}$$

Έπειτα, υπολογίζουμε το ομοιόμορφο και το κρίσιμο βάθος. Έχουμε $y_0 = 0.14 \text{ m}$ και $y_c = 0.38 \text{ m}$.

Βήμα Γ2

Ισχύει πως $y_0 < D$ και οι τιμές των Q , y_0 και y_c είναι ορθές. Άρα όταν $H_1 = 41.12 \text{ m}$ ο οχετός έχει παροχή $2.91 \text{ m}^3/\text{s}$. Ο λαιμός είναι ελεύθερος και η ροή τελεί υπό έλεγχο εισόδου.

Βήμα Δ2-1

Από το προηγούμενο πρόβλημα γνωρίζουμε πως $y_4 = 0.11 \text{ m}$. Συνεπώς $y_4 < y_c$ και στον οχετό παρουσιάζεται το προφίλ B1.

Βήμα E2

Έχουμε $Q > 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και επομένως το πλάτος των 4 m είναι αποδεκτό. Εάν επιθυμούμε να μειώσουμε το χρηματικό κόστος της επιδιόρθωσης του οχετού μπορούμε να μειώσουμε το πλάτος στα 3.5 m ώστε η παροχή του οχετού, για $H_1 = 41.12 \text{ m}$, να μειωθεί στην αποδεκτή τιμή των $2.55 \text{ m}^3/\text{s}$.

Αριθμητικό παράδειγμα 3

Κιβωτοειδής οχετός με διατομή ύψους 1 m και πλάτους 2 m διέρχεται κάτω από επίχωμα. Ο οχετός είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα ($n=0.015$) και έχει μήκος 10 m . Το υψόμετρο του πυθμένα στην είσοδο και στην έξοδο του οχετού είναι 50.10 m και 50 m αντίστοιχα. Εάν ο οχετός πρέπει να παροχετεύει $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ χωρίς το υψόμετρο της στάθμης στα ανάντη του να υπερβαίνει τα 50.70 m , ελέγξτε την επάρκεια του. Το βάθος ροής κατάντη του οχετού είναι 0.50 m . Στο στόμιο εισόδου έχει διαμορφωθεί μεταβατικό τμήμα για την ομαλή προσαρμογή της ροής αλλά στο στόμιο εξόδου δεν έχουν κατασκευαστεί πτερυγότοιχοι.

Επίλυση

Βήμα A

Υπολογίζουμε τον αριθμό λ για $H_1 = H_{\text{des}} = 50.70 \text{ m}$. Έχουμε $\lambda = (50.70 - 50.10)/1 = 0.6$, δηλαδή $\lambda < 1.2$ και επομένως η είσοδος είναι ελεύθερη.

Βήμα B1

Υποθέτουμε πως η κλίση του οχετού είναι απότομη. Έτσι υπολογίζουμε την παροχή από την εξίσωση (2). Έχουμε

$$Q = 0.9 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 9.81 \cdot 2 (50.7 - 50.1)^{1.5} = 1.42 \text{ m}^3/\text{s}$$

Τέθηκε $C=0.9$ διότι η ροή εισρέει ομαλά στον οχετό.

Βήμα Γ1

Έπειτα, η κλίση του οχετού είναι $S=(50.1-50.0)/10=1\%$. Έτσι, με την εξίσωση του Manning υπολογίζεται πως $y_0=0.29$ m ενώ από την εξίσωση $Fr(y_c)=1$ το κρίσιμο βάθος προκύπτει 0.37 m. Συνεπώς $y_0 < y_c$ και η κλίση είναι πράγματι απότομη ενώ οι τιμές των Q , y_0 και y_c είναι σωστές.

Βήμα Δ1-1

Στην συνέχεια έχουμε $y_4 < D$ και εμφανίζεται το προφίλ A3. Η ροή ελέγχεται από την είσοδο της και το υδραυλικό άλμα συμβαίνει κατάντη του οχετού, πράγμα θεμιτό.

