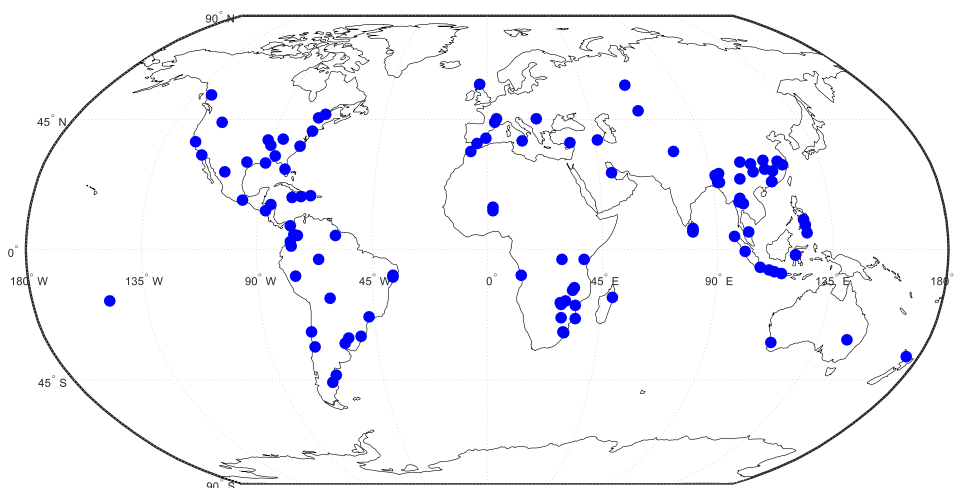


Εκτεταμένη Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας

Παρά το γεγονός ότι η επιστήμη και η τεχνολογία έχουν σημειώσει ραγδαία πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες, ο άνθρωπος αγωνίζεται ακόμα να αντεπεξέλθει στις προκλήσεις που του θέτει η φύση με τις απρόβλεπτες δυνάμεις της. Οι φυσικές καταστροφές συνεχίζουν να προκαλούν θανάτους και καταστροφή περιουσιών.

Μεταξύ αυτών, οι πλημμύρες έχουν εξέχουσα θέση. Ενδεικτικό είναι ότι μόνο στο πρώτο εξάμηνο του 2017 περισσότεροι από 1 100 θάνατοι που αποδίδονται σε πλημμυρικά γεγονότα έχουν καταγραφεί παγκοσμίως, η γεωγραφική κατανομή των οποίων δεν περιορίζεται αυστηρά σε χώρες του τρίτου κόσμου ή/και αναπτυσσόμενες χώρες.



Σχήμα 1 : Γεωγραφική απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού Matlab® των καταγεγραμμένων μεγάλων πλημμυρών, κατά το πρώτο εξάμηνο του 2017

Το γεγονός ότι μεγάλες και θανατηφόρες πλημμύρες συμβαίνουν και στις οικονομικά εύρωστες χώρες, όπου τα μέσα και οι πόροι για τον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό είναι επαρκή και, εν πολλοίς, διατίθενται, καταδεικνύει ότι υπάρχει πολύς ακόμα δρόμος που πρέπει να διανύσει η ανθρωπότητα, για να προστατευθεί από τα ακραία γεγονότα.

Παρότι η επιστημονική κοινότητα αναμφίβολα έχει καταβάλει σημαντικές προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση, οι πολύπλοκοι μηχανισμοί που καθορίζουν την παραγωγή πλημμυρικής απορροής δεν μπορούν να περιγραφούν με ακρίβεια, όχι μόνο επειδή το επιστημονικό πεδίο της υδρολογίας είναι σχετικά νέο και εν μέρει αχαρτογράφητο, αλλά και, κυρίως, λόγω της εγγενούς αβεβαιότητας των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών και υδρογεωλογικών διεργασιών, που δεν επιτρέπουν τις ακριβείς προβλέψεις.

Μέσα σε αυτά τα πλαίσια, παρά το γεγονός ότι οι πιο εξελιγμένες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και περιλαμβάνουν μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής, έχουν καταφέρει να δώσουν αξιόπιστες προβλέψεις, η χρήση τους παρουσιάζει ακόμα προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα, τέτοιες μέθοδοι απαιτούν βαθμονόμηση βασισμένη στην ύπαρξη πραγματικών μετρήσεων βροχής – απορροής που στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν είναι διαθέσιμες. Ακόμη και στην περίπτωση που τέτοιες μετρήσεις υπάρχουν, η ποιότητά τους είναι αρκετές φορές αμφισβητήσιμη. Τέλος, η χρήση τέτοιων προσομοιωμάτων είναι αφενός πολύπλοκη και απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις, ενώ, ταυτόχρονα, η χρήση αρκετών παραμέτρων ως δεδομένα εισόδου αυξάνει την αβεβαιότητα των συστημάτων αυτών.

