



**ΘΕΜΑΤΑ ΔΑΣΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**Αειφορική Διαχείριση
Λεκανών Απορροής**

**16^{ος}
τόμος**

Επιμέλεια
Γεώργιος Παπαϊωάννου

**ΕΚΔΟΣΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΑΣΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΤΟΥ Δ.Π.Θ.**

Θέματα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων
16^{ος} Τόμος: Αειφορική Διαχείριση Δεκανών Απορροής

Έκδοση Τμήματος Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών
Πόρων του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης

Επιμέλεια: Γεώργιος Παπαϊωάννου

ISSN: 1791-7824

ISBN: 978-960-9698-24-5

Copyright © 2024

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ορεστιάδα

Ημερομηνία Έκδοσης: Δεκέμβριος 2024

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Άγγελος Αλαμάνος ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ	1
Ξανθούλα Καρασμανάκη & Γεώργιος Ε. Τσαντόπουλος ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	11
Γεπραξία Τσιάτσιαρη & Δημήτριος Μυρωνίδης ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΤΗΣ ΠΕΡΑΙΑΣ, Ν. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	28
Μάριος Μπίλλιος & Λάμπρος Βασιλειάδης ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΧΩΡΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ	38
Αθανάσιος Καραντάκης, Αθανάσιος Λουκάς & Δημήτριος Φωτάκης ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΠΟΤΑΜΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ, ΘΕΣΣΑΛΙΑ.	55
Ξανθούλα Καρασμανάκη, Αναστασία Στοϊκοπούλου, Θωμάς Καταγής & Γεώργιος Παπαϊωάννου ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΠΙΘΑΝΩΝ ΔΙΑΒΡΩΣΙΓΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ	72
Αναστασία Στοϊκοπούλου, Ξανθούλα Καρασμανάκη, Θωμάς Καταγής & Γεώργιος Παπαϊωάννου ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΠΙΘΑΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ	103
Μελπομένη Γρηγοριάδου & Γεώργιος Παπαϊωάννου ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	128

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Αειφορική Διαχείριση των Λεκανών Απορροής αποτελεί ουσιαστική προσέγγιση για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης υγείας και λειτουργικότητας των λεκανών απορροής. Περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πρακτικών και στρατηγικών που αποσκοπούν στην εξισορρόπηση της οικολογικής ακεραιότητας με τις ανθρώπινες ανάγκες. Σε αυτές περιλαμβάνονται η διατήρηση σε καλή κατάσταση (ποιοτικά και ποσοτικά) των υδατικών πόρων, ο έλεγχος της διάβρωσης, ο έλεγχος του πλημμυρικού κινδύνου, η μείωση της ρύπανσης, η διατήρηση της βιοποικιλότητας και ο βιώσιμος σχεδιασμός των χρήσεων γης. Ενσωματώνοντας την επιστημονική γνώση με πρακτικές εφαρμογές, η αειφορική διαχείριση των λεκανών απορροής συμβάλλει στην προστασία των ζωτικών υδάτινων πόρων και στην ευημερία των κοινοτήτων που εξαρτώνται από αυτούς.

Ο 16ος Τόμος της σειράς «θέματα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων» τιτλοφορείται «Αειφορική Διαχείριση Λεκανών Απορροής» και πραγματεύεται τις θέματα που σχετίζονται με τον υδρολογικό κύκλο και τη διαχείριση των λεκανών απορροής. Περιλαμβάνει, μελέτες που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, τις πολιτικές για τη διαχείριση υδατικών πόρων, τη διευθέτηση χειμαρρικών υδατορρευμάτων, την ανάλυση υδρομετεωρολογικών παραμέτρων, τον καθορισμό του παρόχθιων ζωνών, τις πλημμύρες και τη διάβρωση ως δευτερογενών καταστροφών καθώς και την υδρολογική προσομοίωση.

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στο συνάδελφο Καθηγητή κ. Ευάγγελο Μανωλά για την ανεκτίμητη βοήθειά του στη διόρθωση τυπογραφικών λαθών και στην προσφορά προτάσεων μορφοποίησης για ορισμένες από τις εργασίες που παρουσιάζονται σε αυτό το βιβλίο. Το οξυδερκές μάτι του στη λεπτομέρεια και η αφοσίωσή του στην αριστεία συνέβαλαν σημαντικά στην τελική ποιότητα αυτής της έκδοσης.

Κλείνοντας ευχαριστώ θερμά όλους τους κριτές που αξιολόγησαν τις εργασίες που περιέχονται στον παρόντα τόμο. Επιπλέον, εκφράζω την ειλικρινή μου εκτίμηση και τις θερμές μου ευχαριστίες προς τους συναδέλφους που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στον παρόντα τόμο, των οποίων η συμβολή τους κατέστησε δυνατή την έκδοση αυτού του τόμου. Ελπίζω ο παρών τόμος να αποτελέσει όχι μόνο μια πολύτιμη πηγή πληροφόρησης, αλλά και μια πηγή έμπνευσης για τους αναγνώστες του και να συνεχίσουν να εμπιστεύονται τις εκδόσεις του Τμήματος Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης.

Παπαϊωάννου Γεώργιος

Ορεστιάδα, Δεκέμβριος 2024

ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Άγγελος Αλαμάνος
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Email: angalamanos@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση ταμιευτήρων περιλαμβάνει τον στρατηγικό έλεγχο της αποθήκευσης και της απελευθέρωσης νερού για την επίτευξη διαφόρων στόχων όπως ο έλεγχος των πλημμυρών, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, η άρδευση και η διατήρηση του περιβάλλοντος. Η προσομοίωση ταμιευτήρων αναφέρεται στη μοντελοποίηση υδρολογικών διεργασιών και λειτουργιών των ταμιευτήρων για την κατανόηση της χρήσης τους. Για την εύρεση των καλύτερων (βέλτιστων) επιχειρησιακών στρατηγικών λειτουργίας ταμιευτήρων χρησιμοποιούνται τεχνικές βελτιστοποίησης. Αυτές οι στρατηγικές έχουν στόχο την εξισορρόπηση των ανταγωνιστικών χρήσεων και στόχων που πρέπει να εξυπηρετεί ένας ταμιευτήρας. Σε ορεινές λεκάνες απορροής, όπου οι υδάτινοι πόροι είναι εξαιρετικά μεταβλητοί και σημαντικοί για τις κατάντη περιοχές, η αποτελεσματική διαχείριση των ταμιευτήρων, μέσω προσομοίωσης και βελτιστοποίησής τους είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό των κινδύνων πλημμύρας, τη διασφάλιση αξιόπιστης παροχής νερού και τη διατήρηση της υγείας των οικοσυστημάτων, ιδιαίτερα ενόψει της ανθρωπογενών και κλιματικών μεταβολών. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης ταμιευτήρα και ένα σετ διαφορετικών περιπτώσεων (μοντέλων) βελτιστοποίησης ταμιευτήρα, με χρήση ενδεικτικών τιμών δεδομένων. Τα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί στη γλώσσα προγραμματισμού Python (open source) και είναι ελεύθερα διαθέσιμα ώστε οι χρήστες να μπορούν να τα προσαρμόσουν σε αντίστοιχες αναλύσεις.

Λέξεις κλειδιά: Ταμιευτήρες, Υδρολογία, Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Προσομοίωση, Βελτιστοποίηση, Ορεινές λεκάνες απορροής

Εισαγωγή

Η ορθολογική διαχείριση ταμιευτήρων είναι συνώνυμη ενός επιστημονικώς τεκμηριωμένου και συνετού ελέγχου της αποθήκευσης και της απελευθέρωσης νερού για την εκπλήρωση διαφόρων στόχων. Αυτοί οι στόχοι συνήθως περιλαμβάνουν την τροφοδότηση αστικής, βιομηχανικής, αγροτικής χρήσης νερού, παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, δέσμευση νερού για πλημμυρική προστασία, και διατήρηση οικολογικής ισορροπίας (Fayaed et al. 2013). Προκειμένου αυτό να επιτυγχάνεται με γνώμονα τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε ταμιευτήρα και τους μοναδικούς στόχους και ιδιαιτερότητες κάθε περίπτωσης, χρησιμοποιείται η προσομοίωση ταμιευτήρων. Προσομοίωση είναι ουσιαστικά η περιγραφή με μαθηματικές εξισώσεις (μοντέλα) των υδρολογικών διεργασιών (π.χ. βροχή, εξάτμιση, απορροή, κ.λπ.) και λειτουργιών ταμιευτήρα (π.χ. αποθήκευση νερού, ποσότητες

τροφοδότησης ανά χρήση, κ.λπ.). Έτσι, ενισχύεται η κατανόηση της λειτουργίας ενός ταμιευτήρα, πώς αυτή μεταβάλλεται στο χρόνο, πώς αλληλοεπιδρά με τις ανθρώπινες δραστηριότητες, και τι επιπτώσεις έχει στις κατάντη περιοχές (Basheer et al. 2021). Γίνεται αντιληπτό ότι η λειτουργία ενός ταμιευτήρα είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα, με θεωρητικά άπειρες λύσεις (π.χ. διαφορετικούς όγκους εισροών και εκροών νερού για διάφορους σκοπούς). Προκειμένου να εντοπιστούν οι ‘καλύτερες’ στρατηγικές λειτουργίας ενός ταμιευτήρα, χρησιμοποιούνται τεχνικές βελτιστοποίησης. Βελτιστοποίηση είναι η μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος (λειτουργία ταμιευτήρα εν προκειμένω), με τέτοιο τρόπο ώστε (Garcia & Alamanos 2022, 2023, 2024): Α) να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί ένας καθορισμένος στόχος. Για παράδειγμα, να μεγιστοποιηθεί η ωφέλεια από την παροχή νερού σε αστική, βιομηχανική, ή/και αγροτική χρήση νερού, ή να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας του ταμιευτήρα για παροχή νερού στις διάφορες χρήσεις. Αυτός ο στόχος (μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης) ορίζεται από μέσω μιας «αντικειμενικής συνάρτησης». Β) ο στόχος να επιτευχθεί υπό περιορισμούς του συστήματος, δηλαδή για την περίπτωση μας, φυσικούς και τεχνικούς παράγοντες που δεν μπορεί να καθορίσει ο αναλυτής (π.χ. φυσικά διαθέσιμο νερό, ζήτηση νερού προς χρήση, τιμές ενέργειας κ.ά. κόστη, κλπ.). Αυτοί οι παράγοντες περιγράφονται με εξισώσεις που εκφράζουν τους «περιορισμούς» του προβλήματος. Μέσω της επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης εντοπίζονται οι βέλτιστες στρατηγικές λειτουργίας ενός ταμιευτήρα, που εξισορροπούν αποτελεσματικά τις διάφορες ανταγωνιστικές χρήσεις και στόχους του νερού. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός ταμιευτήρα έχουν έντονα φυσικό χαρακτήρα και μεταβάλλονται δυναμικά με το χρόνο (μηνιαία, εποχιακά, ή ετήσια). Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις στην προσομοίωση και βελτιστοποίηση ταμιευτήρων περιλαμβάνουν τη χρήση διάφορων λογισμικών και μοντέλων, π.χ. HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) (Hatamkhani et al., 2021), WEAP (Water Evaluation and Planning System) (Alamanos et al. 2019), MODSIM (Modeling System for Water Resources) (Shenava & Shourian 2018), SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Sedighkia and Abdoli, 2022), και πλήθος μοντέλων ειδικά διαμορφωμένα από αναλυτές (Zhang et al. 2007, Nourani et al. 2020). Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά τα εργαλεία είναι πολύπλοκα και απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις, ή είναι ειδικά διαμορφωμένα για συγκεκριμένες περιοχές και συνθήκες, καθιστώντας τα λιγότερο προσβάσιμα σε ένα ευρύτερο κοινό. Επομένως, εμφανίζεται μια αυξανόμενη ανάγκη για φιλικά προς τον χρήστη, απλά, ευέλικτα μοντέλα, εύκολα προσαρμόσιμα σε διαφορετικά προβλήματα. Η παρούσα εργασία συνεισφέρει σε αυτή την κατεύθυνση, παρέχοντας μια σειρά από τέτοια εργαλεία για προσομοίωση και βελτιστοποίηση ταμιευτήρων. Τα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί στη γλώσσα προγραμματισμού Python (ανοιχτού κώδικα - open source) και είναι ελεύθερα διαθέσιμα, ώστε να επιδέχονται βελτιώσεις, και τροποποιήσεις ώστε να προσαρμόζονται σε αντίστοιχες αναλύσεις. Η χρησιμότητα αυτών των εργαλείων θεωρείται άρρηκτα συνδεδεμένη με περιπτώσεις διαχείρισης υδάτων σε ορεινές λεκάνες απορροής, όπου απαιτείται προσαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες διαθεσιμότητας νερού, στόχων διαχείρισης ταμιευτήρων, και χρήσεων νερού στις κατάντη περιοχές.

Προσομοίωση ταμιευτήρα

Ο στόχος του μοντέλου προσομοίωσης είναι η περιγραφή της λειτουργίας ενός ταμιευτήρα σε περίοδο 12 μηνών, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες όπως εισροή, εκροή, χωρητικότητα αποθήκευσης, διαφυγές, και ζήτηση για αστική χρήση, γεωργική χρήση και παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Οι παράμετροι του προβλήματος (όπως αναφέρονται στον κώδικα του μοντέλου) είναι οι ακόλουθες:

- n_months : Ο αριθμός των μηνών στην προσομοίωση ($t = 1, \dots, 12$).
- $S[t]$: Το αποθηκευμένο νερό στον ταμιευτήρα το μήνα t (εκ. m^3) - storage.
- $R_u[t]$: Εκροές από τον ταμιευτήρα για αστική χρήση το μήνα t (εκ. m^3) - release.
- $R_irr[t]$: Εκροές από τον ταμιευτήρα για αγροτική χρήση το μήνα t (εκ. m^3) release.
- $R_hydro[t]$: Εκροές από τον ταμιευτήρα για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας το μήνα t (εκ. m^3) release.
- $Spills[t]$: Η ποσότητα του νερού που χύνεται από τη δεξαμενή το μήνα t - διαρροή για αποφυγή υπερχείλισης (εκ. m^3).
- K : Χωρητικότητα ταμιευτήρα (εκ. m^3) - maximum storage.
- $S0$: Αρχικός όγκος νερού στον ταμιευτήρα (εκ. m^3) - initial storage.
- S_min : Ελάχιστος όγκος νερού στον ταμιευτήρα (εκ. m^3) - minimum storage.
- $D_u[t]$: Ζήτηση νερού για αστική χρήση το μήνα t (εκ. m^3) - demand.
- $D_irr[t]$: Ζήτηση νερού για αγροτική χρήση το μήνα t (εκ. m^3) - demand.
- $D_hydro[t]$: Απαίτηση νερού για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας το μήνα t (εκ. m^3) - demand.
- $I[t]$: Εισροές νερού στον ταμιευτήρα το μήνα t (εκ. m^3) - inflows.
- $O[t]$: Διαφυγές νερού από τον ταμιευτήρα το μήνα t , π.χ. απώλειες εξάτμισης (εκ. m^3) - outflows.

Η λειτουργία του ταμιευτήρα υπόκειται στους εξής περιορισμούς:

- Αρχική αποθήκευση: Η αρχική αποθήκευση τον πρώτο μήνα υπολογίζεται ως εξής:

$$S[1] = S0 + I[1] - O[1] \quad (1)$$

- Ισοζύγιο αποθηκευμένου νερού: Για όλους τους επόμενους μήνες ($t > 1$), η αποθήκευση στην αρχή του κάθε μήνα ισούται με την αποθήκευση στο τέλος του προηγούμενου μήνα, συν τις εισροές, μείον τις εκροές για διαφορετικές χρήσεις, μείον τις όποιες διαφυγές:

$$S[t] = S[t - 1] + I[t] - O[t] - R_u[t] - R_irr[t] - R_hydro[t] \quad (2)$$

- Περιορισμοί χωρητικότητας: Η χωρητικότητα $S[t]$ πρέπει να είναι μεταξύ της ελάχιστης απαιτούμενης αποθήκευσης S_min και της χωρητικότητας της ταμιευτήρα K :

$$S_min \leq S[t] \leq K \quad (3)$$

- Περιορισμοί εκροών, βάσει των αντίστοιχων ζητήσεων για κάθε χρήση, και δεδομένης της αντίστοιχης διαθέσιμης χωρητικότητας νερού στον ταμιευτήρα. Για παράδειγμα, οι εκροές για αστική χρήση θα πρέπει να ικανοποιούν την αστική ζήτηση νερού, κ.ο.κ.:

$$R_u[t] = \min(S[t], D_u[t]) \quad (4)$$

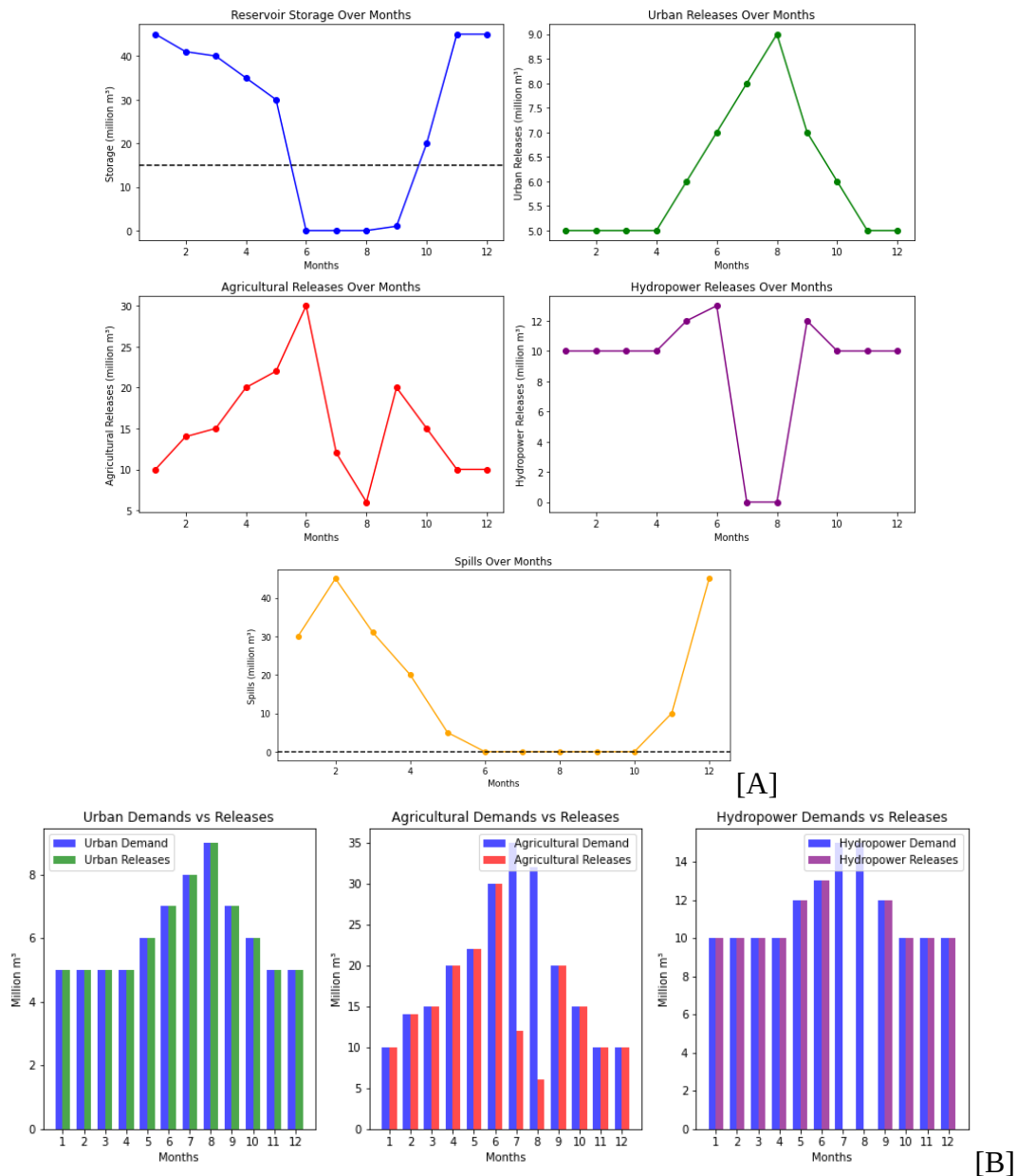
$$R_irr[t] = \min(S[t], D_irr[t]) \quad (5)$$

$$R_{\text{hydro}}[t] = \min(S[t], D_{\text{hydro}}[t]) \quad (6)$$

- Υπολογισμός διαρροών: Διαρροές από τη δεξαμενή συμβαίνουν όταν το επίπεδο αποθήκευσης υπερβαίνει τη χωρητικότητα K . Οι διαρροές υπολογίζονται ως η πλεονάζουσα αποθήκευση πάνω από την K :

$$\text{Spills}[t] = \max(0, S[t] - K) \quad (7)$$

Η προσομοίωση επαναλαμβάνεται κάθε μήνα, ενημερώνοντας την αποθήκευση, τις εκροές και τις διαρροές και διαφυγές, με βάση τους παραπάνω περιορισμούς. Έτσι, το μοντέλο παρέχει τις βασικές πληροφορίες για τη λειτουργία ενός ταμιευτήρα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στο διαθέσιμο παράδειγμα δίνονται ενδεικτικές τιμές στις παραμέτρους του προβλήματος, ώστε να αποδοθεί μια απεικόνιση της μορφής των αποτελεσμάτων του μοντέλου (Εικόνα 1). Ο διαθέσιμος κώδικας αναπαράγει αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 1. Ενδεικτικά αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης για μια περίοδο 12 μηνών, βασικών παραμέτρων ταμιευτήρα [A], και σύγκριση ‘demand-releases’ για κάθε χρήση [B].

Στο μοντέλο, δίνεται προτεραιότητα στην κάλυψη της αστικής ζήτησης πριν από την κατανομή του νερού σε γεωργικές και υδροηλεκτρικές χρήσεις. Δηλαδή εξαντλείται η ποσότητα $R_u[t]$ μέχρι να καλυφθεί η ζήτηση $D_u[t]$ (αν υπάρχει αρκετό διαθέσιμο νερό στον ταμιευτήρα). Εάν δεν υπάρχει αρκετό διαθέσιμο νερό στον ταμιευτήρα για να καλύψει την αστική ζήτηση, απελευθερώνεται η διαθέσιμη ποσότητα και οποιαδήποτε πλεονάζουσα αστική ζήτηση δεν ικανοποιείται. Ακολούθως συνεχίζει η κατανομή νερού (releases) για αγροτική χρήση και υδροηλεκτρική ενέργεια, με την ίδια λογική.

Κάθε στρατηγική διαχείρισης και κατανομής νερού έχει επίσης οικονομικές επιπτώσεις και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής κατανοούν περισσότερο τους οικονομικές παραμέτρους όταν αποφασίζουν. Έτσι στο μοντέλο υπολογίζονται επίσης τα κέρδη από την ικανοποίηση των αναγκών σε νερό ανά χρήση, καθώς και τα κόστη «χαμένου» νερού (spills).

Τα κέρδη (benefits $B_R(R_u(i, t))$) υπολογίζονται με την εξής λογική:

$$B_R(R_{urban,t}) = \text{Αξία νερού} \left(\frac{\$}{m^3} \right) \cdot R_{urban,t}(m^3) - \text{Κόστος επεξεργασίας νερού} \left(\frac{\$}{m^3} \right) - R_{urban,t}(m^3) \quad (8)$$

$$B_R(R_{irr,t}) = \text{Αγροτικές πωλήσεις} \left(\frac{\$}{kg} \right) \cdot \text{Αγροτική παραγωγή} (kg) - \text{Κόστος άρδευσης} (\$) \quad (9)$$

$$B_R(R_{hydro,t}) = \text{Παραγόμενη ενέργεια} \left(\frac{kWh}{m^3} \right) \cdot R_{hydro,t} \cdot \text{Τιμή ενέργειας} \left(\frac{\$}{kWh} \right) - \text{Κόστη παραγωγής ενέργειας} \cdot R_{hydro,t} \quad (10)$$

Τα κόστη (costs $C_{sp,t}(Sp_{i,t})$) υπολογίζονται με την λογική σύνδεσης της ποσότητας διαρροής με ένα κόστος ευκαιρίας (δηλαδή πόσο κέρδος θα είχαμε εάν αυτό το νερό χρησιμοποιούταν). Το μοντέλο υποθέτει ότι το ποσό διαρροής (spills) είναι το σταθμισμένο μερίδιο στις διάφορες χρήσεις. Δηλαδή, για τον μήνα t θα είναι $X\%$ αστικό + $Y\%$ άρδευση + $Z\%$ υδροηλεκτρική ενέργεια, όπου τα ποσοστά αυτά βασίζονται στις αντίστοιχες πραγματικές μηνιαίες απαιτήσεις τους. Πιο συγκεκριμένα, ανά χρήση:

$$C_{sp,urb}(Sp_{u,t}) = \text{Αξία νερού} \left(\frac{\$}{m^3} \right) \cdot Sp_{u,t}(m^3) \quad (11)$$

$$C_{sp,irr}(Sp_{irr,t}) = \text{Κόστος άρδευσης} \left(\frac{\$}{m^3} \right) \cdot Sp_{irr,t}(m^3) \quad (12)$$

$$C_{sp,hydro}(Sp_{hydro,t}) = \text{Ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί} (kWh) \cdot Sp_{hydro,t}(m^3) \cdot \text{τιμή ενέργειας} \left(\frac{\$}{kWh} \right) \quad (13)$$

«Χτίζοντας» πάνω στο μοντέλο προσομοίωσης, διαμορφώθηκαν πέντε διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης, το καθένα με διαφορετικό στόχο (αντικειμενική συνάρτηση) και περιορισμούς.

Βελτιστοποίηση: Model#1

Αυτό το πρόβλημα λαμβάνει υπόψη το ισοζύγιο νερού και περιορισμένη λειτουργία ταμιευτήρα. Στοχεύει στην επίτευξη των ελάχιστων ελλειμμάτων νερού στη δεξαμενή, ή αλλιώς στο μέγιστο διαθέσιμο νερό που εκφράζεται ως αποθήκευση (storage).

Οι βασικές μεταβλητές είναι η αποθήκευση (storage), οι εισροές στον ταμιευτήρα (inflows, π.χ. από βροχή, ποτάμια, κ.λπ.), και οι εκροές από τον ταμιευτήρα (outflows, συνολικά διαρροές και απώλειες), στο χρονικό βήμα t . Οι «μεταβλητές απόφασης», δηλαδή αυτές που θα καθορίσει ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης είναι τα Releases (R), δηλαδή πόσο νερό να διατεθεί για την ικανοποίηση της κάθε χρήσης (αστική, αγροτική και υδροηλεκτρική ενέργεια): $R_{u,t}$, $R_{irr,t}$, $R_{hydro,t}$.

Τα δεδομένα του προβλήματος είναι τα: K (maximum storage), S_0 (initial storage), και οι ζητήσεις κάθε χρήσης ($D_{u,t}$, $D_{irr,t}$, $D_{hydro,t}$).

Όπως αναφέρθηκε, ο στόχος (αντικειμενική συνάρτηση) είναι η ελαχιστοποίηση των ελλειμμάτων νερού (ή μεγιστοποίηση του διαθέσιμου νερού). Αυτό μπορεί να εκφραστεί με δύο ισοδύναμους τρόπους:

$$Zmin = \sum_{t=1}^{T=12} (-S_t) \text{ ή } Zmax = \sum_{t=1}^{T=12} (S_t) \quad (14)$$

Για απλότητα και αποφυγή αρνητικών τιμών, κρατάμε τη δεύτερη έκφραση, το $Zmax$.

Περιορισμοί (σε αντιστοιχία με το μοντέλο προσομοίωσης):

- Ισοζύγιο ταμιευτήρα: $S_t = S_{t-1} + I_t - O_t$, για κάθε t . (15)
- Έλεγχος χωρητικότητας: $S_t \leq K$, για κάθε t . (16)
- Περιορισμοί εκροών: $R_{u,t} \geq D_{u,t}$ και $R_{irr,t} \geq D_{irr,t}$ και $R_{hydro,t} \geq D_{hydro,t}$, για κάθε t . (17)
- Συνθήκες μη-αρνητικότητας: $I_t, O_t, R_{i,t} \geq 0$ (18)

Η λύση αυτού του προβλήματος προσπαθεί όσο το δυνατόν να εξισώσει τις μεταβλητές απόφασης (R) με τις ζητήσεις (D), για να εξασφαλίσουμε ένα ελάχιστο επίπεδο εκροών, οδηγώντας έτσι στη μέγιστη αποθήκευση (storage). Ο κώδικας παρέχει τα αποτελέσματα (όλων των παραπάνω μεταβλητών) για κάθε μήνα της προσομοίωσης ($t = 1, 2, \dots, 12$).

Βελτιστοποίηση: Model#2

Αυτό το παράδειγμα βασίζεται στην ίδια διατύπωση με το Model#1 (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί), αλλά θεωρεί την περίπτωση μιας κατάστασης λειψυδρίας, όπου δεν μπορούν πάντα να ικανοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις (D) και πρέπει να δοθεί προτεραιότητα. Αυτό συμβαίνει συχνά στην πραγματικότητα.

Η αστική ζήτηση ($D_{u,t}$) τίθεται ως πρώτη προτεραιότητα. Αν το διαθέσιμο νερό είναι λιγότερο, τότε όλες οι εκροές είναι ίσες με τη $R_{u,t}$, και δε μένει νερό για τις άλλες χρήσεις, άρα $R_{irr,t} = R_{hydro,t} = 0$.

Αν υπάρχει ακόμα νερό, έπειτα από την κάλυψη των αστικών αναγκών, τότε $R_{u,t} = D_{u,t}$, και το υπόλοιπο νερό, δηλαδή το $S_t - R_{u,t}$, θα κατανέμεται στις άλλες χρήσεις, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Η άρδευση ($D_{irr,t}$) τίθεται ως δεύτερη προτεραιότητα, επομένως η εκροή για άρδευση $R_{irr,t}$ είναι το υπόλοιπο νερό, εφόσον έχει καλυφθεί η $R_{u,t}$.

Το υπόλοιπο διαθέσιμο νερό διατίθεται για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας ($D_{hydro,t}$), αν έχει απομείνει ακόμα νερό, αλλιώς, $R_{hydro,t} = 0$.

Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου δείχνουν την αποθήκευση του ταμιευτήρα και τις εκροές ανά χρήση για κάθε μήνα της περιόδου προσομοίωσης, ενώ παρέχονται και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

Βελτιστοποίηση: Model#3

Το προηγούμενο μοντέλο υπό συγκεκριμένες συνθήκες ενδέχεται να προσπαθεί να «αναγκάσει» την αποθήκευση νερού (storage) στον ταμιευτήρα να είναι όσο γίνεται μεγαλύτερη, παρόλο που αυτό μπορεί να συμβαίνει εις βάρος των πιθανών εκροών για την αγροτική χρήση ή την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, διαμορφώθηκε το Model#3 όπου δείχνει πώς μπορούν να μεγιστοποιηθούν οι εκροές νερού στις τρεις χρήσεις (και πάλι με προτεραιότητα, όπως στο Model#2), αλλά τώρα – δεδομένου του περιορισμένου διαθέσιμου νερού – με πιο χαλαρούς περιορισμούς αποθήκευσης νερού (δηλαδή, λιγότερο διαθέσιμο νερό στη δεξαμενή για να ικανοποιηθούν οι ανταγωνιστικές απαιτήσεις).

Οι παράμετροι είναι ίδιοι με τα προηγούμενα μοντέλα, όπως και οι μεταβλητές απόφασης (Releases: $R_{u,t}$, $R_{irr,t}$, $R_{hydro,t}$).

Εδώ, έχουμε την εξής αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποίησης εκροών για κάθε χρήση:

$$Z_{max} = \sum_{t=1}^{T=12} (R_{u,t} + R_{irr,t} + R_{hydro,t}) \quad (19)$$

Με περιορισμούς:

- Ισοζύγιο ταμιευτήρα: $S_t = S_{t-1} + I_t - O_t$, για κάθε t. (20)
- Έλεγχος χωρητικότητας: $S_{min} \leq S_t \leq K$, για κάθε t. (21)
- Προτεραιότητες εκροών:

Προτεραιότητα 1 – Αστική ζήτηση: το μοντέλο διασφαλίζει ότι η εκροή για αστική χρήση $R_{u,t}$ είναι ίση με την αντίστοιχη ζήτηση $D_{u,t}$

$$R_{u,t} = D_{u,t}, \text{ για κάθε t. } \quad (22)$$

Εάν δεν υπάρχει αρκετό νερό τον μήνα t για να καλύψει όλη την αστική ζήτηση, τότε όλες οι εκροές θα πηγαίνουν προς κάλυψη της αστικής ζήτησης: $R_{u,t} \leq D_{u,t}$ (23)

Προτεραιότητα 2 – Αγροτική ζήτηση: Το υπόλοιπο νερό ($RW1$) θα πηγαίνει προς κάλυψη της αγροτικής χρήσης $R_{irr,t}$ (όσο περισσότερο γίνεται να την καλύψει).

Το υπόλοιπο νερό είναι δηλαδή $RW1_t = R_{irr,t} = S_t - R_{u,t} \leq D_{irr,t}$ για κάθε t. (24)

Προτεραιότητα 3 – Ζήτηση για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας: Εάν μετά την

ικανοποίηση των αστικών και αγροτικών αναγκών, υπάρχει ακόμα διαθέσιμο νερό (RW2), μπορεί να απελευθερωθεί για να καλύψει τη ζήτηση υδροηλεκτρικής ενέργειας, πλήρως ή μόνο εν μέρει, ανάλογα τη διαθεσιμότητα.

$$RW2_t = S_t - R_{u,t} - R_{irr,t}, \text{ για κάθε } t. \quad (25)$$

$$\text{Αν } RW2_t > 0, \text{ τότε } RW2_t = R_{hydro,t} \leq D_{hydro,t}, \text{ για κάθε } t. \quad (26)$$

Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου δείχνουν τη βελτιστοποιημένη αποθήκευση (storage) και τις βελτιστοποιημένες εκροές (releases) για κάθε χρονικό βήμα. Εάν δεν υπάρχει αρκετό νερό για να καλύψει τις απαιτήσεις και δεν μπορεί να ικανοποιηθεί ο ελάχιστος περιορισμός αποθήκευσης, το μοντέλο επιστρέφει “No optimal solution!”.

Βελτιστοποίηση: Model#4

Το Model#4 διαφέρει ελαφρώς από τις προηγούμενες προσεγγίσεις. Αφορά την ελαχιστοποίηση της ανικανοποίητης ζήτησης (unmet demand) για κάθε χρήση, κάτω από τους ίδιους περιορισμούς προτεραιοποίησης.

Τα δεδομένα του προβλήματος είναι τα K , S , οι ζητήσεις κάθε χρήσης ($D_{u,t}$, $D_{irr,t}$, $D_{hydro,t}$). Οι μεταβλητές απόφασης είναι τα Releases (R ανά χρήση, $R_{u,t}$, $R_{irr,t}$, $R_{hydro,t}$).

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η προτεραιοποίηση της αστικής, έπειτα της αγροτικής, και έπειτα της υδροηλεκτρικής χρήσης νερού, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται η ανικανοποίητη ζήτηση (unmet demand)

$$Zmin = \sum_{t=1}^{T=12} [(D_{u,t} - R_{u,t}) + (D_{irr,t} - R_{irr,t}) + (D_{hydro,t} - R_{hydro,t})] \quad (27)$$

Σε αυτή την περίπτωση οι περιορισμοί εκφράζονται ως εξής:

- Ισοζύγιο ταμιευτήρα: $S_t = S_{t-1} + I_t - O_t - R_{u,t} - R_{irr,t} - R_{hydro,t}$, για κάθε t . (28)
- Έλεγχος χωρητικότητας: $S_{min} \leq S_t \leq K$, για κάθε t . (29)
- Προτεραιότητες εκροών:

Προτεραιότητα 1 – Αστική ζήτηση:

$$R_{u,t} = D_{u,t}, \text{ για κάθε } t. \quad (30)$$

Εάν δεν υπάρχει αρκετό νερό τον μήνα t για να καλύψει όλη την αστική ζήτηση, τότε όλες οι εκροές θα πηγαίνουν προς κάλυψη της αστικής ζήτησης: $R_{u,t} \leq D_{u,t}$ (31)

Προτεραιότητα 2 – Αγροτική ζήτηση (το υπόλοιπο νερό έπειτα από την αστική ζήτηση):

$$R_{irr,t} \geq D_{irr,t} - R_{u,t}, \text{ για κάθε } t. \quad (32)$$

Προτεραιότητα 3 – Ζήτηση για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας (το υπόλοιπο νερό από αστική και αγροτική ζήτηση):

$$R_{hydro,t} \geq D_{hydro,t} - R_{u,t} - R_{irr,t}, \text{ για κάθε } t. \quad (33)$$

Βελτιστοποίηση: Model#5

Αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης βασίζεται στις οικονομικές παραμέτρους Benefits και Costs, όπως ορίστηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης ταμιευτήρα.

Ο στόχος του Model#5 είναι να μεγιστοποιηθούν τα συνολικά καθαρά οφέλη που προκύπτουν από τη λειτουργία του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της 12μηνιας περιόδου, υπό τους περιορισμούς ισοζυγίου και χωρητικότητας.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι: βροχόπτωση στον ταμιευτήρα P_t , εξάτμιση από τον ταμιευτήρα E_t , αποθήκευση S_t , οι εκροές για κάθε χρήση νερού R_t , οι ζητήσεις κάθε χρήσης D_t , η χωρητικότητα K , η διαρροή Sp_t , και οι απαιτούμενες περιβαλλοντικές ροές EF_t , για κάθε t .

Η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει υπόψη τα οφέλη από τις εκροές που προορίζονται για κάλυψη των αναγκών των τριών χρηστών, το κόστος που σχετίζεται με τις διαρροές (ως κόστος ευκαιρίας του νερού που θα μπορούσε να είχε χρησιμοποιηθεί), και το κόστος της μη ικανοποίησης των απαιτήσεων ελάχιστης περιβαλλοντικής ροής. Αυτό εκφράζεται ως εξής:

$$Zmax = \sum_{t=1}^{12} [B_R(R_{1t}, R_{2t}, R_{3t}) - C_{sp}(Sp_t) - C_{EF}(EF_t)] \quad (34)$$

Όπου:

B_R = οφέλη από τις εκροές που προορίζονται για κάλυψη των αναγκών R_{it} (i = αστική, αγροτική, υδροηλεκτρική). Υπολογίζονται όπως στην προσομοίωση ταμιευτήρα, σύμφωνα με τις Εξισώσεις (8)-(10).

C_{sp} = κόστος διαρροών (κόστος ευκαιρίας). Υπολογίζονται όπως στην προσομοίωση ταμιευτήρα, σύμφωνα με τις Εξισώσεις (11)-(13).

C_{EF} = κόστος μη συμμόρφωσης με τη διατήρηση των περιβαλλοντικών ροών. Αν οι περιβαλλοντικές ροές είναι κάτω από το ελάχιστο όριο $MinEF_t$, τότε υφίσταται το κόστος C_{EF} όπου ορίζεται ως 'ποινή' (penalty), ανάλογο της απόκλισης από το ελάχιστο όριο.

Οι περιορισμοί του προβλήματος αυτού διαμορφώνονται ως εξής:

- Ισοζύγιο ταμιευτήρα:
 $S_t = S_{t-1} + I_t - E_t + P_t - \sum_i (R_{it}) - Sp_t - EF_t, \quad t = 1, 2, \dots, 12 \quad (35)$
- Έλεγχος χωρητικότητας:
 $0 < S_t \leq K, \quad t = 1, 2, \dots, 12 \quad (36)$
- Περιορισμοί εκροών:
 $R_{i,t} \geq D_i, \quad t = 1, 2, \dots, 12 \quad (37)$
- Περιορισμός διαρροών για αποφυγή υπερχειλίσης ταμιευτήρα:
 $0 \leq Sp_t \leq S_{t-1}, \quad t = 1, 2, \dots, 12 \quad (38)$
- Εξασφάλιση περιβαλλοντικών ροών:
 $EF_t \geq MinEF_t \quad (39)$

Ο κώδικας αυτού του μοντέλου παρέχει μηνιαία αποτελέσματα για την αντικειμενική

συνάρτηση, τους περιορισμούς, και όλες τις παραμέτρους του μοντέλου. Επίσης παρέχει επιλογές οπτικοποίησης όλων των αποτελεσμάτων με γραφήματα.

Κώδικες για τα προβλήματα διαθέσιμοι στο:

Alamanos, A. (2023). Simple Reservoir Simulation Problem, and Different Optimization models. DOI: 10.13140/RG.2.2.12759.44969. Available at: <https://github.com/Alamanos11/Reservoir-Simulation-and-Optimization-models>

Βιβλιογραφία

- Alamanos, A., Latinopoulos, D., Papaioannou, G., Mylopoulos, N. (2019). Integrated Hydro-Economic Modeling for Sustainable Water Resources Management in Data-Scarce Areas: The Case of Lake Karla Watershed in Greece. *Water Resources Management*, Vol. 33, No. 8, pp. 2775–2790.
- Basheer, M., Nechifor, V., Calzadilla, A., Siddig, K., Etichia, M., Whittington, D., Hulme, D., Harou, J.J. (2021). Collaborative management of the Grand Ethiopian Renaissance Dam increases economic benefits and resilience. *Nature Communications*, Vol 12, No. 1, 5622.
- Fayaed, S. S., El-Shafie, A., Jaafar, O. (2013). Reservoir-system simulation and optimization techniques. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 7, pp. 1751–1772.
- Garcia, J.A., Alamanos, A. (2022). Integrated Modelling Approaches for Sustainable Agri-Economic Growth and Environmental Improvement: Examples from Greece, Canada and Ireland. *Land*, Vol. 11, No. 9, Article 9. Available: <https://doi.org/10.3390/land11091548>
- Garcia, J.A., Alamanos, A. (2023). A Multi-Objective Optimization Framework for Water Resources Allocation Considering Stakeholder Input. *Environmental Sciences Proceedings*, Vol. 25, No. 1, Article 1. Available: <https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14227>
- Garcia, J.A., Alamanos, A. (2024). Optimization in Water Resources Management. *Elgar Encyclopedia of Water Policy, Economics and Management*. Edward Elgar Publishing, pp. 188–191. <https://www.elgaronline.com/display/book/9781802202946/chapter43.xml>
- Hatamkhani, A., Shourian, M., Moridi, A. (2021). Optimal Design and Operation of a Hydropower Reservoir Plant Using a WEAP-Based Simulation–Optimization Approach. *Water Resources Management*, Vol. 35, No. 5, pp. 1637–1652.
- Nourani, V., Rouzegari, N., Molajou, A., Hosseini Baghanam, A. (2020). An integrated simulation-optimization framework to optimize the reservoir operation adapted to climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, Vol. 587, 125018.
- Sedighkia, M., Abdoli, A. (2023). Design of optimal environmental flow regime at downstream of multireservoir systems by a coupled SWAT-reservoir operation optimization method. *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 25, No. 1, pp. 834–854.
- Shenava, N., Shourian, M. (2018). Optimal Reservoir Operation with Water Supply Enhancement and Flood Mitigation Objectives Using an Optimization-Simulation Approach. *Water Resources Management*, Vol. 32, No. 13, pp. 4393–4407.
- Zhang, J., Delshad, M., Sepehrnoori, K. (2007). Development of a framework for optimization of reservoir simulation studies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 59, No. 1, pp. 135–146.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Ξανθούλα Καρασμανάκη

Δασολόγος

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
e-mail: xantkara2@fmenr.duth.gr

Γεώργιος Ε. Τσαντόπουλος

Καθηγητής

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
e-mail: tsantopo@fmenr.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική, που καθορίζεται από τα Άρθρα 11 και 191-193 της Συνθήκης για τη Λειτουργία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, περιλαμβάνει πάνω από 300 κανονιστικές πράξεις και στοχεύει στην αειφορική ανάπτυξη της Ευρώπης μέσω προγραμμάτων δράσης που εγκρίνονται από το Συμβούλιο και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Η αναγνώριση του νερού ως κοινό αγαθό και περιορισμένος πόρος έχει οδηγήσει στη θεσμοθέτηση της ΟΠΥ και της Οδηγίας Πλαίσιο για τη Θαλάσσια Στρατηγική (ΟΠΘΣ). Από το 2000, η ΟΠΥ χρησιμοποιείται για την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων, με στόχο την επίτευξη «καλής κατάστασης» για όλα τα υδάτινα οικοσυστήματα μέσω ποιοτικών, οικολογικών και ποσοτικών στόχων. Η ΟΠΥ απαιτεί συνεχόμενη παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων και προβλέπει την ανάπτυξη Σχεδίων Διαχείρισης για κάθε λεκάνη απορροής, τα οποία συνοδεύονται από Προγράμματα Μέτρων για την επίτευξη των στόχων. Η εργασία αναλύει την Περιβαλλοντική Πολιτική της ΕΕ, καθώς και την Πολιτική της για τα Ύδατα, εστιάζοντας στις νομοθετικές ρυθμίσεις των τελευταίων δεκαετιών, συμπεριλαμβανομένων της Οδηγίας Πλαισίου για τα Ύδατα (ΟΠΥ) και των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού (ΣΔΛΑΠ). Μέσα από τη διερεύνηση θα αξιολογηθεί αν αυτές οι ρυθμίσεις ευθυγραμμίζονται με τους στόχους της Περιβαλλοντικής Πολιτικής της ΕΕ και αν επιτυγχάνονται οι βασικές επιδιώξεις της.

Λέξεις κλειδιά: Περιβαλλοντική Διακυβέρνηση, Περιβαλλοντική Αειφορία, Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (ΟΠΥ), Σχέδια Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού (ΣΔΛΑΠ), Ποιότητα Υδάτων

Εισαγωγή

Οι οικοσυστημικές υπηρεσίες του περιβάλλοντος περιλαμβάνουν όλες τις άμεσες και

έμμεσες ωφέλειες που προάγουν την ανθρώπινη ευημερία. Παράλληλα, η βιοποικιλότητα διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση αυτών των ωφελειών, καθιστώντας τη διατήρηση και προστασία της απαραίτητη σε παγκόσμιο επίπεδο (Grizzetti 2016). Σε έναν κόσμο που αντιμετωπίζει τις αυξανόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και την εξάντληση φυσικών πόρων, κυρίως από τους τομείς της γεωργίας, της βιομηχανίας, του τουρισμού, των μεταφορών και της ενέργειας, η προστασία της βιοποικιλότητας και του φυσικού περιβάλλοντος πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα (Καλλία-Αντωνίου 2011). Κεντρικό ρόλο σε αυτήν την προσπάθεια παίζει η Περιβαλλοντική Διακυβέρνηση, η οποία, μέσα από κανονισμούς και διαδικασίες, στοχεύει στην επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης. Ο απώτερος στόχος είναι η εναρμόνιση όλων των τομέων της ανθρώπινης δραστηριότητας με την οικολογική ισορροπία και την περιβαλλοντική αειφορία σε αυτήν και τις επόμενες γενιές (Ορφανού 2024). Το νερό αποτελεί πρωταρχικό στοιχείο για τη διατήρηση της ζωής όλων των ζωντανών οργανισμών και των φυτών, αφού καταλαμβάνει το 60,0-70,0% του ανθρώπινου κυττάρου. Περίπου το 70,0% ολόκληρης της γης καταλαμβάνεται από την κάθε μορφή νερού που σχηματοποιείται επάνω της (Μυρωνίδης 2021). Ωστόσο, από τη συνολική ποσότητα των υδάτων που διαθέτει ο πλανήτης, το 97,0% καταλαμβάνεται από το θαλασσίνο και ωκεάνιο νερό και μόλις το 3,0% αντιστοιχεί στο γλυκό νερό των ποταμών, των λιμνών, των υπόγειων υδροφορέων και των πολικών παγετώνων που βρίσκονται σε στερεή μορφή (Ganoulis 2024), ενώ διαθέσιμο προς τον άνθρωπο είναι λιγότερο από το 1,0% (Μυρωνίδης 2021). Επιπλέον, οι πόροι του γλυκού νερού είναι ανακυκλώσιμοι, αλλά όχι ανανεώσιμοι και δεν παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή πάνω στην επιφάνεια της γης. Ο τρόπος κατανομής των υδατικών πόρων στα διάφορα κράτη συνδέεται άμεσα με τους κοινωνικο-οικονομικούς τομείς τους και συνεπώς η διαχείρισή τους αποκτάει μεγάλη σπουδαιότητα, αφού μπορεί να διαμορφώσει την οικονομική ανάπτυξη των κρατών (Ganoulis 2024).

Η προστασία και η βιώσιμη διαχείριση της ποιότητας και της ποσότητας του νερού, προέχουν από την εμπορευσιμότητά του, καθώς αποτελεί κοινό αγαθό και περιορισμένο πόρο. Σύμφωνα με την Καλλία-Αντωνίου (2011), η πολιτική της ΕΕ έχει καθορίσει δύο κύρια νομικά πλαίσια για την προστασία και τη διαχείριση των γλυκών υδάτων και των θαλάσσιων πόρων με μια ολιστική, οικοσυστημική προσέγγιση: την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα (ΟΠΥ) και την Οδηγία-Πλαίσιο για τη Θαλάσσια Στρατηγική (ΟΠΘΣ). Με την παρούσα εργασία θα επιχειρηθεί να γίνει ενδελεχής ανάλυση της Ευρωπαϊκής Πολιτικής για τα ύδατα μέσω των νομοθετικών ρυθμίσεων, τις τελευταίες δεκαετίες, συμπεριλαμβανομένης και της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα, καθώς και τα Σχέδια Διαχείρισης σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής Ποταμού (ΣΔΛΑΠ) και αν συνάδουν με τους σκοπούς και στόχους της Περιβαλλοντική Πολιτική της ΕΕ.

Η προστασία και η διαχείριση του ύδατος οφείλει να υπερβαίνει τα σύνορα των χωρών, καθώς αποτελεί πολύτιμο αγαθό και κατέχει υψηλή σπουδαιότητα για κάθε χώρα. Η πολιτική της ΕΕ περί υδάτων συνδράμει σημαντικά στη διατήρηση του περιβάλλοντος. Το ευρωπαϊκό νομικό πλαίσιο για τα ύδατα καλύπτει την προστασία των υδατινών πόρων, των θαλάσσιων και των γλυκών υδάτων, καθώς και τη διασφάλιση της ποιότητας του πόσιμου νερού και των υδάτων κολύμβησης. Η Οδηγία-Πλαίσιο για τα ύδατα της ΕΕ καθορίζει τους κανόνες για την προστασία και αποκατάσταση του καθαρών υδατινών πόρων σε ολόκληρη την ΕΕ, με στόχο την εξασφάλιση της

μακροπρόθεσμης και βιώσιμης χρήσης του (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024α).

Με την παρούσα εργασία θα επιχειρηθεί να γίνει ενδελεχής ανάλυση της Ευρωπαϊκής Πολιτικής για τα ύδατα, εστιάζοντας στις νομοθετικές ρυθμίσεις των τελευταίων δεκαετιών, συμπεριλαμβανομένης της Οδηγίας Πλαισίου για τα Ύδατα και των Σχεδίων Διαχείρισης για τις Λεκάνες Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ). Επιπλέον, θα διερευνηθεί αν τα παραπάνω νομικά πλαίσια ευθυγραμμίζονται με τους σκοπούς και στόχους της Περιβαλλοντικής Πολιτικής της ΕΕ και αν, συνεπώς, επιτυγχάνονται οι βασικές επιδιώξεις της.

Ευρωπαϊκή Περιβαλλοντική Πολιτική

Διεθνείς Διακηρύξεις

Η Νομική βάση της ευρωπαϊκής Περιβαλλοντικής Πολιτικής, αποτελείται από τα Άρθρα 11 και 191 έως 193 της Συνθήκης για τη λειτουργία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΣΛΕΕ). Με αυτά καθορίζεται η ΕΕ ως αρμόδια στην περιβαλλοντική πολιτική και οι τομείς δράσης της περιλαμβάνουν τη ρύπανση του αέρα και των υδάτων, τη διαχείριση των αποβλήτων και την κλιματική αλλαγή (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024β). Τα τελευταία χρόνια, η ΕΕ έχει κληθεί να διαχειριστεί πολύπλοκα περιβαλλοντικά ζητήματα, κυρίως της αλλαγής του κλίματος, της απώλειας της βιοποικιλότητας, της εξάντλησης των φυσικών πόρων και της ρύπανσης. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική βασίζεται στις αρχές της προφύλαξης, της πρόληψης, της αποκατάστασης της ρύπανσης στην πηγή και της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024β). Το ζήτημα της περιβαλλοντικής προστασίας σε παγκόσμιο επίπεδο αναδείχθηκε για πρώτη φορά το 1968, όταν η Σουηδία το έφερε στην Ατζέντα του ΟΗΕ. Αυτή η πρωτοβουλία είχε ως αποτέλεσμα να υιοθετηθούν σημαντικές διεθνείς ρυθμίσεις για την προστασία του περιβάλλοντος, αν και αυτές οι ρυθμίσεις δεν ήταν δεσμευτικές (Ορφανού 2024). Η περιβαλλοντική νομοθεσία της ΕΕ καλύπτει ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων και επιπτώσεων. Περιλαμβάνει πάνω από 300 Κανονιστικές Πράξεις, όπως Κανονισμούς, Οδηγίες και Αποφάσεις, οι οποίες αναθεωρούνται και επικαιροποιούνται συνεχώς (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2023).

Η Περιβαλλοντική Πολιτική στο ξεκίνημά της διεθνώς, πραγματοποίησε δύο σημαντικές Διεθνείς Διακηρύξεις. Η πρώτη Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Ανθρώπινο Περιβάλλον έλαβε χώρα στη Στοκχόλμη από τις 5 έως τις 16 Ιουνίου 1972, όπου αναδείχθηκαν οι διεθνείς ανησυχίες για τα κρίσιμα περιβαλλοντικά ζητήματα. Η Διάσκεψη οδήγησε στη Συμφωνία για τη Διακήρυξη της Στοκχόλμης και του Σχεδίου Δράσης για το Ανθρώπινο Περιβάλλον, αναγνωρίζοντας το περιβάλλον ως προϋπόθεση για την ευημερία του ανθρώπου, αφού του παρέχει εκτός από φυσική τροφή, διανοητική, ηθική, κοινωνική και πνευματική ανάπτυξη, καθώς και άνθιση της οικονομίας των χωρών. Επίσης, αναδείχθηκαν μεταξύ άλλων, τα ζητήματα περί ανάπτυξης της επιστήμης και της τεχνολογίας η οποία μετασχηματίζει το ανθρώπινο περιβάλλον, περί των ανθρωπογενών βλαβών προς το περιβάλλον που οδηγούν στην καταστροφή και εξάντληση αναντικατάστατων πόρων και περί της φυσικής αύξησης του πληθυσμού που εντείνει τα προβλήματα για τη διατήρηση του περιβάλλοντος. Στη Διάσκεψη δεν παρήχθησαν νομικά κείμενα υποχρεωτικού χαρακτήρα, διακηρύχθηκε

όμως ότι η περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των ανθρώπων θα μπορούσε να επιτύχει τη βελτίωση του ανθρώπινου περιβάλλοντος για τις σημερινές και τις μελλοντικές γενιές. Επιπλέον, τόνισε ότι η διεθνής συνεργασία μεταξύ των εθνών και η δράση από Διεθνούς Οργανισμούς προς το κοινό συμφέρον, αποτελούν υποχρεωτική πρακτική για την αντιμετώπιση πολλών περιβαλλοντικών προβλημάτων (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024β).

Το 1992 διεξήχθη η «Διάσκεψη Κορυφής για τη Γη» στο Ρίο ντε Τζανέιρο. Στόχος της Διάσκεψης ήταν να προωθηθεί η περιβαλλοντική προστασία, καθώς και η πρόοδος προς την αειφορική ανάπτυξη. Μέσα από τη Διάσκεψη προωθήθηκε η ιδέα της βιώσιμης περιβαλλοντικής ανάπτυξης κατά τον νέο αιώνα και επιβεβαιώθηκε η διακήρυξη της Στοκχόλμης, καθορίζοντας στρατηγικές για τοπική, εθνική και παγκόσμια δράση. Οι στρατηγικές είχαν ως στόχο να ενισχύσουν το ανθρώπινο δυναμικό και να υποστηρίξουν περισσότερο τις αναπτυσσόμενες από τις ανεπτυγμένες χώρες. Ακόμη, ουσιαστικό ρόλο έπαιξαν στη λήψη αποφάσεων οι Μη Κυβερνητικές Οργανώσεις (ΜΚΟ) (Ορφανού 2024). Τέλος, στη Διάσκεψη αυτή συμπεριλήφθηκαν πολλές σημαντικές διακηρύξεις, όπως το Πρόγραμμα Δράσης 21, η Διακήρυξη του Ρίο, η Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) καθώς και η Σύμβαση για τη Βιολογική Ποικιλότητα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024β).

Το 1997 το Πρωτόκολλο του Κιότο, αποτέλεσε προέκταση της Διεθνούς Διάσκεψης του Ρίο (1992), καθώς συμπλήρωσε το κενό της σύμβασης πλαισίου για την κλιματική αλλαγή, σχετικά με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και της τρύπας του όζοντος. Στο Κιότο πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά η θέσπιση νομικού εργαλείου που είχε σαν σκοπό να μειωθούν οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ώστε να συγκρατηθεί η άνοδος της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας (Ορφανού 2024).

Ευρωπαϊκές Συνθήκες

Στόχος της Ευρωπαϊκής Περιβαλλοντικής Πολιτικής είναι η επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης για το κοινωνικό μοντέλο της Ευρώπης. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προτείνει Προγράμματα Δράσης, τα οποία στη συνέχεια εγκρίνονται από το Συμβούλιο σε συμφωνία με το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Αυτά τα προγράμματα αποτελούν νομικά δεσμευτικά πλαίσια και εγκρίνονται σύμφωνα με το άρθρο 192 παρ. 3 της ΣΛΕΕ. Έτσι, η Περιβαλλοντική Πολιτική εφαρμόζεται από τη δεκαετία του 1970 (Παπανικολάου 2024), αρχικά ως Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα από το 1975 έως το 2000 και μετά ως Ευρωπαϊκή Ένωση (Οικονόμου 2024).

Πιο αναλυτικά, το 1972 στο Παρίσι, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο ανέδειξε την ανάγκη για μια Κοινοτική περιβαλλοντική πολιτική και πρότεινε ένα πρόγραμμα δράσης για την προστασία και βελτίωση του περιβάλλοντος, καθώς και την αντιμετώπιση της ρύπανσης και των οχλήσεων.

Το 1987, η Ενιαία Ευρωπαϊκή Πράξη με τον νέο «Τίτλο για το Περιβάλλον» (Τίτλος VII), θέσπισε την πρώτη νομική βάση για τη θέσπιση μίας κοινής περιβαλλοντικής πολιτικής. Οι στόχοι που τέθηκαν ήταν να διατηρηθεί η ποιότητα του περιβάλλοντος, να προστατευτεί η ανθρώπινη υγεία και να προωθηθεί η ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων. Έπειτα, οι αναθεωρήσεις των Συνθηκών ενδυνάμωσαν τη δέσμευση της Κοινότητας για την περιβαλλοντική προστασία και τον ρόλο του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου ως αρμόδιο για την ανάπτυξη περιβαλλοντικής πολιτικής.

Το 1993, η Συνθήκη του Μάαστριχτ έθεσε ως επίσημο τομέα πολιτικής της ΕΕ το περιβάλλον (Τίτλος XVI). Εισήγαγε τη συμμετοχική διαδικασία στη λήψη αποφάσεων και τον κανονισμό της ειδικής πλειοψηφίας στο Συμβούλιο κατά την ψηφοφορία, καθώς επίσης ζητήθηκε η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των κρατών-μελών και η τήρηση της βιώσιμης ανάπτυξης.

Το 1999, το άρθρο 3γ της Συνθήκης του Άμστερνταμ ενσωμάτωσε την προστασία του περιβάλλοντος σε όλες τις κοινοτικές πολιτικές και δράσεις της ΕΕ, επιδιώκοντας την αειφόρο ανάπτυξη.

Το 2007, η Συνθήκη της Λισαβόνας καθόρισε την αειφόρο ανάπτυξη ως προτεραιότητα, εστιάζοντας στην επίτευξη πλήρους απασχόλησης και κοινωνικής προόδου, καθώς και στην προστασία και βελτίωση του περιβάλλοντος. Επίσης, αναγνωρίστηκε η νομική προσωπικότητα της ΕΕ, επιτρέποντάς της τη σύναψη διεθνών συμφωνιών.

Οι εξελίξεις αυτές ενίσχυσαν τη θέση της ΕΕ ως ηγετική δύναμη στη διεθνή περιβαλλοντική πολιτική, καθιστώντας την πρωτοπόρο σε σημαντικές πρωτοβουλίες όπως η πρόσφατη Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και η ευρωπαϊκή νομοθεσία για το κλίμα. Ο κύριος στόχος της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας είναι να καταστήσει την Ευρώπη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο μέχρι το έτος 2050. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσα από υιοθέτηση πολιτικών και πρωτοβουλιών σε διάφορους τομείς. Επιπλέον, ειδικές Οδηγίες και Κανονισμοί καλύπτουν τα θέματα της εκπομπής βιομηχανικών ρύπων και της ηχορύπανσης. Παρομοίως, η διαχείριση των απορριμμάτων και η προστασία των υδάτων αποτελούν επίσης κεντρικούς τομείς, όπως και η ασφάλεια των χημικών ουσιών. Σημαντικά είναι επίσης προγράμματα όπως το Πράσινο Ταμείο και ο Ορίζοντας 2020, τα οποία συμβάλλουν τόσο στην περιβαλλοντική προστασία όσο και στην αειφορική ανάπτυξη (Ορφανού 2024).

Το Ευρωπαϊκό νομοθέτημα για το Κλίμα, θέτει ως στόχο την κλιματική ουδετερότητα μέσα από ρυθμίσεις του Ενωσιακού Δικαίου για τις εκπομπές και απορροφήσεις αερίων του θερμοκηπίου, ώστε να ισοσκελιστούν μέσα στην ΕΕ μέχρι το 2050. Κατά το έτος αυτό επιδιώκεται οι εκπομπές να είναι μηδενικές και πέρα από αυτό το 2050 επιδιώκεται η επίτευξη αρνητικών εκπομπών. Για την επίτευξη του στόχου της κλιματικής ουδετερότητας, είναι απαραίτητο τα αρμόδια θεσμικά όργανα της Ένωσης και τα κράτη-μέλη να εφαρμόσουν τα κατάλληλα μέτρα σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Παράλληλα, θα προωθείται η δικαιοσύνη και η αλληλεγγύη μεταξύ των κρατών μελών, καθώς και η οικονομική αποδοτικότητα ώστε να επιτευχθεί ο στόχος (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024β).

Γενικές αρχές

Η περιβαλλοντική πολιτική της ΕΕ βασίζεται σε τέσσερις θεμελιώδεις αρχές (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024β). Η Αρχή της προφύλαξης αναφέρεται στην παύση ενεργειών οι οποίες ενδέχεται να έχουν αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες και για τις οποίες υπάρχει επιστημονική αβεβαιότητα. *Η Αρχή της Πρόληψης αποτελεί εργαλείο που στοχεύει στην αποφυγή περιβαλλοντικών ζημιών ώστε να αποφεύγεται η ανάγκη αποκατάστασης των ζημιών. Στην ουσία η αρχή αυτή ορίζει ότι πρέπει να λαμβάνονται μέτρα πρόληψης για την εκτίμηση και αποφυγή πιθανών περιβαλλοντικών ζημιών. Η Αρχή της Αποκατάστασης της ρύπανσης, στην πηγή αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου*

ήδη έχουν προκληθεί περιβαλλοντικές βλάβες. Ειδικότερα, οι υπεύθυνοι οφείλουν να προβούν στις απαραίτητες ενέργειες για να αποκαταστήσουν τη ζημιά στον τόπο («πηγή») όπου έγινε. Τέλος, η Αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» ορίζει ότι σε περιπτώσεις περιβαλλοντικής ρύπανσης να αποκαταστήσουν τη ρύπανση και να καλύψουν το κόστος. Η αρχή αυτή τέθηκε σε εφαρμογή μέσω της Οδηγίας για την Περιβαλλοντική Ευθύνη, η οποία στοχεύει στην πρόληψη και αν δεν είναι δυνατή, στην αποκατάσταση της περιβαλλοντικής ζημίας σε προστατευόμενα είδη και φυσικούς οικοτόπους, καθώς και σε υδάτινους πόρους και το έδαφος.

Προγράμματα Δράσης και Οριζόντιες Στρατηγικές

Τέλος, η ΕΕ έχει θεσπίσει τις οριζόντιες Στρατηγικές της για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη, τη Βιοποικιλότητα και τα Συστήματα Τροφίμων, καθώς επίσης και τα Προγράμματα Δράσης για το Περιβάλλον. Αυτά διαμορφώνουν τις προσεχείς νομοθετικές πρωτοβουλίες και στόχους για την περιβαλλοντική πολιτική της ΕΕ και εκδίδονται από την Επιτροπή από το 1973. Το 2022 ενεργοποιήθηκε το 8ο πρόγραμμα δράσης για το περιβάλλον, σύμφωνα με το οποίο η ΕΕ επαναδιατυπώνει Το 7ο πρόγραμμα δράσης για το περιβάλλον με χρονικό ορίζοντα υλοποίησης το 2050 φιλοδοξεί να εξασφαλίσει ευημερία για όλους, εντός των πλανητικών ορίων. Το νέο πρόγραμμα δράσης ενισχύει και αξιοποιεί τους περιβαλλοντικούς και κλιματικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, θέτοντας έξι προτεραιότητες (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024β):

- *Πραγματοποίηση των στόχων της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το έτος 2030 καθώς και της κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το έτος 2050.*
- *Προσαρμοστική ικανότητα στην κλιματική αλλαγή.*
- *Εφαρμογή του μοντέλου αναγεννητικής ανάπτυξης και μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία.*
- *Φιλοδοξία μηδενικής ρύπανσης και διασφάλιση της υγείας και της ποιότητας ζωής των πολιτών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.*
- *Προστασία, διασφάλιση και επανάκαμψη της βιοποικιλότητας, καθώς και βελτίωση των φυσικών πόρων.*
- *Μείωση των περιβαλλοντικών και κλιματικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την παραγωγή και κατανάλωση, με ιδιαίτερη έμφαση στους τομείς της παραγωγής ενέργειας, της βιομηχανικής ανάπτυξης, των κτιρίων και υποδομών, της μετακίνησης και των τροφίμων.*

Περιβαλλοντική Πολιτική της ΕΕ για τον Τομέα των Υδάτων: Οδηγία 2000/60/ΕΚ και Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών

Η πολιτική της ΕΕ για τον τομέα των υδάτων, στοχεύει στην εξασφάλιση της αειφόρου ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Κοινότητας. Ειδικότερα, η ευρωπαϊκή πολιτική για τα ύδατα ευθυγραμμίζεται με το στόχο να εξασφαλιστεί σε όλους τους Ευρωπαίους πολίτες ελεύθερη πρόσβαση στο νερό, του οποίου η ποιότητα θα πρέπει να είναι καλή και σε επαρκείς ποσότητες. Γι' αυτό το σκοπό, χρειάζεται η κατάλληλη διαχείριση των υδάτινων συστημάτων της Ευρώπης ώστε να πληρούν κάποια συγκεκριμένα ελάχιστα πρότυπα. Παράλληλα, χρειάζεται να προστατεύονται εκείνα τα υδάτινα

οικοσυστήματα που χαρακτηρίζονται ως ευπαθή (Μήτα 2015). Συνεπώς, οι προσπάθειες εστιάζονται στη μείωση και την εξάλειψη της ρύπανσης, αλλά και στη διασφάλιση επάρκειας νερού, τόσο για την άγρια ζωή, όσο και για τις ανθρώπινες ανάγκες (European Parliament 2006).

Γενικό Πλαίσιο Υδατικής Πολιτικής

Από τον αρχικό προσδιορισμό κατά τη δεκαετία 1970-1980 των ποιοτικών στόχων για τα ύδατα ανάλογα με την προορισμένη χρήση τους, κατά τη δεύτερη νομοθετική περίοδο 1988-2000 με αφετηρία τη Σύνοδο Υπουργών Περιβάλλοντος το 1988, τέθηκαν ποιοτικοί στόχοι απευθείας στις πηγές της ρύπανσης των υδάτων (Μήτα 2015). Το 1980 η Οδηγία 80/778/ΕΟΚ, αποτέλεσε την πρώτη Οδηγία για το πόσιμο νερό και αφορούσε στον βελτιστοποίηση των απαιτήσεων των κρατών-μελών σχετικά με το νερό, καθώς και την επίτευξη ίσων προϋποθέσεων οικονομικού ανταγωνισμού. Το 1992 στο Ελσίνκι, εγκρίθηκε η Σύμβαση για τα Ύδατα θέτοντας την ΕΕ ως συμβαλλόμενο μέρος. Επιπλέον, προώθησε τη διεθνή συνεργασία και την προστασία των διασυνοριακών επιφανειακών καθώς και υπόγειων υδάτων με εθνικά μέτρα και διεθνή συνεργασία. Το 1997 καθιερώθηκε η Σύμβαση που ρυθμίζει τη χρήση των διεθνών ποταμών και λιμνών για σκοπούς πέρα από τη ναυτιλία, που αφορούσε σε κανόνες για τη διακρατική συνεργασία για τα υδατορεύματα σχετικά με τη χρήση, διαχείριση και προστασία τους. Το 2012, η Επιτροπή ανακοίνωσε το Προσχέδιο για τη Διατήρηση των Υδάτινων Πόρων της Ευρώπης, το οποίο καθόρισε την μακροπρόθεσμη στρατηγική για τη διασφάλιση επαρκούς ποσότητας και ποιότητας νερού για όλες τις επιτρεπόμενες χρήσεις (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024α).

Νομοθετικές Διατάξεις της ΕΕ για τον Τομέα των Υδάτων

Η βιώσιμη πολιτική για τους υδατικούς πόρους αποτελεί το βασικό Στρατηγικό Σχέδιο για να ρυθμιστεί η ισορροπία ανάμεσα στην προσφορά και τη ζήτηση του νερού. Κάτι τέτοιο κρίνεται ως προτεραιότητα στον σύγχρονο κόσμο όπου το νερό απειλείται με υποβάθμιση και ρύπανση. Επιπλέον, σημειώνεται μεγαλύτερη ζήτηση λόγω της αύξησης του πληθυσμού, αλλά και των ακραίων καιρικών φαινομένων που αποτελούν επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η ΕΕ αναμένεται να έρθει αντιμέτωπη με ολοένα και πιο ακραία καιρικά φαινόμενα που αφορούν το νερό, όπως πλημμύρες και παρατεταμένες ξηρασίες. Επομένως, η εφαρμογή πολιτικών για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων και την προσαρμογή σε αυτά είναι εξαιρετικά σημαντική. Η ΕΕ έχει καθιέρωσε δύο κύρια νομικά πλαίσια για να διασφαλιστεί η προστασία και η διαχείριση των γλυκών υδάτων και των θαλάσσιων πόρων: την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα (ΟΠΥ) και την Οδηγία-Πλαίσιο για τη Θαλάσσια Στρατηγική (ΟΠΘΣ) (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024α).

Οι βασικές νομοθετικές διατάξεις της ΕΕ για τον τομέα των υδάτων είναι οι εξής (Καλλία-Αντωνίου 2011):

Οι Οδηγίες 75/440, 91/692, αφορούν στην ποιότητα των επιφανειακών υδάτων που απαιτείται να έχουν, προκειμένου να αντληθεί πόσιμο νερό στα κράτη-μέλη.

Η Οδηγία 98/83 (αντικατάσταση της Οδηγίας 80/778), αφορά στην ποιότητα πόσιμου νερού για τον άνθρωπο.

Οι Οδηγίες 79/869, 81/885 και 91/692 καθορίζουν τις διαδικασίες για τη δειγματοληψία και τον έλεγχο του πόσιμου νερού.

Ο Κανονισμός 648/2004 τροποποιήθηκε με τους Κανονισμούς 907/2006, 1336/2008, 219/2009 και 551/2009, και στη συνέχεια ενοποιήθηκε σε ένα ενιαίο κείμενο στις 27.6.2009, το οποίο αντικατέστησε την Οδηγία 73/404. Ο Κανονισμός αναφέρεται στη ρύπανση που προκαλείται από τα απορρυπαντικά.

Οι Οδηγίες 76/464, 83/513, 84/156, 84/491, 86/176, 86/280, 2006/11, 2008/105, αφορούν στην απελευθέρωση επικίνδυνων τοξικών ουσιών στο υδάτινο περιβάλλον.

Οι Οδηγίες 79/923, 2006/113, είναι περί της απαιτούμενης ποιότητας των νερών για τα οστρακοειδή.

Οι Οδηγίες 78/659, 91/692, 2006/44, αναφέρονται στην απαιτούμενη ποιότητα των υδάτων για τη διατήρηση της ιχθυοπανίδας.

Η Οδηγία 2006/7 που αντικατέστησε την Οδηγία 76/160, αναφέρονται στη διαχείριση της ποιότητας των κολυμβητικών υδάτων.

Οι Οδηγίες 80/68, 2006/118 αφορούν στην προστασία των υπόγειων υδάτων.

Η Οδηγία 91/676 αφορά στην προστασία των υδάτων, τόσο των επιφανειακών, όσο και υπόγειων από τη νιτρική ρύπανση που προκύπτει από τη χρήση λιπασμάτων στον γεωργικό τομέα.

Οι Οδηγίες 91/271, 98/15 αναφέρονται στην ευθύνη για την επεξεργασία των αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων.

Η Οδηγία 79/117, Κανονισμός 850/2004, Απόφαση 2006/507 καλύπτει την καταπολέμηση των επίμονων οργανικών ρύπων.

Η Οδηγία 96/61 αντικαταστάθηκε από την Οδηγία 2008/1 και από τις 7.1.2014 από την Οδηγία 2010/75. Αυτή η Οδηγία αφορά την ολοκληρωμένη πρόληψη και διαχείριση της ρύπανσης των υδάτων κατά τη διαδικασία αδειοδότησης έργων και δραστηριοτήτων.

Η Οδηγία 2000/60 καθορίζει το πλαίσιο για να επιτευχθεί η προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, μεταβατικών, παράκτιων και υπόγειων υδάτων. Στόχοι της είναι η πρόληψη και η μείωση της ρύπανσης, η βιώσιμη χρήση του νερού, η προστασία και η βελτίωση των υδάτινων συστημάτων, καθώς και η μείωση των επιπτώσεων των φαινομένων πλημμύρας αι ξηρασίας πλημμύρες και ξηρασίες. Με λίγα λόγια, η Οδηγία αφορά την επίτευξη καλής περιβαλλοντικής κατάστασης για όλα τα ύδατα. Για να το επιτύχουν αυτό, τα κράτη-μέλη πρέπει να αναπτύσσουν σχέδια διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού, βασισμένα σε φυσικές γεωγραφικές λεκάνες, και να υλοποιούν συγκεκριμένα προγράμματα μέτρων για την πραγματοποίηση των καθορισμένων στόχων.

Τέλος, η Οδηγία 2007/60 που αναφέρεται στην αντιμετώπιση των κινδύνων από πλημμύρες και η Πρόταση Οδηγίας 22.09.2006, που αφορά στην προστασία του εδάφους.

Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (Οδηγία 2000/60/ΕΚ)

Από τις αρχές του 2000, η ΕΕ καθόρισε μια νέα πολιτική όσον αφορά τη διαχείριση των υδατικών πόρων, χρησιμοποιώντας την Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ για τα Ύδατα ως κύριο εργαλείο για την υλοποίησή της (ΟΠΥ) (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας 2017). Στο πλαίσιο της αναθεωρημένης Ευρωπαϊκής Στρατηγικής για την Αειφόρο Ανάπτυξη και την Κλιματική Αλλαγή, τα κράτη-μέλη της ΕΕ οφείλουν να εντοπίζουν και να αναφέρουν τα ζητήματα που αφορούν τη διαχείριση των υδάτων, την κατάσταση του εδάφους, καθώς και τους κινδύνους πλημμύρας. Η εφαρμογή της Οδηγίας ξεκίνησε στις 22 Δεκεμβρίου 2000 τηρώντας τις διαδικασίες της διαβούλευσης και έθεσε ως στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του γλυκού νερού, αυξάνοντας την προστασία των θαλάσσιων περιοχών στις οποίες απολήγουν εσωτερικές υδρολογικές λεκάνες (Καλλία-Αντωνίου 2011). Το Νομοθετικό Πλαίσιο της Οδηγίας περιλαμβάνει την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων. Στόχος της Οδηγίας είναι η «καλή κατάσταση» για όλα τα υδάτινα οικοσυστήματα, επιδιώκοντας μια ολοκληρωμένη διαχείριση σε γεωγραφική κλίμακα των Λεκανών Απορροής Ποταμών (Μήτα 2015).

Η ποιότητα του νερού περιλαμβάνει την οικολογική και την χημική του κατάσταση που θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τα ποιοτικά πρότυπα που έχουν καθοριστεί για τις χημικές ουσίες σε επίπεδο Ευρώπης. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εξασφαλίζεται η ελάχιστη χημική ποιότητα η οποία ορίζεται με βάση τη σχεδόν φυσική κατάσταση αναφοράς του υδάτινου συστήματος, χωρίς τις επιπτώσεις από ανθρώπινες δραστηριότητες. Στο Παράρτημα V ορίζεται η «καλή οικολογική κατάσταση» αναφορικά με την ποιότητα της βιολογικής κοινότητας, σύμφωνα με πολλαπλές ταξινομήσεις διατόμων, βενθικών ασπόνδυλων και ψαριών. Για την επίτευξη της αποκατάστασης και διατήρησης μιας «Καλής» οικολογικής κατάστασης στα Ευρωπαϊκά ύδατα, υιοθετήθηκε η σύνταξη και χρήση των Σχεδίων Διαχείρισης σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής Ποταμού (ΛΑΠ). Στα Σχέδια Διαχείρισης περιλαμβάνονται προγράμματα μέτρων προκειμένου να προστατευτούν και να αποκατασταθούν τα ύδατα, σύμφωνα με το Άρθρο 11 και το Παράρτημα VI της Οδηγίας (Οικονόμου κ.ά. 2023).

Συνεπώς, για την εξασφάλιση της καλής περιβαλλοντικής κατάστασης για όλα τα υδάτινα συστήματα, γίνεται ο συνδυασμός ποιοτικών, οικολογικών και ποσοτικών στόχων. Επιπλέον, προβλέπεται το πλαίσιο για τις συνολικές χρήσεις και υπηρεσίες του νερού, συμπεριλαμβανομένων της αξίας του για το περιβάλλον, την υγεία, την οικιακή χρήση και τη χρήση στον παραγωγικό τομέα. Παράλληλα, η Οδηγία 2000/60/ΕΚ προάγει τη βιώσιμη και άρτια εποπτεία των διασυνοριακών ΛΑΠ και προωθεί καινοτόμες μεθοδολογίες για τη διαχείριση των πλημμυρικών κινδύνων, καθώς και των κινδύνων από τις ξηρασίες (Παπανικολάου 2024).

Επιπρόσθετα, προωθούνται ειδικά μέτρα προκειμένου να μειωθούν σταδιακά οι απορρίψεις ρυπαντικών ουσιών και να εξαλειφθούν τα φαινόμενα της διαρροής, εκπομπής και απόρριψης επικίνδυνων ουσιών στα ύδατα. Έτσι, από τη μία επιχειρείται ο περιορισμός της υδατικής ρύπανσης στους επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους και από την άλλη, η σταδιακή αποκατάσταση της ποιότητάς τους (Μήτα 2015).

Σχέδια Διαχείρισης σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής Ποταμών

Στην Ευρώπη προωθείται η ανάπτυξη Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής μέσω της Οδηγίας Πλαισίου της ΕΕ για τα νερά (WFD, Directive 2000/60/EC). Ο εδαφικός σχεδιασμός είναι αναγκαίος για τη διαχείριση του νερού και χρειάζεται να ληφθούν υπόψη οι υπηρεσίες του οικοσυστήματος, ώστε να αναγνωριστεί η πολυλειτουργικότητα των υδάτινων συστημάτων και η αξία τους για την ανθρώπινη διαβίωση. Με αυτόν τον τρόπο, δικαιολογείται κάθε κόστος για την προστασία και την αποκατάστασή τους (Grizzetti 2016). Σε σύγκριση με τη συνολική ποσότητα των υδάτων που καταλαμβάνουν τα 2/3 της επιφάνειας της γης, η ποσότητα που διατίθεται για ανθρώπινη κατανάλωση κατέχει μόλις το 0,007% του συνόλου, ωστόσο κρίνεται ως επαρκής για την ικανοποίηση όλων των ανθρώπινων αναγκών. Παράγοντες που δημιουργούν δυσχέρειες στην επάρκεια νερού, αποτελούν οι κακές οικονομικές συνθήκες και οι ελλειπείς υποδομές παροχής νερού και αποχέτευσης, με αποτέλεσμα τις ασθένειες και το θάνατο, ιδιαίτερα παιδιών. Σύμφωνα με στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ και αναφορικά με τον Στόχο 6 από τους Παγκόσμιους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), το σύνολο των ανθρώπων που στερείται τη διαθεσιμότητα νερού αντιστοιχεί σε 663 εκατομμύρια, ενώ μολυσμένες πηγές πόσιμου νερού με περιττώματα χρησιμοποιούνται από 1,8 δισεκατομμύρια (ΕΛΣΤΑΤ 2024).

Η Οδηγία επανακαθορίζει το πεδίο εφαρμογής της Λεκάνης Απορροής, το οποίο καλύπτει τα εσωτερικά επιφανειακά ποτάμια και λιμναία ύδατα, τα υπόγεια ύδατα, τα μεταβατικά οικοσυστήματα των δέλτα και των εκβολών ποταμών και τα παράκτια οικοσυστήματα. Σε κάθε περιοχή ΛΑΠ προσδιορίζονται οι ενέργειες που χρειάζεται να γίνουν μέσα σε καθορισμένες προθεσμίες, με βάση χρονοδιάγραμμα μέχρι το 2015, για την αποφυγή της επιδείνωσης της κατάστασης όλων των υδάτων και την υλοποίηση της «καλής κατάστασης» των υδάτων (Παπανικολάου 2024). Αυτός είναι και ο βασικός στόχος της Οδηγίας, δημιουργώντας την υποχρέωση στα κράτη-μέλη της ΕΕ για αποτροπή περαιτέρω υποβάθμισης, βελτίωσης της κατάστασης των νερών τους και προστασίας ποταμών και λιμνών, παράκτιων και υπόγειων νερών. Η επίτευξη αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με περιορισμό και διαχείριση της ρύπανσης προερχόμενης από ποικιλία πηγών, όπως είναι η γεωργία, η βιομηχανία και οι αστικές περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο, προωθείται η βιώσιμη χρήση των νερών, μέσα από την μακροπρόθεσμη προστασία των διαθέσιμων υδατικών πόρων (Μήτα 2015).

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν προβλήματα στην αποτελεσματική εφαρμογή της Οδηγίας, καθώς στην τεχνική έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος παρουσιάστηκαν τα ευρήματα του δεύτερου κύκλου διαχείρισης (European Environment Agency 2018), δείχνοντας ότι το 60,0% των επιφανειακών υδάτων της ΕΕ, δεν έχει επιτύχει το στόχο της Οδηγίας μέχρι το 2015. Το 2012 πραγματοποιήθηκε ο αρχικός έλεγχος για την καλή λειτουργία της Οδηγίας, μέσα από τη συνοδή έκθεση που τιτλοφορήθηκε ως: "Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources" (European Commission 2012). Σε αυτήν τονίστηκε η ανάγκη βελτίωσης της αποτελεσματικότητας της υλοποίησης της νομοθεσίας και παρουσίασε προτάσεις τριών Στρατηγικών έναντι των εθνικών και περιφερειακών οργανισμών που υλοποιούν την Οδηγία 2000/60. Οι στρατηγικές επικεντρώνονται πρωτίστως στο να αποκατασταθούν οι υγρότοποι και να επιβληθούν πρόστιμα για τη ρύπανση. Επιπλέον, στοχεύουν στην εναρμόνιση των στόχων της Οδηγίας με άλλες ευρωπαϊκές πολιτικές όπως η Κοινή Αγροτική Πολιτική και η Οδηγία για την προστασία από τις πλημμύρες (2007/60/EK), καθώς και στην προώθηση της αποδοτικής χρήσης του νερού με μέτρα, ώστε το νερό να

επαναχρησιμοποιείται και να μειωθούν οι διαρροές του. Οι παράγοντες που απέτρεψαν την επίτευξη των στόχων μέχρι το 2015, ήταν η ελλιπής χρηματοδότηση, η καθυστέρηση εφαρμογής της Οδηγίας, καθώς και η ανικανότητα ενσωμάτωσης των περιβαλλοντικών στόχων στις περιφερειακές στρατηγικές (Οικονόμου κ.ά. 2023).

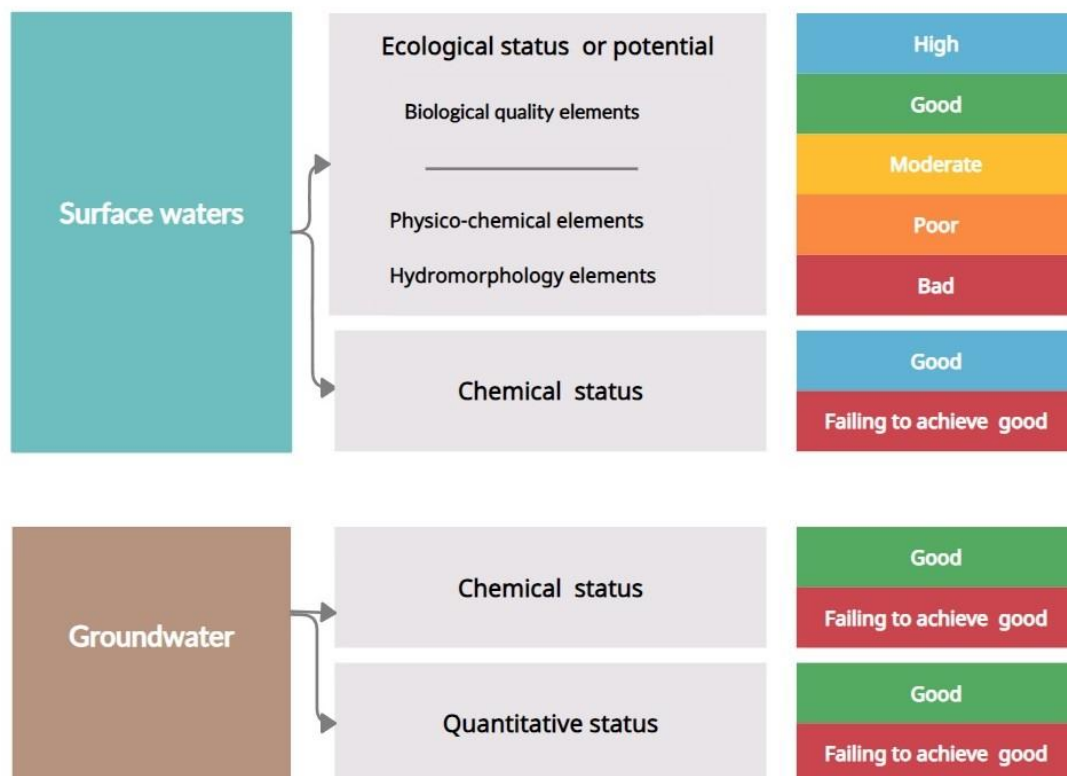
Καθώς κατανοήθηκε ότι η επίτευξη καλής κατάστασης μπορεί να απαιτήσει περισσότερο χρόνο σε κάποια υδατικά συστήματα, δόθηκε η επιλογή στα κράτη-μέλη για εξαίρεση λόγω φυσικών συνθηκών. Έτσι, δόθηκε παράταση της προθεσμίας πέρα από το 2015 έως το 2027, αιτιολογώντας και παραθέτοντας τους λόγους (Papavasiliopoulos 2014). Η ίδια η Οδηγία δεν παρουσίασε εγγενείς αδυναμίες, όμως λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλούς τομείς εφαρμογής, τα περισσότερα κράτη δεν υπήρξαν έτοιμα για την άμεση ενσωμάτωσή της στην εθνική πολιτική τους και ακόμη περισσότερο στην αποτελεσματική εφαρμογή της (Οικονόμου κ.ά. 2023). Συνεπώς, κατά την αξιολόγηση της Οδηγίας το 2019, η Οδηγία κρίθηκε ως κατάλληλη για τον επιδιωκόμενο σκοπό και σύμφωνα με τα παραπάνω η εφαρμογή της πρέπει να επιταχυνθεί. Κατά συνέπεια, το 2020 η Επιτροπή ανακοίνωσε ότι η Οδηγία 2000/60 δε θα αναθεωρηθεί, αλλά θα επικεντρωθεί στην εφαρμογή και την επιβολή όσων προβλέπει ήδη (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024α).

Παρακολούθηση και Αξιολόγηση Υδάτινων Σωμάτων

Η ποιότητα των υδάτων αποτελεί ζήτημα υψίστης σημασίας και παρέχει ποικιλία χρήσεων, όπως είναι η άρδευση, η ύδρευση, η οικιακή χρήση του και η ιδιότητά του ως πόσιμο. Επομένως, χαρακτηρίζεται ως διαχρονικά κύριο επιστημονικό πεδίο μελέτης, απαιτώντας συνεχόμενη μέτρηση και εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με συνεχή παρακολούθηση των φυσικοχημικών και βιολογικών παραγόντων του νερού, ώστε να υπάρχει συμβατότητα με τις αποδεκτές τιμές των επιπέδων που έχει θέσει με νομοθεσία η ΕΕ και όλες οι αναπτυγμένες χώρες (Μήτα 2015). Τα κράτη-μέλη της ΕΕ καλούνται να καταφέρουν να εξασφαλίσουν άριστη ποιότητα σε όλα τα επιφανειακά και υπόγεια υδάτινα συστήματα μέχρι το 2027. Καλή κατάσταση περιλαμβάνει 4 αξιολογήσεις: Οικολογική κατάσταση επιφανειακών υδάτων, Χημική κατάσταση επιφανειακών υδάτων, Χημική κατάσταση υπόγειων υδάτων και Ποσοτική κατάσταση υπόγειων υδάτων. Για την επίτευξή της, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η τήρηση των οικολογικών, χημικών και ποσοτικών προτύπων των υδάτων. Η Οδηγία για τα υπόγεια ύδατα (2006/118/EK) και η Οδηγία για τα κανονιστικά όρια ποιότητας του περιβάλλοντος (2008/105/EK) εισάγουν επιπλέον πρότυπα για τα υπόγεια ύδατα και τις ουσίες προτεραιότητας που αφορούν τις αξιολογήσεις της ΟΠΥ.

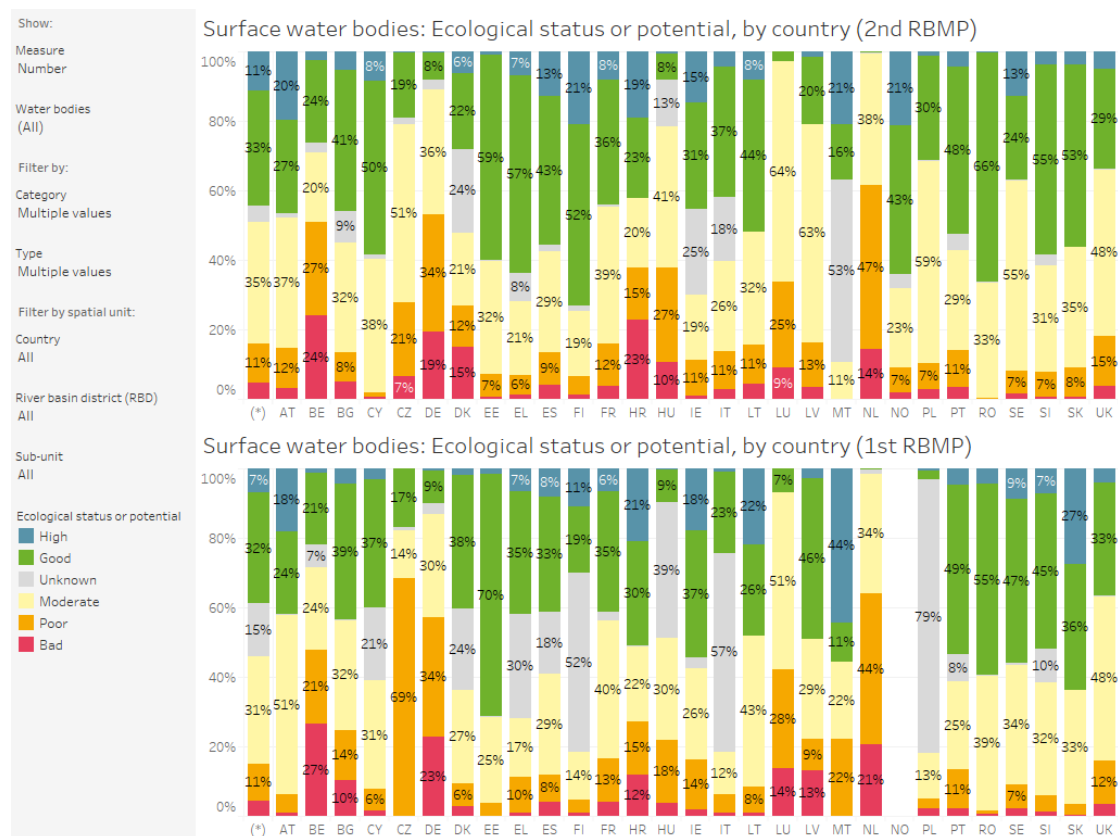
Σύμφωνα με την ΟΠΥ για τα σχέδια διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού υποβάλλονται εκθέσεις κάθε 6 χρόνια. Καθώς η ΕΕ διαθέτει συνολικά 180 λεκάνες απορροής ποταμών, κάθε σχέδιο διαχείρισης καλύπτει μία από αυτές. Σε κάθε σχέδιο περιλαμβάνεται η αξιολόγηση για τα υδάτινα σώματα που διαθέτει, τις πιέσεις που αυτά υφίστανται, καθώς και το σχεδιασμό για την επίτευξη καλής κατάστασης. Η καλή κατάσταση περιλαμβάνει τις αξιολογήσεις για την οικολογική και χημική κατάσταση που παρουσιάζουν τα επιφανειακά ύδατα, όπως και για τη χημική και ποσοτική κατάσταση που παρουσιάζουν τα υπόγεια ύδατα. Ο επίσημος Ιστότοπος της ΕΕ, WISE-Waterfresh Information System for Europe, περιέχει συγκεντρωτικά όλες τις δημοσιοποιημένες πληροφορίες που σχετίζονται με τα γλυκά ύδατα των κρατών-μελών

της ΕΕ. Για παράδειγμα, παρουσιάζει τα στοιχεία από την τεχνική Έκθεση της ΕΕΑ (2018), όπως είναι η ανάλυση της κατάστασης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σύμφωνα με την ΟΠΥ και έχει τη μορφή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 1. Εκτίμηση κατάστασης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σύμφωνα με την ΟΠΥ (WISE 2024).

Για τα επιφανειακά ύδατα διενεργούνται δύο αξιολογήσεις κατάστασης: η αξιολόγηση της Οικολογικής Κατάστασης, με στόχο να επιτευχθεί καλή ή υψηλή κατάσταση, όπου αξιολογούνται όλα τα υδατικά συστήματα (ποτάμια, λίμνες, μεταβατικά και παράκτια ύδατα), όπου αντανακλώνται επιπτώσεις διαφόρων πιέσεων όπως της ρύπανσης, της υποβάθμισης στους οικοτόπους και της αλλαγής του κλίματος. Ακολουθώντας, η αξιολόγηση της Χημικής Κατάστασης, περιλαμβάνει τις ουσίες προτεραιότητας που είναι επιβλαβείς ουσίες για το περιβάλλον, καθώς και απορρίψεις ουσιών στις λεκάνες απορροής ποταμού, γνωστές ως ρύποι. Η Οικολογική Κατάσταση των επιφανειακών υδάτων της ΕΕ, βάσει της αξιολόγησης του 2015 έδειξε ότι το 40,0% από τα επιφανειακά υδάτινα σώματα βρίσκονται σε καλή ή υψηλή κατάσταση οικολογίας, με τα λιμναία και τα παράκτια ύδατα να έχουν καλύτερη κατάσταση από τα ποτάμια και τα μεταβατικά ύδατα. Από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του 2015 για τη Χημική Κατάσταση προέκυψε ότι το 38% των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων ήταν σε καλή χημική κατάσταση (ανά αριθμό υδατικών σωμάτων), ενώ το 46,0% δεν είχε καλή κατάσταση και το 16,0% ήταν άγνωστο. Τα αποτελέσματα των αξιολογήσεων του 2021 δεν είναι ακόμη γνωστά (WISE 2024).



Σχήμα 2. Οικολογική Κατάσταση Επιφανειακών Υδάτινων Σωμάτων για κάθε κράτος-μέλος της ΕΕ, της Νορβηγίας και του Ηνωμένου Βασιλείου (1^ο και 2^ο Σχέδιο Διαχείρισης) (WISE 2024a).

Στην επίσημη ιστοσελίδα του WISE-Waterfresh Information System for Europe παρέχονται πληροφορίες για κάθε κράτος-μέλος της ΕΕ, του Ηνωμένου Βασιλείου και της Νορβηγίας. Κάποιες από τις πληροφορίες που περιλαμβάνουν οι διάφορες ενότητες της Ιστοσελίδας είναι: η κατάσταση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτινων σωμάτων των κρατών-μελών σύμφωνα με την ΟΠΥ, θέματα που αφορούν στα ύδατα των κρατών-μελών, πληροφορίες για την επεξεργασία αστικών λυμάτων για το κάθε κράτος-μέλος, πληροφορίες και χάρτες σχετικά με περιοχές που μπορεί να παρουσιάζουν κίνδυνο πλημμύρας στην ΕΕ, πληροφορίες σχετικά με τον Κανονισμό για την Επαναχρησιμοποίηση Νερού (WRR) και πληροφορίες από τον ποιοτικό έλεγχο στα ύδατα κολύμβησης που διεξάγονται στην κολυμβητική περίοδο από τις χώρες της ΕΕ (WISE 2024).

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι αξιολογήσεις της κατάστασης των υδάτων όλων των κρατών-μελών της ΕΕ στα επιφανειακά ύδατα, από το 1^ο και 2^ο Σχέδιο Διαχείρισης που έχουν καταρτίσει, βάσει του άρθρου 13 της Οδηγίας Πλαισίου για τα Ύδατα (Σχήματα 2 και 3) (WISE 2024a, 2024b).



Σχήμα 3. Χημική Κατάσταση Επιφανειακών Υδάτινων Σωμάτων για κάθε κράτος-μέλος της ΕΕ, της Νορβηγίας και του Ηνωμένου Βασιλείου (1^ο και 2^ο Σχέδιο Διαχείρισης) (WISE 2024b).

Οδηγίες που Πλαισιώνουν την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα

Η Ευρωπαϊκή Πολιτική σχετικά με τις ακτές και τη θάλασσα περιλαμβάνει στοχευμένες Οδηγίες που υποστηρίζουν την ΟΠΥ, όπως είναι η Οδηγία-Πλαίσιο για τη Θαλάσσια Στρατηγική (2008/56/ΕΚ). Αυτή αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της ολοκληρωμένης θαλάσσιας πολιτικής της ΕΕ, με σκοπό την επίτευξη καλής περιβαλλοντικής κατάστασης για τα θαλάσσια ύδατα μέχρι το 2020, καθώς και τη διαρκή προστασία και συντήρησή τους. Καθιερώνει ως ευρωπαϊκές τις θαλάσσιες περιοχές, της Βαλτικής Θάλασσας, του Βορειοανατολικού Ατλαντικού Ωκεανού, της Μεσογείου Θάλασσας και της Μαύρης Θάλασσας, καθώς και τις υποπεριοχές εντός των υφιστάμενων περιφερειακών συμφωνιών για τις θάλασσες. Επιπλέον, περιλαμβάνει κανονισμό για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση των Παράκτιων Ζωνών, ο οποίος καθορίζει τις αρχές για όλα τα κράτη-μέλη σύμφωνα με τις οποίες θα σχεδιάζουν και θα διαχειρίζονται σωστά τις παράκτιες ζώνες. Το 2020 εγκρίθηκε η νέα στρατηγική της ΕΕ για τη βιοποικιλότητα μέχρι το 2030 με σκοπό τη βελτίωση της προστασίας των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Σημαντικά μέτρα περιλαμβάνουν την επέκταση των προστατευόμενων περιοχών και τη δημιουργία ζωνών εντατικής προστασίας για την αποκατάσταση των οικοτόπων και των πληθυσμών ψαριών. Η Οδηγία 2005/35/ΕΚ και η επικαιροποίησή της το 2009, θέσπισε κυρώσεις για τις παραβάσεις σχετικά με τη ρύπανση από τα πλοία (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024α).

Τέλος το 1999, εξαιτίας της πετρελαιοκηλίδας που προκλήθηκε από το ναυάγιο του Erika, η ΕΕ ενέκρινε τον κανονισμό σχετικά με την ίδρυση Ευρωπαϊκού Οργανισμού

για την Ασφάλεια στη Θάλασσα το 2002. Ο Οργανισμός είναι αρμόδιος στο να προλαμβάνει και να καταπολεμάει τη ρύπανση των πλοίων και των πετρελαϊκών εγκαταστάσεων, καθώς και του φυσικού αερίου (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2024α).

Διεθνείς Συμφωνίες Σχετικά με τα Περιφερειακά Ύδατα

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (2024α), η προστασία των θαλάσσιων υδάτων στην Ευρώπη ανάμεσα στα κράτη-μέλη και τα γειτονικά κράτη που μοιράζονται ύδατα που έχουν κοινά ύδατα λειτουργεί βάσει τεσσάρων διεθνών συνεργατικών δομών. Αυτές αποτελούν τις λεγόμενες περιφερειακές συμβάσεις για τις θάλασσες και είναι: η Σύμβαση OSPAR (Όσλο και Παρίσι) του 1992 για τον Βορειοανατολικό Ατλαντικό, η Σύμβαση του Ελσίνκι του 1992 για την περιοχή της Βαλτικής Θάλασσας, η Σύμβαση της Βαρκελώνης του 1995 για τη Μεσόγειο και η Σύμβαση του Βουκουρεστίου του 1992 για τη Μαύρη Θάλασσα. Επιπλέον, υπάρχει ένα σύνολο διεθνών συμβάσεων με τη συμμετοχή της ΕΕ προκειμένου να προστατευτούν τα διασυνοριακά ύδατα, όπως η Σύμβαση για την Προστασία και τη Χρήση των Διασυνοριακών Υδάτων και των Διεθνών Λιμνών (1992), Σύμβαση για την Προστασία του Δούναβη (1994) Σύμβαση για την Προστασία του Ρήνου (1999) και Σύμβαση για τη Διεθνή Επιτροπή Προστασίας του Όντερ (1996). Τέλος, η Διαπεριφερειακή Περιβαλλοντική συνεργασία, που εστιάζει στα θαλάσσια ύδατα και τις λεκάνες απορροής ποταμών, έχει συμβάλλει στην ανάπτυξη σημαντικών Μακροπεριφερειακών Στρατηγικών στην ΕΕ: Στρατηγική για τη Βαλτική Θάλασσα (2009), Στρατηγική για τον Δούναβη (2011) και Στρατηγική για την Αδριατική Θάλασσα και το Ιόνιο Πέλαγος (2014).

Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν να διερευνηθεί η Ευρωπαϊκή Πολιτική για τα ύδατα μέσω από τις νομοθετικές ρυθμίσεις που έχουν θεσπιστεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες και περιλαμβάνουν την Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα, καθώς και τα Σχέδια Διαχείρισης σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ) και αν συνάδουν με τους στόχους και τις κύριες επιδιώξεις που έχει θέσει η ευρωπαϊκή Περιβαλλοντική Πολιτική. Από την ανάλυση προέκυψε, ότι οι στόχοι που έχουν καθοριστεί από την ΕΕ για τον τομέα των υδάτων, είναι σε πλήρη ευθυγράμμιση με το πλαίσιο της Περιβαλλοντικής Πολιτικής της. Η ευρωπαϊκή Περιβαλλοντική Πολιτική περιλαμβάνει όλες τις δραστηριότητες και οχλήσεις, καθώς απαριθμεί περισσότερες από 300 Κανονιστικές Πράξεις, με τη μορφή Κανονισμών, Οδηγιών και Αποφάσεων που ανανεώνονται συνεχώς, σύμφωνα τις επιστημονικές και τεχνολογικές προόδους, αλλά και τις περιβαλλοντικές απειλές. Από τις απαρχές της δημιουργίας της ΕΕ, αναδείχθηκαν στο Συμβούλιο τα περιβαλλοντικά ζητήματα και σταδιακά θεσπίστηκε νομικό πλαίσιο για την προστασία και τη διαχείριση του περιβάλλοντος, ανάλογα με τις προκλήσεις που προέκυπταν. Η αναγνώριση του νερού ως κοινό αγαθό και περιορισμένος πόρος που χρειάζεται προστασία και βιώσιμη διαχείριση, δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη νομοθεσίας προστασίας του. Δύο βασικά νομικά πλαίσια που καθιερώθηκαν για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση με βάση το οικοσύστημα, είναι η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα (ΟΠΥ) και η Οδηγία-Πλαίσιο για τη Θαλάσσια Στρατηγική (ΟΠΘΣ). Μέσα από την Οδηγία Πλαίσιο για τα ύδατα τέθηκαν στόχοι για προστατευτούν τα εσωτερικά ύδατα, να μην υποβαθμίζονται περαιτέρω οι υδατικοί πόροι και τα εξαρτώμενα χερσαία οικοσυστήματα και να γίνει διαχείριση των υδάτων με αειφορικό

τρόπο. Για την επίτευξη των στόχων απαιτούνται δράσεις για να μειωθεί η υδατική υπόγειων υδροφορέων και τον μετριασμό των πλημμυρικών φαινομένων, καθώς και της ξηρασίας που αποτελούν μεγάλη απειλή για τα οικοσυστήματα, τις ανθρώπινες υποδομές, αλλά και την ανθρώπινη ζωή. Συνολικός στόχος της Οδηγίας είναι η καλή κατάσταση για όλα τα ύδατα της ΕΕ. Αυτό έρχεται σε πλήρη αρμονία με τον πρωταρχικό στόχο που έχει θέσει η ΕΕ: «κάθε Ευρωπαίος πολίτης πρέπει να έχει πρόσβαση σε καθαρό νερό».

Ως αποτέλεσμα, τα κράτη-μέλη πρέπει να αναπτύσσουν Σχέδια Διαχείρισης για κάθε λεκάνη απορροής ποταμού, βασισμένα στις φυσικές γεωγραφικές λεκάνες απορροής ποταμών. Τα σχέδια θα συνοδεύονται από ειδικά Προγράμματα Μέτρων για την επίτευξη των στόχων που θέτουν. Με αυτόν τον τρόπο, θα ελέγχει το κάθε κράτος-μέλος ξεχωριστά την πορεία του στη διαχείριση των εθνικών του υδάτων. Συντάσσοντας την αξιολόγησή του, θα μπορεί να παρακολουθεί την πρόοδό του και να κρίνει λάθη, παραλείψεις, ελλείψεις, όπως και βελτιώσεις ή οτιδήποτε άλλο αναδειχθεί από τη διαδικασία. Από τα συμπεράσματα της αξιολόγησης του 1^{ου} και του 2^{ου} Σχεδίου Διαχείρισης, η κατάσταση των υδάτων στην Ευρώπη αξιολογήθηκε ως καλή, όμως πρέπει να μειωθεί η ρύπανση των υδάτων από τις γεωργικές δραστηριότητες που ασκούν τεράστιες πιέσεις, όπως και από τη βιομηχανία. Ως σημαντική απειλή καταγράφηκε η κλιματική αλλαγή για τους υδάτινους πόρους ορισμένων περιοχών σε μεγαλύτερο ποσοστό από ότι σε άλλες. Η ΕΕ, μέσω του Ενωσιακού Δικαίου που διέπει όλη την επικράτειά της, παρακολουθεί την πρόοδο και τις συνεχείς προσπάθειες των χωρών. Αυτό ενισχύει την αποτελεσματικότητα των νομοθεσιών που υιοθετεί, θέτοντας φιλόδοξους μακροπρόθεσμους στόχους για βιώσιμη ανάπτυξη σε όλους τους τομείς ανθρώπινης δραστηριότητας. Επιπλέον, οι χώρες έχουν την ευχέρεια να προσαρμόζουν τις δράσεις τους εγκαίρως, προκειμένου να επιτύχουν τους στόχους τους και, κατά συνέπεια, τους στόχους της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής πολιτικής.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

- ΕΛΣΤΑΤ (2024). ΣΤΟΧΟΣ 6: Διασφαλίζουμε τη διαθεσιμότητα και τη βιώσιμη διαχείριση του νερού και των εγκαταστάσεων υγιεινής για όλους. Διαθέσιμο: <https://www.statistics.gr/sdg6>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2024β). Περιβαλλοντική πολιτική: Γενικές αρχές και βασικό πλαίσιο. Διαθέσιμο: https://www.europarl.europa.eu/erpl-app-public/factsheets/pdf/el/FTU_2.5.1.pdf
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2024α). Προστασία και διαχείριση των υδάτων. Διαθέσιμο: https://www.europarl.europa.eu/erpl-app-public/factsheets/pdf/el/FTU_2.5.4.pdf
- Καλλία-Αντωνίου, Α. (2011). Θεσμικό Πλαίσιο για την Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Μήτα, Ε. (2015). Συγκριτική αξιολόγηση του νομοθετικού πλαισίου διαχείρισης υδατικών πόρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ελλάδας. (Μεταπτυχιακή Διατριβή). Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
- Μυρωνίδης, Δ. (2021). Υδρολογία και Υδραυλική (1η έκδοση). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Οικονόμου Α., Στεφανίδης Κ., & Μητσόπουλος Ι. (2023). Προστασία και διατήρηση οικοσυστημάτων εσωτερικών υδάτων στην Ελλάδα. Η Οδηγία πλαίσιο για τους υδατικούς πόρους (2000/60/EC) και η οδηγία για τους οικοτόπους (92/43/EEC). Περιφέρεια, Τόμος 14, Τεύχος 14, 81–100.

- Οικονόμου, Ε. (2024). Μεμονωμένη και ταυτόχρονη απομάκρυνση βαρέων μετάλλων και ανιόντων από φυσικά και τροποποιημένα ορυκτά σε υδατικά διαλύματα. (Πτυχιακή Εργασία). Τομέας Χημικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Οικονόμου, Ε. (2024). Μεμονωμένη και ταυτόχρονη απομάκρυνση βαρέων μετάλλων και ανιόντων από φυσικά και τροποποιημένα ορυκτά σε υδατικά διαλύματα. (Πτυχιακή Εργασία). Τομέας Χημικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ορφανού, Σ. Μ. (2024). Η Περιβαλλοντική Διακυβέρνηση στον τομέα της Διαχείρισης των Αστικών Απορριμμάτων. Πεδίο Εφαρμογής η Διαχείριση των Αστικών Απορριμμάτων στο Δήμο Καλαμάτας. (Μεταπτυχιακή Διατριβή). Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων και Οργανισμών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου.
- Παπανικολάου, Γ. (2016). Διαχείριση αστικών ρεμάτων Νομοθετικό πλαίσιο, βέλτιστες πρακτικές κι η ελληνική πραγματικότητα. (Μεταπτυχιακή Διατριβή). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2017). Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών. Διαθέσιμο: https://wfdver.ypeka.gr/wp_content/uploads/2017/12/EL12 SDLAP APPROVED.pdf

Ξενόγλωσση

- European Commission (2012). COM (2012) 673 final. A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52012DC0673>
- European Commission. (2023). Water Framework Directive. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en
- European Environment Agency. (2018). European waters Assessment of status and pressures 2018. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water>
- European Parliament (2006). Status of Implementation of EU Environmental Laws in Italy (IP/A/ENVI/IC/2006-183). In <https://www.europarl.europa.eu/ip/A/ENVI/IC/2006-183>. Policy Department: Economic and Scientific Policy. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2006/375865/IPOL-ENVI_ET\(2006\)375865_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2006/375865/IPOL-ENVI_ET(2006)375865_EN.pdf)
- Ganoulis, J. (2024). The dialectics of nature–human conflicts for sustainable water security. Sustainability, Vol. 16, No. 7, 3055.
- Grizetti, B., Lanzanova, D., Liqueste, C., Reynaud, A., Cardoso, A.C. (2016). Assessing water ecosystem services for water resource management. Environmental Science and Policy, Vol. 61, 194-203.
- Papavasiliopoulos, E.N. (2014). Water resources management in Greece: current status and challenges ahead. International journal of environmental studies, Vol. 71, No. 3, pp. 301-314.
- WISE (2024). Water Framework Directive. Available: <https://water.europa.eu/freshwater/europe-freshwater/water-framework-directive>
- WISE (2024a). Surface water ecological status. Available: <https://water.europa.eu/freshwater/resources/water-framework-directive-surface-water-data-products/surface-water-ecological-status?activeTab=835ea532-24d9-4584-b09f-c704eee5f5f5>
- WISE (2024b). Surface water chemical status. Available: <https://water.europa.eu/freshwater/resources/water-framework-directive-surface-water-data-products/surface-water-chemical-status?activeTab=a9865268-b45e-4c5e-9051-a2d6aeb2a8a>

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΤΗΣ ΠΕΡΑΙΑΣ Ν. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Γεπραξία Τσιάτσιαρη

Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος
Εργαστήριο Διευθέτησεως Ορεινών Υδάτων
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
E-mail: eua.tsiatsia@gmail.com

Δημήτριος Μυρωνίδης

Καθηγητής
Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος
Εργαστήριο Διευθέτησεως Ορεινών Υδάτων
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
E-mail: myronid@for.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παγκοσμίως οι ακατάλληλες ανθρωπογενείς επεμβάσεις, η κλιματική αλλαγή και η αστική επέκταση έχουν επιτείνει τα πλημμυρικά φαινόμενα και την ανάγκη διευθέτησης των χειμάρρων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των αναγκών διευθέτησης του χειμάρρου της Περαίας του Ν. Θεσσαλονίκης και η αξιολόγηση διαφόρων εμπειρικών και αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού της μέγιστης πλημμυρικής με περίοδο επαναφοράς 100 έτη, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συστηματικά στις δασοτεχνικές μελέτες. Ειδικότερα προσδιορίστηκε ότι ο μέσος όρων των προαναφερθέντων τύπων υπερεκτιμά, σε σχέση με την ορθολογική μέθοδο, την μέγιστη πλημμυρική παροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη κατά περίπου 50%. Επίσης, η προαναφερθείσα μεταβλητή και η μέγιστη αναμενόμενη στερεοπαροχή προσδιορίστηκαν ίσες με 24,8 m³/sec και 2,76 m³/sec αντίστοιχα. Η κλίση αντιστάθμισης υπολογίστηκε με την εξίσωση του Κωτούλα ίση με τιμή 2,21 % ενώ για την διευθέτηση του χειμάρρου της Περαίας απαιτείται να κατασκευαστούν πέντε φράγματα με συνολικό υπέργειο ύψος 10,60 m (τρία με υπέργειο ύψος 2,2 m και δύο με υπέργειο ύψος 2,0 m). Τέλος, οι θέσεις ίδρυσης των φραγμάτων επιλέχθηκαν εμπειρικά λαμβάνοντας υπόψιν την κλίση αντιστάθμισης και την διαμόρφωση του χώρου στο πεδίο.

Λέξεις κλειδιά: Ορθολογική μέθοδος, Εμπειρικοί τύποι, Στερεοπαροχή, Κλίση αντιστάθμισης, Φραγματικές κατασκευές, Περαία.

Εισαγωγή

Οι πρώτες προσπάθειες διαχείρισης των υδάτων κα διευθέτησης των χειμαρρικών ρεμάτων χρονολογούνται από το 4.000 π.Χ (Μουλόπουλος 1932). Στην Ελλάδα η κυριαρχία του αγροτικού πληθυσμού μέχρι το 1960 είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των πλημμύρων των χειμάρρων λόγω έλλειψης υποδομών στην ύπαιθρο, τον μικρό στρεμματικό κλήρο και την οικιακή μορφή της οικονομίας. Ωστόσο, η τάση μετανάστευσης προς τις αστικές περιοχές μείωσε την έντονες δραστηριότητες στον

ορεινό χώρο και η πλημμυρική δράση μεταφέρθηκε στις αστικές περιοχές (Παυλίδης κ.ά. 2013). Επιπρόσθετα, οι ακατάλληλες τεχνητές επεμβάσεις και η αστική επέκταση είναι υπεύθυνες για την αύξηση της συχνότητας, της έντασης και του μεγέθους των πλημμυρικών φαινομένων (Myrtonidis et al. 2016). Σχετικά με τον προσδιορισμό της μέγιστης πλημμυρικής παροχής με ορισμένη περίοδο επαναφοράς σε λεκάνες απορροής χωρίς υδρομετρήσεις έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού (εμπειρικοί και αναλυτικοί) οι οποίοι όμως αναπτύχθηκαν σε χώρες με διαφορετικές συνθήκες κλίματος, αναγλύφου, γεωλογικού υποθέματος και βλάστησης. (Κωτούλας 1998). Επίσης, καμία από τους προαναφερθέντες μεθόδους δεν είναι σαφώς περισσότερο αξιόπιστη από τις άλλες ενώ ένας εμπειρικός ή αναλυτικός τύπος μπορεί να είναι κατάλληλος για μια περιοχή και σε άλλη περιοχή να μην έχει αξιόπιστα αποτελέσματα (Vogt et al. 2002). Προκειμένου να αμβλυνθεί η αβεβαιότητα των προαναφερθέντων μεθόδων στην δασική πράξη έχει υιοθετηθεί ο προσδιορισμός της μέγιστης πλημμυρικής παροχής με περίοδο επαναφοράς 100 έτη να στηρίζεται στο μέσο όρο του αποτελέσματος των προαναφερθέντων μεθόδων (Κωτούλας 1998). Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η ορθολογική μέθοδος είναι ευρέως διαδομένη και αποδεκτή για την εκτίμηση της μέγιστης πλημμυρικής παροχής για μικρές λεκάνες απορροής σε όλο τον κόσμο και για οποιαδήποτε περίοδο επαναφοράς. Η μέθοδος έχει αρκετά πλεονεκτήματα, καθώς είναι εύκολη στην εφαρμογή της και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα με την ορθολογική χρήση της (Chow et al. 1988). Επιπρόσθετα, για λεκάνες απορροής με εμβαδό μικρότερο των 5 km² η ορθολογική μέθοδος παρέχει απόλυτα λογικά αποτελέσματα (Levy & McCuen 1999) μιας και ικανοποιούνται ευκολότερα οι προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου (Μυρωνίδης 2021). Επιπρόσθετα, συγκρίνοντας την ορθολογική με άλλες μεθόδους έχει επιβεβαιωθεί ότι η ορθολογική μέθοδος παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα (Hotchkiss et al. 1995, Hua et al. 2003, Wang et al. 2012). Ο προσδιορισμός της στερεοπαροχής στις ορεινές κοίτες μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια εμπειρικών μεθόδων, οι οποίες στηρίζονται στην ένταση των χειμαρρικών φαινομένων παραγωγής υλικών που αναπτύσσονται στις ορεινές λεκάνες απορροής. Από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στην υδρονομική πράξη, η εξίσωση των Stiny-Herheulidze βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην Ελλάδα παρέχοντας την πραγματική στερεοπαροχή των χειμαρρικών ρευμάτων (Stiny 1931), η οποία ο Κωτούλας (1998) θεωρεί ότι δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην σύνταξη μελετών στον ελληνικό χώρο.

Στις ορεινές λεκάνες απορροής των χειμαρρικών ρευμάτων, ο έλεγχος της πλημμυρογένεσης και η αξιοποίηση της υδατοαπορροής επιτυγχάνονται με την εφαρμογή του δασοτεχνικού συστήματος διευθέτησης το οποίο περιλαμβάνει την ίδρυση τεχνικών, αγροτεχνικών και φυτοτεχνικών έργων που είναι κατά το δυνατό προσαρμοσμένα στο φυσικό περιβάλλον (Κωτούλας 1996). Μεταξύ των τεχνητών μέσων διευθέτησης ξεχωρίζει η ίδρυση εγκάρσιων φραγματικών κατασκευών οι οποίες διατάσσονται σε βαθμίδες κάθετα προς τη ροή των ρεμάτων. Τέτοιου είδους κατασκευές είναι παγκοσμίως δημοφιλής και χρησιμοποιούνται ευρέως στην διευθέτηση των ορεινών υδάτων (Soltani et al. 2012, Polyakov et al. 2014, Guyassa et al. 2017). Επίσης, Σύμφωνα με τους Hosseinzadeh et al. (2014) η χρήση φραγμάτων ελέγχου μπορεί να μειώσει την πλημμυρική αιχμή έως και 78%. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Yuan et al. (2019) ο χρόνος συγκέντρωσης μπορεί να αυξηθεί έως και 77% με τη χρήση φραγμάτων ελέγχου για γεγονότα με περίοδο επαναφοράς τα 10 έτη.

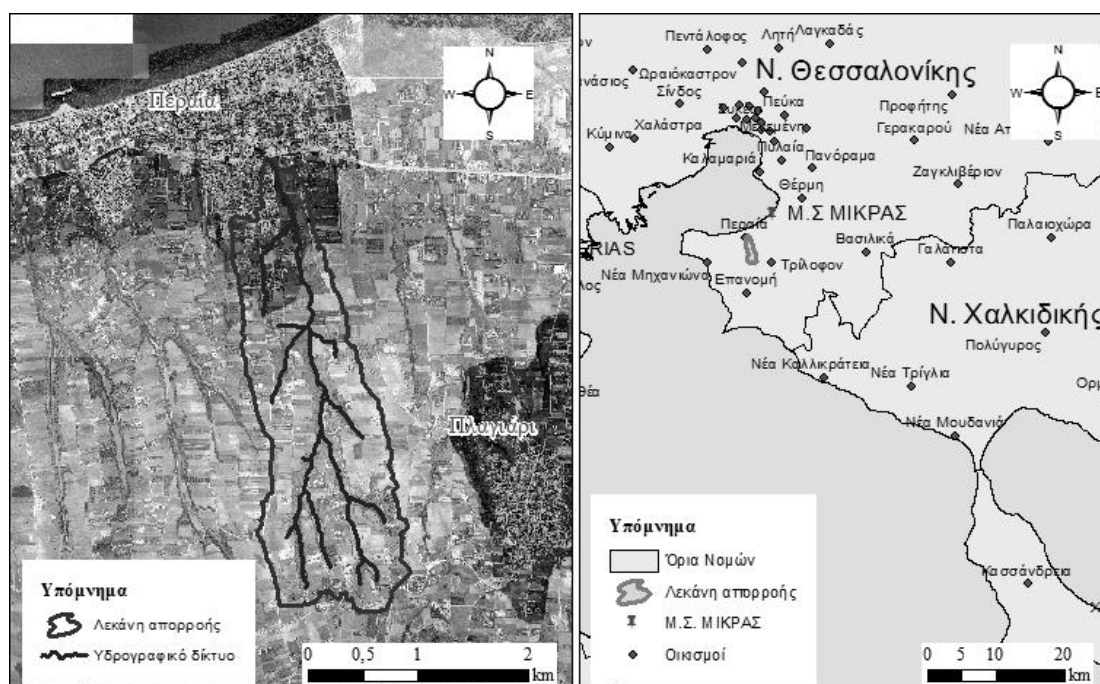
Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η διερεύνηση των αναγκών διευθέτησης του χειμαρρικού ρέματος της Περαίας το οποίο διαρρέει τον ομώνυμο παραθαλάσσιο οικισμό πριν εκβάλει στον Θερμαϊκό κόλπο. Η Περαία, όπως και οι γειτονικοί οικισμοί,

με βάση το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (ΦΕΚ 2638 Β / 5.07.2018), αποτελούν περιοχές με μεγάλη πιθανότητα εκδήλωσης σοβαρών πλημμυρών. Προκειμένου να ελεγχθεί ο πλημμυρικός κίνδυνος διερευνάται η ανάγκη διευθέτησης του χειμάρρου μέσω της ίδρυσης μιας σειράς εγκάρσιων στη ροή του ρέματος φραγματικών κατασκευών με βάση την κλίση αντιστάθμισης όπως αυτή προσδιορίζεται με την εξίσωση του Κωτούλα. Επιπρόσθετα, αξιολογούνται, σε σχέση με την ορθολογική μέθοδο, διάφοροι εμπειρικοί και αναλυτικοί μέθοδοι υπολογισμού της μέγιστης πλημμυρικής οι οποίοι χρησιμοποιούνται συστηματικά στην δασική πράξη.

Υλικά και Μέθοδοι

Περιοχή έρευνας

Η λεκάνη απορροής της Περαίας με συνολική έκταση 3,83 km² εντοπίζεται στο Νομό Θεσσαλονίκης (Σχήμα 1), χαρακτηρίζεται ως μικρή (Μυρωνίδης 2021) και διαμοιράζεται μεταξύ των Δήμων Θερμαϊκού (58,49%) και Μίκρας (41.51%). Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής κυμαίνεται από 18,5 έως 170,0 m, ενώ το μέσο υψόμετρο και η μέση κλίση της λεκάνης απορροής ανέρχονται σε 92,7 m και 15,4%, αντίστοιχα. Σε ό,τι αφορά τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, το μήκος και η κλίση της κεντρικής κοίτης ανέρχονται στα 4,41 km και 2,45 % αντίστοιχα ενώ το ρέμα χαρακτηρίζεται με βάση την ταξινόμηση του Strahler ως 3^{ης} τάξης.

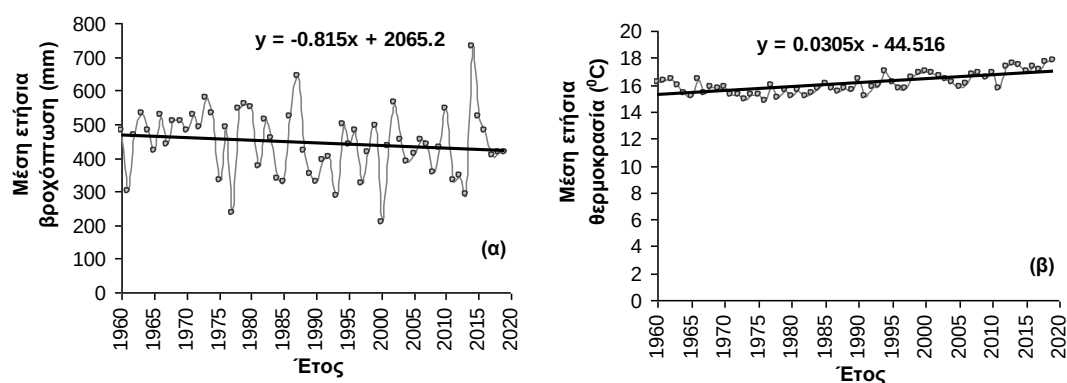


Σχήμα 1. Χάρτης Προσανατολισμού.

Η ψηφιοποίηση των ορθοφωτοχαρτών του κτηματολογίου (2015) κατέδειξε ότι στην λεκάνη απορροής κυριαρχούν οι αγροτικές καλλιέργειες (48,9 %) και οι οικιστικές εκτάσεις (22,0 %) ενώ οι δενδρώδεις καλλιέργειες, οι δασικές εκτάσεις και οι μερικώς δασοσκεπείς εκτάσεις είναι περιορισμένες, 7,8 %, 12,7 % και 8,6% αντίστοιχα. Επίσης, με βάση τα εδαφολογικά δεδομένα του United States Department of Agriculture (USDA) (Ballabio et al. 2016) η μεγαλύτερη έκταση της συνολικής λεκάνης απορροής αποτελείται από αργιλοπηλώδες έδαφος 92,1 % ενώ το υπόλοιπο 7,9 % καλύπτεται από

πηλώδες έδαφος.

Στα όρια της λεκάνης απορροής και σε απόσταση 4,9 km λειτουργεί ο μετεωρολογικός σταθμός του αεροδρομίου της Μίκρας, τον οποίο διαχειρίζεται η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ). Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα προσδιορίστηκαν οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις και θερμοκρασίες για την περίοδο 1960-2019. Η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 443,8 mm, ο μήνας του έτους με τα περισσότερα κατακρημνίσματα είναι ο Δεκέμβριος με περίπου 53,6 mm ενώ ο μήνας με τα λιγότερα κατακρημνίσματα είναι ο Αύγουστος με 19,6 mm. Σχετικά με τις θερμοκρασίες της περιοχής, ο Ιούλιος είναι ο θερμότερος μήνας με μέση μηνιαία θερμοκρασία ίση με 27,2 °C και ο ψυχρότερος ο Ιανουάριος με 5,4 °C. Επίσης, η ανάλυση των μέσων ετήσιων βροχοπτώσεων και θερμοκρασιών κατέδειξε ότι υπάρχει μια τάση μείωσης των κατακρημνισμάτων και αύξησης των θερμοκρασιών κατά -8,1 mm και 0,3 °C ανά δεκαετία αντίστοιχα (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Μέση ετήσια βροχόπτωση (α) και μέση ετήσια θερμοκρασία (β) του Μ.Σ. Μίκρας

Η ορθολογική μέθοδος και οι εμπειρικοί τύποι προσδιορισμού της μέγιστης πλημμυρικής παροχής

Η ορθολογική μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της αιχμής της απορροής υδρολογικών λεκανών και εξακολουθεί να εφαρμόζεται λόγω της αξιοπιστίας της και της ευκολίας στην χρήσης της (Chow et al. 1988). Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για μικρές λεκάνες απορροής με εμβαδό μικρότερο από 15 km² όπου η ένταση και η κατανομή της βροχής είναι ομοιόμορφη και μαθηματικά αποτυπώνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$Q = 0.278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (1)$$

Όπου Q η αιχμή της απορροής (m³/sec), C ο συντελεστής απορροής ο οποίος κυμαίνεται από 0 έως 1, I η ένταση της βροχής (mm/h) με περίοδο επαναφοράς T και χρόνο συγκέντρωσης t_c και A το εμβαδόν της λεκάνης απορροής (km²).

Ο προσδιορισμός του συντελεστή απορροής θεωρείται δύσκολη διαδικασία, καθώς διαφέρει σε κάθε λεκάνη απορροής και δεν είναι σταθερός (Parak & Pegram 2006). Η τιμή του εξαρτάται από τα εδαφολογικά δεδομένα της περιοχής και την ένταση της βροχής (Tolland et al. 1998). Επίσης, με βάση τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, ο συντελεστής απορροής έχει εφαρμογή για περιόδους επαναφοράς έως 10 έτη ενώ για περίοδο επαναφοράς 100 έτη θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με έναν συντελεστή διόρθωσης ίσο με 1,25 (Μυρωνίδης 2021). Η ένταση της βροχής, για τον Μ.Σ. Μίκρας, υπολογίζεται με την εξίσωση 2 η οποία συμπεριλαμβάνεται στο Σχέδιο Διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών του υδατικού διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας

(ΦΕΚ 2638 Β / 5.07.2018):

$$i = \frac{460,28 \cdot (T^{0,07} - 0,82)}{\left(1 + \frac{d}{0,076}\right)^{0,686}} \quad (2)$$

Όπου T η περίοδος επαναφοράς (έτη), d η διάρκεια της βροχής (h) η οποία είναι ίση με τον χρόνο συγκέντρωσης t_c ο οποίος υπολογίζεται με τον τύπο του Kirpich (1940):

$$t_c = 0.01947 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385} \quad (3)$$

όπου L είναι το μέγιστο μήκος διαδρομής του νερού πάνω στην υδρολογική λεκάνη σε m και S η κλίση. Επιπρόσθετα, προκειμένου να αναχθεί η σημειακή ένταση βροχόπτωσης σε επιφανειακή μέση ένταση βροχόπτωσης, πρέπει να πολλαπλασιαστεί η τελευταία με τον συντελεστή επιφανειακής αναγωγής φ ο οποίος είναι ίσος με (Μυρωνίδης 2021):

$$\varphi = 1 - \frac{0,048 \cdot A^{0,36 - 0,01 \cdot \ln A}}{d^{0,35}} \geq 0,25 \quad (4)$$

όπου φ ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής, A το εμβαδό της λεκάνης απορροής (km^2) και d η διάρκεια της βροχής (h).

Επίσης, οι εμπειρικοί και αναλυτικοί τύποι προσδιορισμού της μέγιστης πλημμυρικής παροχής με περίοδο επαναφοράς 100 έτη οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή στην λεκάνη απορροής της Περαίας είναι οι Friedrich, Wundt, Coutagne, Kursteiner, Kresnik, Valenitini, Muller, Hoffbauer, Melli, Fuller, Turazza και Giandotti ενώ περισσότερες λεπτομέρειες για τους προαναφερθέντες τύπους και την εφαρμογή τους δίνονται από τον Κωτούλα (1998).

Ο υπολογισμός της στερεοπαροχής με την μέθοδο Stiny-Herheulidze

Στην Ελλάδα για την εκτίμηση της μέγιστης στερεοπαροχής, ειδικότερα σε περιπτώσεις έλλειψης δεδομένων (Maris et al. 2004), χρησιμοποιείται ευρέως η εξίσωση του Stiny-Herheulidze (Κωτούλας, 2001) η οποία αποτυπώνεται ως:

$$G = \frac{P_n \cdot m}{Y_n \cdot (100 - P_n)} \cdot Q \quad (5)$$

Όπου G η στερεοπαροχή του χειμαρρικού ρεύματος (m^3/sec), Q η υδατοπαροχή του ρεύματος (m^3/sec), P_n το επι % βάρος των στερεών υλικών για ορισμένη κλίση το οποίο δίνεται από πίνακες, m ο βαθμός χειμαρρικότητας της λεκάνης απορροής ο οποίος δίδεται από πίνακες και Y_n το βάρος ενός κυβικού μέτρου των μεταφερόμενων στερεών υλικών, το οποίο ποικίλει ανάλογα με την φύση των υλικών (t/m^3) ενώ κυμαίνεται μεταξύ 1,5 (άμμος) και 2,6 (κροκάλες γρανιτών).

Υπολογισμός της κλίσης αντιστάθμισης και τοποθέτηση φραγμάτων στην μηκοτομή

Οι Hassanli and Beecham (2013) αναφέρουν πως η επιτυχία κατασκευής των φραγμάτων είναι συνάρτηση του σωστού προσδιορισμού της κλίσης αντιστάθμισης, του ύψους, της μεταξύ τους απόσταση και των υλικών δόμησης. Η κλίση

αντιστάθμισης (J_a) είναι η κλίση της κοίτης κατά την οποία επιτυγχάνεται ροή νερού που δεν μεταβάλλει την κοίτη του ρέματος είτε γιατί δεν παρασύρονται υλικά από αυτή είτε γιατί εάν παρασύρει υλικά αποθέτει και ίση ποσότητα (Κωτούλας 1998). Επίσης, αν και για τον προσδιορισμό της κλίσης αντιστάθμισης έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού, στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε για τον υπολογισμό της η εξίσωση του Κωτούλα (1998) η οποία έχει ευρεία εφαρμογή στη χώρα και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$J_a = 1,18 \cdot \frac{d_m^{1,16} \cdot e^{0,385 \cdot \frac{Q_{\max}}{b}}}{\left(\frac{Q_{\max}}{b}\right)^{0,77}} \quad (6)$$

Όπου J_a η κλίση αντιστάθμισης, d_m η καθοριστική διάμετρο των υλικών της κοίτης (m), $Q_{\max}$ η μέγιστη υδατοπαροχή (m^3/sec), b πλάτος κοίτης (m), e η βάση των νεπερίων λογαρίθμων και $G_{\max}$ η μέγιστη στερεοπαροχή (m^3/sec). Επίσης, προκειμένου να επιτευχθεί η κλίση αντιστάθμισης πρέπει να υπερυψωθεί η κοίτη μέσω της κατασκευής ενός φράγματος στερέωσης το ύψος του οποίου προσδιορίζεται με την εξίσωση (Κωτούλας 1996):

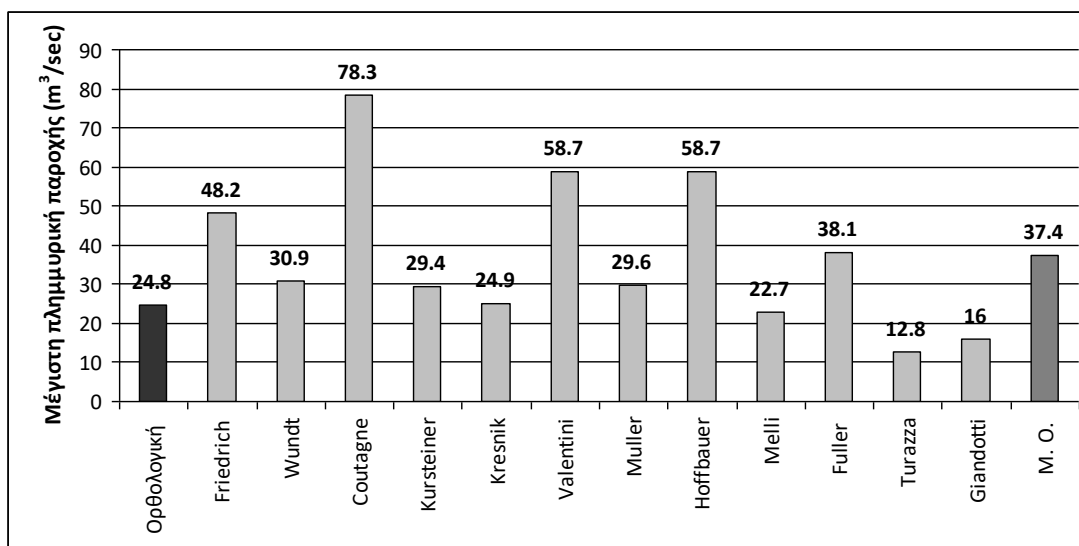
$$H = L \cdot (J_\phi - J_a) \quad (7)$$

όπου H είναι το συνολικό υπέργειο ύψος του φράγματος στερέωσης (m), L το συνολικό οριζόντιο μήκος της κοίτης (m). J_ϕ και J_a είναι η φυσική κλίση της κοίτης και η κλίση αντιστάθμισης αντίστοιχα ως εφαπτομένη της γωνίας. Τέλος, αντί ενός υψηλού φράγματος στερέωσης είναι δυνατό να κατασκευάσουν περισσότερα φράγματα μικρότερου ύψους, το συνολικό ύψος των οποίων όμως θα είναι ταυτόσημο με αυτό του υψηλού φράγματος στερέωσης.

Αποτελέσματα - Συζήτηση

Η ορθολογική μέθοδος και οι εμπειρικοί τύποι προσδιορισμού της μέγιστης πλημμυρικής παροχής

Ο συντελεστής απορροής υπολογίστηκε ως ένας σταθμισμένος με την έκταση μέσος όρος των επιμέρους συντελεστές απορροής κάθε κατηγορίας χρήσεων γης, οι οποίοι επιλέχθηκαν από σχετικούς πίνακες (Μυρωνίδης 2021). Για περίοδο επαναφοράς 10 ετών προσδιορίστηκε ίσος με 0,44 και για περίοδο επαναφοράς των 100 ετών 0,55. Ο χρόνος συγκέντρωσης με βάση την μέθοδο του Kirpich (1940) είναι ίσος με 52 min ή 0,9 hr. Με την εφαρμογή της εξίσωσης (2), υπολογίστηκε η σημειακή ένταση της βροχής ίση με 45,9 mm/h. Πολλαπλασιάζοντας την σημειακή ένταση επί τον συντελεστή επιφανειακής αναγωγής, ο οποίος υπολογίστηκε ίσως με 0,9, προέκυψε ότι η επιφανειακή ένταση της βροχόπτωσης ανέρχεται στα 42,1 mm/h. Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς και την εξίσωση της ορθολογικής μεθόδου η μέγιστη πλημμυρική παροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη ανέρχεται στα 24,8 (m^3/sec). Στο Σχήμα 3 απεικονίζονται τα σχετικά αποτελέσματα ενώ είναι ευδιάκριτη η μεγάλη μεταβλητότητα στον υπολογισμό της πλημμυρικής παροχής με τους εμπειρικούς και αναλυτικούς τύπους.



Σχήμα 3. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μέγιστης πλημμυρικής παροχής με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.

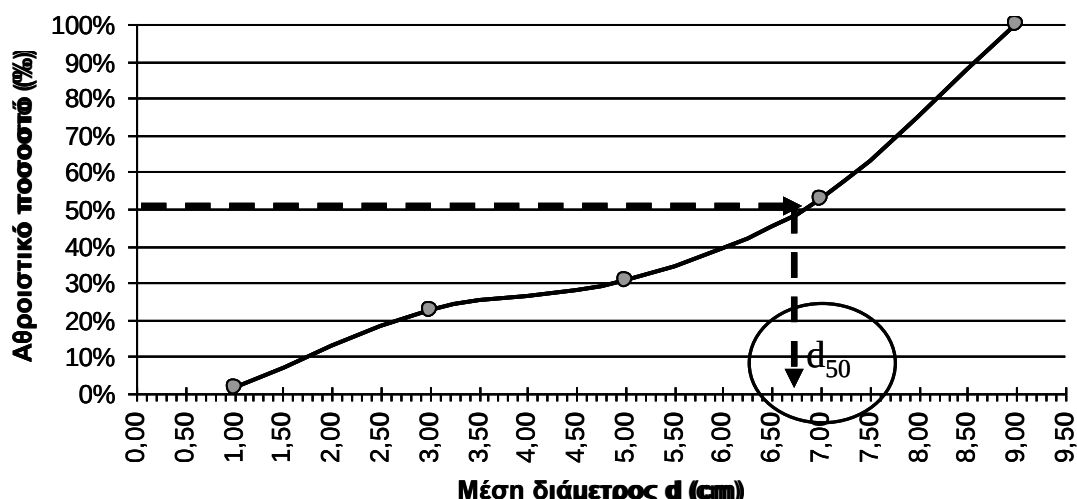
Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι συγκρίνοντας την μέγιστη πλημμυρική παροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη όπως αυτή προσδιορίστηκε με την ορθολογική μέθοδο (24,8 m³/sec) και τον μέσο όρο των εμπειρικών και αναλυτικών τύπων (37,4 m³/sec) κατέδειξε ότι η χρήση του μέσου όρου υπερεκτιμά την μέγιστη πλημμυρική παροχή σε σχέση με την ορθολογική μέθοδο κατά περίπου 50%.

Ο υπολογισμός της στερεοπαροχής με την μέθοδο Stiny-Herheulidze

Η λεκάνη απορροής του χειμαρρικού ρέματος της Περαίας χαρακτηρίζεται από μικρή χειμαρρικότητα ($m = 0,8$) ενώ με βάση την κλίση της λεκάνης απορροής (15,4%) το επί της εκατό βάρος των στερεών υλικών από τους σχετικούς πίνακες εκτιμήθηκε ίσο με 20%. Τα μεταφερόμενα υλικά έχουν κυρίως αμμώδη σύσταση ($Y_n = 1,8$) και το μέγεθος της υδατοπαροχής το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση του Stiny-Herheulidze είναι αυτό το οποίο προέκυψε από την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου (24,8 m³/sec). Με βάση τα προαναφερθέντα η μέγιστη στερεοπαροχή ανέρχεται στα 2,76 m³/sec.

Υπολογισμός της κλίσης αντιστάθμισης και τοποθέτηση φραγμάτων στην μηκοτομή

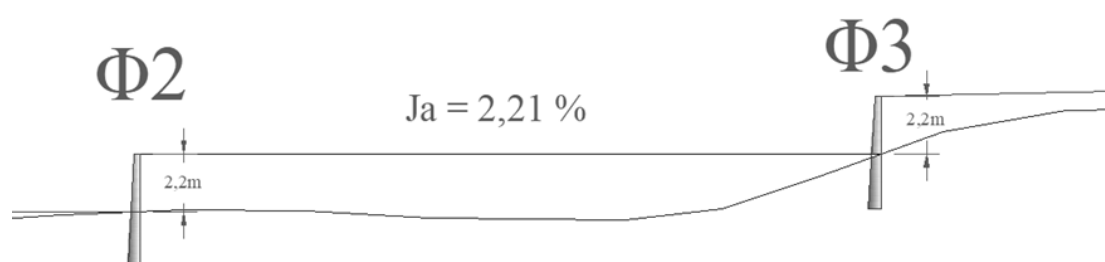
Η μέγιστη υδατοπαροχή και η μέγιστη στερεοπαροχή οι οποίες εκτιμήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες με την ορθολογική μέθοδο και τον τύπο των Stiny-Herheulidze υπολογίστηκαν ίσες με 24,8 και 2,76 m³/sec. Επίσης κατά τις εργασίες υπαίθρου μετρήθηκε το πλάτος της κοίτης μετά την διευθέτηση (7 m), η κλίση των πρανών (0,8) και πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση των μεταφερόμενων υλικών προκειμένου να κατασκευαστεί το διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης (Σχήμα 4) μέσω του οποίου προσδιορίστηκε η αντιπροσωπευτική διάμετρος των μεταφερόμενων υλικών (d_{50}) η οποία είναι ίση με 0,066 m. Ωστόσο, τονίζεται ότι λόγω έλλειψης χρόνου και διαθέσιμων πόρων, τα στοιχεία του διαγράμματος κοκκομετρικής ανάλυσης βασίζονται σε σημειακή μέτρηση επιφάνειας 1 m² στο πυθμένα του χειμαρρικού ρέματος λίγο πριν την είσοδο του ρέματος στον οικισμό, κάτι που αποτελεί και μειονέκτημα της παρούσας έρευνας.



Σχήμα 4. Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης.

Ο υπολογισμός της κλίσης αντιστάθμισης πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια σχετικού λογισμικού το οποίο έχει καταρτίσει το Τμήμα Δασοτεχνικής Διευθέτησης Χειμάρρων (Καπετανόπουλος 2001) και η κλίση αντιστάθμισης υπολογίστηκε ίση με 2,21 %. Επίσης, χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του Εθνικού Κτηματολογίου μεγέθους εικονοστοιχείου 5 m, με κατάλληλες εντολές στο λογισμικό ArcGIS, δημιουργήθηκε η μηκοτομή του χειμάρρου μέσω της οποίας προσδιορίστηκε στην συνέχεια η φυσική κλίση της κεντρικής κοίτης ίση με 2,45 % (Μυρωνίδης 2021). Συνδυάζοντας την κλίση αντιστάθμισης, την κλίση της κοίτης και το μήκος του χειμάρρου (εξίσωση 7), προέκυψε ότι προκειμένου να διευθετηθεί ο χειμάρρος, είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί φράγμα με υπέργειο ύψος 10,6 m.

Ωστόσο, αντί της κατασκευής του περίπου 11 m φράγματος προτείνεται η κατασκευή πέντε μικρότερων φραγμάτων, τέσσερα εκ των οποίων θα έχουν υπέργειο ύψος 2,2 m και δύο με υπέργειο ύψος 2,0 m. Σημειώνεται ότι στην παρούσα έρευνα τα φράγματα τοποθετούνται εμπειρικά σε επιλεγμένες θέσεις (Σχήμα 5) λαμβάνοντας υπόψη κριτήρια όπως η κλίση αντιστάθμισης, η κλίση της κοίτης, η τοπογραφική διαμόρφωση, η προσβασιμότητα των επιλεγμένων θέσεων ενώ το βάθος θεμελίωσης στο Σχήμα 5 είναι ενδεικτικό.



Σχήμα 5. Τοποθέτηση φραγμάτων στην μηκοτομή του χειμάρρου της Περαίας, λεπτομέρεια της μηκοτομής.

Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας έρευνας αποτέλεσε η διερεύνηση των αναγκών διευθέτησης του χειμαρρικού ρέματος της Περαίας, καθώς η περιοχή αυτή θεωρείται επικίνδυνη για την εκδήλωση σοβαρών πλημμυρών. Αρχικά, στην λεκάνη απορροής της Περαίας μελετήθηκε το χειμαρρικό περιβάλλον και στην συνέχεια προσδιορίστηκε η μέγιστη αναμενόμενη υδατοπαροχή χρησιμοποιώντας διάφορους εμπειρικούς και αναλυτικούς τύπους. Με βάση την ορθολογική μέθοδο, η μέγιστη πλημμυρική παροχή της 100 ετίας ανέρχεται στα 24,8 m³/sec ενώ ο μέσος όρος των εμπειρικών και αναλυτικών τύπων υπερεκτιμά την μέγιστη πλημμυρική παροχή σε σχέση με την ορθολογική μέθοδο κατά περίπου 50 %. Επιπρόσθετα, ο υπολογισμός της μέγιστης αναμενόμενης στερεοπαροχής πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του τύπου των Stiny-Herheullidze και βρέθηκε ίση με 2,76 m³/sec.

Οι υπολογισμοί της μέγιστης αναμενόμενης υδατοπαροχής και στερεοπαροχής καθώς και δεδομένα υπαίθρου χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστεί η κλίση αντιστάθμισης χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Κωτούλα και βρέθηκε ίση με 2,21 %. Το παραπάνω μέγεθος αλλά και στοιχεία της μηκοτομής του χειμάρρου η οποία εξήχθη από λεπτομερές ψηφιακό μοντέλου εδάφους συνδυάστηκαν και προέκυψε ότι προκειμένου να διευθετηθεί ο χειμάρρος απαιτείται να κατασκευαστεί φράγμα, λίγο πριν την είσοδο του χειμάρρου στον ομώνυμο οικισμό, με υπέργειο ύψος 10,60 m. Τέλος, αντί της κατασκευής του προαναφερθέντος υψηλού φράγματος προτείνεται να κατασκευαστούν πέντε μικρότερα φράγματα, τρία με υπέργειο ύψος 2,2 m και δύο με υπέργειο ύψος 2,0 m.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

- Καπετανόπουλος, Γ. (2001) Πρόγραμμα «vbClisi.exe», σε γλώσσα Visual Basic 6.0.
- Κωτούλας Δ. (1996) Διευθετήσεις Χειμαρρικών Ρευμάτων II (Ορεινή Υδρονομική II.) Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Τμήμα Εκδόσεων.
- Κωτούλας Δ. (1998) Ορεινή Υδρονομική I. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Τμήμα Εκδόσεων.
- Μουλόπουλος, Χ. (1932). Η Εξέλιξις της Ορεινής Υδρονομικής. Θεσσαλονίκη.
- Μυρωνίδης Δ. (2021) Υδρολογία και Υδραυλική, 1η Έκδοση. 2021, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Α. Τζιολα & Υιοι Α.Ε.
- Παυλίδης, Θ., Τσεμπερίδης, Κ., Γκανάτσιος Χαρ., Κάλφα, Αικ. Και Παυλίδης, Β. (2013). Ανάπτυξη του βέλτιστου συστήματος διευθέτησης του χειμάρρου Γερμας Καστοριάς. 16^ο Πανελλήνιο Δασολογικό Συνέδριο & Annual Meeting of Prosilva Europe. Θεσσαλονίκη, 6-9 (13). <https://ikee.lib.auth.gr/record/320117?ln=el>
- ΦΕΚ 2638 Β / 5.07.2018 Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (GR10). Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων. GR10, P02.

Ξενόγλωσση

- Ballabio, C., Panagos, P., Montanella, L. (2016) 'Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database' Geoderma, 261, pp. 110-123.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988), Applied Hydrology. Singapore: McGraw-Hill.