Βήμα Z-1

Ισχύει $Q > 1.4$ m³/s και ταυτόχρονα $y_0/D=0.29 < 0.7$. Συνεπώς ο οχετός έχει σχεδιαστεί σωστά και αποκτά την επιθυμητή παροχή όταν $H_{des}=50.70$ m.

Αριθμητικό παράδειγμα 4

Εάν ο κιβωτοειδής οχετός του προηγούμενου παραδείγματος είχε κλίση 0.1% και ίδιο υψόμετρο πυθμένα στην είσοδο του, θα μπορούσε να μεταφέρει κατ' ελάχιστο την παροχή των 1.4 m³/s για ανάντη στάθμη με υψόμετρο 50.70 m;

Επίλυση

Ο αριθμός λ δεν επηρεάζεται από την κλίση του οχετού. Έτσι και σε αυτή την περίπτωση η είσοδος του οχετού είναι ελεύθερη. Ξεκινάμε από το βήμα Γ1 (τα βήματα A και B1 είναι ίδια με αυτά του προηγούμενου παραδείγματος).

Βήμα Γ1

Για $Q=1.42$ m³/s και $S=0.1\%$, από την εξίσωση του Manning προκύπτει πως $y_0=0.63$ m ενώ το κρίσιμο βάθος παραμένει 0.37 m. Ισχύει $y_0 > y_c$ και η κλίση είναι εν τέλει ήπια. Έτσι απορρίπτεται η τιμή της παροχής Q του βήματος B1 του παραδείγματος 3, όπως και τα αντίστοιχα y_0 και y_c .

Βήμα Δ1-2

Υποθέτουμε πως $Q=1$ m³/s και η αντίστοιχη τιμή του κρίσιμου βάθους είναι $y_c=0.29$ m. Έχουμε $y_c < y_4$ με αποτέλεσμα η ροή να εμπίπτει στην περίπτωση A2. Έτσι το y_3 προκύπτει από την σχέση (7). Εάν θεωρήσουμε πως το κινητικό φορτίο στην διατομή 4 έχει μικρή τιμή και πως $k_{out}=1$, η εξίσωση (7) δίνει $y_3=y_4=0.50$ m.

Βήμα E1

Μέσω της σχέσης (6), υπολογίζεται πως όταν $Q=1$ m³/s, ισχύει: $y_2=0.5$ m, $E_2=0.55$ m, ενώ το κινητικό φορτίο στην διατομή 2 είναι 0.05 m. Θεωρώντας πως στην είσοδο $k_{in}=0.2$, έχουμε $h_{L2}=0.01$ m. Άρα από την εξίσωση (5) λαμβάνουμε $H_1 = z_2 + E_2 + h_{L2} = 50.10 + 0.55 + 0.01 = 50.64 < H_{des}$. Οπότε επιστρέφουμε στο βήμα Δ1-2 και δοκιμάζουμε μεγαλύτερη τιμή παροχής.

Βήμα Δ1-2

Υποθέτουμε πως $Q=1.25$ m³/s. Έτσι $y_c=0.34$ m και η ροή εμφανίζει το προφίλ A2. Ισχύει ξανά $y_3=y_4=0.50$ m.

Βήμα E1

Με τις σχέσεις (5) και (6), υπολογίζεται πως $E_2=0.58$ m, $y_2=0.5$ m και $h_{L2}=0.02$ m με αποτέλεσμα να έχουμε $H_1=50.10+0.58+0.02=50.70\text{m}=H_{des}$. Άρα η παροχή του οχετού είναι

πράγματι $Q=1.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ενώ οι ορθές τιμές των y_0 και y_c είναι κατ' αντιστοιχία 0.58 m και 0.34 m. Παρατηρούμε πως $y_0 > y_c$, γεγονός που επιβεβαιώνει πως η κλίση του οχετού είναι ήπια.

