

## Πρόλογος

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία – και κατ’ επέκταση τις προπτυχιακές μου σπουδές - τον Δεκέμβριο του 2013, σε μία πολύ δύσκολη συγκυρία για το Πολυτεχνείο, αισθάνομαι ότι είναι απαραίτητο να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν τα τελευταία πέντε χρόνια. Η εμπειρία μου από τη σχολή Πολιτικών Μηχανικών ήταν – με ελάχιστες εξαιρέσεις – πολύ καλή: παρά τα παράπονα που ακούγονται, η προσωπική μου άποψη είναι ότι η πλειοψηφία του διοικητικού και κυρίως του διδακτικού προσωπικού εργάζεται με φιλότιμο κάτω από συνθήκες που διαρκώς επιδεινώνονταν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πρωτίστως θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Δημήτρη Κουτσογιάννη, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να αφιερώσει χρόνο και δυνάμεις στη στήριξη της προσπάθειάς μου και να δώσει διέξοδο στα ποικίλα επιστημονικά και πρακτικά προβλήματα που προέκυψαν.

Η συνεργασία μου με τον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη ήταν μία εξαιρετική εμπειρία. Για μένα θα αποτελεί αξέχαστο παράδειγμα προς μίμηση: ο ενθουσιασμός του και η διαρκής προθυμία του για υποστήριξη από την πρώτη μέρα που τον επισκέφτηκα διστακτικά τον περσινό Δεκέμβριο υπήρξαν ανεκτίμητα.

Φυσικά, οι σπουδές μου – περιλαμβανομένης της εργασίας αυτής – θα ήταν φτωχότερες χωρίς τους συμφοιτητές και φίλους που γνώρισα στο Πολυτεχνείο. Η αλληλοϋποστήριξη και η αλληλεγγύη ήταν απαραίτητες για την αίσια έκβαση των σπουδών μας.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς και στα αδέρφια μου που με στήριξαν και με στηρίζουν διαρκώς με ενδιαφέρον παρά τα προσωπικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο καθένας. Χωρίς την οικογενειακή υποστήριξη και ενθάρρυνση οι σπουδές μου θα ήταν πολύ δυσκολότερες.

Θεόδωρος Μαστροθεόδωρος,

Δεκέμβριος 2013.

## Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος .....	i
Περίληψη .....	v
Abstract.....	vii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2: Υδρολογία πλημμυρών – μέθοδοι υδρολογικής προσομοίωσης.....	5
2.1: Απώλειες βροχόπτωσης .....	5
2.2 Συνολική εκτίμηση ελλειμμάτων βροχόπτωσης.....	5
2.2.1: Η μέθοδος του σταθερού συντελεστή απωλειών .....	6
2.2.2: Η μέθοδος του δείκτη φ.....	7
2.2.3: Η μέθοδος του Soil Conservation Service (SCS).....	7
2.3 Προσομοίωση - Μέθοδος Monte Carlo .....	9
2.3.1 Γενικά .....	9
2.3.2 Η προσομοίωση Monte Carlo στην υδρολογία πλημμυρών.....	10
Κεφάλαιο 3 Γενικά στοιχεία για την Κύπρο.....	15
3.1 Οι φυσικές περιοχές του νησιού.....	15
3.2 Γεωλογικοί σχηματισμοί.....	15
3.3 Κλιματικά δεδομένα.....	17
3.4 Πλημμύρες στην Κύπρο.....	19
Κεφάλαιο 4: Οι υπό μελέτη υδρολογικές λεκάνες .....	21
Κεφάλαιο 5: Συλλογή και επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων.....	31
5.1 Συλλογή και επεξεργασία υδρομετρικών δεδομένων .....	31
5.2 Συλλογή και επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων .....	32
5.3 Προβλήματα στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα .....	32

5.4 Προβλήματα στη λεκάνη του Ξερού ποταμού.....	34
5.5 Συντελεστές απορροής.....	35
Κεφάλαιο 6: Υδρολογική προσομοίωση .....	41
6.1 Υδρολογική προσομοίωση με τη μέθοδο SCS-CN και παραμετρικό μοναδιαίο υδρογράφημα .....	41
6.2 Υδρολογική προσομοίωση με μοντέλα υδραυλικών αναλόγων .....	50
6.2.1: Αρχικό μοντέλο υδραυλικών αναλόγων.....	50
6.2.2: Τελικό μοντέλο υδραυλικών αναλόγων .....	52
6.2.3: Στατιστική επεξεργασία των παραμέτρων του μοντέλου.....	56
Κεφάλαιο 7: Προσομοίωση Monte Carlo .....	63
7.1 Προσομοίωση Monte Carlo με τυχαίες παραμέτρους και αρχικές συνθήκες.....	63
7.2 Προσομοίωση Monte Carlo με σταθερές αρχικές συνθήκες .....	68
7.2.1 Προσομοίωση Monte Carlo με αρχικές συνθήκες ίσες με τις μέσες τιμές όλων των επεισοδίων .....	68
7.2.2 Προσομοίωση Monte Carlo με αρχικές συνθήκες σταθερές και ίσες με το βέλτιστο συνδυασμό για κάθε επεισόδιο.....	74
Κεφάλαιο 8: Σχεδιασμός με προσομοίωση Monte Carlo .....	81
8.1 Υετόγραμμα σχεδιασμού .....	81
8.2 Ανάλυση μεγίστων παρατηρημένων παροχών και προσομοίωση Monte Carlo.....	83
8.3 Προσομοίωση Monte Carlo με μεταφορά παραμέτρων από γειτονική λεκάνη.....	91
8.4 Σύγκριση προσομοίωσης Monte Carlo με άλλες υδρολογικές μεθόδους.....	93
Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα & προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	99
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	103
Παράρτημα Α: Προγράμματα υπολογιστή .....	109
Α1 Μέθοδος SCS-CN .....	109
Α2 Προσομοίωση Monte Carlo .....	112
Παράρτημα Β: Στατιστικές κατανομές παραμέτρων μοντέλου υδραυλικών αναλόγων .....	117
Παράρτημα Γ Αναλυτικά αποτελέσματα προσομοίωσης Monte Carlo .....	125



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής πλημμυρικών υδρογραφημάτων και κατ' επέκταση αντιπλημμυρικού σχεδιασμού σε μεσογειακές λεκάνες με προσομοίωση Monte Carlo. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν δύο υδρολογικές λεκάνες στην Κύπρο για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία βροχής και απορροής. Ελήφθησαν αρχικά 17 πλημμυρικά επεισόδια στη λεκάνη απορροής του ποταμού Περιστερώνα και 20 επεισόδια από τη λεκάνη του Ξερού ποταμού. Έγινε επεξεργασία και ομογενοποίηση των διαθέσιμων στοιχείων, διόρθωση σφαλμάτων και τελική επιλογή 33 συνολικά περιστατικών. Η προσομοίωση των περιστατικών έγινε αρχικά με τη μέθοδο SCS-CN σε συνδυασμό με ένα συνθετικό παραμετρικό μοναδιαίο υδρογράφημα, αλλά διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος αποτυγχάνει να προσομοιώσει την παρατηρημένη απορροή. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν διάφορα μοντέλα υδραυλικών αναλόγων με δύο συνδεδεμένες δεξαμενές που συνεισφέρουν ταυτόχρονα στην απορροή και από αυτά προκρίθηκε το πιο αποτελεσματικό, το οποίο χρησιμοποιεί δύο αρχικές τιμές και πέντε παραμέτρους. Με αυτό το μοντέλο έγιναν πολλαπλές βελτιστοποιήσεις για κάθε περιστατικό, καθώς διαπιστώθηκε ότι με πολύ διαφορετικά σύνολα παραμέτρων επιτυγχάνεται πολύ ικανοποιητική προσομοίωση. Για κάθε παράμετρο εφαρμόστηκε εν συνεχεία μία θεωρητική κατανομή και ευρέθησαν οι στατιστικές παράμετροι. Έπειτα δημιουργήθηκε αλγόριθμος στο Matlab για να γίνει η προσομοίωση Monte Carlo. Αρχικά, επιλέχθηκε να λαμβάνονται με τυχαίο τρόπο τιμές από τις κατανομές που καταρτίστηκαν για τις παραμέτρους και τις αρχικές συνθήκες και το 50% ποσοστημόριο που προέκυψε ήταν σε γενικές γραμμές κοντά στο παρατηρημένο υδρογράφημα, ενώ στη συνέχεια έγινε προσομοίωση Monte Carlo με σταθερές αρχικές συνθήκες και τυχαίες παραμέτρους. Έπειτα, έγινε προσομοίωση Monte Carlo για τα περιστατικά της κάθε λεκάνης με δεδομένα από την άλλη λεκάνη με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας επέκτασης της εφαρμογής της μεθόδου σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις με χρήση στοιχείων από γειτονικές λεκάνες. Τέλος, η προσομοίωση Monte Carlo εφαρμόστηκε και για συνθετικές βροχοπτώσεις. Οι πλημμυρικές αιχμές και οι όγκοι που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ορθολογικής μεθόδου και της μεθόδου SCS και προέκυψαν πιο αξιόπιστοι.



## **Abstract**

The aim of this project is to investigate the possibility to apply Monte Carlo simulation to generate flood hydrographs in Mediterranean basins. Two basins were chosen in Cyprus, for which there was available rain and discharge data. In the basin of Peristeronas river 17 events were selected, while in the basin of Kseros river 20 events were selected. After elaborating, homogenizing and correcting the data, 33 events in total were finally chosen. At first, the simulation of the events was conducted through the application of the SCS-CN method with a parametric unit hydrograph. This method proved to be inappropriate for the simulation of the measured discharge. Consequently, several models of hydraulic analogues with two interconnected tanks were applied. The best of them is a model that uses five parameters and two initial conditions. This model was used for several optimizations of every incident as it was noted that with very different sets of parameters the simulation is almost equally efficient. The statistical analysis that followed included the application of a theoretical distribution for every parameter and initial condition of the model and the estimation of the statistical parameter values. Eventually, the incidents were simulated according to the Monte Carlo method with the use of a Matlab code that was written for this purpose. The simulation included random and stable initial conditions and random parameters as well as with random initial conditions and parameters. In both cases the 50% quantile was generally close to the observed hydrograph. Consequently, the events of each basin were simulated with the use of parameter data of the other basin with the aim to investigate the possibility to apply this method in ungauged catchments. Finally, Monte Carlo simulation was applied for synthetic rain events that were produced through the ombrian curves of Cyprus. The flood peaks and the total discharge volumes were compared to the results of the SCS-CN and the rational method and the Monte Carlo results proved to be more realistic.





# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής της προσομοίωσης Monte Carlo για την προσομοίωση περιστατικών βροχόπτωσης – απορροής και για την εκτίμηση μεγεθών υδρολογικού σχεδιασμού με χρήση συνθετικών βροχοπτώσεων.

Οι διεργασίες που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία της μεταβολής της βροχόπτωσης σε απορροή είναι εξαιρετικά πολύπλοκες και κάθε προσπάθεια για προσδιοριστική ερμηνεία και εξάλειψη της αβεβαιότητας έχει αποτύχει. Στην πραγματικότητα η αβεβαιότητα είναι εγγενές στοιχείο όλων των φυσικών διεργασιών και ως τέτοιο πρέπει να αντιμετωπίζεται. Έπεται ότι κάθε μέθοδος που είτε αγνοεί την αβεβαιότητα, είτε τη λαμβάνει επιλεκτικά υπόψη δεν είναι συνεπής με το φυσικό υπόβαθρο.

Η προσομοίωση Monte Carlo πλεονεκτεί σε σχέση με τις προσδιοριστικές μεθόδους, καθώς δεν οδηγεί σε μονοσήμαντα αποτελέσματα αγνοώντας την αβεβαιότητα (ή λαμβάνοντάς την ελάχιστα υπόψη), αλλά αντίθετα βασίζεται στην αβεβαιότητα στο χώρο και στο χρόνο των υδρολογικών μεταβλητών και δίνει ένα εύρος αποτελεσμάτων συνοδευόμενο από πιθανοτικές αναλύσεις και τα πιθανοτικά μεγέθη που προκύπτουν.

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης Monte Carlo και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα άλλων υδρολογικών μεθόδων. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων η οποία αντανακλάται από το εύρος παροχών που δίνει η μέθοδος, στοιχείο στο οποίο δίδεται έμφαση στην εργασία μέσω της παρουσίασης διάφορων ποσοστημορίων από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τελικός στόχος είναι η μέθοδος αυτή να καταστεί εφαρμόσιμη στον υδρολογικό σχεδιασμό ενδεχομένως και για λεκάνες χωρίς μετρήσεις βροχής – απορροής και να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της υδρολογικής αβεβαιότητας.

## 1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε 9 κεφάλαια.

Το πρώτο -παρόν- κεφάλαιο αποτελεί εισαγωγή στην εργασία με παρουσίαση του σκοπού της εργασίας και της διάρθρωσης αυτής.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται το θεωρητικό πλαίσιο της υδρολογίας των πλημμυρών και οι κύριες μέθοδοι εκτίμησης των υδρολογικών ελλειμμάτων με έμφαση στη μέθοδο της Soil Conservation Service, η οποία εφαρμόστηκε στη συνέχεια. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εισαγωγή στην προσομοίωση και ειδικότερα στη μέθοδο Monte Carlo.

Το Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει βασικά στοιχεία για τη γεωγραφία και τη γεωλογία της Κύπρου και δίδεται έμφαση στα κλιματικά δεδομένα του νησιού που ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με σύντομη αναφορά στο ιστορικό των πλημμυρών στο νησί.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι δύο υπό μελέτη υδρολογικές λεκάνες και παρατίθενται οι σχετικοί χάρτες.

Το Κεφάλαιο 5 αφορά τη συλλογή και επεξεργασία των βροχομετρικών και υδρομετρικών δεδομένων. Δίδεται έμφαση στα προβλήματα που εντοπίστηκαν στο στάδιο αυτό (ανακρίβειες και ελλείψεις δεδομένων) και στον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίστηκαν.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφονται αναλυτικά όλες οι προσπάθειες για προσομοίωση της απορροής στις δύο λεκάνες. Με δεδομένη τη βροχή επιδιώχθηκε κάθε φορά η καλύτερη δυνατή προσέγγιση της μετρημένης απορροής. Αρχικά αναλύεται ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου SCS με το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα που καταρτίστηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι υδραυλικών αναλόγων που εφαρμόστηκαν στις δύο λεκάνες, τα προβλήματα που προέκυψαν και ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίστηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα της επιλεγείσας μεθόδου.

Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει την ανάλυση της προσομοίωσης Monte Carlo. Περιγράφονται οι διάφορες παραλλαγές του μοντέλου που δοκιμάστηκαν προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συσχετίσεις που εντοπίστηκαν μεταξύ κάποιων παραμέτρων κι έπειτα παρατίθενται αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις με τα μοντέλα που επιλέχθηκαν. Στη συνέχεια

ακολουθεί η περιγραφή των προσομοιώσεων με σταθερές αρχικές συνθήκες και αναλύονται τα αποτελέσματά τους σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις που προηγήθηκαν.

Το Κεφάλαιο 8 αφορά το σχεδιασμό με προσομοίωση Monte Carlo. Περιγράφεται η μεθοδολογία υπολογισμού των συνθετικών βροχοπτώσεων και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προσομοίωσης για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Εν συνεχεία η προσομοίωση εφαρμόζεται και με στοιχεία της έτερης κάθε φορά λεκάνης στα πλαίσια της διερεύνησης της αποτελεσματικότητας της μεθόδου σε περίπτωση εφαρμογής σε λεκάνη χωρίς μετρήσεις. Τέλος, περιλαμβάνεται και η σύγκριση των πλημμυρικών όγκων και αιχμών που προκύπτουν από την εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μεθόδου SCS και της ορθολογικής μεθόδου.

Το Κεφάλαιο 9 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα από τις αναλύσεις που έγιναν και συνοδεύεται από προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στα ζητήματα που αφορούν την προσομοίωση Monte Carlo.



## **Κεφάλαιο 2: Υδρολογία πλημμυρών – μέθοδοι υδρολογικής προσομοίωσης**

### **2.1: Απώλειες βροχόπτωσης**

Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί από την εκδήλωση της βροχόπτωσης μέχρι τη δημιουργία της απορροής αρχίζουν οι διεργασίες που συνθέτουν το πολύπλοκο φαινόμενο που είναι γνωστό με τον όρο «απώλειες βροχής». Συγκεκριμένα, αρχικά μία ποσότητα βροχής συγκρατείται από τη βλάστηση και άλλα ψηλά εμπόδια πριν φτάσει στο έδαφος, φαινόμενο γνωστό ως παρεμπόδιση (interception), ενώ στη συνέχεια ποσότητα της επιφανειακής απορροής παγιδεύεται από τις μικροκοιλότητες του τοπογραφικού αναγλύφου (επιφανειακή παγίδευση, depression). Οι απώλειες παρεμπόδισης και επιφανειακής παγίδευσης αναφέρονται συνοπτικά με τον όρο κατακράτηση (retention). Ως ειδική μορφή κατακράτησης θεωρείται η κατακράτηση χιονιού (interception of snow), οποία πραγματοποιείται όταν το έδαφος και η βλάστηση καλύπτονται από χιόνι. Οι απώλειες της βροχής συνεχίζονται με το φαινόμενο της διήθησης. Διήθηση ονομάζεται η φυσική διεργασία της εισχώρησης στο έδαφος νερού που προέρχεται από βροχόπτωση, τήξη χιονιού ή άρδευση. Ποσοτικά, ο ρυθμός διήθησης είναι προφανώς μεταβλητός χωρικά και χρονικά. Εξαρτάται κατά σειρά προτεραιότητας από την ένταση και τη διάρκεια της βροχόπτωσης, τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, την κατάσταση του επιφανειακού εδαφικού καλύμματος και την παρουσία ή όχι χλωρίδας, τη θερμοκρασία, την ποιότητα του βρόχινου νερού κλπ (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

### **2.2 Συνολική εκτίμηση ελλειμμάτων βροχόπτωσης**

Έχει διαπιστωθεί ότι οι επιμέρους ποσοτική εκτίμηση της κατακράτησης και της διήθησης κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης είναι εξαιρετικά δυσχερές, καθώς ακόμη κι αν χρησιμοποιηθούν ακριβή μοντέλα των διεργασιών αυτών, η αβεβαιότητα ως προς τις φυσικές παραμέτρους και τη γεωγραφική και χρονική διακύμανσή τους καθιστά την ακριβή πρόβλεψη της εξέλιξης των αντίστοιχων υδρολογικών μεταβλητών αδύνατη. Εξάλλου, στις περισσότερες περιπτώσεις ο υδρολόγος μηχανικός δεν ενδιαφέρεται για τις επιμέρους

συνιστώσες των υδρολογικών ελλειμμάτων και τους μηχανισμούς που τις διέπουν, αλλά για την αθροιστική ποσοτική συνισταμένη τους (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Γνωρίζοντας την ολική ένταση βροχής και τα ολικά ελλείμματα, μπορεί να προσδιοριστεί το τμήμα της ολικής βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε απορροή, το οποίο είναι γνωστό ως ενεργός βροχόπτωση (effective rainfall) ή πλεόνασμα βροχής (rainfall excess). Η ενεργός ένταση βροχής  $i_e$  γενικά προσδιορίζεται από τη σχέση

$$i_e = i - i_a \quad (2.1)$$

όπου  $i$  η ολική (πραγματική) ένταση βροχής και  $i_a$  η ένταση όλων των ελλειμμάτων αδιακρίτως, ήτοι

$$i_a = i_I + i_D + f \quad (2.2)$$

με  $i_I$ ,  $i_D$  και  $f$  την ένταση των απωλειών παρεμπόδισης, παγίδευσης και διήθησης αντίστοιχα.

Προφανώς, οι μέθοδοι προσδιορισμού των συνολικών ελλειμμάτων αδιακρίτως δεν μπορεί παρά να είναι εμπειρικές ή ημιεμπειρικές αφού δεν κάνουν ακριβή θεώρηση των μηχανισμών που τα δημιουργούν. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι η εύκολη χρήση και ο μικρός αριθμός παραμέτρων (συχνότατα μία) που χρησιμοποιούν.

### 2.2.1: Η μέθοδος του σταθερού συντελεστή απωλειών

Η πρώτη, ιστορικά, σχέση προσδιορισμού της ενεργού βροχόπτωσης από την ολική στηρίζεται στην απλή αναλογία:

$$i_e = \psi i \quad (2.3)$$

όπου  $\psi$  ο συντελεστής απορροής κατά παραδοχή σταθερός. Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη βάση της ορθολογικής μεθόδου, η οποία τυγχάνει ευρείας εφαρμογής μέχρι σήμερα, αν και είναι ανακριβής. Ακολούθως περιγράφονται δύο ακριβέστερες μέθοδοι προσδιορισμού των ολικών ελλειμμάτων.

### 2.2.2: Η μέθοδος του δείκτη $\varphi$

Σύμφωνα με τη μέθοδο του δείκτη  $\varphi$  τα ολικά ελλείμματα πραγματοποιούνται με σταθερό χρονικά ρυθμό, μεγέθους  $\varphi$ . Για εντάσεις βροχής  $i < \varphi$  τα ελλείμματα πραγματοποιούνται με ρυθμό ίσο με  $i$ . Κατά συνέπεια

$$i_a = \min(\varphi, i) \quad (2.4)$$

και

$$i_e = \max(i - \varphi, 0) \quad (2.5)$$

Σε περίπτωση σταθερής έντασης βροχής  $i$  η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$  είναι ισοδύναμη με τη μέθοδο του σταθερού συντελεστή απορροής. Για μεταβλητή, όμως, ένταση βροχής η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$  είναι πιο ρεαλιστική, αν και προφανώς δεν ανταποκρίνεται απολύτως στην πραγματικότητα γιατί ο ρυθμός ελλειμμάτων δεν είναι σταθερός στο χρόνο αλλά παρουσιάζει φθίνουσα πορεία. Επιπλέον, τόσο η κατακράτηση όσο και η διήθηση παρουσιάζουν ένα αρχικό στάδιο κατά το οποίο το οποίο το ύψος τους ταυτίζεται με τη βροχόπτωση πράγμα που δεν περιγράφεται από τη μέθοδο του δείκτη  $\varphi$ . Για την αντιμετώπιση αυτού του μειονεκτήματος έχει αναπτυχθεί μία παραλλαγή της μεθόδου, η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$  με αρχικό έλλειμμα.

Πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη  $\varphi$  από ένα μετρημένο επεισόδιο βροχόπτωσης-απορροής και εν συνεχεία η εφαρμογή του σε άλλες βροχοπτώσεις δεν είναι αξιόπιστη καθώς η τιμή του δείκτη  $\varphi$  μεταβάλλεται σημαντικά συναρτήσει πολλών παραμέτρων της λεκάνης απορροής και της βροχόπτωσης, γεγονός που περιορίζει αισθητά την αξιοπιστία των εφαρμογών της μεθόδου.

### 2.2.3: Η μέθοδος του Soil Conservation Service (SCS)

Μια από τις βασικότερες μεθόδους εκτίμησης του υδρολογικού ελλείμματος είναι η μέθοδος του Αμερικάνικου Soil Conservation Service (SCS). Οι κυριότερες παραδοχές της είναι οι ακόλουθες:

- Για ένα αρχικό διάστημα ( $t_{a0}$ ) όλη η πραγματική βροχή ύψους  $h_{a0}$  γίνεται έλλειμμα.
- Το επιπλέον ελλειμματικό ύψος, πέραν του  $h_{a0}$ , δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή  $S$ , η οποία καλείται δυνητικά μέγιστη κατακράτηση.

- Σε κάθε χρονική στιγμή μετά το χρόνο  $t_{a0}$  οι λόγοι του ενεργού ύψους βροχής  $h_e$  και του ελλειμματικού ύψους βροχής  $h_a$  μείον το αρχικό έλλειμμα  $h_{a0}$  προς τα μεγέθη  $y$  (όπου  $y$  η διαφορά του ελλειμματικού ύψους  $h_{a0}$  από το ολικό ύψος  $h$ ) και  $S$  αντίστοιχα είναι ίσοι.

Από την τελευταία παραδοχή προκύπτει η ακόλουθη σχέση

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq h_{a0} \\ \frac{(h-h_{a0})^2}{h-h_{a0}+S} & h > h_{a0} \end{cases} \quad (2.6)$$

Η σχέση αυτή δίνει σε κάθε χρονική στιγμή το αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης συναρτήσει του ολικού ύψους βροχής  $h$ , του αρχικού ελλειμματικού ύψους  $h_{a0}$  και της δυνητικά μέγιστης κατακράτησης  $S$ .

Από δεδομένα παρατηρήσεων η προτεινόμενη τιμή του αρχικού ελλείμματος είναι η  $h_{a0} = 0.2S$ .

Ο υπολογισμός του  $S$  στην περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα απορροής γίνεται από τη σχέση 2.7 (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999)

$$S = 5h + 10h_e - 10\sqrt{h_e(h_e + 1.25h)} \quad (2.7)$$

Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής ο υπολογισμός του  $S$  γίνεται μέσω της ακόλουθης εμπειρικής σχέσης συναρτήσει του αριθμού καμπύλης απορροής  $CN$ :

$$S[mm] = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.8)$$

Ο αριθμός καμπύλης απορροής  $CN$  παίρνει τιμές από 0 έως 100 και επηρεάζεται από τον εδαφικό τύπο, τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας και τις χρήσεις γης. Οι τιμές του δίνονται από τυποποιημένους πίνακες.



## 2.3 Προσομοίωση - Μέθοδος Monte Carlo

### 2.3.1 Γενικά

Προσομοίωση ονομάζεται η τεχνική μίμησης ενός πραγματικού συστήματος όπως αυτό εξελίσσεται στο χρόνο (Winston, 1994). Μοντέλο προσομοίωσης ονομάζεται ένα σύνολο υποθέσεων για τη λειτουργία του συστήματος, εκφρασμένων από μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων μεταξύ των αντικειμένων του συστήματος (Κουτσογιάννης, 2000).

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι ένα στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης που εφαρμόζεται σε πολλά πεδία της επιστήμης από την οικονομία έως την πυρηνική φυσική. Ο όρος Monte Carlo χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει κάθε αλγόριθμο προσομοίωσης που χρησιμοποιεί γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Μία γεννήτρια είναι ένας αλγόριθμος, συνήθως αναδρομικός, ο οποίος μπορεί να παράγει διαδοχικά οσοσδήποτε όρους της τυχαίας ακολουθίας. Προφανώς οι τυχαίοι αριθμοί δεν γεννώνται στην τύχη, αλλά βάσει ενός προσδιοριστικού αλγορίθμου (ψευδοτυχαίοι αριθμοί οι οποίοι αποτελούν τμήμα περιοδικής ακολουθίας, Κουτσογιάννης, 2000). Ως τέτοια γεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί και η ρουλέτα του καζίνο, από την οποία προέρχεται και το όνομα της μεθόδου (Κουκικόγλου, 2002, με προσαρμογή).

Η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από το Laplace (1749-1827), ο οποίος ήταν και ο πρώτος που έθεσε τις βάσεις της θεωρίας των πιθανοτήτων. Ο Laplace χρησιμοποίησε τη μέθοδο αυτή για τον υπολογισμό αριθμητικών τιμών επαναλαμβάνοντας ένα τυχαίο γεγονός πολλές φορές και παρατηρώντας το αποτέλεσμα πειραματικά. Ένας από τους υπολογισμούς του Laplace αποτελεί κλασικό παράδειγμα τόσο της μεθόδου Monte Carlo όσο και του υπολογισμού του  $\pi$  και βασίζεται στο πρόβλημα της βελόνας του Buffon (1707-1788). Αν και ο Laplace απέδειξε ότι ο υπολογισμός του  $\pi$  με Monte Carlo προσομοίωση είναι αναποτελεσματικός, εν τούτοις έθεσε τις βάσεις για τη μετέπειτα θεμελίωση της μεθόδου Monte Carlo (Ρουμελιώτης, 2001, με προσαρμογή).

Η προσομοίωση Monte Carlo θεμελιώθηκε επιστημονικά τη δεκαετία του 1940 από μαθηματικούς και φυσικούς (Ulam, von Neumann, Fermi, Metropolis) για τη μελέτη φαινομένων πυρηνικής φυσικής. Η μέθοδος Monte Carlo αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη της υδρολογικής προσομοίωσης που ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1950 (Κουτσογιάννης, 2000).

Πλεονεκτήματα της προσομοίωσης είναι η ευελιξία και η αμεσότητα σε συνδυασμό με την ακρίβεια στην περιγραφή του συστήματος. Για την εφαρμογή προσομοίωσης δεν απαιτούνται απλοποιητικές παραδοχές και μάλιστα όταν η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων είναι ανέφικτη ή δυσχερής τότε η προσομοίωση προσφέρει τη μόνη εναλλακτική λύση.

Συχνά, όμως, οι υπολογιστικές διαδικασίες που συνεπάγεται η προσομοίωση είναι αργές και βεβαίως τα αποτελέσματα είναι προσεγγιστικά και εξαρτώνται από το μέγεθος και τον τρόπο δειγματοληψίας.

### 2.3.2 Η προσομοίωση Monte Carlo στην υδρολογία πλημμυρών

Η προσομοίωση Monte Carlo έχει πολυάριθμες εφαρμογές σε θέματα σχετικά με την υδρολογία πλημμυρών. Για παράδειγμα η εκτίμηση της πλημμύρας σχεδιασμού είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες στην ασφάλεια των φραγμάτων. Παραδοσιακά, οι υδρολογικές μελέτες για τους υπερχειλιστές των φραγμάτων βασίζονται σε στατιστική ανάλυση παρατηρημένων πλημμυρικών περιστατικών. Για τον υπολογισμό της πλημμύρας σχεδιασμού έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι που βασίζονται σε διάφορα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης τα οποία συχνά παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων τους.

Η αβεβαιότητα στις τιμές των παραμέτρων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στην υδρολογία πλημμυρών. Αν και πολλές φορές (περιλαμβανομένης της παρούσας εργασίας) διαφορετικά σύνολα παραμέτρων δίνουν υδρογραφήματα που προσομοιώνουν εξίσου ικανοποιητικά τα παρατηρημένα, θα ήταν λανθασμένο να ισχυριστούμε ότι μπορούμε απλά να επιλέξουμε ένα από αυτά τα σύνολα. Στην πραγματικότητα, αυτός ο ισχυρισμός βασίζεται στην υπόθεση ότι όλες οι προσομοιώσεις που οδηγούν σε παρόμοια πλημμυρογραφήματα με διαφορετικά σύνολα παραμέτρων είναι όμοιες. Αυτό, όμως, δεν ισχύει πάντοτε στην περίοδο που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, ούτε σε προσομοιώσεις που γίνονται για περιόδους με διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Συνεπώς, εκτός από τις υπόλοιπες πηγές αβεβαιότητας (φυσική μεταβλητότητα, λανθασμένες μετρήσεις, αβεβαιότητα του μοντέλου) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αβεβαιότητα των παραμέτρων (Seibert, 1997).

Δεν είναι, όμως, πάντοτε εύκολο να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της αβεβαιότητας των παραμέτρων στο παραγόμενο υδρογράφημα και στις επιμέρους συνιστώσες του (πλημμυρική

αιχμή και πλημμυρικός όγκος). Η ευαισθησία του μοντέλου σε μεταβολές στην τιμή κάθε μίας από τις παραμέτρους του μοντέλου ξεχωριστά μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί μεταβάλλοντας την τιμή της και διατηρώντας τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων σταθερές. Επίσης, σε γραμμικά μοντέλα είναι δυνατό να προσδιοριστεί η συνδυασμένη επίδραση δύο παραμέτρων ως επιφάνεια απόκρισης, η οποία πάντως εξαρτάται από τις σταθερές τιμές που θα δοθούν στις υπόλοιπες παραμέτρους. Ωστόσο, η συνδυασμένη επίδραση δύο παραμέτρων στο αποτέλεσμα δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί σε έντονα μη γραμμικά μοντέλα, όπως είναι αυτά που προσομοιώνουν τις υδρολογικές διεργασίες, καθώς δεν ισχύει η υπόθεση ότι χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές των παραμέτρων λαμβάνουμε τη μέση τιμή του αποτελέσματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλες προσεγγίσεις, όπως είναι η προσομοίωση Monte Carlo, η οποία συνίσταται από επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις με τυχαίους συνδυασμούς παραμέτρων (Harlin and Hung, 1992).

Συγκεκριμένα, οι Harlin and Hung, 1992, προσδιόρισαν την ευαισθησία του αποτελέσματος του μοντέλου σε κάθε παράμετρο διερευνώντας την πιθανότητα να οδηγηθούν σε ικανοποιητική προσομοίωση με μία συγκεκριμένη τιμή μιας παραμέτρου. Η προσομοίωση Monte Carlo έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την απάντηση του αντίστροφου ερωτήματος, δηλαδή πόσο μεγάλο είναι το διάστημα για κάθε παράμετρο στο οποίο υπάρχει πιθανότητα να λάβουμε ικανοποιητική προσομοίωση (Seibert, 1997).

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν περιορίζεται από τη συνθετότητα και τη μη γραμμικότητα του μοντέλου. Ωστόσο, πρέπει ο αριθμός των προσομοιώσεων να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση στον προσδιορισμό της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων του μοντέλου και τα αποτελέσματα να είναι στατιστικά αξιόπιστα. Η προσομοίωση Monte Carlo έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση ευαισθησίας από πολλούς ερευνητές (Gardner et al., 1980, Horberger and Spear, 1981, Kung, 1989, Hornberger et al., 1986, Harlin and Hung, 1992).

Πρόσφατα, οι Montanari and Koutsoyiannis, 2012, υποστήριξαν μία νέα ενοποιημένη προσέγγιση για την υδρολογική προσομοίωση και την εκτίμηση της αβεβαιότητας. Η εκτίμηση αβεβαιότητας του αποτελέσματος του μοντέλου επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό της κατανομής πιθανότητας μέσω προσομοίωσης, εφαρμόζοντας δηλαδή το μοντέλο όχι μόνο μία, αλλά περισσότερες φορές. Κάθε εφαρμογή του μοντέλου γίνεται με δεδομένα εισόδου και παραμέτρους που επιλέγονται στοχαστικά και το αποτέλεσμα προκύπτει ως

άθροισμα από τον πληθυσμό των τυχαίων σφαλμάτων του μοντέλου, των οποίων η κατανομή εξαρτάται από τα δεδομένα εισόδου και τις παραμέτρους του μοντέλου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί για την απαιτούμενη αριθμητική ολοκλήρωση μία διαδικασία προσομοίωσης Monte Carlo.

Στοχαστικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή τυχαίων συνθετικών βροχοπτώσεων. Οι Zarris et al., 1998, προτείνουν ένα απλό στοχαστικό μοντέλο επιμερισμού της βροχόπτωσης για εφαρμογή στο σχεδιασμό αστικών συστημάτων ομβρίων υδάτων, εναλλακτικά των μεθόδων συνεχούς προσομοίωσης και εφαρμογής καταίγιδας σχεδιασμού. Αυτό το μοντέλο έχει βασιστεί σε στοχαστική μέθοδο επιμερισμού που προτείνει ο Koutsoyiannis, 1994. Στη μέθοδο αυτή ως δεδομένα εισόδου εισάγονται η διάρκεια του επεισοδίου και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης που αντιστοιχούν σε μία συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Στη συνέχεια παράγονται διάφορα υετογράμματα με διαδοχικούς επιμερισμούς του συνολικού ύψους βροχόπτωσης σε στοιχειώδη ύψη βροχόπτωσης για κάθε χρονικό βήμα. Με χρήση υδρολογικού μοντέλου τα υετογράμματα διοδεύονται κι έτσι λαμβάνουμε ως αποτέλεσμα τη συνάρτηση κατανομής δεσμευμένης πιθανότητας της αιχμής στην έξοδο της υδραυλικής κατασκευής που μελετάται για δεδομένη διάρκεια και ύψος βροχόπτωσης. Η παροχή σχεδιασμού μπορεί να εξαχθεί από την κατανομή αυτή είτε ως η υποθετική τιμή που αναμένεται, είτε ως τιμή που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο επίπεδο πιθανότητας αστοχίας.

Αλλά και μέθοδοι προσομοίωσης Monte Carlo έχουν χρησιμοποιηθεί με τον ίδιο σκοπό. Οι Cameron et al., 1999, προτείνουν συνεχή προσομοίωση της απορροής για τον προσδιορισμό των πλημμυρικών μεγεθών με χρήση τεχνικών τυχαίας δειγματοληψίας Monte Carlo για την παραγωγή των βροχοπτώσεων. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη μέθοδος περιλαμβάνει την τυχαία επιλογή ενός αριθμού από την ομοιόμορφη κατανομή και στη συνέχεια γραμμική παρεμβολή στην αθροιστική στατιστική κατανομή που αντιστοιχεί στις παρατηρημένες διάρκειες με σκοπό τον προσδιορισμό της διάρκειας του επεισοδίου. Κατά αντιστοιχία επιλέγεται άλλη τιμή από την ομοιόμορφη κατανομή και εφαρμόζεται στην μέση αθροιστική κατανομή της έντασης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο εύρος διάρκειας. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται το συνολικό ύψος βροχής του περιστατικού. Στη συνέχεια επιλέγεται τυχαία ένα κανονικοποιημένο προφίλ βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στη διάρκεια του επεισοδίου με στόχο τον επιμερισμό του συνολικού ύψους βροχόπτωσης σε ωριαία βήματα. Τέλος, ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι το επόμενο περιστατικό βροχόπτωσης επιλέγεται με τον ίδιο τρόπο που επιλέγεται και η διάρκεια κάθε επεισοδίου (Cameron et al., 1999).

Η εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo για την παραγωγή συνθετικών βροχοπτώσεων που θα εισάγονται στο υδρολογικό μοντέλο έχει πολλά πλεονεκτήματα. Από τους Krajewski et al., 1991, τονίζεται ότι σε περιπτώσεις λεκανών με περιορισμένα δεδομένα βροχής και απορροής, αυτά χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου και δεν επαρκούν ως δεδομένα εισόδου στις προσομοιώσεις. Εάν χρησιμοποιηθεί ένας περιορισμένος αριθμός παρατηρημένων επεισοδίων βροχόπτωσης τότε η εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων είναι επισφαλής. Επίσης, είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo είναι στατιστικά έγκυρα εφόσον διενεργούνται πολλές προσομοιώσεις, ενώ η ανάλυση ευαισθησίας διευκολύνεται με εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo. Τέλος, η χρήση βροχοπτώσεων που έχουν προκύψει από προσομοίωση Monte Carlo δίνει τη δυνατότητα να προσομοιωθούν οι επιπτώσεις της αβεβαιότητας που προέρχεται από τα σφάλματα των μετρήσεων, κάτι που είναι αδύνατο όταν χρησιμοποιούνται πραγματικά δεδομένα (Krajewski et al., 1991).

Η προσομοίωση Monte Carlo έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό των αβεβαιοτήτων που είναι εγγενείς του φυσικού συστήματος και οφείλονται στην εγγενή μεταβλητότητα (στοχαστική ή aleatory) από αυτές που προέρχονται από την ελλιπή γνώση μας σχετικά με τις υδρολογικές διεργασίες (επιστημική ή epistemic). Οι Apel et al., 2004, εστιάζουν σε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που βασίζεται σε μία δι-διάστατη προσομοίωση Monte Carlo με τα δύο πιο πάνω επίπεδα αβεβαιότητας. Για το πρώτο επίπεδο αβεβαιότητας (aleatory) θεωρείται ότι διαθέτουμε τέλεια ποσοτικοποιημένη γνώση του συστήματος, για παράδειγμα με γνωστές κατανομές των παραμέτρων. Με αυτό τον τρόπο εξάγεται μία καμπύλη αβεβαιότητας για την περιοχή ενδιαφέροντος. Σχετικά με το δεύτερο επίπεδο αβεβαιότητας (επιστημικό) παρατηρείται ότι με αύξηση της γνώσης γύρω από το φυσικό υπόβαθρο, είναι εφικτό να μειωθεί το εύρος αβεβαιότητας. Πολλοί ερευνητές έχουν υποστηρίξει τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo για το διαχωρισμό της στοχαστικής από την επιστημική αβεβαιότητα (Hoffmann and Hammonds, 1994, Cohen et al., 1996, USEPA, 1997, Cullen and Frey, 1999) ενώ άλλοι διαφωνούν και υποστηρίζουν ότι η θεωρία πιθανοτήτων είναι ακατάλληλη για τη διαχείριση της επιστημικής αβεβαιότητας (Ferson and Ginzburg, 1996, Hall et al., 1998, Hall, 2003). Συγκεκριμένα ο Beven, 2001, υποστηρίζει ότι η διαστατικότητα των παραμέτρων και οι υπολογιστικοί χρόνοι που απαιτούνται καθιστούν την εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo σε αρκετά προβλήματα κατανεμημένης μοντελοποίησης προς το παρόν ανέφικτη.

Η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων όπως η προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιείται επίσης σε συνδυασμό με πολύπλοκα προσδιοριστικά μοντέλα για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, η οποία εκτός από την πλημμυρική αιχμή και τον πλημμυρικό όγκο πρέπει να συνοδεύεται και από την πιθανότητα εμφάνισης ώστε να προσδιοριστεί η οικονομική επίπτωση της πλημμύρας. Οι Apel et. al., 2006, εφάρμοσαν σύνθετα ντετερμινιστικά μοντέλα για την προσομοίωση των μετεωρολογικών, υδρολογικών, υδραυλικών γεωτεχνικών και κοινωνικοοικονομικών διαδικασιών. Αυτά τα μοντέλα συνδυάζονται με ένα απλό στατιστικό μοντέλο το οποίο είναι δομημένο σε επιμέρους τμήματα για κάθε διαδικασία, έτσι ώστε το προσδιοριστικό και το στατιστικό μοντέλο να είναι συμβατά σε όλα τα βήματα. Η απλότητα της στοχαστικής προσέγγισης προσδίδει ευελιξία στην προσομοίωση Monte Carlo κι έτσι είναι εφικτή η εξαγωγή πιθανοτικού αποτελέσματος για τον πλημμυρικό κίνδυνο.

Είναι, λοιπόν σαφές ότι η προσομοίωση Monte Carlo έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως τις τελευταίες τουλάχιστον τρεις δεκαετίες σε εφαρμογές για την υδρολογική προσομοίωση και την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε πολλές περιοχές κυρίως της ευρωπαϊκής ηπείρου, αλλά και σε λεκάνες της βόρειας Αμερικής (ενδεικτικά: Vogel et. al., 2001). Ωστόσο, η εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη μέχρι τώρα σε μεσογειακές λεκάνες με εξαίρεση κυρίως την Ιταλία. Και εκεί, ωστόσο, η μέθοδος είτε έχει εφαρμοστεί στα κεντροβόρεια της χώρας όπου το κλίμα διαφέρει από το τυπικό μεσογειακό (Castellarin et. al., 2001), είτε έχει εφαρμοστεί μόνο περιορισμένα σε συνδυασμό με τη μέθοδο SCS-CN (Aronica and Candela, 2007). Στις υπόλοιπες μεσογειακές χώρες η μέθοδος έχει τύχει πολύ περιορισμένων εφαρμογών.

Φιλοδοξούμε με αυτή την εργασία να αναπληρώσουμε σε κάποιο βαθμό αυτό το κενό εφαρμόζοντας την προσομοίωση Monte Carlo σε συνδυασμό με απλά υδρολογικά μοντέλα που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στην καθημερινή πράξη από τους μηχανικούς. Δεδομένης της περιορισμένης εφαρμογής της προσομοίωσης Monte Carlo και της συνθετότητας που χαρακτηρίζει τις κλιματικές συνθήκες και το γεωλογικό υπόβαθρο στις μεσογειακές λεκάνες επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η μέθοδος σε δύο αντιπροσωπευτικές μεσογειακές λεκάνες μικρής έκτασης στην Κύπρο.

## **Κεφάλαιο 3 Γενικά στοιχεία για την Κύπρο**

### **3.1 Οι φυσικές περιοχές του νησιού**

Η Κύπρος έχει έκταση 9 254 km<sup>2</sup> και χωρίζεται σε τέσσερις φυσικές περιοχές (Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου):

(α) Την οροσειρά του Τροόδους, που βρίσκεται στο κεντρικό-δυτικό μέρος του νησιού και η ψηλότερη βουνοκορφή της, ο Όλυμπος, έχει ύψος 1951 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

(β) Την οροσειρά του Πενταδακτύλου, που έχει σχετικά μικρό πλάτος και εκτείνεται κατά μήκος των βόρειων ακτών του νησιού με κορυφές μέχρι 1000 m περίπου,

(γ) Την πεδιάδα της Μεσαορίας, που βρίσκεται μεταξύ των οροσειρών του Τροόδους και του Πενταδακτύλου και έχει γενικά χαμηλό υψόμετρο, το οποίο στην περιοχή της Λευκωσίας δεν ξεπερνά τα 180 m, και

(δ) Τις παράλιες πεδιάδες και κοιλάδες κατά μήκος των ακτών.

### **3.2 Γεωλογικοί σχηματισμοί**

Η Κύπρος διακρίνεται γεωλογικά σε τέσσερις ζώνες σύμφωνα με το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου (Εικόνα 3.1):

(α) την Ακολουθία Κερύνειας

(β) τον Οφιόλιθο Τροόδους

(γ) το Σύμπλεγμα Μαμωνίων και

(δ) την Ιζηματογενή Ακολουθία Τροόδους.



**Εικόνα 3.1** Οι γεωλογικές ζώνες της Κύπρου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικότερα η ζώνη του Οφιολίθου του Τροόδους, στην οποία ανήκουν οι δύο λεκάνες που εξετάζονται παρακάτω.

Ο Οφιόλιθος Τροόδους, δεσπόζει του κεντρικού τμήματος του νησιού και αποτελεί το γεωλογικό πυρήνα της Κύπρου. Εμφανίζεται βασικά σε δύο περιοχές, στην κύρια μάζα της οροσειράς Τροόδους και στην περιοχή του Δάσου Λεμεσού και Ακαπνούς στα νότια της οροσειράς με χαρακτηριστικό επίμηκες και θολωτό σχήμα. Μικρότερες εμφανίσεις του υπάρχουν επίσης στην χερσόνησο του Ακάμα και στην περιοχή του χωριού Τρούλλοι. Δημιουργήθηκε κατά το Ανώτερο Κρητιδικό (90 εκ. χρόνια) στο βυθό της Τηθύος θάλασσας, που τότε εκτεινόταν από τα σημερινά Πυρηναία (μέσω των Άλπεων) μέχρι τα Ιμαλάια. Θεωρείται ως ο πιο πλήρης και καλά μελετημένος οφιόλιθος στον κόσμο. Πρόκειται για κομμάτι του ωκεάνιου φλοιού, πλήρως αναπτυγμένου με σειρά από πλουτώνια, φλεβικά, ηφαιστειακά πετρώματα και χημικά ιζήματα, γεγονός που συνιστά και τη μοναδικότητά του. Δημιουργήθηκε κατά την πολύπλοκη διαδικασία της διεύρυνσης των ωκεανών και της δημιουργίας του ωκεάνιου φλοιού και στη συνέχεια αναδύθηκε και τοποθετήθηκε στη σημερινή του θέση μέσα από πολυσύνθετες τεκτονικές διεργασίες, που καθορίζονταν από τις δύο συγκλίνουσες λιθοσφαιρικές πλάκες: της Ευρασιατικής στο βορρά και της Αφρικανικής στο νότο. Η στρωματογραφία του παρουσιάζει τοπογραφική αναστροφή, δηλ. τα στρωματογραφικά κατώτερα πετρώματα εμφανίζονται στην κορυφή του, ενώ τα στρωματογραφικά ανώτερα στις παρυφές του. Αυτή η φαινόμενη αναστροφή οφείλεται στον τρόπο ανύψωσης του (δημιουργία δόμου) αλλά και στη διαφορετική του διάβρωση. Η ανοδική



διαπειρική πορεία του πυρήνα του Τροόδους έγινε διαχρονικά κυρίως όμως με επεισόδια απότομης ανύψωσης κατά το Πλειστόκαινο (2 εκ. χρόνια). Η στρωματογραφική σειρά του Οφιολίθου Τροόδους αποτελείται, ακολουθώντας τη σειρά από τα στρωματογραφικά κατώτερα προς τα ανώτερα, από τα εξής πετρώματα: Πλουτώνια (ακολουθία μανδύα, σωρευτικά), φλεβικά, ηφαιστειακά και χημικά ιζήματα.

### **3.3 Κλιματικά δεδομένα<sup>1</sup>**

Η Κύπρος βρίσκεται κατά μέσο όρο σε βόρειο γεωγραφικό πλάτος 35° και ανατολικό γεωγραφικό μήκος 33° και περιβάλλεται από την ανατολική Μεσόγειο θάλασσα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του μεσογειακού κλίματος της Κύπρου είναι το ζεστό και ξηρό καλοκαίρι από τα μέσα Μαΐου ως τα μέσα Σεπτεμβρίου, ο βροχερός αλλά ήπιος χειμώνας από τα μέσα Νοεμβρίου ως τα μέσα Μαρτίου και οι δύο ενδιάμεσες μεταβατικές εποχές, το φθινόπωρο και η άνοιξη. Η μέση ετήσια βροχόπτωση πάνω από ολόκληρη την Κύπρο είναι περίπου 480 mm (μέση τιμή για την περίοδο 1951-1980). Από τα στοιχεία που υπάρχουν η πιο χαμηλή ετήσια βροχόπτωση στην Κύπρο ήταν 182 mm κατά το υδρομετεωρολογικό έτος Οκτώβριος 1972 - Σεπτέμβριος 1973 και η πιο ψηλή 759 mm το 1968-69.

Στη διάρκεια του καλοκαιριού η Κύπρος και γενικά η περιοχή της ανατολικής Μεσογείου βρίσκεται κάτω από την επίδραση του εποχιακού βαρομετρικού χαμηλού, που έχει το κέντρο του στη νοτιοδυτική Ασία. Αποτέλεσμα της επίδρασης αυτής είναι οι ψηλές θερμοκρασίες και ο καθαρός ουρανός. Η βροχόπτωση είναι πολύ χαμηλή με μέση τιμή που δεν ξεπερνά το 5% της μέσης ολικής ετήσιας βροχόπτωσης, ενώ τα φαινόμενα έχουν συνήθως τοπικό χαρακτήρα και πέφτουν στις ορεινές περιοχές και στην κεντρική πεδιάδα κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες.

Στη διάρκεια του χειμώνα η Κύπρος επηρεάζεται από το συχνό πέρασμα μικρών υφέσεων και μετώπων που κινούνται στη Μεσόγειο με κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Οι καιρικές αυτές διαταραχές διαρκούν συνήθως από μια μέχρι τρεις μέρες κάθε φορά και δίνουν τις μεγαλύτερες ποσότητες βροχής. Η συνολική μέση βροχόπτωση στους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο αντιστοιχεί περίπου με το 60% της βροχόπτωσης του χρόνου ολόκληρου.

---

<sup>1</sup> Τα κλιματικά δεδομένα έχουν ληφθεί από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου με προσαρμογή.

Η επίδραση του αναγλύφου της ξηράς πάνω στην κατανομή της βροχόπτωσης είναι σημαντική. Συγκεκριμένα, η οροσειρά του Τροόδους και σε μικρότερο βαθμό η οροσειρά του Πενταδακτύλου παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των μετεωρολογικών συνθηκών στις διάφορες περιοχές της Κύπρου και στη δημιουργία τοπικών φαινομένων. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στις νοτιοδυτικές προσήνεμες περιοχές της οροσειράς του Τροόδους αυξάνεται από 450 mm περίπου στους πρόποδες σε 1100 mm στην κορυφή του Ολύμπου. Στις υπήνεμες πλαγιές η βροχόπτωση ελαττώνεται σταθερά κατεβαίνοντας προς τα βόρεια και τα ανατολικά με τιμές 300-350 mm στην κεντρική πεδιάδα και τις πεδινές νοτιοανατολικές περιοχές. Η οροσειρά του Πενταδακτύλου στο βόρειο τμήμα του νησιού προκαλεί σχετικά μικρή αύξηση στη βροχόπτωση που φτάνει στα 550 mm στις κορυφογραμμές της. Η παρουσία επίσης της θάλασσας που περιβάλλει το νησί είναι αιτία δημιουργίας τοπικών φαινομένων στις παράλιες περιοχές.