Ως εκ τούτου αυτά τα συστήματα προσομοίωσης δεν έχουν καθολικά καθιερωθεί και η χρήση τους δεν είναι εύκολη. Έτσι, η διεθνής κοινότητα των μηχανικών –ακόμη και για λόγους κουλτούρας, που έχουν να κάνουν με την αδράνεια στην επιστημονική πρόοδο- στην πλειοψηφία της συνεχίζει να χρησιμοποιεί τις κλασικές μεθόδους προσομοίωσης γεγονότων, παρότι έχει αποδειχθεί ότι βασίζονται σε ορισμένες αρκετά ασυνεπείς και θεωρητικά αβάσιμες υποθέσεις.

Οι μέθοδοι προσομοίωσης γεγονότων, που συναντώνται στις συνήθεις πρακτικές των μηχανικών, δεν λαμβάνουν υπ' όψη τους την αβεβαιότητα που υπάρχει εγγενώς στις υδρομετεωρολογικές μεταβλητές, καθώς και τη μεταβλητότητα των συνθηκών εδαφικής υγρασίας. Σε αυτά τα πλαίσια, η πιθανοτική έκφραση των πλημμυρικών όγκων και των αντίστοιχων πλημμυρικών αιχμών αρκείται στο να ταυτίζεται με την περίοδο επαναφοράς της βροχόπτωσης σχεδιασμού, η χρονική εξέλιξη της οποίας ακολουθεί ένα αυθαίρετα προκαθορισμένο μοτίβο.

Οι σημαντικές ασυνέπειες των μεθόδων αυτών, αλλά και οι δυσκολίες και τα εμπόδια στη χρήση των πιο συνεπών, αλλά πολύπλοκων συστημάτων συνεχούς προσομοίωσης, ορίζουν και τον προσανατολισμό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ειδικότερα, σκοπός της παρούσας δουλειάς είναι η ανάπτυξη ενός πλαισίου στοχαστικής προσομοίωσης σε ψευδο-συνεχή χρόνο για την εκτίμηση πλημμυρικών παροχών, το οποίο θα αποτελεί μία ενδιάμεση προσέγγιση, μεταξύ των παραπάνω. Ένα τέτοιο πλαίσιο, αφενός θα πρέπει να υπερβαίνει τις σοβαρότατες ασυνέπειες και τα ελαττώματα των κλασικών αιτιοκρατικών προσομοιωμάτων και, αφετέρου, να παραμένει απλό στη σύλληψη, αλλά και φειδωλό, ώστε να μην απαιτούνται βαθμονόμηση ή ειδικές γνώσεις για τη χρήση του, όπως συμβαίνει στα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ως «τυπικό αιτιοκρατικό πλαίσιο προσομοίωσης» ορίζεται εκείνο το πλαίσιο σύμφωνα με το οποίο:

- Η καταιγίδα σχεδιασμού επιλέγεται με βάση τις όμβριες καμπύλες, για την επιθυμητή περίοδο επαναφοράς και διάρκεια
- Η χρονική εξέλιξη της καταιγίδας σχεδιασμού καθορίζεται με βάση τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ (alternating blocks method), με ταυτόχρονη επιφανειακή απομείωση της βροχόπτωσης μέσω του δείκτη ϕ (Aerial Reduction Factor)
- Υπολογισμός των υδρολογικών ελλειμάτων με την ευρέως διαδεδομένη μέθοδο NRCS-CN, για μία από τις τρεις διαφορετικές πιθανές συνθήκες υγρασίας (υγρές, μέσες ή ξηρές συνθήκες)
- Μετασηματισμός της ενεργού βροχόπτωσης σε πλημμυρογράφημα με τη χρήση μοναδιαίου υδρογραφήματος. Εν προκειμένω χρησιμοποιείται μοναδιαίο υδρογράφημα παραμετρικό ως προς τον χρόνο συγκέντρωσης, ο οποίος θεωρείται σταθερός και υπολογίζεται με τη γνωστή μέθοδο Giandotti

Τα βασικά μειονεκτήματα της παραπάνω προσέγγισης έχουν να κάνουν με την αυθαίρετη επιλογή συνθηκών υγρασίας, την εξίσου αυθαίρετη επιλογή ενός προκαθορισμένου μοτίβου, όσον αφορά τη χρονική εξέλιξη της καταιγίδας σχεδιασμού, την υπόθεση ότι ο χρόνος συγκέντρωσης είναι σταθερός, αλλά και την ίδια την αντιμετώπιση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, που υποτίθεται ότι διέπεται από πλήρως αιτιοκρατικές σχέσεις.