Βήμα ΣΤ1

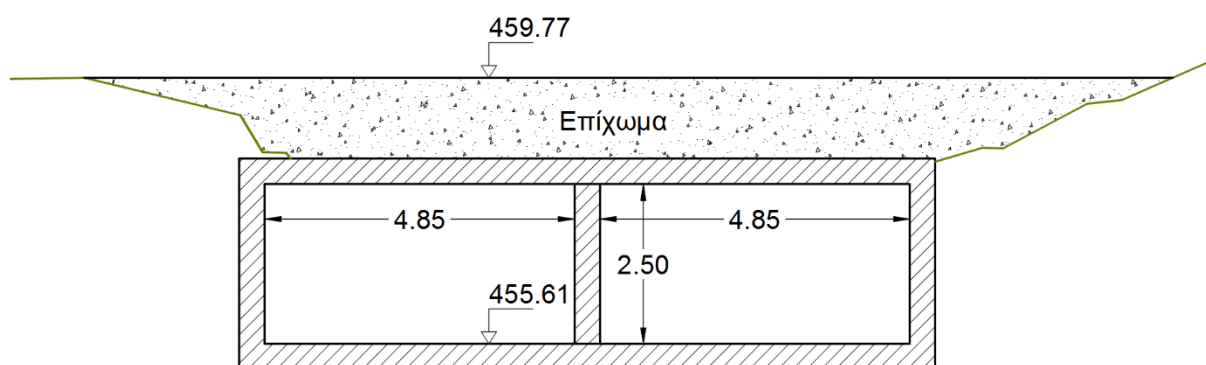
Το σωστό προφίλ της ροής είναι το A2 και υφίσταται έλεγχος εξόδου.

Βήμα Ζ1

Ισχύει $Q < 1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ και συνεπώς ο οχετός δεν επαρκεί για να μεταφέρει την επιθυμητή παροχή των $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ όταν $H_1=50.70 \text{ m}$. Όπως είναι λογικό, η μείωση της κλίσης του οχετού μείωσε την παροχευτική ικανότητα του (από $1.42 \text{ m}^3/\text{s}$ σε $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$).

Αριθμητικό παράδειγμα 5

Σε αγροτική περιοχή της Καλλονής Λέσβου πρόκειται να κατασκευαστεί δίδυμος κιβωτοειδής οχετός μήκους 3 m και κλίσης 5% ώστε ένα υδατόρευμα να διέρχεται μέσω ενός επιχώματος. Η καθαρή διατομή κάθε πλαισίου του οχετού έχει πλάτος 4.85 m και ύψος 2.5 m. Ο πυθμένας στην είσοδο του οχετού έχει υψόμετρο 455.61 m ενώ η στέψη του επιχώματος έχει υψόμετρο 459.77 m. Σχεδιάστε την καμπύλη που συνδέει την παροχή με την στάθμη ύδατος ανάντη του οχετού μέχρι η ροή να υπερπηδήσει το επίχωμα. Τι τιμή έχει η ανάντη στάθμη για παροχή $41 \text{ m}^3/\text{s}$; Στην είσοδο του οχετού έχουμε $C=0.63$ ενώ για τον οχετό $n=0.015$.



Εικόνα 9: Η διατομή στην είσοδο του δίδυμου κιβωτοειδούς οχετού. Φαίνονται οι εσωτερικές διαστάσεις του οχετού σε m. Με πράσινο χρώμα φαίνεται η γραμμή του φυσικού εδάφους.

