

Στοχαστικό Πλαίσιο Εκτίμησης Πλημμυρικού Κινδύνου Υπό Αβεβαιότητα

ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ Ι.^{1,*}, ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ Α.², ΚΟΣΣΙΕΡΗΣ Π.², ΔΗΜΑΣ Π.², ΠΟΥΛΙΑΣΗΣ Γ.³, ΜΠΕΛΛΟΣ Β.⁴, ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΣ Χ.² και ΜΙΧΑΣ Σ.⁵

¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100, Ξάνθη

²Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 15780, Αθήνα

³Moody's RMS, London, United Kingdom

⁴Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100, Ξάνθη

⁵Υδροεξυγιαντική Σύμβουλοι Μηχανικοί, 15125, Αθήνα

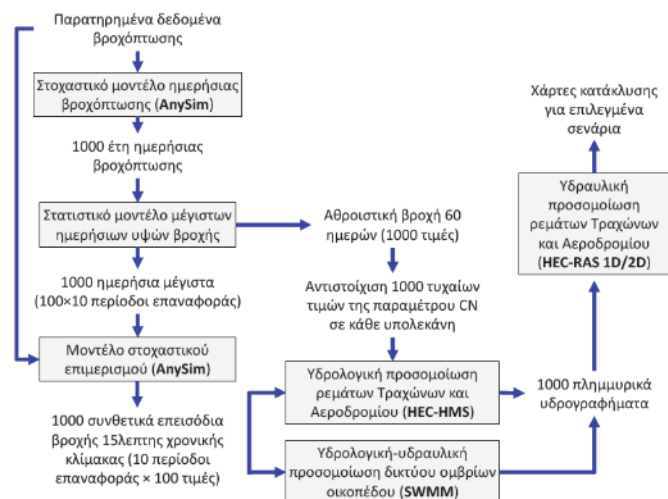
*Υπεύθυνος για την αλληλογραφία συγγραφέας / E-mail: itsoukal@civil.duth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης αποτελεί κρίσιμη συνιστώσα στον σχεδιασμό και τη διαχείριση αντιπλημμυρικών υποδομών. Παραδοσιακά, οι μελέτες πλημμυρών στηρίζονται σε ντετερμινιστικές προσεγγίσεις, όπου η πλημμυρική διακινδύνευση θεωρείται συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς ενός υποθετικού επεισοδίου βροχής. Ωστόσο, αυτού του είδους οι προσεγγίσεις παραβλέπουν σημαντικές αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη στοχαστική φύση των υδρομετεωρολογικών διεργασιών. Στον αντίποδα, οι στοχαστικές προσεγγίσεις προσφέρουν ένα πιο ρεαλιστικό πλαίσιο για την εκτίμηση των πλημμυρικών κινδύνων, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ της διεργασίας βροχόπτωσης, των συνθηκών του εδάφους και των υδρολογικών μηχανισμών των λεκανών απορροής. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου στοχαστικού πλαισίου πλημμυρικής διακινδύνευσης, που συνδυάζει στοχαστικά μοντέλα βροχόπτωσης σε πολλαπλές κλίμακες, με μοντέλα υδρολογικής και υδροδυναμικής προσομοίωσης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται για την ανάλυση της διακινδύνευσης των αντιπλημμυρικών υποδομών του Μητροπολιτικού πόλου του Ελληνικού.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία (Efstratiadis et al., 2022) βασίζεται στην εφαρμογή στοχαστικών μεθόδων για την προσομοίωση των πλημμυρικών διεργασιών και περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (βλ. **Εικόνα 1**):



Εικόνα 1. Διάγραμμα ροής μοντέλων και ανταλλαγής δεδομένων στο πλαίσιο της στοχαστικής προσέγγισης.