Πιο συγκεκριμένα, τόσο η βιβλιογραφία, όσο και η ίδια η εμπειρία των μηχανικών, καταδεικνύει ότι η εδαφική υγρασία επηρεάζει κατά κύριο λόγο την παραγόμενη απορροή, για μια δεδομένη καταιγίδα. Η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας συνήθως εντάσσεται σε μια λογική υπερδιαστασιολόγησης, όπου επιλέγονται οι υγρές συνθήκες χάριν ασφαλείας, παρ'ότι έχει παρατηρηθεί ότι τα ακραία γεγονότα μπορούν να συμβούν ακόμα και σε ξηρές συνθήκες. Ειδικότερα στην Ελλάδα και, πολύ δε περισσότερο στην ανατολική Ελλάδα, οι ξηρές συνθήκες επικρατούν έναντι των υγρών (Pontikos, 2014). Συγχρόνως, σε μια περίοδο που η ανθρωπότητα αγωνίζεται να διατηρήσει πόρους, η κατασπατάλησή τους και, άρα, η κουλτούρα της υπερδιαστασιολόγησης θα έπρεπε να αποφεύγεται.

Καθίσταται επομένως σαφές ότι ένα πλαίσιο στο οποίο περιγράφεται η πραγματική φύση της μεταβλητότητας της εδαφικής υγρασίας, είναι σίγουρα πιο συνεπές και αναπαριστά πιο πιστά το πραγματικό καθεστώς της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Επιπλέον, η διακριτοποίηση των συνθηκών εδαφικής υγρασίας σε τρεις τύπους είναι προφανές ότι είναι εξαιρετικά μη ρεαλιστική, αφού στην πραγματικότητα το έδαφος μπορεί να βρεθεί σε οποιαδήποτε κατάσταση. Βέβαια, μια πιο συνεπής περιγραφή της μεταβλητότητας αυτής δεν μπορεί να γίνει αναθέτοντας αυθαίρετα μία κατανομή στις συνθήκες υγρασίας, αλλά, αντιθέτως θα πρέπει να σχετίζεται με τις διεργασίες εντός της λεκάνης.

Ταυτόχρονα, η αυθαίρετη επιλογή ενός προκαθορισμένου μοτίβου, όσον αφορά τη χρονική εξέλιξη της καταιγίδας σχεδιασμού, έχει αποδειχθεί ότι είναι όχι μόνο μη ρεαλιστική, αλλά οδηγεί και σε εξαιρετικά απίθανες καταιγίδες, καθώς βασίζονται στην υπόθεση ότι το ύψος

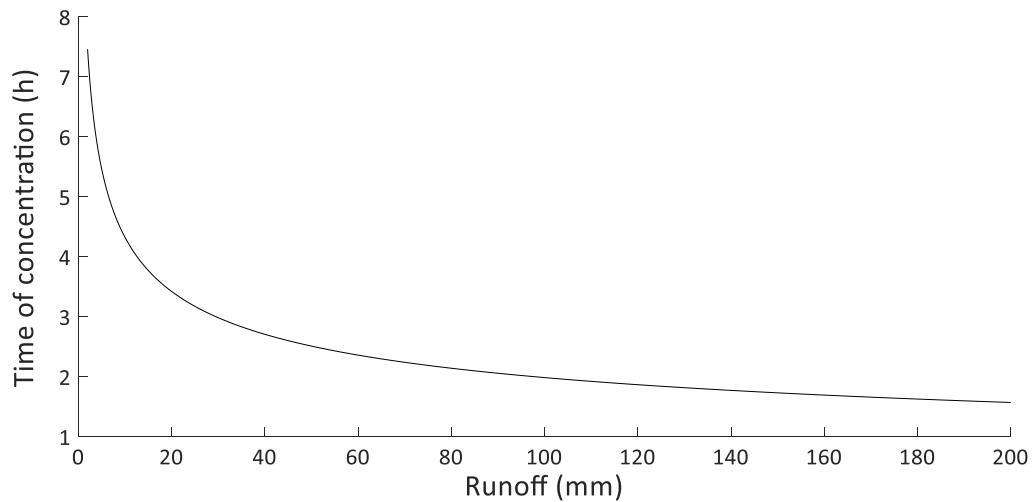
βροχής σε κάθε χρονική διάρκεια αντιστοιχεί στην ίδια περίοδο επαναφοράς. Συνεπώς, η χρήση ενός πλαισίου στο οποίο μπορούν να παραχθούν πιο ρεαλιστικά προφίλ βροχόπτωσης, τα οποία θα μπορούσαν να διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά και τη δομή αυτοσυσχέτισης της βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης καθίσταται απολύτως αναγκαία.

