

Διερεύνηση προσομοίωσης πλημμύρας για το  
σχεδιασμό σε λεκάνες χειμαρρικής δίκαιας  
Εφαρμογή στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου

Ελένη Μαρία Μιχαηλίδη

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



## Πρόλογος

Φθάνοντας στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω αυτούς που με βοήθησαν και με στήριξαν αυτούς τους έξι μήνες και όχι μόνο.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Δημήτρη Κουτσογιάννη. Τον κ. Κουτσογιάννη τον γνωρίσαμε για πρώτη φορά στο μάθημα των Αστικών Υδραυλικών Έργων όταν μας μίλησε για τα υδραυλικά έργα στην Αρχαία Ελλάδα και από τότε έκανε τα πρωινά μας πολύ πιο ευχάριστα. Είναι πραγματικά σπάνιο ένας καθηγητής να έχει ένα τέτοιο γνωστικό υπόβαθρο, να μπορεί να μεταδώσει τη γνώση τόσο εύκολα στους φοιτητές του και να μη διστάζει να τους δίνει ευκαιρίες. Παράλληλα, το πάθος του για το αντικείμενό του είναι επικίνδυνα κολλητικό σε όποιον συναναστρέφεται μαζί του.

Ανδρέας Ευστρατιάδης. Η ψυχή της ομάδας της Ιτιάς. Τον ευχαριστώ βαθύτατα για την καθοριστική βοήθειά του και τη γιγαντιαία υπομονή του. Σε μια δύσκολη εποχή για το Πολυτεχνείο δεν έχασε στιγμή το κέφι του και μας ενθάρρυνε συνεχώς. Ό,τι και να πω θα είναι λίγο. Αυτή η διπλωματική δε θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς αυτόν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Αντώνη Κουκουβίνο για τη συμβολή του στους χάρτες GIS και γενικότερα για τις συμβουλές και παρατηρήσεις του. Ακόμη, ευχαριστώ τον Παναγιώτη Κοτσιέρη για την πολύτιμη βοήθειά του στην εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης καθώς και στην εφαρμογή του HYETOS-R και τον Παναγιώτη Δημητριάδη για τη βοήθειά του στο Matlab. Επίσης, ευχαριστώ τη φίλη μου Δανάη για τις παρατηρήσεις της στη σύνταξη του κώδικα στο Matlab.

Τέλος θα ήθελα να αναφερθώ στα «παιδιά» της σχολής Θεωρή, Άννα και Σταμάτη. Είναι ο κύριος λόγος που η αποφοίτησή μου με γεμίζει μελαγχολία καθώς χάρη σε αυτούς κάθε μέρα στη σχολή ήταν ξεχωριστή.

Ελένη Μαρία Μιχαηλίδη

## Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος .....	ii
Περίληψη .....	vii
Abstract.....	viii
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας .....	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	1
Κεφάλαιο 2 : Τυπική διαδικασία υδρολογικού σχεδιασμού .....	3
2.1 Ορισμός της άμεσης και της βασικής ροής .....	3
2.2 Μορφή του υδρογραφήματος .....	4
2.3 Ορισμός χρόνου συγκέντρωσης .....	6
2.4 Καταιγίδα σχεδιασμού .....	7
2.4.1 Όμβριες καμπύλες.....	8
2.4.2 Μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ .....	8
2.4.3 Στοχαστικές προσεγγίσεις .....	9
2.4.4 Επιφανειακή αναγωγή .....	10
2.5 Εκτίμηση ελλειμμάτων με τη μέθοδο SCS .....	11
2.6 Μοναδιαίο Υδρογράφημα .....	13
2.6.1 Θεωρητικό πλαίσιο.....	13
2.6.2 Το παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.....	14
Κεφάλαιο 3 : Περιοχή μελέτης και συλλογή δεδομένων .....	19
3.1 Περιοχή μελέτης.....	19
3.2 Συλλογή δεδομένων.....	24
3.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκανών απορροής .....	29

Κεφάλαιο 4 : Επεξεργασία υδρομετρικών και βροχομετρικών δεδομένων.....	30
4.1 Επεξεργασία δεδομένων βροχών και απορροών.....	30
4.2 Επιλογή επεισοδίων.....	31
4.3 Δεδομένα από δορυφόρους.....	34
4.3.1 Συμπλήρωση δεδομένων από δορυφόρους.....	34
4.3.2 Επαλήθευση δεδομένων από δορυφόρους.....	36
4.4 Επιφανειακή ολοκλήρωση.....	37
4.5 Περιγραφή επεισοδίων.....	39
4.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επεισοδίων και σχόλια.....	49
Κεφάλαιο 5 : Αναπαραγωγή παρατηρημένων πλημμυρικών επεισοδίων με τη μέθοδο SCS και του παραμετρικού ΣΜΥ.....	51
5.1 Επεξεργασία επεισοδίων.....	51
5.2 Υπολογισμός προσομοιωμένης παροχής.....	52
5.2.1 Διαχωρισμός βασικής απορροής.....	52
5.2.2 Υπολογισμός ενεργού βροχόπτωσης.....	52
5.2.3 Υπολογισμός παραμετρικού συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.....	52
5.1.4 Βελτιστοποίηση.....	53
5.1.5 Συνάρτηση σφάλματος.....	54
5.1.6 Αποτελέσματα και γραφήματα.....	55
5.2 Συμπεράσματα.....	62
Κεφάλαιο 6 : Ανάπτυξη και προσαρμογή εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου λεκάνης Σαρανταπόταμου.....	65
6.1 Εισαγωγή.....	65
6.2 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης (Hydrologic Response Units- HRU).....	65

6.3 Περιγραφή του υδρολογικού μοντέλου .....	67
6.3.1 Υδρολογικό μοντέλο υδραυλικών αναλόγων .....	67
6.3.2 Παραλλαγές του μοντέλου.....	70
6.4 Εκτίμηση παραμέτρων- Βελτιστοποίηση.....	71
6.4.1 Συνάρτηση σφάλματος.....	71
6.4.2 Αποτελέσματα .....	72
6.4.3 Συμπεράσματα .....	81
Κεφάλαιο 7 : Εκτίμηση πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού και στατιστική ανάλυση .....	83
7.1 Εισαγωγή.....	83
7.2 Όμβριες καμπύλες .....	83
7.3 Δημιουργία συνθετικών βροχών .....	84
7.3.1 Κατανομή βροχής με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ.....	84
7.3.2 Κατανομή βροχής με χρήση στοχαστικού μοντέλου .....	86
7.4 Δημιουργία πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού .....	87
7.5 Στατιστική ανάλυση υδρογραφημάτων.....	87
7.5.1 Στατιστική ανάλυση μέγιστων παροχών.....	87
7.5.2 Στατιστική ανάλυση χρόνων εμφάνισης των μέγιστων παροχών .....	93
7.5.3 Στατιστική ανάλυση όγκων απορροής.....	95
7.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	97
Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα και προτάσεις.....	99
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	102
Διαδικτυακές αναφορές .....	105
Παράρτημα Α : Προγράμματα Matlab .....	106
Παράρτημα Α1 : Εφαρμογή μεθόδου SCS-CN .....	106

Παράρτημα Α2 : Εφαρμογή υδρολογικού μοντέλου σε συνθετικές βροχές.....	111
Παράρτημα Β : Στατιστικές κατανομές.....	118

## Περίληψη

Η τυπική διαδικασία υδρολογικού σχεδιασμού έργων στην Ελλάδα χρησιμοποιεί εμπειρικές μεθόδους που έχουν ελεγχθεί πειραματικά σε συγκεκριμένους τύπους λεκανών απορροής στο εξωτερικό. Συνεπώς, κατά την εφαρμογή των μεθόδων αυτών στις ελληνικές λεκάνες τα αποτελέσματα μπορεί να είναι μη ρεαλιστικά ή και παραπλανητικά. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι του υδρολογικού σχεδιασμού σε τμήμα της λεκάνης του Σαρανταπόταμου με διαθέσιμα δεδομένα βροχής και απορροής και ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα αυτών. Συγκεκριμένα δόθηκε έμφαση στην επάρκεια της μεθόδου SCS σε τέτοιου τύπου ασβεστολιθικές λεκάνες υψηλής διηθητικότητας και εφήμερης ροής χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές παραμέτρων καθώς και βελτιστοποιημένες. Η μέθοδος αδυνατούσε να περιγράψει τις παρατηρημένες απορροές κυρίως λόγω της παρουσίας έντονης υποδερμικής ροής πολύ μεγαλύτερης σε διάρκεια από το χρόνο συγκέντρωσης και λόγω της εγγενούς αδυναμίας της μεθόδου να λάβει υπόψη τη μεταβολή της εδαφικής υγρασίας κατά τη διάρκεια του επεισοδίου. Όμως, μετά την προσθήκη και βελτιστοποίηση μιας επιπλέον παραμέτρου του ΣΜΥ η βελτιστοποιημένη μέθοδος SCS παρήγαγε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο υδραυλικών αναλόγων έξι παραμέτρων και τεσσάρων αρχικών συνθηκών. Ακολούθησε η βαθμονόμηση του μοντέλου βάσει των διαθέσιμων δεδομένων βροχής και απορροής και υπολογίστηκαν οι προσομοιωμένες απορροές. Αυτές συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες της βελτιστοποιημένης μεθόδου SCS και διαπιστώθηκε πως το μοντέλο τύπου υδραυλικών αναλόγων έδινε παρεμφερή αποτελέσματα. Στη συνέχεια παρήχθησαν συνθετικές βροχές με στοχαστική προσέγγιση καθώς και με την εμπειρική μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Οι συνθετικές βροχές μεταφράστηκαν σε απορροές με εφαρμογή του μοντέλου των υδραυλικών αναλόγων και έγινε στατιστική ανάλυση των εξαγόμενων πλημμυρογραφημάτων. Η στατιστική ανάλυση μέγιστων παροχών έδειξε την υποεκτίμηση της μέγιστης παροχής κατά την εφαρμογή της μεθόδου των μπλοκ και επομένως οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι στοχαστικές μέθοδοι κατανομής της βροχής είναι ασφαλέστερες κατά τον υδρολογικό σχεδιασμό. Αποτελέσματα της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν στο 5<sup>ο</sup> EGU Leonardo Conference.



## **Abstract**

The typical hydrological procedure used for design in Greece includes empirical methods that were experimentally tested for specific types of basins abroad. Consequently, while implementing those methods in Greek basins the results can be unrealistic or misleading. This procedure was tested in a specific part of Sarantapotamos basin with measured flow and rain data and results were later tested and analyzed. Specific interest was given in the efficiency of the SCS method using typical as well as calibrated parameters in this type of limestone basins with ephemeral flow that favours deep percolation. The method couldn't simulate the observed flows mainly due to the existence of intense interflow that exceeded in duration the concentration time and also the method's inherent inability to take into consideration the change in soil moisture that occurs in an episode. After adding and optimizing an additional parameter used in the parametric SUH the optimized SCS method produced very satisfying results. Next, a hydrological analogues model was developed using six parameters and four initial conditions. The model was calibrated based on the available rain and flow data and the simulated flows were calculated. These flows were later compared with those obtained from the optimized SCS method and the results proved to be similar. In addition, synthetic rain distributions were produced using a stochastic procedure as well as an empirical procedure (alternating block method). The synthetic rain distributions were transformed into flow with the implementation of the hydraulic analogues model and a statistical analysis of the hydrographs was carried out. The statistical analysis of the peak flows showed an underestimation of the peak flow when using the alternating block method and therefore leads to the conclusion that stochastic methods used for rainfall distribution are safer to use for the hydrological design. Results from this thesis were presented at the 5<sup>th</sup> EGU Leonardo Conference.

# **Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή**

## **1.1 Αντικείμενο της εργασίας**

Η παρούσα εργασία μελετά την επάρκεια των τυπικών μεθόδων υδρολογικού σχεδιασμού σε λεκάνη απορροής που χαρακτηρίζεται από χειμαρρική ροή και εδάφη υψηλής διηθητικότητας χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές παραμέτρων καθώς και βελτιστοποιημένες τιμές. Παράλληλα αναπτύχθηκε και προσαρμόστηκε ένα εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο που προσομοιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό την υπό μελέτη λεκάνη. Τέλος, κατά την παραγωγή των πλημμυρογραφήματων σχεδιασμού συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της στοχαστικής προσέγγισης κατανομής της βροχόπτωσης με αυτά της εμπειρικής.

Σκοπός της εργασίας είναι η αναθεώρηση της επάρκειας των τυπικών μεθόδων υδρολογικού σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται ευρέως και η προσαρμογή των παραμέτρων των μεθόδων αυτών για λεκάνες χειμαρρικής δίκαιας. Επίσης, προτείνεται ο έλεγχος και η εφαρμογή παρόμοιου τύπου μοντέλων υδραυλικών αναλόγων και σε άλλες περιοχές μελέτης.

## **1.2 Διάρθρωση της εργασίας**

Στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας περιλαμβάνεται η εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η τυπική διαδικασία υδρολογικού σχεδιασμού που εφαρμόστηκε καθώς και το παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 3 δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης η οποία είναι τμήμα της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου και γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας συλλογής υδρομετρικών και βροχομετρικών δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων βροχής και απορροής καθώς και η συμπλήρωση αυτών, όπου ήταν απαραίτητο. Επίσης γίνεται η περιγραφή και ο σχολιασμός των επιλεγμένων επεισοδίων.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN και της μεθόδου του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος στα δεδομένα της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεθόδων για τυπικές τιμές των παραμέτρων καθώς και για βελτιστοποίηση τριών και τεσσάρων παραμέτρων. Στο τέλος κρίνεται η καταλληλότητα των μεθόδων για τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η περιγραφή και η εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμέτρων του μοντέλου και τα προσομοιωμένα πλημμυρογραφήματα.

Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής συνθετικών βροχών και δίνονται και τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν μετά από εφαρμογή του μοντέλου στις βροχές με τις παραμέτρους που έχουν προκύψει στο Κεφάλαιο 6. Επίσης παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των πλημμυρογραφημάτων και τα συμπεράσματα αυτής.

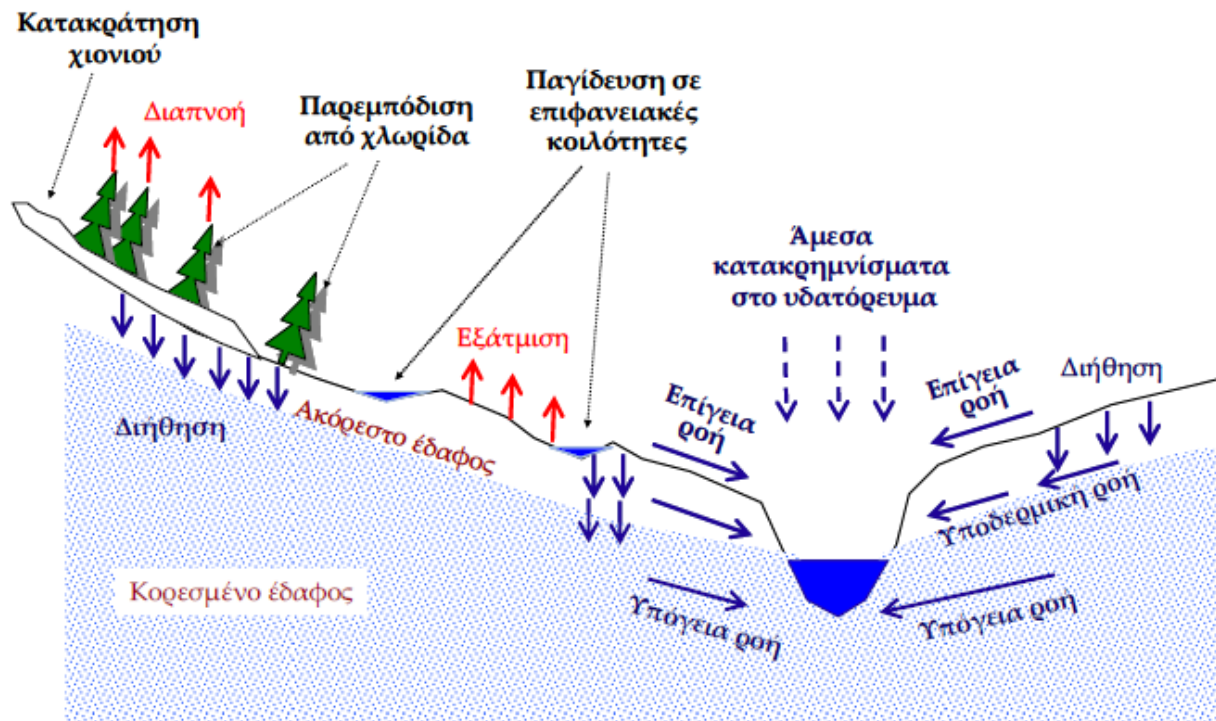
Στο Κεφάλαιο 8 περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας καθώς και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος στο Παράρτημα περιλαμβάνονται τα προγράμματα Matlab που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι κατανομές των μέγιστων παροχών, των χρόνων εμφάνισης μέγιστων παροχών και των όγκων απορροής όπως προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση του Κεφαλαίου 7.

## Κεφάλαιο 2 : Τυπική διαδικασία υδρολογικού σχεδιασμού

### 2.1 Ορισμός της άμεσης και της βασικής ροής

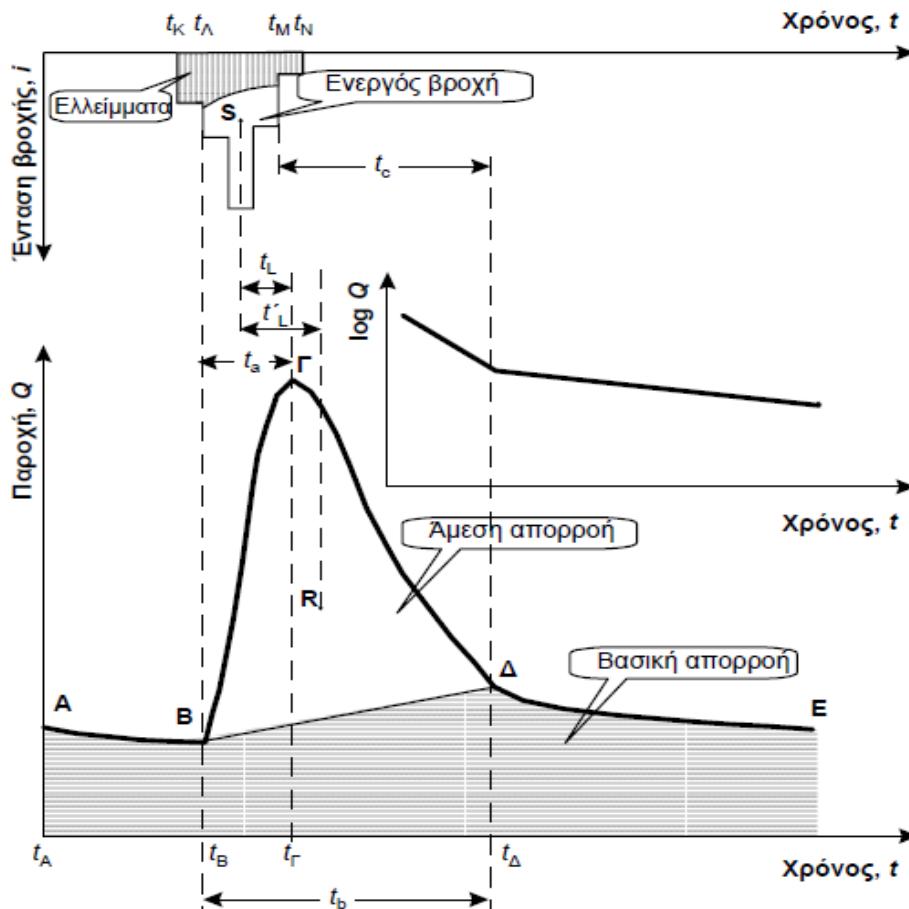
Η επιφανειακή ροή αποτελείται από δύο συνιστώσες, την άμεση απορροή (direct runoff) και τη βασική απορροή (baseflow). Η άμεση απορροή περιλαμβάνει την άμεση κατακρήμνιση, την επίγεια και την υποδερμική ροή και σε περιπτώσεις καρστικών συστημάτων με γρήγορη απόκριση, μέρος της υπόγεια ροής. Ουσιαστικά η άμεση απορροή είναι ο μετασχηματισμός της ενεργού βροχής, δηλαδή της βροχής μετά την αφαίρεση του αρχικού ελλείμματος, σε απορροή. Η βασική απορροή πρακτικά δεν επηρεάζεται κατά τη διάρκεια της πλημμύρας καθώς οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην υπόγεια ροή. Η υπόγεια ροή περιλαμβάνει το νερό που κατέρχεται στην κορεσμένη ζώνη και σχηματίζει τους υπόγειους υδροφορείς. Στη συνέχεια λόγω πιεζομετρικής διαφοράς κινείται και ανέρχεται στην επιφάνεια με τη μορφή πηγών ή μετά από επαφή των υδατορευμάτων με τους υδροφορείς. Η υποδερμική ροή είναι υπεδάφια πλευρική ροή που συμβαίνει με ταχείς ρυθμούς κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων. Πραγματοποιείται σε μια ζώνη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, σε ακόρεστη κατάσταση, χωρίς να αποκλείεται η ροή σε συνθήκες κορεσμού από πάνω (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Η υποδερμική ροή δεν εξελίσσεται τόσο γρήγορα όσο η επίγεια ροή (ροή στην επιφάνεια του εδάφους) αλλά μπορεί να διαρκεί έως και λίγες μέρες μετά τη λήξη της βροχής. Αυτό οφείλεται στην ταχύτητα ροής στην ακόρεστη ζώνη που είναι αρκετά μικρότερη αυτής στην επιφάνεια του εδάφους. Η διάρκεια της υποδερμικής ροής όμως, είναι αρκετά μικρότερη της υπόγεια (Ευστρατιάδης κ.α., 2012).



**Σχήμα 2.1** Απεικόνιση των υδρολογικών διεργασιών κατά τη διάρκεια της πλημμύρας (Πηγή: Ευστρατιάδης κ.α., 2012)

## 2.2 Μορφή του υδρογραφήματος

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα πλημμυρικό υδρογράφημα με το αντίστοιχο υετογράφημα που το προκαλεί.



**Σχήμα 2.2** Η μορφή ενός πλημμυρικού υδρογραφήματος και το υετογράφημα που το προκαλεί (Πηγή: Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Το υετογράφημα έχει καθιερωθεί να σχεδιάζεται με ανεστραμμένη φορά των τεταγμένων. Το υετογράφημα δείχνει ότι στο χρόνο  $t_k$  ξεκινά ένα επεισόδιο βροχής και στο χρόνο  $t_\lambda$ , μετά από ένα αρχικό έλλειμμα, ξεκινά η ενεργός βροχή, η οποία μετατρέπεται σε άμεση απορροή. Η βροχή λήγει στο χρόνο  $t_N$ .

Τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού υδρογραφήματος είναι τα παρακάτω. Ο κλάδος AB ονομάζεται κλάδος στείρευσης της βασικής ροής. Στο χρόνο  $t_\lambda = t_B$  η παροχή του υδατορεύματος αρχίζει και αυξάνεται με έντονο ρυθμό μέχρι που φτάνει στη μέγιστη τιμή της στο χρόνο  $t_T$ . Για σχετικά μεγάλης διάρκειας και απλής δομής επεισόδια ο χρόνος  $t_T$  μπορεί να ταυτίζεται με το χρόνο λήξης της ενεργού βροχής  $t_M$ . Ο κλάδος ΒΓ του υδρογραφήματος ονομάζεται ανοδικός κλάδος, το σημείο Γ ονομάζεται αιχμή του υδρογραφήματος και η

παροχή στο χρόνο  $t_r$  παροχή αιχμής. Ακολουθεί η μείωση της παροχής που απεικονίζεται στον καθοδικό κλάδο ΓΔ. Στο χρόνο παύει η άμεση απορροή, συνεχίζει όμως η βασική απορροή, σχηματίζοντας ένα νέο κλάδο στείρευσης ΔΕ.

Η διάρκεια  $t_b = t_\Delta - t_B$  είναι γνωστή ως διάρκεια πλημμύρας ή χρόνος βάσης. Ο χρόνος ανόδου δίνεται από την σχέση  $t_a = t_r - t_B$  και ο χρόνος υστέρησης (ή ακριβέστερα χρόνος υστέρησης αιχμής)  $t_L = t_r - t_S$ , όπου  $t_S$  ο χρόνος που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους S του ενεργού υετογραφήματος. Χαρακτηριστικό στοιχείο της λεκάνης είναι ο χρόνος συγκέντρωσης ή χρόνος συρροής που ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στη διατομή εξόδου. Στο σχήμα ο χρόνος συγκέντρωσης εμφανίζεται και ως  $t_c = t_\Delta - t_M$ .

Για το διαχωρισμό της βασικής ροής είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν : ο χρόνος έναρξης της άμεσης απορροής (σημείο Β), ο χρόνος λήξης της άμεσης απορροής (Δ) και ο τρόπος μεταβολής της βασικής απορροής στη διάρκεια του χρόνου ο οποίος συμβατικά θεωρείται γραμμικός.

### 2.3 Ορισμός χρόνου συγκέντρωσης

Ο χρόνος συγκέντρωσης ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στη διατομή εξόδου (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Ένας ισοδύναμος ορισμός του χρόνου αυτού έχει δοθεί από τον McCuen (2009) ο οποίος αναφέρει το χρόνο συγκέντρωσης ως τη χρονική απόσταση από το πέρας της ενεργού βροχόπτωσης (δηλαδή του τμήματος της βροχής που μετατρέπεται σε άμεση ή επιφανειακή απορροή) μέχρι το πέρας της επιφανειακής απορροής. Ο υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης έγινε με την εμπειρική σχέση υπολογισμού του Giandotti (1934):

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0,8\sqrt{\Delta z}} \quad (2.1)$$

όπου

$t_c$  ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης (h)

$A$  η επιφάνεια της λεκάνης ( $\text{km}^2$ )

$L$  το μήκος της κύριας μισγάγγειας (km)

$\Delta z$  η υψομετρική διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της (m).

Ο χρόνος συγκέντρωσης χρησιμοποιείται στο διαχωρισμό της βασικής από τη συνολική απορροή.

Πρόσφατα ωστόσο, οι Grimaldi et al (2012) βρήκαν πως ο χρόνος συγκέντρωσης δεν είναι σταθερός σε κάθε επεισόδιο βροχής αλλά διαφέρει ακόμα και κατά μια τάξη μεγέθους μεταξύ επεισοδίων βροχής διαφορετικής συχνότητας.

## 2.4 Καταιγίδα σχεδιασμού

Μια από τις βασικότερες διαδικασίες του υδρολογικού σχεδιασμού είναι η κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού. Αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη ένταση (ή μέγιστο ύψος) βροχής για συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς και διάρκεια βροχής από τις όμβριες καμπύλες. Η σημαντικότερη παραδοχή για την κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού αφορά τη χρονική κατανομή της βροχής. Αυτή γίνεται με διάφορες εμπειρικές προσεγγίσεις όπως η μέθοδος των μπλοκ ή με στοχαστικές προσεγγίσεις (π.χ. μέθοδος Bartlett Lewis) όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια.



### 2.4.1 Όμβριες καμπύλες

Ο υπολογισμός των μέγιστων τιμών έντασης της βροχής για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς γίνεται με χρήση των όμβριων καμπυλών.

Οι όμβριες καμπύλες είναι σχέσεις έντασης  $i$ , χρονικής κλίμακας αναφοράς  $d$  και περιόδου επαναφοράς  $T$ . Οι Κουτσογιάννης κ.α. (2010, σελ.75) σε σχετική εργασία δίνουν την εξίσωση όμβριων καμπυλών για το ορεινό και ημιορεινό τμήμα της λεκάνης του Κηφισού (υψόμετρο μεγαλύτερο των 200m) η οποία εκφράζεται ως εξής :

$$i(d, T) = \frac{260(T^{0.15} - 0.61)}{(1 + d/0.17)^{0.77}} \quad (2.2)$$

όπου  $d$  σε h,  $i$  σε mm/h και  $T$  σε έτη.

Η σχέση αυτή χρησιμοποιήθηκε και για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου, λόγω παρόμοιων κλιματικών δεδομένων των δύο λεκανών.

### 2.4.2 Μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ

Μια από τις βασικότερες μεθόδους χρονικής κατανομής της βροχής είναι η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ. Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός των τμηματικών υψών των επιμέρους διαρκειών από τις όμβριες καμπύλες. Στη συνέχεια τα τμηματικά ύψη διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύψει ένα ρεαλιστικό και ταυτόχρονα δυσμενές υετογράφημα. Αναλυτικά, το μέγιστο διατάχθηκε στο μέσο της επιλεγμένης συνολικής διάρκειας και τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλακτικά εκατέρωθεν του μεγίστου.

Η βασική παραδοχή της μεθόδου είναι πως τα τμηματικά ύψη έχουν ίδια περίοδο επαναφοράς με το συνολικό ύψος της βροχής, κάτι το οποίο δεν ισχύει και αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου (Ευστρατιάδης κ.α., 2012).

### **2.4.3 Στοχαστικές προσεγγίσεις**

Τα υετογράμματα που προκύπτουν από τις εμπειρικές μεθόδους κατανομής της βροχής (π.χ. μέθοδος μπλοκ) είναι στατιστικά ασυνεπή, καθώς δε γίνεται σύγκριση των στατιστικών μεγεθών με τα μεγέθη των ιστορικών χρονοσειρών (Ευστρατιάδης κ.α., 2012). Η αδυναμία αυτή αντιμετωπίζεται με τις στοχαστικές μεθόδους οι οποίες παράγουν συνθετικές βροχές που διατηρούν τα στατιστικά μεγέθη των ιστορικών χρονοσειρών. Για την παραγωγή συνθετικών βροχών λεπτής χρονικής κλίμακας (π.χ. ωριαία) έχουν αναπτυχθεί διάφορες στοχαστικές μέθοδοι επιμερισμού της βροχής. Μια από τις πιο γνωστές είναι η μέθοδος Bartlett-Lewis που προτάθηκε από τους Koutsoyiannis και Onof (2001) και εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια σειρά παραμέτρων (5 στην απλή έκδοση και 7 στην εμπλουτισμένη). Βασικά πλεονεκτήματα του μοντέλου Bartlett-Lewis είναι η ικανότητά του να αναπαράγει τα στατιστικά χαρακτηριστικά διαφορετικών χρονικών κλιμάκων (ημερήσια έως ωριαία κλίμακα) για ένα μοναδικό σύνολο τιμών των παραμέτρων του. Παράλληλα, είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης βροχής συνεχούς χρόνου και έχει εφαρμοστεί σε διαφορετικούς τύπους κλιμάτων (Κοσσιέρης, 2011). Η μεθοδολογία που ακολουθείται και έχει προταθεί από τους Koutsoyiannis και Manetas (1996) συνοψίζεται ως εξής:

- 1) Έστω ότι η χρονοσειρά του υψηλότερου χρονικού επιπέδου  $Z_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) είναι γνωστή. Αυτή η χρονοσειρά μπορεί να είναι είτε ιστορική, είτε συνθετική παραγόμενη από κάποιο στοχαστικό μοντέλο. Μέσω ενός στοχαστικού μοντέλου παράγεται μια συνθετική χρονοσειρά  $X_s$  ( $s = 1, 2, \dots$ ) στο χαμηλότερο χρονικό επίπεδο, η οποία είναι ανεξάρτητη της  $Z_i$ .

- 2) Η συνθετική χρονοσειρά  $Z_i = \sum_{s=(i-1)k+1}^{ik} X_s$  υπολογίζεται μέσω μιας απλής συνάθροισης και έπειτα συγκρίνεται με τη δεδομένη  $Z_i$ .
- 3) Ακολουθεί επαναληπτική διαδικασία των βημάτων 1 και 2 έως ότου η απόκλιση των χρονοσειρών  $Z_i$  και  $Z_i$  να προκύψει μικρότερη από το όριο που έχει τεθεί.
- 4) Τέλος, η συνθετική χρονοσειρά  $X_s$  που επιλέγεται τροποποιείται μέσω μιας διαδικασίας συνόρθωσης ώστε να συμφωνήσει με τη χρονοσειρά μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας  $Z_i$  και να ισχύει η βασική σχέση επιμερισμού. Μέσω της διαδικασίας της συνόρθωσης η απόκλιση που παρουσιάζει η αθροιστική ιδιότητα πριν την τροποποίηση των χρονοσειρών κατανέμεται στις τμηματικές μεταβλητές της κάθε περιόδου.

Ο επιμερισμός της ημερήσιας βροχόπτωσης σε ωριαία προγραμματίστηκε από τον Κοσιέρη (2011) σε περιβάλλον R στο πακέτο HYETOS-R.

#### 2.4.4 Επιφανειακή αναγωγή

Οι τιμές των όμβριων καμπυλών αφορούν σημειακές βροχοπτώσεις. Για την αναγωγή των σημειακών βροχοπτώσεων σε επιφανειακές γίνεται χρήση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής  $\varphi$ . Τα επιφανειακά ύψη προκύπτουν μετά από πολλαπλασιασμό των σημειακών με τους αντίστοιχους συντελεστές αναγωγής. Αυτοί δίνονται από την ακόλουθη σχέση

$$\varphi = 1 - \frac{0.048 A^{0.36-0.01 \ln A}}{d^{0.35}} \geq 0.25 \quad (2.3)$$

όπου  $A$  η έκταση σε  $\text{km}^2$  και  $d$  η χρονική κλίμακα αναφοράς σε h (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

## 2.5 Εκτίμηση ελλειμμάτων με τη μέθοδο SCS

Μια από τις βασικότερες μεθόδους εκτιμήσεις 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  $h_a$  μείνουν 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

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq h_{a0} \\ \frac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} & h > h_{a0} \end{cases} \quad (2.4)$$

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  $h_{a0} = 0.2S$  (δηλ.  $\alpha = 0.2$ ).

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

$$S = 5h + 10h_e - 10\sqrt{h_e(h_e + 1.25h)} \quad (2.5)$$

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

$$S[mm] = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.6)$$

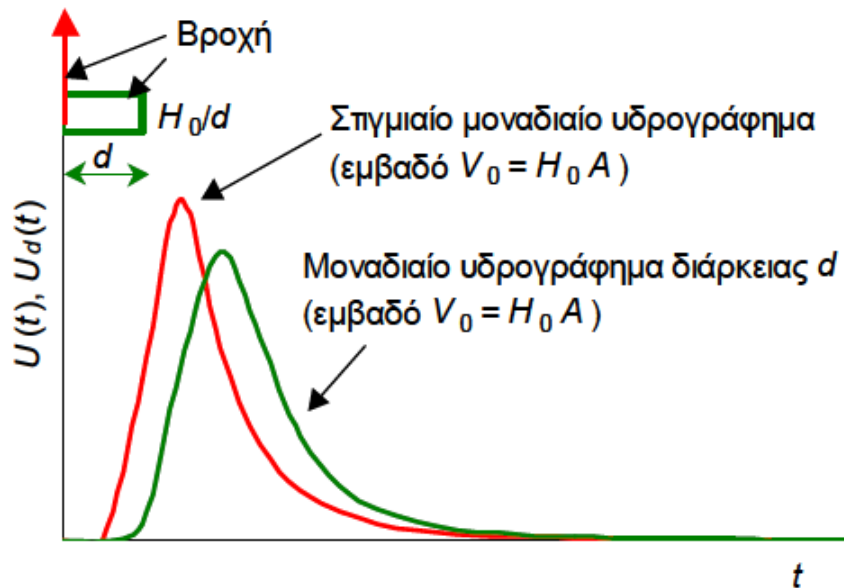
Ο αριθμός καμπύλης απορροής  $CN$  παίρνει τιμές από 0 έως 100 και επηρεάζεται από τον εδαφικό τύπο, τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας και τις χρήσεις γης. Οι τιμές του δίνονται από τυποποιημένους πίνακες.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί κάποιες τροποποιήσεις στον υπολογισμό του  $S$ . Συγκεκριμένα, οι Mishra et al (2002b) εισήγαγαν στον υπολογισμό του  $S$  από την εξίσωση (2.5) την παράμετρο της προηγούμενης υγρασίας  $M$ , η οποία αντικαθιστά την εφαρμογή της κατάταξης των εδαφών σε τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας (AMC), ενώ παράλληλα θεώρησαν την τιμή του  $\alpha$  μεταβλητή. Επίσης οι Mishra και Singh (1999) αναφέρουν σε εργασία τους πως η τιμή της παραμέτρου  $\alpha$  για τον υπολογισμό της αρχικής τιμής του ελλείμματος μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως  $\infty$  και εξαρτάται από μετεωρολογικούς παράγοντες (Mishra και Singh, 2002a).

## 2.6 Μοναδιαίο Υδρογράφημα

### 2.6.1 Θεωρητικό πλαίσιο

Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα βροχής με διάρκεια  $D$  ορίζεται ως το καθαρό πλημμυρογράφημα μιας λεκάνης που παράγεται από ενεργό βροχόπτωση ύψους συνήθως 10 mm. Η βροχόπτωση είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο χώρο και στο χρόνο. Το ΜΥ δηλαδή, εκφράζει το χρονικό μετασχηματισμό της ενεργού βροχόπτωσης σε άμεση απορροή στη λεκάνη. Σύμφωνα με τη μέθοδο του ΜΥ ισχύουν οι αρχές της αναλογίας και της επαλληλίας. Συγκεκριμένα στην αρχή της επαλληλίας διατυπώνεται πως ο λόγος των παροχών δύο σταθερών (χωρικά και χρονικά) ενεργών βροχοπτώσεων ίδιας διάρκειας και διαφορετικού ύψους είναι ίσος με το λόγο των υψών τους. Η αρχή της αναλογίας αναφέρει ότι το άθροισμα των τεταγμένων (τιμές απορροής) των επιμέρους υδρογραφημάτων συνθέτουν το συνολικό υδρογράφημα.



**Σχήμα 2.3** Απεικόνιση του μοναδιαίου και του στιγμιαίου υδρογραφήματος για διάρκεια βροχής  $d$  (Πηγή: Κουτσογιάννης, 2000).

Για δεδομένη βροχόπτωση ύψους  $h_t$  και για ΜΥ με διάρκεια ίση με τη χρονική διακριτότητα της βροχόπτωσης  $\Delta t$  ο υπολογισμός του πλημμυρογραφήματος γίνεται βασιζόμενος στην αρχή

της επαλληλίας. Δηλαδή, αν  $D$  η διάρκεια βροχής θα παραχθούν  $N = D/\Delta t$  επιμέρους υδρογραφήματα που θα αθροιστούν χρονικά για να προκύψει το τελικό υδρογράφημα. Κάθε επιμέρους υδρογράφημα προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του ύψους  $h_t$  στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα  $[t, t + \Delta t]$  με τις τεταγμένες του ΜΥ.

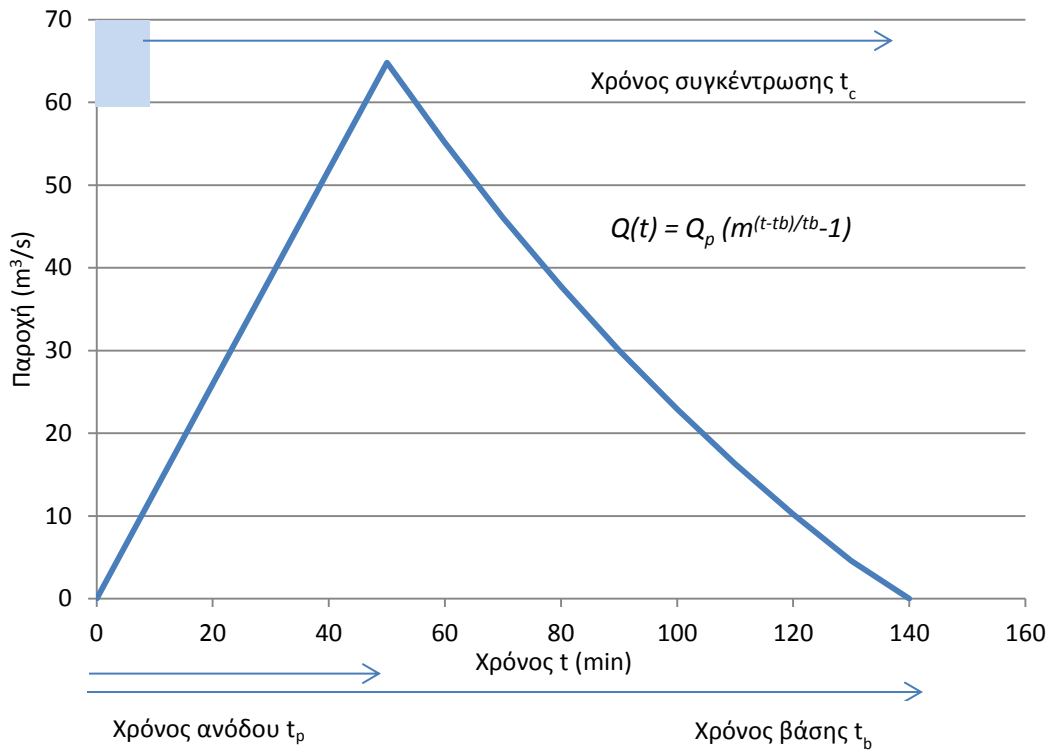
Για δεδομένη απορροή το ΜΥ προκύπτει λύνοντας το αντίστροφο πρόβλημα, με επίλυση δηλαδή ενός συστήματος εξισώσεων. Όταν δεν υπάρχουν στοιχεία απορροής η κατάρτιση του ΜΥ γίνεται χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και τα ΜΥ που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται συνθετικά (ΣΜΥ). Τα πιο διαδεδομένα ΣΜΥ είναι το ΜΥ κατά Snyder και το ΜΥ που προκύπτει από τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση ενός παραμετρικού συνθετικού ΜΥ όπως περιγράφεται και στο επόμενο κεφάλαιο.

### ***2.6.2 Το παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα***

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε ένα παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα αντί των Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων του Snyder και του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.

Το παραμετρικό συνθετικό 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.



**Σχήμα 2.4** Η μορφή του παραμετρικού μοναδιαίου υδρογραφήματος

Ο χρόνος βάσης και ο χρόνος ανόδου δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις

$$t_b = kt_c + D \quad (2.7)$$

και

$$t_p = \beta t_c + \frac{D}{2} \quad (2.8)$$

όπου :

$t_c$  ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής κατά Giandotti

$D$  η διάρκεια βροχής, εδώ λαμβάνεται ίση με 15 min



$\beta$  παράμετρος του υδρογραφήματος που καθορίζει το χρόνο ανόδου σύμφωνα με τη σχέση (2.8) και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Στη μέθοδο SCS για  $D < t_c$  το ποσοστό αυτό λαμβάνεται ίσο 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. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας το  $\beta$  προέκυψε μέσω βελτιστοποίησης όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια.

$k$  παράμετρος του υδρογραφήματος που καθορίζει το χρόνο βάσης σύμφωνα με τη σχέση (2.7). λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες της μονάδας. Η τιμή του  $k$  ισούται με 1 όταν η απορροή είναι εξ'ολοκλήρου επιφανειακή. Ωστόσο επειδή, όπως έχει αποδειχθεί, στην παραγωγή της πλημμύρας συνεισφέρει και μάλιστα σημαντικά η υποδερμική ροή, ο χρόνος αυτός υπερβαίνει εμφανώς τον συμβατικό χρόνο συγκέντρωσης. Για αυτό το λόγο η τιμή του  $k$  μπορεί να γίνει μεγαλύτερη της μονάδας. Στην εργασία αυτή η τιμή της τέθηκε αρχικά ίση με τη μονάδα και στη συνέχεια βελτιστοποιήθηκε.

Ο καθοδικός κλάδος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q(t) = Q_p \left( m^{\frac{t-tb}{tb}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

όπου

$$m = e^{\frac{\ln 2}{(tp-tb)/tb}} \quad (2.10)$$

Η παροχή αιχμής  $Q_p$  προκύπτει από την εξίσωση του όγκου του υδρογραφήματος με το μοναδιαίο όγκο πλημμύρας, δηλαδή (ύψος μοναδιαίας βροχής  $h_0$ )\*(έκταση λεκάνης  $A$ ). Το ύψος της μοναδιαίας βροχής  $h_0$  τίθεται ίσο με 10mm.

Αναλυτικά

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

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

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

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

$$Q_p = \frac{10^4 \times A}{\frac{t_b}{\ln m} \left( 1 - m^{\frac{t_p-t_b}{t_b}} \right) - t_b + \frac{3}{2} t_p} \quad (2.11)$$

όπου  $m$  η σταθερά που υπολογίζεται από τη σχέση (2.10).

Για τον καθοδικό κλάδο επιλέχθηκε μη γραμμική εξίσωση που προσεγγίζει την εκθετική, σύμφωνα με την οποία θεωρείται πως μετά την αιχμή της πλημμύρας η απορροή μπορεί να περιγραφεί ως εκφόρτιση ενός γραμμικού ταμιευτήρα. Μια τέτοια σχέση εκφόρτισης έχει την μορφή  $dS/dt = -kS$ , όπου  $S$  η αποθηκευτικότητα του ταμιευτήρα.

Παρόμοιο παραμετρικό ΣΜΥ είχε αναπτυχθεί στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας της Μαθιουδάκη (2012), η οποία έκανε χρήση ενός ΣΜΥ με λογαριθμικό καθοδικό κλάδο για την αναπαραγωγή παρατηρημένων πλημμυρογραφημάτων στην πειραματική λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας.

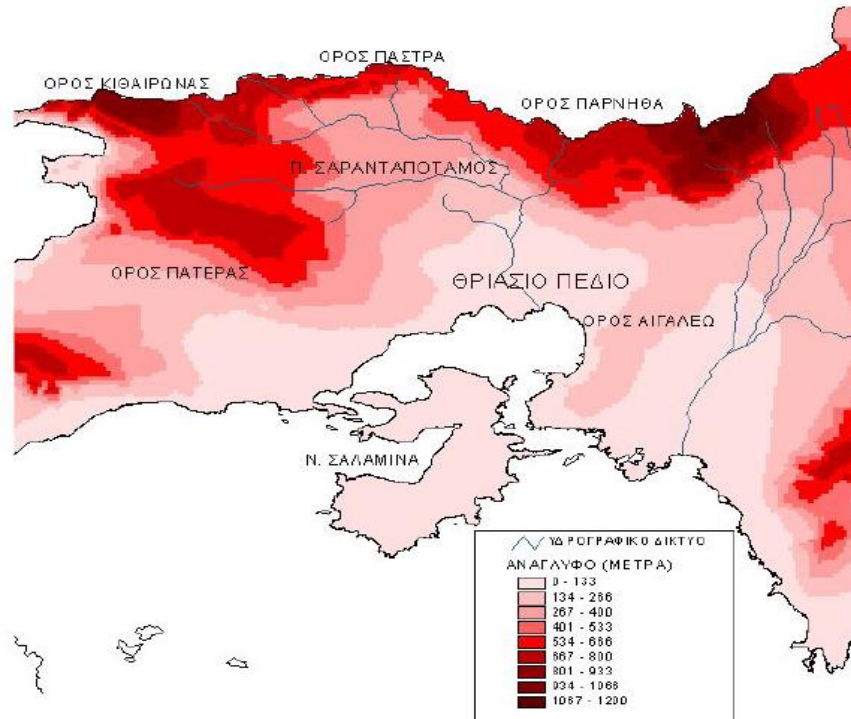
## Κεφάλαιο 3 : Περιοχή μελέτης και συλλογή δεδομένων

### 3.1 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι το ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου. Στο τμήμα αυτό δε υπάρχει κάποια αστική ανάπτυξη, παρά μόνο χωριά.