1. Στοχαστική μοντελοποίηση βροχόπτωσης: Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης (anySim, Tsoukalas et al., 2020), το οποίο αναπαράγει τις πιθανοτικές κατανομές και τη χρονική δομή εξάρτησης των παρατηρημένων δεδομένων. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη δημιουργία μεγάλου αριθμού στοχαστικών επεισοδίων καταιγίδας, με χαρακτηριστικά που αντανακλούν την στοχαστική συμπεριφορά της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης.
2. Υδρολογική προσομοίωση: Διαμορφώνεται ένα υδρολογικό μοντέλο ημικατανεμημένης δομής (σε περιβάλλον HEC-HMS), στο οποίο οι αρχικές συνθήκες υγρασίας, άρα και η παράμετρος CN, καθώς και τα χρονικά μεγέθη εισόδου (χρόνος συγκέντρωσης, χρόνοι ανόδου και βάσης μοναδιαίου υδρογραφήματος, χρόνοι ροής μοντέλων διόδευσης), αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές, εξαρτώμενες από την τρέχουσα και παρελθούσα βροχόπτωση (Efstratiadis et al., 2022).
3. Υδραυλική προσομοίωση: Για τη διερεύνηση της διάδοσης των πλημμυρικών ροών, χρησιμοποιείται ένα υβριδικό μοντέλο 1D/2D (HEC-RAS), το οποίο επιτρέπει την αναπαράσταση τόσο των ροών εντός των υδατορευμάτων όσο και της κατάκλυσης των παρακείμενων εκτάσεων. Η προσομοίωση εκτελείται για πολλαπλά σενάρια εισόδου (βλ. στάδιο #1 και #2), ώστε να ποσοτικοποιηθεί η αβεβαιότητα των πλημμυρικών ροών υπό διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, έντασης και χρονικής κατανομής καταιγίδας.
4. Ανάλυση αποτελεσμάτων και εκτίμηση διακινδύνευσης: Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναλύονται στατιστικά, ώστε να εξαχθούν εμπειρικές κατανομές των πλημμυρικών μεγεθών ενδιαφέροντος (παροχές, βάθη ροής, κατακλυζόμενες εκτάσεις). Επιπλέον, χρησιμοποιούνται πιθανοτικοί δείκτες πλημμυρικής επικινδυνότητας, οι οποίοι ποσοτικοποιούν τον κίνδυνο υπέρβασης κρίσιμων κατωφλίων.

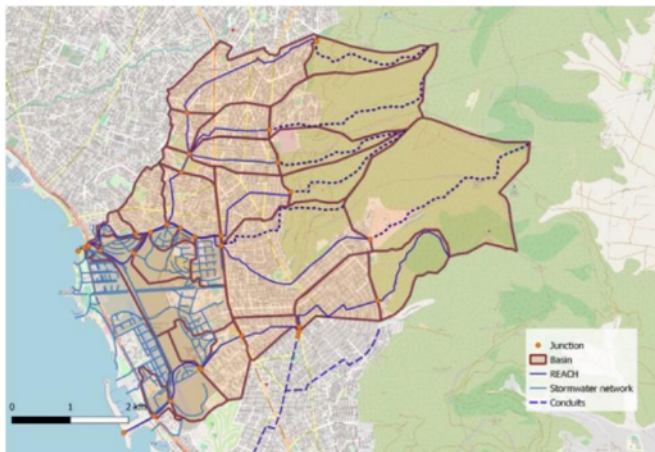
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ως περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε η περιοχή του Μητροπολιτικού πόλου του Ελληνικού, Αθήνα, με σκοπό την ανάλυση της διακινδύνευσης των αντιπλημμυρικών υποδομών και την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στις εκτιμήσεις των πλημμυρικών χαρακτηριστικών.

Αναμφίβολα, πρόκειται για ένα έργο το οποίο χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη υποδομή, τόσο λόγω του μεγέθους του, του κόστους, αλλά και του εύρους ανάπτυξης

του. Η υδρολογική λεκάνη της περιοχής αποστραγγίζεται από ένα σύστημα τόσο φυσικών ρεμάτων αλλά και τεχνητών αποστραγγιστικών έργων. Η μορφολογία της παρουσιάζει έντονες κλίσεις στο ανάντη τμήμα και πιο ήπιες κλίσεις στα κατάντη, όπου συναντώνται κατοικημένες περιοχές ιδιαίτερα ευάλωτες σε πλημμύρες.

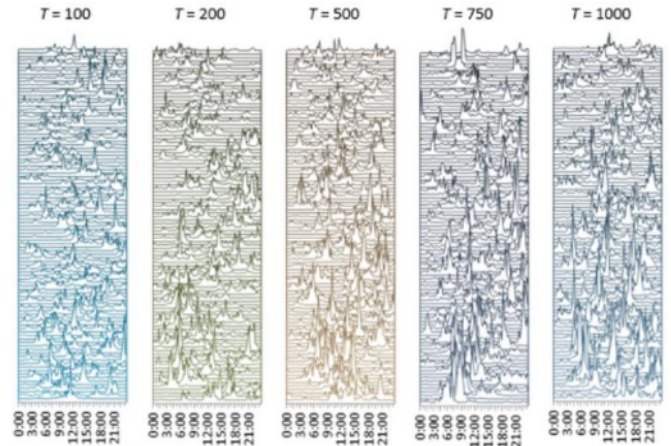
Τα διαθέσιμα δεδομένα περιλαμβάναν χρονοσειρές ημερήσιων βροχοπτώσεων, τοπογραφικά δεδομένα και χάρτες χρήσεων γης, των οποίων η ανάλυση οδήγησε στη προσαρμογή των στοχαστικών μοντέλων βροχόπτωσης, καθώς και τον καθορισμό των δεδομένων εισόδου των υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων. Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής επιτρέπει την εφαρμογή και αξιολόγηση της προτεινόμενης στοχαστικής μεθοδολογίας σε ένα ρεαλιστικό πλαίσιο, με δυνατότητα επέκτασης των ευρημάτων σε άλλες παρόμοιες περιοχές.