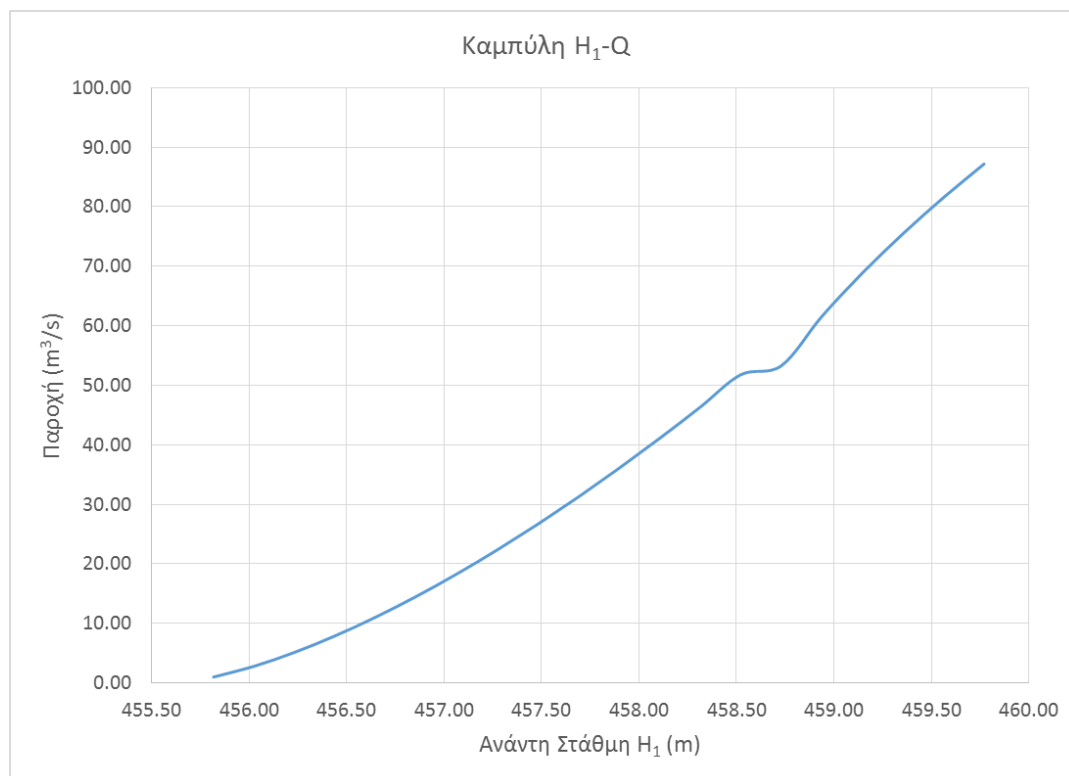
Επίλυση

Για να προκύψει η καμπύλη $Q-H_1$ πρέπει να υπολογιστεί η παροχή που προκαλείται από κάθε τιμή στάθμης στο διάστημα $[455.61, 459.77]$. Επειδή υπάρχουν άπειρες τιμές σε αυτό το διάστημα, οι υπολογισμοί θα γίνουν για 20 τιμές που ισαπέχουν κατά 21 cm. Καθώς μεταβάλλεται η στάθμη H_1 ανάντη του οχετού, είναι δυνατόν το προφίλ της ροής και η θέση του ελέγχου να μεταβληθούν. Για να μελετηθεί αυτό πρέπει να συμπληρωθεί ο παρακάτω πίνακας.

H_1 (m)	λ	Είσοδος;	Υπόθεση	Εξίσ	Q (m^3/s)	y_c (m)	y_0 (m)	Επαληθεύεται η υπόθεση;	Προφίλ
455.82	0.08	Ελεύθερη	$y_c > y_0$	(2)	0.99	0.10	0.05	TRUE	A3 ή A4
456.03	0.17	Ελεύθερη	$y_c > y_0$	(2)	2.80	0.20	0.09	TRUE	A3 ή A4
456.23	0.25	Ελεύθερη	$y_c > y_0$	(2)	5.14	0.31	0.14	TRUE	A3 ή A4
456.44	0.33	Ελεύθερη	$y_c > y_0$	(2)	7.91	0.41	0.18	TRUE	A3 ή A4
456.65	0.42	Ελεύθερη	$y_c > y_0$	(2)	11.05	0.51	0.22	TRUE	A3 ή A4

