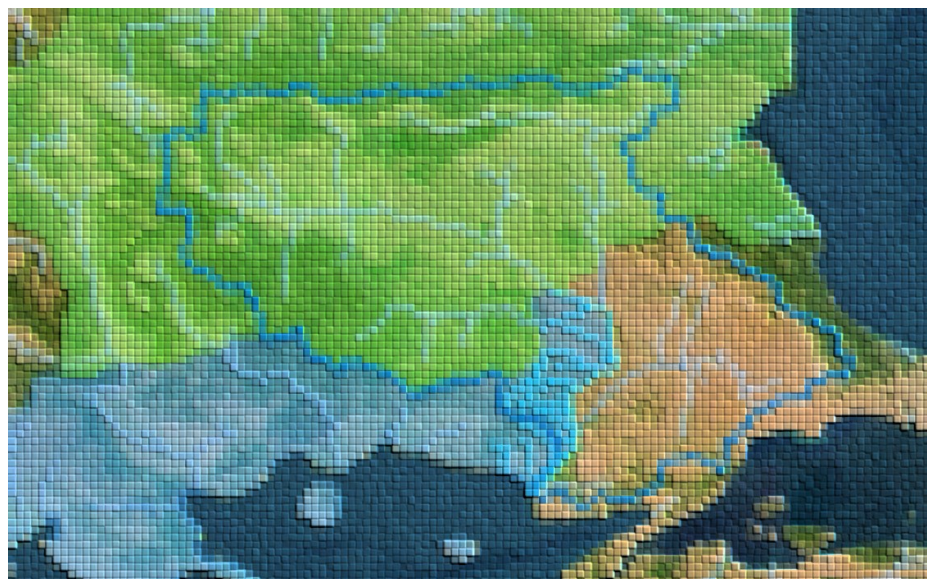




HELLENIC REPUBLIC



MINISTRY OF ENVIRONMENT AND ENERGY
GENERAL SECRETARIAT FOR NATURAL
ENVIRONMENT AND WATER
DIRECTORATE GENERAL FOR WATER



Interreg Greece-Bulgaria FLOODGUARD



European Regional Development Fund

FLOODGUARD

Integrated actions for joint coordination and responsiveness to
flood risks in the Cross Border area

**DELIVERABLE 4.6.5.B – HYDROLOGICAL MODELLING AND HYDRAULIC
SIMULATION OF FLOOD ROUTING IN THE TRANSBOUNDARY EVROS / MARITSA
RIVER BASIN**

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ (ΕΛ)



EMVIS Consultants SA

Ιούλιος 2023

The Project is co-funded by the European Regional Development Fund (ERDF) and by national funds of the countries participating in the Interreg V-A "Greece-Bulgaria 2014-2020" Cooperation Programme





Έκδοση	Ημερομηνία	Σχόλια
1.0	24 Ιουλίου 2023	1 ^η έκδοση

Η παρούσα έκθεση συντάχθηκε από την ΕΜΒΗΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί για λογαριασμό της Γενικής Γραμματείας Φυσικού Περιβάλλοντος και Υδάτων, Γενική Διεύθυνση Υδάτων, στο πλαίσιο του έργου INTERREG "Integrated actions for joint coordination and responsiveness to flood risks in the Cross Border area - FLOODGUARD".

Αποποίηση ευθυνών: Το περιεχόμενο της παρούσας έκθεσης αποτελεί αποκλειστική ευθύνη της Γενικής Γραμματείας Φυσικού Περιβάλλοντος και Υδάτων, Γενική Διεύθυνση Υδάτων και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αντικατοπτρίζει τις απόψεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, των συμμετεχουσών χωρών, της Διαχειριστικής Αρχής και της Κοινής Γραμματείας.



ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έργο FLOODGUARD επικεντρώνεται στην ενίσχυση της ικανότητας διαχείρισης του κινδύνου πλημμύρας μέσω συντονισμένων δράσεων μεταξύ Ελλάδας και Βουλγαρίας στη διασυνοριακή περιοχή. Η περιοχή αυτή είναι επιρρεπής σε πλημμύρες, κάτι που αναμένεται να επιδεινωθεί και λόγω των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Η αποτελεσματική διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς επηρεάζει μεγάλο πληθυσμό και μεγάλη έκταση γης διασυνοριακά.