Χιονοπτώσεις παρατηρούνται σπάνια στις πεδινές περιοχές και στην οροσειρά του Πενταδακτύλου, σημειώνονται όμως συχνά κάθε χειμώνα σε περιοχές της οροσειράς του Τροόδους με υψόμετρο πάνω από 1000 m. Κατά μέσο όρο η πρώτη χιονόπτωση παρατηρείται μέσα στην πρώτη βδομάδα του Δεκέμβρη και η τελευταία γύρω στα μέσα του Απριλίου. Το χιόνι δεν καλύπτει μόνιμα το έδαφος σε όλη τη διάρκεια του χειμώνα, για αρκετές όμως βδομάδες τους πιο ψυχρούς μήνες του χρόνου το ύψος του χιονιού είναι σημαντικό κυρίως στις βόρειες πλαγιές του Τροόδους. Μετά την τελευταία χιονόπτωση το χιόνι μπορεί να εξακολουθήσει να καλύπτει το έδαφος στις επόμενες 10-15 ημέρες.

Χαλάζι πέφτει κατά μέσο όρο δύο ως τρεις φορές το χρόνο στις πεδινές περιοχές και μέχρι 10 φορές το χρόνο στις ορεινές περιοχές, συνήθως μεταξύ Νοεμβρίου και Μαΐου. Η πιο πιθανή περίοδος για να συμβεί σοβαρή χαλαζόπτωση είναι από το Δεκέμβριο μέχρι τον Απρίλιο, το χαλάζι όμως που πέφτει νωρίς το καλοκαίρι και το φθινόπωρο είναι πιο επικίνδυνο γιατί προκαλεί σοβαρές ζημιές στα φρούτα και σε άλλες καλλιέργειες.

Οι καταιγίδες είναι σπάνιες από τον Ιούνιο μέχρι το Σεπτέμβριο, συμβαίνουν όμως κατά μέσο όρο σε τέσσερις μέχρι πέντε ημέρες κάθε μήνα από τον Οκτώβριο μέχρι τον Ιανουάριο και σε δύο μέχρι τρεις ημέρες κάθε μήνα από το Φεβρουάριο μέχρι το Μάιο.

Η Κύπρος έχει ζεστό καλοκαίρι και ήπιο χειμώνα, όμως η γενική αυτή κατάσταση διαφοροποιείται από τόπο σε τόπο από δύο παράγοντες, (α) το ανάγλυφο που ελαττώνει τη θερμοκρασία κατά 5°C περίπου κάθε 1000 m ύψος και (β) την επίδραση της θάλασσας που έχει σαν αποτέλεσμα πιο δροσερό καλοκαίρι και σχετικά πιο ήπιο χειμώνα στις παράλιες

περιοχές και ειδικότερα στις δυτικές. Το ετήσιο εύρος της θερμοκρασίας του αέρα είναι αρκετά μεγάλο και κυμαίνεται γύρω στους 18°C στις εσωτερικές περιοχές και γύρω στους 14°C στα παράλια. Οι διαφορές μεταξύ της ψηλότερης θερμοκρασίας ημέρας και της χαμηλότερης θερμοκρασίας νύχτας είναι επίσης μεγάλες κυρίως στις εσωτερικές περιοχές το καλοκαίρι. Το χειμώνα οι διαφορές αυτές είναι 8-10°C στις πεδινές περιοχές και 5-6°C στις ορεινές, ενώ το καλοκαίρι αυτές αυξάνονται σε 16°C στην κεντρική πεδιάδα και σε 9-12°C στις άλλες περιοχές. Τον Ιούλιο και Αύγουστο οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 29°C στην κεντρική πεδιάδα και 22°C στις ψηλότερες κορυφές του Τροόδου, ενώ οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες στους μήνες αυτούς είναι 36 και 27°C αντίστοιχα. Τον Ιανουάριο οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες είναι 10°C στην κεντρική πεδιάδα και 3°C στις ψηλότερες κορυφές του Τροόδου, με μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες 5 και 0°C αντίστοιχα. Παγετός συμβαίνει συχνά το χειμώνα και την άνοιξη.

### **3.4 Πλημμύρες στην Κύπρο**

Μεγάλα έργα έχουν κατασκευαστεί τις τελευταίες δεκαετίες στην Κύπρο για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας. Ωστόσο, σημαντικό πρόβλημα για το νησί αποτελούν και οι πλημμύρες, καθώς θρηνούνται ακόμη και ανθρώπινα θύματα, όπως συνέβη στις 30/10/2006, όταν δύο άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους στα ορμητικά νερά (Γαλιούνα, 2011). Οι πλημμύρες που σημειώνονται στην Κύπρο είναι συνήθως τοπικού και στιγμιαίου χαρακτήρα (flash floods) και πιο ευπαθείς είναι οι αστικές περιοχές, ωστόσο πλημμύρες σημειώνονται και σε αγροτικές περιοχές με μικρές κλίσεις. Στον παρακάτω Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα πλημμυρικά επεισόδια της περιόδου 1971-1994 (Νικολαΐδου κ.ά., 1995)

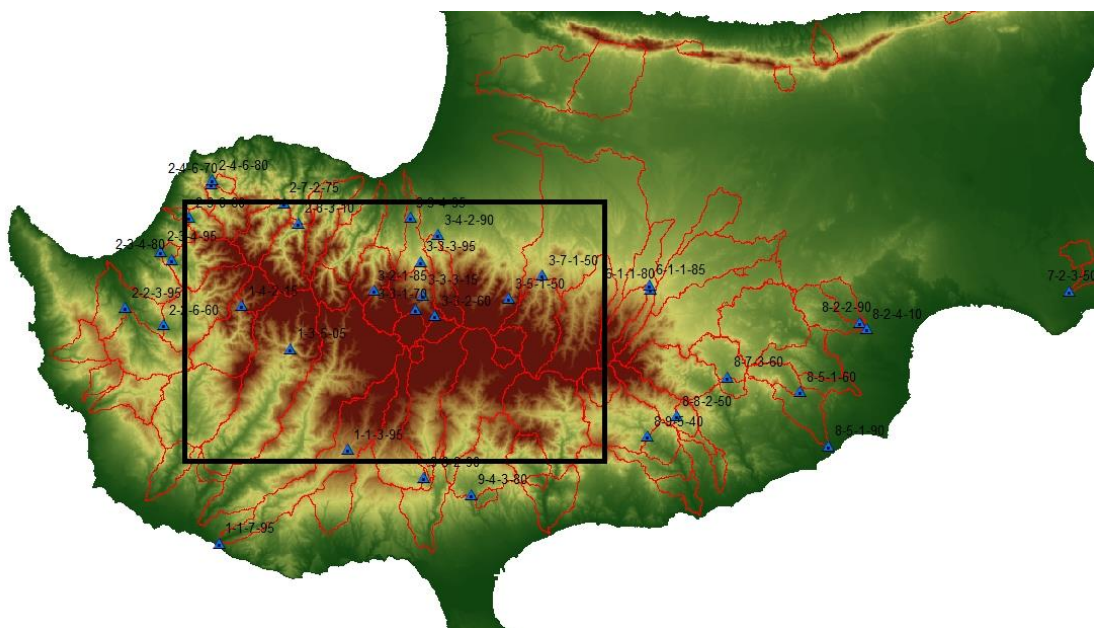
**Πίνακας 3.1** Τα κυριότερα πλημμυρικά επεισόδια της περιόδου 1971-1994 στο νησί της Κύπρου (Πηγή: Νικολαΐδου κ.ά., 1995).

Ημερομηνία	Περιοχή	Ημερομηνία	Περιοχή
5/8/1971	Λευκωσία	29/1/1981	Λεμεσός, Λάρνακα
7/2/1973	Αμμόχωστος	25/3/1981	Παλιομέτοχο
7-11/6/1973	Αμμόχωστος	16/6/1981	Δυτικά χωριά Λάρνακας
8-11/10/1973	Αμμόχωστος	27-28/11/1981	Αμμόχωστος, Λάρνακα
30-31/10/1973	Αμμόχωστος	15/2/1988	Κοκκινοχώρια
23/9/1975	Λευκωσία	1/12/1991	Λάρνακα, Κοκκινοχώρια
8/12/1977	Λάρνακα	16/6/1992	Λευκωσία
11/12/1978	Λάρνακα	3/11/1994	Λευκωσία, Λεμεσός
7/2/1979	Λευκωσία	21/11/1994	Λευκωσία, Λεμεσός, Λάρνακα
2-4/10/1979	Λευκωσία		

Από τα πιο πάνω περιστατικά, στην παρούσα εργασία περιλαμβάνεται η επεξεργασία βροχομετρικών και υδρομετρικών στοιχείων για τις περιόδους 8-11/2/1979 στον ποταμό Περιστερώνα και 19-28/11/1994 και στις δύο λεκάνες. Αξίζει να αναφερθεί ότι η ισχυρή νεροποντή της 21<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1994 έπληξε ιδιαίτερα τους δήμους Λατσίων, Λακατάμειας, Στροβόλου, Ανθουπόλεως, Μακεδονίτισσας (Λευκωσία), Τσερίου (Λεμεσός), όπως και την πόλη της Λάρνακας με ύψη βροχής που ξεπέρασαν τοπικά τα 100 mm. Πλημμύρισαν σπίτια, υποστατικά, δρόμοι, ξεριζώθηκαν δένδρα, ενώ σε αρκετά σημεία διακόπηκε η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Στη Λεμεσό πλημμύρισε η παραλιακή λεωφόρος, ενώ στη Λευκωσία από τον κόμβο Ανθουπόλεως μέχρι τη Μακεδονίτισσα το ύψος του νερού ανήλθε στα 50 cm (Νικολαΐδου κ.ά., 1995).

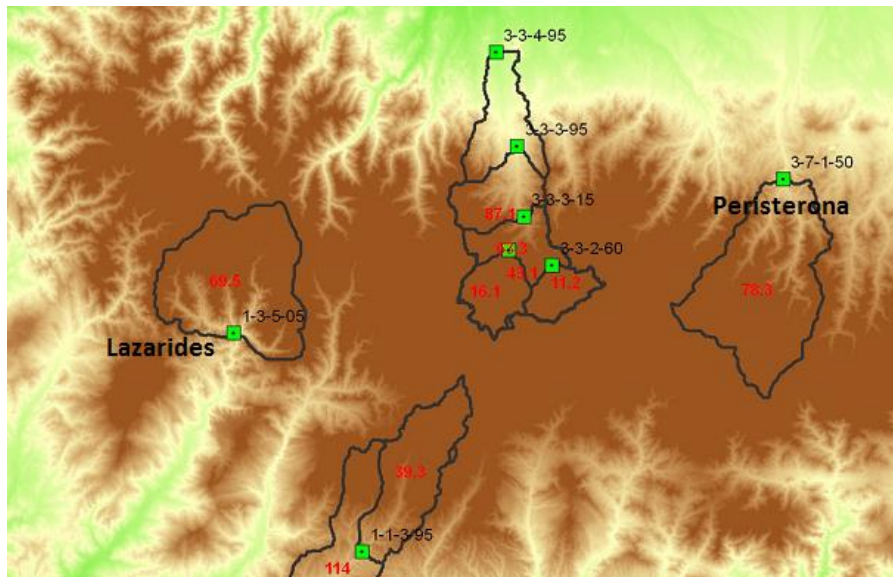
## Κεφάλαιο 4: Οι υπό μελέτη υδρολογικές λεκάνες

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύθηκαν περιστατικά βροχής-απορροής σε δύο υδρολογικές λεκάνες της ευρύτερης περιοχής του όρους Τροόδου. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι λεκάνες απορροής των ποταμών Περιστερώνα και Ξερού (Ασπρόκρεμμου) ανάντη των θέσεων Γεφύρι Παναγιάς και Αλωνούδι αντίστοιχα. Τα στοιχεία ελήφθησαν από το Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων Κύπρου, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία του δικτύου υδρομετρικών σταθμών που παρουσιάζεται στις Εικόνες 4.1 και 4.2.



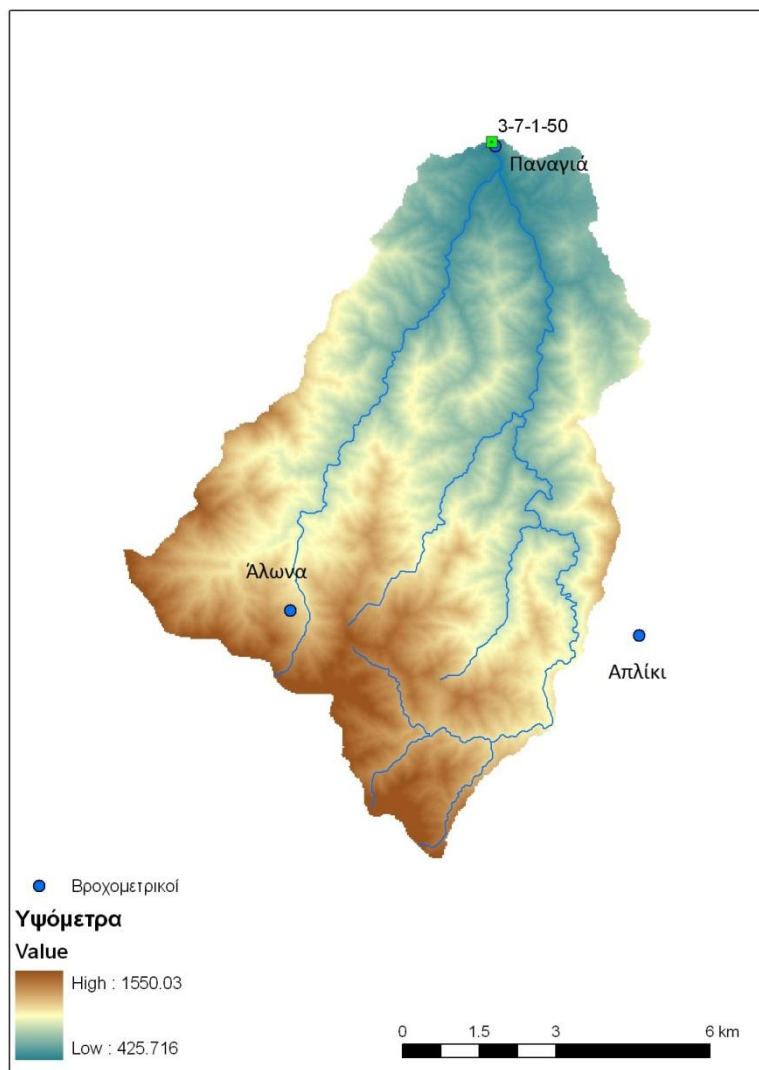
**Εικόνα 4.1** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ευρύτερης περιοχής του Τροόδου από το Τμήμα Κτηματολογίου και Χωροταξίας με σημειωμένες τις λεκάνες απορροής και τους σταθμούς μέτρησης παροχής<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Τα γεωγραφικά δεδομένα του παρόντος κεφαλαίου προέρχονται από τη διπλωματική εργασία με τίτλο «Διερεύνηση εμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση των πλημμυρικών αιχμών στην Κύπρο» (Γαλιούνα, 2011), ενώ η επεξεργασία των χαρτών έγινε στα πλαίσια του έργου Δευκαλίων (πληροφορίες στην ιστοσελίδα: <http://deucalionproject.gr/>).

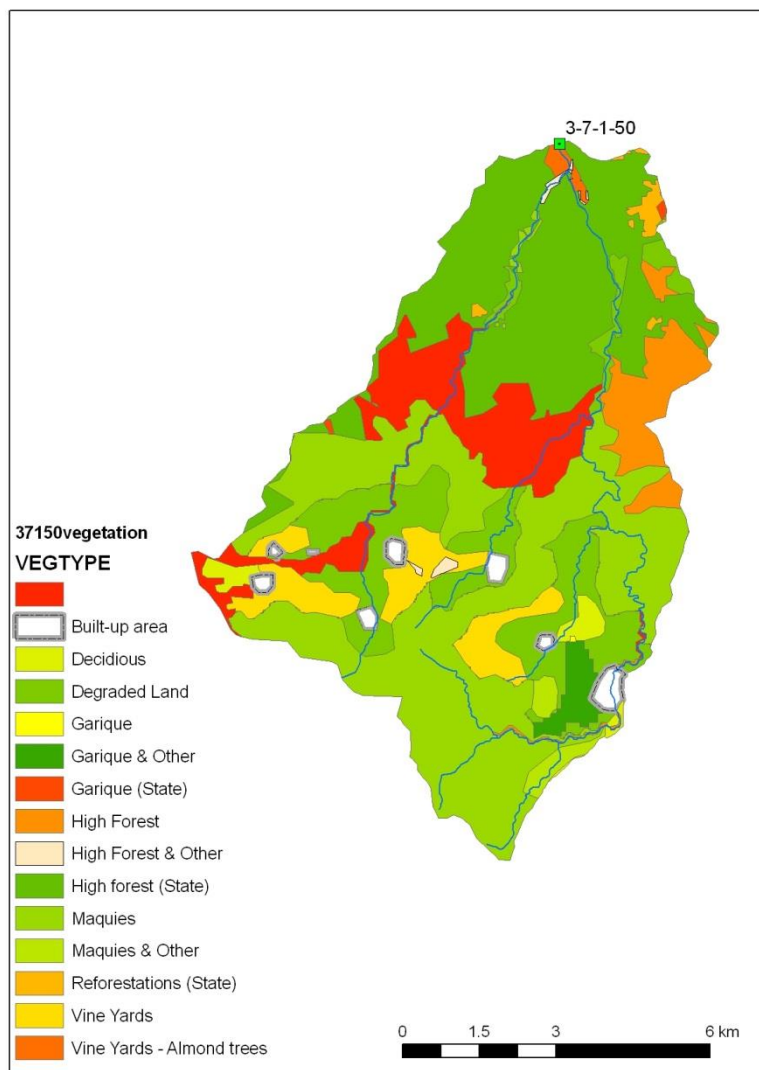


**Εικόνα 4.2** Η περιοχή του Τρόδους που σημειώνεται με μαύρο πλαίσιο στην Εικόνα 4.1 και περιλαμβάνει τις δύο υπό μελέτη υδρολογικές λεκάνες. Οι δύο υδρομετρικοί σταθμοί από τους οποίους ελήφθησαν δεδομένα απορροής είναι ο σταθμός στη θέση Λαζάρηδες (ή Αλωνούδι) με κωδικό 1-3-5-05 και ο σταθμός στη θέση Γεφύρι Παναγιάς με κωδικό 3-7-1-50.

Ο ποταμός Περιστερώνας είναι από τους κύριους παραπόταμους του Σερράχη ποταμού, ο οποίος με μήκος 55 km είναι ο τρίτος μεγαλύτερος σε μήκος ποταμός του νησιού. Ο υδρομετρικός σταθμός από τον οποίο ελήφθησαν τα δεδομένα απορροής βρίσκεται στο γεφύρι της Παναγιάς σε υψόμετρο 430 m περίπου. Το μέγιστο υψόμετρο στη λεκάνη απορροής είναι στην κορυφή Παπούτσα στα 1554 m, στην κορυφογραμμή του όρους Τρόδος, ανατολικά της κορυφής Όλυμπος. Η έκταση της λεκάνης είναι 77 km<sup>2</sup>, το σχήμα της είναι περίπου τριγωνικό και κάπως επίμηκες και ο προσανατολισμός είναι βόρειος. Όσον αφορά τη γεωλογία της περιοχής κυριαρχεί ο διαβάσης και ο βασάλτης ενώ στα μεγαλύτερα υψόμετρα συναντώνται εμφανίσεις γάβρου, παλαιογρανίτη και βερλίτη. Οι πιο ορεινές περιοχές της λεκάνης καλύπτονται από λίγα δάση και κυρίως μακία βλάστηση, ενώ στα χαμηλότερα υψόμετρα κυριαρχούν οι φρυγανότοποι. Γύρω από τα χωριά υπάρχουν καλλιεργημένες εκτάσεις με αμπέλια και αμυγδαλιές κυρίως. Στις Εικόνες 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται ο τοπογραφικός χάρτης και ο χάρτης χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Περιστερώνας, ενώ η Εικόνα 4.5 παρουσιάζει την πανοραμική άποψη του υδρομετρικού σταθμού.



**Εικόνα 4.3** Η λεκάνη απορροής του ποταμού Περιστερώνα με τους τρεις βροχομετρικούς και τον υδρομετρικό σταθμό.



**Εικόνα 4.4** Η βλάστηση στη λεκάνη απορροής του ποταμού Περιστερώνα

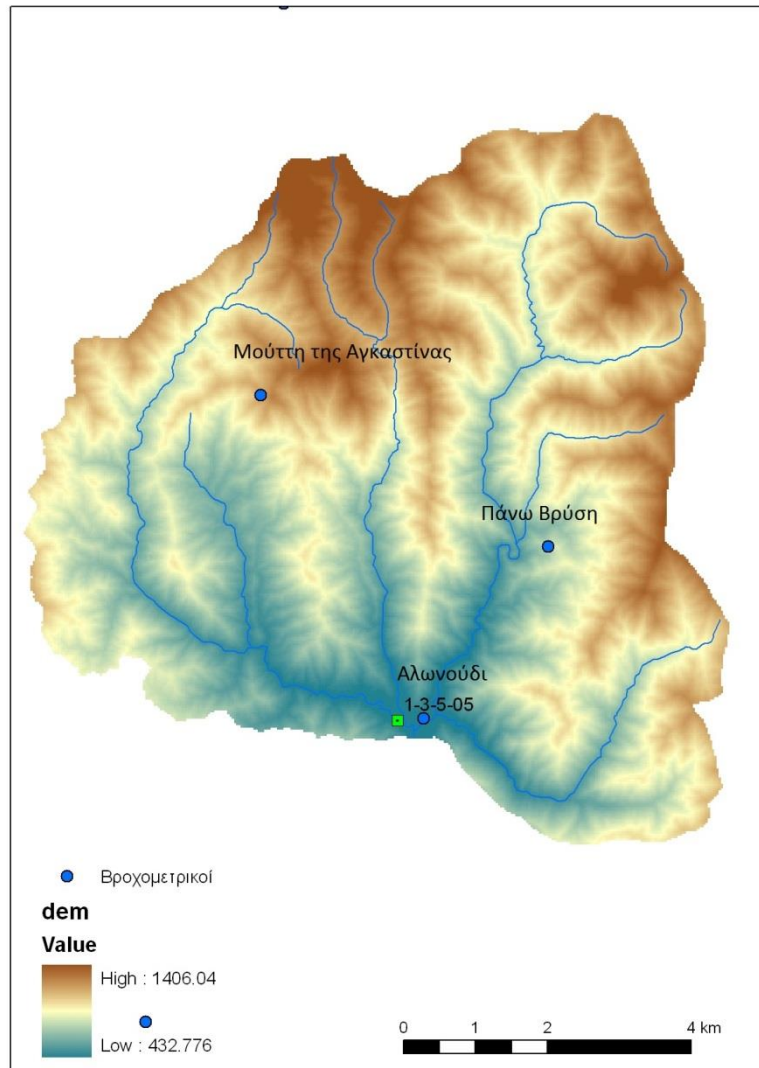




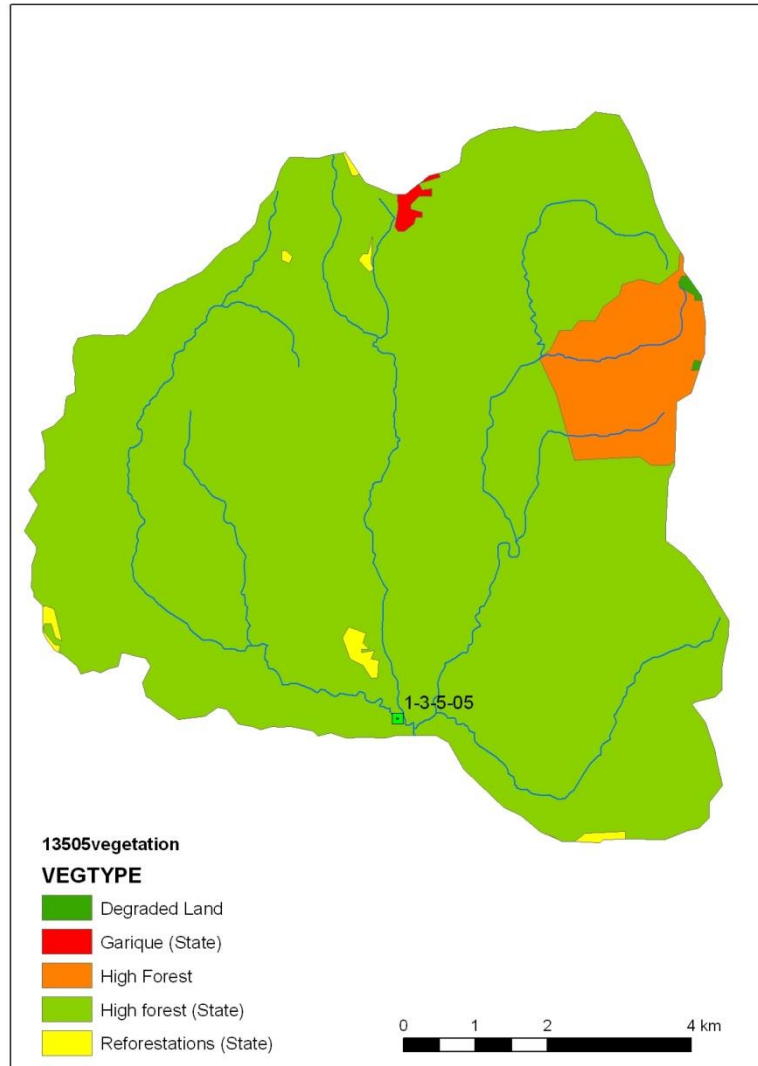
**Εικόνα 4.5** Πανοραμική άποψη του υδρομετρικού σταθμού στη θέση Γεφύρι Παναγιάς

Ο Ξερός ποταμός ή Ασπρόκρεμμος είναι ο 5<sup>ος</sup> σε μήκος ποταμός της Κύπρου. Πηγάζει από το όρος Τρόδος δυτικά-βορειοδυτικά της κορυφής του Ολύμπου και μέρος της λεκάνης του αποτελεί τη γνωστή κοιλάδα των κέδρων που καλύπτεται από δάση μεγάλης οικολογικής σπουδαιότητας με σπάνια και ενδημικά είδη χλωρίδας. Ο υδρομετρικός σταθμός βρίσκεται σε υψόμετρο 430 m περίπου σε γέφυρα στην τοποθεσία Αλωνούδι της περιοχής Λαζάρηδες, ακριβώς κατάντη της συμβολής των τεσσάρων υδατορρευμάτων που δημιουργούν τον Ξερό ποταμό (από δυτικά προς ανατολικά: Αργάκι των Γεφυρκών, Αργάκι τους Αθανάσηδες, Αργάκι του Σκούλουδρου και Αργάκι τους Λαζάρηδες). Από εκεί ο ποταμός ρέει προς τα νοτιοδυτικά, ενώ τα νερά του συλλέγονται σε ταμιευτήρα χωρητικότητας  $52 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (Εικόνα 4.9). Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί δύο φορές υπερχειλίση του φράγματος, το 2004 και το 2012 (κοινοτικό συμβούλιο Αναρίτας, <http://www.anarita.org/gr/dam-lgr/>). Ολόκληρη η λεκάνη ανάντη του υδρομετρικού σταθμού, με συνολική έκταση  $68.5 \text{ km}^2$ , καλύπτεται από δάση κωνοφόρων με κυρίαρχα είδη τα *Pinus brutia* (τραχεία πεύκη) και την ενδημική βελανιδιά *Quercus alnifolia* στον υπόροφο, ενώ στην κορυφή του Τριπύλου βρίσκεται το μοναδικό δάσος του ενδημικού κυπριακού κέδρου *Cedrus brevifolia*, συστάδες του οποίου

συναντώνται και χαμηλότερα (Πρόγραμμα LIFE+ 08, Κοιλάδα των κέδρων – Κάμπος). Στις Εικόνες 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται ο τοπογραφικός χάρτης και ο χάρτης χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του Ξερού ποταμού, ενώ στην Εικόνα 4.8 φαίνεται ο υδρομετρικός σταθμός στη θέση Αλωνούδι.

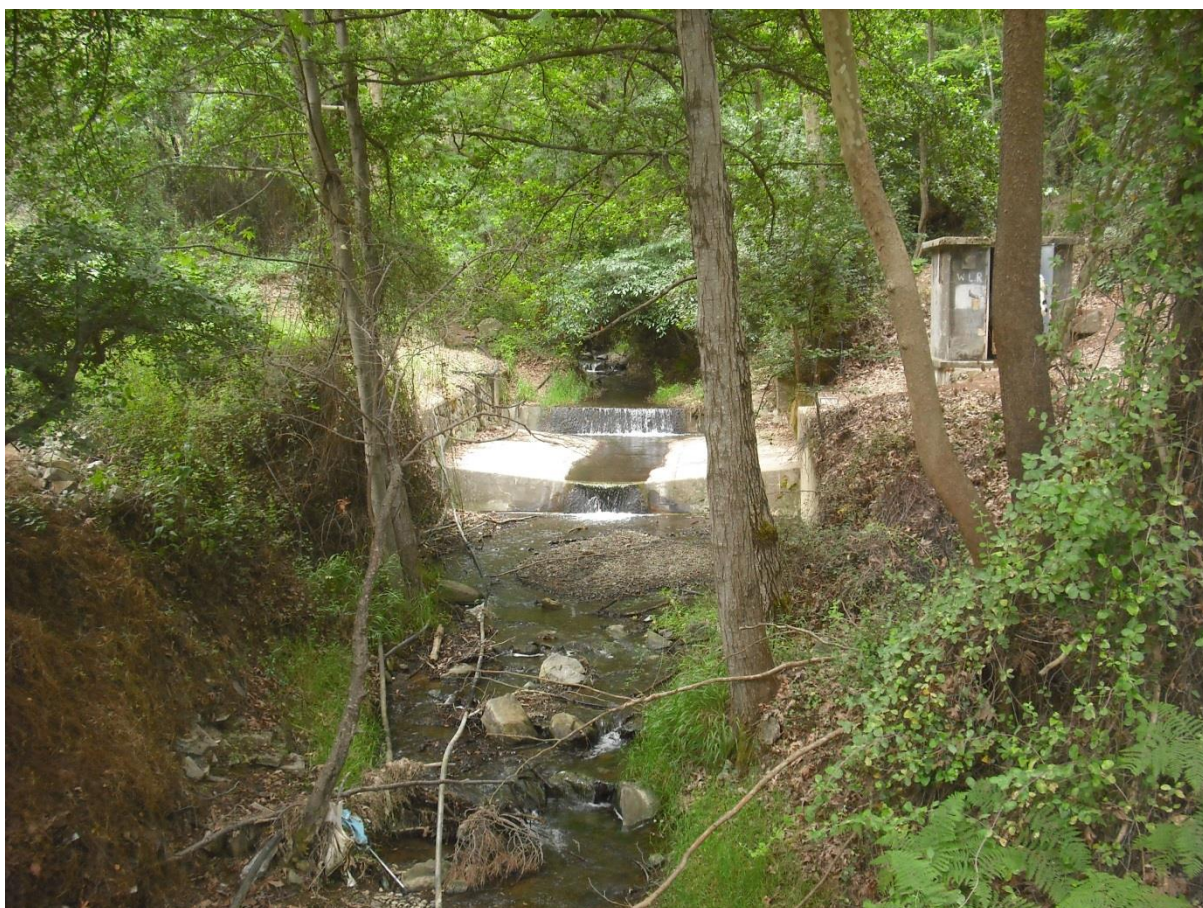


**Εικόνα 4.6** Η λεκάνη του Ξερού ποταμού με τους τρεις βροχομετρικούς και τον υδρομετρικό σταθμό.



**Εικόνα 4.7** Η βλάστηση στη λεκάνη απορροής του Ξερού ποταμού. Η έκταση καλύπτεται σχεδόν αποκλειστικά από υψηλό δάσος.





**Εικόνα 4.8** Άποψη του υδρομετρικού σταθμού στο Αλωνούδι.



**Εικόνα 4.9** Το φράγμα Ασπρόκρεμμου με τον ανάντη ταμιευτήρα, ο οποίος με χωρητικότητα  $52 \cdot 10^6$  κατέχει τη δεύτερη θέση μεταξύ των ταμιευτήρων σε ολόκληρη την Κύπρο (Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων Κύπρου) (Πηγή: <http://www.jandpcy.com/el/Asprokremmos-Dam-gr>).



## Κεφάλαιο 5: Συλλογή και επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων

### 5.1 Συλλογή και επεξεργασία υδρομετρικών δεδομένων

Στην Κύπρο έχει εγκατασταθεί ένα δίκτυο 124 σταθμών μέτρησης παροχής με ρειθρόμετρα. Για τους σταθμούς αυτούς το Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων της Κύπρου (ΤΑΥ) διατηρεί σε ταινίες καταγραφής το σύνολο των παροχομετρήσεων. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν οι σταθμοί στη γέφυρα Παναγιάς και στη θέση Αλωνούδι (Λαζάρηδες) για τους οποίους υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία για μια σειρά πλημμυρικών επεισοδίων από τον Ιανουάριο του 1977 ως το Φεβρουάριο του 2007. Η επιλογή των σταθμών έγινε με τα εξής κριτήρια:

- I. Μη αστικοποιημένη λεκάνη: η λεκάνη απαιτείται να είναι στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό ανεπηρέαστη από ανθρώπινες επεμβάσεις, απαίτηση που καλύπτεται και στις δύο λεκάνες και ιδιαίτερα στη λεκάνη του Ξερού ποταμού, όπου όλη η έκταση ανάντη του σταθμού μέτρησης παροχής καλύπτεται από φυσική βλάστηση (κοιλιάδα των κέδρων).
- II. Απουσία ταμιευτήρα φράγματος ανάντη του σταθμού μέτρησης παροχής: η παρουσία ενός ταμιευτήρα προκαλεί ανασχεση της πλημμυρικής αιχμής και αλλοιώνει τη μορφή του πλημμυρογραφήματος. Άλλωστε, η ροή κατάντη του φράγματος είναι συνήθως ελεγχόμενη.
- III. Ταυτόχρονη διαθεσιμότητα μετρήσεων βροχής και απορροής: η εύρεση αξιόπιστων βροχομετρικών στοιχείων σε περισσότερους από έναν βροχομετρικούς σταθμούς στη λεκάνη είναι απαραίτητη για την εφαρμογή της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

Τα πρωτογενή υδρομετρικά δεδομένα ήταν διαθέσιμα με τυχαίο χρονικό βήμα σε φύλλα excel, τα οποία καταρτίστηκαν στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου Δευκαλίων. Το ερευνητικό έργο Δευκαλίων έχει τίτλο «Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής αβεβαιότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού – πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων» και αποσκοπεί στην ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένων μεθοδολογιών μοντελοποίησης και πρόγνωσης ισχυρών καταιγίδων και των επαγόμενων πλημμυρικών φαινομένων, προσαρμοσμένων στις ιδιαιτερότητες των ελληνικών υδροκλιματικών συνθηκών (περισσότερες πληροφορίες στην ιστοσελίδα <http://deucalionproject.gr/>).



Κατά την επεξεργασία των πρωτογενών υδρομετρικών δεδομένων έγινε κανονικοποίηση του χρονικού βήματος σε βήμα 15 λεπτών με γραμμική παρεμβολή και διορθώθηκαν τα χονδροειδή σφάλματα που εντοπίστηκαν.

## **5.2 Συλλογή και επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων**

Τα βροχομετρικά δεδομένα για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα προέρχονται από τρεις βροχομετρικούς σταθμούς: το σταθμό στα Αλώνια (Αλωνα) στα νοτιοδυτικά της λεκάνης, το σταθμό στο Απλίκι που βρίσκεται λίγο έξω από τα όρια της λεκάνης στα ανατολικά και το σταθμό Παναγιά στη θέση του υδρομετρικού σταθμού με ποσοστά Thiessen 0.45, 0.24 και 0.31 αντίστοιχα. Τα δεδομένα των σταθμών στα Αλωνα και στο Απλίκι ήταν διαθέσιμα σε φύλλα excel, ενώ τα δεδομένα από το σταθμό στη γέφυρα Παναγιάς ήταν διαθέσιμα σε αρχεία jpg, όπως είχαν σκαναριστεί από την καταγραφική ταινία. Για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού τα βροχομετρικά δεδομένα προέρχονται από τους σταθμούς Μούττη της Αγκαστίνας στα βορειοδυτικά της λεκάνης, Πάνω Βρύση (στα ανατολικά, στο δρόμο που οδηγεί από το Αλωνούδι προς τη μονή Κύκκου) και στο Αλωνούδι στην έξοδο της λεκάνης με ποσοστά Thiessen 0.38, 0.18 και 0.44 αντίστοιχα. Τα βροχομετρικά δεδομένα και των τριών σταθμών της λεκάνης του Ξερού ποταμού ήταν διαθέσιμα σε φύλλα excel, όπως είχαν προκύψει από το σκανάρισμα, δηλαδή με τυχαίο χρονικό βήμα. Όλα τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα σε φύλλα excel κανονικοποιήθηκαν ανά 15 λεπτά με χρήση του λογισμικού Υδρογνώμων, ενώ περάστηκαν σε φύλλα excel τα στοιχεία του βροχομετρικού σταθμού της Παναγιάς σε χρονικό βήμα 15 λεπτών απευθείας.

Στη συνέχεια καταρτίστηκε ένα φύλλο στο excel για κάθε περιστατικό σε κάθε λεκάνη και έγινε σύγκριση των διαθέσιμων επεξεργασμένων στοιχείων βροχής και απορροής. Κατά τη σύγκριση αυτή διαπιστώθηκαν αρκετές ελλείψεις και ανακρίβειες στις μετρήσεις βροχής, τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια, μαζί με τον τρόπο που αντιμετωπίστηκαν.

## **5.3 Προβλήματα στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα**

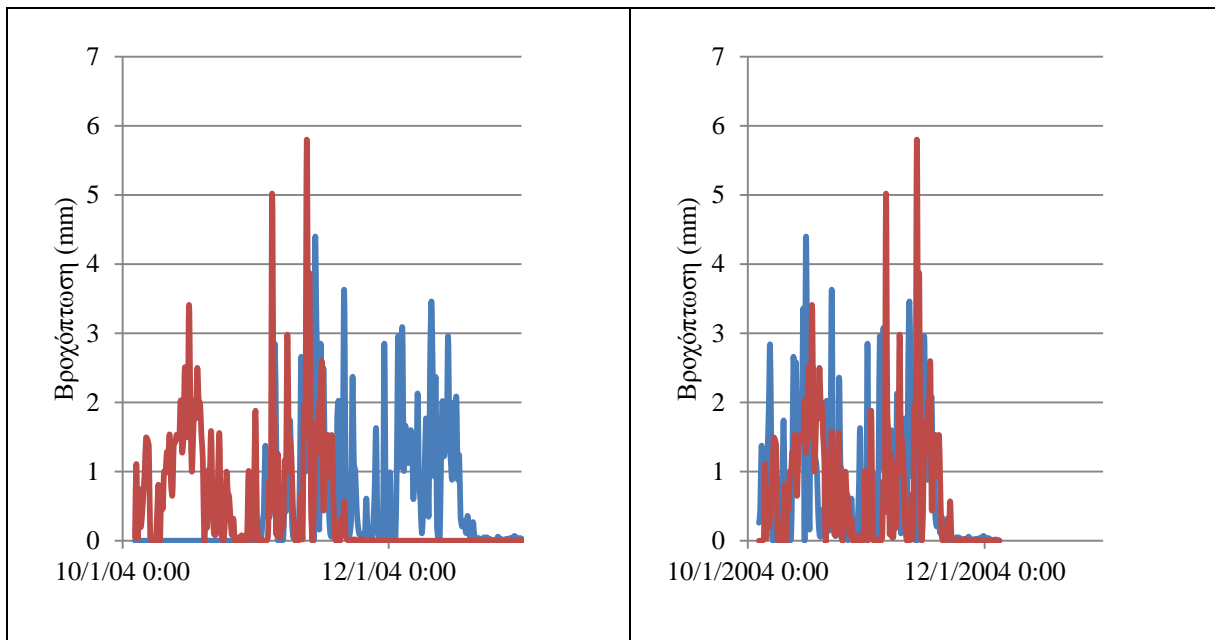
Στα δεδομένα της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα διαπιστώθηκαν λιγιστές ελλείψεις στοιχείων, αλλά τα χονδροειδή σφάλματα ήταν αρκετά. Οι τυχόν ελλείψεις βροχομετρικών δεδομένων αντιμετωπίστηκαν με αναπροσαρμογή των συντελεστών



Thiessen. Συγκεκριμένα όταν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία από τους σταθμούς σε γέφυρα Παναγιάς και Αλώνια οι συντελεστές ελήφθησαν 0.3 και 0.7 αντίστοιχα. Στα περιστατικά στα οποία τα διαθέσιμα στοιχεία προέρχονταν μόνο από τους σταθμούς Αλώνια και Απλίκι οι συντελεστές επιλέχθηκαν 0.8 και 0.2 αντίστοιχα, ενώ τέλος στις περιπτώσεις με στοιχεία μόνο από τους σταθμούς Παναγιά και Απλίκι οι συντελεστές ήταν 0.4 και 0.6 αντίστοιχα. Από τα 17 περιστατικά που επιλέχθηκαν στα οκτώ είχαμε στοιχεία και από τους τρεις βροχομετρικούς σταθμούς, χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψη μετρήσεις σταθμών που κάλυπταν πολύ μικρό διάστημα του επεισοδίου.

Όπως προαναφέρθηκε εντοπίστηκαν πολλές ανακρίβειες στα διαθέσιμα στοιχεία οι οποίες και αντιμετωπίστηκαν σύμφωνα με την κοινή λογική. Υπήρξε εδώ, όπως και στη λεκάνη του Ξερού ποταμού, 24ωρη μετατόπιση των μετρήσεων ενός βροχομετρικού σταθμού. Συγκεκριμένα στο περιστατικό του Φεβρουαρίου 1980 μετακινήθηκαν τα δεδομένα του σταθμού Αλώνια και στο περιστατικό 11<sup>ης</sup>-12<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2004 μετακινήθηκαν τα δεδομένα του σταθμού Απλίκι. Ιδιαίτερα στο τελευταίο αυτό περιστατικό η πολύ κοντινή απόσταση των δύο σταθμών δεν δικαιολογεί τέτοια υστέρηση, κάτι που επιβεβαιώνεται από τα βροχομετρικά στοιχεία του τρίτου σταθμού της λεκάνης (Παναγιά), τη μορφή του πλημμυρογραφήματος και βέβαια από όλα τα άλλα περιστατικά, στα οποία η έναρξη και η λήξη της βροχής περίπου ταυτίζονται στους τρεις σταθμούς (βλ. Σχήμα 5.1).

Επίσης, για το περιστατικό της 6<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 1991 υπήρχαν δύο διαφορετικά αρχεία για τον ίδιο σταθμό (Απλίκι) και έπρεπε να γίνει η επιλογή του αρχείου που είναι πιο πιθανό να είναι το σωστό, ενώ στην ταινία καταγραφής του σταθμού Παναγιά το Φεβρουάριο του 1992 υπήρχαν ακραία μεγάλες τιμές βροχής και η χειρόγραφη ένδειξη “snow melting”. οι τιμές αυτές αγνοήθηκαν. Σε όσα περιστατικά κρίθηκε σκόπιμο επεκτάθηκαν οι παροχές ώστε να καλύψουν όλο το χρονικό εύρος των μετρήσεων βροχής. Να σημειωθεί, τέλος, ότι για το σταθμό της γέφυρας Παναγιάς τα δεδομένα ήταν ανά δίωρο, ή ανά ώρα και κατά συνέπεια κρίθηκε ανώφελη η μετατροπή τους σε 15λεπτο βήμα.

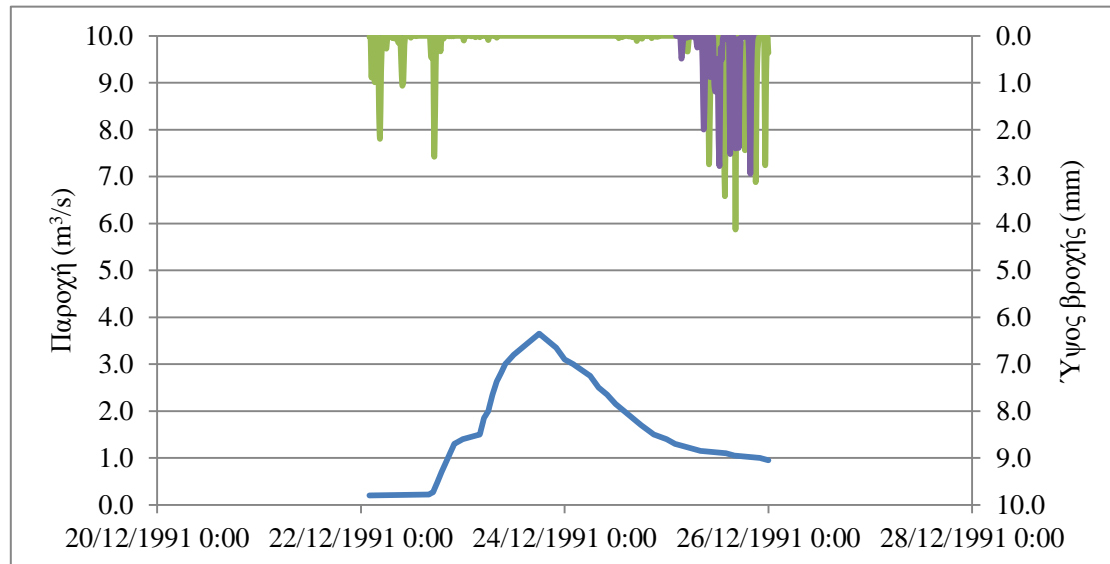


**Σχήμα 5.1** Η καταγεγραμμένη βροχόπτωση για το διάστημα 10-13 Ιανουαρίου 2004 στους σταθμούς Αλώνια (με μπλε γραμμή) και Απλίκι (με κόκκινη γραμμή) πριν και μετά τη μετακίνηση των στοιχείων του δεύτερου σταθμού κατά 24 ώρες αργότερα.

#### 5.4 Προβλήματα στη λεκάνη του Ξερού ποταμού

Στη λεκάνη του Ξερού ποταμού διαπιστώθηκαν πολλές ελλείψεις στα βροχομετρικά δεδομένα. Συγκεκριμένα ο σταθμός Μούττη της Αγκαστίνας διαθέτει στοιχεία μόνο για δύο από τα συνολικά 20 πλημμυρικά επεισόδια. Σε όσα από τα υπόλοιπα επεισόδια διέθεταν στοιχεία και οι δύο άλλοι σταθμοί τα ποσοστά των πολυγώνων Thiessen διορθώθηκαν ως εξής: 0.55 για το σταθμό Πάνω Βρύση και 0.45 για το σταθμό Αλωνούδι, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση των δύο σταθμών στη λεκάνη. Σε πέντε περιστατικά υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα μόνο από ένα βροχομετρικό σταθμό, ενώ σε ένα επεισόδιο δεν υπήρχαν καθόλου βροχομετρικά δεδομένα, οπότε εγκαταλείφθηκε. Εκτός όμως από τις ελλείψεις δεδομένων, υπήρχαν και αδικαιολόγητες αναντιστοιχίες μεταξύ των βροχομετρικών σταθμών ή μεταξύ βροχής και απορροής. Έτσι απορρίφθηκαν δύο ακόμη περιστατικά στα οποία σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία ο χρόνος έναρξης της βροχής ήταν μετά την αιχμή της πλημμύρας (βλ. Σχήμα 5.2) κι ένα ακόμη στο οποίο υπήρχε εμφανής ασυμφωνία μεταξύ βροχής και απορροής. Σε άλλα περιστατικά έγιναν οι απαραίτητες διορθώσεις, όπως για παράδειγμα στο περιστατικό του Φεβρουαρίου 1992, κατά την επεξεργασία του οποίου οι μετρήσεις από το

σταθμό της Πάνω Βρύσης μετακινήθηκαν κατά 24 ώρες αργότερα ώστε να βρίσκονται σε συμφωνία με τα άλλα διαθέσιμα βροχομετρικά και υδρομετρικά δεδομένα. Τέλος, όπου κρίθηκε απαραίτητο, συμπληρώθηκαν οι μετρήσεις παροχής ώστε να καλύπτουν όλο το διάστημα κατά το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία βροχόπτωσης.



**Σχήμα 5.2** Το περιστατικό 22-25 Δεκεμβρίου 1991 στη λεκάνη του Ξερού ποταμού. Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στις μετρήσεις του σταθμού Αλωνούδι και η μωβ στις μετρήσεις του σταθμού Πάνω Βρύση. Το περιστατικό αυτό απορρίφθηκε για περαιτέρω επεξεργασία και προσομοίωση λόγω προφανούς ασυμφωνίας των δεδομένων βροχής και απορροής.

## 5.5 Συντελεστές απορροής

Μετά την ολοκλήρωση της διόρθωσης των σφαλμάτων και της συμπλήρωσης των ελλείψεων υπολογίστηκαν οι συντελεστές απορροής για κάθε επεισόδιο. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο συντελεστής απορροής του επεισοδίου ( $c_1$ ) και ο συντελεστής απορροής που προκύπτει από την πλημμυρική αιχμή ( $c_2$ ) σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$c_1 = \frac{1000 h_{total} A}{V_{total}} \quad (5.1)$$

$$c_2 = \frac{Q_{max}}{0.278 A i} \quad (5.2)$$

όπου  $h_{total}$  το συνολικό ύψος βροχής του επεισοδίου σε mm,  $A$  η έκταση της λεκάνης σε  $km^2$ ,  $Q_{max}$  η παροχή αιχμής σε  $m^3/s$  και  $i$  η μέση ένταση από την αρχή του επεισοδίου μέχρι την εμφάνιση της πλημμυρικής αιχμής σε  $mm/h$ .

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις δύο λεκάνες παρατίθενται στον Πίνακα 5.1.

**Πίνακας 5.1** Οι συντελεστές απορροής  $c_1$  και  $c_2$  για τα περιστατικά των δύο λεκανών.

Περιστερώνας ποταμός			Ξερός ποταμός		
Περιστατικό	$c_1$	$c_2$	Περιστατικό	$c_1$	$c_2$
1/1977	0.390	0.702	1/1989	0.790	0.907
2/1979	0.459	0.523	2/1990	0.214	0.307
2/1980	0.395	0.323	12/1991_a	0.168	0.199
3/1988	0.800	0.798	2/1992	0.394	1.000 <sup>3</sup>
12/1988	0.250	0.409	12/1992_a	0.143	0.223
1/1989	0.711	1.000 <sup>3</sup>	12/1992_b	0.311	0.191
12/1991_a	0.160	0.479	2/1994	0.648	0.291
12/1991_b	0.460	0.572	11/1994	0.152	0.252
2/1992	0.880 <sup>4</sup>	0.475	1/1995	0.395	0.245
12/1992	0.308	0.809	2/1996	0.136	0.163
11/1994	0.422	0.785	2/1997	0.482	0.101
12/2001	0.559	0.986	3/1998	0.381	0.292
1/2002	0.770	0.936	12/1998	0.214	0.169
2/2003	0.144	0.431	2/1999	0.491	0.273
1/2004_a	0.458	0.799	4/2000	0.407	0.206
1/2004_b	0.605	0.657			
2/2007	0.317	0.336			
<b>Μέσος όρος</b>	<b>0.456</b>	<b>0.648</b>		<b>0.355</b>	<b>0.321</b>
Τυπική απόκλιση	0.219	0.224		0.194	0.263

<sup>3</sup> Στις δύο περιπτώσεις στις οποίες προέκυψε συντελεστής απορροής  $c_2$  λίγο μεγαλύτερος της μονάδας αυτός τέθηκε  $c_2=1$ . Οι τιμές αυτές αποτελούν ένδειξη ανακρίβειας των μετρήσεων και ενδεχομένως χονδροειδών σφαλμάτων τα οποία πάντως δεν κατέστη δυνατό να εντοπιστούν και να διορθωθούν. Τέτοια σφάλματα εισάγουν επιπλέον δυσκολίες στη διαχείριση της αβεβαιότητας.

