

Εργαστηριακή μελέτη αποτελεσματικότητας διατάξεων μείωσης ταχύτητας ροής σε ανοικτό αγωγό με έντονη κλίση πυθμένα

Δ.Α. Σωτηρόπουλος

Πολιτικός Μηχανικός. Δημήτρης Σωτηρόπουλος και Συνεργάτες Α.Μ.Ε.

Α.Α. Δήμας

Επίκουρος Καθηγητής. Εργ. Υδραυλικής Μηχανικής. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Πατρών

Γ.Μ. Χορς

Επίκουρος Καθηγητής. Εργ. Υδραυλικής Μηχανικής. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Πατρών

Π.Χ. Γιαννόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής. Εργ. Τεχνολογίας Περιβάλλοντος. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Παν. Πατρών

Ν.Θ. Φουρνιώτης

Πολιτικός Μηχανικός. Εργ. Υδραυλικής Μηχανικής. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Πατρών

Α.Κ. Δημητρακόπουλος

Καθηγητής. Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Πατρών

Λέξεις κλειδιά: ανοικτός αγωγός, έντονη κλίση, πλευρικά στοιχεία τραχύτητας, λεκάνη καταστροφής ενέργειας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία μελετάται εργαστηριακά η ροή σε σήραγγα υπό συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας και έντονης κλίσης πυθμένα 1:10. Διερευνάται η δυνατότητα μείωσης της ταχύτητας ροής μέσω συνδυασμού κατακόρυφων, πλευρικών στοιχείων τραχύτητας και λεκανών καταστροφής ενέργειας με οδοντώσεις. Η μελετώμενη διάταξη στηρίζεται στην ύπαρξη επαναλαμβανομένων τμημάτων (modules) εντός των οποίων επιτυγχάνεται επαναληψιμότητα της ροής. Η αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού διερευνήθηκε σε εργαστηριακό ομοίωμα κλίμακας 1:12.5, που βασίσθηκε σε συνθήκες δυναμικής ομοιότητας κατά Froude για χαρακτηριστικές τιμές παροχής. Η επεξεργασία των μετρήσεων έδειξε ότι με κατάλληλη διάταξη πλευρικών στοιχείων τραχύτητας και διαμόρφωση της λεκάνης καταστροφής ενέργειας ελέγχεται η τιμή της ταχύτητας, ικανοποιείται η απαίτηση μεγίστου βάθους ροής σε σχέση με τις διαστάσεις της σήραγγας και επιτυγχάνεται επαναληψιμότητα της ροής σε κάθε module.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στη διερεύνηση της μείωσης της ταχύτητας ροής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια και έντονη κατά μήκος κλίση πυθμένα.

Αφορμή για τον σχεδιασμό του έργου αποτέλεσε η διερεύνηση της εκτροπής των πλημμυρικών παροχών από κατάκλυση ορεινής λεκάνης σε κατάντη ταμιευτήρα μέσω σήραγγας και συγκεκριμένα από το οροπέδιο Λασιθίου στον ταμιευτήρα του φράγματος Αποσελέμη. Η συγκεκριμένη λύση επελέγη ως περιβαλλοντικά καταλληλότερη, ειδικά κατά τη φάση κατασκευής του έργου. Υπό την έννοια αυτή, η κατασκευή θεωρείται συμπληρωματική του φράγματος.

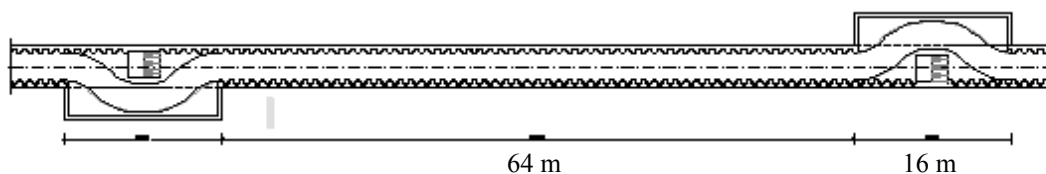
Βασικές αρχές του σχεδιασμού είναι ότι η υπερχειλίση της κατακλυζομένης περιοχής θα παροχετευθεί υπό συνθήκες ελεύθερης ροής μέσω σήραγγας με την κατασκευαστικά μέγιστη δυνατή ενιαία κλίση ($S = 10\%$), η ταχύτητα ροής να είναι τέτοια ώστε να μην απαιτείται ειδική σύνθεση και προστασία του σκυροδέματος στον πυθμένα ή στα τοιχώματα και το έργο να είναι επισκέψιμο με μηχανικά μέσα για μακροχρόνια επιτήρηση και συντήρηση.

Με δεδομένα τα ανωτέρω, η κατασκευή βαθμίδων ή στοιχείων τραχύτητας στον πυθμένα είναι απαγορευτική και επομένως απαιτείται η μόρφωση “πτυχώσεων” στα τοιχώματα έτσι ώστε να αναπτυχθεί δευτερογενής ροή και με εισρόφηση αέρα. Περαιτέρω, ο σχεδιασμός προβλέπει σε τακτά διαστήματα τοπική διεύρυνση της σήραγγας και κατασκευή λεκάνης καταστροφής ενέργειας με οδοντώσεις {1,4}.

Το Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών ανέλαβε την εκτέλεση εργαστηριακών μετρήσεων σε υδραυλικό ομοίωμα της ανωτέρω κατασκευής.

2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

Το συνολικό μήκος της σήραγγας είναι 3 km και η υψομετρική διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου της σήραγγας είναι 300 m με αποτέλεσμα ο υπό μελέτη αγωγός να έχει κλίση 1:10. Η αρχική μελέτη του έργου προτείνει αγωγό με 38 modules (επαναλαμβανόμενα τμήματα) μήκους 80 m έκαστον. Κάθε module αποτελείται από αγωγό ορθογωνικής διατομής, μήκους 64 m και πλάτους 3.4 m, με κατακόρυφα στοιχεία τραχύτητας, τραπεζοειδούς διατομής, στα πλευρικά τοιχώματα και λεκάνη καταστροφής ενέργειας, μήκους 16 m, με τοπικό τραπεζοειδή αναβαθμό πρόκλησης υδραυλικού άλματος (Εικ. 1). Η μέγιστη παροχή σχεδιασμού εκτιμάται ως 25 m³/s. Η προτεινόμενη διάταξη της λεκάνης επιτρέπει την απρόσκοπτη κίνηση οχήματος κατά μήκος της σήραγγας για τυχόν επισκευές και συντήρηση.