Ο κύριος στόχος είναι να ενισχυθεί η ικανότητα των αρχών να διασφαλίζουν τον ολοκληρωμένο συντονισμό και την ανταπόκριση στους κινδύνους πλημμύρας στην περιοχή. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω των κάτωθι προσεγγίσεων:

- Δημιουργία κοινών θεσμικών πλαισίων μεταξύ των αρχών για την αξιολόγηση, τον σχεδιασμό, την πρόληψη και την αντιμετώπιση των πλημμυρών.
- Αύξηση της τεχνικής και διοικητικής ικανότητας των υπηρεσιών πολιτικής προστασίας ώστε να καταστεί δυνατή η συντονισμένη ετοιμότητα και ανταπόκριση.
- Εισαγωγή αποτελεσματικών διασυνοριακών συστημάτων ανταλλαγής πληροφοριών για την ανάλυση και τη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας.

Τα πιο σύγχρονα εργαλεία στα συστήματα πληροφοριών θα συνδυαστούν με την υφιστάμενη ικανότητα και τα μελλοντικά σχέδια των δύο χωρών για την προώθηση των πολιτικών και των υποδομών διαχείρισης του κινδύνου πλημμύρας. Η ανάπτυξη διοικητικής ικανότητας θα περιλαμβάνει κοινές εκπαιδεύσεις, εξοπλισμό και λογισμικό για τις αρχές άμεσης ανταπόκρισης και πολιτικής προστασίας. Τα συστήματα ανταλλαγής πληροφοριών θα επιτρέψουν την από κοινού συλλογή δεδομένων, την πρόβλεψη, την έγκαιρη προειδοποίηση και την υποστήριξη αποφάσεων μέσω χαρτογράφησης GIS, εργαλείων μοντελοποίησης και ενοποίησης βάσεων δεδομένων.

Η παρούσα έκθεση επικεντρώνεται στη διασυνοριακή λεκάνη Έβρου-Μαρίτσας, η οποία είναι επιρρεπής σε πλημμύρες λόγω της χαμηλής τοπογραφικής κλίσης της προς το Αιγαίο Πέλαγος. Ένα υδρολογικό μοντέλο το οποίο βασίστηκε στον κώδικα HYPE αναπτύχθηκε για την προσομοίωση των απορροών του ποταμού. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις απορροής από 31 σταθμούς στη Βουλγαρία, την Ελλάδα και την Τουρκία για το 2020 – 2022 ενώ περιλαμβάνει και μοντελοποίηση 11 ταμιευτήρων. Η περιοχή μελέτης του υδραυλικού μοντέλου καλύπτει τη συνοριακή περιοχή από το Svilengrad (Βουλγαρία) και το Ορμένιο (Ελλάδα) προς τα κατάντη μέχρι την εκροή στο Αιγαίο Πέλαγος. Για την προσομοίωση της ροής στο τμήμα αυτό αναπτύχθηκε μοντέλο με βάση το λογισμικό Hec-Ras.

Το μοντέλο HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) τέθηκε σε λειτουργία στην πλατφόρμα πρόβλεψης του SMHI (Σουηδικό Υδρολογικό και Μετεωρολογικό Ινστιτούτο) και εκτελείται δύο φορές ημερησίως για την παραγωγή πρόβλεψης παροχής 5 ημερών. Δεδομένα μέτρησης της ροής σε πραγματικό χρόνο, ενημερώνουν επί του παρόντος το μοντέλο σε 3 σταθμούς, με δυνατή την επέκταση των σταθμών στο μέλλον. Όσον αφορά το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS για την προσομοίωση των ροών και της πλημμύρας σε 2D, περιγράφεται η έκταση του μοντέλου, η ρύθμιση και τα δεδομένα εισόδου. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση παρατηρούμενων δεδομένων έκτασης της πλημμυρικής ζώνης από προηγούμενα πλημμυρικά γεγονότα. Μαζί, το υδρολογικό και υδραυλικό μοντέλο παρέχουν προηγμένες δυνατότητες πρόβλεψης για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας μέσω κοινής έγκαιρης προειδοποίησης και συντονισμένης αντίδρασης στη συνοριακή περιοχή. Τα μοντέλα θα υποστηρίξουν την πρόληψη καταστροφών και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή στη διασυνοριακή λεκάνη.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Ένα υδρολογικό μοντέλο αναπτύχθηκε για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του ποταμού Έβρου χρησιμοποιώντας τον κώδικα HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) του Σουηδικού Μετεωρολογικού και Υδρολογικού Ινστιτούτου (SMHI). Το HYPE είναι ένα ημι-καταναμεμημένο εννοιολογικό μοντέλο βροχής-απορροής, σχεδιασμένο για εφαρμογές σε κλίμακες από τη λεκάνη απορροής έως την ηπειρωτική κλίμακα. Προσομοιώνει τις χερσαίες υδατικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της δυναμικής του στρώματος χιονιού, της εξατμισοδιαπνοής, της εδαφικής υγρασίας, των υπόγειων υδάτων και της επιφανειακής απορροής. Το μοντέλο επιτρέπει υψηλή χωρική ανάλυση με την χρήση υπολογιστικά ανεξάρτητων μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs), σε υπολεκάνες.

