

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ ΑΠΟΤΟΜΗΣ ΚΛΙΣΗΣ

Δ.Α. Σωτηρόπουλος¹, Α.Α. Δήμας², Γ.Μ. Χορς², Π.Χ. Γιαννόπουλος²,
Ν.Θ. Φουρνιώτης² και Α.Κ. Δημητρακόπουλος²

¹Δημήτρης Σωτηρόπουλος και Συνεργάτες Α.Μ.Ε.

²Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 26 500
e-mail: acdem@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται πειραματικά 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 επαναλαμβανόμενων τμημάτων (modules) εντός των οποίων επιτυγχάνεται επαναληψιμότητα της ροής. Η αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού διερευνήθηκε σε υδραυλικό 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.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTIVENESS OF AN ENERGY DISSIPATION CONFIGURATION IN AN OPEN CHANNEL OF STEEP SLOPE

D.A. Sotiropoulos¹, A.A. Dimas², G.M. Horsch², P.C. Yannopoulos²,
N.Th. Fourniotis² and A.C. Demetracopoulos²

¹Dimitris Sotiropoulos and Associates A.M.E.

²Department of Civil Engineering, University of Patras, Patras, GR-26 500
e-mail: acdem@upatras.gr

ABSTRACT

The free-surface flow in a tunnel of steep bed slope 1:10 is studied experimentally. The effectiveness of vertical roughness elements on the side walls and energy dissipation basins with blocks is investigated, with the aim to reduce 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 physical model was 1:12.5 under Froude similarity conditions. The analysis of measurements indicates that a suitable arrangement of vertical roughness elements on the side walls 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.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εργασία αυτή διερευνάται πειραματικά η δυνατότητα μείωσης της ταχύτητας ροής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια και έντονη κατά μήκος κλίση πυθμένα, μέσω πλευρικών στοιχείων τραχύτητας και λεκανών καταστροφής ενέργειας.

Αφορμή για το συγκεκριμένο σχεδιασμό αποτέλεσε η διερεύνηση της εκτροπής των πλημμυρικών παροχών από κατάκλυση ορεινής λεκάνης σε κατάντη ταμιευτήρα μέσω σήραγγας. Η ανωτέρω λύση επελέγη ως περιβαλλοντικά καταλληλότερη, ειδικά κατά τη φάση κατασκευής του έργου.

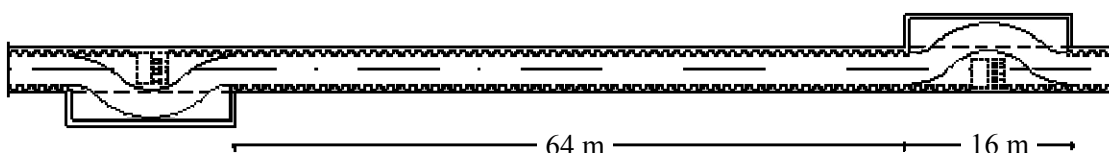
Βασικές αρχές του σχεδιασμού είναι ότι η υπερχειλίση της κατακλυζομένης περιοχής θα παροχετευθεί υπό συνθήκες ελεύθερης ροής μέσω σήραγγας με την κατασκευαστικά μέγιστη δυνατή ενιαία κλίση ($S = 10\%$), η ταχύτητα ροής να είναι τέτοια ώστε να μην απαιτείται ειδική σύνθεση και προστασία του σκυροδέματος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

Με δεδομένα τα ανωτέρω, επιθυμείται να αποφευχθεί η κατασκευή βαθμίδων ή στοιχείων τραχύτητας στον πυθμένα 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 (Bureau of Reclamation, 1987, Γιαννόπουλος, 2007).

Η εκτέλεση των εργαστηριακών μετρήσεων σε υδραυλικό ομοίωμα της ανωτέρω κατασκευής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

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 μέγιστη παροχή σχεδιασμού εκτιμάται ως $25 \text{ m}^3/\text{s}$. 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, με κατακόρυφα στοιχεία τραχύτητας, τραπεζοειδούς διατομής, στα πλευρικά τοιχώματα και λεκάνη καταστροφής ενέργειας, μήκους 16 m, με τοπικό τραπεζοειδή αναβαθμό πρόκλησης υδραυλικού άλματος (Σχήμα 1). Η προτεινόμενη διάταξη της λεκάνης (Σχήμα 2) επιτρέπει την απρόσκοπτη κίνηση οχήματος κατά μήκος της σήραγγας για τυχόν επισκευές και συντήρηση. Λόγω των κατακόρυφων στοιχείων τραχύτητας, το πλάτος του αγωγού μεταβάλλεται μεταξύ 2,65 και 3,45 m με διάμηκες βήμα 1,60 m (Σχήμα 2 και Εικόνα 1β).



Σχήμα 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 αντίστασης 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 υδραυλικό 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 επανάλιψης του ροϊκού πεδίου σε κάθε module. Το υδραυλικό 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 το 1/2 (τμήμα) του αγωγού ενός module (χωρίς λεκάνη καταστροφής), ο οποίος καταλήγει σε ελεύθερη πτώση. Η παροχή ύδατος ελέγχεται με παροχόμετρο τύπου διαφράγματος με ακροφύσιο στον αγωγό που τροφοδοτεί τη δεξαμενή του ομοιώματος. Η κλίμακα του ομοιώματος επιλέχθηκε να είναι 1:12,5 και εξασφαλίζει συνθήκες δυναμικής ομοιότητας κατά Froude για το εύρος των παροχών που εξετάστηκαν (Ettema et al., 2000). Με βάση την επιλεγείσα κλίμακα, η μέγιστη παροχή στο ομοίωμα είναι 45 l/s.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις βάθους ροής και σημειακών ταχυτήτων σε κρίσιμες περιοχές για παροχές 45, 27,2 και 11 l/s στο αρχικό ομοίωμα (οι αντίστοιχες παροχές στο πρωτότυπο είναι 25, 15 και 6 m³/s), καθώς και στο τελικό το οποίο προέκυψε ύστερα από ενδιάμεσες παρατηρήσεις και τροποποιήσεις του σχεδιασμού για τις ίδιες τιμές παροχής. Οι μετρήσεις βάθους έγιναν με σταθμήμετρο τύπου ακίδας και οι μετρήσεις ταχύτητας με σωλήνα Pitot διαμέτρου 1 mm. 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 “ομοιόμορφης” ροής.