<sup>4</sup> Στο περιστατικό του Φεβρουαρίου 1992 στον ποταμό Περιστερώνα παρατηρήθηκαν ανακρίβειες στα δεδομένα βροχής κι αυτός είναι ο λόγος της ψηλής τιμής του συντελεστή απορροής  $c_1$ .

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.1 εξάγεται το συμπέρασμα ότι η λεκάνη του ποταμού Περιστερώνας έχει υψηλότερους συντελεστές απορροής σε σχέση με τη λεκάνη του Ξερού ποταμού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο συντελεστής  $c_2$  αντιστοιχεί στο συντελεστή απορροής  $c$  της ορθολογικής μεθόδου γίνεται στον Πίνακα 5.2 σύγκριση των μέσων όρων που υπολογίστηκαν πιο πάνω με τις τιμές που προτείνονται για τις λεκάνες αυτές από τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (Γαλιούνα, 2011).

**Πίνακας 5.2** Συντελεστές απορροής για εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου (σύμφωνα με τις ΟΜΟΕ και εξαχθέντες από την επεξεργασία των περιστατικών).

Υδρολογική λεκάνη	Προτεινόμενο $c$	Μέσος όρος $c_2$
Περιστερώνας	0.470	0.648
Ξερός	0.460	0.321

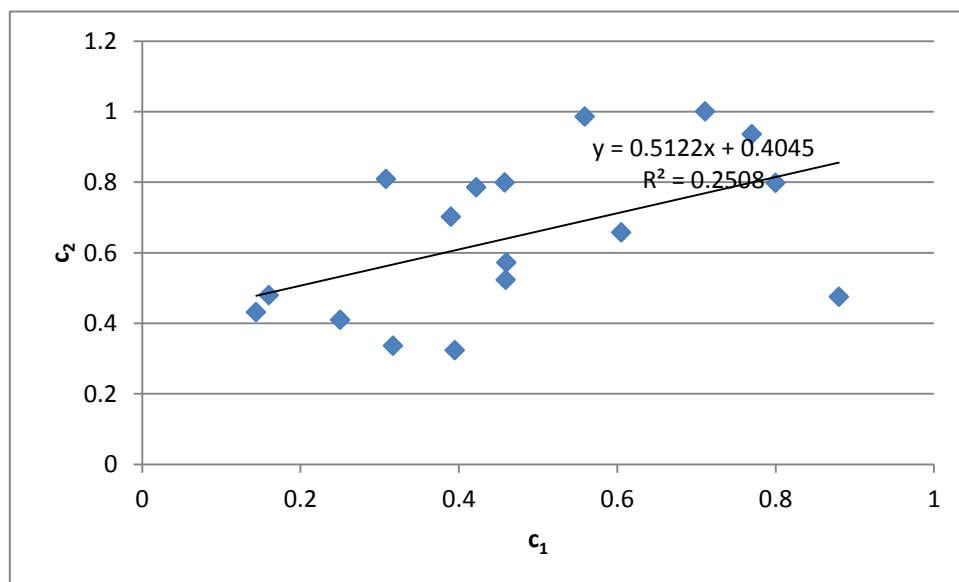
Σύμφωνα με τα παραπάνω οι προτεινόμενοι συντελεστές απορροής ταυτίζονται σχεδόν για τις δύο λεκάνες, κάτι το οποίο δεν επαληθεύεται στα υπό εξέταση περιστατικά, από τα οποία προκύπτει ότι η λεκάνη του Περιστερώνας ποταμού έχει σημαντικά μεγαλύτερο συντελεστή απορροής. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις μέγιστες μηνιαίες παροχές που έχουν παρατηρηθεί στους δύο υδρομετρικούς σταθμούς. Για το διάστημα Οκτωβρίου 1970-Σεπτεμβρίου 2006 υπολογίστηκε η μέση μέγιστη μηνιαία παροχή λαμβανομένων υπόψη αρχικά όλων των τιμών και στη συνέχεια μόνο των μη μηδενικών μόνο τιμών, καθώς ο ποταμός Περιστερώνας στο συγκεκριμένο διάστημα των 36 ετών είχε μηδενική μέγιστη μηνιαία παροχή 113 φορές, δηλαδή τρεις μήνες κάθε έτος το ποτάμι ήταν στεγνό, κάτι το οποίο συνέβη μόνο δύο μήνες συνολικά στον Ξερό ποταμό. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι για τις δύο λεκάνες.

**Πίνακας 5.3** Μέσοι όροι μέγιστων μηνιαίων παροχών με και χωρίς τις μηδενικές τιμές σε  $m^3/s$ .

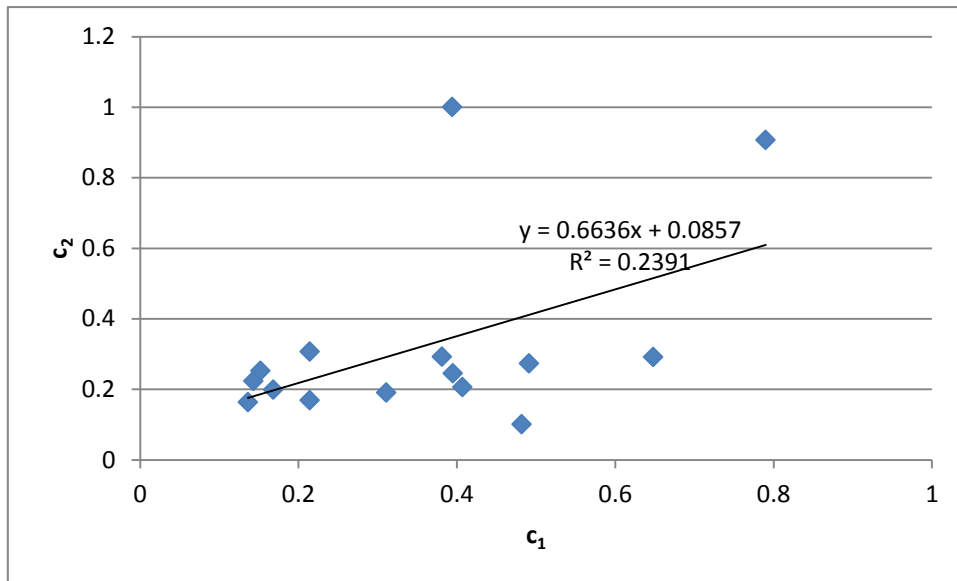
Ποταμός	Συνολικός μέσος όρος	Μέσος όρος μη μηδενικών τιμών
Περιστερώνας	3.50	4.84
Ξερός	1.91	1.92

Είναι φανερό ότι ο Περιστερώνας ποταμός αν και χαρακτηρίζεται από εφήμερη ροή, εν τούτοις έχει μεγαλύτερες παροχές από τον Ξερό ποταμό. Αυτό οφείλεται εν μέρει μόνο στην ελαφρά μεγαλύτερη έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Περιστερώνα (77 km<sup>2</sup> έναντι 68.5 km<sup>2</sup>, δηλαδή περίπου 12% διαφορά). Πιθανόν η κύρια αιτία για αυτή τη διαφορά μπορεί να αναζητηθεί στα διαφορετικά χαρακτηριστικά των δύο λεκανών, καθώς στην περίπτωση του Ξερού ποταμού ολόκληρη η λεκάνη απορροής καλύπτεται από πυκνό δάσος και χαρακτηρίζεται από ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση, ενώ αντίθετα στη λεκάνη απορροής του ποταμού Περιστερώνα βρίσκονται αρκετά χωριά και μεγάλες εκτάσεις με καλλιέργειες και υποβαθμισμένη βλάστηση (Εικόνες 4.4 και 4.7). Συμπεραίνουμε από τα παραπάνω ότι οι προτεινόμενοι συντελεστές απορροής (ΟΜΟΕ) δεν αντανακλούν σωστά τις διαφορές που παρουσιάζουν οι δύο λεκάνες.

Με βάση επίσης τον Πίνακα 5.1 διαπιστώνεται θετική συσχέτιση μεταξύ των συντελεστών απορροής  $c_1$  και  $c_2$ . Οι βαθμοί ετεροσυσχέτισης ταυτίζονται σχεδόν στις δύο λεκάνες: για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα συντελεστής ετεροσυσχέτισης των  $c_1$ ,  $c_2$  είναι 0.50, ενώ στη λεκάνη του Ξερού ποταμού είναι 0.49. Στα Σχήματα 5.3 και 5.4 παρουσιάζεται η συσχέτιση των συντελεστών απορροής για τις δύο λεκάνες.



**Σχήμα 5.3** Η θετική συσχέτιση των συντελεστών απορροής  $c_1$  και  $c_2$  στον ποταμό Περιστερώνα.



**Σχήμα 5.4** Η θετική συσχέτιση των συντελεστών απορροής  $c_1$  και  $c_2$  στον Ξερό ποταμό.

Η συσχέτιση που περιγράφεται παραπάνω αποτελεί ένδειξη για συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών που χρησιμοποιούνται στην ορθολογική μέθοδο και στη μέθοδο SCS. Συνεπώς, προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση του θέματος σε λεκάνες με περισσότερα και πιο αξιόπιστα δεδομένα.





## Κεφάλαιο 6: Υδρολογική προσομοίωση

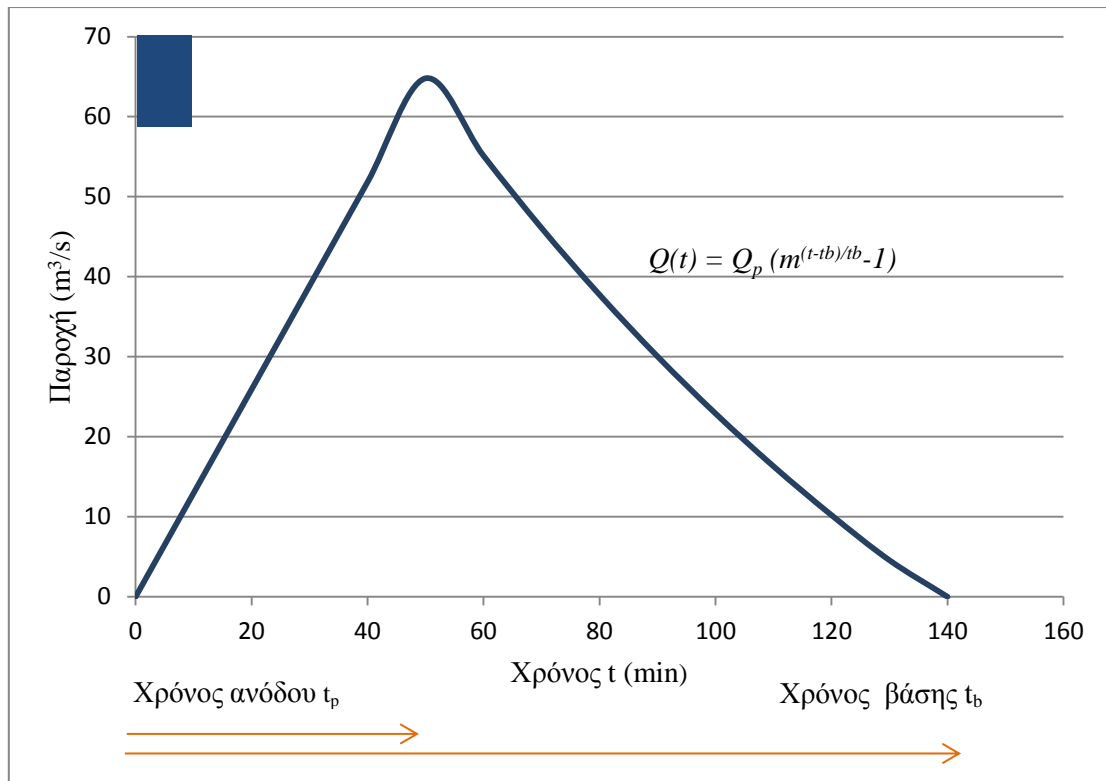
### 6.1 Υδρολογική προσομοίωση με τη μέθοδο SCS-CN και παραμετρικό μοναδιαίο υδρογράφημα

Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων ακολούθησε η διαδικασία της προσομοίωσης των περιστατικών βροχόπτωσης – απορροής. Για τη μοντελοποίηση του συστήματος επιλέχθηκε αρχικά η μέθοδος SCS-CN με το μοναδιαίο υδρογράφημα. Η μέθοδος κωδικοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab και συνδυάστηκε με ρουτίνα βελτιστοποίησης. Ως δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο ορίστηκαν η παρατηρημένη βροχή και απορροή ( $H$  και  $Q_{obs}$  αντίστοιχα), το χρονικό βήμα σε λεπτά ( $dt$ ), η έκταση της λεκάνης σε τετραγωνικά χιλιόμετρα ( $A$ ), το μήκος του κύριου υδατορεύματος σε χιλιόμετρα ( $L$ ), η υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης και του υψομέτρου στην έξοδο σε μέτρα ( $DH$ ), ενώ ως ελάχιστο ύψος βροχής σύμφωνα με το οποίο ορίζεται το τέλος της βροχόπτωσης τέθηκε το 0.1 mm ανά 15 min. Αρχικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει το χρόνο συγκέντρωσης σύμφωνα με τον τύπο του Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A}+1.5L}{0.8\sqrt{DH}} \quad (6.1)$$

Εν συνεχεία υπολογίζεται η αθροιστική βροχή, η αθροιστική ενεργός βροχή και η ενεργός βροχή ( $H_{active}$ ) και προσδιορίζονται τα χρονικά βήματα του τέλους της βροχής, της αρχής και του τέλους της άμεσης απορροής. Με γνωστά τα χρονικά αυτά βήματα προσδιορίζεται η άμεση απορροή ( $Q_{direct}$ ) και ο άμεσος πλημμυρικός όγκος ( $V_{direct}$ ).

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε ένα παραμετρικό υδρογράφημα ως εναλλακτικό των Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων του Snyder και του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας. Το παραμετρικό υδρογράφημα αποτελείται από ένα γραμμικό ανοδικό κλάδο και από ένα καθοδικό κλάδο που φθίνει εκθετικά, σε αντίθεση με τα ΣΜΥ όπου ο καθοδικός κλάδος είναι γραμμικός. Η μορφή του μοναδιαίου υδρογραφήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



**Σχήμα 6.1** Το παραμετρικό μοναδιαίο υδρογράφημα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Ο χρόνος ανόδου και ο χρόνος βάσης δίνονται αντίστοιχα από τις Σχέσεις 6.2 και 6.3:

$$t_p = bt_c + \frac{D}{2} \quad (6.2)$$

$$t_b = t_c + D \quad (6.3)$$

όπου :

$t_c$  ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής κατά Giandotti

$D$  η διάρκεια βροχής, εδώ λαμβάνεται ίση με 10 min

$b$  παράμετρος του υδρογραφήματος που λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Στη μέθοδο SCS για  $D < t_c$  η παράμετρος  $b$  λαμβάνεται ίση με 0.6. Η τιμή  $0.6 t_c$  ονομάζεται χρόνος υστέρησης και θεωρείται ως η χρονική απόσταση του κέντρου βάρους του ενεργού

υετογραφήματος από την αιχμή του πλημμυρογραφήματος. (Ευστρατιάδης κ.ά., 2012). Στα πλαίσια αυτής της εργασίας το  $b$  προέκυψε μέσω βελτιστοποίησης.

Ο καθοδικός κλάδος υπολογίζεται από τη Σχέση 6.4:

$$Q(t) = Q_p \left( m^{\frac{t-t_b}{t_b}} - 1 \right) \quad (6.4)$$

όπου

$$m = e^{\frac{\ln 2}{(t_p-t_b)/t_b}} \quad (6.5)$$

Η παροχή αιχμής  $Q_p$  προκύπτει από την εξίσωση του όγκου του υδρογραφήματος με το μοναδιαίο όγκο πλημμύρας, δηλαδή

$$Q_p = h_0 A \quad (6.6)$$

Το ύψος της μοναδιαίας βροχής  $h_0$  τίθεται ίσο με 10 mm.

Αναλυτικά

$$\int_0^{t_p} Q(t) dt + \int_{t_p}^{t_b} Q(t) dt = 10 \times 10^{-3} \times A \times 10^6 \quad (6.7)$$

$$\frac{1}{2} Q_p t_p + \int_{t_p}^{t_b} Q_p \left( m^{\frac{t-t_b}{t_b}} - 1 \right) dt = 10^4 \times A \quad (6.8)$$

$$\frac{1}{2} Q_p t_p + Q_p \left( \frac{m^{\frac{t-t_b}{t_b}}}{\ln m} t_b \right) \Big|_{t_p}^{t_b} - Q_p (t_b - t_p) = 10^4 \times A \quad (6.9)$$

$$\frac{1}{2} Q_p t_p + Q_p \left[ \frac{t_b}{\ln m} \left( 1 - m^{\frac{t_p-t_b}{t_b}} \right) - (t_b - t_p) \right] = 10^4 \times A \quad (6.10)$$

$$Q_p = \frac{10^4 \times A}{\frac{t_b}{\ln m} \left( 1 - m^{\frac{t_p-t_b}{t_b}} \right) - t_b + \frac{3}{2} t_p} \quad (6.11)$$

όπου η σταθερά  $m$  δίνεται από τη Σχέση 6.5.

Για τον καθοδικό κλάδο επιλέχθηκε εξίσωση εκθετικής μορφής γιατί μπορεί να θεωρηθεί πως μετά την αιχμή της πλημμύρας η ροή που παράγεται μπορεί να περιγραφεί ως ροή κατά την εκφόρτιση ενός ταμιευτήρα. Η σχέση εκφόρτισης έχει την παρακάτω μορφή  $dS/dt = -kS$ , όπου  $S$  η αποθηκευτικότητα του ταμιευτήρα.

Μετά την κατάρτιση του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος ο αλγόριθμος προχωρά στην τελική προσομοίωση του πλημμυρογραφήματος. Το προσομοιωμένο υδρογράφημα παράγεται από την υπολογισθείσα ενεργό βροχή σε συνδυασμό με το μοναδιαίο υδρογράφημα που αναλύεται πιο πάνω. Αρχικά υπολογίζεται μία ενδιάμεση παροχή  $Q_{total}$  για  $i$  από 1 μέχρι  $t_{base} / dt + 1$  και για  $j$  από 1 μέχρι  $n$  (όπου  $n$  το πλήθος των χρονικών βημάτων της παρατηρημένης βροχόπτωσης) από τη σχέση

$$Q_{total}(i, j) = H_{active}(j, 1) \frac{Q(i)}{10} \quad (6.12)$$

Έπειτα υπολογίζεται η μετατοπισμένη – λόγω φαινομένου διόδευσης - παροχή για  $j$  από 1 μέχρι  $n$  και για  $i$  από  $j$  μέχρι  $t_{base} / dt + j$  σύμφωνα με τη σχέση

$$Q_{μετ}(i, j) = Q_{total}(i - (j - 1), j) \quad (6.13)$$

Τέλος, υπολογίζεται το άθροισμα των γραμμών του πίνακα  $Q_{μετ}$  και το διάνυσμα-γραμμή που προκύπτει αντιστρέφεται ώστε να προκύψει το τελικό διάνυσμα-στήλη  $Q_{sim}$  που περιλαμβάνει τις τιμές του προσομοιωμένου υδρογραφήματος.

Η ρουτίνα βελτιστοποίησης ελαχιστοποιεί το συνολικό σφάλμα ( $TS$ ), το οποίο αποτελεί το άθροισμα τριών επιμέρους σφαλμάτων με αντίστοιχα βάρη:

- Το πρώτο σφάλμα είναι το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών του προσομοιωμένου από το παρατηρημένο υδρογράφημα και υπολογίζεται για κάθε χρονικό βήμα από την παρακάτω σχέση:

$$SF_1 = (Q_{direct} - Q_{sim})^2 \quad (6.14)$$

- Το δεύτερο σφάλμα είναι το τετράγωνο της διαφοράς των παροχών αιχμής του προσομοιωμένου από το πραγματικό υδρογράφημα:

$$SF_2 = (\max(Q_{direct}) - \max(Q_{sim}))^2 \quad (6.15)$$

- Το τρίτο σφάλμα είναι η απόλυτη τιμή της διαφοράς του προσομοιωμένου από τον παρατηρημένο συνολικό πλημμυρικό όγκο, δηλαδή

$$SF_3 = abs(V_{direct} - V_{sim}) \quad (6.16)$$

Το άθροισμα των τριών σφαλμάτων προκύπτει σταθμισμένο ως εξής:

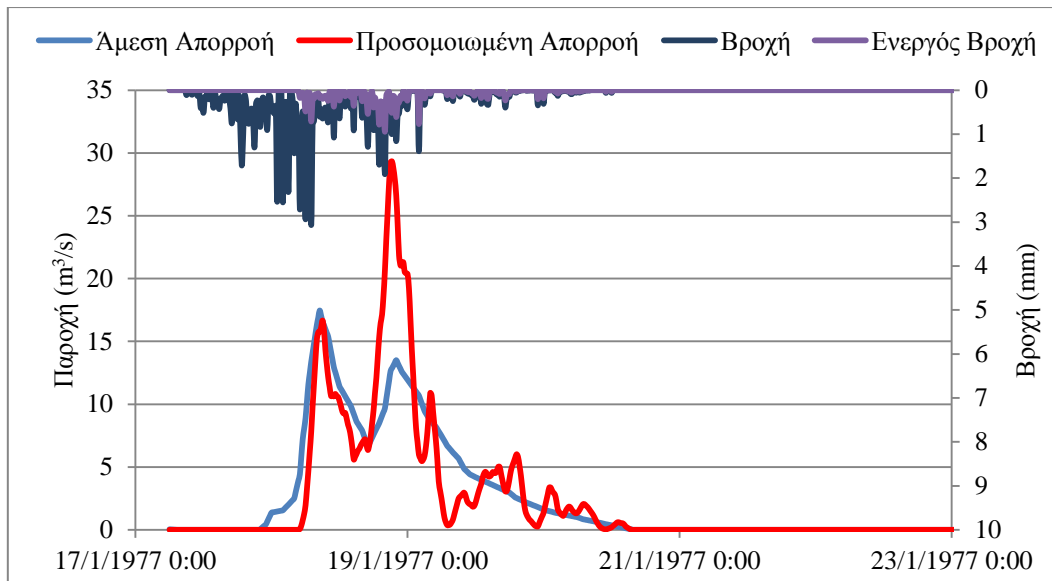
$$TS = SF_1 + 10 SF_2 + 1000 SF_3 \quad (6.17)$$

Μέσω της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκονται τρεις στόχοι: η ικανοποίηση της φυσικής συνθήκης της εξίσωσης του όγκου που προκύπτει από την ενεργό βροχόπτωση με τον παρατηρημένο όγκο της άμεσης απορροής, της προσέγγισης της αιχμής της παρατηρημένης απορροής και της προσέγγισης των μεμονωμένων τιμών της απορροής. Η τήρηση της φυσικής συνθήκης κρίνεται αναγκαία και γι' αυτό το λόγο ο συντελεστής βάρους της είναι μεγάλος (1000). Ενδεικτικά αποτελέσματα για τον Περιστερώνα ποταμό παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

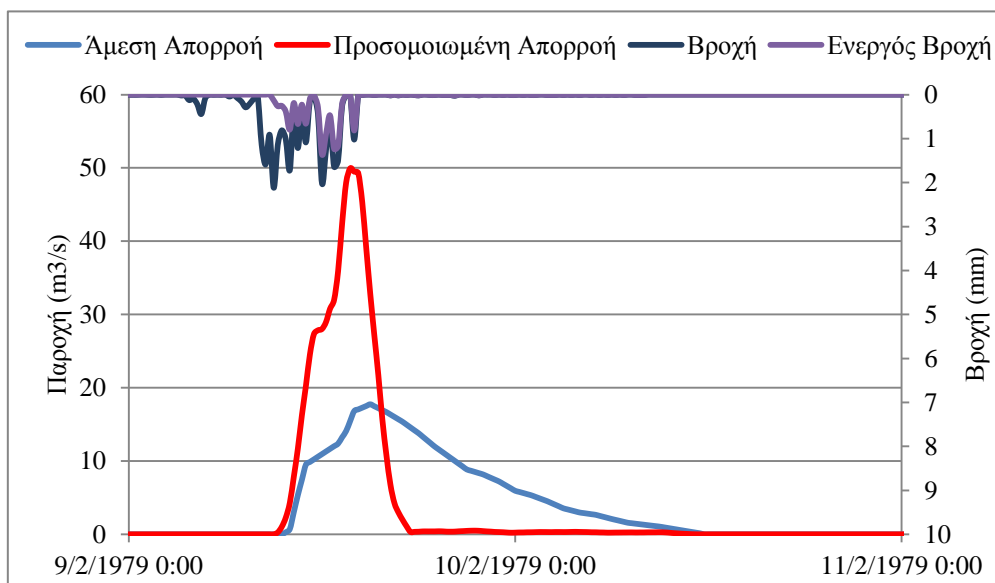
**Πίνακας 6.1** Αποτελέσματα βελτιστοποίησης της μεθόδου SCS-CN στον ποταμό Περιστερώνα.

Περιστατικό	S	a	b	CN	Συνολικό Σφάλμα
1/1977	90.9023	0.3648	0.6090	73.6440	15322
2/1979	14.4377	0.4396	0.4149	94.6216	27350
3/1988	38.4546	0.0962	0.3314	86.8511	152610
1/1989	46.9331	0.4883	0.5304	84.4041	211440
12/1992	147.4272	0.3567	0.3335	63.2742	80080
2/2003	137.5490	0.3628	0.7577	64.8705	12686
1/2004	103.6426	0.3459	0.3671	71.0206	96207

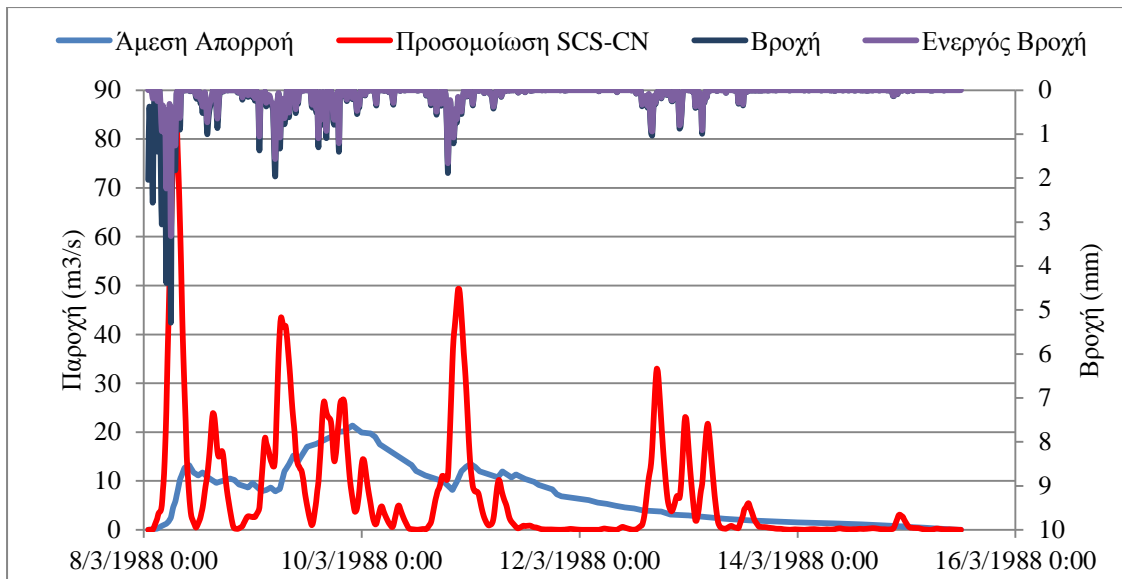
Είναι προφανές ότι το μέγεθος του σφάλματος είναι πολύ μεγάλο. Στα Σχήματα 6.2 έως 6.8 παρουσιάζονται τα περιστατικά που προσομοιώθηκαν.



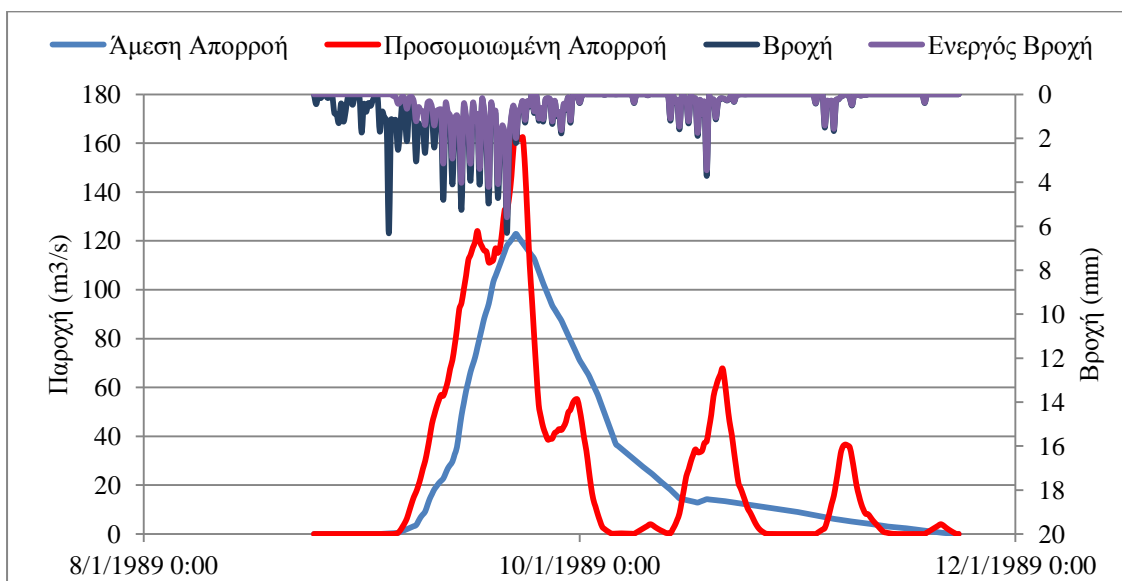
**Σχήμα 6.2** Σύγκριση παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος για το περιστατικό του Ιανουαρίου 1977.



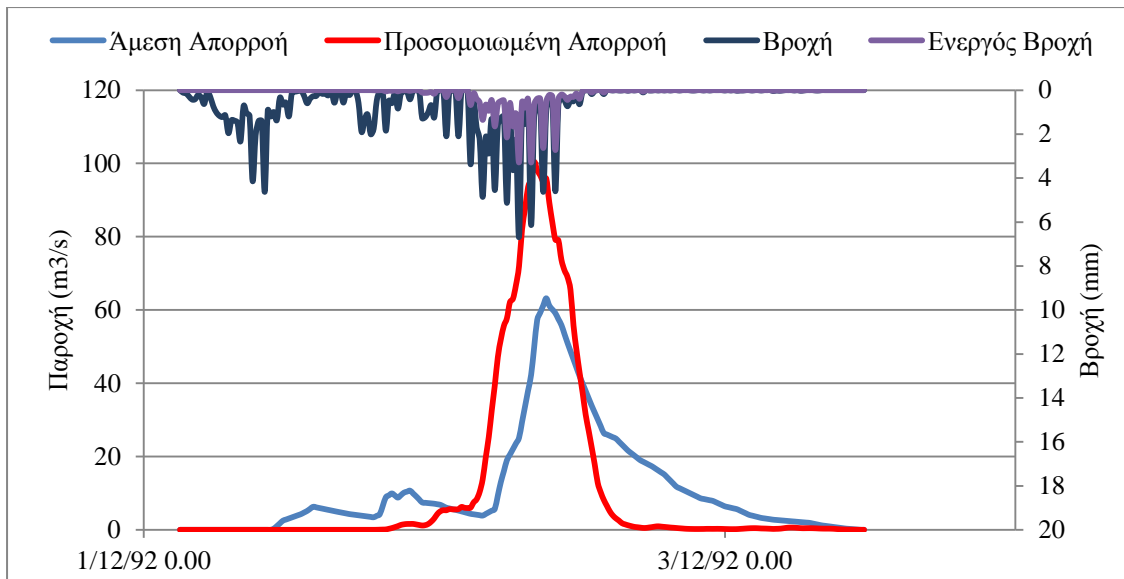
**Σχήμα 6.3** Σύγκριση παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος για το περιστατικό του Φεβρουαρίου 1979.



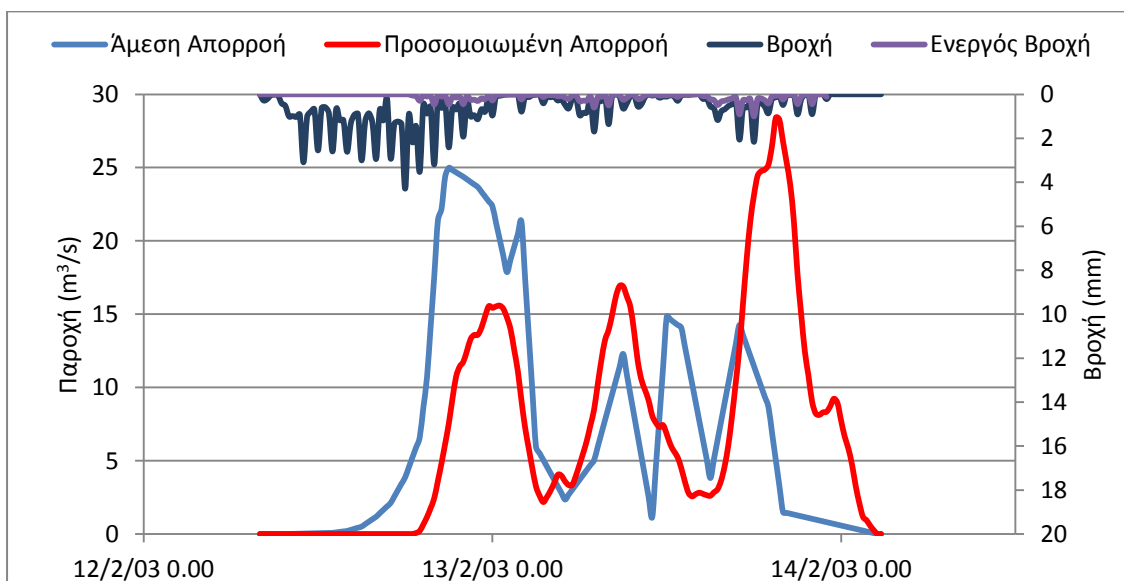
**Σχήμα 6.4** Σύγκριση παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος για το περιστατικό του Μαρτίου 1988.



**Σχήμα 6.5** Σύγκριση παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος για το περιστατικό του Ιανουαρίου 1989.

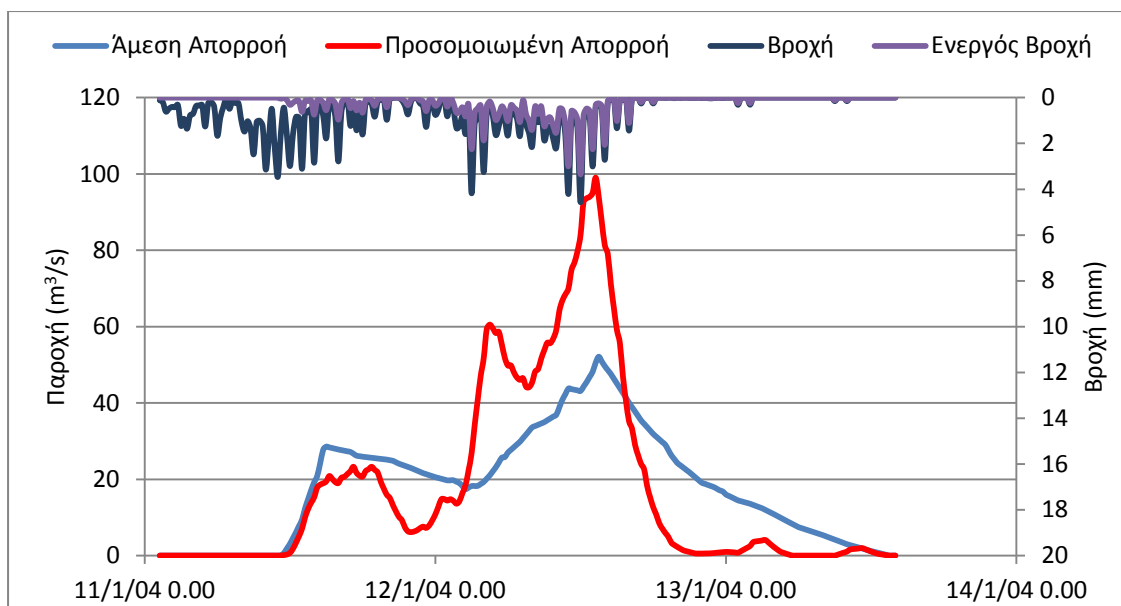


**Σχήμα 6.6** Σύγκριση παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος για το περιστατικό του Δεκεμβρίου 1992.



**Σχήμα 6.7** Σύγκριση παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος για το περιστατικό του Δεκεμβρίου 2003.





**Σχήμα 6.8** Σύγκριση παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος για το περιστατικό του Ιανουαρίου 2004.

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό ότι παρά τη βελτιστοποίηση, η οποία μάλιστα επαναλήφθηκε αρκετές φορές με διάφορες παραλλαγές των μεταβλητών και των ορίων τους, η μέθοδος SCS αποτυγχάνει να προσομοιώσει την παρατηρημένη απορροή. Συγκεκριμένα, η μέθοδος παρουσιάζει εγγενή αδυναμία, καθώς βασίζεται στην υπόθεση ότι όλη η ροή είναι επιφανειακή, κάτι το οποίο απέχει πολύ από την πραγματικότητα στις υπό μελέτη λεκάνες. Η προσομοιωμένη απορροή παρουσιάζει πολύ μεγάλες πλημμυρικές παροχές και πολύ απότομους κλάδους ανόδου καθόδου ώστε να τηρείται ο αυστηρός περιορισμός της εξίσωσης προσομοιωμένου όγκου και όγκου άμεσης απορροής. Σημειώνεται εδώ ότι ως βασική ροή θεωρήθηκε η ελάχιστη τιμή της παροχής που καταγράφηκε ακριβώς πριν την έναρξη της βροχόπτωσης για κάθε επεισόδιο.

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η μέθοδος αυτή είναι αναποτελεσματική κι έτσι απορρίπτεται για περαιτέρω εφαρμογή στις υπό μελέτη λεκάνες. Στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση της αποτελεσματικότητας μεθόδων που βασίζονται στο ισοζύγιο της εδαφικής υγρασίας.

## 6.2 Υδρολογική προσομοίωση με μοντέλα υδραυλικών αναλόγων

Μετά τη διαπίστωση της αδυναμίας της μεθόδου SCS-CN με το μοναδιαίο υδρογράφημα δοκιμάστηκαν μοντέλα υδραυλικών αναλόγων για την υδρολογική προσομοίωση. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν δύο μοντέλα δύο δεξαμενών με κάποιες παραλλαγές και επιλέχθηκε το πιο αποτελεσματικό. Στα μοντέλα αυτά η συνολική απορροή προκύπτει ως άθροισμα των παροχών από τις δύο δεξαμενές σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{sim} = Q_s + Q_{int} \quad (6.18)$$

όπου  $Q_{sim}$  η προσομοιωμένη απορροή,  $Q_s$  η παροχή από την κάτω δεξαμενή και  $Q_{int}$  η παροχή της άνω δεξαμενής. Οι παροχές σε όλα αυτά τα μοντέλα μετατράπηκαν για πρακτικούς λόγους σε ύψος παροχής (mm) με ενδιάμεσο υπολογισμό του πλημμυρικού όγκου για κάθε χρονικό βήμα 15 min ως εξής:

$$V(i) = \frac{1}{2} t_a (Q(i-1) + Q(i)) \quad (6.19)$$

$$q(i)(mm) = \frac{V(i)}{1000 A} \quad (6.20)$$

όπου  $t_a = 9000$  (σε s) και  $A$  η έκταση της λεκάνης σε  $km^2$  όπως αναφέρθηκε πιο πάνω.

### 6.2.1: Αρχικό μοντέλο υδραυλικών αναλόγων

Στο πρώτο μοντέλο που δοκιμάστηκε ως αρχική συνθήκη εισάγεται η στάθμη της άνω δεξαμενής ( $S_0$ ). Οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι εξής:

- Η χωρητικότητα της άνω δεξαμενής σε mm ( $K$ )
- Η στάθμη της οπής από την οποία εκρέει το νερό από την άνω δεξαμενή ως ποσοστό της χωρητικότητας ( $k$ ).
- Ο συντελεστής απορροής από την άνω δεξαμενή προς το υδατόρευμα ( $c$ ).
- Ο συντελεστής απορροής από την άνω προς την κάτω δεξαμενή ( $d$ ).

Αρχικά, σε κάθε χρονικό βήμα  $i$  η στάθμη στην άνω δεξαμενή αυξάνεται κατά το ύψος βροχής  $P$  σε mm σύμφωνα με τη σχέση:

$$S_1(i) = S_0 + P(i) \quad (6.21)$$

Εν συνεχεία το μοντέλο υπολογίζει συναρτήσει της στάθμης  $S_1$  το ύψος της απορροής από την άνω προς την κάτω δεξαμενή σε mm:

$$G(i) = d S_1(i) \quad (6.22)$$

κι έπειτα τη νέα στάθμη της άνω δεξαμενής απομειωμένη κατά  $G$ :

$$S_2(i) = S_1(i) - G(i) \quad (6.23)$$

Ακολουθεί ο υπολογισμός της παροχής  $Q_{int}$  σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$Q_{int} = c(S_2(i) - kK) \geq 0 \quad (6.24)$$

Αντίστοιχα εκ νέου υπολογίζεται η απομειωμένη στάθμη της άνω δεξαμενής:

$$S_3(i) = S_2(i) - Q_{int} \quad (6.25)$$

Τέλος υπολογίζεται το ύψος παροχής  $Q_s$ , η τελική στάθμη της άνω δεξαμενής  $S_4$  και η συνολική απορροή:

$$Q_s(i) = S_3(i) - K \quad (6.26)$$

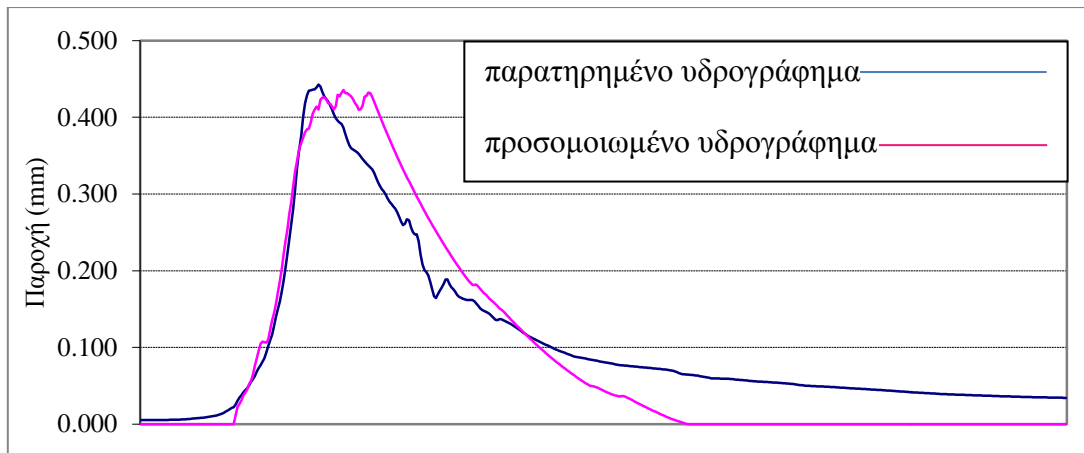
$$S_4(i) = S_3(i) - Q_s(i) \quad (6.27)$$

$$Q_{sim}(i) = Q_{int}(i) + Q_s(i) \quad (6.28)$$

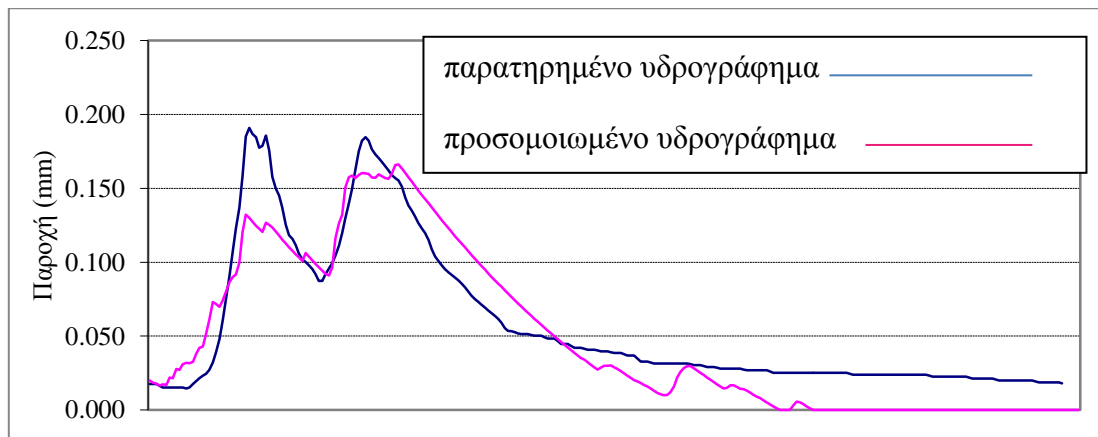
Σε κάθε επόμενο χρονικό βήμα  $i \geq 2$  η στάθμη της άνω δεξαμενής υπολογίζεται ως εξής:

$$S_1(i) = S_4(i-1) + P(i) \quad (6.29)$$

Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε σε υπολογιστικό φύλλο excel και η βελτιστοποίηση έγινε με χρήση μακροεντολής για όλα τα επεισόδια. Η επίδοσή του ήταν σαφώς καλύτερη από της μεθόδου SCS-CN ωστόσο παρατηρήθηκε αδυναμία στην προσομοίωση κυρίως του καθοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.9 και 6.10.



**Σχήμα 6.9** Το περιστατικό του Ιανουαρίου 1989 στη λεκάνη του Ξερού ποταμού.



**Σχήμα 6.10** Το περιστατικό του Νοεμβρίου 1994 στη λεκάνη του Ξερού ποταμού.

### 6.2.2: Τελικό μοντέλο υδραυλικών αναλόγων

Μετά τη διαπίστωση των αδυναμιών του μοντέλου επιδιώχθηκε η εύρεση ενός πιο αποτελεσματικού μοντέλου με έμφαση στην καλύτερη προσομοίωση του καθοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος. Η τελική επιλογή που πέτυχε πολύ καλή προσομοίωση είναι ένα μοντέλο με πέντε παραμέτρους και δύο αρχικές συνθήκες. Οι παράμετροι της παραλλαγής του αρχικού μοντέλου είναι οι παρακάτω:

- Η χωρητικότητα της άνω δεξαμενής ( $K_1$  σε mm),
- Η χωρητικότητα της κάτω δεξαμενής ( $K_2$  σε mm),
- Ο συντελεστής απορροής  $m$  από την άνω προς την κάτω δεξαμενή,
- Ο συντελεστής απορροής  $l_1$  από την άνω δεξαμενή προς το υδατόρευμα και
- Ο συντελεστής απορροής  $l_2$  από την κάτω δεξαμενή προς το υδατόρευμα.

Οι αρχικές συνθήκες είναι οι αρχικές στάθμες στην άνω και στην κάτω δεξαμενή ( $S_{01}$  και  $S_{02}$  αντίστοιχα).

