



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ**  
**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ**  
**ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΜΕ ΤΗ**  
**ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ**  
**ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

*Τελική Έκθεση στα Πλαίσια του Προγράμματος*  
*Βασικής Έρευνας "Κωνσταντίνος Καραθεοδωρή"*

**Σίμων-Μιχαήλ Παπαλεξίου**  
**&**  
**Ανδρέας Ευστρατιάδης**

**Αθήνα, Νοέμβριος 2009**

**Επιστημονικός υπεύθυνος: Δ. Κουτσογιάννης**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1	Ιστορικό – Αντικείμενο έρευνας.....	1
1.2	Διάρθρωση τεύχους .....	1
1.3	Ομάδα μελέτης.....	2
<b>2</b>	<b>Περιοχή μελέτης .....</b>	<b>4</b>
2.1	Όρια περιοχής και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά .....	4
2.2	Υδρογραφικό δίκτυο – Καρστικές πηγές.....	5
2.3	Χρήσεις νερού και βασικά έργα υποδομής.....	7
2.4	Συλλογή πρωτογενών δεδομένων .....	8
2.4.1	Γεωγραφικά δεδομένα .....	8
2.4.2	Υδρολογικά δεδομένα.....	10
2.4.3	Δεδομένα αρδευτικών αναγκών .....	14
<b>3</b>	<b>Πρωτογενής επεξεργασία ημερήσιων βροχών .....</b>	<b>15</b>
3.1	Συλλογή και επικαιροποίηση χρονοσειρών.....	15
3.2	Συγχρονισμός χρονοσειρών .....	17
3.3	Συμπλήρωση χρονοσειρών .....	18
<b>4</b>	<b>Στατιστική ανάλυση ιστορικών βροχοπτώσεων .....</b>	<b>20</b>
4.1	Περιγραφική στατιστική ανάλυση.....	20
4.1.1	Βασικά περιγραφικά μέτρα.....	20
4.1.2	Ετήσιες χρονοσειρές .....	21
4.1.3	Ημερήσιες χρονοσειρές .....	22
4.1.4	Ημερήσιες χρονοσειρές σε μηνιαία βάση.....	24
4.1.5	Ημερήσιες χρονοσειρές μεγίστων .....	25
4.2	Προσαρμογή κατανομών .....	28
4.3	Ανάλυση αυτοσυσχετίσεων και ετεροσυσχετίσεων .....	32

<b>5</b>	<b>Στοχαστική μοντελοποίηση της βροχόπτωσης.....</b>	<b>35</b>
5.1	Επιλογή του στοχαστικού μοντέλου.....	35
5.2	Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών .....	37
5.2.1	Κανονικοποίηση των ιστορικών χρονοσειρών.....	37
5.2.2	Εκτίμηση μητρώων συσχετίσεων και παραμέτρων μοντέλου.....	38
5.2.3	Παραγωγή συνθετικών βροχοπτώσεων .....	39
<b>6</b>	<b>Στατιστική ανάλυση συνθετικών χρονοσειρών .....</b>	<b>40</b>
6.1	Ανάλυση εμπειρικών κατανομών .....	40
6.1.1	Ετήσιες χρονοσειρές συνθετικής βροχής.....	40
6.1.2	Ημερήσιες χρονοσειρές συνθετικής βροχής.....	41
6.1.3	Ημερήσιες χρονοσειρές συνθετικής βροχής σε μηνιαία βάση .....	42
6.1.4	Ημερήσιες χρονοσειρές μεγίστων συνθετικής βροχής.....	44
6.2	Ανάλυση αυτοσυσχετίσεων και ετεροσυσχετίσεων συνθετικής βροχής.....	46
<b>7</b>	<b>Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....</b>	<b>49</b>
7.1	Γενικά.....	49
7.2	Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....	50
7.2.1	Βασικές αρχές και συνοπτική περιγραφή του μοντέλου .....	50
7.2.2	Δεδομένα εισόδου.....	52
7.2.3	Μοντέλο επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών .....	53
7.2.4	Μοντέλο υπόγειας ροής.....	55
7.2.5	Μοντέλο διαχείρισης υδατικών πόρων.....	57
7.2.6	Μοντέλο διόδευσης ημερήσιων παροχών .....	59
7.3	Σχηματοποίηση υδροσυστήματος Βοιωτικού Κηφισού .....	61
7.3.1	Υδρογραφικό δίκτυο.....	61
7.3.2	Διαμόρφωση μονάδων υδρολογικής απόκρισης.....	63
7.3.3	Σχηματοποίηση υδροφορέα.....	64
7.3.4	Σχηματοποίηση υδροσυστήματος.....	66
7.3.5	Χαρακτηριστικά μεγέθη διόδευσης.....	69
7.4	Βαθμονόμηση μοντέλου .....	70

7.4.1	Περίοδος ελέγχου .....	70
7.4.2	Χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης .....	71
7.4.3	Χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής .....	73
7.4.4	Χρονοσειρές παροχής .....	75
7.4.5	Στόχοι και περιορισμοί .....	77
7.4.6	Παράμετροι και μεταβλητές ελέγχου .....	78
7.4.7	Αρχικές και οριακές συνθήκες .....	79
7.4.8	Διατύπωση στοχαστικής συνάρτησης .....	79
7.4.9	Προσαρμογή μοντέλου στις θέσεις ελέγχου .....	81
7.5	Εφαρμογή του μοντέλου για στοχαστική προσομοίωση .....	89
7.5.1	Σκοπός και μεθοδολογία .....	89
7.5.2	Δεδομένα εισόδου .....	90
7.5.3	Αποτελέσματα .....	90

## **8 Στατιστική ανάλυση συνθετικών παροχών και εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου ..... 93**

8.1	Ανάλυση εμπειρικών κατανομών παροχών .....	93
8.1.1	Ετήσιες χρονοσειρές συνθετικών παροχών .....	93
8.1.2	Ημερήσιες χρονοσειρές συνθετικών παροχών .....	94
8.1.3	Ημερήσιες χρονοσειρές συνθετικών παροχών σε μηνιαία βάση .....	95
8.1.4	Ημερήσιες χρονοσειρές μεγίστων .....	96
8.2	Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου .....	99
8.2.1	Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών στην έξοδο της λεκάνης .....	99
8.2.2	Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών στις λοιπές θέσεις ελέγχου .....	101

## **9 Συμπεράσματα ..... 103**

## **10 Αναφορές ..... 108**

---

# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Ιστορικό – Αντικείμενο έρευνας

Στα πλαίσια του Προγράμματος Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας του Ε.Μ.Π. «Κωνσταντίνος Καραθεοδωρή», η Συγκλητική Επιτροπή Βασικής Έρευνας του Ε.Μ.Π. ανέθεσε στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, το ερευνητικό έργο «Εκτίμηση και πρόγνωση του πλημμυρικού κινδύνου με χρήση υδρολογικών μοντέλων και πιθανοτικών μεθόδων» με επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθηγητή Δημήτρη Κουτσογιάννη.

Το αντικείμενο του έργου σύμφωνα με την πρόταση που κατατέθηκε είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου εκτίμησης και πρόγνωσης του πλημμυρικού κινδύνου, με την σύζευξη στοχαστικών, υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων, που θα εφαρμοστεί στη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Το έργο περιλαμβάνει πέντε ενότητες:

Ενότητα 1: Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Ενότητα 2: Στατιστική και στοχαστική ανάλυση ημερήσιων βροχοπτώσεων

Ενότητα 3: Βελτίωση και προσαρμογή υδρολογικού μοντέλου

Ενότητα 4: Εκτίμηση κατωφλίων απορροής

Ενότητα 5: Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου, για διάφορα σενάρια

Στα παραδοτέα του έργου περιλαμβάνονται η παρούσα έκθεση, η οποία περιγράφει και αναλύει τα αποτελέσματα του έργου, και ένας συνοδευτικός ψηφιακός δίσκος με τα δεδομένα εισόδου του υδρολογικού μοντέλου (γεωγραφικά, υδρολογικά, διαχειριστικά) και τις ιστορικές και συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και παροχής.<sup>1</sup>

## 1.2 Διάρθρωση τεύχους

Η παρούσα έκθεση αποτελείται από εννέα κεφάλαια και οχτώ παραρτήματα.

---

<sup>1</sup> Ορισμένα από τα αποτελέσματα του ερευνητικού έργου προγραμματίζεται να δημοσιευτούν σε διεθνή περιοδικά ή πρακτικά διεθνών συνεδρίων και για το λόγο αυτό πολλά από τα σχήματα της παρούσας έκθεσης έχουν λατινικούς χαρακτήρες.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** που αποτελεί την εισαγωγή της έκθεσης παρουσιάζονται το αντικείμενο του έργου, η διάρθρωση του τεύχους και η ομάδα μελέτης.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφεται η περιοχή μελέτης, που είναι η λεκάνη απορροής και το υδροσύστημα του Βοιωτικού Κηφισού.

Το **τρίτο κεφάλαιο** αναφέρεται στη συλλογή και συμπλήρωση των ιστορικών δεδομένων βροχόπτωσης στους σταθμούς της περιοχής μελέτης.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των ιστορικών χρονοσειρών της βροχόπτωσης.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναλύεται το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της ημερήσιας βροχόπτωσης καθώς και η μεθοδολογία παραγωγής των συνθετικών χρονοσειρών.

Στο **έκτο κεφάλαιο** πραγματοποιείται μια στατιστική ανάλυση των συνθετικών χρονοσειρών της ημερήσιας βροχόπτωσης.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** περιγράφεται η προετοιμασία των δεδομένων και η διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου υδρολογικής-υδρογεωλογικής προσομοίωσης ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, για την εκτίμηση των ημερήσιων συνθετικών απορροών σε διάφορα σημεία ελέγχου της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Στο **όγδοο κεφάλαιο** πραγματοποιείται η ανάλυση των συνθετικών απορροών με έμφαση στα ακραία γεγονότα.

Τέλος, στο **ένατο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της έρευνας, σε σχέση και με τους αρχικούς στόχους του έργου.

Στα Παραρτήματα Π1 έως Π5 παρουσιάζονται οι πίνακες των στατιστικών αναλύσεων των ιστορικών και των συνθετικών δεδομένων, ενώ στα Παραρτήματα Σ1 έως Σ3 παρουσιάζονται διαφορά γραφήματα που σχετίζονται με την ανάλυση των ιστορικών και συνθετικών δεδομένων.

### 1.3 Ομάδα μελέτης

Την ομάδα μελέτης του έργου αποτελέσαν οι:

- Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ
- Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc

- Σίμων-Μιχαήλ Παπαλεξίου, Περιβαλλοντολόγος, MSc, Υποψήφιος Δρ. ΕΜΠ
- Αριστοτέλης Τέγος, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc

Ο Δημήτρης Κουτσογιάννης είχε την επιστημονική ευθύνη του συνόλου του έργου, ο Ανδρέας Ευστρατιάδης πραγματοποίησε την προσομοίωση των απορροών και συνέγραψε τα κεφάλαια 2 και 7, ο Σίμων-Μιχαήλ Παπαλεξίου πραγματοποίησε τη στατιστική και στοχαστική ανάλυση των ιστορικών και συνθετικών βροχοπτώσεων, των συνθετικών απορροών, την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης της βροχόπτωσης και συνέγραψε τα κεφάλαια 1, 3, 4, 5, 6 και 8, και τέλος, ο Αριστοτέλης Τέγος συνέβαλε στη συλλογή και ανάλυση των ιστορικών βροχοπτώσεων.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Στην πρόταση προβλεπόταν και η συμμετοχή του Δρ. Κωνσταντίνου Γεωργακάκου από το Hydrologic Research Center (ΗΠΑ) καθώς και η μετάβαση του Υποψήφιου Δρ. Σ. Μ. Παπαλεξίου στο εν λόγω ερευνητικό κέντρο, αλλά για λόγους μη επιστημονικούς δεν κατέστη δυνατή η επίσκεψη.

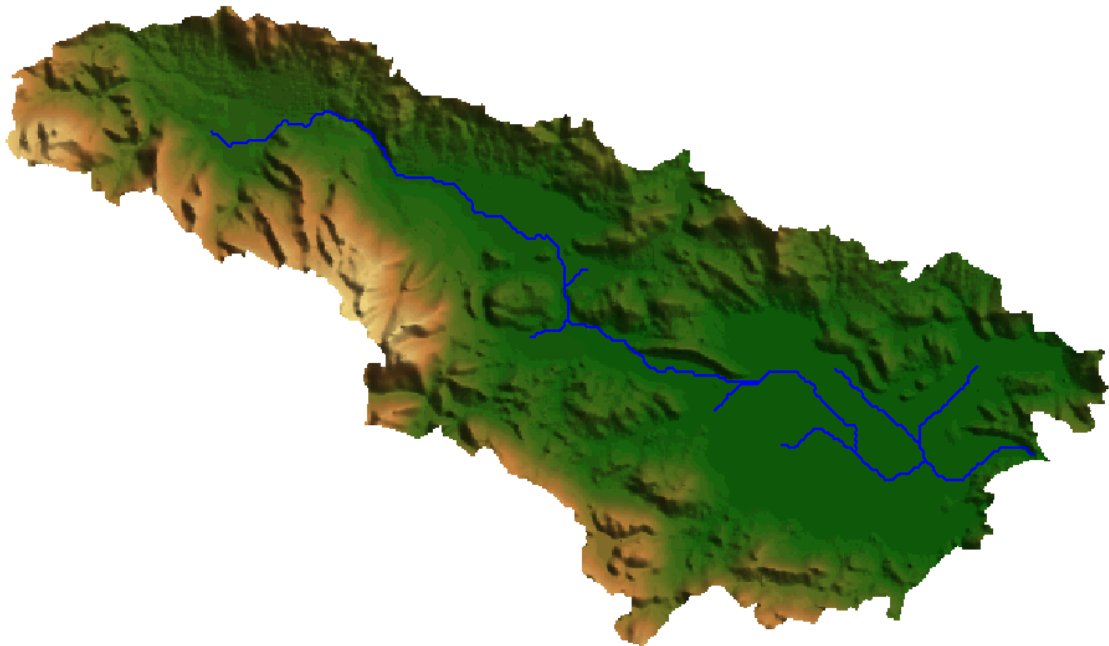
---

## 2 Περιοχή μελέτης

---

### 2.1 Όρια περιοχής και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τη λεκάνη απορροής, τον υδροφορέα και το υδροσύστημα του Βοιωτικού Κηφισού (Σχήμα 2.1). Η λεκάνη έχει έκταση 1852.8 km<sup>2</sup> και είναι η μεγαλύτερη και η σημαντικότερη, από πλευράς υδατικού δυναμικού, της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Ο υδροκρίτης της ορίζεται βόρεια και βορειοανατολικά από τα όρη Οίτη, Καλλίδρομο, Σφίγγιο και Χλωμό, και νότια και νοτιοδυτικά από τα όρη Γκιώνα, Παρνασσός και Ελικώνας. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης ανέρχεται σε 481.4 m, ενώ το μέγιστο υψόμετρό της είναι στην κορυφή Λιάκουρα του Παρνασσού, η οποία φτάνει τα +2457 m.



Σχήμα 2.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού.

Στην πραγματικότητα, πρόκειται για μια κλειστή (ενδοροϊκή) λεκάνη, οι απορροές της οποίας τροφοδοτούσαν τη ρηχή λίμνη της Κωπαΐδας, που καταλάμβανε μια έκταση που κυμαινόταν από 150 km<sup>2</sup>, σε περιόδους ανομβρίας, μέχρι 250 km<sup>2</sup>, σε περιόδους υψηλής υδροφορίας. Τα νερά αυτά, με τη σειρά τους, αποστραγγίζονταν προς γειτονικές λεκάνες και τη θάλασσα,



μέσω ενός πολύπλοκου συστήματος καταβοθρών. Η αποξήρανση της λίμνης έγινε στα τέλη του 19ου αιώνα, οπότε κατασκευάστηκαν μια πληθώρα από αντιπλημμυρικά και αποστραγγιστικά έργα, που διοχετεύουν τα νερά της λεκάνης σε ένα κεντρικό κανάλι (Συγκεντρωτική Διώρυγα), και στη συνέχεια, μέσω της Σήραγγας Καρδίτσας, τα εκτρέπουν προς τη γειτονική λίμνη Υλίκη για την ενίσχυση του υδατικού δυναμικού της Αθήνας. Η τελευταία αποτελεί έναν από τους τέσσερις ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας· μάλιστα, κατά την περίοδο 1950-1980 υπήρξε ο κύριος υδατικός της πόρος. Η χωρητικότητα της Υλίκης φτάνει τα 600 hm<sup>3</sup>, ενώ η μέγιστη στάθμη της ανέρχεται στα +80 m (από τα +40 m, περίπου, που ήταν πριν την αποξήρανση της Κωπαΐδας).

Λόγω της ιδιόμορφης γεωλογικής και υδρογεωλογικής της δομής, που οφείλεται στην κυριαρχία των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού διαθέτει πολύ αξιόλογο υπόγειο και πηγαίο υδατικό δυναμικό. Χαρακτηριστικό είναι ότι η συνεισφορά της βασικής απορροής στο συνολικό επιφανειακό υδατικό δυναμικό της λεκάνης ξεπερνά το 50%, ενώ σημαντικό μέρος του υπόγειου δυναμικού εκφορτίζεται εκτός λεκάνης, είτε επιφανειακά (μέσω πηγών) είτε υποθαλάσσια. Τα μέτωπα των υποθαλάσσιων διαφυγών είναι ιδιαίτερα εκτενή, με κατεύθυνση προς τον Μαλιακό και τον Βόρειο Ευβοϊκό Κόλπο, ενώ επιφανειακές εκφορτίσεις εμφανίζονται στις περιοχές Τραγάνας και Λάρυμνας. Επιπλέον, είναι αρκετά πιθανό μέρος των υπόγειων εκροών να τροφοδοτεί την Υλίκη, ιδιαίτερα όταν η στάθμη της βρίσκεται χαμηλά.

## **2.2 Υδρογραφικό δίκτυο – Καρστικές πηγές**

Ο κύριος κλάδος του Βοιωτικού Κηφισού έχει μήκος 102 km, περιλαμβανομένων και των τοπικών διακοπών της κοίτης του. Ο ποταμός διέρχεται από δύο μεγάλες χαράδρες στις περιοχές Μοδίου-Αμφίκλειας και Ανθοχωρίου-Μαυρονερίου, μέσω των οποίων διαμορφώνονται τρεις χαρακτηριστικές υδρογεωλογικές ενότητες, του άνω, μέσου και κάτω ρου. Ο μεγαλύτερος κλάδος του ξεκινά από τις υπώρειες του όρους Καλλίδρομο, και ακολούθως εμπλουτίζεται από τα νερά των χειμάρρων Γραβιάς και Αγοριανίτου, που τροφοδοτούνται από πολυάριθμες καρστικές πηγές. Οι κυριότερες αναβλύζουν στις υπώρειες του Παρνασσού, σε υψόμετρα περί τα +300 m (Αγία Ελεούσα, Γκατσινός, Άβυσσος, Ανατολικό Κεφαλόβρυσο ή Κάτω Αγόριανη, Δυτικό Κεφαλόβρυσο, Μαριολάτα), ενώ σε αρκετά μεγαλύτερα υψόμετρα αναπτύσσονται τα συγκροτήματα πηγών της Άνω Σουβάλας (από +640 ως +745 m) και της Άνω Αγόριανης (από +725 ως +755 m).

Κατά μήκος του μέσου ρου του Βοιωτικού Κηφισού, και ιδιαίτερα στην περιοχή Αμφίκλειας-Μοδίου, πραγματοποιούνται σημαντικές διηθήσεις, με συνέπεια τη σημαντική μείωση (έως και μηδενισμό) της παροχής του, στο ύψος της γέφυρας Ανθοχωρίου. Στην περιοχή δεν υπάρχουν αξιόλογες καρστικές πηγές, με εξαίρεση αυτές της Αγίας Παρασκευής και του Προφήτη Ηλία, σε υψόμετρο +130 m.

Στη συνέχεια, ο ποταμός διέρχεται από τα στενά της Δαύλειας, και εισέρχεται στην υπολεκάνη του κάτω ρου, όπου ενισχύεται σημαντικά από τα νερά των καρστικών πηγών Μαυρονερίου και των χειμάρρων Πλατανιάς και Αγίου Βλασίου. Οι πηγές Μαυρονερίου, που αναβλύζουν στις ανατολικές υπώρειες του Παρνασσού (Φιλοβοιωτό όρος), και σε υψόμετρα από +120 έως +124 m, διαθέτουν πολύ πλούσιο υδατικό δυναμικό, που καταδεικνύει ότι τα όρια της υδρογεωλογικής τους λεκάνης εκτείνονται πολύ πέρα από τα όρια της αντίστοιχης υδρολογικής. Μετά τη θέση του φράγματος αναρρύθμισης ΒΟΟΤ, κοντά στο χωριό Ρωμαίικο, ο ποταμός ακολουθεί πλέον την τεχνητή του κοίτη, που διανοίχτηκε στα πλαίσια των έργων αποξήρανσης της Κωπαΐδας, για να καταλήξει στην Υλίκη.

Το δεύτερο σημαντικότερο υδατόρευμα της περιοχής μελέτης είναι ο Μέλανας (Μαυροπόταμος). Παλαιότερα, όπως ο Βοιωτικός Κηφισός, έτσι και ο Μέλανας τροφοδοτούσε απευθείας την λίμνη της Κωπαΐδας. Σήμερα, τα νερά του, ενισχυόμενα και από τις εκροές των πηγών Πολυγύρας, εκτρέπονται μέσω διευθετημένης κοίτης (Τάφρος Μέλανα) προς τη Συγκεντρωτική Τάφρο και, ακολούθως, τη Διώρυγα Καρδίτσας, ενώ ένα μικρό μέρος τους, ακολουθώντας την παλιά κοίτη, κατευθύνεται προς το Κάστρο και καταλήγει στις καταβόθρες του Αγίου Ιωάννη, στην περιοχή Τοπόλια (ΒΑ του χωριού Κόκκινο).

Ο Μέλανας πηγάζει από τις ομώνυμες καρστικές πηγές, κοντά στο χωριό Ορχομενός, γνωστές στην αρχαιότητα ως πηγές Χαρίτων. Οι εν λόγω πηγές αναβλύζουν στις υπώρειες του όρους Ακόντιο, σε υψόμετρα που κυμαίνονται από +101 m μέχρι +98 m. Συνολικά, έχουν καταγραφεί 69 εμφανίσεις τους, που εκτείνονται σε μια ζώνη άνω των 2 km. Πρόκειται για εξαιρετικά πλούσιες πηγές, που παρουσιάζουν μικρές μόνο διακυμάνσεις, τόσο σε ετήσια όσο και σε υπερετήσια βάση. Ο μηχανισμός λειτουργίας τους δεν είναι γνωστός. Αρκετά παλιότερα είχε διατυπωθεί η εκδοχή ότι τροφοδοτούνται από έναν υπόγειο καρστικό ποταμό, με ροή από δυτικά προς ανατολικά, δηλαδή από τον Παρνασσό προς την Κωπαΐδα. Νεότερες απόψεις αναφέρουν ότι πρόκειται για καρστικές πηγές υπερχείλισης, τα σημεία εκροής των οποίων συμπίπτουν με διασταυρώσεις δευτερευόντων ρηγμάτων με το κύριο ρήγμα του Ακοντίου όρους και όχι με καρστικούς αγωγούς (Παπαγιαννοπούλου και Λέτσιος, 1971).

Όσον αφορά στις πηγές Πολυγύρας, πρόκειται για τέσσερις καρστικές εκφορτίσεις, που εμφανίζονται σε υψόμετρα περί τα +96 m, ενώ λόγω της γεωλογικής διαμόρφωσης της περιοχής θεωρείται αδύνατη η υδραυλική επικοινωνία τους με τις πηγές Μέλανα.

Άλλος ποταμός με σημαντική ροή είναι η Έρκυνα, που πηγάζει από τις πηγές Κρύας στη Λειβαδιά και τελικά εκτρέπεται στη Συγκεντρωτική Διώρυγα. Οι εν λόγω πηγές αναπτύσσονται στις υπώρειες του Ελικώνα, σε υψόμετρο +200 m. Τέλος, μικρότερης σημασίας πηγές, οι οποίες τροφοδοτούν μικρά ποτάμια που παλαιότερα απέρρεαν στην Κωπαΐδα, είναι αυτές του Λόφι, που αναπτύσσονται νότια του χωριού Μάζι, του Αγίου Ιωάννη, που αναβλύζουν νοτιοανατολικά του χωριού Λαφύστιο, και του Ύψηλάντη, κοντά στο χωριό Σωληνάριο.

### **2.3 Χρήσεις νερού και βασικά έργα υποδομής**

Η κύρια χρήση νερού στη λεκάνη είναι η αρδευτική. Στην περιοχή λειτουργούν τέσσερις τοπικοί οργανισμοί εγγείων βελτιώσεων (ΤΟΕΒ), που διαθέτουν οργανωμένα αρδευτικά δίκτυα. Ο πλέον σημαντικός είναι ο Οργανισμός Κωπαΐδας, που διαχειρίζεται μια έκταση 180 km<sup>2</sup> (από τα οποία αρδεύονται τα 160 km<sup>2</sup>), ενώ οι ΤΟΕΒ Λειβαδιάς, Ορχομενού και Χαιρώνειας διαχειρίζονται μια πολύ μικρότερη έκταση, της τάξης των 10 km<sup>2</sup>. Εκτός των ΤΟΕΒ, αρδευτικές περιοχές που δεν εξυπηρετούνται από δημόσια δίκτυα αναπτύσσονται και στις πεδινές περιοχές του κάτω, μέσου και άνω ρου του Βοιωτικού Κηφισού, με εκτάσεις 19.3, 50.5 και 104.5 km<sup>2</sup>. (Ζαρρής κ.ά., 1999).

Η άρδευση των καλλιεργειών πραγματοποιείται με συνδυασμένες απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά. Ειδικότερα, οι απολήψεις υπόγειων νερών γίνονται κυρίως από ευρύτερα συστήματα γεωτρήσεων και δευτερευόντως από μικρά ιδιωτικά έργα. Οι οργανωμένες γεωτρήσεις εντάσσονται σε δύο κατηγορίες, ήτοι τις παλαιότερες γεωτρήσεις του Υπουργείου Γεωργίας και τις νεώτερες των ΕΥΔΑΠ-ΥΠΕΧΩΔΕ-ΙΓΜΕ. Οι πρώτες διανοίχτηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και εκτείνονται σε μεγάλη έκταση, με τις περισσότερες να βρίσκονται κατάντη του Μαυρονερίου, με εξαίρεση αυτές της Σφάκας και του Προφήτη Ηλία. Ορισμένες καλύπτουν τοπικές αρδευτικές ανάγκες, ενώ οι υπόλοιπες διοχετεύουν τα νερά τους στο Υδραγωγείο Κωπαΐδας, που υδροδοτεί την ομώνυμη περιοχή. Κατά την περίοδο της λειψυδρίας, ορισμένες εξ αυτών (γεωτρήσεις Μαυρονερίου και Ακοντίου) χρησιμοποιήθηκαν εντατικά για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Όσον αφορά στη δεύτερη μεγάλη ομάδα γεωτρήσεων, οι οποίες εκτείνονται από το

Μαυρονέρι μέχρι την περιοχή Βασιλικών-Παρορίου, αυτές διανοίχτηκαν κατά την περίοδο έμμονης ξηρασίας των ετών 1990-1992. Αν και αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (μέσω του Υδραγωγείου Διστόμου), λειτουργούν πλέον μόνο τους θερινούς μήνες για να ενισχύσουν την άρδευση της Κωπαΐδας, μέσω του συγκεντρωτικού αγωγού Βασιλικών-Παρορίου.

Εκτός των γεωτρήσεων, οι περιοχές του κάτω ρου, και των ΤΟΕΒ Ορχομενού, Κωπαΐδας και Κάστρου αρδεύονται με απευθείας απολήψεις επιφανειακών νερών από τον Βοιωτικό Κηφισό και τις πηγές του. Μια επιπλέον πηγή υδροδότησης είναι οι αντλήσεις από την Υλίκη, που στα μέσα της δεκαετίας του 1980 έφτασαν στα επίπεδα των 50 hm<sup>3</sup>/έτος, αλλά τα τελευταία χρόνια έχουν σταθεροποιηθεί στα επίπεδα των 15-20 hm<sup>3</sup>/έτος.

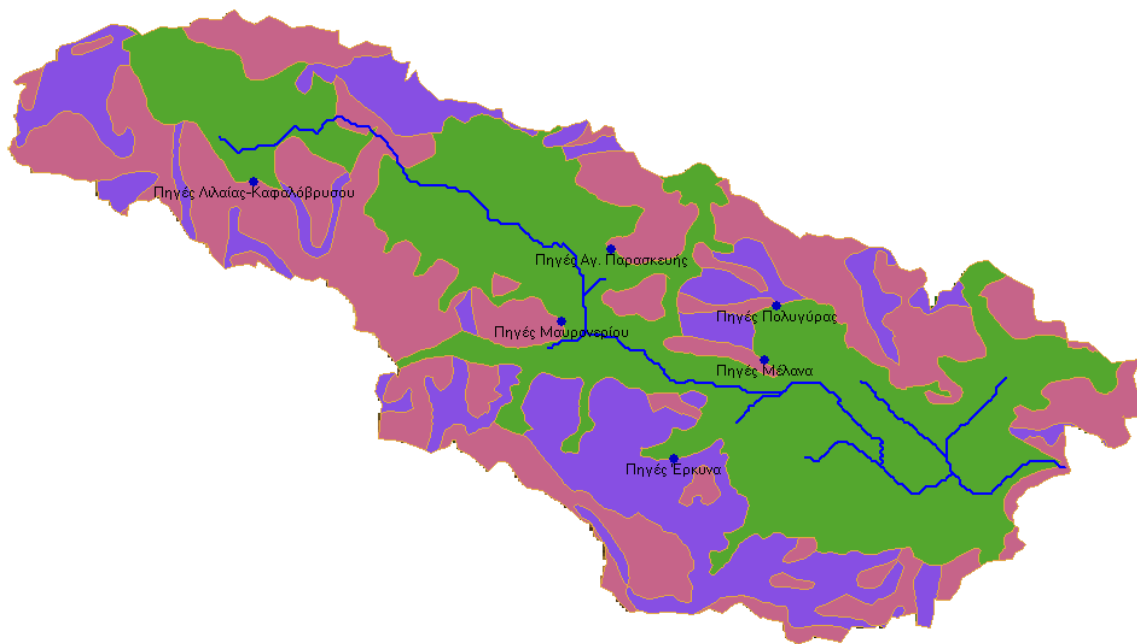
## **2.4 Συλλογή πρωτογενών δεδομένων**

Η μελέτη περιλαμβάνει δύο επίπεδα αναλύσεων. Το πρώτο επίπεδο αφορά στην ανάλυση των ημερήσιων βροχοπτώσεων, μέσω στατιστικών και στοχαστικών προσεγγίσεων, ενώ το δεύτερο αφορά στην ανάλυση των παροχών του ποταμού σε διάφορες θέσεις ελέγχου. Επειδή η διαθέσιμη υδρομετρική πληροφορία για τη λεκάνη είναι περιορισμένη (τόσο χρονικά όσο και χωρικά – διατίθεται μόνο ένα συστηματικό δείγμα ημερήσια απορροών στην έξοδο της λεκάνης), και προκειμένου να μελετηθούν ακραία πλημμυρικά γεγονότα χαμηλής ή και πολύ χαμηλής συχνότητας, απαιτήθηκε η προσαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου, για την εκτίμηση των απορροών. Ειδικότερα, για την αναπαράσταση της υδρολογικής διαίτας της λεκάνης και του υδροφορέα (με έμφαση στις πλημμυρικές διεργασίες) και της λειτουργίας του υδροσυστήματος, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Στο υποκεφάλαιο 7.2 εξηγείται, συνοπτικά, το μαθηματικό υπόβαθρο του μοντέλου, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται τα πρωτογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν για τα διάφορα επίπεδα αναλύσεων.

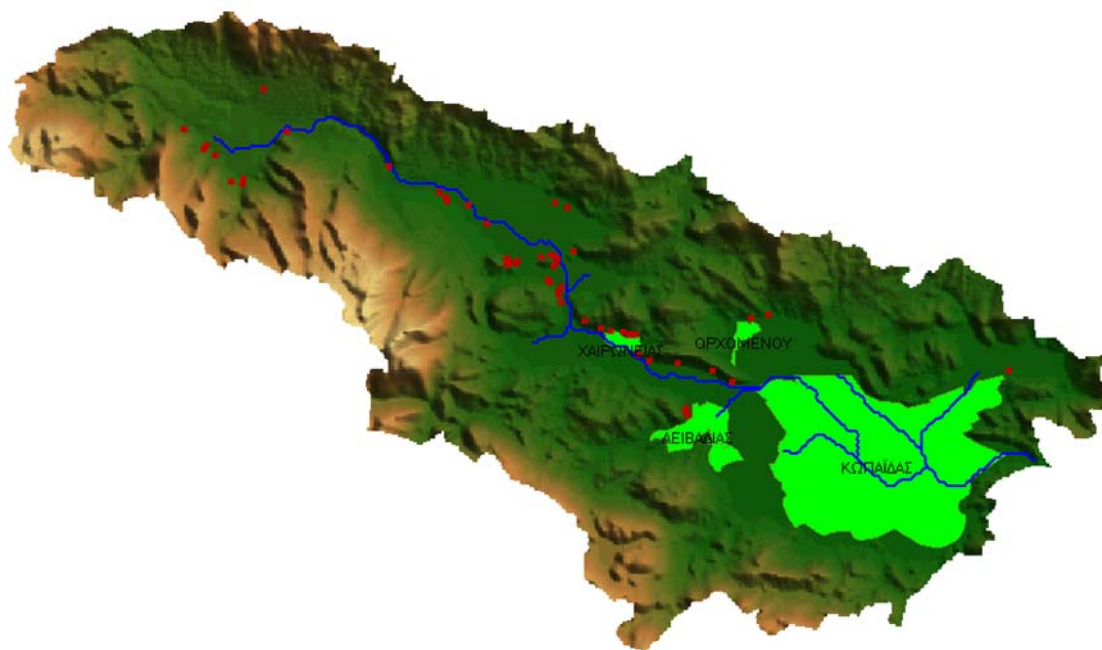
### **2.4.1 Γεωγραφικά δεδομένα**

Τα πρωτογενή γεωγραφικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις είναι το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, ο ψηφιοποιημένος υδρολιθολογικός χάρτης, οι επιφάνειες των ΤΟΕΒ και τα σημειακά επίπεδα των πηγών και των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης.

Με βάση το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (ΨΜΥ) που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1, παρήχθησαν τα επίπεδα διεύθυνσης και συγκέντρωσης ροής, που αποτελούν με τη σειρά τους την πληροφορία εισόδου για την κατασκευή του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών.



Σχήμα 2.2: Κατηγορίες περατότητας και κύριες καρστικές πηγές.



Σχήμα 2.3: Οργανωμένες αρδευόμενες περιοχές (TOEB) και γεωτρήσεις περιοχής μελέτης.

Με βάση τον υδρολιθολογικό χάρτη του ΙΓΜΕ (ΥΠΑΝ κ.ά., 2003) διαμορφώθηκαν τρεις κατηγορίες περατότητας εδαφών (Ευστρατιάδης, 2008):

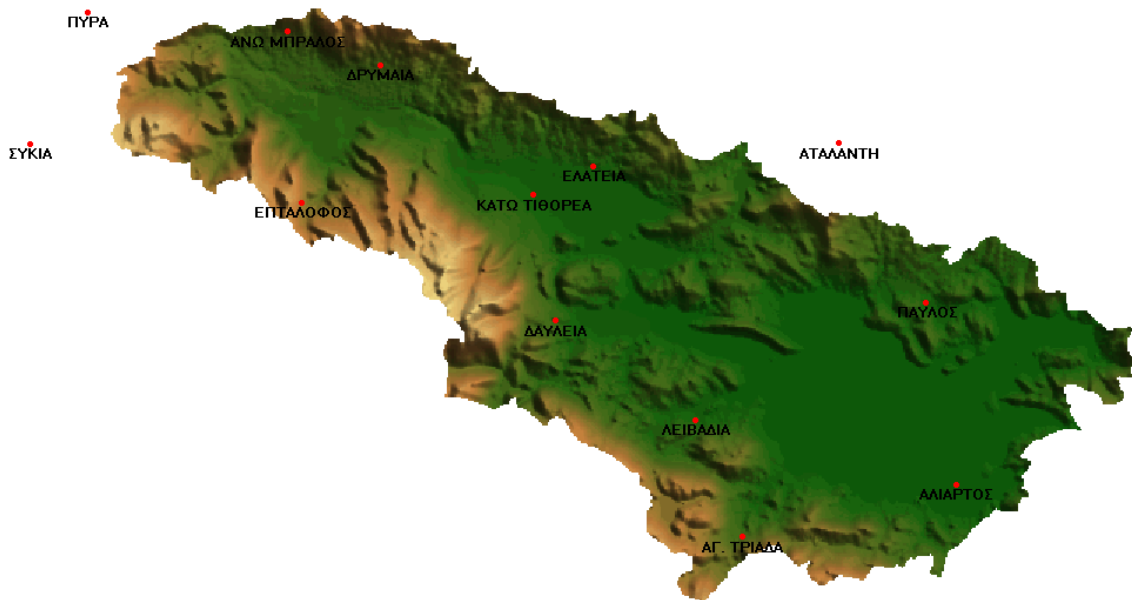
- *Περιοχές χαμηλής περατότητας*, όπου κυριαρχούν ο φλύσχος και τα μεταμορφωμένα, ηφαιστειακά και πλουτώνια πετρώματα·
- *Περιοχές υψηλής περατότητας*, όπου αναπτύσσονται καρστικά πετρώματα, μάρμαρα μέτριας έως υψηλής περατότητας και τριαδικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι·

- Προσχωματικές περιοχές, δηλαδή πεδινές-παραποτάμιες εκτάσεις όπου αναπτύσσονται κοκκώδεις προσχωματικές και μολασικές αποθέσεις.

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται οι παραπάνω κατηγορίες εδαφών και τα σημεία εκφόρτισης των κύριων καρστικών πηγών (Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου, Μαυρονερίου, Αγίας Παρασκευής, Έρκυνα, Μέλανα, Πολυγύρας). Ακόμη, στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων και οι οργανωμένες αρδευόμενες περιοχές της λεκάνης (ΤΟΕΒ).

#### 2.4.2 Υδρολογικά δεδομένα

Στα υδρολογικά δεδομένα περιλαμβάνονται οι σημειακές χρονοσειρές ημερήσιων βροχοπτώσεων, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των αντίστοιχων επιφανειακών βροχοπτώσεων στις υπολεκάνες του υδρολογικού μοντέλου, οι χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων, που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής των λεκανών, και τα δείγματα (συστηματικά ή μη) ημερήσιων παρατηρήσεων παροχής σε διάφορες θέσεις της λεκάνης, με βάση τα οποία έγινε η προσαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος (βαθμονόμηση παραμέτρων).



Σχήμα 2.4: Θέσεις βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης των υπολεκανών.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά βροχομετρικών σταθμών.

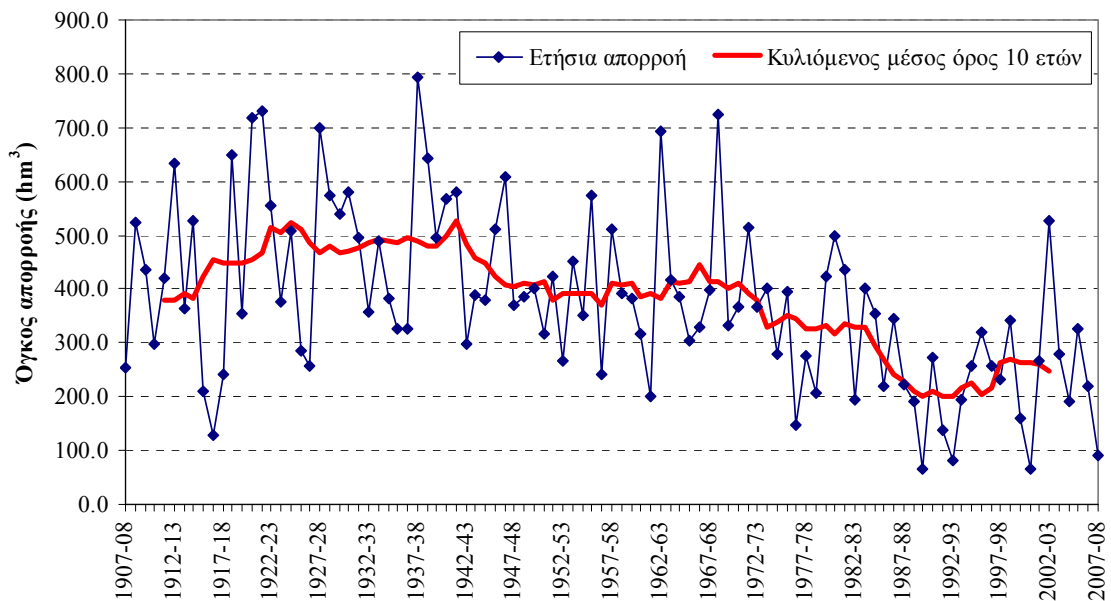
Όνομασία	Υπηρεσία	Υψόμετρο (m)	Μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)
Αγία Τριάδα	ΥΠΕΧΩΔΕ	458.0	998.8
Αλιάρτος	ΕΜΥ	105.0	576.2
Άνω Μπράλος	ΥΠΕΧΩΔΕ	600.0	971.4
Αταλάντη	ΥΠΕΧΩΔΕ	78.1	558.7
Γραβιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	380.7	916.6
Δαύλεια	ΥΠΕΧΩΔΕ	277.4	839.6
Δρυμαία	ΥΠΕΧΩΔΕ	502.6	724.1
Επτάλοφος	ΥΠΕΧΩΔΕ	830.0	1105.4
Κάτω Τιθορέα	ΥΠΕΧΩΔΕ	168.3	670.8
Λειβαδιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	175.6	760.8
Παύλος	ΥΠΕΧΩΔΕ	212.7	497.3
Πυρά	ΥΠΕΧΩΔΕ	1137.1	1325.6
Συκέα	ΥΠΕΧΩΔΕ	707.8	1237.5

Τα ημερήσια βροχομετρικά δείγματα προέρχονται από 13 υδρομετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής, οι θέσεις των οποίων απεικονίζονται στον χάρτη του Σχήματος 2.4. Επισημαίνεται ότι οι σταθμοί Πυράς και Συκέας, αν και ανήκουν στην υδρολογική λεκάνη του Μόρνου, επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικοί ορεινοί σταθμοί, αφού στην περιοχή μελέτης υπάρχει ανεπάρκεια μετρήσεων βροχόπτωσης σε μεγάλα υψόμετρα. Ακόμη, εκτός των ορίων της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού βρίσκεται και ο σταθμός της Αταλάντης. Τα χαρακτηριστικά των σταθμών φαίνονται στον Πίνακα 2.1, ενώ τα δεδομένα τους ελήφθησαν από ερευνητικό έργο του ΕΜΠ (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004).

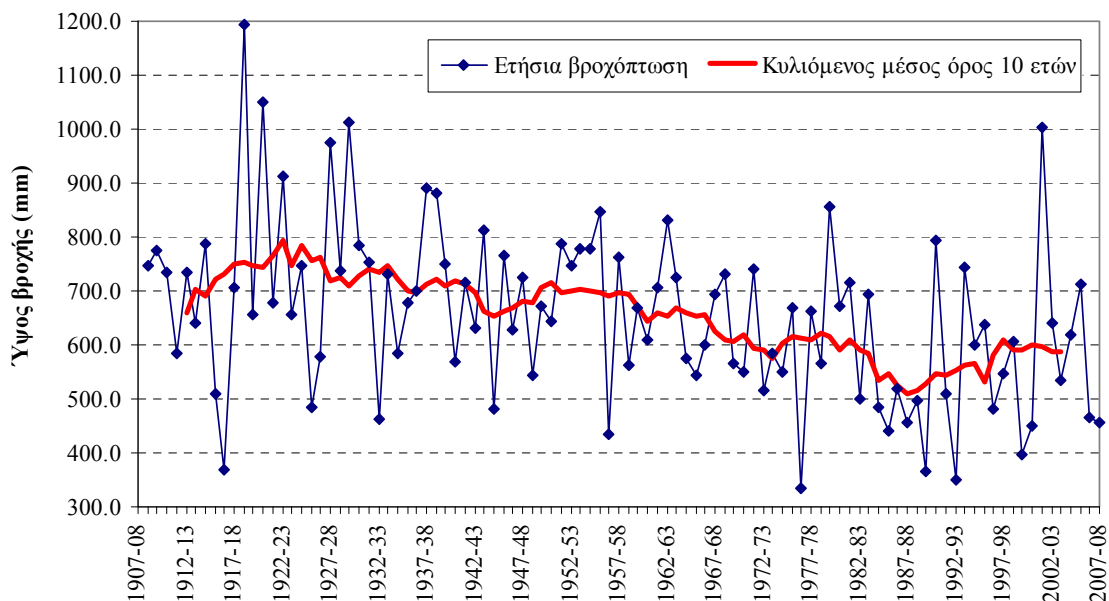
Για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής δεν υπάρχουν μετεωρολογικά δεδομένα, με εξαίρεση το σταθμό Αλιάρτου της ΕΜΥ, όπου διατίθεται δείγμα μηνιαίων θερμοκρασιών μήκους 96 ετών (1907-08 έως 2002-03). Ακόμη, υπάρχει περιορισμένο δείγμα άλλων μετεωρολογικών μεταβλητών, από σταθμούς της ευρύτερης περιοχής. Όλα τα δείγματα ελήφθησαν από ερευνητικό έργο του ΕΜΠ (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004).

Όσον αφορά στα υδρομετρικά δεδομένα, από το 1907, διατίθενται συνεχείς και συστηματικές εκτιμήσεις της ημερήσιας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού μέσω της Σήραγγας Καρδίτσας, οι οποίες πραγματοποιούνται επί της Συγκεντρωτικής Διώρυγας. Στο σημείο αυτό υπάρχει εγκατεστημένο σταθμήμετρο της ΕΥΔΑΠ, όπου μετράται η στάθμη του ποταμού κάθε πρωί, ενώ η αντίστοιχη παροχή εκτιμάται με βάση την εξίσωση ομοιόμορφης ροής κατά Manning. Τα πλέον επίκαιρα δεδομένα απορροής προέρχονται από τους Ευστρατιάδη κ.ά. (2009). Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζονται η ετήσια χρονοσειρά απορροής στην έξοδο της λεκάνης και οι

κυλιόμενοι μέσοι όροι δεκαετίας. Από το διάγραμμα είναι εμφανής η πτωτική πορεία των απορροών, η οποία σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στην διαχρονική αύξηση των αρδευτικών απολήψεων στην περιοχή μελέτης, τόσο από επιφανειακά νερά όσο και από υπόγειους πόρους, γεγονός που επιδρά σημαντικά στο δυναμικό των πηγών της λεκάνης. Ωστόσο, η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης εξηγείται και από την έντονη μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων, όπως αποτυπώνεται στο δείγμα της Αλιάρτου (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.5: Χρονοσειρά ετήσιας απορροής Βοιωτικού Κηφισού και κυλιόμενοι μέσοι όροι δέκα ετών.



Σχήμα 2.6: Χρονοσειρά ετήσιας βροχόπτωσης στο σταθμό Αλιάρτου.





Σχήμα 2.7: Θέσεις υδρομετρικών σταθμών σε πηγές (κύκλοι) και υδατορεύματα (τρίγωνα) της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ναλμπάντης και Ρόζος, 2000).