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση. Οι σημαντικότερες από τις μετρήσεις που έγιναν συνοψίζονται ως εξής:

Δοκιμή 1: σε γεωμετρία που αντιστοιχεί στον αρχικό σχεδιασμό, όπως έχει οριστεί στην Ενότητα 2. Κάτοψη της περιοχής της λεκάνης καταστροφής ενέργειας φαίνεται στο Σχήμα 2.

Δοκιμή 2: σε γεωμετρία που περιλαμβάνει ενιαίο αγωγό, χωρίς λεκάνη καταστροφής ενέργειας.

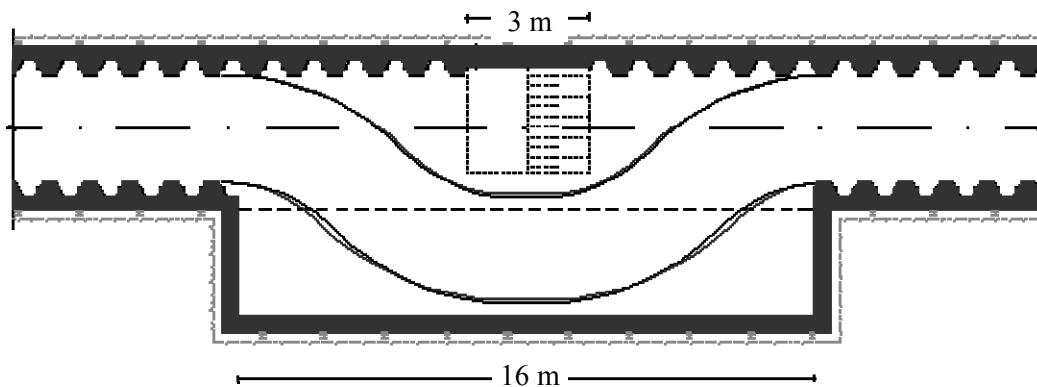
Δοκιμή 3: σε γεωμετρία που αντιστοιχεί στον τελικό σχεδιασμό, στον οποίο κάθε module αποτελείται από αγωγό μήκους 80 m και λεκάνη καταστροφής ενέργειας μήκους 20 m. Η διάταξη των στοιχείων καταστροφής ενέργειας στη λεκάνη φαίνεται στο Σχήμα 3 και την Εικόνα 3α.

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 διατομές ελαχίστου πλάτους (21,2 cm στο ομοίωμα) στο μέσον των προεξεχουσών παρειών των στοιχείων τραχύτητας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρατίθενται στην αντίστοιχη ενότητα υπό τη μορφή διαγραμμάτων.

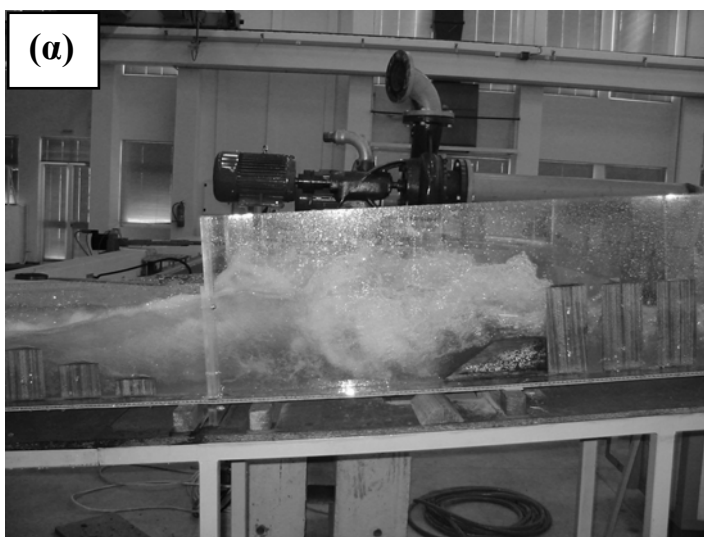
3.1. ΔΟΚΙΜΗ 1

Η πρώτη σειρά δοκιμών έγινε στη γεωμετρία, η οποία αντιστοιχεί στον αρχικό σχεδιασμό (Σχήμα 2). Στο υδραυλικό ομοίωμα, το μήκος του αγωγού είναι 512 cm και το μήκος της λεκάνης καταστροφής ενέργειας είναι 128 cm, συνεπώς, το μήκος ενός module είναι 640 cm. Το πλάτος του αγωγού μεταβάλλεται μεταξύ 21,2 και 27,6 cm με διάμηκες βήμα 12,8 cm. Μέρος της λεκάνης καταστροφής του αρχικού σχεδιασμού, για παροχή 45 l/s, καθώς και το συνακόλουθο υδραυλικό άλμα φαίνονται στην Εικόνα 1.