Παράλληλα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (π.χ. Grimaldi κ.α. (2012)), αλλά και την εμπειρία των μηχανικών, ο χρόνος συγκέντρωσης δεν μπορεί να θεωρείται σταθερός. Είναι προφανές ότι όταν αυξάνεται η απορροή και, άρα, αυξάνονται οι παροχές και οι ταχύτητες της επίγειας ροής, καθώς και της ροής στο υδρογραφικό δίκτυο, ο χρόνος συγκέντρωσης είναι μειωμένος. Σε αυτή την κατεύθυνση, πρόσφατα η Αντωνιάδη (2016) ανέπτυξε μία μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία ο χρόνος συγκέντρωσης μεταβάλλεται και συσχετίζεται με το ύψος της παραγόμενης πλημμυρικής απορροής.

Τέλος, ακόμα και ένα πλαίσιο το οποίο θα αντιμετώπιζε τα παραπάνω, δεν θα μπορούσε να είναι αξιόπιστο, παρά μόνο αν λάμβανε υπόψη και την εγγενή αβεβαιότητα των υδρομετεωρολογικών διεργασιών και των υδρογεωλογικών μηχανισμών που σχετίζονται με αυτές και επηρεάζουν την απόκριση της λεκάνης. Συνεπώς, μόνο μία στοχαστική προσέγγιση, μπορεί να προσφέρει πιο αξιόπιστες λύσεις, κατά την οποία τα μεγέθη σχεδιασμού μπορούν να προσεγγιστούν πιθανοτικά.

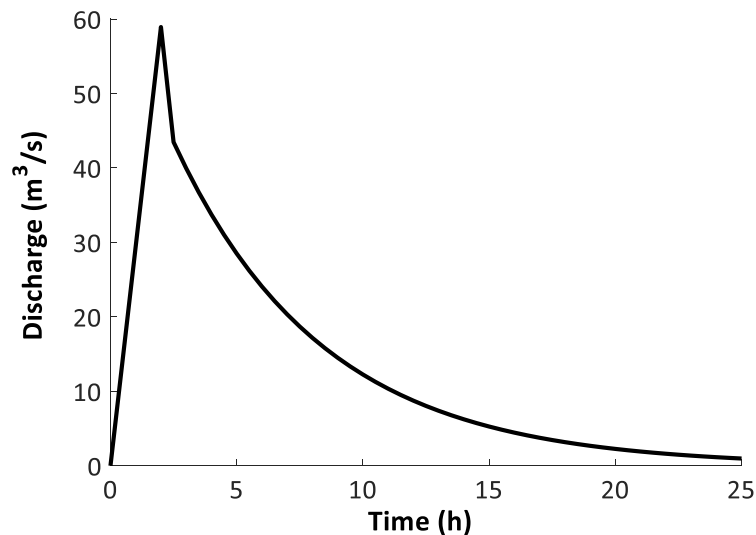
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω προτείνεται το πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης σε ψευδο-συνεχή χρόνο το οποίο περιλαμβάνει αναλυτικά τα ακόλουθα βήματα:

- 1) Μελετώνται τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και καθορίζεται η τιμή αναφοράς για την παράμετρο CN
- 2) Με τη χρήση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της περιοχής υπολογίζεται η σχέση της απορροής με τον χρόνο συγκέντρωσης. Αυτό γίνεται με βάση τη μεθοδολογία που προτείνει η Αντωνιάδη (2016), σύμφωνα με την οποία η απορροή συνδέεται με το χρόνο συγκέντρωσης μέσα από μία εκθετική σχέση, της μορφής $P=at_c^{-b}$, όπου $a, b > 0$ και P η απορροή σε χιλιοστά.