Το HYPE εφαρμόζεται επιχειρησιακά για την πρόβλεψη πλημμυρών στη Σουηδία από το 2008. Τα βασικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- Ευέλικτη χωρική διακριτοποίηση χρησιμοποιώντας λεκάνες απορροής και υπολεκάνες αντί για κελιά πλέγματος.
- Έννοια HRU υπολεκάνης για δυνατότητα μεταφοράς ρυθμισμένων παραμέτρων σε λεκάνες για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα
- Υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας και δημιουργία απορροής
- Ολοκληρωμένη μοντελοποίηση λιμνών και ταμιευτήρων με κανόνες λειτουργίας
- Δρομολόγηση ποταμών μέσω δικτύου υπολεκανών και λιμνών
- Μοντελοποίηση της ποιότητας των υδάτων και του κύκλου εργασιών των θρεπτικών ουσιών
- Ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο των μεταβλητών κατάστασης (state variables) και της εκροής
- Επιχειρησιακές δυνατότητες για συνεχή ανασχεδιασμό και πρόβλεψη

Το μοντέλο HYPE του Έβρου δημιουργήθηκε με τη βελτίωση του πανευρωπαϊκού μοντέλου E-HYPE χρησιμοποιώντας τοπικά δεδομένα για τους ταμιευτήρες και τις παρατηρούμενες απορροές. Ορίζονται 32 λίμνες εξόδου, με τις 11 να ενσωματώνουν βαθμονομημένους κανόνες λειτουργίας.

Τα βασικά στοιχεία της διάταξης περιλαμβάνουν:

- Οριοθέτηση υπολεκάνης με χρήση τοπικών δεδομένων και αναγκών του μοντέλου
- Ωριαίο χρονικό βήμα που απαιτείται για την εισαγωγή του υδραυλικού μοντέλου
- Βαθμονόμηση με χρήση δεδομένων απορροής 2020-2022 από 31 σταθμούς
- Μοντελοποίηση ταμιευτήρα σε 11 ρυθμιζόμενες λίμνες
- Ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο με βάσει 3 σταθμούς μέτρησης
- Λειτουργικό σύστημα πρόβλεψης βασισμένο σε μετεωρολογική πρόγνωση

Η επικαιροποίηση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης σε πραγματικό χρόνο εφαρμόζει ένα μοντέλο αυτοπαλινδρομικού σφάλματος (autoregressive error) για τη διόρθωση των μοντελοποιημένων ροών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με τη χρήση παρατηρούμενων δεδομένων. Η επικαιροποίηση εφαρμόζεται επί του παρόντος σε σταθμούς κατά μήκος των λεκανών απορροής στο Ελληνικό τμήμα και μπορεί να

επεκταθεί. Το μοντέλο εκτελείται δύο φορές ημερησίως σε μια εικονική μηχανή Linux χρησιμοποιώντας μετεωρολογικές προβλέψεις των 00:00 και 12:00 ωρών. Εξάγει μια πρόβλεψη υδρογραφήματος 5 ημερών.

