

Ανάλυση αστοχίας άνω φράγματος και αλυσιδωτές επιπτώσεις κατάντη σε αντλησιοταμιευτικά υδροηλεκτρικά συστήματα: Μελέτη περίπτωσης του έργου Μπράβα - Σφηκιά στον Ποταμό Αλιάκμονα

Δήμας Π.^{1*}, Λύκου Α.¹, Ζαρκαδούλας Α.¹, Σακκή Γ.Κ.¹, Ευστρατιάδης Α.¹, και Μακρόπουλος Χ.¹

¹ Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 15780, Αθήνα

* Υπεύθυνος για την αλληλογραφία συγγραφέας / E-mail: pdimas@mail.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση των μηχανισμών αστοχίας φραγμάτων και της επακόλουθης διάδοσης κυμάτων πλημμύρας είναι κρίσιμη για την κατανόηση των κινδύνων που συνδέονται με τις υδροηλεκτρικές υποδομές. Η εν λόγω προβληματική περιλαμβάνει και τα αντλησιοταμιευτικά υδροηλεκτρικά συστήματα, τα οποία αποτελούν -στην ουσία- διασυνδεδεμένες υποδομές ζωτικής σημασίας για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Λόγω της αυξανόμενης σημασίας τους, είναι καίριας αξίας η κατανόηση των πολυδιάστατων επιπτώσεων ενδεχόμενων αστοχιών στις ανθρώπινες δραστηριότητες και στις κρίσιμες υποδομές κατάντη.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στο εξεταζόμενο αντλησιοταμιευτικό υδροηλεκτρικό σύστημα Μπράβα-Σφηκιάς, το οποίο βρίσκεται στη λεκάνη του ποταμού Αλιάκμονα. Το υφιστάμενο σύστημα περιλαμβάνει μια σειρά ταμιευτήρων (Ιλαρίωνας, Πολύφυτο, Σφηκιά, Ασώματα, Αγία Βαρβάρα). Το εξεταζόμενο έργο περιλαμβάνει έναν υφιστάμενο κύριο ταμιευτήρα (Σφηκιά), έναν προτεινόμενο άνω ταμιευτήρα στη θέση «Μπράβα», καθώς και τις συνοδές υδραυλικές κατασκευές. Με τη χρήση προηγμένων εργαλείων προσομοίωσης σε συνδυασμό με εμπειρικές προσεγγίσεις, η εργασία εξετάζει τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας, με έμφαση στη διασωλήνωση (ripping) του άνω φράγματος στη Μπράβα και τις δυναμικές των παραγόμενων πλημμυρικών κυμάτων σε όλο το κατάντη υδρολογικό μονοπάτι, έως και το κάτω φράγμα (Σφηκιά).

Συγκεκριμένα, η εργασία διερευνά πολλαπλά σενάρια αστοχίας, αξιολογεί τη διάδοση του πλημμυρικού κύματος μέσω υδροδυναμικής προσομοίωσης και εκτιμά τις επιπτώσεις στον κατάντη ταμιευτήρα στο πλαίσιο της υδρολογικής διέλευσης του υδρογραφήματος εισροής και των επιδράσεων από τη δημιουργία κυμάτων μεγάλης κλίμακας (φαινόμενο «τσουνάμι»). Το σύνολο της ανάλυσης καταλήγει σε αποτελεσματικά μέτρα μετριασμού κινδύνου, όπως είναι τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και οι προληπτικές παρεμβάσεις, με στόχο τη διασφάλιση της ασφάλειας και της βιωσιμότητας του ολοκληρωμένου συστήματος.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει:

1. Προσομοίωση αστοχίας του άνω φράγματος με χρήση των λογισμικών HEC-RAS και BASEbreach (Peter et al., 2018), σε πλαίσιο Monte Carlo, για παραγωγή εύρους υδρογραφημάτων εκροής (Εικόνα 1).

2. Υδροδυναμική προσομοίωση με HEC-RAS 2D για τη διάδοση του πλημμυρικού κύματος.
3. Προσέγγιση για δημιουργία και διάδοση «τσουνάμι» στον ταμιευτήρα Σφηκιάς, θεωρώντας το πλημμυρικό κύμα ως κατολίσθηση.
4. Υδρολογική διέλευση του υδρογραφήματος και των συνολικών ανάντη εισροών μέσω των κατασκευών ελέγχου της Σφηκιάς (στρόβιλοι, υπερχειλιστής).