Η πυκνότερη υδρομετρική πληροφορία προέρχεται από την περίοδο 1982-1994, κατά την οποία το ΙΓΜΕ υλοποίησε ένα εκτενές πρόγραμμα υδρομετρήσεων στα πλαίσια της *Υδρογεωλογικής έρευνας της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού* (Παγούνης κ.ά., 1994). Συνολικά επελέγησαν 22 θέσεις υδρομέτρησης στη λεκάνη, οι οποίες βρίσκονται κατά μήκος του κύριου κλάδου και στη έξοδο των κυριότερων παραποτάμων και πηγών του. Οι θέσεις των σταθμών απεικονίζονται στο Σχήμα 2.7, ενώ εκτενής ανάλυση των δεδομένων τους έγινε στα πλαίσια ερευνητικού έργου του ΕΜΠ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004). Στους περισσότερους σταθμούς, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ανά 15 περίπου ημέρες. Η χρονική αυτή διακριτότητα κρίνεται υπερβολικά αδρομερής για την εξαγωγή αξιόπιστων δειγμάτων απορροής σε μηνιαία ή ετήσια κλίμακα, καθώς οι υδρομετρήσεις δεν αξιοποιούνται για την κατάρτιση σχέσεων στάθμης-παροχής που να συνοδεύονται από παρατηρήσεις στάθμης πυκνότερης διακριτότητας (κατ' ελάχιστον ημερήσιας). Παρόλα αυτά, είναι εξαιρετικά χρήσιμες για την εκτίμηση της χωρικής κατανομής του επιφανειακού και πηγαίου υδατικού δυναμικού της λεκάνης, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της προσαρμογής ενός υδρολογικού μοντέλου ημερήσιας προσομοίωσης, όπως στην παρούσα έρευνα.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αφορά στην περίοδο 1984-1990, οπότε διατίθεται ο μεγαλύτερος αριθμός κατανεμημένων υδρομετρικών παρατηρήσεων στη λεκάνη. Εκτός από το συνεχές δείγμα μέσω ημερήσιων παροχών στην έξοδο της λεκάνης (Σήραγγα Καρδίτσας), στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τα πλέον αντιπροσωπευτικά δείγματα υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ, τα οποία αφορούν στις παροχές των έξι κύριων καρστικών πηγών

της λεκάνης (οι πηγές του Παρνασσού θεωρήθηκαν ως ενιαίο συγκρότημα, αθροίζοντας τις επιμέρους παροχές των πηγών Λιλαίας, Ανατολικού και Δυτικού Κεφαλόβρυσου) και στις παροχές πέντε διατομών κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού (γέφυρα Μοδίου, γέφυρα Ανθοχωρίου, γέφυρα Σ/Σ Δαύλειας, γέφυρα Ορχομενού, γέφυρα Λειβαδιάς).

### 2.4.3 Δεδομένα αρδευτικών αναγκών

Οι αρδευτική ζήτηση στη λεκάνη μπορεί να εκτιμηθεί μόνο έμμεσα, με βάση τις θεωρητικές ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό και τις αρδευόμενες εκτάσεις. Σε ετήσια κλίμακα, οι εν λόγω ανάγκες εκτιμώνται σε 650 mm, οι οποίες επιμερίστηκαν ανά μήνα με βάση την κατανομή του Πίνακα 2.2 (Ναλμπάντης και Μαυροδήμου, 1999). Επισημαίνεται ότι για τους μήνες Απρίλιο και Σεπτέμβριο, οι εν λόγω ανάγκες δεν αφορούν στο σύνολο του μήνα, αλλά για ένα περίπου δεκαπενθήμερο. Όσον αφορά στις καλλιεργούμενες εκτάσεις, έγινε ομαδοποίηση των επιμέρους εκτάσεων σε επτά ευρύτερες αρδευόμενες περιοχές, τα χαρακτηριστικά των οποίων (έκταση, ετήσια ζήτηση) φαίνονται στον Πίνακα 2.3. Τα αναλυτικά στοιχεία των εκτάσεων για κάθε περιοχή ελήφθησαν από τους Ζαρρή κ.ά. (1999).

Πίνακας 2.2: Θεωρητικές ανάγκες των καλλιεργειών της περιοχής μελέτης σε νερό (mm).

Μήνας	Αρδευτικές ανάγκες (mm)	Ποσοστό (%)
Απρίλιος	34.0	5.2
Μάιος	79.3	12.2
Ιούνιος	130.2	20.0
Ιούλιος	168.6	25.9
Αύγουστος	153.1	23.6
Σεπτέμβριος	84.8	13.0
Σύνολο	650.0	100.0

Πίνακας 2.3: Αρδευόμενες περιοχές λεκάνης.

Περιοχή	Έκταση (στρέμματα)	Ετήσιες ανάγκες (hm <sup>3</sup> )
Γραβιά, Λιλαία, Αμφίκλεια	19 300	12.5
Ελάτεια, Τιθορέα, Ανθοχώρι	50 500	32.8
Αγ. Βλάσιος έως Ρωμαϊκό	28 150	18.3
ΤΟΕΒ Λειβαδιάς	16 300	10.6
Κάστρο-Κόκκινο	20 000	13.0
ΤΟΕΒ Ορχομενού	48 300	31.4
ΤΟΕΒ Κωπαΐδας	160 000	104.0
Σύνολο	342 550	222.7

---

## 3 Πρωτογενής επεξεργασία ημερήσιων βροχών

---

### 3.1 Συλλογή και επικαιροποίηση χρονοσειρών

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, βασικός στόχος του παρόντος ερευνητικού έργου είναι πρώτον, η στατιστική ανάλυση και στοχαστική μοντελοποίηση της ημερήσιας βροχόπτωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού και δεύτερον, η χρήση των παραγόμενων συνθετικών χρονοσειρών ημερήσιας βροχόπτωσης για τη μοντελοποίηση των παροχών του ποταμού Κηφισού σε διάφορες θέσεις της λεκάνης με χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Είναι φανερό συνεπώς, πως η λεπτομερής συλλογή δειγμάτων ημερήσιας βροχόπτωσης, στην υπό μελέτη λεκάνη, αποτελεί βασικό και πρωταρχικό στάδιο, καθώς η ποσότητα και ποιότητα της πρωτογενούς πληροφορίας επηρεάζει την αξιοπιστία του στοχαστικού μοντέλου βροχόπτωσης και συνεπώς και των προσομοιωμένων παροχών.

Στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, όπως περιγράφεται στο εδάφιο 2.4.2, υπάρχουν εγκατεστημένοι 13 μετεωρολογικοί σταθμοί, με δυνατότητα καταγραφής της βροχόπτωσης και της χιονόπτωσης (για ορισμένους σταθμούς) σε ημερήσια χρονική κλίμακα. Το σύνολο των δεδομένων της ημερήσιας κατακρήμνισης κάθε σταθμού είναι καταγεγραμμένο σε δελτία δεδομένων, που φυλάσσονται στη Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων (Δ7) της Γενικής Γραμματείας Δημοσίων Έργων του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. Ένα μεγάλο μέρος των δεδομένων, για 12 από τους 13 σταθμούς, υπάρχει διαθέσιμο σε ψηφιακά αρχεία από την Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ). Τα ψηφιακά αρχεία της ΕΤΥΜΠ των σταθμών της λεκάνης περιέχουν δεδομένα ημερήσιας βροχόπτωσης και χιονόπτωσης από την αρχή της λειτουργίας κάθε σταθμού μέχρι τις 31/12/1996 ή μέχρι τις 30/09/1997. Με στόχο τη χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων ιστορικών δεδομένων και την επικαιροποίηση των ψηφιακά διαθέσιμων χρονοσειρών, αποδελτιώσαμε τα δελτία ημερήσιας κατακρήμνισης και τα μετατρέψαμε σε ψηφιακή μορφή μέχρι και τις 31/12/2006.

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει αναλυτικά το χρονικό διάστημα των διαθέσιμων χρονοσειρών κάθε σταθμού που μας διατέθηκε σε ψηφιακή μορφή από την ΕΤΥΜΠ, καθώς και το χρονικό διάστημα αποδελτίωσης, που προκύπτει από την ημερομηνία λήξης των χρονοσειρών της ΕΤΥΜΠ μέχρι και τις 31/12/2006. Ειδικά για το σταθμού Αλιάρτου της ΕΜΥ, υπάρχουν

δεδομένα μόνο για το χρονικό διάστημα 01/03/1965 έως 30/09/1990, καθώς στη συνέχεια ο σταθμός έπαψε να λειτουργεί.

Πίνακας 3.1: Διαθέσιμες χρονοσειρές δεδομένων ημερήσιας βροχόπτωσης

Σταθμός	Διαθέσιμα από ΕΤΥΜΠ		Επικαιροποίηση με αποδελτίωση έως
	Έναρξη	Λήξη	
Συκέα	01/08/1963	30/09/1997	31/12/2006
Πυρά	01/08/1963	30/09/1997	31/12/2006
Γραβιά	08/12/1955	31/12/1996	31/12/2006
Άνω Μπράλος	01/11/1969	30/09/1997	31/12/2006
Επτάλοφος	01/12/1969	31/12/1996	31/12/2006
Δριμέα	01/11/1962	31/12/1996	31/12/2006
Τιθορέα	01/11/1962	30/09/1997	31/12/2006
Δαυλειά	01/12/1962	30/09/1997	31/12/2006
Αταλάντη	08/12/1955	31/12/1996	31/12/2006
Λειβαδιά	06/09/1956	30/09/1997	31/12/2006
Παύλος	01/11/1962	31/01/1997	31/12/2006
Αγία Τριάδα	01/12/1962	31/12/1996	31/12/2006
Αλιάρτος†	01/03/1965	30/09/1990	—

† Διαθέσιμα από ΕΜΥ

Μετά το πέρας της συλλογής των ψηφιακών αρχείων της ΕΤΥΜΠ και της αποδελτίωσης, όλες οι επιμέρους χρονοσειρές ενοποιήθηκαν σε ένα εύχρηστο ψηφιακό αρχείο που περιέχει όλα τα διαθέσιμα στοιχεία. Στη διαδικασία ενοποίησης πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα:

1. Έλεγχος και διόρθωση των αρχείων της ΕΤΥΜΠ: Στα ψηφιακά αρχεία της ΕΤΥΜΠ εντοπίστηκαν πολλά σφάλματα. Συγκεκριμένα, σε πολλούς σταθμούς υπήρχαν διπλές εγγραφές, ενώ η διάταξη των δεδομένων δεν ήταν πάντοτε σε αύξουσα ημερολογιακή σειρά. Η διόρθωση των σφαλμάτων αυτών πραγματοποιήθηκε με την σύνταξη προγράμματος σε γλώσσα Mathematica και τη χρήση του αντίστοιχου λογισμικού.
2. Επικαιροποίηση: Τα διορθωμένα αρχεία των χρονοσειρών της ΕΤΥΜΠ επικαιροποιήθηκαν με τις χρονοσειρές που προέκυψαν από την αποδελτίωση.
3. Μετατροπή της χιονόπτωσης σε βροχόπτωση: Οι διαθέσιμες χρονοσειρές περιλαμβάνουν δεδομένα ημερήσιας βροχόπτωσης και χιονόπτωσης. Δεδομένου ότι την παρούσα έρευνα αφορά το σύνολο της κατακρήμνισης, τα δεδομένα της χιονόπτωσης μετατράπηκαν σε ισοδύναμη βροχόπτωση διαιρώντας το ύψος του χιονιού δια του 10 (δηλαδή θεωρώντας πυκνότητα χιονιού ίση με  $100 \text{ kg/m}^3$ ). Η

συνολική ημερήσια κατακρήμνιση, σε mm ύψους βροχής, προκύπτει από το άθροισμα του ύψους βροχόπτωσης και του ισοδύναμου ύψους βροχής της χιονόπτωσης. Στη συνέχεια της έκθεσης ο όρος βροχόπτωση, δεδομένης της μικρής συμβολής της χιονόπτωσης στο συνολικό ύψος, θα αναφέρεται στο συνολικό ύψος κατακρήμνισης.

4. Ενοποίηση: Όλες οι διαθέσιμες χρονοσειρές των σταθμών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού ενοποιήθηκαν σε ένα αρχείο που διατίθεται στο συνοδευτικό ψηφιακό δίσκο αυτής της έκθεσης (όνομα αρχείου: BKifisosOriginalData.xls). Σε αυτό το αρχείο η μη διαθέσιμες τιμές συμβολίζονται με την τιμή -99.

### 3.2 Συγχρονισμός χρονοσειρών

Σε συνέχεια της ενοποίησης των χρονοσειρών, που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.1, πραγματοποιήθηκε μια εκτίμηση των δειγματικών συντελεστών ετεροσυσχέτισης (η εξίσωση ορισμού του συντελεστή ετεροσυσχέτισης παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.3) της ημερήσιας βροχόπτωσης για χρονική υστέρηση 1 d, 0 d και -1 d ( $d = 1$  ημέρα). Δεδομένου ότι υπάρχουν 13 σταθμοί, ένα μητρώο ετεροσυσχετίσεων, οποιασδήποτε χρονικής υστέρησης, θα περιλαμβάνει 169 διαφορετικούς συντελεστές ετεροσυσχέτισης, με εξαίρετη το μητρώο μηδενικής υστέρησης που είναι συμμετρικό ως προς την διαγώνιο. Στο Παράρτημα Π1 στους Πίνακες Π1.1 έως Π1.3, δίνονται τα πλήρη μητρώα ετεροσυσχετίσεων για υστέρηση 1 d, 0 d και -1 d, αντίστοιχα, τα οποία παρουσιάζουν τους δειγματικούς συντελεστές ετεροσυσχέτισης (ή αυτοσυσχέτισης αν πρόκειται για στοιχεία της κυρίας διαγωνίου) όλων των πιθανών συνδυασμών των σταθμών ανά δύο.

Η ενδεδειγμένη εξέταση των μητρώων αποκάλυψε πως οι τιμές των συντελεστών ετεροσυσχέτισης του σταθμού της Τιθορέας με τους άλλους σταθμούς, είναι μεγαλύτεροι για υστέρηση -1 d, από τις αντίστοιχες μηδενικής υστέρησης. Συγκεκριμένα, ο Πίνακας 3.1 που συνοψίζει τα πλήρη μητρώα παρουσιάζοντας τη μέση τιμή του συντελεστή ετεροσυσχέτισης κάθε σταθμού με τους υπόλοιπους για υστέρηση 1d, 0 d και -1 d, αποκαλύπτει πως η μέση τιμή του συντελεστή ετεροσυσχέτισης της Τιθορέας για υστέρηση -1 d είναι ίση με 0.52 ενώ της μηδενικής υστέρησης ίση με 0.36. Επιπλέον, στους υπολοίπους σταθμούς η μέγιστη μέση τιμή του συντελεστή ετεροσυσχέτισης εμφανίζεται για μηδενική υστέρηση, γεγονός αναμενόμενο, δεδομένου ότι σε λεκάνες ανάλογου μεγέθους με αυτήν του Βοιωτικού Κηφισού, αν βρέχει σε κάποιον σταθμό της λεκάνης μια ημέρα πολύ πιθανόν να βρέχει και σε κάποιους άλλους, αν όχι σε όλους.

Πίνακας 3.2: Μέσες τιμές των συντελεστών ετεροσυσχέτισης της ημερήσιας βροχόπτωσης κάθε σταθμού με όλους του υπόλοιπους για τρεις διαφορετικές υστερήσεις.

Σταθμός	Μέση τιμή του συντελεστή ετεροσυσχέτισης για υστέρηση		
	1 d	0 d	-1 d
Συκέα	0.19	0.45	0.24
Πυρά	0.3	0.49	0.24
Γραβιά	0.32	0.59	0.21
Άνω Μπράλος	0.21	0.34	0.21
Επτάλοφος	0.23	0.5	0.23
Δριμέα	0.25	0.5	0.24
<b>Τιθορέα</b>	<b>0.11</b>	<b>0.36</b>	<b>0.52</b>
Δαυλειά	0.37	0.54	0.21
Αταλάντη	0.18	0.44	0.35
Λειβαδιά	0.33	0.5	0.21
Πάυλος	0.25	0.43	0.15
Αγία Τριάδα	0.24	0.53	0.31
Αλιάρτος	0.31	0.57	0.17

Πρακτικά, η ανωμαλία που εμφανίζεται στο σταθμό της Τιθορέας υποδηλώνει μεγαλύτερη συσχέτιση της βροχόπτωσης της Τιθορέας με τις βροχοπτώσεις των άλλων σταθμών της επόμενης ημέρας, από ότι με τις βροχοπτώσεις της ίδιας ημέρας. Το γεγονός αυτό όμως δεν έχει λογική βάση, έτσι οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως τα δεδομένα του σταθμού της Τιθορέας είναι συστηματικά μετατοπισμένα κατά μία ημέρα προς τα πίσω. Συνεπώς, για τον συγχρονισμό των δεδομένων, το δείγμα της Τιθορέας μετατοπίστηκε μια ημέρα μπροστά.

### 3.3 Συμπλήρωση χρονοσειρών

Οι αρχικές χρονοσειρές της ημερήσιας βροχόπτωσης των σταθμών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, εκτός των σφαλμάτων που προαναφέρθηκαν, περιέχουν και αρκετές ελλείψεις. Τα χρονικά διαστήματα των ελλείψεων των σταθμών από την έναρξη λειτουργίας τους μέχρι και τις 31/12/2006, καθώς και ο συνολικός αριθμός των ελλείψεών τους, παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες Π1.4 και Π1.5 του παραρτήματος Π1.

Οι ελλείψεις στα δεδομένα των χρονοσειρών αποτελούν ένα σοβαρό μειονέκτημα καθώς προκαλούν τεχνικές δυσκολίες στη διαχείριση και στην ανάλυση των χρονοσειρών, ενώ ο κίνδυνος εξαγωγής εσφαλμένων συμπερασμάτων είναι αυξημένος. Με στόχο τη κατασκευή ενός ολοκληρωμένου και συνεχούς συνόλου δεδομένων χωρίς ελλείψεις, ώστε αποφευχθούν

οι προαναφερθείσες δυσκολίες, οι ελλείψεις των χρονοσειρών συμπληρώθηκαν με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Το χρονικό διάστημα που πραγματοποιήθηκε συμπλήρωση των χρονοσειρών είναι από τις 01/01/1964 έως 31/12/2006, δεδομένου ότι το σύνολο των σταθμών, με εξαίρεση τους σταθμούς του Άνω Μπράλου, Επταλόφου και Αλιάρτου, έχουν ημερομηνία έναρξης λειτουργίας πριν τις 01/01/1964.

Η γενική εξίσωση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (ΠΓΠ) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα είναι:

$$R_{s,m}(t) = \beta_1 R_{s_1,m}(t) + \dots + \beta_{12} R_{s_{12},m}(t) + \varepsilon(t) \quad (3.1)$$

Η εξίσωση αυτή υποθέτει ότι η βροχοπτώση  $R_{s,m}(t)$  μιας ημέρα  $t$  ενός σταθμού  $s$  με  $s = 1, \dots, 13$  και του μήνα  $m$ , με  $m = 1, \dots, 12$ , ισούται με ένα γραμμικό συνδυασμό των βροχοπτώσεων των υπολοίπων 12 σταθμών της ίδιας ημέρας συν ένα όρο σφάλματος  $\varepsilon(t)$ , όπου  $\beta_i$  είναι οι συντελεστές τη ΠΓΠ που προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος για όλες τις ημέρες.

Η εφαρμογή της μεθόδου της ΠΓΠ στις χρονοσειρές των σταθμών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, ήταν μια επίπονη και πολύπλοκη διαδικασία. Συγκεκριμένα, από την εξίσωση (3.1) προκύπτει πως η συμπλήρωση της τιμής ενός σταθμού μια συγκεκριμένη ημέρα απαιτεί τη διαθεσιμότητα των τιμών στους υπολοίπους σταθμούς την ίδια ημέρα. Στην πράξη, τα δεδομένα μιας ημέρας μπορεί να έχουν πολλαπλές ελλείψεις και επομένως δεν υπάρχουν διαθέσιμες όλες οι τιμές στους υπόλοιπους σταθμούς όπως απαιτεί η γενική εξίσωση (3.1). Συνεπώς, δεν αρκεί μια και μόνο εξίσωση ΠΓΠ για την συμπλήρωση των ελλείψεων ενός σταθμού, αλλά τόσες όσες να καλύπτουν της διαφορετικές περιπτώσεις. Από την ενδελεχή ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι για την συμπλήρωση των ελλείψεων σε όλους τους σταθμούς απαιτείται οι εκτίμηση των συντελεστών 267 διαφορετικών εξισώσεων ΠΓΠ. Οι συντελεστές του συνόλου των 267 εξισώσεων ΠΓΠ καθώς για σε ποιον σταθμό και μήνα αναφέρονται παρουσιάζονται στο παράρτημα Π1 στον Πίνακα Π1.6.

Για την επίτευξη της παραπάνω ανάλυσης, την εκτίμηση των συντελεστών των εξισώσεων ΠΓΠ και τελικά για τη συμπλήρωση των δεδομένων, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε πρόγραμμα σε γλώσσα Mathematica. Το ψηφιακό αρχείο των συμπληρωμένων βροχοπτώσεων για το διάστημα 01/01/1964 έως 31/12/2006 διατίθεται στο συνοδευτικό ψηφιακό δίσκο αυτής της έκθεσης (όνομα αρχείου: BKifisosOriginalDataFilled.xls). Οι ελλείψεις των σταθμών που συμπληρώθηκαν τονίζονται με κόκκινο χρώμα.

---

## 4 Στατιστική ανάλυση ιστορικών βροχοπτώσεων

---

### 4.1 Περιγραφική στατιστική ανάλυση

#### 4.1.1 Βασικά περιγραφικά μέτρα

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται η περιγραφική στατιστική ανάλυση των ιστορικών χρονοσειρών της βροχόπτωσης των σταθμών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι ετήσιες, οι ημερήσιες, οι ημερήσιες σε μηνιαία βάση και οι μέγιστες ημερήσιες βροχοπτώσεις. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι να σχηματιστεί μια αναλυτική στατιστική εικόνα της συμπεριφοράς της βροχόπτωσης, η οποία θα συμβάλει στην ορθή στοχαστική μοντελοποίηση του φαινομένου αλλά και στην εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων.

Γενικά, τα περιγραφικά μέτρα μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: (α) μέτρα θέσης, (β) μέτρα μεταβλητότητας και (γ) μέτρα σχήματος. Τα περιγραφικά μέτρα που έχουν εκτιμηθεί και παρουσιάζονται σε πίνακες (στα παραρτήματα στην πλειοψηφία τους) στην παρούσα εργασία είναι από την κατηγορία (α) η μέση τιμή  $\mu$ , από την κατηγορία (β) η τυπική απόκλιση  $\sigma$ , τα τεταρτημόρια  $Q_1$ ,  $Q_2$ , και  $Q_3$ , η μέγιστη και ελάχιστη τιμή, ο συντελεστής μεταβλητότητας  $C_v = \sigma/\mu$  και ο L-συντελεστής μεταβλητότητας  $L-C_v = \lambda_2/\lambda_1$ , από την κατηγορία (γ) ο συντελεστής ασυμμετρίας  $C_s$  και κύρτωσης  $C_k$  των κλασικών ροπών, καθώς και οι L-συντελεστές ασυμμετρίας και κύρτωσης  $L-C_s$  και  $L-C_k$ , αντίστοιχα, των L-ροπών. Επίσης έχει εκτιμηθεί και η πιθανότητα στεγνής ημέρας  $P_d$ , που ορίζεται για ένα συγκεκριμένο διάστημα ως ο λόγος των ημερών χωρίς βροχόπτωση προς τις συνολικές ημέρες του διαστήματος.

Τα περισσότερα από τα παραπάνω στατιστικά μέτρα είναι τετριμμένα και δεν απαιτούν κάποια περαιτέρω περιγραφή. Αξίζει ίσως μια σύντομη αναφορά στα μέτρα που βασίζονται στις L-ροπές.

Οι L-ροπές [Hosking, 1990] έχουν οριστεί ως γραμμικός συνδυασμός των αναμενόμενων τιμών των διατεταγμένων στατιστικών και έκτοτε έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην υδρολογία τόσο ως μέθοδος προσαρμογής κατανομών αλλά και όσο και ως περιγραφικά



στατιστικά μέτρα [Kroll and Vogel, 2002; Lim and Lye, 2003]. Το βασικό πλεονέκτημα των L-ροπών είναι πως οι δειγματικές εκτιμήσεις τους ως γραμμικοί συνδυασμοί του διατεταγμένου δείγματος, δεν υψώνουν τις παρατηρήσεις του δείγματος σε τετραγωνικές ή κυβικές δυνάμεις, όπως συμβαίνει με την κλασική μέθοδο των ροπών. Ως αποτέλεσμα, οι εκτιμήσεις των L-αδιάστατων συντελεστών διασποράς  $L-C_v = \lambda_2/\lambda_1$ , L-ασυμμετρίας  $L-C_s = \lambda_3/\lambda_2$ , και L-κύρτωσης  $L-C_k = \lambda_4/\lambda_2$ , είναι αμερόληπτες με κανονική σχεδόν κατανομή, όπου  $\lambda_i$  είναι η  $i$ -οστή L-ροπή [Sankarasubramanian and Srinivasan, 1999; Vogel and Fennessey, 1993]. Τιμή του  $L-C_s < 0$  υποδηλώνει αρνητική ασυμμετρία ενώ τιμή του  $L-C_s > 0$  θετική ασυμμετρία. Αντίστοιχα, για τη κύρτωση, τιμή του  $L-C_k > 0.1226$ , που είναι η τιμή της κανονικής κατανομής, υποδηλώνει λεπτόκυρτη κατανομή, ενώ  $L-C_k < 0.1226$  πλατύκυρτη κατανομή.

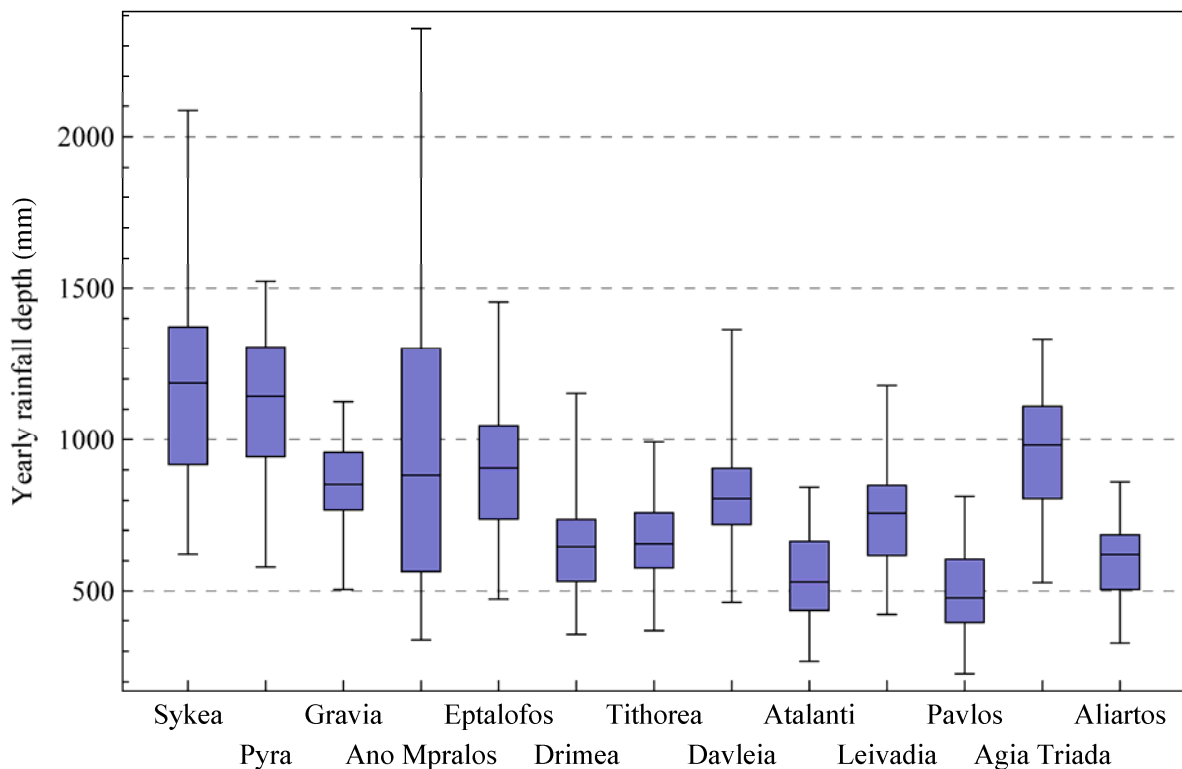
#### 4.1.2 Ετήσιες χρονοσειρές

Όπως έχει γίνει σαφές από τα προηγούμενα κεφάλαια, η βασική χρονική κλίμακα της βροχόπτωσης που διερευνάται στην παρούσα μελέτη είναι η ημερήσια. Παρόλα αυτά, πέραν της ημερησίας κλίμακας, μια άλλη χρονική κλίμακα που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την υδρολογία μιας περιοχής, είναι η ετήσια. Η βροχόπτωση σε ετήσια βάση, δηλαδή το συνολικό ύψος βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια ενός έτους, αποκαλύπτει μια γενική εικόνα για την ποσότητα της βροχόπτωσης σε μια δεδομένη περιοχή.

Για τον υπολογισμό των ετήσιων χρονοσειρών βροχόπτωσης σε κάθε σταθμό της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, χρησιμοποιήθηκαν οι συμπληρωμένες ημερήσιες χρονοσειρές του χρονικού διαστήματος από 01/01/1964 έως 31/12/2006. Μετά από άθροιση των ημερήσιων τιμών κάθε έτους σε κάθε σταθμό προέκυψαν οι ετήσιες χρονοσειρές μήκους 43 ετών. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα Π2.1 του Παραρτήματος Π2, ενώ μια συνοπτική εικόνα της ετήσιας βροχόπτωσης σε κάθε σταθμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.

Από τα στατιστικά χαρακτηριστικά του Πίνακα Π2.1 του Παραρτήματος Π2, αλλά και από τα θηκογράμματα των σταθμών, παρατηρείται πως μέση τιμή της ετήσιας βροχόπτωσης άνω των 1000 mm έχουν μόνο οι σταθμοί της Συκέας και της Πυράς, ενώ η μέση τιμή των υπολοίπων σταθμών κυμαίνεται στο διάστημα 500 mm – 1000 mm. Αξιοσημείωτη είναι επίσης, η μεγάλη διασποράς της ετήσιας βροχόπτωσης του Άνω Μπράλου σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς, στον οποίο έχει καταγραφεί και το ετήσιο μέγιστο ύψος βροχόπτωσης ίσο με 2357 mm. Τέλος, προκύπτει με βάση της δειγματικές τιμές του συντελεστή

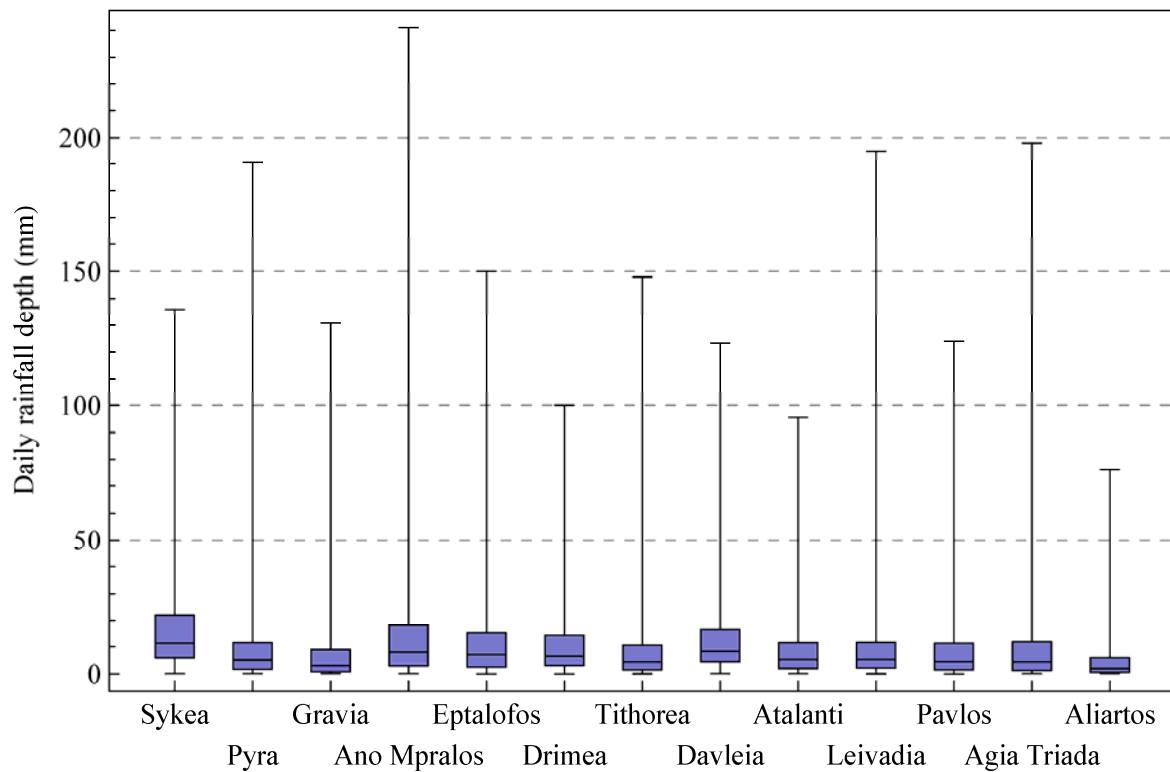
ασυμμετρίας αλλά και τις τιμές του L – συντελεστή ασυμμετρίας, πως οι κατανομές της ετήσιας βροχόπτωσης στην πλειοψηφία των σταθμών παρουσιάζουν μικρή θετική ασυμμετρία. Εξάιρεση αποτελεί ο σταθμός του Άνω Μπράλου που εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή ασυμμετρίας σε σχέση με του υπολοίπους σταθμούς, αλλά και τέσσερις ακόμη σταθμοί που εμφανίζουν μικρή αρνητική ασυμμετρία. Συμπερασματικά και με βάση τα παραπάνω, οι κατανομές της ετήσιας βροχόπτωσης μπορούν να θεωρηθούν κατά προσέγγιση συμμετρικές.



Σχήμα 4.1 Θηκογράμματα του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης σε mm σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

#### 4.1.3 Ημερήσιες χρονοσειρές

Η ημερήσιες χρονοσειρές της βροχόπτωσης κατά κανόνα, σε σχέση με την ετήσια βροχόπτωση εμφανίζονται εξαιρετικά διαφοροποιημένες. Ίσως η κυριότερη διαφοροποίηση της ημερήσιας βροχόπτωσης εντοπίζεται στο διαλείποντα χαρακτήρα της, την ιδιότητά της δηλαδή κάποια χρονικά διαστήματα να βρέχει και κάποια άλλα να μην βρέχει. Συνεπώς, σε μηδενική βροχόπτωση αντιστοιχίζεται μια συγκεκριμένη πιθανότητα μεγαλύτερη του μηδενός, ενώ σε οποιαδήποτε θετική τιμή αντιστοιχίζεται πιθανότητα ίση με μηδέν, οπότε η θετική βροχόπτωση είναι συνεχής τυχαία μεταβλητή. Στη μελέτη της ημερήσιας βροχόπτωσης, εκτός από την εκτίμηση της πιθανότητας να μην βρέχει, ουσιαστική είναι και η μελέτη της κατανομής της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης, δηλαδή της κατανομής της βροχόπτωσης δεδομένου ότι βρέχει.



Σχήμα 4.2 Θηκογράμματα της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης σε mm σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Για τη μελέτη της ημερήσιας βροχόπτωσης σε κάθε σταθμό της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, χρησιμοποιήθηκαν οι συμπληρωμένες ημερήσιες χρονοσειρές του χρονικού διαστήματος από 01/01/1964 έως 31/12/2006. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης καθώς και η πιθανότητα να μην βρέχει παρουσιάζονται στον Πίνακα Π2.2 του Παραρτήματος Π2, ενώ μια συνοπτική εικόνα για κάθε σταθμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.

Τόσο από τα στατιστικά χαρακτηριστικά του Πίνακα Π2.2 όσο και από το Σχήμα 4.2, προκύπτει πως η θετική ημερήσια βροχόπτωση παρουσιάζει μεγάλη θετική ασυμμετρία, με τις τιμές των συντελεστών ασυμμετρίας και L-ασυμμετρίας, να κυμαίνονται από 2.2 έως 4 και από 0.38 έως 0.54, αντίστοιχα. Γενικά, παρατηρείται αρκετά μεγάλη ομοιότητα στα στατιστικά χαρακτηριστικά των περισσότερων σταθμών, π.χ., η μέση τιμή στους περισσότερους κυμαίνεται γύρω από τα  $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ , ενώ η τυπική απόκλιση γύρω από τα  $13 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ . Τέλος, η πιθανότητα να μην βρέχει κυμαίνεται από 0.66 στο σταθμό της Πυράς, που σημαίνει πως κατά μέσο όρο βρέχει 54 μέρες το χρόνο, έως 0.85 στο σταθμό του Παύλου που αντιστοιχεί 124 μέρες βροχής.

#### 4.1.4 Ημερήσιες χρονοσειρές σε μηνιαία βάση

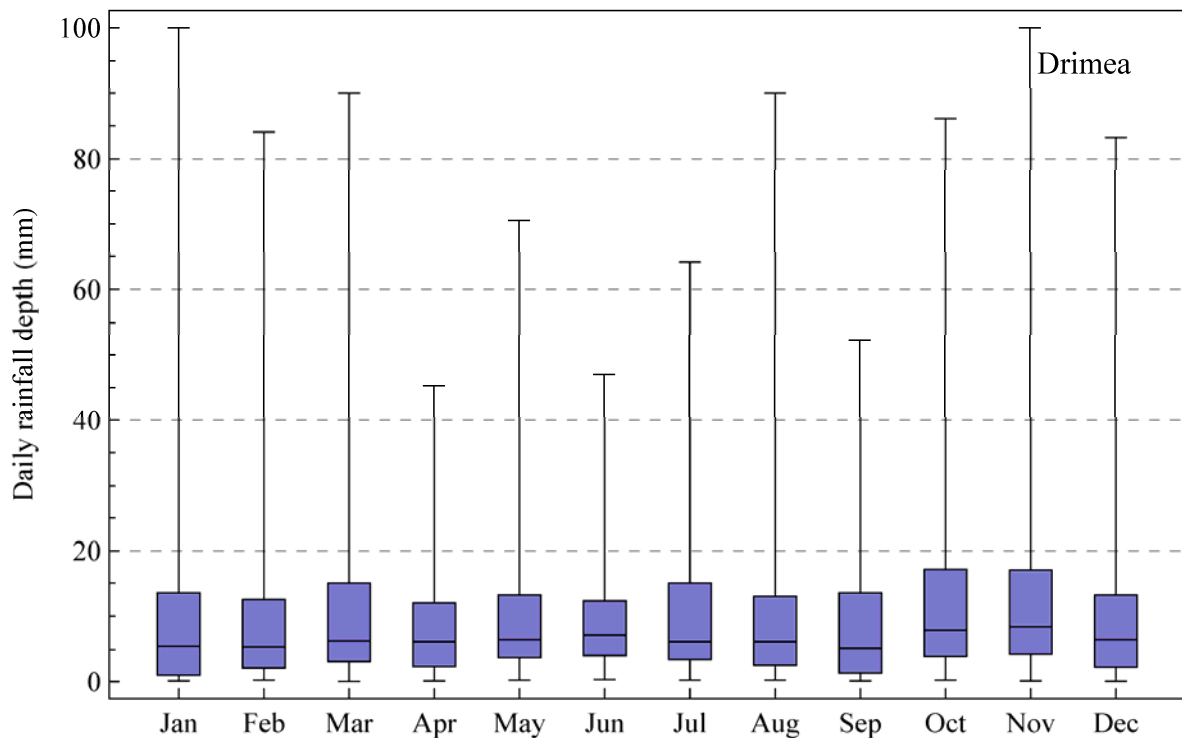
Στο προηγούμενο κεφάλαιο η ημερήσια βροχόπτωση σε κάθε σταθμό αντιμετωπίστηκε ως μια τυχαία μεταβλητή ίδια για κάθε ημέρα του χρόνου. Είναι προφανές, πως μια πιο λεπτομερής ανάλυση, επιβάλλει τη μελέτη της βροχόπτωσης ανά μήνα, δεδομένης της κυκλικής μεταβολής του κλίματος, που αναμφίβολα επηρεάζει όλες τις διεργασίες που σχετίζονται με αυτό. Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο βασικός στόχος αυτής της έρευνας είναι η στοχαστική μοντελοποίηση της ημερήσιας βροχόπτωσης και στη συνέχεια της ημερήσιας απορροής. Συνεπώς, μια έγκυρη στοχαστική μοντελοποίηση οφείλει να αναπαράγει τις όποιες εποχιακές διαφοροποιήσεις.

Για τη μελέτη της ημερήσιας βροχόπτωσης σε κάθε σταθμό της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού ανά μήνα, χρησιμοποιήθηκαν οι συμπληρωμένες ημερήσιες χρονοσειρές του χρονικού διαστήματος από 01/01/1964 έως 31/12/2006 αφού πρώτα απομονώθηκαν τα δεδομένα κάθε μήνα και σταθμού ώστε να κατασκευαστούν οι επιμέρους χρονοσειρές. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης κάθε σταθμού ανά μήνα καθώς και η πιθανότητα να μην βρέχει σε μηνιαία βάση παρουσιάζονται στους πίνακες Π2.3 έως Π2.15 του Παραρτήματος Π2. Μια τυπική εικόνα για ένα σταθμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3, ενώ συνολικά τα θηκογράμματα όλων των σταθμών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Σ1, στα Σχήματα Σ1.1 έως Σ1.13.

Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τη μέση τιμή της πιθανότητας μη βροχερής ημέρας  $\bar{P}_d$ , όπως προκύπτει από όλους τους σταθμούς. Είναι φανερό η μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ των μηνών, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο εξαιτίας της εποχιακής μεταβολής του κλίματος. Αυτή η διαφοροποίηση μεταξύ των μηνών αποτελεί ουσιώδες στοιχείο, αφού όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια, είναι η βασική αιτία που διαφοροποιεί το συνολικό ύψος βροχής ανά μήνα.

Πίνακας 4.1: Μέση τιμή πιθανότητας στεγνής ημέρας όλων των σταθμών ανά μήνα.

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
$\bar{P}_d$	0.66	0.64	0.68	0.76	0.82	0.89	0.93	0.92	0.88	0.77	0.70	0.63



Σχήμα 4.3 Θηκογράμματα μηνιαίας θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης σε mm στο σταθμό Δρυμαία της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Μελετώντας τόσο τα στατιστικά χαρακτηριστικά της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης στους πίνακες Π2.3 έως Π2.15 του Παραρτήματος Π2 αλλά και τα θηκογράμματα όλων των σταθμών στα σχήματα Σ1.1 έως Σ1.13 του Παραρτήματος Σ1, προκύπτει, ίσως αναπάντεχα, πως στην πλειοψηφία των σταθμών, η θετική ημερήσια βροχόπτωση ανά μήνα κάθε σταθμού έχει περίπου την ίδια κατανομή μεταξύ των μηνών. Το βασικό στοιχείο δηλαδή που διαφοροποιείται είναι η πιθανότητα στεγνής ημέρας. Ακόμη και στην περίπτωση που η βροχόπτωση των χειμερινών μηνών παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση τιμή και μεγαλύτερη διασπορά από τους υπολοίπους μήνες, τα χαρακτηριστικά σχήματος της κατανομής φαίνεται να παραμένουν περίπου ίδια μεταξύ των μηνών. Συνεπώς, το γεγονός αυτό υπονοεί πως ίσως να υπάρχει μια και μόνο θεωρητική κατανομή που να περιγράφει ικανοποιητικά την ημερήσια βροχόπτωση για όλους τους μήνες.

#### 4.1.5 Ημερήσιες χρονοσειρές μεγίστων

Για τη μελέτη της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης σε κάθε σταθμό της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, χρησιμοποιήθηκαν οι συμπληρωμένες ημερήσιες χρονοσειρές του χρονικού διαστήματος από 01/01/1964 έως 31/12/2006, από τις οποίες εντοπίστηκαν και απομονώθηκαν τα μέγιστα κάθε έτους για κάθε σταθμό. Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά

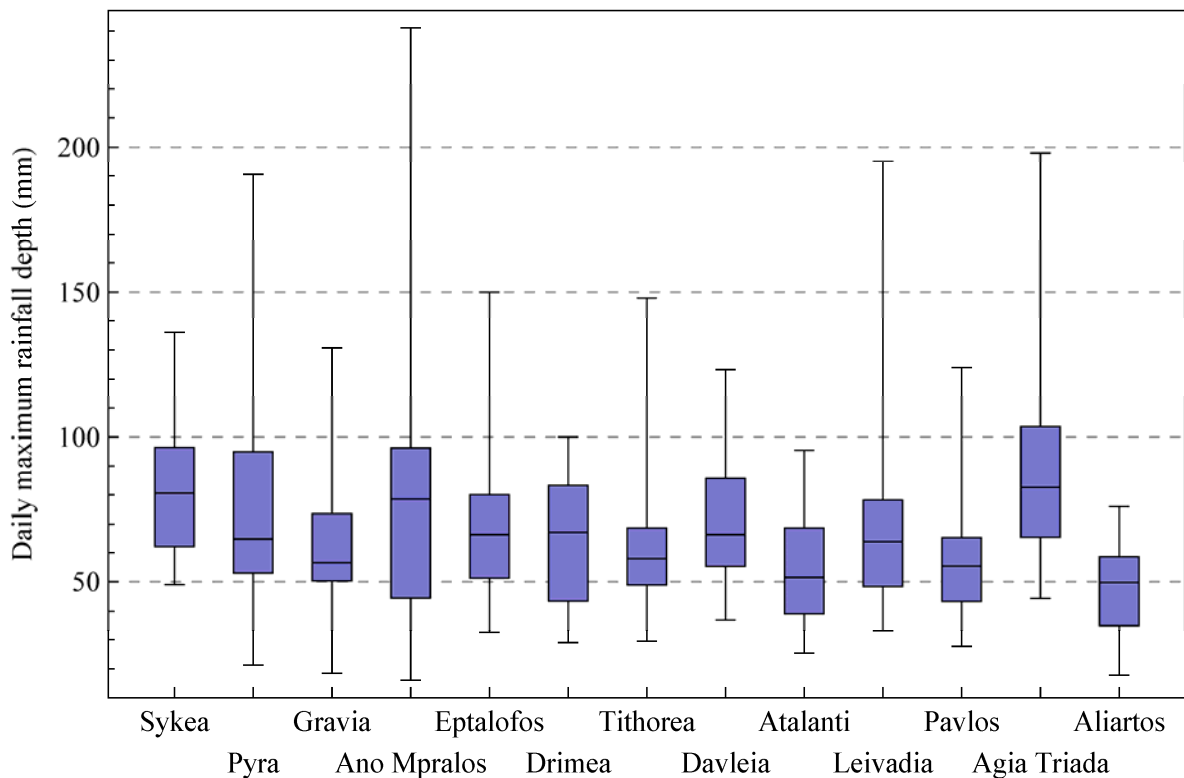
της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης κάθε σταθμού παρουσιάζονται στον Πίνακα Π2.16 του Παραρτήματος Π2, ενώ η συνοπτική εικόνα τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.

Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τα 15 ισχυρότερα επεισόδια ημερήσιας βροχόπτωσης που έχουν καταγραφεί σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, ενώ στον Πίνακα Π2.17 του Παραρτήματος Π2 παρουσιάζονται τα 15 ισχυρότερα επεισόδια στο σύνολο των σταθμών. Η μέγιστη τιμή έχει καταγραφεί στις 11/04/1992 στο σταθμό του Άνω Μπράλου και ήταν ίση με 241 mm, ενώ η δεύτερη μεγαλύτερη είναι κατά 40 mm περίπου μικρότερη. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως τέσσερα από τα 15 πιο ακραία γεγονότα έχουν καταγραφεί στον σταθμό Άνω Μπράλου, τρία στο σταθμό Πυράς και άλλα τρία στο σταθμό Αγίας Τριάδας.

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης, όπως προκύπτει από τον Πίνακα Π2.17 αλλά και το Σχήμα 4.4 διαφοροποιούνται αρκετά μεταξύ των σταθμών, π.χ., η μέση τιμή της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης κυμαίνεται από 48 mm έως 88 mm, ενώ η τυπική απόκλιση κυμαίνεται από 15 mm έως 43 mm. Εκτός όμως της μεγάλης διαφοροποίησης στη μέση τιμή και στην τυπική απόκλιση, μεγάλη διαφοροποίηση υπάρχει και στα δειγματικά χαρακτηριστικά του σχήματος της κατανομής μεταξύ των σταθμών, τα οποία είναι σημαντικά για την επιλογή κατάλληλης κατανομής μεγίστων.