- Guyassa, E., Frankl, A., Zenebe, A., Poesen, J., Nyssen, J. (2017). Effects of check dams on runoff characteristics along gully reaches, the case of Northern Ethiopia, *Journal of Hydrology*, Vol. 545, pp. 299–309.
- Hassanli, M., Beecham, S. (2013) Criteria for optimizing check dam location and maintenance requirements. Available: <https://www.researchgate.net/publication/287636490>
- Hosseinzadeh, P., Saghafian, B., Rostami, M. (2014) The numerical investigation of the effect of subsequent check dams on flood peaks and the time of concentration using the MIKE 11 modeling system (Case study: Golabdareh catchment, Iran), *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow*, pp. 1745- 1750.
- Hotchkiss, H.R., McCallum, E.B. (1995). Peak discharge for small agricultural watersheds. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 1, pp. 36-48.
- Hua, J, Liang, Z, Yu, Z. (2007). A modified Rational formula for flood design in small basins. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 39, No. 5, pp. 1017-1025.
- Kiprich, Z.P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, Vol. 10, No. 6, pp. 362-368.
- Levy, B., McCuen, R. (1999). Assessment of storm duration for hydrologic design. *Journal Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 209-213.
- Maris, F., Iliadis. L., Marinos, D. (2004). Estimation of the torrential risk of Rodopi mountainous watersheds by a fuzzy decision support system: The case of trapezoidal membership function and fuzzy conjunction. Available: <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=6047>
- Myronidis, D., Stathis, D., Sapountzis, M. (2016). Post-evaluation of flood hazards induced by former artificial interventions along a coastal Mediterranean settlement'. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(10), 05016022-9.
- Parak, M., Pegram, G. (2006) The Rational Formula from the Runhydrograph. *Civil Engineering Programme, Water SA*, Vol. 32, No. 2, 163-180. <http://www.wrc.org.za>.
- Polyakov, V.O., Nichols, M.H., McClaran, M.P., Nearing, M.A. (2014). Effect of check dams on runoff, sediment yield, and retention on small semiarid watersheds', *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 69, No. 5, pp. 414-421.
- Soltani, M., Ekhtesasi, M., Talebi, A., Pouraghniaei, M.J., Sarsangi, A.R. (2012). Effect of check dams on reduction of flood peak (case study: Manshad watershed). *Watershed Management Research*, Research Issue 4, No. 93, pp. 46-54.
- Stiny, J. (1931) *Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde*, Wien, pp. 1-120.
- Tolland, L., Cathcart, J., Russell D. (1998). Estimating the Q100 in British Columbia: A practical problem in Forest Hydrology. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 4, pp. 787-794.
- Vogt, S., Forster, F., Hegg, C.I. (2002) A multi-method approach for flood estimation in small torrential catchments. *International Congress INTERPRAEVENT, in the Pacific Rim - MATSUMOTO/JAPAN Congress publication*, pp. 377-389.
- Wang, X., Liu, T., Yang, W. (2012). Development of a robust runoff-prediction model by fusing the Rational Equation and a modified SCS-CN method. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57, No. 6, pp. 1118–1140.
- Yuan, S., Li, Z., Li, P., Xu, G., Gao, Haidong., Xiao, L., Wang, T. Wang, T. (2019). Influence of check dams on flood and erosion dynamic processes of a small watershed in the Loss Plateau. *Water*. Vol. 11, pp 834, doi:10.3390/w11040834.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΧΩΡΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ

Μάριος Μπίλλιος

Πολιτικός Μηχανικός

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική σχολή

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

e-mail: mbillios@uth.gr

Λάμπρος Βασιλειάδης

Επικ. Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική σχολή

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

e-mail: lvassil@uth.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αύξηση των ακραίων βροχοπτώσεων έχει οδηγήσει σε τεράστιες καταστροφές και σε απώλεια ανθρώπινων ζώων σε παγκόσμιο επίπεδο. Προβλήματα όπως η χωρική μεταβλητότητα και η εγγενής αβεβαιότητα που υπάρχει σε κάθε βήμα μιας υδρολογικής μελέτης, αποτελούν τροχοπέδη για την έγκυρη εκτίμηση των ακραίων γεγονότων. Στην παρούσα μελέτη αναλύεται η αβεβαιότητα στην χωρική παρεμβολή των παραμέτρων της κατανομής ακραίων τιμών GEV. Στην αρχή υπολογίζεται η κατανομή δείγματος των παραμέτρων. Στην συνέχεια με την μέθοδο bootstrap και της διασταυρούμενης επικύρωσης μελετάται η συνολική αβεβαιότητα από την χωρική παρεμβολή των παραμέτρων με την μέθοδο αντίστροφης απόστασης (IDW). Δυο υποπαραλλαγές παρουσιάζονται έτσι ώστε να μελετηθεί εάν επηρεάζεται η αβεβαιότητα με τον τρόπο παρεμβολής των παραμέτρων. Τέλος, παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των παραμέτρων θέσης και κλίμακας με το υψόμετρο, και τις συντεταγμένες των σταθμών. Η μελέτη έδειξε ότι η παράμετρος θέσης και κλίμακας εξαρτώνται χωρικά ενώ η παράμετρος σχήματος εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των δειγμάτων. Η μεθοδολογία ατομικής παρεμβολής της κάθε παραμέτρου παράγει καλύτερα αποτελέσματα με τα σφάλματα να αυξάνονται καθώς η παράμετρος βάρους αυξάνεται, εκτός από τη παράμετρο θέσης. Τα χειρότερα αποτελέσματα παρουσιάζει η ομαδική μεθοδολογία, με τα σφάλματα να μειώνονται καθώς η τιμή βάρους της IDW αυξάνεται.

Λέξεις κλειδιά: Αβεβαιότητα, L-ροπές, γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών, Μπεϋζιανές Μαρκοβιανές Αλυσίδες Monte Carlo

Εισαγωγή

Οι ακραίες βροχοπτώσεις αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα για την εκδήλωση φυσικών καταστροφών αφού τις τελευταίες δεκαετίες, οι υδρομετεωρολογικές αποτελούν το 90% περίπου του συνόλου των καταστροφών που συνέβησαν σε όλο τον πλανήτη (Gründemann et al. 2018). Συγχρόνως η ακριβής μέτρηση των ακραίων

βροχοπτώσεων είναι επίσης ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό και την κατασκευή υποδομών (Hailegeorgis & Alfredsen, 2017). Γι' αυτό το λόγο απαιτούνται ακριβείς εκτιμήσεις της σφοδρότητας των ακραίων βροχοπτώσεων για τη βελτίωση της κατανόησης του κινδύνου (Gründemann et al. 2023). Ενώ υπάρχει κάποιος βαθμός σκοπιμότητας για τη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση της βροχόπτωσης, η μακροπρόθεσμη πρόγνωση η οποία αποτελεί τη βάση του σχεδιασμού των υποδομών, είναι ντετερμινιστικά ανέφικτη (Papalexίου & Koutsoyiannis 2013). Ως αποτέλεσμα, χειριζόμαστε τη βροχόπτωση πιθανοτικά, δηλαδή την αντιμετωπίζουμε σαν μια τυχαία μεταβλητή που υπόκειται σε μία κατανομή (Gu et al. 2022). Για την εκτίμηση των πιθανοτήτων εκδήλωσης γεγονότων υψηλών συχνοτήτων και τη μελέτη των κλιματικών ακραίων φαινομένων στο ευρύτερο πλαίσιο της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής, είναι απαραίτητο να επιλεγεί η κατάλληλη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Όμως, ακόμη και αν η σωστή σ.π.π θα μπορούσε θεωρηθεί με μία *a priori* γνώση, η τελική σ.π.π επιλέγεται συνήθως *ad hoc* από ένα τυχαίο σύνολο συναρτήσεων και με βάση την καλύτερη προσαρμογή (Cavanaugh et al. 2015).

Η στατιστική συμπεριφορά της ετήσιας μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης αποτέλεσε το θεμέλιο της στατιστικής υδρολογίας. Από τις δημοσιεύσεις του E.J. Gumbel στη δεκαετία του 1940, η μελέτη των ακραίων τιμών βροχόπτωσης ή πλημμύρας στην υδρολογία αποτελεί θέμα ενεργού έρευνας και συζήτησης. Σε πολλές μελέτες η κύρια χρονική κλίμακα για την ανάλυση βροχοπτώσεων είναι τα έτη και γι' αυτό το λόγο η οικογένεια συναρτήσεων GEV (Coles 2013) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την ανάλυση ακραίων τιμών (Gründemann et al. 2023). Το κύριο ερώτημα για την προσαρμογή της κατανομής GEV είναι, ποια από τις κατανομές Gumbel, Fréchet, Weibull πρέπει να χρησιμοποιηθεί (Papalexίου & Koutsoyiannis 2013).

Ο σχεδιασμός υδραυλικών κατασκευών, η χαρτογράφηση πλημμυρών και η οριοθέτηση ζωνών επικινδυνότητας απαιτεί επίσης αξιόπιστα χωρικά δεδομένα στη περιοχή μελέτης. Ωστόσο, τα δεδομένα αυτά είναι συχνά δυσεύρετα, ιδίως σε λοφώδεις ή ορεινές περιοχές (Li & Heap 2011). Για τον ακριβή υπολογισμό της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης απαιτείται ένα ιδιαίτερα πυκνό δίκτυο μετρητών, το οποίο συνοδεύεται από υψηλά έξοδα εγκατάστασης και λειτουργίας. Επιπλέον, βανδαλισμοί ή παραμέληση του υπευθύνου να ελέγχει τακτικά το μετρητή μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη χαμηλότερη πυκνότητα δειγματοληψίας. Ως εκ τούτου, απαιτείται η παρέκταση σημειακών εκτιμήσεων βροχόπτωσης (Goonaerts 2000). Γι' αυτό τον λόγο οι μελετητές καταφεύγουν σε μεθόδους χωρικής παρεμβολής. Η επιλογή μιας κατάλληλης τεχνικής για την χωρική παρεμβολή είναι ένα δύσκολο ζήτημα που εξαρτάται από την ποιότητα των αποτελεσμάτων (Caruso & Quarta, 1998). Η αξιοπιστία κάθε μεθοδολογίας είναι κάτι το οποίο πρέπει να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα (Lanza et al. 2001). Συνεπώς δεν υπάρχει μία βέλτιστη μέθοδος που να λειτουργεί σε όλες τις περιπτώσεις και μερικές φορές, οι περίπλοκες μέθοδοι είναι εξίσου ακριβείς με τους απλούς αλγορίθμους. Έτσι, κάθε τρόπος για την χωρική επέκταση της βροχόπτωσης έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Όταν επιλέγεται μια μέθοδος παρεμβολής, είναι σημαντικό να λογαριάζεται ο σκοπός μελέτης, η γεωγραφία της περιοχής, καθώς και τις κλίμακες χρόνου και χώρου (Hu et al. 2019).

Σχεδόν όλες οι εργασίες και οι μελέτες των μηχανικών όπως και οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν πιο πάνω περιλαμβάνουν τη λήψη αποφάσεων παρουσία της αβεβαιότητας και γι' αυτό η κατανόηση, η ποσοτικοποίηση και ο τρόπος διάδοσης της αποτελεί το επίκεντρο πολλών ερευνών (Tung & Yen, 2005).

Οι παράμετροι, η δομή του μοντέλου, η βαθμονόμηση και τα δεδομένα εισόδου είναι

οι κύριοι παράγοντες αβεβαιότητας στη επιστήμη της τεχνικής υδρολογίας. Η αβεβαιότητα των δεδομένων εισόδου μπορεί να προέλθει από τη αδυναμία εκτίμησης ή ποσοτικοποίησης, από τη μεταβλητότητα των φυσικών διεργασιών αλλά και από λάθη στις μετρήσεις. Η ποσοτικοποίηση της διακύμανσης των σφαλμάτων των διαφορών των μετρήσεων με την πραγματικότητα είναι δύσκολη, γεγονός που μπορεί να αυξήσει την αβεβαιότητα. Η έλλειψη συνεκτικής θεωρίας, η ανεπάρκεια σε δεδομένα και οι αριθμητικές απλουστεύσεις καθιστούν δύσκολη την αναπαράσταση του υδρολογικού συστήματος. Αυτοί οι περιορισμοί δημιουργούν τη δομική αβεβαιότητα του μοντέλου. Τέλος ακόμα και αν υπήρχε ένα μοντέλο που μπορεί αναπαριστά με ακρίβεια ένα υδρολογικό σύστημα, τα λάθη στα δεδομένα βαθμονόμησης ενδέχεται να προκαλέσουν επίσης αβεβαιότητα (Moges et al., 2020)

Στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση του βαθμού αβεβαιότητας που υπάρχει στη χωρική παρεμβολή των παραμέτρων της κατανομής ακραίων τιμών GEV. Ο υπολογισμός της δειγματικής κατανομής των παραμέτρων πραγματοποιείται στην αρχή της διαδικασίας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η μέθοδος αντίστροφης απόστασης (IDW) προκειμένου να διερευνηθεί η συνολική αβεβαιότητα που προκύπτει από τη χωρική παρεμβολή των παραμέτρων ανάλογα με τη παράμετρο βάρους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της διαδικασίας bootstrap και της διασταυρούμενης επικύρωσης.

Μεθοδολογία

Γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών

Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες για την προσαρμογή των παραμέτρων των κατανομών σε δεδομένα (Nerantzaki and Papalexiou, 2019). Μια από αυτή την μεθοδολογία οι L-ροπές θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Η μέθοδος των L-ροπών (Hosking, 1990), επειδή βασίζεται σε ποσοστημόρια έχει τα ίδια προτερήματα με την μεθοδολογία των ροπών αλλά παράλληλα η εκτίμηση των παραμέτρων είναι καλύτερη από αυτή της μέγιστης πιθανοφάνειας με μικρότερη μεροληψία. Συγχρόνως σύγχρονες μελέτες συνεχίζουν να χρησιμοποιούν τις L-ροπές ως υποψήφια μεθοδολογία μεταξύ άλλων για την εύρεση της καταλληλότερης (Hossain et al. 2022, 2021) ή την χρησιμοποιούν για βρουν την καταλληλότητα των συναρτήσεων κατανομής (Gado 2020, Gocic et al. 2021, Vivekanandan et al. 2023). Τέλος μελέτες όπως των (Li, 2008) και (Kumar et al., 2023) την υπογραμμίζουν τα προτερήματά της. Όπως και στις κλασικές ροπές έτσι και στις L-ροπές για την εύρεση των παραμέτρων της κατανομής GEV εξισώνουμε τις θεωρητικές ροπές (2-7) του πληθυσμού με αυτές του δείγματος (2-8)

$$\lambda_r = \frac{1}{r} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} \mathbb{E}\{X_{r-k:r}\} \quad (1)$$

$$l_r = \frac{1}{r * \binom{n}{r}} \sum_{x_1 < \dots < x_j < \dots < x_r} (-1)^{r-j} \binom{r-1}{j} x_j \quad (2)$$

Έτσι οδηγούμαστε στους εξής τύπους :

$$\hat{a} = \frac{l_2 \hat{k}}{(1 - 2^{-\hat{k}}) \Gamma(1 + \hat{k})} \quad (3)$$

$$\hat{k} = 7.589c + 2.9554c^2 \quad (4)$$

$$\hat{\xi} = l_1 - \frac{\hat{a}}{\hat{k}} [1 - \Gamma(1 + \hat{k})] \quad (5)$$

Μέθοδος της αντίστροφης απόστασης

Ως συνάρτηση χωρικής παρεμβολής (6) επιλέγουμε την μέθοδο αντίστροφης απόστασης. Σύμφωνα με αυτήν η τιμή ενός σημείου αναρτάται από της τιμές των γειτονικών τιμών αλλά δίνοντας τους μια βαρύτητα ανάλογα με το πόσο κοντά ή μακριά είναι.

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \frac{1/d_i^p}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} z(x_i) \quad (6)$$

Η παράμετρος p είναι αυτή η οποία ορίζει το πόσο σημαντικές είναι οι πιο κοντινές τιμές. Η πιο δημοφιλής τιμή είναι για $p=2$ (Li 2008)

Μελέτη αβεβαιότητας

Όπως έχουμε είδη αναφέρει ένα από τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν στις υδρολογικές μελέτες είναι αυτό της αβεβαιότητας. Ξεκινώντας με τη σειρά θα αναλύσουμε τους τρόπους εκτίμησης της αβεβαιότητας για τις μεθοδολογίες που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Η εύρεση των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την κατανομή του πληθυσμού, επειδή γίνεται από έναν περιορισμένο αριθμό δειγμάτων είναι προσθέτει επιπλέον παραμετρική αβεβαιότητα (Li 2008). Έτσι, επειδή η υπόθεση μιας λανθασμένης κατανομής πληθυσμού μπορεί να προκαλέσει μεγάλα σφάλματα έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες οι οποίες μπορούν να προσφέρουν ευελιξία όσον αφορά τις παραμέτρους (Dior & Deme 2021). Οι Efron & Tibshirani, (1994) εισήγαγαν την μεθοδολογία bootstrapping, η οποία βασιζόμενη στη διαδικασία Monte Carlo παράγει δείγματα από ένα αρχικό δείγμα (μη παραμετρικό bootstrapping) ή από μια κατανομή (παραμετρικό bootstrapping) για την εύρεση κυρίως κατανομών δειγμάτων (Efron & Tibshirani 1994). Μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται στην μελέτη είναι αυτή του χωρικού bootstrapping (Uboldi et al. 2014). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή αφού υπολογιστούν τα καινούργια δείγματα στην συνέχεια γίνεται χωρική παρεμβολή. Η μέθοδος μη παραμετρικού bootstrap ονομάζεται και resampling και η διαδικασία είναι να γίνεται τυχαία επιλογή με αντικατάσταση από το αρχικό δείγμα ώσπου να έχουμε ίδιο πληθυσμό στο νέο δείγμα. Όταν θέλουμε να μελετήσουμε τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων ενός συστήματος, ο λόγος που δεν υπάρχουν αναλυτικές σχέσεις είναι εξαιτίας της πολυπλοκότητας και της μη γνώσης της στατιστικής συμπεριφοράς των παραμέτρων εισόδου και της δομής του

συστήματος. Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι να εφαρμοστεί ένα είδος δοκιμασιών Monte Carlo, όπου γίνεται συνεχής δειγματοληψία από τον χώρο των δεδομένων εισόδου και των παραμέτρων του συστήματος δημιουργώντας μια σειρά αποτελεσμάτων από τα οποία μπορούν να εξαχθούν στατιστικά συμπεράσματα για τα ίδια τα δεδομένα εξόδου (Montanari 2007).

Ανάλυση αβεβαιότητας παραμέτρων

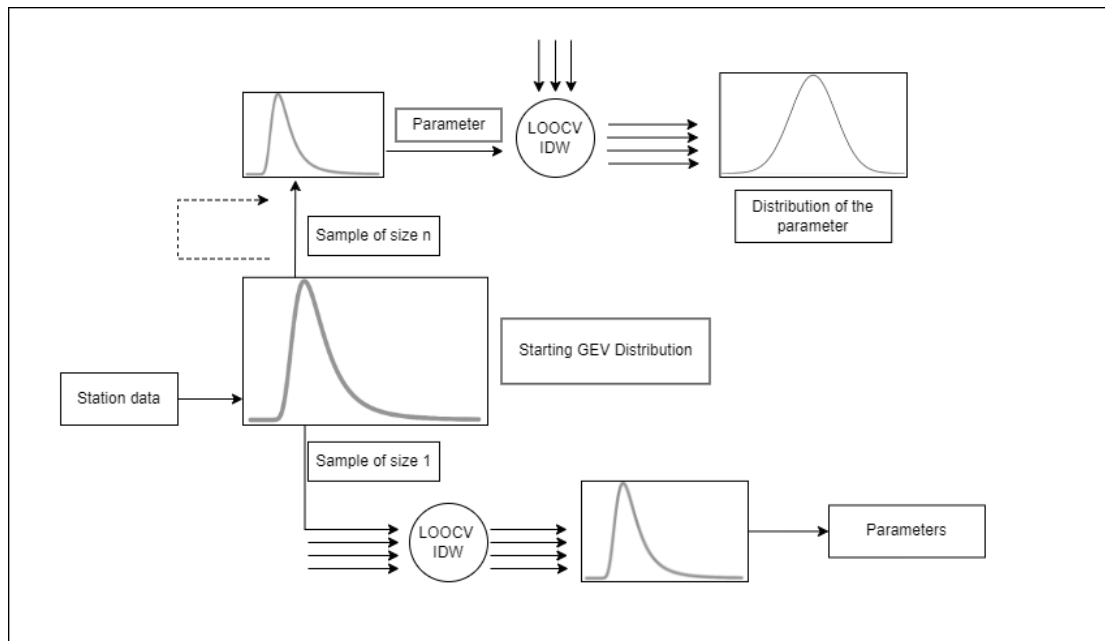
Η ανάλυση αβεβαιότητας των παραμέτρων βασίστηκε στην εύρεση της τυπικής απόκλισης της συνάρτησης κατανομής δείγματος των παραμέτρων μέσω παραμετρικής διαδικασίας Bootstrap. Η διαδικασία αυτή στα γραφήματα των επόμενων παραγράφων θα αναφέρεται ως «in-site». Η διαδικασία παρουσιάζεται στη συνέχεια (Πίνακας 1)

Πίνακας 1. Διαδικασία εύρεσης της αβεβαιότητας των παραμέτρων της κατανομής GEV

1	Προσαρμογή κατανομής GEV με L-ροπές σε κάθε σταθμό
2	Δημιουργία δείγματος από την κατανομή GEV αριθμού ίσου του πληθυσμού του δείγματος του εκάστοτε σταθμού
3	Προσαρμογή κατανομής GEV στο καινούργιο δείγμα και αποθήκευση των νέων παραμέτρων
4	Προσαρμογή κατανομής GEV στο καινούργιο δείγμα και αποθήκευση των νέων παραμέτρων
5	Εύρεση των στατιστικών των παραμέτρων της GEV

Ανάλυση αβεβαιότητας χωρικής παρεμβολής

Σε αυτή την παράγραφο περιγράφεται η μέθοδος, μελέτης της αβεβαιότητας που προέρχεται από την επιλογή της κατάλληλης δύναμης στην μεθοδολογία χωρικής παρεμβολής IDW θεωρώντας αρχικά ότι σε κάθε σταθμό μπορούν να συνεισφέρουν στην παρεμβολή όλοι οι υπόλοιποι. Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων ακολουθήθηκε μια παρόμοια διαδικασία παραμετρικού Bootstrapping όπως με την προηγούμενη παράγραφο αλλά με δυο διαφορετικές παραλλαγές.



Εικόνα 1. Μεθοδολογίες για την ανάλυση αβεβαιότητας της παρεμβολής IDW με την μέθοδο της διασταυρούμενης επικύρωσης

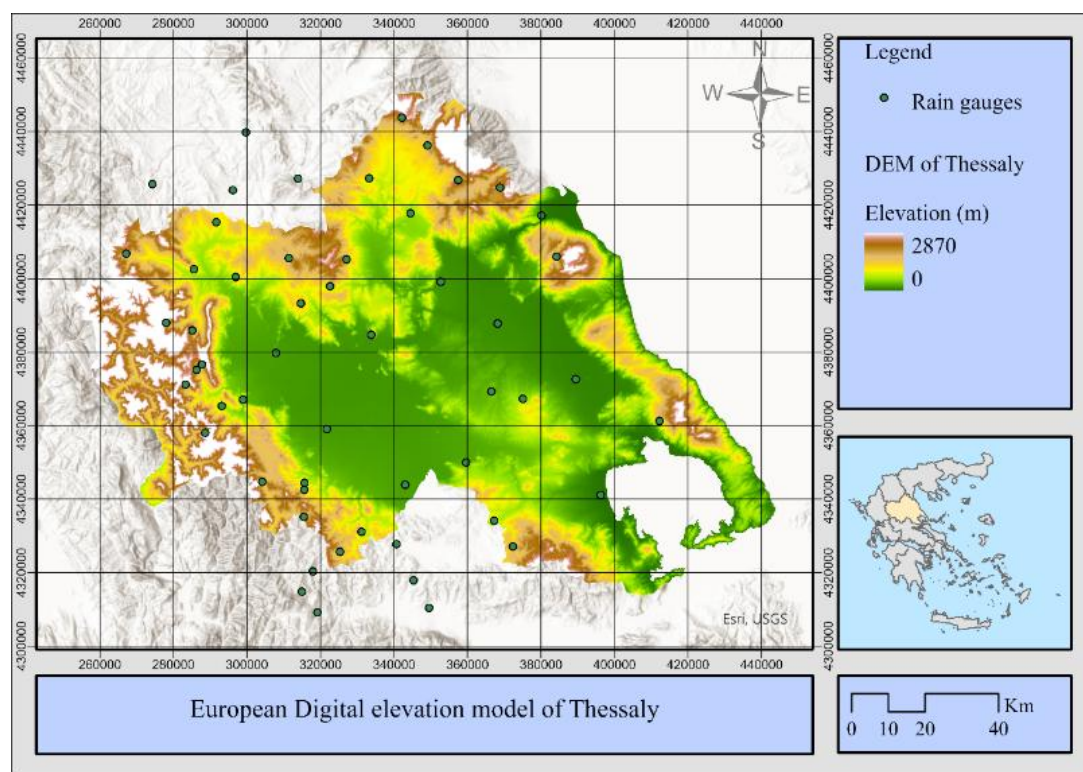
Στην πρώτη μεθοδολογία (Εικόνα 1) από κάθε σταθμό βρέθηκε η κατανομή GEV από την οποία έγινε συλλογή ενός δείγματος ίσου μεγέθους με αυτό του σταθμού στο οποίο ξανά έγινε προσαρμογή της κατανομής GEV (με L-ροπές). Στην συνέχεια κάθε παράμετρος παρεμβάλλεται ανεξάρτητα με την μεθοδολογία της διασταυρούμενης πιστοποίησης. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε 10000 φορές και βρέθηκε η ενδιάμεση τιμή της παρεμβαλλόμενης τιμής της κάθε παραμέτρου. Στις επόμενες παραγράφους αυτή η μεθοδολογία θα αναφέρεται ως «Individually» ή «Each». Η δεύτερη διαδικασία διερευνά εάν είναι σωστή η επιλογή να γίνει παρεμβολή των μεταβλητών ανεξάρτητα ή μία από την άλλη. Γι' αυτό στην δεύτερη υπόπαραλλαγή της μεθόδου όταν γίνεται η προσαρμογή της κατανομής ακραίων στα δεδομένα κάθε σταθμού, γίνεται δειγματοληψία μίας μόνο τιμής από κάθε σταθμό, και αυτές στην συνέχεια παρεμβάλλονται στο σταθμό-αναφοράς με διασταυρούμενη επικύρωση βρίσκοντας μια κατανομή GEV πλέον και όχι κατανομές για κάθε παράμετρο ξεχωριστά. Στις επόμενες παραγράφους αυτή η μεθοδολογία θα αναφέρεται ως «Grouped» ή «All».

Περιοχή μελέτης και δεδομένα

Η Θεσσαλία βρίσκεται στην κεντρική Ελλάδα και καλύπτει μια συνολική έκταση περίπου 14.000 τ.χλμ το 11% της συνολικής έκτασης της χώρας με μέσο υψόμετρο τα 500μ. Στα ανατολικά οριοθετείται από το Πήλιο το οποίο εκτείνεται από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά και συνορεύει με το αιγαίο πέλαγος. Στα βόρεια της περιφέρειας βρίσκεται ο Όλυμπος, δυτικά η Πίνδος και στον νότο Όθρυς. Στο κέντρο αυτών των ορεινών συνόρων βρίσκεται η θεσσαλική πεδιάδα η οποία διασχίζεται από τον Πηνειό και από τους παραπόταμούς του. Όσον αφορά το κλίμα η Θεσσαλία έχει ζεστά, ξηρά καλοκαίρια με θερμοκρασίες που φτάνουν τους 40°C τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή της Θεσσαλίας κυμαίνεται από 400 mm στα χαμηλά υψόμετρα έως 1.850 mm στην δυτική οροσειρά. Η μέση βροχόπτωση είναι 700 mm (Loukas et al. 2007). Οι μεταβολές στα χωρικά

χαρακτηριστικά της περιοχής κάνουν την Θεσσαλία μια περιοχή πολύτιμη για την ανάλυση των ακραίων βροχοπτώσεων και πώς αυτές εξαρτώνται από διάφορες γεωγραφικές ευμετάβλητες.

Για την ανάλυση των ακραίων βροχοπτώσεων θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα από βροχόμετρα τα οποία βρίσκονται εντός αλλά και πέριξ της περιφέρειας της Θεσσαλίας. Όπως είναι φυσιολογικό οι περισσότεροι σταθμοί βρίσκονται στα δυτικά από τον βορά έως τον νότο στην οροσειρά της Πίνδου καθώς εκεί παρουσιάζονται τα μεγαλύτερα ύψη βροχής. Καθώς όμως μετακινούμαστε προς την ανατολή ο αριθμός των βροχόμετρων μικραίνει σημαντικά (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. DEM Θεσσαλίας 90m και βροχομετρικοί σταθμοί.

Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα αποτελούν ετήσια μέγιστα βροχοπτώσεων 24 ωρών από 55 βροχομετρικούς σταθμούς. Ο ενδιάμεσος του υψομέτρου των σταθμών είναι τα 688 μέτρα, πιο υψηλά από το μέσο υψόμετρο της Θεσσαλίας. Ο σταθμός με το χαμηλότερο υψόμετρο είναι αυτός της Αγκιάλου που βρίσκεται στα 15 μέτρα και οι υψηλότεροι είναι αυτοί που βρίσκονται στο Λιβάδι με υψόμετρο 1179 μ. Όσον αφορά τον αριθμό των δεδομένων ο σταθμός που λειτουργεί τα λιγότερα χρόνια είναι αυτός στην περιοχή Πύθιο (15 χρόνια) και αυτός που λειτουργεί το περισσότερο βρίσκεται στα Μετέωρα (69 χρόνια). Ο ενδιάμεσος χρόνος λειτουργίας είναι τα 44 χρόνια και κυμαίνονται από το 1940 έως το 2013.

Αποτελέσματα ανάλυσης

Προσαρμογή της κατανομής GEV και αβεβαιότητα παραμέτρων

Η κατανομή GEV προσαρμόστηκε στα δεδομένα ετήσιας μέγιστης βροχόπτωσης 24 ωρών από τους 55 βροχομετρικούς σταθμούς που βρίσκονται εντός ή/και συνορεύουν

με την Θεσσαλία. Στο σύνολο όλων των σταθμών η παράμετρος θέσης κυμαίνεται από 98,8 στην περιοχή Στουρναραίικα έως 33,6 στη Λάρισα με ενδιάμεση τιμή 53. Η παράμετρος κλίμακας κυμαίνεται από 38,2 στη Μακρινίτσα έως τα 9,5 στα Πιτσιωτά με ενδιάμεση τιμή τα 19,2 και τέλος η παράμετρος σχήματος κυμαίνεται από τα 0,44 στον Τύρναβο έως -0,45 στη Ραχούλα με ενδιάμεση τιμή τα 0,008.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των στατιστικών: ελάχιστη τιμή, 25^ο, 50^ο 75^ο ποσοστημόριο, μέση τιμή και μέγιστη τιμή από το σύνολο των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αβεβαιότητας για τις τρεις παραμέτρους της γενικευμένης κατανομής ακραίων τιμών. Για παράδειγμα, η μέση τιμή του 50^{ου} ποσοστημορίου από τη ανάλυση αβεβαιότητας της παραμέτρου θέσης όλων των σταθμών της Θεσσαλίας είναι 52,99. Πιο αναλυτικά η παράμετρος θέσης κυμαίνεται από 33,59 έως 98,83, με διάμεσο 52,99 και μέσο όρο 68,10. Η παράμετρος κλίμακας έχει εύρος από 9,51 έως 38,21, με διάμεσο 19,20 και μέσο όρο 22,64. Η παράμετρος σχήματος, η οποία κυμαίνεται από -0,45 έως 0,435, έχει μικρή διασπορά, με διάμεσο κοντά στο μηδέν (0,008) και μέση τιμή 0,141.

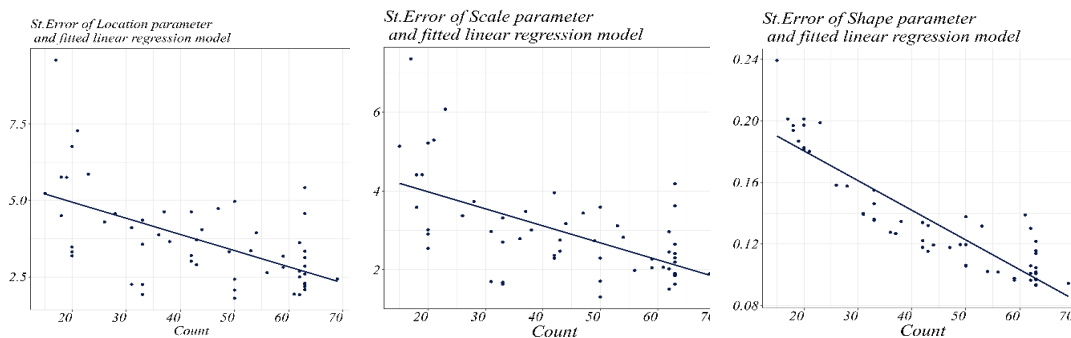
Πίνακας 2. Στατιστικά στοιχεία στο σύνολο των σταθμών για τις τρεις παραμέτρους της κατανομής GEV

Μέση τιμή	min	25%	50%	75%	mean	max
Π. Θέσης	33.59	44.84	52.99	56.86	68.10	98.83
Π. Κλίμακας	9.51	15.86	19.2	19.9	22.64	38.21
Π. Σχήματος	-0.45	-0.099	0.008	0.012	0.141	0.435

Τα αποτελέσματα της μελέτης ανάλυσης αβεβαιότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Η τυπική απόκλιση της κατανομής της παραμέτρου θέσης κυμαίνεται από 1,8 έως 9,95 με ενδιάμεση τιμή 3,34. Η τυπική απόκλιση της κατανομής της παραμέτρου κλίμακας κυμαίνεται από 1,3 έως 7,3 με ενδιάμεση τιμή 2,7 και τέλος η τυπική απόκλιση της κατανομής της παραμέτρου σχήματος κυμαίνεται από 0.09 έως 0.24 με ενδιάμεση τιμή 0.12. Η αλλαγή της τυπικής απόκλισης από σταθμό σε σταθμό εξαρτάται από τον αριθμό του αρχικού δείγματος. Προσαρμόζοντας ένα μοντέλο γραμμικής παρεμβολής στις τιμές των παραμέτρων θέσης, κλίμακας και σχήματος με τα τυπικά σφάλματα από τη μέθοδο bootstrap που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση αβεβαιότητας της προσαρμογής της GEV παρατηρούμε μία ισχυρή αρνητική τάση (Εικόνα 3).

Πίνακας 3. Στατιστικά στοιχεία στο σύνολο των σταθμών για τις τρεις παραμέτρους της κατανομής GEV

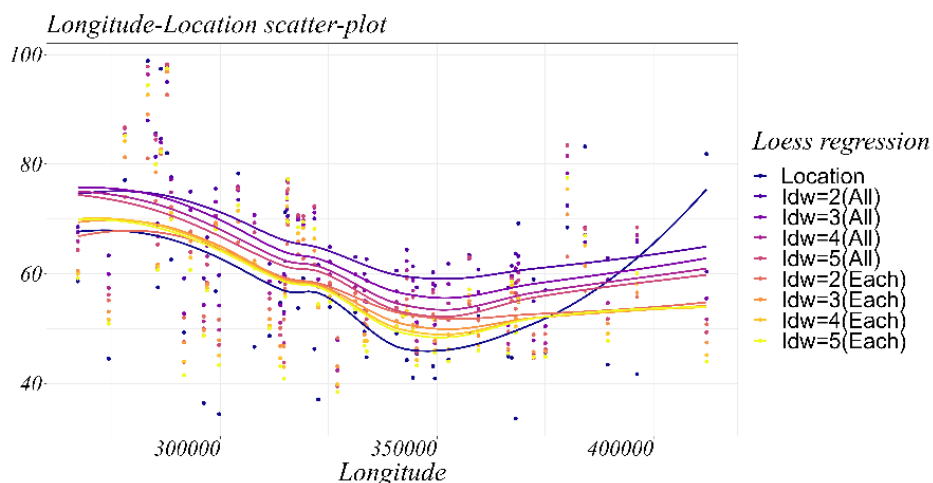
Μέση τιμή	min	25%	50%	75%	max
Π. Θέσης	1.81	2.54	3.34	4.54	9.59
Π. Κλίμακας	1.31	2.06	2.74	3.46	7.35
Π. Σχήματος	0.09	0.11	0.13	0.15	0.24



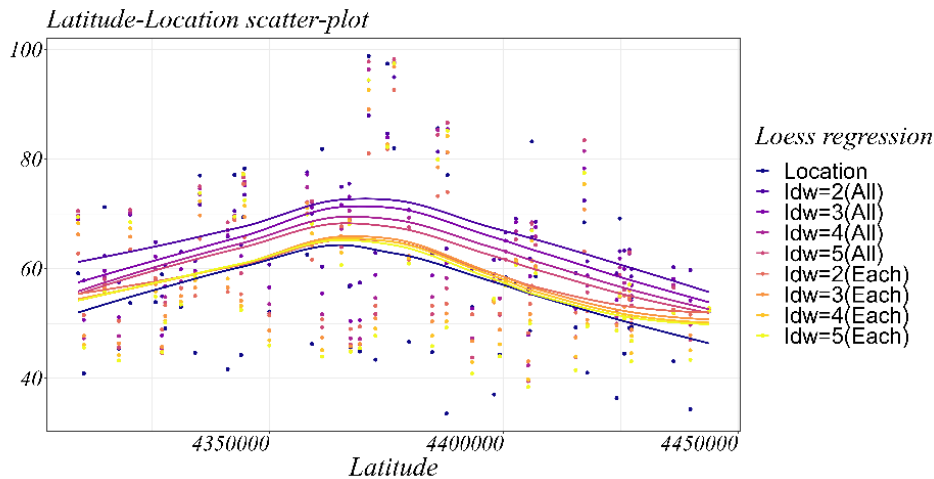
Εικόνα 3. Γραμμική παρεμβολή παραμέτρου Θέσης(αριστερά), Κλίμακας (μέση), Σχήματος(δεξιά) και τυπικού σφάλματος από την ανάλυση αβεβαιότητας της προσαρμογής της κατανομής GEV.

Για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν τα παρακάτω γραφήματα τα οποία εξερευνούν τις σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων της κατανομής και διάφορων άλλων παραμέτρων όπως της γεωγραφικής θέσης, του υψομέτρου αλλά και του αριθμού των δεδομένων που παρείχε ο κάθε σταθμός

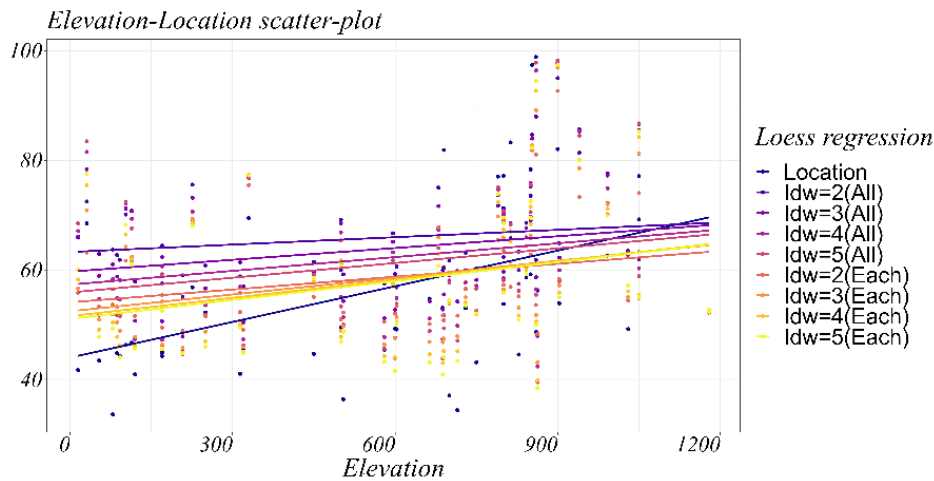
Σύμφωνα με τις Εικόνες 4 και 5 **Εικόνα 6**η παράμετρος θέσης εμφανίζει χωρική μεταβλητότητα τόσο με το γεωγραφικό μήκος όσο με το πλάτος. Στην Εικόνα 4 παρατηρούμε μια φθίνουσα τάση μέχρι τη μέση του γεωγραφικού μήκους και στην συνέχεια μια σχεδόν σταθερή διακύμανση. Η γραμμική παρεμβολή της παραμέτρου θέσης από τη προσαρμογή της κατανομής ακραίων στα δεδομένα των σταθμών παρουσιάζει μια αύξηση στα ανατολικά η οποία δεν μπορεί να αποτυπωθεί στις μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής. Στην Εικόνα 5 παρατηρούμε αύξηση της γραμμής της παρεμβολής μέχρι την μέση του γεωγραφικού πλάτους και μετά μείωση. Και στις δυο εικόνες η γραμμική παρεμβολή αποτυπώνει τη χωρική διακύμανση της παραμέτρου θέσης με την μέθοδο της ατομικής παρεμβολής των παραμέτρων να είναι καλύτερη. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η σχέση του υψομέτρου με την παράμετρο θέσης. Καμία από τις μεθόδους δεν μπορεί να αποτυπώσει σε ικανοποιητικό βαθμό τη πραγματική αυξητική τάση.



Εικόνα 4. Γραμμική παρεμβολή παραμέτρου θέσης – γεωγραφικού μήκους για διαφορετικές μονάδες βάρους της παρεμβολής IDW και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης της αβεβαιότητας

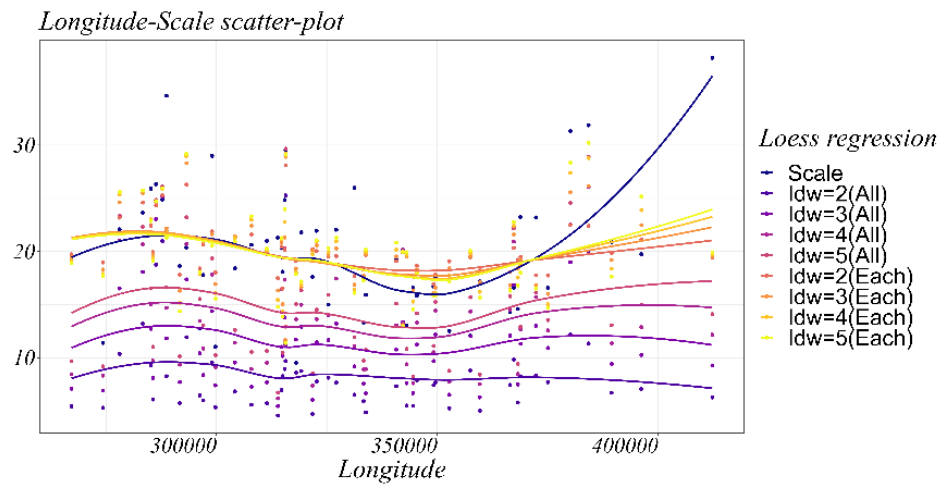


Εικόνα 5. Γραμμική παρεμβολή παραμέτρου θέσης – γεωγραφικού πλάτους για διαφορετικές μονάδες βάρους της παρεμβολής IDW και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης της αβεβαιότητας

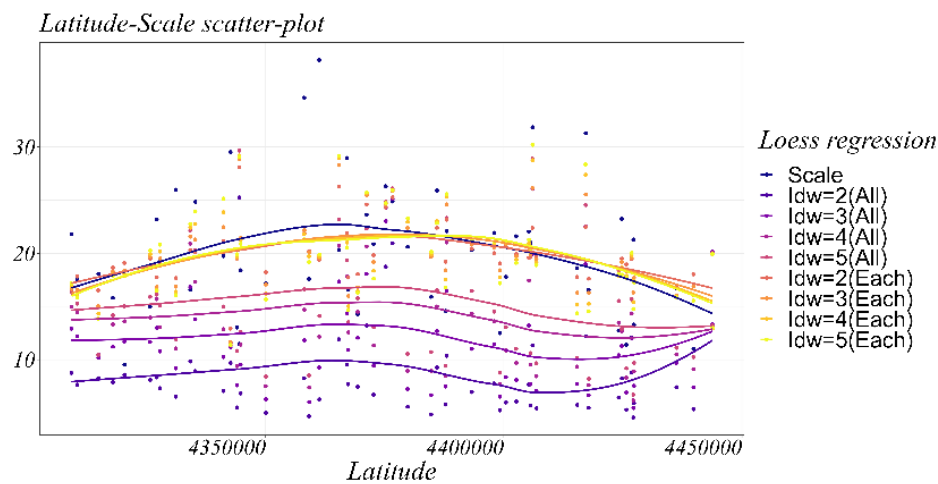


Εικόνα 6. Γραμμική παρεμβολή παραμέτρου θέσης – υψομέτρου για διαφορετικές μονάδες βάρους της παρεμβολής IDW και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης της αβεβαιότητας

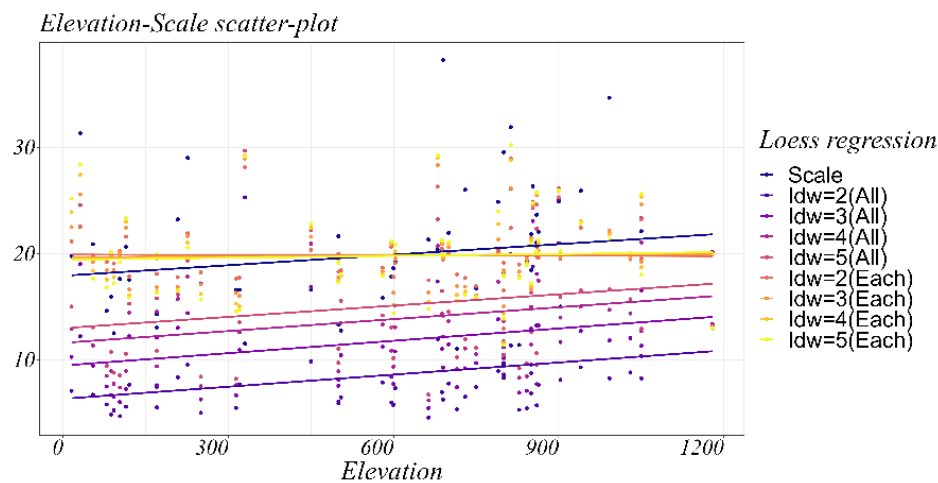
Στις Εικόνες 7 και 8 βλέπουμε τη σχέση της παραμέτρου κλίμακας με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Οι γραμμικές παρεμβολές που εμφανίζονται έχουν παρόμοιες τάσεις με αυτές της παραμέτρου θέσης αν και σε λιγότερο βαθμό. Εμφανίζεται επίσης και η τιμή στα πιο ανατολικά της Θεσσαλίας η οποία δεν μπορεί να υπολογιστεί από τις χωρικές παρεμβολές. Οι καλύτερες παρεμβολές και σε αυτή την περίπτωση είναι αυτές που παρεμβάλουν τις παραμέτρους ατομικά. Επίσης όσον αφορά την σχέση με το υψόμετρο (4-7) παρατηρούμε ότι ενώ η ατομική παρεμβολή βρίσκει καλύτερα αποτελέσματα, η ομαδική παρεμβολή αποτυπώνει καλύτερα την κλίση της γραμμικής παρεμβολής.



Εικόνα 7. Γραμμική παρεμβολή παραμέτρου κλίμακας – γεωγραφικού μήκους για διαφορετικές μονάδες βάρους της παρεμβολής IDW και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης της αβεβαιότητας



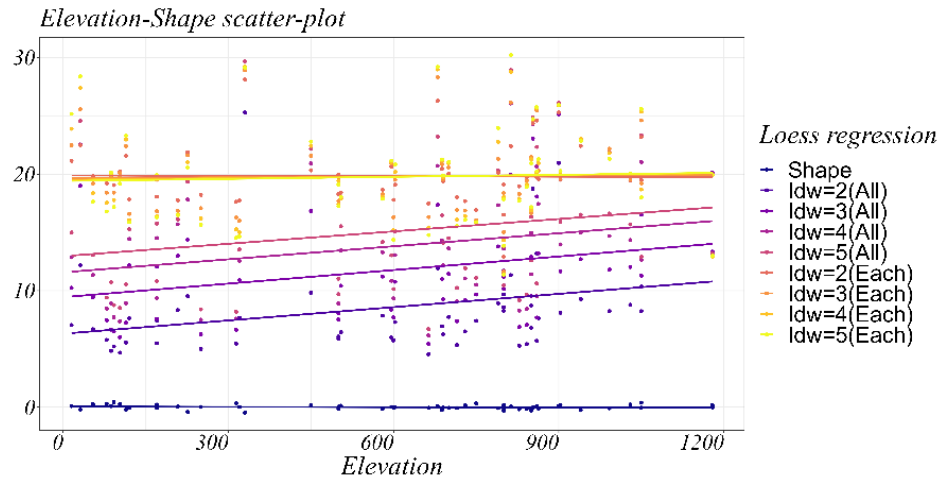
Εικόνα 8. Γραμμική παρεμβολή παραμέτρου κλίμακας – γεωγραφικού πλάτους για διαφορετικές μονάδες βάρους της παρεμβολής IDW και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης της αβεβαιότητας



Εικόνα 9. Γραμμική παρεμβολή παραμέτρου κλίμακας – υψομέτρου για διαφορετικές μονάδες βάρους της παρεμβολής IDW και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης της αβεβαιότητας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σχέσεις μεταξύ παραμέτρου σχήματος με το γεωγραφικό μήκος – πλάτος και υψόμετρο. Παρατηρούμε ότι στην πραγματικότητα η παράμετρος αυτή δεν παρουσιάζει χωρική μεταβλητότητα. Καμία μέθοδος γραμμικής παρεμβολής δεν μπορεί να αποτυπώσει το γεγονός αυτό αλλά ούτε τις πραγματικές τιμές συνεπώς η χωρική παρεμβολή αυτής της παραμέτρου δεν προτείνεται.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται η σχέση παραμέτρου σχήματος με το υψόμετρο



Εικόνα 10. Γραμμική παρεμβολή παραμέτρου σχήματος –υψομέτρου για διαφορετικές μονάδες βάρους της παρεμβολής IDW και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης της αβεβαιότητας

Αβεβαιότητας χωρικής παρεμβολής

Τα συνολικά αποτελέσματα από την χωρική παρεμβολή με την μέθοδο της διασταυρούμενης επικύρωσης για όλους τους σταθμούς συνολικά παρουσιάζονται συνοπτικά στην Εικόνα 11. Στους Πίνακες 4, 5, 6 παρουσιάζονται τα σφάλματα μεταξύ του 50^{ου} ποσοστημρίου της συνολικής εκτίμησης των παραμέτρων όλων των σταθμών με το 50^ο ποσοστημόριο όπως αυτό προέκυψε από την χωρική παρεμβολή όλων των σταθμών .

Πίνακας 4. Αποτελέσματα παρεμβολής για την παράμετρο θέσης της Gen

Location	Individually				Grouped			
	IDW=2	IDW=3	IDW=4	IDW=5	IDW=2	IDW=3	IDW=4	IDW=5
MAE	9.01	8.52	8.59	8.66	12.8	11.21	10.34	10.03
MAPE	0.17	0.16	0.16	0.16	0.26	0.22	0.2	0.19
MSE	123.52	114.92	118.38	123.98	214.17	174.9	158.52	154.55

Πίνακας 5. Αποτελέσματα παρεμβολής για την παράμετρο κλίμακας της GEV

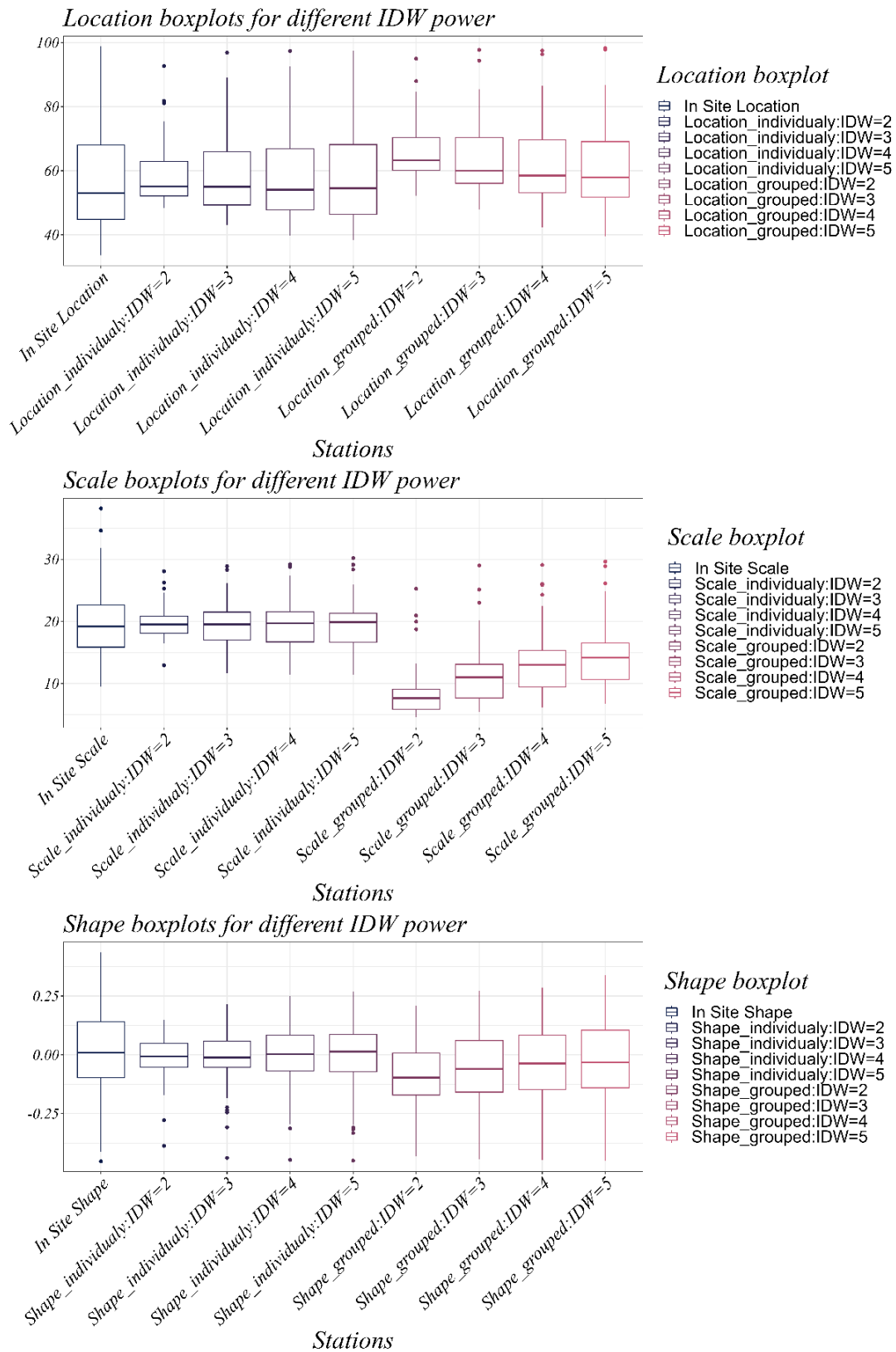
Scale	Individually				Grouped			
	IDW=2	IDW=3	IDW=4	IDW=5	IDW=2	IDW=3	IDW=4	IDW=5
MAE	4.6	4.61	4.69	4.75	12.04	9.1	7.43	6.62
MAPE	0.26	0.26	0.26	0.26	0.59	0.45	0.37	0.34
MSE	38.96	38.66	39.26	40.13	175.81	113.14	82.19	68.21

Πίνακας 6. Αποτελέσματα παρεμβολής για την παράμετρο σχήματος της GEV

Scale	Individually				Grouped			
	IDW=2	IDW=3	IDW=4	IDW=5	IDW=2	IDW=3	IDW=4	IDW=5
MAE	0.1399	0.1464	0.1517	0.1571	0.1685	0.1661	0.1667	0.169
MAPE	1.5532	1.8472	2.0596	2.2065	2.0896	2.3702	2.5144	2.611
MSE	0.0301	0.0320	0.0349	0.0374	0.0453	0.0446	0.0440	0.044

Οι δείκτες σφάλματος παρουσιάζονται στους Πίνακες 4, 5, 6 για διαφορετικές τιμές βάρους της μεθοδολογίας IDW και για τις δυο διαφορετικές μεθοδολογίες επαναδειγματοληψίας. Η μεθοδολογία ατομικής παρεμβολής της παραμέτρου θέσης έχει τα χαμηλότερα σφάλματα για IDW=3, με μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) 8,52, μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE) 0,16 και μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) 114,92. Με MAE 4,60, MAPE 0,26 και MSE 38,96 και IDW=2 η παράμετρος κλίμακας παρουσιάζει τα μικρότερα σφάλματα. Με IDW=2 έχει επίσης τις καλύτερες επιδόσεις η παράμετρος σχήματος, με μέσο απόλυτο σφάλμα 0,1399, μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα 1,5532 και μέσο τετραγωνικό σφάλμα 0,0301. Τα σφάλματα είναι συνήθως μεγαλύτερα στο ομαδικό σενάριο- ωστόσο, η μεγαλύτερες τιμές βάρους της IDW μπορεί να επιφέρει μείωση αυτών των σφαλμάτων.

Με MAE 10,03, MAPE 0,19 και MSE 154,55, και IDW=5 επιτυγχάνει τα χαμηλότερα δυνατά σφάλματα για τη μεταβλητή θέσης Παρόμοια με το προηγούμενο παράδειγμα, η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται με IDW=5 για την παράμετρο κλίμακας με MAE 6,62, MAPE 0,34 και MSE 68,21. Η παράμετρος σχήματος, από την άλλη πλευρά, παρουσιάζει μικρή μεταβολή στις διάφορες δυνάμεις της IDW, με το MAE να είναι το χαμηλότερο στο 0,1661 όταν IDW=3 και το MSE να είναι το χαμηλότερο στο 0,0440 όταν IDW=4. Οι παράμετροι δύναμης IDW μειώνουν τα σφάλματα για το ομαδικό σενάριο, ιδίως για την παράμετρο θέσης και κλίμακας, ενώ οι χαμηλότερες τιμές παραμέτρου δύναμης έχουμε μικρότερα σφάλματα στη μεθοδολογία ατομικής παρεμβολής. Εξαίρεση αποτελεί η παράμετρος θέσης όπου το μικρότερο σφάλμα παρουσιάζεται για παράμετρο βάρους IDW=3.



Εικόνα 11. Θηκογράμματα των χωρικά παρεμβαλλόμενων παραμέτρων της κατανομής GEV στο σύνολό τους (παράμετρος θέσης -πάνω, παράμετρος κλίμακας- μέση, παράμετρος σχήματος κάτω) σε σχέση με το θηκόγραμμα(πρώτο σε κάθε σχήμα) των παραμέτρων που προέκυψε από την προσαρμογή της ίδιας κατανομής.

Συμπεράσματα

Η χωρική ετερογένεια και οι αβεβαιότητες της υδρολογικής ανάλυσης καθιστούν δύσκολή την χωρική επέκταση υδρολογικών μεταβλητών, διαδικασία απαραίτητη καθώς όργανα μέτρησης για διάφορους λόγους δεν επαρκούν. Η μελέτη ποσοτικοποιεί την αβεβαιότητα των παραμέτρων της κατανομής Generalized Extreme Value (GEV) και κατά την χωρική επέκταση αυτών με τη μέθοδο της αντίστροφης σταθμισμένης απόστασης (IDW). Στην αρχή παρουσιάστηκε η αβεβαιότητα δειγματοληψίας με την μέθοδο Bootstrap. Το τυπικό σφάλμα ποικίλλει ανά σταθμό ανάλογα με το μέγεθος του δείγματος. Ένα μοντέλο γραμμικής παρεμβολής που προσαρμόστηκε στα τυπικά σφάλματα αποκαλύπτει μια σαφή αρνητική τάση για τις παραμέτρους θέσης, κλίμακας και σχήματος σε σχέση με τον αρχικό αριθμό του δείγματος δεδομένων.

Η αβεβαιότητα της χωρικής παρεμβολής εξετάστηκε με βάση τη μέθοδο IDW για διαφορετικές βαρύτητες. Οι μεθοδολογίες που προτάθηκαν είναι δυο έτσι ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος που έγινε η παρεμβολή. Τα μέτρα σφάλματος που εφαρμόστηκαν (MAE, MAPE, MSE) δείχνουν ότι, για το ατομικό σενάριο, οι μικρές τιμές της παραμέτρου δύναμης στην IDW οδηγούν γενικά σε καλύτερες επιδόσεις, όπου τα χαμηλότερα σφάλματα παρατηρούνται στις τιμές IDW=2 και IDW=3 για τη παράμετρο θέσης. Αντίθετα, στο σενάριο ομαδικής παρεμβολής, τα σφάλματα είναι σταθερά υψηλότερα, αλλά η αύξηση της παραμέτρου δύναμης IDW από 2 σε 5 μειώνει σημαντικά. Συνολικά, το ατομικό σενάριο παρεμβολής αποδίδει καλύτερα σε χαμηλότερες παραμέτρους δύναμης IDW, ενώ το ομαδικό σενάριο επωφελείται από υψηλότερες δυνάμεις IDW. Τα ευρήματα της μελέτης αποσκοπούν στο να τονιστεί η αναγκαιότητα ποσοτικού προσδιορισμού της αβεβαιότητας για τη βελτίωση των υδρολογικών προγνώσεων και της λήψης αποφάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, οι ερευνητές και οι επαγγελματίες μηχανικοί μπορούν να μειώσουν τους κινδύνους από ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα.

Βιβλιογραφία

- Caruso, C., Quarta, F. (1998). Interpolation methods comparison. *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 35, No. 12, pp. 109–126.
- Cavanaugh, N.R., Gershunov, A., Panorska, A.K., Kozubowski, T.J. (2015). The probability distribution of intense daily precipitation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 5, pp. 1560–1567.
- Coles, S. (2013). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer Science & Business Media.
- Diop, A., Deme, E.H. (2021). Parametric bootstrapping in a generalized extreme value regression model for binary response. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.00489>
- Efron, B., Tibshirani, R.J. (1994). *An Introduction to the Bootstrap*. CRC Press.
- Gado, T.A., 2020. Statistical Behavior of Rainfall in Egypt, in: Negm, A.M. (Ed.), *Flash Floods in Egypt, Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer International Publishing, Cham, pp. 13–30. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29635-3_2
- Gocic, M., Velimirovic, L., Stankovic, M., Trajkovic, S. (2021). Determining the best fitting distribution of annual precipitation data in Serbia using L-moments method. *Earth Science Informatics*, Vol. 14, pp. 633–644.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, Vol. 228, No. 1–2, pp. 113–129.

- Gründemann, G.J., Werner, M., Veldkamp, T.I.E. (2018). The potential of global reanalysis datasets in identifying flood events in Southern Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 22, No. 9, pp. 4667-4683.
- Gründemann, G.J., Zorzetto, E., Beck, H.E., Schleiss, M., van de Giesen, N., Marani, M., van der Ent, R.J. (2023). Extreme precipitation return levels for multiple durations on a global scale. *Journal of Hydrology*, Vol. 621, 129558.
- Gu, X., Ye, L., Xin, Q., Zhang, C., Zeng, F., Nerantzaki, S.D., Papalexiou, S.M., (2022). Extreme Precipitation in China: A Review on Statistical Methods and Applications. *Advances in Water Resources*, Vol. 163, 104144.
- Hailegeorgis, T.T., Alfredsen, K., 2017. Analyses of extreme precipitation and runoff events including uncertainties and reliability in design and management of urban water infrastructure. *Journal of Hydrology*, Vol. 544, pp. 290–305.
- Hosking, J.R.M. (1990). L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, Vol. 52, No. 1, pp. 105-124.
- Hossain, I., Imteaz, M., Khastagir, A. (2021). Study of Various Techniques for Estimating the Generalised Extreme Value Distribution Parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1067, 012065. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1067/1/012065>
- Hossain, I., Khastagir, A., Aktar, M.N., Imteaz, M.A., Huda, D., Rasel, H.M. (2022). Comparison of estimation techniques for generalised extreme value (GEV) distribution parameters: a case study with Tasmanian rainfall. *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 19, 7737-7750.
- Hu, Q., Li, Z., Wang, L., Huang, Y., Wang, Y., Li, L. (2019). Rainfall spatial estimations: A review from spatial interpolation to multi-source data merging. *Water*, 11(3), 579. <https://doi.org/10.3390/w11030579>
- Kumar, N., Patel, P., Singh, S., Goyal, M.K. (2023). Understanding non-stationarity of hydroclimatic extremes and resilience in Peninsular catchments, India. *Scientific Reports*, Vol. 13, 12524.
- Lanza, L.G., Ramírez, J.A., Todini, E. (2001). Stochastic rainfall interpolation and downscaling. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 5, pp. 139-143.
- Li, J. (2008). A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists.
- Li, J., Heap, A.D., 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, Vol. 6, No. 3-4, pp. 228-241.
- Loukas, A., Mylopoulos, N., Vasiliades, L. (2007). A Modeling System for the Evaluation of Water Resources Management Strategies in Thessaly, Greece. *Water Resources Management*, Vol. 21, 1673-1702.
- Moges, E., Demissie, Y., Larsen, L., Yassin, F. (2020). Review: Sources of Hydrological Model Uncertainties and Advances in Their Analysis. *Water*, 13(1), 28.
- Montanari, A. (2007). What do we mean by ‘uncertainty’? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes*, Vol. 21, No. 6, pp. 841-845.
- Nerantzaki, S.D., Papalexiou, S.M. (2019). Tails of extremes: Advancing a graphical method and harnessing big data to assess precipitation extremes. *Advances in Water Resources*, Vol. 134, 103448.
- Papalexiou, S.M., Koutsoyiannis, D. (2013). Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall. *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 1, pp. 187-201.
- Tung, Y.-K., Yen, B.C. (2005). *Hydrosystems Engineering Uncertainty Analysis*. <https://doi.org/10.1036/0071467084>

- Uboldi, F., Sulis, A.N., Lussana, C., Cislighi, M., Russo, M. (2014). A spatial bootstrap technique for parameter estimation of rainfall annual maxima distribution. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 18, No. 3, pp. 981-995.
- Vivekanandan, N., Srishailam, C., Patil, R.G. (2023). Intercomparison of MoM, MLM and LMO estimators of probability distributions for assessment of extreme rainfall, in: Timbadiya, P.V., Singh, V.P., Sharma, P.J. (Eds.), *Climate Change Impact on Water Resources, Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Nature, Singapore, pp. 423–436. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8524-9_34

**ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΠΟΤΑΜΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ
ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ
ΠΟΤΑΜΟΥ, ΘΕΣΣΑΛΙΑ.**

Αθανάσιος Καραντάκης

Τοπογράφος

Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης

e-mail: Thaner4@yahoo.gr

Αθανάσιος Λουκάς

Καθηγητής

Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης

e-mail: agloukas@topo.auth.gr

Δημήτριος Φωτάκης

Κύριος Ερευνητής

Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών, Ε.Λ.Γ.Ο Δήμητρα

e-mail: fotakis@fri.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι παραποτάμιες ζώνες αποτελούν οικοσυστήματα με πολλαπλές και πολύτιμες λειτουργίες. Η γειτνίασή τους με νερό τις καθιστά ζωτικής σημασίας περιοχές. Στην Ελλάδα, παρόλο που από το έδαφός της διέρχονται δίκτυα ποταμών χιλιάδων χιλιομέτρων, δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία σε αυτές τις περιοχές και δεν έχουν γίνει συλλογικές μελέτες οριοθέτησής τους. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην οριοθέτησή τους, εστιάζοντας στη μέθοδο οριοθέτησης που αναδεικνύει τη επιρροή που έχει η διάβρωση του εδάφους στον καθορισμό της έκτασης των περιοχών αυτών. Εφαρμόζεται η μέθοδος που έχει προταθεί από τους Brown και συνεργάτες του (Brown et al, 1987) καθώς και δύο τροποποιήσεις της μεθόδου (ημι-κατανεμημένη και κατανεμημένη). Σκοπός της εργασίας είναι η βέλτιστη προσαρμογή και αντιστοίχιση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στο έδαφος των ΗΠΑ, στα αντίστοιχα δεδομένα της περιοχής μελέτης, δηλαδή της λεκάνης απορροής του Πηνειού Ποταμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η έκταση οριοθέτησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σκοπό της κάθε μεθόδου και τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί. Για την εκτίμηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων κρίθηκε αναγκαίο να βρεθεί μια μέθοδος σύγκρισης. Η μέθοδος σύγκρισης είναι αυτή του προγράμματος Copernicus το οποίο έχει δημιουργήσει παραποτάμιες ζώνες μέσω δορυφορικών δεδομένων πολύ υψηλής ανάλυσης για ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Από την σύγκριση εξήχθησαν πολύτιμα συμπεράσματα για την περιοχή της λεκάνης απορροής του Πηνειού Ποταμού.

Λέξεις κλειδιά: Λεκάνη απορροής Πηνειού Ποταμού, Παραποτάμιες περιοχές, Μέθοδος οριοθέτησης, Σκοπός κάθε μεθόδου, πρόγραμμα Copernicus.

Εισαγωγή

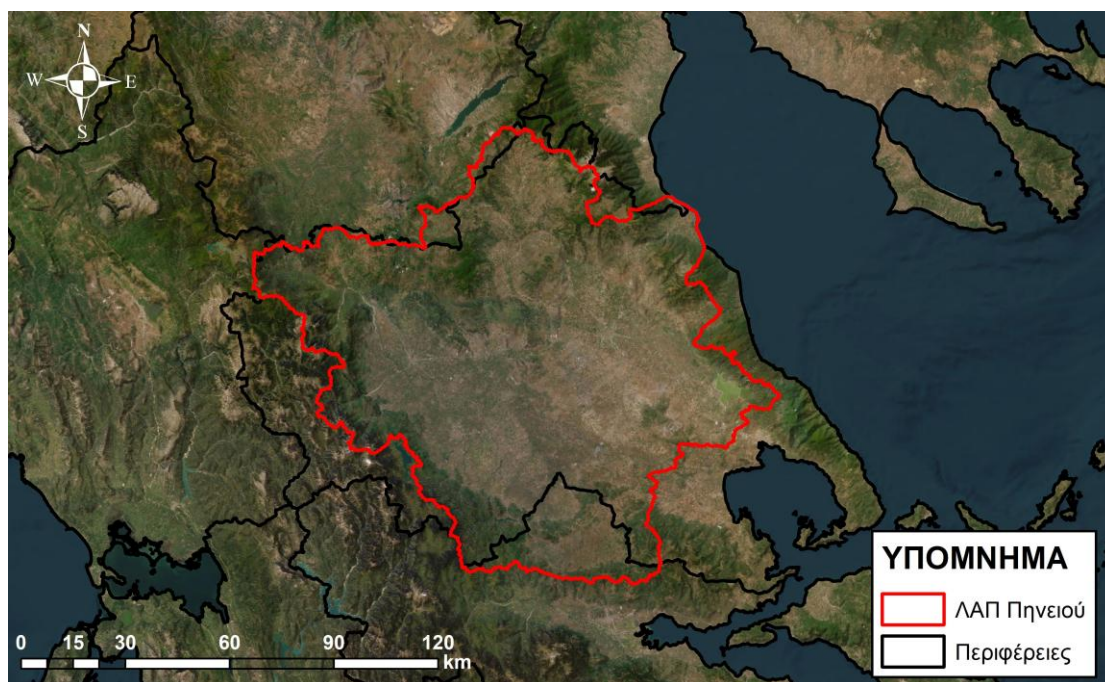
Ο όρος "Riparian" προέρχεται από τη λατινική λέξη *ripa*, που σημαίνει όχθη ή ακτή. (Naiman et al. 1997). Οι παραποτάμιες ζώνες αποτελούν περιοχές όπου συντελείται η αλληλεπίδραση μεταξύ του χερσαίου και του υδάτινου περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να υπάρχει συνάντηση διακριτών βιοκοινοτήτων. Αναπτύσσουν και διατηρούν μια εξαιρετικά πλούσια και διαφοροποιημένη χλωρίδα, ενώ παράλληλα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην παροχή πολυάριθμων λειτουργιών που υποστηρίζουν τη βιωσιμότητα του οικοσυστήματος. (Holmes et al. 2011). Εμπλέκονται σε διάφορες γεωμορφολογικές, υδρολογικές και οικολογικές διεργασίες (Tabacchi et al. 1998), μειώνοντας τον κίνδυνο πλημμύρας και βελτιώνοντας την διαθεσιμότητα και την ποιότητα του νερού. Παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της φυσικής ισορροπίας της λεκάνης και παρέχουν προστασία στους φυσικούς διαδρόμους του υδατορεύματος, διατηρώντας τα ποιοτικά υδάτινα ενδιαίτηματα και κάποια ενδιαίτηματα άγριας ζωής (Gregory et al. 1991). Επίσης οι περιοχές αυτές αυξάνουν τη σταθερότητα των πρανών και ρυθμίζουν τη θερμοκρασία του νερού. Αποτελούν ωστόσο απειλούμενες περιοχές λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και των παρακείμενων χρήσεων γης. Αυτές μπορεί να είναι είτε γεωργικές και βιομηχανικές, είτε χρήσης γης για αναψυχή (Wenger 1999, Hawes et al. 2005, Verry et al. 2004, Stutter et al. 2020, Eishoei et al. 2022, Augusto et al. 2022).

Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί και εφαρμόσκει για την οριοθέτηση των παραποτάμιων περιοχών. Αυτές ποικίλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής, τα κριτήρια και τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη για τη χωρική ανάλυση. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι μεθοδολογίες κινούνται σε δύο (2) άξονες. Ο πρώτος αφορά στην πιο απλή μέθοδο που καθορίζει σταθερό παραποτάμιο πλάτος. Ωστόσο αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη μόνο το υδατόρευμα και δεν συνυπολογίζει το υπόλοιπο περιβάλλον, δηλαδή την κρίσιμη γεωμορφολογία του εδάφους, τη σχετική βλάστηση και τα εδαφικά χαρακτηριστικά (Sinan Abood, 2011, Fischer et al. 2001, Palik et al. 2004, Abood et al. 2012). Ο δεύτερος άξονας αφορά στις μεθόδους που καθορίζουν μεταβλητό πλάτος εκατέρωθεν των ποταμών λαμβάνοντας υπόψη και γεωμορφολογικά και εδαφικά χαρακτηριστικά.

Σε αυτό το άρθρο αναπτύσσεται και αναλύεται η μέθοδος που προτάθηκε από τους Brown et al. 1987. Στόχος είναι η ανάδειξη της επιρροής που έχει η διάβρωση στον καθορισμό της έκτασης των παρόχθιων ζωνών με γνώμονα τη διατήρηση της υγείας του εδάφους. Αναπτύχθηκαν κάποιοι κανονισμοί και προτάσεις για την οριοθέτηση παραποτάμιων ζωνών σε λεκάνες απορροής των Ηνωμένων Πολιτειών συνδυάζοντας δύο μεταβλητές, την κλίση και τον συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους. Όλα τα στοιχεία και δεδομένα αναλύθηκαν λεπτομερώς και προσαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης έτσι ώστε να προκύψουν οι παρόχθιες ζώνες στη λεκάνη απορροής του Πηνειού Ποταμού. Για την εκτίμηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων κρίθηκε αναγκαίο να βρεθεί μια μέθοδος σύγκρισης. Η μέθοδος σύγκρισης είναι αυτή του προγράμματος Copernicus το οποίο δημιούργησε παραποτάμιες ζώνες μέσω δορυφορικών δεδομένων πολύ υψηλής ανάλυσης για ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Ορισμένα από αυτά τα δεδομένα είναι δορυφορικές εικόνες με χωρική ανάλυση 2,5 m. Έγινε αναλυτική σύγκριση ανά τάξη μεγέθους ποταμών χρησιμοποιώντας το σύστημα ταξινόμησης Strahler. Από την σύγκριση, εξήχθησαν πολύτιμα συμπεράσματα για την ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Πηνειού Ποταμού.

Περιοχή μελέτης

Η Ελλάδα αποτελείται από 14 Υδατικά Διαμερίσματα. Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας καταλαμβάνει το ανατολικό τμήμα του ηπειρωτικού κορμού της Ελλάδας. Σημαντικό κομμάτι της Θεσσαλίας αποτελεί η λεκάνη απορροής του Πηνειού Ποταμού η οποία αποτελεί την περιοχή μελέτης της εργασίας (Γκίκας, ΔΠΘ, 2015).