Εικόνα 1. Κάτοψη module αγωγού με κατακόρυφα στοιχεία τραχύτητας στα πλευρικά τοιχώματα και λεκάνη καταστροφής ενέργειας.

Ο στόχος της συγκεκριμένης σχεδίασης είναι η μείωση της ταχύτητας του ύδατος μέσω της αυξημένης τριβής που παρέχουν τα κατακόρυφα πλευρικά στοιχεία τραχύτητας, η δημιουργία υδραυλικού άλματος στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας και η συνέχιση της ροής στο κατάντη module με κρίσιμο βάθος στην είσοδό του. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε εργαστηριακό ομοίωμα, διερευνήθηκε η επάρκεια των κατακόρυφων στοιχείων τραχύτητας στη διατήρηση του βάθους και της ταχύτητας του ύδατος σε τιμές τέτοιες ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα στη διαχρονική λειτουργία του έργου και της λεκάνης καταστροφής ενέργειας, καθώς και στην επίτευξη επανάληψης του ροϊκού πεδίου σε κάθε module. Το εργαστηριακό ομοίωμα αποτελείται από: (α) δεξαμενή προσομοίωσης συνθηκών εισόδου του ύδατος στη σήραγγα, (β) ένα πλήρες module (δηλαδή αγωγό και λεκάνη καταστροφής ενέργειας) και (γ) στα κατάντη τα 2/4 (τμήμα) του αγωγού ενός module (χωρίς λεκάνη καταστροφής), ο οποίος καταλήγει σε ελεύθερη πτώση. Η κλίμακα του ομοιώματος επιλέχθηκε να είναι 1:12.5 και εξασφαλίζει συνθήκες δυναμικής ομοιότητας κατά Froude για το εύρος των παροχών που εξετάστηκαν. Με βάση την επιλεγείσα κλίμακα, η μέγιστη παροχή στο ομοίωμα είναι 45 l/s.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω μετρήσεις:

- Αρχικό ομοίωμα για παροχές 11, 27.2 και 45 l/s.
 - Μετρήσεις βάθους ροής
 - Μετρήσεις σημειακών ταχυτήτων σε κρίσιμες περιοχές
- Τελικό ομοίωμα, το οποίο προέκυψε ύστερα από ενδιάμεσες παρατηρήσεις και τροποποιήσεις του σχεδιασμού, για παροχές 11, 27.2 και 45 l/s.
 - Μετρήσεις βάθους ροής
 - Μετρήσεις σημειακών ταχυτήτων σε κρίσιμες περιοχές

Μετρήσεις βάθους και ταχυτήτων έγιναν και για γεωμετρία αποτελούμενη από ενιαίο αγωγό του ίδιου μήκους όπως το αρχικό ομοίωμα (χωρίς λεκάνη καταστροφής ενέργειας) για τη διερεύνηση επίτευξης συνθηκών “ομοιόμορφου” βάθους ροής.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Γενικά

Οι σημαντικότερες από τις μετρήσεις που έγιναν συνοψίζονται ως εξής:

- Δοκιμή 1: σε γεωμετρία που αντιστοιχεί στον αρχικό σχεδιασμό, όπως έχει ορισθεί στο Κεφ. 2. Κάτοψη της περιοχής της λεκάνης καταστροφής ενέργειας φαίνεται στην Εικόνα 2.
- Δοκιμή 2: σε γεωμετρία που περιλαμβάνει ενιαίο αγωγό, χωρίς λεκάνη καταστροφής ενέργειας.
- Δοκιμή 3: σε γεωμετρία που αντιστοιχεί στον τελικό σχεδιασμό, στον οποίο κάθε module αποτελείται από αγωγό μήκους 80 m και λεκάνη καταστροφής ενέργειας μήκους 20 m. Η διάταξη των στοιχείων καταστροφής ενέργειας στη λεκάνη φαίνεται στις Εικόνες 5 και 6β.

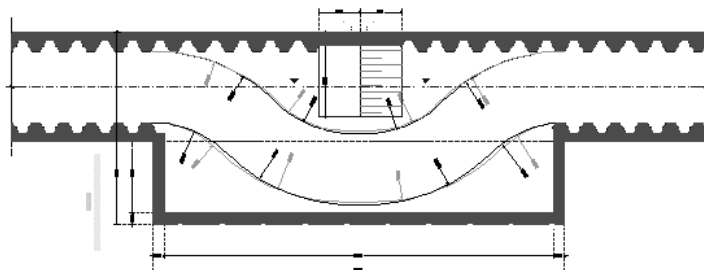
Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν μετρήσεις βάθους ροής, με βάση τις οποίες σχεδιάστηκαν τα διαμήκη προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας στο μέσον του αγωγού και κοντά στα τοιχώματα, καθώς και μετρήσεις ταχύτητας σε επιλεγμένες περιοχές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρατίθενται στην αντίστοιχη ενότητα υπό τη μορφή διαγραμμάτων.

3.2 Δοκιμή 1

Η πρώτη σειρά δοκιμών έγινε στη γεωμετρία που αντιστοιχεί στον αρχικό σχεδιασμό (Εικ. 2). Στο εργαστηριακό ομοίωμα, το μήκος του αγωγού είναι 5.12 m και το μήκος της λεκάνης καταστροφής ενέργειας είναι 1.28 m. Συνεπώς, το μήκος ενός module είναι 6.4 m. Το πλάτος του αγωγού είναι 0.276 m και αντιστοιχεί σε πλάτος πρωτοτύπου 3.45 m.

Μέρος της λεκάνης καταστροφής, για τον αρχικό σχεδιασμό, καθώς και το συνακόλουθο υδραυλικό άλμα για παροχή 45 l/s, φαίνονται στην Εικόνα 3.