Η λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου (Σχήμα 3.1) έχει έκταση 310 km<sup>2</sup> και ορίζεται περιμετρικά από το όρος Πατέρα στα δυτικά, το όρος Κιθαιρώνα στα βορειοδυτικά, το όρος Πάστρα στα βόρεια και την Πάρνηθα στα ανατολικά. Ο Σαρανταπόταμος (ή Ελευσίνιος Κηφισός) διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και το Θριάσιο Πεδίο και εκβάλλει στον κόλπο της Ελευσίνας. Αποτελεί το μεγαλύτερο ποτάμι της περιοχής αφού είναι ο αποδέκτης των απορροών των τριγύρω ορεινών όγκων. Ουσιαστικά, ο Σαρανταπόταμος, πριν την είσοδό του στο Θριάσιο πεδίο, αποτελείται από δύο επιμέρους υδρογραφικά δίκτυα, του ρέματος Πέλκας που διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και του ρέματος Αγ. Γεωργίου που διασχίζει νοτιότερα την ομώνυμη κοιλάδα. Η κύρια πηγή του είναι στο όρος Κιθαιρώνα και συγκεκριμένα κοντά στα Βίλια και τα κυριότερα ρέματα που συμβάλουν σε αυτό είναι το �έμα Αγ. Βλασίου, το Ξηρόρεμα και το �έμα Μεγάλο Κατερίνι (Κουτσογιάννης & Μαμάσης, 2001, ΟΡΣΑ, 2011).

Το υδρογραφικό δίκτυο, που φαίνεται λεπτομερώς στο Σχήμα 3.2, είναι αρκετά πυκνό και αποτελείται κυρίως από εποχιακής ροής χειμάρρους (ΟΡΣΑ, 2011). Όπως θα διαπιστωθεί και από την ανάλυση των παροχών στη συνέχεια ο Σαρανταπόταμος χαρακτηρίζεται από εφήμερη ροή.

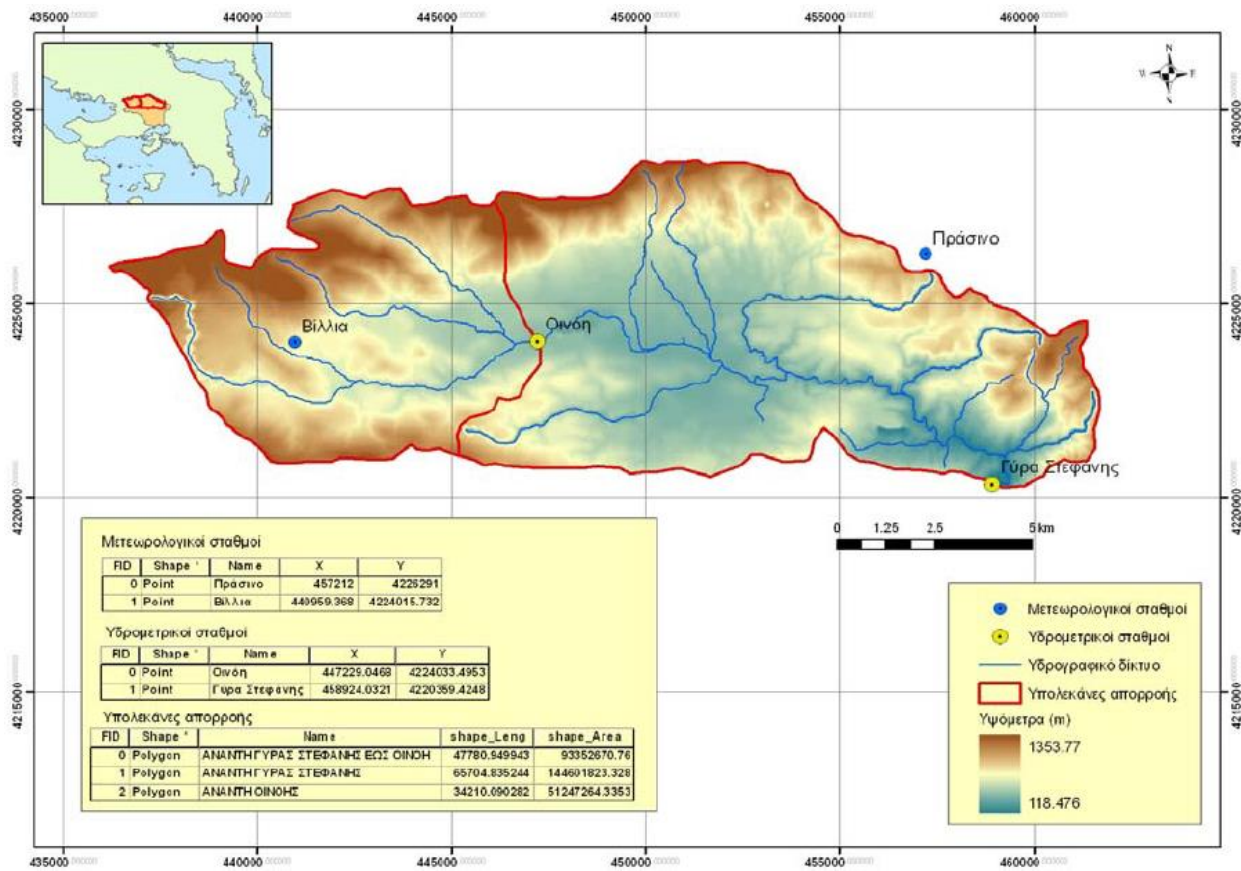


**Σχήμα 3.1** Η περιοχή του Θριασίου πεδίου (Πηγή: Κουτσογιάννης & Μαμάσης, 2001)



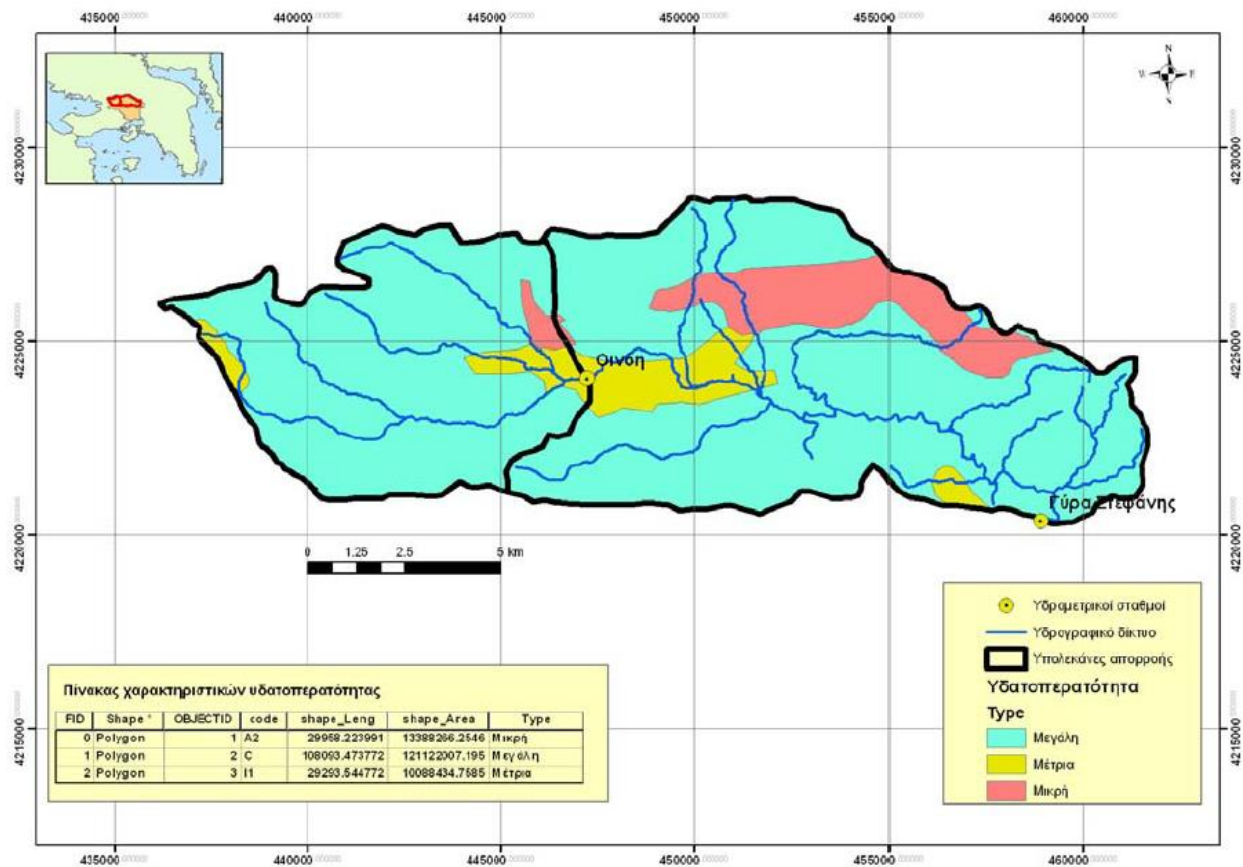
**Σχήμα 3.2** Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου (Πηγή: <http://www.e-per.gr/>).

Η συνολική έκταση της υπό μελέτη λεκάνης είναι 144.6 km<sup>2</sup> και για την παρούσα εργασία χωρίστηκε σε δύο υπολεκάνες την ανάντη της Οινόης και την ενδιάμεση, έκτασης 51.2 και 93.4 km<sup>2</sup> αντίστοιχα. Η λεκάνη ανάντη της Οινόης καλύπτεται σε μεγάλο ποσοστό από ορεινές εκτάσεις. Η έξοδος στη Γύρα Στεφάνης βρίσκεται σε υψόμετρο +157 ενώ στην Οινόη σε +333.



**Σχήμα 3.3** Οι υπολεκάνες, η υδρογραφία και οι υδρομετρικοί σταθμοί της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου (Πηγή: Κουκουβίνος, 2012).

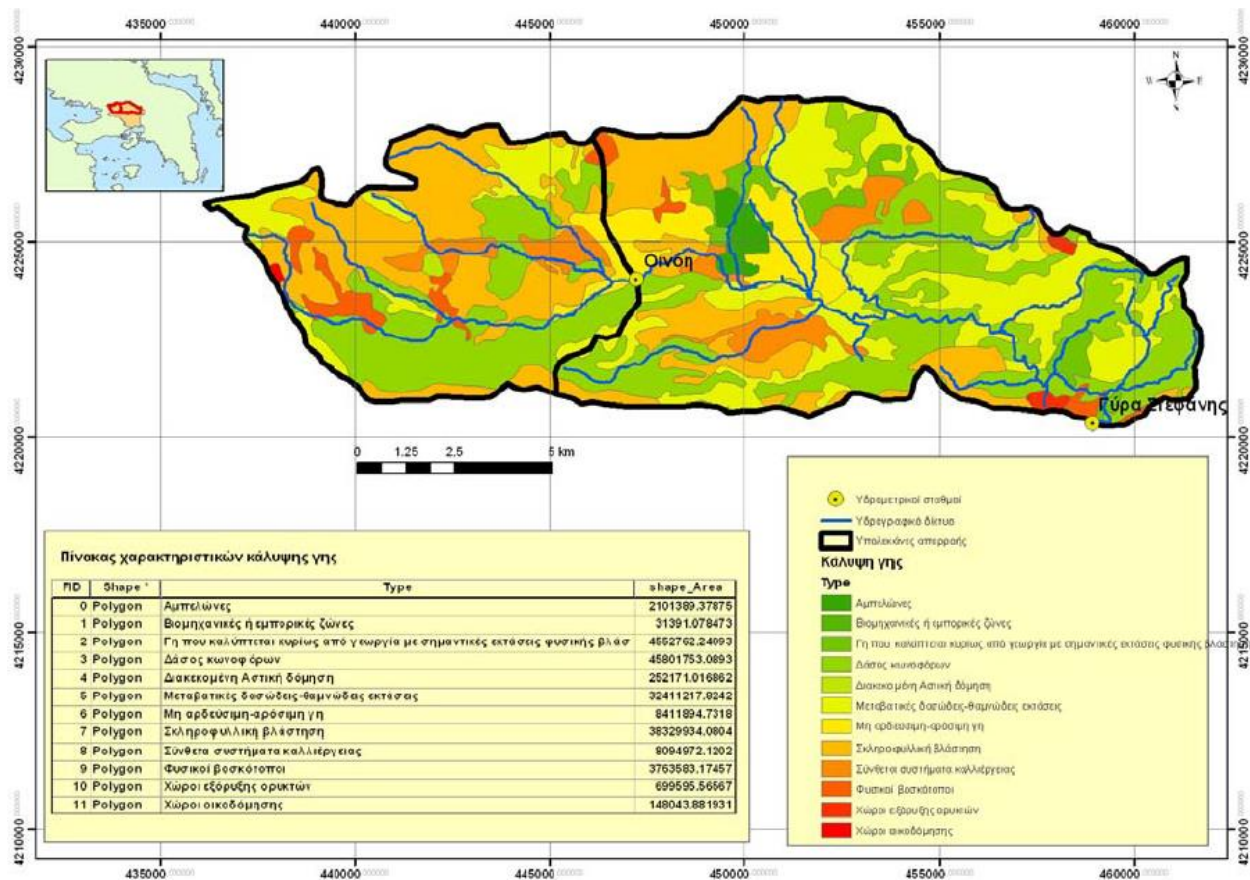
Η υπό μελέτη λεκάνη χαρακτηρίζεται από μεγάλη υδατοπερατότητα λόγω της καρστικοποίησης των ασβεστολιθικών πετρωμάτων που κυριαρχούν στην περιοχή. Στην ενδιάμεση λεκάνη κυρίως όμως, συναντώνται και περιοχές με μεσαία ή και μικρή υδατοπερατότητα (Σχήμα 3.4). Τα ποσοστά των εκτάσεων με μικρή, μέτρια και μεγάλη υδατοπερατότητα είναι αντίστοιχα 9, 7 και 84% της υπό μελέτη λεκάνης.



**Σχήμα 3.4** Η υδατοπερατότητα της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου (Πηγή: Κουκουβίνος, 2012).

Οι καλύψεις γης φαίνονται αναλυτικά στο Σχήμα 3.5. Τα ποσοστά επί της συνολικής λεκάνης των επικρατέστερων χρήσεων είναι 31.6% για τα δάση κωνοφόρων, 22.4% για τις μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις και 26.5% για τη σκληροφυλλική βλάστηση.

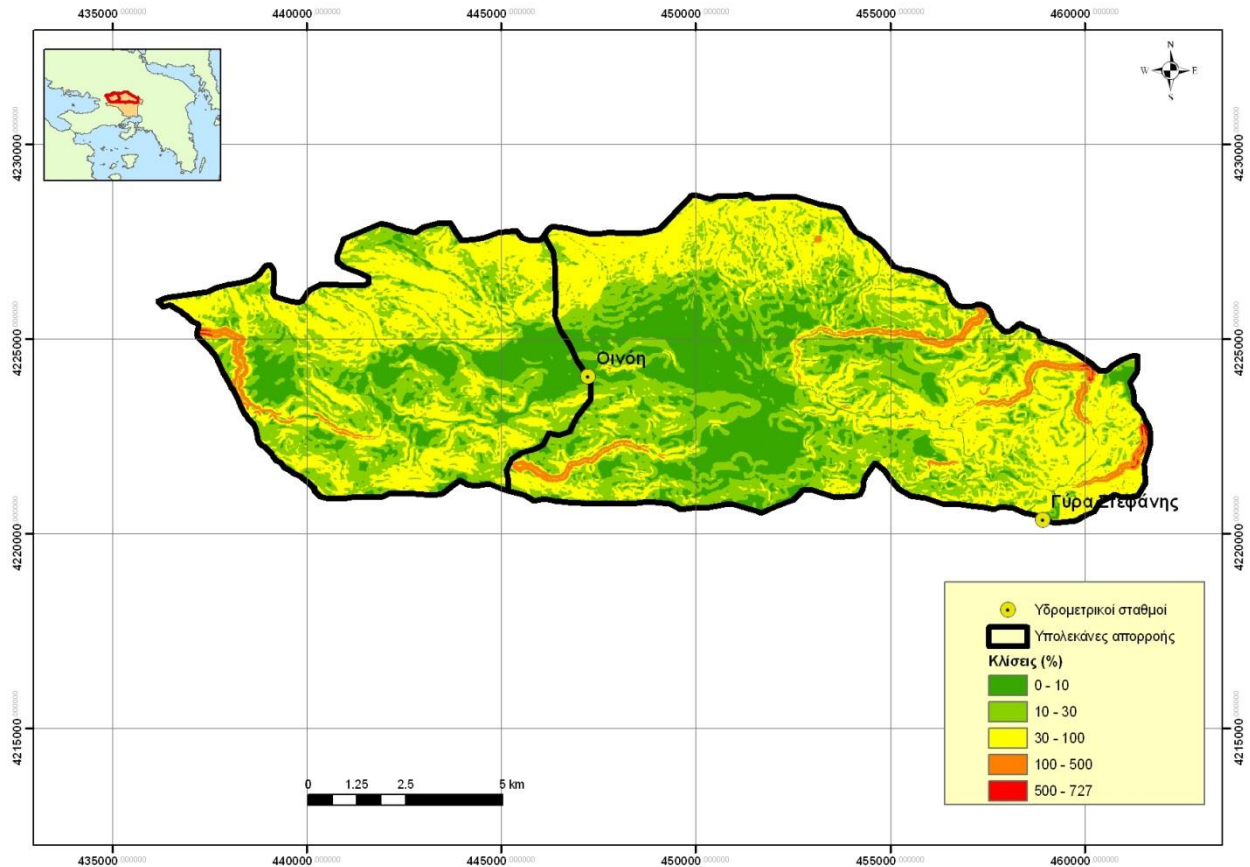




**Σχήμα 3.5** Η κάλυψη γης της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου (Πηγή: Κουκουβίνος, 2012).

Οι κλίσεις γης φαίνονται στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 3.6). Παρατηρείται πως στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής η κλίση κυμαίνεται από 10 έως 30% και από 30 έως 100%, ενώ υπάρχουν και λίγες εκτάσεις με μεγαλύτερη κλίση.





**Σχήμα 3.6** Οι κλίσεις γης της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου (Πηγή: Κουκουβίνος, 2012).

### 3.2 Συλλογή δεδομένων

Τα υδρολογικά δεδομένα συλλέχθηκαν κυρίως από το Δίκτυο Δεδομένων Δευκαλίων (<http://deucalionproject.gr/>). Συγκεκριμένα συλλέχθηκαν τα εξής :

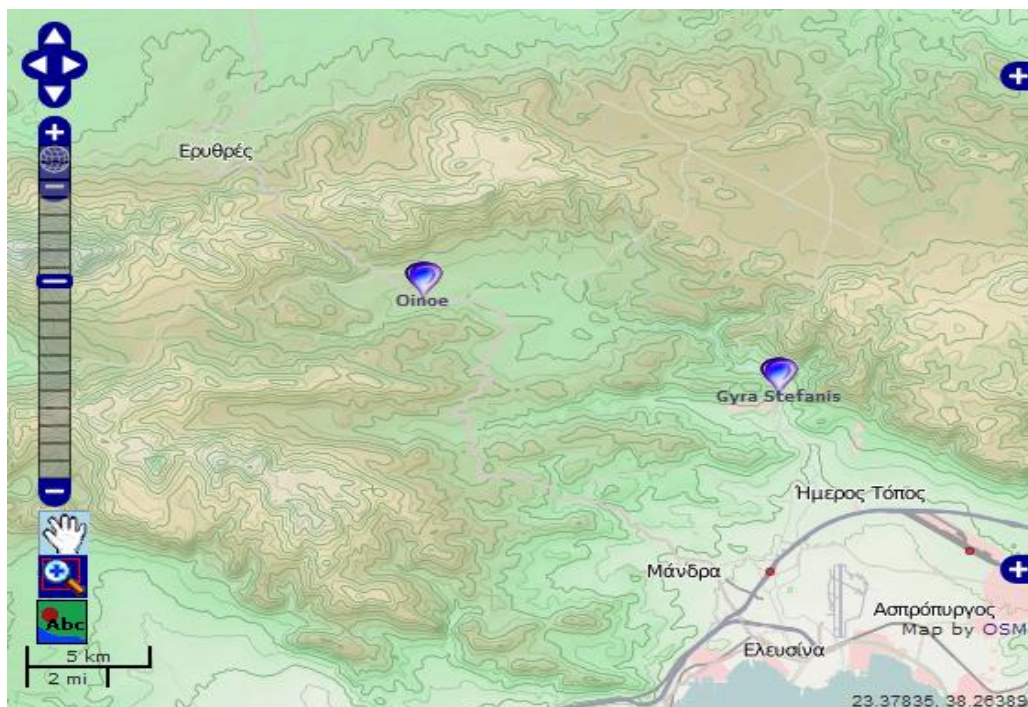
- Δεδομένα παροχής (σε  $m^3/s$  με 15-λεπτό βήμα) στο σταθμό στη Γύρα Στεφάνης (συντεταγμένες  $X=458923.39$  και  $Y=4220368.15$ ). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 09/12/11.
- Δεδομένα παροχής (σε  $m^3/s$  με 15-λεπτο βήμα) στο σταθμό στην Οινόη (συντεταγμένες  $X=447240.65$  και  $Y=4224040.43$ ). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 09/12/11.

- Δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο σταθμό στα Βίλια (συντεταγμένες  $X=440959.37$  και  $Y=4224015.73$ ). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 12/12/11.
- Δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο σταθμό στο Πράσινο (συντεταγμένες  $X=457212.0$  και  $Y= 4226291.0$ ). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 17/01/12.

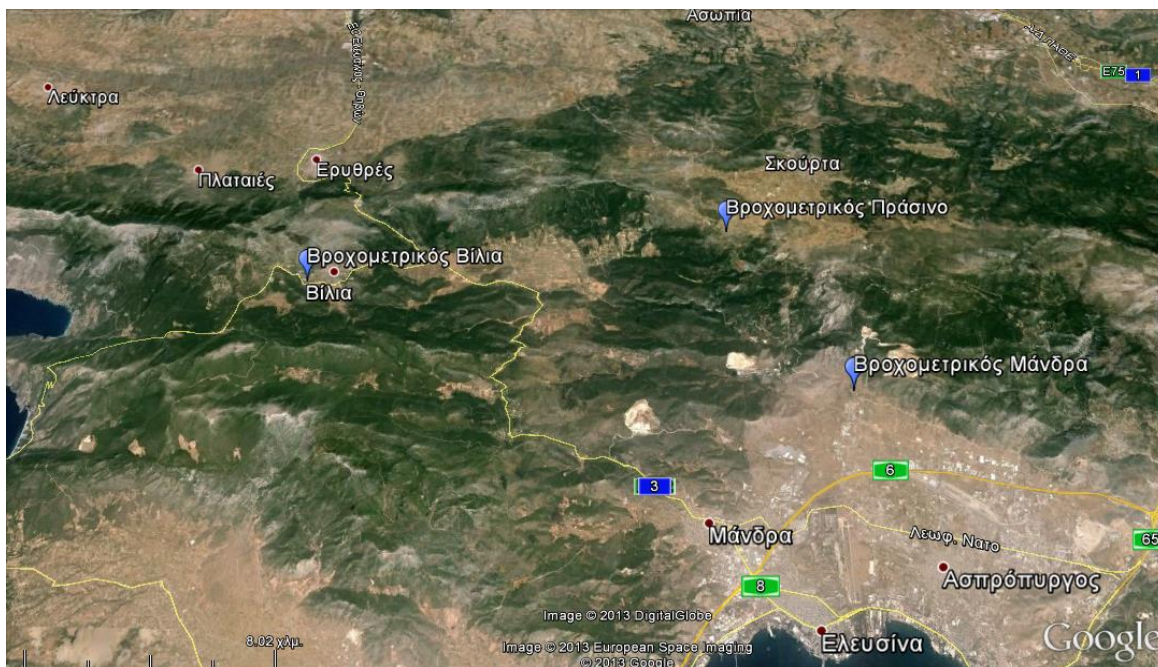
Ακόμα από την ιστοσελίδα του Υδρολογικού Παρατηρητήριου Αθήνας (Hydrological Observatory of Athens (<http://hoa.ntua.gr/>)) συλλέχθηκαν τα δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο σταθμό στη Μάνδρα (συντεταγμένες  $X= 461615.13$  και  $Y= 4219262.43$ ). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 06/07/05.

Οι αυτόματοι υδρομετρικοί σταθμοί στην Οινόη και στη Γύρα Στεφάνης μετράνε τη στάθμη του υδατορεύματος χρησιμοποιώντας αισθητήρες υπερήχων και μεταδίδουν την πληροφορία τηλεμετρικά. Ο σταθμός στη Γύρα Στεφάνης βρίσκεται σε οχετό κάτω από την γέφυρα στην είσοδο της βιοτεχνίας Παναγόπουλου Α.Β.Β.Ε.Τ.Ε. και ο σταθμός της Οινόης στον οχετό κάτω από την οδό Βιλίων-Οινόης, κοντά στην Οινόη. Η διατομή κάτω από τη Στεφάνη είναι οκταγωνική και η κοίτη είναι πλήρως διευθετημένη. Η μέτρηση της στάθμης γίνεται στη μέση της κοίτης. Η διατομή στην Οινόη είναι ορθογωνική και η μέτρηση γίνεται από το μέσο της διευθετημένης κοίτης (Κούσης κ.α., 2012).

Ο μετεωρολογικός σταθμός των Βιλίων είναι εγκατεστημένος στις δυτικές-νοτιοδυτικές παρυφές του οικισμού στο Γυμνασίου-Λυκείου Βιλίων και η μετάδοση των δεδομένων γίνεται διαδικτυακά. Ο σταθμός στο Πράσινο εγκαταστάθηκε στη βόρεια παρυφή του οικισμού, στην ταρατσα εξοχικής οικίας και η μετάδοση γίνεται με διαδικτυακή σύνδεση κινητής τηλεφωνίας (Κούσης κ.α., 2012). Τέλος, ο σταθμός στη Μάνδρα είναι εγκατεστημένος στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού της Μάνδρας, ιδιοκτησίας της Ε.Υ.Δ.Α.Π (<http://hoa.ntua.gr/>).



**Σχήμα 3.7** Χάρτης των υδρομετρικών σταθμών στην Οινόη και στη Γύρα Στεφάνης (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).



**Σχήμα 3.8** Χάρτης των βροχομετρικών σταθμών των Βίλιων, του Πράσινου και της Μάνδρας (<http://deucalionproject.gr/> & <http://hoa.ntua.gr/>).





**Σχήμα 3.9** Η διατομή στην Οινόη την ημέρα του επεισοδίου της 22/02/13 (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).



**Σχήμα 3.10** Άποψη της διατομής στη Γύρα Στεφάνης και του οργάνου από κατάντη (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).



**Σχήμα 3.11** Η διατομή στη Γύρα Στεφάνης την ημέρα του επεισοδίου της 22/02/13 (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).



**Σχήμα 3.12** Άποψη του σταθμού στο Πράσινο (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).

### 3.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκανών απορροής

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της υπολεκάνης ανάντη της Οινόης και της συνολικής λεκάνης. Ο χρόνος συγκέντρωσης έχει υπολογιστεί από τη σχέση Giandotti (Σχέση 2.1).

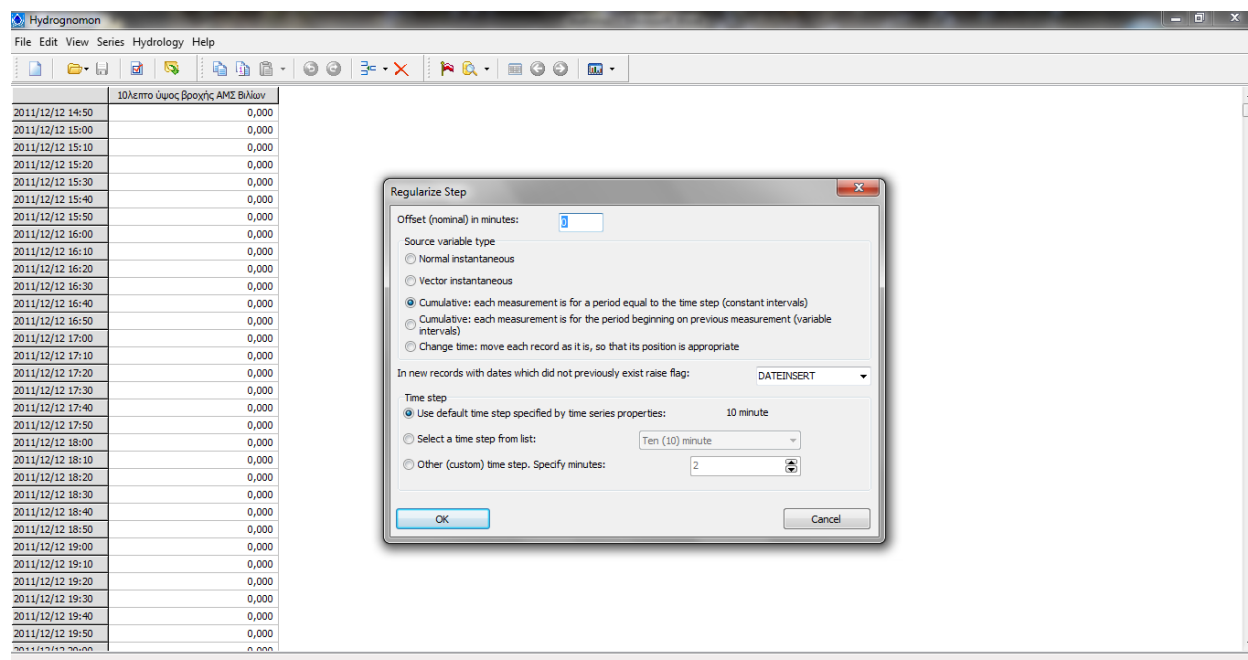
**Πίνακας 3.1** Χαρακτηριστικά της υπολεκάνης ανάντη της Οινόης και της συνολικής λεκάνης.

	Υπολεκάνη Οινόης	Συνολική λεκάνη
A (km <sup>2</sup> )	51.2	144.6
L (km)	13.019	30.700
Δz (m)	283.8	337.9
t <sub>c</sub> (h)	3.57	6.40

## Κεφάλαιο 4 : Επεξεργασία υδρομετρικών και βροχομετρικών δεδομένων

### 4.1 Επεξεργασία δεδομένων βροχών και απορροών

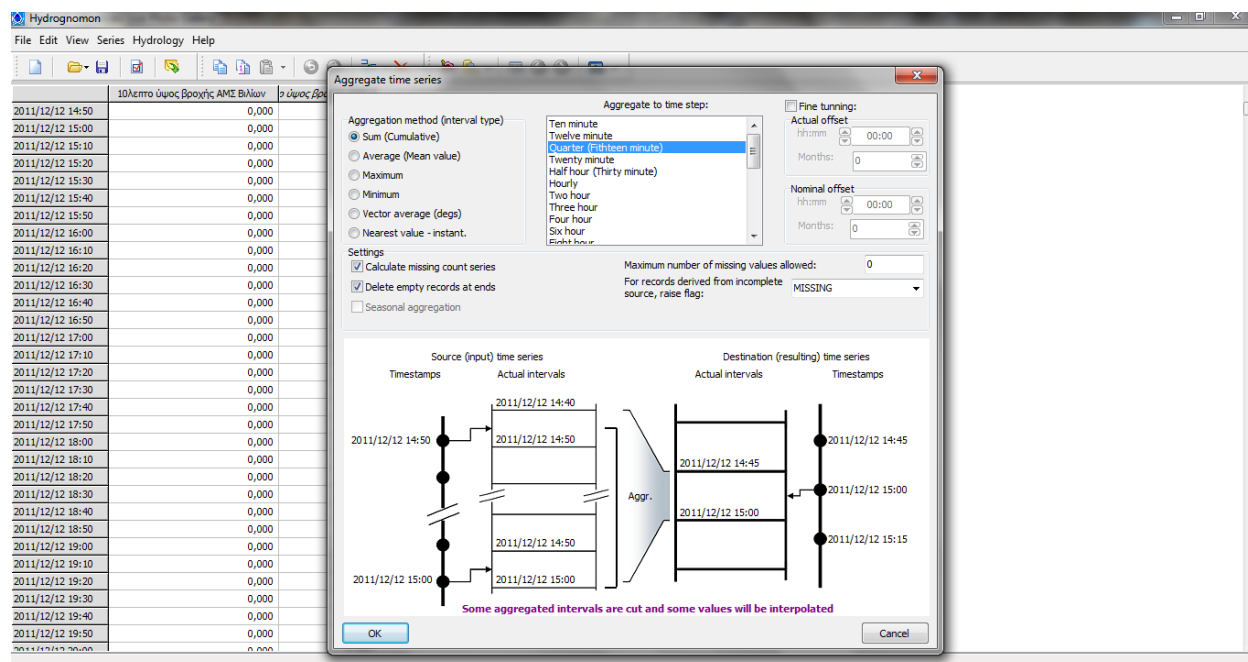
Η επεξεργασία των πρωτογενών χρονοσειρών βροχών και παροχών έγινε με τον Υδρογνώμονα. Αρχικά έγινε κανονικοποίηση του χρονικού βήματος των τιμών κάθε σταθμού (Series > Regularize step) ώστε στη συνέχεια να γίνει η διαδικασία της συνάθροισης.



**Σχήμα 4.1** Η διαδικασία της κανονικοποίησης του χρονικού βήματος στο λογισμικό Υδρογνώμον.

Το χρονικό βήμα των δεδομένων βροχής διαφέρει από αυτό των δεδομένων παροχής. Επομένως για την επεξεργασία αυτών, έγινε συνάθροιση των δεδομένων βροχής κάθε σταθμού (Series > Aggregation) και επιλέχθηκε Aggregation method > Sum και Aggregate to time step > Quarter ώστε η χρονοσειρά να αποκτήσει 15-λεπτο χρονικό βήμα. Για τη σωστή

χρήση του λογισμικού ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του εγχειρίδιου λειτουργίας (Κοζάνης κ.α., 2009).

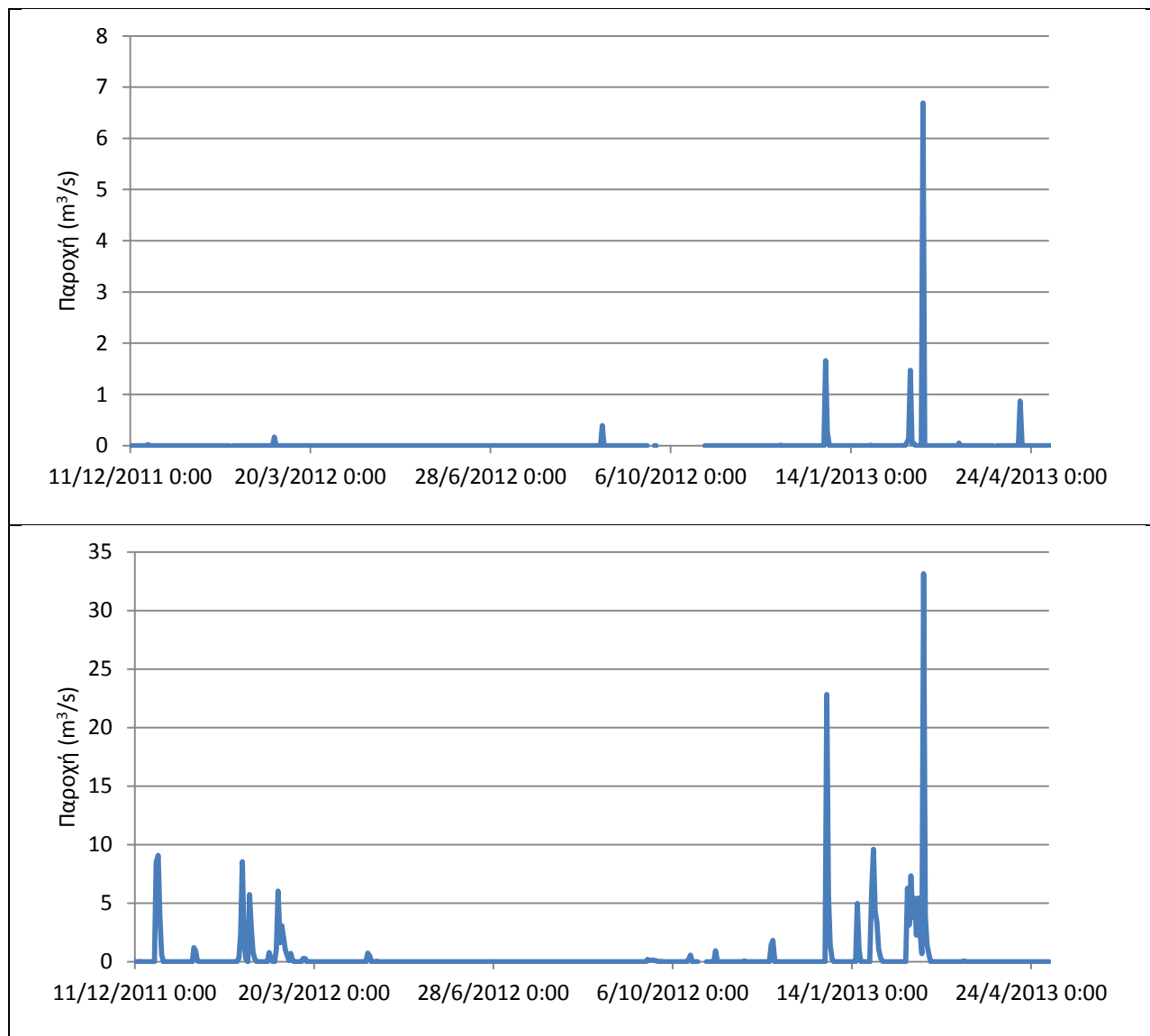


**Σχήμα 4.2** Η διαδικασία της συνάθροισης των δεδομένων σε παράθυρο του λογισμικού Υδρογνώμων.

## 4.2 Επιλογή επεισοδίων

Για την επιλογή των επεισοδίων ελέγχθηκαν οι μέγιστες ημερήσιες παροχές στη Γύρα Στεφάνης και στην Οινόη (Σχήμα 4.3). Στην Οινόη παρατηρούνται πολλές μηδενικές τιμές παροχών παρά τις υψηλές τιμές βροχής. Οι μηδενικές τιμές υποδηλώνουν μεγάλη διηθητικότητα του εδάφους. Επιπλέον οι μέγιστες ημερήσιες παροχές της Οινόης είναι υποπολλαπλάσιες αυτών της Γύρας Στεφάνης παρά το γεγονός πως η λεκάνη της Οινόης καταλαμβάνει το 35% περίπου της συνολικής λεκάνης. Γενικά πρόκειται για λεκάνες με εφήμερη ροή.





**Σχήμα 4.3** Οι μέγιστες ημερήσιες παροχές στην Οινόη (πάνω) και στη Γύρα Στεφάνης (κάτω).

Στην Οινόη τα μοναδικά αξιοσημείωτα επεισόδια ήταν τα παρακάτω.

**Πίνακας 4.1** Μέγιστες παρατηρημένες παροχές και οι αντίστοιχες στάθμες των επιλεγμένων επεισοδίων στην Οινόη.

Ημερομηνίες επεισοδίων	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	Στάθμη h (m)
29/12/12 05:30 – 02/01/13 10:00	1.40	0.26
13/02/13 05:30 – 26/02/13 00:00	6.68	0.63

Για τη Γύρα Στεφάνης επιλέχθηκαν τα επεισόδια με τιμές παροχής μεγαλύτερες των 5,5 m<sup>3</sup>/s.

**Πίνακας 4.2** Μέγιστες παρατηρημένες παροχές και αντίστοιχες στάθμες των επιλεγμένων επεισοδίων στη Γύρα Στεφάνης.

Ημερομηνίες επεισοδίων	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	Στάθμη h (m)
21/12/11 19:15 – 25/12/11 23:00	9.07	0.67
06/02/12 00:00 – 11/02/12 00:00	8.53	0.64
11/02/12 15:15 – 15/02/12 18:00	5.69	0.51
27/02/12 02:15 – 5/03/12 10:15	6.02	0.52
29/12/12 05:30 – 02/01/13 10:00	22.82	1.17
24/01/13 08:00 – 30/01/13 05:00	9.59	0.69
13/02/13 05:30 – 26/02/13 00:00	33.14	1.46

Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν δύο επεισόδια στην Οινόη, τα οποία είναι κοινά και με τη Γύρα Στεφάνης και πέντε μεμονωμένα επεισόδια στη Γύρα Στεφάνης. Στη συνέχεια συλλέχθηκαν οι αντίστοιχες βροχές από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια, στη Μάνδρα και στο Πράσινο.

## 4.3 Δεδομένα από δορυφόρους

### 4.3.1 Συμπλήρωση δεδομένων από δορυφόρους

Για το επεισόδιο στην Οινόη από 29/12/12 έως 02/01/13 παρατηρούνταν ελλιπείς τιμές βροχοπτώσης στα Βίλια από 30/12/12 3:00 έως τις 02/01/13. Για τη συμπλήρωση αυτών των τιμών συλλέχθηκαν δεδομένα από δορυφόρους. Η συλλογή αυτών έγινε από την ηλεκτρονική διεύθυνση του προγράμματος TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) της NASA ([http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance\\_id=TRMM\\_3-Hourly](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly)).

Η πρόσβαση στα δεδομένα γίνεται διαδικτυακά, μέσω του συστήματος TOVAS (TRMM Online Visualization and Analysis System- Σύστημα Διαδικτυακής Οπτικοποίησης και Ανάλυσης του TRMM). Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται είτε οπτικοποιημένα σε χάρτη είτε σε αρχείο κειμένου ASCII. Αρχικά επιλέγεται η περιοχή ενδιαφέροντος στο χάρτη της ιστοσελίδας εισάγοντας τις κατάλληλες συντεταγμένες (Σχήμα 4.4).

The screenshot shows the TRMM Online Visualization and Analysis System (TOVAS) interface. The main heading is "TRMM Online Visualization and Analysis System (TOVAS) 3-hourly TRMM and Other Rainfall Estimate (3B42)". Below this, there is a "Home" button and a "Remove All" button. A paragraph of text describes the interface's purpose for visualization and analysis of 3-hourly TRMM and Other Rainfall Estimate (3B42 V7) data. A "Note" states that the "Lat-Lon map, Time accumulated" service is intended only for the "Accumulated Precipitation" parameter. Below the text is a "Select:" section with a "Spatial" tab. The main area shows a satellite map of the Mediterranean region with a yellow box indicating the Area of Interest. The cursor coordinates are 31.01250, 42.75703. The Area of Interest coordinates are West: 22.950, North: 38.595, South: 37.620, East: 24.150. There is an "Update Map" button. Below the map is a "Parameters" section.

**Σχήμα 4.4** Επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος για την ανάκτηση δορυφορικών δεδομένων από την ιστοσελίδα της NASA.

Στη συνέχεια επιλέγεται η εμφάνιση δεδομένων αθροιστικής βροχόπτωσης τρίωρου βήματος (Accumulated precipitation) και μετά γίνεται η επιλογή των ημερομηνιών και ωρών ενδιαφέροντος. Η ωρολογιακή ζώνη που χρησιμοποιείται είναι η ώρα Γκρίνουιτς (GMT) (αλλιώς UTC ή Z). Τέλος επιλέγεται η μορφή παρουσίασης των δεδομένων να γίνει οπτικοποιημένα σε χάρτη με συντεταγμένες με τρίωρο βήμα (Animation) (Σχήμα 4.5).

Area of Interest: West: 22.950 North: 38.595 South: 37.620 East: 24.150 Update Map

**Parameters**  
 Display:  Data Product Info  Units

**TRMM Level-3 3-hourly Products**

Parameter	Parameter Units	Data Product Info
<input checked="" type="checkbox"/> Accumulated_precipitation	mm	TRMM_3B42.007 TRMM 1997/12/31 - 2013/05/31
<input type="checkbox"/> Precipitation	mm/hr	TRMM_3B42.007 TRMM 1997/12/31 - 2013/05/31
<input type="checkbox"/> relativeError	mm/hr	TRMM_3B42.007 TRMM 1997/12/31 - 2013/05/31

**Temporal**  
 Begin Date Year: 2012 Month: Dec Day: 30 Hour: 00 (Date Begin: 31 Dec 1997)  
 End Date Year: 2013 Month: Jan Day: 2 Hour: 03 (Date End: 31 May 2013)  
 Note: This product is 3-hourly in UTC or Z.

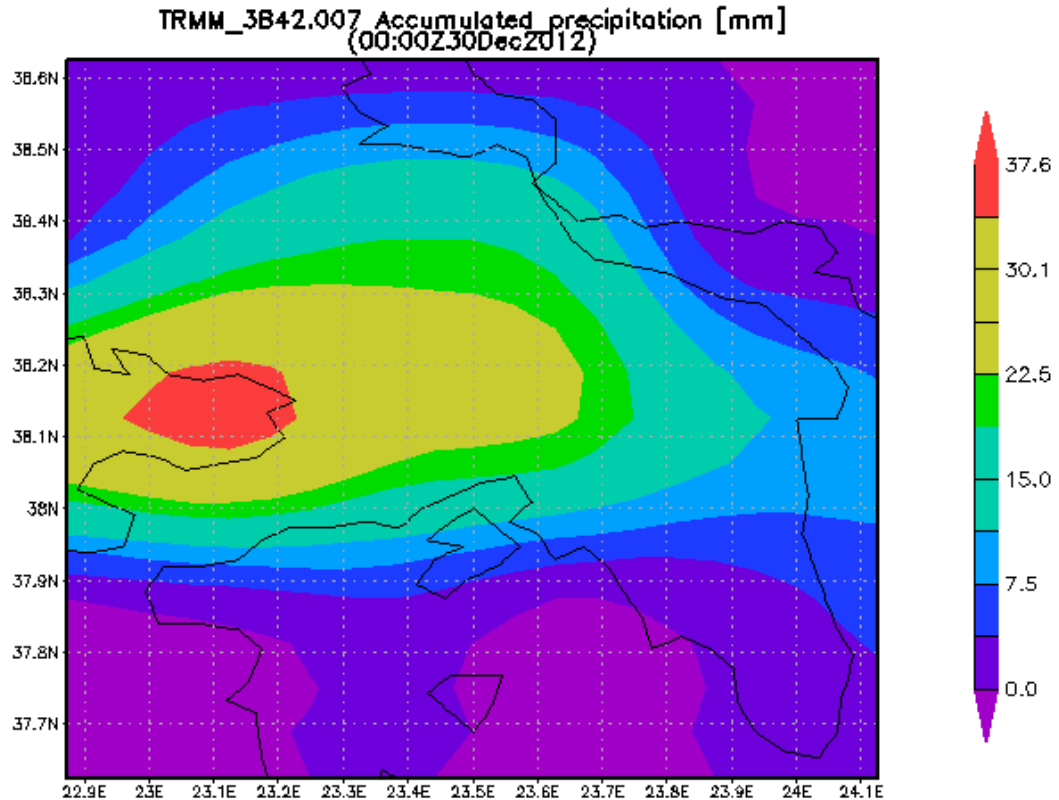
**Select Visualization:**  
 Animation [Edit Preferences](#) [Visualization Help](#)

[Generate Visualization](#) [Reset](#)

NASA Responsible NASA Official: Steven J. Kempler@nasa.gov  
 Web Curator: M. Hegde.gsfco-giovanni-disc@lists.nasa.gov  
 + Privacy Policy and Important Notices [+ Contact Us](#)

**Σχήμα 4.5** Επιλογή των στοιχείων και των ημερομηνιών ενδιαφέροντος.

Τα αποτελέσματα έχουν την παρακάτω μορφή (Σχήμα 4.6).