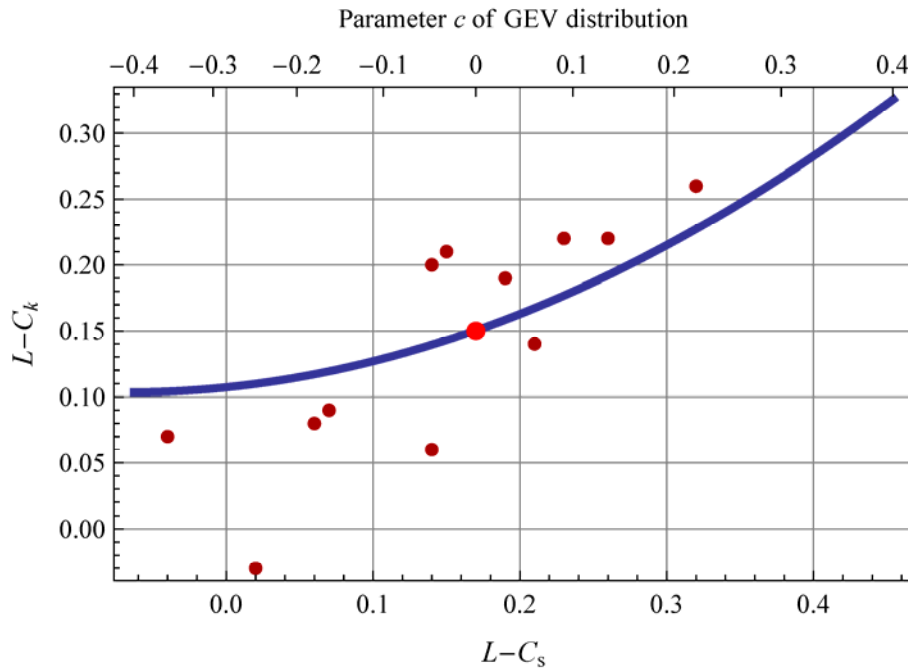
Πίνακας 4.2 Τα 15 ισχυρότερα επεισόδια ημερήσιας βροχόπτωσης σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

No.	Ημερομηνία	Σταθμός	Βροχόπτωση (mm)
1	11/04/1992	Άνω Μπράλος	241.0
2	24/03/1989	Αγία Τριάδα	198.0
3	13/01/1997	Λειβαδιά	195.0
4	13/01/1997	Πυρά	190.5
5	12/01/1997	Αγία Τριάδα	173.5
6	07/01/2004	Άνω Μπράλος	170.0
7	22/10/1994	Πυρά	165.0
8	13/02/1980	Άνω Μπράλος	150.0
9	24/08/1990	Επτάλοφος	150.0
10	09/10/2006	Λειβαδιά	150.0
11	28/10/1980	Πυρά	148.5
12	22/10/1994	Τιθορέα	148.0
13	07/01/2006	Άνω Μπράλος	143.0
14	22/01/1981	Συκέα	136.0
15	26/01/2003	Αγία Τριάδα	134.0



Σχήμα 4.4 Θηκογράμματα μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης ανά έτος σε mm σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Για μια καλύτερη εικόνα το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει τους δειγματικούς συντελεστές L-ασυμμετρίας και L-κύρτωσης, καθώς και τα θεωρητικά σημεία των δυο κατανομών μεγίστων, της Γενικής κατανομής Ακραίων Τιμών και της κατανομής Gumbel. Η διάταξη των σημείων φαίνεται να ευνοεί την κατανομή Gumbel ως κατάλληλο μοντέλο μιας και τα σημεία αναπτύσσονται σχεδόν συμμετρικά γύρω το θεωρητικό σημείο της κατανομής (κόκκινη τέλεια). Παρόλα αυτά, η υιοθέτηση της κατανομής Gumbel, ειδικά για ορισμένους σταθμούς (τα πέντε σημεία δεξιά της κατανομής Gumbel), ίσως να συνιστά επικίνδυνη πρακτική μιας και η κατανομή Gumbel θα μπορούσε να υποεκτιμήσει τη μέγιστη βροχόπτωση δεδομένης περιόδου επαναφοράς για τους σταθμούς αυτούς [Koutsoyiannis, 2004a, 2004b]. Επιπλέον και για λόγους που προκύπτουν από την ανάλυση στο κεφάλαιο 4.2, αν πρέπει να προταθεί ένα μοναδικό μοντέλο κατανομής μεγίστων για όλους τους σταθμούς (με διαφορετική μέση τιμή και τυπική απόκλιση φυσικά) για κάθε σταθμό, τότε προκύπτει πως αυτό είναι Γενική κατανομή Ακραίων Τιμών με τιμή της παραμέτρου  $c$  ίση με 0.15.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα L-ασυμμετρίας και L-κύρτωσης. Οι καφέ τελείες αναπαριστούν τις δειγματικές τιμές των μέγιστων ημερήσιων βροχοπτώσεων (13 σταθμοί), η συμπαγής γραμμή την Γενική Κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV) και η κόκκινη τελεία την κατανομή Gumbel.

## 4.2 Προσαρμογή κατανομών

Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία πως η κατανομή της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης παρουσιάζει μεγάλη θετική ασυμμετρία. Παραδοσιακά, η κατανομές που έχουν περισσότερο χρησιμοποιηθεί ως κατανομές ημερήσιας βροχόπτωσης είναι η εκθετική, η κατανομή Γάμα ή μίξεις εκθετικών [π.χ., *Waymire and Gupta*, 1981; *Wilks*, 1998; *Woolhiser and Roldan*, 1982]. Παρόλα αυτά, άλλες εργασίες [*Fraedrich and Larnder*, 1993; *Veneziano et al.*, 1996; *Wilks*, 1999] προτείνουν αντί της χρήσης εκθετικών κατανομών τη χρήση κατανομών τύπου Pareto, με ουρά δηλαδή τύπου δύναμης. Πρόσφατα, έχει προταθεί [*Papalexiou and Koutsoyiannis*, 2009a, 2008] και δοκιμαστεί με επιτυχία μια εξαιρετικά ευέλικτη τετρα-παραμετρική κατανομή τύπου δύναμης, η κατανομή JH, όχι μόνο στην ημερήσια κλίμακα, αλλά σε ένα μεγάλο εύρος χρονικών κλιμάκων. Στην παρούσα έρευνα, δεδομένου ότι δεν απαιτείται προσαρμογή της κατανομής σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, θα χρησιμοποιηθεί μια απλοποιημένη τρι-παραμετρική μορφή της κατανομής JH, η οποία έχει αναλυτική και απλή έκφραση τόσο της συνάρτησης κατανομής όσο και του ποσοστημορίου [*Papalexiou and Koutsoyiannis*, 2009b]. Η κατανομή αυτή είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως κατανομή Burr τύπου VII [*Rodriguez*, 1977; *Tadikamalla*, 1980]. Ο Πίνακας 4.3 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά της κατανομής.

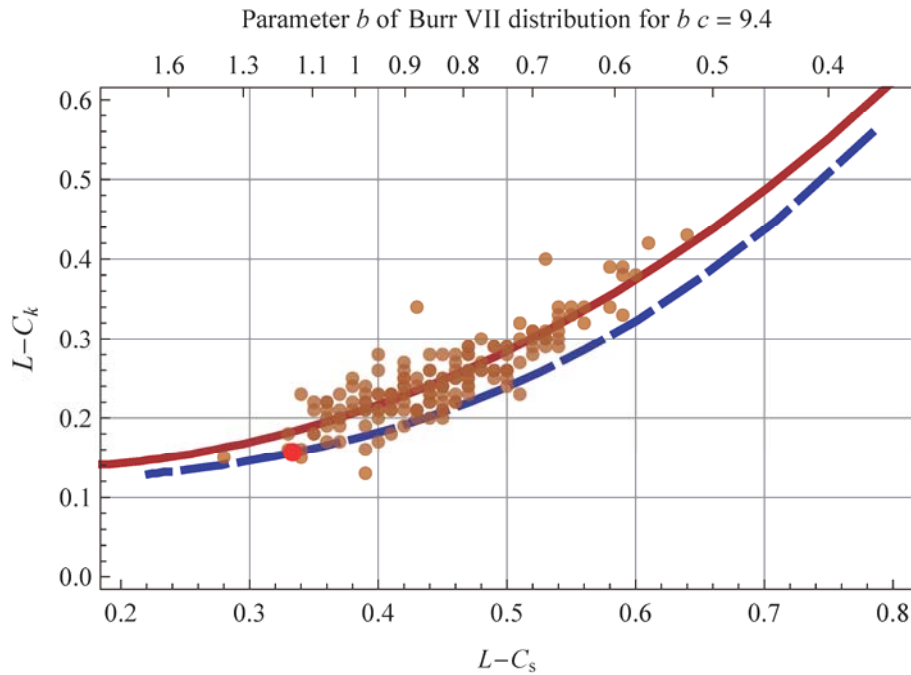


Πίνακας 4.3: Βασικά χαρακτηριστικά της κατανομής Burr VII

	Εξίσωση	Αναφορά
Πυκνότητα πιθανότητας	$f_X(x) = \frac{bc}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \left[1 + \left(\frac{x}{a}\right)^b\right]^{-c-1}$	(4.1)
Συνάρτηση κατανομής	$F_X(x) = 1 - \left[1 + \left(\frac{x}{a}\right)^b\right]^{-c}$	(4.2)
Ποσοστημόριο	$Q_X(u) = a \left[ (1-u)^{-1/c} - 1 \right]^{1/b}$	(4.3)
Πεδίο ορισμού μεταβλητής	$X \in \mathbb{R}^+$	
Περιορισμοί παραμέτρων	$a > 0, b > 0, c > 0$	
Ροπή τάξης $q$	$m_q = c a^q B\left(1 + \frac{q}{b}, c - \frac{q}{b}\right)^\dagger$	(4.4)
Ύπαρξη ροπών	$m_q < \infty$ αν $bc > q$	
Ασυμπτωτική συμπεριφορά	$P(X > x) \sim a^{-b} x^{-bc}$	(4.5)
	$b < 1 \Rightarrow f_X(0) \rightarrow \infty$	
Χαρακτηριστικά σχήματος	$b = 1 \Rightarrow f_X(0) \rightarrow \frac{c}{a}$	
	$b > 1 \Rightarrow f_X(0) \rightarrow 0$	

$$^\dagger B(a, b) = \int_0^1 t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$$

Η υπεροχή της κατανομής Burr VII έναντι μιας πιο παραδοσιακής κατανομής όπως για παράδειγμα η κατανομή Γάμα ή η Εκθετική, αποδεικνύεται από το Σχήμα 4.6 που απεικονίζει το σύνολο των εμπειρικών σημείων ( $L-C_s$ ,  $L-C_k$ ), συνολικά 156 σημεία (13 σταθμοί x 12 μήνες), των χρονοσειρών της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης ανά μήνα των σταθμών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Είναι φανερό, πως η συντριπτική πλειονότητα των σημείων εντοπίζεται στη περιοχή πάνω από τη θεωρητική καμπύλη που εκφράζει την κατανομή Γάμα (μπλε διακεκομμένη γραμμή) και απέχει πολύ από το θεωρητικό σημείο της εκθετικής κατανομής (κόκκινη τελεία). Επιπλέον, στο ίδιο σχήμα έχει σχεδιαστεί η θεωρητική καμπύλη που εκφράζει την κατανομή Burr VII με δείκτη ασυμπτωτικής συμπεριφοράς  $bc = 9.4$  και που όπως είναι εμφανές ταιριάζει εξαιρετικά στο σύνολο των εμπειρικών σημείων. Σημειώνεται, πως τη τιμή του δείκτη ασυμπτωτικής συμπεριφοράς δεν επιλέχθηκε τυχαία, αλλά προέκυψε ως ο μέσος όρος του συνόλου των δεικτών που υπολογίστηκαν μετά από την προσαρμογή της κατανομής (περιγράφεται στη συνέχεια) σε κάθε χρονοσειρά.

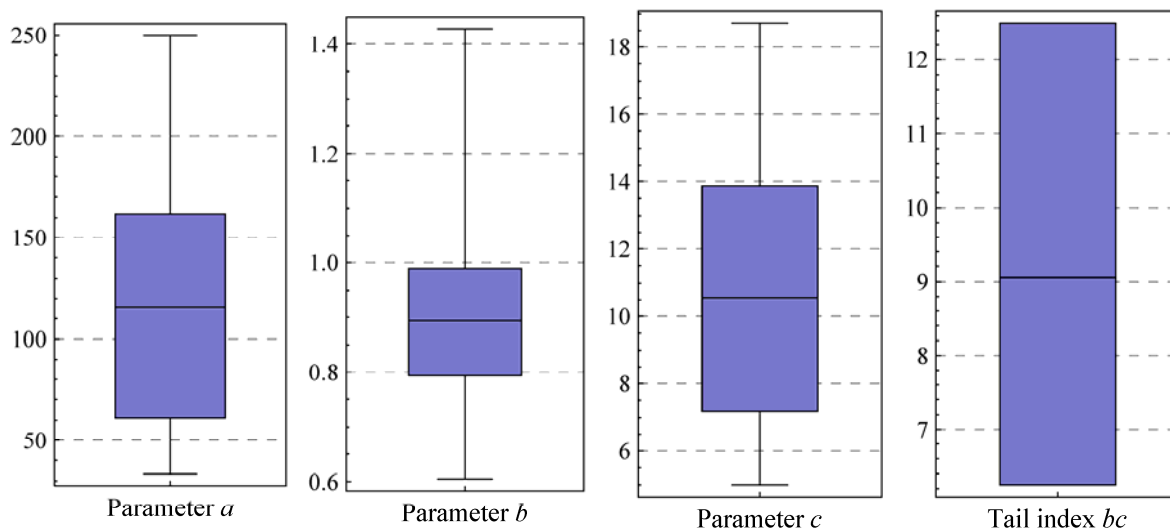


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα L-ασυμμετρίας και L-κύρτωσης. Οι καφέ τελείες αναπαριστούν τα εμπειρικά σημεία  $(L-C_s, L-C_k)$  των ημερήσιων βροχοπτώσεων ανά μήνα (13x12 σημεία), η συμπαγής γραμμή την κατανομής Burr VII, η διακεκομμένη γραμμή την κατανομή Γάμα και η κόκκινη τελεία την Εκθετική κατανομή.

Ως μέθοδος προσαρμογής της κατανομής Burr VII στα δείγματα των θετικών ημερήσιων βροχοπτώσεων σε μηνιαία βάση, εφαρμόστηκε η μέθοδος των ροπών. Σύμφωνα με την κλασική μέθοδο προσαρμογής των ροπών, για μια τρι-παραμετρική κατανομή, η εκτίμηση των παραμέτρων προκύπτει από την επίλυση του συστήματος που σχηματίζεται από την εξίσωση των τριών πρώτων θεωρητικών ροπών της κατανομής με τις αντίστοιχες δειγματικές. Στην παρούσα έρευνα εφαρμόστηκε μια ελαφρά τροποποιημένη μέθοδος, συγκεκριμένα, αντί της χρήσης της τρίτης ροπής χρησιμοποιήθηκε η κλασματική ροπή τάξης  $3/2$ , ώστε να αποφευχθεί η ύψωση των δειγματικών τιμών σε κυβικές δυνάμεις. Το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει δεν έχει αναλυτική λύση και οι παράμετροι της κατανομής προέκυψαν από την αριθμητική λύση της

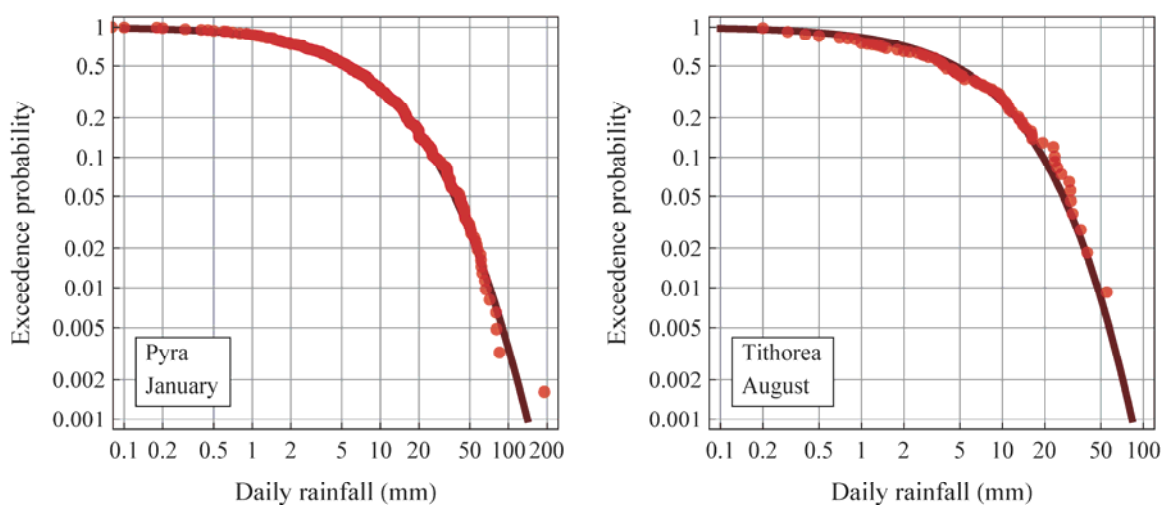
$$\arg \min_{a,b,c} \sum \left[ c a^q B \left( 1 + \frac{q}{b}, c - \frac{q}{b} \right) - \hat{m}_q \right]^2, \quad q = \left\{ 1, \frac{3}{2}, 2 \right\} \quad (4.6)$$

με χρήση του λογισμικού Mathematica, όπου  $\hat{m}_q$  η δειγματική ροπή τάξης  $q$ .



Σχήμα 4.7: Θηκογράμματα των παραμέτρων των προσαρμοσμένων κατανομών Burr VII στα δείγματα της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης.

Οι παράμετροι των προσαρμοσμένων κατανομών (συνολικά 156 κατανομές, 13 σταθμοί x 12 μήνες) παρουσιάζονται συνοπτικά στο ενώ ένα ενδεικτικό γράφημα των εμπειρικών κατανομών της ημερήσιας θετικής βροχόπτωσης και των προσαρμοσμένων κατανομών Burr VII για το σταθμό της Πυράς το μήνα Ιανουάριο και το σταθμό της Τιθορέας το μήνα Αύγουστο δίνεται στο Σχήμα 4.8. Συνολικά, όλες οι εμπειρικές κατανομές των δεδομένων και οι αντίστοιχες προσαρμοσμένες Burr VII κατανομές παρουσιάζονται στα σχήματα Σ1.14 έως Σ1.39 του παραρτήματος Σ1. Από τα γραφήματα προσάρμοσης Σ1.14 έως Σ1.39 προκύπτει πως η κατανομή προσαρμόζεται στην συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων εξαιρετικά.



Σχήμα 4.8: Ενδεικτικό γράφημα εμπειρικών κατανομών της ημερήσιας θετικής βροχόπτωσης και οι προσαρμοσμένες κατανομές Burr VII.

### 4.3 Ανάλυση αυτοσυσχετίσεων και ετεροσυσχετίσεων

Οι συνθετικές χρονοσειρές που προκύπτουν από την εφαρμογή ενός πολυμεταβλητού στοχαστικού μοντέλου, οφείλουν να είναι συνεπείς όχι μόνο ως προς τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών υπό μελέτη, αλλά επίσης και ως προς τη δομή της αυτοσυσχέτισης που παρουσιάζει κάθε χρονοσειρά, όπως και ως προς τη δομή των ετεροσυσχετίσεων που προκύπτουν μεταξύ των χρονοσειρών.

Είναι γνωστό πως υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συσχέτισης, (α) συσχέτιση με εμμονή, όπου ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho(\tau)$  είναι ανάλογος μιας συνάρτησης δύναμης της υστέρησης  $\tau$ , δηλαδή  $\rho(\tau) \sim \tau^{-\alpha}$ , με  $0 < \alpha < 1$ , γεγονός που σημαίνει πως η τιμή του μειώνεται πολύ αργά με το χρόνο και (β) ο συντελεστής συσχέτισης να είναι ανάλογος μιας εκθετικής συνάρτησης της υστέρησης, δηλαδή  $\rho(\tau) \sim a^{-\tau}$ , με  $0 < a < 1$ , που σημαίνει πως η τιμή του μειώνεται πολύ γρήγορα με το χρόνο. Αν και ο τύπος συσχέτισης που έχει περισσότερο χρησιμοποιηθεί στη μοντελοποίηση γεωφυσικών χρονοσειρών είναι ο εκθετικός, υπάρχουν αρκετές εργασίες [Beran, 1992; Cox, 1984; Montanari, 2003] που υποστηρίζουν τη χρήση του τύπου δύναμης ως πιο κατάλληλου. Παρόλα αυτά, η συσχέτιση τύπου δύναμης, που βάσει του ακριβούς ορισμού της είναι μια ασυμπτωτική ιδιότητα, δηλαδή αναφέρεται σε πολύ μεγάλες τιμές της υστέρησης, είναι δύσκολο αν όχι αδύνατο να αποδειχθεί σε γεωφυσικές χρονοσειρές που προφανώς έχουν πεπερασμένο μήκος.

Το γεγονός πάντως είναι, πως η ύπαρξη εμμονής αλλάζει ουσιαστικά τη δομή των παραγόμενων χρονοσειρών και συνεπώς, αν υπάρχουν ενδείξεις εμμονής η εφαρμογή του στοχαστικού μοντέλου οφείλει να τις αναπαράγει. Με στόχο να διαπιστωθεί αν υπάρχουν ενδείξεις εμμονής έχουν κατασκευαστεί τα αυτοσυσχετογράμματα και τα ετεροσυσχετογράμματα των χρονοσειρών των ημερήσιων βροχοπτώσεων σε μηνιαία βάση μέχρι και για υστέρηση πέντε ημερών. Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τις αριθμητικές τιμές των μηνιαίων μέσων τιμών αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης που προκύπτουν από όλους τους σταθμούς μέχρι και για υστέρηση τριών ημερών.

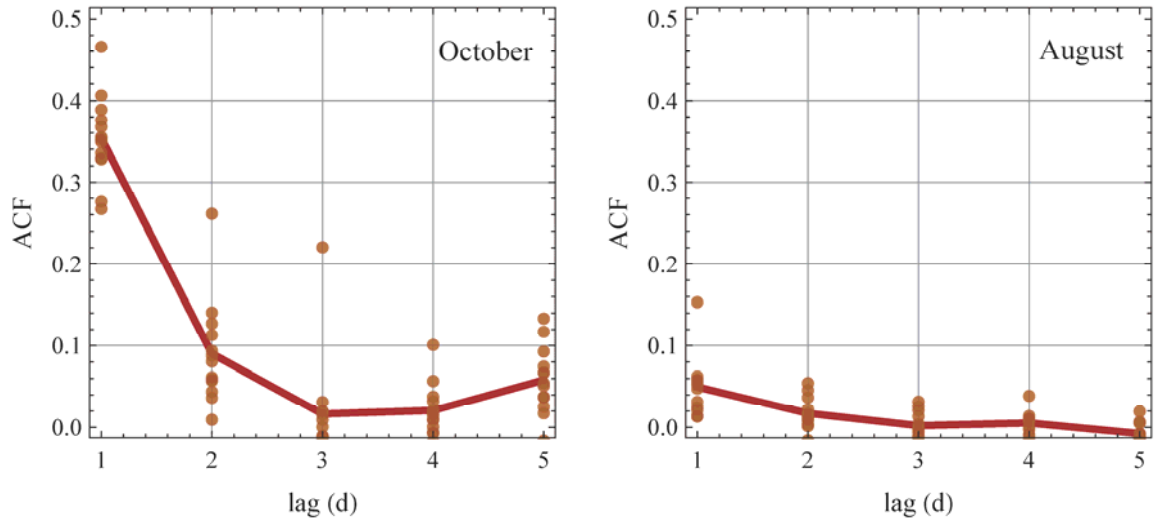
Ενδεικτικά, το Σχήμα 4.9 παρουσιάζει την εμπειρική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ACF, όλων των σταθμών για ένα χειμερινό και ένα θερινό μήνα. Οι τελείες αναπαριστούν τις εμπειρικές τιμές του συντελεστή αυτοσυσχέτισης των χρονοσειρών των σταθμών (13 τελείες) για την αντίστοιχη υστέρηση, ενώ η συμπαγής γραμμή αναπαριστά τη μέση τιμή τους. Ομοίως, το Σχήμα 4.10 παρουσιάζει την εμπειρική συνάρτηση ετεροσυσχέτισης CCF, όλων των διαφορετικών συνδυασμών των σταθμών ανά δύο, για ένα χειμερινό και ένα θερινό μήνα. Οι

τελείες αναπαριστούν τις εμπειρικές τιμές του συντελεστή ετεροσυσχέτισης των χρονοσειρών των σταθμών (156 τελείες) για την αντίστοιχη υστέρηση, ενώ η συμπαγής γραμμή αναπαριστά τη μέση τιμή τους. Το σύνολο των γραφημάτων για όλους του μήνες παρουσιάζεται σχήματα Σ1.40 έως Σ1.43 του παραρτήματος Σ1.

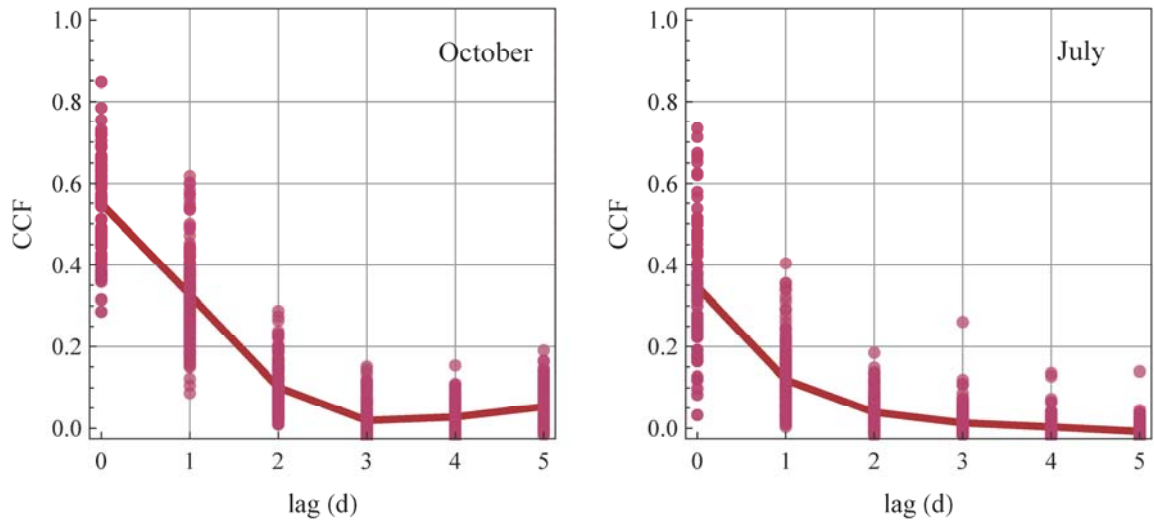
Η μελέτη των αυτοσυσχετογραμμμάτων και των ετεροσυσχετογραμμμάτων δεν υποδεικνύει την ύπαρξη εμμονής. Αντιθέτως, η μείωση της συσχέτισης είναι ραγδαία και συνεπώς το θεωρητικό μοντέλο συσχέτισης που ταιριάζει στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το εκθετικό. Αξίζει να σχολιαστεί, πως οι χειμερινοί μήνες παρουσιάζουν πιο ισχυρή συσχέτιση από τους θερινούς, γεγονός αναμενόμενο εξαιτίας των πολύ λιγότερων ημερών βροχής κατά τους τελευταίους. Τέλος, το εύρος των τιμών των συντελεστών ετεροσυσχέτισης είναι πολύ μεγάλο, για παράδειγμα για το μήνα Ιούλιο κυμαίνεται περίπου από 0 έως 0.75, γεγονός επίσης αναμενόμενο, δεδομένου ότι οι σταθμοί που βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλον παρουσιάζουν μεγάλη ετεροσυσχέτιση, ενώ αυτοί που βρίσκονται μακριά μικρή.

Πίνακας 4.4: Μέση τιμή των αυτοσυσχετίσεων και ετεροσυσχετίσεων των ημερησίων βροχοπτώσεων ανά μήνα για υστέρηση μέχρι τριών ημερών.

	Μέση τιμή του συντελεστής αυτοσυσχέτισης			Μέση τιμή του συντελεστής ετεροσυσχέτισης			
	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_0$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
Ιανουάριος	0.28	0.08	0.03	0.44	0.24	0.08	0.04
Φεβρουάριος	0.21	0.06	0.05	0.43	0.20	0.05	0.04
Μάρτιος	0.24	0.02	-0.01	0.46	0.22	0.03	-0.01
Απρίλιος	0.21	0.03	0.00	0.49	0.23	0.05	0.00
Μάιος	0.18	0.03	0.03	0.42	0.22	0.07	0.03
Ιούνιος	0.13	0.04	0.05	0.37	0.15	0.05	0.06
Ιούλιος	0.08	0.02	0.01	0.35	0.12	0.04	0.01
Αύγουστος	0.05	0.02	0.00	0.45	0.11	0.06	0.01
Σεπτέμβριος	0.13	0.01	0.02	0.37	0.17	0.04	0.01
Οκτώβριος	0.35	0.09	0.02	0.55	0.33	0.10	0.02
Νοέμβριος	0.28	0.08	0.02	0.52	0.25	0.08	0.04
Δεκέμβριος	0.25	0.05	0.01	0.45	0.21	0.05	0.01



Σχήμα 4.9: Ενδεικτικά αυτοσυσχετογράμματα για δύο διαφορετικούς μήνες.



Σχήμα 4.10 Ενδεικτικά ετεροσυσχετογράμματα για δύο διαφορετικούς μήνες.

---

## 5 Στοχαστική μοντελοποίηση της βροχόπτωσης

---

### 5.1 Επιλογή του στοχαστικού μοντέλου

Η στοχαστική μοντελοποίηση της βροχόπτωσης παρουσιάζει πολλές ιδιαιτερότητες και δυσκολίες που οφείλονται κυρίως στον διαλείποντα χαρακτήρα της. Συγκεκριμένα, η ημερήσια βροχόπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ούτε ανέλιξη συνεχών τυχαίων μεταβλητών αλλά ούτε ανέλιξη διακριτών τυχαίων μεταβλητών και αυτό διότι η περιθώρια κατανομή της ημερήσιας βροχόπτωσης ανήκει στην κατηγορία των μικτών τυχαίων μεταβλητών, που είναι εν μέρει διακριτή και εν μέρει συνεχής. Επιπλέον, η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών από θετικά ασύμμετρες κατανομές, όπως της ημερήσιας βροχόπτωσης, που να διατηρούν ζητούμενη δομή αυτοσυσχέτισης, είναι πολύ πιο δύσκολη από ότι η παραγωγή χρονοσειρών από συμμετρικές κατανομές όπως η κανονική.

Γενικά, οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης της βροχόπτωσης στη βιβλιογραφία [*Waymire and Gupta, 1981*] διαχωρίζουν τη μοντελοποίηση σε δύο στάδια, στο πρώτο, μοντελοποιούνται οι περίοδοι ξηρασίας και βροχόπτωσης και στο δεύτερο, μοντελοποιούνται οι τιμές τις βροχόπτωσης όταν βρέχει. Μια άλλη τεχνική που εφαρμόζεται κυρίως σε συνεχείς μεταβλητές και όχι σε μεταβλητές με διαλείποντα χαρακτήρα, είναι πρώτον, η κανονικοποίηση τους, δεύτερον, η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με τα χαρακτηριστικά της κανονικοποιημένης χρονοσειράς και τρίτον, η αποκανονικοποίηση της κανονικοποιημένης χρονοσειράς ώστε να μοιάζει με την αρχική. Στην παρούσα έρευνα, επιχειρείται μια τροποποίηση αυτής της τεχνικής ώστε να είναι εφαρμόσιμη και σε χρονοσειρές διαλείποντος χαρακτήρα.

Η επιλογή του στοχαστικού μοντέλου βασίζεται τόσο στα χαρακτηριστικά του συστήματος που καλείται να προσομοιώσει όσο και στα χαρακτηριστικά που είναι επιθυμητό αυτό να αναπαράγει. Έστω πως υπάρχει ένας μετασχηματισμός που κανονικοποιεί της ιστορικές χρονοσειρές βροχόπτωσης, καθώς και ο αντίστροφός του ώστε να είναι εφικτή η αποκανονικοποίηση τους, τότε στοχαστικό μοντέλο που αναζητούμε για τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά: (α) να είναι πολυμεταβλητό, δεδομένου ότι υπάρχουν 13 σταθμοί, (β) να αναπαράγει την μηνιαία κυκλική μεταβλητότητα

και ( $\gamma$ ) να διατηρεί τη δομή της αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης, η οποία όπως προέκυψε από τα ευρήματα του υποκεφαλαίου 4.3 είναι εκθετικού τύπου.

Ένα μοντέλο που διατηρεί αυτά τα χαρακτηριστικά, είναι το κυκλοστάσιμο πολυμεταβλητό αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 (PAR1). Το μοντέλο αυτό και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην υδρολογία [*Bras and Rodriguez-Iturbe, 1993; Ledolter, 1978; Raman and Sunilkumar, 1995; Salas and Delleur, 1980*] και διατηρεί ή αναπαράγει την ετεροσυσχέτιση μεταξύ των σταθμών για υστέρηση βήματος 0 και 1, καθώς και την αυτοσυσχέτιση για βήμα 1. Η θεωρητική δομή της αυτοσυσχέτισης και της ετεροσυσχέτισης που αναπαράγει είναι η εκθετική και συνεπώς βρίσκεται σε συμφωνία με τα ευρήματα του υποκεφαλαίου 4.3.

Συμβολίζοντας με  $Z_{i,j}(t)$  την κανονικοποιημένη μεταβλητή την ημέρα  $t$ , στον  $i$ -οστό σταθμό για το μήνα  $j$ , με  $i = 1, \dots, 13$  και  $j = 1, \dots, 12$  το μοντέλο PAR1 ορίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{Z}_j(t) = \mathbf{A}_j \mathbf{Z}_j(t-1) + \mathbf{B}_j \boldsymbol{\varepsilon}(t) \quad (5.1)$$

όπου  $\mathbf{Z}_j^T(t) = [Z_{1,j}(t) \dots Z_{13,j}(t)]$  με  $Z_{i,j}(t) \sim N(0,1)$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}^T(t) = [\varepsilon_1(t) \dots \varepsilon_{13}(t)]$  το διάνυσμα των τυχαίων διαταραχών με  $\varepsilon_i(t) \sim N(0,1)$ ,  $\mathbf{A}_j$  και  $\mathbf{B}_j$  τα  $13 \times 13$  μητρώα παραμέτρων με το  $j$  να εξαρτάται από το μήνα που η μέρα  $t$  ανήκει. Συνεπώς, πρέπει να εκτιμηθούν 12 διαφορετικά μητρώα παραμέτρων  $\mathbf{A}_j$  και  $\mathbf{B}_j$ , δηλαδή ένα για κάθε μήνα. Σχετικά με την υλοποίηση του μοντέλου διευκρινίζεται πως σε κάθε βήμα  $t$  πρέπει να επιλέγονται τα κατάλληλα μητρώα παραμέτρων, για παράδειγμα, για τις πρώτες 31 τιμές τα μητρώα  $\mathbf{A}_1$  και  $\mathbf{B}_1$ , για τις επόμενες 28 τιμές τα  $\mathbf{A}_2$  και  $\mathbf{B}_2$  κτλ. Δεδομένου ότι το μοντέλο είναι κυκλοστάσιμο η επιλογή των μητρώων  $\mathbf{A}_j$  και  $\mathbf{B}_j$  είναι περιοδική, επαναλαμβάνεται κάθε 365 ή 366 τιμές.

Τα μητρώα των παραμέτρων  $\mathbf{A}_j$  και  $\mathbf{B}_j$  μπορούν να εκτιμηθούν, αντίστοιχα, από τις εξισώσεις

$$\mathbf{A}_j = \mathbf{K}_{Z_j}(1) \mathbf{K}_{Z_j}^{-1}(0) \quad (5.2)$$

$$\mathbf{B}_j \mathbf{B}_j^T = \mathbf{K}_{Z_j}(0) - \mathbf{K}_{Z_j}(1) \mathbf{K}_{Z_j}^{-1}(0) \mathbf{K}_{Z_j}^T(1) \quad (5.3)$$

όπου  $\mathbf{K}_{Z_j}(\tau)$  είναι το μητρώο συσχετίσεων για υστέρηση  $\tau$ , του μήνα  $j$ , που ορίζεται από τη σχέση

$$\mathbf{K}_{Z_j}(\tau) = \begin{bmatrix} \rho_{1,1}(\tau) & \dots & \rho_{1,13}(\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{13,1}(\tau) & \dots & \rho_{13,13}(\tau) \end{bmatrix} \quad \rho_{p,q}(\tau) = E[Z_{p,j}(t) Z_{q,j}(t-\tau)] \quad (5.4)$$

με  $p = 1, \dots, 13$  και  $q = 1, \dots, 13$ .



## 5.2 Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών

### 5.2.1 Κανονικοποίηση των ιστορικών χρονοσειρών

Γενικά, για έναν αυθαίρετο ένα-προς-ένα μετασχηματισμό  $h$  μιας και συνεχούς τυχαίας μεταβλητής  $Y$  που ορίζεται σε ένα αυθαίρετο σύνολο  $\mathbb{k}$  και μετασχηματίζει την  $Y$  στην τυποποιημένη κανονική μεταβλητή  $Z$ , με δεδομένο ότι το πεδίο ορισμού της  $Z$  είναι το  $\mathbb{R}$ , πρέπει να ισχύει  $h: \mathbb{k} \rightarrow \mathbb{R}$ . Αν συμβολίσουμε με  $Y$  την βροχόπτωση που ορίζεται στο  $\mathbb{R}^+$  και συνεπώς είναι μια μεταβλητή μικτού τύπου με συγκεκριμένη πιθανότητα  $p = \Pr(Y = 0)$  και με  $X$  τη θετική βροχόπτωση, που ορίζεται δηλαδή στο  $(0, \infty)$ , είναι φανερό πως οποιοσδήποτε μετασχηματισμός της  $Y$  θα οδηγήσει και πάλι σε μια μεταβλητή μικτού τύπου, ενώ αντιθέτως ένας συνεχής μετασχηματισμός που δρα στη  $X$  θα τη μετασχηματίσει σε συνεχή μεταβλητή.

Με βάση την προηγούμενη παρατήρηση είναι φανερό πως μόνο η θετική βροχόπτωση  $X$  μπορεί να μετασχηματιστεί στην τυποποιημένη κανονική μεταβλητή  $Z$  με την εφαρμογή ενός καταλλήλου μετασχηματισμού  $Z = g(X)$ . Παρόλα αυτά, σε ένα δείγμα  $n$  τιμών βροχόπτωσης με  $n_0$  μηδενικές τιμές, η μικρότερη θετική τιμή του δείγματος  $x_{(1)}$  έχει εμπειρική πιθανότητα μη υπέρβασης κατά Weibull ίση με  $(n_0+1)/(n+1) = p + 1/(n+1) > 0$  και συνεπώς η τιμή της μεταβλητής  $Z$  που αντιστοιχεί σε αυτή την πιθανότητα είναι  $z_{(1)} > z_p > -\infty$ , όπου  $z_p$  η τιμή της μεταβλητής  $Z$  που αντιστοιχεί στην πιθανότητα  $p = \Pr(Y = 0)$ . Έτσι, αρκεί για το μετασχηματισμό  $g$  να ισχύει  $g: (0, \infty) \rightarrow (z_p, \infty)$ . Επίσης, σχετικά με τα χαρακτηριστικά του μετασχηματισμού  $g$ , δεδομένου ότι από την ανάλυση των θετικών ημερήσιων βροχοπτώσεων ανά μήνα έχει προκύψει ότι η κατανομή τους είναι θετικά ασύμμετρη και τύπου δύναμης, θα πρέπει ο μετασχηματισμός  $Z = g(X)$  να οδηγεί σε μια κατανομή με παρόμοια χαρακτηριστικά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω ο μετασχηματισμός που προτείνεται είναι ο

$$z = g(x) = d + \sqrt{\ln \left[ 1 + \left( 1 + \frac{x}{a} \right)^b \right]^c} \quad g: \mathbb{R}^+ \rightarrow (d + \sqrt{\ln 2}, \infty) \quad (5.5)$$

όπου  $a, b, c, d$  οι παράμετροι του μετασχηματισμού και  $d + \sqrt{\ln 2} = z_p$ . Εφαρμόζοντας την αλλαγή μεταβλητής  $z = g(x)$  στην τυποποιημένη κανονική κατανομή, τότε η πυκνότητα πιθανότητας της μεταβλητής  $X$  είναι

$$f_X(x) = \frac{1}{1-p} \frac{bc}{2a\sqrt{2\pi}} \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \left(\left(\frac{x}{a}\right)^b + 1\right)^{c-1} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\sqrt{\ln\left(\left(\left(\frac{x}{a}\right)^b + 1\right)^c + 1\right)} + d\right)^2\right)}{\left(\left(\left(\frac{x}{a}\right)^b + 1\right)^c + 1\right) \sqrt{\ln\left(\left(\left(\frac{x}{a}\right)^b + 1\right)^c + 1\right)}} \quad (5.6)$$

ή οποία όπως μπορεί να διαπιστωθεί, έχει παρόμοια συμπεριφορά με την κατανομή Burr VII. Συγκεκριμένα, για  $b < 0$  η πυκνότητα πιθανότητας απειρίζεται στο 0, ενώ για έχει  $b > 0$  η πυκνότητα πιθανότητας μηδενίζεται στο 0. Επιπλέον, το πιο σημαντικό είναι πως η κατανομή είναι τύπου δύναμης και ειδικά για  $d = 0$  έχει δείκτη ασυμπτωτικής συμπεριφοράς ίσο με  $bc / 2 + 1$ .

Είναι προφανές πως ο μετασχηματισμός (5.5) πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε μεταβλητή  $X_{i,j}$  που αναφέρεται στην βροχόπτωση του  $i$ -οστού σταθμού για το μήνα  $j$ . Οι εκτιμημένες παράμετροι δίνονται στον Πίνακες Π3.1 έως Π3.4.

## 5.2.2 Εκτίμηση μητρώων συσχετίσεων και παραμέτρων μοντέλου

Για να εφαρμοστεί το μοντέλο PAR1 πρέπει να εκτιμηθούν τα μητρώα των παραμέτρων  $\mathbf{A}_j$  και  $\mathbf{B}_j$  που σύμφωνα με τις σχέσεις (5.2) και (5.3) απαιτείται γνώση των μητρώων συσχετίσεων  $\mathbf{K}_{Z_j}(\tau)$ , όπως αυτά ορίζονται στην σχέση (5.4). Είναι φανερό πως η εφαρμογή του μετασχηματισμού μετασχηματίζει μόνο τις θετικές τιμές της βροχόπτωσης και συνεπώς τα μητρώα  $\mathbf{K}_{Z_j}(\tau)$  δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθούν με ακρίβεια από τις μετασχηματισμένες χρονοσειρές εξαιτίας της ύπαρξης των μηδενικών.

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, πραγματοποιήθηκε μια πληθώρα προσομοιώσεων κανονικών χρονοσειρών με δεδομένες τιμές συσχέτισης, και μελετήθηκε η επίδραση του αντίστροφου μετασχηματισμού της σχέσης (5.5), στις αποκανονικοποιημένες χρονοσειρές. Από τη ανάλυση, προέκυψε ότι ο μετασχηματισμός προκαλεί μείωση της συσχέτισης που εξαρτάται τόσο από την πιθανότητα στεγνής ημέρας  $p$  όσο και από τις τιμές των παραμέτρων του. Συνεπώς, τα μητρώα  $\mathbf{K}_{Z_j}(\tau)$  εκτιμήθηκαν από τα αντίστοιχα μητρώα  $\mathbf{K}_{X_j}(\tau)$  που ορίζονται από την εξίσωση

$$\mathbf{K}_{X_j}(\tau) = \begin{bmatrix} \rho_{1,1}(\tau) & \dots & \rho_{1,13}(\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{13,1}(\tau) & \dots & \rho_{13,13}(\tau) \end{bmatrix} \quad \rho_{p,q}(\tau) = \frac{\text{Cov}[X_{p,j}(t), X_{q,j}(t-\tau)]}{\sigma_{X_{p,j}}(t)\sigma_{X_{q,j}}(t-\tau)} \quad (5.7)$$

οι τιμές των οποίων προσαυξήθηκαν κατά ένα ποσοστό που προέκυψε από τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας ανάλυσης. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει το ποσοστό προσαύξησης που κατά μέσο όρο πρέπει να πραγματοποιηθεί στις τιμές των συντελεστών συσχέτισης των μητρώων  $\mathbf{K}_{X_j}(\tau)$  ώστε να προκύψουν τα μητρώα  $\mathbf{K}_{Z_j}(\tau)$ .

Πίνακας 5.1: Ποσοστό προσαύξησης των συντελεστών συσχέτισης των μητρώων  $\mathbf{K}_{X_j}(\tau)$ .

Υστέρηση	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
$\tau = 0$	0.30	0.25	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.40	0.40	0.25	0.25	0.25
$\tau = 1$	0.40	0.40	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	0.75	0.60	0.40	0.40	0.40

Μετά την εκτίμηση των μητρώων  $\mathbf{K}_{Z_j}(\tau)$ , η εκτίμηση των μητρώων των παραμέτρων  $\mathbf{A}_j$  και  $\mathbf{B}_j$  πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας τις σχέσεις (5.2) και (5.3). Αναφέρεται, πως τα μητρώα των παραμέτρων  $\mathbf{B}_j$  εκτιμήθηκαν βάσει της μεθόδου Cholesky.

### 5.2.3 Παραγωγή συνθετικών βροχοπτώσεων

Για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση 1000 ετών βάσει του μοντέλου PAR1 με χρήση των παραμέτρων που εκτιμήθηκαν. Οι παραχθείσες χρονοσειρές αποκανονικοποιήθηκαν βάσει του αντίστροφου μετασχηματισμού της (5.5)

$$x = g_{Z_{i,j}}^{-1}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq z_{p_{i,j}} \\ a \left\{ \left[ e^{(z-d)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{c}} - 1 \right\}^{\frac{1}{b}}, & z > z_{p_{i,j}} \end{cases}, \quad g^{-1} : (d + \sqrt{\ln 2}, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^+ \quad (5.8)$$

όπου  $g_{Z_{i,j}}^{-1}(z)$  είναι ο μετασχηματισμός που αναφέρεται στον  $i$ -οστό σταθμό του μήνα  $j$ , και  $p_{i,j}$  η αντίστοιχη πιθανότητα στεγνής ημέρας. Τα αρχεία των συνθετικών χρονοσειρών κάθε σταθμού δίνονται στον συνοδευτικό ψηφιακό δίσκο αυτής της έκθεσης (φάκελος SyntheticRain).