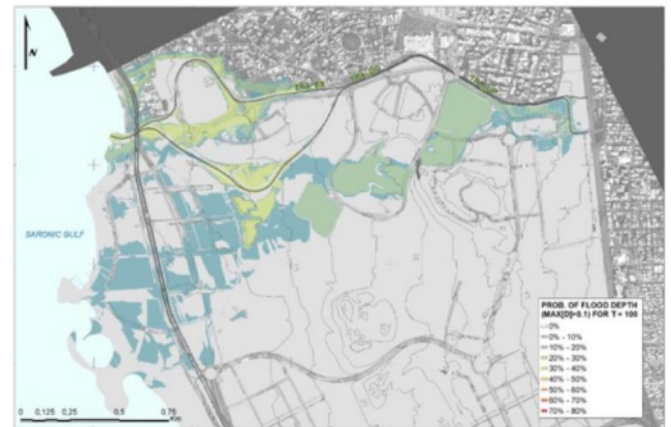
Εικόνα 2. Γενική άποψη ευρύτερης περιοχής μελέτης και βασικά στοιχεία του πλαισίου υδρολογικής προσομοίωσης (υπολεκάνες, κλάδοι, αγωγοί ομβρίων).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης και βασικά συμπεράσματα της ανάλυσης, που αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα της στοχαστικής προσέγγισης έναντι των παραδοσιακών ντετερμινιστικών μεθόδων στην εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης (για περισσότερες πληροφορίες και αποτελέσματα βλ. Efstratiadis et al., 2022). Πιο συγκεκριμένα, στην **Εικόνα 3** απεικονίζεται μέρος των συνθετικών επεισοδίων βροχόπτωσης που δημιουργήθηκαν με βάση το στοχαστικό μοντέλο. Κάθε ένα από τα επεισόδια βροχής αθροίζει στο ύψος βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στην εκάστοτε περίοδο επαναφοράς T , αλλά ταυτόχρονα έχει διαφορετική χρονική κατανομή. Στη συνέχεια, τα επεισόδια αυτά, μαζί με τις στοχαστικές συνθήκες υγρασίας χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο υδρολογικό και υδραυλικό μοντέλο, έτσι ώστε να γίνει η πιθανοτική εκτίμηση των πλημμυρικών μεγεθών ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, στην **Εικόνα 4** απεικονίζεται η πιθανότητα βάθους ροής άνω του 0.1 m (ύψος κρασπέδου), και για γεγονότα βροχόπτωσης που αντιστοιχούν σε $T = 50$ έτη για όλη την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 3. Συνθετικά υετογραφήματα σχεδιασμού, διάρκειας 24 ωρών, και χρονικού βήματος 15 λεπτών, ανά περίοδο επαναφοράς T [έτη] (100 συνθετικά υετογραφήματα ανά T).



Εικόνα 4. Πιθανότητα βάθους ροής > 0.1 m (ύψος κράσπεδου), για ένα γεγονός βροχόπτωσης με $T = 50$ έτη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η στοχαστική προσομοίωση αποτελεί μια ολιστική προσέγγιση για την εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης, καθώς ενσωματώνει την αβεβαιότητα και τη φυσική πολυπλοκότητα των πλημμυρικών διεργασιών, συμβάλλοντας στον σχεδιασμό περισσότερο ανθεκτικών και προσαρμοστικών αντιπλημμυρικών έργων. Στο μέλλον, η μεθοδολογία μπορεί να εμπλουτιστεί ώστε να επιτρέπει την πολυμεταβλητή προσομοίωση των επεισοδίων καταιγίδων σε μεγάλες λεκάνες, και να ενσωματώνει την αβεβαιότητα λόγω του μεταβαλλόμενου κλίματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Efstratiadis A. et al. (2022). Revisiting flood hazard assessment practices under a hybrid stochastic simulation framework. *Water*, 14(3), 457.
- Tsoukalas I. et al. (2020). Simulation of non-Gaussian correlated random variables, stochastic processes and random fields: Introducing the anySim R-Package for environmental applications and beyond. *Water*, 12(6), 1645.