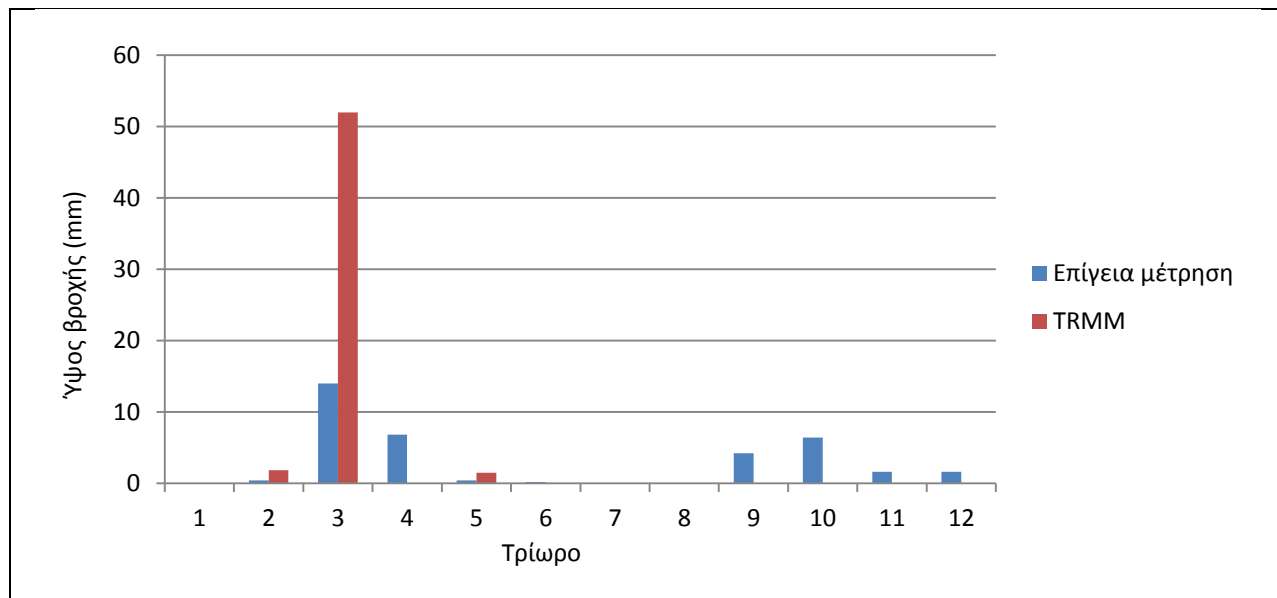
**Σχήμα 4.6** Η παρουσίαση των δεδομένων σε χάρτη συντεταγμένων με την αντίστοιχη κλίμακα.

Για ορισμένα τρίωρα δεν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα βροχόπτωσης. Για κάθε τρίωρο έγινε η ανάγνωση και καταγραφή του εύρους βροχόπτωσης από την κλίμακα βροχόπτωσης, γνωρίζοντας τις συντεταγμένες του σταθμού στα Βίλια. Τέλος υπολογίστηκε ο μέσος όρος κάθε εύρους και η τιμή αυτή θεωρήθηκε ως χαρακτηριστική αθροιστική βροχόπτωση για το τρίωρο.

#### **4.3.2 Επαλήθευση δεδομένων από δορυφόρους**

Για την επαλήθευση της εγκυρότητας των διαθέσιμων δεδομένων από το δορυφόρο έγινε η σύγκρισή τους με τα δεδομένα από τους βροχομετρικούς σταθμούς. Συγκεκριμένα επιλέχτηκε το επεισόδιο στο Πράσινο από 06/02/12 14:00 έως 07/02/12 23:00. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία για τη συλλογή των δεδομένων. Παρατηρείται πως οι τιμές των δεδομένων διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές του σταθμού. Μάλιστα σε ορισμένα τρίωρα δεν υπάρχουν

δεδομένα βροχόπτωσης από τους δορυφόρους. Ακολουθεί ενδεικτικό διάγραμμα σύγκρισης των δορυφορικών τιμών με τις τιμές από το βροχομετρικό σταθμό (Σχήμα 4.7).



**Σχήμα 4.7** Συγκριτικό διάγραμμα δεδομένων βροχόπτωσης από δορυφόρο και από βροχομετρικό σταθμό.

Επομένως η συμπλήρωση τιμών βροχόπτωσης στα Βίλια δεν έγινε από δορυφορικά δεδομένα αλλά χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές στη Μάνδρα λόγω καλύτερης συσχέτισης των προηγούμενων τιμών βροχής των δύο σταθμών.

#### 4.4 Επιφανειακή ολοκλήρωση

Τα βροχομετρικά δεδομένα προέκυψαν σημειακά, από διάφορους σταθμούς (Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα). Η μέθοδος ολοκλήρωσης της βροχής στο σύνολο της επιφάνειας  $S$  της λεκάνης απορροής έγινε θεωρώντας την επιφανειακή βροχόπτωση ως γραμμικό συνδυασμό των σημειακών βροχοπτώσεων με βάση τη σχέση

$$h_s = \sum_{i=1}^k w_i h_i \quad (4.1)$$

όπου  $h_s$  το επιφανειακό ύψος βροχής,  $h_i$  ( $i=1, \dots, k$ ) τα σημειακά ύψη για τους  $k$  σταθμούς της λεκάνης ή περιοχής και  $w_i$  ο συντελεστής βάρους για το σταθμό  $i$ .

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την εύρεση των συντελεστών βάρους  $w_i$  ήταν η μέθοδος Thiessen. Σε αυτήν η συνολική επιφάνεια  $S$  χωρίζεται σε γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής  $S_i$ , μια για κάθε σταθμό, έτσι ώστε

$$\sum_{i=1}^k S_i = S \quad (4.2)$$

Ο συντελεστής βάρους θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού, δηλαδή

$$w_i = \frac{S_i}{S} \quad (4.3)$$

Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού  $i$  να απέχει από τη θέση του σταθμού  $i$  λιγότερο από όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Επομένως η κατασκευή των ζωνών επιρροής γίνεται φέροντας τις μεσοκαθέτους των ευθυγράμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν τα πολύγωνα Thiessen. (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

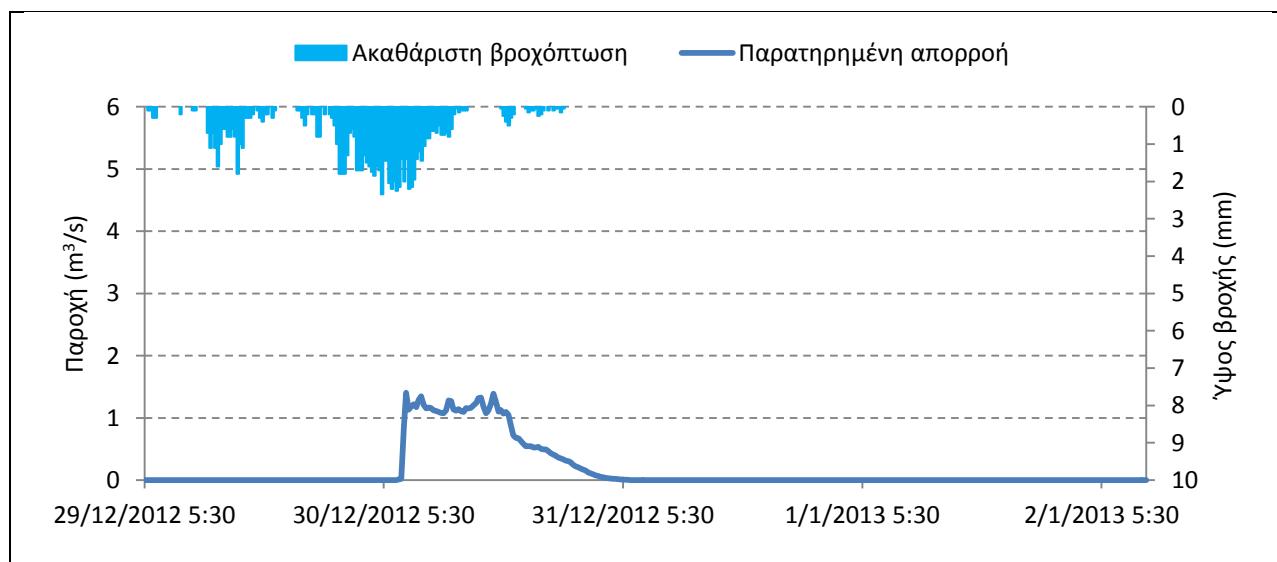
Για την ανάντη λεκάνη (Οινόη) λαμβάνεται υπόψη μόνο η βροχή στα Βίλια, καθώς οι υπόλοιποι σταθμοί βρίσκονται αρκετά μακριά αυτής.

Για τη συνολική λεκάνη απορροής οι συντελεστές Thiessen που υπολογίστηκαν ήταν 0.5 , 0.4 , 0.1 για τα Βίλια, το Πράσινο και τη Μάνδρα αντίστοιχα. Ο σταθμός της Μάνδρας και του Πράσινου παρότι βρίσκονται έξω της λεκάνης έχουν συντελεστή Thiessen. Για την ενδιάμεση λεκάνη οι αντίστοιχοι συντελεστές ήταν 0.23, 0.61 και 0.16.

#### 4.5 Περιγραφή επεισοδίων

- **Επεισόδιο 29/12/12**

A. Σταθμός Οινόης



**Σχήμα 4.8** Η παρατηρημένη απορροή στην Οινόη και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 29/12/12.

Η παρατηρημένη βροχόπτωση (συνολικού ύψους 92.6 mm) που λαμβάνεται υπόψη για το συγκεκριμένο επεισόδιο στην Οινόη προέρχεται από το μετεωρολογικό σταθμό στα Βίλια και λόγω έλλειψης δεδομένων από το σταθμό στη Μάνδρα. Η συνολική διάρκειά της είναι 1 ημέρα και 18 ώρες και η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στις 30/12 στις 05:15 (μέγιστη ένταση

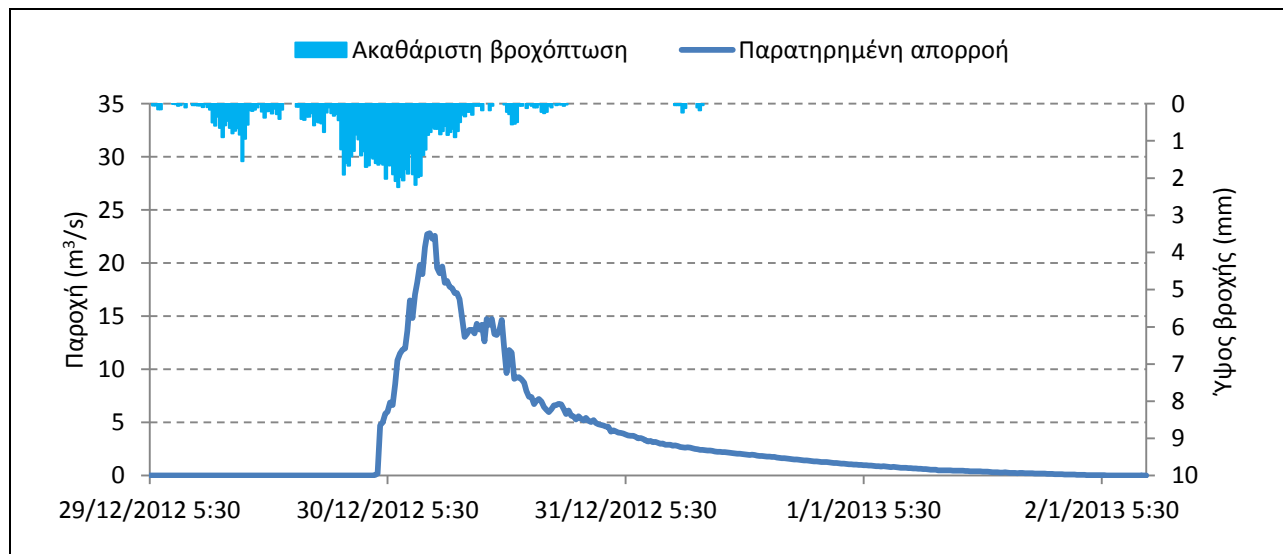


9.40 mm/h). Ο μεγαλύτερος όγκος βροχής πέφτει σε δύο χρονικές υποπεριόδους, από 29/12 11:45 έως 29/12 18:30 και από 30/12 0:00 έως 30/12 13:45.

Το προφίλ της απορροής στην Οινόη παρουσιάζει μια απότομη αύξηση της παροχής από τα 0 m<sup>3</sup>/s στα 1.66 m<sup>3</sup>/s, τιμή που αποτελεί και τη μέγιστη του επεισοδίου. Η τιμή αυτή εμφανίζεται στις 30/12 07:30. Στη συνέχεια παρατηρούνται διακυμάνσεις στην παροχή μεταξύ των τιμών 1 και 1.5 m<sup>3</sup>/s μέχρι τις 30/12 18:00 όπου και εμφανίζεται απότομη πτώση της παροχής. Η παροχή αυξάνεται ελάχιστα στις 30/12 18:45 και συνεχίζει έπειτα να μειώνεται λιγότερο απότομα μέχρι τις 31/12 06:45 όπου και μηδενίζεται.

Η βροχή που πέφτει από 29/12 11:45 έως 29/12 18:30 δε φαίνεται να μεταβάλλει τη στάθμη στην Οινόη. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη ροή της βροχής στον υπόγειο υδροφόρα, η στάθμη του οποίου είναι χαμηλή. Όταν όμως ακολουθήσει η δεύτερη βροχόπτωση ο υδροφόρας έχει κορεστεί και εμφανίζεται ροή στην ακόρεστη ζώνη. Η ροή αυτή ευθύνεται για την απότομη αύξηση της στάθμης του ποταμού. Η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών απορροής και βροχόπτωσης είναι 2 ώρες και 15 λεπτά.

#### B. Σταθμός Γύρας Στεφάνης



**Σχήμα 4.9** Η παρατηρημένη απορροή στη Γύρα Στεφάνης και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 29/12/12.

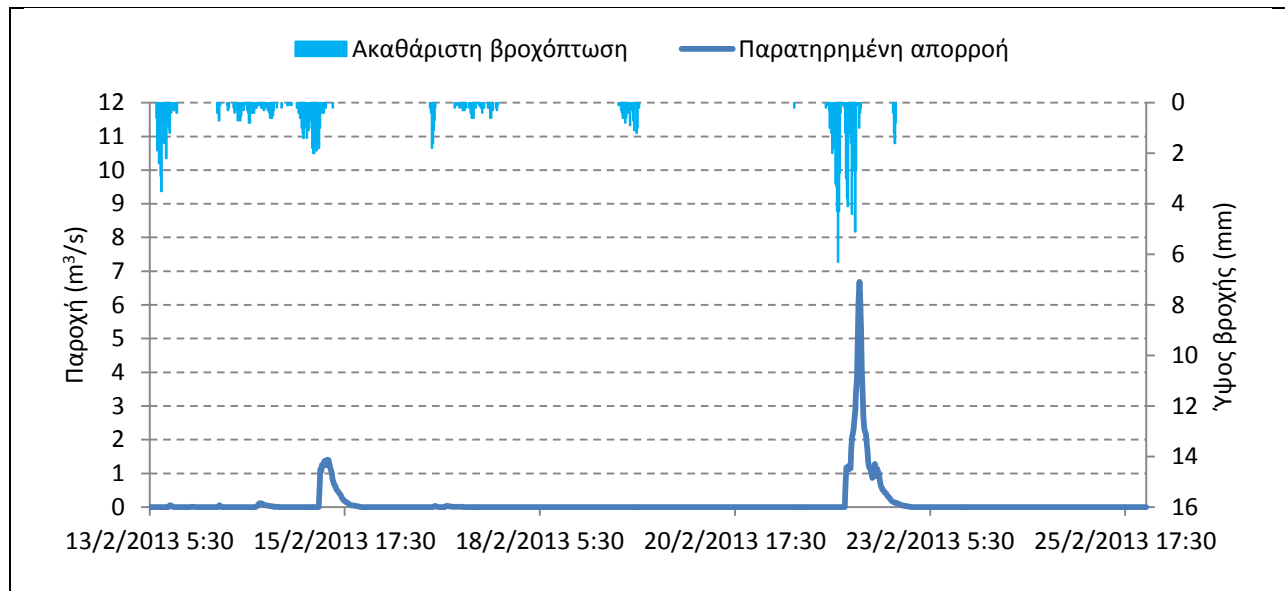
Η βροχόπτωση (συνολικού ύψους 95.5 mm) που λαμβάνεται υπόψη για το ίδιο επεισόδιο στη Γύρα Στεφάνης προέρχεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια, στο Πράσινο και στη Μάνδρα (ανηγμένη με τους κατάλληλους συντελεστές Thiessen). Η συνολική διάρκειά της είναι 1 ημέρα και 18 ώρες και η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στις 30/12 στις 06:45 (μέγιστη ένταση 8.96 mm/h).

Η απορροή στη Γύρα Στεφάνης ξεκινά στις 30/12 04:15 με απότομο ανοδικό κλάδο και φτάνει στη μέγιστη τιμή στις 30/12 09:45 με παροχή 22.8 m<sup>3</sup>/s. Στη συνέχεια παρατηρείται αργή εκφόρτιση, αρκετά μεγαλύτερη του χρόνου συγκέντρωσης. Η αργή εκφόρτιση δημιουργεί υποψίες για την ακαταλληλότητα της μεθόδου SCS-CN η οποία δε μπορεί να προσεγγίσει την υποδερμική ροή, όπως θα περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 5. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης καταγράφεται μια ουσιαστική αύξηση μικρής διάρκειας, η οποία οφείλεται σε μια μικρή αύξηση της βροχόπτωσης. Η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών βροχόπτωσης-παροχής είναι της τάξης των τριών ωρών.

Η μέγιστη τιμή παροχής στη Γύρα Στεφάνης είναι 20-πλάσια αυτής στην Οινόη για ουσιαστικά ίδιου ύψους βροχόπτωση. Επιπλέον, η λεκάνη ανάντη της Οινόης καταλαμβάνει το 35% της συνολικής. Η μεγάλη διαφορά στις παροχές πιθανόν να οφείλεται σε αυξημένη διηθητικότητα του εδάφους ανάντη της Οινόης.

- **Επεισόδιο 13/02/13**

A. Σταθμός Οινόης



**Σχήμα 4.10** Η παρατηρημένη απορροή στην Οινόη και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 13/02/13.

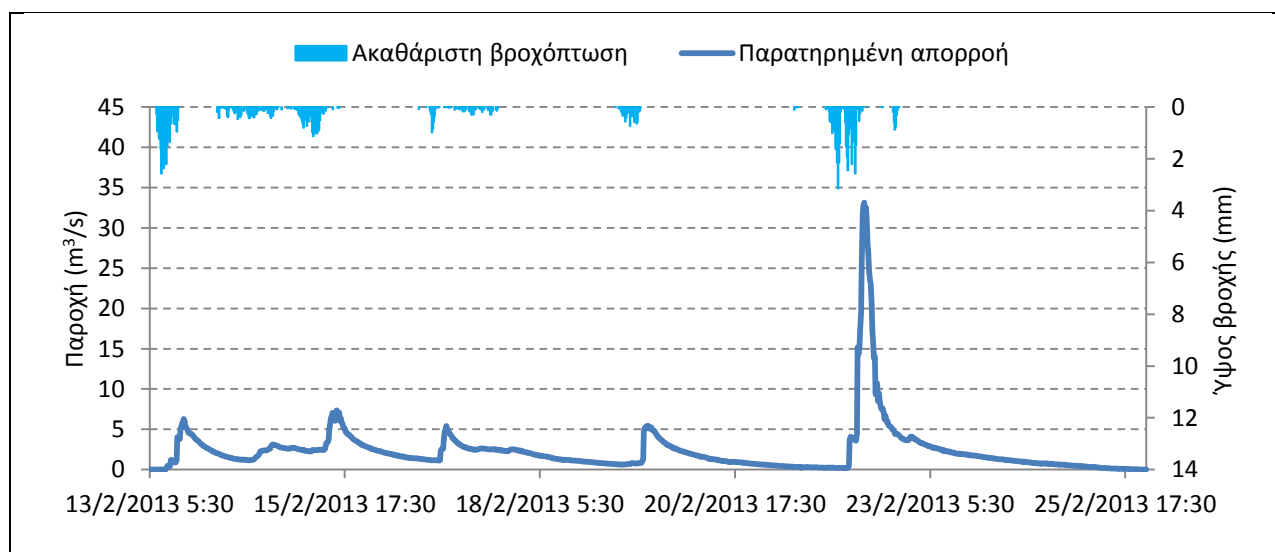
Η παρατηρημένη βροχόπτωση που λαμβάνεται υπόψη για το συγκεκριμένο επεισόδιο στην Οινόη προέρχεται από το μετεωρολογικό σταθμό στα Βίλια (συνολική βροχόπτωση 180.4 mm). Ουσιαστικά, πρόκειται για πέντε ξεχωριστά επεισόδια βροχόπτωσης, με αφετηρία στις 13/02 07:30 και λήξη στις 22/02 19:15. Οι μέγιστες τιμές αυτών εμφανίζονται στις 13/02 09:00 (μέγιστη ένταση 14 mm/h), στις 15/02 07:45 (μέγιστη ένταση 8 mm/h), στις 16/02 20:15 (μέγιστη ένταση 7.2 mm/h), στις 19/02 10:30 (μέγιστη ένταση 4.4 mm/h) και στις 22/02 1:15 (μέγιστη ένταση 25.2 mm/h).

Το προφίλ της απορροής εμφανίζει μια απότομη αύξηση της παροχής ( $1.28 \text{ m}^3/\text{s}$ ) στις 15/02 09:45. Η μέγιστη τιμή ( $1.47 \text{ m}^3/\text{s}$ ) εμφανίζεται στις 15/02 11:15. Στη συνέχεια ακολουθεί σταδιακή μείωση και μηδενισμός της παροχής (15/02 23:30). Η παροχή συνεχίζει με σχεδόν μηδενικές τιμές μέχρι και τις 22/02 03:30, όπου και σημειώνεται το 2ο επεισόδιο, το οποίο

είναι πολύ εντονότερο. Σε αυτό η παροχή φτάνει την τιμή  $6.68 \text{ m}^3/\text{s}$  στις 22/02 07:45 και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι το μηδενισμό της στις 23/02 00:15.

Το πρώτο επεισόδιο βροχόπτωσης δε φαίνεται να μεταβάλλει τη στάθμη στην Οινόη. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου επεισοδίου και αφού έχει κορεστεί ο υπόγειος υδροφορέας εμφανίζεται απορροή. Η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών απορροής και βροχόπτωσης είναι 3 ώρες και 30 λεπτά. Στη συνέχεια μεσολαβούν δύο λιγότερα έντονα και συντομότερα επεισόδια βροχόπτωσης τα οποία δεν προκαλούν κάποια μεταβολή στη στάθμη. Το τελευταίο επεισόδιο είναι αυτό που προκαλεί την απότομη αύξηση της στάθμης και η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών απορροής και βροχόπτωσης είναι 6 ώρες και 30 λεπτά.

#### B. Σταθμός Γύρας Στεφάνης



**Σχήμα 4.11** Η παρατηρημένη απορροή στη Γύρα Στεφάνης και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 13/02/13.

Η βροχόπτωση (συνολικού ύψους 118.6 mm) που λαμβάνεται υπόψη για το ίδιο επεισόδιο στη Γύρα Στεφάνης προέρχεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια, στο Πράσινο και στη Μάνδρα (ανηγμένη με τους κατάλληλους συντελεστές Thiessen) και αποτελείται από πέντε μεμονωμένα επεισόδια. Οι μέγιστες τιμές αυτών εμφανίζονται στις 13/02 09:00 (2 μέγιστη ένταση 10.28 mm/h), στις 15/02 07:45 (μέγιστη ένταση 4.56 mm/h), στις 16/02 20:15

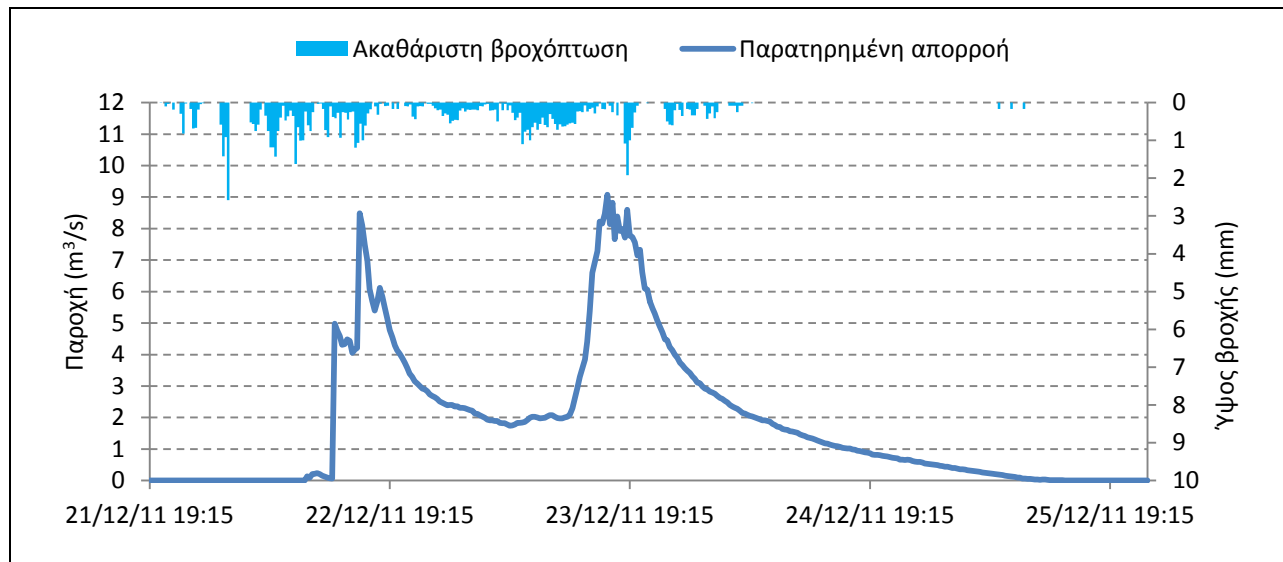
(μέγιστη ένταση 3.96 mm/h), στις 19/02 11:15 (μέγιστη ένταση 2.56 mm/h) και στις 22/02 1:15 (μέγιστη ένταση 12.6 mm/h).

Στο προφίλ της απορροής φαίνονται πέντε κορυφές που αντιστοιχούν στις εξής τιμές της παροχής: στις 13/02 16:00 6.27 m<sup>3</sup>/s, στις 15/02 15:00 7.34 m<sup>3</sup>/s, στις 17/02 00:45 5.41 m<sup>3</sup>/s, στις 19/02 14:15 5.38 m<sup>3</sup>/s και στις 22/02 09:45 33.14 m<sup>3</sup>/s. Η παροχή δεν προλαβαίνει να μηδενιστεί κάποια χρονική στιγμή και συνεχώς αυξομειώνεται. Η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών απορροής και βροχοπτώσης είναι για κάθε επεισόδιο 7 ώρες, 7 ώρες και 15 λεπτά, 4 ώρες και 30 λεπτά, 3 ώρες και 8 ώρες και 30 λεπτά.

Όπως και στο επεισόδιο στις 29/12/12, η εκφόρτιση της παροχής είναι αρκετά αργή (μεγαλύτερη των 12 ωρών) και η διάρκειά της ξεπερνά κατά πολύ το χρόνο συγκέντρωσης.

Στο επεισόδιο αυτό η μέγιστη παροχή στη Γύρα Στεφάνης είναι 5-πλάσια αυτής στην Οινόη (αντίστοιχα ύψη βροχής 180.4 mm και 118.6 mm) λόγω της αυξημένης διηθητικότητας του εδάφους στην Οινόη όπως αναφέρθηκε και για το επεισόδιο στις 29/12/12.

- **Γύρα Στεφάνης (21/12/11)**

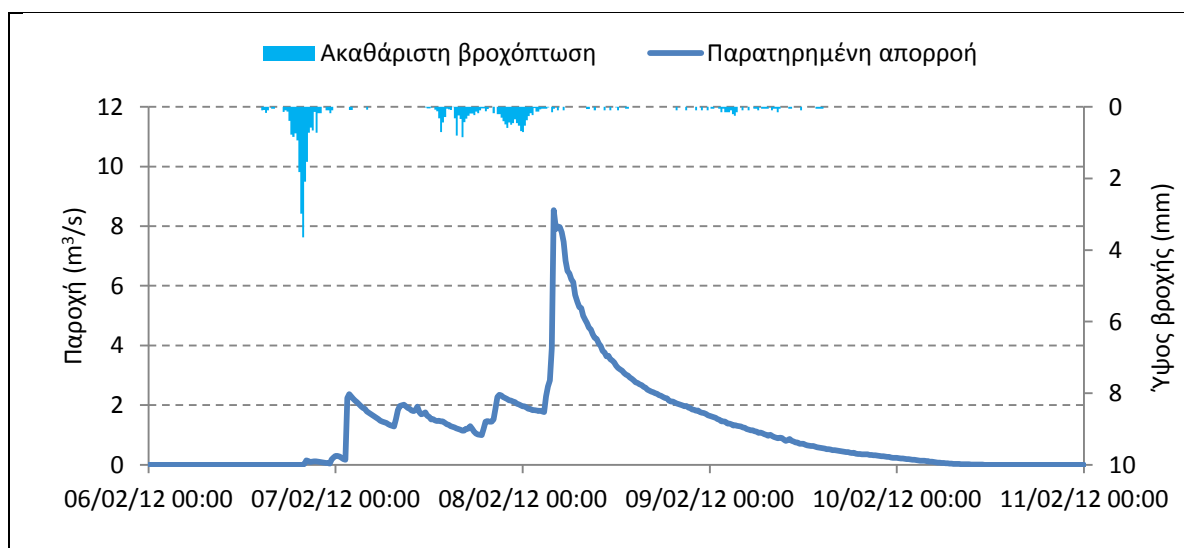


**Σχήμα 4.12** Η παρατηρημένη απορροή στη Γύρα Στεφάνης και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 21/12/11.

Η βροχόπτωση (συνολικού ύψους 74.1 mm) που λαμβάνεται υπόψη για αυτό το επεισόδιο στη Γύρα Στεφάνης προέρχεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια και στη Μάνδρα (ανηγμένη με τους κατάλληλους συντελεστές Thiessen, ο σταθμός στο Πράσινο δεν λειτουργούσε τότε). Η βροχή ξεκινά στις 21/12 20:15 και λήγει στις 24/12 07:30. Οι μέγιστες τιμές της βροχής εμφανίζονται στις 22/12 03:00 (μέγιστη ένταση 7.44 mm/h), στις 22/12 09:45 (6.64 mm/h), στις 22/12 14:15 (6.16 mm/h) και στις 23/12 19:00 (5.52 mm/h).

Η απορροή εμφανίζεται πολύ αργότερα της έναρξης της βροχόπτωσης καθώς το νερό κατεισδύει στον υδροφορέα. Η απορροή αυξάνεται απότομα μέχρι την τιμή των 4.98 m<sup>3</sup>/s (22/12 13:45). Ακολουθεί μείωση της απορροής λόγω μείωσης της βροχής και έπειτα, ακολουθώντας το προφίλ της βροχόπτωσης, η απορροή αυξάνεται μέχρι την τιμή των 9.07 m<sup>3</sup>/s (22/12 16:15). Στη συνέχεια παρατηρείται μια γενική μείωση της παροχής (αφού έχει προηγηθεί μείωση της βροχόπτωσης) και σταθεροποίηση της περίπου στα 2 m<sup>3</sup>/s. Λόγω της μεγάλης διάρκειας βροχόπτωσης η παροχή αρχίζει και αυξάνεται (κορεσμός του υπόγειου υδροφορέα) μέχρι τα 9.07 m<sup>3</sup>/s (23/12 17:00). Ο μηδενισμός της παροχής γίνεται στις 25/12 12:45 μετά από αργή εκφόρτιση της παροχής. Η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών απορροής και βροχόπτωσης είναι 2 ώρες.

- **Γύρα Στεφάνης (06/02/12)**

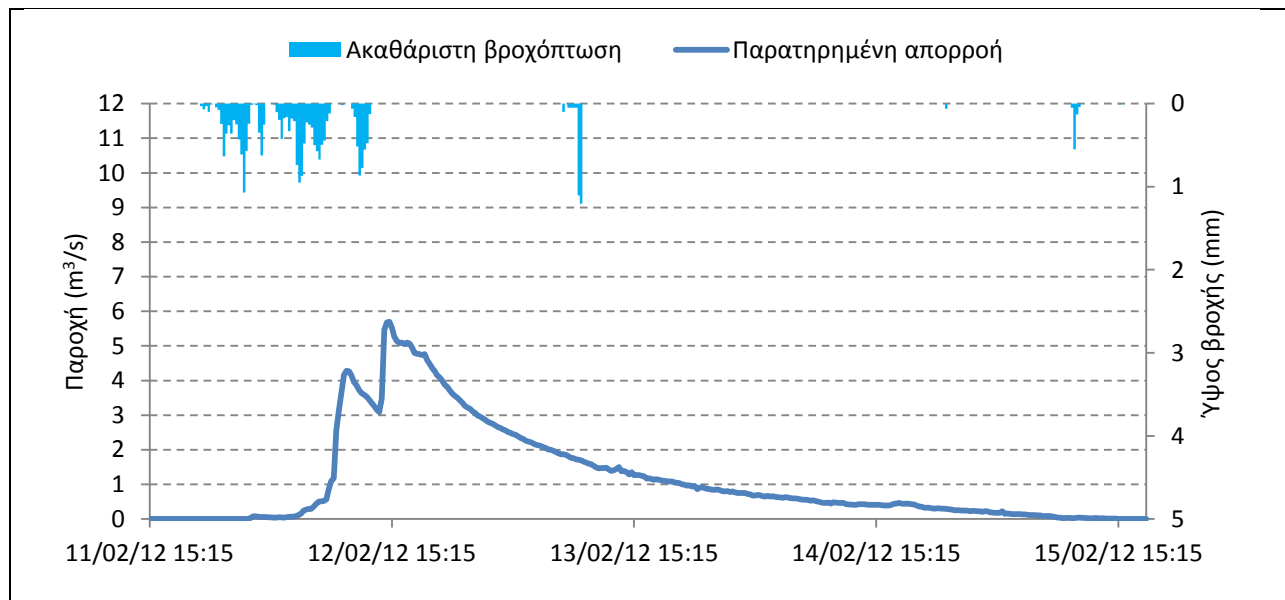


**Σχήμα 4.13** Η παρατηρημένη απορροή στη Γύρα Στεφάνης και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 06/02/12.

Η βροχόπτωση (συνολικού ύψους 40.8 mm) που λαμβάνεται υπόψη για αυτό το επεισόδιο στη Γύρα Στεφάνης προέρχεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια, στο Πράσινο και στη Μάνδρα (ανηγμένη με τους κατάλληλους συντελεστές Thiessen). Ο μεγαλύτερος όγκος βροχής πέφτει σε δύο χρονικές υποπεριόδους, από 06/02 17:15 έως 06/02 23:45 και από 07/02 12:45 έως 8/2 03:00. Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στις 06/02 στις 19:45 (μέγιστη ένταση 14.8 mm/h) και στις 07/02 στις 15:30 (μέγιστη ένταση 3.2 mm/h).

Η απορροή ξεκινά στις 06/02 20:00 και η μορφή του προφίλ της ακολουθεί τη μορφή του προφίλ της βροχόπτωσης, παρουσιάζοντας κάποια τοπικά μέγιστα. Η παροχή αποκτά τη μέγιστη τιμή ( $8.53 \text{ m}^3/\text{s}$ ) στις 08/02 04:00. Μετά από αυτήν την τιμή μειώνεται με αργό ρυθμό μέχρι το μηδενισμό της. Η μέγιστη τιμή της παροχής οφείλεται στο δεύτερο επεισόδιο της βροχόπτωσης. Η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών απορροής και βροχόπτωσης είναι 4 ώρες και 15 λεπτά.

- **Γύρα Στεφάνης (11/02/12)**

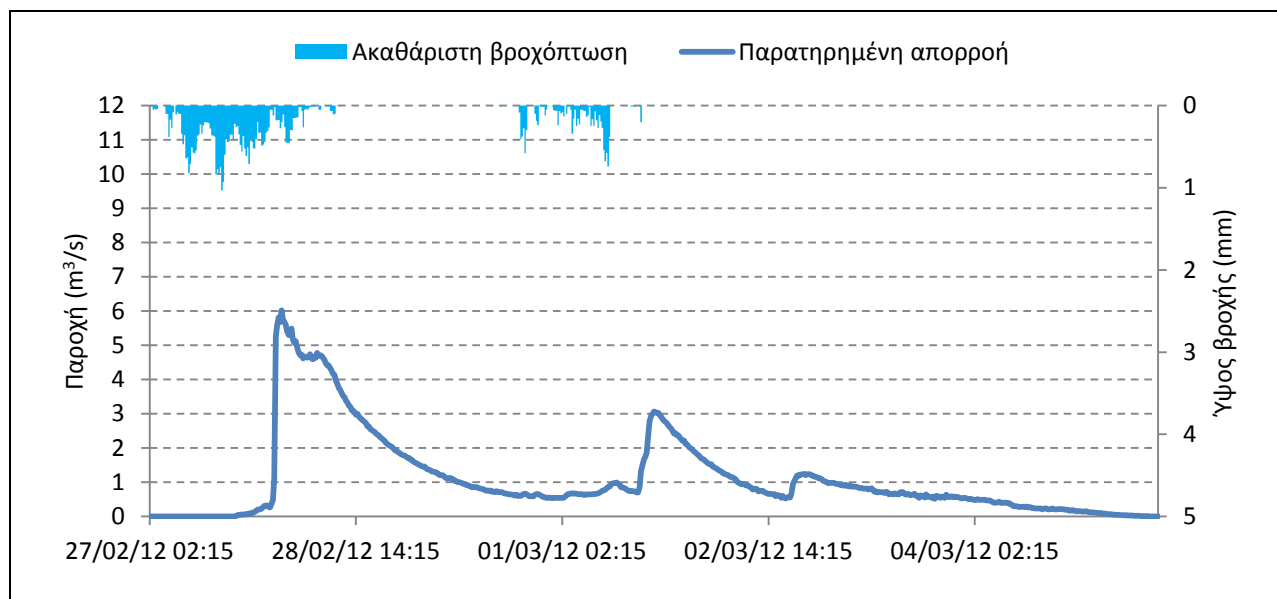


**Σχήμα 4.14** Η παρατηρημένη απορροή στη Γύρα Στεφάνης και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 11/02/12.

Η βροχόπτωση (συνολικού ύψους 22.5 mm) που λαμβάνεται υπόψη για αυτό το επεισόδιο στη Γύρα Στεφάνης προέρχεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια, στο Πράσινο και στη Μάνδρα (ανηγμένη με τους κατάλληλους συντελεστές Thiessen). Ο μεγαλύτερος όγκος βροχής πέφτει από 11/02 22:00 έως 12/02 13:00. Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στις 12/02 00:30 (μέγιστη ένταση 4.4 mm/h) και στις 13/02 10:00 (4.8 mm/h).

Η απορροή ξεκινά στις 12/02 01:15 και αυξάνεται ραγδαία μέχρι τις 12/02 10:45 (4.28 m<sup>3</sup>/s). Στη συνέχεια ακολουθεί μια μικρή πτώση της παροχής λόγω σύντομης διακοπής της βροχόπτωσης και έπειτα αυξάνεται και αποκτά τη μέγιστη τιμή της (5.7 m<sup>3</sup>/s στις 12/02 15:00). Ακολουθεί σταδιακή πτώση της παροχής καθώς οι βροχοπτώσεις που ακολουθούν είναι πολύ σύντομης διάρκειας. Ο μηδενισμός της παροχής επέρχεται στις 15/02 15:00. Η μέγιστη τιμή της παροχής οφείλεται στην τιμή 0.9 mm της βροχής (12/02 12:00) και η χρονική υστέρηση της τιμής αυτής και της μέγιστης τιμής απορροής είναι 3 ώρες.

- **Γύρα Στεφάνης (27/02/12)**



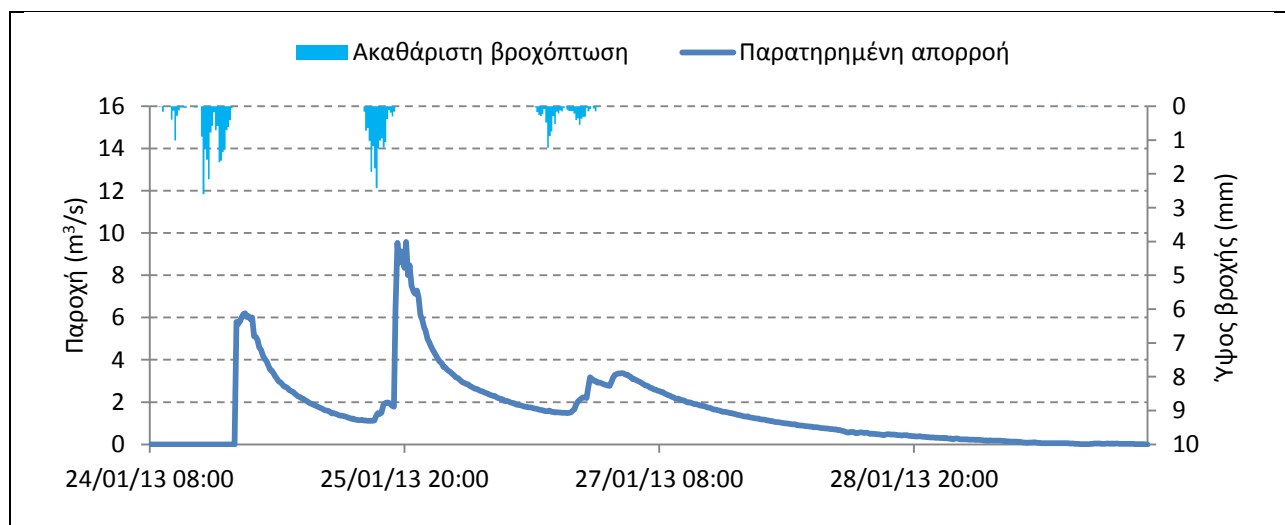
**Σχήμα 4.15** Η παρατηρημένη απορροή στη Γύρα Στεφάνης και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 27/02/12.



Η βροχόπτωση (συνολικού ύψους 45.6 mm) που λαμβάνεται υπόψη για αυτό το επεισόδιο στη Γύρα Στεφάνης προέρχεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια, στο Πράσινο και στη Μάνδρα (ανηγμένη με τους κατάλληλους συντελεστές Thiessen). Ο μεγαλύτερος όγκος βροχής πέφτει από 27/02 02:15 έως 28/02 05:45 και από 29/02 18:45 έως 01/03 10:30. Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στις 27/02 14:45 (μέγιστη ένταση 4.0 mm/h) και στις 01/03 10:15 (2.8 mm/h).

Η απορροή ξεκινά με σχεδόν κάθετο ανοδικό κλάδο στις 27/02 17:15 και αποκτά τη μέγιστη τιμή της ( $6.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ) στις 28/02 01:15. Στη συνέχεια η βροχή μειώνεται και μηδενίζεται και συνεπώς μειώνεται και η παροχή. Όμως η παροχή δεν προλαβαίνει να μηδενιστεί καθώς συμβαίνει ένα δεύτερο επεισόδιο βροχόπτωσης (στις 29/02 18:45) το οποίο θα αυξήσει την παροχή στα  $3.06 \text{ m}^3/\text{s}$  (01/03 18:15). Μετά τη διακοπή και του δεύτερου επεισοδίου παρατηρείται υποδερμική ροή μέχρι το μηδενισμό της παροχής στις 05/03 08:30. Μια μικρή αύξηση της παροχής στις 02/03/12 18:45 είναι πιθανό να έχει προκληθεί από μη καταγεγραμμένη βροχόπτωση. Η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών απορροής και βροχόπτωσης είναι 10 ώρες και 30 λεπτά για το 1ο επεισόδιο και 8 ώρες για το 2ο.

- **Γύρα Στεφάνης (24/1/13)**



**Σχήμα 4.16** Η παρατηρημένη απορροή στη Γύρα Στεφάνης και η ακαθάριστη βροχόπτωση για το επεισόδιο στις 24/01/13.

Η βροχόπτωση (συνολικού ύψους 47.4 mm) που λαμβάνεται υπόψη για αυτό το επεισόδιο στη Γύρα Στεφάνης προέρχεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια, στο Πράσινο και στη Μάνδρα (ανηγμένη με τους κατάλληλους συντελεστές Thiessen). Η βροχή ξεκινά στις 24/01 09:45 και λήγει στις 26/01 23:00. Οι μέγιστες τιμές της βροχής εμφανίζονται στις 24/01 11:30 (μέγιστη ένταση 4.04 mm/h), στις 24/01 15:30 (10.4 mm/h), στις 24/01 17:45 (6.64 mm/h), στις 25/01 16:00 (9.72 mm/h) και στις 26/01 16:15 (4.92 mm/h).

Η πρώτη μέγιστη τιμή της απορροής ( $6.21 \text{ m}^3/\text{s}$  στις 24/01 21:30) προκαλείται μετά την πάροδο και του τρίτου επεισοδίου βροχόπτωσης. Ακολουθεί μείωση της απορροής λόγω μηδενισμού της βροχής και έπειτα, ακολουθώντας το προφίλ της βροχόπτωσης, η απορροή αυξάνεται μέχρι την τιμή των  $9.59 \text{ m}^3/\text{s}$  (25/01 19:15). Στη συνέχεια παρατηρείται μείωση της παροχής λόγω μηδενισμού της βροχόπτωσης. Η επανέναρξη της βροχής προκαλεί αύξηση της απορροής μέχρι την τιμή των  $3,36 \text{ m}^3/\text{s}$  (27/01 02:30). Ο μηδενισμός της παροχής γίνεται στις 30/01 04:45 μετά από την αργή εκφόρτιση που χαρακτηρίζει τα επεισόδια στη Γύρα Στεφάνης. Η χρονική υστέρηση των μέγιστων τιμών απορροής και βροχόπτωσης είναι 1 ώρα και 30 λεπτά.

#### **4.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επεισοδίων και σχόλια**

Όπως παρατηρήθηκε, σε όλα τα επεισόδια των δύο σταθμών η βασική απορροή είναι μηδενική. Όλα τα πλημμυρογραφήματα παρουσιάζουν έναν απότομα ανοδικό κλάδο. Η αργή εκφόρτιση (μεγαλύτερη σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης) και η ύπαρξη υποδερμικής ροής είναι αρκετά έντονη στα επεισόδια στη Γύρα Στεφάνης. Παρακάτω έχει υπολογιστεί ο συντελεστής απορροής  $c$  του κάθε επεισοδίου. Οι συντελεστές απορροής της Οινόης είναι αρκετά μικροί λόγω της αυξημένης διηθητικότητας των εδαφών της.

**Πίνακας 4.3** Μέγιστες παρατηρημένες παροχές, ύψη βροχής και συντελεστές απορροής των επιλεγμένων επεισοδίων στην Οινόη.