Σχήμα 2 : Η σχέση του χρόνου συγκέντρωσης με την παραγόμενη απορροή για τη λεκάνη της Ραφήνας

- 3) Καθορισμός των παραμέτρων του Παραμετρικού Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, όπως αυτό αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ» (2014).



Σχήμα 3 : Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα της λεκάνης της Ραφήνας για χρόνο συγκέντρωσης που έχει υπολογιστεί με τη μέθοδο του Giandotti

- 4) Επιλογή κατάλληλης ιστορικής χρονοσειράς βροχοπτώσεων
- 5) Βαθμονόμηση του πακέτου στοχαστικού επιμερισμού HyetosMinute (2016) με βάση την ιστορική χρονοσειρά
- 6) Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς ημερήσιων βροχοπτώσεων με τη χρήση του λογισμικού Castalia (Efstratiadis, et al., 2014). Η επιλογή του μήκους των συνθετικών

χρονοσειρών γίνεται με βάση την επιθυμητή περίοδο επαναφοράς (10 000 χρόνια παράγονται για τον αξιόπιστο υπολογισμό πλημμύρας σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς ίση με 1 000 χρόνια).

- 7) Στοχαστικός επιμερισμός των ημερήσιων βροχοπτώσεων σε λεπτότερες χρονικές κλίμακες (π.χ. 15 λεπτά) με τη χρήση του πακέτου HyetosMinute (Kossieris, et al., 2016).
- 8) Υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας (τιμή της παραμέτρου CN^i και κατ'έπείτασιν της μέγιστης δυνατικής κατακράτησης) για κάθε ημέρα i , με βάση την αθροιστική βροχή των προηγούμενων πέντε ημερών, P_5 . Σε αυτά τα πλαίσια, οι ξηρές συνθήκες αντιστοιχίζονται στο χαμηλότερο 10% των P_5 , ενώ οι υγρές συνθήκες στο υψηλότερο 10%. Για κάθε ενδιάμεση κατάσταση, γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο, με βάση την εκάστοτε τιμή P_5^i , όπως φαίνεται στις ακόλουθες σχέσεις.

$$\frac{P_5^i - P_5^{dry}}{P_5^{wet} - P_5^{dry}} = \frac{CN^i - CN^I}{CN^{III} - CN^I}, \quad for P_5^{dry} < P_5^i < P_5^{wet}$$

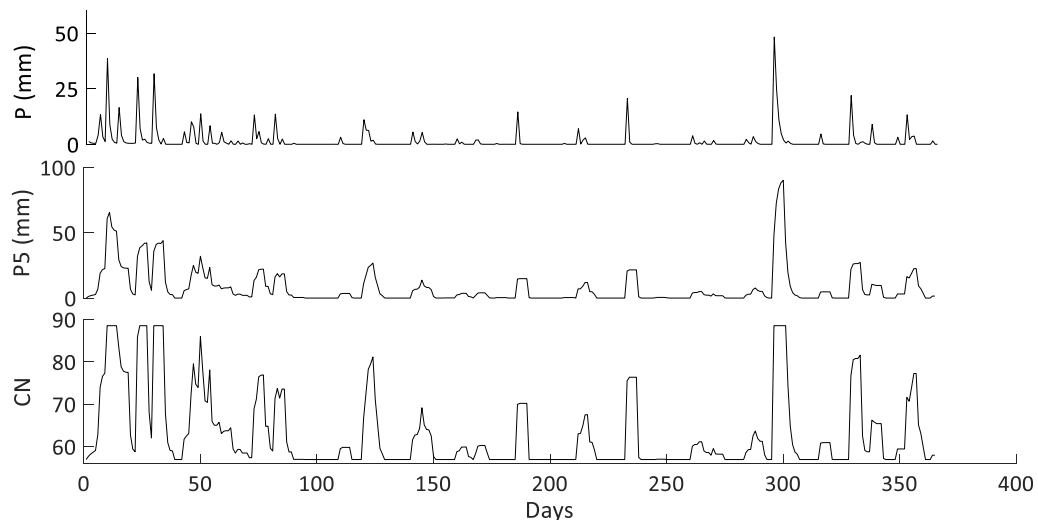
Eq. (Error! No text of specified style in document.-1)

$$CN^i = CN^I, \quad for P_5^i \leq P_5^{dry}$$

Eq. (Error! No text of specified style in document.-2)

$$CN^i = CN^{III}, \quad for P_5^i \geq P_5^{wet}$$

Eq. (Error! No text of specified style in document.-3)