Κατ' αντιστοιχία με το προηγούμενο μοντέλο αρχικά υπολογίζεται η αυξημένη κατά τον υετό στάθμη της άνω δεξαμενής:

$$S_1(1) = S_{01} + P(1) \quad (6.30)$$

καθώς και η παροχή από την άνω προς την κάτω δεξαμενή:

$$G(i) = m S_1(i) \quad (6.31)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται η νέα στάθμη της άνω δεξαμενής και – συναρτήσει αυτής – η εκροή από την άνω δεξαμενή προς το υδατόρευμα:

$$S_2(i) = S_1(i) - G(i) \quad (6.32)$$

$$Q_{int}(i) = l_1 (S_2(i) - K_1) \geq 0 \quad (6.33)$$

Οι υπολογισμοί για την άνω δεξαμενή ολοκληρώνονται με την τελική στάθμη που θα αποτελέσει την αρχική στάθμη του επόμενου χρονικού βήματος:

$$S_3(i) = S_2(i) - Q_{int}(i) \quad (6.34)$$

Η στάθμη στην κάτω δεξαμενή για το πρώτο χρονικό βήμα δίνεται από τη Σχέση 6.35:

$$S_d(1) = S_{02} + G(1) \quad (6.35)$$

Η παροχή από την κάτω δεξαμενή προς το υδατόρευμα υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_s(i) = l_2 (S_d(i) - K_2) \geq 0 \quad (6.36)$$

Οπότε η συνολική παροχή προς το υδατόρευμα είναι:

$$Q_{sim}(i) = Q_{int}(i) + Q_s(i) \quad (6.37)$$

Η τελική στάθμη της κάτω δεξαμενής δίνεται από τη Σχέση 6.38:

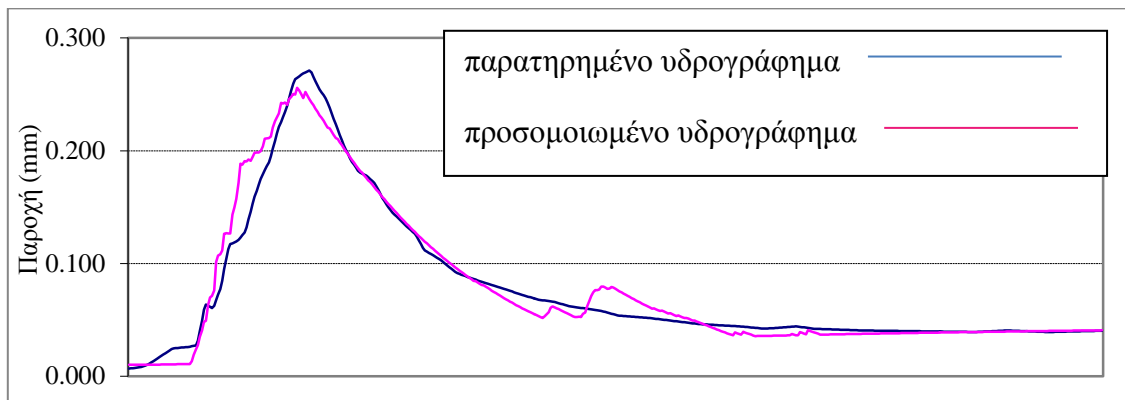
$$S_{dfinal}(i) = S_d(i) - Q_s(i) \quad (6.38)$$

Σε κάθε επόμενο χρονικό βήμα  $i \geq 2$  οι στάθμες των δύο δεξαμενών υπολογίζονται ως εξής:

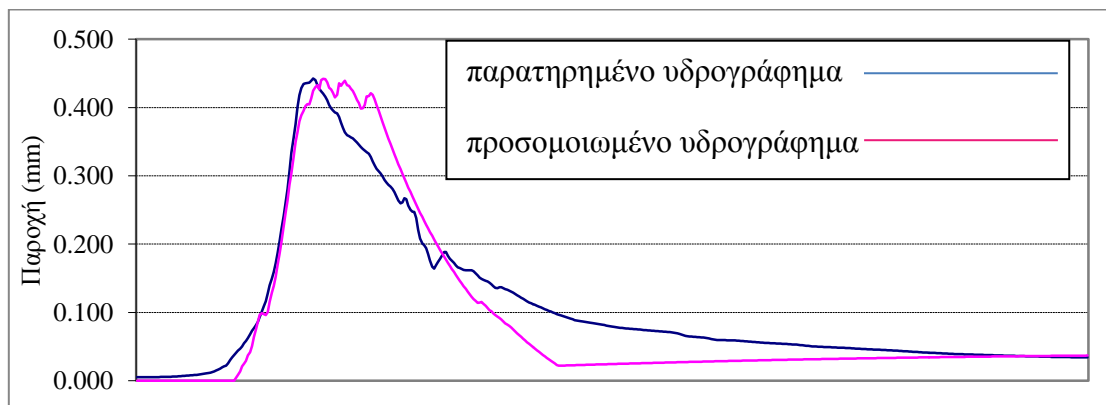
$$S_1(i) = S_3(i-1) + P(i) \quad (6.39)$$

$$S_d(i) = S_{d\text{final}}(i-1) + G(i) \quad (6.40)$$

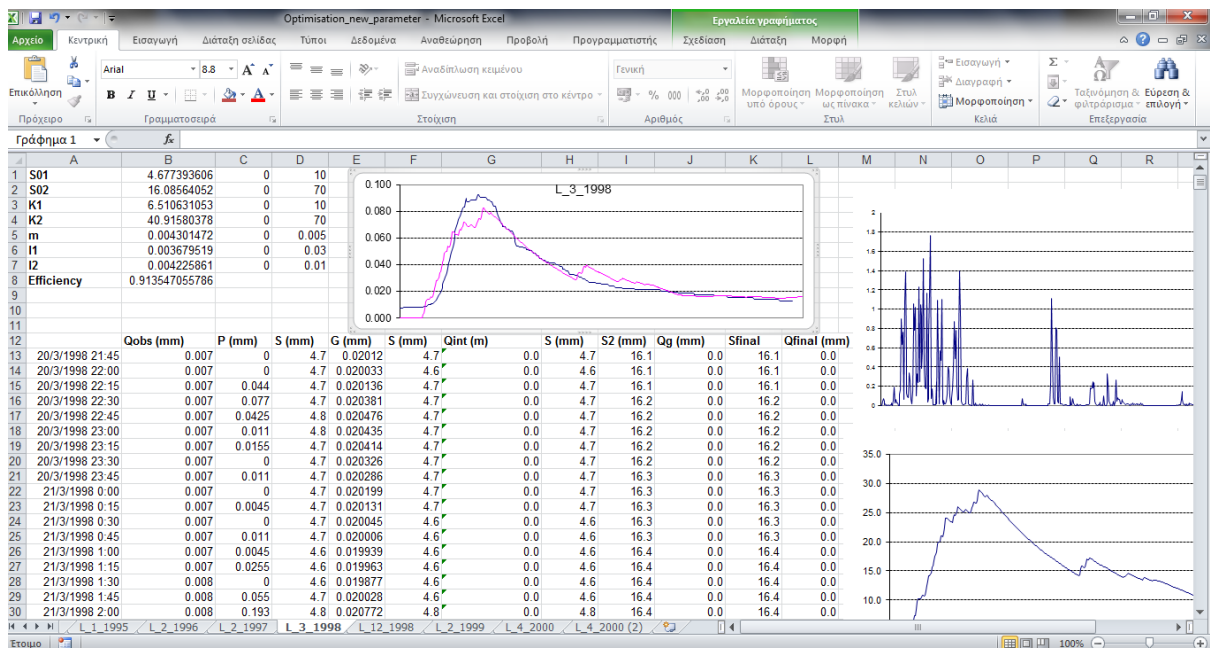
Το μοντέλο αυτό πέτυχε πολύ καλή προσομοίωση στην πλειοψηφία των υπό εξέταση επεισοδίων και στις δύο λεκάνες. Στα Σχήματα 6.11 και 6.12 παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο επεισόδια, ενώ στην Εικόνα 6.1 φαίνεται η χρήση του excel για την προσομοίωση των περιστατικών με το μοντέλο υδραυλικών αναλόγων.



**Σχήμα 6.11** Το περιστατικό του Φεβρουαρίου 1980 στον ποταμό Περιστερώνα.

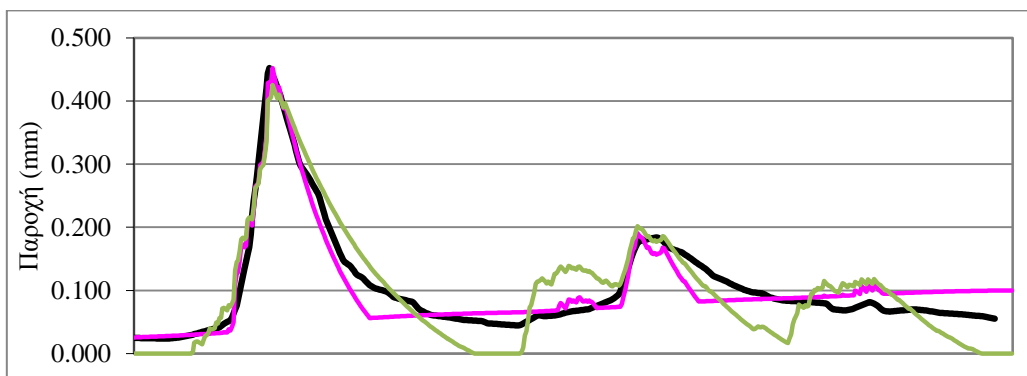


**Σχήμα 6.12** Το περιστατικό του Ιανουαρίου 1989 στον Ξερό ποταμό.



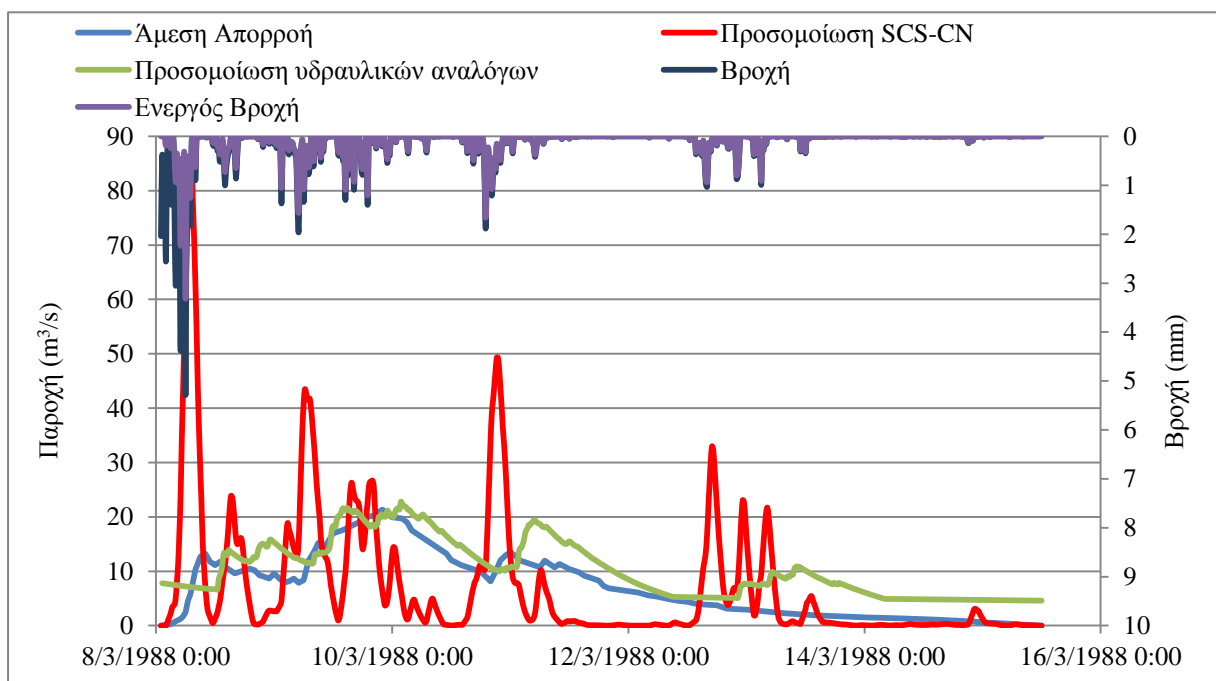
**Εικόνα 6.1** Χρήση του excel για προσομοίωση με το τελικό μοντέλο υδραυλικών αναλόγων.

Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο μοντέλων. Η υπεροχή του δεύτερου μοντέλου είναι φανερή ιδιαίτερα μετά την αιχμή του επεισοδίου.



**Σχήμα 6.13** Το περιστατικό 26-31 Δεκεμβρίου 1991 στον ποταμό Περιστερώνα. Η έντονη μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει το μετρημένο υδρογράφημα. Η λαδί γραμμή αντιπροσωπεύει την προσομοίωση με το αρχικό μοντέλο, ενώ η ροζ την προσομοίωση με το τελικό μοντέλο.

Κρίνεται σκόπιμο στο σημείο αυτό να παρουσιαστεί υπό μορφή διαγράμματος (Σχήμα 6.14) η σύγκριση του τελικού μοντέλου υδραυλικών αναλόγων με τη μέθοδο SCS-CN. Η αδυναμία της μεθόδου SCS-CN και η υπεροχή της μεθόδου υδραυλικών αναλόγων είναι προφανής.



**Σχήμα 6.14** Σύγκριση των προσομοιώσεων των μεθόδων SCS και υδραυλικών αναλόγων για το περιστατικό του Μαρτίου 1988 στον ποταμό Περιστερώνα.

### 6.2.3: Στατιστική επεξεργασία των παραμέτρων του μοντέλου

Το τελευταίο μοντέλο που περιγράφεται πιο πάνω χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συνόλου των διαθέσιμων περιστατικών. Κρίθηκε σκόπιμο κάθε περιστατικό να προσομοιωθεί περισσότερες από μία φορές, καθώς παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο επιτυγχάνει πολύ καλές προσομοιώσεις με σημαντικά διαφοροποιημένες τιμές παραμέτρων. Συγκεκριμένα, κάθε επεισόδιο προσομοιώθηκε πέντε ή έξι φορές και στη συνέχεια όλα τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν προς επεξεργασία σε ένα αρχείο excel. Συνολικά παρήχθησαν 100 σύνολα παραμέτρων για τον ποταμό Περιστερώνα και 82 για τον Ξερό ποταμό. Στους Πίνακες 6.2 και 6.3 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα διαδοχικών βελτιστοποιήσεων του ίδιου επεισοδίου, με σχεδόν ίδιες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.



**Πίνακας 6.2** Πέντε διαφορετικά σύνολα παραμέτρων για το περιστατικό του Μαρτίου 1988 στον ποταμό Περιστερώνα.

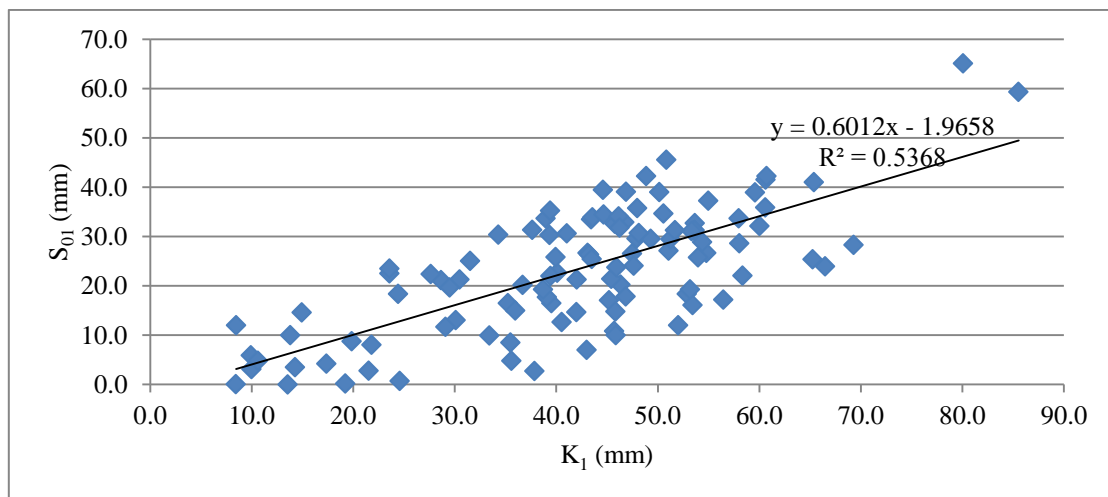
Βελτιστοποιήσεις:	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>
S <sub>01</sub>	18.4	7.0	10.8	2.7	9.950
S <sub>02</sub>	44.9	55.0	59.7	52.6	53.848
K <sub>1</sub>	52.9	43.0	45.7	37.9	45.882
K <sub>2</sub>	27.382	37.000	40.606	37.038	35.837
m	0.0010	0.0012	0.0012	0.0012	0.0011
l <sub>1</sub>	0.0140	0.0150	0.0154	0.0143	0.0148
l <sub>2</sub>	0.0052	0.0060	0.0050	0.0060	0.0060
Efficiency	0.809	0.813	0.809	0.810	0.813

**Πίνακας 6.3** Έξι διαφορετικά σύνολα παραμέτρων για το περιστατικό του Ιανουαρίου 1989 στον Ξερό ποταμό.

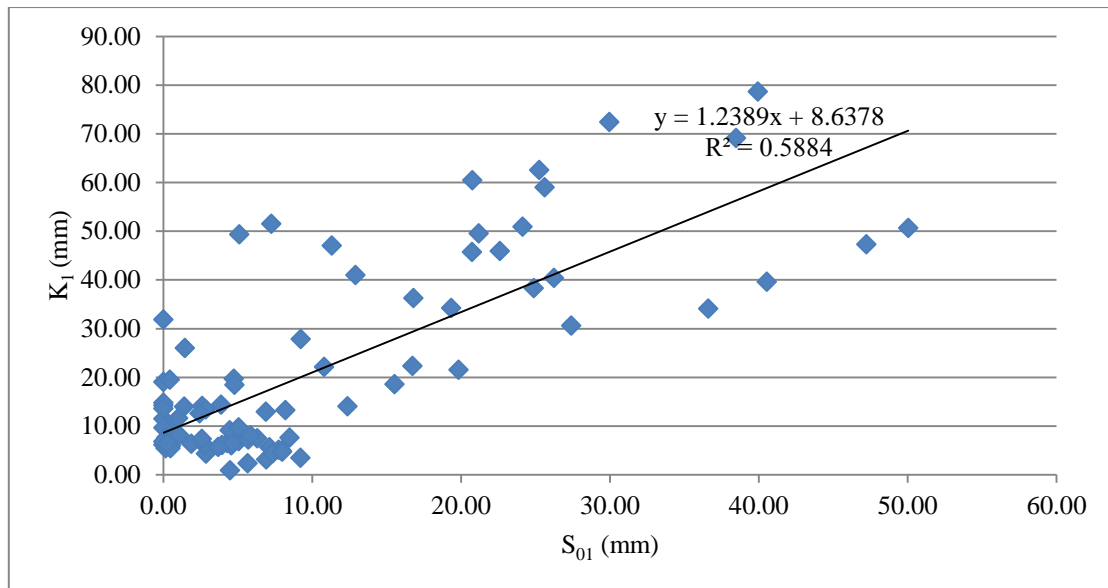
Βελτιστοποιήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>
S <sub>01</sub>	1.44	12.91	38.49	9.22	0.00	21.19
S <sub>02</sub>	57.00	76.02	32.67	21.98	51.20	45.06
K <sub>1</sub>	25.97	41.00	69.09	27.81	31.85	49.56
K <sub>2</sub>	75.78	75.33	48.75	49.64	64.34	49.39
m	0.004	0.003	0.001	0.004	0.003	0.003
l <sub>1</sub>	0.013	0.014	0.012	0.011	0.014	0.014
l <sub>2</sub>	0.003	0.001	0.005	0.006	0.004	0.001
Efficiency	0.927	0.922	0.903	0.903	0.923	0.909

Στους παραπάνω πίνακες η τιμή της συνάρτησης Efficiency αποτελεί κριτήριο της αποτελεσματικότητας της βελτιστοποίησης με μέγιστη τιμή τη μονάδα. Οι διαφορετικές τιμές κάθε παραμέτρου στους παραπάνω πίνακες μπορούν να ερμηνευθούν με βάση το φυσικό υπόβαθρο του μοντέλου. Για παράδειγμα, σε βελτιστοποιήσεις με αυξημένη τη χωρητικότητα της άνω δεξαμενής αυξάνεται και η αρχική της στάθμη. Επίσης, όσο περισσότερο νερό συνεισφέρει η άνω δεξαμενή, τόσο λιγότερο συνεισφέρει η κάτω, δηλαδή αυξανόμενου του  $l_1$ , το  $l_2$  μειώνεται.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις κρίθηκε απαραίτητη η διερεύνηση του ενδεχομένου ύπαρξης συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων ή/και των αρχικών συνθηκών του μοντέλου, γεγονός που θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί, ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo. Πράγματι, εντοπίστηκαν αξιόλογες συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων χωρητικότητας και των αρχικών συνθηκών του μοντέλου. Συγκεκριμένα, για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα εντοπίστηκε συσχέτιση μεταξύ της αρχικής στάθμης και της χωρητικότητας στην άνω δεξαμενή ( $S_{01}-K_1$ ), ενώ στη λεκάνη του Ξερού ποταμού εντοπίστηκε συσχέτιση αρχικής στάθμης και χωρητικότητας και για τις δύο δεξαμενές ( $S_{01}-K_1$  και  $S_{02}-K_2$ , βλ. Σχήματα 6.15 και 6.16). Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου ήταν εμφανώς ασυσχέτιστες.



**Σχήμα 6.15** Θετική συσχέτιση της αρχικής στάθμης και της χωρητικότητας της άνω δεξαμενής για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα.



**Σχήμα 6.16** Θετική συσχέτιση της αρχικής στάθμης και της χωρητικότητας της άνω δεξαμενής για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα έγινε μικρή τροποποίηση στο μοντέλο, ώστε οι αρχικές στάθμες των δύο δεξαμενών να δίδονται ως ποσοστό της χωρητικότητας (βαθμός κορεσμού), δηλαδή οι αρχικές στάθμες  $S_{01}$  και  $S_{02}$  αντικαταστάθηκαν από τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  ως εξής:

$$a = \frac{S_{01}}{K_1} \quad (6.41)$$

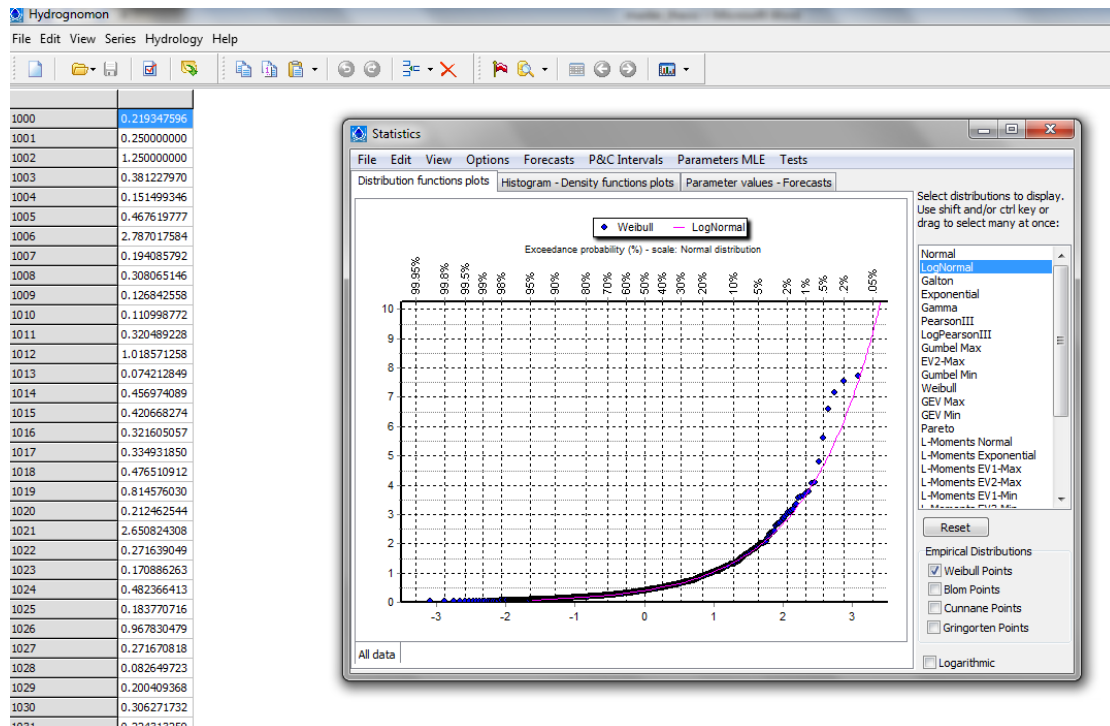
και

$$b = \frac{S_{02}}{K_2} \quad (6.42)$$

Στη συνέχεια ελέγχθηκαν και οι νέες παράμετροι για συσχετίσεις με τις υπόλοιπες παραμέτρους και διαπιστώθηκε ότι πράγματι είναι ασυσχέτιστες. Τελικά, για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα στο μοντέλο αντικαταστάθηκε μόνο η στάθμη  $S_{01}$  με το ποσοστό  $a$ , ενώ για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού αντικαταστάθηκαν και οι δύο στάθμες με τα ποσοστά  $a$  και  $b$ , μετά από συγκρίσεις που περιγράφονται πιο κάτω.

Μετά την ολοκλήρωση και τον έλεγχο των τροποποιήσεων έγινε στατιστική επεξεργασία των παραμέτρων του μοντέλου με συνδυασμένη χρήση των λογισμικών Υδρογνώμων και Πυθία (βλ. Εικόνα 6.2). Για κάθε λεκάνη χωριστά κάθε παράμετρος εισήχθηκε στον Υδρογνώμονα ως ετήσια χρονοσειρά και στη συνέχεια εφαρμόστηκε η καταλληλότερη

στατιστική κατανομή με το λογισμικό Pyθία. Τα στοιχεία των κατανομών καταγράφηκαν συγκεντρωτικά σε αρχείο excel. Σημειώνεται πως για τη σωστή χρήση των λογισμικών Υδρογνώμων και Pyθία ακολουθήθηκαν οι οδηγίες που παρέχονται στο σχετικό οδηγό χρήστη (Κοζάνης κ.ά., 2009).



**Εικόνα 6.2** Χρήση των λογισμικών Υδρογνώμων και Pyθία.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των παραμέτρων στις δύο λεκάνες παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.4 και 6.5. Οι κατανομές όλων των παραμέτρων παρατίθενται στο Παράρτημα Β (Σχήματα Β1 έως Β14).

**Πίνακας 6.4** Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των παραμέτρων για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα.

Παράμετρος	Κατανομή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
$\alpha$	κανονική	0.54	0.25
$S_{02}$	κανονική	45.78	18.18
$K_1$	κανονική	42.12	15.20
$K_2$	κανονική	52.59	17.17
$m$	κανονική	0.00531	0.00316
$l_1$	λογαριθμοκανονική	0.01502	0.00586
$l_2$	γάμμα	0.00298	0.00316

**Πίνακας 6.5** Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των παραμέτρων για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού.

Παράμετρος	Κατανομή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
$\alpha$	λογαριθμοκανονική	0.62	0.75
$b$	γάμμα	0.52	0.31
$K_1$	γάμμα	21.61	19.49
$K_2$	κανονική	52.52	14.62
$m$	λογαριθμοκανονική	0.00708	0.00960
$l_1$	λογαριθμοκανονική	0.00544	0.00443
$l_2$	γάμμα	0.00244	0.00216



## Κεφάλαιο 7: Προσομοίωση Monte Carlo

### 7.1 Προσομοίωση Monte Carlo με τυχαίες παραμέτρους και αρχικές συνθήκες

Διαθέτοντας όλα τα απαραίτητα στατιστικά στοιχεία των παραμέτρων του μοντέλου για τις δύο λεκάνες έγινε εφικτή η προσομοίωση Monte Carlo. Για το σκοπό αυτό γράφτηκε αλγόριθμος σε γλώσσα Matlab<sup>5</sup>. Ο αλγόριθμος αυτός έχει ως δεδομένο εισόδου τη 15λεπτη βροχόπτωση, την οποία διαβάζει από αρχείο txt. Στη συνέχεια παράγει 10 000 πλημμύρες με χρονική διάρκεια ίση με τη διάρκεια της βροχόπτωσης ως εξής: για κάθε πλημμύρα επιλέγονται αρχικά οι τιμές των παραμέτρων και των αρχικών συνθηκών με τυχαίο τρόπο από τις κατανομές που υπολογίστηκαν νωρίτερα. Έπειτα, για κάθε χρονικό βήμα εφαρμόζονται οι εξισώσεις του μοντέλου όπως περιγράφονται πιο πάνω, ενώ για την καλύτερη κατανόηση των εξαχθέντων αποτελεσμάτων, οι παροχές μετατρέπονται από mm σε m<sup>3</sup>/s σύμφωνα με τη Σχέση 7.1:

$$Q \left( \frac{m^3}{s} \right) = Q(mm) 1000 \frac{A}{t_a} \quad (7.1)$$

όπου  $t_a=9000$  (σε s) και  $A$  η έκταση της λεκάνης σε km<sup>2</sup>.

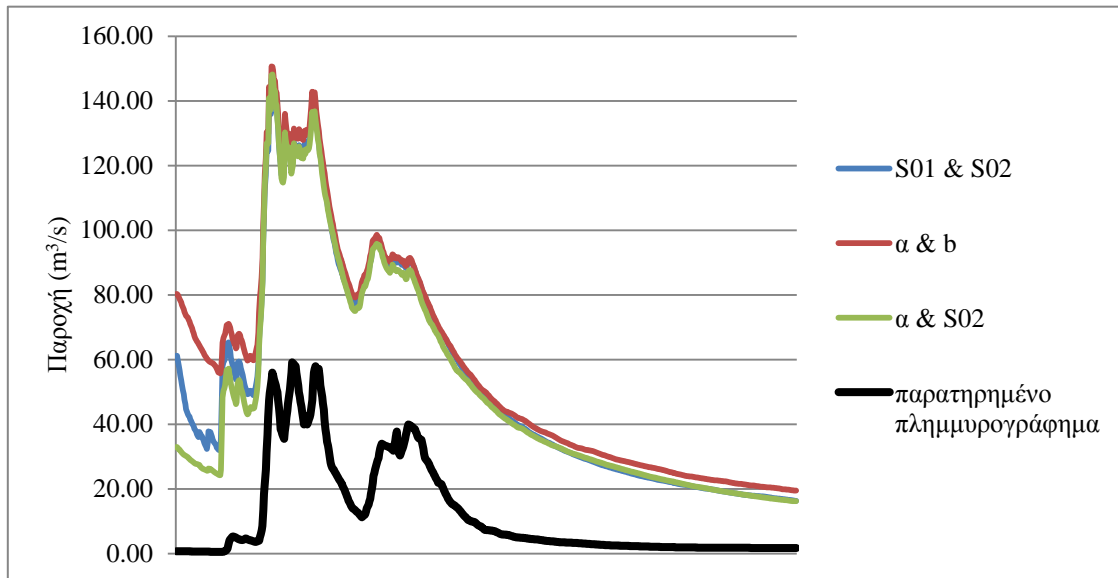
Ο αλγόριθμος έπειτα αποθηκεύει τις πλημμύρες σε πίνακα διαστάσεων  $n$ , 10 000, όπου  $n$  το πλήθος των χρονικών βημάτων του επεισοδίου και δημιουργεί νέο πίνακα διαστάσεων  $n$ , 7, στον οποίο παρουσιάζει τα εξής ποσοστημόρια για κάθε χρονικό βήμα: 0.5%, 2.5%, 5%, 50%, 95%, 97.5% και 99%. Τέλος, υπολογίζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των 10 000 τιμών για όλες τις παραμέτρους με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητας του αλγορίθμου.

Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε αρχικά για ορισμένα περιστατικά ώστε να διερευνηθούν οι τυχόν διαφορές στην επίδοση των παραλλαγών των μοντέλων που δημιουργήθηκαν για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της συσχέτισης μεταξύ αρχικής στάθμης και χωρητικότητας.

---

<sup>5</sup> Όλοι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση Monte Carlo παρατίθενται στο Παράρτημα Α2.

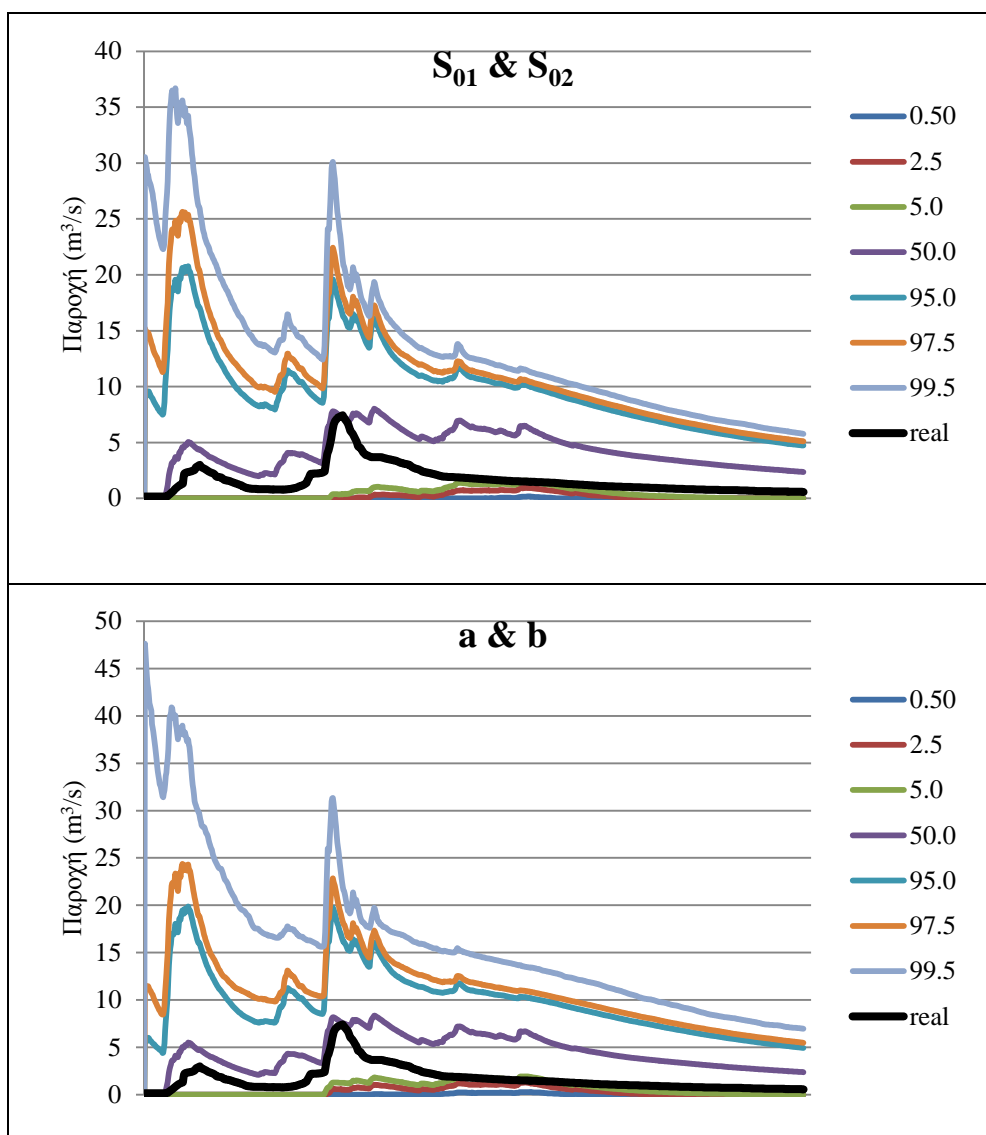
Στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα το μέγεθος των συσχετίσεων κατέστησε εξ αρχής σαφές ότι η καταλληλότερη παραλλαγή του μοντέλου είναι αυτή που περιλαμβάνει το ποσοστό  $a$  για την άνω δεξαμενή και τη στάθμη  $S_{02}$  για την κάτω. Τούτο επιβεβαιώθηκε από τις συγκρίσεις που έγιναν, καθώς όλα τα ποσοστημόρια πλησίασαν το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα (βλ. Σχήμα 7.1).



**Σχήμα 7.1** Το 99% ποσοστημόριο με τρεις παραλλαγές του μοντέλου για το περιστατικό του Νοεμβρίου 1994 στον ποταμό Περιστερώνα.

Αντίθετα με τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα, στη λεκάνη του Ξερού ποταμού δεν ήταν σαφές ποιος συνδυασμός των  $a$ ,  $b$ ,  $S_{01}$  και  $S_{02}$  έπρεπε να χρησιμοποιηθεί κι έτσι έγιναν συγκρίσεις για όλους τους συνδυασμούς. Παρατηρήθηκε, ότι με τις διάφορες παραλλαγές τα διάφορα ποσοστημόρια δεν μεταβάλλονταν όλα με τον ίδιο τρόπο: κάποια παρουσίαζαν βελτίωση και κάποια επιδείνωση σε σχέση με το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα. Τελικώς επιλέχθηκε η παραλλαγή στην οποία και οι δύο αρχικές στάθμες  $S_{01}$  και  $S_{02}$  αντικαταστάθηκαν με τα ποσοστά  $a$  και  $b$ , καθώς αν και το 99.5% ποσοστημόριο υστερεί σε αυτή την περίπτωση (είναι υψηλότερο από τις άλλες παραλλαγές κυρίως στην αρχή του επεισοδίου) τα υπόλοιπα ποσοστημόρια – και ιδιαίτερα τα 95% και 97.5% που εμφανίζονται ευκρινώς στα σχήματα – βελτιώνονται. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2 μία σύγκριση παραλλαγών του μοντέλου.





**Σχήμα 7.2** Δύο από τις τέσσερις παραλλαγές του μοντέλου οι οποίες συγκρίθηκαν μεταξύ τους για το περιστατικό του Φεβρουαρίου 1990 στον Ξερό ποταμό.

Πάντως, και στις δύο λεκάνες, σε όλα τα περιστατικά για τα οποία έγινε σύγκριση, οι διαφορές μεταξύ των παραλλαγών του μοντέλου δεν είναι σημαντικές, λαμβανομένου υπόψη ότι το 50% ποσοστημόριο που ενδιαφέρει ιδιαίτερος δεν παρουσίασε μεταβολές στις παραλλαγές.

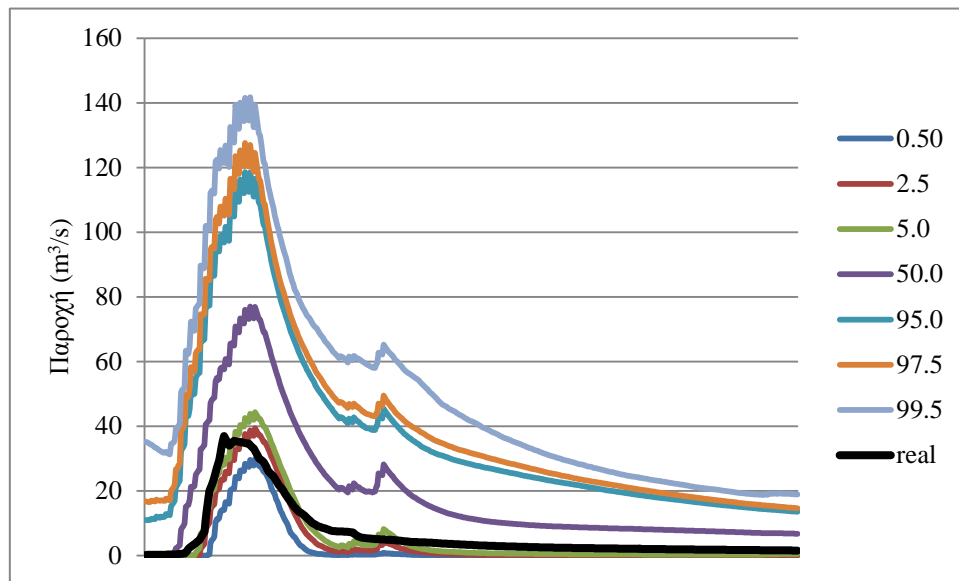
Μετά την τελική επιλογή των παραλλαγών του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο λεκάνες έγινε η προσομοίωση για όλα τα περιστατικά. Στη λεκάνη του Ξερού ποταμού προσομοιώθηκαν 16 περιστατικά και στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα 17 περιστατικά.

Σε πολλά περιστατικά, ιδιαίτερα στον Ξερό ποταμό, το παρατηρημένο υδρογράφημα βρίσκεται κοντά στο 50% ποσοστημόριο της προσομοίωσης Monte Carlo σε όλη τη διάρκεια του επεισοδίου. Σε λίγες περιπτώσεις, όμως, το υδρογράφημα ξέφυγε ακόμα και από τα όρια του 90% ποσοστημορίου (5-95%) και μάλιστα στην αιχμή του, σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τον υδρολόγο μηχανικό. Ως μέτρο επίδοσης της προσομοίωσης υπολογίστηκε για κάθε περιστατικό το ποσοστημόριο στο οποίο βρίσκεται η αιχμή της παρατηρημένης πλημμύρας με γραμμική παρεμβολή. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζεται για κάθε περιστατικό η θέση της πραγματικής αιχμής ως ποσοστημόριο των προσομοιώσεων Monte Carlo.

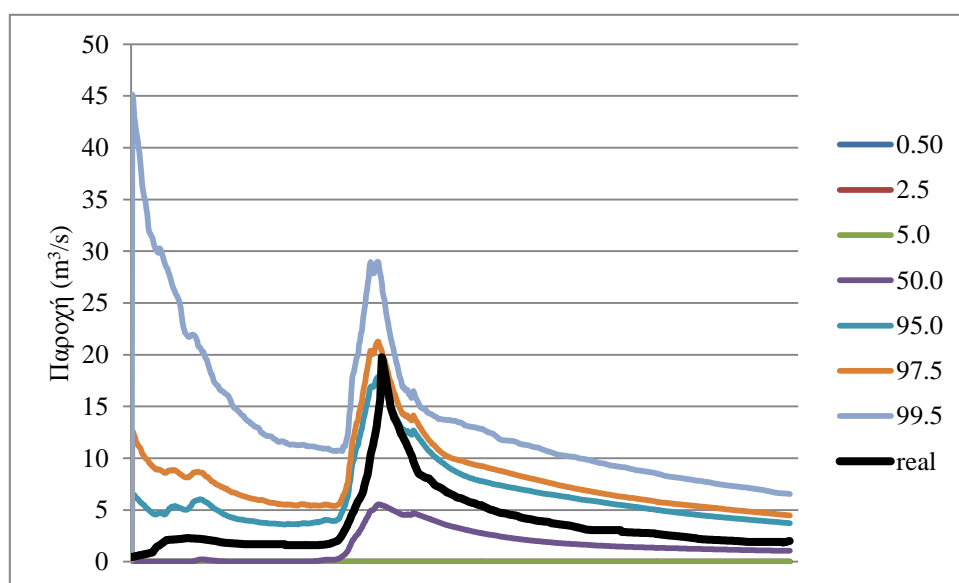
**Πίνακας 7.1** Το ποσοστημόριο στο οποίο βρίσκεται η προσομοιωμένη αιχμή για κάθε περιστατικό στις δύο λεκάνες.

Περιστερώνας ποταμός		Ξερός ποταμός	
Περιστατικό	Ποσοστημόριο (%)	Περιστατικό	Ποσοστημόριο (%)
1/1977	41.5	1/1989	87.3
2/1979	95.3	2/1990	44.3
2/1980	33.5	12/1991	18.9
3/1988	58.8	2/1992	96.4
12/1988	2.0	12/1992_a	38.4
1/1989	96.3	12/1992_b	51.5
12/1991_a	14.3	3/1993	51.5
12/1991_b	67.5	2/1994	61.4
2/1992	87.1	11/1994	54.8
12/1992	40.4	1/1995	55.8
11/1994	20.1	2/1996	59.3
12/2001	75.1	2/1997	55.5
1/2002	79.0	3/1998	62.8
2/2003	27.6	12/1998	44.2
1/2004_a	46.2	2/1999	56.8
1/2004_b	66.2	4/2000	50.2
2/2007	45.2		
<b>Μέση τιμή</b>	<b>52.7</b>		<b>55.6</b>
Τυπική απόκλιση	27.7		17.2

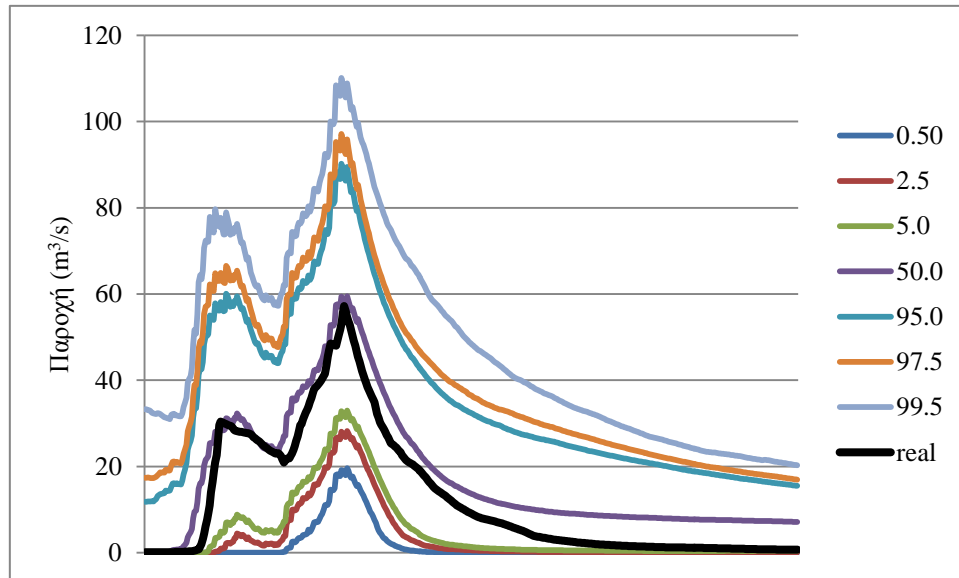
Ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι ο μέσος όρος των 10 000 προσομοιώσεων δίνει αιχμή προσομοιωμένης πλημμύρας κατά μέσο όρο πολύ κοντά στην παρατηρημένη αιχμή πλημμύρας. Στα Σχήματα 7.3, 7.4 και 7.5 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις προσομοίωσης Monte Carlo από τα πιο πάνω περιστατικά. Αναλυτικά οι προσομοιώσεις όλων των επεισοδίων παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.



**Σχήμα 7.3** Το περιστατικό του Δεκεμβρίου 1988 στον ποταμό Περιστερόνα στο οποίο παρατηρήθηκε η σημαντικότερη υπερεκτίμηση της παροχής αιχμής.



**Σχήμα 7.4** Το περιστατικό του Φεβρουαρίου 1992 στον Ξερό ποταμό στο οποίο σημειώθηκε η μεγαλύτερη υποεκτίμηση της παροχής αιχμής. Η απόκλιση των 95%, 97.5% και 99% ποσοστημορίων στην αρχή του περιστατικού οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι προσομοιώσεις Monte Carlo περιλαμβάνουν μέχρι στιγμής τυχαία επιλογή όχι μόνο για τις παραμέτρους αλλά και για τις αρχικές συνθήκες.



**Σχήμα 7.5** Το περιστατικό 11-16 Ιανουαρίου 2004 στον Περιστερώνα ποταμό, στο οποίο το σύνολο σχεδόν του πλημμυρογραφήματος προσεγγίζεται πολύ καλά από το 50% ποσοστημόριο της προσομοίωσης Monte Carlo.

## 7.2 Προσομοίωση Monte Carlo με σταθερές αρχικές συνθήκες

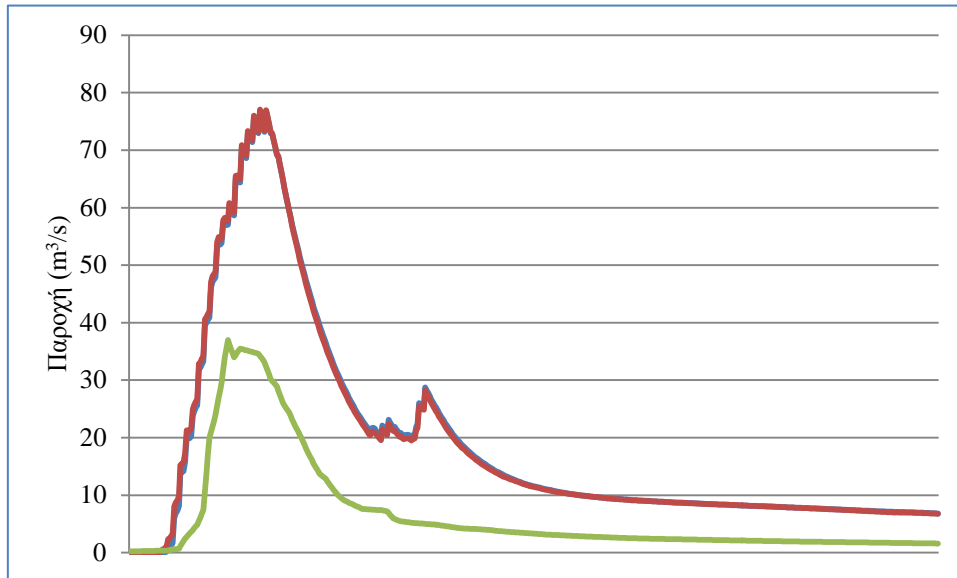
Στα πλαίσια της διερεύνησης της σημασίας του ρόλου των αρχικών συνθηκών στη προσομοίωση Monte Carlo θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνουν προσομοιώσεις στις οποίες οι αρχικές συνθήκες θα λαμβάνονται σταθερές και ίσες είτε με τις μέσες τιμές για όλα τα επεισόδια, είτε με κάποια αντιπροσωπευτική τιμή του συγκεκριμένου επεισοδίου.

### 7.2.1 Προσομοίωση Monte Carlo με αρχικές συνθήκες ίσες με τις μέσες τιμές όλων των επεισοδίων

Αντίθετα από τα ίσως αναμενόμενα, η προσομοίωση Monte Carlo με σταθερές αρχικές συνθήκες ίσες με τις μέσες τιμές δεν έδωσε βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με την

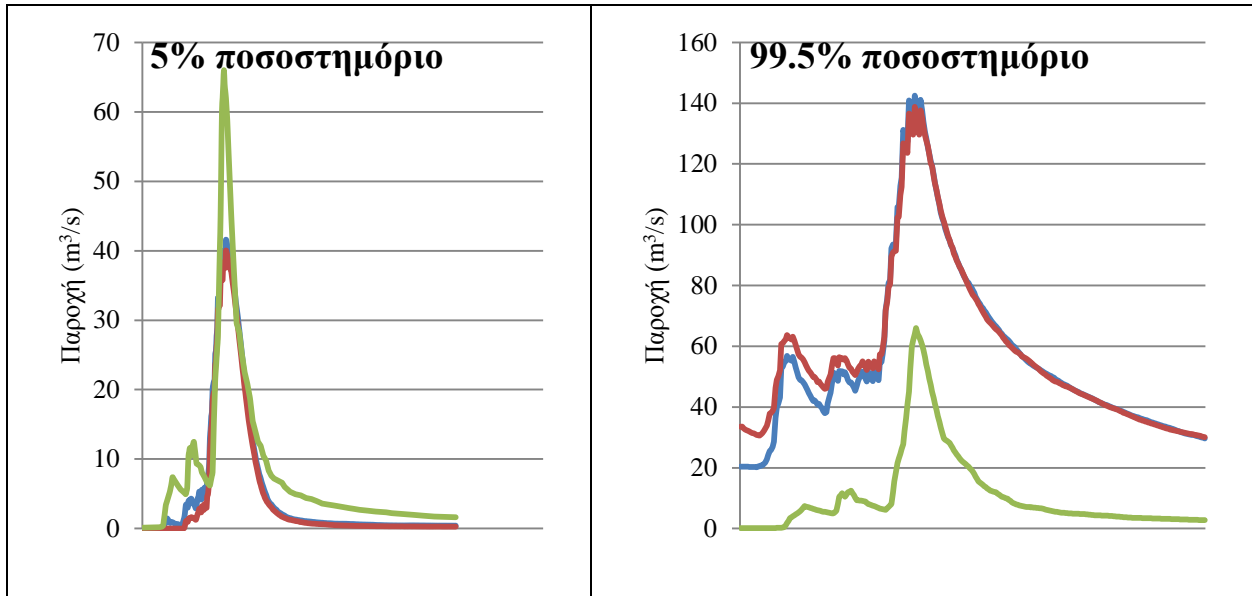
προσομοίωση στην οποία και οι αρχικές συνθήκες λαμβάνονταν με τυχαίο τρόπο σε κάθε μία από τις 10 000 επαναλήψεις. Μάλιστα, στα περισσότερα επεισόδια οι επιδόσεις της προσομοίωσης επιδεινώθηκαν ελαφρά.

Στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζεται ενδεικτικά περιστατικό του ποταμού Περιστερώνα στο οποίο οι προσομοιώσεις Monte Carlo με τυχαίες και σταθερές αρχικές συνθήκες ταυτίζονται, κάτι που παρατηρήθηκε σε όλα τα περιστατικά της λεκάνης.



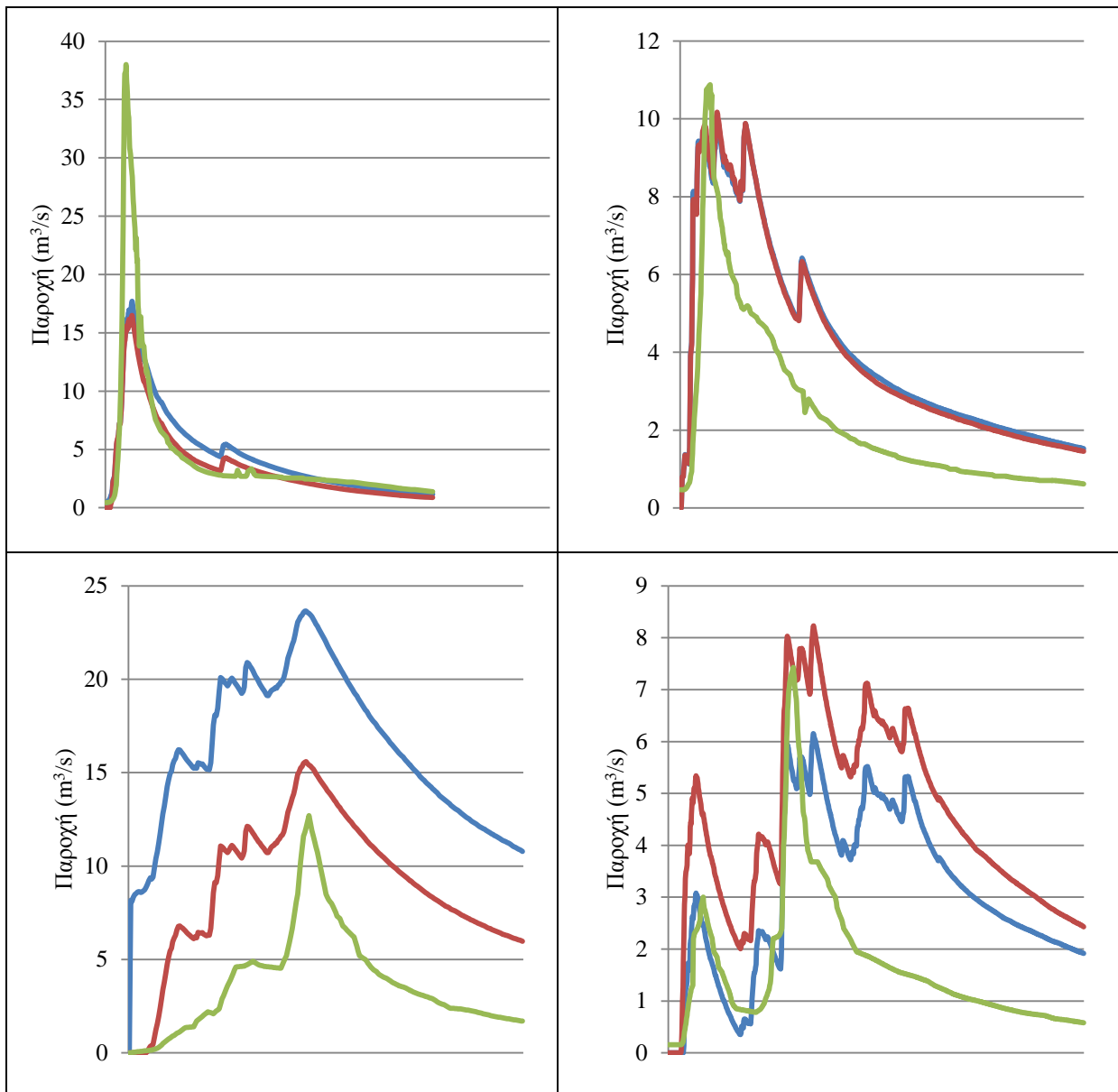
**Σχήμα 7.6** Το επεισόδιο του Δεκεμβρίου 1988 στον ποταμό Περιστερώνα. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται το πραγματικό πλημμυρογράφημα, ενώ το 50% ποσοστημόριο είναι πρακτικά κοινό στις δύο προσομοιώσεις (με τυχαίες και σταθερές αρχικές συνθήκες), κάτι που παρατηρήθηκε σε όλα τα επεισόδια στον ποταμό Περιστερώνα.