---

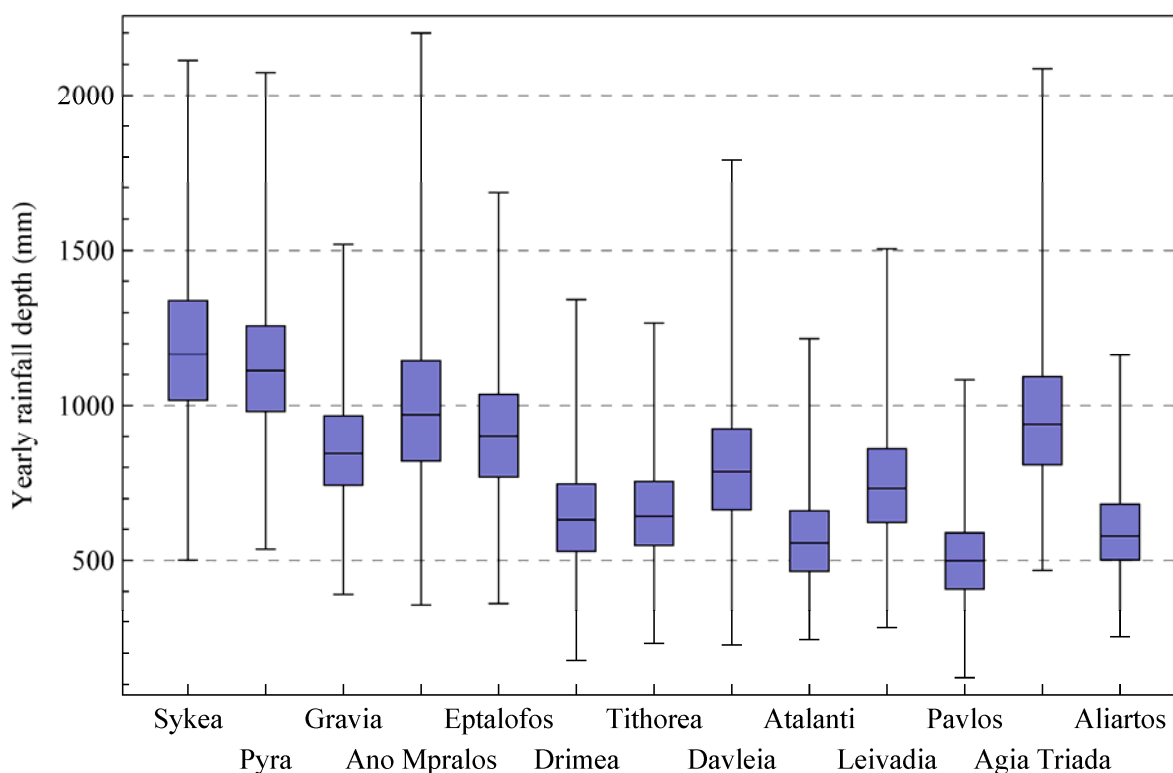
## 6 Στατιστική ανάλυση συνθετικών χρονοσειρών

---

### 6.1 Ανάλυση εμπειρικών κατανομών

#### 6.1.1 Ετήσιες χρονοσειρές συνθετικής βροχής

Μετά από άθροιση των ημερήσιων τιμών κάθε έτους σε κάθε σταθμό προέκυψαν οι ετήσιες χρονοσειρές της συνθετικής βροχόπτωσης μήκους 1000 ετών. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.1 του Παραρτήματος Π4, ενώ μια συνοπτική εικόνα της ετήσιας βροχόπτωσης σε κάθε σταθμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Θηκογράμματα ετήσιου ύψους της συνθετικής βροχόπτωσης σε mm σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

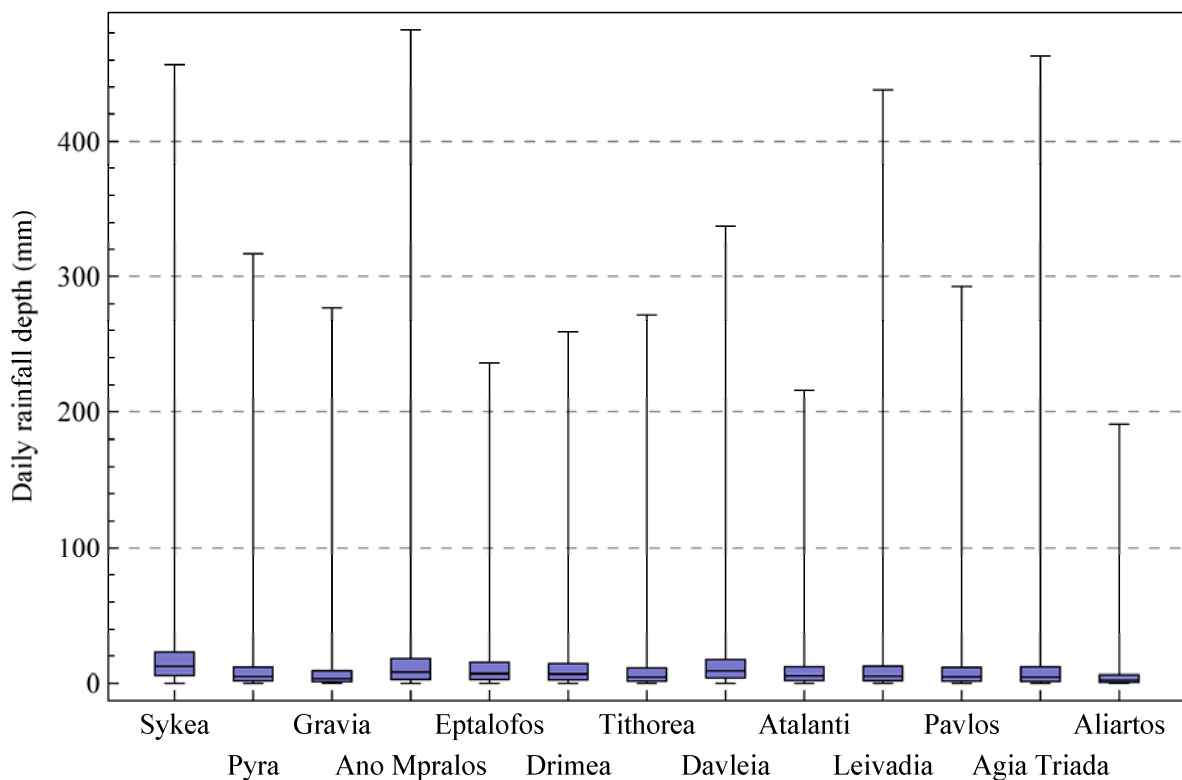
Συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά των ιστορικών ετήσιων βροχοπτώσεων με αυτά των συνθετικών, τόσο από τους Πίνακες Π2.1 του Παραρτήματος Π2 και Π4.1 του Παραρτήματος Π4, όσο και από το Σχήμα 4.1 και Σχήμα 6.1, διαπιστώνεται η πολύ μεγάλη ομοιότητα μεταξύ τους. Η μόνη εμφανής διαφορά είναι στο σταθμό του Άνω Μπράλου, όχι

στο εύρος τιμών του σταθμού, αλλά στο ενδοτεταρτημοριακό πλάτος. Χαρακτηριστικό είναι επίσης πως το ετήσιο μέγιστο ύψος βροχόπτωσης έχει εμφανιστεί και στη συνθετική βροχόπτωση στο σταθμό του Άνω Μπράλου και είναι ίσο με 2200 mm.

Σχετικά με τα χαρακτηριστικά σχήματος των κατανομών της ετήσιας συνθετικής βροχόπτωσης, προκύπτει πως σε όλους τους σταθμούς εμφανίζεται μια ελάχιστη θετική ασυμμετρία, ενώ οι συντελεστές κύρτωσης είναι λίγο μεγαλύτεροι από αυτούς της κανονικής κατανομής. Συμπερασματικά και με βάση τα παραπάνω, οι κατανομές της ετήσιας συνθετικής βροχόπτωσης μπορούν να θεωρηθούν πολύ κοντά στην κανονική κατανομή.

### 6.1.2 Ημερήσιες χρονοσειρές συνθετικής βροχής

Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της θετικής ημερήσιας συνθετικής βροχόπτωσης καθώς και η πιθανότητα να μην βρέχει παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.2 του Παραρτήματος Π4, ενώ μια συνοπτική εικόνα για κάθε σταθμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2.



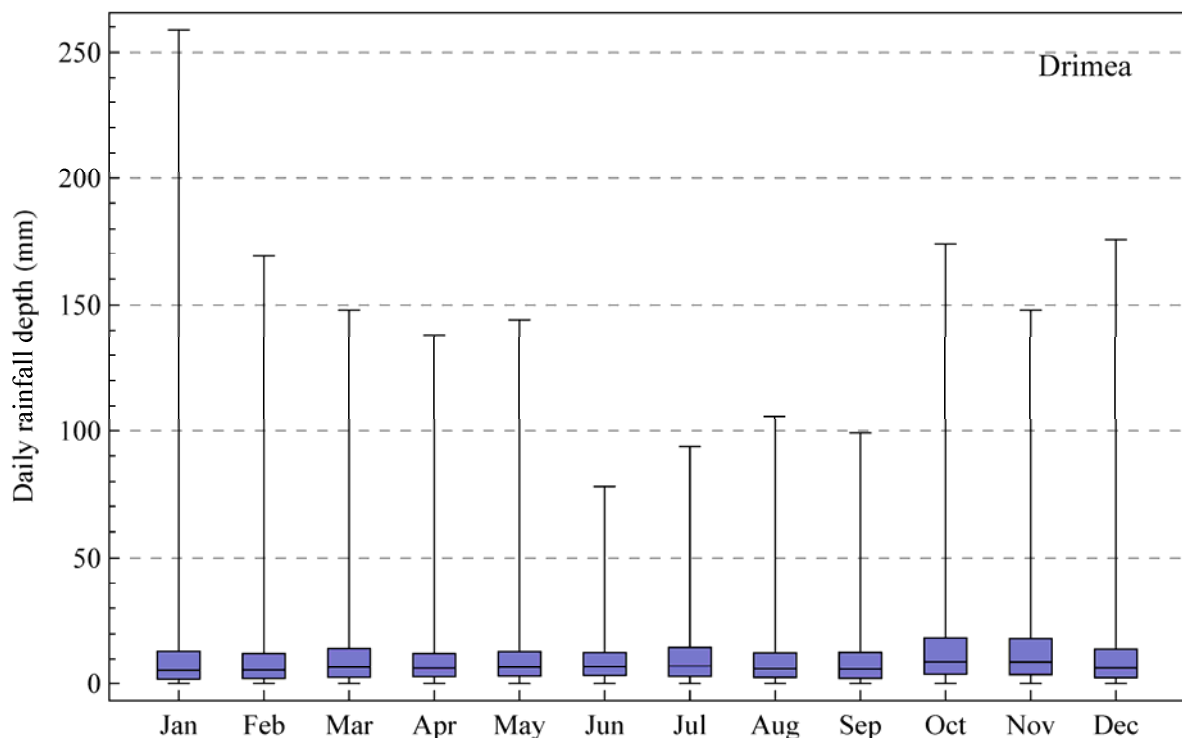
Σχήμα 6.2: Θηκογράμματα της θετικής συνθετικής ημερήσιας βροχόπτωσης σε mm σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Η σύγκριση των χαρακτηριστικά των ιστορικών ημερήσιων βροχοπτώσεων με αυτά των συνθετικών από τους Πίνακες Π2.2 του Παραρτήματος Π2 και Π4.2 του Παραρτήματος Π3, όσο και από το Σχήμα 4.2 και Σχήμα 6.2, αποκαλύπτει μια πολύ μεγάλη ομοιότητα μεταξύ

τους. Η μόνη εμφανής διαφορά εντοπίζεται στη μέγιστη βροχόπτωση των σταθμών, που στις συνθετικές χρονοσειρές είναι πολύ μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό είναι απολύτως δικαιολογημένο, δεδομένου ότι η ιστορική χρονοσειρά αποτελείται από 43 έτη ενώ η συνθετική από 1000 έτη.

### 6.1.3 Ημερήσιες χρονοσειρές συνθετικής βροχής σε μηνιαία βάση

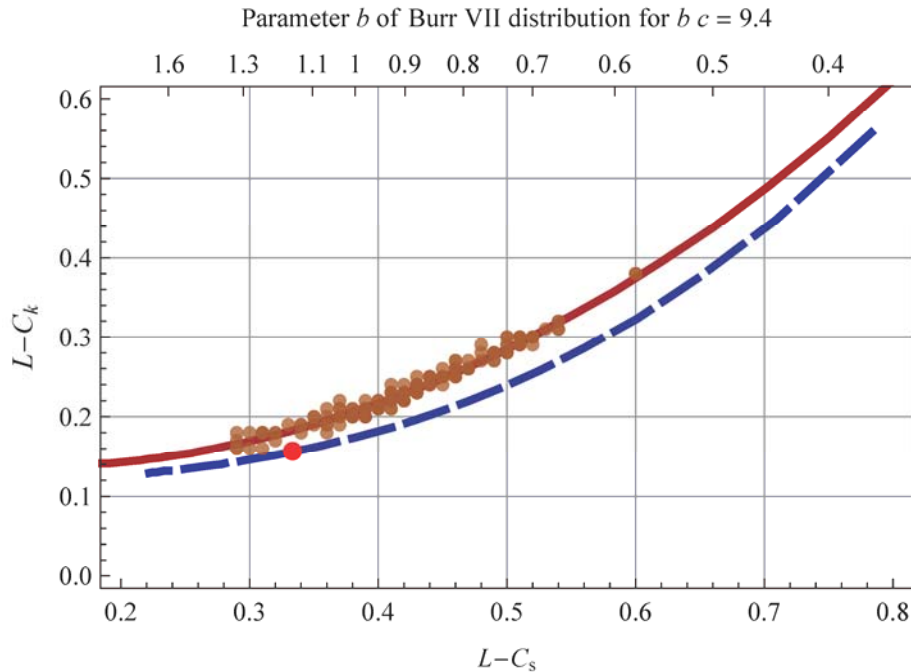
Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της θετικής συνθετικής ημερήσιας βροχόπτωσης κάθε σταθμού ανά μήνα καθώς και η πιθανότητα να μην βρέχει σε μηνιαία βάση παρουσιάζονται στους πίνακες Π4.3 έως Π4.15 του Παραρτήματος Π4. Μια τυπική εικόνα για ένα σταθμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3, ενώ συνολικά τα θηκογράμματα όλων των σταθμών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Σ2, στα Σχήματα Σ2.1 έως Σ2.13.



Σχήμα 6.3: Θηκογράμματα συνθετικής θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης ανά μήνα σε mm στο σταθμό Δριμέα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Μελετώντας και συγκρίνοντας τους πίνακες Π4.3 έως Π4.15 του Παραρτήματος Π4 των στατιστικών χαρακτηριστικών της συνθετικής θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης σε μηνιαία βάση όπως και τα θηκογράμματα των σταθμών στα σχήματα Σ2.1 έως Σ2.13 του Παραρτήματος Σ2 και συγκρίνοντάς τα με τα αντίστοιχα των ιστορικών, προκύπτει μια εξαιρετική ομοιότητα. Επιπλέον, όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 6.4, τα εμπειρικά σημεία ( $L-C_s$ ,  $L-C_k$ ) της θετικής συνθετικής βροχόπτωσης σε μηνιαία βάση όλων των σταθμών

ταιριάζουν σχεδόν απόλυτα με τη θεωρητική καμπύλη της κατανομής Burr VII. Η πολύ μικρότερη διασπορά των σημείων αυτών συγκριτικά με τα αντίστοιχα των ιστορικών χρονοσειρών, οφείλεται προφανώς στο πολύ μεγαλύτερο μήκος των συνθετικών χρονοσειρών.



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα L-ασυμμετρίας και L-κύρτωσης. Οι καφέ τελείες αναπαριστούν τα εμπειρικά σημεία ( $L-C_s$ ,  $L-C_k$ ) των ημερήσιων συνθετικών βροχοπτώσεων ανά μήνα (13x12 σημεία), η συμπαγής γραμμή την κατανομής Burr VII, η διακεκομμένη γραμμή την κατανομή Γάμα και η κόκκινη τελεία την Εκθετική κατανομή.

Συνοπλοποιώντας στα προηγούμενα την πιστή αναπαραγωγή της πιθανότητας στεγνής ημέρας, τη μέση τιμή της οποίας σε μηνιαία βάση παρουσιάζει ο Πίνακας 6.1 οι τιμές του οποίου είναι πανομοιότυπες με του αντίστοιχου πίνακα των ιστορικών χρονοσειρών, αποδεικνύεται πως το στοχαστικό μοντέλο που εφαρμόστηκε αναπαράγει με ακρίβεια τα ζητούμενα στατιστικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 6.1: Μέση τιμή της πιθανότητας στεγνής ημέρας όλων των σταθμών ανά μήνα.

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
$\bar{P}_d$	0.66	0.64	0.68	0.77	0.82	0.89	0.93	0.92	0.87	0.77	0.70	0.62

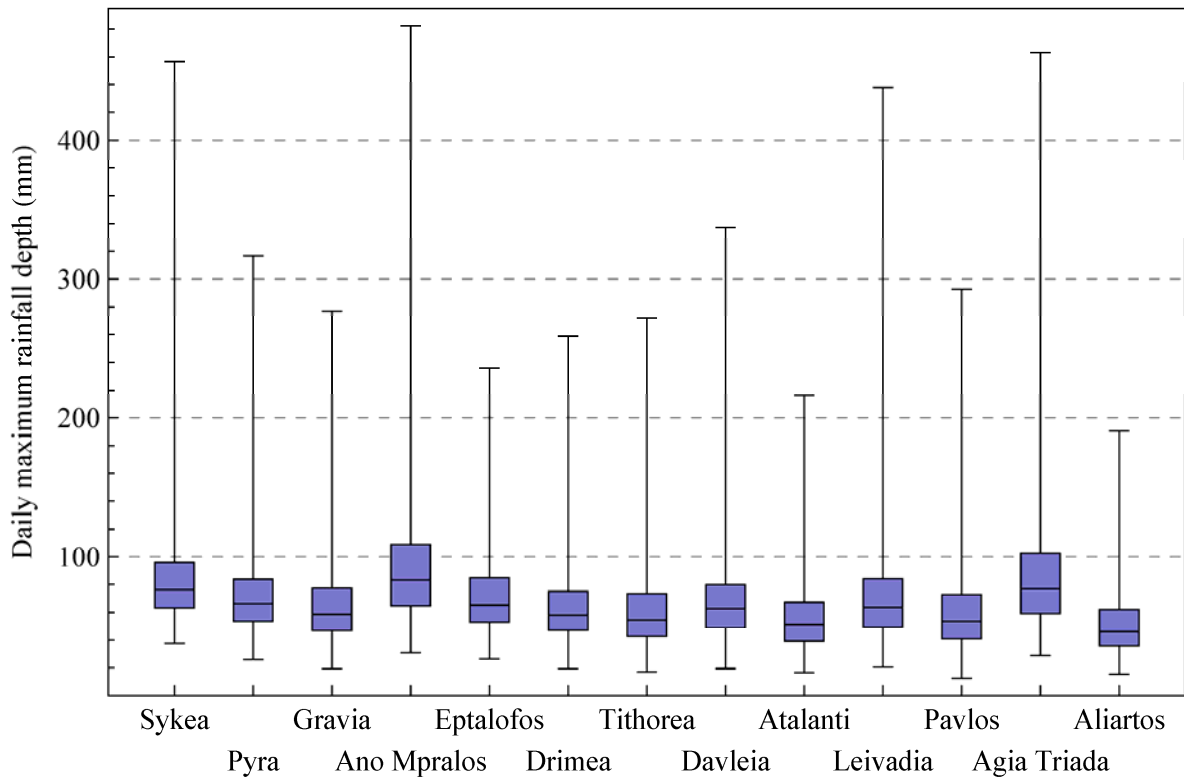
#### 6.1.4 Ημερήσιες χρονοσειρές μεγίστων συνθετικής βροχής

Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της μέγιστης συνθετικής ημερήσιας βροχόπτωσης κάθε σταθμού παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.16 του Παραρτήματος Π4, ενώ μια συνοπτική εικόνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5.

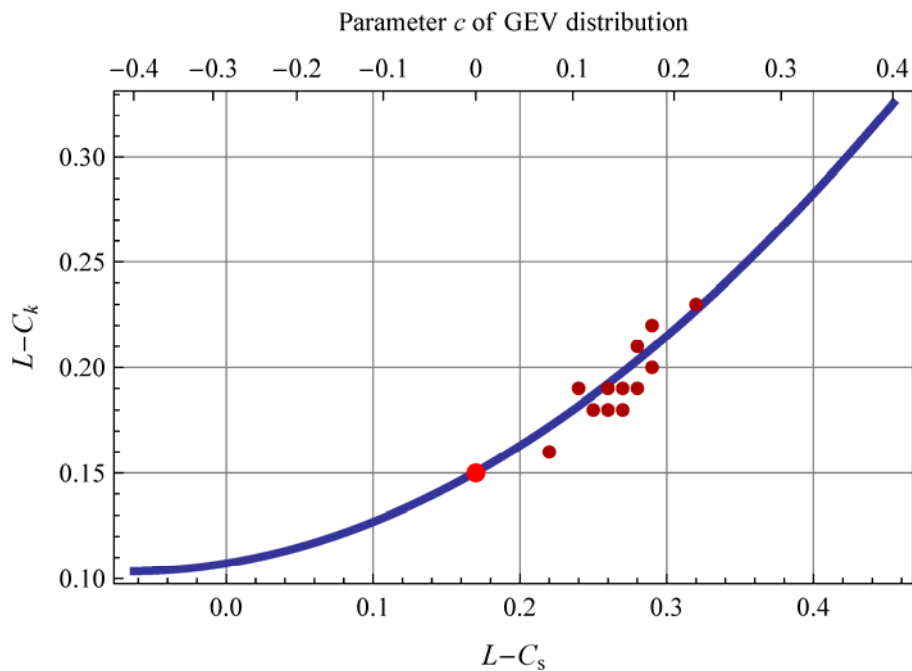
Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μέγιστης ημερήσιας συνθετικής βροχόπτωσης, συγκριτικά με τα αντίστοιχα των ιστορικών χρονοσειρών, εμφανίζονται σε αρκετούς σταθμούς σχετικά διαφοροποιημένα. Συγκεκριμένα, ενώ η μέση τιμή κατά μέσο όρο εμφανίζεται αυξημένη κατά 4%, η τυπική απόκλιση εμφανίζεται αυξημένη κατά μέσο όρο κατά 30%. Το γεγονός αυτό εξηγείται αν ληφθεί υπόψη η μεγάλη αβεβαιότητα που σχετίζεται με την κατανομή των μεγίστων τιμών, όπου τα μικρά δείγματα σπανίως μπορούν να αποκαλύψουν τα πραγματικά χαρακτηριστικά της. Έτσι, από το ιστορικό δείγμα των 43 ετών είναι δύσκολο να εκτιμηθούν τα πραγματικά χαρακτηριστικά της κατανομής, ενώ αντιθέτως, στη συνθετική χρονοσειρά μήκους 1000 ετών είναι πολύ πιο εμφανή. Το επιχείρημα αυτό επιβεβαιώνει και το Σχήμα 6.4, όπου διαπιστώνεται ξεκάθαρα η καταλληλότητα της κατανομής GEV έναντι της κατανομής Gumbel. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός, πως ενώ ο δείκτης ασυμπτωτικής συμπεριφοράς των μηνιαίων κατανομών κατά μέσο όρο εκτιμήθηκε στο 9.4, που αντιστοιχεί σε θεωρητική τιμή της παραμέτρου  $c$  της κατανομής GEV ίση με  $1/9.4 \cong 0.1$ , στη πράξη η τιμή της παραμέτρου εμφανίζεται ακόμη μεγαλύτερη περίπου ίση με 0.15.

Τέλος, ο Πίνακας 6.2 παρουσιάζει τα 15 ισχυρότερα επεισόδια ημερήσιας συνθετικής βροχόπτωσης που έχουν προκύψει από την προσομοίωση, ενώ στον Πίνακα Π4.17 του Παραρτήματος Π4 παρουσιάζονται τα 15 ισχυρότερα επεισόδια συνολικά στη λεκάνη. Είναι λογικό στα 1000 έτη προσομοίωσης να προκύψουν αρκετά επεισόδια μεγαλύτερα από το ιστορικά καταγεγραμμένο των 241 mm. Συγκεκριμένα, έχουν προκύψει 11 τέτοια επεισόδια με το μεγαλύτερο να είναι ίσο 482.1 mm. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, όπως και στα ιστορικά μέγιστα, ότι τα περισσότερα από τα ακραία επεισόδια εμφανίζονται στους σταθμούς του Άνω Μπράλου και της Αγίας Τριάδας.





Σχήμα 6.5 Θηκογράμματα μέγιστης συνθετικής ημερήσιας βροχόπτωσης ανά έτος σε mm σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα L-ασυμμετρίας και L-κύρτωσης. Οι καφέ τελείες αναπαριστούν τις δειγματικές τιμές των συνθετικών μέγιστων ημερήσιων βροχοπτώσεων στους 13 σταθμούς, η συμπαγής γραμμή την Γενική Κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV) και η κόκκινη τελεία την κατανομή Gumbel.

Πίνακας 6.2 Τα 15 ισχυρότερα επεισόδια συνθετικής ημερήσιας βροχόπτωσης 1000 ετών σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού

No.	Ημερομηνία προσομοίωσης	Σταθμός	Βροχόπτωση (mm)
1	21/01/990	Άνω Μπράλος	482.1
2	23/10/822	Αγία Τριάδα	463.1
3	05/11/310	Συκέα	456.8
4	03/10/348	Αγία Τριάδα	438.7
5	10/01/704	Λειβαδιά	437.8
6	18/07/486	Άνω Μπράλος	384.3
7	13/01/602	Άνω Μπράλος	378.9
8	28/01/980	Λειβαδιά	377.0
9	21/10/648	Λειβαδιά	366.1
10	23/01/293	Άνω Μπράλος	362.2
11	06/10/351	Λειβαδιά	348.6
12	17/01/880	Τιθορέα	148.0
13	10/01/704	Άνω Μπράλος	143.0
14	17/04/081	Συκέα	136.0
15	15/04/593	Αγία Τριάδα	134.0

## 6.2 Ανάλυση αυτοσυσχετίσεων και ετεροσυσχετίσεων συνθετικής βροχής

Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τις αριθμητικές τιμές των μηνιαίων μέσων τιμών αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης της συνθετικής βροχόπτωσης που προκύπτουν από όλους τους σταθμούς μέχρι και για υστέρηση τριών ημερών. Η σύγκριση του Πίνακα 6.3 με τον αντίστοιχο Πίνακα 4.4 των ιστορικών χρονοσειρών αποκαλύπτει την συνάφειά τους.

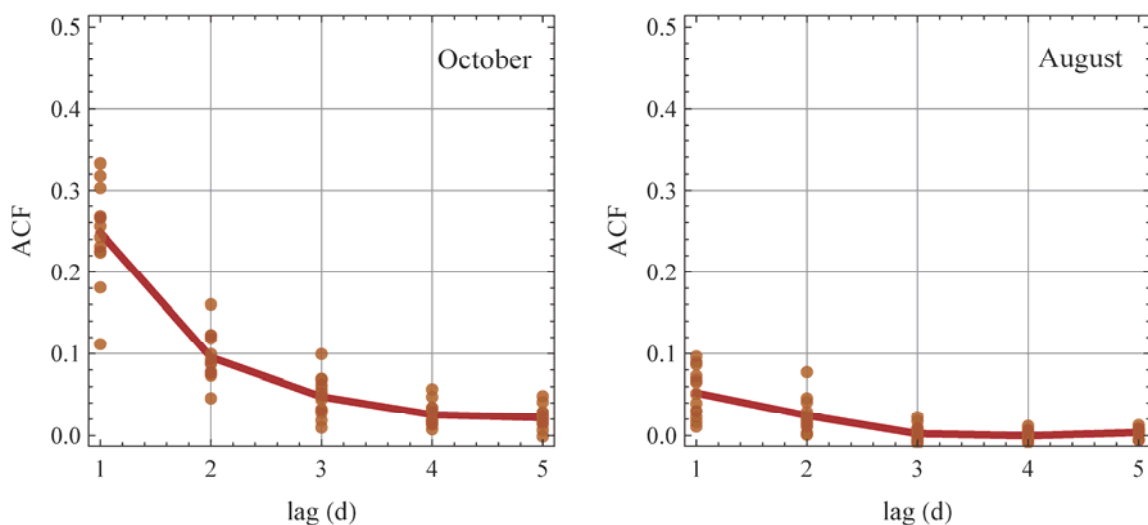
Ενδεικτικά, το Σχήμα 6.7 παρουσιάζει την εμπειρική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ACF των συνθετικών χρονοσειρών όλων των σταθμών για ένα χειμερινό και ένα θερινό μήνα. Οι τελείες αναπαριστούν τις εμπειρικές τιμές του συντελεστή αυτοσυσχέτισης των χρονοσειρών των σταθμών (13 τελείες) για την αντίστοιχη υστέρηση, ενώ η συμπαγής γραμμή αναπαριστά τη μέση τιμή τους.

Ομοίως, το Σχήμα 6.8 παρουσιάζει την εμπειρική συνάρτηση ετεροσυσχέτισης CCF των συνθετικών χρονοσειρών, όλων των διαφορετικών συνδυασμών των σταθμών ανά δυο, για ένα χειμερινό και ένα θερινό μήνα. Οι τελείες αναπαριστούν τις εμπειρικές τιμές του συντελεστή ετεροσυσχέτισης των χρονοσειρών των σταθμών (156 τελείες) για την αντίστοιχη υστέρηση, ενώ η συμπαγής γραμμή αναπαριστά τη μέση τιμή τους. Το σύνολο των γραφημάτων για όλους του μήνες παρουσιάζεται σχήματα Σ2.14 έως Σ2.17 του παραρτήματος Σ2.

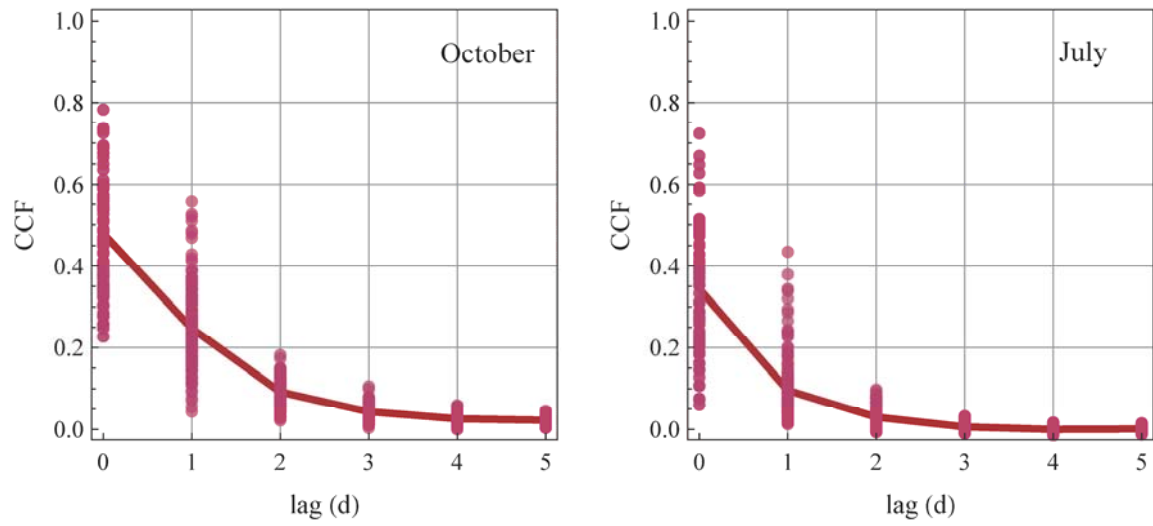
Τέλος, αξίζει να τονιστεί, πως συγκριτικά με τα αντίστοιχα γραφήματα των εμπειρικών συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης των ιστορικών χρονοσειρών, στα γραφήματα των συνθετικών των χρονοσειρών οι εμπειρικές συναρτήσεις παρουσιάζονται πιο ομαλές, πολύ πιο κοντά στο θεωρητικό εκθετικό μοντέλο. Η αιτία φυσικά οφείλεται στο μεγαλύτερο μήκος των συνθετικών χρονοσειρών, που επιτρέπει την εκτίμηση των συντελεστών συσχέτισης με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Πίνακας 6.3: Μέση τιμή των αυτοσυσχετίσεων και ετεροσυσχετίσεων των ημερησίων συνθετικών βροχοπτώσεων ανά μήνα για υστέρηση μέχρι τριών ημερών.

	Μέση τιμή του συντελεστής αυτοσυσχέτισης			Μέση τιμή του συντελεστής ετεροσυσχέτισης			
	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_0$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
Ιανουάριος	0.22	0.07	0.01	0.42	0.19	0.06	0.01
Φεβρουάριος	0.24	0.08	0.02	0.45	0.21	0.08	0.02
Μάρτιος	0.20	0.06	0.02	0.46	0.20	0.06	0.02
Απρίλιος	0.19	0.07	0.03	0.45	0.21	0.07	0.03
Μάιος	0.18	0.08	0.03	0.44	0.20	0.07	0.03
Ιούνιος	0.12	0.05	0.02	0.36	0.14	0.05	0.02
Ιούλιος	0.05	0.04	0.00	0.34	0.10	0.03	0.01
Αύγουστος	0.05	0.02	0.00	0.34	0.10	0.02	0.00
Σεπτέμβριος	0.11	0.05	0.02	0.41	0.16	0.04	0.02
Οκτώβριος	0.25	0.10	0.05	0.48	0.25	0.09	0.04
Νοέμβριος	0.30	0.11	0.04	0.51	0.26	0.10	0.04
Δεκέμβριος	0.27	0.08	0.02	0.48	0.23	0.07	0.02



Σχήμα 6.7: Ενδεικτικά αυτοσυσχετογράμματα της συνθετικής βροχής για δύο διαφορετικούς μήνες.



Σχήμα 6.8 Ενδεικτικά ετεροσυσχετογράμματα συνθετικής βροχής για δύο διαφορετικούς μήνες.

---

## 7 Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

---

### 7.1 Γενικά

Σε αντίθεση με τις βροχοπτώσεις, από τη στατιστική ανάλυση των οποίων είναι δυνατό να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τα ακραία γεγονότα, η εξαιρετικά περιορισμένη υδρομετρική πληροφορία στη λεκάνη επιβάλλει την έμμεση εκτίμηση των παροχών, με τη χρήση κάποιου μοντέλου. Αν και η έμφαση του έργου είναι στις πλημμυρικές παροχές, η πολυπλοκότητα των υδρολογικών διεργασιών, επιφανειακών και υπόγειων, και η αλληλεπίδρασή τους με τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις, καθιστούν αναγκαία τη χρήση ενός συνδυαστικού σχήματος, στο οποίο περιγράφονται όχι μόνο οι φυσικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου αλλά λαμβάνονται υπόψη και οι επιπτώσεις από τις πολιτικές διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης και τη λειτουργία των σχετικών έργων αξιοποίησης.

Από την άλλη πλευρά, η χρονική διακριτότητα της βροχομετρικής πληροφορίας (ημερήσια δείγματα), δεν επιτρέπει την περιγραφή της πλήρους εξέλιξης των πλημμυρικών φαινομένων για την παραγωγή, π.χ. ωριαίων υδρογραφημάτων, τα οποία θα ήταν αναγκαία για το σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων. Ωστόσο, επειδή η χωρική κλίμακα της λεκάνης είναι σχετικά μεγάλη (~2000 km<sup>2</sup>), ενώ οι κλίσεις στο κατάντη τμήμα της είναι εξαιρετικά μικρές, τα υδρογραφήματα εντός της ημέρας δεν αναμένεται να παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διακυμάνσεις, με συνέπεια το ημερήσιο βήμα προσομοίωσης να θεωρείται επαρκές για μια πρώτη εκτίμηση της δόξας των πλημμυρικών παροχών.

Οι παραπάνω απαιτήσεις καλύπτονται από το σύστημα γεω-υδρολογικής προσομοίωσης ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, το οποίο έχει αναπτυχθεί από το ΕΜΠ (Efstratiadis et al., 2005· Rozos and Koutsoyiannis, 2006· Ευστρατιάδης κ.ά., 2006α· Nalbantis et al., 2007· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2008· Efstratiadis et al., 2008· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009· Efstratiadis et al., 2009· Ευστρατιάδης κ.ά., 2009). Το μοντέλο έχει εφαρμοστεί για μηνιαία προσομοίωση σε πολύπλοκα υδροσυστήματα του ελληνικού χώρου, στα πλαίσια ακαδημαϊκών εργασιών (Τέγος, 2005· Κοψιάτη, 2009), διδακτορικών διατριβών

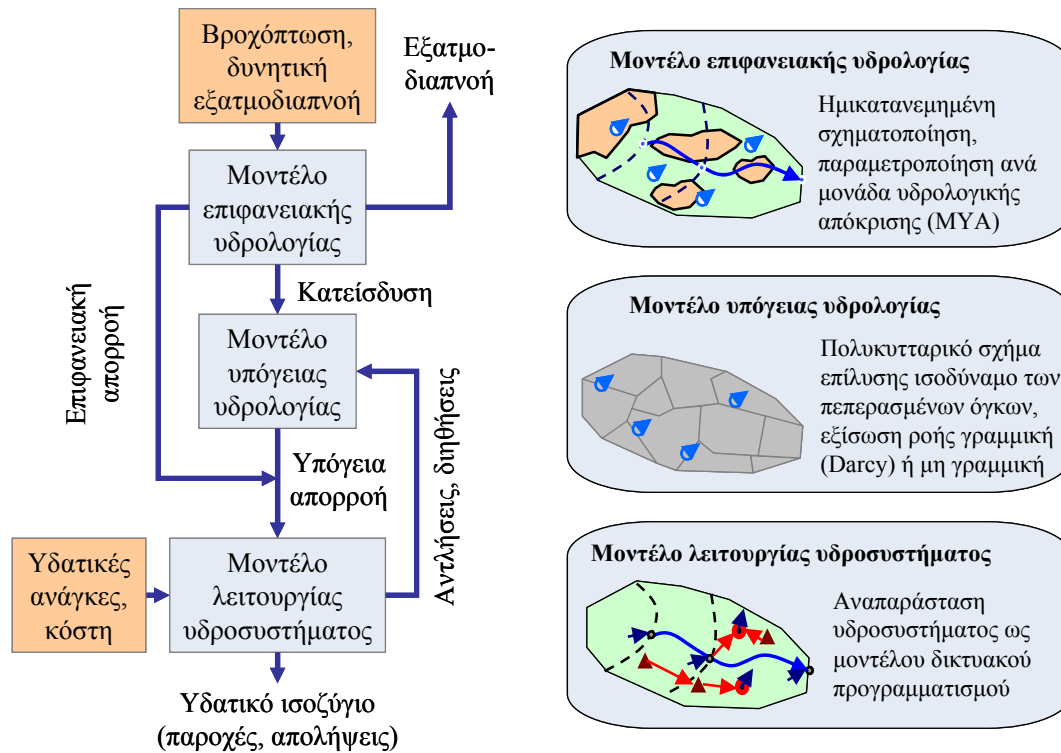
(Ευστρατιάδης, 2008· Ρόζος, 2009), ερευνητικών έργων του ΕΜΠ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006β· Κουτσογιάννης κ.ά., 2008) και μελετών (Μαμάσης κ.ά., 2006), ενώ πρόσφατα προσαρμόστηκε ώστε να υποστηρίζει σχήματα διόδευσης, τα οποία επιτρέπουν μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της χωρικής και χρονικής διαίτας των ροών κατά μήκος ενός υδρογραφικού δικτύου (Efstratiadis et al., 2009). Μάλιστα, η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έχει αποτελέσει την κύρια περιοχή εφαρμογής του μοντέλου, ενώ άλλες περιοχές εφαρμογής του ήταν το υδροσύστημα Δυτικής Θεσσαλίας και η περιοχή των έργων Σμοκόβου. Η νέα έκδοση του μοντέλου παρέχει τη δυνατότητα ημερήσιας προσομοίωσης και διόδευσης, όπως επιβάλλουν οι ανάγκες του παρόντος έργου. Το πρόγραμμα και η αναλυτική θεωρητική τεκμηρίωσή του είναι ελεύθερα διαθέσιμα στη διεύθυνση <http://www.hydroscope.gr/>.

Η εφαρμογή του μοντέλου στην περιοχή μελέτης έγινε σε δύο στάδια. Αρχικά, εκτιμήθηκαν οι παράμετροι του μοντέλου μέσω βαθμονόμησης, με βάση τα υδρολογικά δεδομένα και τις υδατικές ανάγκες της περιόδου 1984-1990. Στη συνέχεια, με γνωστές τιμές παραμέτρων, το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τη στοχαστική προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, με είσοδο τις συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης, μήκους 1000 ετών, οι οποίες κατασκευάστηκαν με εφαρμογή του πολυμεταβλητού στοχαστικού σχήματος που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6. Από την πληθώρα των αποτελεσμάτων του μοντέλου, αναλύθηκαν στατιστικά οι συνθετικές χρονοσειρές παροχής σε τέσσερις χαρακτηριστικές θέσεις της λεκάνης, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 8.

## **7.2 Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ**

### **7.2.1 Βασικές αρχές και συνοπτική περιγραφή του μοντέλου**

Η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, που υλοποιεί ένα συνδυαστικό (επιφανειακό και υπόγειο) υδρολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις διεργασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστημικού προσανατολισμού, το οποίο εκτιμά τις ροές κατά μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού (έργα μεταφοράς) δικτύου και τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων. Στο Σχήμα 7.1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του πλαισίου σύζευξης των τριών αυτών μοντέλων.



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα ροής και συνοπτική περιγραφή των επιμέρους μοντέλων του λογισμικού ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Πηγή: Ευστρατιάδης, 2008).

Η χωρική κλίμακα αναπαράστασης των υδρολογικών και ανθρωπογενών διεργασιών βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη σχηματοποίηση, με την οποία εκτιμάται το ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία (κόμβοι) της λεκάνης απορροής. Οι κόμβοι τοποθετούνται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (στις συμβολές των κλάδων ή σε άλλα σημεία ελέγχου) και σε θέσεις όπου πραγματοποιούνται επιφανειακές και υπόγειες απολήψεις. Η περιγραφή του πεδίου υπόγειας ροής βασίζεται σε μια πολυκυτταρική χάραξη, δημιουργώντας ένα εννοιολογικό δίκτυο διασυνδεδεμένων δεξαμενών, η στάθμη των οποίων αντιστοιχεί στη μέση στάθμη του αντίστοιχου τμήματος του υδροφορέα. Τέλος, το σύστημα διαχείρισης των υδατικών πόρων (υδροσύστημα), περιλαμβάνει μια εννοιολογική απεικόνιση των θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, των κύριων έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις και ομάδες γεωτρήσεων) και των χρήσεων νερού. Για τη διαμόρφωση των χωρικών δεδομένων χρησιμοποιείται το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας MapWindow (<http://www.mapwindow.org/>), στο οποίο έχει ενσωματωθεί κατάλληλο άρθρωμα.

Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο υποστηρίζει μηνιαίο ή ημερήσιο βήμα προσομοίωσης, το οποίο επιλέγεται με βάση το σκοπό της μελέτης καθώς και τη διαθεσιμότητα των υδρολογικών δεδομένων εισόδου. Το μηνιαίο βήμα ενδείκνυται για

μελέτες διαχειριστικού ενδιαφέροντος, ενώ το ημερήσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την περιγραφή πλημμυρικών φαινομένων σε μεγάλες λεκάνες, για τη συνήθη περίπτωση που δεν διατίθενται επαρκή χωρικά δεδομένα βροχόπτωσης σε λεπτές χρονικές κλίμακες. Στη δεύτερη περίπτωση, για την πιστότερη αναπαράσταση των χρονισμών των πλημμυρικών παροχών, υλοποιείται ένα εμπειρικό σχήμα επιμερισμού των ημερήσιων απορροών κάθε υπολεκάνης σε υδρογραφήματα λεπτής χρονικής κλίμακας (ωριαίας), τα οποία στη συνέχεια διοδεύονται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, εφαρμόζοντας μοντέλα μίας (κινηματικό κύμα) ή δύο (μέθοδος Muskingum) παραμέτρων.

Ως προς τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών στην επιφάνεια, την ακόρεστη και την κορεσμένη ζώνη του εδάφους, υιοθετείται μια προσέγγιση φυσικής βάσης, η οποία είναι όσο το δυνατό φειδωλή ως προς τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται. Οι παράμετροι αντιστοιχούν σε χωρικές ενότητες της λεκάνης (μονάδες υδρολογικής απόκρισης) και του υδροφορέα (ζώνες) με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, επιτρέποντας έτσι την αποσύνδεση της παραμετροποίησης από τη χωρική λεπτομέρεια της σχηματοποίησης. Η εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται μέσω βαθμονόμησης, δηλαδή με προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος. Για το σκοπό αυτό, στο λογισμικό έχουν ενσωματωθεί αυτοματοποιημένες διαδικασίες, οι οποίες βασίζονται σε πολλαπλά μέτρα επίδοσης και εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης, ολικής και πολυκριτηριακής.

### **7.2.2 Δεδομένα εισόδου**

Στα δεδομένα του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ περιλαμβάνονται επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας, υδρολογικές χρονοσειρές, στόχοι και περιορισμοί, αρχικές συνθήκες, παράμετροι, κριτήρια ελέγχου, καθώς και ορίσματα αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες προσομοίωσης και βαθμονόμησης. Καθώς η φιλοσοφία του μοντέλου είναι προσανατολισμένη στο διαχειριστικό πρόβλημα, η όλη προσέγγιση βασίζεται σε μια δικτυακή σχηματοποίηση των φυσικών και τεχνητών συνιστωσών της περιοχής μελέτης (λεκάνη απορροής), τα οποία αναπαρίστανται με τη μορφή θεματικών επιπέδων, ήτοι:

- το *επιφανειακό σύστημα*, που περιλαμβάνει το υδρογραφικό δίκτυο, τις υπολεκάνες ανάντη κάθε κόμβου του δικτύου και τις πηγές·
- τις *μονάδες υδρολογικής απόκρισης*, που είναι χωρικές ενότητες με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά και αναπαριστούν διαφορετικούς τύπους εδαφών·



- το *υπόγειο σύστημα* (υδροφορέας) που αναπαρίσταται ως ένα σύστημα πολυγωνικών κυττάρων, στα οποία αντιστοιχούν εννοιολογικές δεξαμενές αποθήκευσης του υπόγειου νερού που συνδέονται μεταξύ τους με εννοιολογικά στοιχεία μεταφοράς και εκφορτίζονται είτε επιφανειακά, μέσω των πηγών, ή υπόγεια, προς γειτονικές λεκάνες και τη θάλασσα.
- το *σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων* (υδροσύστημα), δηλαδή μια σχηματική απεικόνιση των θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις) και των χρήσεων νερού.

Τα επιμέρους θεματικά επίπεδα (δίκτυα) συνδέονται μέσω των πηγών (επιφανειακό σύστημα – υπόγειο σύστημα), των γεωτρήσεων (υδροσύστημα – υπόγειο σύστημα) και των υδραγωγείων (επιφανειακό σύστημα – υδροσύστημα). Όλες οι συνιστώσες με γεωαναφορά, καθώς και τα δευτερογενή γεωγραφικά επίπεδα (ενώσεις και τομές) παράγονται σε περιβάλλον ΣΓΠ.

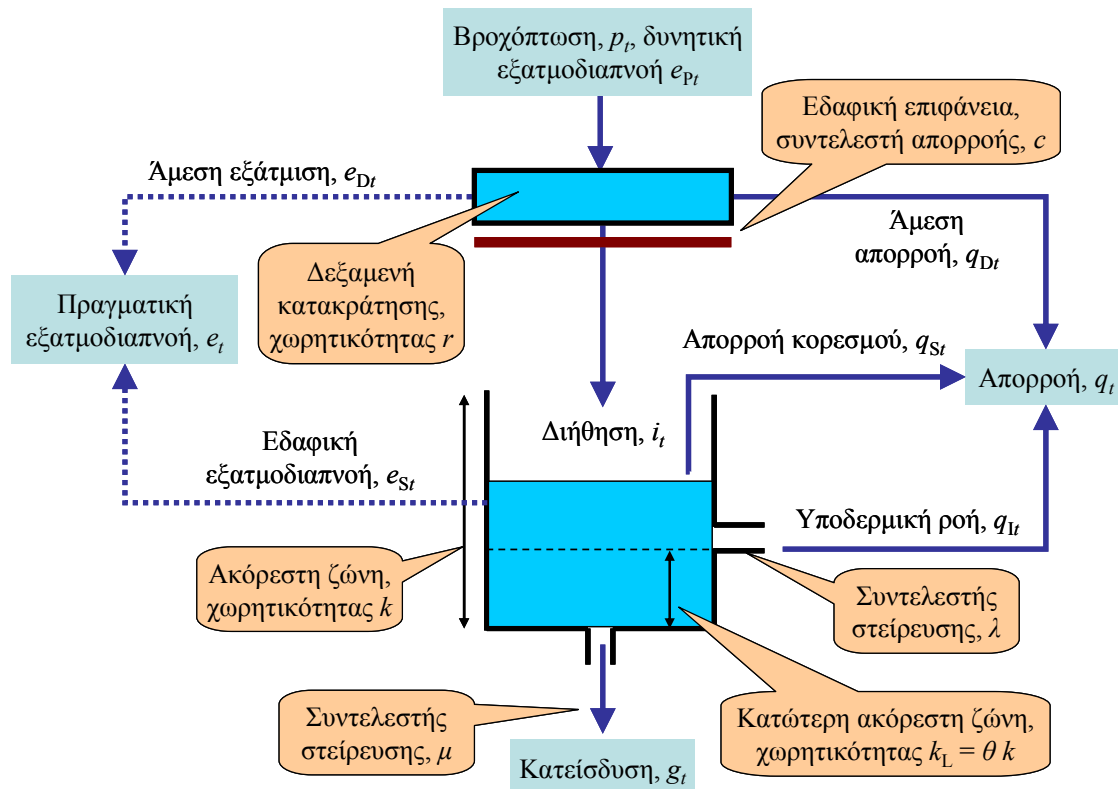
### **7.2.3 Μοντέλο επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών**

Για τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών στην επιφάνεια του εδάφους και την ακόρεστη ζώνη, υιοθετείται μια ημικατανεμημένη διακριτοποίηση της λεκάνης, που προϋποθέτει τη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου, τον ορισμό των σημείων ελέγχου πάνω στο δίκτυο (κόμβοι) και τη χάραξη των υπολεκανών ανάντη κάθε κόμβου. Ως υδρογραφικό δίκτυο νοείται το κύριο υδατόρευμα της λεκάνης καθώς και συμβάλλοντες κλάδοι σε αυτό. Η διαμόρφωση του δικτύου γίνεται με την υποστήριξη του ΣΓΠ, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης και ορίζοντας κατάλληλο όριο στη συνάρτηση συγκέντρωσης της απορροής. Συνήθως απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία, μέχρι να σχηματιστεί το επιθυμητό δίκτυο. Ειδικότερα, το ΣΓΠ παράγει κόμβους μόνο στην έξοδο της λεκάνης και στις θέσεις συμβολής, ενώ ο χρήστης τοποθετεί επιπλέον κόμβους σε ενδιάμεσα σημεία, όπου ζητείται ο υπολογισμός της παροχής, π.χ. υδρομετρικοί σταθμοί, σημεία απολήψεων, σταθμοί ελέγχου της ποιότητας του νερού καθώς και σημεία εισροής νερού από εξωτερικές πηγές. Στη τελευταία περίπτωση, οι χρονοσειρές εξωτερικών εισροών αποτελούν είσοδο του μοντέλου. Ανάντη κάθε κόμβου μπορούν να συμβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου, ενώ κατάντη επιτρέπεται να ξεκινά ένας και μόνο κλάδος. Επιπλέον, οι κόμβοι του υδρογραφικού δικτύου μπορούν να συνδέονται με απεριόριστο αριθμό υδραγωγείων.