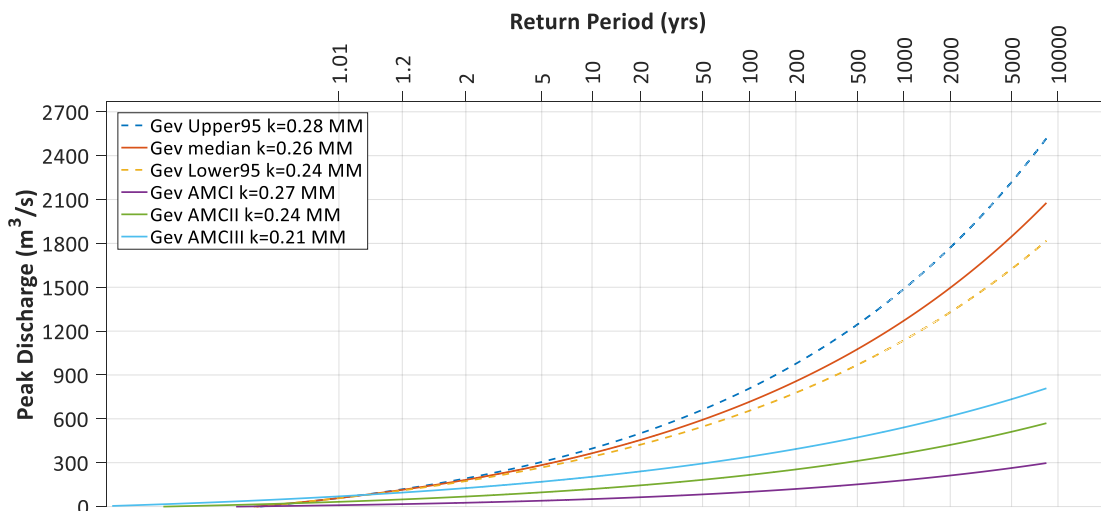
Σχήμα 4 : Παράδειγμα όπου φαίνονται η χρονοσειρά των βροχοπτώσεων, τα αντίστοιχα P_5 και οι τελικές τιμές του CN που ανατίθενται

- 9) Υπολογισμός της ημερήσιας απορροής, με βάση την τιμή του CN που υπολογίστηκε στο βήμα (3), με χρήση της μεθόδου NRCS-CN.
- 10) Επιλογή των ετησίων μεγίστων της απορροής

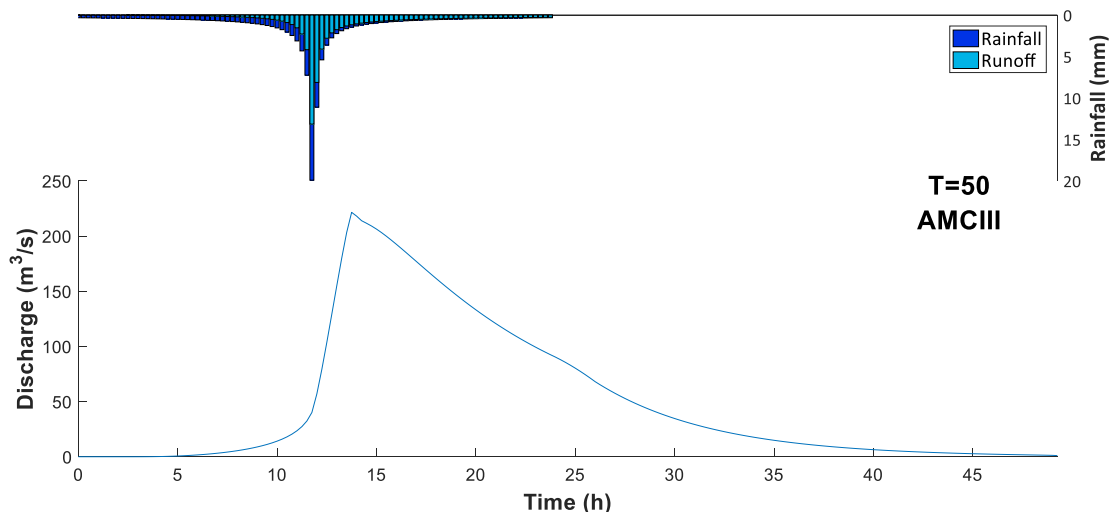
- 11) Υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης, δεδομένης της παραγόμενης απορροής και, επομένως του μοναδιαίου υδρογραφήματος που προκύπτει για κάθε επιλεγμένο επεισόδιο
- 12) Υπολογισμός της χρονικής εξέλιξης των υδρολογικών ελλειμάτων με χρήση της μεθόδου NRCS-CN στην κλίμακα του επεισοδίου και παραγωγή των πλημμυρογραφήματων.
- 13) Επανάληψη των βημάτων (1) έως (12) στα πλαίσια μίας προσομοίωσης Monte-Carlo, προκειμένου να εξαχθούν οι περιθώριες κατανομές των αποτελεσμάτων.