Στο Σχήμα 7.7 παρατηρούμε ότι τα ποσοστημόρια 5 και 99.5% στην περίπτωση της προσομοίωσης με σταθερές αρχικές συνθήκες προσεγγίζουν προς το πραγματικό υδρογράφημα. Αυτό σημαίνει ότι το εύρος των προσομοιώσεων μειώνεται κάπως. Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα σε όλα τα περιστατικά της λεκάνης. Πάντως, η μείωση του εύρους σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το 50% ποσοστημόριο παραμένει περίπου σταθερό σημαίνει ότι η θέση της πραγματικής αιχμής απομακρύνεται από το 50% ποσοστημόριο διότι ο υπολογισμός της θέσης γίνεται με γραμμική παρεμβολή.



**Σχήμα 7.7** Σύγκριση των προσομοιώσεων Monte Carlo στο επεισόδιο του Δεκεμβρίου 1992. Η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει το μετρημένο πλημμυρογράφημα, ενώ η μπλε και η κόκκινη αντιστοιχούν στα ποσοστημόρια της προσομοίωσης με σταθερές και τυχαίες αρχικές συνθήκες αντίστοιχα.

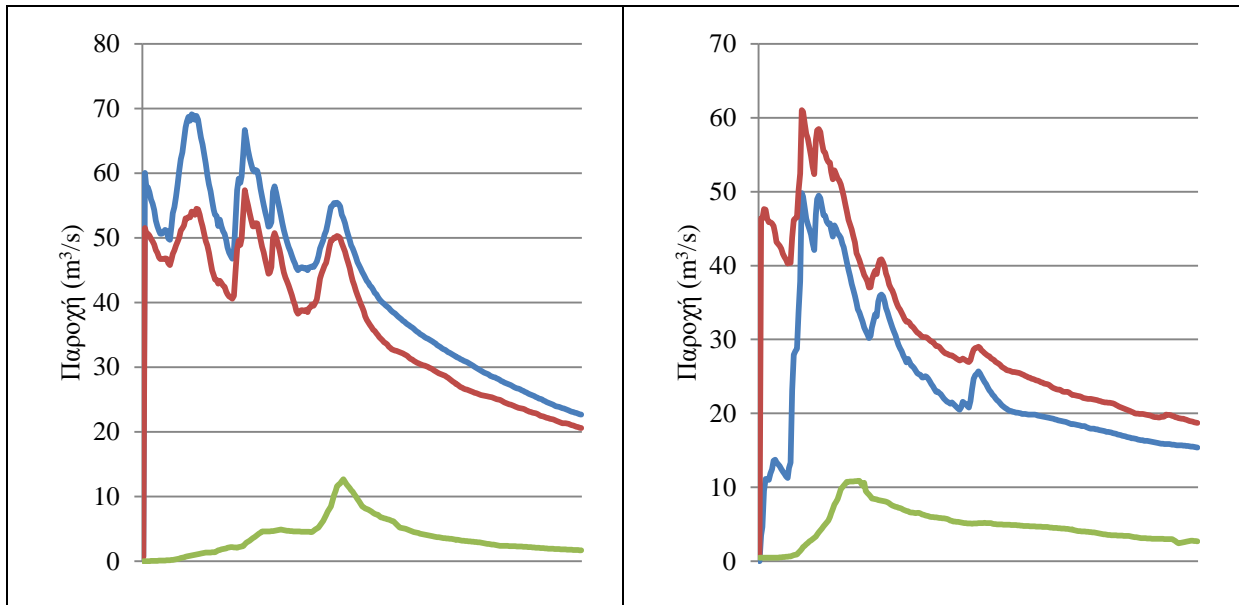
Στα Σχήματα 7.8 και 7.9 παρουσιάζεται αντίστοιχα η σύγκριση των προσομοιώσεων με τυχαίες και σταθερές αρχικές συνθήκες για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού.



**Σχήμα 7.8** Τέσσερα ενδεικτικά περιστατικά της λεκάνης του Ξερού ποταμού στα οποία απεικονίζεται με πράσινη γραμμή το πραγματικό πλημμυρογράφημα και με μπλε και κόκκινη το 50% ποσοστημόριο της προσομοίωσης Monte Carlo με σταθερές και τυχαίες αντίστοιχα αρχικές συνθήκες.

Στα δύο πρώτα διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα 50% ποσοστημόρια των δύο προσομοιώσεων σχεδόν ταυτίζονται. Κάτω δεξιά η προσομοίωση με τυχαίες αρχικές συνθήκες δίνει μεγαλύτερες παροχές από την προσομοίωση με σταθερές αρχικές συνθήκες,

ενώ κάτω αριστερά μικρότερες. Και στις δύο περιπτώσεις, η προσομοιωμένη αιχμή προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη αιχμή με τυχαίες αρχικές συνθήκες, κάτι το οποίο διασαφηνίζεται στη συνέχεια.



**Σχήμα 7.9** Δύο επεισόδια από τη λεκάνη του Ξερού ποταμού στα οποία παρουσιάζεται το 99.5% ποσοστημόριο των προσομοιώσεων. Η προσομοίωση με σταθερές αρχικές συνθήκες (μπλε γραμμή) σε κάποια περιστατικά απομακρύνεται, ενώ σε άλλα πλησιάζει προς το πραγματικό πλημμυρογράφημα σε σχέση με την προσομοίωση με τυχαίες αρχικές συνθήκες, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά.

Χρησιμοποιώντας ως ένα μέτρο επίδοσης της προσομοίωσης το ποσοστημόριο στο οποίο αντιστοιχεί η παρατηρημένη αιχμή, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, παρατηρούμε μικρή επιδείνωση σε όλα σχεδόν τα επεισόδια και στις δύο λεκάνες. Τούτο γίνεται φανερό από τους Πίνακες 7.2 και 7.3, καθώς παρατηρούμε ότι με τη νέα προσομοίωση η παρατηρημένη αιχμή απομακρύνεται από το 50% ποσοστημόριο σε σχέση με την αρχική προσομοίωση. Πάντως, η απομάκρυνση είναι της τάξης της μίας ποσοστιαίας μονάδας και στις δύο λεκάνες, μέγεθος που κρίνεται σχεδόν αμελητέο.



**Πίνακας 7.2** Σύγκριση των επιδόσεων των δύο διαφορετικών προσομοιώσεων με βάση το ποσοστημόριο στο οποίο βρίσκεται η παρατηρημένη αιχμή κάθε επεισοδίου στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα.

Περιστατικό	Ποσοστημόριο προσομοίωσης με τυχαίες αρχικές συνθήκες (%)	Ποσοστημόριο προσομοίωσης με σταθερές αρχικές συνθήκες (%)
1/1977	41.5	41.6
2/1979	95.3	97.7
2/1980	33.5	32.7
3/1988	58.8	61.8
12/1988	2.0	1.7
1/1989	96.3	96.6
12/1991_a	14.3	12.3
12/1991_b	67.5	69.3
2/1992	87.1	96.1
12/1992	40.4	39.2
11/1994	20.1	19.3
12/2001	75.1	77.6
1/2002	79.0	82.5
2/2003	27.6	23.6
1/2004_a	46.2	45.4
1/2004_b	66.2	69.9
2/2007	45.2	45.3
<b>Μέση τιμή</b>	<b>52.7</b>	<b>53.7</b>
Τυπική απόκλιση	27.7	29.7

**Πίνακας 7.3** Σύγκριση των επιδόσεων των δύο διαφορετικών προσομοιώσεων με βάση το ποσοστημόριο στο οποίο βρίσκεται η παρατηρημένη αιχμή κάθε επεισοδίου στη λεκάνη του Ξερού ποταμού.

Περιστατικό	Ποσοστημόριο προσομοίωσης με τυχαίες αρχικές συνθήκες (%)	Ποσοστημόριο προσομοίωσης με σταθερές αρχικές συνθήκες (%)
1/1989	87.3	88.4
2/1990	44.3	42.6
12/1991	18.9	17.8
2/1992	96.4	96.6
12/1992_a	38.4	36.8
12/1992_b	51.5	51.9
3/1993	51.5	51.4
2/1994	61.4	63.4
11/1994	54.8	54.9
1/1995	55.8	56.5
2/1996	59.3	64.2
2/1997	55.5	59.5
3/1998	62.8	65.7
12/1998	44.2	44.9
2/1999	56.8	59.3
4/2000	50.2	51.3
<b>Μέση Τιμή</b>	<b>55.6</b>	<b>56.6</b>
Τυπική Απόκλιση	17.2	17.9

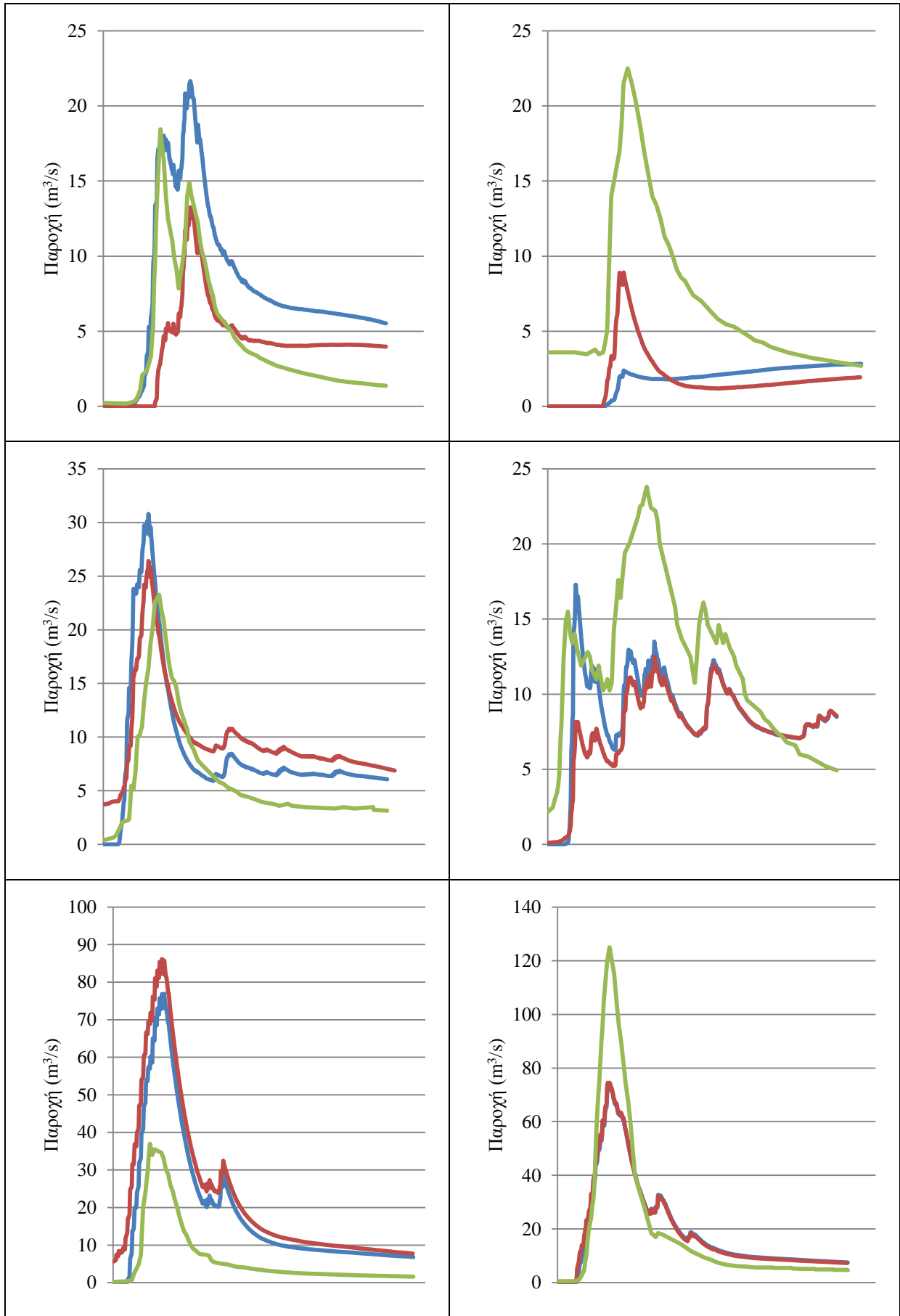
### *7.2.2 Προσομοίωση Monte Carlo με αρχικές συνθήκες σταθερές και ίσες με το βέλτιστο συνδυασμό για κάθε επεισόδιο*

Στα πλαίσια της προσπάθειας για τη δημιουργία ενός συστήματος έγκαιρης βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης πλημμύρας θα είναι ίσως ρεαλιστικό να γίνονται χονδροειδείς εκτιμήσεις για τις αρχικές συνθήκες της λεκάνης λίγο πριν τη στιγμή έναρξης της βροχόπτωσης. Για το σκοπό αυτό διερευνήθηκε η περίπτωση της προσομοίωσης Monte Carlo με τις αρχικές που αντιστοιχούν στην καλύτερη προσομοίωση από τις πέντε ή έξι που έγιναν για κάθε

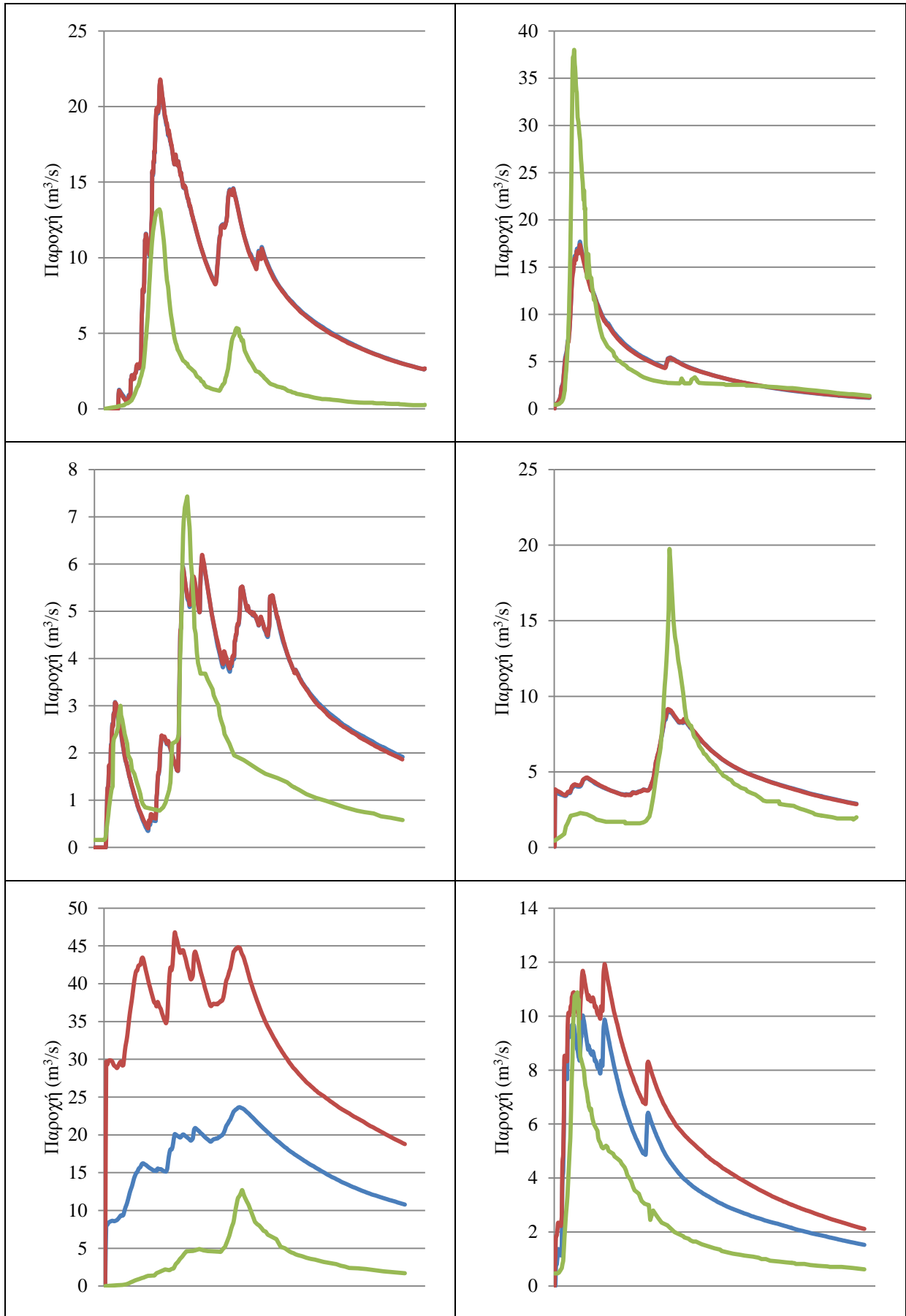
επεισόδιο, ώστε να διαπιστωθεί αν όντως κάτι τέτοιο θα μπορούσε να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα, ως αρχικές συνθήκες τέθηκαν τα  $S_{01}$  και  $S_{02}$  που είχαν υπολογιστεί για κάθε επεισόδιο πριν την τροποποίηση των αρχικών συνθηκών με τα ποσοστά πλήρωσης. Τούτο έγινε ώστε να τηρείται το φυσικό νόημα των αρχικών συνθηκών, καθώς το ποσοστό πλήρωσης ( $a$  ή  $b$ ) στερείται φυσικού νοήματος χωρίς την αντίστοιχη χωρητικότητα της δεξαμενής (άνω ή κάτω αντίστοιχα). Εδώ, όμως, επιδιώχθηκε οι παράμετροι (άρα και οι χωρητικότητες  $K_1$  και  $K_2$ ) να επιλέγονται μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo. Έτσι, η χρήση των αρχικών σταθμών κατέστη υποχρεωτική. Παρατηρήθηκε, ωστόσο, ότι και μόνο η προσομοίωση με χρήση των ποσοστών πλήρωσης οδήγησε σε παραπλήσια αποτελέσματα με την προσομοίωση με τις αρχικές στάθμες στα περισσότερα επεισόδια.

Η διαδικασία που περιγράφεται πιο πάνω ακολουθήθηκε για έξι από τα περιστατικά της κάθε λεκάνης. Στα παρακάτω Σχήματα 7.10 και 7.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη λεκάνη του Περιστερώνα και του Ξερού ποταμού αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.10** Τα 50% ποσοστημόρια των προσομοιώσεων Monte Carlo με σταθερές αρχικές συνθήκες για έξι επεισόδια από τη λεκάνη του Περιστερώνα ποταμού. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει το ποσοστημόριο της προσομοίωσης με αρχικές συνθήκες ίσες με τις μέσες τιμές όλων των επεισοδίων της λεκάνης, ενώ η κόκκινη της προσομοίωσης με αρχικές συνθήκες αυτές που προέκυψαν από την καλύτερη βελτιστοποίηση. Η πράσινη γραμμή είναι το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα.



**Σχήμα 7.11** Τα 50% ποσοστημόρια των προσομοιώσεων Monte Carlo με σταθερές αρχικές συνθήκες για έξι επεισόδια από τη λεκάνη του Ξερού ποταμού. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει το ποσοστημόριο της προσομοίωσης με αρχικές συνθήκες ίσες με τις μέσες τιμές όλων των επεισοδίων της λεκάνης, ενώ η κόκκινη της προσομοίωσης με αρχικές συνθήκες αυτές που προέκυψαν από την καλύτερη βελτιστοποίηση. Η πράσινη γραμμή είναι το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα.

Με βάση τα Σχήματα 7.10 και 7.11 συμπεραίνουμε ότι η προσομοίωση με τις μέσες αρχικές συνθήκες (που μάλιστα έχει γίνει με χρήση μόνο των ποσοστών πλήρωσης χωρίς την αντίστοιχη μέση χωρητικότητα, αλλά χρησιμοποιώντας σε κάθε επανάληψη την τυχαία χωρητικότητα που προκύπτει από τη προσομοίωση Monte Carlo) σπανίως υστερεί σε σχέση με την προσομοίωση με τις βέλτιστες αρχικές συνθήκες κάθε επεισοδίου. Συγκεκριμένα, στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώννα η προσομοίωση με μέσες αρχικές συνθήκες υστερεί μόνο σε ένα από τα έξι επεισόδια (το δεύτερο εικονιζόμενο) ενώ στα υπόλοιπα περιστατικά είτε οι δύο προσομοιώσεις σχεδόν ταυτίζονται, είτε μάλιστα η προσομοίωση με μέσες αρχικές συνθήκες υπερτερεί. Αντίστοιχα, στη λεκάνη του Ξερού ποταμού παρατηρούμε ότι σε τέσσερα επεισόδια τα 50% ποσοστημόρια των δύο προσομοιώσεων ταυτίζονται ενώ σε δύο επεισόδια η προσομοίωση που έγινε με τις μέσες τιμές των αρχικών συνθηκών παράγει 50% ποσοστημόριο αρκετά πιο κοντά στο παρατηρημένο πλημμυρογράφημα.

Από όλα τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η προσομοίωση που λαμβάνει τυχαία τις παραμέτρους και τις αρχικές συνθήκες ταυτόχρονα είναι στις περισσότερες περιπτώσεις εξίσου αξιόπιστη με προσομοιώσεις που λαμβάνουν σταθερές αρχικές συνθήκες, ακόμη μάλιστα κι αν οι αρχικές συνθήκες έχουν ληφθεί για κάθε περιστατικό χωριστά από τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης. Βέβαια, στην περίπτωση των τυχαίων αρχικών συνθηκών το εύρος των αποτελεσμάτων συχνά αυξάνεται (τα μεγάλα ποσοστημόρια άνω του 95% αυξάνονται και τα μικρά κάτω του 5% μειώνονται), ωστόσο το 50% ποσοστημόριο είναι ικανοποιητικό και κάποιες φορές πλησιέστερο στο πραγματικό πλημμυρογράφημα σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις με σταθερές αρχικές συνθήκες.





## Κεφάλαιο 8: Σχεδιασμός με προσομοίωση Monte Carlo

### 8.1 Υετόγραμμα σχεδιασμού

Εκτός από τη διερεύνηση των επιδόσεων της προσομοίωσης Monte Carlo για ιστορικά περιστατικά, η μέθοδος δοκιμάστηκε και για την εκτίμηση πλημμύρας σχεδιασμού από συνθετικές βροχοπτώσεις.

Αρχικά, παρήχθησαν συνθετικές βροχοπτώσεις από τις όμβριες καμπύλες που θεωρούνται κατάλληλες για εφαρμογή στην Κύπρο με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων blocks η οποία εφαρμόστηκε σε περιβάλλον excel. Οι όμβριες καμπύλες Κύπρου σύμφωνα με το Μετεωρολογικό Σημείωμα αρ. 15 (Πασιαρδής, 2009) δίδουν ένταση βροχόπτωσης σχεδιασμού σύμφωνα με τη Σχέση 8.1:

$$i = \frac{(\lambda\psi + \frac{\lambda}{\kappa}((- \ln(1 - \frac{1}{T}))^{-\kappa} - 1))}{(d + \theta)^\eta} \quad (8.1)$$

όπου  $T$  η περίοδος επαναφοράς σε έτη,  $d$  ο χρόνος που μεσολαβεί από την αρχή του επεισοδίου έως το τρέχον χρονικό βήμα και  $\eta$ ,  $\theta$ ,  $\kappa$ ,  $\lambda$ ,  $\psi$  συντελεστές με τιμές που δίδονται από το Μετεωρολογικό Σημείωμα αρ. 15. Οι τιμές για τους σταθμούς που αφορούν τις δύο υπό μελέτη λεκάνες δίδονται στον Πίνακα 8.1 (για το μετεωρολογικό σταθμό Μούττη της Αγκαστίνας δεν υπάρχουν διαθέσιμοι συντελεστές).

**Πίνακας 8.1** Οι συντελεστές ομβρίων καμπυλών Κύπρου (Πηγή: Γαλιούνα, 2011).

Μετεωρολογικός Σταθμός	$\eta$	$\theta$	$\kappa$	$\lambda$	$\psi$
Γεφύρι Παναγιάς	0.816	0.162	0.12	11.52	1.78
Απλίκι	0.749	0.081	0.02	7.87	2.47
Άλωνα	0.732	0.093	0.21	9.11	2.28
Πάνω Βρύση	0.761	0.120	-0.08	7.51	2.78
Αλωνούδι	0.732	0.093	0.21	9.11	2.28

Για κάθε έναν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς αρχικά υπολογίστηκε η ένταση της βροχόπτωσης για κάθε χρονικό βήμα για όλο το διάστημα των 24 ωρών της διάρκειας του συνθετικού επεισοδίου. Δημιουργήθηκε με αυτό τον τρόπο μία φθίνουσα σειρά εντάσεων.

Έπειτα υπολογίστηκε το αθροιστικό σημειακό ύψος βροχής και ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής  $\varphi$  για κάθε χρονικό βήμα  $i$  σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$h_{\text{σημειακό}}(i) = d(i)i(i) \quad (8.2)$$

$$\varphi = \max\left(\frac{1-0.048*A^{0.36-0.01\ln A}}{d^{0.35}}, 0.25\right) \quad (8.3)$$

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν το αθροιστικό επιφανειακό ύψος βροχής και το μερικό ύψος βροχής  $Dh$  που αντιστοιχεί σε κάθε 15λεπτο χρονικό βήμα  $i$  ως εξής:

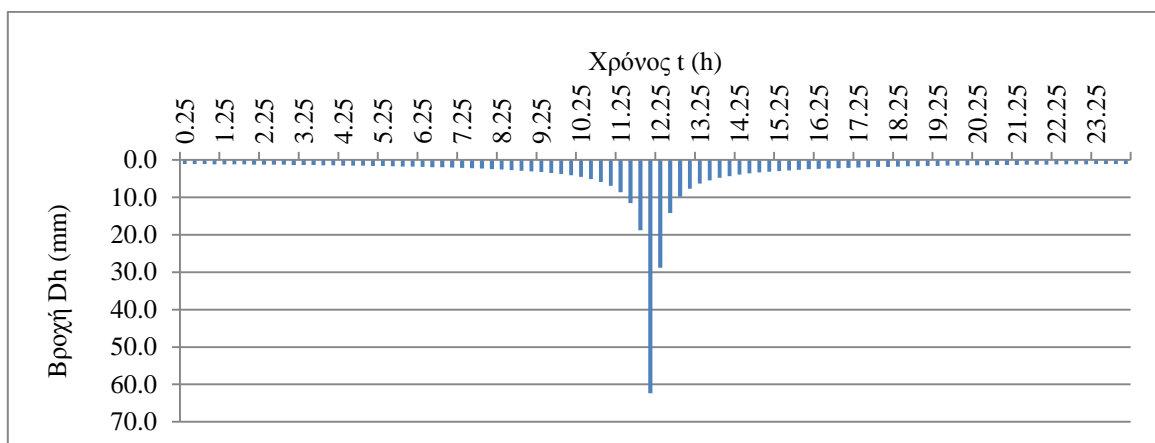
$$h_{\text{επιφανειακό}}(i) = \varphi(i)h_{\text{σημειακό}}(i) \quad (8.4)$$

$$Dh(i) = h_{\text{σημειακό}}(i) - h_{\text{σημειακό}}(i-1), \quad \text{για } i > 1 \quad (8.5)$$

ενώ

$$Dh(1) = h_{\text{σημειακό}}(1) \quad (8.6)$$

Τέλος, τα μερικά ύψη βροχής τοποθετήθηκαν χρονικά σύμφωνα με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων block ώστε να δημιουργήσουν μία καταιγίδα σχεδιασμού 24 ωρών με τη μέγιστη ένταση στις 12 ώρες, στο μέσο του επεισοδίου. Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε για κάθε έναν από τους πέντε σταθμούς και για περιόδους επαναφοράς  $T=20, 50, 100$  και  $1000$  έτη. Στο Σχήμα 8.1 παρατίθεται ενδεικτικά το νετογράφημα που αντιστοιχεί στο Αλωνούδι για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  έτη με τη σημείωση ότι όλα τα νετογραφήματα που παρήχθησαν έχουν ίδια μορφή.



**Σχήμα 8.1** Το νετογράφημα της καταιγίδας σχεδιασμού διάρκειας 24 ωρών και περιόδου επαναφοράς 1000 ετών για το μετεωρολογικό σταθμό στο Αλωνούδι στη λεκάνη απορροής του Ξερού ποταμού.

Μετά την παραγωγή των συνθετικών βροχοπτώσεων για όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς υπολογίστηκε η επιφανειακή βροχόπτωση για το σύνολο της λεκάνης με τους συντελεστές Thiessen που δίδονται στο Κεφάλαιο 5. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το σύνολο βροχής επεισοδίου για  $T=1000$  έτη ξεπερνά τα 200 mm.

## **8.2 Ανάλυση μεγίστων παρατηρημένων παροχών και προσομοίωση Monte Carlo**

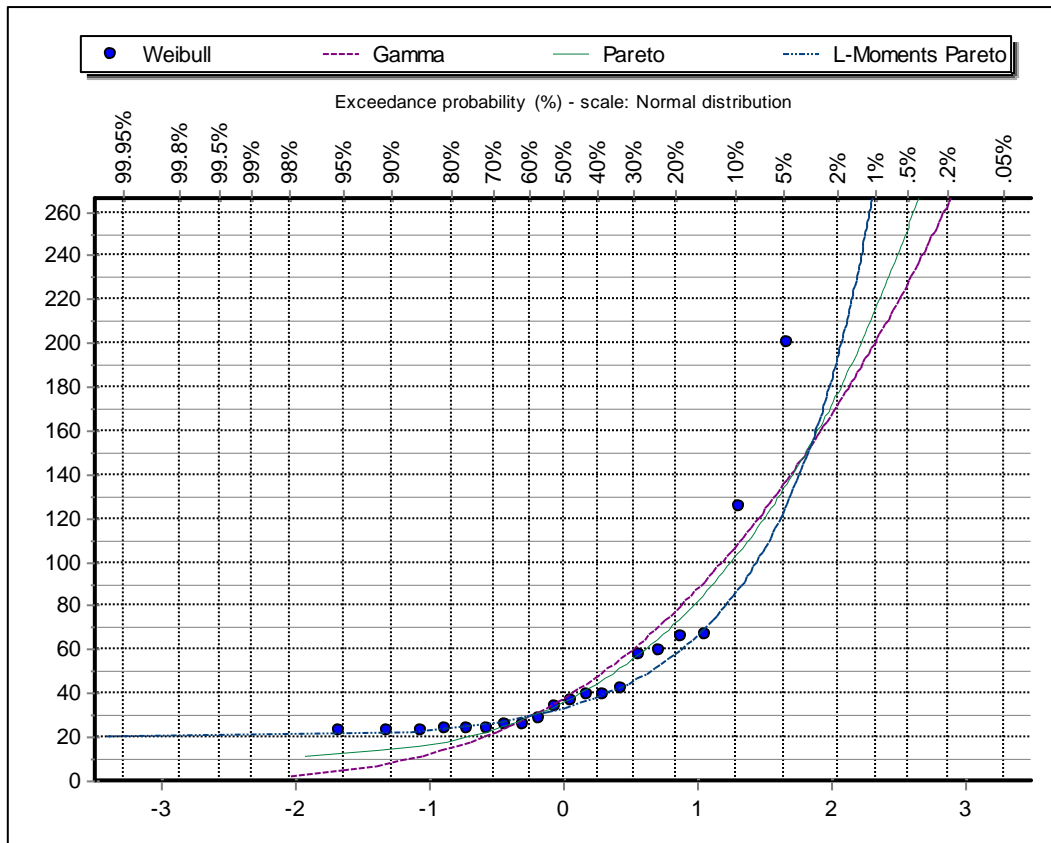
Πριν τον υπολογισμό των πλημμυρικών παροχών με προσομοίωση Monte Carlo έγινε ανάλυση των μεγίστων παρατηρημένων παροχών. Το μήκος των διαθέσιμων χρονοσειρών είναι 42 και 36 έτη στις λεκάνες Περιστερώνα και Ξερού ποταμού αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, ασφαλείς συγκρίσεις της εμπειρικής κατανομής με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo μπορούν από τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς να γίνουν μόνο για  $T=20$  έτη. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς έγινε η ανάλυση μεγίστων μηνιαίων παροχών με την εφαρμογή κατάλληλων στατιστικών κατανομών. Για τη στατιστική επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Υδρογνώμων και Πυθία.

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται οι 20 μεγαλύτερες παρατηρημένες μηνιαίες παροχές στους δύο ποταμούς.

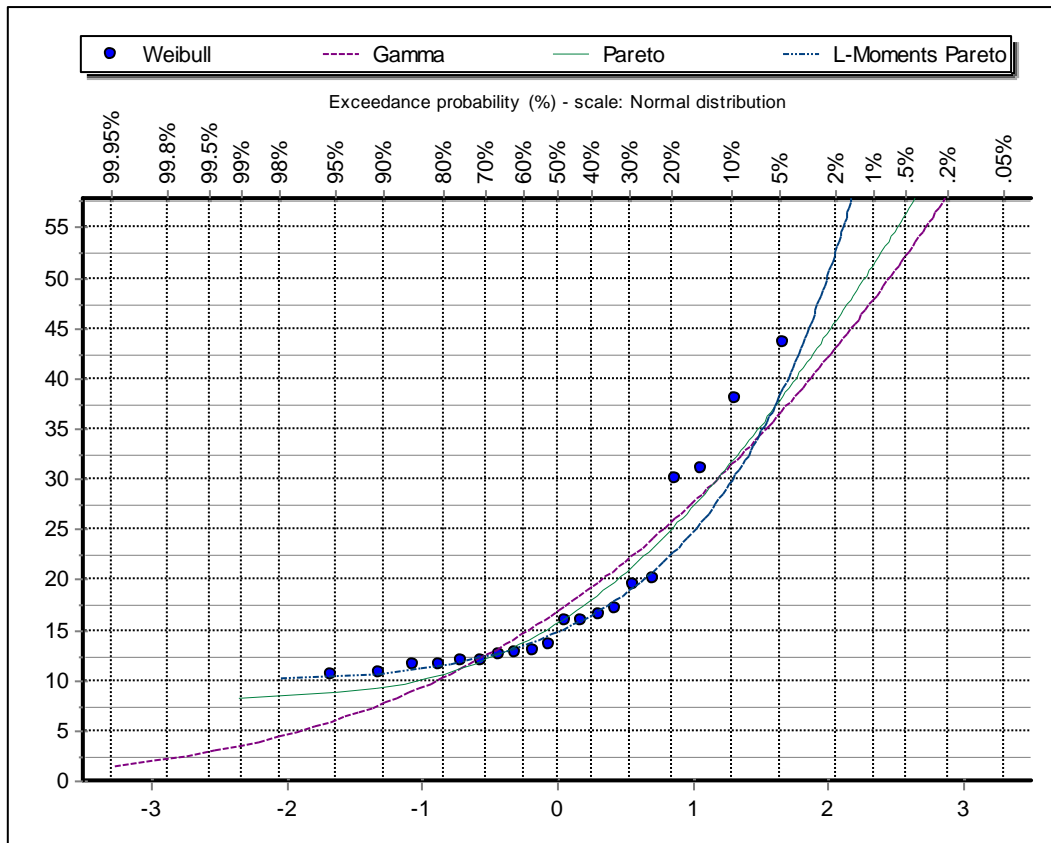
**Πίνακας 8.2** Οι 10 μεγαλύτερες μηνιαίες παροχές σε m<sup>3</sup>/s στους υπό μελέτη ποταμούς.

Περιστερώνας	Ξερός
200	43.5
125	38
66.4	31
66	30
59	20
57.2	19.5
42	17
39.4	16.5
39	16
37	16
34	13.5
28	13
25.6	12.8
25.5	12.5
24	12
23.9	12
23.8	11.5
23	11.5
23	10.8
22.4	10.6

Στα Σχήματα 8.2 και 8.3 παρουσιάζεται η εφαρμογή διάφορων στατιστικών κατανομών στις μέγιστες παροχές στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα και του Ξερού ποταμού. Η καλύτερη προσαρμογή επιτεύχθηκε από την κατανομή Pareto προσαρμοσμένη με τη μέθοδο των L-ροπών.



**Σχήμα 8.2** Οι κατανομές Gamma και Pareto και η κατανομή Pareto προσαρμοσμένη με τη μέθοδο των L-ροπών για τις μέγιστες παροχές στον ποταμό Περιστερώνα.



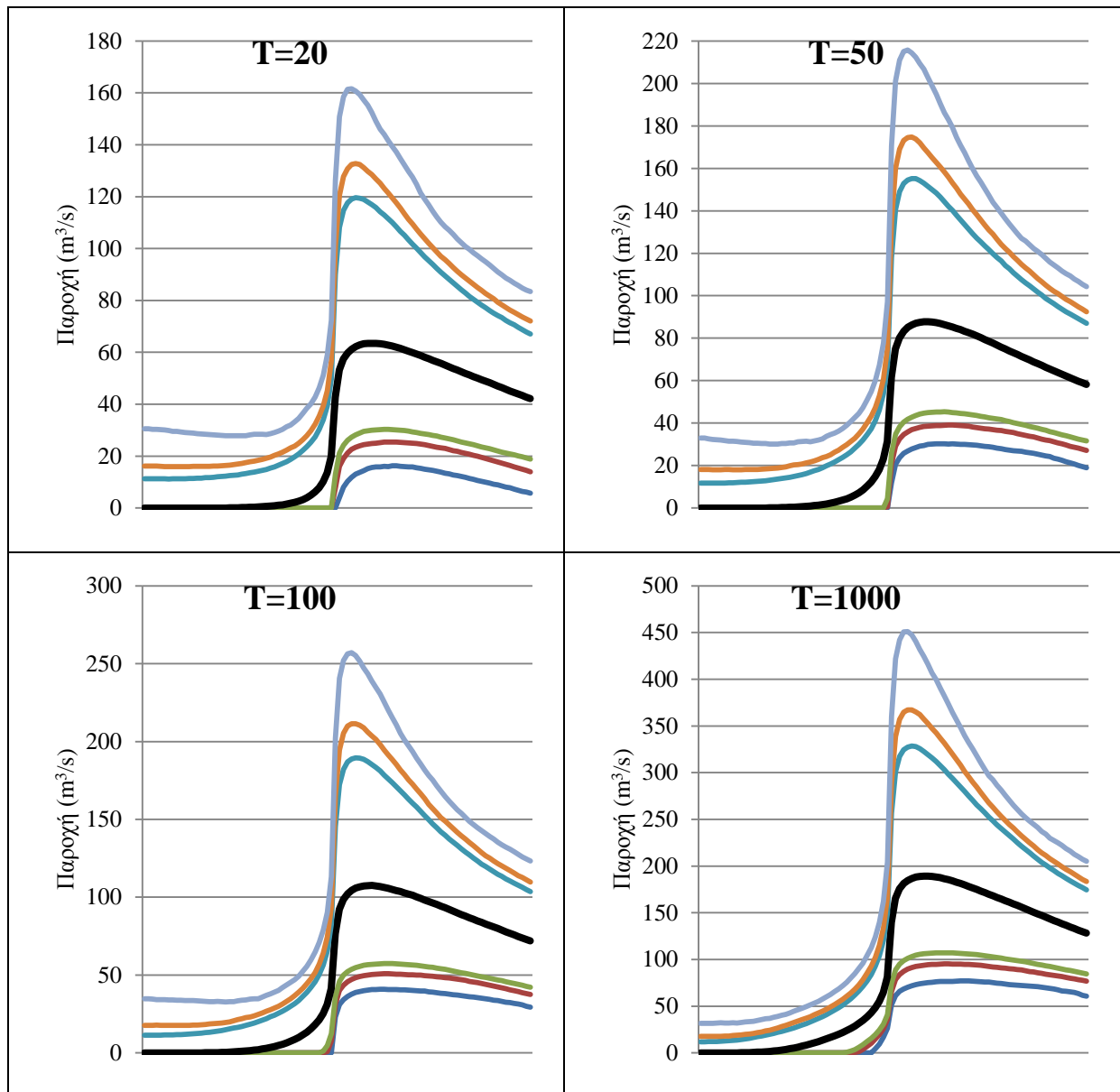
**Σχήμα 8.3** Οι κατανομές Gamma και Pareto και η κατανομή Pareto προσαρμοσμένη με τη μέθοδο των L-ροπών για τις μέγιστες παροχές στον Ξερό ποταμό.

Με χρήση της κατανομής Pareto προσαρμοσμένης με τη μέθοδο των L-ροπών γίνεται πρόβλεψη (forecast) της πλημμυρικής παροχής για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.3.

**Πίνακας 8.3** Πρόβλεψη πλημμυρικών αιχμών για περίοδο επαναφοράς 20, 50 , 100 και 1000 έτη με την κατανομή L-Moments Pareto.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Περιστερώνας ποταμός	Ξερός ποταμός
20	121.8	38.2
50	193.1	52.3
100	270.8	65.6
1000	805.5	131.8

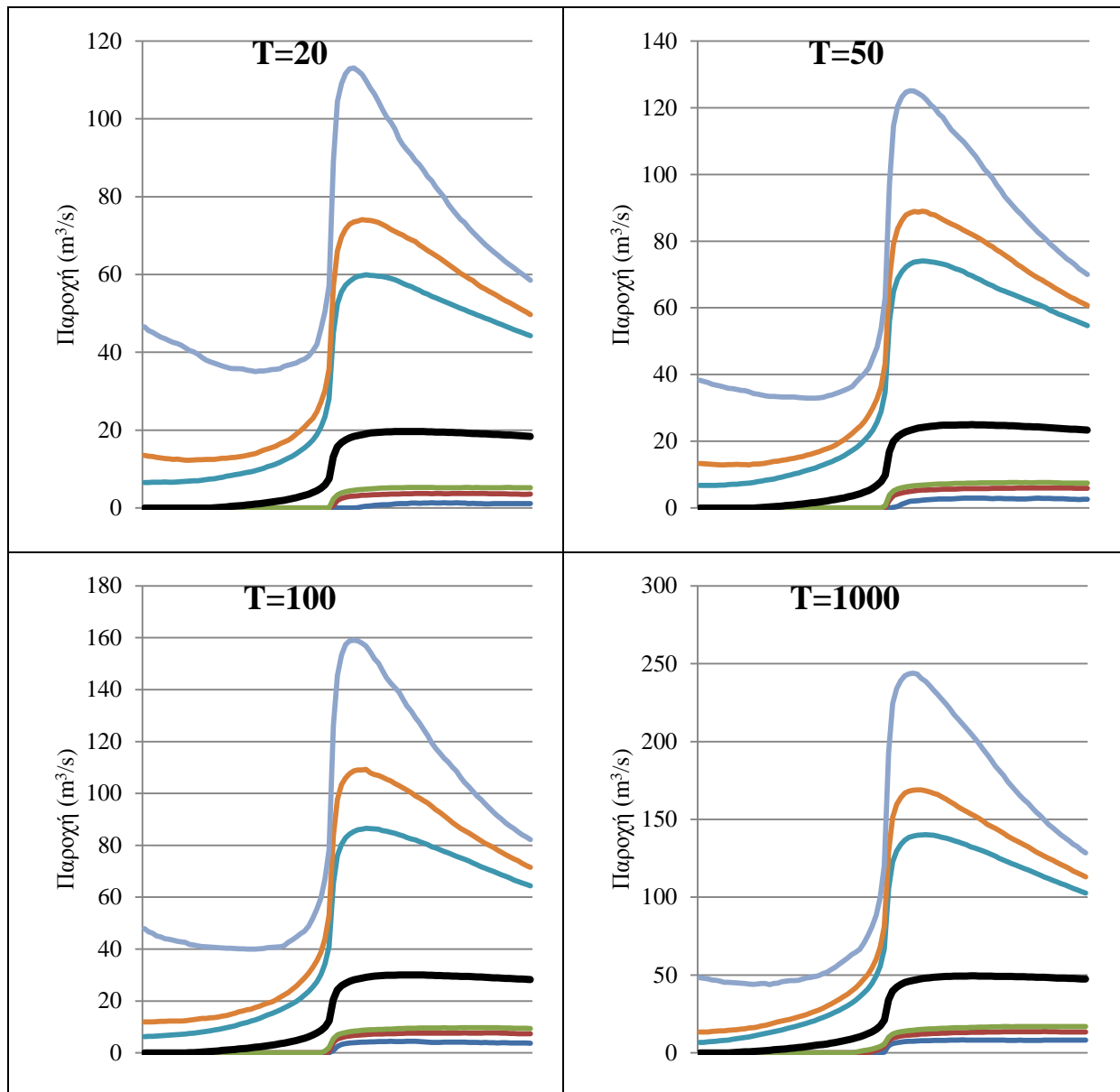
Ακολούθως έγινε η προσομοίωση Monte Carlo, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στα Σχήματα 8.4 και 8.5.



**Σχήμα 8.4** Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo για τις συνθετικές βροχοπτώσεις στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα 0.5%, 2.5%, 5%, 50%, 95%, 97.5% και 99.5% ποσοστημόρια. Η έντονη μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στο 50% ποσοστημόριο.

Η μέγιστη παροχή που έχει καταγραφεί στο σταθμό Γεφύρι Παναγιάς στο διάστημα 1965-2008 είναι τα  $200 m^3/s$  το Δεκέμβριο του 1968, παροχή αιχμής που σύμφωνα με το 50%

ποσοστημόριο των προσομοιώσεων Monte Carlo έχει περίοδο επαναφοράς πάνω από 1000 έτη.



**Σχήμα 8.5** Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo για τις συνθετικές βροχοπτώσεις στη λεκάνη του Ξερού ποταμού. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα 0.5%, 2.5%, 5%, 50%, 95%, 97.5% και 99.5% ποσοστημόρια. Η έντονη μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στο 50% ποσοστημόριο.

Στο σταθμό στους Λαζάρηδες (Αλωνούδι) η μέγιστη παροχή που έχει καταγραφεί στο διάστημα 1970-2006 είναι τα  $43.5 m^3/s$  τον Ιανουάριο του 2002, παροχή αιχμής που



σύμφωνα με το 50% ποσοστημόριο των προσομοιώσεων Monte Carlo έχει περίοδο επαναφοράς πάνω από 100 έτη.

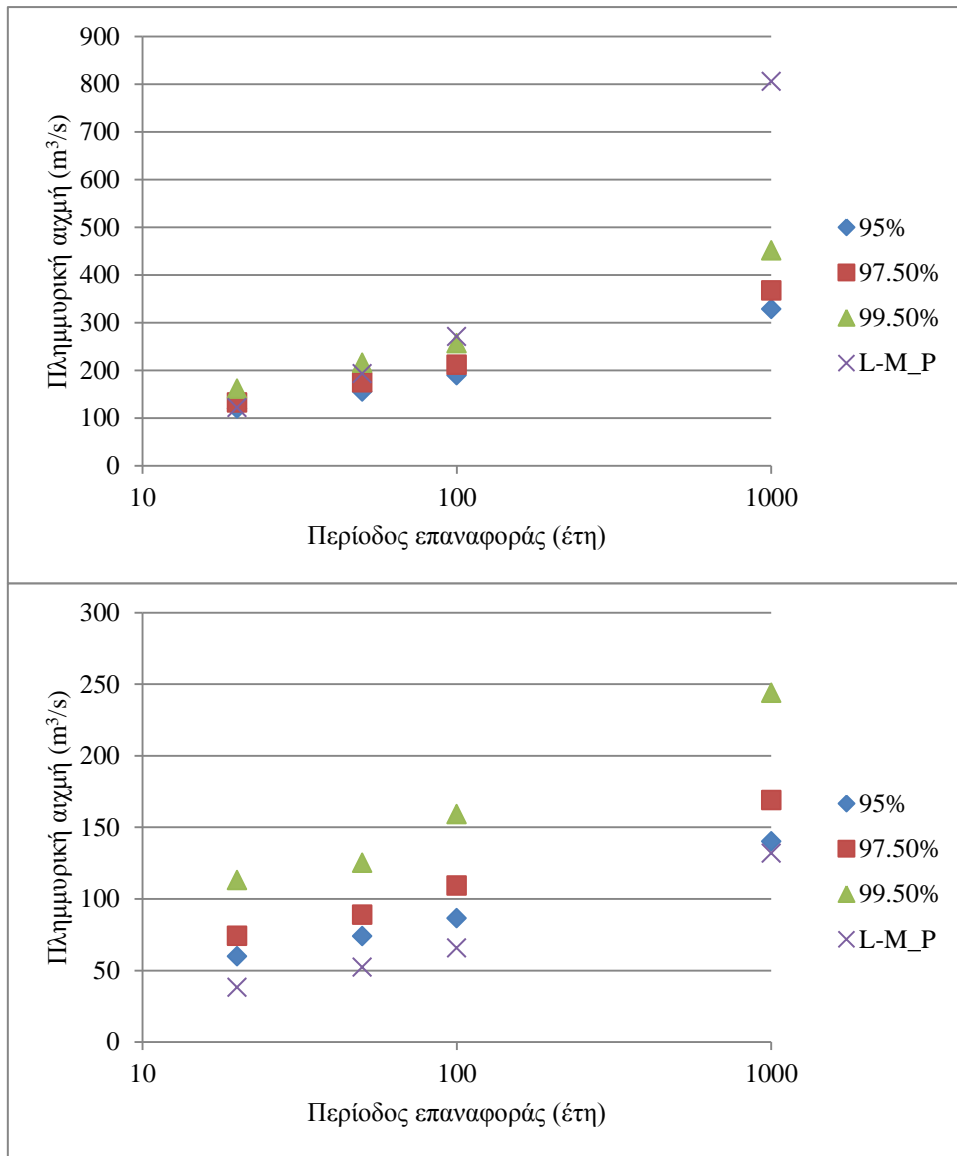
Σύμφωνα με τον Πίνακα 8.2 στον ποταμό Περιστερώνα παροχές περίπου 60 m<sup>3</sup>/s παρατηρήθηκαν τέσσερις φορές σε διάστημα 42 ετών, κάτι που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς περίπου 10 έτη έναντι 20 ετών που δίνει το 50% ποσοστημόριο της προσομοίωσης Monte Carlo. Αντίστοιχα στον Ξερό ποταμό παροχές περίπου 40 m<sup>3</sup>/s παρατηρήθηκαν δύο φορές σε διάστημα 36 ετών, δηλαδή με μια περίοδο επαναφοράς περίπου 18 έτη, ενώ για περίοδο επαναφοράς 20 έτη η προσομοίωση έδωσε μόλις τη μισή παροχή αιχμής (περίπου 20 m<sup>3</sup>/s). Παρατηρείται συνεπώς και στις δύο περιπτώσεις ότι το 50% ποσοστημόριο υποεκτιμά τις παροχές αιχμής. Πάντως, η χρήση 90% εύρους αβεβαιότητας (5-95%) περιλαμβάνει ασφαλώς τις παρατηρημένες αιχμές.