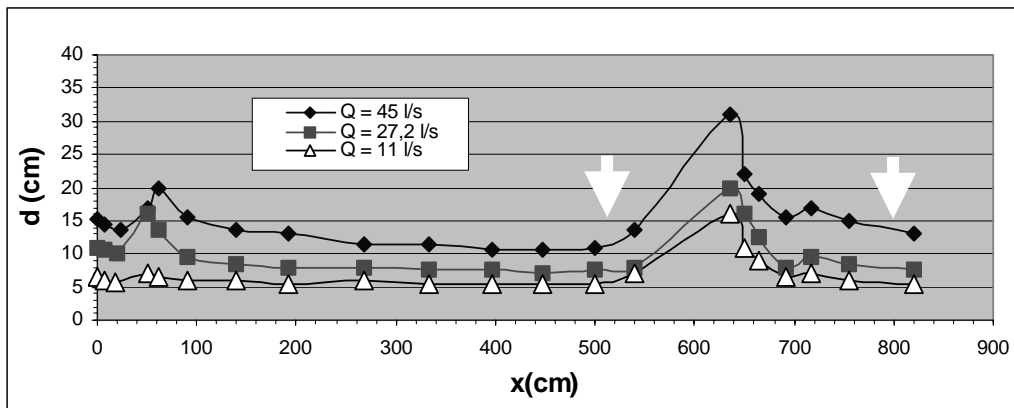
Τα διαμήκη προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας δίδονται και για τις τρεις παροχές που μετρήθηκαν, τόσο κοντά στο τοίχωμα (Γραφ. 1) όσο και στο μέσον του αγωγού (Γραφ. 2). Το βάθος της ροής συμβολίζεται με d . Προφίλ ταχύτητας που μετρήθηκαν σε διατομή πριν τη λεκάνη καταστροφής ενέργειας, η θέση της οποίας σημειώνεται με κατακόρυφο βέλος στο Γράφημα 2, παρουσιάζονται στο Γράφημα 3. Όπως προκύπτει από τα Γραφήματα 1 και 2, το μέγιστο βάθος εντός της λεκάνης καταστροφής ενέργειας είναι 4.38 m (0.35 m στο ομοίωμα) και προκύπτει από το υδραυλικό άλμα που προκαλεί ο τραπεζοειδής αναβαθμός. Επίσης, στην είσοδο του αγωγού του module παρατηρείται μέγιστο βάθος 2.5 m (0.2 m στο ομοίωμα). Τα παραπάνω υπερβαίνουν τα αποδεκτά βάθη για το σχεδιασμό της σήραγγας.



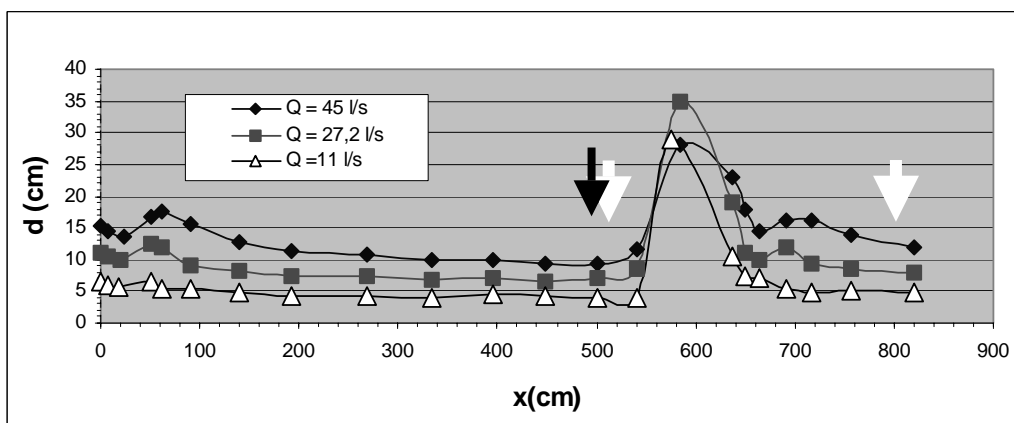
Εικόνα 2. Κάτοψη λεκάνης καταστροφής ενέργειας αρχικού σχεδιασμού (ροή από αριστερά προς δεξιά).



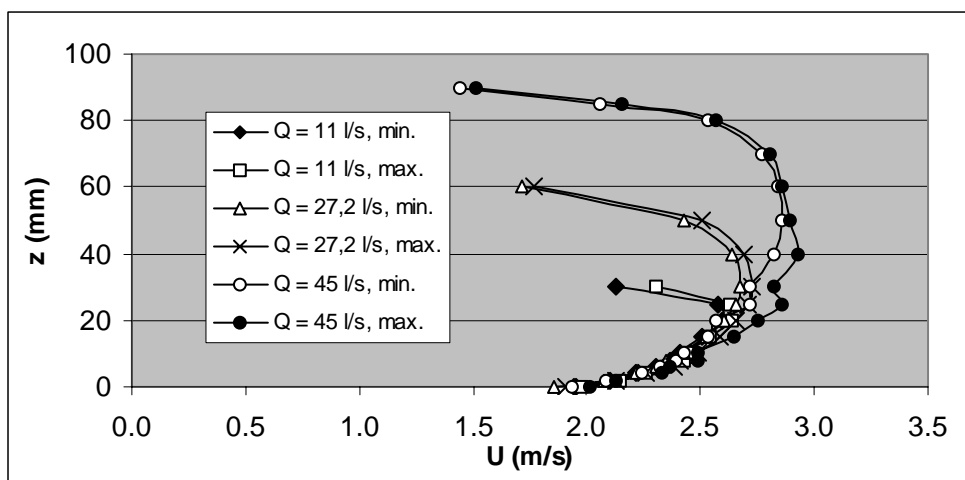
Εικόνα 3. Άποψη τμήματος του αγωγού στην περιοχή της λεκάνης καταστροφής ενέργειας, για τη Δοκιμή 1 (ροή από τα δεξιά προς τα αριστερά).



Γράφημα 1. Το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κοντά στο τοίχωμα, για τη Δοκιμή 1. Τα λευκά βέλη υποδεικνύουν την αρχή και το τέλος της λεκάνης καταστροφής ενέργειας.



Γράφημα 2. Το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας στο μέσον του αγωγού, για τη Δοκιμή 1. Τα λευκά βέλη υποδεικνύουν την αρχή και το τέλος της λεκάνης καταστροφής ενέργειας. Το μαύρο βέλος υποδεικνύει την θέση όπου μετρήθηκαν τα προφίλ της ταχύτητας του Γραφήματος 3.



Γράφημα 3. Προφίλ ταχύτητας που μετρήθηκαν κατά τη Δοκιμή 1 στη θέση που σημειώνεται με μαύρο βέλος στο Γράφημα 2.