Το βάθος ροής, d , μετρήθηκε κατά μήκος του μέσου του αγωγού και του τοιχώματος της λεκάνης καταστροφής ενέργειας. Τα διαμήκη προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας απεικονίζονται στο Γράφημα 1, για τρεις τιμές της παροχής $Q = 45, 27,2$ και 11 l/s. Όπως προκύπτει από το Γράφημα 1, το μέγιστο βάθος εντός της λεκάνης καταστροφής ενέργειας είναι 4,38 m (35 cm στο ομοίωμα) και προκύπτει από το υδραυλικό άλμα που προκαλεί ο τραπεζοειδής αναβαθμός. Επίσης, στην είσοδο του αγωγού του επόμενου module ($x = 640$ cm), παρατηρείται μέγιστο βάθος 2,5 m (20 cm στο ομοίωμα). Τα παραπάνω υπερβαίνουν τα αποδεκτά βάθη για το σχεδιασμό της σήραγγας.

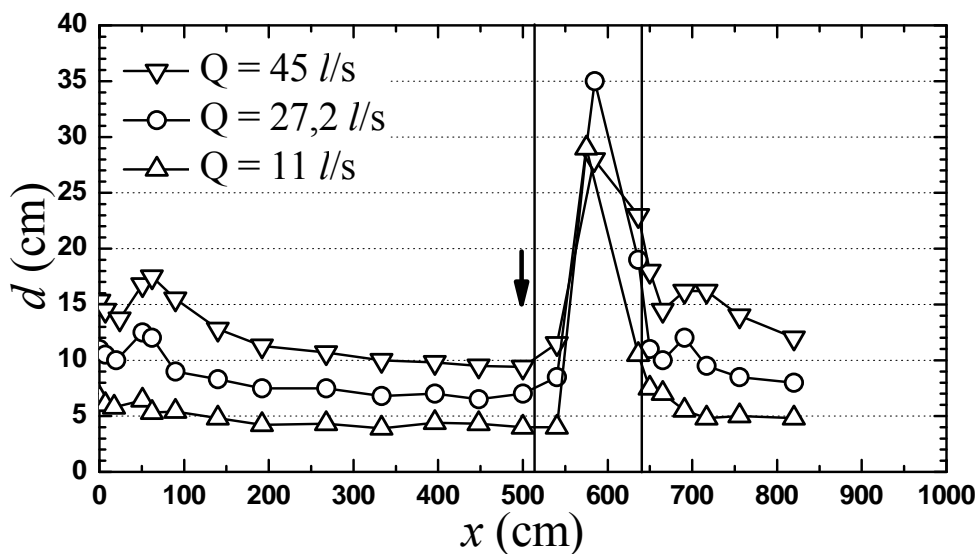


Σχήμα 2. Κάτοψη λεκάνης καταστροφής ενέργειας αρχικού σχεδιασμού (ροή από αριστερά προς δεξιά) με τοπικό τραπεζοειδή αναβαθμό μήκους 3 m και ύψους 1,5 m.

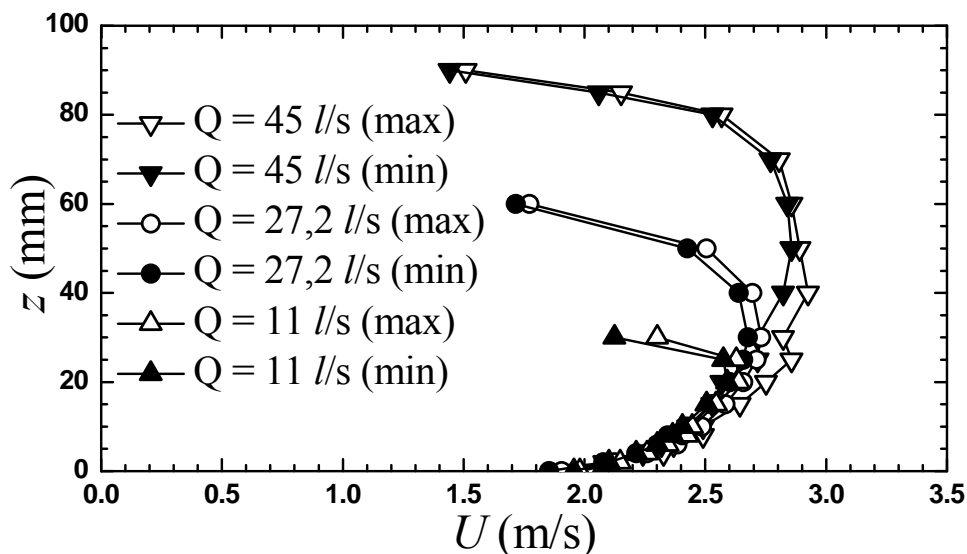


Εικόνα 1. (α) Άποψη της λεκάνης καταστροφής ενέργειας του αρχικού σχεδιασμού κατά τη Δοκιμή 1 (ροή από δεξιά προς τα αριστερά). (β) Άποψη της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας κατάντη της λεκάνης καταστροφής ενέργειας κατά τη Δοκιμή 1.

Κατακόρυφα προφίλ διαμήκους ταχύτητας που μετρήθηκαν στο μέσον διατομής πριν τη λεκάνη καταστροφής ενέργειας, η θέση της οποίας σημειώνεται με βέλος στο Γράφημα 1, παρουσιάζονται στο Γράφημα 2. Για κάθε παροχή, παρουσιάζονται δύο προφίλ ταχύτητας, U_{\min} και U_{\max} , τα οποία αντιστοιχούν στην ελάχιστη και τη μέγιστη ένδειξη του σωλήνα Pitot. Η σχετική απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών είναι μικρότερη του 5%. Το πρώτο σημείο μέτρησης κοντά στον πυθμένα αντιστοιχεί σε $z = 0,5$ mm, καθώς η συγκεκριμένη μέτρηση έγινε με τον σωλήνα Pitot να εφάπτεται του πυθμένα. Πάνω από το μέσον του βάθους, η διαμήκης ταχύτητα μειώνεται λόγω της τρισδιάστατης μορφής της ροής, η οποία αναπτύσσεται από την αποκόλληση και τις δίνες στα πλευρικά στοιχεία τραχύτητας. Κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις ταχύτητας λόγω της ύπαρξης φυσαλίδων αέρα (Εικόνα 1β), συνεπώς, τα προφίλ ταχύτητας στο Γράφημα 2 δεν φθάνουν μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια.