Εκτός από τη σύγκριση με την εμπειρική κατανομή είναι χρήσιμο να συγκριθεί η προσομοίωση Monte Carlo με τη στατιστική κατανομή που εφαρμόστηκε καλύτερα στις παρατηρημένες μέγιστες αιχμές. Η σύγκριση παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.4.

**Πίνακας 8.4** Πλημμυρικές αιχμές σε m<sup>3</sup>/s για διάφορες περιόδους επαναφοράς στις δύο λεκάνες με προσομοίωση Monte Carlo και με τη στατιστική κατανομή L-Moments Pareto.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Περιστερώνας ποταμός		Ξερός ποταμός	
	Monte Carlo 50% ποσοστημόριο	L-Moments Pareto	Monte Carlo 50% ποσοστημόριο	L-Moments Pareto
20	63.5	121.8	19.7	38.2
50	87.8	193.1	25.0	52.3
100	107.5	270.8	30.0	65.6
1000	189.3	805.5	49.5	131.8

Είναι φανερό ότι το 50% ποσοστημόριο της προσομοίωσης οδηγεί σε σημαντικά μειωμένες παροχές σε σχέση με την κατανομή L-Moments Pareto. Στο Σχήμα 8.6 παρουσιάζεται η σύγκριση των 95%, 97.5% και 99% ποσοστημορίων της προσομοίωσης Monte Carlo με την κατανομή L-Moments Pareto για περιόδους επαναφοράς 20, 50, 100 και 1000 έτη.



**Σχήμα 8.6** Σύγκριση των 95%, 97.5% και 99% ποσοστημορίων της προσομοίωσης με τις πλημμυρικές αιχμές της κατανομής Pareto προσαρμοσμένης με τη μέθοδο των L-ροπών στις δύο λεκάνες.

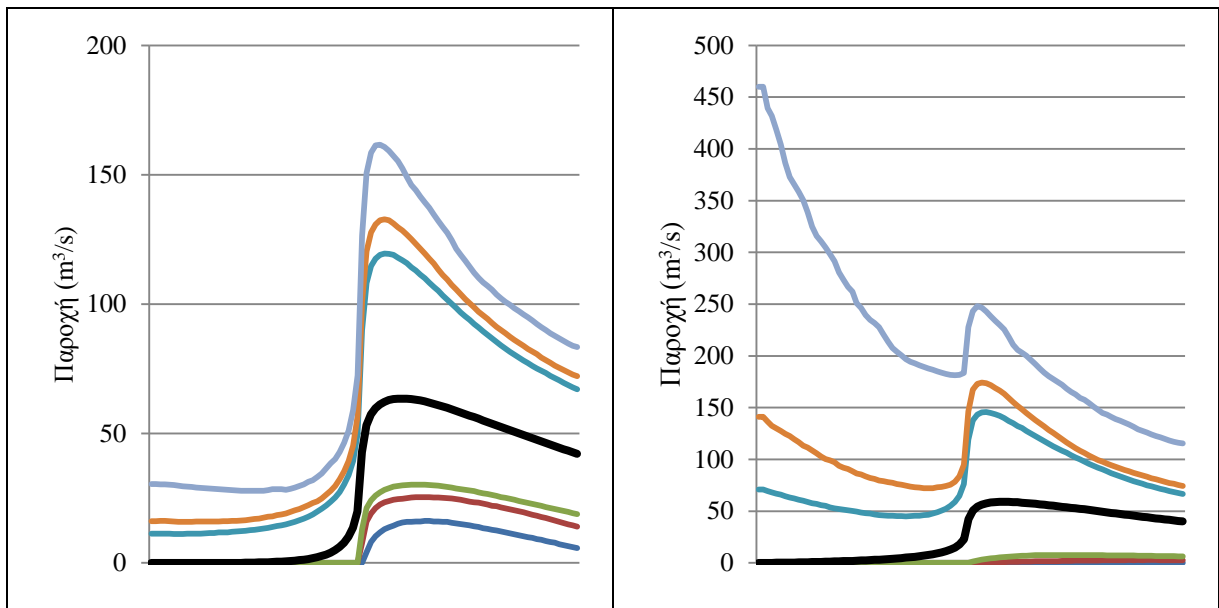
Για τον ποταμό Περιστερώνα (άνω διάγραμμα) παρατηρούμε ότι σε περιόδους επαναφοράς μέχρι 100 έτη η αιχμή της κατανομής Pareto προσαρμοσμένης με τη μέθοδο των L-ροπών βρίσκεται ανάμεσα στα 95% και 99.5% ποσοστημόρια ή λίγο πιο πάνω και μόνο σε περίοδο επαναφοράς 1000 έτη η διαφορά είναι σημαντική. Αντίθετα στον Ξερό ποταμό η αιχμές της κατανομής Pareto προσαρμοσμένης με τη μέθοδο των L-ροπών βρίσκονται σταθερά χαμηλότερα από το 95% ποσοστημόριο, με μειούμενη πάντως διαφορά αυξανομένης της περιόδου επαναφοράς.

### 8.3 Προσομοίωση Monte Carlo με μεταφορά παραμέτρων από γειτονική λεκάνη

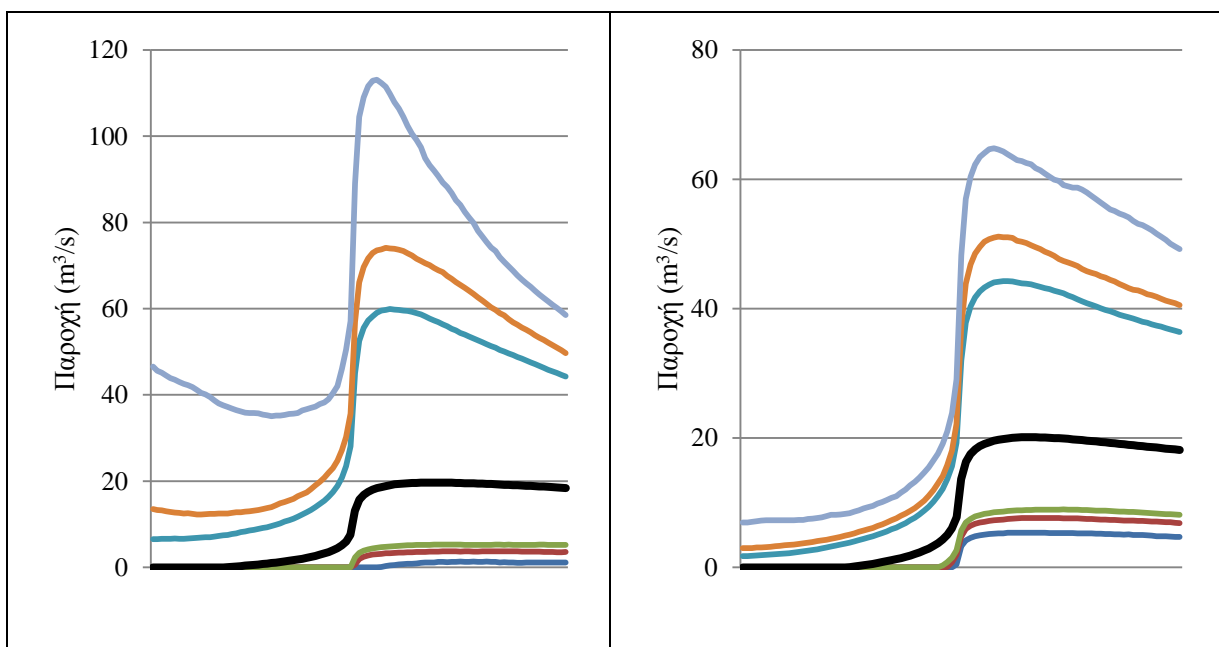
Συχνά στον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό ο υδρολόγος μηχανικός έρχεται αντιμέτωπος με το σοβαρό πρόβλημα της έλλειψης μετρήσεων για τη λεκάνη. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι επιτακτικό να αναζητηθούν στοιχεία από γειτονικές λεκάνες με σκοπό την παραγωγή κατά το δυνατόν ρεαλιστικών μεγεθών σχεδιασμού σύμφωνα με τη διακινδύνευση που θεωρείται αποδεκτή. Θεωρήθηκε, στο πλαίσιο του σχεδιασμού, σκόπιμο να διερευνηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo με χρήση στοιχείων της γειτονικής λεκάνης.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος αλγόριθμος που εφαρμόστηκε σε όλες τις προσομοιώσεις. Για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι και οι αρχικές συνθήκες που προέκυψαν από την ανάλυση των επεισοδίων της λεκάνης του Ξερού ποταμού με διόρθωση της έκτασης της λεκάνης και για τη συνθετική βροχόπτωση της λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα. Για κάθε παράμετρο θεωρήθηκε ρεαλιστικό να υπάρχει μία εκτίμηση της μέσης τιμής. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν οι σωστές μέσες τιμές που υπολογίστηκαν για κάθε παράμετρο της λεκάνης και τροποποιήθηκαν οι τυπικές αποκλίσεις ώστε να παραμείνει σταθερός ο συντελεστής διασποράς της γειτονικής λεκάνης. Επίσης, για κάθε παράμετρο χρησιμοποιήθηκε η κατανομή που αντιστοιχεί στη γειτονική λεκάνη. Η διαφορά των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο λεκάνες (χρήση της αρχικής στάθμης S02 για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα και του ποσοστού πλήρωσης  $b$  για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού) ξεπεράστηκε με χρήση της παραμέτρου της εκάστοτε γειτονικής λεκάνης και τροποποίηση της μέσης τιμής. Αντίστοιχη ανάλυση έγινε και για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού με τις παραμέτρους που προέκυψαν για την άλλη λεκάνη.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση των υπό εξέταση λεκανών η προσομοίωση με χρήση στοιχείων της μιας λεκάνης για τον υπολογισμό του πλημμυρογραφήματος στην άλλη δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με το 50% ποσοστημόριο. Τούτο παρουσιάζεται ενδεικτικά στα Σχήματα 8.7 και 8.8.



**Σχήμα 8.7** Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα για περίοδο επαναφοράς  $T=20$  έτη. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα 0.5%, 2.5%, 5%, 50%, 95%, 97.5% και 99.5% ποσοστημόρια. Το αριστερό διάγραμμα παρήχθη με χρήση των στοιχείων της ίδιας λεκάνης ενώ το δεξί με χρήση των στοιχείων της λεκάνης του Ξερού ποταμού.



**Σχήμα 8.8** Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού για περίοδο επαναφοράς  $T=20$  έτη. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα 0.5%, 2.5%, 5%, 50%, 95%, 97.5% και 99.5% ποσοστημόρια. Το αριστερό διάγραμμα αποτελεί

την προσομοίωση με τα στοιχεία της ίδιας λεκάνης, ενώ το δεξί με τα στοιχεία της γειτονικής.

Εκτός από την πολύ καλή επίδοση του 50% ποσοστημορίου στο σχεδιασμό με μεταφορά παραμέτρων, στα παραπάνω σχήματα παρατηρείται επίσης και υπερεκτίμηση των μεγαλύτερων ποσοστημορίων στην προσομοίωση για τον ποταμό Περιστερώνα με χρήση στοιχείων της γειτονικής λεκάνης. Αντιθέτως, στην περίπτωση του Ξερού ποταμού παρατηρείται υποεκτίμηση των αντίστοιχων ποσοστημορίων.

#### 8.4 Σύγκριση προσομοίωσης Monte Carlo με άλλες υδρολογικές μεθόδους

Στα πλαίσια της διερεύνησης του σχεδιασμού με προσομοίωση Monte Carlo μελετάται εδώ η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με αυτά των μεθόδων SCS-CN και της ορθολογικής μεθόδου. Συγκεκριμένα συγκρίνονται η πλημμυρική αιχμή και ο πλημμυρικός όγκος. Στη σύγκριση που έγινε χρησιμοποιήθηκαν για τις δύο λεκάνες τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.5.

**Πίνακας 8.5** Στοιχεία για την ορθολογική μέθοδο και για τη μέθοδο SCS-CN (Γαλιούνα, 2011).

Υδρολογική λεκάνη	Συντελεστής απορροής c			CN	Χρόνος συρροής (hr) (Giandotti)
	T=20	T=50	T=100		
Περιστερώνα ποταμού	0.517	0.564	0.584	71	3.58
Ξερού ποταμού	0.506	0.552	0.575	61	2.71

Η ένταση βροχόπτωσης που απαιτείται για την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου υπολογίστηκε για κάθε βροχομετρικό σταθμό σύμφωνα με τη Σχέση 8.1 στην οποία ως d ελήφθη η διάρκεια του επεισοδίου ίση με το χρόνο συρροής που υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση του Giandotti. Η συνολική ένταση βροχόπτωσης για κάθε λεκάνη και κάθε περίοδο επαναφοράς υπολογίστηκε σύμφωνα με τους συντελεστές Thiessen. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 8.6.

**Πίνακας 8.6** Μέση ένταση βροχόπτωσης σε mm/h ανά λεκάνη και χρόνο επαναφοράς για την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου.

Υδρολογική λεκάνη	T=20	T=50	T=100	T=1000
Περιστερώνα ποταμού	20.6	26.1	30.7	50.5
Ξερού ποταμού	22.5	27.5	31.7	49.5

Για την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου χρησιμοποιήθηκε η Σχέση 8.7:

$$Q = c i A \quad (8.7)$$

όπου Q η παροχή αιχμής σε m<sup>3</sup>/s, c ο συντελεστής απορροής σύμφωνα με τον Πίνακα 8.3, i η μέση ένταση βροχής σύμφωνα με τον Πίνακα 8.4 και A η έκταση της λεκάνης σε km<sup>2</sup>.

Σημειώνεται, πάντως, ότι το μέγεθος των λεκανών απορροής και κατά συνέπεια του χρόνου συρροής είναι αρκετά μεγάλο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το ανώτατο όριο για την έκταση της λεκάνης απορροής για αξιόπιστη εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου είναι της τάξης των μερικών δεκάδων km<sup>2</sup>.

Για την εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN αρχικά χρησιμοποιήθηκε το μοναδιαίο υδρογράφημα με τον εκθετικό καθοδικό κλάδο που περιγράφεται στην παράγραφο 6.1 με b=0.6. Στη συνέχεια η μέθοδος συνδυάστηκε με το τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα της Soil Conservation Service (SCS) το οποίο αντιστοιχεί σε λίγο μεγαλύτερο χρόνο καθόδου και άρα αναμένεται να δώσει μικρότερες παροχές σε σχέση με το μοναδιαίο υδρογράφημα του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (Ευστρατιάδης κ.ά., 2012). Το συγκεκριμένο υδρογράφημα επιλέχθηκε διότι υπερτερεί έναντι των υπολοίπων, καθώς δεν απαιτεί σύνθετα δεδομένα για τη λεκάνη.

Οι χρόνοι ανόδου και καθόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS ( $t_{ανόδου}$  και  $t_{καθόδου}$  αντίστοιχα) καθώς και η παροχή αιχμής ( $Q_p$ ) δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις:

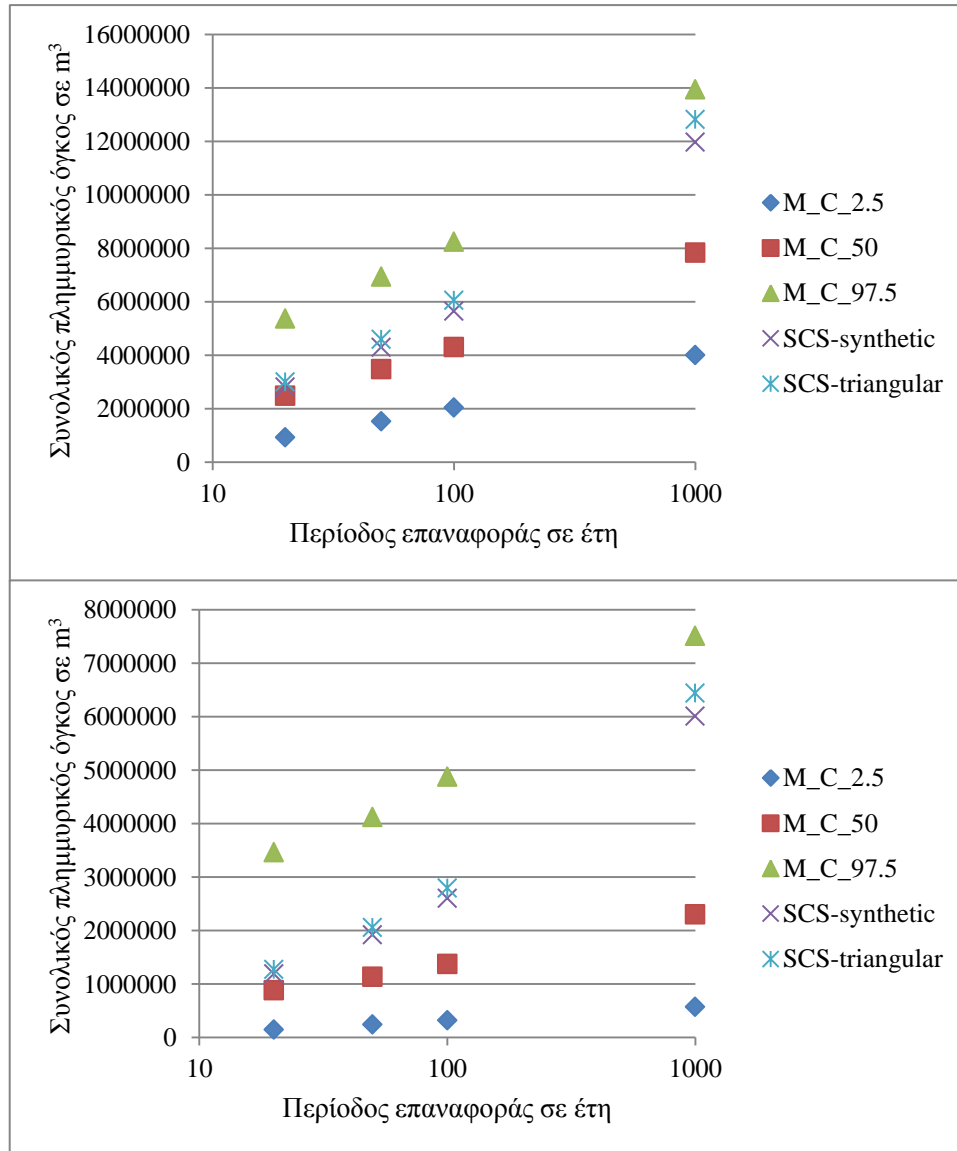
$$t_{ανόδου} = \frac{D}{2} + 0.6t_c \quad (8.8)$$

$$t_{καθόδου} = \frac{5}{3}t_{ανόδου} \quad (8.9)$$

$$Q_p = 0.75H_0 \frac{A}{t_{ανόδου}} \quad (8.10)$$

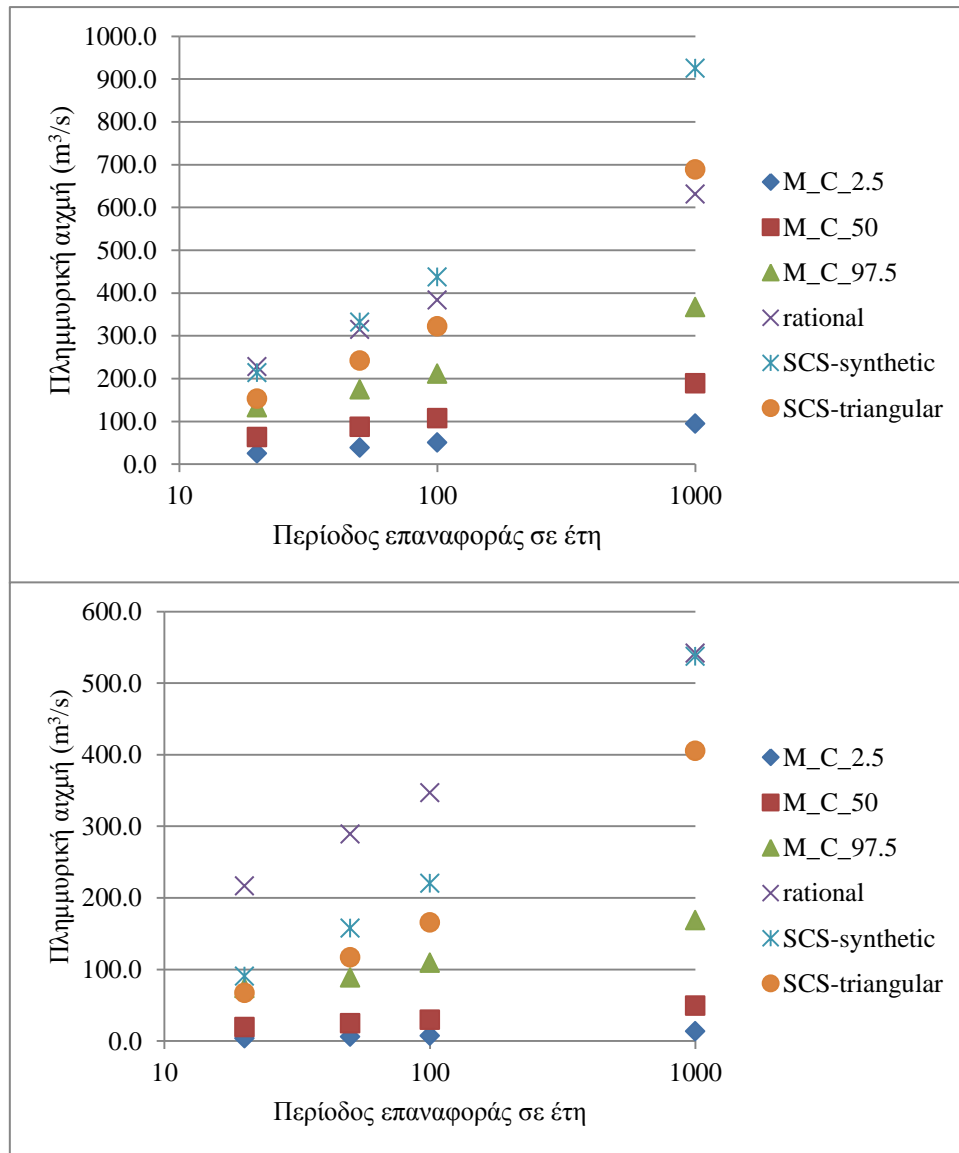
όπου  $t_c$  ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti,  $H_0$  το μοναδιαίο ύψος βροχής ίσο με 10 mm και  $A$  η έκταση της λεκάνης.

Στα Σχήματα 8.9 και 8.10 παρουσιάζονται εποπτικά τα αποτελέσματα της σύγκρισης.



**Σχήμα 8.9** Οι πλημμυρικοί όγκοι που προκύπτουν για τις τέσσερις περιόδους επαναφοράς (20, 50, 100 και 1000 έτη) στις δύο λεκάνες (άνω διάγραμμα για τον ποταμό Περιστερώνα και κάτω για τον Ξερό). Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών ποσοστημορίων της προσομοίωσης Monte Carlo (2.5%, 50% και 97.5%) και τα αποτελέσματα της μεθόδου SCS με τα δύο μοναδιαία υδρογραφήματα που περιγράφονται πιο πάνω.

Παρατηρείται ότι η μέθοδος SCS οδηγεί σε μεγαλύτερους όγκους σε σύγκριση με το 50% ποσοστημόριο της προσομοίωσης Monte Carlo και μάλιστα αυξανομένης της περιόδου επαναφοράς η εκτίμηση της SCS προσεγγίζει το 97.5% ποσοστημόριο. Η χρήση του τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος έχει ως αποτέλεσμα ελαφρώς μεγαλύτερους πλημμυρικούς όγκους σε σύγκριση με το υδρογράφημα που καταρτίστηκε για την παρούσα εργασία.



**Σχήμα 8.10** Οι πλημμυρικές αιχμές που προκύπτουν για τις τέσσερις περιόδους επαναφοράς (20, 50, 100 και 1000 έτη) στις δύο λεκάνες (άνω διάγραμμα για τον ποταμό Περιστερώννα και κάτω για τον Ξερό). Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών ποσοστημορίων της προσομοίωσης Monte Carlo (2.5%, 50% και 97.5%) και τα



αποτελέσματα της μεθόδου SCS με τα δύο μοναδιαία υδρογραφήματα που περιγράφονται πιο πάνω.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι η μέθοδος SCS δίνει τις μεγαλύτερες παροχές στη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα. Είναι χαρακτηριστικό ότι με χρήση του μοναδιαίου υδρογραφήματος που καταρτίστηκε για την παρούσα εργασία οδηγούμαστε σε παροχές υπερδιπλάσιες του 97.5% ποσοστημορίου της προσομοίωσης Monte Carlo σε περιόδους επαναφοράς 100 και 1000 ετών. Τούτο συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με τη μέθοδο SCS που επιχειρήθηκε στα πλαίσια τούτης της εργασίας και οδήγησε σε πολύ μεγάλη υπερεκτίμηση της παροχής (Σχήματα 6.2, 6.3 και 6.4). Ακόμη, παρατηρείται ότι και η ορθολογική μέθοδος δίνει παροχές μεγαλύτερες από το 97.5% ποσοστημόριο της προσομοίωσης Monte Carlo και μάλιστα στη λεκάνη του Ξερού ποταμού δίνει τις μεγαλύτερες παροχές για όλες τις περιόδους επαναφοράς.



## Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα & προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής από δύο λεκάνες απορροής στην περιοχή του Τροόδους στην Κύπρο. Σκοπός ήταν η μελέτη των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της μεθόδου Monte Carlo στην προσομοίωση ιστορικών παρατηρημένων πλημμυρικών περιστατικών καθώς και η διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής της στο σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων.

Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Η μέθοδος SCS-CN γενικά αποτυγχάνει να προσομοιώσει ικανοποιητικά την απορροή και συγκεκριμένα τείνει να οδηγεί σε σημαντική υπερεκτίμηση των παροχών. Για αυτό το λόγο η μέθοδος δεν χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση Monte Carlo.
- Αντίθετα, η χρήση μοντέλων υδραυλικών αναλόγων καταφέρει πολύ ικανοποιητική προσομοίωση της παρατηρημένης απορροής στη συντριπτική πλειοψηφία των υπό μελέτη περιστατικών. Παρότι, μάλιστα, το μοντέλο που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία αποτελείται από πέντε παραμέτρους και δύο αρχικές συνθήκες, έναντι μόλις τριών παραμέτρων της μεθόδου SCS, δεν παρουσίασε σημαντικές δυσκολίες στη βελτιστοποίηση.
- Η μέθοδος της προσομοίωσης Monte Carlo πλεονεκτεί σε σύγκριση με τις προσδιοριστικές μεθόδους καθώς με την παραγωγή χιλιάδων πλημμυρών για την ίδια βροχόπτωση ο υδρολόγος μηχανικός διαθέτει ένα εύρος αποτελεσμάτων για τα οποία εύκολα υπολογίζονται οι πιθανότητες υπέρβασης με βάση τα ποσοστημόρια.
- Στα περισσότερα από τα περιστατικά που προσομοιώθηκαν το 50% ποσοστημόριο ήταν μια ικανοποιητική προσέγγιση του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος. Κατά μέσο όρο παρατηρήθηκε μικρή τάση υποεκτίμησης της παροχής με βάση το 50% ποσοστημόριο.
- Σημαντική υπερεκτίμηση της παροχής με τη μέθοδο αυτή παρατηρήθηκε σε μόλις ένα από τα 33 περιστατικά, στο οποίο το παρατηρημένο υδρογράφημα έπεσε ελάχιστα κάτω από το 2.5% ποσοστημόριο, χωρίς ωστόσο να βρεθεί εκτός των ορίων του 0.5% ποσοστημορίου.
- Περισσότερα ήταν τα περιστατικά στα οποία το 50% ποσοστημόριο υποεκτίμησε την παρατηρημένη παροχή. Σε τρία περιστατικά η αιχμή της πλημμύρας ξεπέρασε το

95% ποσοστημόριο και σε ένα από αυτά το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα ξεπέρασε το 97.5% ποσοστημόριο σε ένα μικρό τμήμα του καθοδικού κλάδου.

- Η επιλογή της προσομοίωσης με σταθερές αρχικές συνθήκες δεν οδηγεί σε σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα και συνεπώς οι αρχικές συνθήκες μπορούν να αντιμετωπίζονται όπως οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου και να εξάγονται με καθαρά στατιστικό τρόπο από τα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία.
- Ο σχεδιασμός με προσομοίωση Monte Carlo είναι απαιτητική διαδικασία ειδικά λαμβανομένης υπόψη της πρόσθετης αβεβαιότητας της βροχής σχεδιασμού που αγνοήθηκε στην παρούσα εργασία. Στην παρούσα εργασία, πάντως, η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις αιχμές που παρατηρήθηκαν σε διάστημα 40 περίπου ετών στις δύο λεκάνες οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το 50% ποσοστημόριο της προσομοίωσης Monte Carlo υποεκτίμησε την παροχή εικοσαετίας, κάτι το οποίο είναι κατά της ασφαλείας στον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό. Πάντως, το 95% ποσοστημόριο περιλαμβάνει τις αιχμές που έχουν παρατηρηθεί σε ρεαλιστικές περιόδους επαναφοράς, και ως εκ τούτου η χρήση του δεν θα πρέπει να θεωρηθεί υπερβολικά συντηρητική, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τις προβλέψεις (forecasts) της στατιστικής κατανομής που εφαρμόστηκε στο δείγμα των μέγιστων παροχών.
- Ο σχεδιασμός με χρήση μόνο μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης των παραμέτρων της λεκάνης και των υπόλοιπων δεδομένων από τη γειτονική λεκάνη οδήγησε σε 50% ποσοστημόρια παραπλήσια με του κανονικού σχεδιασμού που προηγήθηκε. Τα μεγαλύτερα ποσοστημόρια μεταβλήθηκαν σημαντικά: στον ποταμό Περιστερώνα αυξήθηκαν ενώ στον Ξερό ποταμό μειώθηκαν. Μάλιστα, τα νέα 95% ποσοστημόρια που προέκυψαν ανταποκρίνονται λίγο καλύτερα στις παρατηρήσεις τεσσαρακονταετίας.
- Κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης Monte Carlo με τη μέθοδο SCS καθώς και με την ορθολογική μέθοδο έγινε σαφής η υπεροχή της πρώτης έναντι των δύο άλλων. Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι SCS και η ορθολογική υπερεκτιμούν σημαντικά τις πλημμυρικές αιχμές και συχνά ξεπερνούν το 97.5% ποσοστημόριο της προσομοίωσης Monte Carlo. Ιδιαίτερος τα αποτελέσματα της ορθολογικής μεθόδου τίθενται υπό αμφισβήτηση δεδομένου ότι η παροχή αιχμής που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 20 ετών είναι και στις δύο λεκάνες πολύ μεγαλύτερη από την απολύτως μέγιστη που παρατηρήθηκε στο διάστημα των 40 περίπου ετών. Είναι πιθανό ότι οι συντελεστές απορροής που προτείνονται (OMOE) είναι πολύ χαμηλοί

για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα και πολύ ψηλοί για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού, ενώ ενδεχομένως και οι χρόνοι συγκέντρωσης που υπολογίζονται από τη σχέση Giandotti δεν είναι απολύτως ρεαλιστικοί.

Η περαιτέρω διερεύνηση της εφαρμογής της προσομοίωσης Monte Carlo είναι αναγκαία. Ένα καλό βήμα για την τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου θα ήταν η προσομοίωση περιστατικών που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των στατιστικών κατανομών των παραμέτρων του μοντέλου. Τούτο δεν ήταν εφικτό στην παρούσα εργασία λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων βροχής – απορροής. Χρήσιμη θα ήταν επίσης η λεπτομερέστερη διερεύνηση του ρόλου της ανάλυσης των διαθέσιμων περιστατικών στα τελικά αποτελέσματα της μεθόδου. Κατά τη διενέργεια των αναλύσεων για την παρούσα εργασία υπήρξαν ενδείξεις ότι η στατιστική ανάλυση θα μπορούσε να απλοποιηθεί σημαντικά χωρίς ενδεχομένως ουσιαστικές επιπτώσεις στα αποτελέσματα<sup>6</sup>.

Βεβαίως, εκτός του μοντέλου που εφαρμόστηκε εδώ θα είναι χρήσιμο να εφαρμοστούν στην προσομοίωση Monte Carlo και άλλα υδρολογικά μοντέλα υδραυλικών αναλόγων και όχι μόνο. Είναι θεμιτό να ευρεθεί ένα απλούστερο μοντέλο με λιγότερες μεταβλητές το οποίο σε συνδυασμό με την προσομοίωση Monte Carlo θα οδηγεί σε αποτελέσματα παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία, καθώς ο υπολογιστικός φόρτος που προέκυψε για τις 10 000 προσομοιώσεις δεν είναι ευκαταφρόνητος.

Επίσης, στα πλαίσια περαιτέρω έρευνας της δυνατότητας σχεδιασμού με προσομοίωση Monte Carlo κρίνεται αναγκαίο να ληφθεί υπόψη και η αβεβαιότητα της βροχής σχεδιασμού, η οποία εδώ αγνοήθηκε.

Κατά την επεξεργασία των περιστατικών διαπιστώθηκε η θετική συσχέτιση των συντελεστών απορροής επεισοδίου και αιχμής. Είναι ενδιαφέρον να διερευνηθεί περαιτέρω αυτή η συσχέτιση, καθώς οι συντελεστές αυτοί αντιστοιχούν στο CN της μεθόδου SCS και στο  $c$  της ορθολογικής μεθόδου αντίστοιχα. Συνεπώς, είναι πιθανό να εντοπιστούν συσχετίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων, οι οποίες αν και χρησιμοποιούνται ευρέως οδηγούν σε αποτελέσματα αμφίβολης αξιοπιστίας, ιδιαίτερα σε λεκάνες με ιδιαίτερες υδροκλιματικές και γεωμορφολογικές συνθήκες, όπως οι μεσογειακές.

---

<sup>6</sup> Τέτοια ένδειξη αποτελεί το γεγονός ότι ο σχεδιασμός μόνο με χρήση του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης της λεκάνης σε συνδυασμό με τα στοιχεία της γειτονικής λεκάνης οδήγησε σε παραπλήσια αποτελέσματα με το σχεδιασμό που βασίστηκε αποκλειστικά στα στοιχεία της ίδιας λεκάνης.

Σε κάθε περίπτωση η εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo πρέπει να έχει ως απώτερο στόχο να οδηγεί σε αξιόπιστα μεγέθη σχεδιασμού. Θα πρέπει συνεπώς να βρεθεί ένας αξιόπιστος τρόπος να επιλέγεται το ποσοστημόριο το οποίο αντιστοιχεί στην αποδεκτή διακινδύνευση σχεδιασμού.

Το πεδίο εφαρμογής της προσομοίωσης Monte Carlo είναι πραγματικά ευρύ και ξεπερνά τα όρια της υδρολογίας των πλημμυρών. Είναι, συνεπώς, σημαντικό η διερεύνηση των δυνατοτήτων της να συνεχιστεί καθώς αυτό θα συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση και κυρίως-διαχείριση της αβεβαιότητας και στην εδραίωση πληρέστερης αντίληψης της φυσικής πραγματικότητας της οποίας η αβεβαιότητα αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- Γαλιούνα, Ε., 2011, *Διερεύνηση εμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση των πλημμυρικών αιχμών στην Κύπρο*, 169 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Π. Δημητριάδης, και Α. Μαχαίρας, 2012, *Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – 115 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Αθήνα ([http://itia.ntua.gr/getfile/1215/1/documents/ Report\\_WP3\\_1\\_1.pdf](http://itia.ntua.gr/getfile/1215/1/documents/Report_WP3_1_1.pdf) , τελευταία επίσκεψη 2/9/2013).
- Ιστοσελίδα ερευνητικού έργου Δευκαλίων, *Δίκτυο Δεδομένων Δευκαλίων* (<http://deucalionproject.gr/>, τελευταία επίσκεψη 21/9/2013)
- Ιστοσελίδα εταιρίας Ιωάννου και Παρασκευαΐδης, Civil Works, *Υδατοφράκτης Ασπρόκρεμμον*, Επαρχία Πάφου (<http://www.jandpcy.com/el/Asprokremmos-Dam-gr>, τελευταία επίσκεψη 3/9/2013).
- Κοζάνης, Σ., και Ι. Μαρκόνης, 2009, *Υδρογνώμων έκδοση 4 - Οδηγός χρήστη*, 141 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα (<http://itia.ntua.gr/getfile/934/1/documents/HydrognomonV4Manual GR-v1.00.pdf> , τελευταία επίσκεψη 2/9/2013).
- Κοινοτικό Συμβούλιο Αναρίτας, 2013 (<http://www.anarita.org/gr/dam-lgr/>, τελευταία επίσκεψη 2/9/2013).
- Κουικόγλου, Β., 2002, *Προσομοίωση*, 146 σελίδες, Πολυτεχνείο Κρήτης, ([http://www.mie.uth.gr/ekr\\_yliko/simulation.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekr_yliko/simulation.pdf), τελευταία επίσκεψη 21/9/2013).
- Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, 1999, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3<sup>η</sup>, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ., 2000, *Υδρολογική αβεβαιότητα στα συστήματα υδατικών πόρων – Προσομοίωση*, 30 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων,

- (<http://itia.ntua.gr/getfile/200/8/documents/2004WRSOHydrolUncertSimulSM.pdf>., τελευταία επίσκεψη 21/9/2013).
- Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου, 2006, *Το κλίμα της Κύπρου* ([http://www.moa.gov.cy/moa/MS/MS.nsf/DMLcyclimate\\_gr/DMLcyclimate\\_gr?OpenDocument](http://www.moa.gov.cy/moa/MS/MS.nsf/DMLcyclimate_gr/DMLcyclimate_gr?OpenDocument), τελευταία επίσκεψη 2/9/2013).
- Νικολαΐδου, Μ., κ.ά., 1995, *Καταγραφή και αποτίμηση των καταστροφών από πλημμύρες στην Ελλάδα και την Κύπρο*, 115 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, <http://itia.ntua.gr/getfile/445/1/documents/1995nikolaid-xatsixr.pdf>, τελευταία επίσκεψη 12/12/2013).
- Πασιαρδής, Σ., 2009, *Σειρά Μετεωρολογικών Σημειωμάτων Αρ. 15 – Κατάρτιση Ομβρίων Καμυλών στην Κύπρο*, Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου.
- Πρόγραμμα LIFE+ 08, 2010-2013, *Δημιουργία Δικτύου Μικρο-Αποθεμάτων Φυτών στην Κύπρο για τη Διατήρηση Ειδών και Οικοτόπων Προτεραιότητας, Δάση Cedrus brevifolia (Cedrosetum brevifoliae)* ([http://www.plantnet.org.cy/lang1/koilada\\_kedron-kambos.html](http://www.plantnet.org.cy/lang1/koilada_kedron-kambos.html), τελευταία επίσκεψη 2/9/2013).
- Ρουμελιώτης, Μ., 2001, *Μοντελοποίηση και Προσομοίωση*, 250 σελίδες, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Πάτρα (<http://www.teiser.gr/icd/staff/anastasiou/wp-content/uploads/2012/02/simulation-ROUMELIOTIS.pdf>., τελευταία επίσκεψη 21/9/2013).
- Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου  
([http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/reservoir\\_gr/reservoir\\_gr?OpenDocument](http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/reservoir_gr/reservoir_gr?OpenDocument), τελευταία επίσκεψη 2/9/2013)
- Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, 2002, *Η Γεωλογία της Κύπρου* ([http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/B8B1E6BB9C12B333C22572F4003CB4BB/\\$file/GeologyOfCyprusGR.jpg?OpenElement](http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/B8B1E6BB9C12B333C22572F4003CB4BB/$file/GeologyOfCyprusGR.jpg?OpenElement), τελευταία επίσκεψη 2/9/2013).
- Apel, H., Thieken, A.H., Merz, B. and Blöschl, G., 2004, *Flood risk assessment and associated uncertainty*, Natural Hazards and Earth System Sciences (2004) 4, σελίδες 295–308, European Geosciences Union 2004.



- Apel, H., Thielen, A.H., Merz, B. and Blöschl, G., 2006. *A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks*, Natural Hazards (2006) 38, σελίδες 79–100, Springer editions.
- Aronica, G.T. and Candela, A., 2007, *Derivation of flood frequency curves in poorly gauged Mediterranean catchments using a simple stochastic hydrological rainfall-runoff model*, Journal of Hydrology, Volume 347, Issues 1–2, 1, σελίδες 132–142.
- Beven, K., 2001. *How far can we go in hydrological modelling?*, Hydrology and Earth System Sciences 5 (1), σελίδες 1–12.
- Cameron, D.S., Beven, K.J., Tawn, J., Blazkova, S. and Naden, P., 1999, *Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty)*, Journal of Hydrology, 219, σελίδες 169–187, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Castellarin, A., Burn, D.H. and Brath, A., 2001, *Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis*, Journal of Hydrology 241, σελίδες 270-285.
- Cohen, J.T., Lampson, M.A. and Bowers, T.S., 1996, *The use of two-stage Monte Carlo simulation techniques to characterize variability and uncertainty in risk analysis*, Human and Ecological Risk Assessment, 2(4), 939–971.
- Cullen, A.C. and Frey, H.C., 1999, *Probabilistic techniques in exposure assessment: A handbook for dealing with variability and uncertainty in models and inputs*, Springer, 335 σελίδες.
- Ferson S. and Ginzburg, L.R., 1996, *Different methods are needed to propagate ignorance and variability*, Reliability Engineering and Systems Safety 54, σελίδες 133-144.
- Gardner, R.H., Huff, D.D., O'Neill, R.V., Mankin, J.B. Carney, J. and Jones, J., 1980, *Application of error analysis to a marsh hydrology model*, Water Resources Research, 16(4), σελίδες 659-664.
- Hall, J. W., Blockley, D. I., and Davis, J. P., 1998, *Non-additive probabilities for representing uncertain knowledge: theoretical and practical implications*,

- Hydroinformatics '98, edited by Babovic, V. M. and Larsen, L. C., A.A. Balkema, Rotterdam, σελίδες 1101–1108.
- Hall, J.W., 2003, *Handling uncertainty in the hydroinformatic process*, Journal of Hydroinformatics, 05.4, σελίδες 215–232.
- Harlin, J. and Kung, C.-S., 1992, *Parameter uncertainty and simulation of design floods in Sweden*, Journal of Hydrology, 137, σελίδες 209-230, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Hoffman, F. O. and Hammonds, J. S., 1994, *Propagation of uncertainty in risk assessments: The need to distinguish between uncertainty due to lack of knowledge and uncertainty due to variability*, Risk Analysis, 14(5), σελίδες 707–712.
- Hornberger, G.M. and Spear, R.C., 1981, *An approach to the preliminary analysis of environmental systems*. Journal of Environmental Management, 12, σελίδες 7-18.
- Hornberger, G.M., Cosby, B.J. and Galloway, J.N., 1986, *Modeling the effect of acid deposition: uncertainty and spatial variability in estimation of long-term sulfate dynamics in a region*, Water Resources Research, 22(8), σελίδες 1293-1302.
- Koutsoyiannis, D., 1994, *A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis*, Journal of Hydrology, 156, σελίδες 193–225.
- Krajewski, W.F., Lakshmi, V., Georgakakos, K.P. and Jain, S.C., 1991, *A Monte Carlo Study of Rainfall Sampling Effect on a Distributed Catchment Model*, Water Resources Research, 27, 1, σελίδες 119-128.
- Kung, C.-S., 1989, *Uncertainty in dam break flow simulation*, Nordic Hydrology, 20, σελίδες 249-256.
- Montanari, A., and Koutsoyiannis D., 2012, *A blueprint for process-based modeling of uncertain hydrological systems*, Water Resources Research, 48, W09555, doi:10.1029/2011WR011412.
- Seibert, J., 1997, *Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model*, Nordic Hydrology, 28 (4/5), σελίδες 247-262.

- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1997, *Guiding principles for Monte Carlo Analysis*, EPA/630/R-97/001, Risk Assessment Forum, Washington D.C., 35.
- Vogel, R.M., Zarifakou-Koulouris A. and Matalas, N.C., 2001, *Frequency of record-breaking floods in the United States*, *Water Resources Research*, 37, 6, σελίδες 1723–1731.
- Winston, W., L., 1994, *Operations Research, Applications and Algorithms*, 3<sup>rd</sup> ed, Duxbury, Belmont.
- Zarris, D., Koutsoyiannis, D. and Karavokiros, G., 1998, *A simple stochastic rainfall disaggregation scheme for urban drainage modelling*, *Proceedings of the 4th International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling*, σελίδες 85–92, edited by D. Butler and C. Maksimovic, London, International Association of Water Quality, International Association of Hydraulic Research, UNESCO, Imperial College, London.



