

Αξιολόγηση πολιτικών διαχείρισης συστημάτων υδροηλεκτρικών έργων υπό το πρίσμα του πλημμυρικού κινδύνου των κατάντη περιοχών: Η περίπτωση του Αλιάκμονα

Π. Δήμας

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MAS ETH Zürich,
Υποψ. Δρ. ΕΜΠ

Α. Λύκου

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc

Γ-Κ. Σακκή

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc, Υποψ. Δρ. ΕΜΠ

Α. Ευστρατιάδης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Ν. Μαμάσης

Καθηγητής ΕΜΠ

Ε. Ζαχαροπούλου

Πολιτικός Μηχανικός ΔΕΥΠ/ΔΕΗ Α.Ε.

Τ. Καραντουμάνης

Διευθυντής Συγκροτήματος Αλιάκμονα/ΔΕΗ Α.Ε.

Ι. Μαύρος

Αναπληρωτής Διευθυντής ΔΕΥΠ/ΔΕΗ Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου, προκαταρκτική αξιολόγηση ευάλωτων περιοχών, πολυκριτηριακή ανάλυση, υδροδυναμική προσομοίωση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο Αλιάκμονας είναι ο μεγαλύτερος σε μήκος ποταμός της χώρας με σημαντική υδροηλεκτρική αξιοποίηση, η λεκάνη απορροής του οποίου έχει υποστεί έντονες τροποποιήσεις που έχουν αλλάξει δραστικά την πλημμυρική δίαιτα του ποταμού στα κατάντη. Η υδροηλεκτρική παραγωγή και η λειτουργία των εκχειλιστών του συγκροτήματος αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται μια μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον ΣΓΠ για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση του πλημμυρικού κινδύνου και αναπτύσσεται μονοδιάστατο μοντέλο υδροδυναμικής προσομοίωσης σε συνθήκες μόνιμης ροής, για τη διερεύνηση σεναρίων συνδυασμένων εκροών από τα φράγματα. Τα παραπάνω αποτελούν αρχικό στάδιο μιας ολιστικής αντιμετώπισης και μπορούν να αξιοποιηθούν επιχειρησιακά για τη λήψη ενημερωμένων ορθολογικών αποφάσεων.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων σε σειρά, πέραν του γεγονότος ότι επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση του υδροδυναμικού μεγάλων ποταμών, παρέχουν επίσης πολύ μεγάλη ευελιξία στη διαχείριση των πλημμυρών, μετριάζοντας ακόμα περισσότερο τον πλημμυρικό κίνδυνο των κατάντη περιοχών, σε σχέση με μεμονωμένα έργα (Nguyen-Tien *et al.*, 2018). Χαρακτηριστικό παράδειγμα στη χώρα μας αποτελεί ο ποταμός Αλιάκμονας, κατά μήκος του οποίου η ΔΕΗ έχει αναπτύξει τέσσερα μεγάλα Υ/Η έργα (Ιλαρίωνας, Πολύφυτο, Σφηκιά, Ασώματα), και στο πέρας αυτών το αναρρυθμιστικό έργο της Αγ. Βαρβάρας.

Ωστόσο, παρά την εξαιρετικά σημαντική αντιπλημμυρική προστασία που προσφέρει η συνδυασμένη αναρρυθμιστική ικανότητα του υδροηλεκτρικού συγκροτήματος Αλιάκμονα, η χαμηλή ζώνη του ποταμού κατάντη των φραγμάτων της ΔΕΗ εξακολουθεί να αποτελεί μια ιδιαίτερα ευάλωτη περιοχή. Αυτό κυρίως συμβαίνει επειδή στον Αλιάκμονα αποστραγγίζεται και μια πρόσθετη έκταση της τάξης των 2200 km², μέσω της λεγόμενης Περιφερειακή Τάφρου (γνωστής και ως T66). Πρόκειται για ένα από τα σημαντικότερα εγγειοβελτιωτικά-αποστραγγιστικά έργα της δεκαετίας του 1930, που σε συνδυασμό με άλλα μεγάλα έργα στην ευρύτερη πεδιάδα της Θεσσαλονίκης, επέτρεψε την αποξήρανση του έλους των Γιαννιτσών, εκτρέποντας στον Αλιάκμονα τα νερά μιας σειράς ποταμών και χείμαρρων, που έως τότε κατέληγαν εκεί (για το ιστορικό των έργων, βλ. Κωνσταντινίδης, 1993).

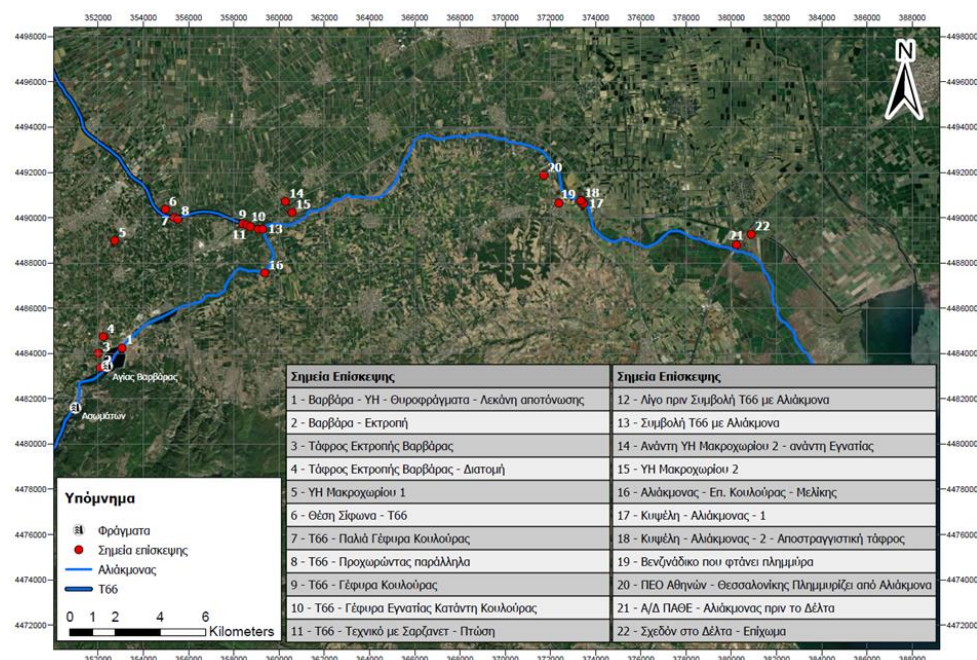
Συνεπώς, σε περιόδους ισχυρών βροχοπτώσεων, οι πλημμυρικές απορροές της Τ66, σε συνδυασμό με τις απορροές που παράγονται στο υδρογραφικό δίκτυο του κάτω ρου του Αλιάκμονα, δύναται να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές σε παρακείμενους οικισμούς και υποδομές, καθώς και στις αγροτικές εκτάσεις που αναπτύσσονται στο ευρύτερο πλημμυρικό πεδίο (floodplain) του ποταμού.