H ₁ (m)	λ	Είσοδος;	Υπόθεση	Εξίσ	Q (m ³ /s)	y _c (m)	y ₀ (m)	Επαληθεύεται η υπόθεση;	Προφίλ
456.86	0.50	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	14.53	0.61	0.26	TRUE	A3 ή A4
457.07	0.58	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	18.30	0.71	0.30	TRUE	A3 ή A4
457.27	0.67	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	22.36	0.82	0.34	TRUE	A3 ή A4
457.48	0.75	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	26.69	0.92	0.37	TRUE	A3 ή A4
457.69	0.83	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	31.25	1.02	0.41	TRUE	A3 ή A4
457.90	0.92	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	36.06	1.12	0.45	TRUE	A3 ή A4
458.11	1.00	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	41.08	1.22	0.49	TRUE	A3 ή A4
458.31	1.08	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	46.33	1.32	0.53	TRUE	A3 ή A4
458.52	1.16	Ελεύθερη	y _c >y ₀	(2)	51.77	1.43	0.56	TRUE	A3 ή A4
458.73	1.25	Βυθισμένη	y ₀ <D	(13)	53.28	1.45	0.57	TRUE	B1 ή B2
458.94	1.33	Βυθισμένη	y ₀ <D	(13)	61.58	1.60	0.63	TRUE	B1 ή B2
459.15	1.41	Βυθισμένη	y ₀ <D	(13)	68.88	1.73	0.68	TRUE	B1 ή B2
459.35	1.50	Βυθισμένη	y ₀ <D	(13)	75.48	1.83	0.72	TRUE	B1 ή B2
459.56	1.58	Βυθισμένη	y ₀ <D	(13)	81.54	1.93	0.75	TRUE	B1 ή B2
459.77	1.66	Βυθισμένη	y ₀ <D	(13)	87.19	2.02	0.78	TRUE	B1 ή B2

Έτσι στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε πως εντέλει, για οποιαδήποτε τιμή του H₁, η ροή ελέγχεται από την είσοδο και ο λαιμός είναι ελεύθερος. Έπειτα, στην τελευταία στήλη του πίνακα, έχουν συμπληρωθεί δύο τύποι προφίλ ανά στάθμη. Αυτό συμβαίνει διότι ο οριστικός καθορισμός του προφίλ (A3 έναντι A4 και B1 έναντι B2) προϋποθέτει την γνώση του βάθους ροής στα κατάντη του οχετού. Στην συνέχεια, βάσει του πίνακα, σχεδιάζουμε την καμπύλη H₁-Q (εικόνα 10) και παρατηρούμε πως για να διέρχεται παροχή 41 m³/s από τον οχετό πρέπει η στάθμη στα ανάντη του να έχει υψόμετρο ίσο με 458.11 m. Η μικρή διαταραχή που παρατηρείται στην καμπύλη H₁-Q οφείλεται στην βύθιση της εισόδου του οχετού.



Εικόνα 10: Η σχέση της στάθμης ανάντη του οχετού με την παροχή.

Αριθμητικό παράδειγμα 6

Διεξάγετε έλεγχο ταχυτήτων για τους οχετούς των παραδειγμάτων 3 και 4. Υποθέστε πως το σκυρόδεμα αντέχει τιμές ταχύτητας της ροής μέχρι 6 m/s.