Οι χρονοσειρές εισόδου κάθε υπολεκάνης είναι η επιφανειακή βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή. Η προσομοίωση των διεργασιών αναφέρεται στα εδαφικά στοιχεία (διαμερίσεις) που προκύπτουν από την ένωση των υπολεκανών και των μονάδων υδρολογικής απόκρισης, τα οποία δέχονται κοινές φορτίσεις και οι μηχανισμοί τους περιγράφονται από κοινές παραμέτρους. Το μαθηματικό υπόβαθρο βασίζεται σε ένα εννοιολογικό σχήμα έξι ή επτά παραμέτρων (για μηνιαία και ημερήσια προσομοίωση, αντίστοιχα), το οποίο αναπαριστά το μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε απορροή, εξατμοδιαπνοή και κατείσδυση προς τον υπόγειο υδροφόρο.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2, η υδρολογική λειτουργία κάθε εδαφικού στοιχείου βασίζεται σε ένα υδραυλικό ανάλογο που περιλαμβάνει δύο διασυνδεδεμένες δεξαμενές. Η ανώτερη δεξαμενή αναπαριστά τις διεργασίες στην επιφάνεια του εδάφους, και συγκεκριμένα την κατακράτηση της βροχής, την επιφανειακή εξάτμιση και την διήθηση. Η διήθηση τροφοδοτεί την ακόρεστη ζώνη (υπέδαφος), οι διεργασίες της οποίας αναπαρίστανται από μια δεξαμενή συγκέντρωσης υγρασίας, πεπερασμένης χωρητικότητας (στην ημερήσια προσομοίωση, δημιουργούνται δύο διακριτές δεξαμενές, όπου στην ανώτερη δεξαμενή κατακρατείται μια ποσότητα εδαφικής υγρασίας που είναι πλήρως διαθέσιμη για την πραγματοποίηση της εξατμοδιαπνοής). Η διάταξη αυτή παρέχει τη δυνατότητα εκροής προς την ατμόσφαιρα (εδαφική εξατμοδιαπνοή), εκροής προς το έδαφος λόγω υπερχειλίσης, πλευρικής εκροής διαμέσου του υπεδάφους και κατακόρυφης εκροής. Η πλευρική εκροή πραγματοποιείται από την οπή που βρίσκεται στο όριο μεταξύ της ανώτερης και κατώτερης ζώνης, ενώ η κατακόρυφη από την οπή που βρίσκεται στον πυθμένα. Ο ρυθμός πραγματοποίησης της πλευρικής και κατακόρυφης εκροής ελέγχεται μέσω δύο συντελεστών στείρευσης, που είναι παράμετροι του μοντέλου. Οι παραπάνω ροές αναπαριστούν, αντίστοιχα, την εδαφική εξατμοδιαπνοή, την πλημμυρική απορροή λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία, την υποδερμική απορροή και την κατείσδυση προς τα βαθύτερα στρώματα (υδροφορέας).

Σε κάθε χρονικό βήμα, οι μεταβλητές εξόδου του μοντέλου (επιφανειακή απορροή, πραγματική εξατμοδιαπνοή, κατείσδυση) ολοκληρώνονται στην επιφάνεια κάθε υπολεκάνης. Η συνολική απορροή προκύπτει προσθέτοντας στην επιφανειακή συνιστώσα την εκφόρτιση όλων των πηγών που ανήκουν στη συγκεκριμένη υπολεκάνη. Τα δύο μεγέθη μεταφέρονται στον κατάντη κόμβο της υπολεκάνης, μέσω του οποίου εισάγονται στο υδρογραφικό δίκτυο ως σημειακή φόρτιση.



Σχήμα 7.2: Σχηματική παράσταση της δομής του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου για την αναπαράσταση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών (Πηγή: Ευστρατιάδης κ.ά., 2009).

#### 7.2.4 Μοντέλο υπόγειας ροής

Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού (κορεσμένη ροή) βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων. Τα σχήματα αυτά προτιμώνται σε σχέση με λεπτομερέστερα μοντέλα ορθογωνικού κανάβου (μοντέλα πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων) όταν υπάρχει έλλειψη υδρογεωλογικών δεδομένων, σε συνδυασμό με την ανάγκη ελαχιστοποίησης του υπολογιστικού φόρτου. Τα μοντέλα αυτά είναι ισοδύναμα με των πεπερασμένων όγκων (finite volume), εφόσον στη χάραξη των κυττάρων ικανοποιούνται οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί (Rozos and Koutsoyiannis, 2006):

- η χάραξη των κυττάρων γίνεται με τρόπο ώστε οι ακμές τους να είναι παράλληλες προς τις ισοδυναμικές γραμμές·
- τα κέντρα βάρη γειτονικών κυττάρων ορίζουν ευθεία κάθετη στην κοινή ακμή.

Με αυτό τον τρόπο χάραξης, είναι δυνατή η εκμετάλλευση της διαθέσιμης πληροφορίας σχετικά με τη μέση πιεζομετρία της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, το πολυγωνικό σχήμα των κυττάρων παρέχει ιδιαίτερη ευελιξία, καθώς επιτρέπει την περιγραφή υδροφορέων τυχαίας γεωμετρίας, με φειδωλό μάλιστα αριθμό κυττάρων. Αυτό περιορίζει σημαντικά τον

υπολογιστικό φόρτο αλλά και συμβάλλει στην καλύτερη εποπτεία του συστήματος, αφού η χάραξη των κυττάρων, και συνακόλουθα η παραμετροποίηση του συστήματος, μπορεί να γίνει με βάση τα μείζονα χαρακτηριστικά του υπεδάφους, που είναι προφανές ότι επηρεάζουν τις υπόγειες υδρολογικές διεργασίες. Ειδικότερα, στο μοντέλο επιτρέπεται η εφαρμογή κοινών παραμέτρων για ευρύτερες ομάδες κυττάρων, με στόχο τη διατύπωση ενός κατά το δυνατόν πιο φειδωλού προβλήματος βαθμονόμησης, προς όφελος του περιορισμού της πολυπλοκότητάς του.

Οι υδρολογικές διεργασίες της κορεσμένης ζώνης αναπαρίστανται από εννοιολογικές δεξαμενές συγκέντρωσης του υπόγειου νερού και εικονικά στοιχεία μεταφοράς (αγωγοί) που συνδέουν τις δεξαμενές μεταξύ τους. Η τοπολογία του δικτύου ροής ορίζεται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες του κέντρου βάρους των κυττάρων, το μέσο μήκος που διανύει η ροή μεταξύ δύο γειτονικών κυττάρων και το μήκος της κοινής τους ακμής. Τα γεωμετρικά αυτά χαρακτηριστικά υπολογίζονται αυτόματα από το ΣΓΠ, εφόσον έχει δοθεί ένα πολυγωνικό επίπεδο με τη χάραξη των κυττάρων. Ακόμη, για τον υπολογισμό των φορτίσεων κάθε δεξαμενής, παράγονται τρία χωρικά επίπεδα, ήτοι:

- η ένωση κυττάρων, υπολεκανών και μονάδων υδρολογικής απόκρισης, με βάση την οποία υπολογίζεται η κατείσδυση που δέχεται κάθε δεξαμενή από το αντίστοιχο εδαφικό στοιχείο·
- η τομή κυττάρων και υδατορευμάτων, με βάση την οποία υπολογίζεται η διήθηση που δέχεται κάθε δεξαμενή από τον αντίστοιχο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου·
- η τομή κυττάρων και γεωτρήσεων, με βάση την οποία υπολογίζεται η αντλούμενη ποσότητα νερού από κάθε δεξαμενή, μέσω του αντίστοιχου αντλητικού συγκροτήματος του συστήματος διαχείρισης υδατικών πόρων.

Οι δύο πρώτες συνιστώσες αντιπροσωπεύουν εισροή νερού στο υπόγειο σύστημα, που οφείλεται σε φυσική τροφοδοσία του υδροφορέα από τη βροχόπτωση, ενώ η τρίτη συνιστώσα αντιπροσωπεύει την εκροή (απόληψη) νερού, που οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα.

Τα γεωμετρικά μεγέθη κάθε δεξαμενής είναι το εμβαδόν της βάσης και τρεις χαρακτηριστικές στάθμες, ήτοι το υψόμετρο του πυθμένα, το υψόμετρο της οροφής και η αρχική στάθμη, οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη. Ο ορισμός των παραπάνω είναι εξαιρετικά σημαντικός, καθώς απαιτεί σημαντική εμπειρία ώστε όχι μόνο να καθοριστεί συνεπής φορά ροής του υπόγειου νερού, σύμφωνη με τις υδρογεωλογικές συνθήκες, αλλά και να εξασφαλιστεί ομαλή διαχρονική μεταβολή της στάθμης των δεξαμενών.

Η εκφόρτιση του υδροφορέα αναπαρίσταται με ειδικούς τύπους δεξαμενών, που υποδηλώνουν είτε σημειακές εξόδους νερού στην επιφάνεια του εδάφους (πηγές) ή ευρύτερες περιοχές συγκέντρωσης των υπόγειων διαφυγών της λεκάνης (π.χ., υποθαλάσσιες εκφορτίσεις). Και στις δύο περιπτώσεις, στο μοντέλο προσομοίωσης θεωρούνται εικονικές δεξαμενές πολύ μεγάλης (θεωρητικά άπειρης) βάσης, ώστε η στάθμη τους να διατηρείται πρακτικά σταθερή. Οι δεξαμενές αυτές δεν δέχονται κατακόρυφες φορτίσεις ούτε τροφοδοτούν γειτονικές τους δεξαμενές.

Το εννοιολογικό δίκτυο που διαμορφώνεται μπορεί να θεωρηθεί ως το υδραυλικό ανάλογο της διακριτής αναπαράστασης του υδροφορέα, στο οποίο οι δεξαμενές φορτίζονται από τις κατακόρυφες διεργασίες των υπερκείμενων στρωμάτων. Στο μοντέλο ισχύουν οι εξισώσεις συνέχειας σε κάθε δεξαμενή, καθώς και οι εξισώσεις ροής, που αναφέρονται στην ανταλλαγή νερού μεταξύ των γειτονικών δεξαμενών. Η στάθμη του νερού κάθε δεξαμενής αποτελεί τη μεταβλητή κατάσταση του συστήματος, η οποία αντιπροσωπεύει το μέσο ύψος νερού της κορεσμένης ζώνης στην περιοχή του αντίστοιχου κυττάρου. Η μεταβλητότητα της στάθμης της δεξαμενής εξαρτάται από την τιμή της ειδικής απόδοσης, η οποία αποτελεί αδιάστατη παράμετρο του μοντέλου. Αν αυτή είναι μικρή, τότε η βάση της δεξαμενής είναι μικρή και απαιτείται μεγάλη αύξηση στάθμης για την αποθήκευση συγκεκριμένου όγκου νερού, ενώ, αντίστροφα, αν η τιμή της ειδικής απόδοσης είναι μεγάλη, τότε η βάση της δεξαμενής είναι μεγάλη και απαιτείται μικρή αύξηση στάθμης για την αποθήκευση του ίδιου όγκου. Άλλη χαρακτηριστική ιδιότητα της δεξαμενής, που επίσης αποτελεί παράμετρο του μοντέλου, είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία έχει μονάδες ταχύτητας. Με τη χρήση κατάλληλου αριθμητικού τελεστή, υπολογίζεται η αντίστοιχη αγωγιμότητα των στοιχείων μεταφοράς που συνδέουν τις δεξαμενές ανά δύο. Σε κάθε χρονικό βήμα, η παροχή των αγωγών εκτιμάται από την εξίσωση Darcy. Εφόσον υπάρχει δίκτυο δεξαμενών, διαμορφώνεται ένα σύστημα εξισώσεων, ο υπολογισμός της ροής στο οποίο μπορεί να γίνει, εναλλακτικά, με ένα ρητό ή ένα πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης.

### **7.2.5 Μοντέλο διαχείρισης υδατικών πόρων**

Η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ παρέχει τη δυνατότητα αναπαράστασης των ανθρωπογενών επεμβάσεων σε μια λεκάνη, υιοθετώντας μια σχηματική διάταξη δικτυακής μορφής, η οποία περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- *κόμβους*, δηλαδή θέσεις προσφοράς ή ζήτησης νερού ή σημεία αλλαγής της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών μεγεθών του δικτύου.

- *αρδευόμενες περιοχές*, που αναπαρίστανται ως κόμβοι όπου συγκεντρώνεται η απόληψη για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών, σταθερό ποσοστό της οποίας θεωρείται ότι επιστρέφει στο δίκτυο μέσω του αποστραγγιστικού δικτύου.
- *ομάδες γεωτρήσεων*, δηλαδή ευρύτερα συστήματα έργων υδροληψίας από υπόγειους υδατικούς πόρους, η αντλητική ικανότητα των οποίων εκτιμάται ως το άθροισμα των επιμέρους αντλητικών ικανοτήτων των γεωτρήσεων που απαρτίζουν τη συγκεκριμένη ομάδα.
- *υδραγωγεία*, δηλαδή έργα μεταφοράς νερού που συνδέουν ζεύγη κόμβων και αναφέρονται σε ανοιχτούς ή κλειστούς αγωγούς, δεδομένης παροχαρακτηριστικής.

Μέσω των υδραγωγείων, υλοποιείται η σύνδεση του τεχνητού με το φυσικό σύστημα, τόσο με τη μορφή απόληξης από επιφανειακά και υπόγεια νερά όσο και με τη μορφή τεχνητής τροφοδοσίας των επιφανειακών αποδεκτών. Το ενοποιημένο αυτό δίκτυο αποτελεί το *υδροσύστημα* της περιοχής μελέτης.

Εκτός από τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων, ο χρήστης ορίζει *στόχους*, οι οποίοι ιεραρχούνται σε σειρά προτεραιότητας. Οι στόχοι αντιπροσωπεύουν καταναλωτικές χρήσεις νερού ή περιορισμούς, και αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη συνιστώσα του συστήματος. Οι πρώτοι αναφέρονται στη ζήτηση νερού για ύδρευση ή άρδευση, ενώ οι δεύτεροι αναφέρονται στη διατήρηση της παροχής στα υδραγωγεία ή τα υδατορεύματα μεταξύ ενός επιθυμητού εύρους, καθώς και στη θέσπιση ελάχιστης και μέγιστης παροχής άντλησης στις ομάδες γεωτρήσεων. Για κάθε στόχο, εισάγεται η αντίστοιχη χρονοσειρά ζήτησης και το επίπεδο προτεραιότητας στην ικανοποίηση του συγκεκριμένου στόχου. Δύο ή περισσότεροι στόχοι μπορούν να ενταχθούν στο ίδιο επίπεδο προτεραιότητας, εφόσον δεν κρίνονται ανταγωνιστικοί. Τέλος, τόσο στα υδραγωγεία όσο και στις ομάδες γεωτρήσεων εισάγεται ένα μοναδιαίο κόστος, που λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία υπολογισμού των απολήψεων.

Σε κάθε χρονικό βήμα, είναι γνωστές μόνο οι εισροές στους κόμβους του υδροσυστήματος, ενώ είναι άγνωστες οι λοιπές συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου, ήτοι:

- οι απολήψεις από τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, της λεκάνης και τους αρδευτικούς κόμβους για την ικανοποίηση των καταναλωτικών χρήσεων νερού.
- οι αντλήσεις νερού από τις ομάδες γεωτρήσεων.
- οι παροχές στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου (υδατορεύματα) και στα υδραγωγεία.

- οι απώλειες νερού στα υδατορεύματα και στα υδραγωγεία λόγω των διηθήσεων και διαρροών, αντίστοιχα.

Εφόσον προκύπτουν αντικρουόμενες ανάγκες σε συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, καθώς και εναλλακτικοί τρόποι ικανοποίησης των αναγκών, με διαφοροποίηση μάλιστα του σχετικού κόστους, τότε ο τρόπος κατανομής των ροών δεν είναι μονοσήμαντος. Στην περίπτωση αυτή, προκύπτει η ανάγκη εύρεσης μιας βέλτιστης κατανομής των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου, ώστε να τηρούνται με αυστηρή ιεραρχία οι ακόλουθες απαιτήσεις:

- να ικανοποιείται το σύνολο των φυσικών περιορισμών του συστήματος, δηλαδή οι εξισώσεις συνέχειας σε όλους τους κόμβους και οι περιορισμοί παροχτευτικότητας των υδραγωγείων και αντλητικής ικανότητας των ομάδων γεωτρήσεων·
- να ικανοποιούνται, εφόσον είναι εφικτό, οι στόχοι και λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος, με την επιθυμητή σειρά προτεραιότητας·
- να ελαχιστοποιείται το κόστος άντλησης και μεταφοράς του νερού.

Αποδεικνύεται ότι τα παραπάνω ανάγονται σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, μετασχηματίζοντας τις συνιστώσες του πραγματικού συστήματος σε συνιστώσες ενός μοντέλου διγράφου, στο οποίο ζητείται η ελαχιστοποίηση του κόστους κατανομής των ροών κατά μήκος ενός εννοιολογικού δικτύου (Koutsoyiannis *et al.*, 2003· Efstratiadis *et al.*, 2004· Ευστρατιάδης *κ.ά.*, 2007). Το πρόβλημα επιλύεται ρητά σε κάθε χρονικό βήμα, ενώ τα αποτελέσματα του εκάστοτε βήματος χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για το επόμενο. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας διατύπωσης είναι η ύπαρξη αναλυτικών αλγορίθμων επίλυσης, που εγγυώνται πλήρη ακρίβεια, με σχετικά μικρό υπολογιστικό φόρτο.

Επισημαίνεται ότι, επειδή οι εκφορτίσεις των πηγών, οι οποίες επηρεάζονται από τις αντλήσεις και τις διηθήσεις, είναι άγνωστες, εφαρμόζεται μια επαναληπτική διαδικασία, στην οποία τα μοντέλα κατανομής των ροών και υπόγειας ροής επιλύονται κυκλικά, μέχρι να σταθεροποιηθεί η πηγαία απορροή. Συνήθως, για το σκοπό αυτό απαιτούνται μία έως δύο επαναλήψεις.

#### **7.2.6 Μοντέλο διόδευσης ημερήσιων παροχών**

Είναι γνωστό ότι εφόσον κατά μήκος ενός υδατορεύματος δεν πραγματοποιούνται πλευρικές εισροές, ένα υδρογράφημα που εισάγεται ανάντη θα εμφανιστεί στα κατάντη με χρονική υστέρηση, μειωμένη αιχμή και αυξημένη χρονική διασπορά. Το φαινόμενο είναι γνωστό ως

διόδευση (routing), ενώ το σχετικό πρόβλημα, δηλαδή η αναπαράσταση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της στάθμης και της παροχής του υδατορεύματος, κατά κανόνα περιγράφεται ικανοποιητικά από τις διαφορικές εξισώσεις μονοδιάστατης μη μόνιμης ροής βαθμιαίας μεταβολής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια. Γενικά, για την πλήρη περιγραφή του φαινομένου οι χρονοσειρές εισόδου (βροχοπτώσεις) καθώς και τα δεδομένα ελέγχου (χρονοσειρές παροχών ή μεμονωμένα υδρογραφήματα πλημμυρών) δίνονται σε ωριαία ή λεπτότερα διαστήματα, ενώ για τους υδραυλικούς υπολογισμούς απαιτούνται λεπτομερείς υδρομορφολογικές ιδιότητες του υδρογραφικού δικτύου.

Επειδή τέτοιας λεπτομέρειας πληροφορίες είναι εξαιρετικά σπάνιες για τις ελληνικές, τουλάχιστον, λεκάνες, στο μοντέλο χρησιμοποιούνται συνθετικά αντί για πραγματικά δεδομένα, τα οποία είναι συνεπή με τα πραγματικά. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται μια τεχνική επιμερισμού, με βάση την οποία οι ημερήσιες χρονοσειρές απορροής των υπολεκανών, στις οποίες αθροίζεται η επιφανειακή απορροή που υπολογίζεται από το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας και η πηγαία απορροή που παράγεται από το μοντέλο υπόγειας ροής, αναλύονται σε ωριαία χρονικά βήματα. Τα λεπτής χρονικής ανάλυσης συνθετικά υδρογραφήματα που προκύπτουν αντιπροσωπεύουν μια υποθετική, πλην όμως ρεαλιστική, χρονική κατανομή της απορροής εντός της ημέρας.

Επιπλέον, στο μοντέλο δεν ζητούνται καθόλου γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου (διατομές, κλίσεις, συντελεστές απωλειών), καθώς για τη διόδευση των ροών υιοθετούνται εννοιολογικές (υδρολογικές) προσεγγίσεις με πολύ μικρό αριθμό παραμέτρων (το πολύ δύο). Ειδικότερα, εφαρμόζεται είτε η μέθοδος του γραμμικού κινηματικού κύματος (για σχετικά μεγάλες κατά μήκος κλίσεις) είτε ένα σχήμα διάχυσης κύματος Muskingum, εισάγοντας μόνο μία ή δύο παραμέτρους για κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, αντίστοιχα. Η επιλογή του σχήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κλάδου, ενώ οι παράμετροί τους εκτιμώνται εμπειρικά ή βαθμονομούνται με βάση τα διαθέσιμα δείγματα παροχών, υποθέτοντας ότι οι στιγμιαίες παρατηρήσεις είναι αντιπροσωπευτικές των συναθροισμένων μέσω ημερήσιων παροχών. Η προσέγγιση αυτή είναι εξαιρετικά φειδωλή σε δεδομένα, υπολογιστικά απλή και ταχεία, ενώ επιτρέπει την επίλυση του προβλήματος από τα ανάντη προς τα κατόντη.

Η υπολογιστική διαδικασία γίνεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, εφαρμόζεται η τυπική διαδικασία προσομοίωσης, με βάση την οποία προκύπτει μια εκτίμηση της πηγαίας απορροής και των απολήψεων. Με γνωστά όλα δεδομένα του υδατικού ισοζυγίου, εκτός των εισροών από το ανάντη υδρογραφικό δίκτυο, και μεταβαίνοντας διαδοχικά προς κατόντη, παράγονται τα



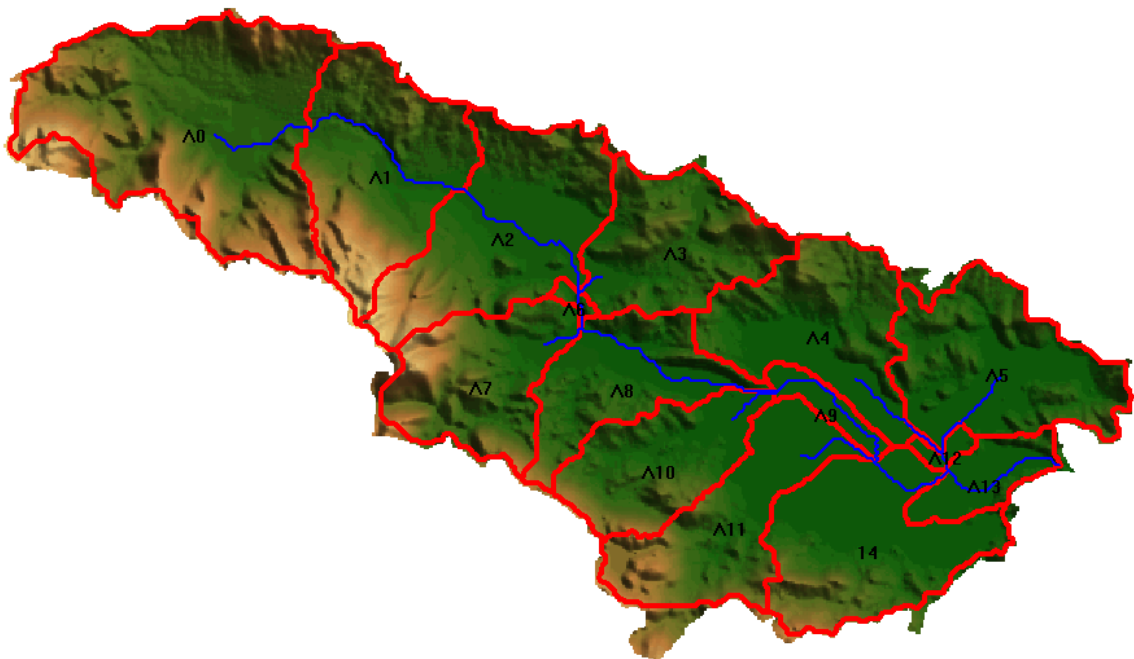
πλήρη (για όλη την περίοδο προσομοίωσης) υδρογραφήματα εισόδου στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, τα οποία αποτελούν είσοδο του μοντέλου διόδευσης.

### 7.3 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος Βοιωτικού Κηφισού

#### 7.3.1 Υδρογραφικό δίκτυο

Για την σχηματοποίηση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, διαμορφώθηκε το υδρογραφικό δίκτυο του Σχήματος 7.3, το οποίο περιλαμβάνει 16 κόμβους, 15 κλάδους και 15 υπολεκάνες. Τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη των παραπάνω συνιστωσών δίνονται στους Πίνακες 7.1, 7.2 και 7.3, αντίστοιχα.

Τονίζεται ότι οι κόμβοι διακρίνονται σε ενδιάμεσους, ανάντη και τελικούς (έξοδος λεκάνης). Οι ανάντη κόμβοι δεν αποτελούν έξοδο υπολεκανών. Συνεπώς, οι υπολογισμοί του υδατικού ισοζυγίου δεν αφορούν στους συγκριμένους κόμβους, ούτε τους κλάδους που ξεκινούν από τους εν λόγω κόμβους. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η αρχική (αυτοματοποιημένη) σχηματοποίηση περιελάμβανε 13 υπολεκάνες. Οι υπολεκάνες Λ0, Λ1 και Λ2 διαχωρίστηκαν μετά την εκ των υστέρων τοποθέτηση των κόμβων Αμφίκλειας και Τιθορέας, οι οποίοι αποτελούν σημαντικές θέσεις ελέγχου της παροχής του Βοιωτικού Κηφισού.



Σχήμα 7.3: Υδρογραφικό δίκτυο και υπολεκάνες υδροσυστήματος Βοιωτικού Κηφισού.

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά κόμβων υδρογραφικού δικτύου.

Κωδικός	Όνομασία	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)	Τύπος κόμβου
0	Καρδίτσα ανάντη	424 228	4 254 000	93	Εσωτερικός
1	Αλίαρτος	418 478	4 254 750	93	Εσωτερικός
2	Συμβολή Έρκυνα	410 978	4 260 250	101	Εσωτερικός
3	Αγ. Βλάσιος	395 978	4 265 000	122	Εσωτερικός
4	Ανθοχώρι	395 728	4 267 750	138	Εσωτερικός
5	Τιθορέα	387 228	4 275 500	157	Εσωτερικός
6	Μεριστής Μέλανα	423 728	4 255 250	94	Εσωτερικός
7	Αμφίκλεια	375 228	4 280 250	260	Εσωτερικός
8	Αγία Τριάδα	412 728	4 255 250	100	Ανάντη
9	Λειβαδιά	407 478	4 258 000	101	Ανάντη
10	Πολυγύρα	416 978	4 261 250	86	Ανάντη
11	Κάστρο	428 228	4 261 500	85	Ανάντη
12	Δαύλεια	392 978	4 263 750	146	Ανάντη
13	Προφ. Ηλίας	397 478	4 269 000	138	Ανάντη
14	Γραβιά	367 728	4 280 000	307	Ανάντη
15	Έξοδος προς Υλίκη	432 728	4 254 500	99	Τελικός

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά κλάδων υδρογραφικού δικτύου.

Κωδικός	Όνομασία	Ανάντη κόμβος	Κατάντη κόμβος	Υπολεκάνη	Μήκος (km)
0	River 0	Καρδίτσα ανάντη	Έξοδος προς Υλίκη	Basin 13	10.510
1	River 1	Αλίαρτος	Καρδίτσα ανάντη	Basin 14	7.303
2	River 2	Συμβολή Έρκυνα	Αλίαρτος	Basin 9	12.900
3	River 3	Αγ. Βλάσιος	Συμβολή Έρκυνα	Basin 8	17.468
4	River 4	Ανθοχώρι	Αγ. Βλάσιος	Basin 6	2.854
5	River 5	Τιθορέα	Ανθοχώρι	Basin 2	13.882
6	River 6	Μεριστής Μέλανα	Καρδίτσα ανάντη	Basin 12	1.457
7	River 7	Αμφίκλεια	Τιθορέα	Basin 1	15.882
8	River 8	Αγία Τριάδα	Αλίαρτος	Basin 11	7.200
9	River 9	Λειβαδιά	Συμβολή Έρκυνα	Basin 10	4.578
10	River 10	Πολυγύρα	Μεριστής Μέλανα	Basin 4	9.528
11	River 11	Κάστρο	Μεριστής Μέλανα	Basin 5	8.260
12	River 12	Δαύλεια	Αγ. Βλάσιος	Basin 7	3.664
13	River 13	Προφ. Ηλίας	Ανθοχώρι	Basin 3	2.268
14	River 14	Γραβιά	Αμφίκλεια	Basin 0	9.053

Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά υπολεκανών.

Κωδικός	Όνομασία	Κόμβος εξόδου	Κλάδος	Έκταση (km <sup>2</sup> )
0	Λ0	Αμφίκλεια	River 14	310.4
1	Λ1	Τιθορέα	River 7	176.9
2	Λ2	Ανθοχώρι	River 5	188.2
3	Λ3	Ανθοχώρι	River 13	128.4
4	Λ4	Μεριστής Μέλανα	River 10	148.9
5	Λ5	Μεριστής Μέλανα	River 11	165.3
6	Λ6	Αγ. Βλάσιος	River 4	5.1
7	Λ7	Αγ. Βλάσιος	River 12	126.3
8	Λ8	Συμβολή Έρκυνα	River 3	113.4
9	Λ9	Αλίαρτος	River 2	22.2
10	Λ10	Συμβολή Έρκυνα	River 9	110.9
11	Λ11	Αλίαρτος	River 8	136.5
12	Λ12	Καρδίτσα ανάντη	River 6	8.5
13	Λ13	Έξοδος προς Υλίκη	River 0	45.3
14	Λ14	Καρδίτσα ανάντη	River 1	166.6

### 7.3.2 Διαμόρφωση μονάδων υδρολογικής απόκρισης

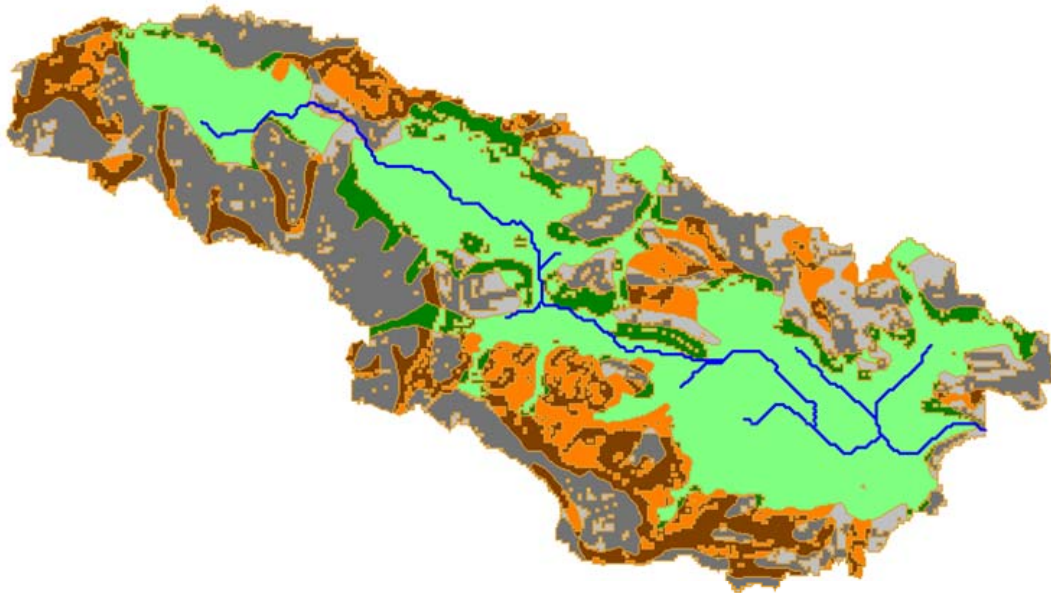
Η έννοια της μονάδας υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) είναι από τις πλέον θεμελιώδεις του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, δεδομένου ότι επιτρέπει χωριστό χειρισμό της λεπτομέρειας της χωρικής ανάλυσης από την παραμετροποίηση, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει συνέπεια με τη φυσική του συστήματος. Για τη διαμόρφωση των ΜΥΑ, αξιοποιήθηκε η διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης που κρίνεται ότι επηρεάζουν σημαντικά την υδρολογική της συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο επίπεδα κατανεμημένης πληροφορίας, ήτοι:

- δύο κατηγορίες κλίσεων εδάφους·
- τρεις κατηγορίες υδατοπερατότητας (βλ. 2.4.1).

Η κλίση του εδάφους επηρεάζει τις ταχύτητες πλημμυρικής απόκρισης, ενώ σχετίζεται έμμεσα με τη φυτοκάλυψη στη λεκάνη, καθώς οι περιοχές ισχυρών κλίσεων καλύπτονται από δασική βλάστηση, ενώ περιοχές ήπιων κλίσεων από μεσαία βλάστηση και καλλιέργειες. Ο χάρτης κλίσεων κατασκευάστηκε με βάση το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων της λεκάνης, ενώ η διάκριση στις δύο κατηγορίες έγινε με όριο την τιμή 10%.

Από το συνδυασμό των δύο επιπέδων προέκυψαν οι έξι μονάδες υδρολογικής απόκρισης που φαίνονται στο Σχήμα 7.4. Οι εκτάσεις που καταλαμβάνουν οι ΜΥΑ δίνονται στον Πίνακα

7.4. Οι πεδινές περιοχές καλύπτονται από προσχωματικές αποθέσεις, μέτριας περατότητας, ενώ οι ορεινοί όγκοι, κυρίως προς την δυτική πλευρά του Παρνασσού, καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από καρστικά (ασβεστολιθικά) πετρώματα, υψηλής περατότητας.



Σχήμα 7.4: Μονάδες υδρολογικής απόκρισης.

Πίνακας 7.4: Χαρακτηριστικά μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

Κωδικός	Κλίση εδάφους	Τύπος πετρωμάτων	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Ποσοστό (%)
0	Χαμηλή	Αδιαπέρατα	171.4	8.9
1	Χαμηλή	Προσχωματικά	696.1	36.1
2	Χαμηλή	Περατά	182.3	9.5
3	Υψηλή	Αδιαπέρατα	243.0	12.6
4	Υψηλή	Προσχωματικά	138.6	7.2
5	Υψηλή	Περατά	495.1	25.7

### 7.3.3 Σχηματοποίηση υδροφορέα

Εξαιτίας της κυριαρχίας των ασβεστολιθικών πετρωμάτων και της τεκτονικής της περιοχής, ο υδροφορέας της λεκάνης χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά σύνθετη πιεζομετρία, η λεπτομερής αποτύπωση της οποίας ξεφεύγει από τη λογική του μοντέλου αλλά και το σκοπό της εργασίας, η οποία είναι εστιασμένη στις πλημμυρικές απορροές. Έτσι, στόχος ήταν η αναπαράσταση των μειζόνων διεργασιών, που να επιτυγχάνει μια ρεαλιστική περιγραφή της λειτουργίας των σημαντικότερων καρστικών πηγών της λεκάνης, των αλληλεπιδράσεων μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών, και ορισμένων ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του

συστήματος (διηθήσεις, υπόγειες διαφυγές). Λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση φειδωλής παραμετροποίησης, διαμορφώθηκε μια διαμέριση του πεδίου υπόγειας ροής σε 42 κύτταρα, που απεικονίζονται στο Σχήμα 7.5. Τέσσερα από τα κύτταρα, τα οποία βρίσκονται εκτός λεκάνης, είναι εικονικά, και συγκεντρώνουν τις διαφυγές προς τον Μαλιακό (38), τον Βόρειο Ευβοϊκό κόλπο (39), την Υλίκη (40) και το Θηβαϊκό πεδίο (41).



Σχήμα 7.5: Πολυκυτταρική σχηματοποίηση υδροφορέα και θέσεις καρστικών πηγών μοντέλου υπόγειας υδρολογίας.

Στο Σχήμα 7.5 φαίνονται ακόμη οι θέσεις των έξι καρστικών πηγών που προσομοιώνονται:

- πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου, σε υψόμετρο +300 m, που τροφοδοτούνται από το κύτταρο 9·
- πηγές Αγίας Παρασκευής, σε υψόμετρο +130 m, που τροφοδοτούνται από το κύτταρο 5·
- πηγές Μαυρονερίου, σε υψόμετρο +120 m, που τροφοδοτούνται από το κύτταρο 6·
- πηγές Μέλινα, σε υψόμετρο +100 m, που τροφοδοτούνται από το κύτταρο 8·
- πηγές Πολυγύρας, σε υψόμετρο +95 m, που τροφοδοτούνται από το κύτταρο 7·
- πηγές Έρκυνα, σε υψόμετρο +200 m, που τροφοδοτούνται από το κύτταρο 4·

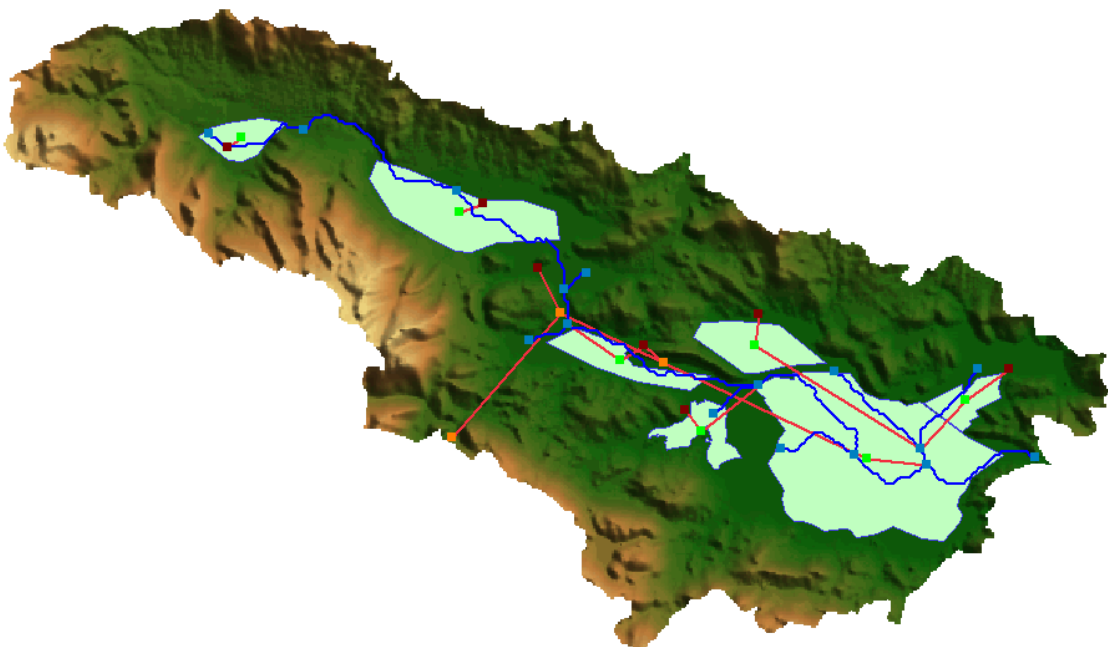
Για τη δεδομένη διακριτοποίηση του υδροφορέα, το ΣΓΠ παράγαγε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος (συντεταγμένες κέντρων βάρους κυττάρων, αποστάσεις

μεταξύ κέντρων βάρους, μήκη κοινών ακμών). Μεταξύ ορισμένων κυττάρων τέθηκαν συνθήκες αδιαπέρατου ορίου, με σκοπό να ανεξαρτητοποιηθούν οι αντίστοιχες υδρογεωλογικές ενότητες. Τέλος, από το ΣΓΠ παρήχθησαν οι ενώσεις των κυττάρων με τα τρία επίπεδα πληροφορίας που σχετίζονται με τις αντίστοιχες συνιστώσες φόρτισης των δεξαμενών δηλαδή (βλ. και Σχήμα 7.7):

- ο συνδυασμός κυττάρων, υπολεκανών και ΜΥΑ, για τον υπολογισμό των εισροών λόγω κατείσδυσης·
- ο συνδυασμός κυττάρων και κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, για τον υπολογισμό των εισροών λόγω διήθησης·
- ο συνδυασμός κυττάρων και γεωτρήσεων, για τον υπολογισμό των αντλήσεων.

#### 7.3.4 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

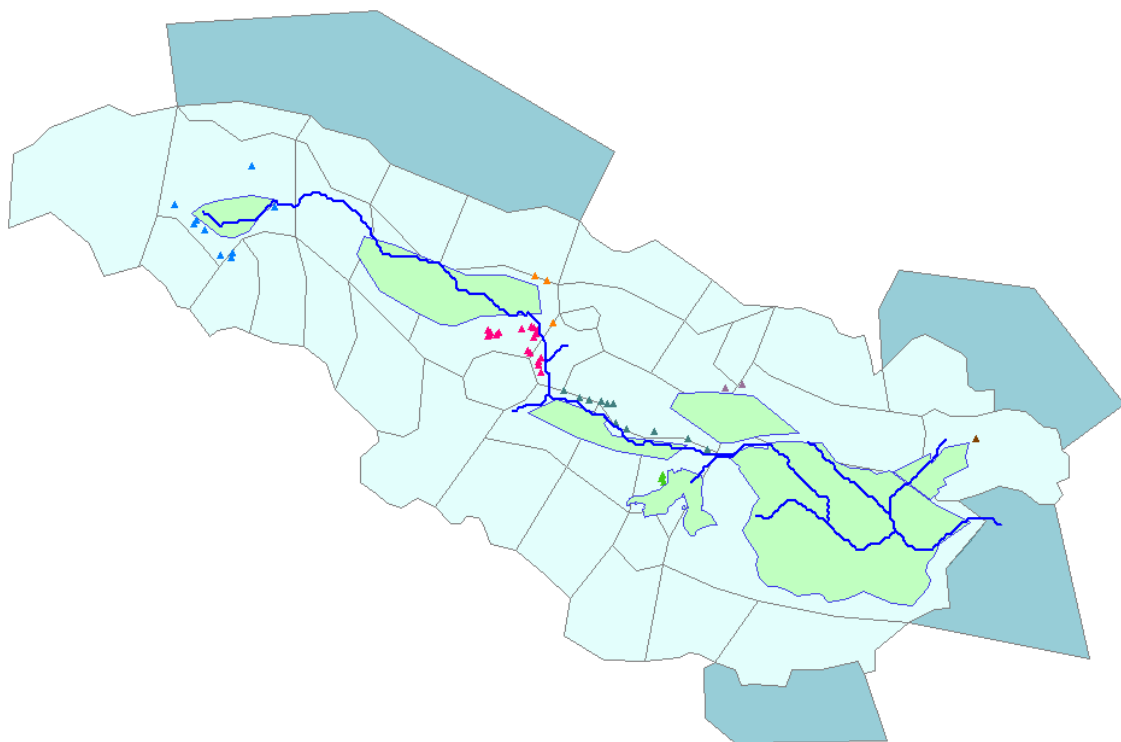
Το υδροσύστημα είναι μια αναπαράσταση της χωρικής κατανομής των υδατικών πόρων της λεκάνης, μετά την παρεμβολή των τεχνικών έργων και των ανθρωπογενών επεμβάσεων. Στην περιοχή επιχειρείται μια αδρομερής περιγραφή της συνδυασμένης λειτουργίας του φυσικού και τεχνητού συστήματος, η οποία απεικονίζεται στο εννοιολογικό δίκτυο του Σχήματος 7.6.



Σχήμα 7.6: Απεικόνιση υδροσυστήματος περιοχής μελέτης (κόμβοι και κλάδοι υδρογραφικού δικτύου, αρδευόμενες περιοχές, απλοί και αρδευτικοί κόμβοι, ομάδες γεωτρήσεων, υδραγωγεία).

Οι κόμβοι αναπαριστούν σημεία κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (έξοδοι υπολεκανών), αρδευόμενες περιοχές, ομάδες γεωτρήσεων, και άλλες θέσεις ελέγχου, ενώ οι κλάδοι αναφέρονται είτε στα επιμέρους τμήματα του ποταμού είτε σε υδραγωγεία, που αναπαριστούν τεχνητές διαδρομές, για την πραγματοποίηση απολήψεων από επιφανειακά και υπόγεια νερά.

Οι αρδευτικοί κόμβοι είναι επτά, και συγκεντρώνουν την ζήτηση των αντίστοιχων περιοχών του Πίνακα 2.3. Οι γεωτρήσεις, οι οποίες στη σχηματοποίηση του υδροφορέα προσομοιώνονται ως μεμονωμένες διατάξεις άντλησης, στο διαχειριστικό μοντέλο αναπαρίστανται ως ευρύτερες ομάδες, τα χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στον Πίνακα 7.5. Η τιμή άντλησης από κάθε ομάδα επιμερίζεται στις μεμονωμένες γεωτρήσεις, με βάση το ποσοστό συμμετοχής κάθε γεώτρησης στη συνολική αντλητική ικανότητα της ομάδας. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται η σημειακή απόληψη νερού από κάθε υπόγεια δεξαμενή, η οποία αφαιρείται από τις εισροές λόγω κατεΐσδυσης και διήθησης. Οι αρδευτικοί κόμβοι και η ομαδοποίηση των γεωτρήσεων φαίνεται στο χάρτη του Σχήματος 7.7.



Σχήμα 7.7: Κύτταρα υδροφορέα, αρδευόμενες περιοχές, γεωτρήσεις (ομαδοποιημένες, με βάση τον χρωματισμό).

Στη σχηματική διάταξη εισάγονται 16 συνολικά υδραγωγεία (Πίνακας 7.6). Τα περισσότερα είναι υποθετικά, ώστε να παραλαμβάνουν την απόληψη από τις ομάδες γεωτρήσεων ή να συνδέουν αρδευόμενες περιοχές (για τα εν λόγω υδραγωγεία, λαμβάνεται μια υψηλή τιμή παροχτετευτικότητας, ίση με  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Ακόμη, το μοντέλο αναπαριστά πραγματικά συστήματα αγωγών, όπως τον συγκεντρωτικό αγωγό Βασιλικών-Παρορίου, τα υδραγωγεία Κωπαΐδας και Διστόμου, και τη Διώρυγα Μαυρονερίου, τα οποία αποτελούν τα σημαντικότερα αρδευτικά έργα υποδομής της λεκάνης.

Με τη συνδυασμένη χρήση των πραγματικών και των υποθετικών αγωγών, επιτυγχάνεται μια ρεαλιστική, αν και αδρομερής, περιγραφή σύνθετων διαχειριστικών πολιτικών. Για παράδειγμα, η ευρύτερη περιοχή της Κωπαΐδας μπορεί να αρδευτεί με τρεις τρόπους, που υλοποιούνται με την ακόλουθη σειρά προτεραιότητας:

- με απευθείας άντληση νερού από την Υλίκη, για την οποία δίνεται η αντίστοιχη ιστορική χρονοσειρά με τη μορφή εξωτερικής εισροής·
- με επιφανειακή απόληψη νερού από τον Βοιωτικό Κηφισό και μεταφορά του μέσω των αντίστοιχων αρδευτικών καναλιών (εννοιολογικός αγωγός 12)·
- με άντληση νερού από τις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου και Ακοντίου, και μεταφορά του μέσω του συγκεντρωτικού αγωγού και του υδραγωγείου Κωπαΐδας (σύστημα αγωγών 2, 4, 5, 6, 7).