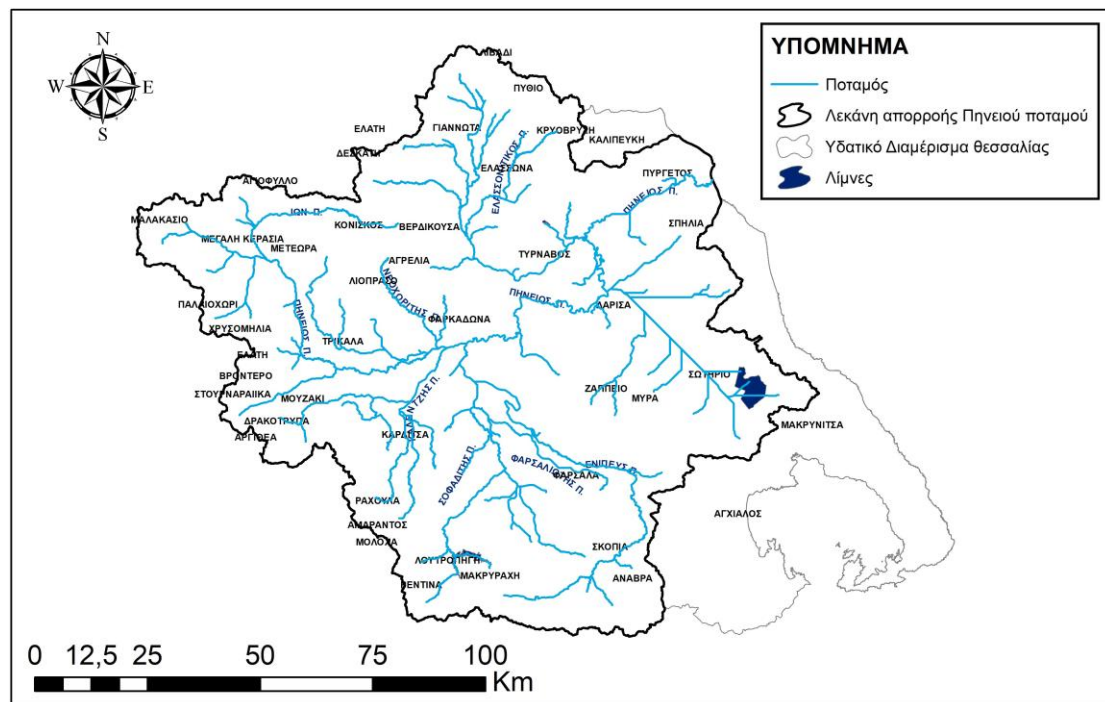


Σχήμα 1. Λεκάνη απορροής Πηνειού Ποταμού.

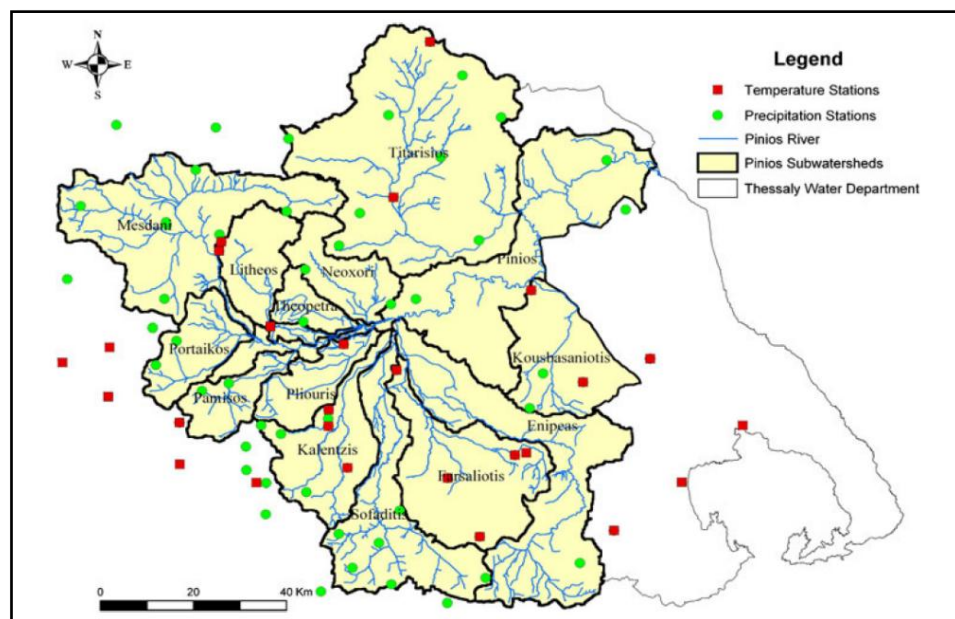
Η λεκάνη απορροής του Πηνειού Ποταμού είναι μία από τις μεγαλύτερες υδρογραφικές λεκάνες της Ελλάδας, με έκταση περίπου 10.855 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Είναι μια πεδινή περιοχή που περιβάλλεται από όρη με μεγάλο υψόμετρο. Η πεδιάδα της καταλαμβάνει έκταση περίπου 4.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα και αποτελεί μια από τις πιο παραγωγικές περιοχές της Ελλάδας. Τα κύρια προϊόντα που καλλιεργούνται είναι το βαμβάκι, το σιτάρι και ο αραβόσιτος ενώ στους πρόποδες των ανατολικών ορέων καλλιεργείται η μηλιά, η βερικοκιά, η κερασιά, η ελιά και τα σταφύλια (Loukas A., Vasiliades L. 2011).

Ο Πηνειός είναι το 3^ο μεγαλύτερο ελληνικό ποτάμι μετά τον Αλιάκμονα και τον Αχελώο. Πηγάζει από τις δυτικές πλαγιές της νότιας Πίνδου στα όρια των νομών Ιωαννίνων και Τρικάλων. Οι παραπόταμοι του Πηνειού που βρίσκονται στη βόρεια πλευρά της λεκάνης είναι ο Τιταρήσιος, ο Νεοχωρίτης, ο Ληθαίος και ο παραπόταμος Μουργκάνι. Δυτικά – βορειοδυτικά βρίσκονται οι ποταμοί Μαλακασιώτης, Κλεινοβίτικος, Πορταϊκός, Πάμισος και ένα κομμάτι του Αχελώου, το οποίο όμως δε συμβάλλει στη λεκάνη απορροής του Πηνειού Ποταμού. Νότια της Θεσσαλίας ο Πηνειός δέχεται τα νερά των παραποτάμων Φαρσαλιώτη, Σοφαδίτη, Ενιππέα, Καλέτζη και Καραμπάλη (Μαντούζα, ΑΠΘ, 2008).

Οι κύριες υπολεκάνες που σχηματίζουν οι παραπόταμοι του Πηνειού φαίνονται στον Πίνακα 1 (ΥΠ.Α.Α.Τ.).



Σχήμα 2. Λεκάνη απορροής Πηνειού Ποταμού.



Σχήμα 3. Υπολεκάνες απορροής Πηνειού Ποταμού (Vasiliadis L., Loukas A., 2011).

Πίνακας 1. Κύριες υπολεκάνες Θεσσαλίας (ΥΠ.Α.Α.Τ.)

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ
Τιταρήσιου
Πορταϊκού
Πάμισου

Καλέντζη
Σοφαδίτη
Φαρσαλιώτη
Ενιπέα

Σε αυτές μπορούν να προστεθούν και οι υπολεκάνες: Ληθαίος, Νεοχώρι, Μεσδάνι, Πλιούρης, Θεόπετρα (Vasiliadis L., Loukas A., 2011).

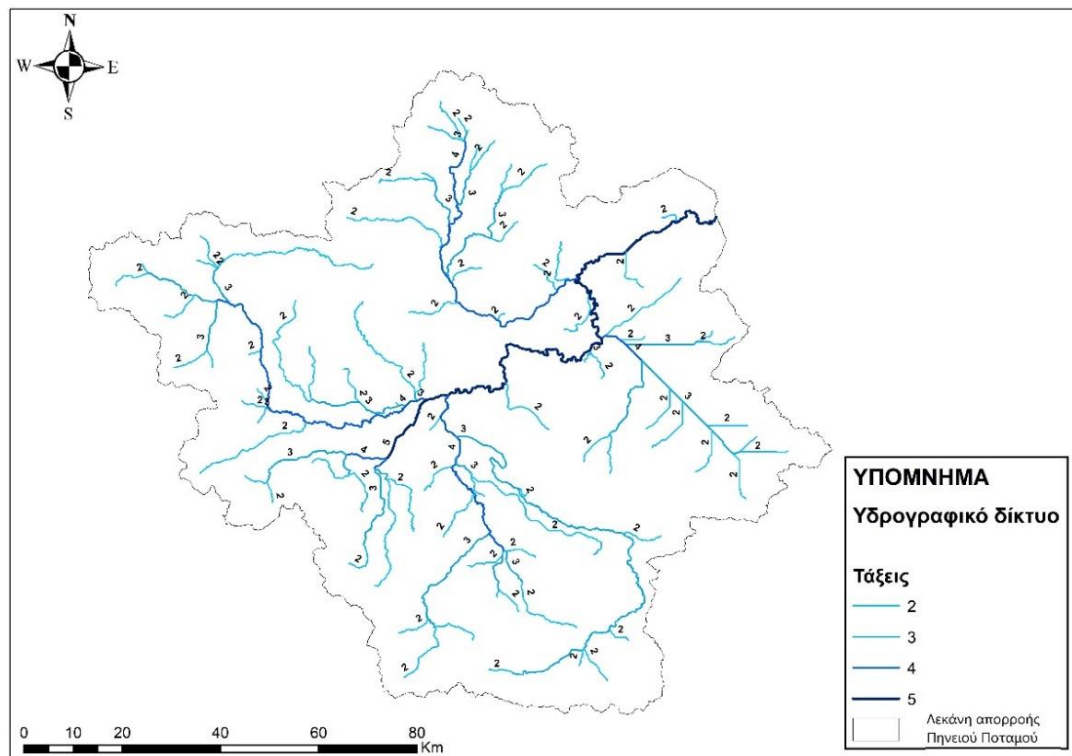
Μέθοδος

Ταξινόμηση του Υδρογραφικού Δικτύου με τη Μέθοδο Strahler

Έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι ταξινόμησης – αρίθμησης των υδρογραφικών δικτύων από τους επιστήμονες. Στην παρούσα εργασία η αρίθμηση του υδρογραφικού δικτύου έγινε με τη μέθοδο Strahler. Σύμφωνα με το σύστημα «από πάνω προς τα κάτω» που επινόησε ο Strahler, οι ποταμοί 1ης τάξης είναι μικροί ποταμοί. Αν συγχωνευθούν δύο ποταμοί ίδιας τάξης αυτός που προκύπτει λαμβάνει έναν αριθμό μεγαλύτερο ενώ αν συγχωνευθούν δύο ποταμοί με διαφορετική τάξη, αυτός που προκύπτει λαμβάνει έναν αριθμό μεγαλύτερο και από τους δύο. Συνεπώς όσο η αρίθμηση μεγαλώνει τόσο μεγαλύτερος γίνεται και ο ποταμός (ο όγκος του). Η σειρά των ποταμών είναι σημαντική πτυχή μιας λεκάνης απορροής.

Ποτάμιο Δίκτυο

Το ποτάμιο δίκτυο του Πηνειού που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε από το DEM στο περιβάλλον του GIS. Αφαιρέθηκαν τα ρέματα 1ης τάξης (μικρά υδατορρεύματα) και οι τάξεις που έμειναν είναι 4 (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Υδρογραφικό δίκτυο Πηνειού (Τάξη υδατορρευμάτων 2-5).

Διάβρωση Εδάφους

Η μελέτη που έκανε ο Brown και οι συνεργάτες του το 1987 (Brown et al., 1987), είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μεταβλητού πλάτους παραποτάμιων περιοχών μέσω μιας εξίσωσης που συνδυάζει δύο μεταβλητές, την κλίση και τον συντελεστή διαβρωσιμότητας. Στόχος ήταν η ανάδειξη της επίδρασης της διάβρωσης στον καθορισμό της έκτασης των περιοχών αυτών, με βασική προτεραιότητα τη διατήρηση της ποιότητας του εδάφους. Αυτή επιτυγχάνεται με την ενίσχυση της σταθερότητας των πρανών και την αντίστοιχη μείωση της διάβρωσης. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας και ανάλυση των μεταβλητών ακολουθεί παρακάτω στην υποενότητα.

Μέθοδος Brown et al. 1987 – Τροποποιημένη

Σύμφωνα με τον Hawes et al.(2005), τα πιο σύνθετα μοντέλα λαμβάνουν υπόψην πολλαπλούς παράγοντες, όπως η κλίση, ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους και οι ρυθμοί διήθησης. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων αποτελεί η πρόταση του Brown σύμφωνα με την οποία ισχύει:

$$\text{Παραποτάμιο Πλάτος} = \left(\frac{\text{Μέση κλίση Εδάφους}}{\text{Συντελεστής Διαβρωσιμότητας } K} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Δηλαδή το πλάτος των παραποτάμιων περιοχών υπολογίζεται από τη ρίζα της διαίρεσης της μέσης κλίσης της λεκάνης με τον αντίστοιχο συντελεστή διαβρωσιμότητας.

Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας K εκφράζει την ευαισθησία του εδάφους στη διάβρωση (πόσο εύκολα μπορεί να διαβρωθεί ένα έδαφος) και σχετίζεται με τις ιδιότητες αυτού, όπως για παράδειγμα την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, την υφή, τη δομή και την διαπερατότητα του (κοκκομετρική σύσταση). Ο συντελεστής K είναι μια συγκεντρωτική παράμετρος που αντιπροσωπεύει μια ολοκληρωμένη ετήσια τιμή του εδαφικού προφίλ σε συσχέτιση με τη διαδικασία αποκόλλησης του εδάφους και της μεταφοράς του από τις σταγόνες της βροχής και την επιφανειακή απορροή.

Ο K μετριέται σε $t \ ha \ h \ ha^{-1} \ MJ^{-1} \ mm^{-1}$ όπου t : τόνος, ha : εκτάριο= $10000 \ m^2$ ή 10 στρέμματα, h : σταθερά, MJ : μέγκα τζάουλ = $10^6 \ J$ που είναι μονάδα μέτρησης της ενέργειας και mm : χιλιοστά. Ο μέσος συντελεστής K για την Ευρώπη εκτιμήθηκε σε $0,032 \ t \ ha \ h \ ha^{-1} \ MJ^{-1} \ mm^{-1}$ με τυπική απόκλιση $0,009 \ t \ ha \ h \ ha^{-1} \ MJ^{-1} \ mm^{-1}$ (Ευρωπαϊκή Επιτροπή – Ευρωπαϊκό Κέντρο Δεδομένων Εδάφους - ESDAC).

Σκοπός της Μεθόδου – Διάβρωση και Παραποτάμιες Περιοχές

Σκοπός της μεθόδου του Brown είναι η οριοθέτηση των παραποτάμιων περιοχών χρησιμοποιώντας ως βασικό κριτήριο τη διάβρωση του εδάφους, και η ανάδειξη της επιρροής που έχει η διάβρωση στον καθορισμό της έκτασης των περιοχών αυτών. Όπως προαναφέρθηκε ζητούμενο είναι η διατήρηση της ποιότητας του εδάφους. Η ποιότητα του εδάφους αναφέρεται στην ικανότητα του εδάφους να υποστηρίζει φυτική ανάπτυξη, να διατηρεί την παραγωγικότητά του, να διασφαλίζει την οικολογική ισορροπία και να παρέχει υπηρεσίες προς το περιβάλλον και τους οργανισμούς. Επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η γονιμότητα, η δομή, η αποστράγγιση, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και η μικροβιακή δραστηριότητα. Ένα «υγιές έδαφος» είναι σταθερό, διατηρεί υγρασία,

θρεπτικά στοιχεία, και είναι ανθεκτικό στη διάβρωση και την υποβάθμιση.

Η διάβρωση του εδάφους στις παραποτάμιες περιοχές αναφέρεται στη διαδικασία της απόπλυσης ή διάβρωσης του εδάφους από τις όχθες των ποταμών, των ρεμάτων και άλλων υδάτινων σωμάτων. Μπορεί να προκληθεί από ένα συνδυασμό φυσικών και ανθρώπινων παραγόντων όπως:

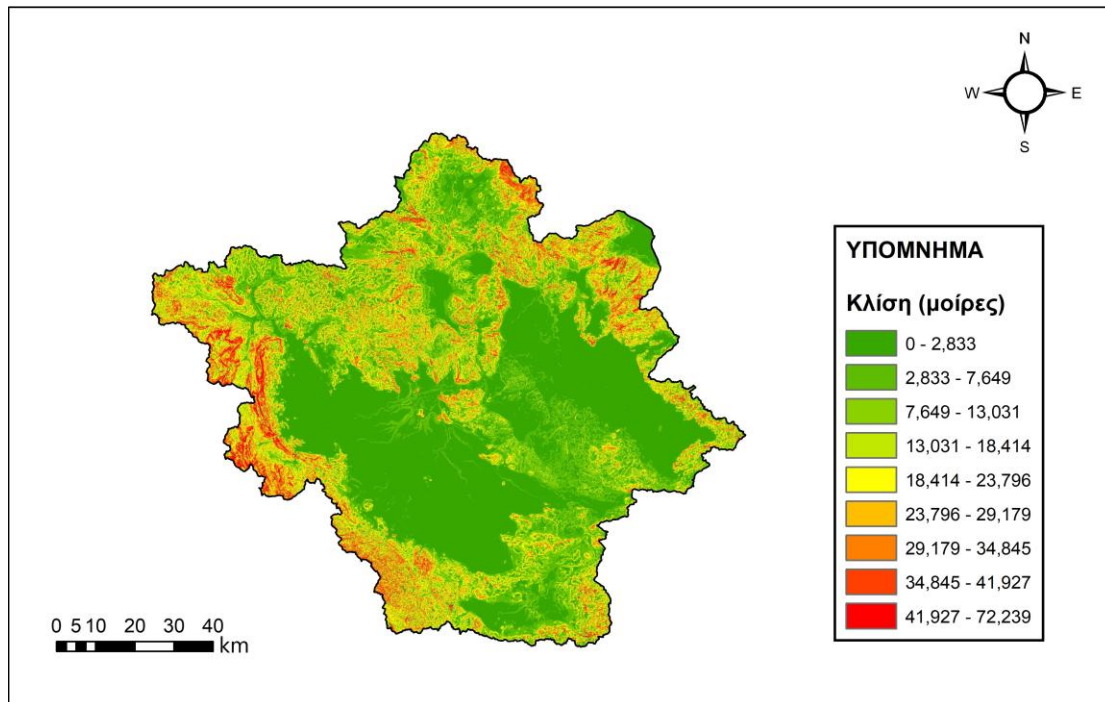
- 1) Φαινόμενα όπως έντονες βροχοπτώσεις, λιώσιμο χιονιού κατά τα οποία προκαλούνται πλημμύρες που μπορούν να μεταφέρουν και να μετακινήσουν σωματίδια εδάφους.
- 2) Αφαίρεση της βλάστησης: Η αποψίλωση ή η διατάραξη της παρόχθιας βλάστησης μπορεί να μειώσει τη σταθεροποιητική επίδραση των ριζών των φυτών.
- 3) Αστική ανάπτυξη: Οι κατασκευαστικές δραστηριότητες και οι αδιαπέραστες επιφάνειες μπορούν να αυξήσουν την απορροή και τη διάβρωση.
- 4) Γεωργικές πρακτικές: Η υπερβόσκηση, η κατεργασία του εδάφους και η φύτευση πολύ κοντά σε υδάτινα σώματα μπορεί να οδηγήσουν σε διάβρωση του εδάφους.
- 5) Οι ανθρωπογενείς αλλοιώσεις σε ποταμούς και ρέματα μπορούν να διαταράξουν τις φυσικές διαδικασίες μεταφοράς ιζημάτων.

Η διάβρωση του εδάφους στις παραποτάμιες περιοχές μπορεί να έχει πολλές αρνητικές επιπτώσεις, όπως:

- 1) Ιζηματοποίηση των υδάτινων σωμάτων: Αυτό οδηγεί σε μειωμένη ποιότητα νερού και αυξημένο κίνδυνο πλημμύρας.
- 2) Απώλεια ενδιαμιγμάτων: Η διάβρωση του εδάφους μπορεί να υποβαθμίσει το βιότοπο των παρόχθιων φυτών και της άγριας ζωής, οδηγώντας σε μείωση της βιοποικιλότητας.
- 3) Μειωμένη ποιότητα νερού: Το διαβρωμένο έδαφος συχνά μεταφέρει ρύπους και θρεπτικά συστατικά που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τα υδάτινα οικοσυστήματα.

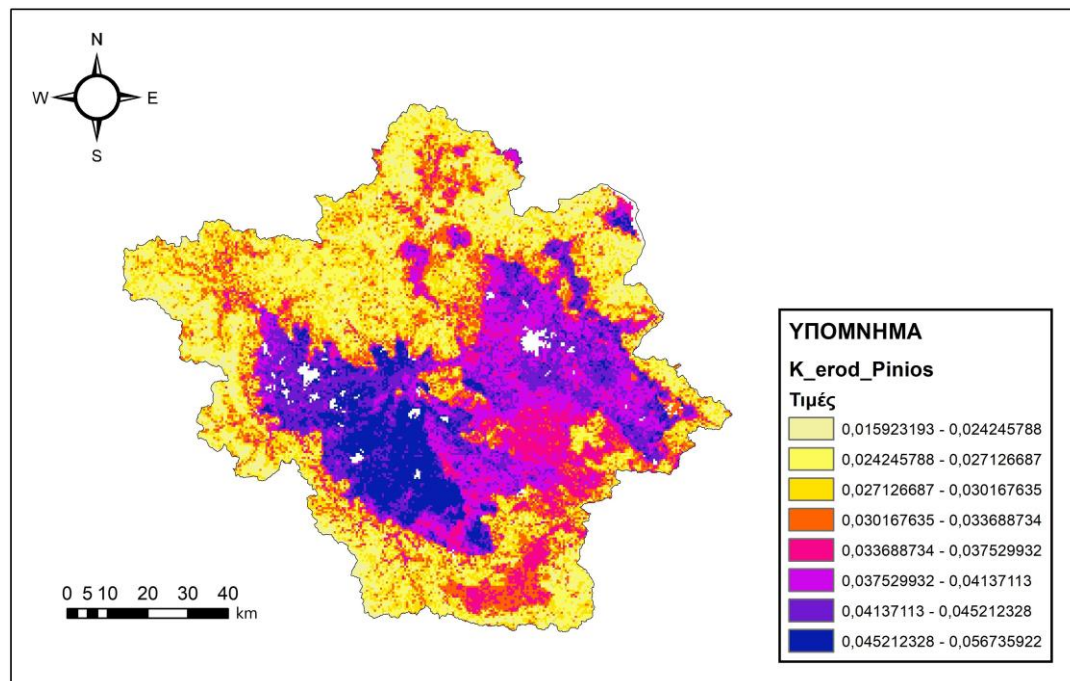
Συνολικά, η κατανόηση και η αντιμετώπιση της διάβρωσης του εδάφους στις παρόχθιες περιοχές είναι απαραίτητη για τη διατήρηση υγιών υδάτινων οικοσυστημάτων, τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και τη διασφάλιση της ποιότητας των υδάτων. Απαιτείται συνδυασμός της διαχείρισης των φυσικών πόρων, των προσπαθειών διατήρησης και των υπεύθυνων πρακτικών χρήσης γης.

Περνώντας στην περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής, αρχικά μελετήθηκε η μία εκ των δύο (2) μεταβλητών της εξίσωσης δηλαδή η κλίση του εδάφους η οποία βρέθηκε από το αντίστοιχο Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (DEM).



Σχήμα 5. Χάρτης κλίσεων του εδάφους στην περιοχή της λεκάνης απορροής Πηνειού Ποταμού (το DEM λήφθηκε από την Υπηρεσία παρακολούθησης της ξηράς CLMS του Προγράμματος Copernicus).

Παρατηρείται ότι οι όσο απομακρυνόμαστε από τα κεντρικά τμήματα της λεκάνης όπου υπάρχει ο Θεσσαλικός κάμπος, τόσο οι κλίσεις του εδάφους (σε μοίρες) αυξάνουν καθώς αυξάνεται και το υψόμετρο (κλίσεις με κόκκινη απόχρωση). Η δεύτερη παράμετρο της εξίσωσης (K), απεικονίζεται στον αντίστοιχο χάρτη της λεκάνης απορροής του Πηνειού Ποταμού.



Σχήμα 6. Χάρτης που απεικονίζει τον συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Πηνειού Ποταμού (Πρόγραμμα Copernicus της Ευρωπαϊκής Επιτροπής)

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται το ακριβώς αντίθετο σε σχέση με τις κλίσεις. Δηλαδή η διαβρωσιμότητα (K) έχει μεγάλες τιμές στο Θεσσαλικό κάμπο ενώ όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της λεκάνης οι τιμές αυτές μικραίνουν. Η διάβρωση του εδάφους και συνεπώς και ο συντελεστής K εξαρτώνται από τη δράση του βρόχινου νερού που μετασχηματίζεται σε απορροή ή στον αέρα (αιολική) ή στη συνδυασμένη δράση των δύο ή σε άλλα φυσικά στοιχεία (Μάρης Φ.Π., 2017). Η επιφανειακή απορροή έχει κατεύθυνση από τα μεγαλύτερα προς τα μικρότερα υψόμετρα. Και όπως είναι λογικό τα επιφανειακά νερά από τις τριγύρω ορεινές περιοχές συσσωρεύονται στις πεδινές περιοχές όπως είναι ο Θεσσαλικός κάμπος. Σε αυτές ακριβώς τις πεδινές περιοχές ο συντελεστής K αγγίζει τις μέγιστες τιμές του.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η λεκάνη απορροής Πηνειού Ποταμού είναι μια πολύ μεγάλη σε έκταση λεκάνη (10855 km²) και η μέση κλίση σε όλη την έκτασή της δεν είναι αντιπροσωπευτική. Συνεπώς θα εφαρμοστεί μια τροποποιημένη μέθοδος του Brown που χωρίζεται σε δύο εφαρμογές. Ουσιαστικά έγιναν δύο τροποποιήσεις όπου η 1^η είναι η πλήρως κατανεμημένη εφαρμογή και η 2^η είναι η ημικατανεμημένη ως προς την τάξη του υδατορρεύματος. Στόχος ήταν η μελέτη και ανάλυση της κλίσης της λεκάνης, για κάθε σημείο του εδάφους (1^η εφαρμογή) αλλά και ως προς την τάξη μεγέθους ποταμών (2^η εφαρμογή) ώστε να καλυφθούν πλήρως όλα τα ενδεχόμενα και να γίνει εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Και οι δύο συγκρίθηκαν με την αρχική αδρομερή εφαρμογή της πρότασης του Brown (μέση κλίση όλης της λεκάνης).

Περιγραφή Διαδικασίας – Πλήρως Κατανεμημένη Εφαρμογή

Στη πρώτη εφαρμογή χρησιμοποιείται η κλίση κάθε σημείου του εδάφους για τον προσδιορισμό του παραποτάμιου πλάτους. Δηλαδή ουσιαστικά ο τύπος:

$$\text{Παραποτάμιο Πλάτος} = \left(\frac{\text{Μέση κλίση Εδάφους}}{\text{Συντελεστής Διαβρωσιμότητας K}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

μετατρέπεται στον

$$\text{Παραποτάμιο Πλάτος} = \left(\frac{\text{Κλίση σε κάθε σημείο του Εδάφους}}{\text{Συντελεστής Διαβρωσιμότητας K}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

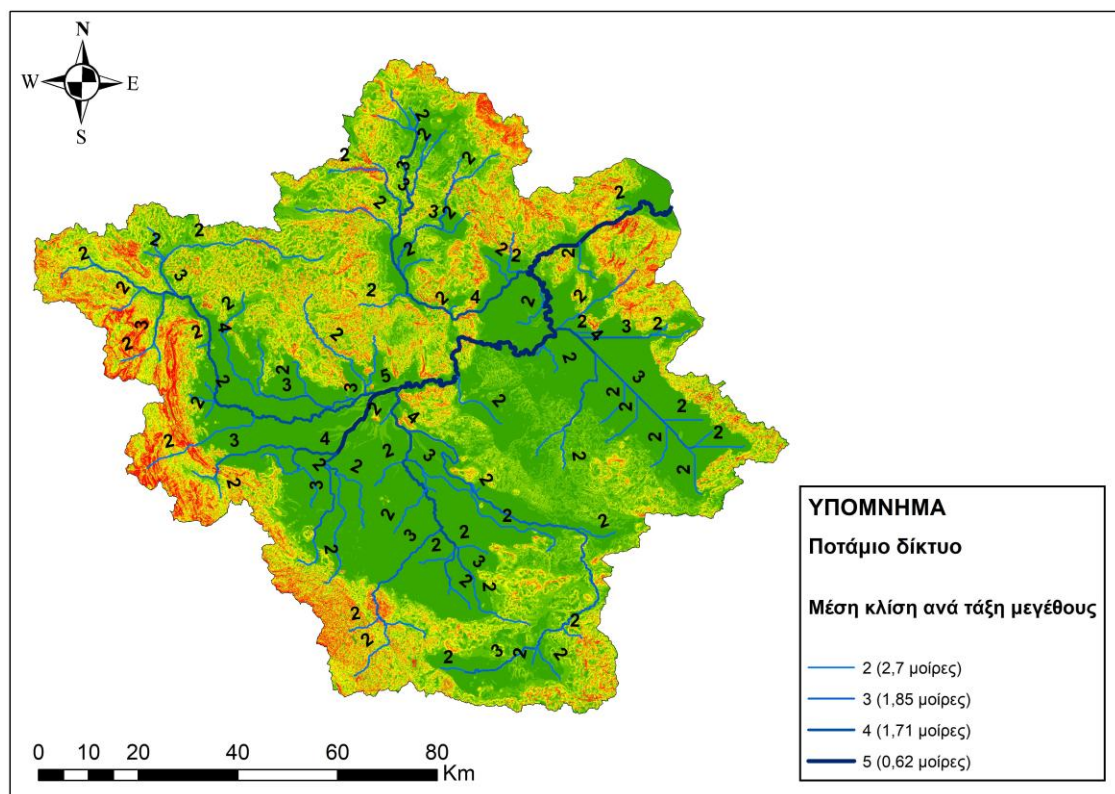
Όπου στον Συντελεστή Διαβρωσιμότητας K μπαίνουν οι τιμές του K που βρίσκονται σε κάθε φατνίο. Συνεπώς το πλάτος της παραποτάμιας περιοχής έχει μεγάλη ευαισθησία και αλλάζει συνεχώς από φατνίο σε φατνίο.

Ημικατανεμημένη Εφαρμογή

Στη 2^η εφαρμογή διαχωρίστηκε το ποτάμιο δίκτυο ανά τάξη μεγέθους υδατορρεύματος. Υπολογίστηκε η μέση κλίση σε κάθε τάξη (ακολουθείτε μια φυσική συνέπεια) και δημιουργήθηκε ξεχωριστά το αντίστοιχο παραποτάμιο πλάτος.

Πίνακας 2. Μέση κλίση ανά τάξη μεγέθους ποταμού.

Τάξη ποταμού	Μέση κλίση
2ης	2,7°
3ης	1,85°
4ης	1,71°
5ης	0,62°



Σχήμα 7. Ποτάμιο δίκτυο ανά τάξη μεγέθους στη λεκάνη απορροής του Πηνειού Ποταμού – Εφαρμογή 2.

Συνεπώς το παραποτάμιο πλάτος για κάθε τάξη μεγέθους διαμορφώνεται ως εξής:

$$(3) \quad \text{Παραποτάμιο Πλάτος (2η Τάξη υδατόρρευμα)} = \left(\frac{2,7}{\text{Συντελεστής Διαβρωσιμότητας } K} \right)^{1/2}$$

$$(4) \quad \text{Παραποτάμιο Πλάτος (3η Τάξη υδατόρρευμα)} = \left(\frac{1,85}{\text{Συντελεστής Διαβρωσιμότητας } K} \right)^{1/2}$$

$$(5) \quad \text{Παραποτάμιο Πλάτος (4η Τάξη υδατόρρευμα)} = \left(\frac{1,71}{\text{Συντελεστής Διαβρωσιμότητας } K} \right)^{1/2}$$

$$(6) \quad \text{Παραποτάμιο Πλάτος (5η Τάξη υδατόρρευμα)} = \left(\frac{0,62}{\text{Συντελεστής Διαβρωσιμότητας } K} \right)^{1/2}$$

Σε αυτή την εφαρμογή η μέση κλίση παραμένει σταθερή ανά τάξη και η παράμετρος που είναι μεταβλητή και αλλάζει είναι ο συντελεστής K .

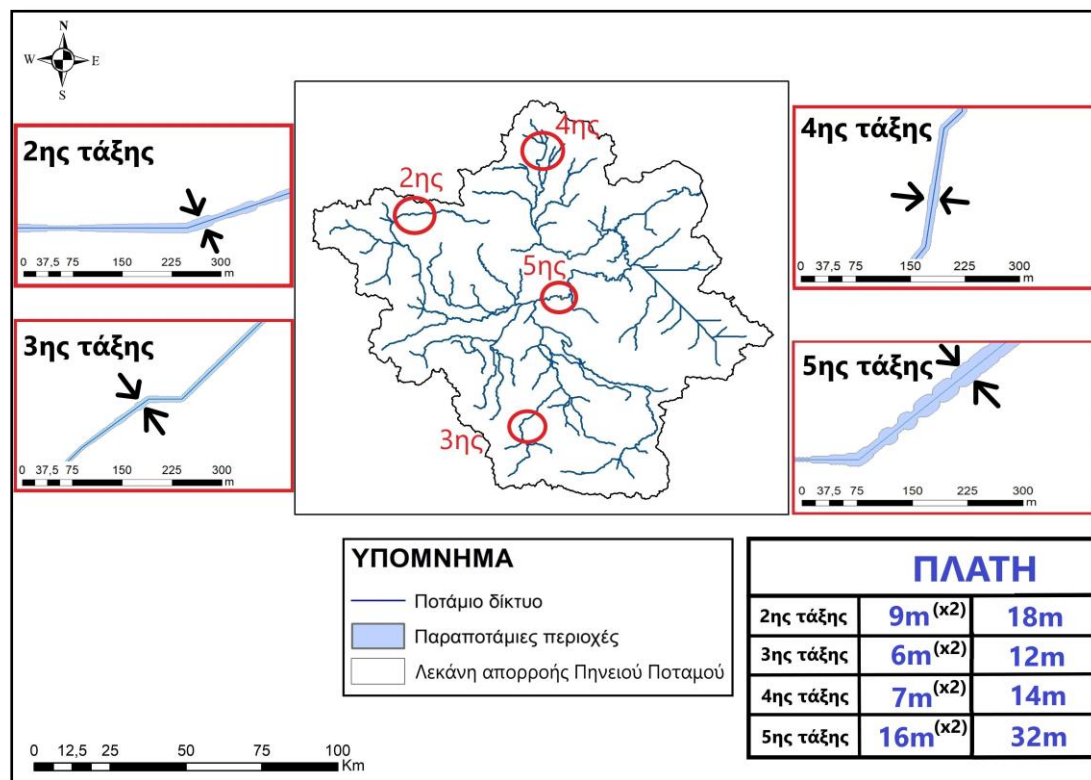
Συνενώνοντας τα επιμέρους υπολογιζόμενα παραποτάμια πλάτη των 4 τάξεων της λεκάνης, διαμορφώθηκε η τελική οριοθέτηση των παραποτάμιων ζωνών της ημι-κατανομημένης εφαρμογής της μεθόδου Brown.

Αποτελέσματα

Η διάβρωση του εδάφους παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό της έκτασης των παραποτάμιων περιοχών. Ζητούμενο πάντα στις περιοχές αυτές, είναι η αύξηση της σταθερότητας των πρανών με αντίστοιχη μείωση της διάβρωσης. Η υποενοότητα αυτή αφορά τα αποτελέσματα της οριοθέτησης και τη σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα της μεθόδου του προγράμματος Copernicus.

1η Εφαρμογή - Πλήρως Κατανεμημένη

Λόγω της μεγάλης έκτασης της λεκάνης ήταν αναγκαίο να γίνει μεγάλη εστίαση σε συγκεκριμένες περιοχές (ανά τάξη μεγέθους).



Σχήμα 8. Τελικός χάρτης παραποτάμιων περιοχών λεκάνης απορροής Πηνειού Ποταμού ανά τάξη μεγέθους - Πλήρως κατανεμημένη εφαρμογή.

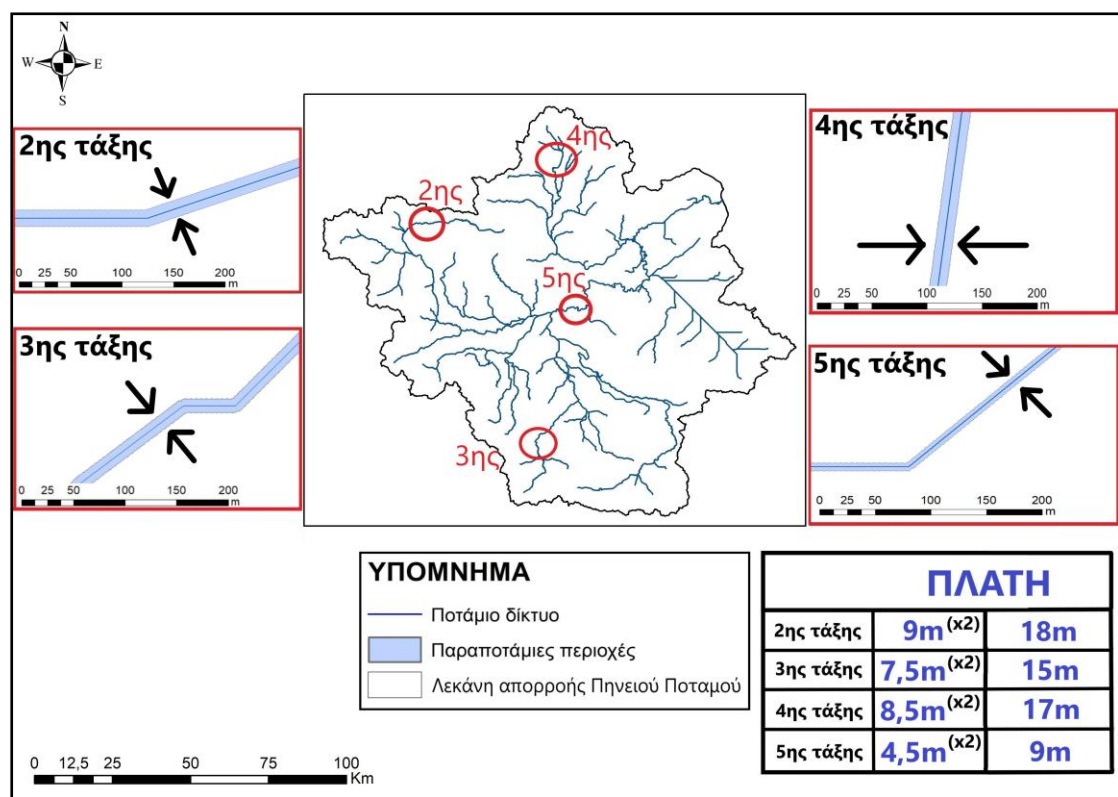
Υπάρχει μια διακύμανση του παραποτάμιου πλάτους από 6 m μέχρι 16 m στην 5η τάξη για κάθε πλευρά του ποταμού. Αυτό ισχύει για τα συγκεκριμένα σημεία που επιλέχθηκαν (εστιασμένες περιοχές). Βέβαια το πλάτος είναι μεταβλητό και όπως διαπιστώνεται μικραίνει σε άλλα σημεία στον κεντρικό Πηνειό, η αντίστοιχα μεγαλώνει σε τμήματα της 2ης, 3ης και 4ης τάξης μεγέθους. Και σε αυτή την περίπτωση το μεγαλύτερο πλάτος εντοπίζεται στο κεντρικό σημείο της λεκάνης από όπου διέρχεται ο Πηνειός Ποταμός. Βέβαια αυτό έχει να κάνει με την επιλογή της διατομής και έρχεται σε αντίθεση με το τι ισχύει πραγματικά. Διότι όπως θα φανεί παρακάτω το μεγαλύτερο παραποτάμιο πλάτος (μέσος όρος) σε αυτή τη μέθοδο εντοπίζεται στην 2η τάξη από όπου διέρχονται υδατορρεύματα με μεγάλη κλίση. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι οι διαφορές του πλάτους είναι μικρές ανάμεσα στις 4 τάξεις υδατορρευμάτων.

2η Εφαρμογή - Ημικατανεμημένη

Σε αυτή την εφαρμογή η μέση κλίση παραμένει σταθερή ανά τμήμα και η παράμετρος

που είναι μεταβλητή είναι ο συντελεστής K.

Συνενώνοντας τα επιμέρους υπολογιζόμενα παραποτάμια πλάτη των 4 τάξεων του ποτάμιου δικτύου, διαμορφώθηκε η τελική οριοθέτηση των παραποτάμιων ζωνών της ημικατανεμημένης εφαρμογής (2η εφαρμογή) της μεθόδου του Brown.



Σχήμα 9. Τελικός χάρτης παραποτάμιων περιοχών λεκάνης απορροής του Πηνειού Ποταμού ανά τάξη μεγέθους – Ημικατανεμημένη εφαρμογή.

Το K αλλάζει ελάχιστα από σημείο σε σημείο και συνεπώς επηρεάζει ελάχιστα και το τελικό buffer. Σε αντίθεση με την εφαρμογή 1 οι διαφορές του παραποτάμιου πλάτους δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές.

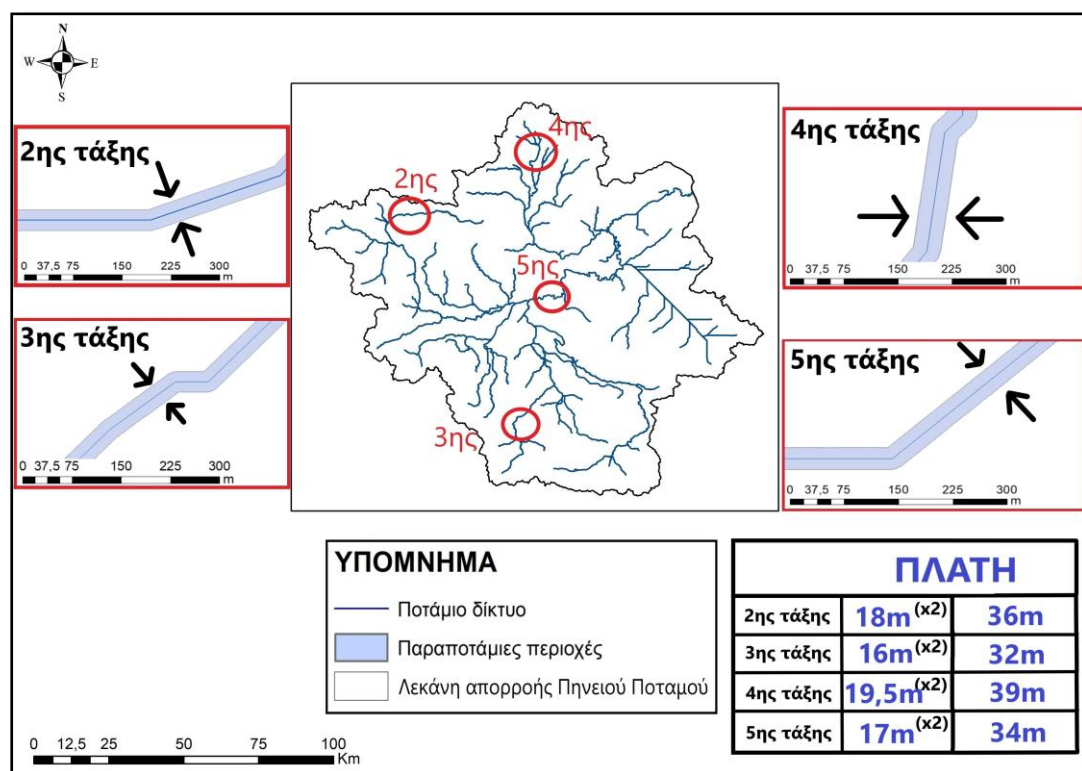
Σύγκριση με την Αδρομερή Εφαρμογή

Η αδρομερής εφαρμογή δηλαδή η εφαρμογή που περιγράφεται στην αρχική προτεινόμενη μέθοδο (Brown et al. 1987). Περιλαμβάνει όπως προαναφέρθηκε την εξίσωση:

$$\text{Παραποτάμιο Πλάτος} = \left(\frac{\text{Μέση κλίση Εδάφους}}{\text{Συντελεστής Διαβρωσιμότητας } K} \right)^{1/2}$$

όπου το παραποτάμιο πλάτος προκύπτει από τη μέση κλίση όλης της λεκάνης η οποία είναι 10,36°.

Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω. Σε αυτή την περίπτωση η απόκλιση του πλάτους ανάμεσα στις 4 τάξεις είναι ακόμα μικρότερη σε σχέση με τις άλλες 2 εφαρμογές, κάτι που είναι απολύτως λογικό καθώς η κλίση στην εξίσωση δεν αλλάζει και είναι κοινή (αλλάζει μόνο ο συντελεστής K). Το μεγαλύτερο πλάτος εντοπίζεται στην 4η τάξη (39m) και το μικρότερο στην 3η (32m).



Σχήμα 10. Τελικός χάρτης παραποτάμιων περιοχών λεκάνης απορροής Πηνειού Ποταμού ανά τάξη μεγέθους – Αδρομερής εφαρμογή.

Τα τελικά αποτελέσματα στον συγκεντρωτικό πίνακα και για τις 3 περιπτώσεις αναδεικνύουν όλα όσα προαναφέρθηκαν.

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας στατιστικών στοιχείων και για τις 3 εφαρμογές.

1η Εφαρμογή - Πλήρως κατανεμημένη			
Τάξη	Μέσος όρος	min - max	Εύρος
2ης	15,5m	1,8m - 98m	96,2m
3ης	12m	1,5m - 78m	76,5m
4ης	12m	1,6m - 84m	82,4m
5ης	14m	1,6m - 78m	76,4m
2η Εφαρμογή - Ημικατανεμημένη			
	Μέσος όρος	min - max	Εύρος
2ης	17,5m	14,6m - 23m	8,4m
3ης	14m	12m - 19,5m	7,5m
4ης	13,5m	11,5m - 18m	6,5m
5ης	8m	7m - 11m	4m
Αδρομερής Εφαρμογή			
	Μέσος όρος	min - max	Εύρος
2ης	34m	28,5m - 45m	16,5m
3ης	33m	29m - 44m	15m
4ης	33m	28m - 43m	15m
5ης	33m	29m - 45m	16m

Με μεγάλη διαφορά το μεγαλύτερο εύρος προκύπτει από την πλήρως κατανεμημένη εφαρμογή. Αυτό ισχύει διότι το παραποτάμιο πλάτος υπολογίστηκε βάσει της κλίσης εδάφους σε κάθε σημείο. Έτσι η διακύμανση του πλάτους είναι μεγάλη καθώς η κλίση στις περιοχές από όπου διέρχεται ο Πηνειός Ποταμός μεγαλώνει με αποτέλεσμα να επηρεάζει άμεσα το buffer (επηρεάζεται και από τον συντελεστή K που είναι μεταβλητή αντιστρόφως ανάλογη της κλίσης). Μετά ακολουθεί η αδρομερής εφαρμογή και τελευταία είναι η ημικατανεμημένη εφαρμογή με το μικρότερο εύρος

για κάθε τάξη μεγέθους ποταμού. Στην αδρομερή εφαρμογή ο μέσος όρος πλάτους έχει την μεγαλύτερη τιμή του και κυμαίνεται μεταξύ 33 - 34 m (πολύ μικρή απόκλιση). Θέτοντας σταθερή μέση κλίση για όλη τη λεκάνη, ουσιαστικά ομαλοποιείται το ανάγλυφο κάτι που δεν ισχύει διότι το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του Πηνειού Ποταμού είναι έντονο με μεγάλες αλλαγές από πεδινές σε ορεινές περιοχές.

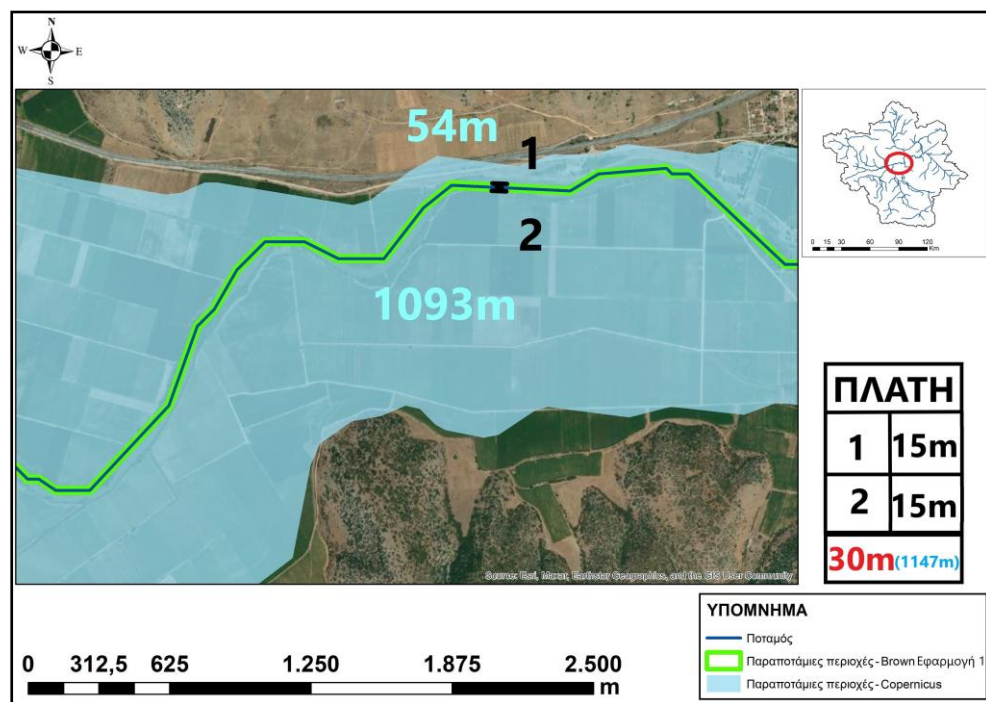
Σύγκριση με τη Μέθοδο Copernicus

Η σύγκριση έγινε σε τέσσερις (4) περιοχές χωρισμένες ανά τάξη μεγέθους για να υπάρξει μια πλήρη εικόνα της κατάστασης. Η αρχή θα γίνει με το κύριο τμήμα του Πηνειού (5η τάξη υδατόρρευμα). Στην 5η τάξη ποταμών, έγινε σύγκριση όλων των μεθόδων και τροποποιήσεων αυτών με την οριοθέτηση του προγράμματος Copernicus. Όπως θα φανεί άλλες πλησιάζουν αρκετά τη μέθοδο σύγκρισης, άλλες λιγότερο και άλλες αποκλίνουν πολύ. Οι λόγοι που απέχουν πολύ παρουσιάζονται και αναλύονται λεπτομερώς στη συνέχεια του κεφαλαίου. Αυτό που πρέπει να τονιστεί, είναι ότι αναλυτική σύγκριση όλων των μεθόδων έγινε και στις υπόλοιπες τρεις τάξεις. Ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο, στην 4η, 3η και 2η τάξη να παρουσιαστούν μόνο οι μέθοδοι των οποίων τα αποτελέσματα πλησιάζουν τη μέθοδο Copernicus, εφόσον οι υπόλοιπες αποκλίνουσες μέθοδοι θα απεικονιστούν ήδη μια φορά (τα αποτελέσματα τους στις υπόλοιπες τάξεις δεν διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με την 5η).

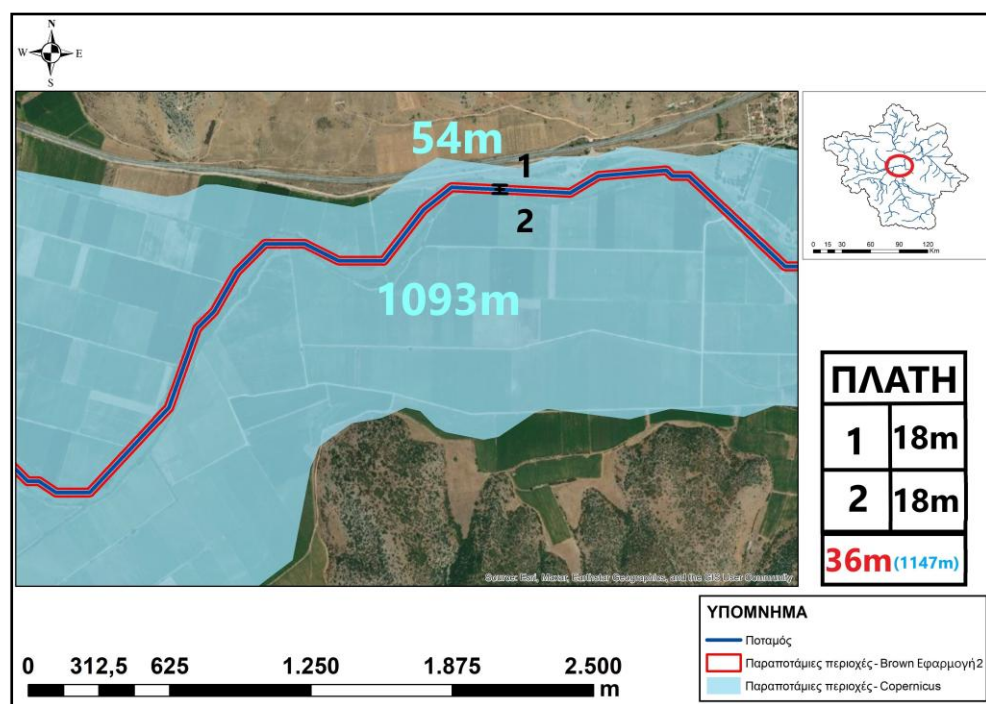
5η Τάξη υδατόρρευμα

Η σύγκριση κάθε εφαρμογής έγινε ξεχωριστά με την μέθοδο του Copernicus. Με το γαλάζιο χρώμα φαίνεται η μέθοδος σύγκρισης, και η εκάστοτε οριοθέτηση με μια γραμμή διαφορετικού χρώματος. Επιλέχθηκε τυχαία ένα σημείο στη 5η τάξη ποταμών (διατομή – μαύρο χρώμα) κατά το οποίο μετρήθηκε η απόσταση των παραποτάμιων περιοχών (ξεχωριστά για τις δύο πλευρές εκατέρωθεν του ποταμού αλλά και συνολικά).

Copernicus – Brown et al. (Πλήρως κατανεμημένη)



Σχήμα 11. Χάρτης σύγκρισης παραποτάμιων περιοχών μεθόδων Copernicus – Brown Πλήρως κατανεμημένη εφαρμογή (5η τάξη υδατόρρευμα).



Σχήμα 12. Χάρτης σύγκρισης παραποτάμιων περιοχών μεθόδων Copernicus – Brown Ημικατανεμημένη εφαρμογή (5η τάξη υδατόρρευμα).

Τα αποτελέσματα για την ημι-κατανεμημένη εφαρμογή της μεθόδου είναι παρόμοια με την κατανεμημένη εφαρμογή. Στη μέθοδο Brown et al. καθοριστική παράμετρος είναι η κλίση του εδάφους. Σε αντίθεση με τη μεθοδολογία του Copernicus, δεν λαμβάνεται υπόψιν η έκταση της δυνητικά πλημμυρικής περιοχής με αποτέλεσμα να είναι φυσιολογικό οι οριοθετήσεις τους να αποκλίνουν αρκετά από την αντίστοιχη του Copernicus.

Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας έρευνας αποτέλεσε η οριοθέτηση των παραποτάμιων ζωνών κατά μήκος του ποτάμιου δικτύου του Πηνειού Ποταμού. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε (Brown et al. 1987) χρησιμοποίησε ως παραμέτρους την κλίση και τον συντελεστή διαβρωσιμότητας του παραποτάμιου εδάφους. Έγινε μια τροποποίηση της μεθόδου στην εφαρμογή της, αδρομερής (αρχική πρόταση μεθόδου), ημι-κατανεμημένη και κατανεμημένη ως προς την κλίση εδάφους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν λεπτομερώς με τα αντίστοιχα του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Copernicus. Η έκταση οριοθέτησης παρουσίασε μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο (2) μεθόδων. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκαν οι 2 μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος των Brown et al. 1987 έχει εξειδικευμένο σκοπό που αφορά τη ανάδειξη της επιρροής που έχει η διάβρωση στον καθορισμό της έκτασης των παρόχθιων ζωνών με βασική προτεραιότητα τη διασφάλιση της ποιότητας του εδάφους. Αντίθετα η οριοθέτηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Copernicus) στοχεύει στην προστασία της χλωρίδας και πανίδας μέσω της προστασίας των υδάτινων οδών. Με αυτόν τον τρόπο παρέχονται μοναδικά ενδιαειρήματα στα οποία ζουν και

αναπαράγονται πολλά είδη φυτών και ζώων. Επίσης στοχεύει στην διατήρηση της ποιότητας του ποτάμιου νερού, εξαλείφοντας τους κινδύνους ρύπανσης. Συνεπώς, είναι προφανές ότι ο βασικός παράγοντας που προσδιορίζει την έκταση οριοθέτησης των παραποτάμιων περιοχών είναι ο σκοπός της κάθε μεθόδου που εφαρμόζεται.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

- Γκίκας, Γ. (2015). Τεχνολογίες που συνδέονται με τη διαχείριση υδατικών λεκανών. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δ.Π.Θ., Κομοτηνή, σελ. 3-7.
- Μαντούζα, Α. (2008). Ανάλυση της λεκάνης του ποταμού Πηνειού στα πλαίσια της οδηγίας 2000/60 με χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Μάρης, Φ. Π. (2017). Υδρολογία Φυσικού Περιβάλλοντος – Κεφάλαιο 15 – Διάβρωση Εδαφών. Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών, Δ.Π.Θ., Κομοτηνή.
- Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Α.Π.Θ. Σπυρίδης, Α., & Κουτάλου, Β. (n.d.). Υετός. Περλέρος, Β., Λιόνης, Μ., & Λεβογιάννης, Μ. Έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπόγειων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας, Θράκης και Θεσσαλίας – Αποτελέσματα λεκάνης Πηνειού. Διεύθυνση Σχεδιασμού, Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Αξιοποίησης Εδαφοϋδατικών Πόρων.

Ξενόγλωσση

- Abood, S.A., (2011), «Modeling and Classifying Variable Width Riparian Zones Utilizing Digital Elevation Models, Flood Height Data, Digital Soil Data and National Wetlands Inventory: A New Approach for Riparian Zone Delineation», Ph.D. Dissertation, Michigan Technological University, Houghton, Michigan, p.111.
- Abood, S. A., Maclean, A. L., & Mason, L. A. (2012). Modeling riparian zones utilizing DEMs and flood height data via GIS. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 78, No. 3, pp. 259–269.
- Augusto, R. C., Madureira Cruz, C. B., Vinicius da Silva, S., & Martins, J. S. (2022). Delimitação de zona ripária em planícies através do Índice Normalizado de Diferença da Água (NDWI) e série multitemporal Landsat. Doutorado em Geografia (Planejamento e Gestão Ambiental) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, pp. 234-249.
- Brown, B., & Hordon, R. M. (1987). Riparian areas and soil erosion – rules and recommended widths. Yale School of Forestry and Environmental Studies, pp. 37-39.
- Eishoei, E., Miryaghoubzadeh, M., & Shahedi, K. (2022). A novel knowledge base method in Riparian Buffer Zone (RBZ) delineation with remote sensing imagery. Natural Resources Faculty, Urmia University, Urmia, Iran.
- Fisher, R. A., Martin, C. O., Ratti, J. T., & Guidice, J. (2001). Riparian terminology: confusion and clarification. U.S. Army Corps of Engineers, Research and Development Center, Army Engineer Waterways Experiment Station, Environmental Laboratory, Vicksburg, MS, p. 7.

- Gregory, S. V., Swanson, F. J., McKee, A. W., & Cummins, K. W. (1991). An ecosystem perspective of riparian zones: focus on links between land and water. *BioScience*. Vol. 41, pp. 540-551.
- Hawes, E., & Smith, M. (2005). Riparian buffer zones: functions and recommended widths. Yale School of Forestry and Environmental Studies, for the Eightmile River Wild and Scenic Study Committee.
- Holmes, K. L., & Goebel, P. C. (2011). A functional approach to riparian area delineation using geospatial methods. Society of American Foresters, Ohio State University, School of Environment and Natural Resources, pp. 233-241.
- Loukas, A., Vasiliades, L., & Liberis, N. (2010). A water balance derived drought index for Pinios River Basin, Greece. *Water Resources Management*. Vol. 25, pp. 1087-1101.
- Naiman, R. J., & Decamps, H. (1997). The ecology of interfaces – riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 28, pp. 621-658.
- Palik, B. J., Tang, S. M., & Chavez, Q. (2004). Estimating riparian area extent and land use in the Midwest. General Technical Report NC-248. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, St. Paul, MN, p. 28.
- Stutter, M., Kronvang, B., Ó hUallacháin, D., & Rozemeijer, J. (2020). Current insights into the effectiveness of riparian management, attainment of multiple benefits, and potential technical enhancement. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 48, pp. 236-247.
- Tabacchi, E., Correl, D. L., Hauer, R., Pinay, G., Plantay-Tabacchi, A.-M., & Wissmar, R. C. (1998). Development, maintenance, and role of riparian vegetation in the river landscape. *Freshwater Biology*. Vol. 40, pp. 497-516.
- Verry, E. S., Dolloff, C. A., & Manning, M. E. (2004). Riparian ecotone: a functional definition and delineation for resource assessment. *Water, Air & Soil Pollution*, pp. 67-94.
- Wenger, S. (1999). A review of the scientific literature on riparian buffer width, extent, and vegetation. Institute of Ecology, University of Georgia, Athens, Georgia, for the Office of Public Service & Outreach, Institute of Ecology, University of Georgia, pp. 1-50.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΠΙΘΑΝΩΝ ΔΙΑΒΡΩΣΙΓΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Καρασμανάκη Ξανθούλα

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων

Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Email: xantkara2@fmenr.duth.gr

Στοϊκοπούλου Αναστασία

Υποψήφια Διδάκτορας,

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων

Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Email: astoikop@fmenr.duth.gr

Καταγής Θωμάς

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων

Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Email: tkatagis@fmenr.duth.gr

Παπαϊωάννου Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων

Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Email: gparaio@fmenr.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διάβρωση του εδάφους μετά από πυρκαγιά αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα, που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις. Οι πυρκαγιές, μέσω της καταστροφής της βλάστησης και της υποβάθμισης του εδάφους, ενισχύουν την επιφανειακή απορροή και την απώλεια εδάφους, καθιστώντας αναγκαίο τον άμεσο εντοπισμό των περιοχών που κινδυνεύουν από διάβρωση. Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου για τη χαρτογράφηση πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών μετά από πυρκαγιά με την χρήση τεχνικών Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (ΠΚΑ) και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ). Συγκεκριμένα, με χρήση εκτενής βιβλιογραφικής ανασκόπησης επιλέχθηκαν επτά κριτήρια που σχετίζονται με την διάβρωση του εδάφους από το νερό και βασίζονται κυρίως σε γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Αρχικά όλα τα κριτήρια κανονικοποιήθηκαν με την μέθοδο min-max με την χρήση ΓΣΠ. Στην συνέχεια μέσω της βιβλιογραφική ανασκόπησης αποδόθηκαν οι συντελεστές βαρύτητας από την Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (ΑΗΡ) και τα κριτήρια με την χρήση της Boolean άλγεβρας αθροίστηκαν για την παραγωγή των δεδομένων των πιθανών διαβρωσιγενών

περιοχών. Στη συνέχεια, οι περιοχές ταξινομήθηκαν σε πέντε κλάσεις πιθανού κινδύνου για διάβρωση με τη χρήση της τεχνικής ομαδοποίησης K-mean, ενώ η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε με το μοντέλο RUSLE. Η περιοχή μελέτης ήταν η Περιφερειακή Ενότητα Έβρου, που επλήγη από την καταστροφική πυρκαγιά του 2023. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο μπορεί να λειτουργήσει ως χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό περιοχών υψηλού κινδύνου διάβρωσης μετά από πυρκαγιά, παρέχοντας τη βάση για στοχευμένα αντιδιαβρωτικά έργα. Η εφαρμογή του πλαισίου ενισχύει την ανθεκτικότητα της περιοχής σε μελλοντικές περιβαλλοντικές καταστροφές, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων και στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των πυρκαγιών.

Λέξεις κλειδιά: Πυρκαγιά, Διάβρωση, MCDA, AHP, K-mean

Εισαγωγή

Οι υδρομετεωρολογικές καταστροφές όπως οι καταιγίδες και οι αιφνίδιες πλημμύρες, είναι από τους σημαντικούς παράγοντες που συμβάλλουν σημαντικά στην διάβρωση του εδάφους (Debele et al., 2019), ιδιαίτερα σε περιοχές με απότομες κλίσεις και όπου η βλάστηση είναι υποβαθμισμένη (Nehai et al., 2021). Η διάβρωση από την επιφανειακή απορροή έχει επιπρόσθετες επιπτώσεις στην κατάντη λεκάνη απορροής όπως η μεταφορά των φερτών υλών και η απόθεση τους (El Jazouli et al., 2017; Nehai et al., 2021). Συγκεκριμένα, η μεταφορά και η απόθεση των φερτών υλών μπορεί να μεταβάλει σημαντικά τη γεωμορφολογία μιας λεκάνης απορροής (π.χ. στόμωση τμημάτων της κοίτης ποταμών. Αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει ότι περιοχές που είναι επιρρεπείς στη διάβρωση από τα επιφανειακά ύδατα, παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες εδάφους που οφείλονται κυρίως στην σύνθετη τοπογραφία, τις απότομες κλίσεις (Sidi Almouctar et al., 2021) και την απώλεια βλάστησης λόγω πυρκαγιών (Nehai et al., 2021). Επιπλέον, η διάβρωση από τα επιφανειακά ύδατα μπορεί να απειλήσει σημαντικά την παραγωγικότητα στις γεωργικές περιοχές με σημαντική μείωση της γονιμότητας του εδάφους (Quinton & Fiener, 2024). Για παράδειγμα στην Αιθιοπία, όπου ο κίνδυνος διάβρωσης είναι αυξημένος εξαιτίας των απότομων κλίσεων και των ακανόνιστων βροχοπτώσεων υπάρχει και αυξημένος ο κίνδυνος για τις καλλιέργειες (Halefom & Teshome, 2019; Andualem et al., 2020). Διαδικασίες όπως η μεταφορά ιζημάτων, οι αποθέσεις, η επιφανειακή απορροή και η διάβρωση από τα επιφανειακά ύδατα ενισχύονται σε φαινόμενα όπως οι αιφνίδιες πλημμύρες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ανθρώπινη αναληψία και αδιαφορία (πχ. μη ικανοποιητική διαχείριση χρήσεων γης), μπορεί να εντείνει τις επιπτώσεις των υδρομετεωρολογικών καταστροφών με αποτέλεσμα την αύξηση της διάβρωσης και των επιπτώσεων της (Suwannachai et al., 2024; Avila-Aceves et al., 2023). Στην έρευνα των El Jazouli et al. (2017) αναδεικνύεται η επίδραση των απότομων κλίσεων και της επέκτασης των γεωργικών εκτάσεων στις διαδικασίες της διάβρωσης του εδάφους, με αποτέλεσμα η ετήσια απώλεια εδάφους να υπερβαίνει τα ανεκτά όρια.

Οι δασικές πυρκαγιές είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες διατάραξης ενός οικοσυστήματος, προκαλούν δραματικές αλλαγές και μπορούν με άμεσο και απρόβλεπτο τρόπο να απειλήσουν την ανθρώπινη ζωή και να μεταβάλουν τις κοινωνικοοικονομικές υποδομές (Katagis & Gitas, 2022). Στην Ελλάδα, εκτός από τις κλιματολογικές συνθήκες, παρατηρείται μεγάλη αύξηση των πυρκαγιών εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Katagis & Gitas 2022). Συγκεκριμένα, το 2023 προκλήθηκε στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στην περιοχή του Έβρου μια από τις μεγαλύτερες πυρκαγιές της Ευρώπης (Dosiou et al. 2024). Ο άμεσος αντίκτυπος των

πυρκαγιών είναι ότι μπορούν να καταστρέψουν την βλάστηση και να αποσταθεροποιήσουν το ριζικό σύστημα, με αποτέλεσμα την έκθεση των εδαφών σε αυξημένη επιφανειακή απορροή και κατ' επέκταση στη διάβρωση (Ebel, 2024; Pereira et al., 2024). Επιπλέον, συνήθως οι πυρκαγιές δημιουργούν υδροφοβικά επιφανειακά στρώματα που εμποδίζουν τη διήθηση του νερού με αποτέλεσμα την αυξημένη επιφανειακή απορροή και την έντονη μεταφορά φερτών υλών (Ebel, 2024; Pereira et al., 2024). Οι πυρόπληκτες περιοχές, όπως η Μεσόγειος και οι ημίξηρες ζώνες, όπου πλήττονται από επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές, έχουν σοβαρή επιδείνωση της υποβάθμιση των εδαφών (Ebel, 2024). Συνεπώς, μετά από ένα γεγονός πυρκαγιάς παρατηρείται αύξηση άμεσης επιφανειακής απορροής, πλημμυρικά φαινόμενα, αύξηση των μέγιστων παροχών, μείωση της τραχύτητας του εδάφους, μειωμένη ή μηδενική διήθηση, αλλοιώσεις στην γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής και αυξημένη μεταφορά φερτών υλών (Papaioannou et al., 2023, Alamanos et al., 2023). Μια κοινή διαφορά μεταξύ των κανονικών πλημμυρών και της δεβριτικής ροής που συχνά εμφανίζονται σε συνθήκες μετά από πυρκαγιές είναι η συσσώρευση μη συνεκτικών ιζημάτων (Ebel, 2024). Οι ροές μετά από πυρκαγιά χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις ιζημάτων και ενέχουν σημαντικό κίνδυνο για τις υποδομές και την ανθρώπινη ασφάλεια. Συγκεκριμένα, η αφαίρεση της βλάστησης από πυρκαγιά, προκαλεί αστάθεια των πρανών, αυξάνοντας την πιθανότητα κατολισθήσεων και μεταφοράς ιζημάτων ακόμα και με ήπιες βροχοπτώσεις (Ebel, 2024; Pereira et al., 2024). Ο αντίκτυπος των πυρκαγιών στη διάβρωση αναδεικνύει την ανάγκη για αποτελεσματικότερες λύσεις στην αντιμετώπιση της διάβρωσης μετά τέτοια γεγονότα.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εντατικοποίηση της δραστηριότητας των πυρκαγιών και των διαδικασιών διάβρωσης έχει συνδεθεί με την κλιματική αλλαγή, ειδικά στις ημίξηρες και μεσογειακές περιοχές όπου βιώνουν παρατεταμένες ξηρασίες και αλλαγές στα μοτίβα της βροχοπτώσης (Ebel, 2024; Pereira et al., 2024). Οι συγκεκριμένες κλιματολογικές αλλαγές επιδεινώνουν την ευπάθεια των εδαφών, καθώς η αυξημένη δραστηριότητα των πυρκαγιών καταστρέφει τη βλάστηση και διαταράσσει τη σταθερότητα του εδάφους, ενώ οι ακανόνιστες βροχοπτώσεις επιταχύνουν την ταχύτητα και την ποσότητα της διάβρωσης (Fang et al., 2024; Tadesse and Tefera, 2021). Για παράδειγμα, στην έρευνα των Bammou et al., (2024), παρουσιάζεται ότι αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά τα ποσοστά της διάβρωσης μέχρι το 2040 υπό διάφορα κλιματικά σενάρια εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Άλλες έρευνες αναδεικνύουν ότι η γεωργική παραγωγικότητα και η ορθή διαχείριση των υδάτινων πόρων απειλούνται από την κλιματική αλλαγή που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοστών διάβρωσης (Andualem et al., 2020; Tadesse and Tefera, 2021). Ομοίως, στην περιοχή της Μεσογείου, αναμένεται αύξηση της μεταφοράς των φερτών υλών και αυξημένη πρόσχωση των ταμιευτήρων εξαιτίας της έντασης των ακραίων υδρομετεωρολογικών φαινομένων (Pereira et al., 2024; El Jazouli et al., 2017). Οι συνδυασμένες επιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω τονίζουν την ανάγκη για ολοκληρωμένες στρατηγικές για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που απορρέουν από την κλιματική αλλαγή (Fang et al., 2024; Sidi Almouctar et al., 2021).

Τις τελευταίες δεκαετίες, ο συνδυασμός της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (ΠΚΑ) με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για τον εντοπισμό περιοχών που είναι επιρρεπείς στη διάβρωση. Η ΠΚΑ επιτρέπει τη συστηματική στάθμιση πολλαπλών παραγόντων, όπως η κλίση, οι χρήσεις γης και άλλοι δείκτες ή παράμετροι που σχετίζονται με την διάβρωση, για την παραγωγή λεπτομερών χαρτών πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών (Andualem et al., 2020- Bammou et al., 2023). Τεχνικές όπως η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως με τα ΓΣΠ για τη μοντελοποίηση των κινδύνων διάβρωσης.