Με βάση τα παραπάνω, το ερώτημα που τίθεται είναι ποιες θα είναι οι εν λόγω επιπτώσεις, στην περίπτωση που καταστεί αναγκαία η απελευθέρωση σημαντικών όγκων νερού και από τα φράγματα της ΔΕΗ, και ειδικότερα διαμέσου των στροβίλων του ΥΗΣ Ασωμάτων, παροχετευτικότητας 300 m³/s, και του εκχειλιστή του φράγματος, παροχετευτικότητας 1600 m³/s. Για να απαντηθεί το παραπάνω ερώτημα, απαραίτητα βήματα καθίστανται η ανάπτυξη κατάλληλης υπολογιστικής υποδομής υδροδυναμικής προσομοίωσης, ο προσδιορισμός του υπολογιστικού της πεδίου, και η ανάλυση διαφορετικών σεναρίων εκροών από το φράγμα και την τάφρο Τ66.

Στο πλαίσιο αυτό, αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη υπολογιστικής υποδομής για την υδροδυναμική προσομοίωση του υδροσυστήματος κατάντη του φράγματος Ασωμάτων. Για την υλοποίηση της, ακολουθούνται δύο διαδοχικές εργασίες, ήτοι η προκαταρκτική αξιολόγηση των ευάλωτων περιοχών και η υδροδυναμική προσομοίωση του κάτω ρου του ποταμού Αλιάκμονα. Η ανάλυση γίνεται με τη μορφή σεναρίων εκροών από τα φράγματα και την Τ66, ενώ επιχειρείται και η επικύρωση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου, με βάση στοιχεία που συλλέχθηκαν κατά την επίσκεψη της ομάδας του έργου στην περιοχή, τον Φεβρουάριο του 2024. Τα αποτελέσματα της υδροδυναμικής προσομοίωσης δίνονται στη μορφή χαρτών όπου αποτυπώνεται το πλημμυρικό πεδίο και τα χαρακτηριστικά του (βάθος ροής, ταχύτητες) για κάθε σενάριο.

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΚΥΡΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΡΓΑ

Η περιοχή που εξετάζεται είναι το ποτάμιο σύστημα του Αλιάκμονα, κατάντη του αναρρυθμιστικού ταμιευτήρα Αγ. Βαρβάρας, που τροφοδοτείται από τις εκροές διαμέσου του φράγματος Ασωμάτων, και της συμβολής της τάφρου Τ66, ως την ευρύτερη περιοχή του οικισμού Κυψέλης (Εικόνα 1). Ανάντη όριο για την συμβάλλουσα τάφρο αποτέλεσε η περιοχή της Κουλούρας, και δη η παλιά γέφυρα. Το ανάντη όριο στην Τ66 καθώς και το κατάντη όριο στο π. Αλιάκμονα τέθηκε λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής αξιολόγησης (βλ. Κεφάλαιο 3), καθώς και αυτοψίας στην περιοχή από την συντακτική ομάδα της εργασίας.



Εικόνα 1: Δορυφορική φωτογραφία περιοχής μελέτης (Πηγή: Google Earth) και σημεία ενδιαφέροντος.

Τα σημαντικότερα τεχνικά έργα της περιοχής, τα οποία έχουν άμεση συνάφεια με το σκοπό της έρευνας, είναι το αναρρυθμιστικό φράγμα Αγ. Βαρβάρας, με τα συνοδά του έργα, η τάφρος Τ66, και το μικρό υδροηλεκτρικό έργο Μακροχωρίου ΙΙ. Συγκεκριμένα, το φράγμα Αγ. Βαρβάρας, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2008, είναι αναρρυθμιστικό έργο, το οποίο έχει κατασκευαστεί στο πέρας του υδροηλεκτρικού συγκροτήματος του Αλιάκμονα. Το κυρίως φράγμα είναι χωμάτινο, με αργιλικό πυρήνα, μήκος 2400 m, μέγιστο ύψος 20.13 m, και υψόμετρο στέψης +43.50 m. Ο ταμιευτήρας που δημιουργείται έχει συνολικό όγκο 4.5 hm³ και ωφέλιμο όγκο 3.5 hm³. Το έργο εξυπηρετεί πολλαπλές χρήσεις, και ειδικότερα την υδροδότηση της Θεσσαλονίκης, με 270 000 m³ ημερησίως, την άρδευση των ΠΕ Ημαθίας, Πέλλας και Θεσσαλονίκης (930 000 στρέμματα), και τη διοχέτευση σταθερής οικολογικής παροχής 4.5 m³/s στον κάτω ρου του Αλιάκμονα. Οι δύο πρώτες χρήσεις εξυπηρετούνται μέσω της λεγόμενης διώρυγας Α0, ενώ η οικολογική παροχή διέρχεται από μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό (ΜΥΗΣ), ισχύος 0.92 MW, παράγοντας ετησίως ενέργεια της τάξης των 4.5 GWh. Η παροχή που εκτρέπεται μέσω της διώρυγας Α0 διέρχεται από το ΜΥΗΣ Μακροχωρίου Ι, ισχύος 10.8 MW, ενώ τμήμα αυτής επιστρέφει στον Αλιάκμονα, μέσω του ΜΥΗΣ Μακροχωρίου ΙΙ, ισχύος 4.0 MW και παροχευτικότητας 75.0 m³/s. Ο εκχειλιστής του φράγματος διαθέτει πέντε μεταλλικά θυροφράγματα μέσω των οποίων διατηρείται σταθερή η στάθμη του νερού του ταμιευτήρα. Η παροχευτικότητά του ανέρχεται σε 1520 m³/s.

Η Περιφερειακή Τάφρος, που αναφέρεται και ως Τ66, είναι το σημαντικότερο αντιπλημμυρικό-αποστραγγιστικό έργο της περιοχής μελέτης. Στην τάφρο διοχετεύονται τα νερά των ποταμών και χειμάρρων που αναπτύσσονται στα ορεινά συγκροτήματα του Βερμίου, του Βόρα και του Πάικου. Εκτός από τον αποστραγγιστικό της χαρακτήρα, η τάφρος Τ66 συμβάλλει στην άρδευση των πεδινών εκτάσεων των περιφερειακών ενοτήτων Πέλλας και Ημαθίας. Το συνολικό μήκος της ανέρχεται σε περίπου 35 km. Η κυρίως κοίτη της έχει πλάτος 38.0 έως 55.0 m και βάθος 3.0 έως 3.5 m, ενώ οι μπαγκίνες έχουν πλάτος από 5.0 έως 10.0 m. Το κατάντη τμήμα της έχει πλάτος 55.0 m και παροχή σχεδιασμού, κατά τη μελέτη, της τάξης των 1600 m³/s. Ωστόσο, στο τμήμα αυτό, η τρέχουσα παροχευτικότητα της τάφρου Τ66, ως συνέπεια της επίδρασης της γήρανσης των υλικών, της ανάπτυξης έντονης βλάστησης στα πρανή, και της καθίζησης φερτών, εκτιμάται ότι δεν υπερβαίνει τα 1300 m³/s.