# Παράρτημα Α: Προγράμματα υπολογιστή

## A1 Μέθοδος SCS-CN

Παρακάτω παρατίθενται τα προγράμματα που γράφτηκαν για την παρούσα εργασία. Όλα τα προγράμματα γράφτηκαν σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Ο παρακάτω αλγόριθμος με όνομα SCS\_CN καλείται από ρουτίνα βελτιστοποίησης που παρατίθεται στη συνέχεια.

```
function [Totalsf]=SCS_CN(PGD)

S=PGD(1);
a=PGD(2);
b=PGD(3);

%rainfall file (rainfall in first column)
load P_2_2003.txt
Z=P_2_2003;
N=size(Z);
n=N(1,1);
%A single column rainfall matrix
for i=1:n
    A(i,1)=Z(i,1);
end

%total discharge file (discharge in first column)
load P_2_2003_Q.txt
Y=P_2_2003_Q;
N2=size(Y);
n2=N2(1,1);
%P single column matrix with observed total discharge
for i=1:n2
    Qobs(i,1)=Y(i,1);
end

% dt in minutes
%area in km^2
%length of main stream in km
%height difference between the mean and exit heights in m

Qb=0;
dt=15;
Dt=10;
area=77.06;
L=18.135;
DH=473.67;
tc=(4*area^0.5+1.5*L)/(0.8*DH^0.5);

%wQ peak error weight
wQ=10;
%wV volume error weight
```

```

wV=1000;

%H cumulative rainfall matrix
H(1,1)=A(1,1);

for i=2:n
    H(i,1)=H(i-1,1)+A(i,1);
end

%He cumulative active rainfall matrix
He=zeros(n,1);

for i=1:n
    if H(i,1)>a*S
        He(i,1)=(H(i,1)-a*S)^2./(H(i,1)-a*S+S);
    end
end

%Hene active rainfall matrix
Hene(1,1)=He(1,1);

for i=2:n
    Hene(i,1)=He(i,1)-He(i-1,1);
end

%tfinal=time step of rainfall end

i=n;
tfinal=0;
while (i>=1 && tfinal==0)
    if Hene(i,1)==0;
        i=i-1;
    else
        tfinal=i;
    end
end

%tstart=time step of direct runoff start
i=1;

while Qobs(i,1)<=Qb
    i=i+1;
end
tstart=i;

%tfinish=time step of direct runoff end
tfinish=round(tfinal+60/dt*tc);

%direct runoff computation
Qdirect=zeros(n2,1);

for i=tstart:min(tfinish,n2)
    %i=tstart:n2
    Qdirect(i,1)=max(Qobs(i,1)-Qb-(Qobs(min(tfinish,n2),1)-
Qobs(tstart,1))/(min(tfinish,n2)-tstart)*(i-tstart),0);
    %Qdirect(i,1)=Qobs(i,1)

```

```

end

plot(Qdirect)
hold on
plot(Qobs)
hold off

%%unit hydrograph%

tpeak=b*tc*60+Dt/2;

tbase=tc*60+Dt;

m=exp(log(2)/((tpeak-tbase)/tbase));

Qpeak=10^4*area/(tbase/log(m)*(1-m^((tpeak-tbase)/tbase))-
tbase+3/2*tpeak)/60;

Q=zeros(round(tbase/dt)+1,1);

for i=2:round(tpeak/dt)+1
    Q(i,1)=Qpeak*(i-1)*dt/tpeak;
end

for i=round(tpeak/dt)+1:round(tbase/dt)
    Q(i,1)=Qpeak*(m^((i*dt-tbase)/tbase)-1);
end

bar(Q)

%%simulated hydrograph%

for i=1:round(tbase/dt)+1
    for j=1:n
        Qtotal(i,j)=Hene(j,1)/10*Q(i,1);;
    end
end

Qmet=zeros(round(tbase/dt)+n,n);

for j=1:n
    for i=j:round(tbase/dt)+j
        Qmet(i,j)=Qtotal(i-(j-1),j);;
    end
end

Qmet2=transpose(Qmet);;

Qsim1=sum(Qmet2);;
Qsim=transpose(Qsim1);

plot(Qdirect)
hold on
plot(Qsim)
hold off

```

```

n3=min(tfinish,n2);

for i=1:min(n3,round(tbase/dt)+n)
    sfalma1(i,1)=(Qdirect(i,1)-Qsim(i,1))^2;
end

SFALMA1=sum(sfalma1);

SFALMA2=(max(Qdirect)-max(Qsim))^2*wQ;

%simulated volume
for i=1:round(tbase/dt)+n-1
    Vsim(i,1)=(Qsim(i,1)+Qsim(i+1,1))*dt*60/2;
end

%observed volume
for i=1:min(tfinish-1,n2-1)
    Vdirect(i,1)=(Qdirect(i,1)+Qdirect(i+1,1))*dt*60/2;
end

SFALMA3=wV*abs((sum(Vsim)-sum(Vdirect)));

Totalsf=SFALMA1+SFALMA2+SFALMA3;
PGD;

end

```

Παρακάτω παρατίθεται η ρουτίνα βελτιστοποίησης οποία καλεί τον αλγόριθμο SCS\_CN.

```

clc; clear all;

[BestValue,BestPar,NumIter,NumfEval,Ftolpop] = eas1(3,20,[10 0.001
0.001],[200 0.3 0.999],[10 0.001 0.001],[200 0.3
0.999],@elenikain_20_9,500,0.01,0.95,0.1,2,5)

```

## A2 Προσομοίωση Monte Carlo

Ο παρακάτω αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση Monte Carlo για τη λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα, λαμβάνοντας ταυτόχρονα τις παραμέτρους και τις αρχικές συνθήκες με τυχαίο τρόπο. Για κάθε περιστατικό άλλαξε ο τίτλος του αρχείου βροχόπτωσης και ο κάθε πίνακας με τα ποσοστημόριο αποθηκεύτηκε ανεξάρτητα σε αρχείο excel. Με τον ίδιο τρόπο έγιναν οι προσομοιώσεις με σταθερές αρχικές συνθήκες, αφού αντικαταστάθηκαν στον παρακάτω αλγόριθμο οι εντολές που αφορούν την τυχαία επιλογή των αρχικών συνθηκών και μετά τις απαραίτητες τροποποιήσεις που περιγράφονται αναλυτικά στο σχετικό κεφάλαιο (7.2). Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης των περιστατικών ο



αλγόριθμος τροποποιήθηκε ελαφρά και χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με συνθετική βροχόπτωση που παρήχθη από τις όμβριες καμπύλες της Κύπρου. Τέλος, ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόστηκε και για το σχεδιασμό με στοιχεία της γειτονικής λεκάνης αφού τροποποιήθηκε σύμφωνα με τις παραλλαγές των μοντέλων που αναλύθηκαν πιο πάνω (κεφάλαιο 8.3). Χάριν συντομίας παρατίθενται εδώ μόνο οι αρχικοί αλγόριθμοι των δύο λεκανών.

```

clc
clear
close all
%rainfall file (rainfall in first column)
load P_synthetikh_1000.txt
Z=P_synthetikh_1000;
N=size(Z);
n=N(1,1);
%M_C final Q matrix
M_C=zeros(n,10000);
for j=1:10000
%model parameters
a(1,j)=norminv(normcdf((0-0.540836)/0.250616,0,1)
+rand(1)*normcdf((1.41-0.540836)/0.250616,0,1)-normcdf((0-
0.540836)/0.250616,0,1))*0.250616+0.540836;
S02(1,j)=norminv(normcdf((0-45.87)/18.82,0,1)+rand(1)*normcdf((100-
45.87)/18.82,0,1)-normcdf((0-45.87)/18.82,0,1))*18.82+45.87;
K1(1,j)=norminv(normcdf((0-41.91)/15.55,0,1)+rand(1)*normcdf((100-
41.91)/15.55,0,1)-normcdf((0-41.91)/15.55,0,1))*15.55+41.91;
K2(1,j)=norminv(normcdf((0-52.46)/17.67,0,1)+rand(1)*normcdf((100-
52.46)/17.67,0,1)-normcdf((0-52.46)/17.67,0,1))*17.67+52.46;
m(1,j)=norminv(normcdf((0-0.00524)/0.00316,0,1)+rand(1)*normcdf((1-
0.00524)/0.00316,0,1)-normcdf((0-
0.00524)/0.00316,0,1))*0.00316+0.00524;
l1(1,j)=logninv(rand(1),-4.2774,0.39019);
l2(1,j)=gaminv(rand(1),0.9156,0.003353);
S1(1,j)=Z(1,1)+a(1,j)*K1(1,j);
G(1,j)=m(1,j)*S1(1,j);
Sint(1,j)=S1(1,j)-G(1,j);
Qint(1,j)=max(0,(Sint(1,j)-K1(1,j))*l1(1,j));

```

```

S(1,j)=Sint(1,j)-Qint(1,j);
S2(1,j)=S02(1,j)+G(1,j);
Qg(1,j)=max(0,(S02(1,j)-K2(1,j))*l2(1,j));
Sfinal(1,j)=S2(1,j)-Qg(1,j);
Qmm(1,j)=Qint(1,j)+Qg(1,j);
V(1,j)=0;
M_C(1,j)=0;
    for i=2:n
        S1(i,j)=S(i-1,j)+Z(i,1);
        G(i,j)=m(1,j)*S1(i,j);
        Sint(i,j)=S1(i,j)-G(i,j);
        Qint(i,j)=max(0,(Sint(i,j)-K1(1,j))*l1(1,j));
        S(i,j)=Sint(i,j)-Qint(i,j);
        S2(i,j)=Sfinal(i-1,j)+G(i,j);
        Qg(i,j)=max(0,(S2(i,j)-K2(1,j))*l2(1,j));
        Sfinal(i,j)=S2(i,j)-Qg(i,j);
        Qmm(i,j)=Qint(i,j)+Qg(i,j);
        M_C(i,j)=Qmm(i,j)*77000/15/60;
    end
    M_C(1,j)=M_C(2,j);
end
Y=prctile(M_C,[0.5 2.5 5 50 95 97.5 99.5],2);
K1mean=mean(transpose(K1));
K1stdev=std(transpose(K1));
K2mean=mean(transpose(K2));
K2stdev=std(transpose(K2));
mmean=mean(transpose(m));
mstdev=std(transpose(m));
l1mean=mean(transpose(l1));
l1stdev=std(transpose(l1));
l2mean=mean(transpose(l2));
l2stdev=std(transpose(l2));

```

Κατά αντιστοιχία παρατίθεται εν συνεχεία ο αλγόριθμος για τη λεκάνη του Ξερού ποταμού.

```
clc
clear
close all
%rainfall file (rainfall in first column)
load L_synthetikh_1000.txt
Z=L_synthetikh_1000;
N=size(Z);
n=N(1,1);
%M_C final Q matrix
M_C=zeros(n,10000);
for j=1:10000
%model parameters
a(1,j)=logninv(rand(1),-0.93397,0.951593);
b(1,j)=gaminv(rand(1),2.7305,0.1893);
K1(1,j)=gaminv(rand(1),1.2298,17.57469);
K2(1,j)=norminv(normcdf((0-52.52)/14.62,0,1)+rand(1)*normcdf((95.36-
52.52)/14.62,0,1)-normcdf((0-52.52)/14.62,0,1))*14.62+52.52;
m(1,j)=logninv(rand(1),-5.4727,1.0214);
l1(1,j)=logninv(rand(1),-5.4691,0.7135);
l2(1,j)=gaminv(rand(1),1.2703,0.001919);
S1(1,j)=Z(1,1)+a(1,j)*K1(1,j);
G(1,j)=m(1,j)*S1(1,j);
Sint(1,j)=S1(1,j)-G(1,j);
Qint(1,j)=max(0,(Sint(1,j)-K1(1,j))*l1(1,j));
S(1,j)=Sint(1,j)-Qint(1,j);
S2(1,j)=b(1,j)*K2(1,j)+G(1,j);
Qg(1,j)=max(0,(S2(1,j)-K2(1,j))*l2(1,j));
Sfinal(1,j)=S2(1,j)-Qg(1,j);
M_C(1,j)=Qint(1,j)+Qg(1,j);
for i=2:n
S1(i,j)=S(i-1,j)+Z(i,1);
G(i,j)=m(1,j)*S1(i,j);
Sint(i,j)=S1(i,j)-G(i,j);
Qint(i,j)=max(0,(Sint(i,j)-K1(1,j))*l1(1,j));
S(i,j)=Sint(i,j)-Qint(i,j);
S2(i,j)=Sfinal(i-1,j)+G(i,j);
```

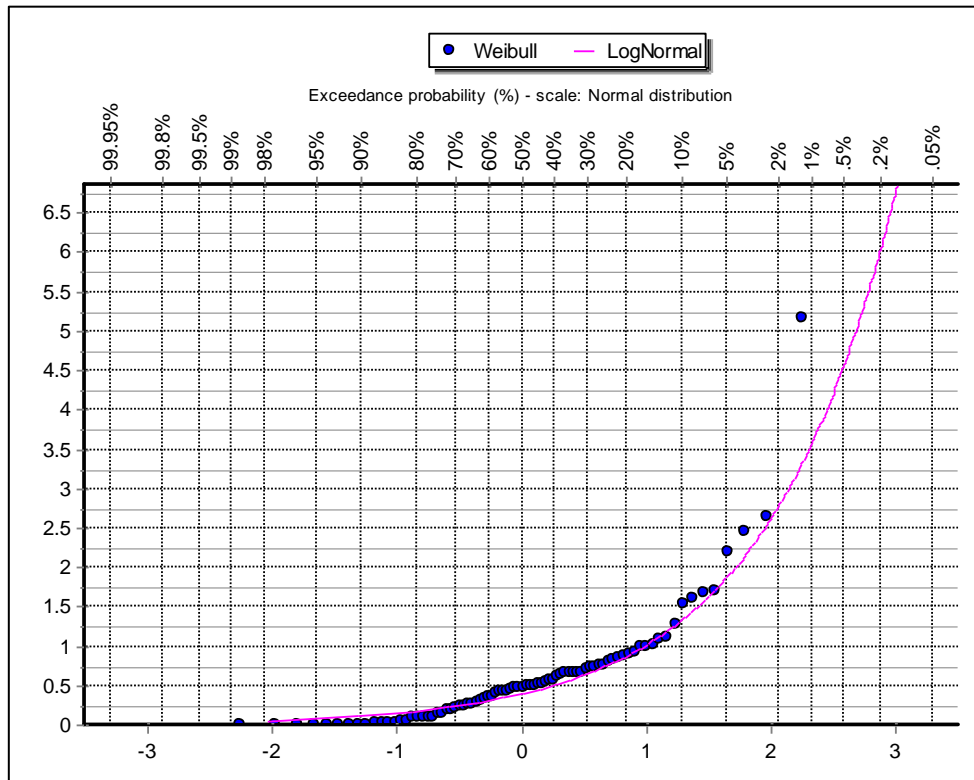
```

    Qg(i,j)=max(0,(S2(i,j)-K2(1,j))*l2(1,j));
    Sfinal(i,j)=S2(i,j)-Qg(i,j);
    Qmm(i,j)=Qint(i,j)+Qg(i,j);
    M_C(i,j)=Qmm(i,j)*68513/15/60;
end
end
Y=prctile(M_C,[0.5 2.5 5 50 95 97.5 99.5],2);
K1mean=mean(transpose(K1));
K1stdev=std(transpose(K1));
K2mean=mean(transpose(K2));
K2stdev=std(transpose(K2));
mmean=mean(transpose(m));
mstdev=std(transpose(m));
l1mean=mean(transpose(l1));
l1stdev=std(transpose(l1));
l2mean=mean(transpose(l2));
l2stdev=std(transpose(l2));

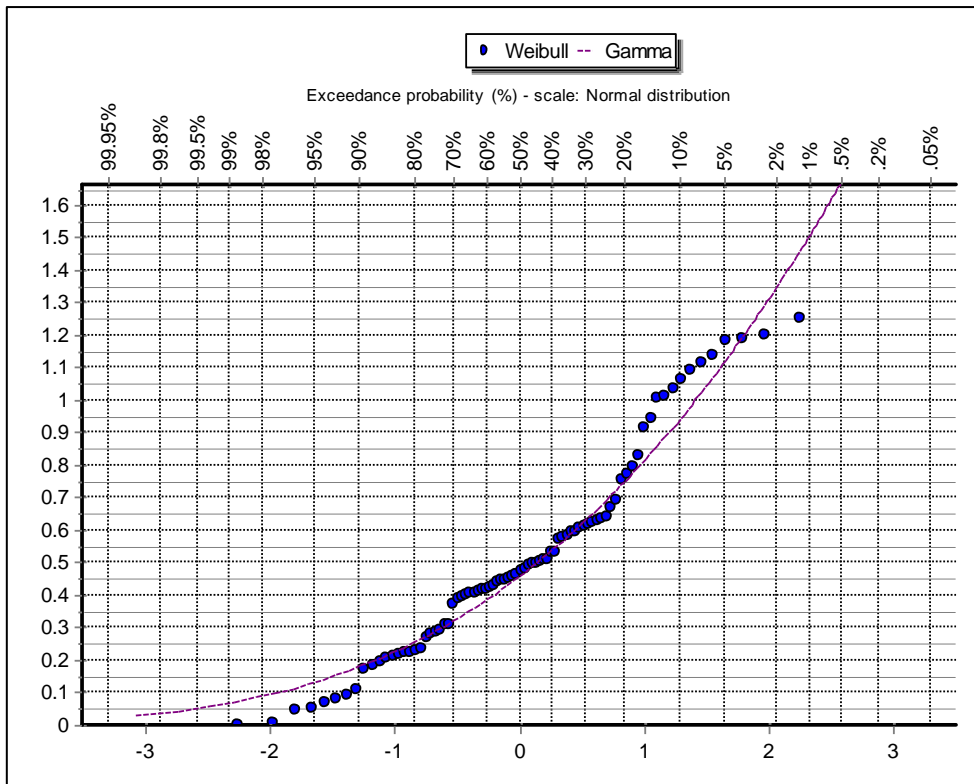
```

## Παράρτημα Β: Στατιστικές κατανομές παραμέτρων μοντέλου υδραυλικών αναλόγων

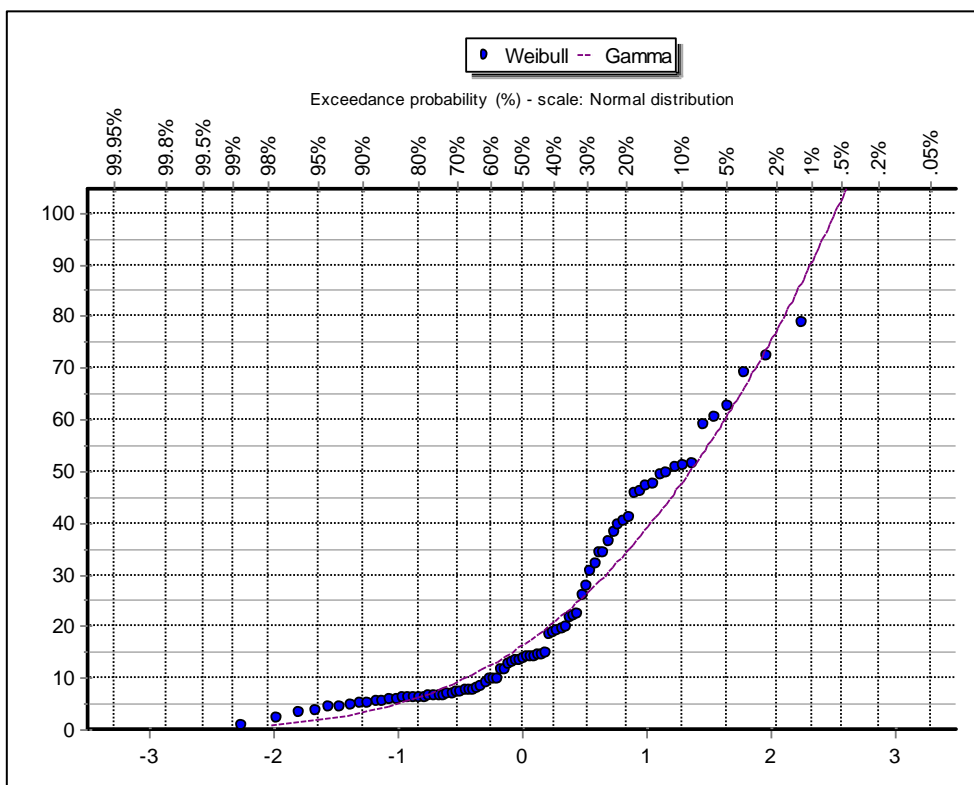
Παρατίθενται στη συνέχεια οι στατιστικές κατανομές όλων των παραμέτρων και αρχικών συνθηκών του μοντέλου για τις δύο λεκάνες μαζί με την εκάστοτε προσαρμοσμένη θεωρητική κατανομή.



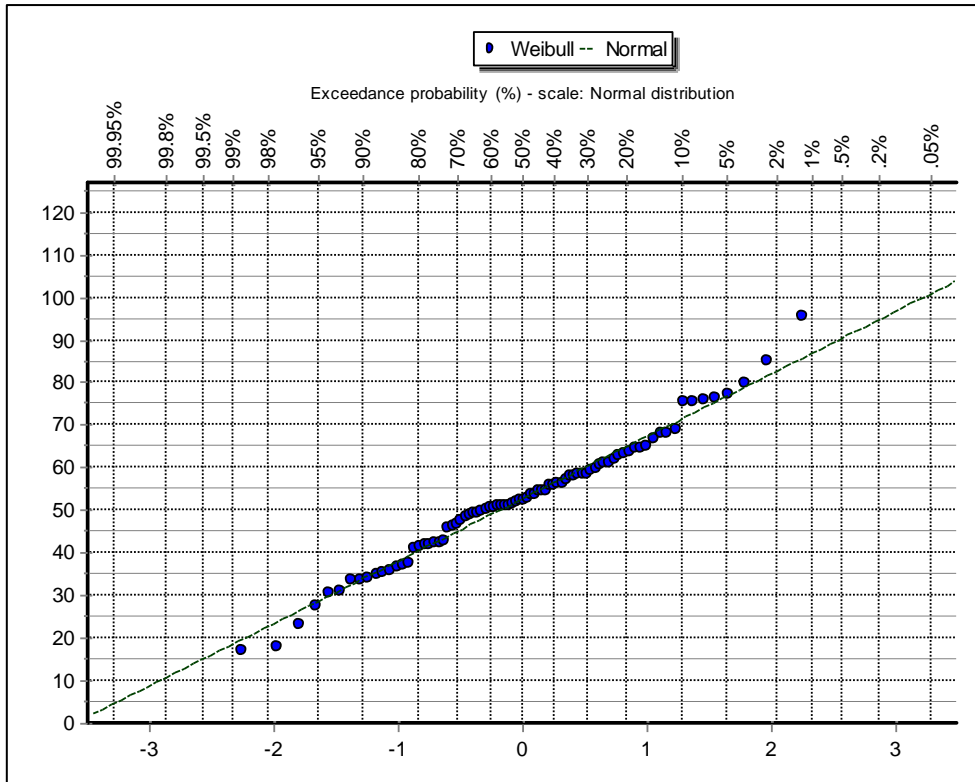
Σχήμα Β1 Η κατανομή της παραμέτρου  $\alpha$  της λεκάνης του Ξερού ποταμού.



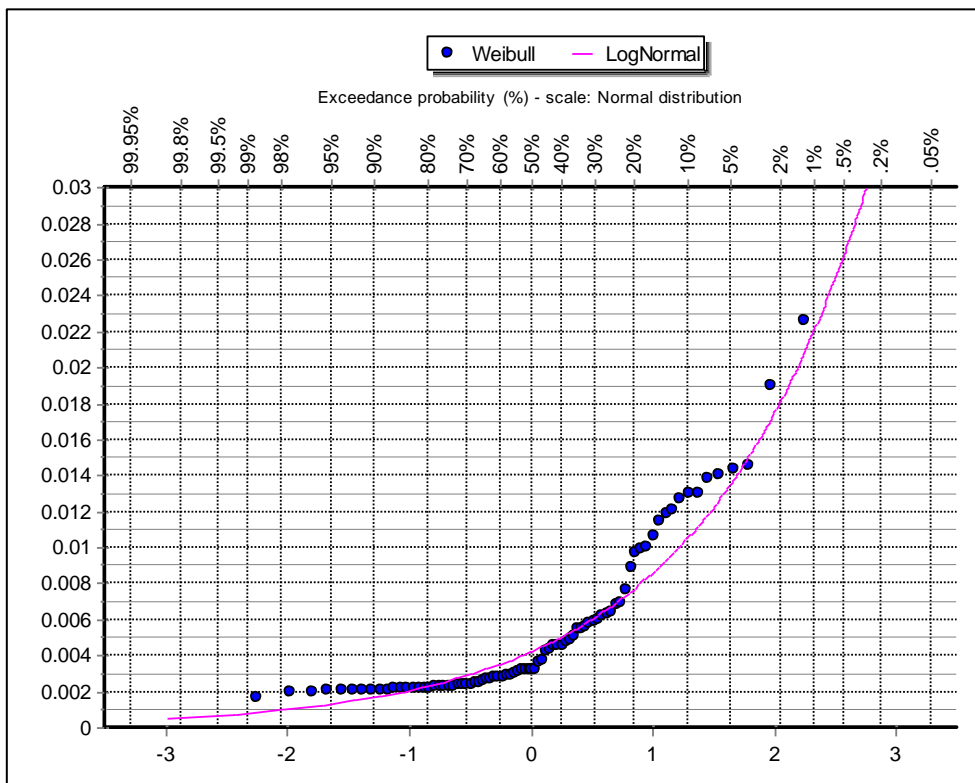
Σχήμα Β2 Η κατανομή της παραμέτρου  $b$  της λεκάνης του Ξερού ποταμού.



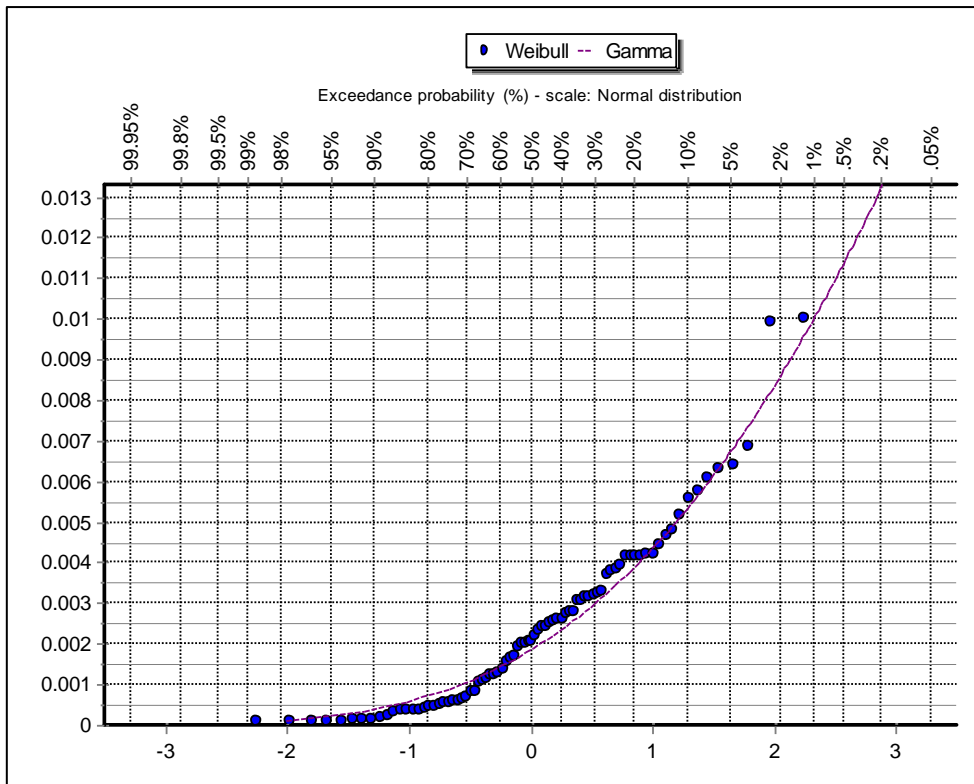
Σχήμα Β3 Η κατανομή της παραμέτρου  $K1$  της λεκάνης του Ξερού ποταμού.



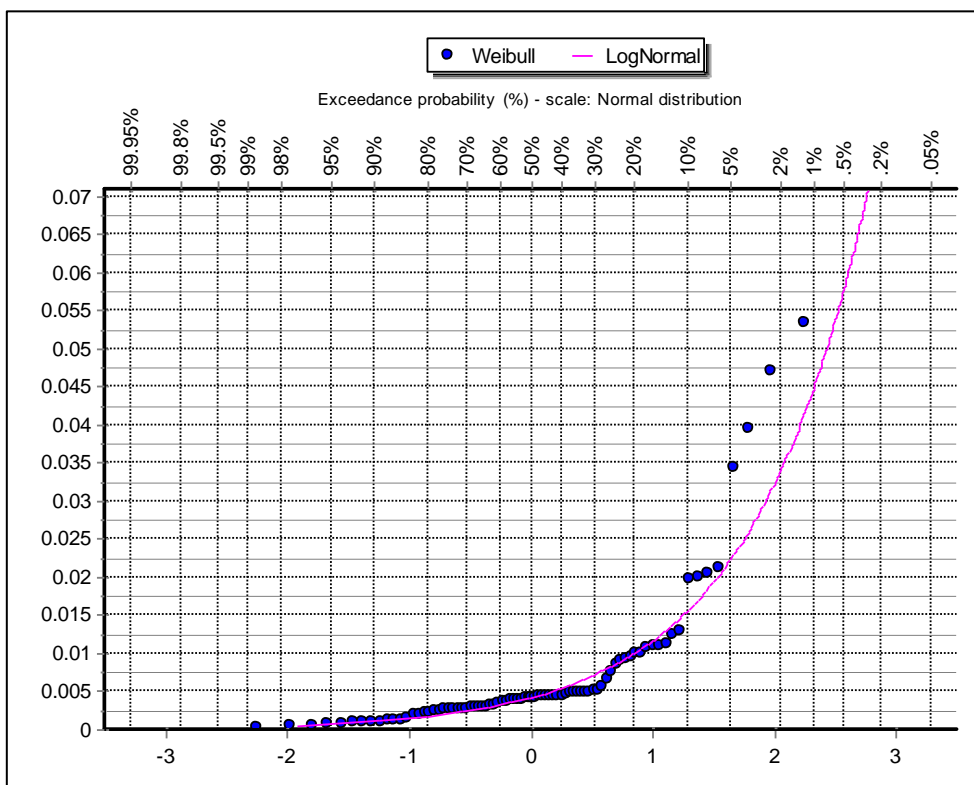
Σχήμα Β4 Η κατανομή της παραμέτρου K2 της λεκάνης του Ξερού ποταμού.



Σχήμα Β5 Η κατανομή της παραμέτρου I1 της λεκάνης του Ξερού ποταμού.

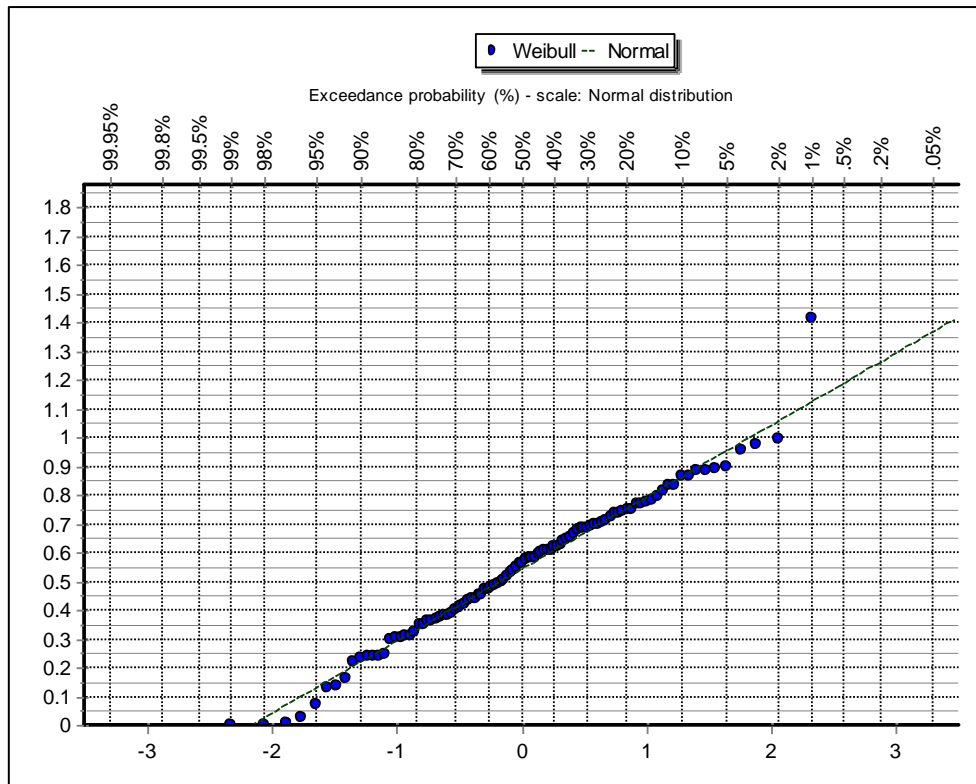


Σχήμα Β6 Η κατανομή της παραμέτρου I2 της λεκάνης του Ξερού ποταμού.

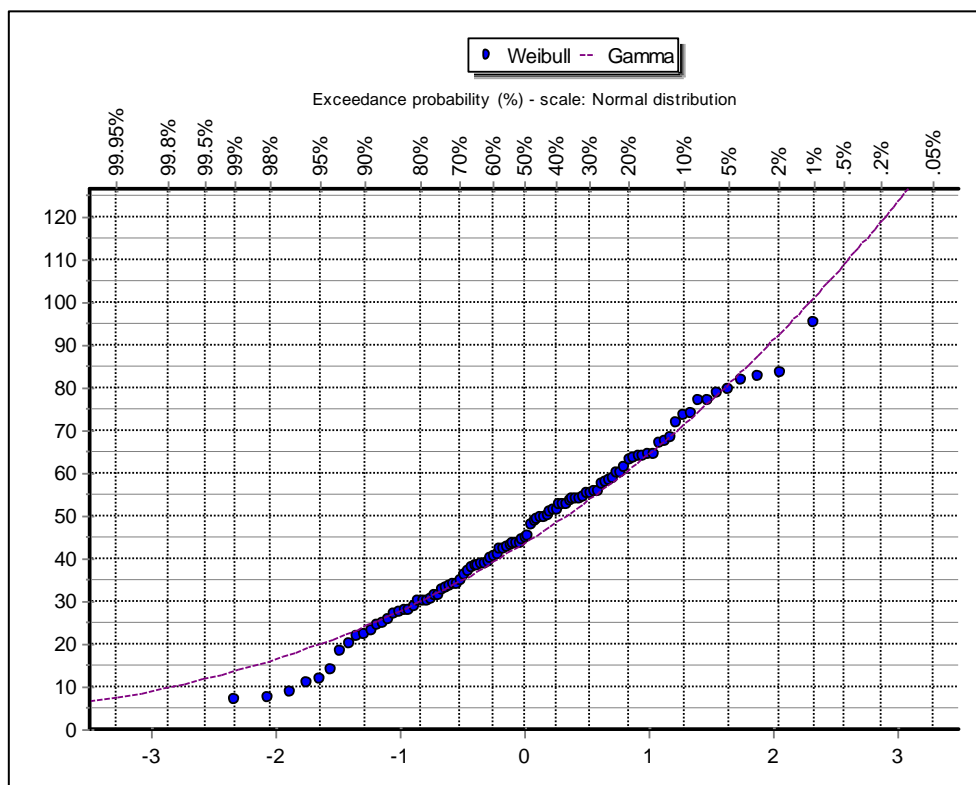


Σχήμα Β7 Η κατανομή της παραμέτρου m της λεκάνης του Ξερού ποταμού.

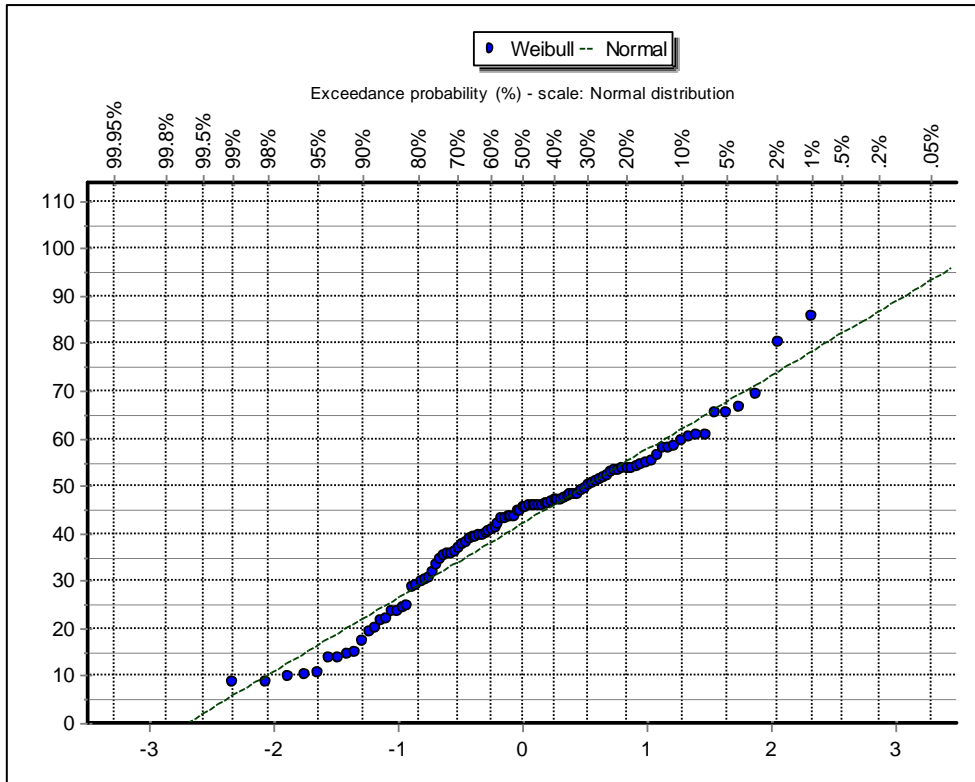




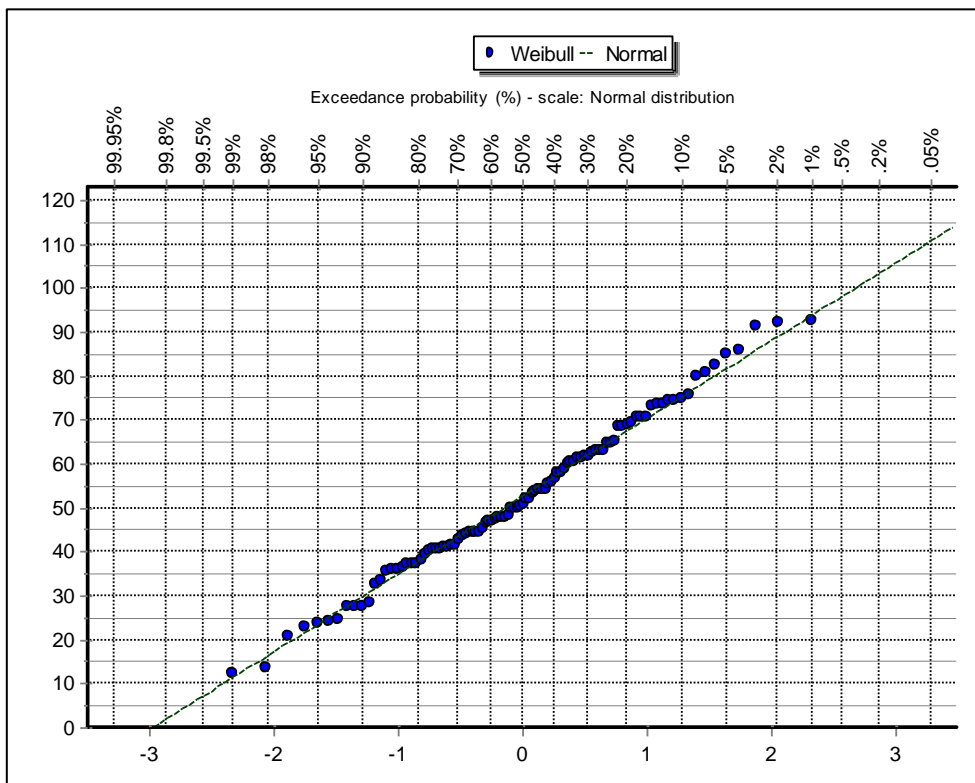
Σχήμα Β8 Η κατανομή της παραμέτρου  $\alpha$  της λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα.



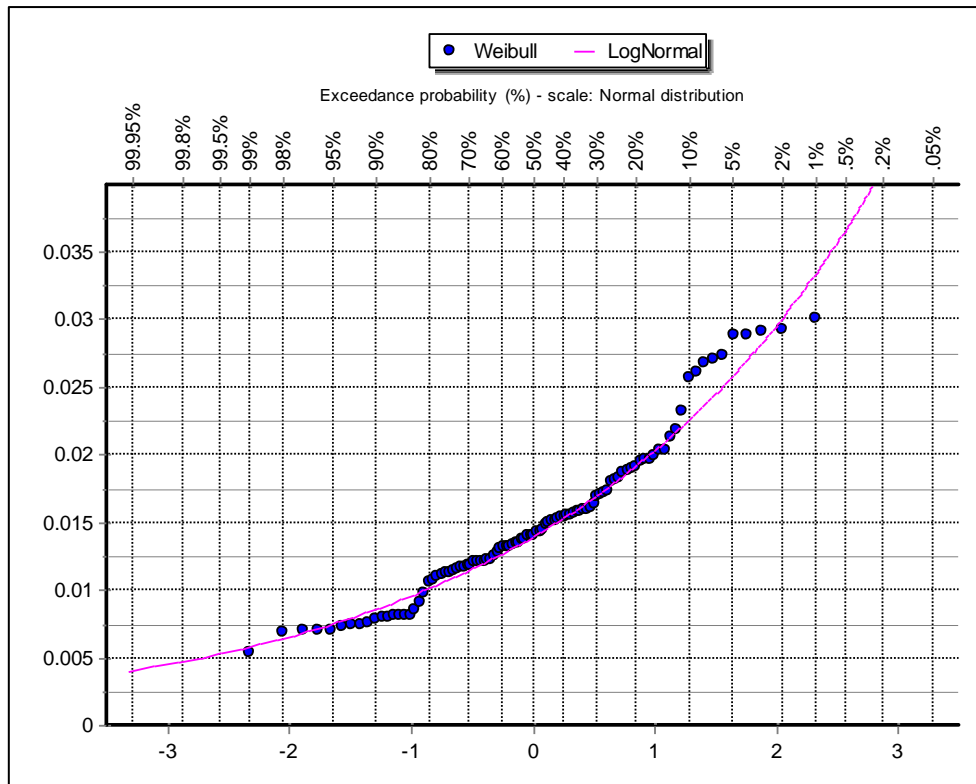
Σχήμα Β9 Η κατανομή της παραμέτρου  $S_{02}$  της λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα.



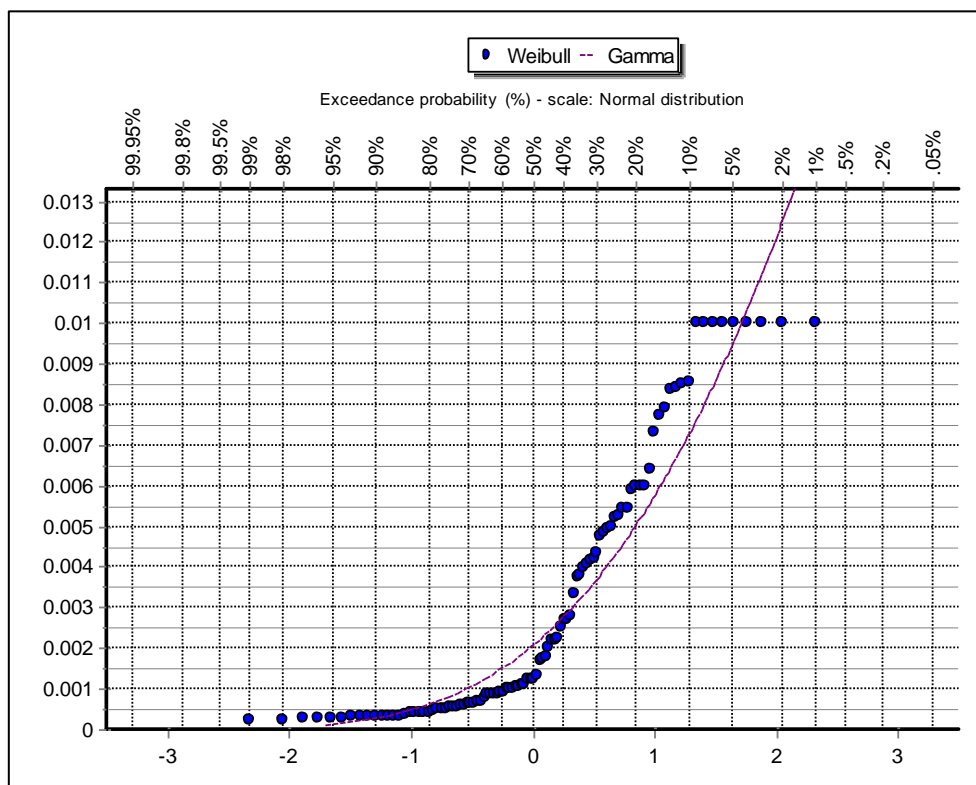
Σχήμα Β10 Η κατανομή της παραμέτρου K1 της λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα.



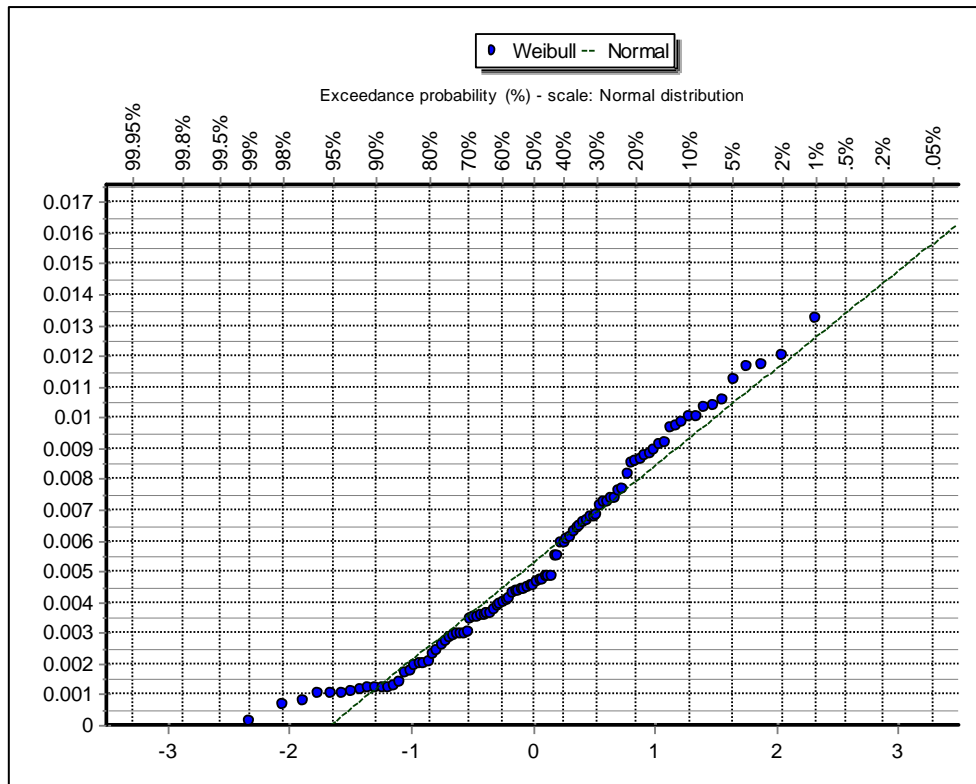
Σχήμα Β11 Η κατανομή της παραμέτρου K2 της λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα.



Σχήμα Β12 Η κατανομή της παραμέτρου I1 της λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα.



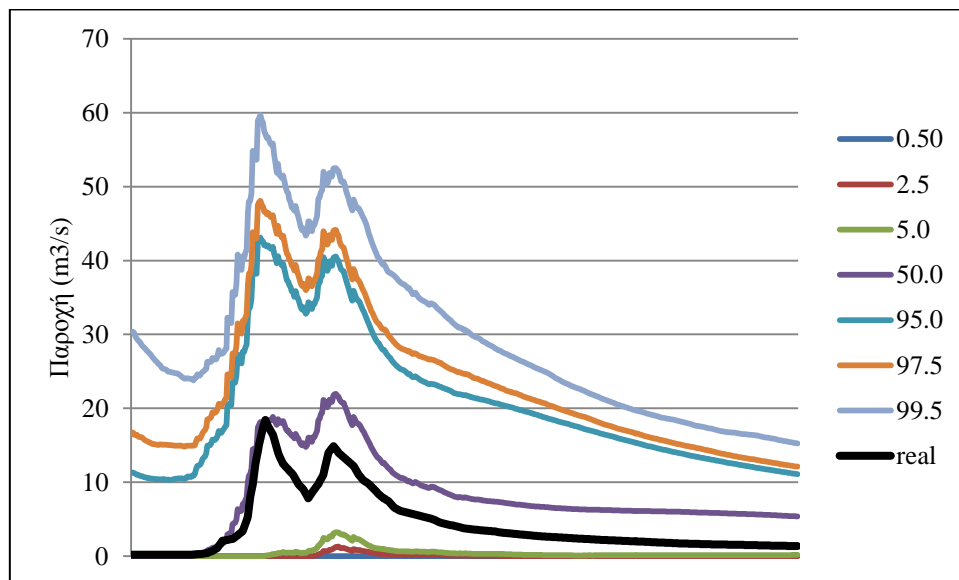
Σχήμα Β13 Η κατανομή της παραμέτρου I2 λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα.



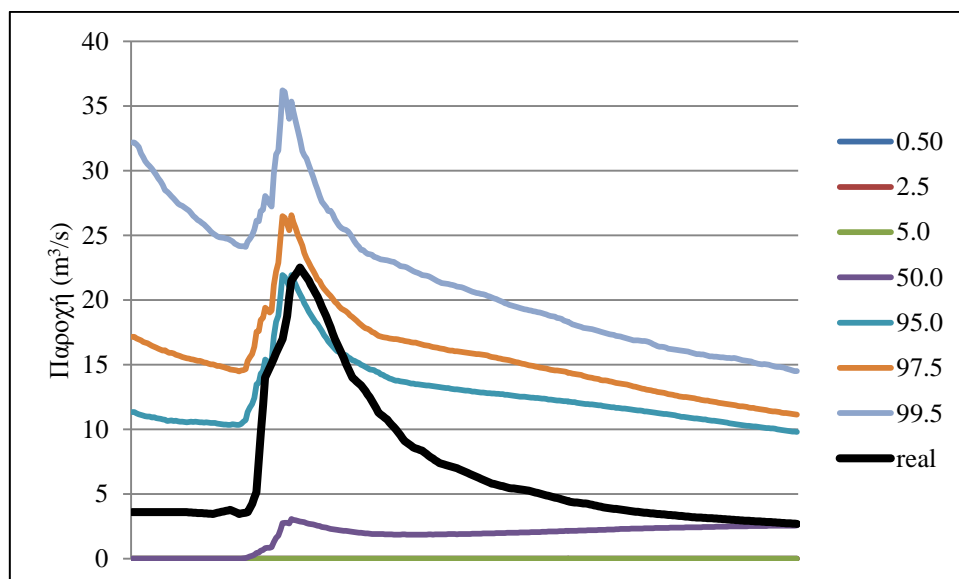
Σχήμα Β14 Η κατανομή της παραμέτρου  $m$  της λεκάνης του Περιστερώνα.

## Παράρτημα Γ Αναλυτικά αποτελέσματα προσομοίωσης Monte Carlo

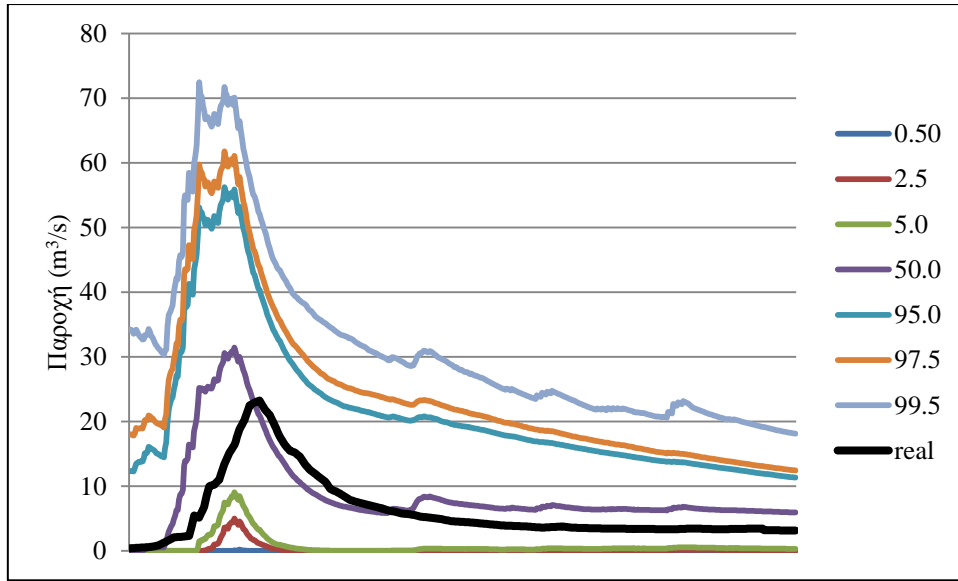
Παρατίθενται στη συνέχεια τα διαγράμματα της Monte Carlo προσομοίωσης με τυχαίες αρχικές συνθήκες για όλα τα περιστατικά στις δύο λεκάνες.



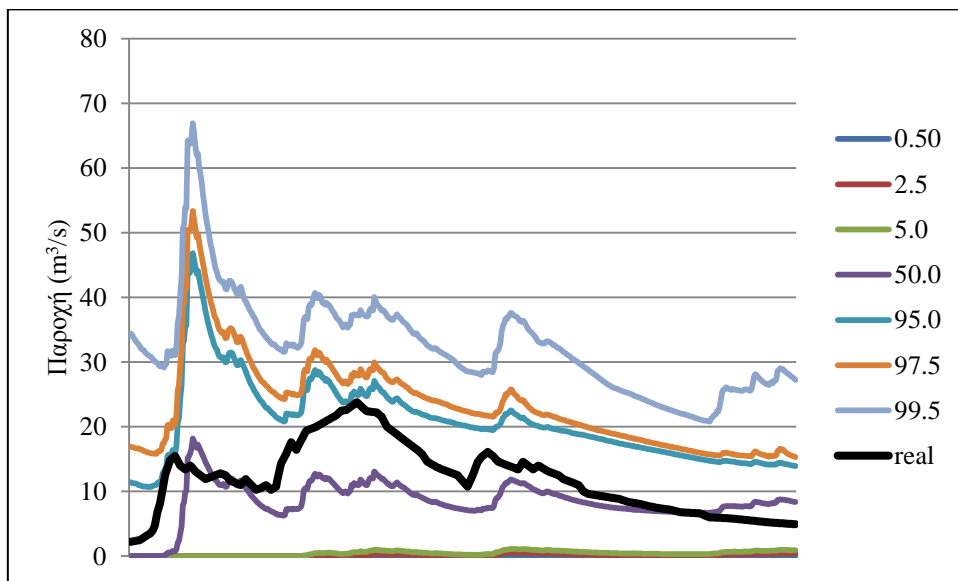
**Σχήμα Γ1** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 17-31 Ιανουαρίου 1977 στον ποταμό Περιστερώνα.



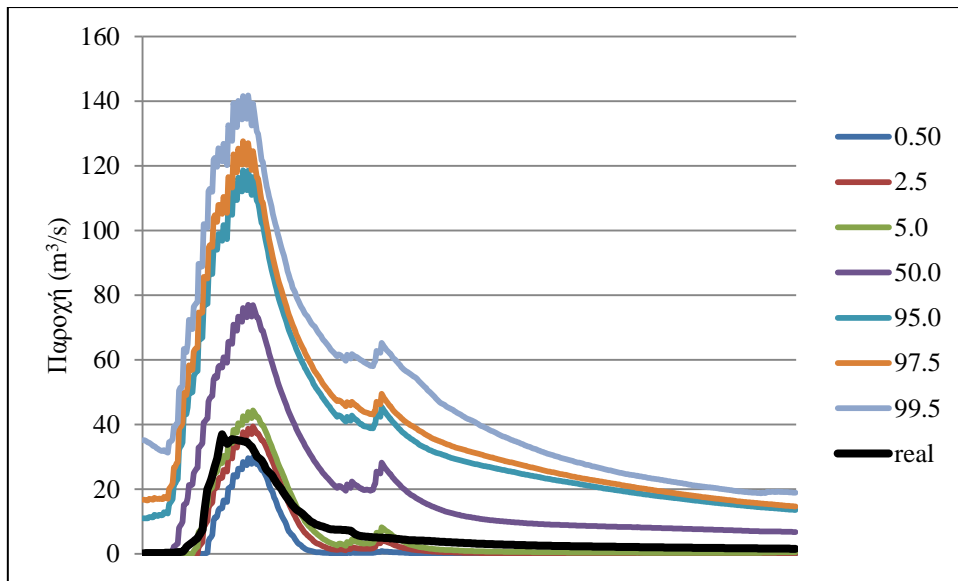
**Σχήμα Γ2** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 8-11 Φεβρουαρίου 1979 στον ποταμό Περιστερώνα.



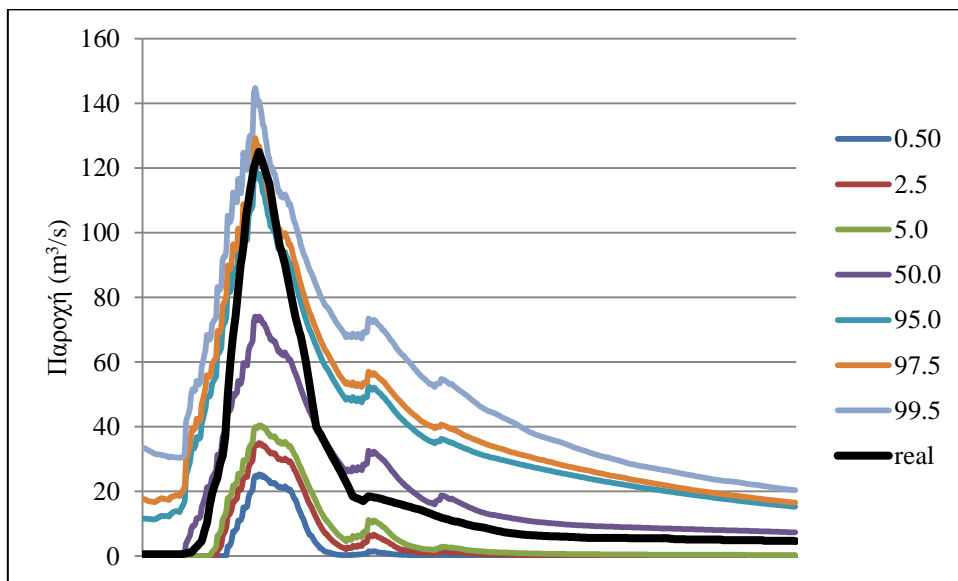
Σχήμα Γ3 Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 13-18 Φεβρουαρίου 1980 στον ποταμό Περιστερώνα.