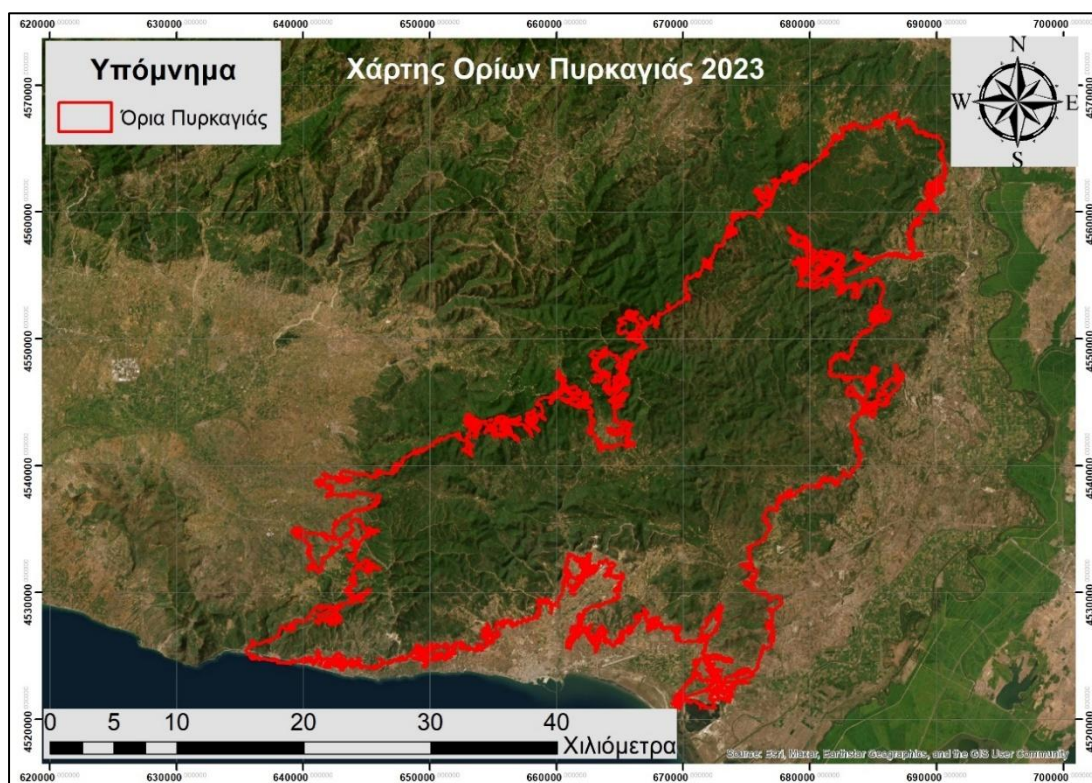
Για παράδειγμα, στις μελέτες των Halefom & Teshome, (2019) και των Andualem et al., (2020) γίνεται χρήση της AHP σε συνδυασμό με ΓΣΠ για τον εντοπισμό των εστιών διάβρωσης, επιτρέποντας στοχευμένες παρεμβάσεις για τη μείωση της απώλειας εδάφους. Ομοίως, στην μελέτη των Tadesse and Tefera (2021) γίνεται χρήση της AHP σε συνδυασμό με ΓΣΠ για τον εντοπισμό πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών με την διαφορά από τις προηγούμενες έρευνες ότι γίνεται χρήση και της Αναθεωρημένης Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας (RUSLE) για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Η πιστοποίηση των συστημάτων ΠΚΑ-ΓΣΠ είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας τους (Tadesse and Tefera, 2021), ωστόσο παραμένει περιορισμένη λόγω έλλειψης ιστορικών δεδομένων, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες, και της δυσκολίας εφαρμογής τεχνικών προσομοίωσης για τον ίδιο λόγο. Συνεπώς, παρά το γεγονός ότι η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία, ο αριθμός των ερευνών που υπολογίζουν τις πιθανές διαβρωσιγενείς περιοχές με την χρήση ΠΚΑ-ΓΣΠ και εφαρμόζουν τεχνικές πιστοποίησης παραμένει περιορισμένος (π.χ. Tadesse and Tefera, 2021; Arabameri, et al., 2020). Τέτοιες προσεγγίσεις επιτρέπουν την ανάπτυξη αξιόπιστων εργαλείων για την τοποθέτηση αντιδιαβρωτικών έργων και την προστασία του εδάφους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρέχει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο, σύμφωνα με το οποίο θα γίνεται η εκτίμηση των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών μετά από πυρκαγιά, μέσα από τη χαρτογράφησή τους. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο συνδυάζει τεχνικές ΠΚΑ-ΓΣΠ για τον εντοπισμό των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών και γίνεται χρήση της μεθόδου RUSLE για την πιστοποίηση του συστήματος. Με την αξιολόγησή τους, θα μπορούσε να ξεκινήσει άμεσα η κατασκευή αντιδιαβρωτικών έργων, όπως είναι τα κορμοφράγματα και κορμοδέματα ή /και κλαδοπλέγματα. Επιπλέον, δύναται να δοθεί προτεραιότητα στις ευπαθείς περιοχές, ώστε να ξεκινήσουν τα αντιδιαβρωτικά έργα από τις περισσότερες ευάλωτες θέσεις, προλαμβάνοντας τυχόν κλιματικά φαινόμενα που θα είχαν αρνητικές συνέπειες. Επιπλέον, με τη δημιουργία νέων μεθοδολογικών προσεγγίσεων, επιχειρείται να ενισχυθεί η άμεση πρακτική εφαρμογή τους από τους αρμόδιους φορείς.

Περιοχή Μελέτης

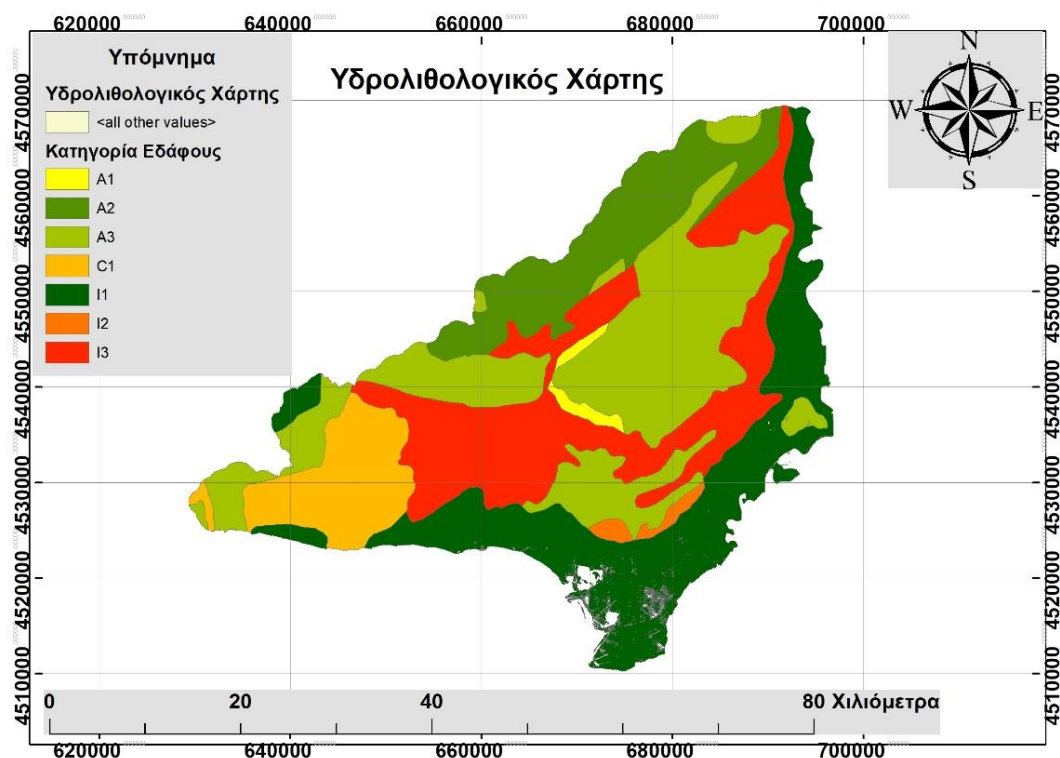
Ως Περιοχή Μελέτης ορίστηκαν οι περιοχές που επηρεάστηκαν από την πυρκαγιά του Αυγούστου του 2023, καθώς και η ευρύτερη περιοχή γύρω από αυτές. Τα όρια των περιοχών που επηρεάστηκαν από την πυρκαγιά, φαίνονται στην Εικόνα 1. Η πυρκαγιά, που διήρκεσε περισσότερες από 15 ημέρες, έπληξε κυρίως περιοχές της Αλεξανδρούπολης και το Εθνικό Πάρκο Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, επηρεάζοντας περισσότερα από 900.000 στρέμματα. Χάθηκαν χιλιάδες ζώα, ελαιόδεντρα, μελίσια, ενώ απείλησε τον μαυρόγυπα λόγω της καταστροφής των θέσεων φωλεοποίησης. Η πυρκαγιά κατέστρεψε το 58% του Εθνικού Πάρκου Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και οι συνολικές ζημιές σε όλη την επηρεασμένη ευρύτερη περιοχή ανέρχονται σε 80.849 εκτάρια. Αν εξαιρεθούν οι άκαυτες νησίδες (18.500 εκτάρια), κάηκαν 62.349 εκτάρια (Ξόφης κ.α. 2024), καθιστώντας την σύμφωνα με το EFFIS, τη μεγαλύτερη πυρκαγιά στην ΕΕ. Η περιοχή μελέτης και η ευρύτερη ζώνη παρουσιάζουν σημαντική υψομετρική διακύμανση, από το επίπεδο της θάλασσας (0 m) έως περίπου τα 1.200 m. Στην ενδοχώρα, το κλίμα έχει ηπειρωτικά χαρακτηριστικά, με ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και ψυχρούς, υγρούς χειμώνες, που συχνά συνοδεύονται από χιονοπτώσεις (Kazakis et al. 2015). Η μέση ετήσια βροχόπτωση φτάνει τα 1.380 mm, με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση να καταγράφεται κατά τους μήνες Νοέμβριο έως Φεβρουάριο, ενώ οι

ξηρές περίοδοι εμφανίζονται κυρίως τον Ιούλιο και τον Αύγουστο (Karditsa et al. 2019).

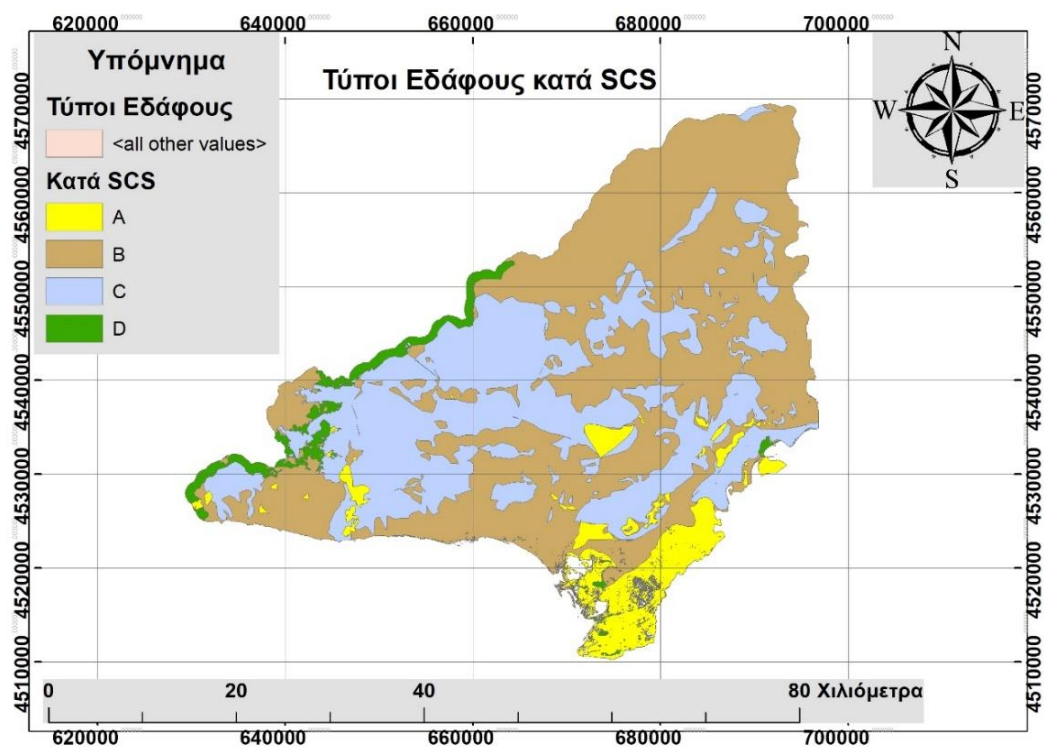


Εικόνα 1. Όρια της πυρκαγιάς του 2023 (Πηγή: Ξόφης κ.α. 2024)

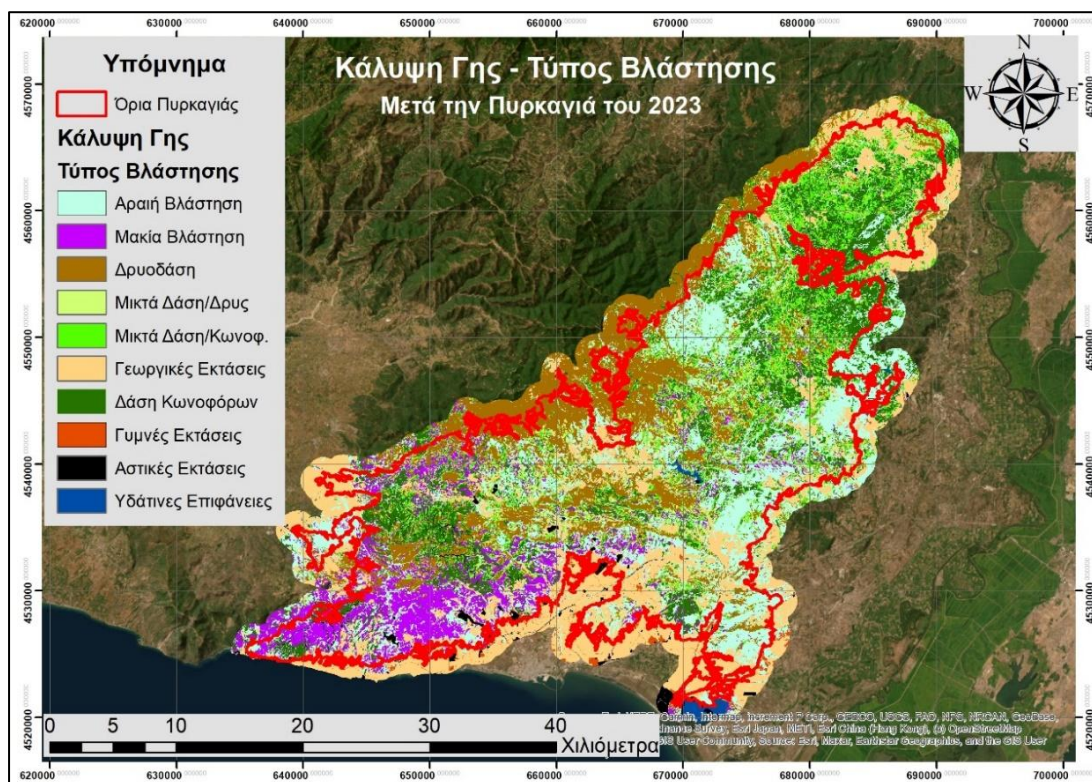
Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία πετρωμάτων, όπως κλαστικά και ιζηματογενή, μεταμορφωμένα, πυριγενή, ηφαιστειακά και ασβεστολιθικά (Karditsa et al. 2019). Σύμφωνα με τον Υδρολιθολογικό Χάρτη της Ελλάδας, στην περιοχή μελέτης εντοπίζονται οι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί A1, A2, A3, C1, I1, I2 και I3 (Εικόνα 2). Αντίστοιχα στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι Κατηγορίες Εδαφών από Υδρολογική Άποψη / Υδατοδιαπερατότητα σύμφωνα με την μέθοδο SCS όπως υπολογίστηκαν από τα ΣΔΚΠ, Υδατικό Διαμέρισμα Έβρου και σε συνδιασμό για ένα τμήμα από τα στοιχεία της Εικόνας 2. Η συνολική έκταση που επηρεάστηκε από την πυρκαγιά, περιλαμβανομένων των άκαυτων νησίδων με φυσική βλάστηση, ανέρχεται σε 94.250 εκτάρια. Από αυτά, τα 62.349 εκτάρια είναι δασικές ή εν γένει δασικές εκτάσεις με αραιή δασική βλάστηση. Σύμφωνα με την αναλυτική ταξινόμηση της βλάστησης στην περιοχή, κυριαρχούν τα δρυοδάση και τα δάση με κυριαρχία δρυών και άλλων πλατύφυλλων, τα οποία καλύπτουν ποσοστό άνω του 25%. Ακολουθούν τα δάση κωνοφόρων και τα μικτά δάση με κυριαρχία κωνοφόρων, με ποσοστό άνω του 23%. Στην εικόνα 4 αποτυπώνονται οι τύποι βλάστησης και τα είδη κάλυψης γης.



Εικόνα 2. Υδρολιθολογικοί Σχηματισμοί Περιοχής Μελέτης



Εικόνα 3. Κατηγορίες Εδαφών από Υδρολογική Άποψη / Υδατοδιαπερατότητα σύμφωνα με την μέθοδο SCS στην Περιοχή Μελέτης

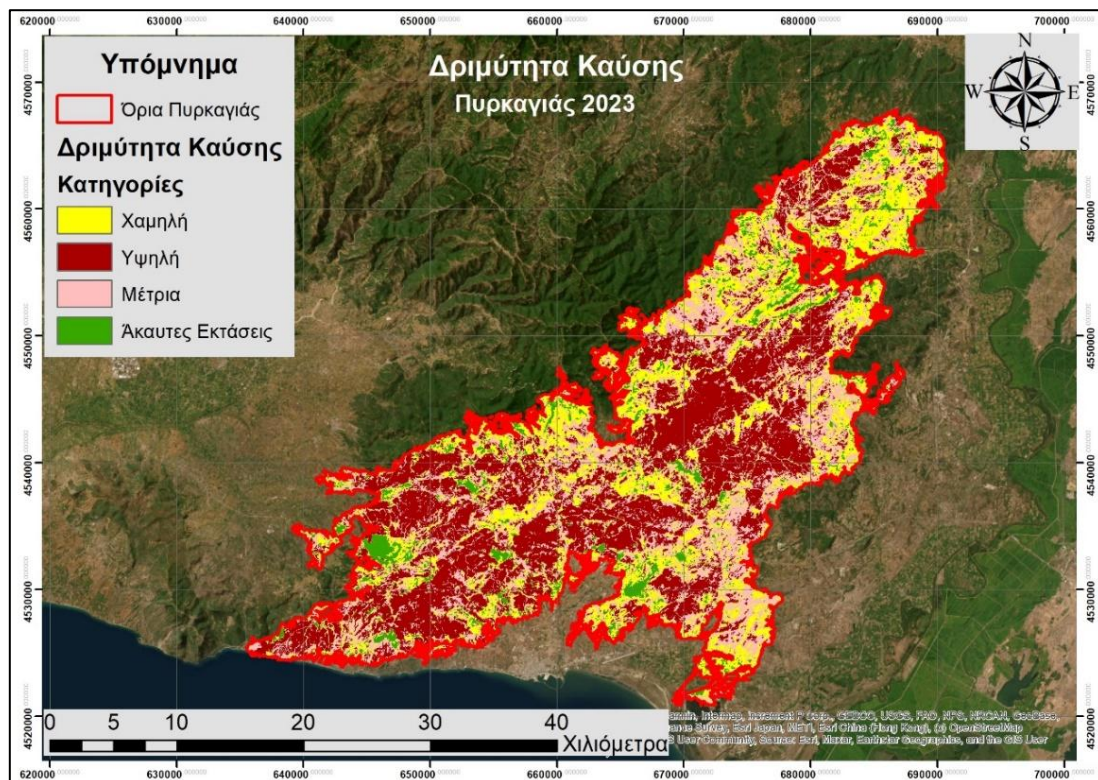


Εικόνα 4. Είδη Κάλυψης γης και Τύποι Βλάστησης στην Επηρεασμένη Περιοχή από την Πυρκαγιά και σε μια περιφερειακή ζώνη γύρω από αυτήν 1200m (Πηγή: Ξόφης κ.α. 2024).

Η δριμύτητα καύσης των δασικών πυρκαγιών αναφέρεται στις επιπτώσεις τους στο οικοσύστημα, όπως η απώλεια εδάφους και οργανικής ύλης. Η ανάλυση αυτής της έντασης είναι σημαντική για τη διαχείριση των εκτάσεων και την πρόληψη μελλοντικών πυρκαγιών, ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου οι πυρκαγιές είναι πιο συχνές λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι ξηρές και θερμές συνθήκες του καλοκαιριού, σε συνδυασμό με τα πευκοδάση και τους θάμνους, αυξάνουν την ευπάθεια της χώρας σε δριμείες πυρκαγιές. Η διαβάθμιση της δριμύτητας καύσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 και την Εικόνα 5.

Πίνακας 1. Διαβάθμιση Δριμύτητας Καύσης στην πληγείσα περιοχή και οι εκτάσεις που επηρεάστηκαν σε Km² (Πηγή: Ξόφης κ.α. 2024)

Δριμύτητα Καύσης	Έκταση (Km ²)
Υψηλή	345,703
Μέτρια	275,341
Χαμηλή	265,55
Άκαυτες Νησίδες	55,907



Εικόνα 5. Δριμύτητα Καύσης της Πυρκαγιάς του 2023 στην επηρεασμένη περιοχή από την πυρκαγιά

Ανάπτυξη Τεχνικών Μεθοδολογίας

Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία - Analytic Hierarchy Process (AHP)

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) αποτελεί πολύ διαδεδομένη μέθοδο της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (MCA) (Ιοαννου et al. 2019). Η μέθοδος αυτή είναι ευέλικτη και εύκολη στη χρήση και μπορεί να εισαχθεί στα ΓΣΠ για την παραγωγή χαρτών. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η λήψη αποφάσεων, μέσα από την απεικόνιση των επιλογών σε πληθώρα προβλημάτων (Ιοαννου et al. 2019). Ευρεία χρήση παρουσιάζει στην εκτίμηση φυσικών κινδύνων, όπως είναι οι πλημμύρες και η διάβρωση, συμμετέχοντας στη δημιουργία αξιόπιστου χάρτη εκτίμησης κινδύνων (Radwan et al. 2018).

Σύμφωνα με τη μέθοδο AHP, οι γλωσσικές κλίμακες του Saaty για τις ζεύγη-συγκρίσεις μετατρέπονται σε ποσοτικές τιμές (πχ. 1 – Ίση σημαντικότητα, 5 – ισχυρή σημαντικότητα, 9 – απόλυτη σημαντικότητα). Στη συνέχεια, οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων υπολογίζονται με τη χρήση των Εξισώσεων (1) και (2) (Saaty 1987):

$$n_{ji} = \frac{a_{ji}}{\sum_{j=1}^n a_{ji}} \quad (1)$$

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ji}}{n} \quad (2)$$

Όπου W_j είναι ο συντελεστής βαρύτητας των κριτηρίων στη μέθοδο AHP, n_{ij} είναι η κανονικοποιημένη τιμή του πίνακα σύγκρισης ζευγών, και a_{ij} είναι το στοιχείο για γραμμή i και στη στήλη j .

Ο Λόγος Συνέπειας (Consistency Ratio - CR) αποτελεί τον μηχανισμό μέσω του οποίου μπορεί να μετρηθεί η εγκυρότητα και τυχασιότητα των απαντήσεων των ειδικών στον πίνακα σύγκρισης ζευγών. Ένα CR < 0.1 (10%) θεωρείται αποδεκτό.

Άλγεβρα Boolean - Boolean Algebra

Με τη χρήση της Boolean Λογικής, επεξεργάζονται τα απαιτούμενα δεδομένα και δημιουργούνται τα απαιτούμενα σύνολα δεδομένων (θεματικά επίπεδα), μέσω των οποίων μπορούν να εντοπιστούν τα ζητούμενα σημεία σε έναν χάρτη. Το απλούστερο και πιο γνωστό μοντέλο ΓΣΠ βασίζεται πιθανώς σε Boolean πράξεις. Ο Robinov εισήγαγε τη χρήση των Boolean πράξεων για την επεξεργασία γεωλογικών χαρτών. Στην πράξη, η τεχνική Boolean περιλαμβάνει τον λογικό συνδυασμό δυαδικών χαρτών, που προκύπτουν από την εφαρμογή τελεστών υπό όρους (conditional operators) (Foomani et al. 2017).

Έστω X ένα αυθαίρετο σύνολο και P(X) η κλάση όλων των υποσυνόλων του X (το σύνολο ισχύος του X). Στο P(X) εφαρμόζονται τρεις βασικές πράξεις: η ένωση, η τομή (διμερείς πράξεις) και η συμπλήρωση (μονομερής πράξη). Η ένωση δύο υποσυνόλων P ∪ Q ορίζεται ως το σύνολο των στοιχείων που ανήκουν είτε στο P είτε στο Q. Η τομή P ∩ Q περιλαμβάνει τα στοιχεία που ανήκουν και στα δύο σύνολα. Η συμπλήρωση P' περιλαμβάνει τα στοιχεία του X που δεν ανήκουν στο P.

Η Boolean άλγεβρα βρίσκει εφαρμογές σε λογική, υπολογιστική επιστήμη και διαχείριση δεδομένων, ενώ οι πράξεις της μπορούν να αποδειχθούν χρησιμοποιώντας θεωρητικά επιχειρήματα βασισμένα στους ορισμούς των πράξεων (Halmos & Givant 2008).

Κανονικοποίηση (Normalization)

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την κανονικοποίηση, όπως η μέθοδος της διαστασιοποίησης χωρίς μονάδα βασισμένη στο άθροισμα, η μέθοδος γραμμικής αναλογίας και η γραμμική μέθοδος μέγιστου-ελάχιστου. Η γραμμική μέθοδος μέγιστου-ελάχιστου, για την τυποποίηση των κριτηρίων, αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο και εκφράζεται με τις εξισώσεις (3) και (4) (Xiao et al. 2016):

- Για θετικούς παράγοντες χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$rij = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (3)$$

- Για αρνητικούς παράγοντες χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$rij = \frac{x_j^{max} - x_{ij}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (4)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις:

- Το rij είναι η κανονικοποιημένη τιμή για το βαθμό του j-ού κριτηρίου.
- Το Xij είναι η αρχική (πρώτη) τιμή για το βαθμό του j-ού κριτηρίου.
- Το Xmax και Xmin είναι οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές για το j-ό κριτήριο.

Παράγοντες όπως το υψόμετρο που αποτυπώνεται στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model - DEM), η κλίση εδάφους (SLOPE), ή η απόσταση από το υδατόρευμα κανονικοποιούνται με την εξίσωση (4), ενώ οι υπόλοιποι παράγοντες χρησιμοποιούν την εξίσωση (3) (Xiao et al. 2016).

Μέθοδος Ομαδοποίησης K-means Clustering

Η μέθοδος K-means είναι ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης που αποσκοπεί στη διαίρεση ενός συνόλου σημείων σε K κλάσεις, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό τετραγωνικό σφάλμα απόστασης μεταξύ των σημείων κάθε κλάσης και του κεντρικού της σημείου (κέντρου). Δεδομένου ενός συνόλου $X=\{x_i\}, i=1,\dots,n$, ο αλγόριθμος αποσκοπεί στη δημιουργία K ομάδων $C=\{c_k\}, k=1,\dots,K$, έτσι ώστε η συνάρτηση κόστους να ελαχιστοποιείται (Jain 2009):

$$J(C) = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in c_k} \|x_i - l_k\|^2 \quad (5)$$

όπου l_k είναι το μέσο της κλάσης C_k .

Η ελαχιστοποίηση αυτού του αντικειμενικού μέτρου είναι ένα σύνθετο πρόβλημα, γι' αυτό και η τεχνική ομαδοποίησης K-means αποτελεί μια τεχνική αλγόριθμου ομαδοποίησης χωρίς επίβλεψη όπου συγκλίνει συνήθως σε τοπικό ελάχιστο, και όχι σε παγκόσμιο ελάχιστο.

Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος της K-mean είναι ένας αλγόριθμος που λαμβάνει αποφάσεις βήμα προς βήμα με σκοπό την τοπική βελτιστοποίηση σε κάθε βήμα, δηλαδή σε κάθε στάδιο επιλέγει την καλύτερη δυνατή απόφαση που έχει μπροστά του, χωρίς να εξετάζει τις συνέπειες στο σύνολο της διαδικασίας. Έτσι, η K-mean, σε κάθε βήμα αναθέτει σημεία στις κλάσεις με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ σημείων και του κέντρου τους. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή οδηγεί συχνά σε τοπικά ελάχιστα, αντί για το βέλτιστο αποτέλεσμα, το παγκόσμιο ελάχιστο. Δηλαδή, ο αλγόριθμος μπορεί να συγκλίνει σε μια λύση που είναι βέλτιστη σε τοπικό επίπεδο αλλά όχι απαραίτητα η καλύτερη δυνατή συνολικά (Jain 2009).

Ο αλγόριθμος K-means εκτελείται με τα εξής βήματα:

- Αρχικοποίηση: Επιλογή αρχικών K κεντρικών σημείων.
- Ανάθεση: Κάθε σημείο αποδίδεται στο πλησιέστερο κέντρο.
- Επανυπολογισμός Κέντρων: Υπολογίζονται εκ νέου τα κέντρα κάθε κλάσης βάσει των σημείων που περιλαμβάνονται σε αυτήν.

Στην παρούσα μελέτη μέσα από το Saga GIS, έγινε χρήση της Ευκλείδειας απόστασης για τη βαθμονόμηση των κλάσεων. Επιπλέον, οι επαναλήψεις ορίστηκαν σε 1000, πολύ περισσότερες από όσες επαρκούσαν και πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές επαναλήψεων.

Universal Soil Loss Equation (USLE) και Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

Η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης σε μια περιοχή βασίζεται στη συλλογή δεδομένων, όπως π.χ. το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM), οι τιμές βροχόπτωσης, οι τύποι εδάφους και οι χρήσεις γης. Κατά την χρήση του μοντέλου USLE (Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας) για τον υπολογισμό της διάβρωσης γίνεται υπολογισμός και χρήση διαφόρων παραγόντων όπως η ένταση βροχόπτωσης (R), η διαβρωσιμότητα εδάφους (K), ο τοπογραφικός παράγοντας (LS), η κάλυψη γης (C) και οι πρακτικές διαχείρισης (P) (Kardhana et al. 2024).

Η τεχνική USLE είναι δημοφιλής λόγω της ισορροπίας μεταξύ της απλότητας χρήσης και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της. Οι παράγοντες της εξίσωσης

πολλαπλασιάζονται για τον υπολογισμό της ετήσιας απώλειας εδάφους σε τόνους ανά εκτάριο ανά έτος (t/ha/yr). Με τη χρήση ΓΣΠ, τα δεδομένα αναλύονται χωρικά και δημιουργούνται χάρτες εδαφικής απώλειας, επιτρέποντας μια λεπτομερή απεικόνιση της διάβρωσης στην περιοχή μελέτης (Cheng et al. 2024).

Η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (USLE) εκφράζει την ετήσια διάβρωση εδάφους (A) ως συνάρτηση παραγόντων: της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R), της διαβρωσιμότητας του εδάφους (K), του μήκους και της κλίσης της κλιτύς (L, S), της κάλυψης με βλάστηση (C) και των πρακτικών υποστήριξης για την προστασία κατά της υποβάθμισης (P). Η εξίσωση είναι (Benavidez et al. 2018):

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (6)$$

Η USLE αναπτύχθηκε αρχικά για γεωργικές εκτάσεις στις ΗΠΑ, με περιορισμούς σε εδάφη με μέτρια υφή, πλαγιές μήκους έως 122 μέτρων και κλίσεις 3%-18%. Χρησιμοποιείται ευρέως λόγω των χαμηλών απαιτήσεων σε δεδομένα, αν και η ακρίβειά της μειώνεται σε πιο σύνθετες γεωμορφολογικές συνθήκες. Η εφαρμογή της απαιτεί δεδομένα υψηλής χρονικής ανάλυσης (π.χ. <30 λεπτών για το R), ενώ δεν υπολογίζει απώλειες από φαράγγια ή μαζικές καταστροφές (π.χ. κατολισθήσεις). Η αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου παραμένει πρόκληση, λόγω έλλειψης αξιόπιστων δεδομένων για επαλήθευση. Ωστόσο, η USLE είναι ιδιαίτερα δημοφιλής σε περιοχές με περιορισμένα δεδομένα, προσφέροντας αξιόπιστες εκτιμήσεις με σχετικά απλές παραμέτρους (Benavidez et al. 2018).

Η Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (RUSLE) είναι μία εξελιγμένη μέθοδος εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης, που βοηθά στον εντοπισμό ευάλωτων περιοχών και στη λήψη μέτρων προστασίας. Βελτιώνει την ακρίβεια της αρχικής USLE με πιο λεπτομερή δεδομένα και προηγμένους αλγόριθμους, όπως οι επικαιροποιημένοι συντελεστές διαβρωτικότητας και διαχείρισης γης. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από την ακρίβεια των δεδομένων και δυσκολεύεται να καταγράψει μικρής κλίμακας μεταβολές ή ακραία φαινόμενα (Renard et al. 1997).

Η ενσωμάτωση της RUSLE στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών ενισχύει τη δυνατότητα μοντελοποίησης και ανάλυσης, επιτρέποντας την ενσωμάτωση δεδομένων όπως η τοπογραφία, οι χρήσεις γης και οι πρακτικές διατήρησης (Renard et al. 1997). Τα ΓΣΠ, με τη χρήση δεδομένων μορφής κανάβου (raster) με πλήρη χωρική κατανομή της πληροφορίας, διευκολύνουν τη δημιουργία χωρικών χαρτών κινδύνου διάβρωσης και τον εντοπισμό περιοχών προτεραιότητας για στοχευμένα μέτρα διατήρησης και σχεδιασμό χρήσεων γης (Mitasova et al. 1996).

Παράγοντας διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R-Factor)

Ο παράγοντας της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R) εκφράζει τη συνεισφορά της βροχόπτωσης στη διάβρωση εδάφους, υπολογιζόμενος από τη μέση ετήσια τιμή EI30, όπου E είναι η κινητική ενέργεια ενός γεγονότος βροχόπτωσης και I30 η μέγιστη ένταση 30 λεπτών. Η ακριβής εκτίμηση απαιτεί λεπτομερή και μακροχρόνια δεδομένα καταιγίδων, αλλά σε περιοχές με περιορισμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται απλοποιημένες εξισώσεις με ετήσια ή μηνιαία βροχόπτωση.

Σε παγκόσμια κλίμακα, ο Panagos et al. (2017) δημιούργησε παγκόσμιο χάρτη R με δεδομένα από 63 χώρες. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται και εξισώσεις είναι χρήσιμες για περιοχές χωρίς λεπτομερή δεδομένα, ενώ διαφορετικές προσεγγίσεις εφαρμόζονται ανάλογα με το κλίμα και τα διαθέσιμα δεδομένα. Η χρήση μηνιαίων δεδομένων διευκολύνει την εκτίμηση εποχιακής διαβρωτικότητας, κάτι κρίσιμο σε περιοχές με

έντονες εποχικές διακυμάνσεις. Η επιλογή του παράγοντα R πρέπει να γίνεται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη την τοπική καταλληλότητα, καθώς η αυθαίρετη μεταφορά τους μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις. Επομένως, η πιστοποίηση και ο έλεγχος ευαισθησίας είναι απαραίτητες τεχνικές για ακριβέστερη πρόβλεψη (Benavidez et al. 2018).

Παράγοντας διαβρωσιμότητας εδάφους (K-Factor)

Ο παράγοντας διαβρωσιμότητας εδάφους (K) εκφράζει την ευαισθησία του εδάφους στη διάβρωση, ανάλογα με τις ιδιότητές του. Ορίζεται ως η μέση ετήσια απώλεια εδάφους ανά μονάδα διαβρωτικής ικανότητας βροχής για τυπικές συνθήκες γυμνού εδάφους, πρόσφατα οργωμένου κατά μήκος της κλίσης χωρίς μέτρα διατήρησης. Υψηλότερες τιμές K υποδηλώνουν μεγαλύτερη ευπάθεια στη διάβρωση. Ο υπολογισμός του γίνεται μέσω εξισώσεων που συσχετίζουν υφή, οργανική ύλη, δομή εδάφους και διαπερατότητα. Ωστόσο, εναλλακτικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται όταν λείπουν δεδομένα για τη δομή και τη διαπερατότητα. Σε περιορισμένα δεδομένα, έχουν προταθεί ορισμένες προσεγγιστικές τιμές βάσει υφής και οργανικής ύλης (Benavidez et al. 2018).

Παράγοντας μήκους και κλίσης της πλαγιάς (LS-Factor)

Ο παράγοντας μήκους και κλίσης της πλαγιάς (LS) εκφράζει την επίδραση του μήκους και της κλίσης μιας πλαγιάς στη διάβρωση από νερό. Υπολογίζεται ως ο λόγος απώλειας εδάφους μιας πλαγιάς σε σχέση με ένα τυπικό πειραματικό αγροτεμάχιο. Οι αρχικές εξισώσεις (USLE) εφαρμόζονται σε πλαγιές με ομοιόμορφη κλίση, ενώ μεθοδολογίες όπως η RUSLE επεκτείνονται σε πιο σύνθετες τοπογραφίες με χρήση ΓΣΠ και ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEMs). Σύγχρονες μέθοδοι ενσωματώνουν τη συσσώρευση ροής και την περιοχή συνεισφοράς, αποτυπώνοντας καλύτερα τη σύγκλιση και απόκλιση της ροής, κάτι που είναι κρίσιμο για πολύπλοκες τοπογραφίες. Οι υψηλής ανάλυσης DEMs (15m ή λιγότερο) προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια, ιδιαίτερα σε μικρής κλίμακας μελέτες (υπολεκάνες ή πεδία), ενώ τα χαμηλότερης ανάλυσης DEMs (>100 m) είναι καταλληλότερα στις μελέτες για παράδειγμα σε εθνικό επίπεδο. Η επιλογή μεθόδου εξαρτάται από την ανάλυση των δεδομένων, τους διαθέσιμους πόρους και την κλίμακα της μελέτης (Benavidez et al. 2018).

Παράγοντας κάλυψης και διαχείρισης (C-Factor)

Ο παράγοντας κάλυψης και διαχείρισης (C) εκφράζει τη σχέση της απώλειας εδάφους από ένα αγροτεμάχιο με συγκεκριμένη κάλυψη και διαχείριση σε σύγκριση με αγρό απλής άροσης χωρίς βλάστηση. Υπολογίζεται μέσω δεδομένων όπως η φυτική κάλυψη, η τραχύτητα της επιφάνειας και η υγρασία του εδάφους. Η μέθοδος αυτή απαιτεί λεπτομερή γνώση της περιοχής, κάτι που είναι πιο εύκολο σε μικρής κλίμακας περιοχές. Για μεγαλύτερες περιοχές, χρησιμοποιούνται τιμές C από τη βιβλιογραφία ή μέσω δεικτών όπως ο NDVI από δορυφορικά δεδομένα, αλλά απαιτείται προσοχή στην ποιότητα και την ανάλυση των δεδομένων. Ο NDVI συσχετίζεται με την πυκνότητα της βλάστησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία χαρτών του παράγοντα C. Αυτή η μέθοδος βοηθά στην καταγραφή εποχιακών μεταβολών της βλάστησης, που επηρεάζουν τη διάβρωση, ειδικά σε περιοχές με έντονη εποχική βροχόπτωση (Benavidez et al. 2018).

Παράγοντας πρακτικών υποστήριξης για την προστασία κατά της υποβάθμισης (P-Factor)

Ο παράγοντας υποστηρικτικών πρακτικών για την προστασία κατά της υποβάθμισης

(P) εκφράζει την αναλογία απώλειας εδάφους σε ένα αγροτεμάχιο με συγκεκριμένες πρακτικές διατήρησης εδάφους (π.χ. καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς, αναβαθμίδες) σε σχέση με ένα αγροτεμάχιο συμβατικής καλλιέργειας (Renard et al. 1997). Όσο πιο αποτελεσματική είναι η πρακτική που εφαρμόζεται, τόσο μικρότερη είναι η τιμή του P. Αν δεν εφαρμόζονται υποστηρικτικές πρακτικές, το P ισούται με 1,0. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο παράγοντας P παραλείπεται γιατί οι τιμές του παράγοντα κάλυψης (C) περιλαμβάνουν ήδη τέτοιες πρακτικές. Παρ' όλα αυτά, σε μελέτες με λεπτομερή δεδομένα, η ενσωμάτωση του P μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της εκτίμησης απώλειας εδάφους και να αξιολογήσει την επίδραση διαφορετικών πρακτικών διαχείρισης. Επίσης, με τη χρήση σεναρίων, μπορούν να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των διαφορετικών καλλιεργητικών πρακτικών στην εδαφική διάβρωση. Συνεπώς, ο παράγοντας P είναι ιδιαίτερα χρήσιμος όταν εξετάζονται διαφορετικές πρακτικές για τη διατήρηση του εδάφους (Benavidez et al. 2018).

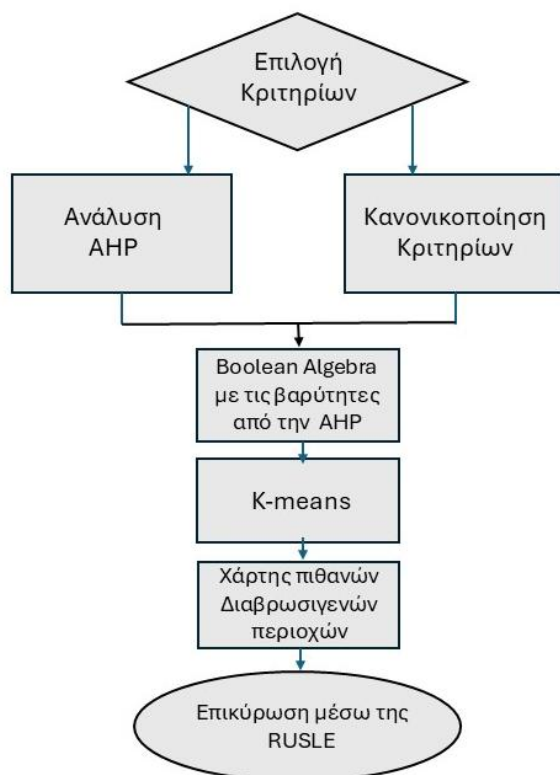
Μεθοδολογία Εντοπισμού Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών

Στην παρούσα ενότητα αναπτύσσεται η μεθοδολογική προσέγγιση που εφαρμόστηκε για τη δημιουργία χαρτών εντοπισμού πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών. Το πλαίσιο της μελέτης βασίζεται στον συνδυασμό της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ), προσαρμοσμένο σε μια εκτεταμένη περιοχή μελέτης. Στην Εικόνα 6, παρουσιάζεται γραφικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα ροής, το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας περιλαμβάνει τη διερεύνηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, με στόχο την αναγνώριση των κρίσιμων παραμέτρων (κριτηρίων), που συνδέονται με την εδαφική διάβρωση που προκαλείται από την επίδραση των επιφανειακών υδάτων. Μετά από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση τα κριτήρια που επιλέχθηκαν καθώς και η μεθοδολογική προσέγγιση που σχετίζεται με την εφαρμογή της AHP και τις βαρύτητες που αποδόθηκαν σε αυτά βασίστηκε στην έρευνα των Tadesse και Tefera (2021). Μετά από την επιλογή των κριτηρίων, όλα τα κριτήρια κανονικοποιήθηκαν και έγινε χρήση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP), όπου δόθηκε στο καθένα η ανάλογη βαρύτητα. Στην συνέχεια με την χρήση των ΓΣΠ, του «ψηφιδωτού» υπολογιστή πράξεων (raster calculator) και της Boolean Άλγεβρας, δημιουργήθηκε ο χάρτης των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών. Για την ταξινόμηση των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών σε πέντε (5) κλάσεις κλιμάκωσης έγινε χρήση της μεθόδου ομαδοποίησης K-means clustering. Τέλος, για την πιστοποίηση (validation) των αποτελεσμάτων σχετικά με τις περιοχές υψηλού κινδύνου διάβρωσης, εφαρμόστηκε η Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (RUSLE).

Η μέθοδος αυτή, επιτρέπει την εκτίμηση της απώλειας εδάφους λόγω διάβρωσης, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως η κλίση του εδάφους. Με την αξιοποίηση της RUSLE, υπολογίστηκαν οι ρυθμοί διάβρωσης και εντοπίστηκαν οι ζώνες υψηλού κινδύνου. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η εξίσωση χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή πολυγώνων πιστοποίησης, που περιλαμβάνουν περιοχές με πολύ υψηλές και υψηλές τιμές διάβρωσης, σύμφωνα με την πενταβάθμια ταξινόμηση των αποτελεσμάτων.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό περιοχών με αυξημένο κίνδυνο διάβρωσης περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω. Στο πλαίσιο της μελέτης, πραγματοποιήθηκε ενδελεχής βιβλιογραφική ανασκόπηση, εστιάζοντας σε έρευνες που ασχολούνται με την αναγνώριση ευπαθών περιοχών διάβρωσης με την χρήση

ΠΚΑ-ΓΣΠ. Παρά την ύπαρξη πληθώρας σχετικών μελετών, διαπιστώθηκαν ελλείψεις στην επικύρωση των αποτελεσμάτων τους, γεγονός που είναι κρίσιμο για την ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων εκτίμησης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε ως αναφορά η μελέτη των Tadesse και Tefera (2021), η οποία παρέχει επικυρωμένα δεδομένα και υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Αυτή η μεθοδολογική προσέγγιση θεωρήθηκε κατάλληλη για την ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού εργαλείου και άμεσα εφαρμόσιμου, ικανού να εντοπίζει πιθανές διαβρωσιγενείς περιοχές υπό ποικίλες περιβαλλοντικές και γεωγραφικές συνθήκες.



Εικόνα 6. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας εκτίμησης πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών

Η ανάλυση ξεκινά με την παρουσίαση των παραμέτρων που καθορίστηκαν ως βάση για τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση περιοχών με αυξημένη πιθανότητα διαβρωσιγένεσης. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν είναι η Κλίση, το Υψόμετρο, οι Χρήσεις Γης/Κάλυψη Γης, το Έδαφος, ο Δείκτης Ορμητικότητας Ροής (SPI), ο Δείκτης Υγρασίας (WI) και η Καμπυλότητα, οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Οι συγκεκριμένοι παράγοντες επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον ΓΣΠ για τη δημιουργία του χάρτη που αποτυπώνει τις περιοχές με πιθανή ευπάθεια στη διάβρωση. Για τη διευκόλυνση της συγκριτικής ανάλυσης, όλοι οι παράγοντες κανονικοποιήθηκαν με τη μέθοδο min-max (εύρος 0-1), εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία των συγκρίσεων (Ali et al. 2014). Η κανονικοποίηση των κριτηρίων έγινε με βάση τον τρόπο που συμμετέχουν στην διαδικασία της διάβρωσής (πχ. η μέγιστη τιμή της κλίσης πήρε την τιμή 1 και η ελάχιστη τιμή της πήρε την τιμή 0 μιας και αναμένεται όσο πιο έντονη είναι η κλίση αντίστοιχα να είναι και η διάβρωση). Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι εφόσον η παράμετρος χρήσεων γης και η παράμετρος με τις κατηγορίες του εδάφους μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους και να αποτελέσουν τον συντελεστή

απορροής CN της SCS, δημιουργήθηκε και ένα σενάριο που κάνει χρήση των υπόλοιπων πέντε (5) παραμέτρων και τον συντελεστή απορροής CN.

Πίνακας 2. Κριτήρια εντοπισμού των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών στην περιοχή μελέτης.

A/A	Κριτήρια	Ελληνική Ονομασία
1	Slope	Κλίση
2	Digital Elevation Model (DEM)	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους
3	LU/LC	Χρήσεις Γης/Κάλυψη Γης
4	Soil	Έδαφος
5	SPI (Stream Power Index)	Δείκτης Ορμητικότητας Ροής
6	WI (Wetness Index)	Δείκτης Υγρασίας
7	Curvature	Καμπυλότητα

Ανάλυση Επιλεγμένων Κριτηρίων για την Δημιουργία Χάρτη Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών

Κλίση - Slope

Η κλίση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην διάβρωση του εδάφους. Ο παράγοντας της κλίσης της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε από το DEM ανάλυσης 5 m χρησιμοποιώντας το εργαλείο Spatial Analyst του ArcGIS. Οι απότομες κλίσεις έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην διάβρωση του εδάφους σε σχέση με τις ήπιες κλίσεις. Η ταχύτητα της επιφανειακής απορροής, αυξάνεται καθώς αυξάνεται η κλίση, και αντίστοιχα όσο αυξάνεται η επιφανειακή απορροή τόσο αυξάνεται και το ποσοστό της εδαφικής διάβρωσης. Επιπλέον, το μήκος της κλίσης επηρεάζει τόσο την ποσότητα της επιφανειακής απορροής, όσο και των μεταφερόμενων σωματιδίων.

Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους - Digital Elevation Model (DEM)

Το υψόμετρο επηρεάζει την εδαφική διάβρωση, καθώς επιδρά στη δημιουργία χαραδρών. Επιπλέον, επηρεάζει την κατανομή της βλάστησης και τη βροχόπτωσης, καθώς με την αύξηση του υψομέτρου οι φυσικές συνθήκες μεταβάλλονται, επηρεάζοντας τη διάβρωση (Naceur et al. 2024). Ένα DEM υψηλής ακρίβειας δύναται να αποτυπώνει με αξιοπιστία τις περιοχές υψηλού κινδύνου διάβρωσης και επομένως τα παράγωγα από αυτό καθώς και τα αποτελέσματα του είναι αξιόπιστα ως προς τον σχεδιασμό των κατάλληλων μέτρων προστασίας (Michalopoulou et al. 2022). Η ανάλυση του υψομέτρου έγινε με τη χρήση DEM ανάλυσης 5x5 σε περιβάλλον ΓΣΠ, παρέχοντας υψηλή ανάλυση στα δεδομένα.

Χρήσεις Γης / Κάλυψη Γης - LU/LC

Η βλάστηση συμβάλλει καθοριστικά στην προστασία του εδάφους από τη διάβρωση, ενώ το γυμνό έδαφος είναι πιο ευπαθές. Στη μελέτη των Ξόφης κ.α. (2024), για την αποτύπωση της βλάστησης στην περιοχή που επλήγη από την πυρκαγιά του 2023, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες Sentinel 2 και Planet, καθώς και δεδομένα πεδίου για όλο το έτος. Μέσω αντικειμενοστραφούς ανάλυσης εικόνας (OBIA) με το

λογισμικό eCognition, αναλύθηκαν τα δεδομένα και καταχωρήθηκαν 10 τύποι κάλυψης γης και βλάστησης, με τα δάση να καλύπτουν το 56% της περιοχής. Αν συνυπολογιστούν οι αραιές εκτάσεις από προηγούμενες πυρκαγιές, τα φυσικά οικοσυστήματα καταλαμβάνουν πάνω από το 75% της περιοχής, δηλαδή πάνω από 100.000 εκτάρια (Ξόφης κ.α. 2024). Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε αναθεώρηση της κατάστασης της βλάστησης μετά την πυρκαγιά, σύμφωνα με τον συνυπολογισμό της δριμύτητας καύσης στα υπάρχοντα δεδομένα.

Εδαφος - Soil

Ο τύπος του εδάφους θεωρείται επίσης βασικός παράγοντας που προκαλεί διάβρωση και επηρεάζει την επιλογή των πρακτικών διαχείρισης γης και χρήσης γης στην περιοχή (Andualem et al. 2020). Οι διάφοροι τύποι εδάφους έχουν διαφορετική ευαισθησία στη διάβρωση, ενώ η λιθολογία επηρεάζει την ανάπτυξή της, ειδικά σε περιοχές με σύνθετα γεωλογικά χαρακτηριστικά, όπως οι καρστικές περιοχές. Εκεί, η διάβρωση εξαρτάται από τα λιθολογικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων. Για παράδειγμα, οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες παρουσιάζουν μικρή διάβρωση, ενώ οι μάργες και οι αμμώδεις ανθρακικοί σχηματισμοί υψηλή. Σε περιοχές με έντονη διάβρωση, μπορεί να παρατηρηθεί απογύμνωση της επιφάνειας (Domazetović et al. 2024).

Οι υδρολογικές ομάδες εδάφους σύμφωνα με τη μέθοδο SCS-CN περιγράφονται στο National Engineering Handbook του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ - Υπηρεσία Διατήρησης Φυσικών Πόρων (USDA-NRCS). Αυτές οι ομάδες κατηγοριοποιούνται με βάση την ικανότητα διήθησης του νερού και περιλαμβάνουν τις εξής ομάδες, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3 (Ross et al. 2018).

Πίνακας 3. Υδρολογικές Ομάδες κατά SCS-CN

Υδρολογικές Ομάδες κατά SCS-CN	Δυναμικό Απορροής	Περιεκτικότητα σε άμμο	Περιεκτικότητα σε άργιλο
Ομάδα Α	Χαμηλότερο	> 90%	< 10%
Ομάδα Β	Μέτρια χαμηλό	50-90%	10-20%
Ομάδα C	Μέτρια υψηλό	< 50%	20-40%
Ομάδα D	Υψηλότερο	< 50%	> 40%

Δείκτης Ορμητικότητας Ροής - Stream Power Index (SPI)

Ο Δείκτης Ορμητικότητας Ροής (SPI) συσχετίζει την κατεύθυνση ροής (Flow Direction) τη συγκέντρωση ροής (Flow Accumulation) και με την κλίση του εδάφους (Slope), που καθορίζουν τη δυναμική ενέργεια που έχει η απορροή στην εδαφική διάβρωση. Ο SPI λαμβάνει υπόψη την τοπογραφική γεωμετρία της κλίσης, καθώς και τη θέση του σημείου στο τοπίο, συνδυάζοντας δεδομένα για την κλίση και την έκταση της λεκάνης απορροής (Andualem et al. 2020):

$$SPI = A_s * \tan\beta \quad (7)$$

όπου, A_s είναι η έκταση της λεκάνης απορροής που συγκεντρώνεται η ροή των υδάτων από τα ανάντη σημεία και $\tan\beta$ είναι η εφαπτομένη της κλίσης στο συγκεκριμένο σημείο της ροής.

Ο Δείκτης Ορμητικότητας Ροής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της δυνητικής διάβρωσης βάσει της ροής σε συγκεκριμένα σημεία της τοπογραφίας της περιοχής. Όταν αυξάνονται η έκταση της λεκάνης απορροής και η κλίση, αυξάνεται η ποσότητα και η ταχύτητα του νερού που ρέει από τις ανάντη περιοχές, με αποτέλεσμα την αύξηση του Δείκτη Ορμητικότητας Ροής και του κινδύνου εδαφικής διάβρωσης (Andualem et al. 2020).

Δείκτης Υγρασίας - Wetness Index (WI)

Ο Δείκτης Υγρασίας (WI) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο η τοπογραφία επηρεάζει τη ροή και τη συγκέντρωση της επιφανειακής απορροής. Εξαρτάται από την κλίση του εδάφους και την έκταση της περιοχής όπου συγκεντρώνονται ύδατα από τα υψηλότερα σημεία (περιοχή συμβολής). Με τη χρήση του δείκτη WI, μπορούν να εντοπιστούν περιοχές με αυξημένη υγρασία, καθώς και ζώνες αυξημένου κινδύνου εδαφικής διάβρωσης ή σχηματισμού ρυακιών. Η εξίσωση για τον υπολογισμό του WI, είναι η εξής (Bohner and Selige, 2006) :

$$WI = \ln (SCA/\tan(\beta)) \quad (8)$$

όπου, SCA είναι η αντίστοιχη έκταση αποστράγγισης στο συγκεκριμένο σημείο ανά μονάδα μήκους (m²/m) και β είναι η γωνία της κλίσης στο συγκεκριμένο σημείο.

Με αυτόν τον τρόπο εκτιμάται τόσο η πιθανότητα συγκέντρωσης ύδατος, όσο και η κατανομή της εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη απορροής, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για τη διαχείριση εδαφικής διάβρωσης και της επιφανειακής απορροής στην περιοχή μελέτης.

Καμπυλότητα – Curvature

Η Καμπυλότητα (Curvature) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη σταθερότητα των πλαγιών και την εδαφική διάβρωση. Η ανάλυση της κυρτότητας βοηθά στον εντοπισμό περιοχών με κίνδυνο αστάθειας, καθώς επηρεάζει τη ροή του νερού στην επιφάνεια και την διεύθυνσή του στο έδαφος. Οι περιοχές που παρουσιάζουν κοιλότητες ευνοούν τη συγκέντρωση νερού, αυξάνοντας την πιθανότητα διάβρωσης, ενώ οι περιοχές με υψώματα (κυρτώματα) ενισχύουν την απορροή του νερού, μειώνοντας το ποσοστό διάβρωσης. Για τον υπολογισμό της, χρησιμοποιήθηκε το ArcGIS με δεδομένα από το DEM, ανάλυσης 5x5 m και υπολογίζεται από την εξίσωση (Dutta et al. 2024):

$$k = \left\| \frac{dt}{ds} \right\| \quad (9)$$

Συντελεστής Απορροής CN της SCS (Soil Conservation Service Curve Number, SCS-CN)

Ο συντελεστής απορροής CN της SCS (Soil Conservation Service Curve Number) χρησιμοποιείται ευρέως στην μέθοδο SCS για την εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής, καθώς είναι απλή και ευρέως εφαρμόσιμη, ιδιαίτερα σε περιοχές χωρίς διαθέσιμα δεδομένα. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την απορροή, όπως τον τύπο του εδάφους, τις χρήσεις γης, καθώς και την κατάσταση της επιφάνειας και την προϋπάρχουσα υγρασία (Mishra & Singh 2003). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να καθοριστεί το δυναμικό της επιφανειακής απορροής σε μία περιοχή μελέτης. Μεγαλύτερη πιθανότητα για πλημμυρικά γεγονότα παρουσιάζουν οι υψηλές τιμές του Συντελεστή Απορροής CN, όπου η τιμή 100 αποδίδεται σε αδιαπέραστες επιφάνειες και τιμές έως περίπου 30 αποδίδονται σε εδάφη υψηλής διαπερατότητας, δηλαδή χαμηλή επιφανειακή απορροή (Rincón et al. 2018).

Για τη δημιουργία του κριτηρίου του Συντελεστή Απορροής CN, γίνεται η χαρτογράφηση των κατηγοριών των εδαφών σύμφωνα με την υδατοδιαπερατότητά τους και των χρήσεων γης. Στην παρούσα μελέτη, για την κατηγοριοποίηση των τιμών του CN αφομοιώθηκαν τα δεδομένα από τις υδρολογικές κατηγορίες εδαφών και την ταξινόμηση των χρήσεων γης από το CORINE Land Cover, σύμφωνα με τη μελέτη των Miliani et al. (2011) (Πίνακας 4). Οι συγκεκριμένες τιμές τροποποιήθηκαν στην συνέχεια για να προσομοιώνουν καλύτερα την περιοχή μελέτης στην μεταπτυχιακή περίοδο.

Πίνακας 4. Τιμές Απορροϊκού Συντελεστή (Curve Number - CN) σύμφωνα με τις Υδρολογικές Εδαφικές Ομάδες και την Ταξινόμηση Καλύψεων Γης του CORINE (Πηγή: Milliani et al. 2011)

Ονοματολογία Κάλυψης Γης CORINE (CORINE LAND COVER)		Υδρολογική Ομάδα Εδάφους			
		A	B	C	D
1.1.1	Συνεχής Αστικός Ιστός	89	92	94	95
1.1.2	Ασυνεχής Αστικός Ιστός	77	85	90	92
1.2.1	Βιομηχανικές και Εμπορικές Ζώνες	81	88	91	93
1.2.2	Οδικά και Σιδηροδρομικά Δίκτυα	98	98	98	98
1.2.3	Ζώνες Λιμένων	81	88	91	93
1.2.4	Αεροδρόμια	72	82	87	89
1.3.1	Χώροι Εξόρυξης Ορυκτών	72	82	87	89
1.3.2	Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	72	82	87	89
1.3.3	Χώροι οικοδόμησης	72	82	87	89
1.4.1	Περιοχές αστικού πρασίνου	68	79	86	89
1.4.2	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	49	69	79	84
2.1.1	Μη Αρδευόμενη Αρόσιμη Γη	49	69	79	84
2.1.2	Μόνιμα Αρδευόμενη Αρόσιμη Γη	49	69	79	84
2.1.3	Ορυζώνες	59	70	78	81
2.2.1	Αμπελώνες	67	77	83	87
2.2.2	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	65	75	82	86
2.2.3	Ελαιώνες	65	75	82	86
2.3.1	Λιβάδια	49	69	79	84
2.4.1	Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες	62	71	78	81
2.4.2	Σύνθετες καλλιέργειες	67	78	85	89
2.4.3	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με	67	78	85	89

σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης

2.4.4	Γεωργο-δασικές Εκτάσεις	45	66	77	83
3.1.1	Δάσος πλατύφυλλων	60	65	70	77
3.1.2	Δάσος κωνοφόρων	60	65	70	77
3.1.3	Μικτό δάσος	60	65	70	77
3.2.1	Φυσικοί βοσκότοποι	60	65	74	80
3.2.2	Θάμνοι και χερσότοποι	60	65	74	80
3.2.3	Σκληροφυλλική βλάστηση	60	65	74	80
3.2.4	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	60	65	74	80
3.3.1	Παραλίες, αμμόλοφοι, Αμμουδιές	25	55	70	77
3.3.2	Απογυμνωμένοι βράχοι	68	79	86	89
3.3.3	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	68	79	86	89
3.3.4	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	68	79	86	89
3.3.5	Παγετώνες και αέναο χιόνι	79	79	79	79
4.1.1	Βάλτοι στην ενδοχώρα	98	98	98	98
5.1.1	Υδατορρέυματα	99	99	99	99
5.1.2	Επιφάνειες στάσιμου ύδατος	99	99	99	99

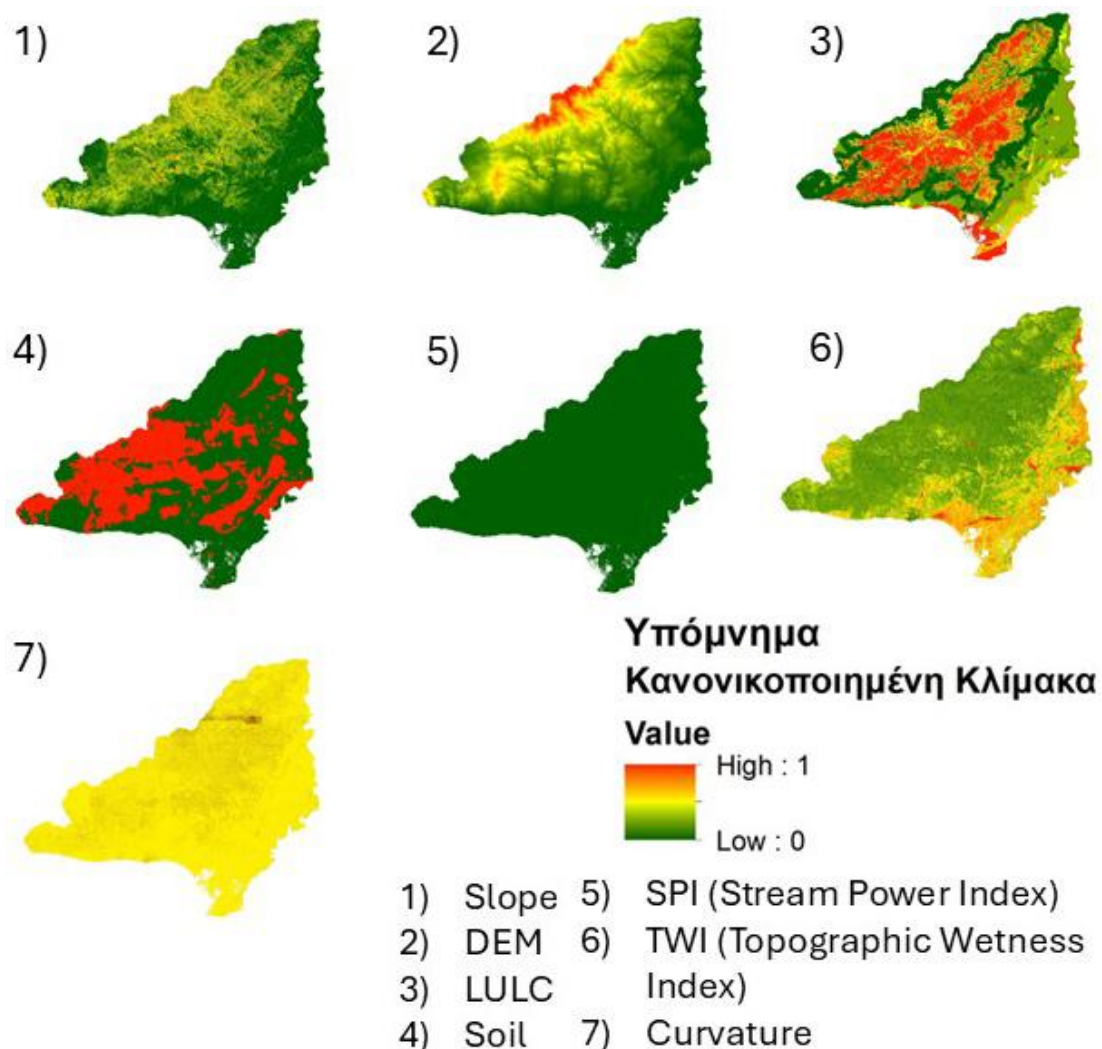
Η μέθοδος SCS-CN εφαρμόζεται ευρέως για την αξιολόγηση της υδρολογικής απόκρισης και των κινδύνων στις λεκάνες απορροής που έχουν επηρεαστεί από δασικές πυρκαγιές, αλλά οι μελέτες για τον προσδιορισμό των τιμών CN σε τέτοιες περιπτώσεις είναι περιορισμένες. Η μελέτη του Soulis (2018) ανέλυσε δεδομένα βροχής-απορροής πριν και μετά από πυρκαγιά σε λεκάνη απορροής στην Αττική, δείχνοντας σημαντική αύξηση της απορροής και των μέγιστων παροχών μετά την πυρκαγιά (7,7 και 11,8 φορές αντίστοιχα). Οι τιμές CN ήταν υψηλότερες μετά την πυρκαγιά, με αύξηση έως και 36,4 μονάδες για συγκεκριμένα και σύνθετα σύνολα εδάφους/κάλυψης. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία της μελέτης των τιμών CN για την εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης στις επηρεασμένες περιοχές μεταπυρικά, ενώ τονίζεται η ανάγκη για συλλογή περισσότερων δεδομένων πεδίου έτσι ώστε να είναι εφικτή η καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της απώλειας βλάστησης στο CN.

Καθώς, η εδαφική διάβρωση σχετίζεται άμεσα με τα πλημμυρικά γεγονότα και τα συστήματα βροχόπτωσης, ο συνυπολογισμός του CN στα κριτήρια εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης, κρίνεται σκόπιμος. Γι' αυτό το λόγο, όπως ήδη έχει αναφερθεί και παραπάνω, η παρούσα προσέγγιση επιχειρεί τη διερεύνηση της συνεισφοράς του Συντελεστή Απορροής CN στην εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης. Μέσα από τη μελέτη των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης και της δριμύτητας καύσης, δημιουργήθηκε ο εξής τρόπος υπολογισμού των συντελεστών CN, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης του Soulis (2018):

- $CN_{post} = CN_{pre} + 10$ (μεγάλου βαθμού επίδρασης πυρκαγιάς)
- $CN_{post} = CN_{pre} + 7$ (μέτριου βαθμού επίδρασης πυρκαγιάς)
- $CN_{post} = CN_{pre} + 4$ (χαμηλού βαθμού επίδρασης πυρκαγιάς)

όπου, CN_{post} είναι ο συντελεστής απορροής μετά την πυρκαγιά και CN_{pre} είναι ο συντελεστής απορροής πριν την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Στην παρούσα μελέτη, οι μεταπυρικές τιμές των Συντελεστών Απορροής (CN_{post}) υπολογίστηκαν για ολόκληρη την περιοχή μελέτης χρησιμοποιώντας το ΓΣΠ, σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω.

Παρακάτω στην Εικόνα 7 που ακολουθεί, παρουσιάζονται όλα τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του Χάρτη Εκτίμησης των Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών. Όλα τα κριτήρια απεικονίζονται στην κανονικοποιημένη τους μορφή όπως έχει περιγραφεί στην ενότητα *Μεθοδολογία Εντοπισμού Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών* (Εικόνα 7).



Εικόνα 7. Κανονικοποιημένη χωρική κατανομή όλων των επιλεχθέντων κριτηρίων για την παραγωγή των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών

Μεθοδολογία Δημιουργίας του Χάρτη Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών με τη Χρήση των Κανονικοποιημένων Κριτηρίων

Μετά την κανονικοποίηση των επτά κριτηρίων που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό της δυνητικών περιοχών σε εδαφικής διάβρωσης, δημιουργήθηκαν ξεχωριστοί χάρτες για κάθε κριτήριο. Ακολούθως, με την χρήση του εργαλείου Raster Calculator και της Boolean Αλγεβρας σε περιβάλλον ΓΣΠ, συνδυάστηκαν όλα τα κριτήρια για την παραγωγή του χάρτη των δυνητικά διαβρωσιγενών περιοχών. Ο συνδυασμός τους επιτεύχθηκε με τον πολλαπλασιασμό τους με την βαρύτητα του κάθε κριτηρίου όπως καθορίστηκε από την Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) σύμφωνα με τις τιμές βαρύτητας που προτάθηκαν από τη μελέτη των Tadesse & Tefera (2021). Συνεπώς, το κάθε κριτήριο πολλαπλασιάστηκε με την αντίστοιχη βαρύτητα του και στην συνέχεια όλα τα επιμέρους αποτελέσματα προστέθηκαν όλα μεταξύ τους για την δημιουργία του χάρτη όπου καταγράφονται οι περιοχές με αυξημένο δυνητικό κίνδυνο σε διάβρωση. Οι βαρύτητες που χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με την μελέτη των Tadesse & Tefera (2021) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Το τελικό αποτέλεσμα από την πρόσθεση όλων των κριτηρίων ταξινομήθηκε σε πέντε κατηγορίες κινδύνου με την χρήση της τεχνική ομαδοποίησης K-mean σε: 1) πολύ χαμηλό, 2) χαμηλό, 3) μέτριο, 4) υψηλό και 5) πολύ υψηλό.

Πίνακας 5. Βαρύτητες Κριτηρίων σύμφωνα με την AHP (Tadesse & Tefera, 2021)

Κριτήρια	Slope	LULC	Soil	DEM	SPI	Curvature	TWI
AHP	40,96	24,91	14,85	8,96	5,22	2,91	2,19

Έτσι δημιουργήθηκε ο 1^{ος} Χάρτης εκτίμησης πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών, με τη χρήση όλων των επτά (7) κριτηρίων. Παράλληλα, δημιουργήθηκε και μία δεύτερη εκδοχή, όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, όπου αντί να γίνει χρήση των Χρήσεων Γης/Κάλυψης Γης (LULC) και των Τύπων Εδάφους (Soil) υπολογίστηκε ο Συντελεστή Απορροής CN όπου και τα αντικατέστησε. Η βαρύτητα που δόθηκε στο νέο κριτήριο υπολογίστηκε ως το άθροισμα από τις βαρύτητες των δύο κριτηρίων που ενσωματώθηκαν στο Συντελεστή Απορροής CN. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι βαρύτητες των κριτηρίων, όπως υπολογίστηκαν για τον 2^ο Χάρτη.

Πίνακας 6. Βαρύτητες Κριτηρίων Διαβρωσιγένεσης με τη συμμετοχή του CN (Tadesse and Tefera, 2021)

Κριτήρια	Slope	CN	DEM	SPI	Curvature	TWI
AHP	40,96	39,76	8,96	5,22	2,91	2,19

Και για τις δύο εκδοχές του τελικού Χάρτη των πιθανών σε διαβρωσιγένεση περιοχών, η ομαδοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω της τεχνικής ομαδοποίησης K-mean Clustering, στο Saga GIS. Ακολούθησε η ανακατηγοριοποίηση της ομαδοποίησης (reclassification) στο ArcMap GIS και εξήχθησαν οι Χάρτες εκτίμησης των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών, σε 5 κλάσεις: 1) Πολύ Χαμηλή (πιθανότητα διαβρωσιγένεσης), 2) Χαμηλή, 3) Μέτρια, 4) Υψηλή και 5) Πολύ Υψηλή.

Μεθοδολογία Πιστοποίησης Αποτελεσμάτων Εκτίμησης των Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών

Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων σχετικά με την εκτίμηση των περιοχών που είναι επιρρεπείς σε διάβρωση, εφαρμόστηκε το μοντέλο RUSLE, όπως προτείνεται από τους Panagos et al. (2015). Η συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιεί μια προσαρμοσμένη εκδοχή του μοντέλου, γνωστή ως RUSLE2015, η οποία εκτιμά τη μέση ετήσια απώλεια εδάφους λόγω επιφανειακής διάβρωσης (sheet erosion) και διάβρωσης από ρυάκια (rill erosion), βασιζόμενη στην παρακάτω εξίσωση (Panagos et al. 2015):

$$E = R \times K \times C \times LS \times P \quad (10)$$

όπου: E είναι η μέση ετήσια απώλεια εδάφους (t/ha/έτος), R είναι ο παράγοντας διαβρωτικότητας βροχόπτωσης, K είναι ο παράγοντας διαβρωσιμότητας εδάφους, C είναι ο παράγοντας διαχείρισης βλάστησης, LS είναι ο παράγοντας κλίσης και μήκους πλαγιάς και P είναι ο παράγοντας προστατευτικών πρακτικών.

Οι παράγοντες προκύπτουν από δεδομένα του Ευρωπαϊκού Κέντρου Δεδομένων Εδάφους και εξειδικευμένες μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της μελέτης των Panagos et al. (2015a) για την συνολική μεθοδολογία, Panagos et al. (2015b) για τον παράγοντα LS, Panagos et al. (2016) για τον παράγοντα R, Panagos et al. (2014) για τον παράγοντα K. Για τον υπολογισμό του παράγοντα C χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση των Knijsf κ.α. (1999), σύμφωνα με την οποία οι τιμές του C σχετίζονται εκθετικά με το δείκτη βλάστησης NDVI:

$$C = \exp[-\alpha(NDVI)/(\beta - NDVI)] \quad (11)$$

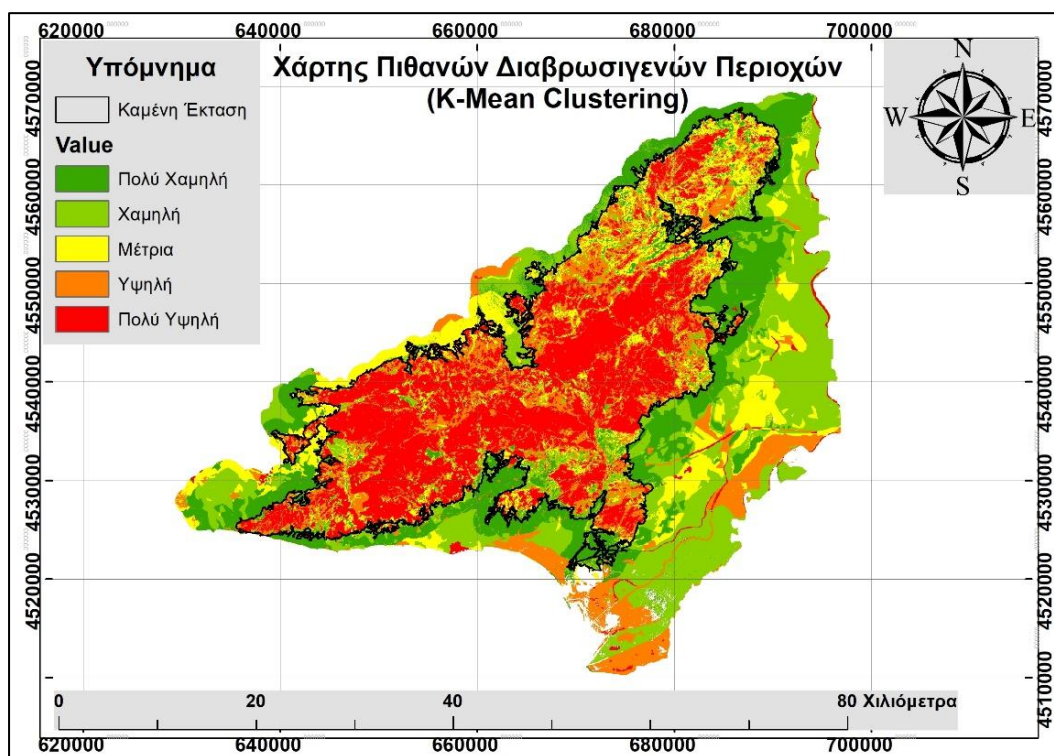
όπου: $\alpha=2$ και $\beta=1$. Ο δείκτης NDVI υπολογίστηκε από εικόνες Sentinel-2 με ημερομηνία λήψης Σεπτέμβριο του 2023.

Ο παράγοντας P ορίστηκε με την τιμή 1 εξαιτίας της πολύ μεγάλης έκτασης της πυρκαγιάς σε συνδυασμό με τα υψηλά ποσοστά δριμύτητας καύσης. Στην παρούσα μελέτη, με την εφαρμογή της RUSLE εντοπίστηκαν και απομονώθηκαν οι περιοχές με κατηγορία υψηλή και πολύ υψηλή διάβρωση σύμφωνα με την προσαρμογή της κλίμακας της έρευνας των Panagos et al. (2015a) σε πενταβάθμια κλίμακα. Από αυτό, εξήχθησαν τα τμήματα εντός της καμένης έκτασης τα οποία και αποτέλεσαν το πολύγωνο πιστοποίησης. Συνεπώς για την πιστοποίηση πραγματοποιήθηκε σύγκριση των ποσοστών των κλάσεων υψηλή και πολύ υψηλή από τους χάρτες πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών εντός της καμένης έκτασης με το πολύγωνο πιστοποίησης.