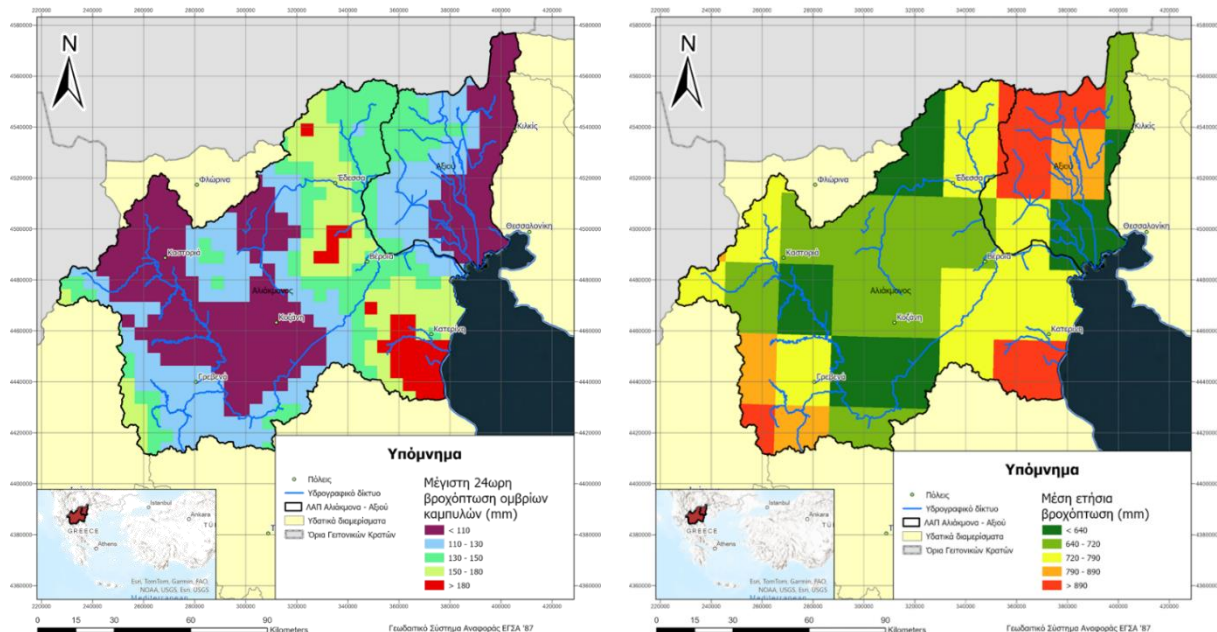
3 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΑΛΩΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΣΩ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Λόγω της πολύ μεγάλης έκτασης της λεκάνης απορροής του Αλιάκμονα (12 400 km²), ο υπολογιστικός φόρτος είναι απαγορευτικός για την συνολική υδροδυναμική προσομοίωση του κάτω ρου του ποταμού. Σε αυτό το πλαίσιο, το πεδίο εφαρμογής των υδροδυναμικών προσομοιώσεων θα προσδιοριστεί από την προκαταρκτική αξιολόγηση των ευάλωτων περιοχών κατάντη του φράγματος των Ασωμάτων. Συγκεκριμένα, θα εφαρμοστεί μία πολυκριτηριακή ανάλυση σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), η οποία θα καταδείξει τις περιοχές με υψηλή επικινδυνότητα εξαιτίας των πλημμυρικών φαινομένων. Για τον σκοπό αυτό, ακολουθείται η μεθοδολογία που προτείνεται, μεταξύ άλλων, από τους Allafta and Opp (2021) και Theochari et al. (2022), καθώς και μία ελαφρώς τροποποιημένη εκδοχή της. Συγκεκριμένα, η πρώτη ανάλυση λαμβάνει υπόψη της, ως ένα από τα κριτήρια, τη μέγιστη 24ωρη βροχόπτωση από τις όμβριες καμπύλες για περίοδο επαναφοράς 50 ετών, ενώ η δεύτερη το μέσο ύψος ετήσιας βροχόπτωσης της περιοχής. Τα υπόλοιπα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις είναι: (i) η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, (ii) το υψόμετρο εδάφους, (iii) η κλίση, (iv) η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, (v) οι χρήσεις γης, (vi) το δυναμικό περατότητας των υδρολιθολογικών σχηματισμών, (vii) το δυναμικό εδαφικής περατότητας.

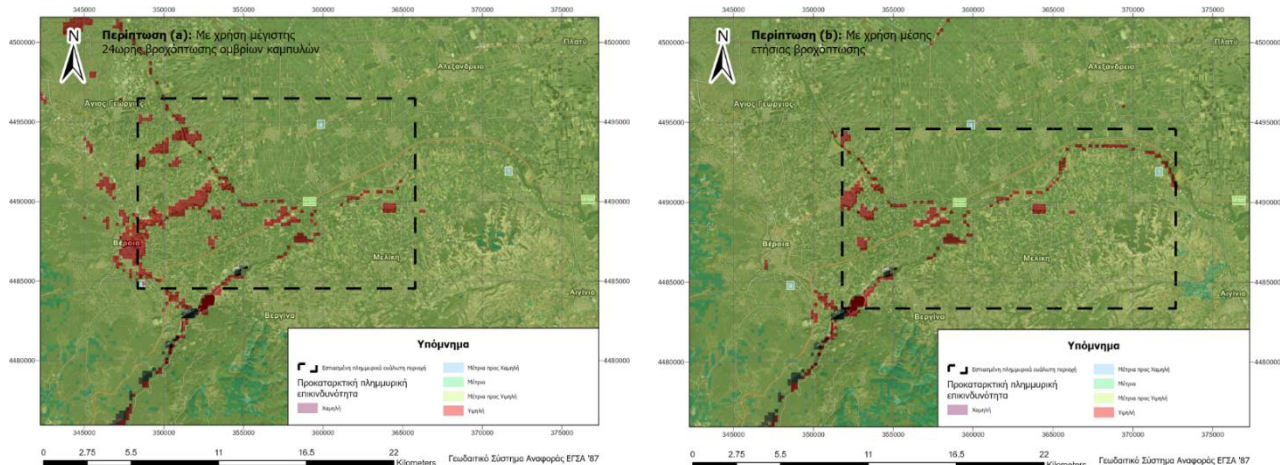
Πίνακας 1. Δεδομένα εισόδου προκαταρκτικής αξιολόγησης ζωνών υψηλής επικινδυνότητας

Κριτήριο	Κλάσεις	Βαρύτητα	Ταξινόμηση
(a) Μέγιστη 24ωρη βροχόπτωση (mm)	< 110	20%	1
	110 – 130		2
	130 – 150		3
	150 – 180		4
	> 180		5
(b) Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	< 640	20%	1
	640 – 720		2
	720 – 790		3
	790 – 890		4
	> 890		5
Απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο (m)	> 17.5	16%	1
	17.5 – 12.5		2
	12.5 – 7.5		3
	7.5 – 2.5		4
	< 2.5		5
Υψόμετρο εδάφους (m)	> 1550	14%	1
	1550 – 1150		2
	1150 – 750		3
	750 – 350		4
	< 350		5
Κλίσεις (μοίρες)	> 40	14%	1
	40 – 30		2
	30 – 20		3
	20 – 10		4
	< 10		5
Χρήσεις γης (δυναμικό επιφανειακής απορροής)	Χαμηλό	11%	1
	Σχετικά Χαμηλό		1.67
	Μέτριο προς Χαμηλό		2.33
	Μέτριο		3
	Μέτριο προς Υψηλό		3.67
Σχετικά Υψηλό	4.33		
Υψηλό	5		
Πυκνότητα υδρογραφικού (km/km ²)	< 0.1	11%	1
	0.1 – 0.2		2
	0.2 – 0.3		3
	0.3 – 0.4		4
	> 0.4		5
Εδαφική υδατοπερατότητα (Hydrologic Soil Groups)	B	9%	2.5
	C		3.75
	D		5
	C/D		4.5
	D/D		4.75
Δυναμικό υδρολιθολογικής περατότητας	Χαμηλό	5%	5
	Σχετικά Χαμηλό		4.33
	Μέτριο προς Χαμηλό		3.67
	Μέτριο		3
	Μέτριο προς Υψηλό		2.33
Σχετικά Υψηλό	1.67		
Υψηλό	1		