Ημερομηνίες επεισοδίων	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελεστής απορροής c
29/12/12 - 02/01/13	1.40	92.6	1.14	0.012
13/02/13 - 26/02/13	6.68	180.4	2.31	0.013

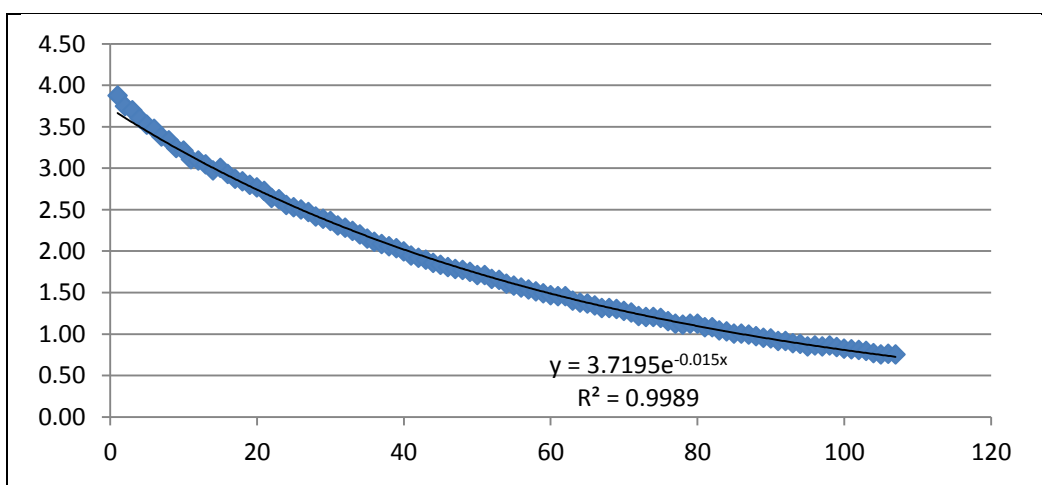
**Πίνακας 4.4** Μέγιστες παρατηρημένες παροχές, ύψη βροχής και συντελεστές απορροής των επιλεγμένων επεισοδίων στη Γύρα Στεφάνης.

Ημερομηνίες επεισοδίων	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελεστής απορροής c
21/12/11 - 25/12/11	9.07	74.1	4.57	0.062
06/02/12 - 11/02/12	8.53	40.8	3.42	0.084
11/02/12 - 15/02/12	5.69	22.5	2.82	0.126
27/02/12 - 5/03/12	6.02	45.6	4.79	0.105
29/12/12 - 02/01/13	22.82	95.5	8.08	0.085
24/01/13 - 30/01/13	9.59	47.4	5.51	0.116
13/02/13 - 26/02/13	33.14	118.6	17.37	0.146

## Κεφάλαιο 5 : Αναπαραγωγή παρατηρημένων πλημμυρικών επεισοδίων με τη μέθοδο SCS και του παραμετρικού ΣΜΥ

### 5.1 Επεξεργασία επεισοδίων

Η μέθοδος SCS/ΣΜΥ αποτελεί μοντέλο γεγονότος. Επομένως δεν είναι δυνατόν να περιγράψει απορροές που έχουν προκληθεί από διάσπαρτα και διαδοχικά επεισόδια βροχών. Για αυτό το λόγο στο επεισόδιο του Φεβρουαρίου του 13' επιλέχθηκε προς προσομοίωση μόνο το τελευταίο επεισόδιο βροχής (21/02/13 21:00 – 26/02/13 00:00), στο επεισόδιο στις 27/02/12 επιλέχθηκε το επεισόδιο από 27/02/12 02:15 έως 03/03/12 00:00 και στο επεισόδιο στις 24/01/13 επιλέχθηκε το επεισόδιο από 24/01/13 08:00 έως 25/01/13 13:45. Στα επεισόδια στις 27/02/12 και 24/01/13 επειδή η απορροή δεν προλαβαίνει να μηδενιστεί λόγω του επόμενου επεισοδίου βροχής (Σχήμα 4.15 και 4.16) και επειδή η μείωση των απορροών είναι εκθετική, θεωρήθηκε πως η απορροή μηδενίζεται εκθετικά και αγνοείται το επόμενο επεισόδιο βροχής. Η θεώρηση αυτή έγινε μετά από αδυναμία της SCS να περιγράψει την απορροή που προκαλείται από το συνδυασμό των δύο επεισοδίων.



Σχήμα 5.1 Η εκθετική μείωση της παροχής και η σχέση που την περιγράφει (επεισόδιο 27/2).

## **5.2 Υπολογισμός προσομοιωμένης παροχής**

Αρχικά ο υπολογισμός της προσομοιωμένης παροχής έγινε χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές  $S$ ,  $\alpha$  (Κεφάλαιο 2.5),  $\beta$  (Υποκεφάλαιο 2.6.2.) ενώ στη συνέχεια έγινε βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών. Τέλος, βελτιστοποιήθηκε και η παράμετρος  $k$  (Υποκεφάλαιο 2.6.2.) του παραμετρικού ΣΜΥ.

### **5.2.1 Διαχωρισμός βασικής απορροής**

Επειδή η λεκάνη είναι χειμαρρικής καθαρά δίαιτας θεωρήθηκε μηδενική βασική ροή.. Επομένως κατά την εφαρμογή της μεθόδου SCS δεν έγινε κάποιος διαχωρισμός και όλη η ροή θεωρήθηκε ως πλημμυρική.

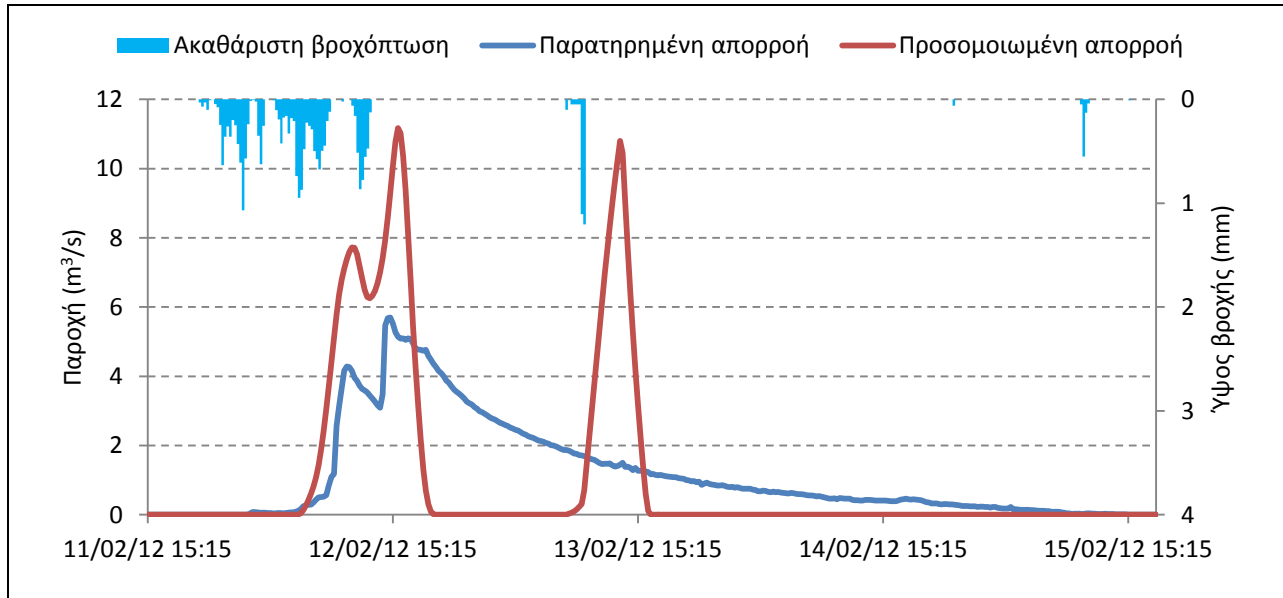
### **5.2.2 Υπολογισμός ενεργού βροχόπτωσης**

Η ενεργός βροχόπτωση υπολογίστηκε από τη μέθοδο SCS-CN (βλ. Κεφάλαιο 2.5) θεωρώντας την τυπική βιβλιογραφική τιμή της παραμέτρου  $\alpha$ , δηλαδή ίση με 0.2. Επειδή είναι γνωστό το ύψος απορροής η παράμετρος  $S$  υπολογίστηκε αναλυτικά για κάθε επεισόδιο από τη σχέση (2.5).

### **5.2.3 Υπολογισμός παραμετρικού συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος**

Στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός των παραμέτρων του παραμετρικού υδρογραφήματος βάσει των σχέσεων του Υποκεφαλαίου 2.6.2 και έγινε ο σχεδιασμός αυτού. Οι παράμετροι  $\beta$  και  $k$  τέθηκαν ίσες με τις τυπικές τιμές 0.6 και 1. Ακολούθησε η διαδικασία υπολογισμού της

προσομοιωμένης απορροής (Κεφάλαιο 2.6). Για τις τυπικές τιμές  $\alpha, \beta, S$  και  $k$  το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα διέφερε σημαντικά του παρατηρημένου έτσι στη συνέχεια ακολούθησε η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Παρακάτω φαίνονται ενδεικτικά οι προσομοιωμένες απορροές για ένα επεισόδιο.



**Σχήμα 5.2** Η προσομοιωμένη απορροή για το επεισόδιο στις 11/02/12 στη Γύρα Στεφάνης για τυπικές τιμές των παραμέτρων.

#### 5.1.4 Βελτιστοποίηση

Η διαδικασία υπολογισμού της προσομοιωμένης απορροής προγραμματίστηκε σε περιβάλλον Matlab. Για τη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε εξελκτικός αλγόριθμος σε περιβάλλον Matlab. Συγκεκριμένα έγινε ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης σφάλματος (Υποκεφάλαιο 5.1.5) με μεταβολή των παραμέτρων  $\alpha, \beta$  και  $S$  και στη συνέχεια η διαδικασία επαναλήφθηκε για τη βελτιστοποίηση των  $\alpha, \beta, S$  και  $k$ . Η παράμετρος  $k$  προστέθηκε στη βελτιστοποίηση λόγω

αδυναμίας της μεθόδου SCS να περιγράψει τον μεγάλης διάρκειας εκθετικό κλάδο, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα. Μεταβάλλοντας το  $k$  μεταβάλλεται και ο χρόνος βάσης του ΣΜΥ. Επομένως μια αύξηση του  $k$  θα οδηγήσει σε μεγαλύτερης διάρκειας καθοδικούς κλάδους.

### 5.1.5 Συνάρτηση σφάλματος

Για την εύρεση των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $S$  και  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $S$ ,  $k$  στη συνέχεια θεωρήθηκε μια συνάρτηση σφάλματος  $f$  και έγινε ελαχιστοποίηση αυτής μεταβάλλοντας τις τρεις (και ύστερα τέσσερις) αυτές παραμέτρους ταυτόχρονα. Η συνάρτηση δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$f = \lambda_1 \times |V_{direct} - V_{sim}| + \lambda_2 \times (maxQ_{direct} - maxQ_{sim})^2 + SSE$$

όπου

$\lambda_1, \lambda_2$  συντελεστές βάρους ίσοι με 1000 και 10 αντίστοιχα

$V_{direct}$  ο πλημμυρικός όγκος της άμεσης απορροής σε  $m^3$

$V_{sim}$  ο προσομοιωμένος όγκος, όπως προκύπτει από το μοναδιαίο υδρογράφημα σε  $m^3$

$maxQ_{direct}$  η μέγιστη τιμή άμεσης απορροής που παρατηρείται σε  $m^3/s$

$maxQ_{sim}$  η μέγιστη τιμή απορροής που προκύπτει από το μοναδιαίο υδρογράφημα σε  $m^3/s$

$SSE = \sum_{i=1}^n (Q_{direct}(i) - Q_{sim}(i))^2$  το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα (sum square error)

Μέσω της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης σφάλματος επιδιώκονται τρεις στόχοι: η ικανοποίηση της φυσικής συνθήκης της εξίσωσης του όγκου που προκύπτει από την ενεργό βροχόπτωση με τον παρατηρημένο όγκο της 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).

### **5.1.6 Αποτελέσματα και γραφήματα**

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.2) παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν μετά από βελτιστοποίηση των  $S$ ,  $a$ ,  $\beta$  και των  $S$ ,  $a$ ,  $\beta$  και  $k$ . Η διαδικασία της βελτιστοποίησης επαναλήφθηκε τέσσερις ή πέντε φορές για κάθε επεισόδιο και μερικές φορές, αρκετά διαφορετικά σεντ παραμέτρων έδιναν παραπλήσιο σφάλμα. Από αυτά τα σεντ επιλέχθηκε αυτό που αντιστοιχούσε σε καλύτερη γραφική περιγραφή των απορροών και σε παρεμφερείς τιμές παραμέτρων των με τα υπόλοιπα επεισόδια. Στη συνέχεια φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα των προσομοιώσεων.



**Πίνακας 5.1** Οι στρογγυλοποιημένες τιμές των παραμέτρων και οι τιμές του σφάλματος μετά από βελτιστοποίηση των  $S, a, \beta$  (Πίν. 5.1.α) και των  $S, a, \beta$  και  $k$  (Πίν. 5.1.β) κάθε επεισοδίου στην Οινόη.

**Πίνακας 5.1α**

	29/12/12	21/02/13	Μέσος όρος
S	493	345	419
$\alpha$	0.134	0.143	0.139
$\beta$	0.158	0.551	0.355
CN	34	42	38
f	61	172	-

**Πίνακας 5.1.β**

	29/12/12	21/02/13	Μέσος όρος
S	752	781	767
$\alpha$	0.082	0.043	0.063
$\beta$	0.174	0.469	0.322
k	3.311	3.316	3.314
CN	25	25	25
f	12	161	-

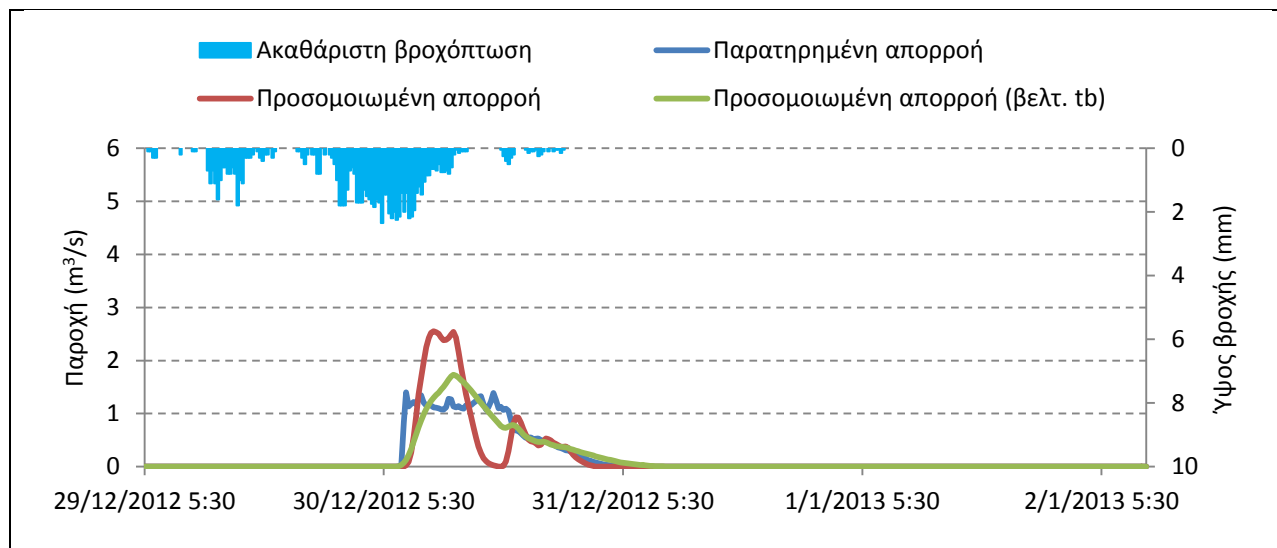
**Πίνακας 5.2** Οι στρογγυλοποιημένες τιμές των παραμέτρων και οι τιμές του σφάλματος μετά από βελτιστοποίηση των  $S$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  (Πίν. 5.2.α) και των  $S, \alpha, \beta$  και  $k$  (Πίν. 5.2.β) κάθε επεισοδίου στη Γύρα Στεφάνης.

**Πίνακας 5.2.α**

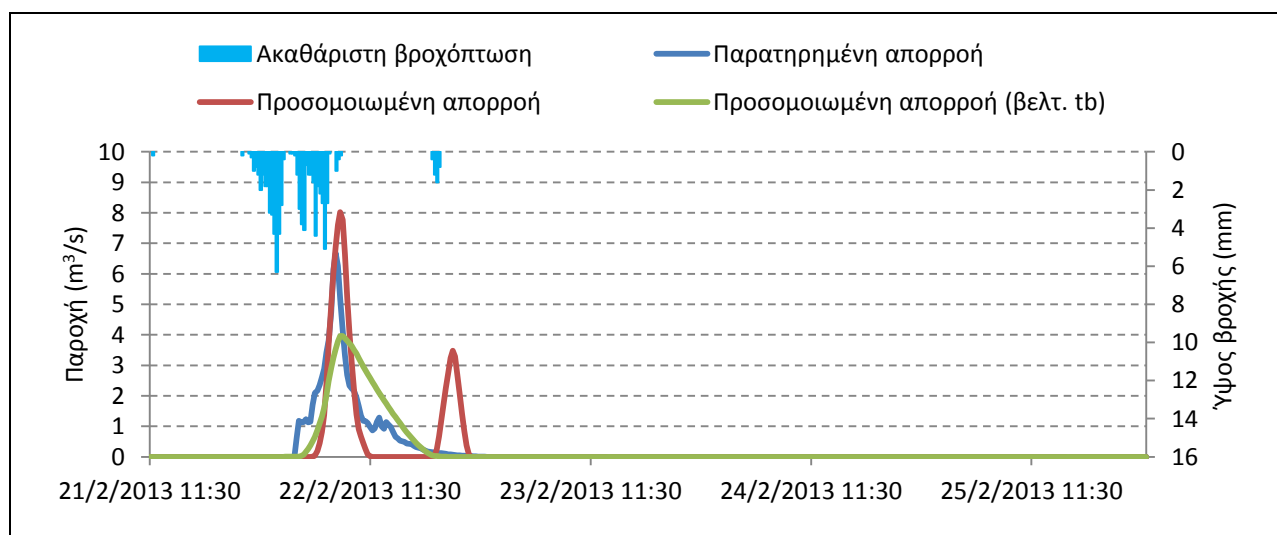
	21/12/11	06/02/12	11/02/12	27/02/12	29/12/12	24/01/13	21/02/13	Μέσος όρος
S	782	207	119	248	769	82	107	330
$\alpha$	0.012	0.054	0.008	0.024	0.010	0.110	0.078	0.042
$\beta$	0.461	0.489	0.563	0.120	0.448	0.340	0.274	0.385
CN	25	55	68	51	25	76	70	53
f	1392	2140	2010	2481	7318	2786	18457	-

**Πίνακας 5.2.β**

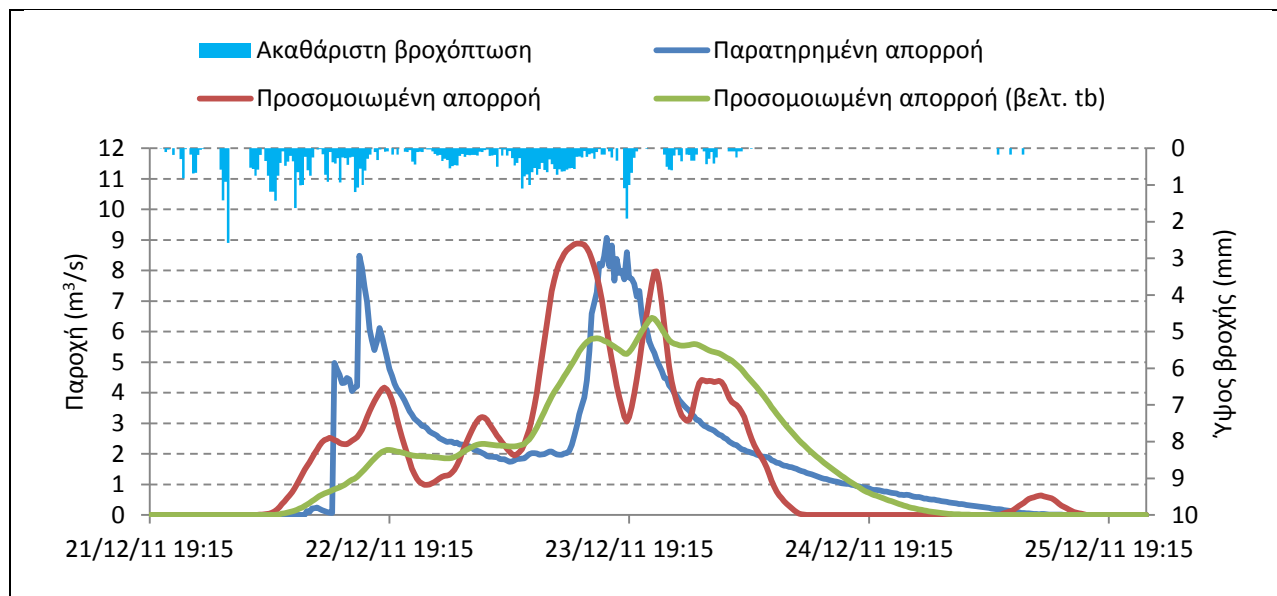
	21/12/11	06/02/12	11/02/12	27/02/12	29/12/12	24/01/13	21/02/13	Μέσος όρος
S	750	327	96	155	270	238	143	283
$\alpha$	0.016	0.016	0.038	0.081	0.159	0.006	0.035	0.050
$\beta$	0.383	0.170	0.420	0.492	0.228	0.430	0.311	0.348
k	3.734	6.502	5.410	7.070	3.162	4.545	2.877	4.757
CN	25	44	73	62	49	52	64	53
f	988	546	85	192	3799	139	3571	-



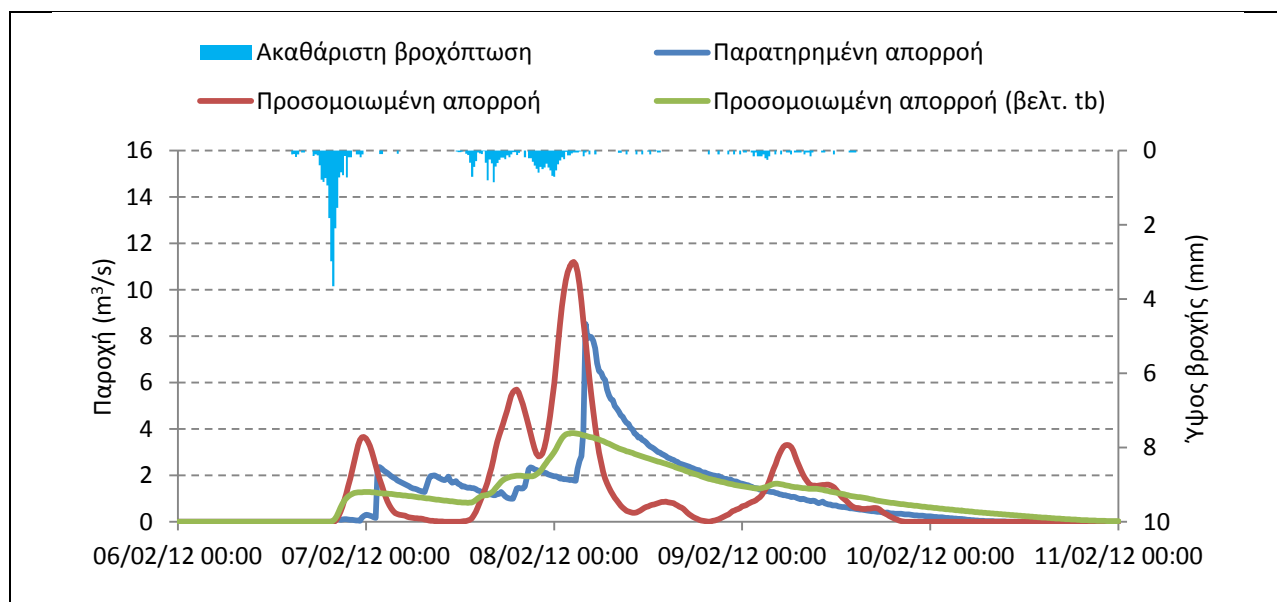
**Σχήμα 5.3** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στην Οινόη για το επεισόδιο στις 29/12/12.



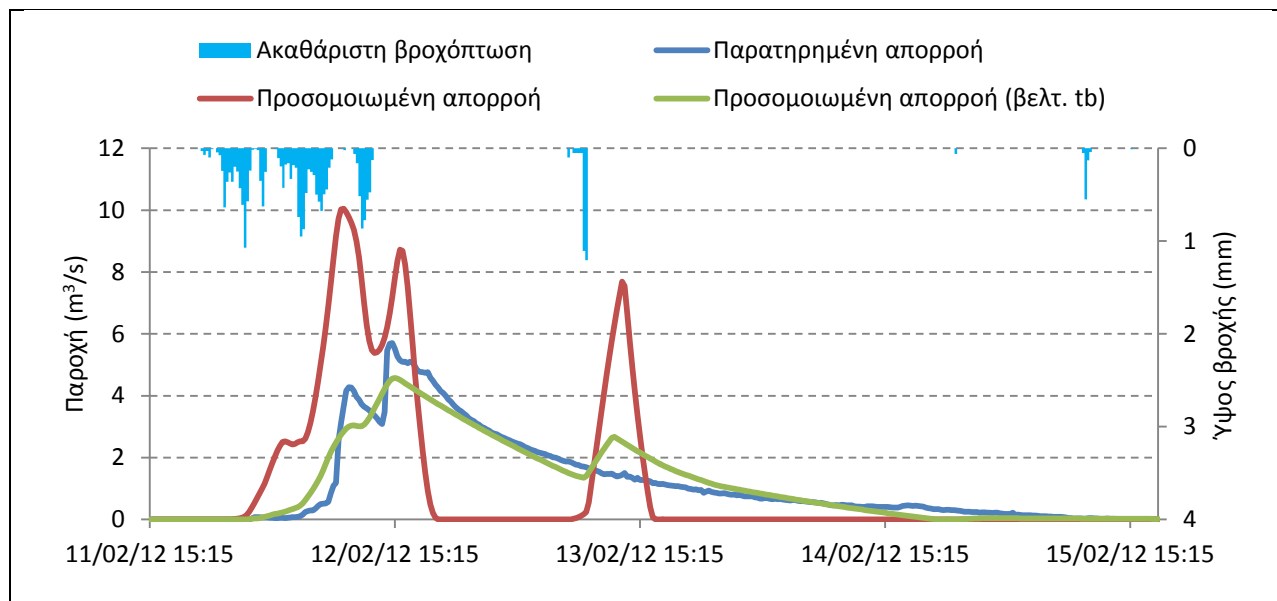
**Σχήμα 5.4** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στην Οινόη για το επεισόδιο στις 21/02/13.



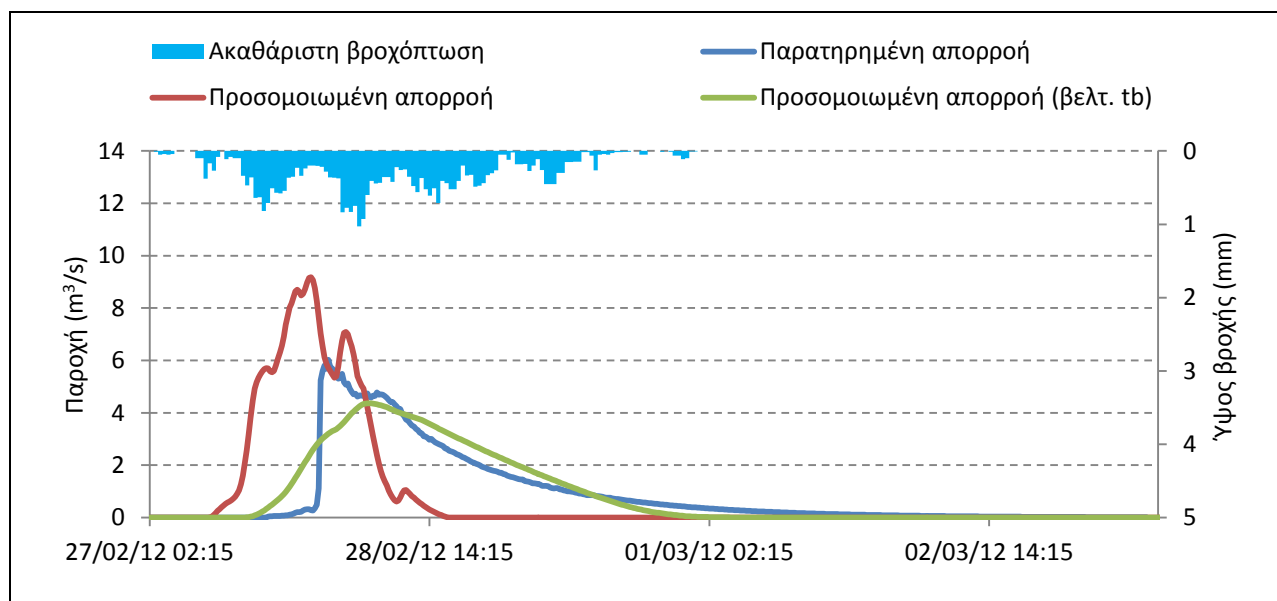
**Σχήμα 5.5** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στη Γύρα Στεφάνης για το επεισόδιο στις 21/12/11.



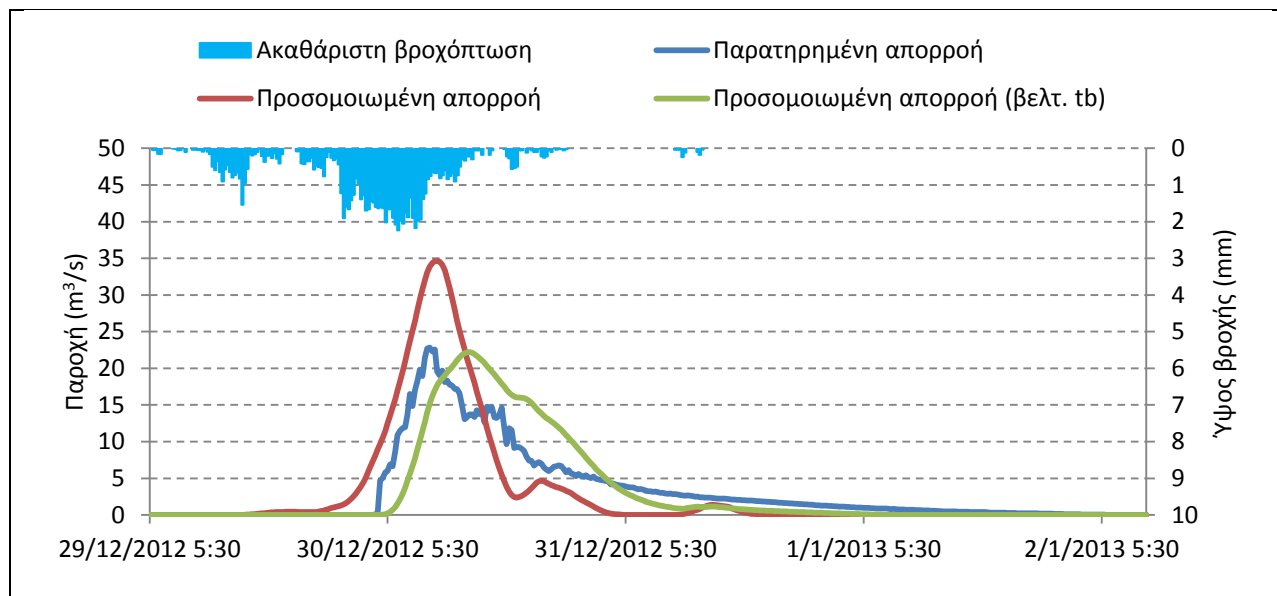
**Σχήμα 5.6** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στη Γύρα Στεφάνης για το επεισόδιο στις 06/02/12.



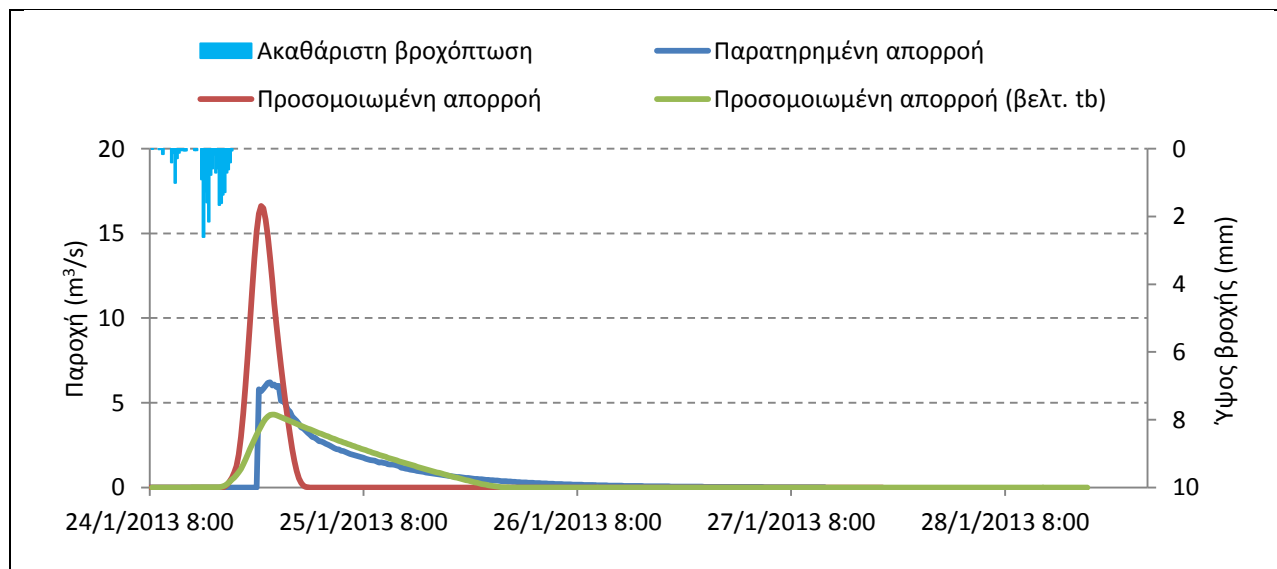
**Σχήμα 5.7** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στη Γύρα Στεφάνης για το επεισόδιο στις 11/02/12.



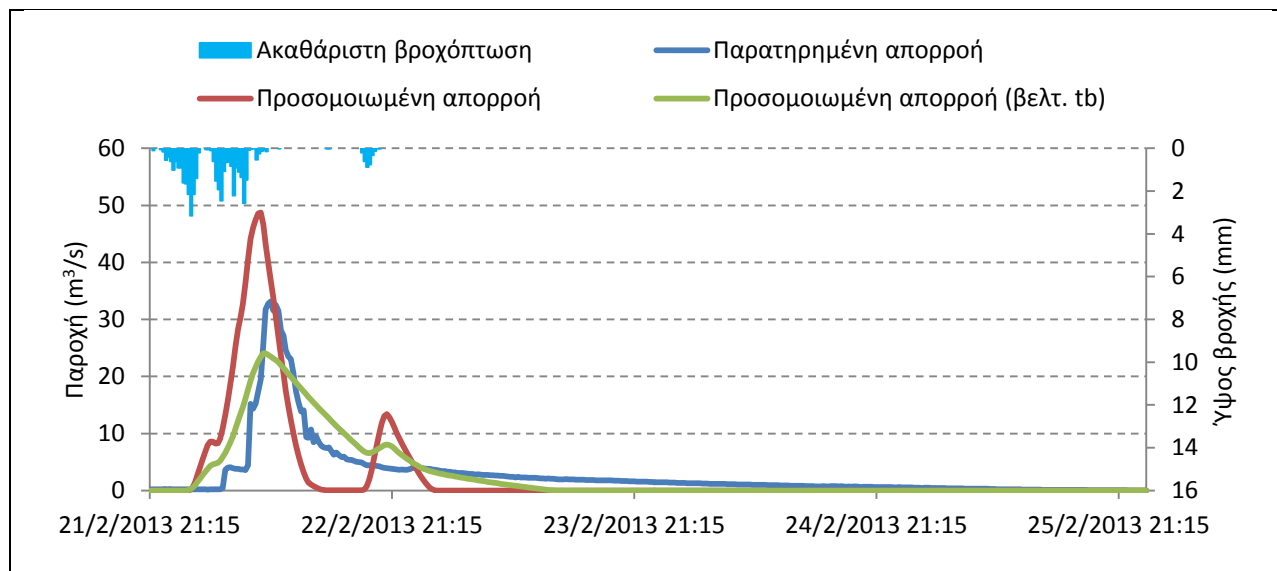
**Σχήμα 5.8** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στη Γύρα Στεφάνης για το επεισόδιο στις 27/02/12.



**Σχήμα 5.9** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στη Γύρα Στεφάνης για το επεισόδιο στις 29/12/12.



**Σχήμα 5.10** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στη Γύρα Στεφάνης για το επεισόδιο στις 24/01/13.



**Σχήμα 5.11** Τα αποτελέσματα απορροής και βροχής της μεθόδου SCS-CN (με βελτιστοποιημένες παραμέτρους) στη Γύρα Στεφάνης για το επεισόδιο στις 21/02/13.

## 5.2 Συμπεράσματα

Οι Efstratiadis et al (2013) σε πρόσφατη εργασία τους αναφέρουν πως η μέθοδος SCS/ΣΜΥ στηρίζεται στη θεώρηση της επικράτησης της πλημμυρικής ροής και ο διαχωρισμός βασικής και πλημμυρικής ροής που εφαρμόζεται βασίζεται στη θεωρία επίγειας ροής του Horton (1933). Σύμφωνα με αυτήν, η επίγεια ροή δημιουργείται από κορεσμό του επιφανειακού καλύμματος ενώ τα βαθύτερα στρώματα παραμένουν ακόρεστα. Παράλληλα, ένα ποσοστό της βροχής διηθείται στον υδροφόρα και δημιουργείται η βασική ροή. Επομένως στη θεωρία αυτή δε λαμβάνεται καθόλου υπόψη η ροή στην ακόρεστη ζώνη (υποδερμική ροή). Η αδυναμία αυτή της μεθόδου επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα.

Οι τιμές που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση των  $S$ ,  $a$ ,  $\beta$  δε μπορούσαν να προσομοιώσουν ικανοποιητικά τις παρατηρημένες απορροές, παρά τις μικρές τιμές σφάλματος σε ορισμένα επεισόδια. Συγκεκριμένα, η μέθοδος SCS αδυνατεί να περιγράψει τον καθοδικό κλάδο της

υποδερμικής ροής και κατά συνέπεια υπερεκτιμά τις παροχές αιχμής σε όλα τα επεισόδια ώστε να τηρήσει τη φυσική συνθήκη εξίσωσης όγκου. Αυτή η αδυναμία της μεθόδου οφείλεται μερικώς στην θεώρηση της τιμής της παραμέτρου  $k$  του παραμετρικού ΣΜΥ ίσης με τη μονάδα. Έτσι ο χρόνος βάσης προκύπτει αρκετά μικρότερος του χρόνου απόσβεσης της υποδερμικής ροής. Με τη βελτιστοποίηση όμως και της παραμέτρου  $k$ , όπως φαίνεται και στα διαγράμματα, η υποδερμική ροή προσεγγίζεται αρκετά ικανοποιητικά. Η μέση τιμή της παραμέτρου  $k$  είναι ίση με 4.757 για τη Γύρα Στεφάνης και με 3.314 για την Οινόη, αρκετά μεγαλύτερες της τυπικής τιμής.

Οι μέσες τιμές του  $CN$  που προκύπτουν μετά τη βελτιστοποίηση είναι ίσες με 53 για τη Γύρα Στεφάνης και με 25 για την Οινόη. Η Τουτζιάρη (2012) υπολόγισε τις τιμές του  $CN$  για την περιοχή μελέτης από τυποποιημένους πίνακες καταλήγοντας σε μέσες τιμές ίσες με 50 για τη Γύρα Στεφάνης, η οποία συμφωνεί με τη βελτιστοποιημένη, και 46 για την Οινόη. Η βελτιστοποιημένη τιμή του  $CN$  για την Οινόη είναι αρκετά μικρότερη της τυπικής πιθανότατα λόγω της αυξημένης διηθητικότητας των εδαφών της, η οποία ευθύνεται και για τη μεγάλη διαφορά μεταξύ των παροχών της Οινόης και της Στεφάνης. Η διαβάθμιση της διηθητικότητας δεν απεικονίζεται στο χάρτη της υδατοπερατότητας της περιοχής μελέτης, στον οποίο υπάρχουν μόνο τρεις ομάδες υδατοπερατότητας (μικρή, μεσαία και μεγάλη).

Οι βελτιστοποιημένες τιμές της παραμέτρου  $\alpha$  είναι αρκετά μικρές με μέση τιμή για την Οινόη ίση με 0.063 και με 0.050 για τη Στεφάνη έναντι της θεωρητικής τιμής 0.2. Σε ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Baltas et al (2007) μελετώντας 18 επεισόδια στην πειραματική λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας και καταλήγοντας σε τιμές του  $\alpha$  μικρότερες του 0.04. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν και με τα αποτελέσματα της ανάλυσης της Μαθιουδάκη (2012) στην πειραματική λεκάνη όπου μετά από βελτιστοποίηση των παραμέτρων οι τιμές του  $\alpha$  προέκυψαν μικρότερες του 0.10.

Οι τιμές του  $\beta$  που προέκυψαν (περίπου ίσες με 0.33) ήταν μικρότερες της προτεινόμενης από τη βιβλιογραφία (0.6). Η παράμετρος  $\beta$  ουσιαστικά μεταβάλλει τη μορφή του υδρογραφήματος. Δηλαδή, μικρότερες τιμές  $\beta$  δίνουν πιο απότομο ανοδικό κλάδο. Τα περισσότερα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα δείχνουν πως η παροχή αυξάνεται



απότομα και οδηγείται στην αιχμή της σε σύντομο χρονικό διάστημα. Γι' αυτό το λόγο μικρότερες των θεωρητικών ( $=0,6$ ) τιμές  $\beta$  είναι καταλληλότερες.

Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη ευαισθησία του συστήματος στη μεταβολή των παραμέτρων. Συγκεκριμένα, μια μεταβολή της βελτιστοποιημένης παραμέτρου  $S$  π.χ. κατά 10% οδηγεί σε αύξηση κατά 94% της απόκλισης από τη φυσική συνθήκη.

Στη μέθοδο SCS οποιαδήποτε ποσότητα βροχής πέσει μετά από ένα συγκεκριμένο ύψος βροχής (έλλειμμα) κάποιο ποσοστό αυτής θα θεωρηθεί ως ενεργός βροχή και συνεπώς θα προκαλέσει άμεση απορροή. Αυτή η υπόθεση δεν είναι ρεαλιστική καθώς δε λαμβάνει υπόψη την εκφόρτιση του υπόγειου υδροφορέα και επομένως την ικανότητά του να απορροφήσει νερό. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται και στα παρακάτω επεισόδια στα οποία το επεισόδιο βροχής που συμβαίνει κατά την εκφόρτιση προκαλεί ραγδαία αύξηση της απορροής ενώ στην πραγματικότητα η βροχή ανασηκώνει αμυδρά το προφίλ της απορροής. Αυξάνοντας όμως την παράμετρο  $k$  διαπιστώνεται πως το φαινόμενο αυτό εξομαλύνεται (π.χ. Σχήμα 5.7).

Στην Ελλάδα το 40% των λεκανών της έχει ασβεστολιθική σύσταση και χαρακτηρίζεται από μεγάλη διηθητικότητα. Στις λεκάνες λοιπόν που δεν υπάρχουν μετρήσεις οι χρήσεις των τυπικών τιμών των παραμέτρων των  $S$ ,  $a$ ,  $\beta$  και  $k$  θα οδηγήσει σε σοβαρές υπερεκτιμήσεις της παροχής αιχμής και κατά συνέπεια σε αυξημένο κόστος. Μια ρεαλιστικότερη εκτίμηση της κατάστασης μπορεί να δοθεί με τη χρήση των μέσων τιμών των παραμέτρων που φαίνονται στον Πίνακα 5.1β και 5.2β. Είναι απαραίτητη βέβαια η ανάλυση και άλλων επεισοδίων, όταν αυτά είναι διαθέσιμα, κυρίως για την υπολεκάνη της Οινόης, ώστε τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο αξιόπιστα.

## **Κεφάλαιο 6 : Ανάπτυξη και προσαρμογή εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου λεκάνης Σαρανταπόταμου**

### **6.1 Εισαγωγή**

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια δημιουργίας ενός υδρολογικού μοντέλου για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου που να περιγράφει ικανοποιητικά την απορροή για δεδομένη βροχή. Από τις απορροές των επιλεγμένων επεισοδίων διαπιστώνεται πως κυριαρχεί η υποδερμική ροή και η βασικά απορροή είναι μηδενική. Επίσης η απορροή ανάντη της Οινόης είναι υποπολλαπλάσια αυτής στη Γύρα Στεφάνης. Επομένως αναζητήθηκε ένα μοντέλο που να προσομοιώνει την υποδερμική ροή, να περιγράφει την απορροή σε δύο θέσεις ταυτόχρονα και να παραμετροποιεί τη μεγάλη διαφορά στις παροχές. Για την προσομοίωση της υποδερμικής ροής και της αργής εκφόρτισης χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τύπου ταμιευτήρα. Η μεγάλη διαφορά στις απορροές παραμετροποιήθηκε με τη χρήση Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια.

Αρχικά το μοντέλο βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας τα επιλεγμένα επεισόδια βροχών έτσι ώστε η προσομοιωμένη απορροή να περιγράφει ικανοποιητικά την παρατηρημένη. Με αυτό τον τρόπο καθορίστηκαν οι παράμετροι του μοντέλου για τη συγκεκριμένη λεκάνη. Οι παράμετροι ήταν κοινές για όλα τα επεισόδια και κάθε επεισόδιο είχε τις δικές του αρχικές συνθήκες.

### **6.2 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης (Hydrologic Response Units- HRU)**

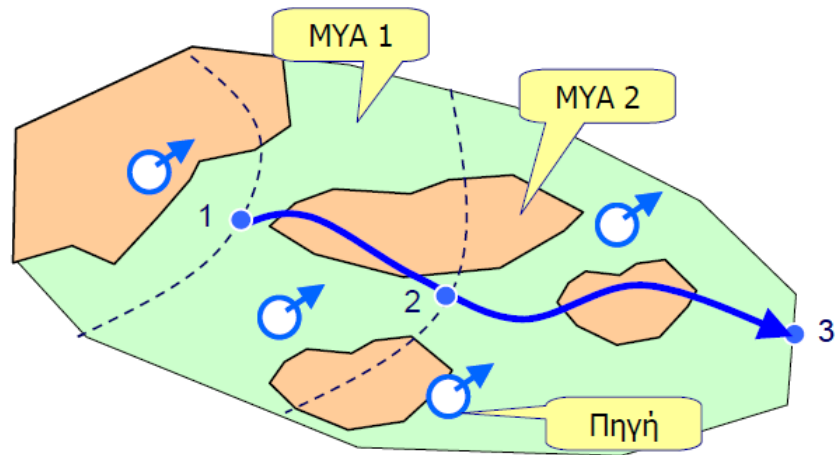
Μετά από σύγκριση των παρατηρημένων απορροών για τα κοινά επεισόδια διαπιστώθηκε πως η απορροή της ανάντη λεκάνης διέφερε σημαντικά αυτής της συνολικής. Η διαφορά αυτή θεωρήθηκε πως οφειλόταν σε κάποια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των δύο λεκανών.