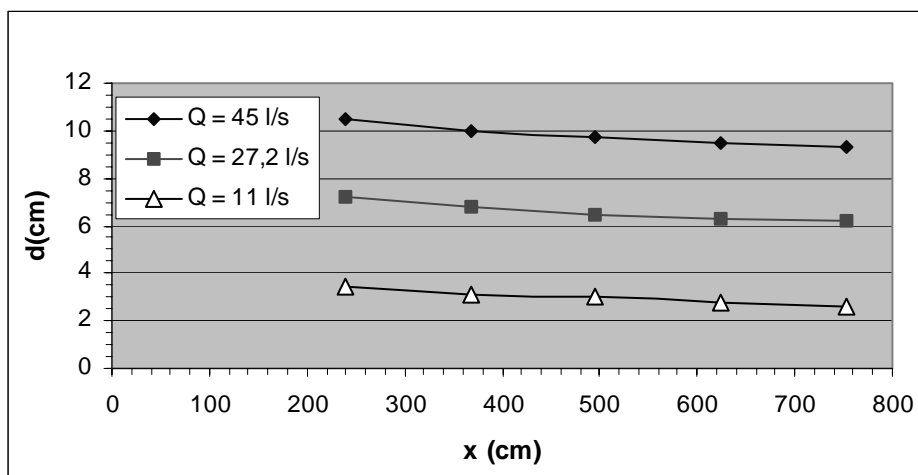
3.3 Δοκιμή 2

Η δεύτερη σειρά δοκιμών έγινε χωρίς τη λεκάνη καταστροφής ενέργειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4α. Η δοκιμή αυτή έγινε προκειμένου να ελεγχθεί η πιθανότητα επίτευξης ομοιόμορφης ροής στο συνολικό διαθέσιμο μήκος του ομοιώματος (8.96 m), το οποίο αντιστοιχεί σε μήκος πρωτοτύπου αγωγού 107.5 m. Άποψη της ελεύθερης επιφάνειας από τα κατάντη για αυτή τη γεωμετρία φαίνεται στην Εικόνα 4β.

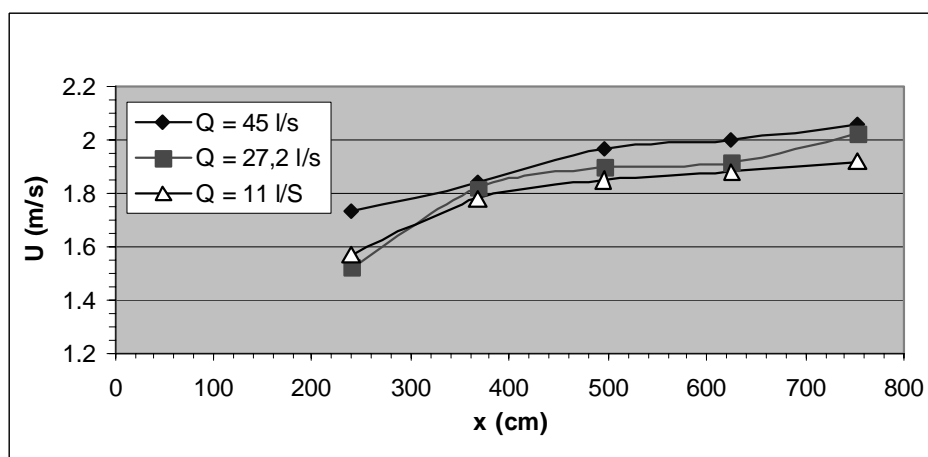
Το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος του αγωγού στη Δοκιμή 2 έχει σχεδιαστεί στο Γράφημα 4, ενώ το αντίστοιχο προφίλ ταχυτήτων κοντά στον πυθμένα στο Γράφημα 5. Είναι προφανές ότι, στο δεδομένο μήκος του αγωγού, η ροή δεν έχει προσεγγίσει το ομοιόμορφο βάθος αλλά συνεχίζει να επιταχύνεται. Το συμπέρασμα αυτό δεν προκύπτει μόνο από παρατήρηση των μετρήσεων αλλά ελέγχθηκε και υπολογιστικά μέσω της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει τη βαθμιαίως μεταβαλλόμενη ροή {2}.



Εικόνα 4. (α) Η ροή στον αγωγό χωρίς λεκάνη καταστροφής ενέργειας, (β) άποψη από τα κατάντη της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας στον αγωγό χωρίς λεκάνη καταστροφής ενέργειας.



Γράφημα 4. Το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος του μέσου του αγωγού, για τη Δοκιμή 2.



Γράφημα 5. Το προφίλ της ταχύτητας στον πυθμένα κατά μήκος του μέσου του αγωγού, για τη Δοκιμή 2.

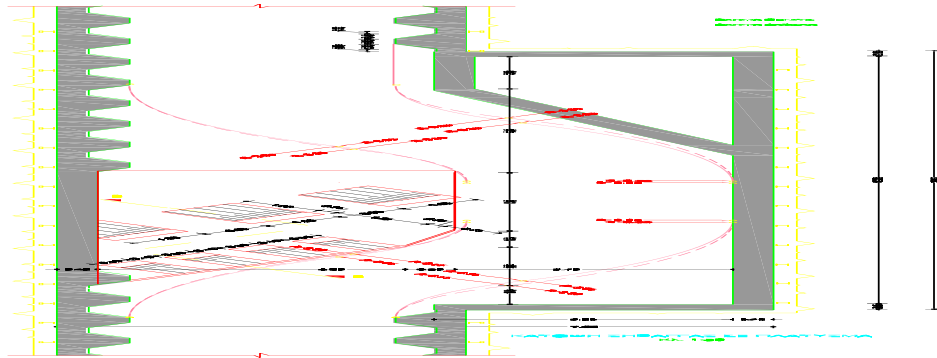
3.4 Δοκιμή 3

Οι δύο πρώτες δοκιμές οδήγησαν σε ορισμένα προκαταρκτικά συμπεράσματα, τα οποία αξιοποιήθηκαν στον τελικό σχεδιασμό:

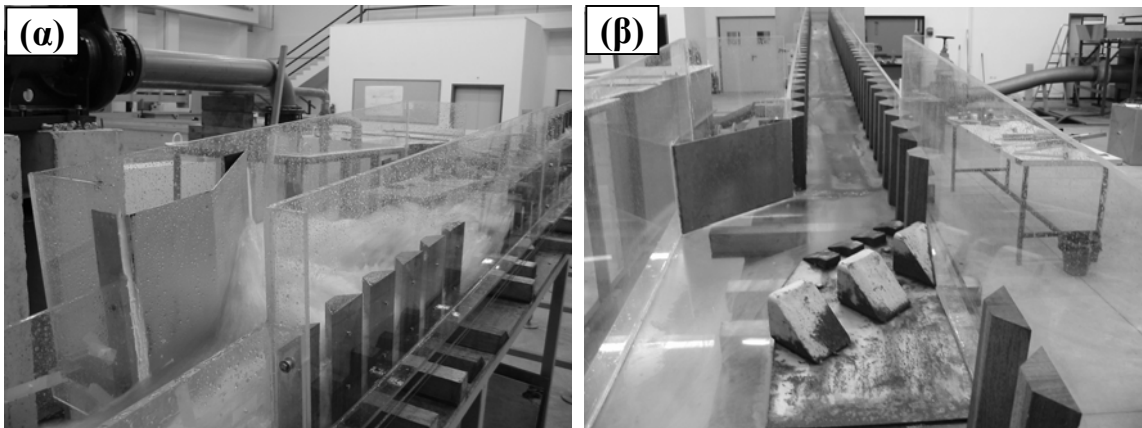
- (α) Η μορφή της λεκάνης καταστροφής ενέργειας και ο τοπικός αναβαθμός πρόκλησης υδραυλικού άλματος δεν είχαν κατάλληλο σχεδιασμό για ικανοποιητική απόδοση του συστήματος.
- (β) Το μήκος έκαστου module δεν μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω της συνεχιζόμενης επιτάχυνσης της ροής για μεγάλο μήκος αγωγού.

Βάσει των ανωτέρω, επιλέχθηκε μήκος module ίσο με 8 m στο ομοίωμα αποτελούμενο από αγωγό μήκους 6.4 m και λεκάνη μήκους 1.6 m. Επιπλέον, ανασχεδιάστηκε η γεωμετρία της λεκάνης καθώς και οι οδοντώσεις πρόκλησης υδραυλικού άλματος, όπως φαίνεται στις Εικόνες 5 και 6α, β.

Η τρίτη σειρά δοκιμών αφορά την παραπάνω γεωμετρία.

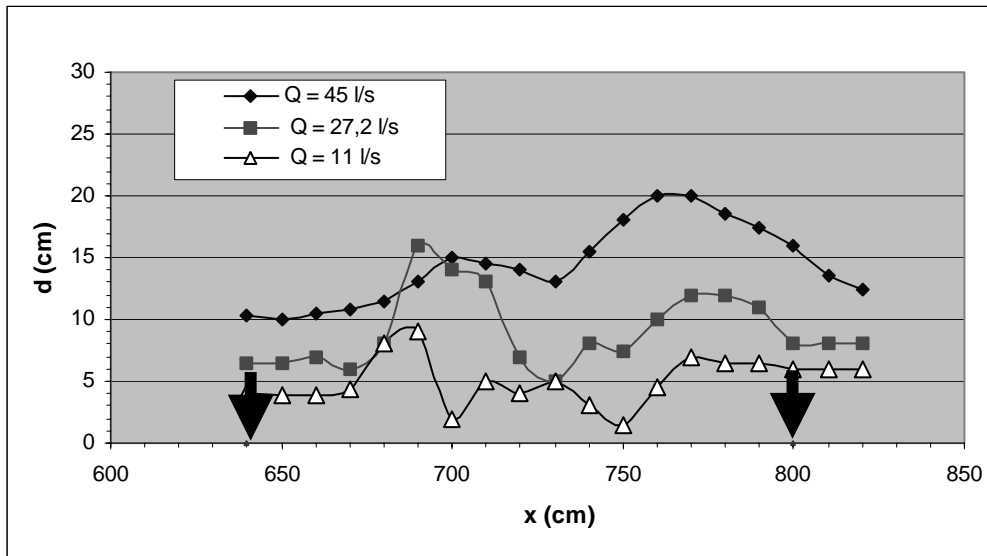


Εικόνα 5. Κάτοψη τελικού σχεδιασμού της λεκάνης καταστροφής ενέργειας (ροή από τα αριστερά προς τα δεξιά).

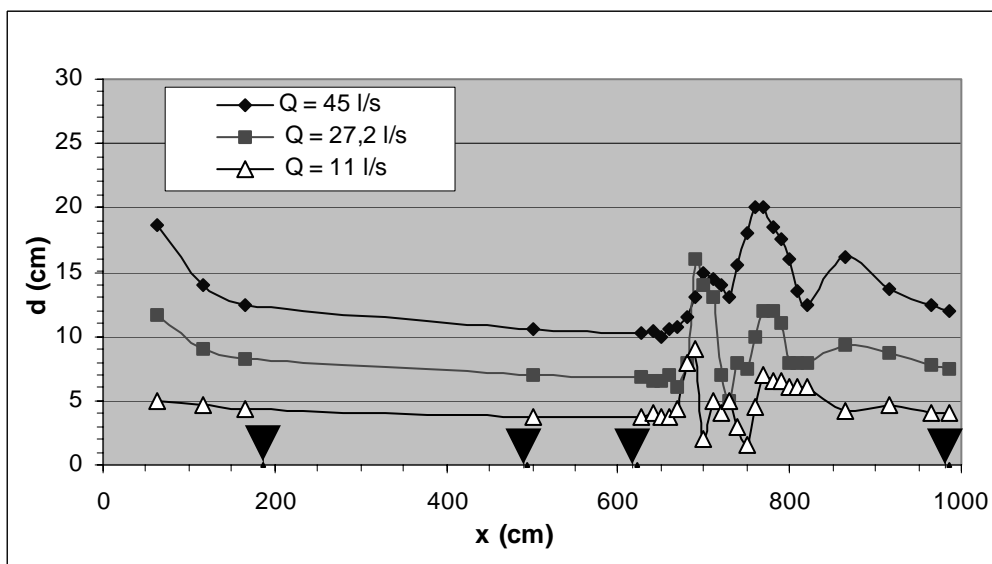


Εικόνα 6. (α) Η διαμόρφωση της γεωμετρίας του κατάντη άκρου της λεκάνης καταστροφής στον τελικό σχεδιασμό (η ροή είναι από τα επάνω δεξιά προς τα κάτω αριστερά), (β) ο τελικός σχεδιασμός των οδοντώσεων πρόκλησης υδραυλικού άλματος στη λεκάνη καταστροφής (η ροή είναι από τα επάνω προς τα κάτω στη φωτογραφία).