Τα αντίστοιχα βάρη και οι κλάσεις διαχωρισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** Σημειώνεται ότι οι τιμές από το 1 έως 5 (τελευταία στήλη του πίνακα) υποδηλώνουν πολύ χαμηλό έως υψηλό κίνδυνο, κατά αύξουσα σειρά. Στη συνέχεια παρήχθησαν οι χάρτες των επιμέρους κριτηρίων (ενδεικτικά το πρώτο κριτήριο στην Εικόνα 2), καθώς και ο χάρτης προκαταρκτικής πλημμυρικής επικινδυνότητας για κάθε ανάλυση. Με βάση αυτούς τους χάρτες και την περιοχή προσδιορίζονται τα συγκεκριμένα όρια ευάλωτων περιοχών που κατέδειξαν οι δύο αναλύσεις (Εικόνα 2). Η πρώτη ανάλυση υπέδειξε ως πλημμυρικά ευάλωτη περιοχή αυτή που εκτείνεται από τη Δημοτική Ενότητα Δοβρά έως το Λουτρό, ενώ η δεύτερη την περιοχή εκείνη από τη Νέα Νικομήδεια έως την Κυψέλη. Λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο αναλύσεις, η τελική περιοχή μελέτης προκύπτει ως η τομή των δύο περιοχών.



Εικόνα 2: Χωρική κατανομή κριτηρίων α) μέγιστης 24ωρης βροχόπτωσης όμβριων καμυλών για περίοδο επαναφοράς 50 έτη και β) μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης.



Εικόνα 3: Χάρτες εστιασμένων πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών με τις δύο αναλύσεις, ήτοι α) με χρήση μέγιστης 24ωρης βροχόπτωσης όμβριων καμυλών για περίοδο επαναφοράς 50 έτη και β) με χρήση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης.

4 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο - Υδραυλικοί υπολογισμοί

Οι υπολογισμοί του προφίλ της ροής έγιναν με το λογισμικό ελεύθερης χρήσης HEC-RAS (έκδοση 6.4.1), του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (USACE). Το HEC-RAS έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει την υδραυλική λειτουργία ενός τεχνητού αγωγού, ρέματος ή δικτύου ρεμάτων, επιλύοντας τις εξισώσεις της βαθμιαία μεταβαλλόμενης ροής. Δέχεται γεωμετρική πληροφορία διατομών οποιασδήποτε μορφής, συνδεδεμένων με αποστάσεις μεταξύ τους. Επιπλέον, μπορεί να προσομοιώνει κατασκευές, όπως οχετοί, γέφυρες, υπερχειλιστές, εμπόδια ροής, αναχώματα, κλπ. Η θεωρητική τεκμηρίωση των υπολογισμών που πραγματοποιεί το λογισμικό δίνονται σε σχετικό εγχειρίδιο (βλ. HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, v.4.0, March 2008).

Οι κύριες παραδοχές της επίλυσης είναι: (i) η ροή είναι μόνιμη, (ii) η ροή είναι βαθμιαία μεταβαλλόμενη, (iii) σε περιπτώσεις ταχέως μεταβαλλόμενης ροής (π.χ., αναβαθμοί), εφαρμόζονται επιπρόσθετες εμπειρικές ή μη σχέσεις, (iv) η ροή είναι μονοδιάστατη, (v) οι κλίσεις του πυθμένα είναι μικρές (π.χ. κάτω από 10%), (vi) η βασική σχέση υπολογισμού της ελεύθερης επιφάνειας του νερού είναι η εξίσωση ενέργειας μεταξύ κάθε δύο διαδοχικών διατομών, (vii) ο υπολογισμός των απωλειών γίνεται με την εξίσωση Manning, (viii) για κάθε διατομή, η εκτίμηση του ενιαίου συντελεστή τραχύτητας κατά Manning γίνεται με αναγωγή βάσει της βρεχόμενης περιμέτρου, από τις καθορισμένες τιμές του συντελεστή για κάθε τμήμα της διατομής, (ix) υπολογισμοί απωλειών μεταξύ δύο διατομών λόγω στένωσης ή διεύρυνσης γίνονται με επιλογή κατάλληλου συντελεστή, που εφαρμόζεται επί της απόλυτης τιμής της διαφοράς των αντίστοιχων κινητικών ενεργειών, και (x) σε περιπτώσεις ταχέως μεταβαλλόμενης ροής και για τις συμβολές, εφαρμόζεται η εξίσωση διατήρησης της ορμής.

Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών, είναι απαραίτητος ο καθορισμός των οριακών συνθηκών. Όταν η γεωμετρία είναι γενικά ομαλή και η υδραυλική δίαιτα είναι σταθερή, τότε λαμβάνεται ως οριακή συνθήκη το ομοίμορφο βάθος, υπολογισμένο με βάση την κλίση του αντίστοιχου τμήματος. Όταν υπάρχουν σημεία ελέγχου ή άλλες σχετικές ενδείξεις, τότε επιλέγεται ως οριακή συνθήκη το κρίσιμο βάθος. Στις περισσότερες περιπτώσεις ορίζεται κρίσιμο βάθος στα ανάντη και στα κατόντη, ειδικά όπου υπάρχουν τεχνικά έργα, ενώ σε συμβολές γίνεται εφαρμογή της ενεργειακής μεθόδου, οπότε απαιτείται και η εξίσωση της στάθμης του νερού. Η επίλυση του μοντέλου γίνεται για μικτές συνθήκες ροής (υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη).

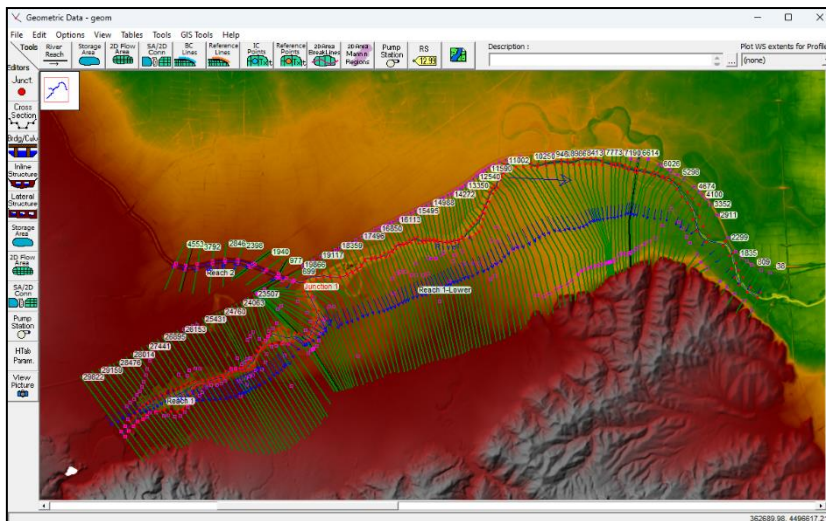
Στο περιβάλλον δημιουργίας της γεωμετρίας (geometry editor) του HEC-RAS δημιουργήθηκαν τρεις κλάδοι:

- i. Ο κύριος κλάδος του Αλιάκμονα, από το ΜΥΗΕ Αγ. Βαρβάρας μέχρι τη συμβολή με την τάφρο Τ66, με κωδικό όνομα Reach 1.
- ii. Ο κύριος κλάδος του Αλιάκμονα, από τη συμβολή με την τάφρο Τ66 μέχρι και ~2 km κατόντη της Κυψέλης, με κωδικό Reach 1-Lower.
- iii. Ο κλάδος της Τ66 από τη συμβολή με τον Αλιάκμονα μέχρι και ~4.5 km προς τα ανάντη.