Η προσομοίωση πλημμύρας εστιάζει στη διάδοση των κυμάτων από τον ταμιευτήρα Μπράβας έως τον κατάντη ταμιευτήρα Σφηκιάς σε περίπτωση αστοχίας του άνω φράγματος. Με χρήση του HEC-RAS 2D, προσομοιώνεται η δυναμική των πλημμυρικών κυμάτων, μέσω κατάλληλων μεγεθών όπως η ταχύτητα, το βάθος και ο χρόνος άφιξης. Τα κύρια σημεία περιλαμβάνουν τα κατωτέρω:

- **Παράμετροι Αστοχίας Φράγματος:** Πολλαπλά σενάρια αστοχίας λόγω διασωλήνωσης (ripping) προσομοιώνονται με χρήση εμπειρικών εξισώσεων και σχέσεων παλινδρόμησης (π.χ. Froehlich, 2008).
- **Υδραυλική Συνδεσιμότητα:** Οι υδρολογικές και τοπογραφικές συνδέσεις μεταξύ των ταμιευτήρων προσομοιώνονται ώστε να καταγραφεί η διάδοση των κυμάτων.
- **Μετασχηματισμός Κύματος Πλημμύρας:** Αξιολογούνται χαρακτηριστικά όπως το μέγιστο βάθος, η ταχύτητα (Εικόνα 2) και ο χρόνος άφιξης του κύματος σε τρία σενάρια (ευνοϊκό, αντιπροσωπευτικό, δυσμενές), λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση λόγω φυσικών και τεχνητών εμποδίων.

Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της δημιουργίας και διάδοσης κυμάτων τύπου «τσουνάμι» (Εικόνα 3) στον ταμιευτήρα Σφηκιάς:

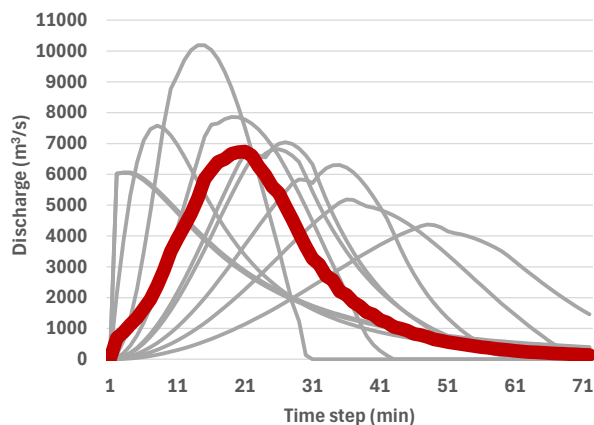
- **Θεωρητική Προσέγγιση:** Βασίζεται σε φυσικές αρχές για την πρόβλεψη της δυναμικής δημιουργίας κυμάτων λόγω εισόδου κατολίσθησης στον ταμιευτήρα. Οι βασικοί παράγοντες είναι:
 - Όγκος κατολίσθησης: Όγκος υλικού που μετατοπίζεται.
 - Ταχύτητα εισόδου: Η ταχύτητα με την οποία το υλικό εισέρχεται στο νερό.
 - Γωνία κλίσης: Επηρεάζει τη μεταφορά ενέργειας στο κύμα.

Το αρχικό ύψος κύματος υπολογίζεται με χρήση της διαφορικής εξίσωσης του Di Risio και Sammarco (2008). Παράγοντες όπως η τριβή του βυθού, η ακτινική διασπορά και η περιθλαση λαμβάνονται υπόψη (Goda, 2010), ενώ το τελικό βήμα υπολογίζει το ύψος αναρρίχησης στο φράγμα Σφηκιάς.

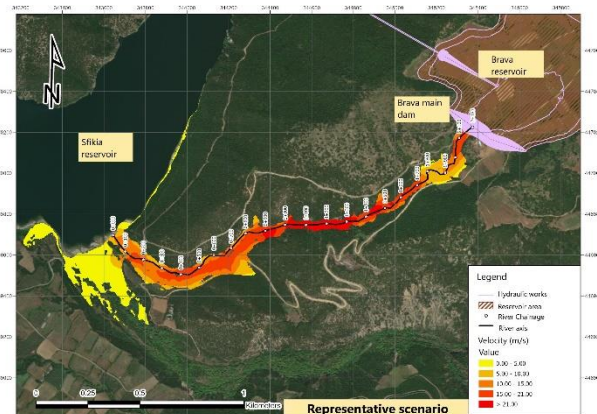
- *Ημι-εμπειρική Προσέγγιση:* Ακολουθεί την υπολογιστική διαδικασία των Evers et al. (2019), η οποία βασίζεται σε εμπειρικές εξισώσεις βαθμονομημένες με βάση παρατηρήσεις, παρέχοντας πιο ρεαλιστικές προβλέψεις των επιπτώσεων του κύματος.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