Αποτελέσματα Εκτίμησης Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών

Τα αποτελέσματα της πιστοποίησης για τις δύο εκδοχές χαρτών που παράχθηκαν για την εκτίμηση πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών, στην πρώτη περίπτωση με τη συμμετοχή των 7 κριτηρίων, έδειξε ποσοστό επιτυχίας 80%, αποδεικνύοντας υψηλή ακρίβεια. Στον δεύτερο χάρτη, όπου χρησιμοποιήθηκε ο Συντελεστής Απορροής CN, το ποσοστό επιτυχίας ανήλθε σε 75%. Αν και ελαφρώς χαμηλότερο από τον πρώτο χάρτη, εξακολουθεί να θεωρείται υψηλό και επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της μεθοδολογίας. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζονται οι πιθανές διαβρωσιγενείς εκτάσεις με την χρήση όλων των 7 κριτηρίων (1^{ος} Χάρτης). Σε αυτή την 1^η εκδοχή του Χάρτη, η επηρεασμένη από την πυρκαγιά περιοχή στη μεγαλύτερή της έκταση παρουσιάζει Υψηλή και Πολύ Υψηλή πιθανότητα Διαβρωσιγένεσης. Ακολουθώντας, στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι εκτάσεις που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση πιθανότητας

διαβρωσιγένεσης, εντός των ορίων της περιοχής που έπληξε η πυρκαγιά με τις κλάσεις υψηλή και πολύ υψηλή να λαμβάνουν ποσοστό 73.5% εντός της καμένης έκτασης.

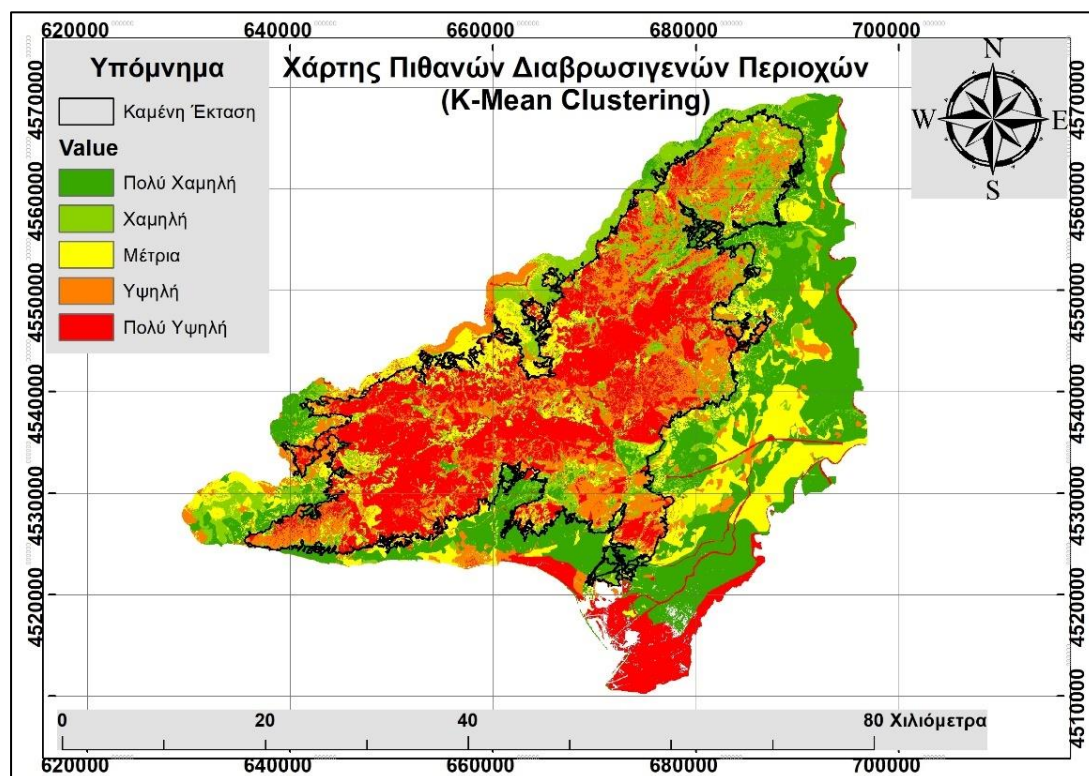


Εικόνα 8. Πιθανές Διαβρωσιγενείς Περιοχές στην Περιοχή Μελέτης

Πίνακας 7. Πίνακας Κλάσεων Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών καμένης περιοχής 1^{ης} Εκδοχής Χάρτη

Πίνακας Κλάσεων Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών		
	Τιμές	Έκταση (Km ²)
	Πολύ Χαμηλή	34.28
	Χαμηλή	82.69
	Μέτρια	131.86
	Υψηλή	240.25
	Πολύ Υψηλή	453.40

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η 2^η εκδοχή του Χάρτη δυνητικών διαβρωσιγενών περιοχών, με την χρήση του Συντελεστή Απορροής CN στα κριτήρια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μικρή διαφοροποίηση από τα προηγούμενα, με ελαφρώς μειωμένα ποσοστά στις κατηγορίες Υψηλής και Πολύ Υψηλής πιθανότητας διάβρωσης. Παρά τις διαφορές, παραμένει αξιόπιστος, καθώς έχει παρόμοιο μοτίβο κατανομής. Σύμφωνα με αυτή την εκδοχή, στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι εκτάσεις που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση πιθανότητας διαβρωσιγένεσης, εντός των ορίων της περιοχής που έπληξε η πυρκαγιά, με τις κλάσεις υψηλή και πολύ υψηλή να λαμβάνουν ποσοστό περίπου 70% εντός της καμένης έκτασης.



Εικόνα 9. Πιθανές Διαβρωσιγενείς Περιοχές στην Περιοχή Μελέτης (CN)

Πίνακας 8. Πίνακας Κλάσεων Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών καμένης περιοχής 2^{ης} Εκδοχής Χάρτη

Πίνακας Κλάσεων Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών (CN)		
	Τιμές	Έκταση (Km ²)
	Πολύ Χαμηλή	31.44
	Χαμηλή	141.54
	Μέτρια	112.96
	Υψηλή	261.75
	Πολύ Υψηλή	394.79

Μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο Χαρτών παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ των κλάσεων της Υψηλής και Πολύ Υψηλής πιθανότητας Διαβρωσιγένεσης. Περιοχές οι οποίες στον 1ο Χάρτη (Εικόνα 8) κατηγοριοποιήθηκαν στην Πολύ Υψηλή πιθανότητα, στον 2ο Χάρτη (Εικόνα 9) κατατάσσονται στην Υψηλή πιθανότητα. Ωστόσο, και στις δύο εκδοχές των αποτελεσμάτων (Εικόνα 8 & 9), εντοπίζονται μεγάλες εκτάσεις με Υψηλή και Πολύ Υψηλή πιθανότητα διάβρωσης εντός της καμένης περιοχής. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, λόγω της φύσης του φαινομένου της διάβρωσης όπου παρουσιάζει αύξηση εντός καμένης περιοχής και ιδιαίτερα σε έντονο ανάγλυφο με απότομες κλίσεις. Παρακάτω, στους Πίνακες 9 και 10

παρουσιάζονται οι κατηγορίες Υψηλής και Πολύ Υψηλής πιθανότητας διαβρωσιγένεσης εντός της καμένης έκτασης, διευκολύνοντας τη σύγκριση των δεδομένων μεταξύ των δύο εκδοχών.

Πίνακας 9. Πίνακας Κλάσεων Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών που ανήκουν στις κλάσεις Υψηλής και πολύ Υψηλής Πιθανότητας στην καμένη έκταση (1^η Εκδοχή Χάρτη)

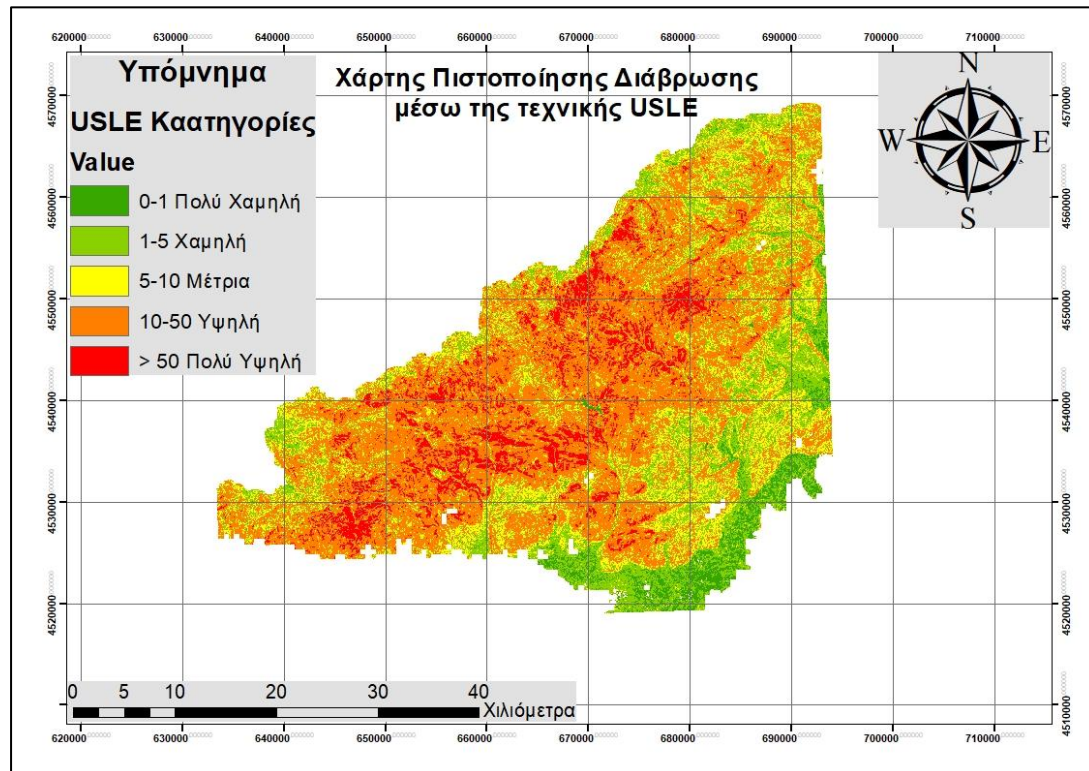
Πίνακας Κλάσεων Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών		
	Τιμές	Έκταση (Km²)
	Υψηλή	240.25
	Πολύ Υψηλή	453.40
	Σύνολο	693.65

Πίνακας 10. Πίνακας Κλάσεων Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών που ανήκουν στις κλάσεις Υψηλής και πολύ Υψηλής Πιθανότητας στην καμένη έκταση (2^η Εκδοχή Χάρτη)

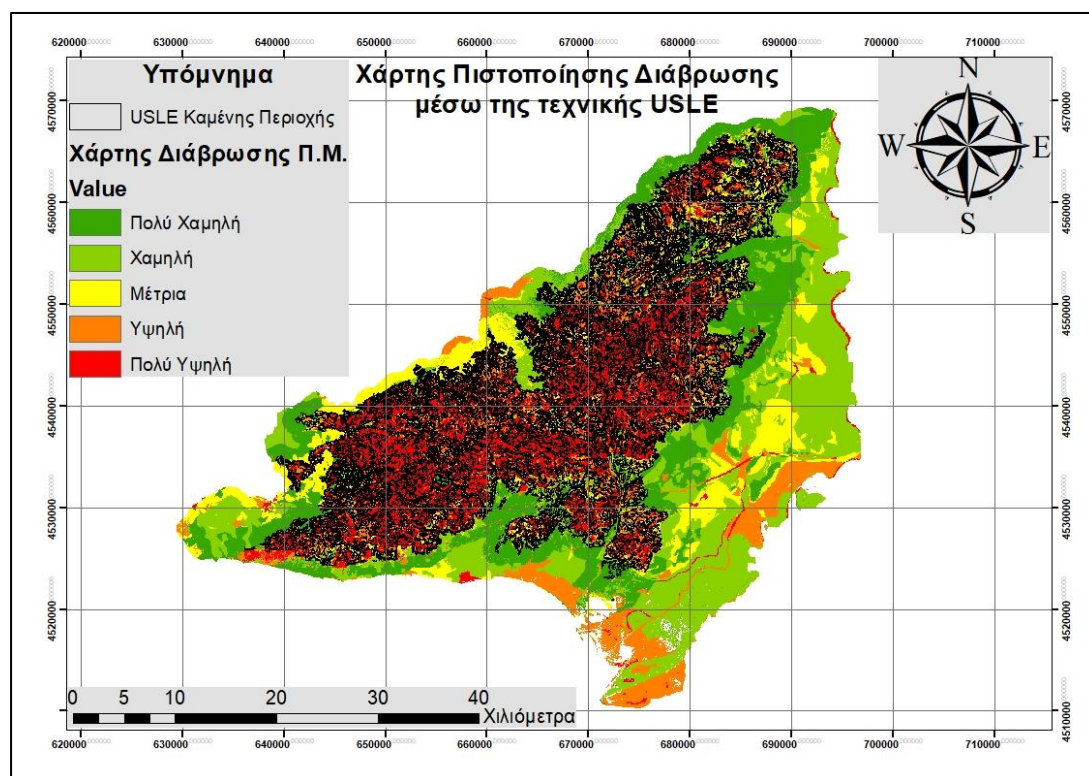
Πίνακας Κλάσεων Πιθανών Διαβρωσιγενών Περιοχών		
	Τιμές	Έκταση (Km²)
	Υψηλή	261.75
	Πολύ Υψηλή	394.79
	Σύνολο	656.54

Έπειτα από τη δημιουργία των δύο Χαρτών Πιθανών Περιοχών Διαβρωσιγένεσης, πραγματοποιήθηκε η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Για την δημιουργία του πολυγώνου πιστοποίησης έγινε χρήση της RUSLE όπου τα αποτελέσματα της ταξινομήθηκαν σε πενταβάθμια κλίμακα όπου διαβαθμίζεται η διάβρωση από Πολύ Χαμηλή σε Πολύ Υψηλή (Εικόνα 10). Από την συγκεκριμένη διαβάθμιση απομονώθηκε το τμήμα εντός της καμένης περιοχής, και συγκεκριμένα οι κλάσεις υψηλή και πολύ υψηλή ώστε να χρησιμοποιηθεί το παραχθέν πολύγωνο για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Εν τέλει, υπολογίστηκαν τα ποσοστά των περιοχών με Υψηλή και Πολύ Υψηλή πιθανότητα διάβρωσης εντός της καμένης έκτασης και συγκρίθηκε το εμβαδό τους με το εμβαδό του πολυγώνου πιστοποίησης. Η σύγκριση έδειξε για την 1^η εκδοχή του Χάρτη, ταύτιση 80% για τις κλάσεις Υψηλή και Πολύ Υψηλή, επαληθεύοντας την υψηλή ακρίβεια της μεθοδολογίας (Εικόνα 11). Για τη 2^η εκδοχή του Χάρτη με τη συμμετοχή του Συντελεστή Απορροής CN έδειξε ταύτιση 75%, αναδεικνύοντας ακόμη μια φορά την αξιοπιστία του μεθοδολογικού πλαισίου (Εικόνα 12). Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων πιστοποίησης των δύο προσεγγίσεων μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο υπολογισμός του Συντελεστή Απορροής CN θα μπορούσε να βελτιωθεί για τις μεταπυρικές συνθήκες. Επομένως, προτείνεται για μελλοντική έρευνα η βελτιστοποίηση της 2^{ης} μεθοδολογικής προσέγγισης για την εκτίμηση των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών. Αυτό θα επιτρέψει την εξαγωγή συμπερασμάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια για την κατάσταση της εδαφικής διάβρωσης στην περιοχή μελέτης και την επίδραση του Συντελεστή Απορροής CN μετά από πυρκαγιά. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα πιο αξιόπιστο μεθοδολογικό πλαίσιο για την εκτίμηση διαβρωσιγενών περιοχών μεταπυρικά, συμπεριλαμβάνοντας τον επανα-υπολογισμό και τη χρήση του

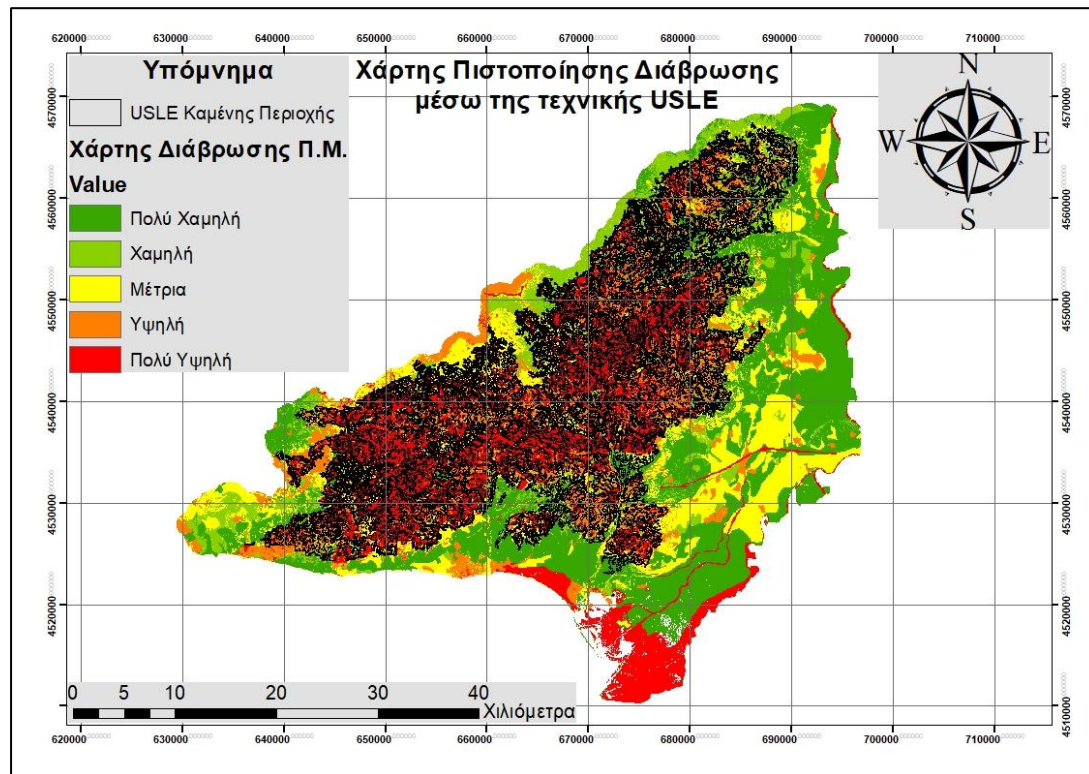
Συντελεστή Απορροής CN σε συνθήκες μετά από πυρκαγιά.



Εικόνα 10. Χάρτης Διαβρωσιγενών περιοχών με χρήση της τεχνικής USLE



Εικόνα 11. Πιστοποίηση Πιθανών Διαβρωσιγενών περιοχών καμένης έκτασης με την τεχνική της USLE.



Εικόνα 12. Πιστοποίηση Πιθανών Διαβρωσιγενών περιοχών με την τεχνική της USLE και με τη συμμετοχή στους παράγοντες του Συντελεστή Απορροής CN

Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας έρευνας, ήταν να εκτιμηθούν άμεσα οι πιθανές διαβρωσιγενείς περιοχές για το τμήμα της καμένης έκτασης και των όμορων περιοχών όπου επλήγησαν από την πυρκαγιά του 2023 στον Έβρο. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο είχε ως απώτερο στόχο τον έγκαιρο εντοπισμό ευάλωτων περιοχών, προκειμένου να προληφθούν δευτερογενείς καταστροφές όπως είναι η διάβρωση, αμέσως μετά από την πυρκαγιά. Η μεθοδολογία παρέχει μια πρώτη εκτίμηση των πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών, βασισμένη σε απλούς δείκτες που βασίζονται κυρίως σε γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά εντός της καμένης έκτασης. Συγκεκριμένα, στην παρούσα έρευνα, αρχικά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση και επιλέχθηκαν το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο για την δημιουργία πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών καθώς και τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν όπως όπως για παράδειγμα η κλίση, το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και ο δείκτης υγρασίας. Όλα τα κριτήρια κανονικοποιήθηκαν και στην συνέχεια με βάση τις βαρύτητες που αποδόθηκαν με την χρήση της AHP στην έρευνα των Tadesse and Tefera, (2021) σε συνδιασμό με τα ΓΣΠ δημιουργήθηκαν οι χάρτες με τις πιθανές διαβρωσιγενείς περιοχές. Η ανάλυση περιλαμβάνει δύο περιπτώσεις όπου στην μια γίνεται χρήση όλων των κριτηρίων όπως αναφέρονται στην έρευνα των Tadesse and Tefera, (2021) και στην άλλη περίπτωση έγινε δοκιμή για την συγχώνευση δυο κριτηρίων και την παραγωγή του συντελεστή απορροής CN όπου και προσέφερε την δεύτερη (2^η) εκδοχή του χάρτη πιθανών διαβρωσιγενών περιοχών. Τα τελικά αποτελέσματα ομαδοποιήθηκαν με την χρήση της τεχνικής ομαδοποίησης K-mean σε πέντε (5) κλάσεις. Το προτεινόμενο πλαίσιο πιστοποιήθηκε με την χρήση πολυγώνου πιστοποίησης που δημιουργήθηκε από την χρήση της μεθόδου RUSLE για το τμήμα εντός της καμένης έκτασης. Κατά

τον έλεγχο πιστοποίησης η πρώτη μεθοδολογική προσέγγιση με την χρήση όλων των κριτηρίων είχε ποσοστό επιτυχίας 80% ενώ η δεύτερη προσέγγιση με την ενσωμάτωση του συντελεστή απορροής CN είχε ποσοστό επιτυχίας 75%. Παρατηρείται ότι και οι δύο προσεγγίσεις έχουν πολύ υψηλά ποσοστά επιτυχίας με ελαφρώς μειωμένο το ποσοστό της δεύτερης προσέγγισης, κάτι το οποίο αφήνει χώρο για περαιτέρω διερεύνηση και βελτιστοποίησή του σε μελλοντική έρευνα. Η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων εξασφαλίζει την εγκυρότητα τους και ενισχύει την εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης μεθοδολογικής προσέγγισης. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο είναι εύχρηστο, αξιόπιστο και άμεσα εφαρμόσιμο σε περιοχές με παρόμοιες συνθήκες - ανάγκες και υπό συνθήκες έλλειψης δεδομένων μιας και τα κριτήρια βασίζονται κυρίως σε παράγωγα του DEM και άλλων δεδομένων όπως οι χρήσεις γης και οι κατηγορίες εδάφους όπου μπορούν να βρεθούν σχετικά γρήγορα και εύκολα. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την προστασία του περιβάλλοντος και την πρόληψη δευτερογενών φυσικών καταστροφών, διευκολύνοντας τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων για στοχευμένο και άμεσο σχεδιασμό αντιδιαβρωτικών μέτρων.

Χρηματοδότηση και αναγνώριση

Η παρούσα έρευνα έλαβε χρηματοδότηση και πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Ερευνητικού Προγράμματος:

“Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου για τον εντοπισμό πιθανών διαβρωσιγενών και πλημμυρικών περιοχών μετά από πυρκαγιά. (Post-fire Erosion and Flood prone areas Identification framework – PEFI)”, Φορέας Χρηματοδότησης: Ειδικός Λογαριασμός Κονδυλίων Έρευνας ΔΠΘ, Πρόγραμμα: Duth to people, Επιστημονικά Υπεύθυνος: Επίκ. Καθηγητής Παπαϊωάννου Γεώργιος.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

Ξόφης Π., Ποϊραζίδης Κ., Αθανασίου Μ., Γεωργιάδης Ν., Πουρσανίδης Δ., Ζαφειρόπουλος, Β, Σκάρτση Θ., Καψάλης. (2024). «Καταγραφή της υπο μελέτης περιοχής μετά την πυρκαγιά». Στο Γ. Σουρβάς κ.α. (Επιμ.), *Μελέτη αναδάσωσης και διαχειριστικών κατευθύνσεων για την αποκατάσταση των δασικών οικοσυστημάτων της περιοχής Έβρου μετά την πυρκαγιά του 2023*. (σσ. 130-204), WWF Ελλάς, Αθήνα

Ξενόγλωσση

Alamanos, A., Papaioannou, G., Varlas, G., Markogianni, V., Papadopoulos, A., & Dimitriou, E. (2023). Representation of a Post-Fire Flash-Flood Event Combining Meteorological Simulations, Remote Sensing, and Hydraulic Modeling. *Land*. Vol. 13, No. 1, pp. 47. <https://doi.org/10.3390/land13010047>

Ali, P. J. M., Faraj, R. H., Koya, E., Ali, P. J. M., & Faraj, R. H. (2014). Data normalization and standardization: a technical report. *Mach Learn Tech Rep*. Vol. 1, No. 1, pp. 1-6. https://docs.google.com/document/d/1x0A1nUz1WWtMCZb5oVzF0SVMY7a_58KQulqQVT8LaVA/edit#

- Andualem, T. G., Hagos, Y. G., Kefale, A., & Zelalem, B. (2020). Soil erosion-prone area identification using multi-criteria decision analysis in Ethiopian highlands. *Modeling Earth Systems and Environment*. Vol. 6, No. 3, pp. 1407–1418.
- Arabameri, A., Tiefenbacher, J. P., Blaschke, T., Pradhan, B., & Bui, D. T. (2020). Morphometric analysis for soil erosion susceptibility mapping using novel GIS-Based ensemble model. *Remote Sensing*. Vol. 12, No. 5, pp. 874. <https://doi.org/10.3390/rs12050874>
- Avila-Aceves, E., Plata-Rocha, W., Monjardin-Armenta, S. A., & Rangel-Peraza, J. G. (2023). Geospatial modelling of floods: A literature review. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Vol. 37, No. 11, pp. 4109–4128.
- Bammou, Y., Benzougagh, B., Bensaid, A., Igmoullan, B., & Al-Quraishi, A. M. F. (2024). Mapping of current and future soil erosion risk in a semi-arid context (haouz plain - Marrakech) based on CMIP6 climate models, the analytical hierarchy process (AHP) and RUSLE. *Modeling Earth Systems and Environment*. Vol. 10, No. 1, pp. 1501–1514.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 22, No. 11, pp. 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Bohner, J., & Selige, T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. In J. Bohner, K. R. McCloy, & J. Strobl (Eds.), *SAGA Analysis and Modelling Applications* (pp. 13–27). Göttinger Geographische Abhandlungen.
- Bozali, N. (2020). Assessment of the soil protection function of forest ecosystems using GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis: A case study in Adıyaman, Turkey. *Global Ecology and Conservation*. Vol. 24, e01271.
- Cheng, J., Zhang, X., Jia, M., Su, Q., Kong, D., & Zhang, Y. (2024). Integrated use of GIS and USLE models for LULC change analysis and soil erosion risk assessment in the Hulan River Basin, northeastern China. *Water*. Vol. 16, No. 2, pp. 241. <https://doi.org/10.3390/w16020241>
- Debele, S. E., Kumar, P., Sahani, J., Marti-Cardona, B., Mickovski, S. B., Leo, L. S., Porcù, F., Bertini, F., Montesi, D., Vojinovic, Z., & di Sabatino, S. (2019). Nature-based solutions for hydro-meteorological hazards: Revised concepts, classification schemes and databases. *Environmental Research*. Vol. 179, pp. 108799.
- Domazetović, F., Šiljeg, A., Marić, I., Cukrov, N., Lončar, N., Panda, L., & Quesada-Román, A. (2024). Assessing the impacts of lithology on short-term gully evolution within the karst Mediterranean area. *CATENA*. Vol. 244, pp. 108238.
- Dosiou, A., Athinelis, I., Katris, E., Vassalou, M., Kyrkos, A., Krassakis, P., & Parcharidis, I. (2024). Employing Copernicus Land Service and Sentinel-2 satellite mission data to assess the spatial dynamics and distribution of the extreme forest fires of 2023 in Greece. *Fire*. Vol. 7, No. 1, pp. 20. <https://doi.org/10.3390/fire7010020>
- Dutta, A., Ray, R., & Banerjee, M. (2024). Multi-criteria-based decision making approach for soil erosion susceptibility modelling of Sali River Basin, Bankura, India. *Environment Development and Sustainability*.
- Ebel, B. A. (2024). Upper limits for post-wildfire floods and distinction from debris flows. *Ebel, Sci. Adv.* Vol. 10. <https://www.science.org>

- El Jazouli, A., Barakat, A., Ghafiri, A., el Moutaki, S., Ettaqy, A., & Khellouk, R. (2017). Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: A case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco). *Geoscience Letters*.
- Fang, H., Zhai, Y., & Li, C. (2024). Evaluating the impact of soil erosion on soil quality in an agricultural land, northeastern China. *Scientific Reports*. Vol. 14, No. 1.
- Foomani, M. S., Karimi, S., Jafari, H., & Ghorbaninia, Z. (2017). Using boolean and fuzzy logic combined with analytic hierarchy process for hazardous waste landfill site selection: A case study from Hormozgan province, Iran. *DOAJ* (DOAJ: Directory of Open Access Journals). <https://doi.org/10.22104/aet.2017.502>
- Halefom, A., & Teshome, A. (2019). Modelling and mapping of erosion potentiality watersheds using AHP and GIS technique: A case study of Alamata Watershed, South Tigray, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. Vol. 5, No. 3, pp. 819–831.
- Halmos, P., & Givant, S. (2008). Introduction to Boolean algebras. In *Undergraduate texts in mathematics*. Ανακτήθηκε στις 18 Ιανουαρίου 2008 από <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68436-9>
- Ioannou, K., Tsantopoulos, G., & Arabatzis, G. (2019). A Decision Support System methodology for selecting wind farm installation locations using AHP and TOPSIS: Case study in Eastern Macedonia and Thrace region, Greece. *Energy Policy*. Vol. 132, pp. 232–246.
- Jain, A. K. (2009). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*. Vol. 31, No. 8, pp. 651–666.
- Kardhana, H., Solehudin, N., Wijayasari, W., & Rohmat, F. I. W. (2024). Assessing basin-wide soil erosion in the Citarum watershed using USLE method. *Results in Engineering*. Vol. 22, pp. 102130.
- Katagis, T., & Gitas, I. Z. (2022). Assessing the accuracy of MODIS MCD64A1 C6 and FIRECCI51 burned area products in Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing*. Vol. 14, No. 3, pp. 602. <https://doi.org/10.3390/rs14030602>
- Knijff J.M., Jones R.J.A., & Montanarella L. (1999). Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau, Joint Research Centre EUR 19022 EN.
- Nehai, S. A., Guettouche, M. S., & Saadoud, D. (2021). Regional modeling of soil sensitivity to water erosion in JIJEL region (Algeria) using MCA and GIS. *Applied Geomatics*. Vol. 13, No. 1, pp. 55–70.
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., & Meusburger, K. (2016). Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. *CATENA*. Vol. 137, pp. 161–172.
- Panagos, P., Borrelli, P., & Meusburger, K. (2015b). A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*. Vol. 5, No. 2, pp. 117–126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G. A., Krasnov, S. F., Gorobets, A. V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., Hoyos, N., Naipal, V., Oliveira, P. T. S., Bonilla, C. A., Meddi, M., Nel, W., Al Dashti, H., Boni, M., Diodato, N., Van Oost, K., Nearing, M. & Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*. Vol. 7, No. 1.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., & Alewell, C. (2015a). The new assessment of soil loss by

- water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. Vol. 54, pp. 438–447.
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of The Total Environment*. Vol. 479–480, pp. 189–200.
- Papaioannou, G., Alamanos, A., & Maris, F. (2023). Evaluating Post-Fire Erosion and Flood Protection Techniques: A Narrative Review of applications. *GeoHazards*. Vol. 4, No. 4, pp. 380–405. <https://doi.org/10.3390/geohazards4040022>
- Pereira, A. de M. M., Oliveira, M. da R., Bao, F., Souza, E. B. de, Pott, A., Escobar, A. C. de S., Carvalho, S. S. de, & Damasceno-Júnior, G. A. (2024). Changes, trends, and gaps in research dynamics after the megafires in the Pantanal. *Environment, Development and Sustainability*.
- Quinton, J. N., & Fiener, P. (2024). Soil erosion on arable land: An unresolved global environmental threat. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. Vol. 48, No. 1, pp. 136–161.
- Sidi Almouctar, M. A., Wu, Y., Zhao, F., & Dossou, J. F. (2021). Soil Erosion Assessment Using the RUSLE Model and Geospatial Techniques (Remote Sensing and GIS) in South-Central Niger (Maradi Region). *Water*. Vol. 13, No. 24, pp. 3511. <https://doi.org/10.3390/w13243511>
- Suwannachai, L., Sriwornamas, K., Sivanpheng, O., & Kangrang, A. (2024). Application of SWAT Model for Assessment of Surface Runoff in Flash Flood Areas. *Water (Switzerland)*. Vol. 16, No. 3. <https://doi.org/10.3390/w16030495>
- Tadesse, T. B., & Tefera, S. A. (2021). Comparing potential risk of soil erosion using RUSLE and MCDA techniques in Central Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. Vol. 7, No. 3, pp. 1713–1725.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΠΙΘΑΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Στοϊκοπούλου Αναστασία

Υποψήφια Διδάκτορας,
Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων
Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Email: astoikop@fmenr.duth.gr

Καρασμανάκη Ξανθούλα

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια
Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων
Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Email: xantkara2@fmenr.duth.gr

Καταγής Θωμάς

Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων
Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Email: tkatagis@fmenr.duth.gr

Παπαϊωάννου Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων
Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Email: gpaiaio@fmenr.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια σημαντική συνιστώσα και πρωταρχική ανάλυση κατά την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας (2007/60) είναι ο καθορισμός των περιοχών που είναι επιρρεπείς σε πλημμύρες. Το μοτίβο και η χωρική κατανομή των περιοχών που είναι επιρρεπείς σε πλημμύρες μπορεί να μεταβληθεί λόγω άλλων φυσικών καταστροφών, όπως οι πυρκαγιές. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η εφαρμογή ενός μεθοδολογικού πλαισίου για τη χαρτογράφηση των πιθανών περιοχών πλημμύρας μετά από μια πυρκαγιά που ενσωματώνει τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) σε συνδυασμό με μια μέθοδο Πολυκριτηριακής Ανάλυσης. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν εννέα (9) κριτήρια που σχετίζονται με την πλημμυρογένεση και βασίζονται σε γεωφυσικά, μορφολογικά, υδρολογικά χαρακτηριστικά λεκανών απορροής και στις χρήσεις γης. Η επεξεργασία των κριτηρίων έγινε σε περιβάλλον ΓΣΠ. Για τον προσδιορισμό της βαρύτητας του κάθε κριτηρίου χρησιμοποιήθηκε η Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδος. Όλοι οι παράγοντες κανονικοποιήθηκαν με τη μέθοδο min-max και πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση του τελικού χάρτη πιθανών πλημμυρικών

περιοχών σε πέντε (5) κλάσεις με τη μέθοδο K-Mean. Ο δείκτης Υγρασίας (Wetness Index) και ο Απορροϊκός Συντελεστής CN είναι τα κριτήρια με το μεγαλύτερο βαθμό επιρροής με ποσοστά 28% και 18% αντίστοιχα. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε στην καμένη έκταση και στις παρακείμενες περιοχές από την καταστροφική πυρκαγιά που εκδηλώθηκε στην περιοχή του Έβρου τον Αύγουστο-Σεπτέμβριο του 2023. Η ακρίβεια του παραγόμενου χάρτη πιθανών πλημμυρικών περιοχών εξετάστηκε με τη χρήση δεδομένων ιστορικών πλημμυρών και των Ζωνών Δυνητικού Κινδύνου Πλημμύρας με ποσοστό επιτυχίας 75% για τις κλάσεις Υψηλή και Πολύ Υψηλή. Τα αποτελέσματά μας έδειξαν ότι το συγκριμένο μεθοδολογικό πλαίσιο συνδυάζει το χαμηλό κόστος με την αμεσότητα και μπορεί αποτελέσει ένα πρακτικό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό πιθανών πλημμυρικών περιοχών μετά από πυρκαγιά.

Λέξεις κλειδιά: ΓΣΠ, Boolean Algebra, Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδος, K-means, Πλημμύρα.

Εισαγωγή

Το φαινόμενο της πλημμύρας κατατάσσεται στις φυσικές καταστροφές και χαρακτηρίζεται ως ένα από τα πιο επικίνδυνα καθώς ασκεί επίδραση σε αρκετούς τομείς και φέρει σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή (Papaioannou et al., 2017). Σύμφωνα με την έρευνα των Roxy et al., (2017) σε παγκόσμιο επίπεδο οι πλημμύρες έχουν υψηλά ποσοστά θνησιμότητας και προκαλούν εκτεταμένες καταστροφές σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις και στο δομημένο περιβάλλον, με αύξηση των γεγονότων κατά τον τελευταίο μισό αιώνα και με οικονομικές απώλειες που ξεπερνάν τα 30 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως κατά την τελευταία δεκαετία. Η λήψη των κατάλληλων αποφάσεων και μέτρων για τη μείωση του κινδύνου πλημμύρας κρίθηκε επιτακτική τις τελευταίες δεκαετίες και για αυτό Ευρωπαϊκή Ένωση αποφάσισε την κατάρτιση της Οδηγίας 2007/60/EK που στοχεύει στη διαχείριση των πλημμυρών και στο μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεών τους. Οι πλημμύρες και συγκεκριμένα οι αιφνίδιες πλημμύρες που είναι συχνό φαινόμενο στις περιοχές της Μεσογείου, χαρακτηρίζονται από μεγάλη ένταση, γεγονός που συχνά οδηγεί σε καταστροφικές επιπτώσεις στις υποδομές, υψηλά ποσοστά θνησιμότητας καθώς και σημαντική στερεομεταφορά σε τέτοιο βαθμό όπου μπορεί και να μεταβάλλουν ραγδαία τη μορφολογία μιας περιοχής (Scorpio et al., 2018). Η έκταση και η ένταση αυτών των γεωμορφολογικών επιπτώσεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής, ενώ είναι συνήθως εντονότερες σε περιοχές με υψηλή επιφανειακή απορροή (Amponsah et al., 2016).

Εκτός από τις ακραίες υδρομετεωρολογικές συνθήκες, οι πυρκαγιές συνιστούν έναν ακόμη καταλυτικό παράγοντα για την πλημμυρογένεση, καθώς επηρεάζουν όλα τα βασικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής όπως το έδαφος, τη βλάστηση και τις χρήσεις γης, με άμεσες επιπτώσεις στις υδρολογικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής απορροής, των ροών εντός των υδατορρευμάτων, και της μεταφοράς ιζημάτων (Moody & Martin, 2001). Η σφοδρότητα και η διάρκεια της πυρκαγιάς αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους που συμβάλλουν στην πλήρη ή μερική απογύμνωση του εδάφους, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε αύξηση της επιφανειακής απορροής και επιτάχυνση της διάβρωσης (Robichaud et al., 2000). Οι πυρκαγιές με υψηλή δριμύτητα καύσης μπορούν να δημιουργήσουν υδατοαποθητικά στρώματα εδάφους, με αποτέλεσμα την σοβαρή μείωση της ικανότητας διήθησης (Shakesby, 2011; Robichaud & Brown, 2005). Επιπλέον, οι έντονες βροχοπτώσεις ενισχύουν σημαντικά

τη διάβρωση και την επιφανειακή απορροή μετά από μία πυρκαγιά λόγω του εκτεθειμένου εδάφους και της έλλειψης προστατευτικών ζωνών βλάστησης (Badia et al., 2015; Robichaud & Brown, 2005). Τα υψηλά φορτία φερτών υλών επηρεάζουν την ποιότητα των υδάτων στα κατάντη των λεκανών απορροής και αυξάνεται σημαντικά ο κίνδυνος πλημμυρών και της δημιουργίας δεβριτικής ροής (Girona-García et al., 2021). Σύμφωνα με την έρευνα των Robichaud et al., (2000), σε περιοχές όπου το οικοσύστημα έχει διαταραχθεί έντονα, η επιφανειακή απορροή μπορεί να αυξηθεί έως και 70%, ενώ ο ρυθμός διάβρωσης ενδέχεται να τριπλασιαστεί. Συνεπακόλουθο της αυξημένης επιφανειακής απορροής είναι οι δευτερογενείς καταστροφές μετά από μια πυρκαγιά που αποτελούν τις πλημμύρες και την έντονη επιφανειακή απώλεια εδάφους-διάβρωση, την έντονη στερεομεταφορά και απόθεση των υλικών στα πεδινά τμήματα των λεκανών απορροής.

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν εφαρμοστεί πολυάριθμα μεθοδολογικά πλαίσια που βασίζονται στη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) σε συνδυασμό με τεχνικές Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (ΠΚΑ), με στόχο την εκτίμηση περιοχών πιθανής πλημμύρας, επικινδυνότητας από φυσικές καταστροφές, γεωλισθήσεις ή άλλες περιβαλλοντικές πιέσεις και προβλήματα (Papaioannou et al., 2015; Stefanidis and Stathis, 2013; Alamanos and Papaioannou, 2020; Kavzoglu et al., 2014). Η ευρεία χρήση τέτοιων προσεγγίσεων οφείλεται κυρίως στην πολυπλοκότητα των προβλημάτων λήψης αποφάσεων, στη διαρκή βελτίωση των δυνατοτήτων των ΓΣΠ, και στην ανάγκη για χωρικά κατανεμημένες και αξιόπιστες λύσεις, ιδίως σε περιπτώσεις όπου η έλλειψη δεδομένων είναι εμφανής. Συγκεκριμένα για τις πλημμύρες υπάρχει πληθώρα μελετών όπου αναπτύχθηκαν μεθοδολογικά πλαίσια για την παραγωγή χαρτών με πιθανές περιοχές που κινδυνεύουν από πλημμυρογένεση (Komolafe et al., 2020, Dash & Sar 2020, Cabrera & Lee 2019, Chen 2022). Παρά ταύτα ο αριθμός των μελετών που μελετούν τον εντοπισμό πιθανών πλημμυρικών περιοχών μετά από πυρκαγιά με την χρήση ΓΣΠ-ΠΚΑ είναι περιορισμένος (Evelpidou et al., 2022). Επιπλέον, παρά τον μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων έχει παρατηρηθεί ότι αρκετές εργασίες κάνουν χρήση συγκεκριμένων κριτηρίων χωρίς να πραγματοποιηθεί κάποιου είδους ανάλυσης συσχέτισης (π.χ. Negese, et al., 2022, Cabrera & Lee, 2019), είτε χρησιμοποιούν περιορισμένες τεχνικές ομαδοποίησης (π.χ. Bansal et al., 2023), είτε χρησιμοποιούν δεδομένα με σταθερή ταξινόμηση κλάσεων (π.χ. Leta & Adugna, 2023), είτε δεν έχουν πραγματοποιήσει πιστοποίηση των αποτελεσμάτων (π.χ. Mohammed, et al., 2024).

Στη παρούσα έρευνα εφαρμόστηκε το μεθοδολογικό πλαίσιο σύμφωνα με την έρευνα των Papaioannou et al., 2015, που συνδυάζει τα ΓΣΠ με τεχνικές Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με σκοπό την δημιουργία χάρτη που θα απεικονίζει τις πιθανές περιοχές για πλημμυρογένεση. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν είναι εννέα (9), με βασικό κριτήριο το ΨΜΕ όπου αποτέλεσε και την βάση για την παραγωγή των υπόλοιπων επιλεγμένων παραγόντων. Πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση όλων των κριτηρίων και στην συνέχεια σε συνδυασμό με τις βαρύτητες που προέκυψαν από την Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδο και την χρήση της Boolean άλγεβρας παράχθηκε ο τελικός χάρτης που απεικονίζει τις πιθανές περιοχές για πλημμυρογένεση. Η ταξινόμηση του χάρτη των πιθανών πλημμυρικών περιοχών έγινε με την χρήση της μεθόδου K-mean. Επιπλέον, τα αποτελέσματα πιστοποιήθηκαν με βάση τα ιστορικά δεδομένα πλημμυρών καθώς με τα πολύγωνα των Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας από τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας. Στην παρούσα έρευνα η εφαρμογή έγινε σε μεταπτυχικές συνθήκες και συγκεκριμένα για το τμήμα της περιοχής του Έβρου που επηρεάστηκε από την καταστρεπτική πυρκαγιά που έλαβε

χώρα στην περιοχή το καλοκαίρι του 2023. Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε να εφαρμοστεί είναι κατάλληλη για τη λήψη αποφάσεων σε πολύπλοκα προβλήματα τα οποία εμπεριέχουν την χρήση πολλαπλών παραγόντων.

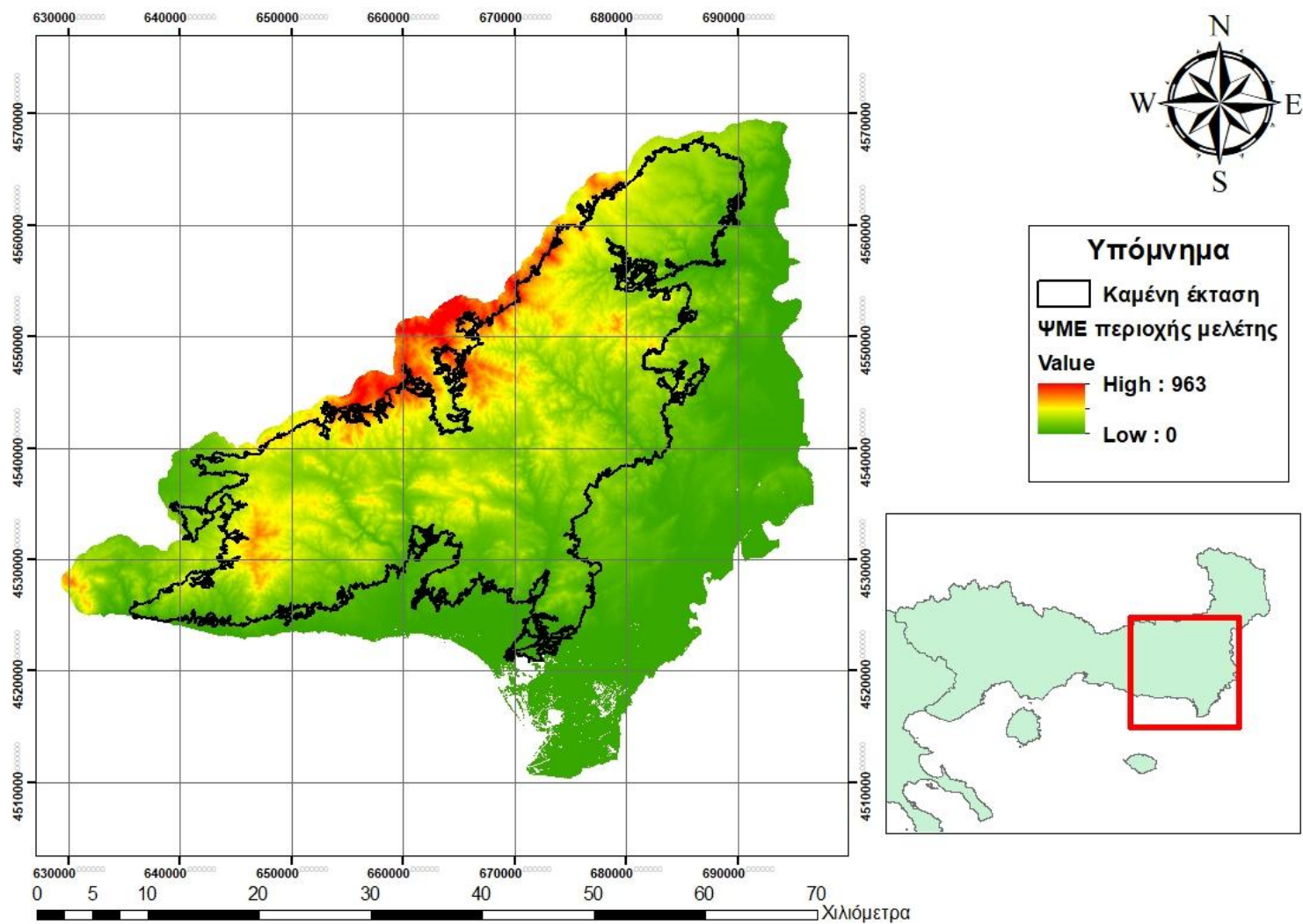
Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τις λεκάνες απορροής που αντιστοιχούν στη περιοχή που κάηκε την περίοδο Αύγουστο-Σεπτέμβριο του 2023 και ανήκουν στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Θράκης και στο νομό Έβρο. Το μέγιστο υψόμετρο της περιοχής μελέτης είναι τα 963 μέτρα και το ελάχιστο τα 0 (Εικόνα 1). Η βόρεια πλευρά της περιοχής συνορεύει με τη Βουλγαρία και στα ανατολικά της βρίσκεται η Τουρκία. Το κλίμα της περιοχής μελέτης, χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες και δροσερά καλοκαίρια. Σύμφωνα με τα δεδομένα από το CORINE 2018 (CORINE, 2018) οι κύριες χρήσεις γης της περιοχής μελέτης αποτελούνται κυρίως από δασικές εκτάσεις με ποσοστό 55,7% και αγροτικές εκτάσεις με ποσοστό 36,3%. Με βάση την κατάταξη εδαφών κατά SCS για το ελληνικό τμήμα της λεκάνης π. Έβρου όπως παρουσιάζεται στα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Λεκάνης Απορροής Έβρου (Παραρτήματα Σταδίου II) σε συνδυασμό τους υδρολιθολογικούς σχηματισμούς για την περιοχή που δεν καλυπτόταν από τα προηγούμενα δεδομένα, το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης αποτελείται κυρίως από κατηγορία εδάφους τύπου B με ποσοστό 54% και τύπου C με ποσοστό 34%.

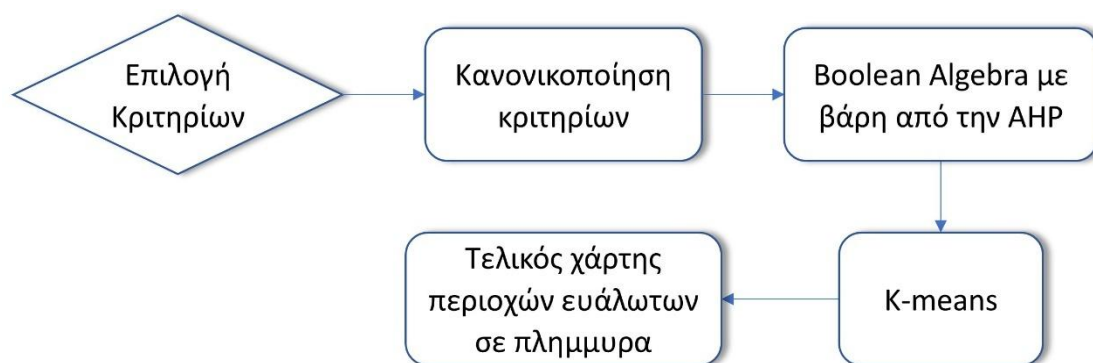
Η περιοχή μελέτης όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 1 εκτείνεται σε μια έκταση περίπου 1.900 τετραγωνικών χιλιομέτρων εκ των οποίων περίπου 942 km² αποτελούν την καμένη έκταση σύμφωνα με την έρευνα των Ξόφης κ.α. (2024). Από την συνολική καμένη έκταση τα 886 km² ανήκουν στις βασικές κατηγορίες δριμύτητας καύσης (υψηλή, μέτρια, χαμηλή), ενώ 772 km² ανήκουν σε δασικές εκτάσεις όπου είχε επίδραση η φωτιά. Σύμφωνα με την μελέτη των Ξόφης κ.α. (2024), εντός των ορίων της πυρκαγιάς που παρουσιάζονται στην Εικόνα 1, περίπου το 37% εντός της καμένης έκτασης ανήκει στην κατηγορία υψηλής δριμύτητας καύσης και περίπου το 29% μεσαίας δριμύτητας καύσης.

Μεθοδολογία

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία χαρτών που παρουσιάζουν ποιες περιοχές είναι επιρρεπείς στην πλημμυρογένεση. Το προτεινόμενο πλαίσιο εφαρμόστηκε σε περιοχή μελέτης μεγάλης κλίμακας και περιλαμβάνει τη χρήση μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνδυασμό με τα ΓΣΠ. Η ροή της μεθοδολογίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνα 2. Τα κύρια βήματα περιλαμβάνουν α) την επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων που επιδρούν στην εμφάνιση πλημμύρας, β) την κανονικοποίηση των κριτηρίων με τη μέθοδο του ελαχίστου-μεγίστου, γ) την εφαρμογή της Αναλυτικής Ιεραρχικής μεθόδου (Analytic Hierarchy Process (AHP)) έτσι ώστε να δοθούν οι βαρύτητες στο κάθε κριτήριο, δ) την δημιουργία του χωρικά κατανομημένου χάρτη που παρουσιάζει ανά pixel τις περιοχές που είναι επιρρεπείς στην πλημμυρογένεση με την χρήση της Boolean Algebra σε συνδυασμό με τα βαρύτητες από το κάθε κριτήριο, ε) την ταξινόμηση του χάρτη σε πέντε (5) κλάσεις με την χρήση της μεθόδου ομαδοποίησης K-mean. Τα αποτελέσματα πιστοποιήθηκαν μέσω της σύγκρισης τους με ιστορικά δεδομένα και τα πολύγωνα των Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) από τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) του Έβρου.



Εικόνα 1. Όρια της πυρκαγιάς του 2023 (Τα όρια της καμένης έκτασης είναι σύμφωνα με την έρευνα των Ξόφης κ.α. 2024)



Εικόνα 2. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.

Επιλογή Κριτηρίων

Η επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων που συμβάλλουν στη πλημμυρογένεση είναι ένα θεμελιώδες βήμα καθώς αυτά καθορίζουν την ορθότητα του αποτελέσματος του χάρτη επικινδυνότητας. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν προέκυψαν από τη μελέτη του Papaioannou et al. 2015. Στην συγκεκριμένη έρευνα αρχικά πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική ανάλυση 32 πιθανών παραγόντων που συνδέονται με την εμφάνιση πλημμύρας. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση συσχέτισης των παραμέτρων και κατέληξαν στην ανάδειξη των δέκα (10) σημαντικότερων παραγόντων. Η έρευνα των Papaioannou et al. 2015 καταλήγει στην χρήση των παρακάτω κριτηρίων: 1) Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, 2) Κλίση, 3) Σταθμισμένος Προσανατολισμός, 4) Συσσώρευση Ροής, 5) Οριζόντια Απόσταση Χερσαίας Ροής, 6) Κάθετη Απόσταση Χερσαίας Ροής, 7) Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης, 8) Δείκτης Υγρασίας, 9) Δείκτης Υδρολογικών Απωλειών βροχής της μεθόδου SCS, 10) Τροποποιημένος Δείκτης Fournier.

Στη παρούσα έρευνα, αφαιρέθηκε από τους παράγοντες ο Τροποποιημένος Δείκτης Fournier καθώς η περιοχή μελέτης έχει μεγάλη χωρική κατανομή με αποτέλεσμα ο υπολογισμός του δείκτη να είναι προβληματικός λόγω της ανεπάρκειας των απαιτούμενων δεδομένων και εξαιτίας του γεγονότος ότι ο συγκεκριμένος δείκτης είχε πολύ μικρή συμμετοχή στην παραγωγή των τελικών χαρτών. Επιπλέον, η χρήση του συγκεκριμένου δείκτη μπορεί να είναι αρκετά χρονοβόρα, κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με το στόχο της συγκεκριμένης έρευνας όπου είναι η ανάπτυξη ενός εργαλείου για τον άμεσο υπολογισμό των δυνητικά απειλούμενων περιοχών από πλημμύρα μετά από πυρκαγιά. Στο Πίνακα 2 αναφέρονται ονομαστικά τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάρτιση του τελικού χάρτη καθώς και η πηγή προέλευσης τους. Ακολούθησε η οργάνωση τους σε ΓΣΠ και η κανονικοποίηση τους με τη μέθοδο του ελαχίστου-μεγίστου έτσι ώστε να μετατραπούν τα κριτήρια σε συγκρίσιμα δεδομένα με βάση μία κοινή κλίμακα. Το ΨΜΕ που χρησιμοποιήθηκε έχει μέγεθος εικονοστοιχείου 5 x 5 m. Όλα τα υπόλοιπα παράγωγα από το ΨΜΕ δημιουργήθηκαν με την ίδια διακριτική ικανότητα για να υπάρχει απόλυτη ταύτιση των εικονοστοιχείων.

Πίνακας 2. Επιλεγμένα κριτήρια.

Κριτήρια	Περιγραφή
Digital Elevation Model (DEM)	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους
Weighted Aspect	Σταθμισμένος Προσανατολισμός
Wetness Index (WI)	Δείκτης Υγρασίας
Slope	Κλίση
Curve Number (CN)	Συντελεστής Απορροής CN της SCS
Horizontal Overland Flow Distance (HOFD)	Οριζόντια Απόσταση Επιφανειακής Ροής
Vertical Overland Flow Distance (VOFD)	Κάθετη Απόσταση Επιφανειακής Ροής
Topographic Position Index (TPI)	Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης
Flow Accumulation	Συγκέντρωση ροής

Τεχνική κανονικοποίησης

Μια από τις πιο γνωστές τεχνικές κανονικοποίησης είναι η μέθοδος κανονικοποίησης ελάχιστου - μέγιστου (Liu et al., 2019):

$$N_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

όπου N_i είναι η κανονικοποιημένη τιμή, X_i είναι η υπάρχουσα τιμή για κάθε κελί, $X_{\min}$ (x) είναι η ελάχιστη τιμή του κριτηρίου και $X_{\max}$ είναι η μέγιστη τιμή του κριτηρίου. Το αποτέλεσμα της χρήσης της συγκεκριμένης μεθόδου κανονικοποίησης είναι ότι κάθε κριτήριο θα λάβει μέγιστη μέγιστη τιμή 1 και ελάχιστη 0. Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος για όλα τα κριτήρια ώστε να έχουν το ίδιο πεδίο τιμών πριν από την εφαρμογή τους με την AHP σε περιβάλλον ΓΣΠ.

Ανάλυση Κριτηρίων

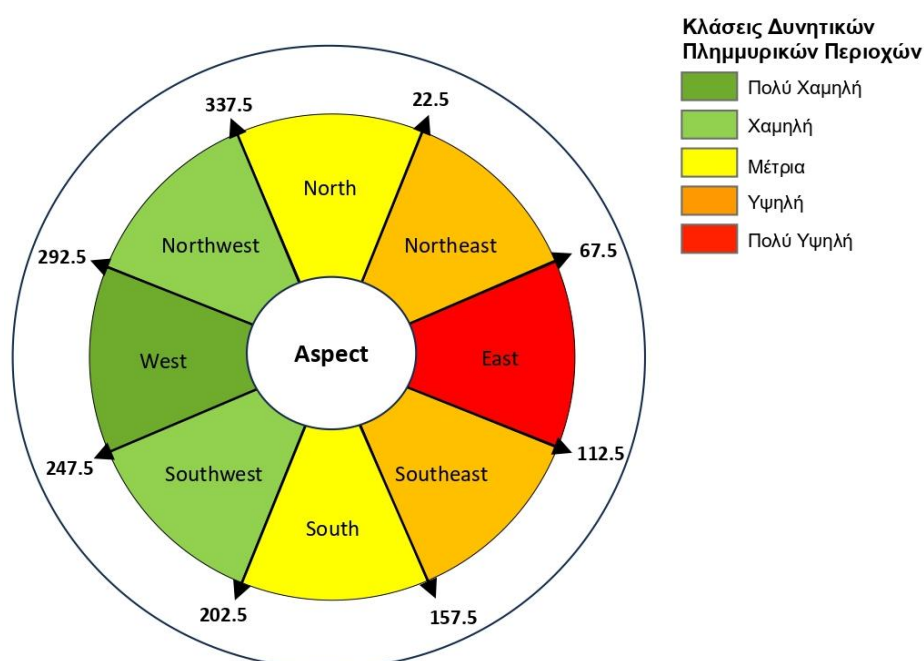
Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM)

Το υψόμετρο θεωρείται παράγοντας «κλειδί» για τη χαρτογράφηση της ευπάθειας σε πλημμύρες (Nachappa TG. 2020). Το ΨΜΕ απεικονίζει την υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων για μία συγκεκριμένη περιοχή. Όσο μικρότερο είναι το υψόμετρο ενός σημείου τόσο μεγαλύτερη είναι η ευπάθεια του σε πλημμύρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μετακίνηση του νερού γίνεται από τις ψηλότερες προς τις χαμηλότερες περιοχές. Το αρχείο του ΨΜΕ λήφθηκε από το Ελληνικό Κτηματολόγιο και χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή αρχείων raster των υπόλοιπων παραγόντων.

Σταθμισμένος Προσανατολισμός (Aspect)

Ο προσανατολισμός μπορεί να οριστεί ως η κατεύθυνση της κλίσης στην επιφάνεια

της γης και θεωρείται ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει την εμφάνιση πλημμύρας καθώς ορίζει την κατεύθυνση της ροής. Ο συγκεκριμένος παράγοντας δημιουργήθηκε μέσω του προγράμματος ArcMap 10.8.1 με τη χρήση του ΨΜΕ. Αντίστοιχα με την έρευνα των Παραϊοαννου et. al., (2015), ο προσανατολισμός σταθμίστηκε με βάση γεγονότα βροχόπτωσης όπου κατέληξαν σε πλημμυρικά γεγονότα την τελευταία πενταετία. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η κατεύθυνση του συστήματος για τα πλημμυρικά γεγονότα που συνέβησαν στην ευρύτερη περιοχή της Αλεξανδρούπολης στις 23/07/2024 και 25/11/2023. Συνεπώς, με βάση την κατεύθυνση της βροχόπτωσης έγινε και η στάθμιση του προσανατολισμού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, επειδή τα συγκεκριμένα γεγονότα είχαν κατεύθυνση από δυτικά προς ανατολικά η στάθμιση έγινε με βάση τον δυτικό προσανατολισμό.



Εικόνα 3. Γράφημα Σταθμισμένου Προσανατολισμού

Δείκτης Υγρασίας (WI)

Πρόκειται για ένα δείκτη που περιγράφει την περιεκτικότητα εδάφους σε νερό και τις ζώνες επιφανειακού κορεσμού. Ο δείκτης υγρασίας βασίζεται σε ένα τροποποιημένο υπολογισμό της λεκάνης απορροής, ο οποίος δεν αντιμετωπίζει τη ροή ως λεπτό φιλμ όπως γίνεται κατά τον υπολογισμό των επιφανειών της λεκάνης απορροής στους συμβατικούς αλγορίθμους (Papaioannou et al. 2015). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη υγρασίας τόσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο υγρασίας στο έδαφος, το οποίο συνεπάγεται σε αυξημένη άμεση απορροή και εμφάνιση πλημμύρας. Για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου παράγοντα έγινε χρήση του ΨΜΕ μέσω του λογισμικού Saga GIS.

Κλίση (Slope)

Κρίνεται σημαντικός παράγοντας καθώς ασκεί επίδραση τόσο στη διείσδυση του νερού στο έδαφος όσο και στην επιφανειακή απορροή. Συγκεκριμένα με την αύξηση της κλίσης του εδάφους μειώνεται η διείσδυση και αυξάνεται η απορροή προς τις μικρότερες κλίσεις. Η αυξημένη ροή νερού στις επίπεδες πλαγιές καθιστά τις μικρές

κλίσεις εδάφους ευάλωτες σε πλημμύρα. Ο χάρτης κλίσης δημιουργείται από τον υπολογισμό της μέσης κλίσης σε κάθε εικονοστοιχείο και μετριέται ως ποσοστό (%) της ανύψωσης προς την οριζόντια μετατόπιση (Ibrahim et al., 2019). Το αποτέλεσμα του χάρτη προέκυψε από την επεξεργασία του ΨΜΕ σε περιβάλλον Arcmap.

Συντελεστής Απορροής CN της SCS (CN)

Ο Συντελεστής Απορροής CN προτάθηκε από την υπηρεσία Διατήρησης Φυσικών Πόρων του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (USDA-US Department of Agriculture) και χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την άμεση απορροή ή τη διήθηση από υπερβολική βροχόπτωση. Για την δημιουργία του απαιτείται η χαρτογράφηση των χρήσεων γης καθώς και των τύπων εδάφους της περιοχής μελέτης. Ακολούθησε η ένωση των κατηγοριών των υδρολογικών τύπων εδάφους με τις ομάδες χρήσεων γης και τέλος η απόδοση τιμών του συντελεστής απορροής CN σύμφωνα με το πίνακα που έχει προταθεί από τους Miliani et al., (2011). Οι τιμές του αδιάστατου συντελεστή απορροής CN κυμαίνονται από 0 έως 100 ανάλογα με την κατηγορία χρήσης γης και τον υδρολογικό τύπο εδάφους. Η εξαγωγή των αρχικών τιμών του CN έγινε σε περιβάλλον ΓΣΠ ύστερα από την επεξεργασία των χαρτών χρήσεων γης, υδρολογικών τύπων εδάφους και του υδρολιθολογικού χάρτη για την περιοχή μελέτης.

Πίνακας 3. Τιμές του Συντελεστής Απορροής CN με βάση την υδρολογική ομάδα εδάφους και την ταξινόμηση κάλυψης γης CORINE 2018 (Πηγή: Milliani et al., 2011).

Χρήσεις Γης σύμφωνα με το CORINE	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
	A	B	C	D
1.1.1 Συνεχής Αστικός Ιστός	89	92	94	95
1.1.2 Ασυνεχής Αστικός Ιστός	77	85	90	92
1.2.1 Βιομηχανικές και Εμπορικές Ζώνες	81	88	91	93
1.2.2 Οδικά και Σιδηροδρομικά Δίκτυα	98	98	98	98
1.2.3 Ζώνες Λιμένων	81	88	91	93
1.2.4 Αεροδρόμια	72	82	87	89
1.3.1 Χώροι Εξόρυξης Ορυκτών	72	82	87	89
1.3.2 Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	72	82	87	89
1.3.3 Χώροι οικοδόμησης	72	82	87	89
1.4.1 Περιοχές αστικού πρασίνου	68	79	86	89
1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	49	69	79	84
2.1.1 Μη Αρδευόμενη Αρόσιμη Γη	49	69	79	84
2.1.2 Μόνιμα Αρδευόμενη Αρόσιμη Γη	49	69	79	84
2.1.3 Ορυζώνες	59	70	78	81
2.2.1 Αμπελώνες	67	77	83	87
2.2.2 Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	65	75	82	86
2.2.3 Ελαιώνες	65	75	82	86
2.3.1 Λιβάδια	49	69	79	84
2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες	62	71	78	81

2.4.2 Σύνθετες καλλιέργειες	67	78	85	89
2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	67	78	85	89
2.4.4 Γεωργο-δασικές Εκτάσεις	45	66	77	83
3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων	60	65	70	77
3.1.2 Δάσος κωνοφόρων	60	65	70	77
3.1.3 Μικτό δάσος	60	65	70	77
3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι	60	65	74	80
3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι	60	65	74	80
3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση	60	65	74	80
3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	60	65	74	80
3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, Αμμουδιές	25	55	70	77
3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι	68	79	86	89
3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	68	79	86	89
3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις	68	79	86	89
3.3.5 Παγετώνες και αέριο χιόνι	79	79	79	79
4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα	98	98	98	98
5.1.1 Υδατορρεύματα	99	99	99	99
5.1.2 Επιφάνειες στάσιμου ύδατος	99	99	99	99
5.2.1 Παράκτιες λιμνοθάλασσες	99	99	99	99

Η υδρολογική απόκριση των λεκανών απορροής επηρεάζεται σημαντικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αλλαγή στην κατάσταση των χρήσεων γης όπως στις περιπτώσεις δασικών πυρκαγιών. Διαδεδομένο εργαλείο για την προσαρμογή της υδρολογικής απόκρισης αποτελεί η μέθοδος SCS-CN όπου μπορεί να ενσωματωθούν οι αλλαγές χρήσεων γης στην υδρολογική απόκριση μέσω του αδιάστατου αριθμού CN. Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος SCS-CN είναι διαδεδομένη σε παγκόσμιο επίπεδο, η βιβλιογραφία για την εκτίμηση των τιμών του CN μετά από γεγονός πυρκαγιάς παραμένει περιορισμένη. Μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε αναπροσαρμογή των τιμών του CN μετά από γεγονός πυρκαγιάς είναι αυτή του Soulis (2018), όπου έγινε χρήση δεδομένων επιφανειακής απορροής και βροχόπτωσης για μία πειραματική λεκάνη απορροής στην Αττική. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση της πυρκαγιάς επηρέασε έντονα τις υδρολογικές διεργασίες, με την άμεση απορροή και τις μέγιστες παροχές να αυξάνονται κατά 7,7 και 11,8 φορές αντίστοιχα μετά την πυρκαγιά, σε σύγκριση με τις προγενέστερες συνθήκες. Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των τιμών του CN μετά την πυρκαγιά η οποία κυμάνθηκε από 8 έως 25 μονάδες. Σύμφωνα με την ανάλυση της χωρικής κατανομής του CN παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες αυξήσεις του CN, όπως 29,2 και 36,4 μονάδες για την κατηγορία Μεικτή βλάστηση-SL και την κατηγορία Μεικτή βλάστηση-SCL, αντίστοιχα. Σε ένα γεγονός πυρκαγιάς, η δριμύτητα καύσης έχει σημαντικό ρόλο στο ποσοστό της μεταβολής της βλάστησης. Στην ανάλυση του Soulis (2018), συνδυάστηκε η δριμύτητα καύσης με την εκτίμηση των τιμών του CN.

Στην παρούσα έρευνα ο προσδιορισμός των τιμών του CN έγινε με βάση των αποτελεσμάτων της έρευνα του Soulis (2018) και την διερεύνηση των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης για την πυρκαγιά του Έβρου του 2023. Η εκτίμηση του συντελεστή CN για περιοχές που είχαν υψηλή δριμύτητα καύσης έγινε

με αύξηση της τιμής του CN κατά 10 μονάδες σε σχέση με την αρχική τιμή, ενώ για περιοχές που είχαν μέτρια και χαμηλή δριμύτητα καύσης έγινε αύξηση της τιμής του CN κατά 7 και 4 μονάδες σε σχέση με την αρχική τιμή αντίστοιχα. Η τροποποίηση των τιμών του CN έγινε σε περιβάλλον ΓΣΠ και εν τέλει δημιουργήθηκε ο τροποποιημένος χωρικά κατανομημένος χάρτης του CN για συνθήκες μετά από την πυρκαγιά του Έβρου του 2023.

Οριζόντια απόσταση επιφανειακής ροής (HOFD)

Εκτιμάται χρησιμοποιώντας την κίνηση του νερού από κελί σε κελί και όχι με την χρήση της ευκλείδειας απόστασης (Papaioannou et al. 2015). Για να εκφραστεί η τιμή του δείκτη, δηλαδή η απόσταση, χρησιμοποιούνται οι ίδιες μονάδες με τα ύψη και τις τιμές μεγέθους κελιών από το ΨΜΕ. Με τη μείωση της απόστασης μεταξύ του κελιού και του ρέματος, αυξάνεται η τρωτότητα σε πλημμύρα και ο παράγοντας ελαχιστοποιείται. Συνεπώς τα σημεία με χαμηλές τιμές του δείκτη είναι περισσότερο ευάλωτα σε πλημμύρες. Για την εξαγωγή του δείκτη έγινε χρήση του ΨΜΕ και του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης σε περιβάλλον Saga GIS.

Κάθετη απόσταση επιφανειακής ροής (VOFD)

Η κατακόρυφη χερσαία ροή εκτιμάται χρησιμοποιώντας την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των υψομέτρων των κελιών και των υψομέτρων που υπολογίζονται για το δίκτυο καναλιών στο συγκεκριμένο κελί (Papaioannou et al. 2015). Όσο μικραίνει η απόσταση τόσο μεγαλώνει ο βαθμός τρωτότητας για πλημμύρα στο σημείο που εξετάζεται και ελαχιστοποιείται η τιμή του παράγοντα. Συνεπώς οι μικρότερες τιμές του δείκτη αναδεικνύουν περιοχές με μεγάλη ευπάθεια σε πλημμύρες. Για την εξαγωγή του δείκτη έγινε χρήση του ΨΜΕ και του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης σε περιβάλλον Saga GIS.

Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (TPI)

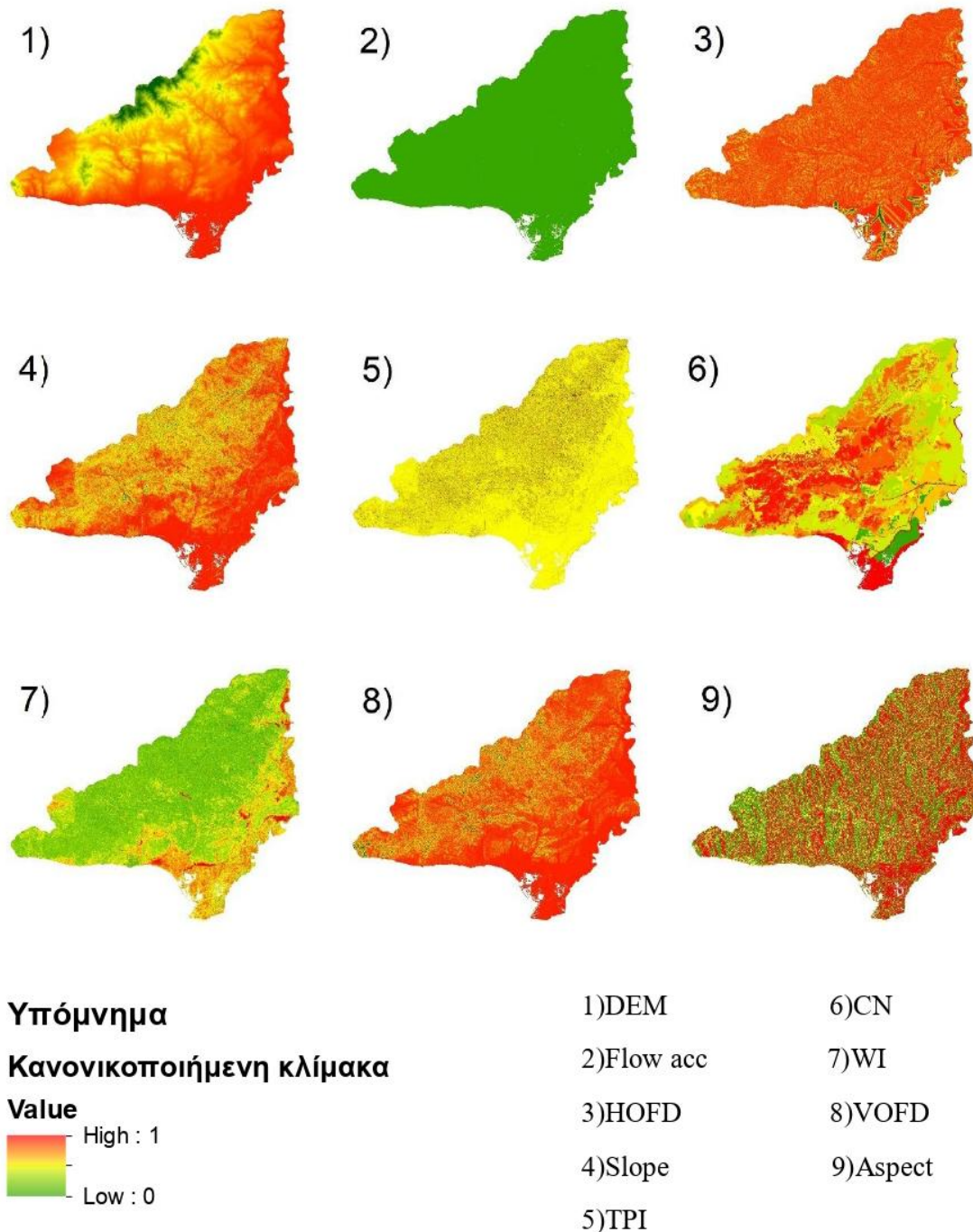
Ο δείκτης τοπογραφικής θέσης δείχνει τη διαφορά ύψους κάθε κελιού με τα μέσα ύψη των γειτονικών του κελιών (Yousef Kanani-Sadat 2019). Για τον υπολογισμό του επιλέχθηκε να δοθεί στην κυκλική περιοχή ακτίνα διαμέτρου 7 κελιών. Τα κελιά που έχουν μεγαλύτερο υψόμετρο από το μέσο υψόμετρο των γειτονικών κελιών εκδηλώνουν θετικές τιμές του δείκτη, σε αντίθεση με τα κελιά που έχουν μικρότερο υψόμετρο σε σχέση με των γειτονικών κελιών. Οι περιοχές με χαμηλές τιμές του δείκτη εμφανίζουν μεγαλύτερη ευπάθεια σε πλημμύρες. Η σχετική τοπογραφική θέση μιας τοποθεσίας μπορεί να ανήκει σε μία από τις κατηγορίες, συμπεριλαμβανομένων τις κοιλάδα, χαμηλή κλίση, επίπεδη πεδιάδα, μέση και υψηλή κλίση και κορυφογραμμή (A. Weiss 2001). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατάρτιση του TPI είναι το ΨΜΕ και η επεξεργασία έγινε σε περιβάλλον Arcmap.