Απαραίτητο δεδομένο του μοντέλου μονοδιάστατης υδροδυναμικής ανάλυσης είναι η γεωμετρία των διατομών. Συνολικά, διαμορφώθηκαν 161 διατομές, οι οποίες ελήφθησαν σε αποστάσεις της τάξης των 250-300 m (Εικόνα 4). Η επιλογή του πλήθους των διατομών έγινε με κριτήριο αφενός την ακριβέστερη αποτύπωση του πεδίου ροής, με όσο το δυνατό πιο μικρό υπολογιστικό φόρτο. Για τη διαμόρφωση των διατομών χρησιμοποιήθηκαν δύο Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ), ήτοι του Εθνικού Κτηματολογίου, χωρικής διακριτικότητας 2.0 m, και της τοπογραφικής μελέτης «Μελέτη συμπλήρωσης-ενίσχυσης αντιπλημμυρικής προστασίας ποταμού Αλιάκμονα με ΜΠΕ & Οριοθέτηση», η οποία παραχωρήθηκε από την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας.

Κατά την επεξεργασία των δύο ΨΜΕ, παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές στα καταγεγραμμένα υψόμετρα, όπως φαίνεται ενδεικτικά στην. Γενικά, τα υψόμετρα περιμετρικά της κοίτης του π. Αλιάκμονα του Κτηματολογίου ήταν συστηματικά μικρότερα κατά περίπου 1.0 ως 1.5 m σε σχέση

με τα τοπογραφικά στοιχεία. Ακόμη, τα δεδομένα του Κτηματολογίου εντός της κοίτης δεν αποτυπώνουν ορθά τον πυθμένα λόγω ροής ή μπορεί να αποτυπώνουν εσφαλμένα υψόμετρα, λόγω της βλάστησης και όχι την πραγματική επιφάνεια του εδάφους. Αντίθετα, το ΨΜΕ από την τοπογραφική μελέτη της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας αποτυπώνει με σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια τον πυθμένα εντός της κοίτης του π. Αλιάκμονα, αλλά είναι σαφώς περιορισμένη η έκταση που καλύπτει η σχετική τοπογραφική αποτύπωση εκατέρωθεν της και αποτυπώνει τα υψόμετρα του εδάφους με την παραδοχή ότι το έδαφος είναι «γυμνό», χωρίς βλάστηση ή επιμέρους εμπόδια. Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω δυσκολίες, η βέλτιστη προσέγγιση που τελικά υιοθετήθηκε για την εκπόνηση των υδροδυναμικών αναλύσεων ήταν ο συνδυασμός των ΨΜΕ των δυο πηγών. Συγκεκριμένα, εντός της κοίτης λήφθηκαν υπόψη τα υψόμετρα των αποτυπώσεων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, ενώ εκατέρωθεν υιοθετήθηκε το ελάχιστο υψόμετρο μεταξύ των δύο ΨΜΕ.



Εικόνα 4: Αναπαράσταση του μοντέλου υδροδυναμικής προσομοίωσης, όπως εικονίζεται στο γραφικό περιβάλλον του Geometry Editor του HEC-RAS.

1.2 Παράμετροι μοντέλου και οριακές συνθήκες

Συντελεστές Manning: Οι συντελεστές Manning ορίστηκαν στις 1D διατομές, σύμφωνα με τις χρήσεις γης κατά Corine. Συγκεκριμένα, σε κάθε κωδικό χρήσης γης ορίστηκε μία τιμή Manning σύμφωνα και με τους πίνακες αναφοράς των Παραιογιάννου et al. (2018).

Οριακές συνθήκες: Ανάντη των Reach 1 και 2 τέθηκε το κρίσιμο βάθος, κατόντη του Reach1-Lower τέθηκε ομοιόμορφο βάθος για κλίση ίση με 1%, στη συμβολή επελέγη η εξίσωση ενεργειών (Energy Steady Flow Computation Mode), ενώ οι παροχές αιχμής τοποθετήθηκαν σύμφωνα με το εκάστοτε σενάριο εκροής από το ΜΥΗΕ Αγ. Βαρβάρας και την παροχή στην τάφρο T66.

Τεχνικά έργα: Σε κάθε θέση μονοδιάστατης ανάλυσης όπου υπήρχε διαθέσιμη η πληροφορία της γεωμετρίας τεχνικού έργου, αυτό προστέθηκε μέσω του σχετικού παραθύρου διαλόγου του HEC-RAS όπως διακρίνεται στην Εικόνα 6.4. Τα στοιχεία των τεχνικών έργων ανακτήθηκαν από τα σχετικά τεύχη των μελετών της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ.

Συντελεστές απωλειών στενώσεων και διευρύνσεων: $C = 0.10$ για στενώσεις και 0.30 για διευρύνσεις φυσικών ή διευθετημένων διατομών, $C = 0.30$ για στενώσεις και 0.50 για διευρύνσεις σε θέσεις γεφυρών τυπικής διατομής, και $C = 0.60$ για στενώσεις και 0.80 για διευρύνσεις σε θέσεις γεφυρών διατομής που εμφανίζει απότομες αλλαγές γεωμετρίας ή επαυξημένες απώλειες.

1.3 Σενάρια παροχών

Διερευνώνται έξι σενάρια διαφορετικών συνδυασμών παροχών, όπως τυποποιούνται στον Πίνακα 2. Το πλέον ευμενές είναι το S01 (εκροή 800 m³/s από τ. Ασωμάτων και 800 m³/s από T66), και το πλέον δυσμενές το S06, στο οποίο εξαντλείται η παροχетеυτικότητα των δύο συστημάτων (εκροή 1500 m³/s από τ. Ασωμάτων και 1300 m³/s από T66). Σε όλα τα σενάρια θεωρείται προσωρινή εκτροπή 80 m³/s μέσω της Διώρυγας Α0 και του ΜΥΗΣ Μακροχωρίου ΙΙ.

Η εκροή από τον ΜΥΗΣ Μακροχώρι ΙΙ εισάγεται ως οριακή συνθήκη στη διατομή 17496 του κλάδου Reach 1-Lower στο περιβάλλον του HEC-RAS. Στα σενάρια αυτά, θεωρήθηκε ότι η εκροή από Ασώματα διοχετεύεται απευθείας στον Αλιάκμονα, μέσω του υπερχειλιστή του ΜΥΗΣ Αγ. Βαρβάρας, πλην μιας ποσότητας ίσης με 80 m³/s, η οποία εκτρέπεται προσωρινά μέσω της διώρυγας Α0, και επιστρέφει στο ποτάμι μέσω του ΜΥΗΣ Μακροχωρίου ΙΙ.