Οι παραπάνω προσεγγίσεις εφαρμόστηκαν στη λεκάνη της Ραφήνας και τα αποτελέσματα της βασικής ανάλυσης παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα, όπου φαίνεται πως το κλασικό ντετερμινιστικό πλαίσιο υποεκτιμά αρκετά τις πλημμυρικές αιχμές, με τη διαφορά των δύο μεθόδων να αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς. Παράλληλα, το προτεινόμενο πλαίσιο, λόγω της μεθόδου επιμερισμού της βροχής που χρησιμοποιείται, δίνει αρκετά ρεαλιστικά πλημμυρογραφήματα, σε αντίθεση με τα τυποποιημένα πλημμυρογραφήματα που παράγονται από το κλασικό πλαίσιο.

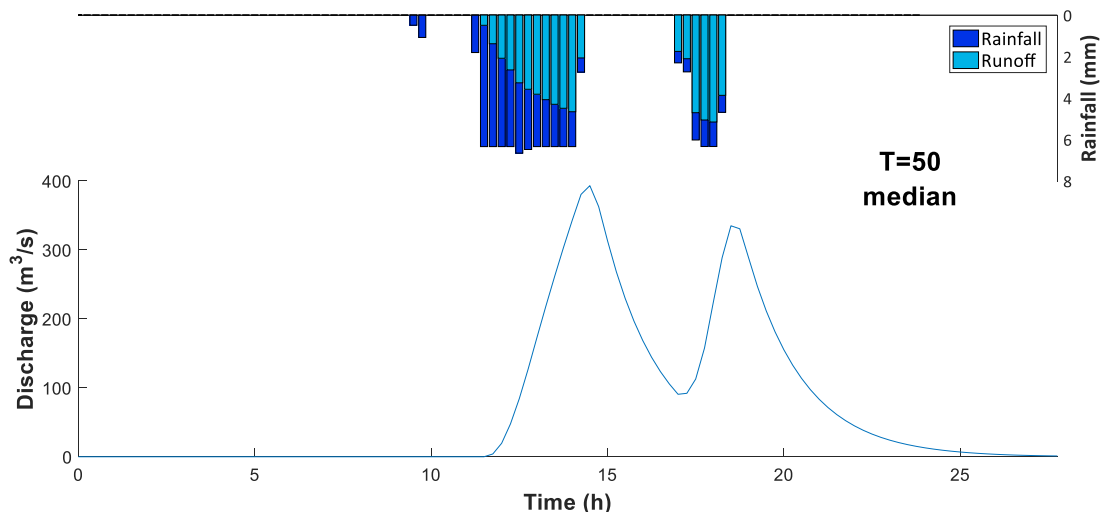
Φυσικά, το προτεινόμενο πλαίσιο είναι αρκετά εύκολο στη χρήση του και χρησιμοποιεί λίγες παραμέτρους, χωρίς να απαιτεί την ύπαρξη μετρήσεων βροχής – απορροής και είναι, συνεπώς, κατάλληλο για λεκάνες χωρίς μετρήσεις, όπως είναι η πλειονότητα των λεκανών παγκοσμίως.



Σχήμα 5 : Οι κατανομές των πλημμυρικών αιχμών υπολογισμένες με βάση το προτεινόμενο πλαίσιο και την κλασική ντετερμινιστική μεθοδολογία. Φαίνονται οι περιθώριες κατανομές του προτεινόμενου πλαισίου (άνω –κάτω όρια για όρια εμπιστοσύνης 95% και ενδιάμεση εκτίμηση) και οι κατανομές του ντετερμινιστικού πλαισίου για τους τρεις τύπους εδαφικής υγρασίας (AMCI-II-III).