Αρχικά μελετήθηκε η γεωλογία της περιοχής η οποία όμως ουσιαστικά ήταν ομοιόμορφη στο σύνολο της λεκάνης, σύμφωνα με τους χάρτες. Όπως διαπιστώθηκε μια πιθανή διαφορά είναι το ποσοστό φυτοκάλυψης. Συγκεκριμένα στην ανάντη λεκάνη (Οινόη) η έκταση που καταλαμβάνουν τα δάση κωνοφόρων και η σκληροφυλλική βλάστηση είναι περίπου 73%, ενώ στην ενδιάμεση λεκάνη το αντίστοιχο ποσοστό είναι 50%. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι εκτάσεις της κωνοφόρας και της σκληροφυλλικής βλάστησης.

**Πίνακας 6.1** Οι εκτάσεις των κωνοφόρων/σκληροφυλλικής βλάστησης και οι συνολικές εκτάσεις των υπολεκανών σε km<sup>2</sup>.

	Εκτάσεις (km <sup>2</sup> )	
	Ανάτη (Οινόη)	Ενδιάμεση λεκάνη
Δάσος κωνοφόρων & Σκληροφυλλική βλάστηση	37.3	46.8
Υπόλοιπο	13.9	46.6
Συνολικά	51.2	93.4

Η διαφορά αυτή εκφράστηκε κατά τη δημιουργία του μοντέλου με τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ). Η μονάδα υδρολογικής απόκρισης νοείται ως μια χωρική ενότητα της λεκάνης με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (Flügel, 1995). Επομένως, στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης η πρώτη ΜΥΑ είναι τα δάση κωνοφόρων και η σκληροφυλλική βλάστηση και η δεύτερη η υπόλοιπη έκταση της υπολεκάνης. Σε κάθε ΜΥΑ ο μηχανισμός γένεσης της απορροής είναι ενιαίος και επομένως η κάθε ΜΥΑ έχει δικές της παραμέτρους. Δηλαδή η παραμετροποίηση των υδρολογικών διεργασιών γίνεται με βάση τις ΜΥΑ και όχι με βάση τις υπολεκάνες, όπως συμβαίνει στα ημικατανεμημένα μοντέλα (Ευστρατιάδης κ.α., 2006). Η οπτικοποίηση των ΜΥΑ γίνεται με χρήση του λογισμικού ArcGIS.



**Σχήμα 6.1** Παράδειγμα σχηματοποίησης υδροσυστήματος τριών υπολεκανών και δύο ΜΥΑ.  
(Πηγή: Ευστρατιάδης κ.α., 2006)

### 6.3 Περιγραφή του υδρολογικού μοντέλου

Στα παρακάτω υποκεφάλαια γίνεται η περιγραφή του υδρολογικού μοντέλου που προσομοιώνει ικανοποιητικά την υπό μελέτη λεκάνη, καθώς και η περιγραφή παραλλαγών αυτού που δοκιμάστηκαν αλλά απορρίφθηκαν λόγω κυρίως της ποιότητας των αποτελεσμάτων τους.

#### 6.3.1 Υδρολογικό μοντέλο υδραυλικών αναλόγων

Η υπό μελέτη λεκάνη αποτελείται από δύο υπολεκάνες, τη λεκάνη ανάντη της Οινόης και την ενδιάμεση λεκάνη με έξοδο τη Γύρα Στεφάνης. Κάθε ΜΥΑ στο μοντέλο προσομοιώνεται ως ένας ταμιευτήρας που αδειάζει και ανατροφοδοτείται με τη βροχή. Το υδρολογικό μοντέλο έχει τρεις παραμέτρους για κάθε ΜΥΑ και μια αρχική συνθήκη για κάθε ΜΥΑ της κάθε υπολεκάνης. Οι παράμετροι για την πρώτη ΜΥΑ είναι η χωρητικότητα της υπολεκάνης  $K1$  εκφρασμένη σε  $mm$ , ο συντελεστής στείρευσης  $\lambda 1$  που εκφράζει το ποσοστό του

αποθηκευμένου όγκου που εκφορτίζεται ως υποδερμική ροή και ο συντελεστής στείρευσης  $\mu_1$  που εκφράζει το ποσοστό του αποθηκευμένου όγκου που διηθείται στον υπόγειο υδροφορέα. Για τη δεύτερη ΜΥΑ οι παράμετροι ήταν αντίστοιχα οι  $K_2$ ,  $\lambda_2$  και  $\mu_2$ . Οι παράμετροι είναι κοινές για τις δύο υπολεκάνες. Για κάθε ΜΥΑ της κάθε υπολεκάνης ορίζεται μια αρχική στάθμη  $S_0$ . Συγκεκριμένα για την πρώτη ΜΥΑ για την ανάντη και την ενδιάμεση υπολεκάνη αντίστοιχα η αρχική στάθμη ορίζεται ως  $S_{011}$  και  $S_{021}$ , ενώ για τη δεύτερη ΜΥΑ οι αντίστοιχες στάθμες είναι οι  $S_{012}$  και  $S_{022}$ . Κατά την εφαρμογή του μοντέλου οι μονάδες των παροχών μετατράπηκαν από  $m^3/s$  σε  $mm$ .

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πρώτη ΜΥΑ και την ανάντη υπολεκάνη ήταν η εξής:

Η πρώτη τιμή της βροχής προστέθηκε στην αρχική στάθμη  $S_0$  για να προκύψει η καινούρια στάθμη  $S_1$  [ $mm$ ], δηλαδή  $S_1(1) = S_{011} + P(1)$ .

Η ποσότητα του νερού  $Q_S$  που ρέει κατάντη ορίζεται ως το μέγιστο του μηδενός και του γινομένου του ποσοστού  $\lambda_1$  με τη διαφορά της στάθμης στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα από την χωρητικότητα, δηλαδή  $Q_S(i) = (S_1(i) - K_1) \times \lambda_1 \geq 0$ .

Η νέα στάθμη  $S_1'$  προκύπτει από την αφαίρεση του  $Q_S$  από τη στάθμη  $S_1$ , δηλαδή  $S_1'(i) = S_1(i) - Q_S(i)$ .

Το νερό που διηθείται στον υπόγειο υδροφορέα ορίζεται ως το γινόμενο της νέας στάθμης  $S_1'$  με το ποσοστό  $\mu_1$  του νερού που διηθείται στον υπόγειο υδροφορέα, δηλαδή  $PERC(i) = S_1'(i) \times \mu_1$ .

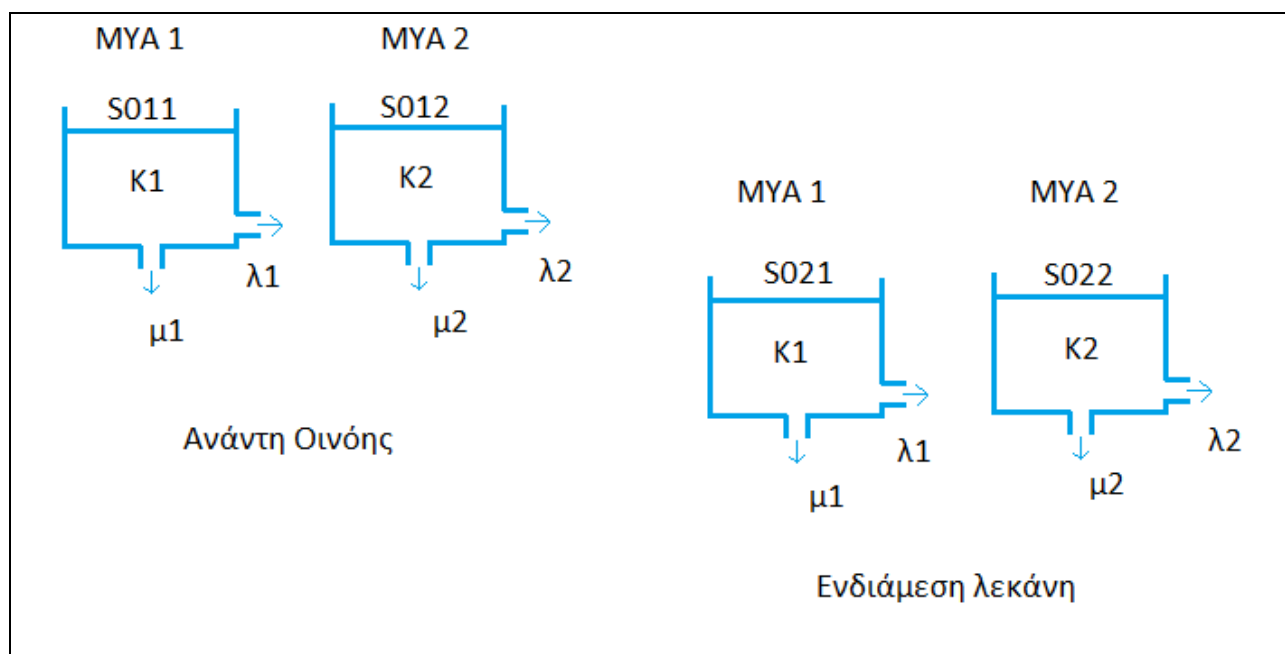
Η τελική στάθμη  $S_1''$  προκύπτει από την αφαίρεση του  $PERC$  από τη νέα στάθμη, δηλαδή  $S_1''(i) = PERC(i) - S_1'(i)$ .

Η διαδικασία συνεχίζεται κατά γραμμή, με επόμενη τιμή στάθμης πλέον το άθροισμα της τελικής στάθμης και της επόμενης τιμής της βροχής, δηλαδή  $S_1'(i) = P(i) + S_1''(i - 1)$ .

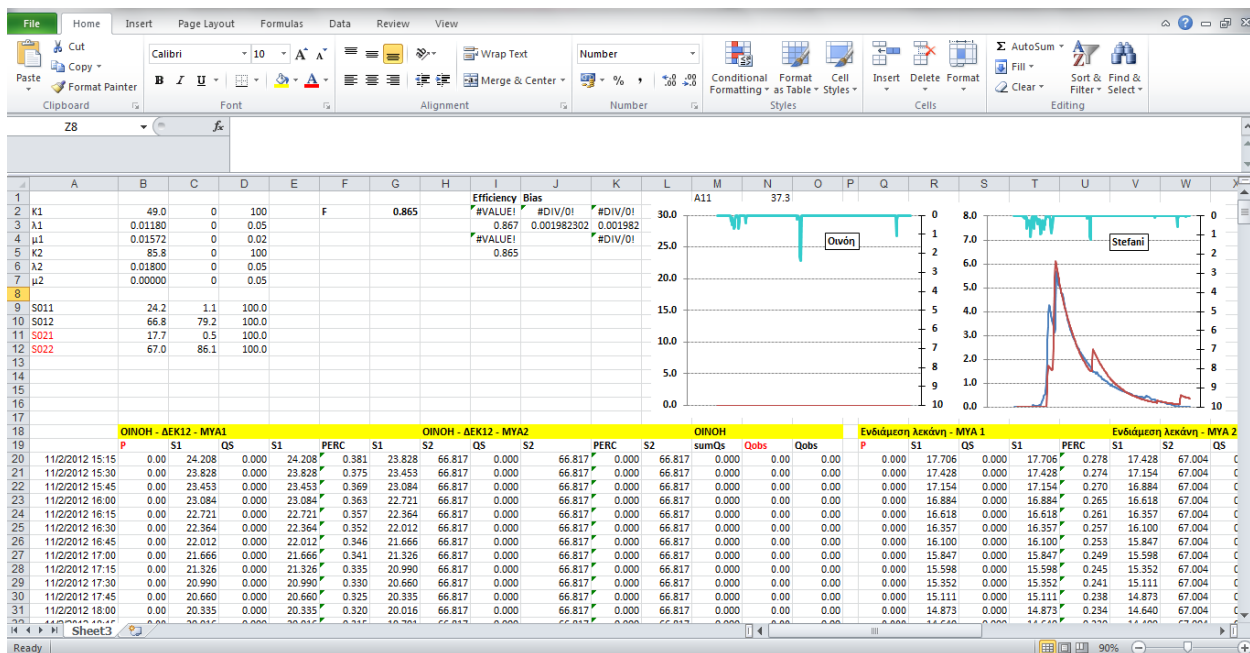
Στη συνέχεια η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται για τη δεύτερη ΜΥΑ της ανάντη υπολεκάνης. Επομένως στην έξοδο της ανάντη υπολεκάνης στην Οινόη η απορροή  $sumQ_S$  προκύπτει ως άθροισμα των  $Q_S$  των δύο ΜΥΑ.

Όμοια διαδικασία ακολουθείται και για την ενδιάμεση λεκάνη και βρίσκεται η απορροή  $sumQ_S$  στην έξοδο.

Για τον υπολογισμό της προσομοιωμένης απορροής στην έξοδο της Γύρας Στεφάνης οι απορροές των δύο υπολεκανών προστίθενται με την κατάλληλη χρονική υστέρηση η καθυστέρηση. Η χρονική υστέρηση αυτή επιλέχθηκε έτσι ώστε οι προσομοιωμένες απορροές να ταιριάζουν χρονικά με τις παρατηρημένες.



**Σχήμα 6.2** Γραφική απεικόνιση του υδρολογικού μοντέλου ταμειυτήρων.



Σχήμα 6.3 Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου στο Excel.

### 6.3.2 Παραλλαγές του μοντέλου

Μια παραλλαγή του υδρολογικού μοντέλου που δοκιμάστηκε ήταν η θεώρηση του υπόγειου υδροφορέα ως ταμειυτήρα με παραμέτρους  $K3$ ,  $\lambda3$  και  $\mu3$  και αρχική συνθήκη  $S_{G0}$ . Έτσι η παροχή στην έξοδο προέκυπτε ως άθροισμα των παροχών των δύο υπολεκανών και της ροής που προκύπτει από τον υπόγειο υδροφορέα. Με το μοντέλο αυτό ο αριθμός των παραμέτρων και των αρχικών συνθηκών αυξήθηκε αρκετά και η ποιότητα των αποτελεσμάτων δεν παρουσίασε κάποια βελτίωση. Σε ορισμένα επεισόδια μάλιστα ήταν κατώτερη αυτής του επιλεγμένου μοντέλου. Στη συνέχεια, για τη μείωση των αρχικών συνθηκών, δοκιμάστηκαν κοινές αρχικές συνθήκες  $S_0$  για τις δύο υπολεκάνες, όμως τα αποτελέσματα δεν ήταν τα επιθυμητά. Επομένως επιλέχθηκε το υδρολογικό μοντέλο που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 6.3.1.

## 6.4 Εκτίμηση παραμέτρων- Βελτιστοποίηση

Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων και των αρχικών συνθηκών έγινε με δύο τρόπους : χειροκίνητα, έτσι ώστε το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα να περιγράφει ικανοποιητικά το παρατηρημένο, και με τη μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης σφάλματος κάνοντας χρήση του εργαλείου Solver του Excel. Σε όλες τις παραμέτρους τέθηκαν άνω και κάτω όρια. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης των παραμέτρων έγινε ταυτόχρονα για δύο επεισόδια πλημμύρας, για το επεισόδιο από τις 29/12/12 05:30 έως τις 02/01/13 10:00 και για το επεισόδιο από τις 13/02/13 05:30 έως τις 26/02/13 00:00. Στη συνέχεια οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιήθηκαν και για τα υπόλοιπα επεισόδια μεταβάλλοντας απλώς τις αρχικές συνθήκες. Δόθηκε προτεραιότητα στην καλύτερη περιγραφή των παρατηρημένων απορροών στη Γύρα Στεφάνης καθώς οι αντίστοιχες παρατηρημένες απορροές που καταγράφηκαν στην Οινόη ήταν αρκετά μικρές ή και μηδενικές, παρά τις υψηλές τιμές καταγεγραμμένης βροχόπτωσης.

### 6.4.1 Συνάρτηση σφάλματος

Η συνάρτηση σφάλματος (μεγιστοποίησης) που χρησιμοποιήθηκε ορίζεται ως εξής

$$f = (eff_{Dec12-Oiv} + eff_{Feb13-Oiv} - |bias|_{Dec12-Oiv} - |bias|_{Feb13-Oiv})/\lambda + (eff_{Dec12-Στεφ} + eff_{Feb13-Στεφ} - |bias|_{Dec12-Στεφ} - |bias|_{Feb13-Στεφ})$$

όπου

$eff$  το μέγεθος αποτελεσματικότητας (ή συντελεστής Nash & Sutcliffe). Συγκεκριμένα

$efficiency = 1 - \sum_1^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2 / \sum_1^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2$ . Το  $Q_t^{obs}$  και το  $Q_t^{sim}$  εκφράζουν την παρατηρημένη και την προσομοιωμένη απορροή αντίστοιχα τη χρονική στιγμή  $t$  και το  $\bar{Q}^{obs}$  εκφράζει τη μέση τιμή της παρατηρημένης απορροής. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τιμές στο εύρος  $[-\infty, 1]$ .



Η μεροληψία ορίζεται ως  $Bias = |\bar{Q}^{obs} - \bar{Q}^{sim}| / \bar{Q}^{obs}$ , όπου  $\bar{Q}^{sim}$  η μέση τιμή της προσομοιωμένης απορροής.

Οι δείκτες στην συνάρτηση σφάλματος δηλώνουν την αντίστοιχη λεκάνη των μετρήσεων (Οινόη, Γύρα Στεφάνης) και το επεισόδιο στο οποίο αντιστοιχούν (Δεκέμβριος 2012, Φεβρουάριος 2013).

$\lambda$  συντελεστής βάρους, εδώ ίσος με 5, έτσι ώστε να δίνεται μεγαλύτερο βάρος στην καλύτερη περιγραφή της απορροής στη Γύρα Στεφάνης.

Εκτός των επεισοδίων των 29/12/12 και 13/02/13, οι απορροές των υπολοίπων επεισοδίων στην Οινόη ήταν μηδενικές και επομένως δε λήφθηκαν υπόψη στον υπολογισμό της συνάρτησης σφάλματος.

#### **6.4.2 Αποτελέσματα**

Από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης και των χειροκίνητων δοκιμών προέκυψαν οι εξής τιμές, σταθερές για τις υπολεκάνες :

**Πίνακας 6.2** Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου όπως προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση.

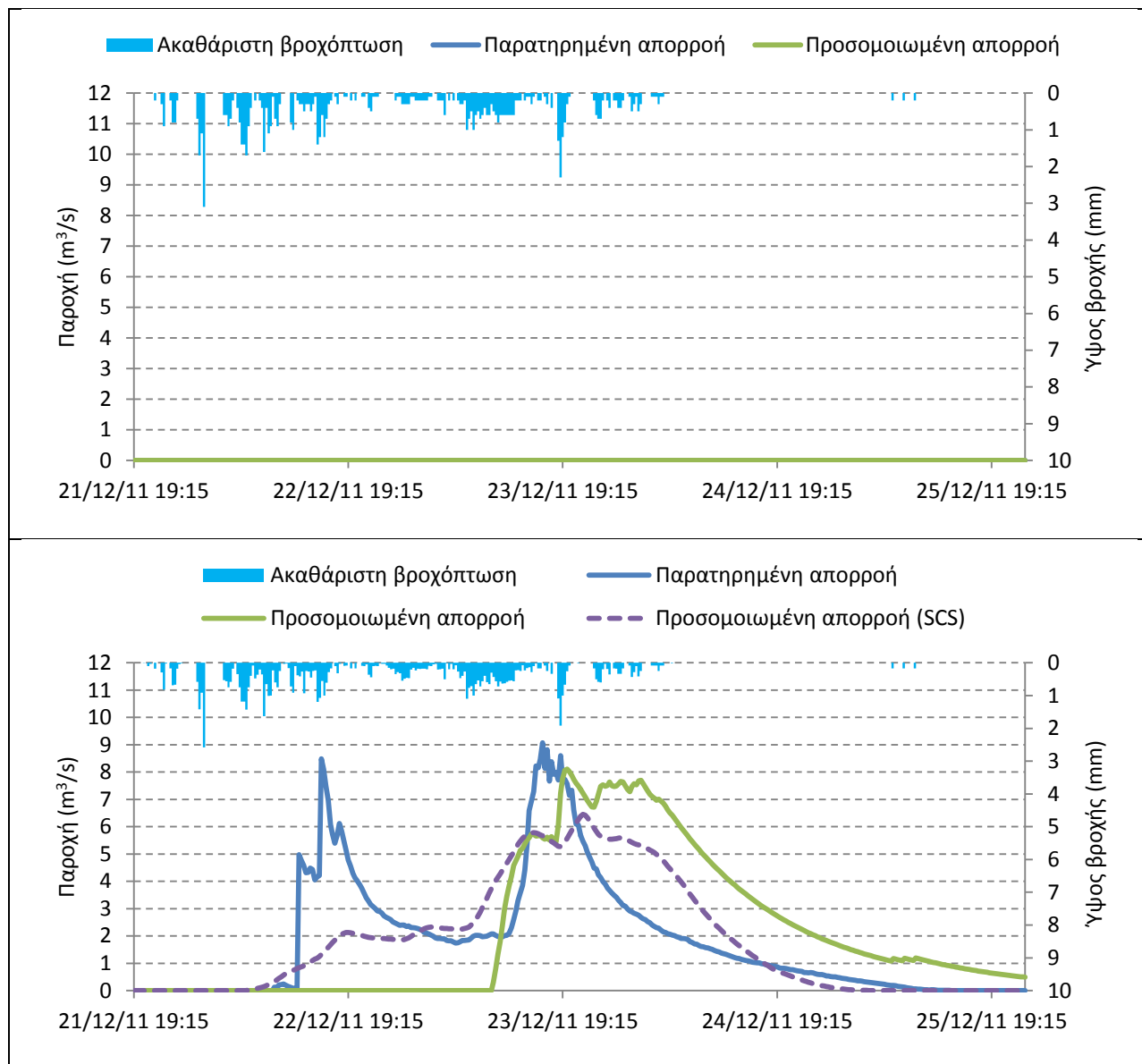
K1 (mm)	49
$\lambda_1$	0.0118
$\mu_1$	0.0157
K2 (mm)	85.8
$\lambda_2$	0.018
$\mu_2$	0.000

Επίσης στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται και οι τιμές των αρχικών συνθηκών για κάθε επεισόδιο.

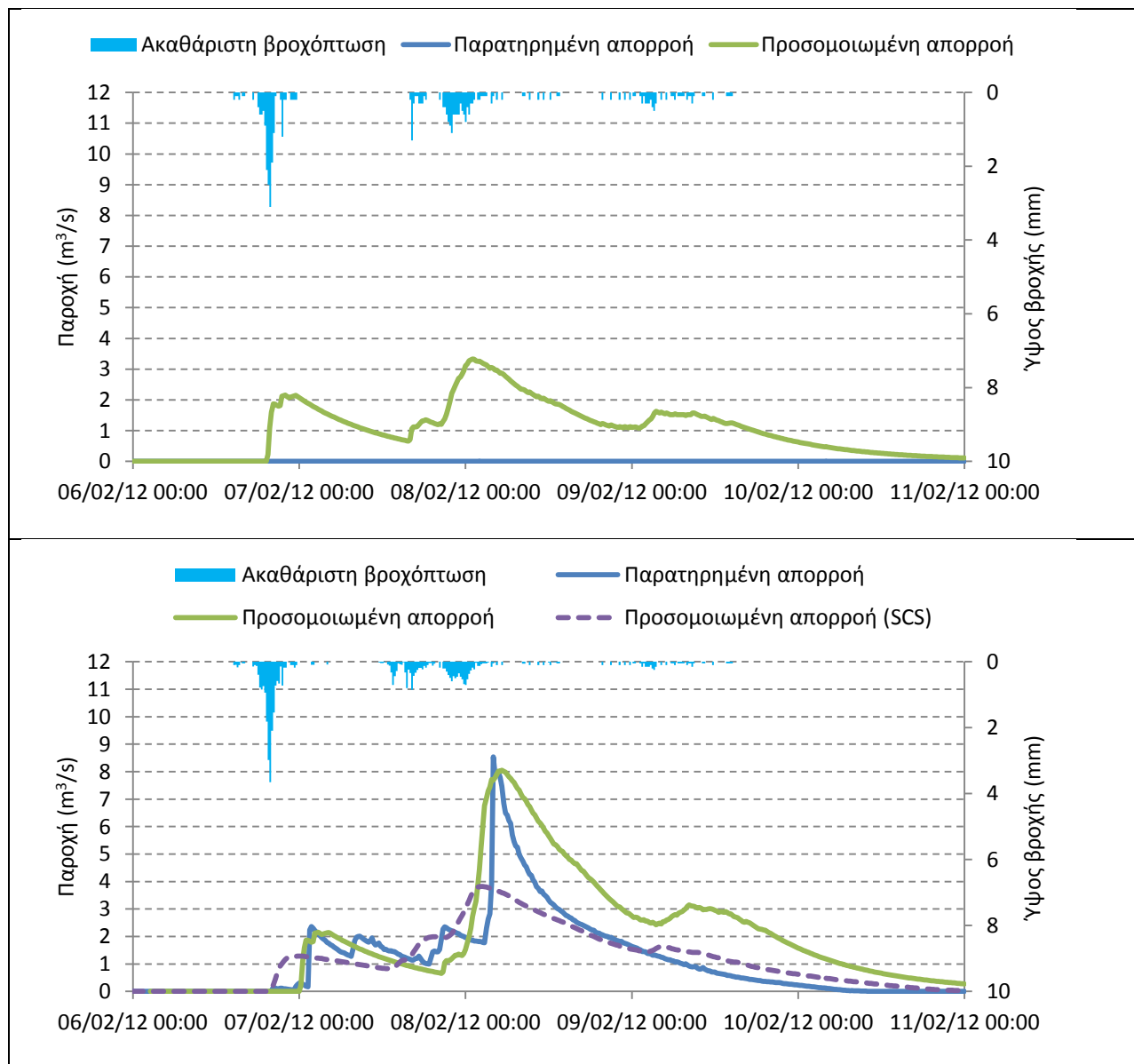
**Πίνακας 6.3** Οι τιμές των αρχικών στάθμεων του μοντέλου όπως προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση.

	21/12/11	06/02/12	11/02/12	27/02/12	29/12/12	24/01/13	13/02/13
S011 (mm)	10.2	20	24.2	27.1	2	20	10
S012 (mm)	59.4	78	66.8	10	2	76	73.4
S021 (mm)	15.7	20	17.7	41.7	48	20	46
S022 (mm)	7.4	53.8	67	70	18	49	27

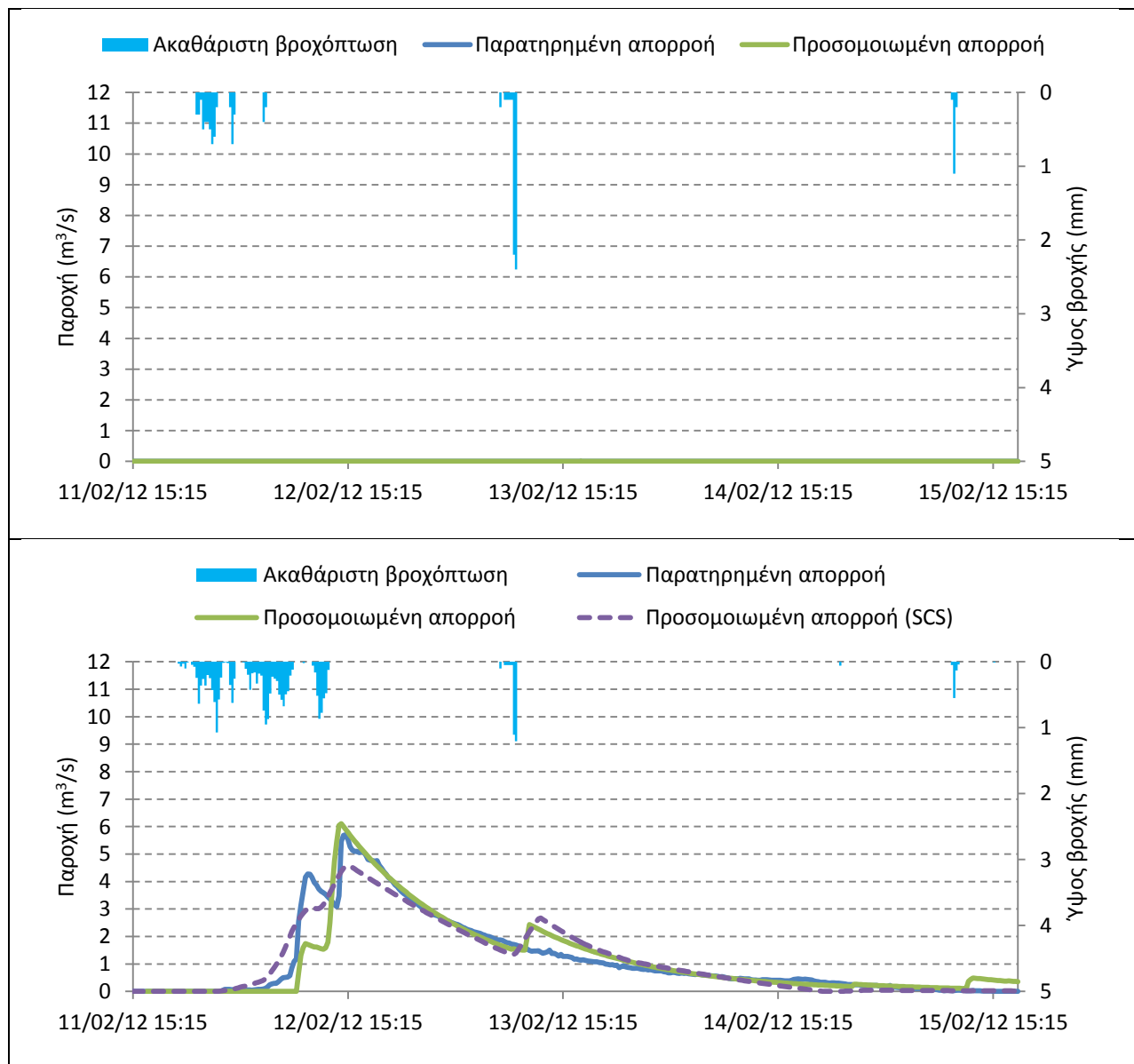
Ακολουθούν τα πλημμυρογραφήματα (προσομοιωμένα και παρατηρημένα) στην έξοδο της Οινόης και της Γύρας Στεφάνης για κάθε επεισόδιο καθώς και η αντίστοιχη βροχή που τα προκαλεί.



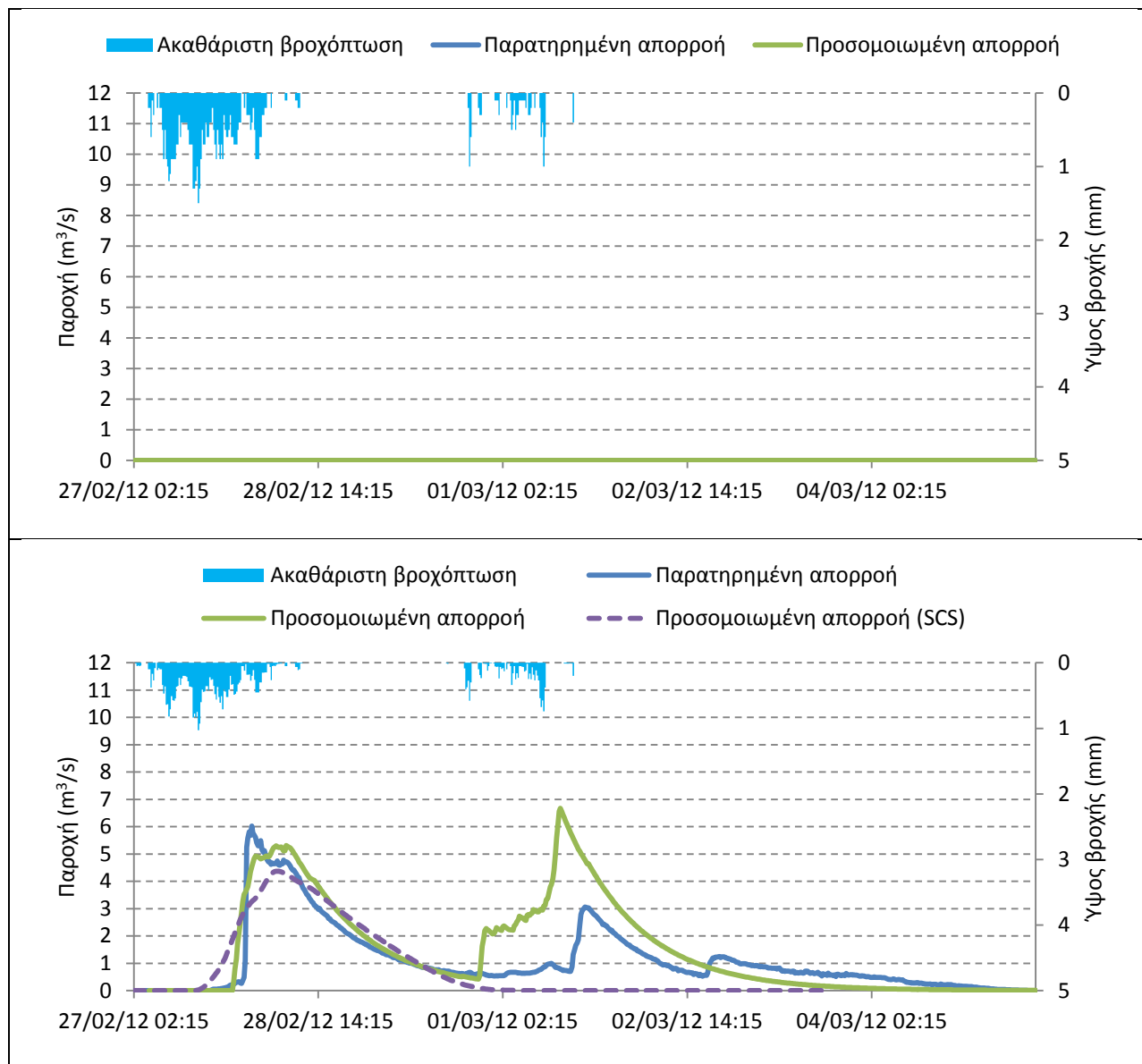
**Σχήμα 6.3** Η παρατηρημένη και η προσομοιωμένη απορροή στην Οινόη (πάνω) και στη Γύρα Στεφάνης (κάτω) και οι αντίστοιχες βροχοπτώσεις για το επεισόδιο στις 21/12/11.



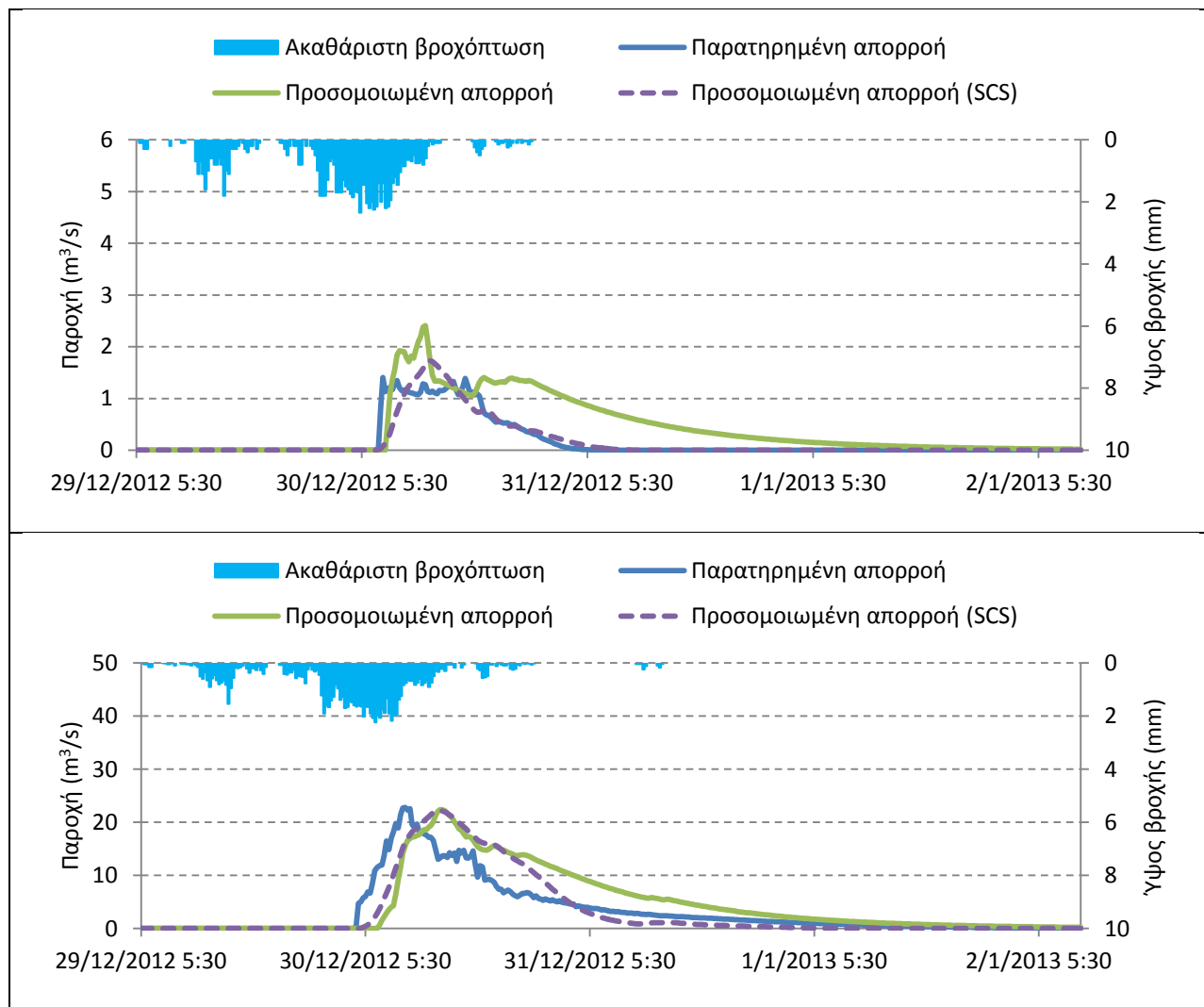
**Σχήμα 6.4** Η παρατηρημένη και η προσομοιωμένη απορροή στην Οινόη (πάνω) και στη Γύρα Στεφάνης (κάτω) και οι αντίστοιχες βροχοπτώσεις για το επεισόδιο στις 06/02/12.



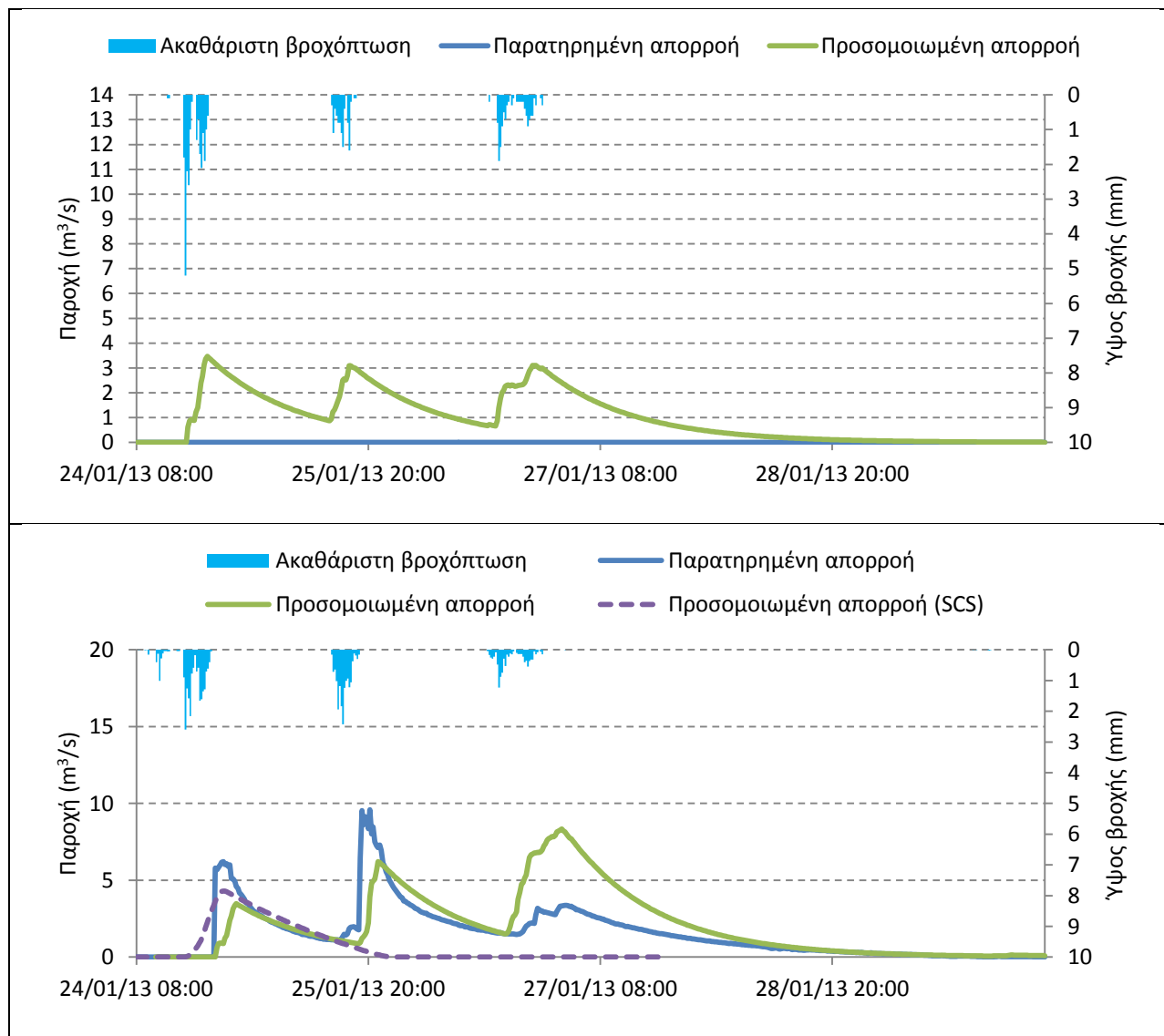
**Σχήμα 6.5** Η παρατηρημένη και η προσομοιωμένη απορροή στην Οινόη (πάνω) και στη Γύρα Στεφάνης (κάτω) και οι αντίστοιχες βροχοπτώσεις για το επεισόδιο στις 11/02/12.



**Σχήμα 6.6** Η παρατηρημένη και η προσομοιωμένη απορροή στην Οινόη (πάνω) και στη Γύρα Στεφάνης (κάτω) και οι αντίστοιχες βροχοπτώσεις για το επεισόδιο στις 27/02/12.

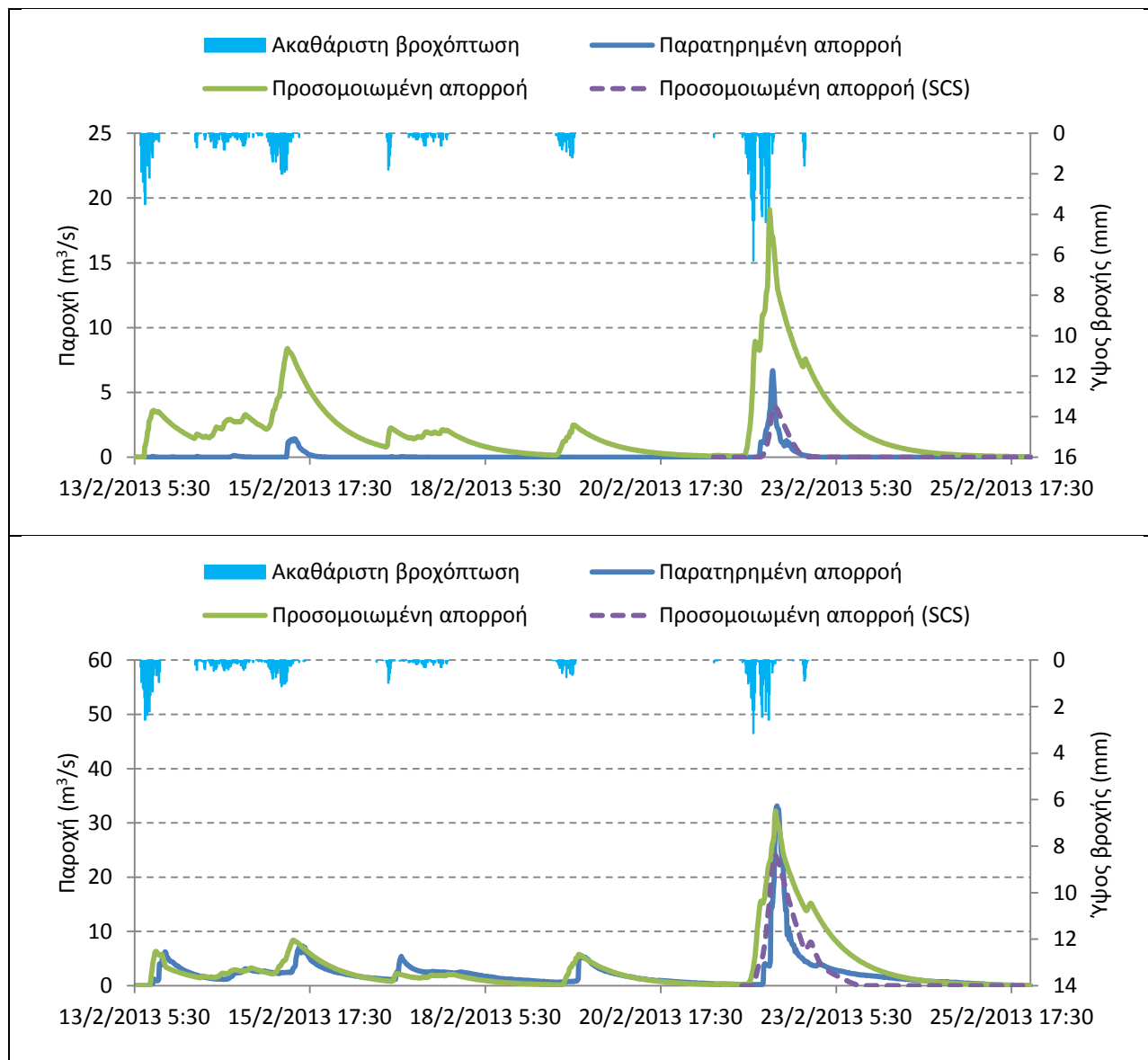


**Σχήμα 6.7** Η παρατηρημένη και η προσομοιωμένη απορροή στην Οινόη (πάνω) και στη Γύρα Στεφάνης (κάτω) και οι αντίστοιχες βροχοπτώσεις για το κοινό επεισόδιο στις 29/12/12.



**Σχήμα 6.8** Η παρατηρημένη και η προσομοιωμένη απορροή στην Οινόη (πάνω) και στη Γύρα Στεφάνης (κάτω) και οι αντίστοιχες βροχοπτώσεις για επεισόδιο στις 24/01/13.





**Σχήμα 6.9** Η παρατηρημένη και η προσομοιωμένη απορροή στην Οινόη (πάνω) και στη Γύρα Στεφάνης (κάτω) και οι αντίστοιχες βροχοπτώσεις για το κοινό επεισόδιο στις 13/02/13.

### 6.4.3 Συμπεράσματα

Η υδρολογική προσομοίωση με το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζει σε αρκετά επεισόδια παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της προσομοίωσης με τη μέθοδο SCS. Στα περισσότερα επεισόδια (21/12/11, 6/2/12, 11/2/12, 27/2/12 και 13/2/13) όμως, η παροχή αιχμής προσεγγίζεται ικανοποιητικότερα με τη χρήση του εννοιολογικού μοντέλου.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιωμένων απορροών διαπιστώνεται πως το μοντέλο άλλοτε κατορθώνει και άλλοτε όχι να παραστήσει ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της λεκάνης που αφορά στη μηδενική παραγωγή απορροής στην Οινόη. Αυτή η ιδιαιτερότητα πιθανότατα οφείλεται σε διαφορά της διηθητικότητας μεταξύ των δύο υπολεκανών, η οποία δεν απεικονίζεται σε κάποιο χάρτη και κατά συνέπεια δεν έχει παραμετροποιηθεί. Ως ΜΥΑ έχει επιλεχθεί η κάλυψη γης, η οποία ενδεχομένως να μην είναι ο καθοριστικός παράγοντας.