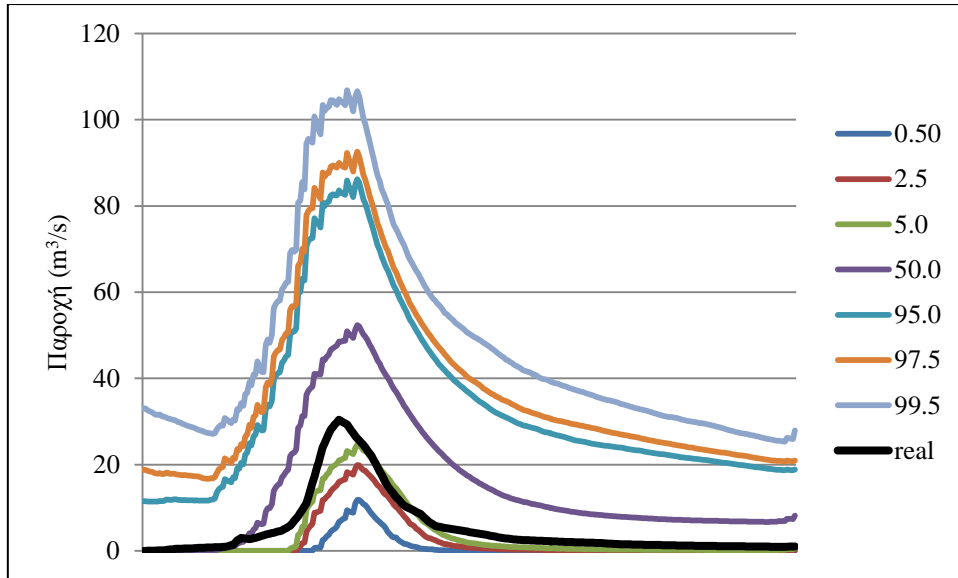
Σχήμα Γ4 Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 8-16 Μαρτίου 1988 στον ποταμό Περιστερώνα.



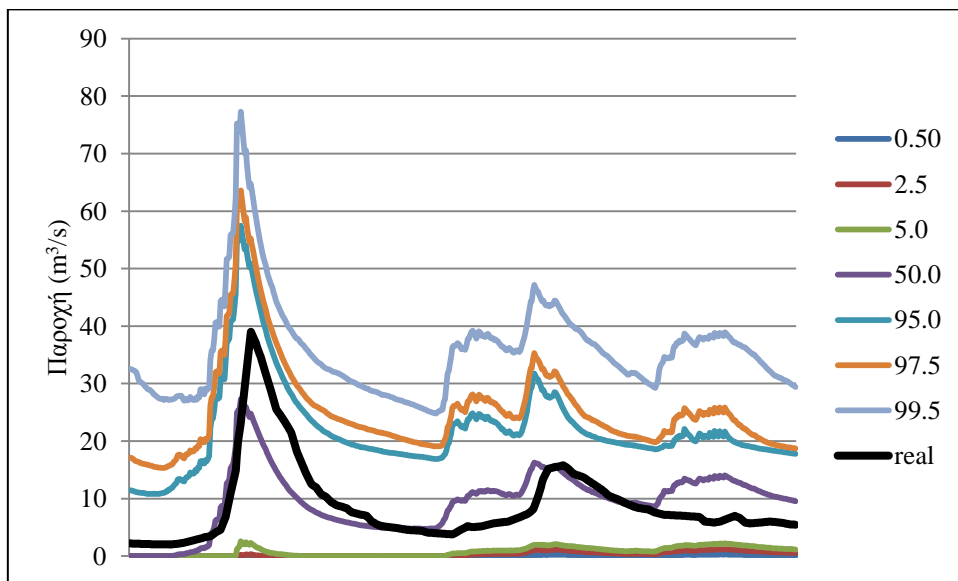
**Σχήμα Γ5** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 24-29 Δεκεμβρίου 1988 στον ποταμό Περιστερώνα.



**Σχήμα Γ6** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 8-13 Ιανουαρίου 1989 στον ποταμό Περιστερώνα.

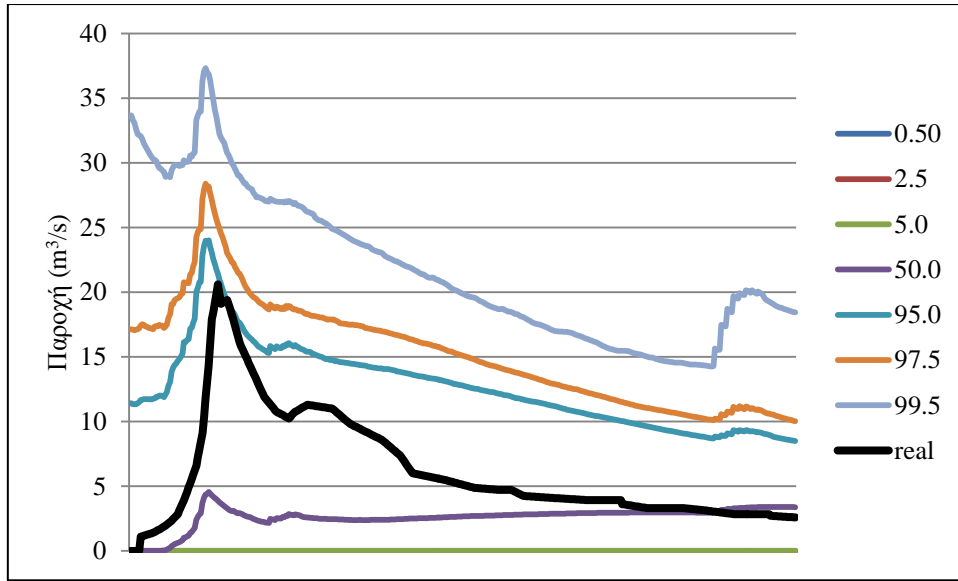


**Σχήμα Γ7** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 7-12 Δεκεμβρίου 1991 στον ποταμό Περιστερώνα.

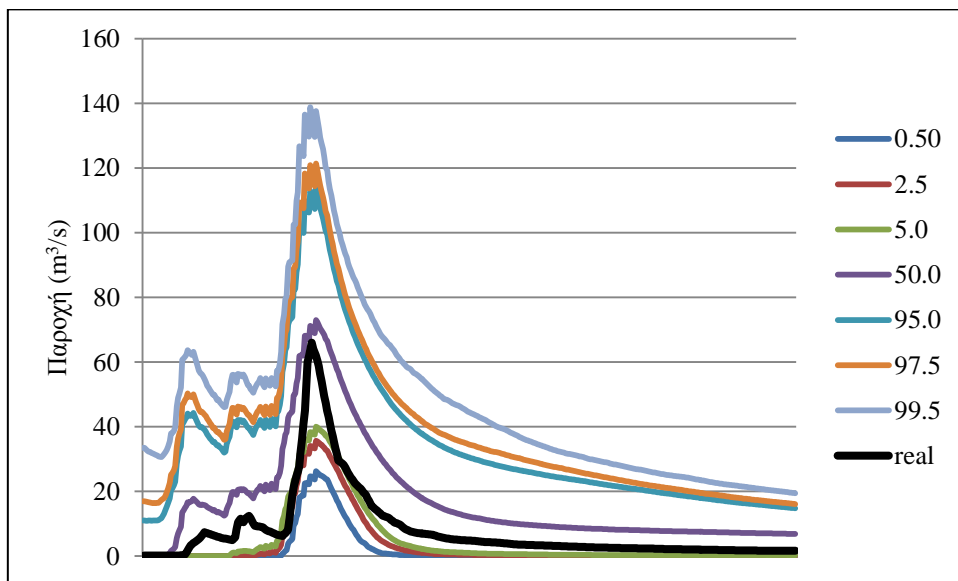


**Σχήμα Γ8** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 26-31 Δεκεμβρίου 1991 στον ποταμό Περιστερώνα.

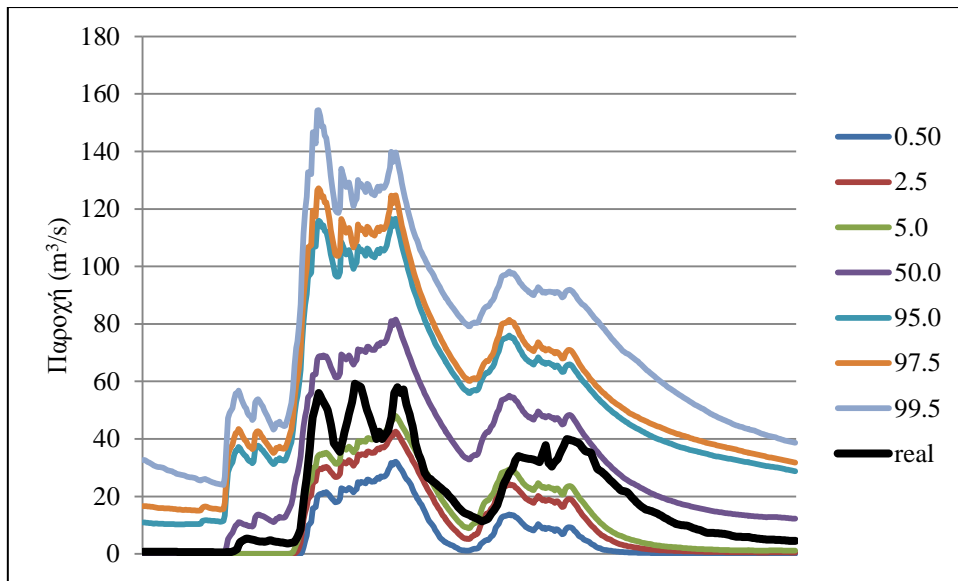




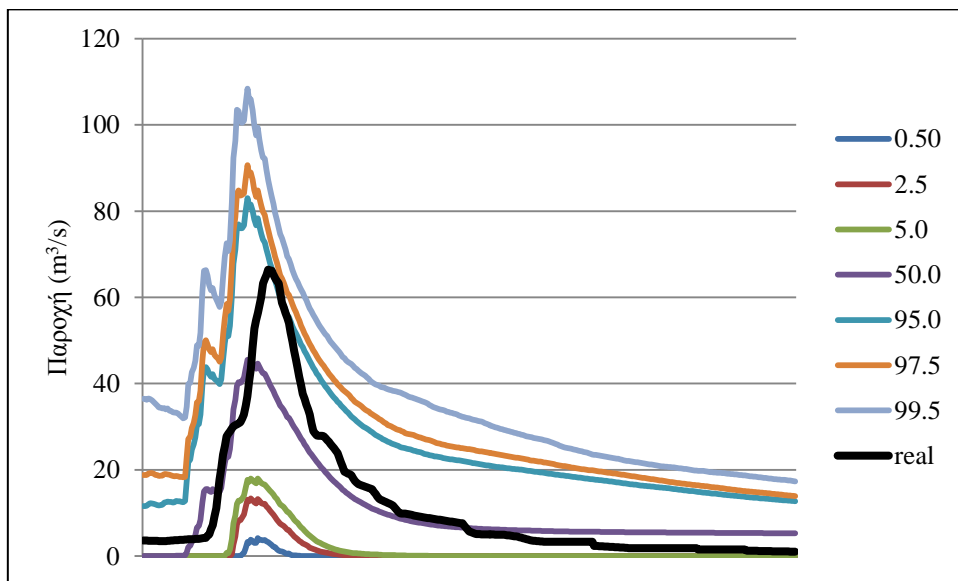
**Σχήμα Γ9** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 5-9 Φεβρουαρίου 1992 στον ποταμό Περιστερώνα.



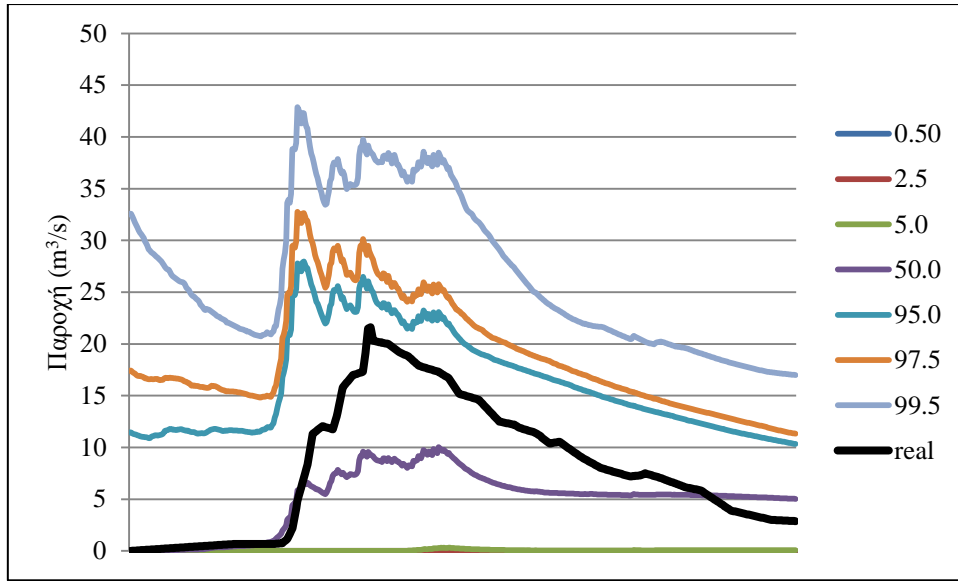
**Σχήμα Γ10** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 1-5 Δεκεμβρίου 1992 στον ποταμό Περιστερώνα.



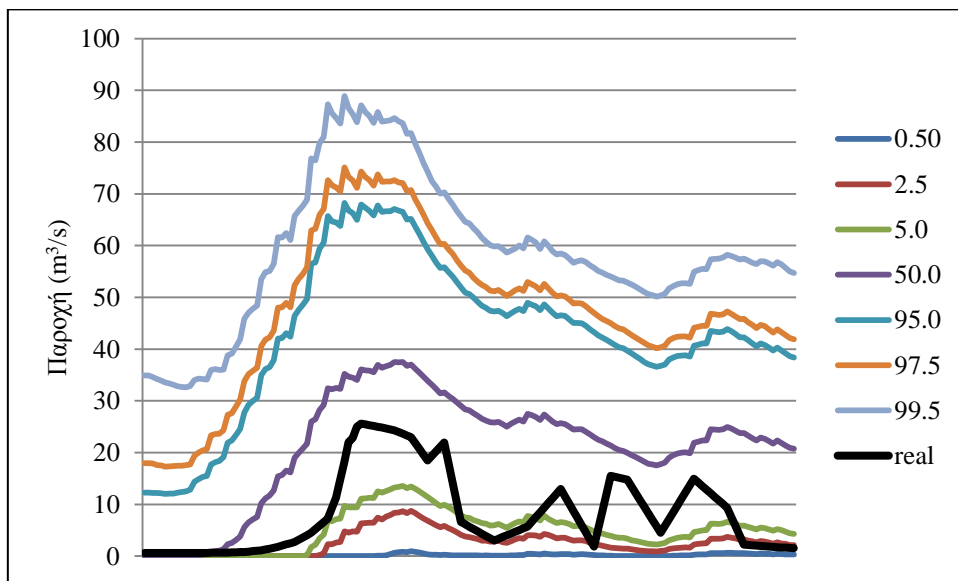
**Σχήμα Γ11** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 20-27 Νοεμβρίου 1994 στον ποταμό Περιστερώνα.



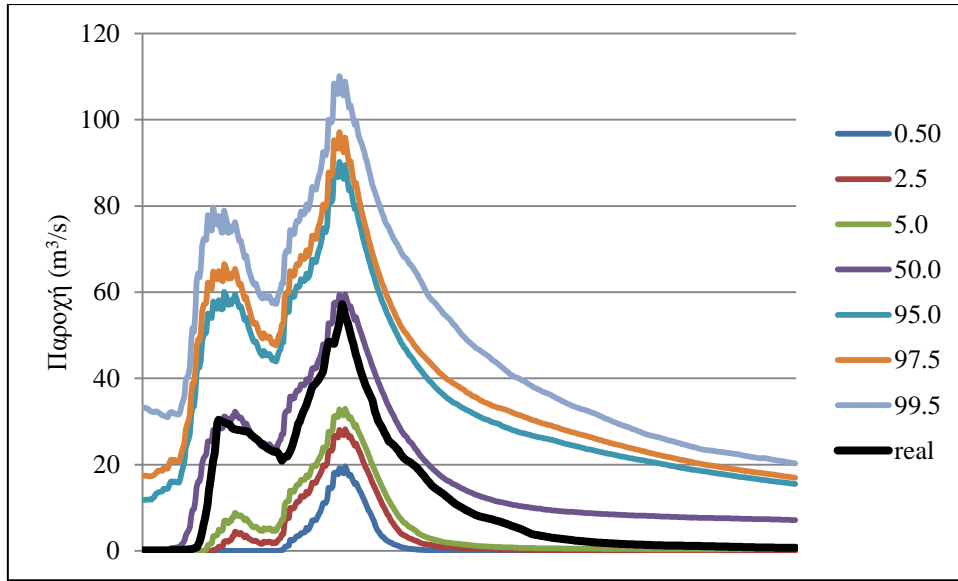
**Σχήμα Γ12** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 8-11 Δεκεμβρίου 2001 στον ποταμό Περιστερώνα.



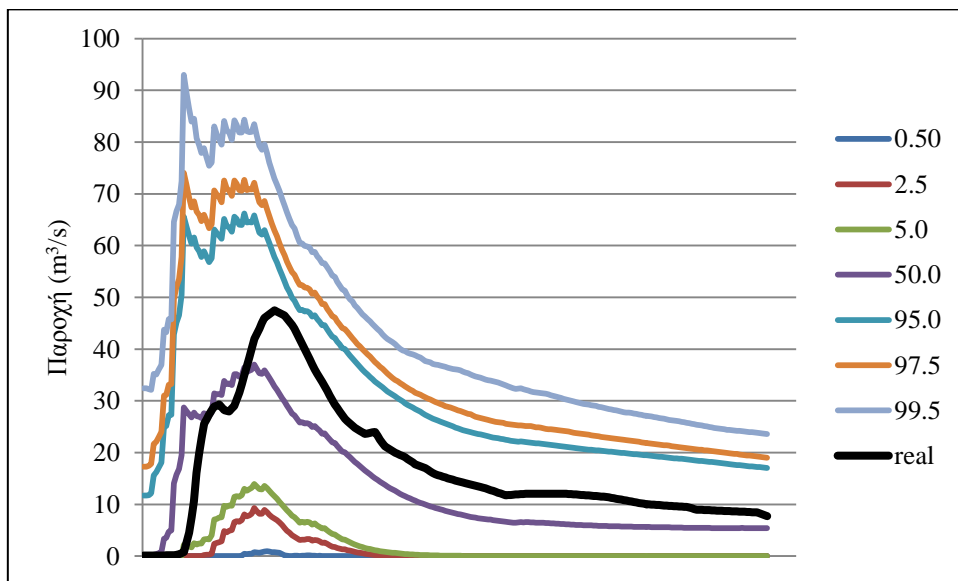
**Σχήμα Γ13** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 3-8 Ιανουαρίου 2002 στον ποταμό Περιστερώνα.



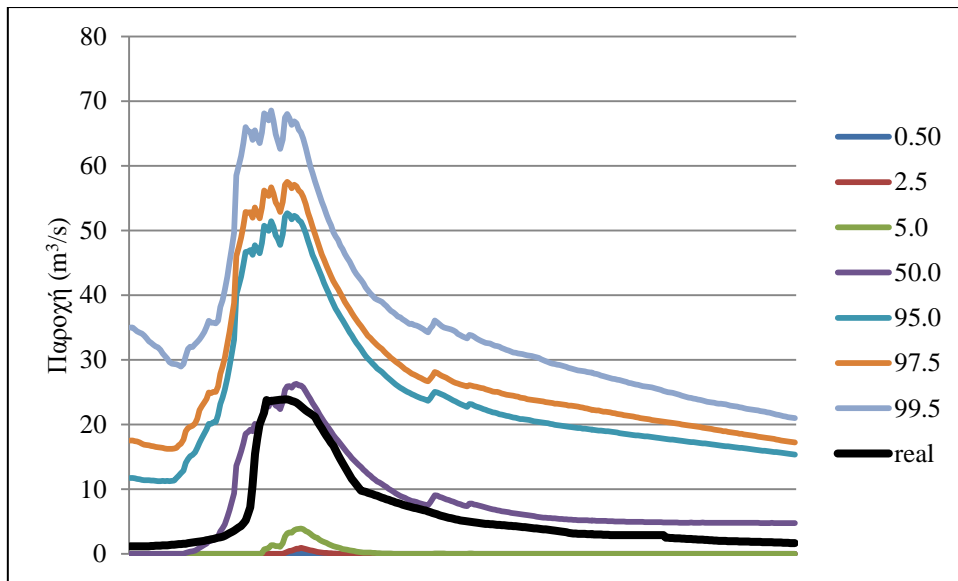
**Σχήμα Γ14** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 12-14 Φεβρουαρίου 2003 στον ποταμό Περιστερώνα.



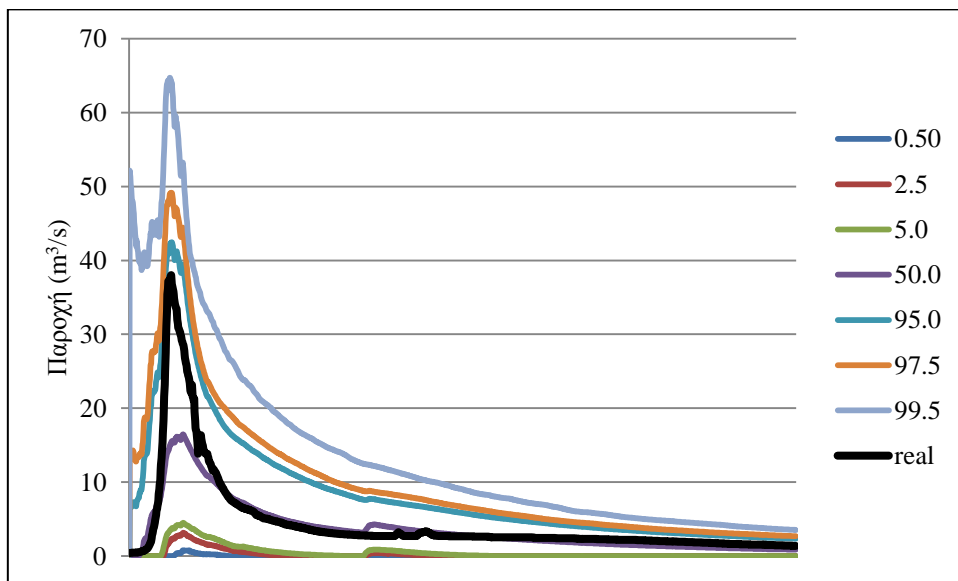
**Σχήμα Γ15** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 11-15 Ιανουαρίου 2004 στον ποταμό Περιστερώνα.



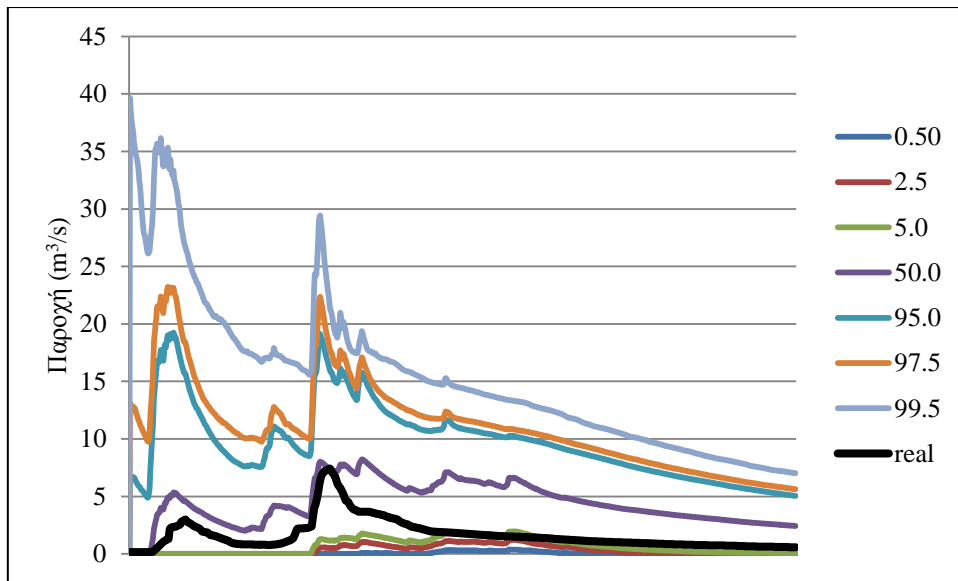
**Σχήμα Γ16** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 22-24 Ιανουαρίου 2004 στον ποταμό Περιστερώνα.



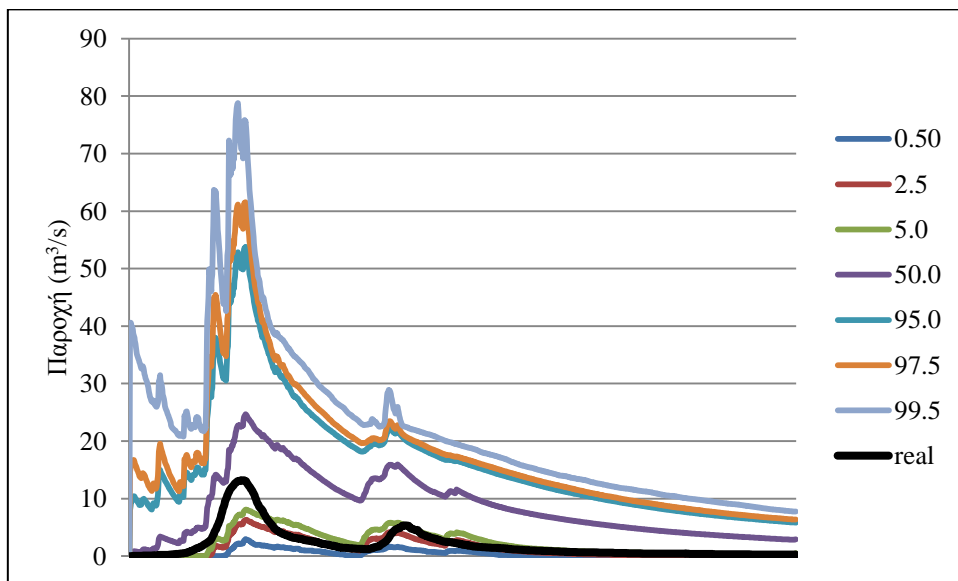
Σχήμα Γ17 Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 5-7 Φεβρουαρίου 2007 στον ποταμό Περιστερώνα.



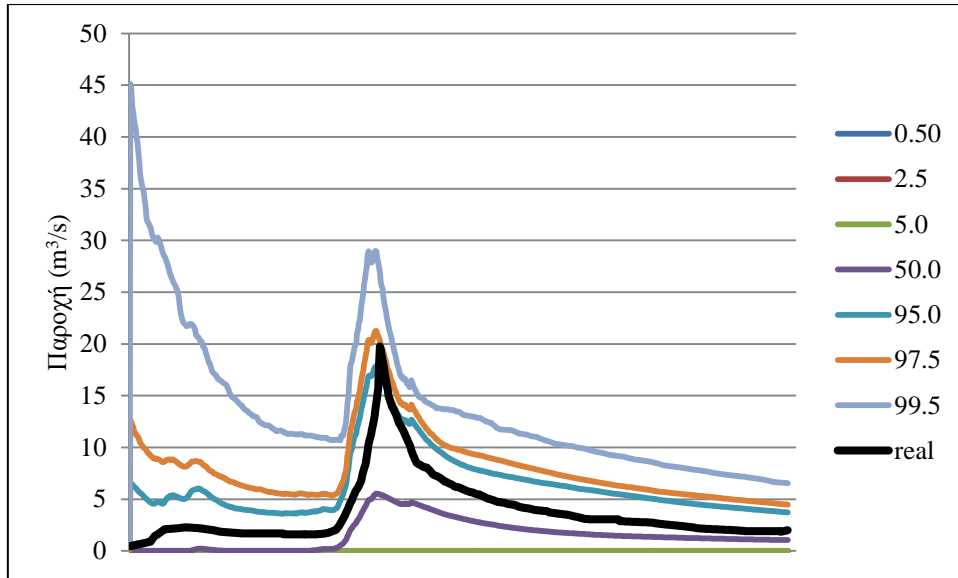
Σχήμα Γ18 Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 8-23 Ιανουαρίου 1989 στον Ξερό ποταμό.



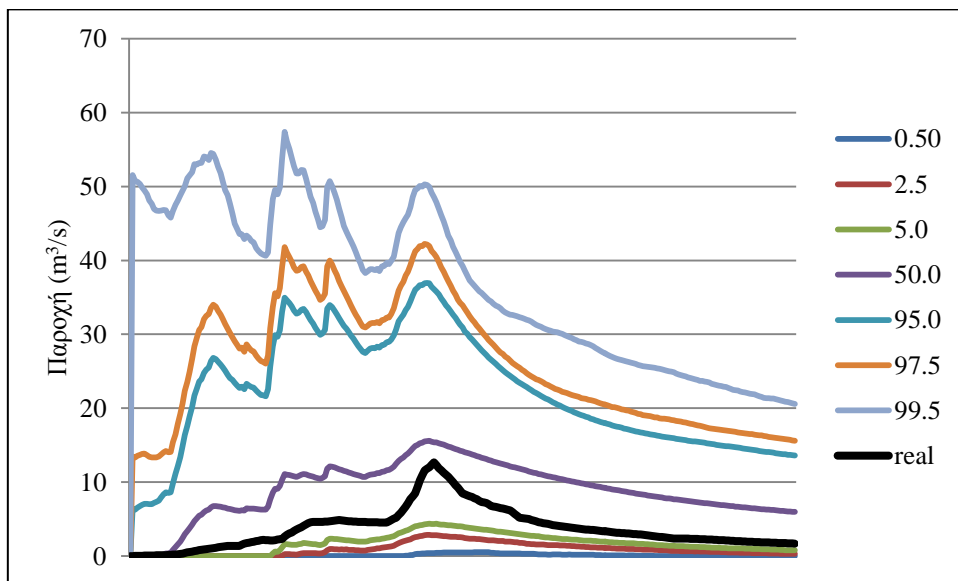
**Σχήμα Γ19** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 11-22 Φεβρουαρίου 1990 στον Ξερό ποταμό.



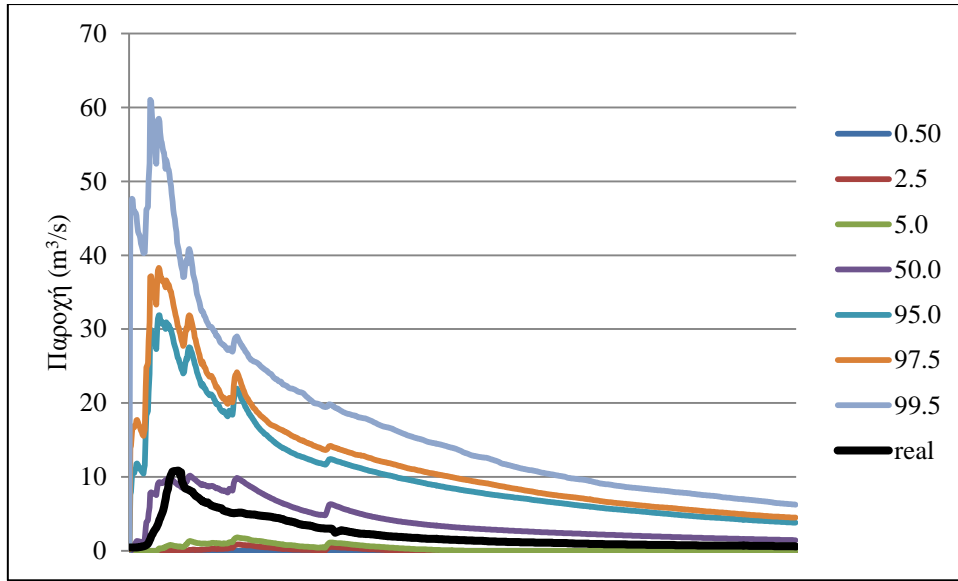
**Σχήμα Γ20** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 6-19 Δεκεμβρίου 1991 στον Ξερό ποταμό.



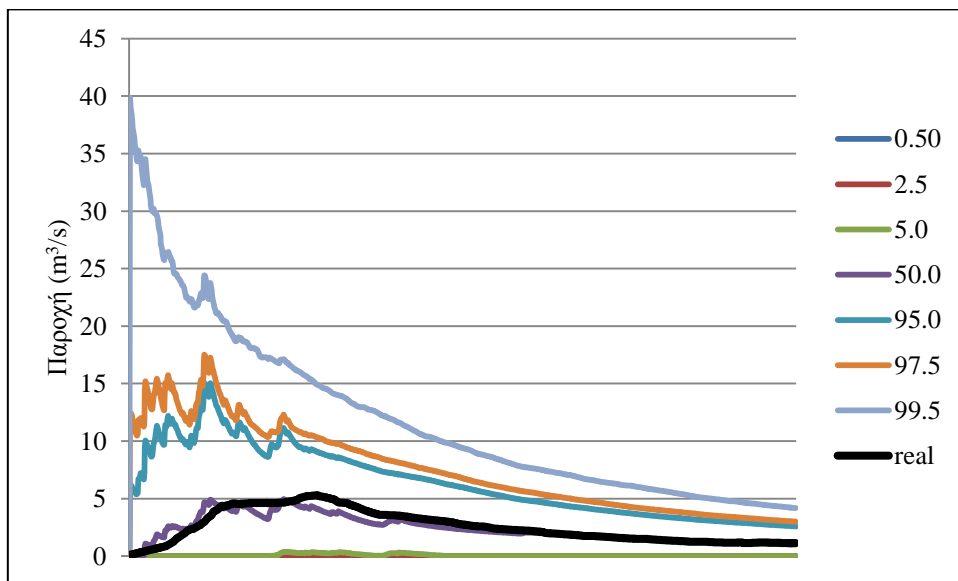
**Σχήμα Γ21** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 3-11 Φεβρουαρίου 1992 στον Ξερό ποταμό.



**Σχήμα Γ22** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 1-4 Δεκεμβρίου 1992 στον Ξερό ποταμό.

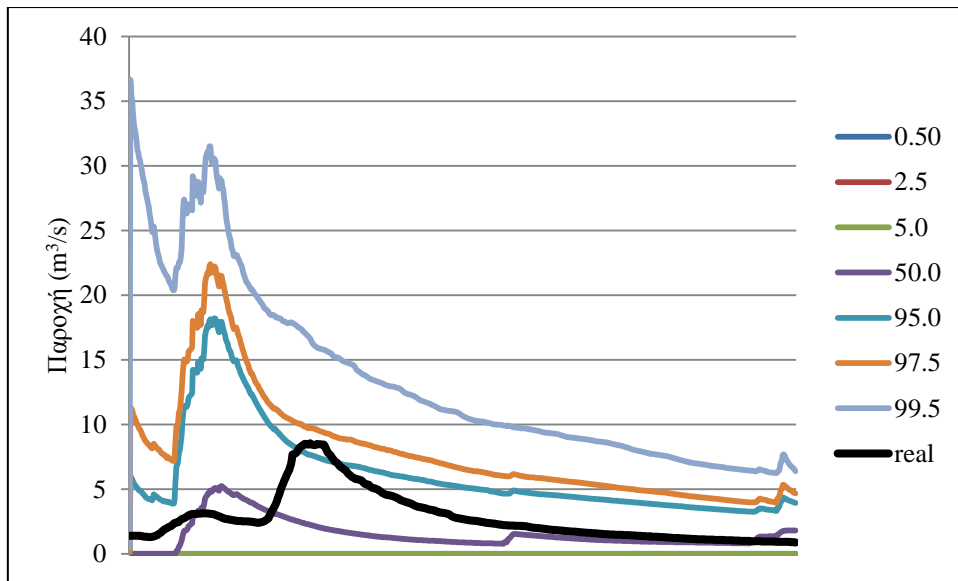


**Σχήμα Γ23** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 13-23 Δεκεμβρίου 1992 στον Ξερό ποταμό.

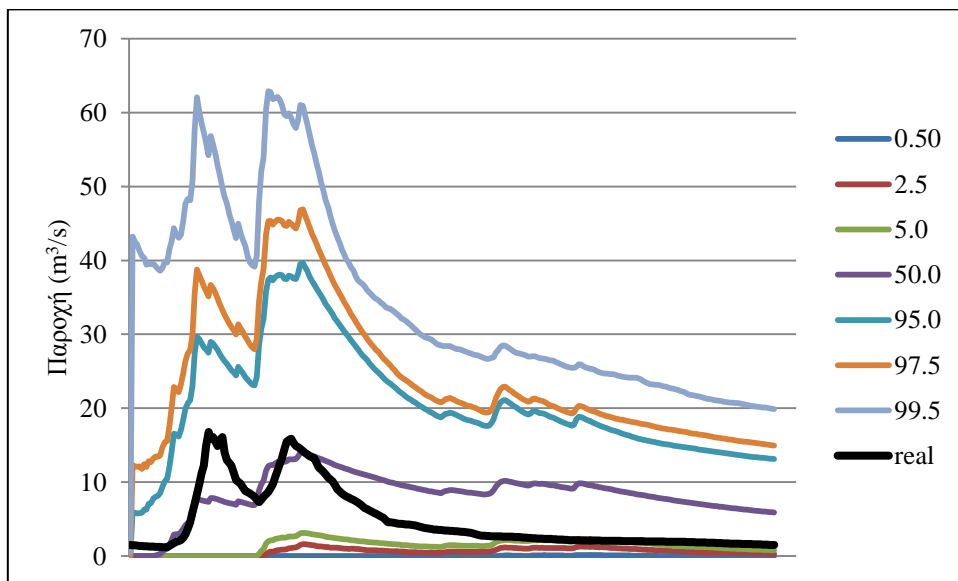


**Σχήμα Γ24** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 6-19 Μαρτίου 1993 στον Ξερό ποταμό.

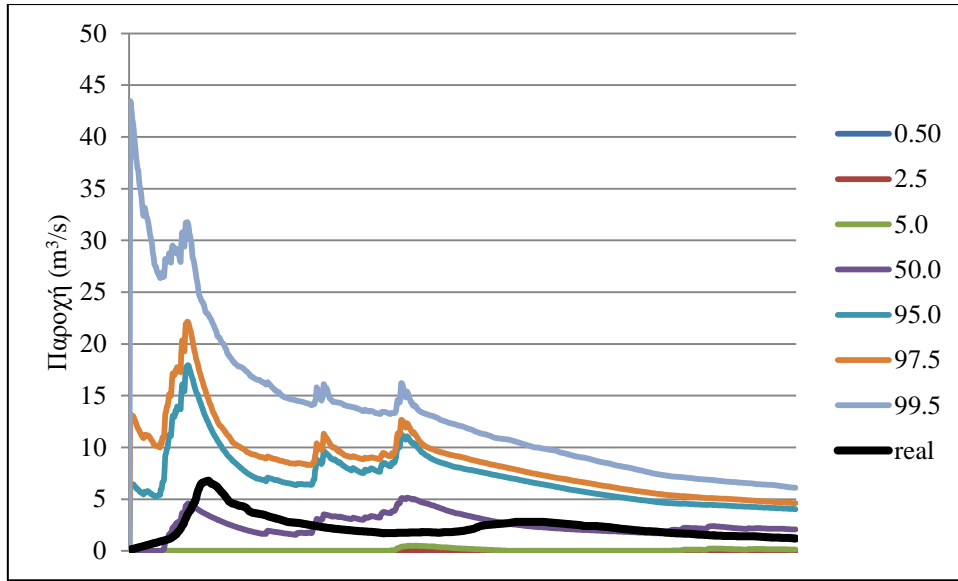




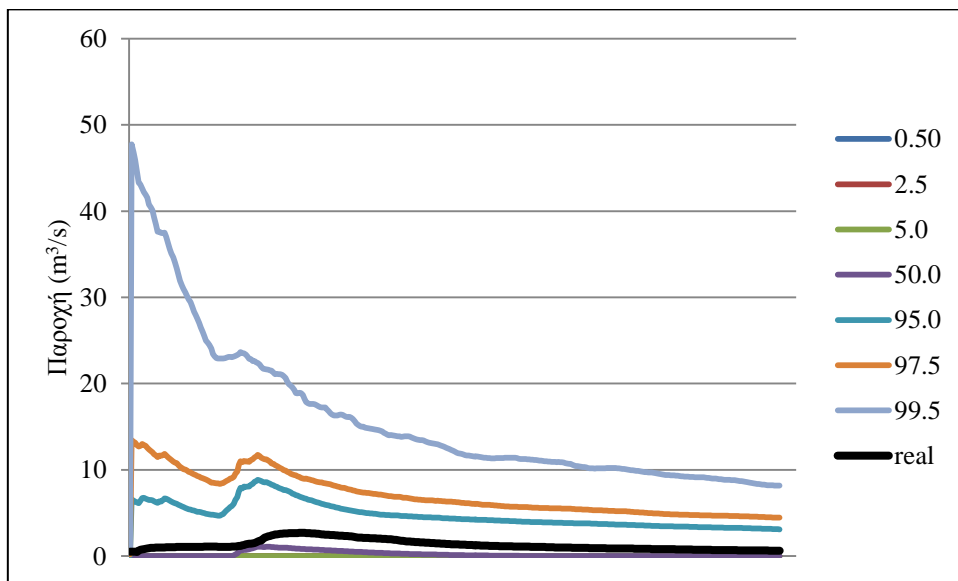
**Σχήμα Γ25** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 7-19 Φεβρουαρίου 1994 στον Ξερό ποταμό.



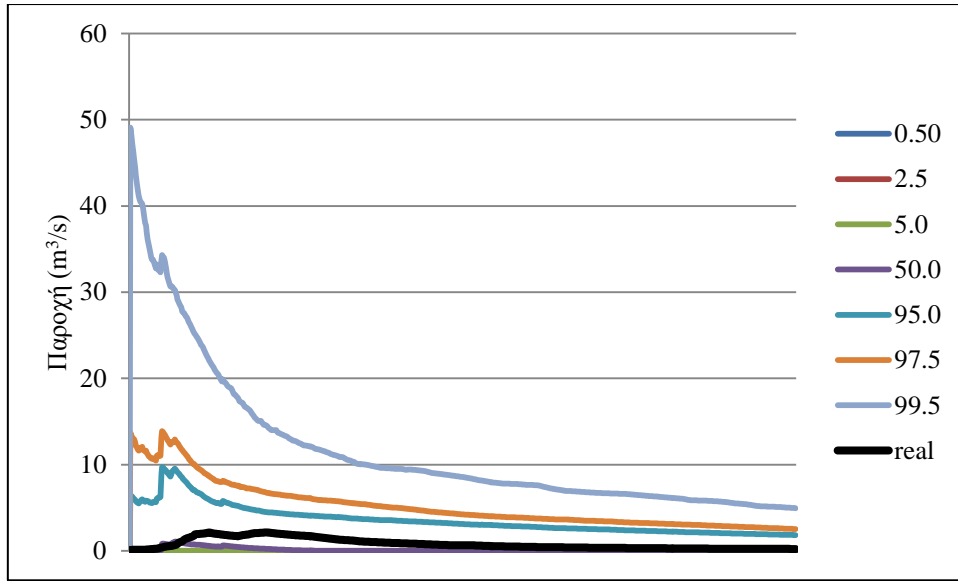
**Σχήμα Γ26** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 21-24 Νοεμβρίου 1994 στον Ξερό ποταμό.



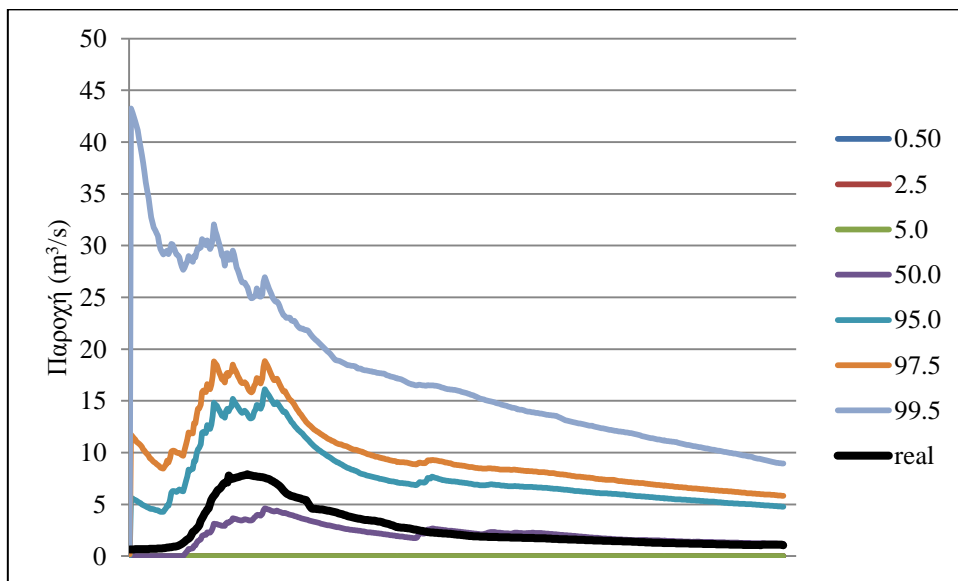
**Σχήμα Γ27** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 12-22 Ιανουαρίου 1995 στον Ξερό ποταμό.



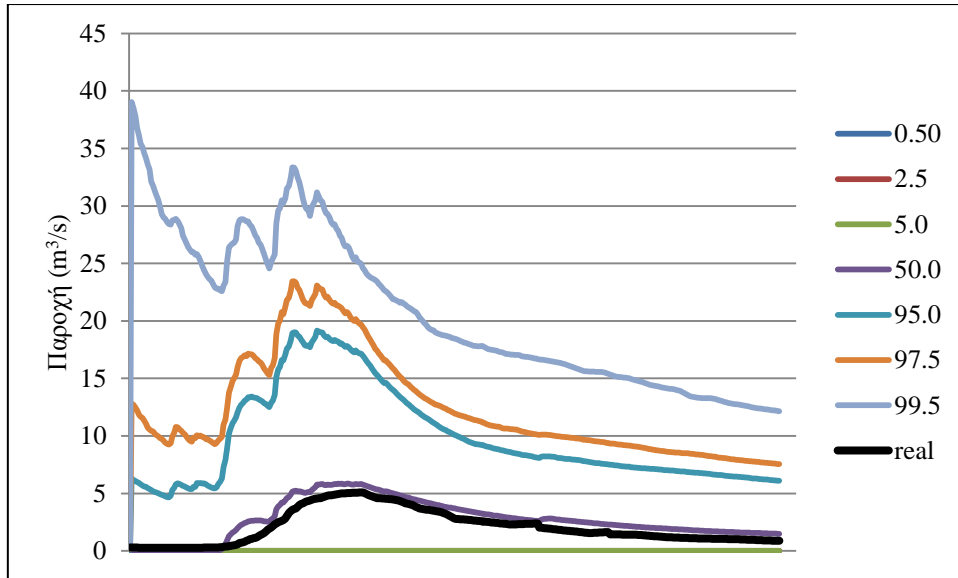
**Σχήμα Γ28** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 10-14 Φεβρουαρίου 1996 στον Ξερό ποταμό.



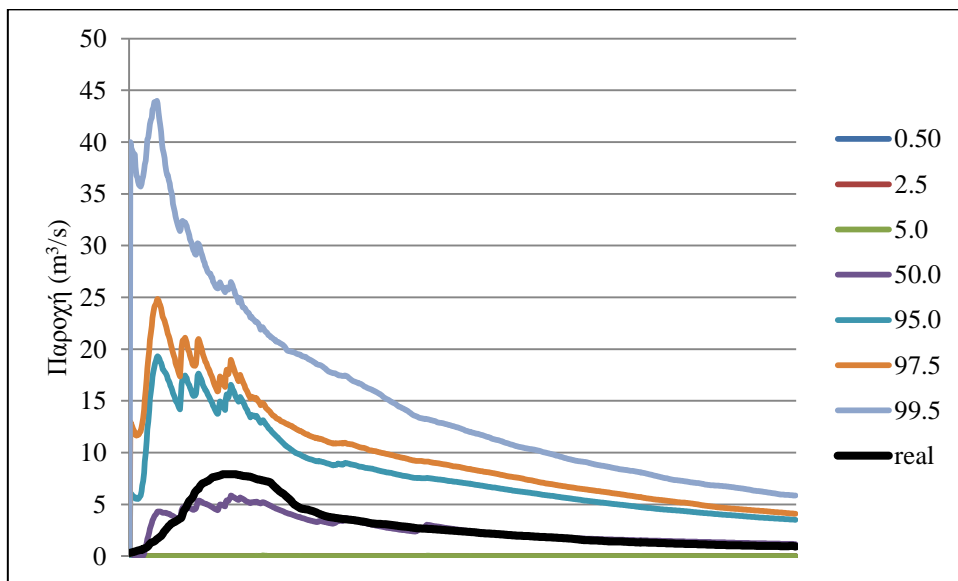
**Σχήμα Γ29** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 19-28 Φεβρουαρίου 1997 στον Ξερό ποταμό.



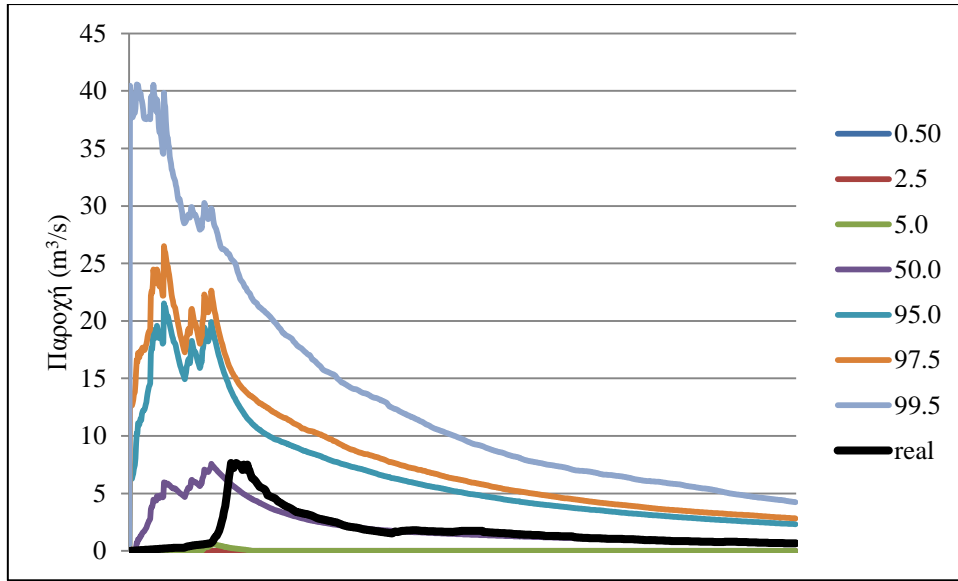
**Σχήμα Γ30** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 21-26 Μαρτίου 1998 στον Ξερό ποταμό.



**Σχήμα Γ31** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 24-27 Δεκεμβρίου 1998 στον Ξερό ποταμό.



**Σχήμα Γ32** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 6-14 Φεβρουαρίου 1999 στον Ξερό ποταμό.



**Σχήμα Γ33** Προσομοίωση Monte Carlo του περιστατικού 14-30 Απριλίου 2000 στον Ξερό ποταμό.