Πίνακας 7.5: Ομάδες γεωτρήσεων υδροσυστήματος.

Κωδικός	Ονομασία	Πλήθος γεωτρήσεων	Συνολική αντλητική ικανότητα ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
23	Γεωτρ. άνω ρου	9	1.40
24	Γεωτρ. μέσου ρου	9	2.73
25	Γεωτρ. Βασιλικών-Παρορίου	18	2.67
26	Γεωτρ. Ακοντίου	11	2.44
27	Γεωτρ. Κερατοβουνίου	3	0.69
28	Γεωτρ. Πολυγύρας	2	0.17
29	Γεωτρ. Κάστρου	1	1.00



Πίνακας 7.6: Υδραγωγεία υδροσυστήματος.

Κωδικός	Ονομασία	Ανάτη κόμβος	Κατάτη κόμβος	Μέγιστη παροχή (m <sup>3</sup> /s)
0	Συνδετικός γεωτρήσεων άνω ρου	Γεωτρήσεις άνω ρου	Αρδευτικός άνω ρου	10.00
1	Συνδετικός γεωτρήσεων μέσου ρου	Γεωτρήσεις μέσου ρου	Αρδευτικός μέσου ρου	10.00
2	Συγκεντρωτικός αγωγός Βασιλικών-Παρορίου	Γεωτρήσεις Βασιλικών	Μεριστής Διστόμου	2.30
3	Υδραγωγείο Διστόμου	Μεριστής Διστόμου	Δίστομο	2.50
4	Υδραγωγείο Κωπαΐδας ανάντη	Μεριστής Διστόμου	Αντλιοστάσιο Ακοντίου	7.75
5	Αντλιοστάσια Α4 ως Α1	Γεωτρήσεις Ακοντίου	Αντλιοστάσιο Ακοντίου	6.50
6	Συνδετικός γεωτρήσεων Ακοντίου	Γεωτρήσεις Ακοντίου	Αρδευτικός κάτω ρου	10.00
7	Υδραγωγείο Κωπαΐδας κατάτη	Αντλιοστάσιο Ακοντίου	Αρδευτικός Κωπαΐδας	7.75
8	Συνδετικός γεωτρήσεων Κερατοβουνίου	Γεωτρήσεις Κερατοβουνίου	Αρδευτικός Λειβαδιάς	10.00
9	Αρδευτικά κανάλια Έρκυνα	Συμβολή Έρκυνα	Αρδευτικός Λειβαδιάς	10.00
10	Συνδετικός γεωτρήσεων Πολυγύρας	Γεωτρήσεις Πολυγύρας	Αρδευτικός Ορχομενού	10.00
11	Αρδευτικά κανάλια Ορχομενού	Μεριστής Μέλανα	Αρδευτικός Ορχομενού	10.00
12	Αρδευτικά κανάλια Κωπαΐδας	Καρδίτσα ανάντη	Αρδευτικός Κωπαΐδας	10.00
13	Αρδευτικός Κάστρου	Μεριστής Μέλανα	Αρδευτικός Κάστρου	10.00
14	Συνδετικός γεωτρήσεων Κάστρου	Γεωτρήσεις Κάστρου	Αρδευτικός Κάστρου	10.00
15	Διώρυγα Μαυρονερίου	Αγ. Βλάσιος	Αρδευτικός κάτω ρου	1.67

### 7.3.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη διόδευσης

Η υδρολογική προσομοίωση έγινε με ημερήσιο χρονικό βήμα, με την ενσωμάτωση του υπολογιστικού σχήματος διόδευσης, τα χαρακτηριστικά μεγέθη του οποίου δίνονται στον Πίνακα 7.7. Η επιλογή των μοντέλων και η εκτίμηση των αντίστοιχων μεγεθών έγινε εμπειρικά. Στους πλέον ανάντη κλάδους, ήτοι κατά μήκος του άνω ρου του Βοιβωτικού Κηφισού, λόγω των σχετικά μεγάλων κλίσεων, θεωρήθηκε μηδενική διόδευση, ήτοι ακαριαία

μεταφορά της παροχής από τον ανάντη στον κατάντη κόμβο. Στους κλάδους κατά μήκος του μέσου ρου, επιλέχθηκε η προσέγγιση του γραμμικού κινηματικού κύματος, με την οποία θεωρείται χρονική μετατόπιση του υδρογραφήματος κατά χρόνο ίσο με το χρόνο διάδοσης του κύματος (παράμετρος  $K$ ). Τέλος, στο κατάντη τμήμα της λεκάνης, όπου οι κλίσεις είναι εξαιρετικά ήπιες (<0.1%), με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σημαντικές ανασχές, υιοθετήθηκε το μοντέλο Muskingum, το οποίο περιλαμβάνει μία ακόμα παράμετρο,  $X$ , που σχετίζεται με την αποθηκευτικότητα του αγωγού.

Πίνακας 7.7: Χαρακτηριστικά μεγέθη διόδευσης των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου.

Κωδικός	Ονομασία	Μοντέλο διόδευσης	Αριθμός υπολογιστικών κλάδων	Παράμετρος $K$ (χρόνος διάδοσης κύματος, σε h)	Παράμετρος $X$ (για τη μέθοδο Muskingum)
0	River 0	Muskingum	3	3.0	0.20
1	River 1	Muskingum	2	2.0	0.30
2	River 2	Muskingum	4	4.0	0.30
3	River 3	Muskingum	4	4.0	0.30
4	River 4	-	1	0.0	-
5	River 5	Κινηματικό κύμα	1	3.0	-
6	River 6	-	1	0.0	-
7	River 7	Κινηματικό κύμα	1	4.0	-

## 7.4 Βαθμονόμηση μοντέλου

### 7.4.1 Περίοδος ελέγχου

Για την προσαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ σε ημερήσια κλίμακα, επιλέχθηκε ως περίοδος ελέγχου το διάστημα 1/10/1984-30/9/1990, το οποίο καλύπτει έξι πλήρη υδρολογικά έτη. Πρόκειται για το πλέον πλούσιο σε κατανεμημένη υδρολογική πληροφορία διάστημα, κατά το οποίο πραγματοποιούνταν συστηματικές μετρήσεις παροχής σε πολλές θέσεις της λεκάνης, στα πλαίσια του προαναφερθέντος ερευνητικού προγράμματος του ΙΓΜΕ. Επιπλέον, πρόκειται για μια περίοδο αντιπροσωπευτική της δίαιτας της λεκάνης, με αλληλουχία ετών υψηλής και χαμηλής υδροφορίας, μεταξύ των οποίων και η αρχή της χαρακτηριστικής ξηρασίας που έπληξε ευρύτερες περιοχές της Μεσογείου, στα τέλη της δεκαετίας του 1980.

Με βάση τη συνήθη πρακτική που υιοθετείται στην προσαρμογή υδρολογικών μοντέλων, η περίοδος ελέγχου χωρίστηκε σε δύο χρονικές ενότητες. Η πρώτη περιλαμβάνει την περίοδο 1/10/1984-30/9/1987, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου, ενώ η δεύτερη, που περιλαμβάνει την περίοδο 1/10/1987-30/9/1990, χρησιμοποιήθηκε για επαλήθευση. Για την σχηματοποίηση που περιγράφεται παραπάνω, η ημερήσια προσομοίωση των έξι ετών (2192 χρονικά βήματα) απαιτεί χρόνο περίπου 1.3 s, σε επεξεργαστή Intel Pentium Dual 1.18 GHz, με 3GB RAM.

#### 7.4.2 Χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης

Η χωρική ολοκλήρωση των σημειακών χρονοσειρών ημερήσιου ύψους βροχής στην επιφάνεια των 15 υπολεκάνων έγινε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen. Με τη βοήθεια του ΣΓΠ, για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκαν τα εμβαδά επιρροής κάθε σταθμού και τα αντίστοιχα ποσοστά, που φαίνονται στον Πίνακα 7.8. Η επιφανειακή ολοκλήρωση έγινε σταθμίζοντας τα επιμέρους δείγματα βροχόπτωσης, με βάση τα εν λόγω ποσοστά (συντελεστές Thiessen).

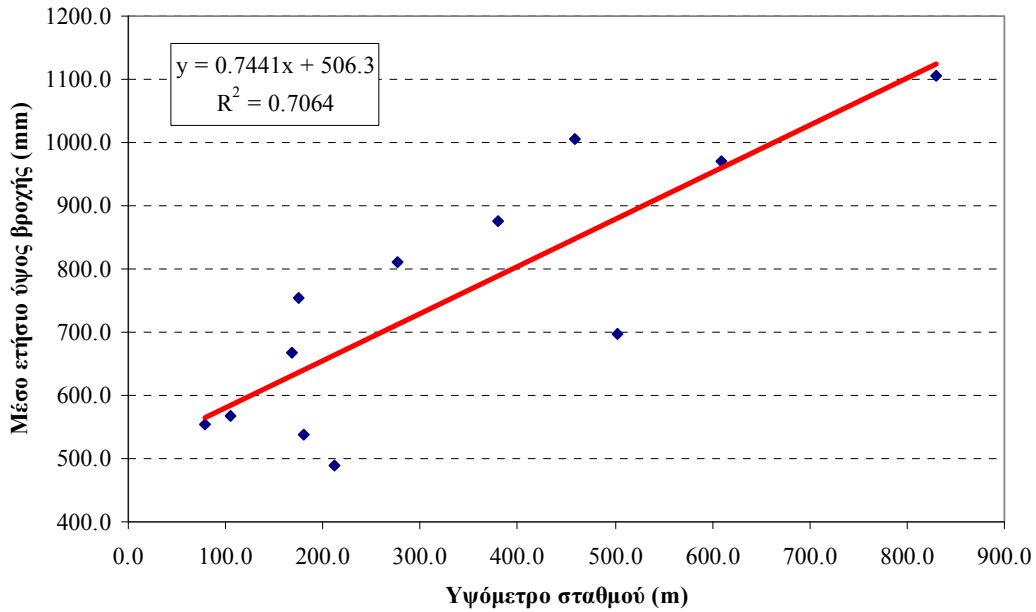
Στη συνέχεια, έγινε υψομετρική διόρθωση των αρχικών επιφανειακών δειγμάτων, με τη μέθοδο του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (7.1)$$

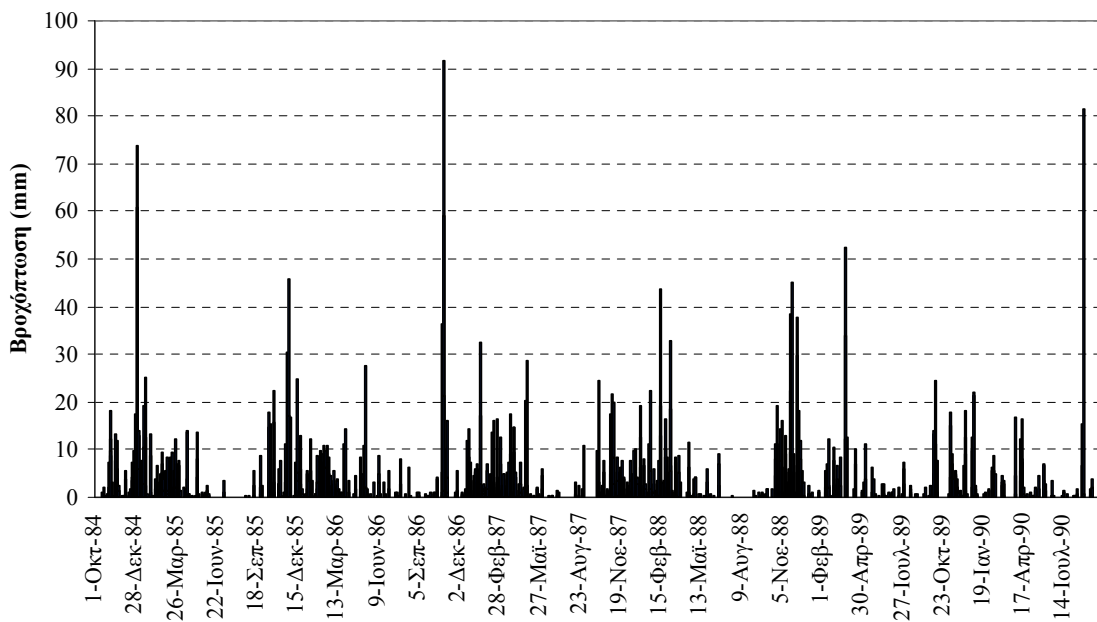
όπου  $z_s$  είναι το μέσο υψόμετρο της κάθε υπολεκάνης σε m,  $z_\sigma$  το μέσο υψόμετρο των σταθμών σε m (που υπολογίζεται ως σταθμισμένος, με βάση τους συντελεστές Thiessen, μέσος όρος των υψομέτρων των σταθμών),  $h_s$  το επιφανειακό μέσο ετήσιο ύψος βροχής (προ της αναγωγής), και  $\beta$  η βροχοβαθμίδα, σε mm/m. Στις επεξεργασίες, θεωρήθηκε κοινή τιμή βροχοβαθμίδας, ίση με  $\beta = 0.74$  mm/m. Η τιμή αυτή υπολογίστηκε με στατιστική ανάλυση των δειγμάτων μέσου ετήσιου ύψους βροχής και υψομέτρου σταθμών, για τη συνολική λεκάνη (Σχήμα 7.8). Τα δύο δείγματα εμφανίζουν ικανοποιητική συσχέτιση, καθώς ο σχετικός συντελεστής προσδιορισμού ανέρχεται σε 71%. Στο Σχήμα 7.9 απεικονίζεται η ημερήσια χρονοσειρά βροχόπτωσης για την περίοδο ελέγχου (1/10/1984-1/9/1990), ανηγμένη στην επιφάνεια της συνολικής λεκάνης.

Πίνακας 7.8: Εμβαδά επιρροής και συντελεστές Thiessen βροχομετρικών σταθμών.

Υπολεκάνη	Μέσο υψόμετρο	Σταθμός	Συντελεστής Thiessen
0	756	Επτάλοφος	0.26
		Άνω Μπράλος	0.12
		Γραβιά	0.42
		Δρυμαία	0.18
1	662	Επτάλοφος	0.09
		Κάτω Τιθορέα	0.53
		Δρυμαία	0.38
2	473	Κάτω Τιθορέα	0.35
		Ελάτεια	0.45
		Δαύλεια	0.20
		Ελάτεια	0.44
3	334	Αταλάντη	0.43
		Δαύλεια	0.07
		Λειβαδιά	0.06
		Αταλάντη	0.13
4	231	Παύλος	0.75
		Λειβαδιά	0.12
5	189	Παύλος	0.98
		Αλίαρτος	0.02
6	196	Δαύλεια	1.00
7	607	Δαύλεια	1.00
8	240	Δαύλεια	0.28
		Λειβαδιά	0.72
9	97	Αλίαρτος	0.08
		Παύλος	0.92
10	355	Λειβαδιά	1.00
		Αλίαρτος	0.05
11	428	Παύλος	0.09
		Λειβαδιά	0.26
		Αγ. Τριάδα	0.60
12	102	Αλίαρτος	0.83
		Παύλος	0.17
13	120	Αλίαρτος	1.00
14	268	Αλίαρτος	0.81
		Αγ. Τριάδα	0.19



Σχήμα 7.8: Διάγραμμα διασποράς για τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας της λεκάνης.



Σχήμα 7.9: Χρονοσειρά ημερήσιας βροχόπτωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, περίοδου 1/10/1984-31/9/1990 (η χρονοσειρά έχει προκύψει με επιφανειακή ολοκλήρωση όλων των σημειακών δειγμάτων).

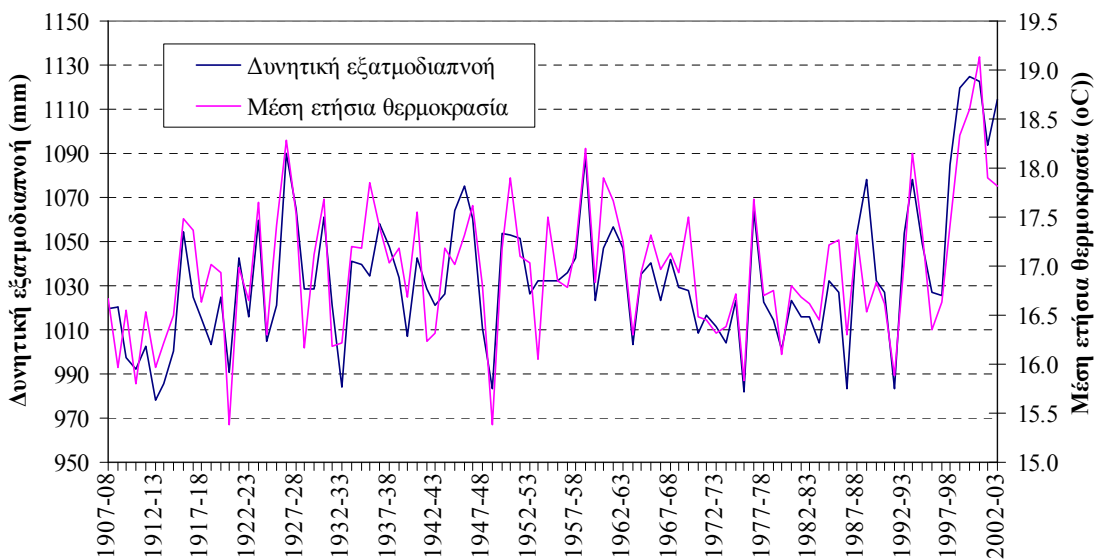
### 7.4.3 Χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής

Η εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής των υπολεκανών της περιοχής μελέτης έγινε μέσω της ακόλουθης ημιεμπειρικής σχέσης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$E = \frac{aS_0 - b}{1 - cT} \quad (7.2)$$

όπου  $S_0$  η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία, που είναι αστρονομικό μέγεθος και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος,  $T$  η μέση μηνιαία θερμοκρασία, και  $a$ ,  $b$  και  $c$  παράμετροι. Στην περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμο δείγμα δυνητικής εξατμοδιαπνοής που έχει υπολογιστεί με κάποια ακριβή μέθοδο, οι παράμετροι  $a$ ,  $b$  και  $c$  εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται αναλυτικά και αυτών που προκύπτουν με εφαρμογή της (7.2).

Η εκτίμηση των παραμέτρων βασίστηκε στα μετεωρολογικά δεδομένα του σταθμού Αλιάρτου, όπου με βάση ένα μικρό δείγμα τιμών μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ωρών ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου, υπολογίστηκε η δυνητική εξατμοδιαπνοή του σταθμού, με την αναλυτική μέθοδο Penman-Monteith (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004). Οι τιμές που προέκυψαν είναι  $a = 6.68 \times 10^{-5}$ ,  $b = 0.321$  και  $c = 0.021$ , που θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές όλης της λεκάνης. Με χρήση των εν λόγω παραμέτρων καθώς και των μέσων θερμοκρασιών του σταθμού, προέκυψε ένα δείγμα δυνητικής εξατμοδιαπνοής που καλύπτει την περίοδο 1907-2003 (Σχήμα 7.10).



Σχήμα 7.10: Χρονοσειρές ετήσιας δυνητικής εξατμοδιαπνοής και μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στο σταθμό Αλιάρτου.

Στη συνέχεια, παρήχθησαν οι χρονοσειρές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας κάθε υπολεκάνης, μέσω της σχέσης αναγωγής:

$$T_{\Lambda} = T_s - c \frac{z_{\Lambda} - z_s}{100} \quad (7.3)$$

όπου  $T_{\Lambda}$  η μέση μηνιαία θερμοκρασία στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης,  $T_s$  η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα του σταθμού αναφοράς (Αλιάρτος),  $z_{\Lambda}$ ,  $z_s$  τα αντίστοιχα υψόμετρα και  $c$  ο μέσος μηνιαίος ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας συναρτήσει του υψομέτρου (θερμοβαθμίδα). Τυπικές τιμές θερμοβαθμίδας για μεσογειακές λεκάνες κάτω του 45ου παραλλήλου, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του Giandotti, δίνονται στον Πίνακα 7.9. Τα μέσα υψόμετρα των υπολεκανών δίνονται στον Πίνακα 7.8, ενώ το υψόμετρο του σταθμού Αλιάρτου είναι 107 m.

Τέλος, με γνωστές τις τιμές της μέσης θερμοκρασίας και των παραμέτρων της σχέσης (7.2), παρήχθησαν οι μηνιαίες χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής των υπολεκανών, ενώ για την ημερήσια κλίμακα θεωρήθηκε κοινή τιμή για όλες τις ημέρες του ίδιου μήνα.

Πίνακας 7.9: Μέση μείωση θερμοκρασίας ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου κατά Giandotti.

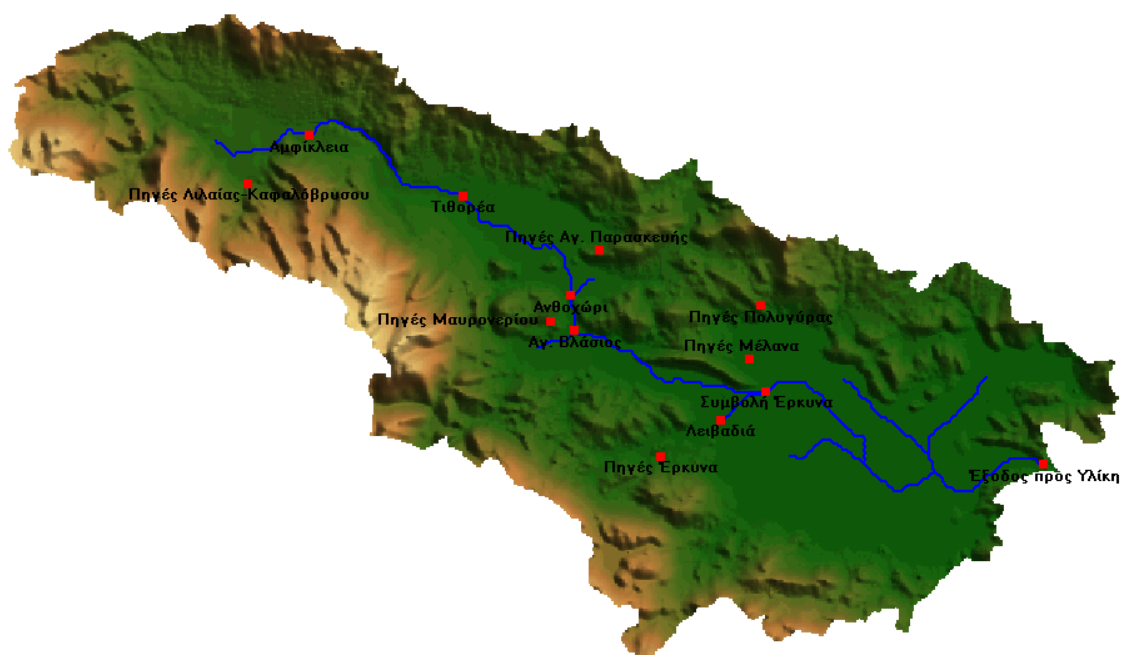
Μήνας	Θερμοβαθμίδα	Μήνας	Θερμοβαθμίδα
Ιανουάριος	0.31	Ιούλιος	0.61
Φεβρουάριος	0.38	Αύγουστος	0.59
Μάρτιος	0.56	Σεπτέμβριος	0.59
Απρίλιος	0.63	Οκτώβριος	0.53
Μάιος	0.63	Νοέμβριος	0.43
Ιούνιος	0.63	Δεκέμβριος	0.34

#### 7.4.4 Χρονοσειρές παροχής

Η βαθμονόμηση του μοντέλου βασίστηκε σε μια πολυκριτηριακή προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία ελέγχθηκε η προσαρμογή του σε πολλαπλές θέσεις ελέγχου (συνολικά 13 θέσεις), οι οποίες απεικονίζονται στο χάρτη του Σχήματος 7.11. Εκτός από την έξοδο της λεκάνης, όπου υπάρχει πλήρες δείγμα ημερήσιων παροχών, στις υπόλοιπες θέσεις η βαθμονόμηση έγινε με βάση τις ακανόνιστες μετρήσεις παροχής που ελήφθησαν από το αρχείο υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά όλων των δειγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 7.10.

Πίνακας 7.10: Χαρακτηριστικά μεγέθη ημερήσιας παροχής στην έξοδο της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού και τις υπόλοιπες θέσεις ελέγχου του μοντέλου, περιόδου 1/10/1984-30/9/1990.

Θέση ελέγχου	Μέγεθος δείγματος	Μέση τιμή (m <sup>3</sup> /s)	Τυπική απόκλιση (m <sup>3</sup> /s)
Έξοδος λεκάνης (κόμβος Καρδίτσας)	2191	7.43	9.99
Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	107	1.26	0.98
Πηγές Μαυρονερίου	110	1.55	0.81
Πηγές Αγίας Παρασκευής	31	0.28	0.28
Πηγές Έρκυνα	47	0.52	0.38
Πηγές Μέλανα	108	3.07	0.66
Πηγές Πολυγύρας	49	0.94	0.27
Κόμβος Αμφίκλειας	113	2.21	3.66
Κόμβος Τιθορέας	121	1.96	3.48
Κόμβος Ανθοχωρίου	119	2.79	4.59
Κόμβος Αγίου Βλασίου	83	5.17	5.17
Κόμβος συμβολή Έρκυνα	63	6.43	5.53
Έξοδος λεκάνης Έρκυνα (Λειβαδιά)	99	1.05	0.85



Σχήμα 7.11: Θέσεις ελέγχου προσαρμογής μοντέλου, στις οποίες υπάρχουν μετρήσεις παροχής.



Επειδή οι θέσεις υδρομέτρησης δεν συμπίπτουν ακριβώς με τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, η κατασκευή των δειγμάτων ελέγχου έγινε με βάση τις ακόλουθες παραδοχές:

- Για τον έλεγχο της παροχής στις πηγές του άνω ρου της λεκάνης (Παρνασού) αθροίστηκαν τα δείγματα υδρομετρήσεων των πηγών Λιλαίας, Ανατολικού και Δυτικού Κεφαλόβρυσου·
- Για τον έλεγχο της παροχής στις πηγές Έρκυνα χρησιμοποιήθηκε το δείγμα υδρομετρήσεων στη γέφυρα Λειβαδιάς των μηνών Απριλίου-Οκτωβρίου, το οποίο θεωρήθηκε ότι περιλαμβάνει μόνο τη βασική ροή του ποταμού·
- Για τον έλεγχο της παροχής στην Αμφίκλεια χρησιμοποιήθηκε το δείγμα υδρομετρήσεων στη γέφυρα Παπαλουκά·
- Για τον έλεγχο της παροχής στην Τιθορέα χρησιμοποιήθηκε το δείγμα υδρομετρήσεων στη γέφυρα Μοδίου·
- Για τον έλεγχο της παροχής στο Ανθοχώρι χρησιμοποιήθηκε το δείγμα υδρομετρήσεων στη γέφυρα του Σιδηροδρομικού Σταθμού Δαύλειας·
- Για τον έλεγχο της παροχής στον Άγιο Βλάσιο χρησιμοποιήθηκε το δείγμα υδρομετρήσεων στη γέφυρα Χαιρώνειας·
- Για τον έλεγχο της παροχής στην έξοδο της λεκάνης Έρκυνα (Λειβαδιά) χρησιμοποιήθηκε το δείγμα υδρομετρήσεων στη γέφυρα Λειβαδιάς·
- Για τον έλεγχο της παροχής στη συμβολή του Βοιωτικού Κηφισού με την Έρκυνα αθροίστηκαν τα δείγματα υδρομετρήσεων στις γέφυρες Ορχομενού και Λειβαδιάς·

#### **7.4.5 Στόχοι και περιορισμοί**

Στο μοντέλο προσομοίωσης ορίστηκαν οκτώ στόχοι και περιορισμοί, που φαίνονται στον Πίνακα 7.11. Οι επτά πρώτοι αφορούν στην ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών των αντίστοιχων αρδευόμενων περιοχών, ενώ ο τελευταίος αφορά στη θέσπιση μηδενικής δυνατότητας άντλησης από τις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου, πριν την περίοδο κατασκευής τους (1990). Για όλους τους μη αντικρουόμενους στόχους τέθηκε κοινό επίπεδο προτεραιότητας, ενώ το εν λόγω επίπεδο διαφοροποιήθηκε για τους αρδευτικούς κόμβους Κάστρου (επίπεδο 2) και Κωπαΐδας (επίπεδο 3). Με τον τρόπο αυτό, οι εκροές του ποταμού Μέλανα, στον οποίο συμβάλουν οι ομώνυμες πηγές καθώς και αυτές της Πολυγύρας, ικανοποιούν κατά προτεραιότητα την αρδευτική ζήτηση της περιοχής του Ορχομενού, στη συνέχεια της περιοχής Κάστρου-Κόκκινου και τελευταία της Κωπαΐδας, που είναι και η πλέον κατάντη περιοχή.

Πίνακας 7.11: Λειτουργικοί στόχοι υδροσυστήματος.

α/α	Τύπος στόχου	Συνιστώσα υδροσυστήματος	Επίπεδο προτεραιότητας
1	Άρδευση	Αρδευτικός κόμβος κάτω ρου	1
2	Άρδευση	Αρδευτικός κόμβος Κωπαΐδας	3
3	Άρδευση	Αρδευτικός κόμβος Κάστρου	2
4	Άρδευση	Αρδευτικός κόμβος Λειβαδιάς	1
5	Άρδευση	Αρδευτικός κόμβος Ορχομενού	1
6	Άρδευση	Αρδευτικός κόμβος μέσου ρου	1
7	Άρδευση	Αρδευτικός κόμβος άνω ρου	1
8	Μέγιστη άντληση	Ομάδα γεωτρήσεων Βασιλικών-Παρορίου	1

#### 7.4.6 Παράμετροι και μεταβλητές ελέγχου

Οι παράμετροι (βαθμοί ελευθερίας) του μοντέλου είναι αρχικώς 143 και αναφέρονται σε συνιστώσες του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος. Συγκεκριμένα:

- συντελεστές διήθησης υδατορευμάτων (συνολικά 15 παράμετροι)·
- επτά παράμετροι ανά δεξαμενή συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας των αντίστοιχων έξι μονάδων υδρολογικής απόκρισης (συνολικά 42 παράμετροι)·
- υδραυλική αγωγιμότητα και ειδική απόδοση 38 κυττάρων (συνολικά 76 παράμετροι)·
- υδραυλική αγωγιμότητα κυττάρων που αναπαριστούν υπόγειες εκφορτίσεις και κυττάρων που αναπαριστούν επιφανειακές εκφορτίσεις (πηγές) (συνολικά 10 παράμετροι).

Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα ομαδοποίησης παραμέτρων της ίδιας κατηγορίας, επιτυγχάνοντας έτσι δραστική μείωση του αριθμού των μεταβλητών ελέγχου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, έγινε οι ακόλουθες παραδοχές:

- θεωρήθηκε ποσοστό απωλειών λόγω διήθησης 30% στον κλάδο μεταξύ Αμφίκλειας και Τιθορέας, το οποίο οφείλεται στη διέλευση του ποταμού από μια έντονη καρστικοποιημένη χαράδρα, και είναι συμβατό με τις παρατηρημένες παροχές (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004)·
- το ποσοστό απωλειών λόγω διήθησης για τους υπόλοιπους κλάδους ελήφθη μηδενικό·
- η ειδική απόδοση (πορώδες) όλων των κυττάρων εκτός αυτών που εκφορτίζονται άμεσα σε πηγές θεωρήθηκε κοινό·
- δημιουργήθηκαν επτά ομάδες κυττάρων, για τις οποίες θεωρήθηκε κοινή τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας.

Με τις παραπάνω απλοποιήσεις, ο τελικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου, δηλαδή των προς βελτιστοποίηση μεταβλητών ελέγχου, περιορίστηκε σε περίπου 70. Για κάθε μεταβλητή ελέγχου ορίστηκαν άνω και κάτω όρια, τα οποία εξαρτώνται από τη φυσική ερμηνεία της εκάστοτε παραμέτρου.

#### **7.4.7 Αρχικές και οριακές συνθήκες**

Οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου αναφέρονται στις μεταβλητές κατάστασης του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος στην αρχή της προσομοίωσης, δηλαδή στις 1/10/1984. Συγκεκριμένα:

- στο ύψος υγρασίας της ανώτερης και κατώτερης δεξαμενής κάθε εδαφικού στοιχείου, που δημιουργείται από την ένωση των υπολεκανών και των ΜΥΑ·
- στη στάθμη υπόγειου νερού στις δεξαμενές του υδροφορέα.

Οι αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης προσδιορίστηκαν εμπειρικά. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ένα μικρό αρχικό ύψος εδαφικής υγρασίας 10 mm σε όλα εδαφικά στοιχεία, κάτι εύλογο αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους, οπότε έχουν αποκατασταθεί οι πλέον ξηρές συνθήκες (η μικρή αυτή τιμή τέθηκε επειδή το καλοκαίρι που προηγήθηκε ήταν σχετικά πλούσιο σε υδροφορία, όπως προκύπτει από τη σύγκριση των τιμών βροχόπτωσης ως προς τους αντίστοιχους μέσους όρους τους).

Από την άλλη πλευρά, οι αρχικές στάθμες των υπόγειων κυττάρων, που αποτελούν καίρια παραδοχή του μοντέλου, ελλείψει υδρογεωλογικών δεδομένων (πιεζομετρικές παρατηρήσεις) εκτιμήθηκαν σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες (δυνατότητα ή μη ανταλλαγής νερού μεταξύ γειτνιάζοντων δεξαμενών) με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ομαλή διακύμανση των υπόγειων αποθεμάτων και ικανοποιητική προσαρμογή του μοντέλου στα παρατηρημένα υδρογραφήματα των πηγών. Αυτό αποτέλεσε ένα από τα δυσκολότερα σημεία της μελέτης, το οποίο προϋποθέτει υψηλή εμπειρία, σε συνδυασμό με καλή εποπτεία των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής (βλ. και Κοψιάτη, 2009).

#### **7.4.8 Διατύπωση στοχικής συνάρτησης**

Το γεγονός ότι το μοντέλο περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό μεταβλητών ελέγχου καθιστά αναγκαία τη διατύπωση ενός ικανού αριθμού κριτηρίων προσαρμογής, ώστε να τηρείται η αρχή της φειδωλής παραμετροποίησης (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2010). Τα κριτήρια ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- μέτρα προσαρμογής των προσομοιωμένων στις παρατηρημένες αποκρίσεις·

- εμπειρικά μέτρα ελέγχου της υπερετήσιας διακύμανσης της προσομοιωμένης στάθμης των υπόγειων δεξαμενών.

Για τον έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου στα 13 δείγματα παροχών χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης *αποτελεσματικότητας* (efficiency), που διατυπώνεται ως εξής:

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - y_t')^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (7.4)$$

Ο παραπάνω δείκτης ελέγχει κατά πόσο η προσομοιωμένη χρονοσειρά,  $y_t'$ , είναι καλύτερη εκτιμήτρια σε σχέση με τη μέση τιμή,  $\bar{y}$ , των παρατηρήσεων,  $y_t$ . Η θεωρητικά μέγιστη τιμή του είναι μονάδα, που υποδηλώνει τέλεια προσαρμογή του μοντέλου, ενώ δεν υπάρχει κάτω όριο ως προς την ελάχιστη τιμή τους. Για την αναπαράσταση της απορροής εξόδου μιας λεκάνης, τιμές της τάξης του 0.80-0.90 θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές, ενώ τιμές της τάξης του 0.30 θεωρούνται οριακές για την αποδοχή ενός μοντέλου ως αντιπροσωπευτικού του φυσικού συστήματος. Η μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποτελεί ισοδύναμη εκτιμήτρια με την παρατηρημένη μέση τιμή, ενώ σε περίπτωση αρνητικής τιμής το μοντέλο θεωρείται αναξιόπιστο για προγνώσεις (Ευστρατιάδης, 2008).

Σε ότι αφορά στην υπερετήσια διακύμανση των μη μετρούμενων αποκρίσεων του υπόγειου συστήματος, επειδή πρόκειται για υδρολογικές διεργασίες με εγγενές αίτιο τη βροχόπτωση, είναι εύλογο να υποθεθεί ότι ακολουθούν παρόμοια δίαυτα, εμφανίζοντας υψηλές τιμές την υγρή και χαμηλές την ξηρή περίοδο. Μια τέτοια χαρακτηριστική μεταβλητή απόκρισης είναι η στάθμη του υδροφορέα, που το μοντέλο υπολογίζει στο κέντρο βάρους κάθε κυττάρου. Επειδή η χωρική κλίμακα του κυττάρου είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την τοπική κλίμακα ενός πιεζομέτρου, είναι σχετικά επισφαλής η προσαρμογή των παραμέτρων ενός μοντέλου με βάση παρατηρήσεις στάθμης· πρόκειται για μια γνωστή δυσχέρεια του αντίστροφου προβλήματος της υδρογεωλογίας. Ακόμα περισσότερο, όταν δεν υπάρχουν καθόλου μετρήσεις στάθμης ή όταν αυτές περιορίζονται σε μικρή έκταση του υδροφορέα, είναι πιθανό να δημιουργηθούν συνθήκες μη ρεαλιστικής αναδιανομής του αποθηκευμένου υπόγειου νερού. Αυτό αληθεύει ιδιαίτερα για τα συνδυαστικά μοντέλα, που βαθμονομούνται αποκλειστικά με βάση μετρήσεις επιφανειακών νερών. Στην περίπτωση αυτή, οι παράμετροι που σχετίζονται με τις υπόγειες δεξαμενές, ιδιαίτερα τις περιμετρικές, είναι, στην πράξη, μη ελεγχόμενες. Έτσι, προκειμένου να αναπαραχθούν οι παροχές, πραγματοποιούνται μη ρεαλιστικές μεταφορές υπόγειου νερού, με αποτέλεσμα κάποιες δεξαμενές να ταπεινώνονται

και άλλες να γεμίζουν συστηματικά. Κατά συνέπεια, οι χρονοσειρές αποθήκευσης (ή στάθμης) παρουσιάζουν μια εικόνα θετικής ή αρνητικής τάσης που είναι ασύμβατη με τη φυσική του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε ένα εμπειρικό μέτρο ποιικής μέσω του οποίου επιδιώκεται η παρεμπόδιση της υπερετήσιας ανύψωσης ή ταπείνωσης της προσομοιωμένης στάθμης των υπόγειων δεξαμενών, ώστε να είναι συνεπής με την αναμενόμενη διακύμανση του υδροφορέα. Το εν λόγω μέτρο ορίστηκε για όλα τα κύτταρα του μοντέλου, εκτός από αυτά που τροφοδοτούν πηγές (κύτταρα 4 ως 9), η στάθμη των οποίων ελέγχεται με μεγαλύτερη ασφάλεια με βάση τα υδρογραφήματα των πηγών.

Η στοχική συνάρτηση προέκυψε ως άθροισμα των 13 μέτρων αποτελεσματικότητας και των 36 μέτρων τάσης. Για όλα τα κριτήρια ορίστηκε μοναδιαίο βάρος, με εξαίρεση την αποτελεσματικότητα στην έξοδο της λεκάνης και κατάντη των τριών κύριων πηγών (Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου, Μαυρονερίου και Μέλανα), για τα οποία τέθηκαν υψηλότεροι συντελεστές βάρους (4 για το υδρογράφημα εξόδου και 2 για τα υδρογραφήματα των πηγών).

#### **7.4.9 Προσαρμογή μοντέλου στις θέσεις ελέγχου**

Η διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων βασίστηκε σε μια υβριδική διαδικασία, που προϋποθέτει συνδυασμένη αξιοποίηση εργαλείων μη γραμμικής βελτιστοποίησης και της υδρολογικής εμπειρίας (Ευστρατιάδης, 2008· Efstratiadis *et al.*, 2008). Ως προς το πρώτο σκέλος, χρησιμοποιήθηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002· Rozos *et al.*, 2004), που είναι ενσωματωμένος στο λογισμικό.

Στους Πίνακες 7.12 και 7.13 παρουσιάζονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των κριτηρίων καλής προσαρμογής, για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, δίνονται οι τιμές της αποτελεσματικότητας (αδιάστατη) και της μεροληψίας της μέσης τιμής (αδιάστατη) (σε  $m^3/s$ ) στις 13 θέσεις ελέγχου. Οι σχετικές προσομοιωμένες και παρατηρημένες χρονοσειρές απεικονίζονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 7.12 έως 7.24. Επισημαίνεται ότι σε αρκετές θέσεις τα δείγματα παρουσιάζουν αρκετά κενά, κυρίως την περίοδο της επαλήθευσης, με συνέπεια οι τιμές να μην είναι επαρκώς αντιπροσωπευτικές της επίδοσης του μοντέλου.

Η προσαρμογή του μοντέλου, τουλάχιστον στις βασικές θέσεις ελέγχου (ήτοι στην έξοδο της λεκάνης και στους περισσότερους κόμβους κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού) κρίνεται ικανοποιητική, με τα αποτελέσματα της επαλήθευσης να είναι ακόμα και υψηλότερα σε σχέση με αυτά της περιόδου βαθμονόμησης. Το γεγονός αυτό τεκμηριώνει την καλή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου όσον αφορά στην προσομοίωση των επιφανειακών

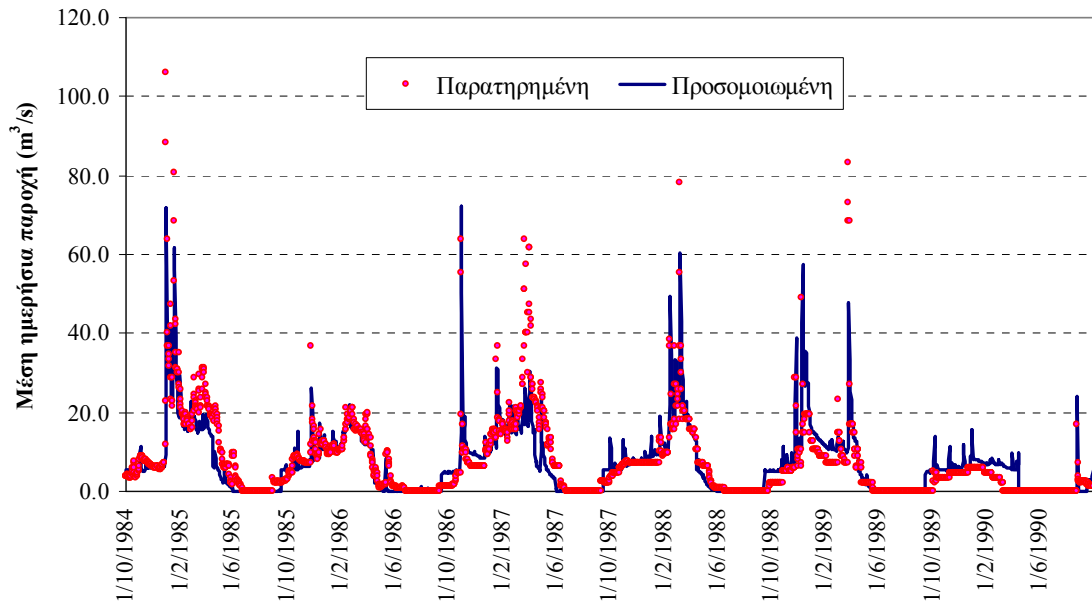
απορροών, στο οποίο δίνει έμφαση η παρούσα έρευνα. Για τις πηγές, εμφανίζεται μικτή εικόνα (π.χ. προκύπτει πολύ καλή προσαρμογή στις πηγές του άνω ρου, σε αντιδιαστολή με το σύστημα Μέλανα-Πολυγύρας) , αλλά ακόμη και εκεί όπου ο συντελεστής προσδιορισμού είναι χαμηλός, αναπαράγεται τουλάχιστον η μέση παρατηρημένη τιμή της πηγαίας απορροής.

Πίνακας 7.12: Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής των χρονοσειρών μηνιαίας παροχής για την περίοδο βαθμονόμησης (1/10/1984-30/9/1987).

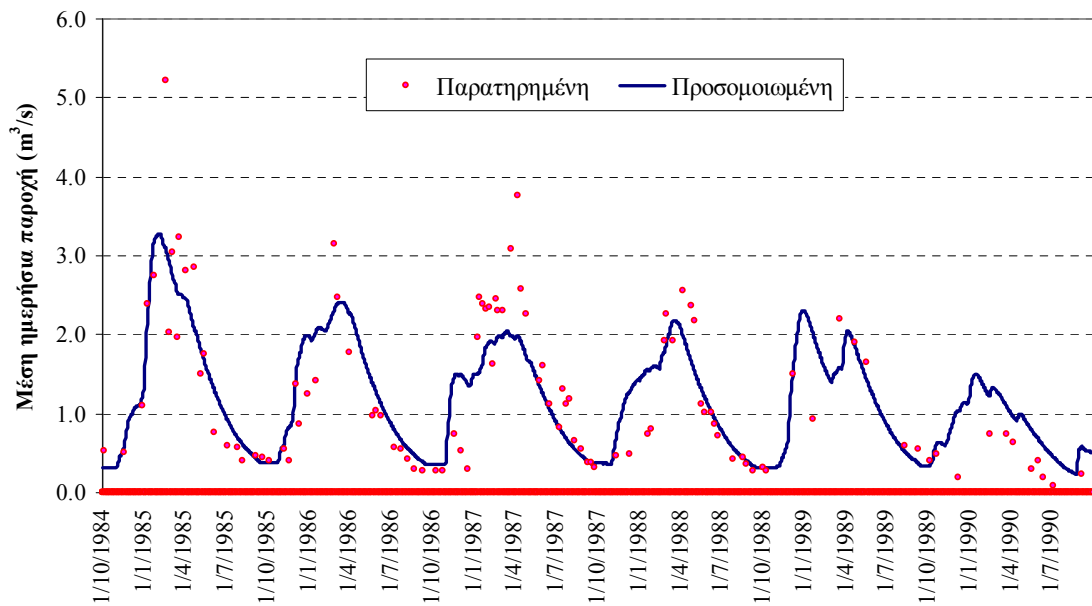
Υδρογράφημα	Αποτελεσματικότητα	Μεροληψία μέσης τιμής
Έξοδος λεκάνης (κόμβος Καρδίτσας)	0.744	-0.185
Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	0.698	-0.049
Πηγές Μαυρονερίου	0.303	-0.054
Πηγές Αγίας Παρασκευής	0.396	-0.319
Πηγές Έρκυνα	0.194	0.001
Πηγές Μέλανα	-0.305	0.003
Πηγές Πολυγύρας	-0.071	-0.046
Κόμβος Αμφίκλειας	0.479	-0.294
Κόμβος Τιθορέας	0.437	-0.328
Κόμβος Ανθοχωρίου	0.593	-0.275
Κόμβος Αγίου Βλασίου	0.714	-0.157
Κόμβος συμβολή Έρκυνα	0.727	-0.096
Έξοδος λεκάνης Έρκυνα (Λειβαδιά)	0.424	0.106

Πίνακας 7.13: Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής των χρονοσειρών μηνιαίας παροχής για την περίοδο επαλήθευσης (1/10/1987-30/9/1990).