Το μοντέλο HYPE βαθμονομήθηκε για την περίοδο 2021-2022 χρησιμοποιώντας δεδομένα επανάλυσης (reanalysis) καιρού βάσει του μοντέλου WRF και παρατηρήσεις απορροής από 31 σταθμούς. Η βαθμονόμηση επικεντρώθηκε στην καταγραφή του χρόνου και του μεγέθους των αιχμών που είναι κρίσιμα για την πρόβλεψη πλημμυρών. Η απόδοση του μοντέλου αξιολογήθηκε με τους δείκτες Nash-Sutcliffe (NSE) και Kling-Gurta (KGE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_m - Q_o)^2}{\sum(Q_o - Q_o_mean)^2}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

όπου Q_m είναι η μοντελοποιημένη εκροή, Q_o είναι η παρατηρηθείσα εκροή, r είναι η γραμμική συσχέτιση, α είναι ο λόγος τυπικής απόκλισης και β είναι ο λόγος μεροληψίας.

Χρησιμοποιήθηκε ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) ανάλυσης 25 m από την ευρωπαϊκή υπηρεσία παρακολούθησης της γης Copernicus, μαζί με διορθώσεις στο προφίλ του κύριου καναλιού του Έβρου με βάση έρευνες πεδίου. Το DEM παρέχει το υψόμετρο βασικών χαρακτηριστικών όπως αναχώματα και πλημμυρικές ζώνες. Η ενσωμάτωση του προφίλ του ποταμού βελτιώνει την αναπαράσταση των ροών. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει ελεύθερα διαθέσιμη τοπογραφία μέσης ανάλυσης με τοπικές μετρήσεις καναλιών που είναι κρίσιμες για την υδρολογική μοντελοποίηση.

Το περιφερειακό ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF παρείχε τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου για τη βαθμονόμηση του μοντέλου HYPE και την επιχειρησιακή πρόγνωση. Η ανάλυση των 5 χιλιομέτρων αποτυπώνει καλύτερα την τοπική βροχόπτωση από ό,τι τα παγκόσμια σύνολα δεδομένων (25 χιλιόμετρα). Ωστόσο, το WRF παρέχει ένα προϊόν επανάλυσης (reanalysis). Τα προϊόντα reanalysis δεν αφομοιώνουν δεδομένα παρατήρησης μετά την αρχικοποίηση. Αυτό εισήγαγε αβεβαιότητα στη διαδικασία βαθμονόμησης. Παρά αυτόν τον περιορισμό, προτιμήθηκε το WRF για να διατηρηθεί η συνοχή με τις επιχειρησιακές προβλέψεις. Η χρήση του ίδιου συνόλου δεδομένων για βαθμονόμηση και πρόβλεψη αποφεύγει την εισαγωγή συστηματικών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν μεταξύ παγκόσμιων και τοπικών προϊόντων. Τα δεδομένα υψηλότερης ανάλυσης του WRF προσδιόρισαν καλύτερα τη δυναμική της βροχόπτωσης που είναι κρίσιμη για την πρόβλεψη πλημμυρών.

Οι παρατηρήσεις παροχής σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιήθηκαν για τη διόρθωση των μοντελοποιημένων ροών σε 3 σταθμούς. Η μέθοδος αυτοπαλινδρομικής επικαιροποίησης συνέκρινε τις μοντελοποιημένες και τις παρατηρούμενες ροές για την εκτίμηση ενός συντελεστή κλιμάκωσης που προσαρμόζει την πρόβλεψη. Μια απλούστερη προσέγγιση επικαιροποίησε τα επίπεδα της λίμνης απευθείας με τις παρατηρήσεις. Η ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο βελτίωσε την απόδοση του μοντέλου με την αφομοίωση των τρεχουσών συνθηκών στις προβλέψεις. Το αρθρωτό πλαίσιο επιτρέπει την επέκταση σε πρόσθετους σταθμούς μέτρησης. Η ενημέρωση βοήθησε στη μετατροπή του βαθμονομημένου μοντέλου HYPE σε ένα ακριβέστερο σύστημα πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο.

Το μοντέλο HYPE μεταφέρθηκε σε επιχειρησιακή χρήση στο πλαίσιο της πλατφόρμας υδρολογικής πρόβλεψης του SMHI. Το σύστημα λειτουργεί συνεχώς, με ορίζοντα πρόβλεψης 5 ημερών, ενσωματώνοντας τις τελευταίες μετεωρολογικές προβλέψεις και δεδομένα παροχής σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το αυτοματοποιημένο σύστημα παρέχει απρόσκοπτη ενσωμάτωση της υδρολογικής μοντελοποίησης με την υδραυλική πρόβλεψη πλημμυρών. Η ευέλικτη αρχιτεκτονική επιτρέπει την τροποποίηση του μοντέλου, την ενημέρωση των δεδομένων εισόδου και την επέκταση της αφομοίωσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τις ανάγκες. Η αυτοματοποίηση εξασφάλισε συνεπείς, έγκαιρες προβλέψεις υδρογραφημάτων για την προσομοίωση με το υδραυλικό μοντέλο.