Συγκέντρωση Ροής (Flow Acc)

Η Συσσώρευση ροής υποδηλώνει τη συνολική ροή που ξεκινάει από τα ανάντη και φτάνει μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο εντός της λεκάνης απορροής. Χρησιμοποιείται

για το καθορισμό του υδρογραφικού δικτύου. Η αύξηση της τιμής του δείκτη σημαίνει μεγαλύτερη πιθανότητα συγκέντρωσης ροής το οποίο οδηγεί σε εμφάνιση πλημμύρας. Για τη κατασκευή του συγκεκριμένου παράγοντα έγινε χρήση της διεύθυνσης ροής, η οποία προέκυψε από το ΨΜΕ ύστερα από την επεξεργασία του στο λογισμικό Arcmap.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται όλα τα παραπάνω κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του τελικού χάρτη πιθανών πλημμυρικών περιοχών σε κανονικοποιημένη μορφή.



Εικόνα 4. Κανονικοποιημένα Κριτήρια.

Πολυκριτηριακή μέθοδος ανάλυσης

Η αξιολόγηση διαφόρων πολύπλοκων προβλημάτων με πολλά και διαφορετικά χαρακτηριστικά μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης. Κύριος σκοπός των συγκεκριμένων μεθόδων είναι η διερεύνηση ενός προβλήματος μέσα από την ανάλυση μιας σειράς παραμέτρων και η κατάταξή τους βάσει μιας κλίμακας προτεραιότητας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εκφράζονται με αριθμητικές τιμές, γνωστές ως "συντελεστές βαρύτητας", που αποδίδονται στις παραμέτρους που εξετάστηκαν και αντανακλούν τη σημαντικότητα του κάθε παράγοντα στη διαδικασία που αξιολογείται. Συνοπτικά τα κύρια στάδια για την εφαρμογή μιας πολυκριτηριακής μεθόδου περιλαμβάνουν: α) τον προσδιορισμό των στόχων, β) τον ορισμό των κριτηρίων αξιολόγησης, γ) ανάλογα με τον στόχο την βαθμολόγηση των κριτηρίων, ε) τον υπολογισμό των συντελεστών βαρύτητας για τα κριτήρια και στ) την ιεράρχηση των στόχων. Στην παρούσα έρευνα έγινε χρήση των αποτελεσμάτων της Αναλυτικής Ιεραρχικής διαδικασίας σύμφωνα με την έρευνα των Papaioannou et al., (2015).

Αναλυτική Ιεραρχική διαδικασία (Analytic Hierarchy Process-AHP)

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδος (AHP), η οποία είναι μια δομημένη μέθοδος λήψης αποφάσεων (Saaty 1980). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί συγκρίσεις ανά ζεύγη και μαθηματικές τεχνικές για να βοηθήσει στην ιεράρχηση και επιλογή εναλλακτικών λύσεων όταν αντιμετωπίζονται σύνθετα προβλήματα που περιλαμβάνουν πολλαπλά κριτήρια (Saaty 1980). Η AHP βασίζεται στη δημιουργία ενός πίνακα σύγκρισης ζευγών στον οποίο αποδίδονται τιμές σημαντικότητας σε κάθε παράγοντα σε σχέση με τους υπόλοιπους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η γλωσσική κλίμακα σημαντικότητας με τις αντίστοιχες τιμές του Saaty (Saaty 1980).

Τα κύρια βήματα για την εφαρμογή της AHP είναι (Saaty 1980; Saaty & Tran, 2007):

1° ΒΗΜΑ. Ορισμός του προβλήματος: Καθορίζεται με σαφήνεια ο στόχος της απόφασης και προσδιορίζονται οι εναλλακτικές λύσεις που πρέπει να αξιολογηθούν.

2° ΒΗΜΑ. Κατασκευή ιεραρχίας: Το πρόβλημα απόφασης αναλύεται σε μια ιεραρχία στόχων, κριτηρίων, υποκριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων. Δηλ. Διαχωρίζεται το πρόβλημα απόφασης σε επίπεδα, ξεκινώντας με τον στόχο στην κορυφή, ακολουθούμενο από τα κριτήρια και τα υποκριτήρια και τέλος τις εναλλακτικές λύσεις στο κάτω μέρος.

3° ΒΗΜΑ. Διεξαγωγή συγκρίσεων κατά ζεύγη: Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων αξιολογούν ζεύγη κριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων με βάση τη σχετική τους σημασία ή προτίμηση χρησιμοποιώντας μια κλίμακα από το 1 (1 = ίση σημασία) έως το 9 (9 = εξαιρετική σημασία) και όταν οι μετρήσεις δεν είναι διαθέσιμες ο πίνακας παίρνει τη θετική αντίστροφη μορφή (Βλέπε Πίνακα Α).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Όπου στον Πίνακα **A** η αντίστροφη μορφή του a_{ji} είναι το $1/a_{ij}$ όπου i είναι οι γραμμές, j οι στήλες και a_{ij} οι τιμές σημαντικότητας.

4° ΒΗΜΑ. Κλίμακες αναλογίας: Οι σχετικοί συντελεστές βαρύτητας υπολογίζονται για τα κριτήρια και τις εναλλακτικές λύσεις χρησιμοποιώντας τα κύρια ιδιοδιανύσματα των πινάκων σύγκρισης.

5° ΒΗΜΑ. Έλεγχος συνέπειας: Η ΑΗΡ υπολογίζει έναν λόγο συνέπειας (CR) για να διασφαλίσει ότι οι κρίσεις είναι λογικά συνεπείς. Όταν η τιμή του CR είναι μικρότερη από 0,10 (10%) είναι συνήθως αποδεκτή η λύση.

6° ΒΗΜΑ. Σύνθεση προτεραιοτήτων: Υπολογίζονται οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο ξεχωριστά για να προσδιοριστεί η συνολική προτεραιότητα κάθε εναλλακτικής λύσης. Έτσι, με βάση τους συντελεστές βαρύτητας του κάθε κριτηρίου, γίνεται κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων για να προσδιοριστεί η βέλτιστη επιλογή.

Σύμφωνα με την έρευνα των Παραϊοαννου et al., (2015) οι πίνακες σύγκρισης ανά ζεύγη συμπληρώθηκαν από εννέα (9) ειδικούς στον τομέα της υδρολογίας και τα αποτελέσματα τους κανονικοποιήθηκαν και εξετάστηκαν με την προσέγγιση του Συντελεστή Συνέπειας (CR). Ο Συντελεστής Συνέπειας εφαρμόζεται με σκοπό την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των τιμών που έχουν αποδώσει οι ειδικοί σε σχέση με τυχαίες τιμές που λαμβάνονται από μεγάλα δείγματα. Σύμφωνα με την έρευνα των Παραϊοαννου et al. (2015), η τιμή που δόθηκε στο συντελεστή συνέπειας για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του πίνακα ήταν 10% και η τιμή που εκτιμήθηκε από όλους τους εμπλεκόμενους ήταν αποδεκτή και κάτω από 10%. Στις περιπτώσεις όπου το αποτέλεσμα της τιμής του συντελεστή ήταν μεγαλύτερο του ποσοστού που ορίστηκε, οι ειδικοί τροποποίησαν τους πίνακες σύγκρισης ζευγών έως ότου η τιμή του Συντελεστή Συνέπειας να είναι μικρότερη από 10%.

Τεχνική Ομαδοποίησης-Ταξινόμησης

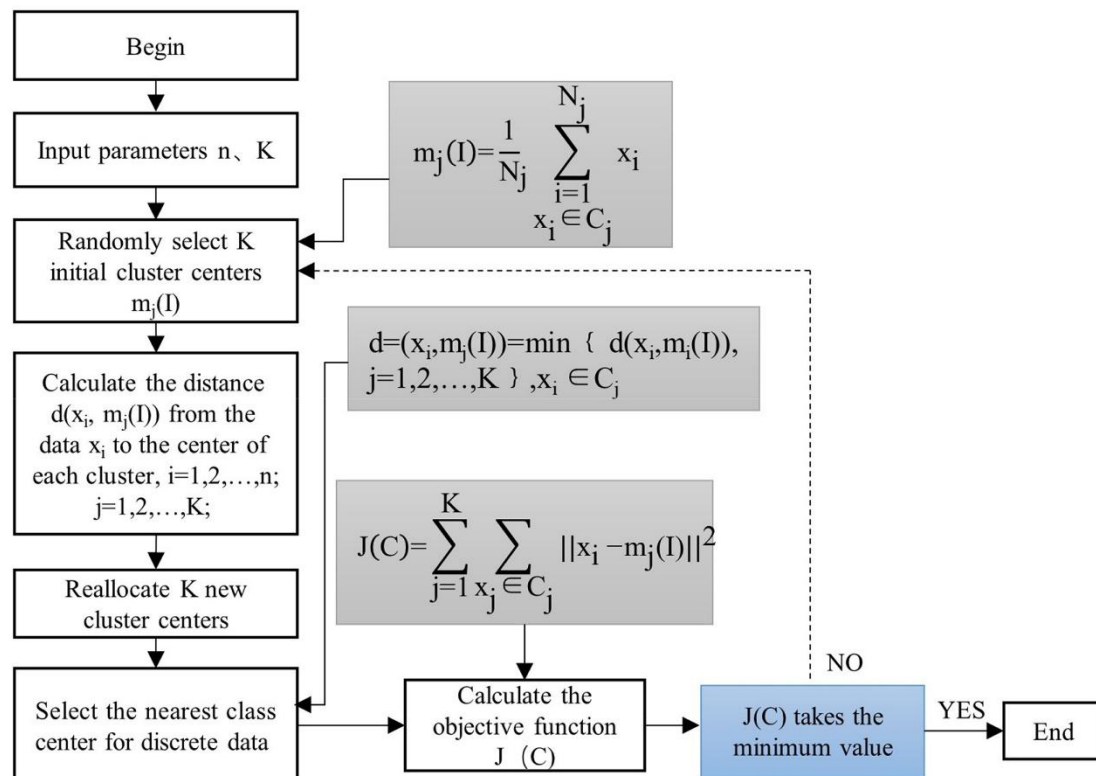
Ως τεχνική ομαδοποίησης δεδομένων νοείται η τεχνική που ομαδοποιεί δεδομένα σε διαφορετικές ομάδες με βάση τα μέτρα ομοιότητάς τους. Αυτό σημαίνει ότι τα στοιχεία δεδομένων στην ίδια ομάδα που ονομάζεται cluster είναι περισσότερο όμοια μεταξύ τους από ό,τι σε άλλες ομάδες.

Στην συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος που ανήκει στην ομάδα του τμηματικού αλγόριθμου καθώς δίνει τη δυνατότητα ομαδοποίησης των δεδομένων σε συγκεκριμένο αριθμό (k) τμημάτων τον οποίο επιλέγει ο χρήστης του αλγορίθμου εκ των προτέρων. Από την ομάδα του συγκεκριμένου αλγόριθμου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ομαδοποίησης K-mean. Η συγκεκριμένη τεχνική επιλέχθηκε σύμφωνα με την έρευνα των Παραϊοαννου et al. (2015), όπου για το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο η K-mean είχε την καλύτερη απόδοση και έδωσε

πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σύγκριση με όλες τις άλλες μεθόδους ταξινόμησης που διερευνήθηκαν όπως η Natural Breaks, FMC, GMMC και η Clara. Η τιμή που δόθηκε στο k είναι πέντε (5) με σκοπό τη δημιουργία πέντε (5) κλάσεων που αποδίδουν τις πιθανές περιοχές για πλημμύρα.

Τεχνική ομαδοποίησης K-mean

Η τεχνική ομαδοποίησης K-mean χρησιμοποιεί έναν επαναληπτικό αλγόριθμο που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των αποστάσεων από κάθε παράγοντα στο κέντρο της ομάδας του, σε όλες τις ομάδες (Papaioannou et al., 2015). Η μέθοδος K-mean προτάθηκε πρώτη φορά από το MacQueen το 1967 και χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της ευκολίας χρήσης και της αποτελεσματικότητας της. Πριν από την εκτέλεση της είναι απαραίτητο να οριστούν ο αριθμός των ομάδων k και το σύνολο των σημείων δεδομένων. Στη συγκεκριμένη μελέτη η τεχνική ομαδοποίησης K-mean αναπτύχθηκε μέσω του λογισμικού Saga GIS. Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται η ακολουθία των βημάτων για την εκτέλεση του αλγορίθμου της τεχνικής K-mean.



Εικόνα 5. Διάγραμμα ροής βημάτων αλγορίθμου της μεθόδου ομαδοποίησης K-mean (Πηγή: Alizade, 2017)

Πριν από την εφαρμογή της τεχνικής ομαδοποίησης K-mean τα επιλεγμένα κριτήρια κανονικοποιήθηκαν και ενώθηκαν σε ένα κοινό χάρτη μέσω της διαδικασίας Boolean Algebra σε περιβάλλον ArcMap. Σε αυτή τη διαδικασία τα επεξεργασμένα κριτήρια πολλαπλασιάστηκαν με τους συντελεστές βαρύτητας που προέκυψαν από τον τελικό πίνακα σύγκρισης ζευγών. Έτσι δημιουργήθηκε ο χάρτης πιθανών περιοχών για

πλημμύρα στον οποίο είναι ενσωματωμένοι όλοι οι παράγοντες με το κάθε ένα από αυτούς να ασκεί το δικό του μέγεθος επίδρασης.

Στην συνέχεια η ομαδοποίηση των τιμών του τελικού χάρτη πιθανών πλημμυρικών περιοχών πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού Saga GIS, όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος ομαδοποίησης K-mean για την ταξινόμηση της περιοχής μελέτης σε πέντε (5) κλάσεις με βάση τον δυνητικό κίνδυνο - ευπάθεια σε πλημμύρες. Ο τελικός ταξινομημένος χάρτης των πιθανών περιοχών σε πλημμύρα περιλαμβάνει τις εξής κλάσεις : Πολύ Υψηλή, Υψηλή, Μέτρια, Χαμηλή, Πολύ Χαμηλή.

Αποτελέσματα

Από την εφαρμογή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Μεθόδου σύμφωνα με την έρευνα των Παραϊοαννου et al. 2015, προέκυψαν οι τιμές βάρη των επιλεγμένων κριτηρίων (Πίνακας 4). Στη παρούσα μελέτη ο Τροποποιημένος Δείκτης Fournier εξαιρέθηκε από την ομάδα επιλεγμένων κριτηρίων και η βαρύτητα του μοιράστηκε ισόποσα στους δύο παράγοντες με την μεγαλύτερη επίδραση στη πλημμυρογένεση, δηλαδή στο Δείκτη Υγρασίας και στο Συντελεστή Απορροής CN της SCS. Μετά την προσθήκη της τιμής βάρους, οι δύο παραπάνω δείκτες συνεχίζουν να έχουν την μεγαλύτερη επίδραση με τιμές 0,28 και 0,18 αντίστοιχα. Συνεπώς όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των κριτηρίων Συντελεστής Απορροής CN της SCS και του Δείκτη Υγρασίας στη περιοχή μελέτης τόσο μεγαλύτερη είναι και η ευπάθεια της περιοχής σε πλημμύρες. Τα αποτελέσματα από τις βαρύτητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 4. Τα σχετικά βάρη της Αναλυτικής Ιεραρχικής Μεθόδου για τους επιλεγμένους παράγοντες και ο Συντελεστής Συνέπειας.

Κριτήρια	DEM	Aspect	WI	Slope	CN	HOFD	VOFD	TPI	Flow Acc
AHP									
Ομάδα ειδικών	0.03	0.02	0.28	0.11	0.18	0.08	0.07	0.08	0.15

Στην συνέχεια, με βάση τον πολλαπλασιασμό όλων των κριτηρίων με την βαρύτητα τους και στην συνέχεια την άθροιση τους παράγεται ο χάρτης πιθανών περιοχών σε πλημμύρα ο οποίος ταξινομείται με την μέθοδο K-mean σε πέντε (5) κλάσεις ευπάθειας σε πλημμύρες (Εικόνα 6). Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται η κατανομή των κλάσεων των πιθανών πλημμυρικών περιοχών για όλη την περιοχή μελέτης καθώς και για την έκταση της καμένης έκτασης ξεχωριστά. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από το ποσοστό κατανομής των κλάσεων πιθανών πλημμυρικών περιοχών για όλη την περιοχή μελέτης φαίνεται ότι οι κλάσεις πολύ υψηλή και υψηλή συγκεντρώνουν ποσοστό της τάξεως του 27,61% ενώ για τις ίδιες κλάσεις το ποσοστό κατανομής των κλάσεων πιθανών πλημμυρικών περιοχών για την περιοχή της καμένης έκτασης συγκεντρώνει ποσοστό της τάξεως του 17,63%. Επιπλέον και για τις δύο περιπτώσεις (συνολική περιοχή μελέτης, περιοχή καμένης έκτασης) φαίνεται ότι επικρατεί η μέτρια κλάση πιθανών πλημμυρικών περιοχών.

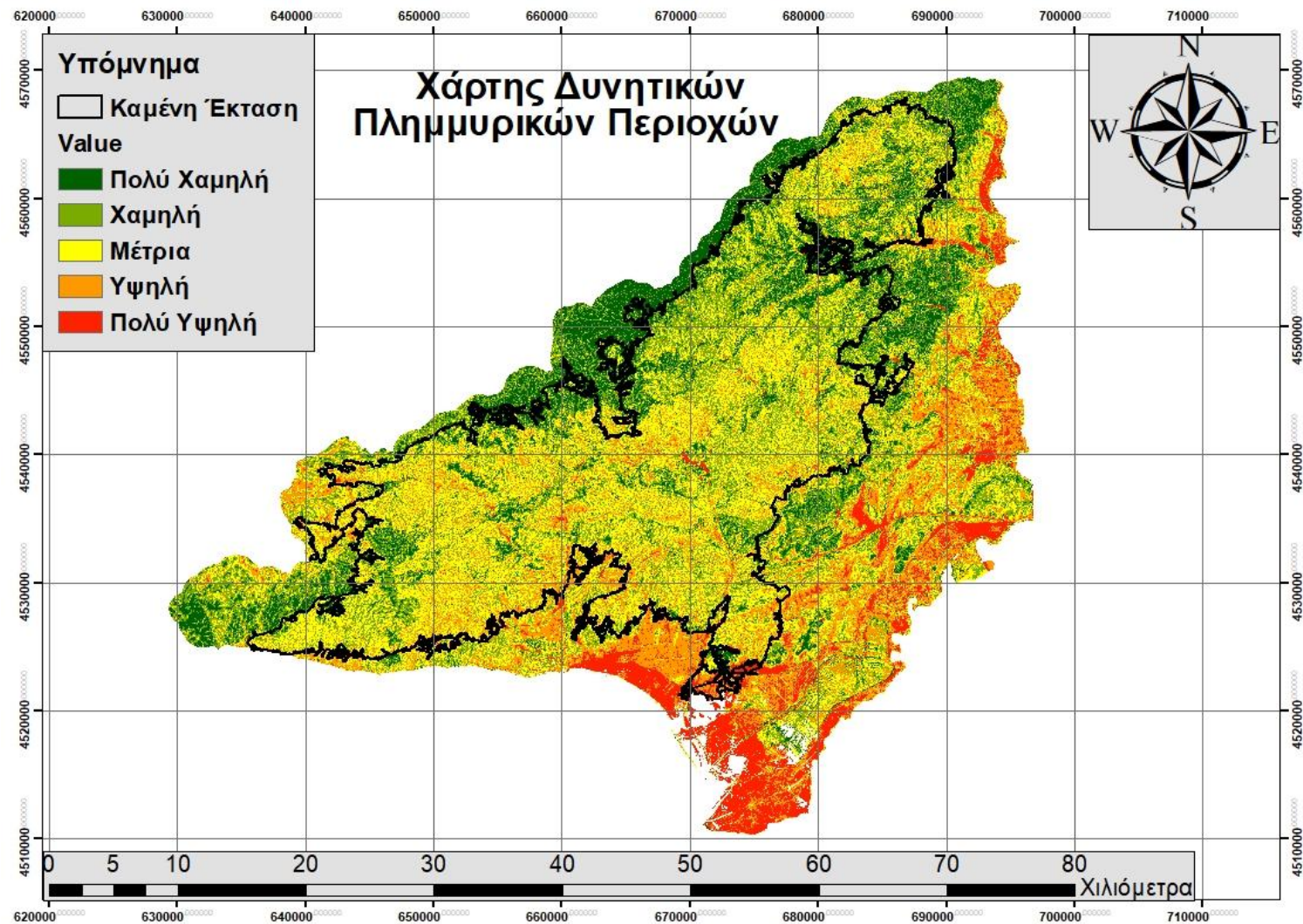
Πίνακας 5. Κατανομή κλάσεων πιθανών πλημμυρικών περιοχών στο σύνολο της περιοχής μελέτης και για την καμένη έκταση ξεχωριστά

Κλάσεις πιθανών πλημμυρικών περιοχών	Ποσοστό (%) της κατανομής των κλάσεων πιθανών πλημμυρικών περιοχών για όλη την περιοχή μελέτης
Πολύ Υψηλή	7.95
Υψηλή	19.66
Μέτρια	31.66
Χαμηλή	26.07
Πολύ Χαμηλή	14.66

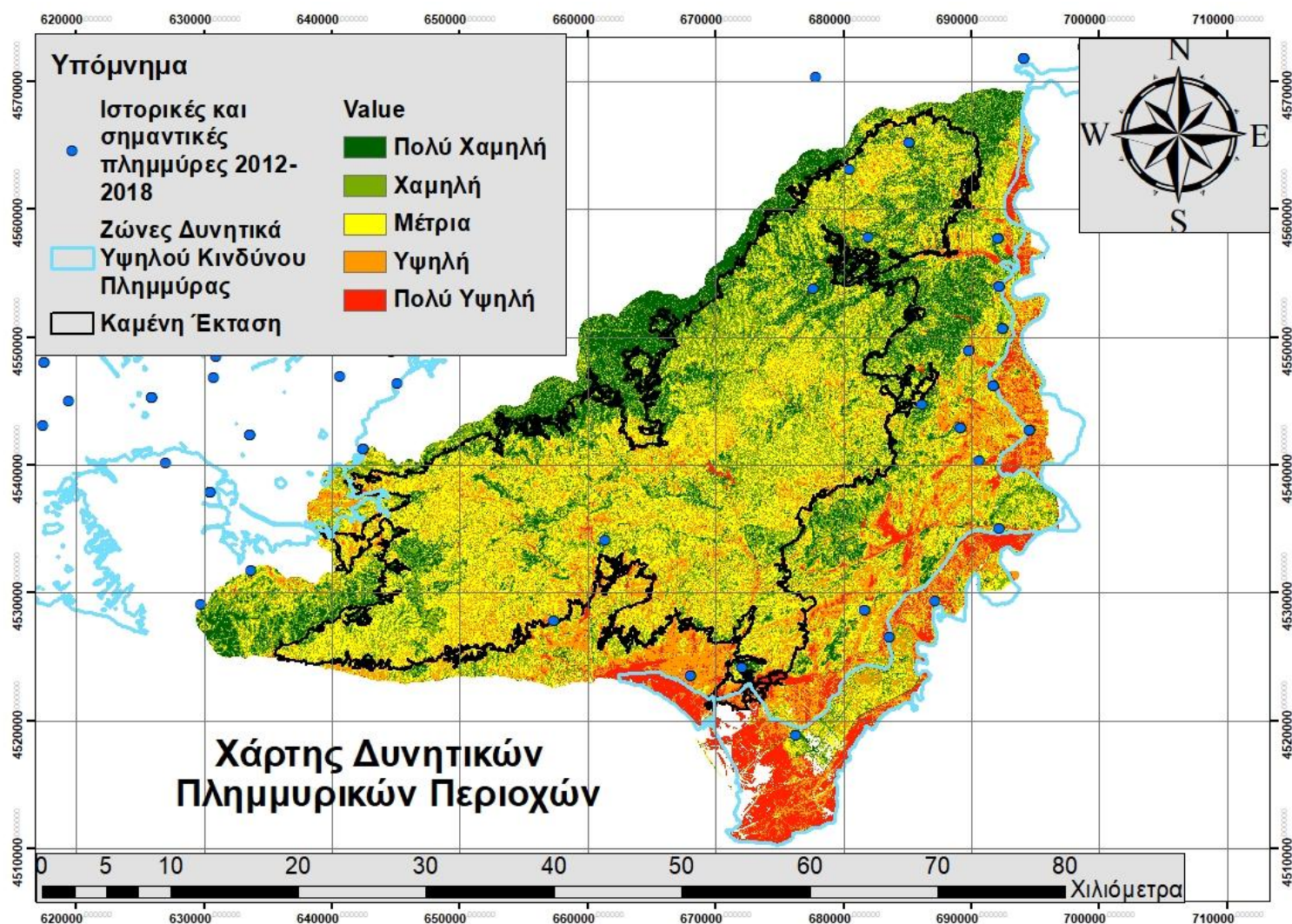
Κλάσεις πιθανών πλημμυρικών περιοχών	Ποσοστό (%) της κατανομής των κλάσεων πιθανών πλημμυρικών περιοχών για την περιοχή της καμένης έκτασης
Πολύ Υψηλή	1.82
Υψηλή	15.81
Μέτρια	40.88
Χαμηλή	29.53
Πολύ Χαμηλή	11.97

Παρατηρώντας την Εικόνα 6, διαπιστώνουμε ότι η νοτιοανατολική πλευρά της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό στις κλάσεις πιθανών πλημμυρικών περιοχών Υψηλή και Πολύ Υψηλή. Το συγκεκριμένο εύρημα μπορεί να αιτιολογηθεί με βάση την ανάλυση των βασικών κριτηρίων που εφαρμόστηκαν στη παρούσα έρευνα. Ειδικότερα, οι χαμηλές κλίσεις που παρατηρούνται στο πεδινό τμήμα της περιοχής, σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές του δείκτη υγρασίας στο ίδιο τμήμα, δημιουργούν συνθήκες που ευνοούν τη συγκέντρωση υδάτων και κατ' επέκταση αυξάνουν την πιθανότητα πλημμυρών. Επιπλέον, οι υψηλές τιμές του συντελεστή απορροής CN της SCS, οι οποίες εμφανίζονται κυρίως στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου κυριαρχεί ο αστικός ιστός, συμβάλλουν περαιτέρω στην κατηγοριοποίηση σημαντικού μέρους της πεδινής ζώνης στις κλάσεις Υψηλή και Πολύ Υψηλή. Αυτό φαίνεται και με την ανάλυση της χωρικής κατανομής των συγκεκριμένων δύο κλάσεων στην Εικόνα 6. Ένα ακόμη ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από την ανάλυση της Εικόνας 6, είναι η παρουσία σημαντικού ποσοστού των κλάσεων Υψηλή και Πολύ Υψηλή εντός των καμένων εκτάσεων. Αυτό εξηγείται κυρίως από τη μεταβολή των χρήσεων γης που προκλήθηκε από την καταστρεπτική πυρκαγιά του 2023.

Για την αξιολόγηση του αποτελέσματος, δηλαδή του χάρτη που αποτυπώνει τις πιθανές περιοχές για πλημμυρογένεση χρησιμοποιήθηκαν τα πολύγωνα των Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας καθώς και οι ιστορικές και σημαντικές πλημμύρες που συνέβησαν την περίοδο 2012-2018. Τα συγκεκριμένα δεδομένα αντιστοιχούν στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θράκης και αντλήθηκαν από την 1^η αναθεώρηση των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας. Ο τελικός χάρτης που συνδυάζει τις κλάσεις των πιθανών πλημμυρικών περιοχών και τα δεδομένα πιστοποίησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 6. Χάρτης Δυνητικών Πλημμυρικών Περιοχών της περιοχής μελέτης



Εικόνα 7. Χάρτης Δυνητικών Πλημμυρικών Περιοχών συμπεριλαμβανομένου τα ιστορικά σημεία πλημμύρας και τα πολύγωνα ΖΔΥΚΠ

Παρατηρώντας την Εικόνα 7 γίνεται αντιληπτό πως οι περιοχές που εντάσσονται στις κλάσεις Πολύ Υψηλή και Υψηλή εμπίπτουν με τις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας όπου βρίσκονται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και σχεδόν αποκλειστικά στο πεδινό της τμήμα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η πιστοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης των κλάσεων Πολύ Υψηλή και Υψηλή των πιθανών περιοχών για πλημμυρογένεση με τα πολύγωνα ΖΔΥΚΠ. Η συγκεκριμένη ανάλυση έδειξε ότι οι δύο παραπάνω κλάσεις καλύπτουν το 74,64% των πολυγώνων ΖΔΥΚΠ, ποσοστό που θεωρείται πολύ ικανοποιητικό. Επιπλέον, σύμφωνα με ποιοτικό έλεγχο της Εικόνας 7, φαίνεται ότι τα σημεία των ιστορικών πλημμυρών της περιόδου 2012-2018 εμφανίζονται σε περιοχές όπου σύμφωνα με το χάρτη πιθανών πλημμυρικών περιοχών ανήκουν στις κλάσεις Μέτρια έως Πολύ Υψηλή.

Συμπεράσματα

Στη παρούσα έρευνα εφαρμόστηκε συγκεκριμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που συνδυάζει τεχνικές Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με τα ΓΣΠ για την παραγωγή ενός χάρτη που απεικονίζει τις πιθανές πλημμυρικές περιοχές. Το πεδίο εφαρμογής είναι η περιοχή του Έβρου που επλήγητε από την πυρκαγιά του 2023. Ανώτερος στόχος του προτεινόμενου πλαισίου είναι ο έγκαιρος εντοπισμός των ευάλωτων περιοχών κατά την μεταπυρική περίοδο προκειμένου να προληφθούν δευτερογενείς καταστροφές όπως είναι η πλημμύρες. Με την χρήση του προτεινόμενου πλαισίου μπορεί να υπάρξει μια πρώτη εκτίμηση των πιθανών περιοχών που κινδυνεύουν από πλημμύρες και βασίζεται σε απλούς δείκτες με πλήρη χωρική κατανομή που γίνεται εύκολα ο χειρισμός τους σε περιβάλλον ΓΣΠ. Συγκεκριμένα, αρχικά πραγματοποιήθηκε η επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν βασίζονται στην έρευνα των Παραϊοαννου et al., (2015) και είναι τα εξής εννέα (9) : το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, ο Σταθμισμένος Προσανατολισμός, ο Δείκτης Υγρασίας, η Κλίση, ο Συντελεστής Απορροής CN της SCS, η Οριζόντια Απόσταση Επιφανειακής Ροής, η Κάθετη Απόσταση Επιφανειακής Ροής, ο Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης και η Συγκέντρωση ροής. Η διακριτική ικανότητα των κριτηρίων είναι υψηλής ανάλυσης (5x5 m). Όλα τα κριτήρια κανονικοποιήθηκαν με την μέθοδο min-max για να έχουν κοινό πεδίο τιμών. Στην συνέχεια μέσω της AHP όπως εφαρμόστηκε στην έρευνα των Παραϊοαννου et al., (2015) αποδόθηκαν οι βαρύτητες για τον κάθε παράγοντα. Ο Δείκτης Υγρασίας και ο Συντελεστής Απορροής CN της SCS έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή με ποσοστά 28% και 18% αντίστοιχα. Τη μικρότερη επίδραση έχει το ΨΜΕ με ποσοστό 3% και ο Σταθμισμένος Προσανατολισμός με 2%. Για την παραγωγή των πιθανών πλημμυρικών περιοχών πολλαπλασιάστηκαν όλα τα κριτήρια με την αντίστοιχη βαρύτητα τους και στην συνέχεια υπολογίστηκε το άθροισμα τους. Για την διαβάθμιση του αποτελέσματος σε πέντε (5) κλάσεις πιθανών πλημμυρικών περιοχών έγινε χρήση της τεχνική ομαδοποίησης K-mean (Πολύ Χαμηλή – Πολύ Υψηλή). Στο σύνολο της περιοχής μελέτης οι πιθανές περιοχές για πλημμύρα σύμφωνα με τις κλάσεις Πολύ υψηλή και υψηλή συγκεντρώνουν ποσοστό 27,91% ενώ οι ίδιες κλάσεις για την περιοχή εντός της καμένης έκτασης συγκεντρώνουν ποσοστό 17,93%. Γενικά παρατηρείται ότι το νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης έχει πολύ υψηλές τιμές κάτι το οποίο πιθανόν αιτιολογείται λόγω της χαμηλής κλίσης, της υψηλής συγκέντρωσης από τον δείκτη υγρασίας και της συσσώρευση ροής όπου γίνεται στα πεδινά τμήματα. Η υπόλοιπη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται κυρίως από μέτρια και υψηλή ευπάθεια σε πλημμύρες με κάποια τμήματα να έχουν και χαμηλές τιμές. Το προτεινόμενο πλαίσιο πιστοποιήθηκε με την χρήση των Ζωνών Δυνητικά Υψηλού

Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) και με ιστορικά δεδομένα πλημμυρών. Η σύγκριση των κατηγοριών Πολύ Υψηλή και Υψηλή με τις ΖΔΥΚΠ είχε ποσοστό επιτυχίας 75%, ενώ η αξιολόγηση των σημείων των ιστορικών πλημμυρών δείχνει ότι υπάρχει σχετικά καλή ταύτιση με τα σημεία να εντοπίζονται σε περιοχές όπου οι τιμές κυμαίνονται από Μέτρια έως Πολύ Υψηλή. Εν κατακλείδι, το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο μπορεί να παράγει αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα, με χαμηλό κόστος και με τη χρήση περιορισμένων δεδομένων, κυρίως δεδομένων που είναι παράγωγα από το ΨΜΕ. Επιπλέον, το προτεινόμενο πλαίσιο μπορεί να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο για δευτερογενείς καταστροφές μετά από πυρκαγιά, όπως οι πλημμύρες, έτσι ώστε οι υπεύθυνοι λήψεως αποφάσεων να κάνουν στοχευμένο και άμεσο σχεδιασμό της χωροθέτησης των αντιπλημμυρικών μέτρων.

Χρηματοδότηση και αναγνώριση

Η παρούσα έρευνα έλαβε χρηματοδότηση και πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Ερευνητικού Προγράμματος:

“Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου για τον εντοπισμό πιθανών διαβρωσιγενών και πλημμυρικών περιοχών μετά από πυρκαγιά. (Post-fire Erosion and Flood prone areas Identification framework – PEFI)”, Φορέας Χρηματοδότησης: Ειδικός Λογαριασμός Κονδυλίων Έρευνας ΔΠΘ, Πρόγραμμα: Duth to people, Επιστημονικά Υπεύθυνος: Επίκ. Καθηγητής Παπαϊωάννου Γεώργιος.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

- Μουσαδής, Ι. (2018). Ανάπτυξη και εφαρμογή ολοκληρωμένης μεθοδολογίας σε περιβάλλον GIS για τον καθορισμό ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών: «Η περίπτωση της Αττικής». Μεταπτυχιακή Διατριβή.
- Ξοφης, Π., Ποϊραζίδης, Αθανασίου Μ., Γεωργιάδης, Ν., & Πουρσανίδης Δ. (2024). «Καταγραφή της υπο μελέτης περιοχής μετά την πυρκαγιά». Στο Γ. Σουρβάς κ.α. (Επιμ.), Μελέτη αναδάσωσης και διαχειριστικών κατευθύνσεων για την αποκατάσταση των δασικών οικοσυστημάτων της περιοχής Έβρου μετά την πυρκαγιά του 2023. (σσ. 130-141), WWF Ελλάς, Αθήνα
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας - Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Θράκης (EL12).
- Forest Plan Environmental Consulting. (2024). Μελέτη αναδάσωσης και διαχειριστικών κατευθύνσεων για την αποκατάσταση των δασικών οικοσυστημάτων της περιοχής του Έβρου μετά την πυρκαγιά του 2023.

Ξενόγλωσση

- Ahmed, I., Das (Pan), N., Debnath, J., Bhowmik, M., & Bhattacharjee, S. (2024). Flood hazard zonation using GIS-based multi-parametric Analytical Hierarchy Process. Geosystem and Geoenvironment. Vol. 3, No. 2.
- Alamanos, A., & Papaioannou, G. (2020). A GIS multi-criteria analysis tool for a low-cost, preliminary evaluation of wetland effectiveness for nutrient buffering at watershed scale: The case study of Grand River, Ontario, Canada. Water (Switzerland). Vol. 12, No. 11, pp. 1–14. <https://doi.org/10.3390/w12113134>

- Alizadeh, M. J., Shahheydari, H., Kavianpour, M. R., Shamloo, H., & Barati, R. (2017). Prediction of longitudinal dispersion coefficient in natural rivers using a cluster-based Bayesian network. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 76, No. 2, pp. 86.
- Arna, F., Jauari, A. N. H., Ilham, R., & Ariv, B. (2017). Spatial flood risk mapping in East Java, Indonesia, using analytic hierarchy process – natural breaks classification. 2nd International Conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE).
- Badía, D., Sánchez, C., Aznar, J. M., & Martí, C. (2015). Post-fire hillslope log debris dams for runoff and erosion mitigation in the semiarid Ebro Basin. *Geoderma*. Vol. 237, pp. 298–307.
- Bansal, N., Mukherjee, M., & Gairola, A. (2023). GIS-based multi-criteria decision analysis for mapping flood-prone areas in Dehradun city, India. *Arab Journal of Geosciences*. Vol. 16, pp. 501.
- Bubeck, P., Botzen, W. J., & Aerts, J. C. (2012). A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. *Risk Analysis*. Vol. 32, No. 9, pp. 1481-1495.
- Cabrera, J. S., & Lee, H. S. (2019). Flood-prone area assessment using GIS-based multi-criteria analysis: A case study in Davao Oriental, Philippines. *Water*. Vol. 11, No. 11, pp. 2203. <https://doi.org/10.3390/w11112203>
- Chen, Y. (2022). Flood hazard zone mapping incorporating geographic information system (GIS) and multi-criteria analysis (MCA) techniques. *Journal of Hydrology*. Vol. 612, pp. 128268.
- Choudhury, S., Basak, A., Biswas, S., & Das, J. (2022). Flash flood susceptibility mapping using GIS-based AHP method. *Spatial Modelling of Flood Risk and Flood Hazards GIScience and Geo-environment Modelling*. pp. 119-142.
- CORINE. (2018). CORINE Land Cover 2018 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly. <https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfd0>
- Das, S. (2020). Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. Vol. 20.
- Dash, P., & Sar, J. (2020). Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index. *Journal of Flood Risk Management*. Vol. 13, No. 3.
- De Brito, M. M., & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: A survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 16, No. 4, pp. 1019-1033.
- Noji, E. K. (1991). Natural disasters. *Critical Care Clinics*. Vol. 7, No. 2, pp. 271-292.
- Ermagun, A., Smith, V., & Janatabadi, F. (2024). High urban flood risk and no shelter access disproportionately impacts vulnerable communities in the USA. *Communications Earth & Environment*. Vol. 5, No. 1.
- Evelpidou, N., Tzouxanioti, M., Spyrou, E., Petropoulos, A., Karkani, A., Saitis, G., & Margaritis, M. (2022). GIS-based assessment of fire effects on flash flood hazard: The case of the summer 2021 forest fires in Greece. *GeoHazards*. Vol. 4, No. 1, pp. 1–22. <https://doi.org/10.3390/geohazards4010001>
- Feloni, E., Mousadis, I., & Baltas, E. (2019). Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach—The case of Attica region. *Flood Risk Management*. Vol. 13, No. S1.
- Ferreira, F. A. F., Ilander, G., & Ferreira, J. J. M. (2019). MCDM/A in practice: methodological developments and real-world applications. *Management Decision*. Vol. 57, No. 2, pp. 295–299.

- FHRC/RPA. (2002). Multi-criteria analysis in the context of flood and coastal defence – Scoping report. Report prepared for the Environment Agency.
- Girona-García, A., Vieira, D. C. S., Silva, J., Fernández, C., Robichaud, P. R., & Keizer, J. J. (2021). Effectiveness of post-fire soil erosion mitigation treatments: A systematic review and meta-analysis. *Earth-Science Reviews*. Vol. 217.
- Guan, H., Huang, J., Li, L., Li, X., Miao, S., Su, W., Ma, Y., Niu, Q., & Huang, H. (2023). Improved Gaussian mixture model to map the flooded crops of VV and VH polarization data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 295.
- Ibrahim, G. R. F., Rasul, A., Ali Hamid, A., Ali, Z. F., & Dewana, A. A. (2019). Suitable site selection for rainwater harvesting and storage case study using Dohuk Governorate. *Water*. Vol. 11, No. 4, pp. 864. <https://doi.org/10.3390/w11040864>
- Yadav, J., & Sharma, M. (2013). A review of K-mean algorithm. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. Vol. 4, No. 7, July 2013.
- Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., & Nasser, M. (2019). A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on GIS-based hybrid multi-criteria decision-making method. *Journal of Hydrology*. Vol. 572, pp. 17-31.
- Kavzoglu, T., Sahin, E. K., & Colkesen, I. (2014). Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides*. Vol. 11, No. 3, pp. 425–439.
- Komolafe, A. A., Awe, B. S., Olorunfemi, I. E., & Oguntunde, P. G. (2020). Modelling flood-prone area and vulnerability using integration of multi-criteria analysis and HAND model in the Ogun River Basin, Nigeria. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 65, No. 10, pp. 1766–1783.
- Leta, B. M., & Adugna, D. (2023). Identification and mapping of flood-prone areas using GIS-based multi-criteria decision-making and analytical hierarchy process: The case of Adama City’s watershed, Ethiopia. *Applied Geomatics*. Vol. 15, pp. 933–955.
- Miliani, F., Ravazzani, G., & Mancini, M. (2011). Adaptation of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 16, No. 3, pp. 218–227.
- Mohammed, Z. T., Hussein, L. Y., & Abood, M. H. (2024). Potential flood hazard mapping based on GIS and Analytical Hierarchy Process. *Journal of Water Management Modeling*.
- Nachappa, T. G., Piralilou, S. T., Gholamnia, K., Ghorban-zadeh, O., Rahmati, O., & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster-Shafer theory. *Journal of Hydrology*. Vol. 125275.
- Negese, A., Worku, D., & Shitaye, A. (2022). Potential flood-prone area identification and mapping using GIS-based multi-criteria decision-making and analytical hierarchy process in Dega Damot district, northwestern Ethiopia. *Applied Water Science*. Vol. 12, pp. 255. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01772-7>
- Papaioannou, G., Vasiliades, L., & Loukas, A. (2015). Multi-criteria analysis framework for potential flood-prone areas mapping. *Water Resources Management*. Vol. 29, No. 2, pp. 399–418.
- Papaioannou, G., Vasiliades, L., Loukas, A., & Aronica, G. T. (2017). Probabilistic flood inundation mapping at ungauged streams due to roughness coefficient uncertainty in hydraulic modelling. *Advances in Geosciences*. Vol. 44, pp. 23–34. <https://doi.org/10.5194/adgeo-44-23-2017>

- Penki, R., Basina, S. S., & Tanniru, S. R. (2023). Application of geographical information system-based analytical hierarchy process modeling for flood susceptibility mapping of Krishna District in Andhra Pradesh. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 30, pp. 99062-99075.
- Vilasan, R. T., & Kapse, V. S. (2022). Evaluation of the prediction capability of AHP and F-AHP methods in flood susceptibility mapping of Ernakulam district (India). *Natural Hazards*. Vol. 112, pp. 1767-1793.
- Robichaud, P. R., & Brown, R. E. (2005). Postfire rehabilitation treatments: Are we learning what works? In: Moglen, G. E. (Ed.), *Managing watersheds for human and natural impacts: engineering, ecological, and economic challenges: Proceedings of the 2005 Watershed Management Conference, July 19-22, 2005, Williamsburg, Virginia*. Alexandria, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 12.
- Roxy, M. K., Ghosh, S., Pathak, A., Athulya, R., Mujumdar, M., Murtugudde, R., Terray, P., & Rajeevan, M. (2017). A threefold rise in widespread extreme rain events over central India. *Nature Communications*. Vol. 8, No. 1, pp. 708.
- Roy, S. K., Morshed, A., Mojumder, P. H., Islam, M. M., & Saiful, A. K. M. (2024). Innovative trend analysis technique with fuzzy logic and K-means clustering approach for identification of homogeneous rainfall region: A long-term rainfall data analysis over Bangladesh. *Quaternary Science Advances*. Vol. 15.
- Saaty, T. L., & Tran, L. T. (2007). On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process. *Mathematical and Computer Modelling*. Vol. 46, No. 7–8, pp. 962–975.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation*. New York: McGraw, pp. 281.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1991). *Prediction, projection, and forecasting: Applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games, and sports*. Kluwer Academic Publishers.
- Sahraei, R., Kanani-Sadat, Y., Homayouni, S., Safari, A., Oubennaceur, K., & Chokmani, K. (2022). A novel hybrid GIS-based multi-criteria decision-making approach for flood susceptibility analysis in large ungauged watersheds. *Flood Risk Management*. Vol. 16, No. 2.
- Shakesby, R. A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*. Vol. 105, Issues 3–4, pp. 71–100.
- Solomatine, D. P., & Ostfeld, A. (2008). Data-driven modelling: Some past experiences and new approaches. *Journal of Hydroinformatics*. Vol. 10, No. 1, pp. 3-22.
- Souissi, D., Zouhri, L., Hammami, S., Msaddek, M. H., Zghibi, A., & Dlala, M. (2019). GIS-based MCDM – AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. *Geocarto International*. Vol. 35, No. 4, pp. 1-25.
- Soulis, K. X. (2018). Estimation of SCS Curve Number variation following forest fires. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 63, No. 9, pp. 1332–1346.
- Stefanidis, S., & Stathis, D. (2013). Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*. Vol. 68, No. 2, pp. 569–585.
- Weiss, A. D. (2001). Topographic position and landforms analysis. Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.
- Wheater, H., Jakeman, A., & Beven, K. (1993). Progress and directions in rainfall-runoff modelling.

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΑΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

Γρηγοριάδου Μελπομένη

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων

Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Email: melpgrig1@fmenr.duth.gr

Παπαϊωάννου Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων

Σχολή Επιστημών Γεωπονίας και Δασολογίας

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Email: gropaio@fmenr.duth.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει την ευαισθησία των πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού εξαιτίας της χρήσης διαφορετικών μεθόδων χρονικής κατανομής καταιγίδας. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών για τη συλλογή και επεξεργασία των γεωγραφικών δεδομένων από τη λεκάνη απορροής του παραπόταμου του ποταμού Έβρου που εντοπίζεται στην περιοχή της Μάνδρας. Στη συνέχεια, με την χρήση των όμβριων καμπυλών των μετεωρολογικών σταθμών στην περιοχή μελέτης έγινε εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης όπως η μέθοδος εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternating Block Method - ABM) και η μέθοδος SCS για τον υπολογισμό της καταιγίδας σχεδιασμού. Η παραγωγή των τελικών υδρογραφημάτων έγινε με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS και του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS. Οι υδρολογικές απώλειες υπολογίστηκαν με την μέθοδο μέθοδο SCS-CN ενώ ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίστηκε με την εξίσωση του Giandotti. Η διόδευση έγινε με την χρήση της μεθόδου Muskingum. Τα παραγόμενα υδρογραφήματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους ώστε να εντοπιστούν οι διαφορές που υπάρχουν εξαιτίας της χρήσης διαφορετικής τεχνικής στην χρονική κατανομή της καταιγίδας σχεδιασμού. Οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων ABM και SCS II αποδείχθηκαν μικρές, ενώ οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων ABM και SCS I ήταν μεγαλύτερες. Συμπερασματικά, η επιλογή της μεθόδου χρονικής κατανομής μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια του πλημμυρογραφήματος και, κατ' επέκταση, τη διαχείριση των πλημμυρικών ζωνών.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση Ευαισθησίας, Πλημμυρογράφημα, Χρονική Κατανομή Καταιγίδας, Υδρολογική Προσομοίωση, Πλημμύρες, Λεκάνη Απορροής

Εισαγωγή

Η υδρολογική προσομοίωση συμβάλλει σημαντικά στην διαχείριση των υδάτινων πόρων, στην εκτίμηση κινδύνου πλημμύρας και στο σχεδιασμό υδραυλικών έργων. Κύριο στοιχείο της υδρολογικής προσομοίωσης είναι η δημιουργία των υδρογραφήματων σχεδιασμού που βασίζονται σε συγκεκριμένης διάρκειας και έντασης καταιγίδας σχεδιασμού (Marsalek, 1984; Watt & Marsalek, 2013). Η κατασκευή των υδραυλικών έργων όπως πχ υποδομές αντιπλημμυρικής προστασίας, βασίζονται στα υδρογραφήματα σχεδιασμού (Voorhees & Wenzel, 1984). Τα υδρογραφήματα σχεδιασμού επιτρέπουν στους υδρολόγους να προβλέπουν τη συμπεριφορά μιας λεκάνης απορροής υπό ακραίες καιρικές συνθήκες και να σχεδιάσουν κατάλληλα μέτρα μετριασμού. Η ακρίβεια αυτών των υδρογραφήματων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η επιλογή του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, η επιλογή της τεχνικής υπολογισμού των απωλειών, η χρονική κατανομή της καταιγίδας σχεδιασμού κλπ (Fatone et al., 2021). Ως εκ τούτου, η διερεύνηση και η επιλογή των κατάλληλων μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των υδρογραφήματων σχεδιασμού μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αξιοπιστία των υδρολογικών προβλέψεων και την ανθεκτικότητα των υδραυλικών κατασκευών σε ακραία φαινόμενα (Marsalek, 1984).

Μια από τις βασικές διεργασίες στην υδρολογική προσομοίωση που επιτρέπει στους ερευνητές να κατανοήσουν το πώς οι μεταβολές συγκεκριμένων παραμέτρων μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα είναι η ανάλυση ευαισθησίας (Ouedraogo et al., 2018). Στην υδρολογική προσομοίωση, η ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της επιρροής διαφορετικών παραμέτρων εισόδου, όπως για παράδειγμα η χρονική και χωρική κατανομή των κατακρημνισμάτων, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και οι μέθοδοι διόδευσης, στο παραγόμενο υδρογράφημα (Amengual et al., 2007). Μεταβάλλοντας συστηματικά αυτές τις παραμέτρους, οι ερευνητές μπορούν να αξιολογήσουν την ευρωστία του μοντέλου, να εντοπίσουν τους βασικούς παράγοντες που συμβάλλουν στην αβεβαιότητα και να βελτιώσουν την επιλογή των παραμέτρων για βελτιωμένη ακρίβεια. Στην έρευνα των Faouzi et al., (2022) δίνεται έμφαση στην σημασία της ανάλυσης ευαισθησίας, ιδίως σε λεκάνες απορροής με μεγάλο υψόμετρο, όπου η ποιότητα των δεδομένων βροχόπτωσης μπορεί να είναι αμφισβητήσιμη. Επιπλέον, στην συγκεκριμένη έρευνα παρατηρείται ότι υδρολογικά λογισμικά όπως το HEC-HMS, είναι ευαίσθητα στις εισροές των κατακρημνισμάτων (δεδομένα TRMM, δεδομένα από Μετεωρολογικούς Σταθμούς, κλπ) και ιδιαίτερα στην μεταβολή του Curve Number, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη βελτίωση της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, καθώς και καλύτερης διερεύνησης της επιρροής των δεδομένων εισόδου και άλλων παραμέτρων κατά την υδρολογική προσομοίωση. Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας είναι επωφελής για τη βελτιστοποίηση των υδρολογικών προσομοιώσεων σε διαφορετικές κλιματικές και γεωγραφικές συνθήκες. (Ewea et al., 2016). Με την ανάλυση ευαισθησίας υποστηρίζεται επίσης η ανάπτυξη τεχνικών ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας, επιτρέποντας στους υδρολόγους να παρέχουν πιο αξιόπιστες προβλέψεις για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου (Amengual et al., 2007). Υπάρχουν αρκετές έρευνες όπου έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας σε υδρολογικά μοντέλα, αποδεικνύοντας την αξία της στη βαθμονόμηση, την επικύρωση και την αξιολόγηση των επιδόσεων των μοντέλων (Vangelis et al., 2022).

Το όφελος της ανάλυσης ευαισθησίας στην υδρολογική προσομοίωση επεκτείνεται πέρα από την απλή βελτίωση των αποτελεσμάτων διότι συμβάλλει και στην λήψη

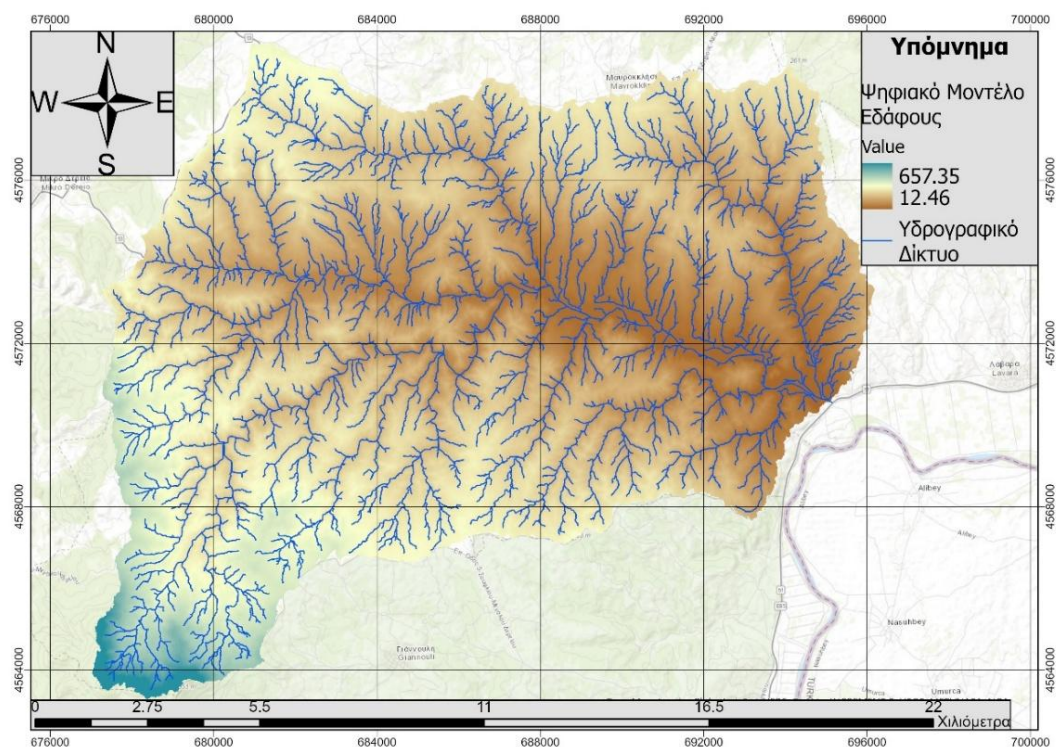
αποφάσεων για την διαχείριση των πλημμυρών καθώς και στον σχεδιασμό των υδραυλικών έργων (Fatone et al., 2023). Προσδιορίζοντας τις παραμέτρους με τη μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα του υδρολογικού μοντέλου, οι υδρολόγοι μπορούν να προτεραιοποιήσουν τις προσπάθειες συλλογής δεδομένων και να βελτιώσουν την ποιότητα των δεδομένων εισόδου (Fonseca et al., 2024). Με την αύξηση της έντασης και της συχνότητας των ακραίων υδρολογικών φαινομένων λόγω της κλιματικής αλλαγής, η χρήση της ανάλυσης ευαισθησίας στην υδρολογική προσομοίωση για την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων κρίνεται επιβεβλημένη ώστε να βελτιωθούν οι στρατηγικές για την διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση της ανάλυσης ευαισθησίας στις ροές εργασίας υδρολογικής μοντελοποίησης ενισχύει τις δυνατότητες πρόβλεψης και προάγει την εμπιστοσύνη στη λήψη αποφάσεων (Devak & Dhanya, 2017). Επιπλέον, η χρονική κατανομή μιας καταιγίδας σχεδιασμού επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματος, όπως η μέγιστη παροχή και ο χρόνος μέχρι την αιχμή (Ewea et al., 2016). Η κατανόηση αυτής της σχέσης μπορεί να είναι σημαντική, καθώς τα πρότυπα χρονικής κατανομής της καταιγίδας σχεδιασμού μπορεί να διαφέρουν οδηγώντας σε διαφορετικές συμπεριφορές απόκρισης στο παραγόμενο υδρογράφημα.

Ως εκ τούτου, ο σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η διερεύνηση του πόσο επηρεάζεται το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού εξαιτίας της χρήσης διαφορετικής μεθόδου χρονικής κατανομής στην καταιγίδα σχεδιασμού. Για την υδρολογική προσομοίωση έγινε χρήση του υδρολογικού λογισμικού HEC-HMS. Για την μετατροπή της βροχής σε απορροή χρησιμοποιήθηκε το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα της SCS (SMY-SCS), ενώ οι απώλειες εκτιμήθηκαν με την μέθοδο SCS Curve Number (SCS-CN) για συνθήκες υγρασίας τύπου II. Η διόδευση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Muskingum για όλα τα τμήματα των υδατορρευμάτων. Οι μέθοδοι χρονικής κατανομής της καταιγίδας σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν είναι η μέθοδος εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternating Block Method) και η μέθοδος SCS (τύπος I, II, III, IA). Για την παραγωγή της καταιγίδας σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τα αναθεωρημένα εθνικά Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας (ΣΔΚΠ). Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι η λεκάνη απορροής Μάνδρας – Πρωτοκκλήσι που συμβάλλει στον ποταμό Έβρο με έξοδο της λεκάνης κοντά στο χωριό Μάνδρα του Έβρου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην μέγιστη παροχή ανάλογα με την επιλογή της μεθόδου για την χρονική κατανομή της καταιγίδας σχεδιασμού αλλά απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση των μεθόδων και σύγκριση των αποτελεσμάτων με ιστορικά δεδομένα.

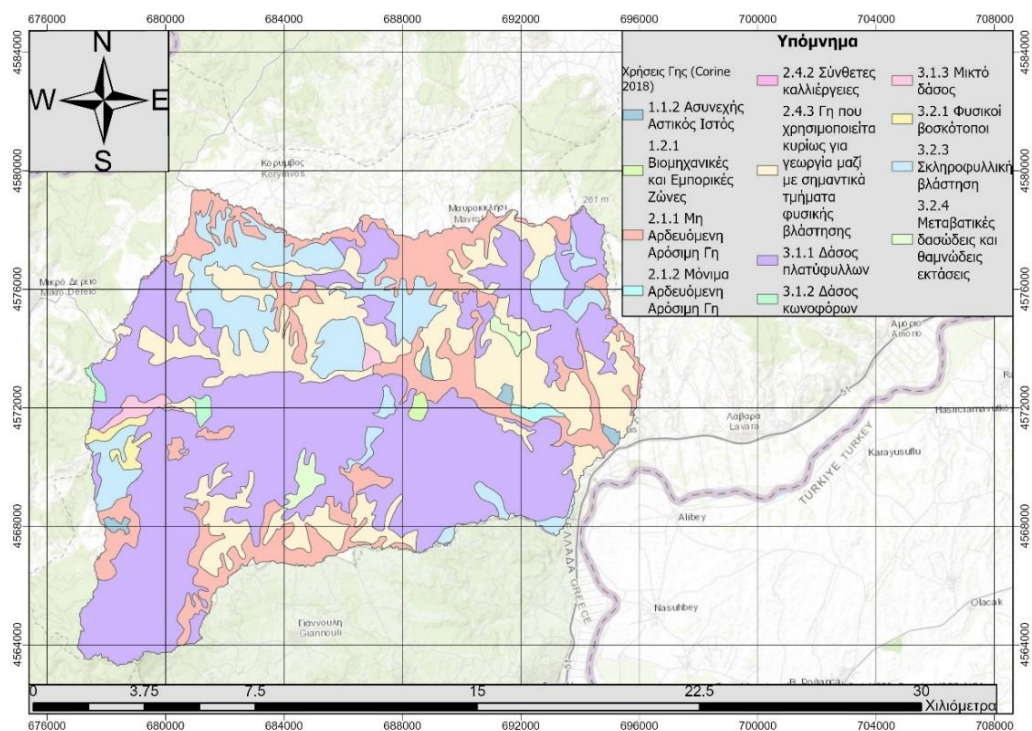
Περιοχή μελέτης

Η μελέτη που επιλέχθηκε είναι η λεκάνη απορροής της Μάνδρας – Πρωτοκκλήσι (Επονομαζόμενη ως Ποτιστικό στα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας), στην περιφερειακή ενότητα Έβρου της Θράκης, η οποία εκβάλλει στον ποταμό Έβρο πλησίον του οικισμού Μάνδρα. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής διότι έχει πληγεί στο παρελθόν από πλημμύρες, με σημαντικά επεισόδια το 2010 όπου υπήρξε εκκένωση του οικισμού της Μάνδρας και τον Ιανουάριο του 2021 όπου το χωριό Πρωτοκκλήσι κινδύνεψε από πλημμυρικά φαινόμενα. Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής κυμαίνεται από 12,46 μέτρα έως 657,35 μέτρα (Εικόνα 1) ενώ η μέση κλίση της λεκάνης απορροής είναι 28,6 %. Σχετικά με τις χρήσεις γης, σύμφωνα με το Corine 2018 (Copernicus, 2019) στην περιοχή μελέτης επικρατούν με 62,9 % οι δασικές εκτάσεις και ακολουθούν οι αγροτικές εκτάσεις με 36,33 % και οι τεχνητές επιφάνειες

με ποσοστό 0,77 % (Εικόνα 2).

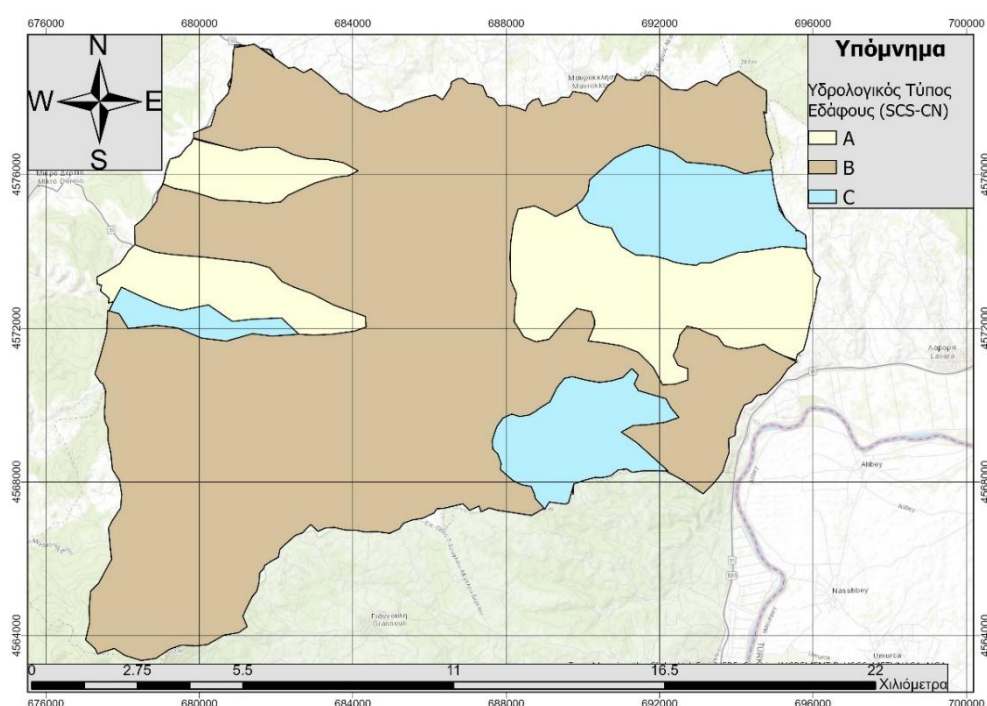


Εικόνα 1. Λεκάνη απορροής περιοχής Μάνδρας – Πρωτοκλήσι με Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και το υδρογραφικό δίκτυο.



Εικόνα 2. Χρήσεις Γης σύμφωνα με το Corine 2018.

Σχετικά με τις εδαφολογικές συνθήκες και συγκεκριμένα για τον υδρολογικό τύπο εδάφους που αποτυπώνει την υδατοπερατότητα όπως προσδιορίζεται σύμφωνα με την εκτίμηση του συντελεστή απορροής CN της SCS (CN), η κύρια κατηγορία που επικρατεί στην περιοχή μελέτης είναι η B με ποσοστό περίπου 70,5% και στην συνέχεια ακολουθούν οι κατηγορίες A και C με ποσοστά 17% και 12,5% αντίστοιχα. Τα δεδομένα των υδρολογικών τύπων εδάφους ανακτήθηκαν από τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) για την λεκάνη απορροής του Έβρου (Παραρτήματα Στάδιο II).

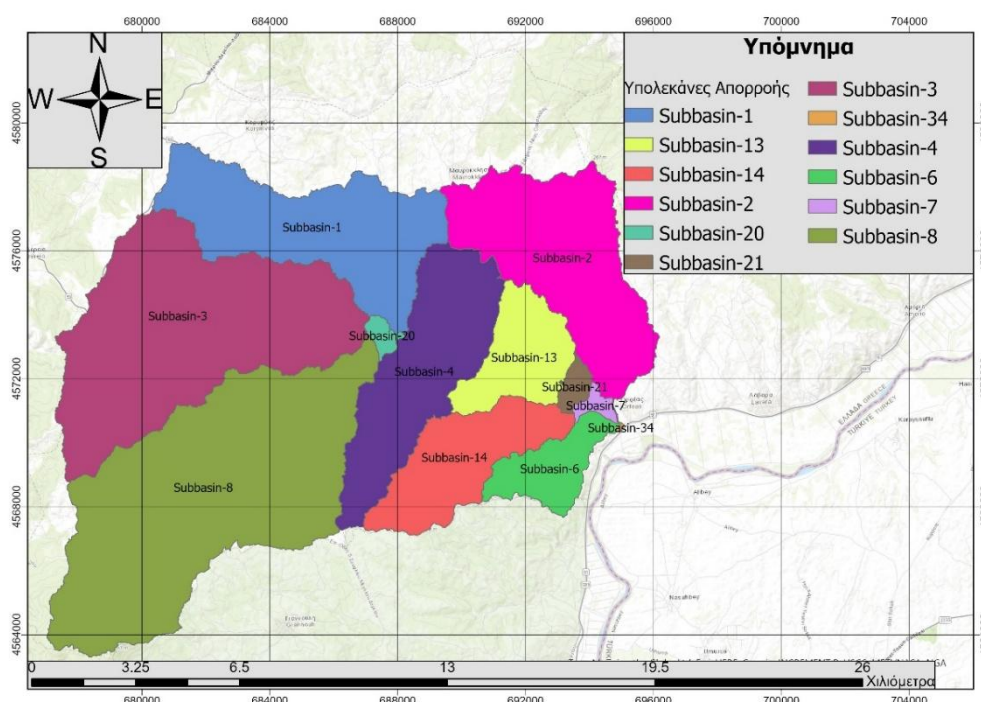


Εικόνα 3. Υδρολογικός τύπος εδάφους σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση από την εκτίμηση του συντελεστή απορροής CN της SCS (CN).

Υπολεκάνες Απορροής

Για την ημι-κατανεμημένη υδρολογική προσομοίωση η λεκάνη απορροής διαχωρίστηκε σε έντεκα (11) επιμέρους υπολεκάνες απορροής οι οποίες προσδιορίστηκαν με βάση την γεωμορφολογία και σημαντικών σημείων ενδιαφέροντος (Εικόνα 4). Κατά την ανάλυση των κύριων χαρακτηριστικών των υπολεκάνων απορροής εκτιμήθηκαν διάφορα χαρακτηριστικά όπως η έκταση, οι κλίσεις και ο προσανατολισμός, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την επιφανειακή απορροή (Πίνακας 1). Για παράδειγμα, η υπολεκάνη 8 έχει τη μεγαλύτερη έκταση (52.14 km²) και τη μεγαλύτερη μεταβολή υψομέτρου (231.78 m), ενώ η υπολεκάνη 7 έχει τη μικρότερη έκταση (0.79 km²) και τη μικρότερη μεταβολή υψομέτρου (13.9 m). Η κλίση των υπολεκάνων κυμαίνεται από 0.127 (υπολεκάνη 7)

μέχρι 0.28 (υπολεκάνη 3), υποδηλώνοντας διαφορές στη γεωμορφολογία και στην υδρολογική τους απόκριση. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι υπολεκάνες απορροής και στον Πίνακα 1 κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 4. Υπολεκάνες απορροής (Subbasins)

Πίνακας 1. Κύρια χαρακτηριστικά υπολεκανών απορροής

Υπολεκάνη Απορροής	Έκταση (km ²)	Εύρος Υψομέτρου (m)	Μήκος Κεντρικής κοίτης (km)	Κλίση
Subbasin-6	6.20	101.19	5.83	0.27
Subbasin-20	0.88	34.35	1.18	0.24
Subbasin-21	1.21	33.51	2.03	0.24
Subbasin-8	52.14	231.78	20.05	0.27
Subbasin-3	42.97	149.34	14.36	0.28
Subbasin-1	24.83	161.68	11.70	0.20
Subbasin-7	0.79	13.91	1.41	0.13
Subbasin-2	24.88	133.93	11.79	0.20
Subbasin-14	13.11	147.74	10.27	0.28
Subbasin-13	9.18	65.32	4.47	0.20
Subbasin-4	20.32	108.46	8.68	0.22

Μεθοδολογία - Εφαρμογή

Όμβριες Καμπύλες

Οι όμβριες καμπύλες είναι μαθηματικές αναπαραστάσεις που συσχετίζουν την ένταση και το ύψος της βροχόπτωσης με τη διάρκεια και τη συχνότητα των γεγονότων αυτών. Οι όμβριες καμπύλες έχουν ευρεία χρήση και συγκεκριμένα έχουν φτιαχτεί όμβριες

καμπύλες για όλη την Ελλάδα στο πλαίσιο των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας. Η χρησιμότητα τους συνδέεται άρρηκτα με τις υδραυλικές κατασκευές μέσω της παραγωγής των υδρογραφημάτων σχεδιασμού. Οι σχέσεις αυτές βασίζονται σε διαρκείς παρατηρήσεις βροχοπτώσεων (Koutsoyiannis et al., 1998).

Περίοδος Επαναφοράς

Ο ορισμός της περιόδου επαναφοράς όπως αποτυπώνεται στο βιβλίο «Στατιστική Υδρολογία» του Δ. Κουτσογιάννη (2016) είναι:

«Η περίοδος επαναφοράς, T , μιας δεδομένης τιμής x της τυχαίας μεταβλητής X ορίζεται ως ο μέσος αριθμός χρονικών διαστημάτων (εν προκειμένω υδρολογικών ετών) που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εμφανίσεων της τυχαίας μεταβλητής με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής x »

Αν και βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα, δεν εγγυάται την αποφυγή επανάληψης του συμβάντος εντός αυτής της περιόδου (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Στην παρούσα εργασία, η περίοδος επαναφοράς βροχόπτωσης ορίστηκε στα εκατό χρόνια ($T=100$).

Κύρια Χαρακτηριστικά Σχετικών Μεταβλητών

Στην ανάλυση της παραγωγής καταιγίδων σχεδιασμού, τα κύρια χαρακτηριστικά των σχετικών μεταβλητών περιλαμβάνουν:

1. Διάρκεια Βροχής (d): Καθορίζει την κλίμακα του χρόνου κατά την οποία παρατηρείται το φαινόμενο (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).
2. Ένταση Βροχής (i): Χαρακτηρίζεται ως η τυχαία μεταβλητή " i ", η οποία αναπαριστά τη διακύμανση του πληθυσμού των έντονων βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια της παρατηρούμενης περιόδου " d ". Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με τη διάρκεια και το ύψος της βροχής μέσω της εξίσωσης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$i = h / t \quad (1)$$

3. Περίοδος Επαναφοράς (T): Αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα, σε έτη, που απαιτείται ώστε η μέση ένταση βροχόπτωσης I , για την περίοδο d , να υπερβεί την τιμή i (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Γενική Συναρτησιακή Σχέση Όμβριων Καμπυλών

Η γενική συναρτησιακή σχέση για τις όμβριες καμπύλες εκφράζεται ως:

$$i(d, T) = a(T)/b(d) \quad (2)$$

Οι συναρτήσεις $a(T)$ και $b(d)$ αντιπροσωπεύουν τις κατάλληλες συναρτήσεις της περιόδου επαναφοράς T και της χρονικής κλίμακας d . Το I αναπαριστά τη μέγιστη ένταση βροχής για την χρονική κλίμακα d και την περίοδο επαναφοράς T (e.g. Chow et al., 1988).

Βήματα Εξαγωγής Όμβριων Καμπυλών

Η διαδικασία ανάκτησης των όμβριων καμπυλών περιλαμβάνει τα εξής βήματα: 1) Συγκέντρωση βροχομετρικών δεδομένων, 2) Διαμόρφωση Δεδομένων με σκοπό την δημιουργία χρονοσειρών, 3) Αξιολόγηση των δεδομένων με χρήση διαφόρων ελέγχων, 4) Επιλογή θεωρητικού μοντέλου κατανομής, 5) Προσαρμογή κατανομής.

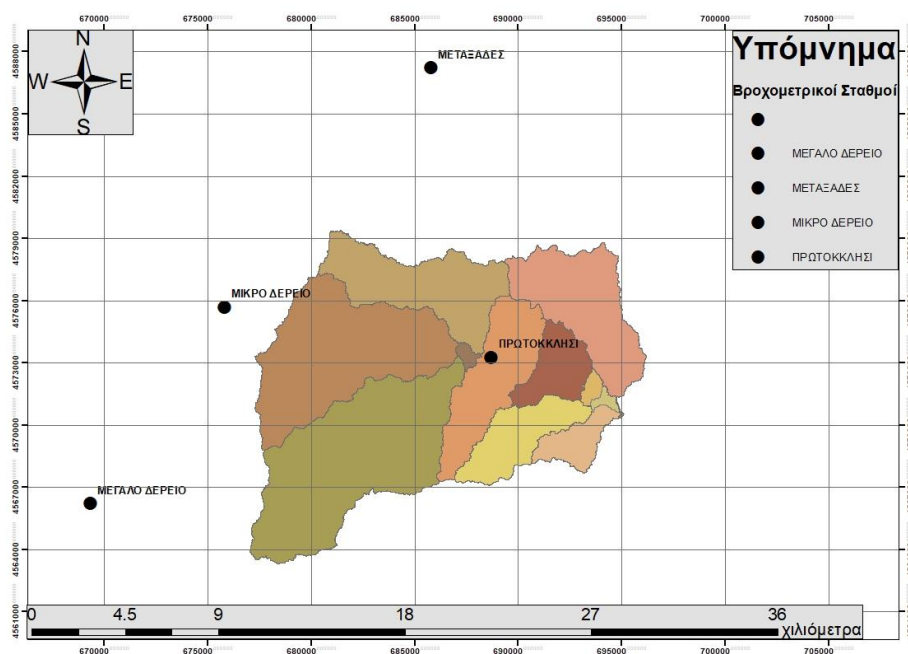
Για τη γενίκευση των όμβριων καμπυλών, χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις κατανομής Pareto και Gumbel. Η σχετική εξίσωση, παρουσιάζεται στην μελέτη της Ειδικής Γραμματεία Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας το 2016 και η αναθεωρημένη της μορφή το 2023, περιλαμβάνει παραμέτρους κλίμακας, θέσης και σχήματος.

$$i(d, T) = \frac{\lambda(T^{\kappa} - \psi')}{(1 + d/\theta)^{\eta}} \quad (3)$$

όπου: κ παράμετρος σχήματος, λ' παράμετρος κλίμακας, ψ' παράμετρος θέσης της συνάρτησης κατανομής, και θ, η οι παράμετροι της συνάρτησης διάρκειας.