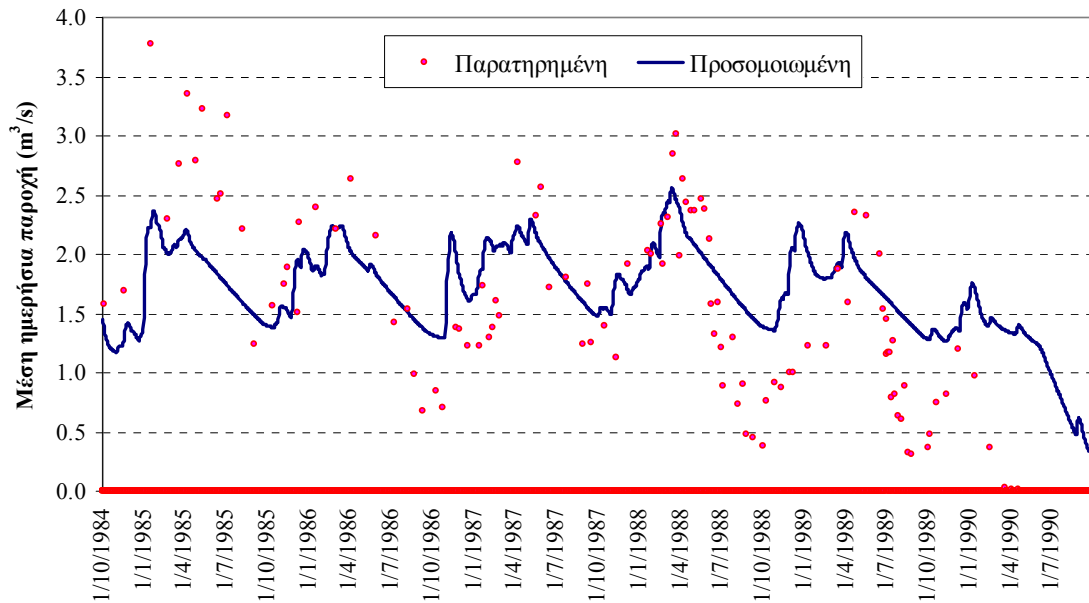
Υδρογράφημα	Αποτελεσματικότητα	Μεροληψία μέσης τιμής
Έξοδος λεκάνης (κόμβος Καρδίτσας)	0.736	0.256
Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	0.640	0.148
Πηγές Μαυρονερίου	0.211	0.336
Πηγές Αγίας Παρασκευής	0.849	-0.144
Πηγές Έρκυνα	-0.804	-0.128
Πηγές Μέλανα	0.201	-0.017
Πηγές Πολυγύρας	-0.985	-0.257
Κόμβος Αμφίκλειας	0.595	0.153
Κόμβος Τιθορέας	0.659	0.598
Κόμβος Ανθοχωρίου	0.557	0.156
Κόμβος Αγίου Βλασίου	0.028	0.525
Κόμβος συμβολή Έρκυνα	-0.364	0.569
Έξοδος λεκάνης Έρκυνα (Λειβαδιά)	-1.568	0.349



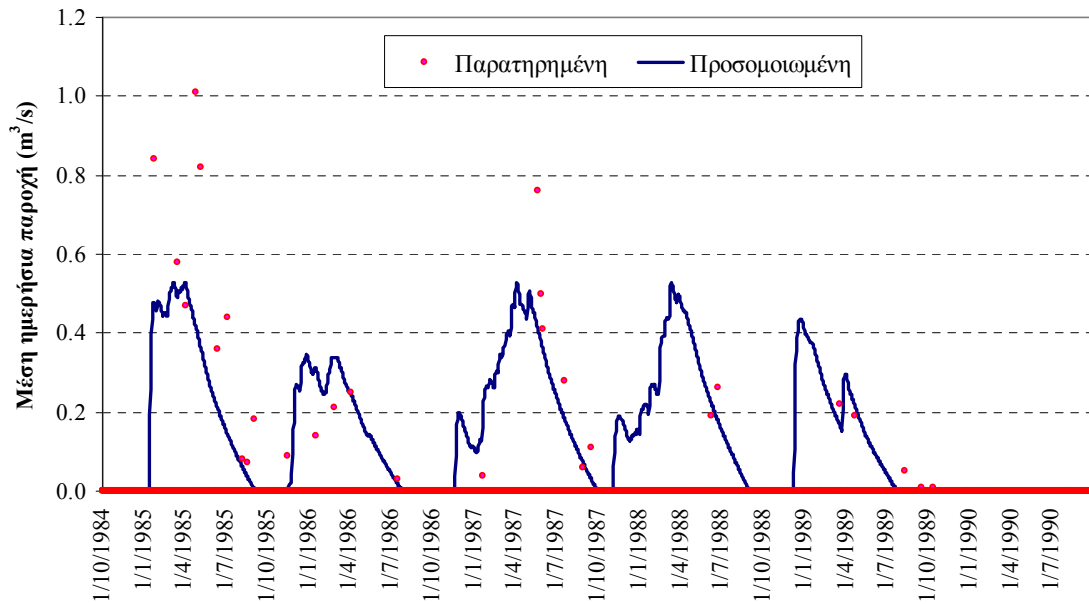
Σχήμα 7.12: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης (Σήραγγα Καρδίτσας).



Σχήμα 7.13: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής πηγών Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου.

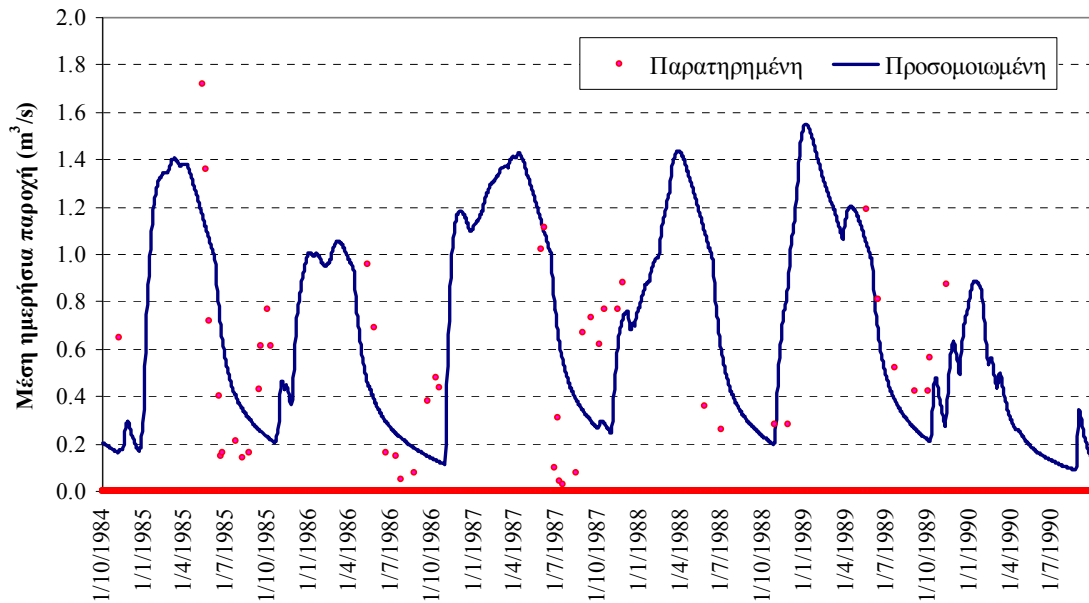


Σχήμα 7.14: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής πηγών Μαυρονερίου.

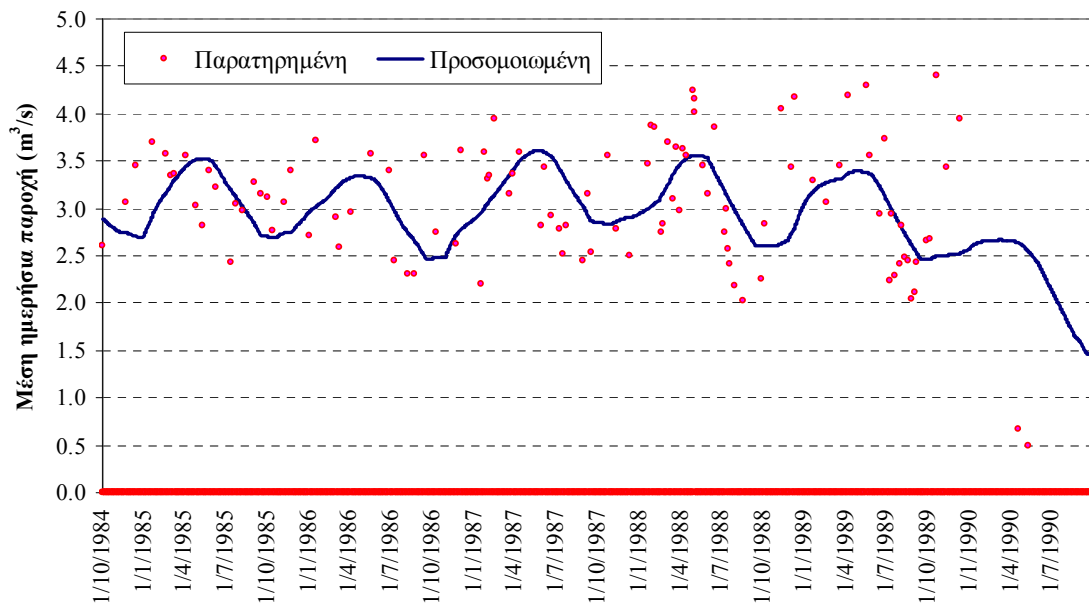


Σχήμα 7.15: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής πηγών Αγίας Παρασκευής.

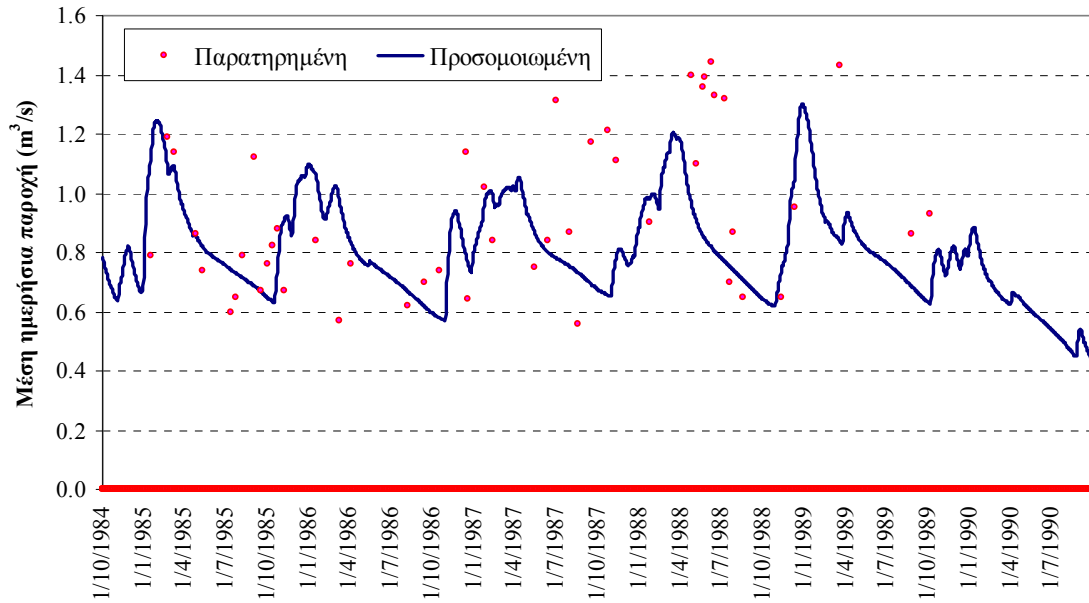




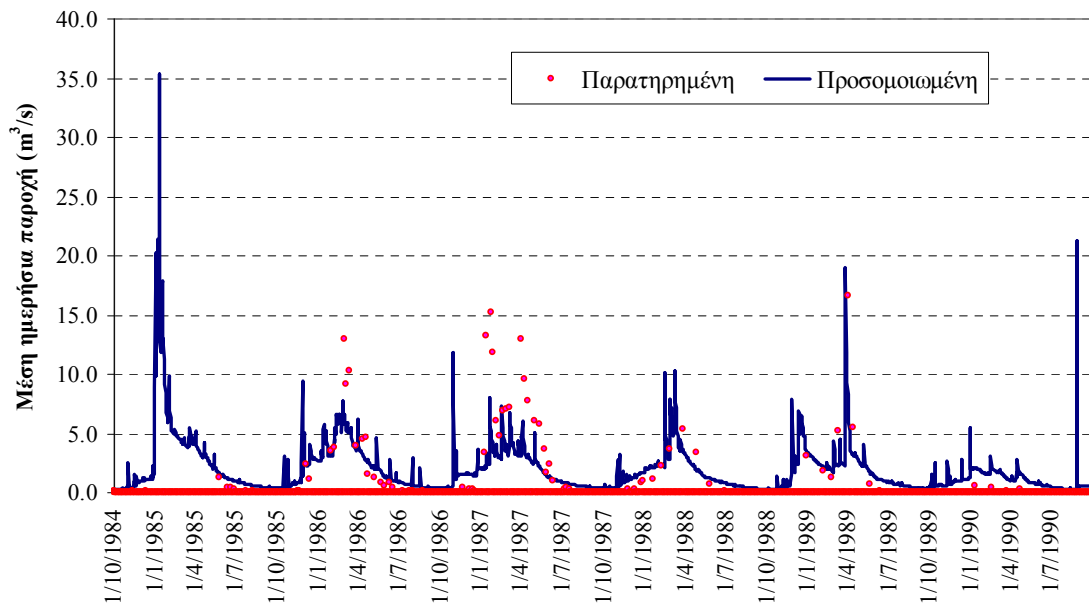
Σχήμα 7.16: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής πηγών Έρκυνα.



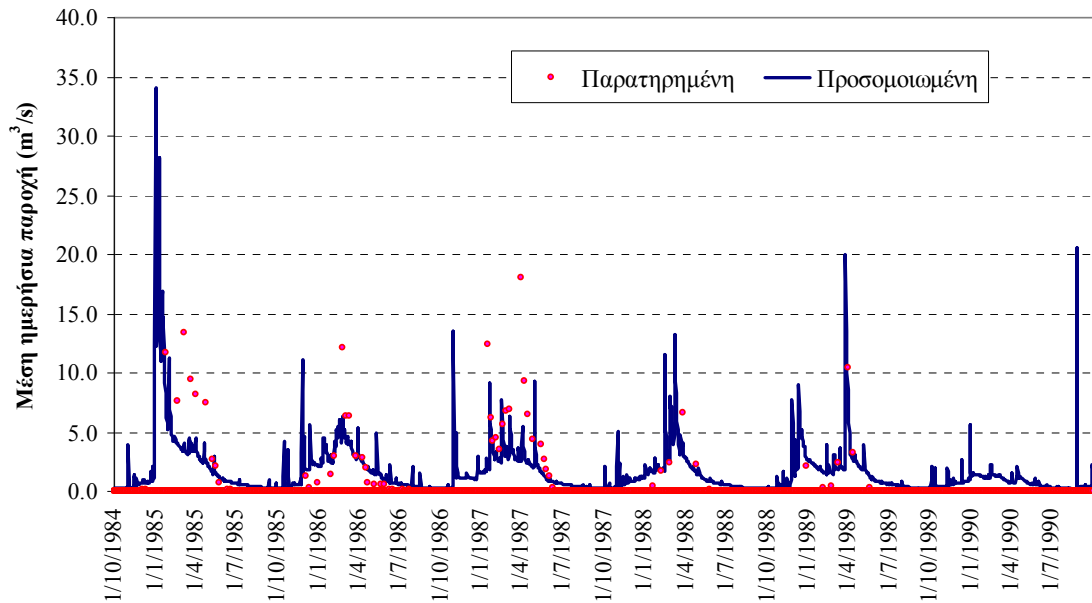
Σχήμα 7.17: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής πηγών Μέλινα.



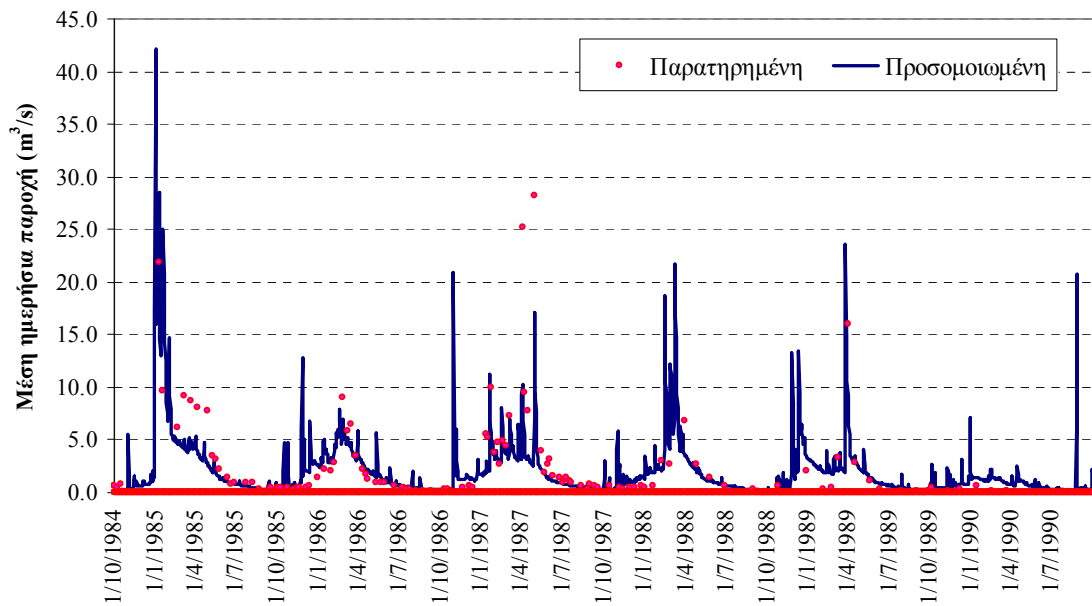
Σχήμα 7.18: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής πηγών Πολυγύρας.



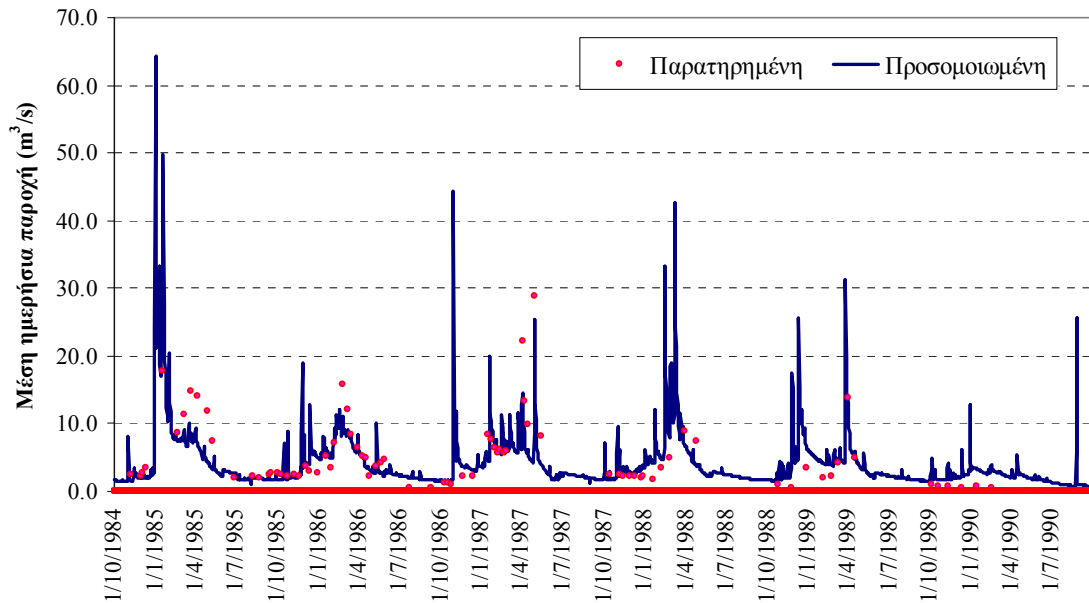
Σχήμα 7.19: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής Βοιωτικού Κηφισού στον κόμβο Αμφίκλειας.



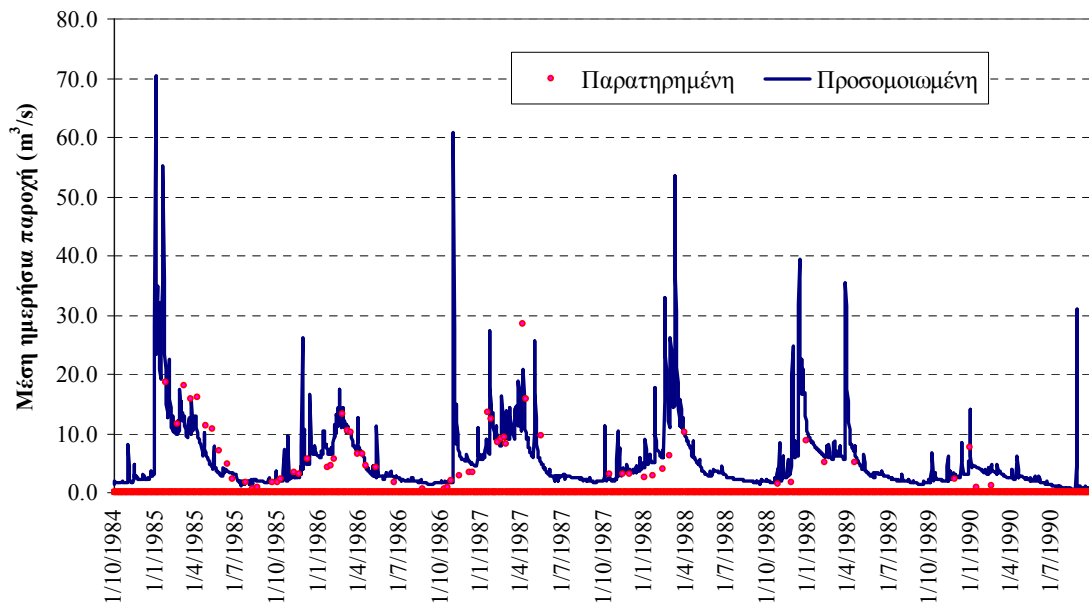
Σχήμα 7.20: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής Βοιωτικού Κηφισού στον κόμβο Τιθορέας.



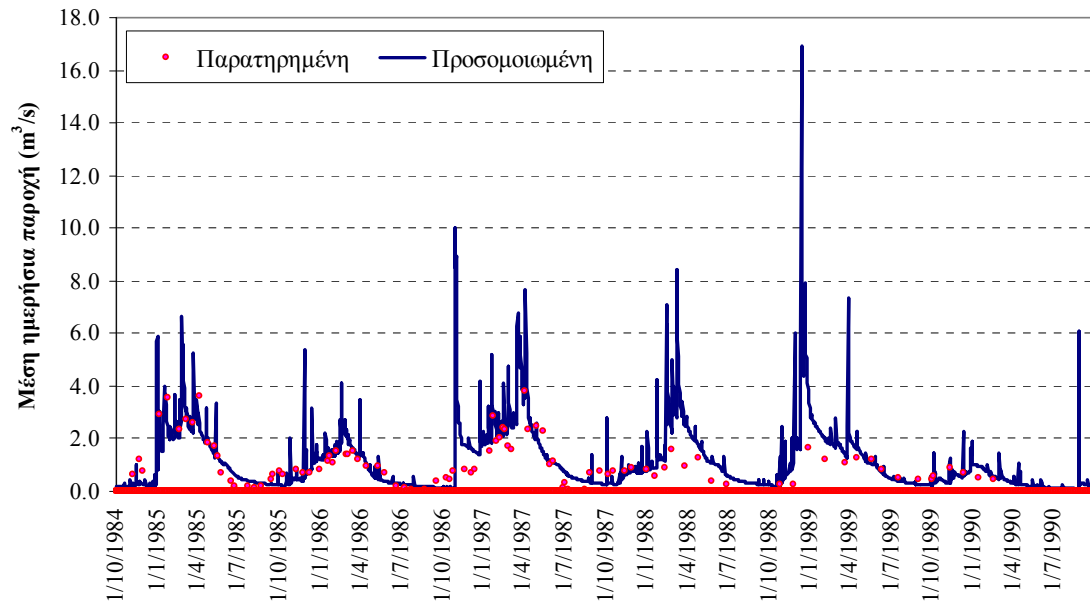
Σχήμα 7.21: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής Βοιωτικού Κηφισού στον κόμβο Ανθοχωρίου.



Σχήμα 7.22: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής Βοιωτικού Κηφισού στον κόμβο Αγίου Βλασίου.



Σχήμα 7.23: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής Βοιωτικού Κηφισού στον κόμβο συμβολής με Έρκυνα.



Σχήμα 7.24: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης ημερήσιας παροχής Βοιωτικού Κηφισού στον κόμβο Λειβαδιάς.

## 7.5 Εφαρμογή του μοντέλου για στοχαστική προσομοίωση

### 7.5.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Οι τιμές των παραμέτρων που εκτιμήθηκαν με τη διαδικασία βαθμονόμησης που περιγράφηκε προηγουμένως, ήτοι με βάση τα δείγματα συστηματικών και μη μετρήσεων παροχής στις 13 θέσεις ελέγχου, θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές των φυσικών μηχανισμών της λεκάνης. Με την παραδοχή αυτή, το μοντέλο εφαρμόστηκε για τη στοχαστική προσομοίωση των πλημμυρικών απορροών της λεκάνης, με χρήση συνθετικών βροχοπτώσεων και για χρονικό ορίζοντα 1000 ετών. Για κάθε μεταβλητή του υδατικού ισοζυγίου του υδροσυστήματος, παρήχθησαν 365 000 προσομοιωμένες τιμές. Προκειμένου να είναι εφικτή η διαχείριση του τεράστιου αυτού όγκου πληροφορίας, διαμορφώθηκαν 10 σενάρια μήκους 100 ετών.

Η προσομοίωση υλοποιήθηκε με δύο διαφορετικές εκδοχές. Στην πρώτη δεν τέθηκαν αρδευτικοί στόχοι στη λεκάνη, δηλαδή το υδροσύστημα θεωρήθηκε αδιατάρακτο. Με τον τρόπο αυτό, εξετάστηκε η απόκριση του φυσικού συστήματος, στην υποθετική περίπτωση που δεν πραγματοποιούνται επιφανειακές και υπόγειες απολήψεις. Στη δεύτερη και πλέον ρεαλιστική εκδοχή, θεωρήθηκαν αρδευτικές χρήσεις, υποθέτοντας σταθερές ανάγκες ίσες με αυτές της περιόδου 1984-1990.

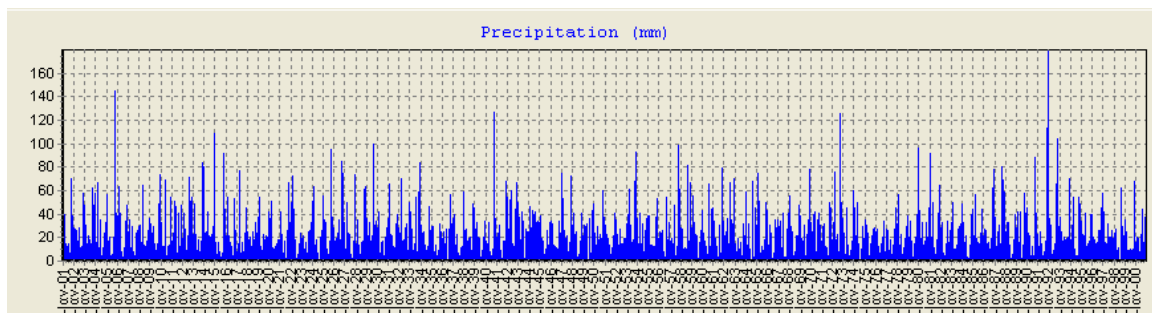
### 7.5.2 Δεδομένα εισόδου

Τα δυναμικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου προσομοίωσης είναι οι χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής των υπολεκανών και οι αρδευτικές ανάγκες. Συγκεκριμένα:

Τα επιφανειακά ύψη βροχής κάθε υπολεκάνης υπολογίστηκαν με χωρική ολοκλήρωση των συνθετικών βροχοπτώσεων, που παρήχθησαν από το ημερήσιο πολυμεταβλητό στοχαστικό μοντέλο, το οποίο αναπαράγει τις χωρικές συσχετίσεις των ιστορικών δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης. Στο Σχήμα 7.25 απεικονίζεται η χρονοσειρά των πρώτων 100 ετών, για την υπολεκάνη Λ0.

Για τις χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής θεωρήθηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές της περιόδου 1984-1990, χωρίς υπερετήσια διακύμανση. Η προσέγγιση αυτή αιτιολογείται λόγω της πολύ μικρής (σε σχέση με τη βροχόπτωση) διασποράς της εξατμοδιαπνοής αλλά και της αμελητέας της επίδρασης στα ισχυρά πλημμυρικά επεισόδια.

Ομοίως, οι ετήσιες αρδευτικές ανάγκες θεωρήθηκαν σταθερές, προκειμένου να ισχύουν οι προϋποθέσεις μιας προσομοίωσης μόνιμης κατάστασης.



Σχήμα 7.25: Συνθετική ημερήσια επιφανειακή βροχόπτωση υπολεκάνης Λ0, για τα προσομοιωμένα έτη 1 ως 100.

### 7.5.3 Αποτελέσματα

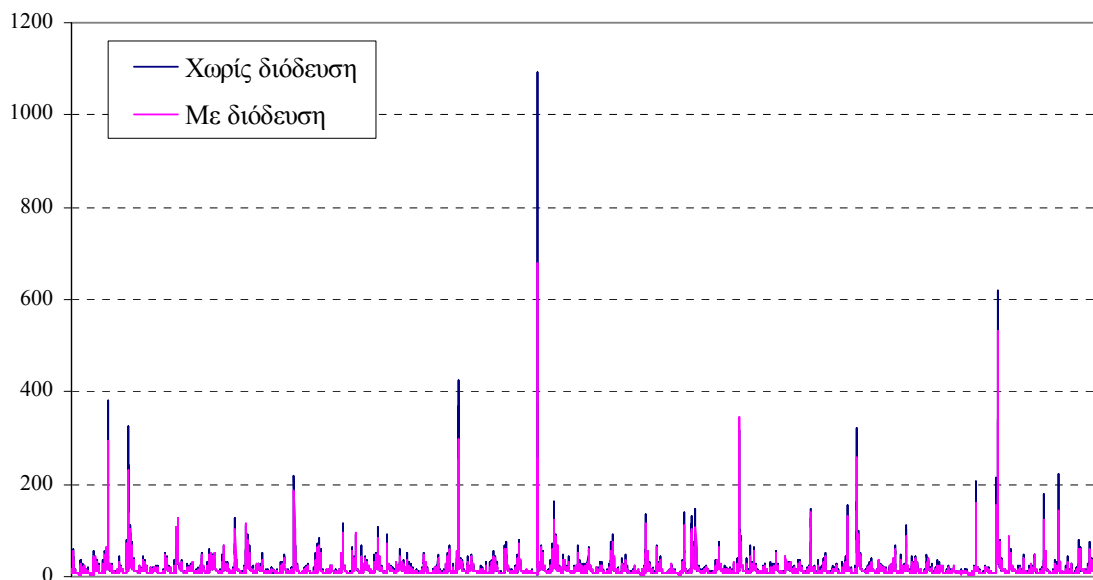
Από τα αποτελέσματα του μοντέλου προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη μακροχρόνια υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης.

Στο Σχήμα 7.26 απεικονίζεται η απόκριση στην έξοδο, με και χωρίς τη θεώρηση μηχανισμών διάδευσης. Είναι φανερό ότι η υδραυλική του υδρογραφικού δικτύου, και κυρίως η ύπαρξη πολύ μικρών κλίσεων στη κατάντη, επιτρέπουν μια σημαντική εξομάλυνση των πλημμυρικών αιχμών, γεγονός που λειτουργεί ανακουφιστικά.

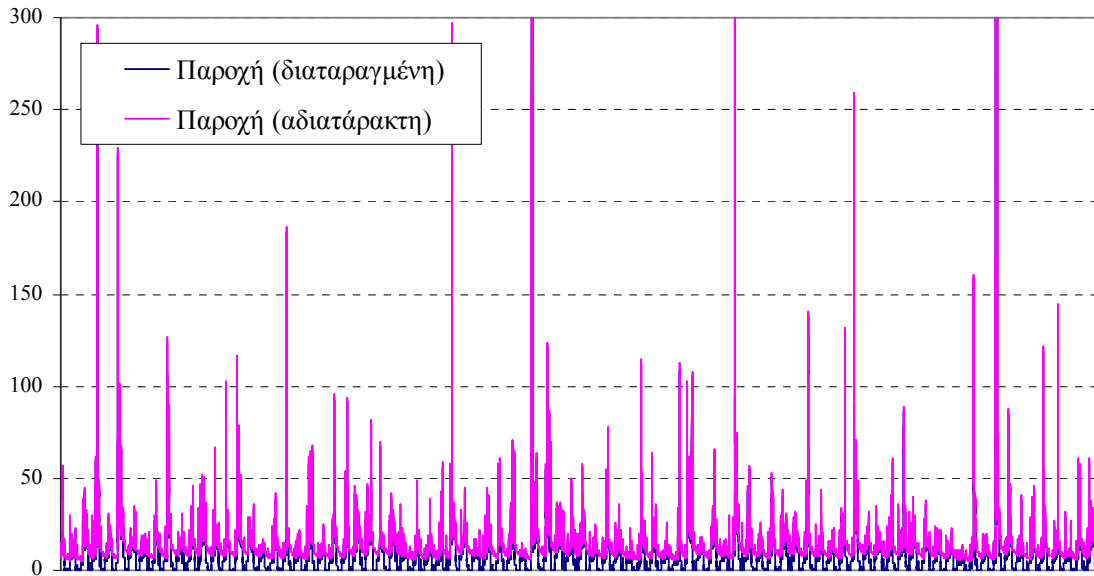
Οι αρδευτικές απολήψεις μειώνουν σημαντικά τις απορροές της λεκάνης, σε ποσοστό της τάξης του 40% (Σχήμα 7.27). Η επίδραση είναι πιο σημαντική στις πηγές Μαυρονερίου, το δυναμικό των οποίων μειώνεται κατά 35%, ενώ 30% είναι η μείωση της μέσης παροχή των πηγών Μέλανα. Αντίθετα, η επίδραση των αντλήσεων στο δυναμικό των πηγών του άνω ρου είναι μικρή, αλλά όχι αμελητέα (-10%).

Τέλος, εντύπωση προκαλεί η έντονη υπερετήσια διακύμανση (εμμονή, φαινόμενο Hurst) του καρστικού υδροφορέα, γεγονός που οφείλεται στη μεγάλη χωρητικότητά του. Η εμμονή φαίνεται ότι αυξάνει περαιτέρω λόγω των αντλήσεων (Σχήμα 7.28).

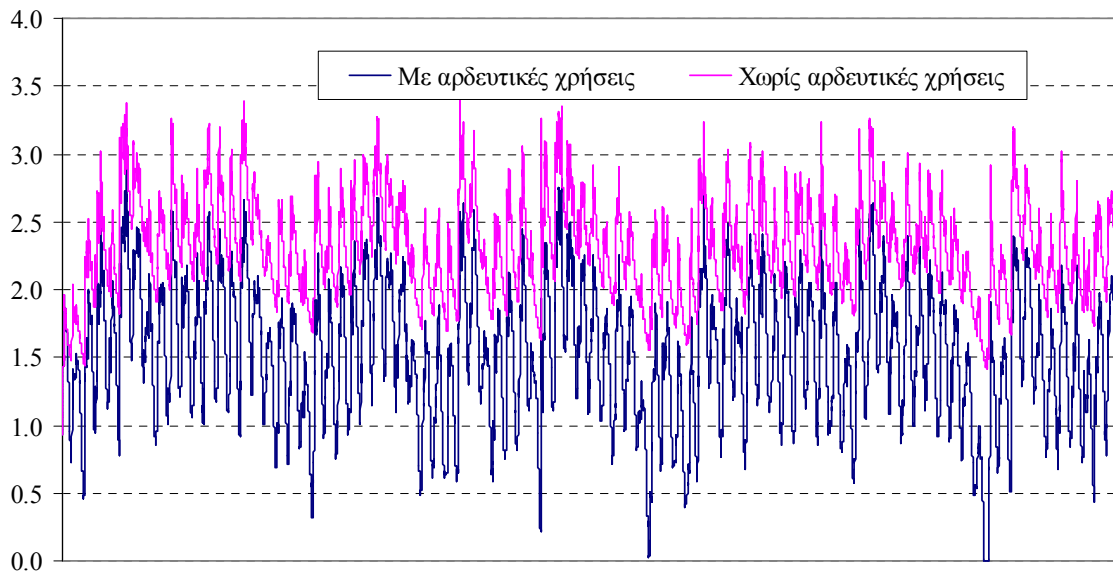
Η λεπτομερής στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων για τις πλημμυρικές απορροές σε τέσσερις χαρακτηριστικές θέσεις της λεκάνης γίνεται στο Κεφάλαιο 8.



Σχήμα 7.26: Συνθετική μέση ημερήσια παροχή Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης, με τη θεώρηση και μη του μοντέλου διόδευσης, για τα προσομοιωμένα έτη 1 ως 100.



Σχήμα 7.27: Συνθετική μέση ημερήσια παροχή Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης, με τη θεώρηση και μη αρδευτικών χρήσεων, για τα προσομοιωμένα έτη 1 ως 100.



Σχήμα 7.28: Συνθετική μέση ημερήσια παροχή πηγών Μαυρονερίου, με τη θεώρηση και μη αρδευτικών χρήσεων, για τα προσομοιωμένα έτη 1 ως 100.



---

## 8 Στατιστική ανάλυση συνθετικών παροχών και εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου

---

### 8.1 Ανάλυση εμπειρικών κατανομών παροχών

Από την εφαρμογή του μοντέλου Υδρόγειος για τη στοχαστική προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της περιοχής μελέτης, ελήφθησαν οι προσομοιωμένες παροχές σε τέσσερις χαρακτηριστικές θέσεις του Βοιωτικού Κηφισού, συγκεκριμένα στην έξοδο του άνω (κόμβος Αμφίκλειας), μέσου (κόμβος Ανθοχωρίου) και κάτω ρου του (κόμβος Αγίου Βλασίου), καθώς και στην έξοδο της λεκάνης (κόμβος Σήραγγας Καρδίτσας). Υπενθυμίζεται ότι οι παροχές αυτές είναι διαταραγμένες, εξαιτίας των αρδευτικών απολήψεων από επιφανειακά και υπόγεια νερά. Προκειμένου να διερευνηθεί η υδρολογική απόκριση της λεκάνης σε πλήρως φυσικές συνθήκες, αναλύθηκε και η χρονοσειρά παροχής εξόδου για το ιδεατό σενάριο μηδενικών χρήσεων νερού.

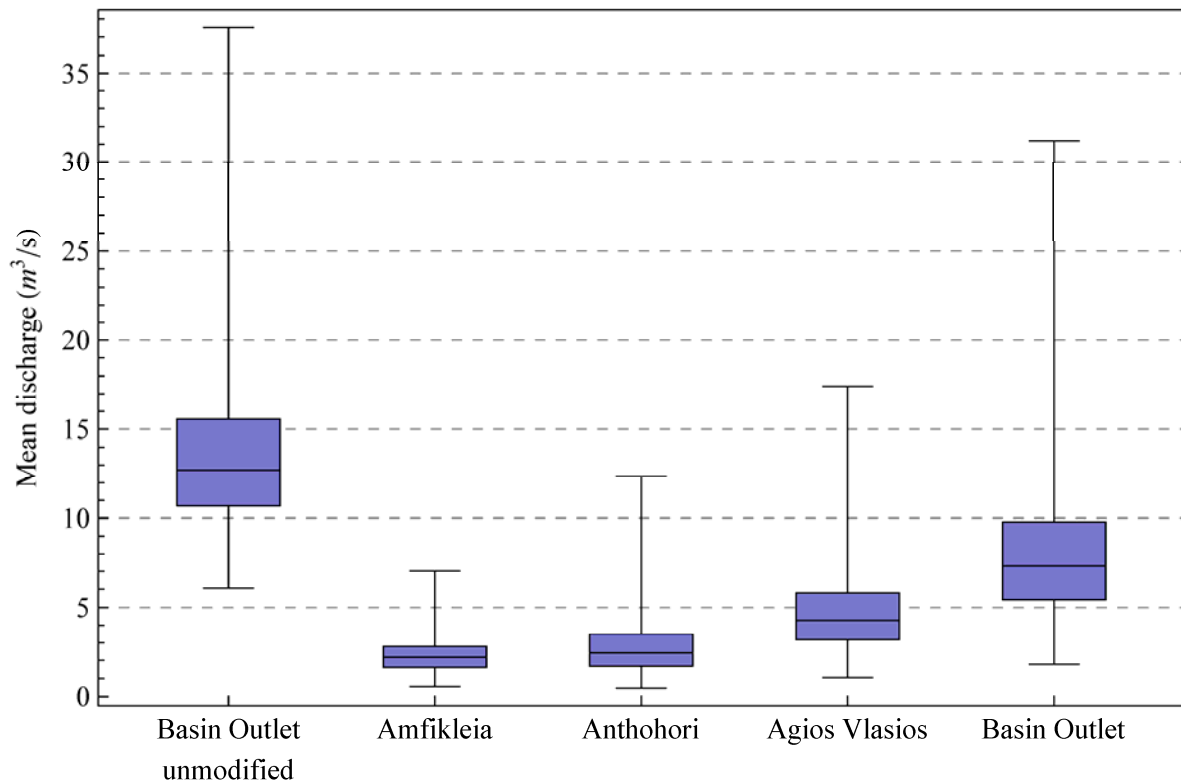
#### 8.1.1 Ετήσιες χρονοσειρές συνθετικών παροχών

Μετά από διαχωρισμό των ημερήσιων τιμών κάθε έτους σε κάθε μια από τις προαναφερθείσες θέσεις και την εκτίμηση της μέσης τιμής ανά έτος, προέκυψαν οι ετήσιες χρονοσειρές συνθετικής παροχής μήκους 1000 ετών. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα Π5.1 του Παραρτήματος Π5, ενώ μια συνοπτική εικόνα της ετήσιας βροχόπτωσης σε κάθε σταθμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1.

Όπως αναμενόταν, η μικρότερη τιμή της μέσης ετήσιας παροχής παρατηρείται στον άνω ρου (κόμβος Αμφίκλειας) και αυξάνεται σταδιακά πηγαίνοντας προς την έξοδο της λεκάνης. Επίσης, εμφανής είναι και η επίδραση των αρδεύσεων καθώς η μέση τιμή στην έξοδο της λεκάνης χωρίς αρδεύσεις είναι κατά 70% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη με αρδεύσεις.

Αν και η μέση ετήσια παροχή προκύπτει ως η μέση τιμή 365 μεταβλητών και σύμφωνα με το κεντρικό οριακό θεώρημα αναμένεται να είναι πολύ κοντά στην κανονική, τα στατιστικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα Π5.1 του Παραρτήματος Π5 δεν επιβεβαιώνουν τη υπόθεση αυτή. Συγκεκριμένα, σε όλες τις θέσεις μελέτης ο συντελεστής ασυμμετρίας ισούται περίπου με 1, ενώ ο συντελεστής κύρτωσης είναι, κατά μέσο όρο,

μεγαλύτερος κατά 85% αυτού της κανονικής. Συμπερασματικά και με βάση τα παραπάνω, η κατανομή της μέσης ετήσιας παροχής, αν και εμφανίζει κωδωνοειδές σχήμα, δεν μπορεί να θεωρηθεί κανονική, η κατανομή Γάμα φαίνεται να αποτελεί καλύτερη επιλογή.



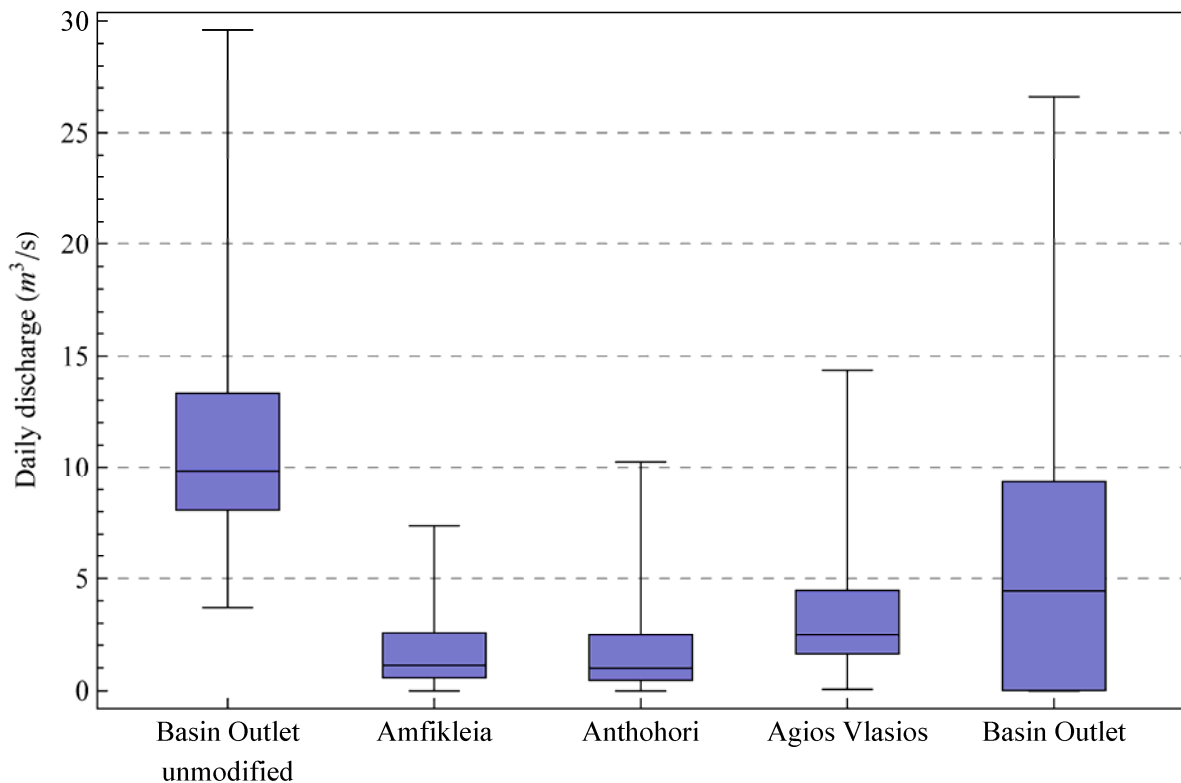
Σχήμα 8.1: Θηκογράμματα μέσης ετήσιας παροχής σε  $m^3/s$ .

### 8.1.2 Ημερήσιες χρονοσειρές συνθετικών παροχών

Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της ημερήσιας συνθετικής παροχής παρουσιάζονται στον Πίνακα Π5.2 του Παραρτήματος Π5, ενώ μια συνοπτική εικόνα για κάθε θέση παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.2. Τονίζεται πως το άνω όριο κάθε θηκογράμματος, για σχεδιαστικούς λόγους, δεν αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή, αλλά στη μέγιστη τιμή του 95% των μικρότερων τιμών, δηλαδή το 5% των μεγαλύτερων τιμών έχουν αποκοπεί.

Το πιο εντυπωσιακό που προκύπτει από τη μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών της μέσης ημερήσιας παροχής, είναι η εξαιρετικά θετικά ασύμμετρη εμπειρική κατανομή η οποία χαρακτηρίζεται από, ίσως δυσανάλογα, ακραίες τιμές. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τη μέγιστη τιμή της παροχής κάθε θέσης, με την αντίστοιχη μέση τιμή, προκύπτει πως η μέγιστη τιμή είναι τουλάχιστον δυο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη. Αυτό και μόνο αποτελεί ισχυρότατη ένδειξη πως η κατανομή της ημερήσιας παροχής είναι τύπου δύναμης, και μάλιστα με συντελεστή ασυμπτωτικής συμπεριφοράς πολύ μικρό.

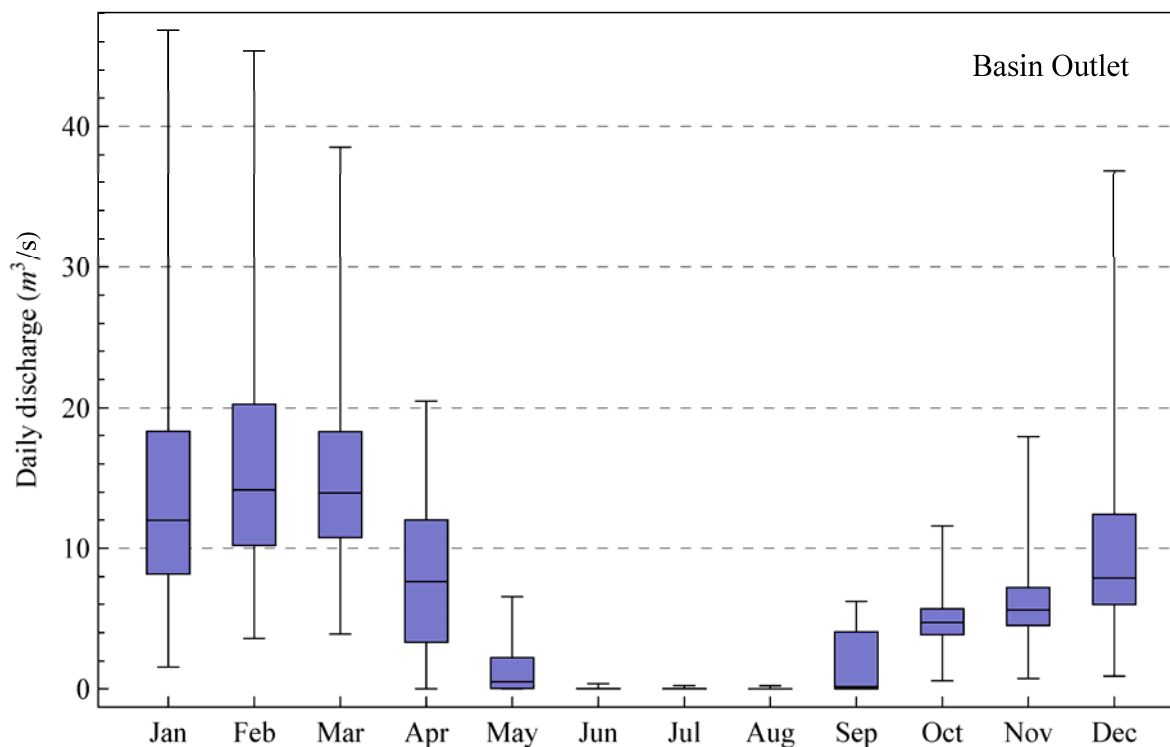
Επίσης, σε τέτοιου είδους δείγματα, οι συντελεστές που βασίζονται στις ανώτερες ροπές όπως ο συντελεστής ασυμμετρίας και κύρτωσης, είναι εξαιρετικά αναξιόπιστοι, π.χ., οι τιμές του συντελεστή κύρτωσης κυμαίνονται από 888 – 3174. Αντιθέτως, οι συντελεστές των L-ροπών μπορούν να δώσουν μια πιο αξιόπιστη εικόνα, για παράδειγμα, οι τιμές των L-συντελεστών ασυμμετρίας κυμαίνονται από 0.45 – 0.59 και οι τιμές των L-συντελεστών κύρτωσης από 0.24 – 0.39, τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές της εκθετικής κατανομής.