Επίλυση

Έλεγχος για παράδειγμα 3

Στον οχετό για παροχή $Q=1.42 \text{ m}^3/\text{s}$ εμφανίζεται το προφίλ A3. Επομένως, η ροή στην είσοδο του οχετού είναι κρίσιμη, δηλαδή $y_2=y_c=0.37 \text{ m}$. Συνεπώς η ταχύτητα της ροής στην είσοδο είναι

$$V_2 = \frac{Q}{By_c} = \frac{1.42 \text{ m}^3/\text{s}}{2\text{m} \cdot 0.37\text{m}} = 1.92 \text{ m/s}$$

Για να υπολογίσουμε την ταχύτητα στην έξοδο (διατομή 3) πρέπει να γνωρίζουμε το βάθος ροής εκεί. Ο προσδιορισμός του βάθους y_3 επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli μεταξύ των διατομών 2 και 3, δηλαδή την σχέση (6) την οποία και ξαναγράφουμε εδώ:

$$H_2 = H_3 + L \frac{S_{f2} + S_{f3}}{2}$$

Η σχέση αυτή για την περίπτωση του προφίλ A3 έχει ως άρρητο άγνωστο το y_3 διότι το ολικό φορτίο στην διατομή 3 και η κλίση τριβής στην ίδια διατομή είναι συναρτήσεις του y_3 , ήτοι $H_3=H_3(y_3)$ και $S_{f3}=S_{f3}(y_3)$. Ειδικότερα η παραπάνω εξίσωση για κιβωτοειδή οχετό μπορεί να πάρει την εξής πιο αναπτυγμένη μορφή:

$$LS + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = y_3 + \frac{Q^2}{2gB^2y_3^2} + \frac{Ln^2Q^2}{2B^{10/3}} \left[\frac{(B+2y_2)^{4/3}}{y_2^{10/3}} + \frac{(B+2y_3)^{4/3}}{y_3^{10/3}} \right]$$

Με δοκιμές προκύπτει πως $y_3=0.3 \text{ m}$ (αναζητούσαμε την υπερκρίσιμη ρίζα της εξίσωσης), με αποτέλεσμα να έχουμε

$$V_3 = \frac{Q}{By_3} = \frac{1.42 \text{ m}^3/\text{s}}{2\text{m} \cdot 0.3\text{m}} = 2.37 \text{ m/s}$$

Οι τιμές των 1.92 m/s και 2.37 m/s είναι ικανοποιητικές, δεδομένου πως το ανώτατο αποδεκτό όριο είναι η τιμή των 6 m/s.

Έλεγχος για παράδειγμα 4

Από την επίλυση προέκυψε πως $Q=1.25 \text{ m}^3/\text{s}$. Επιπλέον, κατά την διαδικασία επίλυσης του προφίλ A2, το βάθος ροής στην είσοδο και στην έξοδο του οχετού υπολογίστηκε ίσο με 0.5 m. Άρα

$$V_2 = V_3 = \frac{Q}{By_2} = \frac{Q}{By_3} = \frac{1.25 \text{ m}^3/\text{s}}{2\text{m} \cdot 0.5\text{m}} = 1.25 \text{ m/s}$$

Η παραπάνω τιμή ταχύτητας είναι αποδεκτή.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, Τεύχος 8: Αποχέτευση-Στράγγιση-Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ), Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας & Δημοσίων Έργων, Νοέμβριος 2020

Σημειώσεις υδραυλικής ανοικτών αγωγών, Α. Δαμασκηνίδου Γεωργιάδου-Ε. Σιδηρόπουλος, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη 1996

Μεταφρασμένα

Μηχανική Ρευστών με τεχνικές εφαρμογές, R. Daugherty, J. Franzini & E. Finnemore, 2007 (ISBN 960-330-332-1)

Ξενόγλωσση

The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction (Basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures), Hubert Chanson, Department of Civil Engineering of The University of Queensland, Australia

Hydraulic Structures, 4th edition, P. Novak, A.I.B. Moffat and C. Nalluri, School of Civil Engineering and Geosciences, University of Newcastle upon Tyne, UK & R. Narayanan, Formerly Department of Civil and Structural Engineering, UMIST, University of Manchester, UK (ISBN 0-203-96463-2)

Hydraulic Design of Highway Culverts, 3rd edition, James D. Schall, Philip L. Thompson, Steve M. Zerges, Roger T. Kilgore and Johnny L. Morris, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, April 2012