Αφού γίνει η βαθμονόμηση του μοντέλου και βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων για την περιοχή ενδιαφέροντος, η διαδικασία εξαγωγής των πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού γίνεται εύκολα (π.χ. σε φύλλο Excel). Αντίθετα στη μέθοδο SCS η διαδικασία αυτή είναι πιο επίπονη σε περιβάλλον Excel και ο προγραμματισμός της (π.χ. σε περιβάλλον Matlab) κρίνεται απαραίτητος.

Η θεώρηση ενός επεισοδίου βροχής-απορροής ως ανεξάρτητο του προηγούμενου είναι εσφαλμένη καθώς η απορροή μια δεδομένη χρονική στιγμή εξαρτάται άμεσα από την ικανότητα διήθησης του νερού στον υπόγειο υδροφορέα. Εάν έχει μεσολαβήσει επεισόδιο βροχής προγενέστερα η απορροή θα είναι αυξημένη. Η μέθοδος SCS λαμβάνει μια τυπική τιμή *CN* (συνήθως για μέσες συνθήκες αρχικής υγρασίας) και συνεπώς η τιμή αυτή θεωρείται σταθερή για τη συγκεκριμένη λεκάνη (Ευστρατιάδης κ.α., 2012). Επίσης οι συνθήκες υγρασίας αλλάζουν και κατά τη διάρκεια του επεισοδίου, μεταβάλλοντας καθοριστικά την απορροή και τη διηθημένη ποσότητα νερού. Επομένως το υδατικό ισοζύγιο αποτελεί ρεαλιστικότερη προσέγγιση της διαδικασίας γένεσης της απορροής. Όμως, ο μεγάλος αριθμός παραμέτρων (6) και αρχικών συνθηκών (4) το καθιστά αρκετά δύσκολο να βαθμονομηθεί. Ιδιαίτερα στις λεκάνες χωρίς μετρήσεις υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την επιλογή των παραμέτρων.

Από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου στα δεδομένα βροχής-απορροής της περιοχής μελέτης διαπιστώθηκε πως υπάρχει μικρή ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες (στάθμες) η οποία αλλάζει ανάλογα με τα επεισόδια. Για παράδειγμα, μια αύξηση κατά 20% της στάθμης S022 στο επεισόδιο στις 29/12/12 προκαλεί αύξηση της αιχμής της παροχής εξόδου της τάξης του 10%. Όπως έχει διαπιστωθεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN οι αρχικές συνθήκες και οι παράμετροι μπορεί να είναι καθοριστικές για την εύρεση της απορροής. Η ευαισθησία των παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου δεν έχει διερευνηθεί αναλυτικά στα πλαίσια αυτής της εργασίας και επομένως δε μπορεί να γίνει σύγκριση (ως προς την ευαισθησία) των δύο μεθόδων.

## **Κεφάλαιο 7 : Εκτίμηση πλημμυρογραφήματων σχεδιασμού και στατιστική ανάλυση**

### **7.1 Εισαγωγή**

Για τη δημιουργία των υδρογραφήματων αρχικά έγινε ο υπολογισμός της μέγιστης έντασης (ή ύψους) από τις όμβριες καμπύλες για περιόδους επαναφοράς T 20, 100 και 1000 έτη για 24-ωρη βροχόπτωση. Οι συνθετικές βροχές προέκυψαν από τον επιμερισμό των μέγιστων υψών σε 15-λεπτα βροχόπτωσης σε εκατό κατανομές. Επίσης παράχθηκε και συνθετική βροχή με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Όλες οι κατανομές της βροχής εφαρμόστηκαν στο υδρολογικό μοντέλο (Κεφάλαιο 6.3) και υπολογίστηκαν τα υδρογραφήματα για τρεις περιπτώσεις αρχικών στάθμεων. Στη συνέχεια έγινε η στατιστική ανάλυση των πλημμυρογραφήματων και έγινε σύγκριση των πλημμυρογραφήματων που προέκυψαν με τη μέθοδο των μπλοκ με τα πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν από τη μέθοδο Bartlett-Lewis.

### **7.2 Όμβριες καμπύλες**

Ο υπολογισμός των δυσμενέστερων τιμών έντασης της βροχής για τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς έγινε με χρήση των όμβριων καμπυλών. Από την εξίσωση όμβριων καμπυλών (Σχέση 2.2) υπολογίστηκαν οι εντάσεις για 24-ωρη βροχόπτωση με 15-λεπτό βήμα και στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα ύψη βροχής και τα συνολικά ημερήσια ύψη. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε για περιόδους επαναφοράς T 20, 100 και 1000 έτη.

Παρακάτω φαίνονται τα αθροιστικά ύψη βροχής που προέκυψαν για τις τρεις περιόδους επαναφοράς και για 24-ωρη βροχόπτωση.

**Πίνακας 7.1** Αθροιστικά ύψη 24-ωρης βροχής για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Αθροιστικό ύψος βροχής (mm)
20	131.39
100	190.13
1000	303.10

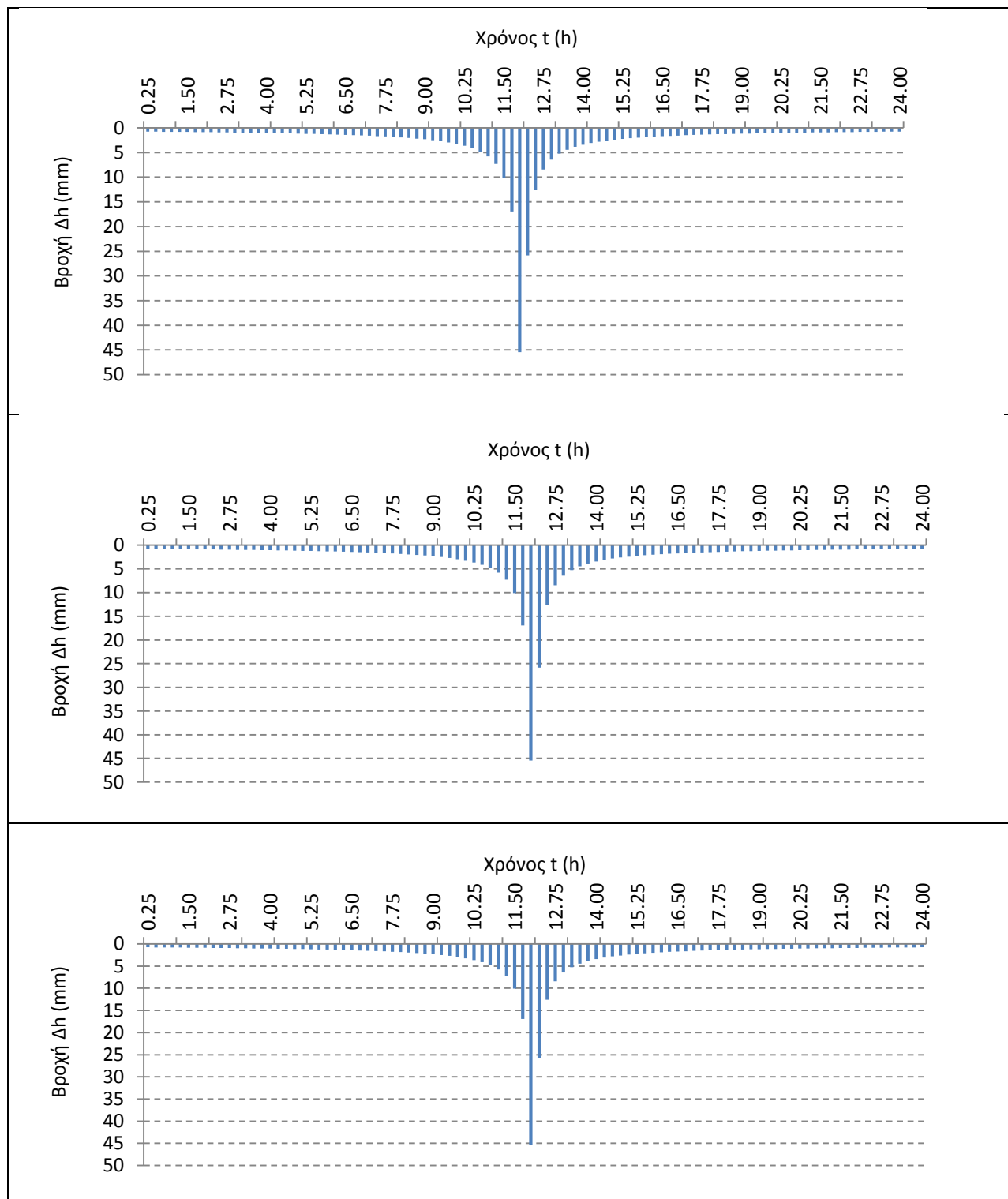
### **7.3 Δημιουργία συνθετικών βροχών**

Για τις παραπάνω τιμές έντασης παρήχθησαν 100 χρονικές κατανομές βροχόπτωσης για κάθε περίοδο επαναφοράς με τη μέθοδο Bartlett-Lewis και στη συνέχεια επιμερίστηκαν σε 15-λεπτα βήματα. Επίσης ως χρονική κατανομή χρησιμοποιήθηκε και η κατανομή που προκύπτει από τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ.

#### **7.3.1 Κατανομή βροχής με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ**

Τα ύψη βροχής για κάθε περίοδο επαναφοράς κατανεμήθηκαν όπως περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 2.4.2. Στη συνέχεια έγινε η επιφανειακή αναγωγή τους στις αντίστοιχες λεκάνες (ανάντη Οινόης, ενδιάμεση και συνολική) με χρήση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής  $\varphi$  (Υποκεφάλαιο 2.4.4).

Παρακάτω φαίνονται τα υετογραφήματα που προκύπτουν από τη μέθοδο των μπλοκ στη Γύρα Στεφάνης για τις τρεις περιόδους επαναφοράς.

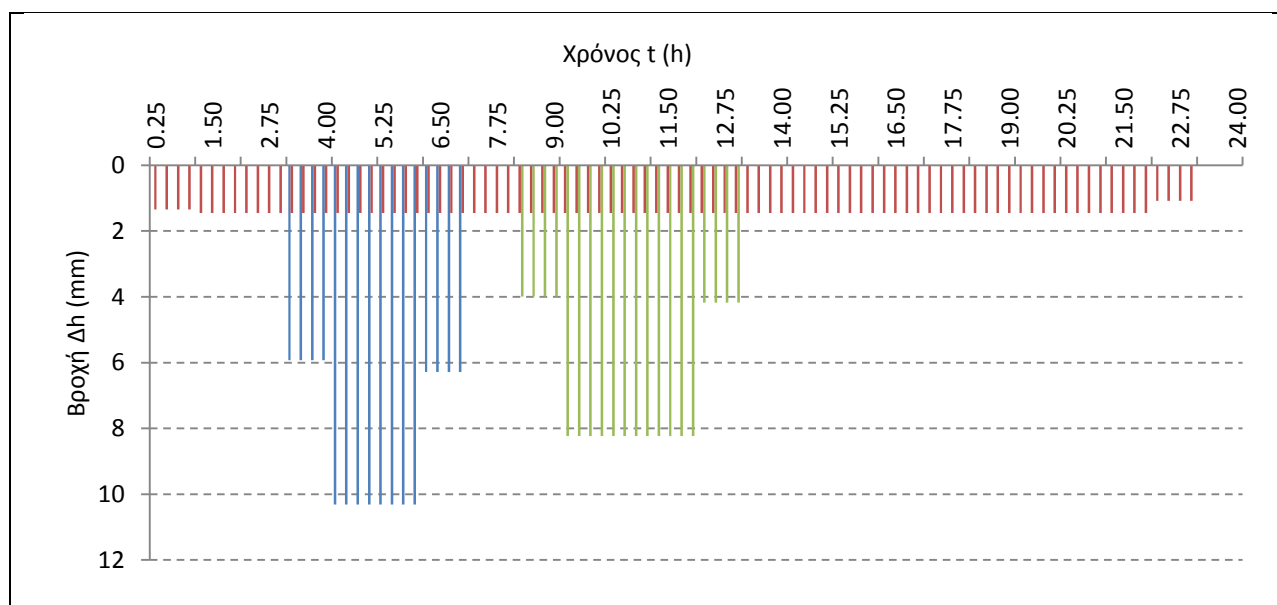


**Σχήμα 7.1** Το υετογράφημα στη Γύρα Στεφάνης για 24-ωρη βροχόπτωση που προκύπτει με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ για T 20, 100 και 1000 έτη (από πάνω προς τα κάτω).

### 7.3.2 Κατανομή βροχής με χρήση στοχαστικού μοντέλου

Για τη χρονική κατανομή της βροχής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Bartlett-Lewis όπως περιγράφεται και στο Υποκεφάλαιο 2.4.3. Οι απαιτούμενες παράμετροι εκτιμήθηκαν βάσει των δεδομένων ωριαίας βροχόπτωσης του Αστεροσκοπείου Αθηνών με τη θεώρηση πως η περιοχή μελέτης και η Αθήνα χαρακτηρίζονται από παρόμοια κλιματικά δεδομένα. Η μέθοδος Bartlett-Lewis επιμερίζει την ημερήσια βροχόπτωση σε ωριαία κλίμακα. Επειδή το υδρολογικό μοντέλο που αναπτύχθηκε (Κεφάλαιο 6) χρησιμοποιεί 15-λεπτο βήμα, για την εφαρμογή του θεωρήθηκε πως η βροχή είναι ομοιόμορφη εντός της ώρας. Η θεώρηση αυτή δίνει πιο ευνοϊκά αποτελέσματα όσον αφορά τις τιμές των παροχών των πλημμυρογραφήματων. Με αυτό τον τρόπο παράχθηκαν 100 κατανομές βροχής για κάθε περίοδο επαναφοράς.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τρία τυχαία υετογραφήματα για περίοδο επαναφοράς  $T=20$  έτη.



**Σχήμα 7.2** Τρία τυχαία υετογραφήματα για 24-ωρη βροχόπτωση που προκύπτουν με τη μέθοδο Bartlett-Lewis για  $T=20$  έτη.

## 7.4 Δημιουργία πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού

Για κάθε χρονική κατανομή βροχής (αφού έγινε η επιφανειακή αναγωγή) εφαρμόστηκε το υδρολογικό μοντέλο με τις παραμέτρους του Κεφαλαίου 6 (Πίνακας 6.2). Οι αρχικές στάθμες που επιλέχθηκαν για κάθε περίοδο επαναφοράς ήταν οι μηδενικές, ίσες με το 50% της αντίστοιχης χωρητικότητας και ίσες με τη χωρητικότητα.

**Πίνακας 7.2** Οι επιλεγμένες περιπτώσεις αρχικών συνθηκών για την εξαγωγή των πλημμυρογραφημάτων.

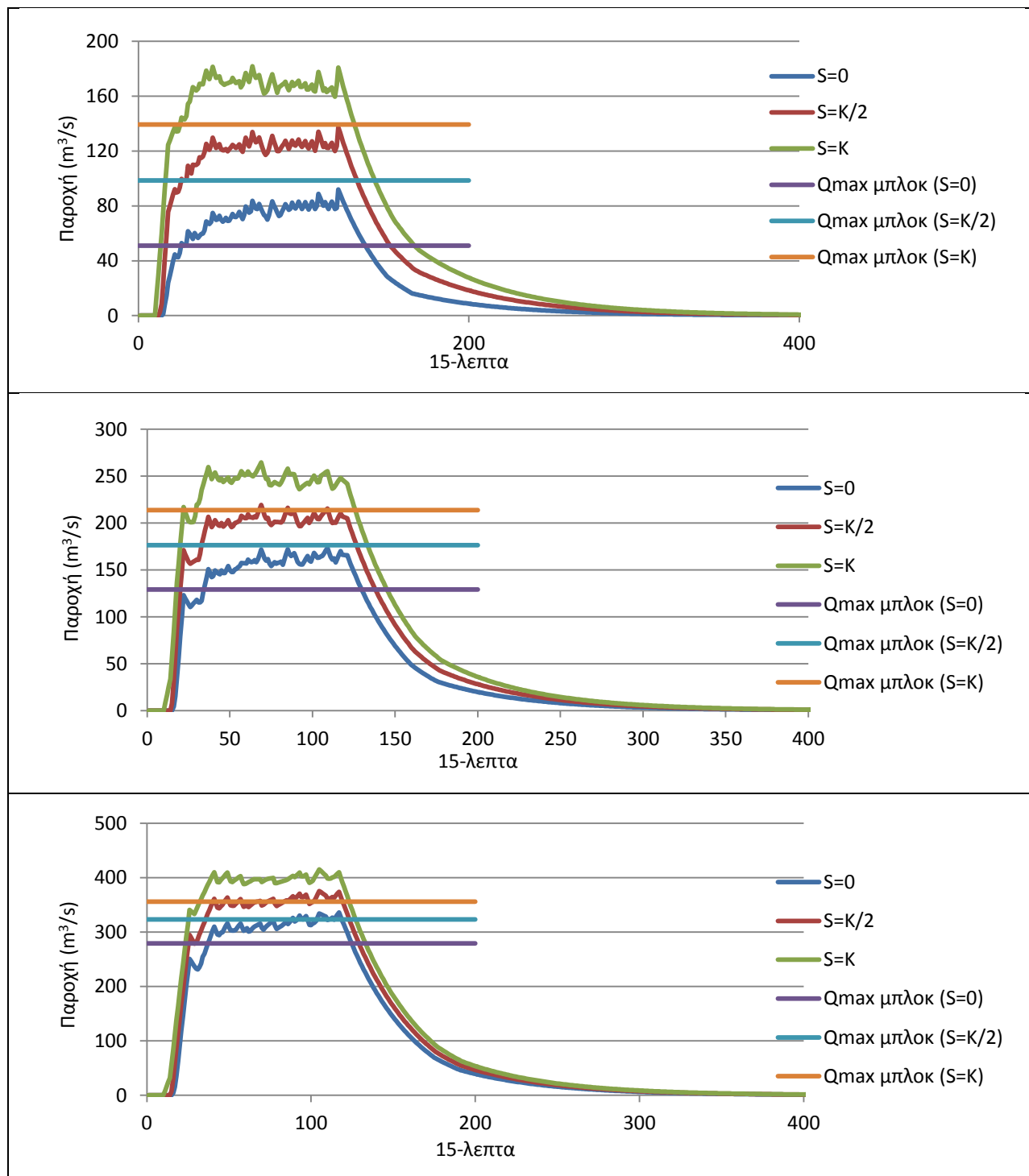
Αρχική στάθμη	Περιπτώσεις		
S011	0	=K1/2	=K1
S012	0	=K2/2	=K2
S021	0	=K1/2	=K1
S022	0	=K2/2	=K2

## 7.5 Στατιστική ανάλυση υδρογραφημάτων

### 7.5.1 Στατιστική ανάλυση μέγιστων παροχών

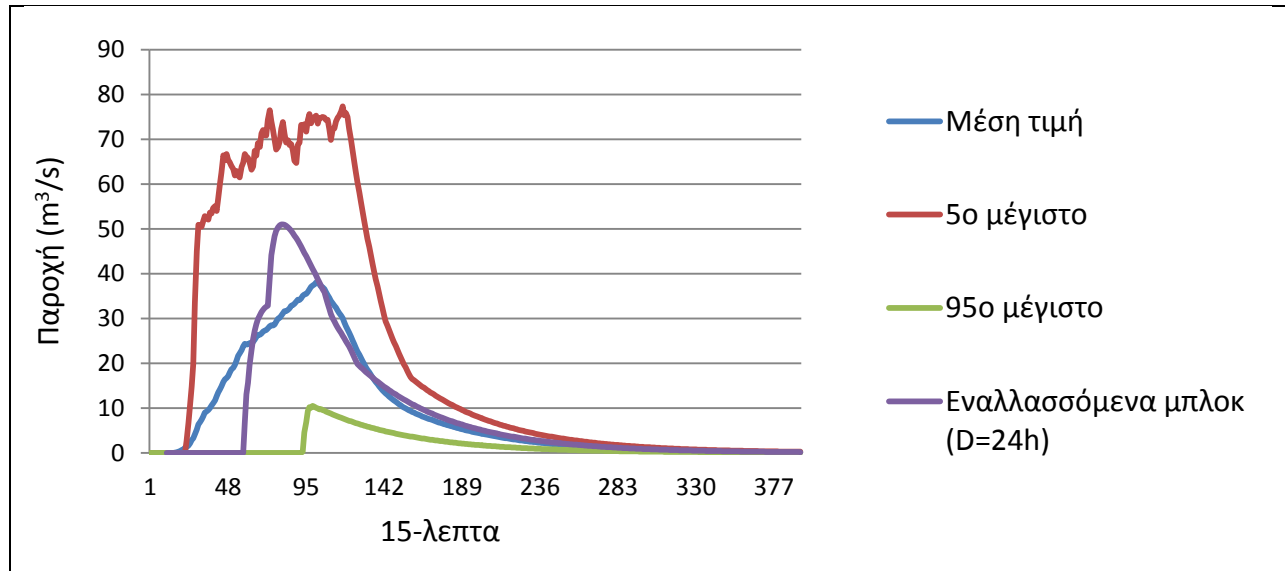
Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται η διακύμανση της μέγιστης παροχής των 100 κατανομών σε κάθε 15-λεπτο ανάλογα με τη μεταβολή των αρχικών συνθηκών, για τις τρεις περιόδους επαναφοράς. Παρατηρείται πως για κάθε περίοδο επαναφοράς οι μέγιστες παροχές αυξάνονται κατά  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  για μεταβολή της αρχικής συνθήκης από  $S=0$  σε  $S=K/2$  και από  $S=K/2$  σε  $S=K$ . Επίσης στα διαγράμματα φαίνεται και η μέγιστη παροχή που προκύπτει από τη μέθοδο των μπλοκ κατά περίπτωση.





**Σχήμα 7.3** Οι μέγιστες παροχές των 100 κατανομών για κάθε 15-λεπτο και οι αιχμές των παροχών με τη μέθοδο των μπλοκ για τρεις περιπτώσεις αρχικών στάθμεων και για περίοδο επαναφοράς T 20,100 &1000 έτη (από πάνω προς τα κάτω).

Στα υδραυλικά έργα για την κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού μια από τις κυριότερες μεθόδους χρονικής κατανομής της βροχής είναι αυτή των εναλλασσόμενων μπλοκ. Γι' αυτό, κρίνεται απαραίτητη η σύγκριση του υδρογραφήματος που έχει προκύψει από τα μπλοκ με τα υδρογραφήματα που έχουν προκύψει από τις 100 κατανομές βροχής. Συγκεκριμένα εξετάζεται η πιθανότητα υπέρβασης της μέγιστης παροχής από τη μέθοδο των μπλοκ, ο χρόνος εμφάνισης αυτής καθώς και ο όγκος της απορροής. Η διερεύνηση αυτή γίνεται για τις τρεις περιπτώσεις αρχικών στάθμεων και για τις τρεις περιόδους επαναφοράς. Ακολουθεί ενδεικτικό διάγραμμα με τα στατιστικά χαρακτηριστικά των κατανομών και η σύγκριση με τις απορροές από τα μπλοκ για  $T=20$  έτη και  $S0=0$ .



**Σχήμα 7.4** Στατιστικά χαρακτηριστικά των 100 κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ ( $T=20$  έτη &  $S0=0$ ).

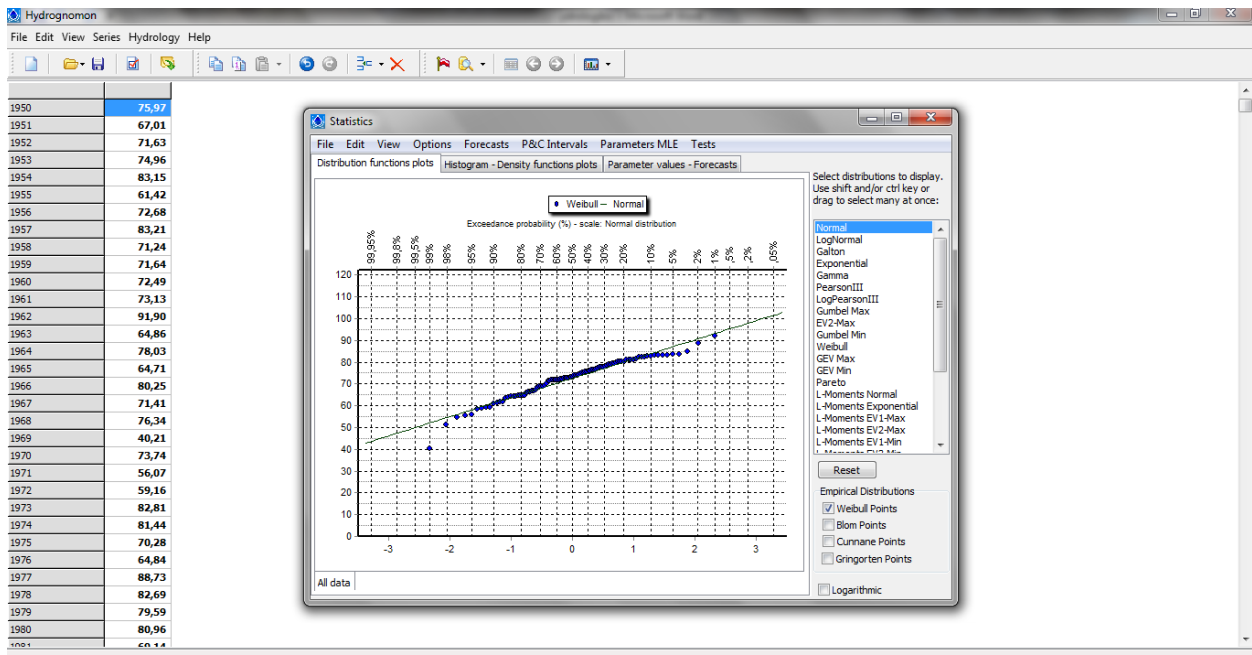
Στο διάγραμμα είναι εμφανές πως οι απορροή με τη μέθοδο από τα μπλοκ ξεπερνά τη μέση παροχή στα περισσότερα 15-λεπτα.

Στον παρακάτω πίνακα σημειώνονται οι μέγιστες τιμές παροχών με τη μέθοδο των μπλοκ.

**Πίνακας 7.3** Οι μέγιστες τιμές παροχών με τη μέθοδο των μπλοκ.

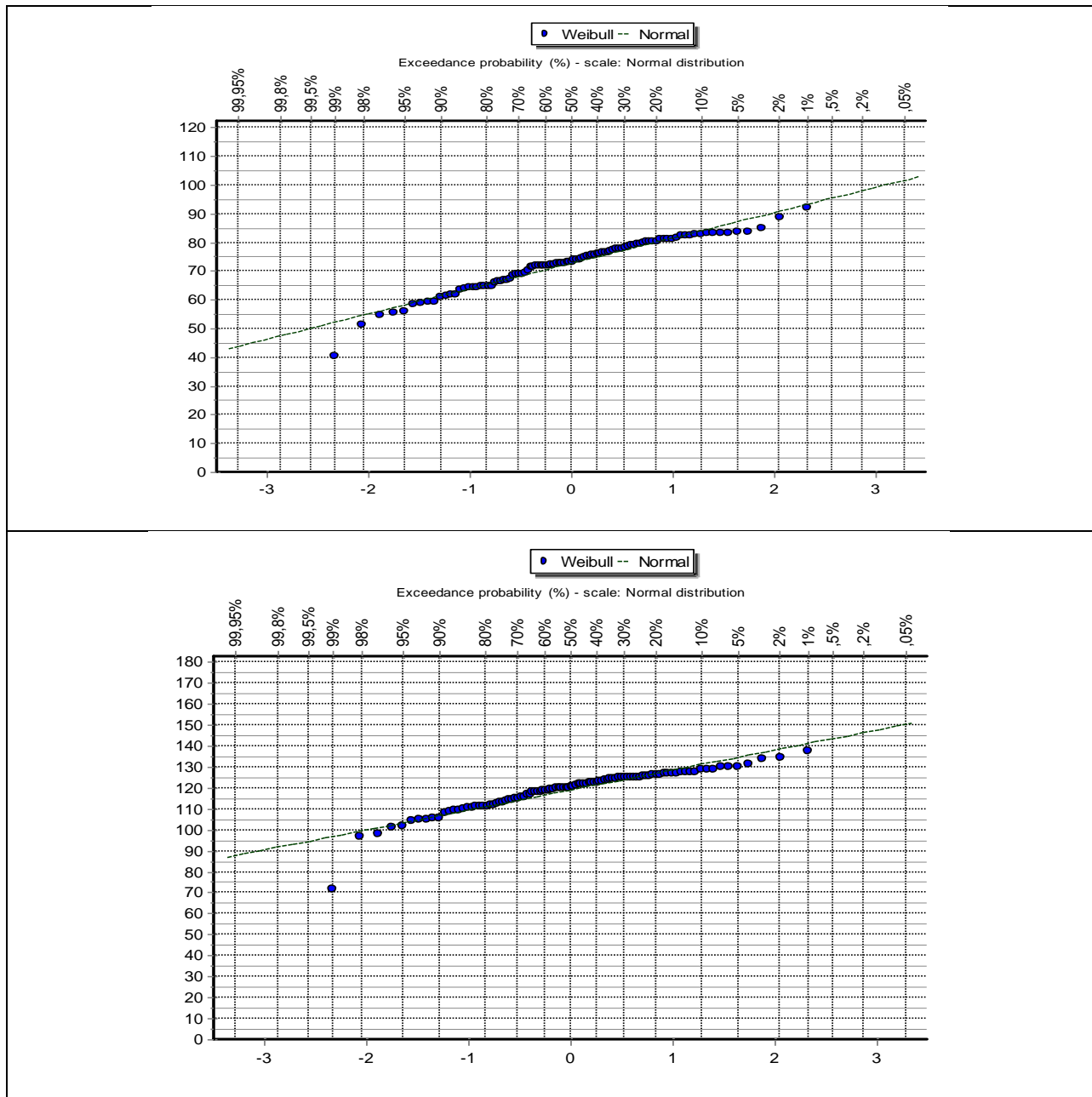
	Q <sub>max</sub> εναλλασσόμενων μπλοκ (m <sup>3</sup> /s)		
	T=20	T=100	T=1000
S0=0	50.99	129.01	279.12
S0=K/2	98.56	176.39	323.39
S0=K	139.29	213.76	355.82

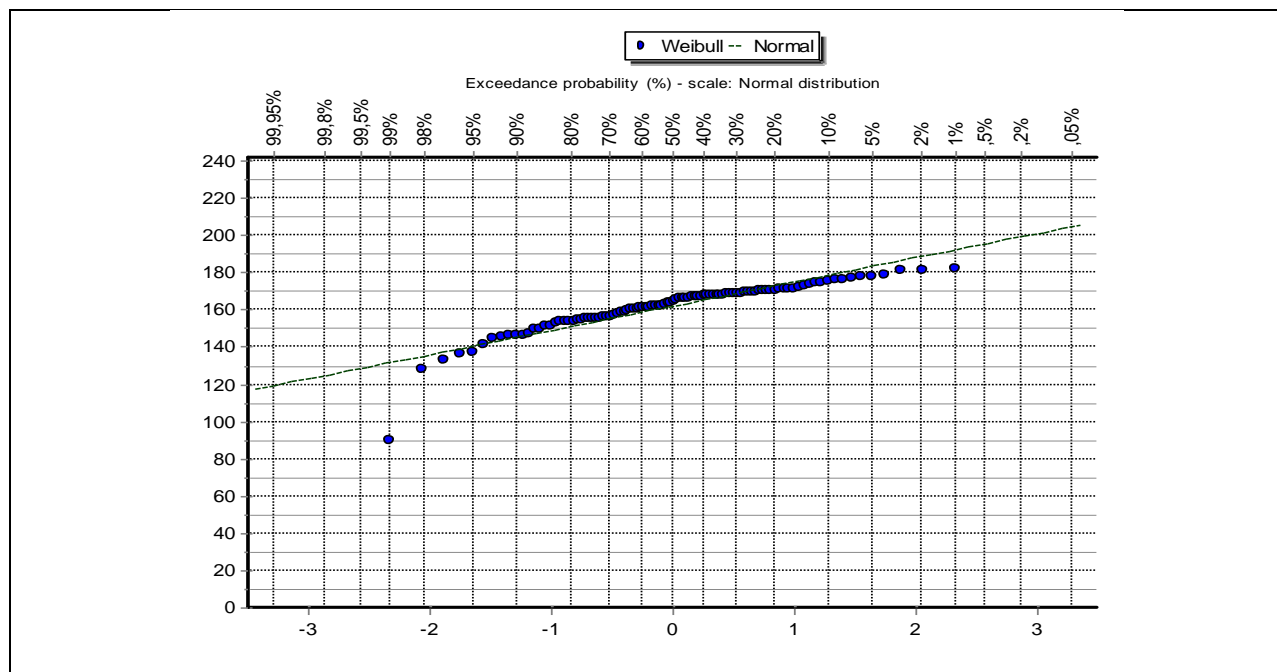
Για τη στατιστική ανάλυση των μέγιστων παροχών των κατανομών χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Pythia του λογισμικού Hydrognomon. Οι μέγιστες παροχές των εκατό κατανομών “ανοίχτηκαν” στο Hydrognomon και στη συνέχεια επιλέχθηκε η εφαρμογή Pythia (Hydrology > Pythia-Statistical analysis).



**Σχήμα 7.5** Το παράθυρο της εφαρμογής Pythia του Hydrognomon

Για κάθε εμπειρική κατανομή μέγιστων επιλέχθηκε μια θεωρητική κατανομή που να την περιγράφει ικανοποιητικά. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για κάθε κατανομή μέγιστων παροχών και των τριών περιόδων επαναφοράς και για όλες τις αρχικές συνθήκες. Παρακάτω ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές κατανομές. Παρατηρείται πως η κανονική κατανομή περιγράφει επαρκώς τις εμπειρικές.



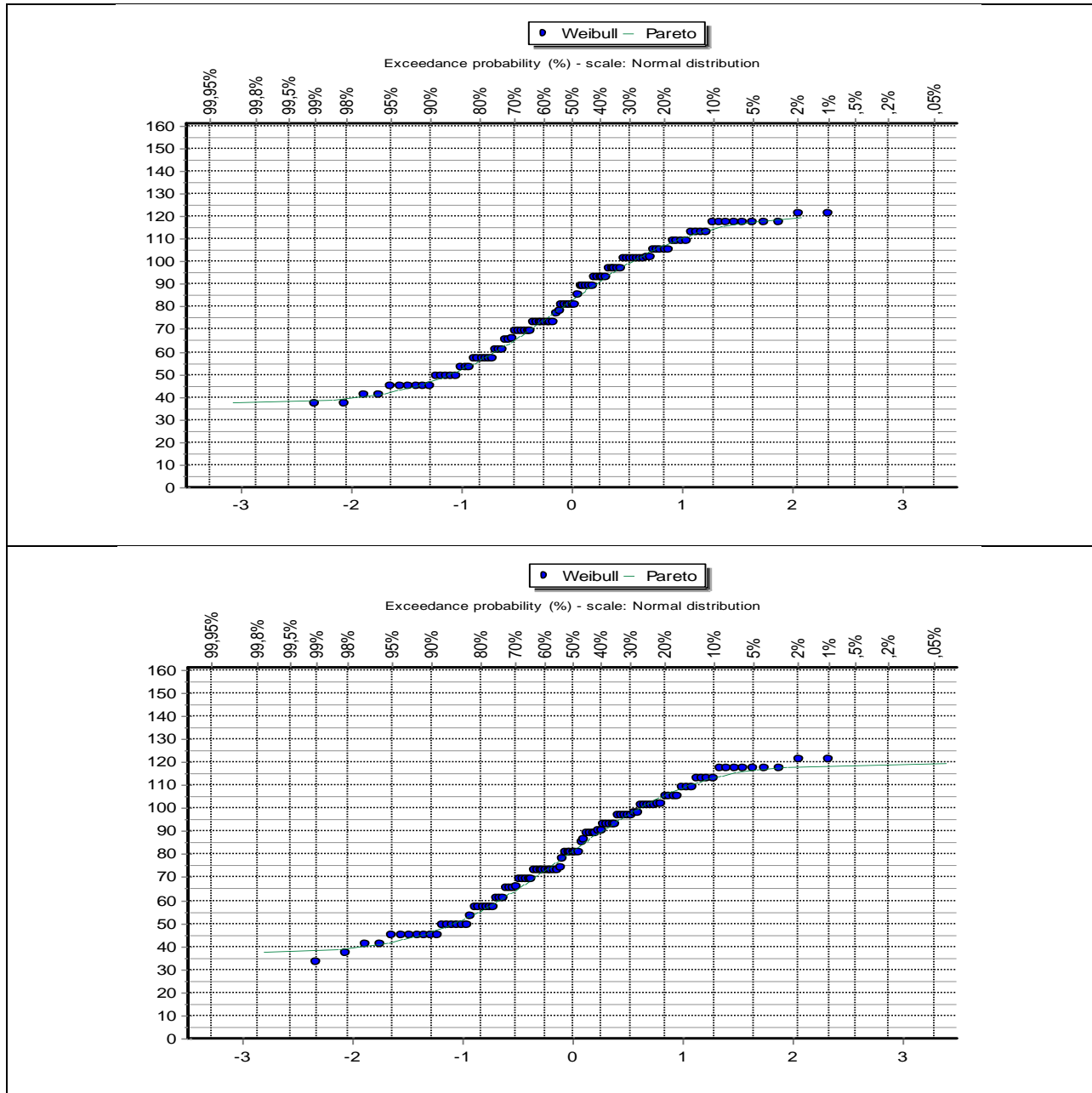


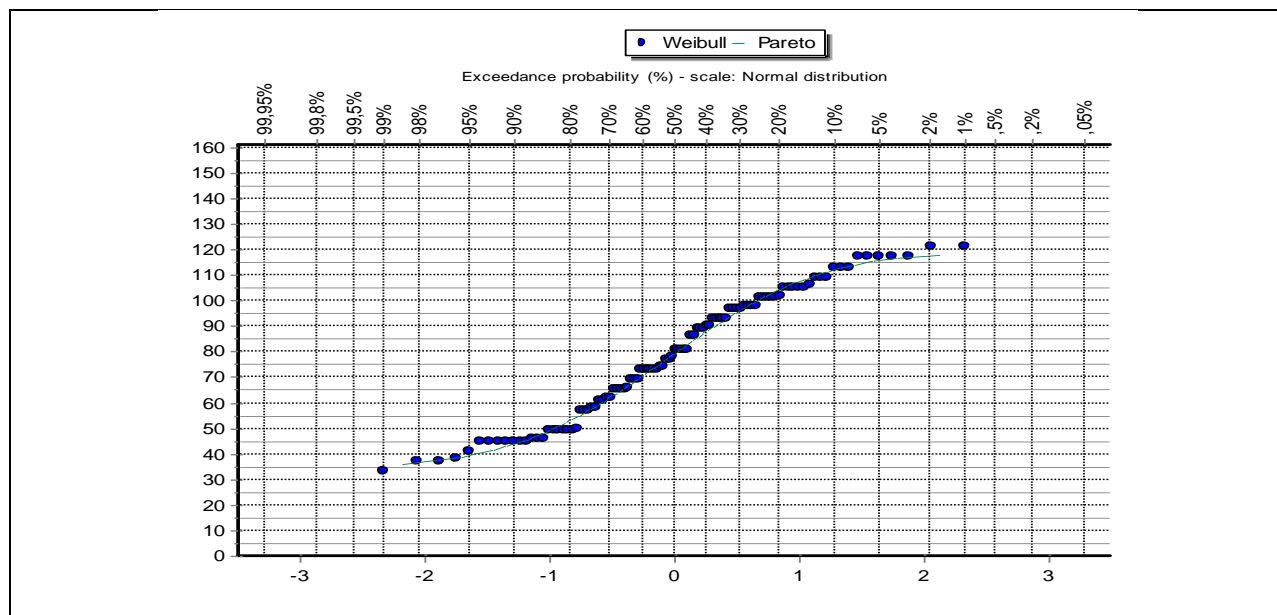
**Σχήμα 7.6** Κατανομή μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=20$  έτη και  $S_0=0$ ,  $S_0=K/2$  &  $S_0=K$  (από πάνω προς τα κάτω).

Συγκρίνοντας τις μέγιστες παροχές των μπλοκ του Πίνακα 7.3 με τις αντίστοιχες κατανομές του Σχήματος 7.6 διαπιστώνεται πως οι πιθανότητες υπέρβασης της μέγιστης παροχής των μπλοκ για  $T=20$  έτη και για  $S_0=0$ ,  $S_0=K/2$  και  $S_0=K$  είναι 98%, 97% και 95%. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά υψηλές και επομένως κρίνεται πως η μέθοδος των μπλοκ είναι κατά της ασφαλείας. Η ίδια ανάλυση έγινε και για τις υπόλοιπες περιόδους επαναφοράς στις οποίες προέκυψε πως οι πιθανότητες υπέρβασης ήταν μικρότερες ( $\approx 90\%$  &  $74\%$  για  $T=100$  &  $1000$  έτη αντίστοιχα). Οι πιθανότητες υπέρβασης αυτές ωστόσο, παραμένουν υψηλές και ενισχύουν το προηγούμενο συμπέρασμα. Παράλληλα διαπιστώνεται ισχυρή εξάρτηση των μέγιστων παροχών από τις αρχικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους Πίνακες 7.5, 7.6 & 7.7. Οι κατανομές για τις υπόλοιπες περιόδους επαναφοράς παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

### 7.5.2 Στατιστική ανάλυση χρόνων εμφάνισης των μέγιστων παροχών

Μέρος της στατιστικής ανάλυσης αποτέλεσε και η εύρεση του χρόνου εμφάνισης της μέγιστης παροχής. Η παρακάτω κατανομή απεικονίζει την κατανομή των χρόνων αυτών. Οι τιμές του κάθετου άξονα αντιστοιχούν στα αντίστοιχα 15-λεπτα.





**Σχήμα 7.7** Κατανομή χρόνων εμφάνισης μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=20$  έτη και  $S_0=0$ ,  $S_0=K/2$  &  $S_0=K$ .

Παρατηρείται πως ο χρόνος εμφάνισης της μέγιστης παροχής δείχνει να είναι ανεξάρτητος των αρχικών συνθηκών. Επίσης, μετά από στατιστική ανάλυση των δεδομένων των υπολοίπων περιόδων επαναφοράς (διαγράμματα στο Παράρτημα) διαπιστώνεται πως η κατανομή παραμένει πρακτικώς ίδια.

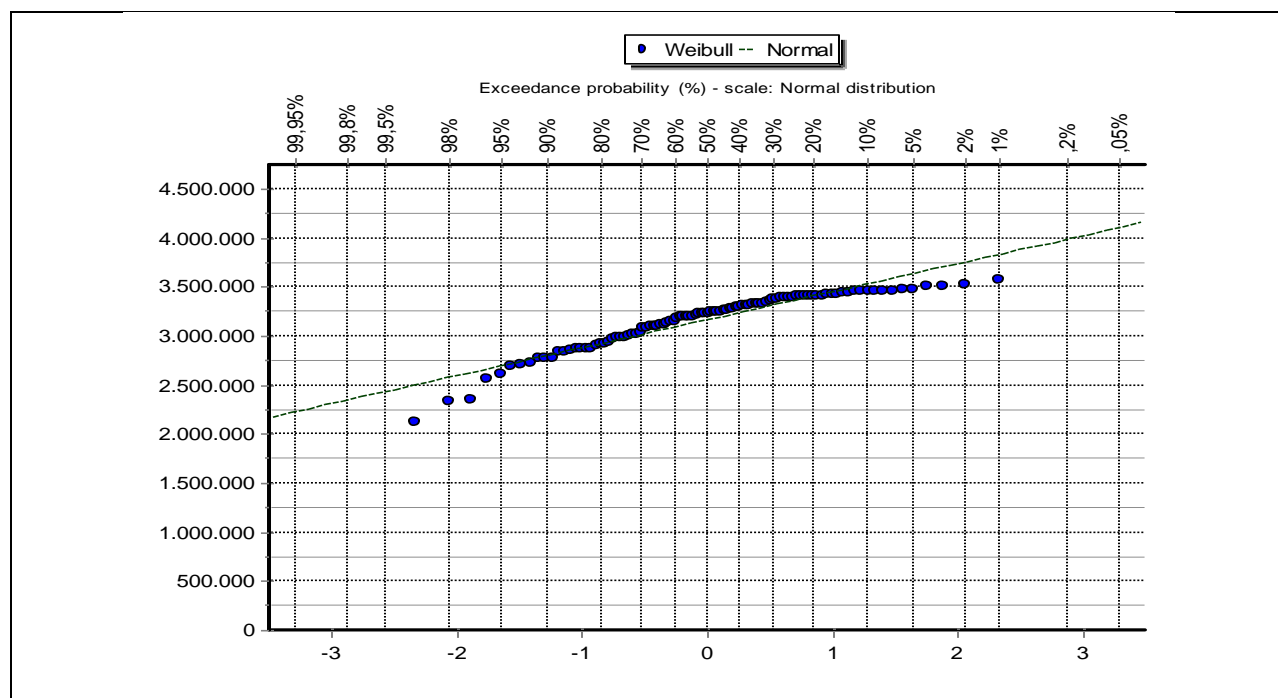
Οι συνθετικές βροχές είναι 24-ωρες (96 15-λεπτα) και από τις κατανομές φαίνεται πως περίπου το 35% των χρονοσειρών των παροχών εμφανίζει τη μέγιστη τιμή παροχής μετά τη λήξη της βροχής. Στη μέθοδο των μπλοκ η εμφάνιση της μέγιστης τιμής για  $T=20$  έτη και  $S_0=0$  γίνεται στο  $81^{\circ}$  15-λεπτο.