Γράφημα 1. Διαμήκη προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας στη Δοκιμή 1. Οι κάθετες γραμμές αντιστοιχούν στην αρχή και το τέλος της λεκάνης καταστροφής ενέργειας. Το μαύρο βέλος υποδεικνύει τη διατομή όπου μετρήθηκαν τα προφίλ ταχύτητας του Γραφήματος 2.

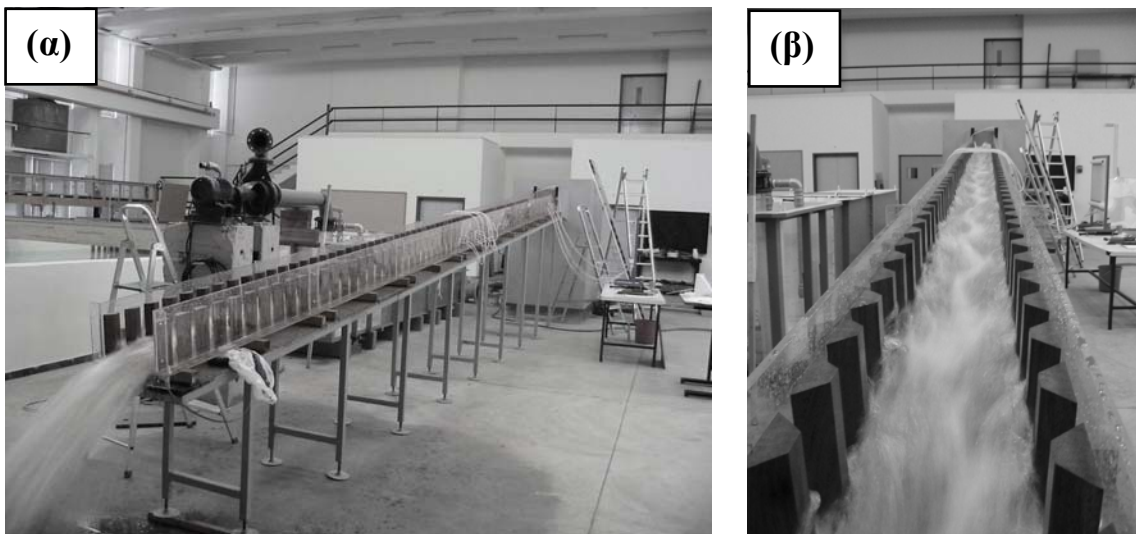


Γράφημα 2. Προφίλ διαμήκους ταχύτητας, τα οποία μετρήθηκαν κατά τη Δοκιμή 1, στο μέσον της διατομής που σημειώνεται με βέλος στο Γράφημα 1.

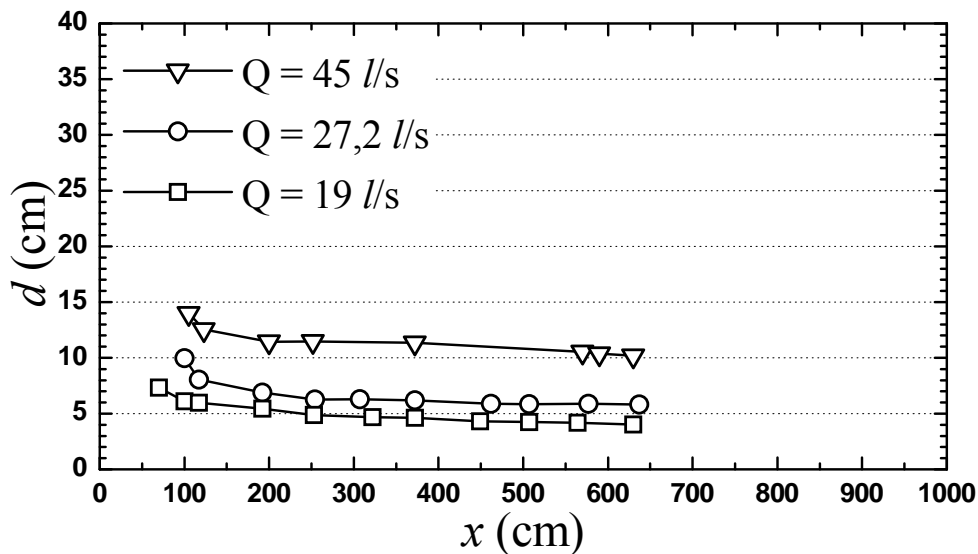
3.2. ΔΟΚΙΜΗ 2

Η δεύτερη σειρά δοκιμών έγινε σε γεωμετρία, η οποία αντιστοιχεί σε ενιαίο αγωγό χωρίς τη λεκάνη καταστροφής ενέργειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Η δοκιμή αυτή έγινε προκειμένου να ελεγχθεί η πιθανότητα επίτευξης ομοιόμορφης ροής στο διαθέσιμο μήκος του ομοιώματος (860 cm), το οποίο αντιστοιχεί σε μήκος πρωτοτύπου αγωγού 107,5 m.