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το υδροδυναμικό μοντέλο HEC-RAS που αναπτύχθηκε από το Σώμα Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ (USACE) επιλέχθηκε για την προσομοίωση της ροής και της πλημμυρικής κατάκλυσης. Το HEC-RAS επιλύει τις εξισώσεις ρηχών υδάτων για να μοντελοποιήσει μονοδιάστατη και δισδιάστατη μη μόνιμη υδραυλική ροή. Τα βασικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- αριθμητικές λύσεις για την υδραυλική των πλημμυρικών πεδίων.
- Υπολογισμοί για υπερκρίσιμες ροές.
- Διάφορες εφαρμογές (ταμιευτήρες, πύλες).
- Υδραυλικά συστήματα γεφυρών και αγωγών.
- Βαθυμετρία σε κλίμακα υποπλέγματος για αποτελεσματική τοπογραφική αναπαράσταση.
- Ανάλυση της κατάκλυσης και της διάβρωσης της πλημμυρικής κοίτης.
- Χαρτογράφηση και επεξεργασία μεταβλητών πλημμύρας.

Αυτές οι δυνατότητες καθιστούν το HEC-RAS κατάλληλο για τη μοντελοποίηση της σύνθετης υδραυλικής των πλημμυρών κατά μήκος του ποταμού Έβρου και της πλημμυρικής του ζώνης. Το μοντέλο παρέχει την προγνωστική ικανότητα που απαιτείται για λεπτομερή έγκαιρη προειδοποίηση πλημμυρών. Το υδραυλικό μοντέλο καλύπτει την περιοχή των ελληνοβουλγαρικών-τουρκικών συνόρων. Ο τομέας εκτείνεται από τα ανάντη του Svilengrad προς τα κατάντη μέχρι το δέλτα του Αιγαίου Πελάγους με βάση την εκτιμώμενη έκταση πλημμύρας 1000 ετών, σύμφωνα με τα εγκεκριμένα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας για την περιοχή. Η τοπογραφία των πλημμυρικών πεδίων οριοθετήθηκε με τη χρήση ψηφιακών υψομετρικών δεδομένων ανάλυσης 25 m, διορθωμένων με λεπτομερείς έρευνες της κοίτης του Έβρου. Υιοθετήθηκε μια προσέγγιση 2D προσομοίωσης αφού οι δοκιμές έδειξαν ότι η σύζευξη 1D-2D αντιμετώπιζε περιορισμούς σταθερότητας και ακρίβειας για μεγάλα πλημμυρικά γεγονότα. Το μοντέλο 2D παρείχε:

- Απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ του καναλιού και της πλημμυρικής κοίτης.
- Μειωμένες απαιτήσεις τοπογραφικών δεδομένων.
- Ευκολότερη αναπαράσταση των εισροών των παραποτάμων.
- Ενισχυμένη αριθμητική σταθερότητα ακόμη και σε μεγαλύτερα χρονικά βήματα.
- Χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος για επιχειρησιακή μοντελοποίηση.

Τα μοντέλα 2D πρέπει να εξισορροπούν την ανάλυση του μοντέλου, τη σταθερότητα της αριθμητικής λύσης και τους χρόνους εκτέλεσης. Οι δοκιμές επιβεβαίωσαν τη σταθερότητα του μοντέλου, διατηρώντας παράλληλα την υπολογιστική αποδοτικότητα. Οι οριακές συνθήκες αντιπροσωπεύουν τις εισροές ροής στο μοντέλο από υδρολογικές προβλέψεις και τα κατάντη επίπεδα της θάλασσας:

- Εισροή Έβρου από τη Βουλγαρία.
- Εισροές από παραπόταμους: Άρδα, Ερυθροποτάμου, Tundzha, Ergene.
- Ανοιχτό όριο στο Αιγαίο Πέλαγος.
- Όρια μη ροής κατά μήκος των μορφολογικών εξάρσεων.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης από το υδρολογικό μοντέλο HYPE παρείχαν εισροές (ροή ποταμού) σε βασικούς παραπόταμους και στο ανάντη όριο του Έβρου. Το όριο της θάλασσας αναπαρίσταται με τη χρήση παρατηρούμενης στάθμης νερού. Τα όρια μη ροής τοποθετήθηκαν σε επαρκή απόσταση από την περιοχή ενδιαφέροντος. Τα πλημμυρικά γεγονότα του 2010 και του Ιανουαρίου 2021 χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση μετά από αξιολόγηση της διαθεσιμότητας των δεδομένων:

Γεγονός του 2010:

- Δορυφορική παρατηρούμενη έκταση πλημμύρας.
- Λεπτομερή μετρημένα υδρογραφήματα για τις οριακές συνθήκες.
- Σημαντικές παρατηρούμενες ζημιές για βαθμονόμηση.

Γεγονός του 2021:

- Ενσωματωμένες υδραυλικές αλλαγές από το 2010.
- Διαθέσιμη δορυφορική έκταση πλημμύρας.
- Υδρογραφήματα από βαθμονομημένο μοντέλο HYPE.
- Παροχή πρόσθετου μηχανισμού πλημμύρας που δεν παρατηρήθηκε το 2010.

Η βαθμονόμηση επικεντρώθηκε στην αντιστοίχιση της παρατηρούμενης και της προσομοιωμένης έκτασης της πλημμύρας, των επιπέδων αιχμής του νερού και του υδρογραφήματος. Τα δορυφορικά δεδομένα αποδείχθηκαν ανεκτίμητα για τη βαθμονόμηση της χωρικής έκτασης της πλημμύρας. Τα δύο γεγονότα παρείχαν διαφορετικούς μηχανισμούς πλημμύρας, βελτιώνοντας την ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώνει διαφορετικά γεγονότα. Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε επαναληπτικά, ξεκινώντας από κύριες παραμέτρους όπως οι συντελεστές τραχύτητας Manning. Οι αναλύσεις ευαισθησίας προσδιόρισαν τις βέλτιστες τιμές τραχύτητας για διάφορες κατηγορίες κάλυψης γης με βάση τα σύνολα δεδομένων Corine. Το πρόσφατο συμβάν του 2021 έλαβε υπόψη πιθανές αλλαγές στη χρήση γης από το 2010. Η βαθμονόμηση έλαβε υπόψη τις αβεβαιότητες στα παρατηρούμενα δεδομένα και τις παραδοχές μοντελοποίησης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το υδρολογικό μοντέλο βαθμονομήθηκε σε πολλαπλά βήματα χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις παροχής από 31 σταθμούς. Μια αρχική βαθμονόμηση βελτιστοποίησε την εξατμισοδιαπνοή και την κατακράτηση τμήματος της απορροής από το έδαφος για τη βελτίωση του υδατικού ισοζυγίου και της δυναμικής της ροής. Οι τιμές της αποτελεσματικότητας του μοντέλου Kling-Gurta (KGE) μετά από αυτό το πρώτο βήμα κυμάνθηκαν από -2.5 έως 0.9, με 17 από τους 31 σταθμούς να παρουσιάζουν $KGE > 0.4$, υποδεικνύοντας ικανοποιητική ικανότητα του μοντέλου. Η δεύτερη φάση βαθμονόμησης επικεντρώθηκε σε 11 ρυθμιζόμενες λίμνες με κανόνες λειτουργίας των φραγμάτων. Η ενσωμάτωση της λειτουργίας των ταμειωτήρων βελτίωσε σημαντικά την απόδοση στα κατάντη. Για παράδειγμα, στο φράγμα Topolnitsa το βαθμονομημένο μοντέλο αποτύπωσε με ακρίβεια την εποχιακή κατανομή της ροής, ιδίως τις υψηλές ροές. Το τελικό βήμα βαθμονόμησης χρησιμοποίησε 9 περιοχές παραμέτρων για την αποτελεσματική βελτίωση της απόδοσης σε όλο το πεδίο. Οι περισσότεροι σταθμοί παρουσίασαν βελτιωμένη τιμή του KGE, με τιμές που κυμαίνονταν από -2.5 έως 0.9 στο τελικό μοντέλο. Η πλειονότητα των παραποτάμιων σταθμών είχε καλή απόδοση ($KGE > 0.7$). Οι ροές αιχμής και τα άκρα υποχώρησης αποτυπώθηκαν με ακρίβεια, πράγμα κρίσιμο για την πρόβλεψη πλημμυρών. Συνολικά, το μοντέλο παρουσίασε καλή απόδοση, με 16 από τους

32 σταθμούς να έχουν $KGE > 0.4$. Η χρονική στιγμή και το μέγεθος των αιχμών προσομοιώθηκαν ικανοποιητικά, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα πρόβλεψης.