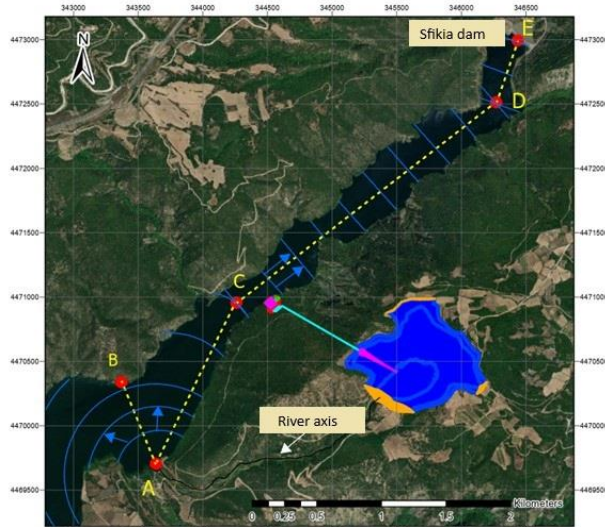
Η ανάλυση των δυνητικών επιπτώσεων από αστοχία του άνω φράγματος αναδεικνύει σημαντικούς κινδύνους στο σύνολο του αντλησιοταμιευτικού συστήματος. Τα προσομοιωμένα κύματα πλημμύρας παρουσίασαν μέγιστες παροχές που υπερβαίνουν τα 6,500 m³/s στον ταμιευτήρα Σφηκιάς, στο αντιπροσωπευτικό σενάριο. Οι αναλύσεις διάδοσης πλημμύρας αποκάλυψαν πιθανές κατακλύσεις περιοχών κατάντη, υπογραμμίζοντας τη σημασία μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης διαχείρισης κινδύνου. Η προσομοίωση κυμάτων τύπου «τσουνάμι» έδειξε ότι κύματα που προκαλούνται από αιφνίδιες εισροές εξαιτίας της αστοχίας του άνω ταμιευτήρα μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη στάθμη του νερού στον κατάντη ταμιευτήρα. Η ημι-εμπειρική προσέγγιση παρήγαγε ύψη κύματος άνω των 6 μέτρων κοντά στη ζώνη πρόσκρουσης της «κατολίσθησης», με εξασθένηση των κυμάτων κατάντη λόγω τριβής του πυθμένα και γεωμετρίας του ταμιευτήρα. Το ύψος αναρρίχησης του κύματος (run-up) στη θέση του φράγματος Σφηκιάς υπολογίζεται σε περίπου 1,4 μέτρα. Αντίθετα, η θεωρητική προσέγγιση αποδίδει ύψη αναρρίχησης που κυμαίνονται από 1,4 έως 3,7 μέτρα. Συνολικά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την ανάγκη για ενίσχυση των στρατηγικών μετριασμού κινδύνων, περιλαμβανομένων συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, προσαρμοσμένων ενισχύσεων στις κατασκευές και συντονισμένων σχεδίων λειτουργίας ταμιευτήρων, ώστε να ενδυναμωθεί η ανθεκτικότητα του συνολικότερου συστήματος.



Εικόνα 1. Υδρογραφήματα εκροής λόγω αστοχίας του άνω φράγματος (η έντονη γραμμή αντιστοιχεί στο αντιπροσωπευτικό σενάριο).



Εικόνα 2. Μέγιστη ταχύτητα ροής για την περιοχή μεταξύ των ταμιευτήρων Μπράβας και Σφηκιάς.



Εικόνα 3. Διαδρομή διάδοσης του κύματος τύπου «τσουνάμι».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Di Risio, M., Sammarco, P., 2008. Analytical modeling of landslide-generated waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* 134, 53–60.
- Evers, F., Heller, V., Fuchs, H., Hager, W., Boes, R., 2019. *Landslide-generated impulse waves in reservoirs. Basics and Computations.* Swiss Federal Office of Energy SFOE. Bern, Switzerland. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology VAW. ETH Zurich. Zurich, Switzerland.
- Froehlich, D.C., 2008. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering* 134, 1708–1721. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708))
- Goda, Y., 2010. *Random seas and design of maritime structures.* World scientific.