Τα διαμήκη προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας απεικονίζονται στο Γράφημα 3, για τρεις τιμές της παροχής $Q = 45, 27,2$ και 19 l/s. Ο έλεγχος ανάπτυξης ομοιόμορφης ροής πραγματοποιήθηκε μέσω υπολογισμού της ειδικής ενέργειας σε χαρακτηριστικές διατομές κατά μήκος του αγωγού. Η σχετική ανάλυση θα παρουσιαστεί στην ενότητα 4. Επισημαίνεται ότι στη Δοκιμή 2 δεν εξετάστηκε η παροχή των 11 l/s, καθώς, κατά τη Δοκιμή 1, δεν παρουσιάστηκε σημαντική μεταβολή του βάθους στο κατάντη $1/2$ του αγωγού πριν την είσοδο στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας.



Εικόνα 2. (α) Άποψη της ροής στον αγωγό χωρίς λεκάνη καταστροφής ενέργειας κατά τη Δοκιμή 2. (β) Άποψη της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη Δοκιμή 2.

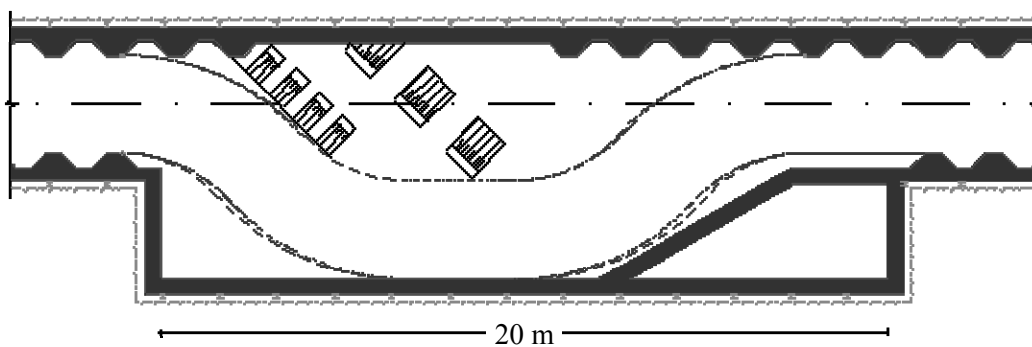


Γράφημα 3. Διαμήκη προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας στη Δοκιμή 2.

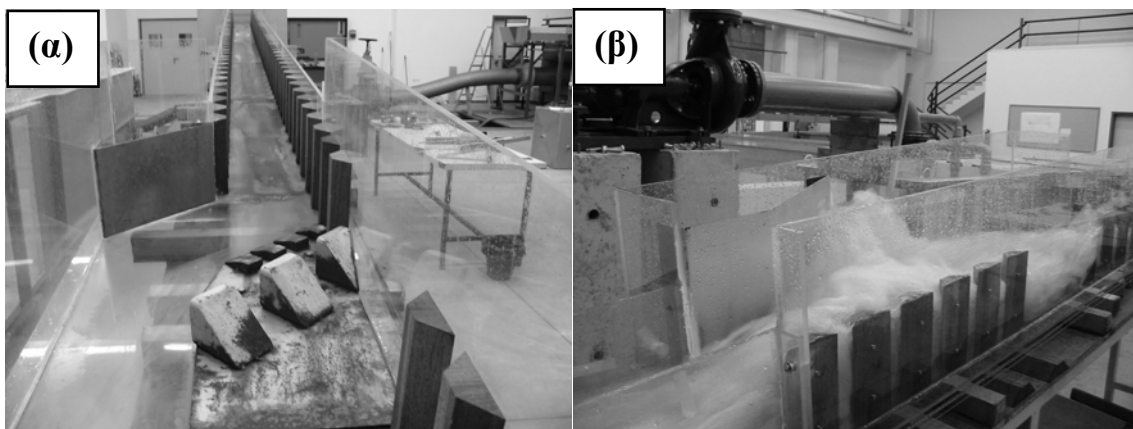
3.2. ΔΟΚΙΜΗ 3

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 θα έπρεπε να αυξηθεί προκειμένου να καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη ομοιόμορφης ροής στο διαθέσιμο μήκος του αγωγού, πριν την λεκάνη καταστροφής ενέργειας.

Βάσει των ανωτέρω, επιλέχθηκε μήκος module ίσο με 100 m (800 cm στο ομοίωμα) αποτελούμενο από αγωγό μήκους 80 m (640 cm στο ομοίωμα) και λεκάνη μήκους 20 m (160 cm στο ομοίωμα). Επιπλέον, ανασχεδιάστηκε η γεωμετρία της λεκάνης καθώς και οι οδοντώσεις για τη δημιουργία υδραυλικού άλματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 και την Εικόνα 3. Η τρίτη σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκε με τη νέα αυτή γεωμετρία.