### 7.5.3 Στατιστική ανάλυση όγκων απορροής

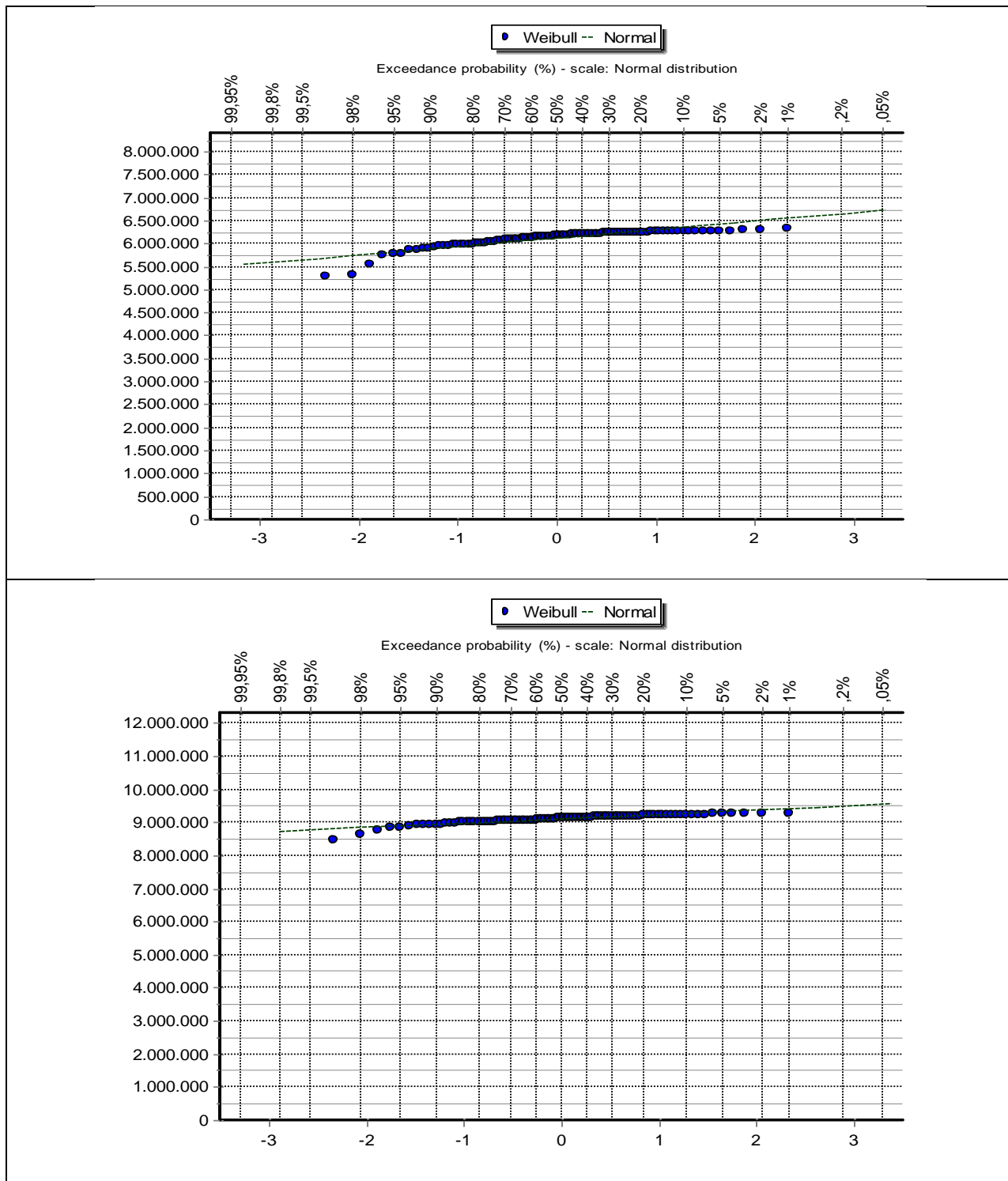
Στη συνέχεια συγκρίθηκαν οι όγκοι της απορροής που προκύπτουν από τη μέθοδο των μπλοκ με αυτούς των κατανομών για κάθε περίπτωση. Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι όγκοι απορροής με τη μέθοδο των μπλοκ και στο Σχήμα 7.8 οι κατανομές των όγκων για περίοδο επαναφοράς  $T=20$  έτη και για τις τρεις περιπτώσεις αρχικών συνθηκών.

**Πίνακας 7.4** Οι όγκοι των απορροών με τη μέθοδο των μπλοκ κατά περίπτωση.

	Vaπορροής εναλ.μπλοκ (m <sup>3</sup> )		
	T=20	T=100	T=1000
S0=0	3176126	7953068	17495516
S0=K/2	6103464	10927341	20543517
S0=K	9054087	13947649	23712037







**Σχήμα 7.8** Κατανομή όγκων απορροής των εκατό κατανομών παροχής για T=20 έτη και S0=0, S0=K/2 & S0=K.

Από το Σχήμα 7.8 διαπιστώνεται πως οι πιθανότητες υπέρβασης του όγκου απορροής της μέθοδο των μπλοκ είναι 60%, 64% και 74% για κάθε περίπτωση αρχικής στάθμης. Παρά τις υψηλές τιμές πιθανοτήτων υπέρβασης οι όγκοι από τη μέθοδο των μπλοκ είναι μικρότεροι των μέγιστων το πολύ κατά 11%. Επίσης παρατηρείται πως με την αύξηση των τιμών των αρχικών παραμέτρων μειώνεται η διακύμανση των όγκων απορροής. Επομένως η μέθοδος των μπλοκ μπορεί να θεωρηθεί πως δε δίνει αποτελέσματα κατά της ασφαλείας όσον αφορά τους όγκους απορροής. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από την ίδια ανάλυση για περιόδους επαναφοράς 100 και 1000 έτη, όπου η διαφορά του μέγιστου όγκου και του όγκου από τα μπλοκ μειώνεται έως και 1%. Μάλιστα, για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  έτη και  $S0=K$  ο όγκος απορροής από τη μέθοδο των μπλοκ ξεπερνά τον μέγιστο.

Τα διαγράμματα για τις υπόλοιπες περιόδους επαναφοράς περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Β.

## 7.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Παρακάτω συνοψίζονται τα αποτελέσματα από τη στατιστική ανάλυση μεγίστων καθώς και από τη στατιστική ανάλυση των όγκων.

**Πίνακας 7.5** Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης μεγίστων παροχών για  $T=20$  έτη.

	$Q_{\max}$ εναλ. μπλοκ ( $m^3/s$ )	Πιθανότητα υπέρβασης P	Χρόνος εμφάνισης t (15-λεπτο)
$S0=0$	50.99	98%	81°
$S0=K/2$	98.56	97%	77°
$S0=K$	139.29	95%	76°

**Πίνακας 7.6** Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης μέγιστων παροχών για T=100 έτη.

	Q <sub>max</sub> Εναλ. μπλοκ (m <sup>3</sup> /s)	Πιθανότητα υπέρβασης P	Χρόνος εμφάνισης t (15-λεπτο)
S <sub>0</sub> =0	129.01	93%	78 <sup>ο</sup>
S <sub>0</sub> =K/2	176.39	89%	76 <sup>ο</sup>
S <sub>0</sub> =K	213.76	89%	76 <sup>ο</sup>

**Πίνακας 7.7** Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης μέγιστων παροχών για T=1000 έτη.

	Q <sub>max</sub> Εναλ. μπλοκ (m <sup>3</sup> /s)	Πιθανότητα υπέρβασης P	Χρόνος εμφάνισης t (15-λεπτο)
S <sub>0</sub> =0	279.12	79%	77 <sup>ο</sup>
S <sub>0</sub> =K/2	323.39	70%	76 <sup>ο</sup>
S <sub>0</sub> =K	355.82	74%	76 <sup>ο</sup>

**Πίνακας 7.8** Οι πιθανότητες υπέρβασης των όγκων απορροής της μεθόδου των μπλοκ.

	T=20	T=100	T=1000
S <sub>0</sub> =0	60%	48%	24%
S <sub>0</sub> =K/2	64%	43%	20%
S <sub>0</sub> =K	74%	25%	1%

## Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα και προτάσεις

Τα συμπεράσματα καθώς και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα συνοψίζονται ως εξής:

- Σε λεκάνες υψηλής πολυπλοκότητας, η ύπαρξη αξιόπιστων δεδομένων βροχής και απορροής είναι αναγκαία τόσο για την κατανόηση της υδρολογικής τους δίαιτας όσο και για τη βαθμονόμηση των εφαρμοζόμενων υδρολογικών μοντέλων. Τέτοιου είδους λεκάνες είναι οι τυπικές μεσογειακές λεκάνες χειμαρρικής δίαιτας που δυστυχώς χαρακτηρίζονται από μεγάλες ελλείψεις σε μετρητικές υποδομές.
- Ειδικότερα στις λεκάνες υψηλής διηθητικότητας, η συνήθης πρακτική του διαχωρισμού του υδρογραφήματος σε δύο συνιστώσες, δηλαδή πλημμυρική και βασική ροή, αγνοεί τη σημαντική διεργασία της υποδερμικής ροής. Η ασυνέπεια αυτή αντανακλάται στα μοντέλα πλημμυρών, όπως η συνδυασμένη μέθοδος SCS και ΣΜΥ, που όταν εφαρμόζεται με τις τυπικές τιμές παραμέτρων δε δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα.
- Η τυποποιημένη μέθοδος SCS αγνοεί την υποδερμική ροή που αποτελεί σημαντικό ποσοστό του όγκου απορροής στη συγκεκριμένη λεκάνη. Επίσης θεωρεί πως ό,τι ποσότητα βροχής πέσει μετά από ένα όριο, ένα ποσοστό αυτής θα θεωρηθεί ως ενεργός βροχή, δηλαδή βροχή που προκαλεί άμεση απορροή. Επομένως οι προσομοιωμένες απορροές θα ακολουθούν γενικώς το σύνθετο προφίλ των βροχών. Επιπλέον, η μεγάλη διηθητικότητα των εδαφών οδηγεί σε απότομες αλλαγές της εδαφικής υγρασίας κατά τη διάρκεια του επεισοδίου οι οποίες δε λαμβάνονται υπόψη στην μέθοδο SCS.
- Από τις αναλύσεις της μεθόδου SCS/ΣΜΥ διαπιστώνεται πως ακόμα και με βελτιστοποιημένες τις τρεις βασικές παραμέτρους  $S$ ,  $\alpha$  και  $\beta$  δεν είναι ικανοποιητική η αναπαραγωγή των παρατηρημένων απορροών. Αυτό οφείλεται κυρίως α) στη σημαντική υποεκτίμηση του χρόνου απόσβεσης που ξεπερνά κατά πολύ το χρόνο συγκέντρωσης κατά Giandotti, και β) στη μεγάλη αναρρυθμιστική ικανότητα της λεκάνης που δημιουργεί γενικώς ομαλά υδρογραφήματα παρά τη σύνθετη μορφή των βροχών.

- Η προσαρμογή των υδρογραφημάτων βελτιώνεται με την προσθήκη και τη βελτιστοποίηση μιας επιπλέον μεταβλητής  $k$  που επηρεάζει το χρόνο βάσης του παραμετρικού ΣΜΥ. Αυξάνοντας σημαντικά το χρόνο βάσης αφενός επιτυγχάνεται καλύτερη αναπαραγωγή του καθοδικού κλάδου και αφετέρου μειώνεται η παροχή αιχμής προσεγγίζοντας την πραγματική.
- Το ημικατανεμήμενο μοντέλο υδραυλικών αναλόγων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας δίνει παρόμοια αποτελέσματα με την βελτιστοποιημένη μέθοδο SCS/ΣΜΥ. Ωστόσο, επειδή το μοντέλο περιγράφει, έστω και αδρομερώς, τις πλημμυρικές διαδικασίες στην κλίμακα της λεκάνης, καθώς και τη μεταβολή της εδαφικής υγρασίας στις επιμέρους υπολεκάνες, είναι σαφώς πιο ρεαλιστικό. Από την άλλη πλευρά, επειδή απαιτεί βαθμονόμηση των παραμέτρων του είναι δύσκολο να εφαρμοστεί επιχειρησιακά.
- Για την εφαρμογή του παραπάνω εννοιολογικού μοντέλου είναι απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση των παραμέτρων και αρχικών συνθηκών που χρησιμοποιεί. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να μελετηθεί η ευαισθησία των μοντέλου σε μεταβολή των παραμέτρων του και η προσαρμογή του σε πολύ μεγαλύτερο αριθμό επεισοδίων.
- Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα εύρος και ένας μέσος όρος των τιμών των παραμέτρων (Κεφάλαιο 5) το οποίο έχει προκύψει από ένα μικρό αριθμό επεισοδίων. Η επαλήθευση των τιμών αυτών μπορεί να γίνει με την ανάλυση μελλοντικών επεισοδίων στην περιοχή αυτή.
- Χρήσιμη θα ήταν και η διερεύνηση άλλων δομών μοντέλων, τύπου υδραυλικών αναλόγων. Τα μοντέλα αυτά θα μπορούσαν να στοχεύσουν στη μείωση του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων και των αρχικών συνθηκών ώστε να είναι πιο εύκολα εφαρμόσιμα και εύχρηστα στις υδρολογικές μελέτες.
- Στην εργασία διερευνήθηκε ακόμη η συνδυασμένη χρήση του εννοιολογικού μοντέλου και του στοχαστικού μοντέλου Υετός για την παραγωγή συνθετικών επεισοδίων βροχής. Κατά τη στατιστική ανάλυση των μέγιστων παροχών διαπιστώθηκε πως οι αρχικές συνθήκες υγρασίας και η κατανομή της βροχής επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα πλημμυρογραφήματα εξόδου.

- Η στοχαστική προσέγγιση έδωσε αρκετά δυσμενέστερα μεγέθη σχεδιασμού από την εμπειρική μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ που ορίζει ένα συγκεκριμένο προφίλ βροχής. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την αναγκαιότητα υιοθέτησης των Monte Carlo προσεγγίσεων στις μελέτες πλημμυρών.
- Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο εξέδωσαν την Οδηγία 2007/60/EK για την εκτίμηση και τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης με στόχο τη μείωση των κινδύνων από τις πλημμύρες και των συνεπειών τους. Για το λόγο αυτό άμεση συνέχιση της παρούσας εργασίας μπορεί να είναι η υδραυλική προσομοίωση της περιοχής με κατάλληλο μοντέλο ώστε να βρεθούν οι περιοχές κατάκλυσης. Η διερεύνηση αυτή θα οδηγήσει στην κατασκευή χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard maps) και χαρτών κινδύνων πλημμύρας (flood risk maps) ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι για την πλημμυρική προστασία των περιοχών.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «Υδρόγειος», Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ), Ανάδοχος: ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 4α, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006

Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Π. Δημητριάδης, και Α. Μαχαίρας, *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 – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 115 σελίδες, Οκτώβριος 2012, 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 4/9/2013)

Κοζάνης, Σ., και Ι. Μαρκόνης, *Υδρογνώμων έκδοση 4 - Οδηγός χρήστη*, 141 σελίδες, 2009, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα <http://itia.ntua.gr/getfile/934/1/documents/HydrognomonV4Manual GR-v1.00.pdf> , τελευταία επίσκεψη 4/9/2013

Κοσσιέρης, Π., *Ανάπτυξη υπολογιστικού συστήματος για τον μονοδιάστατο στοχαστικό επιμερισμό ημερήσιων βροχοπτώσεων σε ωριαίες, σε περιβάλλον R*, Διπλωματική εργασία, 224 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Κουκουβίνος, Α., *Γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες*, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας:

Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ - Αντωνίου - Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 36 σελίδες, Μάρτιος 2012

Κούσης, Α. Δ., Σ. Λυκούδης, και Γ. Καραβοκυρός, *Τεχνική έκθεση περιγραφής μετρητικού συστήματος τηλεμετάδοσης–επεξεργασίας δεδομένων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ - Αντωνίου - Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 77 σελίδες, Μάρτιος 2012*

Κουτσογιάννης, Δ. και Θ., Ξανθόπουλος, 1999. *Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3<sup>η</sup>*, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Μαρκόνης, Α. Κουκουβίνος, Σ.Μ. Παπαλεξίου, Ν. Μαμάσης, και Π. Δημητριάδης, *Υδρολογική μελέτη ισχυρών βροχοπτώσεων στη λεκάνη του Κηφισού, Μελέτη διαχείρισης Κηφισού*, Εργοδότης: Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων – Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, Ανάδοχοι: Εξάρχου Νικολόπουλος Μπενσασσών, Denco, Γ. Καραβοκύρης, κ.ά., 154 σελίδες, Αθήνα, 2010

Κουτσογιάννης, Δ., και Ν. Μαμάσης, *Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών του Θριάσιου πεδίου, Διερεύνηση της παραγωγής φερτών υλικών στο Θριάσιο πεδίο*, 21 σελίδες, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001

Κουτσογιάννης, Δ., *Σημειώσεις Βελτιστοποίησης Συστημάτων Υδατικών Πόρων - Μέρος 1*, Έκδοση 2, 91 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000

Μαθιουδάκη, Μ., *Διερεύνηση παραμέτρων υδρολογικού σχεδιασμού με χρήση συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων, μέσω ανάλυσης χαρακτηριστικών πλημμυρικών επεισοδίων στην πειραματική λεκάνη Λυκορέματος Πεντέλης*, Μεταπτυχιακή εργασία,



Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2012

Τουτζιάρη, Μ., *Υλοποίηση μεθοδολογικού πλαισίου για την κατάρτιση χαρτών πλημμύρας*, MSc thesis, 129 σελίδες, Μάρτιος 2012

Baltas, E. A., Dervos, N. A., and Mimikou, M. A.: *Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1825-1829, doi:10.5194/hess-11-1825-2007, 2007

Efstratiadis, A., A. D. Koussis, D. Koutsoyiannis, and N. Mamassis, *Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?*, Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 1, 7387–7416, doi:10.5194/nhessd-1-7387-2013, 2013

Flügel, W.-A., *Delineating Hydrological Response Units (HRU's) by GIS analysis for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany*, Hydrological Processes, 9, 423-436, 1995

Grimaldi, S., Petroseli, A., Tauro, F., and Porfiri, M.: *Time of concentration: a paradox in modern hydrology*, Hydrolog. Sci. J., 57, 217–228, 2012

Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, *Simple disaggregation by accurate adjusting procedures*, Water Resources Research, 32 (7), 2105–2117, 1996

Koutsoyiannis, D., Onof, C., *Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model*, Journal of Hydrology, 246, 109 – 122, 2001

McCuen, R.H., *Uncertainty analyses of watershed time parameters*, Journal of Hydrologic Engineering, 14(5), 490–498, 2009

Mishra, S. K. and Singh, V. P.: 1999b, *'Behaviour of SCS-CN method in  $C - I_a^* - \lambda$  spectrum'*, Proc., Int. Conf. on Water, Environment, Ecology, Socio-economics, and Health Engineering, 18–21 October, Seoul Nat. Uni., Korea

Mishra, S. K. and Singh, V. P.: 2002a, '*SCS-CN method: Part-I: Derivation of SCS-CN based models*', Acta Geophysica Polonica 50(3), 457–477

Mishra, S. K. and Singh, V. P.: 2002b, '*SCS-CN-based Hydrologic Simulation Package*', Ch. 13, in V. P. Singh and D. K. Frevert (eds), *Mathematical Models in Small Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, P.O. Box 2841, Littleton, Colorado 80161, pp. 391–464.

### **Διαδικτυακές αναφορές**

<http://deucalionproject.gr/> (τελευταία επίσκεψη 4/9/2013)

[http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance\\_id=TRMM\\_3-Hourly](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly) (τελευταία επίσκεψη 4/9/2013)

<http://hoa.ntua.gr/> (τελευταία επίσκεψη 4/9/2013)

<http://www.e-per.gr/> (τελευταία επίσκεψη 4/9/2013)

## Παράρτημα Α : Προγράμματα Matlab

### Παράρτημα Α1 : Εφαρμογή μεθόδου SCS-CN

Ο παρακάτω αλγόριθμος εφαρμόζει τη μέθοδο SCS-CN σε δεδομένα εισόδου (βροχή και απορροή) βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους  $S$ ,  $a$ ,  $\beta$  και  $k$ . Ο αλγόριθμος αυτός καλείται από ρουτίνα βελτιστοποίησης με χρήση εξελικτικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης (Evolutionary Annealing-Simplex Method) σε περιβάλλον Matlab (Κοσσιέρης, 2013).

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

S=PGD(1);
a=PGD(2);
b=PGD(3);
k=PGD(4);

%rainfall file (rainfall in third column)
load vroxes.txt
Z=vroxes;
N=size(Z);
n=N(1,1);
%A single column rainfall matrix
for i=1:n
    A(i,1)=Z(i,3);
end

%total discharge file (discharge in third column)
load paroxes.txt
Y=paroxes;
N2=size(Y);
n2=N2(1,1);
%P single column matrix with observed total discharge
for i=1:n2
    Qobs(i,1)=Y(i,3);
end

%CN=input('please enter cn=');
%a=input('please enter a=');
%dt=input('please enter dt in minutes=');
%area=input('please enter area in km^2=');
%L=input('please enter length of main stream in km=');
```

```

%DH=input('please enter height difference between the mean and
exit heights in m=');
%b=input('please enter b constant for tpeak=');

Qb=0;
dt=15;
Dt=15;
area=144.6;
L=30.7;
DH=337.9;
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
end

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

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

%tfinish=time step of direct runoff end
%tfinish=round(tfinal+60/dt*tc) (gia diaxwrisimo rohs);
tfinish=n2;

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

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

    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*k+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

%%simulated hydrograph%

n4=min(round(tbase/dt),n);
for i=1:n4+1
    for j=1:n
        Qtotal(i,j)=Hene(j,1)/10*Q(i,1);
    end
end

Qmet=zeros(n4+n,n);

for j=1:n
    for i=j:n4+j
        Qmet(i,j)=Qtotal(i-(j-1),j);
    end
end

Qmet2=transpose(Qmet);

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

n3=min(tfinish,n2);

for i=1:min(n3,n4+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:n4+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

if sum(Qdirect)==0
    SFALMA3=10^9;
else
    SFALMA3=wV*abs((sum(Vsim)-sum(Vdirect)));
end

Totalsf=SFALMA1+SFALMA2+SFALMA3;
PGD;

end

```

**Ακολουθεί η ρουτίνα βελτιστοποίησης**

```

clc; clear all;
[BestValue,BestPar,NumIter,NumfEval,Ftolpop] = eas1(4,20,[100
0.001 0.1 1],[900 0.6 0.9 9],[100 0.001 0.1 1],[900 0.6 0.9
9],@SCS,800,0.01,0.95,0.1,2,5)

```

## Παράρτημα Α2 : Εφαρμογή υδρολογικού μοντέλου σε συνθετικές βροχές

Το παρακάτω πρόγραμμα (σε κώδικα Matlab) χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των υδρογραφημάτων με εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου. Τα δεδομένα εισόδου είναι τα δεδομένα βροχής, δηλαδή στην παρούσα εργασία οι 100 κατανομές της βροχής για μια συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς και τα δεδομένα εξόδου τα υδρογραφήματα στην έξοδο της υπό μελέτη λεκάνης.

```
clc
clear all

% For specific return period T and initial conditions(line 8 and
92)

% T file: vroxoptywsh
load T1000.txt
Z=T1000;
N1=size(Z);

% T= Return period in years
% D= duration of rain in hours
% d= time step in minutes

T=20;
D=24;
d=15;

% Area (km^2)
% Au, Al= area of upper and lower basin
Au=51.2;
Al=93.4;

% Time in hours

t(1,1)=d/60;
for i=2:(60/d)*D
    t(i,1)=t(i-1,1)+d/60;
end

% Areal reduction factor f (Syntelesths epifaneiakhs anagwghs f)
```



```

% Upper basin

for i=1:(60/d)*D
    fu(i,1)=max((1-0.048*Au^(0.36-
0.01*log(Au)))/t(i,1)^0.35),0.25);
end

% Lower basin

for i=1:(60/d)*D
    fl(i,1)=max((1-0.048*A1^(0.36-
0.01*log(A1)))/t(i,1)^0.35),0.25);
end

% Final rainfall

% Upper basin

for i=1:(60/d)*D
    for j=1:N1(1,2)
        Zu(i,j)=fu(i,1)*Z(i,j);
    end
end

% Lower basin

for i=1:(60/d)*D
    for j=1:N1(1,2)
        Zl(i,j)=fl(i,1)*Z(i,j);
    end
end

% APPLICATION OF RAINFALL IN HYDROLOGICAL MODEL

% Area (km^2)
% A11, A21 1st Model upper and lower basin
% A12, A22 2nd Model upper and lower basin
A11=37.3;
A12=13.9;
A21=46.8;
A22=46.6;

% Concentration time
% tcu= concentration time of upper basin to exit (in hours)
% tcl= concentration time of lower basin to exit (in hours)

```

```

tcu=6.402296188;
tcl=2.829554289;

% Constants for basin for two models (K and l in mm, m
percentage)
K1=49;
l1=0.0117966129011801;
m1=0.0157235971507196;
K2=85.7991637079117;
l2=0.018;
m2=0.00;

% Initial conditions
S011=0;
S012=0;
S021=0;
S022=0;

Pu=zeros(1000,N1(1,2));
Pl=zeros(1000,N1(1,2));

% UPPER BASIN

% Single column rain matrix (upper basin) in mm
for i=1:N1(1,1)
    for j=1:N1(1,2)
        Pu(i,j)=Zu(i,j);
    end
end

% 1st Model

% S1Au= Water level (A) of upper basin in mm (1st Model)

% Qs1u= Spill discharge Qs of upper basin in mm (1st Model)

% S1Bu= Water level (B) of upper basin in mm (1st Model)

% PERClu= Percolation of upper basin in mm (1st Model)

% S1Cu= Water level (C) of upper basin in mm (1st Model)

for j=1:N1(1,2)
    S1Au(1,j)=S011+Pu(1,j);
    Qs1u(1,j)=max(0,S1Au(1,j)-K1)*l1;
    S1Bu(1,j)=S1Au(1,j)-Qs1u(1,j);

```

```

PERC1u(1,j)=S1Bu(1,j)*m1;
S1Cu(1,j)=S1Bu(1,j)-PERC1u(1,j);
end

for i=2:1000
    for j=1:N1(1,2)
        S1Au(i,j)=S1Cu(i-1,j)+Pu(i,j);
        Qs1u(i,j)=max(0,S1Au(i,j)-K1)*l1;
        S1Bu(i,j)=S1Au(i,j)-Qs1u(i,j);
        PERC1u(i,j)=S1Bu(i,j)*m1;
        S1Cu(i,j)=S1Bu(i,j)-PERC1u(i,j);
    end
end

% 2nd Model

% S2Au= Water level (A) of upper basin in mm (2nd Model)
% Qs2u= Spill discharge Qs of upper basin in mm (2nd Model)
% S2Bu= Water level (B) of upper basin in mm (2nd Model)
% PERC2u= Percolation of upper basin in mm (2nd Model)
% S2Cu= Water level (C) of upper basin in mm (2nd Model)

for j=1:N1(1,2)
    S2Au(1,j)=S012+Pu(1,j);
    Qs2u(1,j)=max(0,S2Au(1,j)-K2)*l2;
    S2Bu(1,j)=S2Au(1,j)-Qs2u(1,j);
    PERC2u(1,j)=S2Bu(1,j)*m2;
    S2Cu(1,j)=S2Bu(1,j)-PERC2u(1,j);
end

for i=2:1000
    for j=1:N1(1,2)
        S2Au(i,j)=S2Cu(i-1,j)+Pu(i,j);
        Qs2u(i,j)=max(0,S2Au(i,j)-K2)*l2;
        S2Bu(i,j)=S2Au(i,j)-Qs2u(i,j);
        PERC2u(i,j)=S2Bu(i,j)*m2;
        S2Cu(i,j)=S2Bu(i,j)-PERC2u(i,j);
    end
end

% Discharge of upper basin in m^3/s
for i=1:1000
    for j=1:N1(1,2)

```

```

        Qsu(i,j)=(Qs1u(i,j)*A11+Qs2u(i,j)*A12)/0.9;
    end
end

% LOWER BASIN

% Single column rain matrix (lower basin) in mm
for i=1:N1(1,1)
    for j=1:N1(1,2)
        Pl(i,j)=Zl(i,j);
    end
end

% 1st Model

% S1A1= Water level (A) of lower basin in mm (1st Model)
% Qs11= Spill discharge Qs of lower basin in mm (1st Model)
% S1B1= Water level (B) of lower basin in mm (1st Model)
% PERC11= Percolation of lower basin in mm (1st Model)
% S1C1= Water level (C) of lower basin in mm (1st Model)

for j=1:N1(1,2)
    S1A1(1,j)=S011+Pl(1,j);
    Qs11(1,j)=max(0,S1A1(1,j)-K1)*l1;
    S1B1(1,j)=S1A1(1,j)-Qs11(1,j);
    PERC11(1,j)=S1B1(1,j)*m1;
    S1C1(1,j)=S1B1(1,j)-PERC11(1,j);
end

for i=2:1000
    for j=1:N1(1,2)
        S1A1(i,j)=S1C1(i-1,j)+Pl(i,j);
        Qs11(i,j)=max(0,S1A1(i,j)-K1)*l1;
        S1B1(i,j)=S1A1(i,j)-Qs11(i,j);
        PERC11(i,j)=S1B1(i,j)*m1;
        S1C1(i,j)=S1B1(i,j)-PERC11(i,j);
    end
end

% 2nd Model

% S2A1= Water level (A) of lower basin in mm (2nd Model)

```

```

% Qs2l= Spill discharge Qs of lower basin in mm (2nd Model)

% S2B1= Water level (B) of lower basin in mm (2nd Model)

% PERC2l= Percolation of lower basin in mm (2nd Model)

% S2C1= Water level (C) of lower basin in mm (2nd Model)

for j=1:N1(1,2)
S2A1(1,j)=S012+P1(1,j);
Qs2l(1,j)=max(0,S2A1(1,j)-K2)*12;
S2B1(1,j)=S2A1(1,j)-Qs2l(1,j);
PERC2l(1,j)=S2B1(1,j)*m2;
S2C1(1,j)=S2B1(1,j)-PERC2l(1,j);
end

for i=2:1000
    for j=1:N1(1,2)
        S2A1(i,j)=S2C1(i-1,j)+P1(i,j);
        Qs2l(i,j)=max(0,S2A1(i,j)-K2)*12;
        S2B1(i,j)=S2A1(i,j)-Qs2l(i,j);
        PERC2l(i,j)=S2B1(i,j)*m2;
        S2C1(i,j)=S2B1(i,j)-PERC2l(i,j);
    end
end

% Discharge of lower basin in m^3/s
for i=1:1000
    for j=1:N1(1,2)
        Qs1(i,j)=(Qs1l(i,j)*A21+Qs2l(i,j)*A22)/0.9;
    end
end

% Exit of basin

% Shifted Discharges (using concentration time)

Qsufinal=zeros(1000+round(tcu*60/15),N1(1,2));
Qslfinal=zeros(1000+round(tcl*60/15),N1(1,2));

for i=round(tcu*60/15):round(tcu*60/15)+999
    for j=1:N1(1,2)
        Qsufinal(i,j)=Qsu(i+1-round(tcu*60/15),j);
    end
end

for i=round(tcl*60/15):round(tcl*60/15)+999

```

```

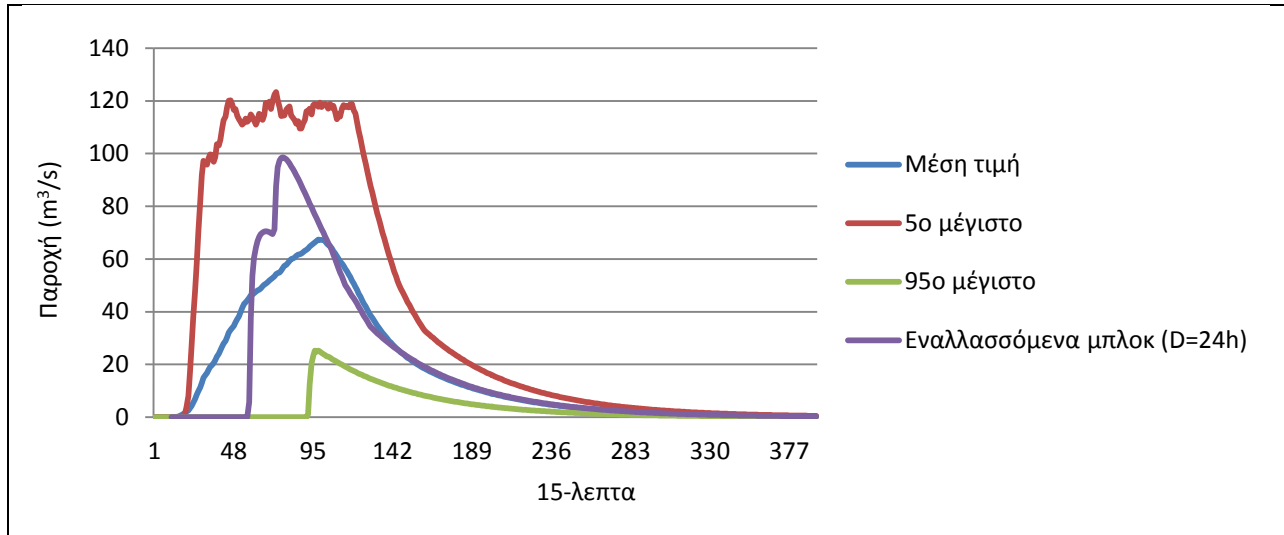
    for j=1:N1(1,2)
        Qslfinal(i,j)=Qsl(i+1-round(tcl*60/15),j);
    end
end

% Total Discharge at exit of basin in m^3/s
for i=1:min(round(tcu*60/15)+1000,round(tcl*60/15)+1000)
    for j=1:N1(1,2)
        Qstot(i,j)=Qsufinal(i,j)+Qslfinal(i,j);
    end
end