Ακόμη, εξετάστηκε ένα σενάριο για την επαλήθευση και τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου (Σενάριο 7). Το σενάριο αυτό εκτιμάται ότι ανταποκρίνεται στις συνθήκες ροής που επικρατούσαν την ημέρα που έλαβε χώρα η επίσκεψη στην περιοχή μελέτης. Επισημαίνεται ότι την περίοδο εκείνη ο καιρός ήταν βροχερός, και είχαν προηγηθεί αρκετά σημαντικές βροχοπτώσεις. Για το σενάριο αυτό θεωρήθηκε παροχή της τάξης των 10 m³/s στον Αλιάκμονα (εκ των οποίων 4.5 m³/s είναι η οικολογική παροχή που διοχετεύεται μέσω του αναρρυθμιστικού ταμιευτήρα Αγ. Βαρβάρας, ενώ η υπόλοιπη ροή αφορά σε πλευρικές εισροές), και παροχή 50 m³/s στην Τάφρο T66.

Πίνακας 2. Σενάρια παροχών που εξετάστηκαν με τους αντίστοιχους κωδικούς τους

a/a	Παροχή T66 (m ³ /s)	Συνολική εκροή από ΥΗΕ (m ³ /s)	Εκροή από Αγ. Βαρβάρα (m ³ /s)	Εκροή από ΜΥΗΣ Μακροχώρι ΙΙ (m ³ /s)	Κωδικός Σεναρίου
1	800	800	720	80	S01_T0800_HP0800
2	800	1300	1220	80	S02_T0800_HP1300
3	800	1800	1720	80	S03_T0800_HP1800
4	1300	800	720	80	S04_T1300_HP0800
5	1300	1300	1220	80	S05_T1300_HP1300
6	1300	1800	1720	80	S06_T1300_HP1800
7	50	10	10	0	S07_T0050_HP0010

1.4 Αποτελέσματα υδραυλικών υπολογισμών

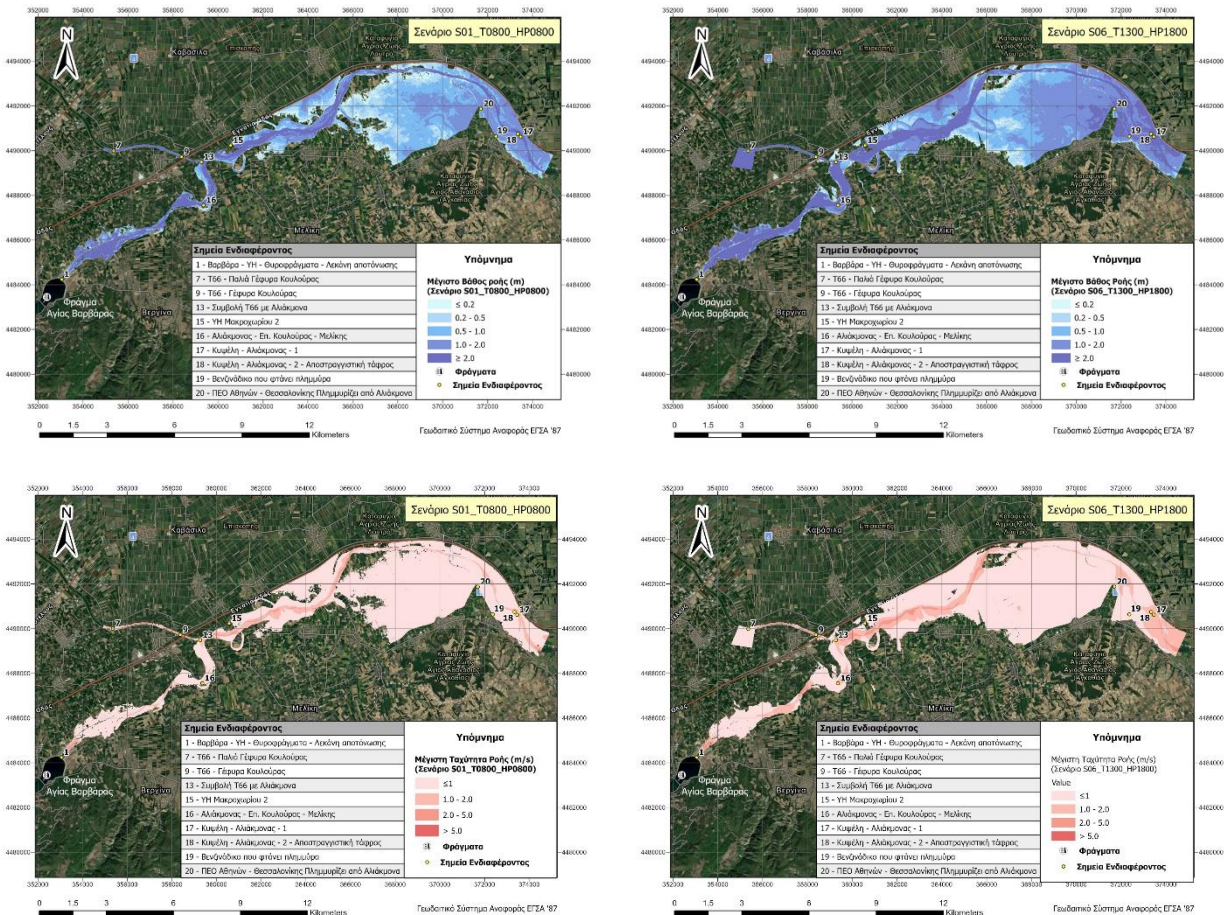
Κατά την εκπόνηση των υδροδυναμικών αναλύσεων προσομοιώθηκαν τα προαναφερθέντα σενάρια, με βάση τα οποία προέκυψαν οι χάρτες πλημμυρικού κινδύνου, σε όρους μέγιστου βάθους ροής, μέγιστης ταχύτητας και ορίου κατακλυζόμενης έκτασης. Οι χάρτες αυτοί παρατίθενται στη συνέχεια (ενδεικτικά για τα σενάρια 1 και 6 στην Εικόνα 5). Η προκύπτουσα έκταση της επιφάνειας κατάκλυσης για κάθε σενάριο ήταν: S01: 33.74 km², S02: 37.45 km², S03: 40.33 km², S04: 37.63 km², S05: 40.74 km², S06: 42.94 km², S07: 1.68 km² (σενάριο επαλήθευσης).

Από τις υδροδυναμικές αναλύσεις συμπεραίνονται τα ακόλουθα:

- Μεταβαίνοντας από το πιο ευνοϊκό σενάριο (S01) στο πλέον δυσμενές (S06), η κατακλυζόμενη έκταση αυξάνει κατά 27%. Στις εκτάσεις αυτές αναπτύσσονται κυρίως αγροτικές δραστηριότητες. Εξάιρεση, αποτελεί τμήμα του οικισμού Κυψέλης όπου για το S01, στην είσοδο του οικισμού (ΠΕΟ Αθηνών-Θεσσαλονίκης, στο ύψους του βενζινάδικου) τα μέγιστα βάθη ροής κυμαίνονται μεταξύ 0.5-1.5 m, ενώ οι μέγιστες ταχύτητες είναι περίπου 0.5 m/s. Στο σενάριο S06, τα μέγιστα βάθη είναι 1.6 έως 2.2 m, και η μέγιστες ταχύτητες είναι 0.7 m/s, ενώ κατακλύζονται και κάποιες εκτάσεις εντός του οικισμού (μέγιστο βάθος περίπου 0.5 m και ταχύτητα 0.4 m/s). Στο ίδιο σενάριο, το πεδίο κατάκλυσης

φτάνει στα όρια των οικισμών Αγκάθια, Αγ. Τριάδα και Πρόδρομος, ενώ προσεγγίζει το οικόπεδο του ΜΥΗΕ Μακροχωρίου ΙΙ χωρίς να εισέρχεται σε αυτό.