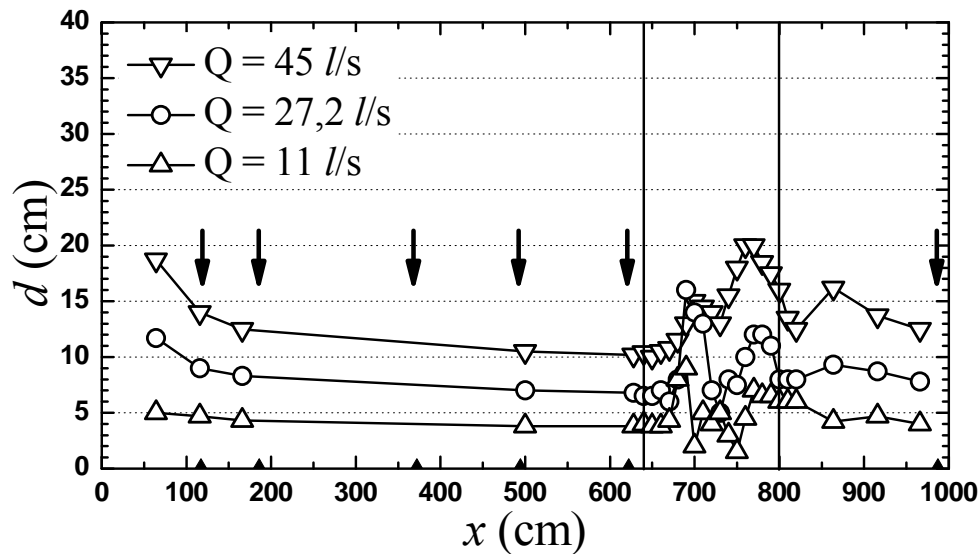


Σχήμα 3. Κάτοψη λεκάνης καταστροφής ενέργειας τελικού σχεδιασμού (ροή από αριστερά προς δεξιά) με λοξή διάταξη τεσσάρων οδοντώσεων, ύψους 0,25 m εκάστη, στα ανάντη και τριών οδοντώσεων, ύψους 1 m εκάστη, στα κατόντη (Εικόνα 3α).

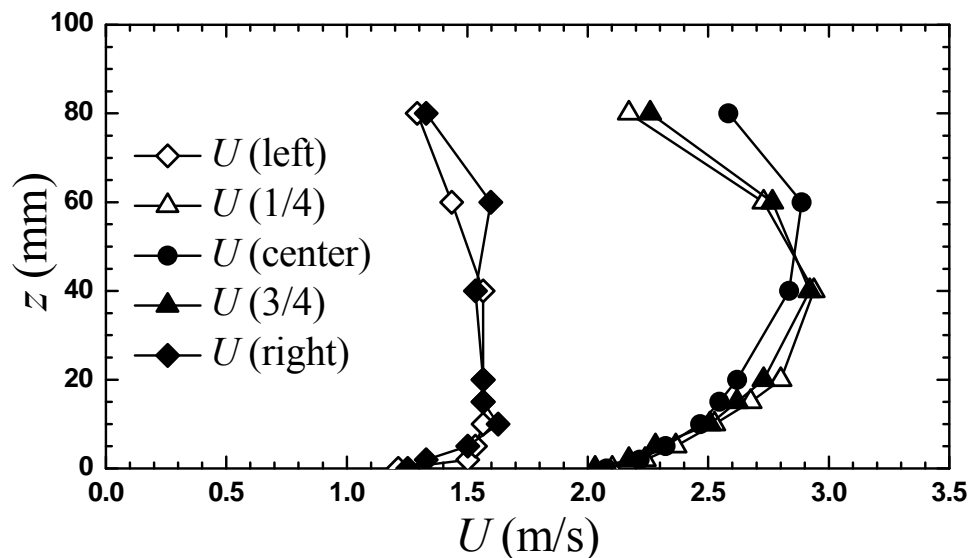


Εικόνα 3. (α) Άποψη της διαμόρφωσης των οδοντώσεων πρόκλησης υδραυλικού άλματος στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας του τελικού σχεδιασμού για τη Δοκιμή 3. (β) Άποψη της διαμόρφωσης της ελεύθερης επιφάνειας στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας κατά τη Δοκιμή 3 (ροή από δεξιά προς αριστερά).

Τα διαμήκη προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας απεικονίζονται στο Γράφημα 4, όπου σημειώνονται με βέλη οι διατομές στις οποίες έγιναν μετρήσεις κατακόρυφου προφίλ διαμήκους ταχύτητας, για τρεις τιμές της παροχής $Q = 45, 27,2$ 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 των προεξεχουσών παρειών των στοιχείων τραχύτητας, και από ένα, $U_{1/4}$ και $U_{3/4}$, στο 1/4 και στα 3/4 του πλάτους της διατομής. Τυπικό παράδειγμα δίδεται στο Γράφημα 5, όπου παρουσιάζονται τα κατακόρυφα προφίλ διαμήκους ταχύτητας, για $Q = 45$ l/s, στην πέμπτη (από τα ανάντη) διατομή που σημειώνεται με βέλος στο Γράφημα 4.



Γράφημα 4. Διαμήκη προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας στη Δοκιμή 3. Οι κάθετες γραμμές αντιστοιχούν στην αρχή και το τέλος της λεκάνης καταστροφής ενέργειας. Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν τις διατομές μέτρησης της ταχύτητας.



Γράφημα 5. Προφίλ διαμήκους ταχύτητας, τα οποία μετρήθηκαν κατά τη Δοκιμή 3 για παροχή $Q = 45$ l/s, στην πέμπτη (από τα ανάντη) διατομή που σημειώνεται με βέλος στο Γράφημα 4.

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

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

Από την πειραματική έρευνα των απωλειών ενέργειας για την επιλεγείσα διάταξη κατακόρυφων πλευρικών στοιχείων τραχύτητας στο ευθύγραμμο τμήμα του αγωγού, προέκυψαν συνθήκες ομοιόμορφης ροής για μήκος αγωγού μεγαλύτερο από αυτό που είχε προταθεί στον αρχικό σχεδιασμό. Επομένως, απαιτήθηκε η αύξηση εκάστου module προκειμένου να καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη ομοιόμορφης ροής στο διαθέσιμο μήκος του αγωγού, πριν την λεκάνη καταστροφής ενέργειας. Επιπλέον, βελτιώθηκε ο σχεδιασμός των διατάξεων καταστροφής ενέργειας, οι οποίες 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 στη συμπεριφορά της κατανομής του βάθους ύδατος d (Γράφημα 4), της ειδικής ενέργειας E (Γράφημα 6) και του αριθμού Froude Fr (Γράφημα 7) κατά μήκος του υδραυλικού ομοιώματος.