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το υδραυλικό μοντέλο βαθμονομήθηκε για τις πλημμύρες του 2010 και του Ιανουαρίου 2021, οι οποίες είχαν διαφορετικούς μηχανισμούς πλημμύρας. Οι δορυφορικές εικόνες παρείχαν παρατηρούμενα χωρικά δεδομένα για την έκταση της πλημμύρας που δεν ήταν διαθέσιμα από επίγειες μετρήσεις. Οι αρχικές εκτελέσεις βαθμονόμησης του 2010 χρησιμοποίησαν μέση τιμή n του Manning 0.06 για το κύριο κανάλι και τις πλημμυρικές ζώνες. Η προσομοιωμένη έκταση της πλημμύρας ήταν μικρότερη από την παρατηρούμενη, πιθανότατα λόγω των αδρομερέστερων τοπογραφικών δεδομένων. Η προσαρμογή των τιμών n με βάση τα δεδομένα χρήσης γης Corine βελτίωσε σημαντικά τα αποτελέσματα πλημμύρας των πλημμυρικών πεδίων. Το συμβάν του 2021 συνυπολόγισε τις αλλαγές στη χρήση γης από το 2010 με τη χρήση επικαιροποιημένων δεδομένων Corine. Το βαθμονομημένο μοντέλο αποτύπωσε με ακρίβεια την έκταση της πλημμύρας και τη μοναδική δυναμική αυτού του συμβάντος που οφείλεται στις υψηλές ροές του ποταμού Εργίνη. Η βαθμονόμηση σε δύο διαφορετικά γεγονότα βελτίωσε την αξιοπιστία του μοντέλου. Τα δορυφορικά δεδομένα αποδείχθηκαν ανεκτίμητα, παρέχοντας παρατηρούμενη χωρική κάλυψη της έκτασης της πλημμύρας, ο προσδιορισμός της οποίας θα ήταν ανέφικτος μόνο με επίγεια δεδομένα.

Δόθηκε προσοχή στην προσαρμογή των παραμέτρων μόνο εντός των αποδεκτών ορίων και στη συνεκτίμηση των αβεβαιοτήτων των δεδομένων. Ο στόχος δεν ήταν η τέλεια αναπαράσταση των παρελθόντων γεγονότων, αλλά η ακριβής αναπαράσταση των κυρίαρχων διαδικασιών και του χρόνου εξέλιξης των πλημμυρών. Το υδραυλικό μοντέλο 2D HEC-RAS έδειξε καλή συμφωνία με την παρατηρούμενη έκταση και το χρονοδιάγραμμα των πλημμυρών.

Το βαθμονομημένο σύστημα μοντελοποίησης παρέχει προηγμένη ικανότητα πρόβλεψης για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας στη διασυνοριακή περιοχή του ποταμού Έβρου. Τα μοντέλα επιτρέπουν την έγκαιρη προειδοποίηση και τη συντονισμένη αντίδραση μέσω της προσομοίωσης των εκροών και της κατάκλυσης των πλημμυρικών πεδίων σε ένα συνεχές λειτουργικό σύστημα. Πρόσθετα δεδομένα σχετικά με τις παροχές και την έκταση των πλημμυρών θα βελτίωναν την εμπιστοσύνη του μοντέλου. Η συνεχής παρακολούθηση και η αφομοίωση δεδομένων μπορούν να επικαιροποιήσουν τα μοντέλα ώστε να αντιπροσωπεύουν τις τρέχουσες συνθήκες. Συνολικά, το σύστημα μοντελοποίησης συνεισφέρει στη διαχείριση κινδύνου για μια περιοχή επιρρεπή σε καταστροφικές διασυνοριακές πλημμύρες. Το σύστημα παρέχει τα θεμέλια για την πρόληψη καταστροφών και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή σε ολόκληρη την περιοχή.