- ii. Για όλα τα σενάρια, οι κρίσιμες υποδομές οδοποιίας εντός του πλημμυρικού πεδίου φαίνεται ότι δεν τίθενται σε κίνδυνο. Ειδικότερα, στο σενάριο S01, το ελεύθερο περιθώριο στη Γέφυρα Μελίκης είναι 0.23 m, ενώ στο δυσμενές σενάριο S06 το ύψος φτάνει στο κατάστρωμα χωρίς να υπερχειλίζει (0.70 m ως τη στέψη). Στη γέφυρα διέλευσης της ΠΕΟ Αθηνών-Θεσσαλονίκης, το περιθώριο ασφαλείας είναι της τάξης των 1.3 m.
- iii. Όσον αφορά στην Τ66, οι αναλύσεις επιβεβαίωσαν ότι η τρέχουσα παροχαρακτηριστικά της είναι της τάξης των 1300 m³/s (οριακή επάρκεια διατομών).
- iv. Στην περιοχή της συμβολής της Τ66 με τον Αλιάκμονα, οι ταχύτητες που αναπτύσσονται (στροφή, πλευρά του αριστερού πρηνούς), είναι αρκετά υψηλές, το οποίο και εξηγεί την ισχυρή διάβρωση που παρατηρείται στην εν λόγω θέση.
- v. Η Εγνατία Οδός φαίνεται να λειτουργεί ως ανάχωμα, προστατεύοντας τους οικισμούς και τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις προς το βορρά. Η επίδραση των μικρών εγκάρσιων έργων (οχετοί) θα μπορούσαν να διοχετεύσουν νερό προς τα ανάντη (φαινόμενα ανάστροφης ροής). Κάτι τέτοιο ωστόσο είναι ρεαλιστικό για μεγάλες παροχές, που υπερβαίνουν κατά πολύ την φέρουσα ικανότητα των εν λόγω έργων, οπότε αυτά είναι σε ολική πλήρωση.

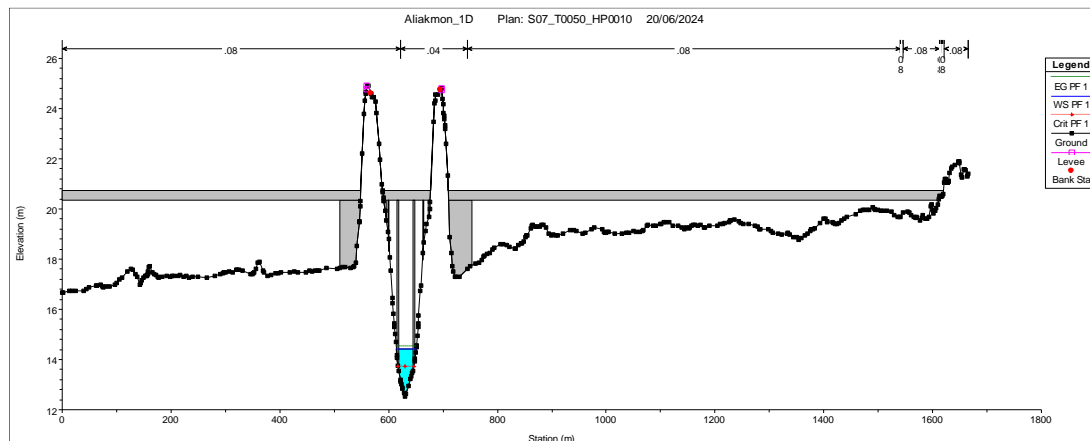


Εικόνα 5: Μέγιστο βάθος ροής (άνω) και μέγιστη ταχύτητα ροής (κάτω) σεναρίου S01 και S06

1.5 Επαλήθευση μοντέλου

Στη παρούσα ανάλυση επιχειρείται μια εμπειρική (και σε μικρότερο βαθμό ποσοτική) αξιολόγηση της αληθοφάνειας του υδροδυναμικού μοντέλου, αξιοποιώντας μακροσκοπικά στοιχεία και ποιοτικές πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά την επίσκεψη στην περιοχή μελέτης. Τα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη είναι:

- i. Η τρέχουσα εκτίμηση της παροχτευτικότητας της T66, ήτοι $1300 \text{ m}^3/\text{s}$, επιβεβαιώνονται από τις διατομές για τα σενάρια S04, S05 και S06, όπου φαίνεται ότι εισάγοντας την παροχή αυτή ως οριακή συνθήκη φόρτισης στα ανάντη, οι περισσότερες διατομές επαρκούν οριακά.
- ii. Κατά την επίσκεψη στην περιοχή μελέτης και υπό το συγκεκριμένο καθεστώς ροής (εκτιμάται παροχή περίπου $50 \text{ m}^3/\text{s}$ στην Περιφερειακή Τάφρο T66 και $10 \text{ m}^3/\text{s}$ στον π. Αλιάκμονα), η διαφορά στις ταχύτητες ροής εντός της T66 που εμφανίστηκαν στην Παλαιά και Νέα Γέφυρα Κουλούρας είναι 1 προς 2. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της υδροδυναμικής ανάλυσης για το σενάριο S07, καθώς οι ταχύτητες που υπολογίστηκαν είναι $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ στην Παλιά Γέφυρα Κουλούρας και $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ στη Νέα Γέφυρα.
- iii. Η απόσταση της επιφάνειας του νερού ως το κατάστρωμα της Γέφυρας Κουλούρας είναι στα $\sim 6 \text{ m}$, κάτι που επιβεβαιώνεται ποιοτικά από το αποτέλεσμα της στάθμης στη διατομή της γέφυρας για το σενάριο S07 (Εικόνα 6), σε αντιπαραβολή και με παρατηρήσεις κατά την επίσκεψη στην περιοχή. Συγκεκριμένα, κατά την αυτοψία που διενεργήθηκε, η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας εκτιμήθηκε σε περίπου $\sim 14.5 \text{ m}$, και η στάθμη της κάτω παρειάς του καταστρώματος της γέφυρας σε $\sim 20.4 \text{ m}$.
- iv. Ομοίως για το σενάριο S07 παρατηρείται διαχωρισμός σε επιμέρους ροές στην περιοχή της συμβολής της τάφρου T66 και του Αλιάκμονα, και επαληθεύεται από φωτογραφία που λήφθηκε κατά την επίσκεψη στην περιοχή μελέτης.
- v. Στο πλέον δυσμενές σενάριο (S06) στην περιοχή της συμβολής εμφανίζονται ταχύτητες της τάξης των 2.5 έως 5.0 m/s οι οποίες θεωρούνται αρκετά αυξημένες για φυσικές ανεπένδυτες διατομές (Χρυσάνθου, 2015). Ως εκ τούτου, δικαιολογείται η έντονη διάβρωση στο αριστερό πρηνές του Αλιάκμονα, που διαπιστώθηκε κατά την αυτοψία.
- vi. Από τις αναλύσεις όλων των σεναρίων επιβεβαιώνεται ότι οι ΒΔ παρυφές του οικισμού Κυψέλης είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε πλημμυρικά φαινόμενα.