Η ειδική ενέργεια υπολογίζεται από την εξίσωση

$$E = \alpha \frac{\bar{U}^2}{2g} + d \quad (4.1)$$

και ο αριθμός Froude από την εξίσωση

$$Fr = \frac{\bar{U}}{\sqrt{gd}} \quad (4.2)$$

όπου $a = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^3 dA$ είναι ο συντελεστής συνόρθωσης, A είναι το εμβαδόν, U είναι η

σημειακή και $\bar{U} = \frac{1}{A} \int_A U dA$ η μέση ταχύτητα σε κάθε διατομή. Η ειδική ενέργεια

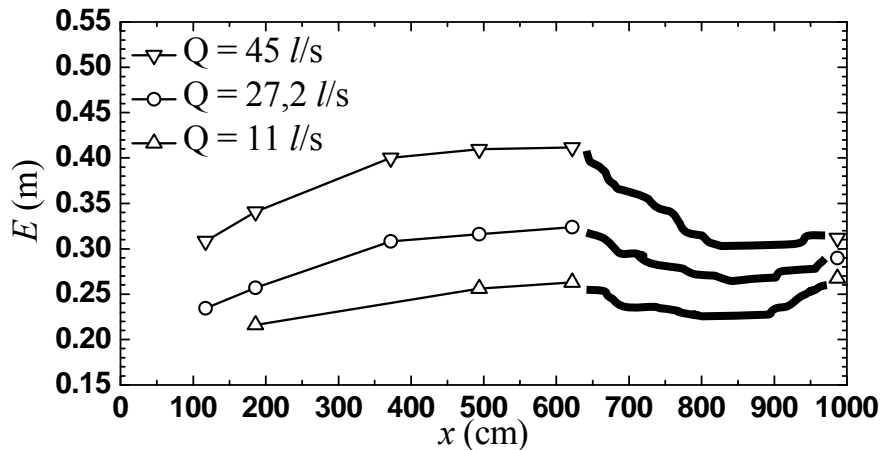
υπολογίσθηκε σε όλες τις διατομές των Δοκιμών 2 και 3, στις οποίες μετρήθηκαν τα κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων, σύμφωνα με το Γράφημα 5, και οι οποίες αντιστοιχούν σε θέσεις εντός του αγωγού ανάντη και κατάντη της λεκάνης καταστροφής ενέργειας.

Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας και του συντελεστή συνόρθωσης έγινε, κατόπιν παρεκβολής των προφίλ ταχύτητας μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια, μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης σε κάθε διατομή διά της μεθόδου του τραπεζίου. Σε κάθε διατομή προέκυψε $\bar{U} \cdot A / Q \approx 1,1 > 1$, λόγω της παρουσίας φυσαλίδων αέρα κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, οι οποίες, επομένως, εκτιμήθηκε ότι καλύπτουν περίπου το 10% κάθε διατομής. Επίσης, προέκυψαν τιμές του συντελεστή συνόρθωσης στο διάστημα $1,05 < \alpha < 2,20$, ενώ παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες τιμές του σχετίζονται με την υψηλότερη παροχή. Αυτό συμβαίνει επειδή η συμβολή των πλευρικών στοιχείων τραχύτητας αυξάνει με την αύξηση της παροχής, επομένως και του βάθους ροής, καθιστώντας τη ροή έντονα τρισδιάστατη.

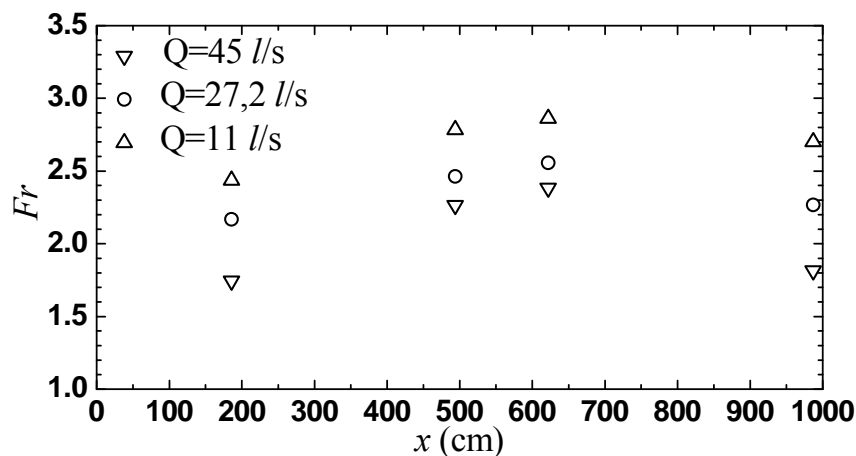
Στο Γράφημα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Δοκιμής 3. Ανάντη της λεκάνης καταστροφής, όπου η ροή είναι υπερκρίσιμη και δεν επηρεάζεται από την παρουσία της λεκάνης καταστροφής, προκύπτει ισότητα της ειδικής ενέργειας των Δοκιμών 2 και 3, ενώ προέκυψαν συνθήκες ομοιόμορφης ροής σε τμήμα του αγωγού ανάντη της λεκάνης καταστροφής ενέργειας. Συγκεκριμένα, η καμπύλη μεταβολής της ειδικής ενέργειας λαμβάνει σχεδόν σταθερή τιμή μετά τη θέση $x = 500$ cm, για τα τελευταία 140 cm του αγωγού πριν την έναρξη της λεκάνης καταστροφής ενέργειας στη θέση $x = 640$ cm. Ειδικότερα, με βάση το Γράφημα 6, υπολογίζεται ότι, σε αυτό το τμήμα του αγωγού, η απόκλιση της τιμής των απωλειών ειδικής ενέργειας από την υψομετρική διαφορά των δύο διατομών είναι μικρότερη του 6%. Επομένως, θεωρείται ότι οι απώλειες ειδικής ενέργειας είναι περίπου ίσες με την υψομετρική διαφορά των δύο διατομών και έχει αναπτυχθεί ομοιόμορφη ροή.