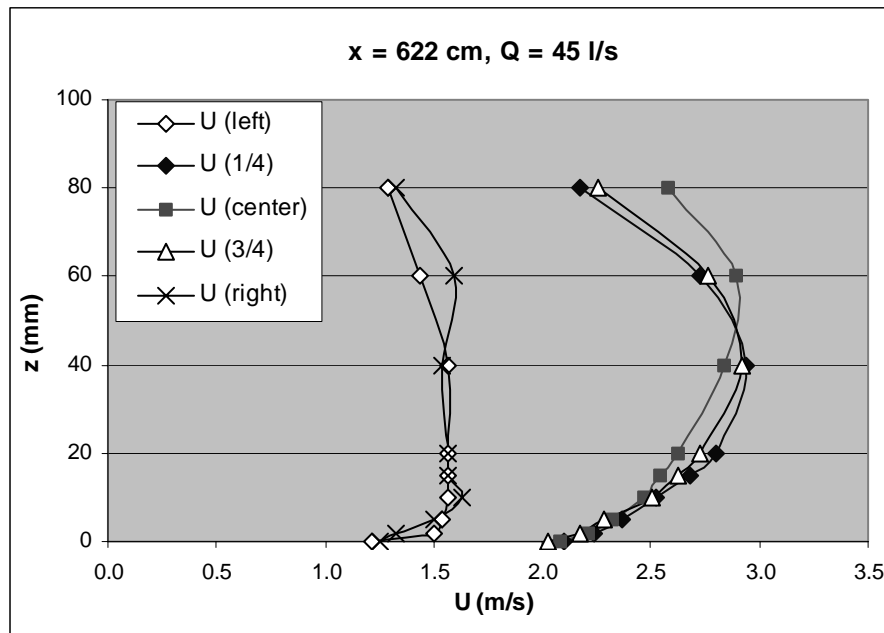
Το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος της λεκάνης καταστροφής ενέργειας σε προέκταση του άξονα του αγωγού παρουσιάζεται στο Γράφημα 6. Στο Γράφημα 7 έχει σχεδιασθεί το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος ολοκλήρου του εργαστηριακού ομοιώματος. Στο σχήμα αυτό σημειώνονται με κατακόρυφα βέλη οι τέσσερις διατομές στις οποίες έγιναν μετρήσεις κατακόρυφου προφίλ διαμήκου ταχύτητας για χαρακτηριστικές τιμές της παροχής $Q=45$ l/s, 27.2 l/s και 11 l/s. Σε κάθε διατομή μετρήθηκαν πέντε κατακόρυφα προφίλ ταχύτητας: ένα στο μέσον, U_c , από ένα, U_l και U_r , στην επιφάνεια που ορίζεται από τις προεξέχουσες παρειές των στοιχείων τραχύτητας, και από ένα, $U_{1/4}$ και $U_{3/4}$, στο $1/4$ και στα $3/4$ του ελάχιστου πλάτους της διατομής, όπως αυτό ορίζεται από τις προεξέχουσες παρειές των στοιχείων τραχύτητας. Τυπικό παράδειγμα δίδεται στο Γράφημα 8 όπου παρουσιάζονται τα κατακόρυφα προφίλ ταχύτητας για $Q=45$ l/s στην τρίτη διατομή, η οποία σημειώνεται με κατακόρυφο βέλος στο Γράφημα 7.



Γράφημα 6. Το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος της λεκάνης καταστροφής στην προέκταση του άξονα του αγωγού, για τη Δοκιμή 3. Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν την αρχή και το τέλος της λεκάνης.



Γράφημα 7. Το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος όλου του εργαστηριακού ομοιώματος στον άξονα του αγωγού, για τη Δοκιμή 3.



Γράφημα 8. Προφίλ ταχύτητας που μετρήθηκαν κατά τη Δοκιμή 3 για $Q=45$ l/s στην τρίτη διατομή, που σημειώνεται με μαύρο βέλος στο Γράφημα 7.

4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη αποτελούν την σύνοψη των σημαντικότερων παρατηρήσεων και μετρήσεων που έγιναν κατά την διάρκεια του έργου και εκφράζουν την εξελικτική πορεία στο σχεδιασμό του συστήματος. Ο τελικός σχεδιασμός βελτιώνει σημαντικά τη συμπεριφορά του βάθους της ροής μέσα στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας, ενώ δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στις ταχύτητες και τα βάθη ροής μεταξύ του αρχικού και τελικού σχεδιασμού στον αγωγό, ανάντη και κατάντη της λεκάνης.

Από την πειραματική έρευνα για την επιλεγείσα διάταξη κατακόρυφων, πλευρικών στοιχείων τραχύτητας δεν προέκυψαν συνθήκες “ομοιόμορφου” βάθους ροής και επομένως απαιτήθηκε η μόρφωση διατάξεων καταστροφής ενέργειας, που επαναλαμβανόμενες επιτρέπουν τη διατήρηση μικρών ταχυτήτων ροής κατά μήκος του έργου. Οι διατάξεις αυτές συνδυάζονται με τις αναγκαίες κατασκευαστικές διευρύνσεις για την διάνοιξη της σήραγγας και δημιουργούν modules στα οποία επαναλαμβάνεται η υδραυλική λειτουργία: κρίσιμο βάθος ανάντη – υπερκρίσιμη ροή – υδραυλικό άλμα.

Συγκεκριμένα, ο βασικός στόχος του τελικού σχεδιασμού είναι η ροή να εκκινεί από υποκρίσιμο βάθος στην είσοδο του αγωγού κάθε module, στη συνέχεια μέσω διέλευσης από το κρίσιμο βάθος να γίνεται υπερκρίσιμη κατά το μεγαλύτερο μήκος του αγωγού έως την είσοδο στην λεκάνη καταστροφής ενέργειας. Εντός της λεκάνης, μέσω της δημιουργίας υδραυλικού άλματος να προκαλείται καταστροφή ενέργειας και μετάβαση της ροής σε υποκρίσιμη πριν την είσοδο στον αγωγό του επομένου module, κ.ο.κ. Η επίτευξη της ανωτέρω επανάληψης της ροής αποτελεί το βασικό κριτήριο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας του τελικού σχεδιασμού. Στην παρούσα εργασία, τα συμπεράσματα για την επίτευξη ή μη επανάληψης της ροής βασίζονται στην συμπεριφορά της κατανομής του βάθους ύδατος d (Γραφ. 7), της ειδικής ενέργειας E (Γραφ. 9) και του αριθμού Froude Fr (Γραφ. 10) κατά μήκος του εργαστηριακού ομοιώματος. Η ειδική ενέργεια υπολογίζεται από την εξίσωση