Εικόνα 6: Διατομή 955 BR U τάφρου T66, αποτέλεσμα σεναρίου S07, ανάντη της Νέας Γέφυρας Κουλούρας

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη υπολογιστικής υποδομής για την υδροδυναμική προσομοίωση του υδροσυστήματος κατάντη του φράγματος Ασωμάτων και μέρους

της Περιφερειακής Τάφρου T66, υπό διάφορα σενάρια λειτουργίας των στροβίλων και του υπερχειλιστή, σε συνδυασμό με σενάρια παροχών εισροής από την T66. Ακόμη, εξετάστηκε το σενάριο επαλήθευσης S07, ως αντιπροσωπευτικό των συνθηκών ροής κατά την περίοδο των αυτοψιών (Μάρτιος 2024), το οποίο κατέδειξε ότι το μοντέλο είναι αρκετά αξιόπιστο, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα των φυσικών διεργασιών και τις έντονες αβεβαιότητες κρίσιμων δεδομένων εισόδου (υψομετρικές αποκλίσεις μεταξύ Κτηματολογίου και τοπογραφικής αποτύπωσης, παραδοχές συντελεστών τραχύτητας, λοιπές παραδοχές υδραυλικού μοντέλου). Τα αποτελέσματα κρίνονται εύλογα, και μπορούν να αποτελέσουν οδηγό για τη λήψη αποφάσεων, σε στρατηγικό-μακροσκοπικό επίπεδο.

Γενικά, διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο 1D υδροδυναμικής ανάλυσης που υλοποιήθηκε σε συνθήκες μόνιμης ροής αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο, πολύ μικρού υπολογιστικού φόρτου και υπόβαθρο ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, για την εκτίμηση και διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου. Παρόλα αυτά, υστερεί στην ακρίβεια προσομοίωσης πολύπλοκων συνθηκών ροής και στην ακριβέστερη εκτίμηση των βάθους ή ταχύτητας ροής στο πεδίο. Για αυτό συνίσταται η εκπόνηση 2D υδροδυναμικής ανάλυσης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, που θα αποτυπώνει ορθότερα την εξέλιξη του πλημμυρικού φαινομένου εντός και εκτός κοίτης και την σχετική αλληλεπίδραση. Τονίζεται πως οι παρούσες αναλύσεις δίνουν μια εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου αποκλειστικά λόγω της λειτουργίας/διαχείρισης των ανάντη έργων, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη πρόσθετες εισροές και την επίδραση: (α) των πλημμυρικών απορροών που παράγονται στη λεκάνη απορροής κατάντη του φράγματος Ασωμάτων, και διοδεύονται στον κύριο κλάδο του ποταμού μέσω του τοπικού υδρογραφικού δικτύου (fluvial flooding), (β) των φαινομένων κατάκλυσης λόγω της ίδιας της βροχόπτωσης (pluvial flooding), τα οποία κρίνονται εξαιρετικά σημαντικά σε μια περιοχή με τόσο ήπιες κλίσεις και έντονη αλλοίωση του αναγλύφου, λόγω σύνθετου αποστραγγιστικού-αρδευτικού δικτύου, και (γ) των πλημμυρικών απορροών που παράγονται στην ίδια τη λεκάνη της Περιφερειακής Τάφρου, έκτασης 2200 km², και διοδεύονται μέσω αυτής. Για τους παραπάνω λόγους, κρίνεται απαραίτητη η εκπόνηση συνδυαστικής υδρολογικής-υδραυλικής μελέτης, που θα παρέχει τα σχετικά δεδομένα εισόδου (πλημμυρογραφήματα) σε κατάλληλες υδροδυναμικές αναλύσεις, σε συνδυασμό με τα σενάρια λειτουργίας του υδροσυστήματος του π. Αλιάκμονα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Allafta, H., and C. Opp. 2021. GIS-based multi-criteria analysis for flood prone areas mapping in the trans-boundary Shatt Al-Arab basin, Iraq-Iran, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2087-2116, doi:10.1080/19475705.2021.1955755
2. Nguyen-Tien, V., R.J.R. Elliott, and E.A. Strobl. 2018, Hydropower generation, flood control and dam cascades: a national assessment for Vietnam. *Journal of Hydrology*, 560 109-126, doi:10.1016/j.jhydrol.2018.02.063.
3. Papaioannou, G., A. Efstratiadis, L. Vasiliades, A. Loukas, S.M. Papalexou, A. Koukouvinos, I. Tsoukalas, and P. Kossieris. 2018. An operational method for Floods Directive implementation in ungauged urban areas, *Hydrology*, 5(2), 24, doi:10.3390/hydrology5020024.
4. Theochari, A. P., M. Develeku, and E. Baltas. 2022. GIS-based multi-criteria approach towards sustainability of flood-susceptible areas in Giofiros River Basin, Greece, *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1615-1626, doi:10.1007/s43615-021-00096-z.
5. Ελληνικό Κτηματολόγιο, ΕΠΨΣ 2007-13, ΕΠΑΝΕΚ2014 – 20
6. Κωνσταντινίδης, Δ.. 1993 Τα υδραυλικά έργα στην Ελλάδα, Σημειώσεις σειράς διαλέξεων στο ΕΜΠ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
7. Χρυσάνθου, Β. 2016. Ποτάμια Υδραυλική και Τεχνικά Έργα, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, doi:10.57713/kallipos-493.

Evaluation of management policies for hydropower plants in the light of flood risk at the downstream areas: the case of Aliakmon River

P. Dimas
Civil Engineer NTUA, MAS ETH Zürich, PhD cand. NTUA

A. Lykou
Civil Engineer NTUA, MSc

G-K. Sakki
Civil Engineer NTUA, MSc, PhD cand. NTUA

A. Efstratiadis
Assistant Professor, NTUA

N. Mamassis
Professor, NTUA

E. Zacharopoulou
Civil Engineer, Hydroelectric Production Management Department/PPC S.A.

T. Karantoumanis
Director of Hydroelectric Power Plants of Aliakmon River/PPC S.A.

I. Mavros
Deputy Director, Hydroelectric Production Management Department/PPC S.A.

Key Words: flood risk management, preliminary assessment, multicriteria analysis, hydrodynamic analysis

SUMMARY: Aliakmonas is the longest river in Greece with significant hydroelectric production. Its river basin has undergone intense modifications that have drastically changed the flood regime in the downstream areas. Hydroelectric production and the operation of spillways of such complex hydroelectric plants are crucial factors for flood risk evolution and management. In this study, a multi-criteria GIS analysis is applied to identify flood prone areas and assess floor risk, and a 1D hydrodynamic simulation model under steady flow conditions is developed to investigate scenarios of combined flow releases from upstream structures. The above constitutes the initial step for holistic risk assessment and can be operationally utilised in decision making processes.