Υπολογισμός Σημειακών Εντάσεων Βροχής

Για τον υπολογισμό των σημειακών εντάσεων βροχής, επιλέχθηκαν τέσσερις βροχομετρικοί σταθμοί, με έναν από αυτούς να βρίσκεται εντός της λεκάνης απορροής (Πρωτοκκλήσι) και τους υπόλοιπους να εντοπίζονται κοντά στην λεκάνη απορροής: Μικρό Δέρειο, Μεγάλο Δέρειο, και Μεταξάδες. Σύμφωνα με τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας για την περιφερειακή ενότητα του Έβρου, εντοπίστηκαν οι παράμετροι σχήματος (κ), κλίμακας (λ') και θέσης (ψ') για κάθε σταθμό, βασισμένες στα τοπικά βροχομετρικά δεδομένα. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η τοποθεσία των σταθμών και στον Πίνακα 2 οι εκτιμημένες παράμετροι και τα υψόμετρα σύμφωνα με τα ΣΔΚΠ. Συνεπώς, για τον υπολογισμό των εντάσεων βροχής χρησιμοποιήθηκαν οι σημειακές όμβριες καμπύλες για διάρκεια $D=24$ ώρες και περίοδο επαναφοράς $T=100$ χρόνια, με χρονικό βήμα 15 λεπτών.



Εικόνα 5. Τοποθεσία βροχομετρικών σταθμών

Πίνακας 2. Παράμετροι των όμβριων καμπυλών των βροχομετρικών σταθμών

ΣΤΑΘΜΟΣ	X	Y	Z	θ	η	κ	λ	ψ	ψ'	λ'
ΜΙΚΡΟ ΔΕΡΕΙΟ	675836,05	4575682,98	116,2	0,082	0,708	0,04	39,25	2,72	0,891	981,15
ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	688715,39	4573261,24	50,2	0,082	0,708	0,04	36,07	3,42	0,863	901,84
ΜΕΓΑΛΟ ΔΕΡΕΙΟ	669344,06	4566205,17	381,6	0,082	0,708	0,04	44,36	3,24	0,87	1108,94
ΜΕΤΑΞΑΔΕΣ	685821,45	4587217,54	138,7	0,082	0,708	0,04	39,30	2,86	0,886	982,62

Χρόνος Συγκέντρωσης

Ο χρόνος συγκέντρωσης (T_c) αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για το νερό να φτάσει στο σημείο εξόδου της λεκάνης από το πιο απομακρυσμένο σημείο της. Ο χρόνος συγκέντρωσης εξαρτάται από γεωμορφολογικούς παράγοντες όπως η κλίση του εδάφους, κλπ. Μια από τις πιο γνωστές εξισώσεις για τον υπολογισμό του, όπου έγινε χρήση και στην παρούσα εργασία, είναι η εξίσωση του Giandotti (Michailidi et al., 2018):

$$T_c = \frac{4\sqrt{A}+1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} = \frac{4\sqrt{A}+1.5L}{0.8\sqrt{H_{mref}-H_{ref}}} \quad (4)$$

Όπου T_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης (hr), A είναι η έκταση της λεκάνης (km^2), L είναι το μέγιστο μήκος υδατορρεύματος (km), H_{mref} είναι το μέσο υψόμετρο λεκάνης (m), H_{ref} είναι το υψόμετρο στην έξοδο της λεκάνης απορροής (m).

Όλες οι παράμετροι για τον υπολογισμό του T_c εκτιμήθηκαν σε περιβάλλον ΓΣΠ, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3 με τους χρόνους συγκέντρωσης για κάθε υπολεκάνη.

Πίνακας 3. Υπολεκάνες απορροής και αντίστοιχοι χρόνοι συγκέντρωσης σύμφωνα με την εξίσωση του Giandotti

Υπολεκάνες	Έκταση	Μέσο υψόμετρο	Υψόμετρο στην έξοδο	ΔH ($H_{mref}-H_{ref}$)	Μήκος κεντρικής κοίτης	T_c
Subbasin-6	6,20	113,92	12,73	101,19	5,83	2,32
Subbasin-20	0,88	65,88	31,53	34,35	1,18	1,18
Subbasin-21	1,21	48,80	15,29	33,51	2,03	1,61
Subbasin-8	52,14	265,29	33,51	231,78	20,05	4,84
Subbasin-3	42,97	181,33	31,99	149,34	14,36	4,89
Subbasin-1	24,83	194,34	32,66	161,68	11,70	3,68
Subbasin-7	0,79	26,53	12,62	13,91	1,41	1,90
Subbasin-2	24,88	148,09	14,16	133,93	11,79	4,06
Subbasin-14	13,11	163,45	15,71	147,74	10,27	3,07
Subbasin-13	9,18	83,80	18,48	65,32	4,47	2,91
Subbasin-4	20,32	131,36	22,90	108,46	8,68	3,73
Watershed	196,52	185,48	12,46	173,02	29,48	9,53

Επιφανειακή ολοκλήρωση με μέθοδο Thiessen

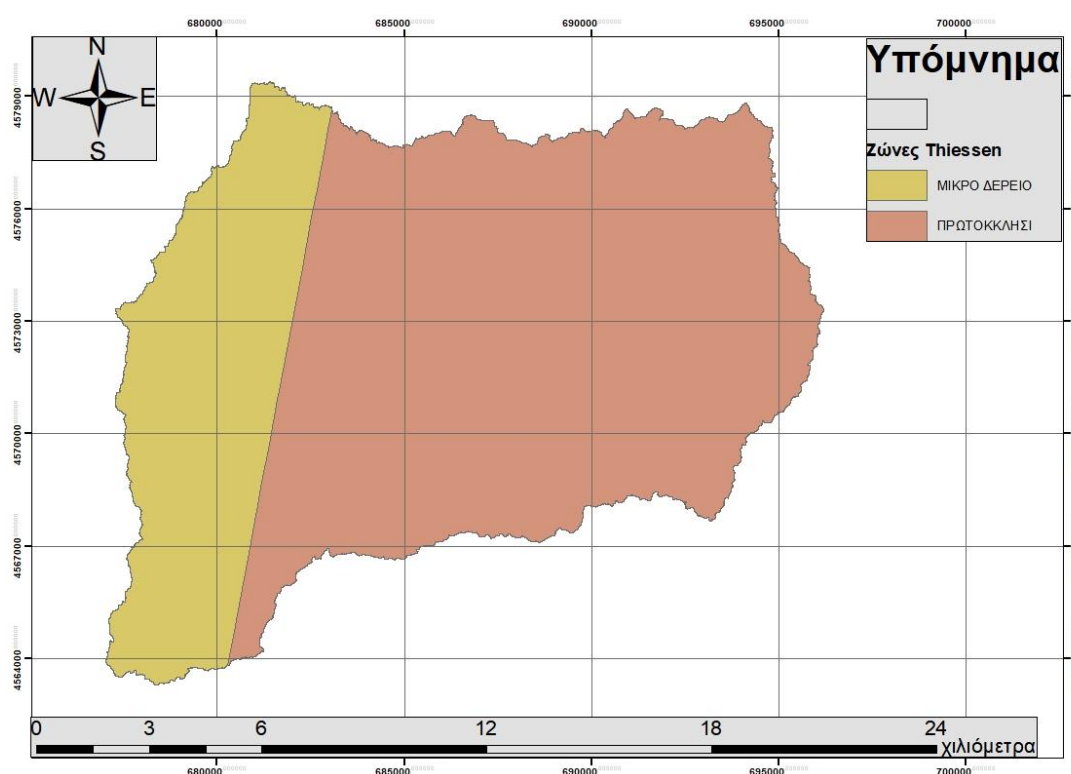
Για την διερεύνηση της χωρικής κατανομής των βροπτώσεων έγινε χρήση της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι από τις πιο διαδεδομένες

μεθόδους για την επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακών μετρήσεων βροχόπτωσης. Σύμφωνα με την μέθοδο των πολυγώνων Thiessen, η περιοχή χωρίζεται σε ζώνες επιρροής "Α_i" για κάθε σταθμό, όπου γίνεται εκτίμηση της βαρύτητας επιρροής του κάθε σταθμού με βάση των εμβადών των πολυγώνων επηρεασμού του κάθε σταθμού. Για τον υπολογισμό του συντελεστή βαρύτητας "λ_i" κάθε ζώνης επιρροής, ισχύει (Lebel et al., 1987):

$$\lambda_i = \frac{S_i}{S} \quad (5)$$

Όπου λ_i είναι η εκτιμώμενη βαρύτητα, S_i είναι η έκταση του εκάστοτε πολυγώνου επιρροής και S είναι η συνολική έκταση.

Στην συνέχεια οι βαρύτητες πολλαπλασιάζονται με την τιμή της βροχόπτωσης και το άθροισμα τους ανα υπολεκάνη ή λεκάνη απορροής είναι η τιμή που λαμβάνεται υπόψιν. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η ύπαρξη των σημείων των σταθμών και η εφαρμογή μεσοκαθέτων για την δημιουργία των πολυγώνων.



Εικόνα 6. Πολύγωνα Thiessen της λεκάνης απορροής

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι εκτάσεις που προέκυψαν μαζί με τους συντελεστές βαρύτητας κάθε υπολεκάνης.

Πίνακας 4. Πίνακας εκτάσεων ανά υπολεκάνη απορροής και το ποσοστό της βαρύτητας επιρροής του κάθε Μετεωρολογικού Σταθμού με την μέθοδο Thiessen.

Όνομα Υπολεκάνης	Έκταση Υπολεκάνης (km ²)	Σταθμός επιρροής	Έκταση	Ποσοστό (%)
Subbasin-1	24,831925	ΜΙΚΡΟ ΔΕΡΕΙΟ	5,66	22,8
		ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	19,17	77,2
Subbasin-13	9,18395	ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	9,184	1
Subbasin-14	13,112025	ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	13,112	1
Subbasin-2	24,880925	ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	24,88	1
Subbasin-20	0,880925	ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	0,881	1
Subbasin-21	1,2054	ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	1,205	1
Subbasin-3	42,974325	ΜΙΚΡΟ ΔΕΡΕΙΟ	27,274	63,47
		ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	15,697	36,53
Subbasin-4	20,31855	ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	20,319	1
Subbasin-6	6,2028	ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	6,203	1
Subbasin-7	0,793075	ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	0,793	1
Subbasin-8	52,140425	ΜΙΚΡΟ ΔΕΡΕΙΟ	20,757	39,82
		ΠΡΩΤΟΚΚΛΗΣΙ	31,37	60,18

Υψομετρική αναγωγή με τη μέθοδο της βροχοβαθμίδας

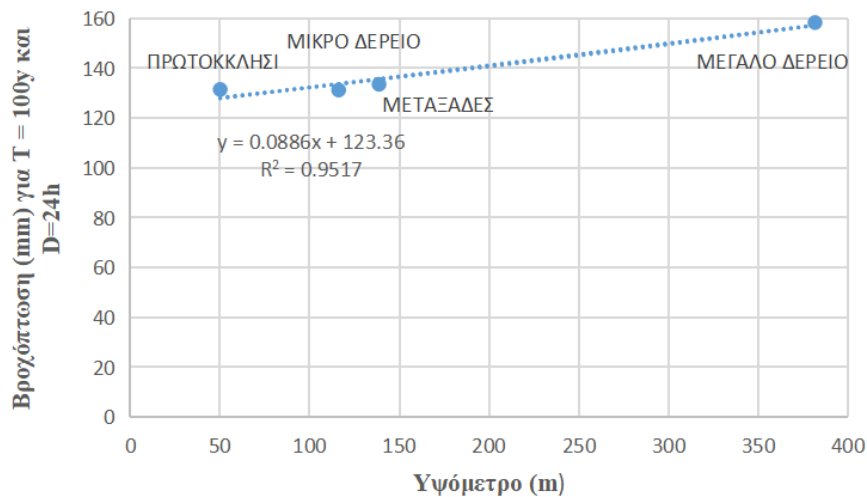
Η υψομετρική αναγωγή είναι σημαντική για τον ακριβή υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης, καθώς λαμβάνει υπόψη την επίδραση του υψομέτρου. Όταν το μέσο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών z_s διαφέρει από το μέσο υψόμετρο της λεκάνης z_s , η επιφανειακή βροχόπτωση h_s προσαρμόζεται με τον συντελεστή υψομετρικής αναγωγής λ , ο οποίος υπολογίζεται με τη βροχοβαθμίδα β (mm/m). Η βροχοβαθμίδα δείχνει πόσο αυξάνεται η τιμή της βροχόπτωσης με την αύξηση του υψομέτρου (mm/m).

Με την χρήση των ΓΣΠ υπολογίζεται το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής, ενώ το μέσο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών υπολογίζεται από την στάθμιση τους με βάση την σχέση εμβαδού επιρροής-υψομέτρου για κάθε σταθμό και αθροίζεται ανά υπολεκάνη απορροής. Η αναγωγή της επιφανειακής βροχόπτωσης σε ανοιγμένη επιφανειακή βροχόπτωση h'_s γίνεται με τον συντελεστή υψομετρικής αναγωγής σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_s}{h_s} \quad (7)$$

$$h'_s = \lambda h_s \quad (8)$$

Με την εφαρμογή της εξίσωσης της όμβριας καμπύλης, υπολογίστηκαν οι σημειακές εντάσεις βροχόπτωσης και τα ύψη βροχής για κάθε μετεωρολογικό σταθμό, για διάρκεια καταιγίδας 24 ωρών και περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Η γραμμική συσχέτιση του υψομέτρου με τη σημειακή βροχόπτωση έδειξε ισχυρή συσχέτιση, με βροχοβαθμίδα 8.86 mm/100m και συντελεστή συσχέτισης $R=0.9756$.



Εικόνα 7. Γράφημα γραμμικής συσχέτισης του υψομέτρου Z σε σχέση με τη σημειακή βροχόπτωση P για διάρκεια βροχόπτωσης 24 ώρες και περίοδο επαναφοράς 100 έτη.

Συντελεστής Επιφανειακής Αναγωγής ϕ

Οι σημειακές εντάσεις βροχόπτωσης από την ανάλυση της όμβριας καμπύλης απαιτούν μετατροπή σε μέσες εντάσεις για την περιοχή. Στην παρούσα έρευνα για την επίτευξη του παραπάνω έγινε χρήση του "συντελεστή επιφανειακής αναγωγής" (ϕ), που υπολογίζεται με τη σχέση (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999):

$$\Phi = 1 - \frac{0,048A^{0,36-0,01\ln A}}{D^{0,35}} \geq 0.25 \quad (9)$$

όπου A είναι η έκταση (km^2) και D η διάρκεια της βροχόπτωσης (hr). Ο συντελεστής ϕ είναι κρίσιμος στην ανάλυση της βροχής, καθώς έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με την έκταση και θετική σχέση με τη διάρκεια της βροχής. Η αύξηση της περιόδου επαναφοράς οδηγεί σε ήπια μείωση του ϕ , που παραμένει πάντα μικρότερος από 1, υποδεικνύοντας ότι οι μέγιστες εντάσεις δεν συμβαδίζουν ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής ϕ για κάθε υπολεκάνη απορροής.

Πίνακας 5. Συντελεστής επιφανειακής αναγωγής ϕ για κάθε υπολεκάνη.

Όνομα υπολεκανών*	S-1	S-13	S-14	S-2	S-20	S-21	S-3	S-4	S-6	S-7	S-8
Συντελεστής επιφανειακής αναγωγής ϕ	0.96	0.972	0.969	0.96	0.985	0.984	0.951	0.963	0.976	0.985	0.947

*όπου S = Subbasin

Παράμετροι καταιγίδας σχεδιασμού – Διαδικασία υπολογισμού

Για τον σχεδιασμό της καταιγίδας σχεδιασμού, είναι απαραίτητος ο καθορισμός συγκεκριμένων βασικών παραμέτρων όπως το χρονικό βήμα (Δt) σε λεπτά, η διάρκεια της βροχόπτωσης (D) σε ώρες και η περίοδος επαναφοράς (T) σε έτη. Η διάρκεια της βροχόπτωσης πρέπει να είναι πολλαπλάσια του χρόνου συγκέντρωσης και το χρονικό βήμα υποπολλαπλάσιο από την ελάχιστη τιμή του χρόνου συγκέντρωσης των υπολεκανών απορροής. Στην παρούσα έρευνα το η διάρκεια της βροχόπτωσης ορίστηκε στις 24 ώρες για όλες τις υπολεκάνες απορροής και το χρονικό βήμα ορίστηκε σε 15 min. Επιπλέον, επιλέχθηκε η περίοδος επαναφοράς $T=100$ έτη.

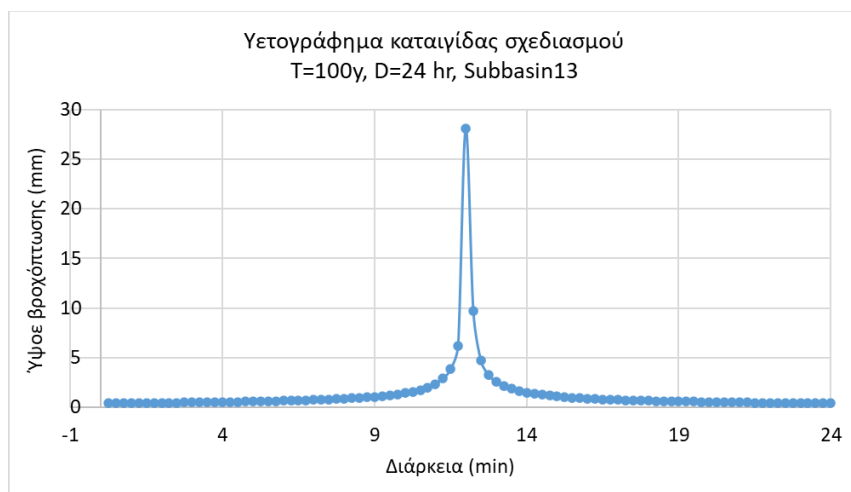
Στην παρούσα έρευνα η περίοδος επαναφοράς της καταιγίδας σχεδιασμού θεωρήθηκε ότι είναι ίση με την περίοδο επαναφοράς της πλημμύρας σχεδιασμού. Για τον υπολογισμό των καταιγίδων σχεδιασμού για κάθε υπολεκάνη απορροής ξεχωριστά έγινε χρήση των περιοχικών όμβριων καμπυλών για τον υπολογισμό της έντασης στο σταθμισμένο μέσο υψόμετρο σύμφωνα με την Thiessen z_o . Στην συνέχεια έγινε χρήση της μεθόδου της βροχοβαθμίδας για την αναγωγή των τιμών στο μέσο υψόμετρο της κάθε υπολεκάνης απορροής z_s . Έπειτα οι τιμές βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη απομειώθηκαν με τον συντελεστή επιφανειακής αναγωγής ϕ (όλα τα παραπάνω βήματα περιγράφηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια). Το τελικό βήμα για την ολοκλήρωση της διαδικασίας για την προετοιμασία των καταιγίδων σχεδιασμού μετά από την χρήση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής ϕ είναι η χρονική κατανομή τους που περιγράφεται παρακάτω.

Χρονική κατανομή καταιγίδας σχεδιασμού

Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση όλων των προαναφερθέντων τεχνικών και παραχθεί η καταιγίδα σχεδιασμού το τελευταίο βήμα στην διαδικασία είναι η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης. Η χρονική κατανομή καταιγίδας σχεδιασμού μπορεί να γίνει με την χρήση διάφορων μεθόδων, όπως η SCS, το τριγωνικό βροχογράφημα, η μέθοδος εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternate Block Method - ABM) και η μέθοδος του δυσμενέστερου συνδυασμού. Στην συγκεκριμένη έρευνα διερευνήθηκε η χρήση των τεχνικών ABM και SCS.

Μέθοδος εναλλασσόμενων υψών βροχής και χρονική κατανομή

Η Μέθοδος Εναλλασσόμενων Υψών Βροχής (Alternating Block Method - ABM) είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές για τη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης. Η τεχνική βασίζεται στις εντάσεις που προκύπτουν από καμπύλες έντασης-διάρκειας-συχνότητας (IDF). Η μέθοδος περιλαμβάνει τον υπολογισμό των εντάσεων της βροχής για καθορισμένα χρονικά βήματα και την αναδιάταξη τους με την τοποθέτηση του μέγιστου ύψους στο κέντρο της περιόδου και τις υπόλοιπες τιμές συμμετρικά γύρω από αυτό (Chow et al., 1988). Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται ενδεικτικά το γράφημα της καταιγίδας σχεδιασμού σύμφωνα με την χρήση της ABM για την υπολεκάνη απορροής ν.13 (Subbasin 13).



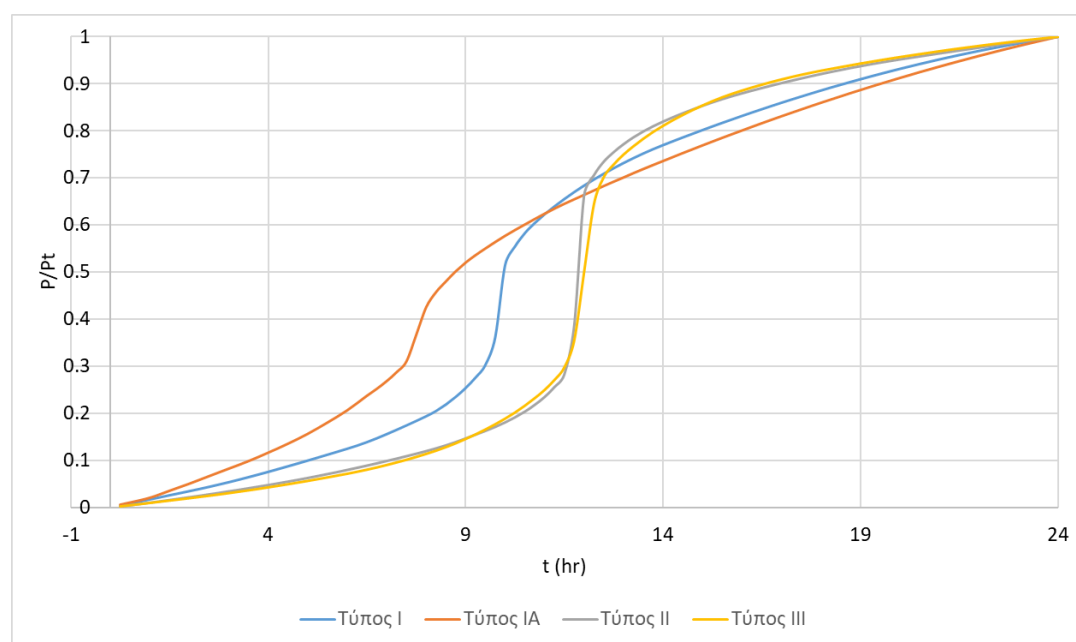
Εικόνα 8. Γράφημα κατανομής υψών βροχής για την υπολεκάνη 13, με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών, για περίοδο επαναφοράς 100 ετών και διάρκεια 24 ωρών.

Μέθοδος SCS (Soil Conservation Service)

Η μέθοδος SCS έχει τέσσερις τύπους κατανομής βροχόπτωσης προσαρμοσμένες σε διαφορετικές κλιματικές περιοχές των ΗΠΑ, για βροχές διάρκειας 24 και 6 ωρών. Οι κύριοι τύποι για καταιγίδες 24 ωρών είναι (USDA-SCS, 1986):

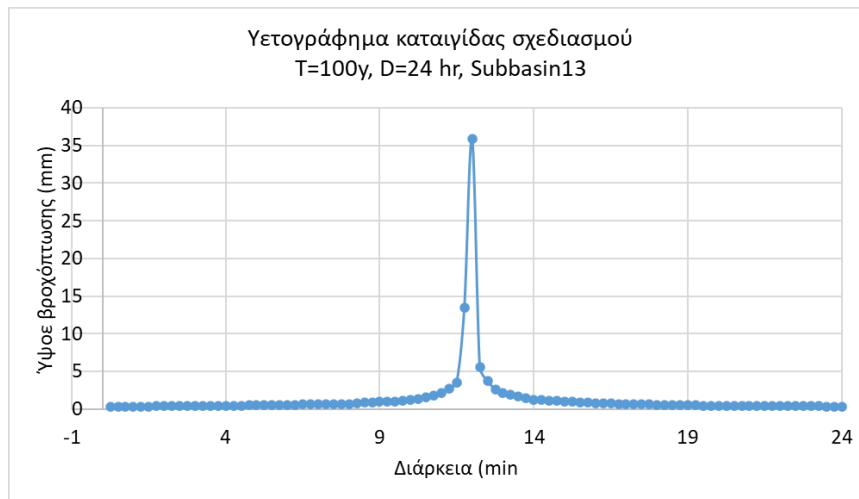
1. Τύπος I: Παραθαλάσσιες περιοχές Ειρηνικού με υγρούς χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια.
2. Τύπος IA: Παραθαλάσσιες περιοχές Ειρηνικού με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.
3. Τύπος II: Υπόλοιπες περιοχές ΗΠΑ για έντονες, σύντομες καταιγίδες.
4. Τύπος III: Περιοχές Κόλπου του Μεξικού και Ατλαντικού με τροπικές καταιγίδες άνω των 24 ωρών.

Οι σχετικές τιμές και η κατανομή τους στον χρόνο παρουσιάζονται στην Εικόνα 9. Για την χρονική κατανομή των καταιγίδων σχεδιασμού με την χρήση της μεθόδου SCS γίνεται πολλαπλασιασμός των τιμών της βροχόπτωσης με τις αντίστοιχες τιμές για τον κάθε τύπο ξεχωριστά. Οι τιμές που υπολογίζονται με την παραπάνω διαδικασία είναι αθροιστικές και για αυτό στην συνέχεια γίνεται ανάκτηση των αρχικών τιμών από τις αθροιστικές τιμές.



Εικόνα 9. Γράφημα κατανομής των τύπων βροχής SCS

Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ενδεικτικά το γράφημα κατανομής υψών βροχής για την υπολεκάνη 13 με τη μέθοδο της SCS – Τύπου II.



Εικόνα 10. Γράφημα κατανομής υψών βροχής για την υπολεκάνη 13, με τη μέθοδο της SCS – Τύπου II, για περίοδο επαναφοράς 100 ετών και διάρκεια 24 ωρών.

Υδρολογική Προσομοίωση

Η υδρολογική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS. Το λογισμικό HEC-HMS είναι από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά υδρολογικής προσομοίωσης και η χρήση του επικεντρώνεται σε στιγμιαία γεγονότα βροχής. Οι ολοκληρωμένες δυνατότητές του επιτρέπουν τη προσομοίωση διαφόρων υδρολογικών διεργασιών, όπως η επιφανειακή απορροή, η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή και η διόδευση της ροής, καθιστώντας το κατάλληλο για ποικίλες υδρολογικές μελέτες σε διαφορετικές γεωγραφικές και κλιματικές συνθήκες (USACE, 2016). Η εφαρμογή του HEC-HMS για την παραγωγή συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων με την χρήση καταιγίδων σχεδιασμού είναι διαδεδομένη (Papaioannou et al., 2018).

Στην παρούσα έρευνα εξετάστηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια που σχετίζονται αποκλειστικά με την χρονική κατανομή της καταιγίδας σχεδιασμού. Συγκεκριμένα έγινε χρήση της μεθόδου SCS-CN για τον υπολογισμό των απωλειών, της μεθόδου Muskinghum για την διόδευση και έγινε χρήση του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος της SCS (ΣΜΥΓ-SCS). Για τις υδρολογικές απώλειες έγινε χρήση μόνο των συνθηκών υγρασίας τύπου II και η βασική απορροή θεωρήθηκε ότι είναι μηδενική μιας και εξετάζεται το σενάριο καταιγίδας σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Συνεπώς, η μόνη παράμετρος που αλλάζει στην παρούσα έρευνα είναι το δεδομένο εισόδου (καταιγίδα σχεδιασμού) που μεταβάλλεται με την χρήση των διαφορετικών τεχνικών χρονικής κατανομής της καταιγίδας (ABM, SCS I, SCS IA, SCS II, SCS III).

Υδρολογικές απώλειες - Μέθοδος SCS-CN

Η μέθοδος SCS-CN, αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service το 1972, και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενεργής βροχόπτωσης μέσω της χρήσης της χωρικής κατανομής του υδρολογικού τύπου εδάφους σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης και της προϋπάρχουσας κατάσταση της υγρασίας του εδάφους. Το ενεργό ύψος βροχής υπολογίζεται με συγκεκριμένη σχέση που συνδέει το ενεργό ύψος (h_e) και το συνολικό ύψος βροχής (h) (Mimikou et al., 2016):

$$h_e = \begin{cases} 0 & , h \leq 0.2 S \\ \frac{(h-0.2S)^2}{h+0.8 S} & , h > 0.2 S \end{cases} \quad (10)$$

Η παράμετρος S επηρεάζεται από τον αριθμό καμπύλης απορροής (CN) της λεκάνης και υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (Mimikou et al., 2016):

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (11)$$

Ο αριθμός καμπύλης (CN) κυμαίνεται από 0 έως 100 και προσδιορίζεται με βάση τον υδρολογικό τύπο εδάφους (Εικόνα 3) σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης (Εικόνα 2) και την προηγούμενη κατάσταση της υγρασίας (Antecedent Moisture Condition - AMC), η οποία χωρίζεται σε: ξηρή (AMC_I), μέτρια (AMC_{II}) και υγρή (AMC_{III}). Οι κατηγορίες του εδάφους είναι για εδάφη με : 1) μεγάλο ρυθμό διήθησης (A), 2) με μέσο ρυθμό διήθησης (B), 3) με μικρό ρυθμό διήθησης (C), 4) με πολύ μικρό ρυθμό διήθησης (D). Οι τιμές του συντελεστή απορροής CN που αποδόθηκαν στην συγκεκριμένη έρευνα βασίζονται στην έρευνα των Miliani et al., (2011). Αρχικά εκτιμήθηκαν οι συντελεστές απορροής CN για κάθε διαφορετική χρήση γης σε συνδυασμό με τον υδρολογικό τύπο εδάφους για το σενάριο με AMC_{II} για κάθε μια υπολεκάνη απορροής (Παράδειγμα της εφαρμογής για μία υπολεκάνη παρουσιάζεται στον Πίνακα 6). Στην συνέχεια με την μέθοδο της αναλογίας με βάση την έκταση της κάθε κατηγορίας υπολογίστηκε ο σταθμισμένος μέσος συντελεστής απορροής CN για κάθε μια υπολεκάνη ξεχωριστά (Πίνακας 7).

Πίνακας 6. Συντελεστής απορροής CN για την υπολεκάνη απορροής v.1 (Subbasin1)

Χρήσεις Γης σύμφωνα με το CORINE 2018	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
	A Έκταση (km ²)	CN	B Έκταση (km ²)	CN
2.1.1 Μη Αρδευόμενη Αρόσιμη Γη	0.224	49	7.96	69
3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων	0	-	3.5	65
2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	1.201	67	3.23	78
3.1.3 Μικτό δάσος	0	-	0.0017	65
3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση	0.463	60	8.25	65

Πίνακας 7. Συντελεστής απορροής CN για κάθε υπολεκάνη.

Όνομα υπολεκανών*	S-1	S-13	S-14	S-2	S-20	S-21	S-3	S-4	S-6	S-7	S-8
CN	68	66	69	69	69	68	67	66	68	70	67

*όπου S = Subbasin

Μοναδιαίο υδρογράφημα - SCS Unit Hydrograph – Υπολογισμός του Lag Time

Η μέθοδος του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος είναι ευρέως γνωστή για υδρολογικές προσομοιώσεις και στην ανάλυση πλημμυρών. Σε λεκάνες απορροής με περιορισμένα ή και ανύπαρκτα υδρομετρικά ή και μετεωρολογικά δεδομένα η χρήση των Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων είναι αρκετά διαδεδομένη. Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά ενός ΣΜΥΓ είναι ο χρόνος εμφάνισης της μέγιστης παροχής, η τιμή της μέγιστης παροχής και ο χρόνος βάσης (Mimikou et al., 2016). Το ΣΜΥΓ της SCS που επιλέχθηκε για την ανάλυση είναι μια εμπειρική μέθοδος που αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service των ΗΠΑ. Περισσότερες λεπτομέρειες για το ΣΜΥΓ-SCS μπορούν να βρεθούν στο HEC-HMS Technical Reference Manual (USACE-HEC, 203).

Ο χρόνος υστέρησης (Lag Time) σύμφωνα με την NRCS είναι ο χρόνος από το κέντρο της ενεργής βροχόπτωσης έως την μέγιστη τιμή της παροχής (Folmar et al., 2007). Η πιο διαδεδομένη μέθοδος υπολογισμού είναι η εξίσωση SCS (1972), που εξαρτάται από παραμέτρους όπως το υδραυλικό μήκος της λεκάνης, την κλίση και τον δείκτη καμπύλης CN II. Η εξίσωση διατυπώνεται ως εξής (Folmar et al., 2007) :

$$T_{lag} = L^{0.8} \frac{(S+1)^{0.7}}{1900\sqrt{Y}} \quad (12)$$

Όπου: T_{lag} = χρόνος υστέρησης, σε ώρες

L = υδραυλικό μήκος της λεκάνης απορροής σε πόδια

Y = κλίση της λεκάνης απορροής σε ποσοστό επί τοις εκατό

S = μέγιστη κατακράτηση στη λεκάνη απορροής σε ίντσες,

όπως ορίζεται από: $S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (13)$

CN = αριθμός καμπύλης SCS για τη λεκάνη απορροής, όπως ορίζεται από τη μέθοδο SCS-CN.

Πίνακας 8. Υπολογισμός Lag Time

Όνομα υπολεκανών*	S-1	S-13	S-14	S-2	S-20	S-21	S-3	S-4	S-6	S-7	S-8
L(km)	22.26	15.64	13.84	1.86	9.99	5.94	11.46	2.82	6.74	12.87	2.07
Y (Slope)	0.27	0.28	0.20	0.24	0.22	0.20	0.28	0.24	0.27	0.20	0.13
Lag(hr)	2.70	1.99	2.08	0.37	1.61	1.13	1.47	0.54	1.00	1.89	0.54
Lag(min)	162.09	119.12	124.83	22.36	96.63	67.66	88.07	32.12	60.15	113.65	32.41

Υδρολογική διόδευση - Μέθοδος Muskingum

Για να επιτευχθεί η συγκέντρωση της ροής στην έξοδο της λεκάνης απορροής με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS γίνεται χρήση του στοιχείου Reach όπου αποτελεί τον αγωγό (κεντρική κοίτη) για την διόδευση της ροής. Η πιο διαδεδομένη επιλογή για την συγκεκριμένη διαδικασία είναι η μέθοδος υδρολογικής διόδευσης, Muskingum όπου και έγινε χρήση στην παρούσα έρευνα.

Η μέθοδος Muskingum βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας, και λαμβάνει υπόψη την εισροή, την εκροή και την αποθήκευση νερού στο υδατόρρευμα. Η βασική αρχή της μεθόδου έγκειται στην εξίσωση συνέχειας, η οποία διατυπώνεται ως εξίσωση διαφωρών (USACE-HEC, 2023):

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I(t) - O(t) \quad (14)$$

όπου $I(t)$ είναι η μέση ροή (εισροή στο υδατόρρευμα) στο ανάντη τμήμα κατά τη διάρκεια της περιόδου Δt , $S(t)$ είναι η μεταβολή της αποθήκευσης στο υδατόρρευμα κατά τη διάρκεια της περιόδου Δt , και $O(t)$ είναι η μέση ροή (εκροή από το υδατόρρευμα) στο κατάντη τμήμα κατά τη διάρκεια της περιόδου Δt .

Οι κύριες παράμετροι της μεθόδου είναι ο συντελεστής χωρητικότητας (K) και η αδιάστατη σταθερά συγκεκριμένης ευθυγραμμίας (X). Ο συντελεστής χωρητικότητας αντιπροσωπεύει τον χρόνο υστέρησης της πλημμυρικής ροής και επηρεάζει την απόσβεση του πλημμυρικού κύματος, ενώ η αδιάστατη σταθερά συγκεκριμένης ευθυγραμμίας καθορίζει την αναλογία της αποθηκευμένης ροής σε σχέση με την εισροή και εκροή (Λουκάς, 2015).

Για την αριθμητική επίλυση αυτής της εξίσωσης, χρησιμοποιείται η σχέση (USACE-HEC, 2023; Λουκάς, 2015):

$$S(t) = K[\theta I(t) + (1 - \theta)O(t)] \quad (15)$$

όπου K είναι η χρονική παράμετρος που εκφράζει τον μέσο χρόνο διαδρομής και θ είναι μια αδιάστατη παράμετρος που κυμαίνεται από 0 έως 0.5. Στη συνέχεια, προκύπτει η αναδρομική εξίσωση (USACE-HEC, 2023; Λουκάς, 2015):

$$O(t) = c_0 I_t + c_1 I_{t-1} + c_2 O_{t-1} \quad (16)$$

Με τους συντελεστές:

$$c_0 = \frac{-2K\theta + \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (17)$$

$$c_1 = \frac{2K\theta + \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (18)$$

$$c_2 = \frac{2K(1-\theta) - \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (19)$$

$$\text{που ικανοποιούν τη σχέση } c_0 + c_1 + c_2 = 1 \quad (20)$$

Η εξίσωση της μεθόδου Muskingum διαμορφώνεται ως εξής (Λουκάς, 2015):

$$S_t = K[XI_t + (1 - X)Q_t] \quad (21)$$

όπου S_t είναι η αποθήκευση νερού στο χρόνο t , I_t είναι η εισροή και Q_t είναι η εκροή.

Οι παράμετροι X και K βαθμονομήθηκαν για να αντανakλούν τις τοπικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Η εκτίμηση της παραμέτρου K πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού HEC-RAS, ενώ οι μετρήσεις επιβεβαιώθηκαν μέσω του QGIS (Chow et al., 1988; Brunner, 2016). Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της παραμέτρου K για κάθε κλάδο.

Στη μέθοδο Muskingum, η παράμετρος K υπολογίστηκε με την βοήθεια της εξίσωσης του Manning. Η εξίσωση Manning σχετίζεται με την παροχή (Q), τον συντελεστή τραχύτητας (n), το εμβαδόν της διατομής (A), την υδραυλική ακτίνα (R) και την κλίση (S). Ο υπολογισμός του K μέσω της εξίσωσης Manning εξασφαλίζει την ακριβή αναπαράσταση των φυσικών συνθηκών του καναλιού, βελτιώνοντας την ακρίβεια της πρόβλεψης της ροής. Η εξίσωση Manning εκφράζεται ως:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (22)$$

Πίνακας 9. Αποτελέσματα Muskingum k

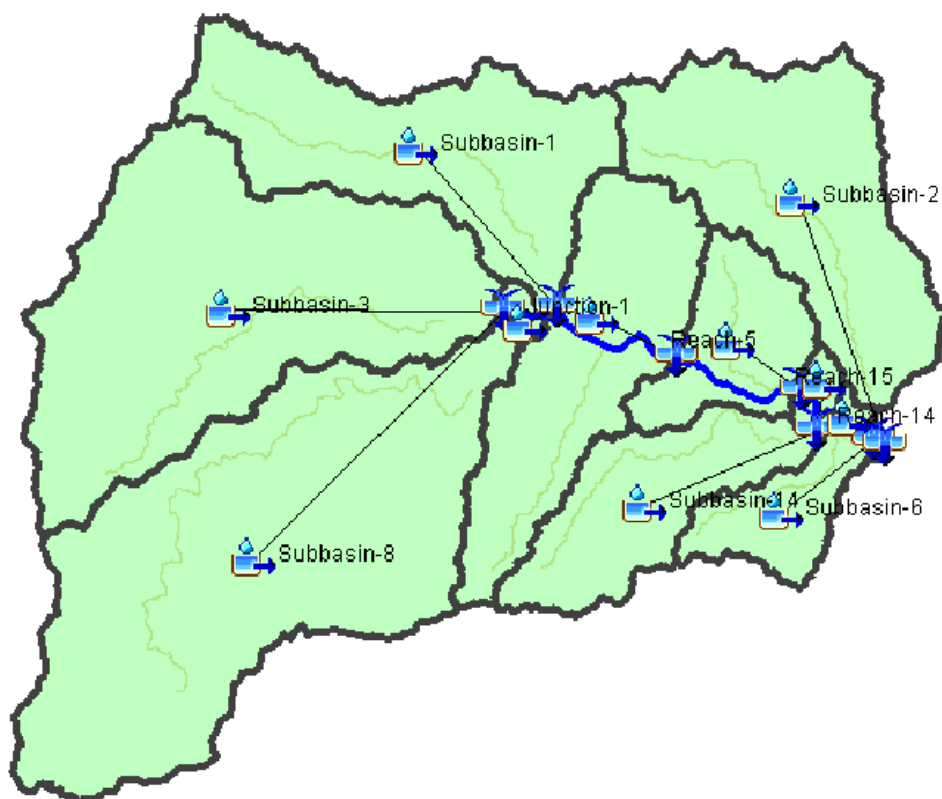
Αγωγός	R 12	R 13	R 14	R 15	R 5	R 1
Πλάτος	50.49	45	24	26.515	28.5	32
Βάθος	3.3	3.7	1.5	2.4	2.2	1.75
Εμβαδόν	166.62	166.5	36	63.636	62.7	56
Manning's n	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Κλίση	0.0012	0.0013	0.0023	0.0015	0.0024	0.0017
Υδραυλική Ακτίνα (R)	3.3	3.7	1.5	2.4	2.2	1.75
Ταχύτητα Ροής (V)	1.54	1.73	1.25	1.40	1.66	1.19
Μήκος Ροής (L)	0.29	1.34	1.35	3.25	3.34	1.39
Muskingum K	0.19	0.78	1.07	2.32	2.02	1.16
K για T=100	0.16	0.66	0.91	1.97	1.72	0.99
X	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

Προετοιμασία Μοντέλου της Λεκάνης Απορροής

Για την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης με το λογισμικό HEC-HMS, απαιτείται η δημιουργία επιπέδων που αναπαριστούν τη λεκάνη απορροής. Η δημιουργία όλων των απαραίτητων στοιχείων για την υδρολογική προσομοίωση έγινε σε στο περιβάλλον του HEC-HMS με την χρήση του ΨΜΕ. Συγκεκριμένα, για την προσομοίωση δημιουργήθηκαν τα εξής τρία βασικά στοιχεία: υπολεκάνες (12), ρέματα (6) και κόμβοι (7). Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η απεικόνιση των παραπάνω στοιχείων για όλη την λεκάνη απορροής.

Προσομοίωση στο HEC-HMS

Η προετοιμασία του υδρολογικού λογισμικού περιλαμβάνει αρκετές διεργασίες όπως η δημιουργία του μετεωρολογικού μοντέλου στο οποίο γίνεται η σύνδεση των υετογραφημάτων για κάθε μια υπολεκάνη απορροής ξεχωριστά. Το χρονικό βήμα προσομοίωσης ορίστηκε στα 15 λεπτά για όλες τις προσομοιώσεις και η συνολική διάρκεια προσομοίωσης ορίστηκε στην 1 ημέρα. Ο σχεδιασμός των καταιγίδων σχεδιασμού βασίστηκε στα υετογραφήματα διάρκειας 24 ωρών και με περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Για τις υδρολογικές απώλειες έγινε χρήση της μεθόδου SCS-CN και συγκεκριμένα του τύπου AMCII. Δεν λήφθηκε υπόψιν η ύπαρξη βασικής ροής και η διόδευση της ροής έγινε με την μέθοδο Muskingum. Όλες οι παραπάνω παράμετροι παρέμειναν σταθερές για όλες τις προσομοιώσεις ώστε να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας της μεθόδου χρονικής κατανομής της καταιγίδας σχεδιασμού στο παραγόμενο υδρογράφημα. Συγκεκριμένα, για την χρονική κατανομή των καταιγίδων σχεδιασμού έγινε χρήση των μεθόδων ABM, SCS τύπου I, IA, II και III. Σύμφωνα με την χρήση των τεσσάρων παραπάνω τεχνικών παράχθηκαν για κάθε μια υπολεκάνη απορροής και στην έξοδο της λεκάνης απορροής τέσσερα διαφορετικά υδρογραφήματα. Στα αποτελέσματα παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια από τα αποτελέσματα από τις υπολεκάνες απορροής και στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Στα παραδείγματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο από τις μεθόδους ABM και SCS II, καθώς είναι οι πιο αντιπροσωπευτικές για την ανάλυση της παροχής σχεδιασμού.



Εικόνα 11. Απεικόνιση του μοντέλου της λεκάνης απορροής από το λογισμικό HEC-HMS.

Αποτελέσματα

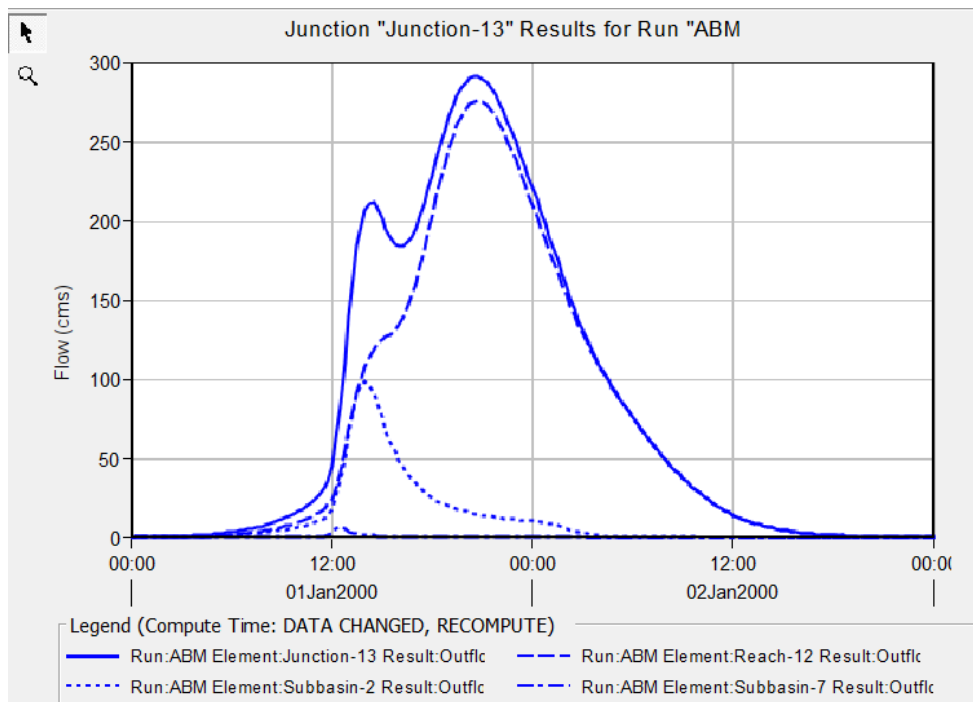
Ενδεικτικά αποτελέσματα από την μέθοδο ABM

Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις όπου έγινε χρήση της καταιγίδας σχεδιασμού με την μέθοδο χρονική κατανομής της ABM, στην Εικόνα 12 παρουσιάζονται για κάθε κόμβο (J), αγωγό (R) και υπολεκάνη (SUB) χαρακτηριστικά όπως η έκταση, η μέγιστη παροχή και ο χρόνος της καθώς και ο όγκος. Η ανάλυση εξετάζει την επίδραση της μεθόδου χρονικής κατανομής της καταιγίδας σχεδιασμού στα πλημμυρογράφημα, με όλες τις παραμέτρους της προσομοίωσης να παραμένουν σταθερές, εκτός από τη μέθοδο χρονικής κατανομής του υετογράφηματος. Στην Εικόνα 12, παρατηρείται ότι η μέγιστη παροχή με τιμή $291 \text{ m}^3/\text{s}$ καταγράφεται στην έξοδο της λεκάνης απορροής και συγκεκριμένα στον κόμβο J13.

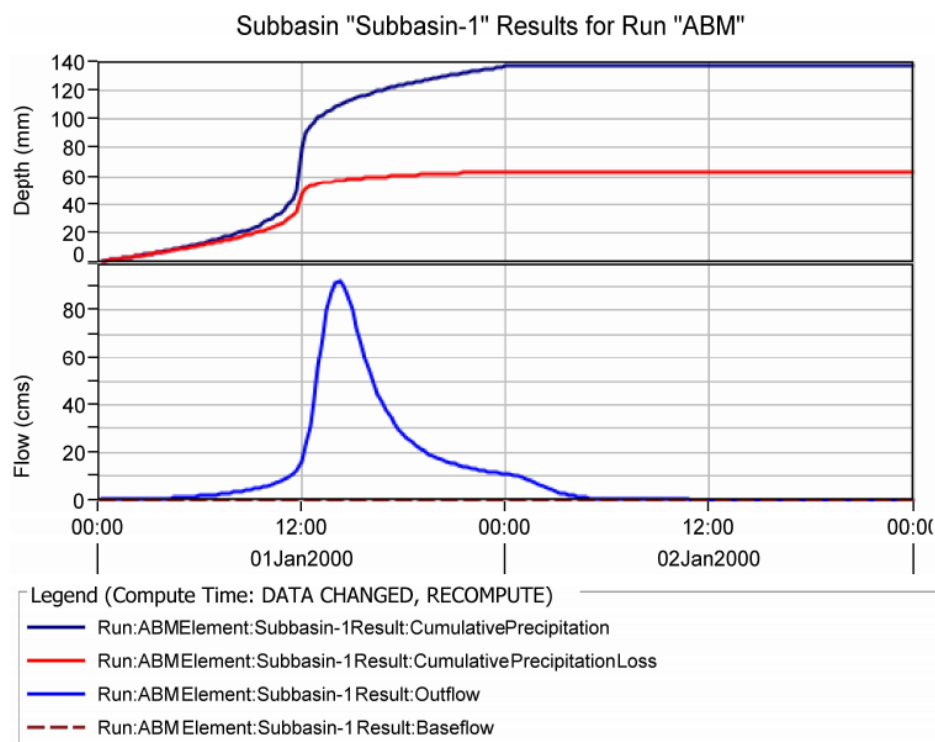
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Subbasin-8	52.14000	164.3	01Jan2000, 15:00	73.53
Subbasin-3	42.97400	152.5	01Jan2000, 14:00	67.48
Junction-1	95.11400	306.9	01Jan2000, 14:30	70.80
Reach-1	95.11400	290.7	01Jan2000, 15:15	70.80
Subbasin-1	24.83200	92.3	01Jan2000, 14:15	72.64
Subbasin-20	0.88090	8.2	01Jan2000, 12:15	69.84
Junction-21	120.82690	371.5	01Jan2000, 15:00	71.17
Reach-5	120.82690	301.5	01Jan2000, 16:30	71.17
Subbasin-4	20.31900	81.7	01Jan2000, 13:45	66.83
Junction-17	141.14590	327.8	01Jan2000, 16:30	70.54
Reach-15	141.14590	271.1	01Jan2000, 18:45	70.54
Subbasin-13	9.18390	44.3	01Jan2000, 13:15	64.78
Junction-16	150.32980	276.4	01Jan2000, 18:45	70.19
Reach-14	150.32980	272.3	01Jan2000, 19:30	70.19
Subbasin-14	13.11200	62.6	01Jan2000, 13:30	74.14
Subbasin-21	1.20540	9.3	01Jan2000, 12:30	67.02
Junction-15	164.64720	281.4	01Jan2000, 19:15	70.48
Reach-13	164.64720	272.9	01Jan2000, 20:30	70.48
Subbasin-6	6.20280	35.3	01Jan2000, 13:00	70.14
Junction-14	170.85000	276.0	01Jan2000, 20:30	70.47
Reach-12	170.85000	275.8	01Jan2000, 20:45	70.47
Subbasin-2	24.88100	98.0	01Jan2000, 14:00	72.16
Subbasin-7	0.79307	6.2	01Jan2000, 12:30	68.71
Junction-13	196.52407	291.0	01Jan2000, 20:30	70.67

Εικόνα 12. Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο ABM.

Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται το με μπλέ συνεχόμενη γραμμή το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής (κόμβος 13) καθώς και τα υδρογραφήματα του αγωγού (τμήματος κεντρικής κοίτης) 12 και των υπολεκάνων 2 και 7 όπου αποτέλεσαν τα στοιχεία για την δημιουργία του υδρογραφήματος στον συγκεκριμένο κόμβο. Ενδεικτικά στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται, το υδρογράφημα της υπολεκάνης απορροής SUB1 (μέγιστη τιμή παροχής περίπου 90 m³/s) με συνεχόμενη γαλάζια γραμμή, καθώς και το αθροιστικό υετογράφημα (συνεχόμενη μπλέ σκούρα γραμμή) μαζί με τα αθροιστικές υδρολογικές απώλειες (κόκκινη συνεχόμενη γραμμή).



Εικόνα 13. Υδρογράφημα στον κόμβο Junction-1 με μέθοδο ABM



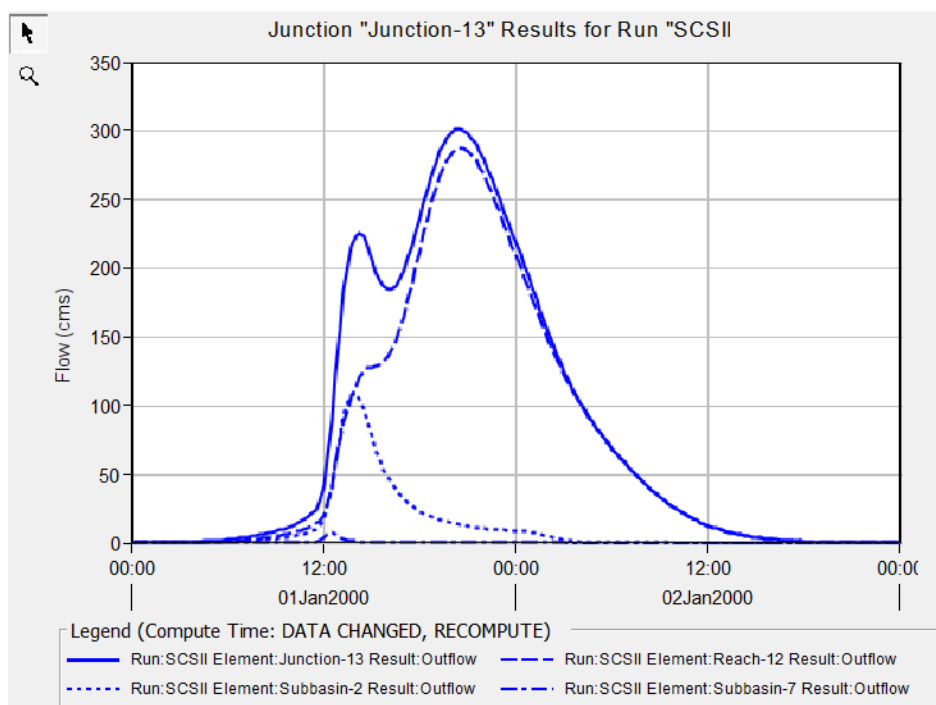
Εικόνα 14. Αποτελέσματα για Subbasin-1 με μέθοδο ABM

Ενδεικτικά αποτελέσματα από την μέθοδο SCS II

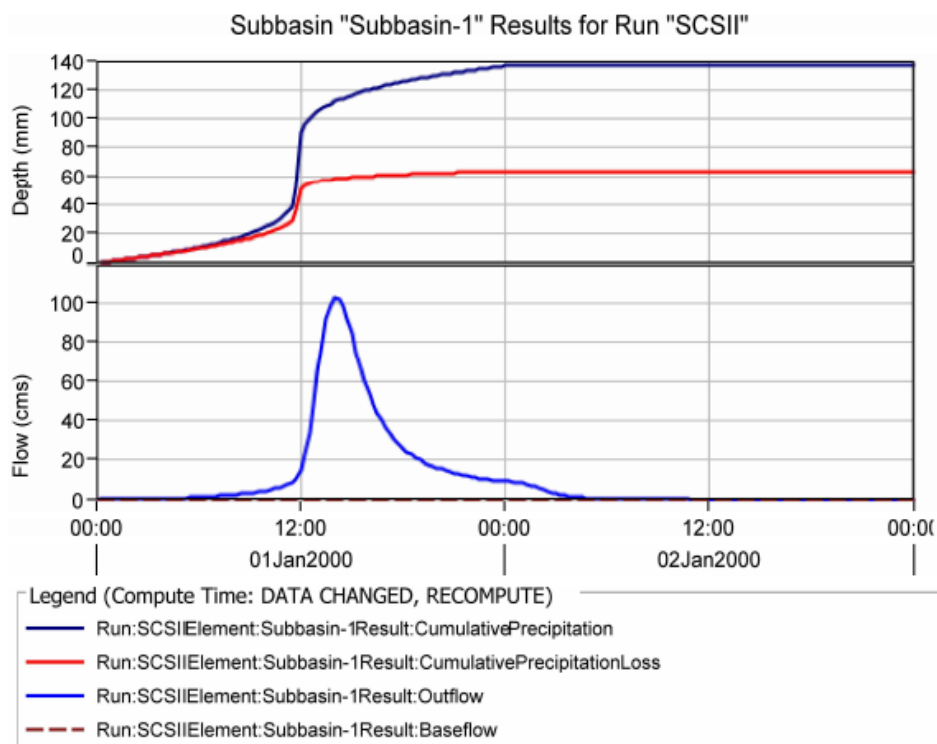
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τη μέθοδο SCS II. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 15 φαίνεται ότι η μέγιστη παροχή στην έξοδο της λεκάνης απορροής (κόμβος J1) φτάνει τα 340 m³/s. Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται το υδρογράφημα για το υδατόρευμα R1, όπου η μέγιστη παροχή φτάνει τα 300 m³/s. Τέλος, στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται το υδρογράφημα της υπολεκάνης SUB1, με τη μέγιστη παροχή να είναι περίπου 100 m³/s. Στο άρθρο θα συμπεριληφθούν μόνο τα σχήματα από Junction-1, Reach-1 και Subbasin-1. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται το με μπλέ συνεχόμενη γραμμή το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής (κόμβος 13) καθώς και τα υδρογραφήματα του αγωγού (τμήματος κεντρικής κοίτης) 12 και των υπολεκανών 2 και 7 όπου αποτέλεσαν τα στοιχεία για την δημιουργία του υδρογραφήματος στον συγκεκριμένο κόμβο. Ενδεικτικά στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται, το υδρογράφημα της υπολεκάνης απορροής SUB1 (μέγιστη τιμή παροχής λίγο πάνω από 100 m³/s) με συνεχόμενη γαλάζια γραμμή, καθώς και το αθροιστικό υετογράφημα (συνεχόμενη μπλέ σκούρα γραμμή) μαζί με τα αθροιστικές υδρολογικές απώλειες (κόκκινη συνεχόμενη γραμμή).

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Subbasin-8	52.14000	180.0	01Jan2000, 14:45	73.53
Subbasin-3	42.97400	170.1	01Jan2000, 14:00	67.48
Junction-1	95.11400	337.7	01Jan2000, 14:15	70.80
Reach-1	95.11400	318.8	01Jan2000, 15:00	70.80
Subbasin-1	24.83200	102.2	01Jan2000, 14:00	72.64
Subbasin-20	0.88090	10.6	01Jan2000, 12:15	69.84
Junction-21	120.82690	406.7	01Jan2000, 14:45	71.17
Reach-5	120.82690	324.3	01Jan2000, 16:30	71.17
Subbasin-4	20.31900	91.9	01Jan2000, 13:30	66.83
Junction-17	141.14590	350.9	01Jan2000, 16:15	70.54
Reach-15	141.14590	286.4	01Jan2000, 18:30	70.54
Subbasin-13	9.18390	51.5	01Jan2000, 13:00	64.78
Junction-16	150.32980	291.4	01Jan2000, 18:30	70.19
Reach-14	150.32980	286.5	01Jan2000, 19:15	70.19
Subbasin-14	13.11200	70.8	01Jan2000, 13:30	74.15
Subbasin-21	1.20540	11.1	01Jan2000, 12:30	67.02
Junction-15	164.64720	294.9	01Jan2000, 19:15	70.48
Reach-13	164.64720	285.0	01Jan2000, 20:30	70.48
Subbasin-6	6.20280	40.9	01Jan2000, 13:00	70.14
Junction-14	170.85000	287.8	01Jan2000, 20:15	70.47
Reach-12	170.85000	287.6	01Jan2000, 20:30	70.47
Subbasin-2	24.88100	108.8	01Jan2000, 14:00	72.16
Subbasin-7	0.79307	7.5	01Jan2000, 12:30	68.71
Junction-13	196.52407	301.5	01Jan2000, 20:30	70.67

Εικόνα 15. Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο SCS II.



Εικόνα 16. Αποτελέσματα για Junction-13 με μέθοδο SCSII



Εικόνα 17. Αποτελέσματα για Subbasin-1 με μέθοδο SCSII

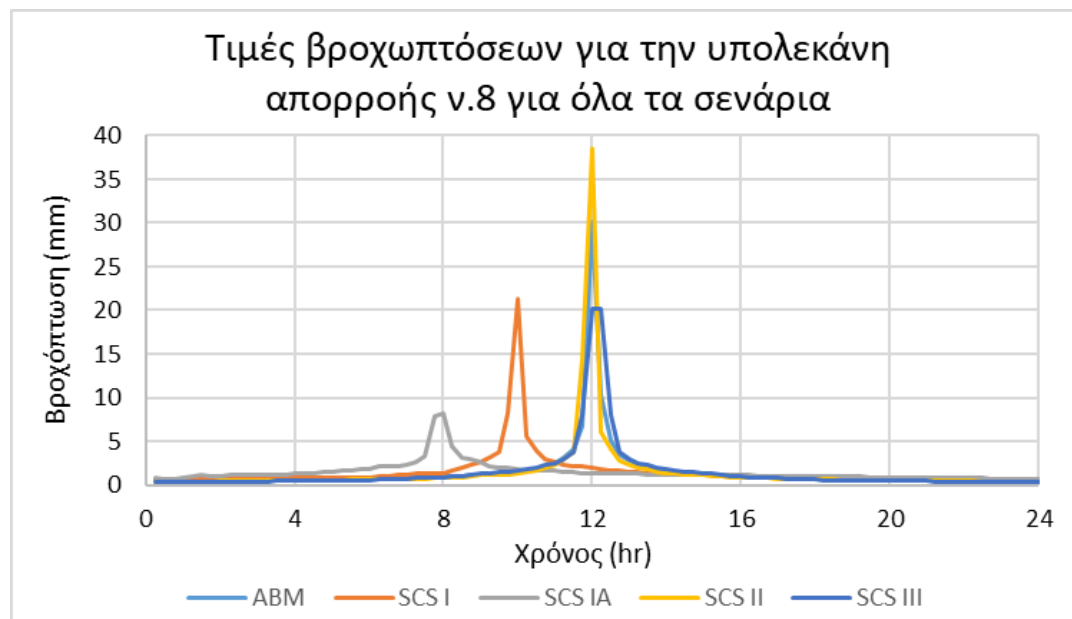
Αποτελέσματα

Συγκριτικά Αποτελέσματα Βροχοπτώσεων και Παροχών

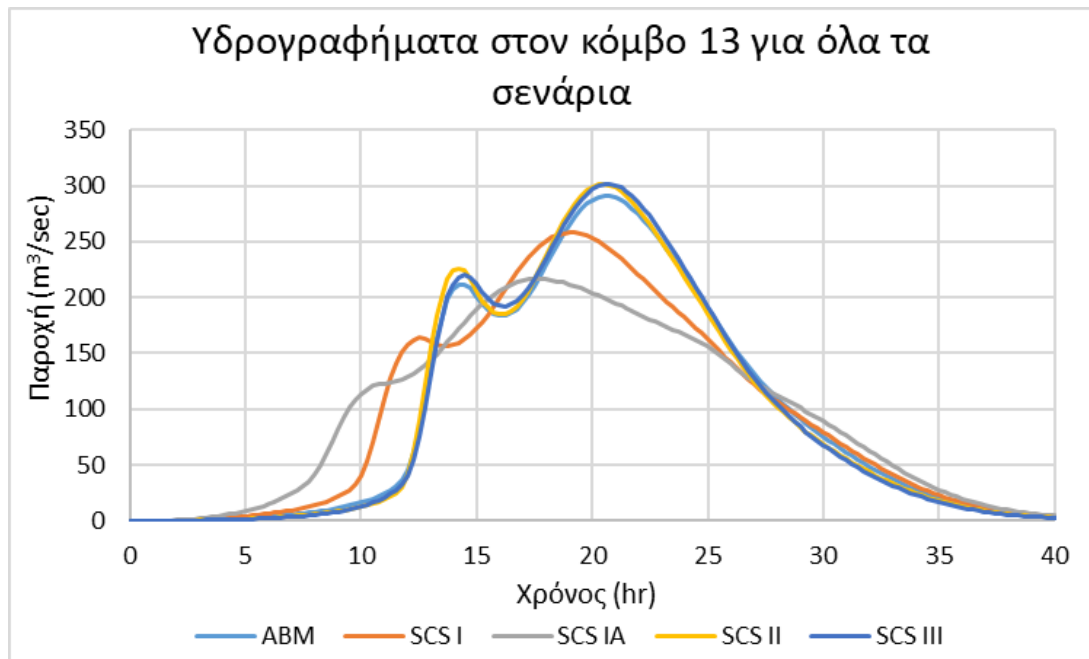
Στα συμπεράσματα των προσομοιώσεων παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των μεθόδων χρονικής κατανομής των καταιγίδων. Στα υετογραφήματα φαίνεται ότι η μέθοδος SCS II παράγει την υψηλότερη τιμή, με την μέθοδο ABM να ακολουθεί, ενώ οι μέθοδοι SCS I, IA και III εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές (π.χ. Εικόνα 18). Όσον αφορά τις μέγιστες παροχές, οι μέθοδοι SCS II και III εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα με την ABM, ενώ οι μέθοδοι SCS I και IA παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές. Από την σύγκριση των υδρογραφημάτων σχεδιασμού προκύπτει ότι η μέθοδος ABM έχει μικρή διαφορά (4%) από την SCS II, ενώ η διαφορά με την SCS I αγγίζει το 12% (Πίνακας 10, Εικόνα 19). Συνεπώς, η επιλογή της μεθόδου δείχνει ότι μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα, με την ABM και την SCS II να έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους, ενώ η μέθοδος SCS I παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση λόγω των κλιματικών συνθηκών που αντιπροσωπεύει (Πίνακας 10). Στην Εικόνα 18 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα υετογραφήματα σχεδιασμού όπως υπολογίστηκαν για κάθε μια μέθοδο χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης για την SUB-8. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα σχεδιασμού που προέκυψαν στην έξοδο της λεκάνης απορροής (Junction-13) για όλες τις μεθόδους για της χρήση της κάθε μιας μεθόδου χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης ξεχωριστά.

Πίνακας 10. Μέγιστες παροχές για όλες τις υπολεκάνες με CN II για ABM, SCS I, SCS IA, SCS II, SCS III

Στοιχεία προσομοίωσης	Μέγιστη παροχή για όλα τα σενάρια προσομοίωσης				
	ABM	SCS I	SCS IA	SCS II	SCS III
Subbasin-8	164.3	126.1	88.9	180	174.2
Subbasin-3	152.5	113.2	76.6	170.1	161.3
Junction-1	306.9	232.1	161.5	337.7	324.9
Reach-1	277.9	213.6	152	303.7	294.6
Subbasin-1	92.3	69.1	47.0	102.2	97.6
Subbasin-20	8.2	5.8	3	10.6	8.4
Junction-21	352.2	270.9	193	384.4	372.9
Reach-5	297.3	235.2	173.8	319	314.6
Subbasin-4	81.7	59.6	39	91.9	86.5
Junction-17	322.4	259.9	195.1	344	341.5
Reach-15	284.7	233.7	180.1	301.5	301.6
Subbasin-13	44.3	31.6	19.6	51.5	47.3
Junction-16	290.5	240.8	187.7	306.7	306.7
Reach-14	283.4	236.1	185.2	298.3	299
Subbasin-14	62.6	45.7	29.5	70.8	65.7
Subbasin-21	9.3	6.4	3.5	11.1	9.2
Junction-15	292.7	248.1	198.3	307.1	307.5
Reach-13	289.1	245.9	197.1	303.3	303.8
Subbasin-6	35.3	25.1	15.2	40.9	36.9
Junction-14	292.4	250.5	202.3	306.2	306.5
Reach-12	292.4	250.4	202.2	305.8	306.2
Subbasin-2	98	72.8	48.9	108.8	103.3
Subbasin-7	6.2	4.3	2.4	7.5	6.2
Junction-13	309.2	271.8	225.3	321.7	321.6



Εικόνα 18. Υετογραφήματα της υπολεκάνης 8 με την χρήση όλων των μεθόδων χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης.



Εικόνα 18. Υδρογραφήματα σχεδιασμού στον κόμβο Junction-13 με την χρήση όλων των μεθόδων χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης.

Συμπεράσματα

Συνοπτικά, στην παρούσα έρευνα μελετήθηκε η επίδραση της χρήσης διαφορετικών μεθόδων χρονικής κατανομής καταιγίδων στα παραγόμενα υδρογραφήματα. Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι ABM και SCS (I, IA, II, III) έδειξαν διαφοροποιήσεις στις μέγιστες τιμές παροχών και στο σχήμα των παραγόμενων υδρογραφημάτων. Η μέθοδος της ABM, όπου χρησιμοποιείται ευρέως, έδωσε παρόμοια αποτελέσματα με την SCS II με διαφορά μόλις +4%. Η SCS I, αν και θεωρείται πως είναι πιο κοντά στις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας, είχε χαμηλότερες τιμές (-12%), ενώ η SCS III είχε επίσης παρόμοια αποτελέσματα με τη SCS II. Συνολικά, η ανάλυση έδειξε ότι η επιλογή της μεθόδου επηρεάζει το σχήμα και την μέγιστη τιμή του υδρογραφήματος αλλά σε σχετικά μικρό ποσοστό. Παρά ταύτα, κρίνεται ότι πρέπει να πραγματοποιηθεί περαιτέρω ανάλυση για το συγκεκριμένο ζήτημα σε περισσότερες και διαφορετικές κλίμακες μεγέθους λεκάνες απορροής ώστε να μπορεί να εξαχθεί εύλογο συμπέρασμα και να ενισχυθούν τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση

- Κουτσογιάννης, Δ. (2016). Στατιστική Υδρολογία. (5η έκδ.). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. (1999). Τεχνική Υδρολογία. (4η έκδ.). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λουκάς, Α. (2015). Σημειώσεις μαθήματος «Υδρολογία», Ενότητα 10: Διόδευση Πλημμυρών. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ξενόγλωσση

- Amengual, A., Romero, R., Gómez, M., Martín, A., & Alonso, S. (2007). A hydrometeorological modeling study of a flash-flood event over Catalonia, Spain. *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 8, No. 3, pp. 282–303.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. Διαθέσιμο: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. Vol. 28. New York: McGraw-Hill. Ανακτήθηκε από https://uon.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- Copernicus. (2019). CORINE Land Cover 2018 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly. <https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfd0>
- Devak, M., & Dhanya, C. T. (2017). Sensitivity analysis of hydrological models: review and way forward. *Journal of Water and Climate Change*. Vol. 8, No. 4, pp. 557–575.
- Ewea, H. A., Elfeki, A. M. M., Bahrawi, J. A., & Al-Amri, N. S. (2016). Sensitivity analysis of runoff hydrographs due to temporal rainfall patterns in Makkah Al-Mukkramah region, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 9, No. 5.
- Faouzi, E., Arioua, A., Hssaisoune, M., Boudhar, A., Elaloui, A., & Karaoui, I. (2022). Sensitivity analysis of CN using SCS-CN approach, rain gauges and TRMM satellite data assessment into HEC-HMS hydrological model in the upper basin of Oum Er Rbia, Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment*. Vol. 8, No. 4, pp. 4707–4729.
- Fatone, F., Szeląg, B., Kiczko, A., Majerek, D., Majewska, M., Drewnowski, J., & Łagód, G. (2021). Advanced sensitivity analysis of the impact of the temporal distribution and intensity of rainfall on hydrograph parameters in urban catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 25, No. 10, pp. 5493–5516.
- Fatone, F., Szeląg, B., Kowal, P., McGarity, A., Kiczko, A., Wałek, G., Wojciechowska, E., Stachura, M., & Caradot, N. (2023). An advanced tool integrating failure and sensitivity analysis into novel modeling of the stormwater flood volume. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 27, No. 18, pp. 3329–3349.
- Folmar, N. D., Miller, A. C., & Woodward, D. E. (2007). History and development of the NRCS lag time equation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 43, No. 3, pp. 829–838.
- Fonseca, A., Botelho, C., Boaventura, R. A. R., & Vilar, V. J. P. (2024). Evaluating the effects of parameter uncertainty on river water quality predictions. *Resources*. Vol. 13, No. 8, pp. 106.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*. Vol. 206, No. 1–2, pp. 118–135.
- Lebel, T., Bastin, G., Obled, C., & Creutin, J. D. (1987). On the accuracy of areal rainfall estimation: A case study. *Water Resources Research*. Vol. 23, No. 11, pp. 2123–2134.
- Marsalek, J. (1984). Temporal distribution of design storm rainfall. *Water Science and Technology*. Vol. 16, No. 8–9, pp. 167–175.

- Michailidi, E. M., Antoniadis, S., Koukouvinos, A., Bacchi, B., & Efstratiadis, A. (2018). Timing the time of concentration: shedding light on a paradox. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 63, No 5, pp. 721–740,
- Miliani, F., Ravazzani, G., & Mancini, M. (2011). Adaptation of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 16, No. 3, pp. 218–227.
- Mimikou, M., Baltas, E., & Tsihrintzis, V. (2016). *Hydrology and Water Resource Systems Analysis*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ouédraogo, W. A. A., Raude, J. M., & Gathenya, J. M. (2018). Continuous modeling of the Mkurumudzi River catchment in Kenya using the HEC-HMS conceptual model: Calibration, validation, model performance evaluation and sensitivity analysis. *Hydrology*. Vol. 5, No. 3. <https://doi.org/10.3390/hydrology5030044>
- Papaioannou, G., Efstratiadis, A., Vasiliades, L., Loukas, A., Papalexiou, S., Koukouvinos, A., Tsoukalas, I., & Kossieris, P. (2018). An operational method for flood directive implementation in ungauged urban areas. *Hydrology*. Vol. 5, No. 2, pp. 24. <https://doi.org/10.3390/hydrology5020024>
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2016). Hydrologic modeling system HEC-HMS user's manual. Vol. 1. Hydrologic Engineering Center, Davis, p. 598.
- U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service (USDA-SCS). (1986). Urban hydrology for small watersheds. Technical Release TR-55. National Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
- US Army Corps of Engineers (USACE) - Hydrologic Engineering Center (HEC). (2023). *HEC-HMS Technical Reference Manual*. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual-20231106.pdf
- Vangelis, H., Zotou, I., Kourtis, I. M., Bellos, V., & Tsihrintzis, V. A. (2022). Relationship of rainfall and flood return periods through hydrologic and hydraulic modeling. *Water (Switzerland)*. Vol. 14, No. 22. <https://doi.org/10.3390/w14223618>
- Voorhees, M. L., & Wenzel, H. G. (1984). Urban design-storm sensitivity and reliability. *Journal of Hydrology*. Vol. 68, No. 1–4, pp. 39–60.
- Watt, E., & Marsalek, J. (2013). Critical review of the evolution of the design storm event concept. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 40, No. 2, pp. 105–113.

Θέματα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων
16^{ος} Τόμος: Αειφορική Διαχείριση Λεκανών Απορροής

**Έκδοση Τμήματος Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων
του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης**

Επιμέλεια: Παπαϊωάννου Γεώργιος

Copyright © 2024

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης, Ορεστιάδα

Ημερομηνία Έκδοσης: Δεκέμβριος 2024