$$E = \frac{1}{2gA} \int_A U^2 dA + d \quad (1)$$

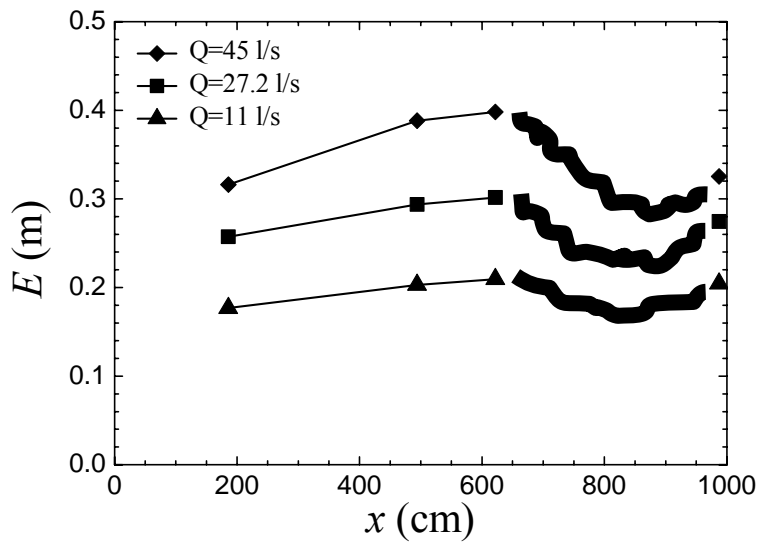
και ο αριθμός Froude από την εξίσωση

$$Fr = \frac{\bar{U}}{\sqrt{gd}} \quad (2)$$

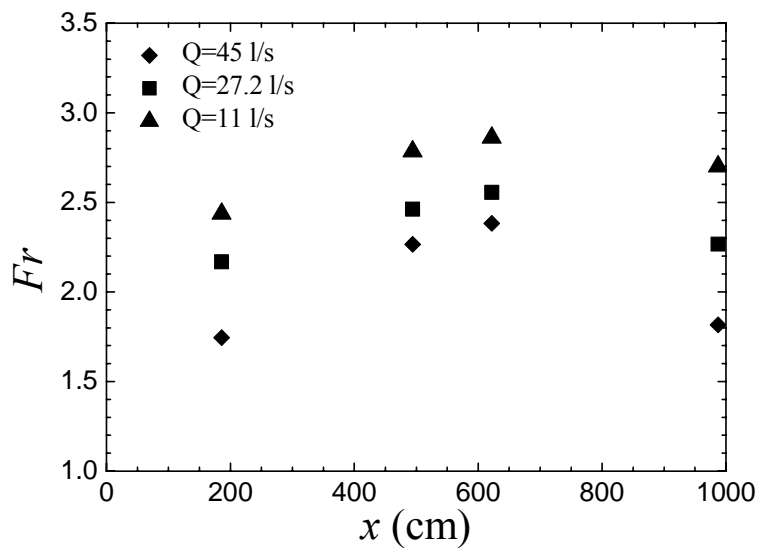
όπου A είναι το εμβαδόν, U είναι η σημειακή και \bar{U} η μέση ταχύτητα σε κάθε διατομή. Η ειδική ενέργεια υπολογίζεται στις τέσσερις διατομές, στις οποίες μετρήθηκαν τα κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων και οι οποίες αντιστοιχούν σε θέσεις εντός του αγωγού ανάντη (οι 3 πρώτες διατομές) και κατάντη (η τέταρτη διατομή) της λεκάνης καταστροφής ενέργειας. Η δημιουργία υδραυλικού άλματος εντός της λεκάνης, όπως φαίνεται και από το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας (Γραφ. 7) και τις σχετικές μαγνητοσκοπήσεις των μετρήσεων, προκαλεί απώλεια ειδικής ενέργειας. Όμως, η πολυπλοκότητα της ροής εντός της λεκάνης, λόγω της λοξής διάταξης των οδοντώσεων πρόκλησης υδραυλικού άλματος και της συνεπακόλουθης τρισδιάστατης μορφής του ροϊκού πεδίου, δεν επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό αυτής της απώλειας. Έτσι, η διαμήκης κατανομή της ειδικής ενέργειας, εντός της λεκάνης και στην είσοδο του αγωγού του επομένου module, δίδεται μόνο ενδεικτικά και πάντως είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή E_{\min} , η οποία αντιστοιχεί στη νέα διέλευση της ροής από το κρίσιμο βάθος. Περαιτέρω, υπολογισμοί του κρίσιμου βάθους, για τις τρεις παροχές, επιβεβαιώνουν ότι η διέλευση της ροής απ' αυτό επιτυγχάνεται στις θέσεις από 8.7 m έως 9.2 m στο ομοίωμα. Πράγματι, οι θέσεις αυτές αντιστοιχούν στο τρίτο τοπικό μέγιστο των προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας (Γραφ. 7) και ευρίσκονται στο αρχικό τμήμα του αγωγού του δεύτερου module, το οποίο αρχίζει στα 8 m. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει η μεταβολή του Fr . Η διαδικασία γραφικής απεικόνισης της κατανομής του είναι ανάλογη με αυτή της E .

Εκ των ανωτέρω, σε συνδυασμό με τα μετρηθέντα προφίλ ταχύτητας, προκύπτει επαναληψιμότητα του φαινομένου: υποκρίσιμη ροή στην περιοχή εισόδου του module – διέλευση από κρίσιμο βάθος – υπερκρίσιμη ροή – υδραυλικό άλμα εντός της λεκάνης καταστροφής ενέργειας – επαναφορά σε υποκρίσιμη ροή στην περιοχή εισόδου του επομένου module, κ.ο.κ. Βεβαίως, επισημαίνεται ότι το φαινόμενο δεν έχει περιοδικότητα, όπως αυτό σηματοδοτείται από το γεγονός ότι η E στην αρχή του επομένου module (διατομή 4) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στη διατομή 1. Εικάζεται πάντως ότι το φαινόμενο πιθανόν να έχει και περιοδικότητα για μεγαλύτερο αριθμό modules.