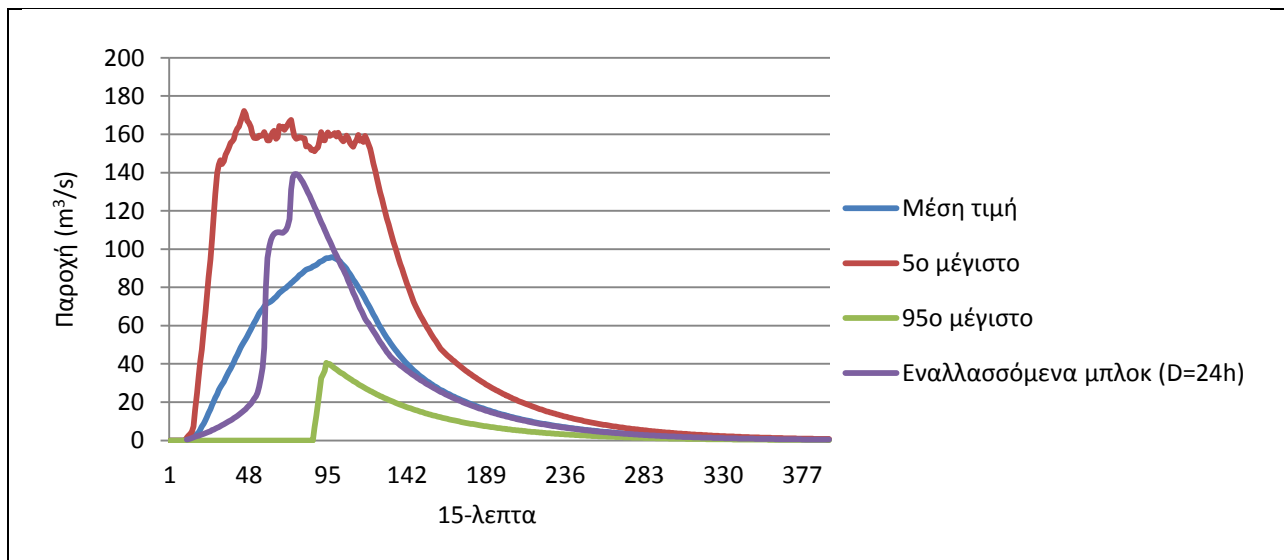
xlswrite('T1000.xlsx',Qstot,'Sheet1');

```

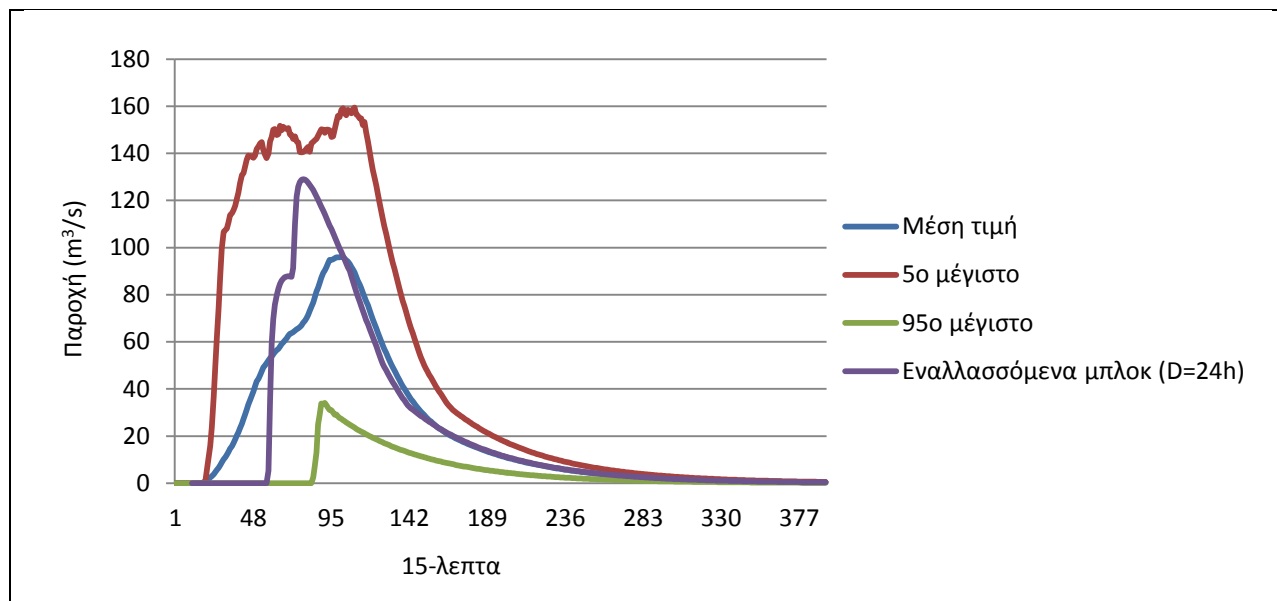
## Παράρτημα Β : Στατιστικές κατανομές



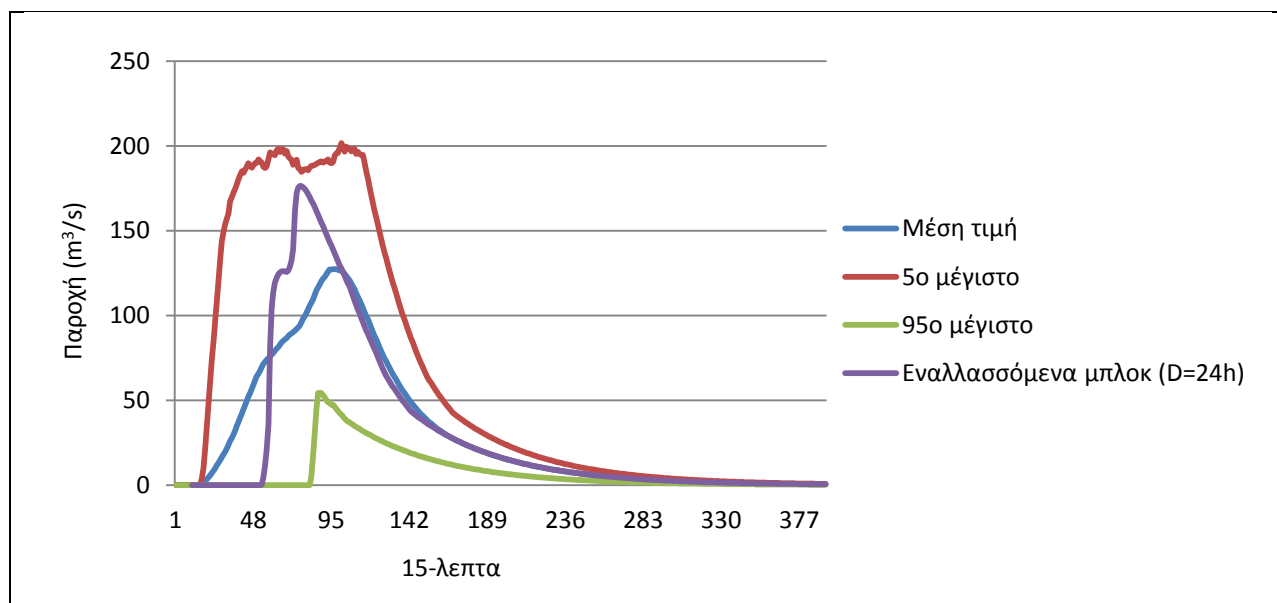
**Σχήμα ΠΒ-1** Στατιστικά χαρακτηριστικά των εκατό κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ (T=20 έτη & S0=K/2).



**Σχήμα ΠΒ-2** Στατιστικά χαρακτηριστικά των εκατό κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ (T=20 έτη & S0=K).

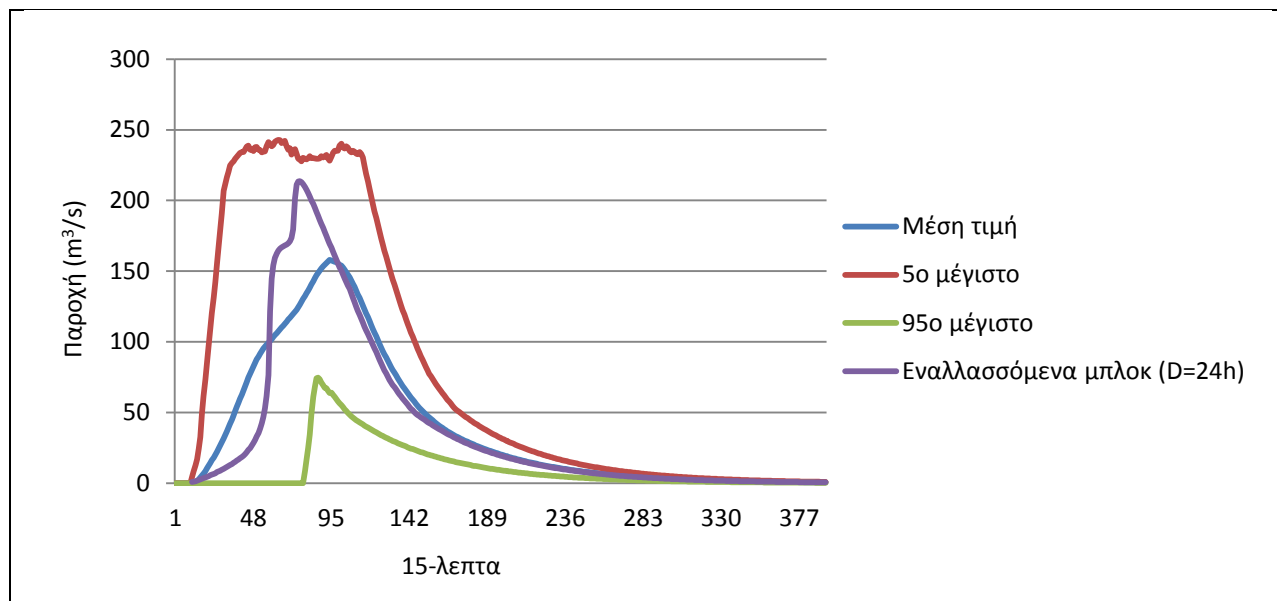


**Σχήμα ΠΒ-3** Στατιστικά χαρακτηριστικά των εκατό κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ (T=100 έτη & S0=0).

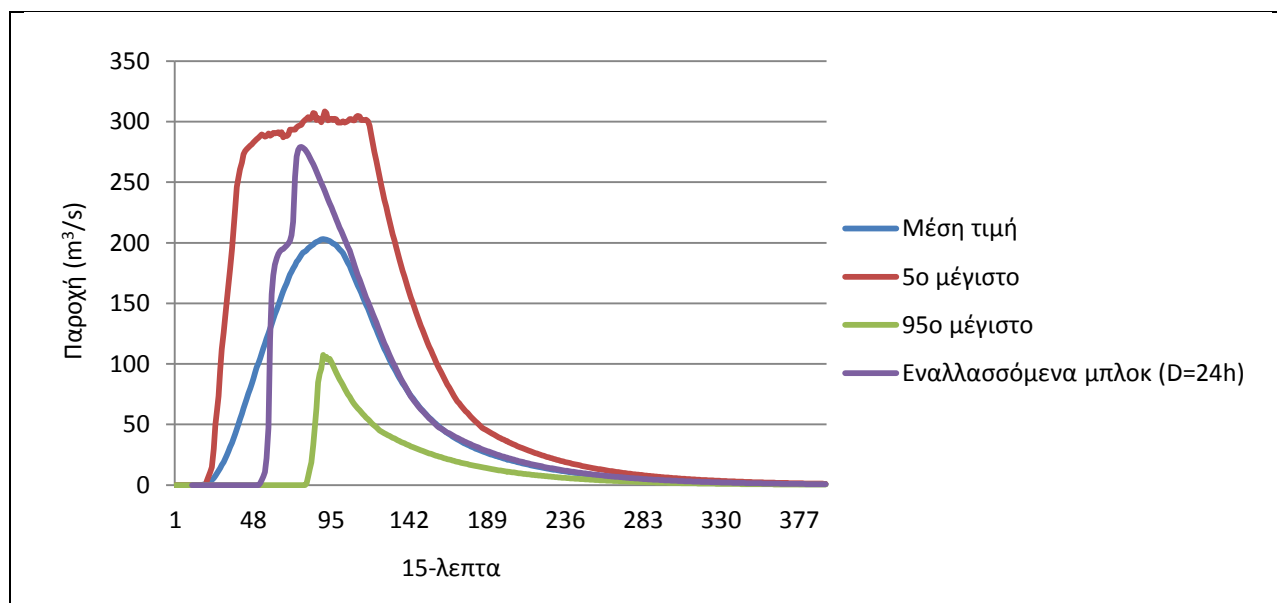


**Σχήμα ΠΒ-4** Στατιστικά χαρακτηριστικά των εκατό κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ (T=100 έτη & S0=K/2).

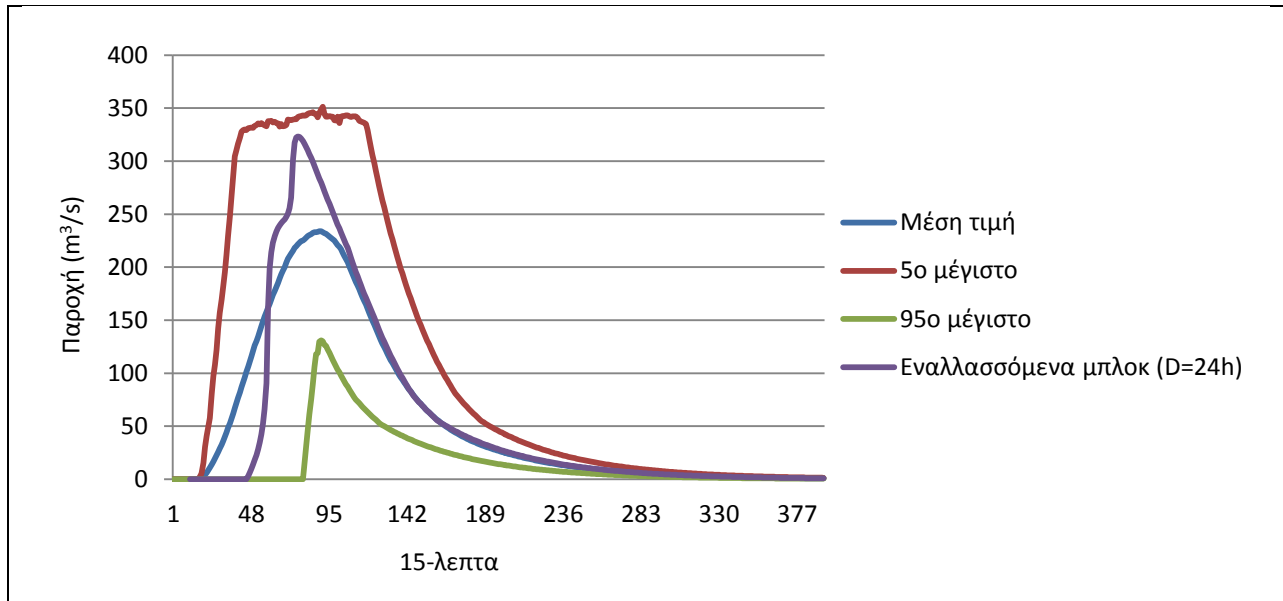




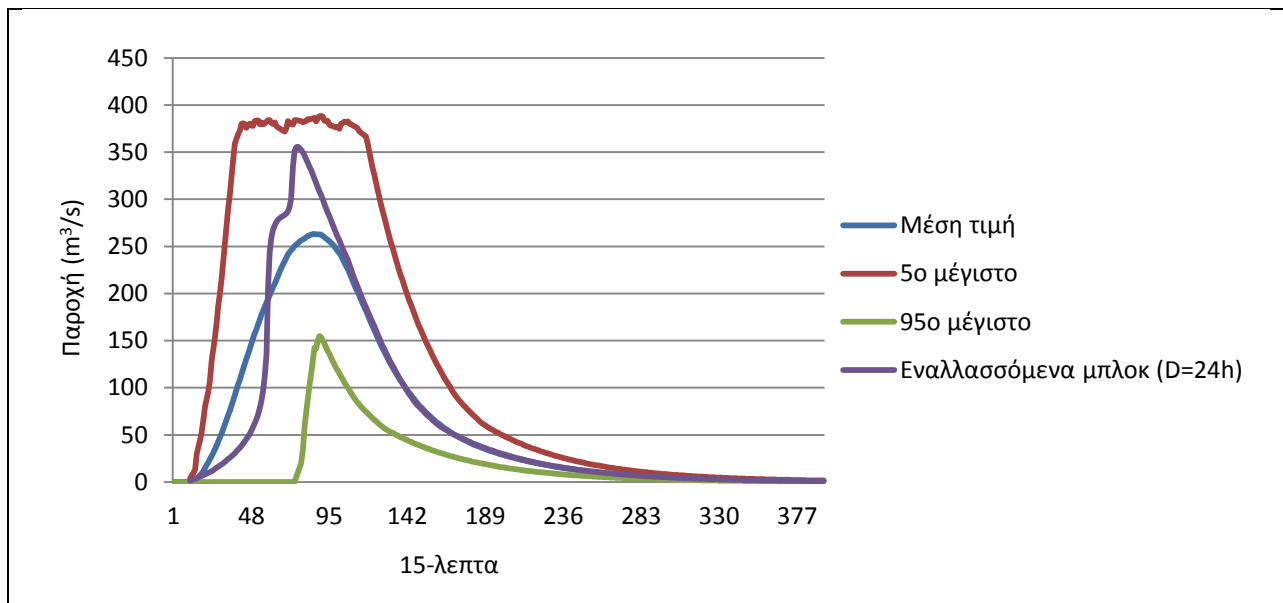
**Σχήμα ΠΒ-5** Στατιστικά χαρακτηριστικά των εκατό κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ (T=100 έτη & S0=K).



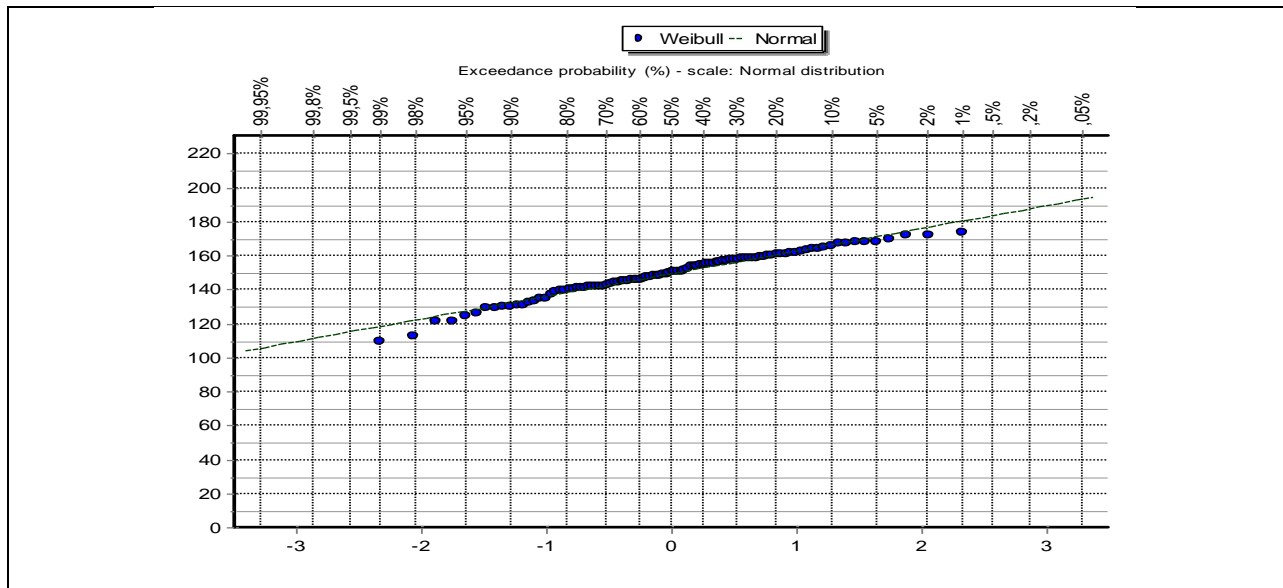
**Σχήμα ΠΒ-6** Στατιστικά χαρακτηριστικά των εκατό κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ (T=1000 έτη & S0=0).



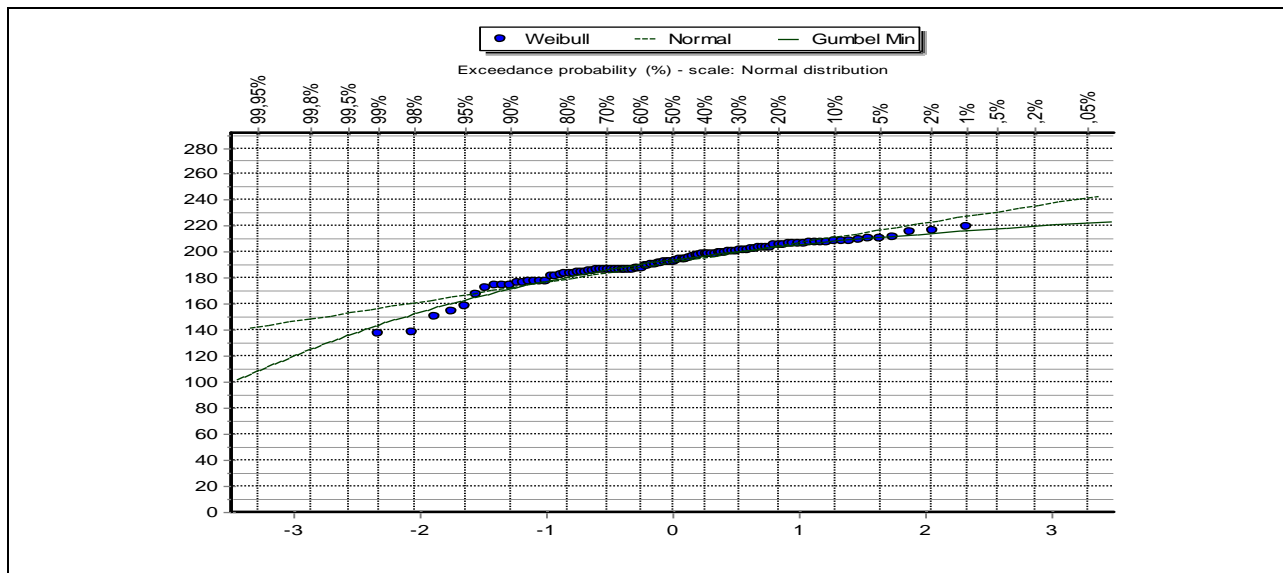
**Σχήμα ΠΒ-7** Στατιστικά χαρακτηριστικά των εκατό κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ (T=1000 έτη & S0=K/2).



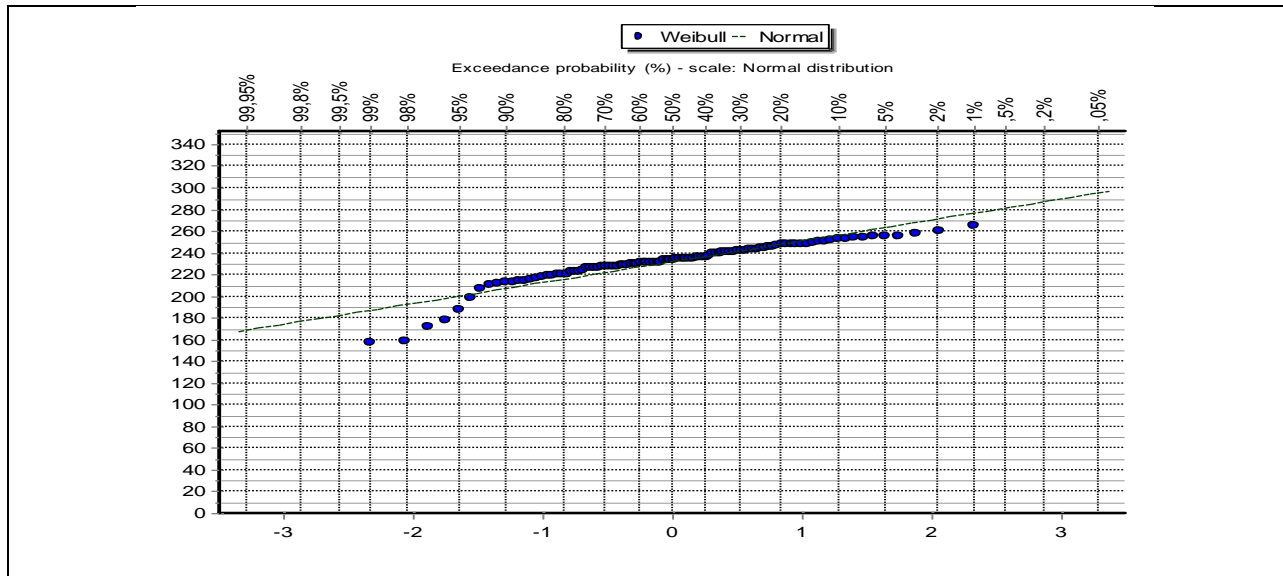
**Σχήμα ΠΒ-8** Στατιστικά χαρακτηριστικά των εκατό κατανομών παροχής για κάθε 15-λεπτό & σύγκριση με παροχή από τη μέθοδο των μπλοκ (T=1000 έτη & S0=K).



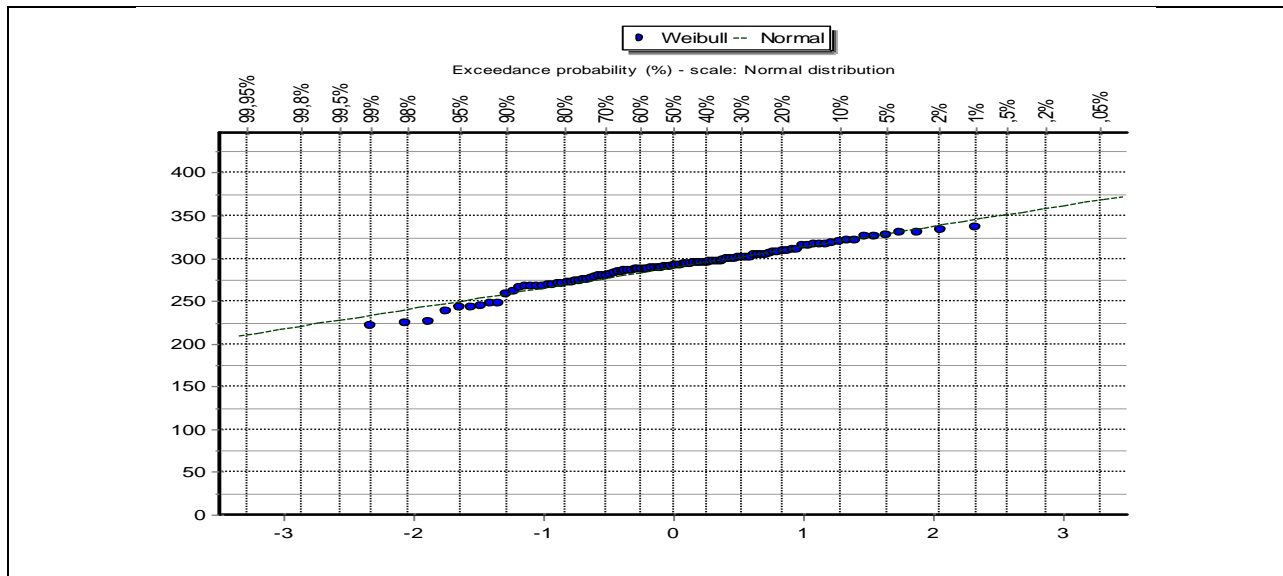
Σχήμα ΠΒ-9 Κατανομή μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=100$  έτη και  $S_0=0$ .



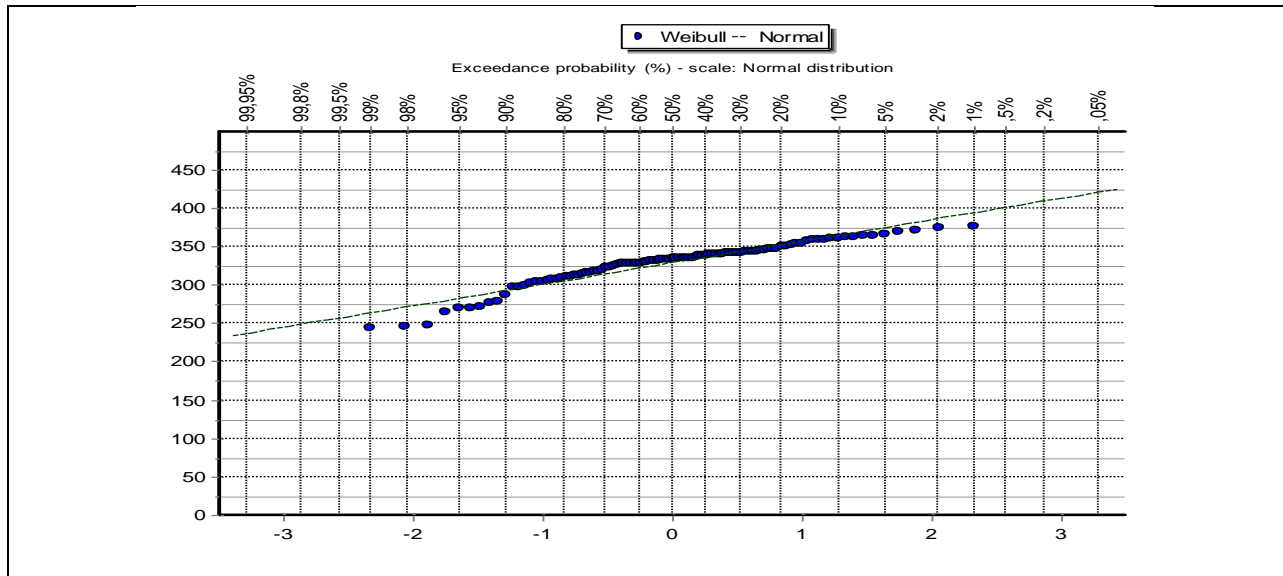
Σχήμα ΠΒ-10 Κατανομή μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=100$  έτη και  $S_0=K/2$ .



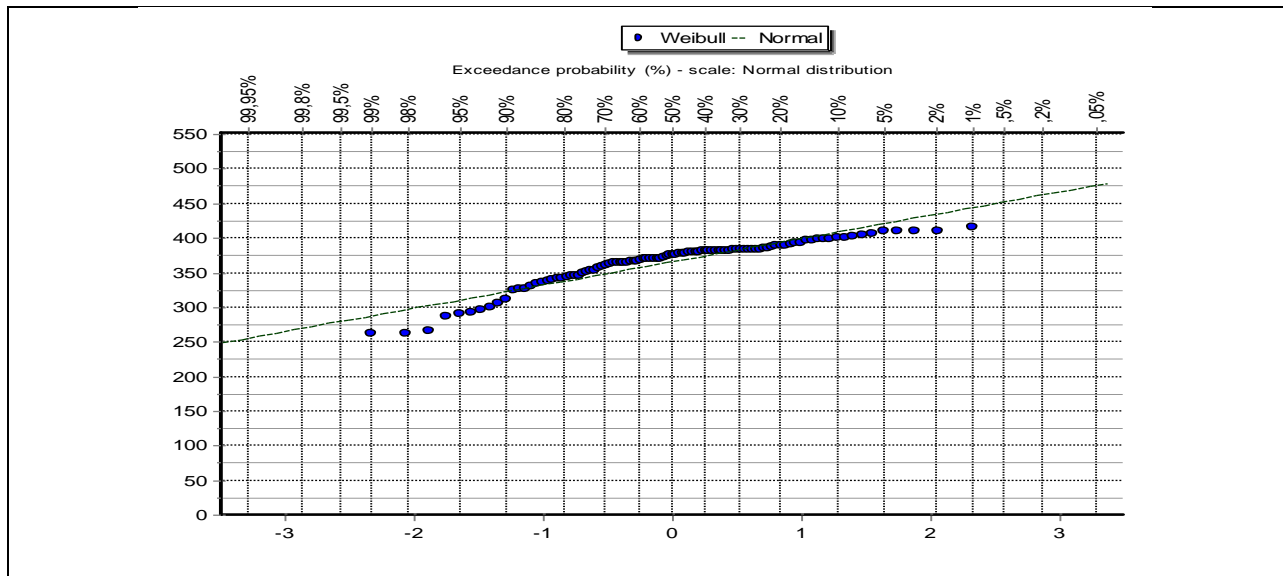
Σχήμα ΠΒ-11 Κατανομή μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για T=100 έτη και  $S_0=K$ .



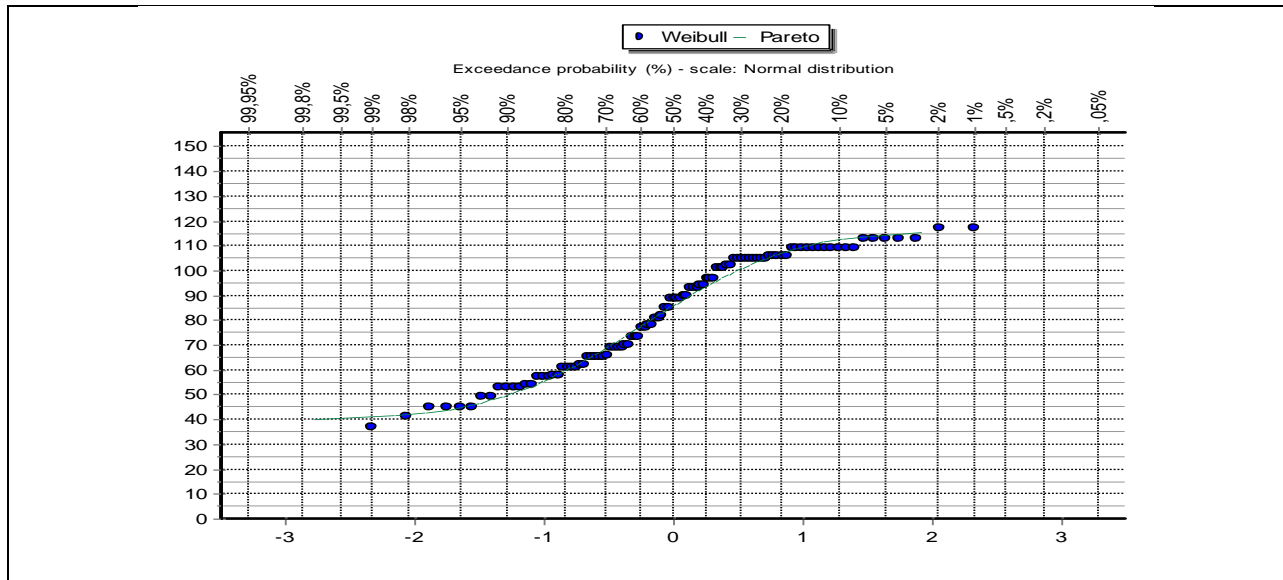
Σχήμα ΠΒ-12 Κατανομή μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για T=1000 έτη και  $S_0=0$ .



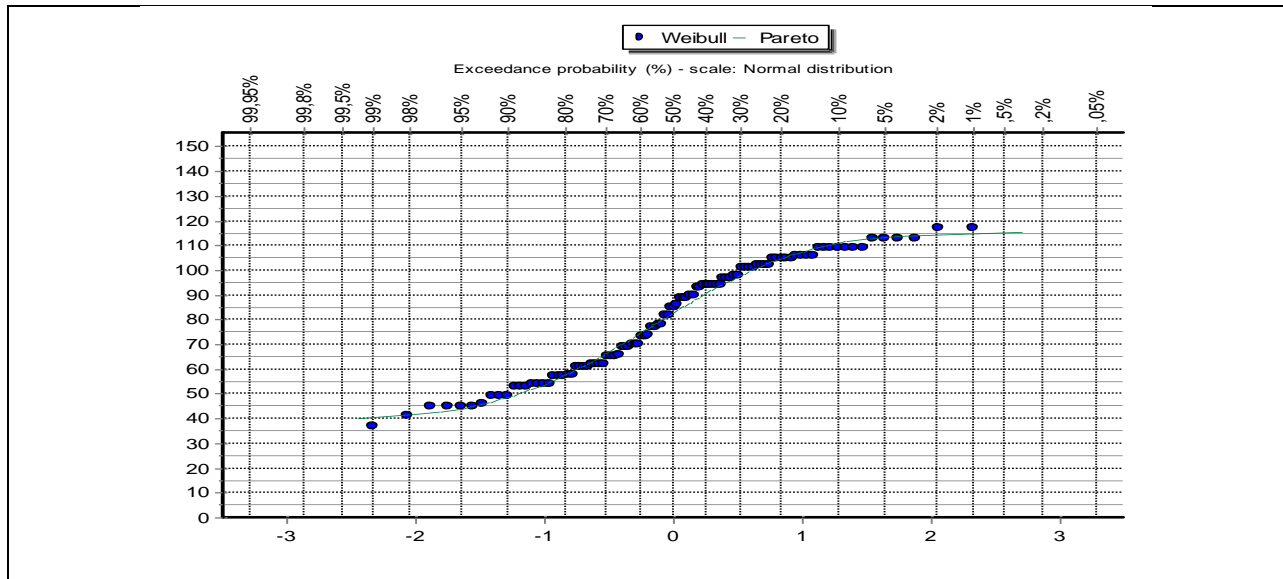
Σχήμα ΠΒ-13 Κατανομή μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για T=1000 έτη και  $S_0=K/2$ .



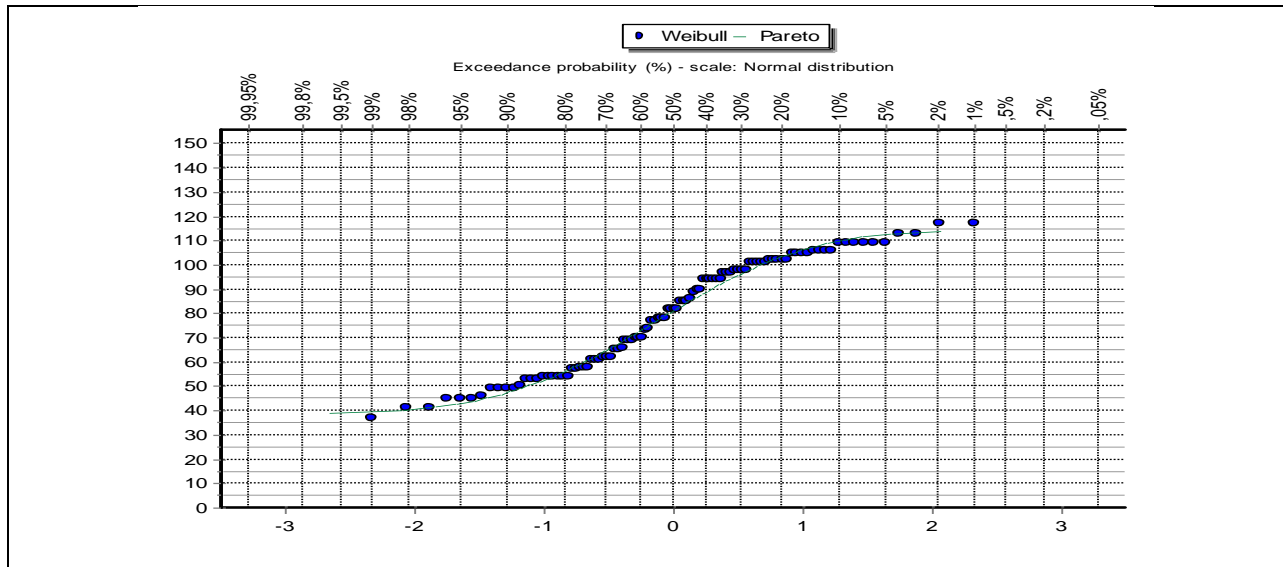
Σχήμα ΠΒ-14 Κατανομή μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για T=1000 έτη και  $S_0=K$ .



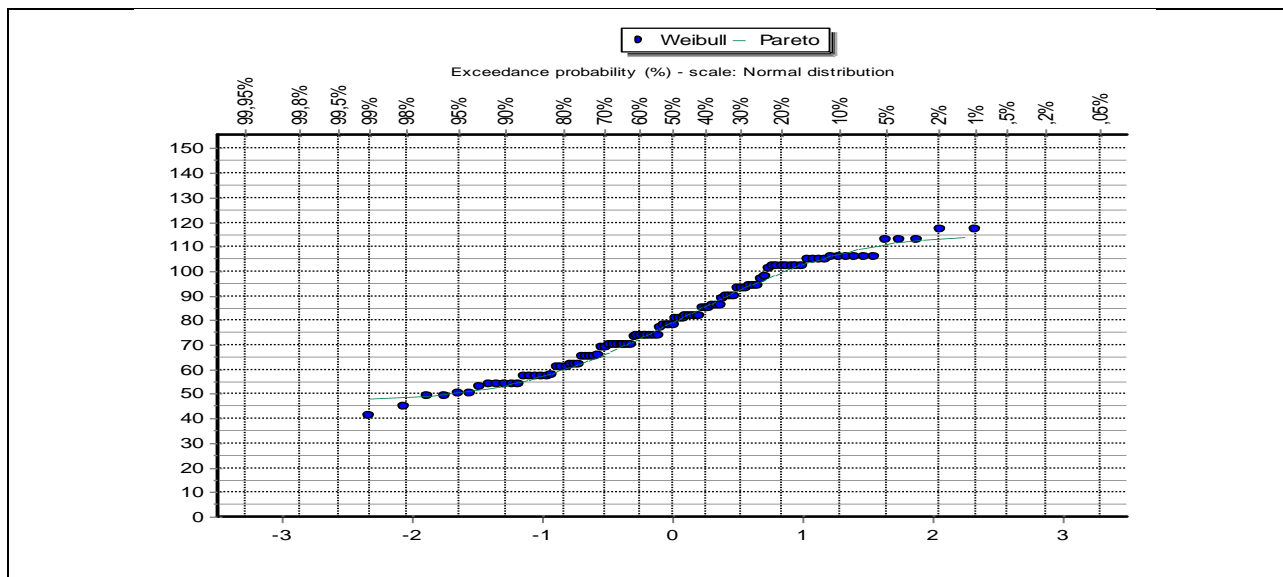
Σχήμα ΠΒ-15 Κατανομή χρόνων εμφάνισης μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=100$  έτη και  $S_0=0$ .



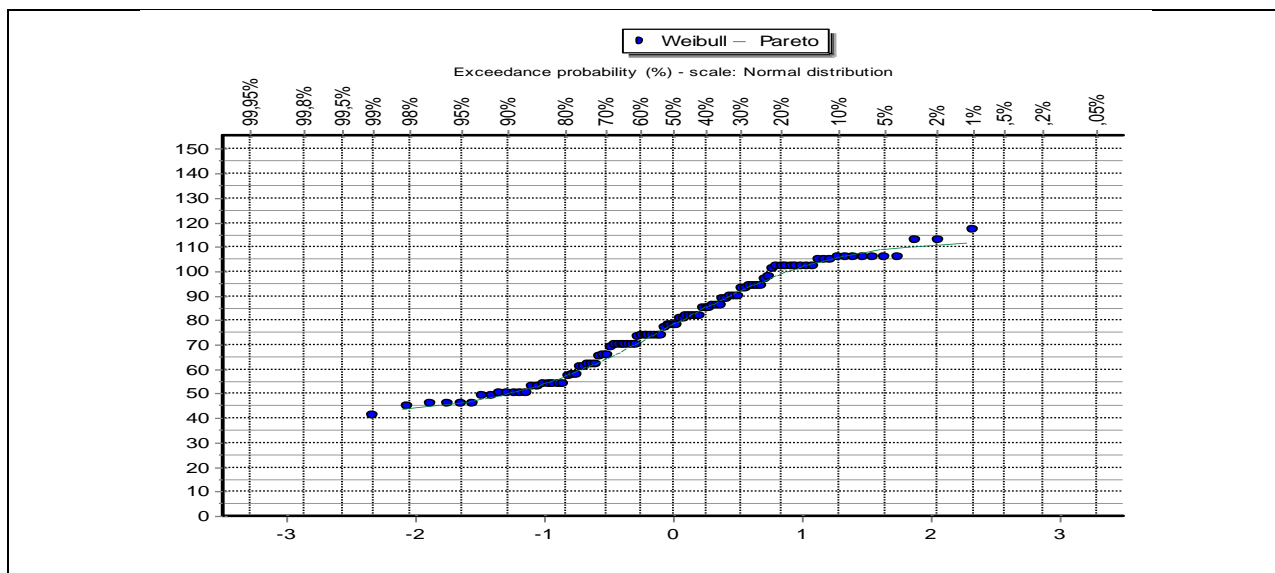
Σχήμα ΠΒ-16 Κατανομή χρόνων εμφάνισης μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=100$  έτη και  $S_0=K/2$ .



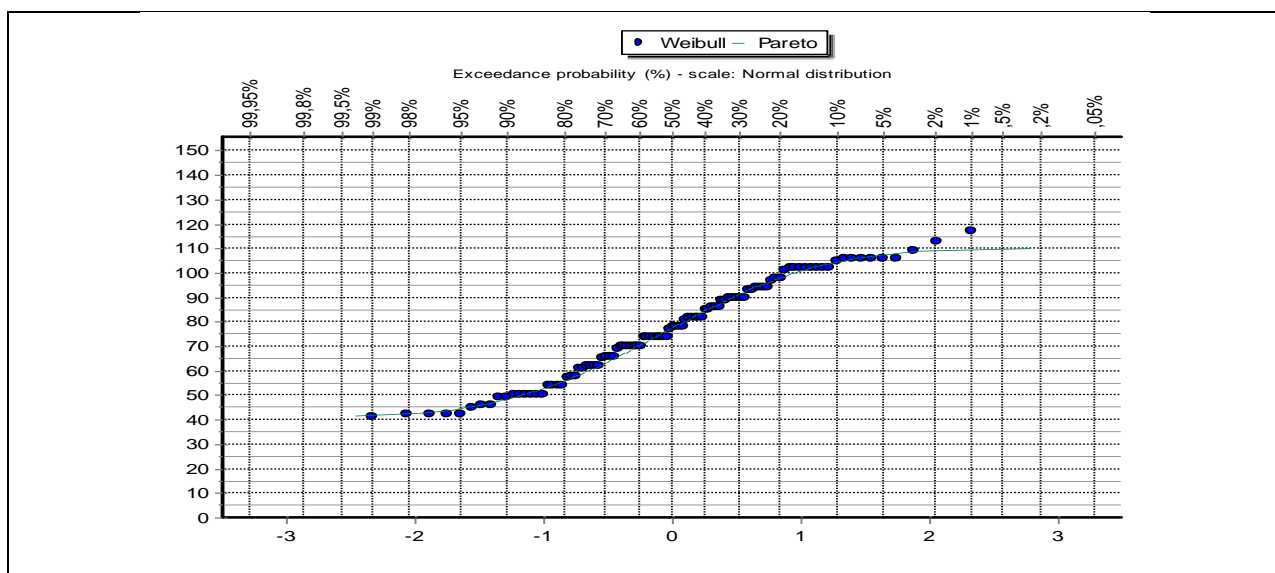
Σχήμα ΠΒ-17 Κατανομή χρόνων εμφάνισης μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=100$  έτη και  $S_0=K$ .



Σχήμα ΠΒ-18 Κατανομή χρόνων εμφάνισης μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=1000$  έτη και  $S_0=0$ .

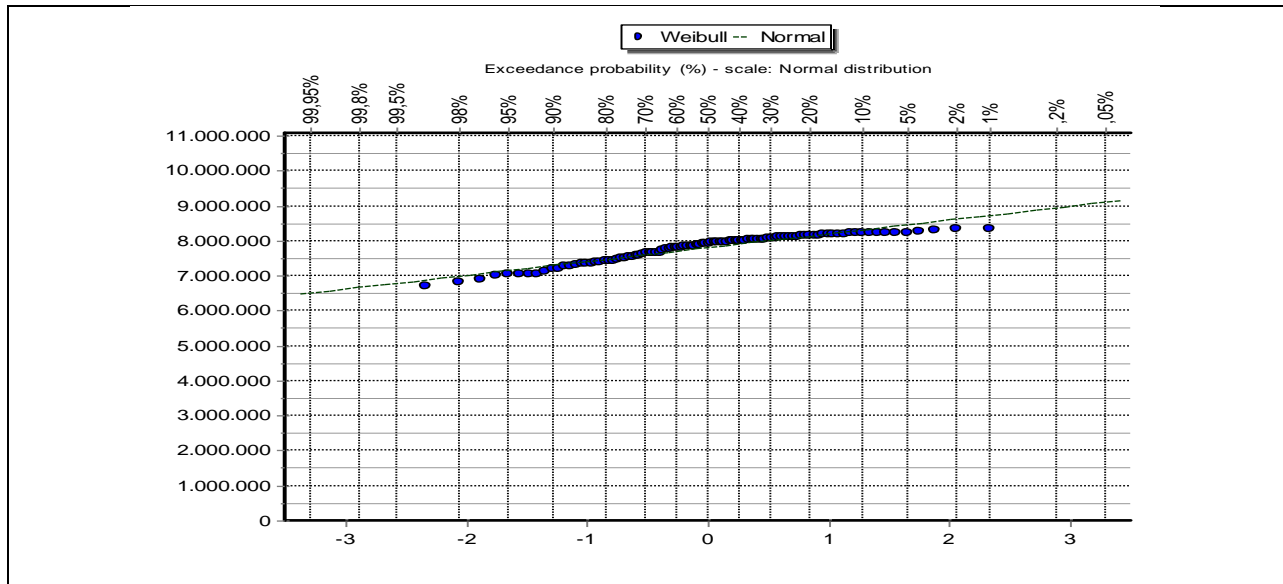


Σχήμα ΠΒ-19 Κατανομή χρόνων εμφάνισης μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=1000$  έτη και  $S0=K/2$ .

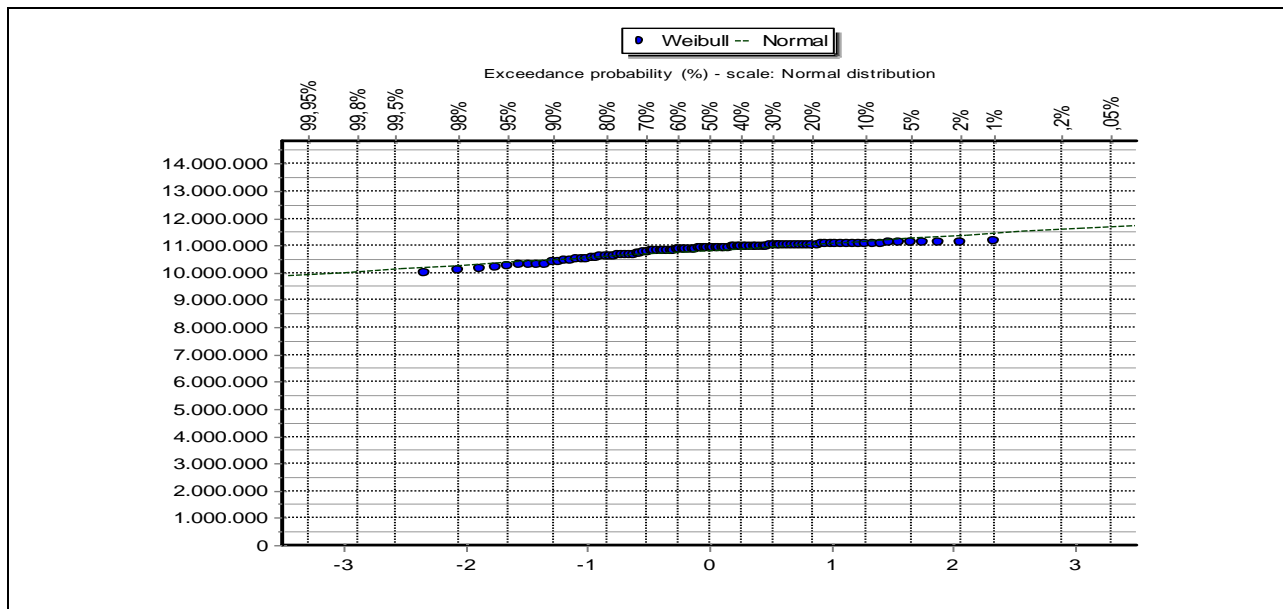


Σχήμα ΠΒ-20 Κατανομή χρόνων εμφάνισης μέγιστων παροχών των εκατό κατανομών παροχής για  $T=1000$  έτη και  $S0=K$ .

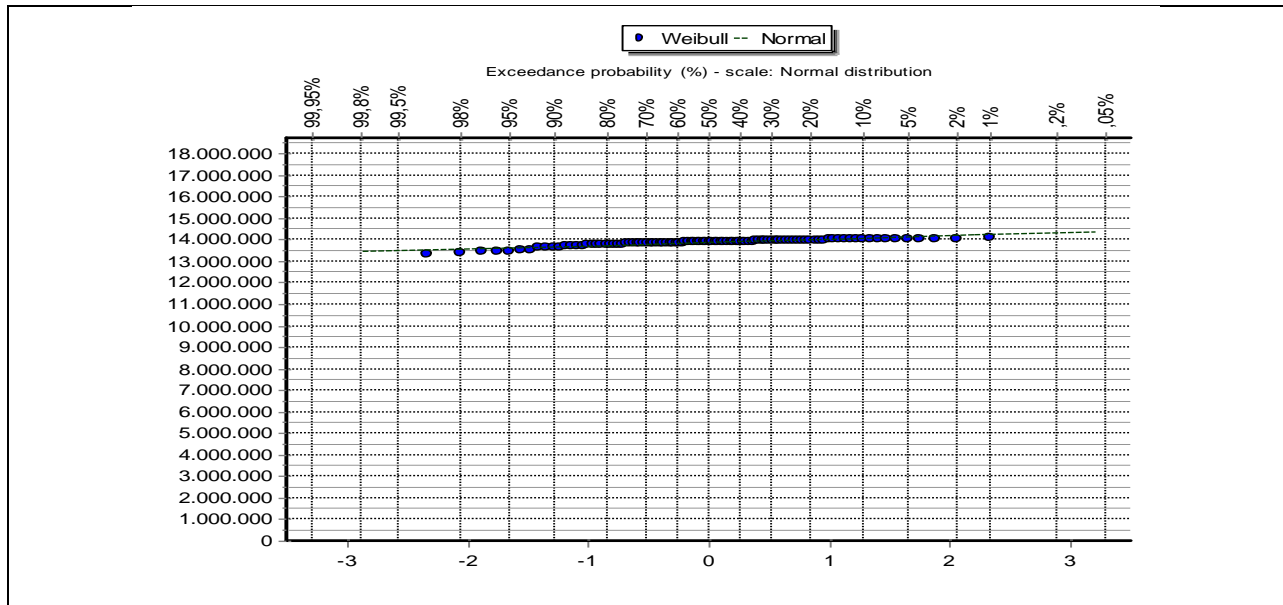




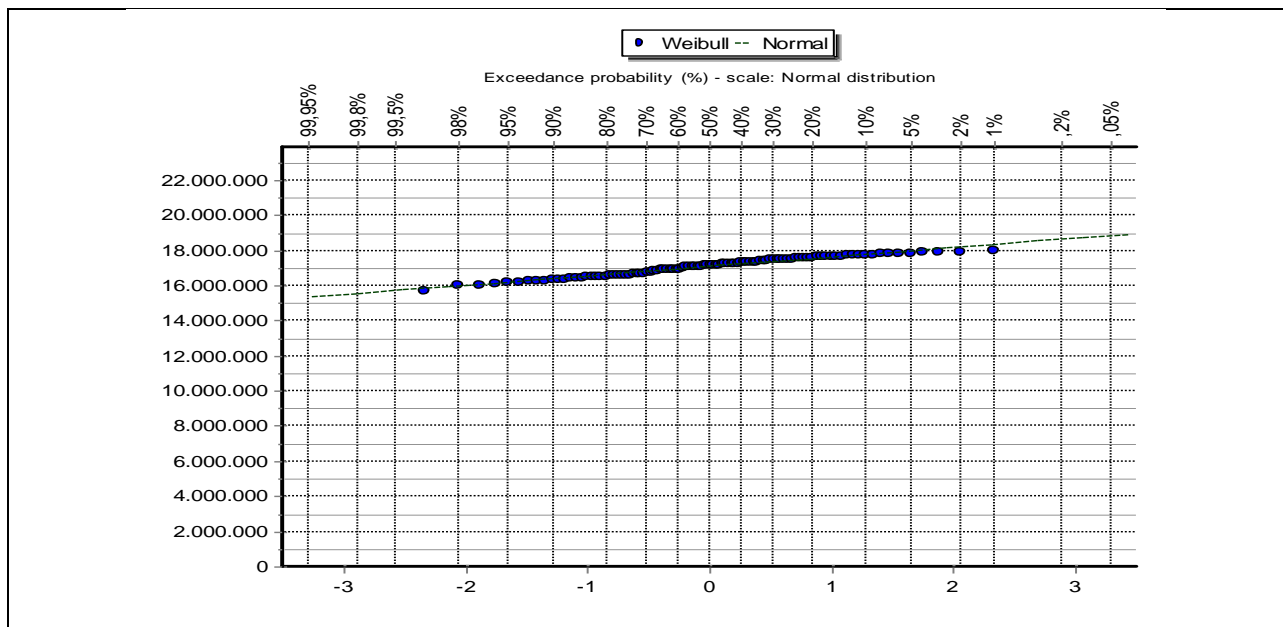
Σχήμα ΠΒ-21 Κατανομή όγκων απορροής των εκατό κατανομών παροχής για T=100 έτη και  $S_0=0$ .



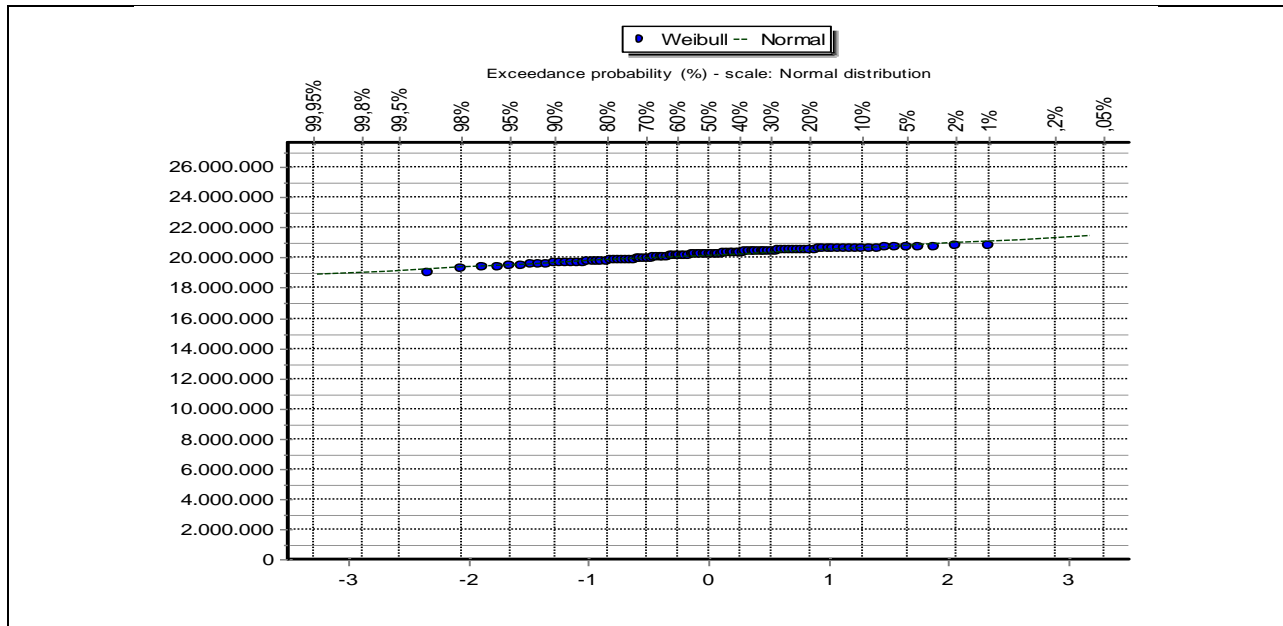
Σχήμα ΠΒ-22 Κατανομή όγκων απορροής των εκατό κατανομών παροχής για T=100 έτη και  $S_0=K/2$ .



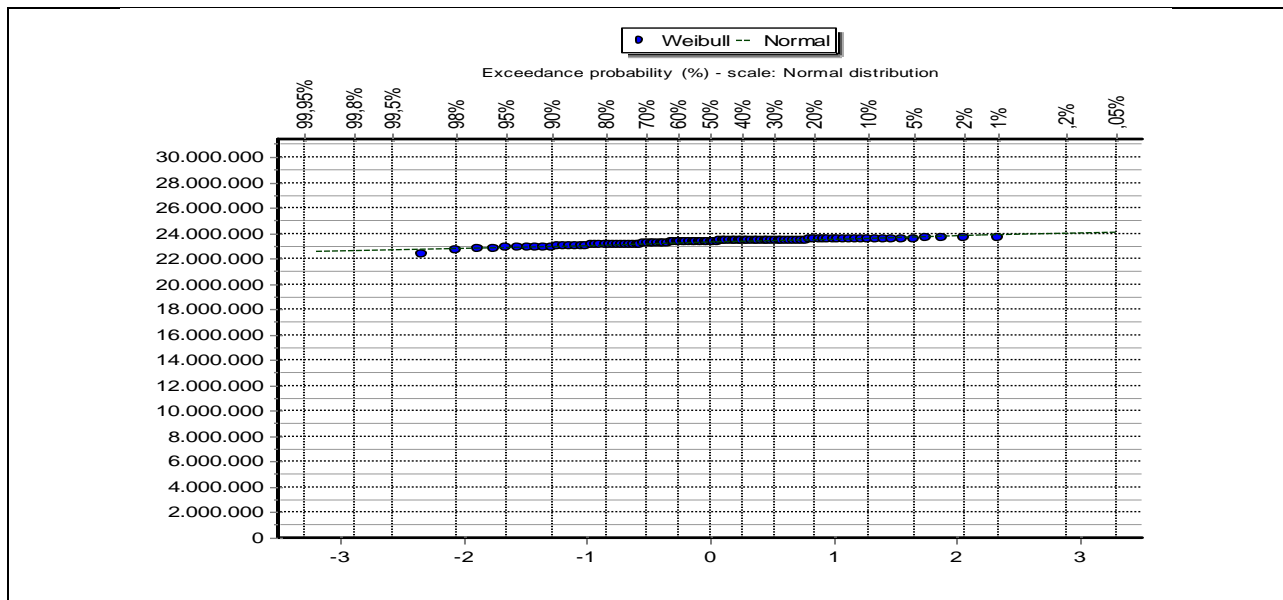
Σχήμα ΠΒ-23 Κατανομή όγκων απορροής των εκατό κατανομών παροχής για T=100 έτη και S0=K.



Σχήμα ΠΒ-24 Κατανομή όγκων απορροής των εκατό κατανομών παροχής για T=1000 έτη και S0=0.



Σχήμα ΠΒ-25 Κατανομή όγκων απορροής των εκατό κατανομών παροχής για T=1000 έτη και  $S_0=K/2$ .



Σχήμα ΠΒ-26 Κατανομή όγκων απορροής των εκατό κατανομών παροχής για T=1000 έτη και  $S_0=K$ .