Η δημιουργία υδραυλικού άλματος εντός της λεκάνης (Δοκιμή 3), όπως φαίνεται και από το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας (Γράφημα 4) και τις σχετικές μαγνητοσκοπήσεις των μετρήσεων, προκαλεί μείωση της 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 870 cm έως 920 cm στο ομοίωμα. Πράγματι, οι θέσεις αυτές αντιστοιχούν στο τρίτο τοπικό μέγιστο των προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας (Γράφημα 4) και ευρίσκονται στο αρχικό τμήμα του αγωγού του δεύτερου module, το οποίο αρχίζει στα 800 cm. Επιπλέον, ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας αμέσως μετά την λεκάνη καταστροφής έδειξε ότι ικανοποιείται σε μεγάλο βαθμό το κριτήριο περιοδικότητας του ροϊκού πεδίου. Ειδικότερα, για την περίπτωση της παροχής σχεδιασμού του έργου ($Q = 45$ l/s), υπολογίστηκε ότι στη θέση $x = 1000$ cm, δηλαδή 200 cm από την έναρξη του επόμενου module, η ροή εκκινεί από την ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας με αυτήν που υπολογίστηκε στη θέση $x = 200$ cm, δηλαδή 200 cm από την έναρξη του προηγούμενου module.

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. Εικάζεται πάντως ότι το φαινόμενο πιθανόν να έχει και περιοδικότητα για μεγαλύτερο αριθμό modules. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει η μεταβολή του αριθμού Froude (Γράφημα 7).



Γράφημα 6. Διαμήκης κατανομή ειδικής ενέργειας για τη Δοκιμή 3. Με έντονη γραμμή απεικονίζεται ενδεικτικά η κατανομή στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας και στο αμέσως κατάντη της τμήμα του αγωγού.



Γράφημα 7. Ενδεικτικές τιμές του αριθμού Froude για τη Δοκιμή 3.

Μετά την επαναληψιμότητα, ένα 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 (16,2 cm στο ομοίωμα) στον αγωγό, σε απόσταση 8 m (64 cm στο ομοίωμα) από την έξοδο της λεκάνης καταστροφής ενέργειας, και μέγιστο βάθος 3,75 m (30 cm 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 εμφάνισης της και της δυνατότητας διαχείρισής της μέσω τεχνικού έργου ελέγχου της παροχής στην είσοδο της σήραγγας.

Τρίτο κριτήριο αξιολόγησης του τελικού σχεδιασμού είναι η επίτευξη μέσης ταχύτητας ροής στον αγωγό τέτοιας ώστε να αποτραπεί η εμφάνιση σπηλαιώσης, η

οποία θα προκαλέσει διάβρωση του σκυροδέματος στον πυθμένα ή στα τοιχώματα, και να μην απαιτηθεί ειδική σύνθεση και προστασία του σκυροδέματος. Σύμφωνα με οδηγίες του U.S. Army Corps of Engineers (1985), δεν προκαλείται σπηλαιώση όταν η μέση ταχύτητα ροής δεν υπερβαίνει τα 12 m/s και η επιφάνεια του σκυροδέματος είναι λεία. Η μέγιστη μέση ταχύτητα, και για τις τρεις παροχές που εξετάστηκαν, παρατηρείται στο τέλος του αγωγού πριν από την είσοδο στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας. Η μέγιστη μέση ταχύτητα είναι 8,34 m/s (2,36 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 6,40 m/s (1,81 m/s στο ομοίωμα) για παροχή 6 m³/s (11 l/s στο ομοίωμα). Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η ροή παρουσιάζει επαναληψιμότητα, ενώ φαίνεται να βελτιώνεται η περιοδικότητά της στον τελικό σχεδιασμό. Ωστόσο, η αύξηση της μέσης ταχύτητας στη θέση $x = 1000$ cm, δηλαδή 200 cm εντός του δεύτερου module, σε σχέση με την αντίστοιχη θέση, $x = 200$ cm, του πρώτου module, ως ποσοστό επί της ανάντη μέσης ταχύτητας, είναι 2,8%, 4,6% και 9,5% 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. Αντιθέτως, προτείνεται η βελτίωση της επαναληψιμότητας αλλά και η καλύτερη λειτουργία του αγωγού για τις μικρές (συνήθεις) παροχές μέσω της χρήσης εγκαρσίων στοιχείων τραχύτητας στον πυθμένα του αγωγού. Τούτο δικαιολογείται και από τη μικρή συμβολή των 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

$$F = \rho g A \frac{d}{2} + \rho \int_A U^2 dA \quad (4.3)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ύδατος. 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.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, 1987. *Design of Small Dams*. Denver, Colorado.
- Ettema, R., Amdt, R., Roberts, P. and Wahl, T., 2000. *Hydraulic Modeling: Concepts and Practice*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1985. *Specialized Repair Technique: Repair of Structures Damaged by Cavitation-Erosion*. REMR Technical Note CS-MR-9.2, U.S. Army Engineer Research Development Center, Vicksburg, Mississippi.
- Γιαννόπουλος, Π.Χ., 2007. Κεφάλαιο 3: Φράγματα. *Ανάλυση και Σχεδιασμός Κατασκευών*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.