Το δεύτερο κριτήριο αξιολόγησης του τελικού σχεδιασμού είναι η επίτευξη μέγιστου βάθους ύδατος μικρότερου ή ίσου με 2 m στον αγωγό και αποφυγή της πιθανότητας δημιουργίας συνθηκών ροής υπό πίεση εντός της σήραγγας στην περιοχή της λεκάνης καταστροφής ενέργειας. Οι μετρήσεις προβλέπουν μέγιστο βάθος 2.03 m (0.162 m στο ομοίωμα) στον αγωγό, σε απόσταση 8 m (0.64 m στο ομοίωμα) από την έξοδο της λεκάνης καταστροφής ενέργειας, και μέγιστο βάθος 3.75 m (0.3 m στο ομοίωμα) στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας. Σημειώνεται πάντως ότι το μέγιστο βάθος εντός της λεκάνης καταστροφής ενέργειας είναι σημειακό, λόγω της έντονα τρισδιάστατης μορφής του ροϊκού πεδίου, ενώ στο μεγαλύτερο μέρος αυτής είναι σημαντικά μικρότερο. Οι ανωτέρω μέγιστες τιμές προκύπτουν για τη μέγιστη παροχή 25 m³/s. Συνεπώς, προκύπτει οριακή επάρκεια ύψους της διατομής. Η κατάσταση αυτή μπορεί να αντιμετωπισθεί με μείωση της μέγιστης παροχής σχεδιασμού σε 20 m³/s (ενδεικτική τιμή) δεδομένης της μικρής συχνότητας εμφάνισής της και της δυνατότητας διαχείρισής της μέσω τεχνικού έργου ελέγχου της παροχής στην είσοδο της σήραγγας.



Γράφημα 9. Διαμήκης κατανομή ειδικής ενέργειας για τη Δοκιμή 3.



Γράφημα 10. Διαμήκης κατανομή αριθμού *Froude* για τη Δοκιμή 3.

Το τρίτο κριτήριο αξιολόγησης του τελικού σχεδιασμού είναι το μέτρο της μέγιστης ταχύτητας ύδατος στα τοιχώματα του αγωγού. Η μέγιστη ταχύτητα, και για τις τρεις παροχές που εξετάστηκαν, παρατηρείται στον πυθμένα, στο τέλος του αγωγού του module (πριν από την είσοδο στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας). Η μέγιστη ταχύτητα είναι 7.43 m/s (2,1 m/s στο ομοίωμα) για παροχή 25 m³/s (45 l/s στο ομοίωμα), 7.39 m/s (2.09 m/s στο ομοίωμα) για παροχή 15 m³/s (27.2 l/s στο ομοίωμα) και 7.14 m/s (2.02 m/s στο ομοίωμα) για παροχή 6 m³/s (11 l/s στο ομοίωμα). Όλες οι τιμές των ταχυτήτων στον πυθμένα και στα τοιχώματα για το πρωτότυπο, U_p ,

μπορούν να υπολογισθούν από τα στοιχεία των μετρήσεων μέσω της μετατροπής ταχυτήτων στο μοντέλο, U_m , με χρήση της εξίσωσης (ομοιότητα κατά Froude)

$$U_p = U_m (12.5)^{1/2} \quad (3)$$

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η ροή παρουσιάζει επαναληψιμότητα όχι όμως και περιοδικότητα. Η αύξηση της ταχύτητας στον πυθμένα στη διατομή 4 (εντός του δευτέρου module) σε σχέση με την αντίστοιχη του πρώτου module (διατομή 1), ως ποσοστό επί της ανάντη ταχύτητας, είναι 7.5%, 3.7% και 13.5% για τις παροχές 25 m³/s, 15 m³/s και 6 m³/s, αντιστοίχως. Σε κάθε περίπτωση πάντως δεν προτείνεται περαιτέρω αύξηση του μήκους εκάστου module, καθώς αυτό είναι οριακό, όπως διαπιστώθηκε και από τις μετρήσεις της Δοκιμής 2. Αντιθέτως, προτείνεται η βελτίωση της επαναληψιμότητας αλλά και η καλύτερη λειτουργία του αγωγού για τις μικρές (συνήθειες) παροχές μέσω της χρήσης εγκαρσίων στοιχείων τραχύτητας στον πυθμένα του αγωγού. Τούτο δικαιολογείται και από τη μικρή συμβολή των κατακόρυφων πλευρικών στοιχείων τραχύτητας στα μικρά βάθη ροής.

Τέλος, ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται στις οδοντώσεις της λεκάνης πρέπει να βασισθεί σε μία συντηρητική προσέγγιση μέσω της ορμής της ροής στο τέλος του αγωγού του module. Κατά συνέπεια, το μέτρο της συνολικής δύναμης υπολογίζεται από την εξίσωση

$$F = \rho g A \frac{d}{2} + \rho \int_A U^2 dA \quad (4)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα ύδατος, A το εμβαδόν της διατομής και d το βάθος της ροής στο τέλος του αγωγού του module. Από τους σχετικούς υπολογισμούς προκύπτει $F = 260$ kN ($F = 133$ N στο ομοίωμα) για τη μέγιστη παροχή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η μελέτη αυτή χρηματοδοτήθηκε από την ΑΚΤΩΡ Α.Τ.Ε. Ιδιαίτέρως, ευχαριστούμε τον κ. Τ. Καρεφυλλάκη για τη συνεργασία κατά τη διάρκεια εκπόνησης του ερευνητικού έργου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior. 1987. Design of Small Dams. Denver, Colorado.
2. French, R.H. 1985. Open-Channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill Book Company.
3. Morris, H.M. & Wiggert, J.M. 1972. Applied Hydraulics in Engineering. New York: The Ronald Press Company.
4. Γιαννόπουλος, Π.Χ. 2007. Κεφάλαιο 3: Φράγματα. Ανάλυση και Σχεδιασμός Κατασκευών. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Experimental study of effectiveness of flow velocity reduction devices in open channel with steep bed slope

D.A. Sotiropoulos

Civil Engineer. Dimitris Sotiropoulos and Associates A.M.E.

A.A. Dimas

Assistant Professor. Hydraulic Engineering Lab. Department of Civil Engineering. University of Patras

G.M. Horsch

Assistant Professor. Hydraulic Engineering Lab. Department of Civil Engineering. University of Patras

P.C. Yannopoulos

Associate Professor. Environmental Technology Lab. Department of Civil Engineering. University of Patras

N.Th. Fourniotis

Civil Engineer. Hydraulic Engineering Lab. Department of Civil Engineering. University of Patras

A.C. Demetracopoulos

Professor. Hydraulic Engineering Lab. Department of Civil Engineering. University of Patras

ABSTRACT: The free-surface flow in a tunnel of steep bed slope 1:10 is studied experimentally. It is desired to determine the effectiveness of vertical roughness elements on the side wall and energy dissipation basins with blocks on reducing flow velocity in the tunnel. The design is based on the concept of repeated modules in order to achieve flow repeatability. The scale of the corresponding physical model is 1:12.5 under Froude similarity conditions for all examined flow rates. The analysis of measurements indicates that a suitable arrangement of vertical roughness elements on the side wall and a suitable design of the energy dissipation basin can control the flow velocity magnitude, satisfy the maximum flow depth requirement with respect to the tunnel dimensions, and achieve flow repeatability in each module.