Σχήμα 6 : Πλημμυρογράφημα που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 έτη, υπολογισμένο με το ντετερμινιστικό πλαίσιο

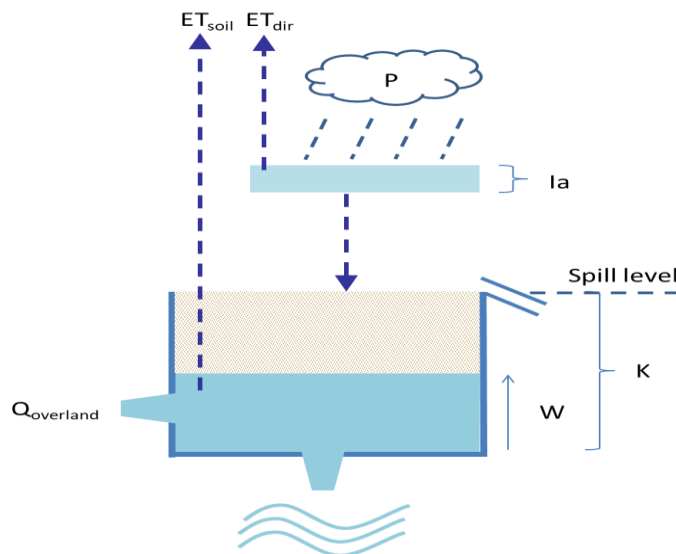


Σχήμα 7 : Πλημμυρογράφημα που αντιστοιχεί στην ενδιάμεση εκτίμηση για περίοδο επαναφοράς 50 έτη, υπολογισμένο με το προτεινόμενο στοχαστικό πλαίσιο

Με αυτά κατά νου, διενεργήθηκε παράλληλα μία σωρεία αναλύσεων με βάση αρκετές τροποποιήσεις στις διάφορες πτυχές του προτεινόμενου μοντέλου, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των οποίων καταλαμβάνουν έναν σημαντικό όγκο πληροφορίας και σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να παρουσιαστούν στην παρούσα περίληψη, αλλά παρουσιάζονται εκτενώς στα κεφάλαια της εργασίας που ακολουθούν.

Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή που έχουν στο παραγόμενο αποτέλεσμα οι διάφορες υποθέσεις του προτεινόμενου πλαισίου και αναζητηθούν ενδείξεις που να στηρίζουν την ορθότητα των επιλογών μας.

Οι διαφοροποιήσεις αφορούν τον επιμερισμό της βροχής (με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ ή με μία απλή ομοιόμορφη κατανομή), τη θεώρηση του χρόνου συγκέντρωσης ως σταθερού, ενώ μελετήθηκε και το φειδωλό συνεχές εννοιολογικό προσομοίωμα Annie-model που αναπτύχθηκε από τους Παπουλάκο κ.α (2017).



Σχήμα 8 : Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών της λεκάνης σύμφωνα με το Annie-model

Μεταξύ πολλών ευρημάτων και συμπερασμάτων, αναφέρουμε εδώ ενδεικτικά ότι ο χρόνος συγκέντρωσης φαίνεται να έχει την πιο έντονη επιρροή στο αποτέλεσμα, ενώ το πακέτο HyetosMinute, που παράγει πιο συμπαγή και περιορισμένα στο χρόνο συσσωματώματα βροχής, μπορεί να παράξει πιο δυσμενή υδρογραφήματα από ό,τι οι άλλες μέθοδοι επιμερισμού.

Παράλληλα, αν και το μοντέλο υπολογισμού της εδαφικής υγρασίας του προτεινόμενου πλαισίου φαίνεται να μπορεί να αναπαραστήσει σε πολύ αδρές γραμμές το καθεστώς της περιοχής, που είναι κατά κανόνα ξηρό, προκύπτει, ύστερα από μια ποιοτική σύγκριση με το πιο πλήρες Annie-model, ότι μια προσέγγιση βασισμένη στην αθροιστική βροχή των 60 ή 90 –αντί των 5- προηγούμενων ημερών ίσως ήταν πιο αξιόπιστη.

Κλείνοντας, σε γενικές γραμμές μπορεί να θεωρηθεί ότι το προτεινόμενο πλαίσιο έχει ικανοποιητική λειτουργία. Παρ'όλα αυτά σίγουρα πρέπει να γίνουν προσπάθειες για τη βελτίωση ορισμένων πτυχών του.

Οι πρώτες κατευθυντήριες γραμμές τόσο για τη βελτίωση του προτεινόμενου πλαισίου, όσο και για περαιτέρω αυτόνομη έρευνα, αλλά και βελτίωση των διάφορων εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τεθεί αναλυτικώς στα κεφάλαια της πλήρους εργασίας.