Σχήμα 8.2: Θηκογράμματα μέσης ημερήσιας παροχής σε  $m^3/s$ . Το άνω όριο κάθε θηκογράμματος αντιστοιχεί στο σημείο του 95% ποσοστημορίου.

### 8.1.3 Ημερήσιες χρονοσειρές συνθετικών παροχών σε μηνιαία βάση

Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της μέσης ημερήσιας παροχής σε μηνιαία βάση παρουσιάζονται στους πίνακες Π5.3 έως Π5.7 του Παραρτήματος Π5. Μια τυπική εικόνα για την έξοδο της λεκάνης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3, ενώ συνολικά τα θηκογράμματα όλων των θέσεων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Σ3 στα σχήματα Σ3.1 έως Σ3.5.



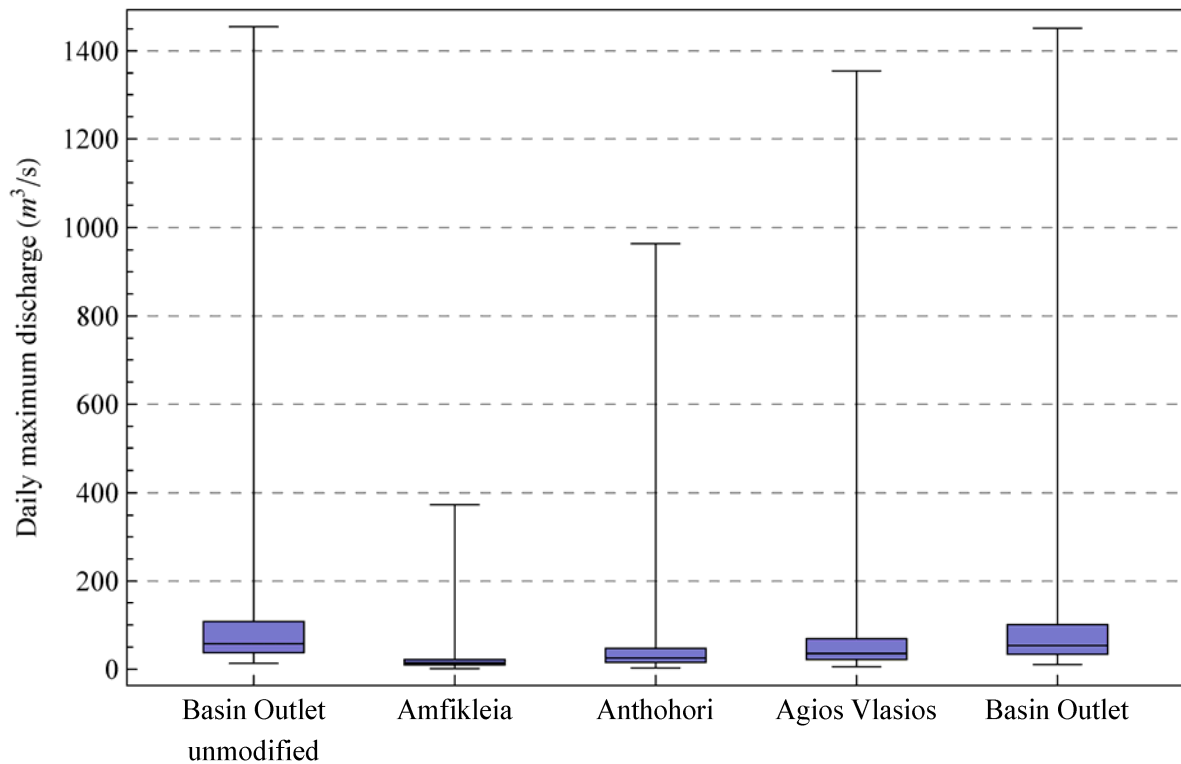
Σχήμα 8.3: Θηκογράμματα μέσης ημερήσιας παροχής σε  $m^3/s$  σε μηνιαία βάση. Το άνω όριο κάθε θηκογράμματος αντιστοιχεί στο σημείο του 95% ποσοστημορίου.

Εκτός της πολύ μεγάλης διαφοροποίησης της παροχής μεταξύ των μηνών, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των πινάκων Π5.3 έως Π5.7 του Παραρτήματος Π5, αποκαλύπτουν και μια μεγάλη διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά του σχήματος της κατανομής. Υπενθυμίζεται πως τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ημερήσιας θετικής βροχόπτωσης ήταν περίπου ίδια μεταξύ των μηνών. Σε αντίθεση, η μέση μηνιαία παροχή εμφανίζει μεγαλύτερους συντελεστές ασυμμετρίας και κύρτωσης κατά του χειμερινούς μήνες, γεγονός που ερμηνεύεται σε μια μεγαλύτερη δυναμική για ακραίες παροχές κατά τους χειμερινούς μήνες, συμπέρασμα που συμβαδίζει με την πραγματικότητα. Φαινομενική εξαίρεση στα παραπάνω αποτελούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σχήματος της κατανομής της μέσης παροχής στην έξοδο της λεκάνης, όπου κατά τους θερινούς μήνες εμφανίζονται μεγαλύτερα. Το γεγονός αυτό εξηγείται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.3 από τις πάρα πολλές τιμές που είναι πολύ κοντά στο μηδέν οι οποίες ανεβάζουν τις τιμές των συντελεστών.

#### 8.1.4 Ημερήσιες χρονοσειρές μεγίστων

Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της μέγιστης συνθετικής ημερήσιας παροχής κάθε θέσδης παρουσιάζονται στον Πίνακα Π5.8 του Παραρτήματος Π5, ενώ μια συνοπτική εικόνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.4.

Είναι φανερό από μελέτη των θηκογραμμάτων στο Σχήμα 8.4 αλλά και από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1, πως η παροχή μπορεί να εμφανίσει εξαιρετικά ακραίες τιμές, συγκριτικά πάντα με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλισή της. Για παράδειγμα, η μέση τιμή της ετήσιας μέγιστης ημερήσιας παροχής στην έξοδο της λεκάνης είναι περίπου ίση με 88 m<sup>3</sup>/s, η τυπική απόκλιση ίση 112 m<sup>3</sup>/s και η μέγιστη προσομοιωμένη τιμή ίση με 1451 m<sup>3</sup>/s, δηλαδή αυξημένη κατά 1500% περίπου σε σχέση με τη μέση τιμή.



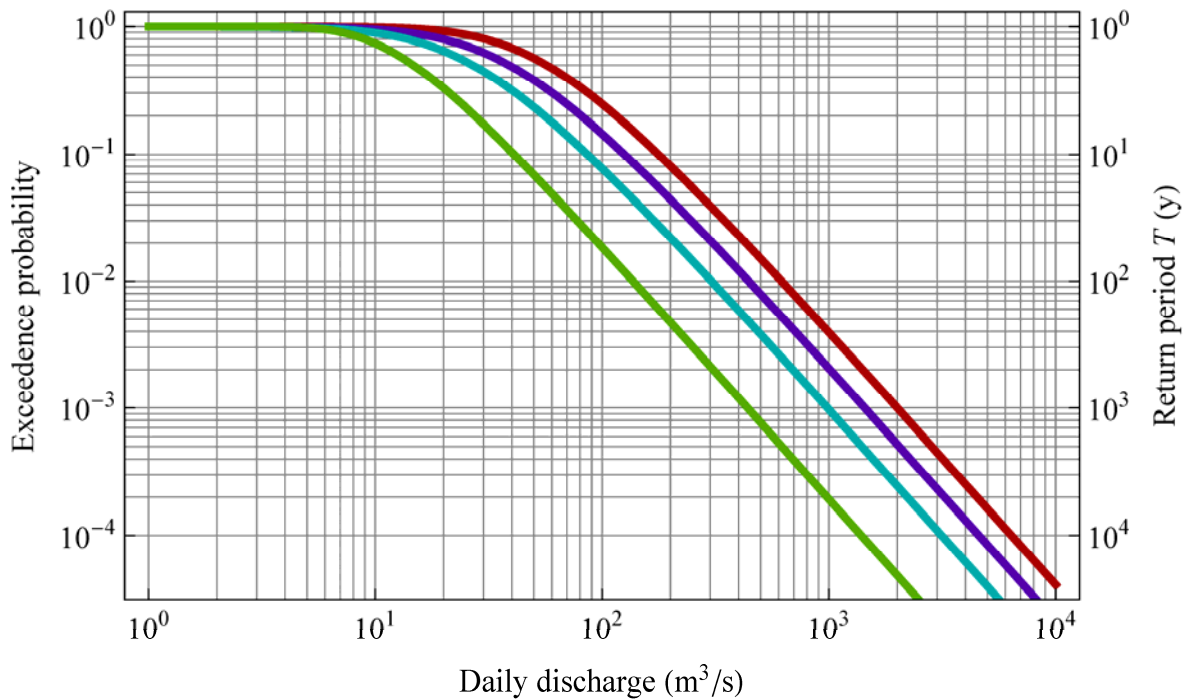
Σχήμα 8.4: Θηκογράμματα ετήσιας μέγιστης ημερήσιας παροχής σε m<sup>3</sup>/s.

Πίνακας 8.1: Οι δέκα πιο ακραίες προσομοιωμένες τιμές παροχής σε m<sup>3</sup>/s.

No.	Έξοδος λεκάνης (αδιατάραχτη)	Αμφίκλειας	Ανθοχωρίου	Αγίου Βλασίου	Έξοδος λεκάνης
1	1454.4	373.4	964.1	1354.8	1451.2
2	1286.8	225.5	864.4	1101.6	1284.5
3	890.3	198.5	655.9	825.4	887.9
4	739.4	192.2	420.3	604.9	737.2
5	699.5	163.8	392.5	519.1	678.4
6	681.0	163.7	389.6	512.8	675.9
7	680.2	160.0	368.9	497.6	630.7
8	633.3	153.0	366.1	497.3	627.1
9	629.9	153.0	359.3	471.9	595.3
10	598.1	147.2	350.1	422.2	591.0

Πίνακας 8.2: Βασικά χαρακτηριστικά γενικής κατανομής ακραίων τιμών GEV.

	Εξίσωση	Αναφορά
Πυκνότητα πιθανότητας	$f_X(x) = \frac{1}{b} \left[ 1 + \frac{c(x-a)}{b} \right]^{-\frac{1}{c}-1} \exp \left\{ - \left[ 1 + \frac{c(x-a)}{b} \right]^{\frac{1}{c}} \right\}$	(8.1)
Συνάρτηση κατανομής	$F_X(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \frac{c(x-a)}{b} \right]^{\frac{1}{c}} \right\}$	(8.2)
Ποσοστημόριο	$Q_X(u) = a - \frac{b}{c} \left[ 1 - (-\ln u)^{-c} \right]$	(8.3)
Περιορισμοί	$b > 0, \text{ αν } c > 0 \Rightarrow a + b/c < x < \infty$	



Σχήμα 8.5: Πιθανοτικό διάγραμμα μέσης ημερήσιας παροχής στην έξοδο της λεκάνης. Οι συμπαγείς γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά, αναπαριστούν τις θεωρητικές κατανομές της παροχής στους κόμβους, Αμφίκλειας, Ανθοχωρίου, Αγίου Βλασίου και στην έξοδο της λεκάνης, αντίστοιχα.

Για την ποσοτικοποίηση του κινδύνου ακραίων πλημμυρικών επεισοδίων και τη σύνδεση των ακραίων τιμών παροχής με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς, έχει προσαρμοστεί η κατανομή GEV στις προσομοιωμένες χρονοσειρές των ετήσιων μεγίστων, τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας δίνονται στον Πίνακα 8.2. Η προσαρμογή πραγματοποιήθηκε με

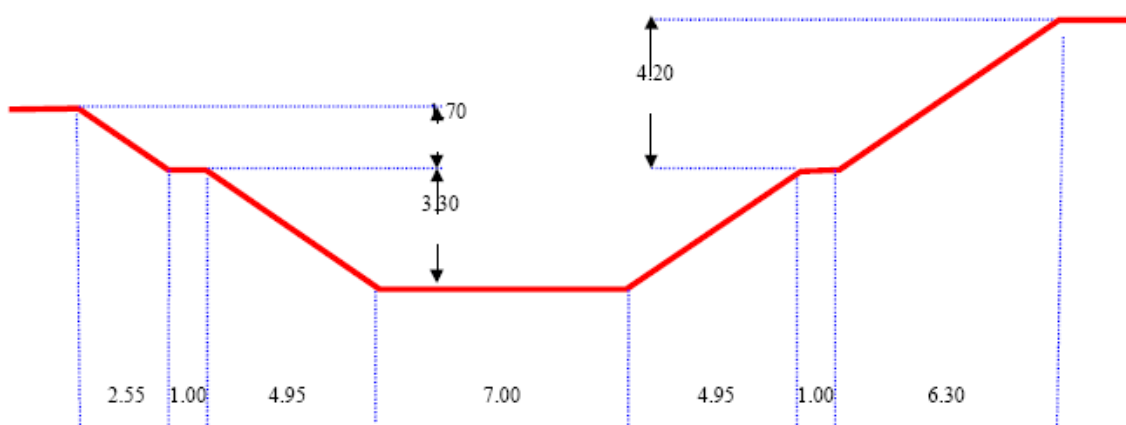
τη μέθοδο των L-ροπών [Hosking, 1990] και είναι πολύ ικανοποιητική όπως αποδεικνύεται από τα σχήματα Σ3.4 έως Σ3.7 του Παραρτήματος Σ3. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι οι εκτιμήσεις της παραμέτρου  $c$  της κατανομής, που σχετίζεται με την ουρά της κατανομής και συνεπώς με τις ακραίες τιμές, κυμανθήκαν από 0.46 έως 0.54, που είναι εξαιρετικά υψηλές. Δεδομένης της αβεβαιότητας της εκτίμησης αυτής της παραμέτρου, τελικά επιλέχθηκε η τιμή  $c = 0.5$  για όλες τις θέσεις.

Στο Σχήμα 8.5 παρουσιάζει ένα λειτουργικό πιθανοτικό γράφημα, όπου παρουσιάζονται οι προσαρμοσμένες κατανομές όλων των θέσεων, έτσι ώστε για να μπορεί να εκτιμηθεί άμεσα η περίοδος επαναφοράς οποιασδήποτε τιμής της παροχής σε οποιαδήποτε θέση.

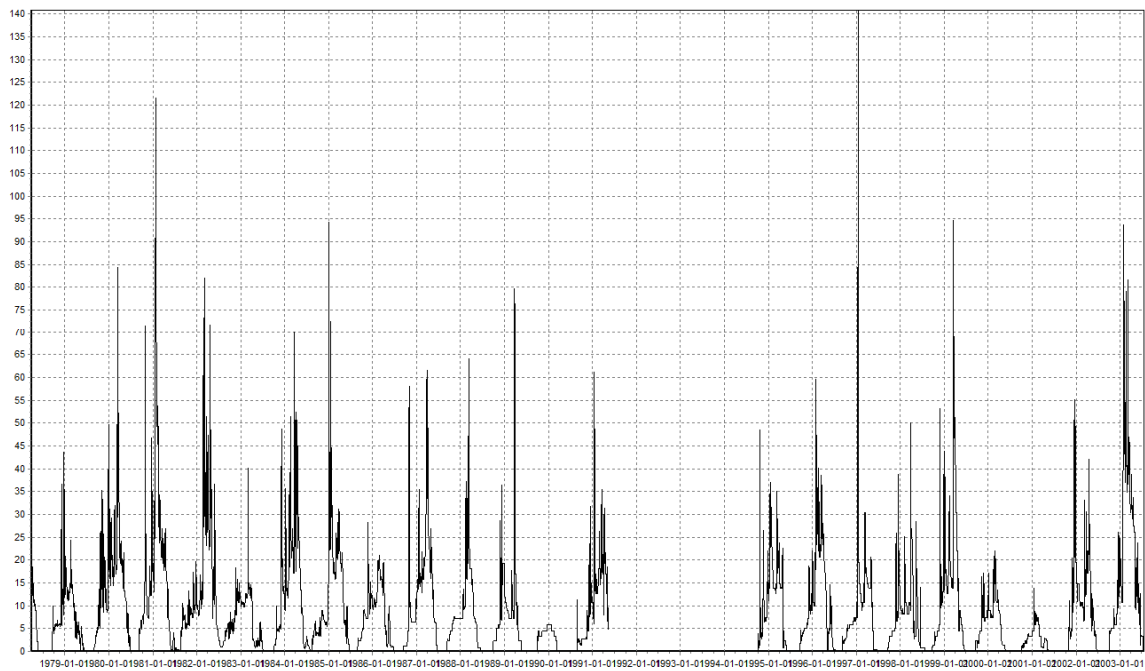
## 8.2 Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου

### 8.2.1 Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών στην έξοδο της λεκάνης

Η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου είναι εφικτή για την έξοδο της λεκάνης (Διώρυγα Καρδίτσας), όπου η διατομή είναι πρισματική (Σχήμα 8.6), οπότε είναι δυνατή η εκτίμηση των χαρακτηριστικών υδραυλικών μεγεθών της. Μάλιστα, στην εν λόγω διατομή διατίθεται δείγμα ημερήσιων παροχών για τις περιόδους 1/4/1978-13/5/1991 και 1/10/1994-17/7/2003, που προέρχεται από παρατηρήσεις στάθμης της ΕΥΔΑΠ και αναγωγή τους σε παροχή, με εφαρμογή της σχέσης ομοιόμορφης ροής του Manning (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004). Η εν λόγω χρονοσειρά απεικονίζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 8.7.



Σχήμα 8.6: Σκαρίφημα διατομής Διώρυγας Καρδίτσας, στην έξοδο της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού (Πηγή: Μαμάσης και Γαβριηλίδης, 2000).



Σχήμα 8.7: Χρονοσειρά ημερήσιων παροχών στη Διώρυγα Καρδίτσας για τις περιόδους 1/4/1978-13/5/1991 και 1/10/1994-17/7/2003.

Από την ανάλυση του δείγματος ημερήσιων παροχών προκύπτει ότι η μέγιστη ιστορική τιμή την παροχής ανέρχεται σε  $145 \text{ m}^3/\text{s}$ , όπως καταγράφηκε στις 14/1/1997 (την επόμενη ημέρα καταγράφηκε ελαφρά χαμηλότερη τιμή,  $137 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Με βάση την κατανομή του Σχήματος 8.5, το ιστορικό υψηλό αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς περίπου 10 ετών, ενώ το ιστορικό δείγμα έχει μήκος 24 έτη. Όσον αφορά στην παροχευτικότητα της Διώρυγας Καρδίτσας, αυτή εκτιμάται σε  $315 \text{ m}^3/\text{s}$ , σύμφωνα με την αναθεωρημένη προσέγγιση των Μαμάση και Γαβριηλίδη (2000). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς περίπου 40 έτη, η οποία αντιστοιχεί θεωρητικά στο επίπεδο του πλημμυρικού κινδύνου της λεκάνης, στην ημερήσια χρονική κλίμακα (βεβαίως, η αιχμή του πλημμυρογραφήματος εντός της ημέρας αναμένεται να είναι μεγαλύτερη). Το συγκεκριμένο επίπεδο ασφαλείας κρίνεται επαρκές, λαμβάνοντας υπόψη ότι στην περιοχή αναπτύσσονται αρδευτικές, αποκλειστικά, χρήσεις, και δεν υπάρχουν οικισμοί κοντά. Συνεπώς, είναι εύλογο να δεχτεί κανείς ότι ένα τμήμα της Κωπαΐδας θα πλημμυρίζει με αρκετά υψηλή συχνότητα, κάτι που εξάλλου έχει παρατηρηθεί αρκετές φορές στο παρελθόν (π.χ. με πλέον πρόσφατο το 2002).

Συγκρίνοντας την εμπειρική κατανομή από το δείγμα ετήσιων μεγίστων παροχών στην έξοδο της λεκάνης με τη θεωρητική κατανομή που απεικονίζεται στο Σχήμα 8.5 (δεξιά καμπύλη), φαίνεται να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις. Τα στοιχεία αυτά υποδηλώνουν ότι είτε το



δείγμα είναι μη αντιπροσωπευτικό της δίαιτας των πλημμυρικών παροχών είτε ότι το μοντέλο δεν είναι ικανοποιητικά συμβατό με τα ιστορικά ακραία γεγονότα της λεκάνης, με συνέπεια οι συνθετικές χρονοσειρές να υπερεκτιμούν τα μεγάλα πλημμυρικά γεγονότα, με συνέπεια να αποδίδεται μικρότερη περίοδος επαναφοράς από την αναμενομένη. Σε κάθε περίπτωση, το περιορισμένο ιστορικό δείγμα παροχών που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μετρήσεις παροχής προέρχονται από στιγμιαίες παρατηρήσεις στάθμης, ενώ το μοντέλο παράγει μέσες ημερήσιες παροχές, εισάγουν μεγάλη αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία των εκτιμήσεων θα ήταν επιθυμητή η αναθεώρηση του πλαισίου βαθμονόμησης του μοντέλου, χρησιμοποιώντας πολύ μεγαλύτερο δείγμα παροχών – διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα που δεν ήταν δυνατό να υλοποιηθεί στα πλαίσια αυτής της έρευνας. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή, η μοναδική θέση ελέγχου θα ήταν η έξοδος της λεκάνης, ενώ για τις υπόλοιπες αποκρίσεις του μοντέλου δεν θα υπήρχε κανένας έλεγχος. Τέλος, για την ακριβέστερη αποτύπωση του κινδύνου και της χωρικής κατανομής του απαιτούνται λεπτομερή δεδομένα γεωμετρίας διατομών και άλλα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου, κάτι που ξεφεύγει από τους σκοπούς αλλά και τις δυνατότητες μιας ακαδημαϊκής έρευνας.

### 8.2.2 Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών στις λοιπές θέσεις ελέγχου

Για τις υπόλοιπες τρεις θέσεις ελέγχου, οι οποίες ταυτίζονται ή βρίσκονται κοντά στην έξοδο των τριών υδρογεωλογικών ενοτήτων της λεκάνης (άνω, μέσος και κάτω ρους), συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της παρούσας προσέγγισης με τις εκτιμήσεις της αντιπλημμυρικής μελέτης του Κωνσταντινίδη (1985), όπου δίνονται οι παροχές αιχμής για διάρκεια βροχής 24 και 48 h και περιόδους επαναφοράς 50 και 100 έτη (Πίνακας 8.3). Συγκρίνοντας τις παροχές αιχμής με τις μέσες ημερήσιες παροχές της παρούσας προσέγγισης, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 8.4, προκύπτει ότι τα μεγέθη, αν και δεν αναφέρονται ακριβώς στις ίδιες διατομές και στην ίδια χρονική περίοδο, είναι εύλογα.

Πίνακας 8.3: Πλημμυρικές αιχμές (σε  $m^3/s$ ) σε χαρακτηριστικές θέσεις ελέγχου της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, για διάφορες διάρκειες βροχής  $d$  (σε h) και περιόδους επαναφοράς  $T$  (σε έτη), σύμφωνα με τη μελέτη του Κωνσταντινίδη (1985).

Υπολεκάνη	Ανάτη Αμφίκλειας	Ανάτη Κινέτας	Ανάτη φράγματος BOOT
$d = 48 \text{ h}, T = 100 \text{ έτη}$	505	576	741
$d = 48 \text{ h}, T = 50 \text{ έτη}$	427	491	636
$d = 24 \text{ h}, T = 100 \text{ έτη}$	392	474	587

Πίνακας 8.4: Μέση ημερήσια παροχή (σε m<sup>3</sup>/s) στις θέσεις ελέγχου του υδρολογικού μοντέλου, για περιόδους επαναφοράς 50 και 100 έτη, σύμφωνα με την παρούσα προσέγγιση.

Υπολεκάνη	Αμφίκλεια	Ανθοχώρι	Άγιος Βλάσιος
T = 100 έτη	141	333	443
T = 50 έτη	99	231	307

---

## 9 Συμπεράσματα

---

Όπως έχει αναφερθεί στην Εισαγωγή, οι στόχοι του παρόντος ερευνητικού έργου, όπως περιγράφονται στην πρόταση, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε ενότητες.

### **Ενότητα 1:** Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων (Κεφάλαιο 3)

Ο βασικός στόχος αυτής της ενότητας ήταν να συλλεχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πληροφορία, βροχομετρική και υδρομετρική, για την υπό μελέτη περιοχή, ήτοι τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.

Προς αυτή την κατεύθυνση, συγκεντρώσαμε όλα τα διαθέσιμα ψηφιακά αρχεία ημερήσιας βροχοπτώσης τα οποία επικαιροποιήσαμε, μετά από αποδελτίωση των αναλογικών αρχείων, μέχρι και τις 31/12/2006. Στα πρωτογενή αυτά δεδομένα πραγματοποιήθηκε ενδελεχής έλεγχος και εντοπίστηκαν αρκετά σφάλματα, τα οποία και διορθώσαμε. Επιπλέον, οι διαθέσιμες χρονοσειρές περιείχαν αρκετά κενά, τα οποία συμπληρώσαμε με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τέλος, ενοποιήσαμε όλες τις διαθέσιμες διορθωμένες και συμπληρωμένες χρονοσειρές σε ένα εύχρηστο ψηφιακό αρχείο, ώστε να μπορούν να εύκολα διαχειρίσιμες.

Επειδή η εκτίμηση των παροχών έγινε με χρήση υδρολογικού μοντέλου, εκτός από τις ιστορικές βροχοπτώσεις, στις πληροφορίες που συλλέχτηκαν περιλαμβάνεται ένα μεγάλο πλήθος γεωγραφικών, υδρομετεωρολογικών και διαχειριστικών δεδομένων που απαιτήθηκαν αρχικά για την βαθμονόμηση του μοντέλου και ακολούθως για τη στοχαστική προσομοίωση των διεργασιών της λεκάνης.

### **Ενότητα 2:** Στατιστική και στοχαστική ανάλυση ημερήσιων βροχοπτώσεων (Κεφάλαια 4-6)

Η ενότητα αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρεις υποενότητες, όσα δηλαδή και τα κεφάλαια στα οποία αναλύεται.

Στην πρώτη υποενότητα (Κεφάλαιο 4) πραγματοποιήθηκε λεπτομερής στατιστική ανάλυση των ιστορικών χρονοσειρών. Από την ανάλυση αυτή προέκυψαν τα εξής σημαντικά συμπεράσματα: (α) η συνάρτηση κατανομής της θετικής (μη μηδενικής) ημερήσιας

βροχόπτωσης προκύπτει να είναι τύπου δύναμης με εκθέτη ασυμπτωτικής συμπεριφοράς που κυμαίνεται από 0.1- 0.15, γεγονός που υποδεικνύει πως ακραία επεισόδια βροχόπτωσης είναι πολύ πιο πιθανά από ότι θα προέβλεπε ένα εκθετικό μοντέλο συνάρτησης κατανομής, και (β) φαίνεται πως η συνάρτηση κατανομής της θετικής ημερήσιας βροχόπτωσης είναι περίπου ίδια για όλους τους μήνες, ενώ ακόμη και στην περίπτωση που διαφοροποιείται μεταξύ των μηνών, η διαφοροποίηση εντοπίζεται στην κλίμακα και όχι στο σχήμα της κατανομής. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι υποδεικνύει πως ίσως είναι εφικτή η υιοθέτηση μιας και μόνο κατανομής για όλους τους μήνες και όλους τους σταθμούς, με κοινά χαρακτηριστικά. Αυτό λοιπόν που προκύπτει πως διαφοροποιεί την βροχόπτωση μεταξύ των μηνών είναι η πιθανότητα στεγνής ημέρας, η οποία προφανώς είναι πολύ μεγαλύτερη κατά τους θερινούς μήνες.

Στην δεύτερη υποενότητα (Κεφάλαιο 5), παρουσιάζεται το στοχαστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της ημερήσιας βροχόπτωσης. Είναι φανερό πως η ταυτόχρονη προσομοίωση της βροχόπτωσης σε 13 θέσεις, λαμβάνοντας υπόψη και τη μηνιαία διαφοροποίηση, αποτελεί ένα εξαιρετικά δύσκολο εγχείρημα, που αποτελεί σημαντική συμβολή της παρούσας έρευνας. Επίσης, η βιβλιογραφία σχετικά με την προσομοίωση της βροχόπτωσης αποκαλύπτει πως η κύρια τακτική που ακολουθείται είναι στο πρώτο στάδιο η προσομοίωση των στεγνών και βροχερών ημερών και στο δεύτερο στάδιο και η προσομοίωση της βροχόπτωσης κατά τις ημέρες που βρέχει. Στη παρούσα έρευνα, αναπτύξαμε ένα διαφορετικό τρόπο μοντελοποίησης της βροχόπτωσης, εισάγοντας ένα μετασχηματισμό κανονικοποίησης που οδηγεί σε κατανομές τύπου δύναμης παρόμοιες με τις εμπειρικές κατανομές που διαπιστώθηκαν κατά την ανάλυση των ιστορικών χρονοσειρών. Το αποτέλεσμα ήταν η εξαιρετικά ακριβής προσομοίωση όσον αφορά τη συνάρτηση κατανομής κάθε σταθμού για κάθε μήνα αλλά όσο και τη δομή των αυτοσυσχετίσεων και ετεροσυσχετίσεων.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 6, όπου και διαπιστώθηκε η ακρίβεια της μοντελοποίησης σε σχέση με τις ιστορικές χρονοσειρές. Επιπλέον, ένα σημαντικό συμπέρασμα, το οποίο δεν ήταν δυνατό να εξαχθεί με βεβαιότητα από τη μελέτη των ιστορικών χρονοσειρών, είναι πως η κατανομή της μέγιστης ημερησίας βροχόπτωσης ακολουθεί την Γενική κατανομή Ακραίων τιμών GEV με παράμετρο σχήματος ίση με 0.15 και όχι την κατανομή Gumbel, που είναι και το σύνηθες μοντέλο. Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ σημαντικό διότι η κατανομή GEV προβλέπει για την ίδια περίοδο επαναφοράς πολύ πιο ακραία γεγονότα έναντι της Gumbel, με προφανείς συνέπειες στον υδρολογικό σχεδιασμό.

### **Ενότητα 3:** Βελτίωση και προσαρμογή υδρολογικού μοντέλου (Κεφάλαιο 7)

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας, τα οποία οφείλονται στη συνθετότητα των φυσικών διεργασιών (αλληλεπιδράσεις επιφανειακών και υπόγειων νερών, μεγάλη συνεισφορά της βασικής ροής στο υδατικό ισοζύγιο, ταχεία απόκριση πηγών, εκτενείς και μη μετρούμενες απώλειες λόγω διαφυγών), σε συνδυασμό με τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις στη λεκάνη (συνδυασμένες απολήψεις επιφανειακών και υπόγειων νερών, που διαταράσσουν σημαντικά την υδρολογική δίαιτα). Κατά συνέπεια, για την αναπαράσταση των διεργασιών απαιτήθηκε μια ολιστική προσέγγιση, η οποία βασίστηκε στη χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί εξ ολοκλήρου στο ΕΜΠ, ενώ ορισμένες πτυχές του υλοποιήθηκαν ή δοκιμάστηκαν για πρώτη φορά στα πλαίσια του παρόντος έργου, όπως η εφαρμογή του σε ημερήσια κλίμακα για την στοχαστική πρόγνωση των παροχών.

Σε προηγούμενες εργασίες, το μοντέλο έχει εφαρμοστεί πιλοτικά στην περιοχή μελέτης για τη μηνιαία προσομοίωση του υδροσυστήματος, υιοθετώντας μια αρκετά αδρομερή χωρική ανάλυση των διεργασιών. Για τη μετάβαση στην ημερήσια χρονική κλίμακα απαιτήθηκε μια πιο λεπτομερής σχηματοποίηση, με διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης σε 15 υπολεκάνες, τη διαμέριση του υδροφορέα σε περίπου 40 κύτταρα και την αναλυτικότερη περιγραφή των υδατικών χρήσεων και των τεχνικών έργων, μέσω ενός εννοιολογικού συστήματος κόμβων και υδραγωγείων (πραγματικών και εικονικών). Η κατασκευή των αναγκαίων επιπέδων χωρικής πληροφορίας και ο υπολογισμός των λοιπών δεδομένων εισόδου του μοντέλου έγινε με την υποστήριξη της τελευταίας έκδοσης του λογισμικού, που μεταξύ άλλων ενσωματώνει λειτουργίες συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας.

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι παράμετροι του μοντέλου, οι οποίες περιγράφουν τη δίαιτα των επιφανειακών και υπόγειων νερών της λεκάνης, επιλέχθηκε η περίοδος 1/10/1984-30/9/1990 για την οποία υπάρχει πυκνή υδρομετρική πληροφορία (μετρήσεις παροχών κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και κατάντη των κύριων καρστικών πηγών). Συγκεκριμένα, ο έλεγχος της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου έγινε σε 13 θέσεις ταυτόχρονα, με συνδυασμένη αξιοποίηση εξελιγμένων εργαλείων βελτιστοποίησης και της υδρολογικής εμπειρίας. Δεδομένης της δυσκολίας του προβλήματος, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης κρίνεται ικανοποιητικά, ειδικά ως προς την αναπαραγωγή των επιφανειακών απορροών.

Για τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου, και με είσοδο τις συνθετικές ημερήσιες βροχοπτώσεις μήκους 1000 ετών, επιχειρήθηκε η στοχαστική προσομοίωση του

υδροσυστήματος, με σκοπό την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών μέσης ημερήσιας παροχής σε χαρακτηριστικούς κόμβους του Βοιωτικού Κηφισού. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα που εξηγούν την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης σε μακροχρόνια κλίμακα, όπως η μεγέθυνση της υπερετήσιας αβεβαιότητας (φαινόμενο εμμονής), κυρίως λόγω της ύπαρξης ενός υδροφορέα μεγάλης αποθηκευτικότητας. Ακόμη, αγνοώντας τις αρδευτικές χρήσεις, μελετήθηκε η ιδεατή απόκριση της λεκάνης σε αδιατάρακτες συνθήκες.

#### **Ενότητα 4:** Εκτίμηση κατωφλίων απορροής (Κεφάλαιο 7)

Στην αρχική πρόταση προβλεπόταν ότι για την εκτίμηση και πρόγνωση του πλημμυρικού κινδύνου θα εφαρμοζόταν η μεθοδολογία των κατωφλίων απορροής, που έχει αναπτυχθεί στο Κέντρο Υδρολογικών Ερευνών του Σαν Ντιέγκο. Το προτεινόμενο πλαίσιο προέβλεπε τη χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ μόνο ως ενδιάμεσο εργαλείο, προκειμένου να εκτιμηθεί η χωροχρονική κατανομή της εδαφικής υγρασίας. Με γνωστή την εν λόγω κατανομή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατομών του ποταμού, θα ήταν δυνατή η εκτίμηση της κρίσιμης έντασης βροχής που προκαλεί πλημμύρα στη λεκάνη.

Ωστόσο, επειδή δεν κατέστη δυνατή η μετάβαση στο ερευνητικό κέντρο (για λόγους μη επιστημονικούς), εφαρμόστηκε μια διαφορετική προσέγγιση, που ικανοποιεί τους στόχους του έργου με ρεαλιστικό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη έλλειψη βροχομετρικών δεδομένων λεπτής χρονικής ανάλυσης αλλά και στοιχείων υδραυλικής, που απαιτούνται για την εκτίμηση των κατωφλίων απορροής. Συγκεκριμένα, το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ εφαρμόστηκε σε όλα τα στάδια της μοντελοποίησης, αναπαριστώντας την πλήρη χωροχρονική δίαιτα των ημερήσιων απορροών της λεκάνης, με χρήση μάλιστα των ελάχιστων διαθέσιμων δεδομένων. Επισημαίνεται ότι όταν είχε υποβληθεί η πρόταση, το μοντέλο βρισκόταν σε πρωτόλειο στάδιο ανάπτυξης, και δεν είχε τη δυνατότητα εφαρμογής ημερήσιου χρονικού βήματος, καθώς και περιγραφής των διεργασιών διόδευσης.

#### **Ενότητα 5:** Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου (Κεφάλαιο 8)

Μετά από την ανάλυση των συνθετικών χρονοσειρών, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα: (α) η κατανομή της μέσης ημερησίας παροχής εμφανίζει εξαιρετικά ακραίες τιμές σε σχέση με τη μέση τιμή της σε κάθε κόμβο που μελετήθηκε. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει πως και η κατανομή της παροχής είναι τύπου δύναμης, και μάλιστα με εκθέτη ασυμπτωτικής συμπεριφοράς έντονα θετικό περίπου ίσο με 0.5 και (β) η κατανομή της μέγιστης ημερησίας παροχής, που είναι και η μεταβλητή που ενδιαφέρει περισσότερο όσον αφορά τα πλημμυρικά

γεγονότα, είναι η Γενική Ακραίων Τιμών με παράμετρο σχήματος ίσο με 0.5, γεγονός που υποδεικνύει την δυνατότητα εμφάνισης εξαιρετικά ακραίων απορροών. Τέλος, οι θεωρητικές κατανομές της μέγιστης ημερήσιας παροχής στους τέσσερις κόμβους που μελετήθηκαν, παρουσιάζονται σε ένα ενιαίο γράφημα που σχετίζει την απορροή με την περίοδο επαναφοράς ώστε να είναι εφικτή η άμεση εκτίμηση της παροχής σε κάθε κόμβο και για οποιαδήποτε περίοδο επαναφοράς.

Στην έξοδο της λεκάνης, όπου είναι γνωστή η παροχεταιτικότητα της διατομής, έγινε μια προσεγγιστική εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, καθώς εκτιμήθηκε ότι η πιθανότητα υπέρβασης της εν λόγω προχεταιτικότητας αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 40 ετών. Στις υπόλοιπες θέσεις, συγκρίθηκαν οι παροχές αιχμής της μελέτης πλημμυρών του Κωνσταντινίδη (1985) με τις μέσες ημερήσιες παροχές που προκύπτουν βάσει του δείγματος που υπολογίστηκε μέσω προσομοίωσης, για περιόδους επαναφοράς 50 και 100 ετών, απ' όπου προκύπτει ότι οι εκτιμήσεις του προτεινόμενου στοχαστικού πλαισίου είναι ρεαλιστικές.

---

## 10 Αναφορές

---

- Beran, J. (1992), Statistical methods for data with long-range dependence, *Statistical Science*, 7(4), 404–416.
- Bras, R. L., and I. Rodriguez-Iturbe (1993), *Random functions and hydrology*, Dover Pubns.
- Cohn, T. A., W. L. Lane, and W. G. Baier (1997), An algorithm for computing moments-based flood quantile estimates when historical flood information is available, *Water Resources Research*, 33(9), 2089–2096.
- Cox, D. R. (1984), Long-range dependence: A review, *Statistics: An Appraisal*, 55–74.
- Efstratiadis, A., A. Mazi, A. D. Koussis, and D. Koutsoyiannis, Flood modelling in complex hydrologic systems with sparsely resolved data, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, Vienna, 4157, European Geosciences Union, 2009.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems, *Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, 1423–1428, International Water Association, 2002.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, Fitting hydrological models on multiple responses using the multiobjective evolutionary annealing simplex approach, *Practical hydroinformatics: Computational intelligence and technological developments in water applications*, edited by R.J. Abraham, L. M. See, and D. P. Solomatine, 259–273, Springer, 2008.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, One decade of multiobjective calibration approaches in hydrological modelling: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 2010 (in press).
- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urban Water Journal*, 1(1), 3-15, 2004.
- Efstratiadis, A., E. Rozos, A. Koukouvinos, I. Nalbantis, G. Karavokiros, and D. Koutsoyiannis, An integrated model for conjunctive simulation of hydrological processes and water resources management in river basins, *European Geosciences Union General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Vienna, 03560, European Geosciences Union, 2005.
- Efstratiadis, A., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, HYDROGEIOS: A semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 989-1006, 2008.
- Fraedrich, K., and C. Larnder (1993), Scaling regimes of composite rainfall time series, *Tellus A*, 45(4), 289–298.
- Hosking, J. R. M. (1990), L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 105–124.
- Koutsoyiannis, D. (2004a), Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 1, Theoretical investigation, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 575-590.



- Koutsoyiannis, D. (2004b), Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 2, Empirical investigation of long rainfall records, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 591-610.
- Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, and A. Christofides, A decision support system for the management of the water resource system of Athens, *Physics and Chemistry of the Earth*, 28 (14-15), 599-609, 2003.
- Kroll, C. N., and R. M. Vogel (2002), Probability distribution of low streamflow series in the United States, *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(2), 137-146.
- Ledolter, J. (1978), The analysis of multivariate time series applied to problems in hydrology, *Journal of Hydrology*, 36(3-4), 327-352.
- Lim, Y. H., and L. M. Lye (2003), Regional flood estimation for ungauged basins in Sarawak, Malaysia, *Hydrological Sciences Journal*, 48(1), 79-94.
- Montanari, A. (2003), Long-range dependence in hydrology, *Theory and applications of long-range dependence*, 461-472.
- Nalbantis, I., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, On the use and misuse of semi-distributed rainfall-runoff models, *XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Perugia*, International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Hydrological Sciences, 2007.
- Papalexiou, S., and D. Koutsoyiannis (2009a), An all-timescales rainfall probability distribution, in *European Geosciences Union General Assembly 2009*, p. 13469. [online] Available from: <http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/902/> (Accessed 24 November 2009)
- Papalexiou, S., and D. Koutsoyiannis (2009b), Ombrian curves: from theoretical consistency to engineering practice, in *8th IAHS Scientific Assembly / 37th IAH Congress*. [online] Available from: <http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/926/> (Accessed 1 December 2009)
- Papalexiou, S., and D. Koutsoyiannis (2008), Probabilistic description of rainfall intensity at multiple time scales, in *IHP 2008 Capri Symposium: "The Role of Hydrology in Water Resources Management"*. [online] Available from: <http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/884/> (Accessed 1 December 2009)
- Raman, H., and N. Sunilkumar (1995), Multivariate modelling of water resources time series using artificial neural networks, *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 40(2), 145-164.
- Rodriguez, R. N. (1977), A guide to the Burr type XII distributions, *Biometrika*, 64(1), 129.
- Rozos, E., A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis, Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 819-842, 2004.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, A multicell karstic aquifer model with alternative flow equations, *Journal of Hydrology*, 325(1-4), 340-355, 2006.
- Salas, J. D., and J. W. Delleur (1980), *Applied modeling of hydrologic time series*, Water Resources Publication.
- Sankarasubramanian, A., and K. Srinivasan (1999), Investigation and comparison of sampling properties of L-moments and conventional moments, *Journal of Hydrology*, 218(1-2), 13-34.
- Tadikamalla, P. R. (1980), A look at the Burr and related distributions, *International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique*, 48(3), 337-344.
- Veneziano, D., R. L. Bras, and J. D. Niemann (1996), Nonlinearity and self-similarity of rainfall in time and a stochastic model, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 101(D21).

- Vogel, R. M., and N. M. Fennessey (1993), L moment diagrams should replace product moment diagrams, *Water Resources Research*, 29(6), 1745–1752.
- Waymire, E., and V. Gupta (1981), The mathematical structure of rainfall representations. I. A review of the stochastic rainfall models., *Water Resources Research*, 17(5), 1261-1272.
- Wilks, D. (1998), Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model, *Journal of Hydrology*, 210(1-4), 178-191.
- Wilks, D. S. (1999), Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models, *Agricultural and Forest Meteorology*, 93(3), 153–169.
- Woolhiser, D., and J. Roldan (1982), Stochastic daily precipitation models: 2. A comparison of distributions of amounts., *Water Resources Research*, 18(5), 1461-1468.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «Υδρογείος», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 4α, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006α.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Τέγος, Γ. Καραβοκυρός, Ι. Κυριαζοπούλου, και Ι. Βαζίμας, Σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων περιοχής Καρδίτσας, *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 16, 132 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006β.
- Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Δ. Κουτσογιάννης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 9, 91 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2007.
- Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Ν. Μαμάσης, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας - Έτος 2009, *Συντήρηση, αναβάθμιση και επέκταση του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για την διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ*, Τεύχος 1, 116 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2009.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και Ε. Ρόζος, Μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 21, 196 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- Ευστρατιάδης, Α., και Ν. Μαμάσης, Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 17, 72 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.

- Ευστρατιάδης, Α., Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων, Διδακτορική διατριβή, 391 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008.
- Ευστρατιάδης, Α., Σ. Μπακή, Ε. Ρόζος, και Α. Κουκουβίνος, Αναλυτική περιγραφή μοντέλων, Ανάπτυξη νέας βάσης δεδομένων για τη διαχείριση και λειτουργία της Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ) – Γ΄ Φάση σε περιβάλλον ΣΓΠ (GIS) και δημοσιοποίηση του έργου της ΕΤΥΜΠ, Τεύχος 13, Κ/Ξ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ, Νοέμβριος 2009.
- Ζαρρής, Δ., Ε. Ρόζος, και Δ. Σακελλαριάδης, Περιγραφή των υδατικών συστημάτων, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3*, Τεύχος 36, 160 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ν. Μαμάσης, Α. Κουκουβίνος, και Α. Ευστρατιάδης, Τελική έκθεση, *Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 4, 66 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2008.
- Κοψιάτη, Μ., Διερεύνηση στρατηγικών παραμετροποίησης υδρογεωλογικού υπομοντέλου του λογισμικού Υδρόγειος - Εφαρμογή στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, Μεταπτυχιακή εργασία, 133 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2009.
- Κωνσταντινίδης, Δ. Θ., Υδρολογική μελέτη, *Οριστική μελέτη εφαρμογής αντιπλημμυρικών έργων λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού*, Έκθεση 12, Εργοδότης: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Νοέμβριος 1995.
- Μαμάσης, Ν., Α. Κουκουβίνος, και Α. Ευστρατιάδης, Υδρολογική μελέτη, *Μελέτες Διερεύνησης Προβλημάτων Άρδευσης και Δυνατότητας Κατασκευής Ταμιευτήρων Νομού Βοιωτίας*, Εργοδότης: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Ανάδοχος: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ - Αντωνίου - Πέππας και Συνεργάτες, Αθήνα, 2006.
- Μαμάσης, Ν., και Ι. Γαβριηλίδης, Επιλογή θέσεων υδρομετεωρολογικών σταθμών, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 3, 30 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Ναλμπάντης, Ι., και Ε. Ρόζος, Σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Β. Κηφισού, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 10, 72 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Ναλμπάντης, Ι., και Ρ. Μαυροδήμου, Εκτίμηση υδατικών αναγκών, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3*, Τεύχος 37, 63 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 1999.

- Παγούνης, Μ., Θ. Γκέρτσος, και Α. Γκατζογιάννης, *Υδρογεωλογική έρευνα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, 1994.
- Παπαγιαννοπούλου, Α., και Α. Λέτσιος, *Υδρογεωλογική μελέτη Κωπαϊδικού πεδίου και Βοιωτικού Κηφισού*, Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα, 1971.
- Ρόζος, Ε., *Μοντέλα προσομοίωσης υδροφορέων υψηλής αβεβαιότητας*, Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009 (υποβληθείσα για τελική κρίση).
- Τέγος, Α., *Συνδυασμένη προσομοίωση υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών και λειτουργίας υδροσυστήματος Δυτικής Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, 132 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.
- ΥΠΑΝ, ΕΜΠ, ΙΓΜΕ, και ΚΕΠΕ, *Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας, Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας*, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 549 σελίδες, Υπουργείο Ανάπτυξης, Αθήνα, Ιανουάριος 2003.